

## Finite Element Analysis-Based Evaluation of Normal and FRP-Coated Concrete Bridge Piers Under Close-in Blast Loading Scenarios

Mokhtar Ansari<sup>1\*</sup>, Naser Safaeian Hamzehkolaei<sup>2</sup>

1- Assistant Professor, Faculty of Engineering, Bozorgmehr University of Qaenat, Qaen, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of Engineering, Bozorgmehr University of Qaenat, Qaen, Iran

### ABSTRACT

Nowadays, Fibre-reinforced polymer sheets are used to ensure the serviceability of the bridge at different levels of damage after the explosion and to improve their performance. In this study, the performance of the FRP-coated reinforced concrete bridge piers under various explosion scenarios was investigated using Abaqus software. The effect of section shape was examined by considering rectangular, square, box, and circular sections with equal cross-sectional area and reinforcement. All models exhibited a sharp increase in base shear at the beginning of the explosion, followed by a decrease in an oscillatory manner. However, the rectangular section showed the maximum response in a shorter time. The investigation of performance indicators such as maximum stress, displacement change, base shear, energy absorption, and damage level under different explosion scenarios showed that the rectangular and circular sections had the best performance and the most damage, respectively. The effect of TNT weight and blast distance was also examined. Increasing the TNT weight from 100 to 200 and 300 kg led to an increase in maximum displacement (220% and 419%, respectively), plastic strain energy absorption (140% and 302%), and damage intensity, while shear capacity decreased. However, the explosion distance had a more significant effect on structural performance. With an increase in the explosion distance from 1 to 3 and 5 meters, the maximum displacement, shear capacity, and strain energy absorption decreased by 96% and 98%, 53% and 61%, and 92% and 95%, respectively. For a specific TNT value at a safe distance, the column does not suffer noticeable damage. However, as the TNT weight increased, even at a safe distance, the severity of damage increased. Furthermore, column retrofitting with only one FRP layer increased the system's capacity by 28.5% while reducing the maximum displacement by 30%.

### ARTICLE INFO

Receive Date: 06 January 2024

Revise Date: 09 April 2024

Accept Date: 17 June 2024

### Keywords:

Reinforced concrete bridge pier  
Fiber-Reinforced Polymer (FRP)  
Close-in Blast-loading  
Finite element analysis  
ABAQUS software

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.432016.3305](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.432016.3305)

\*Corresponding author: Mokhtar Ansari.

Email address: [ansari@buqaen.ac.ir](mailto:ansari@buqaen.ac.ir)

## ارزیابی اجزای محدود پایه های پل بتن مسلح معمولی و تقویت شده با FRP تحت سناریوهای مختلف انفجار نزدیک

مختار انصاری<sup>1\*</sup>، ناصر صفائیان حمزه کلائی<sup>2</sup>

1- استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه بزرگمهر قائنات، قاین، ایران

2- استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه بزرگمهر قائنات، قاین، ایران

### چکیده

امروزه برای اطمینان از سرویس رسانی پل در سطوح مختلف آسیب انفجار و بهبود عملکرد آنها از ورق های FRP استفاده می شود. در این تحقیق، عملکرد ستون پایه پل بتن مسلح معمولی و تقویت شده با پوشش FRP تحت سناریوهای مختلف انفجار سطحی از نوع نزدیک با نرم افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق ابتدا اثر شکل مقطع بر عملکرد پایه پل با در نظر گرفتن 4 مقطع مختلف (مستطیلی، مربعی، جعبه ای و دایره ای) با سطح مقطع و فولادگذاری یکسان بررسی شد. در تمامی مدل ها، ابتدا یک افزایش شدید در برش پایه سیستم در لحظه وقوع انفجار رخ داده و سپس نیروها به صورت نوسانی کاهش یافت؛ ولی پاسخ بیشینه مقطع مستطیلی در زمان کمتری پس از وقوع انفجار اتفاق افتاد. بررسی شاخص های عملکردی مختلف نظیر بیشینه مقدار تنش، تغییر مکان، برش پایه، جذب انرژی و میزان خرابی تحت سناریوهای مختلف انفجار نشان داد که مقطع مستطیلی و دایره ای به ترتیب بهترین عملکرد و بیشترین آسیب را داشته اند. پس از ارزیابی و انتخاب مقطع مستطیل به عنوان مرجع، اثر وزن ماده منفجره و فاصله منبع انفجار مورد بررسی قرار گرفت. با افزایش TNT از 100 به 200 و 300 کیلوگرم، تغییر مکان بیشینه (به ترتیب 220٪ و 419٪)، جذب انرژی کرنش پلاستیک (140٪ و 302٪) و همچنین شدت خرابی افزایش ولی ظرفیت برشی کاهش یافت. با این وجود، فاصله منبع انفجار اثر بیشتری بر عملکرد پایه پل داشته است. با افزایش فاصله انفجار از 1 به 3 و 5 متر، بیشینه تغییر مکان (96٪ و 98٪)، ظرفیت برشی (53٪ و 61٪) و جذب انرژی کرنش خمیری (92٪ و 95٪) کاهش یافت. اما با افزایش TNT حتی در فاصله ایمن، شدت آسیب افزایش یافت. در انتها، مقاوم سازی ستون با تنها یک لایه پوشش FRP، ظرفیت باربری سیستم را تا اندازه 28/5 درصد افزایش داد و تغییر مکان بیشینه 30 درصد کاهش یافت.

کلمات کلیدی: ستون پایه پل بتن مسلح، پوشش FRP، بار انفجار نزدیک، تحلیل اجزای محدود، نرم افزار آباکوس.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2024.432016.3305">10.22065/jsce.2024.432016.3305</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2024.432016.3305">https://doi.org/10.22065/jsce.2024.432016.3305</a>	/11/30 1403	/11/30 1403	/03/28 1403	/01/21 1403	1402/10/16
مختار انصاری ansari@buqaen.ac.ir				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

## 1- مقدمه

با گسترش عملیات تروریستی و خسارت‌های ناشی از انفجار، طراحی سازه‌های مقاوم در برابر انفجار در سال‌های اخیر رواج یافته است. در روش‌های نوین طراحی در برابر انفجار، تخمین ظرفیت و ارزیابی عملکرد در برابر بار انفجار نیازمند تحلیل دقیق است. با این وجود، اکثر مطالعات آزمایشگاهی و عددی تحت انفجار بر روی تیرها، دال‌ها [1-7] و قاب‌های ساختمانی [8-12] انجام شده و آیین‌نامه‌های طراحی در برابر انفجار نیز عموماً برای سازه‌های ساختمانی توسعه یافته‌اند. با توجه به اهمیت موضوع و وجود ابهامات فراوان در خصوص عملکرد پل‌ها در برابر بار انفجار، تحقیقات در زمینه تحلیل و طراحی این‌گونه سازه‌ها در برابر انفجار ضروری به نظر می‌رسد.

فوجیکورا و برونو<sup>1</sup> با انجام تحقیقات آزمایشاتی، عملکرد پایه پل شکل‌پذیر و غیرشکل‌پذیر لرزه‌ای با پوشش فولادی را در برابر بار انفجار مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق نشان داد که ستون‌ها رفتار شکل‌پذیر تحت بار انفجار نداشته و در اثر گسیختگی برشی پای ستون دچار خرابی می‌گردد [13]. بررسی ظرفیت پل‌های با عرشه دال بتنی و تیر مقاوم‌سازی شده با الیاف FRP<sup>2</sup> تحت بار انفجار ضعیف و متوسط نشان داد استفاده از بتن مقاومت بالا در مقایسه با استفاده از الیاف FRP تاثیر چندانی در افزایش ظرفیت پل تحت بار انفجار ندارد [14]. احمد در سال 2009 با تهیه طیف بارگذاری استاتیکی برای سیستم الاستیک یک درجه آزادی معادل، پاسخ پل‌ها تحت بار انفجار را به روش عددی بررسی کرده و راهکارهایی برای کاهش خطرات ناشی از انفجار در پل‌ها ارائه کردند [15]. ارزیابی عملکرد پلهای کابلی دارای دکل‌های فولادی و عرشه خرپایی فلزی در انفجارهای نزدیک از دغدغه‌های محققین بوده و در این راستا مشخص شده که این نوع انفجار باعث خرابی‌های موضعی می‌گردد و در مواردی باعث انهدام کلی می‌گردد [16-20]. نصر و همکاران در سال 2013 با مقایسه نتایج تحلیل المان محدود با نتایج آزمایشگاهی، یک مدل یک درجه آزادی معادل برای بررسی اثر نیروی محوری بر مقاومت و پایداری ستون‌های فولادی تحت بار انفجار ارائه نمودند [21]. حبیبی و خالدی در سال 2015 با بررسی 240 نمونه با مشخصات مختلف، تحلیل استاتیکی غیرخطی پل‌های کامپوزیت تحت بار انفجار را مورد مطالعه قرار داده و طیف‌هایی برای معادل‌سازی اثر انفجار با بار استاتیکی ارائه نمودند [22]. اسماعیل‌نیا و ملایی در سال 2017 با در نظر گرفتن اثر لنگرهای ثانویه ( $\delta$ -P)، پاسخ ستون‌های بتن مسلح تحت بارگذاری فشار جانبی ناشی از موج انفجار را به روش تک درجه آزادی معادل مورد بررسی قرار داده و با مقایسه نتایج با نرم‌افزار LS-DYNA نشان دادند که نتایج روش تک درجه آزادی معادل محافظه‌کارانه است [23]. واقفی و مبارکی در سال 2018 با بررسی پاسخ دینامیکی پل بتنی تحت اثر انفجار سطحی ناشی از مقادیر مختلف TNT، خرابی‌های ایجاد شده در ستون، پی و شمع پل بتنی را با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA مورد بررسی قرار دادند [24]. ملایی و خضری در سال 2019 با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS رفتار ستون‌های بتن تقویت شده با پوشش فولادی در برابر انفجار را با بررسی 6 نمونه ستون دایره‌ای و مربعی با مشخصات مقطع و فولادگذاری یکسان مورد مطالعه قرار دادند. ایشان اثر تغییرمیزان مقاومت بتن، آرماتورهای طولی و همچنین مشخصات هندسی جاکت فولادی را بررسی کرده و نشان دادند که ستون‌های دایره‌ای عملکرد بهتری در انفجار داشته و وجود ژاکت فولادی علاوه بر افزایش ظرفیت انفجاری ستون، اثر استفاده از بتن مقاوم‌تر و درصد فولاد بیشتر را نیز تقویت می‌کند [25]. واویلایا<sup>3</sup> و همکاران در سال 2020 اثر پوشش فوم پلیمری جاذب انرژی بر عملکرد ستون بتن مسلح تحت بار انفجار را با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با تقویت ستون با لایه فوم پلیمری همراه با ورق فولادی، جذب انرژی انفجار افزایش یافته و جابجایی به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد [26]. نوری و همکاران در سال 2021 با بررسی اثر آرایش‌های مختلف میلگردهای عرضی بر عملکرد المان‌های تیر-ستون تحت بار انفجار نزدیک نشان دادند که به‌ازای مقدار فولاد ثابت، المان تیر-ستون با خاموت مربعی همراه با سنجاق، تغییرشکل کمتر و عملکرد بهتری دارد [27]. حنیف‌زاده و همکاران در سال 2021 ظرفیت جانبی ستون‌های بتن مسلح دایره‌ای مقاوم‌سازی شده با روکش بتنی محصور شده با ژاکت فولادی تحت بار انفجار را مورد بررسی قرار دادند [28]. علی و همکاران در سال 2022 با در نظر گرفتن اندرکنش انفجار-سازه با اعمال بارهای گره‌ای روی سطح عرشه، اثر انفجارهای کوچک تا بزرگ را بر عملکرد کابل اصلی، آویزها و فروپاشی کل سیستم پل معلق را با روش المان محدود مورد بررسی قرار

<sup>1</sup> Fujikura and Bruneau<sup>2</sup> Fiber reinforced polymer (FRP)<sup>3</sup> Vavilala

دادند [29]. امیر و همکاران در سال 2022، اثر جرم و مکان انفجار بر پاسخ دینامیکی پل فولادی تحت فشار موج انفجار را با نرم‌افزار ABAQUS مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفتند که بارگیری شدید مواد منفجره غیرعادی روی عرشه به غیر از تکیه‌گاه‌ها بسیار مخرب بوده و پل را تقریباً غیرقابل ترمیم می‌کند [30]. ژو<sup>4</sup> و همکاران در سال 2022 حالت‌های خرابی و فواصل ایمنی پایه‌های پل بتن مسلح استوانه‌ای ناشی از انفجار وسایل نقلیه را با استفاده از نرم‌افزار Autodyn مورد بررسی قرار دادند. ایشان ضمن ارائه فاصله ایمن انفجار برای 5 نوع وسیله نقلیه مختلف، نشان دادند که پایه‌های پل استوانه‌ای دارای سه حالت مختلف شکست پانچ-برشی همراه با جابجایی زیاد، شکست برشی بتن تمام مقطع و شکست موضعی برشی بتن می‌باشند [31]. لین<sup>5</sup> و همکاران در سال 2023، اثر بار انفجار بر شدت آسیب و همچنین ظرفیت کابل‌های رشته‌ای آسیب‌دیده را با مطالعه آزمایشگاهی و عددی به روش LS-DYNA مورد ارزیابی قرار دادند [32]. ایشان مطالعات پارامتری برای بررسی تاثیر نیروی پیش‌تنیدگی، ابعاد کابل، مقدار ماده منفجره، و فاصله انفجار بر میزان آسیب کابل‌های رشته‌ای انجام داده و یک رابطه تجربی برای تخمین ظرفیت باقی‌مانده کابل‌های رشته‌ای پس از انفجار ارائه دادند. یوسفی و همکاران در سال 2023 با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS عملکرد ستون بتن مسلح تحت بار انفجار مخزن CNG خودرو را مورد بررسی قرار دادند [33]. عطاخانی و همکاران در سال 2023، با استفاده از کد تحلیل دینامیکی صریح LS-DYNA اثر جرم ماده منفجره و همچنین محل بار انفجار بر الگوهای شکست و روند آسیب پل معلق کابلی سه‌دهانه تحت بارگذاری انفجاری روی عرشه را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. ایشان با بررسی پاسخ‌های دینامیکی جابجایی، تنش و کرنش، بحرانی‌ترین فاصله مواد منفجره را با توجه به شدت خرابی اجزای پل ارزیابی کردند [34].

با توجه به اینکه رویدادهای انفجاری بیشترین تلفات جانی و مالی در مقیاس با سایر مخاطرات را دارد، مقاوم‌سازی و بهبود عملکرد پل‌ها در برابر بار انفجار در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. اکثر دستورالعمل‌ها و به صورت ویژه آئین نامه ASCE برای انفجار، برای اعضای سازه ای برای حفظ عملکرد پس از انفجار، پارامترهای پیشینه انحراف تکیه گاهی و نسبت شکل‌پذیری و برای قاب‌ها تغییر مکان نسبی و تغییر زاویه تکیه گاهی را به عنوان شاخص خسارت در سطوح مختلف آسیب بررسی و کنترل می‌کند. برای حفظ عملکرد پایه پل در سطح آسیب سطحی و متوسط یکی از مناسب‌ترین راهکارها، استفاده از ورق‌های FRP است. استفاده از این مصالح می‌تواند ضمن افزایش مقاومت، باعث بهبود عملکرد سازه در برابر بار انفجار و کاهش اثر ترکش گردد. از طرفی، بررسی پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که اکثر مطالعات قبلی با توجه به شرایط بارگذاری، فرضیات و ساده‌سازی در مدل‌سازی محدود به بررسی عملکرد کلی پلها بوده است.

با توجه به اینکه نتایج تحقیقات تجربی (آزمایشگاهی) محققان پرهزینه، وقت‌گیر و دارای مشکلات امنیتی است و کمتر نتایج تست‌های واقعی در اینترنت و مراکز داده ثبت شده است، شبیه‌سازی اثر انفجار در سازه‌ها با اجزای محدود مرسوم است و نتایج تحقیق حاضر هم در انتخاب شکل مناسب پایه پل در مناطق مستعد حملات تروریستی مفید خواهد بود و هم نشان خواهد داد که استفاده از FRP تا حد زیادی ظرفیت باربری بار انفجار را افزایش می‌دهد و تغییر مکانهای پیک را کاهش می‌دهد. هدف این تحقیق در ابتدا بررسی اثر شکل مقطع بر عملکرد پایه پل با در نظر گرفتن 4 مقطع مختلف (مستطیلی، مربعی، جعبه‌ای و دایره‌ای) با سطح مقطع و فولادگذاری یکسان در انفجار-نزدیک است. شاخص‌های عملکردی مختلف نظیر پیشینه مقدار تنش، تغییر مکان، برش پایه، جذب انرژی و میزان خرابی تحت سناریوهای مختلف انفجار-نزدیک بررسی می‌گردد. پس از ارزیابی و انتخاب مقطع با بهترین عملکرد اثر وزن مقدار ماده منفجره و فاصله منبع انفجار روی مقطع منتخب مورد بررسی قرار می‌گیرد. در انتها ارزیابی مقاوم‌سازی ستون با 1، 3 و 5 لایه FRP تحت بار انفجار انجام می‌گردد تا بهینه‌ترین مقطع با کمترین تعداد لایه پوشش و بهترین عملکرد (افزایش ظرفیت باربری و کاهش تغییر مکان پیشینه) تعیین گردد.

<sup>4</sup> Zhu<sup>5</sup> Lin

## 2- شبیه‌سازی به روش اجزای محدود

### 1-2- مشخصات مصالح

مدول الاستیسیته ( $E_u$ ) و کرنش نظیر تنش تسلیم نهایی ( $\varepsilon_0$ ) بتن را می‌توان با رابطه (1) محاسبه نمود.

$$E_u = 10,200(f'_c)^{1/3}, \quad \varepsilon_0 = 0.00078(f'_c)^{1/4} \quad (1)$$

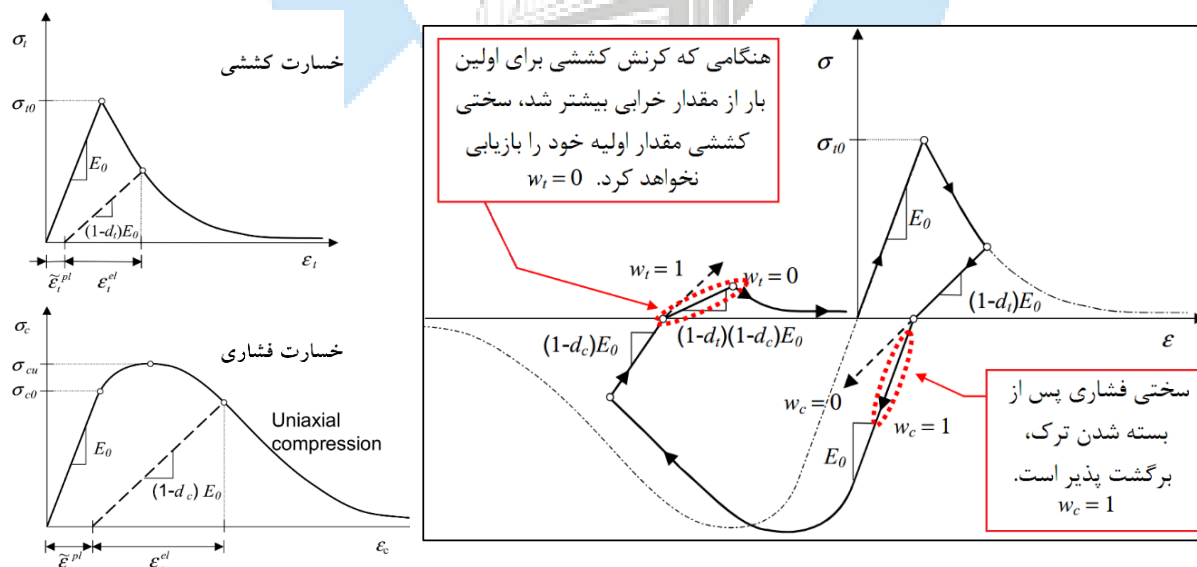
که  $\varepsilon_0$  پارامتر بدون بعد و  $f'_c$  بر حسب MPa است. همچنین، رابطه تنش-کرنش برای بتن‌های مقاومت بالا به صورت زیر بیان می‌شود [35]:

$$f_c = f'_c \left[ \frac{k_1 \beta \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)}{k_1 \beta - 1 + \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^{k_2 \beta}} \right] \quad (2)$$

که در این جا،  $\beta$  معرف ضریب شکل نمودار تنش-کرنش و  $k_1$  و  $k_2$  ضرایب اصلاح مقاومت هستند که برای بتن‌های با مقاومت کمتر از 50MPa برابر 1 در نظر گرفته می‌شوند.

$$\beta = \frac{1}{1 - \left( \frac{f'_c}{\varepsilon_0 E_u} \right)}, \quad k_1 = \left( \frac{50}{f'_c} \right)^3, \quad k_2 = \left( \frac{50}{f'_c} \right)^{1.3} \quad (3)$$

در شکل 1، منحنی تنش-کرنش بتن تحت بار چرخه‌ای برای دو حالت مود شکست کششی و فشاری ارائه شده است. در این شکل،  $\varepsilon_t^{pl}$  و  $\varepsilon_c^{pl}$  به ترتیب بیان‌گر مقدار کرنش سخت‌شدگی کششی و فشاری بتن می‌باشند.



شکل 1: منحنی تنش-کرنش بتن تحت بار چرخه‌ای بتن.

$$\sigma_t = \sigma_t \left( \varepsilon_t^{pl}, \varepsilon_t^{pl}, \theta, f^{\alpha} \right), \quad d_t = d_t \left( \varepsilon_t^{pl}, \theta, f^{\alpha} \right), \quad \bar{\sigma}_t = \sigma_t (1 - d_t) \quad (4)$$

$$\sigma_c = \sigma_c \left( \varepsilon_c^{pl}, \varepsilon_c^{pl}, \theta, f^a \right), \quad d_c = d_c \left( \varepsilon_c^{pl}, \theta, f^a \right), \quad \bar{\sigma}_c = \sigma_c (1 - d_c) \quad (5)$$

در این پژوهش، مقدار 0/99 و صفر به ترتیب برای ضرایب بازگشت پذیری سختی فشاری و کششی بتن در نظر گرفته شد. همچنین، از کرنش‌ها و تنش‌های واقعی استفاده شد.

$$\varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_{nom}), \quad \sigma = \sigma_{nom} (1 + \varepsilon_{nom}) \quad (6)$$

در رابطه (6)،  $\varepsilon_{nom}$  و  $\sigma_{nom}$  به ترتیب بیان گر کرنش و تنش اسمی بوده و  $\varepsilon$  و  $\sigma$  نیز کرنش و تنش واقعی هستند.

برای فولاد طولی ستون از مصالح Steel400 و برای خاموت‌ها نیز از مصالح Steel300 با وزن مخصوص 7850 کیلوگرم بر متر مکعب، مدول الاستیسیته 200 گیگاپاسکال و ضریب پواسون 0/3 استفاده شد. مشخصات مصالح بتنی و فولادی در جدول 1 ارائه شده است.

جدول 1: مشخصات مصالح بتنی و فولادی

	مشخصات پلاستیک مصالح بتنی						خاموت‌ها (Steel300)		فولاد طولی (Steel400)	
	Strain	Stress (Pa)	Plastic strain	Plastic strain (shifted)	Compressive damage	Tensile damage	Plastic strain	Stress (Pa)	Plastic strain	Stress (Pa)
1	0	0	-	-	-	-	0	3 10 <sup>+08</sup>	0	4 10 <sup>+08</sup>
2	0.0002	5320000	-	-	-	-	0.0035	3 10 <sup>+08</sup>	0.005	4 10 <sup>+08</sup>
3	0.0004	10080000	-	-	-	-	0.0045	3.02 10 <sup>+08</sup>	0.007	4.08 10 <sup>+08</sup>
4	0.0006	14280000	3.10757 10 <sup>-05</sup>	0	0	-	0.0065	3.13 10 <sup>+08</sup>	0.01	4.25 10 <sup>+08</sup>
5	0.0008	17920000	8.60558 10 <sup>-05</sup>	5.49801 10 <sup>-05</sup>	0	-	0.0095	3.29 10 <sup>+08</sup>	0.013	4.4 10 <sup>+08</sup>
6	0.001	21000000	0.000163347	0.000132271	0	-	0.0125	3.43 10 <sup>+08</sup>	0.016	4.54 10 <sup>+08</sup>
7	0.0012	23520000	0.000262965	0.000231889	0	-	0.0155	3.55 10 <sup>+08</sup>	0.022	4.78 10 <sup>+08</sup>
8	0.0014	25480000	0.000384861	0.000353785	0	-	0.0165	3.59 10 <sup>+08</sup>	0.025	4.88 10 <sup>+08</sup>
9	0.0016	26880000	0.000529084	0.000498008	0	-	0.0185	3.65 10 <sup>+08</sup>	0.031	5.04 10 <sup>+08</sup>
10	0.0018	27720000	0.000695618	0.000664542	0	-	0.0215	3.74 10 <sup>+08</sup>	0.034	5.1 10 <sup>+08</sup>
11	0.002	28000000	0.000884462	0.000853386	0	0	0.0245	3.81 10 <sup>+08</sup>	0.037	5.14 10 <sup>+08</sup>
12	0.0022	27720000	0.001095618	0.001064542	0.01	0.0011	0.0315	3.89 10 <sup>+08</sup>	0.04	5.18 10 <sup>+08</sup>
13	0.0024	26880000	0.001329084	0.001298008	0.04	-	0.0335	3.9 10 <sup>+08</sup>	0.046	5.2 10 <sup>+08</sup>
14	0.0026	25480000	0.001584861	0.001553785	0.09	-	0.0365	3.89 10 <sup>+08</sup>	0.049	5.19 10 <sup>+08</sup>
15	0.0028	23520000	0.001862948	0.001831872	0.16	-	0.0425	3.83 10 <sup>+08</sup>	0.052	5.17 10 <sup>+08</sup>
16	0.003	21000000	0.002163347	0.002132271	0.25	-	0.0455	3.77 10 <sup>+08</sup>	0.055	5.13 10 <sup>+08</sup>
17	0.0032	17920000	0.002486056	0.00245498	0.36	-	0.0485	3.67 10 <sup>+08</sup>	0.058	5.09 10 <sup>+08</sup>
18	0.0034	14280000	0.002831076	0.0028	0.49	-	0.0515	3.6 10 <sup>+08</sup>	0.064	4.95 10 <sup>+08</sup>
19	0.0036	10080000	0.003198406	0.00316733	0.64	-	0.0545	3.49 10 <sup>+08</sup>	0.067	4.86 10 <sup>+08</sup>
20	0.0038	5320000	-	-	-	-	0.0555	3.45 10 <sup>+08</sup>	0.074	4.6 10 <sup>+08</sup>
21	0.004	0	-	-	-	-	0	3 10 <sup>+08</sup>	0	4 10 <sup>+08</sup>

برای تعیین ضرایب سختی الاستیک مصالح کامپوزیت از ورق پایه کربنی CFRP مقاومت بالا با وزن مخصوص برابر با 1800 کیلوگرم بر مترمکعب استفاده شد. مدول الاستیسیته مصالح به صورت صفحه‌ای و با روش لایه‌ای<sup>6</sup> لحاظ شده (جدول 2) و برای بررسی روند گسیختگی نیز معیار خرابی هاشین<sup>7</sup> مطابق با مقادیر جدول 3 در نظر گرفته شد.

جدول 2: مدول الاستیسیته و مشخصات مکانیکی ورق CFRP با مقاومت بالا [35]

G <sub>23</sub> (GPa)	G <sub>13</sub> (GPa)	G <sub>12</sub> (GPa)	Nu <sub>12</sub>	E <sub>2</sub> (GPa)	E <sub>1</sub> (GPa)
1.86	3.27	3.27	0.22	4.8	62

<sup>6</sup> Lamina

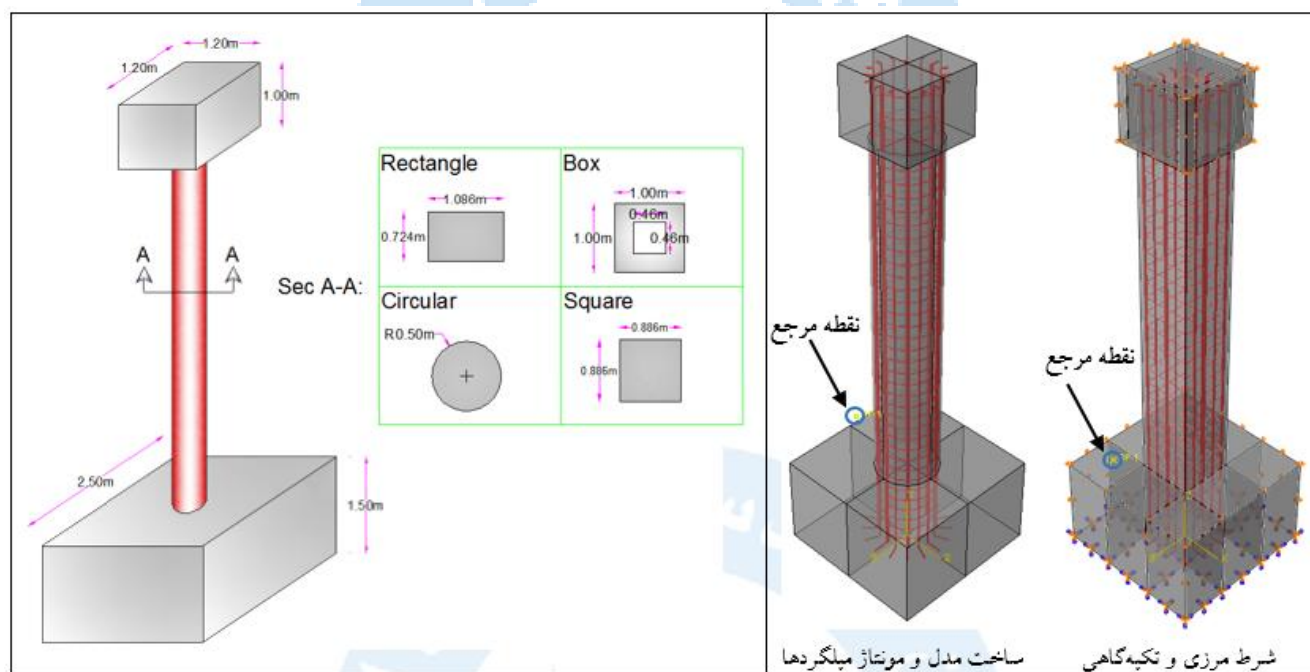
<sup>7</sup> Hashin Damage

جدول 3: خواص FRP برای معیار خرابی هاشین

Transverse Shear Strength (MPa)	Longitudinal Shear Strength (MPa)	Transverse Compressive Strength (MPa)	Transverse Tensile Strength (MPa)	Longitudinal Compressive Strength (MPa)	Longitudinal Tensile Strength (MPa)
48	96	74	74	958	958

## 2-2- مدل سازی ستون پایه پل تحت بار انفجار

در این تحقیق، برای مقایسه کلی اثر شکل مقطع پایه پل، چهار مقطع مختلف شامل مقطع مستطیلی، مربعی، جعبه‌ای و مقطع دایره‌ای در نظر گرفته شد. سطح مقطع تمامی اعضا برابر با  $0/785$  مترمربع در نظر گرفته شد. بدین منظور، مقطع مربعی به ضلع  $0/886$  متر، مقطع دایره‌ای با شعاع با  $0/5$  متر، مقطع مستطیلی با ابعاد  $1/086$  در  $0/724$  متر (نسبت ارتفاع مقطع به عرض مقطع برابر با  $1/5$ ) و مقطع جعبه‌ای با ابعاد داخلی و بیرونی به ترتیب برابر با  $0/463$  متر و  $1$  متر مدل شده‌اند. مشخصات هندسی پایه پل و ابعاد سطح مقطع‌های مورد بررسی در شکل 2 نشان داده شده است. برای کلیه مقاطع، نسبت فولاد طولی تقریباً برابر با  $2\%$  در نظر گرفته شده و مقدار نیروی محوری ستون نیز برابر با  $20\%$  مقاومت فشاری محوری نهایی ( $P_{n,max}$ ) بر اساس نشریه شماره ۳۸۹ (آیین نامه طرح و محاسبه پل‌های بتن آرمه) اعمال شد. بدین منظور از  $24$  میلگرد طولی ( $16$  میلگرد با توزیع یکنواخت در محیط مقطع و  $8$  میلگرد به صورت یک در میان) با قطر  $28$  میلی‌متر و همچنین از خاموت به قطر  $10$  میلی‌متر با توزیع یکنواخت و یکسان استفاده شد.



شکل 2: مشخصات هندسی مدل‌های ستون پایه پل بتن مسلح مورد مطالعه.

برای مدل سازی پایه پل، ابتدا قطعات بتنی (سرستون، ستون و فونداسیون) به صورت سه‌بعدی، میلگردها با المان Wire به صورت یک خط ایجاد شده و صفحات FRP نیز با المان Shell به صورت یک پوسته مطابق شکل 2 ایجاد شد. اندرکنش بین بخش‌های مختلف به صورت گیردار در نظر گرفته شد. برای تعریف تماس بین سطوح نیز اندرکنش میلگردها و بتن به صورت ناحیه مدفون و برای اندرکنش FRP و بتن از اتصال گره به گره استفاده شد [20]. مطابق شکل 2، در کلیه مدل‌ها وجه انتهایی فونداسیون به صورت گیردار و وجوه جانبی سرستون و فونداسیون به صورت غلتکی در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که در نرم‌افزار آباکوس دو روش اصلی برای تعریف میلگردها وجود دارد. روش اول مدل‌سازی سازه به صورت سه‌بعدی و گنجاندن میلگرد در بتن به صورت مدفون و روش دوم مدل‌سازی به صورت shell

است. در روش دوم با استفاده از قابلیت نرم‌افزار برای المان‌های shell نیازی به مدل‌سازی میلگردها نبوده و فقط مختصات لایه آرماتور، سطح مقطع میلگرد و فاصله‌ی آن‌ها به نرم‌افزار معرفی می‌گردد.

## 2-3- بارگذاری موج انفجاری

تهدید و خطر ناشی از یک بمب هوایی توسط دو گزینه تقریباً مهم تعریف می‌شود؛ اندازه بمب یا وزن خرج انفجاری و فاصله بین مرکز انفجار و هدف که به فاصله رویارویی معروف است. در نمودار فشار - زمان (شکل 3)، دو فاز اصلی قابل مشاهده است: بخش فوقانی فشار محیطی نامیده شده، که مدت زمان فاز مثبت  $t_0^+$  در حالی که بخش تحتانی فشار محیطی مدت زمان فاز منفی انفجار  $t_0^-$  نامیده می‌شود. فاز منفی دارای مدت زمان بیشتر و شدت کمتر نسبت به فاز مثبت می‌باشد. با افزایش فاصله رویارویی، مدت زمان فاز مثبت موج انفجار افزایش یافته که منجر به کاهش دامنه و افزایش مدت زمان پالس ضربه می‌گردد. مواد منفجره ای که در فاصله بسیار نزدیک از سازه هدف قرار گرفته اند، ضربه بسیار سنگین و بار فشاری بسیار زیادی را به یک ناحیه خاصی از سازه وارد می‌کنند. مواد منفجره ای که در فاصله دورتری از سازه قرار گرفته اند، توزیع فشار یکنواختی با زمان بیشتر و دامنه کمتر در روی کل سازه خواهند داشت.

پروفایل اضافه فشار ناشی از موج انفجار بر اساس زمان ورود موج انفجار ( $t_A$ )، اضافه فشار مبنا ( $p_{s0}$ ) و زمان انفجار مشخص می‌شود (شکل 3). این پارامترها تابعی از قدرت ماده انفجاری، فاصله محل اندازه‌گیری تا منبع انفجار و زاویه برخورد هستند. ویژگی‌های ماده منفجره نیز بر اساس متغیرهایی مانند مقدار انرژی، چگالی و سرعت آزاد شدن انرژی و همچنین قدرت ماده منفجره بر حسب وزن TNT معادل بیان می‌شود. برای یک ماده منفجره ایده آل، می‌توان انفجار را بر حسب مقدار کل انرژی توصیف کرد. خصوصیات موج انفجار حاصل از یک ماده منفجره در فاصله دلخواه با استفاده از قوانین مقیاس قابل محاسبه است. روش هاپکینز-کرانز (روش ریشه سوم) رایج ترین روش برای مقیاس کردن انفجار می‌باشد که پارامتر  $Z$  را به‌عنوان فاصله مقیاسی در نظر می‌گیرد [16].

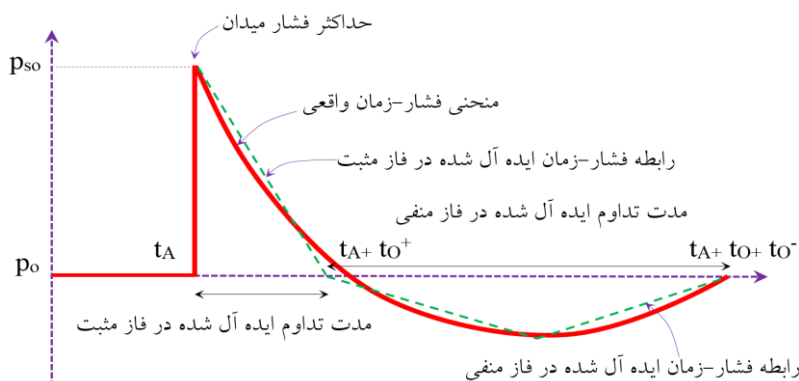
$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (6)$$

که در آن  $R$  و  $W$  به ترتیب بیان گر فاصله منبع انفجار تا نقطه اندازه‌گیری (بر حسب متر) و جرم معادل ماده منفجره TNT (بر حسب کیلوگرم) می‌باشد. روابط تحلیلی مختلفی برای محاسبه پارامترهای بیش فشار و فشار حداکثر استاتیکی ناشی از انفجار در هوا ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به روابط هنریش (7) اشاره کرد. این روابط برای انفجار حوزه نزدیک با داده‌های تجربی به‌خوبی مطابقت دارد.

$$p_s(\text{bar}) = \frac{14.072}{Z} + \frac{5.540}{Z^2} - \frac{0.357}{Z^3} + \frac{0.00625}{Z^4} \quad (0.05 < Z < 0.3)$$

$$p_s(\text{bar}) = \frac{6.194}{Z} - \frac{0.326}{Z^2} + \frac{2.132}{Z^3} \quad (0.3 < Z < 1.0)$$

$$p_s(\text{bar}) = \frac{0.662}{Z} - \frac{4.05}{Z^2} + \frac{3.288}{Z^3} \quad (1.0 < Z < 10)$$



شکل 3: نمودار فشار-زمان ایده‌آل در اثر انتشار موج حاصل از انفجار.

شکل 3 نمودار تغییرات فشار-زمان ایده آل ناشی از انفجار قبل از برخورد به سازه (فشار در میدان آزاد) را نشان می‌دهد. برای اعمال موج انفجار در نرم‌افزار آباکوس، یک نقطه مرجع در فاصله 1 متری از محور ستون به‌عنوان نقطه شروع موج انفجار در نظر گرفته شد (شکل 2). سپس، با استفاده از مدل CONWEP، مقدار 100 کیلوگرم TNT اعمال شده و زمان انفجار نیز برابر با 0/03 ثانیه معرفی گردید. در این مدل جرم ماده منفجره بر حسب TNT معادل و سطحی از جسم که موج انفجار با آن اندرکنش دارد به نرم‌افزار معرفی می‌شود. سپس، فشار ناشی از موج انفجار بر اساس مکانیک سیالات محاسباتی به‌صورت خودکار و بسیار دقیق محاسبه شده و به سازه اعمال می‌گردد.

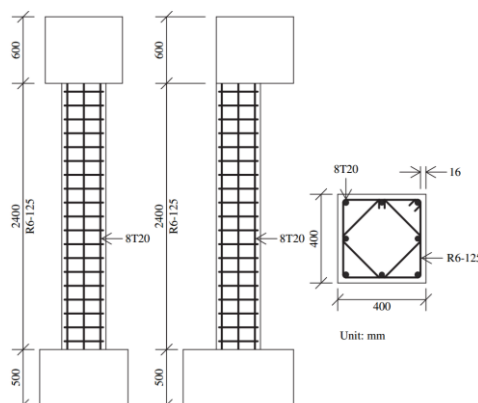
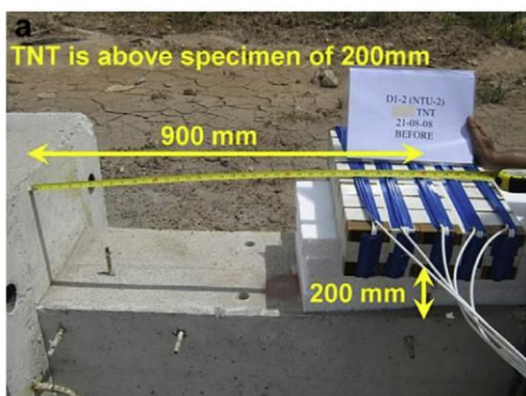
### 3- نتایج و بحث

بارهای انفجار، فشارهای شدید و کوتاه مدتی هستند که می‌توانند باعث تغییر شکل سریع و خرابی بتن شوند. خواص مصالحی مانند مقاومت، سختی و رفتار خرابی بتن تحت بارهای با نرخ کرنش بالا، به طور قابل توجهی با بارهای استاتیکی متفاوت است. خواص مصالح مانند تنش تسلیم و مقاومت نهایی اغلب با افزایش نرخ کرنش (نرخ تغییر شکل) که در بارهای انفجار مشاهده می‌شود، افزایش می‌یابد. لذا در این تحقیق براساس روابط CEB از ضریب افزایش دینامیکی (DIF) که براساس نرخ کرنش محاسبه می‌شود برای اصلاح مقاومت فشاری و کششی بتن استفاده شده است. با توجه به اینکه مقاومت بتن 30 مگا پاسکال است و نرخ کرنش بین 60 تا 80 (S-1) متغیر است این ضریب محاسبه و مدل بتن اصلاح شده است. برای تحلیل مدل‌ها از تحلیل دینامیکی صریح به طول 0/1 ثانیه و با گام زمانی 0/005 ثانیه در نرم‌افزار استفاده شد. داده‌های خروجی شامل تغییر مکان، برش پایه، تنش و کرنش پلاستیک (خمیری)، نمودار تاریخچه زمانی انرژی مستهلک شده کل و همچنین انرژی جذب شده توسط تغییر شکل پلاستیک سازه می‌باشند. انرژی تغییر شکل پلاستیک 8 که بیان‌گر انرژی جذب شده توسط مصالح در اثر ایجاد مفصل‌های خمیری است، یکی از معیارهای اساسی برای درجه خرابی سازه‌ها می‌باشد.

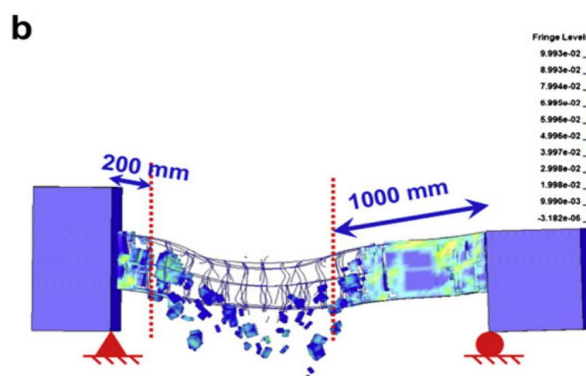
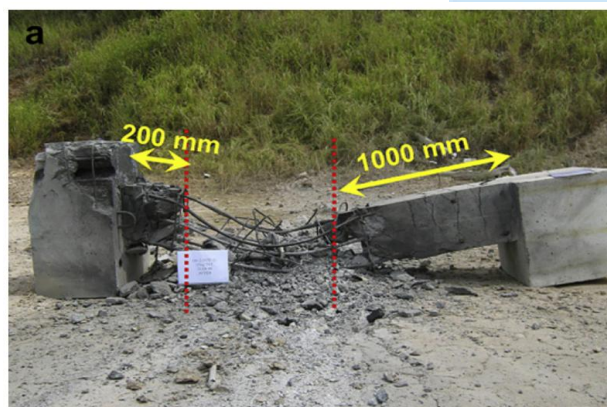
#### 3-1- صحت‌سنجی مدل اجزای محدود بر اساس بار انفجار

در تحلیل‌های مبتنی بر اجزای محدود، کاهش حجم مدل (کاهش تعداد المان) ضمن حفظ دقت پاسخ‌ها، بر زمان و هزینه تحلیل بسیار تاثیرگذار می‌باشد. در این قسمت، ابتدا تحلیل همگرایی نتایج مدل اجزای محدود ستون تحت بار انفجار مورد بررسی قرار گرفته است. صحت سنجی مدل با بار انفجار واقعی با توجه به هزینه تست‌ها، زمانبر بودن و محرمانه بودن تحقیقات کمتر در اینترنت و مراکز داده‌ها وجود دارد. با این حال با توجه به دسترسی اندک برای صحت‌سنجی مدل از تحقیقات آقای وو و همکاران در سال 2011 [37] استفاده شده است. ابعاد، هندسه و میلگردگذاری نمونه ستون در شکل 4 (سمت راست) آورده شده است. بتن مورد استفاده دارای مقاومت 28 روزه 30 مگاپاسکال بوده می‌باشد. مشخصات فولاد با وزن مخصوص 7850 کیلوگرم بر مترمکعب و مدول الاستیسیته 200 گیگاپاسکال و ضریب پواسون 0.3 ایجاد شد. در قسمت رفتار پلاستیک مصالح، تنش جاری شدن برای فولاد طولی 420 مگاپاسکال با مقاومت نهایی 500 مگاپاسکال و برای فولادهای عرضی، مقاومت تسلیم 280 مگاپاسکال و مقاومت نهایی 380 مگاپاسکال با کرنش نهایی 0.22 بوده است. مطابق شکل 4 (سمت چپ)، 25 کیلوگرم ماده منفجره TNT در بارگذاری انفجاری این مطالعه در فاصله 20 سانتیمتری از بدنه نمونه و با فاصله 90 سانتیمتری از ستون به ابعاد 40 در 40 سانتیمتر منفجر شد. در دو انتهای ستون دو کلاهک به منظور ایجاد شرایط مرزی تکیه‌گاهی افزوده شده است. گسترش خرابی در نمونه پس از انفجار نیز در شکل 5 ارائه شده است.

<sup>8</sup> Plastic Strain Energy

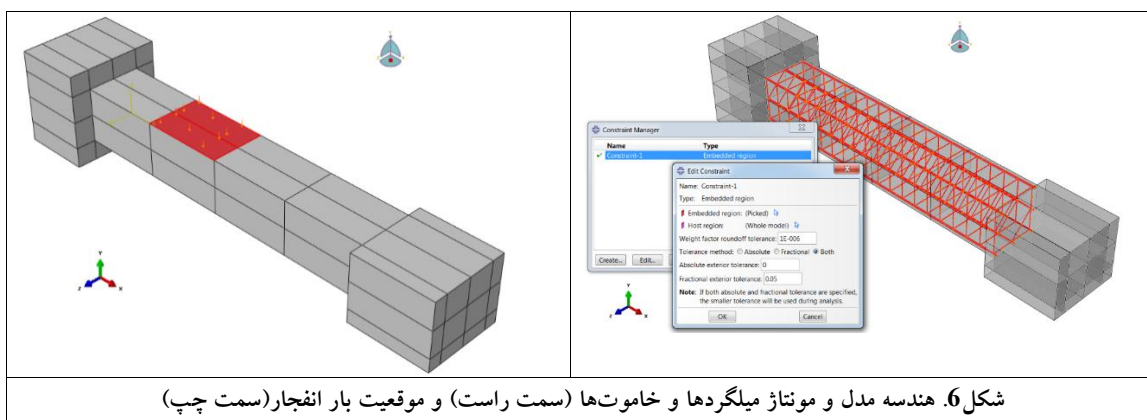


شکل 4: ابعاد هندسی و میلگرد گذاری نمونه و موقعیت قرارگیری TNT آزمایش و و همکاران [37]



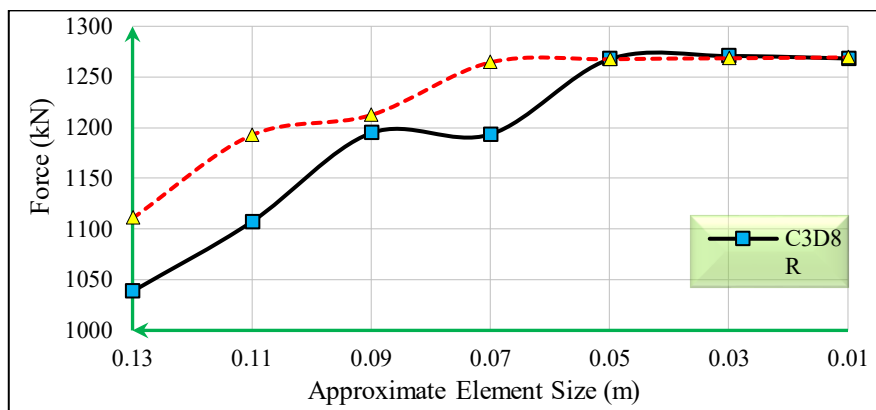
شکل 5. گسترش خرابی در مدل آزمایشگاهی و همچنین مدل اجزای محدود مطالعه و و همکاران [37]

شکل 6 مدل ایجاد شده در نرم افزار آباکوس را نشان می دهد. برای معرفی شرایط مرزی روش حل Static General انتخاب شده و مدت زمان تحلیل برای آن 1 ثانیه با گام زمانی 1 ثانیه تعریف شد. در ادامه یک گام تحلیل دینامیکی به طول 0.03 ثانیه و با گام زمانی 0.005 ثانیه در نظر گرفته شد. همچنین، با استفاده از قید اندرکنش Embedded میلگردها بصورت مدفون شده درون بتن قرار داده شد. لازم به ذکر است که درجه آزادی انتهای تحتانی در کلاهک سمت راست بصورت غلظتی و در سمت چپ بصورت مفصلی مشابه با مطالعه و و همکاران ایجاد شد.



شکل 6. هندسه مدل و مونتاژ میلگردها و خاموتها (سمت راست) و موقعیت بار انفجار (سمت چپ)

برای تعیین تعداد المان بهینه، تحلیل همگرایی مش بندی صورت گرفته است. برای این منظور 7 مقدار مختلف برای تعداد مش ها در نظر گرفته شده و همچنین تاثیر نوع المان بر پاسخ سازه شامل نیروی عکس العمل تکیه گاهی ستون مورد ارزیابی قرار گرفت. ابعاد تقریبی و تعداد المان ها در دو نوع مختلف در جدول 4 ارائه شده است. برای هر کدام از انواع مش بندی ها، نمودار عکس العمل تکیه گاهی شامل نیرو-تغییر مکان استخراج شد و مقدار ماکزیمم نیرو در این چرخه بعنوان شاخص مقایسه برای آنالیز همگرایی در نظر گرفته شد. نتایج مطالعه همگرایی در شکل 7 ارائه شده است.

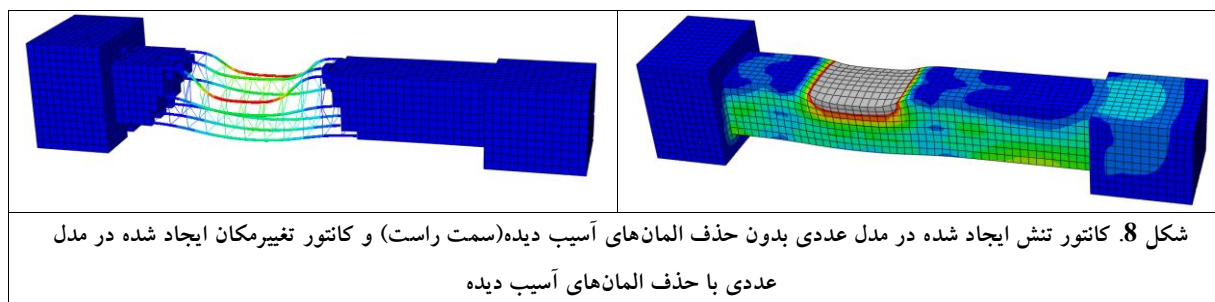


شکل 7. نمودار پاسخ حساسیت سیستم نسبت به نوع و ابعاد المان ها  
جدول 4. ابعاد، تعداد و نوع المان های بررسی شده در آنالیز حساسیت

المان سه بعدی هشت نقطه ای		المان سه بعدی چهار نقطه ای	
C3D8R		C3D4	
اندازه تقریبی (m)	تعداد المان	اندازه تقریبی (m)	تعداد المان
0.01	160000	0.01	320000
0.03	17689	0.03	35378
0.05	6472	0.05	12800
0.07	3249	0.07	6498
0.09	1936	0.09	3872
0.11	1296	0.11	2592
0.13	961	0.13	1922

در شکل 7، میزان حساسیت سیستم در پاسخ ماکزیمم نیروی عکس العمل تکیه گاهی ستون نسبت به ابعاد المان ها (برای دو حالت مش بندی مختلف) رسم شده است. با توجه به نمودار در المان های مکعبی با اندازه تقریبی 13 سانتیمتر (961 المان) حداکثر نیروی محوری به 1038.54 کیلو نیوتن رسیده است که تفاوت قابل توجهی با مقدار بدست آمده از المان های هرمی دارد. با کاهش اندازه المان ها به 5 سانتیمتر، دو نمودار با یکدیگر برخورد کرده و به مقدار 1269.01 کیلو نیوتن می رسند. پس از آن، افزایش تعداد المان تاثیر چندانی در پاسخ سازه ایفا نمی کند. بنابراین برای مدل سازی و تحلیل به منظور همگرایی از المان مکعبی 8 گرهی با اندازه 5 سانتیمتر استفاده می شود. در نهایت کانتورهای تنش، تغییر مکان در شکل 8 نشان می دهد مدل عددی با مدل آزمایشگاهی (شکل 5)، نشان میدهد که تطابق بسیار خوبی بین مدل عددی ایجاد شده و مدل آزمایش و همکاران برقرار است. با توجه به اینکه در انفجار نزدیک شدت خرابی ها امکان ثبت پارامترهای مهندسی را نمی دهد عمدتاً از ارزیابی سطح و عمق خرابی برای مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل سازی استفاده می شود. نتایج

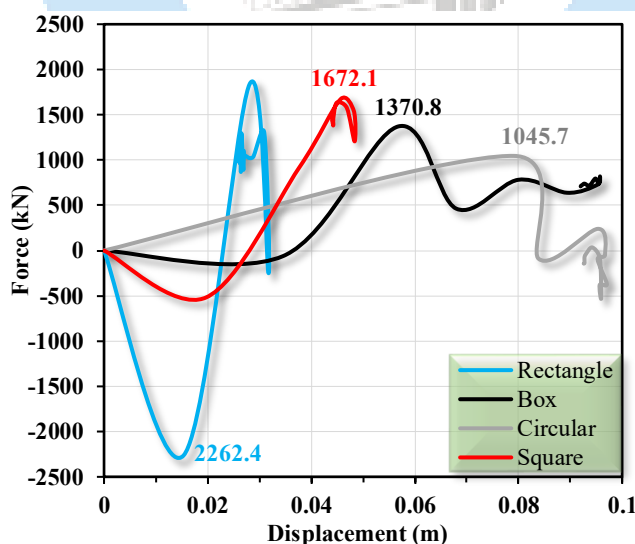
حاصله بیانگر صحت و دقت مدل اجزای محدود هستند.



### 3-2- بررسی اثر شکل مقطع بر پاسخ در برابر انفجار

در این قسمت، عملکرد پایه پل بتنی با چهار مقطع (مربعی، دایره‌ای، مستطیلی و جعبه‌ای) تحت بارگذاری موج ناشی از انفجار به اندازه 100 کیلوگرم TNT در نقطه مرجع به فاصله 1 متری از ستون (شکل 2) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به صورت کانتورهای تنش و کرنش و نمودارهای تاریخچه زمانی تغییر مکان، برش پایه، انرژی کل و انرژی کرنش پلاستیک ارائه شده و مورد مقایسه قرار گرفته است.

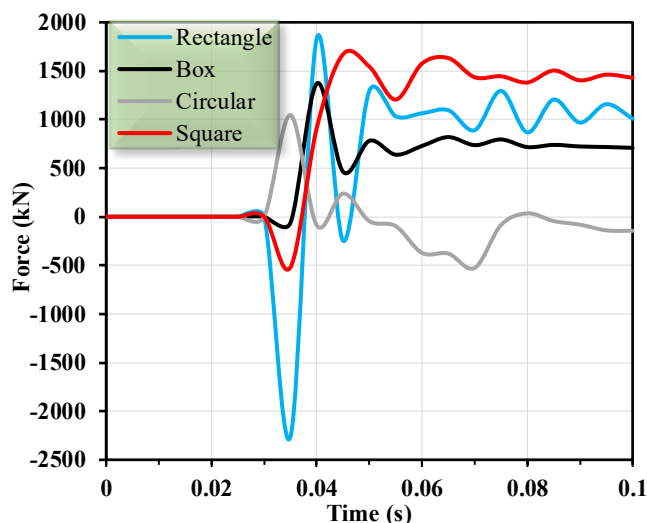
منحنی بار-تغییر مکان (برش پایه) پایه پل با چهار مقطع مختلف مورد بررسی در شکل 9 ارائه شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که بیشترین مقدار برش پایه در مقطع مستطیلی ایجاد شده و لذا این مقطع دارای بیشترین ظرفیت باربری در برابر موج انفجار می‌باشد. دلیل این امر عمق زیاد مقطع مستطیلی در راستای انفجار می‌باشد. همچنین، برش پایه در مقطع مربعی بیشتر از مقطع جعبه‌ای و دایره‌ای می‌باشد. کمترین مقاومت نیز در مقطع دایره‌ای مشاهده شد که به دلیل سختی کمتر این مقطع می‌باشد. به دلیل پیچیدگی تحلیل سیستم در برابر بار انفجار، نامنظمی بسیار زیادی در منحنی بار-تغییر مکان مشاهده شده است که تحلیل دقیق آن را با مشکل مواجه می‌نماید. به همین دلیل، نمودارهای تاریخچه زمانی برش پایه و تغییر مکان مدل‌ها به ترتیب در شکل 10 و شکل 11 مورد بررسی قرار گرفته است.



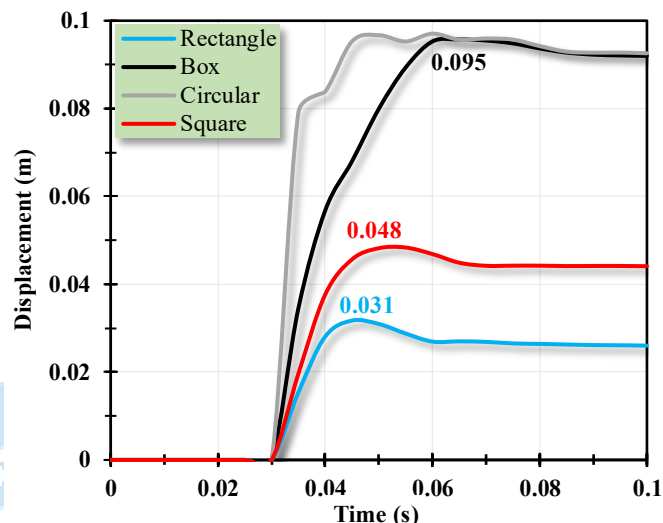
شکل 9: منحنی بار-تغییر مکان برای ستون‌های مورد مطالعه.

با مقایسه تاریخچه زمانی تغییر مکان (شکل 10) می‌توان دریافت که مقدار تغییر مکان برای تمامی مدل‌های مورد بررسی ابتدا تا مقدار بیشینه متناظر افزایش یافته و سپس به تغییر مکان نهایی (کمتر از مقدار بیشینه) همگرا شده است. مقطع دایره‌ای و جعبه‌ای

بیشترین تغییر مکان را داشته‌اند. با این وجود، تغییر مکان نهایی در این دو مقطع تقریباً برابر بوده، ولی تغییر مکان بیشینه در مقطع دایره‌ای بیشتر است. کمترین مقدار تغییر مکان نیز مربوط به مقطع مستطیلی بوده است که بیان‌گر عملکرد مناسب این مقطع در برابر بار انفجار می‌باشد.

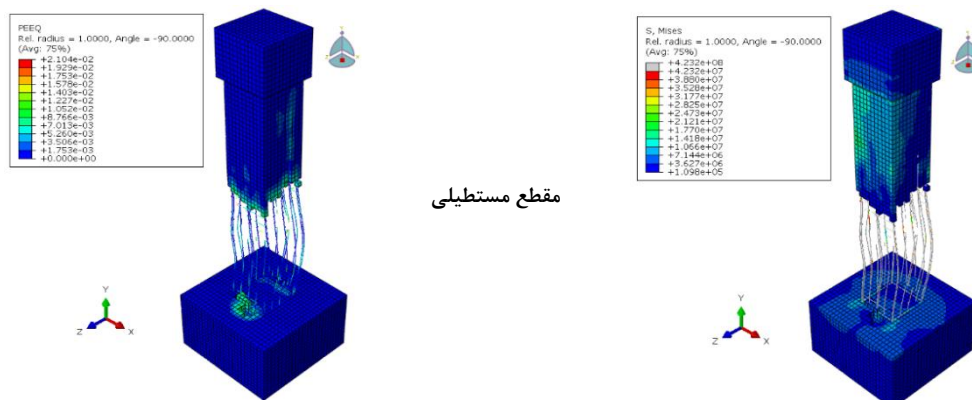


شکل 11: تاریخچه زمانی برش پایه.

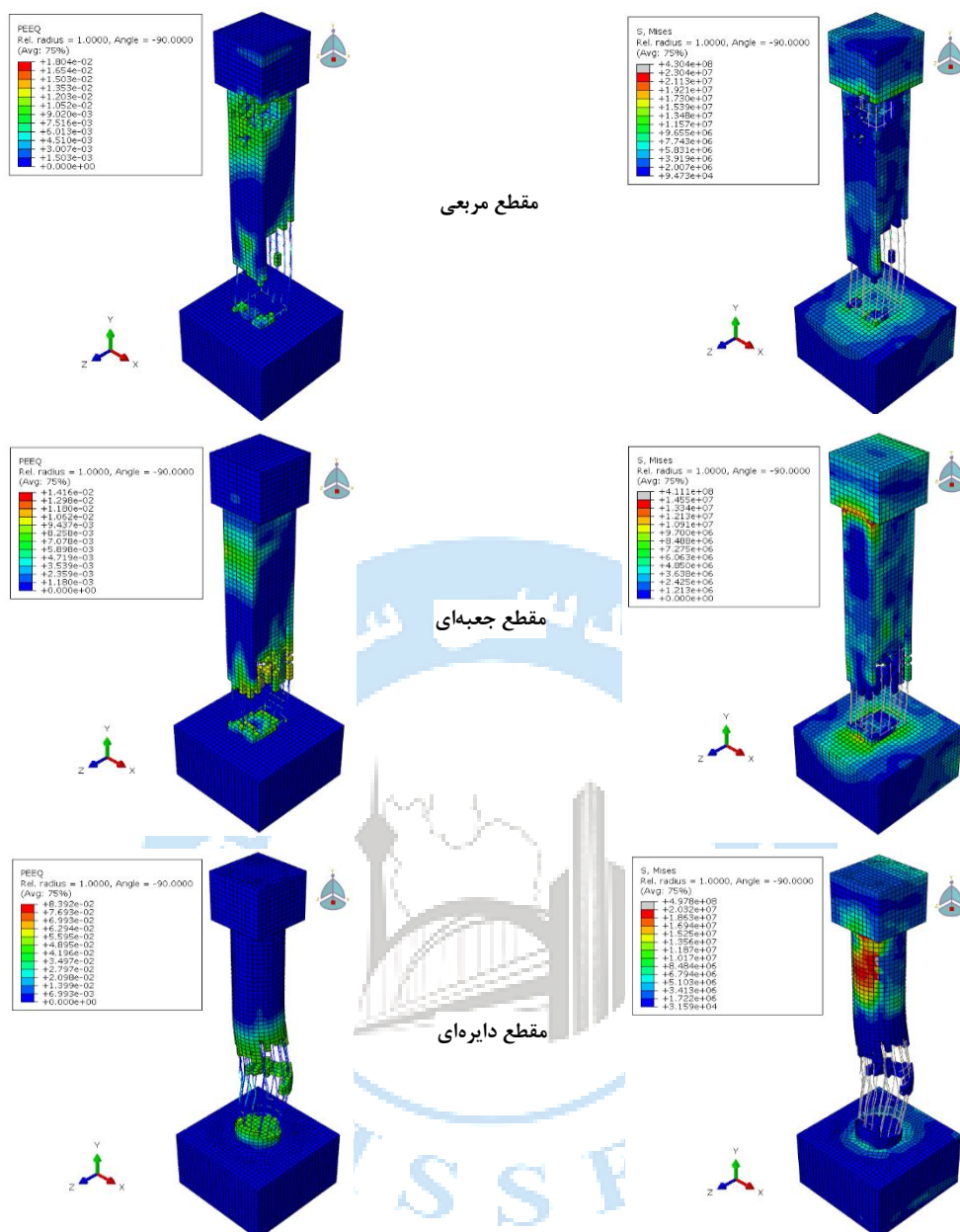


شکل 10: تاریخچه زمانی تغییر مکان.

بررسی تاریخچه زمانی برش پایه (شکل 11) نشان می‌دهد که برش پایه نهایی در تمامی مدل‌های مورد بررسی کمتر از مقدار بیشینه برش پایه سیستم متناظر است. همچنین، کمترین و بیشترین مقدار برش پایه مربوط به مقطع دایره‌ای و مستطیلی بوده که به ترتیب برابر با  $1045/7$  و  $2262/4$  کیلونیوتن می‌باشند. با این وجود، بعد از مدت کوتاهی از وقوع انفجار ( $t > 0.04$  s) برش پایه در سیستم با مقطع مستطیلی کاهش یافته و مقدار نهایی آن کمتر از مقدار متناظر در مقطع مربعی می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان به ایجاد تنش و کرنش پلاستیسیته بیشتر در مقطع مستطیلی نسبت به مقطع مربعی مرتبط دانست (شکل 12 و 13). در المانهایی که در معرض تنش‌های نرمال و برشی هستند ابتدا تنش‌های نرمال اصلی محاسبه و بر اساس معیار فون میسز تنش معادل آن محاسبه می‌شود و با مقادیر تنش‌های تسلیم و استحکام مصالح مقایسه می‌شود تا محدوده آسیب مشخص گردد (شکل 12- سمت راست). کرنش پلاستیک معادل یا PEEQ کرنش بدون مولفه است که بصورت کمیت بدون بعد بر اساس کرنش‌های اصلی محاسبه می‌شود و از آن به عنوان معیاری برای مقایسه کرنش‌های پلاستیک موجود با معیار خرابی استفاده شده است (شکل 13- سمت چپ). نتایج نشان می‌دهد مقطع مستطیل کمترین جابجایی ماکزیمم را تجربه می‌کند و در انتهای زمان انفجار کمترین جابجایی ماندگار را دارد که به لحاظ سرویس‌دهی بعد از انفجار بهترین عملکرد است. علاوه بر این، بیشینه مقدار تغییر مکان (شکل 10) و برش پایه (شکل 11) در مقطع مستطیلی در زمان کمتری پس از وقوع انفجار نسبت به سایر مدل‌ها اتفاق افتاده است.



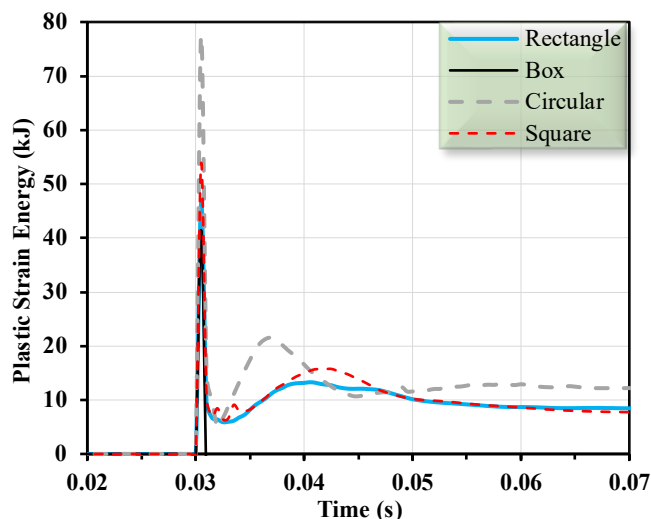
مقطع مستطیلی



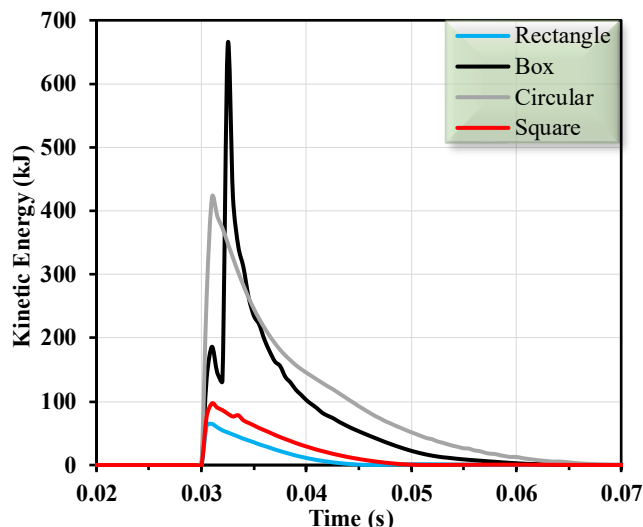
شکل 13: کانتور کرنش پلاستیک معادل تحت بار انفجار.

شکل 12: کانتور تنش فون میسز تحت بار انفجار.

در شکل 12 و شکل 13 به ترتیب کانتور تنش و کرنش پلاستیک برای مقاطع مورد بررسی تحت بار انفجار در فاصله 1 متری ارائه شده است. در این شکل‌ها، المان‌های آسیب دیده با مقدار کرنش پلاستیسیته بیشتر از 0/01 حذف شده‌اند. نتایج در حالت کلی بیان‌گر مقدار تنش و کرنش بیشتر در مقطع دایره‌ای است که علی‌رغم انتظار نشان‌دهنده عملکرد نامناسب این مقطع در برابر انفجار می‌باشد.



شکل 15: تاریخچه زمانی انرژی کرنش پلاستیسیته.



شکل 14: تاریخچه زمانی جذب انرژی کل.

برای بررسی جذب انرژی تحت بار انفجار، تاریخچه زمانی جذب انرژی کل و همچنین جذب انرژی کرنش پلاستیک که بیان گر مقدار انرژی جذب شده پس از فرآیند پلاستیسیته شدن مصالح می باشد، به ترتیب در شکل 14 و 15 ارائه شده اند. نتایج شکل 14 حاکی از آن است که مقطع جعبه‌ای و دایره‌ای به ترتیب با 659/5 و 420/8 کیلوژول بیشترین انرژی کل را جذب نموده اند. در حالی که مقطع مستطیلی با کمترین تغییر مکان، کمترین جذب انرژی را نیز داشته است. از طرفی، بیشترین مقدار انرژی کرنش پلاستیک در مقطع دایره‌ای و برابر با 77/4 کیلوژول است. مقطع جعبه‌ای و مستطیلی نیز به ترتیب با 41/4 و 46/6 کیلوژول کمترین جذب انرژی کرنش پلاستیک را داشته اند.

جدول 5: اثر شکل مقطع بر پیشینه مقادیر پاسخ پایه پل تحت بار انفجار

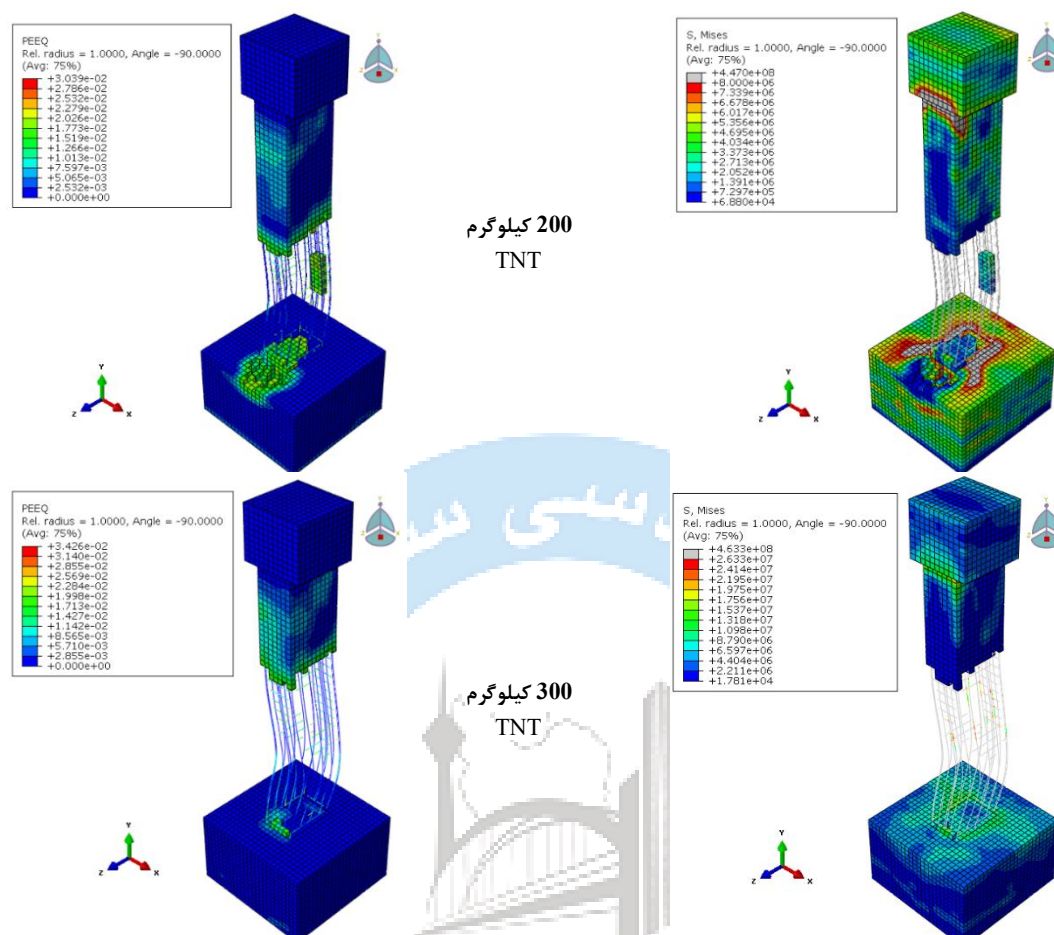
شکل مقطع	تغییر مکان (cm)	برش پایه (kN)	انرژی کل (kJ)	انرژی کرنش پلاستیسیته (kJ)
دایره‌ای	9/7	1045/7	420/8	77/4
مربع	4/8	1672/1	97/1	53/9
مستطیل	3/1	2262/4	64/7	46/4
جعبه‌ای	9/5	1370/8	659/5	41/4

در جدول 5 خلاصه نتایج به دست آمده برای مقاطع مورد مطالعه ارائه شده است. با جمع بندی نتایج این بخش می توان نتیجه گرفت که مقطع مستطیلی و مربعی دارای عملکرد بهتری (بر اساس معیار تغییر مکان، ظرفیت برش پایه و شدت خرابی) نسبت به سایر مقاطع مورد مطالعه بوده و مقطع دایره‌ای نیز ضعیف ترین عملکرد در برابر بار انفجار را داشته است. از اشکال شکل 10 مشخص می گردد که مقطع دایره با توجه به انرژی کرنشی پلاستیسیته بالاتر به میزان زیادی وارد مرحله پلاستیک شده و تغییر شکل ماندگار زیاد آن حاکی این موضوع است. در مطالعه حاضر، برای مطالعه پارامتری به منظور بررسی اثر فاصله انفجار، مقدار ماده منفجره و همچنین مقاوم سازی پایه پل توسط FRP از مقطع مستطیلی استفاده شده است.

### 3-3- بررسی اثر مقدار ماده منفجره

برای بررسی اثر وزن ماده منفجره بر رفتار مقطع مستطیلی، دو انفجار با مقدار 200 و 300 کیلوگرم TNT در فاصله 1 متری از پایه با مقطع مستطیلی نیز بررسی شده و با نتایج 100 کیلوگرم TNT مقایسه شده است. بدین منظور، کانتورهای تنش و کرنش پلاستیک

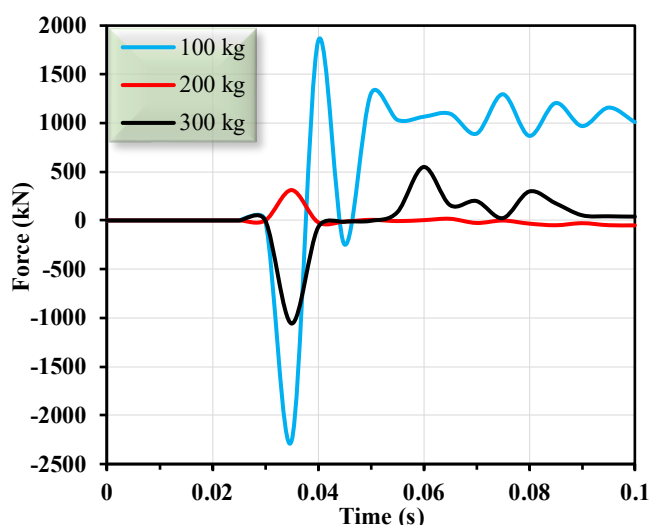
برای مقادیر مختلف ماده منفجره در شکل 16 و شکل 17 ارائه شده‌اند. بررسی نتایج شکل‌های 16 و 17 نشان می‌دهد که با افزایش وزن TNT مقادیر تنش، کرنش و تعداد المان‌های آسیب دیده (با کرنش پلاستیسیته بیشتر از 0/01) به اندازه قابل توجهی افزایش یافته‌اند.



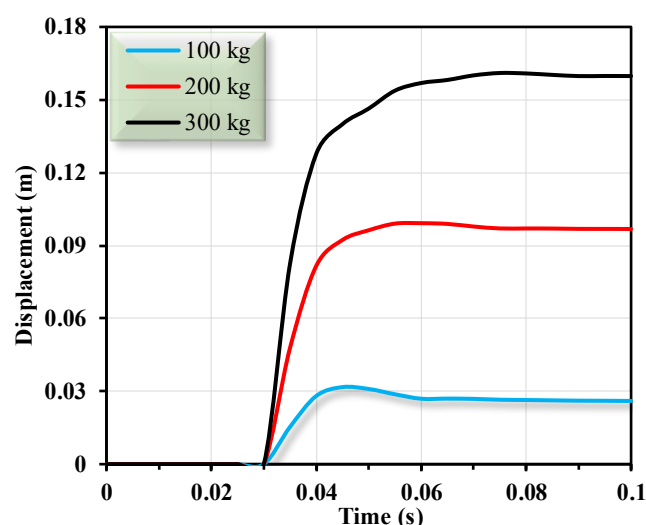
شکل 17: اثر وزن ماده منفجره بر کرنش پلاستیک.

شکل 16: اثر وزن ماده منفجره بر تنش فون میسز (مقطع مستطیلی).

اثر وزن ماده منفجره بر تاریخچه زمانی تغییر مکان و برش پایه به ترتیب در شکل 18 و 19 مورد بررسی قرار گرفته است. شکل 18 نشان می‌دهد که با افزایش مقدار ماده منفجره از 100 کیلوگرم به 200 و 300 کیلوگرم TNT، تغییر مکان بیشینه در مقطع مستطیلی از 3/1 سانتی‌متر به ترتیب با 220 درصد و 419 درصد افزایش تا اندازه 9/9 و 16/1 سانتی‌متر افزایش یافته است. از طرفی، برش پایه که بیان‌گر ظرفیت باربری می‌باشد، رفتار متفاوتی از خود نشان داده و با افزایش وزن TNT بیشینه مقدار برش پایه کاهش یافته است (شکل 19). با توجه به این که خرابی بسیار زیادی با افزایش مقدار TNT رخ داده و زمان ایجاد خرابی نیز بسیار سریع است (شکل 11، 15 و 19) بنابراین سازه فرصت کافی برای بسیج کردن مصالح و مقاومت در برابر بار وارده را نخواهد داشت. در نتیجه، با افزایش مقدار TNT تغییر اساسی در رفتار سازه رخ داده و نتایج برش پایه متفاوت از انتظار دریافت شده است. لازم به ذکر است که فاصله سازه تا محل انفجار نیز بر نتایج تاثیرگذار است که در بخش بعدی مورد بررسی قرار گرفته است.

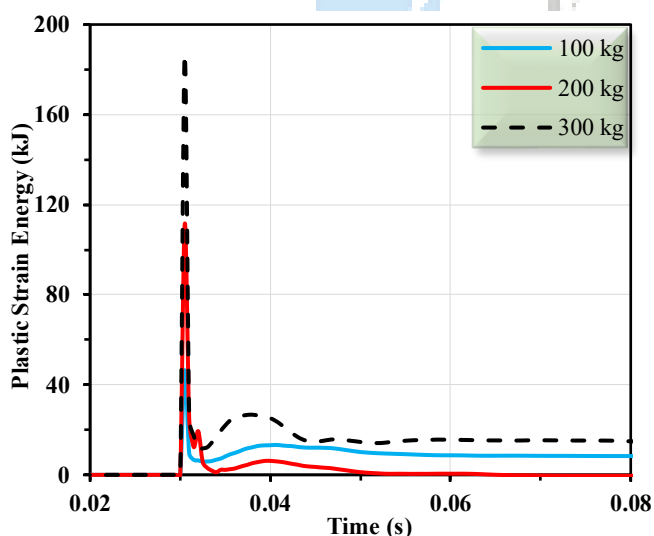


شکل 19: اثر وزن TNT بر تاریخچه زمانی برش پایه.

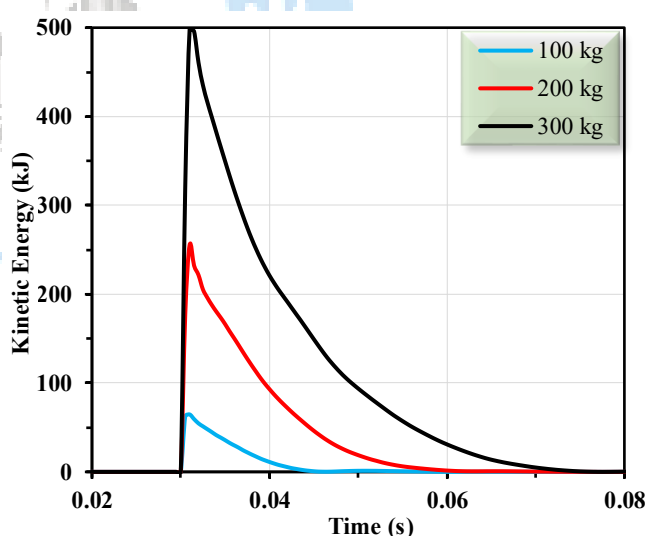


شکل 18: اثر وزن TNT بر تاریخچه زمانی تغییر مکان.

در شکل‌های 20 و 21 اثر مقدار ماده منفجره بر تاریخچه زمانی جذب انرژی بررسی شده است. نتایج ارائه شده حاکی از آن است که جذب انرژی کل و همچنین انرژی کرنش پلاستیک سازه با افزایش وزن ماده منفجره به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. با توجه به شکل 17، با تغییر مقدار TNT از 100 کیلوگرم به 200 و 300 کیلوگرم، جذب انرژی کرنش پلاستیک از 46/4 کیلوژول به ترتیب با 140 درصد و 302 درصد افزایش تا اندازه 111/5 و 186/8 کیلوژول افزایش یافته است. خلاصه نتایج بررسی اثر وزن ماده منفجره بر پاسخ پایه پل با مقطع مستطیلی در جدول 6 ارائه شده است.



شکل 21: اثر وزن TNT بر تاریخچه زمانی جذب انرژی کرنش پلاستیسیته.



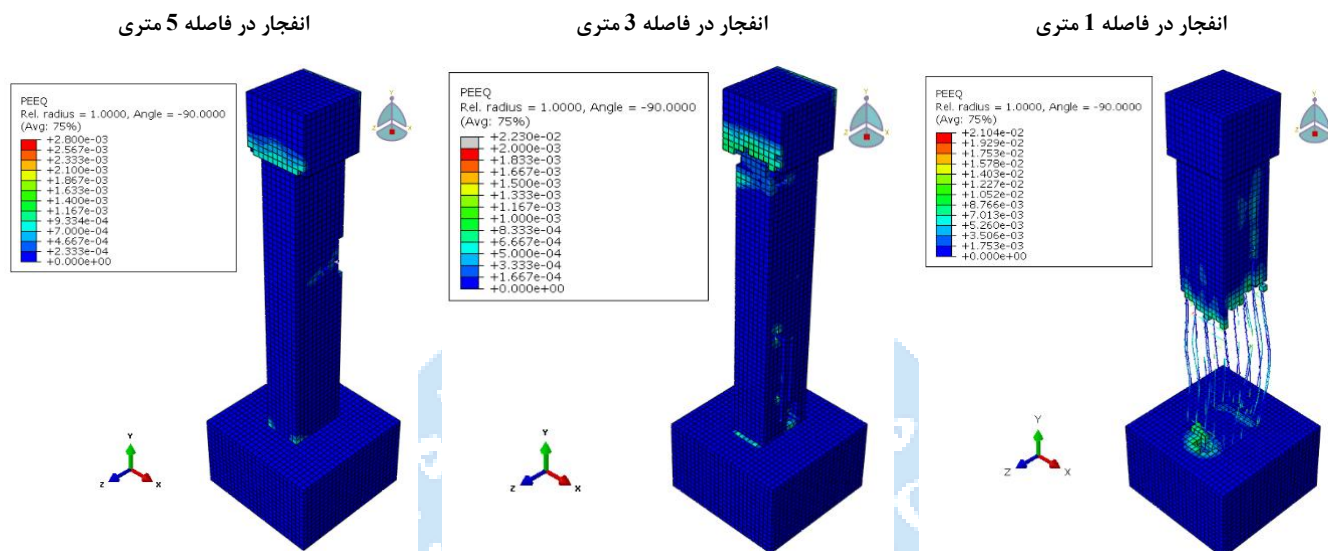
شکل 20: اثر وزن TNT بر تاریخچه زمانی جذب انرژی کل.

جدول 6: اثر وزن ماده منفجره بر بیشینه مقادیر پاسخ پایه پل با مقطع مستطیلی تحت بار انفجار

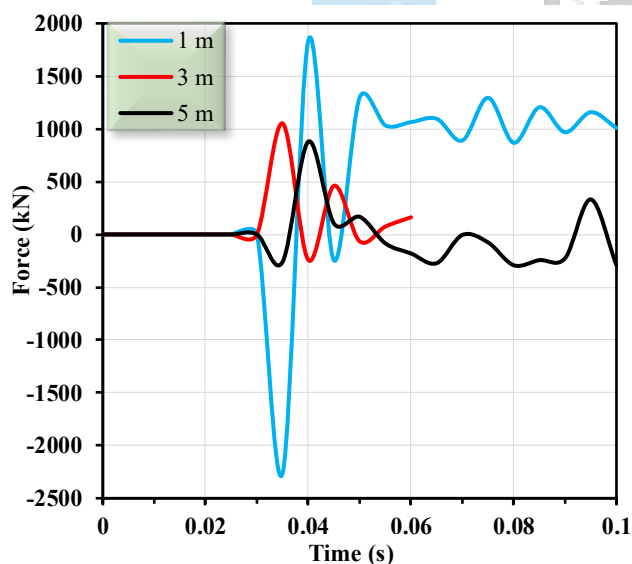
وزن TNT	تغییر مکان (cm)	برش پایه (kN)	انرژی کل (kJ)	انرژی کرنش پلاستیسیته (kJ)
100 کیلوگرم	3/1	2262/4	64/7	46/4
200 کیلوگرم	9/9	311/8	253/3	111/5
300 کیلوگرم	16/1	1057/8	498/1	186/8

## 3-4- بررسی اثر فاصله انفجار

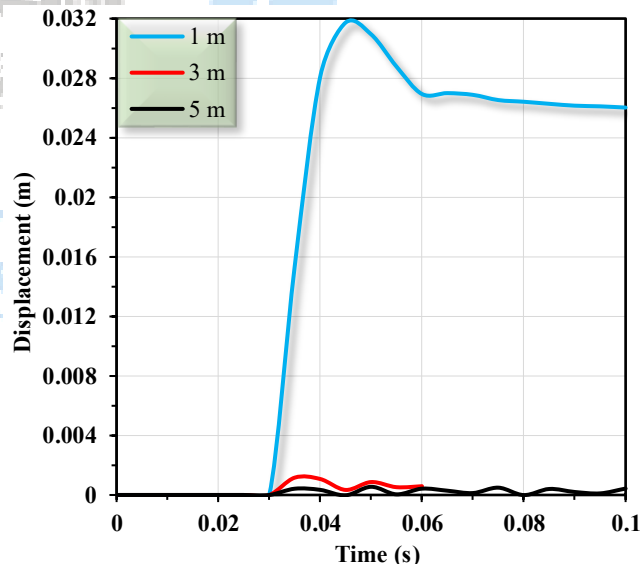
در این بخش، انفجار در فاصله 3 و 5 متری از ستون پایه پل تحلیل شده و با نتایج انفجار در فاصله 1 متری مقایسه می‌گردد. بدین منظور وزن ماده منفجره در هر حالت ثابت و برابر با 100 کیلوگرم TNT در نظر گرفته شد. در شکل 22، اثر فاصله منبع انفجار بر کرنش پلاستیک مقطع مستطیلی را نشان می‌دهد. نمودارهای تاریخچه زمانی تغییر مکان، برش پایه، جذب انرژی کل و همچنین جذب انرژی کرنش پلاستیک برای فاصله‌های مختلف منبع انفجار نیز به ترتیب در شکل‌های 23 تا 26 ارائه شده‌اند.



شکل 22: اثر فاصله منبع انفجار بر کرنش پلاستیک معادل مقطع مستطیلی (100 کیلوگرم TNT).



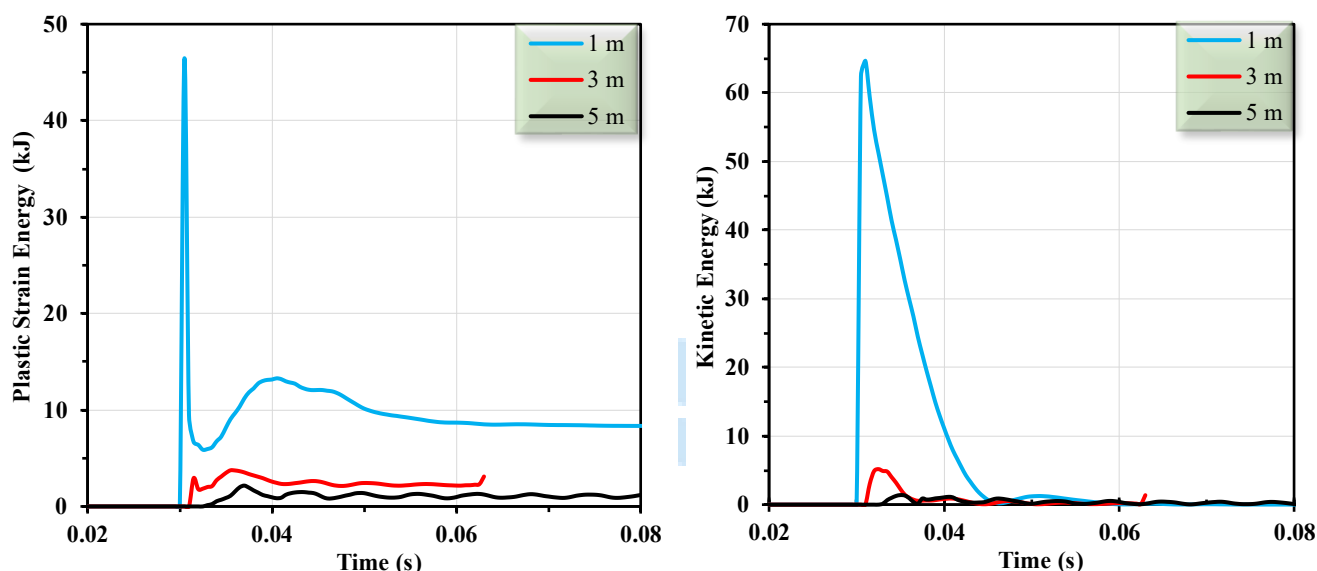
شکل 24: اثر فاصله منبع انفجار بر تاریخچه زمانی برش پایه.



شکل 23: اثر فاصله منبع انفجار بر تاریخچه زمانی تغییر مکان.

نتایج ارائه شده حاکی از آن است که افزایش فاصله منبع انفجار در کاهش تغییر مکان (شکل 23)، نیروی برشی (شکل 24) و همچنین میزان خرابی ایجاد شده در سازه (شکل 22 و 26) اثر قابل توجهی دارد. با افزایش فاصله انفجار از مقدار 1 متر به 3 و 5 متر، تغییر مکان بیشینه در سازه از مقدار  $3/1$  سانتی‌متر به ترتیب تا اندازه  $0/11$  و  $0/055$  سانتی‌متر کاهش یافته و برش پایه در این حالت نیز از مقدار  $2262/4$  کیلونیوتن به ترتیب با 53 درصد و 61 درصد کاهش، تا اندازه  $1051/6$  و  $879/6$  کیلونیوتن کاهش یافته است (شکل 24).

در مورد جذب انرژی نیز روند مشابهی در شکل‌های 25 و 26 مشاهده می‌گردد. با افزایش فاصله منبع انفجار از 1 متر به 3 و 5 متر، جذب انرژی کرنش پلاستیک در سازه از 46/4 کیلوژول در حالت انفجار در فاصله 1 متری به ترتیب تا اندازه 3/7 و 2/2 کیلوژول کاهش یافته است. با مقایسه کلی نتایج این قسمت با نتایج بخش قبل می‌توان دریافت که پارامتر فاصله منبع انفجار نسبت به تغییر در وزن ماده منفجره، بر عملکرد ستون تحت بار انفجار بسیار تاثیرگذارتر می‌باشد.

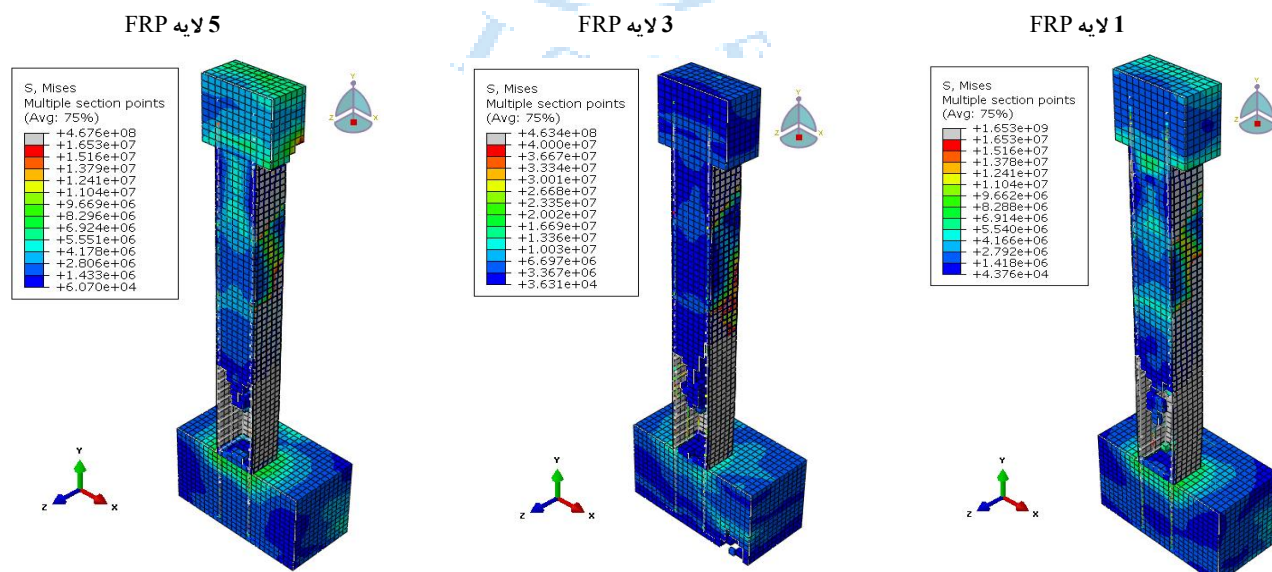


شکل 26: اثر فاصله منبع انفجار بر تاریخچه زمانی انرژی کرنش پلاستیک.

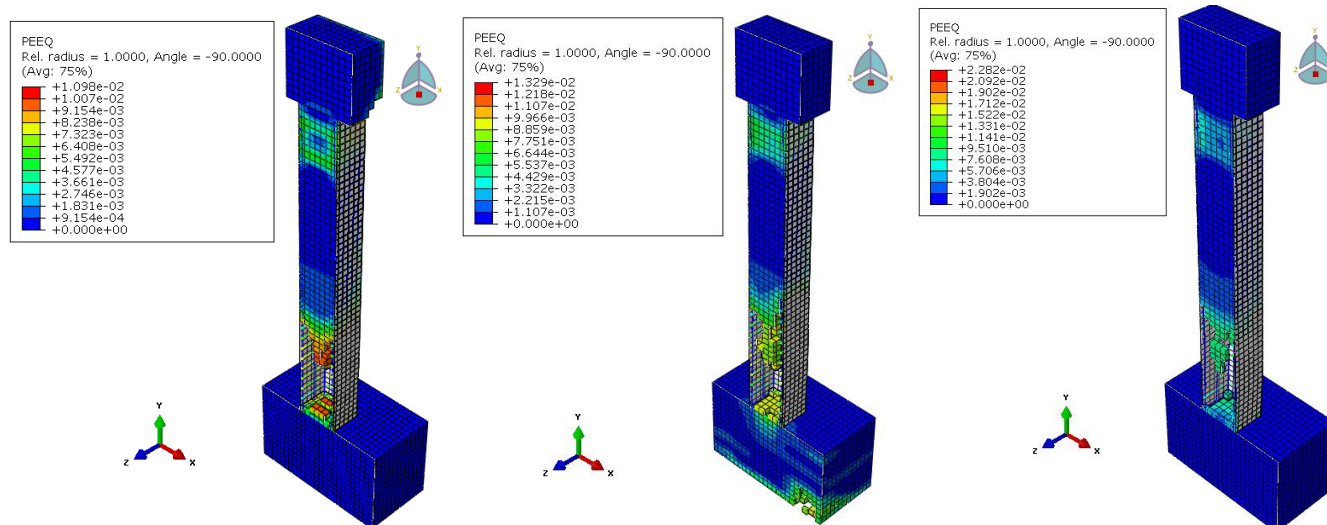
شکل 25: اثر فاصله منبع انفجار بر تاریخچه زمانی انرژی کل.

### 3-5- بررسی اثر انفجار بر مقطع مقاوم‌سازی شده با FRP

در این بخش، عملکرد پایه پیل تقویت شده با FRP تحت بار انفجار مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور سه مدل مختلف ستون پایه پیل با مقطع مستطیلی و با تعداد 1، 3 و 5 لایه FRP در پوشش بدنه به منظور مقاوم‌سازی در برابر بار انفجار استفاده شده است. هرکدام از مدل‌ها در برابر انفجار 100 کیلوگرم TNT در فاصله 1 متری تحلیل شده و نتایج حاصل با ستون بدون FRP مقایسه شده‌اند.

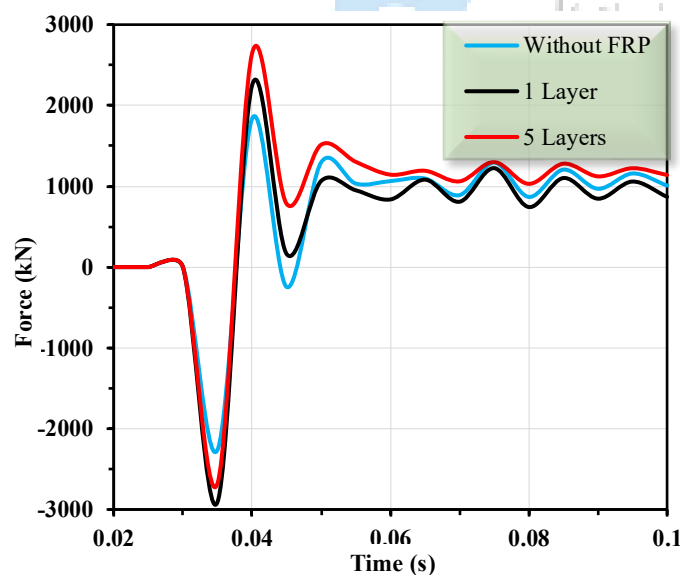


شکل 27: اثر تعداد لایه FRP بر کانتور تنش فون میسز ستون با مقطع مستطیلی مقاوم‌سازی شده تحت بار انفجار.

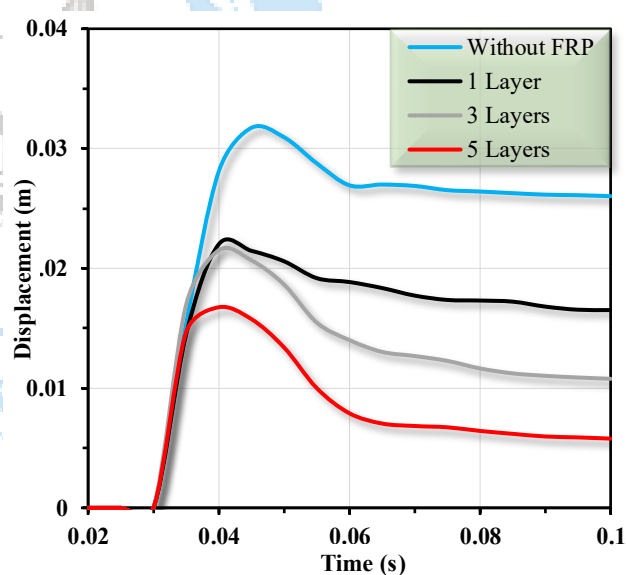


شکل 28: اثر تعداد لایه FRP بر کانتور کرنش پلاستیک معادل ستون پایه پل با مقطع مستطیلی مقاوم سازی شده تحت بار انفجار.

در شکل 27 و 28 به ترتیب اثر تعداد لایه FRP بر کانتور تنش و کرنش پلاستیک ستون پایه پل مقاوم سازی شده تحت بار انفجار ارائه شده است. برای نمایش بهتر نتایج، کانتورهای تنش و کرنش در برشی از وسط مقطع ستون ارائه شده و المان‌های آسیب دیده با کرنش پلاستیک بیشتر از 0/01 نیز حذف شده‌اند. نتایج ارائه شده نشان می‌دهد که با افزایش تعداد لایه‌های FRP مقادیر تنش، کرنش و همچنین شدت آسیب (تعداد المان‌های تخریب شده) تا اندازه قابل توجهی کاهش یافته‌اند.



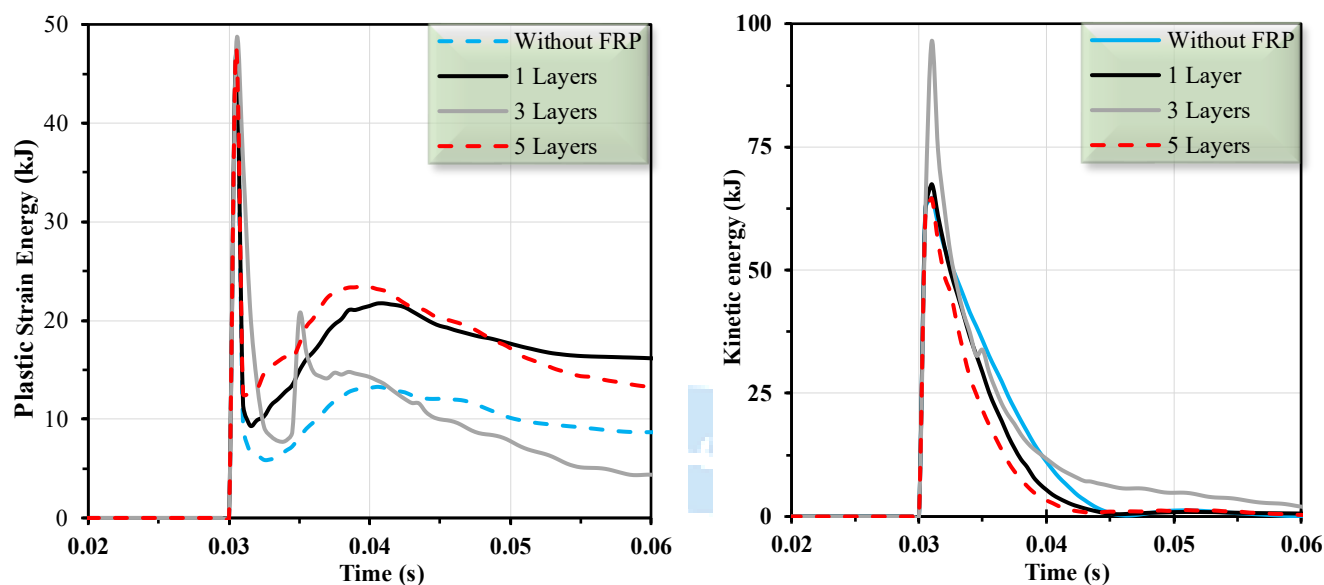
شکل 30: تاریخچه زمانی برش پایه.



شکل 29: تاریخچه زمانی تغییر مکان.

در شکل‌های 29 تا 32 نتایج مربوط به تغییر مکان، برش پایه و جذب انرژی ستون مقاوم سازی شده با FRP ارائه شده‌اند. اثر بسیار زیاد استفاده از FRP در کاهش مقدار بیشینه تغییر مکان ایجاد شده در ستون در شکل 29 مشهود است. مقدار تغییر مکان بیشینه از 3/1 سانتی‌متر برای ستون با مقطع مستطیلی بدون FRP، تا اندازه 2/1، 2/2 و 1/6 سانتی‌متر به ترتیب برای مقطع مقاوم سازی شده با 1، 3 و 5 لایه FRP کاهش یافته است. بررسی تغییرات برش پایه نشان داد که استفاده از 1 و 3 لایه پوشش FRP ظرفیت باربری سیستم را تا اندازه 28/5 درصد و 18/3 درصد در مقایسه با حالت بدون FRP افزایش داده است. لازم به ذکر است که استفاده از 5 لایه FRP تاثیر قابل توجهی بر افزایش ظرفیت باربری و جذب انرژی سازه نداشته، ولی تغییر مکان بیشینه را در مقایسه با 3 لایه FRP کاهش داده است (شکل 29). همچنین، مقایسه جذب انرژی ستون در شکل 31 نشان می‌دهد که بیشینه انرژی کل جذب شده با 3 لایه FRP (96/4 کیلوژول)

بوده و انرژی کرنش پلاستیسیته نیز در این مدل دارای بیشترین مقدار می باشد که بیان گر بیشترین خرابی در ستون در این حالت می باشد. با جمع بندی نتایج این بخش می توان نتیجه گرفت که مقاوم سازی ستون با تنها 1 لایه FRP علاوه بر مقرون به صرفه بودن و افزایش ظرفیت باربری سیستم، تغییر مکان بیشینه را نیز تا اندازه 30 درصد در مقایسه با ستون بدون پوشش FRP کاهش داده است.



شکل 31: تاریخچه زمانی انرژی کل.

شکل 32: تاریخچه زمانی انرژی کرنش پلاستیک.

#### 4- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، اثر شکل مقطع پایه پل، مقدار ماده منفجره، فاصله منبع انفجار تا سازه و همچنین پاسخ ستون مقاوم سازی شده با صفحات FRP نیز مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. از مدل سازی اجزای محدود پایه پل نتایج کلی زیر به اختصار به دست آمد:

1- نتایج بررسی شاخص های عملکردی مختلف نظیر شدت تنش و تغییر مکان، میزان جذب انرژی پلاستیک و همچنین میزان آسیب تحت سناریوهای مختلف انفجار نشان داد که مقطع مستطیلی و دایره ای به ترتیب بهترین عملکرد (در پل ها با توجه به معیار سرویس دهی و خدمات دهی پس از آسیب های احتمالی، کاهش تغییر مکان های جانبی مخصوصا تغییر شکلهای پلاستیک از اهمیت بالایی برخوردار است و همین معیار ملاک انتخاب مقطع مستطیلی بوده است) و بیشترین آسیب را در مقایسه با مقطع مربعی و جعبه ای (با سطح مقطع برابر) داشته اند. همچنین، بیشینه تغییر مکان و جذب انرژی پلاستیک در مقطع مربعی نزدیک به مقطع مستطیلی است.

2- بررسی کانتورهای کرنش پلاستیسیته حاصل از تحلیل مدل های مورد بررسی در مطالعه حاضر نشان داد که ستون پایه پل با مقطع دایره ای دارای نواحی خرابی بیشتری در مقایسه با مقطع مستطیلی و مربعی بوده است. مقطع جعبه ای نیز دارای نواحی بسیار مستعد خرابی در برابر بار انفجار بوده است. عمده این خرابی ها در ناحیه اتصال پایه به فونداسیون بوده است. قدر مسلم با افزایش میزان دوران و انحراف پایه افزایش یافته و بر اساس معیارهای عملکردی پل را دچار مخاطره می کند.

3- طیف بارگذاری موج ناشی از انفجار نزدیک در فضای آزاد و در سطح زمین، در دو فاز فشاری و کششی بر ستون پایه پل اعمال شد. با آن که مقدار قدرمطلق نیروی کششی ناشی از طیف موج انفجار بسیار کمتر از مقدار نیرو در فاز فشاری اولیه می باشد، نتایج نشان داد که پس از اتمام فاز فشاری، با توجه به زمان اثر گذاری بیشتر، خرابی زیادی نیز هنگام وقوع پدیده فشار معکوس ناشی از انفجار در سازه رخ می دهد.

4- در تمامی مدل‌ها، ابتدا یک افزایش شدید در برش پایه سیستم در لحظه وقوع انفجار رخ داده و پس از پایان انفجار نیروها به صورت نوسانی کاهش یافت. با این وجود، تغییر مکان و برش پایه بیشینه در مقطع مستطیلی در زمان کمتری پس از وقوع انفجار اتفاق افتاده است.

5- با افزایش مقدار ماده منفجره از 100 کیلوگرم به 200 و 300 کیلوگرم TNT، تغییر مکان بیشینه در پایه پل با مقطع مستطیلی از 3/1 سانتی‌متر به ترتیب 220 درصد و 419 درصد افزایش یافت. همچنین، جذب انرژی کرنش پلاستیک تحت انفجار در این حالت از 46/4 کیلوژول به ترتیب تا 140 درصد و 302 درصد افزایش یافته است. ولی بیشینه مقدار برش پایه با افزایش وزن TNT کاهش یافت.

6- پارامتر فاصله منبع انفجار اثر بیشتری بر عملکرد پایه پل نسبت به تغییر وزن ماده منفجره از خود نشان داده است. با افزایش فاصله منبع انفجار از 1 متری تا اندازه 3 و 5 متری، بیشینه مقدار تغییر مکان (به ترتیب 96 درصد و 98 درصد)، نیروی داخلی (53 درصد و 61 درصد) و جذب انرژی حاصل از انفجار (92 درصد و 95 درصد) کاهش یافته است.

7- انرژی کرنش پلاستیسیته معادل ایجاد شده در مدل‌های مورد بررسی که نشان دهنده مقدار خرابی رخداد تا مقاومت نهایی سازه می‌باشد. بررسی تغییرات انرژی کرنش پلاستیسیته نشان داد که با افزایش فاصله منبع انفجار تا سازه، مقدار و شدت خرابی تا اندازه بسیار زیادی کاهش یافته است.

8- مقاومت‌سازی ستون با ورق FRP علاوه بر افزایش شکل پذیری، می‌تواند ظرفیت مقطع در برابر انفجار را به میزان قابل توجهی افزایش دهد. نتایج نشان داد که تنها با استفاده از یک لایه پوشش FRP، ظرفیت باربری پایه پل با مقطع مستطیلی تا اندازه 28/5 درصد افزایش یافته، در این حالت تغییر مکان بیشینه سیستم نیز تقریباً 30 درصد کاهش یافت. به کارگیری بیشتر از 3 لایه FRP تاثیر چندانی در بهبود عملکرد مقطع در برابر انفجار نداشته و مقرون به صرفه نیست.

9- در مطالعه حاضر سطح مقطع ستون، نسبت فولاد طولی، شدت بار انفجار و همچنین فاصله منبع انفجار برای تمامی مقاطع یکسان بوده و وجه اعمال فشار نیز از بعد کوچکتر مقطع مستطیلی (با نسبت طول به عرض مقطع 1/5) در نظر گرفته شد. مطالعات تکمیلی با در نظر گرفتن اثر زاویه برخورد، وجه اعمال فشار و نسبت‌های هندسی مقطع و همچنین مدل‌سازی کامل سیستم پایه و عرشه پل در تحقیقات آتی ضروری به نظر می‌رسد.

## مراجع

- [1] Nazeri, S. and Peyman, S. (2023). Numerical analysis and investigation of the behavior of concrete slabs reinforced with perforated steel plates under the effect of explosive loads. *Journal of Structural and Construction Engineering*. <https://doi.org/10.22065/JSCE.2023.385657.3039>.
- [2] Wu, J., Zhou, Y., Zhang, R., Liu, C. and Zhang, Z. (2020). Numerical simulation of reinforced concrete slab subjected to blast loading and the structural damage assessment. *Engireeng Failure Analysis*, 118, 104926.
- [3] Shi, Y., Wang, J. and Cui, J. (2020). Experimental studies on fragments of reinforced concrete slabs under close-in explosions. *International Journal of Impact Engineering*, 144, 103630.
- [4] Kumar, V., Kartik, K.V. and Iqbal, M.A. (2020). Experimental and numerical investigation of reinforced concrete slabs under blast loading. *Engineering Structures*, 206, 110125.
- [5] Ning, J., Yang, S., Ma, T. and Xu, X. (2022). Fragment behavior of concrete slab subjected to blast loading. *Engireeng Failure Analysis*, 138, 106370.
- [6] Bodaghi, M., Damanpack, A.R., Aghdam, M.M. and Shakeri, M. (2012). Non-linear active control of FG beams in thermal environments subjected to blast loads with integrated FGP sensor/actuator layers. *Composite Structure*, 94, 3612-23.
- [7] Carta, G. and Stochino, F. (2013). Theoretical models to predict the flexural failure of reinforced concrete beams under blast loads. *Engireeng Structure*, 49, 306-315.
- [8] Tavakoli, H., Moradi, M. and Kiandoust, M. (2021). Evaluation of the performance of a 10 story steel structure with Base Isolation under blast loads. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8, 214-235.
- [9] Khizab, B., Sadeghi, A., Hashemi, S.V., Mehdizadeh, K. and Nasserri, H. (2021). Investigation the performance of

- Dual Systems Moment-Resisting Frame with Steel Plate Shear Wall Subjected to Blast Loading. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8, 102–127.
- [10] Goodarzi, M.J., Najafi, H. and Moradi, M. (2022). Energy-based analysis of a steel moment frame with viscous damper under blast loading. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 9(5), 140–162.
- [11] Fayyaz, M., Abasi, F., Mirmoeini, S., Khosravi, F. and Fayyaz, M. (2021). Performance Evaluation of Steel Structure With Diverse Dampers Under Blast Load. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8, 110–129.
- [12] Alshaikh, I.M.H., Bakar, B.H.A., Alwesabi, E.A.H. and Akil, H.M. (2020). Experimental investigation of the progressive collapse of reinforced concrete structures: An overview. *Structures*, 25, 881–900.
- [13] Fujikura, S. and Bruneau, M. (2008). Blast resistance of seismically designed bridge piers. *Structural Engineer*, 2, 1.
- [14] Abdelahad, F.A. and Arockiasamy M. (2008). Analysis of blast/explosion resistant reinforced concrete solid slab and T-beam bridges. *In Masters Abstracts International*, May, 46, 05.
- [15] Tokal-Ahmed, Y.M. (2009). Response of bridge structures subjected to blast loads and protection techniques to mitigate the effect of blast hazards on bridges. *PhD Thesis, Rutgers The State University of New Jersey, School of Graduate Studies*.
- [16] Deng, R.B. and Jin XL. (2009). Numerical simulation of bridge damage under blast loads. *WSEAS Transactions on Computers*, Sep 1, 9, 1564-1574.
- [17] Tang, E.K.C. and Hao, H. (2010). Numerical simulation of a cable-stayed bridge response to blast loads, Part I: Model development and response calculations. *Engineering Structure*, 32, 3180–3192.
- [18] Son, J. and Lee, H.J. (2011). Performance of cable-stayed bridge pylons subjected to blast loading. *Engineering Structure*, 33, 1133–1148.
- [19] Lee, J., Choi, K. and Chung, C. (2020). Numerical Analysis-Based Blast Resistance Performance Assessment of Cable-Stayed Bridge Components Subjected to Blast Loads. *Applied Sciences*, 10(23), 1-19.
- [20] Hashemi, S.K., Bradford, M.A. and Valipour, H.R. (2017). Dynamic response and performance of cable-stayed bridges under blast load: Effects of pylon geometry. *Engineering Structure*, 137, 50–66.
- [21] Nassr, A.A., Razaqpur, A.G., Tait, M.J., Campidelli, M. and Foo, S. (2013). Strength and stability of steel beam columns under blast load. *International Journal of Impact Engineering*, 55, 34–48.
- [22] Habibi, A. and Khaledi, N. (2015). Evaluating Rectangular Loading pattern in Nonlinear Analysis of Composite Bridges Subjected to Blast Loading. *Ferdowsi Civil Engineering*, 26(2), 67–84.
- [23] Esmail Nia Omran, M. and Mollaei, S. (2017). Estimation of RC columns' response under the effect of lateral blast loading by SDOF method and comparison with FEM. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 90–81, 3(4)
- [24] Vaghefi, M. and Mobaraki, B. (2018). INVESTIGATION OF DYNAMIC BEHAVIOR OF CONCRETE BRIDGE COLUMNS UNDER SURFACE BLASTING. *Sharif Journal of Civil Engineering*, May 22, 34(1.2), 133-141.
- [25] Mollaei, S. and Khezri, M. (2019). Evaluation and Comparison of Behavior of Steel Jacketed RC Columns with Circular and Square Sections under Blast Loading. *Journal of Energetic Materials*, 14(2), 83–93.
- [26] Vavilala, S., Shirbhate, P., Mandal, J. and Goel, M.D. (2020). Blast mitigation of RC column using polymeric foam. *Materials Today: Proceedings*, 26, 1347–1351.
- [27] Nouri, G., Barmah, J. and Massumi, A. (2021). Effect of different transverse bars arrangements on the behavior of concrete columns under impact loading. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(1), 220–35.
- [28] Hanifehzadeh, M., Aryan, H., Gencturk, B. and Akyniyazov, D. (2021). Structural Response of Steel Jacket-UHPC Retrofitted Reinforced Concrete Columns under Blast Loading. *Materials*, 14(6), 1521.
- [29] Ali, K., Javed, A., Mustafa, A.E. and Saleem, A. (2022). Blast-Loading Effects on Structural Redundancy of Long-Span Suspension Bridge Using a Simplified Approach. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 27(3), 04022024.
- [30] Aamir, M., Alam, M., Anas, S.M., Uriayer, F.A., Umair, M. and Tahzeeb, R. (2022). Numerical simulation of a bowstring steel highway girder bridge response to blast loads: model development and anti-blast performance prediction. *International Journal of Reliability and Safety*, 16(3/4), 218–36.
- [31] Zhu, Z., Li, Y. and He, S. (2022). Safety distances of cylindrical reinforced concrete piers under vehicle explosion. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, 175(4), 319–331.
- [32] Lin, J., Zong, Z., Gan, L., Chen, Z. and Li, M. (2023). Damage modes and residual capacity of strand cables subjected to blast loads. *Journal of Constructional Steel Research*, 204, 107855.
- [33] Yousefi, E., Khalighi, M. and Yousefi, Y. (2023). Evaluation of the performance of the reinforced concrete column under the influence of the load caused by the explosion of the CNG capsule of cars. *Journal of Structural and Construction Engineering*. <https://doi.org/10.22065/JSCE.2023.342379.2815>.

- [34] Atakhani, M., Shekastehband, B. and Alaei, A.R. (2023 ). Numerical analysis of suspension bridges with box girders subjected to detonations. *Journal of Constructional Steel Research*, 208, 107983.
- [35] Nouri, G. and Kamalvand, M. (2022). Seismic performance of FRP-strengthened RC joints by applying bond effects of concrete-FRP interface, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54, 3263–3286.
- [36] Zhang, F., Wu, C., Wang, H. and Zhou, Y. (2015). Numerical simulation of concrete filled steel tube columns against BLAST loads, *Thin-Walled Structures*, 92, 82–92.
- [37] Wu, K. C., Li, B., & Tsai, K. C. (2011). Residual axial compression capacity of localized blast-damaged RC columns. *International journal of impact engineering*, 38(1), 29-40.

