

## 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

Edris yosefi<sup>1</sup>, Masoud Khalighi<sup>2\*</sup>, Yousef Yousefi<sup>3</sup>

1- M Sc Graduated, Department of Civil Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

2- Assistant professor, Department of Civil Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

3- M Sc Graduated, Department of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

### ABSTRACT

With the increasing cost of petrol for Iranian customers, the interest in using dual fuel cars is increasing widely. It is common to use CNG vessels in Iranian dual-fuel cars. Nowadays there are millions of CNG vessels with more than 10 years of Commissioning time in Iran. In this study, the burst CNG car tank performance of steel reinforced concrete (RC) columns was numerically investigated with Abaqus software. Recently, the number of explosions of CNG tanks is increasing which has caused a lot of casualties and financial losses. In this study, the effect of CNG tank explosion on the Reinforced concrete column was investigated by considering four variables, including the distance between the CNG tank and column, reduction of the resistance of the car body, strength of concrete, and dimensions of the column's section. Investigations showed that the most effective parameters according to the changes of the examined parameters are 1) distance between CNG tank and column and reduction of the resistance of the car body 2) section area of a column and 3) strength of concrete as, by increasing distance from 50 to 130-centimeter the maximum displacement decreased 63 %, by decrease the resistance of the automobile body to 80% the maximum displacement decreased 64%, by change strength of concrete from 20 to 40 Mpa the maximum displacement decreased 15% and by increase section from 35×35 to 50×50 cm<sup>2</sup> the maximum displacement decreased 45%.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 06 June 2022

**Revise Date:** 02 January 2023

**Accept Date:** 17 February 2023

### Keywords:

CNG

Explosion load

Reinforced Concrete Column

Finite element method

Performance

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.342379.2815>

\*Corresponding author: Masoud Khalighi

Email address: m.khalighi@uok.ac.ir

## ارزیابی عملکرد ستون بتن مسلح تحت اثر بار ناشی از انفجار مکانیکی مخازن CNG خودرو

ادریس یوسفی<sup>۱</sup>، مسعود خلیقی<sup>۲\*</sup>، یوسف یوسفی<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

۲- استادیار، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

۳- کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

### چکیده

با افزایش قیمت بنزین در ایران تمایل به استفاده از خودروهای دوگانه سوز با مخازن گاز طبیعی فشرده (CNG) به طرز گسترده‌ای رو به افزایش است. اخیراً آمار انفجار مخازن CNG در خودروهای با عمر بیش از ده سال رو به افزایش است. انفجار این مخازن در نزدیکی ستونها خصوصاً در پارکینگ‌ها موجب آسیب به ساختمان‌ها شده است. هدف این پژوهش، بررسی اثر انفجار مخازن خودروهای گازسوز بر روی ستونهای بتنی است. برای نیل به این هدف بررسی جابجایی میانه ستون بتن مسلح ناشی از انفجار با در نظر گرفتن سه متغیر فاصله مخزن CNG تا ستون، مقاومت بتن و سطح مقطع ستون مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا بمنظور مدل سازی ستون بتنی از روش المان محدود و از نرم‌افزار Abaqus و برای بار اعمالی با تی‌ان‌تی معادل از نرم افزار Phast استفاده شد. بمنظور صحت سنجی، نتایج شبیه سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی مرجع شماره ۹ مقایسه گردید. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که موثرترین پارامترها به ترتیب عبارتند از: (۱) فاصله مخزن تا ستون بتنی و کاهش مقاومت بدنه خودرو (۲) سطح مقطع ستون (۳) مقاومت فشاری بتن. با افزایش فاصله مخزن تا ستون از ۵۰ سانتی‌متر به ۱۳۰ سانتی‌متر جابجایی حداکثر میانه ستون ۶۳٪، با کاهش مقاومت خودرو تا ۸۰ درصد جابجایی حداکثر میانه ستون حدود ۶۴٪، با افزایش مقاومت بتن از ۲۰ مگاپاسکال به ۴۰ مگاپاسکال جابجایی حداکثر میانه ستون ۱۴٪ و با افزایش ابعاد مقطع ستون از ۳۵ سانتی‌متر به ۵۰ سانتی‌متر مقدار جابجایی حداکثر میانه ستون ۴۵٪ کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: مخازن CNG، بار انفجاری، ستون بتنی مسلح، روش المان محدود، عملکرد

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	شناسه دیجیتال:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2023.342379.2815">https://doi.org/10.22065/jsce.2023.342379.2815</a>					
	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2023.342379.2815">10.22065/jsce.2023.342379.2815</a>	۱۴۰۲/۰۸/۳۰	۱۴۰۱/۱۱/۲۸	۱۴۰۱/۱۱/۲۸	۱۴۰۱/۱۰/۱۲	۱۴۰۱/۰۶/۱۶
				*نویسنده مسئول:		
				مسعود خلیقی		
				m.khalighi@uok.ac.ir		
				پست الکترونیکی:		

<sup>۱</sup>Compressed natural gas

## ۱- مقدمه

با توجه به مقرون به صرفه بودن سوخت CNG و رتبه دوم ایران در جهان از لحاظ ذخایر گاز طبیعی، در سال‌های اخیر تولید خودروهای گازسوز افزایش یافته و همچنین تبدیل خودروهای بنزین سوز به گازسوز مورد توجه واقع شده است [۱]. از طرفی انفجار ناشی از آزاد شدن ناگهانی فشار محبوس شده در سیلندرهای خودروهای گاز سوز یکی از معضلاتی است که در دهه اخیر به طور فزاینده ای رخ داده است [۲]. آمار قابل توجه انفجار این مخازن در خودروها، اهمیت بررسی اثر آن را بر رفتار اعضای ساختمان برجسته می نماید. در سال‌های اخیر مطالعات گسترده ای در این حوزه انجام شده که در ادامه به آنها اشاره شده است.

فیوض و همکاران [۱] تاثیر مصالح و شکل سازه را بر روی عملکرد سازه در برابر انفجار بررسی کردند. نتایج نشان داد که هر چه سطوح عمود بر امتداد موج انفجار در سازه کمتر شده، عملکرد سازه برای مقابله با انفجار بهبود یافته است. همچنین نتایج نشان داد که در سازه‌های فولادی مورد بررسی با تغییر شکل سازه از مکعب به نیم استوانه، تنش بیشینه به میزان ۱۷٪ کاهش یافته و تعداد المانهای تسلیم شده از ۲۹٪ به کمتر از ۸٪ رسید. در مورد سازه‌های بتنی نیز نتایج مشابهی بدست آمد. پروینی و همکاران [۲] انفجار در جایگاه CNG را مدلسازی کردند. آنها حداقل فاصله امن تا مرکز انفجار، نوع آتش و انتشار مواد سمی را برای جلوگیری از وقوع حوادث و کاهش شدت آسیب احتمالی بررسی و بر اساس نتایج توصیه‌هایی رو اعلام کردند. ژانگ و همکاران [۳] در پژوهشی به بررسی آزمایشگاهی و مقاومت واقعی استاتیکی و دینامیکی تحت بارگذاری انفجار ستون‌های مرکب با دولایه فولاد پر شده از بتن (CFDST) ۲ و ستون‌های بتن مسلح تقویت شده با الیاف با عملکرد بالا (UHPFRC) ۳ پرداختند. نتایج نشان داد که با اینکه مقطع ستونهای مربعی بیشتر از دایره ای بوده ولی ظرفیت محوری هر دو نوع ستون نزدیک بهم است. همچنین نمونه‌های CFDST ظرفیت باربری محوری حدود ۶۰٪ را حتی تحت بار انفجاری شدید دارد. ژانگ و همکاران [۴] در مقاله دیگری مقاومت ستون‌های مرکب دوجداره فولادی تحت بارگذاری انفجار را بر اساس آزمایش‌های انجام شده در مرجع بررسی کردند. نتایج نشان داد که ستون CFDST از مقاومت انفجاری خوبی برخوردار است. وانگ و همکاران [۵] مقاومت انفجاری ستون‌های فولادی پر شده از بتن تحت بار انفجاری نزدیک را بررسی کردند. به طور کلی، نمونه‌های با لوله‌های فولادی ضخیم‌تر، نسبت بار محوری باقیمانده بیشتری داشته و نمونه‌های مربعی نسبت بار محوری بیشتری را نسبت به نمونه‌های مدور تحت بارهای انفجار مشابه نشان دادند. یانگ و همکاران [۶] مطالعات آزمایشگاهی و عددی خود را بر روی دال بتن لاستیکی با آرماتور تحت بار انفجار و با درصد‌های مختلف لاستیک انجام دادند. نتایج آزمایش‌ها در مدت زمان حداکثر فشار با مدل سادوفسکی اصلاح شده، در مدت زمان فشار مثبت با مدل سادوفسکی و در پارامتر زوال موج با مدل لارچر انطباق خوبی را نشان داد. هنگامی که وزن بار انفجاری زیاد نیست (۲/۳ کیلوگرم یا ۳/۴ کیلوگرم)، دال بتنی معمولی با خسارت کم و در محدوده خطی باقی می‌ماند در حالی که دالهای بتنی لاستیکی در محدوده پلاستیک و با تغییر مکان بزرگ در وسط دهنه و ترک‌های بزرگ در ناحیه کششی بود. در مواد منفجره با وزن بیشتر (۵/۶ کیلوگرم) تفاوت بین دال‌های بتنی معمولی و لاستیکی در جابجایی وسط دهنه کاهش می‌یابد و آسیب در ناحیه کششی دال بتنی لاستیکی کمتر از دال معمولی شده است. نلسون و همکاران [۷] در پژوهشی به بررسی پدیده انفجار در سیلندر کامپوزیت با روش عددی و آزمایشگاهی پرداختند. مطالعات موردی متعدد بر روی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی در معرض انفجارهای داخلی در تعیین روش مناسب برای شبیه‌سازی انفجار انجام شد. همچنین تلاش شد تا در روش مدل‌سازی کامل پیش‌بینی پاسخ سازه‌های بارگذاری شده به هر دو پاسخ الاستیک و پس از شکست پرداخته شود. نتایج نشان داد که یک روش کارآمد با استفاده از عناصر پوسته، شرایط مرزی تقارن مناسب و تابع تقریب انفجار می‌تواند به طور دقیق پاسخ یک سازه کامپوزیتی استوانه‌ای را به یک انفجار داخلی بزرگ شبیه‌سازی کند. هوایی و بیات [۸] خرابی پیش رونده ناشی از اثر انفجار در ساختمان‌های بتن آرمه را بررسی نمودند. تحلیل تاریخیچه زمانی الاستیک خطی نشان داد که مقادیر قابل توجهی از نیروهای برشی و خمشی ناشی از فشار مستقیم انفجار به اجزای نزدیک به محل انفجار وارد می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که انفجار با شدت زیاد، موجب از بین رفتن پوشش بتن هسته ستون و در نتیجه کماتورها می‌شود. همچنین نتایج تحلیل غیرخطی نشان داد که در خرج انفجاری معادل ۳۰۰ کیلوگرم تی‌ان‌تی، ستونها از ۳۹٪ تا خرابی کامل را تجربه

<sup>2</sup> Concrete filled double skin steel tubes

<sup>3</sup> Ultra-high performance fiber reinforced concert

می‌کنند. در نهایت راهکارهایی برای تقویت ستون بتنی در اثر بار انفجاری ارائه کردند. لو و همکاران [۹] در پژوهشی به مطالعه عملکرد انفجاری تیرهای بتنی مسلح به صورت آزمایشگاهی و تحلیلی پرداختند. در این پژوهش تیرها با فاصله متغیر از محل انفجار و با وزنهای متفاوت مواد منفجره مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که تیرهای بتنی تنها تغییر شکلهای خمشی را تحمل می‌کنند و فاصله فروپاشی نسبت به قسمت بیرونی تیر کاهش می‌یابد. در این مطالعه نیز فرمول بندی جهت محاسبه تغییر شکل وسط تیرهای مذکور با توجه به نتایج آزمایشگاهی ارائه شد. مجا و همکاران [۱۰] مقاومت ستونهای بتنی را به دو روش آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که در مراحل شکست در ابتدا پوشش بتن خرد شده و میلگردهای طولی کمانش می‌کنند. در نهایت نیز بتن هسته مرکزی از بین خواهد رفت. همچنین نتایج این مطالعه نشان داد در صورتی که مواد منفجره  $500 \text{ g}$  پنتولیا باشد تیپ میلگردهای عرضی عامل مهمی در افزایش نیروی محوری و نگهداری از هسته مرکزی و در نهایت خرابی می‌باشد. بزرگوار و همکاران [۱۱] اثر انفجار بر روی ساختمانهای بتنی مقاوم در برابر زلزله را بررسی کردند. با تحلیل سه بعدی ساختمان ۴ طبقه بتنی تحت اثر بار ناشی از انفجار و مقایسه آن با نتایج تحلیل استاتیکی بار زلزله مشخص شد که تغییر مکان تراز بام ناشی از  $600$  کیلوگرم تی ان تی حدود  $8$  برابر تغییر مکان تراز بام در طراحی لرزه ای می‌باشد. همچنین این افزایش در برش پایه ساختمان حدود  $3$  برابر می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد با سناریوی خرابی و از دست دادن یک ستون بتنی در اثر انفجار مخازن CNG خودروها، خصوصاً در پارکینگها و متعاقباً خرابی پیش رونده به صورت متوالی، امکان تخریب سازه‌ها و خسارات جانی و مالی وجود دارد. لی و فنوس [۱۲] مدل جدید خرابی پلاستیک بتن تحت بارگذاری چرخه ای را بر اساس انرژی شکست و کاهش سختی در مکانیک محیط پیوسته را توسعه دادند. برای معرفی خرابیهای مختلف، دو متغیر برای کشش و فشار و تابع تسلیم سخت شوندگی چند متغیره معرفی گردید. عملکرد مدل پیشنهادی با نتایج چند مثال عددی بررسی و نتایج قابل قبولی بدست آمد. لوکیس و دراگانی [۱۳] در پژوهشی رفتار ستونهای بتنی را در اثر بار انفجار بررسی و برای شناسایی کاستیها در این موضوع گزارشهای فنی زیادی در خصوص آزمایشهای رفتار ستونهای ساختمان و پلها در اثر بار انفجاری جمع آوری کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که افزایش ناچیز ابعاد ستون می‌تواند اثر قابل توجهی بر کاهش خرابی ستونها داشته باشد. از سوی دیگر می‌توان با افزایش فاصله بار انفجاری از ستون، اثر خرابی را کاهش داد. همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که ستونهای دایره ای عملکرد بهتری نسبت به سایر اشکال دیگر ستون از خود نشان می‌دهند. آزادی کاکاوند و همکاران [۱۴] در ابتدا قابلیت‌ها و کاستیهای مدل‌های المان محدود و پارامترهای مهندسی زلزله ستونهای بتنی را بمنظور تحلیل پوش اور مورد بررسی قرار دادند. مدل‌های المان محدود به صورت المان‌های سه بعدی پیوسته بتن و المانهای تک بعدی خرابی محصور شده در بتن مدلسازی شدند. رفتار غیرخطی بتن، با سخت شدگی کرنش در ناحیه پیش از پیک منحنی‌های تنش-کرنش و نرم شدگی کرنش در ناحیه پس از پیک، همراه با تغییر شکل غیرقابل برگشت و در نهایت شکست مواد توصیف شد. آزادی کاکاوند و همکاران [۱۵] همچنین در پژوهشی دیگر مدل خرابی بتن را با توجه به در نظر گرفتن اثرات خرابی کششی بر رفتار فشاری و بالعکس توسعه دادند. این مدل اثر خرابی بارگذاری چند محوری بتن را با توجه به در نظر گرفتن اثر خرابی فشاری-کششی بر پاسخ آنها لحاظ نمود. نتایج این مطالعه، مطابقت مناسب پاسخ مدل پیشنهادی را با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد. آزادی کاکاوند و همکاران [۱۶] در پژوهشی دیگر بیان نمودند که پیش بینی رفتار مرکب ستونهای بتنی همراه با عدم قطعیت می‌باشد. در همین راستا بمنظور پیش بینی رفتار ستونها داده‌های آزمایشگاهی بسیاری از سال ۱۹۶۴ جمع آوری گردید. با توجه به عدم قطعیت موجود در پیش بینی رفتار ستونها، رویکرد جدیدی برای پیش بینی مدل‌های شکست خمشی، برشی و محوری آنها معرفی شد. منحنی‌های خرابی بدست آمده با مدل‌های قبلی جهت تایید مدل پیشنهادی مقایسه و نتایج قابل قبول بدست آمد. آزادی کاکاوند و همکاران [۱۷] در پژوهش دیگری مدل‌های داده محور جدیدی برای پیش بینی حداکثر مقاومت برشی ستونهای بتن مسلح مستطیلی و دایره ای ارائه نمودند. در این راستا دو دسته نتایج آزمایشگاهی برای هر دو شکل مقطع ستون جمع آوری گردید. این داده‌ها برای توسعه معادلات خطی و غیر خطی و برای پیش بینی ظرفیت برشی نهایی ستونهای دایره ای و مستطیلی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج مدل پیشنهادی نشان داد که مدل ارائه شده توسط محققین مذکور از دقت قابل قبولی در مقایسه با مدل‌های غیر خطی موجود برخوردار است. فنگ و همکاران [۱۸] نیز در پژوهش دیگری مدلی احتمالاتی بمنظور پیش‌بینی طول مفصل پلاستیک ستونهای بتن مسلح ارائه نمودند. در این پژوهش هفت مدل پارامتری موجود ابتدا با استفاده از یک پایگاه داده جامع شامل اندازه گیری طول مفصل پلاستیک از ۱۳۳ تست ستون بتن مسلح ارزیابی شده است. مشاهده می‌شود که عملکرد این هفت مدل و پیش‌بینی‌های آن دارای عدم قطعیت قابل توجهی است.

در ادامه یک تکنیک جدید برای ترکیب آنها در یک مدل فوق العاده میانگین وزنی ابداع شد که در آن وزن‌ها از طریق استنتاج بیزی تعیین می‌شوند. مقایسه‌های پیش‌بینی نشان می‌دهد که مدل توانمند پیشنهادی، عملکرد بالاتری نسبت به تمام مدل‌های قبلی دارد. بر اساس مرور منابع در خصوص مطالعات انجام شده در حوزه اثرات انفجار مخازن CNG این نتیجه حاصل شد که پژوهش‌های انجام شده بمنظور بررسی اثرات انفجار مخازن مذکور بر اجزای سازه ای محدود بوده است. بنابراین در مقاله حاضر در قالب یک مطالعه پارامتریک به بررسی اثر انفجار مخازن خودروهای گازسوز بر روی ستونهای بتن مسلح در ساختمان‌ها پرداخته شده است. برای نیل به این هدف، جایجایی میانه ستون بتن مسلح ناشی از انفجار با در نظر گرفتن سه متغیر فاصله مخزن CNG تا ستون، مقاومت بتن و سطح مقطع ستون مورد بررسی قرار می‌گیرد. تمامی مدل‌سازی‌ها و تحلیل‌ها در مقاله حاضر به کمک نرم افزار Abaqus انجام شده است. این نرم‌افزار یک نرم‌افزار تحلیل پیشرفته بر مبنای روش اجزا محدود می‌باشد که از آن جهت مدل‌سازی‌های پیچیده استفاده می‌شود [۱۹]. نسخه اولیه این نرم‌افزار در سال ۱۹۷۸ میلادی منتشر شد. از آنجاییکه در این نرم‌افزار مدل‌سازی آسان و با دقت بالایی انجام می‌شود، بنابراین می‌توان از آن در انجام تحلیل‌های دینامیکی غیر خطی گذرا (انفجار، برخورد و ضربه) استفاده و نتایج قابل قبول و معتبری کسب نمود. نرم‌افزار دیگر مورد استفاده در این مطالعه نرم‌افزار Phast می‌باشد. این نرم‌افزار توسط شرکت DNV بمنظور مدلسازی حوادث مربوط به حوزه نفت، گاز و پتروشیمی تولید شده است. از قابلیت‌های این نرم‌افزار می‌توان به مدلسازی دقیق و سریع حوادث و ارائه نتایج حاصل از آن اشاره نمود [۲۰]. در این مقاله ستون بتنی توسط روش المان محدود مدلسازی شده و با استفاده از نرم‌افزار Phast بار انفجار مکانیکی مخازن CNG محاسبه و با سعی و خطا مقدار این بار برای محاسبه تی‌ان‌تی معادلی که همان فشار را وارد کند بدست آمد. در نهایت در نرم‌افزار المان محدود جهت محاسبه بار انفجار و تحلیل مدل، از تی‌ان‌تی معادل بار انفجار مکانیکی مخزن CNG استفاده شده است.

## ۲- مدل‌سازی ستون بتن مسلح تحت بار انفجار

در این مقاله بمنظور مدلسازی اثر انفجار مکانیکی مخازن تحت فشار CNG بر ستون‌های بتن مسلح از دو نرم‌افزار Phast و Abaqus استفاده شده است. در گام نخست بمنظور محاسبه میزان فشار ناشی از انفجار مخزن CNG بر ستون در فواصل مختلف، پدیده انفجار در نرم‌افزار phast مدلسازی می‌گردد. سپس بر اساس نتایج حاصل از نرم‌افزار phast بار تی‌ان‌تی معادل به کمک روش المان محدود در نرم‌افزار Abaqus بر روی سطح ستون اعمال می‌شود. در ادامه روند مدل‌سازی به صورت گام به گام تشریح می‌گردد:

### ۲-۱- مدل‌سازی مصالح

مدل پلاستیک آسیب‌دیده بتن<sup>۴</sup> مدل توانمندی است که برای بارگذاری‌های مختلف کاربرد داشته و با بیان رفتار مجزای بتن در فشار و کشش رفتار غیر خطی این ماده را به صورت واقعی‌تر بیان می‌کند. در مدل پلاستیک آسیب‌دیده بتن دو مکانیزم اصلی شکست عبارتند از ترک‌های کششی و خردشدگی فشاری بتن [۲۱]. کامل شدن سطح شکست، با استفاده از متغیرهای سخت‌شدگی ( $\epsilon_t^{pl}$  و  $\epsilon_c^{pl}$ ) که به ترتیب مربوط به مکانیزم‌های شکست تحت بارگذاری‌های فشاری و کششی هستند، کنترل می‌شود.  $\epsilon_t^{pl}$  و  $\epsilon_c^{pl}$  کرنش‌های پلاستیک معادل هستند. در شکل ۱ نمودارهای تنش-کرنش بتن در کشش و فشار تک‌محور آورده شده است [۲۱]. در اثر کشش تک‌محوره منحنی تنش-کرنش تا نقطه تنش خرابی  $\sigma_{t0}$  به صورت خطی تغییر می‌کند که این تنش با شروع و گسترش ترک‌های ریز در بتن همراه می‌باشد. پس از عبور از نقطه مذکور، خرابی‌ها به صورت ترک‌های قابل مشاهده در می‌آیند که به صورت منحنی نرم شونده در نمودار تنش-کرنش نمایش داده می‌شود. تحت فشار تک‌محوره، پاسخ تا رسیدن به نقطه جاری شدن  $\sigma_{c0}$  به صورت الاستیک خواهد بود و رفتار در ناحیه پلاستیک عموماً به صورت منحنی سخت‌شونده بیان می‌شود. در نهایت با رسیدن به نقطه تنش نهایی  $\sigma_{cu}$  منحنی‌ها به صورت نرم‌شونده در می‌آیند. این مدل معرفی شده با وجود سادگی نسبی، خصوصیات اصلی بتن را ارضا می‌کند [۲۱]. نمودارهای تنش-کرنش تحت بارگذاری تک‌محوری قابلیت تبدیل به منحنی‌های تنش-کرنش پلاستیک را دارا هستند. این کار به صورت خودکار با استفاده از

<sup>4</sup> Concrete Damage Plasticity

تنش‌های داده شده و کرنش‌های غیرالاستیک که بوسیله کاربر به نرم‌افزار داده می‌شود، انجام می‌شود. در روابط ۱ و ۲ تنش کششی و فشاری لحاظ شده در این مدل و وابستگی آنها به سایر پارامترها نشان داده شده است.

$$\sigma_t = \sigma_t(\varepsilon_t^{pl}, \dot{\varepsilon}_t^{pl}, \theta, f_i) \quad (1)$$

$$\sigma_c = \sigma_c(\varepsilon_c^{pl}, \dot{\varepsilon}_c^{pl}, \theta, f_i) \quad (2)$$

در روابط اخیر،  $\varepsilon_t^{pl}$  و  $\varepsilon_c^{pl}$  کرنش‌های پلاستیک معادل در کشش و فشار،  $\dot{\varepsilon}_t^{pl}$  و  $\dot{\varepsilon}_c^{pl}$  نرخ کرنش‌های پلاستیک معادل در کشش و فشار،  $\theta$  نشان دهنده دما و  $f_i = (i = 1, 2, 3, \dots)$  بیانگر دیگر متغیرهای میدانی تعریف شده می‌باشد.

همانطور که در شکل ۱ دیده می‌شود، در اثر باربرداری نمونه در قسمت نرم شوندگی، شیب منحنی باربرداری کمتر از شیب منحنی الاستیک است که نشان دهنده آسیب دیدگی می‌باشد. کاهش سختی اولیه نمونه توسط دو متغیر آسیب  $d_t$  و  $d_c$  مطابق روابط ۳ و ۴ نشان داده شده است. در این روابط فرض بر این است که دو متغیر  $d_t$  و  $d_c$  تابعی از کرنش پلاستیک، دما و دیگر متغیرهای میدانی می‌باشند.

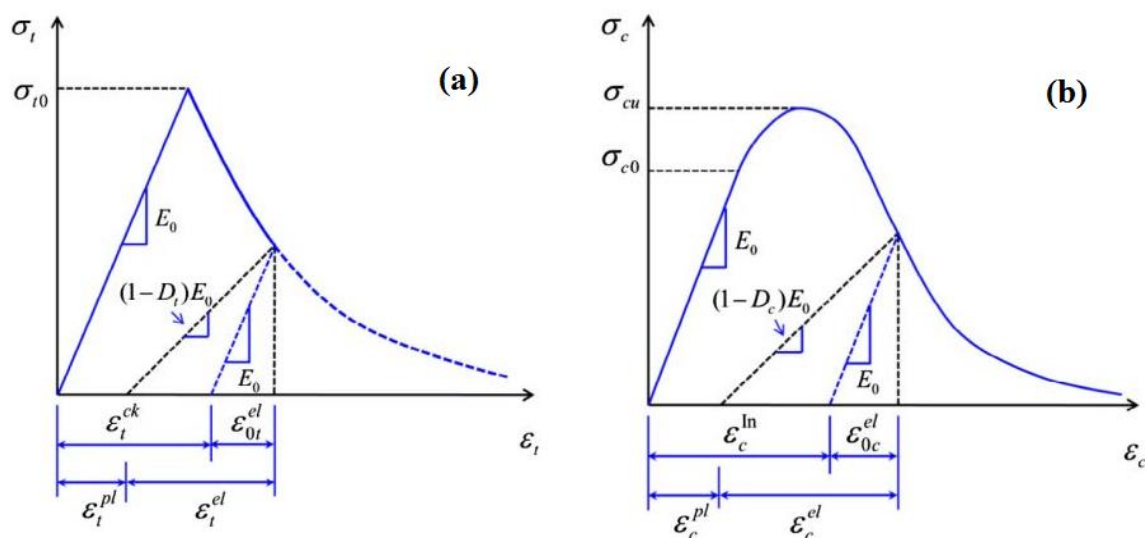
$$d_t = d_t(\varepsilon_t^{pl}, \theta, f_i) \quad 0 \leq d_t \leq 1 \quad (3)$$

$$d_c = d_c(\varepsilon_c^{pl}, \theta, f_i) \quad 0 \leq d_c \leq 1 \quad (4)$$

در منحنی‌های تنش کرنش تک محوره، آسیب بتن توسط دو متغیر  $d_t$  و  $d_c$  مشخص می‌شود. بر اساس دو متغیر مذکور رابطه تنش-کرنش بتن مطابق با روابط ۵ و ۶ بیان می‌گردد:

$$\sigma_t = (1 - d_t) E_0 \quad (5)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c) E_0 (\varepsilon_c - \varepsilon_t^{pl}) \quad (6)$$



شکل ۱: نمودار تنش کرنش **a**: کششی بتن و **b**: فشاری بتن [۲۱]

مدل تخریب-پلاستیسیته مورد استفاده در این مقاله مدل پیشنهادی لی و فونوس می‌باشد [۱۲]. این مدل توانایی شبیه سازی رفتار چرخه‌ای بتن را دارد. پارامترهای لازم برای تعریف این مدل در جدول ۱ آمده است. از میان این پارامترها زاویه اتساع داخلی موثرترین

پارامتر می‌باشد. زاویه اتساع داخلی<sup>۵</sup> نسبت کرنش حجمی به کرنش برشی مصالح است. این زاویه که برای بتن معمولاً بین ۲۰ تا ۴۰ درجه فرض می‌شود، بر روی شکل پذیری مصالح و در نتیجه در شکل پذیری کل مدل تأثیری قابل توجه دارد. هر چه مقدار این زاویه کوچکتر باشد رفتار مصالح تردتر و هر چه این زاویه بزرگتر باشد ماده از خود رفتار شکل پذیرتری نشان می‌دهد.

جدول ۱: پارامترهای تعریف مدل پلاستیک آسیب دیده در نرم افزار Abaqus مطابق مرجع [۲۲]

پارامتر ویسکوزیته	K	$f_{b0} / f_{c0}$	خروج از مرکزیت	زاویه اتساع داخلی
۰/۰۰۱	۰/۶۶۶	۱/۱۶	۰/۱	۳۱

در جدول ۱ پارامتر K بیانگر زاویه محصور شدگی بتن و شکل انحراف صفحه تنش می‌باشد. در صورتی که صفحه انحراف متمایل به شکل مثلثی باشد درجه محصور شدگی کمتر از زمانی است که صفحه انحراف دایره ای شکل باشد. همچنین در این جدول،  $f_{b0}$  مقاومت فشاری تحت بارگذاری دو محوره و  $f_{c0}$  مقاومت فشاری تک محوره بتن می‌باشد [۲۲]. در این مدل سازی برای تعریف منحنی رفتار تک محوره بتن غیر محصور از مدل رفتاری بتن غیر محصور اصلاحی<sup>۶</sup> استفاده شده است که فرمول آن در رابطه ۷ و به صورت زیر می‌باشد.

$$\sigma_c = f_{c0}' \left[ 2 \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_c'} \right) - \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_c'} \right)^2 \right] \quad (7)$$

در این رابطه ۷  $\sigma_c$  و  $\epsilon_c$  به ترتیب تنش و کرنش فشاری،  $f_{c0}'$  و  $\epsilon_c'$  به ترتیب مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای بتن غیر محصور و کرنش متناظر با آن می‌باشد. پارک و پاولی<sup>۷</sup> مقدار  $\epsilon_c'$  را حدود ۰/۰۰۲ گزارش کرده‌اند و در این مدل سازی نیز این پارامتر همان مقدار در نظر گرفته شده است [۲۳]. بر اساس ویرایش پنجم مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، مدول الاستیسیته بتن بر حسب مگاپاسکال از رابطه ۸ بدست می‌آید:

$$E_c = 0.043 W_c^{1.5} \sqrt{f_c'} \quad (8)$$

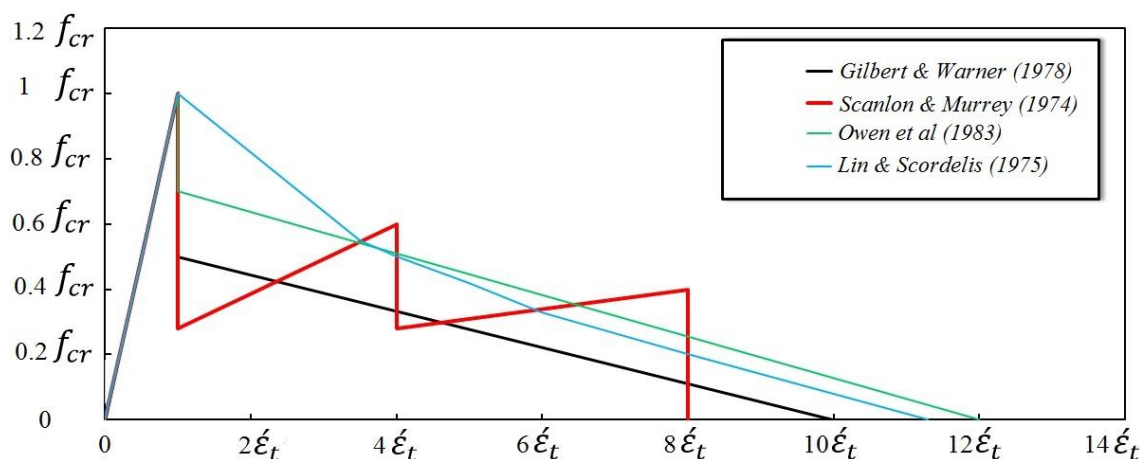
در رابطه ۸،  $W_c$  جرم واحد حجم بتن بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب و  $f_c'$  مقاومت فشاری مشخصه بتن بر حسب مگاپاسکال می‌باشد. مدل‌های مختلفی توسط محققین بمنظور معرفی رفتار تنش-کرنش بتن تحت کشش مطابق شکل ۲ ارائه شده است. در این شکل،  $f_{cr}$  تنش کششی نظیر ترک خوردگی بتن است که در کشش مستقیم برابر  $f_t'$ ، و در کشش ناشی از خمش برابر با  $f_r$  در نظر گرفته می‌شود. همچنین  $\epsilon_t'$  کرنش کششی متناظر با  $f_{cr}$  است. در این مطالعه به دلیل مطابقت مناسب با نتایج تجربی، از منحنی اون و همکاران مطابق شکل ۲ استفاده شده است.  $\epsilon_t'$  در کرنش خالصی در حدود ۰/۰۰۰۱ و در کشش ناشی از خمش در محدوده ۰/۰۰۰۱۴ تا ۰/۰۰۰۲ بوده و  $\epsilon_t'$  برابر ۰/۰۰۰۱۴ در نظر گرفته شده و مقدار  $f_{cr} = 3.5 \text{ Mpa}$  می‌باشد [۲۴].

<sup>5</sup> Dilation angle

<sup>6</sup> Hognestad

<sup>7</sup> Park & Paulay





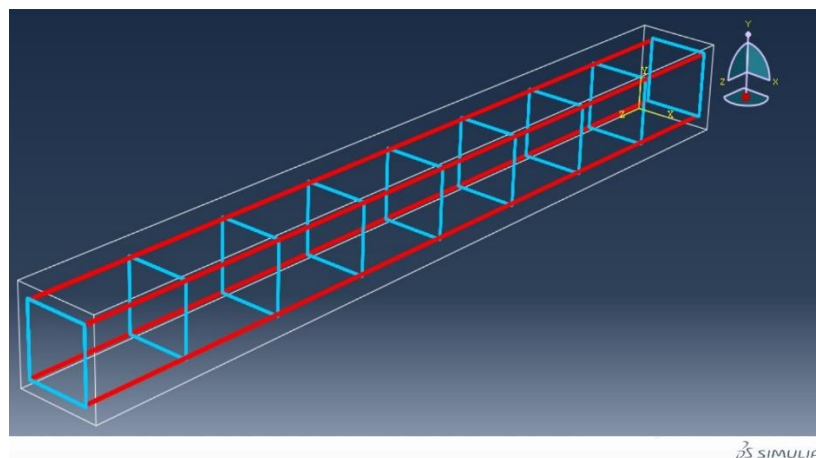
شکل ۲: چند مدل پیشنهادی برای رفتار تنش-کرنش بتن تحت کشش [۲۳]

در روش المان محدود مورد استفاده در این مطالعه، آرماتورها را می‌توان به شیوه‌های مختلفی از جمله مدل تسلیح اندود در بتن، روش المان چسبیده و المان‌های تیر یا خرپایی مجزا با قید مدفون یا لایه‌های توکار آرماتور مدلسازی نمود. استفاده از المان‌های خرپایی روشی مرسوم بمنظور تعریف میلگردها می‌باشد. در این روش تنها پارامتر قابل تعریف، سطح مقطع میلگرد است. همچنین می‌توان از المان‌های تیر نیز به منظور مدل‌سازی میلگردها استفاده نمود که در این روش بدلیل تعدد پارامترهای ورودی و در نتیجه افزایش زمان حل، این روش توصیه نمی‌شود. مدل ناحیه مدفون در سال‌های اخیر در مطالعه اعضای بتن آرمه در محیط نرم افزار آباکوس بشدت مورد توجه محققین واقع شده است [۲۵-۲۸]. به عنوان مثال الگنده و توپیلین تحلیل غیرخطی ستون‌های بتن مسلح آسیب دیده مقاوم سازی شده بوسیله زاکتهای فیبرکربنی را به کمک مدل ناحیه مدفون در آباکوس انجام دادند [۲۶]. در این مقاله نیز بمنظور مدلسازی آرماتورها در ستون بتن مسلح مورد نظر در نرم افزار آباکوس از مدل ناحیه مدفون استفاده شده است. در این شیوه بتن مصالح پایه و میلگرد توسط بتن محصور می‌گردند. تاثیر لغزش میلگرد در بتن در روش ناحیه مدفون در نظر گرفته نمی‌شود اما می‌توان گفت تاثیر این پدیده به نحوی در سخت شدگی کششی بتن لحاظ شده است. بمنظور معرفی رفتار فولاد میلگردها از منحنی تنش-کرنش رابطه راسمونس استفاده شده است [۲۹].

## ۲-۲- مدل المان محدود

مدلسازی ستون بتنی در نرم‌افزار آباکوس نیازمند ساخت هندسه ستون و سپس آرماتورهای طولی و عرضی است. بمنظور مدلسازی بتن در محیط نرم افزار از المان سه بعدی C3D8R از خانواده المانهای تنش-کرنش محیط پیوسته استفاده شده است که در هر المان ۸ گره و در هر گره سه درجه آزادی انتقالی در نظر گرفته می‌شود. این المان در سه جهت دلخواه امکان قرار دادن میلگردهایی با خصوصیت متفاوت را داشته، بنابراین می‌تواند در تحلیل غیرخطی مصالح یا هندسی و یا ترکیب این دو مورد استفاده قرار گیرد. بمنظور مدلسازی آرماتورهای فولادی از المان خرپایی سه بعدی T2D3 استفاده شده است که دارای دو گره و در هر گره ۳ درجه آزادی انتقالی و مقاومت کششی و فشاری در جهت محور عضو را دارد. در جداول ۲ تا ۶، ابعاد ستون‌های مورد مطالعه، تعداد و قطر میلگردها در هر مرحله تحلیل ارائه شده است. فولاد مورد استفاده فولاد معمولی با تنش تسلیم ۲۴۰ و تنش گسیختگی ۴۱۵ مگا پاسکال فرض شده است. مقاومت بتن در بررسی‌ها از ۲۰ تا ۴۰ مگا پاسکال متغیر می‌باشد. شکل شماره ۳ نمای کلی از مدل المان محدود ستون را نشان می‌دهد. در مقاله حاضر، مقطع ستون براساس آیین نامه بتن ایران (آبا) و ضوابط موجود در مبحث نهم مقررات ملی ((طرح و اجرای ساختمانهای بتن آرمه)) طراحی شده است. در بررسی‌های انجام شده سعی شده است که از اندازه‌های معمول ستون در ساختمانهای ۲ تا ۴ طبقه یعنی تقریباً ابعاد ۴۰ تا ۵۰ سانتیمتر استفاده شود. همچنین در تعیین میلگردهای ستون سعی شده که درصد آن از مقدار حداکثر مجاز کمتر در نظر گرفته شود. در قسمت بحث و نتایج و برای بررسی پارامترهای مختلف موثر بر رفتار ستون، ابعاد، نمره میلگردهای طولی و عرضی و همچنین مقاومت مشخصه بتن تعیین و سپس نتایج آورده شده است.



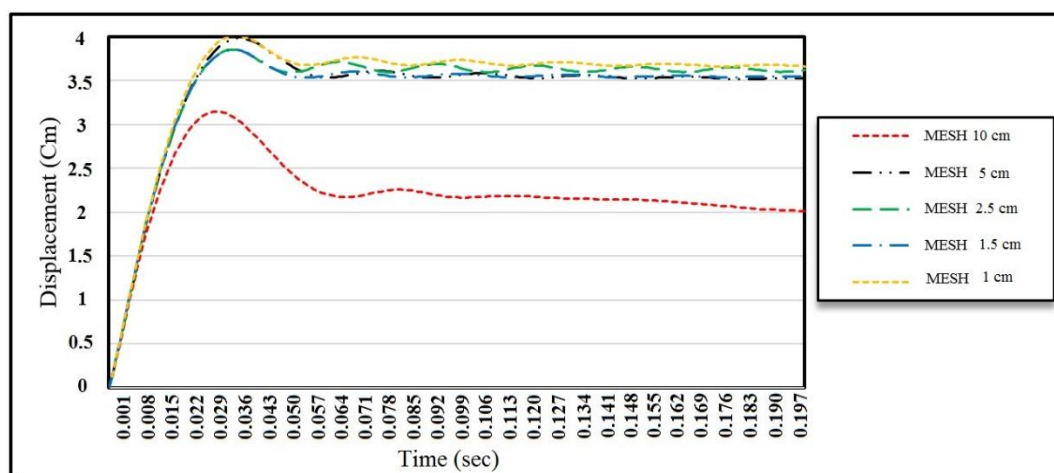


شکل ۳: مدل نرم‌افزاری ساخته شده ستون بتنی بدون نمایش بتن

بارگذاری انفجاری به دو پارامتر زمان و مکان وابسته است. در این مطالعه برای ساده سازی و کاهش زمان عملیات شبیه سازی رایانه‌ای مدل‌ها از وابستگی مکانی بارگذاری صرف نظر شده و تنها به توزیع زمانی بار پرداخته شد. به عبارت دیگر، توزیع فشار ناشی از انفجار به صورت یک فشار یکنواخت ولی تابع زمان بر روی سطح ستون اعمال شد [۳۰]. در این مطالعه ستون دو طرف گیردار مدل سازی گردید و بار وارده به صورت فشار یکنواخت و در مدت زمان بسیار کوتاهی اعمال شده است.

### ۳-۲- اندازه مش بندی

بمنظور تعیین اندازه مش بندی مدل در نرم افزار آباکوس، اندازه مش بندی از یک سانتی‌متر شروع و اندازه‌های ۱/۵، ۲/۵، ۵ و ۱۰ سانتی‌متر نیز مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق شکل ۴ مشاهده می‌شود که اندازه مش بندی برابر ۵ سانتی‌متر و کمتر تاثیر قابل ملاحظه‌ای در نتایج تحلیل ندارد. بنابراین در مقاله حاضر بمنظور مدلسازی ستون بتن آرمه در محیط نرم افزار آباکوس از اندازه ۴ سانتی‌متر برای مش بندی استفاده شده است.



شکل ۴: نتایج تحلیل حساسیت مش بندی در نرم افزار Abaqus

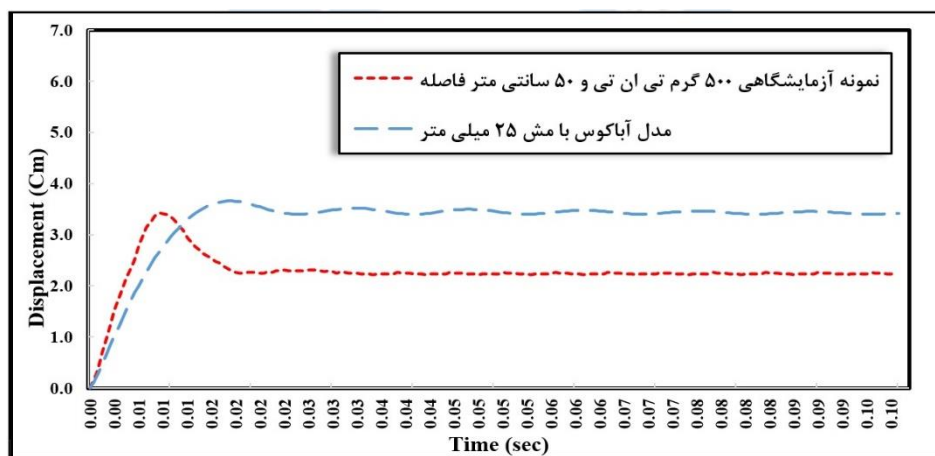
### ۳- شبیه سازی عددی مدل آزمایشگاهی و صحت سنجی

در این مطالعه جهت صحت سنجی، از مدل آزمایشگاهی انجام گرفته توسط لیو و همکاران [۹] استفاده شده است. آنها چند مدل آزمایشگاهی تیر را با مقادیر متفاوت ماده منفجره و فاصله غیر یکسان تحت انفجار قرار دادند و جابه جایی حداکثر آنها را بدست آوردند. تیرها طوری روی تکیه گاه های بتنی قرار داده شدند که شرایط تکیه گاه مفصلی رو داشته باشند. مواد منفجره در بالای تیر و در فاصله مشخصی قرار داده شد. از لحاظ فاصله از منبع انفجار و مقدار مواد منفجره مدل B1-4 میانگین مدل های آزمایش شده می باشد در نتیجه در این مطالعه مدل B1-4 جهت صحت سنجی مدل های عددی مورد بررسی قرار گرفته است. مدل آزمایشگاهی در ابعاد ۱۵×۱۵ و طول ۱۷۰ سانتیمتر بوده که دارای چهار میلگرد طولی به قطر ۸ میلیمتر و خاموت با قطر ۶ میلیمتر می باشد. فواصل خاموت ها در این مدل ۱۸ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. مقاومت ۲۸ روزه بتن ۳۰ مگا پاسکال و مقاومت کششی میلگردها ۴۱۰ مگا پاسکال می باشد. شکل ۵ نحوه خرابی تیر B1-4 را در اثر انفجار نشان می دهد.



شکل ۵ : نحوه ایجاد خرابی در تیر آزمایشگاهی مورد بررسی جهت صحت سنجی مدل عددی [۹]

همانطور که در شکل ۵ دیده می شود تیر در اثر تغییر مکان میانه بوجود آمده در اثر بار انفجار، دچار خرابی شده است. همانطور که پیش تر بیان شد به منظور صحت سنجی مدل عددی مورد استفاده در این مقاله، تیر مربوط به مرجع [۹] تحت بار انفجار در نرم افزار آباکوس توسط نویسندگان مدل سازی و نتایج جابجایی بر حسب زمان میانه تیر با نتایج موجود در مدل آزمایشگاهی لیو و همکاران [۹] مطابق شکل ۶ مقایسه گردید. در این شکل اختلاف مقدار حداکثر جابجایی تغییر مکان میانه مدل تحلیلی و نمونه آزمایشگاهی در حدود ۷٪ می باشد که این امر نشان دهنده انطباق مناسب نتایج است.



شکل ۶ : مقایسه نمودار جابجایی - نمونه اجزا محدودی و آزمایشگاهی

## ۴- بحث و نتایج

در این مقاله تغییر مکان حداکثر در میانه ارتفاع ستون بتن مسلح تحت اثر بار انفجار مخازن CNG خودروها به عنوان پارامتر اصلی ارزیابی مورد بررسی قرار گرفته است. چهار متغیر فاصله ستون از منبع انفجاری، رده‌های متفاوت مقاومت فشاری بتن، تغییر در ابعاد سطح مقطع ستون مربعی و در نهایت کاهش بار اعمالی به مدل به علت تغییرات مقاومت بدنه خودرو در مدل‌سازی لحاظ شده است.

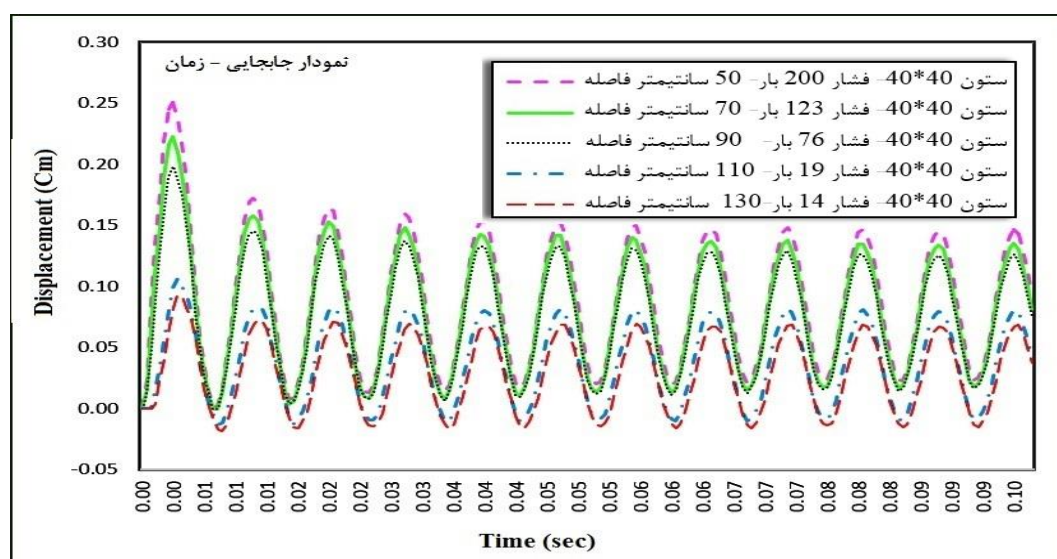
## ۴-۱- متغیر فاصله ستون از منبع انفجار

در بررسی این متغیر مخزن خودروی گازسوز در حالت حداکثر پرشدگی فرض شده و مقدار فشار وارده برحسب فاصله بار انفجار از ستون بدست آمده است. در جدول شماره ۲ مشخصات ستون‌های مورد بررسی و مقادیر بار نشان داده شده است.

جدول ۲: مشخصات ستون بتنی مورد آزمایش در نرم‌افزار Abaqus (متغیر فاصله بار انفجار)

ارتفاع ستون (cm)	عرض ستون (cm)	طول ستون (cm)	مقاومت مشخصه بتن (مگا پاسکال)	قطر آرماتورهای عرضی (cm)	قطر آرماتورهای طولی (cm)	فاصله خاموتها (cm)	اندازه مش بندی (cm)	مقدار فشار (بار)	فاصله از انفجار (cm)
۳۲۰	۴۰	۴۰	۲۵	۱	۲/۸	۱۵	۴	۲۰۰	۵۰
۳۲۰	۴۰	۴۰	۲۵	۱	۲/۸	۱۵	۴	۱۲۳	۷۰
۳۲۰	۴۰	۴۰	۲۵	۱	۲/۸	۱۵	۴	۷۶	۹۰
۳۲۰	۴۰	۴۰	۲۵	۱	۲/۸	۱۵	۴	۱۹	۱۱۰
۳۲۰	۴۰	۴۰	۲۵	۱	۲/۸	۱۵	۴	۱۴	۱۳۰

در گام اول مدل ستون تحت بار انفجار در حالت پر شدگی و برابر ۲۰۰ بار تحلیل شد و مقدار تغییر مکان بیشینه میانه آن محاسبه گردید. در گام‌های بعدی مدل مورد مطالعه با کاهش بار انفجار، برای لحاظ نمودن فاصله منبع انفجار از ستون تحلیل شده و مجدداً مقدار بیشینه تغییر مکان میانه آن محاسبه گردید. این کاهش بار تا فاصله ۱۳۰ سانتیمتری فاصله منبع انفجار از ستون انجام گردید. نتایج تغییر فاصله اعمال بار انفجار از ستون مطابق شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷: مقایسه نتایج تغییر فاصله در گام‌های ۲۰ سانتی متری

محور افقی زمان بر حسب ثانیه و محور قائم جابجایی حداکثر ستون را در میانه آن نشان می‌دهد. منحنی‌های تغییر مکان میانه ستون برای فاصله منبع انفجار از ۵۰ تا ۱۳۰ سانتیمتر با گام‌های ۲۰ سانتیمتری در شکل ۶ بر حسب زمان ترسیم شده است. مطابق شکل در فاصله منبع انفجار تا ۵۰ سانتی‌متر از ستون حداکثر جابجایی میانه آن ۰/۲۵۱ سانتیمتر و با افزایش فاصله به ۱۳۰ سانتی‌متر این مقدار ۰/۰۹۴ سانتیمتر بدست آمده که کاهش ۶۳٪ را نسبت به فاصله نزدیک منبع انفجار نشان می‌دهد. این مطلب نشان می‌دهد که فاصله منبع انفجار از ستون عامل مهمی در کاهش اثر بار انفجاری و در نتیجه کاهش تغییر مکان حداکثر میانه ستون می‌باشد.

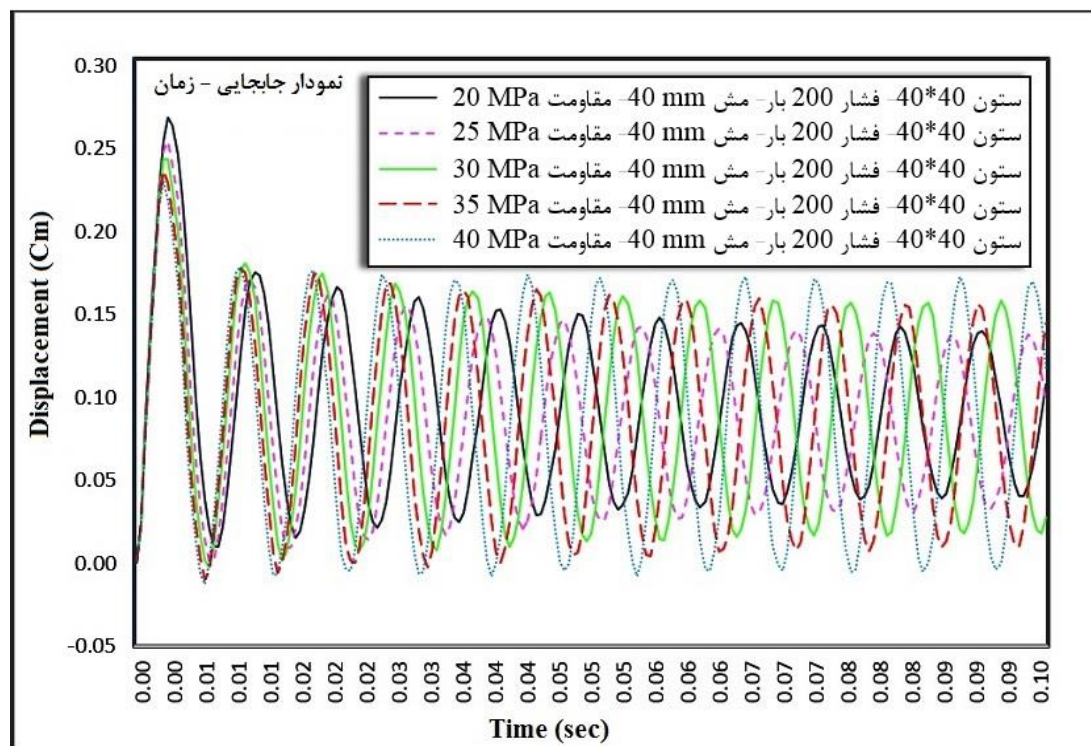
#### ۴-۲- تاثیر مقاومت فشاری بتن بر تغییر مکان حداکثر ستون

برای بررسی تاثیر مقاومت بتن بر تغییر مکان حداکثر میانه ستون از بتن با رده‌های مقاومت ۲۰-۲۵-۳۰-۳۵-۴۰ مگاپاسکال استفاده شده است. در این بررسی فاصله منبع انفجار از ستون نزدیک و حداکثر ۵۰ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. مطابق این فرض مقدار بار انفجار در فاصله نزدیک برابر ۲۰۰ بار لحاظ شده است. مشخصات مدل ستون در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳: مشخصات ستون بتنی مورد آزمایش در نرم‌افزار Abaquse (متغیر مقاومت فشاری بتن)

ارتفاع ستون (cm)	عرض ستون (cm)	طول ستون (cm)	مقاومت مشخصه ستون (مگا پاسکال)	قطر آرماتور عرضی (cm)	قطر آرماتور طولی (cm)	فاصله بین خاموت (cm)	مقدار فشار (بار)	فاصله از انفجار (cm)
۳۲۰	۴۰	۴۰	۲۰	۱	۲/۸	۱۵	۲۰۰	۵۰
۳۲۰	۴۰	۴۰	۲۵	۱	۲/۸	۱۵	۲۰۰	۵۰
۳۲۰	۴۰	۴۰	۳۰	۱	۲/۸	۱۵	۲۰۰	۵۰
۳۲۰	۴۰	۴۰	۳۵	۱	۲/۸	۱۵	۲۰۰	۵۰
۳۲۰	۴۰	۴۰	۴۰	۱	۲/۸	۱۵	۲۰۰	۵۰

نتایج تحلیل اثر مقاومت بتن در جابجایی حداکثر میانه ستون در شکل ۸ نشان داده شده است. مطابق نتایج، مشاهده می‌شود که با افزایش مقاومت فشاری در مدل‌های با شرایط یکسان، جابجایی حداکثر میانه ستون در بتن با مقاومت ۴۰ مگا پاسکال نسبت به نمونه با مقاومت ۲۰ مگاپاسکال کاهش یافته است. در مدل ستون با مقاومت ۲۰ مگا پاسکال، مقدار جابجایی حداکثر میانه حدود ۰/۲۷ سانتیمتر و این مقدار برای ستون با مقاومت ۴۰ مگا پاسکال حدود ۰/۲۳ سانتیمتر بدست آمده است. این کاهش در ستون با مقاومت ۴۰ مگا پاسکال نسبت به ستون با رده بتن ۲۰ مگاپاسکال حدود ۱۵٪ می‌باشد. نتایج نشان دهنده تاثیر کمتر مقاومت فشاری ستون بر تغییر مکان حداکثر میانه آن نسبت به متغیر فاصله ستون از منبع انفجار است.



شکل ۸: مقایسه حداکثر جابجایی تمامی نمونه‌ها مورد مطالعه و تاثیر مقاومت فشاری بتن

#### ۴-۳- تاثیر تغییر ابعاد ستون بر تغییر مکان حداکثر میانه

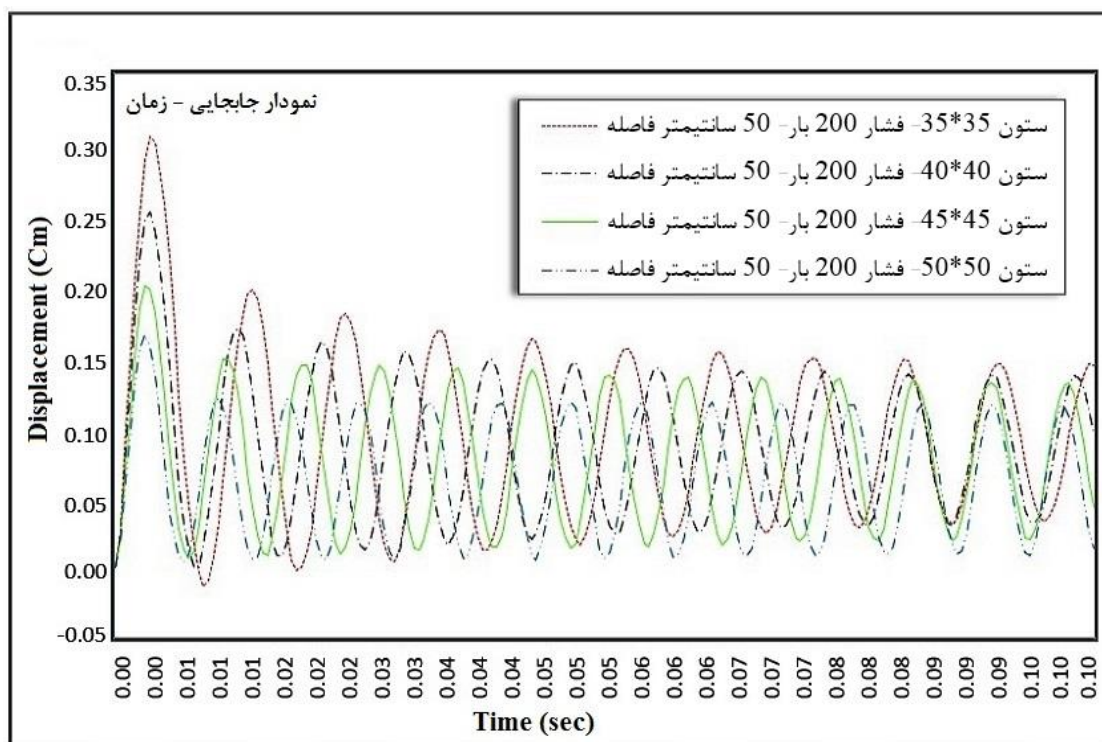
جهت بررسی اثر تغییر ابعاد ستون بر تغییر مکان حداکثر میانه آن، ابعاد ستون در مدل از ۳۵ سانتیمتر با گامهای ۵ سانتیمتری تا ۵۰ سانتیمتر افزایش داده شده است. مشخصات مدل‌های تحت بررسی مطابق جدول ۴ می‌باشد. مقدار فشار انفجار در حالت حداکثر بار یعنی حالت پر شدگی مخزن فرض شده و اثر ابعاد ستون بر حداکثر تغییر مکان میانه آن بررسی شده است.

جدول ۴: تاثیر تغییر هندسه ستون در گام‌های ۵ سانتیمتری

ارتفاع ستون (cm)	عرض ستون (cm)	طول ستون (cm)	مقاومت مشخصه بتن (مگا پاسکال)	قطر میلگردهای عرضی (cm)	قطر میلگردهای طولی (cm)	فاصله بین خاموت (cm)	مقدار فشار (بار)	فاصله از انفجار (cm)
۳۲۰	۳۵	۳۵۰	۲۰	۱	۲/۸	۱۵	۲۰۰	۵۰
۳۲۰	۴۰	۴۰۰	۲۵	۱	۲/۸	۱۵	۲۰۰	۵۰
۳۲۰	۴۵	۴۵۰	۳۰	۱	۲/۸	۱۵	۲۰۰	۵۰
۳۲۰	۵۰	۵۰۰	۳۵	۱	۲/۸	۱۵	۲۰۰	۵۰

در شکل شماره ۹ نتایج بررسی ابعاد ستون در تغییر مکان حداکثر میانه نشان داده شده است. مقدار حداکثر تغییر مکان میانه ستون با ابعاد ۳۵×۳۵ حدود ۰/۳۱ سانتیمتر و همین مقدار در ستون با ابعاد ۵۰×۵۰ سانتیمتر حدود ۰/۱۷ سانتیمتر بدست آمده است. نتایج تحلیل مدل‌های ذکر شده در این قسمت در شکل شماره ۷ نشان داده شده است. مطابق شکل تغییر ابعاد سطح مقطع ستون مربعی از ۳۵ به ۵۰ سانتی‌متر باعث کاهش جابجایی حدود ۰/۴۵٪ شده است که در مقایسه با دو متغیر دیگر به لحاظ اهمیت در مرتبه دوم قرار می‌گیرد. از نتایج چنین استنباط می‌شود که اثر افزایش ابعاد ستون از ۳۵ به ۵۰ سانتیمتر در کاهش جابجایی حداکثر تغییر مکان میانه آن نسبت به متغیر فاصله منبع انفجار از ستون کمتر ولی نسبت به متغیر افزایش مقاومت فشاری اثر بیشتری دارد.





شکل ۹: مقایسه حداکثر جابجایی میانه ستون با تغییر ابعاد سطح مقطع ستون بتنی

#### ۴-۴- تاثیر مقاومت بدنه خودرو

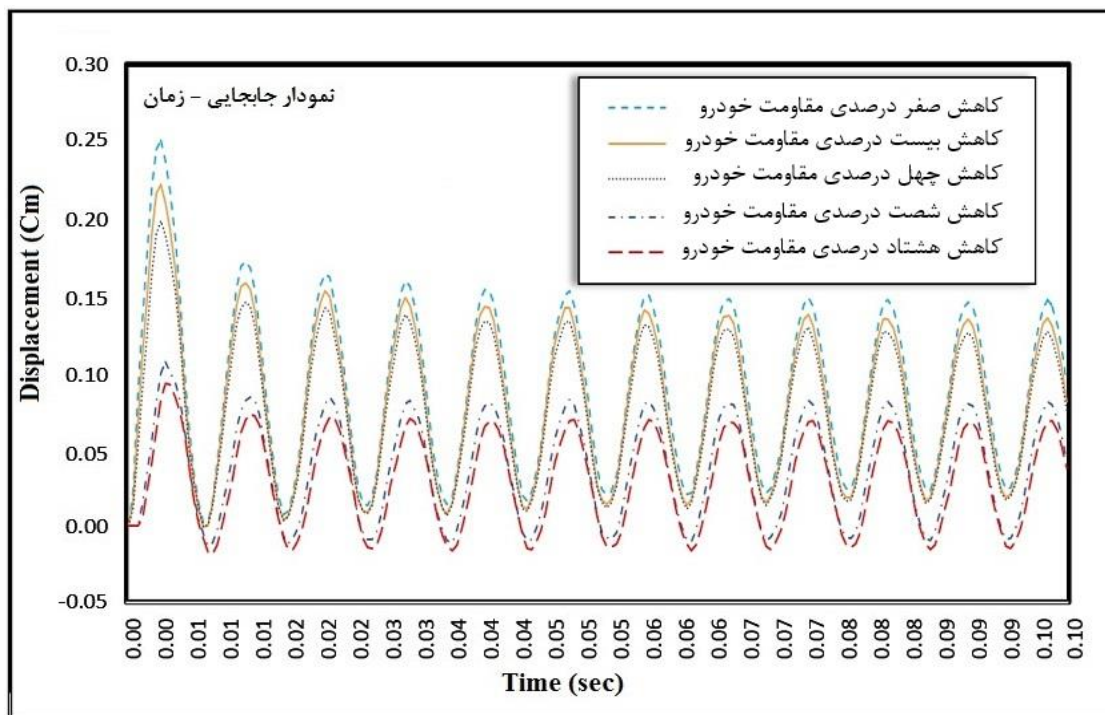
با توجه به اینکه مقاومت بدنه خودروها به علت تنوع در کلاس بندی، کیفیت ساخت کمپانی سازنده، و عمر خودرو متفاوت است، اثر مقاومت بدنه خودرو به صورت کاهش بار اعمالی بر ستون در نظر گرفته شده است. در واقع فرض شده است که در خودرو با افزایش مقاومت بدنه، در اثر انفجار مخزن در حالت پرشدگی، مقدار بار اعمالی کمتر شده است. این کاهش بار انفجار برای لحاظ کردن اثر مقاومت بدنه خودرو در گام‌های ۲۰ درصدی لحاظ شده است. مشخصات مدل‌های مورد بررسی و کاهش بار انفجار بر روی آن‌ها در جدول ۵ نشان داده شده است. مطابق جدول ۵ کاهش بار از صفر تا ۸۰ درصد برحسب کاهش فرضی مقاومت بدنه خودرو در نظر گرفته شده است.

ارتفاع ستون (cm)	عرض ستون (cm)	طول ستون (cm)	مقاومت مشخصه بتن (مگا پاسکال)	فاصله بین خاموتها (cm)	قطر آرماتورهای عرضی (cm)	قطر آرماتورهای طولی (cm)	مقدار فشار (بار)	در صد کاهش بار (اثر مقاومت بدنه خودرو)
۳۲۰	۵۰	۵۰	۲۵	۱۵	۱	۲/۸	۲۰۰	۰
۳۲۰	۵۰	۵۰	۲۵	۱۵	۱	۲/۸	۱۶۰	۲۰
۳۲۰	۵۰	۵۰	۲۵	۱۵	۱	۲/۸	۱۲۰	۴۰
۳۲۰	۵۰	۵۰	۲۵	۱۵	۱	۲/۸	۸۰	۶۰
۳۲۰	۵۰	۵۰	۲۵	۱۵	۱	۲/۸	۴۰	۸۰

جدول ۵: مشخصات مدل‌های مورد بررسی تاثیر مقاومت بدنه خودرو در کاهش بار انفجار در گام‌های کاهش ۲۰ درصدی



شکل ۱۰ نتایج محاسبه تغییرمکان حداکثر میانه ستون در اثر کاهش بار انفجار به دلیل کاهش مقاومت بدنه خودرو را نشان می‌دهد. نسبت جابجایی حداکثر در میانه ستون در حالت ۸۰ درصد کاهش مقاومت بدنه خودرو ۰/۹۲ سانتیمتر و در حالت بدون کاهش مقاومت خودرو ۰/۲۵۶ سانتیمتر بدست آمده است. تغییرمکان حداکثر میانه ستون در خودرو با مقاومت صد درصد نسبت به خودرو با مقاومت ۲۰ درصد در حدود ۶۴٪ می‌باشد. این مطلب نشان‌دهنده اثر زیاد کاهش مقاومت بدنه خودرو نسبت به سایر پارامترهای مورد بررسی در محدوده تغییرات این پارامترها می‌باشد.



شکل ۱۰: مقایسه حداکثر جابجایی میانه ستون در اثر کاهش مقاومت بدنه خودرو

## ۵- نتیجه گیری

در این مطالعه جابجایی میانه ستون بتن مسلح ناشی از انفجار بار مخازن CNG خودرو با در نظر گرفتن سه متغیر فاصله مخزن CNG تا ستون، مقاومت مشخصه بتن مصرفی، سطح مقطع ستون و کاهش مقاومت بدنه خودرو در محدوده تغییرات این پارامترها مورد بررسی قرار گرفته است.

۱- حداکثر جابجایی میانه ستون در اثر انفجار مخزن با فاصله مرکز انفجار نزدیک از ۲/۵۰۹ میلی‌متر بدست آمده است. با افزایش فاصله مرکز انفجار از ستون در گام‌های ۱۰ سانتی‌متری تا فاصله ۱۳۰ سانتی‌متری از مرکز انفجار مقدار جابجایی محاسبه شده که این مقدار در دورترین فاصله یعنی ۱۳۰ سانتی‌متری به ۰/۹۲۳ میلی‌متر رسیده است که نشان از اهمیت بالای فاصله ستون از مرکز انفجار دارد. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که جابجایی دورترین فاصله ستون از بار انفجاری نسبت به حالت حداقل فاصله به میزان ۶۳٪ کاهش پیدا کرده است.

۲- برای بررسی اثر تغییرات مقاومت بتن بر جابجایی میانه ستون، مقاومت فشاری بتن در رده‌های مختلف با مقاومت ۲۰ مگاپاسکال تا ۴۰ مگاپاسکال مورد بررسی قرار گرفته است. در مدل با مقاومت ۲۰ مگاپاسکال حداکثر جابجایی در میانه ستون ۰/۲۷ سانتیمتر و با افزایش مقاومت بتن در گام‌های ۵ مگاپاسکالی تا ۴۰ مگاپاسکال، این جابجایی به ۰/۲۳ رسیده است. جابجایی میانه ستون در حداقل و حداکثر مقاومت به میزان ۱۵٪ کاهش پیدا کرده است.

۳- جهت بررسی اثر ابعاد ستونها بر جابجایی حداکثر میانه، ابعاد ستونها از  $35 \times 35$  سانتیمتر تا  $50 \times 50$  سانتیمتر تغییر یافت. در کوچکترین بعد ستون و فاصله نزدیک بار انفجاری مقدار جابجایی حداکثر  $0/31$  سانتیمتر بدست آمده است که این مقدار در ستون با حداکثر بعد به  $0/17$  سانتیمتر رسیده است. تغییرمکان حداکثر میانه ستون در ابعاد حداکثر در نظر گرفته شده ستون در این مطالعه نسبت به کمترین بعد ستون به میزان  $45\%$  کاهش پیدا کرده است. این مطلب نشان دهنده تاثیر قابل ملاحظه افزایش سطح مقطع ستون در کاهش جابجایی در اثر انفجار می‌باشد.

۴- حداکثر تغییرمکان میانه ستون در اثر کاهش مقاومت بدنه خودرو در گام‌های کاهش  $20\%$  درصدی مقاومت بدنه بررسی گردید. حداکثر تغییرمکان میانه ستون در خودرو بدون کاهش مقاومت بدنه  $0/256$  سانتیمتر بدست آمده است که این مقدار در کاهش  $80\%$  درصدی مقاومت بدنه خودرو به  $0/92$  سانتیمتر رسیده است. این مطلب نشان می‌دهد که تغییرات مقاومت بدنه خودرو از صفر تا  $80\%$  درصد حدود  $0/64$  درصد در تغییرمکان حداکثر میانه ستون تاثیر داشته است.

۵- در محدوده تغییرات پارامترهای مورد بررسی، نتایج نشان داد که اثر فاصله بار انفجار از ستون و کاهش مقاومت بدنه خودرو بیشترین اثر را در تغییرمکان حداکثر میانه ستون داشته است. پس از تغییر ابعاد ستون با اثر کمتر از دو پارامتر قبلی، تغییرات مقاومت بتن کمترین اثر را در حداکثر تغییرمکان میانه ستون اثر داشته است.

## منابع

- [1] Fayouz, A., et al. (2009). Investigation of the effect of materials and shape of the structure on the performance of the structure against explosion, 8th International Civil Engineering Congress, Shiraz,. (In Persian).
- [2] Parvini, M. and A. Kordrostami. (2014) *Consequence modeling of explosion at Azad-Shahr CNG refueling station*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 30: p. 47-54.
- [3] Zhang, F. et al. (2015). *Residual axial capacity of CFDSST columns infilled with UHPFRC after close-range blast loading*. Thin-Walled Structures. 96: p. 314-327.
- [4] Zhang, F. et al. (2016). *Experimental study of CFDSST columns infilled with UHPC under close-range blast loading*. International Journal of Impact Engineering. 93: p.184-195
- [5] Wang, H. et al.(2017) *Experimental study of large-sized concrete filled steel tube columns under blast load*. Construction and Building Materials. 134: p. 131-141.
- [6] Yang, F. et al. (2019). *Experimental and numerical study of rubber concrete slabs with steel reinforcement under close-in blast loading*. Construction and Building Materials, 198: p. 423-436.
- [7] Nelson, S.M. B.J. O'Toole. (2018). *Computational analysis of blast loaded composite cylinders*. International Journal of Impact Engineering. 119: p. 26-39
- [8] Havaei, G. R, and Bayat, E. (2017). The structural response and manner of progressive collapse in RC buildings under the blast and Provide approaches to retrofitting columns against blast, Journal of Structural and Construction Engineering, 4 (1), p. 81-100. (In Persian).
- [9] Liu, Y. Yan, J.B. and Huang, F.L. (2018). Behavior of of reinforced concrete beams and columns subjected to blast loading. *Defence Technology*, 14(5), pp.550-559.
- [10] Nestor Mejia a. Ricardo Peralta a,b, Rodrigo Tapia a,b, Ricardo Durán a, Andrés Sarango. (2022). Damage assessment of RC columns under the combined effects of contact explosion and axial loads by experimental and numerical investigations. *Engineering Structures*, 254, 113776,
- [11] Bozorgvar, M. Shoushtari, A. (2011). Effects of Explosion on Earthquake Resistant Concrete Buildings, 6th National Congress of Civil Engineering, Semnan. (In Persian).
- [12] Lee, J and Fenves, J. (1998). Plastic-Damage modeling for cyclic loading of concrete structure, Journal of Engineering Mechanics, 124, p 892-900.
- [13] Lukić, S and Draganić, H, (2021), Blast Loaded Columns—State of the Art Review, Applied Science, 11, 7980
- [14] Azadi Kakavand, M R, Neuner, M, Schreter M and Hofstetter, G, (2018), A 3D continuum FE-model for predicting the nonlinear response and failure modes of RC frames in pushover analyses, Bull Earthquake Eng.
- [15] Azadi Kakavand, M R, Taciroglu E. (2019). An enhanced damage plasticity model for predicting the cyclic behavior of plain concrete under multiaxial loading conditions, Front. Struct. Civ. Eng, 14(6): 1531–1544
- [16] Azadi Kakavand, M R. (2019), Enhanced empirical models for predicting the drift capacity of less ductile RC columns with flexural, shear, or axial failure modes, Front. Struct. Civ. Eng. 2019, 13(5): 1251–1270
- [17] Azadi Kakavand, M R, Halil S and Taciroglu, E. (2021), Data-Driven Models for Predicting the Shear Strength of Rectangular and Circular Reinforced Concrete Columns, Journal of Structural Engineering, 147(1),

- [18] Feng , D-C , Chen , S-Z , Azadi Kakavand , M R & Taciroglu , E 2021 , ' Probabilistic Model Based on Bayesian Model Averaging for Predicting the Plastic Hinge Lengths of Reinforced Concrete Columns ' , Journal of Engineering Mechanics , vol. 147 , no. 10 , 04021066 . [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001976](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001976)
- [19] ABAQUS. Analysis User's Manual, Dassault Systems Simulia Crop. Providence, RI, USA, 2019.
- [20] DNV GL. PHAST tutorial manual. London, UK: DNV GL software; 2016.
- [21] Nasim, M., & Setunge, S. (2022). Damage Estimation of a Concrete Pier When Exposed to Extreme Flood and Debris Loading. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(5), 710.
- [22] The Most Complete Practical Reference of ABAQUS(In Persian)
- [23] Park, R, and Paulay, T. (1991). Reinforce concrete structures. Wiley
- [24] Mostofinejad, D. (2000). Reinforced Concrete Structures (Second Edition). Esfahan: Arkan Danesh, 53.
- [25] Rasoul, Z. M. A. (2019). Accuracy of concrete strength prediction behavior in simulating punching shear behavior of flat slab using finite element approach in Abaqus. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*, 7(4), 1933-1949.
- [26] Algnde, G., & Topilin, A. (2022). Nonlinear analysis of damaged reinforced concrete columns, restored with carbon fiber jacket using Abaqus. In *Advances in Construction and Development* (pp. 21-33). Springer, Singapore.
- [27] Roudane, B., Adanur, S., & Altunışık, A. C. (2019). Numerical modeling of masonry infilled reinforced concrete building during construction stages using Abaqus software. *Buildings*, 9(8), 181.
- [28] Chen, L., Liu, D., Lei, M., Zhang, Y., Zhao, T., & Zheng, Y. (2022). The Study on the Constitutive Model of Concrete for Explicit Dynamic of ABAQUS Based on Damage Energy. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022.
- [29] D. Fernando , J. Teng, W. Quach, L.Waal. (2020). *Full-range stress-strain model for stainless steel alloys*. *Journal of Constructional Steel Research*, 173, 106266.
- [30] . Marchand, K, A. Alfawakhiri, F. (2005). Blast and Progressive Collapse, American Institute of Steel Construction, Inc.