



## Investigation of the behaviour of trapezoidal corrugated steel shear wall reinforced by reinforced polymer fibbers under impact loads

Mohammad Reza Farhamand<sup>1</sup>, Mehran Iranpour<sup>2\*</sup>

*1 - Master's student in civil engineering, Lanjan Branch Islamic Azad University, Lanjan, Iran*

*\*2 - Assistant Professor, Lanjan Branch Islamic Azad University, Lanjan, Iran*

Received: 15 January 2025; Revised: 24 January 2025; Accepted: 30 January 2025; Published: 21 March 2025

### ABSTRACT

*In this study, the behavior of trapezoidally corrugated steel shear walls under impact loads caused by TNT explosions was investigated in both normal and AFRP-reinforced conditions. To achieve this, the steel shear wall was first modeled using Abaqus software, and the results from cyclic loading were compared with experimental data to validate the software's accuracy. Subsequently, the shear wall was subjected to impact loading using TNT at various weights and distances, and its performance was analyzed in both normal and AFRP-reinforced states. The research methodology included steps such as modeling the shear wall, validating the model, applying impact loading, exposing the shear wall to explosive loads using TNT at different weights and distances, and finally examining the effect of AFRP strips on the wall's behavior under impact loads. The results demonstrated that using AFRP as a reinforcement reduced the final deformation caused by the explosion by 7% and 6%, respectively. Additionally, the plastic strains in the center of the steel plate decreased by 66% and 61% in the reinforced models. Furthermore, energy absorption in the reinforced models was 7% and 6% lower than in the normal models. These findings indicate that AFRP reinforcement significantly enhances the performance of trapezoidally corrugated steel shear walls under impact loads. This study highlights the importance of using advanced reinforcement methods like AFRP to improve the performance of steel shear walls under extreme loads and suggests that future research focus on utilizing more advanced composite materials and exploring different corrugation geometries.*

### Keywords:

Corrugated steel shear wall, AFRP polymer reinforcement sheet, control of plastic strain behaviour of steel shear wall

**Cite this article as** Iran pour mobarakeh, M. and Farahmand, M. (2025). Investigation of the behavior of trapezoidal corrugated steel shear wall reinforced by reinforced polymer fibers under impact load. *Civil and Project*, 7(1), -. <https://doi.org/10.22034/cpj.2025.500179.1340>

ISSN: 2676-511X / Copyright: © 2025 by the authors.

**Open Access:** This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

**Journal's Note:** CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

\*Corresponding author E-mail address: [Me.Iranpour@iau.ac.ir](mailto:Me.Iranpour@iau.ac.ir)



## نشریه عمران و پروژه

<http://www.cpjournals.com/>

# بررسی رفتار دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای تقویت شده توسط الیاف پلیمری مسلح تحت بارهای ضربه‌ای

محمدرضا فرهمند<sup>۱</sup>، مهران ایرانپور<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، واحد لنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لنجان، ایران  
۳- استادیار، واحد لنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لنجان، ایران

تاریخ دریافت: ۲۶ دی ۱۴۰۳؛ تاریخ بازنگری: ۰۵ بهمن ۱۴۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۱ بهمن ۱۴۰۳؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ فروردین ۱۴۰۴

## چکیده

در این پژوهش، رفتار دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای در برابر بارهای ضربه‌ای ناشی از انفجار TNT در دو حالت معمول و تقویت‌شده با AFRP مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، ابتدا دیوار برشی فولادی در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شد و نتایج حاصل از بارگذاری چرخه‌ای با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه گردید تا صحت عملکرد نرم‌افزار تأیید شود. در مرحله بعد، دیوار برشی در معرض بارگذاری ضربه‌ای با استفاده از TNT در حجم‌ها و فواصل مختلف قرار گرفت و عملکرد آن در حالت‌های معمول و تقویت‌شده با AFRP تحلیل شد. روش تحقیق شامل مراحل مدل‌سازی دیوار برشی، صحت‌سنجی مدل، اعمال بارگذاری ضربه‌ای و قرار دادن دیوار برشی در معرض بارهای انفجاری با استفاده از TNT در حجم‌ها و فواصل مختلف و در نهایت بررسی تأثیر استفاده از نوارهای AFRP بر رفتار دیوار برشی در برابر بارهای ضربه‌ای می‌باشد. نتایج نشان داد که استفاده از نوارهای AFRP به‌عنوان تقویت‌کننده، تغییر شکل نهایی ایجاد شده در اثر انفجار را به ترتیب ۷٪ و ۶٪ کاهش داده است. همچنین، کرنش‌های پلاستیک ایجاد شده در وسط ورق فولادی برای مدل‌های تقویت‌شده به ترتیب ۶۶٪ و ۶۱٪ کاهش یافت. علاوه بر این، جذب انرژی در مدل‌های تقویت‌شده به ترتیب ۷٪ و ۶٪ کمتر از مدل‌های معمول بود. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از نوارهای AFRP به‌عنوان تقویت‌کننده، عملکرد دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای را در برابر بارهای ضربه‌ای به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌بخشد. این پژوهش بر اهمیت استفاده از روش‌های نوین تقویت‌کننده مانند AFRP برای بهبود عملکرد دیوارهای برشی فولادی در برابر بارهای شدید تأکید می‌کند و پیشنهاد می‌کند تحقیقات آینده بر روی استفاده از مواد کامپوزیتی پیشرفته‌تر و بررسی هندسه‌های مختلف موج متمرکز شوند.

**کلمات کلیدی:** دیوار برشی فولادی موجدار، ورق تقویت‌کننده پلیمری AFRP، بارگذاری ضربه‌ای، بار TNT

دیوارهای برشی فولادی ابزار مناسبی برای بالا بردن ظرفیت لرزه‌ای سازه‌های بتنی و فولادی می‌باشند، این سیستم شامل صفحات فلزی میانقابی هستند که به تیرها و ستون‌های اطراف (در طول کل ارتفاع) متصل شده که به دلیل مقاومت بالا در مقابل بارهای جانبی کارایی بهتر و مقرون به صرفه‌تری نسبت به سیستم‌های مهاربندی برای سازه‌هایی که در برابر بارهای جانبی قرار می‌گیرند را دارند. سختی اولیه بالا، منحنی هیستریزس پایدار، جذب انرژی مناسب، شکل‌پذیری زیاد، مقاومت بالا و درجه نامعینی ذاتی بالا از ویژگی‌های متمایز دیوار برشی فولادی است که آن را به یک گزینه مناسب جهت استفاده از این سیستم در مناطق با خطر لرزه‌پذیری نسبی زیاد تبدیل کرده است.

از آنجایی که دیوار برشی فولادی موجددار دارای ظرفیت باربری، اتلاف انرژی و سختی مناسبی می‌باشد و از طرفی هزینه اجرا و وزن کمتری در شرایط یکسان طراحی دارند، مطالعه پارامتریک بر روی این دیوارها موضوعیت پیدا می‌کند. بنابراین ایده دیوار برشی فولادی موجددار<sup>۱</sup> CSSW<sup>۱</sup> به‌عنوان جایگزینی برای دیوارهای برشی سخت شده مطرح شد که انتظار می‌رود این ورق‌ها به علت دارا بودن سختی ذاتی برون صفحه‌ای، از مقاومت کمانشی بالایی برخوردار بوده و در نهایت عملکردی مشابه دیوارهای برشی سخت شده داشته باشند [۱].

دیوارهای برشی فولادی از نظر طراحی به دو گروه تقسیم می‌شوند؛ گروه اول، دیوارهای برشی فولادی سخت شده که در آن‌ها از کمانش صفحات فولادی تحت بارهای خدمت قبل از تسلیم برشی جلوگیری شده و دسته دوم، دیوارهای برشی صفحه فولادی بدون سخت کننده، که در آن‌ها از مقاومت پس کمانشی پانل‌ها استفاده می‌شود. از آن جایی که مقاومت حد کمانش در ورق‌ها حتی اگر پانل‌ها تقویت شوند بسیار کمتر از مقاومت پس کمانشی همان ورق‌ها به صورت تقویت نشده هستند، توجه به ظرفیت حد کمانش در ورق‌ها حتی اگر پانل‌ها تقویت شوند بسیار کمتر از آن، امکان ساخت سازه‌هایی با قابلیت شکست نرم و امکان بازسازی سریع و کم هزینه سازه‌های آسیب دیده در این روش بر مزایای سیستم دیوار برشی فولادی با استفاده از ورق نازک (بدون سخت کننده) افزوده می‌شود. در انتخاب دیوار برشی فولادی سخت نشده یا سخت شده، لازم است که طراح، عملکرد سازه‌ای، ملزومات طراحی، اقتصادی، راحتی ساخت، انتقال و احداث را مدنظر قرار دهد.

در دیوار برشی فولادی موجددار به دلیل وجود خم‌های متعدد و تبدیل نیروهای درون صفحه‌ای به نیروهای برون صفحه‌ای و برعکس در این مکان‌ها، ورق‌های صاف تشکیل دهنده ورق موجددار، یکدیگر را مقید نموده و در واقع به نوعی، نقش سخت کننده‌ها را ایفا می‌کنند. بنابراین دیوار برشی فولادی موجددار را از نظر عملکرد سازه‌ای می‌توان جزء دیوارهای برشی سخت شده محسوب کرد. دیوارهای برشی فولادی موجددار می‌توانند مزایای هر دو نوع دیوار برشی سخت شده و سخت نشده را داشته باشند.

یکی از نقاط ضعف دیوارهای برشی فولادی، کمانش و تغییر شکل درون صفحه‌ای است که این نقیصه با استفاده از سخت کننده‌های فولادی، اجرای یک لایه بتنی در دو طرف صفحه و تقویت ورق‌های فولادی با لایه های پلیمری تقویت شده با الیاف کربن برطرف می‌گردد که عملکرد روش تقویت ورق فولادی موجددار با لایه‌های پلیمری تقویت شده با الیاف کربن یاز به بررسی و ارزیابی بیشتری دارد [۲].

در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای در زمینه بررسی رفتار دیوار برشی فولادی موجددار با فرمت های قرارگیری مختلف چه به صورت افقی، عمودی و یا مورب در برابر بارگذاری های مختلف صورت پذیرفته است که تعدادی از مهم‌ترین مطالعات انجام شده در این به شرح زیر می‌باشند:

صبوری قمی و اسد سجادی (۲۰۱۲) در مطالعه‌ای به بررسی رفتار خطی و غیرخطی ورق فولادی و قاب اطراف آن پرداختند و مدل‌های ریاضی برای پیش‌بینی رفتار دیوارهای برشی فولادی ارائه کردند. نتایج نشان داد که استفاده از ورق‌های فولادی با تنش تسلیم پایین می‌تواند رفتار لرزه‌ای سازه‌ها را بهبود بخشد [۱]. محمد داودی و ابوطالب قائد رحمتی (۲۰۱۹) با استفاده از نرم‌افزار المان محدود، دیوار برشی مرکب با ورق موجددار دوزنقه‌ای را بررسی کردند. نتایج نشان داد که پانل‌ها با برش‌گیر گل‌میخ عملکرد بهتری در جذب انرژی دارند [۲]. مهدی قنبری (۲۰۱۹) رفتار دیوار برشی فولادی موجددار را در قاب فلزی تحلیل کرد و نشان داد که این سیستم‌ها از نظر تغییر مکان و جذب انرژی عملکرد مناسبی دارند [۳]. عموزاده و حسینی (۲۰۱۹) در پژوهشی نشان دادند که دیوارهای برشی فولادی تقویت‌شده عملکرد بهتری نسبت به دیوارهای صاف دارند و می‌توانند هزینه‌های ساخت را کاهش دهند [۴]. عباس عین‌علی‌طلب و فرزاد شهبان مقدم (۲۰۱۹) با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، رفتار دیوار برشی فولادی موجددار را بررسی کردند. نتایج نشان داد که نسبت طول دهانه به ارتفاع ۵/۱ و راستای موج افقی

<sup>1</sup> corrugated steel shear wall

برای دیوارهای با اتصال مفصلی مناسب‌تر است [۵]. Mahdavi و همکاران (۲۰۲۳) عملکرد پلاستیک ده نوع بادی فولادی جدید را تحت تحلیل Pushover بررسی کردند. نتایج نشان داد که برخی بادیها در جذب انرژی و مقاومت در برابر بارهای جانبی عملکرد بهتری دارند [۶]. Mahdavi (۲۰۲۰) رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی با بازشو و تیر با مقطع کاهش‌یافته را تحلیل کرد و نشان داد که بازشوها تأثیر قابل‌توجهی بر رفتار لرزه‌ای سازه دارند [۷]. مهدوی و همکاران (۱۴۰۳) عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی مشبک (PSPSW) با سوراخ‌های منظم را بررسی کردند و نشان دادند که سوراخ‌های منظم توزیع تنش را بهبود می‌بخشند [۸]. Zhang و همکاران (۲۰۱۸) رفتار لرزه‌ای سازه‌های فولادی را با روش‌های پیشرفته تحلیل غیرخطی بررسی کردند و نشان دادند که این روش‌ها دقت پیش‌بینی رفتار لرزه‌ای را افزایش می‌دهند [۹]. Wang و همکاران (۲۰۲۰) رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی با بازشوها مختلف را تحلیل کردند و نشان دادند که اندازه و موقعیت بازشوها تأثیر زیادی بر رفتار لرزه‌ای دارد [۱۰]. Li و همکاران (۲۰۲۱) عملکرد لرزه‌ای سازه‌های فولادی را با روش‌های ترکیبی تحلیل عددی و آزمایش‌های تجربی بررسی کردند و نشان دادند که این روش‌ها دقت ارزیابی را افزایش می‌دهند [۱۱]. Hosseini و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی به بررسی رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی با ورق‌های کامپوزیتی پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از ورق‌های کامپوزیتی می‌تواند مقاومت و شکل‌پذیری دیوارهای برشی را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد [۱۲]. Chen و همکاران (۲۰۲۲) رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی با بازشوها بزرگ را بررسی کردند. نتایج نشان داد که استفاده از تقویت‌کننده‌های موضعی در اطراف بازشوها می‌تواند عملکرد لرزه‌ای دیوارها را بهبود بخشد [۱۳]. Khan و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای به بررسی تأثیر ضخامت ورق فولادی بر رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش ضخامت ورق می‌تواند مقاومت دیوار را افزایش دهد، اما ممکن است شکل‌پذیری آن را کاهش دهد [۱۴]. Gholami و همکاران (۲۰۲۲) رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی با ورق‌های موجدار را تحلیل کردند. نتایج نشان داد که ورق‌های موجدار می‌توانند توزیع تنش را بهبود بخشند و عملکرد لرزه‌ای دیوارها را افزایش دهند [۱۵]. Zhang و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهشی به بررسی تأثیر اتصالات نیمه‌صلب بر رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی پرداختند. نتایج نشان داد که اتصالات نیمه‌صلب می‌توانند عملکرد لرزه‌ای دیوارها را بهبود بخشند [۱۶]. Wang و همکاران (۲۰۲۱) رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی با ورق‌های تقویت‌شده با نانوذرات را بررسی کردند. نتایج نشان داد که استفاده از نانوذرات می‌تواند مقاومت و شکل‌پذیری دیوارها را افزایش دهد [۱۷]. Li و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای به بررسی تأثیر نسبت ابعادی بر رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی پرداختند. نتایج نشان داد که نسبت ابعادی تأثیر قابل‌توجهی بر توزیع تنش و عملکرد لرزه‌ای دیوارها دارد [۱۸]. Ahmadi و همکاران (۲۰۲۳) رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی با ورق‌های ساندویچی را تحلیل کردند. نتایج نشان داد که ورق‌های ساندویچی می‌توانند عملکرد لرزه‌ای دیوارها را به‌طور قابل‌توجهی بهبود بخشند [۱۹]. Salehi و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی به بررسی تأثیر بارهای دینامیکی بر رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی پرداختند. نتایج نشان داد که بارهای دینامیکی می‌توانند تأثیر قابل‌توجهی بر رفتار غیرخطی دیوارها داشته باشند [۲۰]. Farahani و همکاران (۲۰۲۳) رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی با ورق‌های پرفوراته را بررسی کردند. نتایج نشان داد که ورق‌های پرفوراته می‌توانند توزیع تنش را بهبود بخشند و عملکرد لرزه‌ای دیوارها را افزایش دهند [۲۱].

## ۲- روش تحقیق

هدف اصلی این پژوهش، بررسی رفتار دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای تحت بار انفجار و مقایسه آن با رفتار نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف پلیمری (AFRP) تحت همان شرایط بارگذاری است. برای دستیابی به این هدف، یک نمونه دیوار برشی فولادی مطابق با آیین‌نامه‌های طراحی، در دو حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفت:

حالت معمول: دیوار برشی فولادی بدون هرگونه تقویت‌کننده.

حالت تقویت‌شده: دیوار برشی فولادی تقویت‌شده با الیاف پلیمری (AFRP).

هر دو نمونه در معرض بار انفجار در فواصل شعاعی مختلف قرار گرفتند و نتایج حاصل از تحلیل‌ها استخراج شد. برای تحلیل تنش‌ها و تغییرشکل‌های ایجاد شده در دیوار برشی، از نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده شد. به‌منظور اطمینان از صحت نتایج، ابتدا یک نمونه

مشابه از دیوار برشی از مقالات معتبر استخراج و در نرم‌افزار مدل‌سازی شد. سپس، نتایج حاصل از مدل‌سازی با داده‌های تجربی ارائه‌شده در مقاله مقایسه گردید تا صحت‌سنجی نرم‌افزار و روش تحلیل تأیید شود. این روش تحقیق شامل مراحل زیر است:

- طراحی نمونه‌ها: طراحی دیوار برشی فولادی مطابق با آیین‌نامه‌های طراحی.
- تقویت نمونه‌ها: تقویت یکی از نمونه‌ها با الیاف پلیمری (AFRP).
- اعمال بار انفجار: اعمال بار انفجار در فواصل شعاعی مختلف به هر دو نمونه.
- تحلیل المان محدود: استفاده از نرم‌افزار آباکوس برای تحلیل تنش‌ها و تغییرشکل‌ها.
- صحت‌سنجی مدل: مقایسه نتایج مدل‌سازی با داده‌های تجربی موجود در مقالات معتبر.
- استخراج نتایج: تحلیل و مقایسه رفتار دو نمونه در برابر بار انفجار.

این روش تحقیق به‌منظور بررسی دقیق رفتار دیوارهای برشی فولادی تحت بارهای دینامیکی مانند انفجار و ارائه راهکارهای تقویت مؤثر طراحی شده است.

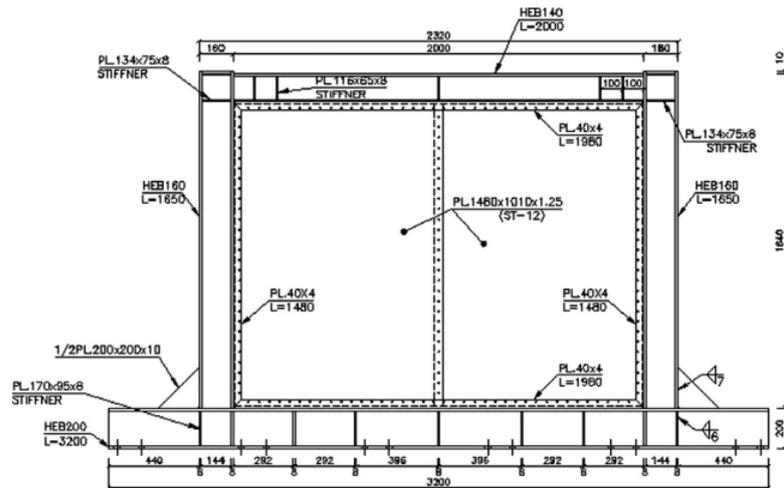
#### ۴- صحت‌سنجی

با استفاده از سیستم باربر جانبی دیوارهای برشی جدار نازک می‌توان ظرفیت باربری سازه‌ها را به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش داد. در مواردی که اولویت اول مقاوم‌سازی افزایش ظرفیت باربری سیستم است، استفاده از ستون‌های نگهدارنده سخت‌تر برای دیوار برشی نسبت به ستون‌های نگهدارنده انعطاف‌پذیر ارجحیت داشته و در مواردی که اولویت مقاوم‌سازی، افزایش ظرفیت جذب انرژی می‌باشد، استفاده از ستون‌های نگهدارنده انعطاف‌پذیر برای دیوار برشی نسبت به ستون‌های نگهدارنده سخت و قوی ارجحیت خواهد داشت. البته انعطاف‌پذیر بودن ستون‌های نگهدارنده یک محدوده بهینه داشته که در آن محدوده اولاً سختی ستون‌ها به حدی است که ستون‌ها توانایی نگه داشتن ورق دیوار و تشکیل میدان کششی را داشته و از کماتش کلی دیوار جلوگیری می‌نمایند و ثانیاً سختی ستون‌ها آن قدر زیاد نباشد که قاب نگهدارنده دیوار تحمل نیروهای وارده را نداشته و دچار شکست ترد دیوار شده و همچنین در مقادیر کم نیروهای برشی، سختی زیاد ستون مانع از تغییر شکل‌های مناسب برای جذب بیشتر انرژی گردد. اندرکنش سازه اولیه و دیوار برشی طوری است که موجب تقویت سازه اولیه شده و نیروهای وارد شده به اجزاء سازه اولیه را تعدیل می‌نماید. در مراحل اولیه بارگذاری سازه اولیه در باربری جانبی شرکت کرده و در ادامه بارگذاری با فراتر رفتن نیروها از ظرفیت باربری سازه، نیروی برشی بیشتری از قاب به دیوار برشی منتقل شده و باربری جانبی عمده‌تاً توسط دیوار برشی صورت می‌گیرد.

امامی، مفید و وفایی (۲۰۱۳)، بر روی سه نمونه دیوار برشی فولادی در یک قاب یک طبقه و یک دهانه، تحت بارگذاری چرخه‌ای آزمایش انجام دادند. در این آزمایش‌ها نمونه اول دیوار برشی تخت، نمونه دوم دیوار برشی موجدار دوزنقه‌ای در مقطع و نمونه سوم دیوار برشی موجدار دوزنقه‌ای در ارتفاع بوده که در جدول شماره ۱ خلاصه‌ای از لیست نمونه‌های طراحی شده جهت آزمایش ارائه می‌شود [۲۲].

جدول ۱: لیست خلاصه طراحی نمونه‌ها. ابعاد به میلی‌متر (امامی و همکاران، ۲۰۱۳)

Specimens	Beam	Column	Plate Thickness	$\frac{L}{t}$	$\frac{h_c}{t}$	Type panel
NO1	HE-B140	HE-B160	1.25	1600	1200	Unstiffened
NO2	HE-B140	HE-B160	1.25	1600	1200	Vertical Corrugated
NO3	HE-B140	HE-B160	1.25	1600	1200	Horizontal Corrugated



شکل ۱ مشخصات هندسی نمونه اول آزمایشگاهی (ابعاد به میلیمتر) (امامی و همکاران، ۲۰۱۳)

در این پژوهش برای صحت سنجی از نمونه سوم یعنی دیوار برشی فولادی موجدار استفاده شده است. لذا در ادامه فقط خصوصیات نمونه سوم شرح داده شده است. در این آزمایش قاب حاوی دیوار برشی فولادی، یک طبقه و یک دهانه می باشد.



شکل ۲ قرارگیری قاب در جک بارگذاری در آزمایشگاه (امامی و همکاران، ۲۰۱۳)

برای بدست آوردن خصوصیات مصالح مورد آزمایش، آزمایش‌هایی مطابق استاندارد ASTM E8M-04 انجام گرفته که نتایج آن در جدول شماره ۲ آورده شده است.

جدول ۲: خصوصیات مصالح مورد آزمایش (امامی و همکاران، ۲۰۱۳)

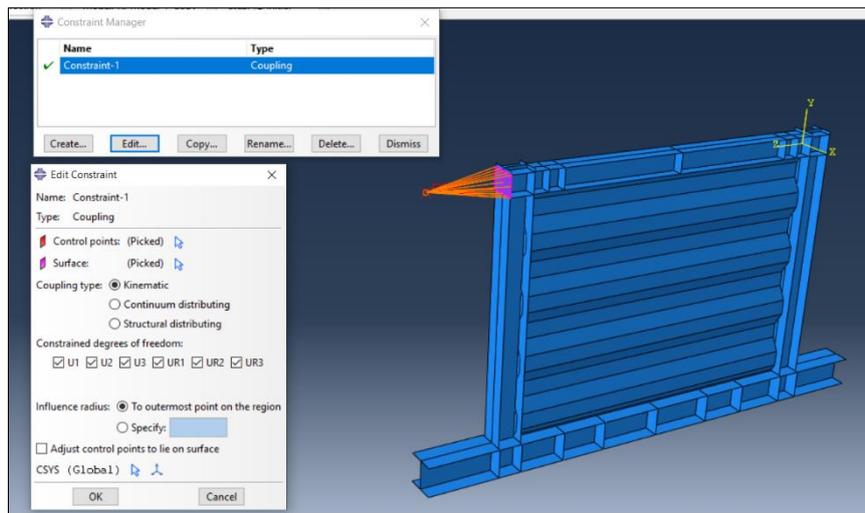
Type	Young's Modulus $E$ (GPa)	Yield Stress $f_y =$ (MPa)	Ultimate Stress $f_u =$ (MPa)	$\frac{f_y}{f_u}$	Percent Elongation (%)
Plate	210	207	290	0.71	41
Column	210	300	443	0.67	33
Beam	210	288	456	0.63	37

#### ۴-۱- مدل سازی

در این پژوهش جهت صحت سنجی مدل شماره ۳ آزمایشگاهی که دیوار برشی فولادی موجدار است، در نرم افزار آباکوس مشابه نمونه آزمایشگاهی در نرم افزار مدل سازی شده و خصوصیات مصالح مشابه خصوصیات مصالح به دست آمده در آزمایش، به نرم افزار معرفی و پروتکل بارگذاری نیز مشابه پروتکل آزمایشگاهی و دقیقاً مشابه آزمایش به تراز تیر اعمال شده است. برای مدل سازی مطابق با جدول مقاطع تیر و ستون و سخت کننده ها در ماژول Part مدل سازی شده است.

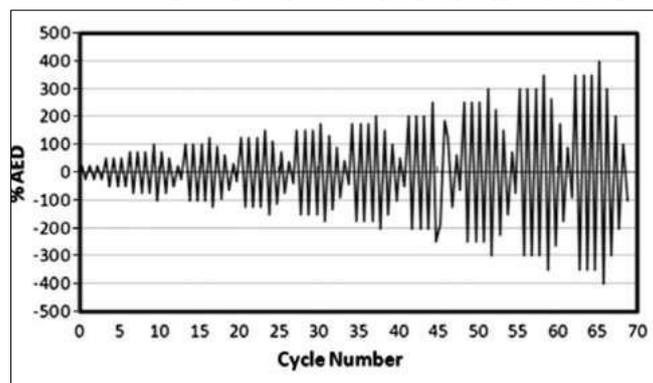
در ماژول Part، بسته به نیاز مسئله، هندسه های متفاوتی ایجاد گردیده و یادر ماژول Property هر کدام از این هندسه ها، جنس های مختلفی نیز داشته باشند. ولی در هر کدام از این دو ماژول، قطعات هیچ ارتباطی با یکدیگر ندارند. اما در سومین ماژول موجود در نرم افزار آباکوس که ماژول Assembly نام دارد، این اجازه به کاربر داده می شود تا تمامی قطعات از پیش طراحی شده را وارد یک محیط واحد نموده و موقعیت قرارگیری آن ها را نسبت به یکدیگر مشخص کند. با استفاده از ابزارهای موجود در این ماژول می توان مجموعه قطعات را جابه جا و نسبت به هم مقید نموده و یا از آن ها در راستای خطی یا شعاعی تکثیر کرد. در ماژول step نوع تحلیل و یا تحلیل هایی که می خواهید توسط آباکوس انجام شود را تعریف می کنیم. در واقع هر تحلیل منفرد در قالب یک step انجام خواهد شد.

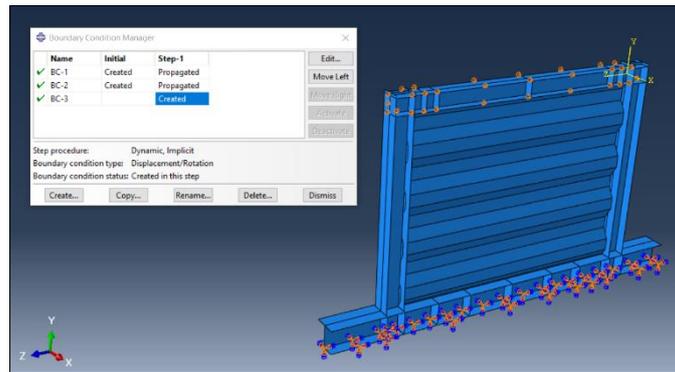
پس از تعیین نوع تحلیل، نوبت به تعیین اندرکنش های موجود در مدل می رسد. در ماژول interaction شما می توانید اندرکنش ها را تعریف نمایید. از این جمله می توان به اندرکنش تماس بین دو part متفاوت و یا اندرکنش بخش های مختلف یک part با یکدیگر اشاره کرد. همچنین تعریف برخی از قیود هندسی نیز باید در این ماژول صورت پذیرد.



شکل ۳ قیود و بارگذاری تعریف شده در مدل

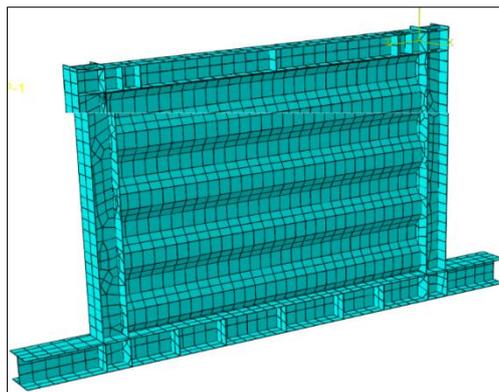
قاب مورد نظر داخل دستگاه بارگذاری قرار گرفته و توسط جک هیدرولیکی بر کنار تیر بارگذاری می گردد. برای بدست آوردن رفتار لرزه ای نمونه ها، بارگذاری چرخه ای به قاب اعمال می شود. پروتکل این بارگذاری در شکل شماره ۶ آمده است.





شکل ۵ اعمال بارگذاری چرخه ای و شرایط مرزی

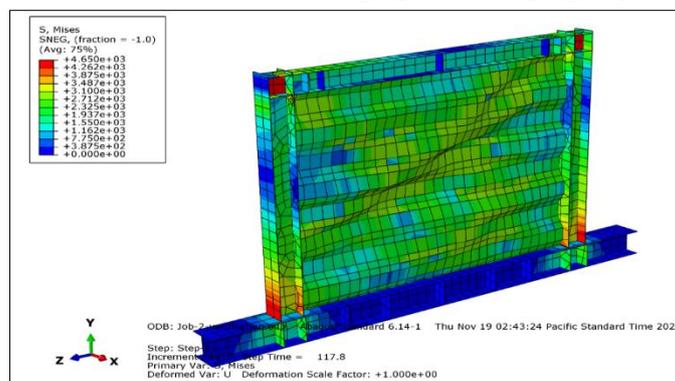
مش بندی قسمت‌های مختلف مدل یکی از حساس‌ترین مراحل مدل سازی است. در بخش‌هایی که شکل هندسی منظمی ندارند بایستی ابتدا آن را به چندین زیر بخش (پارتیشن) تقسیم کرد تا بتوان برای همه قسمت‌ها مش بندی مناسبی را فراهم نمود. مش بندی اعضاء بصورت جداگانه و مستقل از یکدیگر انجام می‌شود. ابعاد مش بندی برای تیرها و ستون‌ها برابر ۱۰ میلیمتر و برای پلیت و صفحه میانی برابر ۵ میلیمتر می‌باشد.



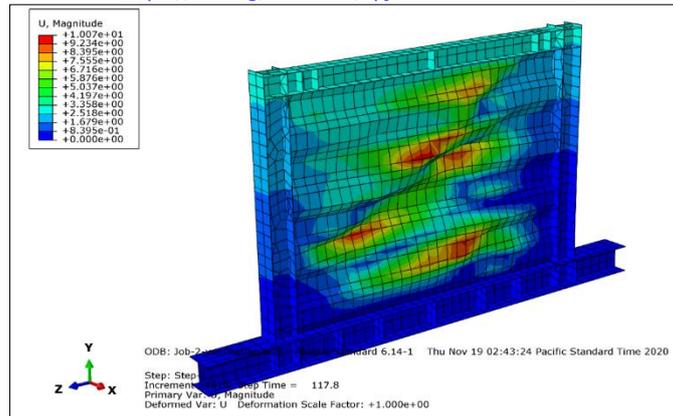
شکل ۶ مش بندی قطعات مختلف دیوار برشی

#### ۴-۲- صحت سنجی مدل طراحی شده در نرم افزار با نمونه آزمایشگاهی

جهت صحت سنجی مدل طراحی شده نمونه آزمایشگاهی و ساخته شده در نرم افزار، مقایسه می‌گردد و همچنین کانتور رنگی میزان جابجایی و تنش وون میزس نیز آورده شده و نتایج این مطالعه نشان می‌دهد:



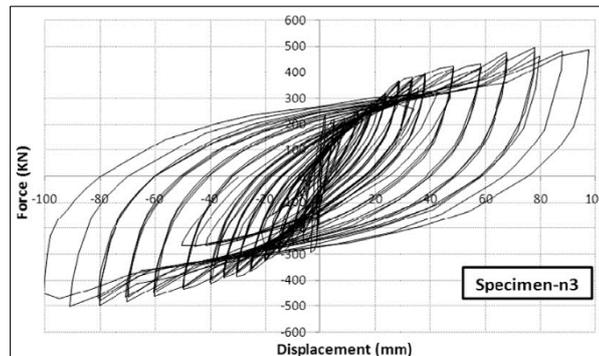
شکل ۷ نمایش تنش وون میزس در گام آخر بارگذاری



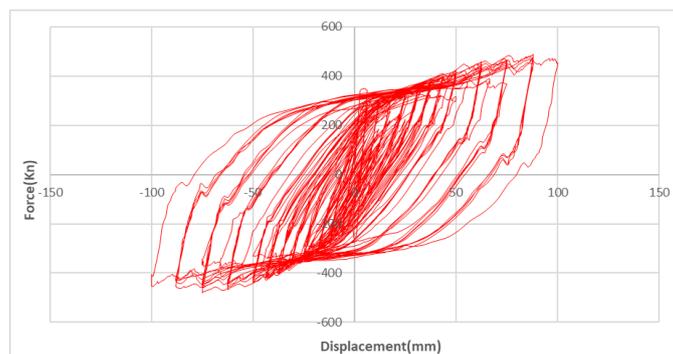
شکل ۸ نمایش میزان تغییر مکان در گام آخر بارگذاری

### ۳-۴- نتایج حاصل از مقایسه مدل نرم افزاری با نمونه آزمایشگاهی

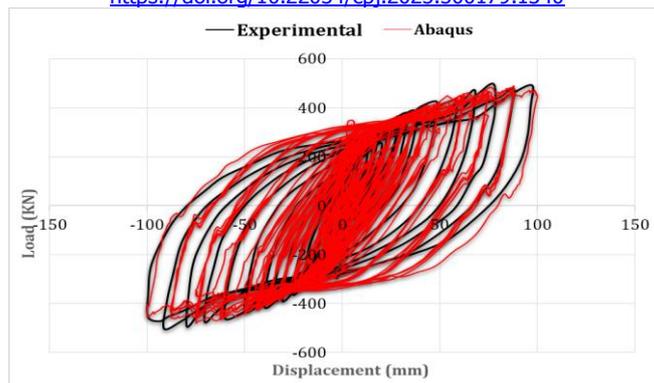
بر اساس نتایج، نحوه تغییر شکل ایجاد شده در دیوار برشی فولادی در انتهای چرخه بارگذاری، هم در تحلیل اجزاء محدود و هم در آزمایش مشابه یکسان بوده و نمودار هیستریزیس‌های حاصله، هر دو دارای مقادیر بیشینه و کمینه برابر می‌باشند.



شکل ۹ نمودار هیستریزیس نمونه آزمایشگاهی (امامی و همکاران، ۲۰۱۳)



شکل ۱۰ نمودار هیستریزیس نمونه عددی مدل سازی شده در نرم افزار



شکل ۱۱ مقایسه نمودار هیستریزیس نمونه آزمایشگاهی و نمونه عددی

بدین ترتیب نتایج حاصله از تحلیل اجزاء محدود تا حد بسیار خوبی به نتایج آزمایشگاهی نزدیک بوده و در نتیجه روش انجام کار با نرم افزار دارای نتایج قابل قبولی می‌باشد.

جدول ۳: اختلاف مقادیر نتایج آزمایشگاهی و تئوری

MAX Abaq	489.3734	اختلاف %	0.127876
Max Exp	490		

## ۵- مدل سازی دیواربرشی فولادی دوزنقه‌ای و بررسی رفتار آن در برابر بارگذاری انفجار (TNT)

در این پروژه از چهار مدل بشرح ذیل استفاده نموده و سپس تاثیر و عملکرد آن‌ها با یکدیگر مقایسه می‌شود.

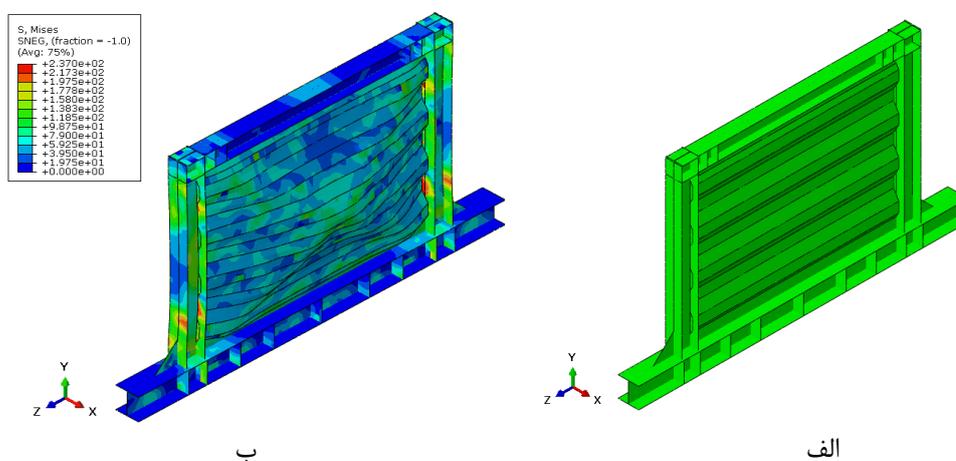
- ۱- دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای با TNT به وزن ۱۰۰ گرم در فاصله ۱ متری.
  - ۲- دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای با TNT به وزن ۳۰۰ گرم در فاصله ۲ متری.
  - ۳- دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای مقاوم سازی شده با AFRP تحت انفجار با TNT به وزن ۱۰۰ گرم در فاصله ۱ متری.
  - ۴- دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای مقاوم سازی شده با AFRP تحت انفجار با TNT به وزن ۳۰۰ گرم در فاصله ۲ متری.
- در این تحقیق برای اینکه بتوان تا حد مطلوبی رفتار مورد نظر را مطالعه کرد، یک نمونه دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای مدلسازی شد. در مدلسازی تیر و ستون از مقطع H شکل استفاده شده و در این مدل‌ها اتصال تیر به ستون به صورت صلب در نظر گرفته و اتصال ورق به تیر و ستون به شکل مفصلی مدل شده است. اعضای مرزی را می‌توان با المان BEAM مدل کرد؛ با این وجود در صورتیکه کمانش موضعی در آنها اتفاق افتد این مورد در تحلیل در نظر گرفته نخواهد شد. برای در نظر گرفتن کمانش جانبی، ورق و اعضای مرزی با المان پوسته‌ای S4r مدلسازی شده که یک المان چهارگره‌ای دو انحنایی با انتگرال گیری کاهش یافته است. هر گره از این المان ۶ درجه آزادی یعنی ۳ درجه انتقال و ۳ درجه دوران دارد.

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، همه‌ی درجات آزادی انتقالی، عمود بر صفحه بسته شده است. مدل سازی و تحلیل مدل‌ها نتایج به صورت زیر می‌باشد؛

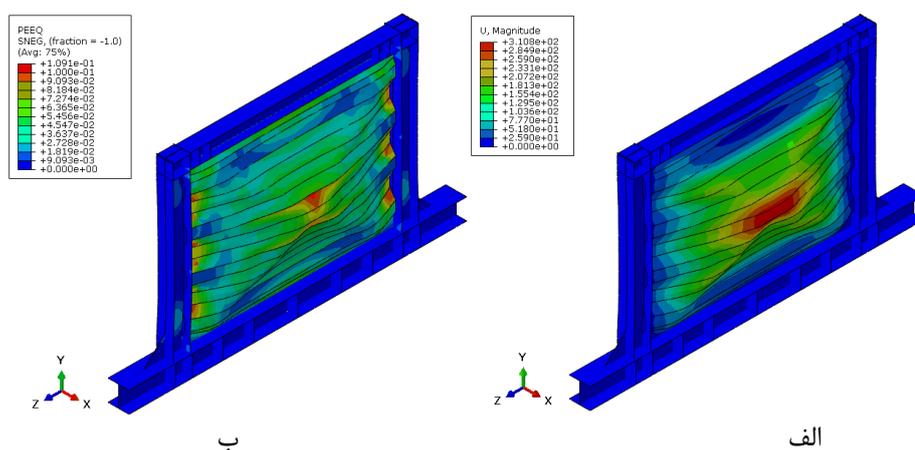
شکل ۱۲ مقایسه‌ای از توزیع تنش در وسط ورق فولادی موجدار دوزنقه‌ای را در دو حالت معمول و تقویت شده با AFRP تحت بار انفجار ۱۰۰ گرم TNT در فاصله ۱ متری نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از AFRP باعث کاهش تنش‌های ایجاد شده در ورق فولادی می‌شود. شکل ۱۳ توزیع تنش در وسط ورق فولادی موجدار دوزنقه‌ای را در دو حالت معمول و تقویت شده با AFRP تحت بار انفجار ۳۰۰ گرم TNT در فاصله ۲ متری نشان می‌دهد. استفاده از AFRP باعث کاهش تنش‌های ایجاد شده در ورق فولادی می‌شود. شکل ۱۴ مقایسه‌ای از کرنش‌های پلاستیک ایجاد شده در وسط ورق فولادی موجدار دوزنقه‌ای را در دو حالت معمول و تقویت شده با AFRP تحت بار انفجار ۱۰۰ گرم TNT در فاصله ۱ متری نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از AFRP باعث کاهش کرنش‌های پلاستیک می‌شود. شکل ۱۵

توزیع کرنش‌های پلاستیک در وسط ورق فولادی موجدار دوزنقه‌ای را در دو حالت معمول و تقویت‌شده با AFRP تحت بار انفجار ۳۰۰ گرم TNT در فاصله ۲ متری نشان می‌دهد. استفاده از AFRP باعث کاهش کرنش‌های پلاستیک می‌شود. شکل ۱۶ مقایسه‌ای از تغییر شکل ایجاد شده در وسط ورق فولادی موجدار دوزنقه‌ای را در دو حالت معمول و تقویت‌شده با AFRP تحت بار انفجار ۱۰۰ گرم TNT در فاصله ۱ متری نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از AFRP باعث کاهش تغییر شکل نهایی می‌شود. شکل ۱۷ توزیع تغییر شکل در وسط ورق فولادی موجدار دوزنقه‌ای را در دو حالت معمول و تقویت‌شده با AFRP تحت بار انفجار ۳۰۰ گرم TNT در فاصله ۲ متری نشان می‌دهد. استفاده از AFRP باعث کاهش تغییر شکل نهایی می‌شود. شکل ۱۸ مقایسه‌ای از جذب انرژی در مدل‌های مختلف را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از AFRP باعث کاهش جذب انرژی در دیوار برشی فولادی می‌شود. شکل ۱۹ مقایسه‌ای از منحنی نیرو-زمان در مدل‌های مختلف را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در ابتدای انفجار، مدل‌ها تحت اثر نیروی فشاری قرار می‌گیرند و سپس در ادامه به علت موج انفجار، نیروی کششی در مدل‌ها ایجاد می‌شود.

۱- دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای با TNT به وزن ۱۰۰ گرم در فاصله ۱ متری.

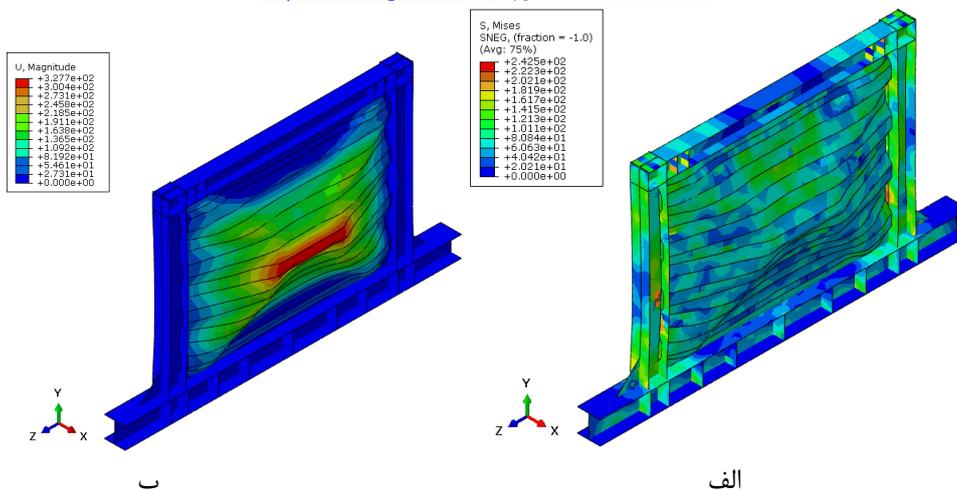


شکل ۱۲ الف: سازه قبل از انفجار - ب: توزیع تنش وون میزس در مدل

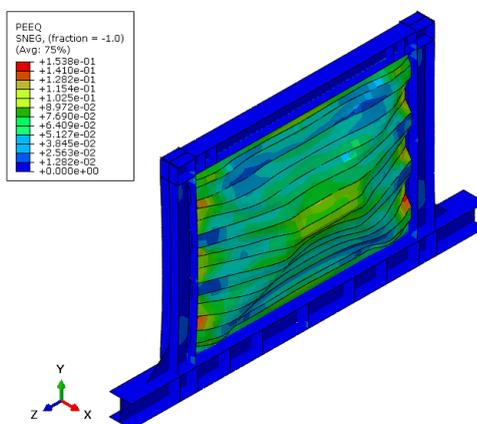


شکل ۱۳ الف: تغییر شکل ایجاد شده در اثر انفجار - ب: توزیع کرنش پلاستیک در مدل

۲- دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای با TNT به وزن ۳۰۰ گرم در فاصله ۲ متری.

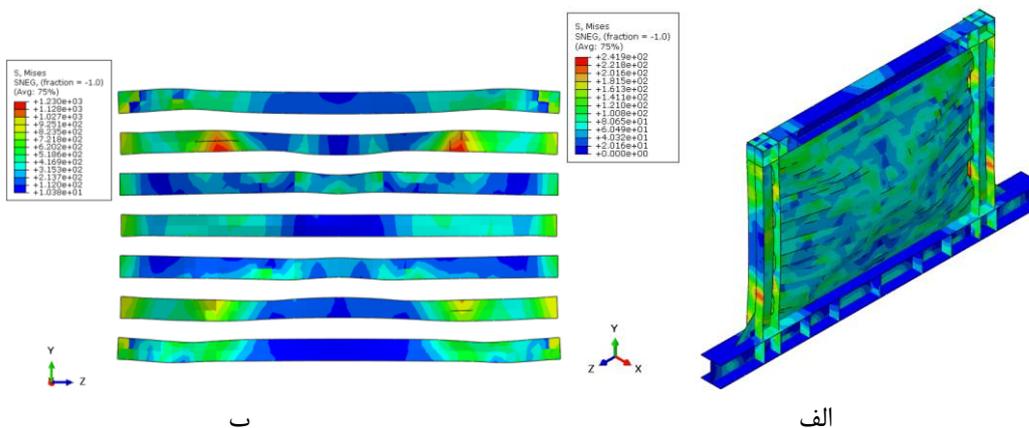


شکل ۱۴ الف: توزیع تنش وون میزس در مدل-ب: تغییر شکل ایجاد شده در اثر انفجار

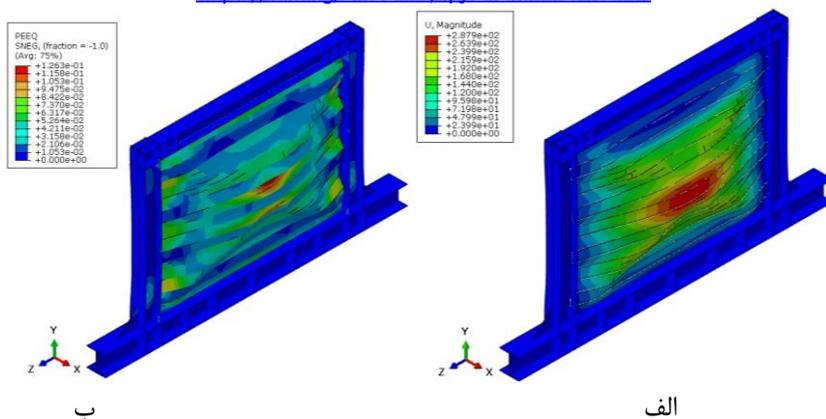


شکل ۱۵ توزیع کرنش پلاستیک در مدل

۳- دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه ای مقاوم سازی شده با AFRP تحت انفجار با TNT به وزن ۱۰۰ گرم در فاصله ۱ متری.

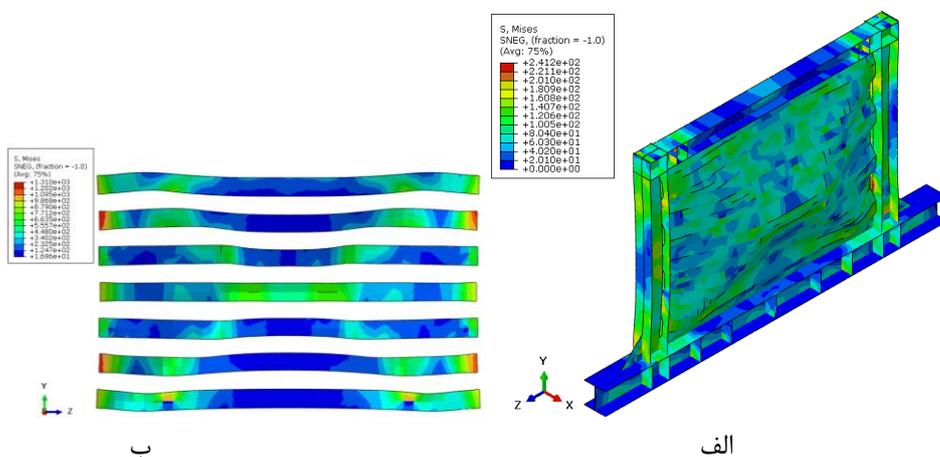


شکل ۱۶ الف: توزیع تنش وون میزس در دیوار برشی فولادی موجدار-ب: توزیع تنش وون میزس در نوار AFRP

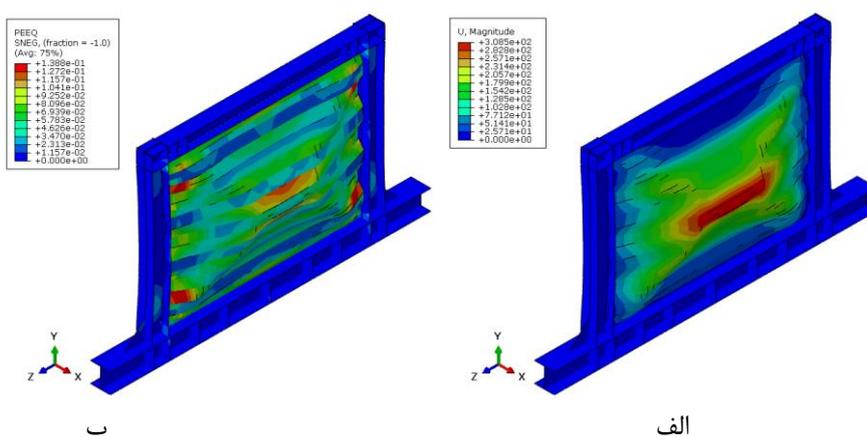


شکل ۱۷ الف: تغییر شکل ایجاد شده در اثر انفجار - ب: توزیع کرنش پلاستیک در دیوار برشی فولادی دوزنقه‌ای

۴- دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای مقاوم سازی شده با AFRP تحت انفجار با TNT به وزن ۳۰۰ گرم در فاصله ۲ متری.



شکل ۱۸ الف: توزیع تنش وون میزس در دیوار برشی فولادی دوزنقه‌ای - ب: توزیع تنش وون میزس در نوارهای AFRP



شکل ۱۹ الف: تغییر شکل ایجاد شده در اثر انفجار - ب: توزیع کرنش پلاستیک در دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای

در جدول ۵ مقادیر تنش، کرنش و تغییر شکل در انتهای آنالیز نشان داده شده است. تنش: مقادیر تنش در مدل‌های تقویت شده با AFRP (مدل‌های ۳ و ۴) نسبت به مدل‌های معمول (مدل‌های ۱ و ۲) کاهش یافته است. این نشان‌دهنده تأثیر مثبت AFRP در کاهش تنش‌های ایجاد شده در دیوار برشی است. کرنش پلاستیک: کرنش‌های پلاستیک در مدل‌های تقویت شده با AFRP نیز کاهش یافته است. این کاهش

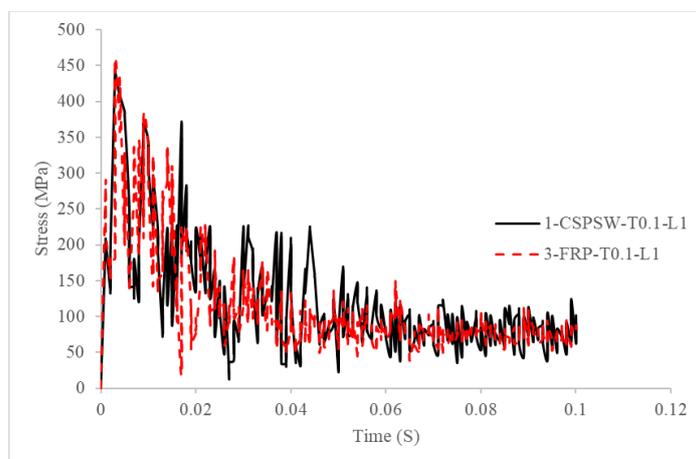
نشان دهنده بهبود عملکرد دیوار برشی در برابر بارهای انفجاری است. تغییر شکل: تغییر شکل نهایی در مدل‌های تقویت‌شده با AFRP کمتر از مدل‌های معمول است. این نشان می‌دهد که استفاده از AFRP باعث افزایش مقاومت دیوار برشی در برابر تغییر شکل‌های ناشی از انفجار می‌شود.

جدول ۵: مقایسه تنش، کرنش و تغییر شکل در مدل‌ها در انتهای آنالیز

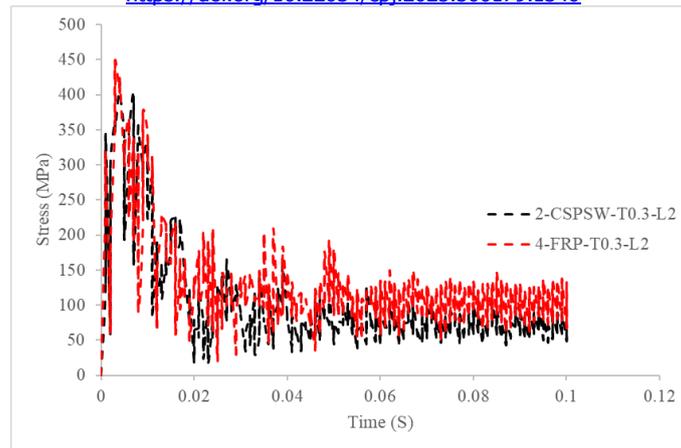
Models	Stress	Plastic Strain	Deflection
1-CSPSW-T0.1-L1	237	0.1091	310.8
2-CSPSW-T0.3-L2	242.5	0.1538	327.7
3-AFRP-T0.1-L1	241.9	0.1263	287.9
4-AFRP-T0.3-L2	241.2	0.1388	308.5

و همچنین در ادامه به منظور بررسی تاثیر استفاده از نوارهای AFRP بر روی دیوار برشی فولادی موجدار تحت اثر انفجار، به ترتیب نمودارهای تنش، کرنش و تغییر شکل در وسط ورق فولادی موجدار با یکدیگر در دو حالت بارگذاری انفجار مقایسه شده است. شکل ۲۰ توزیع تنش وون میزس را در دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای تحت بار انفجار ۱۰۰ گرم TNT در فاصله ۱ متری نشان می‌دهد. این شکل تنش‌های ایجاد شده در ورق فولادی را قبل از تقویت با AFRP نمایش می‌دهد. شکل ۲۱ توزیع تنش وون میزس را در نوارهای AFRP در همان شرایط بارگذاری نشان می‌دهد. مقایسه این دو شکل نشان می‌دهد که استفاده از AFRP باعث کاهش تنش‌های ایجاد شده در ورق فولادی می‌شود. شکل ۲۲ تغییر شکل ایجاد شده در اثر انفجار را در دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای تحت بار انفجار ۱۰۰ گرم TNT در فاصله ۱ متری نشان می‌دهد. این شکل تغییر شکل‌های ناشی از انفجار را قبل از تقویت با AFRP نمایش می‌دهد. شکل ۲۳ توزیع کرنش پلاستیک را در دیوار برشی فولادی دوزنقه‌ای تحت همان شرایط بارگذاری نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که کرنش‌های پلاستیک در ورق فولادی به‌طور قابل توجهی کاهش یافته است. شکل ۲۴ توزیع تنش وون میزس را در دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای تقویت‌شده با AFRP تحت بار انفجار ۳۰۰ گرم TNT در فاصله ۲ متری نشان می‌دهد. این شکل تنش‌های ایجاد شده در ورق فولادی را پس از تقویت با AFRP نمایش می‌دهد. شکل ۲۵ توزیع تنش وون میزس را در نوارهای AFRP در همان شرایط بارگذاری نشان می‌دهد. مقایسه این دو شکل نشان می‌دهد که استفاده از AFRP باعث کاهش تنش‌های ایجاد شده در ورق فولادی می‌شود.

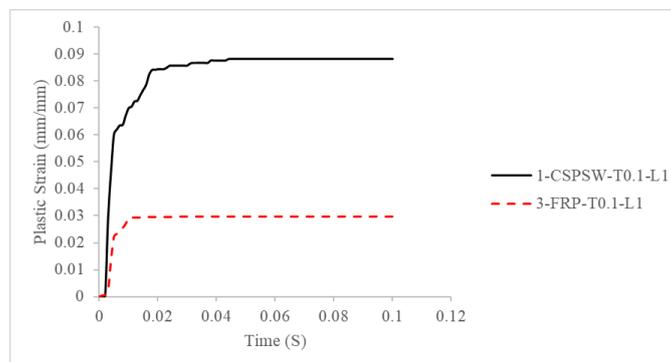
شکل ۲۶ تغییر شکل ایجاد شده در اثر انفجار را در دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای تقویت‌شده با AFRP تحت بار انفجار ۳۰۰ گرم TNT در فاصله ۲ متری نشان می‌دهد. این شکل تغییر شکل‌های ناشی از انفجار را پس از تقویت با AFRP نمایش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که تغییر شکل نهایی در دیوار برشی تقویت‌شده با AFRP به‌طور قابل توجهی کاهش یافته است.



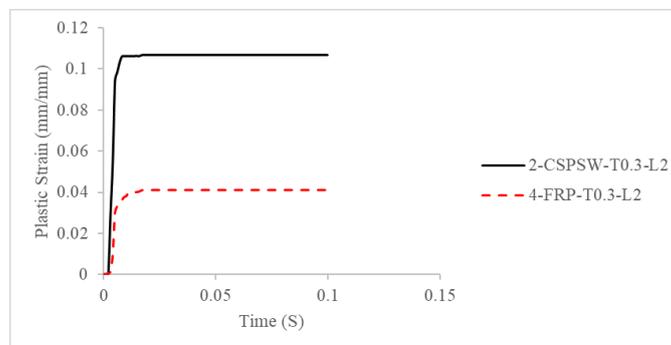
شکل ۲۰ مقایسه مقادیر تنش در وسط ورق فولادی موجدار دوزنقه‌ای در مدل‌های با مقدار TNT ۱۰۰ گرم و به فاصله ۱ متر



شکل ۲۱ مقایسه مقادیر تنش در وسط ورق فولادی موجدار دوزنقه‌ای در مدل‌های با مقدار TNT ۳۰۰ گرم و به فاصله ۲ متر

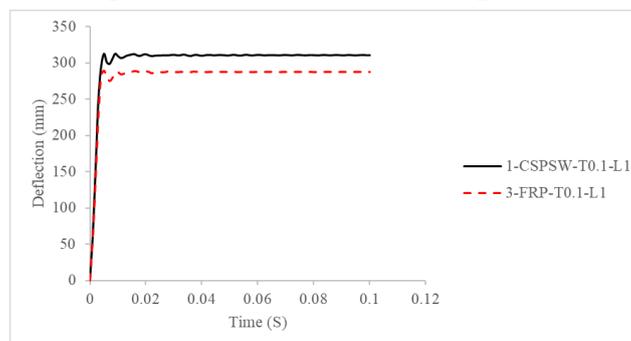


شکل ۲۲ مقایسه مقادیر کرنش پلاستیک در وسط ورق فولادی موجدار دوزنقه‌ای در مدل‌های با مقدار TNT ۱۰۰ گرم و به فاصله ۱ متر

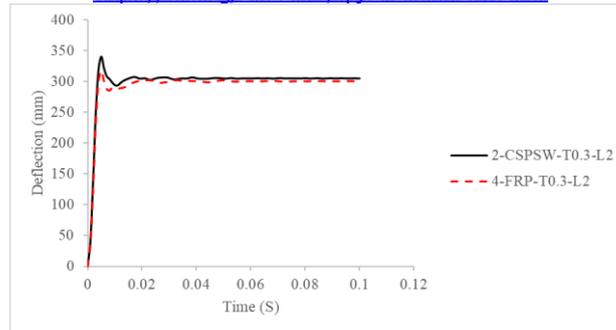


شکل ۲۳ مقایسه مقادیر کرنش پلاستیک در وسط ورق فولادی موجدار دوزنقه‌ای در مدل‌های با مقدار TNT ۳۰۰ گرم و به فاصله ۲ متر

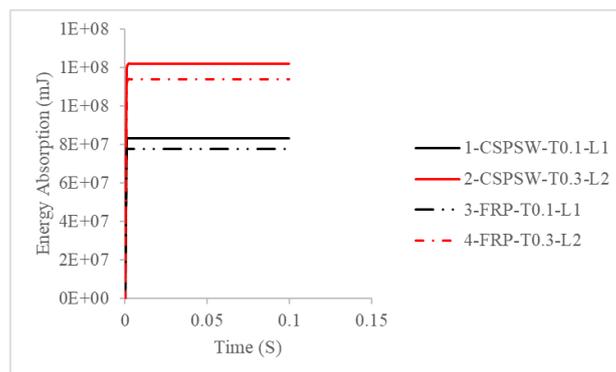
همچنین در نمودارهای زیر مقادیر و منحنی‌های جذب انرژی از نرم افزار استخراج گردیده است.



شکل ۲۴ مقایسه تغییر شکل در وسط ورق فولادی موجدار دوزنقه‌ای در مدل‌های با مقدار TNT ۱۰۰ گرم و به فاصله ۱ متر

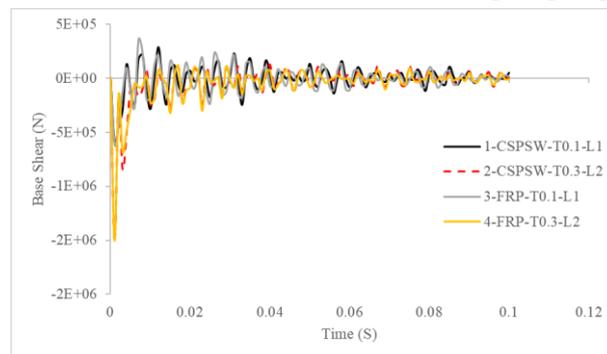


شکل ۲۵ مقایسه تغییر شکل در وسط ورق فولادی موجدار دوزنقه ای در مدل های با مقدار TNT ۳۰۰ گرم و به فاصله ۲ متر



شکل ۳۵: مقایسه جذب انرژی در مدل ها

در شکل پایین مقایسه منحنی نیرو زمان مدل نشان داده شده است.



شکل ۲۶ مقایسه منحنی نیرو- زمان مدل ها

## ۶- نتیجه گیری و پیشنهادات

در این پژوهش، رفتار دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای در برابر بار ضربه‌ای در دو حالت معمول و تقویت‌شده با نوارهای AFRP مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا دیوار برشی فولادی در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شد و نتایج حاصل از بارگذاری چرخه‌ای با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه گردید تا صحت عملکرد نرم‌افزار تأیید شود. در مرحله بعد، دیوار برشی در معرض بارگذاری ضربه‌ای با استفاده از TNT در حجم‌ها و فواصل مختلف قرار گرفت و عملکرد آن در حالت‌های معمول و تقویت‌شده با AFRP تحلیل شد. نتایج حاصل از تحلیل‌های نرم‌افزاری به شرح زیر است:

- کاهش تغییر شکل نهایی: مقایسه مدل‌های ۱ و ۳ و همچنین مدل‌های ۲ و ۴ نشان می‌دهد که استفاده از نوارهای AFRP به‌عنوان تقویت‌کننده، تغییر شکل نهایی ایجاد شده در اثر انفجار را به ترتیب ۷٪ و ۶٪ کاهش داده است.

- کاهش تنش و کرنش پلاستیک: نتایج نمودار تنش‌ها نشان می‌دهد که مقادیر تنش در ابتدای انفجار به حداکثر خود رسیده و سپس کاهش می‌یابد. همچنین، استفاده از نوارهای AFRP باعث کاهش تغییر شکل ورق فولادی موجدار شده و در نتیجه، کرنش‌های پلاستیک ایجاد شده در وسط ورق فولادی برای مدل‌های اول و دوم به ترتیب ۶۶٪ و ۶۱٪ کاهش یافته است.
- کاهش جذب انرژی: با استفاده از نوارهای AFRP، تغییر شکل‌های ایجاد شده در دیوار برشی فولادی موجدار محدود شده و در نتیجه، جذب انرژی در مدل‌های تقویت‌شده کاهش یافته است. به‌طور مشخص، در مدل‌های ۳ و ۴، میزان جذب انرژی به ترتیب ۷٪ و ۶٪ کمتر از مدل‌های ۱ و ۲ بوده است.
- رفتار نیرو-زمان: مقایسه منحنی نیرو-زمان در مدل‌ها نشان می‌دهد که در ابتدای انفجار، مدل‌ها تحت تأثیر نیروی فشاری قرار گرفته و سپس با ایجاد موج انفجار، نیروی کششی در مدل‌ها ایجاد می‌شود. مقادیر حداکثر نیرو در مدل‌ها به ترتیب ۲۸۷، ۱۲۴، ۳۵۴ و ۱۱۷ کیلو نیوتن بوده است.

### پیشنهادهای

۱. استفاده از مواد کامپوزیتی پیشرفته: پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده از مواد کامپوزیتی پیشرفته‌تر مانند الیاف کربن یا الیاف شیشه برای تقویت دیوارهای برشی فولادی استفاده شود تا عملکرد آن‌ها در برابر بارهای ضربه‌ای و لرزه‌ای بهبود یابد.
۲. بررسی تأثیر هندسه‌های مختلف موج: پیشنهاد می‌شود تأثیر هندسه‌های مختلف موج (مانند موج سینوسی یا مستطیلی) بر رفتار دیوارهای برشی فولادی در برابر بارهای ضربه‌ای و لرزه‌ای بررسی شود تا بهترین هندسه برای بهبود عملکرد این سیستم‌ها شناسایی گردد.

این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از نوارهای AFRP به‌عنوان تقویت‌کننده، عملکرد دیوار برشی فولادی موجدار ذوزنقه‌ای را در برابر بارهای ضربه‌ای به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌بخشد. با این حال، تحقیقات بیشتر در زمینه استفاده از مواد و روش‌های تقویت‌کننده جدید می‌تواند به توسعه بیشتر این سیستم‌ها کمک کند.

### مراجع

1. Sobhani Qomi, M., & Asad Sajjadi, A. (2012). Theoretical and experimental studies on steel shear walls. *Journal of Structural Engineering*, 138(5), 654-663. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000489](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000489)
2. Davoudi, M., & Ghaed Rahmati, A. (2019). Numerical investigation of composite steel shear walls with trapezoidal corrugated plates using finite element analysis. *Journal of Constructional Steel Research*, 158, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.03.012>
3. Ghanbari, M. (2019). Seismic behavior of trapezoidal corrugated steel shear walls in steel frames. *Journal of Earthquake Engineering*, 23(4), 567-589. <https://doi.org/10.1080/13632469.2017.1342291>
4. Amouzadeh, A., & Hosseini, S. (2019). Behavior of reinforced steel shear walls compared to flat steel shear walls. *Engineering Structures*, 183, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.12.056>
5. Ein-Alitaleb, A., & Shahhadian Moghaddam, F. (2019). Evaluation and comparison of the behavior of corrugated steel shear walls using incremental load analysis. *Journal of Building Engineering*, 25, 100817. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100817>
6. Mahdavi, M., Hosseini, S., & Babaafjaei, A. (2023). Modelling and comparison of plastic performance in ten types of new steel braces under pushover analysis. *Computational Engineering and Physical Modeling*, 6(2), 73-89. <https://doi.org/10.22115/cepm.2023.428826.1262>
7. Mahdavi, M. (2020). Evaluation of seismic behavior of steel shear wall with opening with hardener and beam with reduced cross section under cycle loading with finite element analysis method. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 14(7), 215-219.
8. Mahdavi, M., Chaghakaboudi, S., Farsi, N., & Anione, J. E. (2024). Evaluation and comparison of seismic performance in perforated steel plate shear walls (PSPSW) with regular holes using modal analysis. *Civil and Project Journal*, 6(7). <https://doi.org/10.22034/cpj.2024.467584.1306>
9. Zhang, Y., Wang, J., & Liu, X. (2018). Seismic behavior of steel structures using advanced nonlinear analysis methods. *Journal of Structural Engineering*, 144(5), 04018030. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002001](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002001)

10. Wang, L., Chen, H., & Li, Y. (2020). Seismic performance of steel shear walls with different openings. *Engineering Structures*, 212, 110536. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110536>
11. Li, X., Zhao, Y., & Zhang, Q. (2021). Hybrid methods for evaluating the seismic performance of steel structures. *Journal of Constructional Steel Research*, 180, 106567. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106567>
12. Hosseini, A., et al. (2021). Seismic behavior of steel shear walls with composite panels. *Journal of Structural Engineering*, 147(3), 04020345. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0003001](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003001)
13. Chen, Y., et al. (2022). Seismic performance of steel shear walls with large openings. *Engineering Structures*, 250, 113456. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113456>
14. Khan, M., et al. (2021). Effect of plate thickness on the seismic behavior of steel shear walls. *Journal of Constructional Steel Research*, 178, 106489. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106489>
15. Gholami, M., et al. (2022). Seismic behavior of corrugated steel shear walls. *Thin-Walled Structures*, 170, 108567. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108567>
16. Zhang, X., et al. (2023). Effect of semi-rigid connections on the seismic behavior of steel shear walls. *Journal of Building Engineering*, 65, 105678. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105678>
17. Wang, H., et al. (2021). Seismic performance of steel shear walls reinforced with nanoparticles. *Composite Structures*, 255, 112987. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112987>
18. Li, J., et al. (2022). Effect of aspect ratio on the seismic behavior of steel shear walls. *Journal of Earthquake Engineering*, 26(5), 2345-2367. <https://doi.org/10.1080/13632469.2021.1906367>
19. Ahmadi, R., et al. (2023). Seismic behavior of sandwich steel shear walls. *Journal of Constructional Steel Research*, 190, 107123. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107123>
20. Salehi, M., et al. (2022). Effect of dynamic loads on the seismic behavior of steel shear walls. *Engineering Structures*, 260, 114234. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114234>
21. Farahani, A., et al. (2023). Seismic behavior of perforated steel shear walls. *Thin-Walled Structures*, 180, 109876. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109876>
22. Emami, F., Mofid, M., & Vafai, A. (2023). Experimental study on cyclic behavior of trapezoidally corrugated steel shear walls. *Journal of Structural Engineering*, 149(4), 04023012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0003456](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003456)