

Original Research Paper

Fracture analysis for optimization of dimension stone block extraction using numerical methods; case study from the Melika Marble quarry, Kerman province

Sina Alizadeh¹, Mohammad Reza Ghassemi*², Mehran Arian¹, Ali Solgi¹, and Zahra Maleki¹

¹ Department of Earth Sciences, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

² Research Institute for Earth Sciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2025 January 17

Accepted: 2025 May 29

Available online: 2025 September 23

Keywords:

Fracture

Joint

Dimension stone quarry

Numerical modeling

3DEC software

Operation optimization

Kerman

Iran

ABSTRACT

Natural fractures and discontinuities such as joints, faults, and layering have a dual effect on the extraction of the dimension stones. On the one hand, these discontinuities can help to extract rock masses more easily, and on the other hand, they can reduce the dimensions of the extracted blocks and reduce the quality of the stone. As a result, a detailed study of the natural discontinuities in dimension stone mines from the perspective of geometry, spacing, surface characteristics, and so on can play a key role in planning and managing the extraction and proper exploitation of the mine. In this study, the development of joints and fractures in the rock mass and their geometric complexities in the Melika marble mining area located in the Kerman province have been investigated as a case study. After the field studies and structural geological evaluation of the mine area, the aforementioned features were used in the 3DEC software to prepare a three-dimensional model for optimal mining. In the process of optimizing the extraction, the maximum and most suitable number of extractable blocks was investigated directly through the aforementioned software model. Based on the results of this study, when mining from south to north and east to west, the highest and lowest yields of intact blocks may be expected, respectively. Our modeling also shows that with increasing depth, the recovery rate also reaches a maximum at depths of 22 to 25 meters. Our studies show that in addition to the geometry and arrangement of fracture spaces, the mine's topographic slope should also be analyzed to optimize the mining direction.

1. Introduction

The production of building stone (dimension stone) in the form of blocks or coups depends mostly on the size of the block to be mined. A block or slab is a piece of stone that typically weighs more than a few tons (up to 28 tons), and the minimum weight


of a slab depends on the market's demand and the type of the stone. For example, in the case of marble, pieces of about 500 kg are also called slabs. Extracting a sound and voluminous block is of vital importance in the extraction of the building stone from a


* Corresponding author: Mohammad Reza Ghassemi; E-mail: ghassemi.m.r@gmail.com

Citation:

Alizadeh, S., Ghassemi, M.R., Arian, M, Solgi, A., and Maleki, Z., 2025. Fracture analysis for optimization of dimension stone block extraction using numerical methods; case study from the Melika Marble quarry, Kerman province. Scientific Quarterly Journal of Geosciences, 35(3), 137, 63-78. <https://doi.org/10.22071/gsj.2025.500409.2174>.

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2021 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

 doi: 10.22071/gsj.2025.500409.2174

 dor: 20.1001.1.10237429.1404.35.3.4.9



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

quarry, which is controlled by the three-dimensional pattern of the discontinuity system in rock. These discontinuities include joints, cracks, faults or layering of the mined rock. The development of separate blocks in an in-situ rock mass (Lu and Lathman, 1999) depends on the cross-cutting discontinuities. Joints are more or less found in all rocks that have been deformed near the Earth's surface, and yet they are important from many engineering and economic geological perspectives (Ghasemi, 2008).

Recent studies in Iran (e.g., Alvan-Darestani and Kuhi-Esfahani, 2011; Basiri and Partashk, 2011; Shafiei et al., 2012; Yarahmadi et al., 2015) are devoted to the improvement of the recovery rate of dimension stone mines using different methods. Yarahmadi et al. (2014, 2015, 2017a,b,c, 2018) have reviewed the methods of surveying and harvesting stone blocks, comprehensively discussed 2D and 3D models and methods for evaluating the geometry of stone blocks, determining optimal cutting directions using experimental methods, and the effect of geomechanical properties of rock on economic production in dimension stone quarries. They have also introduced a quality factor for construction stones based on uniformity and esthetic indices. This research attempts to propose methods for the optimal extraction of dimension stone by using appropriate field observation approaches, testing rock samples, and applying numerical methods in the Melika marble quarry as a case study.

The Melika limestone mine is located in the Ravar County, north of Kerman Province, Iran. From a geological perspective, the Melika mine is located in the Tabas block between the Lut block and the Central Iran block. As a result, its stratigraphic features correspond to the Tabas block. The aforementioned mine is located in the south of a rounded syncline structure (Chahartaq Syncline) in which Jurassic and Cretaceous clastic and carbonate rocks are exposed (Fig. 1). The Upper Jurassic sequence with an unusual diapiric structure is located in the core of this alluvial and includes the Ravar series (Hajmola-Ali, 1995).

2. Research methodology

The Melika mine limestone has a color range of light brown to dark brown, and is classified into four varieties (Fig. 2). These varieties are: a) light cream stone without fossils, b) brown stone (Nescafe brown) without fossils, c) dark brown stone with fossils (bivalves), and d) light brown stone with fossils (bivalves). Based on the analyses conducted on the types of these stones, they are classified as stones resistant to physical weathering and relatively resistant to the chemical weathering. Given that the market for cutting and processing decorative stones tends towards cutting with saws in large sizes, slabs of this type of stone do not require mesh and resin for the final processing. The field surveys of this research were limited to studying and sampling of the Cretaceous rock units

and measurements of the joints and discontinuities in and around the mine.

The microscopic facies of the Cretaceous limestone in the mine area is mostly biomicritic biosparitic (Fig. 4), and the microfossils of all samples indicate an early Late Cretaceous (early Cenomanian) age. Trenching and core drilling of the mine area are used to evaluate the quality variations of the rocks and distribution of the discontinuities in the area (Fig. 5).

3. Results

In addition to the remote sensing studies and the field surveys before exploitation of the construction stone quarry, it is necessary to conduct a structural study after the opening of the main quarry. The most important structural phenomena to be surveyed are joints, fractures, layering and faults. In this way, the geometry and more detailed characteristics of the discontinuity network within the rock mass are analyzed and modeled. In order to carry out a systematic survey of the discontinuities in the Melika mine, stations were planned in different parts of the mine (Fig. 9). The information collected at 12 stations are averaged and summarized in Fig. 10. The average spacing of the joints and layering is estimated to be 5.3 and 7.0 meters, respectively. The spacing of the surveyed joints is slightly greater than the figures measured on the satellite image (3.2 to 4.0 meters). The angle between the layering plane and the main joint set on the stereogram was measured to be 55.5 degrees.

4. Modeling and discussion

The modeling of the virgin rock mass in the mine was based on considering discontinuities in order to optimize the extraction of blocks, and the 3DEC software (Itasca Consulting Group, Inc., 2019) was used to analyze the data. For the modeling purpose, both discontinuities (joints and layering) in a cubic mass of rock were selected and were considered as the first step to reconstruct the discontinuity pattern and draw the model maps. The voxel volume selected for the model is 12 cubic meters (2×3×2 meters). A voxel is the 3D equivalent of a pixel; each voxel has a certain volume in space. The voxel size indicates the accuracy of the model. The voxels were designed in a volume with a size of 50×51×50 meters (equivalent to the east, north, and up directions in the X, Y, and Z directions of the model, respectively) (Fig. 11).

During the modeling process, the program creates a database of 2D cross-sections around the model, which can be converted into a 3D model. The software also allows the user to freely segment the model and, by rotating the entire model, view the spacing and orientation of the joints. In this way, the user can examine the mining conditions from several different possible perspectives, get an idea of the distribution of effective discontinuities in the mine, and predict the dimensions and shape of the production blocks.

The 3DEC software has the ability to model the mining progression in various directions, and by counting the number of healthy blocks mined in each direction, calculates the mining efficiency in that direction as the ratio of healthy blocks to total mined blocks. Fig. 12 shows the mining progression in the model block in the 8 main directions. As a result, for the evaluation of extracted slabs, with the help of modeling and other information provided in this section, it is possible to increase the quality and number of the slabs and develop a plan and apply it to the surveying process during the extraction. Since the main goal of the mining progress stages and the further processing steps, is to make the extraction more economical, the sizing of the blocks should be done consciously and immediately after the extraction of the block according to the routine steps, considering the information obtained from the model (Fig. 13).

According to the modeling carried out for a section of the Melika mine (Fig. 12), the efficiency of the modeled block has been calculated according to the different directions of mining progression and is summarized in Table 4. The highest efficiency (100%) is related to the south-north direction and the lowest (77%) is related to the east-west direction. Investigating the optimal mining direction in different directions allows planning the location of the ramps and other facilities in the mine area to be selected with greater freedom of action.

The 3DEC software also allows for estimating the mine's efficiency at varying mining depths. To test this method, the

efficiency of the Melika mine was examined at depths of 6, 10, 15, 20, 22, and 25 meters for both west-east and east-west directions (Fig. 15).

5. Conclusion

The spatial geometry of natural discontinuities, such as joints, faults, and beddings, have a significant impact on the ease of drilling and mining of dimension stone quarries, and their evaluation can help to optimize the mining, reduce the rock waste, and increase the economic production in the mine. The main determining natural discontinuities in the Melika limestone quarry include a set of steep major joints and a shallowly-dipping bedding surface. The mine is located in medium-bedded to massive Cretaceous limestone in the southern part of a syncline. Exploratory drilling and test trenching provide useful information to better identify the quality of the rock and the attitude of the rock mass discontinuities. The surveying of the mine discontinuities and the use of data in the 3DEC software model revealed valuable results for the evaluation of the optimal methods of the mining process. The outputs of this modeling reveal that the direction of mine advancement from the south to north and from the northwest to southeast contains the highest and lowest percentage of recovery, respectively. However, the slope of the local topography of the mine also plays an important role in the choice of the direction of advancement. Modeling with 3DEC software also reveals that with increasing mining depth, the recovery rate reaches its maximum value at depths of 22 to 25 meters.

واکاوی شکستگی‌ها برای بهینه‌سازی استخراج سنگ ساختمانی به کمک روش‌های عددی؛ پژوهش موردی در گستره معدنی سنگ مرمریت ملیکا، استان کرمان

سینا علیزاده^۱، محمدرضا قاسمی^{۲*}، مهران آرین^۱، علی سلگی^۱ و زهرا ملکی^۱

^۱ گروه علوم زمین، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

^۲ پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

چکیده

شکستگی‌ها و ناپیوستگی‌های طبیعی مانند درزه‌ها، گسل‌ها و لایه‌بندی اثری دوگانه بر استخراج سنگ‌های ساختمانی دارند. این ناپیوستگی‌ها از سویی می‌توانند به استخراج آسان‌تر توده‌های سنگ کمک کنند و از سوی دیگر می‌توانند سبب کاهش ابعاد بلوک‌های استخراج شده و کاهش کیفیت سنگ گردند. از این رو، بررسی دقیق ناپیوستگی‌های طبیعی در معادن سنگ از دیدگاه هندسه، فاصله‌داری، ویژگی‌های سطح و مانند آن می‌تواند در برنامه‌ریزی و مدیریت استخراج و بهره‌برداری صحیح از معدن کلیدی باشد. در این پژوهش، گسترش درزه‌ها و شکستگی‌های توده سنگ و پیچیدگی هندسی آن‌ها در محدوده معدنی سنگ مرمریت ملیکا واقع در استان کرمان به عنوان نمونه موردی واکاوی شده است. پس از برداشت میدانی و ارزیابی زمین‌شناسی ساختاری گستره معدن، از ویژگی‌های یادشده در نرم‌افزار 3DEC استفاده شد تا مدلی سه‌بعدی برای استخراج بهینه معدن تهیه شود. در فرایند بهینه‌سازی استخراج، بیشترین و مناسب‌ترین تعداد بلوک‌های قابل استخراج به طور مستقیم از راه مدل نرم‌افزاری یادشده بررسی شد. بر پایه نتایج این پژوهش، هنگام استخراج سنگ با پیشروی از جهت‌های جنوب به شمال و خاور به باختر به ترتیب بیشترین و کمترین بازده بلوک‌های سالم را می‌توان انتظار داشت. همچنین این مدل‌سازی نشان می‌دهد با افزایش ژرفا، میزان بازیابی نیز در ژرفاهای ۲۲ تا ۲۵ متری به بیشینه می‌رسد. مطالعات ما نشان می‌دهند افزون بر هندسه و آرایش فضای شکستگی‌ها، شیب توپوگرافی معدن نیز باید برای بهینه‌سازی جهت برداشت، مورد واکاوی قرار گیرد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱

کلیدواژه‌ها:

شکستگی

درزه

معدن سنگ ساختمانی

مدل‌سازی عددی

نرم‌افزار 3DEC

بهینه‌سازی بهره‌برداری

کرمان

ایران

۱- پیش‌نوشتار

تولید سنگ ساختمانی (dimension stone) به صورت بلوک، کوپ یا قواره‌سنگ به طور عمده به اندازه بلوک قابل استخراج بستگی دارد. بلوک یا کوپ، قطعه‌ای از سنگ است که به طور معمول بیش از چند تن وزن دارد (تا ۲۸ تن) و کمترین وزن کوپ به بازار و نوع سنگ بستگی دارد. برای نمونه، در مورد مرمر به قطعه‌های در حدود ۵۰۰ کیلوگرم نیز کوپ گفته می‌شود. استخراج بلوک سالم و پر حجم در استخراج از معدن سنگ ساختمانی اهمیتی حیاتی دارد که با الگوی سه‌بعدی سامانه ناپیوستگی‌ها مهار می‌شوند. این ناپیوستگی‌های عبارتند از: درزه‌ها، شکاف‌ها، گسل‌ها یا لایه‌بندی سنگ. تشکیل بلوک‌های جدا از هم در توده سنگ برجا (in-situ block - Lu and Latham, 1999) به برخورد این ناپیوستگی‌ها وابسته است.

درزه‌ها کم و بیش در تمام سنگ‌هایی که در نزدیکی سطح زمین دگرریخت شده‌اند، دیده می‌شوند و با این وجود از بسیاری از دیدگاه‌های مهندسی و زمین‌شناسی اقتصادی اهمیت دارند (قاسمی، ۱۳۸۷).

در هنگام استخراج سنگ طبیعی می‌بایست هدف اصلی، بهینه‌سازی اندازه بلوک‌های بریده شده باشد. این ویژگی به طور عمده به فاصله‌داری درزه‌ها و شکستگی‌ها و جهت نسبی آن‌ها، وابسته می‌باشد (Mosch et al., 2011). تولید بلوک‌های بدون شکستگی و درزه و ترک می‌تواند به طور موثر با یک الگوریتم عددی مدل‌سازی شود. این پژوهش اثرات جهت‌گیری اصلی شکستگی‌ها بر روی اندازه و شکل بلوک‌ها را بررسی می‌کند و برنامه‌ای برای کاهش حضور شکستگی‌ها

* نویسنده مسئول: محمدرضا قاسمی؛ E-mail: ghassemi.m.r@gmail.com

ماخذنگاری:

علیزاده، س.، قاسمی، م.ر.، آرین، م.، سلگی، ع.، ملکی، ز.، ۱۴۰۴، واکاوی شکستگی‌ها برای بهینه‌سازی استخراج سنگ ساختمانی به کمک روش‌های عددی؛ پژوهش موردی در گستره معدنی سنگ مرمریت ملیکا، استان کرمان. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۵(۳)، ۱۳۷-۶۳. <https://doi.org/10.22071/gsj.2025.500409.2174>

doi: 10.22071/gsj.2025.500409.2174



doi: 20.1001.1.10237429.1404.35.3.4.9

حقوق معنوی مقاله برای فصلنامه علوم زمین و نویسندگان مقاله محفوظ است.



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

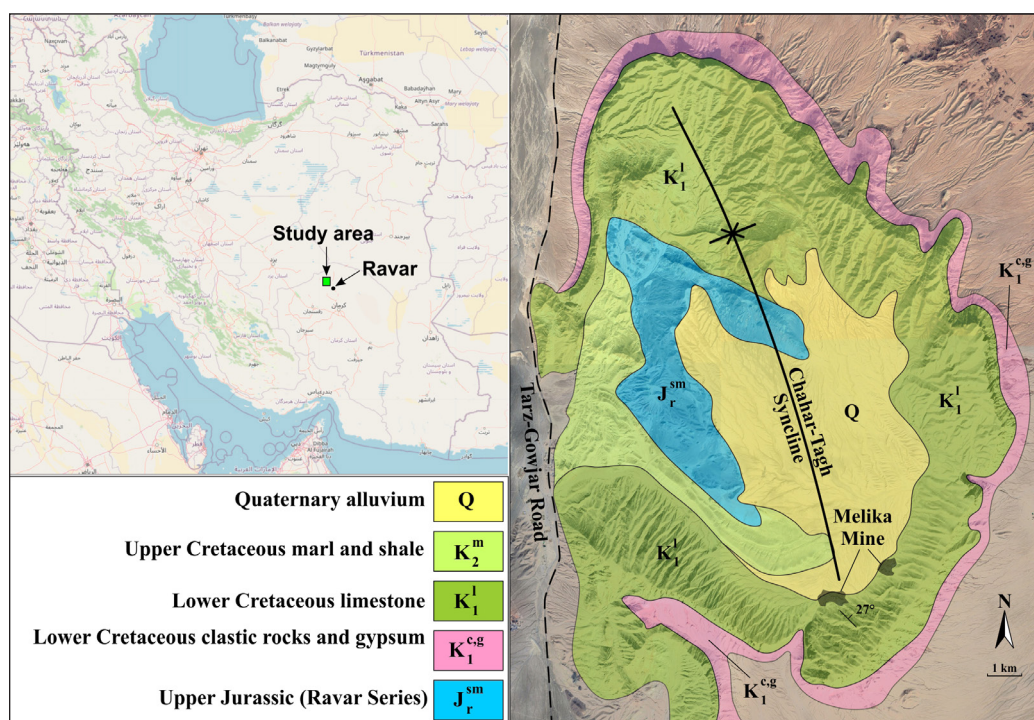
این معادن ناشی از عملکرد دو سامانه گسلش (راستالغز و عادی) بوده است. مُش و همکاران (Mosch et al., 2011) با هدف بهینه‌سازی برداشت در چندین معدن سنگ به کمی‌سازی بلوک‌های بدون شکستگی پرداختند. الگوریتم عددی که آن‌ها برای بررسی خود استفاده کردند، می‌تواند به عنوان ابزاری قوی در طراحی برداشت معدن و بهره‌برداری آینده از سنگ‌های ساختمانی مورد استفاده قرار گیرد. عطایی و همکاران (۱۴۰۰) از نرم‌افزار 3DEC برای بهینه‌سازی کوپ‌دهی در یک معدن تراورتن استفاده کرده‌اند. یاراحمدی و همکاران (Yarahmadi et al., 2014, 2015, 2017a,b,c, 2018) به صورت جامع به مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی و روش‌های ارزیابی هندسه بلوک‌های سنگی، تعیین جهت‌های بهینه برش به کمک روش‌های تجربی و اثر ویژگی‌های ژئومکانیکی سنگ بر تولید اقتصادی در معادن سنگ ساختمانی پرداخته‌اند. ایشان همچنین یک ضریب کیفیت برای سنگ‌های ساختمانی بر پایه شاخص‌های یکنواختی و زیبایی معرفی کرده‌اند. این پژوهش تلاش دارد با استفاده از رویکردهای مناسب برداشت میدانی، آزمایش نمونه‌های سنگ و به کارگیری روش‌های عددی در معدن سنگ مرمریت ملیکا، روش‌هایی را برای استخراج بهینه سنگ ساختمانی پیشنهاد نماید.

معدن مرمریت نسکافه‌ای ملیکا راور کرمان در شهرستان راور در شمال استان کرمان در ۷ کیلومتری شمال خاور روستای طرز و ۳۲ کیلومتری شمال باختر شهر راور قرار دارد (شکل ۱). مختصات بخش فعال معدن عبارت است از $31^{\circ}26'20''$ N و $56^{\circ}32'25''$ E.

از دیدگاه زمین‌شناسی، معدن ملیکا در بلوک طبس بین بلوک لوت و بلوک ایران مرکزی قرار گرفته است. از این رو ویژگی‌های چینه‌شناسی آن با بلوک طبس همخوانی دارد. معدن یاد شده در جنوب یک ساختار ناودیس گرد (ناودیس چهارتاق) قرار دارد که سنگ‌های آواری و کربناته ژوراسیک و کرتاسه در آن رخنمون یافته‌اند. توالی ژوراسیک بالایی با یک ساختار دیاپیری غیرعادی در هسته این ناودیس قرار گرفته است و شامل سری راور است (حاج‌ملاعلی، ۱۳۷۴).

در بلوک‌ها ارایه می‌نماید. مقدار کمی (عددی) بلوک‌های دارای شکستگی با هدف بهینه‌سازی، به کمک مطالعات دقیق در معدن مرمریت ملیکا کرمان در این نوشتار نشان داده شده است. الگوریتم مورد استفاده در این پژوهش می‌تواند به عنوان یک ابزار قدرتمند در برنامه‌ریزی آینده یک معدن و بهره‌برداری از سنگ‌های ساختمانی (تزیینی) با کیفیت استفاده شود. استفاده از رویکرد توصیف شده در نمونه‌های عملی استخراج سنگ‌های طبیعی ساختمانی در معدن یاد شده نشان داده شده است. تولید بلوک می‌تواند با استفاده از نرم‌افزار 3DEC و با یک رویکرد نوین که سبب افزایش حجم تولید سنگ بدون درزه و شکستگی، ارایه یک برنامه مدون برای پیشروی جبهه برداشت و همچنین به استفاده پایدار از منابع زیست‌محیطی می‌انجامد، صورت گیرد.

الوان دارستانی و کوهی اصفهانی (۱۳۹۰) با درزه‌نگاری و بررسی ژئومکانیکی در معدن سنگ ساختمانی مرمریت برد شیراز تلاش کردند پیشنهادهایی برای بهینه‌سازی استخراج از این معدن ارایه نمایند. آن‌ها برداشت درزه‌ها را به روش پنجره‌ای شعاعی انجام دادند و با کمک نرم‌افزارهای معمولی به واکاوی این داده‌ها پرداختند. بصیری و پرتاشک (۱۳۹۰) با بررسی سامانه درزه‌ها و شکستگی‌های چندین معدن سنگ ساختمانی تلاش کردند موفقیت‌آمیز بودن معدن‌کاری را با توجه به جهت درزه‌ها ارزیابی نمایند. به باور آن‌ها در حالت‌هایی که تنها یک سامانه شکستگی و یا دو سامانه شکستگی عمود بر هم وجود داشته باشد و فاصله‌داری بین درزه‌های آن‌ها دست‌کم به اندازه ابعاد بلوک‌های سنگی مورد نظر باشد، با طراحی جهت پیشروی سینه‌کار به موازات راستای این سامانه‌ها، میزان ضایعات سنگی به کمینه خواهد رسید. میکائیل (۱۳۹۰) از یک سامانه رده‌بندی نوین برای برآورد قابلیت برش توده سنگ و تعیین عوامل موثر بر آن استفاده کرده است. این رده‌بندی بر پایه چهار عامل مهم مقاومت فشاری تک محوری، سختی موهس، فاکتور سایندگی شیمیایی و مدول الاستیسیته بنا شده است. شفیعی و همکاران (۱۳۹۱) در بررسی معدن سنگ ساختمانی سعیدی کرمان نتیجه‌گیری نمودند که گسترش ناپوستگی‌ها در محدوده



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی گستره معدن ملیکا در شمال باختر راور. محل قرارگیری گستره مورد پژوهش در نقشه ایران نمایش داده شده است.

Figure 1. Geological map of the Melika mine area in the northwest of Ravar. The location of the study area is shown on the map of Iran.

یادشده برای نوع سنگ‌ها به کار می‌رود، با نام زمین‌شناسی آن‌ها تفاوت دارد؛ برای نمونه گرانیت معمولی به گرانیت سفید و بازالت به گرانیت سیاه معروف شده است! نام مرمریت به سنگ آهک‌هایی گفته می‌شود که پس از صیقل داده شدن، براق می‌شوند، به طور معمول دارای اثر لایه‌بندی نیستند و ممکن است حضور ماکروفسیل‌ها به آن‌ها نقش‌های زیبایی داده باشد. به این ترتیب نام مرمر در نام این نوع سنگ به معنی دگرگون شدن سنگ آهک نیست و بیشتر به جلا و نقش سنگ اشاره دارد. سورت‌بندی (sorting) سنگ‌های ساختمانی به این صورت است که پس از برش و فرآوری سنگ‌ها، آن‌هایی که طرح و رنگ بسیار مشابهی دارند، در یک پارت یا دسته قرار می‌گیرند. در سنگ‌های مرمریت، بازی رنگ در سنگ‌های یک سورت معین باید به تقریب صفر باشد و میزان رگه و هاله‌های سطح سنگ مشابه با ورق‌های دیگر سنگ باشد.

سنگ مرمریت نسکافه‌ای ملیکا با طیف رنگی قهوه‌ای روشن تا قهوه‌ای تیره به چهار سورت دسته‌بندی می‌گردد (شکل ۲). این چهار سورت عبارتند از: a) سنگ کرم روشن یک دست بدون سنگواره، b) سنگ قهوه‌ای (نسکافه‌ای) یک دست بدون سنگواره، c) سنگ قهوه‌ای تیره با سنگواره (دوکفه‌ای) و d) سنگ قهوه‌ای روشن با سنگواره (دوکفه‌ای).

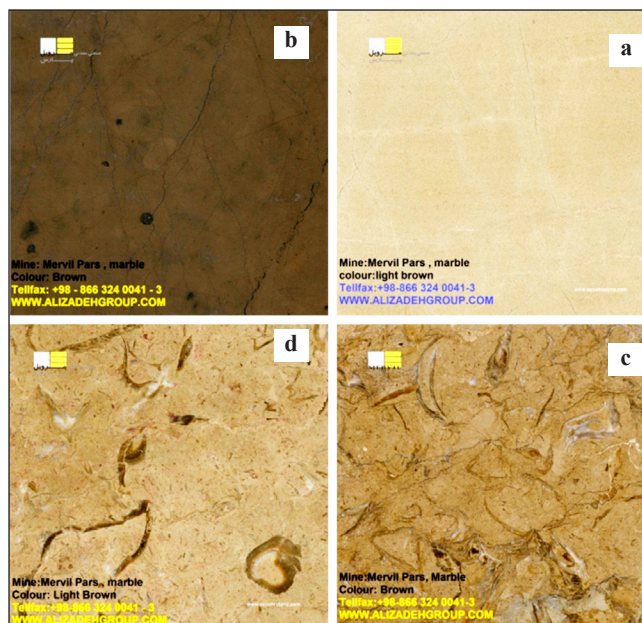
بر پایه آنالیزهایی بر روی انواع این سنگ‌ها انجام شده است، در رده سنگ‌های مقاوم در برابر هوازدگی فیزیکی و به نسبت مقاوم در برابر هوازدگی شیمیایی قرار می‌گیرند. با توجه به این که بازار برش و فرآوری سنگ‌های تزئینی به سمت برش با دستگاه اره و اندازه‌های بزرگ رفته است، اسلب این نوع سنگ برای فراوری نهایی به توری و رزین نیاز ندارد، و رنگ تیره آن سبب شده است سنگ تولیدی معدن، نسبت به مرمریت‌های مشابه برتری شایان توجهی داشته باشد. یادآوری می‌شود که مورد مصرف این سنگ بر پایه خواسته بازار در داخل ساختمان به عنوان سنگ کف پوش و در محوطه‌های باز قابل استفاده است ولی به دلیل جنس سنگ و همچنین جذب آب پایین برای استفاده در نمای ساختمان توصیه نمی‌شود. به این ترتیب تولید بلوک‌های بزرگ از سنگ سالم یکی از هدف‌های اصلی این پژوهش بوده است.

سری راور یک واحد سنگ‌چینه‌ای متشکل از آمیزه‌ای از ماسه‌سنگ سرخ‌رنگ، سنگ‌های تبخیری، دولومیت، سنگ آهک تیره‌رنگ و سنگ‌های آتشفشانی مافیک و فلسیک است که به ویژه در جنوب شهرستان راور به گونه‌ای دیاپیرمانند در اطراف گسل‌ها به سطح زمین رسیده است و به همین رو در برگیرنده سنگ‌هایی به سن متفاوت است (آقاناتی، ۱۳۸۹). توالی کرتاسه زیرین گستره از کهن به نو شامل سنگ‌های آواری (ماسه‌سنگ و گنگومرا) به رنگ سرخ، یک واحد مارن گچی و گچ، یک واحد سنگ آهک خاکستری رنگ متوسط تا سبتر لایه و یک واحد مارن و شیل است (مجیدی‌فرد و قاسمی، ۱۴۰۲). بنا بر نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ راور (حاج‌ملاعلی، ۱۳۷۴)، بالاترین بخش توالی کرتاسه در ناودیس چهارطاق شامل سنگ آهک خاکستری رنگ، سنگ آهک شیلی و شیل کربناته است که بر روی آن یک سری سنگ آهک بیودتریتیک، شیل کربناته و مارن سرخ‌رنگ قرار گرفته است. بنا بر نقشه یادشده، معدن ملیکا از سنگ آهک خاکستری کرتاسه بالا (K21) استخراج می‌شود، اما بنا بر نقشه ۱:۱۰۰,۰۰۰ شمشیرآباد (مجیدی‌فرد و قاسمی، ۱۴۰۲) واحد یادشده به کرتاسه پایینی (K11) تعلق دارد (شکل ۱). مطالعات دیرینه‌شناسی این پژوهش نشان می‌دهد نمونه‌های برداشت شده از معدن سن‌های پایان کرتاسه پیشین و آغاز کرتاسه پسین (سنومانین پیشین) را نشان می‌دهند.

از دیدگاه ساختاری، بخش جنوبی بلوک طبس که گستره معدن در آن قرار دارد، بین دو گسل نایبند در خاور و گسل کوه‌بان در باختر قرار گرفته است. واحدهای مزوزوییک گستره بین این دو گسل ساختارهای چین‌خورده با روند عمومی شمالی-جنوبی تا شمال‌باختری-جنوب‌خاوری از خود نشان می‌دهند. به نظر می‌رسد سازندهای تبخیری ژوراسیک و نوپروتروزوییک (هم‌ارز سری هرمز) به عنوان سطح جدایش (detachment) این چین‌ها عمل کرده باشند.

۲- روش پژوهش

در آغاز لازم است به اصطلاحات مورد استفاده برای توصیف نوع سنگ‌ها و دسته‌بندی آن‌ها در صنعت سنگ اشاره شود. بسیاری از نام‌هایی که در صنعت



شکل ۲- چهار سورت سنگ‌های صیقل خورده معدن مرمریت نسکافه‌ای ملیکا. نمونه‌ها به ترتیب به پله‌های معین زیر تعلق دارند: a) پله ۴، b) پله ۳، c) پله ۲ و d) پله ۱.

Figure 2. Four types of the polished stones from the Melika limestone quarry. The samples belong to the following specific steps in the mine respectively: a) Step 4, b) Step 3, c) Step 2, and d) Step 1.

برداشت‌های میدانی این پژوهش به مطالعه و نمونه‌برداری واحدهای سنگی کرتاسه و برداشت درزه‌ها و ناپوستگی‌های موجود در گستره معدن و پیرامون آن اختصاص داشت.

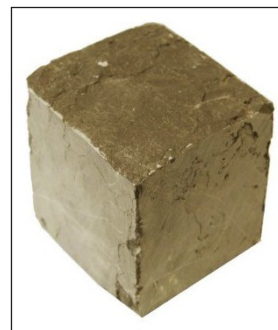
۲-۱- نمونه‌برداری

در بخش نمونه‌برداری برای مطالعات کیفیت مکانیکی، سنگ‌های تراش خورده در

جدول ۱- نتیجه آزمایش ASTM بر روی سنگ معدن ملیکا.

Table 1. The ASTM test results on the Melika mine rock sample.

Value	Unit	Test
2.685	gr/cm ³	dry density
2.698	gr/cm ³	saturated density
857	kg/cm ²	dry compressive strength
845	kg/cm ²	saturated compressive strength
0.3	%	Absorbed water



شکل ۳- نمونه مکعبی سنگ معدن ملیکا برای انجام آزمایشات مورد نیاز. اندازه هر ضلع مکعب ۱۰ سانتی‌متر است.

Figure 3. A cubic sample from the Melika mine cut for performing the required tests. The size of each side of the cube is 10 centimeters.

برآورد قیمت و زمان‌بندی را به اپراتورهای استخراج ارایه می‌دهد (شکل ۵-ا). حفر چاهک‌های (گمانه‌های) اکتشافی به کمک دستگاه راسول (دستگاه کوچکی که با ضربه و دوران و بدون آب، حفاری‌های ۹۰ سانتی‌متری انجام می‌دهد) نیز با ثبت ویژگی‌ها حین حفاری، همچون تغییرات رنگ و جنس سنگ و کیفیت سنگ با ژرفا به هنگام حفاری و اندازه‌گیری سرعت پیشروی مته می‌تواند کمک بزرگی برای تصمیم‌گیری و نتیجه‌گیری نهایی در زمینه شرایط زمین‌شناسی و ساختاری گستره باشد (شکل ۵-ب). از حفاری با دستگاه راسول در فاز استخراجی برای عبور دادن سیم برش نیز استفاده می‌شود.

طبق برداشت‌های صورت گرفته، تکه‌های بالا آمده حین حفاری در ژرفاهای ۰ تا ۱۰ متر بدون شواهد فسیلی و با رنگ روشن و در ژرفای ۱۰ تا ۱۶ متری، با پر رنگ شدن تدریجی رنگ سنگ و شواهد پراکنده فسیل همراه می‌شوند و سرعت حفاری نیز کاهش پیدا می‌کند. در ژرفای ۱۶ تا ۲۵ متری، رنگ سنگ به سمت تیره و کدر می‌رود و سرعت حفاری به صورت تقریبی و چشمی به یک سوم دوره ابتدایی حفاری می‌رسد که البته این کاهش سرعت نه تنها نشان از افزایش فشردگی و سختی سنگ می‌باشد، بلکه نتیجه افزایش ژرفای حفاری و کاهش توان مته حفاری در ژرفاهای پایین‌تر نیز هست، که در نتیجه و در نظر گرفتن عامل کاهش توان پمپ مته حفاری کاهش سرعت به نسبت سنگ‌شناسی گستره برابر با نصف سرعت حفاری لایه‌های بالایی است که نشان دهنده افزایش سلامت هرچه بیشتر سنگ از نظر درزه و ترک در ژرفاهای پایین‌تر می‌باشد.

۲-۴- حفاری و مغزه‌گیری

مغزه‌گیری یکی از مراحل مهم و اساسی در مرحله اکتشافی در معدن است که اطلاعات ارزشمندی در زمینه میزان و حجم سنگ موجود در محدوده معدنی به پیمانکار ارایه می‌دهد. این نوع حفاری با استفاده از یک نقشه حفاری مناسب و پیشنهاد یک ژرفای بهینه برای حفاری، که از اطلاعات نقشه زمین‌شناسی و نقشه‌برداری به دست می‌آید، شکستگی‌ها و درزه‌هایی که در سطح زمین و درون ترانشه در مرحله پیش پدیدار شده‌اند را نیز پی‌جویی کرده و کلیات هندسه و روند و جهت درزه‌ها و شکستگی‌های ساختارهای گستره مورد پژوهش آشکار می‌سازد.

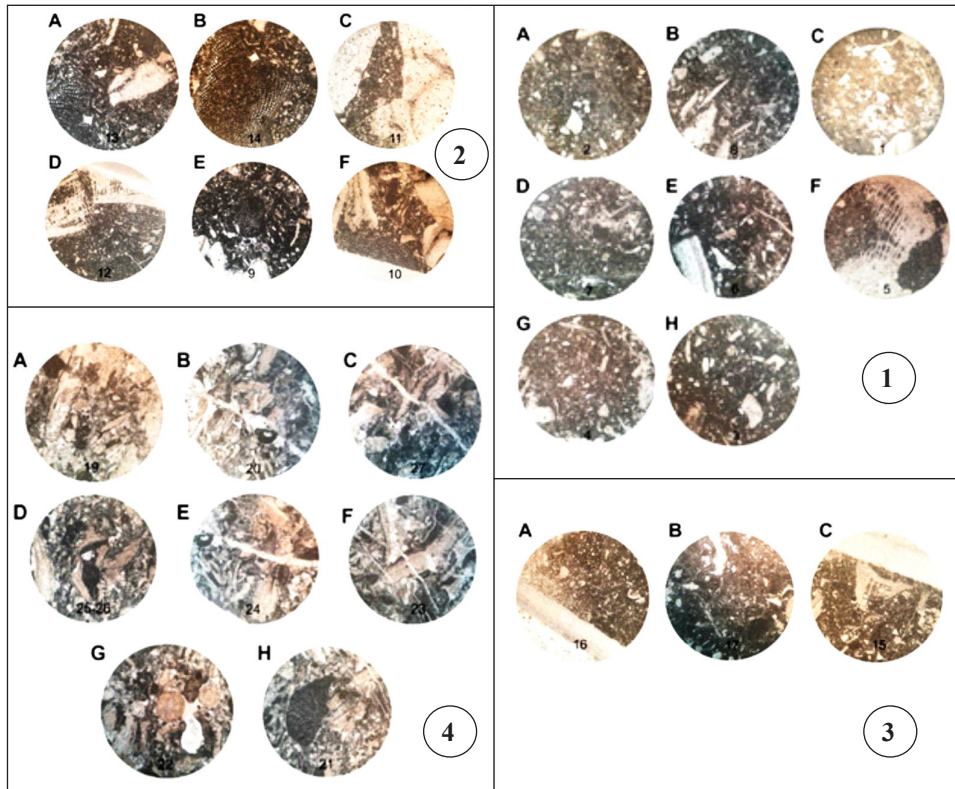
۲-۲- تهیه مقطع نازک از نمونه بلوک‌ها و مطالعه دگرسانی و دیرینه‌شناسی

چهار نمونه از سنگ آهک مرمریتی معدن برای مطالعات دیرینه‌شناسی برداشت و مورد مطالعه دیرینه‌شناسی و سنگ‌شناسی قرار گرفت (شکل ۴). همان گونه که در برخی نمونه‌های دستی مشاهده می‌شد، در چند برش میکروسکوپی، رودیست‌ها و خرده‌های صدف دوکفه‌ای‌های دیگر به فراوانی مشاهده می‌شوند. رخساره میکروسکوپی این سنگ‌ها بیشتر بیومیکریتی و گاهی بیواسپاریتی است و میکروفسیل‌های همه نمونه‌ها به سن اوایل کرتاسه پسین (سنومانین پیشین) اشاره دارند.

- 1) Microfacies: Biomicrite
Fossils: *Nezzazata* sp., *Cyclammina* sp., *Cuneolina* sp., Miliolidae, Rudist debris, Lamelibranchia debris, *Acicularia* sp., *Cymopolia* sp.
Age: Late Cretaceous (Early Cenomanian)
- 2) Microfacies: Biomicrite in parts poorly washed micrite
Fossils: *Nautiloculina oolithica*, *Orbitolina* spp., *Cuneolina* sp., Textularitea, Rudist debris, *Acicularia* sp.
Age: Late cretaceous (Early Cenomanian)
- 3) Microfacies: Biomicrite
Fossils: *Nezzazata* sp., *Nummoloculina* sp., *Cuneolina* sp., Textularidea, Miliolitea, Rudist debris, Lamelibranchia debris
Age: Late Cretaceous (Early Cenomanian)
- 4) Microfacies: poorly washed biosparite with sparry calcite veins
Fossils: *Nodosaria* sp., Miliolidae, Rudist debris Lamelibranchia debris, Crinoid debris, *Solenopora* sp.
Age: Late Cretaceous (Early Cenomanian)

۲-۳- حفر چاهک و ترانشه زنی

انجام این عملیات در معدن سنگ سبب شناخت درزه‌ها و شکستگی‌ها می‌شود و برداشت درزه‌ها و شکستگی‌ها را دقیق‌تر و آسان‌تر می‌کند و همچنین نمایی کلی از الگوی عملیات معدنی به پیمانکار می‌دهد و زمان و کلیات هزینه‌ای تقریبی برای



شکل ۴- تصویرهای میکروسکوپی مقاطع نازک تهیه شده از ۴ نمونه معدن.

Figure 4. Microscopic images of the thin-sections prepared from the 4 samples in the mine.

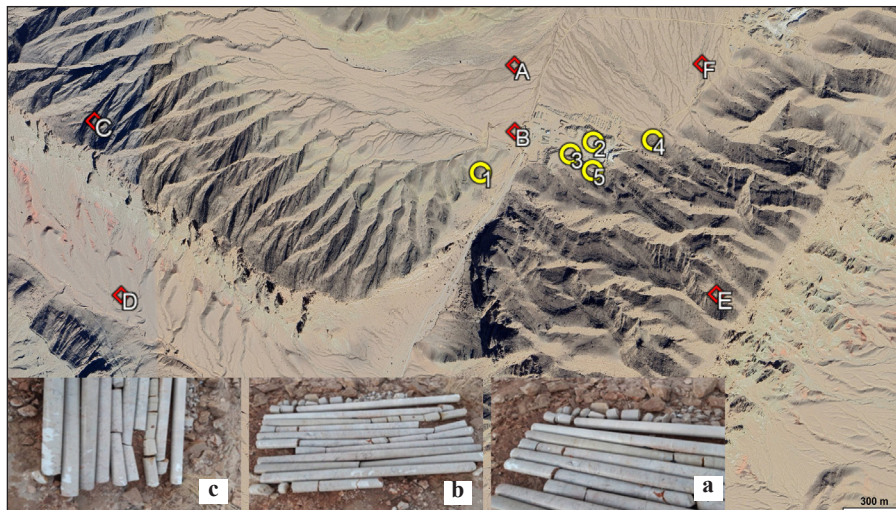


شکل ۵- a) حفر ترانشه به کمک سیم برش الماسه و بیل مکانیکی. b) حفاری اکتشافی عمودی در سنگ معدن با دریل واگن (دستگاه راسول).

Figure 5- a) Digging a trench using a diamond wire cutter and an excavator. b) Vertical exploratory drilling in ore with a wagon drill (Rasol rig).

مطالعات دورسنجی بر روی تصویر ماهواره‌ای گستره پیرامون معدن یک دسته درزه اصلی با راستای عمومی ۰۳۲ درجه (۲۱۲ درجه) و شیب زیاد را آشکار ساخت (شکل ۷). فاصله‌داری این درزه‌ها بر روی تصویر بین ۳/۲ تا ۴/۰ متر متغیر است. برخورد این درزه‌های سامانه‌ای با سطح لایه‌بندی سنگ آهک کرتاسه بلوک‌هایی طبیعی را ایجاد کرده است.

نقشه حفاری اکتشافی در معدن ملیکا در شکل ۶ به صورت نقطه‌های ۱ تا ۵ نمایش داده شده است. ژرفای پیشنهادی برای این حفاری‌ها ۱۰۰ متر و با زاویه عمودی بوده است. طبق شواهد و برداشت‌های انجام شده، گستره معدن دارای ۳ دسته شکستگی اصلی می‌باشد که در ادامه تلاش شده است با برداشت‌های اطلاعات درزه‌ها، تفسیر یادشده مورد ارزیابی قرار گیرند.



شکل ۶- نقشه نقطه‌ها (۱ تا ۵) و مغزه‌های حفاری شده در معدن ملیکا به همراه مغزه‌های استخراجی از این نقطه‌ها. a، b و c به ترتیب مغزه‌های خارج شده از گمانه‌های ۱ تا ۳ را نمایش می‌دهند. نشانه‌های A تا F محدوده پروانه معدن را نشان می‌دهند.

Figure 6. Map showing the points (1 to 5) and cores drilled in the Melika mine along with the cores extracted from these points. a, b and c show the cores extracted from boreholes 1 to 3, respectively. The symbols A to F indicate the mine's license area.



شکل ۷- راستای درزه‌های اصلی موجود در گستره معدن با راستای عمومی ۰۳۲ درجه و شیب زیاد (پیکان‌های زرد رنگ). پله‌های معدن (پیکان‌های صورتی رنگ) به تدریج با جهت درزه‌های تطبیق داده شده‌اند.

Figure 7. The direction of the main joints in the mine area with a general direction of 032 degrees and a steep slope (yellow arrows). The mine steps (pink arrows) are gradually aligned with the direction of the Joints.

پس از تعیین جهت مناسب برای بهره‌برداری از معدن، بلوک‌های مادر تعیین و برش داده می‌شوند. بلوک مادر بسته به میزان سلامت سنگ، در ابعاد ۱۲×۱۲×۶ یا ۱۵×۱۵×۶ متر برش داده می‌شود، عدد کوچک‌تر در ابعاد یادشده ارتفاع بلوک مادر را نشان می‌دهد. سپس درون بلوک مادر، تیغه‌ها برش داده می‌شوند، این تیغه‌ها که با وسط‌بری تولید می‌شوند، ابعاد ۱/۸×۱۲×۶ دارند؛ به این ترتیب هر بلوک مادر به ۶ یا ۷ تیغه تبدیل می‌شود.

۲-۵- تهیه یک یا چند کوپ آزمایشی

این مرحله از مطالعه به تقریب در آغاز عملیات استخراج و به منظور شناسایی جهت‌های مناسب برای برش بلوک‌ها صورت می‌گیرد. هنگام تهیه کوپ‌های آزمایشی بخشی از معدن به صورت مثلثی برش داده شده و جهت‌های گوناگون برای شناسایی بهترین نتیجه کوپ‌دهی ارزیابی می‌شود (شکل ۸). به خاطر شکل مثلثی، به این بخش از برش معدن لچکی نیز گفته می‌شود.



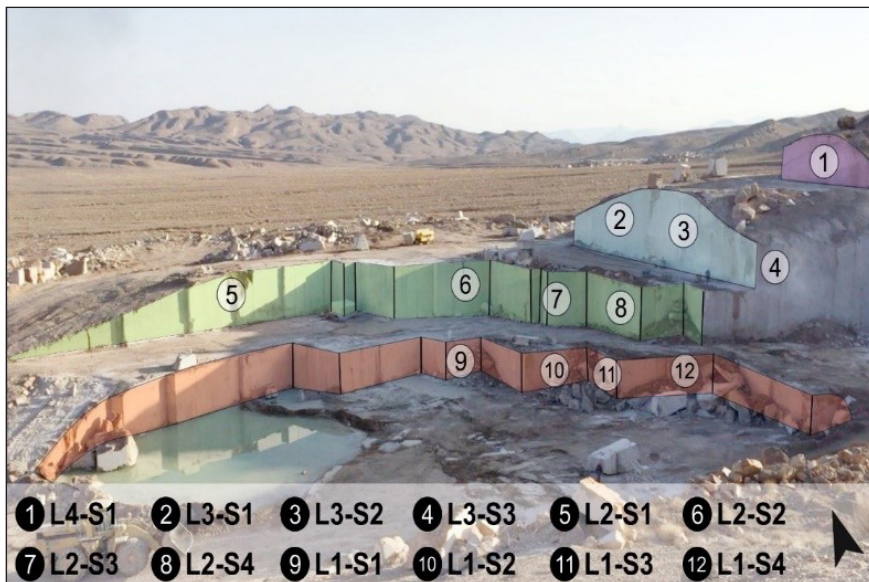
شکل ۸- تهیه چند کوب آزمایشی در یک برش لچکی از معدن.

Figure 8. Preparation of some test coups in a triangular section of the mine.

۳- نتایج و بررسی ساختاری گستره معدن

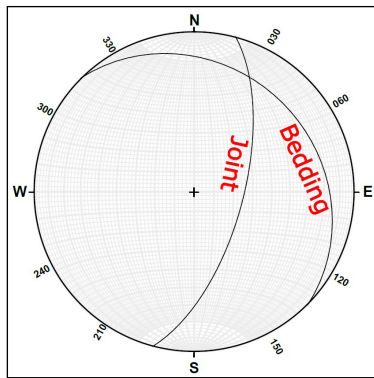
لایه‌بندی به ترتیب ۵/۳ و ۷/۰ متر برآورد شده است. فاصله‌داری درزه‌های برداشت شده اندکی از عدد اندازه‌گیری شده بر روی تصویر ماهواره‌ای (۳/۲ تا ۴/۰ متر) بیشتر است. زاویه بین سطح لایه‌بندی با دسته درزه اصلی بر روی استریوگرام ۵۵/۵ درجه اندازه‌گیری شد. غیر از روش برداشت میدانی، روش‌ها و فناوری‌های نوین برای شناسایی سطح‌های ضعف و ناپیوستگی در سنگ‌های ساختمانی نیز چندی است در بهینه‌سازی برداشت سنگ‌های ساختمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد (e.g., Levitskyi, 2012; Elci and Turk, 2014; Deliormanli et al., 2014; Elkarmoty et al., 2017; Levitskyi et al., 2018).

افزون بر مطالعات دورسنجی و برداشت‌های میدانی پیش از بهره‌برداری از معدن سنگ ساختمانی، لازم است مطالعه ساختاری پس از باز شدن سینه کار نیز در برش‌های معدن صورت پذیرد. مهم‌ترین پدیده‌های ساختاری مورد برداشت عبارتند از: درزه‌ها، شکستگی‌ها، لایه‌بندی و گسل‌ها. به این ترتیب هندسه و مشخصات دقیق‌تر شبکه ناپیوستگی در محدود توده سنگ واکاوی و مدل خواهد شد. به منظور برداشت سامانه‌ای این ناپیوستگی‌ها در معدن ملیکا، ایستگاه‌هایی در بخش‌های گوناگون معدن طراحی شد (شکل ۹). اطلاعات برداشت شده در ۱۲ ایستگاه میانگین‌گیری و در جدول ۲ و شکل ۱۰ خلاصه شده است. فاصله‌داری (spacing) متوسط درزه‌ها و



شکل ۹- دوازده ایستگاه برداشت درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها در سه دیواره معدن. L ها نشان‌دهنده تراز برداشت و S ها شماره ایستگاه در آن تراز هستند. برداشت سنگ از ترازهای معدن به ترتیب از بالا به پایین (L4 به L1) صورت می‌گیرد.

Figure 9. Twelve stations for surveying of the joints and discontinuities in three mine walls (benches). The Ls indicate the extraction level and the Ss are the station number at that level. The rock is extracted from the mine levels in order from the top to the bottom (L4 to L1).



شکل ۱۰- استریوگرام وضعیت درزه‌ها و لایه‌بندی در معدن ملیکا.

Figure 10. Stereogram of the attitudes of the joints and layering in the Melika mine.

جدول ۲- دو دسته ناپیوستگی اصلی در سنگ‌های آهکی ستبر لایه کرتاسه معدن ملیکا. J1 دسته درزه اصلی و J2 ناپیوستگی لایه‌بندی است.

Table 2. Two main discontinuities in the thick-bedded Cretaceous limestones of the Melika mine. J1 is the main joint set and J2 is the layering discontinuity.

J ₂	J ₁	Discontinuity set
135,23NE	015,65SE	strike, dip
7.0 m	5.3 m	spacing

۴- مدل‌سازی و بحث

را به صورت پراکندگی فضایی ناپیوستگی‌های بین بلوک‌ها دارد و اطلاعات لازم را در مورد پراکندگی درزه‌ها و ارتباط آن‌ها با یکدیگر در توده سنگ بکر را با توجه به حجم و شکل بلوک‌ها به کاربر ارائه می‌دهد. درزه‌هایی که به صورت رویه‌های مستوی در نظر گرفته می‌شوند را می‌توان به صورت ریاضی در یک سامانه مختصات مکانی به صورت یک صفحه مدل کرد. اطلاعات مورد نیاز برای این فرایند را به راحتی می‌توان از معدن یا گستره عملیات اکتشافی با انجام برداشت‌های زمین‌شناسی به دست آورد.

برای ساختن مدل بر پایه یک الگوریتم عددی، ارزیابی هر بلوک با مدل‌سازی موزاییکی انجام پذیرفت. اندازه و کسل‌ها نشان دهنده دقت مدل است و طول هر ضلع و کسل (۲ یا ۳ متر) دقت مدل را برای استفاده در معدن نشان می‌دهد و تعداد هر مقطع (سینه کار) برای پیشروی در معدن وابسته به تعداد و کسل‌های انتخاب شده است. مدت زمان محاسبات برنامه رایانه‌ای بسیار وابسته به تعداد و اندازه و کسل‌های تحت بررسی است که با تعداد مکعبات و اندازه و کسل‌ها افزایش و یا کاهش پیدا می‌کند. برنامه در روند مدل‌سازی، در کنار مقطع‌های دوبعدی پیرامون مدل، یک بانک اطلاعات درست می‌کند که می‌تواند این مقطع‌ها را به مدل سه‌بعدی تبدیل کند. همچنین نرم‌افزار به کاربر اجازه می‌دهد بخش‌بندی مدل را آزادانه انجام دهد و با چرخش کل مدل، فاصله و جهت‌گیری درزه‌ها را مشاهده نماید. به این ترتیب کاربر می‌تواند شرایط تولید معدن را از چند چشم‌انداز گوناگون ممکن بررسی کند و ایده‌ای در مورد پراکندگی ناپیوستگی‌های موثر در معدن پیدا کند و ابعاد و شکل بلوک‌های تولیدی را پیش‌بینی نماید. برای ارزیابی اولیه پیشنهاد می‌شود از تعداد کم و کسل‌ها برای آغاز مدل‌سازی استفاده شود.

۴-۱- مدل‌سازی برای معدن

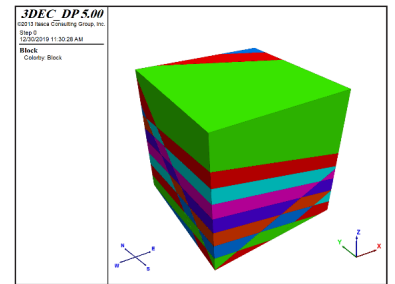
مدل سه‌بعدی بخشی از معدن سنگ آهک مرمریتی ملیکا با ابعاد ۵۰×۵۱×۵۰ متر در نرم‌افزار 3DEC ساخته شد و در مرحله نخست، مشخصات ناپیوستگی‌های گستره به مدل وارد شد (شکل ۱۱). در مرحله بعد با توجه به بلوک‌های مورد نظر، بلوک‌های استخراجی در ابعاد (۲×۳×۲) متر و حجم ۱۲ متر مکعب بر روی مدل پیاده‌سازی شدند. میزان تناژ استخراجی، کل ذخیره این بخش مدل شده از معدن و تمام مشخصات بلوک ساخته شده بر پایه مشخصات توده سنگ در جدول ۳ آورده شده است.

مدل‌سازی صورت گرفته در توده سنگ بکر معدن به منظور بهینه‌سازی استخراج بلوک‌ها بر پایه در نظرگیری ناپیوستگی‌ها است و برای آن از نرم‌افزار 3DEC (Itasca Consulting Group, Inc., 2019) استفاده شده است. برای مدل‌سازی، هر دو ناپیوستگی (درزه و لایه‌بندی) در یک توده معکبی شکل فعال معدنی انتخاب شد و به عنوان اولین گام برای بازسازی الگوی ناپیوستگی‌ها و ترسیم نقشه‌های مدل در نظر گرفته شد. حجم و کسل انتخاب شده برای مدل ۱۲ متر مکعب است (۲×۳×۲ متر). و کسل (voxel) معادل سه‌بعدی پیکسل است؛ هر و کسل در فضا حجم معینی دارد. اندازه و کسل‌ها نشان دهنده دقت مدل است. و کسل‌ها در یک حجم با اندازه ۵۰×۵۱×۵۰ (به ترتیب در جهت‌های X، Y و Z مدل هم ارز با جهت‌های خاور، شمال و بالا) متری طراحی شدند. به این ترتیب حجم کل مدل ۱۲۷،۵۰۰ متر مکعب است. برای نمونه برای یک بلوک مادر که دارای ابعاد ۱۲×۱۲×۶ متر و حجم ۸۶۴ متر مکعب است، می‌توان ۷۲ و کسل را در یک حجم قرار داد. این مدل شامل دو ناپیوستگی است که بر پایه اندازه‌گیری جهت، هندسه فضایی و فاصله‌داری (spacing) آن‌ها تهیه شده است. مدل‌های خروجی نشان می‌دهند که تقسیم‌بندی اورتوگونال بر سامانه ناپیوستگی‌ها حاکم است، هر چند که برخی از ناپیوستگی‌ها دارای انحرافات در جهت‌های گوناگون می‌باشند. به همین روی توده سنگ مدل شده شامل یک سری بلوک‌های سنگی ریز نیز می‌شوند که دارای گوشه‌هایی با زاویه حاده هستند. بر پایه مدل، میانگین وزن بلوک سنگ در حدود ۲۰ تن است و بزرگ‌ترین بلوک سنگ مدل شده بیشتر از میانگین بلوک‌ها حجم دارد که در قسمت SSW مدل قرار گرفته است. به صورت خلاصه، حجم کوچک برخی بلوک‌های سنگ و بخش‌هایی که هندسه ارتوگونالی ندارند را می‌توان حاصل از مشکلات حین استخراج دانست که سبب کاهش میزان کیفیت بلوک‌ها در قسمت‌هایی از مدل می‌شود. این معدن با توجه به فاصله مناسب موجود بین دو دسته ناپیوستگی برای بهینه‌سازی استخراج مدل‌سازی گردید. لایه‌های ستبر سنگ آهک مرمریتی با الگوی درزه ارتوگونال تقسیم‌بندی شد و مسیر حفاری به طول دقیق مشخص شد تا از قطع کردن بلوک‌بندی داخل دیواره‌ها با در نظر گرفتن جهت حفاری و برش، که به موازات ناپیوستگی‌ها است، خودداری شود. در نتیجه به کمک این مدل سه‌بعدی، می‌توان بهترین صفحه‌ها را برای اقدام واقعی و نتیجه‌بخش در استخراج بلوک‌های اقتصادی تعیین کرد. نرم‌افزار 3DEC توانایی مدل‌سازی و ارزیابی داده‌های هندسی

جدول ۳- مشخصات بلوک طراحی شده بر پایه مشخصات توده سنگ برای گستره معدن.

Table 3. Specifications of the planned blocks based on the rock mass specifications for the mine area.

Property	Value
Model's dimension (m ³)	127,500
Block's dimension (m ³)	12
Blocks' density (ton/m ³)	2.68
(ton) Reserve	341,700
Number of blocks (n)	10,625
Annual production rate (APR) (ton)	3,000
Consumable life of the mine based on the APR (year)	114
Tonnage of the blocks (ton)	32.2
Number of blocks mined per year based on annual tonnage (n)	93.3
Annual blocks mined based on tonnage for the first decade (n)	933
Annual blocks mined based on tonnage for the first decade in east-west direction (n)	1037

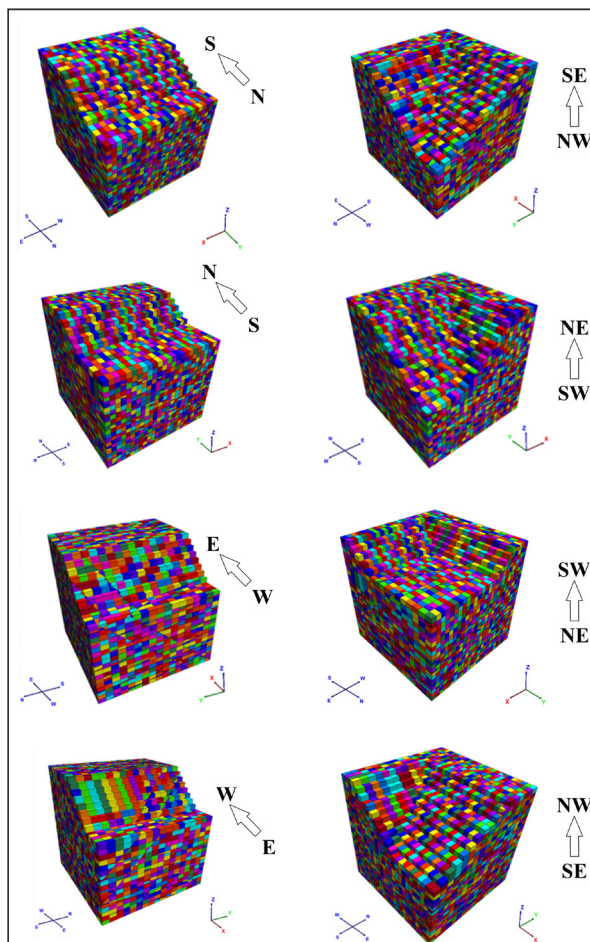


شکل ۱۱- مدل اولیه سه‌بعدی بلوک اصلی و دو دسته ناپیوستگی موجود در آن.

Figure 11. The initial 3D model of the main block in the main, and the two discontinuities cutting across the block.

نرم‌افزار 3DEC این قابلیت را دارد که پیشروی برداشت از معدن را در جهت‌های گوناگون مدل‌سازی کند و با شمارش بلوک‌های سالم استخراج شده در هر یک از جهت‌ها، میزان بازده برداشت از معدن در آن جهت را به صورت نسبت بلوک‌های سالم به کل بلوک‌های برداشت شده، محاسبه نماید. شکل ۱۲ وضعیت پیشروی معدن در بلوک مدل را در ۸ جهت اصلی نمایش می‌دهد.

هدف از استخراج بلوک‌های قواره شش وجه برش (ابعادی)، به دست آوردن بلوک‌هایی با بیشترین میزان سلامت برای تولید بیشترین میزان اسلب می‌باشد. در بسیاری از موارد به دلیل انحراف ناپیوستگی‌ها، به راحتی نمی‌توان میزان زیادی بلوک سالم را استخراج کرد زیرا در بیشتر معادن، در اثر عملیات حفاری، برداشته شدن فشار روباره و عملیات برش کاری، در بلوک‌های برجا شکستگی‌هایی به وجود می‌آید.



شکل ۱۲- مدل سه‌بعدی بلوک نهایی استخراج شده در ۸ جهت اصلی پیشروی معدن کاری.

Figure 12. 3D model of the final extracted block in the 8 main directions of the mining progression.

۲-۴- قواره کردن بلوک‌های استخراجی

بازدهی بخش یادشده، با توجه به جهت‌های گوناگون پیشروی استخراج محاسبه و در جدول ۴ خلاصه شده است. بیشترین میزان بازدهی (۱۰۰٪) به جهت پیشروی جنوب به شمال و کمترین آن (۷۷٪) به جهت خاور به باختر مربوط می‌شود. بررسی جهت بهینه استخراج در جهت‌های مختلف این امکان را فراهم می‌سازد که محل احداث رمپ‌ها و تاسیسات در واحدهای معدنی با آزادی عمل بیشتری انتخاب گردند.

نکته مهمی که باید در این ارزیابی در نظر داشت آن است که جهت شیب توپوگرافی اولیه معدن نیز نقش بسیار مهمی در آسانی برداشت و تعیین جهت پیشروی دارد (e.g., Elkarmoty et al., 2017). برای نمونه در معدن ملیکا، با توجه به شکل ناودیسی لایه‌های کرتاسه، شیب عمومی توپوگرافی به سوی شمال است، اگرچه برخی آبراه‌های فرسایش یافته در لایه‌ها، شیب‌های موضعی نیز در دسترس معدن کار قرار می‌دهد. با این ترتیب، اگر شیب توپوگرافی، جهت پیشروی از شمال به جنوب را القا کند، درصد بازده معدن به ۸۰ درصد می‌رسد. با این حال جهت پیشروی تجربی کنونی معدن از شمال باختر به جنوب خاور است که یکی از کمترین بازده‌ها را در خود دارد. نرم‌افزار 3DEC همچنین این امکان را می‌دهد که میزان بازدهی معدن را با تغییر ژرفای استخراج برآورد نمود. برای آزمون این روش، بازدهی معدن ملیکا در ژرفاهای ۶، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۲ و ۲۵ متری برای جهت‌های باختر به خاور و خاور به باختر مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱۵).

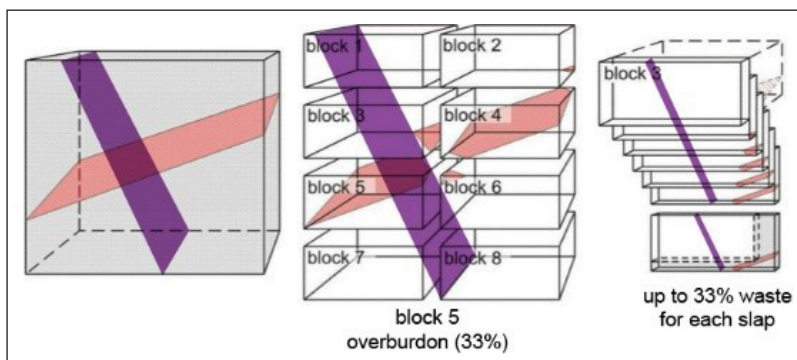
در پایان، یادآوری می‌شود با توجه به عدم قطعیت وضعیت زمین‌شناسی و هندسه ناپیوستگی‌ها از یک سو، و ناهمگنی ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌ها، برای تعیین راستای بهینه برش بهتر است هر پله معدنی جداگانه ارزیابی شود تا نتایج دقیق‌تر باشد. مدل‌سازی مقاله با فرض سامانه‌مند (سیستماتیک) بودن درزه‌ها و تداوم آن‌ها در سراسر محدوده معدن صورت گرفته است و از این دیدگاه دارای محدودیت است.

هر بلوک سنگ که دارای شکستگی است می‌بایست به آرامی حمل شود تا بدون آسیب دیدن بتوان آن را به بلوکی با حجم بزرگ و بدون شکستگی تبدیل کرد و با کاستن از میزان باطله مربوط به حفاری و استخراج، یک محصول بدون نقص با شرایط مطلوب بازدهی را تولید کرد. برای بهینه‌سازی در قواره کردن سنگ خام، بیشتر جنبه اقتصادی آن در نظر گرفته می‌شود و با توجه به این که فرایند یادشده به طور مشخص به اقدامات کارگران معدن باز می‌گردد، باید در این روند، چیدمان بلوک‌ها در کف معدن و قواره کردن بلوک در جهت سالم سنگ مورد توجه قرار گیرد. در این مرحله از استخراج، همچنین هزینه سیم الماسه برش و هزینه قواره کردن دلخواه مشتری برای تولید بیشترین تعداد بلوک‌های بدون درز و ترک و با شش وجه (به اصطلاح معدن‌کاران، قوطی کبریتی) نیز در قیمت تمام شده منظور گردد. در نتیجه برای ارزیابی اسلب‌های استخراجی، با کمک مدل‌سازی و دیگر اطلاعات ارایه شده در این بخش، می‌توان میزان کیفیت و تعداد اسلب‌ها را افزایش داد و برنامه‌ای را تدوین و آن را در حین نقشه‌برداری ضمن استخراج به کار بست. از آن جا که هدف اصلی مراحل پیشروی معدن و روند فرآوری بیشتر در راستای اقتصادی بودن استخراج است، باید با توجه به اطلاعات به دست آمده، قواره کردن بلوک‌ها به صورت آگاهانه و بلافاصله پس از استخراج بلوک طبق مراحل روتین صورت پذیرد (شکل ۱۳). شکل ۱۴ چشم‌انداز فرضی میزان دورریز در بلوک‌های گوناگون یک بلوک خام را نشان می‌دهد. انتخاب جهت‌های مناسب برای تهیه بلوک‌ها با سیم برش و استفاده از سطح ضعف درزه‌ها برای برش با سیم می‌تواند بر کاهش زمان استخراج و کاهش مصرف انرژی در معدن اثرگذار باشد (e.g., Mikaeil et al., 2018). با توجه به مدل‌سازی انجام شده برای یک بخش از معدن ملیکا (شکل ۱۲)، میزان



شکل ۱۳- a تا c به ترتیب مرحله‌های روتین خواباندن بلوک، طراحی قواره‌ها و تبدیل بلوک به قواره را نشان می‌دهند.

Figure 13- a to c show the routine steps of laying the block, designing the blocks, and converting the block into sub-blocks, respectively.



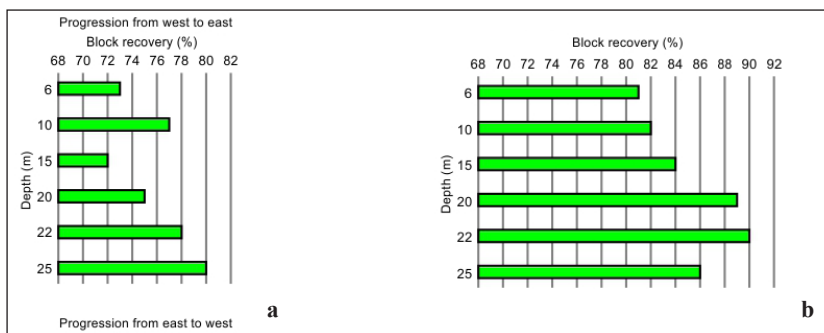
شکل ۱۴- شکل نمادین برای نمایش میزان دورریز سنگ در یک از بلوک‌های فرعی از یک بلوک مادر سنگ ساختمانی که با دو ناپیوستگی اصلی قطع شده است. بلوک ۵ بیشترین دورریز را دارد و بلوک ۳ بسته به محل برش اسلب می‌تواند تا ۳۳٪ دورریز داشته باشد (Mosch et al., 2011).

Figure 14. Schematic figure to show the amount of stone waste in one of the sub-blocks of a parent building stone block that is cut by two major discontinuities. Block 5 has the highest waste and block 3 can have up to 33% waste depending on the location of the slab cut (Mosch et al., 2011).

جدول ۴- میزان بازدهی بلوک سه‌بعدی مدل به ازای جهت پیشروی در جهت‌های اصلی به ترتیب بازده.

Table 4. Efficiency of the three-dimensional block model per direction of progression in the main directions in order of efficiency.

Yield %	Mining direction
100	South to North
99	Southeast to Northwest
94	Southwest to Northeast
89	West to East
81	Northeast to Southwest
80	North to South
78	Northwest to Southeast
77	East to west



شکل ۱۵- تغییرات میزان بازیابی معدن با تغییرات ژرفا در دو جهت استخراج باختر به خاور (بالا) و خاور به باختر (پایین).

Figure 15. Variations in the mine recovery rate with changes in depth in two mining directions: west to east (top) and east to west (bottom).

را در اختیار قرار می‌دهد. برداشت ناپیوستگی‌های معدن و استفاده از داده‌ها در مدل نرم‌افزاری محیط 3DEC نتایج ارزشمندی را در زمینه ارزیابی روش‌های بهینه فرایند استخراج آشکار ساخت. خروجی‌های این مدل‌سازی آشکار ساخت جهت پیشروی معدن از جنوب به شمال و از شمال باختر به جنوب خاور به ترتیب در بردارنده بیشترین و کمترین درصد بازده است. با این وجود شیب توپوگرافی محلی معدن نیز در انتخاب جهت پیشروی نقش مهمی بازی می‌کند. مدل‌سازی با نرم‌افزار 3DEC همچنین نشان می‌دهد که با افزایش ژرفای برداشت، میزان بازیابی در ژرفاهای ۲۲ تا ۲۵ متری به بیشینه مقدار خود می‌رسد.

۵- نتیجه گیری

ویژگی‌های هندسه فضایی ناپیوستگی‌های طبیعی مانند درزه‌ها، گسل‌ها و لایه‌بندی اثر مهمی بر آسانی حفاری و برداشت از معدن‌های سنگ ساختمانی دارند و ارزیابی آن‌ها می‌تواند به بهینه‌سازی برداشت، کاهش دورریز (باطله) سنگ و تولید اقتصادی در معدن یاری برساند. ناپیوستگی‌های طبیعی اصلی و تعیین کننده در معدن سنگ مرمریت ملیکا شامل یک دسته درزه اصلی با شیب زیاد و سطح لایه‌بندی با شیب کم است. معدن در سنگ‌آهک متوسلا لایه تا توده‌ای کرتاسه در بخش جنوبی یک ناودیس قرار گرفته است. حفاری‌های اکتشافی و ایجاد ترانشه آزمایشی برای شناسایی بهتر کیفیت سنگ و وضعیت ناپیوستگی‌های توده سنگ اطلاعات مفیدی

کتابنگاری

- آقاباتی، ع.، ۱۳۸۹، زمین‌شناسی ایران. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، چاپ سوم، ۶۱۹ ص.
- الوان‌دارستانی، ر.، و کوهی‌اصفهان‌ی، و.، ۱۳۹۰، مطالعات درزه‌نگاری و بررسی‌های ژئومکانیکی در طراحی و استخراج معادن سنگ ساختمانی، مطالعه موردی: معدن مرمریت برد شیراز. فصلنامه علمی پژوهشی زمین و منابع واحد لاهیجان، سال چهارم، شماره اول، بهار ۱۳۹۰، ص ۱۱-۱۶.
- بصیری، م.، و پرتاشک، ا.، ۱۳۹۰، تحلیل ساختاری شکستگی‌های معادن و محدوده‌های اکتشافی سنگ‌های ساختمانی و تزئینی به منظور برآورد امکان استخراج. مجموعه مقالات سی‌امین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- حاج‌ملاعلی، ع.، ۱۳۷۴، نقشه زمین‌شناسی راور، مقیاس ۱:۱۰۰,۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- شفیعی، ش.، عبادی، م.، و ترکاشوند، م.، ۱۳۹۱، تحلیل ناپیوستگی‌ها در معادن سنگ ساختمانی و اهمیت آن در بهینه‌سازی استخراج (مطالعه موردی معدن سنگ ساختمانی سعیدی، کرمان). فصلنامه علمی علوم زمین، تابستان ۹۱، سال بیست و یکم، شماره ۸۴، ص ۸۹-۹۸. <https://doi.org/10.22071/gsj.2012.53961>.
- عطایی، م.، صالح‌آبادی، ه.، و رفیعی، ر.، ۱۴۰۰، تعیین جهت بهینه استخراج به منظور بهینه‌سازی کوپ دهی سنگ ساختمانی با استفاده از مدل سازی ناپیوستگی‌ها (مطالعه موردی معدن تراورتن کپول). فصلنامه علمی-پژوهشی انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، دوره ۱۴، شماره ۲، شهریور ۱۴۰۰، ص ۱۵-۲۹.
- قاسمی، م. ر.، ۱۳۸۷، پایه‌های زمین‌شناسی ساختمانی. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۳۲۰ ص.
- مجیدی‌فرد، م. ر.، و قاسمی، م. ر.، ۱۴۰۲، نقشه زمین‌شناسی شمشیرآباد، مقیاس ۱:۱۰۰,۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- میکائیل، ر.، ۱۳۹۰، ارایه سیستم طبقه‌بندی جدید برای ارزیابی قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی و بهینه‌سازی پارامترهای برش. رساله دکترا، دانشکده مهندسی معدن دانشگاه صنعتی شاهرود، ۲۲۷ ص.

References

- Aghanabati, A., 2010. *Geology of Iran. Geological Survey of Iran, Third Edition, 619 p. (In Persian).*
- Alvan-Darestani, R., and Kouhi-Esfahani, V., 2011. Joint studies and geomechanical investigations in the design and extraction of construction stone mines, case study: Shiraz marble mine. *Quarterly Scientific Research Journal of Land and Resources, Lahijan Branch, Year 4, Issue 1, Spring 2011, 11-16. (In Persian).*
- Ataei, M., Salehabadi, H., and Rafiei, R., 2011. Determining the Optimal Extraction Direction to Maximize Construction Stone Copping Using Discontinuity Modeling (Case Study of Kapiol Travertine Mine). *Quarterly Scientific-Research Journal of the Iranian Society of Engineering Geology, Volume 14, Issue 2, September 2011, 15-29. (In Persian).*
- Basiri, M., and Partashek, A., 2011. Structural analysis of fractures in mines and exploration areas of construction and ornamental stones in order to estimate the possibility of extraction. *Proceedings of the 30th National Geosciences Conference, Geological Survey of Iran. (In Persian).*
- Deliormanli, A., Maerz, N., and Otoo, J., 2014. Using terrestrial 3D laser scanning and optical methods to determine orientations of discontinuities at a granite quarry. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 66, 41-48.*
- Elci, H., and Turk, N., 2014. Rock mass block quality designation for marble production. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 69, 26-30.*
- Elkarmoty, M., Colla, C., Gabrielli, E., Kasmaeeyazdi, S., Tinti, F., Bonduà, S., and Bruno, R., 2017. Mapping and modelling fractures using ground penetrating radar for ornamental stone assessment and recovery optimization: Two case studies. *The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin, UDC: 550.8:552.1, doi:10.17794/rgn.2017.4.7.*
- Ghassemi, M.R., 2008. *Fundamentals of Structural Geology. Geological Survey of Iran, 320 p. (In Persian).*
- Hajmola-ali, A., 1995. *Geological Map of Ravar, Scale 1:100,000, Geological Survey of Iran. (In Persian).*
- Itasca Consulting Group, Inc., 2019. 3DEC - Three-Dimensional Distinct Element Code, Ver. 5.2. Minneapolis: Itasca.
- Levytskyi, V., 2012. Quality management and certification of block production on quarries of decorative stone on the basis of surface digital phototheodolitic survey. *Bulletin of Zhytomyr State Technological University, 3, 62, 126-136.*
- Levytskyi, V., Sobolevskiy, R., and Korobiichuk, V., 2018. The optimization of technological mining parameters in a quarry for dimension stone blocks quality improvement based on photogrammetric techniques of measurement. *The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin, UDC: 622:35, doi:10.17794/rgn.2018.2.8.*
- Lu, P., and Latham, J.P., 1999. Developments in the assessment of in situ block size distributions of rock masses. *Rock Mech Rock Eng 32(1):29-49.*
- Majidifard, M.R., and Ghassemi, M.R., 2002. *Geological map of Shamshir-Abad, Scale 1:100,000, Geological Survey of Iran. (In Persian).*
- Mikaeil, R., Sohrabian, B., and Ataei, M., 2018. The Study of Energy Consumption in the Dimension Stone Cutting Process. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 33(4): p. 65-71.*
- Mikaeil, R., 2011. *Presenting a new classification system for evaluating the cutting ability of structural rocks and optimizing cutting parameters. Ph.D. thesis, Faculty of Mining Engineering, Shahrood University of Technology, 227 p. (In Persian).*
- Mosch, S., Nikolayev, D., Ewiak, O., and Siegesmund, S., 2011. Optimized extraction of dimension stone blocks. *Environ Earth Sci (2011) 63:1911-1924.*
- Shafiei, Sh., Ebadi, M., and Torkashvand, M., 2012. Analysis of Discontinuities in Construction Stone Quarries and Its Importance in Optimization of Extraction (Case Study of Saeidi Construction Stone Quarry, Kerman). *Scientific Quarterly Journal of Geosciences, Summer 2012, Year 21, Issue 84, 89-98. (In Persian). https://doi.org/10.22071/gsj.2012.53961.*
- Yarahmadi, R., Bagherpour, R., Kakaie, R., Mirzaie, N.H., Yari, M., 2014. Development of 2D computer program to determine geometry of rock mass blocks. *Int. J. Min. Sci. Technol. 24, 191-194.*
- Yarahmadi, R., Bagherpour, R., Khademian, A., Sousa, L.M.O., Almasi, S.N., Esfahani, M.M., 2017a. Determining the optimum cutting direction in granite quarries through experimental studies: a case study of a granite quarry. *Bull. Eng. Geol. Environ. http://dx.doi.org/10.1007/s10064-017-1158-5.*
- Yarahmadi, R., Bagherpour, R., Sousa, L.M., Taherian, S.-G., 2015. How to determine the appropriate methods to identify the geometry of in situ rock blocks in dimension stones. *Environ. Earth Sci. 74, 6779-6790.*
- Yarahmadi, R., Bagherpour, R., Tabaei, M., Sousa, L.M.O., 2017b. Investigation of intact rock geomechanical parameters' effects on commercial blocks' productivity within stone reserves: a case history of some quarries in Isfahan, Iran. *J. Afr. Earth Sci. 134, 383-388. http://dx.doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.07.013.*

- Yarhamadi, R., Bagherpour, R., Taherian, S.-G., Sousa, L.M.O., 2017c. A new quality factor for the building stone industry: a case study of stone blocks, slabs, and tiles. *Bull. Eng. Geol. Environ.* <http://dx.doi.org/10.1007/s10064-017-1040-5>.
- Yarhamadi, R., Bagherpour, R., Taherian, S.-G., Sousa, L.M.O., 2018. Discontinuity modelling and rock block geometry identification to optimize production in dimension stone quarries. *Bull. Eng. Geol.*, 232, 22-33. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.11.006>.