



Effect of Number and Type of Soil Layers on the Response of Buried Structures to Explosion

M. Hematiyan, H. Dashti*

Department of Civil Engineering, Bushehr Branch, Islamic Azad University, Bushehr, Iran

ABSTRACT: In the field of buried or underground structures, the objective of passive defense is to properly design, improve and place such structures. Among the best methods to analyze the problems are numerical and computer models. In the present research, using the previous results, the accuracy of surface explosion loading modeling results was evaluated. Moreover, the structures buried in different soils and the layered system were investigated after ensuring these models. To model the effect of soil-structure interaction, the analysis is performed non-linearly using Abaqus software. The structure is buried in the soil as a single layer, double layers, and triple layers with a burial depth of 8 m above the ground while comparing the displacement and stress. The soils used in this research are soft sand, hard sand, and clay. The results show that the highest displacement is related to the placement of the first layer of soft sand, the second layer of hard sand, and the third layer of clay. However, the lowest amount of displacement is associated with a single layer of soft sandy soil. Also, changes in the material and the number of layers sometimes lead to a reduction of more than 100% and 19% respectively in the resulting stresses and the displacement in the buried structure. This issue shows the necessity of the effect of soil layering in the design of buried structures.

Review History:

Received: Oct. 31, 2020
Revised: Feb. 12, 2022
Accepted: Feb. 18, 2022
Available Online: Mar. 17, 2022

Keywords:

Soil layering
Explosion
Buried structure
Numerical modeling

1- Introduction

Examination of buried structures to safely design them is greatly important. The type and number of the soil layers for burying can be effective on the buried structure's response. Heydari and Zolfaghari [1] investigated the behavior of underground structures buried in a two-layer system against loading due to underground explosion, under different soil behavior models. Their results show that the Mohr-Columbus behavioral model increased compressive stresses compared to the Drager-Prager behavioral model. Habibi et al. [2] assessed the effects of explosions on buried tanks and their dynamic response. From their results, it is indicated that the effect of an explosion on any structure depends on the type, weight, size, and shape of the impact of the explosive. In a study, Negi et al. [3] investigated a structure buried at the depth of 4 m under the influence of a surface explosion. According to the research results, the amount of displacement, acceleration, and stress in the center of the roof is more intense than in the corner of the roof. In this research, a buried structure is modeled numerically under explosion.

2- Methods

In the present research, Abaqus software was used for numerical modeling. To validate the modeling results, the research of Negi et al. [3] on clay was considered. Considering

the importance of the accuracy of the results in this study, it was tried to use the default validation materials as much as possible while changing the layering and type of the soils. In modeling, the nonlinear Drager-Prager model was used for three types of clay, soft sand, and hard sand.

3- Results and Discussion

First, the soil types in the single-layer state were studied. Then, increasing the number of soil layers, the two-layer and three-layer states were considered to examine the maximum stress and displacement in different states. The single-layer, two-layer, and three-layer modes are respectively represented in Figures 1-3. Parameters a, b and c are the variable thicknesses of the layer.

Figure 4 represents the comparison of different states for maximum displacement and in Figure 5 for maximum stress. As seen in Figure 4, the highest displacement is related to the three-layer soil conditions. It means that the first layer is soft sand, the second layer is hard sand and the third layer is clay. The lowest displacement is related to the single-layer soft sand soil conditions. The difference of 19% represents the importance of soil layering on the response of buried structures. This proves that the behavioral properties of soils and the interaction of layers can change the displacement

*Corresponding author's email: hdashti1356@yahoo.com



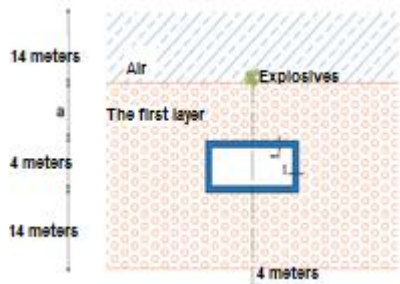


Fig. 1. The schematic illustration of a structure buried in a single layer of soil

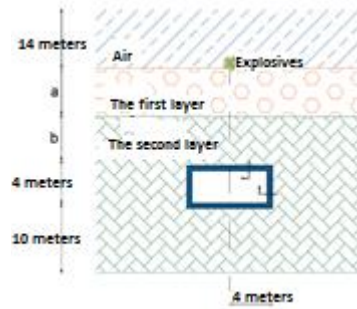


Fig. 2. The schematic image of a structure buried in two layers of soil

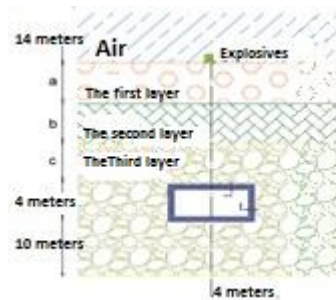


Fig. 3. The schematic image of a structure buried in three layers of soil

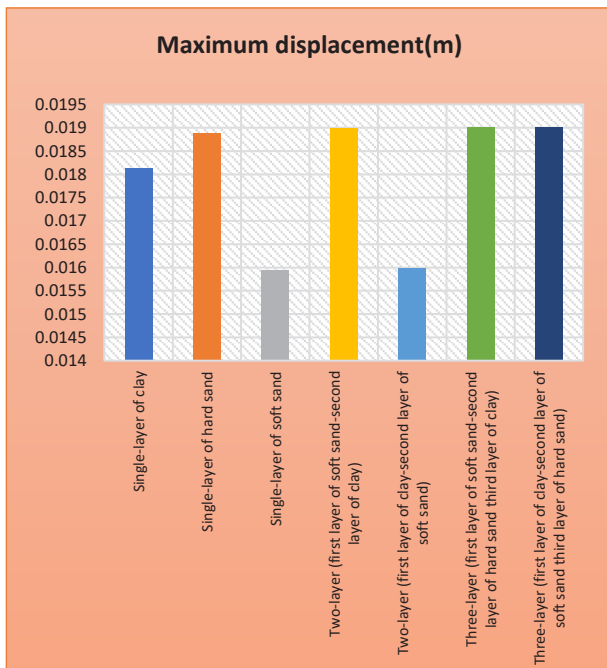


Fig. 4. The maximum displacement for all soil conditions at a depth of 8 m

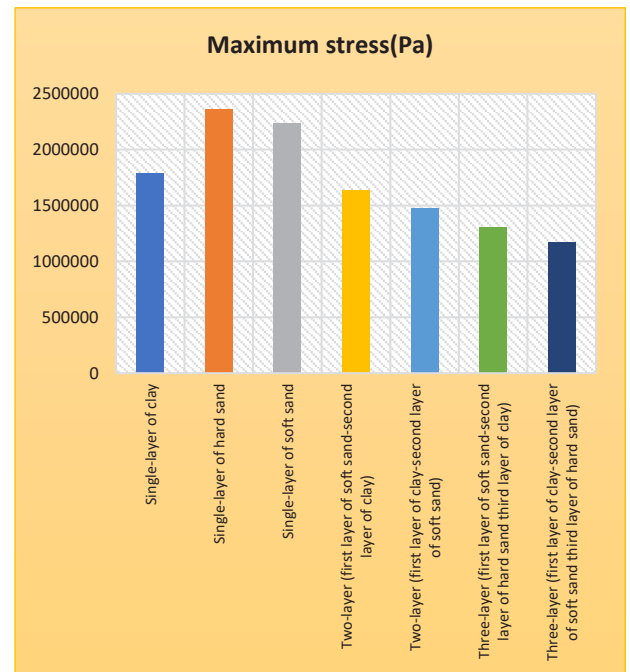


Fig. 5. The maximum stress for all soil conditions at a depth of 8 m

created in the structure by changing their number. Also, single-layer soft sand compared to clay and single-layer hard sand reduced the displacement in the structure. These differences were about 18% and 13%,

respectively. This indicates the importance of changing the behavioral characteristics of the soil on the transmission of explosion waves to the structure. This means that even by not changing the number of layers, altering the soil materials'

properties can lead to a difference of more than 20% in the results.

According to Figure 5, the maximum stress values in the layered state in the buried structure are less than in the single-layer soil. A difference of more than about 100% is observed between the state of single-layer hard sand soils to three-layer soils.

4- Conclusion

In this study, using Abaqus finite element software, the effect of soil number and type on the response of buried structures to the explosion was analyzed. It was indicated that the highest displacement was related to the three-layer soil condition, meaning that the first layer was soft sand, the second layer was hard sand and the third layer was clay. The lowest displacement was in single-layer soft sand soil conditions. The rate of this difference was about 19%. Also, single-layer soft sand reduced the displacement in the structure compared to the clay and single-layer hard sandy soil. These differences were about 18% and 13%, respectively. Regarding the effect of soil layers on the response of buried structures, it was indicated that with increasing the number of soil layers, the rate of stresses was decreased. This stress difference is sometimes almost more than 100%.

References

- [1] A. Hamidi, O. Zolfaghary, Investigation of blast waves in buried structures (tunnels) in layered soils by finite element method, 5th International Conference on Civil Engineering, Architecture & Urban Development, Tehran, Iran, (2017) (In Persian).
- [2] M.R. Habibi, S.M.S. Sameti, S.M. Hosseini, Investigation of the effect of loads caused by surface explosion on buried tanks. International Conference on Architecture, Urbanism, Civil Engineering, Art, Environment, Future Horizons & Retrospect, Tehran, Iran, (2016) (In Persian).
- [3] N. Nagy, M. Mohamed, J.C. Boot, Nonlinear numerical modelling for the effects of surface explosions on buried reinforced concrete structures, journal Geomechanics and Engineering, 2(1) (2010) 1-18.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Hematiyan, H. Dashti, *Effect of Number and Type of Soil Layers on the Response of Buried Structures to Explosion*, Amirkabir J. Civil Eng., 54(9) (2022) 703-706.

DOI: [10.22060/ceej.2022.19195.7100](https://doi.org/10.22060/ceej.2022.19195.7100)





تأثیر تعداد و جنس لایه های خاک بر پاسخ سازه های مدفون در برابر انفجار

مبین همتیان، هادی دشتی*

دانشکده مهندسی عمران، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۱۰
بازنگری: ۱۴۰۰/۱۱/۲۳
پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۲۹
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۲/۲۶

کلمات کلیدی:

لایه بندی خاک
انفجار، سازه مدفون
مدل سازی عددی
اندرکنش خاک-سازه

خلاصه: در حوزه سازه های مدفون یا زیرزمینی، پدافند غیرعامل در واقع همان تلاش برای طراحی، بهسازی و جانمایی مناسب این نوع سازه ها است. مدل سازی عددی و کامپیوتری یکی از بهترین روش هایی است که می توان از آن برای تحلیل مسائل استفاده نمود. در این تحقیق با استفاده از نتایج گذشته صحت نتایج مدل سازی بارگذاری انفجار سطحی مورد ارزیابی قرار گرفته و پس از اطمینان از این مدل سازی، به بررسی سازه مدفون در خاک های متفاوت و سیستم لایه ای پرداخته شده است. در مدل سازی اثر اندرکنش خاک و سازه لحاظ شده و تحلیل به صورت غیرخطی با استفاده از نرم افزار آباکوس انجام گرفته است، سازه در خاک به صورت تک لایه، دو لایه و سه لایه با عمق دفن ۸ متر از سطح زمین مدفون شده و به بررسی و مقایسه تغییر مکان و تنش پرداخته شده است. خاک های مورد استفاده در این تحقیق ماسه نرم، ماسه سخت و خاک رس می باشد. نتایج به دست آمده نشان می دهد که، بیشترین جابجایی مربوط به شرایط قرارگیری لایه اول ماسه نرم، لایه دوم ماسه سخت و لایه سوم خاک رس، و کمترین مقدار جابجایی در شرایط خاک تک لایه، حالت ماسه نرم می باشد. همچنین تغییر در جنس و تعداد لایه ها گاهی تا ۱۰۰ درصد کاهش برای تنش های حاصل و تا ۱۹ درصد برای جابجایی در سازه مدفون را به همراه دارد. این مسأله ضرورت تأثیر لایه بندی خاک را در طراحی سازه های مدفون نشان می دهد.

۱- مقدمه

سازه و نحوه انتشار امواج ناشی از انفجار مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحقیق آن ها نشان می دهد که مدل رفتاری موهر-کلمب موجب افزایش تنش های فشاری نسبت به مدل رفتاری دراگر-پراگر گردیده است.

در تحقیقی دیگر بیتی و همکاران [۲]، به بررسی رفتار سازه های زیرزمینی مدفون در یک سیستم خاک دو لایه ای در برابر بارگذاری ناشی از انفجار زیرزمینی، تحت مدل های مختلف رفتاری خاک به کمک نرم افزار آباکوس پرداخته اند. در این راستا، آن ها ابتدا تحلیل حوزه آزاد انفجار را روی سطح و داخل خاک های مختلف انجام داده، تا پدیده انتشار امواج در داخل خاک های مختلف بررسی شود. در این تحلیل با تقریب عددی، تغییرات عمق انفجار بین ۲ تا ۶ متر از سطح زمین و مدل های رفتاری مختلف خاک با پارامترهای فیزیکی و مکانیکی متفاوت انجام گرفته و به بررسی تأثیرات آن بر روی خرابی سازه و نحوه انتشار امواج ناشی از انفجار پرداخته شد. با مقایسه نتایج تحلیل نرم افزاری و آزمایشگاهی مشخص گردید که نتایج مدل رفتاری

بررسی سازه مدفون به منظور طراحی ایمن این سازه ها اهمیت بالایی دارد، پدافند غیرعامل در واقع همان تلاش برای طراحی بهینه و ایمن تر شدن این سازه ها است. نوع و تعداد لایه های خاکی که در آن مدفون می شود، می تواند تأثیر مؤثری در پاسخ سازه مدفون داشته باشد. لایه بندی خاک، تغییر نوع لایه های خاک، تغییر ضخامت لایه ها و رفتار غیرخطی به عنوان مسائل نوآورانه در پژوهش ها می تواند مورد توجه قرار گیرد. مسأله سازه های مدفون از گذشته در برخی از پژوهش ها مورد بررسی قرار گرفته است، رفتار سازه های زیرزمینی مدفون در یک سیستم دو لایه ای در برابر بارگذاری ناشی از انفجار زیرزمینی، تحت مدل های مختلف رفتاری خاک توسط حیدری و ذوالفقاری [۱]، بررسی شده است. در تحلیل آن ها از روش اجزاء محدود با در نظر گرفتن مدل های مختلف رفتاری خاک در اعماق بین ۲ تا ۶ متر از سطح زمین، استفاده شده و تأثیر انفجار بر روی خرابی

* نویسنده عهده دار مکاتبات: hdashti1356@yahoo.com



کم-کلی در پلاستیسیته مطابقت بیشتری با مدل دراگر-پراگر اصلاح شده دارد. از طرفی بر اساس نتایج آزمایشگاهی ملاحظه می‌گردد مدل دراگر-پراگر اصلاح شده در مقایسه با رفتار موهر-کولمب برای خاک‌های چسبنده عملکرد بهتری داشته است. همچنین در زوایای اصطکاک داخلی بزرگ‌تر از ۲۲ درجه، نتایج مدل‌های دراگر-پراگر و موهر-کولمب بر هم منطبق است. این تحقیق نشان می‌دهد انفجارهای زیرزمینی در مقایسه با انفجارهای سطحی در شرایط یکسان، تأثیرات بیشتری را بر روی سازه‌های مدفون در خاک دارد.

پور قزوینی و تودشکی [۳]، اثر اشباع خاک ماسه‌ای بر پناهگاه‌های بتنی تحت اثر انفجار سطحی را بررسی کرده‌اند. در این تحقیق، تأثیر رطوبت خاک بر روی ایمنی یک پناهگاه زیرزمینی از جهت میزان تنش و جابجایی وارد بر آن بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان داده که بالا رفتن درجه اشباع لایه خاک، موجب افزایش فشار وارده بر خاک شده و در نتیجه تنش فون میسز^۱ سیستم بتن و فولاد، افزایش یافته و سبب بروز شرایط بحرانی گردیده است.

حسینی و حسینی [۴]، منطقه نزدیک محل انفجار را با رویکرد اوپلری به منظور تحلیل پاسخ حوزه نزدیک انفجار و گودال ناشی از انفجار، و رویکرد لاگرانژی را برای تحلیل پاسخ حوزه دور از انفجار و فشار وارد بر سازه مدفون مورد استفاده قرار داده و اثر پارامترهای مختلف ماده منفجره (جرم)، محیط انتشار موج (چگالی، مدول یانگ، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی) و سازه مدفون (هندسه و جنس دیوار) را بر پاسخ محیط و سازه مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها با توجه به این مطالعات به این نتیجه رسیدند که در تحلیل و طراحی سازه‌های زیرزمینی حساس، بارهای انفجاری سطحی ناشی از پرتاب بمب‌ها به صورت چند مرحله‌ای بر روی سازه مدفون می‌بایستی شبیه‌سازی شود.

حبیبی و همکاران [۵]، اثر انتشار امواج انفجار بر روی خطوط مخازن مدفون را در نرم‌افزار آباکوس^۲ و با استفاده از مدل اجزاء محدود، شبیه‌سازی نموده و به بررسی اثرات انفجار بر روی خطوط مخازن مدفون، و پاسخ دینامیکی آن‌ها پرداختند. برای این منظور تأثیر تغییرات بارگذاری و عمق دفن مخزن در سه نوع خاک رس، ماسه سست و ماسه‌ی متراکم مورد بررسی قرار گرفته است. از نتایج تحقیق آن‌ها می‌توان دریافت، تأثیر انفجار بر روی هر سازه به نوع،

1 Von mises stress

2 Abaqus

وزن، اندازه و شکل برخورد ماده منفجره بستگی دارد.

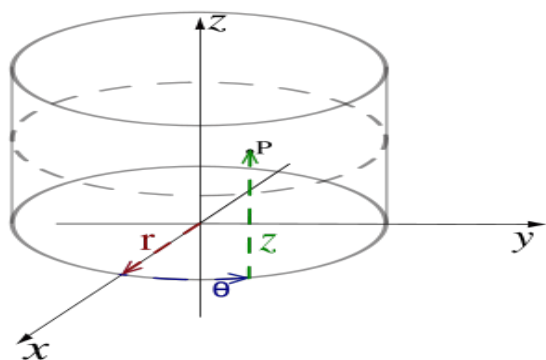
عرب بافرانی و همکاران [۶]، به بررسی رفتار مخازن زیرزمینی بتنی مسلح تحت بارگذاری انفجار سطحی پرداخته‌اند. این بررسی به لحاظ کیفی به بررسی محل‌های حداقل و حداکثر تنش و کرنش پلاستیک که بیانگر حداکثر و حداقل آسیب می‌باشد و همچنین به بررسی مود تغییر شکل اعضای مخزن پرداخته است. در این تحلیل اثرات اندرکرنش خاک-سازه-سیال لحاظ شده است. در نتایج به دست آمده آن‌ها مشخص شد که در حالت انفجار، بیشترین تنش و کرنش پلاستیک در نواحی گوشه‌های دیوارها و سقف و کمترین تنش و کرنش پلاستیک در وسط دیوارها و سقف اتفاق می‌افتد. همچنین بیشترین تغییر شکل در وسط دیوارها و سقف و کمترین در گوشه‌ها می‌باشد.

عابدین و فدایی [۷]، در پژوهش خود یک مانع بتنی در دو متری بالای سازه قرار داده‌اند و با استفاده از روش اوپلری-لاگرانژی مدل خود را در آباکوس مدل‌سازی نمودند. برای مدل‌سازی رفتار خاک هم از مدل دراگر-پراگر استفاده گردید. آن‌ها با توجه به نتایج تحقیقشان کاهش ۴۰ درصدی تنش در مرکز سقف را گزارش نمودند.

چوگانی و اولی‌پور [۸]، به بررسی عملکرد عناصر سازه‌ای تونل تحت اثر انفجار از روی سطح زمین و تغییرات رفتار سازه با تغییر مشخصات رفتاری خاک و تغییر مشخصات تونل پرداخته‌اند. با توجه به متفاوت بودن جنس خاک و قطر تونل، اثرات مقادیر مختلف بار انفجاری نسبت به ارتفاع خاک روی هر سازه بررسی گردید. نتایج نشان می‌دهد، هر چه خاک روی سازه چسبندگی و زاویه اصطکاک بیشتری داشته باشد، اثر انفجار روی سازه کمتر خواهد شد. بنابراین یکی از راحت‌ترین و به صرفه‌ترین راه‌های محافظت از سازه در مقابل آثار انفجار، استفاده از خاک با دانه‌بندی مناسب با ارتفاع بهینه بر روی سازه می‌باشد. همچنین به منظور کاهش تغییر شکل سازه می‌توان از بتن با مقاومت بالاتر استفاده کرد.

لو و همکاران [۹]، تفاوت نتایج دو بعدی و سه بعدی را بررسی کرده‌اند. نتایج به دست آمده نشان داده است که در تجزیه و تحلیل‌های میدان آزاد، فشار محاسبه شده در نقطه ۱۰ متری از خرج انفجاری در حالت دو بعدی و سه بعدی تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند.

نادری و گنجی [۱۰]، با استفاده از نرم‌افزار ال اس داین^۳ به بررسی



شکل ۱. دستگاه مختصات استوانه‌ای [۱۳]

Fig. 1. Cylindrical coordinate system [13]

نمودند. پارامترهای مورد بررسی جابجایی، شتاب و تنش بوده است. بر اساس نتایج تحقیق، پارامترهای ذکر شده در مرکز سقف نسبت به گوشه سقف آسیب‌پذیری بیشتری دارند.

در این پژوهش یک سازه مدفون تحت اثر انفجار به صورت عددی مدل می‌گردد، پس از تأیید صحت‌سنجی، عملکرد مدل عددی با تغییر در جنس خاک همچنین لایه‌بندی خاک و جابجایی لایه‌ها و مقایسه نتایج، ایمن‌ترین حالت برای سازه مدفون محاسبه می‌گردد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- صحت‌سنجی

در این تحقیق برای مدل‌سازی عددی، از نرم‌افزار آباکوس^۱ استفاده شده است. جهت اعتبارسنجی نتایج مدل‌سازی، پژوهش‌نگی و همکاران [۱۳] بر روی خاک رس، مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق از یک سازه بتنی که در عمق ۴ متری خاک قرار گرفته، استفاده شده است. نوع سیستم مختصات، قطبی (استوانه‌ای) در نظر گرفته شده است (شکل ۱)، پارامترهای مورد استفاده در این سیستم شعاع و ارتفاع است که با زاویه ۳۶۰ درجه به دور خود دوران داده می‌شود از این رو شعاع و ارتفاع سازه ۴ متر بوده است.

هندسه مدل به ترتیب از سه قسمت هوا، خاک و سازه مدفون تشکیل شده است. مدل به صورت سه بعدی و با مختصات استوانه‌ای طراحی شده است، در مختصات استوانه‌ای به صورت سه بعدی از قانون دو ضلع و یک زاویه استفاده می‌شود. مختصات استوانه‌ای نوعی

لوله‌های مدفون و پاسخ دینامیکی آن‌ها بسته به مشخصات و ویژگی خاک پیرامون آن پرداخته‌اند. در این تحقیق از خاک ماسه شنی با روش دراگر-پراگر استفاده شده است. با توجه به آن که پدیده انفجار در سطح زمین باعث ایجاد چاله انفجاری می‌شود و همچنین در محل ایجاد چاله انفجار تنش و فشار زیادی به خاک و سازه‌های موجود در این محل اعمال می‌شود، و در اعماق پایین‌تر از عمق چاله مقدار چشمگیری از این تنش و فشار کاسته شده، بنابراین اجرای سازه‌ها از جمله خطوط انتقال آب در اعماقی بیشتر از عمق تشکیل چاله انفجار کمک چشمگیری در ایمن ماندن آن‌ها تحت بارهای انفجاری می‌نماید.

تاج بخش و پرویزی [۱۱]، اثرات انفجار سطحی بر تونل مدفون در خاک ماسه‌ای سست را با استفاده از نرم‌افزار آباکوس را بررسی کرده‌اند، در این مقاله، مدل سازه به صورت یک المان میانی از یک تونل مدفون در خاک سست طراحی شده، و در مقابل انفجارهای سطحی نیز در سه فاصله‌ی ۵، ۱۰ و ۱۵ متری سطح زمین در نظر گرفته شده است. بارگذاری انفجار روی خاک ماسه سست و تأثیر آن در سه عمق مختلف انجام شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش عمق دفن، جابجایی، تنش‌های اصلی و کرنش‌ها در تونل تحت انفجارهای سطحی، در این نوع خاک کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش زاویه اصطکاک داخلی برای این نوع خاک تنش وارده بر دیواره تونل بتنی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش چگالی خاک، برای این نوع خاک تنش وارده بر دیواره تونل بتنی افزایش می‌یابد.

بیطرفیان و رهنما [۱۲]، تحقیقی تحت عنوان شبیه‌سازی اثر انفجار زیرزمینی و پاسخ آن بر روی سازه محبوس شده در خاک اشباع ارائه داده‌اند و در آن رفتار پاسخ انفجاری به یک فونداسیون شمعی که در یک توده شن و ماسه اشباع با کاربرد آنالیز غیرخطی صریح المان محدود، با توجه به رفتار پیچیده‌ی مواد خاک و اندرکنش خاک-شمع است، می‌پردازند. نتایج نشان می‌دهد که قسمت بالایی شمع آسیب‌پذیر است و پاسخ شمع با فاصله یافتن از ماده منفجره از بین می‌رود.

نگی و همکاران [۱۳]، در تحقیقی سازه مدفونی را تحت اثر انفجار سطحی بررسی نمودند، آن‌ها سازه را در عمق ۴ متری زمین مدفون و برای مدل رفتاری خاک از روش غیرخطی دراگر-پراگر استفاده

جدول ۱. مشخصات بتن مورد استفاده [۱۳]

Table 1. Specifications of the used concrete [13]

مشخصات بتن	مقادیر
مدول یانگ (E)	۱۹/۷ GPa
نسبت پواسون (ν)	۰/۱۹
زاویه اصطکاک داخلی (β)	۳۸ ^۰
خروج از مرکزیت	۱
σ_{d0}/σ_{c0}	۱/۱۲
k_c	۰/۶۶۶

در مدل سازی بتن، رفتار مکانیکی آن با استفاده از روش آسیب پلاستیکی وارد شده است. مدل آسیب پلاستیکی از مفاهیم الاستیک مقاوم ایزوتروپیک در ترکیب با کشش ایزوتروپیک و خواص پلاستیک فشرده برای نشان دادن رفتار غیرقابل انعطاف بتن است. مدل آسیب پلاستیکی یک روش مناسب برای مدل سازی بتن ساده و بتن مسلح است، که از برنامه های کاربردی آن می توان به بارگذاری پویا تر اشاره کرد. این مدل می تواند برای شبیه سازی آسیب برگشتناپذیر در روند شکستگی و بازیابی سختی به عنوان تغییرات بار که از تنش به فشرده سازی و بالعکس است مورد استفاده قرار بگیرد.

هوا: در این مدل سازی از روش گاز ایده آل استفاده شده که مشخصات مصالح آن مطابق با جدول ۳ است.

ماده منفجره: از TNT به عنوان ماده منفجره استفاده شده است و حجم آن ۱۰۰ kg می باشد. در مدل انفجاری از معادله jwl^2 استفاده شده است. مشخصات رفتاری از تحقیق نگی و همکاران [۱۳] استفاده شده است. این شبیه سازی فشار (P) ایجاد شده توسط گسترش انرژی شیمیایی حاصل از انفجار مواد شیمیایی است. این مدل انفجاری به طور گسترده ای توسط مهندسين در برنامه های مختلف و در شبیه سازی های متنوع که نیاز به مدل سازی انفجار است مورد استفاده قرار می گیرد. معادله JWL را از لحاظ اولیه در واحد وزن به صورت ثابت می توان نوشت:

$$P = A \left(1 - \frac{\omega \rho}{R_1 \rho_0}\right) e^{\left(-R_1 \frac{\rho}{\rho_0}\right)} + B \left(1 - \frac{\omega \rho}{R_2 \rho_0}\right) e^{\left(-R_2 \frac{\rho}{\rho_0}\right)} + \frac{\omega \rho^2}{\rho_0} E_{m0} \quad (1)$$

مختصات متعامد (عمود بر هم) است که در آن یک نقطه، در فضا بر روی قاعده یک استوانه در نظر گرفته می شود. مکان آن نقطه بر اساس شعاع و ارتفاع استوانه (r) و (Z) زاویه ای که شعاع قاعده گذرنده از آن نقطه با محور X می سازد (θ)، بیان می شود. این دستگاه، در حالت دو بعدی، با حذف مختصات Z به مختصات قطبی تبدیل می شود.

جهت تحلیل بتن و فولاد مصرفی موجود در سازه از محیط لاگرانژی استفاده شده است. به طور کلی می توان گفت از معادلات لاگرانژی جهت تحلیل مواد و مصالح صلب استفاده می شود. فضای لاگرانژی این تحقیق شامل بلوک مستطیلی به ارتفاع ۴ متر و شعاع ۴ متر است که حول محور ۳۶۰ درجه دوران داده شده است. ضخامت آن نیز ۰/۵ متر می باشد (شکل ۵). محیط اویلری حاکم بر فضای اویلر برای تحلیل مصالحی مناسب هستند که المان های آن بر اثر انفجار به سرعت بسیار بالایی می رسند و جابجایی بسیار زیادی در زمان کمی خواهند داشت. بنابراین جهت مدل سازی هوا، ماده منفجره و خاک که در محدوده شعاع موثر امواج اولیه انفجار هستند از محیط اویلری استفاده شده است.

۲-۱-۱- مشخصات مصالح

بتن: در مدل سازی سازه مدفون از روش آسیب بتن که به اصطلاح به روش (CDP) معروف است، استفاده شده و بتن مورد استفاده ۵۰ B می باشد که مشخصات رفتار خطی آن در جدول ۱ و رفتار غیرخطی در جدول ۲ آمده است.

1 Concrete damage plasticity

جدول ۲. مشخصات رفتار غیرخطی بتن مورد استفاده [۱۳]

Table 2. Characteristics of nonlinear behavior of used concrete [13]

سخت شوندهگی فشاری بتن		آسیب فشاری بتن	
Stress (Pa)	Crushing strain	Damage	Crushing strain
۱۵۰۰۰۰۰۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
۲۰۱۹۷۸۰۴	۰/۰۰۰۰۷۴۷۳۰۷	۰/۰	۰/۰۰۰۰۷۴۷۳۰۷
۳۰۰۰۰۶۰۹	۰/۰۰۰۹۸۸۴۷۹	۰/۰	۰/۰۰۰۹۸۸۴۷۹
۴۰۳۰۳۷۸۱	۰/۰۰۰۱۵۴۱۲۳	۰/۰	۰/۰۰۰۱۵۴۱۲۳
۵۰۰۰۷۶۹۲	۰/۰۰۰۷۶۱۵۳۸	۰/۰	۰/۰۰۰۷۶۱۵۳۸
۴۰۲۳۶۰۹۰	۰/۰۰۲۵۵۷۵۵۹	۰/۱۹۵۴۰۲	۰/۰۰۲۵۵۷۵۵۹
۲۰۲۳۶۰۹۰	۰/۰۰۵۶۷۵۴۳۱	۰/۵۹۶۳۸۲	۰/۰۰۵۶۷۵۴۳۱
۵۲۵۷۵۵۷	۰/۰۱۱۷۳۳۱۱۹	۰/۸۹۴۸۶۵	۰/۰۱۱۷۳۳۱۱۹

سختی کششی بتن		آسیب کششی بتن	
Stress (Pa)	Cracking strain	Damage	Cracking strain
۱۹۹۸۹۳۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
۲۸۴۲۰۰۰	۰/۰۰۰۰۳۳۳۳	۰/۰	۰/۰۰۰۰۳۳۳۳
۱۸۶۹۸۱۰	۰/۰۰۰۱۶۰۴۲۷	۰/۴۰۶۴۱۱	۰/۰۰۰۱۶۰۴۲۷
۸۶۲۷۲۳	۰/۰۰۰۲۷۹۷۶۳	۰/۶۹۶۳۸	۰/۰۰۰۲۷۹۷۶۳
۶۲۵۴	۰/۰۰۰۶۸۴۵۹۳	۰/۹۲۰۳۸۹	۰/۰۰۰۶۸۴۵۹۳
۵۶۵۷۶	۰/۰۰۱۰۸۶۷۳	۰/۹۸۰۰۹۳	۰/۰۰۱۰۸۶۷۳

جدول ۳. مشخصات هوای مورد استفاده [۱۴]

Table 3. Specifications of the used air [14]

مقدار	مشخصات هوا
۱/۴	γ
۱/۲۲۵ kg/m ³	دانشیته مرجع
۲۸۸/۲ K	دمای مرجع
۷۱۷/۳ J/kg ^o k	دمای مخصوص در حجم ثابت

جدول ۴. مشخصات ماده منفجره مورد استفاده در آنالیز صحت‌سنجی [۱۳]

Table 4. Specifications of the explosive used in the validation analysis [13]

مقدار	مشخصات تی ان تی
۶۹۳۰ m/s	سرعت موج انفجار (Cd)
۳۷۳/۸ GPa	A
۳/۷۴۷ GPa	B
۴/۱۵	R ₁
۰/۹	R ₂
۰/۳۵	ω
۱۶۳۰ kg/m ³	دانسیتته (ρ ₀)
۳/۶۳ Joule/kg	انرژی اولیه (E _{m0})

۲-۱-۲- شرایط مرزی

چون خاک یک محیط نیمه بی‌نهایت است باید طوری مدل شود که تمام خصوصیات آن از جمله نیمه بی‌نهایت بودن آن لحاظ شود. دو روش کلی برای این کار وجود دارد روش اول به این صورت است که آنقدر ابعاد خاک را بزرگ در نظر بگیریم که موج در آن قابل برگشت نباشد که این روش حل بسیار طولانی دارد. روش دوم برای آن شرایط مرزی مشابه‌ای در نظر گرفته شود، که همان نتایج حاصل گردد. در این تحقیق شرایط مرزی تلفیقی از هر دو روش است، یعنی هم ابعاد خاک بزرگ در نظر گرفته شده و هم شرایط مرزی تعریف شده است، در نرم‌افزار برای مدل‌سازی این موضوع از شرط بدون برگشت استفاده شده است، که به این معنا است که موج وارد شده دیگر قابل برگشت نباشد. این همان معنی شرایط مرزی نامحدود را می‌دهد شکل ۲.

شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب نمودارهای جابجایی قائم و افقی در مرکز سقف را نشان می‌دهد در این نمودارها شاهد مقایسه جابجایی تحقیق حاضر و مطالعه نیگی و همکاران [۱۳] هستیم. همانگونه که در جدول ۶ مشاهده می‌گردد نتایج فایل مدل‌سازی شده با نتایج مطالعه نیگی و همکاران [۱۳] از دقت قابل قبولی برخوردار است.

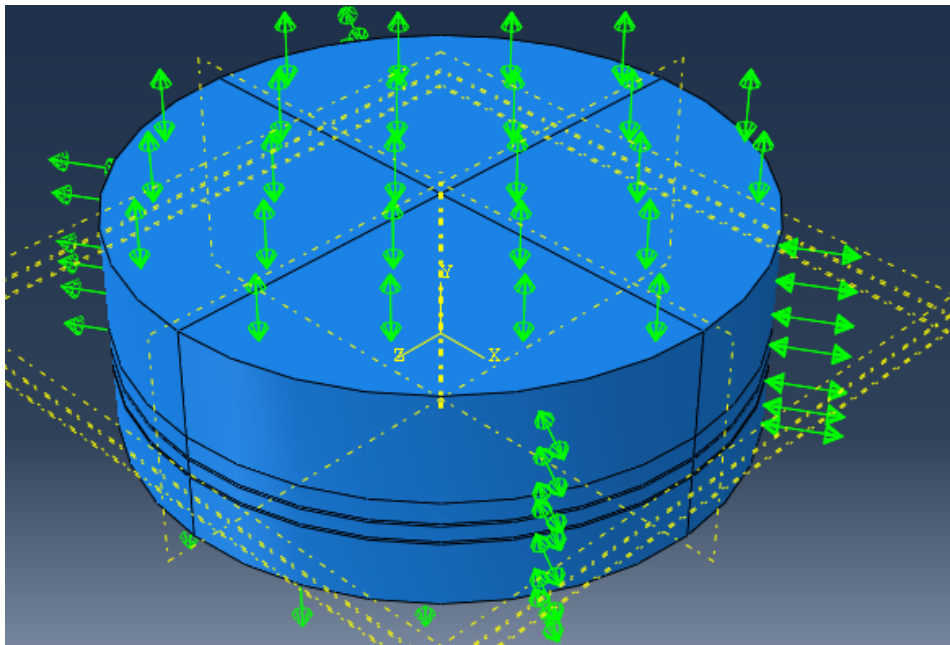
پارامترهای A, B, R₁, R₂ و ω ثابت‌های مواد هستند. ρ₀ چگالی اولیه ماده منفجره، ρ چگالی محصولات ناشی از فرآیند انفجار است. نسبت اولیه ρ/ρ₀ در معادله برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود. مدل انفجاری همانطور که گفته شد از معادله JWL که وانگ و همکاران در سال ۲۰۰۴ آن را ارائه نموده‌اند با مشخصات انفجاری طبق جدول ۴ آورده شده است [۱۳].

مشخصات خاک: جهت افزایش دقت در بررسی اثر بارگذاری دینامیکی بر توده خاک مواد به صورت غیرخطی در نظر گرفته شده است. در این پژوهش از خاک رس و برای مشاهده رفتار خاک در شبیه‌سازی از مدل الاستوپلاستیک دراگر- پراگر کپ استفاده شده است. این نوع رفتار در اصل جهت پیش‌بینی تغییر شکل‌های پلاستیک خاک تحت فشار توسعه داده شده است که شامل دو قسمت اصلی می‌باشد: یک بخش شامل گسیختگی برشی (Fs) و بخش دیگر شامل کلاهیکی (Fc) که یک مکانیزم سخت شونده غیرالاستیک را جهت تخمین فشردگی پلاستیک فراهم می‌کند. همچنین در کنترل حجم اتساع وقتی که مواد دچار گسیختگی برشی می‌شوند نقش خواهد داشت. پارامترهای به کار رفته برای خاک در نرم‌افزار آباکوس برای استفاده در بخش مشخصات مصالح نرم‌افزار طبق جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵. مشخصات خاک مورد استفاده [۱۳]

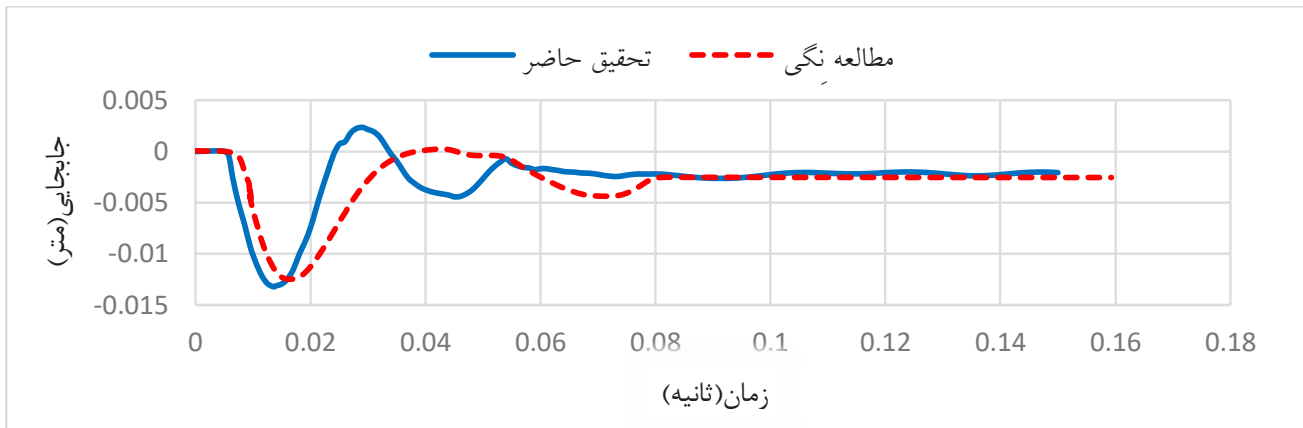
Table 4. Specifications of used soil [13]

مقادیر	مشخصات خاک
۵۱/۷ MPa	مدول یانگ (E)
۰/۴۵	نسبت پواسون (ν)
۱۹۲۰ kg/m ³	دانسیته خاک (ρ)
۰/۰۳۶ MPa	چسبندگی خاک (d)
۲۴ ⁰	زاویه اصطکاک (β)
۰/۳	پارامتر خروج از مرکزیت سر مدل
۰/۰۲	موقعیت اولیه سطح تسلیم سر مدل (ε _v)
۰/۰	پارامتر شعاع سطح انتقال (α)
Stress	plastic volumetric strain
۲/۷۵ MPa	۰/۰
۴/۸۳ MPa	۰/۰۲
۵/۱۵ MPa	۰/۰۴
۶/۲۰ MPa	۰/۰۸



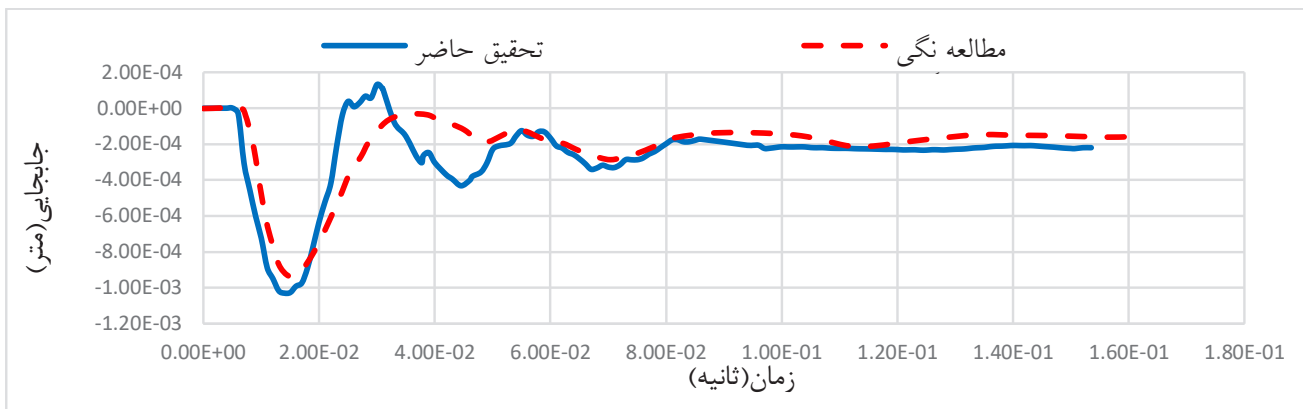
شکل ۲. شرایط مرزی مدل

Fig. 2. Model boundary conditions



شکل ۳. مقایسه جابهجایی قائم در مرکز سقف

Fig. 3. Comparison of vertical displacement in the center of the roof



شکل ۴. مقایسه جابهجایی افقی در مرکز سقف

Fig. 4. Comparison of horizontal displacement in the center of the roof

در شکل ۵، شماتیک سازه مدفون و هندسه مدل نشان داده شده است، قسمت (الف) مدل کلی سازه می‌باشد، موقعیت قرارگیری سازه مدفون و ماده منفجره در آن مشخص است، قسمت (ب) تصویر برش خورده سازه مدفون را نشان می‌دهد که در نرم‌افزار سالید ۱ ورژن ۲۰۱۷ طراحی شده است، همچنین ابعاد و ضخامت در آن قابل مشاهده است. در طراحی بتن از روش CDP استفاده شده است که مشخصات رفتاری آن مطابق جدول‌های ۱ و ۲ است.

۲-۲- مدل‌سازی

با توجه به اهمیت صحت نتایج در این پژوهش سعی گردیده تا حد امکان از مصالح پیش فرض صحت‌سنجی استفاده شود، ولی لایه‌بندی و جنس خاک‌ها تغییر کرده است. در مدل‌سازی از مدل غیرخطی دراگر-پراگر برای سه نوع خاک رس، ماسه نرم و ماسه سخت استفاده شده است که مشخصات آن مطابق جدول ۷ می‌باشد. همچنین عمق دفن از ۴ متر به ۸ متر افزایش یافته است.

جدول ۶. درصد اختلاف نتایج مطالعه نگی و تحقیق حاضر

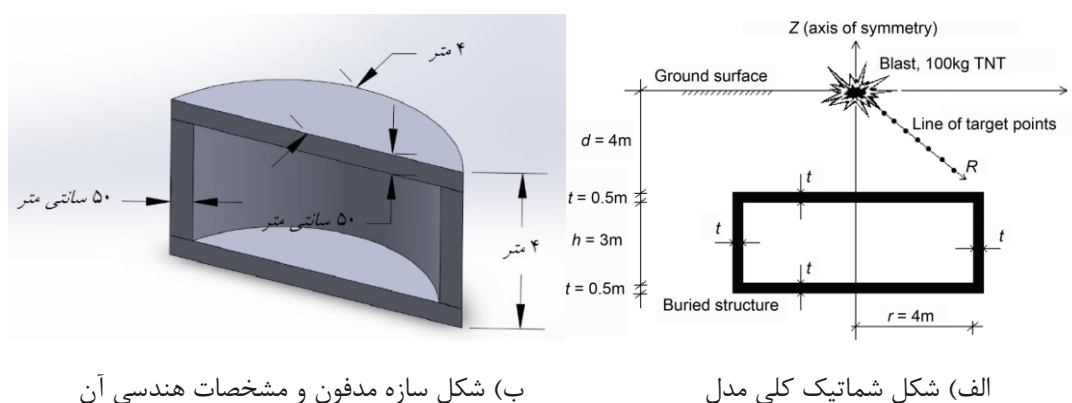
Table 6. Percentage difference between the results of the Negi study and the present study

نقاط	بیشینه جایجایی مطالعه نگی (متر)	بیشینه جایجایی تحقیق حاضر (متر)	قدرمطلق درصد اختلاف
جایجایی قائم در مرکز سقف	$-1/13e-2$	$-1/23e-2$	$٪۷/۴۲$
جایجایی افقی در مرکز سقف	$-1/0.3e-3$	$-9/32e-4$	$٪۱۰/۵۲$

جدول ۷. مشخصات خاک مورد بررسی در مطالعه [۵]

Table 7. Soil characteristics studied in the study [5]

نوع خاک مقادیر	خاک رس	ماسه سخت	ماسه نرم
دانسیته	1800 kg/m^3	2000 kg/m^3	1600 kg/m^3
چسبندگی	20 kPa	0 kPa	0 kPa
زاویه اصطکاک	0	25	35
مدول یانگ	4 MPa	14 MPa	7 MPa
نسبت پواسون	$0/3$	$0/3$	$0/4$
α	0	$0/19$	$0/27$
k	$23/0.9$	0	0
β	0	$44/53$	$54/81$
مدل بالک	1 MPa	$0/58 \text{ MPa}$	$0/8 \text{ MPa}$
زاویه اتساع	0	$44/53$	$54/81$



شکل ۵. تصویر شماتیک سازه مدفون

Fig. 5. Schematic image of a buried structure

جدول ۸. حالت‌های مورد بررسی

Table 8. Study modes

حالت‌ها	ضخامت کل خاک	تعداد لایه‌های خاک	نوع لایه‌های خاک	ضخامت هر لایه
۱	۸ متر	تک لایه	رس	۸ متر
۲	۸ متر	تک لایه	ماسه نرم	۸ متر
۳	۸ متر	تک لایه	ماسه سخت	۸ متر
۴	۸ متر	دو لایه	لایه اول: ماسه نرم لایه دوم: رس	۴ متر ۴ متر
۵	۸ متر	دو لایه	لایه اول: رس لایه دوم: ماسه نرم	۴ متر ۴ متر
۶	۸ متر	سه لایه	لایه اول: ماسه نرم لایه دوم: ماسه سخت لایه سوم: رس	۳ متر ۳ متر ۲ متر
۷	۸ متر	سه لایه	لایه اول: رس لایه دوم: ماسه سخت لایه سوم: ماسه نرم	۳ متر ۳ متر ۲ متر

۳- نتایج و بحث

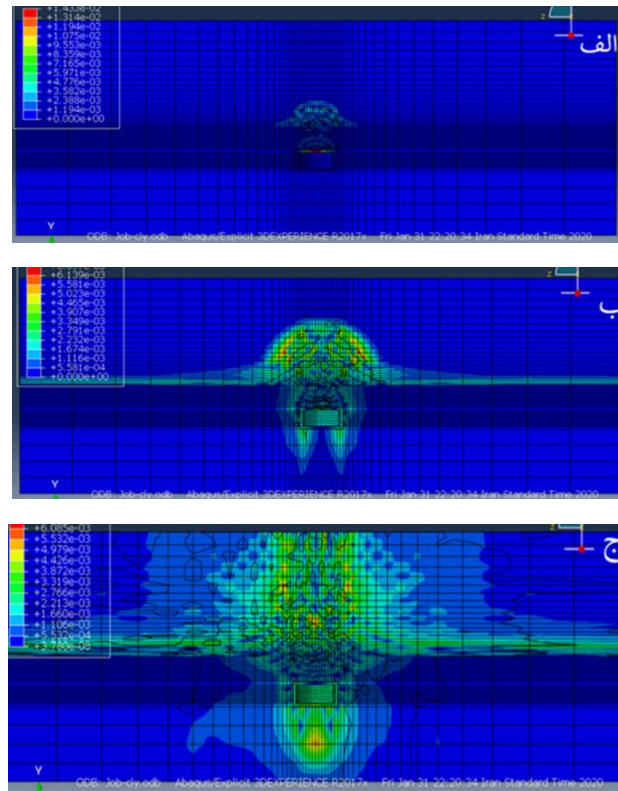
در ابتدا به بررسی انواع خاک در حالت تک لایه پرداخته، سپس تعداد لایه‌های خاک را افزایش داده و حالت دو لایه و سه لایه را در نظر گرفته، آنگاه تنش و جابجایی را در ضخامت ۸ متر بررسی کرده و در انتها به مقایسه حالت‌ها پرداخته شده است. حالت‌های مختلف ۷ گانه در جدول ۸ بررسی شده است.

جهت مشاهده نحوه انتشار موج انفجار در خاک یک نمونه در شکل ۶ نمایش داده شده است. شکل ۶ قسمت «الف» انفجار در زمان ۰/۰۰۱ را نشان می‌دهد که این زمان همان لحظه انفجار است در قسمت «ب» ذرات خاک به اطراف پرت شده و هوای متراکم تشکیل شده بر اثر انفجار، جریان هوای اطراف را تحت تاثیر قرار داده است همچنین سازه در معرض آسیب می‌باشد، در قسمت «ج» شکل لحظه ۰/۱۵ را نشان می‌دهد، در این لحظه گودال انفجار شکل گرفته و سازه بیشترین حد آسیب را گذرانده و اثر انفجار کاهش یافته است.

۳-۱-۱- حالت تک لایه

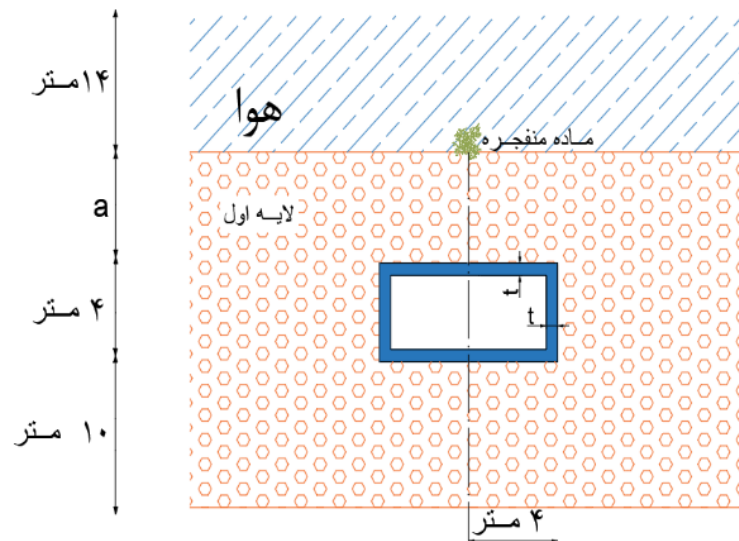
در این بخش سازه در خاک به صورت تک لایه‌ای مدفون شده است (شکل ۷) تنش و جابجایی در بحرانی‌ترین نقطه (مرکز سقف) در عمق دفن ۸ متر اندازه‌گیری می‌گردد، با توجه به شکل ۷ سازه در زیر یک لایه خاک با جنس و ارتفاع متفاوت قرار گرفته است، نوع خاک و ارتفاع آن با توجه به جدول ۷ تعیین می‌شود.

با توجه به شکل ۸ شاهد نتایج بسیار نزدیک به هم می‌باشیم، اما سازه در ماسه نرم جابجایی ماکزیم نسبتاً کمتری نسبت به دیگر خاک‌ها تجربه کرده است. بیشینه جابجایی در ماسه نرم ۰/۰۱۵ متر است که در لحظه ۰/۰۱۹ ثانیه رخ داده است، همچنین بیشینه جابجایی سازه مدفون در خاک ماسه سخت و خاک رس به ترتیب ۰/۰۱۹ متر و ۰/۰۱۸ متر است که در لحظه ۰/۰۱۵ و ۰/۰۱۶ ثانیه رخ داده است.



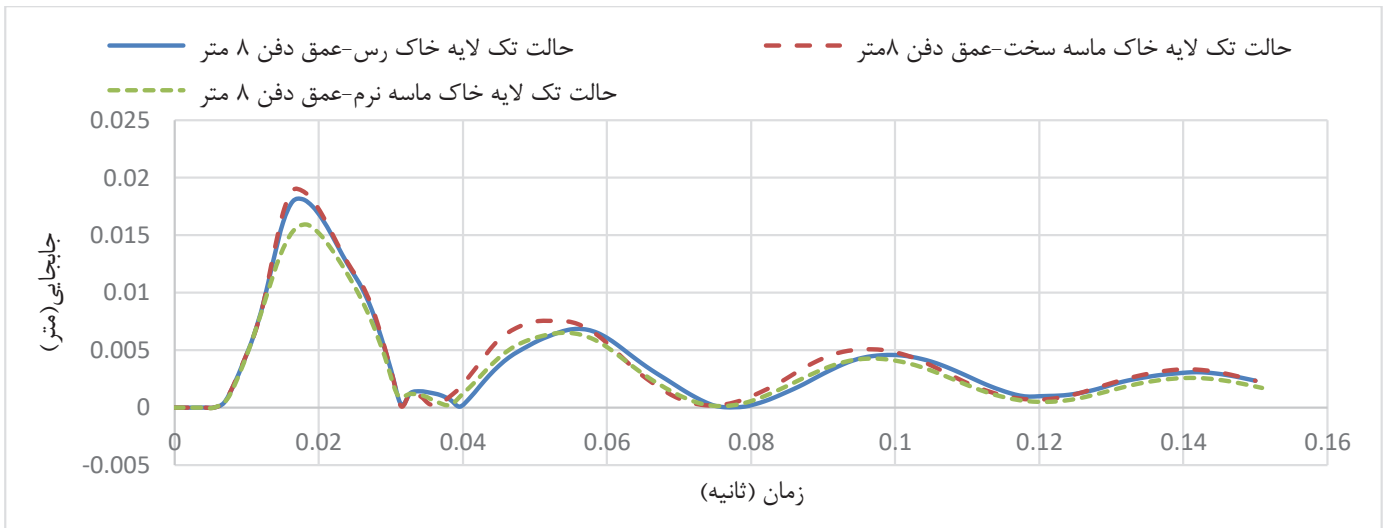
شکل ۶. انتشار موج حاصل از انفجار در بازه زمانی ترتیب از $+0.01$ تا $+0.15$ ثانیه

Fig. 6. The propagation of the blast wave ranged from 001.0 to 15.0 seconds



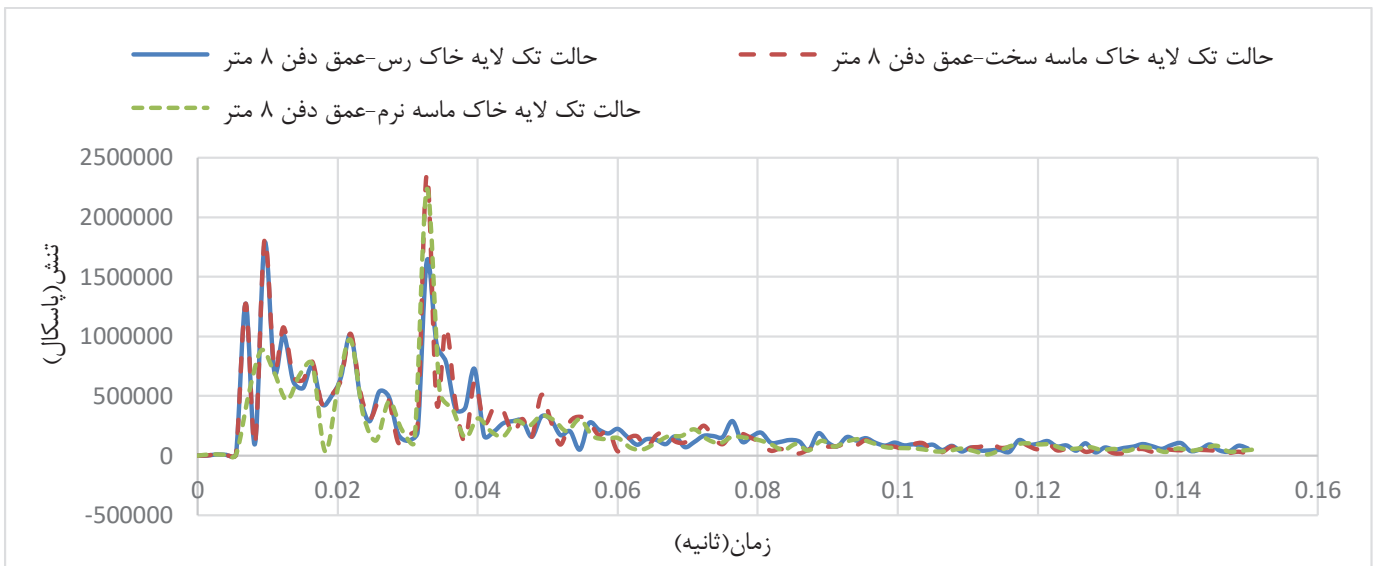
شکل ۷. تصویر شماتیک سازه مدفون در حالت تک لایه خاک

Fig. 7. Schematic image of a structure buried in a single layer of soil



شکل ۸. برآیند جابجایی در المان مرکز سقف در حالت تک لایه

Fig. 8. The result of displacement in the center element of the roof in single-layer mode



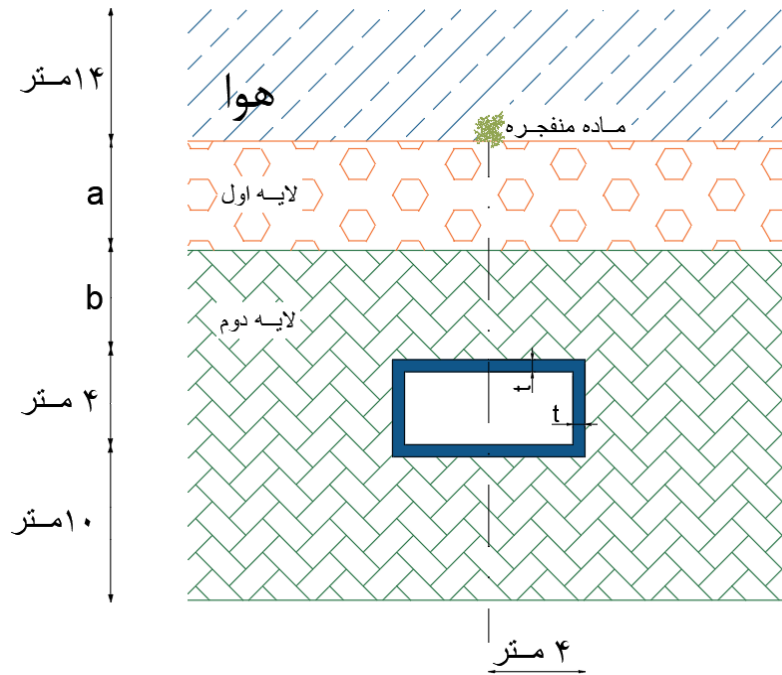
شکل ۹. برآیند تنش در المان مرکز سقف در حالت تک لایه

Fig. 9. The result of stress in the center element of the roof in a single-layer state

۳-۲- حالت دو لایه

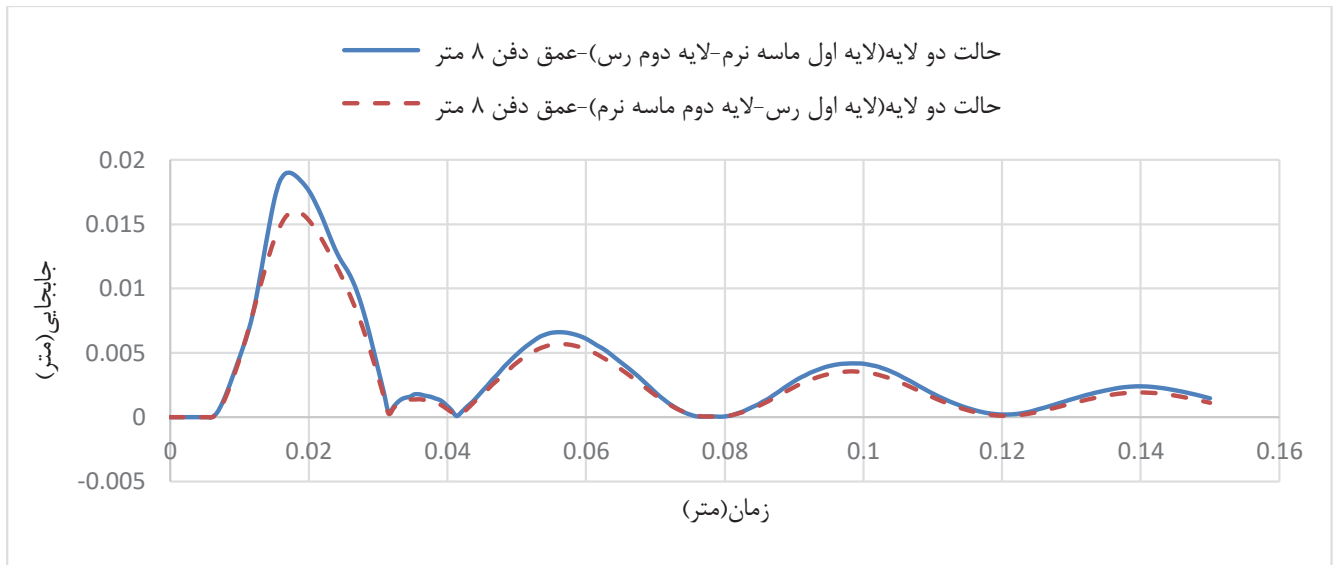
در این بخش خاک به صورت لایه‌ای در نظر گرفته می‌شود، تنش و جابجایی در بحرانی‌ترین نقطه سقف سازه مدفون شده در عمق دفن ۸ متر بررسی می‌گردد. در شکل ۱۰ می‌توان شماتیک مدل را مشاهده کرد، با توجه به شکل سازه (شکل ۱۰) در زیر دو لایه خاک با جنس و ارتفاع متفاوت قرار گرفته است، نوع خاک و ارتفاع آن با توجه به جدول ۷ تعیین می‌شود.

شکل ۹ نشان می‌دهد که بیشینه تنش در سازه مدفون شده در خاک ماسه سخت و نرم تقریباً یکسان بوده و مقدار آن $4e223$ پاسکال در لحظه 0.034 ثانیه می‌باشد. مقدار بیشینه تنش در خاک رس $4e181$ پاسکال در زمان 0.009 ثانیه بوده است. از این رو می‌توان نتیجه گرفت تنش در سازه مدفون شده در خاک رس کمتر از دو حالت دیگر است.



شکل ۱۰. تصویر شماتیک سازه مدفون در حالت دو لایه خاک

Fig. 10. Schematic image of a structure buried in two-layer soil

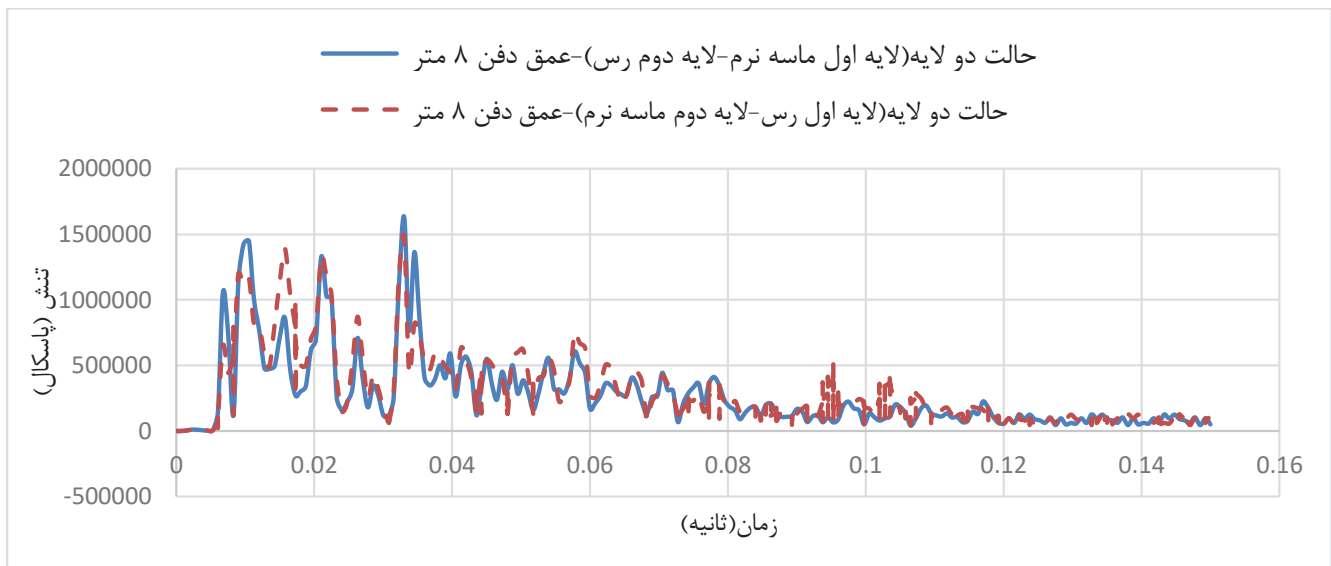


شکل ۱۱. برآیند جابجایی در المان مرکز سقف در حالت دو لایه

Fig. 11. The result of displacement in the center element of the roof in two layers

جابجایی حالت ۴ (لایه اول ماسه نرم-لایه دوم رس) ۰/۰۱۹ متر در لحظه ۰/۰۱۷ ثانیه می‌باشد.

با توجه به شکل ۱۱ بیشینه جابجایی در حالت ۵ (لایه اول رس- لایه دوم ماسه نرم) مقدار کمتری داشته است که مقدار عددی آن ۰/۰۱۶ متر در لحظه ۰/۰۱۸ ثانیه است. همچنین مقدار عددی بیشینه



شکل ۱۲. برآیند تنش در المان مرکز سقف در حالت دو لایه

Fig. 12. The result of stress on the center element of the roof in the two-layer state

-لایه سوم خاک رس) بیشتر از حالت ۷ (لایه اول خاک رس- لایه دوم ماسه سخت -لایه سوم خاک ماسه نرم) بوده و مقدار آن‌ها به ترتیب ۵۵۱۳ و ۵۵۱۱ پاسکال است، این بیشینه تنش برای حالت اول در زمان ۰/۰۰۹ ثانیه و حالت دوم در زمان ۰/۰۰۳ ثانیه رخ داده است. این موضوع نشان دهنده‌ی آن است که سازه در حالت ۷ تنش کمتری را تجربه کرده است. بررسی در این حالت نشان می‌دهد تغییر مکان لایه‌ها تأثیر چندانی بر پاسخ سازه‌ها نداشته است.

۳-۴- تأثیر تعداد و جنس لایه‌ها بر پاسخ سازه مدفون

در این بخش برای درک بهتر این موضوع که شرایط سازه در هر حالت به چه گونه‌ای است، بیشینه جابجایی و تنش به صورت نمودارهای میله‌ای ارائه می‌گردد.

از بررسی شکل ۱۶ ملاحظه می‌گردد که بیشترین جابجایی مربوط به شرایط حالت ۶ (خاک سه لایه) جدول ۷ (لایه اول ماسه نرم- لایه دوم ماسه سخت -لایه سوم خاک رس) و کمترین مقدار جابجایی در شرایط خاک تک لایه حالت ۲ (ماسه نرم) می‌باشد. میزان این اختلاف حدود ۱۹ درصد می‌باشد، که این موضوع اهمیت لایه‌بندی خاک بر پاسخ سازه‌های مدفون را نشان می‌دهد. این موضوع ثابت می‌نماید

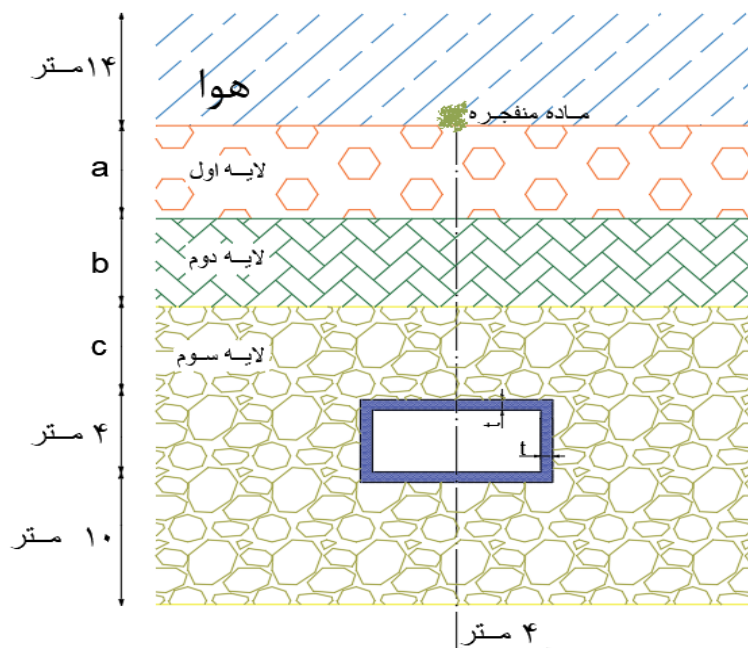
با توجه به شکل ۱۲ می‌توان دریافت تنش وارد شده به سازه مدفون در حالت ۴ (لایه اول ماسه نرم- لایه دوم خاک رس) بیشتر از حالت ۵ (لایه اول خاک رس- لایه دوم خاک ماسه نرم) بوده و مقدار آن‌ها به ترتیب ۵۵۱۶ و ۵۵۱۴ پاسکال است، و این مقادیر در زمان ۰/۰۰۳ ثانیه اتفاق افتاده است. این موضوع نشان دهنده‌ی آن است که سازه مدفون شده در حالت ۵ تنش کمتری را تجربه کرده است.

۳-۳- حالت سه لایه

در این بخش خاک به صورت سه لایه در نظر گرفته می‌شود، تنش و جابجایی در بحرانی‌ترین نقطه سقف سازه مدفون شده در عمق دفن ۸ متر مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به شکل ۱۳ سازه در زیر سه لایه خاک با جنس و ارتفاع متفاوت قرار گرفته است، نوع خاک و ارتفاع آن با توجه به جدول ۷ تعیین می‌شود.

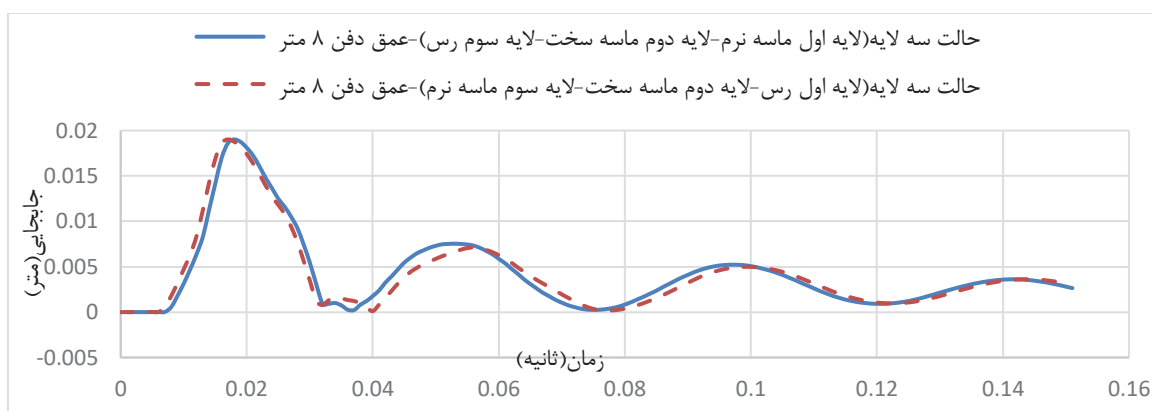
همانگونه که ملاحظه می‌شود، با توجه به شکل ۱۴ بیشینه برآیند جابجایی بسیار نزدیک به هم است و مقدار بیشینه برآیند جابجایی در هر دو حالت ۰/۰۱۹ متر می‌باشد. این بیشینه در لحظه ۰/۰۱۸ ثانیه رخ داده است.

همچنین با توجه به شکل ۱۵ می‌توان دریافت تنش وارد شده به سازه مدفون در حالت ۶ (لایه اول ماسه نرم- لایه دوم ماسه سخت



شکل ۱۳. تصویر شماتیک سازه مدفون در حالت سه لایه خاک

Fig. 13. Schematic image of a structure buried in a three-layer soil

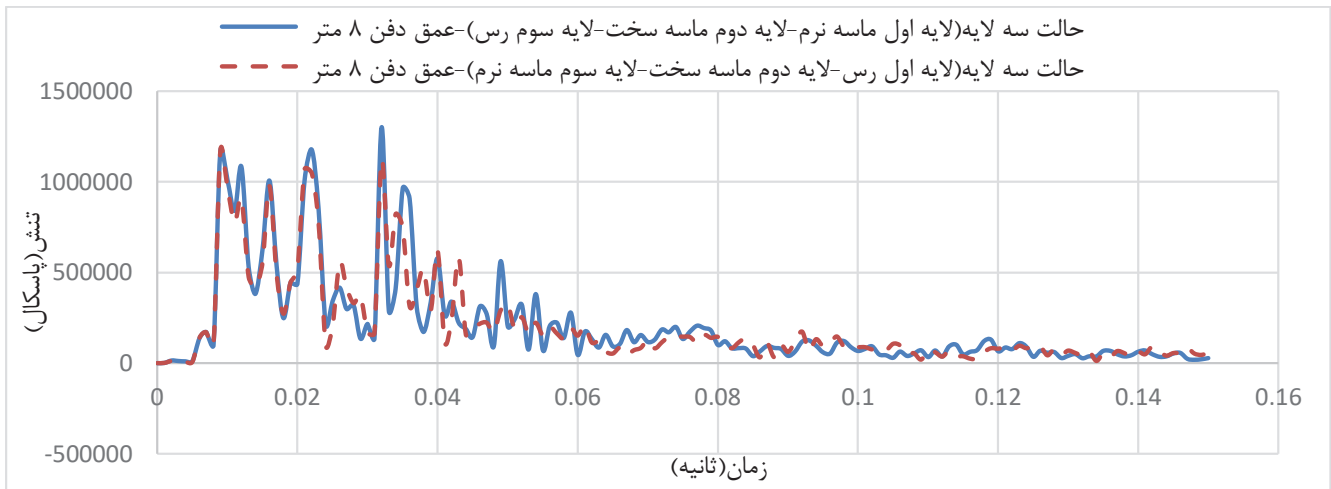


شکل ۱۴. برآیند جابجایی در المان مرکز سقف در حالت سه لایه

Fig. 14. The result of displacement in the center element of the roof in three layers

این اختلافات به ترتیب حدود ۱۸ و ۱۳ درصد محاسبه گردیده است. این موضوع نیز اهمیت تغییر خصوصیات رفتاری خاک بر نحوه انتقال امواج انفجار به سازه را نمایان می‌نماید. یعنی حتی در شرایطی که تعداد لایه‌ها عوض نشود تغییر خصوصیات مصالح خاکی می‌تواند تا حدود ۲۰ درصد اختلاف در نتایج را به همراه داشته باشد.

که تعداد لایه‌ها و جنس آن‌ها به میزان قابل توجهی می‌تواند نتایج را تحت تأثیر قرار دهد. به عبارت دیگر ویژگی‌های رفتاری خاک‌ها و اندرکنش لایه‌ها با تغییر تعداد آن‌ها می‌تواند سبب تغییر جابجایی ایجاد شده در سازه گردد. همچنین ماسه نرم تک لایه نسبت به خاک رس و ماسه سخت تک لایه باعث کاهش جابجایی در سازه گردیده‌اند



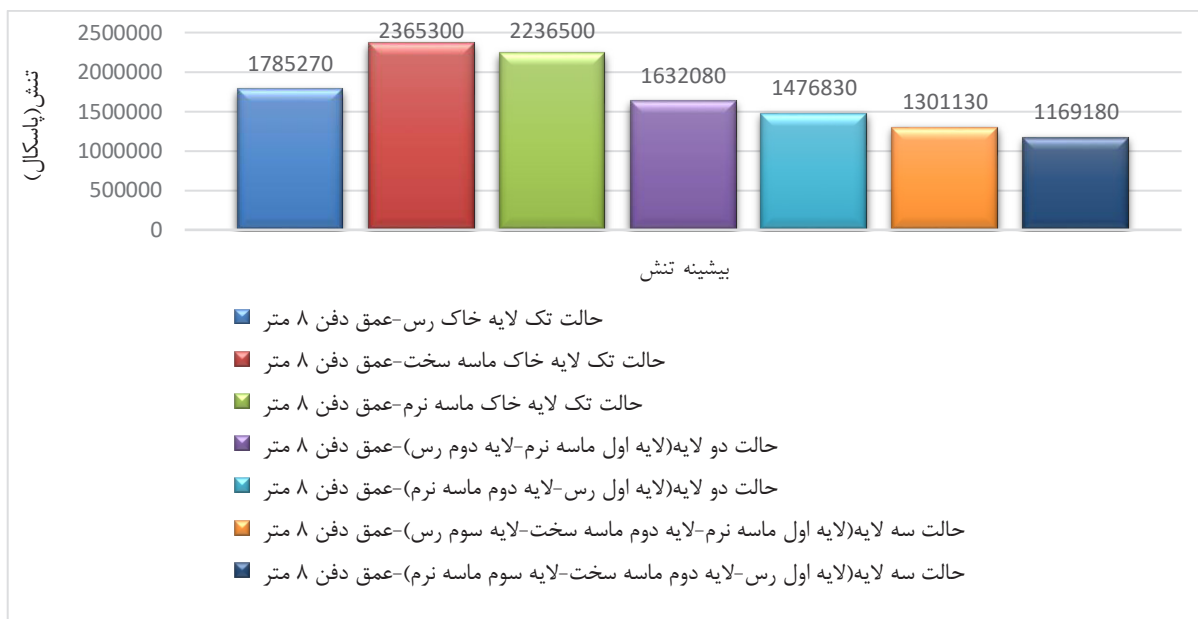
شکل ۱۵. برآیند تنش در المان مرکز سقف در حالت سه لایه

Fig. 15. The result of stress on the center element of the roof in the three-layer state



شکل ۱۶. بیشینه جابجایی برای تمامی حالات خاک در عمق دفن ۸ متر

Fig. 16. Maximum displacement for all soil conditions at a burial depth of 8 meters



شکل ۱۷. بیشینه تنش برای تمامی حالات خاک در عمق دفن ۸ متر

Fig. 17. Maximum stress for all soil conditions at a burial depth of 8 meters

تک لایه، دو لایه و سه لایه در عمق دفن‌های ۸ متر قرار گرفته است. با تحقیق انجام گرفته مشخص گردید که، بیشترین جابجایی مربوط به شرایط حالت ۶ جدول ۷ (لایه اول ماسه نرم- لایه دوم ماسه سخت -لایه سوم خاک رس) و کمترین مقدار جابجایی در شرایط خاک تک لایه حالت ۳ (ماسه سخت) می‌باشد. میزان این اختلاف حدود ۱۹ درصد می‌باشد، که این موضوع اهمیت لایه‌بندی خاک بر پاسخ سازه‌های مدفون را نشان می‌دهد. همچنین ماسه نرم تک لایه نسبت به خاک رس و خاک ماسه سخت تک لایه باعث کاهش جابجایی در سازه گردیده‌اند این اختلافات به ترتیب حدود ۱۸ و ۱۳ درصد محاسبه گردیده است.

همچنین در خصوص تأثیر لایه‌های خاک بر پاسخ سازه‌های مدفون ملاحظه می‌گردد با افزایش تعداد لایه‌های خاک، میزان تنش‌ها کاهش یافته است. این اختلاف تنش، گاهی تا حدود ۱۰۰ درصد مشاهده گردیده است. این میزان اختلاف به خوبی تأثیر تعداد لایه‌های خاک در کاهش پاسخ‌ها در سازه‌های مدفون نشان می‌دهد.

از بررسی شکل ۱۷ ملاحظه می‌گردد مقادیر تنش حداکثر در حالت لایه‌ای در سازه مدفون نسبت به خاک تک لایه کمتر گردیده است، این اختلاف تا حدود ۱۰۰ درصد بین حالت خاک تک لایه‌ای ماسه سخت تا سه لایه‌ای مشاهده می‌گردد. نکته قابل توجه کاهش مقادیر تنش با افزایش تعداد لایه‌ها است. این موضوع می‌تواند با توجه به تئوری انتشار امواج در خاک و شکست‌های چندگانه موج و انعکاس و انتقال آن‌ها مربوط گردد، که در حالت چند لایه نسبت به حالت سه لایه امواج تنش کاهش بیشتری را تجربه می‌نمایند.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس، تأثیر تعداد و جنس خاک بر پاسخ سازه‌های مدفون در برابر انفجار مورد تحلیل قرار گرفت و پارامترهای جابجایی و تنش برحسب زمان بررسی شدند. تحلیل به صورت غیرخطی در نظر گرفته شده است. سازه مورد بررسی بتنی بوده و در خاک رس، ماسه نرم و ماسه سخت به صورت

۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی

P_0 : بیشینه فشار (MPa)

R : فاصله از مرکز انفجار (m)

W : وزن ماده منفجره (Kg)

E : مدول الاستیسیته (N/m^2)

منابع

- [7] A. Abedin, S. Fadaei, of Surface Explosion on Buried Structures with Concrete Barriers, 2th National Conference on Applied Research in Structural Engineering and Construction Management, Tehran, Iran, (2017)(In Persian).
- [8] R. Ghogzni, Analysis of the effect of surface explosion on safe underground structure (tunnel) buried in soil, Master Thesis, Shahid Chamran University, (2017)(In Persian).
- [9] Y. Lu, Z. Wang, K. Chong, A comparative study of buried structure in soil subjected to blast load using 2D and 3D numerical simulations, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 25 (4) (2015) 275–288.
- [10] R. naderi, L. Gangi, Evaluation of the reaction of steel pipes buried in the soil due to surface explosion, The 1th National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tehran, Iran, (2014) (In Persian).
- [11] A. Tajbakhsh, M. Parvizi, Effects of surface blasting on tunnels buried in loose sandy soil, The 1th National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tehran, Iran, (2014) (In Persian).
- [12] H.R. Bitarfan, H. Rahnama, Simulation of the effect of an underground explosion and its response on a structure trapped in saturated soil by LS Dina software, The 1th national conference on geotechnical engineering, Ardabil, Iran, (2013)(In Persian).
- [13] N. Nagy, M. Mohamed, J.C. Boot, Nonlinear numerical modelling for the effects of surface explosions on buried reinforced concrete structures, journal Geomechanics and Engineering, 2(1) (2010) 1-18.
- [14] M. Mokhtari, A. Alavi Nia, The application of CFRP to strengthen buried steel pipelines against subsurface explosion, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 87 (2016) 52–62.
- [15] A. Aghasi, M, Zolfaghari, M,safi, Investigation of the effect of soil mechanical properties on the performance of blasted steel facilities under explosion, 3th National Conference on Earthquake and Structures ,Kerman, Iran, (2012) (In Persian).
- [1] A. Hamidi, O. Zolfaghary, Investigation of blast waves in buried structures (tunnels) in layered soils by finite element method, 5th International Conference on Civil Engineering, Architecture & Urban Development, Tehran, Iran, (2017) (In Persian).
- [2] S. Beiti, The effect of soil behavioral models in multilayer systems on the response of underground structures under the dynamic load due to explosion, Master Thesis, University of Tabriz, (2014) (In Persian).
- [3] V. Hosseinitoudeshki, P. Mehdipour Ghazvini, Investigating the Effect of Soil Moisture on the Safety of the Underground Shelters against the Waves Caused by Surface Explosion, Scientific Journal of Advanced Defense Science and Technology, 10(1) (2019) 101-111(In Persian).
- [4] S.A. Hosseini, N. Hosseini, Numerical Modeling of Underground Explosion and Response of Buried Structures using Coupled Eulerian-Lagrangian Method, Scientific Journal of Advanced Defense Science and Technology, 9(3) (2018) 325-336(In Persian).
- [5] M.R. habibi, S.M.S. Sameti, S.M. Hosseini, Investigation of the effect of loads caused by surface explosion on buried tanks. International Conference on Architecture, Urbanism, Civil Engineering, Art, Environment, Future Horizons & Retrospect, Tehran, Iran, (2016) (In Persian).
- [6] A.R. Arab Bafarani, GH. Dehghani Ashkazari, S. Haji Qasim Ali, Investigation of the behavior of reinforced concrete tanks buried under surface explosion load, 5th National Concrete Conference of Iran, Tehran, Iran, (2013)(In Persian).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Hematiyan, H. Dashti, Effect of Number and Type of Soil Layers on the Response of Buried Structures to Explosion, Amirkabir J. Civil Eng., 54(9) (2022) 3451-3470.

DOI: [10.22060/ceej.2022.19195.7100](https://doi.org/10.22060/ceej.2022.19195.7100)



