

**R. Heydari Mal-Amiri**

Department of Civil  
Engineering, Shahrekord  
Branch, Islamic Azad  
University, Shahrekord, Iran.

**e-mail:**  
Rezaheydari991@yahoo.com

**D. Tavakoli\***

Department of Civil  
Engineering, Shahrekord  
Branch, Islamic Azad  
University, Shahrekord, Iran.

**e-mail:** d.tavakoli@sru.ac.ir

## **Comparison of the Behavior of FRP Rebar with Steel Rebar in Reinforced Concrete Columns under Impact Loading**

*The aim of this paper is to dynamic analyses of rectangular columns using different types of Fibre-reinforced plastic (FRP) rebars (CFRP-AFRP-GFRP) and compare them with steel rebars under impact loading. For this purpose, first, to evaluate the effect of FRP, the 25 cm column with 12mm rebars are placed under three types of impact loads in near the base, middle and the whole column. Then, to evaluate the reinforcement size effect, 12 mm rebars is replaced with 18 mm and the effect of the impact load on the whole column is evaluated. In the next step to evaluate the effect of cross sectional dimensions, the impact load across the column with the rectangular cross sectional with 35 cm dimensions will be examined. Finally, 20 models are prepared and examined by the finite element method and the results related to displacement, stress and energy are calculated. The results show that FRP reinforcements are more resistant to impact load than steel reinforcements and CFRP polymer reinforcement has performed better than other existing reinforcements. In general, it can be said that the use of Fibre-reinforced plastic reinforcement can be a measure to strengthen structures against impact load.*

**Keywords:** Concrete Column, Impact load, Rebar, CFRP, AFRP, GFRP.

---

\* Corresponding author

Received 22 June 2021, Revised 04 August 2021, Accepted 05 August 2021.  
DOI: 10.22091/cer.2021.7062.1260

## مقایسه رفتار آرماتورهای FRP با فولادی در ستون‌های بتن مسلح تحت بارگذاری انفجار

در این مقاله، هدف تحلیل دینامیکی ستون‌های مربعی با استفاده از انواع میلگردهای پلیمری (GFRP-AFRP-CFRP) و مقایسه آن‌ها با میلگرد فولادی تحت بار انفجار است. برای این منظور، ابتدا جهت ارزیابی اثر آرماتورهای پلیمری، ستون با بعد ۲۵ سانتی‌متر و آرماتورهای ۱۲ میلی‌متر، تحت سه نوع بارگذاری انفجار در قسمت‌های نزدیک پایه، میان و کل ستون قرار می‌گیرد. سپس جهت ارزیابی اثر سایز آرماتور، آرماتور با سایز ۱۸ میلی‌متر جایگزین آرماتورهای ۱۲ میلی‌متری شده و اثر بار انفجار بر کل ستون مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در گام بعد، جهت ارزیابی تأثیرگذاری ابعاد ستون، بارگذاری انفجار در کل ستون با بعد ۳۵ مورد بررسی قرار خواهد گرفت. نهایتاً ۲۰ مدل آماده شده و توسط روش اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفته و نتایج مربوط به جابه‌جایی، تنش و انرژی مستهلك شده محاسبه می‌گردد. نتایج نشان داده است که آرماتورهای FRP مقاومت بیشتری نسبت به آرماتورهای فولادی در برابر بارگذاری انفجار دارند و آرماتور پلیمری CFRP نسبت به مابقی آرماتورهای موجود، عملکرد بهتری از خود نشان داده است. بهطور کلی، می‌توان گفت استفاده از آرماتورهای پلیمری می‌تواند اقدامی در جهت مقاوم‌سازی سازه‌ها در برابر انفجار باشد.

**واژگان کلیدی:** ستون بتنی، انفجار، میلگرد، GFRP، AFRP، CFRP

رضا حیدری مال امیری

گروه مهندسی عمران واحد  
شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی،  
شهرکرد، ایران.

پست الکترونیک:  
Rezaheydari991@yahoo.com

**\* داود توکلی\***

گروه مهندسی عمران واحد  
شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی،  
شهرکرد، ایران.  
پست الکترونیک:  
d.tavakoli@sru.ac.ir

سازه‌ها در اواخر دهه ۸۰ میلادی آغاز گردید و بعد از  
وقوع ۱۱ سپتامبر ۲۰۰۱، این موضوع در مرکز توجه  
محققین قرار گرفت؛ از آن زمان تحقیقات آزمایشگاهی و  
عددی قابل توجهی در خصوص انفجار بر سازه‌ها انجام  
گرفته است [۱].

موج انفجار از آزاد شدن بسیار سریع انرژی به صورت  
نور، گرما و صدا ایجاد شده و یک موج ضربه‌ای است. موج  
ضربه‌ای مشکل از هوای بسیار فشرده‌ای است که موج را  
به صورت شعاعی و با سرعت فراصوتی، از سطح ماده  
منفجره به سمت محیط اطرافش منتشر می‌کند. براساس  
FEMA 427، قاب ساختمان آخرین قسمتی است که در  
مقابل انفجار عکس العمل نشان می‌دهد [۲].

به طور کلی، در بررسی اثر انفجار بر سازه عوامل زیر  
در اولویت توجه قرار دارند: موقعیت محل انفجار نسبت به

### ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، انفجارهای متعددی در گوشه کنار دنیا به علت حوادث ناشی از فعالیت‌های تروریستی و نظامی رخ داده است. برای محافظت سازه‌ها و نجات زندگی انسان‌ها در مقابل حوادث انفجار، درک صحیح از نحوه رفتار و اثر موج‌های انفجاری بر روی سازه‌ها، ضروری است. در یک انفجار، بار انفجار به صورت یک بار آنی و در بازه زمانی خیلی کوتاه به همراه فشار و حرارت زیاد بر سازه اعمال می‌شود. تحقیقات در خصوص اثر انفجار بر

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۰۴/۰۱، بازنگری ۱۴۰۰/۰۵/۱۳، پذیرش ۱۴۰۰/۰۵/۱۴

DOI: 10.22091/cer.2021.7062.1260

دیگری همچون ۱۱۲۶۸ TIC/DOE کارگروه ارزی آمریکا در سال ۱۹۹۲ و دستورالعمل‌های FEMA، FEMA 426، DAHSCWE ۱۹۹۵، FEMA ۴۲۶ و ۴۲۷ FEM ۴۲۸ تهیه شده‌اند. نهایتاً دستورالعمل UFC ۳-۳۴۰-۰۲ در سال ۲۰۰۸ ارائه گردید [۱].

از سوی دیگر در این سال‌ها روش‌های مختلفی برای مقاومسازی سازه‌ها ارائه شده است. یکی از روش‌هایی که برای مقاومسازی ستون‌ها استفاده می‌شود، استفاده از میلگردهای FRP است. استحکام کششی به میزان قابل توجهی بیشتر از فولاد است، در صورتی که وزن آن تنها یک‌چهارم فولاد است. همچنین کامپوزیت FRP نسبت به میلگردهای فولادی در برابر یون کلرید و حمله شیمیایی بسیار مقاوم هستند [۹]. استفاده از این مواد بیشتر به صورت ورق و جهت مقاومسازی سازه‌های موجود بوده است. جهت طراحی سازه‌ها با این کامپوزیتها تاکتون چندین آئین‌نامه طراحی ارائه گردیده است [۱۰-۱۲].

در زمینه استفاده کامپوزیتهای FRP در سازه مطالعات زیادی انجام شده است. در سال ۲۰۱۶ محققین در مطالعه آزمایشگاهی خود به بررسی تأثیر جایگزینی میلگردهای GFRP<sup>۴</sup> به جای میلگردهای فولادی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد استفاده از میلگردهای GFRP به جای میلگردهای فولادی می‌تواند روش مؤثری برای بهسازی تیرهای بتنی آسیب‌دیده باشد [۱۳].

محققین در سال ۲۰۱۷ در تحقیق آزمایشگاهی خود، به ارزیابی عملکرد ستون‌های بتنی با مقاومت بالا مسلح شده با استفاده از میلگردها و دورپیچ‌های GFRP پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد استفاده از میلگردها و دورپیچ‌های GFRP می‌تواند روش مناسبی برای تحمل بار محوری مرکز در ستون‌ها باشد. براساس نتایج این تحقیق با استفاده از میلگردها و دورپیچ‌های GFRP

<sup>۴</sup>- Glass- Fiber Reinforced Polymers Rebars

سازه، هندسه و نحوه سیستم سازه، خواص مواد منفجره مانند جنس، وزن، مقدار انرژی آزاد شده، مقدار تشديد موج در اثر تداخل با زمین و حفاظ [۲ و ۳].

روابط زیادی در مطالعات جهت بررسی انفجار ارائه شده‌اند. رابطه هاپکینسون-کرانز که عموماً به رابطه ریشه سوم نیز مشهور است، در بررسی پدیده انفجار کاربرد بسیار زیادی دارد [۴]. روابط دیگر در این زمینه همچون رابطه مشهوری که توسط نیومارک و هنسن<sup>۱</sup> در سال ۱۹۶۱ معرفی گردید؛ رابطه‌ای توسط Lam<sup>۲</sup> و همکاران به صورت رابطه لگاریتمی ارائه شد و رابطه‌ای که توسط ایزدی‌فر و همکاران به صورت رابطه لگاریتمی ارائه گردید، استفاده می‌شوند [۵-۷]. همچنین تاریخچه زمانی فشار ناشی از انفجار، غالباً توسط رابطه فریدلندر<sup>۳</sup> بررسی می‌گردد [۸].

اهمیت بررسی اثرات انفجار بر روی سازه‌ها سبب شده تا دستورالعمل‌هایی در زمینه طراحی ساختمان‌ها و فضاهای شهری در برابر انفجار تدوین گردد. دستورالعمل TM5-855-1 که در سال ۱۹۸۶ توسط دپارتمان نیروی زمینی ارتش آمریکا برای سازه‌های مقاوم در برابر انفجار تهیه شد را می‌توان به عنوان یکی از اولین دستورالعمل‌هایی دانست که از اوایل دهه ۵۰ به بعد ارائه گردیده است [۱]. پس از آن دستورالعمل TR 87-57 در سال ۱۹۸۹ توسط بخش مهندسی نیروی هوایی آمریکا به منظور تحلیل و طراحی سازه‌های مقاوم در برابر انفجارهای غیراتمی ارائه شد. در سال ۱۹۵۹ ارتش آمریکا نشریه‌ای تحت عنوان سازه‌های مقاوم در برابر اثرات انفجارهای تصادفی منتشر کرد. در سال ۱۹۹۰ نیز دستورالعمل TM 5-1300 توسط دپارتمان نیروی زمینی، نیروی دریایی و نیروی هوایی ارتش آمریکا ارائه شد که به صورت گسترده جهت طراحی سازه‌ها در برابر انفجار مورد استفاده قرار گرفت [۲]. در ادامه، دستورالعمل‌های

<sup>۱</sup>- Newmark and Hansen

<sup>۲</sup>- Lam

<sup>۳</sup>- Friedlander

کارایی استفاده از CFRP به عنوان یک روش تقویت کننده برای تیرهای بتن‌آرمé تحت بارگذاری انفجار نیز در سال ۲۰۱۹ انجام شده است، که براساس نتایج بدست آمده با استفاده از تحلیل عددی، پلیمرهای CFRP می‌تواند جایگزین مناسبی برای تیرهای بتن‌آرمé در برابر انفجار باشد [۲۰].

اکثر مطالعات انجام شده در این زمینه، معطوف به ورق‌های FRP بوده است و تاکنون تحقیق جامعی بر روی عملکرد انواع میلگردهای FRP و همچنین اثر سایر میلگردهای بر عملکرد ستون تحت بار انفجار انجام نشده است. از این‌رو، در این مطالعه به بررسی عملکرد این آرماتورها با جنس‌های مختلف CFRP<sup>۶</sup>، AFRP<sup>۷</sup> و GFRP و مقایسه با آرماتور فولادی پرداخته شده است تا دید جامعی در مورد عملکرد این آرماتورها در برابر انفجار بدست آید.

## ۲- فرضیات مدل‌سازی

### ۲-۱- صحت‌سنجی

در این مقاله، بهمنظور صحت‌سنجی نتایج مدل‌سازی اجزای محدود، یک مدل آزمایشگاهی ستون بتنه مربعی شکل انتخاب و توسط نرم‌افزار آباکوس مدل گردید [۲۱]. مشخصات هندسی و آرایش آرماتورهای نمونه آزمایشگاهی در شکل ۱-الف نشان داده شده است. مقطع عرضی عضو بتنه مربعی با بعد ۲۳۰ و طول ۲۴۴۰ میلی‌متر است. مطابق با شکل ۱-ب، ۸ کیلوگرم معادل TNT در فاصله ۳۲۰ میلی‌متری از انتهای پایه و به ارتفاع ۶۰۰ میلی‌متری عضو کار گذاشته شده است.

مشخصات مصالح مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است. شرایط مرزی به این صورت تعریف شد که هر دو پایه با تکیه‌گاه گیردار مقید شده و بار انفجار بر ستون در نزدیکی پایه سمت چپ اعمال می‌شود. شکل ۲، برای نمایش تطابق توزیع خسارت کششی و شکست رخ داده

ظرفیت بار محوری ستون حدود ۱۰ تا ۱۲ درصد کاهش و شکل‌پذیری ستون حدود ۳۰ درصد نسبت به ستون‌های تقویت شده با میلگردها و دورپیچ‌های فولادی افزایش می‌یابد [۱۴].

محققین در سال ۲۰۱۵، آسیب واردہ به ستون‌های بتنه مسلح در اثر انفجار را با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود مورد بررسی قرار دادند. ستون‌ها یکی از مهم‌ترین المان‌های سازه‌ای در قاب‌های بتنه مسلح بوده و ستون‌های کناری سازه‌ها نیز در معرض بیشترین خطر آسیب از حملات تروریستی هستند. چندین پارامتر مؤثر بر رفتار تحت بار انفجار در تحقیق لحاظ گردیده است [۱۵].

در سال ۱۹۹۷ محققین، به بررسی نمودار فشار- ضربه و پیش‌بینی میزان خسارت ستون‌های بتن‌آرمé تحت بارگذاری انفجار پرداخته و روش پیشنهادی خود را برای پیش‌بینی میزان خسارت ارائه نمودند [۱۶].

در مطالعه تجربی دیگر، ستون‌های تقویت شده توسط ورق‌های FRP بررسی و اثر روش مقاوم‌سازی ستون‌های بتنه مسلح توسط این ورق‌ها بررسی شد [۱۷]. مکانیسم تقویت برشی دال بتنه یک‌طرفه با استفاده از میلگردهای FRP در سال ۲۰۱۶ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق مؤثر بودن استفاده از میلگردهای FRP بر تقویت برشی دال بتنه یک‌طرفه را تائید نمود. نتایج نشان داد که استفاده از ورق با الیاف کربنی (CFRP<sup>۸</sup>) می‌تواند باعث جابه‌جایی مفصل پلاستیک از بر ستون شود [۱۸].

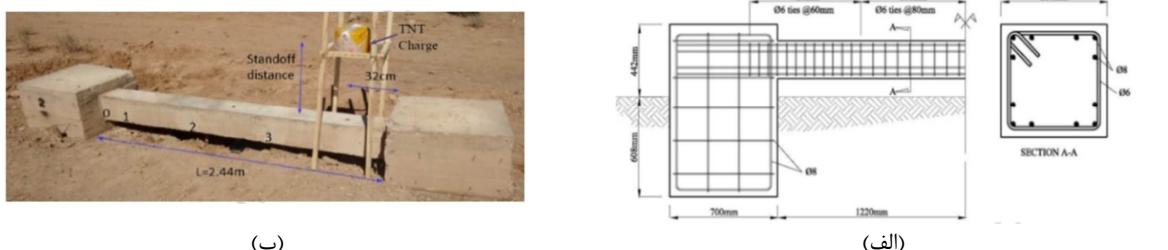
محققین در سال ۲۰۱۹، پاسخ‌های دینامیکی بتنه اعضای با میلگردهای FRP تقویت شده تحت انفجار را با روش اجزای محدود مورد بررسی قرار دادند. نتایج بدست آمده مزايا الیاف بازالت را نشان داد [۱۹].

<sup>۶</sup>- Aramid- Fiber Reinforced Polymers Rebars

<sup>۵</sup>- Carbon-Fiber Reinforced Polymers Rebars

شده است. درصد اختلاف مدل اجزای محدود با نمونه آزمایشگاهی ۲/۵ درصد است.

در نمونه آزمایشگاهی و مدل اجزای محدود استخراج گردیده است. مقایسه حداکثر تغییرشکل‌های رخ داده در نمونه آزمایشگاهی و مدل اجزای محدود در جدول ۲ ارائه شد.



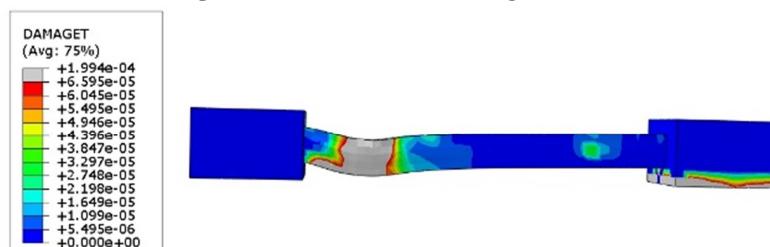
شکل ۱- (الف) شکل کلی و مشخصات نمونه آزمایشگاهی و (ب) شرایط مرزی و بارگذاری اعمالی بر عضو بتنی [۲۱ و ۲۲]

جدول ۱- مشخصات مکانیکی مصالح [۲۱]

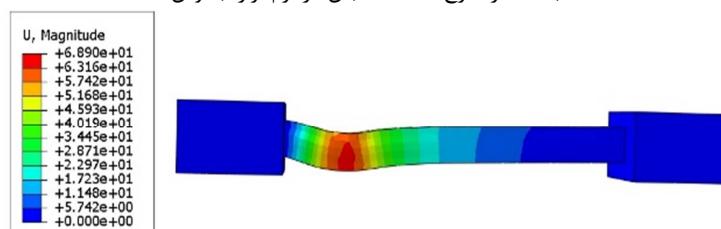
تنش تسلیم (MPa)	مقاومت فشاری بتن (MPa)	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (GPa)	جرم مخصوص (kg/m³)	
-	۳۰	۰/۲	۲۶/۴۱	۲۴۰۰	بتن
۴۲۰	-	۰/۳	۲۰۵	-	مدل الاستوپلاستیک برای فولاد



(الف) خسارت رخ داده شده ستون در نمونه آزمایشگاهی [۲۱]



(ب) خسارت رخ داده شده بتن در نرم‌افزار آباکوس



(پ) تغییرشکل داده شده ستون در نرم‌افزار آباکوس

شکل ۲- تطابق نتایج مربوط به توزیع خسارت کششی و شکست رخ داده در نمونه آزمایشگاهی و مدل اجزای محدود

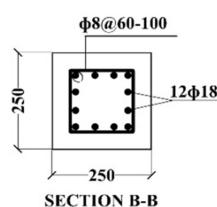
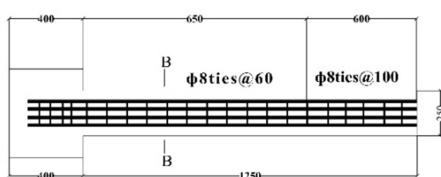
جدول ۲- مقایسه حداکثر تغییرشکل‌های رخ داده در اعضای مدل

درصد اختلاف (%)	مدل اجزای محدود (mm)	نمونه آزمایشگاهی (mm)
۲/۵۲	۶۸/۹	۶۷/۲

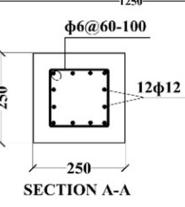
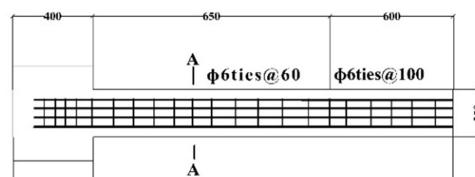
ستون‌های بتن مسلح با طول ۲۵۰۰ میلی‌متر، مربعی شکل با بعد ۲۵۰ میلی‌متر و با دو سایز آرماتور ۱۲ و ۱۸ میلی‌متر و با بعد ۳۵۰ میلی‌متر با آرماتور سایز ۱۸ میلی‌متر مورد مدل‌سازی قرار گرفته‌اند.

## ۲-۲-۲- مدل‌سازی

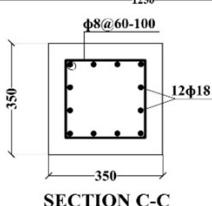
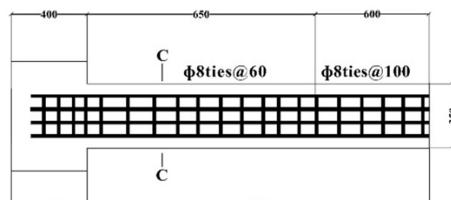
مشخصات هندسی ستون مورد مدل‌سازی در این مطالعه در شکل ۳ ارائه شده است. مطابق شکل،



(ب) ستون با بعد ۲۵ سانتی‌متر و میلگرد قطر ۱۸



(الف) ستون با بعد ۲۵ سانتی‌متر و میلگرد قطر ۱۲



(پ) ستون با بعد ۳۵ سانتی‌متر و میلگرد قطر ۱۸

شکل ۳- هندسه ستون‌های مورد بررسی در این پژوهش

مشخصات مصالح استفاده شده در شبیه‌سازی نیز

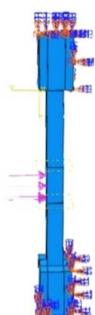
در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است.

محل و نحوه اعمال شرایط مرزی در شکل ۴ نشان

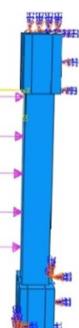
داده شده است، پایین و بالای ستون (پایه‌ها) با تکیه‌گاه گیردار مقید شده است و به ستون طبق شکل، بار انفجار (در پایه، میان ستون و کل ستون) اعمال می‌شود.



(پ) ستون با بعد ۲۵ سانتی‌متر



(ب) ستون با بعد ۲۵ سانتی‌متر



(الف) ستون با بعد ۳۵ سانتی‌متر

شکل ۴- محل اعمال شرایط مرزی و بارگذاری در (الف) کل، (ب) مرکز و (پ) پایه ستون

جدول ۳- مشخصات مکانیکی مصالح

تنش نهایی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	مقاومت فشاری بتن (MPa)	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (MPa)	جرم مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )	
-	-	۳۰	۰/۲	۲۷۳۸۶	۲۴۵۰	بتن
۵۶۰	۴۸۰	-	۰/۳	۲۱۰۰۰	۲۴۵۰	مدل الاستوپلاستیک برای فولاد

جدول ۴- مشخصات میلگرد FRP

تنش نهایی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	نوع میلگرد FRP
۳۴۰۰	۱۸۲	CFRP bar
۱۳۳۰	۶۵	GFRP bar
۲۴۷۰	۱۱۰	AFRP bar

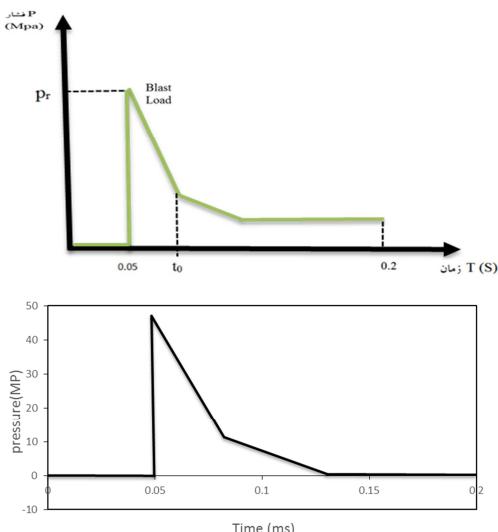
معرف مسلح‌سازی با میلگرد NB AFRP، NB بیانگر برخورد انجار به محل نزدیک پایه، MH بیانگر برخورد انجار به مرکز ستون و WH بیانگر برخورد انجار به کل ستون است.

مدل‌ها براساس جدول ۵ در نظر گرفته شده‌اند. در این جدول، S به معنای نمونه، SB معرف مسلح‌سازی با میلگرد فولادی، CB معرف مسلح‌سازی با میلگرد AB، GFRP، CFRP، GB معرف مسلح‌سازی با میلگرد CFRP

جدول ۵- مدل‌های طراحی شده

نام مدل	نوع ستون	محل برخورد انجار
S-SB-NB	بعد ۲۵ سانتی‌متر، مسلح شده با میلگرد STEEL، قطر ۱۲	نزدیک پایه ستون
S-CB-NB	بعد ۲۵ سانتی‌متر، مسلح شده با میلگرد CFRP، قطر ۱۲	نزدیک پایه ستون
S-GB-NB	بعد ۲۵ سانتی‌متر، مسلح شده با میلگرد GFRP، قطر ۱۲	نزدیک پایه ستون
S-AB-NB	بعد ۲۵ سانتی‌متر، مسلح شده با میلگرد AFRP، قطر ۱۲	نزدیک پایه ستون
S-SB-MH	بعد ۲۵ سانتی‌متر، مسلح شده با میلگرد STEEL، قطر ۱۲	مرکز ستون
S-CB-MH	بعد ۲۵ سانتی‌متر، مسلح شده با میلگرد CFRP، قطر ۱۲	مرکز ستون
S-GB-MH	بعد ۲۵ سانتی‌متر، مسلح شده با میلگرد GFRP، قطر ۱۲	مرکز ستون
S-AB-MH	بعد ۲۵ سانتی‌متر، مسلح شده با میلگرد AFRP، قطر ۱۲	مرکز ستون
S-SB-WH1-2	بعد ۲۵ سانتی‌متر، مسلح شده با میلگرد STEEL، قطر ۱۲ و ۱۸	کل ستون
S-CB-WH1-2	بعد ۲۵ سانتی‌متر، مسلح شده با میلگرد CFRP، قطر ۱۲ و ۱۸	کل ستون
S-GB-WH1-2	بعد ۲۵ سانتی‌متر، مسلح شده با میلگرد GFRP، قطر ۱۲ و ۱۸	کل ستون
S-AB-WH1-2	بعد ۲۵ سانتی‌متر، مسلح شده با میلگرد AFRP، قطر ۱۲ و ۱۸	کل ستون
S-SB-WH3	بعد ۳۵ سانتی‌متر، مسلح شده با میلگرد STEEL، قطر ۱۸	کل ستون
S-CB-WH3	بعد ۳۵ سانتی‌متر، مسلح شده با میلگرد CFRP، قطر ۱۸	کل ستون
S-GB-WH3	بعد ۳۵ سانتی‌متر، مسلح شده با میلگرد GFRP، قطر ۱۸	کل ستون
S-AB-WH3	بعد ۳۵ سانتی‌متر، مسلح شده با میلگرد AFRP، قطر ۱۸	کل ستون

۳۴۰-۰۲ و سایر رابطه‌های آیین‌نامه نمودار فشار- زمان ناشی از انفجار محاسبه می‌شود و بررسی انفجارهای نزدیک یا تماسی مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین در شکل ۵ مشخص است که یک فشار براساس موج انفجار می‌باشد و برای طراحی سازه‌های مقاوم اغلب در فاز مشبت چون شدت بیشتر می‌باشد، در نظر گرفته می‌شود و در فاز منفی اغلب از اهمیت کمتری برخورده است. به همین دلیل در اکثر مواقع، بار به صورت مثلثی در نظر گرفته می‌شود. نحوه بارگذاری و زمان‌بندی آن در این تحقیق مطابق شکل ۵ است.



شکل ۵- نحوه اعمال بارگذاری، فشار بر حسب زمان

### ۳- نتایج و تحلیل

نتایج مدل‌سازی تحت انفجار نشان داده است که تغییرشکل در میلگردهای FRP بسیار کمتر از میلگردهای فولادی بوده است. تغییرشکل رخ داده در ستون تحت موج انفجار در شکل‌های ۶ تا ۸ ارائه شده است. در شکل ۹ نیز ماکریم تغییرشکل رخ داده در مدل‌ها نشان داده شده است. طبق نتایج، در ستون با مقطع ۲۵ و آرماتور قطر ۱۲ میلی‌متر با میلگردهای GFRP، CFRP و AFRP تحت انفجار در نزدیک پایه، کاهش تغییرشکل رخ داده در ستون به ترتیب به میزان ۴۵/۹، ۶۷/۸ و ۵۵/۸ درصد نسبت به ستون مسلح شده با

برای محاسبه پارامترهای انفجار، معمولاً از روشی به نام روش فاصله مقیاس‌بندی شده استفاده می‌کنند. عمومی‌ترین روش مقیاس‌گذاری انفجار، روش هاپکینسون- کرانز<sup>۷</sup> یا ریشه سوم است که ابتدا توسط هاپکینسون در سال ۱۹۱۹ و سپس توسط کرانز در سال ۱۹۲۶ افرمول‌بندی شد [۲۳]. براساس این قانون امواج مشابه هنگامی به وجود می‌آیند که دو ماده منفجره با جنس یکسان در فواصل مقیاس‌گذاری شده مشابه منفجر شوند [۲۲].

مواد منفجره مختلف، فشارهای متفاوتی را ایجاد می‌کنند. بنابراین برای داشتن یک مبنای برای مقایسه، مواد منفجره مختلف با ماده منفجره TNT معادل و مقایسه می‌شوند. پارامتر مقیاس  $Z_G$  فاصله مقیاس شده، برای محاسبه اثر انفجار بر مبنای وزن معادل TNT طبق معادله زیر تعریف می‌شود:

$$Z_G = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (1)$$

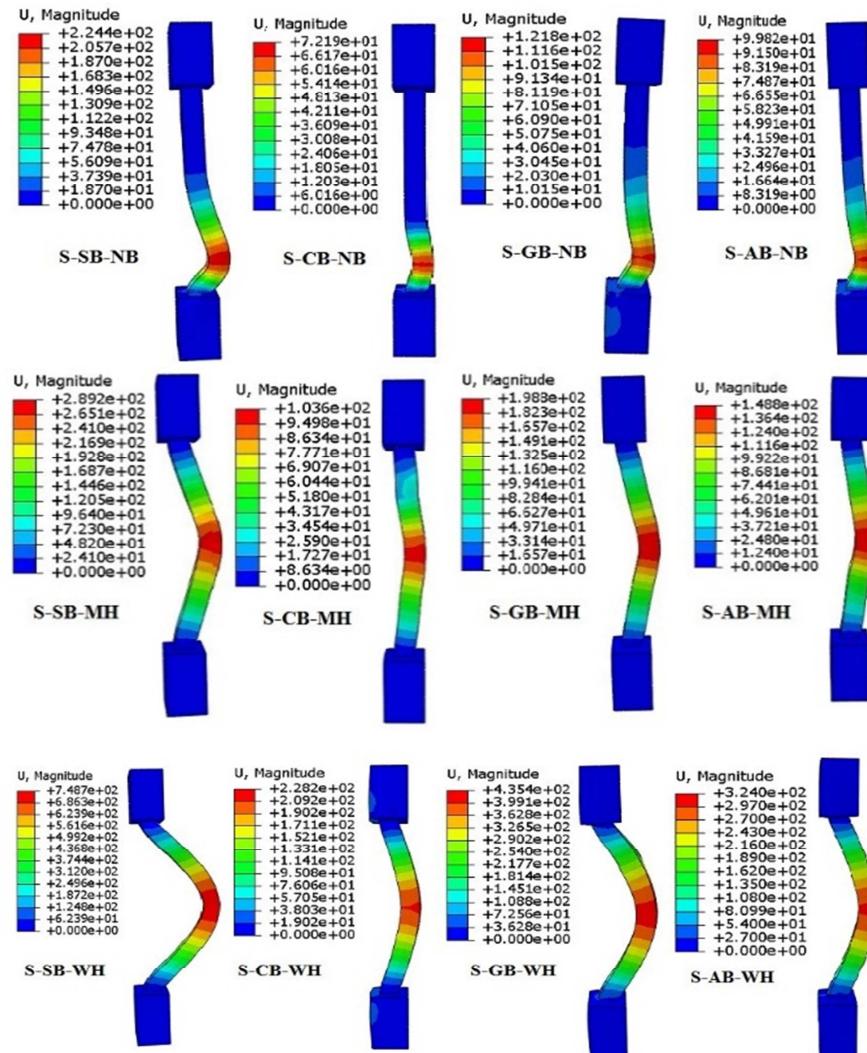
که در آن،  $W$  جرم معادل TNT ماده منفجره (وزن خرج) بر حسب  $Kg$  و  $R$  فاصله مرکز انفجار از نقطه موردنظر بر حسب  $m$  است.

لازم به ذکر است در این مطالعه برای ساده‌سازی و کاهش زمان عملیات شبیه‌سازی مدل‌ها، از وابستگی مکانی بارگذاری صرف‌نظر شده و تنها به توزیع زمانی بار پرداخته شده است. به عبارت دیگر، توزیع فشار ناشی از انفجار به صورت یک فشار یکنواخت ولی تابعی از زمان بر روی سطح ستون تعریف می‌شود. این امر را می‌توان با استناد به آیین‌نامه انفجار UFC مورد قبول دانست [۱]. بر طبق این آیین‌نامه در انفجارهای دور می‌توان اثر بار انفجار را به صورت فشار یکنواخت بار روی سازه در نظر گرفت [۱]. با استفاده از پارامتر فاصله مقیاس شده  $Z_G$  محاسبه شده طبق رابطه (۱) و نمودارهای ۳- UFC مطابق با مطالعه است.

<sup>7</sup>- Hopkinson-Cranz

درصد، در ستون تحت انفجار در کل ارتفاع به ترتیب میزان  $41/8$ ،  $69/5$  و  $56/6$  درصد بوده است.

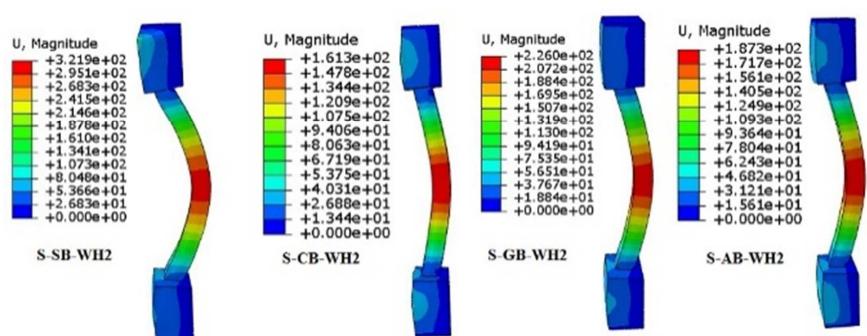
فولاد بوده است. همچنین این میزان کاهش در ستون تحت انفجار در مرکز به ترتیب میزان  $31/4$ ،  $64/3$  و  $48/7$  است.



شکل ۶- تغییرشکل در مدل‌های ستون  $25 \times 25$  با میلگرد ۱۲ میلی‌متر

بعد  $35$  سانتی‌متر با آرماتور قطر  $18$  میلی‌متر تحت انفجار در کل ارتفاع به ترتیب  $40$ ،  $20/2$  و  $29/7$  درصد است.

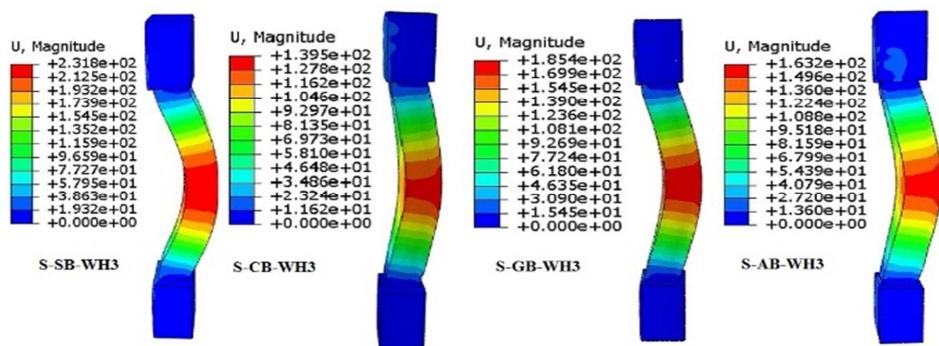
در ستون با بعد  $25$  سانتی‌متر با میلگرد با قطر  $18$  میلی‌متر تحت انفجار در کل ارتفاع این میزان کاهش به ترتیب میزان  $49/8$ ،  $49/6$  و  $41/7$  درصد و در ستون با



شکل ۷- تغییرشکل در مدل ستون  $25 \times 25$  با میلگرد ۱۸ میلی‌متر

این کاهش برای نمونه‌های میلگرد فولادی، CFRP و AFRP و GFRP به ترتیب برابر با ۴۲، ۴۸، ۵۷ و ۴۲ درصد بوده است. بیشترین کاهش جابه‌جایی با افزایش سایز آرماتور مربوط به نمونه‌های حاوی آرماتورهای فولادی بوده است. بنابراین می‌توان گفت با افزایش سایز آرماتور، تأثیر مثبت آرماتورهای FRP کاهش می‌یابد.

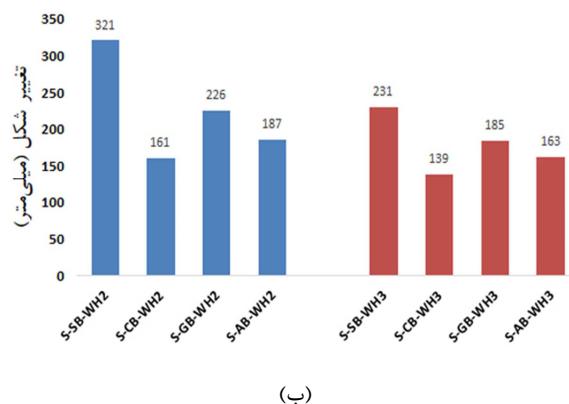
عملکرد مناسب میلگردهای FRP به‌وضوح در نتایج مشخص است و در این بین، بهترین عملکرد مربوط به میلگرد CFRP بوده است. عملکرد میلگردهای مختلف در هر سه حالت بار انفجار تقریباً مشابه می‌باشد و بیشترین تغییرمکان به ترتیب در بارگذاری کل ستون، میان ستون و پایه ستون بوده است. افزایش سایز آرماتور از ۱۲ به ۱۸ میلی‌متر منجر به کاهش جابه‌جایی در ستون شده است.



شکل ۸- تغییرشکل در مدل ستون  $35 \times 35$  با میلگرد ۱۸ میلی‌متر

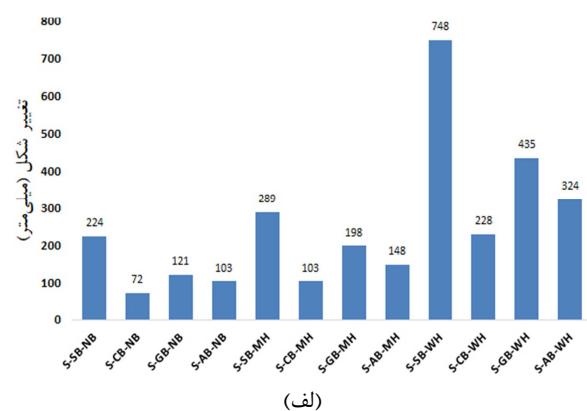
AFRP و GFRP به ترتیب برابر با ۲۸، ۱۳، ۱۸ و ۱۲ درصد بوده است که اثرگذاری کمتری به نسبت افزایش سایز آرماتور داشته است. همچنین اثر نوع آرماتور در ابعاد بزرگ‌تر ستون تأثیر معناداری نداشته است.

همچنین افزایش سایز ستون نیز باعث کاهش جابه‌جایی شده است. این کاهش برای نمونه‌ها با بعد ۳۵ سانتی‌متر و با آرماتور سایز ۱۸ به نسبت نمونه‌ها با بعد ۲۵ سانتی‌متر برای نمونه‌های میلگرد فولادی، CFRP



شکل ۹- تغییرشکل ماکریم رخ داده، (الف) ستون‌ها با بعد ۲۵ و آرماتور قطر ۱۲ میلی‌متر و (ب) آبی: ستون‌ها با بعد ۲۵ و آرماتور قطر ۱۸ میلی‌متر و قرمز: ستون‌ها با بعد ۳۵ و آرماتور قطر ۱۸ میلی‌متر

مدل‌های مسلح شده با میلگردهای فولادی و مدل‌های مسلح شده با میلگردهای GFRP به نقطه تنش نهایی رسیده است؛ ولی تنش رخ داده در مدل‌های مسلح شده

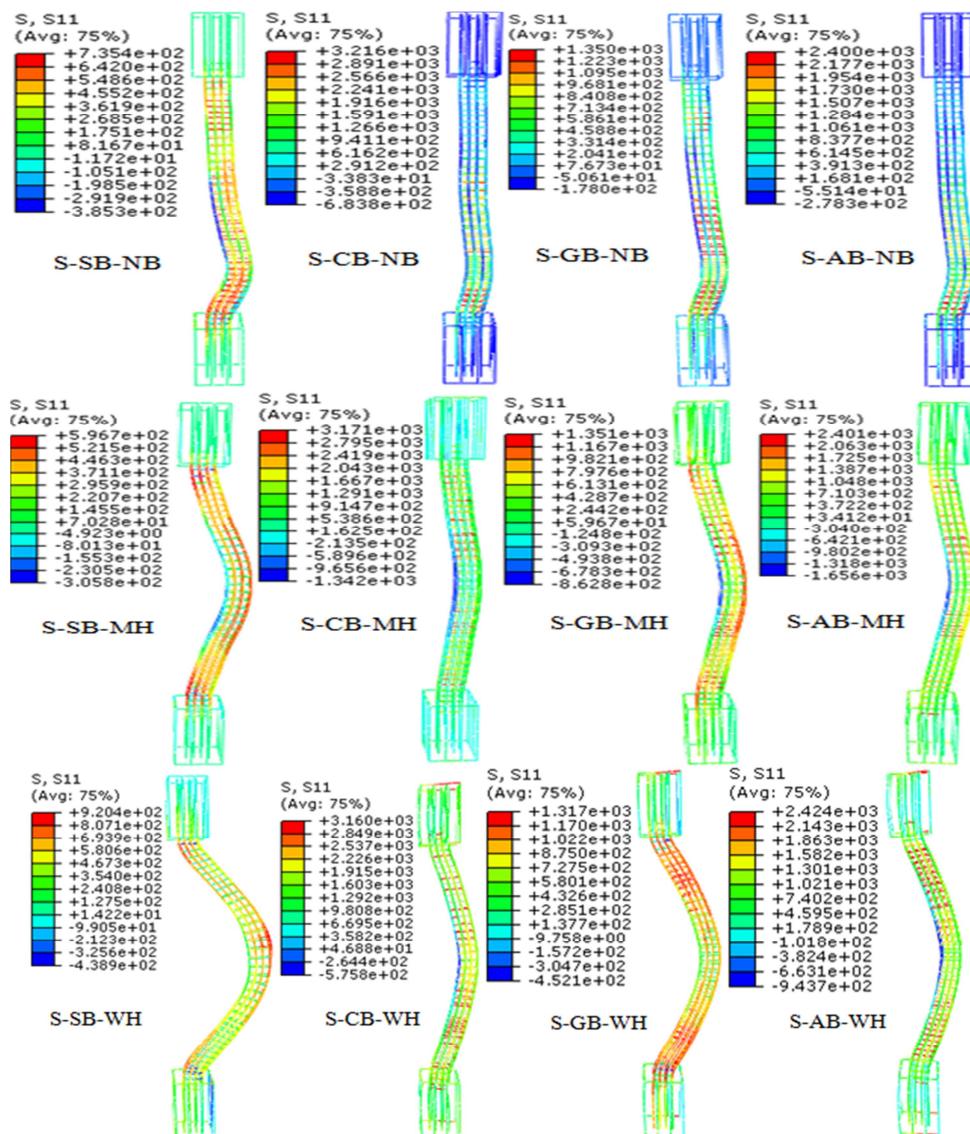


شکل ۹- تغییرشکل ماکریم رخ داده، (الف) ستون‌ها با بعد ۲۵ و آرماتور قطر ۱۲ میلی‌متر و قرمز: ستون‌ها با بعد ۳۵ و آرماتور قطر ۱۸ میلی‌متر و قرمز: ستون‌ها با بعد ۳۵ و آرماتور قطر ۱۸ میلی‌متر

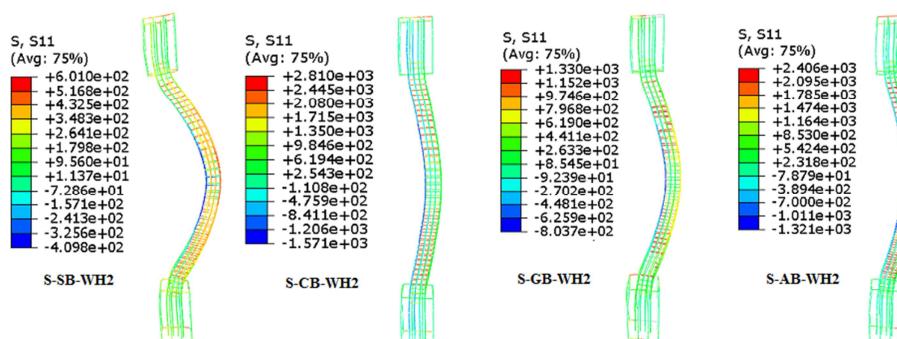
شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ توزیع تنش محوری در میلگردها را نشان می‌دهد. حداقل تنش محوری مدل‌ها در جدول ۶ ارائه شده است. با مقایسه تنش در میلگردها با تنش نهایی آن‌ها مشاهده می‌شود که تنش در همه

میلگردها است.

با میلگردهای AFRP و CFRP کمتر از تنش نهایی این



شکل ۱۰- توزیع تنش محوری در ستون با بعد ۲۵ سانتی‌متر و با میلگردهای ۱۲ میلی‌متر



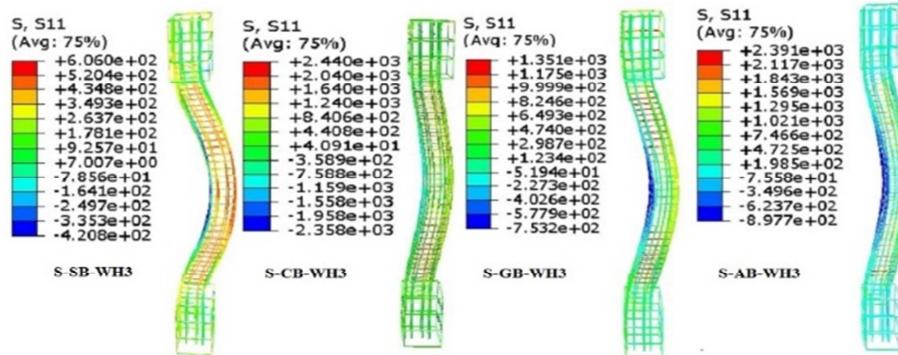
شکل ۱۱- توزیع تنش محوری در ستون با بعد ۲۵ سانتی‌متر و با میلگردها با قطر ۱۸ میلی‌متر

ترتیب منجر به کاهش حداقل تنش محوری به میزان ۳۴، ۱۱، ۳ و ۱ درصد شده است که نشان دهنده این

افزایش سایز میلگرد از ۱۲ به ۱۸ در نمونه‌های حاوی میلگرد فولادی، CFRP، GFRP و AFRP به

محوری شده است که این کاهش در اکثر مدل‌ها قابل توجه نبوده است. همان‌طور که در شکل‌ها مشخص است به دلیل بار ضربه‌ای انفجار، تنش‌های میلگردی FRP مقاومت بیشتری از خود نشان داده است.

است که میلگردی‌های کامپوزیتی در سایزهای کوچک‌تر می‌توانند عملکرد بهتری در برابر انفجار در مقایسه با میلگرد فولادی داشته باشند. همچنین افزایش ابعاد ستون از ۲۵ به ۳۵ سانتی‌متر منجر به کاهش حداقل تنش



شکل ۱۲- توزیع تنش محوری در ستون ۳۵ سانتی‌متر و با میلگرد با قطر ۱۸ میلی‌متر

جدول ۶- حداقل تنش محوری در مدل‌ها

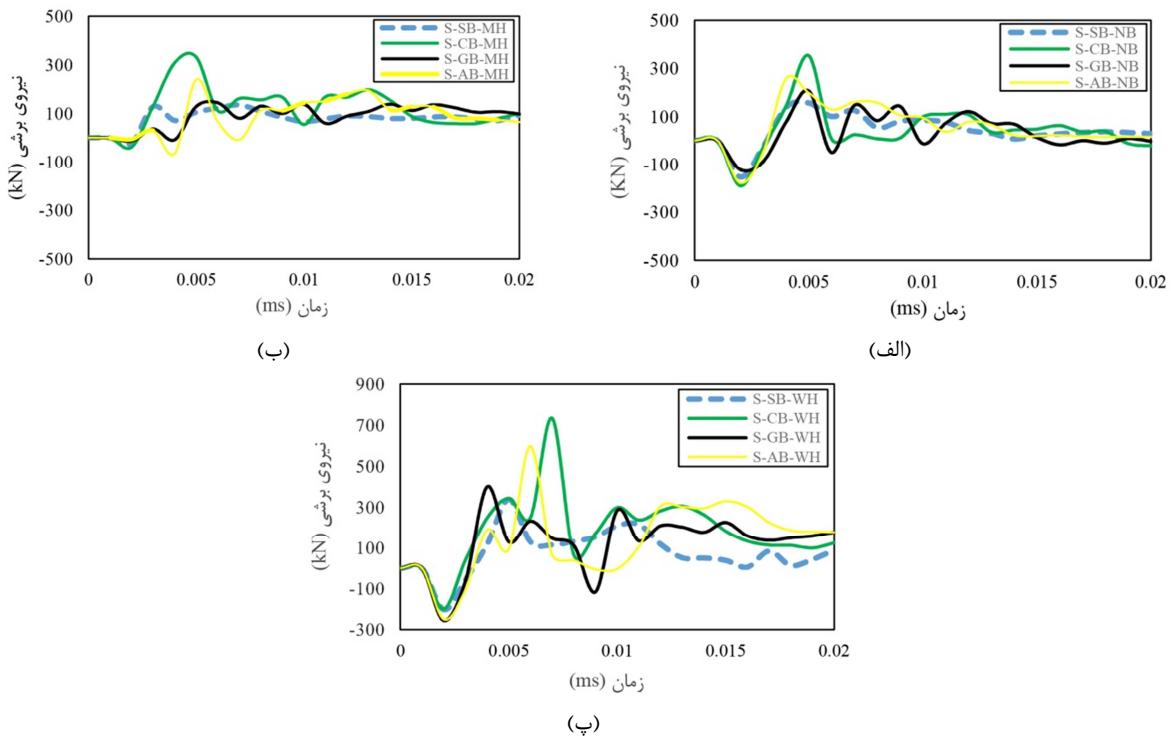
حداقل تنش محوری میلگردها (N/mm <sup>2</sup> )	نام مدل
۷۳۵	S-SB-NB
۳۲۱۰	S-CB-NB
۱۳۵۰	S-GB-NB
۲۴۰۰	S-AB-NB
۵۹۶	S-SB-MH
۳۱۷۱	S-CB-MH
۱۳۵۱	S-GB-MH
۲۴۰۱	S-AB-MH
۹۲۰	S-SB-WH
۳۱۶۰	S-CB-WH
۱۳۷۱	S-GB-WH
۲۴۲۴	S-AB-WH
۶۰۱	S-SB-WH2
۲۸۱۰	S-CB-WH2
۱۳۳۰	S-GB-WH2
۲۴۰۶	S-AB-WH2
۶۰۶	S-SB-WH3
۲۴۴۰	S-CB-WH3
۱۳۵۱	S-GB-WH3
۲۳۹۱	S-AB-WH3

حداقل ظرفیت برشی مدل‌ها نشان داده شده است. براساس نتایج، مسلح کردن ستون با میلگردهای CFRP

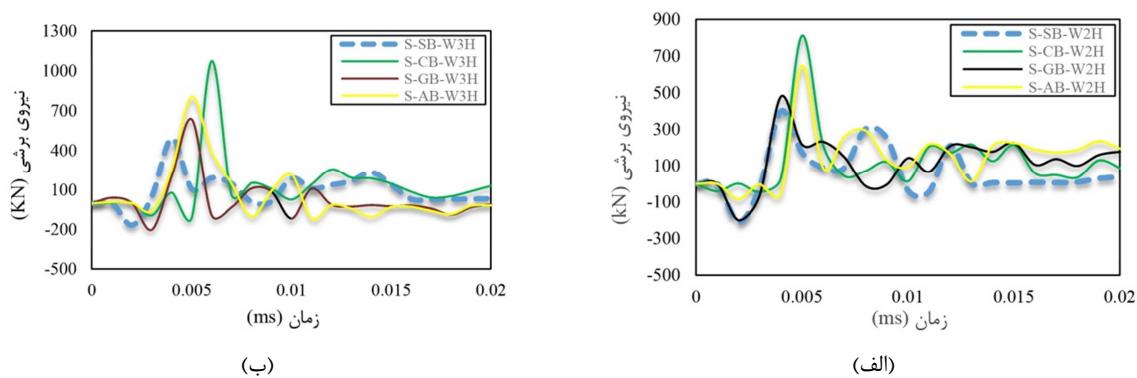
در نمودارهای شکل‌های ۱۳ و ۱۴ منحنی نیروی برشی- زمان مدل‌ها ارائه شده است. همچنین در جدول ۷

درصد، و برای ستون با بعد ۳۵ سانتی‌متر و با میلگرد ۱۸ میلی‌متر به ترتیب به میزان ۱۱۶، ۲۷ و ۶۲ درصد نسبت به ستون مسلح شده با فولاد گزارش شده است. در نمودارهای نیروی برشی همان‌طور که مشخص است میلگردهای FRP مقاومت بالایی از خود نشان داده‌اند. از نتایج مشخص است که اثر افزایش سطح مقطع بیشتر از افزایش قطر آرماتورها بوده است. افزایش مازکزیم ظرفیت برشی در مدل‌های حاوی CFRP قابل توجه بوده است.

AFRP و GFRP برای ستون با بعد ۲۵ سانتی‌متر و آرماتور ۱۲ میلی‌متر به ترتیب سبب افزایش ظرفیت برشی، تحت انفجار در نزدیک پایه ستون به میزان ۱۲۷، ۳۷ و ۷۳ درصد، تحت انفجار در مرکز ستون به میزان ۱۵۲، ۳۳ و ۸۷ درصد، تحت انفجار در کل ارتفاع ستون به میزان ۱۲۶، ۳۴ و ۸۴ درصد نسبت به مدل با آرماتور فولادی شده است. همچنین افزایش ظرفیت برشی تحت انفجار در کل ارتفاع ستون با بعد ۲۵ سانتی‌متر و با میلگرد ۱۸ میلی‌متر به ترتیب به میزان ۱۰۲، ۲۰ و ۶۲



شکل ۱۳- منحنی نیروی برشی - زمان مدل‌های تحت انفجار در (الف) نزدیک پایه، (ب) مرکز و (پ) کل ارتفاع ستون ۲۵×۲۵، میلگرد قطر ۱۲ میلی‌متر



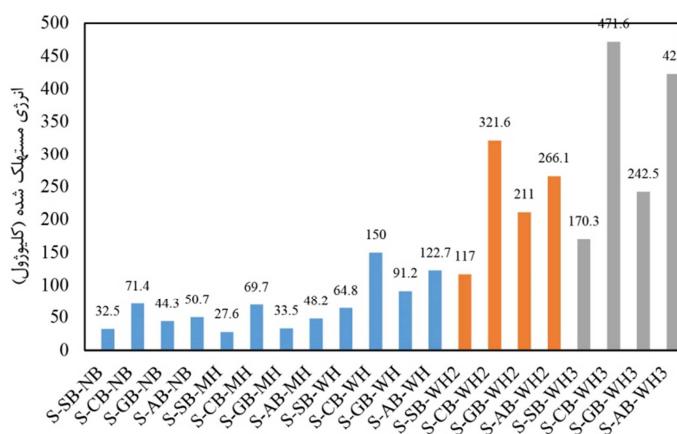
شکل ۱۴- منحنی نیروی برشی - زمان مدل‌های تحت انفجار در کل ارتفاع (الف) ستون ۲۵×۲۵ و (ب) ستون ۳۵×۳۵، میلگرد قطر ۱۸ میلی‌متر

جدول ۷- حداکثر ظرفیت برشی مدل‌ها

نام مدل	ماکزیمم ظرفیت برشی مدل‌ها (kN)
S-SB-NB	۱۶۱
S-CB-NB	۳۶۷
S-GB-NB	۲۲۱
S-AB-NB	۲۷۹
S-SB-MH	۱۳۶
S-CB-MH	۳۴۴
S-GB-MH	۱۸۱
S-AB-MH	۲۵۴
S-SB-WH	۳۰۸
S-CB-WH	۶۹۸
S-GB-WH	۴۱۵
S-AB-WH	۵۶۹
S-SB-WH2	۱۶۱
S-CB-WH2	۳۶۷
S-GB-WH2	۲۲۱
S-AB-WH2	۲۷۹
S-SB-WH3	۱۳۶
S-CB-WH3	۳۴۴
S-GB-WH3	۱۸۱
S-AB-WH3	۲۵۴

ستون، تحت انفجار در نزدیک پایه به میزان ۱۱۹، ۳۶ و ۵۶ درصد، تحت انفجار در مرکز به میزان ۱۵۲، ۲۱ و ۷۴ درصد و تحت انفجار در کل ارتفاع، به میزان ۱۳۱، ۴۰ و ۸۹ درصد می‌شود.

انرژی مستهلك شده در شکل ۱۵ ارائه شده است. طبق نتایج، مسلح کردن ستون با بعد ۲۵ سانتی‌متر و با میلگرد ۱۲ میلی‌متری با میلگردهای GFRP، CFRP و AFRP به ترتیب سبب افزایش انرژی مستهلك شده



شکل ۱۵- انرژی مستهلك شده مدل‌ها (آبی: مدل‌ها با بعد ۲۵ سانتی‌متر و آرماتور قطر ۱۲ میلی‌متر، قرمز: مدل‌ها با بعد ۲۵ سانتی‌متر و آرماتور قطر ۱۸ میلی‌متر و سبز: مدل‌ها با بعد ۳۵ سانتی‌متر و آرماتور قطر ۱۸ میلی‌متر)

- با مقایسه تنش در میلگردها با تنش نهایی آن‌ها مشاهده می‌شود که تنش در همه مدل‌های مسلح شده با میلگردهای فولادی و مدل‌های مسلح شده با میلگردهای GFRP به نقطه تنش نهایی رسیده است، ولی تنش رخ داده در مدل‌های مسلح شده با میلگردهای CFRP و AFRP کمتر از تنش نهایی این میلگردها است.

- مسلح کردن ستون با میلگردهای CFRP، GFRP و AFRP سبب افزایش ظرفیت برشی ستون تحت انفجار در هر سه سناریو بارگذاری می‌شود؛ که بیشترین افزایش ظرفیت مربوط به سناریو بارگذاری در پایه ستون است. این میزان افزایش برای آرماتورهای CFRP از همه بیشتر بوده و بسیار چشمگیر است.

- آرماتورهای پلیمری عملکرد بسیار مناسبی در زمینه استهلاک انرژی داشته‌اند.

- افزایش سایز آرماتور از شدت اثرگذاری مثبت آرماتورهای پلیمری در بحث جایی کم می‌کند و در سایزهای بزرگ‌تر اختلاف در بهبود نتایج با آرماتور فولادی کاهش یافته است؛ ولی از سوی دیگر، در زمینه استهلاک انرژی آرماتورهای پلیمری با سایز بزرگ‌تر عملکرد بهینه‌تری داشته‌اند.

- افزایش بعد مقطع باعث کاهش اثر انفجار بر روی ستون شده است، ولی این اثر از تأثیر افزایش سایز آرماتور کمتر بوده است. تفاوت معناداری در مدل‌های دارای آرماتورهای پلیمری با مدل آرماتور فولادی پس از افزایش بعد مقطع مشاهده نشد.

- به طور کلی، آرماتورهای پلیمری جهت تقویت سازه در برابر انفجار توصیه می‌شوند. در این بین، بهترین عملکرد را به ترتیب آرماتورهای CFRP و GFRP داشته‌اند.

همچنین برای بار انفجار در کل ارتفاع ستون، برای ستون با میلگرد ۱۸ میلی‌متر برای بعد ۲۵ سانتی‌متر به ۳۵ میزان ۱۷۴، ۸۰ و ۱۲۷ درصد و ستون با بعد ۳۵ سانتی‌متر به میزان ۱۷۶، ۴۲، ۱۴۸ درصد نسبت به ستون مسلح شده با فولاد افزایش مشاهده شده است.

نتایج مربوط به انرژی مستهلاک شده نشان می‌دهد که با افزایش سایز آرماتور، عملکرد آرماتورهای پلیمری در استهلاک انرژی بهتر می‌شود. با افزایش سایز آرماتور از ۱۲ به ۱۸ میزان استهلاک انرژی به ترتیب برای مدل‌های دارای آرماتور فولادی، CFRP، GFRP و AFRP به میزان ۱۱۷، ۱۳۱، ۱۱۴ و ۸۰ درصد افزایش داشته است که نشان‌دهنده عملکرد خوب آرماتورهای پلیمری در سایزهای بالا در زمینه استهلاک انرژی است. همچنین افزایش ابعاد ستون نیز تأثیر قابل توجهی بر روی استهلاک انرژی داشته است که نوع رفتار به نوع آرماتور وابستگی قابل توجهی نداشته است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تحلیل دینامیکی بارگذاری انفجار روی ۲۰ مدل ستون‌های مربعی شکل با ابعاد  $25 \times 25$  و  $35 \times 35$  سانتی‌متر و با آرماتورهای با قطر ۱۲ و ۱۸ میلی‌متر با استفاده از میلگردهای پلیمری (CFRP-AFRP-GFRP) و فولادی در سه ناحیه بارگذاری انفجاری (نزدیک پایه ستون، مرکز ستون و کل ستون) انجام شد.

نتایج حاصل از این مطالعه به شرح ذیل است:

- مسلح کردن ستون تحت انفجار با آرماتورهای CFRP، GFRP و AFRP در هر سه سناریو بارگذاری سبب کاهش تغییرشکل رخ داده در ستون نسبت به ستون مسلح شده با فولاد می‌شود که این میزان کاهش برای آرماتورهای CFRP بیشتر بوده است.

## مراجع

- [1] DoD, U. S. (2008). "Structures to resist the effects of accidental explosions", *Unified Facilities Criteria, United States of America, Department of Defense, Washington, DC, Document No. UFC, 3-340*.
- [2] FEMA426. (2003). *Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks against Building*, Federal Emergency Management Agency, 4, 1-20.
- [3] FEMA427. (2003). *Primer for Design of Commercial Buildings to Mitigate Terrorist Attacks*, Federal Emergency Management Agency, 4, 1-10.
- [4] Bangash, M. Y. H., & Bangash, T. (2006). "Blast and Explosive Loadings on Buildings", *Explosion-Resistant Buildings: Design, Analysis, and Case Studies*, 67-101.
- [5] Newmark, N. M., & Hansen, R. J. (1961). *Design of blast resistant structures*. Shock and vibration handbook, 3, 1-19.
- [6] Lam, N., Mendis, P., & Ngo, T. (2004). "Response spectrum solutions for blast loading", *Electronic Journal of Structural Engineering*, 4(4), 28-44.
- [7] Izadifard, R. A., & Maher, M. R. (2010). "Application of displacement-based design method to assess the level of structural damage due to blast loads", *Journal of mechanical science and technology*, 24(3), 649-655.
- [8] Accidental Explosions. (1990). "The Design of Structures to Resist the Effects of US Department of the Army, Navy, and Air Force", *Washington DC*, 5-1300.
- [9] Amran, Y. M., Alyousef, R., Rashid, R. S., Alabduljabbar, H., & Hung, C. C. (2018). "Properties and applications of FRP in strengthening RC structures: A review", In *Structures*, Elsevier, 16, 208-238.
- [10] ACI Committee 440. (2003). *Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars*, ACI440.1R-03, American Concrete Institute, USA, 41.
- [11] Canadian Standards Association. (2002). *Design and Construction of Building Components with Fiber Reinforced Polymers*.CSA, Rexdale Ontario, S806-02.
- [12] Japanese Society of Civil Engineers. JSCE. (1997). *Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials*, Concrete Engineering Series, 23.
- [13] Escórcio, P., & França, P. M. (2016). "Experimental study of a rehabilitation solution that uses GFRP bars to replace the steel bars of reinforced concrete beams", *Engineering Structures*, 128, 166-183.
- [14] Hasan, H. A., Sheikh, M. N., & Hadi, M. N. (2017). "Performance evaluation of high strength concrete and steel fibre high strength concrete columns reinforced with GFRP bars and helices", *Construction and Building Materials*, 134, 297-310.
- [15] Shi, Y., & Stewart, M. G. (2015). "Spatial reliability analysis of explosive blast load damage to reinforced concrete columns", *Structural safety*, 53, 13-25.
- [16] Shi, Y., Hao, H., & Li, Z. X. (2008). "Numerical derivation of pressure-impulse diagrams for prediction of RC column damage to blast loads", *International Journal of Impact Engineering*, 35(11), 1213-1227.
- [17] Crawford, J. E., Malvar, L. J., Wesevich, J. W., Valancius, J., & Reynolds, A. D. (1997). "Retrofit of reinforced concrete structures to resist blast effects", *Structural Journal*, 94(4), 371-377.
- [18] Abdul-Salam, B., Farghaly, A. S., & Benmokrane, B. (2016). "Mechanisms of shear resistance of one-way concrete slabs reinforced with FRP bars", *Construction and Building Materials*, 127, 959-970.
- [19] Zhou, Y., Liu, S., Feng, J., & Fan, H. (2019). "Improved finite difference analysis of dynamic responses of concrete members reinforced with FRP bars under explosion", *Composite Structures*, 230, 111518.
- [20] Jahami, A., Temsah, Y., & Khatib, J. (2019). "The efficiency of using CFRP as a strengthening technique for reinforced concrete beams subjected to blast loading", *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 11(4), 411-420.
- [21] Codina, R., Ambrosini, D., & de Borbón, F. (2016). "Alternatives to prevent the failure of RC members under close-in blast loadings", *Engineering Failure Analysis*, 60, 96-106.
- [22] Thai, D. K., & Kim, S. E. (2018). "Numerical investigation of the damage of RC members subjected to blast loading", *Engineering Failure Analysis*, 92, 350-367.
- [23] Bangash, M. Y. H., & Bangash, T. (2006). "Blast and Explosive Loadings on Buildings", *Explosion-Resistant Buildings: Design, Analysis, and Case Studies*, 67-101.