



## Evaluating an Empirical Relationship for Determination of the Hydraulic Conductivity of the “Anomaly A” in the Sangan Iron Mine using Exploratory and Geotechnical Data

Mohsen Safari<sup>1</sup>, Faramarz Doulati Ardejani<sup>2\*</sup>, Soroush Maghsoudy<sup>3</sup>

1. Ph.D. Candidate, School of Mining, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, msafari66@ut.ac.ir
2. Professor, School of Mining, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, fdoulati@ut.ac.ir
3. Researcher, Mine Environment and Hydrogeology Research Laboratory (MEHR Lab), University of Tehran, Tehran, Iran, s.maghsoudy@ut.ac.ir

Received: 2022/07/09 - Accepted: 2023/08/19

### Abstract

The operation of open-pit mines requires a good understanding of the hydraulic properties of rock mass, especially hydraulic conductivity. Hydraulic conductivity is the ability of a rock mass to transmit water through pore spaces and/or fractures, which is of great importance in investigating issues such as seepage, drainage, and pit slope stability. Therefore, the researchers are searching for an appropriate method for determining the hydraulic conductivity of the rock mass. This study determined an empirical relationship of hydraulic conductivity based on parameters obtained from exploratory and geotechnical boreholes, including Rock Quality Designation (RQD), joint spacing, and compressive strength. The images of the core samples drilled in the western anomaly A of the Sangan iron mine were examined for this. The RQD value for each drilling interval was calculated by re-logging. By examining the drilling core images, the hydraulic conductivity of each drilling run along the borehole was evaluated by qualitative variables. Then, qualitative variables were converted to quantitative values using empirical relationships with similar geological conditions and hydraulic conductivity coefficients based on rock type. Finally, scatter plots of changes in hydraulic conductivity relative to the factors RQD, depth, joint spacing, and compressive strength were drawn, and regression curves were fitted to each plot. It was found that with an increase in depth, joint spacing, and compressive strength of the rock, hydraulic conductivity decreases. Still, there is no high correlation between changes in hydraulic conductivity and each of these factors. The results show that the relationship between hydraulic conductivity and RQD has a very high coefficient of determination ( $R^2=0.8247$ ). Therefore, this empirical relationship can be beneficial for estimating the hydraulic conductivity of the studied area.

### Keywords

Hydraulic conductivity, empirical relationship, RQD, geotechnical parameters, Sangan mine.

\* Corresponding Author



## 1- Introduction

Hydraulic conductivity is one of the essential characteristics of rock masses, and it significantly affects pore water pressure, groundwater level, water flow rate, and pit slope movements subject to mining operations. Many mining media have pores, joints, and cracks that act as conduits to transfer water into the mining area [1]. In addition, mining operations disrupt the natural stress in the rock mass around the mining site and cause deformation, especially fractures. By creating new fractures or opening pre-existing fractures in the rock mass, the hydraulic properties of the rock mass around the mining area will naturally change. As a result, the hydraulic conductivity will generally increase in horizontal and vertical directions. This causes a larger volume of water to be entered into the mining works through the fractures of the rock mass, leading to destructive effects in the working areas of the mine [2]. The hydraulic conductivity of the rock mass is determined for many purposes, such as determining the amount of water seepage around the pit walls, estimating the erodibility of the rock mass, determining the amount of water inflow entering the pit, designing the drainage system, etc. In addition, in some industrialized countries, deep underground excavations in hard rocks are considered suitable places to bury nuclear waste. Hence, the study of the hydraulic conductivity of rocks, groundwater flow, surface water infiltration, and the transport of dissolved radioactive pollutants through the groundwater flow system has become an important issue [3]. Estimating hydraulic conductivity is a significant task and is a preliminary stage in developing groundwater flow and contaminant transport models associated with mining. Many characteristics of groundwater flow in the rock mass media highly depend on the values of this parameter, and the most successful prediction of the state of groundwater flow in the rock masses is related to the accuracy in determining the hydraulic conductivity parameter. Several factors affect the hydraulic conductivity of rock masses, including the amount and type of stress and the dimensions and characteristics of discontinuities comprising aperture, density, persistence, orientation, interconnectivity, filling material, and roughness. Moreover, the geological and tectonic parameters, including depth, RMR, RQD, GSI, uniaxial compressive strength of rocks, and rock type, also affect the hydraulic conductivity of the fractured rock masses [4].

In the current study, an empirical relationship is presented for determining the hydraulic conductivity of the rock mass using geotechnical data obtained from the exploratory boreholes based on the influential factors in the desired pit area. Using this method to determine a proper relationship for hydraulic conductivity is a new idea for implementing this method. Information on the Sangan iron mine in northeast Iran has been used. Based on this, to empirically estimate the hydraulic conductivity of the rock mass, the influential factors, including RQD, depth, joint spacing, and the compressive strength of the rocks and their interaction in determining the hydraulic conductivity, were first investigated and analyzed. This allows parameters affecting hydraulic conductivity in the study area to be determined.

## 2- Methods

In this study, to determine the hydraulic conductivity ( $K$ ), the images of the cores taken from the geotechnical borehole BHAK-23, BHAK-41, and BHAK-61 were first checked, and the value of RQD was calculated by re-logging of each drill run. By examining the drilling core images, the hydraulic conductivity of each drilling run along the borehole was evaluated using qualitative variables A, B, C, and D (Figure 1). To convert qualitative variables to quantitative ones, the average hydraulic conductivity was calculated in each borehole considering depth factors, RQD, and rock type and applying empirical relationships used in the areas exhibiting the same geological conditions [5-7] and also using the relationships developed based on the rock type only [8-10]. For example, the average hydraulic conductivities calculated in some segments of the length of the borehole BHAK-23 are presented in Table 1. Then, the most considerable calculated value corresponding to qualitative variable A and the smallest value corresponding to D were considered, and variables B and C were also transformed into quantitative variables relative to A and D (Table 2).

Finally, to obtain an empirical relationship for the hydraulic conductivity of anomaly A in the

Sangan iron mine, the scatter plot of the evaluated hydraulic conductivity variations in the previous stage was drawn based on each of the factors RQD, depth, joint spacing, and rock compressive strength. Regression curves were fitted to each of the plots, which will be further examined and analyzed to provide a suitable empirical relationship for estimating the hydraulic conductivity of the studied area.



Figure 1. An example of the image of the evaluated drilling core

Table 1. Hydraulic conductivity estimated by empirical relationships of borehole BHAK-23

Dept (m)	RQD (%)	Rock type	Joint Spacing (mm)	Compressive strength (Mpa)	Hydraulic conductivity based on different factors (m/s)				Average Hydraulic Conductivity (m/s)
					Rock type [8-10]	Depth [5]	RQD [6]	RQD [7]	
17.5	0	Shale	0	0	$10^{-10.5}$	$5.06 \times 10^{-7}$	$1.38 \times 10^{-5}$	$1.03 \times 10^{-6}$	$3.84 \times 10^{-6}$
62.5	70	Shale	130	37.5	$10^{-10.5}$	$2.75 \times 10^{-7}$	$1.07 \times 10^{-6}$	$1.34 \times 10^{-7}$	$3.71 \times 10^{-7}$
64.5	30	Shale	0	0	$10^{-10.5}$	$2.71 \times 10^{-7}$	$3.62 \times 10^{-6}$	$1.27 \times 10^{-7}$	$1.004 \times 10^{-6}$
130.5	65	Limestone	0	0	$10^{-8}$	$1.93 \times 10^{-7}$	$1.3 \times 10^{-6}$	$4.12 \times 10^{-8}$	$3.85 \times 10^{-7}$
136.75	50	Basalt	400	75	$10^{-11.5}$	$1.89 \times 10^{-7}$	$2.08 \times 10^{-6}$	$3.82 \times 10^{-8}$	$5.78 \times 10^{-7}$
140.25	48	Shale	400	37.5	$10^{-10.5}$	$1.86 \times 10^{-7}$	$2.21 \times 10^{-6}$	$3.67 \times 10^{-8}$	$6.07 \times 10^{-7}$
141.75	30	Basalt	0	0	$10^{-11.5}$	$1.85 \times 10^{-7}$	$3.62 \times 10^{-6}$	$3.61 \times 10^{-8}$	$9.59 \times 10^{-7}$
443.3	12.5	Limestone	0	0	$10^{-8}$	$1.07 \times 10^{-7}$	$6.24 \times 10^{-6}$	$5.82 \times 10^{-9}$	$1.6 \times 10^{-6}$

Table 2. Qualitative and quantitative parameters of hydraulic conductivity evaluation

Linguistic variable	Qualitative value	Quantitative value of corresponding hydraulic conductivity (m/s)
Very High	A	$5.58958 \times 10^{-6}$
High	B	$3.73639 \times 10^{-6}$
Moderate	C	$1.8832 \times 10^{-6}$
Low	D	$3.00059 \times 10^{-8}$

### 3- Findings and Argument

The results of investigating the relationship between hydraulic conductivity and different parameters revealed that a good correlation between hydraulic conductivity and RQD indicates the fairness of this relationship for the study area. Therefore, the regression equation (Figure 2 and Eq. 1) can provide a valuable tool for predicting the hydraulic conductivity of the rock mass as a function of measured values of RQD per each drilling run of the borehole length in the western deposits of the Sangan iron mine.

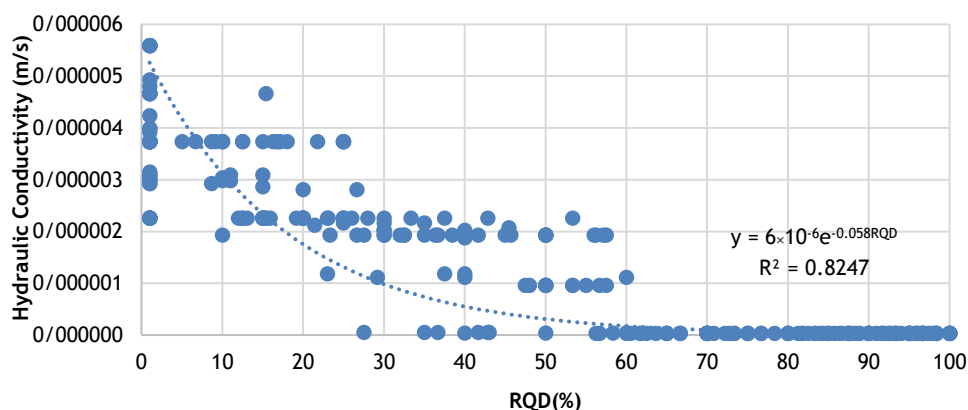


Figure 2. Regression result of hydraulic conductivity (K) with RQD

$$K = 6 \times 10^{-6} \times e^{-0.058RQD}, R^2 = 0.8247 \tag{Eq. 1}$$

In order to further verify the applicability of the empirical relationship obtained for estimating the hydraulic conductivity of the rock mass of the study area, the values estimated from Eq. 1 have been compared with those obtained from the equation presented by Hsu et al. (2011) [11]. Hsu et al.'s equation relies on the RQD, depth, gouge content, and lithology indices to estimate rock mass hydraulic conductivity, and it is highly similar to the work done in this research. In the equation of Hsu et al., the hydraulic conductivity index (HC) is defined as Eq. 2.

$$HC = (1 - \frac{RQD}{100})(DI)(1 - GCD)(LPI) \tag{Eq. 2}$$

RQD is the rock quality designation; DI represents the depth index; GCD is the gouge content designation; and LPI is the lithology permeability index.

Finally, the relationship between hydraulic conductivity and HC index presented by Hsu et al. with a coefficient of determination of 0.866 can be expressed by Eq. 3.

$$K = 2.93 \times 10^{-6} \times (HC)^{1.38} \tag{Eq. 3}$$

where K is the hydraulic conductivity (m/s).

This comparison was made for some segments of the total length of a borehole that intersected shale, limestone, and basalt. By comparing the values of hydraulic conductivity estimated by Eq. 1 and the values obtained using the equation of Hsu et al., it was found that the results of the empirical equation presented here are very close to those obtained from the empirical equation of Hsu et al. Therefore, it is possible to understand the rationality of the estimated hydraulic conductivity values resulting from Eq. 1.

By using Eq. 1, the hydraulic conductivity in the study area can be obtained directly from the logging or re-logging information of exploratory boreholes, which reduces the cost of in-situ hydraulic tests and the duration of determining the hydraulic conductivity of the rock mass in the investigated area to the minimum possible.

#### 4- Conclusions

One of the critical parameters that must be determined in the hydrogeological investigations of mines is the hydraulic conductivity of the fractured-porous rock mass. By correctly determining the hydraulic conductivity parameter, it is possible to accurately predict groundwater inflows to a mine pit and design a proper drainage system. Based on this, various methods, including in-situ methods, experimental, analytical, and numerical methods, have been presented to estimate hydraulic conductivity. However, the equations obtained are only valid for a specific geological condition or

mines with similar geological characteristics. However, a particular equation should be determined for a mining site with different geological and lithological conditions.

In this study, in order to determine a relationship between hydraulic conductivity and RQD, depth, joint spacing, and rock compressive strength parameters, scatter plots of changes in hydraulic conductivity relative to each of these factors were drawn, and regression curves were fitted to each of the plots. The analysis results showed an exponential relationship between the two parameters of hydraulic conductivity and RQD with a good coefficient of determination ( $R^2=0.8247$ ). In addition, to validate and confirm the obtained equation, Hsu et al.'s empirical formula was used, and it was found that the estimated values are very close to the results obtained using Hsu et al.'s equation. The resulting equation provides a valuable tool for predicting the hydraulic conductivity of the rock mass based on the measured RQD values. From the equation obtained for hydraulic conductivity as a function of RQD, it is possible to estimate the hydraulic conductivity of the rock mass of the study area by using the logging information from exploratory and geotechnical boreholes. Estimating the hydraulic conductivity using the equation presented here and high accuracy is cost-saving and time-efficient. This study also showed that such an approach is very productive for subsurface hydrogeological assessment, especially in the absence of hydraulic test data due to limited financial resources.

## References

1. Aryafar, A., and Doulati Ardejani, F., 2009; "Anisotropy and bedding effects on the hydrogeological regime in a confined aquifer to design an appropriate dewatering system," *International Journal of Environmental Science and Technology*, 6, 563-570.
2. Aryafar, A., Khosravi, V., and Karami, Sh., 2020; "Groundwater quality assessment of Birjand plain aquifer using kriging estimation and sequential Gaussian simulation methods," *Environmental Earth Sciences*, 79, 1-21.
3. Lugeon, M., 1933; "Barrages of Geology Dunned," Paris.
4. Louis, C., 1974; "Rock Hydraulics in Rock Mechanics (ed. L. Muller)," Springer Verlag, Vienna.
5. Chen, Y. F., Ling, X. M., Liu, M. M., Hu, R., and Yang, Z., 2018; "Statistical distribution of hydraulic conductivity of rocks in deep-incised valleys, Southwest China," *Journal of Hydrology*, 566, 216-226.
6. Qureshi, M. U., Khan, K. M., Bessaih, N., Al-Mawali, K., and Al-Sadrani, K., 2014; "An empirical relationship between in-situ permeability and RQD of discontinuous sedimentary rocks," *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 19, 4781-4790.
7. Carlsson, A., and Olsson, T., 1977; "Hydraulic properties of Swedish crystalline rocks-hydraulic conductivity and its relation to depth," *Bulletin of the Geological Institute, University of Uppsala*, NS, 7, 71-84.
8. Bear, J., 1972; "Dynamics of Fluids in Porous Media, American Elsevier Publication Co., New York
9. Spitz, K., and Moreno, J., 1996; "A practical guide to groundwater and solute transport modeling," John Wiley, New York, 480 p.
10. Singhal, B. B. S. and Gupta, R.P., 1999; "Applied hydrogeology of fractured rocks," Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 400 p.
11. Hsu, S. M., Lo, H. C., Chi, S. Y., and Ku, C. Y., 2011; "Rock mass hydraulic conductivity estimated by two empirical models," *Developments in hydraulic conductivity research*, In Dikinya O (ed) *Developments in hydraulic conductivity research*, InTech, New York, pp 134-158.



## مقاله پژوهشی

## ارایه رابطه تجربی برای تعیین هدایت هیدرولیکی محدوده آنومالی A معدن سنگ آهن سنگان با بهره‌گیری از اطلاعات گمانه‌های اکتشافی و ژئوتکنیکی

محسن صفری<sup>۱</sup>، فرامرز دولتی ارده‌جانی<sup>۲\*</sup>، سروش مقصودی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، msafari66@ut.ac.ir

۲. استاد، دانشکده مهندسی معدن، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، fdoulati@ut.ac.ir

۳. پژوهشگر، آزمایشگاه تحقیقاتی MEHR، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، s.maghsoudy@ut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۱۸ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۸

## چکیده

انجام عملیات استخراج در معادن روباز مستلزم شناخت خواص هیدرولیکی توده سنگ به ویژه هدایت هیدرولیکی است. هدایت هیدرولیکی، میزان توانایی توده سنگ برای انتقال سیالات است که در بررسی مشکلات نشت، زهکشی و پایداری دیواره‌های کاواک معادن روباز اهمیت زیادی دارد. از این رو، محققان در جستجوی روش مناسبی برای تعیین هدایت هیدرولیکی توده سنگ تشکیل‌دهنده مناطق معدنی‌اند. در این مطالعه، برای تعیین رابطه تجربی هدایت هیدرولیکی بر اساس پارامترهای حاصل از گمانه‌های اکتشافی و ژئوتکنیکی شامل شاخص کیفی توده سنگ (RQD)، فاصله‌داری درزه‌ها و مقاومت فشاری، ابتدا تصویر مغزه‌های گمانه‌های ژئوتکنیکی حفر شده در آنومالی A کانسار غربی معدن سنگ آهن سنگان بررسی و با نمودارنگاری مجدد مقدار RQD برای هر نوبت حفاری محاسبه شد و با بررسی تصاویر مغزه‌های حفاری، هدایت هیدرولیکی هر ران حفاری در طول گمانه با متغیرهای کیفی ارزیابی شد. سپس با استفاده از روابط تجربی با شرایط زمین‌شناسی مشابه و ضرایب هدایت هیدرولیکی ارایه شده بر اساس جنس سنگ متغیرهای کیفی به کمی تبدیل شدند. در نهایت نمودار پراکندگی تغییرات هدایت هیدرولیکی نسبت به هر یک از فاکتورهای RQD، عمق، فاصله‌داری درزه‌ها و مقاومت فشاری سنگ رسم و منحنی رگرسیون بر هر یک از نمودارها برازش شده و مشخص شد با افزایش هر یک از فاکتورهای عمق، فاصله‌داری درزه‌ها و مقاومت فشاری سنگ، هدایت هیدرولیکی کاهش می‌یابد اما همبستگی بالایی بین تغییرات هدایت هیدرولیکی با هر یک از این فاکتورها وجود ندارد. نتایج نشان می‌دهد که رابطه هدایت هیدرولیکی بر اساس RQD ضریب تعیین بسیار بالایی دارد ( $R^2=0.8247$ )، بنابراین این رابطه تجربی می‌تواند برای تخمین هدایت هیدرولیکی محدوده مورد مطالعه بسیار مفید واقع شود.

## کلمات کلیدی

هدایت هیدرولیکی، رابطه تجربی، شاخص کیفی توده سنگ، پارامترهای ژئوتکنیکی، معدن سنگان



## ۱- مقدمه

هیدروژئولوژیکی معادن به کار گرفته شده است. هر یک از این روش‌ها مزایا و معایب متعددی دارند. با وجود اینکه تمام این تحقیقات درک بهتری از عوامل کنترل‌کننده هدایت هیدرولیکی می‌دهند، نمی‌توان به دنبال یک رابطه کلی بین هدایت هیدرولیکی و سایر عوامل و پارامترها بود که برای مناطق معدنی مختلف معتبر باشد. با این وجود همه پذیرفته‌اند که قابل اعتمادترین روش تعیین نفوذپذیری درجا در توده سنگ، آزمایش لوژان است [۴۵] اما در عمل، روش‌های مورد استفاده برای ترسیم خواص هیدرولیکی پرهزینه و زمان‌برند [۴۶]. از آنجا که جریان آب از طریق توده سنگ ناپیوسته رخ می‌دهد باید از خواص آن‌ها برای تعیین هدایت هیدرولیکی استفاده شود [۴۷]. با توجه به اینکه روابط تجربی موجود مبتنی بر داده‌های میدانی‌اند و از خواص توده سنگ برای تعیین هدایت هیدرولیکی استفاده می‌کنند، نسبت به سایر روش‌ها قابل اعتمادترند. در پژوهش حاضر نیز از روشی تجربی برای تعیین رابطه‌ای برای تخمین هدایت هیدرولیکی بهره گرفته شده است.

## ۲- مبانی موضوع تحقیق

## ۲-۱- روابط تجربی تخمین هدایت هیدرولیکی

استفاده از روابط تجربی روشی معمول در تعیین هدایت هیدرولیکی در مطالعات هیدروژئولوژیکی معادن است که از داده‌هایی مانند آزمایش‌های میدانی، اطلاعات مغزه‌های حفاری و یا پارامترهایی مانند عمق و ویژگی‌های زمین‌شناسی بهره گرفته می‌شود. از آنجا که مطالعات تجربی معمولاً مبتنی بر اطلاعات اکتشافی و ژئوتکتونیک برای کاهش هزینه‌های مربوط به مطالعات هیدروژئولوژیکی معادن است، همبستگی متقابل بین مجموعه داده‌ها می‌تواند بینش بیشتری را در تعیین هدایت هیدرولیکی سنگ‌ها ارایه دهد. روابط تجربی به دست آمده توسط محققان مختلف در جدول ۱ ارایه شده است. کاربرد هر رابطه تجربی موجود، محدود به سنگ خاصی است که داده‌های تجربی از آن به دست آمده است و امکان استفاده از آن در مطالعات هیدروژئولوژیکی سایر سایت‌های معدنی با توجه به تغییر نوع و مشخصات هندسی توده سنگ وجود ندارد. تعدادی از محققان [۱۲-۷، ۴-۲۱-۲۰] روابط تجربی برای تغییرپذیری هدایت هیدرولیکی نسبت به عمق را ارایه داده‌اند و بیان کردند که هدایت هیدرولیکی یک توده سنگ با عمق کاهش می‌یابد و ویژگی‌های زمین‌شناسی یک توده سنگ بر هدایت هیدرولیکی تاثیر می‌گذارد. تغییر هدایت هیدرولیکی توده سنگ

هنگامی که معدنکاری روباز در ترازهای پایین‌تر از سطح آب زیرزمینی انجام می‌شود آب زیرزمینی به داخل محدوده کاری معدن جریان می‌یابد و ممکن است باعث از دست دادن دسترسی به بخشی یا تمام معدن، افزایش هزینه‌های جاری، خوردگی تجهیزات، حمل و نقل ناکارآمد و شرایط کاری نایمن شود. کاواک آنومالی A معدن سنگ آهن سنگان نیز بعد از چند سال بهره‌برداری و استخراج سنگ معدن به تراز پایین‌تر از سطح آب زیرزمینی رسیده است، به طوری که آب‌های زیرزمینی از لایه‌های اطراف به سمت داخل کاواک جریان یافته و عملیات استخراج با مشکلات و مخاطرات متعددی مواجه شده است، بنابراین بررسی رفتار هیدرولیکی و هیدروژئولوژیکی توده سنگ تشکیل‌دهنده این منطقه معدنی و نحوه جریان آب زیرزمینی در اطراف کاواک این معدن یکی از مهم‌ترین و چالش برانگیزترین مسایل مرتبط با هیدروژئولوژی معدن سنگ آهن سنگان است. یکی از پارامترهای مهم هیدرولیکی، هدایت هیدرولیکی است که قابلیت عبور آب در میان خلل و فرج و درزه و شکاف‌های توده سنگ را بیان می‌کند. بسیاری از ویژگی‌های جریان و حرکت آب زیرزمینی در محیط توده سنگ به مقادیر این پارامتر بستگی دارد و بیشترین موفقیت در پیش‌بینی وضعیت حرکت آب زیرزمینی در معادن به میزان دقت در برآورد پارامتر هدایت هیدرولیکی مربوط می‌شود، به طوری که با افزایش و کاهش هدایت هیدرولیکی در توده سنگ، رفتار و ویژگی‌های جریانی آب زیرزمینی تغییر می‌کند [۱].

هدایت هیدرولیکی توده سنگ‌های تشکیل‌دهنده مناطق معدنی برای اهدافی مانند تعیین میزان نشت آب، تعیین میزان آب ورودی به کارهای معدنی، طراحی سیستم زهکشی و نظایر آن تعیین می‌شود و در مطالعات و شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی محدوده معدن به عنوان یک پارامتر مهم کاربرد دارد که با عدم قطعیت‌های مختلفی روبه‌رو است [۲]. عوامل متعددی بر میزان هدایت هیدرولیکی توده سنگ‌ها موثر است که از آن جمله می‌توان به میزان و نوع تنش، ابعاد و ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها مانند بازشدگی دسته درزه‌ها، توزیع درزه‌ها و فاصله‌داری آن‌ها، عمق، پارامترهای زمین‌شناسی و تکتونیک شامل RMR، RQD، GSI، مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ‌ها و جنس آن‌ها اشاره کرد. برآورد هدایت هیدرولیکی توده سنگ تشکیل‌دهنده محدوده کاواک معدن روباز و به ویژه برآورد جریان آب ورودی به کاواک معدن، از دیرباز مورد توجه محققان مختلف بوده است. بدین منظور روش‌های مطالعاتی مختلفی شامل آزمایش‌های برجا [۳]، روش‌های تجربی [۲۲-۴]، روش‌های تحلیلی [۲۹-۲۳] و مدل‌سازی عددی [۴۴-۳۰] برای تعیین هدایت هیدرولیکی به منظور بررسی‌های

جدول ۱- روابط مختلف تجربی برای تخمین هدایت هیدرولیکی توده سنگ

پارامترهای رابطه	رابطه	مرجع	ردیف
K: نفوذپذیری بر حسب $ft^2$ و z: عمق بر حسب ft	$\log K = -8.9 - 1.671 \log Z$	Snow, 1969 [4]	۱
K: هدایت هیدرولیکی بر حسب m/s، $K_s$ : هدایت هیدرولیکی نزدیک سطح زمین، H: عمق (m) و A: گرادیان هیدرولیکی	$K = K_s e^{(-Ah)}$	Louis, 1974 [5]	۲
K: هدایت هیدرولیکی بر حسب m/s و z: عمق بر حسب متر	$\log K = 5.57 + 0.352 \log Z$ $-0.978(\log Z)^2 + 0.167(\log Z)^3$	Burgess, 1977 [6]	۳
K: هدایت هیدرولیکی بر حسب m/s و z: عمق بر حسب متر	$K = 10^{-(1.6 \log Z + 4)}$	Carlson and Olsson, 1977 [7]	۴
RQD: شاخص کیفیت توده سنگ، $J_n$ : تعداد شکستگی یا تعداد درزه، $J_k$ : هدایت هیدرولیکی شکست، $J_{af}$ : درجه بازشدگی شکست و $J_w$ : محتوای آب درزه یا شکست	$HP_{rating} = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_k \times J_{af}} \times J_w$	Gates, 1977 [8]	۵
K: هدایت هیدرولیکی شکست بر حسب m/s، E: بازشدگی مکانیکی ( $\mu m$ ) اندازه‌گیری شده در محل، $\nu$ : بازشدگی هیدرولیکی ( $\mu m$ ) و JRC: ضریب زبری درزه	$K = \frac{gE^3}{12\nu \left[ 1 + 8.8 \left( 0.5 - \frac{E}{2JRC^{2.5}} \right)^{1.5} \right]}$	Barton et al., 1985 [9]	۶
a, b: ثابت و Z: عمق قایم زیر سطح آب زیرزمینی بر حسب متر	$K = aZ^{-b}$	Black, 1987 [10]	۷
K: هدایت هیدرولیکی بر حسب m/s، $K_0$ : هدایت هیدرولیکی نزدیک سطح زمین m/s و z: عمق (m) و $\mu$ و $\beta$ : ثابت‌های تجربی	$K = K_0 \left( \frac{1-Z}{\mu} \right)^\beta$	Strack, 1989 [11]	۸
K: هدایت هیدرولیکی بر حسب m/s، $K_i$ : هدایت هیدرولیکی نزدیک سطح زمین m/s و z: عمق (m)	$K = K_i \left( 1 - \frac{Z}{58 + 1.02Z} \right)^3$	Wei et al., 1995 [12]	۹
K: هدایت هیدرولیکی در لوژان (tL)، RQD: شاخص کیفیت توده سنگ و RMR: شاخص رده‌بندی توده سنگ	$K = 177.45e^{(-0.0346 \times RQD)}$ $K = 5 \times 10^6 e^{(-1.1923 \times RMR)}$	El-Naqa, 2001 [13]	۱۰
	$K = 890.9e^{(-0.0559 \times RQD)}$ $K = 3166.1e^{(-0.0755 \times RMR)}$	El-Naqa, 2001 [13]	۱۱
K: هدایت هیدرولیکی بر حسب m/s، h: عمق (m) و RQD: شاخص کیفیت توده سنگ	$K = 0.4892 \times e^{(-0.0543 \times RQD)}$ $RQD = 0.2875h + 65.751$	Jiang et al., 2009 [14]	۱۲
K: هدایت هیدرولیکی بر حسب m/s، RQD: شاخص کیفیت توده سنگ، DI: شاخص عمق، GCD: شاخص گوج گسلی و LPI: شاخص نفوذپذیری لیتولوژیکی	$K = 2.93 \times 10^{-6} \times (HC)^{1.38}$ $HC = \left( 1 - \frac{RQD}{100} \right) (DI)(1 - GCD)(LPI)$	Hsu et al., 2011 [15]	۱۳
$K_a$ : هدایت هیدرولیکی ظاهری (cm/s) و RQD: شاخص کیفیت توده سنگ	$K_a = 0.01382 - 0.003 \ln RQD$	Qureshi et al., 2014 [16]	۱۴
K: هدایت هیدرولیکی بر حسب m/s، RQD: شاخص کیفیت توده سنگ، AD: بازشدگی شکست، RID: شاخص یکپارچگی سنگ، LPI: شاخص نفوذپذیری لیتولوژیکی، $V_p$ : سرعت موج P الاستیک توده سنگ، $V_f$ : سرعت موج P الاستیک بلوک سنگ، c و d ثابت تجربی	$RMP = (1 - RQD)(1 - RID)(AD)(LPI)$ $RID = \left( \frac{V_p}{V_f} \right)^2$ $K = c(RMP)^d$	Song et al., 2014 [17]	۱۵



جدول ۱- روابط مختلف تجربی برای تخمین هدایت هیدرولیکی توده سنگ (ادامه)

ردیف	مرجع	رابطه	پارامترهای رابطه
۱۶	Jun et al., 2016 [18]	$\log K = \alpha + \lambda PD + \gamma \log Z$ $PD = (1 - RQD)(1 - GCD)$	K: هدایت هیدرولیکی (cm/s)، $\alpha$ ، $\lambda$ و $\gamma$ ثابت‌های تجربی، RQD: شاخص کیفیت توده سنگ، GCD: شاخص گوج گسلی، Z: عمق (m)
۱۷	Öge, 2017 [19]	$ul = e^{\left[ \left( 5.5 + \left( \frac{16.5 JCond - 165}{RQD} \right) \right) - 1 \right]}$	ul: مقدار لوژان برای هدایت هیدرولیکی، RQD: شاخص کیفیت توده سنگ و JCond: شرایط درزه
۱۸	Piscopo et al., 2018 [20]	$K = K_0 e^{-(\beta d)}$	K: هدایت هیدرولیکی بر حسب m/s، $K_0$ : هدایت هیدرولیکی نزدیک سطح زمین m/s، d: عمق (m) و $\beta$ : ثابت تجربی $9.3 \times 10^{-3}$ (1/m)
۱۹	Chen et al., 2018 [21]	$K = 2 \times 10^{-6} d^{-0.48}$	k: هدایت هیدرولیکی بر حسب m/s و d: عمق (m)
۲۰	Cao et al., 2021 [22]	$K = \alpha \cdot A + \beta \cdot C_{wcf} + \gamma$ $C_{wcf} = \sum_{j=1}^N \frac{A_j}{\sigma_{nj}^3}$	K: هدایت هیدرولیکی (cm/s)، $C_{wcf}$ : شاخص یکپارچگی هیدرولیکی ( $MPa^{-3}$ )، ثابت‌های تجربی $\alpha$ ، $\beta$ و $\gamma$ که از رگرسیون خطی بدست می‌آید، A: توزیع امتداد شکستگی‌ها، $\sigma_{nj}$ : تنش نرمال

با RQD و شرایط درزه (Jcond) و هدایت هیدرولیکی و کائو و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۲۲] رابطه هدایت هیدرولیکی با شاخص یکپارچگی هیدرولیکی ( $C_{wcf}$ )، توزیع امتداد شکستگی‌ها (A)، تنش نرمال ( $\sigma_{nj}$ ) با لحاظ ثابت‌های تجربی  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\gamma$  (حاصل از رگرسیون خطی) را ارایه دادند. از آنجا که شاخص‌های زمین‌شناسی توده سنگ عمدتاً برای توصیف مکانیک توده سنگ اتخاذ می‌شوند، ممکن است این شاخص‌ها به طور کامل برای رفتار هیدرولیکی قابل استفاده نباشند. نه RQD و نه شاخص HC پارامترهای اصلی موثر بر هدایت هیدرولیکی توده سنگ (بازشدگی، فاصله‌داری، جهت و نظایر آن) را شامل نمی‌شود. خواص هیدرولیکی توده سنگ ممکن است با تنش ژئواستاتیک، سنگ‌شناسی و خواص سطوح شکست مانند بازشدگی و فراوانی شکست، طول شکست، جهت و زاویه شکست، چسبندگی محل شکست، مواد پرکننده و ویژگی‌های صفحه شکست متفاوت باشد اما از آنجا که روابط تجربی موجود مبتنی بر داده‌های میدانی‌اند، نسبت به سایر روش‌ها قابل اعتمادترند و از این رو، نتایج سایر روش‌ها باید با روابط تجربی سازگار باشد. برای افزایش جامعیت روش‌های تجربی، مطالعات بیشتر و گسسته‌سازی پارامترهای مرتبط برای اطمینان از پیش‌بینی دقیق‌تر رفتار هیدرولیکی توده سنگ مورد نیاز است. بنابراین، یک رابطه تجربی کاربردی‌تر برای تخمین هدایت هیدرولیکی توده سنگ باید در برگیرنده عوامل فوق باشد.

با عمق به دلیل افزایش تنش ناشی از بار روباره است. به طور معمول، تنش باعث کاهش بازشدگی درزه‌ها و کاهش نفوذپذیری می‌شود اما نوع تنش (برشی یا نرمال) در نظر گرفته نمی‌شود. این روابط فقط برای توده‌های سنگی که ویژگی‌های زمین‌شناسی و مورفولوژیکی بسیار مشابه دارند اعتبار دارند که پارامترهای کلیدی موثر بر هدایت هیدرولیکی توده سنگ، مانند تخلخل یا فاصله و جهت شکستگی‌ها را در نظر نگرفته‌اند. طرح هیدروپتانسیل (HP) [۸] و سیستم  $^1HC$  [۱۵] هدایت هیدرولیکی نسبی مغزه را با استفاده از شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) یا رده‌بندی توده سنگ (RMR) ارزیابی کردند، ال-ناقا در سال ۲۰۰۱ [۱۳] رابطه هدایت هیدرولیکی با RQD و رابطه هدایت هیدرولیکی با RMR و جیانگ و همکاران در سال ۲۰۰۹ [۱۴] رابطه تجربی بین RQD، عمق و هدایت هیدرولیکی، سونگ و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۱۷]، رابطه هدایت هیدرولیکی با پارامترهای بازشدگی شکست (AD)، شاخص یکپارچگی سنگ (RID)، شاخص نفوذپذیری لیتولوژیکی (LPI)، سرعت موج P الاستیک توده سنگ ( $Vp$ )، سرعت موج P الاستیک بلوک سنگ ( $Vr$ ) و ثابت‌های تجربی c و d به همراه RQD، قریشی و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۱۶] رابطه هدایت هیدرولیکی با RQD، جون و همکاران در سال ۲۰۱۶ [۱۸] رابطه بین هدایت هیدرولیکی و RQD، GCD (شاخص گوج گسلی) و عمق، اوجه در سال ۲۰۱۷ [۱۹] رابطه عدد لوژان

<sup>۱</sup> Hydraulic conductivity index (HC-system)

در پژوهش حاضر، برای تخمین تجربی هدایت هیدرولیکی توده سنگ تشکیل‌دهنده کاواک آنومالی A معدن سنگ آهن سنگان، رابطه هدایت هیدرولیکی با پارامترهای مختلفی مانند RQD، عمق، فاصله‌داری درزه‌ها و مقاومت فشاری سنگ‌ها بررسی و تحلیل خواهد شد و در نهایت رابطه تجربی برای تعیین هدایت هیدرولیکی توده سنگ با استفاده از اطلاعات ژئوتکنیکی گمانه‌های حفر شده در محدوده کاواک مورد نظر ارائه می‌شود.

## ۲-۲- عوامل موثر بر هدایت هیدرولیکی توده سنگ‌ها

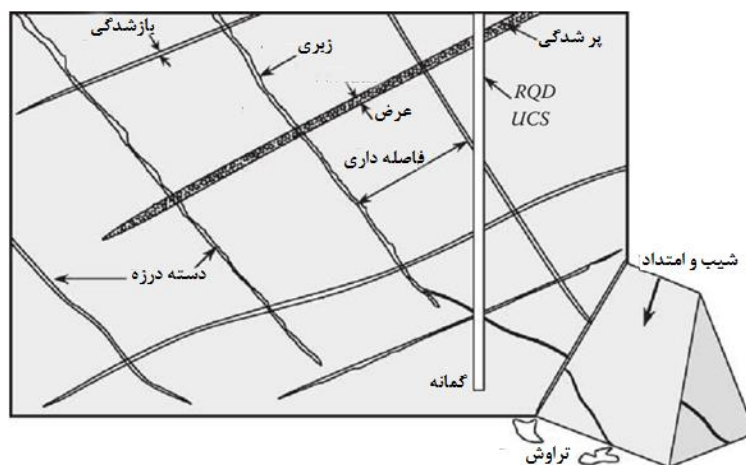
عوامل متعددی بر میزان هدایت هیدرولیکی توده سنگ‌ها موثر است که از آن جمله می‌توان به عوامل زیر اشاره کرد.

### ۱-۲-۲- تنش

طبق گفته ژانگ [۴۸]، هدایت هیدرولیکی توده‌های سنگی ناپیوسته و دست نخورده تحت تاثیر تنش ژئواستاتیک قرار می‌گیرد. با تغییر تنش قائم، دهانه درزه، سطح نسبی تماس و درجه زبری یک ناپیوستگی تغییر می‌کند. بنابراین جریان آب در ناپیوستگی‌ها و خواص هیدرولیکی آن‌ها، به طور مستقیم تحت تاثیر تغییر تنش، تغییر می‌کنند. رویکردهای مدل‌سازی عددی مختلف بیان می‌کند که هدایت هیدرولیکی مستقیماً با تنش برشی مرتبط است [۴۹] و رابطه معکوس با تنش نرمال دارد [۵۰].

### ۲-۲-۲- ویژگی‌های ناپیوستگی

ناپیوستگی‌ها مهم‌ترین ویژگی توده سنگ برای کنترل هدایت هیدرولیکی‌اند. هدایت هیدرولیکی با افزایش تعداد



شکل ۱- نمایی از پارامترهای ناپیوستگی‌ها [۵۳]

بسیاری از پژوهشگران معتقدند که هدایت هیدرولیکی توده سنگ با عمق کاهش می‌یابد (با نرخ بالای تغییر در نزدیکی سطح زمین) [۵۱]. کاهش هدایت هیدرولیکی با عمق در سنگ‌های دارای شکستگی معمولاً بیانگر کاهش در میزان بازشدگی و فاصله‌داری شکستگی‌هاست. در مورد منطقه‌ای بدون سابقه رویدادهای زمین‌ساختی و با وضعیت سنگ‌شناسی یکنواخت، کاهش عمقی در فراوانی ناپیوستگی می‌تواند به کاهش میانگین هدایت هیدرولیکی و افزایش در شاخص کیفیت توده سنگ مرتبط باشد [۵۲]. از این رو، عمق به عنوان یک پارامتر مهم در تخمین هدایت هیدرولیکی توده سنگ اهمیت زیادی دارد.

۲-۲-۴- توسعه کاواک و استخراج

حفاری‌ها به ویژه حفاری و آتشیاری در معادن به منظور استخراج، حالت طبیعی تنش‌های برجا را در توده سنگ اطراف کارهای معدنی به هم می‌زند و باعث تغییر شکل و به ویژه شکستگی در توده سنگ می‌شود. سه مکانیزم اصلی وجود دارد که به موجب آن انفجار سنگ می‌تواند بر ساختار سنگ‌های مجاور تاثیر بگذارد، از جمله ایجاد شکستگی‌های جدید در سنگ سالم قبلی، باز شدن درزه‌های موجود و ناپیوستگی‌های حاصل از فشار بالای گازهای انفجاری و افزایش لغزش در امتداد درزه‌ها و سطوح شکستگی با جهت‌گیری نامناسب. ایجاد شکستگی‌های جدید در سنگ‌های دست نخورده و بکر قبلی و اتساع درزه‌ها و ناپیوستگی‌های موجود، اساسا به لرزش و ارتعاش ناشی از انفجار مرتبط می‌شود و به آنها اثرات میدان نزدیک می‌گویند که در نزدیکی منطقه انفجار رخ می‌دهد. سومین اثر لغزش اولیه در امتداد درزه‌ها با جهت نامطلوب نیز اثرات ارتعاشی است و می‌تواند صدها متر دورتر از انفجار رخ دهد و به آن‌ها اثرات میدان دور می‌گویند.

در مورد تاثیرات روی هدایت هیدرولیکی در توده سنگ اطراف، ممکن است خطوط شکستگی در اطراف چال انفجار ایجاد شود. این خطوط نشان‌دهنده منطقه اطراف یک چال انفجاری است که در آن شکستگی تازه در نتیجه ارتعاش ناشی از انفجار مواد منفجره در چال انفجار رخ می‌دهد. سنگ نزدیک محدوده انفجاری معدن اگر دارای محیط شکسته و هدایت هیدرولیکی در دو جهت افقی و عمودی باشد، این هدایت هیدرولیکی با اثر انفجار افزایش می‌یابد. یک هاله افزایش نفوذپذیری (۱۰۰ برابر بیشتر از مقادیر عادی) به دلیل شکستگی کششی ناشی از انفجار و کاهش تنش‌های جانبی می‌تواند در اطراف دیواره‌های معدن روباز ایجاد شود. در واقع، نفوذپذیری نزدیک به فضای خالی ممکن است به قدری بالا باشد که جریان متلاطم نزدیک کاواک را به نفع خود فراهم کند که منجر به یک سطح آب نزدیک به کاواک شود که بسیار شیب‌دارتر از آن چیزی است که اگر جریان آب زیرزمینی کاملا از قانون داریسی تبعیت کند [۵۴]. چنانچه کاواک پایین‌تر از سطح ایستابی باشد، آب از محیط با هدایت هیدرولیکی بالایی که ایجاد شده به سمت کاواک جریان می‌یابد. این امر باعث می‌شود حجم بیشتری از آب از طریق شکستگی‌های ایجاد شده در توده سنگ اطراف به داخل کارهای معدنی انتقال یابد و باعث اثرات مخرب در محیط کاری معادن شود.

۲-۲-۵- شاخص RQD

در مهندسی سنگ، از نظر مکانیکی، درجه شکستگی نشان‌دهنده کیفیت سنگ است. RQD یک شاخص ساده برای قضاوت در مورد کیفیت مهندسی سنگ فراهم می‌کند. از نقطه نظر زمین‌آب‌شناسی، شکستگی‌ها منعکس‌کننده توانایی توده سنگ برای انتقال آب از طریق خود شکستگی‌ها است. بنابراین، درجه شکستگی ممکن است به عنوان عاملی در ارزیابی هدایت هیدرولیکی توده سنگ در نظر گرفته شود [۱۵]. شاخص RQD به عنوان درصد قطعات مغزه سالم بازیابی شده با طول بیش از ۱۰ سانتی‌متر در طول کل یک مغزه [۵۵] است و برای ارزیابی تاثیر مشخصه شکست بر هدایت هیدرولیکی، این شاخص به صورت رابطه ارایه شده توسط دیر و همکاران سال ۱۹۶۷ [۵۶] بیان می‌شود (رابطه ۱):

$$RQD = \frac{\sum (L_i \geq 0.1m)}{L_T} \times 100 \quad (1)$$

که در آن:

$L_i$ : طول قطعات

$L_T$ : طول کل مغزه

وقتی که مغزه در دسترس نیست، RQD را می‌توان از تعداد درزه‌ها در واحد حجم سنگ تخمین زد. رابطه ساده‌ای که می‌توان مورد استفاده قرار داد، برای مواردی است که توده سنگ عاری از مواد رسی باشد و تقریبی است (رابطه ۲):

$$RQD = 115 - 3.3J_V \quad (2)$$

که در آن:

$J_V$ : تعداد کل درزه‌ها در هر مترمکعب از سنگ

در مواردی که،  $J_V < 4/5$ ، شاخص RQD معادل ۱۰۰ منظور می‌شود و برای  $J_V > 30$ ، شاخص RQD معادل صفر منظور می‌شود (جدول ۲).

جدول ۲- اندازه بلوک‌ها و مقادیر  $J_V$  [۵۷]

توضیح	$J_V$
بلوک‌های خیلی بزرگ	< ۱
بلوک‌های بزرگ	۱ تا ۳
بلوک‌های متوسط	۳ تا ۱۰
بلوک‌های کوچک	۱۰ تا ۳۰
بلوک‌های خیلی کوچک	۳۰ تا ۶۰
سنگ خرد شده	> ۶۰

۶-۲-۲- مقاومت فشاری سنگ

مقاومت فشاری را می‌توان به عنوان ظرفیت سنگ برای تحمل بارها قبل از شکست تعریف کرد. مقاومت فشاری سنگ‌ها با افزایش تخلخل کاهش و هدایت هیدرولیکی آن‌ها افزایش می‌یابد، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت سنگ‌های با مقاومت فشاری بالا هدایت هیدرولیکی پایینی دارند و سنگ‌های با مقاومت فشاری پایین، هدایت هیدرولیکی بالاتری دارند.

۷-۲-۲- هدایت هیدرولیکی ذاتی سنگ

این پارامتر خاصیت ویژه‌ای از سنگ در شرایطی از ترکیب کانی‌ها، اندازه دانه‌ها، بافت، رنگ و نظایر آن است. هدایت هیدرولیکی بالای یک سنگ بدون درزه و هوازدگی، متاثر از میانگین اندازه منافذ، توزیع منافذ و شکل ذرات است.

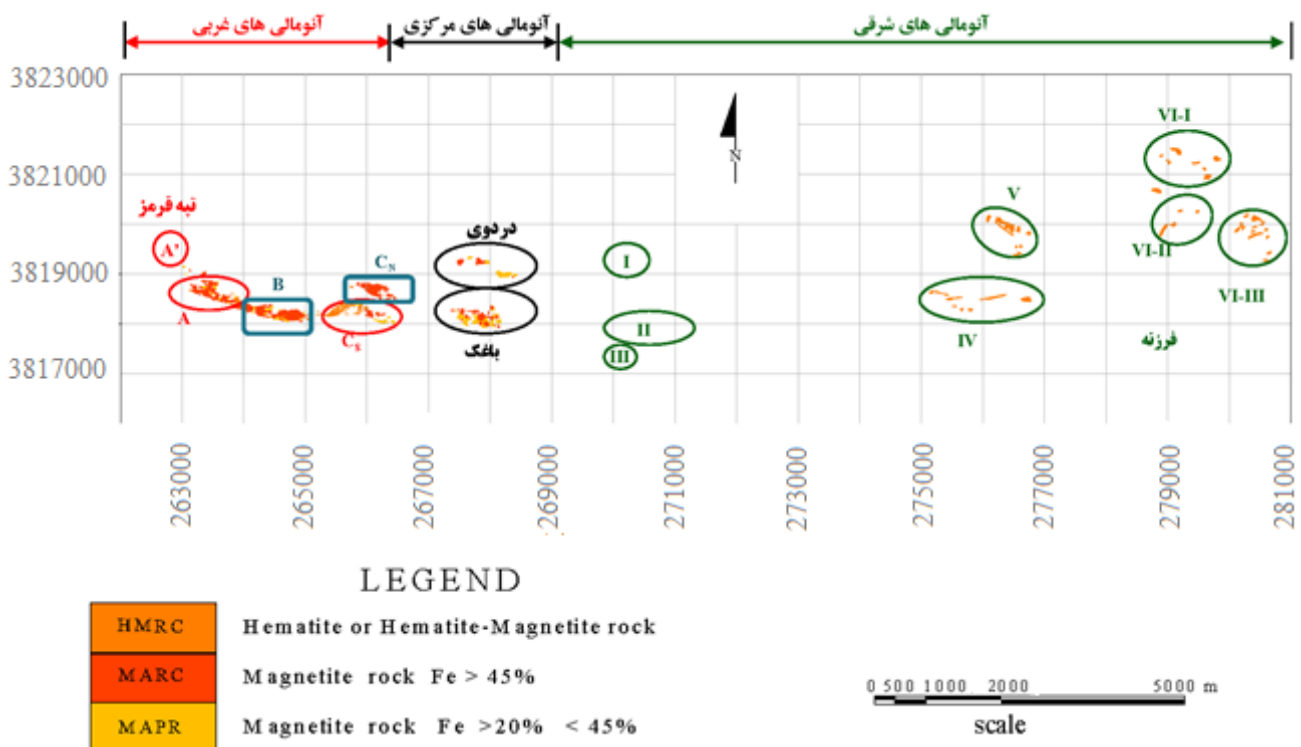
۳- معرفی محدوده مورد مطالعه

معدن سنگ آهن سنگان در استان خراسان رضوی (شمال شرقی ایران) در فاصله ۳۰۰ کیلومتری جنوب شرقی مشهد و ۱۶ کیلومتری شمال شهر سنگان از توابع شهرستان خواف، در منطقه‌ای به عرض جغرافیایی ۲۴' و ۳۴° و طول جغرافیایی ۱۶' و ۶۰° واقع شده است. نتایج مطالعات اکتشافی انجام شده حاکی از آن است که ابعاد تقریبی کانسار سنگان در حدود ۲۰۸ (۸×۲۶)

کیلومترمربع و از سه ناحیه معدنی شرقی، مرکزی و غربی تشکیل شده است و ذخیره زمین‌شناسی آن در حدود ۱/۲ میلیارد تن تخمین زده می‌شود. بیشترین میزان ذخایر سنگ آهن به ناحیه معدنی غربی با ابعاد تقریبی ۲×۵ کیلومتر تعلق دارد که خود به پنج آنومالی A، A'، B، C شمالی و C جنوبی تقسیم می‌شود. محدوده مطالعاتی در این مقاله آنومالی A از کانسارهای غربی است (شکل ۲).

۴- ارایه رابطه تجربی تخمین هدایت هیدرولیکی در محدوده مورد مطالعه

پیچیدگی سیستم‌های هیدروژئولوژیکی معادن، کمبود و نقص اطلاعات در دسترس، تحلیل و پیش‌بینی پارامترهای موثر را مشکل می‌سازد. نوع نگرش موجود به تحلیل مسایل هیدروژئولوژی، نگرش سیستمی است. این نگرش در بررسی این مسایل سعی در بررسی و توسعه روابط بین پارامترهای مهندسی توده سنگ و هدایت هیدرولیکی دارد و باعث سادگی تحلیل پارامترهای هیدروژئولوژیک معادن می‌شود. از این رو، ارایه رابطه تجربی مناسب برای تعیین هدایت هیدرولیکی محدوده کاواک آنومالی A منطقه معدنی سنگ آهن سنگان مورد توجه قرار گرفته است.



شکل ۲- موقعیت کانسارهای مجموعه ذخایر سنگ آهن سنگان [۵۸]

در این تحقیق با استفاده از اطلاعات اکتشافی و ژئوتکنیکی موجود، رابطه تجربی برای تعیین هدایت هیدرولیکی آنومالی A از کانسارهای غربی معدن سنگ آهن سنگان ارایه می‌شود. برای این منظور، ابتدا تصویر مغزه‌های گمانه ژئوتکنیکی BHAK-23 (عمیق‌ترین گمانه حفر شده در محدوده آنومالی A به عمق ۴۴۴ متر) بررسی و با نمودارنگاری مجدد مقدار RQD برای هر ران حفاری محاسبه شد و با بررسی تصاویر مغزه‌های حفاری، هدایت هیدرولیکی هر ران حفاری در طول گمانه با متغیرهای کیفی A، B، C و D ارزیابی شدند (شکل ۳). برای تبدیل متغیرهای کیفی به کمی، ابتدا ضریب هدایت هیدرولیکی متوسط با در نظر گرفتن فاکتورهای عمق، RQD و جنس سنگ با استفاده از روابط تجربی با شرایط زمین‌شناسی مشابه [۲۱،۱۶،۷] و ضرایب هدایت هیدرولیکی ارایه شده بر اساس جنس سنگ [۶۱-۵۹] برای گمانه یا شده محاسبه شد. به طور مثال، نحوه محاسبه ضریب هدایت هیدرولیکی متوسط در قسمت‌هایی از طول گمانه در جدول ۳ ارایه شده است. سپس بزرگترین مقدار محاسبه شده معادل متغیر کیفی A و کم‌ترین مقدار معادل D لحاظ شد و متغیرهای B و C نیز نسبت به A و D به متغیر کمی تبدیل شدند (جدول ۴).

مطالعات تجربی معمولاً مبتنی بر تحقیقات اکتشافی و ژئوتکنیکی برای کاهش هزینه‌های مربوط به بررسی‌های هیدروژئولوژی معادن است، همبستگی متقابل بین مجموعه داده‌ها می‌تواند بینش‌های بیشتری را در مورد نقش داده‌های اکتشافی و ژئوتکنیکی در تعیین هدایت هیدرولیکی ارایه دهد. اطلاعات مربوط به گمانه‌های اکتشافی و شیوه انبارداری و نگهداری مغزه‌ها در معدن سنگ آهن سنگان بسیار منظم و منسجم است. وجود این اطلاعات گمانه‌ها و امکان نمودارنگاری مجدد و بررسی دوباره آن‌ها در مطالعات مختلف به ویژه مطالعات هیدروژئولوژی معدنی بسیار مهم است. در معدن سنگان در مجموع حدود ۳۰۰ هزار متر حفاری انجام شده است، مجموع حفاری در محدوده کانسارهای غربی حدود ۱۶۵ هزار متر است که از این مترها حفاری حدود ۴۴ هزار متر حفاری در آنومالی A انجام شده است. تعداد گمانه‌های حفر شده در کل محدوده معدن ۱۱۳۶ عدد بوده که ۵۹۲ گمانه در محدوده غربی و ۱۶۲ گمانه از محدوده غربی در آنومالی A حفر شده است. از ۱۶۲ گمانه حفر شده، ۱۸ گمانه برای اهداف ژئوتکنیکی حفر شده و حاوی اطلاعات مفید ژئوتکنیکی است و بقیه گمانه‌ها از نوع اکتشافی‌اند.



شکل ۳- نمونه‌ای از تصویر مغزه حفاری ارزیابی شده مربوط به فاصله عمقی ۱۴۷/۷۰ تا ۱۵۴/۱۰ متر از گمانه BHAK-23

جدول ۳- نمونه فرم ارزیابی بخش‌هایی از گمانه BHAK-23

عمق (متر)	RQD (درصد)	جنس سنگ	فاصله‌داری درزه‌ها (میلی‌متر)	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	هدایت هیدرولیکی بر اساس فاکتورهای مختلف (متر بر ثانیه)				هدایت هیدرولیکی متوسط (متر بر ثانیه)
					جنس سنگ (مراجع [۶۱-۵۹])	عمق (مراجع [۲۱])	RQD (مراجع [۱۶])	RQD (مراجع [۷])	
۱۷٫۵	۰	شیل	۰	۰	۱۰-۱۰٫۵	۵٫۰۶×۱۰ <sup>-۷</sup>	۱٫۳۸×۱۰ <sup>-۵</sup>	۱٫۰۳×۱۰ <sup>-۶</sup>	۳٫۸۴×۱۰ <sup>-۶</sup>
۶۲٫۵	۷۰	شیل	۱۳۰	۳۷٫۵	۱۰-۱۰٫۵	۲٫۷۵×۱۰ <sup>-۷</sup>	۱٫۰۷×۱۰ <sup>-۶</sup>	۱٫۳۴×۱۰ <sup>-۷</sup>	۳٫۷۱×۱۰ <sup>-۷</sup>
۶۴٫۵	۳۰	شیل	۰	۰	۱۰-۱۰٫۵	۲٫۷۱×۱۰ <sup>-۷</sup>	۳٫۶۲×۱۰ <sup>-۶</sup>	۱٫۲۷×۱۰ <sup>-۷</sup>	۱٫۰۰۴×۱۰ <sup>-۶</sup>
۱۳۰٫۵	۶۵	سنگ آهک	۰	۰	۱۰-۸	۱٫۹۳×۱۰ <sup>-۷</sup>	۱٫۳×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴٫۱۲×۱۰ <sup>-۸</sup>	۳٫۸۵×۱۰ <sup>-۷</sup>
۱۳۶٫۷۵	۵۰	بازالت	۴۰۰	۷۵	۱۱-۱۰٫۵	۱٫۸۹×۱۰ <sup>-۷</sup>	۲٫۰۸×۱۰ <sup>-۶</sup>	۳٫۸۲×۱۰ <sup>-۸</sup>	۵٫۷۸×۱۰ <sup>-۷</sup>
۱۴۰٫۲۵	۴۸	شیل	۴۰۰	۳۷٫۵	۱۰-۱۰٫۵	۱٫۸۶×۱۰ <sup>-۷</sup>	۲٫۲۱×۱۰ <sup>-۶</sup>	۳٫۶۷×۱۰ <sup>-۸</sup>	۶٫۰۷×۱۰ <sup>-۷</sup>
۱۴۱٫۷۵	۳۰	بازالت	۰	۰	۱۱-۱۰٫۵	۱٫۸۵×۱۰ <sup>-۷</sup>	۳٫۶۲×۱۰ <sup>-۶</sup>	۳٫۶۱×۱۰ <sup>-۸</sup>	۹٫۵۹×۱۰ <sup>-۷</sup>
۴۴۳٫۳	۱۲٫۵	سنگ آهک	۰	۰	۱۰-۸	۱٫۰۷×۱۰ <sup>-۷</sup>	۶٫۲۴×۱۰ <sup>-۶</sup>	۵٫۸۲×۱۰ <sup>-۹</sup>	۱٫۶×۱۰ <sup>-۶</sup>

تا عمق حدود ۳۰ متری، میزان RQD تقریباً صفر و به کمتر از ۱۰ تا ۲۰ درصد می‌رسد و در اعماق بیشتر میزان RQD نسبت به عمق متغیر است. برای بررسی ارتباط بین هدایت هیدرولیکی و RQD در محدوده آنومالی A، نمودار تغییرپذیری هدایت هیدرولیکی نسبت به RQD مربوط به گمانه BHAK-23 رسم شد. با برازش و تجزیه و تحلیل منحنی رگرسیون نمایی و ضریب تعیین در شکل ۴، مشاهده می‌شود که هدایت هیدرولیکی با افزایش RQD، کاهش می‌یابد و ضریب تعیین بسیار بالایی بین این دو پارامتر وجود دارد ( $R^2=0.8247$ )، که نشان می‌دهد ارتباط بالایی بین تغییرات هدایت هیدرولیکی با RQD در محدوده مورد مطالعه وجود دارد.

#### ۴-۲- رابطه هدایت هیدرولیکی با عمق

برای بررسی تغییرپذیری هدایت هیدرولیکی نسبت به عمق و به دست آوردن رابطه‌ای بین این دو، نمودار پراکندگی هدایت هیدرولیکی نسبت به عمق برای گمانه BHAK-23 رسم شد (شکل ۵). بررسی این نمودار یک رابطه آشکار بین هدایت هیدرولیکی و عمق اما پراکندگی نسبتاً بالا داده‌ها را نشان می‌دهد. برای بررسی دقیق، منحنی رگرسیون خطی برازش شد، سپس رابطه و ضریب تعیین برای منحنی برازش شده محاسبه شد. با تجزیه و تحلیل رابطه و ضریب تعیین رگرسیون خطی مشخص می‌شود که به علت همبستگی پایین ( $R^2=0.1559$ )، رابطه معنی‌داری برای هدایت هیدرولیکی نسبت به عمق برای

جدول ۴- پارامترهای کیفی و کمی ارزیابی هدایت هیدرولیکی

متغیر زبانی	پارامتر کیفی	مقدار کمی هدایت هیدرولیکی متناظر (متر بر ثانیه)
خیلی زیاد	A	۵٫۵۸۹۵۸×۱۰ <sup>-۶</sup>
زیاد	B	۳٫۷۳۶۳۹×۱۰ <sup>-۶</sup>
متوسط	C	۱٫۸۸۳۲×۱۰ <sup>-۶</sup>
کم	D	۳٫۰۰۵۹×۱۰ <sup>-۸</sup>

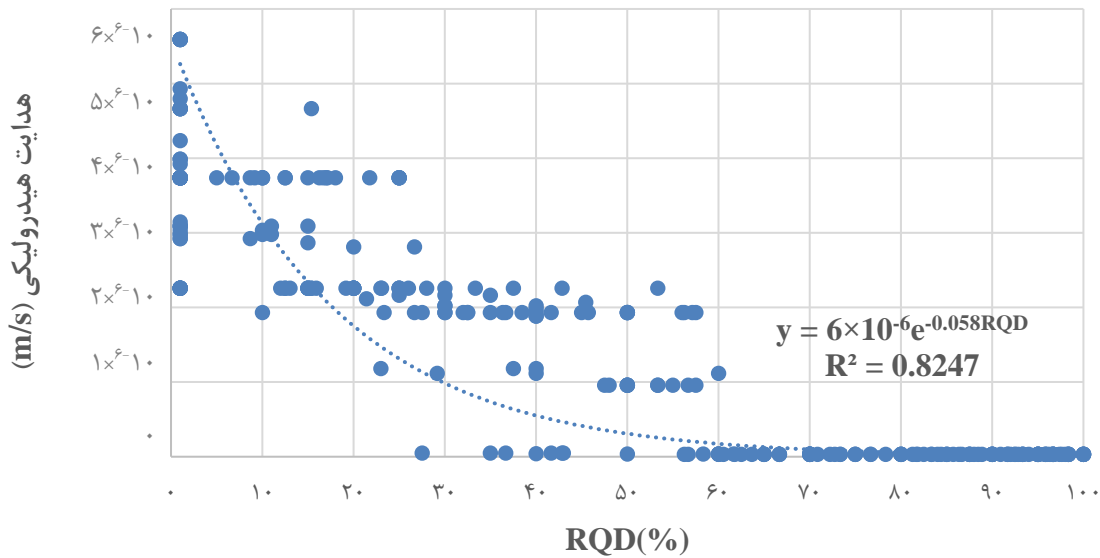
در نهایت برای بدست آوردن رابطه تجربی کلی هدایت هیدرولیکی محدوده کاواک آنومالی A معدن سنگ آهن سنگان، نمودار پراکندگی تغییرات هدایت هیدرولیکی ارزیابی شده در مرحله قبل نسبت به هر یک از فاکتورهای RQD، عمق، فاصله‌داری درزه‌ها و مقاومت فشاری سنگ رسم و منحنی رگرسیون بر هر یک از نمودارها برازش شده که در ادامه بررسی و تحلیل می‌شود و رابطه تجربی مناسب برای تخمین هدایت هیدرولیکی محدوده مورد مطالعه ارائه می‌گیرد.

#### ۴-۱- رابطه هدایت هیدرولیکی با RQD

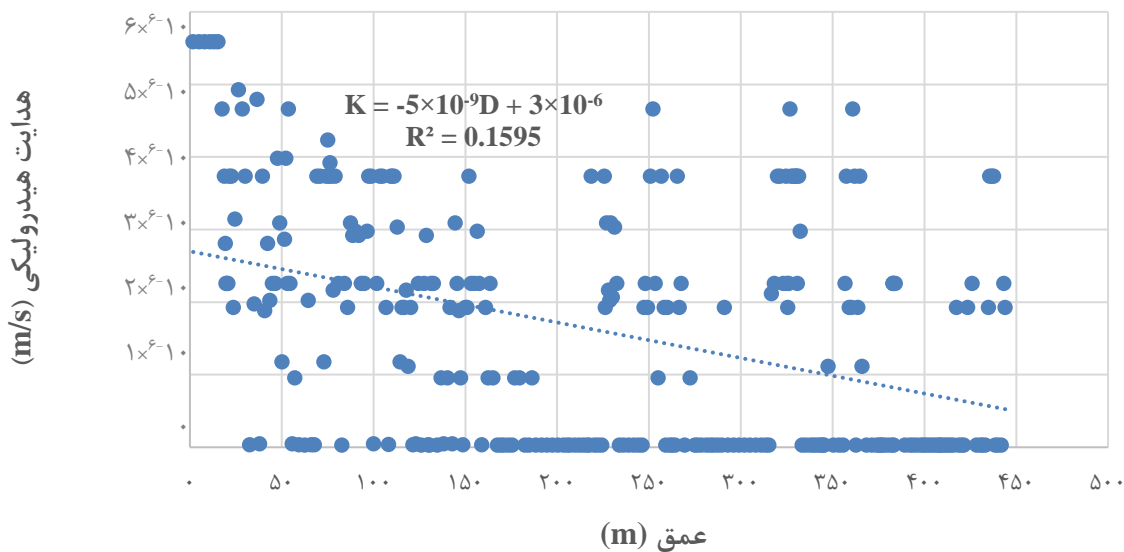
RQD شاخص پذیرفته شده‌ای در میان شاخص‌های توده سنگ است و می‌تواند به راحتی از مغزه‌های بازیابی شده در حین حفاری گمانه محاسبه شود. در این مقاله نیز RQD از مغزه‌های گمانه‌های حفر شده به دست آمده است. با بررسی لاگ ژئوتکنیکی گمانه BHAK-23 می‌توان دریافت که از دهانه گمانه

نشده‌اند، ایجاد می‌شوند زیرا هدایت هیدرولیکی تحت تاثیر عوامل مختلف زمین‌شناسی بوده و در نتیجه همبستگی هدایت هیدرولیکی با عمق پایین است.

محدوده مورد مطالعه دیده نمی‌شود و تخمین‌ها در یک عمق معین به طور قابل توجهی متفاوت‌اند. این تغییرات زیاد احتمالا به وسیله عوامل دیگری مانند لایه‌بندی، ناهمگنی‌های سنگ‌شناسی یا تاثیرات ساختاری که در این تحلیل‌ها لحاظ



شکل ۴- رابطه بین هدایت هیدرولیکی و RQD



شکل ۵- رابطه بین هدایت هیدرولیکی و عمق

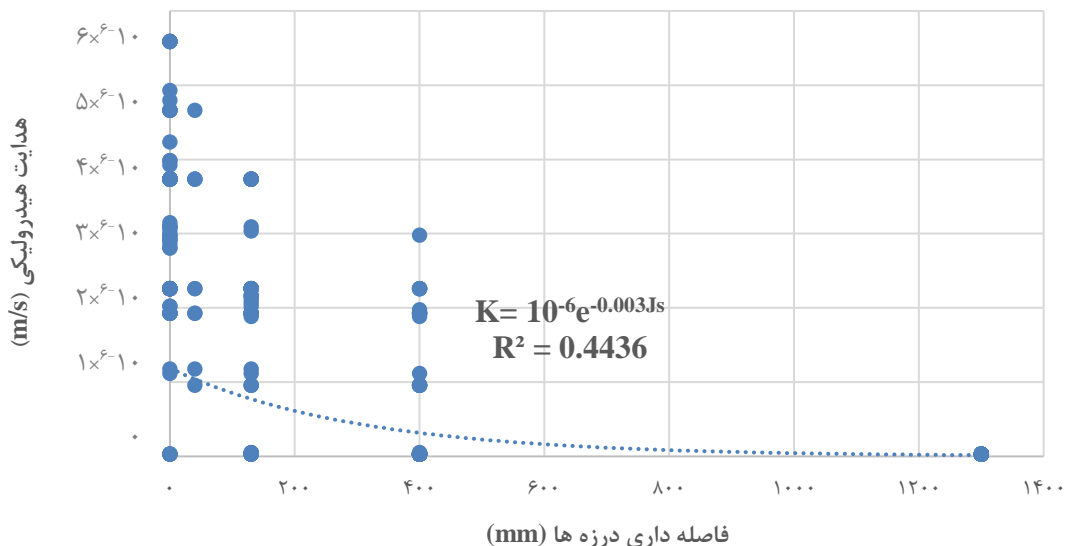
مهم تلقی می‌شود و باید برای ارزیابی هدایت هیدرولیکی مورد توجه قرار گیرد. برای بررسی رابطه هدایت هیدرولیکی (K) با فاصله‌داری درزه‌ها (JS) در محدوده مورد مطالعه، ابتدا نمودار پراکنندگی هدایت هیدرولیکی نسبت به فاصله‌داری برای گمانه BHAK-23 رسم شد (شکل ۶). با تجزیه و تحلیل رابطه و ضریب تعیین منحنی برازش شده مشخص می‌شود که همبستگی

۳-۴- رابطه هدایت هیدرولیکی با فاصله داری درزه‌ها

شکستگی‌ها یا درزه‌ها به عنوان مجاری اصلی عبور جریان آب زیرزمینی در توده سنگ‌های فاقد هدایت هیدرولیکی اولیه محسوب می‌شوند، بنابراین در بررسی جریان آب در یک توده سنگ درزه و شکافدار، فاصله‌داری درزه‌ها به عنوان یک پارامتر

درزه‌ها، هدایت هیدرولیکی کاهش می‌یابد. به طور کلی رابطه معنی‌داری برای هدایت هیدرولیکی با فاصله‌داری درزه‌ها برای محدوده مورد مطالعه دیده نمی‌شود.

پایینی بین این دو عامل وجود دارد.  $(R^2=0.4436)$ . همانطور که در نمودار شکل ۶ مشخص است، قسمت زیادی از گمانه دارای خردشدگی و فاصله‌داری درزه‌ها بسیار پایین است. در نتیجه هدایت هیدرولیکی بالایی انتظار می‌رود. با افزایش فاصله‌داری

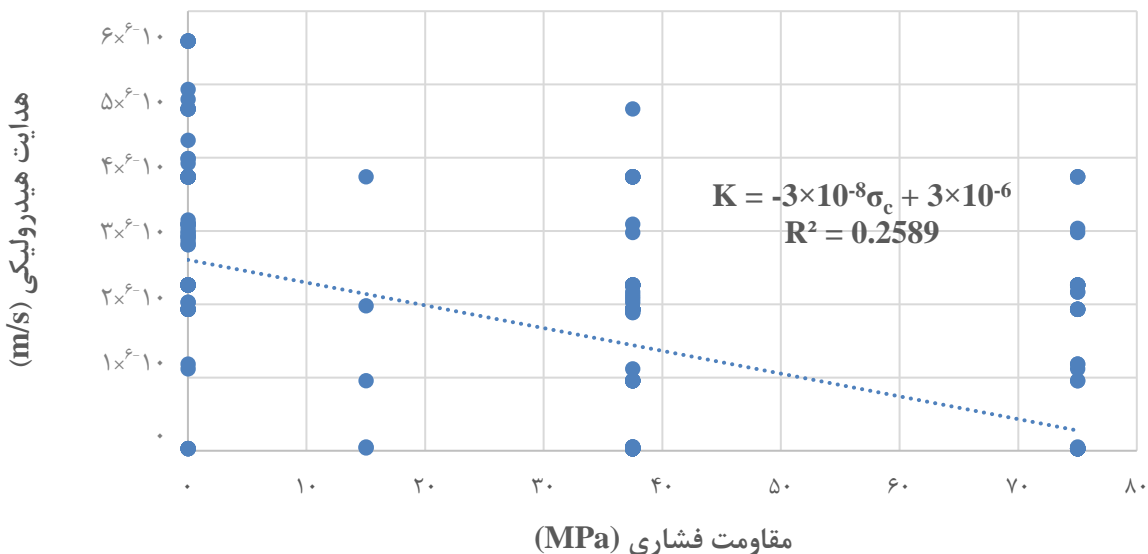


شکل ۶ - رابطه بین هدایت هیدرولیکی و فاصله‌داری درزه‌ها

تعیین و رابطه برازش شده مشخص می‌شود که هدایت هیدرولیکی با افزایش مقاومت فشاری، کاهش می‌یابد اما به علت ضریب تعیین پایین  $(R^2=0.2589)$  بین این دو فاکتور، نمی‌توان رابطه معنی‌داری بین هدایت هیدرولیکی (K) و مقاومت فشاری ( $\sigma_c$ ) برای محدوده مورد مطالعه متصور بود.

شکل ۴-۴ - رابطه هدایت هیدرولیکی با مقاومت فشاری

برای بررسی رابطه هدایت هیدرولیکی با مقاومت فشاری، نمودار پراکندگی هدایت هیدرولیکی نسبت به مقاومت فشاری برای گمانه BHAK-23 رسم شد (شکل ۷). با بررسی ضریب



شکل ۷ - رابطه بین هدایت هیدرولیکی و مقاومت فشاری



۵- تحلیل و اعتبارسنجی

با توجه به نتایج بررسی رابطه هدایت هیدرولیکی پارامترهای مختلف مشخص شد که همبستگی زیاد بین هدایت هیدرولیکی و RQD، بیانگر منطقی بودن این رابطه در مطالعه ارایه شده است. بنابراین رابطه رگرسیون (رابطه ۳) می‌تواند ابزار مفیدی برای پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی توده سنگ آنومالی A معدن سنگ آهن سنگان بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده RQD به ازای هر نوبت حفاری از طول گمانه فراهم کند.

$$K = 6 \times 10^{-6} \times e^{-0.058RQD}, R^2 = 0.8247 \quad (3)$$

که در آن:

K: هدایت هیدرولیکی (متر بر ثانیه)

به منظور اعتبارسنجی رابطه تجربی به دست آمده برای تخمین هدایت هیدرولیکی توده سنگ محدوده کلاواک آنومالی A معدن سنگ آهن سنگان، مقادیرهای برآورد شده از رابطه ۳ با مقادیر به دست آمده از رابطه هسو و همکاران، ۲۰۱۱ [۱۵] مقایسه شده‌اند. رابطه هسو و همکاران شاخص‌های عمق، RQD، سنگ‌شناسی و گوج گسلی را برای ارزیابی هدایت هیدرولیکی توده سنگ‌ها لحاظ می‌کند و مشابهت بالایی با کار انجام شده در این مقاله دارد. در رابطه هسو و همکاران شاخص هدایت هیدرولیکی به صورت رابطه ۴ تعریف شده است.

$$HC = (1 - \frac{RQD}{100})(DI)(1 - GCD)(LPI) \quad (4)$$

که در آن:

HC: شاخص هدایت هیدرولیکی  
LPI: شاخص نفوذپذیری لیتولوژیکی  
GCD: شاخص گوج گسلی  
DI: شاخص عمق  
RQD: شاخص کیفیت توده سنگ

در نهایت رابطه بین هدایت هیدرولیکی و شاخص HC با ضریب تعیین ۰/۸۶۶ مطابق رابطه ۵ به دست می‌آید:

$$K = 2.93 \times 10^{-6} \times (HC)^{1.38} \quad (5)$$

که در آن:

K: هدایت هیدرولیکی (متر بر ثانیه)  
HC: شاخص هدایت هیدرولیکی

این مقایسه برای قسمت‌هایی از طول گمانه که دارای جنس شیل، سنگ آهک و بازالت است، به شرح جدول ۵ انجام شده است. با مقایسه مقدار هدایت هیدرولیکی برآورد شده با رابطه ۳ و مقدار به دست آمده از رابطه هسو و همکاران مشخص شد که نتایج رابطه تجربی ارایه شده با رابطه تجربی هسو و همکاران بسیار نزدیک است، بنابراین می‌توان به منطقی بودن مقادیر برآورد شده حاصل از رابطه ۳ پی برد.

با استفاده از این رابطه، داده‌های هدایت هیدرولیکی در این بخش از منطقه معدنی سنگ آهن سنگان را می‌توان به طور مستقیم از اطلاعات نمودارنگاری یا نمودارنگاری مجدد گمانه‌های اکتشافی به دست آورد که هزینه آزمایش‌های هیدرولیکی درجا و مدت زمان تعیین هدایت هیدرولیکی توده سنگ محدوده مورد بررسی را به حداقل ممکن کاهش می‌دهد.

جدول ۵- اعتبارسنجی رابطه تجربی ارایه شده

عمق (متر)	RQD (درصد)	جنس سنگ	هدایت هیدرولیکی محاسبه شده توسط رابطه هسو و همکاران	هدایت هیدرولیکی برآورد شده با رابطه ۳	درصد اختلاف
			K (متر بر ثانیه)	K (متر بر ثانیه)	
۱۶/۵	۱۰	شیل	$2.9 \times 10^{-6}$	$3.36 \times 10^{-6}$	۱۱
۱۲۹/۵	۵۰	سنگ آهک	$3.1 \times 10^{-7}$	$3.3 \times 10^{-7}$	۶
۱۳۱/۵	۲۰	شیل	$1.79 \times 10^{-6}$	$1.9 \times 10^{-6}$	۶
۳۹۷/۵	۷۰	بازالت	$1.22 \times 10^{-7}$	$1.1 \times 10^{-7}$	۹/۸
۴۴۳/۵	۱۵	سنگ آهک	$2.34 \times 10^{-6}$	$2.5 \times 10^{-6}$	۶/۴

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

است. با تعیین صحیح پارامتر هدایت هیدرولیکی می‌توان پیش‌بینی دقیقی از نحوه جریان آب ورودی به کلاواک معدن انجام داد و سیستم مناسب زهکشی را طراحی کرد. بر این اساس،

یکی از پارامترهایی که در بررسی‌های زمین آب‌شناسی معادن باید تعیین شود، ضریب هدایت هیدرولیکی توده سنگ

3. Lugeon, M., 1933; "Barrages of Geology Dunned", Paris.
4. Snow, D. T., 1969; "Anisotropic permeability of fractured media", Water Resources Research, 5(6), 1273-1289.
5. Louis, C., 1974; "Rock Hydraulics in Rock Mechanics (ed. L. Muller)", Springer Verlag, Vienna.
6. Burgess, A., 1977; "Groundwater Movements Around a Repository -Regional Groundwater Analysis", KBS Teknisk Rapport KBS54:03, Kaernbraenslesaeckerhet, Stockholm, Sweden.
7. Carlsson, A., and Olsson, T., 1977; "Hydraulic properties of Swedish crystalline rocks-hydraulic conductivity and its relation to depth", Bulletin of the Geological Institute, University of Uppsala, NS, 7, 71-84.
8. Gates, W.C. B., 1997; "The hydro-potential (HP) value: a rock classification technique for evaluation of the ground-water potential in fractured bedrock", Environmental and Engineering Geoscience, 3(2), 251-267.
9. Barton, N., Bandis, S., and Bakhtar, K., 1985; "Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints", In International journal of rock mechanics and mining sciences and geomechanics abstracts, 22(3), 121-140.
10. Black, J. H., 1987; "Flow and flow mechanisms in crystalline rock", In: Fluid Flow in Sedimentary Basins and Aquifers, J.C. Goff and B.P.J Williams (eds.), Geological Society, Special Publications, 34(1), 185-200.
11. Strack, O. D., 1989; "Groundwater mechanics", prentice hall.
12. Wei, Z. Q.; Egger, P. and Descoeudres, F., 1995; "Permeability predictions for jointed rock masses", International Journal of Rock Mechanics, Mineral Science and Geomechanics, Vol. 32, 251-261.
13. El-Naqa, A., 2001; "The hydraulic conductivity of the fractures intersecting Cambrian sandstone rock masses", central Jordan. Environmental Geology, 40(8), 973-982.
14. Jiang, X. W., Wan, L., Wang, X. S., Wu, X., and Zhang, X., 2009; "Estimation of rock mass deformation modulus using variations in transmissivity and RQD with depth", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 46(8), 1370-1377.
15. Hsu, S. M., Lo, H. C., Chi, S. Y., and Ku, C. Y., 2011; "Rock mass hydraulic conductivity estimated by two empirical models", Developments in hydraulic conductivity research, In: Dikinya O (ed) Developments in hydraulic conductivity research, InTech, New York, pp 134-158.
16. Qureshi, M. U., Khan, K. M., Bessaih, N., Al-

روش‌های مختلفی شامل روش برجا، روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی برای تخمین هدایت هیدرولیکی ارائه شده است. برآورد هدایت هیدرولیکی توده سنگ با استفاده از روابط تجربی امکان‌پذیر دارای مزایای زیادی است. با توجه به این که روش‌های تجربی از داده‌های آزمایش‌های برجا و اطلاعات لاگ مغزه‌های گمانه‌های اکتشافی بهره می‌گیرند، نسبت به سایر روش‌ها قابل اعتمادترند اما روابط تجربی به دست آمده فقط برای یک شرایط زمین‌شناسی خاص یا معادنی با ویژگی‌های زمین‌شناسی بسیار مشابه معتبر است و برای سایت معدنی با شرایط زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی متفاوت باید رابطه مختص آن تعیین شود.

در این مطالعه، رابطه هدایت هیدرولیکی با پارامترهای RQD، عمق، فاصله‌داری درزه‌ها، مقاومت فشاری سنگ و عمق برای هر ران حفاری از طول گمانه، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. برای تخمین وابستگی هدایت هیدرولیکی به هر یک از پارامترهای یاد شده تجزیه و تحلیل رگرسیون انجام شد. نتایج رگرسیون نشان داد که یک رابطه نمایی بین دو پارامتر هدایت هیدرولیکی و RQD با ضریب تعیین بالایی ( $R^2=0.8247$ ) وجود دارد. علاوه بر این، برای اعتبارسنجی و تایید رابطه به دست آمده، از پژوهش هسو و همکاران استفاده و مشخص شد مقادیر برآورد شده بسیار نزدیک به نتایج این رابطه است. رابطه حاصل از رگرسیون ابزار مفیدی برای پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی توده سنگ بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده RQD فراهم می‌کند. از رابطه به دست آمده برای این دو پارامتر می‌توان هدایت هیدرولیکی توده سنگ محدوده مورد مطالعه را با استفاده از اطلاعات نمودارنگاری گمانه‌های اکتشافی و ژئوتکنیکی تخمین زد. با تخمین هدایت هیدرولیکی به وسیله این رابطه، علاوه بر دقت بالا، صرفه‌جویی زیادی از لحاظ هزینه و زمان نیز انجام می‌شود. این مطالعه همچنین نشان داد که چنین رویکردی برای ارزیابی هیدروژئولوژیکی زیرسطحی، به ویژه در غیاب داده‌های آزمایش هیدرولیکی به دلیل منابع مالی محدود، بسیار سازنده است.

#### منابع

1. Aryafar, A., and Doulati Ardejani, F., 2009; "Anisotropy and bedding effects on the hydro geological regime in a confined aquifer to design an appropriate dewatering system", International journal of Environmental Science and technology, 6, 563-570.
2. Aryafar, A., Khosravi, V., and Karami, Sh., 2020; "Groundwater quality assessment of Birjand plain aquifer using kriging estimation and sequential Gaussian simulation methods", Environmental Earth Sciences, 79, 1-21.

- 36(5), 581-596.
29. Zhou, C. B., Sharma, R. S., Chen, Y. F., and Rong, G., 2008; "Flow-stress coupled permeability tensor for fractured rock masses", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 32(11), 1289-1309.
  30. Zhang, X., and Sanderson, D. J., 1996; "Effects of stress on the two-dimensional permeability tensor of natural fracture networks", Geophysical Journal International, 125(3), 912-924
  31. Damjanac, B., Fairhurst, C., and Brandshaug, T., 1999, August; "Numerical simulation of the effects of heating on the permeability of a jointed rock mass", In 9th ISRM Congress. OnePetro.
  32. Takatoshi, I. T. O., Swenson, D., and Hayashi, K., 2004; "Effect of thermal deformation on fracture permeability in stressed rock masses", In Elsevier Geo-Engineering Book Series, 2, 673-678.
  33. Lin, H. I., and Lee, C. H., 2009; "An approach to assessing the hydraulic conductivity disturbance in fractured rocks around the Syueshan tunnel, Taiwan", Tunnelling and Underground Space Technology, 24(2), 222-230.
  34. Paluszny, A., and Matthäi, S. K., 2009; "Numerical modeling of discrete multi-crack growth applied to pattern formation in geological brittle media", International Journal of Solids and Structures, 46(18-19), 3383-3397.
  35. Mortimer, L., Aydin, A., Simmons, C. T., and Love, A. J., 2010; "Determining the Directional Hydraulic Conductivity of a Rock Mass. In Proceedings World Geothermal Congress. Bali, Indonesia.
  36. Xiong, X., Li, B., Jiang, Y., Koyama, T., and Zhang, C., 2011; "Experimental and numerical study of the geometrical and hydraulic characteristics of a single rock fracture during shear", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 48(8), 1292-1302.
  37. Saeidi, O., Stille, H., and Torabi, S. R., 2013; "Numerical and analytical analyses of the effects of different joint and grout properties on the rock mass groutability", Tunnelling and underground space technology, 38, 11-25.
  38. Lang, P. S., Paluszny, A., and Zimmerman, R. W., 2014; "Permeability tensor of three-dimensional fractured porous rock and a comparison to trace map predictions", Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 119(8), 6288-6307.
  39. Lei, Q., Latham, J. P., Xiang, J., Tsang, C. F., Lang, P., and Guo, L., 2014; "Effects of geomechanical changes on the validity of a discrete fracture network representation of a realistic two-dimensional fractured rock", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 70, 507-523.
  - Mawali, K., and Al-Sadrani, K., 2014; "An empirical relationship between in-situ permeability and RQD of discontinuous sedimentary rocks", Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 19, 4781-4790.
  17. Song, K., Yan, E. C., and Chen, G., 2014; "Hydraulic conductivity estimation of rock mass in water sealed underground storage caverns", Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 33(3), 575-580.
  18. Jun, C. H. E. N., Ming-ming, L., Xing, L. I., Yi-feng, C., and Chuang-bing, Z., 2016; "A geological indexes-based empirical model for estimation of permeability coefficient in fractured rock mass", Rock and Soil Mechanics, 37(6), 1706-1714.
  19. Öge, İ. F., 2017, June; "Assessing rock mass permeability using discontinuity properties", Procedia Engineering, 191, 638-645.
  20. Piscopo, V., Baiocchi, A., Lotti, F., Ayan, E. A., Biler, A. R., Ceyhan, A. H., ... and Taşkın, M., 2018; "Estimation of rock mass permeability using variation in hydraulic conductivity with depth: experiences in hard rocks of western Turkey", Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 77(4), 1663-1671.
  21. Chen, Y. F., Ling, X. M., Liu, M. M., Hu, R., and Yang, Z., 2018; "Statistical distribution of hydraulic conductivity of rocks in deep-incised valleys, Southwest China", Journal of Hydrology, 566, 216-226.
  22. Cao, Y., Gong, W., Zhang, X., Chen, J., and Huang, Z., 2021; "An Estimation Model for Hydraulic Conductivity of Low-Permeability and Unfilled Fractured Granite in Underground Water-Sealed Storage Caverns", Geofluids, 2021, 1-15
  23. Snow, D. T., 1969; "Closure to "Rock Fracture Spacings, Openings, and Porosities", Journal of the soil mechanics and foundations division, 95(3), 880-883.
  24. Király, L., 1969; "Anisotropie et hétérogénéité de la perméabilité dans les calcaires fissurés: avec 3 figures", Eclogae Geologicae Helvetiae, 62(2), 613-619.
  25. Bear, J., 1972; "Dynamics of Fluids in Porous Media", American Elsevier Publication Co., New York.
  26. Todd, D. K., 1980; "Groundwater hydrology", John Wiley.
  27. Oda, M., 1986; "An equivalent continuum model for coupled stress and fluid flow analysis in jointed rock masses", Water resources research, 22(13), 1845-1856.
  28. Liu, J., Elsworth, D., and Brady, B. H., 1999; "Linking stress-dependent effective porosity and hydraulic conductivity fields to RMR", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,

- of gas shale fracture permeability on effective stress and reservoir pressure: model match and insights*", Fuel, 139, 383-392.
51. Shahbazi, A., Saeidi, A., and Chesnaux, R., 2020; "A review of existing methods used to evaluate the hydraulic conductivity of a fractured rock mass", Engineering Geology, 265, 105438.
  52. Jiang, X. W., Wan, L., Wang, X. S., Liang, S. H., and Hu, B. X., 2009; "Estimation of fracture normal stiffness using a transmissivity-depth correlation", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 46(1), 51-58.
  53. Younger, P. L. (2004). Impacts of mining on physical hydrogeology. In *Groundwater Management in Mining Areas. Proceedings of the 2nd Image-Train Advanced Study Course*.
  54. Hudson, H., 1989; "Engineering Rock Mechanics", London.
  55. Abzalov, M., 2016; "Applied Mining
  56. *Geology*", Modern Approaches in Solid Earth Sciences, Springer, p. 448.
  57. Deere, D. U., Hendron, A. J., Patton, F. D., and Cording, E. J., 1967; "Design of surface and near surface construction in rock", Proceedings of 8th U.S. Symposium. Rock Mechanics. American Institute of Mining Engineers, New York, pp. 237-302.
  58. Palmstrom, A., 2005; "Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD)", Tunnelling and Underground Space Technology, 20(4), 362-377.
  ۵۹. حلاجی، امیر؛ حسنی‌پاک، علی‌اصغر؛ رجاییان، فرانک؛ ۱۳۷۴؛ "گزارش مدل‌سازی، تیپ‌بندی و محاسبه ذخیره کانسار آهن دردوی"، شرکت سنگ آهن شرق ایران.
  60. Bear, J., 1972; "Dynamics of Fluids in Porous Media, American Elsevier Publication Co., New York
  61. Spitz, K., and Moreno, J., 1996; "A practical guide to groundwater and solute transport modeling," John Wiley, New York, 480 p.
  62. Singhal, B. B. S. and Gupta, R.P., 1999; "Applied hydrogeology of fractured rocks", Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 400.
  40. Figueiredo, B., Tsang, C. F., Rutqvist, J., and Niemi, A., 2015; "A study of changes in deep fractured rock permeability due to coupled hydro-mechanical effects", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 79, 70-85.
  41. Huang, N., Jiang, Y., Liu, R., and Li, B., 2017; "Estimation of permeability of 3-D discrete fracture networks: an alternative possibility based on trace map analysis", Engineering Geology, 226, 12-19.
  42. Borbély, D., 2018; "Tunnel-excavation-induced permeability change of rock mass around a radioactive waste repository tunnel", Central European Geology, 61(1), 73-84.
  43. Dang, W., Wu, W., Konietzky, H., and Qian, J., 2019; "Effect of shear-induced aperture evolution on fluid flow in rock fractures", Computers and Geotechnics, 114, 103152.
  44. Alizadeh Kaklar, S., and Doulati Ardejani, F., 2019; "Determining hydraulic conductivity tensor of anisotropic rock mass in Roudbar dam, Lorestan", Journal of Mineral Resources Engineering, 4(4), 81-97.
  45. Houlsby, A. C., 1976; "Routine interpretation of the Lugeon water-test", Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 9(4), 303-313.
  46. Long, J. C., and Witherspoon, P. A., 1985; "The relationship of the degree of interconnection to permeability in fracture networks", Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 90(B4), 3087-3098.
  47. Qureshi, M. U., Mahmood, Z., and Rasool, A. M., 2021; "Using multivariate adaptive regression splines to develop relationship between rock quality designation and permeability", Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.06.011>
  48. Zhang, L., 2013; "Aspects of rock permeability", Frontiers of structural and civil engineering, 7(2), 102-116.
  49. Xiong, X., Li, B., Jiang, Y., Koyama, T., and Zhang, C., 2011; "Experimental and numerical study of the geometrical and hydraulic characteristics of a single rock fracture during shear", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 48(8), 1292-1302.
  50. Chen, D., Pan, Z., and Ye, Z., 2015; "Dependence