

Numerical Modeling and Optimization of Rock Layers Arrangement to Reduce the Effect of Surface Impact Loading on Underground Spaces

M .Y. Radan*, A. Moghadam, S. A. Hoseini

Faculty of Passive Defense, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

ABSTRACT: Today, the use of buried spaces to protect sensitive facilities and equipment is not hidden from anyone. Buried safe spaces, especially tunnels, are used to create warehouses, maintain defense and military equipment, and also store some special materials and equipment. In addition, it is common to use these spaces as tunnels for urban services such as water transmission lines, telecommunications, energy, etc. Ensuring the security of these spaces against surface loads is one of the most important things in their construction and design. Buried spaces are exposed to various loadings, one of which is surface impact loading caused by an explosion. In this article, impact loading in buried environments is numerically modeled using the Eulerian-Lagrangian (CEL) method in the ABAQUS software environment. For this purpose, using single-layer, double-layer, and three-layer stone arrangements, the maximum pressure caused by impact load has been investigated in different models. According to the simulation results in this research, the highest amount of shock wave damping was obtained when the rock layer with the highest degree of weathering (porous rock) is located in the closest position to the buried space. Based on this, the safe depth of the modeled buried space was found to be about 12 meters for weak or porous rock, about 14 meters for medium rock, and about 18 meters for strong or pristine rock. Also, based on the results, the amount of transfer stress from weak rock to strong rock increases, and the amount of stress from strong rock to weak rock decreases.

Review History:

Received: May, 11, 2021

Revised: Dec. 07, 2023

Accepted: Aug. 28, 2024

Available Online: Aug. 04, 2025

Keywords:

Impact Load

Numerical Modelling

Protective Layers

Optimization

Buried Space

1- Introduction

A critical issue concerning underground spaces is ensuring their stability. The focus of this research is on reinforcing underground spaces against loads generated by external factors. Important underground infrastructures, such as subway tunnels, communication tunnels, and military facilities, require protection. Impact loading can occur on the surface or after penetration into the ground. The study of impact loading and underground spaces dates back to World War II, with increased attention following terrorist attacks in various locations [1]. Countries like Japan, France, and Germany suffered significant damage during World War II. Additionally, in the 20th century, terrorist attacks such as the bombing of the World Trade Center in London, the Federal Building bombing, and the attacks on the Twin Towers, as well as the subsequent damages in Afghanistan and Iraq, highlighted the importance of this issue [2]. Numerous studies have been conducted to examine this topic, which can be categorized into different groups, such as experimental and numerical studies [3-19].

2- Modeling

To validate the buried space modeled by Tiwari and colleagues [4], an analysis was conducted using the ABAQUS software. For modeling the rock, the Drucker-Prager failure criterion was employed. The failure behavior of the rock is characterized by local nonlinearity. The properties of the rock used in the analysis are the same as those of the stone used in Tiwari and colleagues [4].

As previously explained, the JWL-EOS model was employed for the simulation of TNT and its parameters [15]. The governing equation for this model and the relevant parameters are presented below:

$$p = A(1 - \frac{\omega}{R_1 \bar{\rho}})e^{R_1 \bar{\rho}} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 \bar{\rho}})e^{R_2 \bar{\rho}} + \omega p e_{\text{int}} \quad (1)$$

Figure 5 illustrates the positioning of TNT in both the buried and assembled configurations within the ABAQUS software environment. The modeling was conducted using

*Corresponding author's email: radan@mut.ac.ir

Table 1. Rocks' characteristics used for modeling [18]

Rock Type	H	M	L
Specific gravity (G)	2.65	2.65	2.65
Density (qr) (kg/m ³)	2550	2420	2350
Elastic modulus (ER) (GPa)	28	14	4
Poisson's ratio (m)	0.25	0.28	0.4
Angle of internal friction (u)	42	39	33
In situ stress ratio (K0)	0.5	0.5	0.5
Dilation angle (w)	5	5	5
Cohesion (c) (MPa)	2.3	1.54	1.4
fc (MPa)	40	28	10.5
RQD range	75-90	30-40	20-10
RMR	47	33	20

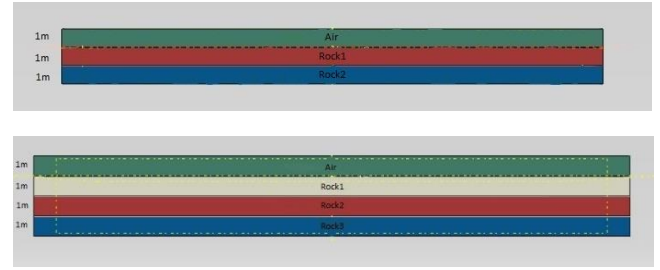
the Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) method. To enhance the accuracy of the simulation, a mesh sensitivity analysis was employed. Consequently, a mesh size of 4 cm was selected for this study.

Rocks can be classified into three general categories based on their resistance to impact loading: strong (H), medium (M), and weak (L). The characteristics of these categories are provided in Table 1. The Drucker-Prager constitutive model has been employed in ABAQUS software to model the behavior of these rocks.

of the buried space were modeled in the ABAQUS software based on the research conducted by Brox and Lee [19]. The buried space was modeled with a length of 10 meters, a width of 7.5 meters, a depth of 30 meters, and a thickness of 0.25 meters. The properties of the concrete used are the same as in [4].

Upon modeling, it is observed that at a depth of approximately 18 to 20 meters for strong (intact) rock, the rotation of the upper wall of a square tunnel with a thickness of 0.25 meters is about 2 degrees. According to the analysis results, the maximum pressure exerted on the buried space in this scenario is approximately 10 to 12 MPa. Therefore, it can be concluded that when the maximum pressure exerted on the buried space is around 10 to 12 MPa, the rotation of the upper wall of the square tunnel reaches 2 degrees, which is the maximum allowable wall rotation according to the UFC 2014 code.

Additionally, based on the obtained results and in accordance with the UFC 2014 code, the pressure exerted on the buried space is approximately 1.7 times the maximum pressure exerted on the soil or rock layer above it, which is referred to as the reflection coefficient. The maximum pressure exerted on the soil or rock is determined to be around 7 MPa by dividing 12 MPa by 1.7. In the following sections, we will examine the modeling results for single-layer, double-layer, and triple-layer rock under an impact loading of 2000 kg/m².

**Fig. 1. Teo-layer (up) and Three-layer (down) model; the upper layer is the Air.**

3- Results and Discussion

Modeling of single-layer, double-layer, and three-layer rock configurations with a surface impact load of 2000kg was done in ABAQUS software in order to find the optimal arrangement. The schematics of two/three-layer models are shown in Figure 1. The results are as follows:

Single-layer rock model

The safe burial depth for weak or porous rock (L) is approximately 12 meters, for medium-strength rock (M) it is about 14 meters, and for strong or intact rock (H) it is around 18 meters. Following the modeling, the maximum pressure for the midsection of the single-layer rocks at depths of 5, 10, 15, 20, and 25 meters was recorded. Rock type H exhibits a higher maximum pressure compared to rock types M and L. In contrast, rocks M and L reduce the maximum pressure exerted on the structure at depths of 5, 10, 15, and 25 meters by 50%, 66%, 32%, 52%, 23%, 54%, 17%, and 37%, respectively, compared to rock type H.

Two-layer rock model

Six configurations for the two-layered model were conducted: H-L, H-M, L-H, L-M, M-H, and M-L. The maximum pressure results for the mid-sections of the layers were compared.

In the first layer, the least effective configuration in terms of damping the maximum pressure from impact loading is H-L, whereas L-H is the most effective configuration for damping maximum impact pressure. It can be concluded that the configurations H-M, M-L, M-H, L-M, and L-H reduce the maximum impact pressure by 8%, 34%, 44%, 62%, and 63%, respectively, compared to H-L.

In the second layer, the configurations with the least effectiveness in damping the maximum pressure from impact loading are L-H and M-H, while H-L is the most effective configuration for damping the maximum impact pressure. It can be concluded that the configurations M-H, L-M, H-M, M-L, and H-L reduce the maximum impact pressure by 0.2%, 16%, 21%, 47%, and 51%, respectively, compared to L-H.

Three-layer rock model

In the first layer, the most inappropriate mode that has the lowest amount of maximum pressure damping from impact load is H-L-M mode, also, L-H-M is the most suitable mode

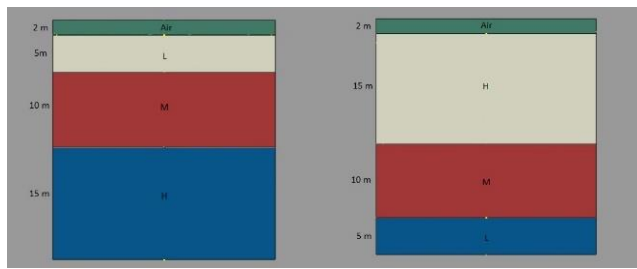


Fig. 2. The L-M-H (Left) and H-M-L (right) configurations.

for maximum pressure damping from impact load. It can be concluded that H-M-L, M-L-H, M-H-L, L-M-H, and L-H-M modes reduce the maximum pressure resulting from the shock load by 6%, 43%, 46%, 63% and 65%, respectively, compared to the H-L-M mode.

In the second layer, the most inappropriate mode that has the lowest amount of maximum pressure damping due to shock load is M-H-L mode, also, H-L-M is the most suitable mode for maximum pressure damping due to shock load. It can be concluded that L-H-M, H-M-L, L-M-H, M-L-H, and H-L-M modes reduce the maximum pressure resulting from impact load by 2%, 5%, 16%, 34%, and 43%, respectively, compared to M-H-L mode.

In the third layer, the most inappropriate mode that has the lowest amount of maximum pressure damping due to impact load is M-L-H mode, also, H-M-L is the most suitable mode for maximum pressure damping due to impact load. It can be concluded that L-M-H, H-L-M, L-H-M, M-H-L, and H-M-L reduce the maximum pressure resulting from impact load by 12%, 26%, 37%, 61% and 62%, respectively, compared to the M-L-H mode, which is the most inappropriate mode for the third layer.

The L-M-H configuration, with layer thicknesses of 5, 10, and 15 meters respectively, and the H-M-L configuration, with layer thicknesses of 15, 10, and 5 meters respectively, have been modeled in the ABAQUS software for a TNT charge of 2000 kilograms, which are shown in Figure 2.

4- Conclusions

In this study, previous research on the design of buried spaces was reviewed, and numerical modeling was employed to examine the behavior of buried spaces under impact loading. The goal was to mitigate the effect of transmitted impact forces on buried spaces by leveraging the properties of the surrounding environment. The study utilized finite element modeling to simulate single-layer, double-layer, and triple-layer rock arrangements, as well as layers of varying rock thicknesses. The simulation results indicated that the arrangement of rock layers significantly influences the reduction of peak pressure resulting from impact loading. The greatest wave attenuation was observed when the rock layer with the highest degree of weathering was positioned closest to the buried space. The maximum damping of the

impact wave occurred when the most weathered rock layer (porous rock) was in the closest proximity to the target buried space. The safe burial depth, according to the graph, was approximately 12 meters for weak or porous rock (L), around 14 meters for medium-strength rock (M), and about 18 meters for strong or intact rock (H). The results also showed that at the boundary between two layers, the transmission of stress from weak rock to strong rock increases, while the stress transmission from strong rock to weak rock decreases.

References

- [1] Buonsanti M, Leonardi G, Scopelliti F. 3-D Simulation of shock waves generated by dense explosive in shell structures. *Procedia Engineering*. 2011 Jan 1;10:1550-5.
- [2] Bazar MH, Salehzadeh H, Kazemi M, Rabeti Moghadam M. Centrifuge modeling of an underground structure subjected to blast loading. *Journal of Advanced Defense Science & Technology*. 2014 Apr 21;5(1):31-41. (in Persian)
- [3] Abaqus/Explicit User's Manual, version 6.13 Dassault Systems Simulia Corporation, Providence. 2016.
- [4] Tiwari R, Chakraborty T, Matsagar V. Dynamic analysis of tunnel in weathered rock subjected to internal blast loading. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016 Nov;49(11):4441-58.
- [5] Tiwari R, Chakraborty T, Matsagar V. Dynamic analysis of tunnel in soil subjected to internal blast loading. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2017 Aug;35:1491-512.
- [6] Feldgun VR, Karinski YS, Edri I, Yankelevsky DZ. Prediction of the quasi-static pressure in confined and partially confined explosions and its application to blast response simulation of flexible structures. *International Journal of Impact Engineering*. 2016 Apr 1;90:46-60..
- [7] Feldgun VR, Kochetkov AV, Karinski YS, Yankelevsky DZ. Internal blast loading in a buried lined tunnel. *International Journal of Impact Engineering*. 2008 Mar 1;35(3):172-83.
- [8] Woods RD. Screening of surface waves in soils. *Journal of the soil mechanics and foundations division*. 1968 Jul;94(4):951-79.,
- [9] Gui MW, Chien MC. Blast-resistant analysis for a tunnel passing beneath Taipei Shongsan airport—a parametric study. *Geotechnical & Geological Engineering*. 2006 Apr;24:227-48.
- [10] Paoletta L, Ochmanski M, Modoni G. An Innovative Holistic GIS-BIM and Artificial Intelligence-Based Approach to Manage Mechanized Tunnelling: The Back-Analysis of the Budapest Metro Line4. In *National Conference of the Researchers of Geotechnical Engineering 2023 Jun 17* (pp. 251-258). Cham: Springer Nature Switzerland.
- [11] Alipour, R., Heshmati A.A., Karimiazar, J., Esazadefar, N., Asghari-Kaljahi, E., Bahmani, S.H. "Resistance and swelling of Tabriz marl soils stabilised using nano-silica

- and nano-alumina.” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering* (2022): 1-14. (in Persian)
- [12] Alipour R, Aminpour H, Dehghanzadeh A. Investigating the effect of soil improvement by micropile method in marl soil: a case study of Bidboland, Khuzestan. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*. 2023 Feb 20;54(12):4573-88.(in persian)
- [13] Khan S, Chakraborty T, Matsagar V. Parametric sensitivity analysis and uncertainty quantification for cast iron-lined tunnels embedded in soil and rock under internal blast loading. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2016 Dec 1;30(6):04016062.
- [14] Lee J, Fenves GL. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. *Journal of Engineering Mechanics*. 1998 Aug;124(8):892-900..
- [15] Larcher M, Casadei F. Explosions in complex geometries—a comparison of several approaches. *International journal of protective structures*. 2010 Jun;1(2):169-95..
- [16] TM5-1300 .Structures to resist the effects of accidental explosions. Technical Manual of the US Departments of the Army and Navy, and the Air Force, USA .1990.
- [17] Tiwari R, Chakraborty T, Matsagar V. Analysis of curved tunnels in soil subjected to internal blast loading. *Acta Geotechnica*. 2020 Feb;15(2):509-28.
- [18] Yadav HR. Geotechnical evaluation and analysis of Delhi metro tunnels (Doctoral dissertation), 2005.
- [19] Brox DR, Lee KW. Yielding And Collapse Of Large Span Tunnels In Weak Rock. In *ISRM Congress 1995 Sep 25* (pp. ISRM-8CONGRESS). ISRM.



مدلسازی عددی و بهینه سازی ترتیب لایه های سنگی به منظور کاهش اثر بارگذاری ضربه ای سطحی بر فضاهای زیرزمینی

محمدیاسر رادان کوهپائی*، آرین مقدم، سید احمد حسینی

مجمع دانشگاهی پدافند غیرعامل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۲۱

بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۱۶

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۳

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۵/۱۳

کلمات کلیدی:

بارگذاری ضربه ای

مدلسازی عددی

لایه های محافظ

بهینه سازی

فضای مدفون

خلاصه: امروزه کاربرد فضاهای مدفون برای حفاظت از تأسیسات و تجهیزات حساس بر کسی پوشیده نیست. از فضاهای امن مدفون بویژه تونل ها برای ایجاد انبارها، نگهداری از تجهیزات دفاعی و نظامی و همچنین ذخیره سازی برخی مواد و تجهیزات خاص استفاده می شود. علاوه بر آن استفاده از این فضاها بعنوان تونل های خدمات شهری مانند خطوط انتقال آب، مخابرات، انرژی و ... متداول است. تامین امنیت این فضاها در برابر بارگذاری های سطحی از موارد بسیار مهم در ساخت و طراحی آن ها می باشد. فضاهای مدفون در مقابل بارگذاری های مختلف قرار می گیرند که یکی از آن ها بارگذاری ضربه ای سطحی ناشی از انفجار است. در این مقاله، بارگذاری ضربه ای در محیط های مدفون با استفاده از روش کوپل اویلری - لاگرانژی (CEL) در محیط نرم افزار ABAQUS بصورت عددی مدل سازی شده است. بدین منظور از چیدمان سنگ تک لایه، دولایه و سه لایه، بیشینه فشار ناشی از بار ضربه ای در مدل های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق با نتایج حاصل از شبیه سازی در این پژوهش، بیشترین میزان دمپ موج ضربه ای زمانی حاصل شد که لایه سنگی با بیشترین درجه هوازگی (سنگ متخلخل) در نزدیک ترین موقعیت نسبت به فضای مدفون مورد نظر قرار گرفته باشد. بر این اساس، عمق ایمن فضای مدفون مدلسازی شده برای سنگ ضعیف یا متخلخل حدود ۱۲ متر، برای سنگ متوسط حدود ۱۴ متر و برای سنگ قوی یا بکر حدود ۱۸ متر بدست آمد. همچنین بر اساس نتایج حاصله، میزان تنش انتقالی از سنگ ضعیف به سنگ قوی افزایش و میزان تنش از سنگ قوی به سنگ ضعیف کاهش می یابد.

۱- مقدمه

مسئله مهم در رابطه با فضاهای مدفون تامین پایداری آن ها می باشد. موضوع تحقیق حاضر معطوف به مقاوم سازی فضاهای مدفون در برابر بارگذاری ناشی از عوامل خارجی است. تونل های مترو، تونل های ارتباطی، تأسیسات مهم نظامی و ... از جمله مهم ترین فضاهای زیرزمینی هستند که نیاز به محافظت دارند. بارگذاری ضربه ای می تواند بر روی سطح زمین باشد یا بعد از نفوذ در داخل زمین اعمال شود. سابقه بررسی پدیده بار ضربه ای و همچنین فضای های مدفون به جنگ جهانی برمی گردد. همچنین پس از آن بعد از حملات تروریستی انجام شده در نقاط مختلف توجه به بررسی این موضوع بیشتر شده است [۱]. در زمان جنگ جهانی دوم خسارت جدی به کشورهای مثل ژاپن و فرانسه و آلمان وارد شده است. علاوه بر آن در قرن بیستم حملات تروریستی مانند انفجار در مرکز تجارت جهانی لندن، انفجار در ساختمان مرکزی فدرال، حملات تروریستی به برج های دوقلو و همچنین

به تبع آن خسارت های ناشی از حملات به کشورهای افغانستان و عراق بر اهمیت این موضوع افزوده است [۲]. مطالعات زیادی به منظور بررسی این موضوع انجام شده است. این مطالعات می تواند به گروه های مختلفی مثل مطالعات آزمایشگاهی و مطالعات عددی تقسیم بندی کرد. در ادامه به بررسی این مطالعات پرداخته می شود. می توان گفت یکی از ابتدایی ترین و جامع ترین مطالعاتی که انجام شده است در قالب یک آیین نامه به عنوان TM5-855-1 منتشر شده است. در ادامه تمرکز بررسی مطالعات انجام شده بر روی دو بخش قرار دارد. بخش اول به بررسی پدیده بار ضربه ای و بخش دوم به بررسی مقاوم سازی تونل ها پرداخته می شود. در پژوهش حاضر، پدیده بار ضربه ای در محیط های مدفون با استفاده از روش کوپل اویلری - لاگرانژی (CEL) در محیط نرم افزار ABAQUS مدل سازی شده است. آلمان های اویلری هوا و خاک در نظر گرفته شده اند و در صورت وجود فضای مدفون، آلمان های لاگرانژی برای تعریف فضای استفاده شده است. با توجه به



روش تحلیل که از نوع CEL می‌باشد، لازم است از حل گر صریح (Ex-plicit) نرم‌افزار ABAQUS به منظور تحلیل‌های عددی استفاده شود [۳]. در روش اویلری، مش‌بندی ثابت است و مصالح مربوط به بخش‌های مختلف مدل، درون این مش‌بندی ثابت می‌توانند حرکت کنند. بنابراین کل محدوده مورد نظر برای مساله توسط یک قطعه اویلری تعریف می‌شود. سپس محل اولیه مصالح مربوط به بخش‌های مختلف مدل تعریف می‌شوند. بعنوان مثال محدوده قرارگیری ماده منفجره در قطعه اویلری، توسط کسر حجمی اویلری (EVF)^۱ مربوطه تعریف می‌شود. بنابراین نرم افزار، المان‌هایی را که در قطعه اویلری متناظر با ماده منفجره هستند را شناسایی کرده و مصالح مربوطه را به آن اختصاص خواهد داد [۴]. در سال ۲۰۱۶ تیواری و همکاران [۵] با استفاده از مدلسازی عددی در نرم افزار ABAQUS به بررسی رفتار دو تونل مجاور در اثر بارگذاری ضربه‌ای پرداختند. در این مدلسازی از دو تونل به قطر های برابر و ۵ متری در عمق ۷/۵ متری استفاده شده است که فاصله مرکز به مرکز این تونل ها ۱۰ متر و ابعاد کل مدل $15 \times 20 \times 20$ متر انتخاب شده است. مرز های اطراف مدل در راستای عمود بر آن بسته شده اند تا پایداری مدل تامین شود. بار ضربه‌ای در یکی از تونل ها اتفاق افتاده و در تونل دیگر اطلاعات و رفتار آن بررسی می‌شود. این تونل به عنوان تونل دریافت کننده نام گذاری شده است. لاینینگ تونل ها با استفاده از بتن های مسلح مدلسازی شده اند. از المان های سه بعدی ۸ گره ای برای مدلسازی خاک و بتن مسلح استفاده شده است. در حالی که از المان های تیر برای مدلسازی تسلیح استفاده شده است. میزان شدت بار ضربه‌ای به میزان وزن مواد آن بستگی دارد. در این مدلسازی از بار ضربه‌ای به وزن ۵۰ کیلوگرم استفاده شده است. در مدلسازی مدل‌های رفتاری از مدل دراکر پراگر برای خاک و از مدل جانسون کوک برای فلز و بتن استفاده شده است. این مدل ها وابسته به نرخ کرنش می‌باشند و می‌توانند در بارگذاری دینامیکی مانند بار ضربه‌ای مورد استفاده قرار بگیرند. تغییر مکان و تنش های ایجاد شده در تونل مجاور از پارامترهایی هستند که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته اند. نتایج نشان می‌دهد که فاصله تونل ها و وزن مواد منفجره از اهمیت زیادی برخوردار است. به وضوح میزان تغییر مکان و تنش ناشی از بار ضربه‌ای در اطراف تونلی که در آن بار ضربه‌ای اتفاق می‌افتد بیشتر از تغییر مکان و تنش است که در اطراف تونل دریافت کننده می‌باشد. در تحقیق مشابه در سال ۲۰۱۴ توسط فلدگان و همکارانش [۶] دو تونل به شکل هندسی مستطیلی مدلسازی شده است که بارگذاری ضربه‌ای درون تونل و

تاثیر آن بر روی تونل مجاور بررسی شده است. در این تحقیق همه مراحل بار ضربه‌ای از جمله تشکیل جبهه گاز پرفشار درون تونل و فشار آن به دیوار تونل مدلسازی شده است. اندرکنش خاک و تونل در هنگام بارگذاری دینامیکی و انتشار موج ضربه‌ای در این دو محیط نیز در نظر گرفته شده است. در سال ۲۰۱۴ تحقیقی که توسط بازپار و همکاران [۲] انجام شد، از ماده ژئوفوم و هم چنین از خاک درشت دانه با درصد تراکم پایین استفاده شد. خاک اصلی استفاده شده در این آزمایش درصد تراکم نسبی ۸۷ بوده و از یک لایه خاک درشت دانه با درصد تراکم ۴۰ درصد به عنوان یک مانع برای کاهش اثرات مخرب بار ضربه‌ای استفاده شده است. هم چنین در حالت دیگر از این آزمایش از ژئوفوم با چگالی ۹ کیلوگرم بر متر مکعب به عنوان مانع بکار برده شده است. آزمایش سانتریفیوژ با شتاب ۷۰ برابر گرانش در حالی انجام شده است که از ۶ وسیله از جمله کرنش سنج و شتاب سنج و فشار سنج استفاده شده است. در آزمایشی دیگر که توسط وودز و همکاران [۷] انجام شد، محل قرار گیری مناسب مانع بین فاصله ماده منفجره و سازه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج در این آزمایش نشان می‌دهد بهترین تاثیر کاهشی مثبت مربوط به محل قرار گیری مانع کنار سازه می‌باشد. ونگ و همکاران در سال ۲۰۰۶ [۸] یک مدل عددی برای بررسی مانع بر روی توزیع تنش های ناشی از بار ضربه‌ای ساخته اند. بارگذاری در این مدل عددی بصورت مثلثی تخمین زده شده و بصورت گسترده بر روی سطح مدل اعمال شده است. مانعی که در این مدل عددی مورد استفاده قرار گرفته از ترکیب لایه های مختلف تشکیل شده است. هسته اصلی مانع از جنس ژئوفوم می باشد. در لایه های بالایی و زیرین این هسته نیز از ماده بتن استفاده شده است. در آن مدل عددی از مدل سازی سازه خودداری شده است و تنها توزیع و گسترش موج تنش در مدل در نقاط مختلف اندازه گیری شده است. نتایج نشان داده است که استفاده از این مانع به منظور کاهش موج های تنشی در مدل عددی موثر می باشد. ایرادی که به این تحقیق وارد است استفاده از بارگذاری مثلثی شکل و اعمال آن به صورت بار گسترده در سطح مدل می باشد. در سال ۲۰۰۶ نیز گویی و چن و [۹] با استفاده از برنامه FLAC یک مدل عددی دو بعدی برای بررسی و تحلیل اثر بار ضربه‌ای بر روی تونل موجود زیر فرودگاه تایپی ساخته است. سپس در این مدل عددی تحلیل پارامتریک انجام شده است. در شکل زیر نمای جایگاه فرودگاه و تونل زیر آن نشان داده شده است. هم چنین مدل دو بعدی نیز که در مدل ایجاد شده در ادامه ارائه شده است. خاک منطقه عمدتاً از رس با پلاستیسیته پایین

تشکیل شده است. همچنین عدد SPT^۱ در این خاک کمتر از ۲۰ می باشد که نشان دهنده سست بودن خاک سایت است. در بارگذاری دینامیکی فرض شده است که بمب تا عمق ۱۲/۵ متری نفوذ کرده و وزن معادل ۲۰۹۰ پوند ماده منفجره داشته باشد. پائولا و مدونی در سال ۲۰۲۳ [۱۰] یک ابزار نوین برای طراحی خط ۴ متروی بوداپست بر اساس GIS-BIM و شبکه‌های عصبی مصنوعی پیشنهاد دادند. این ابزار به طور موثری تغییرات شکل زمین و آسیب‌های ناشی از حفاری مکانیزه را پیش‌بینی می‌کند. حفاری تونل مکانیزه یک روش کارآمد با تأثیر محدود بر محیط زیست در مناطق شهری است. دستگاه حفاری تونل (TBM) پیشروی سریع‌تر، کنترل بهتر تغییرات شکل سطحی و استانداردهای ایمنی بهتر را فراهم می‌کند. عالی پور و همکارانش در سال ۲۰۲۲ [۱۱] طی تحقیقاتشان در مورد خاک‌های مارن تبریز انجام دادند. مارن‌ها از خاک‌های مسئله دار هستند که در صورت قرار گرفتن در معرض جریان آب متورم می‌شوند و مشکلاتی در پایداری بستر پروژه‌های عمرانی ایجاد می‌کنند. خاک‌های مارن تبریز که به دلیل مقاومت کم و تورم زیاد مشکلاتی برای پروژه‌ها ایجاد می‌کنند، را با استفاده از افزودنی‌های نانوسیلیکا و نانوالومینا با موفقیت تثبیت کردند. این مطالعه تأثیر این افزودنی‌ها روی نمونه‌های بازسازی شده از خاک مارن تبریز را بررسی کرد و هدف آن کاهش تأثیرات محیط زیستی منفی نسبت به تثبیت کننده‌های سنتی مانند سیمان یا آهک بود. ارزیابی‌های آزمایشگاهی، از جمله محدوده‌های اثر برگ، فشار تورم، نسبت تحمل کالیفرنیا (CBR) و آزمون برش مستقیم، به بهبود قابل توجه رفتار خاک اشاره داشتند. به‌ویژه، نانوسیلیکا تأثیر بیشتری در افزایش استحکام خاک (CBR) داشت. این تحقیق رویکرد جدیدی برای رفع چالش‌های مرتبط با خاک‌های مارن ارائه می‌دهد. عالی پور و همکارانش در سال ۲۰۲۳ [۱۲] در یک مطالعه موردی، با استفاده از ریزشمع‌های تزریقی، عملیات بهسازی خاک زیر پی‌های منفرد یک سازه بتنی نشست کرده انجام شد. در این تحقیق، تأثیر استفاده از ریزشمع‌ها در کنترل میدان تنش-تغییر شکل خاک بستر سازه بتنی مورد بررسی قرار گرفت. برای ارزیابی نشست‌های رخ داده، اطلاعات مورد نیاز با انجام شناسایی زیرسطحی از طریق حفر گمانه‌های ژئوتکنیکی جمع‌آوری شد و همچنین عملیات پایش نشست‌ها انجام شد. نقشه‌های برداشت قبل از عملیات بهسازی خاک نشان دهنده نشست پی‌های منفرد و ادامه‌دار بودن نشست‌ها بود. اما پس از عملیات بهسازی خاک، این روند به صفر رسید. با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدود ABAQUS، تحلیل‌های عددی روی سازه

بتنی روی بستر سست که مستعد تغییر شکل‌های مخرب در اعضای باربر مانند ستون‌ها است، انجام شد. در این شبیه‌سازی‌ها، برای به‌دست آوردن عملکرد بهینه ریزشمع‌ها، پارامترهای عمق، قطر و تعداد ریزشمع مورد بررسی قرار گرفت. این تحقیق در خصوص تصمیم‌گیری برای بهسازی خاک یک سازه بتنی نشست کرده در نزدیکی گودبرداری انجام شده، از طریق روش ریزشمع یا تخریب سازه صورت گرفت. نتایج نشان داد که پارامترهای طول و تعداد ریزشمع بیشترین تأثیر را در کنترل میدان تغییر شکل و نشست سازه دارند. همچنین نتایج نشان می‌دهند که تأثیر پارامتر وزن سازه در اندرکنش ریزشمع و سازه قابل توجه است. در این مقاله، بارگذاری ضربه‌ای در محیط‌های زیرزمینی با استفاده از روش کوپل اویلری - لاگرانژی در محیط نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی شده است. المان‌های اویلری برای تعریف بار ضربه‌ای، هوا و خاک در نظر گرفته شده‌اند و برای مدلسازی سازه مدفون، از المان‌های لاگرانژی برای تعریف آن استفاده شده است. با توجه به روش تحلیل که از نوع CEL می‌باشد، در روش اویلری (Eulerian)، مش بندی ثابت است و مصالح مربوط به بخش‌های مختلف مدل درون این مش بندی قابلیت حرکت دارد. بنابراین کل محدوده موردنظر برای مسئله درون یک قطعه اویلری تعریف می‌شود. محدوده قرارگیری بار ضربه‌ای در قطعه اویلری، به کمک کسر حجمی اویلری (EVF) مربوطه تعریف می‌شود؛ در نتیجه نرم‌افزار، المان‌هایی متناظر با بار ضربه‌ای است را در قطعه اویلری شناسایی کرده و مصالح مربوطه را به آن اختصاص می‌دهد. همین روند در معرفی هوا و خاک پیروی می‌گردد [۱۳].

۲- مدلسازی و صحت سنجی

مشخصات مصالح مصرفی برای صحت سنجی

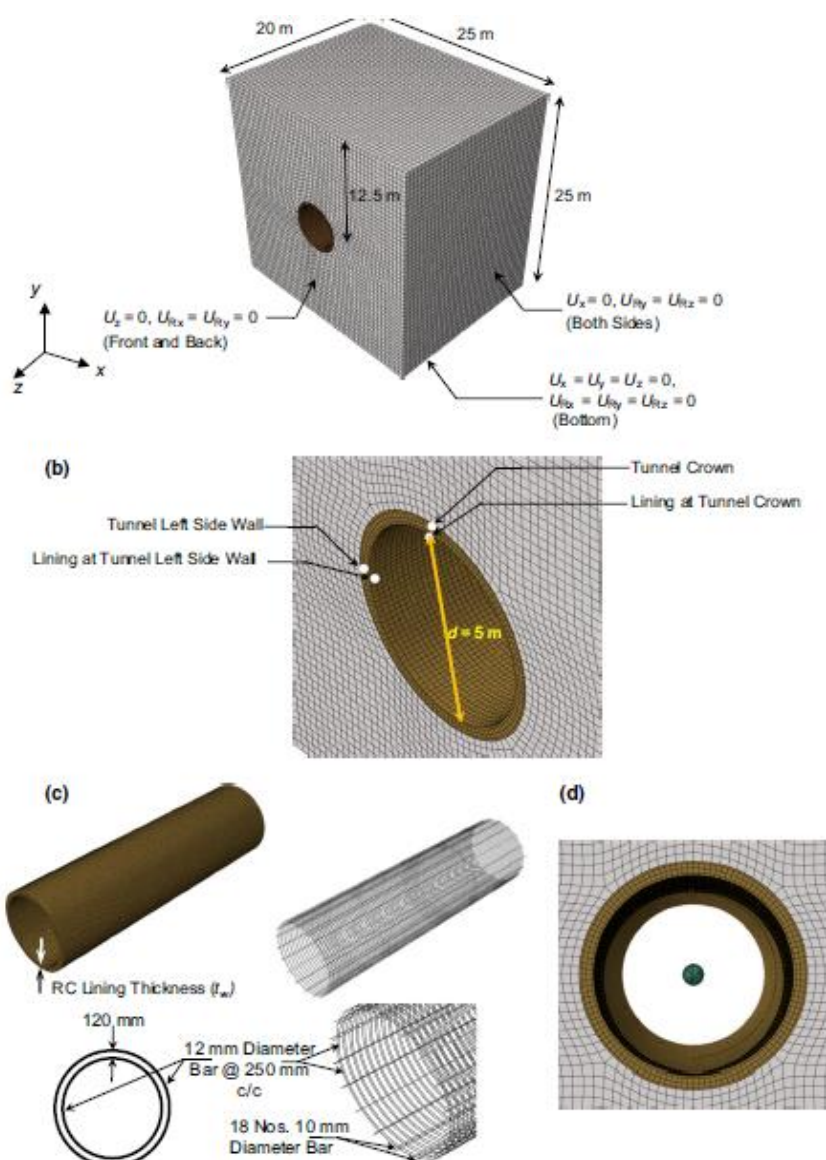
به منظور صحت سنجی فضای مدفون مدل شده توسط تیواری و همکارانش [۴] که به صورت مدلسازی در نرم افزار ABAQUS انجام شده است مورد بررسی قرار گرفته است. ابعاد و کلیه مشخصات اعم از شرایط مرزی و میلگردهای این فضای در شکل ۱ ارائه شده است.

مشخصات سنگ :

برای مدل سازی سنگ از معیار گسیختگی دراکر - پراگر استفاده شده است. معیار دراکر - پراگر^۲، معیاری است مبتنی بر آزمایش و عمل (مبتنی بر تجربه) یا به عبارت دیگر معیاری است عملی آزمایشگاهی که مشخصات

2. Drucker Prager

1. Standard Penetration Test



شکل ۱. مشخصات فضای مدفون مدلسازی شده [۴]

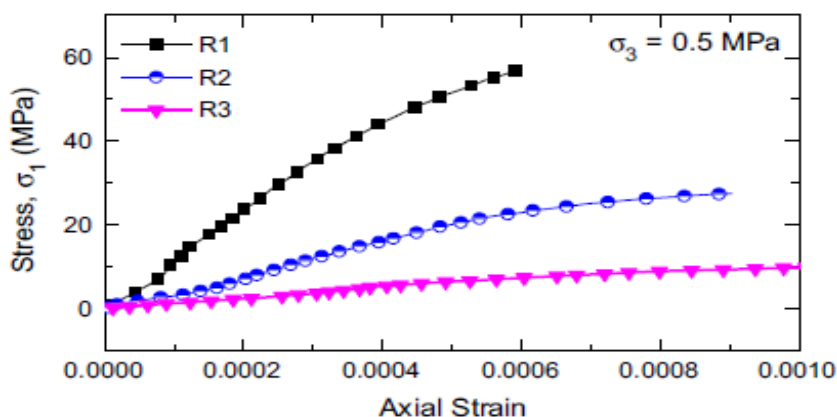
Fig. 1. Characteristics of the modeled buried space [4]

کاملاً الاستیک در نظر می‌گیرد. برای مدل سازی بتن از تحقیقات لی و همکارانش [۱۴] استفاده شده است. یکی از ویژگی های مهم مدل رفتاری ترک خوردگی، تعیین محل شروع شکست بر اساس گسیختگی مدل است. رفتار برشی مدل، بستگی به میزان باز شدن ترکها دارد. به طور دقیق تر مدول برش ترک خوردگی با افزایش ترکها کاهش می‌یابد. از این رو در نرم افزار ABAQUS سختی برشی پس از شکست به عنوان یک تابع از افت فشار در سراسر ترک خوردگی تعریف شده است. به طور کلی در نرم افزار ABAQUS روند حذف المان و خرابی به این شکل است که علاوه بر

سنگ را بر اساس انجام آزمایش های عملی نتیجه می‌دهد و گسیختگی آن به شکل موضعی غیر خطی است. خصوصیات سنگ مصرفی در جدول ۱ ارائه شده است.

مشخصات بتن :

طبق مدل سازی بتن در مقاله تیواری و همکارانش [۵] از مدل Concrete damage plasticity model استفاده می‌کنیم. این مدل به این جهت است که چون ضعف بتن در کشش هست، رفتار فشاری را



شکل ۲. نمودار تنش-کرنش سنگ [۴]

Fig. 2. Rock stress-strain diagram [4]

جدول ۲. مشخصات بتن [۴]

Table 2. Concrete specifications [4]

۲۷ (GPa)	مدول یانگ
۰/۲	ضریب پواسون
۲۴۰۰ (Kg/m ³)	چگالی
۳۰ (MPa)	مقاومت فشاری

جدول ۱. مشخصات سنگ [۴]

Table 1. Rock specifications [4]

۲۸ (GPa)	مدول یانگ
۰/۲۵	ضریب پواسون
۲۵۵۰ (Kg/m ³)	چگالی
$\phi = 42$	زاویه اصطکاک
$\psi = 5$	زاویه اتساع
$C = 2/3$ (MPa)	چسبندگی

که مطابق با آیین نامه بین المللی TM-5 می باشد [۱۵ و ۱۶].

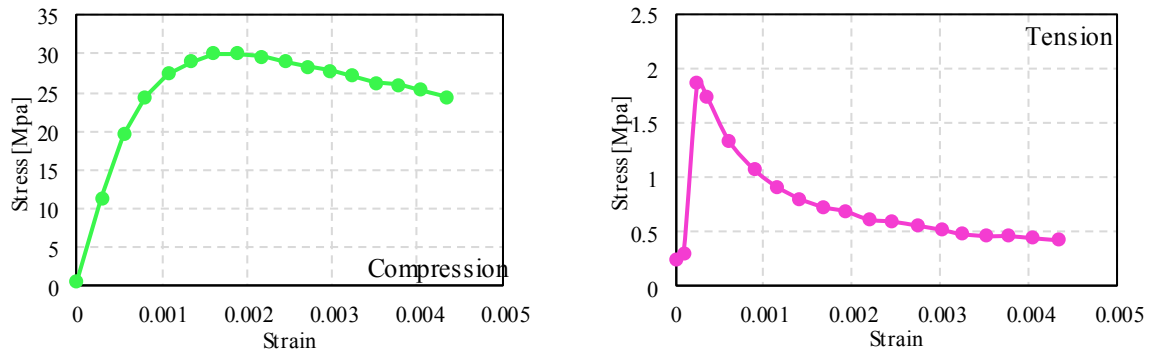
شکل شماره ۴ (سمت راست) نحوه معادل سازی TNT ۵۰ کیلوگرمی معادل یک کره توپر و شکل ۵ (سمت راست) محل قرار گیری TNT در فضای زیرزمینی را نشان میدهد. به منظور اعمال بارگذاری ضربه‌ای TNT را معادل یک کره تو پر در نظر گرفته که وزنی معادل ۵۰ کیلوگرم دارد و از روش JWL که یک روش نوین است برای اعمال بارگذاری ضربه‌ای استفاده می شود که مشخصات و ضرایب TNT در جدول ۳ آورده شده است. همانطور که توضیح داده شد برای مدل سازی TNT و پارامترهای آن از مدل JWL-EOS استفاده شده است [۱۵]. معادله حاکم بر این مدل و پارامترهای مورد نظر در زیر ارائه شده است.

$$p = A(1 - \frac{\omega}{R_1 \bar{\rho}})e^{R_1 \bar{\rho}} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 \bar{\rho}})e^{R_2 \bar{\rho}} + \omega p e_{int} \quad (1)$$

تعریف الاستیک و پلاستیک بایستی رفتار تکامل آسیب برای مصالح تعریف گردد. و مشخصات پارامترهای این مدل طبق جدول ۲ می باشد. همچنین نمودارهای تنش و کرنش فشار و کشش در شکل ۳ ارائه شده است [۱۴].

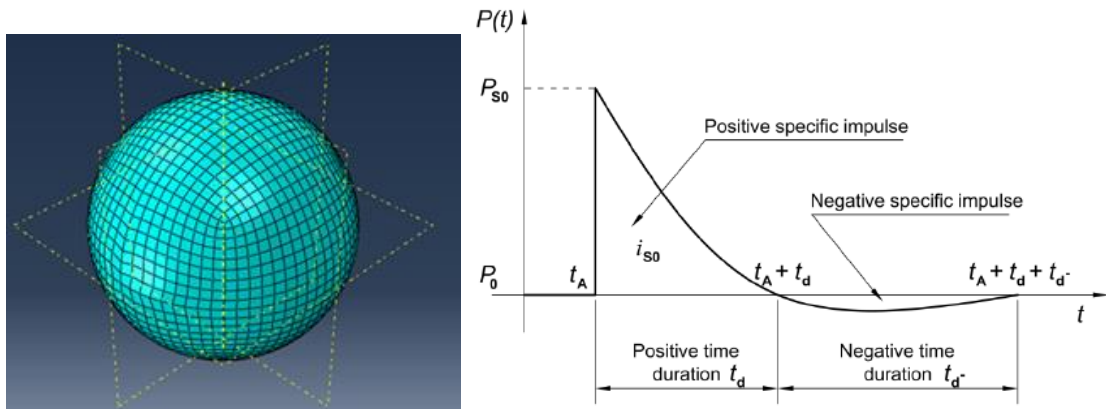
مشخصات بارگذاری ضربه‌ای:

برای اعمال بار ضربه‌ای طبق مقاله تیواری و همکارانش [۵] از معادله Jones – Wilkins – Lee استفاده شده است. طبق مقاله مورد نظر از ۵۰ کیلوگرم TNT برای بار ضربه‌ای در مرکز فضای استفاده شده است. شکل ۴ نوع بارگذاری ضربه‌ای در نرم افزار ABAQUS را نشان می دهد



شکل ۳. نمودار تنش و کرنش بتن در فشار و کشش [۴]

Fig. 3. Stress and strain diagram of concrete in compression and tension [4]



شکل ۴. TNT معادل شده با کره (شکل سمت راست)، نمودار فشار موج بار ضربه ای - زمان در نرم افزار ABAQUS (شکل سمت چپ) [۱۵]

Fig. 4. TNT equivalent to a sphere (right figure), shock load wave pressure-time diagram in ABAQUS software (left figure) [15]

جدول ۳. مشخصات TNT [۴، ۱۷]

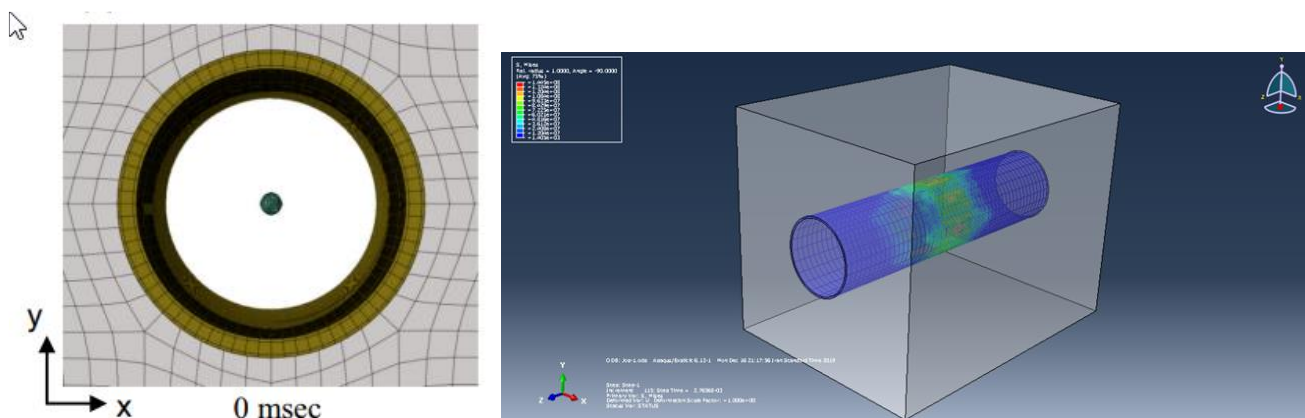
Table 3. Specifications of TNT [4, 17]

۶۹۳۰ (m/s)	سرعت موج
۱۶۳۰ (Kg/m ³)	چگالی
۴/۱۵	R1
۰/۹	R2
۳۷۳۸۰۰ (Mpa)	A
۳۷۴۷ (Mpa)	B
۰/۳۵	ω
۳۶۸۰	چگالی انرژی

نتایج صحت سنجی:

محل قرار گیری TNT در فضای مدفون و فضای مونتاژ شده در نرم

افزار ABAQUS به منظور صحت سنجی :



شکل ۵. محل قرار گیری TNT در فضای مدفون (شکل سمت راست) فضای مونتاژ شده در نرم افزار ABAQUS (شکل سمت چپ)

Fig. 5. Placement of TNT in the buried space (right figure) space assembled in ABAQUS software (left figure)

مشخصات سنگ مصرفی در مدلسازی

می‌توان سنگ‌ها را در برابر بار ضربه‌ای به ۳ دسته کلی قوی (H)، متوسط (M) و ضعیف (L) دسته بندی کنیم. که در جدول ۴ مشخصات آن‌ها آورده شده است. برای مدلسازی سنگ‌ها در نرم افزار ABAQUS از مدل رفتاری Drucker-Prager استفاده شده است. همچنین چگالی، مدول الاستیسیته، ضریب پواسن، زاویه اصطکاک داخلی، RQD و RMR برای سه دسته سنگ در جدول ۴ قابل مشاهده هستند [۱۸].

۳- بحث و نتایج

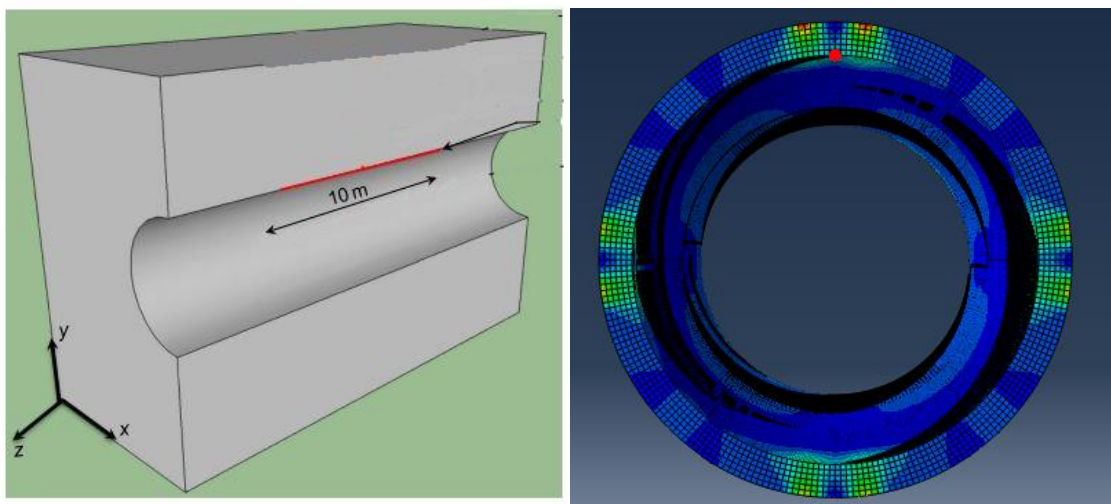
ابعاد فضای مدفون بر اساس تحقیقات براکس و لی [۱۹] در نرم افزار ABAQUS مدلسازی شده اند. همانطور که از شکل ۸ مشخص است فضای مدفون مدل سازی شده به طول ۱۰، عرض ۷/۵، عمق ۳۰ و ضخامت ۰/۲۵ متر در نرم افزار مدلسازی شده است. مشخصات بتن مصرفی نیز در جدول ۲ و شکل ۳ شرح داده شده است و از مدل Concrete damage plasticity model به منظور تعریف مشخصات بتن استفاده شده است که در بخش قبلی برای آن صحت سنجی انجام شد.

شکل ۵ محل قرار گیری TNT در فضای مدفون و فضای مونتاژ

شده در نرم افزار ABAQUS را نشان می‌دهد که از روش CEL (کوپل اولیری-لاگرانژی) به منظور مدلسازی استفاده شده است. برای بالا بردن دقت مدلسازی از آنالیز حساسیت مش استفاده شده است یعنی سائز مش‌ها به قدری کوچک شوند تا نتایج خروجی از مدلسازی بعد از یک سائز مشخص از مش همگرا شوند که در این مدلسازی سائز مش ۴ سانتی متر در نظر گرفته شده و نتیجه آن تطابق خوبی با مقاله تیواری و همکارانش [۴] داشته باشد.

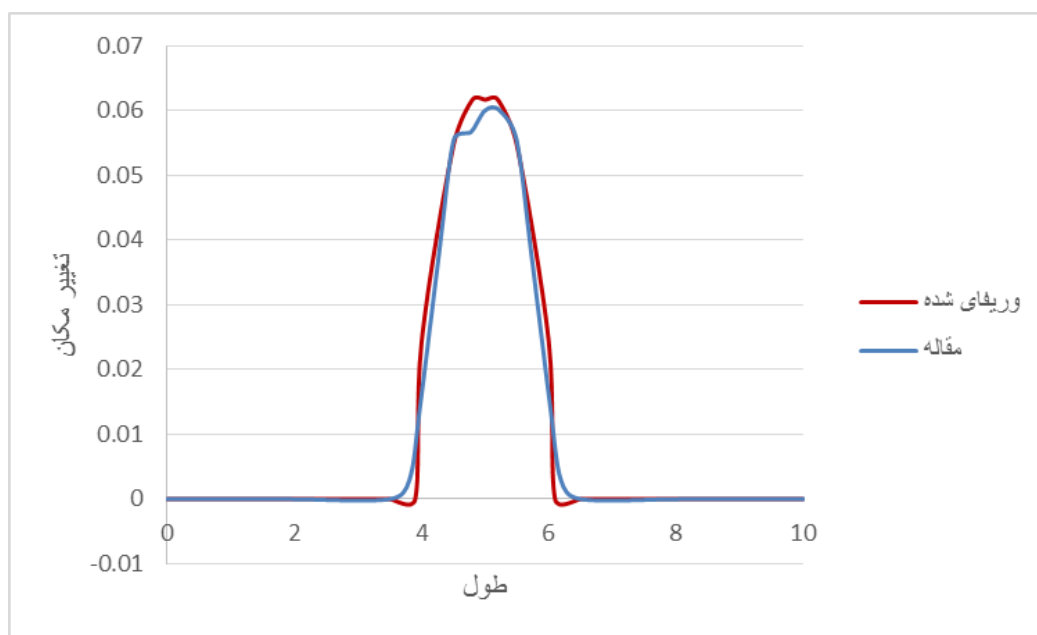
نمودار تغییر مکان تاج تونل در لاینینگ در زمان ۱/۲ میلی ثانیه:

با توجه به شکل ۶ در راستای نشان داده شده در قسمت تاج تونل یک بازه به طول ۱۰ متر در نظر گرفته شده و مقادیر بیشینه تغییر مکان در این بازه استخراج شده اند. از مقایسه نتایج در نمودار شکل ۷ این نتیجه حاصل می‌شود که نتایج بیشینه تغییر مکان مدلسازی انجام شده در نرم افزار ABAQUS به منظور صحت سنجی با نتایج بیشینه تغییر مکان ارائه شده در مقاله تیواری و همکارانش [۴] تطابق خوبی دارد که این نشان می‌دهد مدل به درستی صحت سنجی شده است. مقایسه نتایج خروجی مدل مونتاژ شده در شکل ۵ با مقاله تیواری و همکارانش [۴] در شکل ۷ نشان داده است.



شکل ۶. نمودار تغییر مکان تاج تونل در لاینینگ

Fig. 6. Diagram of tunnel crown change in lining



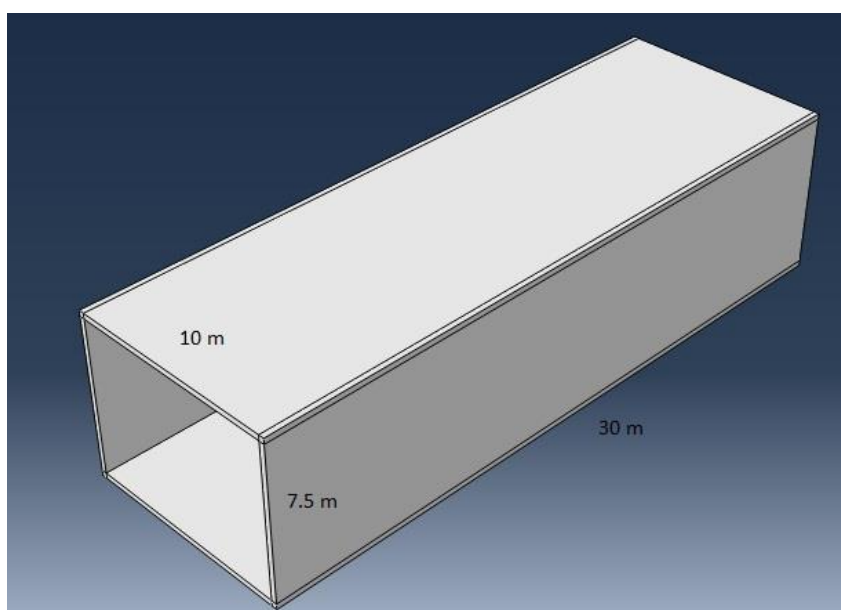
شکل ۷. مقایسه نمودارهای نمودارهای طول - تغییر مکان تاج تونل در لاینینگ در مقاله [۳] و مدلسازی

Fig. 7. Comparison of graphs of length graphs - change of location of tunnel crown in lining in article [3] and modeling

جدول ۴. مشخصات سنگ‌های مدل‌سازی شده در نرم افزار ABAQUS [۱۸]

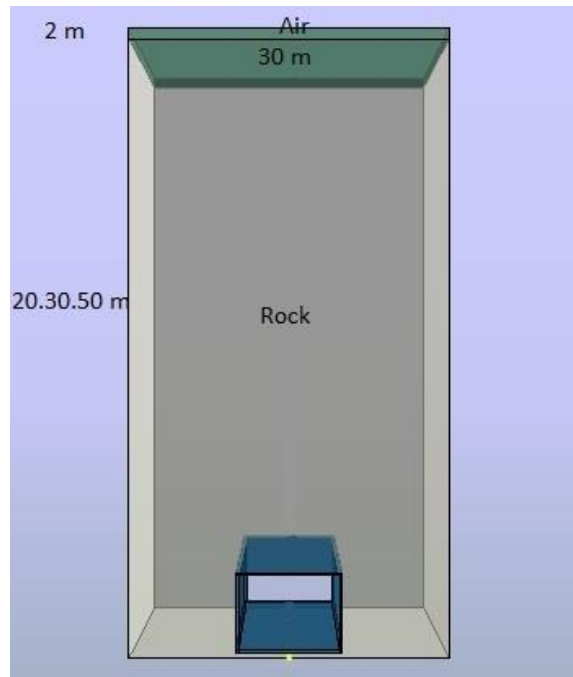
Table 4. Characteristics of rocks modeled in ABAQUS software [18]

Weathering conditions	مشخصات سنگ‌های مصرفی		
	Highly to completely (H) or R1	Moderately to highly (M) or R2	Slightly to moderately (L) or R3
Specific gravity (G)	۲/۶۵	۲/۶۵	۲/۶۵
Density (ρ) (kg/m ³)	۲۵۵۰	۲۴۲۰	۲۳۵۰
Elastic modulus (E) (GPa)	۲۸	۱۴	۴
Poisson's ratio (ν)	۰/۲۵	۰/۲۸	۰/۴
Angle of internal friction (ϕ)	۴۲	۳۹	۳۳
In situ stress ratio (K_0)	۰/۵	۰/۵	۰/۵
Dilation angle (ψ)	۵	۵	۵
Cohesion (c) (MPa)	۲/۳	۱/۵۴	۱/۴
f_c (MPa)	۴۰	۲۸	۱۰/۵
RQD range	۷۵-۹۰	۳۰-۴۰	۱۰-۲۰
RMR	۴۷	۳۳	۲۰



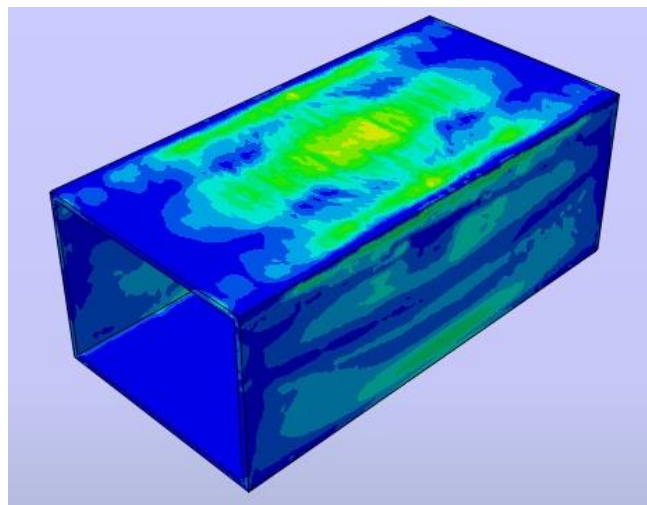
شکل ۸. مشخصات ابعاد فضای مدفون مدل‌سازی شده در نرم افزار ABAQUS [۱۹]

Fig. 8. Specifications of the dimensions of the buried space modeled in the ABAQUS software [19]



شکل ۹. فضای مدفون زیر زمینی مدلسازی شده در نرم افزار ABAQUS در عمق ۳۰ متری

Fig. 9. The underground space modeled in ABAQUS software at a depth of 30 meters

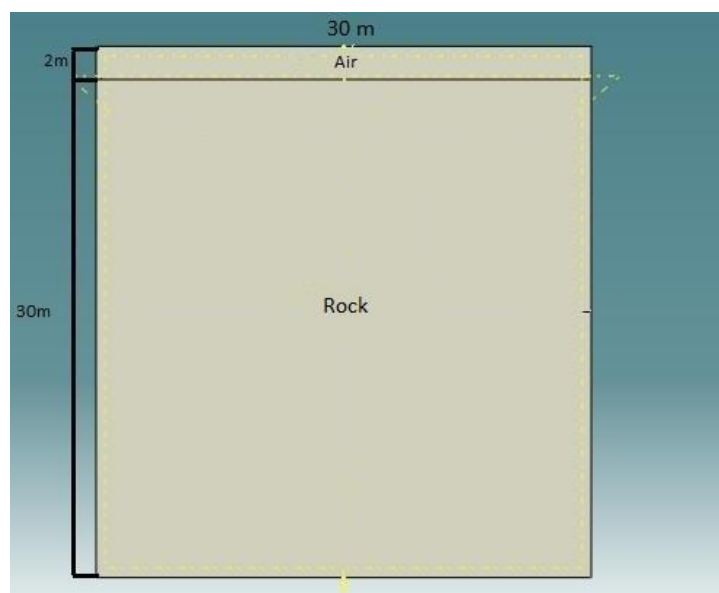


شکل ۱۰. کانتور فشار وارده بر فضای مدفون در زمان بیشینه فشار وارده حاصل از بار ضربه‌ای

Fig. 10. The contour of the pressure on the buried space at the time of the maximum pressure resulting from the impact load

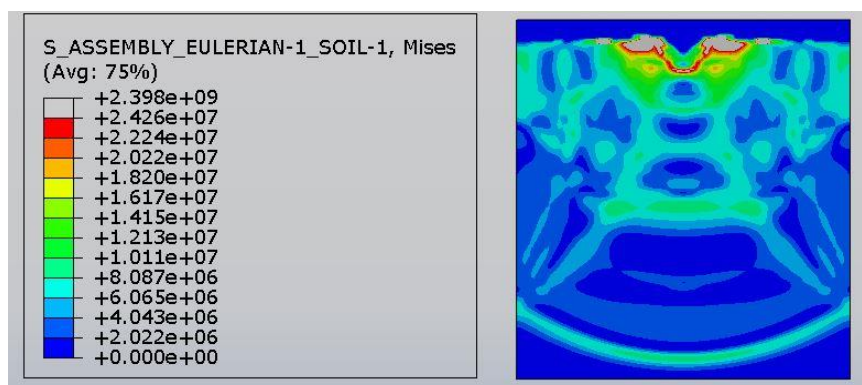
۱۰ تا ۱۲ مگاپاسکال می‌باشد. لذا این نتیجه حاصل می‌شود که هنگامی که بیشینه فشار وارده بر فضای مدفون حدود ۱۰ تا ۱۲ مگاپاسکال باشد میزان دوران دیوار بالایی تونل مربعی هم به ۲ درجه که بیشینه دوران مجاز دیواره تونل آیین نامه UFC 2014 است، می‌باشد. همچنین باتوجه به

با توجه به مقایسه نتایج بالا این نتیجه حاصل می‌شود که حدوداً در عمق ۱۸ تا ۲۰ متر برای سنگ قوی (بکر) دوران دیوار بالایی تونل مربعی با ضخامت ۰/۲۵ به مقدار حدود ۲ درجه نزدیک است. با توجه به نتایج آنالیز انجام شده میزان بیشینه فشار وارده به فضای مدفون در این حالت حدود



شکل ۱۱. مدل‌سازی سنگ تک لایه با بار ضربه‌ای سطحی ۲۰۰۰ کیلوگرم در نرم افزار ABAQUS

Fig. 11. Modeling of single-layer rock with a surface impact load of 2000 kg in ABAQUS software



شکل ۱۲. کانتور فشار وارده بر سنگ تک لایه برای بار ضربه‌ای ۲۰۰۰ کیلوگرم سطحی برای عمق ۳۰ متر

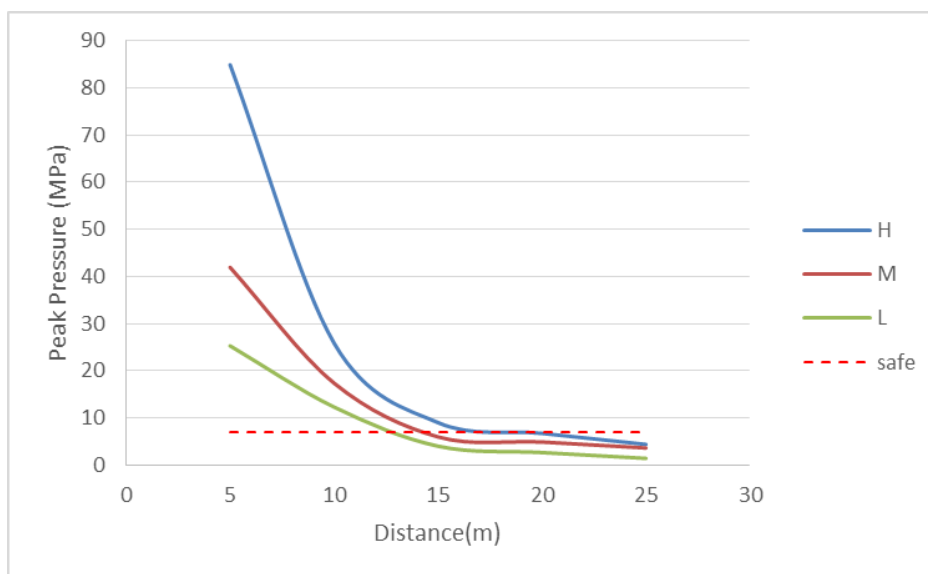
Fig. 12. Contour of pressure on single-layer rock for 2000 kg surface impact load for 30 meters depth

سنگ تک لایه با عمق ۳۰ متری برای بارگذاری ضربه ای ۲۰۰۰ کیلوگرم سطحی

در شکل‌های ۱۱ و ۱۲، به ترتیب مدل خاک تک لایه و کانتور فشار وارده بر آن برای بار ضربه‌ای ۲۰۰۰ کیلوگرم سطحی برای عمق ۳۰ متر مشاهده می شود.

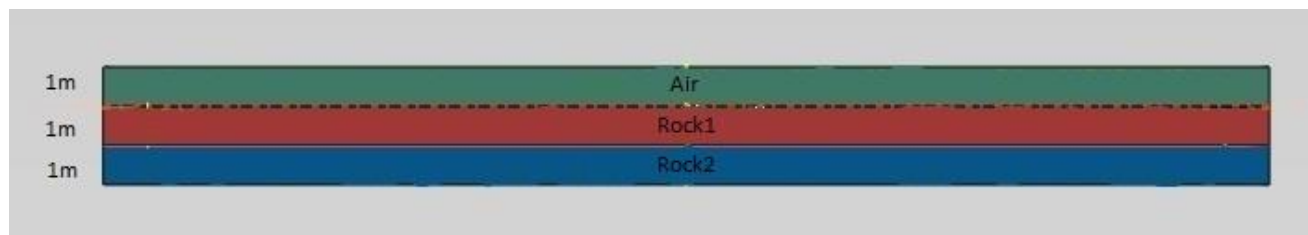
عمق ایمن فضای مدفون با توجه به نمودار برای سنگ ضعیف یا متخلخل (L) حدود ۱۲ متر، برای سنگ متوسط (M) حدود ۱۴ متر و برای

نتایج به دست آمده و طبق آیین نامه UFC 2014 میزان فشار وارده بر فضای مدفون حدوداً ۱/۷ برابر بیشینه فشار وارده بر لایه خاک یا سنگ قرار گرفته بر روی خود می باشد که اصطلاحاً به آن ضریب انعکاس می گویند. که بیشینه فشار وارده بر خاک یا سنگ از تقسیم ۱۲ مگاپاسکال بر ۱/۷ حدود ۷ مگاپاسکال تعیین می شود. در ادامه نتایج مدل‌سازی سنگ تک لایه، دولایه و سه لایه برای بارگذاری ضربه ای ۲۰۰۰ کیلوگرم سطحی را بررسی خواهیم کرد.



شکل ۱۳. مقایسه بیشینه فشار برای ۳ حالت سنگ ۳۰ متری تک لایه

Fig. 13. Comparison of the maximum pressure for 3 conditions of 30 m single-layer rock



شکل ۱۴. مدل سازی سنگ دو لایه با بار ضربه ای سطحی ۲۰۰۰ کیلوگرم در نرم افزار ABAQUS

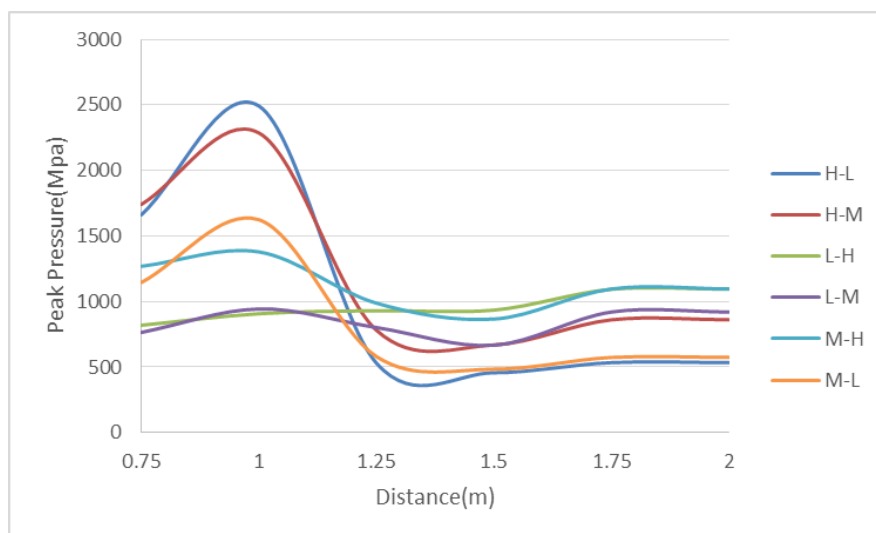
Fig. 14. Modeling of two-layer rock with a surface impact load of 2000 kg in ABAQUS software

الگوی سنگ با چیدمان دو لایه برای بارگذاری ضربه ای ۲۰۰۰ کیلوگرم سطحی به منظور یافتن چیدمان بهینه لایه ها

مطابق شکل ۱۴، ۶ حالت H-L, H-M, L-H, L-M, M-H, M-L برای حالت سنگ با چیدمان دو لایه مدل سازی شده و نتایج بیشینه فشار برای قسمت میانی لایه ها با هم مقایسه می شوند.

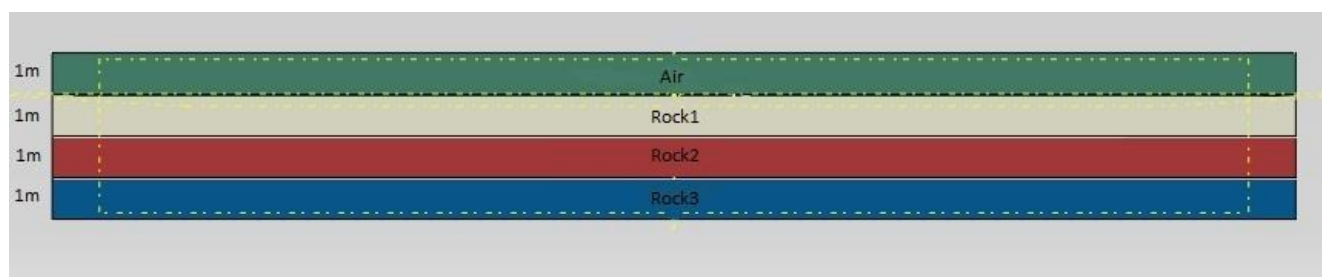
در لایه اول نامناسب ترین لایه که کمترین میزان دمپ بیشینه فشار حاصله از بار گذاری ضربه ای را دارد حالت H-L می باشد، همچنین L-H مناسب ترین حالت برای دمپ بیشینه فشار حاصله از بار ضربه ای را دارد.

سنگ قوی یا بکر (H) حدود ۱۸ متر می باشد. پس از مدل سازی، بیشینه فشار برای قسمت میانی سنگ های تک لایه برای عمق های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ متر خروجی گرفته شده و تحت نمودار فاصله-بیشینه فشار در شکل ۱۳ دیده می شوند. همان طور که از شکل ۱۳ مشهود است سنگ H نسبت به سنگ M و L بیشینه فشار بیشتری دارد. سنگ های M و L در عمق های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۵ بیشینه فشار وارد بر سازه را نسبت به سنگ H به ترتیب به میزان ۵۰، ۶۶، ۳۲، ۵۲، ۲۳، ۵۴، ۱۷ و ۳۷ درصد کاهش می دهند.



شکل ۱۵. مقایسه پیشینه فشار برای ۶ حالت سنگ با چیدمان دو لایه

Fig. 15. Comparison of the maximum pressure for 6 types of rock with two layers arrangement



شکل ۱۶. مدلسازی سنگ سه لایه با بار ضربه‌ای سطحی ۲۰۰۰ کیلوگرم در نرم افزار ABAQUS

Fig. 16. Three-layer rock modeling with a surface impact load of 2000 kg in ABAQUS software

الگوی سنگ با چیدمان سه لایه برای بارگذاری ضربه ای ۲۰۰۰

کیوگرم سطحی به منظور یافتن چیدمان بهینه لایه‌ها

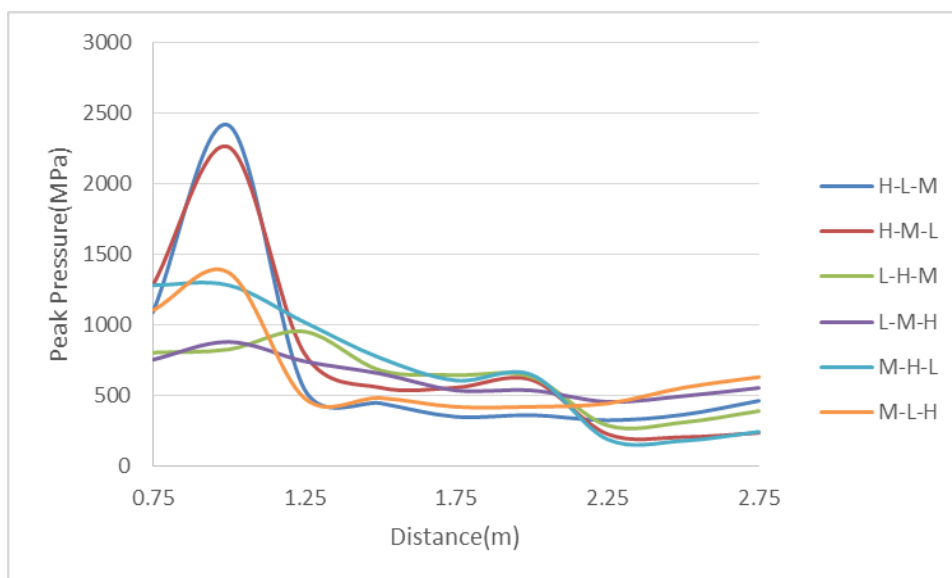
مطابق شکل ۱۶، ۶ حالت H-L-M, H-M-L, L-H-M, L-M-H, M-H-L, M-L-H برای حالت سنگ با چیدمان سه لایه مدل سازی شده

و نتایج پیشینه فشار برای قسمت میانی لایه‌ها با هم مقایسه می‌شوند.

در لایه اول نامناسب ترین لایه که کمترین میزان دمپ پیشینه فشار حاصله از بار ضربه‌ای را دارد حالت H-L-M می‌باشد، همچنین L-H-M مناسب ترین حالت برای دمپ پیشینه فشار حاصله از بار ضربه‌ای را دارد. می‌توان نتیجه گرفت حالت H-M-L، M-L-H، M-H-L، L-M-H و L-H-M و L-H-M پیشینه فشار حاصل از بار ضربه‌ای را به ترتیب ۶٪، ۴۳٪، ۴۶٪، ۶۳٪ و ۶۵٪ نسبت به حالت H-L-M که نامناسب ترین حالت برای

می‌توان نتیجه گرفت حالت H-M، M-L، M-H، L-M و L-H و L-H بیشینه فشار حاصل از بار ضربه‌ای را به ترتیب ۸٪، ۳۴٪، ۴۴٪، ۶۲٪ و ۶۳٪ نسبت به حالت H-L که نامناسب ترین حالت برای لایه‌ی اول است را کاهش می‌دهد.

در لایه دوم نامناسب ترین لایه که کمترین میزان دمپ پیشینه فشار حاصله از بار ضربه‌ای را دارد حالت L-H و M-H می‌باشد، همچنین H-L مناسب ترین حالت برای دمپ پیشینه فشار حاصله از بار ضربه‌ای را دارد. می‌توان نتیجه گرفت حالت M-H، L-M، H-M، M-L و H-L بیشینه فشار حاصل از بار ضربه‌ای را به ترتیب ۲٪، ۱۶٪، ۲۱٪، ۴۷٪، ۵۱٪ نسبت به حالت L-H که نامناسب ترین حالت برای لایه‌ی اول است را کاهش می‌دهد.



شکل ۱۷. مقایسه بیشینه فشار برای ۶ حالت سنگ با چیدمان سه لایه

Fig. 17. Comparison of maximum pressure for 6 types of rock with three layer arrangement

۱۰ و ۵ متر در نرم افزار ABAQUS برای TNT به وزن ۲۰۰۰ کیلوگرم مدلسازی شده اند.

در شکل ۲۰ به مقایسه بیشینه فشار و درصد کاهش آن برای ۲ حالت در نظر گرفته شده بالا برای لایه‌ها در عمق‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۷ متر در سنگ‌ها پرداخته شد. طبق نتایج به دست آمده انتقال تنش در مرز دو لایه میزان تنش انتقالی از سنگ ضعیف به سنگ قوی افزایش و میزان تنش از سنگ قوی به سنگ ضعیف کاهش می‌یابد.

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه با بررسی مطالعات پیشین بر روی نحوه طراحی فضای مدفون، با بهره جویی از مدل‌سازی عددی، رفتار فضای مدفون در برابر بار ضربه‌ای مورد بررسی قرار گرفت تا بتوان با استفاده از خواص محیط دربرگیرنده آنها، اثر ضربه انتقالی بر فضای مدفون را کاهش داد. چیدمان سنگ لایه‌ای تک‌لایه، دو لایه و سه لایه و همچنین لایه‌های سنگ با ضخامت متفاوت با استفاده از روش المان محدود مدل‌سازی شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که ترتیب چیدمان لایه‌های سنگ اثر قابل ملاحظه‌ای در کاهش بیشینه فشار حاصل از بارگذاری ضربه‌ای دارد، به شکلی که بیشترین میزان تضعیف موج از لایه سنگی با بیشینه هوازگی حاصل شد. بیشترین میزان دمپ موج ضربه‌ای زمانی حاصل شده که لایه

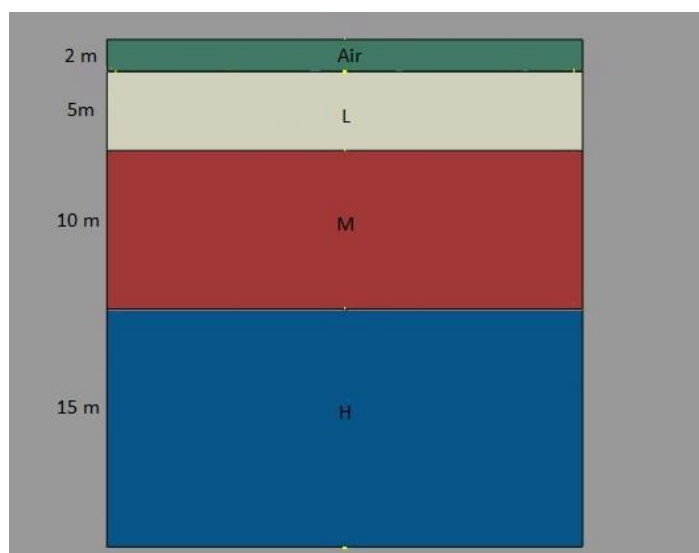
لایه‌ی اول است را کاهش می‌دهد.

لایه دوم نامناسب‌ترین لایه که کمترین میزان دمپ بیشینه فشار حاصله از بار ضربه‌ای را دارد حالت M-H-L می‌باشد، همچنین H-L-M مناسب‌ترین حالت برای دمپ بیشینه فشار حاصله از بار ضربه‌ای را دارد. می‌توان نتیجه گرفت حالت L-H-M، H-M-L، L-M-H، M-L-H و H-L-M بیشینه فشار حاصل از بار ضربه‌ای را به ترتیب ۲٪، ۵٪، ۱۶٪، ۳۴٪ و ۴۳٪ نسبت به حالت M-H-L که نامناسب‌ترین حالت برای لایه‌ی دوم است را کاهش می‌دهد.

در لایه سوم نامناسب‌ترین لایه که کمترین میزان دمپ بیشینه فشار حاصله از بار ضربه‌ای را دارد حالت M-L-H می‌باشد، همچنین H-M-L مناسب‌ترین حالت برای دمپ بیشینه فشار حاصله از بار ضربه‌ای را دارد. می‌توان نتیجه گرفت حالت L-M-H، L-H-M، H-L-M، M-H-L و H-M-L بیشینه فشار حاصل از بار ضربه‌ای را به ترتیب ۱۲٪، ۲۶٪، ۳۷٪، ۶۱٪ و ۶۲٪ نسبت به حالت M-L-H که نامناسب‌ترین حالت برای لایه‌ی سوم است را کاهش می‌دهد.

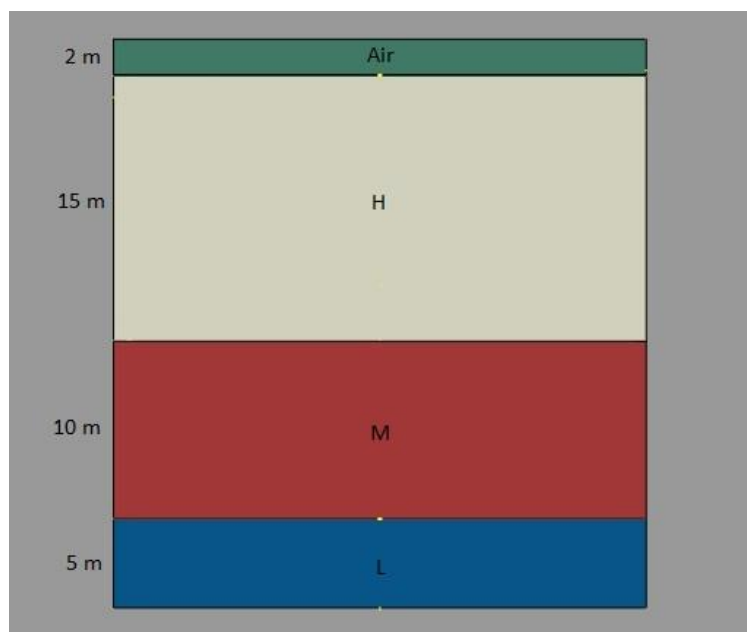
سنگ با چیدمان سه لایه برای عمق ۳۰ متر

با توجه به شکل ۱۸ چیدمان L-M-H به ترتیب با ضخامت‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ متر و شکل ۱۹ چیدمان H-M-L به ترتیب با ضخامت‌های ۱۵،



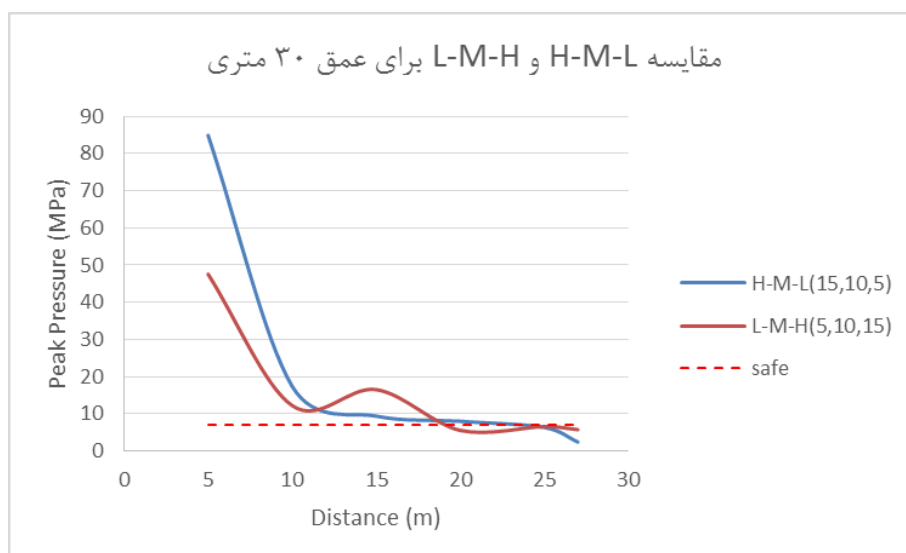
شکل ۱۸. چیدمان سنگ سه لایه L-M-H با ضخامت ۵-۱۰-۱۵ متر

Fig. 18. Three-layer stone arrangement L-M-H with a thickness of 5m-10m-15m



شکل ۱۹. چیدمان سنگ سه لایه H-M-L با ضخامت ۱۵-۱۰-۵ متر

Fig. 19. Three-layer stone arrangement H-M-L with a thickness of 15m-10m-5m



شکل ۲۰. مقایسه بیشینه فشار برای چیدمان H-M-L و L-M-H برای عمق ۳۰ متر

Fig. 20. Comparison of the maximum pressure for the H-M-L and L-M-H arrangement for a depth of 30 meters

منابع

- [1] Buonsanti M, Leonardi G, Scopelliti F. 3-D Simulation of shock waves generated by dense explosive in shell structures. *Procedia Engineering*. 2011 Jan 1;10:1550-5.
- [2] Baziar MH, Salehzadeh H, Kazemi M, Rabeti Moghadam M. Centrifuge modeling of an underground structure subjected to blast loading. *Journal of Advanced Defense Science & Technology*. 2014 Apr 21;5(1):31-41. (in persian)
- [3] Abaqus/Explicit User's Manual, version 6.13 Dassault Systems Simulia Corporation, Providence. 2016.
- [4] Tiwari R, Chakraborty T, Matsagar V. Dynamic analysis of tunnel in weathered rock subjected to internal blast loading. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016 Nov;49(11):4441-58.
- [5] Tiwari R, Chakraborty T, Matsagar V. Dynamic analysis of tunnel in soil subjected to internal blast loading. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2017 Aug;35:1491-512.
- [6] Feldgun VR, Karinski YS, Edri I, Yankelevsky DZ. Prediction of the quasi-static pressure in confined and

سنگی با بیشترین درجه هوازدگی (سنگ متخلخل) در نزدیک‌ترین موقعیت نسبت به فضای مدفون موردنظر قرار گرفته باشد عمق ایمن فضای مدفون با توجه به نمودار برای سنگ ضعیف یا متخلخل (L) حدود ۱۲ متر، برای سنگ متوسط (M) حدود ۱۴ متر و برای سنگ قوی یا بکر (H) حدود ۱۸ متر می‌باشد. طبق نتایج به دست آمده انتقال تنش در مرز دو لایه میزان تنش انتقالی از سنگ ضعیف به سنگ قوی افزایش و میزان تنش از سنگ قوی به سنگ ضعیف کاهش می‌یابد.

نتایج بدست آمده در این پژوهش را می‌توان در کاربردهای مهندسی و اجرایی مختلفی برای دیمپ انرژی امواج مکانیکی منتشر شده در زمین از منشأهایی نظیر ضربه و انفجار سطحی بکار گرفت. برخی از مهمترین این کاربردها عبارتند از:

- حفاظت از سازه‌های امن و فضاهای مدفون در برابر امواج حاصل از برخورد پرتابه‌ها و اجسام سنگین به سطح زمین
- جلوگیری از انتقال تکانه و موج ناشی از انفجارهای سطحی به اهداف زیرزمینی
- طراحی لایه‌های دمپر با استفاده از مصالح طبیعی (سنگ و خاک) برای سازه‌های مهندسی
- حفاظت از تأسیسات و تجهیزات مدفون و همچنین تونل‌های خدمات شهری در مقابل امواج انفجاری سطحی

- the effect of soil improvement by micropile method in marl soil: a case study of Bidboland, Khuzestan. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*. 2023 Feb 20;54(12):4573-88. (in persian)
- [13] Khan S, Chakraborty T, Matsagar V. Parametric sensitivity analysis and uncertainty quantification for cast iron-lined tunnels embedded in soil and rock under internal blast loading. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2016 Dec 1;30(6):04016062.
- [14] Lee J, Fenves GL. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. *Journal of engineering mechanics*. 1998 Aug;124(8):892-900..
- [15] Larcher M, Casadei F. Explosions in complex geometries—a comparison of several approaches. *International journal of protective structures*. 2010 Jun;1(2):169-95..
- [16] TM5-1300. Structures to resist the effects of accidental explosions. Technical Manual of the US Departments of the Army and Navy and the Air Force, USA. 1990.
- [17] Tiwari R, Chakraborty T, Matsagar V. Analysis of curved tunnels in soil subjected to internal blast loading. *Acta Geotechnica*. 2020 Feb;15(2):509-28.
- [18] Yadav HR. Geotechnical evaluation and analysis of Delhi metro tunnels (Doctoral dissertation), 2005.
- [19] Brox DR, Lee KW. Yielding And Collapse Of Large Span Tunnels In Weak Rock. In *ISRM Congress 1995 Sep 25 (pp. ISRM-8CONGRESS)*. ISRM.
- partially confined explosions and its application to blast response simulation of flexible structures. *International Journal of Impact Engineering*. 2016 Apr 1;90:46-60..
- [7] Feldgun VR, Kochetkov AV, Karinski YS, Yankelevsky DZ. Internal blast loading in a buried lined tunnel. *International Journal of Impact Engineering*. 2008 Mar 1;35(3):172-83.
- [8] Woods RD. Screening of surface wave in soils. *Journal of the soil mechanics and foundations division*. 1968 Jul;94(4):951-79.,
- [9] Gui MW, Chien MC. Blast-resistant analysis for a tunnel passing beneath Taipei Shongsan airport—a parametric study. *Geotechnical & Geological Engineering*. 2006 Apr;24:227-48.
- [10] Paoletta L, Ochmanski M, Modoni G. An Innovative Holistic GIS-BIM and Artificial Intelligence Based Approach to Manage Mechanized Tunnelling: The Back-Analysis of the Budapest Metro Line4. In *National Conference of the Researchers of Geotechnical Engineering 2023 Jun 17 (pp. 251-258)*. Cham: Springer Nature Switzerland.
- [11] Alipour, R., Heshmati A.A., Karimiazar, J., Esazadefar, N., Asghari-Kaljahi, E., Bahmani, S.H. “Resistance and swelling of Tabriz marl soils stabilised using nano-silica and nano-alumina.” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering* (2022): 1-14. (in persian)
- [12] Alipour R, Aminpour H, Dehghanzadeh A. Investigating

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M .Y. Radan, A. Moghadam, S. A. Hoseini, *Numerical Modeling and Optimization of Rock Layers Arrangement to Reduce the Effect of Surface Impact Loading on Underground Spaces, Amirkabir J. Civil Eng., 57(6) (2025) 999-1020.*

DOI: [10.22060/ceej.2025.19894.7322](https://doi.org/10.22060/ceej.2025.19894.7322)



