

## The assessment of rock brittleness effect on drillability

Seyed Sajjad Karrari<sup>1</sup>, Mojtaba Haidari<sup>1\*</sup>, Jafar Khademi Hamidi<sup>2</sup>, Ebrahim Sharifi Tashnizi<sup>3</sup>

1- Department of Geology, Faculty of Sciences, Bu-Ali Sina University of Hamedan, Iran

2- Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University of Tehran, Iran

3- Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdosi University of Mashhad, Iran

**Keywords:** Brittleness, Sievers' J-miniature, Drilling rate index, Brittleness index, Glass tunnel

### 1-Introduction

Tunnel excavation using mechanical excavation methods like tunnel boring machines (TBMs) and road headers have become increasingly common in recent years. Selection of machinery and equipment without physical, mechanical, and petrographic rock properties may cause dramatic problems during working. Therefore, it is essential to find rock properties before starting tunneling operations (Yarali and Soyer, 2011).

The term "drillability" is commonly used to describe the rock's ability to be bored and will be of great importance to performance predictions, cost evaluations, and the excavation method selection. Drillability considers the influence that intact rock properties, breakability, and abrasivity, have during boring in hard rock. There are several methodologies available to assess the influence of intact rock properties in hard rock excavation. The main intact rock properties and commonly used test methodology listed in the following:

Strength: Uniaxial Compressive Strength (UCS), Brazilian Tensile Strength (BTS), Point Load Test (PLT). Surface hardness: Sievers' J miniature drill test (SJ), Vickers hardness (VH). Brittleness: brittleness tests (S20), several definitions including strain, UCS and tensile strengths, stress-strain relations.

Abrasivity: Cerchar test (CAI), LCPC test, Abrasion Value Steel test (AVS), abrasive minerals content, Vickers hardness number of rock (VHNR). Rock petrography (rock texture, mineral composition (Macias et al., 2017).

Brittleness is one of the most important mechanical properties of rocks. Some researchers have investigated the relation between brittleness and drilling rates. However, there are no available studies on the relation between the brittleness and the DRI (Yarali, 2007; Altindag, 2010). This paper examines the equations between the brittleness and the DRI.

### 2- Material and methods

This investigation transferred 30 blocks with  $30 \times 30 \times 30$  dimensions to the Bu Ali Sina University of Hamadan's geotechnical laboratory without any weathering and jointing. Based on the ASTM D 4543 method, the cylindrical cores with a diameter of 54 mm (Nx) with a length to the diameter of 2.5:1 were prepared.

The uniaxial compressive strength test performed according to the standard (ASTM D7012, 2004), the S20 and SJ tests based on the NTNU / SINTEF standard (Dahl, 2003), and the Brazilian tensile strength test performed on the standard (ASTM D3967, 2008).

Database of parameters such as uniaxial compressive strength, tensile strength, elastic and total strain values, reversible and total energy, Young's modulus, Poisson's modulus, shear modulus, post-peak modulus, lame coefficient, density, S20, and SJ was developed to calculate the brittleness and drillability indices. In this database, 16 brittleness indices have been calculated. Then, the normality of the data statistically analyzed using Kolmogorov-Smirnov, skewness, and tensile tests.

### 3- Results and discussion

The normality of the data examined using Kolmogorov-Smirnov and skewness and kurtosis tests. In the Kolmogorov-Smirnov test, the significance level and the Z test are more than 0.05. As a result, the null assumption that the input parameters are normal will not be rejected. Since the parameters' values are in the interval (-2, 2) in the skewness and kurtosis test, the parameters' statistical distribution is normal.

\*Corresponding author: heidarim\_enggeol@yahoo.com

DOI: 10.22055/AAG.2020.31787.2063

Received 2019-11-28

Accepted 2020-12-01

The statistical analysis of these parameters performed using the normality of the parameters. The results of these regressions are shown as the best relation (exponential, linear, and logarithmic), and the coefficient of determination and root mean square error (Table 1).

Table 1. Results of calculation brittleness indices with drilling rate index.

RMSE	R <sup>2</sup>	Equation type	equation	Number equation
11.86	0.01	exponential	DRI = 1.3931 exp - 0.017 (B1)	a
17.64	0.03	exponential	DRI = 0.3777 exp -0.899 (B2)	b
1.02	0.78	exponential	DRI = 62.453 exp -5E-04 (B3)	c
0.95	0.80	exponential	DRI = 81.728 exp -0.024 (B4)	d
13.67	0.10	linear	DRI = -20.14 (B6) + 59.572	e
16.52	0.12	exponential	DRI = 80.297 exp - 0.717 (B9)	f
8.83	0.13	linear	DRI = 21.451 (B10) + 37.896	g
10.95	0.18	logarithmic	DRI = -14.4 Ln (B11) +38.545	h
10.98	0.34	logarithmic	DRI = -23.15 Ln (B19) +31.307	i
66.31	0.33	linear	DRI = - 365.77 (B24) + 396.2	j
10.05	0.50	logarithmic	DRI = -24.47 Ln (B25) +79.184	k
55.58	0.39	logarithmic	DRI= -10.23Ln (B26)+99.936	l
168.35	0.39	logarithmic	DRI = - 10.22Ln (B27) + 110.12	m
5.66	0.33	logarithmic	DRI = -13.29 Ln (B28) + 84.533	n
13.78	0.60	exponential	DRI = 75.004 exp - 0.024 (B29)	o

According to Table 1, the equations (c and d) show the highest coefficient of determination and the lowest root mean square error between the rock's brittleness index and their drilling rate index. Therefore, in this study, brittleness indices B3 and B4 can be considered the most acceptable indices compared to other indices for evaluation of rock drilling rate index.

Different statistical indicators were used to investigate the ability and accuracy of the equations and their performance.

Statistical indicators were calculated to predict the performance of the brittleness indices (Table 2). The values of the statistical indicators represent the significance and efficiency of the presented statistical equations.

Table 2. Performance of statistical indicators for prediction brittleness indices

Tabulated F Values	F fisher	VAF (%)	RMSE	adjusted R <sup>2</sup>	Number equation	Brittleness index
4.49	36.48	0.85	1.02	0.76	c	B3
4.49	42.44	0.89	0.95	0.79	d	B4

In this study, DRI values, B3, and B4 brittleness indices comprise Yarali and Soyer's (2011) study (Fig. 1 and 2). According to Equations 5 and 6, the adjusted R square of DRI values, B3 and B4 are 0.78 and 0.79, respectively. The accuracy of the equations presented in this study is close to those presented by Yarali and Soyer (2011). The multiple regression model and some statistical indicators for the validation of the model have been calculated (Table 3).

Equation (1) DRI = 61.753 exp (-0.0005) (B3) R<sup>2</sup>=0.7764  
 Equation (2) DRI= 68.511 exp (-0.002) (B4) R<sup>2</sup>=0.7915

#### 4- Conclusion

In this study, the results of uniaxial compressive strength and tensile strength tests, the area under the stress-strain curve, and rock modulus were calculated. Also, Sievers' J miniature drill test and brittleness test have been performed to calculate the rock drilling rate index. The normality of the data examined by using Kolmogorov-Smirnov and skewness and kurtosis tests.

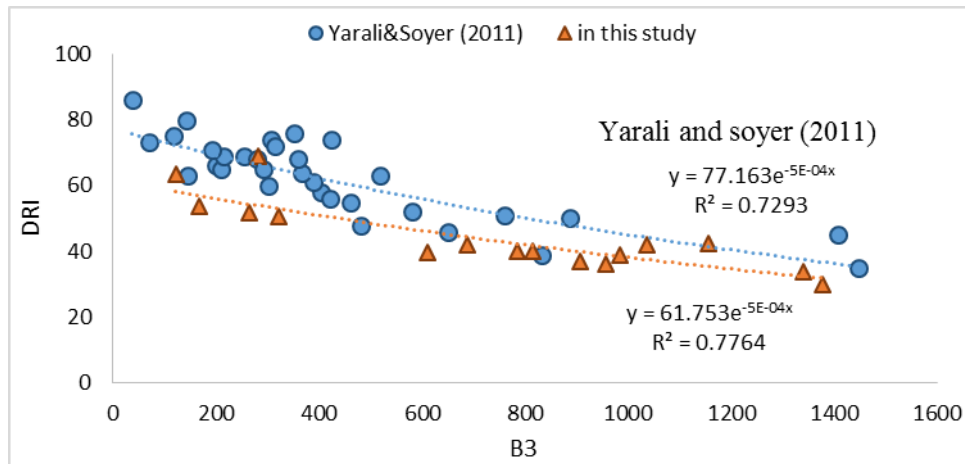


Fig. 1. Comparison DRI values with B3 in this study by Yarali and Soyer (2011).

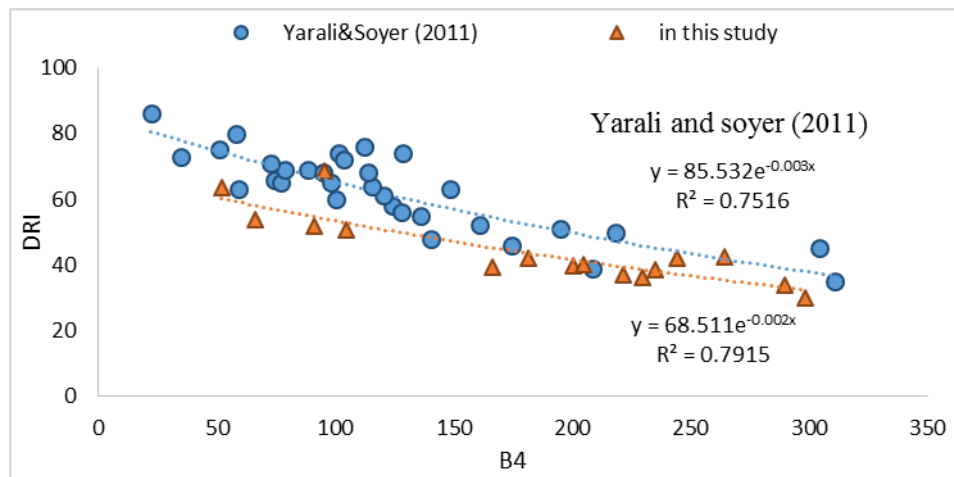


Fig. 2. Comparison DRI values with B4 in this study by Yarali and Soyer (2011).

Table 3. Multiple regression model and some statistical indicators for the validation of model.

Equation	R	R2	Adjusted R <sup>2</sup>	Standard error	F fishr	sig	RMSE
DRI = 68.577 + 0.013 (B3) – 0.179 (B4)	0.87	0.76	0.72	5.80	20.45	0.000	1.071

The highest adjusted R square was exponential with 0.78 and 0.80 for B3 and B4 brittleness indexes, respectively. Significance and validity of equations confirmed by adjusted R square, VAF, RMSE, and F Fisher statistical indicators. The equations compared with those of previous researchers. The precision and accuracy of equations are confirmed with equations former. These equations can be used to estimate the drillability of rocks.

**References**

Altindag, R., Guney, A., 2010. Predicting the relationships between brittleness and mechanical properties (UCS, TS and SH) of rocks. Scientific Research and Essays 5(16), 2107-2118.

ASTM, 2001. Standard Practice for Preparing Rock Core Specimens and Determining Dimensional and Shape Tolerances. American Society for Testing and Materials, D4543.

ASTM, 2004. Test method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures, D7012-04.

ASTM, 2008. Standard test method for splitting tensile strength of intact rock core specimens, D3967-08.

Dahl, F., 2003. DRI, BWI, CLI and NTNU Standards. Angleggsdrift, Trondheim, p. 21.



- Macias, J.F., Dahl, F., Bruland, A., Kasling, H., Thuro, K., 2017. Drillability Assessments in Hard Rock. 3<sup>rd</sup> Nordic Rock Mechanics Symposium, Helsinki, Finland, Johansson & Raasakka (Eds.), 1-12.
- Yarali, O., 2007. Investigation of the relations between rock brittleness and drilling rate index. Proceedings of the 20<sup>th</sup> International Mining Congress of Turkey, Ankara, Turkey, pp. 217-224.
- Yarali, O., Soyer, E., 2011. The effect of mechanical rock properties and brittleness on drillability. Scientific Research and Essays 6(5), 1077-1088.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Karrari, S.S., Haidari, M., Khademi Hamidi, J., Sharifi Tashnizi, E., 2022. The assessment of rock brittleness effect on drillability. Adv. Appl. Geol. 11(4), 671-689.

DOI: 10.22055/AAG.2020.31787.2063

url: [https://aag.scu.ac.ir/article\\_16252.html?lang=en](https://aag.scu.ac.ir/article_16252.html?lang=en)

## ارزیابی تاثیر شکنندگی سنگ‌ها بر قابلیت حفاری آنها

سید سجاد کراری

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا همدان، ایران

مجتبی حیدری\*

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا همدان، ایران

جعفر خادمی حمیدی

گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس تهران، ایران

ابراهیم شریفی تشنیزی

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۷/۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۴

\*heidari\_enggeol@yahoo.com

### چکیده

شکنندگی سنگ‌ها از خصوصیات مهم و موثر در حفاری سنگ‌هاست. شناخت ارتباط بین قابلیت حفاری و شکنندگی سنگ‌ها به افزایش کارایی حفاری سنگ‌ها کمک خواهد کرد. در این پژوهش خواص مکانیکی ۱۶ نمونه سنگی مختلف از جمله سنگ‌های گرانیت، گرانودیوریت، دولومیت، هورنفلس و مرمر در محدوده پروژه تونل انتقال آب گلاس در حاشیه شهرستان نقده مطالعه شده است. با بهره‌گیری از منحنی تنش- کرنش، مدول و خواص مقاومتی سنگ‌های مذکور، ۱۶ شاخص شکنندگی محاسبه شده است. هم‌چنین آزمایش‌های سیورز جی (SJ) و شکنندگی (S20) برای محاسبه مقدار شاخص نرخ حفاری (DRI) انجام شده است. روابط آماری بین شاخص‌های شکنندگی با شاخص نرخ حفاری نشان دهنده ارتباط قوی بین شاخص شکنندگی B3 (ضرایب تعیین  $R^2 = 0.77$  و  $RMSE = 1.02$ ) و شاخص شکنندگی B4 (ضرایب تعیین  $R^2 = 0.79$  و  $RMSE = 0.95$ ) با شاخص نرخ حفاری سنگ‌ها می‌باشد. روابط آماری بدست آمده بین شاخص‌های شکنندگی و قابلیت حفاری سنگ‌ها با روابط گذشته مقایسه شده است. صحت و دقت روابط ارائه شده با روابط گذشته مطابقت دارد. هم‌چنین مدلی به کمک آنالیز رگرسیون چندگانه ارائه شده است. از این روابط می‌توان برای ارزیابی قابلیت حفاری سنگ‌ها استفاده کرد.

**کلمات کلیدی:** شکنندگی، سختی سطحی سیورز، شاخص نرخ حفاری، شاخص شکنندگی، تونل گلاس

### مقدمه

حفاری تونل با استفاده از روش‌های حفاری مکانیکی مانند TBM و کله گاوی (Roadheader) در سال‌های اخیر به طور فزاینده‌ای متداول شده است. انتخاب ماشین آلات و تجهیزات حفاری بدون در نظر گرفتن خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و پتروگرافی سنگ‌ها می‌تواند مشکلات چشمگیری را ایجاد نماید (Yarali and Soyer, 2011).

قابلیت حفاری سنگ‌ها، مقاومتی است که سنگ از خود در برابر نفوذ دستگاه حفاری نشان می‌دهد. این پارامتر اهمیت بسیاری در پیش بینی عملکرد دستگاه حفاری، ارزیابی هزینه‌ها و انتخاب روش حفاری دارد. در بیان قابلیت حفاری بایستی همواره نوع ماشین حفاری و خصوصیات سنگ‌ها در نظر گرفته شود. زیرا پارامترهای ماشین حفاری را می‌توان کنترل کرد اما تغییر در پارامترهای سنگی غیر قابل کنترل است. قابلیت حفاری سنگ‌ها را نمی‌توان با یک شاخص واحد یا یک آزمایش واحد اندازه‌گیری کرد. زیرا قابلیت

حفاری سنگ‌ها تحت تأثیر پارامترهای زیادی می‌باشند. برای ارزیابی قابلیت حفاری سنگ‌ها روش‌های مختلفی مانند: سنجش مقاومت (آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی و بار نقطه‌ای)، شکنندگی (آزمایش شکنندگی (S20) و توصیف‌های متعددی از روابط بین مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی و روابط بین منحنی تنش - کرنش و مدول سنگ‌ها، سختی سطح سنگ‌ها (آزمایش‌های سیورز جی (SJ) و سختی ویکرز (VHNR))، سایش (آزمایش‌های سرشار (CAI)، (LCPC)، میزان سایش تیغه‌های فولادی (AVS) و مقدار کانی‌های ساینده) و پتروگرافی (بافت و ترکیب کانی شناسی) وجود دارد (Macias et al., 2017).

براساس مطالعات انجام شده شاخص قابلیت حفاری (Drillability rate index) سنگ‌ها با مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی انطباق خوبی را نشان می‌دهد (Yenice et al., 2018). شاخص قابلیت حفاری سنگ‌ها با مقاومت فشاری

پس از تحمل ۲۰ ضربه توسط وزنه ۱۴ کیلوگرمی از ارتفاع ۲۵ سانتی متری تعریف می‌شود. این آزمون به طور معمول بر روی یک نمونه معرف ۳ تا ۵ بار انجام شده و میزان S20 براساس میانگین گیری از این آزمایش‌ها گزارش می‌شود. در صورتی که انحراف معیار این چند آزمایش کمتر از ۲ واحد باشد، نشان دهنده همگن بودن خرده سنگ‌های مورد آزمایش می‌باشد (Dahl et al., 2012).

### آزمایش تعیین سختی سطحی سیورز (J-Sievers' miniature)

این آزمایش برای تعیین سختی سطح سنگ و یا مقاومت آن در برابر فرورفتگی ابزار برشی و مته حفاری تعریف می‌شود. ضریب SJ به عنوان مقدار میانگین عمق سوراخ ایجاد شده پس از ۲۰۰ دور چرخش مته‌ای ۸/۵ میلی‌متری از جنس کاربید تنگستن تحت بار ۲۰ کیلوگرم به مدت یک دقیقه و بر حسب ۰/۱ میلی‌متر تعریف می‌شود. در حالت استاندارد آزمایش بر روی سطحی برش نخورده و عمود بر جهت فولیاسیون سنگ انجام می‌شود. آزمایش SJ با توجه به تغییرات در بافت سنگ نمونه ۴ تا ۸ بار تکرار می‌شود و مقدار ضریب SJ براساس میانگین آزمایش‌های انجام شده گزارش می‌شود (Dahl et al., 2012).

### شاخص نرخ حفاری (Drilling Rate Index)

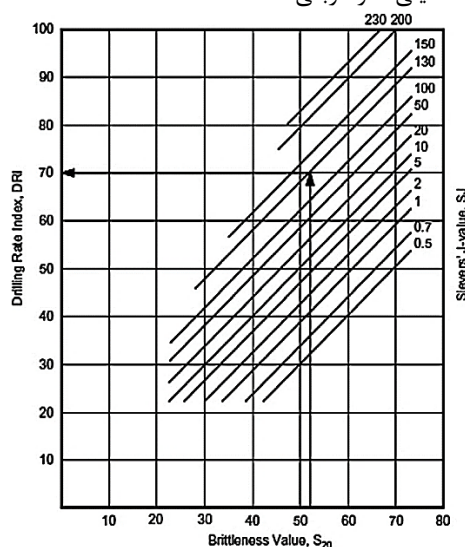
این شاخص بر مبنای دو پارامتر آزمایشگاهی مقدار شکنندگی (S20) و مقدار سیورز جی (SJ) ارزیابی می‌گردد. آزمایش شکنندگی معیاری از خواص مقاومتی نمونه سنگ و آزمایش سیورز جی معیاری از سختی سطحی سنگ است. جهت ارزیابی شاخص نرخ حفاری (DRI) براساس مقادیر شکنندگی و سختی سطحی از شکل ۱ استفاده می‌شود (Zare and Bruland, 2013). در جدول ۱ طبقه‌بندی‌های شکنندگی، سختی سطح و شاخص نرخ حفاری نشان داده شده است.

تک محوری، مقاومت بار نقطه‌ای قطری و محوری، و سختی اسکلروسکوپ شور روابط خطی نزولی دارند. علاوه بر این روابط معنی داری بین قابلیت حفاری سنگ‌ها و شاخص‌های شکنندگی B3 و B4 وجود دارد (Yarali and Soyer, 2011). هم چنین رابطه‌ی نمایی قابل قبولی بین DRI و شاخص شکنندگی  $B8 = (\sigma_c \times \sigma_t) / 2$  بدست آمده که می‌تواند برای ارزیابی قابلیت حفاری سنگ‌ها استفاده شود (Yarali and Kahraman, 2011).

در این پژوهش ارتباط قابلیت حفاری سنگ‌ها با شاخص‌های شکنندگی آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. هیچ مطالعه جامعی در مورد رابطه شاخص‌های شکنندگی و قابلیت حفاری سنگ‌ها وجود ندارد (Altindag, 2010; Yarali, 2007). هدف این پژوهش تخمین مقدار قابلیت حفاری سنگ‌ها به کمک شاخص‌های شکنندگی آن‌ها برای افزایش کارایی حفاری می‌باشد. در ادامه برای تعیین قابلیت حفاری سنگ‌ها به تشریح برخی از این آزمون‌ها و نحوه محاسبه آن‌ها و نیز توصیف شاخص‌های شکنندگی موجود پرداخته می‌شود.

### آزمایش شکنندگی یا S20 (Brittleness)

این آزمایش به عنوان معیاری برای تعیین شکنندگی یا مقاومت سنگ در برابر خردشدن تحت ضربات مکرر تعریف می‌شود. این آزمایش بر روی خرده سنگ‌های عبوری از الک ۱۱/۶ میلی‌متر مربعی و باقیمانده بر روی الک ۱۱/۲ میلی‌متر مستطیلی انجام می‌شود. وزن نمونه‌های باقی مانده بر روی الک ۱۱/۲ میلی‌متر به عنوان معیاری برای سنجش وزن نمونه مورد نیاز استفاده می‌شود. برای نمونه سنگی با دانسیته ۲/۶۵ گرم بر سانتی مترمکعب، وزنی برابر با ۵۰۰ گرم انتخاب می‌گردد. وزن نمونه‌های دیگر نیز براساس مقدار دانسیته آنها نسبت به این معیار محاسبه می‌شود. ضریب S20 به عنوان درصد اجزای عبوری از الک ۱۱/۲ میلی‌متر مربعی،



شکل ۱- نمودار ارزیابی شاخص نرخ حفاری (DRI) (Dahl, 2003).

Fig. 1. Diagram for assessment of DRI (Dahl, 2003).

جدول ۱- طبقه بندی SJ، S20 و DRI (Dahl, 2003).

Table 1. Classification of SJ, S20 and DRI (Dahl, 2003).

Category	S20 (%)	SJ (mm/10)	DRI
Extremely low	$\leq 2$	$\geq 66$	$\leq 25$
Very low	2.1 - 3.9	60.0 - 65.9	32-26
Low	4.0 - 6.9	51.0 - 59.9	42-33
Medium	7.0 - 18.9	41.0 - 50.9	57-43
High	19.0 - 55.9	35.0 - 40.9	69-58
Very high	56.0 - 85.9	29.1 - 34.9	82-70
Extremely high	$\geq 86$	$29 \leq$	$\geq 83$

### شاخص های شکنندگی

شاخص شکنندگی اصطلاحی است که برای توصیف شکنندگی توده سنگ پیشنهاد شده است. برای تعریف این شاخص از ویژگی-های مقاومتی، آزمایش های نفوذ و بار نقطه‌ای، کانی شناسی، مدول، سختی، انرژی، زاویه اصطکاک داخلی و تغییر شکل سنگ‌ها استفاده می‌شود. در جدول ۲ خلاصه‌ای از شاخص های شکنندگی بیان شده است. در این جدول روش ارزیابی و فرمول محاسبه شاخص شکنندگی ذکر گردیده است.

### منطقه مورد مطالعه

محدوده پروژه تونل انتقال آب گلاس براساس تقسیمات کشوری در جنوب استان آذربایجان غربی و در مجاورت مرز ایران با کشور عراق واقع شده است. دهانه خروجی تونل در موقعیت جغرافیایی  $X=541522$  و  $Y=4085189$  و در تراز ارتفاعی ۱۳۳۰ متر در ۱۶ کیلومتری جنوب شرق شهرستان نقده و در دامنه شمالی ارتفاعات روستای بیگم قلعه از توابع شهرستان نقده واقع شده است. راه دسترسی به محل دهانه خروجی تونل از جاده آسفالتی نقده به بیگم قلعه و از آنجا به بعد از طریق جاده خاکی روستایی امکان پذیر است. نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است. در این پژوهش از سنگ های مختلف آذرین (گرانیت، گرانودیوریت)، رسوبی (دولومیت) و دگرگونی (هورنفلس و مرمر) نمونه برداری شده است. این ناحیه از دیدگاه تقسیمات واحدهای ساختمانی - رسوبی ایران در بخش شمال شرقی کمربند دگرگونی و افیولیتی زون سنندج - سیرجان قرار گرفته است. بطور کلی واحد-های سنگی این منطقه را می‌توان به واحدهای آذرین و کربناته تقسیم بندی کرد. در بخش هایی که واحدهای کربناته در مجاورت واحدهای آذرین قرار دارند، رخساره های دگرگونی مجاورتی (هورنفلس) توسعه یافته است.

### مواد و روش ها

برای انجام این پژوهش ۳۰ بلوک با ابعاد  $30 \times 30 \times 30$  بدون هر گونه درزه و هوازدگی به همراه مغزه های سنگی (تهیه شده در محل

پروژه) از منطقه مورد مطالعه به آزمایشگاه ژئوتکنیک دانشگاه بوعلی سینا همدان منتقل گردیده است. در شکل ۳ تصویر مغزه های سنگی نشان داده شده است.

مغزه گیری از نمونه ها براساس استاندارد (ASTM D4543, 2001) با قطر ۵۴ میلی متر و نسبت طول به قطر ۲/۵ انجام شده است. در مورد مغزه های سنگی با قطر بیشتر تصحیح قطر آنها انجام شده است. آزمایش مقاومت فشاری تک محوری توسط دستگاه ELE (شکل ۴c) با نرخ بارگذاری کنترل شده و براساس استاندارد (ASTM D7012, 2004) و آزمایش مقاومت کششی برزیلین براساس استاندارد (ASTM D3967, 2008) انجام شده است. این دستگاه به ابزار قرائت و ثبت داده های بار و کرنش خودکار (دیتالاگر) مجهز می باشد. کرنش ارسال شده از کرنش سنج های LVDT (Linear variable differential transducer) در این دیتالاگر ذخیره می شود. پس از اتمام آزمایش برای محاسبات از این داده ها استفاده می شود. برای ثبت تغییرات منحنی پس از نقطه پیک از یک نگهدارنده پلی اتیلن استفاده شده است (شکل ۴d). این نگهدارنده از یک لوله پلی اتیلن UPVC فشار قوی به طول ۱۳ سانتی متر و قطر داخلی ۵۴ میلی متر تشکیل شده است. دو عدد کمربند آلومینیومی در اطراف این لوله برای جلوگیری از شکست سریع نمونه تعبیه شده است. در شکل ۵ منحنی تنش - کرنش برخی از نمونه های بدست آمده در آزمایش مقاومت فشاری تک محوری نشان داده شده است. آزمایش های S20 و SJ براساس استاندارد NTNU/SINTEF در آزمایشگاه حفاری مکانیزه دانشکده فنی و مهندسی (بخش معدن) دانشگاه تربیت مدرس (شکل ۴a و ۴b) انجام شده است. نتایج داده های حاصل از آزمایش های مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی، S20 و SJ به ترتیب در جداول ۳ و ۴ نشان داده شده است.

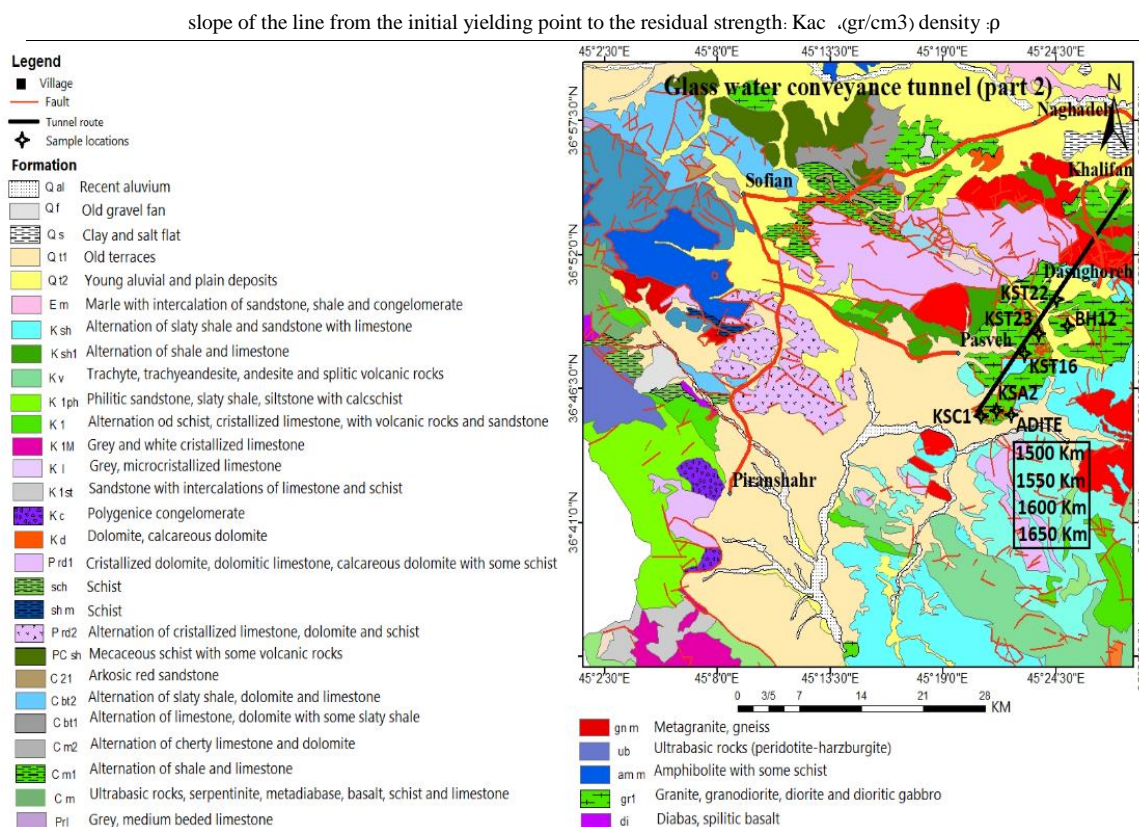
جدول ۲- خلاصه‌ای از شاخص‌های شکنندگی موجود.

Table 2. Summary of pre-existing brittleness indices.

reference	Calculation formula	Measurement method
(Hucka and Das, 1974)	$B1 = \frac{\sigma_c}{\sigma_t}$	Based on the strength
(Hucka and Das, 1974)	$B2 = \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t}$	
(Altindag, 2002)	$B3 = \frac{\sigma_c * \sigma_t}{2}$	
(Yarali and Soyer, 2011)	$B4 = (\sigma_c * \sigma_t)^{0.72}$	
(Hajiabdolmajid and Kaiser, 2003)	$B5 = \frac{\tau_p - \tau_r}{\tau_p}$	
(Andreev, 1995)	$B6 = \varepsilon_{li} * 100$	Based on the deformation
(Hucka and Das, 1974)	$B7 = \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_t}$	
(Hajiabdolmajid and Kaiser, 2003)	$B8 = \frac{\varepsilon_f^p - \varepsilon_c^p}{\varepsilon_c^p}$	
(Hucka and Das, 1974)	$B9 = \frac{Wr}{Wt}$	Based on the energy
(Tarasov and Potvin, 2013)	$B10 = \left( \frac{M-E}{M} \right)$	
(Tarasov and Potvin, 2013)	$B11 = \frac{E}{M}$	
(Quinn and Quinn, 1997)	$B12 = \frac{H * E}{K_{IC}^2}$	Based on the hardness
(Lawn and Marshall, 1979)	$B13 = \frac{H}{K_{IC}}$	
(Hucka and Das, 1974)	$B14 = \left( \frac{H\mu - H}{K} \right)$	
(Gong and Zhao, 2007)	$B15 = S20$	Based on the fines content
(Hucka and Das, 1974)	$B16 = q * \sigma_c$	
(Yagiz, 2009)	$B17 = \frac{F_{max}}{P}$	Based on the penetration tests
(Copur et al, 2003)	$B18 = \frac{P_{dec}}{P_{inc}}$	
(Reichmuth, 1967)	$B19 = St - Kb * P$	Based on point load testing
(Jarvie et al, 2007)	$B20 = \frac{Wqtz}{(Wqtz + Wcarb + Wclay)}$	Based on mineral composition
(Suorinen et al, 2009)	$B21 = RTRI = Sf * Gf * Ff$	
(Hucka and Das, 1974)	$B22 = \sin \varphi$	Based on the inner friction angle
(Hucka and Das, 1974)	$B23 = 45^\circ + (\varphi/2)$	
(Goodway et al, 2010)	$B24 = \frac{\lambda}{\lambda + 2\mu}$	Based on the rock modulus
(Chen et al, 2014)	$B25 = \frac{E}{\lambda}$	
(Luan et al, 2014)	$B26 = \frac{E}{\nu}$	
(Sun et al, 2013)	$B27 = \frac{E * \rho}{\nu}$	
(Rickman Mullen et al, 2008)	$B28 = \frac{E + \nu}{2}$	
(Nejati and Mosavi, 2017)	$B29 = \frac{\sigma_t^{0.84} * E^{0.51}}{\sigma_c^{0.21}}$	
(Meng et al, 2015)	$Bd = B1d * B2d$ $= \left( \frac{\tau_p - \tau_r}{\tau_p} \right) \left( \frac{\log kac }{10} \right)$	Based on the shear strength

(MPa) residual strength :  $\tau_r$  (MPa) peak strength :  $\tau_p$  (MPa) tensile strength :  $\sigma_t$  (MPa) compression strength :  $\sigma_c$   
 plastic strain for frictional strengthening :  $\varepsilon_f^p$  total strain :  $\varepsilon_t$  reversible strain :  $\varepsilon_r$  length strain :  $\varepsilon_{li}$   
 (J/m<sup>3</sup>) total energy :  $Wt$  (J/m<sup>3</sup>) reversible energy :  $Wr$  cohesion loss for plastic strain :  $\varepsilon_c^p$   
 (J/m<sup>3</sup>) fracture toughness :  $K_{IC}$  hardness :  $H$  (GPa) elastic modulus :  $E$  (MPa) post-peak modulus :  $M$   
 percentage of the fines less than 11.2 mm :  $S20$  constant :  $K$  micro-indentation hardness :  $H\mu$   
 (mm) penetration depth :  $P$  (KN) maximum applied force :  $F_{max}$  percentage of fines (-28 mesh) :  $q$   
 relative brittleness index :  $Kb$  (S) average force increment period :  $p$  (S) average force decrement period :  $P_{dec}$   
 quartz content minerals :  $Wqtz$  (KN) applied load at failure :  $P$  (MPa) tensile strength :  $St$   
 clay content minerals :  $Wclay$  carbonate content minerals :  $Wcarb$   
 foliation factor :  $F_f$  texture factor :  $G_f$  stiffness factor :  $S_f$  rock tenacity rating index :  $RTRI$   
 poisson modulus :  $\nu$  (GPa) shear modulus :  $\mu$  lame coefficient :  $\lambda$  (°) inner friction angle :  $\varphi$





شکل ۲- نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه و راه های دسترسی آن (اقتباس از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ شهرستان نقده، سازمان زمین شناسی کشور).

Fig. 2. Geological map and location of the study area (adapted from 1:100000 map of Naghadah city, Geological Survey of Iran).



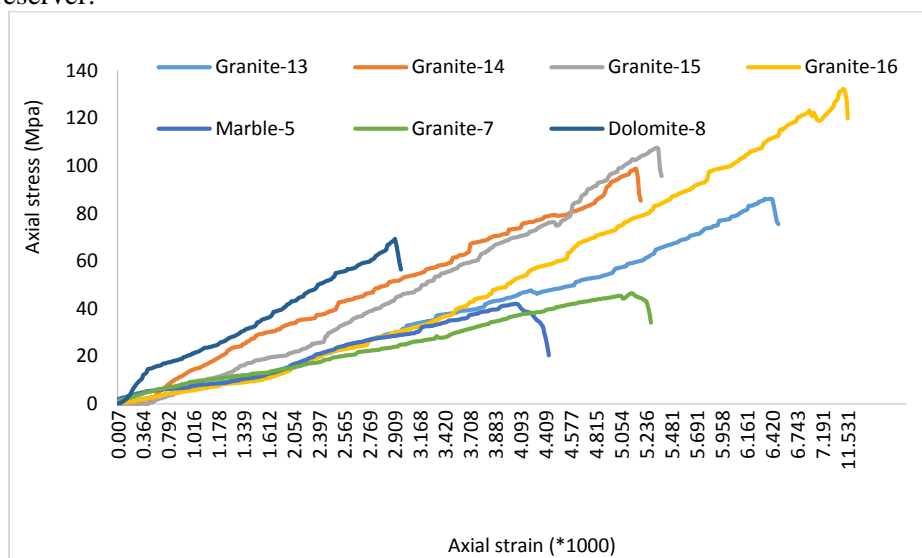
شکل ۳- تصویر مغزه های سنگی.

Fig. 3. Picture of cylindrical samples.



شکل ۴- تصاویری از (a) دستگاه آزمایش سیورزجی، (b) دستگاه آزمایش شکنندگی، (c) دستگاه آزمایش مقاومت فشاری تک محوری و (d) نگهدارنده.

Fig. 4. Picture of (a) Sievers' J-miniature test, (b) brittleness test, (c) uniaxial compression strength test and (d) preserver.



شکل ۵- منحنی تنش- کرنش برخی نمونه‌های سنگی.  
Fig. 5. Stress-strain curve of some rock samples.

جدول ۳- متوسط نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی.

Table 3. Average results of compression strength and tensile strength tests.

Rock code	Rock type	$\sigma_c$ (Mpa)	$\sigma_t$ (Mpa)
1	Granite	115.8	16.5
2	Hornless	152.4	17.5
3	Granodiorite	117.2	17.7
4	Granodiorite	127.1	18.2
5	Marble	45.7	5.3
6	Granite	118.9	16.5
7	Granite	40.6	8.3
8	Dolomite	68.1	8.2
9	Granite	128.6	12.2
10	Granodiorite	149.5	18.5
11	Granodiorite	71.8	9.5
12	Granite	59.5	10.8
13	Granite	97.2	12.4
14	Granite	107.1	12.7
15	Granite	115.8	14.3
16	Granite	125.5	14.4

جدول ۴- مقادیر شاخص نرخ حفاری و طبقه بندی آن‌ها.

Table 4. Drilling rate index values and its classifications.

Rock code	Rock type	SJ (mm/10)	S20 (%)	DRI	class
1	Granite	3.2	39	36	Low
2	Hornless	6.4	37	34	Low
3	Granodiorite	14.2	42	42	Low
4	Granodiorite	12.8	41	42	Low
5	Marble	55.7	62	63	High
6	Granite	5.3	41	39	Low
7	Granite	17.5	53	54	Medium
8	Dolomite	50.8	59	69	High
9	Granite	5.2	42	40	Low
10	Granodiorite	4.6	34	30	Very low
11	Granodiorite	14.2	52	52	Medium
12	Granite	13.2	51	51	Medium
13	Granite	5.3	42	39	Low
14	Granite	5.9	44	42	Low
15	Granite	5.7	43	40	Low
16	Granite	4.5	40	37	Low

شاخص نرخ حفاری سنگ‌ها ارائه شده است. برای بررسی عملکرد روابط ارائه شده از چهار نشانگر آماری ضریب تعیین اصلاح شده  $R^2$  (adjusted)، ارزش حسابی  $(VAF\%)$ ، ریشه میانگین مربعات خطا  $(RMSE)$  و آزمون  $F$  فیشر استفاده شده است. مقادیر ضریب تعیین اصلاح شده، ارزش حسابی، ریشه میانگین مربعات خطا و آزمون  $F$  فیشر با استفاده از روابط (۱، ۲، ۳، ۴) محاسبه می‌شوند.

$$R^2_{\text{adjusted}} = 1 - \frac{(1-R^2)(N-1)}{N-P-1} \quad (1)$$

$$VAF(\%) = \left[ 1 - \frac{\text{var}(Ai-Pi)}{\text{var}(Ai)} \right] * 100 \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Ai - Pi)^2} \quad (3)$$

$$F = \frac{\frac{\sum(Pi-Ai+P)^2}{K}}{\frac{\sum(Ai-Pi)^2}{N-K-1}} \quad (4)$$

در این روابط  $Ai$ : مقدار واقعی،  $Pi$ : مقدار پیش بینی شده،  $P$ :

با پارامترهای بدست آمده از آزمایش مقاومت فشاری تک محوری و خصوصیات فیزیکی نمونه‌ها بانک اطلاعاتی شامل: دانسیته، ضریب لامه، مدول برشی، مقادیر کرنش الاستیک و کرنش کل، مدول یانگ، مدول پواسون، انرژی برگشت پذیر و انرژی کل، مدول بعد از نقطه پیک، برای محاسبه شاخص‌های شکنندگی ایجاد شده است (جدول ۵). از بین ۳۰ شاخص شکنندگی موجود ۱۶ شاخص شکنندگی به کمک این بانک اطلاعاتی و داده‌های موجود محاسبه شده است. نرمال بودن داده‌ها از نظر توزیع آماری به کمک آزمون‌های کولموگوروف - اسمیروف (Smirnov- ) و کولموگوروف (Kolmogorov)، چولگی (Skewness) و کشیدگی (Kurtosis) مورد بررسی قرار گرفته است. پس از محاسبه شاخص‌های شکنندگی، روابط آماری (رگرسیون ساده) بین این شاخص‌ها با

میانگین مقدار پیش بینی شده،  $K$ : تعداد متغیر مستقل استفاده شده در رابطه،  $n$ : تعداد نمونه‌ها  $N$ : تعداد کل نمونه  $P$ : تعداد متغیرهای پیش‌بینی و  $R^2$  ضریب تعیین می‌باشند. رابطه‌ای ایده آل است که ضریب تعیین اصلاح شده، ارزش حسابی و ریشه میانگین مربعات خطای آن به ترتیب ۱، ۱۰۰ درصد و صفر باشد. زمانی که

مقدار  $F$  بدست آمده از جدول توزیع با سطح اطمینان ۹۵ درصد کوچکتر از مقدار محاسبه شده از رابطه ۴ باشد، کارایی و مناسب بودن رابطه را تایید می‌نماید. در نهایت مدلی برای تعیین  $DRI$  از طریق شاخص‌های شکنندگی  $B3$  و  $B4$  به کمک تحلیل رگرسیونی چندگانه ارائه شده است.

جدول ۵- نتایج داده‌های حاصل از آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری و خصوصیات فیزیکی نمونه‌ها.

Table 5. The results of compression strength and physical properties tests of samples.

Rock code	Rock type	$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\lambda$	G (GPa)	$\epsilon_t$	$\epsilon_r$	$E_t$ (GPa)	$W_t$ (j/m <sup>3</sup> )	$W_r$ (j/m <sup>3</sup> )	$\nu$
1	Granite	2.64	9.87	19.15	0.0064	0.0056	44.80	346.10	306.20	0.17
2	Hornfels	2.77	13.11	27.86	0.0050	0.0038	64.60	509.10	432.60	0.16
3	Granodiorite	2.82	9.93	16.20	0.0084	0.0042	38.50	237.80	213.30	0.19
4	Granodiorite	2.69	12.99	25.23	0.0064	0.0061	59.10	384.50	314.50	0.17
5	Marble	2.71	5.29	4.15	0.0111	0.0046	10.60	113.50	93.20	0.28
6	Granite	2.66	9.98	21.21	0.0057	0.0056	49.20	382.30	351.60	0.16
7	Granite	2.66	10.07	9.29	0.0062	0.0056	23.40	124.60	97.50	0.26
8	Dolomite	2.72	9.92	9.92	0.0079	0.0030	24.80	127.60	99.60	0.25
9	Granite	2.70	7.32	13.01	0.0130	0.0071	30.70	392.20	317.50	0.18
10	Granodiorite	2.74	9.45	16.80	0.0053	0.0047	39.60	362.80	321.50	0.18
11	Granodiorite	2.67	14.24	33.22	0.0058	0.0050	76.40	176.10	160.10	0.15
12	Granite	2.84	9.98	19.38	0.0049	0.0043	45.30	130.80	113.70	0.17
13	Granite	2.68	6.61	11.57	0.0049	0.0030	27.30	228.30	155.30	0.18
14	Granite	2.68	8.51	17.44	0.0091	0.0039	40.60	285.60	228.60	0.16
15	Granite	2.69	9.29	20.62	0.0096	0.0046	47.60	340.60	284.60	0.15
16	Granite	2.77	8.83	19.43	0.0076	0.0053	44.90	339.60	258.70	0.16

$\gamma$ : دانسیته (g/cm<sup>3</sup>),  $W_r$ : انرژی برگشت پذیر (j/m<sup>3</sup>),  $W_t$ : انرژی کل (j/m<sup>3</sup>),  $E_t$ : مدول یانگ (GPa),  $\epsilon_r$ : کرنش الاستیک،

$\epsilon_t$ : کرنش کل،  $G$ : مدول برشی (GPa)،  $\lambda$ : ضریب لامه،  $\nu$ : مدول پواسون

## نتایج و بحث

در این پژوهش خواص مکانیکی ۱۶ نمونه سنگی مختلف از جمله سنگ‌های گرانیت، گرانودیوریت، دولومیت، هورنفلس و مرمر در محدوده پروژه تونل انتقال آب گلاس مطالعه شده است. پس از انجام آزمایش‌های ذکر شده، تحلیل‌های رگرسیونی ساده و چندگانه انجام شده است. تحلیل‌های رگرسیونی ساده و چندگانه مدل‌هایی را برای تخمین قابلیت حفاری سنگ‌ها ارائه می‌دهند. در ابتدا به بررسی نرمال بودن داده‌ها و دقت روابط ارائه شده با استفاده از روش‌های آماری پرداخته شده است. برای بررسی نرمال بودن داده‌ها از آزمون‌های کولموگروف - اسمیروف و چولگی و کشیدگی استفاده شده است (جدول ۶). آزمون کولموگروف - اسمیروف از معروف‌ترین آزمون‌ها برای برازش نرمال بودن داده‌ها است. هنگام بررسی نرمال بودن داده‌ها فرض صفر مبتنی بر اینکه توزیع داده‌ها نرمال است، در سطح اطمینان ۹۵٪ آموده می‌شود. اگر آماره آزمون بزرگتر یا مساوی ۰/۰۵ باشد در این صورت دلیلی برای رد فرض صفر مبتنی بر اینکه داده نرمال است، وجود نخواهد داشت. به عبارت دیگر توزیع داده‌ها نرمال خواهد بود. در آزمون کولموگروف - اسمیروف سطح معنی داری و  $Z$  آزمون از مقدار ۰/۰۵ بیشتر می‌باشند. در نتیجه فرض صفر مساله که پارامترهای ورودی نرمال‌اند، رد نخواهد شد. چولگی معیاری از تقارن یا عدم تقارن تابع توزیع می‌باشد. برای

یک توزیع کاملاً متقارن چولگی صفر و برای یک توزیع نامتقارن با کشیدگی منحنی به سمت مقادیر بالاتر چولگی مثبت و برای توزیع نامتقارن با کشیدگی منحنی به سمت مقادیر کوچکتر مقدار چولگی منفی است. کشیدگی نشان دهنده ارتفاع یک توزیع است. به عبارتی کشیدگی معیاری از بلندی منحنی در نقطه ماکزیمم است و مقدار کشیدگی برای توزیع نرمال برابر با عدد ۳ می‌باشد. کشیدگی مثبت یعنی قله منحنی توزیع مورد نظر از توزیع نرمال بالاتر و کشیدگی منفی نشانه پایین‌تر بودن از قله منحنی توزیع نرمال است. با توجه به اینکه در آزمون چولگی و کشیدگی مقادیر پارامترهای ورودی در بازه (۲ و -۲) قرار گرفته‌اند، توزیع آماری پارامترهای ورودی نرمال می‌باشند. پس از کنترل نرمال بودن پارامترهای ورودی، تحلیل آماری این پارامترها انجام شده است. در جدول ۷ مقادیر شاخص‌های شکنندگی  $B1, B2, B3, B4, B6, B7, B9, B10, B11, B19$ ،  $B24, B25, B26, B27, B28, B29$  براساس روابط موجود در جدول ۲ محاسبه گردیده است. در شکل ۶ (a تا p) رابطه بین شاخص‌های شکنندگی با شاخص نرخ حفاری سنگ‌ها برآزش شده است. در جدول ۸ نتایج این برآزش‌ها به صورت بهترین رابطه (نمایی، خطی و لگاریتمی) و مقدار ضریب تعیین و ریشه میانگین مربعات خطا نشان داده شده است.

جدول ۶- نتایج آزمون‌های کولموگوروف - اسمیرنوف، چولگی و کشیدگی.

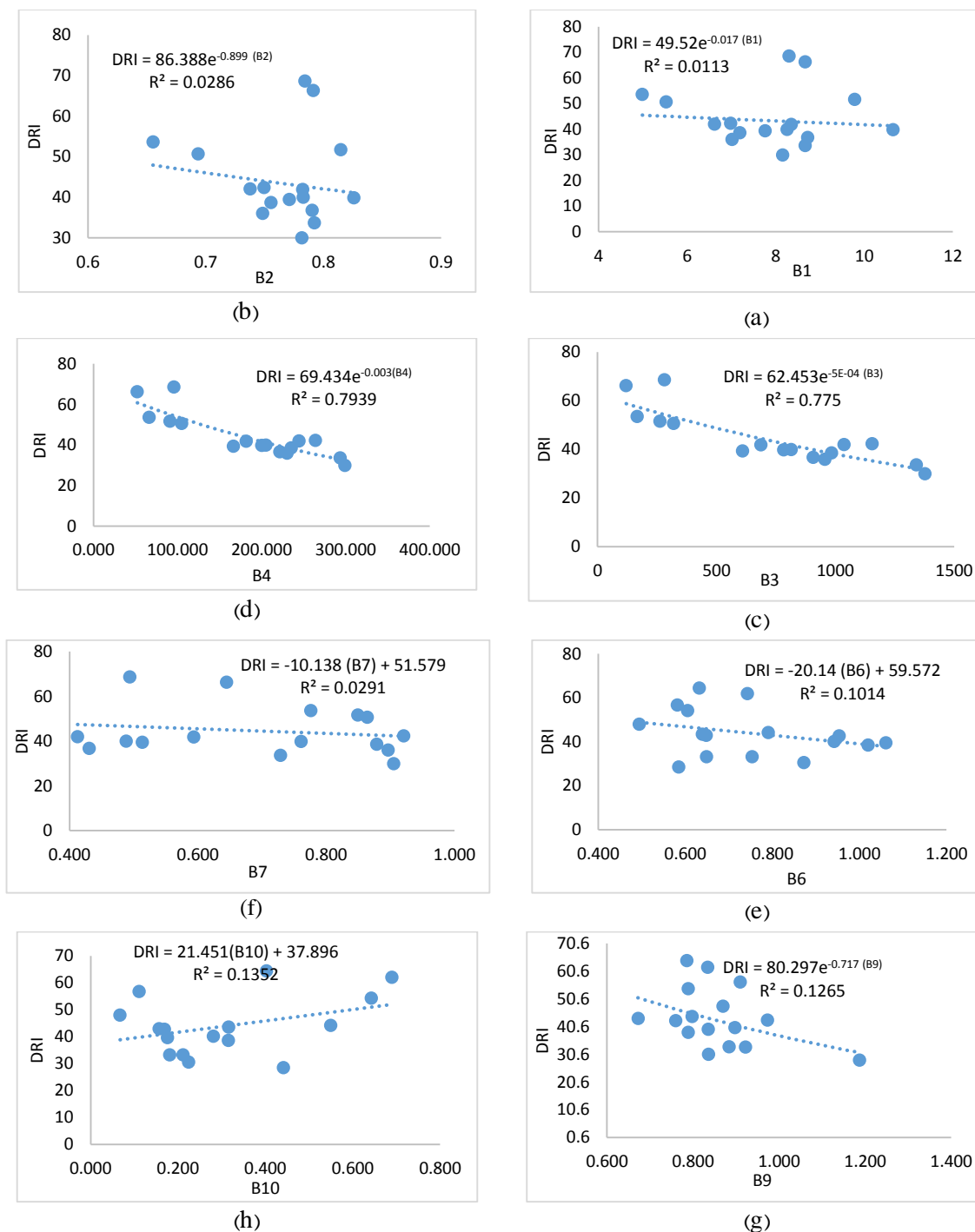
Table 6. Results of Smirnov- Kolmogorov (Z), skewness and kurtosis tests.

Parameter	Rock number	Smirnov – Kolmogorov (Z)	Kurtosis	Skewness	Significant
$\sigma$ (Mpa)	16	0.084	- 0.615	- 0.153	0.200
$\sigma_t$ (Mpa)	16	0.136	- 0.805	0.464	0.161
DRI	16	0.264	0.723	1.147	0.064
B1	16	0.081	- 0.156	- 0.046	0.200
B2	16	0.139	1.186	- 1.101	0.142
B3	16	0.104	- 0.600	0.264	0.200
B4	16	0.133	- 0.669	- 0.330	0.188
B6	16	0.149	0.065	0.335	0.087
B7	16	0.212	-1.58	-0.29	0.200
B9	16	0.102	0.404	- 0.708	0.200
B10	16	0.129	0.555	0.887	0.200
B11	16	0.129	0.555	- 0.887	0.200
B19	16	0.142	- 0.540	0.355	0.200
B24	16	0.254	2.04	-2.34	0.003
B25	16	0.203	1.598	- 1.514	0.060
B26	16	0.118	0.581	- 0.380	0.200
B27	16	0.130	0.650	- 0.441	0.200
B28	16	0.109	1.133	- 0.497	0.200
B29	16	0.111	0.661	- 0.076	0.200

جدول ۷- مقادیر شاخص‌های شکنندگی.

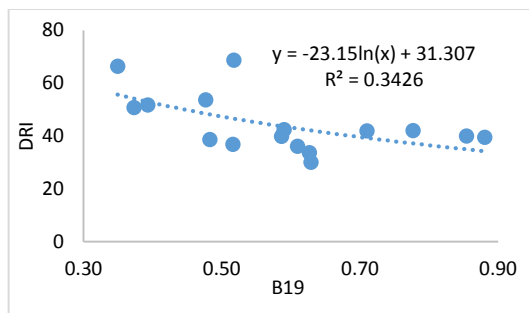
Table 7. Brittleness indices values.

Rock code	Rock type	B1	B2	B3	B4	B6	B7	B9	B10	B11	B19	B24	B25	B26	B28	B27	B29
1	Granite	7.0	0.7	952.5	229.90	0.64	0.89	0.90	0.88	0.21	0.78	0.973	0.97	4.9	1003.1	379.8	30.1
2	Hornless	8.8	0.8	1315.6	290.09	0.87	0.73	0.73	0.83	0.22	0.77	0.971	0.97	5.3	1007.8	364.0	27.5
3	Granodiorite	6.6	0.7	1036.9	244.40	0.94	0.41	0.41	0.90	0.28	0.72	0.962	0.96	3.7	538.4	190.9	18.6
4	Granodiorite	7.0	0.7	1157.8	264.58	0.64	0.92	0.92	0.82	0.15	0.84	0.974	0.97	4.3	912.9	323.2	28.3
5	Marble	8.6	0.8	120.9	52.02	0.74	0.64	0.64	0.83	0.69	0.31	0.908	0.91	1.9	104.5	38.6	5.6
6	Granite	7.2	0.7	982.8	235.14	0.75	0.88	0.87	0.92	0.18	0.82	0.972	0.97	5.1	958.1	359.5	28.1
7	Granite	4.8	0.6	168.5	66.06	0.60	0.78	0.77	0.78	0.64	0.35	0.936	0.93	2.1	170.9	64.3	8.9
8	Dolomite	8.2	0.7	281.1	95.49	0.63	0.50	0.50	0.78	0.40	0.60	0.960	0.96	2.9	402.5	147.8	16.6
9	Granite	10.5	0.8	786.3	200.25	0.79	0.76	0.76	0.80	0.55	0.45	0.954	0.95	4.5	516.6	190.5	16.2
10	Granodiorite	8.1	0.7	1368.4	298.42	0.58	0.91	0.90	0.91	0.44	0.56	0.965	0.96	4.0	613.7	223.6	20.8
11	Granodiorite	9.7	0.8	263.2	91.07	0.58	0.85	0.85	0.90	0.11	0.89	0.979	0.98	5.3	1360.0	509.3	38.3
12	Granite	5.5	0.7	320.1	104.86	0.50	0.86	0.86	0.87	0.06	0.93	0.967	0.96	4.5	757.4	266.7	22.7
13	Granite	7.7	0.7	607.8	166.37	0.64	0.51	0.51	0.68	0.31	0.68	0.964	0.96	4.8	732.0	273.0	21.8
14	Granite	8.3	0.7	685.9	181.50	0.95	0.60	0.60	0.76	0.17	0.83	0.969	0.97	5.1	884.9	329.4	25.5
15	Granite	8.2	0.7	812.5	205.04	1.06	0.49	0.48	0.83	0.17	0.82	0.968	0.97	5.0	845.5	313.9	24.6
16	Granite	8.7	0.8	905.3	221.63	1.02	0.43	0.43	0.78	0.31	0.68	0.962	0.96	4.7	678.3	246.2	20.2

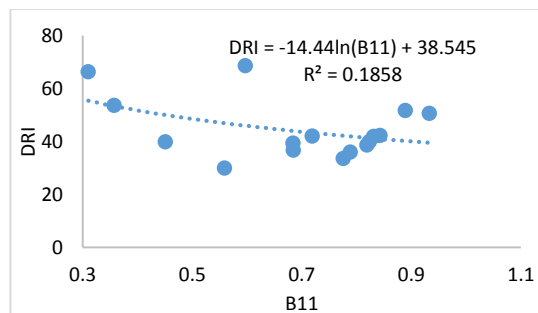


شکل ۶- ارتباط بین انواع شاخص‌های شکنندگی با شاخص نرخ حفاری سنگ‌ها (DRI) (a) B1، (b) B2، (c) B3، (d) B4، (e) B6، (f) B7، (g) B9، (h) B10، (i) B11، (j) B19، (k) B24، (l) B25، (m) B26، (n) B27، (o) B28، و (p) B29.

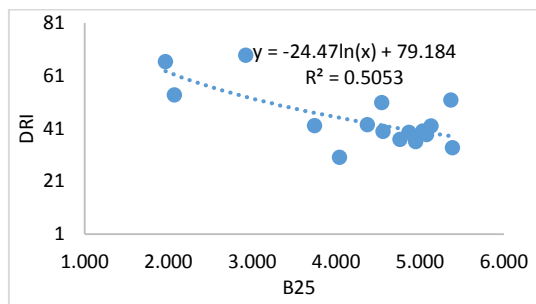
Fig. 6. Relationship between brittleness indices and drilling rate index (DRI) of rocks (a) B1, (b) B2, (c) B3, (d) B4, (e) B6, (f) B7, (g) B9, (h) B10, (i) B11, (j) B19, (k) B24, (l) B25, (m) B26, (n) B27, (o) B28, and (p) B29.



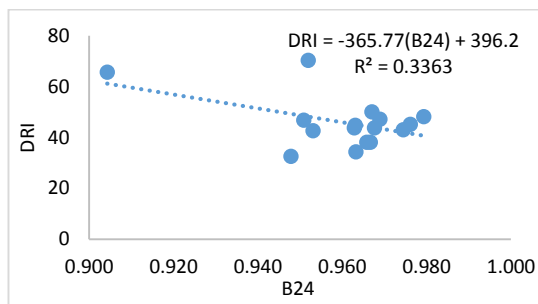
(j)



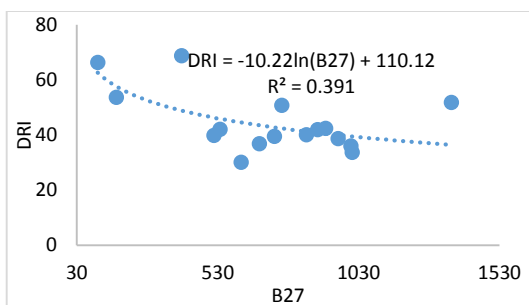
(i)



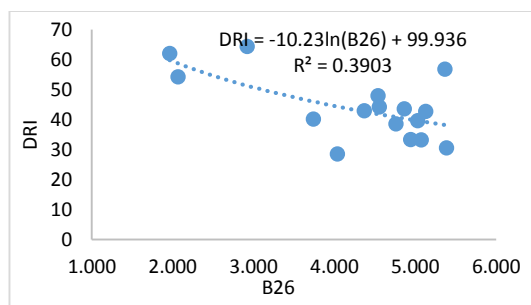
(l)



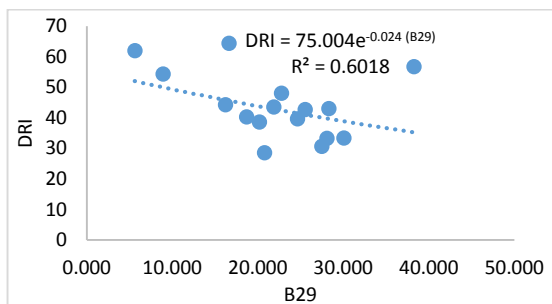
(k)



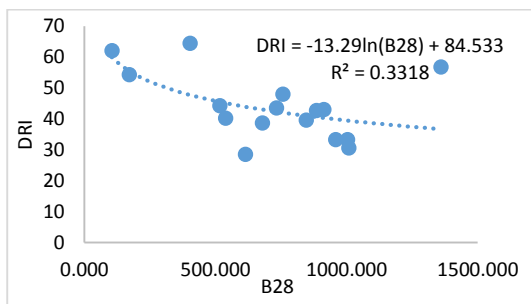
(n)



(m)



(p)



(o)

شکل ۶- ادامه

Fig. 6. Continued.

جدول ۸- نتایج برازش شاخص‌های شکنندگی با شاخص نرخ حفاری.

Table 8. Results of calculation brittleness indices with drilling rate index.

Number equation	equation	Equation type	(R <sup>2</sup> )	RMSE
a	DRI = 1.3931 exp - 0.017 (B1)	Exponential	0.01	11.86
b	DRI = 0.3777 exp -0.899 (B2)	Exponential	0.03	17.64
c	DRI = 62.453 exp -5E-04 (B3)	Exponential	0.78	1.02
d	DRI = 69.434 exp -0.003 (B4)	Exponential	0.79	0.95
e	DRI = -20.14 (B6) + 59.572	Linear	0.10	13.67
f	DRI = -10.138 (B7) + 51.579	Linear	0.03	12.11
g	DRI = 80.297 exp - 0.717 (B9)	Exponential	0.12	16.52
h	DRI = 21.451 (B10) + 37.896	Linear	0.13	8.83
i	DRI = -14.4 Ln (B11) +38.545	Logarithmic	0.18	10.95
j	DRI = -23.15 Ln (B19) +31.307	Logarithmic	0.34	10.98
k	DRI = - 365.77 (B24) + 396.2	Linear	0.33	66.31
l	DRI = -24.47 Ln (B25) +79.184	Logarithmic	0.50	10.05
m	DRI= -10.23Ln (B26)+99.936	Logarithmic	0.39	55.58
n	DRI = - 10.22Ln (B27) + 110.12	Logarithmic	0.39	168.35
o	DRI = -13.29 Ln (B28) + 84.533	Logarithmic	0.33	5.66
p	DRI = 75.004 exp - 0.024 (B29)	Exponential	0.60	13.78

آماري مورد بررسی قرار گرفته است. روابط خطی با شیب منفی بین (DRI) و شاخص شکنندگی B3 و B4 برای ۳۲ نمونه سنگی مختلف به ترتیب با ضریب تعیین ۰/۷۳ و ۰/۷۵ بدست آمده است (Yarali and Soyer, 2011). هم چنین رابطه خطی با شیب منفی بین (DRI) و شاخص شکنندگی B8=(σc×σt)/2 برای ۴۱ نمونه سنگی مختلف با ضریب تعیین ۰/۸۱ بدست آمده است (Ozfirat et al., 2016). در اشکال ۷ و ۸ به ترتیب مقایسه بین مقادیر DRI و شاخص‌های شکنندگی B3 و B4 در این پژوهش و پژوهش Yarali و Soyer (۲۰۱۱) نشان داده شده است. طبق روابط ۵ و ۶ در این پژوهش بین مقادیر DRI و شاخص‌های شکنندگی B3 و B4 به ترتیب ضریب تعیین ۰/۷۸ و ۰/۷۹ بدست آمده است. میزان دقت روابط ارائه شده در این پژوهش نزدیک به روابط ارائه شده توسط Yarali و Soyer (۲۰۱۱) است.

رابطه (۵)  $DRI = 61.753 \exp (-0.0005)(B3)$   
 $R^2=0.7764$   
 رابطه (۶)  $DRI= 68.511 \exp (-0.002)(B4)$   
 $R^2=0.7915$

با توجه به جدول ۸، روابط (c و d) بیشترین ضریب تعیین و کمترین ریشه میانگین مربعات خطا را بین شاخص شکنندگی سنگ‌ها با شاخص نرخ حفاری آن‌ها نشان می‌دهند. بنابراین در این پژوهش می‌توان شاخص‌های شکنندگی B3 و B4 را به عنوان قابل قبول‌ترین شاخص‌ها در مقایسه با شاخص‌های دیگر برای بررسی شاخص نرخ حفاری سنگ در نظر گرفت. به دلیل ماهیت متفاوت پارامترهای مورد استفاده در محاسبه شاخص‌های شکنندگی دیگر و ترکیب کانی شناسی متفاوت، در این شاخص‌ها ضریب تعیین کاهش و ریشه میانگین مربعات خطا افزایش یافته است. به عبارتی DRI ترکیبی از مقاومت سنگ در برابر ضربه و نفوذ است. لذا ترکیب کانی‌شناسی اثر مستقیم بر روی پارامترهای S20، SJ و میزان همبستگی روابط ارائه شده خواهد داشت.

پس از ارائه روابط به کمک رگرسیون ساده با استفاده از نشانگرهای آماری مختلف به بررسی توانایی و دقت روابط بدست آمده و عملکرد آن‌ها پرداخته می‌شود. در جدول ۹ نشانگرهای آماری برای پیش‌بینی عملکرد شاخص‌های شکنندگی محاسبه شده است. مقادیر نشانگرهای آماری معنی‌داری و کارایی روابط آماری ارائه شده را نشان می‌دهند.

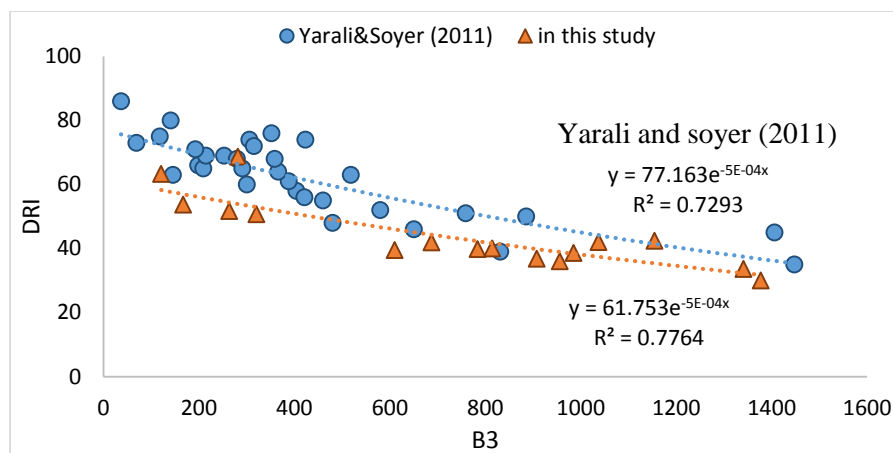
در مطالعات گذشته نیز شاخص‌های شکنندگی B3 و B4 با شاخص نرخ حفاری سنگ‌ها (DRI) با استفاده از روش‌های

جدول ۹- عملکرد نشانگرهای آماری برای پیش‌بینی شاخص‌های شکنندگی.

Table 9. Performance of statistical indicators for prediction brittleness indices.

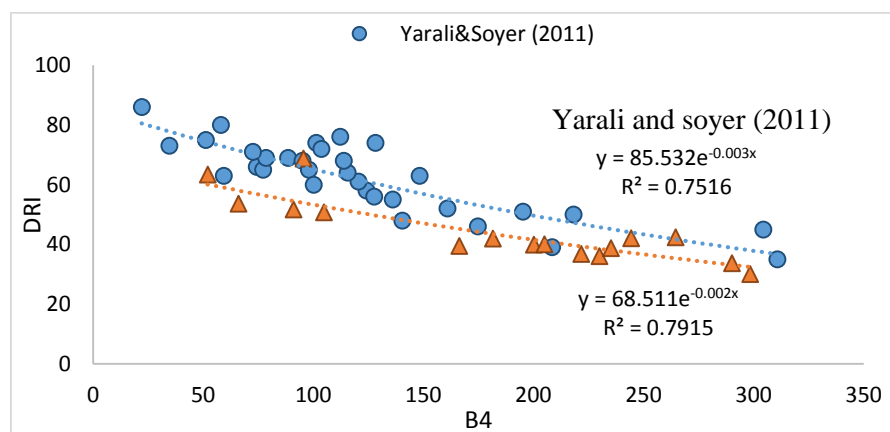
Brittleness index	Number equation	adjusted R <sup>2</sup>	RMSE	VAF (%)	F fisher	Tabulated F Values
B3	C	0.76	1.02	0.85	36.48	4.49
B4	D	0.79	0.95	0.89	42.44	4.49





شکل ۷- مقایسه مقادیر DRI با B3 در این پژوهش و پژوهش Yarali و Soyer (۲۰۱۱).

Fig. 7. Comparison DRI values with B3 in this study with Yarali and Soyer (2011) study.



شکل ۸- مقایسه مقادیر DRI با B4 در این پژوهش و پژوهش Yarali و Soyer (۲۰۱۱).

Fig. 8. Comparison DRI values with B4 in this study with Yarali and Soyer (2011) study.

آماري معنی داری و کارایی رابطه آماری ارائه شده را نشان می-دهند.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n \quad (\text{رابطه } Y)$$

مقایسه مقادیر و منحنی های DRI با شاخص های شکنندگی B3 و B4 تطابق قابل قبولی را نشان می دهند. با توجه به نتایج بدست آمده می توان گفت با افزایش شکنندگی سنگ ها میزان قابلیت حفاری آن ها کاهش می یابد. به عبارتی با افزایش مقاومت سنگ ها قابلیت خرد شدن و نفوذ در آن ها کاهش می یابد.

آنالیز رگرسیون چندگانه با سطح اطمینان ۹۵ درصد بین DRI با شاخص های شکنندگی B3 و B4 در نرم افزار IBM SPSS Statistics 23 انجام شده است. در آنالیز رگرسیون چندگانه مطابق با رابطه  $Y$  پارامتر  $Y$  به عنوان متغیر وابسته،  $X_1$  تا  $X_n$  به عنوان متغیر مستقل می-باشند. در جدول ۱۰ نتایج رگرسیون چندگانه و نشانگرهای آماری مربوط به اعتبارسنجی مدل ارائه شده است. مقادیر نشانگرهای

جدول ۱۰- مدل رگرسیون چندگانه و نشانگرهای آماری برای اعتبارسنجی مدل.

Table 10. Multiple regression model and some statistical indicators for the validation of model.

Equation	R	R <sup>2</sup>	Adjusted R <sup>2</sup>	Standard error	F fishr	sig	RMSE
DRI = 68.577 + 0.013 (B3) - 0.179 (B4)	0.87	0.76	0.72	5.80	20.45	0.000	1.071

### نتیجه گیری

شاخص‌های شکنندگی B3 و B4 در برابر شاخص نرخ حفاری سنگ‌ها بوده است. معنی‌داری و اعتبار روابط ارائه شده توسط نشانگرهای آماری  $R^2$  adjusted, VAF, RMSE و F فیشر مورد تایید می‌باشد. روابط ارائه شده با روابط محققین قبلی مورد مقایسه قرار گرفته است. روابط گذشته صحت و دقت روابط ارائه شده را تایید می‌نمایند. همچنین مدلی برای محاسبه DRI از طریق شاخص‌های شکنندگی B3 و B4 به کمک آنالیز رگرسیون چندگانه ارائه شده است. به کمک این روابط می‌توان قابلیت حفاری سنگ‌ها را تخمین زد. با افزایش مقاومت سنگ‌ها قابلیت خرد شدن و نفوذ در آن‌ها کاهش می‌یابد.

در این پژوهش با استفاده از نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی، منحنی تنش - کرنش و مدول سنگ‌ها شاخص‌های شکنندگی سنگ‌ها محاسبه شده است. هم چنین آزمایش‌های سیورز جی و شکنندگی برای محاسبه شاخص نرخ حفاری سنگ‌ها انجام شده است. به کمک آزمون‌های کولموگروف - اسمیرنوف، چولگی و کشیدگی، نرمال بودن داده‌ها تایید شده است. مقادیر ضریب تعیین ۱۶ شاخص - های شکنندگی محاسبه شده در برابر شاخص نرخ حفاری به کمک روش‌های آماری ارزیابی شده است. بیشترین ضریب تعیین به صورت نمایی و به ترتیب برابر با ۰/۷۸ و ۰/۷۹ مربوط به

### منابع

- Altindag, R., 2002. The evaluation of rock brittleness concept on rotary blast hold drills. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy 102(1), 61-66.
- Altindag, R., Guney, A., 2010. Predicting the relationships between brittleness and mechanical properties (UCS, TS and SH) of rocks. Scientific research and Essays 5(16), 2107-2118.
- Andreev, G.E., 1995. Brittle failure of rock materials: Test results and constitutive models. A.A. Balkema, Rotterdam, p. 446.
- ASTM, 2001. Standard Practice for Preparing Rock Core Specimens and Determining Dimensional and Shape Tolerances. American Society for Testing and Materials, D4543.
- ASTM, 2004. Test method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures, D7012-04.
- ASTM, 2008. Standard test method for splitting tensile strength of intact rock core specimens, D3967-08.
- Chen, J., Zhang, G., Chen, H., Yin, X., 2014. The Construction of Shale Rock Physics Effective Model and Prediction of Rock Brittleness. SEG Annual Meeting, Society of Exploration Geophysicists, 2861-2865.
- Copur, C., 2003. A set of indices based on indentation tests for assessment of rock cutting performance and rock properties. Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy 103, 589-599.
- Dahl, F., 2003. DRI, BWI, CLI and NTNU Standards. Angleggsdrift, Trondheim, p. 21.
- Dahl, F., Bruland, A., Jakobsen, P.D., Nilsen, B., Grov, E., 2012. Classifications of properties influencing the drillability of rocks based on the NTNU/SINTEF test method. Tunneling and Underground Space Technology 28, 150-158.
- Gong, Q.M., Zhao, J., 2007. Influence of rock brittleness on TBM penetration rate in Singapore granite. Tunneling and Underground Space Technology 22(3), 317-324.
- Goodway, B., Perez, M., Varsek, J., Abaco, C., 2010. Seismic petrophysics and isotropic anisotropic AVO methods for unconventional gas exploration. The Leading Edge 29 (12), 1500-1508.
- Hajiabdolmajid, V., Kaiser, P., 2003. Brittleness of rock and stability assessment in hardrock tunnelling. Tunneling and Underground Space Technology 18, 35-48.
- Hucka, V., Das, B., 1974. Brittleness determination of rocks by different methods. International Journal Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts 11, 389-392.
- Jarvie, D.M., Hill, R.J., Ruble, T.E., Pollastro, R.M., 2007. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 91(4), 475-499.
- Lawn, B.R., Marshall D.B., 1979. Hardness, toughness, and brittleness: an indentation analysis. Journal of the American Ceramic Society 62(7-8), 347-350.

- Luan, X., B. Di., J. Wei., X. Li., K. Qian., J. Xie., P. Ding., 2014. Laboratory Measurements of Brittleness Anisotropy in Synthetic Shale with Different Cementation. SEG Annual Meeting. Denver, Society of Exploration Geophysicists, 3005-3009.
- Macias, J.F., Dahl, F., Bruland, A., Kasling, H., Thuro, K., 2017. Drillability Assessments in Hard Rock. 3<sup>rd</sup> Nordic Rock Mechanics Symposium, Helsinki, Finland, Johansson & Raasakka (Eds.), 1-12.
- Meng, F., Zhou, H., Zhang, C., Xu, R., Lu, J., 2015. Evaluation methodology of brittleness of rock based on postpeak stress-strain curves. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 48(5), 1787-1805.
- Nejati, H., Moosavi, S.A., 2017. A new brittleness index for estimation of rock fracture toughness. *Journal of Mining and Environment* 8, 83-91.
- Ozfirat, M.K., Yenice, H., Simsir, F., Yarali, O., 2016. A new approach to rock brittleness and its usability at prediction of drillability. *Journal of African Earth Sciences* 119, 94-101.
- Quinn J.B., Quinn, G.D., 1997. Indentation brittleness of ceramics: a fresh approach. *Journal of Materials Science* 32(16), 4331-4346.
- Reichmuth, D.R., 1967. Point load testing of brittle materials to determine tensile strength and relative brittleness. The 9<sup>th</sup> US Symposium on Rock Mechanics (USRMS). American Rock Mechanics Association, pp. 134-159.
- Rickman, R., Mullen, M.J., Petre, J.E., Grieser, W.V., Kundert, D., 2008. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: All shale plays are not clones of the Barnett Shale, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers.
- Sun, S.Z., Wang, K.N., Yang, P., Li, X.G., Sun, J.X., Liu, B.H., Jin, K., 2013. Integrated Prediction of Shale Oil Reservoir Using Pre-Stack Algorithms for Brittleness and Fracture Detection, Beijing, International Petroleum Technology Conference.
- Suorineni, F.T., Chinnasane, D.R., Kaiser, P.K., 2009. A procedure for determining rock-type specific Hoek-Brown brittle parameter s. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 42(6), 849-881.
- Tarasov, B., Potvin, Y., 2013. Universal criteria for rock brittleness estimation under triaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 59, 57- 69.
- Tarasov, B.G., Potvin, Y., 2012. Absolute, relative and intrinsic rock brittleness at compression. *Mining Technology* 121(4), 218-225.
- Yagiz, S., 2009. Assessment of brittleness using rock strength and density with punch penetration test. *Tunnelling and Underground Space Technology* 24(1), 66-74.
- Yarali, O., 2007. Investigation of the relations between rock brittleness and drilling rate index. In: *Proceedings of the 20th International Mining Congress of Turkey*, (in Turkish), Ankara, Turkey, pp. 217-224.
- Yarali, O., Kahraman, S., 2011. The drillability assessment of rocks using the different brittleness values. *Tunnelling and Underground Space Technology* 26, 406-414.
- Yarali, O., Soyer, E., 2011. The effect of mechanical rock properties and brittleness on drillability. *Scientific Research and Essays* 6(5), 1077-1088.
- Yenice, H., Mehmet, V., Ozdogan, M., Ozfirat, K., 2018. A Sampling Study on Rock Properties Affecting Drilling Rate Index (DRI). *Journal of African Earth Sciences*, pp. 1-18.
- Zare, S., Bruland, A., 2013. Applications of NTNU/SINTEF drillability indices in hard rock tunneling. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 46(1), 179-187.

