



Original Paper



Stability Analysis of Ancient Man-Made Underground Spaces (A Case Study of Noushabad Underground City)

Mojtaba Khodaei Josheghani ¹, Majid Noorian-Bidgol ^{*2}

¹. *M.Sc. in Mining Engineering, Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, University of Kashan, Kashan, IRAN*

². *Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, University of Kashan, Kashan, IRAN*

 Received: 04/06/2022

Accepted: 02/11/2022

Abstract

The ancient subterranean cities are a set of interconnected spaces traditionally excavated into soil or rock, and are of cultural value thanks to their age. Studying their stability and state of preservation is thus crucial. The purpose of this research was to investigate the stability of the underground city of Noushabad, one of the world's largest ancient cities and one of Iran's famous tourist attractions. For this purpose, in the first stage, samples were obtained for laboratory tests to determine the type of material into which the spaces were cut, and its geotechnical characteristics and mechanical behavior. In the second stage, a finite element numerical analysis with Plaxis2D software was used to model parts of the accessible spaces at the site (three cross-sections along the main corridor) so as to enable a static analysis of stress-displacement. Finally, the safety factor was figured out. The laboratory results of this study indicated the soil in the underground city to be of an inorganic clay type with pasty properties. Also, the modeling results showed that while the increase in the cross-sectional area of the excavation caused a decrease in the safety factor and an increase in the values of stress and displacement around the excavation, due to the very low values of the displacement of the excavations (in the range of a few millimeters) and a safety factor greater than 1, based on the current state of preservation of the main corridors, the site has relatively good stability. Paying attention to the findings of this research will be an effective step in ensuring the safety of visitors to this place and the region's sustainable development.

Keywords: Man-made underground space, Stability analysis, Numerical modeling, Finite element method (FEM), Plaxis software, Noushabad underground city.

 *Corresponding Author: noriyan@kashanu.ac.ir

Introduction

Underground spaces have existed since remote antiquity. Today, such spaces represent an indicator of development and one of the most effective ways of interacting with the environment when designing and building infrastructure for modern societies. Therefore, predicting the strength behavior and deformability and evaluating their stability is a subject of utmost importance in underground space engineering.

Subterranean cities, consisting of a network of interconnected underground spaces, have been widely used since the distant past for residential purposes but also as a safe haven in times of danger, and in other words, illustrate a unique example of passive defense structures. Most of these cities are artificial structures cut deep into soils or rocks under preexistent urban areas. Today, these underground spaces are considered cultural heritages because of their age, so most of them are UNESCO World Heritage Sites. As a long time has passed since the creation of these structures, studying their stability with an eye to preserve and maintain them and ensure the safety of visitors is vital [1].

As an ancient and prominent civilization in the world, Iran is home to many examples of this underground architectural monuments with an extended history [2]. The man-made underground spaces of Noushabad, Aran va Bidgol [3], Saman, Malayer [4], Kariz, Kish [5], Meymand, Kerman [6], and Kandovan, Tabriz [7] are the most conspicuous examples of related structures. A review of the literature shows that extensive investigations have covered the underground city of Cappadocia in Turkey to evaluate its short- and long-term stability [8-14], and the same is true of other localities of Turkey, among them being Zelve [15-16], Derinkuyu [17], Gümüşler [18], Tatlarin [19-20], and Afyon-Kütahya [21]. Such stability analyses with numerical methods have likewise been performed at Wieliczka of Poland [22-23] and Marsala of Italy [24].

This paper aims to investigate the stability of the Noushabad underground city (Fig. 1), known as Ouyi, as one of the world's largest artificial ancient underground spaces and one of Iran's famous tourist centers. Located in the environs of the Aran va Bidgol city of Isfahan province, it represents a notable piece of ancient architecture. The main reason for the establishment of this subterranean city was typically the region's insecurity in the past. Exposed to frequent raids, the local populations formed an underground chain of passages beneath the entire city, where they could take refuge during such occasions.

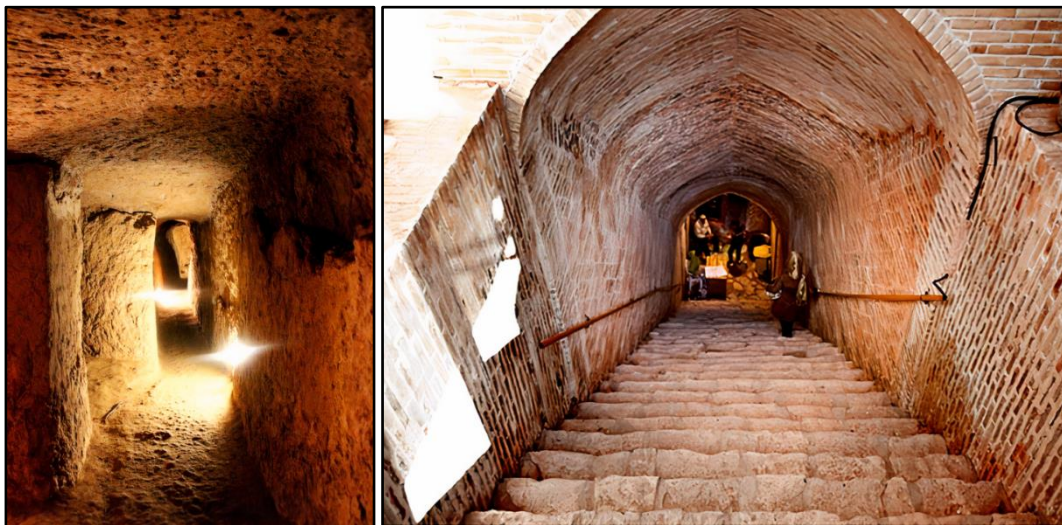


Fig. 1. The entrance (left) and a part of the main corridors (right) of the Noushabad underground city

Materials and Methods

For stability analysis of the Noushabad underground city, in the first stage, standard laboratory tests were carried on the obtained samples from the matrix content. It was found to be of clay type, and its geotechnical properties were calculated (Table 1).

Table 1. Mechanical properties of soil at the Noushabad underground city

Parameters	Unit	value
Dry density	KN/m ³	16.6
Saturated density	KN/m ³	18.8
Modulus of elasticity	KPa	55500
Friction angle	Degree	33
Cohesion	KPa	21
Poisson's ratio	-	0.3
Uniaxial compressive strength (UCS)	KPa	161.8

In the second step, a numerical finite element approach using Plaxis 2D software was applied to perform a static stress-displacement analysis through modeling parts of the site (three transverse sections along the main corridor) (Fig. 2). And finally, the safety factor was determined. Figure 3 shows the plans of the Noushabad underground city along with the locations of three selected sections and the points from which soil samples were obtained on the second level.

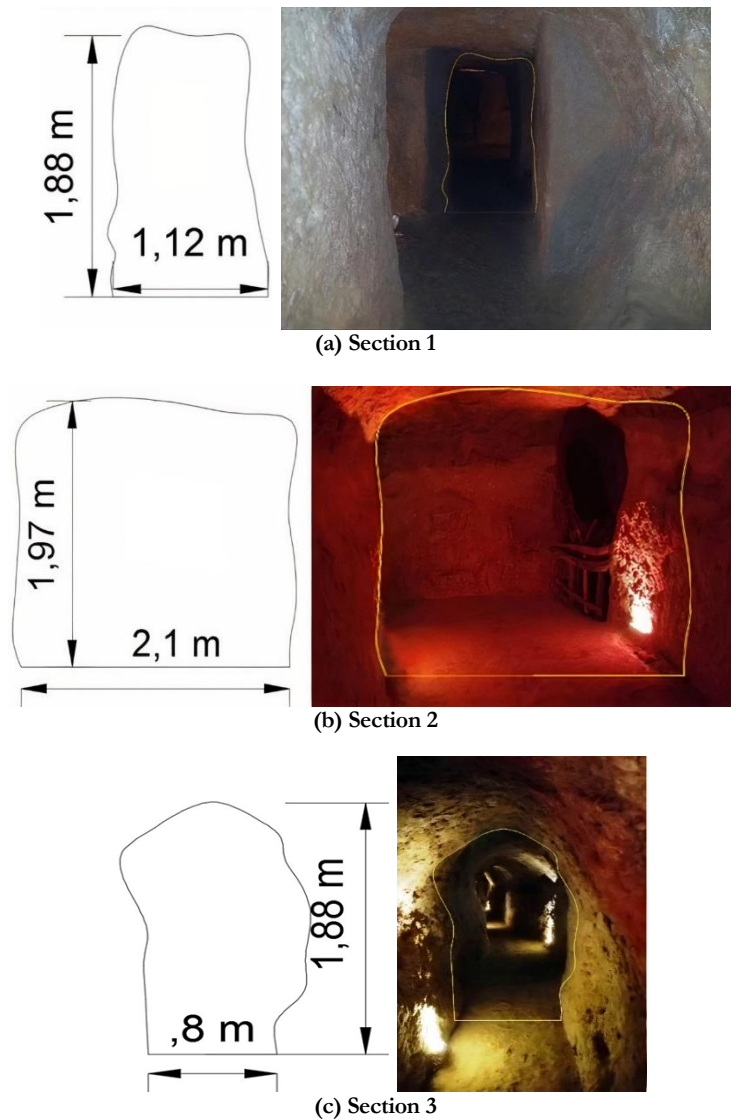


Fig. 2. Corridors of the Noushabad underground city (right) and their shapes and geometric characteristics (left) in the three selected sections



Fig. 3. Plan of the Noushabad underground city showing the locations of the three selected sections and soil sampling points on the second level.

Results

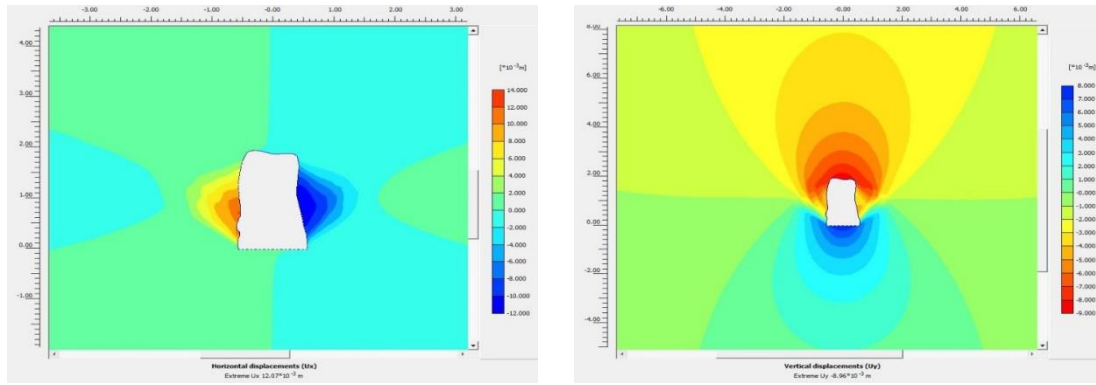
In Fig. 4, contours show the values of horizontal and vertical displacements obtained around the excavation at the three sections. Comparing the results shows that in all investigated sections, the amount of displacement in the excavation walls (in the horizontal direction) is higher than that estimated for the roof of the excavation (in the vertical direction). This is due to the fact that in structures close to the land surface, the amount of horizontal stress is usually higher than the vertical one. Therefore, in our case, the amount of horizontal displacement will be higher than the vertical displacement.

Discussion

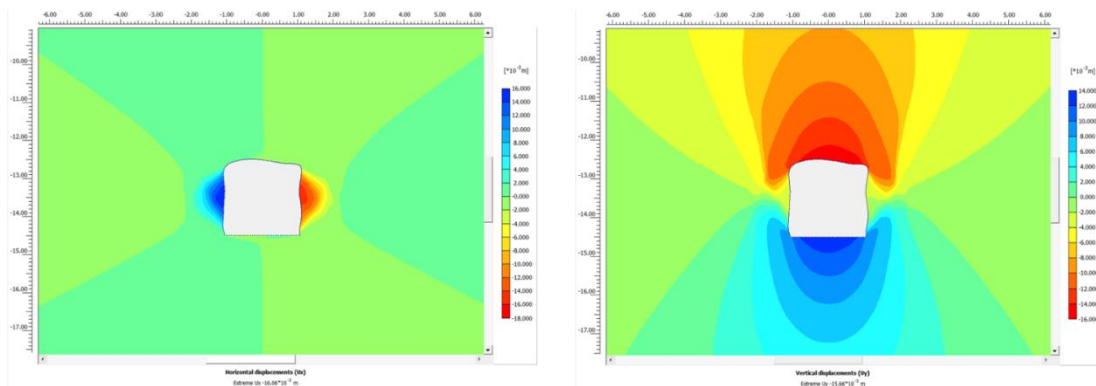
In engineering, the safety factor (SF), also known as a factor of safety (FoS), indicates the stability of a structure against applied loads. Usually, if this value is more significant than 1, the structure will be stable, and of course, the higher the value, the more stable the structure will be. In this research, the reducing cohesion-friction angle (Φ -c) approach was used to determine the safety factor. In this method, soil strength parameters (cohesion and friction angle) are reduced automatically and successively until the failure occurs in the structure, and at the end of the process, the safety factor is calculated. In Table 2, the safety factors obtained for the three studied sections are given along with the values for maximum horizontal, vertical and total displacement, and maximum principal stress. Obviously, the safety factor is greater than 1 in all the entire sections, so all of them are stable. In this case, the safety factor decreases with the increase of the excavation's cross-sectional area. Accordingly, Section 2, with the largest cross-sectional area, has the lowest safety factor, while Section 3, with the smallest cross-sectional area, exhibits the highest safety factor.

Conclusions

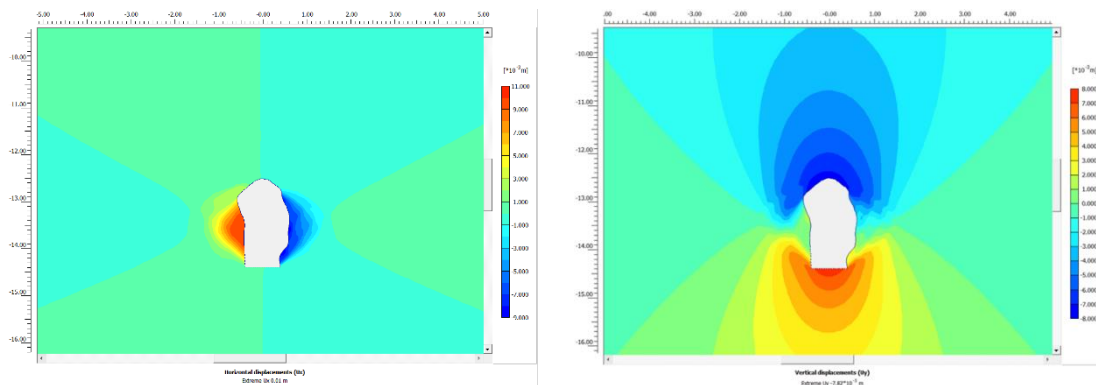
Among the available methods for evaluating the stability of underground spaces, numerical methods can take into account all regional conditions through structural modeling and stress-displacement analysis of the surrounding areas. The results of this study show that although increasing the cross-sectional area of the excavation at the Noushabad underground city has caused a reduced the safety factor and increased amount of stress and displacement around the excavation, given the very small amounts of displacement (a few millimeters) and the safety factor of greater than 1, the main corridors are currently relatively stable. In this case, increasing the cross-section and depth of the space will increase the amount of stress and displacement and decrease the safety factor. The findings of this study can be a practical step towards ensuring the safety of visitors to the site and the sustainable development of the local community.



(a) Section 1



(b) Section 2



(c) Section 3

Fig. 4. Displacements around the excavation in the vertical (*right*) and horizontal (*left*) directions in the three selected sections

Table 2. Values of safety factor and maximum displacement and principal stress around the excavation in the three studied sections

Sections	Geometric characteristics of excavation		Maximum displacement (mm)			Maximum principal stress (KPa)	Safety factor
	Width (m)	Height (m)	Horizontal	Vertical	Total		
1	1.12	1.88	12.07	8.96	12.85	421.6	1.85
2	2.1	1.97	16.06	15.66	16.24	499.24	1.764
3	0.8	1.88	10	7.82	10.02	497.7	1.875

References

- [1] Cakir, O., Evren, S., Tören, E., & Kozak, N. (2018), "Utilizing the sustainable livelihoods approach to evaluate tourism development from the rural host communities' point of view: The case of Cappadocia (Turkey)." *GeoJournal of Tourism and Geosites*, 21(1), 7-25.
- [2] Montazerolhodjah, M., Pourjafar, M., & Taghvaei, A. (2015), "Urban underground development an overview of historical underground cities in Iran." *Iran University of Science and Technology*, 25(1), 53-60.
- [3] Salehi, M., Abdolhoseyni, J., & Armaghani, A. (2016), "Investigation of underground architecture of Ouyi city (Noushabad)." In the first national conference of architectural and urban planning approaches ahead, Kermanshah, Iran. (In Persian).
- [4] Mohamadifar, Y., hemati Azandaryai, E., Khaksar, A., & Fooruzanfar, F. (2015), "A Study on the Subterranean Burials of the Sāmen (Malayer) rocky Architectural Complex." *Journal of archaeological studies*, 7(2), 117-129. (In Persian).
- [5] Shariatmadari, N., & Fazelian, A. F. (2008), "Investigating the stability of underground spaces in the Kish karez project. In 3rd International Conference on Geotechnical Engineering and Soil Mechanics." Iranian Geotechnical Society. Tehran.
- [6] Hashemi, M., Basmenj, A. K., & Banikheir, M. (2018), "Engineering geological and geoenvironmental evaluation of UNESCO World Heritage Site of Meymand rock-hewn village, Iran." *Environmental earth sciences*, 77(1), 3.
- [7] Kaljahi, E. A., & Birami, F. A. (2015), "Engineering geological properties of the pyroclastic cone-shaped rocky houses of Kandovan, Iran." *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74(3), 959-969.
- [8] Ulusay, R., Akagi, T., Ito, T., Seiki, T., Yuzer, E., & Aydan, O. (1999), "Long term mechanical characteristics of Cappadocia tuff." In 9th ISRM Congress. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering. OnePetro.
- [9] Aydan, O., & Ulusay, R. (2003), "Geotechnical and geoenvironmental characteristics of man-made underground structures in Cappadocia, Turkey." *Engineering Geology*, 69(3-4), 245-272.
- [10] Ulusay, R., Aydan, O., Genis, M., & Tano, H. (2011), "The stability of an underground congress center in soft tuffs through an integrated in-situ monitoring, experimental, analytical and numerical methods (Cappadocia, Turkey)." In 12th ISRM Congress. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- [11] Aydan, O., & Ulusay, R. (2016), "Rock engineering evaluation of antique rock structures in Cappadocia Region of Turkey. In ISRM International Symposium-EUROCK 2016." International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- [12] Matsubara, H., & Aydan, O. (2016), "The effect of biological degradation of tuffs of Cappadocia, Turkey." In ISRM International Symposium-EUROCK 2016. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- [13] Ito, T., Akagi, T., Aydan, O., Ulusay, R., & Seiki, T. (2016), "Time-dependent properties of tuffs of Cappadocia, Turkey." In ISRM International Symposium-EUROCK 2016. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- [14] Tano, H., Aydan, O., Ulusay, R., & Tanaka, T. (2016), "Geomechanical investigations and pioneering monitoring attempts in Cappadocia, Turkey." In ISRM International Symposium-EUROCK 2016. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- [15] Ito, T., Aydan, O., Ulusay, R., & Kasmer, O. (2008), "Creep characteristics of tuff in the vicinity of

- Zelve antique settlement in Cappadocia Region of Turkey." In ISRM International Symposium, 5th Asian Rock Mechanics Symposium. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- [16] Kasmer, O., Ulusay, R., & Geniş, M. (2013), "Assessments on the stability of natural slopes prone to toe erosion, and man-made historical semi-underground openings carved in soft tuffs at Zelve Open-Air Museum (Cappadocia, Turkey)." *Engineering geology*, 158, 135-158.
- [17] Aydan, O., & Ulusay, R. (2013), "Geomechanical evaluation of Derinkuyu antique underground city and its implications in geoengineering." *Rock mechanics and rock engineering*, 46(4), 731-754.
- [18] Korkanc, M., Tuğrul, A., Savran, A., & Ozgur, F. Z. (2015), "Structural–geological problems in Gümüşler archeological site and monastery." *Environmental Earth Sciences*, 73(8), 4525-4540.
- [19] Dincer, I., Orhan, A., Frattini, P., & Crosta, G. B. (2015), "Rock mass instabilities in Tatlarin Underground City (Cappadocia-Turkey)." In *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 8* (pp. 361-365). Springer, Cham.
- [20] Dincer, I., Orhan, A., Frattini, P., & Crosta, G. B. (2016), "Rockfall at the heritage site of the Tatlarin Underground City (Cappadocia, Turkey)." *Natural Hazards*, 82(2), 1075-1098.
- [21] Aydan, O., & Kumsar, H. (2016), "A geoengineering evaluation of antique underground rock settlements in Frig (Phrygian) Valley in the Afyon-Kütahya region of Turkey." In ISRM International Symposium-EUROCK 2016. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- [22] Perski, Z., Hanssen, R., Wojcik, A., & Wojciechowski, T. (2009), "InSAR analyses of terrain deformation near the Wieliczka Salt Mine, Poland." *Engineering Geology*, 106(1-2), 58-67.
- [23] Cala, M., Stopkowicz, A., Kowalski, M., Blajer, M., Cyran, K., & D'obyry, K. (2016), "Stability analysis of underground mining openings with complex geometry." *Studia Geotechnica et Mechanica*, 38(1), 25-32.
- [24] Margherita, Z., Claudio, C., Laura, E., & Alessandra, N. (2018), "A risk assessment proposal for underground cavities in Hard Soils-Soft Rocks." *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 103, 43-54.



تحلیل پایداری فضاهاى زیرزمینی دستکند باستانی (مطالعه موردی: شهر زیرزمینی نوش آباد)

مجتبی خدایی جوشقانی^۱، مجید نوریان بیدگلی^{۲*}

۱. کارشناسی ارشد مهندسی معدن، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

۲. استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۱۴

چکیده

شهرهای زیرزمینی باستانی مجموعه‌ای از فضاهاى حفر شده به صورت سنتی در خاک و سنگ است که به دلیل قدمشان ارزش فرهنگی و تاریخی بالایی دارند، لذا بررسی پایداری و حفظ و نگهداری آن‌ها بسیار مهم و ضروری است. هدف از انجام این پژوهش بررسی پایداری شهر زیرزمینی اُویی نوش آباد به عنوان یکی از بزرگ‌ترین شهرهای دستکند باستانی در جهان و از مراکز معروف گردشگری ایران است. بدین منظور، در مرحله اول با نمونه برداری و انجام آزمون‌های آزمایشگاهی، جنس مواد دربرگیرنده حفریه‌ها تعیین و سپس ویژگی‌های ژئوتکنیکی و رفتار مکانیکی آن‌ها مشخص شده است. در مرحله دوم، بر اساس روش عددی اجزای محدود و استفاده از نرم‌افزار Plaxis2D، با مدل‌سازی بخشی از فضاهاى قابل دسترسی برداشت شده در این منطقه (سه مقطع عرضی در طول راهروی اصلی)، تحلیل استاتیکی تنش-جابجایی انجام شده و در نهایت فاکتور ایمنی بررسی شده است. نتایج آزمایشگاهی این مطالعه نشان می‌دهد که جنس خاک دربرگیرنده شهر زیرزمینی از نوع رُس غیرآلی با خاصیت خمیری است. همچنین نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که اگرچه افزایش سطح مقطع حفریه، باعث کاهش فاکتور ایمنی و افزایش مقادیر تنش و جابجایی اطراف حفریه شده است، با توجه به مقادیر خیلی کم، میزان جابجایی به دست آمده حفریه‌ها (در حد چند میلی‌متر) و فاکتور ایمنی بزرگ‌تر از یک، در شرایط فعلی راهروهای اصلی از پایداری نسبتاً مناسبی برخوردار است. توجه به دستاوردهای این پژوهش می‌تواند گامی موثر در راستای تأمین ایمنی بازدیدکنندگان از این مکان و توسعه پایدار منطقه باشد.

واژگان کلیدی: فضای زیرزمینی دستکند، تحلیل پایداری، مدل‌سازی عددی، روش اجزای محدود، نرم‌افزار Plaxis، شهر زیرزمینی نوش آباد.

* نویسنده مسئول مکاتبات: کیلومتر شش بلوار قطب راوندی، دانشگاه کاشان، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی معدن.
پست الکترونیکی: norijan@kashanu.ac.ir

۱. مقدمه

از دیرباز تا کنون، استفاده از فضاهای زیرزمینی برای رفع نیازهای متنوع زندگی بشری مورد توجه بوده و روزبه‌روز بر آن افزوده شده است، به طوری که امروزه استفاده از آن‌ها به عنوان یکی از شاخصه‌های توسعه‌یافتگی و از مهم‌ترین راهکارهای تعامل با محیط زیست در توسعه زیرساخت‌های جوامع مدرن محسوب می‌شود. لذا پیش‌بینی رفتار مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری و ارزیابی پایداری آن‌ها، یکی از مسائل مهم در مهندسی فضاهای زیرزمینی است.

شهرهای زیرزمینی به صورت شبکه‌ای از فضاهای زیرزمینی مرتبط به هم، از گذشته دور به منظور سکونت و پناهگاه امن در زمان خطر و به تعبیری نمونه‌ای بی‌نظیر از سازه‌های پدافند غیرعامل، کاربرد گسترده‌ای داشته‌اند. اغلب این شهرها به صورت دستکند در خارج از شهرهای اصلی و در دل کوه و صخره‌ها و یا در زیر شهرها و نواحی مسکونی در عمق زمین حفر شده‌اند. در حال حاضر، این فضاهای زیرزمینی با توجه به قدمشان به عنوان آثار باستانی و میراث فرهنگی هر کشور محسوب می‌گردد، به طوری که اغلب آن‌ها به عنوان یک اثر با ارزش در سازمان یونسکو ثبت و ضبط می‌گردد. به دلیل اینکه در اغلب موارد عمر زیادی از ایجاد این نوع سازه‌های مهندسی سپری شده، لذا برای حفظ و نگهداری آن‌ها و تأمین امنیت بازدیدکنندگان، مطالعه علمی وضعیت پایداری و تغییر شکل‌پذیری فضاهای موجود بسیار ضروری است [1].

ایران به دلیل داشتن تمدنی کهن و برجسته در جهان، دارای نمونه‌هایی از این نوع فضاهای زیرزمینی با قدمت بسیار است، به طوری که طی سال‌های گذشته کوشش شده در نقاط مختلف کشور کشف و شناسایی شوند [2]. شهرها و سازه‌های زیرزمینی اُویی نوش‌آباد [3]، سامن ملایر [4]، کاریز کیش [5]، میمند کرمان [6] و کندوان تبریز [7] نمونه‌هایی از این مناطق ارزشمند و منحصربه‌فرد در نقاط مختلف ایران است. بنابراین، لازم است به منظور تأمین ایمنی بازدیدکنندگان این آثار، که نقش بسزایی در رونق صنعت توریست و جذب گردشگر

دارد، مطالعه‌های علمی و اصولی انجام گیرد. مسلماً با شناسایی نقاط مستعد ریزش در مناطق مذکور می‌توان با اقدام‌های پیشگیرانه از تخریب و از بین رفتن آن‌ها جلوگیری کرد. علاوه بر ایران، کشورهایی دیگر نظیر ترکیه، ایتالیا و لهستان هم دارای این نوع فضاهای زیرزمینی با ارزش هستند که پژوهش‌های متعددی به ویژه در ترکیه انجام شده است. برای مثال، در شهر زیرزمینی Cappadocia ترکیه، پژوهش‌های گسترده‌ای با هدف بررسی پایداری کوتاه و بلندمدت این منطقه انجام شده است. نتایج این مطالعه‌ها نشان داده است که علاوه بر وضعیت زمین‌شناسی و ساختاری منطقه، علت ناپایداری در این منطقه تغییر شدید آب‌وهوایی و چرخه سرد شدن، انجماد، ذوب و تبخیر نزولات فصلی تعیین شده است [8-14]. تحقیق‌های مشابهی در مناطق دیگر ترکیه نظیر Zelve [15-16]، Derinkuyu [17]، Gümüşler [18]، Tatarin [19-20] و Afyon-Kütahya [21] انجام شده است. همچنین تحلیل پایداری فضاهای زیرزمینی فرهنگی به کمک روش‌های عددی در مناطقی در Wieliczka لهستان [22-23] و Marsala ایتالیا [24] نیز انجام شده که نشان از توجه ویژه به منظور حفاظت و نگهداری این نوع سازه‌های زیرزمینی قدیمی است. لذا لازم است در ایران نیز این نوع کارهای پژوهشی به صورت دقیق و جامع انجام گیرد.

شهر زیرزمینی اُویی نوش‌آباد به عنوان یکی از بزرگ‌ترین دستکندهای قدیمی در جهان، طی سالیان اخیر کشف و مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. هدف اصلی این پژوهش علاوه بر تعیین جنس و ویژگی‌های ژئوتکنیکی مواد دربرگیرنده فضاهای زیرزمینی منطقه مذکور، تحلیل پایداری استاتیکی بخشی از مناطق بحرانی و قابل دسترس این منطقه است. لذا در اولین بخش از این پژوهش با نمونه‌برداری و انجام آزمون‌های آزمایشگاهی، پارامترهای مکانیکی مواد تعیین شده است. در ادامه، تلاش شده است با ساخت مدل‌های هندسی بخشی از فضاهای زیرزمینی برداشت شده، تحلیل عددی تنش-جابجایی انجام گیرد و مناطق دارای پتانسیل احتمالی ریزش در مقاطع مورد بررسی شناسایی و فاکتور ایمنی

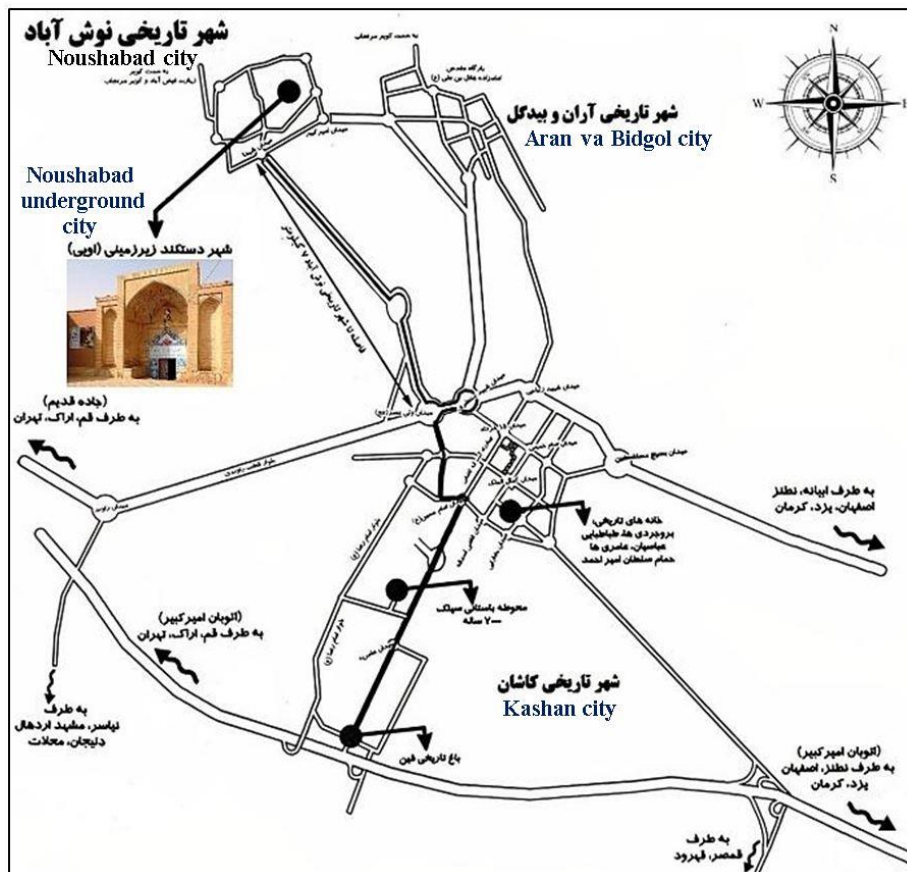
این منطقه بخشی از دشت کاشان است که سنگ کف آبرفت‌های آن در طبقه‌های غیرقابل نفوذ پلیوسن و میوسن قرار دارد. آبرفت‌ها از جنس رس، شن و ماسه هستند. عوارض بیابانی همچون دشت بزرگ رسی-نمکی، تل‌ماسه‌های بادی شمال و شرق و غلبه سیستم فرسایش بادی از ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی این ناحیه است.

شهر زیرزمینی نوش‌آباد که به زبان محلی به نام اُویی گفته می‌شود، به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین و زیباترین شهرهای دستکند زیرزمینی جهان، در زیر بافت اصلی شهر نوش‌آباد قرار گرفته است. وسعت این شهر به دلیل ارتباط میان محله‌ها و حفاظت از جان و مال مردم در مواقع ناامنی زیاد بوده و در دو سطح افقی و عمودی تا سطح کنونی شهر نوش‌آباد گسترش یافته است. موقعیت قرارگیری و نحوه دسترسی به این منطقه در شکل ۱ نشان داده شده است.

تعیین گردد. بدین منظور، از نسخه دوبعدی نرم‌افزار Plaxis که بر پایه روش عددی اجزای محدود بوده، استفاده شده است.

۲. شهر زیرزمینی اُویی نوش‌آباد

شهر تاریخی و کویری نوش‌آباد با طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۲۹ دقیقه و عرض ۳۴ درجه و ۴۶ دقیقه، در ارتفاع نهمصد متری از سطح دریا قرار دارد. این شهر با وسعتی بالغ بر ۱۷۰ هکتار از توابع شهرستان آران و بیدگل بوده و در استان اصفهان در مرکز ایران واقع شده است. نوش‌آباد از شرق به آران و بیدگل، از جنوب به کاشان، از غرب به سفیدشهر و از شمال به کویر مرکزی ایران ارتباط دارد. این منطقه با آب‌وهوایی گرم‌وخشک در حاشیه دشت کویر و در محیطی بیابانی قرار گرفته و شهری تقریباً مسطح است که گرادیان شیب توپوگرافی این منطقه از جنوب به سمت شمال کاهش می‌یابد. از نظر زمین‌شناسی



شکل ۱: موقعیت قرارگیری و نحوه دسترسی به شهر زیرزمینی اُویی نوش‌آباد
Fig. 1: Location and access to the Noushabad underground city

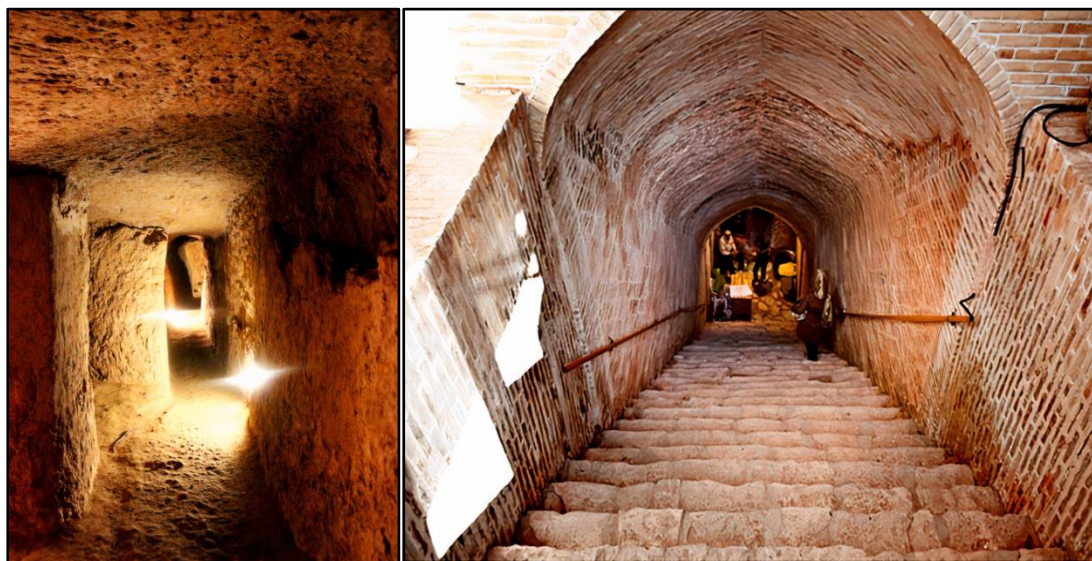
استفاده می‌شود. در شکل ۲، بخشی از راهروها (سمت چپ) و دهانه ورودی (سمت راست) شهر زیرزمینی مذکور نشان داده شده است.

شهر زیرزمینی نوش‌آباد در سه طبقه روی همدیگر قرار گرفته است. طبقه اول در حقیقت کوره‌راه‌ها و دالان‌هایی است که در گذشته برای همراه کردن تعقیب‌کنندگان احتمالی در زمان جنگ و حمله اشرار به شهر استفاده می‌شده است. طبقه دوم و سوم محل پناه‌گرفتن اهالی شهر و زندگی در مواقع خطر و ذخیره آذوقه و غذا بوده است. راه ورودی به طبقه‌ها طوری حفاری شده که هرکس قصد ورود به فضا را دارد، ناگزیر باید از پایین به بالا حرکت کند. این ساختار دفاعی به گونه‌ای طراحی شده که قدرت دفاعی افراد مهاجم را به صفر می‌رساند و تسلط کافی را برای مقابله با دشمن فراهم می‌نماید.

این منطقه باستانی در واقع نمونه‌ای بی‌نظیر از سازه‌های زیرزمینی پدافند غیرعامل در گذشته بوده که مهم‌ترین هدف سازندگان آن ایجاد پناهگاهی امن و مخفی در برابر حمله اشرار به منطقه بوده است. به همین دلیل، این شهر به دلیل قدمت و معماری خاصش دارای ارزش فرهنگی و تاریخی بی‌نظیر بوده و جزو میراث گرانبه‌های کشور است که باید برای حفظ و حفاظت آن تلاش شود.

کشف این شهر در سال ۱۳۸۵ به صورت اتفاقی، توسط فردی که قصد حفر چاه در منزل خود داشته، انجام شده است. قدمت این شهر به هزاروپانصد سال پیش و دوره ساسانی (صدر اسلام تا دوره صفوی) بازمی‌گردد. این اثر در تاریخ ۸ مرداد ۱۳۸۵ با شماره ثبت ۱۵۸۱۶ به‌عنوان یکی از آثار ملی ایران به ثبت رسیده است. به‌علت قدمت تاریخی آن، این مکان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، به طوری که طی سالیان گذشته به‌عنوان یکی از مراکز معروف توریستی و گردشگری در ایران شناخته شده و بسیار پربازدید بوده است.

این شهر دارای ساختاری متراکم، پیچیده و گسترده‌ای است که شامل اتاق‌های کوچک، راهروهای باریک پیچ درپیچ و تعدادی چاه است. اتاق‌ها به شکل تودرتو و با راهروهای زاویه‌دار که دید مستقیم را با فضای بعدی از بین می‌برد، ساخته شده است. عمق این شهر بین ۴ تا ۱۶ متر است که وسعت آن به قول اهالی بومی منطقه، تا بیرون از حصار تاریخی شهر گسترده شده و تا ۴ کیلومتر تخمین زده شده است. غیر از ورودی اصلی، ارتفاع تمام قسمت‌های این شهر به‌اندازه قد یک انسان، بین ۱۷۰ تا ۱۹۰ سانتیمتر است. لازم به ذکر است که به دلیل پیدانشدن ورودی اصلی، در حال حاضر برای ورود به آن از آب‌انباری که مجاور این شهر است،



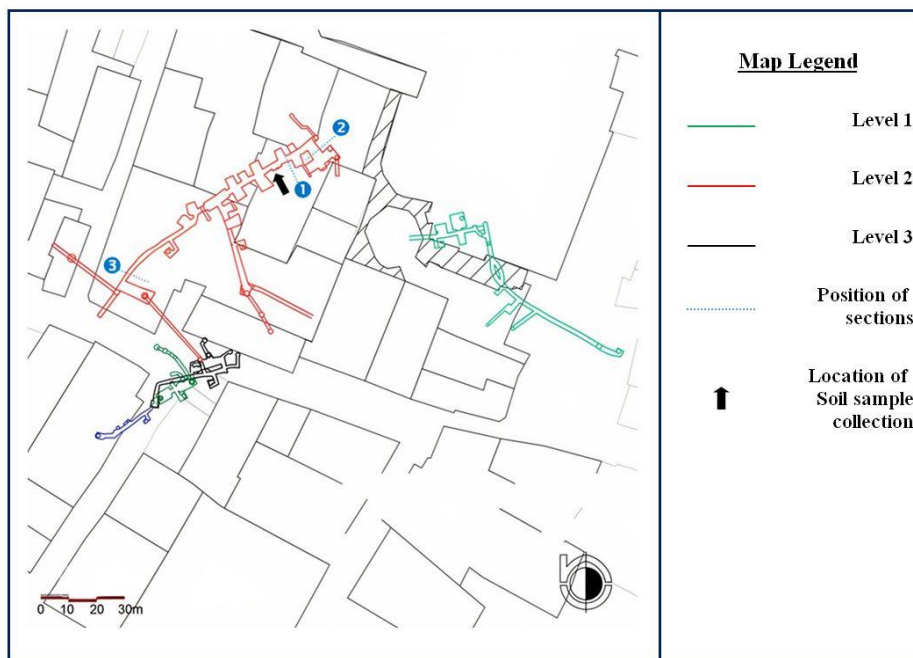
شکل ۲: دهانه ورودی (سمت راست) و بخشی از راهروهای اصلی (سمت چپ) شهر زیرزمینی اُویی نوش‌آباد
Fig. 2: The entrance (left side) and a part of the main corridors (right side) of the Nushabad underground city

۳. تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی منطقه

به منظور تحلیل پایداری هر نوع سازه خاکی و سنگی، ویژگی‌های مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری ژئوتکنیکی و ژئومکانیکی مواد دربرگیرنده سازه مورد نیاز است. لذا در اولین مرحله از این پژوهش، با انجام مطالعه‌های میدانی و نمونه‌برداری، مقادیر کیفی و کمی پارامترهای مورد نیاز در آزمایشگاه تعیین گردید.

در این مرحله با توجه به تاریخی بودن سازه و محدودیت برداشت نمونه، با هماهنگی و همکاری اداره میراث

فرهنگی، از طبقه دوم شهر زیرزمینی (طبقه فعال و قابل دسترسی) مقدار صد کیلوگرم خاک نمونه‌گیری شد و به آزمایشگاه مهندسی عمران و معدن دانشگاه کاشان انتقال داده شد. در شکل ۳، محل برداشت نمونه‌های خاک (با علامت فلش مشکی‌رنگ) روی نقشه پلان شهر زیرزمینی نوش‌آباد (منطقه قرمز رنگ) مشخص شده است. در این شکل، محل قرارگیری تقریبی طبقات مختلف شهر نسبت به همدیگر، به رنگ‌های مختلف مشخص شده است.



شکل ۳: نقشه پلان شهر زیرزمینی نوش‌آباد و محل نمونه‌برداری در طبقه دوم (فلش مشکی)

Fig. 3: Plan map of the Noushabad underground city along with the location of three selected sections and the soil sample collection on the second level

جدول ۱: پارامترهای مکانیکی خاک شهر زیرزمینی نوش‌آباد

Table 1. Mechanical parameters of soil obtained in the Noushabad underground city

Parameters	Unit	value
Dry density	KN/m ³	16.6
Saturated density	KN/m ³	18.8
Modulus of elasticity	KPa	55500
Friction angle	Degree	33
Cohesion	KPa	21
Poisson's ratio	-	0.3
Uniaxial compressive strength (UCS)	KPa	161.8

زوایای مختلف اندازه‌گیری و در مرحله بعد مقادیر وارد نرم‌افزار AutoCAD شده است. در شکل ۴، سه مقطع برداشت شده راهروها به روش مذکور و ترسیم آن توسط نرم‌افزار اتوکد نشان داده شده است. همچنین در شکل ۵ نیز تصویر واقعی حفریه (شکل سمت راست) و مشخصات هندسی آن در دو بُعد (شکل سمت چپ) در سه مقطع برداشت شده نشان داده شده است.

پس از تعیین شکل و سطح مقطع حفریه‌ها، مدل هندسی هر مقطع در نرم‌افزار Plaxis ساخته شده است. برای تحلیل تنش-کرنش مقاطع دوعبده راهروها، حالت کرنش صفحه‌ای (Plan strain) انتخاب شده است. در ساخت مدل‌های عددی، ارتفاع بارسنگ در تمام مقاطع برابر با ۱۲ متر که در حقیقت برابر با عمق متوسط طبقه دوم است، در نظر گرفته شده است. بر این اساس، وزن بارسنگ روی حفریه به‌عنوان بار استاتیکی و معادل با تنش قائم برجای ناشی از شتاب ثقل به‌سمت پایین فرض شده است. در واقع، محاسبه و اعمال تنش‌های برجا در مدل بر اساس روش ثقلی انجام شده است. همچنین با توجه به اینکه سطح آب زیرزمینی پایین‌تر از تراز مقاطع مورد بررسی در پژوهش است، لذا فشار آب وجود ندارد و مسئله با وضعیت زه‌کشی خاک حل شده که در آن فشار آب حفراهی در حین بارگذاری برابر با صفر است.

به‌منظور بررسی دقیق میزان تنش‌های القایی و جابه‌جایی‌های ایجادشده در اطراف حفریه، محدوده مدل چهارگوش، و به‌اندازه کافی بزرگ انتخاب شده است. بدین منظور، ارتفاع بالای سقف حفریه برابر با مقدار بارسنگ و فاصله دیواره‌ها و کف حفریه نسبت به مرز مدل برابر با پنج برابر بیشترین ابعاد مقطع در هر حالت انتخاب شده است. همچنین از آنجاکه در مدل‌سازی معمولاً شرایط مرزی مدل باید به گونه‌ای تعیین شود که دقیقاً منطبق یا نزدیک با شرایط واقعی باشد، در این پژوهش از شرایط مرزی استاندارد استفاده شده است. بدین منظور، مرزهای دو طرف راست و چپ مدل برای حرکت در راستای افق محدود ولی در راستای قائم آزاد بوده است. همچنین برخلاف مرز بالای مدل که سطح زمین آزاد فرض شده، مرز پایین مدل در تمام جهتها کاملاً ثابت و مقید فرض شده است.

در مرحله بعد در آزمایشگاه، طی چندمرحله آزمایش‌های جامعی نظیر دانه‌بندی، حدود اتربرگ، وزن مخصوص و مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت برشی خاک روی نمونه‌های انجام شده است. لازم به ذکر است برای تعیین وزن مخصوص خاک، آزمایش دانسیته در محل انجام گرفته شده است. در نهایت، جنس خاک دربرگیرنده فضاهاى زیرزمینی منطقه مورد مطالعه، رس غیرآلی با خاصیت خمیری کم (رس با پلاستیسته کم) تعیین گردید. در جدول ۱، پارامترهای ژئوتکنیکی اندازه‌گیری شده خاک مورد نظر آورده شده است.

۴. تحلیل پایداری فضاهاى زیرزمینی منطقه

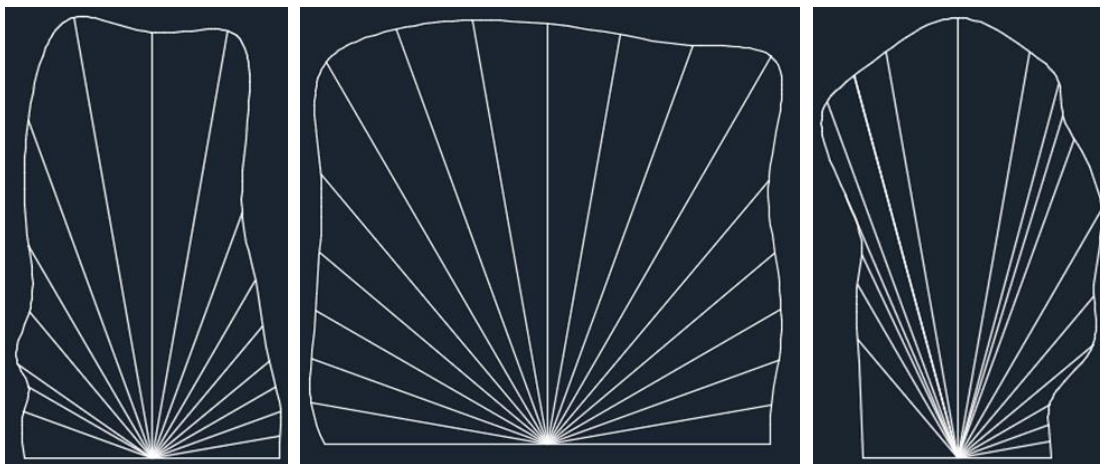
مدل‌سازی عددی روشی است که می‌توان توسط آن ارزیابی دقیقی از مقادیر تنش و جابه‌جایی‌های اطراف حفریه‌های زیرزمینی، مکانیزم ناپایداری‌های محتمل و در نتیجه میزان پایداری بر اساس ضریب ایمنی داشت. لذا در این مرحله از پژوهش با کامل شدن داده‌های ژئوتکنیکی خاک دربرگیرنده، پایداری بخشی از فضاهاى شهر زیرزمینی تعیین شده است. بدین منظور، با توجه به نوع مصالح، از نرم‌افزار اجزای محدود Plaxis 2D استفاده شده است.

معمولاً اولین مرحله مدل‌سازی عددی، ساخت هندسه مدل است. بدین منظور، برای تحلیل پایداری فضاهاى زیرزمینی در حالت دوعبده نیاز به ابعاد، شکل و سطح مقطع حفریه‌ها در مقاطع قائم مسیر حفر است. لذا در این مرحله از تحقیق، پس از انتخاب سه ناحیه در مسیر راهروهای طبقه دوم شهر زیرزمینی، برداشت سطح مقطع انجام گردید. موقعیت قرارگیری این نواحی با شماره ۱ تا ۳ در شکل ۳ نشان داده شده است. دلیل انتخاب این مناطق، قابلیت دسترسی به آنها بوده، همچنین سعی شده است نقاط طوری انتخاب گردد که اولاً، در طول مسیر بازدیدکنندگان و پراکنده باشد؛ ثانیاً، سطح مقطع حفریه (از کوچک تا بزرگ) متفاوت باشد. برای برداشت ابعاد و سطح مقطع حفریه‌ها در سه موقعیت مورد اشاره، از روش مترکشی استفاده شده است. بدین منظور، به کمک متر و نقاله، مجموعه‌ای از طول خطوط واصل از مرکز کف مقطع حفریه به دیواره و سقف آن در

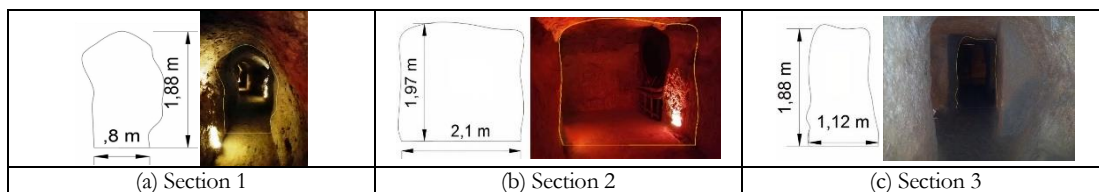
گرفته نشده است. بنابراین، اجرای مدل طی دو مرحله انجام شده است. در مرحله اول مدل بدون حفریه اجرا شده تا به تعادل برسد و در مرحله بعد حفریه طی یک مرحله ایجاد و مجدداً مدل اجرا شده است. در اجرای تمام مدل‌های ساخته شده، برای در نظر گرفتن تغییر شکل‌های الاستو-پلاستیک که تغییر فشار آب حفره‌ای در آن‌ها لحاظ نمی‌شود، از تحلیل پلاستیک استفاده شده است.

برای تکمیل مدل برای تحلیل تنش-جابجایی فضاهای زیرزمینی مدل‌سازی شده، با توجه به نوع خاک و پارامترهای ارائه شده در جدول ۱، در این پژوهش از مدل رفتاری موهر-کلمب استفاده شده است. همچنین برای افزایش دقت محاسبه، گسسته‌سازی مدل با ایجاد المان‌هایی از طریق مش‌بندی مثلثی ۱۵ گرهی ریز برای کل مدل و یک درجه ریزتر در اطراف حفریه انجام شده است.

همچنین با توجه به اینکه شهرهای زیرزمینی قدیمی به‌طور کامل حفر شده‌اند، لذا برای حل مدل مراحل حفر در نظر



شکل ۴: نحوه برداشت و ترسیم مقاطع دوبعدی راهروها به روش مترکشی (به ترتیب از چپ به راست، مقطع شماره ۱، ۲ و ۳)
Fig. 4: Mapping and drawing the two-dimensional sections of the corridors using the metering method (Section number 1, 2 and 3 from left to right, respectively)

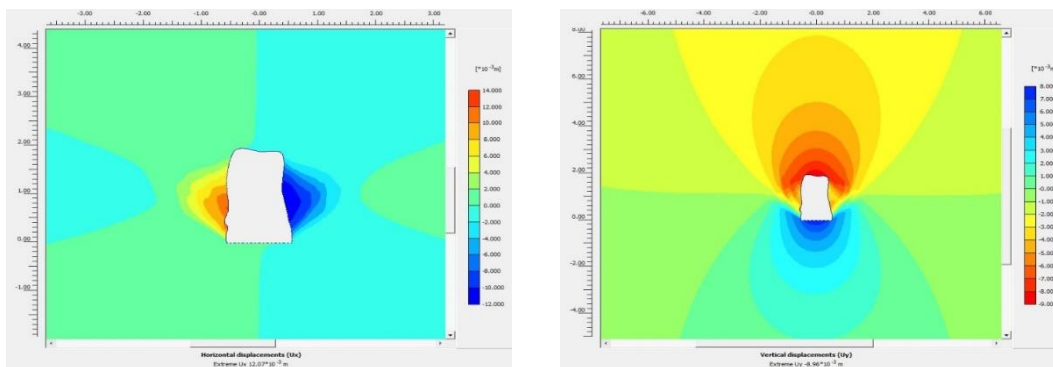


شکل ۵: تصاویر راهروهای شهر زیرزمینی نوش‌آباد (سمت راست) و مشخصات هندسی آن (سمت چپ) در سه مقطع انتخابی
Fig. 5: Pictures of the corridors of the Noushabad underground city (right side) and its shape and geometric characteristics (left side) in three selected sections

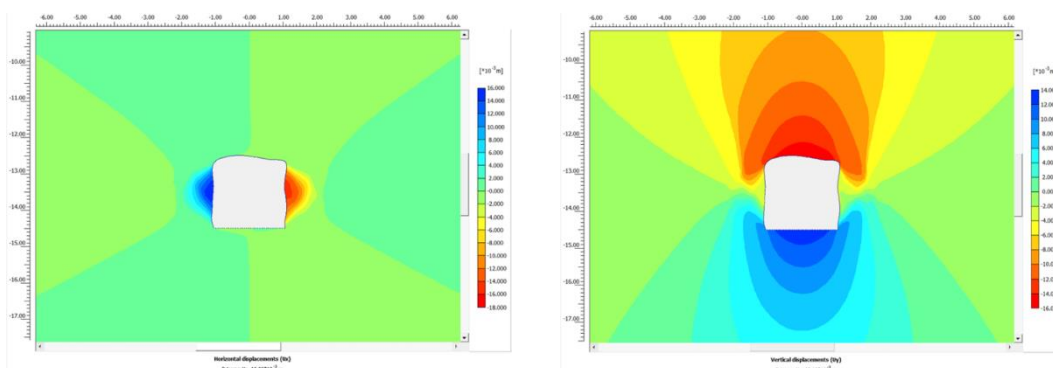
سقف حفریه (در راستای قائم) بیشتر است. این به دلیل آن است که معمولاً در سازه‌های نزدیک به سطح زمین میزان تنش افقی بیشتر از قائم است، لذا در این حالت میزان جابجایی افقی نیز از قائم بیشتر خواهد بود. همچنین منطقه پلاستیک (نقاط قرمز در شکل سمت راست) و وضعیت بردار تنش‌های کل اطراف حفریه‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است.

۵. تحلیل و تفسیر نتایج

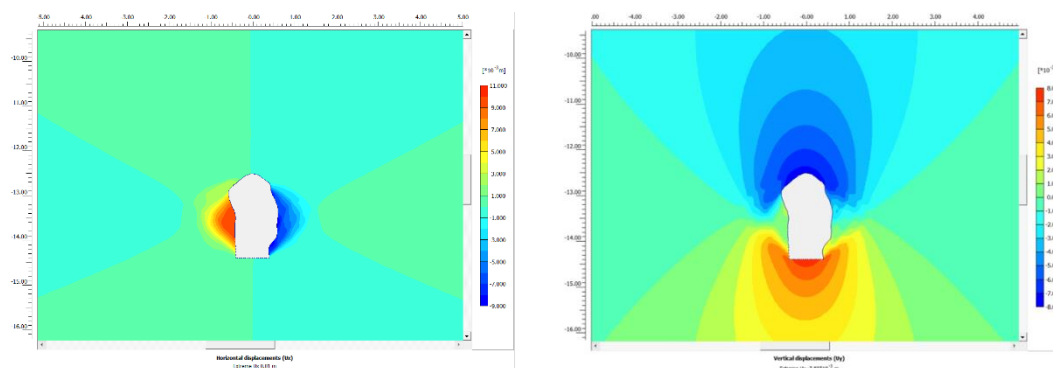
این بخش شامل نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل تنش-جابجایی در سه مقطع مورد مطالعه است. در شکل ۶ منحنی‌های هم‌تراز مقادیر جابجایی‌های افقی و قائم به‌دست‌آمده اطراف حفریه‌ها را نشان می‌دهد. مقایسه این نتایج نشان می‌دهد که در تمام مقاطع بررسی شده، میزان جابجایی‌ها در دیواره حفریه (در راستای افقی) نسبت به



(a) Section 1

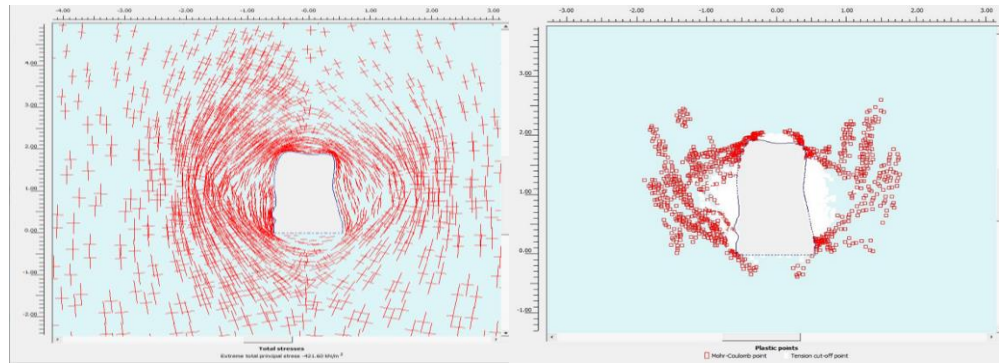


(b) Section 2

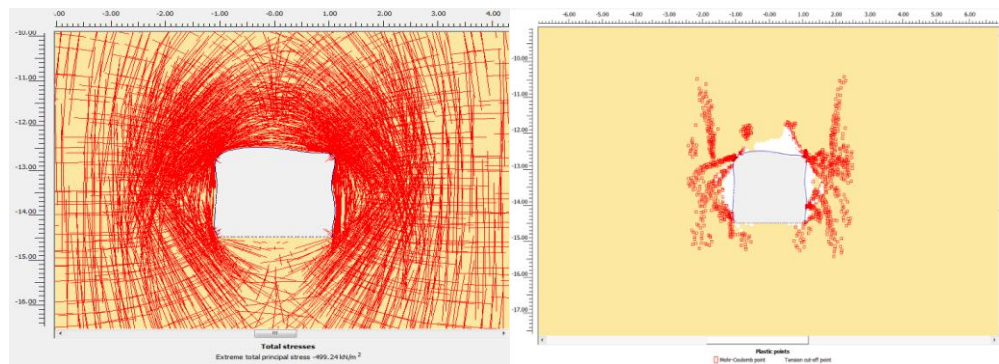


(c) Section 3

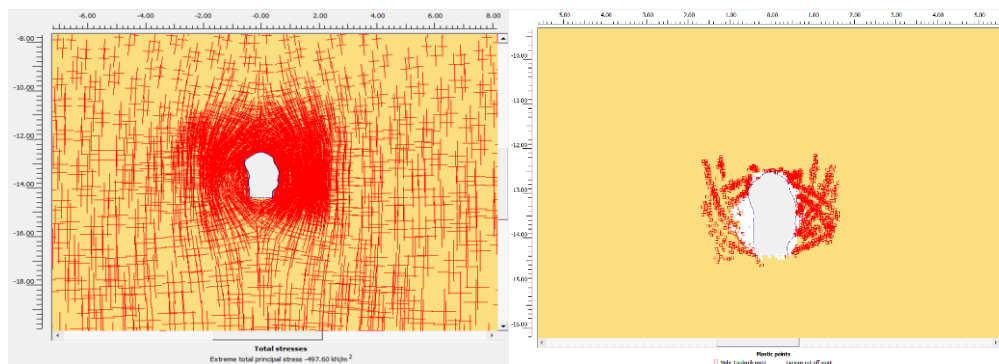
شکل ۶: وضعیت جابه‌جایی‌های اطراف حفریه در راستای قائم (شکل سمت راست) و افقی (شکل سمت چپ) در سه مقطع مورد مطالعه
 Fig. 6: Displacements around the excavation in the vertical (right side) and horizontal (left side) direction in three selected sections



(a) Section 1



(b) Section 2



(c) Section 3

شکل ۷: مناطق پلاستیک (شکل سمت راست) و بردار تنش کل (شکل سمت چپ) اطراف حفریه در سه مقطع مورد مطالعه
 Fig. 7: Plastic zones (right figure) and total stress vector (left figure) around the excavation in three studied sections

نشان می‌دهد. معمولاً اگر مقدار فاکتور ایمنی از یک بزرگ‌تر باشد، سازه پایدار خواهد بود و البته هرچه این مقدار بیشتر باشد، سازه پایدارتر خواهد بود. در این پژوهش برای تعیین فاکتور ایمنی، از روش کاهش چسبندگی - زاویه اصطکاک داخلی (Phi-c) استفاده شده است. در این روش پارامترهای مقاومتی خاک (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) به‌طور خودکار و پی‌درپی تا زمانی که شکست در سازه رخ دهد، کاهش داده می‌شوند و در پایان فرآیند، فاکتور ایمنی محاسبه می‌گردد. در جدول ۲، علاوه بر مقادیر حداکثر جابه‌جایی افقی، قائم و کل و حداکثر تنش اصلی، فاکتور ایمنی به‌دست‌آمده در سه مقطع مورد مطالعه نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است در تمام مقاطع بررسی شده فاکتور ایمنی از یک بیشتر است، لذا در این حالت هر سه حفریه پایدار است. در این حالت با افزایش سطح مقطع حفریه، میزان فاکتور ایمنی کاهش می‌یابد. در این خصوص حفریه شماره ۲ با بیشترین سطح مقطع، دارای کمترین فاکتور ایمنی و در مقابل آن، حفریه شماره ۳ با کمترین سطح مقطع، دارای بیشترین فاکتور ایمنی است.

بررسی نتایج مذکور نشان می‌دهد که با افزایش سطح مقطع حفریه، میزان جابه‌جایی و تنش کل افزایش می‌یابد. در این خصوص، حفریه شماره ۲ با بیشترین سطح مقطع، دارای بیشترین مقدار تنش و جابه‌جایی و در مقابل آن، حفریه شماره ۳ با کمترین سطح مقطع، دارای کمترین مقدار تنش و جابه‌جایی است. همچنین بررسی نحوه توزیع نقاط پلاستیک اطراف حفریه‌ها نشان می‌دهد که با توجه به نحوه توزیع تنش، تقریباً در تمام موارد تعداد نقاط پلاستیک در دیواره‌ها بیشتر از سقف حفریه است. همچنین به دلیل تقارن‌نداشتن سطح مقطع و حفاری غیریکنواخت، گوشه‌های تیز در مرز حفریه زیاد بوده و در نتیجه تمرکز نقاط پلاستیک به دلیل تمرکز تنش در این نواحی بیشتر شده است. لذا به دلیل اینکه معمولاً احتمال شکست و ریزش در این مناطق بیشتر است و باید توجه ویژه‌ای برای کنترل و پایداری این مناطق انجام گیرد. در ادامه نیز برای بررسی میزان پایداری، فاکتور ایمنی مقاطع مورد بررسی محاسبه شده‌اند. اساساً، فاکتور ایمنی میزان پایداری یک سازه در مقابل بارهای اعمال شده را

جدول ۲: مقادیر فاکتور ایمنی و حداکثر مقدار جابه‌جایی و تنش اطراف حفریه در سه مقطع مورد مطالعه

Table 2. Values of safety factor and maximum displacement and principal stress around the excavation in three studied sections

Sections	Geometric characteristics of excavation		Maximum displacement (mm)			Maximum principal stress (KPa)	Safety factor
	Width (m)	Height (m)	Horizontal	Vertical	Total		
1	1.12	1.88	12.07	8.96	12.85	421.6	1.85
2	2.1	1.97	16.06	15.66	16.24	499.24	1.764
3	0.8	1.88	10	7.82	10.02	497.7	1.875

نظر، خاک رُس غیرآلی با خاصیت خمیری کم است. در مرحله دوم نیز بر اساس روش عددی اجزای محدود و به کمک نرم‌افزار Plaxis2D، تحلیل تنش-جابه‌جایی بخشی از راهروهای اصلی این شهر زیرزمینی با سطح مقطع مختلف انجام شده است. تحلیل استاتیکی انجام‌شده نشان می‌دهد به دلیل اینکه که میزان جابه‌جایی محاسبه‌شده اطراف حفریه‌ها در حد چند میلی‌متر است، در حال حاضر راهروهای مذکور در مقاطع مورد مطالعه از

۴. نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش، تحلیل پایداری و تعیین رفتار تغییرشکل‌پذیری شهر زیرزمینی نوش‌آباد به‌عنوان فضاهاى زیرزمینی دستکند باستانی است. بدین منظور، در مرحله اول، با انجام آزمایش‌های ژئوتکنیکی روی نمونه‌های برداشت‌شده از منطقه مورد مطالعه، پارامترهای مکانیکی خاک دربرگیرنده تعیین شده است. نتایج این بخش از پژوهش نشان داده که جنس مصالح منطقه مورد

به کنترل بیشتر و پایدارسازی موضعی در مناطق ریزشی نیاز دارند. بدین منظور، پیشنهاد می‌گردد برای ثبت مقادیر تنش و کرنش در طول زمان با نصب ابزار دقیق، رفتارسنجی فضاهای زیرزمینی در طول سال انجام گردد تا بدین ترتیب با نظارت دقیق از بروز ریزش و تخریب جلوگیری گردد. همچنین با توجه به زلزله‌خیز بودن ایران، تحلیل پایدار دینامیکی شهر زیرزمینی مذکور در دست بررسی است که نتایج آن در آینده ارائه خواهد گردید.

پایداری نسبتاً مطلوبی برخوردارند. همچنین هرچند که با افزایش سطح مقطع حفریه‌ها فاکتور ایمنی کاهش یافته است، فاکتور ایمنی در کلیه مقاطع مورد بررسی بیشتر از یک است که دلیلی بر پایداری فضاهای زیرزمینی موجود است. تحلیل پلاستیک اطراف حفریه نیز نشان می‌دهد که به‌طور کلی، وضعیت پایداری در سقف نسبت به دیواره حفریه بهتر است. در این حالت بیشترین ناپایداری در گوشه‌های تیز حفریه به‌وجود آمده است، لذا این مناطق

References

- [1] Cakir, O., Evren, S., Tören, E., & Kozak, N. (2018), "Utilizing the sustainable livelihoods approach to evaluate tourism development from the rural host communities' point of view: The case of Cappadocia (Turkey)." *GeoJournal of Tourism and Geosites*, 21(1), 7-25.
- [2] Montazerolhodjah, M., Pourjafar, M., & Taghvaei, A. (2015), "Urban underground development an overview of historical underground cities in Iran." *Iran University of Science and Technology*, 25(1), 53-60.
- [3] Salehi, M., Abdolhoseyni, J., & Armaghani, A. (2016), "Investigation of underground architecture of Ouyi city (Noushabad)." In the first national conference of architectural and urban planning approaches ahead, Kermanshah, Iran. (In Persian).
- [4] Mohamadifar, Y., hemati Azandaryai, E., Khaksar, A., & Fooruzanfar, F. (2015), "A Study on the Subterranean Burials of the Sâmen (Malayer) rocky Architectural Complex." *Journal of archaeological studies*, 7(2), 117-129. (In Persian).
- [5] Shariatmadari, N., & Fazelian, A. F. (2008), "Investigating the stability of underground spaces in the Kish karez project. In 3rd International Conference on Geotechnical Engineering and Soil Mechanics." Iranian Geotechnical Society. Tehran.
- [6] Hashemi, M., Basmenj, A. K., & Banikheir, M. (2018), "Engineering geological and geoenvironmental evaluation of UNESCO World Heritage Site of Meymand rock-hewn village, Iran." *Environmental earth sciences*, 77(1), 3.
- [7] Kaljahi, E. A., & Birami, F. A. (2015), "Engineering geological properties of the pyroclastic cone-shaped rocky houses of Kandovan, Iran." *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74(3), 959-969.
- [8] Ulusay, R., Akagi, T., Ito, T., Seiki, T., Yuzer, E., & Aydan, O. (1999), "Long term mechanical characteristics of Cappadocia tuff." In 9th ISRM Congress. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering. OnePetro.
- [9] Aydan, O., & Ulusay, R. (2003), "Geotechnical and geoenvironmental characteristics of man-made underground structures in Cappadocia, Turkey." *Engineering Geology*, 69(3-4), 245-272.
- [10] Ulusay, R., Aydan, O., Genis, M., & Tano, H. (2011), "The stability of an underground congress center in soft tuffs through an integrated in-situ monitoring, experimental, analytical and numerical methods (Cappadocia, Turkey)." In 12th ISRM Congress. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- [11] Aydan, O., & Ulusay, R. (2016), "Rock engineering evaluation of antique rock structures in Cappadocia Region of Turkey. In ISRM

- International Symposium-EUROCK 2016." International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- [12] Matsubara, H., & Aydan, O. (2016), "The effect of biological degradation of tuffs of Cappadocia, Turkey." In ISRM International Symposium-EUROCK 2016. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- [13] Ito, T., Akagi, T., Aydan, O., Ulusay, R., & Seiki, T. (2016), "Time-dependent properties of tuffs of Cappadocia, Turkey." In ISRM International Symposium-EUROCK 2016. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- [14] Tano, H., Aydan, O., Ulusay, R., & Tanaka, T. (2016), "Geomechanical investigations and pioneering monitoring attempts in Cappadocia, Turkey." In ISRM International Symposium-EUROCK 2016. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- [15] Ito, T., Aydan, O., Ulusay, R., & Kasmer, O. (2008), "Creep characteristics of tuff in the vicinity of Zelve antique settlement in Cappadocia Region of Turkey." In ISRM International Symposium, 5th Asian Rock Mechanics Symposium. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- [16] Kasmer, O., Ulusay, R., & Geniş, M. (2013), "Assessments on the stability of natural slopes prone to toe erosion, and man-made historical semi-underground openings carved in soft tuffs at Zelve Open-Air Museum (Cappadocia, Turkey)." *Engineering geology*, 158, 135-158.
- [17] Aydan, O., & Ulusay, R. (2013), "Geomechanical evaluation of Derinkuyu antique underground city and its implications in geoengineering." *Rock mechanics and rock engineering*, 46(4), 731-754.
- [18] Korkanc, M., Tuğrul, A., Savran, A., & Ozgur, F. Z. (2015), "Structural-geological problems in Gümüşler archeological site and monastery." *Environmental Earth Sciences*, 73(8), 4525-4540.
- [19] Dincer, I., Orhan, A., Frattini, P., & Crosta, G. B. (2015), "Rock mass instabilities in Tatlarin Underground City (Cappadocia-Turkey)." In *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 8* (pp. 361-365). Springer, Cham.
- [20] Dincer, I., Orhan, A., Frattini, P., & Crosta, G. B. (2016), "Rockfall at the heritage site of the Tatlarin Underground City (Cappadocia, Turkey)." *Natural Hazards*, 82(2), 1075-1098.
- [21] Aydan, O., & Kumsar, H. (2016), "A geoengineering evaluation of antique underground rock settlements in Frig (Phrygian) Valley in the Afyon-Kütahya region of Turkey." In ISRM International Symposium-EUROCK 2016. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- [22] Perski, Z., Hanssen, R., Wojcik, A., & Wojciechowski, T. (2009), "InSAR analyses of terrain deformation near the Wieliczka Salt Mine, Poland." *Engineering Geology*, 106(1-2), 58-67.
- [23] Cala, M., Stopkowicz, A., Kowalski, M., Blajer, M., Cyran, K., & D'obryn, K. (2016), "Stability analysis of underground mining openings with complex geometry." *Studia Geotechnica et Mechanica*, 38(1), 25-32.
- [24] Margherita, Z., Claudio, C., Laura, E., & Alessandra, N. (2018), "A risk assessment proposal for underground cavities in Hard Soils-Soft Rocks." *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 103, 43-54.