# علمي – بژوهشي مدلسازی عددی دیوار بنایی تقویت شده با کامیوزیتهای FRP به منظور بررسی تأثیر آرایشهای مختلف FRP بر رفتار دیوار در برابر انفجار

مهدی یزدانی'، سیداحمد حسینی ۲ 🍽

۱- دانشجوی دکتری دانشگاه علم وصنعت ایران ۲- استادیاردانشگاه صنعتی مالک اشتر (دريافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۴، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۰۲، يذير ش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۲، انتشار: ۱۴۰۳/۰۳/۱۱

## چكىدە

سازههای بنایی پتانسیل خرابی شدیدی در انفجار داشته و باتوجهیه افزایش حوادث تروریستی، مقاومسازی این ساختمانها ضروری به نظر می سد. در سی سال گذشته، پلیمرهای مسلح شده با الیاف (FRP) کاربرد گسترده و مناسبی در امر مقاومسازی و بهبود عملکرد این سازهها داشته است. مدل سازی به روش اجزا محدود ضمن ایجاد زمینهای برای درک بهتر رفتار دیوارهای بنایی، در پیش بینی رفتار این اعضا پس از تقویت مخصوصاً در فقدان نتایج آزمایشگاهی بسیار مفید خواهد بود. در این پژوهش، با استفاده از مدلسازی عددی در نرمافزار آباکوس، رفتار دیوارهای بنایی تقویتشده با ورقهای FRP در برابر انفجاری با خرج ماده منفجره معادل ۱۵۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۵ متری مورد بررسی قرار گرفت. جنس فیبر، عرض نوار، ضخامت نوار، مساحت و زاویه نوارهای FRP از پارامترهای تأثیرگذاری بودند که در این تحقیق مورد کنکاش قرار گرفتند. نتایج حاصل از مدلسازی نشان میدهد که این روش مقاومسازی برای تقویت دیوار بنایی در مقابل انفجار کارآمد بوده بهطوریکه جابجایی مرکز دیوار و انرژی کل آن را بهطور قابل توجهی کاهش داده است. علاوه بر این مقاومسازی دیوارها با نوارهای افقی در مقایسه با نوارهای عمودی و قطری، عملکرد دیوار را به مقدار بیشتری بهبود می بخشد.

كليدواژهها: ديوار بنايي، انفجار، مقاومسازي، كاميوزيت FRP، مدل سازي عددي

## Numerical Modeling of Reinforced Masonry Wall with FRP Composites to Investigate the Effect of Different FRP Arrangements on the Behavior of Masonry Wall Subjected to Blast Loading

M.Yazdani, A. Hosseini\*

malek ashtar university of technology. Tehran. Iran (Received:2024/03/04, Revised: 2024/04/21, Accepted: 2024/05/01, Published: 2024/05/31) DOR: https://dorl.net/dor/20.1001.1.26762935.1402.14.3.1.5

#### Abstract

Masonry structures have a high potential for severe damage in explosions, and given the increase in terrorist incidents, reinforcing these buildings seems necessary. Over the past thirty years, fiber-reinforced polymers (FRP) have been widely and effectively used for strengthening and improving the performance of these structures. Finite element modeling, while providing a basis for better understanding the behavior of masonry walls, 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 sheets against an explosion with a charge equivalent to 150 kg of TNT at a distance of 5 meters was investigated, and the necessary and influential parameters for evaluating the application of this reinforcement method were analyzed. Fiber material, width, thickness, area and arrangement angle of the FRP sheets are among the parameters affecting the behavior of reinforced masonry walls. The results of the modeling show that this reinforcement method is effective for strengthening masonry walls against explosions, significantly reducing the displacement of the wall center and its total energy. Additionally, reinforcing walls with horizontal strips, compared to vertical and diagonal strips, improves the wall's performance to a greater extent.

**Keywords:** Masonry wall, Explosion, Strengthening, FRP Composite, Numerical Modeling

*Corresponding Author E-mail: hoseini@mut.ac.	ir	Advanced Defence Sci. & Technol., 2024, 1, 45-56.
This article is an open-access article distributed license.	under the terms and	conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY)
Publisher: Imam Hussein University	Authors	

#### ۱. مقدمه

باتوجهبه این که حملات تروریستی در سالهای اخیر شکل وسیعتری به خود گرفته است و اکثر حملات بهصورت بمبهای حجیم منفجرشده در اطراف ساختمانها است که منجر به خسارات جانی و سازهای بهخصوص دیوارها با مصالح بنایی می گردد. لیکن ازآنجایی که نمی توان از وقوع چنین رخدادهایی جلوگیری کرد ونیز به علت شکست و گسیختگی این دیوارها عمدتاً به دلیل ناکافی بودن شکل پذیری و مقاومت لازم مصالح است. لذا باتوجهبه این که اکثر دیوارهای موجود در بناهای کشور از مصالح آجر است. ضرورت بررسی مقاومسازی این نوع دیوارها در برابر تهدیدات ناشی از انفجارات عمود بر سطح احساس گردید.

طراحی و ساخت سازههای مقاوم در برابر انفجار مقرون به صرفه نیست. ولی با تمهیداتی می توان از شدت و دامنه خسارات وارده کاست و عملکرد سازه را ارتقا بخشید. اکثر ساختمانهای موجود را سازه قاب تشکیل می دهد که معمولاً از یک قاب با ظرفیت باربری نسبتاً بالا و دیوار پر شده با مقاومت نسبتاً کم تشکیل شده است [۲, ۱]. مطالعات زیادی نشان می دهد که میزان آسیب دیوار بنایی در مقایسه با قاب تحت بار انفجار شدیدتر بوده و آوارهای پر تاب شده به طور اجتناب ناپذیری یک تهدید بزرگ برای افراد و ابزار موجود در سازه خواهد بود [۷-۳]. بنابراین، یافتن روشهای حفاظتی مؤثر برای کاهش آسیب دیوارهای بنایی آسیب پذیر 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 مسلح شده با الیاف تکنیکی است که اخیراً اقبال زیادی دارد [۸-۱۰]. 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 AFRP ،GFRP ،CFRP و BFRP به یکدیگر متصل می شوند [۱۵-۱۱]. ژاک [۱۶] 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 حداکثر جابجایی نمونه های تقویت شده با FRP مشاهده شد. اورتون و همکاران [۱۷] اثر بار انفجار ضعیف بر دال بتنی تقویت شده با CFRP را بررسی کرد. یافتههای آزمایش نشان داد که CFRP به طور موثر در برابر بار انفجار مقاومت می کند 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. بهمنظور تعیین اثر سازه های بتنی تقویت شده با FRP هنگام قرار گرفتن در معرض بارهای انفجاری، رویکردهای عددی متعددی پیشنهاد شده است؛

بررسیهای عددی موتالیب و همکاران [۱۸] نشان میدهد که حفظ عملکرد ترکیبی بین FRP و بتن به طور قابلتوجهی 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 موثری ظرفیت آن را برای مقاومت در برابر بارهای انفجار افزایش میدهد. الانچژیان و همکاران [۱۹] 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. بهطورکلی تحقیقات موجود در مورد بررسی تقویت FRP با زیرساختهای عمرانی در برابر بارهای انفجار بیشتر بر روی دیوارهای سازهای [۲۰, ۲۱]، دالها [۲۳ ۲۲] و یا تیرها [۲۵, ۲۴] متمرکز است. بنابراین، نیاز به مطالعه اثر آرماتور FRP بر روی دیوارهای بنایی تحت بارگذاری انفجار وجود دارد.

#### ۲. رفتار مصالح

## ۲-۱. مصالح بنایی

سازه بنایی یک ماده ناهمسانگرد ترکیبی میباشد و مکانیزم رفتارش کاملاً بستگی به خصوصیات 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 منحصربه فرد خود را دارند که همین امر باعث ایجاد ترکیبی غیرهمگن از آنها در ساخت دیوارهای بنایی گردیده است که درنهایت موجب به تغییر در رفتار دیوار می گردد. 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 می توان دیوار را به صورت هموژن و یکدست در نظر گرفت که از دقت چندانی برخوردار نیست [۲۶]. درروش دیگر، مصالح آجر و ملات و سطح مشترک بین آنها بهصورت جداگانه مدلسازی می گردد که به دلیل دقت بالای این روش، حجم محاسبات و زمان تحلیل آن افزایش می یابد. روش آخر که از دقت کافی برخوردار است و درعین حال حجم محاسبات مدل منطقی و مناسب است، روش میکرو سادهشده نام دارد که ملات در آن مدلسازی نمی گردد اما اثر چسبندگی آن برآجرها بهطور کامل مدلسازی می گردد [۲۷].

	7 -	-	-					•
اندركنش	للات	•	دركنش	ان	د بنایی	واح		
آجر و ملات \	در	Ī	ر و ملانا	، آج ۱	رشيافته	گست	ھمگن	ماده
		Λ						
							5	
	_			l			/	
	ē			ب			الف	

**شکل ۱**. انواع روش مدلسازی دیوار بنایی الف) ماکرو ب) میکرو سادهشده ج) میکرو

## ۲-۲. کامپوزیت FRP

کامپوزیتها همچنان که از نامشان پیداست ترکیبی فیزیکی از دو یا چند ماده هستند که ماده حاصل دارای ویژگیهای خاصی است که در هیچیک 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 جهت بهسازی و ترمیم سازهها مورد توجه محققان قرار داده است. بر اساس معیار هشین کشش در ماتریس و فشار در ماتریس بر اساس روابط ۱ تا ۴ محتمل بوده و هرگاه نسبت تنش ایجادشده در هریک از قسمتهای الیاف و ماتریس تحت اثر فشار یا کشش، بیشتر از یک شود مکانیزم خرابی آغاز می گردد [۲۸].

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

$$F_f^c = \left(\frac{\sigma_{11}}{v^c}\right)^2 \tag{(Y)}$$

$$F_{m}^{t} = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y^{T}}\right)^{2} + \left(\frac{\tau_{12}}{S^{L}}\right)^{2} \tag{(7)}$$

$$F_{m}^{t} = \left(\frac{\sigma_{22}}{2S^{T}}\right)^{2} + \left[\left(\frac{Y^{C}}{2S^{T}}\right)^{2} - 1\right] \frac{\sigma_{22}}{Y^{C}} + \left(\frac{\tau_{12}}{S^{L}}\right)^{2}$$
(\*)

که در این رابطهها  $F_f^t$  و  $F_f^c$  به ترتیب کشش و فشار ایجاد شده در الیاف و  $F_m^t$  و  $F_m^t$  اعنیز به ترتیب کشش و فشار ایجادشده در ماتریس است. همچنین  $\sigma_{ij}$  اعضای تانسور تنش مؤثر،  $X^T$  و X مقاومت مقاومت کششی و فشاری در راستای طولی،  $T^r$  و  $Y^c$  مقاومت کششی و فشاری در جهت الیاف عرضی و  $^{L}$  و  $T^c$  مقاومت برشی در جهت طولی و عرضی هستند. زمانی که تنش برابر یا برشی در جهت طولی و عرضی هستند. زمانی که تنش برابر یا می گردد و با بار گذاری بیشتر، مکانیزم کاهش سختی مصالح شروع می شود که پارامترهای خرابی به عنوان کنترل کننده کاهش سختی از مقدار صفر (بدون خرابی) شروعشده و تا مقدار یک (خرابی کامل) ادامه می یابند.

## ۳. روش تحقیق

#### ۱–۳. بیان مسئله

در این تحقیق با درنظر گرفتن مقدار وزنی ماده منفجرهای که احتمال میرود 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 [۲۹]. همچنین، فاصله انفجار برابر با ۵ متر انتخاب شد که برای اتخاذ تدابیر امنیتی و تمهیدات بازدارنده نظیر حصار کشی و ایجاد محوطه قرق، از نظر اقتصادی به صرف است.

## ۲-۳. مدلسازی عددی

باتوجهبه ماهیت بار انفجاری و تغییرات بسیار سریع آن با زمان و هم چنین رفتار غیر خطی آجر، ملات و اندر کنش آجر - ملات، در این پژوهش برای تحلیل پاسخ دیوار آجری و پوشش FRP در برابر انفجار، از روش تحلیل دینامیکی غیرخطی استفاده شده است. جهت نیل به این مقصود و باتوجهبه حجم بسیار بالای محاسبات عددی، استفاده از رایانه و نرمافزارهای اجزای محدود ضروری است. محیط کاربرپسند در کنار کتابخانه قوی پیشبینی رفتار مواد در نرمافزار ABAQUS منجر به انتخاب این نرم افزار جهت تحليل ديناميكي غيرخطي ديوار شد. براي انجام تحليل ديناميكي با نرخ کرنش بسیار بالا، از حل گر صریح (Explicit) و جهت مدلسازی رفتار غیرخطی مصالح از مدل موادی که تغییرات نرخ کرنش را در رفتار مصالح و نمودار تنش- کرنش لحاظ میکنند استفاده شد. بهصورتزمان در نظر گرفتهشده برای کل فرآیند انفجار برابر ۱ ثانیه است. اعمال بار انفجاری بر روی سازه با استفاده از روش Conwep صورت گرفته است که با استفاده از تکنیکهای اتصال منحنی، معادلات با درجه بالای نمایی را برای رفتار انفجار در نظر می گیرد.

در این تحقیق، دیوار بنایی به روش میکرو سادهشده شبيهسازىشده است؛ يعنى يک واحد بنايي با مشخصات آجر مدل شده ولي بهجاي مدل كردن ملات، اثر چسبندگي آن بر آجر ها اعمال شده است. مطابق شکل (۲)، ابعاد دیوار مدل شده در اين تحقيق 3m × 3m است و هر آجر به ابعاد × 80mm 120mm × 240mm با استفاده از المان SOLID و بهصورت سهبعدی شبیهسازیشده 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 میشود زیرا روش به کار گرفتهشده از نوع میکرو ساده شده است و بهاین تر تیب نیازی به مدل سازی ملات به صورت پارت های مجزا نیست. 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 گردد. بنابراین اندازه ابعاد مربوط به ارتفاع و طول آجر به میزان یک سانتیمتر افزایش داده شد. همچنین ورقهای FRP نیز با استفاده از المان SHELL در نرمافزار شبیه سازی شده است که از قید tie برای اتصال این ورقها به دیواراستفاده گردید. 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 دور دیوار صرفنظر گردید و به محدود کردن درجات آزادی برای حصول به شرایط مفصلی اکتفا شده است. (درجه آزادی انتقالی در سه جهت صفر قرار دادهشد.) از آنجایی که مصالح بنایی مانند بتن رفتار مىكنند بنابراين براى توصيف رفتار غيرخطى بتن، مدل

1

بنايى

ديوار

پارامترهای آسیب آنها بر اساس معیار هشین به ترتیب در

شکل ۲. الف) واحد بنایی مدل شده با اندازه مش ۴ سانتیمتر

مرزى مفصلى

جدولهای (۳) و (۴) ارائه شده است.

الف

ب) شرایط

خرابی پلاستیسیته آن به نرمافزار معرفی شد. معیار خرابی و عملکرد تسلیم به ترتیب بر اساس مدل دراگر- پراگر و عملکرد لابلینر تعیین شد. در این مدل فرض میشود که تلفیق فشار و ترک بتن مکانیزم اصلی شکست است. این مدل در بسیاری از استفاده شده است. پارامترهای مدل پلاستیک بتن آسیبدیده برای مصالح بنایی و همینطور رفتار آن در فشار و کشش به نظر گرفتن مدل واقعی از PRP ها، خصوصیات آنها بهصورت مرکب شبیهسازی شد و تئوری هشین برای ارزیابی عملکردهای RPP های لایهای برای مقاومسازی دیوارها مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات الاستیک کامپوزیتهای FRP و همینطور

جدول ۱. مشخصات مکانیکی و پارامترهای مدل CDP برای مصالح بنایی [۳۰]

جدول ۲. رفتار فشاری و کششی مصالح بنایی برای مدل CDP [۳۰]

E(MPa)	υ	$f_c'(MPa)$	$f_t$ (MPa)	$g(kg/m^3)$	ψ	K	е	$(Fb_0/Fc_0)$	Viscosity
١٨٩٢	۰/۱۵	٩/٩	٠/۶٩	١٨١٢	۲۰	•/97	٠/١	1/18	•

فشارى	رفتار	رفتار كششى		
تنش تسليم (MPa)	كرنش غيرالاستيك	تنش تسليم (MPa)	کرنش ترکخوردگی	
۶/۹۲	•	٠ /۶٩	•	
٨/٠٠	•/•••٣٣	•/۵۴	•/•••))	
٩/۶٨	•/••١٧٧	۰ /۳۶	•/•••٢٩	
٩/٩ •	•/•• ٢٨٢	۰/۲۵	•/••• ۴۲	
٩/۶٨	•/••۴١٨	•/1Y	•/•••۵۵	
٨/٦٣	•/••\$44	•/17	•/•••۶٧	
۷/۲۸	•/•• • * *	٠/• ٩	•/•••YA	
۴/۲۸	•/• 119٣	• / • Y	•/•••YA	

جدول ۳. مشخصات رفتار الاستیک کامپوزیتهای FRP [۲۱, ۲۰]

	$E_1(MPa)$	$E_2$ (Mpa)	$\upsilon_{12}$	G <sub>12</sub> (MPa)	G <sub>13</sub> (MPa)	G <sub>13</sub> (MPa)
CFRP	56	7777	۰/۳	1177	1177	1177
GFRP	۱۸۰۰۰	۸۱۸	۰/۳	414	414	414
BFRP	10	1	۰/۳	47	47	47

<b>جدول</b> ۴. پارامنرهای آسیب کامپوزیتهای ۴KP بر آساس معیار هشین [۱۱]							
پارامتر	CFRP	GFRP	BFRP				
Tensile strength in normal dir. of fiber (MPa)	١١٨٨	۸۱۰	48.				
Compressive strength in normal dir. of fiber (MPa)	۳/٩۶	۲/۷	780				
Tensile strength in transverse dir. of fiber (MPa)	۳/٩۶	۲/۷	۴۵				
Compressive strength in transverse dir. of fiber (MPa)	۳/٩۶	۲/۷	۶۰				
Shear strength in normal dir. of fiber (MPa)	۳/٩۶	۲/۷	۳۵				
Shear strength in transverse dir. of fiber (MPa)	٣/٩۶	۲/۷	۲.				
Fracture tensile energy in fibers' dir. (mJ)	٩٢	٩٢	۷۳				
Fracture tensile energy in transverse dir. (mJ)	1/1	١/١	۰/۶۷				
Fracture compressive energy in fibers' dir. (mJ)	٠/٢	٠/٢	۲۶/۷				
Fracture compressive energy in transverse dir. (mJ)	٠/٢	۰/۲	۱۳/۳				

**دول ۴**. پارامترهای آسیب کامپوزیتهای FRP بر اساس معیار هشین [۳۱]

#### ۳–۳. صحت سنجی

بخش حاضر به صحتسنجی و مقایسه نتایج پژوهش انجامشده چیکیتو و همکاران [۳۲] در سال ۲۰۲۱ و نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود در نرمافزار آباکوس اختصاص داده شده است. ایـن محققین به بررسی دیوار بنایی تحت بار انفجار و تقویت آنها بـه کمـک پوشـش FRP در نـرمافـزار المـان محـدود ال اس داینـا پرداختهاند و و نتایج مدلسازی خود را با تحقیقات آزمایشـگاهی (میدانی) مقایسه نمودهاند. آنها دیوار مورد نظر خود را بـا ابعـاد 2.5m × 2.5m

چیکیتو و همکاران نوع انفجار را سطحی انتخاب کردهاند و تمام انفجارها با خرج تی ان تی ۳۱/۴ کیلوگرم و در فاصله ۵ متری از دیوار مدل شدهاند. همچنین از شرایط مرزی گیردار برای دیوار استفاده کردند. هرچند که در ادامه، محققین فوق الذکر به این نتیجه رسیدهاند که در انفجارهای شدید، همه شرایط مرزی به صورت مفصلی عمل خواهندکرد.

اندازه آجر مورد استفاده در مدل چیکیتو و همکاران به صورت ۲۰۰۰ میلی متر بوده، ضخامت ملات ۲۰۰۰ 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 جهت 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 گردیده است. همچنین مقایسه میانگین تغییرشکلهای رخداده در جدول (۵) ارائه شده است. باتوجهبه نتایج، صحت مدلسازی این پژوهش محقق میشود و به نظر میرسد اختلافی هم که وجود دارد به دلیل تفاوت در شبیهسازی به کمک نرمافزارهای مختلف و فرضهای سادهکننده مورد استفاده در خلال مدلسازی است.



شکل ۳. کانتور تغییر شکل دیوار در این تحقیق و مقاله مرجع [۳۲]

جدول ۵. خلاصه نتایج جابجایی وسط دیوار پیشبینی شده در مدل پیشنهادی و مقایسه با نتایج عددی و آزمایشگاهی پژوهش مرجع [۳۳]

جابهجایی وسط دیوار (میلیمتر)	
ABAQUS LS-DYNA["Y]	نمونه
ازمایش (درصد خطا) (درصد خطا)	
10/51 10/01	ديوار
(V/٩ ½) (1·/١ ½)	تقويتنشده
11/AV 17/11	ديوار
(Δ/Υ ½) (Υ/Δ ½)	تقويتشده

#### ۴. تجزیه و تحلیل

در این پژوهش سه خروجی مدنظر است.

 ۲. خروجی جابهجایی: برای این کار، جابهجایی مرکز دیوار محاسبه می شود.

۲. خروجی آسیب FRP: برای بررسی دقیقتر، کانتور آسیب کششی نوارهای FRP ارائه خواهد شد.

۳. 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 است [۳۳]. این انرژی به سه صورت خود را نشان میدهد؛ انرژی جنبشی (که سبب سرعت گرفتن المان می شود)، انرژی پتانسیل (انرژی کرنشی الاستیک) و انرژی مستهلک شده (ناشی از ترکهای پلاستیک، اصطکاک داخلی، تغییر شکل های پلاستیک، خرد شدن). برای ایجاد بالانس انرژی، باتوجهبه کار خارجی انجامشده و مقابله با انرژی ورودی در سيستم، سازه با تغييرشكلهاي الاستيك، پلاستيك، ميرايي و انرژی جنبشی سعی میکند تا تعادل را ایجاد نماید [۳۴]. از آن جایی که میزان انرژی رسیده به موانع با ابعاد یکسان، مستقل از نوع تقویت و جنس مصالح به کار گرفته شده است و باتوجه به این که در لحظه پیک انرژی جنبشی، انرژی پتانسیل صفر است، می توان انرژی مستهلک شده در حالات گوناگون مقاوم سازی را با یکدیگر مقایسه کرد. بنابراین درصورتیکه پیک انرژی جنبشی در یک حالت کمتر از حالتی دیگر باشد در این صورت میزان انرژی مستهلکشده در آن بیشتر است.

#### ۱-۴. بررسی دیوار موجود مقاومنشده

شکل (۴)- الف کانتور جابهجایی دیوار بنایی مقاوم کننده را در مقابل بار انفجار ناشی از ۱۵۰ کیلوگرم خرج TNT در فاصله ۵ متری از پاشنه دیوار نشان میدهد. همان طور واضح است، دیوار بنایی قابلیت سرویس دهی خود را کاملاً از دست داده و ملات و

آجر هر دو دچار گسیختگی شده است. شکل (۴)-ب نیز نمودار انرژیهای دیوار بنایی مقاومنشده را نشان میدهد. باتوجهبه توضیحات بالا اختلاف میان کار خارجی و مجموع انرژیهای پتانسیل و جنبشی، انرژی مستهلکشده است که خود شامل انرژی مستهلکشده چزش است.



**شکل ۴**. الف) کانتور تغییر شکل دیوار مقاوم نشده تحت بار انفجار ب) نمودار انرژی های دیوار مقاوم نشده تحت بار انفجار

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 می گیرد که الیاف FRP به دلیل سبکی، بدون افزودن جرم دیوار میتوانند بسیار کارآمد باشند. افزون بر این، یافتن مناسب ترین چیدمان به دلیل گرانبودن 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 نتیجه گیری سادهتر گردد. براین اساس، متغیرهای در نظر گرفته برای این تحقیق شامل عرض نوار، ضخامت نوار، سطح پوشش، زاویه نوار و جنس فیبر است.

## ۴-۲. بررسی اثر جنس فیبر

جهت بررسی پارامتریک اثر جنس فیبر ورقهایFRP ، ورقهای FRP ، ورقهای FRP ، از نوار با فیبرهای شیشه، کربن و بازالت به ترتیب جهت مقاومسازی دیوارهای اول، دوم و سوم استفاده شده است. سایر پارامترها ثابت هستند یعنی عرض، ضخامت، سطح پوشش و چیدمان نوارهای FRP به ترتیب ۲۴ سانتیمتر، ۱ میلیمتر، مرکز درصد و افقی است. نمودار انرژی جنبشی دیوار و جابجایی مرکز

آن برای جنسهای مختلف الیاف نوار، در شکل (۶) نشان داده شده است.



**شکل ۵.** چیدمانهای مختلف تقویت برای مطالعه اثر پارامترهای: الف) جنس الیاف، ب) عرض نوار، ج) ضخامت نوار، د) سطح پوشش ه) زاویه نوار

رد مقایسه بین فیبرها، (۶) و (۷)، در مقایسه بین فیبرها، CFRP عملکرد بهتری در کنترل جابجایی دیوار و بهبود پایداری آن در برابر بار انفجار دارد، در حالی که GFRP و BFRP به ترتیب عملکرد ضعیفتری نشان میدهند. اگرچه تأثیر جنس فیبر بر انرژی جنبشی تفاوت چشمگیری نداشته، اما CFRP از نظر کاهش جابجایی و پایدارسازی دیوار گزینه مطلوبتری است. فیبر کربن سختی و استحکام بیشتری نسبت به فیبر شیشه و فیبر بازالت دارد. این سختی و استحکام بالا باعث میشود که دیوار تقویتشده با CFRP در برابر تغییر شکلهای ناشی از بار انفجار مقاومت بیشتری نشان دهد و کمتر دچار جابجایی شود.



**شکل ۶**. تأثیر جنس فیبر بر الف) نمودار انرژی جنبشی دیوار، ب) نمودار تاریخچه زمانی تغییرشکل مرکز دیوار



**شکل ۷**. تأثیر جنس فیبر بر الف)کانتور جابجایی دیوار، ب) کانتور آسیب کششی FRP

## ۳-۴. بررسی اثر عرض نوار

جهت بررسی پارامتریک اثر عرض ورقهای FRP ، از نوار با عرضهای ۱۲، ۲۴ و ۴۸ سانتیمتری به ترتیب جهت 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 است. نمودار انرژی جنبشی دیوار و جابجایی مرکز آن برای عرضهای مختلف نوار، در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل ۸- تأثیر عرض نوار بر الف) نمودار انرژی جنبشی دیوار، ب) نمودار تاریخچه زمانی تغییرشکل مرکز دیوار

باتوجهبه شکل (۸)، نوارهای باریکتر به دلیل محدودیت در ناحیه تقویتشده و نوارهای پهنتر به دلیل افزایش سختی زیاد، موجب افزایش ذخیره انرژی بهصورت انرژی جنبشی شدهاند. این موضوع نشان میدهد که انتخاب عرض مناسب برای نوار FRP اهمیت زیادی در بهینهسازی رفتار دیوار در برابر انفجار دارد. عرضهای بسیار کوچک یا بزرگ نوار ممکن است مانع از انتقال مناسب انرژی به مکانیزمهای استهلاک شوند و در نتیجه عملکرد دیوار را در جذب و مستهلکسازی انرژی کاهش دهند. در مجموع، نتایج نشان میدهد که نوار FRP با عرض متوسط (در اینجا برابر ۴۴ سانتیمتر)، تعادلی بهینه بین سختی و انعطاف پذیری دیوار ایجاد نرده است. همچنین بر مبنای کانتورهای جابجایی مرکز دیوار و خرابی نوارهای FRP که در شکل (۹) نشان داده شده است، عرض ۴۴ سانتیمتری نوارهای FRP عملکرد بهتری را نسبت به دیگر عرضهای نوار از خود نشان داده است.



**شکل ۹**. تأثیر عرض نوار بر الف)کانتور جابجایی دیوار، ب) کانتور آسیب کششی FRP

## ۴-۴. بررسی اثر ضخامت نوار

جهت بررسی پارامتریک اثر ضخامت ورقهای FRP، از نوار با ضخامتهای ۲۰/۵، ۱ و ۲ میلیمتری به ترتیب جهت مقاومسازی دیوارهای اول، دوم و سوم استفاده شده است. سایر پارامترها ثابت هستند یعنی عرض، سطح پوشش، چیدمان و جنس فیبر نوارهای FRP به ترتیب ۲۴ سانتیمتر، ۵۰ درصد، افقی و کربن است. نمودار انرژی جنبشی دیوار و جابجایی مرکز آن برای ضخامتهای مختلف نوار، در شکل (۱۰) قابل مشاهده است. نمودار انرژی جنبشی دیوار و جابجایی مرکز آن برای ضخامتهای مختلف نوار، در شکل (۱۰)

همان طور که در شکلهای (۱۰) و (۱۱) مشخص است، نوار با ضخامت نازکتر، اگرچه تا حدی انعطاف پذیری دیوار را حفظ میکند، اما به دلیل سختی کم، توانایی کافی در جذب و توزیع انرژی واردشده را ندارد. ضخامت بیشتر باعث افزایش سختی دیوار میشود و آن را از نظر مکانیکی مستحکم تر میکند؛

اما افزایش بیش از حد سختی میتواند به کاهش انعطاف پذیری و توزیع تنشهای داخلی منجر شود که به دنبال آن، دیوار کمتر قادر به جذب و توزیع انرژی از طریق تغییر شکلهای داخلی است. در این تحقیق، ضخامت یک میلیمتری بهینه به نظر میرسد، زیرا ترکیب مناسبی از سختی و انعطاف پذیری را فراهم کرده است. با این ضخامت، نوار قادر است انرژی واردشده را بهطور مؤثری جذب و در سراسر دیوار توزیع کند، بدون آنکه دیوار بیش از حد سخت و شکننده شود.



شکل ۱۰. تأثیر ضخامت نوار بر الف) نمودار انرژی جنبشی دیوار، ب) نمودار تاریخچه زمانی تغییرشکل مرکز دیوار



**شکل ۱۱.** تأثیر ضخامت نوار بر الف)کانتور جابجایی دیوار ب) کانتور آسیب کششی FRP

#### ۵-۴. بررسی اثر درصد پوشش

جهت بررسی پارامتریک اثر مساحت ورقهای FRP ، ورقهای FRP ، ورقهای FRP ، از مقادیر ۲۵ ، ۵۰ و ۱۰۰ درصد سطح پوشش به ترتیب جهت مقاومسازی دیوارهای اول، دوم و سوم استفاده شده است. سایر پارامترها ثابت هستند یعنی عرض، ضخامت، چیدمان و جنس فیبر نوارهای FRP به ترتیب ۲۴ سانتیمتر، ۱ میلیمتر، افقی و کربن است. نمودار انرژی جنبشی دیوار و جابجایی مرکز

آن برای مساحتهای مختلف نوار، در شکل (۱۲) 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 جابجایی مرکز ایجاد نمی شود. اما وقتی که سطح مقاوم سازی به روش FRP به ۱۰۰ درصد می رسد (یعنی پوشش کل دیوار)، حداکثر جابجایی مرکز دیوار به حدود ۱۷ میلی متر می رسد. علاوه بر این، مطابق شکل (۱۳)، 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.



**شکل ۱۲.** تأثیر درصد پوشش نوار بر الف) نمودار انرژی جنبشی دیوار ب) نمودار تاریخچه زمانی تغییرشکل مرکز دیوار



سال ۲۰ دیر درطنا پوسس نوار بر ۲۰۰۰ دیگور جابادی دیوار ب) کانتور آسیب کششی FRP

## ۶-۴. بررسی اثر زاویه نوار

جهت بررسی پارامتریک اثر زاویه ورقهای FRP، از نوار با زاویههای صفر، ۴۵ و ۹۰ درجهای استفاده شده است. نمودار انرژی جنبشی دیوار و جابجایی مرکز آن برای زاویههای مختلف نوار، در شکل (۱۴) نشان داده شده است.

۹۰ حداکثر انرژی جنبشی برای نوار با زاویههای صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه به ترتیب برابر ۷/۱۹، ۶/۴۱ و ۷/۲۷ است. علاوه براین

همانطور که در شکل (۱۴)-ب مشخص است، چیدمان افقی نوارهای FRP عملکرد بهتری را از خود نشان داده بهطوریکه جابجایی مرکز دیوار با نوارهای افقی، با کاهشی ۳۶ درصدی و ۵۸ درصدی به ترتیب نسبت به چیدمانهای مورب و قائم داشته است. دلیل این پدیده را میتوان به پوشش کامل درزهای افقی و سرتاسری آجرها توسط نوارهای افقی نسبت داد. همچنین از شکل (۱۵) هم میتوان نتیجه گرفت زاویه نوار تأثیر زیادی بر خرابی نوارها ندارد و تقریباً در هر چیدمانی، دو طرف انتهایی نوارها دچار خرابی کششی میشود.



شکل ۱۴. تأثیر زاویه نوار بر الف) نمودار انرژی جنبشی دیوار، ب) نمودار تاریخچه زمانی تغییرشکل مرکز دیوار



**شکل ۱۵.** تأثیر زاویه نوار بر الف)کانتور جابجایی دیوار، ب) کانتور آسیب کششی FRP

#### ۴-۷. جمعبندی نتایج

در این تحقیق ۱۶ حالت در نظر گرفتهشده که اولین حالت بدون تقویت بوده که محلهای خرابی کاملاً مشخص می باشد. سپس آثار پارامترهای مهم مقاومسازی به روش کامپوزیتهای

FRP (عرض، ضخامت، درصد پوشش، زاویه و جنس فیبر نوار (FRP) مورد تحلیل قرار گرفت که خلاصه نتایج به دست آمده در این پژوهش در جدول (۶) ارائه شده است که برای هر پارامتر، بهترین حالت از نظر کاهش انرژی جنبشی و خیز دیوار مشخص شده است. انتخاب پارامتر مناسب در واقع به معنای ایجاد تعادل بین سختی و انعطاف پذیری دیوار است. در ادامه، ذکر شده که چرا این تعادل اهمیت دارد و چگونه بر عملکرد دیوار در برابر بار انفجاری تأثیر می گذارد:

۱. نقش سختی در مقاومت در برابر جابه جایی و تغییر شکل ها: سختی دیوار به میزان مقاومت آن در برابر تغییر شکل و جابه جایی تحت بار انفجاری کمک میکند. دیواری که بهاندازه کافی سخت باشد، میتواند از تغییر شکلهای بزرگ جلوگیری کرده و بارهای انفجاری را بدون ایجاد تغییرات زیاد در ساختار خود تحمل کند. برای مثال، افزایش ضخامت یا استفاده از نوارهای تقویت با درصد پوشش بالا میتواند سختی دیوار را افزایش دهد. بااین حال، سختی بیش از حد میتواند منجر به شکنندگی شود و توانایی دیوار را در جذب انرژی از طریق تغییر شکلهای کوچک کاهش دهد.

۲. اهمیت انعطاف پذیری در جذب و مستهلک سازی انرژی: انعطاف پذیری به دیوار این امکان را می دهد که بخشی از انرژی واردشده را از طریق تغییر شکلهای کوچک و داخلی جذب و مستهلک کند. دیواری که بسیار سخت باشد، ممکن است نتواند این تغییر شکلهای جزئی را به خوبی مدیریت کند و در نتیجه انرژی انفجاری را به صورت جابه جایی های متمرکز و آسیبهای موضعی ذخیره کند. از سوی دیگر، انعطاف پذیری بیش از حد نیز می تواند باعث افزایش جابه جایی ها و کاهش پایداری دیوار شود.

#### ۳. ایجاد تعادل بین سختی و انعطافپذیری:

پارامترهای مختلفی مانند زاویه نوار، ضخامت و درصد پوشش، به ایجاد این تعادل کمک میکنند. بهعنوان مثال، زاویه ۴۵ درجه ترکیبی از مقاومت و انعطاف پذیری مناسب را ارائه میدهد، زیرا میتواند تنشها را در جهات مختلف توزیع کرده و بارهای انفجاری را بهتر جذب کند. ضخامت یا درصد پوشش متوسط نیز میتواند به ایجاد تعادل بین سختی و انعطاف پذیری کمک کند؛ برای مثال، ضخامت ۱ میلی متر یا پوشش ۵۰ درصدی به دیوار اجازه میدهد که بدون ایجاد جابه جایی زیاد، بخشی از انرژی را از طریق تغییر شکل های داخلی جذب کند.

#### ۴. اثر تعادل در عملکرد بهینه:

دیواری که تعادل مناسبی بین سختی و انعطاف پذیری دارد، میتواند انرژی واردشده را به صورت متوازن توزیع کند. این دیوار قادر است جابه جایی ها را به حداقل برساند، از شکستهای ناگهانی جلوگیری کند و تغییر شکل های متمرکز را به حداقل

برساند. در نتیجه، ایجاد تعادل بین سختی و انعطاف پذیری به عملکرد بهینه دیوار در برابر بارهای ناگهانی و شدید؛ مانند انفجار کمک میکند.

متغير	نمونه	خیز عمودی (سانتیمتر)	تغييرات خيز (٪)	حداکثر انرژی جنبشی (کیلوژول)	تغییرات انرژی جنبشی (٪)
مقاوم كننده	N.R	۶۳/۱	-	٨/٣١	-
	GFRP	٧/٨	- <b>A</b> A	۷/۷۴	- Y
جنس فيبر	CFRP	Y/Y	- λλ	٧/١٩	- 1۳
	BFRP	۱۰/۷	- ۸۳	٧/٧٠	- Y
عرض نوار (سانتیمتر)	١٢	۱۳/۲	- Y٩	۱۶/۵۸	+ ٩٩
	74	Y/Y	- λλ	٧/١٩	- 1۳
	۴۸	۱۴/۵	- <b>YY</b>	17/87	+ 117
1 1	•/۵	۹/۶	– λΔ	۷/۶۰	– ٩
صحامت توار	١/٠	Y/Y	- λλ	٧/١٩	- 1۳
(میلیمنز)	۲/۰	۶/۳	– ۹۰	۶/۵۰	- 77
a é t	۲۵	٧/٨	- <b>A</b> A	۵/۴۵	- 34
سطح پوشش ( ٪ )	۵۰	Y/Y	- λλ	٧/١٩	- 1۳
	۱۰۰	١/٧	– ۹۷	• / Y N	- 91
1 • • • •	•	Y/Y	$-\lambda\lambda$	۷/۱۹	- 1۳
زاويه نوار (د. جد)	40	17/1	- ۸۱	۶/۴۱	- ۲۳
(درجه)	٩٠	۱۸/۴	- Y I	٧/٢٧	- 17

وں ۲ جابجایے تھایے مرکز دیوار و حداکثر اگردی جنبسے دیوار	جنبشى ديوار	حداکثر انرژی	مرکز دیوار و	نھایے	8. جابجایی	دول
--	-------------	--------------	--------------	-------	------------	-----

#### ...

۶. مرجعها

[1] Furtado, A.; Rodrigues, H.; Arêde, A.; Varum, H. "Experimental Evaluation of Out-of-Plane Capacity of Masonry Infill Walls"; Eng. Struct. 2016, 111, 48–63. doi:10.1016/j.engstruct.2015.12.013.

سانتیمتر و پوشش ۵۰ درصد سطح است.

[2] Shamim, S.; Ahmad, S.; Khan, R. A. "An Investigation on Response of Blast Load on Masonry Structure"; Smart Cities—Opportunities and Challenges: Select Proceedings of ICSC 2019, 527–537. doi:10.1007/978-981-15-2545-2-44.

[3] Shamim, S.; Ahmad, S.; Khan, R. A. "Numerical Study on Dynamic Response of Hollow and Cavity Type Clay Brick Masonry Infill Panels Subjected to Blast Loading"; Eng. Fail. Anal. 2023, 146, 107104. doi:10.1016/j.engfailanal.2023. 107104.

 Badshah, E.; Naseer, A.; Ashraf, M.; Ahmad, T.
 "Response of Masonry Systems Against Blast Loading"; Def. Technol. 2021, 17, 1326–1337. doi:10.1016/j.dt.2020.07.003.

[5] Chiquito, M.; López, L. M.; Castedo, R.; Pérez-Caldentey, A.; Santos, A. P. "Behaviour of Retrofitted Masonry Walls Subjected to Blast Loading: Damage Assessment"; Eng. Struct. 2019, 201, 109805. doi:10.1016/j.engstruct.2019. 109805.

[6] Shamim, S.; Khan, R. A.; Ahmad, S. "Fragility Analysis of Masonry Wall Subjected to Blast Loading"; Struct. 2022, 39, 1016–1030. doi:10.1016/j.istruc.2022.03.056.

[7] Hatfield, J. E.; Davidson, J. S. "Fragmentation and Hazard Analysis of Brittle Materials Under Far-Field Blast Loading"; Adv. Struct. Eng. 2022, 25, 1535– 1548. DOI:10.1177/13694332221087339

#### ۵. نتیجه گیری

آشنایی با روش مقاومسازی جهت تقویت دیوارهای بنایی با استفاده از پوشش FRP و همچنین تأثیر پارامترها و آرایشهای مختلف بر رفتار دیوار تقویتشده با این روش، دستاورد اصلی این تحقيق به شمار مىآيد. باتوجهبه نتايج اين تحقيق مىتوان استنباط کرد 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 است. بنابراین آرایش افقی در مقایسه با آرایش قائم و مورب عملکرد بهتری از خود نشان میدهد. باتوجهبه نمودارهای هیستریکال جابجایی مرکز دیوار و انرژی جنبشی دیوار میتوان دریافت که رفتار دیوارهای مقاومشده برخلاف دیوار مقاومنشده بهصورت بهصورترفت و برگشتی است. دلیل این امر این است که ديوار تقويتنشده به علت ضعيف بودن نسبت به انفجار موردنظر، بهصورت محسوسی رفتار پالسی دارد. در واقع نوارهای FRP به عنوان المانهای با مدول بالا عمل میکنند که هم مقاومت کششی بالایی دارند و هم ضریب میرایی بیشتری را به سازه

اضافه مىكنند.نتايج عددى نشان مىدهد اين روش مقاومسازى

برای تقویت دیوار بنایی در مقابل انفجار در نظر گرفتهشده در این

یژوهش کارآمد بوده و جابجایی مرکز دیوار را در همه حالات

بهطور قابل توجهی کاهش داده و انرژی کل دیوار را نیز بهجز در دو مورد کاهش داده است. بهطورکلی، بررسی پارامترهای مختلف نشان میدهد که انتخاب پارامتر مناسب، در واقع تلاشی برای یافتن تعادل بین سختی و انعطاف پذیری است. دیواری که بیش از حد سخت باشد، ممکن است نتواند انرژی را بهخوبی مستهلک کند، و دیواری که بیش از حد انعطاف پذیر باشد، ممکن است کند، و دیواری که بیش از حد انعطاف پذیر باشد، ممکن است کند، و دیواری که ایش از حد انعطاف پذیر باشد، ممکن است جابجایی زیادی داشته باشد و پایدار نباشد. بنابراین، انتخاب پارامترهایی که این تعادل را حفظ میکنند، بهینهترین راهکار برای طراحی دیوارهایی مقاوم در برابر بارهای انفجاری است. در نهایت آرایش بهینه پیشنهادی برای این پژوهش، استفاده از نوارهای CFRP بهصورت افقی، با ضخامت ۱ میلی متر، عرض ۲۴ [19] Elanchezhian, C.; Ramnath, B. V.; Hemalatha, J. "Mechanical Behaviour of Glass and Carbon Fibre Reinforced Composites at Varying Strain Rates and Temperatures"; Procedia Mater. Sci. 2014, 6, 1405–1418. doi:10.1016/j.mspro.2014.07.120.

[20] Yavartanoo, F.; Kang, T. H. K. "Retrofitting of Unreinforced Masonry Structures and Considerations for Heritage-Sensitive Constructions"; J. Build. Eng. 2022, 49, 103993. doi:10.1016/j.jobe.2022.103993.

[21] Taghavi Parsa, M. H.; Geravan, A. "Investigating the Destructive Effect of Explosions at Different Distances on Concrete Retaining Walls"; Adv. Defence Sci. Technol. 2020, 11(4), 369-382 (In Persian). https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26762935.1399.11.4.3.8.

[22] Hosseini, S. A.; Foroughi, A.; Peymani Forushani, S. "Assessment of Response and Stiffness of Two-way Reinforced Concrete Slab Against Explosion Using Genetic Algorithm and Response Surface Method"; Adv. Defence Sci. Technol. 2023, 13, 239-250 (In Persian). https://dor.isc.ac/ dor/20.1001.1.26762935.1401.13.4.4.3

[23] Reifarth, C.; Castedo, R.; Santos, A. P.; Chiquito, M.; López, L. M.; Pérez-Caldentey, A.; Martínez-Almajano, S.; Alañon, A. "Numerical and Experimental Study of Externally Reinforced RC Slabs Using FRPs Subjected to Close-In Blast Loads"; Int. J. Impact Eng. 2021, 156, 103939. doi:10.1016/j.ijimpeng.2021.103939.

[24] Gemi, L.; Madenci, E.; Özkılıç, Y. O.; Yazman, Ş.; Safonov, A. "Effect of Fiber Wrapping on Bending Behavior of Reinforced Concrete Filled Pultruded GFRP Composite Hybrid Beams"; Polymers 2022, 14, 3740. doi:10.3390/ polym14183740.

[25] Hosseini, S. A.; Najafi Alamuti, M. H. "Parametric Analysis of Reinforced Concrete Beams Under Blast Load"; Adv. Defence Sci. Technol. 2023, 14, 1-10 (In Persian). https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26762935.1402.14.1.1.1.

[26] Abdulla, K. F.; Cunningham, L. S.; Gillie, M. "Simulating Masonry Wall Behaviour Using a Simplified Micro-Model Approach"; Eng. Struct. 2017. 151, 349-365. doi:10.1016/j.engstruct.2017.08.021

[27] D'Altri, A. M.; de Miranda, S.; Castellazzi, G.; Sarhosis, V. "A 3D Detailed Micro-Model for the In-Plane and Out-of-Plane Numerical Analysis of Masonry Panels"; Comput. Struct. 2018, 206, 18-30. doi:10.1016/j.compstruc.2018. 06.007.

[28] Shin, D. K.; Kim, H. C.; Lee, J. J. "Numerical Analysis of the Damage Behavior of an Aluminum/CFRP Hybrid Beam under Three Point Bending"; Composites Part B. 2014, 56, 397-407. doi:10.1016/j.compositesb.2013.08.030.

[29] Karlos, V.; Solomos, G. "Calculation of Blast Loads for Application to Structural Components"; Luxembourg: [8] Dong, Z.; Ji, J. H.; Liu, Z. Q.; Wu, C.; Wu, G.; Zhu, H.; Zhang, P. "I-Shaped ECC/UHPC Composite Beams Reinforced With Steel Bars and BFRP Sheets"; Sustain. Struct. 2023, 3, 000022[v1]. DOI: 10.54113/j.sust.2023.000022

[9] Yan, J.; Liu, Y.; Xu, Z.; Li, Z.; Huang, F. "Experimental and Numerical Analysis of CFRP Strengthened RC Columns Subjected to Close-In Blast Loading"; Int. J. Impact Eng. 2020, 146, 103720. doi:10.1016/j.ijimpeng.2020.103720.

[10] Li, H.; Chen, B.; Fei, B.; Li, H.; Xiong, Z.; Lorenzo, R.; Fang, C.; Ashraf, M. "Mechanical Properties of Aramid Fiber Reinforced Polymer Confined Laminated Bamboo Lumber Column Under Cyclic Loading"; Eur. J. Wood Wood Prod. 2022, 80, 1057–1070. doi:10.1007/s00107-022-01816-4.

[11] Elshazli, M. T.; Saras, N.; Ibrahim, A. "Structural Response of High Strength Concrete Beams Using Fiber Reinforced Polymers Under Reversed Cyclic Loading"; Sustain. Struct. 2022, 2, 000018. doi: 10.54113/j.sust.2022.000018.

[12] Liang, R.; Hota, G. "Development and Evaluation of Load-Bearing Fiber Reinforced Polymer Composite Panel Systems With Tongue and Groove Joints"; Sustain. Struct. 2021, 1[v2], 1-22 DOI:10.54113/j.sust.2021.000008

[13] Olonisakin, K.; He, S.; Yang, Y.; Wang, H.; Li, R.; Yang, W. "Influence of Stacking Sequence on Mechanical Properties and Moisture Absorption of Epoxy-Based Woven Flax and Basalt Fabric Hybrid Composites"; Sustain. Struct. 2022, 2, 16. doi: 10.54113/j.sust.2022.000016.

[14] Hosseini, M.; Jian, B.; Li, H.; Yang, D.; Wang, Z.;
Feng, Z.; Shen, F.; Zhang, J.; Lorenzo, R.; Corbi, I.; Corbi, O. "A Review of Fibre Reinforced Polymer (FRP)
Reinforced Concrete Composite Column Members
Modelling and Analysis Techniques"; J. Renew. Mater.
2022, 10, 3243–3262. doi:10.32604/jrm.2022.022171.

[15] Wilt, J.; Liang, R.; GangaRao, H.; Mostoller, J.
"Structural Responses of FRP Sheet Piles Under Cantilever Loading"; Sustain. Struct. 2023, 3[v3], 1-17
DOI:10.54113/j.sust.2023.000021

[16] Jacques, E. "Blast Retrofit of Reinforced Concrete Walls and Slabs"; University of Ottawa (Canada), 2011.

[17] Orton, S. L.; Chiarito, V. P.; Minor, J. K.; Coleman, T. G. "Experimental Testing of CFRP-Strengthened Reinforced Concrete Slab Elements Loaded by Close-In Blast"; J. Struct. Eng. 2014, 140, 04013060. doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000821.

[18] Mutalib, A. A.; Hao, H. "Numerical Analysis of FRP-Composite-Strengthened RC Panels With Anchorages Against Blast Loads"; J. Perform. Constr. Facil. 2011, 25, 360–372. doi:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000199. Masonry Walls Subjected to Blast Loading"; Int. J. Impact Eng. 2021, 148, 103760. doi:10.1016/j.ijimpeng.2020.103760.

[33] Peyman, S.; Ebrahimzade, A. "Numerical Investigation of the Effect of Geometry on the Energy Absorption Rate of Sandwich Panels under Blast Loading"; Adv. Defence Sci. Technol. 2020, 11, 347-355 (In Persian). https://dor.isc.ac/ dor/20.1001.1.26762935.1399.11.4.1.6.

[34] Szyniszewski, S.; Krauthammer, T. "Energy Flow in Progressive Collapse of Steel Framed Buildings"; Eng. Struct. 2012, 42, 142-153. doi.org/10.1016/j.engstruct.2012. 04.014. Publications Office of the European Union, 2013, 5. doi:10.2788/61866.

[30] Motovali Emami, S. M.; Mohammadi, M.; Lourenço,
P. B. "Equivalent Diagonal Strut Method for Masonry
Walls in Pinned Connection and Multi-Bay Steel Frames";
Journal of Seismology and Earthquake Engineering 2017,
19, 299-311.

[31] Raza, A.; Ali, B.; Nawaz, M. A.; Ahmed, I. "Structural Performance of FRP-RC Compression Members Wrapped with FRP Composites"; Structures 2020, 27, 1693-1709. doi:10.1016/j.istruc.2020.07.071.

[32] Chiquito, M.; Castedo, R.; Santos, A. P.; López, L.M.; Pérez-Caldentey, A. "Numerical Modelling and Experimental Validation of the Behaviour of Brick