

Investigation the effect of angle of placement in multilayer composite fibers on the performance of steel shear walls under nonlinear static analysis

Ashkan Khodabandehlou¹ , Maryam Minadi² 

1. Corresponding Author, Civil Engineering Dept, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Urmia, Iran. E-mail: a.khodabandehlou@iaau.ac.ir

2. Civil Engineering Dept, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Urmia, Iran. E-mail: maryam.minadi@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received

2024-03-13

Received in revised form

2024-05-09

Accepted

2024-06-19

Available online

2024-06-30

Keywords:

Steel Shear Wall,
Carbon Polymer,
Post-buckling behavior,
Ductility,
Geometric nonlinearity,
Materials nonlinearity

ABSTRACT

The selection of the lateral resistant system is done by considering the architectural considerations, load combination, gravity load transferring, structural dimension, codes provisions and etc. In this regard, in the last two decades using of steel shear wall system in modern structures or for purpose of rehabilitation of existing building systems to strengthen against the lateral seismic loads is increasing. The main advantages of these systems are higher elastic stiffness and ductility, stable hysteresis behavior in cyclic loading, as well as easier construction and installation of opening. Since buckling occurs in the steel plate used as a wall, it is very common to use reinforced polymer carbon fiber (CFRP) with special properties such as high stiffness and strength, to reduce this buckling and also increase the energy dissipation capacity. Web steel plate in steel shear walls can be reinforced with carbon layers on both sides. In this type of composite steel shear wall, such as unreinforced steel shear wall, the web plate has low buckling strength and the shear capacity of the system is provided by diagonal tension fields in the composite sheet. In this particular type of steel shear wall, the role of reinforced polymer fibers in increasing the shear strength after buckling and the secondary stiffness of the system is significant. This system has both positive properties of bare steel shear wall such as low cost and high construction speed and also has performance of reinforced steel shear wall such as high stiffness and strength in displacement control. In this research, by changing of position angle and number of fibers to achieve the best seismic performance, sixteen models have been analyzed using ABAQUS finite element software. In modeling, wide flange profile Size 20 as beam and column elements and 1.6*3.8 mm steel plates with various thicknesses of 0.8, 1 and 1.5 mm has been used as wall filling sheet. The dimensions of the panel bays and height of the panels are 4 and 2 meters respectively. In all models, the beam-to-column connection is assumed rigid and the connection of the sheet to the beam and column is assumed hinged. The results of the research show that the best angles for the orientation of the layers are 45% and 60%. In addition, the use of carbon fiber improves seismic performance and increases parameters such as strength, ductility, equivalent plastic strain, energy dissipation by approximately 40%, which can be a desirable advantage for a lateral system be considered.

Cite this article: Khodabandehlou, Ashkan., & Minadi, Maryam. (2024). Investigation the effect of angle of placement in multilayer composite fibers on the performance of steel shear walls under nonlinear static analysis. *Advanced Modeling in Civil Engineering*, 1(1), 161-178. DOI: 10.22126/amcen.2024.3302



© The Author(s).

DOI: 10.22126/amcen.2024.3302

Publisher: Razi University

Introduction

The primary application of steel shear walls is to resist horizontal shear forces in the floor and overturning moments caused by lateral loads. Generally, the steel shear wall system consists of a steel wall, two peripheral columns, and horizontal floor beams. The steel wall and columns act together as a vertical beam-column system, where the columns serve as the flanges of the beam-column and the infill metal plate acts as the web. The horizontal beams function, to some extent, as transverse stiffeners for the beam-column system. Mohammad et al conducted comprehensive research in 2014 and 2015 on the reinforcement of concrete shear walls with glass fiber polymer composite bars compared to steel bars. They found that reinforcing the shear wall system with glass fibers resulted in favorable behavior against lateral resistance of the structure, with these systems exhibiting linear behavior up to about 80% of their ultimate capacity. Laboratory and numerical studies have been conducted on steel shear walls affected by composite fibers, considering the increasing application of such systems worldwide. Sadeghi et al, in 2021, carried out extensive research on the interaction effects between frames and walls in steel shear walls reinforced with fibers, demonstrating that the presence of fibers increases the stiffness and energy absorption capacity of the structure. Considering that the properties of fiber-reinforced composites vary in different directions, a series of parameters must be taken into account to achieve the optimal state of stress and deflection in the structure. These parameters include the addition of reinforcements, the effect of different fiber orientations, the impact of the number and thickness of layers, and the examination of various types of fibers. This article focuses on the finite element analysis of the effect of the orientation angle of multilayer composite fibers in structural elements subjected to cyclic loading.

Method

To investigate the desired behavior in this study, 16 samples of steel shear walls reinforced with carbon fibers were modeled. In the modeling, wide flange profile number 20 was used as beam and column elements, while steel plates with thicknesses of 0.8 mm, 1 mm, and 1.5 mm, measuring 1.6×3.8 meters, were utilized as infill plates for the various samples. The panel openings in all models were considered to be 4 meters wide and 2 meters high. Non-linear A572 steel material (with a yield strength of 345 megapascals) was selected for the beams and columns, while materials with a minimum yield strength of 165 megapascals were chosen for the steel shear wall plates. In all models, the connection between the beams and columns was modeled as rigid, and the connection between the plates and beams/columns was modeled as pinned. Given that the infill plates are considered to be thin-walled shells, shell elements were deemed the best option for modeling them. To account for lateral buckling, all boundary elements, fibers, and plates were modeled using shell elements, which are four-node elements, with each node having six degrees of freedom (three translational and three rotational degrees of freedom). Non-linear analysis was performed using the Abaqus finite element software, which has the capability to solve problems with high non-linearity.

Results

The maximum stress values, according to the analyses and results obtained from the finite element analysis in this study, indicate that the use of carbon sheets significantly enhances the strength of the samples. Depending on the number of fibers used, their orientation, and placement angles, the extent of strength increase will vary. The energy dissipation in the fiber-reinforced samples has increased compared to the unreinforced samples. The energy dissipation obtained from the finite element analysis shows that, as expected, energy dissipation increases; however, this increase depends on various factors, including the number of fibers used in the analysis and the orientation of the fibers. A very important point regarding the specimens reinforced with two carbon fibers is the position and orientation of CFRP layers. Placing fibers with positive-negative angles in steel plate shear wall specimens (SPSW10 and SPSW12) results in approximately a 14% increase in energy absorption compared to specimens with similar angles but different orientations. Additionally, based on the output values, the increase in ductility and energy absorption in the case of using 3 layers of CFRP is only 4% higher than using two layers of carbon, which is not economically justified. Therefore, the optimal condition for SPSW12 specimens is using two layers of CFRP. Furthermore, for further investigation, the load-displacement curve for all models and the bilinear curve have been obtained.

Conclusions

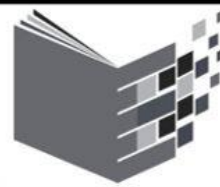
Shear walls reinforced with carbon fibers exhibit greater strength, ductility, and energy absorption capacity compared to steel-reinforced walls. As observed, the use of fibers in most analyzed samples has led to a 40% increase in energy dissipation and absorption, enhancing the seismic performance of these structures, which can be considered a desirable advantage for a lateral load-bearing system. The number of fiber layers used in the samples also affects the seismic parameters. The sample reinforced with 1 layer of fibers shows lower strength, energy dissipation, and ductility compared to the sample with 2 layers. The increase in strength and energy dissipation in the 1-layer sample is 42% and 64%, respectively, while the increase in strength and energy dissipation in the 4-layer sample is 58% and 76%. The presence of carbon reinforcement fibers has a direct and significant impact on the amount of energy absorption and dissipation, which may be due to the reduced constriction in the hysteresis curve of the control sample compared to the reinforced samples with fibers. Another important factor is the angle of fiber orientation. The strength and energy dissipation in samples reinforced with fibers at angles of 60 degrees and 45 degrees show the highest increases, while samples at angles of 0 degrees and 90 degrees exhibit the lowest increases in strength and energy dissipation.

Author Contributions

All authors participated in writing and revising the article.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



بررسی تأثیر زاویه قرارگیری الیاف کامپوزیت چندلایه‌ای بر عملکرد دیوارهای برشی فولادی

تحت تحلیل استاتیکی غیر خطی

اشکان خدابنده لو^۱، مریم مینادی^۲

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران. رایانامه: a.khodabandehlou@iaurmia.ac.ir

۲. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران. رایانامه: maryam.minadi@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۳	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۲۰	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۳۰	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۴/۱۰	
کلیدواژه‌ها: دیوار برشی فولادی، غیر خطی هندسی و مصالح، اجزا محدود، ورق تقویت کربن	در چهار دهه اخیر استفاده از سیستم دیوار برشی فولادی در سازه‌های جدید و مقاوم سازی ساختمان‌های موجود برای مقاومت در برابر نیروهای جانبی رو به افزایش است. آزمایشی اصلی این سیستم‌ها، به شکل پذیری بالا و مقاومت زیاد آن‌ها در مقابل نیروهای جانبی می‌توان اشاره کرد. با توجه به اینکه سیستم دیوار برشی فولادی در اوایل بارگذاری کمانش کرده و عمدتاً انتظار عملکرد پس کمانشی بالا، دلیل اصلی استفاده از این سیستم است لذا در این پژوهش به بررسی تأثیر تقویت این سیستم با استفاده از الیاف کربن پرداخته شده است، همچنین در مرحله بعد با اعمال تغییرات در زاویه قرارگیری و تعداد الیاف برای دستیابی به بهترین عملکرد لرزه‌ای، شانزده مدل، مورد تحلیل غیرخطی هندسی و مصالح با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس قرار گرفته است. نتایج حاصل از پژوهش نشان می‌دهد که بهترین زاویه‌ها برای جهت‌گیری لایه‌ها $\pm 45^\circ$ و $\pm 60^\circ$ درجه می‌باشد. افزون بر آن استفاده از الیاف کربن سبب بهبود عملکرد لرزه‌ای و افزایش پارامترهایی نظیر مقدار مقاومت، شکل پذیری، کرنش پلاستیک معادل، استهلاک و جذب انرژی به مقدار تقریبی ۴۰ درصد شده است که این مورد برای یک سیستم باربر جانبی می‌تواند یک مزیت مطلوب محسوب گردد.

استناد: خدابنده لو، اشکان؛ و مینادی، مریم. (۱۴۰۳). بررسی تأثیر زاویه قرارگیری الیاف کامپوزیت چند لایه‌ای بر عملکرد دیوارهای برشی فولادی تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی. *مجله مدل سازی پیشرفته در مهندسی عمران*، ۱(۱)، ۱۷۸-۱۶۱.

DOI: 10.22126/amcen.2024.3302

© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی.



۱. مقدمه

دیوار برشی فولادی (SSW)^۱ یک سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی بوده که در آزمایشگاه‌ها و زلزله‌های گذشته رفتار مناسبی داشته است. با توجه به سختی، مقاومت و شکل پذیری بالای این سیستم، محققان در سراسر دنیا مطالعات زیادی بر روی این سیستم، جهت بهبود رفتار لرزه‌ای آن انجام داده و در حال انجام است. کاربرد اصلی دیوار برشی فولادی جهت مقاومت برش افقی طبقه و لنگرهای واژگونی ناشی از بارهای جانبی می‌باشد. به‌طور کلی سیستم دیوار برشی فولادی متشکل از یک دیوار فولادی و دو ستون محیطی و تیرهای کف افقی می‌باشد که دیوار فلزی و ستون‌ها به‌صورت ترکیبی، به‌عنوان یک تیروورق عمودی عمل می‌کنند که ستون‌ها به‌عنوان بال تیروورق و صفحه پرکننده فلزی به‌عنوان جان آن عمل می‌کند و تیرهای افقی، کم و بیش به‌عنوان سخت‌کننده‌های عرضی جان تیروورق عمل می‌کند. سیستم دیوار برشی فولادی در اوایل بارگذاری به دلیل نازک بودن ورق به سرعت کمانش کرده و تشکیل میدان کششی قطری می‌دهد که عمده مزیت استفاده از سیستم دیوار برشی هم همان تشکیل میدان کششی قطری و مقاومت پس‌کمانشی بالای آن است، حال آنکه با توجه به این توضیحات اگر بتوان به نحوی مقاومت پس‌کمانشی سیستم را افزایش داد می‌توان به عملکرد بسیار بهتری از سیستم دست یافت. یکی از روش‌های تقویت سیستم استفاده از تسمه‌ها و سخت‌کننده‌های افقی و عمودی است که این روش با توجه به ایجاد کردن سختی اولیه از عملکرد مناسب سیستم که همان کمانش اولیه ورق دیوار و تشکیل میدان کششی قطری است جلوگیری کرده است، لذا گزینه مناسب نیست. یکی دیگر از روش‌های جدید تقویت سازه‌ها استفاده از مواد کامپوزیتی با الیاف کربن به اختصار CFRP^۲ می‌باشد، CFRP به سبب نسبت مقاومت به وزن بالا، مقاومت در مقابل خوردگی و مواد شیمیایی، مقاومت در برابر خستگی ناشی از بارگذاری و همچنین نصب سریع در چند سال اخیر جهت امر تقویت سازه‌ها خصوصاً سازه‌های بتنی به‌شدت مورد توجه قرار گرفته‌اند. الیاف کربن یکی از مهم‌ترین اعضای خانواده الیاف پیشرفته است که خواصی نظیر استحکام بسیار بالا (با توجه به نوع الیاف بین ۷ تا ۱۰ برابر فولاد)، چگالی پایین (حدود ۷۰ درصد آلومینیوم)، رسانایی الکتریکی بسیار خوب، قابلیت بافت و تولید پارچه، ساخت کامپوزیت‌های سبک و مستحکم و پایداری

در برابر حرارت، آن را از سایر مواد مهندسی متمایز می‌سازد. الیاف کربن با توجه به خواص فوق‌العاده مکانیکی، حرارتی و الکتریکی از کاربردهای متنوعی برخوردار است و حجم بسیار زیادی از تولید جهانی آن به صورت کامپوزیت مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲، ۱].

راو مین وانگ و همکاران در تحقیقاتشان نشان دادند که کامپوزیت‌های زمینه پلیمری از رایج‌ترین دسته کامپوزیت‌ها هستند. مواد پلیمری مانند اپوکسی و پلی استرها در مقایسه با فلزات، خواص مکانیکی خیلی بالا ندارند. به عنوان مثال استحکام کششی قوی ترین پلیمرها، رزین اپوکسی ۱۴۰ مگاپاسکال است و علاوه بر استحکام کم، مقاومت به ضربه این پلیمرها نیز کم است. در کامپوزیت‌های زمینه پلیمری الیاف تقویت کننده باید خواص مکانیکی از جمله استحکام کششی بسیار بالایی نسبت به زمینه پلیمری داشته باشند. با افزایش تقویت کننده به زمینه پلیمری استحکام کششی و مدول کشسانی کامپوزیت افزایش می‌یابد. در موقع اعمال بار قسمت اعظم نیرو توسط الیاف تحمل می‌شود و زمینه پلیمری در واقع ضمن حفاظت الیاف از صدمات فیزیکی و شیمیایی، کار انتقال نیرو به الیاف را انجام می‌دهد. در ضمن زمینه الیاف را مانند یک چسب کنار هم نگه می‌دارد و البته گسترش ترک را محدود می‌کند [۳]. بوری و همکاران استفاده از موادی همچون اپوکسی با الیاف شیشه را گرایشی نوین می‌داند [۴]. وی معتقد است این مواد دارای مزایای همسان با فایبرگلاس، اما قوی‌تر و سبک‌تر و بسیارگران قیمت‌تر هستند و بر خلاف پلی استر چنانچه در معرض آب و اشعه‌ی فرابنفش، به ویژه آب دریا قرار گیرد آسیب نمی‌بیند. بدین ترتیب، این نوع از قایق، از طریق لایه خارجی محافظتی و یک لایه‌ی داخلی دیگر پوشانده می‌شود. بنابراین، نگهداری مناسب از این لایه‌ها، در مدت زمان عمر مفید قایق موثر است. پیش از این بررسی‌های گسترده‌ای بر روی کامپوزیت‌های لایه‌ای به صورت عام انجام شده است که در جای جای صنعت و به طور خاص در صنعت ساختمان مورد توجه است.

همچنین هوآون و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۰، به روش تحلیلی و عددی استحکام نهایی کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف پیوسته و ناپیوسته کربنی تک لایه تک جهته را بررسی نموده که البته ساده ترین ترکیب از کامپوزیت‌های لایه‌ای محسوب می‌گردد. ایشان بیان کردند که بطور کلی تقویت زمینه کامپوزیت‌ها با استفاده از الیاف کربنی مقادیر کرنش‌ها را کاهش داده و سبب

² Carbon Fiber Reinforced Polymer¹ Steel Shear Wall

سازه می‌شود. همچنین تا حدود ۸۰ درصد ظرفیت نهایی خود این سیستم‌ها دارای رفتار خطی هستند.

تحقیقاتی به صورت آزمایشگاهی و عددی بر روی دیوارهای برشی فولادی تحت اثر الیاف کامپوزیت، با توجه به کاربرد روزافزون اینگونه سیستم جدید در دنیا صورت گرفته است. صدیقی و همکاران در سال ۲۰۲۱ بر روی اثرات اندرکنش قاب-دیوار در دیوارهای برشی فولادی همراه با الیاف تحقیقات جامعی انجام دادند، آنها نشان دادند که وجود الیاف سبب افزایش سختی سکانت و جذب انرژی بیشتر در سازه می‌گردد [۱۶]. همچنین سایر محققین نشان دادند که انواع سایر الیاف‌های کامپوزیتی مانند کربن، شیشه و آرامید نیز تأثیر بسزایی در تقویت دیوارهای برشی فولادی دارند، آنها با بررسی متغیرهایی از قبیل وجود بازشو در دیوارهای برشی و تقویت قسمت‌هایی از این سیستم، یا با تغییر نحوه چیدمان الیاف به صورت افقی، عمودی، قطری و صلیبی، ظرفیت باربری و عملکرد لرزه ای این سازه‌ها را بررسی نمودند [۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰].

برای تحلیل استاتیکی یک سازه کامپوزیتی ساخته شده از لایه‌های مختلف، با توجه به این نکته که خواص کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف در راستاهای مختلف، متفاوت است باید یکسری پارامتر برای بدست آوردن بهینه‌ترین حالت تنش و خیز سازه در نظر گرفته شود که از جمله این پارامتر می‌توان به افزودن تقویت‌کننده-ها، تأثیر جهت‌گیری‌های مختلف الیاف، تأثیر تعداد و ضخامت لایه-ها و بررسی الیاف‌های مختلف اشاره نمود. این مقاله به بررسی تحلیل اجزاء محدود تأثیر زاویه قرارگیری الیاف کامپوزیت چندلایه‌ای سازه‌ای تحت اثر بارگذاری چرخه ای می‌پردازد.

۲. معرفی مدل‌ها

به منظور بررسی رفتار مطلوب در این مقاله، ۱۶ نمونه از دیوار برشی فولادی همراه با الیاف کربن مدل سازی شد. در مدلسازی از پروفیل بال پهن نمره ۲۰ بعنوان المان‌های تیر و ستون، از ورق فولادی با ضخامت‌های ۰/۸، ۱ و ۱/۵ میلیمتر و به ابعاد ۱۶*۳/۸ متر جهت نمونه‌های مختلف بعنوان ورق پرکننده دیوار استفاده شده است. ابعاد دهانه پانل‌ها در تمامی مدل‌ها ۴ متر و ارتفاع پانل‌ها ۲ متر در نظر گرفته شده است. مصالح غیرخطی فولاد A572 برای تیر و ستون‌ها (تنشی معادل ۳۴۵ مگاپاسکال) و مصالح با تنش

افزایش مقاومت کششی و چقرمگی شکست می‌شود. نتایج بدست آمده از این تحقیق با برخی نتایج تجربی، مورد مقایسه قرار گرفته و صحت پیش‌بینی‌های حاصل از این روش را تأیید نموده است. همچنین نتایج آنها نشان داد که حل عددی روشی بسیار سریع و آسان به منظور پیش‌بینی دقیق رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های تولید شده با الیاف می‌باشد. همچنین برخی تلاش نموده اند تا نحوه پیشروی خرابی در سازه‌های کامپوزیتی تحت بارهای سازه‌ای را بررسی نمایند. خیرالدین و نادرپور [۶] در سال ۲۰۰۸ تلاش نمودند تا با استفاده از تئوری کاهش استحکام ورق کامپوزیتی را تحت بار خستگی خمشی مدل‌سازی کنند و اثر زاویه الیاف و چینش لایه‌ها در عمر خستگی آن را مورد بررسی قرار دهند.

رهایی و علیپور [۷] در پژوهشی که در نشریه زلزله شناسی و مهندسی زلزله در سال ۲۰۱۶ به چاپ رسیده است، اثر الیاف کامپوزیتی کربن در افزایش ظرفیت خمشی تیرهای بتن مسلح را بررسی نموده‌اند. ایشان در پژوهش خود روش تجربی را دنبال نموده‌اند و تلاش کردند تا اثر فیبر کربن در افزایش استحکام خمشی بتن مسلح را بررسی نمایند. در سال ۲۰۱۲ لی و همکاران [۸] کامپوزیت‌های لایه‌ای مهندسی کاغذ و فیبر کربن را مورد آنالیز خمشی سه‌بعدی قرار دادند. مقاطع I شکل با استفاده از تحلیل اجزا محدود و تحت خمش چهارنقطه‌ای مورد تحلیل قرار گرفتند. همچنین سو و ژو [۹] در سال ۲۰۰۵ تلاش کردند تا با استفاده از تکنیک قراردادی کامپوزیت در نزدیکی سطح و با استفاده از کامپوزیت‌های لایه‌ای تقویت شده با استفاده از فیبر کربن در شیارهای احتمالی سازه‌های بتنی، استحکام خمشی تیرهای بتنی را افزایش دهند. کامپوزیت‌ها موادی هستند که از ترکیب دو یا چند ماده مختلف ساخته شده‌اند که خواص آنها از خواص هر یک از اجزا به تنهایی بالاتر می‌باشد. بیشتر کامپوزیت‌ها از دو فاز زمینه و تقویت‌کننده تشکیل شده‌اند، که فاز زمینه، فاز پیوسته است که فاز تقویت‌کننده را احاطه می‌کند [۱۰]. محمد و همکارانش [۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵] در سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵، تحقیقات جامعی بر روی تسلیح دیوارهای برشی بتنی با میلگردهای کامپوزیت پلیمری شیشه‌ای^۳ در مقایسه با میلگردهای فولادی انجام دادند. آنها با مقایسه مقادیر تغییر مکان نسبی و ظرفیت نهایی باربری سازه دریافتند که تقویت سیستم دیوار برشی با الیاف‌های شیشه ای سبب رفتار مناسبی در برابر مقاومت جانبی

شامل غیرخطی هندسی و مصالح انجام شده است و معیار گسیختگی Von-mises می باشد. همچنین معیار سنجش تحلیل شبه استاتیکی با بررسی انرژی جنبشی سیستم کنترل می شود که باید طی تحلیل مقدار آن ناچیز باشد. برای تحلیل بارگذاری دوره‌ای از منحنی بارگذاری سیکلی شکل ۲ استفاده شده است.

آنالیز غیرخطی توسط نرم افزار المان محدود آباکوس که قابلیت حل مسائل با درجات غیرخطی بالا را دارد انجام شده است. جهت آنالیز مدل ها، از روش صریح^۵ استفاده شده است. روش ضمنی^۶ با توجه به اینکه از متدهای روش تکراری سعی و خطای مختلف مانند الگوریتم نیوتن رافسون یا الگوریتم ریکس^۷ استفاده می کند، با توجه به تغییر شکل ناگهانی خارج از صفحه ورق فولادی به علت توسعه میدان کششی سبب مشکلات همگرایی در تحلیل دیوار برشی فولادی شده و این امر منجر به ناپایداری موضعی در همگرایی و در نهایت سبب شکست نمونه میگردد، به دلیل موارد فوق، روش صریح دینامیکی غیرخطی جهت آنالیز نمونه‌ها انتخاب شده است.

۲-۲. آنالیز حساسیت مش بندی

برای دست یافتن به تعداد مش‌های بهینه مورد استفاده در هر کدام از بخش‌های مدل و با کاهش دادن درصد خطای حاصل از مش بندی بزرگ و چلوگیری از صرف زمان زیاد تحلیل حاصل از مش بندی بسیار ریز، تحلیل همگرایی مش بندی صورت گرفته است. برای این منظور ۳ مقدار مختلف برای تعداد مش‌ها در نظر گرفته شده و همچنین تاثیر نوع المان بر پاسخ سازه شامل انرژی کل مورد ارزیابی قرار می گیرد. ابعاد تقریبی و تعداد المان‌ها در دوتنوع مختلف در جدول شماره ۱ آورده شده است. همانگونه که در جدول شماره ۱ مشهود است و با توجه به تحلیل حساسیت هر کدام از نمونه و بررسی انرژی کل هر یک از حالت‌ها، با توجه به همگرا شدن سازه در اندازه المان‌ها در ۱۰ سانتی متر، از المان مکعبی شش وجهی هشت نقطه‌ای مورد استفاده در تحلیل های این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است.

تسلیم حداقل ۱۶۵ مگاپاسکال برای ورق‌های دیوار برشی فولادی در نظر گرفته شده است. ورق‌های کربن با مدول الاستیسیته ۱۶۵ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰.۱۲ و مقاومت کششی نهایی ۲۴۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است.

در تمامی مدل‌ها اتصال تیر به ستون، صلب و اتصال ورق به تیر و ستون به صورت مفصلی مدلسازی شده است. با توجه به اینکه ورق‌های پرکننده دیوار از جمله پوسته‌های با ضخامت نازک تلقی می گردند، بنابراین المان پوسته بهترین گزینه برای مدلسازی آن‌ها به نظر می رسد. برای در نظر گرفتن کمانش جانبی، کلیه المان‌های مرزی، الیاف و ورق‌ها با المان پوسته^۴ مدلسازی شده که این یک المان چهار گرهی است که هر گره آن شش درجه آزادی (سه درجه آزادی تغییر مکانی و سه درجه آزادی دورانی) دارد. استفاده از آن در المان بندی کاملاً^۸ مثلثی توصیه نمی شود، ولی می توان از آن به عنوان المان مثلثی پرکننده در تکمیل المان بندی مستطیلی استفاده کرد. در این تحقیق کلیه المان بندی‌ها مستطیلی می باشد. این المان برای تحلیل‌های خطی و همچنین تحلیل‌های غیرخطی تغییر شکل‌های بزرگ و کرنش‌های بزرگ مناسب می باشد. تغییرات ایجاد شده در ضخامت پوسته در تحلیل‌های غیرخطی در نظر گرفته می شود. امکان حل مسائل تحلیل خمیری، تحلیل مواد هایپروالاستیک، مواد ویسکوالاستیک و ویسکوپلاستیک، سخت شدگی هندسی، خزش در این المان در نظر گرفته شده است. در مدلسازی اعضای مرزی، هرچند که می توان آن‌ها را با المان Beam مدل کرد، اما بعلت در نظر گرفتن کمانش موضعی در آن‌ها از المان پوسته در مدلسازی آن‌ها استفاده شده است. در شکل ۱، نمونه مدلسازی شده دیوار برشی فولادی به همراه مش بندی نشان داده شده است.

۱-۲. شرایط مرزی و بارگذاری

در کلیه مدل درجات آزادی فعال در گره‌های تراز سقف، درجات آزادی انتقالی داخل صفحه و چرخش حول محورها است و برای اعضای تیر و ستون درجات آزادی انتقالی خارج از صفحه بسته شده است. در گره‌های تراز پایه همه درجات آزادی انتقالی، عمود بر صفحه بسته شده است. همه مدل‌ها با اعمال تغییر مکان کناری در گره‌های اتصال تیر به ورق فولادی بارگذاری شده است. پیش بینی رفتار مدل‌های مورد نظر بر اساس تحلیل استاتیکی غیرخطی

⁶ Implicit

⁷ Riks

⁴ S4R

⁵ Explicit

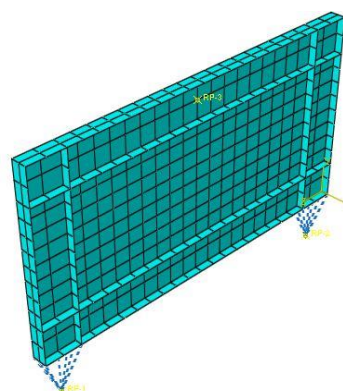
جدول ۱. ابعاد، تعداد و نوع المان‌های بررسی شده در آنالیز حساسیت

المان سه بعدی شش وجهی هشت نقطه‌ای		المان سه بعدی چهار وجهی چهار نقطه‌ای	
C3D8R		C3D4	
اندازه تقریبی (متر)	۰.۰۲	اندازه تقریبی (متر)	۰.۰۲
تعداد المان‌ها	۱۴۵۳۲	تعداد المان‌ها	۵۶۷۸۱
اندازه تقریبی (متر)	۰.۰۵	اندازه تقریبی (متر)	۰.۰۵
تعداد المان‌ها	۳۹۵۱	تعداد المان‌ها	۳۸۵۴۴
اندازه تقریبی (متر)	۰.۱	اندازه تقریبی (متر)	۰.۱
تعداد المان‌ها	۹۸۶	تعداد المان‌ها	۷۵۶۹

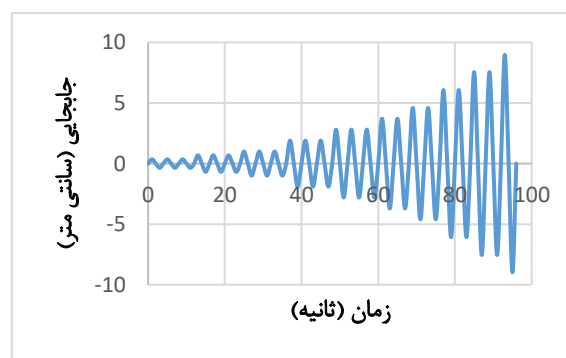
لایه‌ها مدل‌سازی شد که مشخصات مدل‌های مورد بررسی در جدول شماره ۲ آورده شده است.

جدول ۲. مشخصات هندسی نمونه‌های مدل‌سازی شده دیوارهای برشی فولادی با الیاف کربن

نام مدل	تعداد لایه الیاف کربن	زاویه قرارگیری الیاف	جهت قرار گیری الیاف
SPSW	۰	۰	نمونه گواه (مینا)
SPSW1	۱	۳۰	مثبت
SPSW2	۱	۴۵	مثبت
SPSW3	۱	۶۰	مثبت
SPSW4	۱	۹۰	مثبت
SPSW5	۱	۳۰	منفی
SPSW6	۱	۴۵	منفی
SPSW7	۱	۶۰	منفی
SPSW8	۱	۹۰	منفی
SPSW9	۲	(30)-(30)	مثبت-مثبت
SPSW10	۲	(30)-(-30)	مثبت-منفی
SPSW11	۲	(45)-(60)	مثبت-مثبت
SPSW12	۲	(-45)-(60)	منفی-مثبت
SPSW13	۳	(30)-(90)-(30)	مثبت-مثبت-مثبت
SPSW14	۳	(30)-(90)-(-30)	مثبت-مثبت-منفی
SPSW15	۳	(45)-(90)-(45)	مثبت-مثبت-مثبت
SPSW16	۳	(-45)-(90)-(45)	منفی-مثبت-مثبت



شکل ۱. نمونه مدل‌سازی شده دیواربرشی فولادی

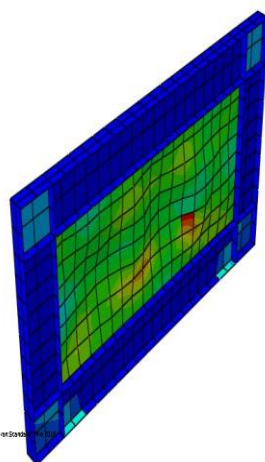
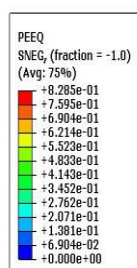


شکل ۲. منحنی بارگذاری سیکلی

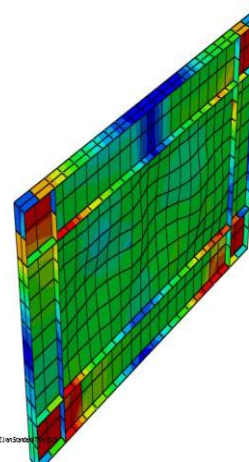
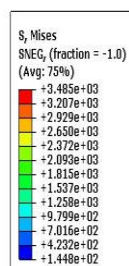
برای تحلیل بارگذاری چرخه‌ای از منحنی بارگذاری سیکلی شکل ۲ استفاده شده است. همانگونه که مشهود است نوع بارگذاری به صورت سیکلیک فزاینده از نوع جابجایی کنترل می‌باشد. در این پژوهش برای این که بتوان تا حد مطلوبی رفتار مورد نظر را مطالعه کرد، ۱۶ نمونه از دیوار برشی فولادی در حالت بدون تقویت و تقویت شده با الیاف کربن تحت تعداد و زوایای مختلف

گواه)، نمودارهای کانتور تنش و منحنی‌های هیستریزس برای هریک از شانزده نمونه ساخته شده استخراج گردید که در شکل‌های ۳ الی ۱۵ به نمایش در آمده است.

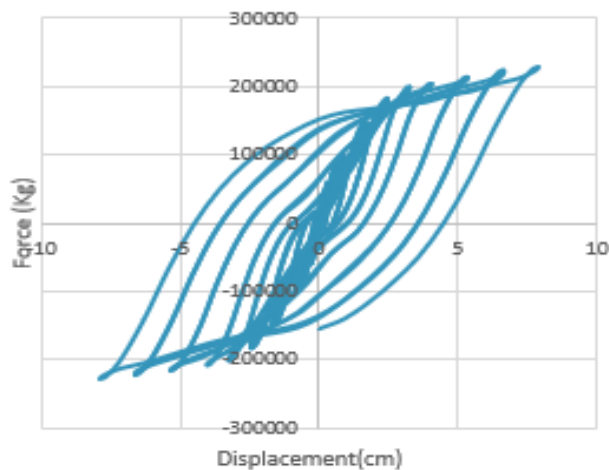
۳. اثر تعداد لایه‌های متفاوت و زوایای مختلف قرارگیری الیاف پس از انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی، به منظور مقایسه عملکرد لرزه‌ای قاب‌های تقویت شده با الیاف کربن تحت زوایا و تعداد لایه‌های مختلف در مقایسه با نمونه بدون تقویت (نمونه



(ب)

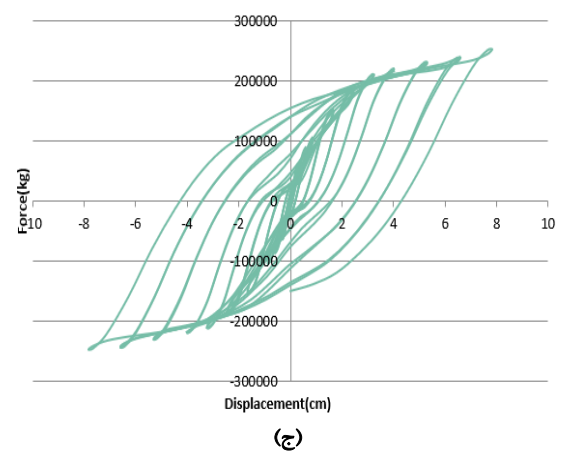
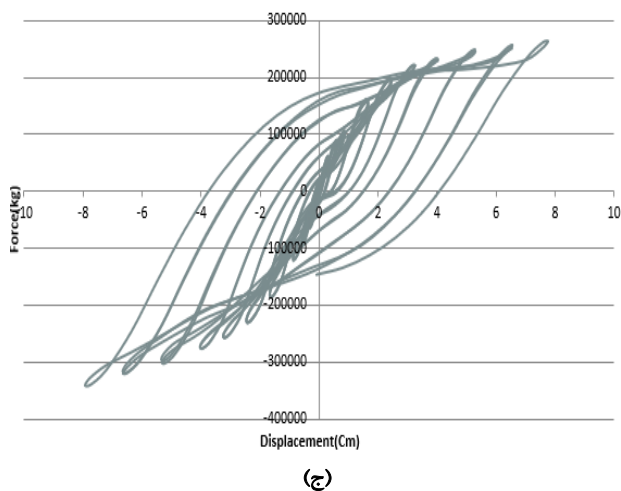
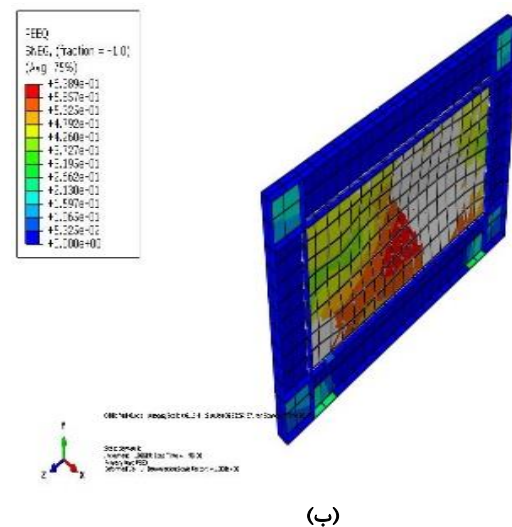
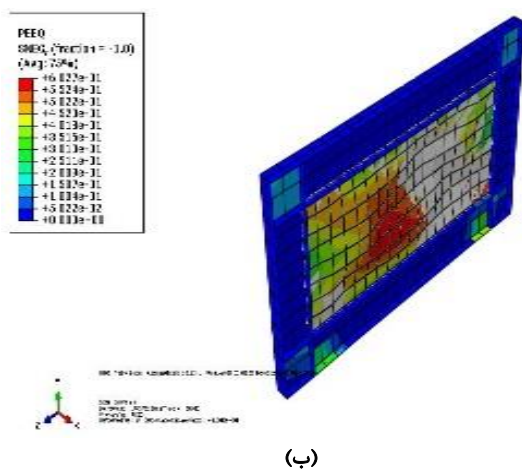
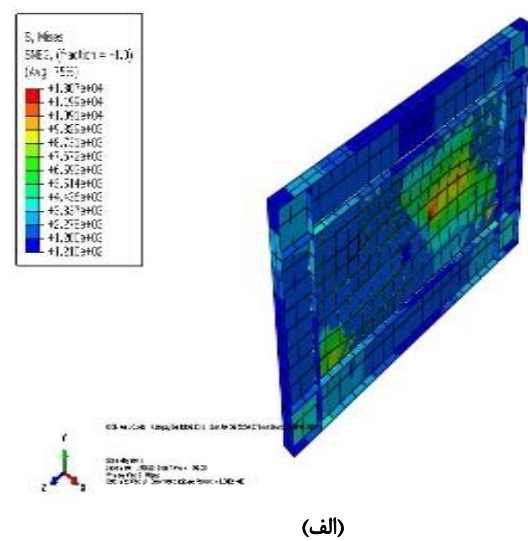
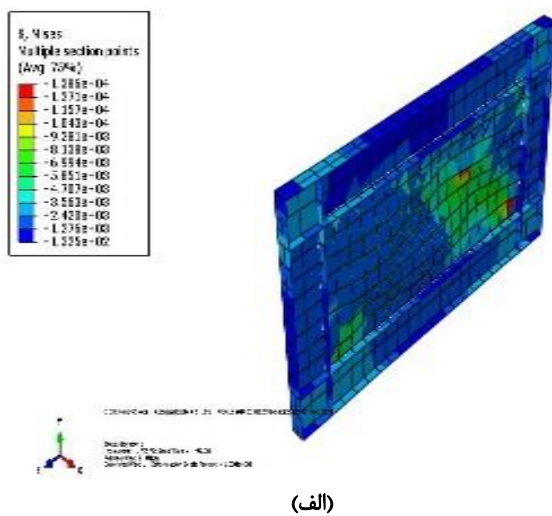


(الف)



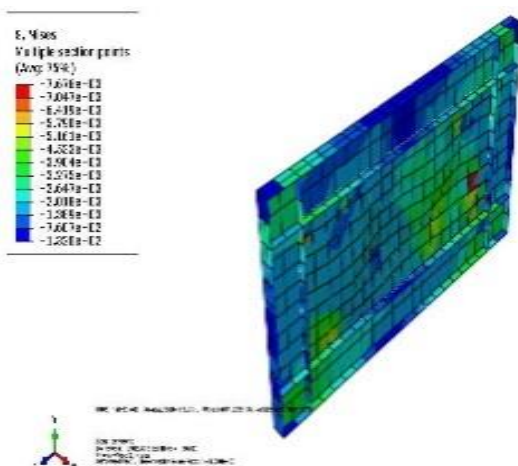
(ج)

شکل ۳. نمودار نمونه گواه SPSW (الف) کانتور تنش فون میسز، (ب) کانتور کرنش پلاستیک معادل، (ج) نمودار منحنی هیستریزس

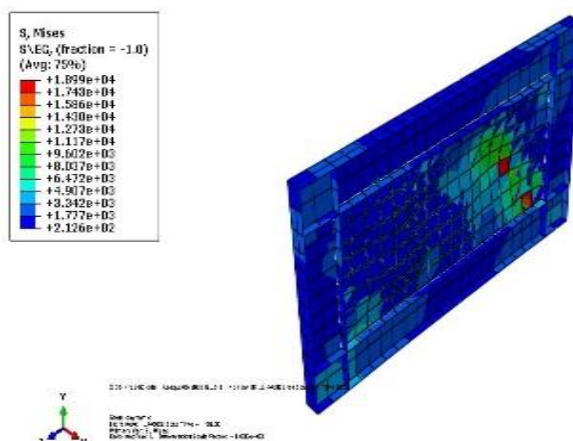


شکل ۵. نمودار نمونه SPSW2 (الف) کانتور تنش فون میسز، (ب) کانتور کرنش پلاستیک معادل، (ج) نمودار منحنی هیستریزس

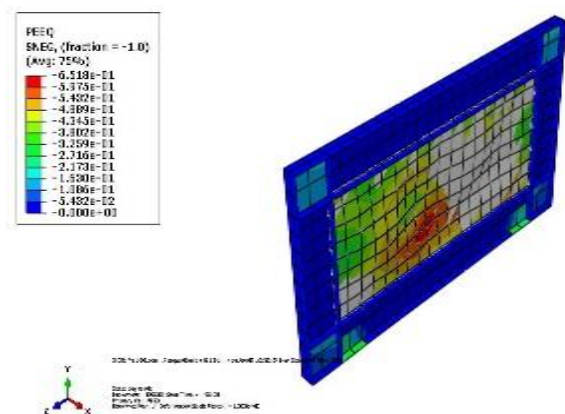
شکل ۴. نمودار نمونه SPSW1 (الف) کانتور تنش فون میسز، (ب) کانتور کرنش پلاستیک معادل، (ج) نمودار منحنی هیستریزس



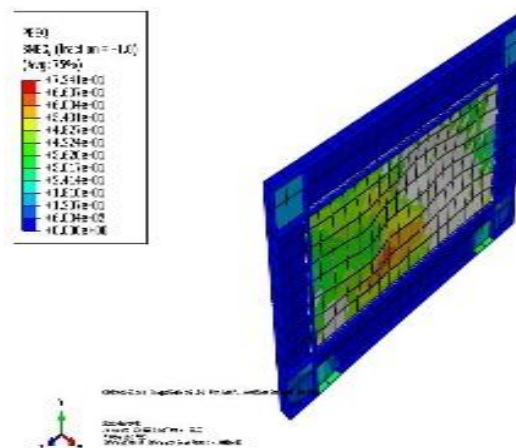
(الف)



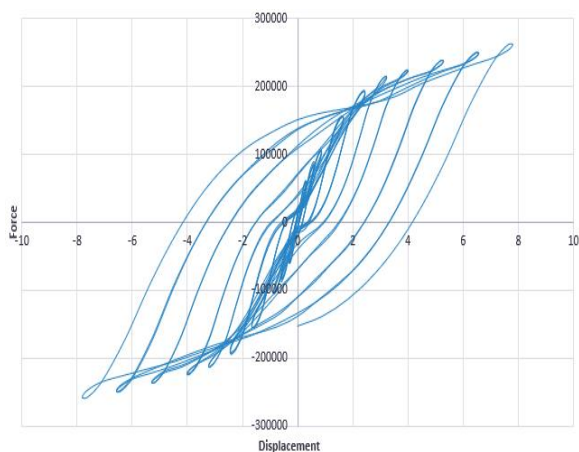
(الف)



(ب)

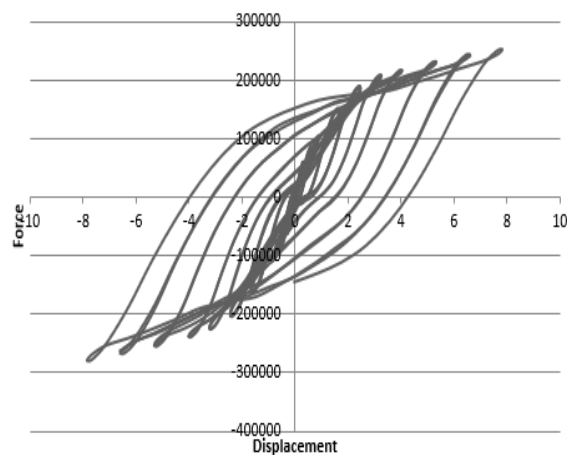


(ب)



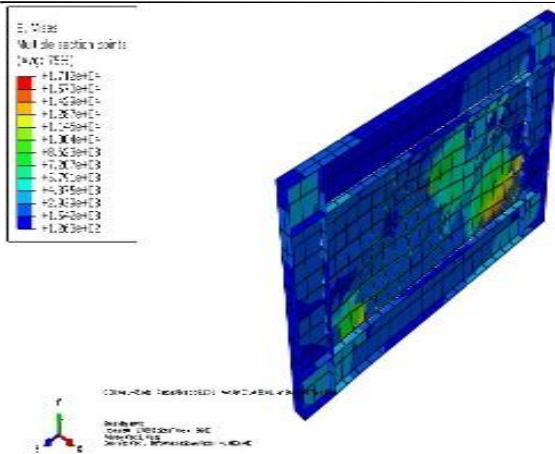
(ج)

شکل ۷. نمودار نمونه SPSW4 (الف) کانتور تنش فون میسز، (ب) کانتور کرنش پلاستیک معادل، (ج) نمودار منحنی هیستریزس

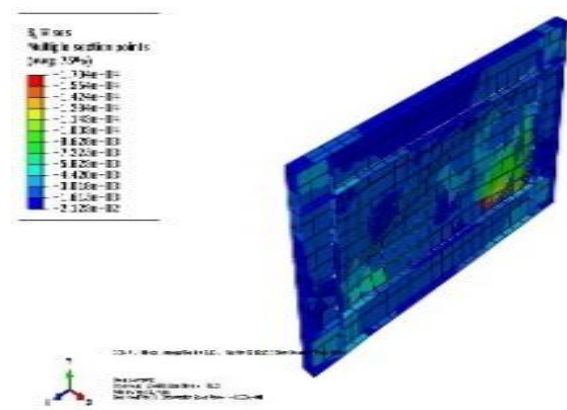


(ج)

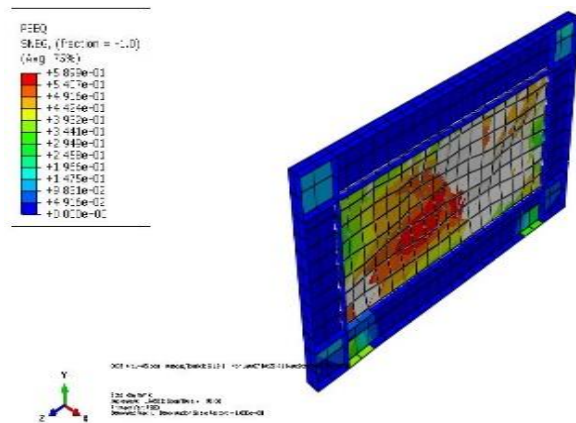
شکل ۸. نمودار نمونه SPSW3 (الف) کانتور تنش فون میسز، (ب) کانتور کرنش پلاستیک معادل، (ج) نمودار منحنی هیستریزس



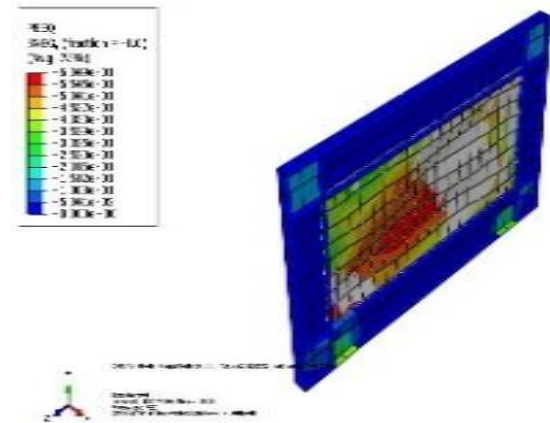
(الف)



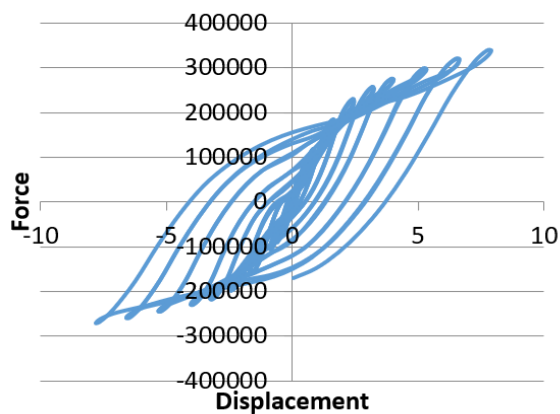
(الف)



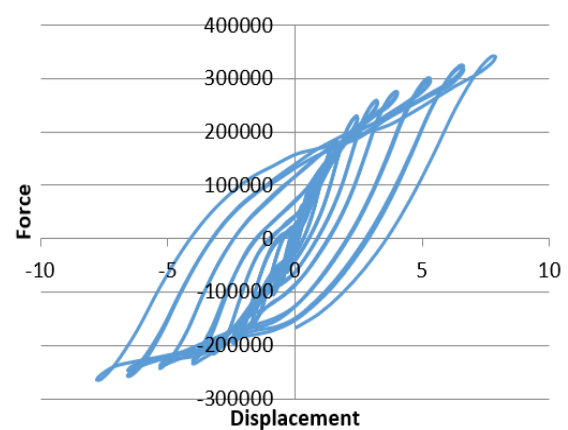
(ب)



(ب)



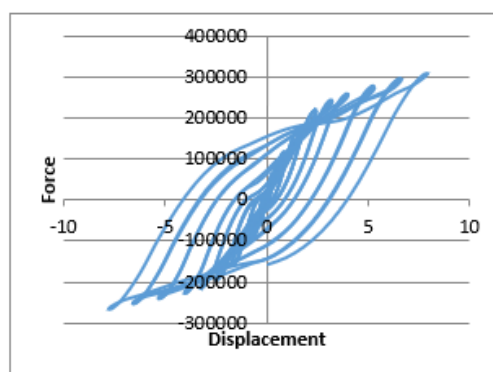
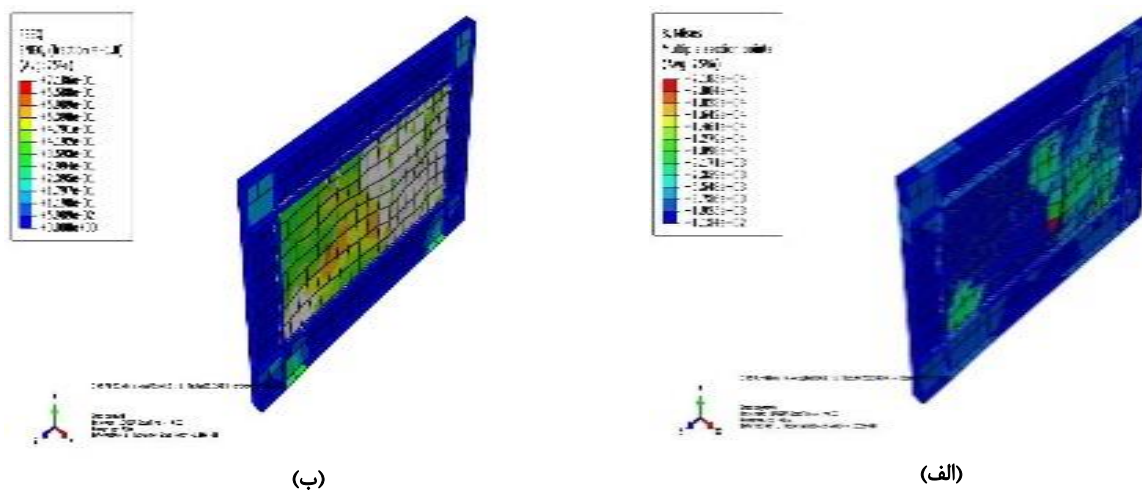
(ج)



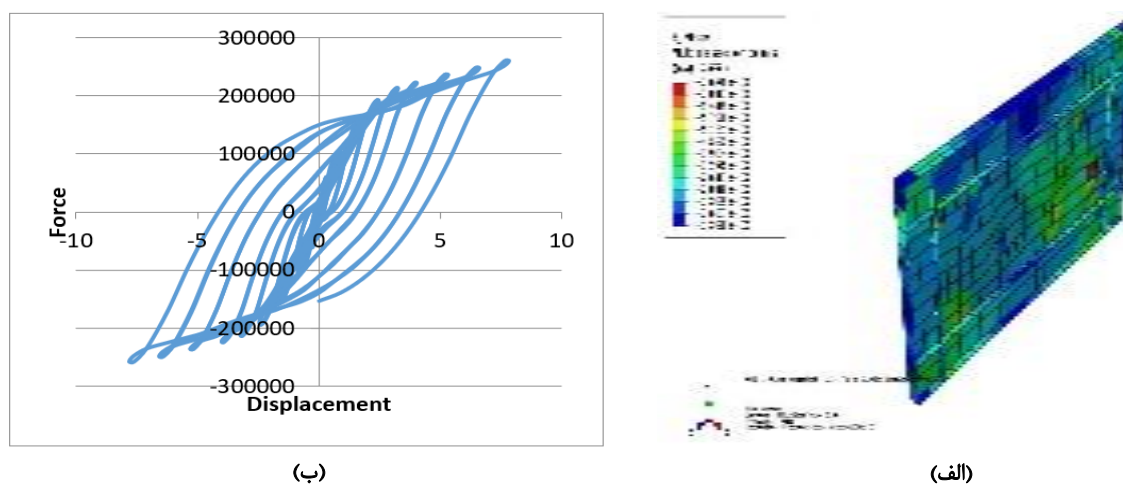
(ج)

شکل ۹. نمودار نمونه SPSW6 (الف) کانتور تنش فون میسز، (ب) کانتور کرنش پلاستیک معادل، (ج) نمودار منحنی هیستریزس

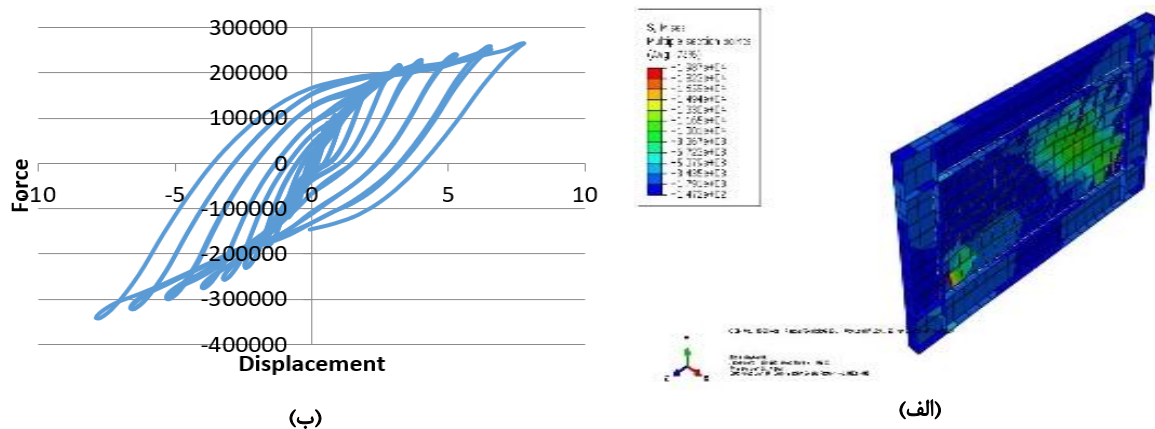
شکل ۸. نمودار نمونه SPSW5 (الف) کانتور تنش فون میسز، (ب) کانتور کرنش پلاستیک معادل، (ج) نمودار منحنی هیستریزس



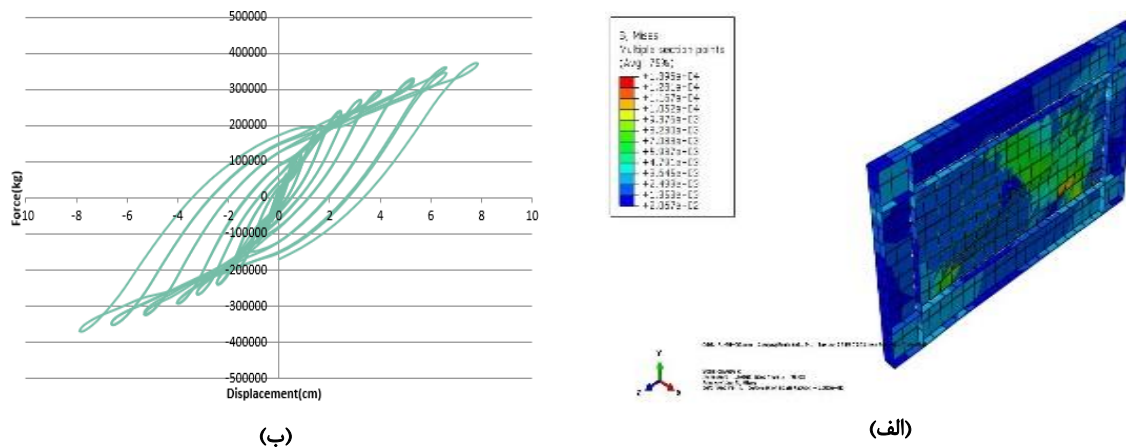
شکل ۱۰. نمودار نمونه SPSW7 (الف) کانتور تنش فون میسز، (ب) کانتور کرنش پلاستیک معادل، (ج) نمودار منحنی هیستریزس



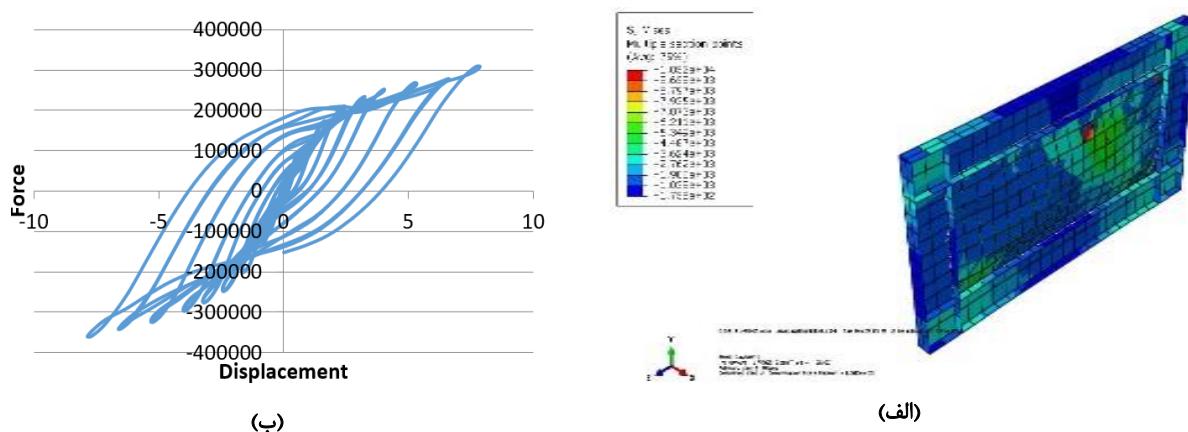
شکل ۱۱. نمودار نمونه SPSW8 (الف): کانتور تنش فون میسز، (ب) نمودار منحنی هیستریزس



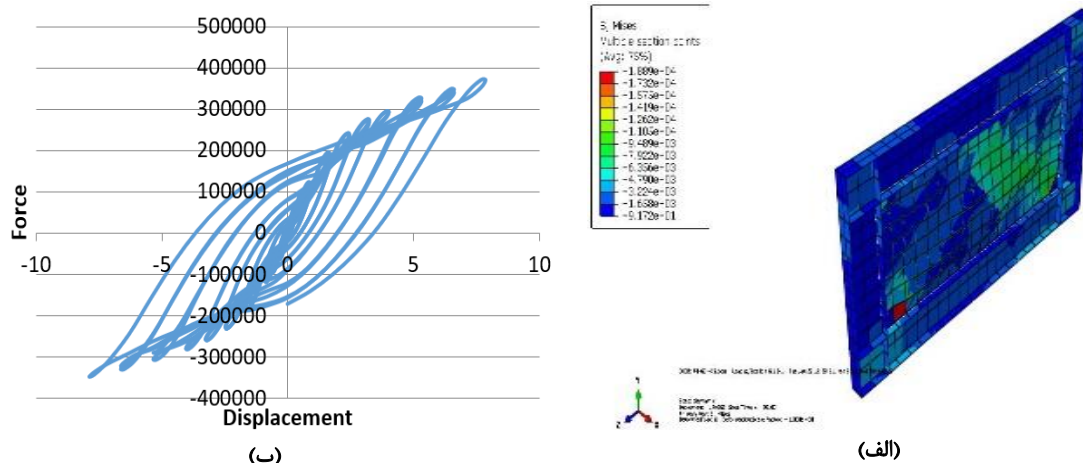
شکل ۱۲. نمودار نمونه (الف) کانتور تنش فون میسز، (ب) نمودار منحنی هیستریزس



شکل ۱۳. نمودار نمونه SPSW10 (الف) کانتور تنش فون میسز، (ب) نمودار منحنی هیستریزس



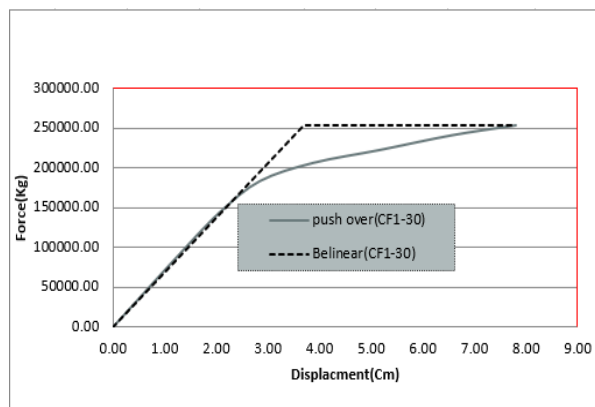
شکل ۱۴. نمودار نمونه SPSW11 (الف) کانتور تنش فون میسز، (ب) نمودار منحنی هیستریزس



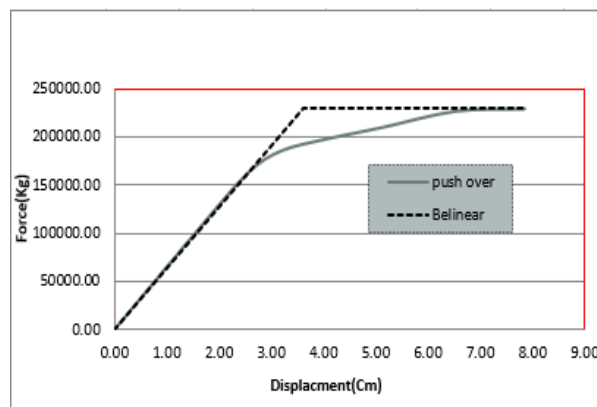
شکل ۱۵. نمودار نمونه SPSW12 (الف) کانتور تنش فون میسز، (ب) نمودار منحنی هیستریزس

۲۷٪ رخ داده است. همچنین میزان افزایش استهلاک انرژی در باقی نمونه‌ها در حالت استفاده از دو الیاف کربن، نمونه SPSW12 نیز با افزایش ۷۶٪ دارای مقدار حداکثری می‌باشد. نکته بسیار مهم در ارتباط با نمونه های تقویت شده با دو الیاف کربن، موقعیت و جهت قرارگیری لایه های CFRP می‌باشد. همانگونه که مشهود است، جهت قرارگیری الیاف با زاویه مثبت-منفی در نمونه‌های دیوار برشی فولادی (SPSW10 و SPSW12) تقریباً دارای ۱۴٪ افزایش در مقدار جذب انرژی نسبت به نمونه‌هایی با زاویه مشابه و جهت قرارگیری متفاوت مثبت-مثبت می‌باشد. همچنین با توجه به مقادیر خروجی، میزان افزایش شکل پذیری و جذب انرژی در حالت استفاده از ۳ لایه CFRP تنها ۴٪ افزایش نسبت به حالت استفاده از دو لایه کربن می‌باشد که با توجه به عدم توجیه اقتصادی، بهینه‌ترین حالت، در نمونه‌های SPSW12 می‌باشد. همچنین جهت بررسی بیشتر، نمودار پوش‌اور برای تمامی مدل‌ها و نمودار دوطبقی به دست آورده شده است.

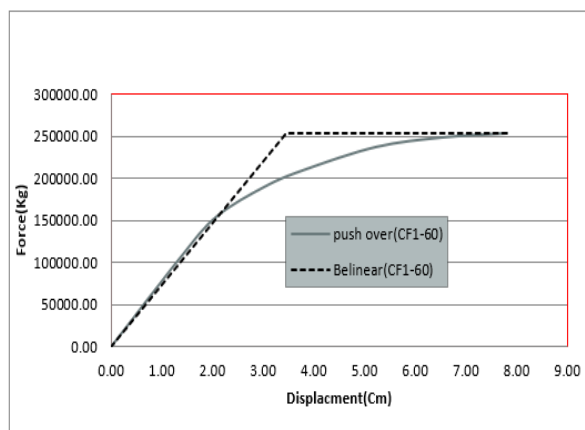
همانگونه که در نمودارهای هیستریزس و کانتور تنش مشهود است، بیشینه مقدار تنش طبق بررسی‌ها و نتایج به دست آمده از تحلیل المان محدود در این پژوهش مشخص گردید که استفاده از ورقه‌های کربن به میزان قابل توجهی مقاومت نمونه‌ها را افزایش می‌دهد. بسته به تعداد الیاف مصرفی، جهت و زوایای قرارگیری الیاف میزان افزایش مقاومت متفاوت خواهد بود. استهلاک انرژی نمونه‌های تقویت شده با الیاف نسبت به نمونه تقویت نشده افزایش داشته است. استهلاک انرژی به دست آمده از تحلیل المان محدود نشان می‌دهد که همانطور که انتظار می‌رفت استهلاک انرژی با افزایش همراه شود ولی این افزایش بستگی به عوامل متعددی دارد از جمله اینکه از چه تعداد الیافی در تحلیل استفاده شود و یا اینکه جهت قرارگیری الیاف به چه صورت باشد. طبق نتایج به دست آمده از تحلیل‌ها مربوط به حالت استفاده از یک لایه کربن، بیشترین افزایش میزان استهلاک انرژی در نمونه SPSW3 به میزان ۶۴٪ و کمترین افزایش در نمونه SPSW4 با افزایش



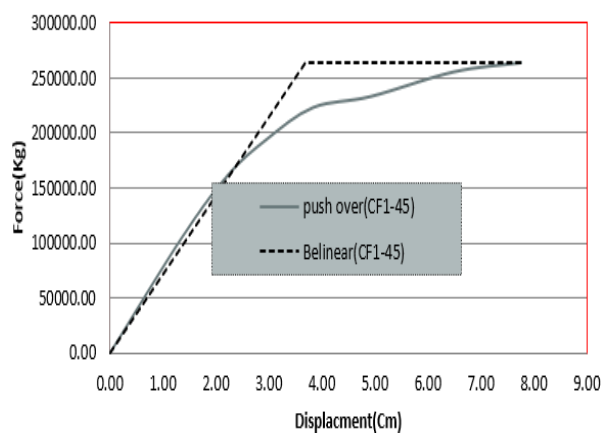
SPSW1 (ب)



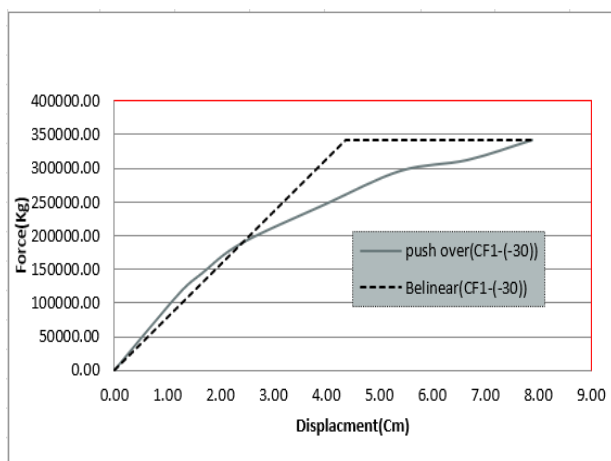
SPSW3 نمونه گواه (الف)



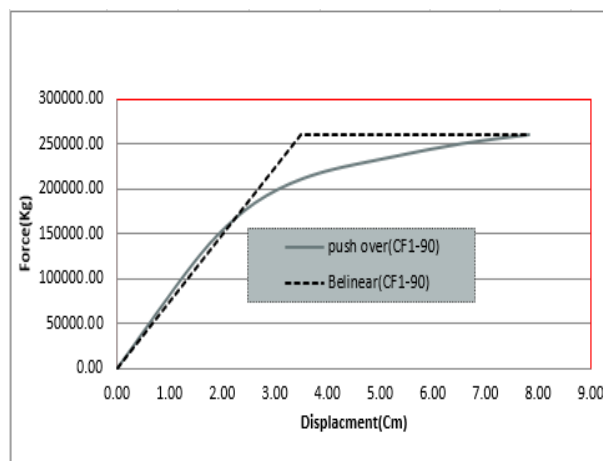
SPSW3 (د)



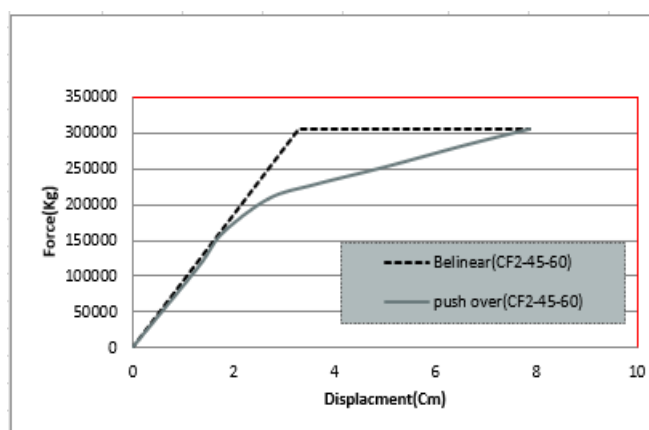
SPSW2 (ج)



SPSW5 (ه)



SPSW4 (و)



SPSW11 (ی)

شکل ۱۷. نمودار پوش اور و دوخطی برای تعدادی از نمونه های مورد آنالیز

۴. نتیجه گیری

نتایج کلیدی حاصل از تحقیق به شرح زیر است:

استفاده از ورق های تقویت در اطراف دیوار برشی فولادی باعث ایجاد بهترین پاسخ در در عملکرد سازه خواهد شد.

دیوارهای برشی تقویت شده با الیاف کربن نسبت به نوع فولادی از مقاومت، شکل پذیری و ظرفیت جذب انرژی بیشتری برخوردار می باشد. همانطور که مشاهده شد، استفاده از الیاف در بیشتر نمونه های مورد آنالیز با افزایش ۴۰ درصدی در مقدار استهلاک و جذب انرژی، سبب بهبود عملکرد لرزه ای این سازه ها شده است که این مورد برای یک سیستم باربر جانبی می تواند یک مزیت مطلوب محسوب گردد.

تعداد لایه های الیاف به کار رفته در نمونه ها نیز در پارامترهای لرزه ای مؤثر است. نمونه تقویت شده با ۱ لایه الیاف مقاومت، استهلاک انرژی و شکل پذیری کمتری نسبت به نمونه دارای ۲ لایه دارد. افزایش مقاومت و استهلاک انرژی در نمونه با ۱ لایه به ترتیب ۴۲٪ و ۶۴٪ می باشد در صورتیکه افزایش مقاومت و استهلاک انرژی در نمونه با ۴ لایه به ترتیب ۵۸٪ و ۷۶٪ است.

از عوامل مهم دیگر نقش زاویه قرارگیری الیاف می باشد. مقاومت و استهلاک انرژی در نمونه های تقویت شده با الیاف با زاویه ۶۰ درجه و ۴۵ درجه بیشترین افزایش را دارند و بالعکس نمونه با زاویه ۰ و ۹۰ کمترین افزایش را در مقاومت و استهلاک انرژی دارند.

References

- [1] Poul, M.K., Nateghi-Alahi, F. and Zhao, X.L., 2016. Experimental testing on CFRP strengthened thin steel plates under shear loading. *Thin-walled structures*, 109, pp.217-226.
- [2] Bui, T.L., Larbi, A.S., Reboul, N. and Ferrier, E., 2015. Shear behavior of masonry walls strengthened by external bonded FRP and TRC. *Composite Structures*, 132, pp.923-932.
- [3] Wang, M., Yang, W., Shi, Y. and Xu, J., 2015. Seismic behaviors of steel plate shear wall structures with construction details and materials. *Journal of Constructional Steel Research*, 107, pp.194-210.
- [4] Borri, A., Castori, G., Corradi, M. and Sisti, R., 2014. Masonry wall panels with GFRP and steel-cord strengthening subjected to cyclic shear: An experimental study. *Construction and Building Materials*, 56, pp.63-73.
- [5] Huawen, Y., König, C., Ummenhofer, T., Shizhong, Q. and Plum, R., 2010. Fatigue performance of tension steel plates strengthened with prestressed CFRP laminates. *Journal of Composites for Construction*, 14(5), pp.609-615.
- [6] KHEYR, A.A. and Naderpour, H., 2008. Nonlinear finite element analysis of composite RC shear walls.
- [7] Rahai, A.R. and Alipoura, M., 2011. Behavior and characteristics of innovative composite plate shear walls. *Procedia Engineering*, 14, pp.3205-3212.
- [8] Li, B., Qian, K. and Tran, C.T.N., 2013. Retrofitting earthquake-damaged RC structural walls with openings by externally bonded FRP strips and sheets. *Journal of Composites for Construction*, 17(2), pp.259-270.
- [9] Su, R.K.L. and Zhu, Y., 2005. Experimental and numerical studies of external steel plate strengthened reinforced concrete coupling beams. *Engineering structures*, 27(10), pp.1537-1550.
- [10] Hau, K.K., Zhijun, L., Balendra, T. and Kiang Hwee, T., 2005. Finite Element Modelling of Cyclic Behaviour of Shear Wall Structure Retrofitting With GFRP.
- [11] Mohamed, N., Farghaly, A.S., Benmokrane, B. and Neale, K.W., 2014. Flexure and shear deformation of GFRP-reinforced shear walls. *Journal of Composites for Construction*, 18(2), p.04013044.
- [12] Mohamed, N., Farghaly, A.S., Benmokrane, B. and Neale, K.W., 2014. Experimental investigation of concrete shear walls reinforced with glass fiber-reinforced bars under lateral cyclic loading. *Journal of Composites for Construction*, 18(3), p.A4014001.
- [13] Mohamed, N., Farghaly, A.S. and Benmokrane, B., 2015. Aspects of Deformability of Concrete Shear Walls Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Bars. *Journal of composites for construction*, 19(5), p.06014001.
- [14] Mohamed, N., Farghaly, A.S., Benmokrane, B. and Neale, K.W., 2014. Numerical simulation of mid-rise concrete shear walls reinforced with GFRP bars subjected to lateral displacement reversals. *Engineering structures*, 73, pp.62-71.
- [15] Mohamed, N., Farghaly, A.S., Benmokrane, B. and Neale, K.W., 2014. Drift capacity design of shear walls reinforced with glass fiber-reinforced

- polymer bars. *ACI structural Journal*, 111(6), p.1397.
- [16] Seddighi, M., Barkhordari, M.A. and Hosseinzadeh, S.A.A., 2021. The Wall-Frame Interaction in Composite FRP-Steel Plate Shear Walls. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, pp.1-24.
- [17] Song, X., Huang, Z., Shen, J. and Yao, Y., 2020, December. Experimental study on cyclic behavior of hybrid CFRP grids-steel shear walls. In *Structures* (Vol. 28, pp. 496-511). Elsevier.
- [18] Seddighi, M., Barkhordari, M.A. and Hosseinzadeh, S.A.A., 2019. Behavior of FRP-reinforced steel plate shear walls with various reinforcement designs. *Steel and Composite Structures*, 33(5), pp.729-746.
- [19] Dakhel, M., Donchev, T. and Hadavinia, H., 2019. Behaviour of connections for hybrid FRP/steel shear walls. *Thin-Walled Structures*, 134, pp.52-60.
- [20] Ren, F., Chen, J., Chen, G., Guo, Y. and Jiang, T., 2018. Seismic behavior of composite shear walls incorporating concrete-filled steel and FRP tubes as boundary elements. *Engineering Structures*, 168, pp.405-419.
- [21] Council, A., 1992. Guidelines for cyclic seismic testing of component of steel structures. Redwood City, CA: ATC-24.