

Strengthening and Investigating the Effect of Various FRP Strip Configurations on the Behavior of Masonry Wall Subjected to Blast Loading

Mahdi Yazdani¹, Seyed Ahmad Hosseini^{2*} 

1. Ph.D. Student, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
2. Assistant Professor, Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

Abstract

So far, the performance of masonry walls against in-plane lateral loads such as earthquake loads has been extensively studied, but less attention has been paid to out-of-plane loads such as explosions. Due to their large surface area, walls endure significant forces during explosions, leading to extensive damage and potentially causing severe financial losses and casualties. Given the increase in terrorist and sabotage attacks, reinforcing these structures seems necessary. In recent years, fiber-reinforced polymers (FRP) have been widely and effectively used in the reinforcement and performance improvement of these structures. Their light weight, high stiffness and high strength, and corrosion resistance are among the properties that have attracted researchers to use these materials. Finite element modeling not only provides a basis for better understanding the behavior of masonry walls but also is very useful in predicting the behavior of these members after reinforcement, especially in the absence of experimental results. In this study, using numerical modeling in ABAQUS software, the behavior of masonry walls reinforced with FRP strips against a blast with an explosive charge equivalent to 150 kg of TNT (the weight of explosive likely to be carried in a sabotage attempt via a vehicle) at a distance of 5 meters was investigated. Lagrangian equations were used to model the mechanical behavior of the structure, and the solver used in this research is an explicit solver to account for the time factor in the software's integration process. The total time considered for the entire explosion process is 1 second, and the explosive load was applied to the studied structure using the Conwep method. The type of fibers, width, thickness, area, and angle of the FRP strips were important and influential parameters that were examined for the efficiency of this reinforcement method. The modeling results indicate that this reinforcement technique is highly effective in strengthening masonry walls against explosions, as it has reduced the deflection of the wall by at least 70% and its energy by up to 90%. It can also be inferred that an arrangement for reinforcing masonry walls with FRP strips is suitable if it covers the areas prone to damage, which in masonry walls are the mortar joints between the bricks. Therefore, the horizontal arrangement shows better performance compared to the vertical and diagonal arrangements. Similarly, reinforcing 100% of the wall area performs much better than reinforcing 50% and 25% of the wall area, but it is not economically acceptable. In general, similar to structural elements, non-structural elements can also exhibit plastic behavior in critical situations, preventing the collapse of these elements due to the absorbed energy. Therefore, walls with higher plastic energy show better behavior against explosive loads. Additionally, based on the hysterical displacement and kinetic energy diagrams of the wall, it can be seen that the behavior of reinforced walls is oscillatory, while the behavior of unreinforced walls is noticeably pulsating. Finally, the optimal arrangement of FRP strips proposed for reinforcing masonry walls against explosions in this study is the use of CFRP strips horizontally, with a thickness of 1 mm, a width of 24 cm, and covering 50% of the surface area; This configuration successfully decreased the deflection of the wall from 63.1 cm to 7.7 cm and damped approximately 13% of the blast wave energy.

Review History

Received: Dec 05, 2024

Revised: Dec 10, 2024

Accepted: Nov 25, 2024

Keywords

Masonry wall

Explosion

Strengthening

FRP Composite

Numerical Modeling

* Corresponding Author Email: hosseini@mut.ac.ir - ORCID: 0000-0001-9268-9295



مقاوم سازی و بررسی تاثیر آرایش های مختلف نوارهای FRP بر رفتار دیوار بنایی در برابر بار انفجار

مهدی یزدانی^۱، سید احمد حسینی^{۲*} 

۱. دانشجوی دکترا، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

۲. استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

سازه های بنایی پتانسیل خرابی شدیدی در انفجار داشته و با توجه به افزایش حوادث تروریستی، مقاوم سازی این ساختمان ها ضروری به نظر می رسد. در سی سال گذشته، پلیمرهای مسلح شده با الیاف (FRP) کاربرد گسترده و مناسبی در امر مقاوم سازی و بهبود عملکرد این سازه ها داشته است. مدل سازی به روش اجزا محدود ضمن ایجاد زمینه ای برای درک بهتر رفتار دیوارهای بنایی، در پیش بینی رفتار این اعضا پس از تقویت، در فقدان نتایج آزمایشگاهی بسیار مفید خواهد بود. در این پژوهش، با استفاده از مدل سازی عددی در نرم افزار آباکوس، رفتار دیوارهای بنایی تقویت شده با ورق های FRP در برابر انفجاری با خرج ماده منفجره معادل ۱۵۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۵ متری مورد بررسی قرار گرفت و پارامترهای لازم و تاثیرگذار برای بررسی کاربرد این روش مقاوم سازی تحلیل شدند. عرض، ضخامت، مساحت و زاویه چیدمان ورق های FRP از پارامترهای موثر بر رفتار دیوارهای بنایی تقویت شده به شمار می رود. نتایج حاصل از مدل سازی نشان می دهد که این روش مقاوم سازی برای تقویت دیوار بنایی در مقابل انفجار کارامد بوده به طوری که جابه جایی ۶۳ سانتی متری مرکز دیوار حداقل ۷۰ درصد و انرژی آن تا ۹۰ درصد نیز کاهش داشته است. علاوه بر این مقاوم سازی دیوارها با نوارهای افقی در مقایسه با نوارهای عمودی و قطری، عملکرد دیوار را به مقدار بیشتری بهبود می بخشد.

کلمات کلیدی

دیوار بنایی، انفجار

مقاوم سازی

کامپوزیت FRP

مدل سازی عددی

۱- مقدمه

آجر می باشد. ضرورت بررسی مقاوم سازی این نوع دیوارها در برابر تهدیدات ناشی از انفجارات عمود بر سطح احساس شد. تاکنون عملکرد دیوارهای آجری در برابر بارهای جانبی داخل صفحه مانند بار زلزله مورد مطالعه زیادی قرار گرفته ولی در برابر بارهای عمود بر صفحه مانند بار انفجار کمتر مورد توجه بوده است. دیوارها به دلیل مساحت بسیار زیادی که دارند، در انفجار نیروی زیادی را متحمل می شوند که استعداد بالای خرابی آن ها را در پی دارد. در این تحقیق با در نظر گرفتن یک دیوار بنایی آجری با مشخصات ثابت و تنها با تغییر پارامترهای تاثیرگذار بر مقاوم سازی

با توجه به اینکه حملات تروریستی در سال های اخیر شکل وسیع تری به خود گرفته است و بیشتر حملات به صورت بمب های حجیم منفجر شده در اطراف ساختمان ها می باشد که منجر به خسارات جانی و سازه ای به ویژه دیوارها با مصالح بنایی می شود. لیکن از آنجایی که نمی توان از وقوع چنین رخدادهایی جلوگیری کرد و نیز به علت شکست و گسیختگی این دیوارها عمدتاً به دلیل ناکافی بودن شکل پذیری و مقاومت لازم مصالح می باشد. پس با توجه به اینکه بیشتر دیوارهای موجود در بناهای کشور از مصالح

* رایانامه نویسنده مسئول: hoseini@mut.ac.ir - ORCID - 0000-0001-9268-9295

کپی رایت © ۲۰۲۵، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه ای کپی، باز نشر و باز آفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیر تجاری استفاده کنید.



به کمک پوشش FRP، پاسخ دیوار به این تغییرات بررسی شد.

۲- تاریخچه مطالعات

طراحی و ساخت سازه‌های مقاوم در برابر انفجار مقرون به صرفه نیست. ولی با تمهیداتی می‌توان از شدت و دامنه خسارات وارد شده کاست و عملکرد سازه را ارتقا بخشید. بیشتر ساختمان‌های موجود را سازه قاب تشکیل می‌دهد که معمولاً از یک قاب با ظرفیت باربری نسبتاً بالا و دیوار پر شده با مقاومت نسبتاً کم تشکیل شده است [1, 2]. مطالعات زیادی نشان می‌دهد که میزان آسیب دیوار بنایی در مقایسه با قاب تحت بار انفجار شدیدتر بوده و آوارهای پرتاب‌شده به طور اجتناب‌ناپذیری یک تهدید بزرگ برای افراد و ابزار موجود در سازه خواهد بود [3-7]. بنابراین، یافتن روش‌های حفاظتی مؤثر برای کاهش آسیب دیوارهای بنایی آسیب‌پذیر تحت بار انفجار از اهمیت بالایی برخوردار است.

رویکردی که برای مقاوم‌سازی دیوارهای موجود در برابر انفجار باید در نظر گرفت، تقویت خارجی آن‌هاست و استفاده از پلیمرهای مسلح‌شده با الیاف تکنیکی است که اخیراً اقبال زیادی دارد [8-10]. سیستم‌های متداول FRP مورد استفاده عبارتند از: الیاف کربن، شیشه، آرامید و یا بازالت که توسط یک ماتریکس پلیمری مانند اپوکسی، وینیل استر یا پلی استر برای ساختن CFRP، GFRP، AFRP و BFRP به یکدیگر متصل می‌شوند [11-15]. ژاک [16] اثر استفاده از پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف را به عنوان یک استراتژی مقاوم‌سازی برای بهبود مقاومت در برابر انفجار در دیوارها و دال‌های بتنی بررسی کرد که افزایش قابل توجهی در استحکام و سختی و کاهش قابل توجهی در حد بیشتر جابه‌جایی نمونه‌های تقویت شده با FRP مشاهده شد. اورتون و همکاران [17] اثر بار انفجار ضعیف بر دال بتنی تقویت شده با CFRP را بررسی کرد. یافته‌های آزمایش نشان داد که CFRP به طور مؤثر در برابر بار انفجار مقاومت می‌کند و انحرافات دال را کاهش می‌دهد؛ اما تحت بارهای انفجاری شدید، بتن به طور فاجعه‌باری در ضخامت دال شکست خورد و پارگی کامل در سطح پشتی CFRP قابل مشاهده بود. به منظور تعیین اثر سازه‌های بتنی تقویت شده با FRP هنگام قرار گرفتن در معرض بارهای انفجاری، رویکردهای عددی متعددی پیشنهاد شده است؛

بررسی‌های عددی موتالیب و همکاران [18] نشان می‌دهد که حفظ عملکرد ترکیبی بین FRP و بتن به طور قابل توجهی به استحکام پیوند بین دیوار و پوشش FRP و هم‌چنین تعداد لایه‌های آن بستگی دارد و نتایج نشان داد که تقویت دیوار بتن آرمه با FRP به طور مؤثری ظرفیت آن را برای مقاومت در برابر بارهای انفجار افزایش می‌دهد. الانچیزیان و همکاران [19] نیز اثر نرخ کرنش بر رفتار مکانیکی و خمشی لایه‌های کامپوزیت CFRP و GFRP را بررسی کرده و نتیجه گرفتند که اگرچه کرنش تا شکست برای هر دو ماده CFRP و GFRP با افزایش نرخ کرنش کاهش یافت، اما مقاومت دینامیکی ماده GFRP با افزایش نرخ کرنش بهبود پیدا کرد.

به طور کلی تحقیقات موجود در مورد بررسی تقویت FRP با زیرساخت‌های عمرانی در برابر بارهای انفجار بیشتر بر روی دیوارها سازه‌ای [20, 21]، دال‌ها [22, 23] و یا تیرها [24, 25] متمرکز است. بنابراین، نیاز به مطالعه اثر آرماتور FRP روی دیوارهای بنایی تحت بارگذاری انفجار وجود دارد.

۳- رفتار مصالح

۳-۱- مصالح بنایی

سازه بنایی یک ماده ناهمسانگرد ترکیبی می‌باشد و سازوکار رفتارش کاملاً بستگی به ویژگی‌های اجزاء تشکیل‌دهنده‌اش دارد. به بیان ساده‌تر، سازه‌های بنایی از واحدهای بنایی تشکیل یافته‌اند که به وسیله ملات به یکدیگر متصل شده‌اند. واحد بنایی و ملات هرکدام ویژگی‌های منحصر به فرد خود را دارند که همین امر باعث ایجاد ترکیبی غیرهمگن از آن‌ها در ساخت دیوارهای بنایی شده است که در نهایت موجب تغییر در رفتار دیوار می‌شود. دیوارهای بنایی به صورت مصالح کامپوزیتی که شامل مصالح آجر و ملات می‌باشند غیرایزوتروپیک و دارای رفتار غیرخطی هستند. مطابق شکل (۱)، سه روش مرسوم در زمینه مدل‌سازی دیوارهای بنایی وجود دارند. در روش اول می‌توان دیوار را به صورت هموژن و یک‌دست در نظر گرفت که از دقت چندانی برخوردار نمی‌باشد [26]. در روش دیگر، مصالح آجر و ملات و سطح مشترک بین آن‌ها به صورت جداگانه مدل‌سازی می‌شود که به دلیل دقت بالای این روش، حجم محاسبات و زمان تحلیل آن افزایش می‌یابد. روش آخر که از دقت کافی برخوردار است و در عین حال حجم

می شود و با بارگذاری بیشتر، سازوکار کاهش سختی مصالح شروع می شود که پارامترهای خرابی به عنوان کنترل کننده کاهش سختی از مقدار صفر (بدون خرابی) شروع شده و تا مقدار یک (خرابی کامل) ادامه می یابند.

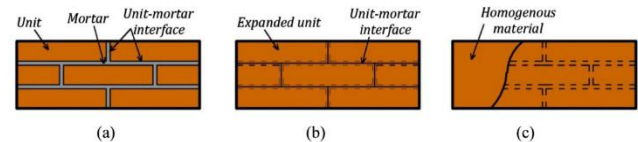
۴- روش تحقیق

۴-۱- بیان مسئله

در این تحقیق با در نظر گرفتن مقدار وزنی ماده منفجره ای که احتمال می رود در یک اقدام خرابکارانه از طریق وسیله نقلیه (خودرو با اندازه متوسط) حمل شود، مقدار ۱۵۰ کیلوگرم معادل ماده منفجره TNT در نظر گرفته شد [29]. هم چنین، فاصله انفجار برابر با ۵ متر انتخاب شد که برای اتخاذ تدابیر امنیتی و تمهیدات بازدارنده مانند حصارکشی و ایجاد محوطه قرق، از نظر اقتصادی به صرفه باشد.

۴-۲- مدل سازی عددی

در این مطالعه برای شبیه سازی اجزا محدود از نرم افزار اجزا محدود آباکوس نسخه ۲۰۲۲ استفاده شد. از آنجایی که آنالیز غیرخطی قدرتمندترین ابزار برای تحلیل انواع سازه ها با مصالح مختلف از جمله مصالح بتنی و آجری است. در این روش امکان پیگیری کامل پاسخ سازه از مرحله الاستیک تا مرحله ترک خوردگی و خردشدگی تا گسیختگی نهایی وجود دارد. به دلیل وجود ملات و درز ملات در سازه های بتنی و آجری که به صورت یک سری صفحات ضعیف عمل می کنند، رفتار سازه های بتنی یا بنایی حتی در برابر بارهای متوسط و نه چندان شدید نیز یک رفتار غیرخطی است. بنابراین آنالیز غیرخطی به عنوان بهترین و کامل ترین روش برای سازه های آجری شمرده می شود. برای مدل سازی رفتار مکانیکی سازه از معادلات لاگرانژی استفاده شده است و حلگر مورد استفاده در این تحقیق حلگر از نوع صریح (Explicit) می باشد تا عامل زمان در فرآیند انتگرال گیری نرم افزار لحاظ شود. زمان در نظر گرفته شده برای کل فرآیند انفجار برابر ۱ ثانیه می باشد. اعمال بار انفجاری روی سازه مورد مطالعه با استفاده از روش CONWEP صورت گرفته است که با استفاده از تکنیک های اتصال منحنی، معادلات با درجه بالای نمایی را برای رفتار انفجار در نظر می گیرد.



شکل ۱. انواع روش مدل سازی دیوار بنایی

(الف) ماکرو، (ب) میکرو ساده شده، (ج) میکرو [26]

Fig. 1. Types of masonry wall modeling methods: a) detailed Micro, b) simplified Micro, c) Macro [26]

محاسبات مدل منطقی و مناسب است، روش میکرو ساده شده نام دارد که ملات در آن مدل سازی نمی شود اما اثر چسبندگی آن برآجرها به طور کامل مدل سازی می شود [27].

۳-۲- کامپوزیت FRP

کامپوزیت ها هم چنان که از نامشان پیداست ترکیبی فیزیکی از دو یا چند ماده هستند که ماده حاصل دارای ویژگی های خاصی است که در هیچ یک از مواد تشکیل دهنده به تنهایی یافت نمی شود. وزن سبک، سختی و مقاومت زیاد و مقاومت در برابر خوردگی از جمله خواصی است که استفاده از این مواد را برای بهسازی و ترمیم سازه ها مورد توجه پژوهشگران قرار داده است. بر اساس معیار هشین چهار نوع مود گسیختگی شامل کشش در الیاف، فشار در الیاف، کشش در ماتریس و فشار در ماتریس بر اساس روابط ۱ تا ۴ محتمل بوده و هرگاه تنش ایجاد شده در هر یک از قسمت های الیاف و ماتریس تحت اثر فشار یا کشش، بیشتر از یک شود سازوکار خرابی آغاز می شود [28].

$$F_f^t = \left(\frac{\sigma_{11}^t}{X^T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}^t}{S^L}\right)^2 \quad (1)$$

$$F_f^c = \left(\frac{\sigma_{11}^c}{X^C}\right)^2 \quad (2)$$

$$F_m^t = \left(\frac{\sigma_{22}^t}{Y^T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}^t}{S^L}\right)^2 \quad (3)$$

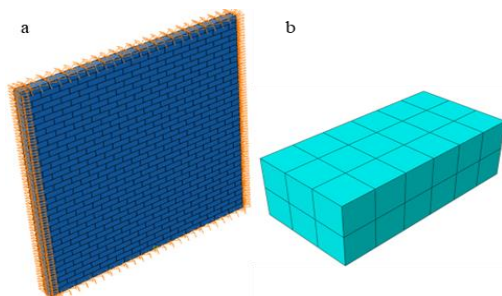
$$F_m^c = \left(\frac{\sigma_{22}^c}{2S^T}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y^C}{2S^T}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_{22}^c}{Y^C} + \left(\frac{\tau_{12}^c}{S^L}\right)^2 \quad (4)$$

که در این رابطه ها F_f^t و F_f^c به ترتیب کشش و فشار ایجاد شده در الیاف و F_m^t و F_m^c نیز به ترتیب کشش و فشار ایجاد شده در ماتریس می باشد. هم چنین σ_{ij} اعضای تانسور تنش مؤثر، X^C و X^T مقاومت کششی و فشاری در راستای طولی، Y^C و Y^T مقاومت کششی و فشاری در جهت الیاف عرضی و S^L و S^T مقاومت برشی در جهت طولی و عرضی می باشند. زمانی که تنش برابر یا بیشتر از یکی از مقادیر روابط ۱ تا ۴ شد سازوکار خرابی آغاز

دور دیوار صرف نظر شد و به محدود کردن درجات آزادی برای حصول به شرایط مفصلی اکتفا شده است (درجه آزادی انتقالی در سه جهت صفر قرار داده شد).

از آنجایی که مصالح بنایی مانند بتن رفتار می کنند بنابراین برای توصیف رفتار غیرخطی بتن، مدل خرابی پلاستیسیته آن به نرم افزار معرفی شد. معیار خرابی و عملکرد تسلیم به ترتیب بر اساس مدل دراگر-پراگر و عملکرد لابلینر تعیین شد. در این مدل فرض می شود

که تلفیق فشار و ترک بتن سازوکار اصلی شکست است. این مدل در بسیاری از تحقیقات برای مطالعه پاسخ دینامیکی سازه بتنی تحت بار انفجار استفاده شده است. پارامترهای مدل پلاستیک بتن آسیب دیده برای مصالح بنایی و همینطور رفتار آن در فشار و کشش به ترتیب در جدول های (۱ و ۲) ارائه شده است. همچنین تئوری هشین برای ارزیابی عملکردهای FRP های لایه ای برای مقاوم سازی دیوارها مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات الاستیک کامپوزیت های FRP و همینطور پارامترهای آسیب آن ها بر اساس معیار هشین به ترتیب در جدول های (۳ و ۴) ارائه شده است.



شکل ۲. الف) شرایط مرزی مفصلی دیوار بنایی

ب) واحد بنایی مدل شده با اندازه مش ۴ سانتی متر

Fig. 2. a) Joint boundary conditions of masonry wall; b) Modeled masonry unit with a mesh size of 4 cm

جدول ۱. مشخصات مکانیکی و پارامترهای CDP برای مصالح بنایی [31]

Table 1. Mechanical properties and CDP parameters for brick [31]

$E(\text{MPa})$	1892	ψ	20
ν	0.15	K	0.67
$f'_c (\text{MPa})$	9.9	e	0.1
$f_t (\text{MPa})$	0.69	(Fb_0/Fc_0)	1.16
$g(\text{kg}/\text{m}^3)$	1812	Viscosity	0

روش CONWEP یکی از روش های شناخته شده و رایج برای شبیه سازی آثار انفجار در محیط های عددی است که توسط ارتش ایالات متحده در نرم افزارهای محاسباتی توسعه داده شده است. این روش بر اساس داده های تجربی، مقدار فشار انفجار و زمان اعمال آن را برای سازه هایی که در معرض موج انفجار قرار می گیرند، محاسبه می کند. پارامترهای ورودی در این روش، مقدار ماده منفجره (معادل TNT) و همچنین فاصله بین محل انفجار و سازه هستند و باتوجه به رابطه ۵، فشاری که در هر نقطه از هدف وارد می شود تابعی از فشار بازتابی و فشار فرودی در آن نقطه و زاویه تابش موج انفجار می باشد [30].

$$p = p_i (1 + \cos \alpha - 2 \cos^2 \alpha) + p_r \cdot \cos^2 \alpha \quad (5)$$

که در آن α زاویه برخورد، P_i فشار فرودی و P_r فشار بازتابی است.

در این تحقیق، دیوار بنایی به روش میکرو ساده شده شبیه سازی شده است؛ یعنی یک واحد بنایی با مشخصات آجر مدل شده ولی به جای مدل کردن ملات، اثر چسبندگی آن بر آجرها اعمال شده است. مطابق شکل (۲)، ابعاد دیوار مدل شده در این تحقیق $3\text{m} \times 3\text{m}$ می باشد و هر آجر به ابعاد $80\text{mm} \times 120\text{mm} \times 240\text{mm}$ با استفاده از المان SOLID و به صورت سه بعدی شبیه سازی شده است. لازم به ذکر است که ارتفاع انتخاب شده برای سطح مقطع آجر به میزان یک سانتی متر بیش از مقدار واقعی در نظر گرفته می شود زیرا روش به کار گرفته شده از نوع میکرو ساده شده می باشد و به این ترتیب نیازی به مدل سازی ملات به صورت پارت های مجزا نمی باشد. به این دلیل لازم است به ارتفاع آجر (ناشی از وجود ملات در درزهای افقی) و به طول آجر (ناشی از وجود ملات در درزهای قائم) به میزان نیمی از ضخامت ملات در هر طرف افزوده شود. بنابراین اندازه ابعاد مربوط به ارتفاع و طول آجر به میزان یک سانتی متر افزایش داده شد. همچنین ورق های FRP نیز با استفاده از المان SHELL در نرم افزار شبیه سازی شده است که از قید tie برای اتصال این ورق ها به دیوار استفاده شد. از آنجایی که دیوار فقط تحت بار ثقلی وزن خودش و نیروی فشار انفجار قرار می گیرد و بار خارجی دیگری به آن وارد نمی شود، با یک فرض ساده کننده، از مدل سازی قاب

جدول ۲. رفتار فشاری و کششی مصالح بنایی برای مدل CDP [31]

Table 2. Compressive & tensile behavior of brick for CDP model [31]

Compressive behavior		Tensile behavior	
Yield stress (MPa)	Inelastic strain	Yield stress (MPa)	Cracking strain
6.92	0	0.69	0
8.00	0.00033	0.54	0.00011
9.68	0.00177	0.36	0.00029
9.90	0.00287	0.25	0.00042
9.68	0.00418	0.17	0.00055
8.63	0.00644	0.12	0.00067
7.28	0.00842	0.09	0.00078
4.28	0.01193	0.07	0.00078

جدول ۳. مشخصات رفتار الاستیک کامپوزیت های FRP [20, 32]

Table 3. Elastic behavior of FRP composites [20, 32]

	E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	ν_{12}	G_{12} (MPa)	G_{13} (MPa)	G_{23} (MPa)
CFRP	54000	2227	0.3	1127	1127	1127
GFRP	18000	818	0.3	414	414	414
BFRP	15000	10000	0.3	4800	4800	4800

جدول ۴. پارامترهای آسیب کامپوزیت های FRP بر اساس معیار هشین [32]

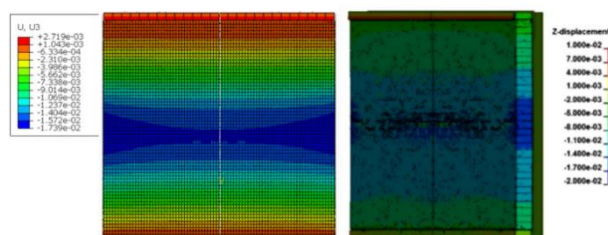
Table 4. Damage parameters of FRP composites based on Hashin model [32]

	CFRP	GFRP	BFRP
Tens. strength in norm. dir. of fiber (MPa)	1188	810	460
Comp. strength in norm. dir. of fiber (MPa)	3.96	2.7	260
Tens. strength in trans. dir. of fiber (MPa)	3.96	2.7	45
Comp. strength in trans. dir. of fiber (MPa)	3.96	2.7	60
Shear strength in norm. dir. of fiber (MPa)	3.96	2.7	35
Shear strength in trans. dir. of fiber (MPa)	3.96	2.7	20
Fracture Tens. energy in fibers' dir. (mJ)	92	92	73
Fracture Tens. energy in trans. dir. (mJ)	1.1	1.1	0.67
Fracture Comp. energy in fibers' dir. (mJ)	0.2	0.2	26.7
Fracture Comp. energy in trans. dir. (mJ)	0.2	0.2	13.3

۳-۴- درستی آزمایی

بخش حاضر به درستی آزمایی و مقایسه نتایج پژوهش انجام شده چیکیتو و همکاران [33] در سال ۲۰۲۱ و نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود در نرم افزار آباکوس اختصاص داده شده است. این پژوهشگران به بررسی دیوار بنایی تحت بار انفجار و تقویت آن ها به کمک پوشش FRP در نرم افزار المان محدود ال اس داینا پرداخته اند و و نتایج مدل سازی خود را با تحقیقات آزمایشگاهی (میدانی) مقایسه نموده اند. آن ها دیوار مورد نظر خود را با ابعاد $2.5m \times 2.5m$ از جنس آجر مدل کردند. چیکیتو و همکاران نوع انفجار را سطحی انتخاب کرده اند و تمام انفجارها با خرج تی ان تی $31/4$ کیلوگرم و در فاصله ۵ متری از دیوار مدل شده اند. هم چنین از شرایط مرزی گیردار برای دیوار استفاده کردند. هر چند که در ادامه، پژوهشگران فوق الذکر به این نتیجه رسیده اند که در انفجارهای شدید، همه شرایط مرزی به صورت مفصلی عمل خواهند کرد. اندازه آجر مورد استفاده در مدل چیکیتو

و همکاران به صورت $70mm \times 110mm \times 240mm$ میلی متر بوده، ضخامت ملات بین آجرها ۱۰ میلی متر در نظر گرفته شده و دیوارها با ضخامت ۲۴ سانتی متر مدل شدند. هم چنین در مدل سازی از المان مکعب مستطیلی هشت گره ای استفاده شده و برای مش بندی آجرها سه اندازه مختلف ۱۰، ۲۰ و ۴۰ میلی متر را امتحان کرده و نهایتاً مش مورد قبول که همگرایی و تطابق بیشتری با نتایج آزمایشگاهی داشته را ۴۰ میلی متر انتخاب کردند. شکل (۳) برای نمایش تطابق مطالعه چیکیتو و همکاران و این پژوهش استخراج شده است. هم چنین مقایسه میانگین تغییر شکل های رخ داده در جدول (۵) ارائه شده است. با توجه به نتایج، درستی مدل سازی این پژوهش محقق می شود و به نظر می رسد اختلافی هم که وجود دارد به دلیل تفاوت در شبیه سازی به کمک نرم افزارهای مختلف و فرض ساده کننده مورد استفاده در خلال مدل سازی می باشد.



شکل ۳. کانتور تغییر شکل دیوار در شبیه‌سازی این تحقیق و مقاله مرجع [33]

Fig. 3. Contour of the wall deflection in the research and the reference article [33]

جدول ۵. نتایج جابه‌جایی وسط دیوار در مدل پیشنهادی و مقایسه با نتایج عددی و آزمایشگاهی پژوهش مرجع [33]

Table 5. Results of the deflection of the wall in the proposed model and comparison with the numerical and experimental results (based on [33])

Deflection of the center of the wall (mm)			
ABAQUS (Error)	LS-DYNA[32] (Error)	Experimental	
15.21 (7.9%)	15.51 (10.1%)	14.09	Unreinforced wall
11.87 (5.3%)	12.11 (7.5%)	11.27	Reinforced wall

مستهلك شده در آن بیشتر می‌باشد.

۵- تجزیه و تحلیل

در این پژوهش سه خروجی مدنظر است؛

- خروجی جابه‌جایی: برای این کار، جابه‌جایی مرکز دیوار محاسبه می‌شود.
 - خروجی آسیب FRP: برای بررسی دقیق‌تر، کانتور آسیب کششی نوارهای FRP ارائه خواهد شد.
 - خروجی انرژی-زمان: برای ارزیابی تعادل انرژی، انرژی جنبشی کل سازه محاسبه خواهد شد.
- یکی از روش‌های بررسی پاسخ موانع سازه‌ای در معرض انفجار، انرژی رسیده به مانع می‌باشد. این انرژی به سه صورت خود را نشان می‌دهد؛ انرژی جنبشی (که سبب سرعت گرفتن المان می‌شود)، انرژی پتانسیل (یا انرژی کرنشی الاستیک) و انرژی مستهلك شده (ناشی از ترک‌های پلاستیک، اصطکاک داخلی، تغییر شکل‌های پلاستیک، خرد شدن). برای ایجاد بالانس انرژی، با توجه به کار خارجی انجام شده و مقابله با انرژی ورودی در سیستم، سازه با تغییر شکل‌های الاستیک، پلاستیک، میرایی و انرژی جنبشی سعی می‌کند تا تعادل را ایجاد نماید [34]. از آن جایی که میزان انرژی رسیده به موانع با ابعاد یکسان، مستقل از نوع تقویت و جنس مصالح به کار گرفته شده می‌باشد و با توجه به اینکه در لحظه پیک انرژی جنبشی، انرژی پتانسیل صفر می‌باشد، می‌توان انرژی مستهلك شده در حالات گوناگون مقاوم‌سازی را با یکدیگر مقایسه کرد. بنابراین در صورتی که پیک انرژی جنبشی در یک حالت کمتر از حالتی دیگر باشد در این صورت میزان انرژی

۵-۱- بررسی دیوار موجود مقاوم نشده

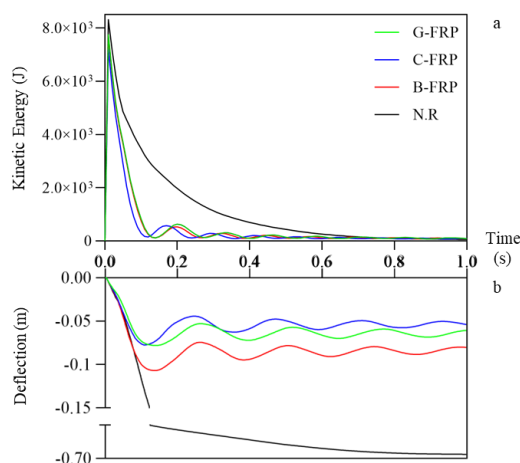
شکل (۴-الف) کانتور جابه‌جایی دیوار بنایی مقاوم نشده را در مقابل بار انفجار ناشی از ۱۵۰ کیلوگرم خراج TNT در فاصله ۵ متری از پاشنه دیوار نشان می‌دهد. همان‌طور واضح است، دیوار بنایی قابلیت سرویس‌دهی خود را کاملاً از دست داده و ملات و آجر هر دو دچار گسیختگی شده‌است. شکل (۴-ب) نیز نمودار انرژی‌های دیوار بنایی مقاوم نشده را نشان می‌دهد. با توجه به توضیحات بالا اختلاف میان کار خارجی و مجموع انرژی‌های پتانسیل و جنبشی، انرژی مستهلك شده می‌باشد که خود شامل انرژی مستهلك شده پلاستیک، انرژی مستهلك شده خرد شدن، انرژی مستهلك شده خزش می‌باشد.

کار اصلی این پژوهش از این بخش آغاز می‌شود. مدل پایه مطابق شکل (۵)، توسط چیدمان‌های متفاوت تقویت شد. این کار به این دلیل صورت می‌گیرد که الیاف FRP به دلیل سبکی، بدون افزودن جرم دیوار می‌تواند بسیار کارآمد باشند. افزون بر این، یافتن مناسب‌ترین چیدمان به دلیل گران بودن این کامپوزیت، گام بزرگی در بهینه کردن این دیوارها است. برای سنجش درستی چیدمان‌ها تلاش شد تا از منطقی بخردانه پیروی شود تا مقایسه آن‌ها و نتیجه‌گیری ساده‌تر شود. بر این اساس، متغیرهای در نظر گرفته برای این تحقیق شامل عرض نوار، ضخامت نوار، سطح پوشش، زاویه نوار و جنس فیبر می‌باشد.

۲-۵- بررسی اثر جنس فیبر

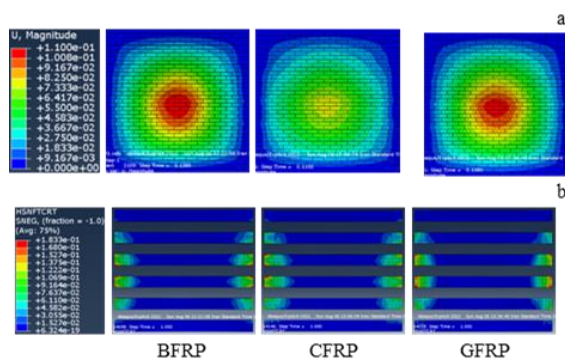
برای بررسی پارامتریک اثر جنس فیبر ورق های FRP، از نوار با فیبرهای شیشه، کربن و بازالت به ترتیب برای مقاوم سازی دیوارهای اول، دوم و سوم استفاده شده است. سایر پارامترها ثابت هستند یعنی عرض، ضخامت، سطح پوشش و چیدمان نوارهای FRP به ترتیب ۲۴ سانتی متر، ۱ میلی متر، ۵۰ درصد و افقی می باشد. نمودار انرژی جنبشی دیوار و جابه جایی مرکز آن برای جنس های مختلف الیاف نوار، در شکل (۶) نشان داده شده است.

با توجه به نمودارها و کانتورهای شکل های (۶ و ۷)، جنس فیبر نوارهای FRP اثر قابل توجهی بر انرژی جنبشی دیوار و خرابی کششی نوارهای FRP نمی گذارد و فقط جابه جایی مرکز دیوار مقاوم شده با نوار BFRP متفاوت است به طوری که جابه جایی مرکز دیوار مقاوم شده با نوارهای GFRP، CFRP و BFRP به ترتیب برابر ۷/۷، ۸/۷ و ۱۰/۷ سانتی متر می باشد.



شکل ۶. تاثیر جنس فیبر بر: الف) نمودار انرژی جنبشی دیوار، ب) نمودار تاریخچه زمانی تغییر شکل مرکز دیوار

Fig. 6. Effect of fiber type on: a) kinetic energy, b) Time history deformation

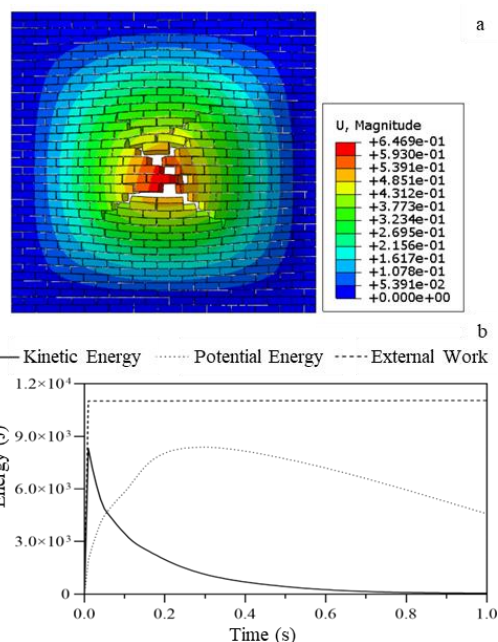


شکل ۷. تاثیر جنس فیبر بر:

الف) کانتور جابه جایی دیوار، ب) کانتور آسیب کششی FRP

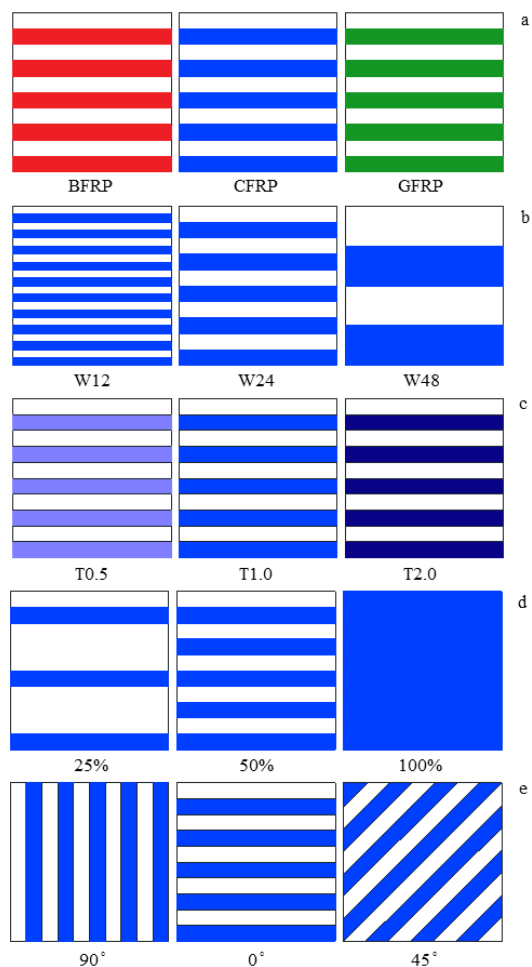
Fig. 7. Effect of fiber type on:

a) wall displacement contour, b) FRP tensile damage contour



شکل ۴. الف) کانتور تغییر شکل و ب) نمودار انرژی های دیوار

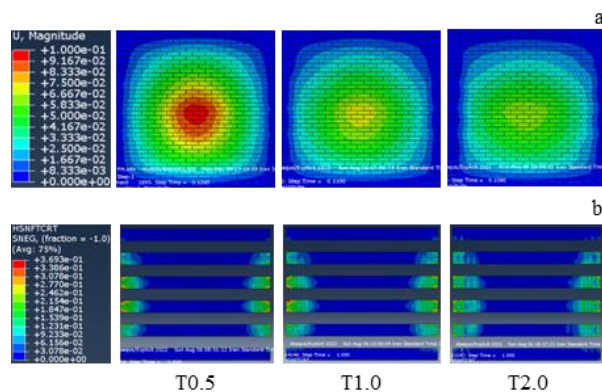
Fig. 4. a) Deflection and b) Energy diagram of unreinforced wall



شکل ۵. چیدمان های مختلف تقویت برای مطالعه اثر پارامترهای:

الف) جنس الیاف، ب) عرض، ج) ضخامت، د) سطح پوشش، ه) زاویه

Fig. 5. Different reinforcement arrangements to study the effect of parameters: a) type of fibers, b) strip width, c) strip thickness, d) coverage percentage, e) strip angle



شکل ۱۱. تاثیر ضخامت نوار بر:

(الف) کانتور جابه‌جایی دیوار، (ب) کانتور آسیب کششی FRP

Fig. 11. Effect of strip thickness on:

a) wall displacement contour, b) FRP tensile damage contour

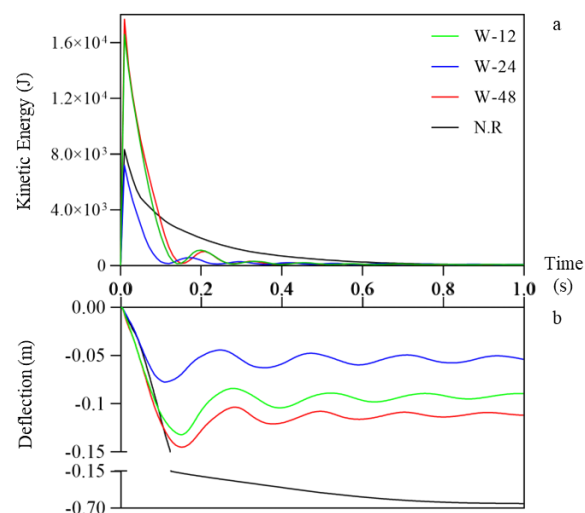
۳-۵- بررسی اثر عرض نوار

برای بررسی پارامتریک اثر عرض ورق‌های FRP، از نوار با عرض‌های ۱۲، ۲۴ و ۴۸ سانتی‌متری به ترتیب برای مقاوم‌سازی دیوارهای اول، دوم و سوم استفاده شده است. سایر پارامترها ثابت هستند یعنی ضخامت، سطح پوشش، چیدمان و جنس فیبر نوارهای FRP به ترتیب ۱ میلی‌متر، ۵۰ درصد، افقی و کربن می‌باشد. نمودار انرژی جنبشی دیوار و جابه‌جایی مرکز آن برای عرض‌های مختلف نوار، در شکل (۸) نشان داده شده‌است.

با توجه به شکل (۸)، جابه‌جایی مرکز دیوار مقاوم‌شده با نوارهای FRP با عرض متوسط (۲۴ سانتی‌متر) حدوداً نصف جابه‌جایی مرکز دیوار مقاوم‌شده به کمک نوار با عرض‌های ۱۲ سانتی‌متر و ۴۸ سانتی‌متر می‌باشد و حدیشت انرژی جنبشی برای عرض‌های ۱۲، ۲۴ و ۴۸ سانتی‌متر به ترتیب برابر ۱۶/۵۸، ۷/۱۹ و ۱۷/۶۸ کیلوژول می‌باشد. هم‌چنین بر مبنای کانتورهای جابه‌جایی مرکز دیوار و خرابی نوارهای FRP که در شکل (۹) نشان داده شده‌است، عرض ۲۴ سانتی‌متری نوارهای FRP عملکرد بهتری را نسبت به دیگر عرض‌های نوار از خود نشان داده‌است.

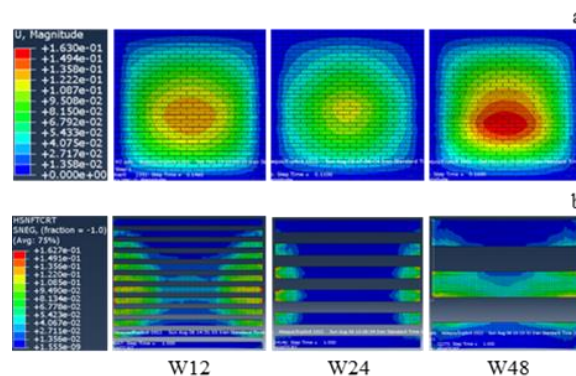
۴-۵- بررسی اثر ضخامت نوار

برای بررسی پارامتریک اثر ضخامت ورق‌های FRP، از نوار با ضخامت‌های ۰/۵، ۱ و ۲ میلی‌متری استفاده شده‌است. همانطور که در شکل (۱۰) مشخص است، دیوار مقاوم‌شده به وسیله نوار با ضخامت‌های مختلف، تقریباً انرژی جنبشی یکنواختی را تجربه کرده اما جابه‌جایی مرکز دیوار با ضخامت نوارهای FRP رابطه مستقیم دارد. هم‌چنین با توجه به شکل (۱۱)، خرابی نوارهای FRP با ضخامت‌های ۰/۵ میلی‌متر و ۱ میلی‌متر تقریباً یکسان بوده که از خرابی نوار با ضخامت ۲ میلی‌متر کمتر است که منطقی می‌باشد.



شکل ۸. تاثیر عرض نوار بر: (الف) نمودار انرژی جنبشی دیوار، (ب) نمودار تاریخچه زمانی تغییر شکل مرکز دیوار

Fig. 8. Effect of strip width on: a) kinetic energy, b) Time history deformation

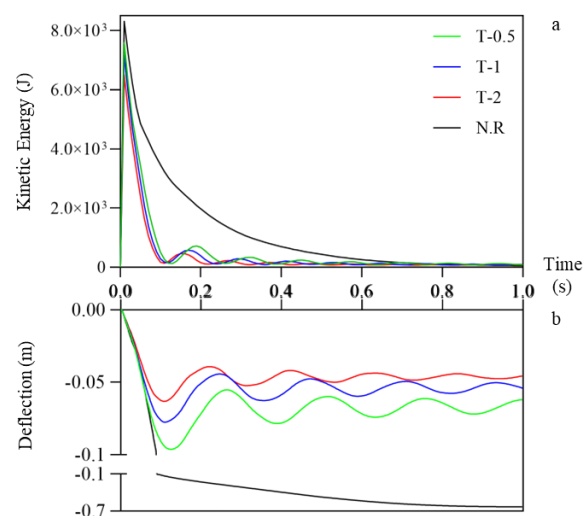


شکل ۹. تاثیر عرض نوار بر:

(الف) کانتور جابه‌جایی دیوار، (ب) کانتور آسیب کششی FRP

Fig. 9. Effect of strip width on:

a) wall displacement contour, b) FRP tensile damage contour



شکل ۱۰. تاثیر ضخامت نوار بر: (الف) نمودار انرژی جنبشی دیوار، (ب) نمودار تاریخچه زمانی تغییر شکل مرکز دیوار

Fig. 10. Effect of strip thickness on: a) kinetic energy, b) Time history deformation

۵-۵- بررسی اثر درصد پوشش

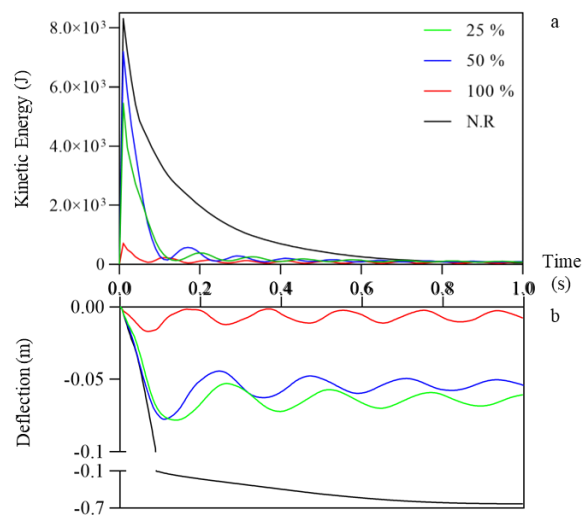
برای بررسی پارامتریک اثر مساحت ورق های FRP، از مقادیر ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ درصد سطح پوشش به ترتیب برای مقاوم سازی دیوارهای اول، دوم و سوم استفاده شده است. سایر پارامترها ثابت هستند یعنی عرض، ضخامت، چیدمان و جنس فیبر نوارهای FRP به ترتیب ۲۴ سانتی متر، ۱ میلی متر، افقی و کربن می باشد. نمودار انرژی جنبشی دیوار و جابجایی مرکز آن، در شکل (۱۲) و شکل (۱۳) نیز کانتور جابه جایی و خرابی پوشش FRP را برای مساحت های مختلف نوار نشان داده شده است.

همانطور که در شکل (۱۲) قابل مشاهده است، با افزایش سطح پوشش نوارهای FRP از ۲۵ درصد به ۵۰ درصد، تفاوت چندانی در جابه جایی مرکز ایجاد نمی شود. اما وقتی که سطح مقاوم سازی به روش FRP به ۱۰۰ درصد می رسد (یعنی پوشش کل دیوار)، حدیشتتر جابه جایی مرکز دیوار به حدود ۱۷ میلی متر می رسد. علاوه بر این، انرژی جنبشی و خرابی پوشش FRP هم به طور چشم گیری کاهش می یابد. با این حال پوشش این درصد از سطح دیوار صرفه اقتصادی خوبی ندارد.

۵-۶- بررسی اثر زاویه نوار

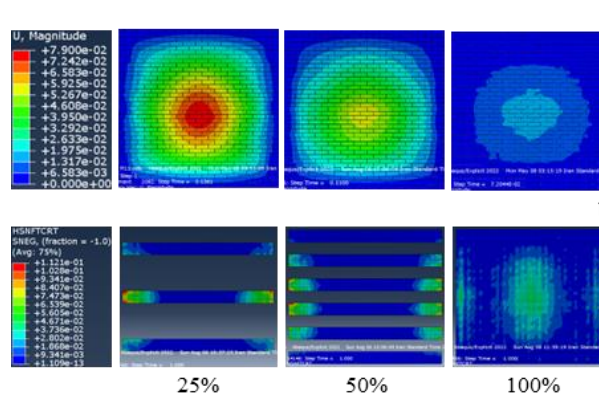
برای بررسی پارامتریک اثر زاویه ورق های FRP، از نوار با زاویه های ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه ای به ترتیب برای مقاوم سازی دیوارهای اول، دوم و سوم استفاده شده است. سایر پارامترها ثابت هستند یعنی عرض، ضخامت، سطح پوشش و جنس فیبر نوارهای FRP به ترتیب ۲۴ سانتی متر، ۱ میلی متر، ۵۰ درصد و کربن می باشد. نمودار انرژی جنبشی دیوار و جابه جایی مرکز آن برای زاویه های مختلف نوار، در شکل (۱۴) نشان داده شده است.

حدیشتتر انرژی جنبشی برای نوار با زاویه های صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه به ترتیب برابر ۷/۱۹، ۶/۴۱ و ۷/۲۷ می باشد. علاوه بر این همان طور که در شکل (۱۴-ب) مشخص است، چیدمان افقی نوارهای FRP عملکرد قابل قبول تری را نسبت به دیگر چیدمان ها از خود نشان داده به طوری که جابه جایی مرکز دیوار با نوارهای افقی، با کاهشی ۳۶ درصدی و ۵۸ درصدی به ترتیب نسبت به چیدمان های مورب و قائم داشته است. دلیل این پدیده را می توان به پوشش کامل درزهای افقی و سرتاسری آجرها توسط نوارهای افقی نسبت داد. هم چنین از شکل (۱۵) هم می توان نتیجه گرفت



شکل ۱۲- تاثیر درصد پوشش بر: الف) نمودار انرژی جنبشی دیوار، ب) نمودار تاریخچه زمانی تغییر شکل مرکز دیوار

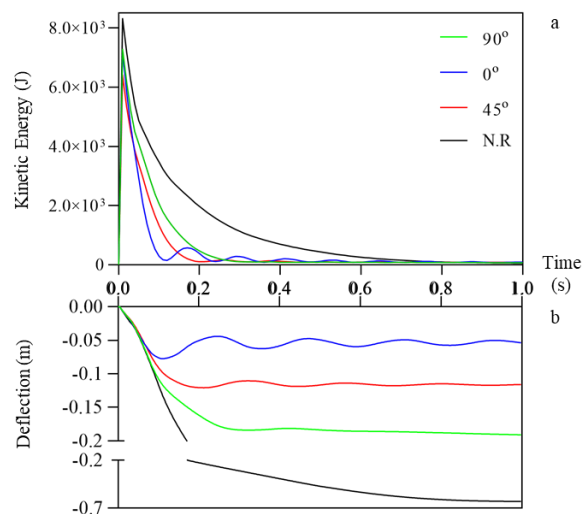
Fig. 12. Effect of coverage percentage on: a) kinetic energy, b) Time history deformation



شکل ۱۳. تاثیر درصد پوشش بر:

الف) کانتور جابجایی دیوار، ب) کانتور آسیب کششی FRP

Fig. 13. Effect of coverage percentage on: a) wall displacement contour, b) FRP tensile damage contour

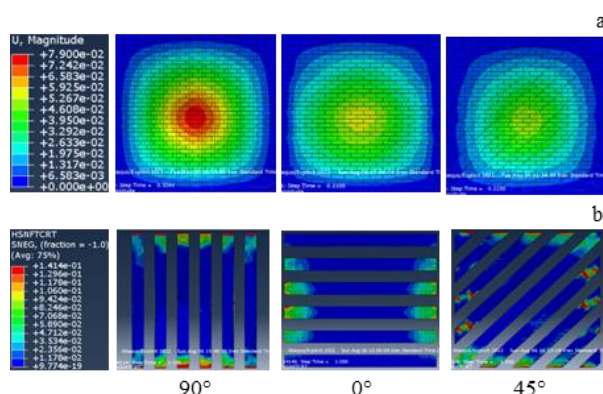


شکل ۱۴. تاثیر زاویه نوار بر: الف) نمودار انرژی جنبشی دیوار، ب) نمودار تاریخچه زمانی تغییر شکل مرکز دیوار

Fig. 14. Effect of strip angle on: a) kinetic energy, b) Time history deformation

کارامد بوده به طوری که جابه جایی مرکز دیوار حداقل ۷۰ درصد و انرژی آن تا ۹۰ درصد نیز کاهش داشته است.

۴- در نهایت آرایش بهینه پیشنهادی، استفاده از نوارهای CFRP به صورت افقی، با ضخامت ۱ میلی متر، عرض ۲۴ سانتی متر و پوشش ۵۰ درصد سطح می باشد. این آرایش توانسته خیز قائم دیوار را از ۶۳/۱ سانتی متر به ۷/۷ سانتی متر کاهش دهد و چیزی حدود ۱۳ درصد از انرژی حاصل از موج انفجار را دمپ کند.



شکل ۱۵. تاثیر جنس فیبر بر:

(الف) کانتور جابه جایی دیوار، (ب) کانتور آسیب کششی FRP

Fig. 15. Effect of strip angle on:

a) wall displacement contour, b) FRP tensile damage contour

جدول ۶. خلاصه نتایج جابه جایی نهایی مرکز و حدیشت انرژی جنبشی دیوار

Table 6. Summary results of residual displacement and maximum kinetic energy of the wall

	Sample	Deflection (cm)	Deflection Change (%)	Max Kinetic Energy (kJ)	Kin. Energy Change (%)
Fiber Type	N.R	63.1	-	8.31	-
	GFRP	7.8	-88	7.74	-7
	CFRP	7.7	-88	7.19	-13
	BFRP	10.7	-83	7.70	-7
Strip Width	12	13.2	-79	16.58	+99
	24	7.7	-88	7.19	-13
	48	14.5	-77	17.67	+113
Strip Thickness	0.5	9.6	-85	7.60	-9
	1.0	7.7	-88	7.19	-13
	2.0	6.3	-90	6.50	-22
Coverage Percentage	25	7.8	-88	5.45	-34
	50	7.7	-88	7.19	-13
	100	1.7	-97	7.09	-91
Strip Angle	0	7.7	-88	7.19	-13
	45	12.1	-81	6.41	-23
	90	18.4	-71	7.28	-12

قردرانی نویسندگان

در انجام این پژوهش، از سوی مراکز یا دانشگاه ها حمایتی

زاویه نوار تاثیر زیادی بر خرابی نوارها ندارد و تقریباً در هر چیدمانی، دو طرف انتهایی نوارها دچار خرابی کششی می شود.

۷-۵- جمع بندی نتایج

در این تحقیق ۱۶ حالت در نظر گرفته شده که اولین حالت بدون تقویت بوده که محل های خرابی کاملاً مشخص می باشد. سپس آثار پارامترهای مهم مقاوم سازی به کمک نوارهای FRP مورد تحلیل قرار گرفت که خلاصه نتایج بدست آمده در این پژوهش در جدول (۶) ارائه شده است.

در جدول (۶)، برای هر پارامتر، بهینه ترین حالت از نظر کاهش انرژی جنبشی و خیز دیوار مشخص شده است. در واقع می توان گفت که انتخاب پارامتر مناسب به معنای ایجاد تعادل بین سختی و انعطاف پذیری دیوار می باشد.

۶- نتیجه گیری

آشنایی با روش مقاوم سازی برای تقویت دیوارهای بنایی با استفاده از پوشش FRP و همچنین تاثیر پارامترها و آرایش های مختلف بر رفتار دیوار تقویت شده با این روش، دستاورد اصلی این تحقیق به شمار می آید. به سخن دیگر، یافتن میزان تاثیر عرض، ضخامت، مساحت، زاویه و جنس فیبر ورق های FRP بر جابه جایی مرکز دیوار و انرژی جنبشی آن، مدنظر نویسندگان بوده است. از نتایج حاصل از این پژوهش می توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- با توجه به نتایج این تحقیق می توان فهمید که آرایشی برای تقویت دیوار بنایی به کمک نوارهای FRP مناسب است که سطوح مستعد خرابی را بیشتر پوشش دهد که در دیوارهای بنایی این سطوح، اتصالات ملات می باشد. بنابراین آرایش افقی در مقایسه با آرایش قائم و مورب عملکرد بهتری از خود نشان می دهد.

۲- با توجه به نمودارهای هیستریکال جابه جایی مرکز دیوار و انرژی جنبشی دیوار می توان دریافت که رفتار دیوارهای مقاوم شده بر خلاف دیوار مقاوم نشده به صورت رفت و برگشتی است. دلیل این امر این است که دیوار تقویت نشده به علت ضعیف بودن نسبت به انفجار مورد نظر، به صورت محسوسی رفتار پالسی دارد.

۳- نتایج عددی نشان می دهد این روش مقاوم سازی برای تقویت دیوار بنایی در مقابل انفجار در نظر گرفته شده در این پژوهش

صورت نگرفته است.

سهم نویسندگان

سهم هر یک از نویسندگان با هم برابر است.

تعارض منافع

هیچ تعارض منافی برای نویسندگان این پژوهش در انتشار آن

وجود ندارد.

منابع مالی

در انجام این پژوهش، از منابع مالی شخص یا نهادی استفاده

نشده است.

References

- [1] Furtado, A., Rodrigues, H., Arêde, A. and Varum, H., 2016. Experimental evaluation of out-of-plane capacity of masonry infill walls. *Engineering Structures*, 111, pp.48-63.
- [2] Shamim, S., Ahmad, S. and Khan, R.A., 2020. An investigation on response of blast load on masonry structure. In *Smart Cities—Opportunities and Challenges: Select Proceedings of ICSC 2019* (pp. 527-537). Springer Singapore.
- [3] Shamim, S., Ahmad, S. and Khan, R.A., 2023. Numerical study on dynamic response of hollow and cavity type clay brick masonry infill panels subjected to blast loading. *Engineering Failure Analysis*, 146, p.107104.
- [4] Badshah, E., Naseer, A., Ashraf, M. and Ahmad, T., 2021. Response of masonry systems against blast loading. *Defence Technology*, 17(4), pp.1326-1337.
- [5] Chiquito, M., López, L.M., Castedo, R., Pérez-Caldentey, A. and Santos, A.P., 2019. Behaviour of retrofitted masonry walls subjected to blast loading: Damage assessment. *Engineering Structures*, 201, p.109805.
- [6] Shamim, S., Khan, R.A. and Ahmad, S., 2022, May. Fragility analysis of masonry wall subjected to blast loading. In *Structures* (Vol. 39, pp. 1016-1030). Elsevier.
- [7] Hatfield, J.E. and Davidson, J.S., 2022. Fragmentation and hazard analysis of brittle materials under far-field blast loading. *Advances in Structural Engineering*, 25(7), pp.1535-1548.
- [8] Dong, Z., Ji, J., Liu, Z., Wu, C., Wu, G., Zhu, H. and Zhang, P., 2023. I-shaped ECC/UHPC composite beams reinforced with steel bars and BFRP sheets. *Sustain. Struct*, 3, p.000022.
- [9] Yan, J., Liu, Y., Xu, Z., Li, Z. and Huang, F., 2020. Experimental and numerical analysis of CFRP strengthened RC columns subjected to close-in blast loading. *International Journal of Impact Engineering*, 146, p.103720.
- [10] Li, H., Chen, B., Fei, B., Li, H., Xiong, Z., Lorenzo, R., Fang, C. and Ashraf, M., 2022. Mechanical properties of aramid fiber reinforced polymer confined laminated bamboo lumber column under cyclic loading. *European Journal of Wood and Wood Products*, 80(5), pp.1057-1070.
- [11] Elshazli, M.T., Saras, N. and Ibrahim, A., 2022. Structural response of high strength concrete beams using fiber reinforced polymers under reversed cyclic loading. *Sustain. Struct*, 2(2), p.000018.
- [12] Liang, R. and Hota, G., 2021. Development and evaluation of load-bearing fiber reinforced polymer composite panel systems with tongue and groove joints. *Sustainable Structures*, 1(2).
- [13] Olonisakin, K., He, S., Yang, Y., Wang, H., Li, R. and Yang, W., 2022. Influence of stacking sequence on mechanical properties and moisture absorption of epoxy-based woven flax and basalt fabric hybrid composites. *Sustain. Struct*, 2, p.16.
- [14] Hosseini, M., Jian, B., Li, H., Yang, D., Wang, Z., Feng, Z., Shen, F., Zhang, J., Lorenzo, R., Corbi, I. and Corbi, O., 2022. A Review of Fibre Reinforced Polymer (FRP) reinforced concrete composite column members modelling and analysis techniques. *Journal of Renewable Materials*, 10(12), pp.3243-3262.
- [15] Wilt, J., Liang, R., GangaRao, H. and Mostoller, J., 2023. Structural responses of FRP sheet piles under cantilever loading. *Sustainable Structures*, 3(1).
- [16] Jacques, E., 2011. *Blast retrofit of reinforced concrete walls and slabs*. University of Ottawa (Canada).
- [17] Orton, S.L., Chiarito, V.P., Minor, J.K. and Coleman, T.G., 2014. Experimental testing of CFRP-strengthened reinforced concrete slab elements loaded by close-in blast. *Journal of Structural Engineering*, 140(2), p.04013060.
- [18] Mutalib, A.A. and Hao, H., 2011. Numerical analysis of FRP-composite-strengthened RC panels with anchorages against blast loads. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 25(5), pp.360-372.
- [19] Elanchezhian, C., Ramnath, B.V. and Hemalatha, J., 2014. Mechanical behaviour of glass and carbon fibre reinforced composites at varying strain rates and temperatures. *Procedia Materials Science*, 6, pp.1405-1418.
- [20] Yavartanoo, F. and Kang, T.H.K., 2022. Retrofitting of unreinforced masonry structures and considerations for heritage-sensitive constructions. *Journal of Building Engineering*, 49, p.103993.
- [21] Tabatabaei, Z.S., Volz, J.S., Baird, J., Gliha, B.P. and Keener, D.I., 2013. Experimental and numerical analyses of long carbon fiber reinforced concrete

- panels exposed to blast loading. *International journal of impact engineering*, 57, pp.70-80.
- [22] Hosseini, M., Jian, B., Zhang, J., Li, H., Lorenzo, R., Hosseini, A., Ghosh, P., Shen, F., Yang, D. and Wang, Z., 2023. Numerical Study on the Behaviour of Hybrid FRPs Reinforced RC Slabs Subjected to Blast Loads. *Journal of Renewable Materials*, 11(9), pp.1-15.
- [23] Reifarth, C., Castedo, R., Santos, A.P., Chiquito, M., López, L.M., Pérez-Caldentey, A., Martínez-Almajano, S. and Alañon, A., 2021. Numerical and experimental study of externally reinforced RC slabs using FRPs subjected to close-in blast loads. *International Journal of Impact Engineering*, 156, p.103939.
- [24] Gemi, L., Madenci, E., Özkılıç, Y.O., Yazman, Ş. and Safonov, A., 2022. Effect of fiber wrapping on bending behavior of reinforced concrete filled pultruded GFRP composite hybrid beams. *Polymers*, 14(18), p.3740.
- [25] Aksoylu, C., Yazman, Ş., Özkılıç, Y.O., Gemi, L. and Arslan, M.H., 2020. Experimental analysis of reinforced concrete shear deficient beams with circular web openings strengthened by CFRP composite. *Composite Structures*, 249, p.112561.
- [26] Abdulla, K.F., Cunningham, L.S. and Gillie, M., 2017. Simulating masonry wall behaviour using a simplified micro-model approach. *Engineering Structures*, 151, pp.349-365.
- [27] D'Altri, A.M., de Miranda, S., Castellazzi, G. and Sarhosis, V., 2018. A 3D detailed micro-model for the in-plane and out-of-plane numerical analysis of masonry panels. *Computers & Structures*, 206, pp.18-30.
- [28] Shin, D.K., Kim, H.C. and Lee, J.J., 2014. Numerical analysis of the damage behavior of an aluminum/CFRP hybrid beam under three point bending. *Composites Part B: Engineering*, 56, pp.397-407.
- [29] KARLOS, V. and SOLOMOS, G., 2013. Calculation of Blast Loads for Application to Structural Components. Administrative Arrangement No JRC 32253-2011 with DG-HOME Activity A5-Blast Simulation Technology Development.
- [30] Børvik, T., Hanssen, A.G., Langseth, M. and Olovsson, L., 2009. Response of structures to planar blast loads—A finite element engineering approach. *Computers & Structures*, 87(9-10), pp.507-520.
- [31] Motovali Emami, S.M., Mohammadi, M. and Lourenço, P.B., 2017. Equivalent diagonal strut method for masonry walls in pinned connection and multi-bay steel frames. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 19(4), pp.299-311.
- [32] Raza, A., Ali, B., Nawaz, M.A. and Ahmed, I., 2020, October. Structural performance of FRP-RC compression members wrapped with FRP composites. In *Structures* (Vol. 27, pp. 1693-1709). Elsevier.
- [33] Chiquito, M., Castedo, R., Santos, A.P., López, L.M. and Pérez-Caldentey, A., 2021. Numerical modelling and experimental validation of the behaviour of brick masonry walls subjected to blast loading. *International Journal of Impact Engineering*, 148, p.103760.
- [34] Szyniszewski, S. and Krauthammer, T., 2012. Energy flow in progressive collapse of steel framed buildings. *Engineering Structures*, 42, pp.142-153.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Yazdani1, M. and Hoseini, S. A., 2025. Strengthening and Investigating the Effect of Various FRP Strip Configurations on the Behavior of Masonry Wall Subjected to Blast Loading. *Modares Civil Engineering journal*, 25(3), pp.87-99.

DOI: 10.22034/25.3.7

