

Research Article

Study of Seismic Factors of a Flat-Double Corrugated Trapezoidal Steel Shear Wall under Cyclic Loading

Ramin Mansouri¹, Fereshteh Emami^{2*}, Pasha Javadi³

1- PhD Student, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran



Citation: Mansouri, R., Emami, F., and Javadi, P. (2026), "Study of Seismic Factors of a Flat-Double Corrugated Trapezoidal Steel Shear Wall under Cyclic Loading", *Journal of Steel & Structures*, 20(53), pp.24-46. (In Persian)

doi <https://doi.org/10.22034/jss.2026.596105.1051>

Article info:

Article History:

Received: 4 February 2026

Revised: 21 April 2026

Accepted: 22 April 2026

Published: 23 September 2026

Keywords:

Hybrid Steel Plate Shear Wall
Maximum Strength
Response Modification Factor
Ductility
Cyclic Loading

ABSTRACT

Background: To improve seismic performance and control the lateral displacements of structures, this research introduces a novel steel shear wall system. The primary objective of this study is to realistically evaluate the effectiveness of this system in enhancing lateral resistance and preventing structural collapse under severe earthquakes.

Methods: In this study, the behavior of three types of steel shear walls, including: Flat Steel Plate Shear Wall (FSPSW), Vertically Single-layer Corrugated Steel Plate Shear Wall (VCSPSW), and the hybrid system (VDCFSPSW) under cyclic loading following the SAC loading protocol, was analyzed using numerical models in Finite Element software. The results obtained from the numerical modeling showed significant agreement with experimental results, demonstrating the validity of the work. In the subsequent stage, parametric studies were conducted on the Vertically Double Corrugated-Flat Steel Plates Shear Wall (VDCFSPSW) featuring double vertical corrugated plates, which included investigating dimensional ratios b/h from 0.5 to 2.5, corrugation angles of 30, 45, 60 and the ratio of the double corrugated plate width to the opening width 25%, 50%, 75% in the hybrid model.

Results: Numerical analyses results indicate that the VDCFSPSW-30-50% hybrid model exhibits a significant improvement in maximum strength (ranging from 4.42% to 13.80%) compared to the VCSPSW-30 model at b/h dimensional ratios between 0.5 and 1.5. Additionally, at a b/h ratio of 2.5 this model shows comparable strength to the FSPSW model, confirming the system's desirable performance. Furthermore, the average ductility factor of the VDCFSPSW hybrid systems shows a marked superiority over flat shear walls, while its average response modification factor significantly outperforms single-layer corrugated shear walls, double-corrugated shear walls, and the hybrid HDCFSPSW systems, demonstrating the enhanced seismic performance of these hybrid systems.

Conclusion: The hybrid VDCFSPSW model outperforms various configurations by combining superior ductility, higher strength, and an improved response modification factor. Its efficient force redistribution and suitable inelastic behavior make it a highly effective and economical alternative to conventional steel shear walls.

* Corresponding Author's E-mail: femami@iaui.ac.ir



Copyright for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Iranian Society of Steel Structures Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Introduction

Extensive research conducted over recent decades on steel shear walls, focusing on ultimate strength and seismic coefficients for both flat and corrugated shear walls, reveals that each system possesses distinct advantages and limitations. Therefore, this study introduces a novel steel shear wall system that combines double-layered flat and corrugated plates. This integrated approach aims to address the weaknesses of previously studied flat and corrugated steel shear wall systems while capitalizing on their strengths. Consequently, by enhancing the steel shear wall system, this research evaluates a new hybrid system incorporating the characteristics of both flat and corrugated walls. This parametric study, utilizing 125 numerical models, thoroughly assesses the seismic performance of the hybrid steel shear wall system by examining maximum strength, seismic coefficients, and response modification factor, overstrength, and ductility factors. The ultimate goal is to achieve an optimized system with favorable seismic performance.

Methods

In this study, three experimental specimens comprising a Flat Steel Plate Shear Wall (FSPSW), a Vertically Corrugated Steel Plate Shear Wall (VCSPSW), and a composed Vertically Double Corrugated-Flat Steel Plates Shear Wall (VDCFSPSW). were evaluated and validated through both physical testing and Finite Element (FE) numerical modeling using Abaqus. The numerical analyses were performed using an implicit dynamic solver in Abaqus, incorporating material nonlinearity. Subsequently, a parametric study was conducted using Abaqus to investigate various aspect ratios b/h ranging from 0.5 to 2.5 and corrugation angles of 30, 45 and 60. For the combined model VDCFSPSW featuring double vertical corrugated plates, the parametric study considered aspect ratios (b/h) from 0.5 to 2.5, as well as the

ratio of the double-corrugated-plate width to the span width, examined at three levels: 25%, 50%, and 75%. Through the analysis of 125 distinct models, these configurations were systematically compared in terms of ultimate strength and seismic coefficients.

Results

This study investigates the seismic performance of a novel Vertical Double-Corrugated Steel Plate Shear Wall (VDCFSPSW) system, comprising a combination of flat plates and double-trapezoidal corrugated plates, through advanced numerical analyses and a comparative study with conventional (SPSW) systems. The numerical results reveal that the peak strength of the specimens is directly dependent on the aspect ratio b/h , the corrugation angle, and the orientation of the plates. Specifically, increasing both the aspect ratio and the corrugation angle leads to an enhancement in ultimate strength, a trend that is particularly pronounced in single- and double-layer corrugated walls. Furthermore, for the VDCFSPSW models with vertical double-corrugation, the width ratio of the double-corrugated plates relative to the opening width (investigated at 25%, 50%, and 75%) significantly influences the strength capacity across aspect ratios ranging from 0.5 to 2.5. Overall, the VDCFSPSW system outperforms flat, single-layer, and double-layer corrugated models. This superiority is demonstrated by higher ultimate strength across a wide range of aspect ratios, more stable hysteretic behavior, delayed strength degradation, and a substantial reduction in the pinching effect compared to the flat plate models. Most importantly, the combined system offers significant advantages in terms of ductility and Response Modification factors. Consequently, the VDCFSPSW system is proposed as an efficient and highly reliable seismic solution to mitigate buckling and enhance the seismic performance of steel

shear walls, particularly in high-seismicity regions where high ductility is critical.

Conclusion

This study demonstrates the effectiveness of VDCFSPSW systems in enhancing seismic performance. By examining aspect ratios b/h from 0.5 to 2.5, corrugation angles, orientation, and double-corrugated plate width ratios (25%, 50%, and 75%), an optimal shear wall system for lateral resistance was identified. Numerical results indicate that the VDCFSPSW model with a 30° corrugated angle and 50% width ratio achieves maximum peak strength. Compared to the single-layer VCSWSW 30, peak strength increases by 4.42%, 13.80%, and 8.52% for b/h ratios between 0.5 and 1.0, respectively. At b/h of 2.5 its peak strength matches that of a conventional FSPSW. Additionally, the average maximum strength of combined VDCFSPSW models exceeds that of HDCFSPSW models. Analysis of seismic parameters shows that the average Response Modification factors for flat, single-layer (horizontal and vertical), and double-layer (horizontal and vertical) walls are 5.88, 5.45, 5.44, 5.33, and 5.333, respectively. In contrast, VDCFSPSW models with 25%, 50%, and 75% width ratios, alongside the HDCFSPSW model, yield factors of 5.62, 5.38, 5.27, and 5.52. Thus, VDCFSPSW systems offer higher average Response Modification factors than other double-corrugated configurations. Similarly, average ductility factors for flat, single-layer, and double-layer walls are 9.98, 11.86, 12.35, 12.50, and 12.60, respectively, while VDCFSPSW models (25%, 50%, 75%) and HDCFSPSW show 11.25, 12.21, 12.82, and 11.89. Ultimately, combined VDCFSPSW systems exhibit superior ductility and the ability to sustain significant inelastic deformations prior to failure.

Declaration of Generative AI and AI-assisted Technologies in the Writing Process

The authors declare that no generative AI or AI-assisted technologies were used in the

writing, editing, or preparation of this manuscript. All parts of this paper, including conceptualization, data analyses, drafting of the text, and scientific revisions, were performed exclusively by the authors. The authors take full responsibility for the content and accuracy of the information presented herein.

Ethical Consideration

Compliance with ethical guidelines

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Author's contributions

First Author: Conceptualization, Methodology, Analysis, Investigation, Writing.

Second Author: Review and Editing, Supervision, and Project Administration.

Third Author: Review and Editing.

Conflicts of interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper. There is no conflict of interest associated with the publication of this manuscript.

Acknowledgments

The author received no financial support for the research, authorship, and/or publication of this article. No specific grants from any funding agency in the public, commercial, or not for profit sectors were provided for this research.

مقاله پژوهشی

مطالعه ضرایب لرزه‌ای دیوار برشی فولادی صاف-موج‌دار دوبل دوزنقه‌ای تحت بارگذاری چرخه‌ای

رامین منصوری^۱، فرشته امامی^{۲*}، پاشا جوادی^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران

۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران



Citation: Mansouri, R., Emami, F., and Javadi, P. (2026), "Study of Seismic Factors of a Flat-Double Corrugated Trapezoidal Steel Shear Wall under Cyclic Loading", *Journal of Steel & Structures*, 20(53), pp.24-46. (In Persian)

doi <https://doi.org/10.22034/jss.2026.596105.1051>

چکیده

زمینه پژوهش: در راستای بهبود عملکرد لرزه‌ای و کنترل تغییر مکان‌های جانبی سازه‌ها، این پژوهش یک سیستم نوین دیوار برشی فولادی معرفی می‌کند. هدف اصلی این مطالعه، ارزیابی واقع‌بینانه کارایی این سیستم در ارتقای مقاومت جانبی و جلوگیری از فروریزش سازه تحت زلزله‌های شدید است.

روش پژوهش: در این مطالعه، ابتدا رفتار سه نوع دیوار برشی فولادی شامل: صاف (FSPSW)، تک‌لایه موج‌دار (VCSPSW) و سیستم ترکیبی (VDCFSPSW) تحت بارگذاری چرخه‌ای مطابق پروتکل بارگذاری SAC با استفاده از مدل‌های عددی در نرم‌افزار اجزای محدود تحلیل شد. نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی تطابق قابل توجهی داشت که نشان‌دهنده صحت کار است. در مرحله بعد، مطالعات پارامتریک بر روی سیستم ترکیبی با ورق موج‌دار دوبل قائم انجام گرفت که شامل بررسی نسبت‌های ابعادی b/h از ۰/۵ تا ۲/۵ و زوایای موج ۳۰، ۴۵، ۶۰ درجه و نسبت عرض ورق موج‌دار دوبل به عرض دهانه ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد در مدل ترکیبی بود.

یافته‌ها: نتایج تحلیل عددی نشان می‌دهد که مدل ترکیبی VDCFSPSW-30-50% در مقایسه با مدل VCSPSW-30 در نسبت‌های ابعادی b/h بین ۰/۵ تا ۱/۵ بهبود قابل توجهی در مقاومت بیشینه (بین ۴/۴۲ تا ۱۳/۸۰ درصد) از خود نشان می‌دهد. همچنین، این مدل در نسبت ابعادی b/h برابر ۲/۵ مقاومت یکسانی با مدل FSPSW دارد که عملکرد مطلوب سیستم را تأیید می‌کند. علاوه بر این، میانگین ضریب شکل‌پذیری در سیستم‌های ترکیبی VDCFSPSW نسبت به دیوارهای برشی صاف و میانگین ضریب رفتار آن نسبت به دیوارهای برشی تک‌لایه موج‌دار و دیوارهای برشی دوبل موج‌دار و ترکیبی HDCFSPSW برتری چشم‌گیری دارد، که نشان‌دهنده بهبود عملکرد لرزه‌ای در این سیستم‌های ترکیبی است.

نتیجه‌گیری: مدل ترکیبی VDCFSPSW با دارا بودن شکل‌پذیری بالاتر نسبت به مدل صاف و ضریب رفتار و بیشینه مقاومت بالاتر نسبت به بسیاری از مدل‌های موج‌دار، عملکرد مطلوب همراه با طرح اقتصادی را نشان می‌دهد. این سیستم به دلیل قابلیت بازتوزیع نیرو و رفتار غیرالاستیک مناسب، به عنوان جایگزینی کارآمد برای سایر دیوارهای برشی فولادی توصیه می‌شود.

اطلاعات مقاله:

سابقه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۵ بهمن ماه ۱۴۰۴
تاریخ بازنگری: ۱ اردیبهشت ماه ۱۴۰۵
تاریخ پذیرش: ۲ اردیبهشت ماه ۱۴۰۵
تاریخ انتشار: ۱ مهر ماه ۱۴۰۵

واژگان کلیدی:

دیوار برشی فولادی ترکیبی
مقاومت حداکثر
ضریب رفتار
شکل‌پذیری
بارگذاری چرخه‌ای

* آدرس ایمیل نویسنده مسئول: femami@iaui.ac.ir

حقوق نشر این مقاله برای نویسنده(گان) محفوظ است و حقوق انتشار آن به انتشارات انجمن سازه‌های فولادی ایران واگذار شده است. محتوای این مقاله تابع قوانین و شرایط مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution 4.0 (CC-BY-NC 4.0) می‌باشد. برای اطلاعات بیشتر، لطفاً به وبسایت <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> مربوطه مراجعه فرمایید.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، دیوارهای برشی فولادی (SPSWs)^۱ با ورق‌های صاف پرکننده به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان سیستم‌های مؤثر برای مقاومت در برابر بارهای جانبی در ساختمان‌های بلندمرتبه به‌کار گرفته شده‌اند [۱ و ۲]. از آنجاکه ورق‌های صاف در SPSWs مرسوم مستعد کماتش تحت بارهای افقی هستند، نواحی کششی مورب تشکیل می‌دهند که منجر به ظرفیت اتلاف انرژی محدود تحت بارگذاری چرخه‌ای افقی در صفحه می‌شود [۳]. برای حل این مشکل، محققان انواع جدیدی از سازه‌های دیوار برشی فولادی را معرفی کرده‌اند که شامل SPSWs کماتش تاب [۴] و دیوارهای برشی مرکب فولادی-بتنی (کامپوزیت) [۵] می‌شوند. با توجه به اهمیت جلوگیری یا حداقل به تأخیر انداختن کماتش در ورق‌های صاف در سیستم‌های دیوار برشی فولادی، محققان استفاده از ورق‌های موج‌دار را به‌عنوان المان‌های پرکننده به‌جای ورق‌های صاف پیشنهاد کرده‌اند. در مقایسه با SPSWs نازک و صاف، دیوارهای برشی فولادی با ورق‌های موج‌دار (CSPSWs)^۲ سختی خمشی خارج از صفحه را در یک جهت به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهند [۶]. ورق‌های فولادی موج‌دار با پروفیل‌های متنوعی مانند دوزنقه‌ای، سینوسی، مثلثی و مستطیلی در سیستم‌های دیوار برشی فولادی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در میان این‌ها، ورق‌های موج‌دار دوزنقه‌ای بیش‌ترین کاربرد را داشته‌اند. تحقیقات گسترده تجربی و عددی روی CSPSWs قابلیت‌های عالی سازه‌ای این سیستم را به‌عنوان یک مکانیزم مقاوم در برابر بار جانبی نشان داده است [۷-۱۴]. اگرچه CSPSWs مزایای قابل‌توجهی ارائه می‌دهد، یافته‌ها و مشاهدات، نقاط ضعف خاصی را در این سیستم‌های سازه‌ای آشکار کرده‌اند. مطالعات تجربی مقایسه‌ای بین دیوارهای صاف سنتی و تک‌لایه موج‌دار (VCSPSW)^۳ [۱۵-۱۷] نشان داده است که در مقایسه با دیوارهای مرسوم صاف، دیوارهای تک‌لایه موج‌دار سختی الاستیک بالاتر، بار کماتشی بیش‌تر و ظرفیت اتلاف انرژی بالایی از خود نشان می‌دهند. با این حال، مقاومت نهایی آن‌ها کم‌تر از دیوارهای صاف است که به‌عنوان یک عیب در نظر گرفته می‌شود. ورق‌های فولادی موج‌دار را می‌توان با جهت‌دهی موج به‌صورت افقی یا عمودی نصب کرد که هر پیکربندی دارای مزایا و ویژگی‌های برجسته متمایزی است. در یک سیستم مرسوم SPSW، بارهای ثقلی عمودی از طبقات فوقانی قبل از اعمال بارهای جانبی (باد و

زلزله) به‌صورت پیش‌فشاری به ورق پرکننده اعمال می‌شود؛ این پیش‌فشاری بر ظرفیت ورق پرکننده تأثیر گذاشته و در نهایت مقاومت باربری جانبی آن را کاهش می‌دهد. در یک دیوار موج‌دار با جهت‌دهی افقی، ورق‌های موج‌دار افقی اثرات این پیش‌فشاری را از طریق اثر آکاردئونی کاهش می‌دهند و در نتیجه اثر نامطلوب پیش‌فشاری عمودی بر ظرفیت بار جانبی چنین دیوارهایی را حذف می‌کنند [۱۸ و ۱۹]. در مقابل، در دیوارهایی با ورق‌های موج‌دار عمودی، ورق‌ها ناگزیر تحت بارهای پیش‌فشاری عمودی قرار می‌گیرند که در نتیجه منجر به کاهش ظرفیت باربری جانبی آن‌ها می‌شود. مطالعات ثابت کرده‌اند که عملکرد بهینه دیوارهای برشی فولادی با پانل‌های پرکننده موج‌دار مشروط به انتخاب مناسب پارامترهای هندسی پانل است [۲۰].

یک چالش عمده شناسایی شده در این مطالعات، کاهش محسوس مقاومت جانبی پس از کماتش خارج از صفحه است که به‌طور نامطلوبی بر شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی سیستم تأثیر می‌گذارد. این مسئله به‌ویژه در پانل‌های با جهت‌دهی افقی با نسبت‌های عرض به ارتفاع بزرگ (مثلاً $b/h \geq 1.5$) حادث‌تر است؛ جایی که شناسایی ابعاد ورق موج‌دار که کاهش مقاومت پس از کماتش را رفع کند، به‌طور قابل‌توجهی دشوار است. برای مهار کماتش خارج از صفحه ورق‌های موج‌دار پرکننده، پژوهشگران ایده استفاده از دیوارهای تک‌لایه موج‌دار سخت‌شده را پیشنهاد و اتخاذ کرده‌اند [۲۱-۲۳].

یک ورق موج‌دار از آنجایی که از طریق فرایند نورد سرد تهیه می‌شود، به‌دلیل محدودیت‌های تهیه و همچنین هزینه‌بر بودن این فرآیند، دارای حداکثر ضخامت ۷ الی ۸ میلی‌متر است که استفاده از آن را در طبقات پایینی سازه‌های بلندمرتبه با نیروهای برشی زیاد با محدودیت مواجه می‌کند. برای غلبه بر این مشکل در دیوارهای برشی فولادی، **تونگ**^۴ و **همکاران** ایده استفاده از ورق‌های دوبل موج‌دار را مطرح کردند [۲۰ و ۲۴]. در این سیستم، ورق‌های تک‌لایه موج‌دار یکسان و موازی از طریق پیچ‌های متصل‌کننده با مقاومت بالا به یکدیگر متصل شده و یک واحد یکپارچه را شکل می‌دهند. تحقیقات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که سختی اولیه و اتلاف انرژی در دیوارهای برشی فولادی دوبل موج‌دار (VDCFSPSW)^۵ بیش‌تر از دیوارهای برشی تک‌لایه موج‌دار است [۲۵]. تحقیقات آزمایشگاهی و عددی همچنین نشان می‌دهد که دیوارهای برشی فولادی دوبل موج‌دار از ظرفیت

⁴ Tong

⁵ Vertically Double Corrugated-Flat Steel Plates Shear Wall

¹ Steel Plate Shear Wall

² Corrugated Steel Plate Shear Walls

³ Vertically Single-layer Corrugated Steel Plate Shear Wall

باربری جانبی، سختی اولیه و ظرفیت اتلاف انرژی قابل توجهی برخوردار هستند [۱۸ و ۲۶-۲۹].

در سال‌های اخیر، نوآوری‌ها در سیستم‌های دیوار برشی فولادی، که این مدل‌ها شامل سیستم‌های دیوار برشی فولادی با ورق‌های موج‌دار (Flat CFW) است که ورق‌های صاف و موج‌دار را یکپارچه می‌سازد. این سیستم در پیکربندی‌های مختلفی ارائه می‌شود؛ از جمله یک دیوار برشی دولایه متشکل از یک ورق صاف و یک ورق موج‌دار دوزنقه‌ای [۳۰-۳۲]، یک دیوار سه‌لایه متشکل از یک ورق موج‌دار محصورشده توسط ورق‌های صاف [۳]، یک دیوار برشی سه‌لایه که در آن یک ورق صاف توسط ورق‌های موج‌دار محصور شده است [۶] و یک دیوار چهارلایه متشکل از یک ورق دوبل موج‌دار محصورشده توسط ورق‌های دیوار برشی صاف [۳۳-۳۹].

و^۱ به بررسی مقایسه عملکرد دیوارهای برشی فولادی با ورق موج‌دار دوزنقه‌ای دوبل در برابر دیوارهای برشی فولادی با ورق موج‌دار دوزنقه‌ای صاف، تحت بارگذاری چرخه‌ای جانبی پرداخت [۴۰]. در این پژوهش، رفتار جانبی دیوارهای DCSSW و FCSSW دولایه با زاویه‌های موج‌دارشدن و ضخامت‌های مختلف ورق پرنکنده، تحت بارگذاری چرخه‌ای جانبی در نرم‌افزار Abaqus بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که دیوارهای FCSSW به دلیل اثر متقابل میان ورق صاف و ورق موج‌دار، عملکرد بهتری نسبت به دیوارهای DCSSW دارند. بیشینه مقاومت دیوارهای FCSSW نسبت به DCSSW حداقل ۱/۷ درصد و حداکثر ۱۲ درصد افزایش یافته است.

ژو^۲ و همکاران دیوارهای صاف-موج‌دار با پیکربندی‌های مختلف را بررسی نمودند [۴۱]. این مقاله به بررسی عددی عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی موج‌دار-صاف، نوآورانه (FCSSW) در پیکربندی‌های گوناگون می‌پردازد. در این تحقیق، دیوارهای FCSSW دو، سه و چهار لایه با جهات موج‌دار افقی و عمودی (با زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه) مورد ارزیابی قرار گرفته و با سیستم‌های متداول شامل دیوارهای برشی فولادی صاف (FSSW)، موج‌دار تک‌لایه (CSSW) و موج‌دار دوبل (DCSSW) مقایسه شده‌اند. مدل‌های اجزای محدود که با داده‌های تجربی اعتبارسنجی شده‌اند، تحت بارگذاری چرخه‌ای مطابق با پروتکل SAC قرار گرفته‌اند [۴۲]. نتایج نشان می‌دهد که دیوارهای FCSSW در مقایسه با FSSW و CSSW، حلقه‌های پسماند

مناسب‌تر، کاهش پدیده پینچینگ و اتلاف انرژی به مراتب بهتری از خود نشان می‌دهند. دیوار دوبل FCSSW به‌عنوان عملی‌ترین پیکربندی شناخته شد که بهبودی متوازن در مقاومت (به‌طور میانگین ۱۳/۲٪ بیش‌تر از CSSW و ۴/۳٪ بیش‌تر از FSSW)، را با حداقل پیچیدگی ساخت ارائه می‌دهد.

با توجه به مطالعات گسترده انجام‌شده در زمینه دیوار برشی فولادی که طی دهه‌های اخیر درخصوص بررسی مقاومت بیشینه، و ضرایب لرزه‌ای در دیوارهای صاف و موج‌دار صورت گرفته است، می‌توان دریافت که هریک از این سیستم‌ها دارای مزایا و محدودیت‌های خاص خود هستند؛ لذا در این تحقیق با درنظرگرفتن یک سیستم دیوار برشی فولادی جدید که ترکیبی از ورق‌های صاف و موج‌دار دوبل است، می‌توان نقاط ضعف سیستم‌های دیوار برشی فولادی با مدل صاف و موج‌دار مورد بررسی در گذشته را پوشش داد و درعین‌حال به نقاط قوت آن‌ها دست یافت. بنابراین در این پژوهش با ارتقای سیستم دیوار برشی فولادی، یک سیستم ترکیبی جدید که در برگیرنده خصوصیات دیوارهای صاف و موج‌دار است، مورد ارزیابی قرار گرفت. در مطالعه پارامتریک با درنظرگرفتن ۱۲۵ مدل عددی و در ادامه با بررسی این مدل‌ها از نظر مقاومت حداکثر و ضرایب لرزه‌ای ازجمله ارائه ضرایب رفتار، ضریب اضافه‌مقاومت و ضریب شکل‌پذیری مشخص، می‌توان عملکرد لرزه‌ای سیستم دیوار برشی فولادی ترکیبی را به‌صورت کامل بررسی نمود و به یک سیستم بهینه با عملکرد لرزه‌ای مناسب دست یافت.

۲- صحت‌سنجی مدل‌های آزمایشگاهی

در این بخش سه نمونه دیوار برشی فولادی آزمایشگاهی با مدل‌های عددی تحلیل‌شده در نرم‌افزار اجزای محدود Abaqus مورد صحت‌سنجی قرار خواهند گرفت؛ نمونه‌های آزمایشگاهی شامل دیوار برشی فولادی صاف (FSPSW)، دیوار برشی فولادی تک‌لایه موج‌دار (VCSPSW) و دیوار برشی فولادی ترکیبی که متشکل از ورق‌های صاف و موج‌دار دوبل (VDCFWSPSW) است. دیوارهای برشی فولادی یک‌طبقه و یک دهانه با مقیاس ۱:۲ در نظر گرفته شدند.

۲-۱- مشخصات مدل‌ها

جزئیات هندسی دیوارهای برشی فولادی به این صورت است که، تیر فوقانی و ستون‌های قاب به‌ترتیب دارای مقاطع HEB160 و

¹ Wu

² Zhou

پیچ‌ها از نمرة M8 از نوع پرمقاومت ۱۰.۹ بوده و دارای فاصله ۵۰ میلی‌متر هستند. لازم به ذکر است که اتصال ورق‌های پرکننده به اعضای مرزی شامل تیرها و ستون‌ها نیز توسط ورق‌های کمکی (فیش پلیت) صورت گرفته است. ورق‌های موج‌دار دوزنقه‌ای با زاویه موج ۳۰ درجه و عرض زیرورق صاف و مورب برابر ۵۰ میلی‌متر به‌کار برده شده است. جزئیات مدل‌های آزمایشگاهی در شکل (۱) ارائه شده است.



FSPSW



VCSPSW



VDCFSPSW

شکل ۱- جزئیات مدل‌های آزمایشگاهی

در مدل‌های آزمایشگاهی در حین تست است. مدل‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفتند و با استفاده از یک حل‌کننده ضمنی دینامیکی (Implicit Dynamic) در Abaqus تحلیل شدند. در تحلیل عددی حاضر، رفتار مصالح در مدل‌ها به‌صورت غیرخطی است که برای درنظرگرفتن رفتار غیرخطی مصالح فولادی از مدل Combined Hardening استفاده شده است. این مدل، ترکیبی از سخت‌شوندگی Isotropic و Kinematic را در نظر می‌گیرد و از این‌رو برای شبیه‌سازی رفتار مصالح تحت بارگذاری چرخه‌ای و بازتولید اثر Bauschinger بسیار مناسب است. معیار تسلیم مورد استفاده نیز فون‌میسز^۱ بوده است. همچنین، منحنی تنش-کرنش و پارامترهای مربوط به رفتار پس از تسلیم و سخت‌شوندگی مطابق با مشخصات مکانیکی مصالح مورد استفاده در مدل عددی تعریف شده‌اند. شکل‌های (۳) و (۴) به‌ترتیب شرایط مرزی و مش‌بندی مناسب بعد از تحلیل حساسیت مش را برای مدل دیوار برشی فولادی ترکیبی نشان می‌دهد. برای مدل‌سازی تمام اجزای دیوار، شامل ورق‌های پرکننده، المان‌های مرزی و سخت‌کننده‌ها (Stiffeners)، از المان چهار گرهی با انتگرال کاهش‌یافته (S4R) که در Abaqus موجود است، برای تعیین اندازه مش مناسب تحلیل حساسیت مش روی مدل ترکیبی VDCFSPSW-30-50% انجام شده و اندازه‌های مش درنظرگرفته‌شده برابر ۲۵، ۵۰ و ۷۵ میلی‌متر هستند. نتایج المان محدود در اندازه مش‌بندی برابر ۵۰×۵۰ میلی‌متر همگرایی نشان

HEB180 و تیر تحتانی نیز دارای مقطع HEB200 است [۱۵]. ارتفاع ستون‌های محیطی برابر ۱۷۶۸ میلی‌متر و ارتفاع و عرض خالص ورق پرکننده به‌ترتیب ۱۵۷۸ و ۲۰۰۰ میلی‌متر است. ضخامت ورق دیوار برشی نیز برابر ۱/۵ میلی‌متر است. ارتفاع مورد استفاده در محاسبه دررفت سازه از محل بار اعمالی منطبق بر تراز مرکز تیر فوقانی تا تراز روی تیر پایینی بوده، که برابر با ۱۶۵۸ میلی‌متر است. در تمام مدل‌ها ورق‌ها در نقاط مشترک از طریق پیچ و جوش (اتصال هیبریدی) به هم متصل شده‌اند.

مشخصات مکانیکی مصالح فولادی استفاده‌شده برای نمونه‌های مختلف در این پژوهش به‌شرح زیر است: ورق دیوار برشی فولادی از فولاد نرمه ساختمانی ST37 و تیرها و ستون‌ها از فولاد نوع ST52 ساخته شده‌اند. این مشخصات در جدول (۱) ارائه شده است. همچنین نسبت پواسون مصالح فولادی ۰/۳ در نظر گرفته شده است.

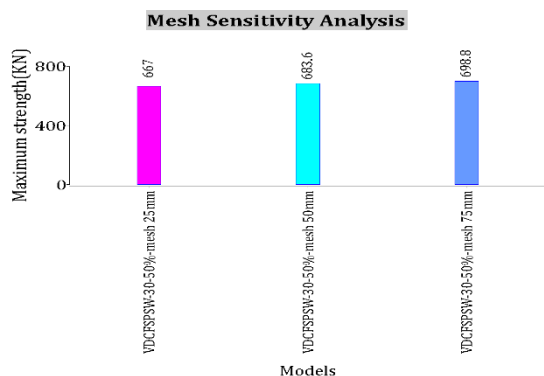
جدول ۱- مشخصات مکانیکی مصالح

نوع مصالح	مدول الاستیسیته E (GPa)	تنش تسلیم F _y (MPa)	تنش کششی	
			تنش نهایی F _u (MPa)	F _y /F _u
پانل	۲۱۰	۲۲۰	۳۳۰	۰/۶۷
ستون	۲۱۰	۳۳۰	۴۷۰	۰/۷
تیر	۲۱۰	۳۱۵	۴۶۳	۰/۶۸

۲-۲- مدل‌سازی اجزای محدود (Finite Element Analysis)

نمونه‌های آزمایشگاهی در نرم‌افزار اجزای محدود Abaqus مدل‌سازی شدند. اتصال بین صفحات پرکننده و المان‌های مرزی با استفاده از گزینه‌ای به نام Tie Constraint مطابق شکل (۲) شبیه‌سازی شد. پیچ‌هایی که ورق‌ها را به هم متصل می‌کنند، به‌طور مستقیم مدل‌سازی نشده‌اند؛ در نتیجه نقاط منطبق بر روی ورق‌ها در محل تماس مشترک، از طریق Constraint Coupling به هم متصل (کوپل) شدند که دلیل آن عملکرد مناسب محل اتصالات

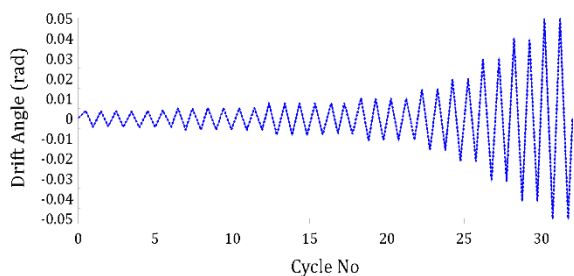
^۱ von-Mises



شکل ۵- تحلیل حساسیت مش با مقایسه مقاومت حداکثر دیوار برشی فولادی ترکیبی با مش‌بندی‌های مختلف ۲۵، ۵۰ و ۷۵ میلی‌متر

۳-۲- بارگذاری نمونه‌ها

نمونه‌های مورد مطالعه در این تحقیق تحت بارگذاری چرخه‌ای جانبی قرار گرفتند. لازم به ذکر است که با توجه به ورق‌های فولادی نازک مورد استفاده در دیوارهای برشی قبل از اعمال بارگذاری جانبی به مدل‌ها در نرم‌افزار Abaqus، تحلیل کماتش ویژه مقدار بر روی مدل‌های اجزای محدود انجام شد و Imperfection هندسی اولیه بر اساس شکل مود کماتش متناظر با مود اول، با دامنه‌ای برابر با $500/1$ ارتفاع ورق دیوار برشی فولادی، در مدل‌ها اعمال شد. بارگذاری چرخه‌ای مورد نظر مطابق پروتکل SAC که به جابه‌جایی تسلیم وابسته نبوده و با توجه به شکل (۶) به تراز بام در تیر فوقانی سازه اعمال شده است [۴۲].

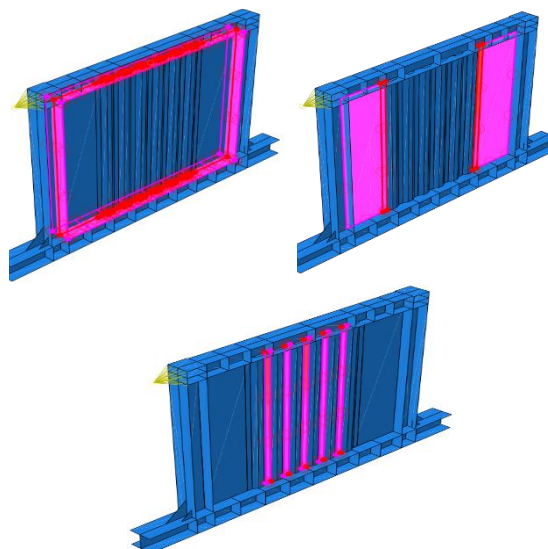


شکل ۶- پروتکل بارگذاری SAC [۴۲]

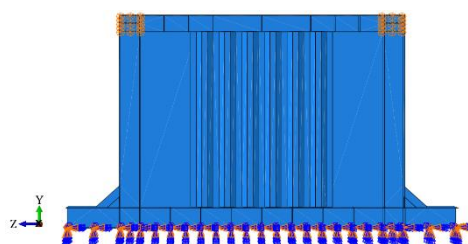
۴-۲- بررسی مقاومت پیشینه در مدل‌ها

برای یک سیستم دیوار برشی فولادی با توجه به منحنی هیستریزس نمونه‌ها، مقاومت پیشینه از ویژگی‌های موثری است که در این تحقیق نیز مورد بررسی قرار گرفته و نمونه‌ها بر اساس آن با هم مقایسه شده‌اند. مقایسه منحنی هیستریزس و منحنی اسکلت دیوارهای برشی فولادی حاصل از آزمایش با حالت عددی تحلیل شده در نرم‌افزار Abaqus در شکل (۷) نشان داده شده است. با توجه به منحنی‌های هیستریزس می‌توان فهمید که

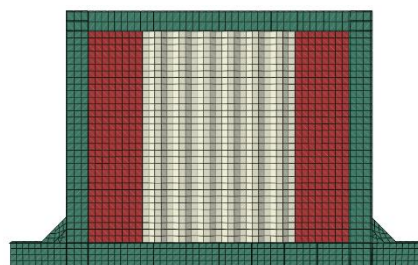
داده و همچنین مطابق با نتایج، با کاهش اندازه مش از ۵۰ میلی‌متر به ۲۵ میلی‌متر و افزایش اندازه آن به ۷۵ میلی‌متر، با توجه به پایین بودن درصد تغییرات در مقدار مقاومت حداکثر مدل‌ها و محدود شدن مقدار درصد تغییرات به کمتر از ۳ درصد مطابق شکل (۵) در نهایت اندازه مش بندی ۵۰ میلی‌متر برای مدل‌ها در نظر گرفته شد.



شکل ۲- اتصال بین صفحات پرکننده و المان‌های مرزی با استفاده از Tie Constraint



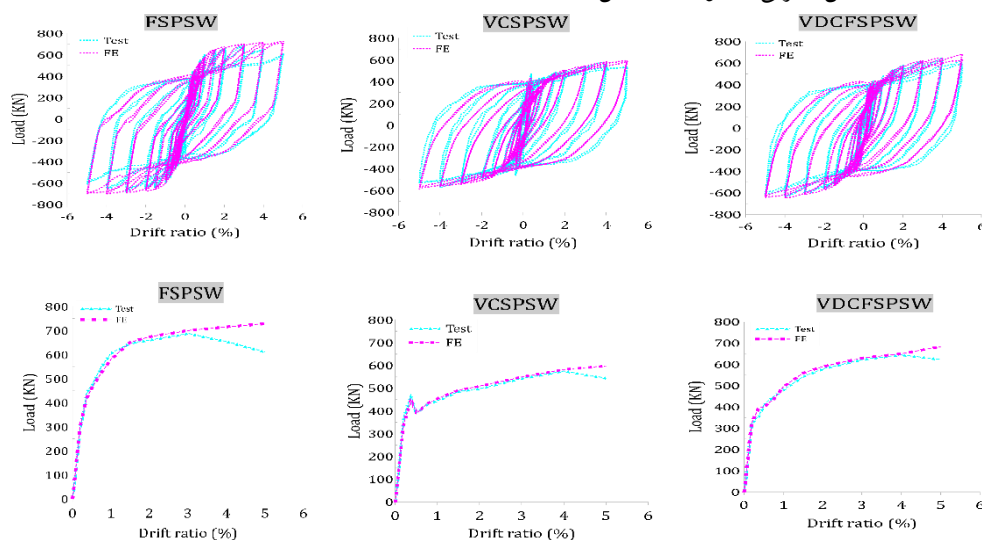
شکل ۳- شرایط مرزی در مدل دیوار برشی فولادی ترکیبی



شکل ۴- شکل مش‌بندی در مدل دیوار برشی فولادی ترکیبی

به دلیل ماهیت مدل سازی المان ها و چالش های موجود در بازسازی دقیق پدیده های غیرخطی بسیار موضعی (مانند کماتش موضعی همراه با شکست یا پارگی در اتصالات) در نرم افزار Abaqus است که به شدت به تراکم شبکه مش و معیارهای آسیب وابسته است. مدل عددی فعلی با موفقیت توانسته است سختی اولیه، ظرفیت باربری و رفتار هیستریزس در محدوده پلاستیک پایدار را به خوبی پیش بینی کند. در نهایت تطابق قابل قبولی بین نتایج آزمایشگاهی و مدل سازی عددی در نرم افزار Abaqus به دست آمده است. بنابراین با توجه به نزدیک بودن نتایج، تحلیل های عددی را می توان قابل قبول دانست. در جدول (۲)، مقادیر مقاومت حداکثر مدل های آزمایشگاهی با حالت عددی تحلیل شده در نرم افزار Abaqus و همچنین درصد اختلاف مقاومت آن ها ارائه شده است.

بیشینه مقاومت مدل دیوار برشی ترکیبی نسبت به مدل تک لایه موج دار بیش تر بوده و رفتار هیستریزسی مدل ترکیبی نسبت به مدل صاف دارای شرایط مطلوبی است؛ همچنین در نمونه های آزمایشگاهی با توجه به منحنی هیستریزس مدل ها می توان فهمید که در مدل صاف تا دریفت ۳٪ افت مقاومت ایجاد نشده و در مدل های تک لایه موج دار و ترکیبی با توجه به منحنی هیستریزس آن ها می توان فهمید که تا دریفت ۴٪ مقاومت مدل ها افزایش داشته و بعد از آن دچار افت مقاومت شده اند. همچنین بر اساس منحنی اسکلت نمونه ها در مدل موج دار تک لایه در دریفت کم تر از ۱٪ یک افت مقاومت قابل ملاحظه ای ایجاد شده است که در دو مدل صاف و ترکیبی چنین افت مقاومتی دیده نشد. درخصوص عدم مشاهده افت مقاومت در منحنی اسکلت مدل عددی در Abaqus در شکل (۷) در مدل عددی، افت مقاومت در دریفت های بالا به اندازه آزمایش تجربی مشهود نیست. این تفاوت



شکل ۷- مقایسه منحنی هیستریزس و منحنی اسکلت مدل های آزمایشگاهی با تحلیل عددی اجزای محدود

برای بررسی دقیق اقتصادی بودن طرح در سیستم دیوار برشی فولادی ترکیبی VDCFSPSW-30-50% نسبت به مدل های صاف FSPSW و مدل موج دار تک لایه VCSPSW-30 در تحلیل عددی در Abaqus (FE)، در شکل (۸) نسبت مقاومت حداکثر این مدل ها به وزن آن ها نشان داده شده است. همان طور که مشخص است، این نسبت در سیستم ترکیبی در مقایسه با مدل موج دار تک لایه ۱۳/۸۰٪ بیش تر است که اقتصادی بودن طرح مدل ترکیبی نسبت به مدل موج دار تک لایه را تأیید می کند.

جدول ۲- مقادیر مقاومت حداکثر مدل های آزمایشگاهی با حالت

عددی تحلیل شده در نرم افزار Abaqus

نوع دیوار برشی	مسیر بارگذاری	مقاومت حداکثر (kN)		درصد اختلاف مقاومت
		Test	FE	
FSPSW	+	۶۸۸	۷۲۸/۴	۵/۸۷
	-	۶۸۲	۷۰۵/۸۷	۳/۵۰
VCSPSW	+	۵۷۶	۵۹۸/۲	۳/۸۵
	-	۵۷۳	۵۸۶/۶۴	۲/۳۸
VDCFSPSW	+	۶۴۵	۶۸۳/۶	۵/۹۸
	-	۶۲۵	۶۴۷/۷	۳/۶۳

نوآورانه هستند، مقادیر مشخص ضریب رفتار آنها هنوز در استانداردهای طراحی لرزه‌ای تصویب نشده است. در نتیجه، این مقاله از روش **یانگ**^۱ برای تعیین ضریب رفتار این مدل‌ها استفاده می‌کند [۴۵]. ضریب رفتار سیستم در روش طراحی مبتنی بر ضریب بار و مقاومت (LRFD) با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$R = \frac{V_{eu}}{V_s} = \frac{V_{eu}}{V_y} \times \frac{V_y}{V_s} = R_{\mu} \Omega_o \quad (1)$$

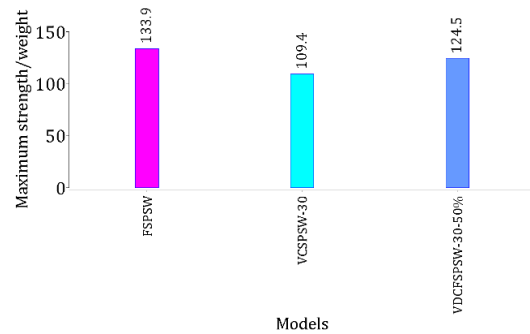
ضریب شکل‌پذیری، همان‌طور که توسط **یانگ** تعریف شده است [۴۵]، ظرفیت یک سازه را برای تحمل تغییر شکل‌های پلاستیکی پیش از فروپاشی، کمی می‌سازد. این ضریب به‌عنوان نسبت بیش‌ترین جابه‌جایی افقی (Δ_{max}) به جابه‌جایی تسلیم (Δ_y) مطابق رابطه (۲) محاسبه می‌شود. مبنای انتخاب دررفت نهایی، دررفت حداکثر ۵ درصد در مدل عددی، با هدف مطابقت با پروتکل آزمایشگاهی و بازسازی رفتار مشخصه سیستم در محدوده عملکردی مورد نظر انجام شده است. از آنجایی که در آزمایش‌های تجربی انجام‌شده، با رسیدن به دررفت ۵ درصد، افت مقاومت شدید رخ داده و تست متوقف شده است، در مدل‌سازی عددی، این دررفت را به‌عنوان نقطه پایان بررسی‌های رفتار پلاستیک پایدار در نظر گرفته تا امکان مقایسه مستقیم بین نتایج آزمایش و مدل عددی فراهم شود.

$$\mu = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_y} \quad (2)$$

عامل اضافه‌مقاومت برابر نسبت برش پایه در حالت تسلیم (V_y) به برش پایه در زمان تشکیل اولین مفصل پلاستیک (V_s) است و بر اساس روش **یانگ** از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

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

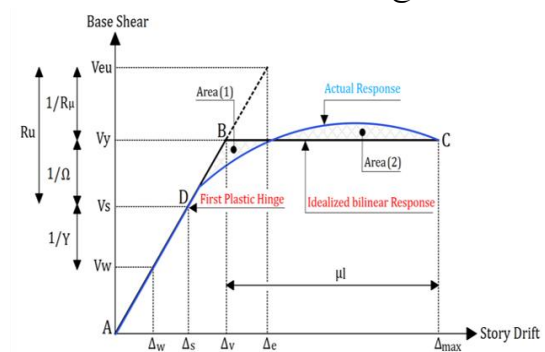
عامل شکل‌پذیری وابسته به دوره تناوب (R_{μ})، که به‌عنوان نسبت بیشینه برش پایه الاستیک (V_{eu}) به برش تسلیم (V_y) تعریف می‌شود، با دوره تناوب طبیعی سازه تغییر می‌کند و وابسته به دوره



شکل ۸- نسبت مقاومت حداکثر مدل‌های دیوار برشی فولادی در تحلیل عددی (FE) به وزن آنها

۲-۵- بررسی ضرایب لرزه‌ای در مدل‌ها

این مطالعه عوامل عملکرد لرزه‌ای شامل اضافه‌مقاومت (Ω)، ضریب شکل‌پذیری (μ) و ضریب رفتار (R) را برای مدل‌های مورد بررسی با دنبال کردن رویه‌های مقرر در آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای تعیین می‌کند. ابتدا، منحنی اصلی از پوش منحنی هیستریزس استخراج می‌شود که تنها شاخه صعودی آن در نظر گرفته شده و بخش نزولی حذف می‌شود؛ سپس مطابق با آیین‌نامه FEMA-356 [۴۳]، یک منحنی دوطخطی معادل بر منحنی اصلی ایجاد می‌شود (شکل (۹)). نقطه B به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که پاره خط AD برابر با $0.7/V_y$ پاره خط AB باشد و در نتیجه، نقطه تقاطع منحنی اصلی و پاره خط اول دوطخطی در $0.7V_y$ قرار گیرد. افزون بر این، منحنی دوطخطی تنظیم می‌شود تا اطمینان حاصل شود که سطح زیر منحنی اصلی (سطح ۱) با سطح زیر منحنی دوطخطی ایده‌آل‌شده (سطح ۲) مطابقت دارد (شکل (۹)).



شکل ۹- پاسخ واقعی و ایده‌آل منحنی دوطخطی سازه [۴۴]

ضریب رفتار در طراحی لرزه‌ای بنیادین است، زیرا از طریق ارتباط پاسخ غیرخطی لرزه‌ای سازه با پاسخ خطی معادل، بیانگر شکل‌پذیری و اضافه‌مقاومت سازه است. با توجه به این که مدل‌های VCSPSW، VDCFSPSW و FSPSW جزء سیستم‌های

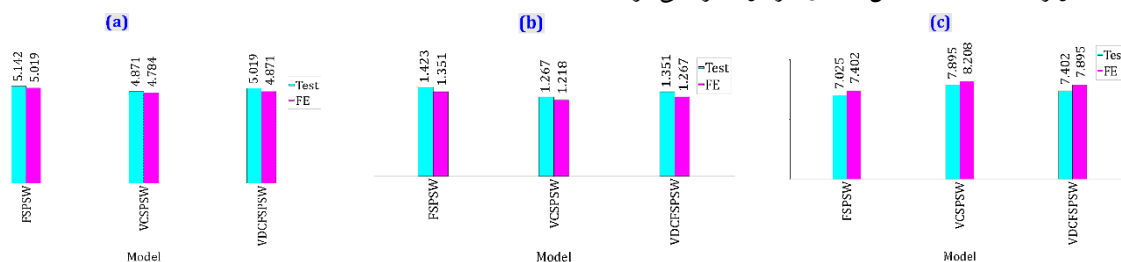
^۱ Uang

گرفته و نمونه‌ها بر اساس آن باهم مقایسه شده‌اند. مقایسه ضرایب لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی حاصل از آزمایش با حالت عددی تحلیل شده در نرم‌افزار Abaqus در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تطابق قابل قبولی بین نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار Abaqus به دست آمده است. در جدول (۳)، مقادیر ضرایب لرزه‌ای مدل‌های آزمایشگاهی با حالت عددی تحلیل شده در نرم‌افزار Abaqus ارائه شده است.

تناوب است. این رابطه توسط نیومارک^۱ و هال^۲ در رابطه (۴) بیان شده است [۴۶]

$$\begin{cases} R_{\mu} = \sqrt{2\mu - 1} , & 0.12 \leq T \leq 0.5s \\ R_{\mu} = \mu , & T \geq 1s \end{cases} \quad (4)$$

در یک سیستم دیوار برشی فولادی ضرایب لرزه‌ای از جمله ضریب رفتار، ضریب اضافه مقاومت و ضریب شکل پذیری از ویژگی‌های مؤثری هستند که در این تحقیق نیز مورد بررسی قرار



شکل ۱۰- (a) مقایسه ضریب رفتار، (b) ضریب اضافه مقاومت و (c) ضریب شکل پذیری در مدل‌های آزمایشگاهی با تحلیل عددی اجزای محدود

برابر ۴ میلی‌متر منظور شد. این ضخامت در محدوده استاندارد و رایج استفاده در دیوارهای برشی با ورق فولادی (SPSW) قرار دارد که این امر امکان مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین را تسهیل می‌کند. برای اعضای مرزی شامل تیرها از مقاطع I شکل ساخته شده از ورق به صورت بال‌پهن با عرض و ضخامت بال ۳۰×۳۳۰ و جان ۲۵×۳۳۰ میلی‌متر و ستون‌ها از مقاطع I شکل ساخته شده از ورق به صورت بال‌پهن با عرض و ضخامت بال ۳۰×۳۴۰ و جان ۲۵×۳۵۰ میلی‌متر استفاده شده است. لازم به ذکر است که ارتفاع ورق (h) در تمام نمونه‌ها ثابت بوده و برابر ۲۶۶۰ میلی‌متر فرض شده است. بدین ترتیب عرض ورق (b) در دیوارهای با نسبت‌های ابعادی ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ به ترتیب ۱۳۳۰، ۲۶۶۰، ۳۹۹۰، ۵۳۲۰ و ۶۶۵۰ میلی‌متر است. برای اعضای فولادی شامل ورق‌ها و اعضای مرزی از فولاد با تنش تسلیم ۲۳۵ مگاپاسکال، تنش کششی نهایی ۳۷۰ مگاپاسکال، مدول الاستیسیته ۲۰۰ گیگاپاسکال و نسبت پواسون ۰/۳ استفاده شده است. لازم به ذکر است که بارگذاری این نمونه بر اساس پروتکل بارگذاری SAC بوده است [۴۲]. در مدل‌های عددی، تغییر مکان نهایی تا نسبت دررفت ۵ درصد در نظر گرفته شده است. پس از بررسی دیوارهای صاف در نرم‌افزار Abaqus، دیوارهای تک‌لایه موج‌دار، دوبل موج‌دار و ترکیبی مورد بررسی قرار گرفتند. تصویر مدل‌ها به ترتیب تک‌لایه موج‌دار قائم و افقی، دوبل موج‌دار قائم و افقی،

جدول ۳- مقادیر ضرایب لرزه‌ای مدل‌های آزمایشگاهی با حالت عددی تحلیل شده در نرم‌افزار Abaqus

نمونه‌های دیوار برشی فولادی	ضریب رفتار (R)		ضریب اضافه مقاومت (Ω)		ضریب شکل پذیری (μ)	
	Test	FE	Test	FE	Test	FE
FSPSW	۵/۱۴۲	۵/۰۱۹	۱/۴۲۳	۱/۳۵۱	۷/۰۲۵	۷/۴۰۲
VCSPSW	۴/۸۷۱	۴/۷۸۴	۱/۲۶۷	۱/۲۱۸	۷/۸۹۵	۸/۲۰۸
VDCFSW	۵/۰۱۹	۴/۸۷۱	۱/۳۵۱	۱/۲۶۷	۷/۴۰۲	۷/۸۹۵

۳- مطالعات پارامتریک

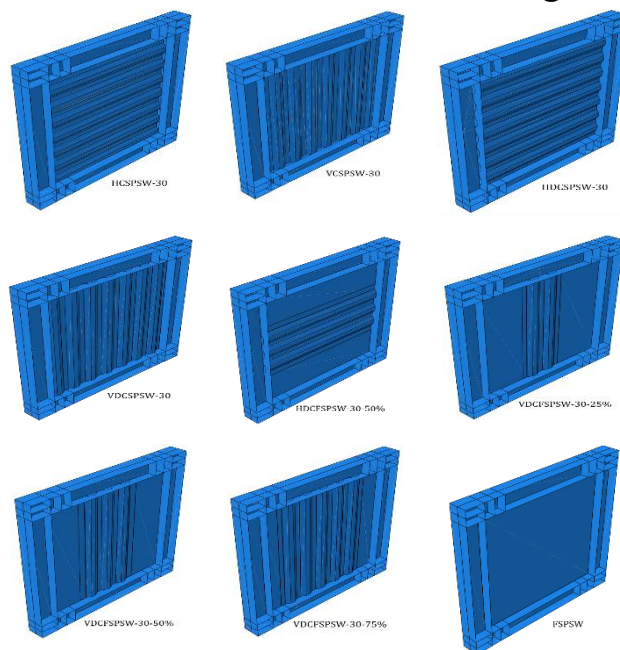
در این تحقیق علاوه بر کارهای آزمایشگاهی، تحقیقات اجزای محدود روی ۱۲۵ مدل عددی نیز انجام شده است. به منظور مدل‌سازی مدل‌های مورد مطالعه در این پژوهش، نمونه‌ها در نرم‌افزار اجزاس محدود Abaqus ایجاد شدند. برای این کار، ابتدا چندین نمونه یک‌طبقه و یک دهانه دیوار برشی فولادی با ورق صاف مطابق الزامات راهنمای آیین‌نامه AISC 341-20 طراحی شد [۴۷]. در این مدل‌ها که دارای نسبت‌های ابعادی (عرض به ارتفاع ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵) هستند، ضخامت ورق دیوار برشی فولادی

^۱ Newmark

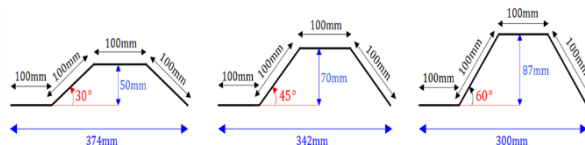
^۲ Hall

است. عرض زیرورق افقی و مورب برابر ۱۰۰ میلی‌متر منظور شده است. اتصال بین صفحات پرکننده و المان‌های مرزی با استفاده از گزینه‌ای به نام Tie Constraint مطابق شکل (۱۳) شبیه‌سازی شد.

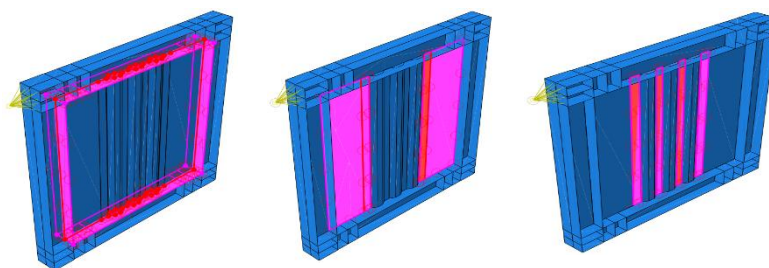
مدل‌های ترکیبی متشکل از ورق‌های صاف و موج‌دار دوبل قائم و افقی و مدل صاف در نسبت b/h برابر ۱ با زاویه موج ورق ۳۰ درجه در مدل‌های موج‌دار و ترکیبی در تحلیل اجزای محدود مطابق شکل (۱۱) است. برای ورق‌های موج‌دار، از سه هندسه مختلف مطابق شکل (۱۲) استفاده شد. تفاوت این نمونه‌ها در زاویه موج ورق بوده که شامل ۳ زاویه موج ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه



شکل ۱۱- مدل‌ها در نسبت b/h برابر یک در تحلیل عددی اجزای محدود



شکل ۱۲- مشخصات هندسی ورق‌های موج‌دار



شکل ۱۳- اتصال بین صفحات پرکننده و المان‌های مرزی با استفاده از Tie Constraint

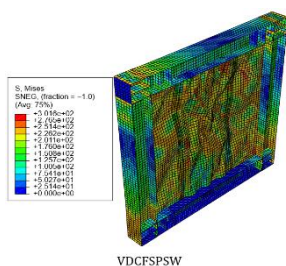
شده، همچنین عرض ورق‌های دوبل موج‌دار قائم در مدل ترکیبی در نسبت‌های ابعادی b/h برابر ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ برابر ۲۵ درصد، ۵۰ درصد و ۷۵ درصد عرض دهانه در نظر گرفته شده

پس از ورق‌های موج‌دار تک‌لایه، از ورق‌های موج‌دار دوبل و سپس از سیستم ترکیبی استفاده شد. در مدل‌های دیوار برشی ترکیبی در این بخش، عرض ورق‌های دوبل موج‌دار افقی در تمام نسبت‌های ابعادی b/h برابر ۵۰ درصد عرض دهانه در نظر گرفته

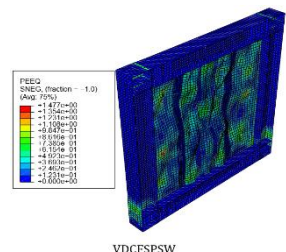
است. در جدول (۴)، مدل‌های عددی مورد تحلیل در این تحقیق معرفی شده است.

جدول ۴- معرفی مدل‌های عددی مورد تحلیل

ردیف	مدل	معرفی مدل‌ها
۱	HCSPSW	دیوار برشی فولادی تک‌لایه موج‌دار افقی
۲	VCSPSW	دیوار برشی فولادی تک‌لایه موج‌دار قائم
۳	HDCSPSW	دیوار برشی فولادی دوبل موج‌دار افقی
۴	VDCSPSW	دیوار برشی فولادی دوبل موج‌دار قائم
۵	HDCFSPSW	دیوار برشی فولادی ترکیبی، صاف و دوبل موج‌دار افقی
۶	VDCFSPSW	دیوار برشی فولادی ترکیبی، صاف و دوبل موج‌دار قائم
۷	FSPSW	دیوار برشی فولادی با ورق صاف



شکل ۱۵- توزیع تنش فون میسز در نمونه‌های عددی



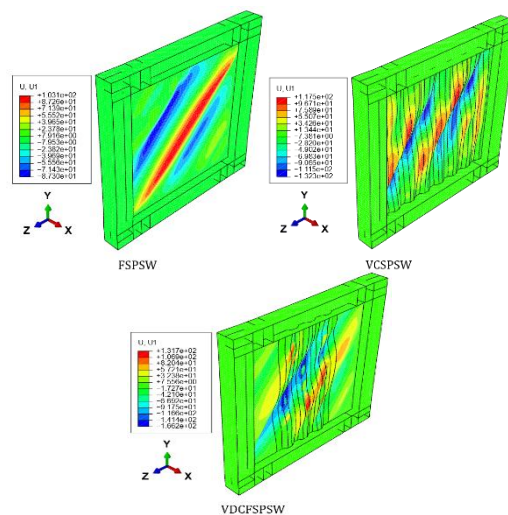
شکل ۱۶- کرنش پلاستیک معادل PEEQ در نمونه‌های عددی

۴- نتایج تحلیل عددی

۴-۱- بررسی مقاومت پیشینه در مدل‌ها

در شکل (۱۷) منحنی هیستریزس حاصل از مدل‌سازی عددی در نسبت‌های عرض به ارتفاع ۰/۵ تا ۲/۵ نشان داده شده است. همچنین در شکل (۱۸) مقایسه مقاومت پیشینه نمونه‌ها ارائه شده است. این مقایسه‌ها برای تمامی نسبت‌های ابعادی b/h از ۰/۵ تا ۲/۵ می‌باشد. با توجه به این که در این تحقیق از ورق‌های موج‌دار افقی و قائم با سه زاویه موج مختلف ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه استفاده شده، در شکل (۱۹) به مقایسه میانگین پیشینه مقاومت نمونه‌ها نیز پرداخته شده است. منظور از میانگین پیشینه مقاومت، میانگین پیشینه مقاومت یک نمونه با پیکربندی ثابت است. مقایسه‌های حاصل از این بررسی جامع در کل نشان می‌دهند که مقایسه مقاومت پیشینه نمونه‌ها وابستگی مستقیمی به نسبت ابعادی b/h نمونه‌های دیوار برشی فولادی داشته و همچنین زاویه موج و جهت موج ورق‌ها نیز در این مورد تأثیرگذار است. علاوه بر این موارد، در مدل‌های ترکیبی با ورق موج‌دار دوبل قائم در نسبت‌های ابعادی b/h از ۰/۵ تا ۲/۵، نسبت عرض ورق موج‌دار دوبل نسبت به عرض دهانه که در سه حالت ۲۵ درصد، ۵۰ درصد و ۷۵ درصد مورد بررسی قرار گرفته است، تأثیر به‌سزایی در میزان مقاومت مدل‌های ترکیبی با ورق موج‌دار دوبل قائم دارد. بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش نسبت ابعادی b/h نمونه‌ها از ۰/۵ به ۲/۵ و همچنین با افزایش زاویه موج ورق‌ها در مدل‌های موج‌دار تک‌لایه و دولایه از ۳۰ درجه به ۶۰ درجه وضعیت سیستم از لحاظ پیشینه مقاومت بهبود خواهد یافت و مقاومت پیشینه سیستم افزایش می‌یابد. همچنین در مدل ترکیبی با

در شکل‌های (۱۴) الی (۱۶) به ترتیب توزیع جابه‌جایی خارج از صفحه، توزیع تنش فون میسز و کرنش پلاستیک معادل PEEQ در مدل‌های صاف، تک‌لایه موج‌دار قائم و مدل ترکیبی متشکل از ورق‌های صاف و موج‌دار دوبل قائم با نسبت عرض ورق دوبل موج‌دار به عرض دهانه ۵۰ درصد در نسبت b/h برابر یک با زاویه موج ورق ۳۰ درجه در مدل‌های موج‌دار و ترکیبی در تحلیل المان محدود ارائه شده است.



شکل ۱۴- توزیع جابه‌جایی خارج از صفحه در نمونه‌های عددی

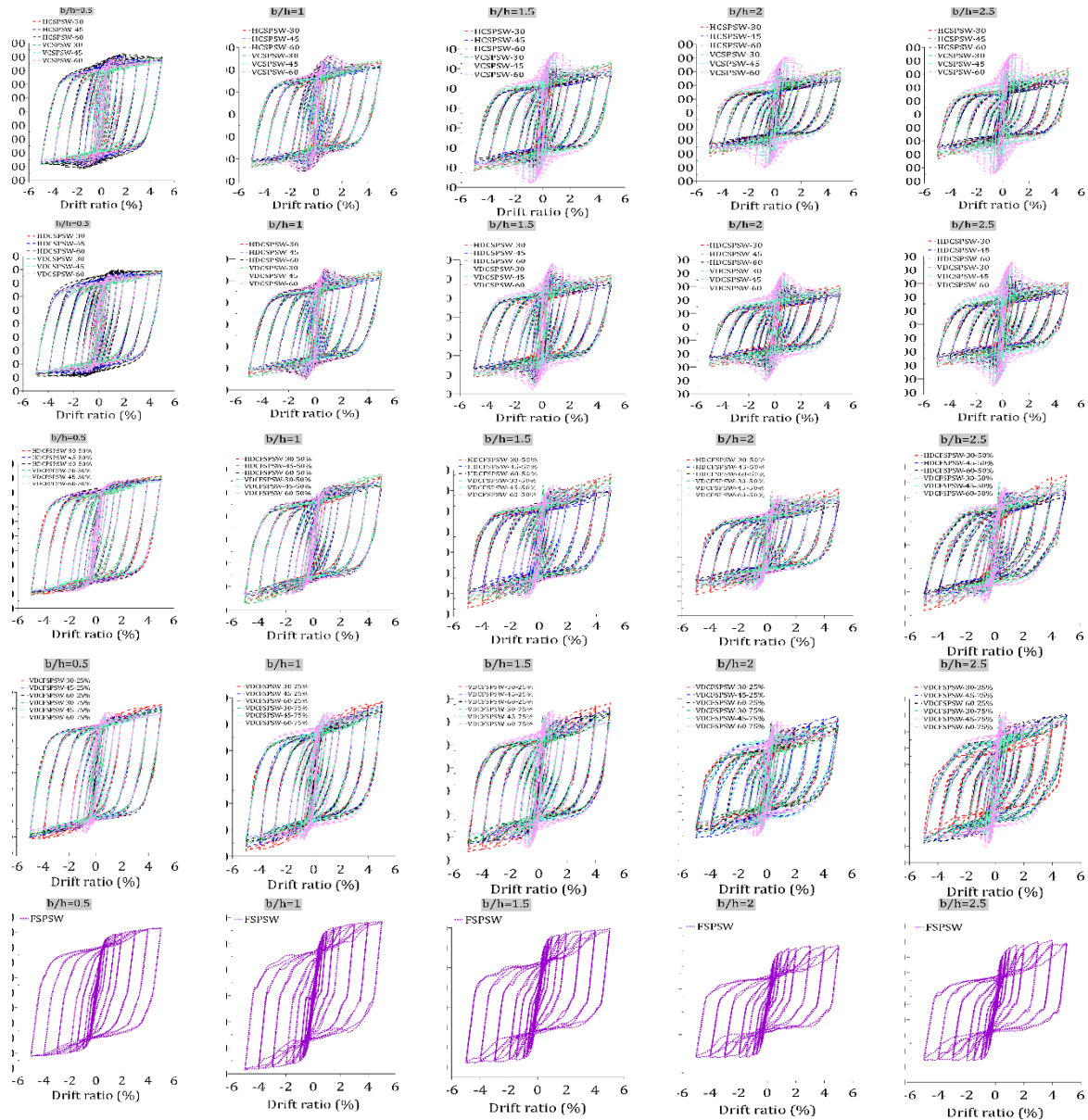
VDCFSPSW نسبت به مدل صاف، این سیستم عملکرد بهتری نسبت به سایر سیستم دیوار برشی فولادی دارد. این موضوعات عملکرد مطلوب سیستم ترکیبی VDCFSPSW را از لحاظ بیشینه مقاومت و به تأخیر افتادن افت مقاومت تأیید کرده و می‌توان این سیستم را به عنوان جایگزین مناسبی به جای سایر سیستم‌های دیوار برشی فولادی از جمله صاف و موج دار توصیه نمود.

از آنجایی که در دیوارهای عریض عملکرد برشی داشته و جابه‌جایی‌های برشی نقش اصلی را در پاسخ غیرخطی ایفا می‌کنند و رفتار دیوار از حالت خمشی خارج می‌شود، استفاده از مقاومت بر واحد عرض دیوار بر حسب (kN/m) یک معیار استاندارد برای ارزیابی کارایی سیستم و مقایسه منطقی بین مدل‌های مختلف با هندسه‌های متفاوت فراهم می‌آورد. در شکل (۲۰) مقایسه مقاومت بیشینه در واحد عرض دیوار نمونه‌ها ارائه شده است. همچنین در شکل (۲۱) به مقایسه میانگین بیشینه مقاومت در واحد عرض دیوار در نمونه‌ها نیز پرداخته شده است.

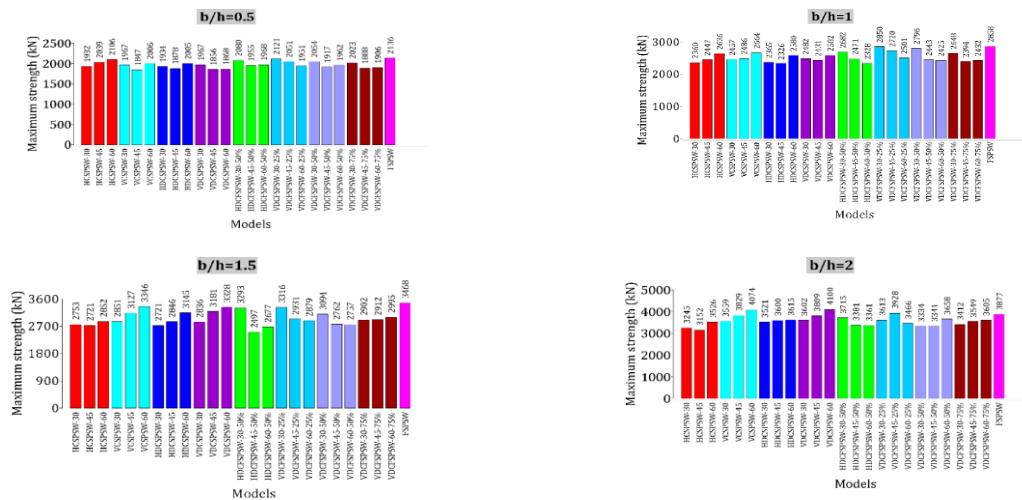
در مدل ترکیبی VDCFSPSW با زاویه موج ورق برابر 30° درجه و با نسبت عرض ورق موج دار دوبل نسبت به عرض دهانه در حالت 50% در مقایسه با مدل موج دار تک لایه قائم با زاویه موج 30° درجه در نسبت ابعادی b/h برابر $0/5$ تا $1/5$ دارای مقاومت بیشینه در واحد عرض دیوار به ترتیب $13/78\%$ و $8/49\%$ بیش تر است. در مدل ترکیبی VDCFSPSW با زاویه موج ورق برابر 30° درجه و با نسبت عرض ورق موج دار دوبل نسبت به عرض دهانه در حالت 50% در مقایسه با مدل صاف سستی در نسبت ابعادی b/h برابر $2/5$ دارای مقاومت بیشینه یکسانی هستند.

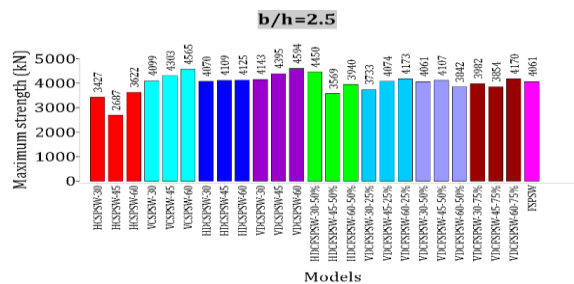
ورق موج دار دوبل افقی، بیش ترین مقاومت آن در زمان استفاده از ورق موج دار دوبل افقی با زاویه 30° درجه است. در مدل‌های ترکیبی با ورق‌های موج دار دوبل قائم افزایش مقاومت بیشینه سیستم در نسبت‌های ابعادی b/h دارای نوسان است، به طوری که در نسبت‌های ابعادی b/h از $0/5$ تا $2/5$ ، با نسبت عرض ورق موج دار دوبل نسبت به عرض دهانه در حالت 25% در مقایسه با سایر نسبت‌ها دارای مقاومت بالاتری بوده و تا نسبت b/h برابر $0/5$ تا $1/5$ بیش ترین مقاومت مربوط به حالت زاویه موج ورق دوبل موج دار برابر 30° درجه در این مدل ترکیبی است.

مدل صاف در نسبت‌های ابعادی b/h از $0/5$ تا $1/5$ دارای بیش ترین مقدار مقاومت نسبت به سایر سیستم‌ها بوده اما در نسبت‌های ابعادی از 2 تا $2/5$ مقاومت مدل صاف کاهش پیدا کرده و نسبت به بسیاری از سیستم‌های دیگر کم تر است. نتایج نشان می‌دهد که در نسبت ابعادی کوچک (در این مقاله $b/h=0.5$)، مقاومت بیشینه نمونه‌ها بسیار به یکدیگر نزدیک است. در مدل ترکیبی VDCFSPSW با زاویه موج ورق برابر 30° درجه و با نسبت عرض ورق موج دار دوبل نسبت به عرض دهانه در حالت 50% در مقایسه با مدل موج دار تک لایه قائم با زاویه موج 30° درجه در نسبت ابعادی b/h برابر $0/5$ تا $1/5$ دارای مقاومت بیشینه به ترتیب $13/80\%$ و $8/52\%$ بیش تر می‌باشد. در مدل ترکیبی VDCFSPSW با زاویه موج ورق برابر 30° درجه و با نسبت عرض ورق موج دار دوبل نسبت به عرض دهانه در حالت 50% در مقایسه با مدل صاف سستی در نسبت ابعادی b/h برابر $2/5$ دارای مقاومت بیشینه یکسانی هستند. همچنین می‌توان فهمید که مقدار میانگین بیشینه مقاومت در مدل‌های ترکیبی VDCFSPSW نسبت به مدل‌های ترکیبی HDCFSWSW بیش تر است. نتایج تحلیل عددی نشان داد، سیستم دیوار برشی فولادی ترکیبی VDCFSPSW با نسبت عرض ورق موج دار دوبل نسبت به عرض دهانه در سه حالت 25% ، 50% و 75% در مقایسه با سیستم‌های دیوار برشی فولادی موج دار تک لایه و موج دار دوبل و صاف و حتی مدل دیوار برشی ترکیبی HDCFSWSW در بسیاری از نسبت‌های ابعادی b/h دارای میانگین بیشینه مقاومت بالاتری بوده و با توجه به عملکرد هیستریزس مناسب و به تأخیر انداختن کماتش ورق‌ها در مدل‌های ترکیبی

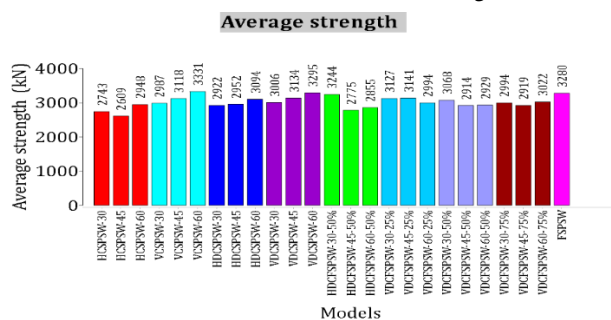


شکل ۱۷- منحنی هیستریزس نمونه‌های اجزای محدود

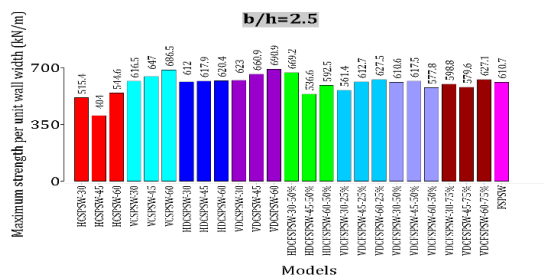
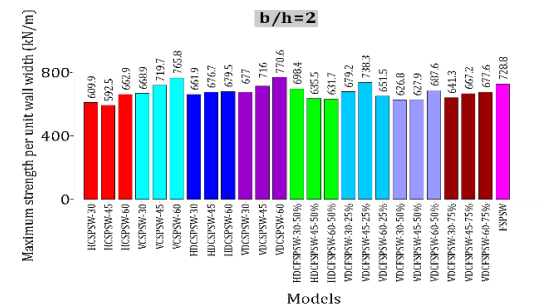
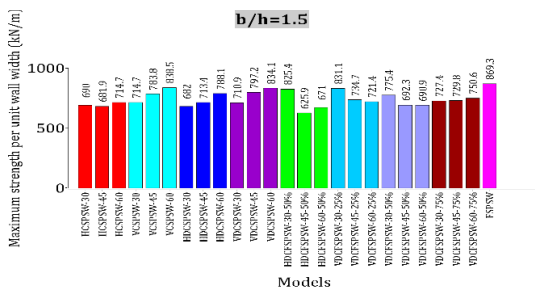
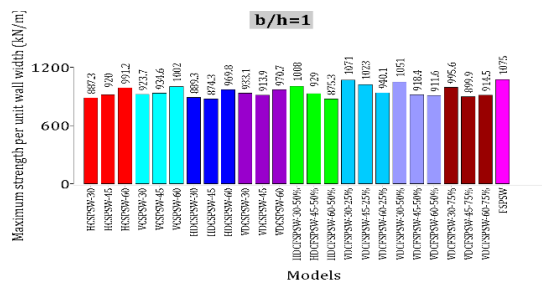
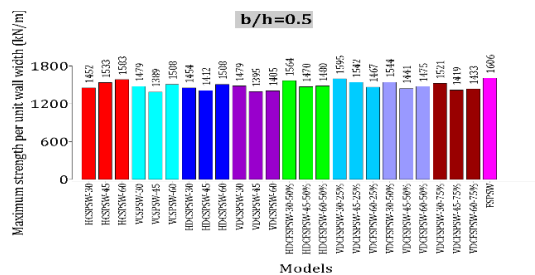




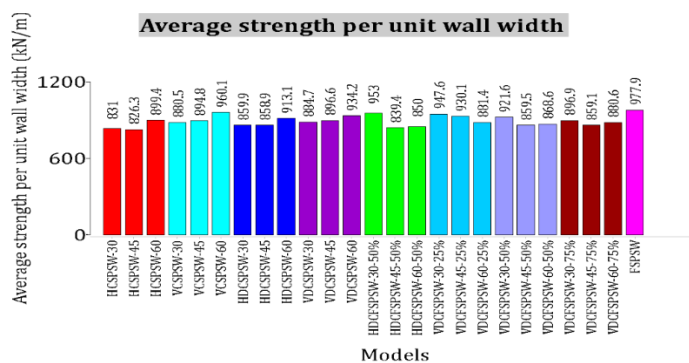
شکل ۱۸- مقایسه مقاومت بیشینه در نمونه‌ها



شکل ۱۹- مقایسه میانگین بیشینه مقاومت در نمونه‌ها



شکل ۲۰- مقایسه مقاومت بیشینه در واحد عرض دیوار در نمونه‌ها



شکل ۲۱- مقایسه میانگین بیشینه مقاومت در واحد عرض دیوار در نمونه‌ها

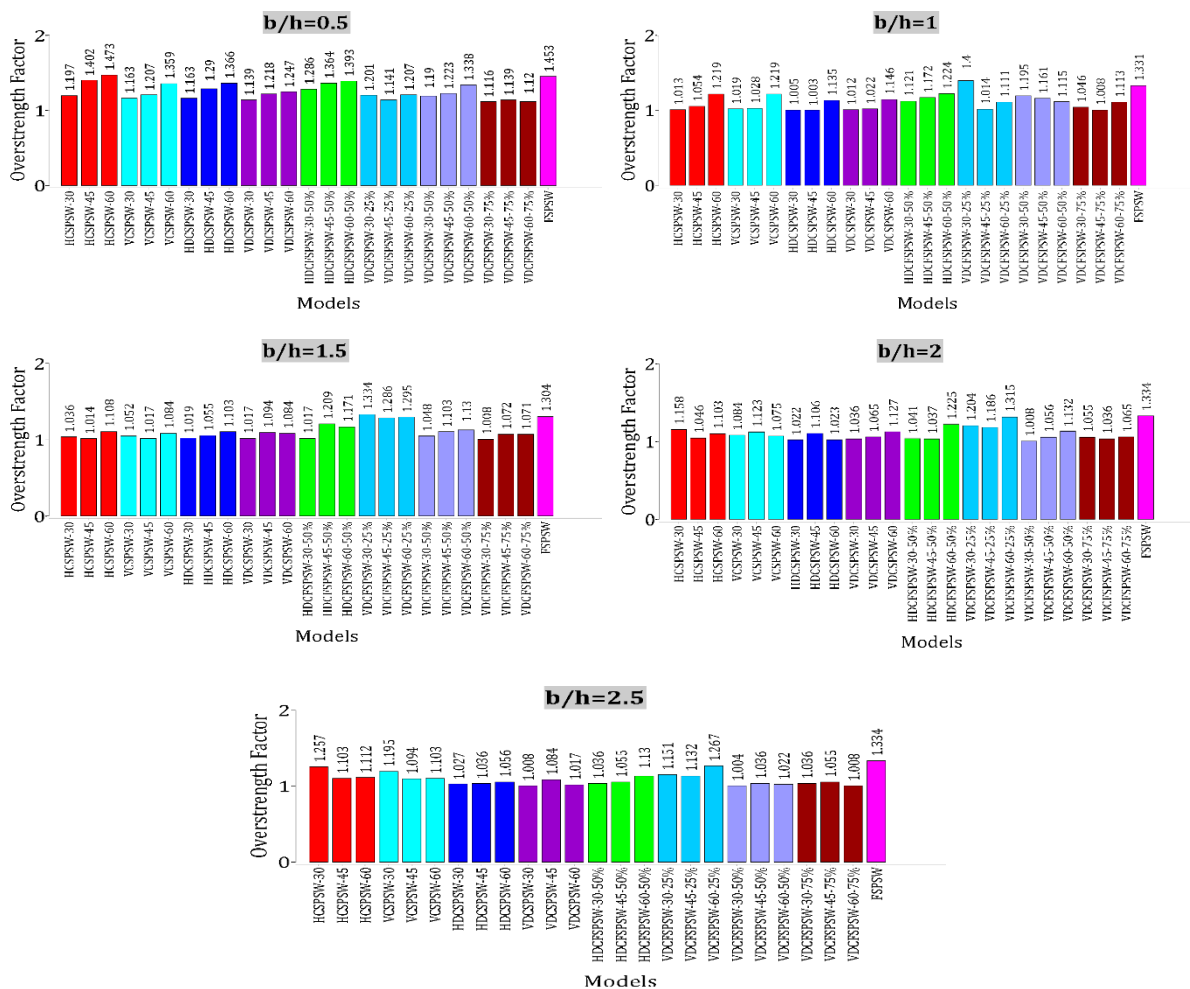
۴-۲- بررسی ضرایب لرزه‌ای در مدل‌ها

طبق بند (۲-۵) در این تحقیق، عوامل عملکرد لرزه‌ای شامل اضافه‌مقاومت، شکل‌پذیری و ضریب رفتار را برای مدل‌های عددی محاسبه نموده و با توجه به شکل (۲۲) ضریب رفتار نمونه‌های مورد مطالعه ارائه شده است. با بررسی مدل‌ها می‌توان فهمید که میانگین ضریب رفتار در مدل ترکیبی VDCFSPW نسبت عرض ورق موج‌دار دوبل نسبت به عرض دهانه در حالت ۵۰٪ در مقایسه با مدل موج‌دار تک‌لایه و دوبل قائم در نسبت ابعادی b/h برابر ۰/۵ تا ۱/۵ دارای مقادیر بیشتری است و در مدل ترکیبی VDCFSPW با کاهش نسبت عرض ورق موج‌دار دوبل نسبت به عرض دهانه از ۷۵٪ به ۲۵٪ مقدار میانگین ضریب رفتار افزایش می‌یابد. میانگین ضریب رفتار مدل‌ها طبق شکل (۲۳) در دیوارهای صاف، تک‌لایه موج‌دار افقی و قائم و دوبل موج‌دار افقی و قائم به ترتیب برابر ۵/۸۸، ۵/۴۵، ۵/۴۴ و ۵/۳۳ است. این درحالی است که میانگین ضریب رفتار مدل‌های VDCFSPW با نسبت عرض ورق موج‌دار دوبل نسبت به عرض دهانه در سه حالت ۲۵٪، ۵۰٪ و ۷۵٪ و HDCFSPW به ترتیب برابر ۵/۶۲، ۵/۳۸، ۵/۲۷ و ۵/۵۲ است؛ لذا میانگین ضریب رفتار سیستم‌های ترکیبی VDCFSPW به نسبت دیوارهای برشی دوبل موج‌دار، بالاتر بوده و نزدیک به ضریب رفتار سیستم‌های تک‌لایه موج‌دار می‌باشد.

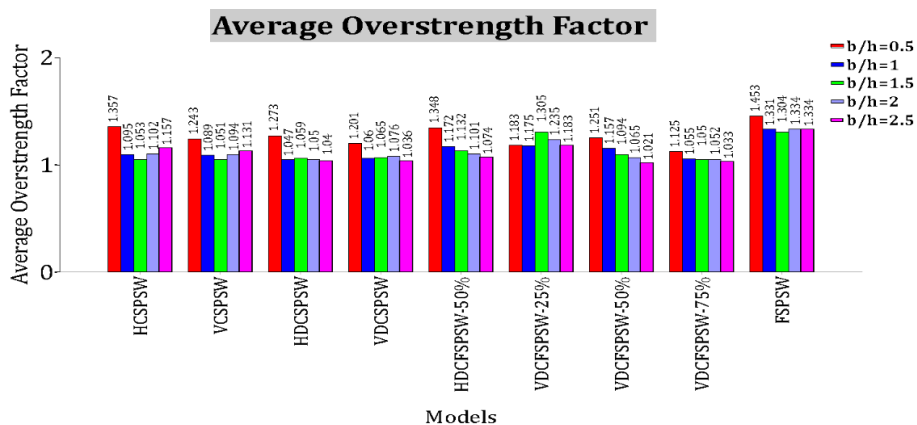
بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این امر نشان‌دهنده عملکرد مناسب و مطلوب سیستم‌های ترکیبی از منظر قابلیت بازتوزیع نیرو و رفتار غیرالاستیک است. در شکل (۲۴) ضریب اضافه‌مقاومت نمونه‌های مورد مطالعه ارائه شده است. میانگین ضریب اضافه‌مقاومت طبق شکل (۲۵) در دیوارهای صاف، تک‌لایه موج‌دار افقی و قائم و دوبل موج‌دار افقی و قائم به ترتیب برابر ۱/۳۵، ۱/۱۵، ۱/۱۲، ۱/۰۹۴ و ۱/۰۸۸ است. این درحالی است که میانگین ضریب اضافه‌مقاومت مدل‌های VDCFSPW نسبت عرض ورق موج‌دار دوبل نسبت به عرض دهانه در سه

حالت ۲۵٪، ۵۰٪ و ۷۵٪ و HDCFSPW به ترتیب برابر ۱/۲۱۶، ۱/۱۱۸، ۱/۰۶۳ و ۱/۱۶۵ است. لذا میانگین ضریب اضافه‌مقاومت سیستم‌های ترکیبی VDCFSPW به نسبت دیوارهای برشی تک‌لایه و دوبل موج‌دار بالاتر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این امر نشان‌دهنده این است سیستمی که ضریب اضافه‌مقاومت بیش‌تری دارد در زلزله طرح، دیرتر وارد ناحیه غیرالاستیک خواهد شد. یعنی اعضای اصلی کم‌تر به ناحیه پلاستیک رفته بنابراین خسارت کم‌تری در زلزله‌های متوسط تا شدید در سیستم‌های ترکیبی ایجاد شده و با توجه به برش پایه کم‌تر و سبک‌تر شدن المان‌های سازه‌ای، سیستم ترکیبی VDCFSPW می‌تواند موجب اقتصادی‌شدن طرح شود.

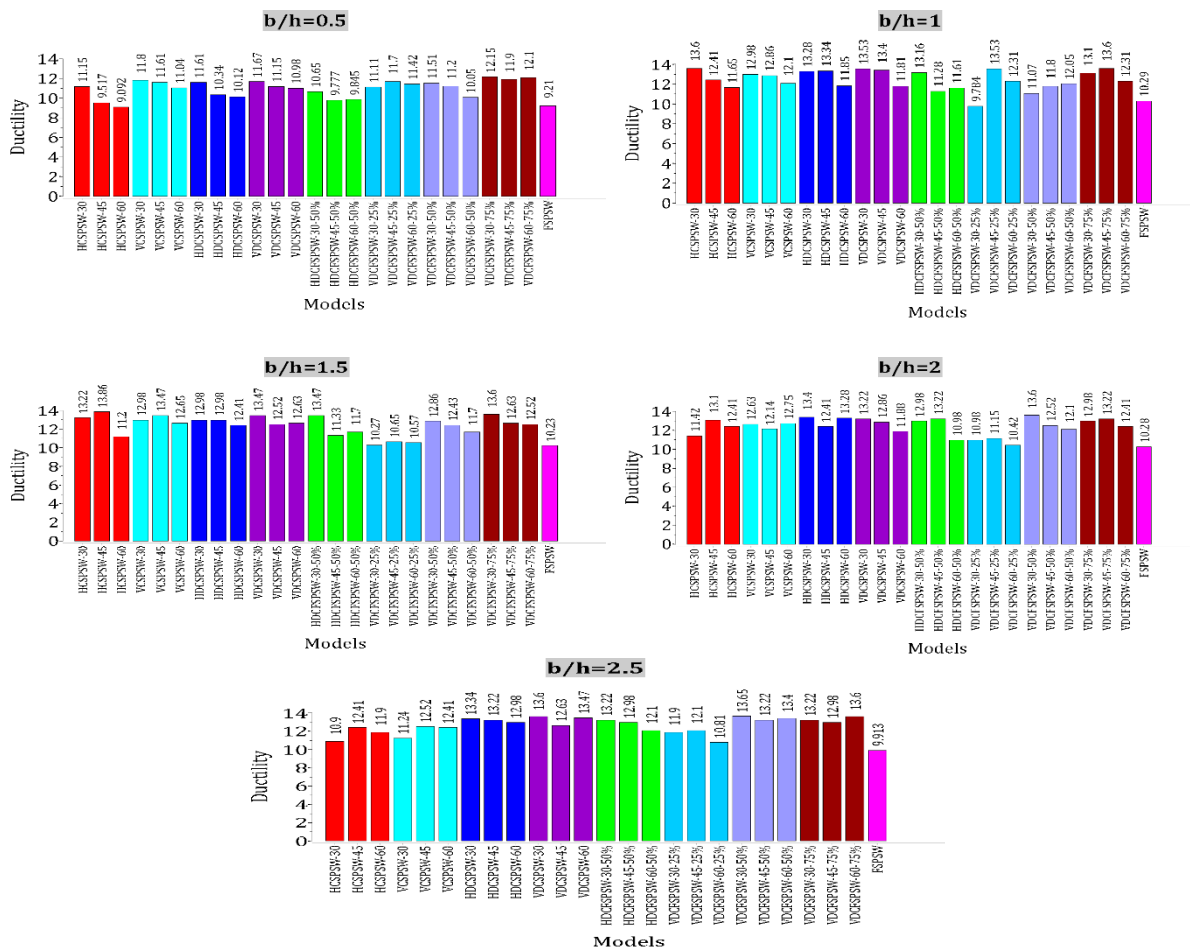
در شکل (۲۶) ضریب شکل‌پذیری نمونه‌های مورد مطالعه ارائه شده است. همچنین میانگین ضریب شکل‌پذیری طبق شکل (۲۷) در دیوارهای صاف، تک‌لایه موج‌دار افقی و قائم و دوبل موج‌دار افقی و قائم به ترتیب برابر ۹/۹۸، ۱۱/۸۶، ۱۲/۳۵، ۱۲/۵ و ۱۲/۶۰ است. این درحالی است که ضریب شکل‌پذیری میانگین مدل‌های VDCFSPW با نسبت عرض ورق موج‌دار دوبل نسبت به عرض دهانه در سه حالت ۲۵٪، ۵۰٪ و ۷۵٪ و HDCFSPW به ترتیب برابر ۱۱/۲۵، ۱۲/۲۱، ۱۲/۸۲ و ۱۱/۸۹ است؛ لذا ضریب شکل‌پذیری میانگین سیستم‌های ترکیبی VDCFSPW به نسبت دیوارهای برشی صاف و تک‌لایه موج‌دار افقی بالاتر بوده و نزدیک به ضریب شکل‌پذیری سیستم‌های تک‌لایه موج‌دار قائم و دوبل موج‌دار افقی و قائم است. از لحاظ آیین‌نامه‌ای سیستم ترکیبی VDCFSPW با توجه به ضریب شکل‌پذیری بالا می‌تواند جایگزین مناسبی برای سایر دیوارهای برشی فولادی باشد. درنهایت با توجه به بررسی ضرایب لرزه‌ای می‌توان به این نتیجه رسید که ضریب رفتار نشان‌دهنده این است که سازه چه مقدار می‌تواند انرژی لرزه‌ای را از طریق تغییرشکل‌های پلاستیک (غیرالاستیک) جذب و دفع کند.



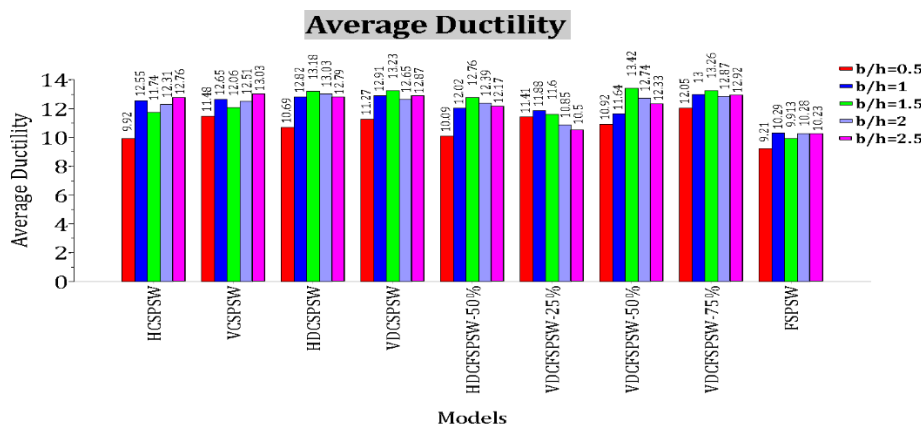
شکل ۲۴- ضریب اضافه مقاومت نمونه های مورد مطالعه



شکل ۲۵- مقایسه میانگین ضریب اضافه مقاومت نمونه های مورد مطالعه



شکل ۲۶- ضریب شکل‌پذیری نمونه‌های مورد مطالعه



شکل ۲۷- مقایسه میانگین ضریب شکل‌پذیری نمونه‌های مورد مطالعه

۵- نتیجه‌گیری

مورد بررسی قرار گرفت، اهم دستاوردهای حاصل به شرح زیر

است:

- ۱- نتایج حاصل از تحلیل عددی نشان داد که مقاومت بیشینه نمونه‌ها، وابستگی مستقیمی به نسبت ابعادی b/h نمونه‌های دیوار برشی فولادی داشته و همچنین زاویه موج و جهت موج ورق‌ها نیز در این مورد تأثیرگذار است. علاوه بر این

در این مطالعه، عملکرد لرزه‌ای سیستم نوین دیوار برشی فولادی ترکیبی متشکل از ورق‌های صاف و موج‌دار دوبل دوزنقه‌ای VDCFSWSW از طریق مطالعات عددی با سایر سیستم‌های دیوار برشی فولادی از جمله مدل‌های صاف، موج‌دار تک‌لایه افقی و قائم و موج‌دار دوبل افقی و قائم و مدل ترکیبی HDCFSWSW

و دابل موج دار افقى و قائم به ترتیب برابر ۵/۸۸، ۵/۴۵، ۵/۴۴، ۵/۳۳ و ۵/۳۳۳ است. درحالی که میانگین ضریب رفتار مدل های VDCFSPSW با نسبت عرض ورق موج دار دابل نسبت به عرض دهانه در سه حالت ۲۵٪، ۵۰٪ و ۷۵٪ و HDCFSPSW به ترتیب برابر ۵/۶۲، ۵/۳۸، ۵/۲۷ و ۵/۵۲ می باشد. لذا میانگین ضریب رفتار سیستم های ترکیبی VDCFSPSW به نسبت دیوارهای برشی دابل موج دار بالاتر است. میانگین ضریب شکل پذیری در دیوارهای صاف، تک لایه موج دار افقى و قائم و دابل موج دار افقى و قائم به ترتیب برابر ۹/۹۸، ۱۱/۸۶، ۱۲/۳۵، ۱۲/۵ و ۱۲/۶۰ است. درحالی که میانگین ضریب شکل پذیری مدل های VDCFSPSW با نسبت عرض ورق موج دار دابل نسبت به عرض دهانه در سه حالت ۲۵٪، ۵۰٪ و ۷۵٪ و HDCFSPSW به ترتیب برابر ۱۱/۲۵، ۱۲/۲۱، ۱۲/۸۲ و ۱۱/۸۹ می باشد. لذا میانگین ضریب شکل پذیری سیستم های ترکیبی VDCFSPSW به نسبت دیوارهای برشی صاف و تک لایه موج دار افقى بالاتر است. این موارد حاکی از توانایی بالای سیستم ترکیبی در تحمل تغییر شکل های غیرخطی پیش از فروپاشی است.

۵- در مجموع، مدل های ترکیبی VDCFSPSW با توجه به مقاومت بیشینه بیش تر در بسیاری از نسبت های ابعادی b/h نسبت به مدل های صاف و موج دار تک لایه و دولا به و ترکیبی HDCFSPSW و همچنین از نظر رفتار هیستریزس مناسب، تأخیر در افت مقاومت، کاهش پدیده پینچینگ و مهم تر از همه، از لحاظ شکل پذیری و ضریب رفتار، برتری قابل توجهی داشته و این سیستم می تواند به عنوان یک جایگزین لرزه ای کارآمد و با قابلیت اطمینان بالا برای مهار کماتش و بهبود عملکرد لرزه ای دیوارهای برشی فولادی، به ویژه در مناطقی با لرزه خیزی شدید که نیاز به شکل پذیری زیاد است، معرفی شود.

نتایج این پژوهش مربوط به رفتار مکانیکی قاب با سیستم های دیوار برشی فولادی یک دهانه و یک طبقه است و برای تعمیم این نتایج به سیستم های سازه ای واقعی در مقیاس بزرگ، انجام تحلیل های دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی در سازه های سه بعدی و ارزیابی احتمال شکست بر اساس پروتکل های استاندارد FEMA-P695 به عنوان گام های ضروری در تحقیقات آینده پیشنهاد می شود.

موارد، در مدل های ترکیبی با ورق موج دار دابل قائم در نسبت های ابعادی b/h از ۰/۵ تا ۲/۵، نسبت عرض ورق موج دار دابل نسبت به عرض دهانه در سه حالت ۲۵٪، ۵۰٪ و ۷۵٪، تأثیر به سزایی در میزان مقاومت مدل های ترکیبی با ورق موج دار دابل قائم دارد.

۲- با افزایش نسبت ابعادی b/h نمونه ها از ۰/۵ به ۲/۵ و همچنین با افزایش زاویه موج ورق ها در مدل های موج دار تک لایه و دولا به از ۳۰ درجه به ۶۰ درجه وضعیت سیستم از لحاظ بیشینه مقاومت بهبود خواهد یافت و مقاومت بیشینه سیستم افزایش می یابد. همچنین در مدل ترکیبی با ورق موج دار دابل افقى بیش ترین مقاومت آن در زمان استفاده از ورق موج دار دابل افقى با زاویه ۳۰ درجه است. در مدل های ترکیبی با ورق های موج دار دابل قائم، افزایش مقاومت بیشینه سیستم در نسبت های ابعادی b/h دارای نوسان است؛ به طوری که در نسبت های ابعادی b/h از ۰/۵ تا ۲/۵، با نسبت عرض ورق موج دار دابل نسبت به عرض دهانه در حالت ۲۵ درصد در مقایسه با سایر نسبت ها دارای مقاومت بالاتری بوده و تا نسبت b/h برابر ۰/۵ تا ۱/۵ بیش ترین مقاومت مربوط به حالت زاویه موج ورق دابل موج دار برابر ۳۰ درجه در این مدل ترکیبی می باشد. مدل صاف در نسبت های ابعادی b/h از ۰/۵ تا ۱/۵ دارای بیش ترین مقدار مقاومت نسبت به سایر سیستم ها بوده اما در نسبت های ابعادی از ۲ تا ۲/۵ مقاومت مدل صاف کاهش پیدا کرده و نسبت به بسیاری از سیستم های دیگر کم تر است. نتایج نشان می دهد که در نسبت ابعادی کوچک (در این مقاله $b/h=0.5$)، مقاومت بیشینه نمونه ها بسیار به یکدیگر نزدیک است.

۳- در مدل ترکیبی VDCFSPSW با زاویه موج ورق برابر ۳۰ درجه و با نسبت عرض ورق موج دار دابل نسبت به عرض دهانه در حالت ۵۰٪ در مقایسه با مدل موج دار تک لایه قائم با زاویه موج ۳۰ درجه در نسبت ابعادی b/h برابر ۰/۵ تا ۱/۵ دارای مقاومت بیشینه به ترتیب ۴۲٪ و ۱۳۸٪ و ۸/۵۲٪ بیش تر است. در مدل ترکیبی VDCFSPSW با زاویه موج ورق برابر ۳۰ درجه و با نسبت عرض ورق موج دار دابل نسبت به عرض دهانه در حالت ۵۰ درصد در مقایسه با مدل صاف سستی در نسبت ابعادی b/h برابر ۲/۵ دارای مقاومت بیشینه یکسانی هستند. همچنین می توان فهمید که مقدار میانگین بیشینه مقاومت در مدل های ترکیبی VDCFSPSW نسبت به مدل های ترکیبی HDCFSPSW بیش تر است.

۴- نتایج مطالعات پارامتریک عددی نشان داد که میانگین ضریب رفتار مدل ها در دیوارهای صاف، تک لایه موج دار افقى و قائم

- Shear Walls with Reinforced Boundary Elements", In Structures, 68, p.107067.
- [13] Cao, Q., Huang, J., Gu, B., Li, D., and Huang, J. (2024), "Experimental and Numerical Study on Hysteretic Behaviour of Corrugated Steel Plate Shear Walls under Lateral Loads", Journal of Building Engineering, 82, p.108297.
- [14] Nouri, G., Rayegani, A., Nemati, F., and Eftekhari, G.H. (2023), "Experimental and Numerical Analyses of Perforated Corrugated Steel Shear Walls", KSCE Journal of Civil Engineering, 27(12), pp.5281-5293.
- [15] Emami, F., Mofid, M., and Vafai, A. (2013), "Experimental Study on Cyclic Behavior of Trapezoidally Corrugated Steel Shear Walls", Engineering Structures, 48, pp.750-762.
- [16] Qiu, J., Zhao, Q., Yu, C., and Li, Z. (2018), "Experimental Studies on Cyclic Behavior of Corrugated Steel Plate Shear Walls", Journal of Structural Engineering, 144(11), p.04018200.
- [17] Zand, S.M.D., Kalatjari, V., and Attari, N.K. (2024), "Cyclic Behavior of New Steel Plate Shear Walls Reinforced with Trapezoidal Corrugated Plates", Periodica Polytechnica Civil Engineering, 68(1), pp.337-348.
- [18] Tong, J.Z., Wu, R.M., Xu, Z.Y., and Guo, Y.L. (2023), "Subassembly Tests on Seismic Behavior of Double-Corrugated-Plate Shear Walls", Engineering Structures, 276, p.115341.
- [19] Tong, J., Wu, R., and Wang, L. (2023), "Experimental and Numerical Investigations on Seismic Behavior of Stiffened Corrugated Steel Plate Shear Walls", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 52(12), pp.3551-3574.
- [20] Tong, J.Z., 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.
- [21] Feng, L., Yang, H., Wang, J.O.Q., and Sune, M. (2025), "Shear Resistance and Design of Horizontally-Placed Stiffened Corrugated Steel Plate Shear Walls", Steel & Composite Structures, 55(6), p.473.
- [22] Feng, L., Sun, T., and Ou, J. (2021), "Method of Determining the Minimum Number of Stiffeners for Stiffened Corrugated Steel Walls", In Structures, 34, pp.3487-3500.
- [23] Feng, L., Yang, H., and Ou, J. (2024), "Experimental and Numerical Study on Vertically-Placed Stiffened Corrugated Steel Plate Shear Walls", Journal of Constructional Steel Research, 219, p.108765.
- [24] Tong, J.Z., Guo, Y.L., Zuo, J.Q., and Gao, J.K. (2020), "Experimental and Numerical Study on Shear Resistant Behavior of Double-Corrugated-Plate Shear Walls", Thin-Walled Structures, 147, p.106485.
- [25] Deng, R., Yang, J.D., Wang, Y.H., Li, Q.Q., and Tan, J.K. (2022), "Cyclic Shear Performance of Built-Up Double-Corrugated Steel Plate Shear Walls: Experiment and Simulation", Thin-Walled Structures, 181, p.110077.
- [1] Pourmahdi, S., Rakan-Nasrabadi, T., Cheraghi, K., and Haghollahi, A. (2025), "Numerical Study of Cyclic Behavior of Single-Layer Flat-Corrugated Steel Shear Walls", Asian Journal of Civil Engineering, 26(12), pp.5049-5068.
- [2] Rakan-Nasrabadi, T., Pourmahdi-Tazeabadi, S., Karimi-Gabalou, S., and Haghollahi, A. (2025), "Investigating Lateral Behavior of the Hybrid System of Flat Steel Shear Walls and Cold-Formed S-Shaped Steel Plate Dampers under Cyclic Loading", Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 49(4), pp.3927-3951.
- [3] Dou, C., Xie, C., Wang, Y., and Yang, N. (2023), "Cyclic Loading Test and Lateral Resistant Behavior of Flat-Corrugated Steel Plate Shear Walls", Journal of Building Engineering, 66, p.105831.
- [4] Guo, L., Hou, J., Li, Z., and Zhang, S. (2020), "Hysteretic Analysis and a Simplified Model of Buckling Restrained Steel Plate Shear Walls", International Journal of Steel Structures, 20(1), pp.121-135.
- [5] Cheng, Y., He, H., Sun, H., and Li, J. (2024), "Seismic Experiment and Performance Analysis on Embedded Optimized Steel Plate-Reinforced Concrete Composite Shear Wall under Multi-Dimensional Loading", Journal of Building Engineering, 98, p.111087.
- [6] Qiu, J., Zhao, Q., Yu, C., and Wang, Z. (2022), "Lateral Behavior of Trapezoidally Corrugated Wall Plates in Steel Plate Shear Walls, Part 2: Shear Strength and Post-Peak Behavior", Thin-Walled Structures, 174, pp.109103.
- [7] Zhu, B.L., Liu, W.C., Hou, J., and Guo, Y.L. (2025), "Simplified Shear-Resistant Computational Model of Vertically Corrugated Steel Plate Shear Wall Embedded in Frame Structure", In Structures, 75, p.108817.
- [8] Hosseinzadeh, L., Emami, F., and Mofid, M. (2017), "Experimental Investigation on the Behavior of Corrugated Steel Shear Wall Subjected to the Different Angle of Trapezoidal Plate", The Structural Design of Tall & Special Buildings, 26(17), p.e1390.
- [9] Emami, F., and Mofid, M. (2014), "On the Hysteretic Behavior of Trapezoidally Corrugated Steel Shear Walls", The Structural Design of Tall & Special Buildings, 23(2), pp.94-104.
- [10] Dadmanesh, M., and Mofid, M. (2024), "On the Probabilistic Seismic Damage Assessment of Trapezoidally Corrugated Steel Plate Shear Walls", Results in Engineering, 24, p.102971.
- [11] Noruzi, A.H., and Jalaeifar, A. (2024), "Effect of Corrugated Plate Arrangements on the Performance of Steel Shear Wall Frames", In Structures, 66, p.106871.
- [12] Wen, C.B., Zuo, J.Q., Zhu, B.L., Sun, H.J., Guo, Y.L., Zheng, W.J., and Deng, L.L. (2024), "Shear Resistance Design of Prefabricated Corrugated Steel Plate

- Engineering", *International Journal of Mechanics & Materials in Design*, 21(6), pp.1917-1931.
- [40] Wu, Z., and Fu, M. (2026), "Comparison of the Performance of Double-Corrugated Steel Shear Walls with Flat-Corrugated Steel Shear Walls under Cyclic Lateral Loading", *International Journal for Simulation & Multidisciplinary Design Optimization*, 17, p.13.
- [41] Zhou, L., Teng, X., and Li, S. (2026), "Seismic Performance of Flat-Corrugated Steel Shear Walls with Different Patterns", *In Structures*, 86, p.111369.
- [42] Krawinkler, H. (2009), "Loading Histories for Cyclic Tests in Support of Performance Assessment of Structural Components", *In The 3rd International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering*, San Francisco.
- [43] Prestandard, F.E.M.A., (2000), *Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA356)*. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, 7(2), p.518.
- [44] Jouneghani, H.G., Nouri, Y., Memarzadeh, P., Haghollahi, A., and Hemati, E. (2024), "Seismic Performance and Failure Mechanisms Evaluation of Multi-Story Elliptic and Mega-Elliptic Bracing Frames: Experimental and Numerical Investigation", *In Structures*, 70, p.107658.
- [45] Uang, C.M. (1991), "Establishing R (or R w) and C d Factors for Building Seismic Provisions", *Journal of Structural Engineering*, 117(1), pp.19-28.
- [46] Newmark, N.M., and Hall, W.J. (1982), "Earthquake Spectra and Design", *Engineering Monographs on Earthquake Criteria*.
- [47] Sabelli, R., and Bruneau, M. (2007), "Design guide 20: Steel Plate Shear Walls", *American Institute of Steel Construction*. Chicago, IL, USA.
- [26] Wang, T., Zha, Z., Bai, Y., Guo, T., Gao, J., and Ma, J. (2025), "Seismic Performance of a Novel Replaceable Bolted Built-Up Double Corrugated Steel Plate Shear Wall", *Thin-Walled Structures*, p.113871.
- [27] Ghodrati-Kashan, S.M., and Maleki, S. (2021), "Numerical Investigation of Double Corrugated Steel Plate Shear Walls", *Journal of Civil Engineering & Construction*, 10(1), pp.44-58.
- [28] Ghodrati-Kashan, S.M., and Maleki, S. (2022), "Experimental Investigation of Double Corrugated Steel Plate Shear Walls", *Journal of Constructional Steel Research*, 190, p.107138.
- [29] Hu, Y., and Yan, X. (2025), "Investigation of the Lateral Performance of Trapezoidal Double Corrugated Steel Shear Walls with Two Different Corrugation Angles", *Journal of Engineering & Applied Science*, 72(1), p.21.
- [30] Lv, P. (2024), Investigating the Behavior of a Steel Shear Wall Consisting of a Corrugated and Flat Plate with Fully and Semi Connections to Boundary Elements", *Multiscale & Multidisciplinary Modeling, Experiments & Design*, 7(4), pp.3827-3839.
- [31] Lv, P. (2025), "Cyclic Behavior of Two-Layer Flat-CSSWs with Square Opening", *International Journal of Steel Structures*, 25(3), pp.591-608.
- [32] Guan, Z., and Zhang, L. (2025), "On the Hysteretic Behavior of Fully Connected and Beam-Connected Flat-Corrugated Steel Shear Walls with Different Corrugation Angles and Orientations", *Electronic Journal of Structural Engineering*, 25(2), pp.33-39.
- [33] Broujerdian, V., Pahnabi, R., and Ghamari, A. (2023), "Semi-Supported Steel Plate Shear Wall with Oblique Sides", *Scientia Iranica A*, 30(3), pp.891-901.
- [34] Abbaszadeh, A., Ghamari, A., and Broujerdian, V. (2023), "Seismic Behavior of an Innovative Four-Layer Steel Shear Wall", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 27(11), pp.4770-4786.
- [35] Nayel, I.H., Ghamari, A., and Broujerdian, V. (2022), On the Behavior of an Innovative Four-Layer Semi-Supported Steel Plate Shear Wall", *Case Studies in Construction Materials*, 17, p.e01427.
- [36] Nayel, I.H., Broujerdian, V., and Ghamari, A. (2022), "Investigating the Behavior of Semi-Supported Steel Plate Shear Walls Compounded of Two Flat and Two Corrugated Plates: a Numerical and Parametrical Study", *International Journal of Civil Engineering*, 20(10), pp.1197-1210.
- [37] Broujerdian, V., Ghamari, A., and Abbaszadeh, A. (2021), "Introducing an Efficient Compound Section for Steel Shear Wall using Flat and Corrugated Plates", *In Structures*, 33, pp.2855-2871.
- [38] Liu, X. (2025), "Investigation of the Lateral Performance of Four-Layer Flat-Corrugated Steel Shear Walls under Cyclic Loading", *Sādhana*, 50(2), p.81.
- [39] Zhang, S. (2025), "Improving the Structural Performance of Steel Shear Wall Systems with Four-Layer Flat-Corrugated Steel Plates in Construction