



Sensitivity Analysis of the Impact of Distance and Explosive Load on Concrete Structures Considering Soil-Structure Interaction Effects

Mohammad Emami Korandeh^a , Saeed Farokhizadeh^a 

- a. *Assistant Professor of Geotechnical Engineering, Department of Civil Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.*
- b. *Assistant Professor of Construction Management, Department of Civil Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.*

Received: 9 April 2025 Received in revised form: 20 July 2025 Accepted: 2 August 2025 p.p:128 –150

<https://doi.org/10.22034/ispdrc.2025.2057525.1179>

ABSTRACT

The undeniable influence of soil-structure interaction on the behavior of structures, along with the increasing importance of explosive loads in the current global security context, has led to the modeling and sensitivity analysis of the effects of distance and explosive loads on concrete structures. In this study, three types of structures with 3, 7 and 15 stories were investigated. ETABS and ABAQUS software were used, with ETABS for the design of structural elements and ABAQUS for the analysis of soil-structure interaction effects. The results showed that increasing the distance of the explosion from the structure significantly reduces the force generated by the explosion, while increasing the weight of the explosive materials increases the applied force. However, the effect of distance is more pronounced compared to variations in TNT weight. The input energy and the induced displacements in the structures showed a significant correlation with the blast force. In all three structures studied, increasing the distance or decreasing the weight of the explosives resulted in reduced energy and displacement. In addition, increasing the number of stories significantly increased the displacements, with the 15-story structure experiencing greater displacement and energy absorption compared to the other structures. The damage pattern also varied; for example, in the 3-story structure, damage was observed primarily in the upper floors, in the 7-story structure, in the middle floors, and in the 15-story structure, in the lower floors. Maximum displacement occurred in the upper floors of the 3-story structure, the middle floors of the 7-story structure, and the lower floors of the 15-story structure. Overall, this study demonstrates a significant relationship between input energy, induced displacements, and explosive force in all three structures.

Keywords: Soil-Structure Interaction, Explosive Load, Sensitivity Analysis, Effect of Distance

Extended Abstract:

Introduction

In 2001, Yerli and Tanrikolu presented a hybrid method combining finite element, infinite element and boundary element methods, which was used in this study to verify the accuracy of the proposed soil model. In 2004, Wolf introduced the cone model to simulate the soil under structures, which was used in this study to evaluate the accuracy of the soil model combined with the structure. In 2007, Hong and his colleagues continued studies on finite element models by using viscous elements to simulate the distant soil region and attempted to incorporate nonlinear soil properties into their model. Boundary element studies in finite element methods have attracted considerable attention from researchers.

Hokmabadi and colleagues in 2014 evaluated and assessed tall buildings on soft soil, considering the soil-foundation-structure interaction. Specifically, this study investigated the dynamic response of 5-, 10-, and 15-story buildings using a shake table to evaluate the effects of soil-foundation-structure interaction (SSPSI). In 2015, Rahgozar and his colleague analyzed the soil-structure interaction in adjacent tall buildings. This article highlighted the importance of soil-structure interaction effects on the dynamic response of tall buildings by examining two structures, 20 and 40 stories, designed as special steel moment frames on soft and hard soils. The soft soil had a dynamic period close to the period of the 20-story structure, while the hard soil had a dynamic period close to the dominant period of the bedrock.

Methodology

The samples investigated in this study include three concrete medium moment frame structures: low-rise (3-story), mid-rise (7-story), and high-rise (15-story), under different conditions with and without consideration of soil-structure interaction. In order to evaluate the effect of soil-structure interaction on the behavior of concrete frames according to seismic regulations, three models were designed and categorized into 3, 7, and 15-story groups. Each of these three groups was analyzed and designed as a three-dimensional model using Etabs software. Then, one frame of the designed models was simulated in ABAQUS software and its performance under two conditions-with and without soil-structure interaction-was evaluated by comparing parameters such as maximum roof displacement, bearing capacity, and stress among the models.

Results and discussion

The main objective of this paper is to perform a sensitivity analysis on the effects of distance and explosive charge on the behavior of concrete structures, taking into account the effects of soil-structure interaction. First, the effects of different blast distances are considered, ranging from 10 centimeters to 10 meters. The explosion distance parameter is denoted by the letter S. In addition, the weight of the explosive material is simulated, ranging from 20 kilograms to 180 kilograms.

The distance between the explosion and the structure significantly affects the magnitude of the applied force, with the force decreasing sharply as the distance increases. The table below shows models S1 through S7 and the distances of a 100-kilogram explosive from the structure. The results of the analysis of models S1 through S7 are presented and discussed. In these models, the impact of a 100-kilogram TNT explosion on the middle floor of a 7-story building is applied at various distances between the center of the explosion and the building. It is observed that increasing the explosion distance significantly reduces the resulting displacement, with a particularly sharp decrease. It is also evident that increasing the blast distance beyond 1 meter results in a dramatic reduction in the stress exerted on the structure.

Conclusion

Urban development is increasing construction demand due to limited space and high costs. High-rise buildings are popular due to hard-soiled sites, which constitute a significant portion of existing structures. Iran's location necessitates consideration of all possible scenarios. This article begins with an introduction to concrete moment frames on hard soils, including explosive loading. The second section discusses previous research and the theoretical foundations of methods for analyzing these systems. The third section presents the finite element method, ABAQUS software, and response validation. The fourth section discusses the results of designing and analyzing finite element models of 3-, 7-, and 15-story structures against explosion loads. This section ends with general findings and recommendations for future research. The main findings of this research can be summarized as follows: Increasing the number of stories results in significantly larger displacements, with the 15-story structure exhibiting more displacement and energy absorption than the other structures. The blast load spectrum is applied to the structure in two phases: compression and tension. Although the absolute magnitude of the tensile force in the blast spectrum is much

smaller than the force in the initial compression phase, it is observed that after the completion of the compression phase, significant damage occurs during the reverse pressure phenomenon in the blast.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.



تحلیل حساسیت اثر فاصله و بار انفجاری بر سازه‌های بتنی با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه

محمد امامی کورنده* - استادیار مهندسی ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
سعید فرخی زاده - استادیار مدیریت ساخت، گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۱ ص.ص ۱۲۸-۱۵۰

<https://doi.org/10.22034/ispdrc.2025.2057525.1179>

چکیده:

در این پژوهش، تأثیر بارهای انفجاری و اندرکنش خاک و سازه بر رفتار قاب‌های خمشی بتنی با ارتفاع‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به افزایش تهدیدات ناشی از انفجار در محیط‌های شهری و اهمیت تحلیل دقیق رفتار دینامیکی سازه‌ها، سه مدل سازه‌ای با تعداد طبقات ۳، ۷ و ۱۵ طبقه تحت سناریوهای مختلف بارگذاری انفجاری مورد تحلیل قرار گرفتند. طراحی اعضای سازه‌ای در نرم‌افزار ETABS و تحلیل دینامیکی غیرخطی با در نظرگیری اندرکنش خاک و سازه در نرم‌افزار ABAQUS انجام شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که افزایش فاصله انفجار از سازه، کاهش قابل توجهی در نیروهای وارد بر سازه، انرژی انتقال‌یافته و جابجایی‌های القاشده به دنبال دارد، با این حال کاهش وزن ماده منفجره اثرگذاری بیشتری نسبت به افزایش فاصله دارد. بررسی پاسخ‌های سازه‌ای نشان داد که با افزایش تعداد طبقات، مقادیر جابجایی و انرژی جذب‌شده نیز افزایش می‌یابد، به طوری که بیشترین پاسخ‌ها در سازه ۱۵ طبقه مشاهده شد. همچنین الگوی خرابی در طبقات مختلف بسته به ارتفاع سازه متفاوت است؛ در سازه ۳ طبقه تمرکز خرابی در طبقه فوقانی، در سازه ۷ طبقه در نواحی میانی، و در سازه ۱۵ طبقه در طبقات پایینی مشاهده شد. رابطه معناداری میان شدت بار انفجار، انرژی ورودی و میزان تغییرمکان ایجاد شده در تمامی سازه‌ها مشاهده شد. یافته‌ها بر لزوم در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه در تحلیل دقیق رفتار سازه‌ها تحت بار انفجاری تأکید داشته و می‌تواند مبنای طراحی مقاوم‌سازی سازه‌های شهری در برابر تهدیدات انفجاری قرار گیرد.

واژگان کلیدی: اندرکنش خاک و سازه، بار انفجاری، تحلیل حساسیت، اثر فاصله

در سال ۲۰۰۱ میلادی، یرلی و تانریکولو روش مختلط المانهای محدود و المانهای نامحدود و روش المانهای مرزی را ارائه کردند که در این تحقیق برای بررسی دقت مدل خاک پیشنهادی بکار رفته است. در سال ۲۰۰۴ ولف مدل مخروطی یا *Cone* را برای مدل کردن خاک زیر سازه استفاده کرد در این تحقیق برای بررسی میزان دقت مدل خاک ارائه شده به همراه سازه از آن استفاده شده است [۱]. در سال ۲۰۰۷ میلادی، هونگ و همکارانش در ادامه تحقیقات در زمینه مدل‌های المان محدود به منظور مدل کردن ناحیه دور خاک از المانهای ویسکوز استفاده کردند و تلاش کردند تا خصوصیات غیرخطی خاک را در مدل خود اعمال کنند [۲]. مطالعات در زمینه المانهای مرزی در روش المانهای محدود مورد توجه محققان بسیاری می‌باشد. حکم آبادی و همکارانش در سال ۲۰۱۴، به بررسی و ارزیابی سازه‌های بلند بر روی خاک نرم با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-پی-سازه پرداختند. در واقع این تحقیق به منظور ارزیابی اثر اندرکنش خاک-پی-سازه (*SSPSI*) پاسخ دینامیکی سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه بر روی میز لرزه‌ای را بررسی کرده است [۳]. رهگذر و همکارش در سال ۱۳۹۴ به بررسی و آنالیز خاک-سازه در سازه‌های بلند همجوار پرداختند [۴]. در این مقاله با توجه به اهمیت اثر اندرکنش خاک و سازه بر پاسخ دینامیکی سازه‌های بلند دو سازه ۲۰ و ۴۰ طبقه که بصورت قاب خمشی ویژه فولادی بر روی خاک نرم و خاک سخت واقع شده‌اند مورد بررسی قرار گرفته‌اند خاک نرم دارای پیوند دینامیکی نزدیک به پیوند سازه ۲۰ طبقه و خاک سخت دارای پیوند دینامیکی نزدیک به پیوند غالب سنگ بستر می‌باشد فاصله سازه‌های مجاور از همدیگر یک دهم و یک پنجم بعد پی در نظر گرفته شده است. بررسی تاثیر الیاف پلیمری کربن بر مقاومت‌سازی دیوارهای برشی مرکب در برابر موج انفجار در حالت‌های با و بدون اندرکنش خاک و سازه در سال ۱۳۹۸ توسط بهروزی و باباعلی انجام شده است [۵]. این موضوع بدان جهت از اهمیت بالایی برخوردار است که عملکرد کلی یک ساختمان نظامی ضد انفجار پس از وقوع حادثه تنها تابعی از عملکرد سازه‌ای آن نبوده و بخش‌های غیرسازه‌ای نیز می‌باید پس از وقوع انفجار از عملکرد مناسبی برخوردار باشند. به دلیل اهمیت بحث مقاومت‌سازی سازه‌ها، در این مقاله تاثیر الیاف پلیمری کربن بر مقاومت‌سازی دیوارهای برشی مرکب در برابر موج انفجار با لحاظ نمودن اثر اندرکنش خاک و سازه مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل‌ها به صورت دینامیکی و با استفاده از روش کانوپ انجام گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از الیاف پلیمری کربن در مقاومت‌سازی دیوار برشی مرکب، میزان استهلاک انرژی و کمانش ورق فولادی را کاهش می‌دهد. زیرا بخشی از نیروی انفجار توسط این الیاف مستهلک شده و از ایجاد خسارت بیشتر در اجزای اصلی سازه جلوگیری به عمل می‌آورد. کاظمینی و رضانبیور تحقیق خود را با هدف بررسی اثر اندرکنش خاک و سازه در تحلیل سازه بتنی با هسته مرکزی تحت بارهای انفجاری در سال ۱۳۹۹ انجام دادند [۶]. در این پژوهش سازه طراحی شده در نرم‌افزار دارای پانزده طبقه بوده که اندرکنش در حالت انفجار در نرم‌افزار *Abaqus* در سه حالت بررسی شد. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل اندرکنش خاک و سازه موجب کاهش نیروهای سازه ای مانند برش پایه و لنگر خمشی در برابر نیروی زلزله می‌گردد. سپس به مقایسه بیشترین مقدار تغییر مکان‌ها پرداخته شد. تقوی و نوده فراهانی در سال ۱۴۰۱ ارزیابی رفتار دینامیکی مقاطع پر کاربرد تونل‌های شهری تحت سناریو انفجار احجام متفاوتی از *TNT* در عمق خاک انجام دادند [۷]. بررسی سرعت ذرات در نقطه‌ای مشخص از تاج تونل، حداکثر تنش ایجاد شده در مدت زمان بارگذاری انفجاری و میزان جذب انرژی انفجاری توسط مقاطع تونل‌ها مورد بررسی پرداخته و به مقایسه هریک خواهیم پرداخت. نتایج نشان می‌دهد تنش فون میزس در تونل با مقطع مستطیلی به دلیل تمرکز تنش در کناره‌ها از سایر تونل‌ها بیشتر است. همچنین تونل با مقطع دایروی با بالاترین جذب انرژی حاصل انفجار عملکرد مناسبی در مقایسه با مقاطع مستطیلی و نعل اسبی از خود نشان داد.

تعیین ستون بحرانی در پدیده فروپاشی پیش‌رونده در قاب خمشی فولادی با ملاحظه اثر اندرکنش خاک و سازه به دو روش مستقیم و غیر مستقیم توسط امامی و حسینی تحت بارگذاری انفجاری در سال ۱۴۰۲ انجام شده است [۸]. پارامترهای مختلفی مانند ضریب رفتار، برش پایه، تغییر مکان نقطه عملکرد و تغییر مکان بالای گره حذف شده و گسترش مفاصل پلاستیک به‌عنوان شاخص‌های ارزیابی مطرح شدند. نتایج این تحقیق نشان دادند که ستون‌های گوشه وضعیت بحرانی‌تری دارند. تحلیل رفتار پانلهای سه بعدی ساختمانی تحت بارگذاری انفجاری تحقیق دیگری است که توسط اعلمی و گل‌محمدی در سال ۱۴۰۳ انجام شده است [۹]. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از شبکه مش فولادی به شکل الیه زنبوری و فرم محدب برای پوسته پانل، بهترین حالت برای افزایش مقاومت آن در برابر انفجار است. همچنین، نوع ماده پرکننده و ابعاد پانل نیز تاثیر قابل توجهی بر رفتار آن در برابر بارگذاری انفجاری دارند.

پرسش اصلی تحقیق این است که آیا اثر اندرکنش خاک و سازه بر رفتار سازه تحت بارگذاری انفجاری تاثیرگذار است؟ چنانچه پاسخ مثبت است این تاثیر در مدلسازی به چه صورتی قابل ارزیابی است و آیا اثرات تحلیل حساسیت فاصله و میزان بار قابل بررسی است؟ هدف اصلی این تحقیق نیز پاسخ به این سوالات با استفاده از مدلسازی عددی می‌باشد. فرضیه اصلی تحقیق حاضر نیز اهمیت اثر اندرکنش خاک و سازه در رفتار سازه بر مبنای پیوست پنجم آیین‌نامه ۲۸۰۰ است.

با توجه به آنکه تحلیل حساسیت اثر فاصله و بار انفجاری بر سازه‌های بتنی با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه بسیار مهم است، هدف اصلی تحقیق حاضر به توضیح و تفسیر این مدلسازی می‌پردازد. مجموعه اطلاعات این تحقیق در نرم‌افزارهای *ETABS* و *ABAQUS* مدلسازی

شده است. بخش اول مقاله حاضر به مقدمه و مروری بر ادبیات فنی تحقیق پرداخته است. در بخش دوم این مقاله، به معرفی و تعریف مبانی نظری تحقیق این مقاله پرداخته شده است. بخش سوم به روش تحقیق و نحوه انجام آن پرداخته است. سپس در بخش چهارم نتایج مدلسازی تحقیق بررسی شده است و در نهایت در بخش پنجم نیز به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری پرداخته است.

۲- مبانی نظری تحقیق

به طور کلی تغییرشکل‌های یک سازه ناشی از زلزله تحت تاثیر اندرکنش سه سیستم مرتبط با همدیگر سازه، فونداسیون و مشخصات لایه های خاک زیر و اطراف فونداسیون می‌باشد و آنالیز اندرکنش خاک- سازه پاسخ این سیستم‌ها را به حرکت زمین در میدان آزاد مورد ارزیابی قرار می‌دهد. مکانیزم‌های اندرکنش ما بین سازه- خاک شامل دو قسمت اندرکنش اینرسی و اندرکنش سینماتیکی می‌باشد. اثر اینرسی در سازه که ناشی از ارتعاشات خود سازه است باعث می‌شود تا در پایه ی سازه برشی و لنگر به وجود آید. به بیان دیگر ارتعاش سازه و نیروی اینرسی ناشی از آن باعث ایجاد حرکات جدیدی در شالوده خواهد شد. تحلیل اثر اندرکنش خاک- سازه، روش‌های مختلفی وجود دارد که عبارتند از:

روش المان‌های محدود، روش المان‌های مرزی، روش‌هایبرید یا پیوندی و روش زیر سازه [۱۰].
 که از روش‌های فوق به دو روش المان‌های محدود و روش زیر سازه اشاره می‌شود. به طور کلی روش‌های تحلیل اندرکنش خاک- سازه را می‌توان به دو گروه اصلی روش‌های مستقیم و روش زیر سازه طبقه‌بندی نمود. در روش مستقیم سازه و خاک هر دو با همدیگر مدل می‌شوند و تحلیل در یک گام صورت می‌گیرد. غالباً خاک با المان‌های *Solid* و سازه با المان‌های *Beam* المان‌بندی می‌گردند. به دلیل اینکه در این حالت فرضیه جمع آثار قوا لازم نمی‌باشد، آنالیزهای غیرخطی حقیقی ممکن می‌گردند. البته آنالیزهای غیرخطی می‌تواند نسبت به پارامترهای مدل خاک که به طور ناقص تعریف شوند، کاملاً حساس باشد (ممکن است با کم توجهی نتایج غلطی با بار آید) همچنین این نوع آنالیز از نقطه نظر محاسباتی کاملاً گران تمام می‌شوند، بنابراین آنالیزهای مستقیم *SSI*، بیشتر با استفاده از روش‌های خطی معادل با تقریب اثرات غیرخطی خاک انجام می‌گردند [۱۱].

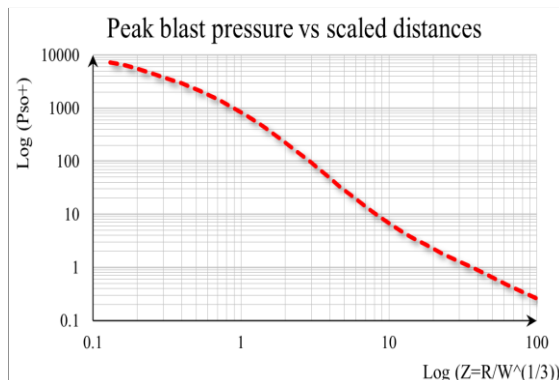
مزیت اصلی روش زیر سازه، قابلیت انعطاف‌پذیری آن می‌باشد و به دلیل مستقل بودن هر مرحله (گام) از سایر مراحل دیگر، آنالیز می‌تواند بر روی وضعیت‌های مهم مسئله متمرکز شود. آنالیزهای اندرکنش اینرسی تفاوت ضریب میرایی و پریود را در مود اول ارتعاش مابین پایه انعطاف‌پذیر (که شامل انعطاف‌پذیری دو سیستم خاک- فونداسیون می‌شود) و حالت پایه فیکس شده غیر واقعی (که فقط شامل انعطاف‌پذیری سازه می‌شود) را نشان می‌دهد. پارامترهای مودال پایه انعطاف‌پذیر می‌تواند با استفاده از طیف پاسخ میدان آزاد نیروهای برشی طراحی پایه سازه را مورد ارزیابی قرار گیرد. بنابراین این آنالیزها منطبق با گام‌های ۲ و ۳ از روش زیر سازه می‌باشند. اما آنالیزهای اندرکنش سینماتیکی (گام ۱ روش زیر سازه) دامنه‌های تابع تبدیل وابسته به فرکانس را که حرکت‌های فونداسیون و میدان آزاد را به همدیگر مربوط می‌سازد بیان می‌کند. مقررات *ATC* و *NEHRP* که شامل آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای می‌شوند در مورد *SSI* مشابه قسمت‌هایی از مراحل تحلیل اندرکنش اینرسی توضیح داده شده می‌باشند [۱۲]. در این آیین‌نامه‌ها از اثرات سینماتیکی چشم‌پوشی شده است. و این بدین معنی است که فرض می‌شود حرکت‌های میدان آزاد و *FIM* یکی باشند. با توجه به حجم بالای مطالب قابل‌ارایه در این مقاله، بیشتر به مبانی نظری تحقیق اشاره نشده است. در مجموع مدلسازی اثر اندرکنش خاک و سازه به روش مستقیم با استفاده از تئوری اجزایمحدود انجام شده و بارگذاری انفجاری نیز در بخش روش تحقیق‌ارایه شده است [۱۳].

۳- روش تحقیق

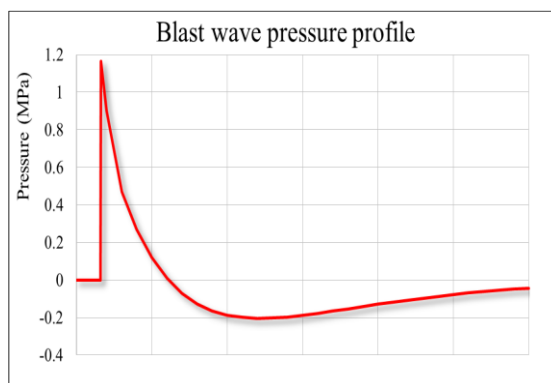
بطور کل، بعد از انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی روی مدل سازه‌ای مورد نظر، رفتار بار-تغییرمکان، تنش، محل‌های ایجاد مفاصل پلاستیک و میزان جذب انرژی آن تحت اثر بارهای انفجار تعیین می‌شود و تأثیر اعمال نیروی انفجار روی رفتار سیستم بررسی می‌شود. همچنین انواع خرابی ممکن در این ساختار معرفی می‌شود و در نهایت توصیه‌های لازم جهت طراحی مهندسی بیان می‌شود. بطور خلاصه مراحل انجام تحقیق در این مقاله عبارتست از: ۱- مدل‌سازی عناصر محدود سه‌بعدی قاب خمشی بتنی متوسط کوتاه مرتبه (۳ طبقه)، میان مرتبه (۷ طبقه) و بلندمرتبه (۱۵ طبقه)، ۲- تحلیل پایداری استاتیکی مدل‌ها تحت بارهای ثقلی، ۳- آنالیز دینامیکی مدل‌ها تحت اثر بارهای انفجار، ارائه نتایج مربوط به تأثیر پارامترهای مؤثر در پایداری سازه، ۴- تعیین مکانیزم‌های مختلف خرابی شامل خرابی موضعی و خرابی کلی، ۵- ارائه نتایج مربوط به اثرات کششی و فشاری بار انفجار بر واکنش‌های تکیه‌گاهی و ۶- مقایسه پاسخ سازه در حالت با و بدون در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه.

برای یافتن ماکزیمم مقدار بار انفجار نیز از پارامتر مقیاس *Z* استفاده می‌شود و پس از محاسبه *Z*، مقدار بیشینه فشار وارده از نمودار شکل (۱) استخراج می‌شود و نمودار شکل (۲) به مقدار بدست آمده مقیاس می‌شود و بصورت طیف فشار، بر وجه سازه که رو به انفجار قرار دارد اعمال می‌شود [۱۴].

تحلیل حساسیت اثر فاصله و بار انفجاری بر سازه‌های بتنی با ...



شکل ۱- بیشینه فشار انفجار در برابر فاصله مقیاس شده



شکل ۲- طیف بارگذاری انفجار برای حالت $Z=0.5$

طیف نیروی ارائه شده در شکل (۲) مربوط به ۱۰۰ کیلوگرم TNT با انفجار در فاصله ۲.۳۵ متری از سازه می‌باشد. لذا با اعمال مقادیر فوق در رابطه $Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}}$ مقدار فاصله معادل Z برابر با ۰.۵ بدست خواهد آمد. جامعه آماری مطالعه حاضر عبارتست از رفتار دینامیکی تمامی سازه‌های بتن آرمه که بر روی خاک سخت بنا شده‌اند، در مواجهه با بارهای انفجاری [۱۵]. لذا نمونه‌هایی که در این مطالعه مورد بررسی قرار داده می‌شوند عبارت خواهند بود از سه سازه قاب خمشی بتنی متوسط کوتاه مرتبه (۳ طبقه)، میان مرتبه (۷ طبقه) و بلندمرتبه (۱۵ طبقه) و در حالات مختلف با و بدون درنظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه. به منظور بررسی اثر اندرکنش خاک و سازه بر رفتار قاب‌های بتنی طبق آیین‌نامه لرزه‌ای، ابتدا ۳ مدل طراحی کرده که در تعداد طبقات ۳، ۷، ۱۵ طبقه دسته‌بندی می‌شوند. در هر کدام از این سه گروه، نمونه‌ها به صورت سه‌بعدی در نرم‌افزار *Etabs* آنالیز و طراحی می‌شوند. سپس یک قاب از مدل‌های طراحی شده در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده و عملکرد آنها در دو حالت با و بدون اندرکنش خاک و سازه ارزیابی شده و پارامترهایی نظیر حداکثر تغییر مکان بام، میزان ظرفیت باربری و تنش در مورد مدل‌ها با هم مقایسه می‌گردند. برای آنالیز و بارگذاری لرزه‌ای مدل‌ها، از استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم و آیین‌نامه *ASCE/SEI 7-10* استفاده شده است. برای طراحی سازه‌های این فصل از ضوابط موجود در آیین‌نامه طراحی *AISC 360-05* آمریکا برای سازه‌های آنالیز شده با آیین‌نامه‌های ایران و آمریکا استفاده می‌شود. به منظور ارزیابی لرزه‌ای مدل‌ها از ضوابط موجود در نشریه ۳۶۰ و همچنین *FEMAP695* و آیین‌نامه *ASCE/SEI 41-13* بهره‌برداری شده است.

۱-۳- مدل مفهومی تحقیق

در این تحقیق، با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی اجزای محدود، رفتار قاب‌های خمشی بتنی با ارتفاع‌های مختلف (سه، هفت و پانزده طبقه) تحت اثر بارهای انفجار مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا تحلیل‌های استاتیکی برای ارزیابی پایداری اولیه سازه‌ها تحت بارهای ثقلی انجام می‌شود.

سپس تحلیل دینامیکی غیرخطی برای شبیه‌سازی پاسخ سازه‌ها در برابر بار انفجار صورت می‌گیرد. در این مرحله، منحنی‌های بار-تغییرمکان، محل ایجاد مفاصل پلاستیک، میزان جذب انرژی، و واکنش‌های تکیه‌گاهی به‌دست می‌آید. همچنین، با مقایسه نتایج در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه، تأثیر شرایط مرزی بر عملکرد سازه تحلیل می‌شود. در ادامه اجزای مختلف مدل مفهومی تحقیق حاضر معرفی می‌گردد:

ورودی‌ها (*Input Variables*): نوع سازه: قاب خمشی بتنی. تعداد طبقات: ۳، ۷، و ۱۵ طبقه. نوع بارگذاری: بارهای ثقلی، بارهای انفجاری با شدت‌های مختلف، شرایط مرزی و تکیه‌گاهی، اندرکنش خاک و سازه (در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن)، مشخصات مصالح و المان‌های سازه‌ای.

فرآیندها (تحلیل و ارزیابی): ۱. مدل‌سازی سه‌بعدی اجزای محدود برای سازه‌های سه ارتفاع مختلف. ۲. تحلیل استاتیکی برای بررسی پایداری اولیه سازه‌ها تحت بارهای ثقلی، ۳. تحلیل دینامیکی غیرخطی تحت بارهای انفجار جهت بررسی رفتار زمانی و مکان‌یابی نقاط آسیب‌پذیر. ۴. بررسی مکانیسم‌های خرابی: خرابی موضعی (*Local Failure*). خرابی کلی (*Global Collapse*). ۵. ارزیابی پاسخ‌های سازه‌ای: منحنی بار-تغییرمکان، محل ایجاد مفاصل پلاستیک، میزان انرژی جذب‌شده، واکنش‌های تکیه‌گاهی. ۶. بررسی تأثیر اندرکنش خاک-سازه بر رفتار کلی سیستم.

خروجی‌ها (نتایج و یافته‌ها): ارزیابی عملکرد سازه در برابر بار انفجار، شناسایی نواحی آسیب‌پذیر و حساس به خرابی، مقایسه پاسخ سازه در حالت‌های مختلف (با و بدون اندرکنش خاک-سازه)، تعیین مؤثرترین پارامترها بر پایداری سازه، ارائه پیشنهادات طراحی مهندسی جهت بهبود ایمنی و عملکرد در برابر انفجار.

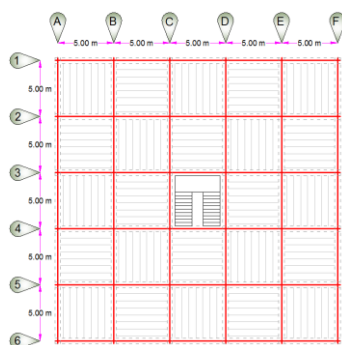
روابط اصلی در مدل مفهومی: افزایش شدت بار انفجار → افزایش مفاصل پلاستیک، انرژی جذب‌شده و احتمال خرابی، افزایش تعداد طبقات → تغییر در نوع مکانیسم خرابی (از موضعی به کلی)، در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه → تغییر در واکنش‌های تکیه‌گاهی و پاسخ کلی سازه.

برای گردآوری داده‌ها در این تحقیق از روش‌های عددی و شبیه‌سازی‌های کامپیوتری استفاده شده است. ابزار اصلی گردآوری داده‌ها، نرم‌افزارهای تحلیل اجزای محدود مانند *SAP2000*، *ABAQUS* یا *ETABS* هستند که امکان مدل‌سازی دقیق رفتار غیرخطی مصالح و سازه‌ها را فراهم می‌سازند. با استفاده از این نرم‌افزارها، قاب‌های خمشی بتنی با تعداد طبقات مختلف (کوتاه‌مرتبه، میان‌مرتبه و بلندمرتبه) تحت بارهای انفجاری مختلف مدل‌سازی شده و پاسخ‌های دینامیکی نظیر تغییرمکان، تنش، محل مفاصل پلاستیک، و میزان انرژی جذب‌شده استخراج می‌گردند. اطلاعات مربوط به ویژگی‌های مصالح، مشخصات هندسی و شرایط مرزی از استانداردها و منابع مهندسی معتبر گرفته شده‌اند.

نحوه تحلیل داده‌ها در این تحقیق بر مبنای تحلیل مقایسه‌ای و توصیفی است. ابتدا تحلیل‌های استاتیکی برای ارزیابی پایداری اولیه سازه‌ها تحت بارهای ثقلی انجام می‌شود و سپس تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی برای بررسی اثر بارهای انفجاری صورت می‌گیرد. داده‌های به‌دست‌آمده از مدل‌سازی‌ها شامل پاسخ‌های زمانی، نمودارهای نیرو-تغییرمکان، و الگوهای خرابی سازه، با یکدیگر مقایسه شده و اثر متغیرهایی نظیر شدت انفجار، ارتفاع سازه و اندرکنش خاک و سازه تحلیل می‌شود. در نهایت، نتایج به‌صورت نمودار و جداول ارائه شده و بر مبنای آن‌ها، پیشنهادات مهندسی برای بهبود عملکرد سازه‌ها در برابر انفجار ارائه می‌گردد.

۳-۲- مدل‌سازی در ETABS

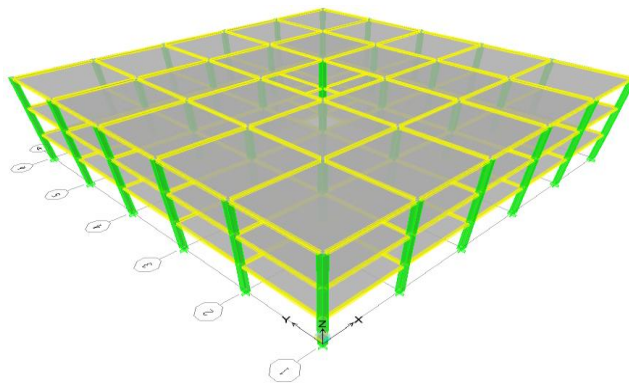
مدل‌ها به صورت سه‌بعدی در نرم‌افزار *Etabs* آنالیز طراحی می‌شوند. مدل‌ها دارای پنج دهانه ۵ متری در هر جهت می‌باشند. همچنین ارتفاع کلیه طبقات ۳ متر اختیار شده‌اند. با توجه به شکل (۳) پلان سازه منظم و اتصالات تیرها به صورت گیردار در نظر گرفته شده است.



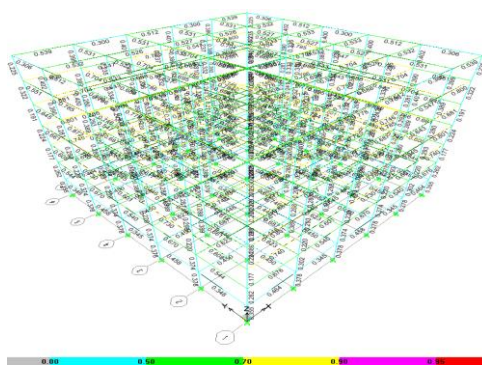
شکل ۳- پلان سازه‌های مدل‌سازی شده در این تحقیق

تحلیل حساسیت اثر فاصله و بار انفجاری بر سازه‌های بتنی با ...

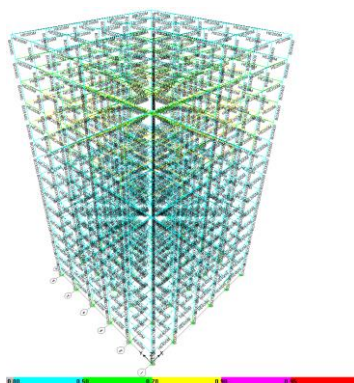
فولاد مصرفی در کلیه مدل‌ها از نوع رایج $St37$ با تنش تسلیم 400 مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. مقاومت بتن نیز 24 مگاپاسکال مدنظر قرار داده شده است [۱۶]. سایر خصوصیات مصالح نیز به صورت استاندارد بر اساس آیین‌نامه لحاظ شده است. برای آنالیز خطی مدل‌ها از روش تحلیل استاتیکی معادل استاندارد 2800 استفاده شده است. در این روش برش پایه برابر $V=CW$ می‌باشد. در این رابطه، C ضریب زلزله و W وزن لرزه‌ای سازه بر اساس فرمول استاندارد 2800 می‌باشند. آیین‌نامه‌ی $ASCE/SEI 7-10$ بارهای لرزه‌ای و ضوابط طراحی را در شرایط طبقه‌بندی طراحی لرزه‌ای (SDC) مشخص می‌کند، که تابعی از سطح زلزله طراحی (DE) و طبقه‌بندی کاربری ساختمان می‌باشد. در این تحقیق مدل‌ها به گونه‌ای بارگذاری می‌شوند که رفتار ایمنی جانی با فرض اینکه تمام ساختمان‌ها در یکی از طبقه‌بندی‌های کاربری ۱ یا ۲، با یک ضریب اهمیت مشابه مساوی واحد قرار دارند، می‌باشد [۱۷]. هر سه سازه ۳، ۷ و ۱۵ طبقه بر اساس روش‌های ارایه شده به صورت دقیق طراحی شده که جزئیات طراحی این مدل‌ها به علت جلوگیری از حجم بالای مطالب در مقاله ارایه نشده است و در صورت نیاز به صورت پیوست قابل ارایه است. نتایج مدل‌سازی و طراحی نهایی سازه‌ها نیز به همین گونه قابل ارایه خواهد بود. در این بخش به عنوان نمونه شکل‌هایی از سه سازه ۳، ۷ و ۱۵ طبقه پیش و پس از طراحی ارایه شده است. شکل (۴) مدل‌سازی سازه سه طبقه، شکل (۵) مقادیر نسبت تنش سازه ۷ طبقه و شکل (۶) نیز مقادیر نسبت تنش سازه ۱۵ طبقه را نشان می‌دهد.



شکل ۴- مدل‌سازی سازه سه طبقه به فرم سه‌بعدی



شکل ۵- مقادیر نسبت تنش سازه ۷ طبقه پس از طراحی



شکل ۶- مدل سازی و مقاطع سازه ۱۵ طبقه به فرم سه بعدی

۳-۳- مدل سازی در ABAQUS

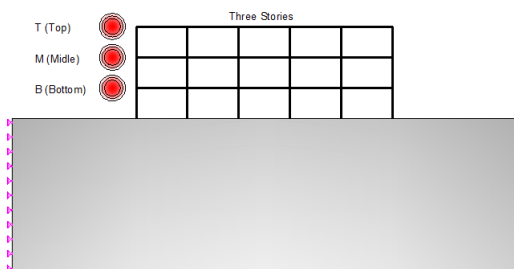
هدف اصلی در این مقاله بررسی اثرات اندرکنش خاک و سازه در رفتار سازه بتنی تحت بارگذاری انفجاری است. نرم افزار ABAQUS به علت قابلیت زیاد در زمینه مدل سازی مستقیم اثر اندرکنش خاک و سازه و همچنین قابلیت در مدل سازی بار انفجاری انتخاب شده است ولی به علت تلاش محاسباتی بالا در این نرم افزار مدل سازی سه بعدی زمان و هزینه زیادی برای کاربران دارد. بنابراین یک قاب از سازه های ۳، ۷ و ۱۵ طبقه طراحی شده توسط ETABS، با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه و مطابق با مدل های توسعه داده شده در بخش صحت سنجی، در نرم افزار آباکوس شبیه سازی شدند. بار انفجار به سه طبقه تحتانی، میانی و فوقانی هر کدام از سازه ها اعمال شد و نتایج استخراج شدند. لازم به ذکر است که پس از وقوع پدیده انفجار، موج ضربه ای از محل وقوع انفجار ساطع شده و به اطراف منتشر می شود. در هر نقطه از محیط اطراف سازه که موج انفجار به آن می رسد، فشار بطور ناگهانی به مقدار بیشینه P_m می رسد. فشار دینامیکی ناشی از موج ضربه ای بر حسب زمان، با نماد $P(t)$ نشان داده می شود. رابطه فشار بر حسب زمان معمولاً به شکل زیر است.

$$P(t) = P_m \cdot e^{\left(\frac{-t}{\theta}\right)} \quad (1)$$

$$P_m = 52.16 \left(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{S}\right)^{1.13} \quad (2)$$

$$\theta = 96.5 \left(W^{\frac{1}{3}}\right) \left(\frac{1}{S}\right)^{-0.22} \quad (3)$$

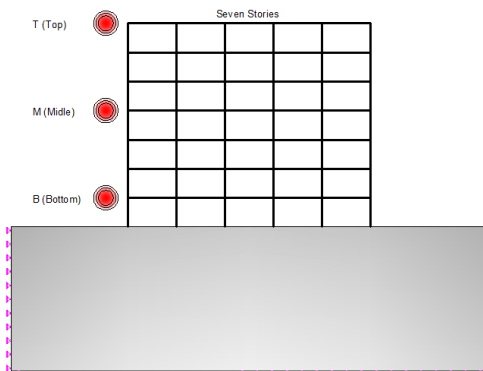
در رابطه (۱)، P_m و θ به ترتیب در روابط (۲) و (۳) ارائه شده اند. W نیز وزن ماده TNT به کیلوگرم و S فاصله محل وقوع انفجار تا سازه می باشد [۱۸]. با توجه به مطالعات پیشین بار انفجار بطور ثابت برای مقدار وزن ۱۰۰ کیلوگرم TNT و در فاصله ۱۰ سانتیمتری از سازه با توجه به رابطه ۴-۲۰ برابر با ۳۹۸۷۲۰۰۰ نیوتن برآورد می شود. همانطور که ذکر شد، بار انفجار به سه طبقه پایینی، میانی و فوقانی هر یک از سازه ها اعمال شدند. برای نام گذاری مدل ها در این بخش، ابتدا تعداد طبقات سازه با نام های 7Story، 3Story و 15Story ارائه شد. پس از آن موقعیت



شکل ۷- موقعیت های اعمال بار انفجار در سازه سه طبقه

اعمال بار انفجار بر سازه بیان شد. برای این منظور، برای موقعیت تحتانی سازه، حرف B (مخفف Bottom)، برای موقعیت میانی سازه، حرف M (مخفف Middle) و برای موقعیت فوقانی سازه، حرف T (مخفف Top) انتخاب شد. در ادامه مدل ها به همراه نتایج، شامل کانتور تنش، نمودارهای تاریخچه زمانی تغییر مکان بام سازه، تنش ستون گوشه، انرژی مستهلک شده در کل سازه و نرخ پلاستیسیته معادل کل سازه می باشند [۱۹].

تحلیل حساسیت اثر فاصله و بار انفجاری بر سازه‌های بتنی با ...



شکل ۸- موقیعت‌های اعمال بار انفجار در سازه هفت طبقه

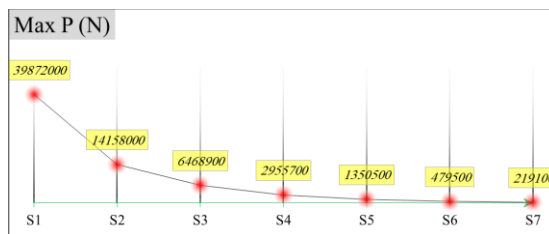
۴- تجزیه و تحلیل نتایج مدلسازی

مهمترین هدف مقاله حاضر آنالیز حساسیت اثر فاصله و بار انفجاری بر رفتار سازه بتنی با ملاحظه اثر اندرکنش خاک و سازه است. در این قسمت ابتدا اثر فاصله‌های مختلف انفجار، مقادیر فواصل مختلف انفجار از ۱۰ سانتیمتر تا ۱۰ متر بصورت متغیر در نظر گرفته می‌شود. پارامتر فاصله انفجار توسط حرف S نشان داده می‌شود. همچنین وزن ماده منفجره نیز از ۲۰ کیلوگرم تا ۱۸۰ کیلوگرم بصورت متغیر شبیه‌سازی می‌شود. مقادیر نیروی حاصل از انفجار در فواصل مختلف سازه در جدول (۱) ارائه شده است. مدل‌هایی که در آنها اثر فاصله انفجار به عنوان متغیر در نظر گرفته شده‌اند توسط S1 تا S7 نشان داده شده‌اند.

جدول ۱- مقادیر نیروی وارده تحت اثر فواصل مختلف و برای ۱۰۰ کیلوگرم ماده منفجره

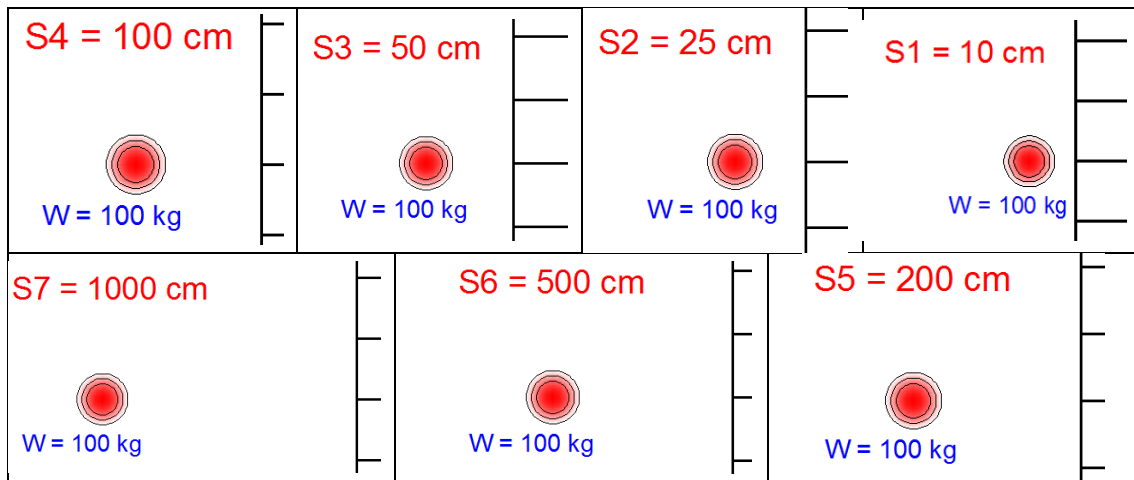
نام مدل	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
فاصله (متر)	0.10	0.25	0.50	1.00	2.00	5.00	10.00
نیرو (نیوتن)	39872000	14158000	6468900	2955700	1350500	479500	219100

برای درک بهتر اثر فاصله بر نیروی وارده در انفجار بر سازه، مقادیر نیرو در برابر شماره هر مدل در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۹- بیشینه مقدار نیروی وارده در فواصل مختلف

همانطور که از شکل فوق مشخص است، فاصله انفجار تا سازه اثر بسزایی در مقدار نیروی وارده خواهد داشت و با افزایش فاصله انفجار، نیروی وارده کاهش بسزایی می‌یابد. جدول زیر نشان دهنده مدل‌های S1 تا S7 و فاصله محل وقوع انفجار ۱۰۰ کیلوگرم ماده منفجره از سازه می‌باشد.



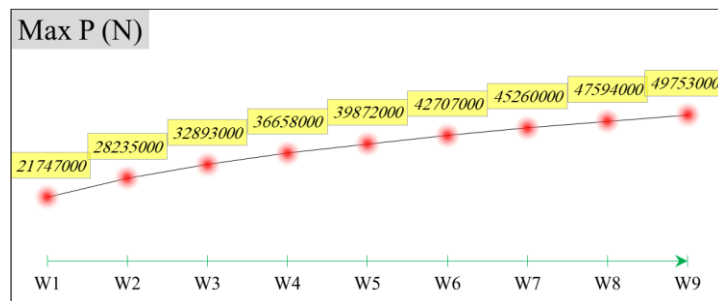
شکل ۱۰- شکل آنالیز حساسیت فاصله در مدل‌های S1 تا S7 و محل وقوع انفجار

به همین ترتیب همانطور که ذکر شد، ۹ مقدار مختلف برای وزن ماده منفجره از ۲۰ کیلوگرم تا ۱۸۰ کیلوگرم نیز برای پارامتر وزن ماده منفجره شبیه‌سازی شد که این پارامترها در جدول (۲) نشان داده‌اند.

جدول ۲- مقادیر نیروی وارده تحت اثر وزن‌های مختلف TNT و برای فاصله ۱۰ سانتیمتر

نام مدل	W5	W4	W3	W2	W1
وزن (کیلوگرم)	100	80	60	40	20
نیرو (نیوتن)	39872000	36658000	32893000	28235000	21747000
نام مدل	W9	W8	W7	W6	
وزن (کیلوگرم)	180	160	140	120	
نیرو (نیوتن)	49753000	47594000	45260000	42707000	

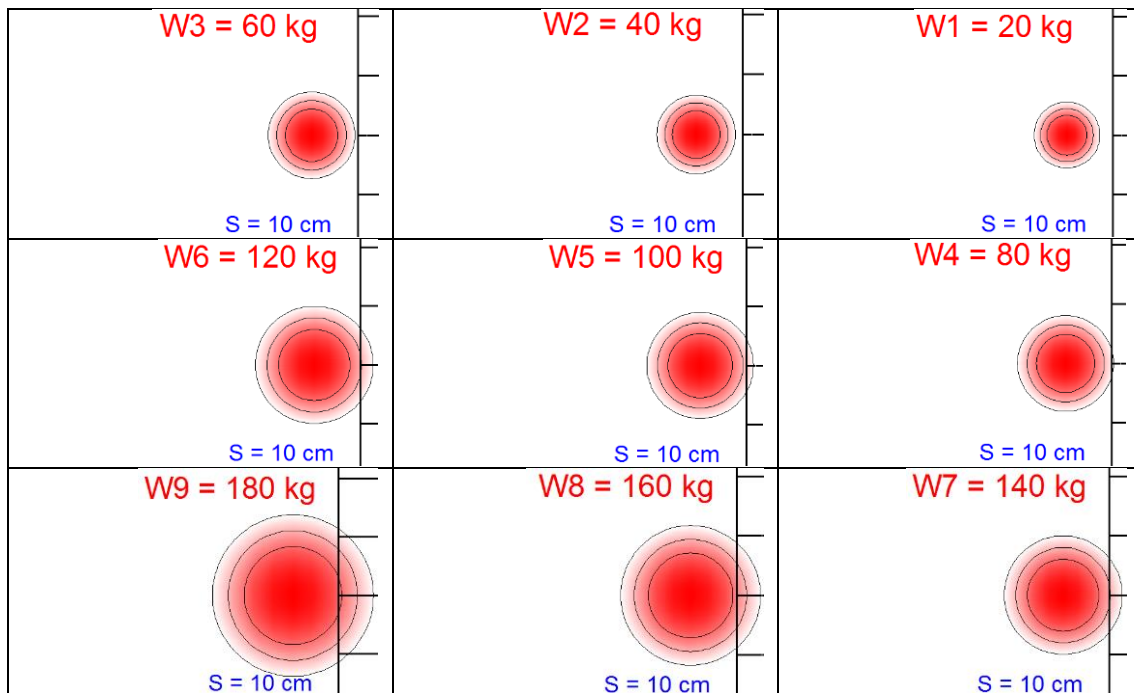
برای درک بهتر اثر وزن ماده منفجره بر نیروی وارده در انفجار بر سازه، مقادیر نیرو در برابر شماره هر مدل در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل ۱۱- بیشینه مقدار نیروی وارده در فواصل مختلف

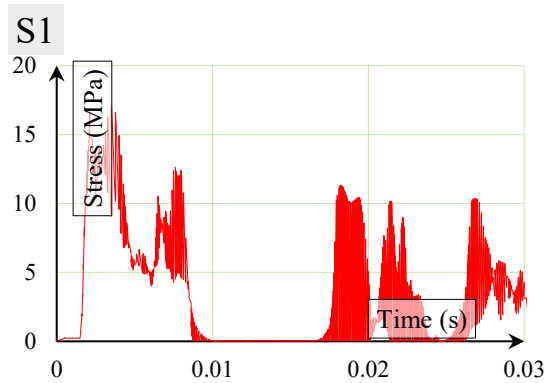
تحلیل حساسیت اثر فاصله و بار انفجاری بر سازه‌های بتنی با ...

به این ترتیب برای سازه ۷ طبقه و در حالت اعمال انفجار در وسط سازه، ۲۰ مدل ایجاد گردیده است. دلیل انتخاب سازه ۷ طبقه این است که این سازه می‌تواند نماینده مناسبی برای دو سازه ۳ و ۱۵ طبقه باشد. به این ترتیب اثر فاصله انفجار تا سازه در هفت مدل SI تا $S7$ که بر طبقه میانی سازه ۷ طبقه اعمال می‌شوند، مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. در نهایت نیز اثر وزن ماده منفجره در مدل ۹ $W1$ تا $W9$ بررسی می‌شود. لازم به ذکر است برای اعمال بار، طیف بارگذاری با حداکثر مقدار ۱ در نرم‌افزار آباکوس و بر موقیعت موردنظر سازه وارد شده و نیروی حاصل از انفجار، بصورت ضریب این طیف اعمال می‌شود.

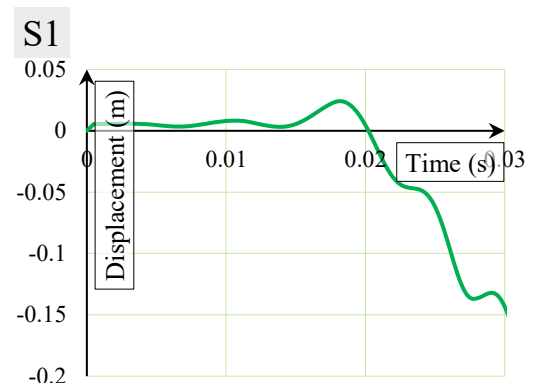


شکل ۱۲- بزرگای انفجار در اثر مقادیر مختلف اوزان TNT

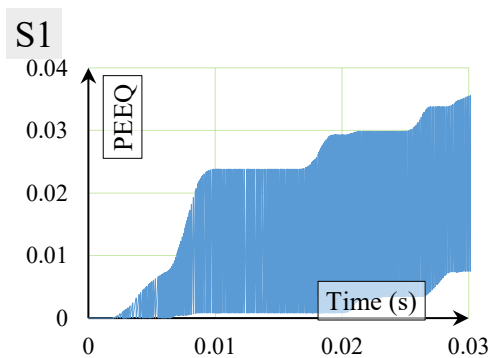
نتایج حاصل از تحلیل مدل‌های SI تا $S7$ در ادامه ارائه شده و در مورد آنها بحث می‌شود. در این مدل‌ها اثر انفجار ۱۰۰ کیلوگرم TNT بر طبقه میانی سازه ۷ طبقه و در فواصل مختلف مرکز انفجار تا سازه اعمال می‌شود. نتایج مدلسازی‌های اشاره شده در قسمت بالا برای تمامی حالت‌های ذکر شده مشابه شکل (۱۳) استخراج شده و در قالب شکل‌های (۱۴) و (۱۵) جمع‌بندی شده است.



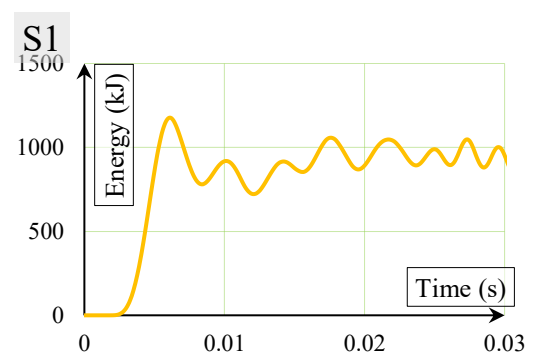
ب- تاریخچه زمانی تنش



الف- تاریخچه زمانی تغییر مکان



د- تاریخچه زمانی پلاستیسیته معادل

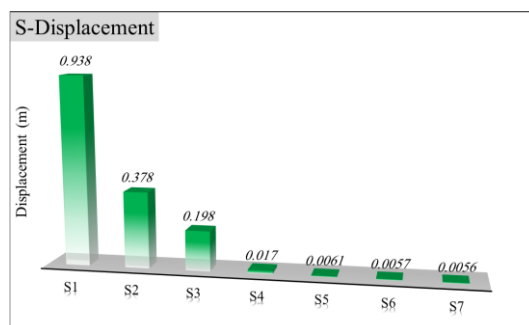


ج- تاریخچه زمانی انرژی وارده

شکل ۱۳- نتایج حاصل از تحلیل مدل S1

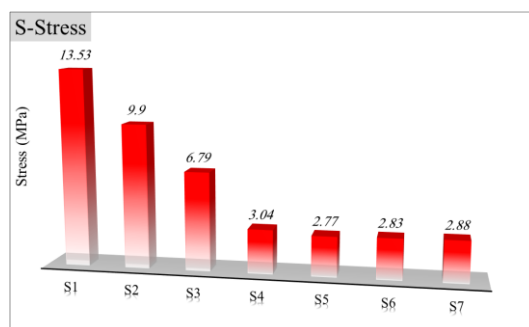
با توجه به جدول فوق مشهود است که بیشینه مقدار تغییر مکان در این حالت برابر با $0/938$ متر، بیشینه مقدار تنش وارده به قاب برابر با $13/53$ مگاپاسکال، بیشینه مقدار انرژی وارده به سازه در انفجار برابر با 2589 کیلوژول و حداکثر درصد پلاستیسیته معادل، برابر با $0/022$ بوده است. مشابه شکل‌های بالا برای تمامی حالت‌ها محاسبه شده است و در صورت نیاز به صورت پیوست قابل ارایه است. پارامترهای مختلف ارایه شده در شکل (۱۳) بر اساس حالت‌های مختلف آنالیز حساسیت در ادامه در شکل‌های (۱۴) تا (۱۷) ارایه شده است.

تحلیل حساسیت اثر فاصله و بار انفجاری بر سازه‌های بتنی با ...



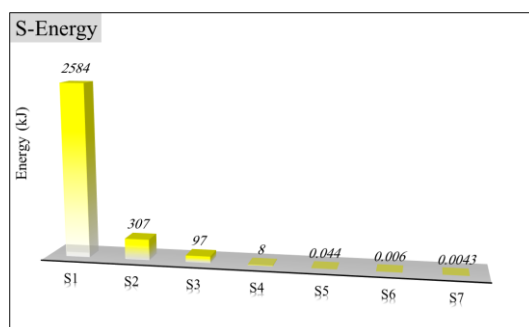
شکل ۱۴- بیشینه مقدار تغییر مکان ایجاد شده در سازه در تحلیل اثر فواصل مختلف انفجار

مشاهده می‌شود که افزایش فاصله انفجار از سازه سبب کاهش تغییر مکان ایجاد شده می‌شود و این کاهش بسیار چشمگیر می‌باشد.



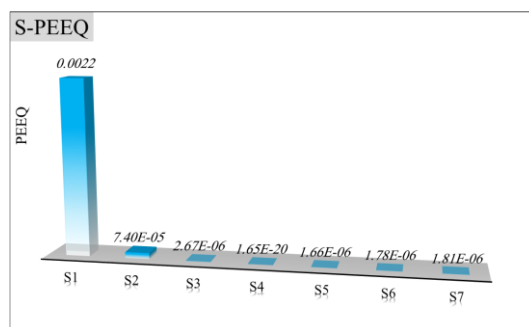
شکل ۱۵- بیشینه مقدار تنش ایجاد شده در سازه در تحلیل اثر فواصل مختلف انفجار

با توجه به نمودار فوق مشاهده می‌شود که بیشتر شدن فاصله انفجار از ۱ متر سبب افت شدید تنش وارده به سازه شده است.



شکل ۱۶- بیشینه مقدار انرژی وارده به سازه در تحلیل اثر فواصل مختلف انفجار

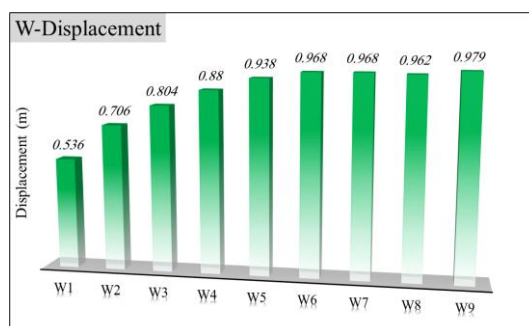
رخداد پدیده انفجار در فاصله ۱۰ سانتیمتری از سازه شوک شدیدی را به قاب وارد نموده و بیشتر شدن فاصله، اثر بسزایی در کاهش انرژی وارده به سازه خواهد داشت.



شکل ۱۷- بیشینه مقدار پلاستیسیته معادل ایجاد شده در سازه در تحلیل اثر فواصل مختلف انفجار

مشاهده می شود که نرخ پلاستیسیته معادل، روندی مطابق با انرژی وارده داشته است. افزایش فاصله انفجار، اثر بسزایی در کاهش نیروهای وارده به سازه دارد.

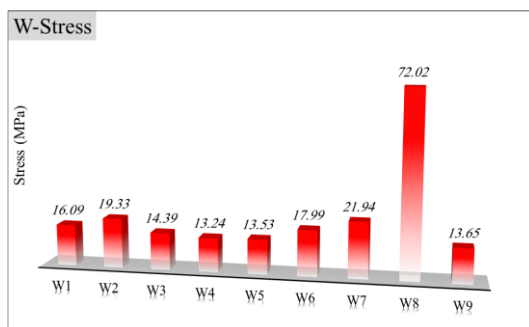
همچنین محاسبات مشابه آنالیز حساسیت فاصله انفجار برای آنالیز حساسیت بار انفجاری نیز مدلسازی و جمع بندی انجام شده است و نمودارهای شکل (۱۳) برای این مدلسازی استخراج شده است که در صورت نیاز قابل ارایه است. سپس با در نظر گرفتن نمودارهای حاصله گرافهای نتیجه گیری در قالب شکل های (۱۸) تا (۲۱) ارایه شده است.



شکل ۱۸- بیشینه مقدار تغییرمکان ایجاد شده در سازه در تحلیل اثر وزن TNT

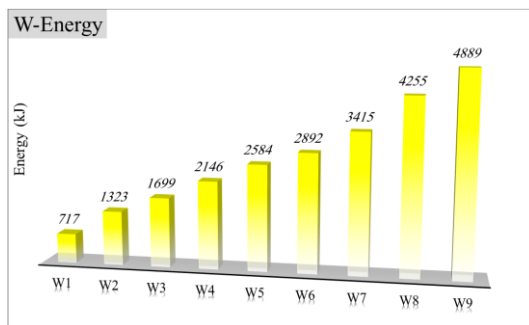
تغییرمکان ایجاد شده در سازه در مقابل مقادیر مختلف اوزان TNT روندی رو به افزایش داشته است. طیف این افزایش مطابق با نیروی محاسبه شده در هر مورد می باشد.

تحلیل حساسیت اثر فاصله و بار انفجاری بر سازه‌های بتنی با ...



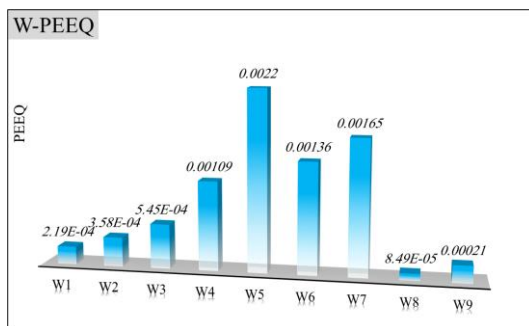
شکل ۱۹- بیشینه مقدار تنش ایجاد شده در سازه در تحلیل اثر وزن TNT

تنش ایجاد شده در سازه نیز روندی تقریباً رندوم داشته و ممکن است بتوان بطور صریح رابطه معناداری میان وزن TNT و تنش ایجاد شده ارائه نمود.



شکل ۲۰- بیشینه مقدار انرژی وارده به سازه در تحلیل اثر وزن TNT

انرژی وارده نیز با افزایش وزن ماده منفجره مطابق با افزایش مقدار نیرو، افزایش یافته است.

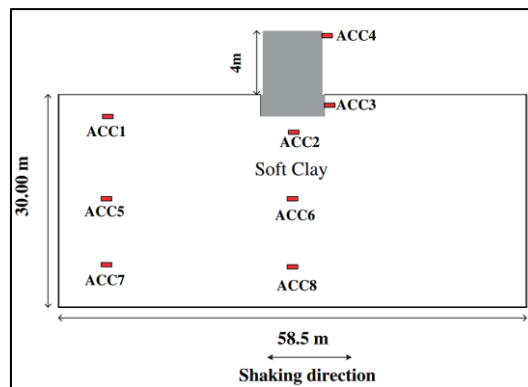


شکل ۲۱- بیشینه مقدار نرخ خرابی ایجاد شده در سازه در تحلیل اثر وزن TNT

نرخ خرابی معادل نیز با افزایش وزن ماده منفجره بیشتر خواهد شد و این افزایش بصورت نمایی رخ می‌دهد. اما در مقادیر بیشتر از ۱۰۰ کیلوگرم مقادیر با نویز همراه شده‌اند.

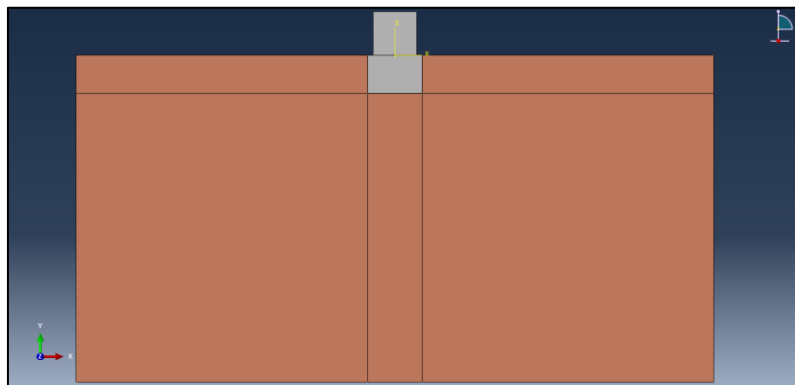
۵- صحت سنجی

برای صحت سنجی پاسخ مدل، از پژوهش ترابی و همکاران (۲۰۱۴) در رابطه با اندرکنش دینامیکی خاک-سازه در مقابل زلزله استفاده شده است [۱۹]. ترابی و همکاران یک سازه بسیار ساده سازی شده بر روی خاک را با در نظرگیری اندرکنش خاک و سازه مورد صحت بررسی قرار دادند. ایشان با اعمال لرزه نورث ریچ بر مدل، پاسخ سازه شامل نمودار تاریخچه زمانی شتاب ایجاد شده در سازه را ارائه نمودند.



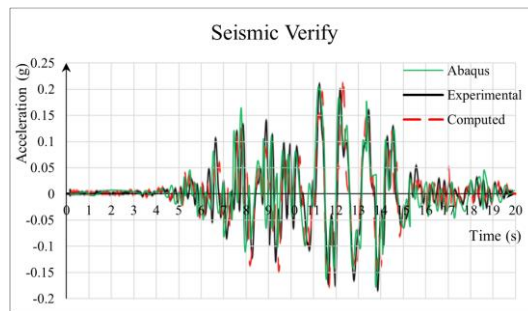
شکل ۲۲- مدل پژوهش ترابی به همراه جهت اعمال زلزله

این مدل در نرم افزار آباکوس بصورت پوسته شبیه سازی شد که هندسه آن در شکل (۲۳) مشاهده می‌شود.



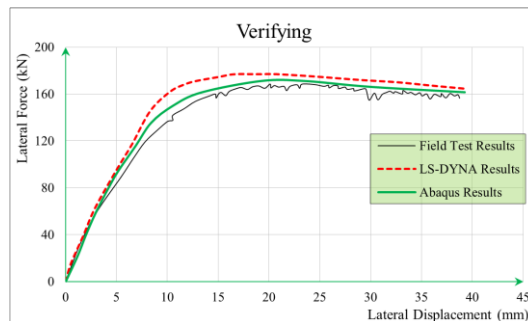
شکل ۲۳- مدل شبیه سازی شده در نرم افزار آباکوس مطابق با مدل پژوهش ترابی

با روی هم گذاری نتایج حاصل از مطالعه ترابی و مدل حاضر، نمودارهای شکل (۲۴) حاصل شدند.



شکل ۲۴- پاسخ نوک انتهایی سازه در پژوهش حاضر توسط نرم افزار آباکوس و مقایسه با نتایج ترابی

روند اوج و فرود بدست آمده در نرم‌افزار آباکوس، تشابه بسیار زیادی با نتایج بدست آمده از پژوهش ترابی داشته است. همچنین مقدار اوج شتاب ایجاد شده در سازه در پژوهش ترابی در ثانیه ۱۱.۲ به مقدار ۰.۲۱ شتاب ثقل رخ داده است. در مدل اجزای محدود نیز این مقدار شتاب در ثانیه ۱۱.۲ با خطای ناچیز ۰.۴۷ درصد و به مقدار ۰.۲۰۹ شتاب گرانش محاسبه شده است که حاکی از صحت و دقت مدل ایجاد شده اجزای محدود می‌باشد. به همین ترتیب با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، مدل آزمایشگاهی اجرا شده در رساله دکتری Zhang مورد صحت سنجی قرار داده می‌شود. در این پژوهش ستون‌های مرکب فولادی-بتنی *CFDST* با بتن با مقاومت بالا *UHPC* تحت بار انفجار قرار داده شدند [۲۰]. که در شکل (۲۵) مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است در این پژوهش تنها از مقطع مستطیلی برای صحت سنجی استفاده خواهد شد.



شکل ۲۵- مقایسه پاسخ بدست آمده از اجزای محدود و نتایج مطالعه میدانی و عددی Zhang

مشاهده می‌شود که در مدل کالیبره شده توسط Zhang به مقدار ۵ درصد خطا میان حداکثر مقدار پاسخ نرم‌افزار *LS-DYNA* و نمونه آزمایش شده وجود دارد [۲۱]. اما با شبیه‌سازی دقیق‌تر این پدیده در آباکوس، مقدار خطا به ۱ درصد کاهش داده شده است.

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با رشد سریع شهرنشینی و محدودیت فضای شهری، نیاز به ساخت سازه‌های بلند بیش از پیش احساس می‌شود؛ به‌ویژه در مناطقی با خاک سخت که بخش زیادی از سازه‌های موجود را شامل می‌شوند. از سوی دیگر، با توجه به موقعیت ژئوپلیتیکی ایران، بررسی عملکرد سازه‌ها در برابر تهدیداتی مانند انفجار، از اهمیت بالایی برخوردار است. این پژوهش با هدف تحلیل عملکرد قاب‌های خمشی بتنی احداث‌شده بر روی خاک سخت در برابر بارهای انفجاری انجام شده است.

مطالعه حاضر در ابتدا به معرفی سازه‌های مورد بررسی و مفهوم بارگذاری انفجاری پرداخت، سپس پیشینه پژوهش‌ها و مبانی نظری تحلیل این سازه‌ها مرور شد. در ادامه، فرآیند مدل‌سازی اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار آباکوس شرح داده شد و اعتبارسنجی نتایج صورت گرفت. تحلیل دینامیکی مدل‌های سه، هفت و پانزده طبقه نشان داد که شدت انفجار، ارتفاع سازه و اندرکنش خاک و سازه تأثیر بسزایی در رفتار کلی سیستم دارند. در پایان نیز، نتایج کلی تحقیق و پیشنهادهایی برای مطالعات آینده ارائه گردید. در این پژوهش، از مدل‌های رفتاری پیشرفته مصالح در جعبه‌ابزار نرم‌افزار *ABAQUS* بهره گرفته شد که به‌عنوان یکی از دقیق‌ترین ابزارهای تحلیل اجزای محدود شناخته می‌شود. با استفاده از این نرم‌افزار، تحلیل‌های دقیقی بر روی قاب‌های خمشی بتنی انجام شد و نتایج عددی به‌دست‌آمده با نتایج پژوهش‌های ترابی و همکاران (۲۰۱۴) و ژانگ (۲۰۱۷) مورد مقایسه قرار گرفت. انطباق مناسب داده‌ها و خطای کمتر از یک درصد در برخی موارد، صحت مدل‌سازی عددی را تأیید کرد و شرایط لازم برای توسعه مدل در ارتفاع‌های مختلف (۳، ۷ و ۱۵ طبقه) فراهم شد.

نتایج تحلیل‌ها نشان داد که با افزایش ارتفاع سازه، تغییرمکان‌ها و میزان جذب انرژی به‌طور محسوس افزایش می‌یابد؛ به‌ویژه در سازه ۱۵ طبقه، بیشترین تغییرمکان‌ها مشاهده شد. همچنین بررسی نواحی پلاستیسیته در تحلیل‌ها نشان داد که محل بروز خرابی با افزایش تعداد طبقات دچار جابجایی می‌شود. در سازه ۳ طبقه، خرابی عمدتاً در طبقات بالایی، در سازه ۷ طبقه در میانه، و در سازه ۱۵ طبقه بیشتر در طبقات پایینی متمرکز بود. این الگوها بیانگر اهمیت شناسایی نواحی بحرانی در طراحی مقاوم‌سازی هستند و نشان می‌دهند که محل آسیب بسته به ارتفاع سازه، نیازمند توجه و تقویت خاصی در طراحی است.

الگوی تغییرمکان‌های بزرگ در سازه‌ها بسته به تعداد طبقات متفاوت است؛ به‌طوری که در سازه کوتاه‌مرتبه ۳ طبقه، بیشترین جابجایی در طبقات فوقانی، در سازه میان‌مرتبه ۷ طبقه در طبقات میانی، و در سازه بلندمرتبه ۱۵ طبقه در طبقات پایینی مشاهده شد. این روند بیانگر تفاوت در انتقال نیرو و تمرکز آسیب در سازه‌های با ارتفاع‌های مختلف است که در طراحی مقاوم‌سازی باید به‌صورت ویژه در نظر گرفته شود. همچنین مشخص شد که هرچند دامنه نیروی کششی در فاز دوم بارگذاری انفجاری کمتر از فاز اولیه فشاری است، اما در مرحله فشار معکوس نیز خرابی قابل‌توجهی به سازه وارد می‌شود، که نشان‌دهنده اهمیت در نظر گرفتن هر دو فاز بار انفجار در تحلیل‌هاست.

تحلیل‌های انجام‌شده با در نظرگیری اندرکنش خاک و سازه و شرایط مرزی واقعی، با استفاده از نرم‌افزار *ABAQUS*، پاسخ‌های بسیار نزدیکی به شرایط فیزیکی واقعی ارائه داد، مشروط بر آن‌که پارامترهای هندسی و مکانیکی مصالح به‌درستی تعریف شوند. از مهم‌ترین اثرات انفجار بر سازه‌ها، خرابی موضعی اولیه و سپس تخریب کلی سازه است؛ با این حال، ویژگی‌هایی مانند ابعاد هندسی، مقاومت فشاری، و ظرفیت جذب انرژی نقش کلیدی در عملکرد نهایی سازه دارند. همچنین، بین میزان انرژی جذب‌شده و تغییرمکان‌ها با شدت انفجار و فاصله آن رابطه معناداری وجود دارد؛ به‌طوری که با افزایش فاصله یا کاهش بار انفجار، پاسخ سازه‌ای نیز کاهش می‌یابد. تنش‌های ایجادشده نیز تحت‌تأثیر مودهای حرکتی مختلف، دارای نوسانات زیادی هستند. در نهایت، کاهش نرخ پلاستیسیته با افزایش فاصله انفجار، نشان داد که فاصله‌گذاری مناسب یکی از عوامل کلیدی در کاهش خرابی است و باید در پژوهش‌های آتی مورد بررسی دقیق قرار گیرد.

References

- 1- Radkia, S., Abbas Gandomkar, F., & Rahnavard, R. (2019). *Seismic Response of Asymmetric Sliding Steel Structure with Considering Soil-Structure Interaction Effects*. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 6(Issue 3), 105-120. doi: 10.22065/jsce.2018.105638.1384. In persian.
- 2- Torabi Kanibaghi, M., Kargar, S. H., 2016, *Seismic design response investigation of reinforced concrete structures with steel shear wall considering the effect of soil-structure interaction*, 3rd Annual National Conference on Mechanical Engineering and Industrial Solutions, Mashhad, Arg. In persian.
- 3- Abbasian, M., & shaporian, S. (2023). *Presenting a Model to Identify the Relationship Between Effective Factors in the Construction and Establishment of Field Hospitals with a Passive Defense Approach*. *Passive Defense*, 14(4), 75-83. In persian.
- 4- Rahgozar, Peyman and Marandi, Seyed Morteza, 2015, *Analysis of soil-structure interaction in adjacent tall structures*, 10th International Congress on Civil Engineering, Tabriz, <https://civilica.com/doc/364642>. In persian.
- 5- Behrouzi, Naser and Babaali, Hamidreza, 2019, *Investigation of the effect of carbon polymer fibers on the reinforcement of composite shear walls against blast waves in cases with and without soil-structure interaction*, Sixth National Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management and Fifth Specialized Exhibition of Housing and Building Mass Producers of Tehran Province, Tehran, <https://civilica.com/doc/927318>. In persian.
- 6- Kazemiini, Omid and Ramezanpour, Mohammad Ali, 2019, *Investigation of the effect of soil-structure interaction on the behavior of concrete structures with a central core under explosive load*, Third International Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Management, <https://civilica.com/doc/1041275>. In persian.
- 7- Taghavi Parsa, Mohammad Hossein and Nodeh Farahani, Rasoul, 2012, *Evaluation of Dynamic Behavior of Frequently Used Sections of Urban Tunnels under Explosion Scenarios of Different Volumes of TNT Deep in the Soil*, <https://civilica.com/doc/1590402>. . In persian.
- 8- EmamiKorandeh, M., & Hosseini, S. A. (2022). *Determination of the Critical Column in the Phenomenon of Progressive Collapse of the Steel Bending Frame Considering the Effect of Soil-Structure Interactions with both the Direct and Indirect Methods*. *Passive Defense*, 13(2), 1-13. In persian.
- 9- Aalami, Mohammad and Golmohammadi, Amirhossein, 1403, *Analysis of the behavior of three-dimensional building panels under explosive loading*, 13th International Conference on Interdisciplinary Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management of the 21st Century, Tehran, <https://civilica.com/doc/2203964>. In persian.
- 10- Hassanvand, P., & Hosseini, M. (2023). *Strengthening of Reinforced Concrete Bridge Columns Against Blast Loading and Comparison of Different Methods of Strengthening*. *Passive Defense*, 14(3), 27-39. In persian.
- 11- Mokhtari, M., & Ebrahimi, M. (2022). *Numerical Assessment of the Reinforced Ultra-High Performance Concrete Slab Subjected to Blast loading*. *Passive Defense*, 13(2), 15-23. In persian.
- 12- Mahmoudzadeh, M., Shidaei, M. R., 2014, *Effects of soil-structure interaction in response to earthquakes of double short steel systems*, 2nd International Conference and 6th National Conference on Earthquakes and Structures, Kerman, Kerman University Jihad. In persian.

- 13- Shorestani, S., Soltani, F., Ghasemi, M., Meadarami, S., 2015, *Parametric studies of isolated structures at the foundation considering the effects of soil-structure interaction*, Second International Conference on New Research Findings in Engineering Civil Engineering, Architecture and Urban Management, Tehran, International Confederation of Inventors of the World (IFIA), University of Applied Sciences. In persian.
- 14- Taghavi Parsa, M. H., & Nodeh Farahani, R. (2022). *Evaluation of dynamic behavior of sections of widely used urban tunnels under the scenario of explosion of different volumes of TNT in the soil depth*. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 9(4), 164-181. doi: 10.22065/jsce.2021.250210.2254. In persian.
- 15- Taghavi Parsa, M., & Peyman, S. (2019). *Analysis of the Effect of Buried Explosive Loading on Underground Reinforced Concrete Structures*. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 51(1), 3-18. doi: 10.22060/ceej.2018.12858.5288. In persian.
- 16- Abbasi Karafshani, Saeed; Alireza Ardakani and Mansour Lakhrian, 2014, *investigation of the effect of near-field earthquakes on the seismic response of the soil-piles-structure system*, the second national conference on soil mechanics and foundation engineering, Qom, Qom University of Technology.
- 17- Behrouzi, Nasser and Baba Ali, Hamidreza, 2018, *investigation of the effect of carbon polymer fibers on the strengthening of composite shear walls against blast waves in the states with and without soil-structure interaction*, the 6th National Conference on Applied Researches in Civil Engineering, Architecture and Urban Management and the 5th Mass specialized exhibition of housing and building builders in Tehran Province, Tehran, <https://civilica.com/doc/927318>.
- 18- EmamiKorandeh, M., & Askari, B. (2023). *The Effect of BRB and CBF Braces on Seismic Behavior of Steel Structures under Near Field Earthquakes*. *Passive Defense Quarterly*, 14(1), 139-148.
- 19- Peyman Rahgozar and Seyed Morteza Marandi, 2014, *Analysis of soil-structure interaction in adjacent tall structures*, 10th International Congress of Civil Engineering, Tabriz, Tabriz University, Faculty of Civil Engineering.
- 20- Emami, M. (2014). *Modelling and Prediction of Coarse Grained Alluvium behavior by pressuremeter test results and Laboratory chamber (Doctoral dissertation, Doctoral Dissertation, Tarbiat Modares University, Tehran. Iran)*.
- 21- Torabi, H., & Rayhani, M. T. (2014). *Three-dimensional finite element modeling of seismic soil-structure interaction in soft soil*. *Computers and Geotechnics*, 60, 9-19.
- 22- Wang, H. F., & Zhang, R. L. (2021). *Dynamic structure-soil-structure interaction of piled high-rise buildings under earthquake excitations I: Influence on dynamic response*. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 18.
- 23- Tabatabaiefar, H, R., Fatahi, B., Samali, B., 2014, *Numerical and Experimental Investigations on Seismic Response of Building Frames under Influence of Soil-Structure Interaction*, *Advances in Structural Engineering*, volume 17, issue 1.(۲۰۱۴)
- 24- Emami M, Yasrebi S. *Application of artificial neural networks in interpretation of pressuremeter test results*. *MCEJ 2014; 14 (5) :11-25*
- 25- Borbory, E, 2020, *Opening effects in reinforced concrete shear walls, a literature review on experimental and finite element studies*, *International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS) ISSN: 2394-3661, Volume-7, Issue-2, Februry 2020*.
- 26- Casagrande, D., Fanti, R., Greco, M., Garvic I., Polastri, A., 2021, *On the distribution of internal forces in single-storey CLT symmetric shear-walls with openings*, *Structures 33 (2021) 4718–4742*
- 27- Emami, M. (2009). *Application of artifitial neural networks in pressuremeter test results*. Master

- of Science thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.*
- 28- Nasr, E., Fayed, M, N., Hussien, G, El-Makhlasi, A, M., *The Effect of Shear Wall Openings on the Response Reduction Factor, Civil Engineering Journal April 2022*
 - 29- Ayatollahi Moosavi, S, M., Tabatabaei Mirhoseini, R., Kebriaie, M., 2022, *Investigation of seismic behavior of the reinforced concrete wall-frame system on a flexible bed, Results in Engineering 15 (2022) 100581.*
 - 30- Bush R.C., Shirkol A.I., Sruthi J.S., Ajay Kumar., 2022, *Study of seismic analysis of asymmetric building with different shapes of staggered openings and without openings in Shear Wall, Materials Today: Proceedings, May 2022.*
 - 31- Sarlak, A., Saeedmonir, H., Gheytratmand, C., 2017, *Numerical and Experimental Study of Soil-structure Interaction in Structures Resting on Loose Soil Using Laminar Shear Box, IJE TRANSACTIONS B: Applications Vol. 30, No. 11, (November 2017) 1654-1663.*
 - 32- Taji, Hamed and Mohadi Far, Seyed Mojtabi, 2016, *Investigation of the effect of explosion on the behavior of steel shear walls with stiffeners considering the interaction of soil and structure, 4th International Conference on Structural Engineering, Tehran, <https://civilica.com/doc/879408>.*