



Research article

DOI: 10.22034/IJME.2025.2014497.1988

OPEN ACCESS

Technical investigation of changing the mining method from surface to underground in Dehbid stone mine

Ebrahim Mahdavi¹, Majid Noorian-Bidgoli^{2*}

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

² Associate Professor, Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

Article info	Abstract
<p>Received: 27 October 2023 Revised: 6 March 2025 Accepted: 7 March 2025</p> <p>Keywords</p> <p>Surface mining quarry Underground mining Stability analysis Building stone Room and pillar</p> <p>*corresponding author Majid Noorian-Bidgol noriyan@kashanu.ac.ir</p>	<p>Surface mining, particularly using the quarry method, is a common technique for extracting building stones in Iran. However, the increasing depth of mines and the environmental impacts, especially dust generated during quarry mining, have led to a transition towards underground mining of building stones in various regions worldwide. Room and pillar is a commonly applied and suitable underground mining method for extracting building stone blocks. Typically, this method involves a trade-off where increasing the dimensions of the pillars while narrowing the rooms results in reduced extraction volumes or recovery percentages. Consequently, to determine the optimal dimensions for both room and pillar, it is imperative to design the stope to maximize ore recovery while minimizing displacement. Given that stone underground mining remains unexplored in Iran, this research focuses on a technical examination of transitioning from surface (quarry) to underground (room and pillar) mining methods. Utilizing data from the Dehbid marble mine, the study encompasses the design and stability analysis of the room and pillar stope. The research employs numerical modeling through FLAC3D finite difference software. In the initial modeling phase, SketchUp software was used to simulate the topography of the surface and the underground mining spaces, including regular rooms and square pillars, by creating a 3D geometry of the underground mine. The rock's mechanical characteristics were assigned to the model based on results from rock mechanics tests and data from RocData software. Four geometries with varying room and pillar dimensions (20×10, 18×16, 16×16, 18×18 m) were analyzed to determine the optimal dimensions of the stope. The findings from the stress-displacement analysis indicate that increasing the pillars' dimensions and reducing the rooms' width—specifically, changing a stop from dimensions of 20×10 meters to 16×16 meters—decreased roof displacement. The stop's roof displacement decreased from 4.32 mm to 2.75 mm in such case. Also, stability analysis employing the Sakurai method further affirmed the safety and stability of this chosen stope, categorizing it at a warning level of 2.</p>

How to cite this article

Mahdavi, E. Noorian-Bidgoli, M., 2025, Technical investigation of changing the mining method from surface to underground in Dehbid stone mine. *Journal of Mining Engineering*, 20(1): 1-26. (in Persian with English Abstract)

<https://doi.org/10.22034/IJME.2025.2014497.1988>

©2025 The author(s). Published by [Iranian Society of Mining Engineering](#).

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



EXTENDED ABSTRACT

1. Introduction

Quarry is a surface mining method to extract large stone blocks with minimal fragmentation [1]. Depending on the type of stone, traditional, semi-mechanized, or mechanized methods are used [2], but advanced cutting methods such as wire saw machines are most common [3]. Surface mining causes environmental challenges including biosphere disturbance, air and water pollution, landscape destruction, soil erosion, and habitat loss [4–5]. Increasing waste disposal with mining depth makes operations difficult and unprofitable, especially in mountainous areas [6], leading to a tendency toward underground mining.

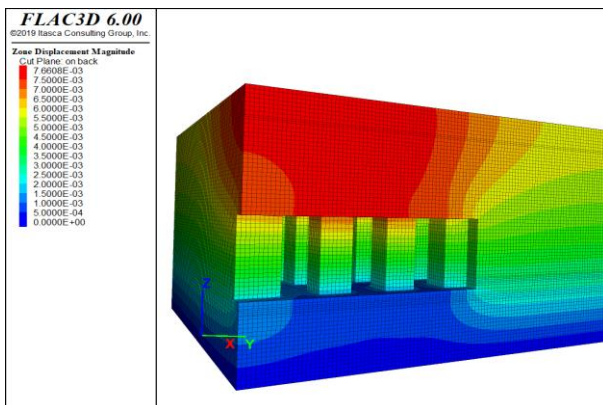
The Room and Pillar method, one of the most ancient underground extraction techniques, was historically used in Europe and remains widely utilized [7–10]. Considering the benefits of underground mining, this research explores the feasibility of changing the mining method from surface quarrying to underground room and pillar in Dehbid stone mine, with technical and economic assessment based on geomechanical analysis and numerical modeling.

2. Methodology

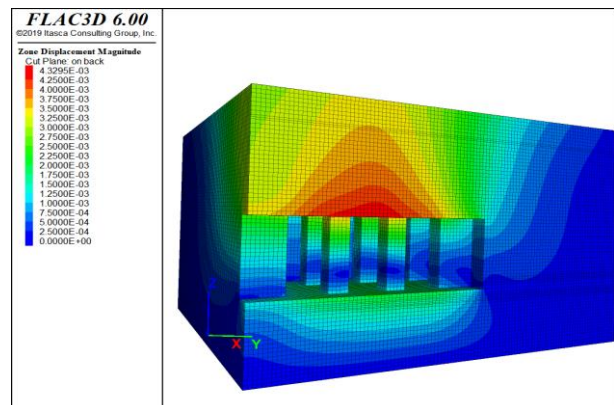
The Dehbid marble mines complex is located in Khorrambid city, Fars province, about 10 km from Safashahr. Extraction follows a benching approach with benches 4 to 10 m high, and reserves are estimated at 1,160,000 tons with a 15-year plan and 80,000 tons annual extraction. In underground mining, stability of subsurface spaces is supported by room and pillar. Pillar size and room dimensions control stability and recovery, requiring balance between safety and mineral loss. Different patterns of room and pillar were studied to determine the optimal layout. FLAC3D (Version 6) was used for stability analysis. Mine geometry was modeled in SketchUp and converted to STL in Rhinoceros, then mechanical properties were assigned using Mohr-Coulomb Theory. Boundary stresses at excavation limits were free, and lateral boundaries were roller supports.

3. Findings and argument

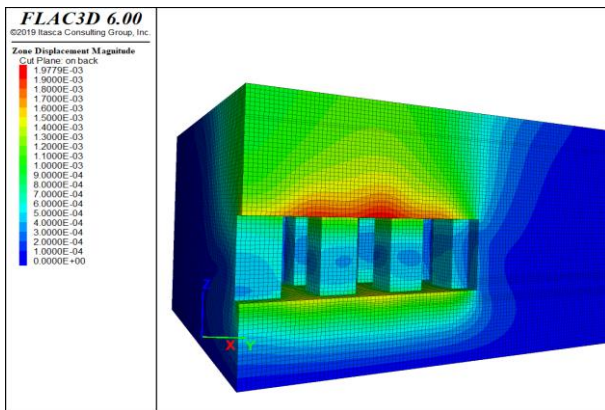
The three-dimensional displacement contours along vertical sections (in the z-axis direction) for stopes 1 to 4 are shown in Fig 1. These figures illustrate the displacement changes in the roof and pillars of the stopes. A comparison of the results indicates that displacement in the roof and pillars decreases as the pillar dimensions increase and the room width decreases. However, this results in a reduction in mineral recovery. Therefore, an optimal design should be chosen that minimizes displacement while maximizing mineral recovery.



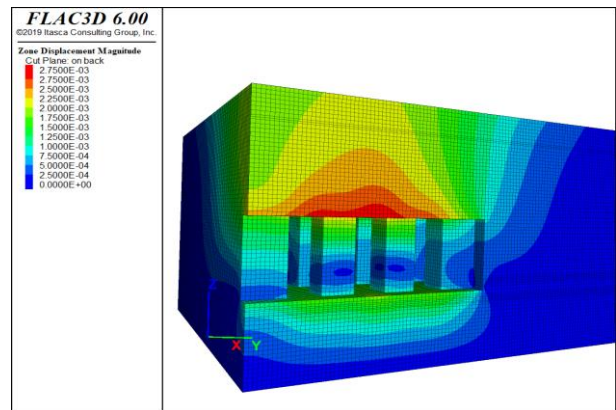
(B) Stope 2



(A) Stope 1



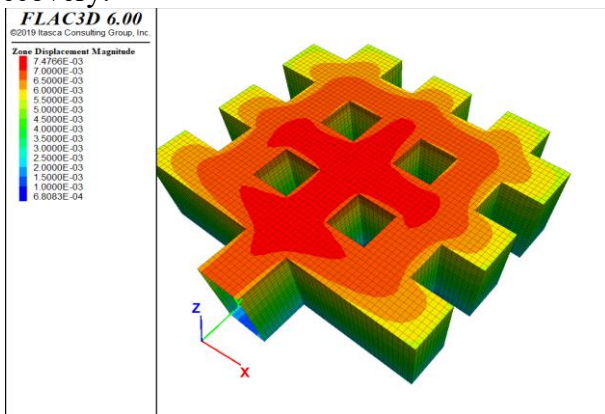
(D) Stope 4



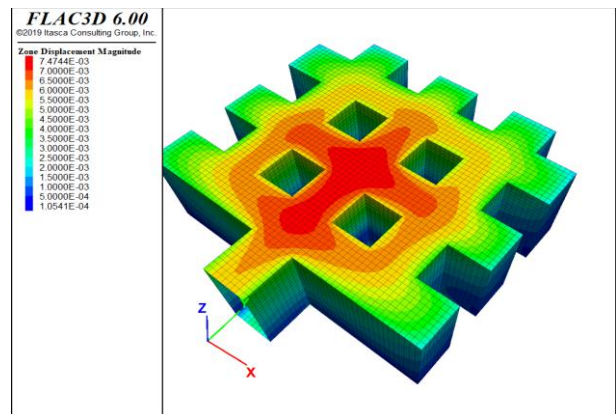
(C) Stope 3

Fig1. Displacement distribution in vertical section of stope model

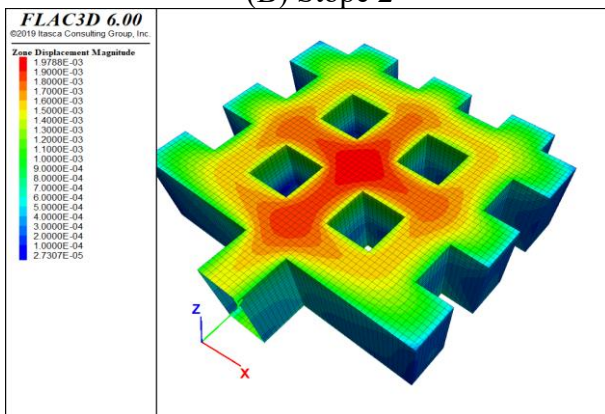
Similarly, three-dimensional displacement contours for horizontal sections (plan view between the x and y axes) for stopes 1 to 4 are shown in Fig 2. These figures reveal the variations in displacement in the roof of the stope. The results indicate that the room and pillar dimensions directly affect displacement in the roof. The greater the displacement, the lower the stability of the extracted space. Therefore, the optimal design would minimize displacement in the stope roof. While increasing pillar dimensions achieves this goal, it results in a decrease in mineral recovery. Thus, a balance must be struck between room and pillar dimensions to minimize displacement while maximizing mineral recovery.



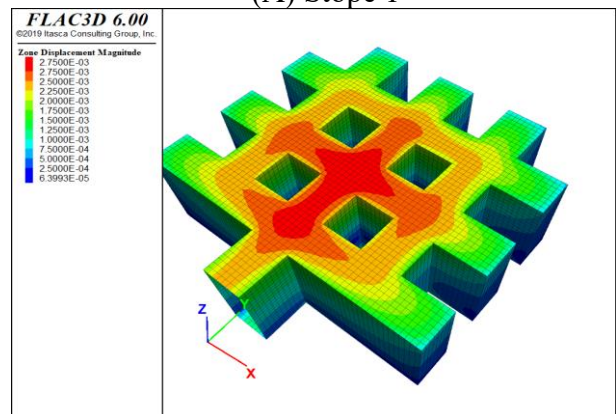
(B) Stope 2



(A) Stope 1



(D) Stope 4



(C) Stope 3

Fig 2. Displacement distribution in horizontal section of stope model

The analysis shows maximum principal stress at the roof and floor of stopes, with highest stress between pillars at the stope center, decreasing from roof to surface. Stability was evaluated using the critical strain concept (Sakurai method), comparing roof displacement from numerical modeling with critical values.

Results indicate that room and pillar dimensions strongly affect displacement. For example, with equal pillar size (16 m), increasing room dimension from 16 m to 18 m more than doubled the displacement, showing that design is directly influenced by room and pillar size.

4. Conclusions

The study evaluated the technical feasibility of changing the mining method from surface quarrying to underground room and pillar in the Dehbid marble mine using FLAC3D numerical modeling. The analysis focused on the effect of room and pillar dimensions on stability, displacement, stress distribution, recovery, and safety. The main results are summarized as follows:

- Increasing pillar dimensions and reducing room width decreased roof displacement (32.4 mm → 7.5 mm) but reduced recovery.
- Maximum stress occurred at room center; roof and floor experienced tensile stresses, while pillars and walls experienced compressive stresses with risk of failure.
- Safety factor, displacement, and recovery must be considered simultaneously in stope design.
- Stope 3 (16x16 m) had a safety factor of 2 and warning level 2 (Sakurai method), confirming stability.
- Sensitivity analysis showed minimal effect of surface topography when overburden variations were small.

5. References

- [1] Darling, P., 2023. “*SME Surface Mining Handbook*”. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, SME.
- [2] Yarahmadi, R., Bagherpour, R., Sousa, L.M. and Taherian, S.G., 2015. “*How to determine the appropriate methods to identify the geometry of in situ rock blocks in dimension stones*”. *Environmental Earth Sciences*, 74: 6779-6790.
- [3] Samarakoon, K.G.A.U., Chaminda, S.P., Jayawardena, C.L., Dassanayake, A.B.N., Kondage, Y.S. and Kannangara, K.A.T.T., 2023. “*A Review of Dimension Stone Extraction Methods*”. *Mining*, 3(3): 516-531.
- [4] Ilseven, S. and Kaşot, N., 2020. “*Impact of quarries on the Kyrenia Mountains (Cyprus) towards human and natural environment*”. *Journal of Environmental Biology*, 41(2): 323-327.
- [5] Sairanen, M., Rinne, M. and Selonen, O., 2018. “*A review of dust emission dispersions in rock aggregate and natural stone quarries*”. *International Journal of Mining, reclamation and environment*, 32(3): 196-220.
- [6] Mosaféri, M., Dianat, I., Khatibi, M.S., Mansour, S.N., Fahiminia, M. and Hashemi, A.A., 2014. “*Review of environmental aspects and waste management of stone cutting and fabrication industries*”. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 16: 721-730.
- [7] Kun, M. and Baran Tufan, N.K., 2014. “*The applicability of underground mining methods in limestone quarries of Western Taurus*”. In *Proceedings of the International Conference on Mining, Material and Metallurgical Engineering*, Prague, Czech Republic, Paper (No. 61).
- [8] Newman, C., Newman, D. and Dupuy, R., 2020. “*Development of a multiple-level underground limestone mine from geology through mine planning*”. *International Journal of Mining Science and Technology*, 30(1): 63-67.
- [9] Hartman, H.L. and Mutmanský, J.M., 2002. “*Introductory mining engineering*”. John Wiley & Sons.
- [10] González-Nicieza, C., Álvarez-Fernández, M.I., Menéndez-Díaz, A. and Álvarez-Vigil, A.E., 2006. “*A comparative analysis of pillar design methods and their application to marble mines*”. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 39: 421-444.



OPEN ACCESS

DOI: 10.22034/IJME.2025.2039035.2017

مقاله پژوهشی

بررسی فنی تغییر روش استخراج از سطحی به زیرزمینی در معدن سنگ ساختمانی دهبید

ابراهیم مهدوی^۱، مجید نوریان بیدگلی^{۲*}

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد استخراج مواد معدنی، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، ایران

^۲ دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۰۵	معدنکاری سطحی کواری، از روش‌های رایج استخراج سنگ‌های ساختمانی در ایران است. باطله‌برداری زیاد به دلیل افزایش عمق معدنکاری و معضلات زیست‌محیطی ناشی از تولید گرد و غبار حین استخراج در معدنکاری کواری، باعث استفاده گسترده روش معدنکاری زیرزمینی برای استخراج سنگ ساختمانی در سایر کشورها شده است. اتاق و پایه، یکی از روش‌های معدنکاری زیرزمینی پرکاربرد و قابل اجرا برای استخراج بلوک‌های سنگ ساختمانی است. معمولاً در این روش استخراج، افزایش ابعاد پایه و کاهش عرض اتاق‌ها باعث کاهش میزان استخراج یا درصد بازیابی می‌شود. بنابراین برای تعیین ابعاد بهینه اتاق و پایه باید به گونه‌ای کارگاه طراحی شود که با کمترین میزان جابه‌جایی، بیشترین میزان بازیابی ماده معدنی حاصل شود. از آنجا که هنوز در ایران معدنکاری زیرزمینی سنگ ساختمانی انجام نشده است، در این تحقیق به مطالعه فنی تغییر روش معدنکاری سنگ ساختمانی، از روش سطحی کواری به روش زیرزمینی اتاق و پایه، پرداخته شده است. بدین منظور با استفاده از اطلاعات معدن سنگ مرمریت دهبید، به طراحی و تحلیل پایداری کارگاه استخراج اتاق و پایه پرداخته شده است. روش بکار رفته در این تحقیق، مدل‌سازی عددی به کمک نرم‌افزار تفاضل محدود $FLAC3D$ است. در مرحله اول مدل‌سازی با ساخت هندسه سه‌بعدی معدن زیرزمینی به کمک نرم‌افزار $SketchUp$ ، توپوگرافی سطح زمین و فضاهای استخراجی زیرزمینی، شامل اتاق‌های منظم و پایه‌های مربعی، شبیه‌سازی شده است. برای تخصیص ویژگی‌های مکانیکی سنگ به مدل، از نتایج آزمایش‌های مکانیک سنگ انجام شده و داده‌های به دست آمده از نرم‌افزار $RocData$ استفاده شده است. همچنین برای تعیین ابعاد بهینه کارگاه استخراج، از چهار هندسه کارگاه استخراجی با ابعاد مختلف اتاق و پایه، یعنی ۱۰×۲۰ ، ۱۶×۱۸ ، ۱۶×۱۶ و ۱۸×۱۸ متر استفاده شده است. نتایج تحلیل تنش - جابه‌جایی نشان داد که با افزایش ابعاد پایه و کاهش عرض اتاق‌ها، یعنی از کارگاهی با ابعاد ۱۰×۲۰ متر به کارگاهی با ابعاد ۱۶×۱۶ متر، میزان جابه‌جایی در سقف کارگاه استخراج از $۴/۳۲$ به $۲/۷۵$ میلی‌متر کاهش یافته است. همچنین از بین چهار کارگاه استخراج در نظر گرفته شده، کارگاه با ابعاد اتاق و پایه برابر با ۱۶×۱۶ متر، به عنوان طرح بهینه برای احداث کارگاه استخراج انتخاب شده است. تحلیل پایداری بر اساس روش ساکورایی نیز نشان داد که کارگاه یاد شده دارای سطح تراز هشدار ۲ بوده است، بنابراین این کارگاه پایدار و ایمن است.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۱۶	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۷	
واژه‌های کلیدی	
معدنکاری سطحی کواری	
معدنکاری زیرزمینی	
تحلیل پایداری	
سنگ ساختمانی	
روش استخراج اتاق و پایه	
*نویسنده مسئول	
مجید نوریان بیدگلی	
noriyan@kashanu.ac.ir	

استناد به این مقاله:

مهدوی، ابراهیم؛ نوریان بیدگلی، مجید؛ ۱۴۰۴. بررسی فنی تغییر روش استخراج از سطحی به زیرزمینی در معدن سنگ ساختمانی دهبید. نشریه

مهندسی معدن. ۲۰(۱): ۱-۲۶. <https://doi.org/10.22034/IJME.2025.2039035.2017>

۱- مقدمه

به هر حال، تاثیر معدنکاری سطحی بر محیط زیست، دارای درجات و اثرات متفاوتی است. به عنوان مثال در معدنکاری سنگ ساختمانی، تغییرات توپوگرافی سطح زمین به واسطه برداشت و استخراج بلوک های سنگی، مشکلات محل دپوی (انباشت) باطله، کاهش و آلودگی ذخایر آب زیرزمینی، از جمله مشکلات اصلی زیست محیطی است [۵]. همچنین معدنکاری سطحی سنگ ساختمانی، بر کاهش کیفیت هوا، آلودگی صوتی محیط پیرامون معدن و از بین رفتن شرایط زندگی سالم گیاهان و جانوران است [۶].

از دیگر معضلات عمده استخراج سطحی سنگ ساختمانی، باطله برداری و تولید حجم زیاد ضایعات سنگی همراه با استخراج معدن است. همچنین با افزایش عمق معدنکاری در طول عمر معدن، ضمن اینکه شرایط اجرای روش از لحاظ فنی مشکل شده و در برخی از موارد، حتی غیرممکن می گردد، باعث می شود به دلیل افزایش حجم باطله بردای، معدنکاری اقتصادی نیز نباشد. این موضوع در مناطق کوهستانی و مواردی که حجم زیادی از کانسار در عمق زمین واقع شده، حادث تر است [۷]. به همین دلایل در دهه های اخیر، تمایل به معدنکاری زیرزمینی سنگ ساختمانی افزایش یافته است.

اتاق و پایه، یکی از قدیمی ترین روش های استخراج معادن زیرزمینی است. این روش از سالیان خیلی دور در اروپا برای استخراج سنگ های ساختمانی استفاده شده است [۸، ۹].

این روش را که به آن روش استخراج کارگاه باز نیز گفته می شود، اصولاً جزو روش های بدون نگهدارنده مصنوعی یا با نگهداری طبیعی است [۱۰]. این روش معدنکاری، در حال حاضر، معمول ترین و پرکاربردترین روش استخراج سنگ ساختمانی به روش زیرزمینی است [۱۱].

ایتالیا، به عنوان بزرگترین تولیدکننده سنگ در اروپا، دارای متنوع ترین نوع معدنکاری زیرزمینی سنگ ساختمانی است. در این کشور، برای استخراج سنگ ساختمانی در عمق زیاد، به دلیل هزینه بالای معدنکاری و دشواری استخراج سطحی، تعداد زیادی از معادن سنگ ساختمانی به صورت زیرزمینی استخراج می شود. اغلب این معادن سنگ ساختمانی، معادن سطحی بوده اند که مدت طولانی به روش کواری استخراج می شده اند، ولی بعدها به دلیل عمیق شدن معدن، به روش استخراج زیرزمینی تبدیل شده اند. در این معادن، استخراج سنگ ساختمانی بدون انفجار و با دستگاه های سیم برش الماسه و اره زنجیری انجام می شود. به عنوان مثال، رشته کوه کارارا در منطقه تاسکنی در شمال ایتالیا شامل ذخایر زیادی از سنگ مرمریت است که به روش زیرزمینی

کواری، یکی از روش های معدنکاری سطحی است که در آن، برخلاف سایر روش های معدنکاری سطحی که هدف استخراج ماده معدنی به صورت خردشده است، هدف استخراج بلوک های بزرگ مقیاس سنگ با کمترین میزان خردشدگی می باشد [۱].

در معادن سنگ ساختمانی، بلوک های شش وجهی سنگ با ابعاد بزرگ منظم (قواره) و نامنظم (کوپ) از جبهه کارهایی با پله های با ارتفاع زیاد قائم برش داده شده و از معدن خارج می شود. به این منظور، با توجه به جنس و نوع سنگ (گرانیت، مرمریت، تراورتن، مرمر و نظایر آن)، می توان از روش های سنتی (دستی) و یا پیشرفته (نیمه مکانیزه یا تمام مکانیزه) برای جدا کردن بلوک های سنگی استفاده کرد [۲].

امروزه روش های سنتی مانند استفاده از مواد ناریه سبک (باروت) و مواد شیمیایی منبسط شونده (کتراک) و یا حتی روش چال ردیفی (پارس-گوه)، به دلیل عدم بازیابی مناسب بلوک های سنگی و سرعت پایین عملیات کمتر مورد استفاده قرار می گیرند. روش های پیشرفته نیز شامل استفاده از دستگاه هایی مانند سیم برش فلزی (حلزونی) یا الماسه، تیغه برنده (هاواژ) یا دیسک برنده (صفحه برش)، ضربه زن، جت آب (واتر جت)، جت شعله و جت لیزر است که از بین آن ها، استفاده از دستگاه سیم برش متداول تر است [۳].

عموماً فعالیت های معدنکاری تغییرات مختلفی را در محیط معدن و اطراف آن ایجاد می کند. اصلی ترین عیب استخراج سنگ ساختمانی به روش های سطحی، مشکلات زیست محیطی حین و بعد از پایان معدنکاری است. به طور کلی، آثار بالقوه و احتمالی زیست محیطی حاصل از انجام فعالیت های معدنی در معادن سنگ ساختمانی عبارتند از [۴]:

- بیوسفر: تغییر و از بین بردن زندگی جانداران، لطمه به موازنه اکوبیولوژیکی، آلودگی صوتی
- اتمسفر: آلودگی هوا به دلیل گردوغبار ناشی از برش سنگ
- منابع آب: تغییرات هیدرولوژی و آلودگی منابع آب های سطحی و زیرسطحی
- محیط زیست انسانی: تغییر منظره و توپوگرافی، تخریب بناهای تاریخی و لطمه به سلامت انسان ها
- ترکیب ژئومورفولوژیکی: تغییرات مورفولوژیکی، ناپایداری شیب و فرسایش خاک

زیرزمینی سنگ ساختمانی دارد. معادن زیرزمینی دراما و اتن ولاکس از جمله این معادن اند [۲۰].

کشور آمریکا، دارای معادن سنگ ساختمانی زیادی است که به صورت زیرزمینی استخراج می‌شود. معدن مرمر سفید پوله، یکی از بزرگترین معادن سنگ ساختمانی آمریکا است. سنگ مرمر سفید این معدن با درجه خلوص ۹۹/۵ درصد کلسیت، خالص‌ترین سنگ مرمر جهان به شمار می‌آید. این معدن، اواخر قرن هجدهم اکتشاف شده و تا سال ۱۹۴۱ استخراج آن ادامه داشته است. بعد از تعطیلی معدن، با به‌روز کردن تکنولوژی استخراج، از سال ۱۹۹۰ دوباره فعالیت خود را آغاز کرده است. همچنین معدن مرمریت آلاباما در سال ۱۸۸۴ به وسیله شرکت راک وود افتتاح شد. در سال ۱۹۵۶، معدنکاری در این معدن به روش زیرزمینی تغییر یافت. روش استخراج این معدن، کارگاه و پایه مکانیزه است [۲۱].

کشور ترکیه نیز در بخش استخراج و صادرات سنگ‌های ساختمانی، در چند سال اخیر پیشرفت قابل توجهی داشته است. در سال ۲۰۱۸، این کشور حدود ۴۲ درصد سنگ مرمریت را در دنیا به خود اختصاص داده است. معدن سنگ آهک دربی‌داغلاری از جمله معادن سنگ ساختمانی زیرزمینی به روش اتاق و پایه، واقع در جنوب غربی ترکیه است. همچنین معدن سنگ مرمر لیمر، واقع در جنوب ترکیه، به دلیل بارسنگ زیاد (۷۰ تا ۷۲ متر)، از روش اتاق و پایه برای استخراج بلوک‌های سنگ به کمک سیم برش الماسه و اره زنجیری، استفاده می‌کند [۲۲].

مهم‌ترین عامل موثر برای توجیه شروع و ادامه یک طرح در یک معدن سنگ، پایداری ژئومکانیکی کارگاه استخراج است [۲۳]. هدف از پایداری، کنترل تنش‌های القایی (ثانویه) بعد از عملیات استخراج و نزدیک کردن این تنش‌ها به تنش‌های برجا (اولیه) قبل از عملیات استخراج (حالت تعادل) است. تحت این شرایط، عدم کنترل تنش‌ها می‌تواند باعث جابه‌جایی و تغییر شکل زیاد سنگ‌های دربرگیرنده و در نتیجه ناپایداری (شکست و ریزش) سقف فضاهای معدنکاری شود [۲۴].

بنابراین طراحی بهینه کارگاه استخراج، به‌ویژه در روش معمول معدنکاری زیرزمینی سنگ ساختمانی، مانند روش استخراج اتاق و پایه، می‌تواند باعث شود که با انتخاب صحیح ابعاد و شکل اتاق‌ها و پایه‌های موجود در کارگاه استخراج، علاوه بر نگهداری طبیعی ایمن و کم‌هزینه فضاهای زیرزمینی (نگهداری از طریق مقاومت سنگ پایه‌ها، بدون نیاز به نگهدارنده‌های مصنوعی)، میزان بازایی مواد معدنی نیز افزایش و ریسک پروژه کاهش یابد [۲۵، ۲۶].

در حال استخراج است. سابقه حکاکی روی سنگ مرمریت از زمان روم نشان می‌دهد که این معادن سابقه دوهزار ساله یا حتی بیشتر دارد [۱۲، ۱۳].

انگلستان در بین سال‌های ۱۷۰۰ تا ۱۸۰۰ میلادی در منطقه‌ای به نام Dudley، واقع در جنوب این کشور، استخراج سنگ‌های آهکی را داشت. بعدها در منطقه ولیز، معدن زیرزمینی اسلیت هم راه‌اندازی شده است. معادن Cornwall and West Devon نیز از جمله معادن گرانیت قدیمی انگلستان است. معدن Bieber در انگلستان، به معدن متروکه زیرزمینی شهرت دارد که از آن به‌عنوان جاذبه گردشگری استفاده می‌شود. این معدن، دارای سنگ‌های آهکی با لایه‌هایی به ضخامت ۴ متر بوده است [۱۴].

کشور اسلوانی، امروزه با بهره‌گیری از تکنولوژی جدید و دستگاه‌های استخراج پیشرفته، توانسته حتی با توجه به ذخایر اندک، صادرات قابل توجهی داشته باشد. به‌عنوان نمونه، شرکت کامنپازین، با خرید دستگاه اره زنجیری از شرکت Fantini ایتالیا و استفاده از آن‌ها در معادن کانفانر و وینکوران، تولید و فروش بالاتری نسبت به دیگر معادن سنگ ساختمانی دارد [۱۵، ۱۶].

در کشور اسلواکی، شرکت هاتولیه، از سال ۱۹۹۳ شروع به استخراج زیرزمینی سنگ ساختمانی به روش اتاق و پایه کرده است. معدن سنگ ساختمانی یاد شده، یک نمونه سنگ مرمر هفت‌رنگ است که با به‌کارگیری دستگاه اره زنجیری و سیم برش الماسه، سالانه حدود ۴۰۰۰ تن سنگ استخراج می‌کند [۱۷].

در جنوب غرب پایتخت بلژیک، معدنی به نام گلرینه وجود دارد که از سال ۱۹۲۸ به بعد، به دلیل افزایش عمق معدن به‌صورت زیرزمینی در حال استخراج است. در این معدن، برای استخراج بلوک‌های سنگی، از سیم برش الماس و پارس و گوه استفاده می‌شود [۱۸].

در شهر پورتو کشور پرتغال، یک نمونه سنگ اسلیت به صورت تونلی استخراج می‌شود. در حال حاضر استخراج زیرزمینی سنگ ساختمانی به توسط دو شرکت به نام‌های پریراگومس و کاروال هو انجام می‌شود. این دو شرکت، سالیانه ۷۵۰۰ تن سنگ از این معادن استخراج می‌کنند [۱۹].

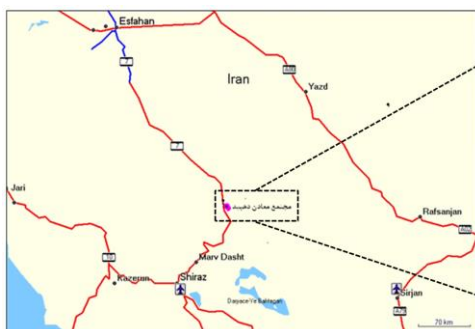
استخراج سنگ در یونان، قدمتی ۲۵۰۰ ساله دارد. معدن سنگ مرمر پتلیکن، یکی از قدیمی‌ترین معادن مرمر یونان محسوب می‌شود. شرکت دیونیس، از سال ۱۹۴۹، مجری استخراج این معدن است. این شرکت، ۱۱ معدن سطحی و

در ایران، استفاده شده است. مطالعه امکان‌سنجی معدنکاری زیرزمینی در این معدن در دو بخش فنی و اقتصادی انجام شده که در این مقاله، به تحلیل فنی (ژئومکانیکی) تغییر روش معدنکاری سنگ ساختمانی از روش استخراج سطحی کواری به روش استخراج زیرزمینی اتاق و پایه پرداخته شده است. بدین منظور با مدل‌سازی عددی یک معدن سنگ ساختمانی، به طراحی و تحلیل پایداری کارگاه استخراج معدن یاد شده به روش اتاق و پایه پرداخته شده است.

۲- معدن سنگ مرمریت دهبید

مجموعه معادن سنگ مرمریت دهبید، در شهرستان خرم‌بید (دهبید)، در شمال استان فارس و در فاصله حدود ۱۰ کیلومتری شهر صفاشهر، واقع است. صفاشهر در فاصله ۱۷۰ کیلومتری شمال شیراز قرار دارد. ارتفاع آن از سطح دریا حدود ۲۳۲۴ متر است. این شهرستان، از شمال به استان یزد (شهرستان ابرکوه)، از جنوب به شهرستان پاسارگاد، از شرق به شهرستان بوانات و از غرب به شهرستان اقلید محصور می‌شود. مجتمع سنگ دهبید، در فاصله حدود ۱۷۵ کیلومتری شمال شرقی شیراز و در ارتفاع متوسط ۲۵۰۰ متر از سطح دریا، در مسیر جاده آسفالت شیراز-آباد قرار گرفته است (شکل ۱).

از نظر رنگ و جنس، سنگ دهبید یکی از مرغوب‌ترین و شناخته‌شده‌ترین سنگ‌های مرمریت در ایران و جهان است. این سنگ، از معادن مختلفی مانند، چاه‌مرغی، شایان، انگورک، ثمین، چهرک، دیپلمات، کوه سفید، آشفته و حسن‌آباد و در رنگ‌های کرم روشن، کرم، کرم گل‌دار و بژ، استخراج می‌شود. این تحقیق، در معدن سنگ انگورک انجام شده است.



در این خصوص، عواملی مانند پارامترهای مقاومتی و تغییرشکل‌پذیری ماده معدنی و سنگ دربرگیرنده، ضخامت و شیب کارگاه استخراج و عمق معدنکاری، از جمله مواردی است که می‌تواند در طراحی و پایداری معادن یاد شده مهم و تاثیرگذار باشد [۲۷]. در این مرحله، متناسب با شرایط زمین‌شناسی منطقه و نوع سنگ، می‌توان از روش‌های آزمایشگاهی [۲۸]، روش‌های تجربی ملنند؛ استفاده از روش فاکتور ایمنی [۲۹، ۳۰] و نمودار [۳۱]، روش‌های تحلیلی مانند؛ حوزه تاثیر تنش [۳۲]، تحلیل تنش- کرنش [۳۳]، امکان‌سنجی اقتصادی [۳۴] و فرمول‌بندی [۳۵]، روش‌های عددی مانند؛ اجزای محدود [۳۶، ۳۷، ۳۸، ۳۹]، اجزای مرزی دوبعدی [۴۰] و سه‌بعدی [۴۱]، اجزای مجزای دوبعدی [۴۲] و سه‌بعدی [۴۳] و تفاضل محدود دوبعدی [۴۴، ۴۵، ۴۶] و سه‌بعدی [۴۷، ۴۸، ۴۹، ۵۰، ۵۱، ۵۲، ۵۳، ۵۴، ۵۵] و روش تحلیل تصاویر دیجیتالی [۵۶، ۵۷] برای طراحی و تحلیل پایداری کارگاه استخراج استفاده کرد. از میان این روش‌ها، تحلیل‌های عددی سریع‌تر و با هزینه کمتر نسبت به سایر روش‌ها انجام می‌شوند. بنابراین این روش‌ها بسیار کاربردی و پر طرفدارند.

به هر حال، با توجه به مزایای معدنکاری زیرزمینی سنگ ساختمانی، از این روش می‌توان در برخی از معادن استفاده کرد. به دلیل اینکه تاکنون از روش استخراج زیرزمینی در معادن سنگ ساختمانی ایران استفاده نشده است، در این تحقیق برای اولین بار در ایران، به بررسی امکان‌پذیر بودن معدنکاری زیرزمینی در این نوع معادن پرداخته شده است. به این منظور، از اطلاعات و شرایط موجود در یکی از معادن مجتمع سنگ دهبید، به عنوان یکی از مناطق فعال و معروف سنگ مرمریت



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی معدن سنگ مرمریت دهبید [۵۸]

و بازگشایی آن با باطله‌برداری و آماده‌سازی و در نهایت احداث پله‌های استخراجی است.

منطقه دهبید و معدن انگورک، در زون سندانج- سیرجان قرار دارد. این زون جزئی به عنوان فعال‌ترین زون ساختمانی

طراحی و انتخاب روش استخراج در این معدن، همانند سایر معادن سنگ ایران، به صورت پلکانی انجام شده است. ارتفاع پله‌ها معمولاً بین ۴ تا ۱۰ متر است. در این معادن، با وجود توپوگرافی زیاد، معدنکاری شامل احداث راه دسترسی به ذخیره

جدول ۱- ویژگی‌های مکانیک سنگی به‌دست آمده برای نمونه سنگ مرمریت دهبید

پارامتر	واحد	مقدار
وزن مخصوص	gr/cm ³	۲٫۶۹
مقاومت فشاری تک‌محوری	MPa	۴۵٫۲۲
مدل الاستیسیته	GPa	۴۵٫۹۲
نسبت پواسون	-	۰٫۲۴
مقاومت کششی	MPa	۲٫۱۶
زاویه اصطکاک داخلی	درجه	۵۵٫۵۸
چسبندگی	MPa	۹٫۲۸
شاخص کیفیت سنگ (RQD)	-	۸۰
شاخص مقاومت زمین شناسی سنگ (GSI)	-	۸۰

جدول ۲- ویژگی‌های مکانیک سنگی توده‌سنگ مرمریت دهبید

نسبت پواسون (-)	مقاومت فشاری تک‌محوری (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	چسبندگی (MPa)	مدل الاستیسیته (GPa)
۰٫۲۴	۱۵٫۰۹۷	۵۱٫۵۰	۲٫۴۶	۳۸٫۱۰

۳- معدنکاری زیرزمینی معدن سنگ مرمریت دهبید

یکی از مشکلات عمده اجرای روش‌های معدنکاری زیرزمینی، عدم پایداری فضاهای زیرزمینی بعد از استخراج ماده معدنی است. همان‌طور که در مقدمه توضیح داده شد، در روش استخراج زیرزمینی اتاق و پایه، پایداری فضاهای استخراجی با پایه‌هایی از جنس خود ماده معدنی در کارگاه استخراج انجام می‌شود. بنابراین آنچه در طراحی و اجرای این روش استخراج در معادن زیرزمینی مهم است، انتخاب مناسب ابعاد و شکل پایه‌های موجود در کارگاه استخراج است. همچنین برای رسیدن به پایداری مناسب، باید طول و عرض اتاق‌ها و یا راهروهای اطراف پایه‌ها درست انتخاب شوند. در این حالت، با افزایش ابعاد پایه‌ها، پایداری فضاهای زیرزمینی بیشتر می‌شود ولی از طرفی، افزایش ابعاد پایه‌های موجود در کارگاه استخراج، میزان بازیابی ماده معدنی را کاهش می‌دهد. بنابراین باید تعادلی میان این دو هدف (افزایش ایمنی و کاهش افت ماده معدنی) در طراحی کارگاه استخراج روش اتاق و پایه وجود داشته باشد. در این تحقیق، از الگوهای مختلفی از ابعاد اتاق و پایه برای رسیدن به طرح بهینه کارگاه استخراج استفاده شده است.

ایران، از فلات مرکزی ایران به‌شمار می‌آید که به‌صورت نواری طولانی دگرگون شده در امتداد روراندگی زاگرس قرار دارد. شباهت بین ایران مرکزی و زون سنندج- سیرجان، به‌ویژه در این ناحیه، به قدری فراوان است که زون سنندج- سیرجان را باید دنباله جنوب باختری ایران مرکزی دانست. تفاوت این دو زون در وفور سنگ‌های ولکانیک در میان سنگ‌های پالئوزوتیک زون سنندج- سیرجان و کمتر بودن این سنگ‌ها، در ایران مرکزی خلاصه می‌شود.

میزان ذخیره سنگ مرمریت در این معدن، بر اساس طرح بهره‌برداری شماره ۲۲۷۷۶، مورخ ۱۳۸۹/۵/۲۰، ۱۱۶۰۰۰۰ تن است. در این طرح، مدت بهره‌برداری از معدن ۱۵ سال، با میزان استخراج سالیانه ۸۰۰۰۰ تن، در نظر گرفته شده است.

۲-۱- تعیین مشخصات مکانیکی سنگ معدن

با توجه به عدم وجود ویژگی‌های مکانیک سنگی (پارامترهای مقاومتی و تغییرشکل‌پذیری) سنگ مرمریت در منطقه مورد مطالعه، در شروع این تحقیق نمونه‌ای از سنگ معدن، به‌صورت یک بلوک سنگی به ابعاد ۵۰×۵۰×۵۰ سانتی‌متر مکعب، از پله سوم کارگاه استخراجی گرفته و برای تعیین ویژگی‌های مکانیکی، به آزمایشگاه مکانیک سنگ شرکت آزمون فولاد ارسال شد. خلاصه‌ای از نتایج به‌دست آمده از انجام این آزمایشات، بر اساس استاندارد ISRM، در جدول ۱ آورده شده است.

در ادامه نیز برای به‌دست آوردن پارامترهای مکانیک‌سنگی توده‌سنگ، از نرم‌افزار RocData استفاده شده است. این نرم‌افزار، بر اساس معیار شکست هوک- براون استوار است و با آن پارامترهای مکانیکی توده سنگ تعیین می‌شود. معیار شکست هوک و براون، یک رابطه تجربی است که برای پیش‌بینی شکست سنگ ارایه شده است. پایه اصلی این روش، استفاده از پارامترهای سنگ بکر (نمونه سنگ) و اضافه کردن تعدادی ضریب برای کاهش ویژگی‌های ناشی از ناپیوستگی توده‌سنگ است.

پارامترهای ورودی نرم‌افزار یاد شده، شامل مقاومت فشاری تک‌محوری ماده سنگ، ثابت ماده سنگ، شاخص مقاومت زمین‌شناسی و فاکتور آشفستگی سنگ (برابر با صفر با توجه به ماشینی بودن روش استخراج) است. پارامترهای مکانیکی به‌دست آمده توده سنگ را می‌توان به‌عنوان ورودی در برنامه‌های تحلیل عددی مانند FLAC3D استفاده کرد. در جدول ۲، ویژگی‌های مکانیک سنگی توده‌سنگ به‌دست آمده از نرم‌افزار یاد شده، برای این معدن ارایه شده است.

۳-۱- تحلیل پایداری کارگاه استخراج روش اتاق و پایه

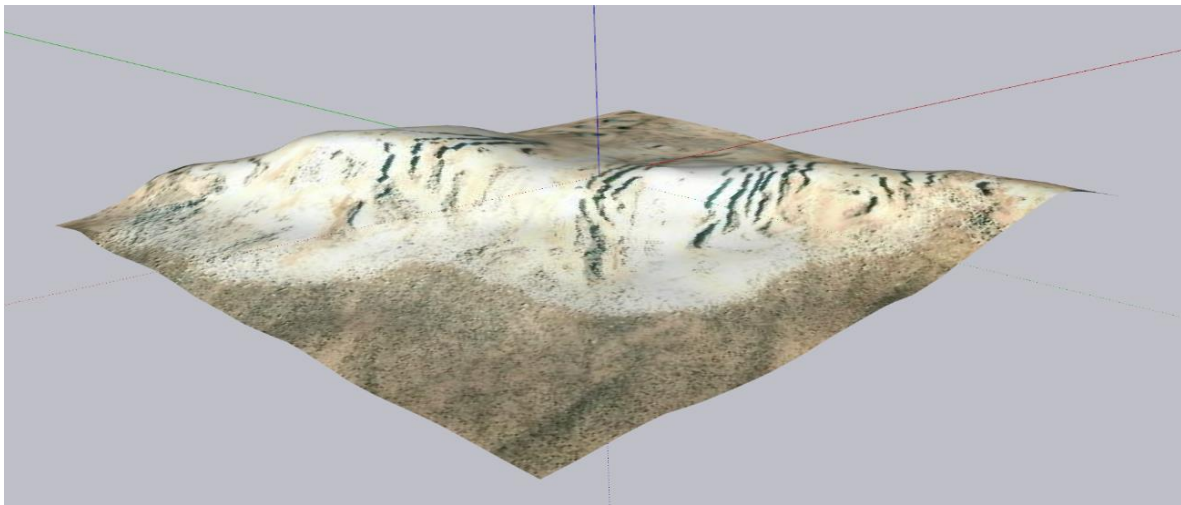
در این تحقیق، از نرم‌افزار عددی تقاضل محدود FLAC3D، نسخه ۶ برای تحلیل پایداری فضاهای معدنکاری شده (کارگاه استخراج) طرح استخراج به روش زیرزمینی معدن سنگ مورد مطالعه استفاده شده است. این نرم‌افزار، قادر است با دریافت فایل‌هایی با فرمت‌هایی مانند DXF، CAD، STL و نظایر آن، از نرم‌افزارهای مختلف طراحی سه‌بعدی مانند AutoCAD و SketchUp، مدل هندسی فضاهای زیرزمینی را به صورت سه‌بعدی ایجاد کند، سپس با ساخت مدل‌های FDM، به تحلیل تنش - جابه‌جایی پرداخته می‌شود [۵۹].

در این تحقیق، برای ساخت هندسه سه‌بعدی مدل، از نرم‌افزار SketchUp استفاده شده است. این نرم‌افزار قدرتمند، ابزارهای متنوعی برای ساخت، ویرایش و انتشار مدل‌های سه‌بعدی دارد. مدل‌های این برنامه از اتصال خطوط به یکدیگر، به‌عنوان لبه‌های مدل، ایجاد می‌شوند. بنابراین در صورت پیوستن تعداد سه لبه یا بیشتر به یکدیگر، یک صفحه ایجاد می‌شود و سپس به‌طور خودکار، وجه مدل به وجود می‌آید. در انتها، لبه‌های

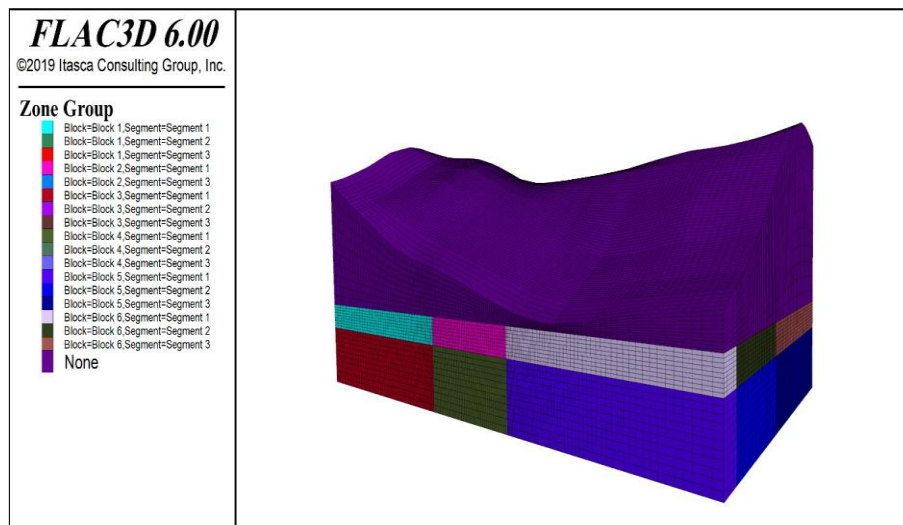
مورد نظر و نیز وجوه ایجاد شده، باعث ایجاد مدل سه‌بعدی می‌شود. از مزایای این نرم‌افزار نسبت به دیگر نرم‌افزارهای مشابه این است که برای سه‌بعدی‌سازی هندسه، حافظه کمتری از منابع سیستم اشغال می‌شود، بنابراین این نرم‌افزار در کامپیوترهای ضعیف هم قابل اجرا است.

برای ساخت مدل هندسه با نرم‌افزار SketchUp، از مختصات نقاط برداشت شده توپوگرافی محدوده معدن استفاده شده است (شکل ۲). سپس با استفاده از نرم‌افزار Rhinoceros، توپوگرافی معدن به فایل STL برای سازگاری با نرم‌افزار FLAC3D تبدیل و ساخته شده است.

محدوده واقعی پهنه استخراجی ۱۴۰ هزار مترمربع است؛ ولی برای اجتناب از افزایش المان‌های مدل و در نتیجه کاهش حجم محاسبات غیرضروری، ابعاد مدل ساخته در راستای محورهای x، y و z به ترتیب برابر با ۴۰، ۱۲۰ و ۱۰۰ متر در نظر گرفته شده است. هندسی نهایی مدل، ساخته شده با نرم‌افزار FLAC3D در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲- توپوگرافی منطقه ساخته شده با نرم‌افزار SketchUp



شکل ۳- هندسه مدل ساخته شده با نرم‌افزار FLAC3D

افزایش یافته است ولی در راستای z، ابعاد مش‌بندی در مدل بدون ضریب افزایش ابعاد، انتخاب شده است.

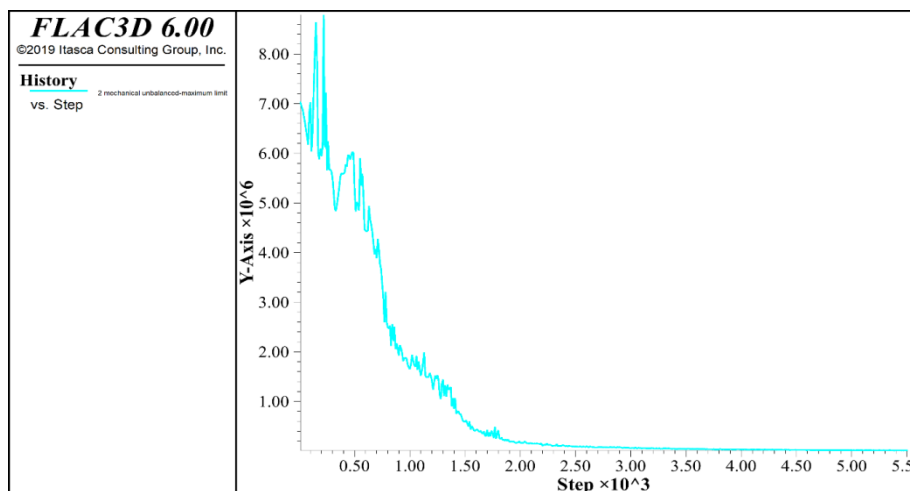
پس از اینکه شرایط مرزی به مدل اعمال شد، مدل تا رسیدن به تعادل اجرا می‌شود. در این مرحله، به تنش‌های برجا یا ثقلی اجازه داده می‌شود که به مدل اعمال شوند تا به تعادل برسند. معمولاً نیروی‌های نامتعادل، نشان‌دهنده این است که چه زمانی مدل به تعادل رسیده است و آن زمانی است که بردار نیروی گرهی خالص در هر گره، به صفر یا نزدیک به صفر برسد. از آنجا که در روش‌های عددی، این نیروها هرگز کاملاً صفر نمی‌شوند، وقتی مقدار آن خیلی کوچک باشد و به $0.1/0.0001$ مقدار اولیه برسد، فرض می‌شود که مدل به تعادل رسیده است. در شکل ۴، تاریخچه نیروهای نامتعادل‌کننده، به ترتیب قبل از حفاری نشان داده شده که نشان‌دهنده تعادل مدل بعد از اجرا است.

پس از به تعادل رسیدن اولیه مدل، حفر کارگاه‌های استخراج اتاق و پایه در مدل انجام شده است. در اولین مرحله، با توجه به حداقل عرض مورد نیاز برای استقرار تجهیزات معدنی و همچنین برای دسترسی به ماده معدنی، یک تونلی به عرض ۱۶ و طول ۹۶ متر حفر شده است. سپس برای تعیین ابعاد بهینه اتاق و پایه و بررسی تاثیرات متقابل تونل‌ها و پایه‌ها مجاور بر روی یکدیگر، چهار کارگاه استخراجی با ابعاد اتاق و پایه‌های مختلف، مطابق با جدول ۳، در مدل ایجاد شده است. این ابعاد برای اتاق و پایه با استفاده از فرمول‌های تجربی و آزمون و خطا در مدلسازی عددی به‌دست آمده است.

بعد از ساخت هندسه مدل، باید ویژگی‌های مکانیکی توده‌سنگ به مدل تخصیص یابد. نرم‌افزار FLAC از مدل‌های رفتاری مختلف برای این کار استفاده می‌کند. با توجه به اطلاعات موجود توده سنگ (جدول ۲) و پیوسته فرض کردن محیط، در این تحقیق از مدل رفتاری موهر-کلمب برای تخصیص ویژگی‌های مکانیکی توده‌سنگ به مدل استفاده شده است.

در مرحله بعد مدل‌سازی باید شرایط مرزی و اولیه به مدل اعمال شود. معمولاً در شرایط مرزی تعیین وضعیت جابه‌جایی‌ها و یا تنش‌ها در مرز مدل کار مشکلی است. بنابراین با توجه به اینکه مقدار دقیق تنش‌های برجا مشخص نیست، ثابت کردن مرز مدل، به نحوی که جابه‌جایی نقاط مرزی صفر باشد، تنها راه اعمال شرایط مرزی واقعی است. یکی از فواید استفاده از تنش مرزی، شبیه‌سازی مساله با ابعاد بزرگ است. به این ترتیب که در هنگام مدل‌سازی با ابعاد بزرگ، از ارتفاع آن کاسته شده و با مقیاس کوچک تحلیل می‌شود. در این تحقیق، تنش مرزی محدوده حفاری به صورت آزاد در نظر گرفته شده است. همچنین مرزهای جانبی مدل، در جهت x و y به صورت غلطکی در نظر گرفته شده است.

به دلیل بزرگ بودن مدل در این تحقیق (کارگاه استخراج شامل اتاق و پایه)، مش‌بندی مدل به صورت المان‌های مربعی شکل به ابعاد ۴ متر انجام شده است. در این حالت تا فاصله ۱۴۰ متر در راستای محورهای x و y کارگاه استخراج، ابعاد مش‌بندی مدل با ضریب ۵ درصد نسبت به دور شدن از فضای استخراجی،



شکل ۴- تاریخچه نیروهای نامتعادل کننده مدل قبل از حفاری

هاواژ و یا سیم برش الماسه در معادن زیرزمینی برای تولید بلوک سنگ است که مشابه با معدنکاری به روش کواری است.

بعد از حفاری، مدل مورد نظر دوباره حل شده است. در این مرحله، مدل باید کاملاً حل شده تا به تعادل برسد. همانطور که در شکل ۵ دیده می‌شود، بعد از تعادل در مرحله اولیه، حفاری انجام شده و نیروهای نامتعادل کننده در هر گام افزایش یافته است. در نهایت بعد از طی گام‌های مناسب، مدل به تعادل رسیده است.

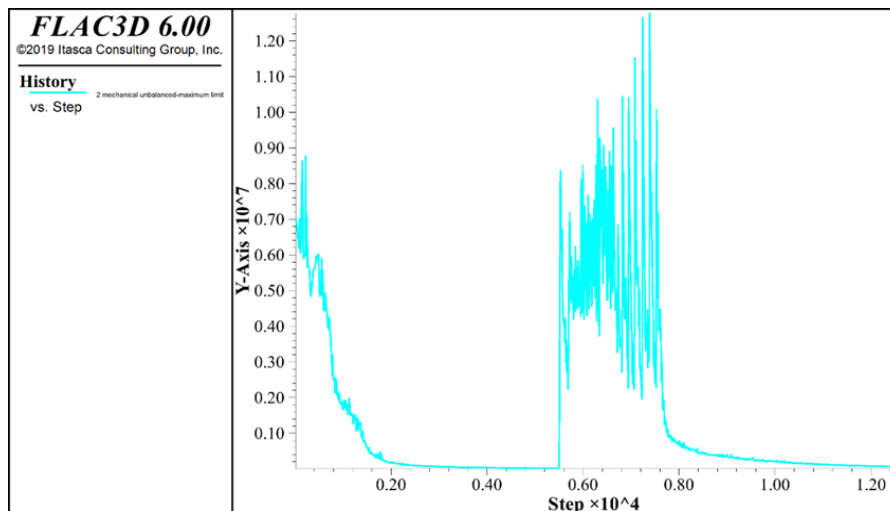
در تمام مدل‌های عددی ساخته شده در این تحقیق، فرض شده است که محیط همگن (با یک جنس) و پیوسته (بدون ناپیوستگی) است. همچنین سطح تراز آب زیرزمینی پایین‌تر از کارگاه‌های استخراج فرض شده است. در شکل ۶، نمایی سه‌بعدی از نحوه شبیه‌سازی کارگاه استخراج روش اتاق و پایه، با پایه‌های مربعی شکل و منظم، نشان داده شده است. با مدل‌سازی کارگاه استخراج و جانمایی پایه‌ها، امکان بررسی وضعیت تنش‌ها و جابه‌جایی‌ها در اطراف حفاریات وجود دارد.

جدول ۳- مشخصات کارگاه‌های استخراج فرضی در روش اتاق و پایه

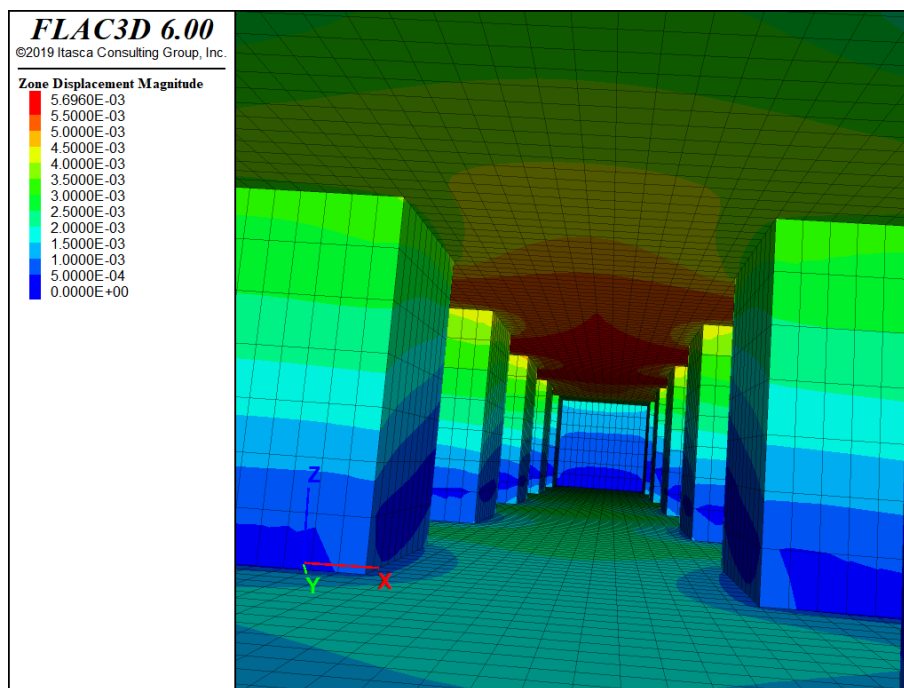
کارگاه	ابعاد اتاق (متر)		ابعاد پایه (متر)	
	عرض	طول	عرض	طول
۱	۲۰	۱۰۰	۱۰	۱۰
۲	۱۸	۱۰۲	۱۶	۱۶
۳	۱۶	۹۶	۱۶	۱۶
۴	۱۸	۱۰۸	۱۸	۱۸

گام حفاری برای اجرا در هر مرحله، ۴ متر در راستای محورهای x و y در نظر گرفته شده است. این میزان پیشروی در هر گام بر اساس طول تیغه برش دستگاه هاواژ (اره زنجیری) در برش سنگ در روش استخراج اتاق و پایه انتخاب شده است.

همچنین با توجه به اینکه در این معدن، ضخامت سنگ مرغوب حدوداً ۴۰ متر است، بنابراین ارتفاع کارگاه برابر با همین مقدار در نظر گرفته شده است. بر این اساس، در مدل‌سازی، ارتفاع کارگاه به صورت ۴ گام ۱۰ متری (در راستای محور Z) در نظر گرفته شده است. علت این انتخاب، قابلیت برش دستگاه



شکل ۵- تاریخچه نیروهای نامتعادل کننده مدل بعد از حفاری



شکل ۶- نمایی از کارگاه شبیه‌سازی شده روش استخراج اتاق و پایه با پایه‌های مربعی شکل

- بارگذاری متغیر، بر اساس میزان بار سنگ واقعی (با توجه به توپوگرافی سطح زمین)

بنابراین در ادامه، نتایج این دو بخش به صورت مجزا بررسی شده است. حالت دوم برای تحلیل حساسیت عمق معدنکاری در تحلیل پایداری فضای استخراجی مدل‌سازی شده انجام شده است.

۳-۲- بررسی و تفسیر نتایج

نتایج این بخش به صورت کانتورهای جابه‌جایی و تنش اصلی در صفحات مختلف ارائه شده است. کانتورهای سه‌بعدی

برای تحلیل پایداری فضاهای زیرزمینی مدل شده، از وزن ستون سنگی برای اعمال بار وارد بر سقف و پایه‌های کارگاه استخراج استفاده شده است. در این حالت بارگذاری به صورت ثقلی (وزن بار سنگ) و در راستای قائم (رو به پایین) انجام می‌شود. برای این منظور، از دو نوع بارگذاری متفاوت برای کل کارگاه استخراج، به شرح زیر استفاده شده است:

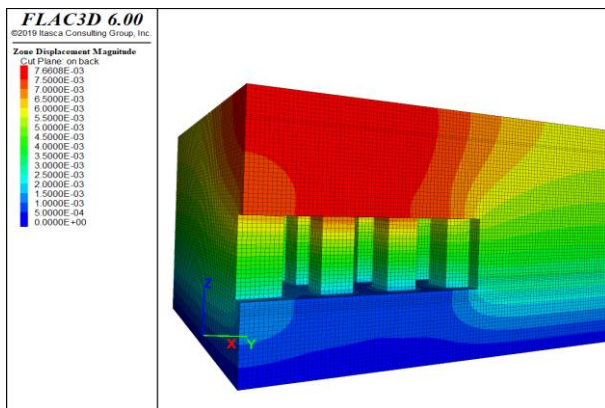
- بارگذاری یکپارچه، بر اساس حداکثر میزان بار سنگ (برابر با ۶۰ متر)

حالت، حداکثر مقدار جابه‌جایی برابر با ۴٫۳ میلی‌متر و در سقف کارگاه استخراج به‌دست آمده است (شکل ۷- الف). همچنین حداقل مقدار جابه‌جایی، در پایه‌ها مشاهده می‌شود. بر اساس این شکل، توزیع میزان جابه‌جایی در پایه، از بالا (سقف) به پایین (کف)، کاهش یافته است.

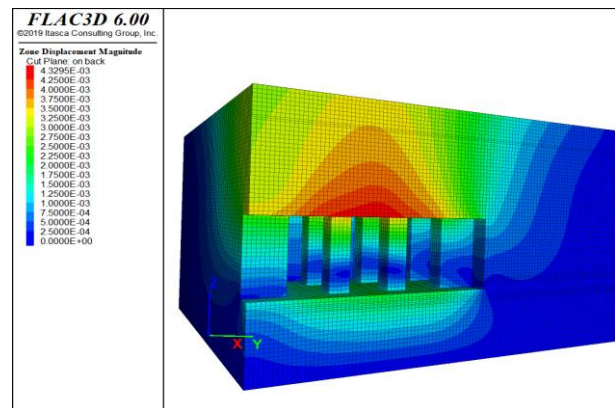
به همین ترتیب، در کارگاه استخراج شماره ۲، ابعاد پایه‌های مربعی شکل ۱۶ متر و عرض اتاق‌های اطراف پایه‌ها (عرض حفاری شده)، برابر با ۱۸ متر در نظر گرفته شده است. در این حالت، حداکثر مقدار جابه‌جایی برابر با ۷٫۶۶ میلی‌متر و در سقف کارگاه استخراج به‌دست آمده است (شکل ۷- ب). همچنین مشابه حالت قبلی، حداقل مقدار جابه‌جایی در پایه‌ها مشاهده می‌شود.

جابه‌جایی در مقاطع قائم (در راستای محور Z)، برای کارگاه‌های استخراج شماره ۱ تا ۴ (بر اساس طرح استخراج جدول ۳)، در شکل ۷ نشان داده شده است. در این شکل‌ها می‌توان تغییرات میزان جابه‌جایی در سقف و پایه‌ها را مشاهده کرد. ارتفاع بارسنگ در تمام مدل‌های ارائه شده در این بخش ثابت (بارگذاری یکنواخت در کل کارگاه استخراج، بدون در نظر گرفتن توپوگرافی واقعی منطقه) و برابر با ۶۰ متر در نظر گرفته شده است. همچنین در تمام این مدل‌ها، شکل پایه مربعی و به‌صورت منظم در کارگاه استخراج جانمایی شده‌اند.

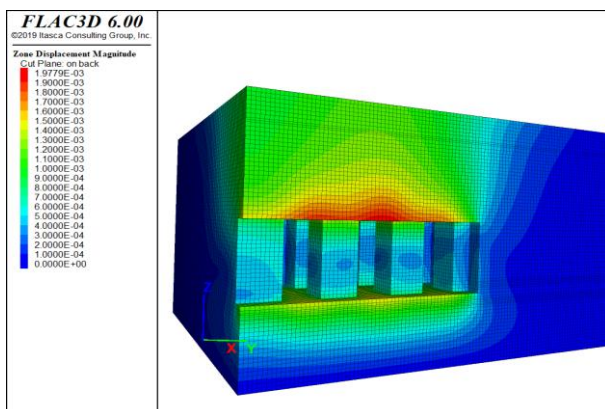
کارگاه استخراج شماره ۱، ابعاد پایه‌های مربعی شکل ۱۰ متر فرض شده است. همچنین عرض اتاق‌های اطراف پایه‌ها (عرض حفاری شده) برابر با ۲۰ متر در نظر گرفته شده است. در این



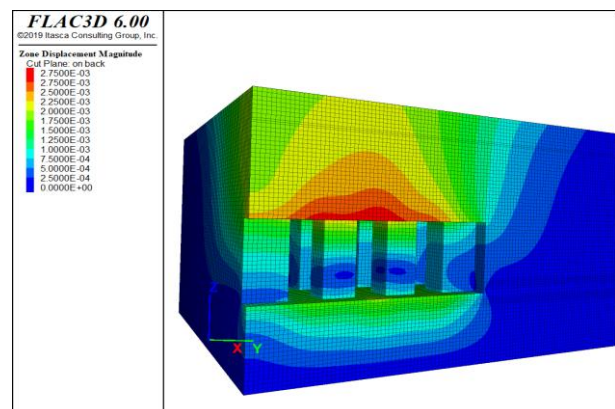
ب- کارگاه استخراج شماره ۲



الف- کارگاه استخراج شماره ۱



ت- کارگاه استخراج شماره ۴



پ- کارگاه استخراج شماره ۳

شکل ۷- توزیع جابه‌جایی در مقطع قائم مدل کارگاه استخراج

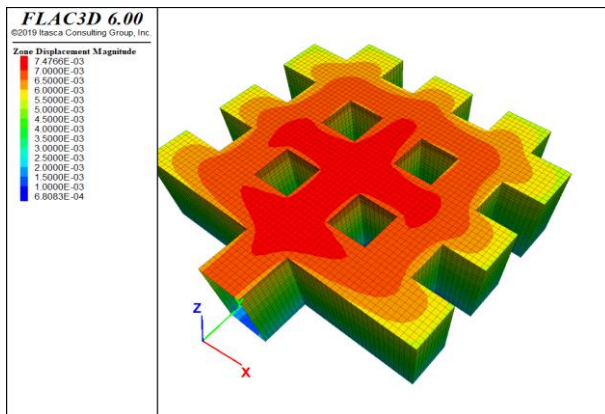
در کارگاه استخراج شماره ۴، با ابعاد پایه‌های مربعی شکل ۱۸ متر و عرض اتاق‌های اطراف پایه‌ها (عرض حفاری شده)، برابر با ۱۸ متر، کمترین میزان جابه‌جایی حداکثر نسبت به سه کارگاه قبلی، به‌دست آمده است. در این حالت، حداکثر مقدار جابه‌جایی

در کارگاه استخراج شماره ۳، ابعاد پایه‌های مربعی شکل ۱۶ متر فرض شده است. همچنین عرض اتاق‌های اطراف پایه‌ها (عرض حفاری شده)، برابر با ۱۶ متر در نظر گرفته شده است. در این حالت، حداکثر مقدار جابه‌جایی برابر با ۲٫۷۵ میلی‌متر و در سقف کارگاه استخراج به‌دست آمده است (شکل ۷- پ).

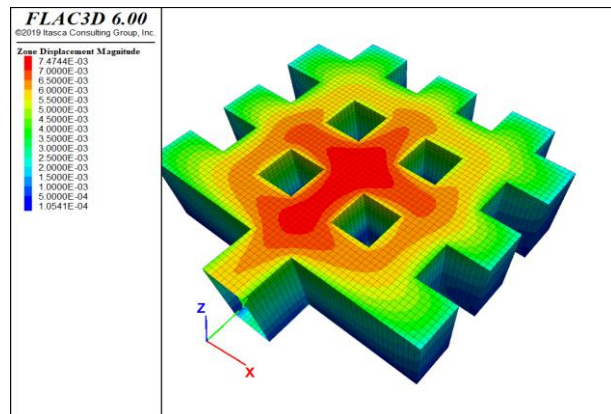
به همین ترتیب، کانتورهای سه‌بعدی جابه‌جایی در مقاطع افقی (پلان افقی در صفحه واقع بین محورهای x و y) برای کارگاه‌های استخراج شماره ۱ تا ۴ (بر اساس طرح استخراج جدول ۳)، در شکل ۸ نشان داده شده است. در این شکل‌ها، می‌توان تغییرات میزان جابه‌جایی در سقف کارگاه استخراج را مشاهده کرد. ارتفاع بارسنگ در تمام مدل‌های ارائه شده در این بخش نیز ثابت (بارگذاری یکنواخت در کل کارگاه استخراج، بدون در نظر گرفتن توپوگرافی واقعی منطقه) و برابر با ۶۰ متر در نظر گرفته شده است.

برابر با ۱٫۹۷ میلی‌متر و در سقف کارگاه استخراج به‌دست آمده است (شکل ۷-ت).

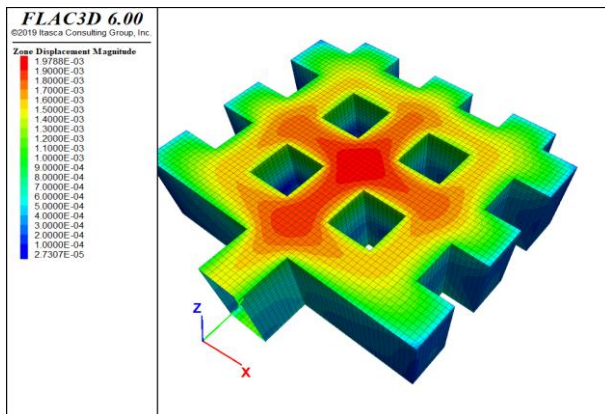
مقایسه نتایج این بخش نشان می‌دهد که با افزایش ابعاد پایه و کاهش عرض اتاق‌ها، میزان جابه‌جایی در سقف کارگاه استخراج و پایه‌ها کاهش می‌یابد ولی در عوض، میزان استخراج (بازیابی) کاهش می‌یابد. بنابراین باید در تعیین ابعاد بهینه اتاق و پایه، طرحی انتخاب شود که با کمترین میزان جابه‌جایی، بیشترین میزان بازیابی ماده معدنی حاصل شود.



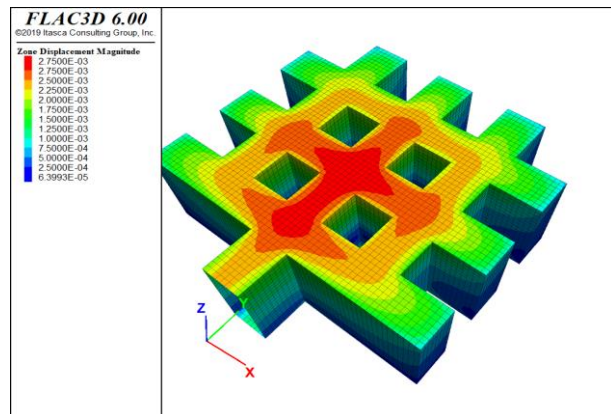
ب- کارگاه استخراج شماره ۲



الف- کارگاه استخراج شماره ۱



ت- کارگاه استخراج شماره ۴



پ- کارگاه استخراج شماره ۳

شکل ۸- توزیع جابه‌جایی در مقطع افقی مدل کارگاه استخراج

مقایسه نتایج نشان می‌دهد که بهترین و بدترین حالت توزیع جابه‌جایی در سقف کارگاه استخراج (با توجه به گسترش زون قرمز رنگ)، به ترتیب در کارگاه‌های شماره ۴ (شکل ۸-ت) و شماره ۲ (شکل ۸-ب) است. همچنین از نظر مقدار جابه‌جایی در سقف کارگاه استخراج، حداکثر میزان جابه‌جایی برابر با ۷٫۴۷ میلی‌متر، مربوط به کارگاه‌های شماره ۱ (شکل ۸-الف) و شماره ۲ (شکل ۸-ب) است. این مقدار برای کارگاه‌های شماره ۳ (شکل ۸-پ) و شماره ۴ (شکل ۸-ت)، به ترتیب برابر با ۲٫۷۵ و

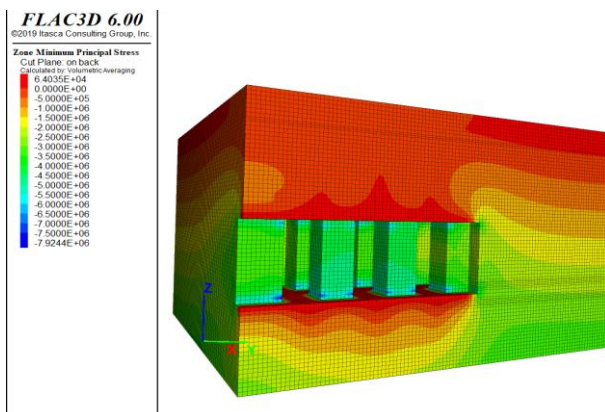
در تمام این مدل‌ها، شکل پایه مربعی و به‌صورت منظم در کارگاه استخراج جانمایی شده‌اند. به هر حال، نتایج این بخش نشان می‌دهد که بیشترین میزان جابه‌جایی (مناطق قرمز رنگ) در تقاطع بین اتاق‌هاست. در این مناطق، بیشترین تمرکز تنش و در نتیجه جابه‌جایی وجود دارد. همچنین میزان جابه‌جایی در سقف اتاق‌ها و پایه‌های مرکزی کارگاه استخراج، نسبت به اتاق‌ها و پایه‌های کناری واقع در مرزهای کارگاه استخراج، بیشتر است.

در ادامه، کانتورهای سه‌بعدی تنش اصلی در مقاطع قائم (در راستای محور Z)، برای کارگاه‌های استخراج شماره ۱ تا ۴، (بر اساس طرح استخراج جدول ۳)، در شکل ۹ ارائه شده است. مقایسه نسبی نتایج نشان می‌دهد که در تمام مدل‌ها، حداکثر میزان تنش اصلی، در سقف و کف (کف کمتر از سقف) کارگاه استخراج مشاهده می‌شود. این میزان تنش در فاصله بین پایه‌ها (اتاق‌ها)، به ویژه در مرکز کارگاه استخراج، بیشترین مقدار است. در تمام حالت‌ها، میزان تنش از سقف کارگاه استخراج تا سطح زمین، کاهش یافته است.

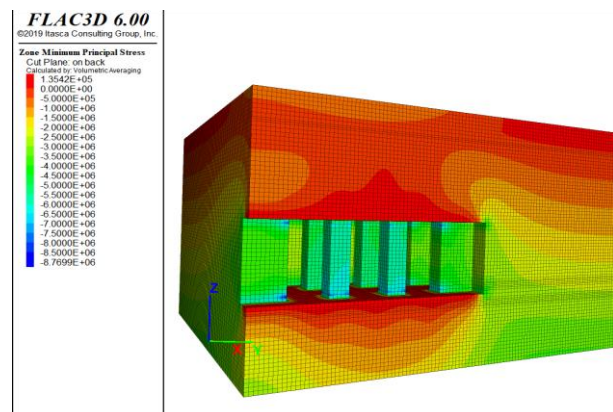
در FLAC، نوع تنش‌ها می‌تواند فشاری (منفی) یا کششی (مثبت) باشد. بر این اساس مشاهده می‌شود که در تمام مدل‌ها، تنش‌های در سقف و کف کارگاه استخراج کششی است. ولی پایه‌ها و دیواره‌های مدل تحت تاثیر تنش‌های فشاری اند. در این حالت، اگر مقادیر تنش‌های فشاری به دست آمده از تحلیل عددی بیشتر از مقاومت سنگ پایه باشد، احتمال شکست پایه وجود دارد. موضوعی که در این تحقیق مشاهده نشده است.

۱/۹۷ میلی‌متر به دست آمده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که به‌طور نسبی، کارگاه‌های شماره ۲ و ۴، به ترتیب بدترین (بحرانی‌ترین) و بهترین شرایط را بر اساس میزان و توزیع جابه‌جایی سقف کارگاه استخراج، در بین سایر کارگاه‌های استخراج در نظر گرفته شده، دارند.

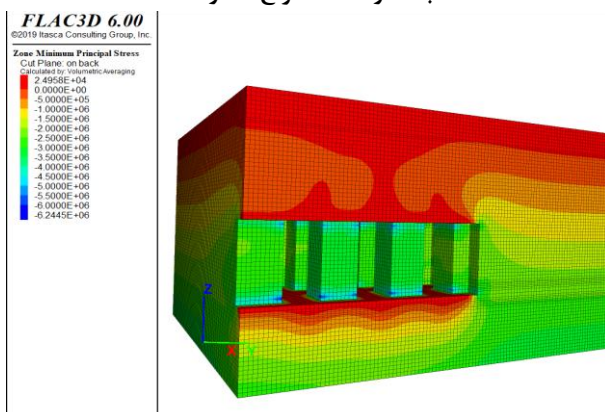
این نتایج نشان می‌دهد که ابعاد اتاق و پایه، تاثیر مستقیمی بر میزان جابه‌جایی سقف کارگاه استخراج در روش اتاق و پایه دارد. مسلماً هر چه جابه‌جایی بیشتر باشد، پایداری فضای استخراج شده کمتر می‌شود. بنابراین از این بابت، طرحی بهینه است که حداقل میزان و گسترش جابه‌جایی، در سقف کارگاه استخراج ایجاد شود. اگر چه با افزایش ابعاد پایه‌ها این هدف محقق می‌شود ولی در عوض میزان بازیابی ماده معدنی کاهش می‌یابد. بنابراین مجدد تاکید می‌شود که باید تعادلی بین ابعاد اتاق و پایه ایجاد شود؛ به نحوی که با کمترین میزان جابه‌جایی، بیشترین میزان بازیابی ماده معدنی به دست آید.



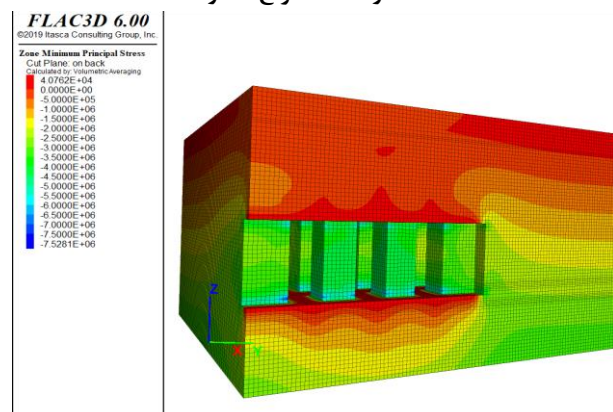
ب- کارگاه استخراج شماره ۲



الف- کارگاه استخراج شماره ۱



ت- کارگاه استخراج شماره ۴



پ- کارگاه استخراج شماره ۳

شکل ۹- توزیع تنش اصلی در مقطع قائم مدل کارگاه استخراج

نسبت به سایر کارگاه مقدار کمتری دارد ولی توزیع تنش در سقف کارگاه به‌صورت تجمعی و روی اتاق و پایه‌های مرکزی

بررسی نتایج نشان می‌دهد که اگر چه حداکثر مقدار تنش به‌دست آمده در سقف کارگاه استخراج شماره ۱ (شکل ۹-الف)،

است. بر اساس این روش می‌توان کرنش بحرانی (ε_{cr}) را از رابطه ۱ محاسبه کرد [۵۷]:

$$\varepsilon_{cr} = \frac{\sigma_c}{E} \quad (۱)$$

که در آن:

σ_c مقاومت فشاری تک محوری سنگ
 E مدول الاستیک سنگ

بر اساس تجارب و مطالعات انجام شده بر روی فضاهای حفاری شده مختلف، ساکورایی روابط زیر را برای محاسبه کرنش بحرانی پیشنهاد داده است:

$$\begin{aligned} \log \varepsilon_{cr} &= -0.251 \log E - 0.85 \quad ۱ \text{ تراز هشدار خطر} \\ \log \varepsilon_{cr} &= -0.251 \log E - 1.22 \quad ۱ \text{ (شکل ۹-ب) و ۳ (شکل ۹-پ) نشان می‌دهد که اگر چه ابعاد} \\ \log \varepsilon_{cr} &= -0.251 \log E - 1.59 \quad ۳ \text{ تراز هشدار خطر} \end{aligned}$$

که در آن:

ε_{cr} کرنش بحرانی (درصد) (نسبت جابه‌جایی به فضای حفاری)

E مدول الاستیک (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)

بر این اساس:

تراز هشدار خطر ۱، نشان‌دهنده این است که فضای حفاری شده مشکل ناپایداری دارد.

تراز هشدار خطر ۲، به‌عنوان مبنای طراحی فضای حفاری پیشنهاد می‌شود.

تراز هشدار خطر ۳، نشان‌دهنده پایداری کوتاه مدت فضای حفاری شده است.

با تعیین کرنش مجاز و با استفاده از رابطه ۳، جابجایی مجاز تعیین می‌شود:

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{u_c}{a} \quad (۳)$$

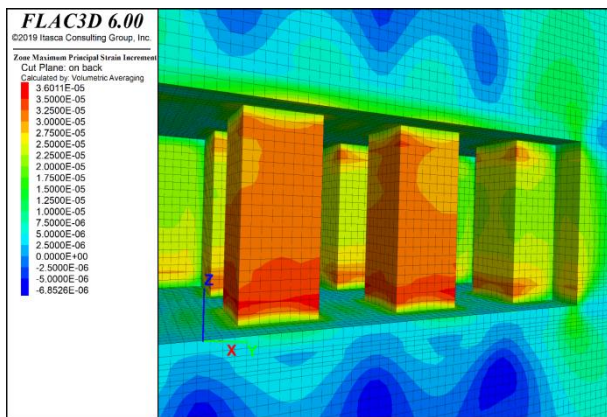
در جدول ۴، نتایج به‌دست آمده از به‌کارگیری روش ساکورایی برای تعیین وضعیت پایداری در کارگاه‌های استخراج مختلف، کارگاه‌های استخراج شماره ۱ تا ۴ (بر اساس طرح استخراج جدول ۳)، ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که بر اساس روش ترازبندی ساکورایی، کارگاه استخراج شماره ۳ دارای تراز هشدار ۲ است و می‌تواند مبنای طراحی و تحلیل پایداری فضای حفاری شده در این تحقیق لحاظ شود.

است، بنابراین احتمال شکست در این حالت، به دلیل کم بودن ابعاد پایه، نسبت به دیگر طرح‌ها بیشتر است. همچنین مشاهده توزیع تنش در سقف نشان می‌دهد که دیگر کارگاه استخراج، کارگاه شماره ۲، ۳ و ۴، توزیع تنش به‌صورت تجمعی روی یک بخش از کارگاه نبوده؛ بلکه تنش در فاصله بین پایه‌ها توزیع شده است. در این حالت، بیشترین مقدار تنش در مرکز اتاق است و از مرکز به سمت پایه‌ها، تنش کمتر می‌شود. به هر حال، از بین این سه کارگاه استخراج، حداکثر مقدار تنش به‌دست آمده در سقف کارگاه‌های استخراج شماره ۲ (شکل ۹-ب) و شماره ۴ (شکل ۹-ت)، به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار را دارند.

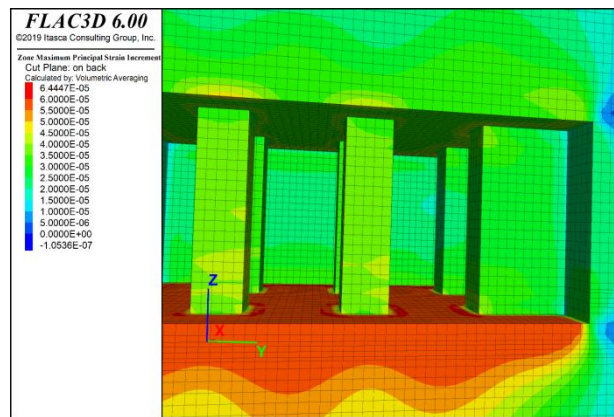
مقایسه بین حداکثر مقدار تنش در کارگاه‌های شماره ۲ (شکل ۹-ب) و ۳ (شکل ۹-پ) نشان می‌دهد که اگر چه ابعاد پایه در هر دو کارگاه یکسان است (۱۶ متر) ولی عرض اتاق در کارگاه ۲ (۱۸ متر) بیشتر از کارگاه ۳ (۱۶ متر) است، بنابراین میزان تنش در کارگاه شماره ۲ بیشتر است. به همین صورت، مقایسه بین حداکثر مقدار تنش به‌دست آمده در کارگاه‌های شماره ۲ (شکل ۹-ب) و ۴ (شکل ۹-ت) نشان می‌دهد که اگر چه در هر دو کارگاه، ابعاد اتاق یکسانی دارند (۱۸ متر)، ولی ابعاد پایه در کارگاه ۴ (۱۸ متر) بیشتر از کارگاه ۲ (۱۶ متر) است. بنابراین میزان تنش در کارگاه شماره ۴ کمتر است. می‌توان نتیجه گرفت، افزایش ابعاد اتاق و پایه به ترتیب باعث افزایش و کاهش تنش می‌شود.

در ادامه کانتورهای سه‌بعدی کرنش اصلی ماکزیمم در مقاطع قائم (در راستای محور Z)، برای کارگاه‌های استخراج شماره ۱ تا ۴، (بر اساس طرح استخراج جدول ۳)، در شکل ۱۰، ارائه شده است. از این نمودارها، برای تحلیل پایداری کارگاه‌های استخراج بر اساس مفهوم کرنش بحرانی (روش ساکورایی)، استفاده شده است. در این روش، مقادیر جابه‌جایی سقف فضاهای زیرزمینی به‌دست آمده از مدل‌سازی عددی با مقادیر جابه‌جایی بحرانی محاسبه شده از روابط ساکورایی مقایسه می‌شود. سپس وضعیت پایداری فضای زیرزمینی بر اساس سطح تراز هشدار این روش، تعیین می‌شود.

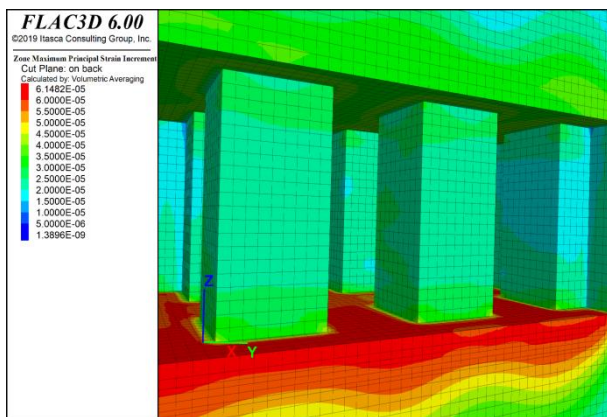
ساکورایی، در سال ۱۹۸۳، بیان کرد که می‌توان پایداری فضای زیرزمینی حفاری شده را بر اساس کرنش ایجاد شده در توده‌سنگ دربرگیرنده آن، ارزیابی کرد. کرنش یاد شده به‌صورت نسبت همگرایی فضای حفاری شده به قطر آن، قابل محاسبه



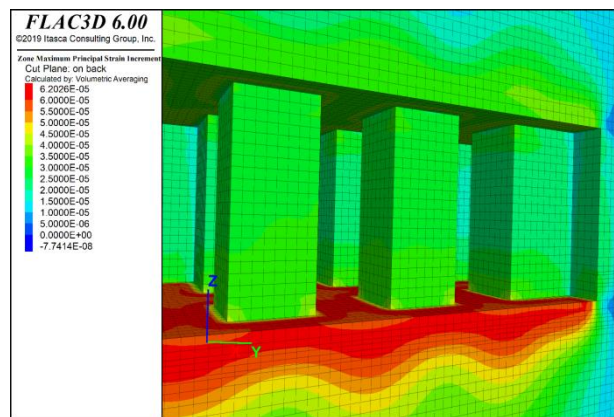
ب- کارگاه استخراج شماره ۲



الف- کارگاه استخراج شماره ۱



ت- کارگاه استخراج شماره ۴



پ- کارگاه استخراج شماره ۳

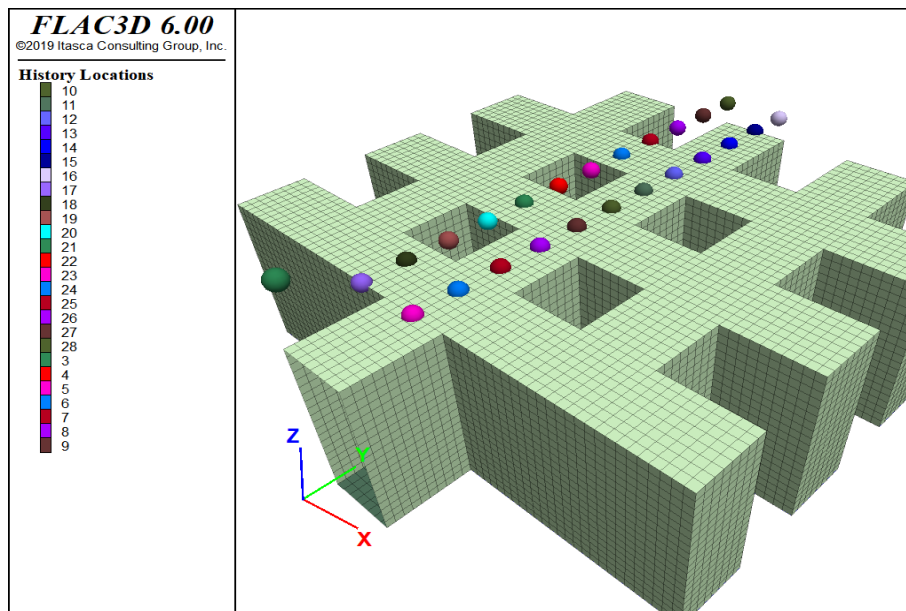
شکل ۱۰- توزیع کرنش اصلی در مقطع قائم مدل کارگاه استخراج

جدول ۴- بررسی پایداری کارگاه‌های استخراج مدل‌سازی شده بر اساس روش ساکورایی

شماره کارگاه	حداکثر جابه‌جایی	نسبت جابه‌جایی سقف به فضای حفاری	تراز خطر ۱	تراز خطر ۲	تراز خطر ۳	وضعیت پایداری
۱	۴,۳۲	۰,۲۱۶	۰,۵۵۳	۰,۲۳۶	۰,۱۰۱	هشدار خطر ۳
۲	۷,۶۶	۰,۳۸۳	۰,۵۵۳	۰,۲۳۶	۰,۱۰۱	هشدار خطر ۳
۳	۲,۷۵	۰,۱۳۸	۰,۵۵۳	۰,۲۳۶	۰,۱۰۱	هشدار خطر ۲
۴	۲,۹۷	۰,۰۹۹	۰,۵۵۳	۰,۲۳۶	۰,۱۰۱	هشدار خطر ۱

میزان جابه‌جایی در محدوده حفاری، از یک سری نقاط به فاصله ۱۰ متری از یکدیگر، واقع در سقف کارگاه استخراج (وسط اتاق‌ها و پایه‌ها)، استفاده شده است (شکل ۱۱).

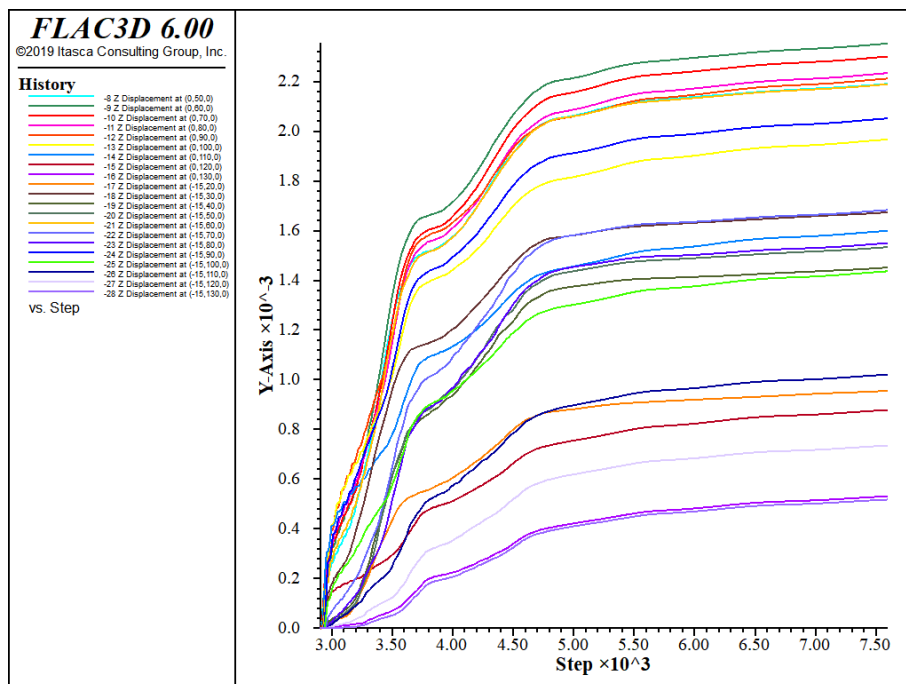
از قابلیت‌های خوب نرم‌افزار FLAC، استفاده از نقاط مشاهده‌ای برای بررسی وضعیت تنش، جابه‌جایی و نظایر آن در طول زمان حل مدل است. در این تحقیق نیز برای بررسی دقیق‌تر



شکل ۱۱- موقعیت قرارگیری نقاط مشاهده‌ای در مدل

تمام نقاط مشاهده‌ای تقریباً ثابت شده است. بنابراین می‌توان مطمئن بود که اجرای مدل برای رسیدن به وضعیت تعادل درست انجام شده است. ضمن اینکه هر نقطه، با توجه به موقعیت قرارگیری، مقدار جابه‌جایی متفاوتی دارد. در این حالت، جابه‌جایی نقاط واقع در سقف کارگاه، جایی که فضا باز است (اتاق) نسبت به فضای بسته (پایه)، بیشتر است.

یکی از تاریخچه‌های به دست آمده از تغییرات جابه‌جایی در نقاط مشاهده‌ای تعریف شده در نرم‌افزار، در شکل ۱۲ نشان داده شده است. بر اساس این شکل، روند تغییرات جابه‌جایی طی زمان، در تمام نقاط مشاهده‌ای در نظر گرفته شده، یکسان است. این روند نشان می‌دهد که با افزایش زمان، مقادیر جابه‌جایی زیاد شده تا اینکه مدل به تعادل می‌رسد. در این حالت، جابه‌جایی در



شکل ۱۲- تاریخچه میزان جابه‌جایی در نقاط مشاهده‌ای واقع در سقف کارگاه استخراج

۳-۳- بحث

و پایه، تاثیر زیادی در میزان جابه‌جایی دارد. به عنوان مثال، مقایسه بین کارگاه شماره ۲ و ۳ نشان می‌دهد که با ابعاد یکسان پایه (۱۶ متر)، افزایش ابعاد اتاق در کارگاه شماره ۲ (۱۸ متر) نسبت به کارگاه شماره ۳ (۱۶ متر)، باعث شده است که میزان جابه‌جایی بیش از دو برابر شود. این تغییرات در ابعاد اتاق و پایه، باعث تغییر در ابعاد کارگاه شده است.

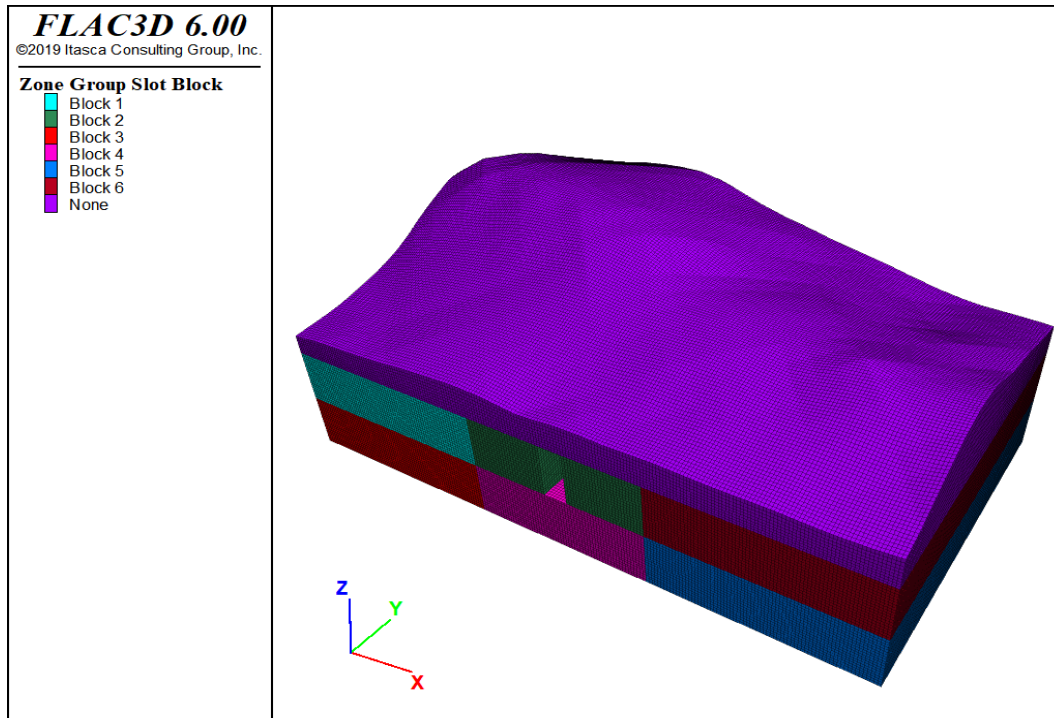
خلاصه‌ای از نتایج به‌دست آمده از حداکثر میزان جابه‌جایی، تنش و کرنش به همراه درصد بازیابی ماده معدنی و فاکتور ایمنی در چهار کارگاه استخراج مدل‌شده در این تحقیق، در جدول ۵ آورده شده است. مشاهده این نتایج نشان می‌دهد که ابعاد اتاق

جدول ۵- خلاصه‌ای از نتایج مدل‌سازی کارگاه‌های استخراج اتاق و پایه

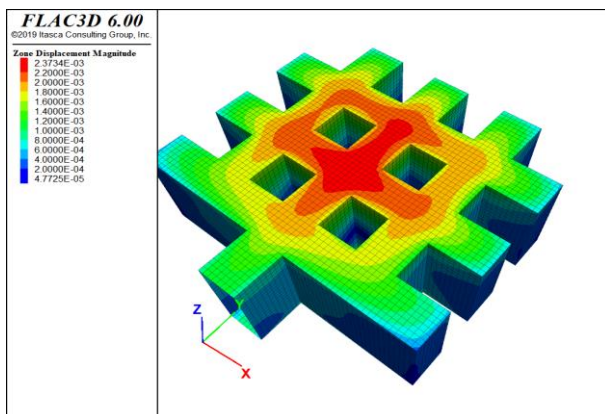
پارامتر	شماره کارگاه			
	۴	۳	۲	۱
ابعاد کارگاه (متر)	۱۰۸×۱۲۶	۹۶×۱۱۲	۱۰۲×۱۰۸	۱۰۰×۱۲۰
ابعاد اتاق- پایه (متر)	۱۸×۱۸	۱۶×۱۶	۱۶×۱۸	۱۰×۲۰
حداکثر جابه‌جایی (میلی-متر)	۱،۹۷	۲،۷۵	۷،۶۶	۴،۳۲
حداکثر تنش (مگاپاسکال)	۶،۲۴	۷،۵۱	۷،۹۲	۸،۷
حداکثر کرنش	۱،۶	۲،۴	۳،۵	۳،۷
درصد بازیابی سنگ	۷۲	۷۲	۷۵	۸۷
فاکتور ایمنی	۲،۴۲	۲،۰۱	۱،۹۰	۱،۷۲

مدل‌سازی کارگاه استخراج شماره ۳، در دو نوع بارگذاری ثابت (یکنواخت و بدون در نظر گرفتن توپوگرافی واقعی منطقه) و متغیر (غیر یکنواخت و با در نظر گرفتن توپوگرافی واقعی منطقه)، ارایه شده است. مقایسه نتایج این دو حالت بارگذاری نشان می‌دهد که نتایج تحلیل مدل با بارگذاری متغیر (بارسنگ بین ۳۰ تا ۶۰ متر) با نتایج بارگذاری ثابت (حداکثر میزان بارسنگ برابر با ۶۰ متر)، اختلاف ناچیزی دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که به دلیل کم بودن میزان بارسنگ روی کارگاه استخراج، توپوگرافی واقعی تاثیر زیادی روی نتایج ندارد و مدل به تغییرات ناچیز بارسنگ حساس نیست ولی این قابلیت در نرم‌افزار FLAC وجود دارد که می‌توان توپوگرافی سطح زمین را در مدل‌ها اعمال کرد.

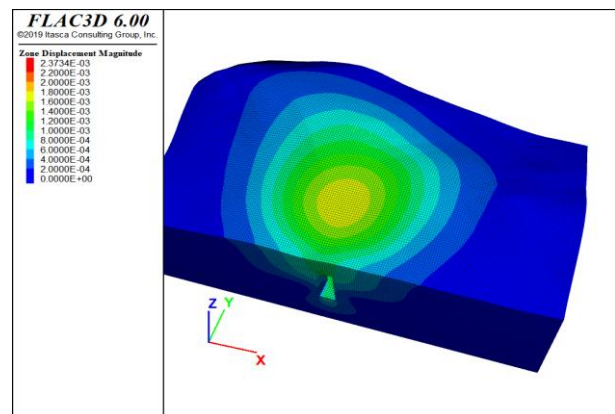
در انتخاب ابعاد مناسب برای اتاق و پایه، علاوه بر میزان جابه‌جایی، درصد بازیابی ماده معدنی و فاکتور ایمنی نیز مهم است. در این تحقیق، هدف و مبنای طراحی، رسیدن به حداقل فاکتور ایمنی ۲ بوده است. بنابراین دو کارگاه شماره ۱ و ۲، از نظر پایداری مناسب نیست ولی کارگاه شماره ۳ و ۴، با درصد بازیابی یکسان، پایدار است. هر چند که به دلیل پایداری بیش از حد کارگاه شماره ۴، کارگاه شماره ۳، کارگاه بهینه انتخاب شده و مبنی تحلیل اقتصادی قرار گرفته است. همان‌طور که در ابتدای این بخش توضیح داده شد، از دو نوع بارگذاری متفاوت برای بررسی تحلیل پایداری کارگاه استخراج، استفاده شده است. نتایج ارایه شده، تاکنون بر اساس بارگذاری یکپارچه به اندازه حداکثر میزان بارسنگ، برابر با ۶۰ متر، بوده است. در ادامه این بخش، به منظور تحلیل حساسیت، نحوه بارگذاری متغیر، بر اساس میزان بارسنگ واقعی و با توجه به توپوگرافی واقعی سطح زمین (شکل ۱۳)، همراه با نتایج آن ارایه شده است. بدین منظور، وضعیت پایداری کارگاه استخراج شماره ۳ (کارگاه بهینه انتخاب شده از مرحله قبل)، با بارگذاری متغیر بررسی شده و نتایج آن با نتایج قبلی (بارگذاری یکنواخت) مقایسه شده است. در شکل ۱۴، کانتورهای جابه‌جایی در مقطع قائم، جابه‌جایی در مقطع افقی، تنش اصلی و کرنش اصلی مدل با در نظر گرفتن توپوگرافی سطح زمین، ارایه شده است. در جدول ۶ نیز خلاصه‌ای از نتایج



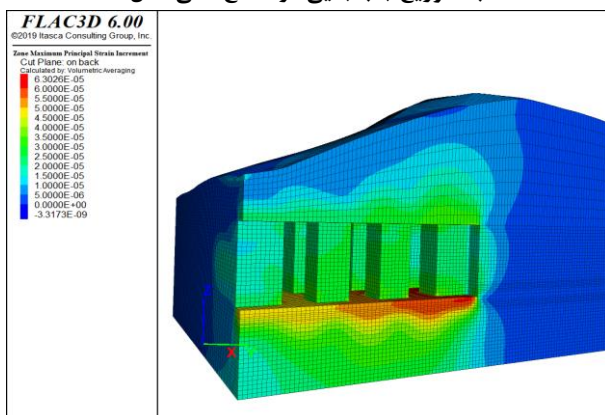
شکل ۱۳- مدل هندسی با در نظر گرفتن توپوگرافی سطح زمین



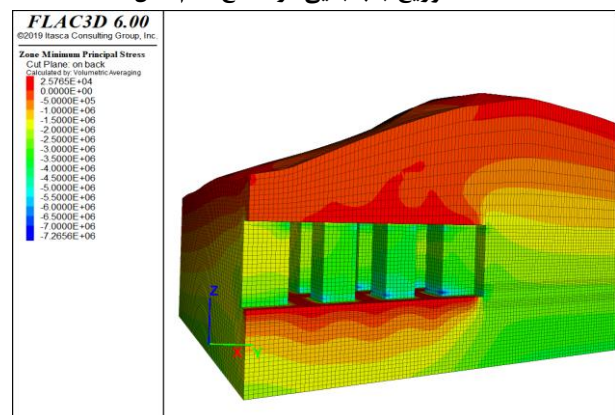
ب- توزیع جابه‌جایی در مقطع افقی مدل



الف- توزیع جابه‌جایی در مقطع قائم مدل



ت- توزیع کرنش اصلی در مقطع قائم مدل



پ- توزیع تنش اصلی در مقطع قائم مدل

شکل ۱۴- نتایج مدل‌سازی با در نظر گرفتن توپوگرافی سطح زمین در کارگاه استخراج شماره ۳

جدول ۶- خلاصه نتایج مدل‌سازی کارگاه استخراج شماره ۳ با بارگذاری متفاوت

فاکتور ایمنی	حداکثر کرنش	حداکثر تنش (مگاپاسکال)	حداکثر جابه‌جایی (میلی‌متر)	نوع بارگذاری
۲,۰۱	۲,۴	۷,۵۱	۲,۷۵	ثابت (یکنواخت)
۲,۰۷	۲,۲	۷,۲۶	۲,۳۷	متغیر (غیریکنواخت)

۴- نتیجه‌گیری

حالت اگر مقدار تنش فشاری به‌دست آمده از تحلیل عددی (نیروی محرک) بیشتر از مقاومت سنگ پایه (نیروی مقاوم) باشد، احتمال شکست پایه وجود دارد.

- در تعیین ابعاد مناسب اتاق و پایه، علاوه بر میزان جابه‌جایی و درصد بازیابی ماده معدنی، فاکتور ایمنی نیز مهم است. نتایج این تحقیق نشان داده است که از بین چهار کارگاه استخراج در نظر گرفته شده، کارگاه شماره ۳ (با ابعاد پایه و اتاق برابر با ۱۶ متر)، دارای حداقل فاکتور ایمنی فرض شده در این تحقیق (مقدار ۲) است. فاکتور ایمنی به‌دست آمده برای دیگر کارگاه‌های استخراج، از این مقدار کمتر (کارگاه‌های شماره ۱ و ۲) و بیشتر (کارگاه شماره ۴) است.

- تحلیل پایداری بر اساس مفهوم کرنش بحرانی (روش ساکورایی) نشان داده است که کارگاه استخراج شماره ۳، دارای سطح تراز هشدار ۲ بوده و پایدار است. بنابراین این کارگاه استخراج برای تحلیل اقتصادی و مبنای طراحی اتاق و پایه در این تحقیق، انتخاب شده است.

- تحلیل حساسیت برای بررسی نوع بارگذاری نیز نشان داده است که نتایج تحلیل مدل با بارگذاری متغیر (بارسنگ بین ۳۰ تا ۶۰ متر) با نتایج بارگذاری ثابت (حداکثر میزان بارسنگ برابر با ۶۰ متر) اختلاف ناچیزی دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در زمانی که تغییرات بارسنگ کم است، توپوگرافی سطح زمین تاثیر زیادی روی نتایج ندارد.

۵- تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان بیان نشد.

۶- قدردانی

از داوران محترم برای نظرهای دقیق و بازخوردهای سازنده‌ای که به بهبود و ارتقاء کیفی این مقاله کمک شایانی کردند، صمیمانه تشکر میکنیم. همچنین از سردبیر محترم به خاطر حمایت‌ها و راهنمایی‌های مفیدی که در طول فرایند بازبینی انجام دادند، سپاسگزاریم.

۷- منابع

[1] Darling, P., 2023. "SME Surface Mining Handbook". Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, SME.

بررسی فنی تغییر روش معدنکاری از روش استخراج سطحی کواری به روش استخراج زیرزمینی اتاق و پایه یک معدن سنگ ساختمانی، هدف اصلی این تحقیق بوده است. در واقع در این مطالعه به نحوه استفاده روش استخراج اتاق و پایه از دیدگاه ژئومکانیکی برای استخراج سنگ ساختمانی پرداخته شده است، موضوعی که هنوز در معادن سنگ ساختمانی ایران کمتر به آن توجه شده است. بدین منظور با استفاده از اطلاعات معدن سنگ مرمریت دهبید، طراحی و تحلیل پایداری کارگاه استخراج به روش اتاق و پایه، با مدل‌سازی عددی به کمک نرم‌افزار تقاض محدود FLAC3D انجام شده است. مدل‌سازی عددی راهکار مناسبی برای شبیه‌سازی سه‌بعدی توپوگرافی سطح زمین، پایه‌ها و اتاق‌های موجود در هر کارگاه استخراج زیرزمینی است. خلاصه‌ای از نتایج بدست آمده از این تحقیق به شرح زیر ارائه شده است:

- با افزایش ابعاد پایه و کاهش عرض اتاق‌ها از کارگاهی با ابعاد ۱۰×۲۰ متر به کارگاهی با ابعاد ۱۶×۱۶ متر، میزان جابه‌جایی در سقف کارگاه استخراج کاهش یافته است (از ۴,۳۲ به ۲,۷۵ میلی‌متر)، بنابراین در روش معدنکاری اتاق و پایه، ابعاد اتاق و پایه تاثیر قابل توجهی بر میزان جابه‌جایی سقف کارگاه استخراج دارد.

- معمولاً در روش استخراج اتاق و پایه، افزایش ابعاد پایه و کاهش عرض اتاق‌ها باعث کاهش میزان استخراج (درصد بازیابی) می‌شود. بنابراین برای تعیین ابعاد بهینه اتاق و پایه باید به گونه‌ای عمل شود که با کمترین میزان جابه‌جایی، بیشترین میزان بازیابی ماده معدنی حاصل شود.

- بیشترین مقدار تنش در مرکز اتاق‌ها است و از مرکز به سمت پایه‌ها، تنش کمتر شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزایش ابعاد اتاق و پایه به ترتیب باعث افزایش و کاهش تنش می‌شود.

- در تمام مدل‌های این تحقیق، تنش‌های در سقف و کف کارگاه استخراج کششی بوده است. همچنین پایه‌ها و دیواره‌های مدل تحت تاثیر تنش‌های فشاری بوده است. در این

- methods and its application to marble mines". *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 39: 421-444.
- [12] Bonetto, S., Fornaro, M., Giuliani, A. and Lasagna, M., 2008. "Underground quarrying and water control: Some cases from Northern Italy". *Mine water and the Environment*, 7-10.
- [13] Pelizza, S., Oreste, P.P., Peila, D. and Oggeri, C., 2000. "Stability analysis of a large cavern in Italy for quarrying exploitation of a pink marble". *Tunnelling and underground space technology*, 15(4): 421-435.
- [14] Millar, D.L., Brown, T.J., Kruyswijk, J.B., Smith, N., Coggan, J.S., Foster, P.J., Steadman, E.J., Evans, D.J. and Hewitt, J., 2012. "Assessing the feasibility of underground mining of aggregates in southern and eastern England". In *Proceedings of the 16th Extractive Industry Geology Conference*, Extractive Industry Geology Conference, 54-70.
- [15] Kortnik, J., 2009. "Underground natural stone excavation technics in Slovenia". *RMZ—Materials and Geoenvironment*, 56(2).
- [16] Kortnik, J., 2015. "Stability assessment of the high safety pillars in Slovenian natural stone mines". *Archives of Mining Sciences*, 60(1): 403-417.
- [17] Rybár, P., Hronček, P., Tometzová, D., Domaracká, L. and Jesenský, M., 2017. "Underground quarries their possible use for mining tourism purposes—Slovak perspectives on the example of the underground stone quarry of *Veľká Stráň*". *Acta Geoturistica*, 8(2): 87-107.
- [18] Van Den Eeckhaut, M., Poesen, J., Duser, M., Martens, V. and Duchateau, P., 2007. "Sinkhole formation above underground limestone quarries: A case study in South Limburg (Belgium)". *Geomorphology*, 91(1-2): 19-37.
- [19] Oggeri, C., Oreste, P., Valentino, D. and Fornaro, M., 2001. "Going underground in quarrying: Technical perspectives for marble in Portugal". In *Proceedings of the 17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey-IMCET*, Ankara, 19-22.
- [20] Benardos, A.G., Kaliampakos, D.C., Prousiotis, J.G., Mavrikos, A.A. and Skoparantzou, K.A., 2001. "Underground aggregate mining in [2] Yarahmadi, R., Bagherpour, R., Sousa, L.M. and Taherian, S.G., 2015. "How to determine the appropriate methods to identify the geometry of in situ rock blocks in dimension stones". *Environmental Earth Sciences*, 74: 6779-6790.
- [3] Samarakoon, K.G.A.U., Chaminda, S.P., Jayawardena, C.L., Dassanayake, A.B.N., Kondage, Y.S. and Kannangara, K.A.T.T., 2023. "A Review of Dimension Stone Extraction Methods". *Mining*, 3(3): 516-531.
- [4] Langer, W.H., 2001. "Potential environmental impacts of quarrying stone in karst: a literature review". U.S. Geological Survey open-file report, 01-0484.
- [5] İlseven, S. and Kaşot, N., 2020. "Impact of quarries on the kyrenia mountains (cyprus) towards human and natural environment". *Journal of Environmental Biology*, 41(2): 323-327.
- [6] Sairanen, M., Rinne, M. and Selonen, O., 2018. "A review of dust emission dispersions in rock aggregate and natural stone quarries". *International Journal of Mining, reclamation and environment*, 32(3): 196-220.
- [7] Mosaferi, M., Dianat, I., Khatibi, M.S., Mansour, S.N., Fahiminia, M. and Hashemi, A.A., 2014. "Review of environmental aspects and waste management of stone cutting and fabrication industries". *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 16: 721-730.
- [8] Kun, M. and Baran Tufan, N.K., 2014. "The applicability of underground mining methods in limestone quarries of Western Taurus". In *Proceedings of the International Conference on Mining, Material and Metallurgical Engineering Prague, Czech Republic, Paper (No. 61)*.
- [9] Newman, C., Newman, D. and Dupuy, R., 2020. "Development of a multiple level underground limestone mine from geology through mine planning". *International Journal of Mining Science and Technology*, 30(1): 63-67.
- [10] Hartman, H.L. and Mutmansky, J.M., 2002. "Introductory mining engineering". John Wiley & Sons.
- [11] González-Nicieza, C., Álvarez-Fernández, M.I., Menéndez-Díaz, A. and Alvarez-Vigil, A.E., 2006. "A comparative analysis of pillar design

- Conference on Ground Control in Mining, 318-324.
- [30] Esterhuizen, G.S., Ellenberger, J.L., 2010. "Pillar and roof span design in stone mines". Extracting the Science: A Century of Mining Research.
- [31] Perrotti, M., Lollino, P., Fazio, N.L. and Parise, M., 2019. "Stability charts based on the finite element method for underground cavities in soft carbonate rocks: validation through case-study applications". Natural Hazards and Earth System Sciences, 19(10): 2079-2095.
- [32] Iannacchione, A.T., 1999. "Pillar design issues for underground stone mines". In Proceedings of the 18th International Conference on Ground Control in Mining, Morgantown, WV: West Virginia University, 271-281.
- [33] Kortnik, J., 2012. "High safety pillars design for underground excavation of natural stone blocks". Journal of. Civil Engineering and Construction Technology, 3(6): 179-188.
- [34] Millar, D.L., Brown, T.J., Kruijswijk, J.B., Smith, N., Coggan, J.S., Foster, P.J., Steadman, E.J., Evans, D.J. and Hewitt, J., 2012. "Assessing the feasibility of underground mining of aggregates in southern and eastern England". In Proceedings of the 16th Extractive Industry Geology Conference, Extractive Industry Geology Conference, 54-70.
- [35] Kun, M.E.T.E., 2014. "Evaluation and applications of empirical approaches and numerical modeling of an underground limestone quarry with room and pillar design". Journal of Mining Science, 50: 126-136.
- [36] Coli, M., Livi, E., Baldi, M. and Coli, N., 2012. "Studies for rockburst prediction in the Carrara marble-II: geostructural/geomechanical revisitation and 2D FEM modeling of a large underground quarry". In ISRM EUROCK, (pp. ISRM-EUROCK).
- [37] Ferrero, A.M., Segalini, A. and Giani, G.P., 2010. "Stability analysis of historic underground quarries". Computers and Geotechnics, 37(4): 476-486.
- [38] Georgieva, T., Descamps, F., Gonze, N., Vandycke, S., Ajdanlijsky, G. and Tshibangu, J.P., 2023. "Stability assessment of a shallow Athens: a promising investment plan". Tunnelling and underground space technology, 16(4): 323-329.
- [21] Esterhuizen, G.S., Dolinar, D.R. and Ellenberger, J.L., 2011. "Pillar strength in underground stone mines in the United States". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 48(1): 42-50.
- [22] Aksoy, C.O. and Onargan, T.U.R.G.A.Y., 2006. "Sizing room and pillar by numerical modeling for underground marble quarries in Turkey". Journal of Mining Science, 42: 483-489.
- [23] Soni, A., Monsalve, J.J., Bishop, R. and Ripepi, N., 2023. "Modified design of pillar based on estimated stresses and strength of pillar in an underground limestone mine". Mining, Metallurgy & Exploration, 40(2): 529-541.
- [24] Iannacchione, A.T., Marshall, T.E., Burke, L., Melville, R. and Litsenberger, J., 2003. "Safer mine layouts for underground stone mines subjected to excessive levels of horizontal stress". Mining Engineering, 55(4): 25-31.
- [25] Soni, A., 2022. "Optimizing Pillar Design for Improved Stability and Enhanced Production in Underground Stone Mines", Doctoral dissertation, Virginia Tech.
- [26] Monsalve Valencia, J.J., 2022. "A Risk-Based Pillar Design Approach for Improving Safety in Underground Stone Mines". Doctoral dissertation, Virginia Tech.
- [27] Esterhuizen, G.S., Dolinar, D.R. and Ellenberger, J.L., 2008. "Pillar strength and design methodology for stone mines". In Proceedings of the 27th international conference on ground control in mining. Morgantown WV: West Virginia University, 241-253.
- [28] He Mc, J.I.A.X.N., Coli, M., Livi, E. and Sousa, L., 2012. "Experimental study of rockbursts in underground quarrying of Carrara marble". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 52: 1-8.
- [29] Esterhuizen, E., Dolinar, D.R., Ellenberger, J., 2010. "Roof span design for underground stone mines". In Proceedings of the 29th International

- [47] Crassoulis, G., Kapenis, A., Thoraval, A., Ferrero, M., Germann, K., Iabichino, G., Gardenato, M. and Dell'Antone, F., 1999. "Development of an integrated computer-aided design and planning methodology for underground marble quarries". Conference of EUROTHEN'99, Second annual Workshop, Cagliari, 1-6.
- [48] Dintwe, T.K., Seiki, T. and Noguchi, S., 2017. "Stability Evaluation of an Underground Quarry in Oya". In Proceedings of the 2nd Join Conference of Utsunomiya University and Universitas Padjadjaran, 145-150.
- [49] Esterhuizen, G.S. and Iannacchione, A.T., 2005. "Effect of the dip and excavation orientation on roof stability in moderately dipping stone mine workings". In ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, (pp. ARMA-05).
- [50] Esterhuizen, G.S., Dolinar, D.R. and Iannacchione, A.T., 2008. "Field observations and numerical studies of horizontal stress effects on roof stability in US limestone mines". Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 108(6): 345-352.
- [51] Grosso, B., Dentoni, V. and Bortolussi, A., 2021. "Effect of the rock stress on the water jet cutting performance". Rock Mechanics and Rock Engineering, 54(9): 4987-4999.
- [52] Kumar, R., Choudhury, D. and Bhargava, K., 2016. "Simulation of rock subjected to underground blast using FLAC3D". Japanese Geotechnical Society Special Publication, 2(12): 508-511.
- [53] Oggeri, C. and Oreste, P., 2015. "Underground Quarrying for Marble: Stability assessment through modelling and monitoring". International Journal of Mining Science (IJMS), 1(1): 35-42.
- [54] Seiki, T., Dintwe, T.K.M., Yamaguchi, R., Noguchi, S., and Ohmura, T., 2018. "Seismic characteristics of field measurements and numerical analyses of an underground quarry in Oya". In Rock Dynamics and Applications 3, 501-507.
- [55] Yang, H.S., Kim, W.B. and Ali, M.A., 2012. "Performance of pillar design in underground abandoned chalk mine of Malogne (Belgium)". European Journal of Environmental and Civil Engineering, 27(6): 2358-2372.
- [39] Martins, R., Lopes, L. and Branco, E., 2017. "Underground Marble Exploitation-A Portuguese Case Study and Technical Aspects". In Proceedings of the IV International Stone Congress, Izmir - Turkey, 65-683.
- [40] Ferrero, A., Migliazza, M., Segalini, A. and Giani, G.P., 2009. "In situ fracturing mechanics stress measurements to improve underground quarry stability analyses". In Proceedings of the 3rd CANUS Rock Mechanics Symposium, 1-8.
- [41] Cravero, M. and Iabichino, G., 1997. "Geomechanical study for the exploitation of an underground marble quarry". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34(3-4): 58.e1-58.e14.
- [42] Marchetti, D., Avanzi, G.D.A., Sciarra, N., Calista, M. and Piaggi, L., 2012. "Pillar sizing and stability analysis by numerical modeling for underground stone quarrying". In Proceedings of the ISRM International Symposium-EUROCK, 1-13.
- [43] Ferrero, A.M., Migliazza, M., Segalini, A. and Gulli, D., 2013. "In situ stress measurements interpretations in large underground marble quarry by 3D modeling". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 60: 103-113.
- [44] Alcalde-Gonzalo, J., Prendes-Gero, M.B., Álvarez-Fernández, M.I., Álvarez-Vigil, A.E. and González-Nicieza, C., 2013. "Roof tensile failures in underground excavations". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 58: 141-148.
- [45] Biondi, G., Fiandaca, O., Aliberti, D. and Cascone, E., 2022. "Effect of the presence of a historical underground quarry on site seismic response". In Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites III, CRC Press, 756-767.
- [46] Cardu, M., Dipietromaria, S. and Oreste, P., 2016. "Sub-level stoping in an underground limestone quarry: an analysis of the state of stress in an evolutionary scenario". Archives of Mining Sciences, 61(1).

- stone mines that include discontinuities*". Geosystem Engineering, 15(3): 187-194.
- [56] Fargier, Y., Antoine, R., Dore, L., Lopes, S.P. and Fauchard, C., 2017. "3D assessment of an underground mine pillar by combination of photogrammetric and geoelectric methods". Geophysics, 82(4): E143-E153.
- [57] Slaker, B.A., Murphy, M.M. and Miller, T., 2017. "Analysis of monitoring techniques to measure floor heave in an underground limestone mine". In Proceedings of the SME Annual Conference and Expo 2017, 54-58.
- [58] Mahdavi, E, 2023. "Design and geomechanical analysis of the stope in changing the mining method from quarry to underground (Case study: Dehbid stone mine)". Thesis, University of Kashan.
- [59] Itasca, F., 2013. "Fast lagrangian analysis of continua in 3 dimensions". Minneapolis, Minnesota, Itasca Consulting Group.