

Numerical Study on the Behavior of Steel Shear Walls Consisting of Flat and Corrugated Plates with Different Bolt Rows

Alireza Abbaszadeh^{1✉} , Vahid Broujerdian² Ali Ghamari³

1. Corresponding Author, Civil Engineering Dept., Faculty of Engineering, Ilam University, Ilam, Iran. E-mail: a.abaszadeh@ilam.ac.ir

2. Faculty of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. E-mail: broujerdian@iust.ac.ir

3. Civil Engineering Dept., Faculty of Engineering, Azad University Ilam branch, Ilam, Iran. E-mail: aghamari@alumni.iust.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received

2026-02-20

Received in revised form

2026-05-18

Accepted

2026-06-21

Available online

2026-06-28

Keywords:

Steel Shear Wall,
Stiffness,
Ultimate Strength,
Pushover,
Corrugated

ABSTRACT

Previous studies on steel plate shear walls (SPSWs) have demonstrated their substantial shear stiffness and strength, coupled with considerable ductility and energy dissipation capacity under lateral loads. The distinct advantages of this system over other lateral load-resisting systems have led to its increasing application, particularly in tall buildings. The incorporation of corrugated sheets alongside flat plates enhances the elastic buckling resistance and ductility of the lateral load-resisting system. Consequently, this paper numerically investigates the influence of bolt rows on a four-layer corrugated-flat plate shear wall. Its seismic parameters are examined through numerical analysis, employing nonlinear static (pushover) analysis for their extraction. The results indicate that for corrugated walls incorporating flat plates, seismic parameters such as the ductility factor and over strength factor increase compared to double-corrugated plate shear walls. Furthermore, recommended values for the ductility factor and over strength factor of the four-layer shear wall are 4.55 and 4.8, respectively. It was also observed that increasing the corrugation angle up to 51.8 degrees enhances performance; however, beyond this value, it has negligible impact on the shear capacity of the four-layer shear wall while increasing stress concentration in the boundary elements.

Cite this article: Abbaszadeh, Alireza., Broujerdian, Vahid., & Ghamari, Ali. (2026). Numerical Study on the Behavior of Steel Shear Walls Consisting of Flat and Corrugated Plates with Different Bolt Rows. *Advanced Modeling in Civil Engineering*, 3(1), 170-188.

DOI:10.22126/amcen.2025.13173.1049



© The Author(s).

DOI:10.22126/amcen.2025.13173.1049

Publisher: Razi University

Introduction

Research on flat-plate steel shear walls as a lateral-resisting system began in 1970, and experimental and numerical results indicate that this lateral-resisting system is a very suitable system in terms of economy and performance. Also, this lateral-resisting system has performed well in past earthquakes, and for this reason, the use of steel shear walls as an efficient system was used in various countries [1-2].

Initial research on the elastic buckling of corrugated plates was carried out by Elsi et al., which included plates with simple supports and without considering geometrical defects. Bahraber et al. investigated the effect of thickness, shape, plate angle, and opening size on the parameters of buckling and energy absorption under cyclic loading on a corrugated shear wall [3]. They investigated the shear wall of the corrugated shear wall in the reinforced concrete frame in a laboratory and observed that the corrugated shear wall has a high seismic performance [4]. Gholizadeh and Yadalehi investigated the seismic parameters of ductility and shear capacity of corrugated corrugated walls as well as walls with curved waves and subjected to cyclic loads by numerically using different models and investigated the parameters of hardness and energy absorption and ultimate strength [5-6].

In another study, Tang proposed to prevent buckling of corrugated walls by using two stiffeners on the sides of the wall and proposed the relationships between buckling and shear strength [16]. Kao et al. conducted a two-story, single-span frame in the laboratory and found that the shear wall with corrugated sheets has high capacity, ductility, energy absorption, and high initial stiffness [17]. Recently, the use of double corrugated walls has been considered, which was proposed by Tang et al. [18]. The results of numerical and laboratory studies showed that by reducing the length-to-height ratio of the sheet, its performance improves. Although the studies of this researcher showed that the use of double sheets improves the stiffness and ultimate strength of the wall, this wall suffers a sudden drop in small displacement and results in low ductility [19].

In another study, it was proposed to use two flat sheets on the sides of the double corrugated wall to compensate for the decrease in strength and increase ductility. The results showed that the use of flat sheets around double corrugated sheets improves the stiffness and ultimate strength of the shear wall [20-21].

The aim of this paper is to investigate the effects of bolt rows on the seismic behavior of flat and double corrugated shear walls and their combination using the finite element method. For this purpose, models with different aspect ratios and sheet thicknesses have been analyzed under pushover analysis.

Method

In this research, a series of single-story, single-bay steel shear wall models with varying width-to-height ratios, incorporating double-corrugated infill plates, as well as a novel configuration comprising double-corrugated plates encased by flat plates, are investigated. The design of the steel shear wall models is based on capacity design principles in accordance with the American seismic design provisions for steel structures (AISC 341-05) and its accompanying guide (AISC User Note 20). The models are analyzed using a nonlinear static analysis method (pushover) employing the finite element method via the Abaqus software. The seismic behavior of the double-corrugated steel shear wall will be

compared with that of the proposed wall configuration. It is anticipated that the combination of the two plate types will enhance the seismic performance of the shear wall compared to the double-corrugated walls. The total thickness of the infill plates in the corresponding models is identical; therefore, all models utilize the same volume of material. To investigate the effect of plate thickness on wall behavior, models with thicknesses of $t = 6$ mm, 8 mm, and 10 mm will be analyzed.

Results

In this study, the seismic behavior of two steel shear wall systems—namely, a double-corrugated type and a proposed configuration comprising a double-corrugated plate encased in flat plates—was investigated through nonlinear static analysis. The considered variables included plate thickness, aspect ratio of the boundary elements, and the number of bolt rows.

Conclusions

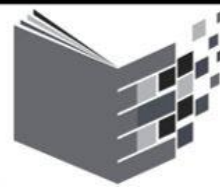
The results indicated that an increase in the number of bolt rows enhanced energy dissipation capacity (13%) and ultimate strength (14%), while having no significant effect on elastic stiffness. As plate thickness increased, the over strength factor and displacement amplification factor in the double-corrugated system rose by 11% and 16%, respectively. In the proposed system, the over strength factor increased by 13%, whereas the displacement amplification factor remained nearly unchanged. The four-plate system exhibited superior performance compared to the double-corrugated system, with increases of up to 42% in over strength, 18% in displacement amplification, and 31% in the response modification factor. The proposed ductility and over strength factors for the four-plate system are 4.55 and 4.8, respectively. Furthermore, increasing the corrugation angle up to 51.8 degrees improved seismic performance; however, angles beyond this threshold had no considerable effect on shear capacity and led to increased stress concentration in the boundary elements.

Author Contributions

author participated in writing and revising the article.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



مطالعه عددی رفتار دیوار برشی فولادی متشکل از ورق‌های تخت و موجدار با ردیف پیچ‌های متفاوت

علیرضا عباس‌زاده^۱، وحید بروجردیان^۲، علی قمری^۳

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران. رایانامه: A.abaszadeh@ilam.ac.ir

۲. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران. رایانامه: broujerdian@iust.ac.ir

۳. گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ایلام، ایلام، ایران. رایانامه: aghamari@alumni.iust.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۱	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۲۸	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۳۱	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۷	
کلیدواژه‌ها: پوش آور، سختی، دیوار برشی فولادی موجدار، مقاومت نهایی	مطالعات انجام شده بر روی دیوار برشی فولادی نشان دهنده سختی و مقاومت برشی بالا و شکل‌پذیری و جذب انرژی قابل توجه این سیستم بار بر جانبی بوده است. مزایای خاص این سیستم نسبت به سایر سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی سبب شده که استفاده از آن به‌خصوص در ساختمان‌های بلند روز به روز گسترش یابد. استفاده از ورق‌های موجدار همراه با ورق تخت باعث افزایش مقاومت الاستیک ورق و همچنین افزایش شکل‌پذیری سیستم باربر جانبی می‌شود. بنابراین در این مقاله به بررسی اثرات ردیف پیچ‌ها بر روی دیوار برشی ۴ لایه موجدار و صاف پرداخته شده است. پارامترهای لرزه‌ای آن به صورت عددی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. برای استخراج پارامترهای لرزه‌ای از تحلیل غیرخطی استاتیکی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد برای دیوار موجدار با ورق‌های تخت پارامترهای لرزه‌ای از جمله ضریب شکل‌پذیری ضریب افزایش مقاومت نسبت به دیوار موجدار دابل افزایش پیدا می‌کند. همچنین مقادیر پارامترهای ضریب شکل‌پذیری و ضریب اضافه مقاومت برای دیوار برشی چهار لایه بترتیب ۴/۵۵ و ۴/۸ پیشنهاد می‌شود. همچنین ملاحظه گردید افزایش زاویه چین تا مقدار ۵۱/۸ درجه سبب بهبود عملکرد و برای مقادیر بیشتر از آن تاثیر چندانی بر ظرفیت برشی دیوار برشی چهار لایه نخواهد داشت و تمرکز تنش در المان مرزی را افزایش می‌دهد.

استناد: عباس‌زاده، علیرضا؛ بروجردیان، وحید؛ قمری، علی. (۱۴۰۵). مطالعه عددی رفتار دیوار برشی فولادی متشکل از ورق‌های تخت و موجدار با ردیف پیچ‌های متفاوت. *مجله مدل‌سازی پیشرفته در مهندسی عمران*، ۳(۱۸۸)، ۱۷۰-۱۸۸. DOI:10.22126/amcen.2025.13173.1049



۱. مقدمه

تحقیقات بر روی دیوار برشی فولادی با ورق تخت به عنوان یک سیستم مقاوم جانبی در سال ۱۹۷۰ آغاز شد و نتایج آزمایشگاهی و عددی بیانگر این واقعیت است که این سیستم مقاوم جانبی از لحاظ اقتصادی و عملکردی یک سیستم بسیار مناسب می باشد. همچنین این سیستم مقاوم جانبی عملکرد مناسبی در زلزله های گذشته داشته و به همین دلیل استفاده از دیوار برشی فولادی به عنوان یک سیستم کارا در کشورهای مختلف مورد استفاده قرار گرفت [۱-۲].

تحقیقات اولیه درباره کمانش الاستیک صفحات چیندار توسط السی و همکاران انجام گرفت که در برگیرنده صفحات با تکیه گاه های ساده و بدون در نظر گرفتن نقص های هندسی بود. بهره بر و همکاران به بررسی تاثیر ضخامت شکل و اندازه زاویه صفحات و اندازه باز شو بر روی پارامترهای شکل پذیری و جذب انرژی تحت بارگذاری سیکلیک بر روی دیوار برشی موجدار پرداختند [۳]. مو و پرنگ دیوار برشی چیندار در قاب بتن مسلح را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داده و ملاحظه نمودند دیوار برشی موجدار عملکرد لرزه ای بالایی دارد [۴]. قلی زاده و یدالهی با بررسی مدل های مختلف به روش عددی به بررسی پارامترهای لرزه ای شکل پذیری و ظرفیت برشی دیوارهای موجدار کنگره ای و همچنین دیوارهای با موج های منحنی وار تحت بارهای چرخه ای پرداختند و پارامترهای سختی و جذب انرژی و مقاومت نهایی را بررسی نمودند [۵-۶]. فرزامپور و همکاران به بررسی اثرات باز شو بصورت دایره ای بر روی المان مرزی و همچنین جذب انرژی مقاومت نهایی و شکل پذیری پرداختند. همچنین در تحقیق دیگری با استفاده از رگرسیون خطی فرمولی به بررسی پارامتری ظرفیت نهایی دیوار برشی پرداخته و برای دو پارامتر مذکور فرمولی ارائه نمودند [۷-۸]. محققان دیگری به بررسی درصد باز شوها و مکان باشوها و همچنین به بررسی شکاف های عمودی در دیوارهای برشی پرداخته و پارامترهای لرزه ای آنها مورد مطالعه قرار دادند [۹]. امامی و همکاران به بررسی آزمایشگاهی دیوار برشی دوزنقه ای و مهار نشده تحت بارگذاری چرخه ای پرداختند و پارامترهای ضریب شکل پذیری ظرفیت برشی و انرژی جذب شده در سیکل های مختلف به دست آوردند و ملاحظه کردند که پارامترهای ضریب شکل پذیری

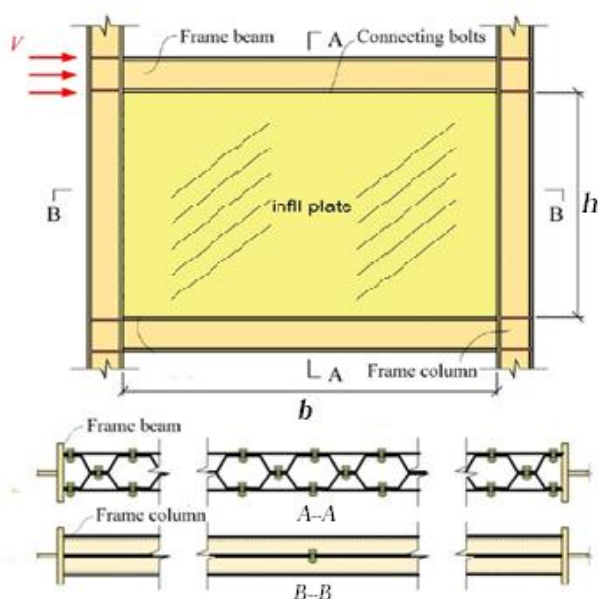
جذب انرژی و سختی اولیه در دیوار چیندار نسبت به دیوار سخت نشده بیشتر اما مقاومت نهایی کمتر است [۱۰-۱۱]. شن و همکاران نحوه قرار گیری چینها به صورت آزمایشگاهی پرداخته و دریافتند که در دیوار با چین افقی دچار کمانش کلی و دیوار با چین قائم دچار کمانش موضعی میشود [۱۲]. کلالی در مطالعه دیگری پارامترهای دیوار موجدار از جمله ضخامت دیوار و زاویه و تعداد موجهای دیوار برشی را مورد مطالعه قرار دادند [۱۳].

قلهکی به بررسی شاخص خرابی در دیوارهای برشی پرداختند و بیان داشتند که شاخص تغییر مکان در مقایسه با شاخص های دیگر معتبر تر است [۱۴]. همچنین بنویدی و همکاران به بررسی اثرات آتش سوزی بر ضریب رفتار دیوارهای برشی فولادی با تنش تسلیم پایین پرداختند و بیان کردند که ضریب رفتار آیین نامه برای این نوع بارها محافظه کارانه می باشد [۱۵]. در تحقیق دیگری تانگ برای جلوگیری از کمانش دیوار موجدار پیشنهاد کرد که از دو سخت کننده در طرفین دیوار استفاده و روابط مربوط به کمانش آن و مقاومت برشی را پیشنهاد کرد [۱۶]. کاو و همکاران در آزمایشگاه قاب دو طبقه و یک دهانه و نموده و دریافتند که دیوار برشی با صفحات موجدار ظرفیت و شکل پذیری و جذب انرژی بالا و سختی اولیه بالایی دارد [۱۷]. اخیرا استفاده از دیوار موجدار بصورت دوبل مورد توجه قرار گرفته است که توسط تانگ و همکاران پیشنهاد شد [۱۸]. نتایج مطالعات عددی و آزمایشگاهی نشان داد که با کاهش نسبت طول به ارتفاع ورق، عملکرد آن بهبود پیدا می کند. هر چند مطالعات این محقق نشان داد که استفاده از ورق های دوبل باعث بهبود سختی و مقاومت نهایی دیوار می شود اما این دیوار در تغییر مکان کم دچار افت ناگهانی می شود و شکل پذیری کمی را نتیجه می دهد [۱۹].

در تحقیق دیگری برای جبران کاهش مقاومت و افزایش شکل پذیری پیشنهاد گردید که از دو ورق تخت در ظرفیت دیوار موجدار دوبل استفاده شود. نتایج نشان داد که استفاده از ورق های تخت در اطراف ورق های موجدار دوبل باعث بهبود سختی و مقاومت نهایی دیوار برشی می شود [۲۰-۲۱].

اخیرا استفاده از دیوار برشی موجدار که با بتن پر شده است مورد توجه قرار گرفته است [۲۲-۲۳]. مطالعات نشان می دهد این

معرف Double Corrugator و F معرف دیوار برشی فولادی چهار لایه می باشد. بخش دوم نشان دهنده نسبت b به h است. بخش سوم نام هر مدل معرف ضخامت ورق فولادی بر حسب میلیمتر است. بخش چهارم تعداد ردیف پیچ های مورد نیاز برای اتصال ورق ها است. به عنوان مثال، 3-10-1.5-D معرف دیوار برشی فولادی موجدار دابل با $b/h=1.5$ و ضخامت ورق برابر 10mm که با سه ردیف پیچ به همدیگر متصل شده است.



شکل ۲. هندسه دیوار برشی متشکل از چهار ورق فولادی [۲۱].

برای بررسی تاثیر ابعاد دیوار برشی بر روی پارامترهای لرزه ای ارتفاع دیوار را مقدار ثابت $h=2880$ mm فرض نموده سپس ۳ مدل با المان مرزی ثابت با نسبت های $b/h = 0.85, 1.25, 1.75$ مدل سازی گردید که در ستون چهارم جدول (۱) این نسبت ها نشان داده شده است. ضخامت ورق فولادی در مدل مبنا برابر 4mm است. لذا برای بررسی اثر افزایش ضخامت بر رفتار کلی سیستم، با ثابت نگه داشتن سایر اجزا، ضخامت ورق $t=4, 6, 8, 10$ mm در نظر گرفته شده که در ستون چهارم جدول (۱) آورده شده است.

نوع دیوار برشی دارای ظرفیت و جذب انرژی بالاتری نسبت به موجدار دابل می باشند [۲۴].

هدف این مقاله بررسی اثرات ردیف پیچ ها بر رفتار لرزه ای دیوار برشی تخت و موجدار دابل و ترکیب آن ها به روش المان محدود می باشد. برای این منظور مدل هایی با نسبت ابعاد مختلف و ضخامت ورق های متفاوت تحت آنالیز پوش آور مورد تحلیل قرار گرفته است.

۲. روش تحقیق

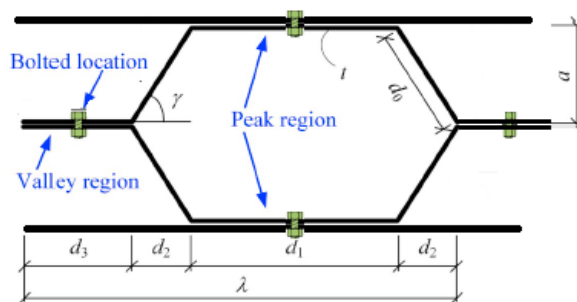
در این تحقیق یک مدل دیوار برشی یک طبقه یک دهانه با نسبت عرض به ارتفاع متفاوت با ورق های موجدار دابل و همچنین ترکیب پیشنهادی ورق موجدار دابل که با ورق های تخت محاط شده در نظر گرفته شده است. طراحی مدل های دیوار برشی فولادی مبتنی بر اصول طراحی بر اساس ظرفیت مطابق با دستورالعمل طراحی لرزه ای سازه های فولادی آمریکا AISC-345-04 راهنمای آن AISC User guide 20 انجام شده است. مشخصات پروفیل های قاب طراحی شده در شکل (۲) نمایش داده شده است. تحلیل مدل ها با به روش استاتیکی غیر خطی که با روش المان محدود به کمک نرم افزار آباکوس صورت گرفته و رفتار لرزه ای دیوار برشی فولادی موجدار دابل با دیوار پیشنهادی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. انتظار می رود ترکیب دو نوع ورق باعث بهبود رفتار لرزه ای دیوار برشی در مقایسه با دیوار های موجدار دابل بشود. مجموع ضخامت ورق های دیوار برشی در مدل های متناظر یکسان بوده لذا در تمام مدل ها از حجم مصالح یکسانی استفاده شده است. برای بررسی اثر ضخامت بر رفتار دیوار ها، مدل هایی با ضخامت ۶ و ۸ و $t=10$ میلیمتر مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۳. مطالعات عددی

۳-۱. معرفی مدل ها

به منظور ارزیابی پارامترهای لرزه ای دیوار برشی موجدار دابل و همچنین دیوار موجدار با ورق تخت که به صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است، مدل های عددی مطابق با جدول ۱ در نظر گرفته شده است. در این جدول، نام هر مدل از چهار بخش تشکیل شده است. بخش اول معرف نوع دیوار است که در آن D

به منظور مدل سازی تحلیل مدل ها به روش عددی مقطع دیوار برشی ثابت فرض شده و ابعاد المان مرزی و همچنین ضخامت صفحات موجدار و تخت متغیر می باشد. به منظور مقایسه رفتار لرزه ای دو مدل فرض شده است ضخامت مجموع ورق ها در دو مدل یکسان می باشد. شکل ۲ بیانگر قسمتی از مقطع دیوار برشی F می باشد که در آن مقادیر پارامتر ها $d_1=85\text{mm}$, $d_2=27.5$, $d_3=40$, $a=35\text{mm}$ در نظر گرفته شده است.

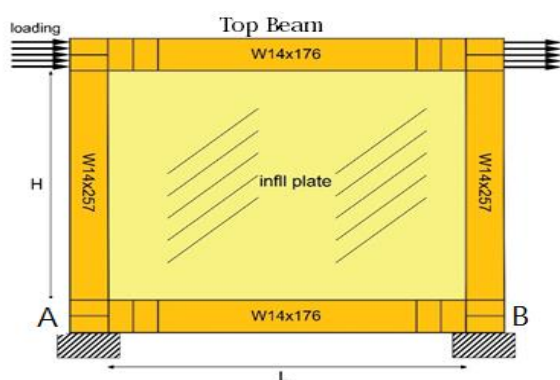


شکل ۳. مقطع دیوار برشی متشکل از چهار ورق

جدول ۱. مدل های المان محدود

Model	b (mm)	b/h	t_w (mm)	$\frac{t_w}{t_w = 8\text{mm}}$	N	a(mm)
F-0.85-4-N	2448	0.85	4	1.00	0,1,2,3	35
F-0.85-6-N	2448	0.85	6	1.50	0,1,2,3	35
F-1.25-6-N	3600	1.25	6	1.50	0,1,2,3	35
F-1.25-8-N	3600	1.25	8	2.00	0,1,2,3	35
F-1.75-6-N	5040	1.75	6	1.75	0,1,2,3	35
F-1.75-10-N	5040	1.75	10	2.50	0,1,2,3	35
F-1.75-6-N-a	5040	1.75	6	2.50	0,1,2	15,25,30,35,50,55
D-1.75-6-N	5040	1.75	6	1.75	0,1,2,3	35
D-1.75-10-N	5040	1.75	10	2.50	0,1,2,3	35

بارگذاری سازه مطابق شکل (۴) به صورت اعمال تغییر مکان به میزان $\frac{2}{5}$ درصد ارتفاع تراز فوقانی در نظر گرفته شده است. از آنجا که عملاً تیر طبقه در سقف مدفون می شود لذا از کمانش خارج از صفحه تیر فوقانی جلوگیری می شود. اعمال شرایط مرزی در مدل سازی باختصار در شکل ۴ آورده شده است.

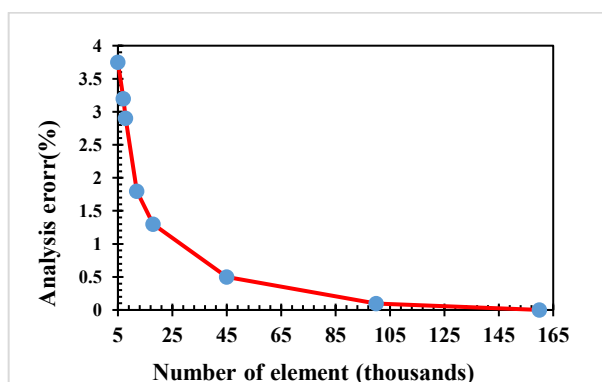


۲-۳. مشخصات مصالح و شرایط مرزی

برای تمام اجزا دیوار از فولاد Q345 با مشخصات مکانیکی مطابق جدول ۲ استفاده شده است. در تمام مدل ها مشخصات قاب محیطی یکسان فرض شده و مطابق شکل (۴) در نظر گرفته می شود. برای شبیه سازی رفتار غیرخطی مصالح، از رفتار الاستیک-پلاستیک کامل با سطح تسلیم Von-Misses استفاده شده است.

جدول ۲. مشخصات مکانیکی مصالح

Material	Frame	Plate (shear wall)
Elastic Module, E (Gpa)	206	215
Yield Stress, F_y (Mpa)	410	403
Ultimate Stress, F_y (Mpa)	530	553
Elongation ratio	37.8%	25.7%



(ب)

شکل ۵. الف: شکل شماتیک مش بندی مدل ب: نمودار درصد خطای آنالیز با تعداد المان‌ها

با توجه به اینکه نتایج تست آزمایشگاهی دیوار برشی پیشنهادی در دسترس نیست، به منظور بررسی صحت نتایج المان محدود مدل آزمایشگاهی تانگ و همکاران انتخاب شده است که هندسه آن‌ها در شکل ۶ نمایش داده شده است.

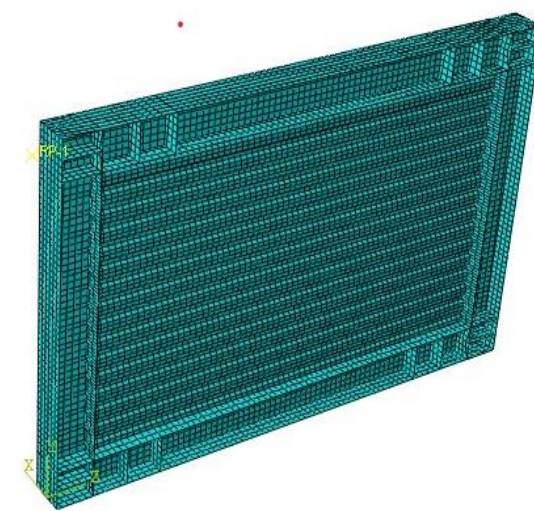
RF Point	Boundary Condition					
	U_x	U_y	U_z	θ_x	θ_y	θ_z
A	0	0	0	0	0	0
Top Beam	1	1	0	1	1	1
B	0	0	0	0	0	0
	1:Free			0:Fixed		

شکل ۴. شرایط مرزی دیوار برشی فولادی

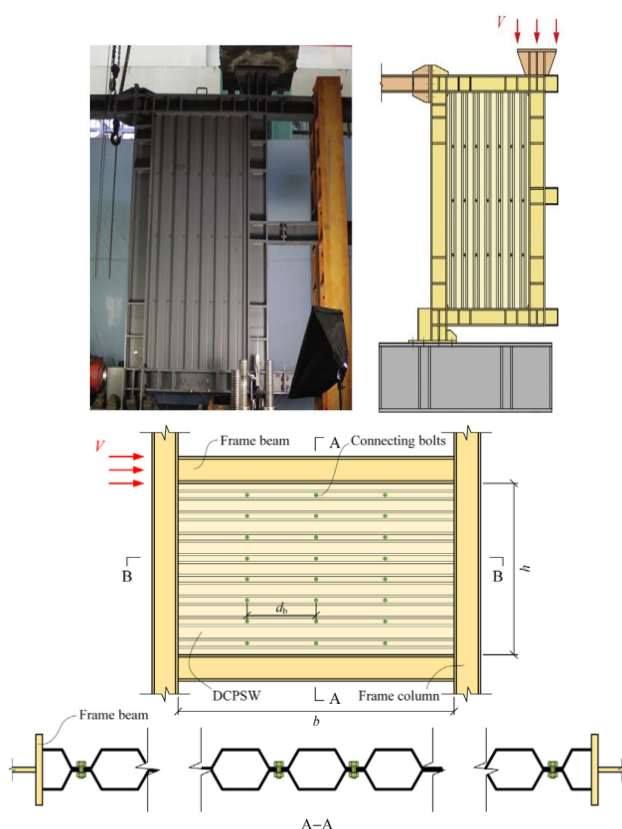
۳-۳. صحت سنجی نتایج المان محدود

در این تحقیق برای شبیه سازی مدل‌ها از روش المان محدود در نرم افزار ABAQUS استفاده می شود. المان مورد استفاده تمام اجزا دیوار با استفاده از المان شل چهار گرهی با خاصیت انتگرال گیری کاهش یافته (S4R) می باشد.

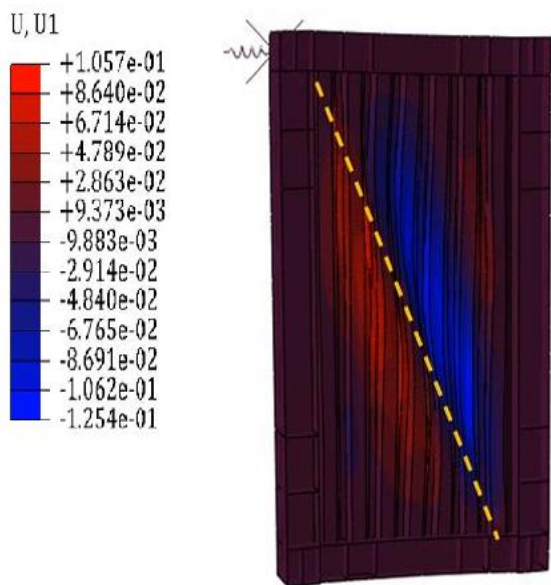
المان Shell قابلیت در نظر گرفتن کمانش و تسلیم را دارد. برای مدل سازی پیچ‌ها از کانتکت کوپل استفاده گردید و دیگر خود پیچ‌ها مدل سازی نشده است. مطابق با شکل زیر هرچه اندازه المان‌ها کاهش یابند تعداد المان‌ها افزایش که در نتیجه آن دقت محاسبات بیشتر خواهد شد که نمودار شکل (۴-ب) بیانگر کاهش خطای آنالیز در مقابل افزایش تعداد المان می باشد.



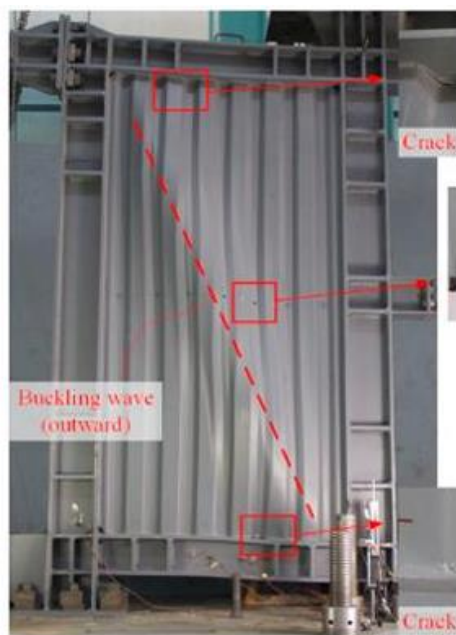
(الف)



شکل (۶). شکل شماتیک و مقطع مورد استفاده دیوار موجدار دوبل [۱۸]



الف) تغییر شکل خارج از صفحه مدل شبیه سازی



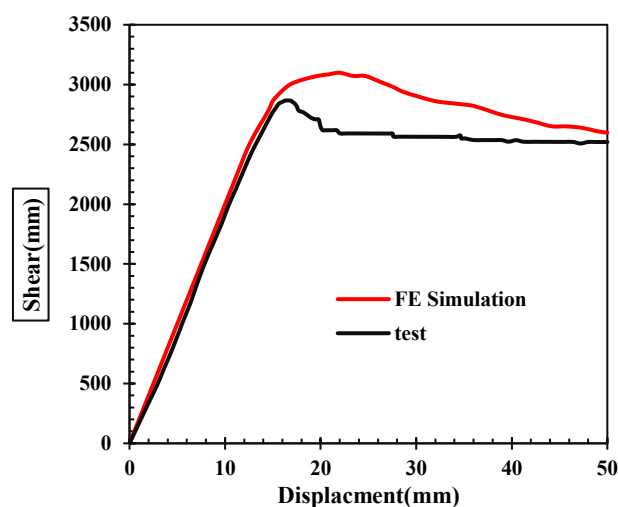
ب) تغییر شکل خارج از صفحه مدل آزمایشگاهی

شکل ۸. مقایسه تغییر شکل مدل سازی با تست آزمایشگاهی

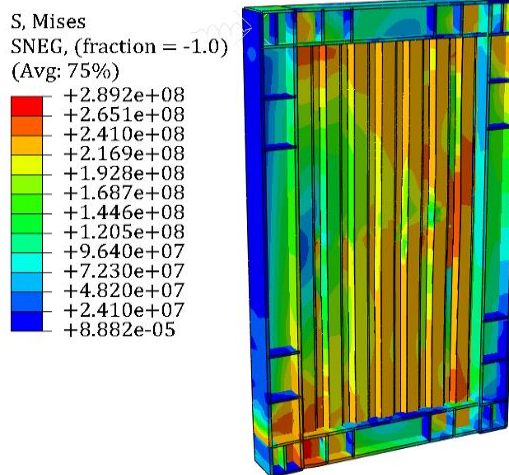
۴. مبانی نظری استخراج ضریب رفتار

روش‌های متفاوتی برای تعیین ضریب رفتار وجود دارد که بر پایه روش‌های انرژی است. در این مقاله برای تعیین ضریب رفتار

پس از مدل سازی و استخراج نتایج با استفاده از نرم افزار آباکوس ملاحظه می‌شود نتایج شبیه سازی المان محدود با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است که حاکی از دقت بالای مدل سازی است. منحنی بار تغییر مکان سختی اولیه ظرفیت نهایی را به خوبی نشان می‌دهد. همچنین تغییر شکل خارج از صفحه که به صورت یک موج در نمونه مشاهده شده بود به خوبی در مدل شبیه سازی شده نمایان شده است. همچنین وضعیت تسلیم در مدل های آزمایشگاهی تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.



الف) مقایسه نمودار بار-تغییر مکان عددی و آزمایشگاهی



ب) کانتور تنش در مدل شبیه سازی شده

شکل ۷. مقایسه مدل سازی با تست آزمایشگاهی [۱۸]

باقی بماند. بعد از تعیین پارامترهای مورد نیاز ضریب شکل پذیری مطابق رابطه زیر به دست می آید.

$$(\mu_s) = \frac{V_e}{V_y} \quad (2)$$

هنگامیکه یکی از اعضای سازه به حد تسلیم رسیده باشد در آن مفصل پلاستیک به وجود آمده و از دیدگاه طراحی در حالت بهره برداری به پایان رسیده است. ولی از دیدگاه طراحی به حالت نهایی پدیده فوق بیانگر پایان طراحی نبوده و عضو می تواند همچنان با ایجاد تغییر شکل های پلاستیک انرژی جذب نموده تا در نهایت گسیخته شود. با تشکیل مفصل های پلاستیک به تدریج سختی سازه کاهش یافته و درجه نامعینی سازه کاهش می یابد ولی سازه همچنان پایدار بوده و از خود مقاومت نشان می دهد. این روند تا تشکیل مفاصل پلاستیک بیشتر ادامه پیدا کرده تا وقتی سازه ناپایدار شود.

مقاومتی که سازه پس از تشکیل اولین مفصل پلاستیک تا مرحله ورود به برش پایه جاری شدن از خود نشان می دهد را ضریب مقاومت افزون می نامند که از رابطه زیر به دست می آید.

$$R_s = \Omega_n = \frac{V_y}{V_s} \quad (3)$$

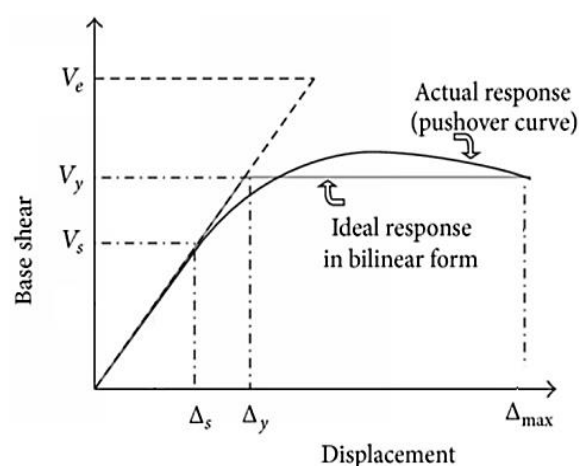
$$\Omega_0 = R_1, R_2, R_3, \Omega_n \quad (4)$$

در این رابطه ضریب R_1 عبارت است از نسبت تنش جاری شدن مورد انتظار به تنش اسمی مصالح دیوار برشی می باشد. مطالعات آماری نشان می دهد مقدار این ضریب برای فولاد با در نظر گرفتن نوع فولاد A_{36} و A_{52} به ترتیب مقدار $1/5$ و $1/3$ می توان در نظر گرفت. برای تفاوت بین تنش تسلیم استاتیکی واقعی و تنش تسلیم اسمی مقدار ضریب R_2 را به صورت تقریبی 1.05 در نظر می گیرند.

کاهش مقاومت سازه از مقاومت الاستیک مورد نیاز سازه به منظور پاسخ به نیروی زلزله توسط ضریب رفتار سازه صورت می گیرد. همچنین این ضریب با عوامل رفتار غیر خطی جذب انرژی و اثرات میرایی نیروی مورد نیاز الاستیک را به نیروی طراحی تبدیل می کند. به طور کلی این ضریب در استانداردهای بارگذاری با تقلیل

دیوار برشی از روش دوطبقی یوانگ استفاده شده است. در این روش از منحنی پاسخ سازه و دو خطی ساده شده در شکل ۹ نشان داده شده است استفاده می شود. در این شکل محور قائم بیانگر مقدار نیروی برشی و محور افقی تغییر مکان تراز پایه دیوار برشی می باشد.

بر اساس این ساده سازی، V_e و Δ_e به ترتیب حداکثر برش پایه با فرض رفتار الاستیک سیستم و تغییر مکان الاستیک نظیر آن می باشد. V_y میزان نیروی برشی جاری شدن Δ_y تغییر مکان متناظر آن می باشد. V_s عبارت است از میزان نیروی برشی که در هنگام تشکیل اولین عنصر به حد پلاستیک رسیده و رفتار سازه از حالت خطی خارج شده و وارد مرحله غیر خطی می شود و Δ_s تغییر مکان متناظر این نقطه می باشد. در این شکل Δ_m حداکثر تغییر مکان اعمالی به سازه می باشد.

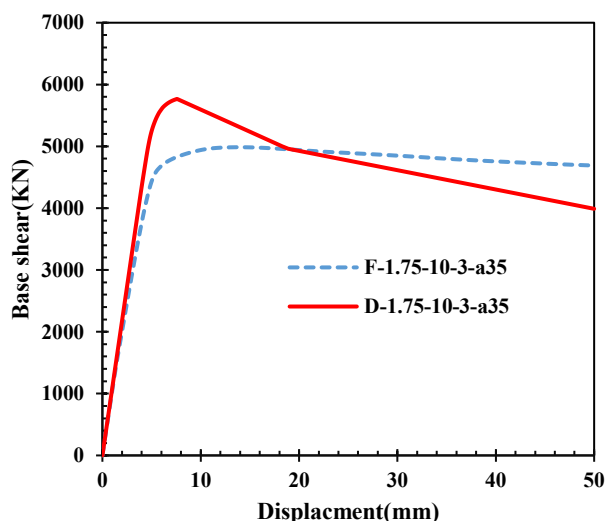
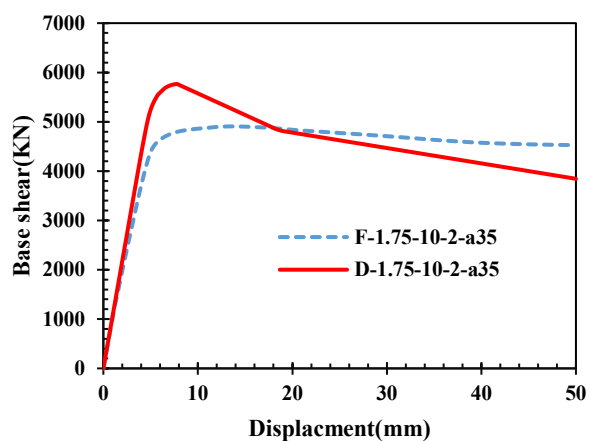
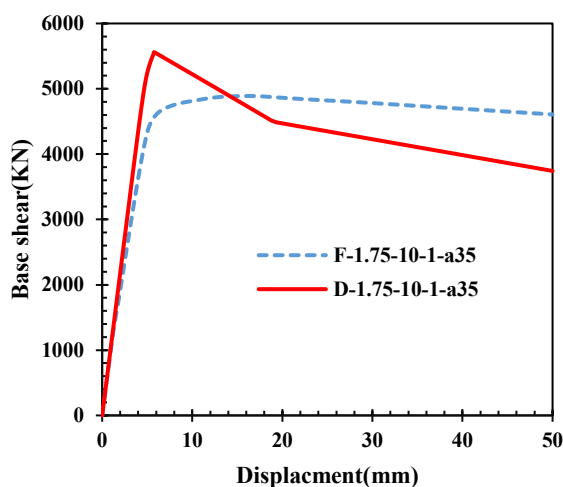


شکل ۹. ساده سازی منحنی پاسخ

ضریب شکل پذیری سازه (μ_s) مطابق رابطه زیر به دست می آید.

$$(\mu_s) = \frac{\Delta_m}{\Delta_y} \quad (1)$$

روش دوم برای تعیین ضریب رفتار بدین صورت است که از روی منحنی ساده شده دوطبقی مقدار متناظر برش پایه الاستیک با قرار دادن مقدار انرژی معادل در دو حالت الاستیک کامل و منحنی ایده آل شده مطابق شکل (۹) به دست می آید. در این شکل مقدار بیشترین مقاومت برشی با فرض اینکه سازه در حالت الاستیک



نیروهای الاستیک به نیروهای طراحی به روش بار و مقاومت نهایی از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$R_u = R_\mu * \Omega_0 \quad (5)$$

در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها در برابر زلزله‌های شدید، تخمین ماکزیمم تغییر مکان جانبی سازه‌ها حائز اهمیت بسیاری می‌باشد آئین نامه‌های لرزه‌ای، ماکزیمم تغییر مکان سازه‌ها را با ضریب تغییر مکان الاستیک سازه‌ها که از تحلیل الاستیک آن‌ها بدست می‌آید در عددی بزرگتر از یک تعیین می‌نمایند این عدد ضریب بزرگنمایی تغییر مکان نام دارد.

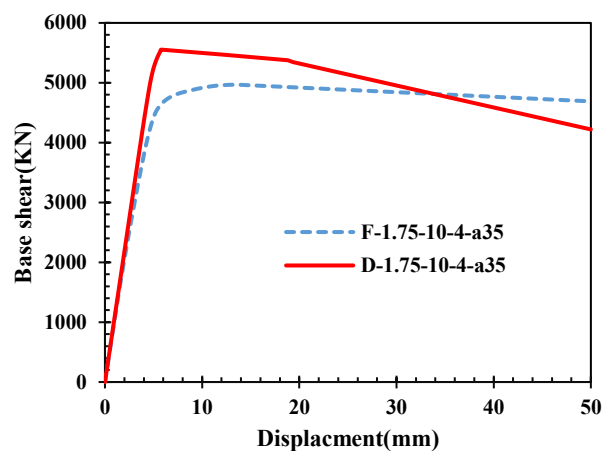
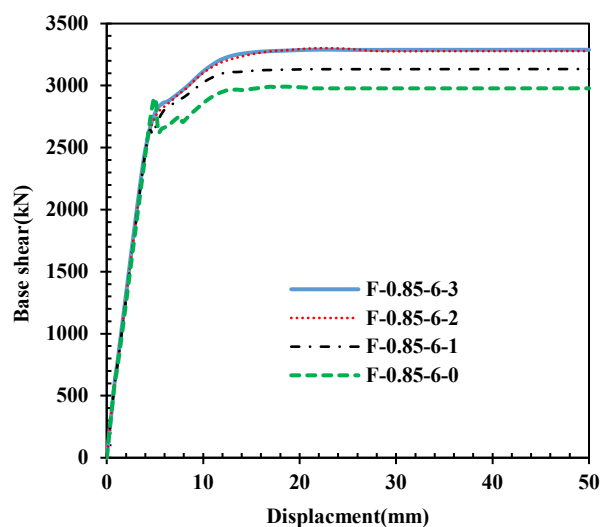
مقدار ضریب بزرگنمایی تغییر مکان از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$C_d = \frac{\Delta_m}{\Delta_s} \quad (6)$$

۵. بحث و بررسی نتایج

۵-۱. مقایسه نمودار بار-تغییر مکان برای مدل موجدار دوبل و چهار لایه

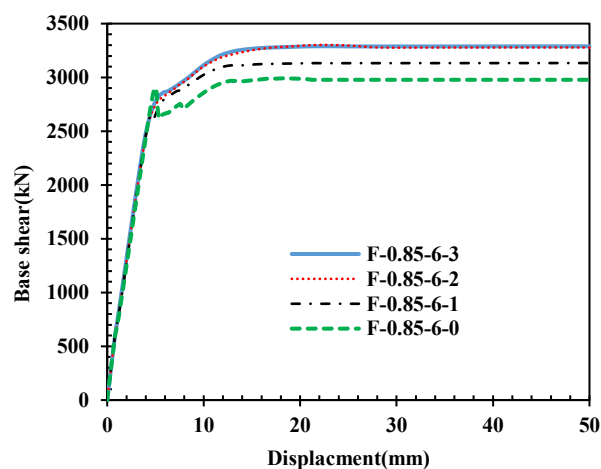
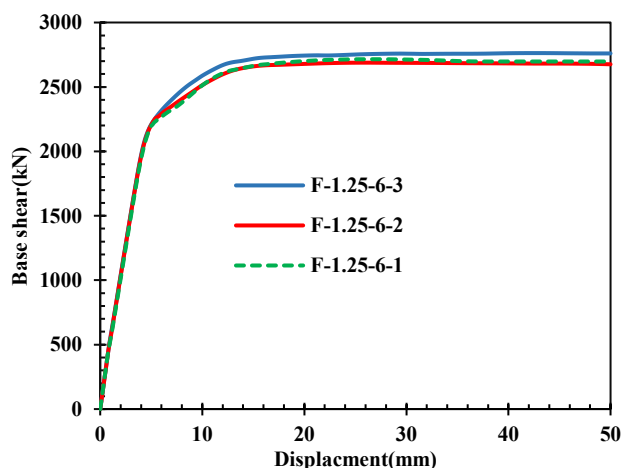
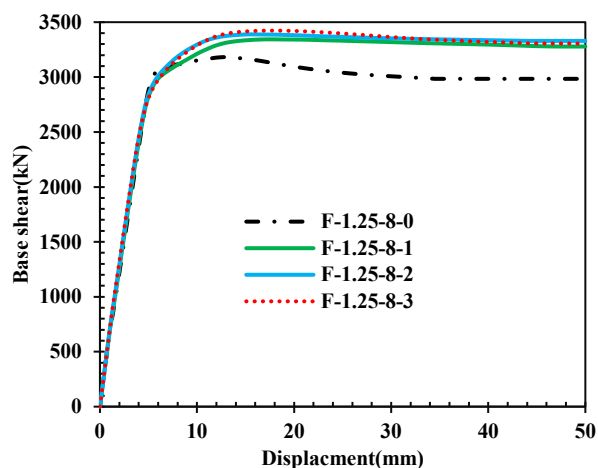
در این مقاله برای بررسی رفتار دیوارهای برشی فولادی از تحلیل استاتیکی غیر خطی استفاده شده است. با استفاده از نمودار پوش آور می‌توان پارامترهای لرزه‌ای را می‌توان از آن استخراج نمود. با مشاهده نمودارهای پوش آور به راحتی می‌توان کلیات عملکرد سازه‌ها را با هم از جنبه شکل‌پذیری، ضریب رفتار، مقاومت افزون مقایسه نمود. بدین منظور در شکل (۱۱) نمودار بار-تغییر مکان مدل‌های عددی تحلیل شده آورده شده است. همانگونه که از این شکل نمایان است، دیوار برشی فولادی همراه چهار ورق دارای رفتار لرزه‌ای بهتری نسبت به دیوار برشی موجدار دوبل می‌باشد. ضعف اصلی دیوار برشی موجدار دوبل کماتش الاستیک ناگهانی و افت شدید ظرفیت برشی آن می‌باشد. ملاحظه می‌شود در تمامی مدل‌ها ظرفیت نهایی دیوار برشی چهار لایه از دیوار برشی موجدار دوبل بیشتر است. به عنوان مثال در مدل با یک ردیف پیچ درصد افزایش مقاومت به ۱۸ درصد می‌رسد.



شکل ۱۱. نمودار بار-تغییر مکان مدل های عددی موجدار دابل و چهار لایه

۲-۵. بررسی تعداد ردیف پیچ ها بر نمودار بار-تغییر مکان رفتار دیوار برشی ۴ لایه

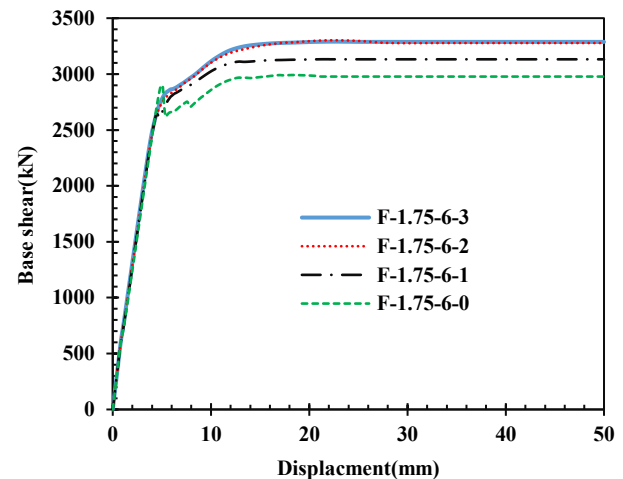
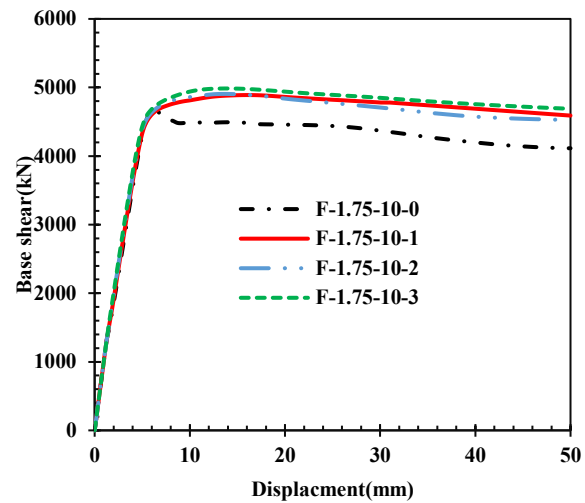
در این قسمت به بررسی و مطالعه تعداد ردیف پیچ ها بر مدل دیوار پیشنهادی و مدل موجدار دابل پرداخته شده است. همچنین برای بررسی بیشتر سه مدل به نسبت ابعادی $b/h=0.85, 1.25$ و به ضخامت ورق های مختلف با تعداد ردیف پیچ های ۱ و ۲ و ۳ و ۴ برای مدل F انتخاب و مدل سازی شده است. هدف بررسی و مقایسه تعداد ردیف پیچ ها بر نمودار بار-تغییر مکان می باشد. همانطور ملاحظه می شود در تمامی مدل ها با افزایش ردیف پیچ ها مدل ها رفتار بهتری از خود نشان داده است. بهترین عملکرد از لحاظ ظرفیت برشی مربوط به مدل های با چهار ردیف پیچ بوه که کماتش موضعی رخ نمی دهد.



چیدمان (حجم مساوی مصالح) این دو پارامتر افزایش داشته باشند، علاوه بر بهبود رفتار لرزه‌ای سیستم، باعث اقتصادی شدن طرح می‌شوند. برای استخراج پارامترهای لرزه‌ای ابتدا با استفاده از روش یوانگ منحنی پوش آور مدل‌ها را دوخطی نموده و پس از استخراج پارامترهای Δy و Δm استفاده از رابطه ۱۲ مقدار ضریب شکل‌پذیری به دست می‌آید که در ستون دوم جدول ۳ مشاهده می‌شود بدین منظور در جدول (۳) شکل‌پذیری و ضریب افزایش مقاومت‌های تحلیل شده لیست شده است. همچنین میزان سختی اولیه و جذب انرژی برای مقایسه دو نوع مدل دیوار برشی موجدار دوبل و مدل چهار لایه در جدول ۳ آورده شده است.

همانطور که در جدول ۳ نشان داده شده است افزایش تعداد ردیف پیچ‌ها تاثیر بیشتری بر روی مقاومت افزون در دیوار موجدار دوبل می‌شود. همانطور در ستون ۷ جدول ۳ ملاحظه می‌شود میزان افزایش مقاومت افزون در مدل دیوار برشی موجدار دوبل ۳۸ درصد افزایش می‌یابد. میزان جذب انرژی در هر دو نوع دیوار برشی با افزایش ردیف پیچ‌ها تقریباً یکسان بوده و در ستون ششم جدول آورده شده است که به ترتیب ۱۳ و ۱۵ درصد می‌باشد.

۳-۵. ضریب اضافه مقاومت، سختی و جذب انرژی برای مدل چهار لایه
جذب انرژی یکی از پارامترهای مهم و تاثیر گذار بر رفتار لرزه‌ای سازه‌هاست. سازه‌های با قابلیت جذب انرژی بالاتر در زلزله نیروهای کمتری را تجربه خواهند کرد. بنابراین هر چه مقدار قابلیت جذب انرژی هر سازه بیشتر باشد عملکرد بهتری در زلزله‌های واقعی خواهد داشت. مقدار جذب انرژی مدل‌ها از جمع مساحت زیر نمودار پوش سازه به دست می‌آید که در ستون سوم جدول (۴) مقادیر آن برای مدل‌های عددی لیست شده است. همچنین مقدار سختی الاستیک و مقاومت نهایی مدل‌ها از تحلیل المان محدود به دست آمده که به ترتیب در ستون‌های ۲ و ۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۲. نمودار بار-تغییر مکان مدل‌های چهار لایه

۱-۲-۵. شکل‌پذیری و مقاومت افزون مدل موجدار دوبل

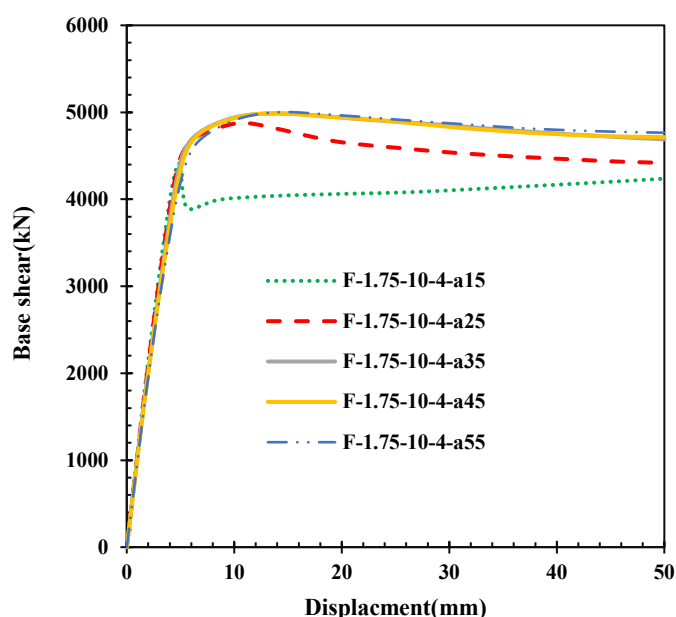
شکل‌پذیری و مقاومت افزون دو پارامتر مهم در طراحی لرزه‌ای هستند. هر سیستم سازه‌ای باید شکل‌پذیری مناسب در برابر زلزله داشته باشد. تامین افزایش شکل‌پذیری و مقاومت در هر سیستم سازه‌ای با افزایش هزینه و مصالح همراه خواهد بود. اما اگر با تغییر

جدول ۳. مقایسه شکل پذیری و جذب انرژی و پارامترهای لرزه‌ای برای مدل موجدار و چهار لایه

Model	$k(\frac{kN}{mm})$	Energy	$R_{\mu} = \frac{V_e}{V_y}$	Ω_n	$\frac{E(1.75 - 10 - N)}{E(1.75 - 10 - 1)}$	$\frac{\Omega_n(1.75 - 10 - N)}{\Omega_n(1.75 - 10 - 1)}$
F-1.75-10-1	1050.88	207641.51	4.63	4.30	1.00	1.00
F-1.75-10-2	1050.92	218769.95	4.61	4.44	1.05	1.03
F-1.75-10-3	1051.59	223907.58	4.55	4.54	1.08	1.06
F-1.75-10-4	1051.22	229811.57	4.52	4.64	1.11	1.08
F-1.75-10-5	1051.30	235579.63	4.56	4.23	1.13	0.98
D-1.75-10-1	1091.20	211943.94	4.38	1.29	1.00	1.00
D-1.75-10-2	1091.50	222558.83	4.18	1.61	1.05	1.25
D-1.75-10-3	1091.40	227891.51	4.23	1.46	1.08	1.14
D-1.75-10-4	1091.80	238478.02	4.05	1.72	1.13	1.34
D-1.75-10-5	1091.80	244350.46	3.97	1.78	1.15	1.38

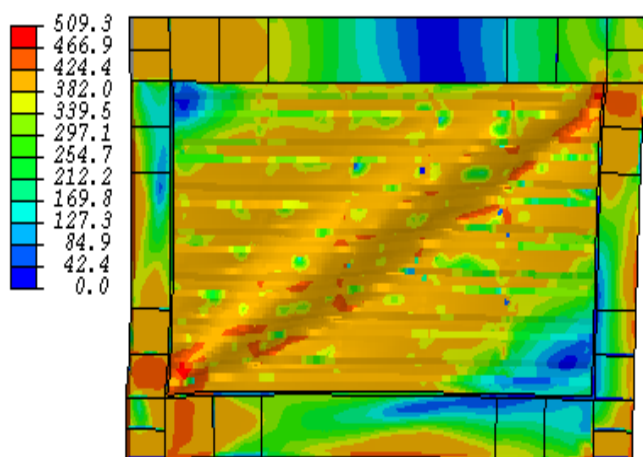
جدول ۴. مقایسه شکل پذیری و جذب انرژی و پارامترهای لرزه‌ای در مدل چهار لایه

Model	$k(\frac{kN}{mm})$	Energy	$R_{\mu} = \frac{V_e}{V_y}$	V_u	$\frac{E(i-t-N)}{E(i-t-0)}$	$\frac{V_u(i-t-N)}{V_u(i-t-0)}$	$\frac{V_u(i-t-N)}{V_u(0.85-4-0)}$	$\frac{k(i-t-N)}{k(0.85-4-0)}$
F-0.85-4-0	329	77330.26	4.64	1698.96	1.00	1.00	1.00	1.00
F-0.85-4-1	329	80462.712	4.72	1824.83	1.04	1.07	1.00	1.07
F-0.85-4-2	329	82166.906	4.58	1849.79	1.06	1.09	1.00	1.09
F-0.85-4-3	329	82166.906	4.58	1849.79	1.06	1.09	1.00	1.09
F-0.85-6-0	424	99421.31	4.46	2139.155	1.00	1.00	1.29	1.26
F-0.85-6-1	423	101577.43	4.56	2196.65	1.02	1.03	1.29	1.29
F-0.85-6-2	424	102953.25	4.43	2234.71	1.04	1.04	1.29	1.32
F-0.85-6-3	424	103349.55	4.40	2243.44	1.04	1.05	1.29	1.32
F-1.25-6-1	572	125478.72	4.81	2697.46	1.00	1.00	1.74	1.59
F-1.25-6-2	572	124959.04	4.74	2725.8	1.00	1.01	1.74	1.60
F-1.25-6-3	572	128080.83	4.78	2759.97	1.02	1.02	1.74	1.62
F-1.25-8-0	692	144662.82	6.65	2984.304	1.00	1.00	2.10	1.76
F-1.25-8-1	692	155379.17	4.61	3278.21	1.07	1.10	2.10	1.93
F-1.25-8-2	692	157554.86	4.54	3329.56	1.09	1.12	2.10	1.96
F-1.25-8-3	692	157756.49	4.50	3305.97	1.09	1.11	2.10	1.95
F-1.75-6-0	744	140391.87	5.20	2977.72	1.00	1.00	2.26	1.75
F-1.75-6-1	744	147134.13	5.04	3132.1	1.05	1.05	2.26	1.84
F-1.75-6-2	744	153246.05	4.93	3277.48	1.09	1.10	2.26	1.93
F-1.75-6-3	744	153720.69	4.86	3287.83	1.09	1.10	2.26	1.94
F-1.75-10-0	1050	207641.51	4.63	4114.03	1.00	1.00	3.19	2.42
F-1.75-10-1	1050	218769.95	4.61	4607	1.05	1.12	3.19	2.71
F-1.75-10-2	1051	223907.58	4.55	4626.37	1.08	1.12	3.20	2.72
F-1.75-10-3	1051	229811.57	4.52	4689.18	1.11	1.14	3.20	2.76
F-1.75-10-4	1051	235579.63	4.65	4689.18	1.13	1.14	3.20	2.76



شکل ۱۳. نمودار بار تغییر مکان با ابعاد چین متفاوت

برای بررسی بیشتر تاثیر ابعاد موج‌های دیوار چیندار کانتور تنش در صفحات موجدار و تخت استخراج شده است که در شکل (۱۳) نشان داده شده است.



الف. تنش فون میسز در صفحه موجدار (a=15)

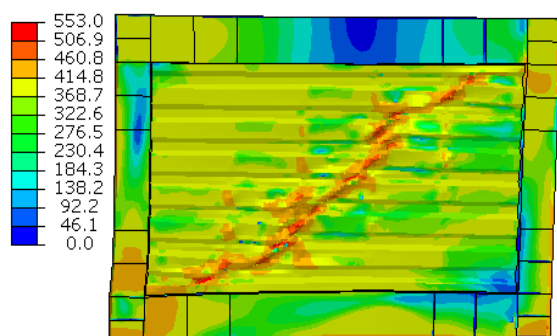
نتایج جدول (۴) نشان می‌دهد با افزایش تعداد ردیف پیچهای فولادی جذب انرژی و مقاومت نهایی در تمامی مدل‌ها افزایش پیدا می‌کند که در ردیف‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. اما نرخ افزایش اضافه مقاومت ناشی از افزایش ضخامت ورق برای سیستم F بطور قابل ملاحظه‌ای متاثر از نسبت b/h نیست. بطور کلی با افزایش ضخامت ورق به اندازه ۱.۵ تا ۱.۶۷ برابری ضخامت ورق، ضریب شکل‌پذیری برای سیستم دیوار فولادی با ورق چهار لایه تقریباً بدون تغییر و به صورت میانگین ۴.۶۵ می‌باشد.

با رجوع به ستون پنجم جدول ۴ مشاهده می‌شود که بیشترین تاثیر افزایش ردیف پیچ‌ها در مدل دیوار ۴ لایه F با افزایش تعداد ردیف پیچ‌ها میزان جذب انرژی و مقاومت نهایی به ترتیب ۱۳٪ و ۱۴٪ افزایش پیدا می‌کند که مربوط به مدل F-1.75-10-4 بوده که در ردیف‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است.

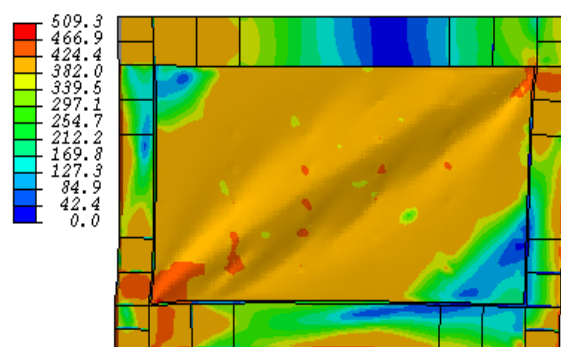
در جدول (۴) نسبت افزایش سختی الاستیک و مقاومت نهایی مدل‌های F نسبت به مدل مبنای F-0.85-4-0 در ستون‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش نسبت ابعاد دو پارامتر مذکور افزایش چشمگیر ۲.۷۶ و ۳.۲ برابری دارند.

۴-۵. بررسی اثرات ابعاد موج‌ها (تغییرات a)

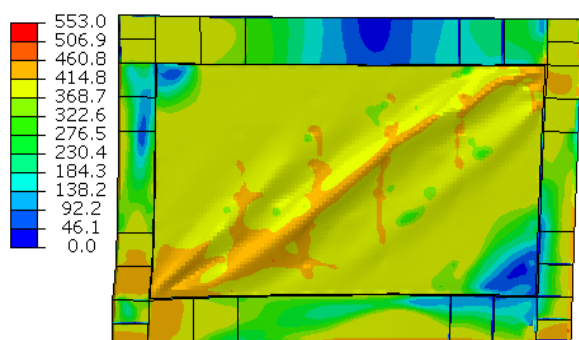
برای بررسی زاویه موج‌ها در صفحات چیندار مدل‌هایی با نسبت ابعاد عرض به ارتفاع $1.75 (b/h)$ و ضخامت مجموع ورق‌های دیوار ۱۰ میلیمتر، با عرض چین با مقادیر ۱۵، ۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۵۵ میلیمتر و زوایای $28/6$ ، $42/3$ ، $51/8$ ، $58/5$ و $63/5$ مدل‌سازی شد. نمودار بار-تغییر مکان مدل‌ها در شکل (۱۳) نشان داده شده است. همانطور مشاهده می‌شود با افزایش مقدار a از افت مقاومت جلوگیری نموده و سبب بهبود رفتار دیوار برشی پیشنهادی می‌شود با افزایش مقدار a تا ۳۵ میلیمتر (زوایای 51.8°) سبب بهبود رفتار دیوار شده و از مقدار ۳۵ بالاتر تاثیر چندانی بر رفتار دیوار ندارد.



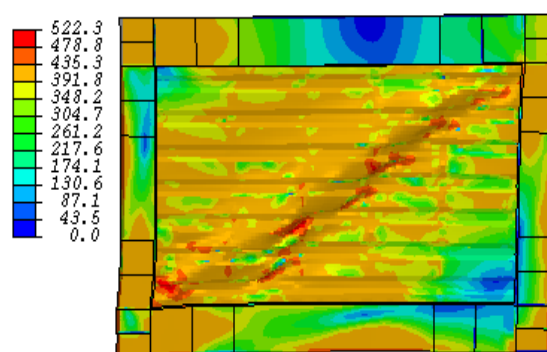
ه. تنش فون میسز در صفحه موجدار (a=45)



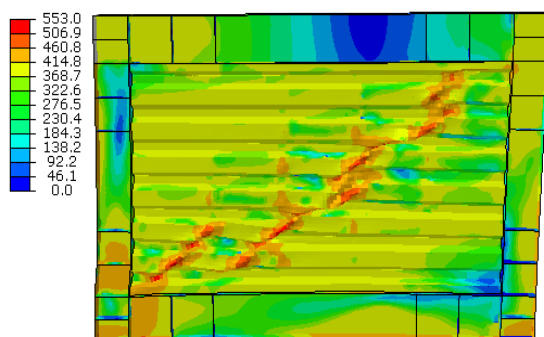
ب. تنش فون میسز در صفحه تخت (a=15)



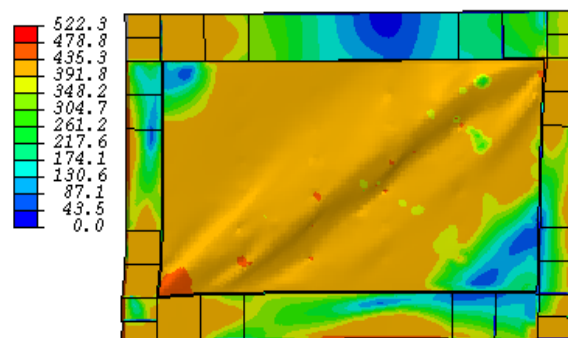
و. تنش فون میسز در صفحه تخت (a=45)



ج. تنش فون میسز در صفحه موجدار (a=25)



ز. تنش فون میسز در صفحه موجدار (a=55)



د. تنش فون میسز در صفحه تخت (a=25)

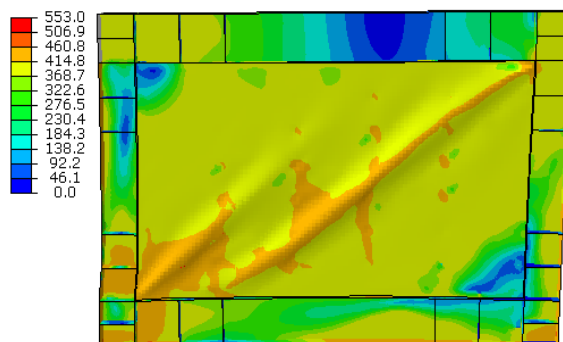
دوبل به ترتیب حدودا ۱۱٪ و ۱۶٪ و سیستم دیوار پیشنهادی ضریب بزرگنمایی تقریباً بدون تغییر و ضریب مقاومت افزون حدودا ۱۳٪ افزایش پیدا می کند.

- استفاده از دیوار پیشنهادی در مدل های P افزایش ضریب اضافه مقاومت و ضریب تغییر مکان به ترتیب ۴۲٪ و ۱۸٪ نسبت به دیوار فولادی موجدار دوبل می باشد که قابل توجه است.

- نتایج نشان داد مقدار ضریب رفتار و ضریب افزایش مقاومت در مدل پیشنهادی نسبت به دیوار برشی موجدار دوبل بسته به ضخامت و ابعاد به ترتیب تا ۳۱٪ و ۴۲٪ رشد داشته است.

- مقادیر پارامترهای ضریب شکل پذیری و ضریب اضافه مقاومت برای دیوار برشی پیشنهادی بترتیب ۴/۵۵ و ۴/۸ پیشنهاد می شود.

- مقایسه نتایج نشان می دهد افزایش زاویه چین دیوار موجدار تا مقدار ۵۱/۸ درجه سبب بهبود عملکرد و برای مقادیر بیشتر از آن تاثیر چندانی بر ظرفیت برشی دیوار برشی چهار لایه نخواهد داشت و تمرکز تنش در المان مرزی را افزایش می دهد.



ح: تنش فون میسز در صفحه تخت (a=55)

شکل ۱۵. کانتور تنش ون مایسز در صفحه تخت و موجدار برای ابعاد چین متفاوت

همانطور که مشاهده می شود با افزایش مقدار a مقدار تنش در صفحه دیوار از ۵۰۹ تا ۵۵۳ مگاپاسکال افزایش می یابد. همچنین نحوه پخش تنش در ابعاد کوچکتر $a=15,25$ به صورت یکنواخت تر نسبت به ابعاد $a=45,55$ می باشد. به عبارت ساده تر افزایش ابعاد a سبب تمرکز تنش در صفحات دیوار برشی می شود.

۶. نتیجه گیری

در این تحقیق رفتار لرزه ای دو مدل دیوار برشی تحت اثر تحلیل استاتیکی غیر خطی به صورت عددی و به روش المان محدود مورد مطالعه قرار گرفت. در این راستا تاثیر تغییرات ضخامت دیوار و نسبت ابعاد المان مرزی بر پارامترهای لرزه ای از جمله ضریب شکل پذیری، ضریب رفتار و ضریب اضافه مقاومت در نیروی جانبی بررسی شد. خلاصه نتایج به دست آمده در زیر آورده شده است.

- نسبت افزایش سختی الاستیک و مقاومت نهایی مدل های F نسبت به مدل مبنای F-0.85-4-0 با افزایش نسبت ابعاد افزایش چشمگیر ۲.۷۶ و ۳.۲ برابری دارند.

- بیشترین تاثیر افزایش ردیف پیچ ها در مدل دیوار ۴ لایه بر پارامترهای میزان جذب انرژی و مقاومت نهایی به ترتیب ۱۳٪ و ۱۴٪ بوده که مربوط به مدل F-1.75-10-4 می باشد.

- میزان سختی الاستیک مدل ها متاثر از تعداد ردیف پیچ ها نبوده و ثابت می باشد.

- با افزایش ضخامت ورق دیوار برشی، ضریب اضافه مقاومت و ضریب بزرگنمایی تغییر مکان برای سیستم دیوار فولادی با ورق

- [10] F. Emami, M. Mofid, and A. Vafai, "Experimental study on cyclic behavior of trapezoidally corrugated steel shear walls," *Engineering Structures*, vol. 48, pp. 750–762, Mar. 2013, doi: 10.1016/j.engstruct.2012.11.028.
- [11] F. Emami and M. Mofid, "On the hysteretic behavior of trapezoidally corrugated steel shear walls: ON THE HYSTERETIC BEHAVIOR OF TRAPEZOIDALLY CORRUGATED STEEL SHEAR WALLS," *Struct. Design Tall Spec. Build.*, vol. 23, no. 2, pp. 94–104, Feb. 2014, doi: 10.1002/tal.1025.
- [12] S. Shon, M. Yoo, and S. Lee, "An Experimental Study on the Shear Hysteresis and Energy Dissipation of the Steel Frame with a Trapezoidal-Corrugated Steel Plate," *Materials*, vol. 10, no. 3, p. 261, Mar. 2017, doi: 10.3390/ma10030261.
- [13] H. Kalali, T. G. Ghazijahani, M. Hajsadeghi, T. Zirakian, and F. J. Alaei, "Numerical Study on Steel Shear Walls with Sinusoidal Corrugated Plates," *Lat. Am. j. solids struct.*, vol. 13, no. 15, pp. 2802–2814, Dec. 2016, doi: 10.1590/1679-78252837.
- [14] G. Pachideh, M. Gholhaki, and A. Saedi Daryan, "Analyzing the damage index of steel plate shear walls using pushover analysis," *Structures*, vol. 20, pp. 437–451, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.istruc.2019.05.005.
- [15] A. Benvidi, E. Mohammadi Dehcheshmeh, P. Safari, V. Broujerdian, and S.-S. Huang, "Post-fire seismic performance of low-yielding-steel plate shear wall systems," *International Journal of Civil Engineering*, vol. 21, no. 10, pp. 1661–1678, 2023.
- [16] J.-Z. Tong and Y.-L. Guo, "Shear resistance of stiffened steel corrugated shear walls," *Thin-Walled Structures*, vol. 127, pp. 76–89, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.tws.2018.01.036.
- [17] Q. Cao and J. Huang, "Experimental study and numerical simulation of corrugated steel plate shear walls subjected to cyclic loads," *Thin-Walled Structures*, vol. 127, pp. 306–317, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.tws.2018.01.042.
- [18] J.-Z. Tong, Y.-L. Guo, J.-Q. Zuo, and J.-K. Gao, "Experimental and numerical study on shear resistant behavior of double-corrugated-plate shear walls," *Thin-Walled Structures*, vol. 147, p. 106485, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.tws.2019.106485.

References

- [1] A. Astaneh-Asl, "Seismic Behavior and Design of Steel Shear Walls".
- [2] M. R. Behbahanifard, G. Y. Grondin, and A. E. Elwi, "Analysis of Steel Plate Shear Walls Using Explicit Finite Element Method".
- [3] M. Bahrebar, M. Z. Kabir, T. Zirakian, M. Hajsadeghi, and J. B. P. Lim, "Structural performance assessment of trapezoidally-corrugated and centrally-perforated steel plate shear walls," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 122, pp. 584–594, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.jcsr.2016.03.030.
- [4] Y. L. Mo and S. F. Perng, "Behavior of Framed Shearwalls Made of Corrugated Steel under Lateral Load Reversals," *Advances in Structural Engineering*, vol. 3, no. 3, pp. 255–262, Jul. 2000, doi: 10.1260/1369433001502184.
- [5] M. Gholizadeh and Y. Yadollahi, "Comparing Steel Plate Shear Wall Behavior with Simple and Corrugated Plates," *AMM*, vol. 147, pp. 80–85, Dec. 2011, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.147.80.
- [6] M. Bahrebar, J. B. P. Lim, G. C. Clifton, T. Zirakian, A. Shahmohammadi, and M. Hajsadeghi, "Perforated steel plate shear walls with curved corrugated webs under cyclic loading," *Structures*, vol. 24, pp. 600–609, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.istruc.2020.01.047.
- [7] N. Paslar, A. Farzampour, and F. Hatami, "Investigation of the infill plate boundary condition effects on the overall performance of the steel plate shear walls with circular openings," *Structures*, vol. 27, pp. 824–836, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.istruc.2020.06.031.
- [8] A. Farzampour, J. A. Laman, and M. Mofid, "Behavior prediction of corrugated steel plate shear walls with openings," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 114, pp. 258–268, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.jcsr.2015.07.018.
- [9] D. Vian, M. Bruneau, K. C. Tsai, and Y.-C. Lin, "Special Perforated Steel Plate Shear Walls with Reduced Beam Section Anchor Beams. I: Experimental Investigation," *J. Struct. Eng.*, vol. 135, no. 3, pp. 211–220, Mar. 2009, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2009)135:3(211).

- [19] J.-Z. Tong, Y.-L. Guo, and W.-H. Pan, "Ultimate shear resistance and post-ultimate behavior of double-corrugated-plate shear walls," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 165, p. 105895, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.jcsr.2019.105895.
- [20] A. Abbaszadeh, A. Ghamari, and V. Broujerdian, "Seismic behavior of an innovative four-layer steel shear wall," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 27, no. 11, pp. 4770–4786, 2023.
- [21] V. Broujerdian, A. Ghamari, and A. Abbaszadeh, "Introducing an efficient compound section for steel shear wall using flat and corrugated plates," *Structures*, vol. 33, pp. 2855–2871, 2021.
- [22] S.-J. Duan, R.-M. Wu, C.-Q. Yu, and J.-Z. Tong, "Seismic behavior and design of a novel composite-corrugated steel plate shear wall," *Journal of Building Engineering*, p. 115932, 2026.
- [23] J. Hao, S. Li, Q. Xue, X. Sun, C. Fan, and H. Liu, "Global stability performance of sandwich steel plate shear wall with embedded corrugated plate," *Engineering Structures*, vol. 360, p. 122852, 2026.
- [24] L. Zhou, X. Teng, and S. Li, "Seismic performance of flat-corrugated steel shear walls with different patterns," in *Structures*, Elsevier, 2026, p. 111369.