

Research Article

Geostatistical investigation of RQD to identify the high permeable zones in the Takht-e-Gonbad copper mine pit, Sirjan

Fereshteh Movahedi¹, Reza Jahanshahi^{1*}, Naser Asadi¹, Sepideh Mali²

1- Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Sistan and Baluchestan

2- Faculty of Geosciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

Keywords: *Geostatistical investigation of RQD to identify the high permeable zones in the Takht-e-Gonbad copper mine pit, Sirjan*

1-Introduction

The groundwater inrush into the mine pit is one of the problems that can make extraction and mining activities difficult. The location and amount of water entering the mine pit are mainly dependent on the developed permeable zones within the formation of the region; therefore, to control the groundwater inrush and suggest the best location of the pumping wells for the drainage of the mine, it is necessary that the zones and permeable areas identified (Nakhaie Sarvedani et al., 2022). The geostatistics methods are widely used to estimate the hydraulic parameters of the aquifer hydrogeological by geotechnical parameters. Geostatistical approaches have been studied worldwide (e.g., Anvari et al., 2008; Assari and Mohammadi, 2017; Dehshibi et al., 2022. Eliat and Chehrzari, 2016; Lu et al, 2016; Moshrefi et al, 2016; Nakhaie Sarvedani et al, 2022; Razack and Lasm, 2006; Sasani Nia et al, 2015; Triki et al, 2012; Yu, 2010). The study area of this research is the Takht-e-Gonbad copper mine, which is an open-pit mine and is currently in the early years of mineral extraction. Groundwater seepage into the pit mine has created several problems, including slope instability, dewatering of blast holes, and mining operations below the groundwater table. Therefore, the aims of this research are (a) exploratory-spatial analysis, (b) Stochastic simulation of RQD, and (c) Identification of permeable zones.

2-Material and methods

In the area around the Takht-e Gonbad mine pit, statistical data from 69 exploration boreholes are available, and 11,607 RQD data have been recorded. In this research, exploratory-spatial analysis, declustering, variogram modeling, and geostatistical simulation with the Gaussian method have been performed on the variable data of RQD.

3-Results and discussions

The study area of this research is the Takht-e-Gonbad copper mine, located in Kerman province and 80 km northeast of Sirjan city. Structural geology shows this area is placed in the Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc. This mine is an open-pit type and is currently in the early years of mineral extraction. A total of 69 exploration boreholes have been dug around the pit. During the drilling, the variable data of the rock quality designation (RQD) was recorded during a spatial distance of 3 m along the entire length of the boreholes. Identifying areas with high permeability in the rock units of the region, especially in the subsurface of the aquifer, is necessary to carry out the drainage plan in the future. In this research, geostatistical simulation methods have been used to identify permeable zones. The results of the preliminary statistics showed that the RQD has an increasing trend with increasing depth. The spatial continuity of the RQD based on the directional variogram and the spherical model was estimated at 81 meters and was more significant in the

* Corresponding author: jahanshahireza@science.usb.ac.ir

DOI: 10.22055/AAG.2023.42624.2339

Received: 2023-01-02

Accepted: 2023-06-21

east-west direction. Finally, the areas with high permeability in the region have been determined by geostatistical simulation.

4-Conclusion

The results of the preliminary statistical analysis showed that the RQD variable has an increasing trend at different altitude levels with increasing depth. Investigating the spatial continuity of the RQD based on the omnidirectional variogram and the spherical model is approximately equal to 81 meters. Therefore, the iso-value map using the Kriging interpolation method is more valid than other methods. Also, the directional variogram showed that the spatial continuity is more in the east-west direction than the other direction. Therefore, the permeable zones are more likely to have expanded in the east-west direction. Finally, the Gaussian simulation of the RQD variable shows that, generally, the northeast and southwest areas of the mine have more potential to expand permeable zones.

5-References

- Anvari, A.A., Katibeh, H., Mahmoudabadi, H., 2008. Estimation of equivalent permeability in Amirkabir Tunnel alignment with neural network. 2nd Iranian Mining Engineering Conference.
- Assari, A., Mohammadi, Z., 2017. Analysis of rock quality designation (RQD) and Lugeon values in a karstic formation using the sequential indicator simulation approach, Karun IV Dam site, Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 76, 771-782. <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0898-y>
- Dehshibi, R., Jahanshahi, R., Mozafari, M., Assari, A., 2022. Application of the geostatistics to identification of the high water escape potential locations in the Tangab Dam. *Ferdowsi Civil Engineering*. 34(4), 15-30. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.27832805.1400.34.4.2.0>
- Eliat, M., Chehrzari, A., 2016. Combination of image logs analysis and petrophysical evaluation results in order to Porosity and permeability determination. The 2nd National Geology and Mining Exploration Symposium.
- Lu, L., Kashiwaya, K., Koike, K., 2016. Geostatistics-based regional characterization of groundwater chemistry in a sedimentary rock area with faulted setting. *Environmental Earth Sciences* 75, 829. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5619-0>
- Moshrefi, M.R., Barkhordari, K., Mosavi, H., 2016. Evaluation of the geotechnical and geological features of the engineering of the Ivshan reservoir dam. Second National Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Development.
- Nakhaie Sarvedani, B., Jahanshahi, R., Assari, A., 2022. Determining the best places for dewatering wells in the Gohar-Zamin pit mine, using geostatistical method. *Geopersia* 12(2), 287-298. <https://doi.org/10.22059/geope.2022.339672.648651>
- Razack, M., Lasm, T., 2006. Geostatistical estimation of the transmissivity in a highly fractured metamorphic and crystalline aquifer (Man-Danane Region, Western Ivory Coast). *Journal of Hydrology* 325(4-1), 164-178. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.10.014>
- Sasani Nia, N., Habib Nia, B., Ghobadi, H., 2015. Estimation of porosity and spatial distribution of permeability using geostatistical model in one of the oil fields in southwestern Iran. International Conference on Science and Engineering.
- Triki, L., Zairi, M., Ben Dhia, H., 2012. A geostatistical approach for groundwater head monitoring network optimisation: case of the Sfax superficial aquifer (Tunisia). *Water and Environment Journal* 27(3), 372-362. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2012.00352.x>
- Yu, Y., 2010. Geostatistical Interpolation and Simulation of RQD Measurements. MSc. Thesis, University of British Columbia (Vancouver). <https://doi.org/10.14288/1.0069917>.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Jahanshahi, R., Movahedi, F., Asadi N., Mali, S., 2024. Geostatistical investigation of RQD to identify the high permeable zones in the Takht-e-Gonbad copper mine pit, Sirjan. Adv. Appl. Geol. 13(4), 1139-1153.

DOI: 10.22055/AAG.2023.42624.2339

URL: https://aag.scu.ac.ir/article_18571.html

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers

بررسی زمین آماری شاخص کیفیت سنگ جهت شناسایی مناطق با نفوذپذیری بالا در محدوده پیت معدن مس تخت گنبد سیرجان

فرشته موحدی

گروه زمین شناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان

رضا جهانشاهی*

گروه زمین شناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان

ناصر اسدی

گروه زمین شناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان

سپیده مالی

دانشجوی دکترا گروه آبشناسی و زمین شناسی زیست محیطی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود

*jahanshahireza@science.usb.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۳۱

چکیده

یکی از مهمترین مشکلات در معدنکاری جریان آب‌های زیرزمینی به درون پیت معادن است. محل و مقدار آب ورودی به پیت معدن غالباً وابسته به مناطق تراوا است. لذا جهت شناسایی مناطق با نفوذپذیری بالا می‌توان از روش‌های زمین‌آمار استفاده نمود. بدین منظور پژوهش زمین آماری بر روی داده‌های متغیر شاخص کیفیت سنگ جهت شناسایی زون‌های تراوا در معدن مس تخت‌گنبد سیرجان انجام شده است. معدن مس تخت گنبد در استان کرمان و در ۸۰ کیلومتری شمال شرق سیرجان واقع شده است. معدن مذکور از نوع روباز بوده و در حال حاضر در سال‌های ابتدایی استخراج ماده معدنی است. تعداد ۶۹ گمانه اکتشافی در محدوده اطراف پیت معدن حفر شده است. که حین حفاری داده‌های متغیر شاخص کیفیت سنگ به فواصل ۳ متر در کل طول گمانه‌ها برداشت شده است. شناسایی مناطق با تراوایی بالا در واحدهای سنگی منطقه بخصوص در زیرسطح ایستایی به جهت انجام طرح زهکشی در آینده، لازم و ضروری می‌باشد. در این پژوهش از روش‌های درونیابی زمین آماری جهت شناسایی زون‌های تراوا استفاده شده است. نتایج بررسی آمار مقدماتی نشان داد شاخص کیفیت سنگ با افزایش عمق، یک روند افزایشی دارند. بررسی پیوستگی مکانی شاخص کیفیت سنگ بر اساس تغییرنمای جهت دار و مدل کروی نشان داد پیوستگی مکانی حدوداً برابر با ۸۱ متر محاسبه شده است و در جهت شرقی - غربی بیشتر می‌باشد. در نهایت با استفاده از روش شبیه سازی زمین آماری گاوسی متوالی مناطق با تراوایی بالا در منطقه مشخص شده است؛ که عمدتاً در شمال شرقی و جنوب غربی پیت قرار دارند.

واژگان کلیدی: پیوستگی مکانی، تغییرنما، شاخص کیفیت سنگ، شبیه سازی زمین آماری، ایران

۱- مقدمه

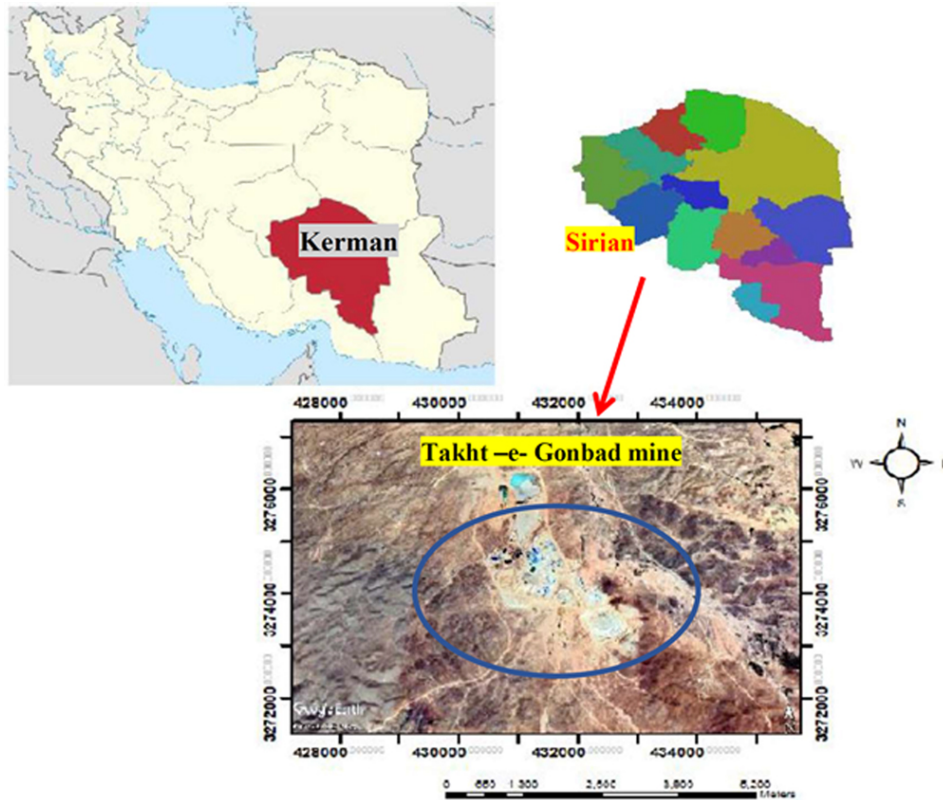
یکی از مهمترین پدیده‌هایی که می‌تواند فعالیت‌های استخراج و معدنکاری را با مشکل روبه‌رو کند جریان آب‌های زیرزمینی به درون پیت معادن است. محل و مقدار آب ورودی به پیت معدن غالباً وابسته به زون‌ها مناطق تراوایی است که در درون سازندهای منطقه گسترش یافته‌اند. بنابراین شناسایی زون‌ها و مناطق تراوا جهت کنترل آب ورودی به معدن و جانمایی چاه‌های پمپاژ جهت زهکشی ضروری می‌باشد. یکی از ویژگی‌های سنگ متخلخل، تراوایی است که نشان‌دهنده‌ی

قابلیت سنگ در انتقال شاره‌ها می‌باشد (Eliat and Chehrzari, 2016). غالباً شناسایی زون‌های تراوا با استفاده از آزمایش پمپاژ، ارزیابی ارتباط لوژان، شاخص کیفیت سنگ و استفاده از روش‌های زمین‌آمار انجام می‌گیرد. روش‌های زمین‌آمار به‌طور وسیعی برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان و بررسی عدم قطعیت پارامترهای هیدروژئولوژیکی و ژئوتکنیک استفاده شده‌اند.

معدن مس تخت‌گنبد به‌عنوان محدوده‌ی مطالعاتی این تحقیق در ۸۰ کیلومتری شمال شرق سیرجان در استان کرمان

تخت گنبد که تراز کف پیت معدن در آبخوان معلق قرار گرفته است بررسی تعیین وضعیت زون‌های تراوا جهت زهکشی معدن و جلوگیری از اختلال در فرآیند استخراج امری ضروری است. لذا لازم و ضروری است که محل زون‌های تراوا با استفاده از روش‌های زمین‌آماري شناسایی شوند و در طراحی آینده سیستم زهکشی پیت معدن مدنظر قرار گیرند. بنابراین اهداف این تحقیق شناسایی مناطق با نفوذپذیری بالا با تعیین همبستگی مکانی داده‌های شاخص کیفیت سنگ و بررسی زمین آماری می باشد.

واقع شده است (شکل ۱). معدن مذکور از نوع روباز بوده و در سال‌های ابتدایی استخراج ماده معدنی صورت گرفته است و جهت استخراج، نوع پیت روباز پلکانی انتخاب شده است. مشاهدات میدانی نشان می‌دهد که یک لایه خاک با ضخامت بسیار کم در حدود یک متر در منطقه گسترش دارد. بنابراین آبخوان آبرفتی در محدوده مطالعاتی وجود ندارد. تعداد ۶۹ عدد گمانه اکتشافی در محدوده اطراف پیت معدن تخت گنبد حفر شده است که حین حفاری داده‌های متغیرهای شاخص کیفیت سنگ و درصد بازیابی مغزه به فواصل ۳متر در کل طول گمانه ها برداشت شده است. با توجه به وضعیت کنونی معدن مس



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی معدن مس تخت گنبد.

Fig. 1. Geographical location of Takht-e-Gonbad copper mine.

کارست استفاده شده‌اند. نتایج ایشان نشان داد که جناح چپ و پایه سد بیشترین پتانسیل را برای گسترش کارست نسبت به جناح راست دارند همچنین یک رابطه ضعیف بین مقادیر شاخص کیفیت سنگ و لوژان دیده شد. Sasaki و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از مدل زمین‌آماري، توزیع فضایی تراوایی را در یکی از میدانی نفتی جنوب غربی ایران را تخمین زدند، نتایج حاصل از چاه آزمایشی و مدل نمودن

پژوهش‌های مشابه با این تحقیق در سایر نقاط ایران و جهان انجام شده است که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌شود: براساس Assari و Mohammadi (۲۰۱۷) دو متغیر لوژان و شاخص کیفیت سنگ به عنوان شاخص گسترش کارست در آهک آسماری در محل سد کارون ۴ انتخاب کردند. متغیرهای شاخص کیفیت سنگ و لوژان به عنوان معیار گسترش کارست در نظر گرفته شدند و برای شبیه‌سازی احتمالاتی در گسترش

Moshrefi و همکاران (۲۰۱۶) در محور سد مخزنی ایوشان در استان گلستان آزمایشات نفوذپذیری لوژان را در ۱۳ گمانه اکتشافی انجام دادند که بر اساس ارتباطی آنها با شاخص کیفیت سنگ، درصد بازیابی مغزه‌های سنگ و لوژان نشان از آببندی کامل مصالح کنگلومرایی در محدوده محور سد دارد. Triki و همکاران (۲۰۱۲) در آبخوان اسفاکس در جنوب شرقی تونس برای بهینه‌سازی شبکه نظارت برآب زیرزمینی از روش‌های زمین‌آمار و نرم افزار زمین‌آمار ایساتیس استفاده کردند. روش‌های مختلف تجزیه و تحلیل داده‌ها شامل مدل‌سازی، تغییرنما، صحت‌سنجی متقاطع، تخمین و درون‌یابی در این آبخوان بکار گرفته شد. نتایج نشان دادند که تکنیک‌های زمین‌آمار یک ابزار قدرتمند در پیش‌بینی توزیع مکانی ارتفاع ستون آب درون پی‌زومترها و ارزیابی شبکه مشاهده سطح آب زیرزمینی است.

برای شناسایی محل‌هایی با پتانسیل بالای فرار آب در سد تنگاب از کاربرد زمین‌آمار برای نقشه‌های شبیه‌سازی سه متغیر شاخص کیفیت سنگ و سیمان‌خوری، لوژان استفاده و تجزیه - تحلیل نقشه‌های احتمال و عدم قطعیت متغیرهای ذکر شده در منطقه مورد مطالعه، صورت گرفته است. در دو محل واقع در مرکز مخزن و شمال غربی سد، مناطقی با نفوذپذیری بالا وجود دارد. زیرا پتانسیل فرار آب نیز در این مکان‌ها بیشتر می‌باشد. بررسی گسل‌های منطقه مورد مطالعه نیز نشان می‌دهد که تراکم گسل‌ها بیشتر در جناح راست سد می‌باشد و این می‌تواند سبب افزایش نفوذپذیری در این منطقه باشد (Dehshibi et al., 2022).

Nakhaie Sarvedani و همکاران (۲۰۲۲) در آبخوان سنگی معدن گل‌گهر سیرجان، تحلیل اکتشافی - مکانی داده‌ها شامل موقعیت مکانی، نمودار فراوانی، میانگین و واریانس متحرک، همبستگی متغیرها و تغییرنما بر روی دو متغیر شاخص کیفیت سنگ و لوژان را انجام داده‌اند و از شبیه‌سازی گاوسی متوالی متغیرهای شاخص کیفیت سنگ و لوژان با کمک تغییرنمای مقادیر نرمال استفاده نموده‌اند.

۲- روش کار

در محدوده اطراف پیت معدن تخت گنبد داده‌های آماری از ۶۹ گمانه اکتشافی حفاری شده، موجود است (شکل ۲) و مجموعاً تعداد ۱۱۶۰۷ عدد داده شاخص کیفیت سنگ برداشت شده است. خلاصه آماری آن در جدول ۱ ارائه شده است. در این پژوهش بر روی داده‌های متغیر شاخص کیفیت سنگ تحلیل اکتشافی -

توزیع فضایی تخلخل و تراوایی میدان مورد مطالعه را به صورت نقشه‌های دوبعدی و سه‌بعدی تخلخل و تراوایی نشان داده‌اند. نتایج مطالعه نشان داده است که میزان تخلخل میدان پایین است و تولید ۷ چاه، از طریق شکاف‌های عمودی قطع کننده چاه‌ها، انجام می‌گیرد. با توجه به نقشه‌های دو بعدی و سه بعدی، تراوایی قسمت‌های غربی و شمال غربی میدان، از موقعیت اقتصادی خوبی برخوردار بوده و در این بخش‌ها ریسک عملیاتی بسیار کمتر است و برنامه توسعه میدان باید بر روی این قسمت از میدان تمرکز یابد. همچنین پیشنهاد شده، به صورت افقی چاه‌های جدید حفاری شود، تا نتیجه بهتری به دست آید.

Lu و همکاران (۲۰۱۶) در یک ناحیه رسوبی و گسل خورده ویژگی‌های محلی شیمی آب را بر اساس زمین‌آمار در منطقه هورونوب، واقع در شمال ژاپن، مورد بررسی قرار دادند. آنها توانستند به وسیله تکنیک‌های زمین‌آمار و شبیه‌سازی گاوسی متوالی و واریوگرامی مرز بین آب‌های شور و شیرین را شناسایی کنند.

Anvari و همکاران (۲۰۰۸) تخمین نفوذپذیری معادل در امتداد محور تونل امیرکبیر را با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی مطالعه کردند. در این بررسی سعی شده است با کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی، نفوذپذیری معادل در امتداد محور تونل انتقال آب سد امیرکبیر، تخمین زده شود. بدین منظور با استفاده از اطلاعات حاصل از حفر ۱۲ گمانه و انجام حدود ۱۰۰ تست فشار آب (لوژان)، مقدار نفوذپذیری توده سنگ در امتداد محور تونل با شبکه عصبی RBF (شبکه‌های با توابع پایه شعاعی) تخمین زده شود. مقایسه نتایج به دست آمده از شبکه عصبی RBF با نتایج حاصل از معادلات تحلیلی حاکم بر نفوذ آب‌های زیرزمینی به تونل، مؤید دقت قابل قبول نتایج حاصل از شبکه‌های RBF است. نتایج حاصل از تحلیل داده‌ها توسط شبکه‌های طراحی شده نشان می‌دهند که دامنه تغییرات نفوذپذیری در امتداد محور تونل تغییر می‌کند، که با توجه به نقشه‌های زمین‌شناسی موجود، اغلب واحدهای مورد نظر به جز زون‌های خرد شده و گسله‌دار، مشکل عمده‌ای از نظر میزان آب ورودی به تونل نخواهند داشت.

Razack و Lasm (۲۰۰۶) در سنگ‌های کریستالی و دگرگونی غرب آفریقا به منظور تخمین قابلیت انتقال در شکستگی‌های آبخوان سنگی از روش‌های زمین‌آمار استفاده کردند. نتایج مطالعه ایشان نشان داد که زمین‌آمار یک روش مفید در تخمین پارامترهای قابلیت انتقال در این منطقه است.

مکانی، - دکلاسترینگ، مدل سازی تغییرنا و شبیه سازی با روش گاوسی متوالی با کمک نرم افزار ایساتیس انجام شده است. - شاخص کیفیت سنگ یا اصطلاحاً RQD معیاری تقریبی برای تعیین میزان درزه داری یا تعداد شکستگی های درون توده سنگ محسوب می شود. این معیار، درصد مغزه های بزرگ تر از ۱۰ سانتی متر را نشان می دهد. مفهوم کیفیت مغزه حفاری در مقایسه با سایر شاخص هایی که پیش از آن برای تعیین کیفیت سنگ به کار می رفت دقیق تر بوده و علاوه بر آن به طور غیرمستقیم نشان های از درجه خردشدگی و هوازدگی سنگ را نیز نشان می دهد.

تغییرنا اساسی ترین ابزار در زمین آمار است که برای تشریح ارتباط مکانی یک متغیر به کار می رود. تغییرنا، کمیتی برداری که درجه همبستگی مکانی و شباهت بین نقاط اندازه گیری شده را برحسب مربع تفاضل مقدار دونقطه و با توجه به جهت و فاصله آن ها نشان می دهد معمولاً تغییرنا را با علامت $\gamma(h)$ نشان می دهند و از رابطه (۱) محاسبه می شود.

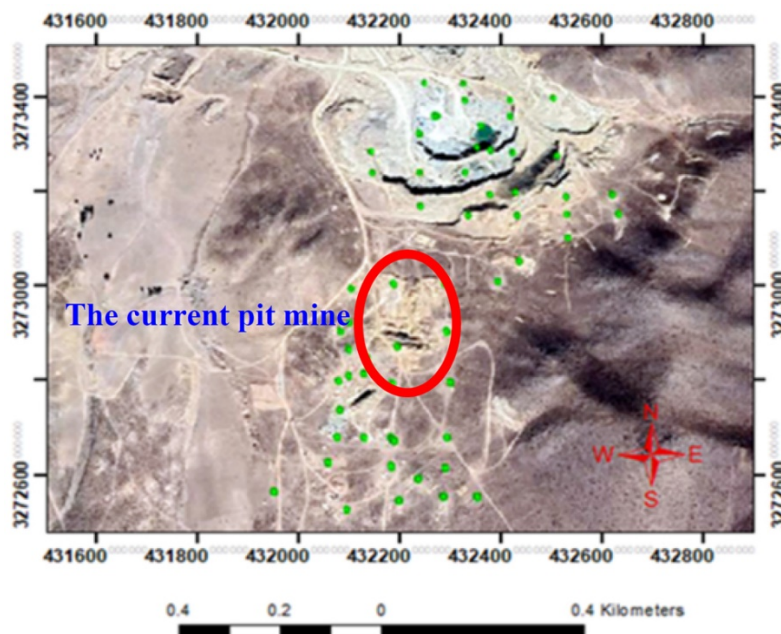
تغییرنا اساسی ترین ابزار در زمین آمار است که برای تشریح ارتباط مکانی یک متغیر به کار می رود. تغییرنا، کمیتی برداری که درجه همبستگی مکانی و شباهت بین نقاط اندازه گیری شده را برحسب مربع تفاضل مقدار دونقطه و با توجه به جهت و فاصله آن ها نشان می دهد معمولاً تغییرنا را با علامت $\gamma(h)$ نشان می دهند و از رابطه (۱) محاسبه می شود.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum (z(x_i + h) - z(x_i))^2$$

که در آن $N(h)$ ، تعداد جفت نمونه های به کاررفته در محاسبه که در فاصله h از یکدیگر قرار دارند؛ $Z(x_i)$ مقدار مشاهده شد متغیر مورد نظر و $Z(x_i+h)$ مقدار مشاهده شد

تغییرنا جهت دار می گویند. اگر بعدی می توان تغییرنا جهت دار و ناهمسانگردی را محاسبه نمود. تغییرنا جهت دار را می توان این گونه تعریف نمود. اگر در محاسبه تغییرنا فقط از زوج نقاطی که بردار h آن ها (برداری که دونقطه را به هم وصل می کند) در امتداد معین و معلومی قرار داشته باشد، استفاده شود، در این صورت آن تغییرنا را تغییرنا جهت دار می گویند.

- شبیه سازی گاوسی متوالی به کارگیری اصل توالی تحت مدل چندگاوسی توابع تصادفی را شبیه سازی گاوسی متوالی می گویند. این الگوریتم برای شبیه سازی یک مشخصه واحد با استفاده از مقادیر واحد و سپس به دست آوردن اطلاعات ثانویه و شبیه سازی مشترک چندین مشخصه وابسته، برای اولین بار معرفی شده است. این الگوریتم برای انجام شبیه سازی به داده های نرمال استاندارد نیاز دارد.



شکل ۲- موقعیت گمانه های اکتشافی (نقاط سبز رنگ) در محدوده اطراف پیت معدن مس تخت گنبد.

Fig. 2. The location of exploration boreholes in the surrounding of the Takht-e-Gonbad copper mine pit.

جدول ۱- خلاصه پارامترهای آماری شاخص کیفیت سنگ در گمانه های اکتشافی منطقه مورد مطالعه

Table 1. Summary of statistical parameters of RQD in exploration boreholes in the study area

Variable	RQD
Number	11607
Minimum	0
Maximum	100
Mean	59.97
Standard deviation	29.35
Variance	58.861
Range	0.49
Skewness	-0.22
Kurtosis	1.76

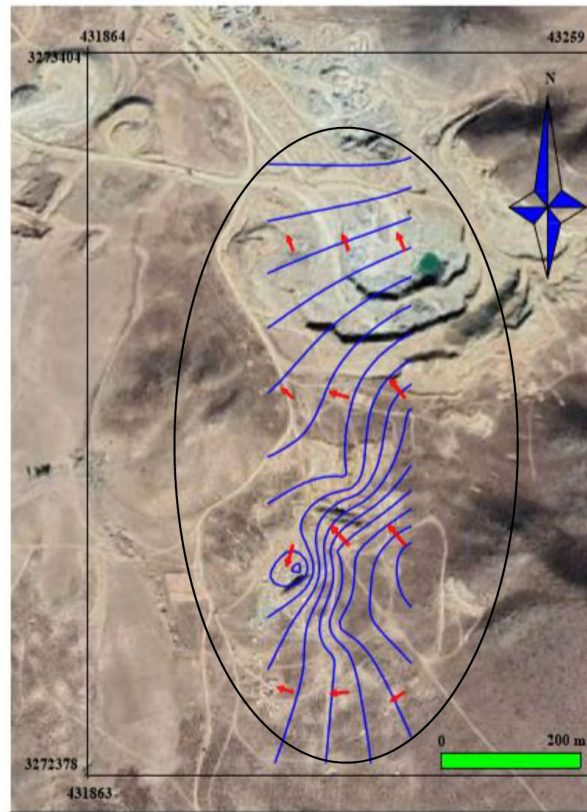
۳- نتایج و بحث

براساس شکل ۳ نقشه خطوط همپتانسیل و جهت جریان آب زیرزمینی در اطراف پیت معدن، دیده می شود خطوط جریان از قسمت شرق به غرب معدن و تا حدودی به سمت شمال پیت معدن متمایل می باشد. ورود این آب به پیت برای فعالیت معدنکاری مشکل ایجاد می کند؛ زیرا باعث ناپایداری دیواره های پیت و سبب هزینه های هنگفتی در عملیات انفجار خواهد شد. مقاطع عرضی از وضعیت لیتولوژی منطقه مورد بررسی به همراه سطح ایستایی اندازه گیری در بهمن ماه سال ۱۳۹۹ ترسیم شده است (شکل ۴ و ۵). مقطع عرضی $A - A'$ امتداد شمالی و جنوبی دارد. واحدهای سنگ شناسی نشان می دهد از تراز ۲۶۸۰ متر (از سطح دریا) تا قسمت جنوب معدن میگروگرانودیوریت بخش عمده واحدها را در بر گرفته است و بقیه واحدها عبارتند از گرانودیوریت، توف، هورنفلس سیلیسی شده و داسیت پورفیری. گمانه های J3299، J3301، J3300، J2500، J2250، H2500، در قسمت شمالی و گمانه های J3400، J3075، J3250، J3150، DDH13، DDH07، در قسمت جنوبی پیت واقع شده اند. سطح ایستایی تغییرات ناچیزی با یک شیب بسیار اندکی در سمت جنوب معدن دارد. لیتولوژی عمده تراز ۲۷۰۰ تا ۲۴۰۰ متر (از سطح دریا) در

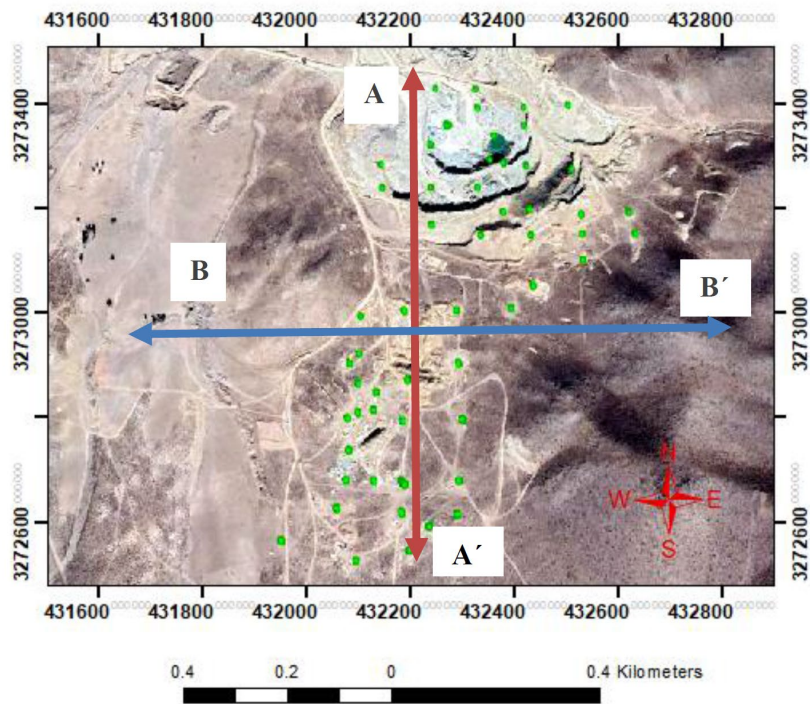
قسمت غرب منطقه توف است در حالیکه در شرق منطقه بیشتر میگروگرانودیوریت را در بر گرفته است.

نقشه موقعیت مکانی متغیر شاخص کیفیت سنگ سه بعدی در شکل ۶ دیده می شود. البته با توجه به سه بعدی بودن داده ها با استفاده از نمای پلان و جانبی نمی توان استنباط چندانی در مورد تغییرات متغیر شاخص کیفیت سنگ در فضا داشت.

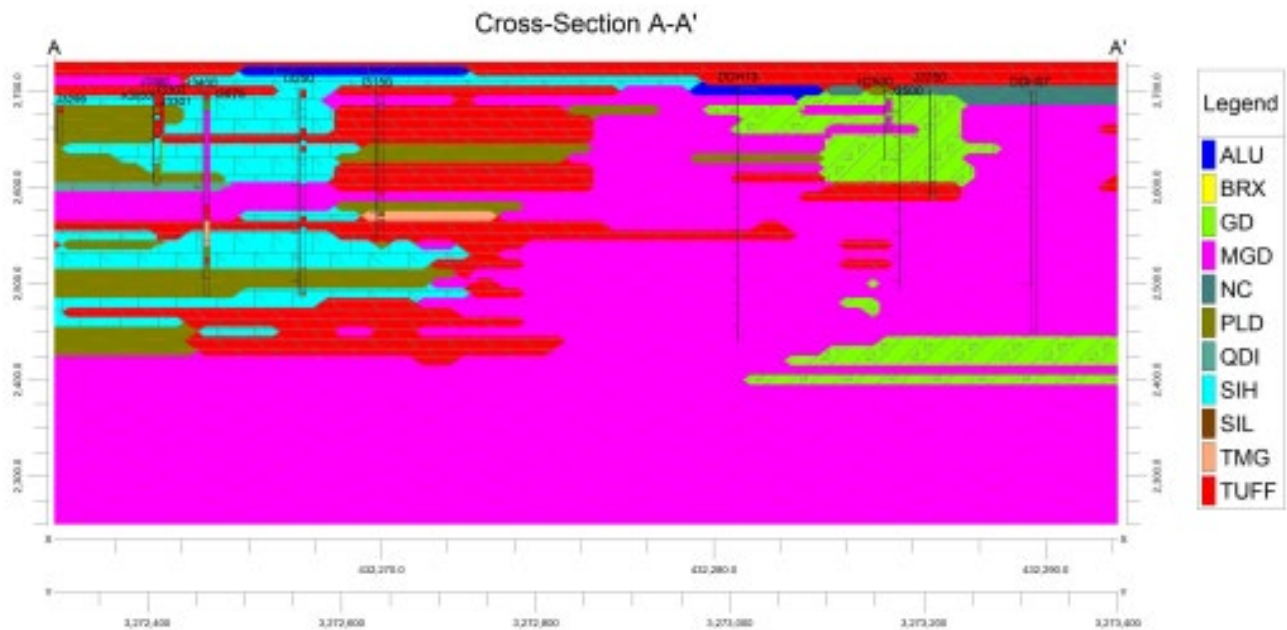
آمار مقدماتی نشان می دهد متغیر شاخص کیفیت سنگ دارای میانگین $50/84$ ، واریانس $1185/6$ و انحراف معیار $34/27$ می باشد. مقادیر چارک اول، دوم و سوم این متغیر به ترتیب برابر با $17/56$ ، $53/00$ و $84/17$ می باشد. دامنه تغییرات شاخص کیفیت سنگ برابر با ۱۰۰ می باشد و نشان دهنده وجود مقادیر شاخص کیفیت سنگ پایین در کنار مقادیر بالای این متغیر است. همچنین ضریب چولگی و کشیدگی آن به ترتیب برابر $0/11 -$ و $1/29$ محاسبه شده است. نمودار فراوانی (هیستوگرام) شاخص کیفیت سنگ با ۱۵ کلاس در شکل ۷، نشان داده شده است. جهت بررسی ارتباط متغیرهای شاخص کیفیت سنگ با عمق، نمودار جعبه ای آن در ترازهای ارتفاعی مختلف برای فاصله ارتفاعی ۵۰ متر ترسیم شده است (شکل ۸). در ترازهای ارتفاعی ۲۳۰۰ تا ۲۷۰۰ متر (از سطح دریا) با افزایش عمق، در متغیر شاخص کیفیت سنگ یک روند افزایشی دیده می شود. از سطح زمین به عمق، چولگی از مثبت به منفی تغییر پیدا کرده است.



شکل ۳- نقشه‌ی خطوط هم‌پتانسیل و جهت جریان آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی.
Fig. 3. Map of iso-potential lines and groundwater flow direction in the study area.

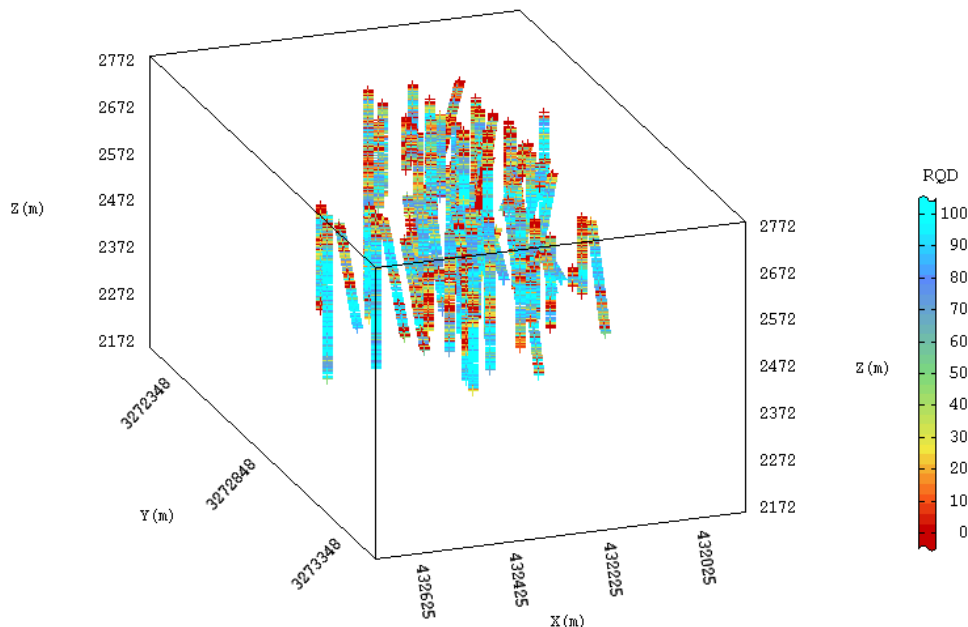


شکل ۴- مقاطع عرضی زمین شناسی در امتداد A-A'
Fig. 4. Geological cross-sections along A-A'



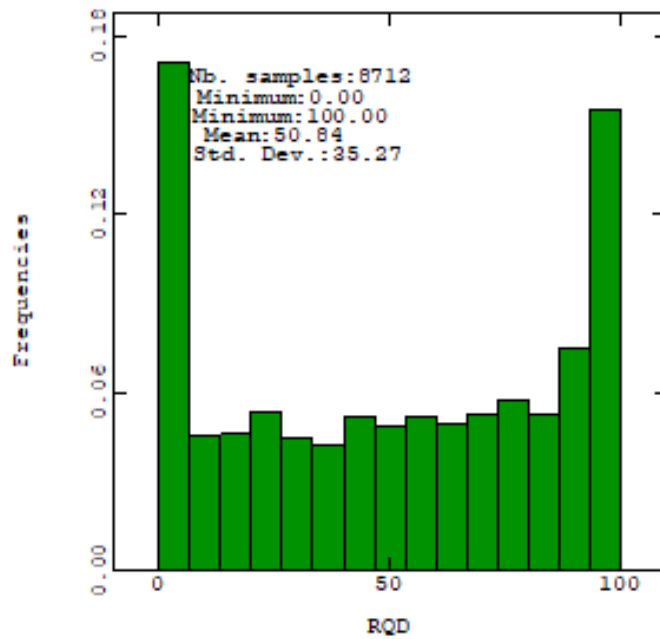
شکل ۵- مقاطع عرضی از لیتولوژی‌های موجود در منطقه مورد مطالعه به همراه سطح ایستابی اندازه‌گیری. (علائم اختصاری در راهنما: ALU: آبرفت، GD: گرانودیوریت، BRX: برش، MGD: میکروگرانودیوریت، NC: بدون هسته، PLD: داسیت پورفیری، QDL: کوارتز دیوریت، SIH: هورنفلس سیلیسی شده، SIL: منطقه سیلیس، TMG: توف ترکیب شده با گرانیت، TUFF: توف).

Fig. 5. Cross sections of the lithology and water table in the study area (Abbreviations in the guide: ALU: Alluvium, GD: Granodiorite, BRX: Breccia, MGD: Microgranodiorite, NC: No Core, PLD: Porphyry Dacite, QDL: Quartz Diorite, SIH: Silicified Hornfels, SIL: Siliceous Zone, TMG: Tuff combined with Granite, TUFF: Tuff).



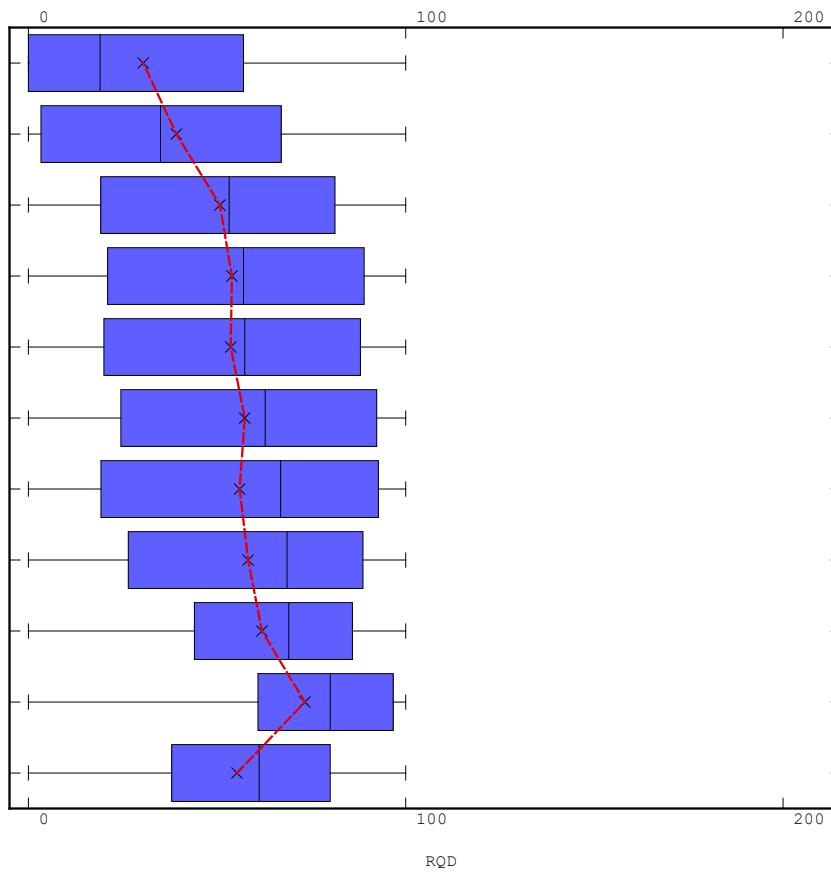
شکل ۶- نقشه موقعیت مکانی متغیر شاخص کیفیت سنگ به صورت سه بعدی با کمک نرم افزار ایساتیس

Fig. 6. Location map of the RQD in three-dimensional view



شکل ۷- نمودار فراوانی متغیر شاخص کیفیت سنگ

Fig. 7. Frequency diagram of RQD



شکل ۸- نمودار جعبه‌ای شاخص کیفیت سنگ در ترازهای ارتفاعی مختلف (فواصل ۵۰ متری).

Fig. 8. RQD box diagram for different levels (50-meter intervals)

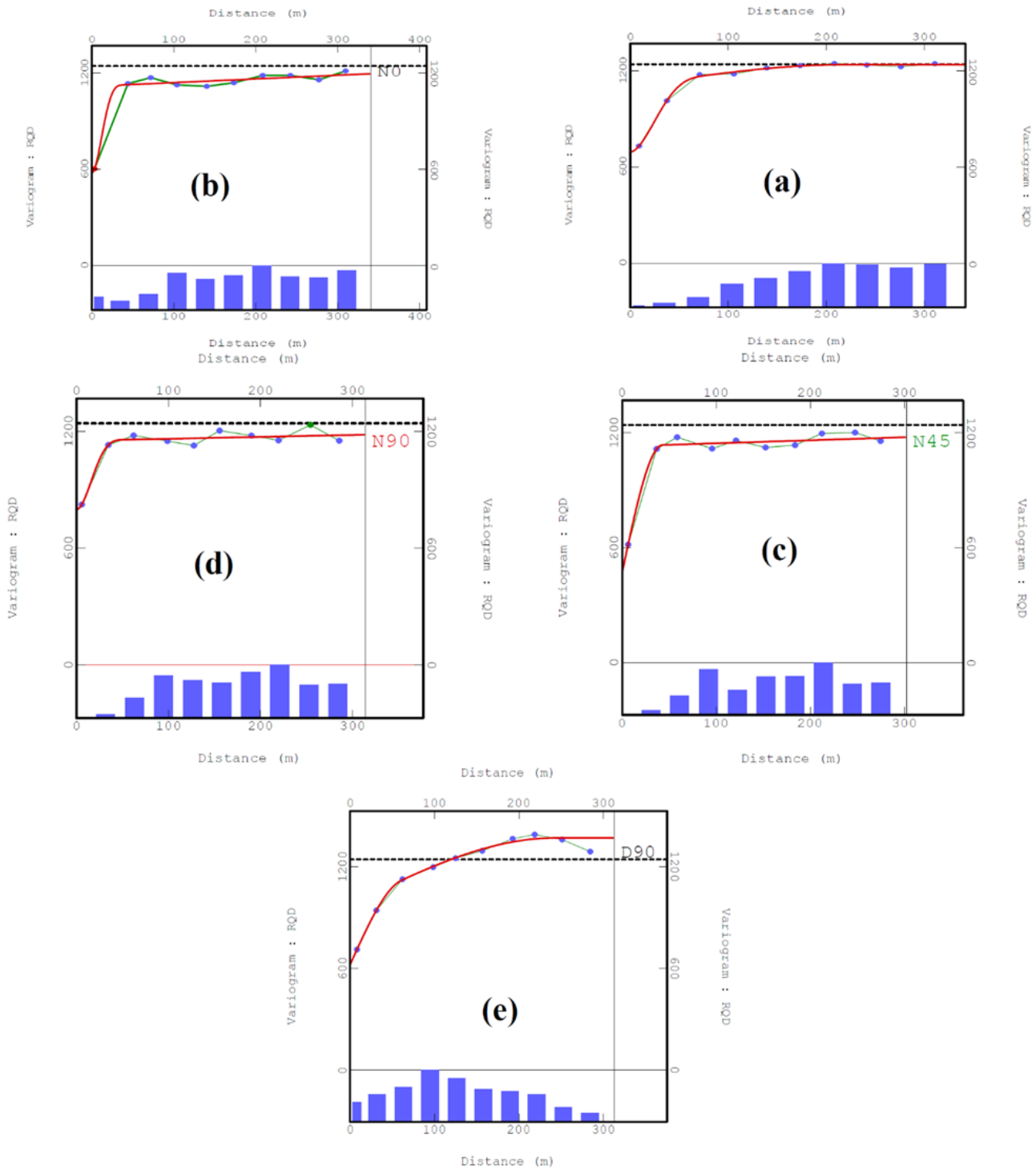
یافته هست) کمتر باشد؛ تغییرنمای مدل انطباق بیشتری را با تغییرنمای تجربی خواهد داشت و لذا مدلی که کمترین مقدار خطای را داشت، انتخاب گردید. مشخصات مدل برازش یافته در جدول ۳ گزارش شده است. برای تغییرنمای بدون جهت این مقدار برای متغیر شاخص کیفیت سنگ برابر ۵/۴۵ می باشد. در اغلب موارد متغیرهای ناحیه‌ای در جهت‌های مختلف پیوستگی مکانی مختلفی را نمایش می‌دهند. لذا تغییرنمای تجربی در جهت‌های متفاوت فضایی در نظر گرفته شده است و جهت اینکه بهترین روند را در جهت‌های مختلف به دست آورد، پارامترهای مؤثر بر روی روند تغییرنا همچنین تعداد لگ، مقدار لگ، تلورانس زاویه، تلورانس فاصله و تعداد جفت نقاط بررسی شدند. جهت‌های تغییرنا شامل: Azimut 0-Dip 0، Azimut 45-Dip 0، Azimut 90-Dip 0، Dip 90 می باشد. لازم به ذکر است منظور از شیب صفر و ۹۰ به ترتیب، تغییرنا در جهت افقی و عمودی (عمقی) می باشد. مشخصات ذکر شده تغییرناها به همراه مدل برازش یافته به آن‌ها در شکل ۹ و جدول ۳ نمایش و ارائه شده است. سپس مدل‌های تغییرنمای ذکر شده با هم‌دیگر ترکیب و یک مدل واحد تهیه شده است (شکل ۱۰). در محاسبه‌های تخمین و شبیه‌سازی لازم است تا مقدار تغییرنمای برابر آن و تابع کوواریانس در جهت‌های مختلف فضای سه‌بعدی در دسترس باشد.

نتایج حاصله مربوط به محاسبه و مدل‌سازی تغییرناهای بدون جهت و جهت‌دار شاخص کیفیت سنگ (با کمک نرم افزار ایساتیس) در جدول ۲ مشاهده می‌شود. در شکل ۹ نیز تغییرنمای تجربی بدون جهت و جهت‌دار با مقادیر اصلی شاخص کیفیت سنگ با مدل برازش یافته، دیده می‌شود. به هر حال ماهیت داده های RQD منطقه به نحوی بوده است که سبب شده اثر قطعه ای بالایی ایجاد شود. از طرفی زمانی که اثر قطعه ای بالاست، در تغییرنا نسبت اثر قطعه ای به سقف را در نظر گرفته می‌شود و اگر این نسبت حدود نیم و کمتر باشد عدم قطعیت تغییرنا در حد قابل قبول است (Issaks and Srivastava 1989). همانطور که در نمودارهای تغییرنا (شکل ۹) دیده می‌شود که این نسبت حدود نیم می باشد و لذا عدم قطعیت قابل اغماض خواهد بود. همچنین در این شکل نمودار فراوانی تعداد جفت نقاط برای ترسیم تغییرنمای تجربی در هر نقطه ارائه شده است. در واقع هر چقدر تعداد جفت نقاط بیشتر باشد تغییرنمای تجربی از اعتبار بالاتری برخوردار می‌شود (Issaks and Srivastava 1989). در شکل ۹، تغییرنمای بدون جهت شاخص کیفیت سنگ با مقادیر اصلی دیده می‌شود. سقف تغییرنا شامل ۱ و مدل کوبیک و کروی در مدل‌سازی تغییرنا استفاده است. هر چه مجموع خطای توان دوم باقی مانده (SSR) (میزان اختلاف با تغییرنمای تجربی و مدل برازش

جدول ۲- مشخصات مدل برازش شده به تغییرنمای تجربی (بدون جهت و جهت‌دار) متغیر شاخص کیفیت سنگ.

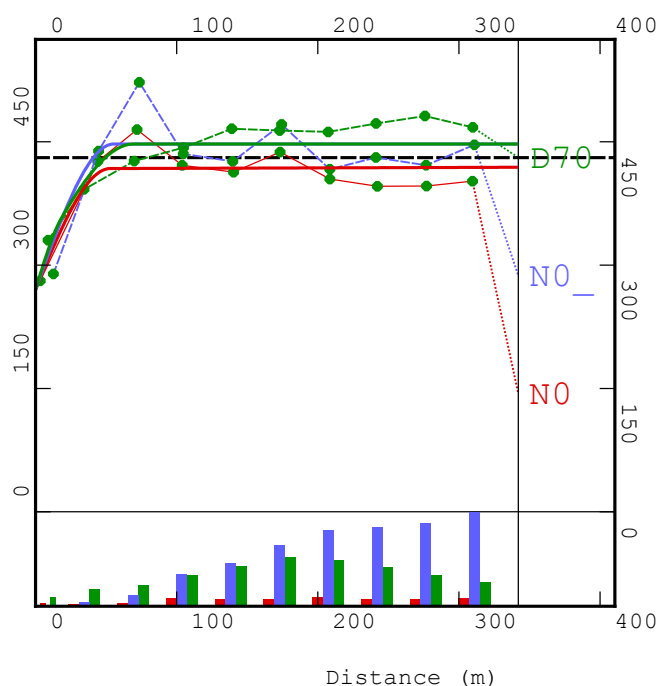
Table 2. Characteristics of the fitted model to the experimental variogram (omnidirectional and directional) for the RQD.

The sum of the squared residual error (SSR)	Range (meter)	Model	Variogram	Variable
5.45	80.86	Spherical	omnidirectional	
	221.29	Cubic		
26.026	37013.8	Spherical	Azimuth 0, Dip 0	RQD
	39.53	Cubic		
40.961	20.52	Spherical	Azimuth 45, Dip 0	
	52.73	Cubic		
67.77	151197.3	Spherical	Azimuth 90, Dip 0	
	95.76	Cubic		
58.67	299.55	Spherical	Dip 90	



شکل ۹- تغییرنمای تجربی و مدل تغییرنمای برازش شده برای مقادیر اصلی شاخص کیفیت سنگ، تغییرنمای (a) بدون جهت، (b) Azimuth 0, Dip 0، (c) Azimuth 45, Dip 0، (d) Azimuth 90, Dip 0 و (e) Dip 90.

Fig. 9. Experimental variogram and the model of fitted variogram for the values of RQD (a) omnidirectional variogram, (b) Azimuth 0, Dip 0, (c) Azimuth 45, Dip 0, (d) Azimuth 90, Dip 0 and (e) Dip 90.



شکل ۱۰- تغییرنمای تجربی برازش شده، در امتداد محورهای سه بعدی ناهمسانگردی متغیر شاخص کیفیت سنگ

Fig. 10. The experimental variogram, along the three-dimensional axes of variable anisotropy of the RQD the variation

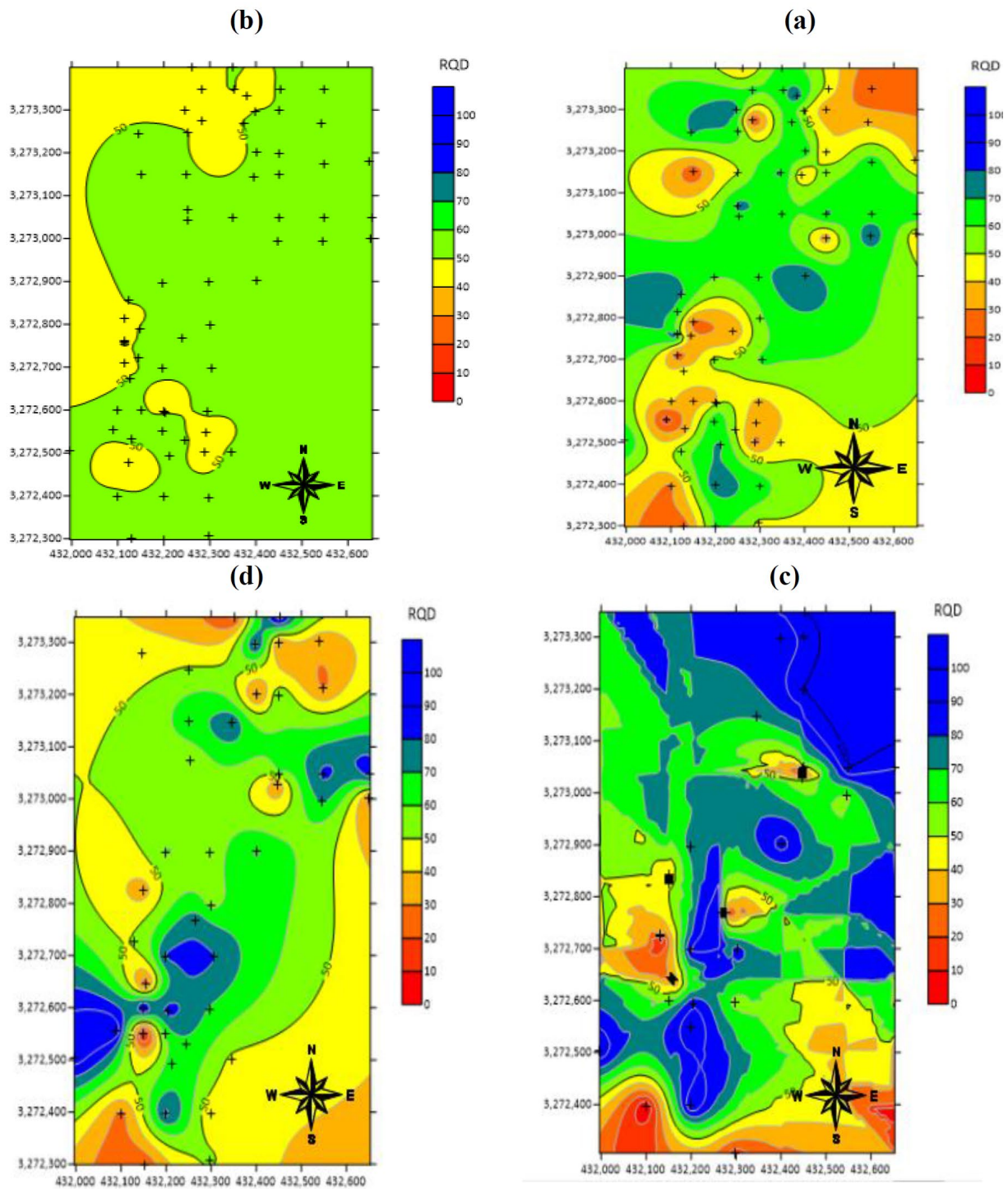
جدول ۳- مشخصات مدل واحد برازش شده به تغییرنمای تجربی شاخص کیفیت سنگ، برای جهات عمودی برهم (Azimuth 0, Dip 0؛ Azimuth 45, Dip 70).

Table 3. The characteristics of the unit fitted model for the RQD experimental variogram in the vertical directions (Azimuth 0, Dip 0; Azimuth 45, Dip 0; Dip 70).

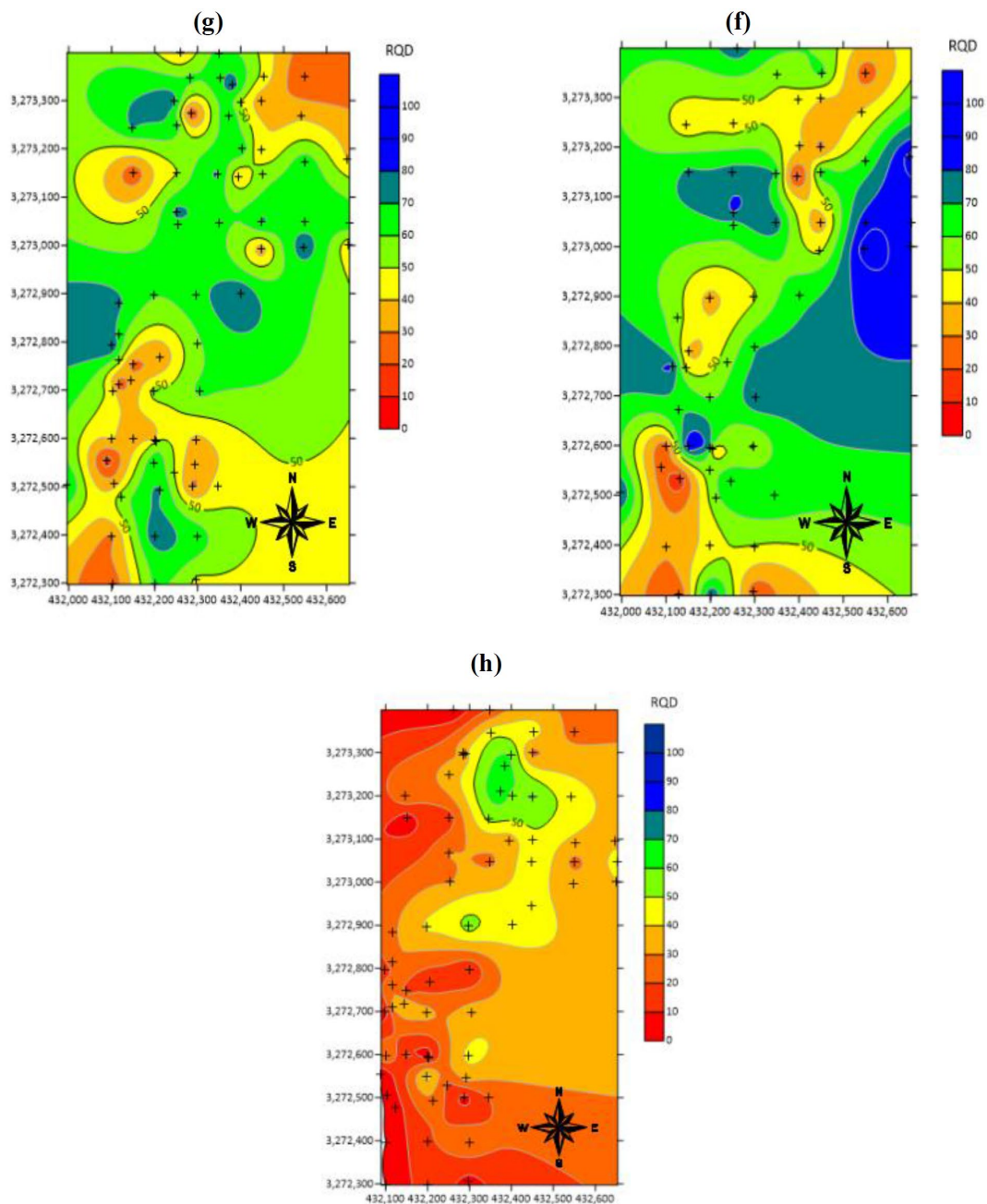
The sum of the squared residual error (SSR)	Domain (meter)	Model	Variogram	Variable
	43.45	Cubic		
149.35	53.57	Spherical	Unit variogram	RQD
	912.97	Power		

در شکل ۱۱ شبیه سازی گاوسی متوالی مقادیر متغیر شاخص کیفیت سنگ در ۷ تراز ارتفاعی مختلف نمایش داده شده است. در تراز ارتفاعی ۲۷۲۹ متر از سطح دریا (شکل ۱۱) مشاهده می شود مقدار پایین شاخص کیفیت سنگ در قسمت شمال شرقی و جنوب غربی قرار دارد و نشان از احتمال وجود زون های تراوا دارد. در تراز ارتفاعی ۲۶۲۹ متر از سطح دریا (شکل ۱۱) b، در بخش شرقی و جنوب شرقی مقادیر کمتر شاخص کیفیت سنگ مشاهده می شود. میزان این متغیر در تراز ارتفاعی ۲۵۷۹ متر از سطح دریا (شکل ۱۱) c در قسمت جنوب غربی کاهش یافته است. در شکل ۱۰ d، دیده می شود در تراز ارتفاعی ۲۵۲۹ متر از سطح دریا در شمال شرقی - جنوب غربی مقدار شاخص کیفیت سنگ پایین می باشد. در تراز ارتفاعی ۲۴۷۹، ۲۴۲۹ و ۲۳۷۹ متر از سطح دریا (شکل ۱۱) e، f، g همانند تراز ارتفاعی ۲۷۲۹ مقدار پایین شاخص کیفیت سنگ در قسمت شمال شرقی و جنوب غربی قرار دارند. در شکل ۱۱ h دیده می شود مقادیر شاخص کیفیت سنگ در تراز ارتفاعی ۲۷۲۹ در بخش وسیعی مقادیر پایینی دارد.

در شکل ۱۱ شبیه سازی گاوسی متوالی مقادیر متغیر شاخص کیفیت سنگ در ۷ تراز ارتفاعی مختلف نمایش داده شده است. در تراز ارتفاعی ۲۷۲۹ متر از سطح دریا (شکل ۱۱) مشاهده می شود مقدار پایین شاخص کیفیت سنگ در قسمت شمال شرقی و جنوب غربی قرار دارد و نشان از احتمال وجود زون های تراوا دارد. در تراز ارتفاعی ۲۶۲۹ متر از سطح دریا (شکل ۱۱) b، در بخش شرقی و جنوب شرقی مقادیر کمتر شاخص کیفیت سنگ مشاهده می شود. میزان این متغیر در تراز ارتفاعی ۲۵۷۹ متر از سطح دریا (شکل ۱۱) c در قسمت جنوب



شکل ۱۱- شبیه‌سازی متغیر شاخص کیفیت سنگ در تراز ارتفاعی (a) ۲۷۲۹، (b) ۲۶۲۹، (c) ۲۵۷۹ و (d) ۲۵۲۹ متر از سطح دریا.
 Fig. 11. Simulation of the RQD in elevation level (a) 2729, (b) 2629, (c) 2579 and (d) 2529 meters from sea level.



ادامه شکل ۱۱- شبیه‌سازی متغیر شاخص کیفیت سنگ در (f) تراز ارتفاعی ۲۴۷۹، (g) تراز ارتفاعی ۲۴۲۹ و (h) تراز ارتفاعی ۲۳۷۹ متر از سطح دریا.

Continued Fig. 11. Simulation of the RQD elevation level (f) 2479, (g) 2429 and (h) 2379 meters from sea level.

روش گاوسی متوالی معتبرتر از روش‌های درون یابی بدون در نظر گرفتن پیوستگی مکانی، می‌باشد. همچنین تغییر نماهای جهت‌دار نشان دادند پیوستگی مکانی در جهت شرقی - غربی بیشتر از جهت دیگر است. لذا احتمال اینکه زون‌های تراوا در جهت شرقی - غربی گسترش پیدا کرده باشند، بیشتر است و در نهایت مدل شبیه‌سازی گوسی متغیر شاخص کیفیت سنگ

۴- نتیجه‌گیری

نتایج بررسی آمار مقدماتی نشان داد که متغیر شاخص کیفیت سنگ در ترازهای ارتفاعی مختلف با افزایش عمق، یک روند افزایشی دارد. بررسی پیوستگی مکانی شاخص کیفیت سنگ بر اساس تغییرنمای بی‌جهت و مدل کروی حدوداً برابر با ۸۱ متر می‌باشد. لذا نقشه هم‌ارزش با استفاده از روش درون یابی به

سپاسگزاری

این پژوهش با همکاری معدن مس تخت گنبد سیرجان انجام گرفته است.

نشان می‌دهد بطور کلی مناطق شمال شرقی و جنوب غربی معدن از پتانسیل بیشتری در گسترش زون‌های تراوا دارند.

مراجع

- Anvari, A.A., Katibeh, H., Mahmoudabadi, H., 2008. Estimation of equivalent permeability in Amirkabir Tunnel alignment with neural network. 2nd Iranian Mining Engineering Conference.
- Assari, A., Mohammadi, Z., 2017. Analysis of rock quality designation (RQD) and Lugeon values in a karstic formation using the sequential indicator simulation approach, Karun IV Dam site, Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 76, 771-782. <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0898-y>
- Dehshibi, R., Jahanshahi, R., Mozafari, M., Assari, A., 2022. Application of the geostatistics to identification of the high water escape potential locations in the Tangab Dam. *Ferdowsi Civil Engineering*. 34(4), 15-30. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.27832805.1400.34.4.2.0>
- Eliat, M., Chehrzari, A., 2016. Combination of image logs analysis and petrophysical evaluation results in order to Porosity and permeability determination. *The 2nd National Geology and Mining Exploration Symposium*.
- Issaks, E.H., Srivastava, R. M., 1989. *Applied Geostatistics*, Newyork, Oxford University Press. P. 561.
- Lu, L., Kashiwaya, K., Koike, K., 2016. Geostatistics-based regional characterization of groundwater chemistry in a sedimentary rock area with faulted setting. *Environmental Earth Sciences* 75, 829. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5619-0>
- Moshrefi, M.R., Barkhordari, K., Mosavi, H., 2016. Evaluation of the geotechnical and geological features of the engineering of the Ivshan reservoir dam. *Second National Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Development*.
- Nakhaie Sarvedani, B., Jahanshahi, R., Assari, A., 2022. Determining the best places for dewatering wells in the Gohar-Zamin pit mine, using geostatistical method. *Geopersia* 12(2), 287-298. <https://doi.org/10.22059/geope.2022.339672.648651>
- Razack, M., Lasm, T., 2006. Geostatistical estimation of the transmissivity in a highly fractured metamorphic and crystalline aquifer (Man-Danane Region, Western Ivory Coast). *Journal of Hydrology* 325(4-1), 164-178. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.10.014>
- Sasani Nia, N., Habib Nia, B., Ghobadi, H., 2015. Estimation of porosity and spatial distribution of permeability using geostatistical model in one of the oil fields in southwestern Iran. *International Conference on Science and Engineering*.
- Triki, L., Zairi, M., Ben Dhia, H., 2012. A geostatistical approach for groundwater head monitoring network optimisation: case of the Sfax superficial aquifer (Tunisia). *Water and Environment Journal* 27(3), 372-362. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2012.00352.x>