

Study of engineering geology and analysis of rock slope stability in karstic areas

Mehdi Karami^{1*}, Mojtaba Rahimi Shahid¹, Gholam Reza Lashkaripour¹

1- Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

Keywords: Engineering geology, Karst, Stability analysis, Rock slope, Artificial waterfall, Khorramabad, Iran

1-Introduction

Karst is a phenomenon in the earth's crust manifested in the form of various phenomena such as holes and caves in the surface and underground. In technical terms, the phenomenon of corrosion and dissolution of carbonate rocks (limestone and dolomite), gypsum or salt is called karst. Studies show that about 25% of the land area is karst (Milanovic, 1981). Iran has the highest percentage of karst after the United States, China and Turkey and more than 11% of its surface area covered by karst formations. Many urban areas are affected by the karst bed. As a result, karst systems pose many engineering and environmental problems (Calembert, 1975; Ford, 1993; Williams, 1993; Johnson and Neal, 2003; Gutiérrez et al., 2008a). The complexity and variety of geological conditions in the karst are so vast that it makes each research work or structure very unique. Construction on hollow bedrock and sinkholes is challenging for geoscientists and engineers (Waltham and Fookes, 2003; Waltham et al., 2005; Gutiérrez et al., 2008b). Design and construction of civil engineering structures in these areas due to unpredictable location, dimensions and geometry of the karst structure and existing cavities face many problems. In addition, karst environments, especially karst aquifers, are so vulnerable and sensitive that subtle natural or human changes may have unintended effects in the short term. (Ford and Williams, 1989). In this research, before designing and constructing a waterfall and an artificial pond with an output flow rate of 400 litres per second, in the southeastern heights of Khorramabad due to karst conditions of the study area, comprehensive assessment of karst engineering geological studies and rock slope stability analysis can be done in different ways.

2- Methodology

For this purpose, in the first step with karst geomorphological studies (such as dissolution cavities), the karstification of the area was evaluated, and the geological characteristics of the karst engineering site with field and laboratory studies of physical, hydraulic, resistance, durability and solubility of rock mass were analyzed. Finally, by study discontinuity by the method of (Scan line) in the rocky slope of the waterfall, while classifying the rock mass and determining the type of possible landslides, stability analysis using software (Dips, Roclab, Rockplane, Swedge and Slide), It was evaluated in static mode and contact mode with surface water flow.

3- Discussion and conclusion

This study shows that the design and construction of civil projects in karst areas due to complex and diverse geological conditions requires the integration of karst engineering geological studies with engineering design analyses such as stability analysis of rocky slopes. For example, the known possible landslides in the proposed location of the artificial waterfall in Khorramabad can be stabilized using anchors, bolts, shotcrete and steel mesh. However, due to the karst conditions of the region, its stabilization, in the long run, will be affected by factors such as rock mass solubility, water leakage, cavities, joint system and gaps. Accordingly, the risk of possible slippery slides and the use of cement and shotcrete injection improvement methods in cavities, joints and dissolution cracks will create environmental problems in the karst environment of the region. Therefore, the proposed relocation will be a priority due to the increase in construction costs and environmental risks.

*Corresponding author: geotechnical47@gmail.com

DOI: 10.22055/AAG.2020.33794.2127

Received 2020-05-31

Accepted 2020-11-27

References

- Calembert, L., 1975. Engineering geological problems in karstic regions: Bulletin of the International Association of Engineering Geology 12, 39–82.
- Chen, D., Yi, C., 2017. Study on Roof Safe Thickness of Rock Foundation with Karst Cave and Karst Cave-surrounding Rock Stability, 4th International Conference on Mechanics and Mechatronics Research (ICMMR 2017), 1-6.
- Cooper, A.H., Farrant, A.R., Price, S.J., 2011. The use of karst geomorphology for planning, hazard avoidance and development in Great Britain. *Geomorphology* 134(1-2), 118–131.
- Ford, D.C., 1993. Environmental Change in Karst Areas. *Environmental Geology* 21(3).
- Ford, D.C., Williams, P.W., 1989. *Karst Geomorphology and Hydrology*. Academic Division of Unwin Hyman Ltd, London. p. 601
- Ghobadi, M.H., Ghorbani, S., 2011. Study of geomorphology karst in Khorramabad city, 7th Iranian Conference on Engineering Geology and Environmental, Shahroud University of Technology, September 2011, pp. 9.
- Ghobadi, M.H., Torabi-Kaveh, M., Miri, M., Mahdiabadi, N., 2014. An introduction to the karst geomorphology of the Bisetun–Taqe Bostan historical region (northeast Kermanshah, Iran) with special emphasis on karst development as a serious threat for the UNESCO World Heritage Site, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*.
- Gutiérrez, F., Mozafari, M., Carbonel, D., Gomez, R., Raeisi, E., 2015. Leakage problems in dams built on evaporates, the case of La Loteta Dam (NE Spain), a reservoir in a large karstic depression generated by interstratal salt dissolution. *Engineering Geology* 185, 139–154.
- Gutiérrez, F., Johnson, K.S., Cooper, A.H., 2008a. Evaporate karst processes, landforms and problems. *Environmental Geology* 53(5).
- Huang, X., Li, S., Xu, Z., Guo, M., Chen, Y., 2018. Assessment of a Concealed Karst Cave's Influence on Karst Tunnel Stability: A Case Study of the Huaguoshan Tunnel, China. *Sustainability* 10(7), 2132.
- Waltham, A.C., Fookes, P.G., 2003. Engineering classification of karst ground conditions. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 36, 101–118.
- Waltham, T., Bell, F., Culshaw, M., 2005. *Sinkholes and subsidence*. Springer, Chichester.
- Williams, P.W., 1993. *Karst Terrains, Environmental Changes and Human Impact: Cremlingen-Destedt, Germany*, *Catena Supplement* 25, 268p.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Karami, M., Rahimi Shahid, M., Lashkaripour, G., 2022. Study of engineering geology and analysis of rock slope stability in karstic areas. *Adv. Appl. Geol.* 11(4), 804-824.

DOI: 10.22055/AAG.2020.33794.2127

url: https://aag.scu.ac.ir/article_16256.html

مطالعه زمین شناسی مهندسی و تحلیل پایداری دامنه سنگی آهک کارستی خرم آباد در محل آبشار مصنوعی

مهدي کرمي*

دانشجوی دکتری زمین شناسی مهندسی، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

مجتبی رحیمی شهید

دانشجوی دکتری زمین شناسی مهندسی، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

غلامرضا لشکری پور

استاد زمین شناسی مهندسی، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۰۷

*Karami.mehdi@mail.um.ac.ir

چکیده

طراحی و ساخت سازه‌های مهندسی در مناطق کارستی، به علت عدم اطمینان به شرایط زیرسطحی، ابعاد و هندسه ساختار کارستی و حفره‌های موجود می‌تواند با مشکلات زیادی مواجه گردد. به همین منظور، بررسی‌های جامع ممکن است به اجتناب از مناطق مسئله‌دار، برنامه‌ریزی پیشگیرانه و اعمال اقدامات اصلاحی مؤثر کمک کند. در این پژوهش، به دلیل شرایط کارستی موقعیت ساخت آبشار مصنوعی شهر خرم‌آباد، روش‌های مختلفی برای ارزیابی مطالعه زمین‌شناسی مهندسی کارست و تحلیل پایداری دامنه سنگی مورد استفاده قرار گرفته است. این روش‌ها شامل تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی، هیدرولیکی و انحلال‌پذیری نمونه‌های سنگی به دست آمده از گمانه‌های حفاری شده در دامنه سنگی است. همچنین برای ارزیابی توسعه کارست و قضاوت مهندسی، اشکال ژئومورفولوژی کارست و طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ نیز بررسی شد و برای تعیین و تحلیل لغزش‌های احتمالی در دامنه سنگی از نرم‌افزارهای (Slide و Swedge, Rockplane, Roclab, Dips)، در حالت استاتیکی و در حالت تماس با جریان آب سطحی استفاده گردیده است. نتایج بررسی‌ها نشان داد که شرایط کارستی منطقه در رده کارست جوان است و ثابت سرعت انحلال‌پذیری سنگ آهک 6.99×10^{-5} (m/s) می‌باشد. همچنین لغزش‌های احتمالی شناسایی شده در دامنه سنگی، از نوع صفحه‌ای، گوه‌ای و توده‌ای است که پایداری بلندمدت آن‌ها با استفاده از انکر و شاتکریت قابل تأمین است؛ اما با توجه به هزینه پایدارسازی، مشکلات زیست‌محیطی ناشی از تزریق سیمان در حفرات انحلالی و افزایش ریسک لغزش‌های ناشی از جریان آب سطحی، توصیه می‌گردد که برنامه‌ریزی پیشگیرانه برای ساخت آبشار در محل پیشنهادی مدنظر قرار گیرد.

کلمات کلیدی: زمین‌شناسی مهندسی کارست، تحلیل پایداری، دامنه سنگی، آبشار مصنوعی، خرم‌آباد

مقدمه

۱۱ درصد سطح آن را سازندهای کارستی می‌پوشاند. بسیاری از مناطق شهری تحت تأثیر بستر کارستی شده قرار دارند. در نتیجه، سیستم‌های کارستی مشکلات مهندسی و محیط‌زیستی بسیاری را به وجود می‌آورند (Calembert, 1975; Ford, 1993; Williams, 1993; Johnson and Neal, 2003; Gutiérrez, et al., 2008a). پیچیدگی و تنوع شرایط زمین‌شناسی در کارست آن‌چنان زیاد است که هر یک از کارهای تحقیقاتی یا سازه‌ای را منحصر به فرد می‌سازد. ساخت و ساز بر روی سنگ بستر حفره‌دار و مناطق مستعد دارای فروچاله^۱، به عنوان یک موضوع چالش‌برانگیز برای محققان زمین‌شناسی مهندسی مطرح است (Waltham and Fookes, 2003; Waltham et al., 2005; Gutiérrez et al., 2008b). طراحی و ساخت سازه‌های مهندسی در مناطق کارستی، به علت مشخص نبودن شرایط زیرسطحی، ابعاد و هندسه

کارست^۱ پدیده‌ای در پوسته‌ی زمین است که نشانه‌های آن به صورت حفره‌ها و غارها در سطح و زیر زمین وجود دارد. در متون فنی به پدیده انحلال سنگ‌های کربناته (سنگ آهک و دولومیت)، گچی یا نمکی کارست گفته می‌شود. طبق نظر Maksimovic (۱۹۶۹) یک چهارم سطح زمین را سنگ‌های قابل حل و عمدتاً کربناته تشکیل می‌دهد. سنگ‌های کربناته تقریباً ۴۰ میلیون کیلومتر مربع، ژئیس و انیدریت ۷ میلیون کیلومتر مربع و هالیت ۴ میلیون کیلومتر مربع از کل سطح زمین را تشکیل داده‌اند. برای مثال حدود ۳۳ درصد سطح زمین در کشور یوگسلاوی، ۳۵ تا ۴۰ درصد مساحت کشورهای شوروی سابق و ۱۵ درصد آمریکا از سنگ‌های کربناته و قابل حل تشکیل شده است (Milanovic, 1981). ایران بعد از کشورهای آمریکا، چین و ترکیه بالاترین درصد کارست را دارد و بیش از

نظر گرفتن شرایط کارستی محل پروژه، مطالعه جامع زمین‌شناسی مهندسی کارست و تحلیل پایداری دامنه سنگی به روش‌های مختلف در حالت استاتیکی و در حالت تماس با جریان آب سطحی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

برای بهبود کیفیت مطالعه، شناخت بیشتر محیط توده‌سنگ و قضاوت مهندسی، مطالعه زمین‌شناسی مهندسی کارست در ایستگاه آبشار مصنوعی انجام شده است. برای این منظور ۶ گمانه مغزه‌گیری سنگ به عمق ۱۰ متر در دامنه سنگی آبشار مصنوعی حفاری گردید (شکل ۱). برای بررسی اشکال ژئومورفولوژی کارست از مطالعات Ghobadi و همکاران (۲۰۱۴) در ایستگاه سنگ سوراخ استفاده شد. ایستگاه سنگ سوراخ و ایستگاه آبشار مصنوعی در شرایط زمین‌شناسی یکسانی و با فاصله کمی نسبت به یکدیگر قرار گرفته‌اند. همچنین برای تجزیه و تحلیل درزه‌ها و تعیین نوع لغزش‌های احتمالی در دامنه سنگی و ارائه روش‌های پایداری در حالت استاتیکی و در حالت تماس با جریان آب سطحی، از نرم‌افزارهای (Dips, Rockplane, Roclab, Swedge و Slide) استفاده شد. در ادامه موقعیت ایستگاه‌ها و گمانه‌های حفاری شده در منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است (جدول ۱).

ساختار کارستی و حفره‌های موجود می‌تواند با مشکلات زیادی مواجه گردد. علاوه بر این، محیط‌های کارستی و به ویژه آبخوان‌های کارستی، بسیار آسیب‌پذیر و حساس هستند، به طوری که تغییرات ظریف طبیعی و یا انسانی ممکن است تأثیرات ناخواسته را در دوره‌های کوتاه مدت به همراه داشته باشند (Ford and Williams, 1989). روش‌های مرسوم شناسایی کارست مطالعات دفتری، حفاری گمانه، ترانسه‌های آزمایشی و روش‌های ژئوفیزیکی هستند که البته هر یک از آن‌ها مزایا و معایب خود را دارند. لذا این روش‌ها باید در اجرای متناسب با هر پروژه، بودجه موجود و ریسک قابل قبول مورد استفاده قرار گیرند (Xeidakis et al., 2004). همچنین بررسی‌های جامع ممکن است به اجتناب از مناطق مسئله‌دار، برنامه‌ریزی پیشگیرانه و اعمال اقدامات اصلاحی مؤثر کمک کند. با این حال، شناخت مؤلفه‌های کارست و روابط پیچیده آنها، مبنایی برای طراحی مناسب و استراتژی توسعه ایمن است. از جمله مطالعات صورت گرفته در خصوص بررسی مشکلات و خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی مناطق کارستی در پروژه‌های مختلف می‌توان به مطالعات (Xeidakis et al., Cooper et al., Jiang et al., 2008; Parise, 2008; 2004 Gao et al., Alija et al., 2013; 2011; Abdeltawab, 2013; Niu et Parise et al., 2015; Ghobadi et al., 2014; 2014; al., 2015; Gutiérrez, et al., 2015; Li et al., 2016; Chen Huang et al., 2018; and Yi, 2017) اشاره کرد.

در این پژوهش، قبل از ساخت آبشار و حوضچه مصنوعی با حجم دبی خروجی ۴۰۰ لیتر در ثانیه در ارتفاعات جنوب شرقی شهر خرم‌آباد، با در



شکل ۱- تصویری از مغزه‌گیری سنگ در ایستگاه آبشار مصنوعی.

Fig. 1. View of rock drilling in artificial waterfall station.

جدول ۱- موقعیت ایستگاه‌ها و گمانه‌های حفاری شده در منطقه مورد مطالعه.

Table 1. Location of stations and drilled boreholes

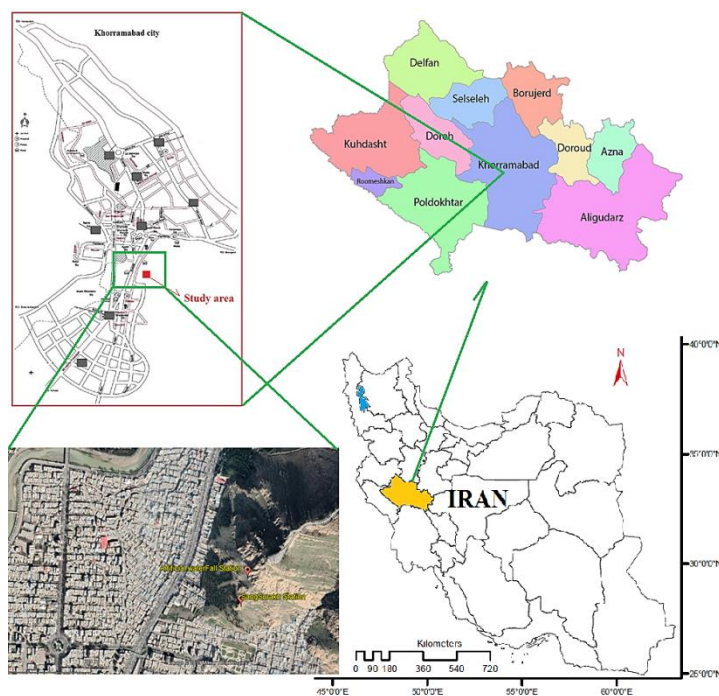
Station	Borehole	X (UTM)	Y (UTM)
Artificial Waterfall	BH1	254711	3707274
	BH2	254713	3707275
	BH3	254710	3707277
	BH4	254712	3707273
	BH5	254710	3707275
	BH6	254719	3707267
Sang Surakh	-	254681	3707166

زمین‌شناسی منطقه

خرم‌آباد مرکز استان لرستان بین ۴۸ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۲۳ دقیقه طول شرقی و ۳۳ درجه و ۲۷ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۳۳ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. موقعیت ایستگاه آبشار مصنوعی و سنگ سوراخ در شکل ۲ و نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه در شکل ۳ نشان داده شده است.

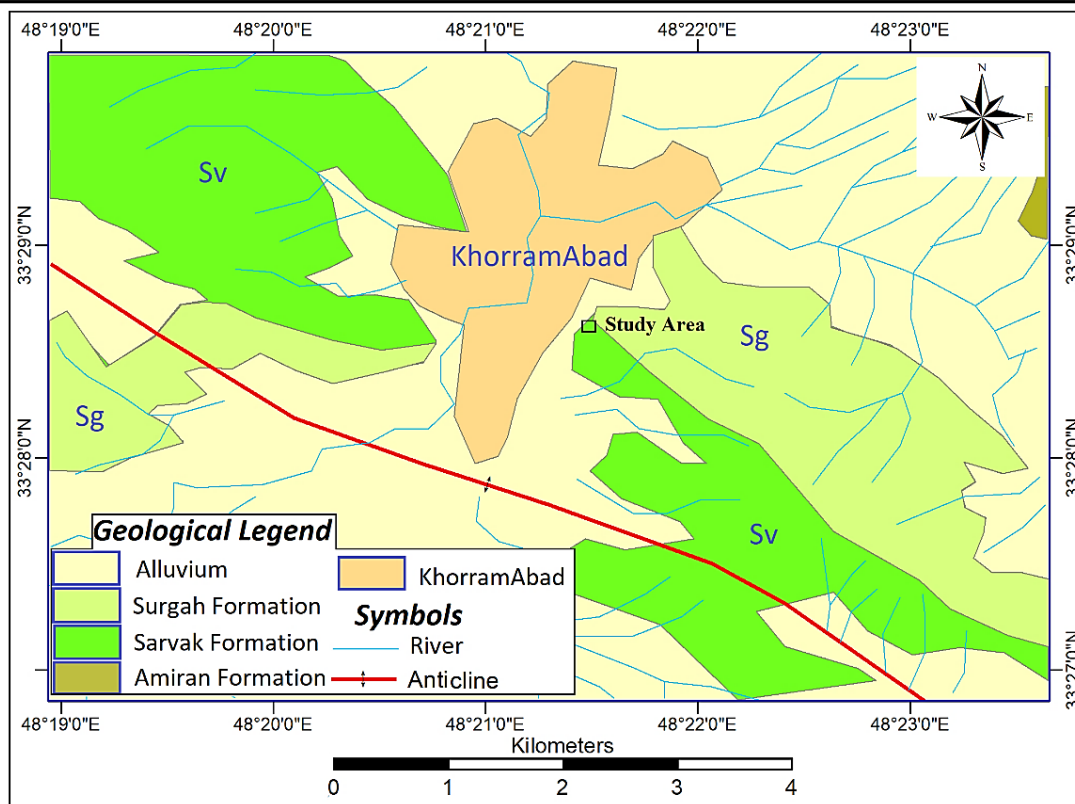
ساختمان اصلی زمین‌شناسی شهر خرم‌آباد تاقدیسی با طول ۶۵ کیلومتر و عرض متوسط ۷ کیلومتر که محور آن هم‌روند با زاگرس جنوب شرقی - شمال غربی است. به نظر می‌رسد که این تاقدیس در سفیدکوه واقع گردیده و متشکل از سازندهای ایلام - سروک، گورپی، امیران، تله زنگ، کشکان، آسماری، شهبازان، گروه فارس و سازند بختیاری است. این

تاقدیس ارتفاعات بلندی را در منطقه مورد مطالعه ایجاد کرده و شهر خرم‌آباد در امتداد دره‌ای که به طور عرضی تاقدیس خرم‌آباد را قطع کرده، قرار گرفته است. سازند آهکی ایلام - سروک با سن کرتاسه بخش وسیعی از شهر خرم‌آباد را پوشانده و طراحی آبشار مصنوعی نیز بر روی این سازند قرار گرفته است. سازند کربناتی ایلام - سروک از سنگ‌های آهکی ضخیم تا متوسط لایه با میان لایه‌های مارنی تشکیل شده است. با مطالعات صورت گرفته با وجود بالا بودن میزان اکسید کلسیم نسبت به درصد اکسید منیزیم در توده‌سنگ‌های کربناتی ایلام - سروک، قابلیت کارستی شدن در آن‌ها کم‌تر از توده‌سنگ‌های آسماری می‌باشد. این تفاوت در چگونگی ایجاد و توسعه کارست، نتیجه تفاوت در خصوصیات فیزیکی سنگ را بیان می‌کند.



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی آبشار مصنوعی در شهر خرم‌آباد.

Fig. 2. Geographical location of the artificial waterfall in Khorramabad city



شکل ۳- نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه، برگرفته از نقشه زمین‌شناسی خرم‌آباد (Sahandi et al., 1992)

Fig. 3. Geological map of the study area, taken from the Khorramabad geological map (Sahandi et al., 1992).

تنوع اشکال ژئومورفولوژی کارست منطقه مورد مطالعه، بلوغ کارستی شدن آن در رده کارست جوان^۳ طبقه‌بندی می‌گردد.

مطالعات آزمایشگاهی

خصوصیات سنگ‌شناسی

به منظور بررسی ترکیب سنگ‌شناسی و رده‌بندی سنگ‌های کربناته، از نمونه‌های انتخاب شده گمانه BH-2 در ایستگاه آبشار، مقطع نازک تهیه شد. با توجه به مطالعه مقطع نازک و بر اساس رده‌بندی Folk (1959) نام سنگ بایو میکرایت (پکستون) می‌باشد. این نمونه از فرامینیفراهای پلانکتونیک مثل رادیولر تشکیل شده است که در زمینه‌ای از آهک تیره (میکرایت) قرار گرفته‌اند. همچنین تعدادی رگچه‌های ریز در نمونه مشاهده شده است که تمام آن‌ها با سیمان کلسیتی پر شده‌اند. در این نمونه هیچ تخلخلی مشاهده نشد و اکثر رادیولرها کلسیتی شده‌اند (شکل ۶).

پدیده‌های ژئومورفولوژی کارست

پدیده‌های ژئومورفولوژی کارست که در مناطق کارستی دیده می‌شوند متنوع هستند و بین ژئومورفولوژی کارست و تکامل آن ارتباط نزدیکی وجود دارد. به عبارت دیگر فراوانی و گسترش پدیده‌های مورفولوژیکی کارست از گسترش کارست در ناحیه حکایت دارد. در شهر خرم‌آباد در سنگ‌آهک کرتاسه، طاقی طبیعی تشکیل شده است که به سنگ سوراخ معروف است. پدیده ژئومورفولوژی کارست منطقه محل پروژه نشان دهنده شرایط کارستی محیط می‌باشد. برخی از شواهد ژئومورفولوژی کارست در جدول ۲ نشان داده شده است.

از نتیجه میزان درجه کارستی شدن می‌توان در طبقه‌بندی مهندسی کارست استفاده کرد. این طبقه‌بندی برای مهندسین بسیار مفید است، به طوری که این طبقه‌بندی یک یا گروهی از پارامترها را درجه‌بندی و مشخص می‌کند.

بر اساس بررسی‌های میدانی، عمده اشکال ژئومورفولوژی کارست مشاهده شده در محل پیشنهادی آبشار مصنوعی، شکستگی‌های تکتونیک، حفرات انحلالی و صفحات لغزشی می‌باشد (شکل‌های ۴ و ۵). با توجه به

جدول ۲- مشخصات اشکال ژئومورفولوژی کارست ایستگاه سنگ سوراخ (Ghobadi and Gorbani, 2011).

Table 2. Characteristics of Geomorphological Forms of Karst in Sang Surakh station (Ghobadi and Ghorbani, 2011).

Phenomenon	UTM	Elevation	Aperture Length (m)	Aperture Width (m)	Size (m)
Cave 1	X=0254666 Y= 3707151	1218	2.2	1.35	5.3
Cave 2	X= 0254653 Y= 3707159	1218	3.55	1.2	2.5
Karstic arch	X= 0254681 Y= 3707166	1268	4.34	9.8	
Karst Cavity	X= 0254671 Y= 3707181	1268	2.9	1.5	1.1
	X= 0254673 Y= 3707192	1268	1.5	1.45	0.92
	X= 0254675 Y= 3707199	1270	3.2	1.13	0.55
Fractures	X= 0254672 Y= 3707153	1218	7.76	4.2	7.5
	X= 0254681 Y= 3707168	1269	7.6	0.45	0.75
	X= 0254682 Y= 3707166	1268	4.7	0.2	0.35
	X= 0254682 Y= 3707166	1268	7.5	0.2	0.35



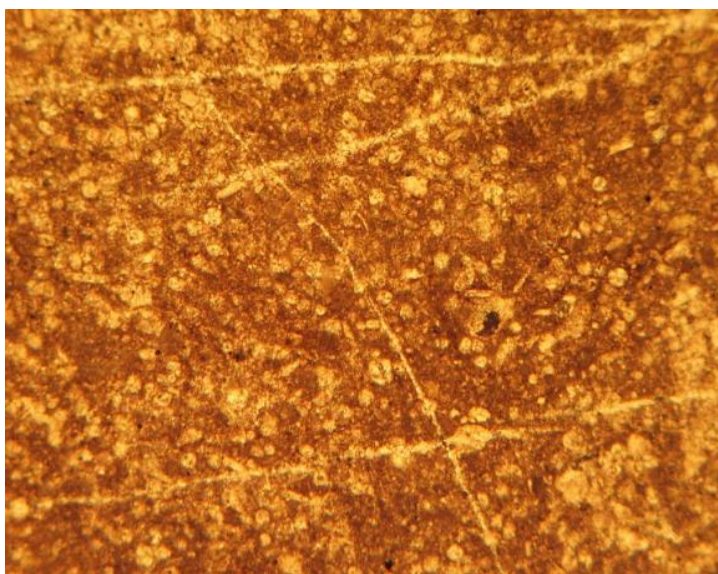
شکل ۴- شکستگی‌های تکتونیکی دامنه اصلی آبشار (زاویه دید به سمت شمال شرق).

Fig. 4. Tectonic fractures of the main slope of the waterfall (view to the northeast).



شکل ۵- تصاویری از لغزش دیواره به همراه حفره انحلالی.

Fig. 5. View of the slope slide with the dissolved hole.



شکل ۶- تصویر میکروسکوپی نمونه سنگ آهک گمانه BH2 (دانه‌های کروی روشن فرامینیفر و رادیولر).

Fig. 6. Microscopic image of the limestone of borehole BH2 (bright spherical beads of Foraminifera and Radiolar).

خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها

کارستی شدن و توسعه کارست با ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی، نفوذپذیری و قابلیت انحلال سنگ‌ها ارتباط مستقیم دارد. به همین منظور، متوسط خصوصیات برای نمونه‌های به دست آمده از ۶ گمانه مغزه‌گیری سنگ به عمق ۱۰ متر مورد ارزیابی قرار گرفتند و نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است.

آزمایش فلورسانس اشعه‌ی ایکس (XRF)

آنالیز به روش فلورسانس ایکس (XRF) یکی از دقیق‌ترین روش‌ها برای تعیین ترکیب شیمیایی سنگ می‌باشد. نتایج حاصل از سنجش به صورت اکسیدهای عناصر بیان می‌گردد. بالا بودن درصد اکسید کلسیم و پایین بودن درصد اکسید منیزیم به توسعه فرایند کارستی شدن کمک خواهد کرد. نتایج حاصل از آنالیز شیمیایی در منطقه ارائه گردیده است (جدول ۳).

جدول ۳- نتایج آنالیز XRF بر حسب درصد.

Table 3. Results of XRF analysis in percent.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	P ₂ O ₃	SO ₃	L.O.I
2.1	0.71	0.33	54.68	0.25	0.11	0.1	0.16	42.21

جدول ۴- خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های سنگی مغزه‌گیری شده.

Table 4. Physical and mechanical properties of rock samples.

Parameter			
n%		3.45	
e		0.03	
Percentage of Water Absorption		1.38	
ω%		0.48	
Density(gr/cm ³)	Dry	2.56	
	Moist	2.58	
	Saturation	2.60	
G _s		2.64	
Hydraulic conductivity (m/sec)		2.4 × 10 ⁻⁸	
Durability	(Id ₂)	99.82	
	(Id ₃)	99.74	
σ _c (Max) 50% MPa		37.1	
Shear strength (Saw Cut)	C(Kg/cm ²)	0.98	
	φ°	34.6°	
Point Load (MPa)	Dry	Is (50)	5.18
		UCS	57.39
		BTS	11.04
	Moist	Is (50)	4.65
		UCS	44.13
		BTS	9.18
	Saturation	Is (50)	4.03
		UCS	32.6
		BTS	6.83
E (GPa)	Dry	47.81	
	Moist	53.56	
	Saturation	58.2	
ν	Dry	0.29	
	Moist	0.30	
	Saturation	0.31	
V _p (km/s)	Dry	4.99	
	Moist	5.33	
	Saturation	5.59	
V _s (km/s)	Dry	2.68	
	Moist	2.80	
	Saturation	2.92	
Solubility (m/s)	pH (6.5-7)	6.99 × 10 ⁻⁵	
Rock Classification		CM	

طبقه‌بندی مهندسی سنگ

برای ارزیابی طبقه‌بندی توده‌سنگ در محل دیواره آبشار و پی حوضچه ذخیره آب از سه شاخص کیفی سنگ (Q, RMR, RQD) استفاده شده است (جدول‌های ۵، ۶ و ۷).

تحلیل پایداری دامنه سنگی
برداشت و مطالعات زمین‌شناسی صحرایی

رفتار مکانیکی سنگ‌ها به شدت تحت تأثیر خصوصیات سیستم ناپیوستگی‌ها و تعداد دسته‌درزه‌هاست. ناپیوستگی‌ها می‌توانند خصوصیات مقاومتی سنگ را کاهش داده و نفوذپذیری و تغییر شکل‌پذیری را افزایش دهند (Goodman, 1989; Bell, 2007); بنابراین بررسی صحرایی و تحلیل دقیق وضعیت و خصوصیات سیستم

درزه و شکستگی‌ها از مهم‌ترین مسائل در تحلیل خصوصیات توده‌سنگ می‌باشد. در این تحقیق بر اساس دستورالعمل (ISRM, 1978)، خصوصیات سطوح ناپیوستگی‌ها در طول خط برداشت، شیروانی سنگی توسط متر و کمپاس برداشت گردید. این برداشت‌ها شامل اطلاعاتی همچون شیب و جهت شیب سطوح ناپیوستگی توده‌سنگ است. جهت تحلیل ساختاری شیروانی آبشار مصنوعی و مشخص کردن تعداد و جهت دسته درزه‌های اصلی، نمودار رزیدیاگرام در شکل ۷ نمایش داده شده است. در شکل ۸ و جدول ۸ نتایج تحلیل دسته‌درزه‌ها و نمایش توزیع قطب در نرم‌افزار Dips ارائه شده است. با توجه به تحلیل و مشخص شدن دسته‌درزه‌ها، پتانسیل انواع لغزش‌های صفحه‌ای و گوه‌ای و یا توده‌ای ارزیابی شد (جدول ۸).

جدول ۵ - مقادیر (RQD) در هر گمانه.

Table 5. RQD values of boreholes.

Borehole	RQD (%)	Rock Quality
BH1	39	Poor (weathered rocks)
BH2	32	Poor (weathered rocks)
BH3	43	Poor (weathered rocks)
BH4	61	Fair (Moderately weathered rocks)
BH5	13	Very poor (Completely weathered rock)
BH6	70	Fair (Moderately weathered rocks)

جدول ۶ - طبقه‌بندی RMR توده سنگ.

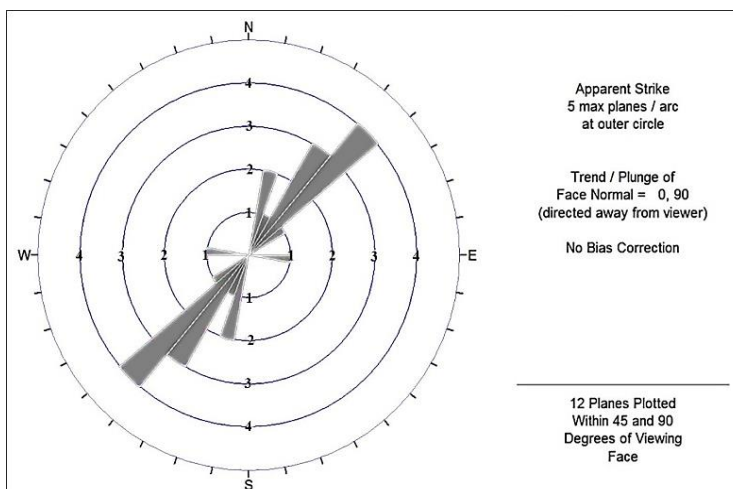
Table 6. RMR classification of rock mass.

Parameters	Artificial Waterfall slope		Basin	
	values	condition	values	condition
Uniaxial comp. strength (σ_c)	7	50-100 MPa	7	50-100MPa
RQD	8	25-50 %	3	<25 %
Discontinuity spacing	18	2-2.6 m	5	<0.06 m
Condition of discontinuity surfaces	25	Sum of 5 Parameters	25	Sum of 5 Parameters
Groundwater conditions	15	Dry	15	Dry
Orientation of discontinuities	-32	Fair	-15	Fair
RMR		41		40

جدول ۷ - امتیازدهی پارامترهای Q.

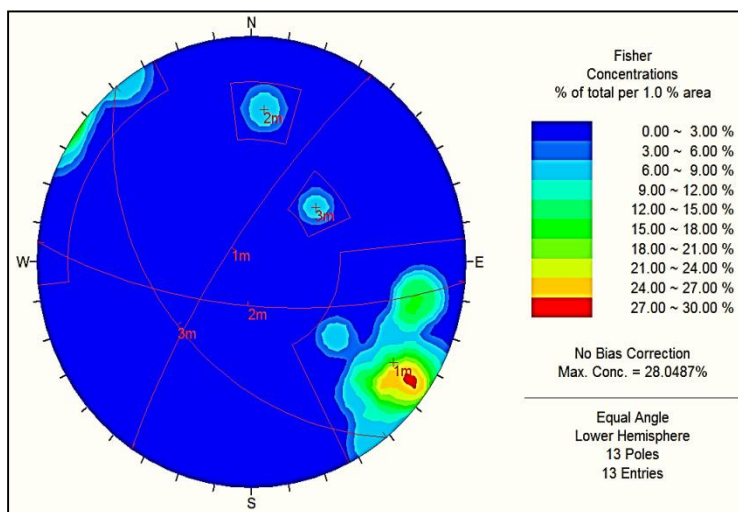
Table 7. Scoring of Q parameters.

Q		Artificial Waterfall	Type of rock	RQD	J_n	J_r	J_a	j_w	SRF
Value	Description								
5.7	Poor	Slope	Limestone	43	9	3	1	1	2.5
1.06	Poor	Basin	Limestone	25>	9	3	3	1	2.5



شکل ۷- نمودار رزدياگرام رسم شده با نرم افزار Dips

Fig. 7. Rose diagram in Dips software.



شکل ۸- نمایش دسته درزه ها در نرم افزار Dips.

Fig. 8. Joint sets in Dips software.

جدول ۸- شیب و جهت شیب دسته درزه های غالب.

Table 8. Dip and dip direction of main joint sets.

Joint set	Dip	Dip Direction
Waterfall Body	75	240
Joint set (1)	77	304
Joint set (2)	42	231
Joint set (3)	68	185

تعیین پارامترهای مقاومتی درزه‌ها

اولین گام جهت بررسی پایداری، تعیین پارامترهای مقاومت برشی ناپیوستگی‌ها است؛ به عبارت دیگر در صورت وجود پتانسیل شکست‌های ساختاری، با توجه به مقاومت برشی ناپیوستگی‌ها، پایداری آن‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. پارامترهای مقاومت برشی ناپیوستگی‌ها از دو روش آزمایشگاهی و یا با استفاده از معیار شکست غیرخطی همچون رابطه بارتن تعیین می‌گردد. در روش معیار شکست غیرخطی بارتن با استفاده از پارامترهای JRC (ضریب زبری درزه)، JCS (مقاومت فشاری دیواره درزه)، ϕ_b (زاویه اصطکاک مینای سطوح درزه) و σ_n (تنش عمودی وارد بر سطح درزه) پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک به دست خواهد آمد. معیار شکست غیرخطی بارتن طبق معادله ۱ می‌باشد.

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg} \left[\left[\phi_b + \operatorname{JRC} \operatorname{Log}_{10} \left[\frac{\operatorname{JCS}}{\sigma_n} \right] \right] \right] \quad (1)$$

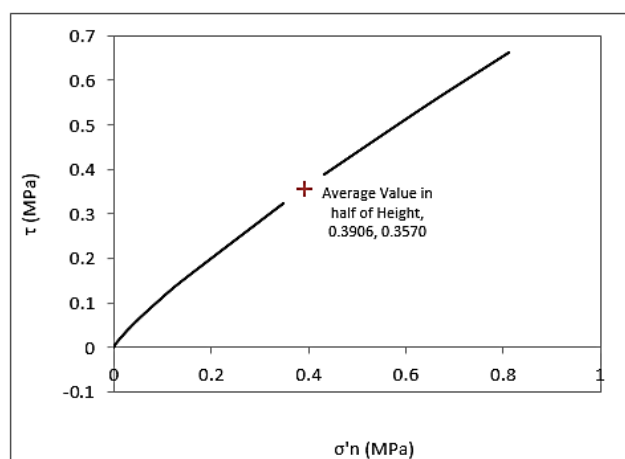
مقدار JRC بر اساس زبری درزه و با استفاده از شکل استاندارد به دست می‌آید. در برداشتهای صحرایی این مقدار مشخص گردید. مقدار JRC بر اساس زبری برابر ۱۰ و همچنین مقدار JCS نیز معادل مقدار مقاومت فشاری سنگ ۳۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. منحنی مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی بر حسب میزان تنش قائم برای ناپیوستگی‌ها بر اساس معیار شکست بارتن در توده سنگ شیروانی آبشار ارائه شده است (شکل ۹)؛ که بر اساس آن مقدار تنش عمود بر سطح درزه برابر با ۰/۳۵۷ مگاپاسکال، مقدار چسبندگی برابر ۵۴ کیلو پاسکال و زاویه اصطکاک برابر ۳۷ درجه تخمین زده شد.

تعیین ضریب اطمینان گسیختگی صفحه‌ای

به منظور بررسی پتانسیل گسیختگی صفحه‌ای، مطابق بررسی‌ها، امکان ایجاد شکست صفحه‌ای بر روی دسته درزه دو (۴۲/۲۳۱) وجود

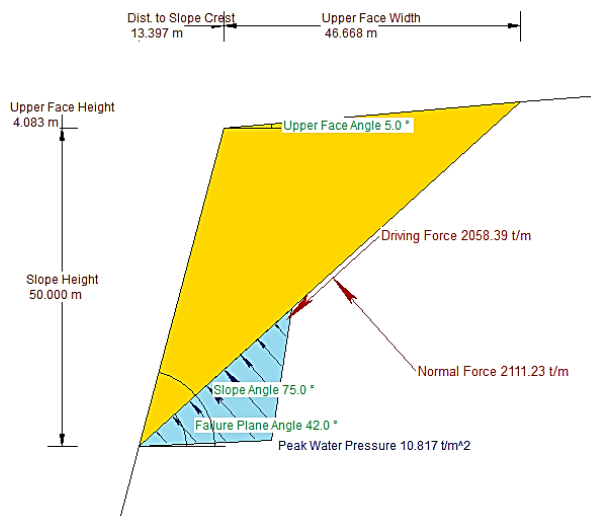
دارد. شیب و مشخصات درزه و دیواره شیروانی تا حدود زیادی شبیه هم هستند؛ بنابراین تحلیل گسیختگی صفحه‌ای با استفاده از نرم‌افزار RocPlane در مورد این درزه انجام شد (شکل ۱۰ و جدول ۹). تحلیل پایداری صفحه‌ای انجام شده نشان داد که ضریب اطمینان در شرایط غیر از تسلیح معادل $FOS=1.20$ می‌باشد و این مقدار ضریب اطمینان از مقدار مشخص شده در آیین‌نامه (2010) FHWA کمتر است.

برای جلوگیری از گسیختگی صفحه‌ای استفاده از انکر پیشنهاد می‌گردد. به این صورت که انکرهای پیشنهادی در گسیختگی صفحه‌ای، تقریباً افقی طراحی شده‌اند و در طراحی انکراژ علاوه بر سطح لغزش، جهت کانال‌های انحلالی نیز مدنظر قرار گرفته است و از منطبق شدن زاویه انکر در جهت حفرات انحلالی اجتناب شده است. همچنین با توجه به این‌که، لحاظ کردن حفرات انحلالی در مدل تحلیل پایداری، نیازمند تعیین دقیق ابعاد هندسی حفرات با استفاده از روش‌های غیر مخرب ژئوفیزیکی است و در نظر گرفتن حفرات در مدل سبب پیچیدگی محاسبات می‌گردد؛ به همین منظور سعی شد بین نتایج بررسی‌های زمین‌شناسی مهندسی کارست و تحلیل پایداری، قضاوت مهندسی صورت پذیرد. مطابق نتایج تحلیل ارائه شده، برای تأمین پایداری به ۶ عدد انکر ۸۵ تنی نیاز است. همچنین همراه با سیستم انکر می‌بایست شاکریت به ضخامت ۵ سانتی-متر با یک لایه مش فولادی اجرا گردد. نتایج تحلیل پایداری گسیختگی صفحه‌ای شیروانی در شکل ۱۱ و جداول ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است. تحلیل تعادل حدی انجام شده نشان داد که ضریب اطمینان در شرایط تسلیح (استفاده از انکر) معادل ۱/۵۲ است؛ بنابراین روش پیشنهادی، پایداری بلندمدت را تأمین می‌کند.



شکل ۹- مقادیر مقاومت برشی سطوح ناپیوستگی توده سنگ محدوده آبشار.

Fig. 9. Values of shear strength of rock mass discontinuous surfaces in water fall site.

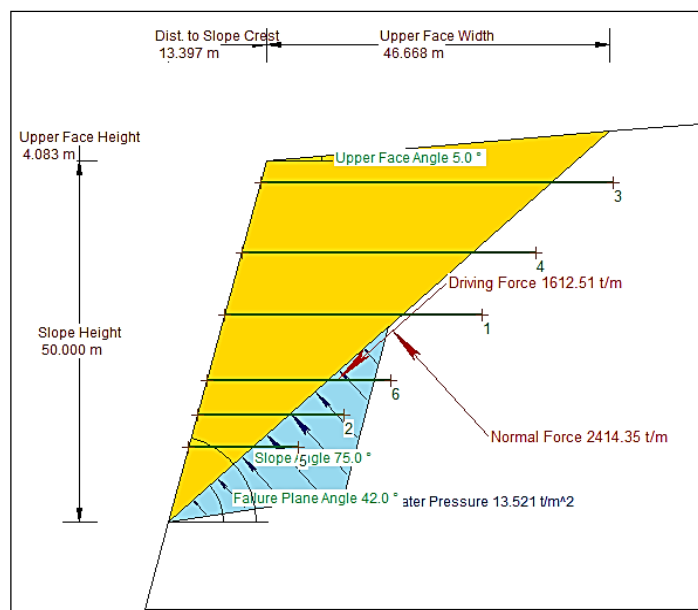


شکل ۱۰- محاسبه ضریب اطمینان گسیختگی صفحه‌ای بر روی درزه J₂.
 Fig. 10. Calculating the factor of safety of plane failure in Joint J₂.

جدول ۹- محاسبه ضریب اطمینان و مشخصات هندسی لغزش بر روی درزه J₂.

Table 9. Calculate the factor of safety and geometric characteristics of the slide in joint J₂.

FOS	Resisting Force	Wedge Weight	Wedge Volume	Shear strength	Normal Force	Plane Waviness	Water Force on Failure plane
1.19	2458 t/m	3076 t/m	1139 m ³ /m	2085 t/m ²	2111 t/m	10°	174 t/m



شکل ۱۱- ضریب اطمینان با استفاده آنکر.
 Fig. 11. Factor of safety using Anchor.

جدول ۱۰- پایداری سازی گسیختگی صفحه‌ای با استفاده از انکر.

Table 10. Stabilization of plane failure using Anchor.

FOS	1.52
Driving Force	1612 t/m
Resisting Force	2449 t/m
Wedge Weight	3076 t/m
Wedge Volume	1139 m ³ /m
Shear strength	2322 t/m ²
Normal Force	2414 t/m
Plane Waviness	3°
Active Bolt Force	0.00 t
Active Bolt Angle	0°
Passive Bolt Force	0.00 t
Passive Bolt Angle	0°
Water Force on Failure Plane	273t/m

جدول ۱۱- خصوصیات انکرهای پیشنهادی.

Table 11. Characteristics of the proposed anchors.

No	Angle	Capacity	Length (m)	Anchor Length (m)
1	0°	100 t/m	35	10.9
2	0°	100 t/m	20	7.5
3	0°	100 t/m	48	8.3
4	0°	100 t/m	40	8.5
5	0°	100 t/m	15	6.3
6	0°	100 t/m	25	8.4

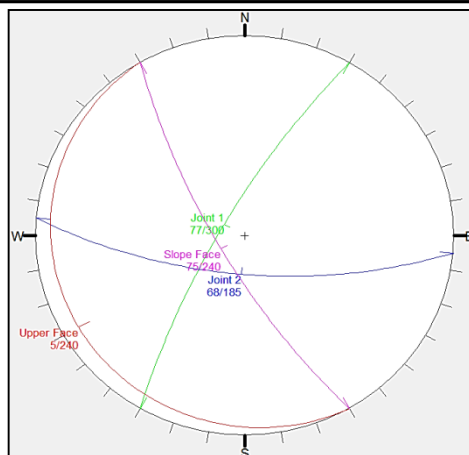
تعیین ضریب اطمینان گسیختگی گوه‌ای

به واسطه وجود سه ناپیوستگی احتمال تشکیل گوه و ایجاد گسیختگی گوه‌ای در شیروانی سنگی وجود دارد. در اولین گام با ترکیب دوتایی از ناپیوستگی‌های موجود در دیواره‌ها به همراه هندسه شیب، پتانسیل تشکیل گوه با استفاده از نرم‌افزار Swedge مورد بررسی قرار گرفت. این نرم‌افزار بر مبنای روش برداری تئوری هوک پتانسیل تشکیل گوه را تعیین می‌نماید. در صورت تشکیل گوه، هندسه، وزن، جهت لغزش، نیروهای مقاوم، نیروهای محرک و ضریب اطمینان پایداری گوه توسط این نرم‌افزار محاسبه می‌شود. همچنین این نرم‌افزار قابلیت مدل‌سازی سیستم‌های نگهداری را نیز دارد. مطابق نتایج پتانسیل ایجاد سه نوع گوه در بدنه آبشار وجود دارد. گوه یک، حاصل تقاطع دسته درزه شماره ۱ و دسته درزه شماره ۲، گوه دو، حاصل تقاطع دسته درزه شماره ۱ و دسته درزه شماره ۳ و گوه سه،

حاصل تقاطع دسته درزه شماره ۲ و دسته درزه شماره ۳ هستند (شکل ۱۲). نتایج تحلیل پایداری هر یک از گوه‌ها در شکل‌های (۱۳، ۱۴ و ۱۵) ارائه شده است.

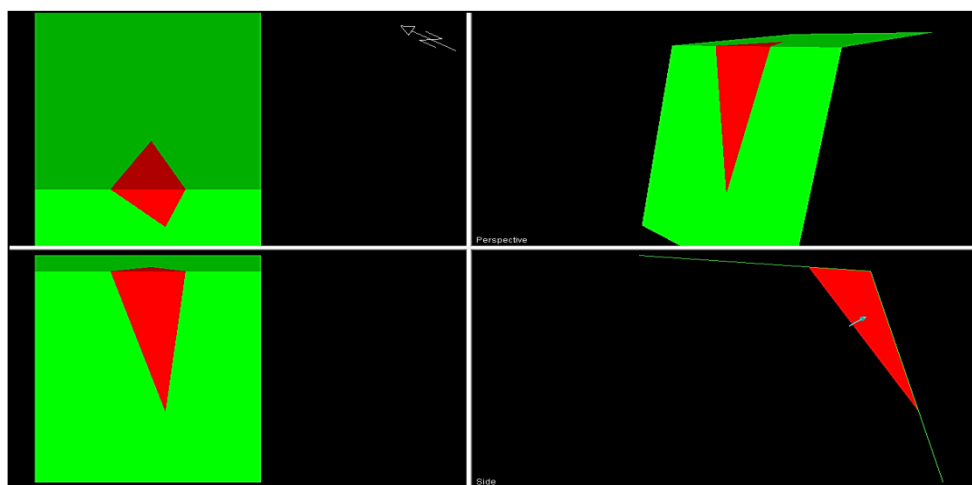
نتایج تحلیل پایداری گوه‌ای بر روی درزه‌های مختلف در جدول ۱۲ ارائه شده است. مقادیر ضریب اطمینان هر سه گوه ایجاد شده کمتر از مقدار مشخص شده در آیین‌نامه FHWA (2010) می‌باشد.

برای تأمین پایداری بلند مدت و رسیدن به ضریب اطمینان مورد قبول، تأثیر نصب انکرهای ۱۵ متری با فاصله‌داری ۳ متر در گوه‌ها بررسی شد. مطابق نتایج تحلیل پایداری، به ۴ عدد انکر ۷۵ تنی در هر متر از ارتفاع دیواره شیروانی نیاز است (شکل ۱۶). همچنین فواصل طولی اجرای انکرها برابر با ۳ متر در نظر گرفته شد.



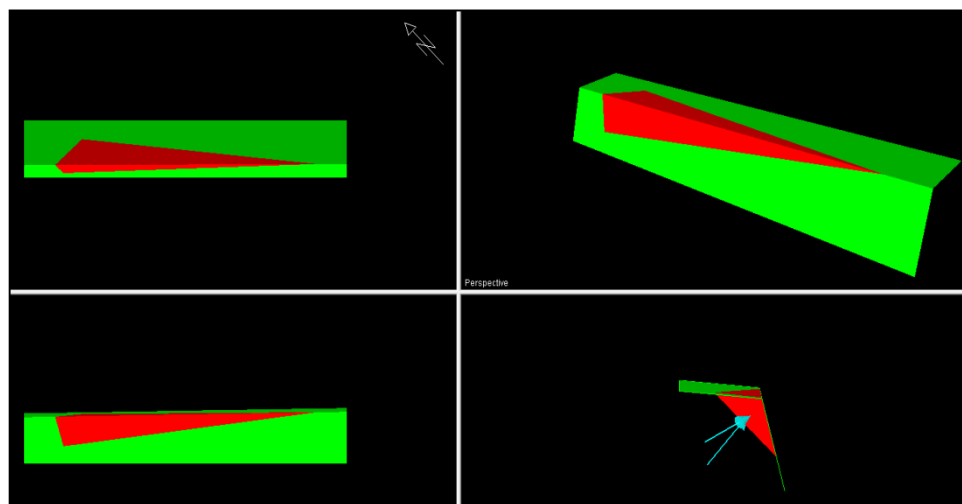
شکل ۱۲- موقعیت کلی گوه‌های لغزشی.

Fig. 12. General position of sliding wedges.



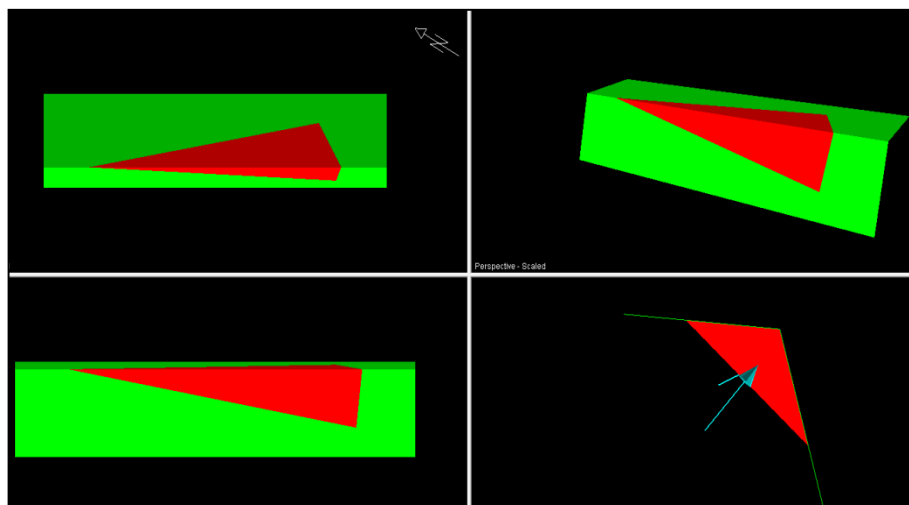
شکل ۱۳- ضریب اطمینان $FOS=1.47$ گسیختگی گوه‌ای بر روی درزه J_1 و J_3 .

Fig. 13. $FOS = 1.47$, wedge failure on joints J_1 and J_3 .



شکل ۱۴- ضریب اطمینان $FOS=1.16$ گسیختگی گوه‌ای بر روی درزه J_2 و J_3 .

Fig. 14. $FOS = 1.16$, wedge failure on joints J_2 and J_3 .

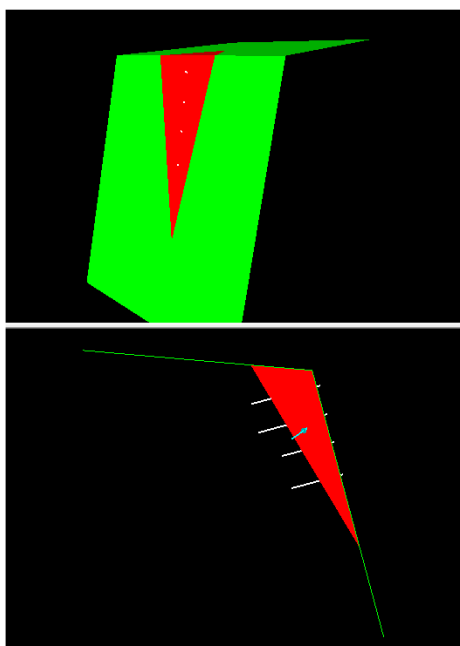


شکل ۱۵- ضرایب اطمینان $FOS = 1.42$ گسیختگی گوه‌ای بر روی درزه J_1 و J_2 .
 Fig. 15. $FOS = 1.42$, wedge failure on joints J_1 and J_2 .

جدول ۱۲- ضرایب اطمینان گوه‌های ایجاد شده.

Table 12. Safety factor of the created wedges.

No.	Wedge	FOS
1	J_1 - J_2	1.42
2	J_1 - J_3	1.47
3	J_2 - J_3	1.16



شکل ۱۶- نمایی از وضعیت انکرهای پیشنهادی در گوه ایجاد شده درزه J_1 و J_3 .
 Fig. 16. View of the position of the proposed anchors in the wedge created by joints J_1 and J_3 .

تعیین ضریب اطمینان گسیختگی توده‌ای

تا ۵ محاسبه شد؛ و نتایج ارزیابی این پارامترها در شکل ۱۷ ارائه شده است. همچنین تعیین ضریب اطمینان گسیختگی توده‌ای در سه حالت قبل از جاری شدن آب بر سطح دامنه، بعد از جاری شدن آب و بعد از دوران بهره‌برداری به همراه عملیات تسلیح با انکراژ ارزیابی گردیده است. بررسی در حالت قبل از جاری شدن آب در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نشان داده شده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که ضریب اطمینان معادل ۱/۹۷ خواهد بود و این ضریب اطمینان برای تأمین پایداری بلندمدت کافی است. ارزیابی ضریب اطمینان بعد از جاری شدن آب بر سطح دامنه نیز در شکل ۲۰ نشان داده شده که مقدار آن معادل ۱/۲۸ می‌باشد. این ضریب اطمینان برای تأمین پایداری بلند مدت کافی نیست.

در نهایت ضریب اطمینان بعد از دوران بهره‌برداری به همراه عملیات تسلیح انکراژ در شکل ۲۱ نشان داده شده است که بر اساس آن پس از جاری شدن آب بر سطح دامنه و عملیات تسلیح با انکراژ ضریب اطمینان معادل ۱/۵۴ خواهد بود؛ و این ضریب اطمینان برای تأمین پایداری بلندمدت کافی است.

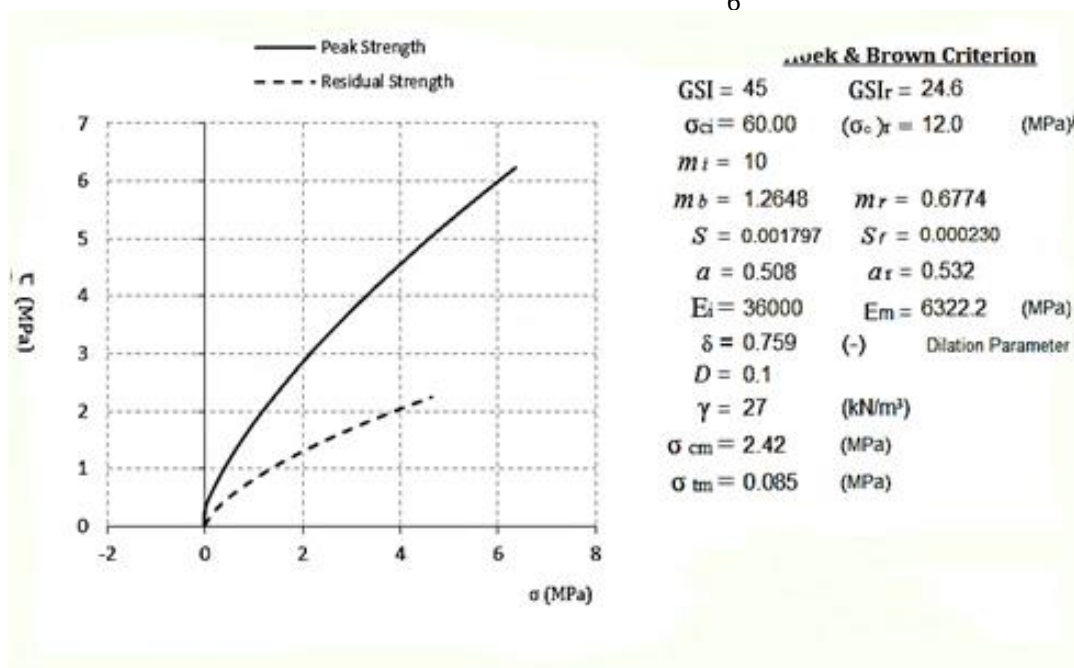
در توده‌سنگ‌های بلوکی و خرد شده و آبدار، امکان ایجاد باند ضعیفی در امتداد سطوح احتمالی لغزش و بروز گسیختگی کلی وجود دارد. مطابق مشاهدات و برداشت‌های صحرایی، شکل رانش احتمالی قاشقی شکل بوده ولی دلیل اصلی رانش وجود ناپیوستگی‌هایی هم‌جهت با دامنه سنگی و با شیب حدود ۴۶ تا ۶۶ درجه خواهد بود. برای ارزیابی گسیختگی توده‌ای، از نرم‌افزار Slide استفاده شده است. این نرم‌افزار بر مبنای روش تعادل حدی، ضریب اطمینان را در سطوح لغزش احتمالی محاسبه و سطح لغزش با کم‌ترین ضریب اطمینان را به عنوان سطح لغزش بحرانی معرفی می‌کند. برای تخمین پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ مورد نیاز تحلیل گسیختگی توده‌ای، از معیار شکست (Hoek-Brown (2002) و بر اساس شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) استفاده گردید. با بررسی ساختارهای زمین‌شناسی و تطابق وضعیت توده‌سنگ، مقدار GSI برای توده‌سنگ ارزیابی شد. بر اساس نتایج حاصل از بررسی خصوصیات آزمایشگاهی مقاومت سنگ بکر و استفاده از نرم‌افزار RocLab، ضرایب ثابت معیار شکست هوک و برون و مدول دگرشکلی توده‌سنگ بر اساس معادله‌های ۲

$$m_r = m_i \exp\left(\frac{GSI_r - 100}{28}\right) \quad (2)$$

$$s_r = \exp\left(\frac{GSI_r - 100}{9}\right) \quad (3)$$

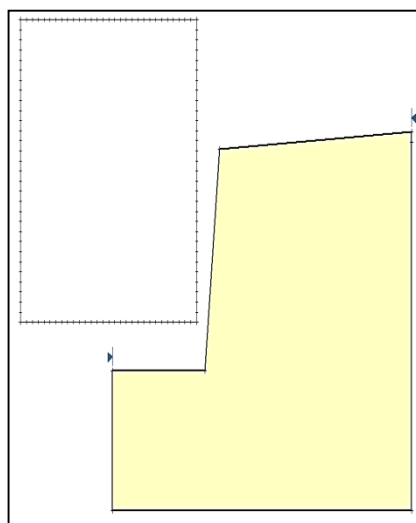
$$GSI_r = GSI \cdot e^{-0.0134 GSI} \quad (4)$$

$$a_r = 0.5 + \frac{1}{6} (e^{GSI_r/15} - e^{-20/3}) \quad (5)$$



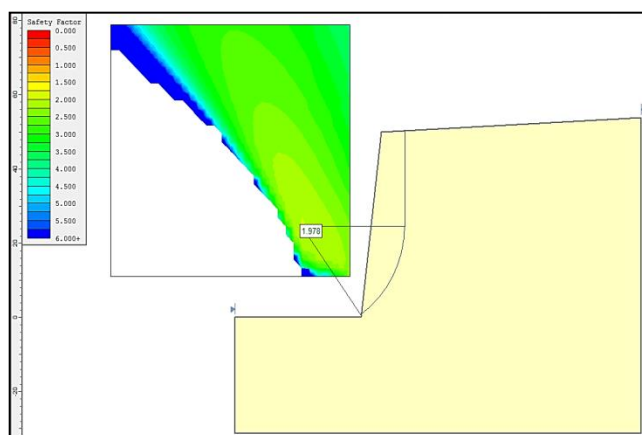
شکل ۱۷- پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ محدوده آبشار.

Fig. 17. The the geomechanical parameters of the waterfall rock mass.



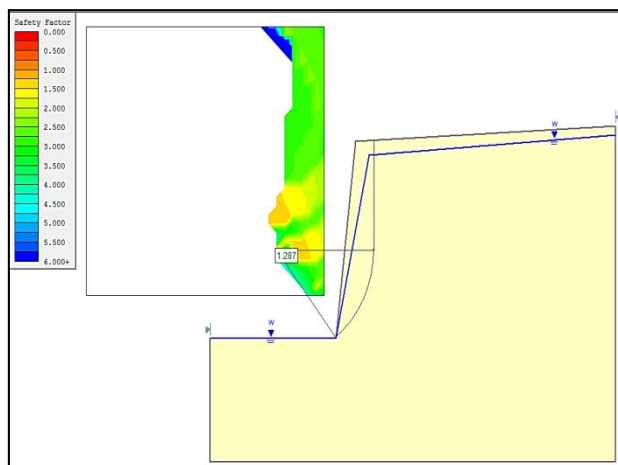
شکل ۱۸- هندسه بدنه آبشار.

Fig. 18. Geometry of the waterfall.



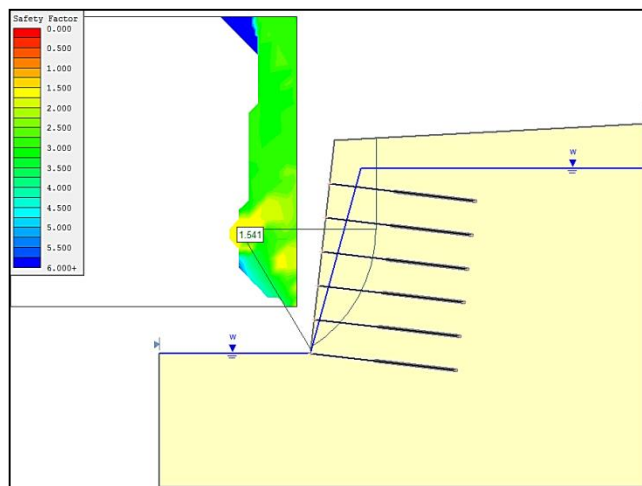
شکل ۱۹- سطح لغزش و ضریب اطمینان قبل از جاری شدن آب بر سطح دامنه.

Fig. 19. Slide plane and safety factor before water flows on the slope.



شکل ۲۰- سطح لغزش و ضریب اطمینان بعد از دوران بهره‌برداری آبشار.

Fig. 20. Slid plane and safety factor after water fall utilization.



شکل ۲۱- ضریب اطمینان در حالت بعد از تسلیح با انکراژ.

Fig. 21. Safety factor after anchor arming.

انحلالی در مدل‌های تحلیل پایداری، نیازمند تعیین دقیق ابعاد هندسی حفرات با استفاده از روش‌های غیرمخرب ژئوفیزیکی است و در نظر گرفتن حفرات در مدل سبب پیچیدگی محاسبات می‌گردد؛ بنابراین در این پژوهش سعی شده است بین نتایج بررسی‌های زمین‌شناسی مهندسی کارست و تحلیل پایداری، قضاوت مهندسی صورت پذیرد. به این صورت که انکرهای پیشنهادی در گسیختگی صفحه‌ای تقریباً افقی طراحی شده‌اند و در طراحی انکراژ علاوه بر سطح لغزش، جهت کانال‌های انحلالی نیز مدنظر قرار گرفته و از منطبق شدن زاویه انکر در جهت حفرات انحلالی اجتناب شده است. با توجه به شرایط توسعه کارست، پایداری دامنه سنگی در بلند مدت می‌تواند تحت تأثیر عواملی همچون انحلال‌پذیری توده سنگ و سیستم درز و شکاف انحلالی قرار گیرد. بر این اساس ریسک لغزش‌های احتمالی افزایش خواهد یافت. همچنین استفاده از روش‌های بهسازی تزریق سیمان در شکاف‌های انحلالی، مشکلات زیست‌محیطی در کارست منطقه ایجاد خواهد کرد. بر این اساس لازم است که برنامه‌ریزی پیشگیرانه برای ساخت آبشار مصنوعی در مکان پیشنهادی مدنظر قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهد که سنگ آهک دامنه آبشار مصنوعی خرم‌آباد با یومیکرایت (پکستون) و سرعت انحلال‌پذیری $(6.99 \times 10^{-5} \text{ m/s})$ ، هدایت هیدرولیکی $(2.4 \times 10^{-8} \text{ m/sec})$ ، دوام در سه سیکل (99.74) درصد و مقادیر (زاویه اصطکاک داخلی 34.6° و چسبندگی 0.98 Kg/cm^2) و طبقه‌بندی توده سنگ آهک بر اساس استاندارد (۲۸۴۵) ASTM D، CM می‌باشد. همچنین بر طبق بررسی‌های اشکال ژئومورفولوژی کارست، شرایط کارستی منطقه در رده کارست جوان است و بر اساس طبقه‌بندی مهندسی سنگ (RQD, RMR, Q)، توده سنگ‌های آهکی دامنه آبشار مصنوعی در رده کیفی متوسط و توده سنگ‌های پی حوضچه در رده توده سنگ‌های ضعیف ارزیابی شده است. تحلیل دسته‌درزه‌ها نشان می‌دهد که پتانسیل انواع لغزش‌های صفحه‌ای، گوه‌ای و توده‌ای در دامنه سنگی مورد مطالعه وجود دارد و نتایج تحلیل آن‌ها در حالت استاتیکی و در تماس با آب نشان می‌دهد که تسلیح با استفاده از انکراژ و شاتکریت پایداری لغزش‌های دامنه سنگی را در بلند مدت تأمین می‌کند. همچنین با توجه به این که لحاظ کردن اثر حفرات

منابع

- Abdeltawab, S., 2013. Karst limestone foundation geotechnical problems, detection and treatment: Case studies from Egypt and Saudi Arabia. *International Journal of Scientific & Engineering Research* 5, 376-387.
- Alija, S., Torrijo, F.J., Quinta-Ferreira, M., 2013. Geological engineering problems associated with tunnel construction in karst rock masses: The case of Gavarres tunnel (Spain). *Engineering Geology* 157, 103-111.
- ASTM D2845, "Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 14.02, ASTM, USA (1996). Bell, F.G., 2007. *Engineering geology*. Butterworth-Heinemann, p. 581.
- Calembert, L., 1975. Engineering geological problems in karstic regions. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 12, 39-82.

- Chen, D., Yi, C., 2017. Study on Roof Safe Thickness of Rock Foundation with Karst Cave and Karst Cave-surrounding Rock Stability. 4th International Conference on Mechanics and Mechatronics Research (ICMMR 2017), 1-6.
- Cooper, A.H., Farrant, A.R., Price, S.J., 2011. The use of karst geomorphology for planning, hazard avoidance and development in Great Britain. *Geomorphology* 134, 118–131.
- FHWA, 2010. Ground Anchors and Anchors Systems. Geotechnical Engineering Circular, No. 4, FHWA-IF-99-015.
- Folk, R.L., 1959. Practical Petrographic Classification of Limestones. *AAPG Bulletin* 43, 1-38.
- Ford, D.C., 1993. Environmental Change in Karst Areas. *Environmental Geology* 21, 107-109.
- Ford, D.C., Williams, P.W., 1989. Karst Geomorphology and Hydrology. Academic Division of Unwin Hyman Ltd, London. p. 601.
- Gao, Sh., Wang, L., Long, W., 2014. Variation of the Ultimate Bearing Capacity of Karst Cave Roof under the Loading of Pile Foundation. *EJGE* 19, 8467-8483.
- Ghobadi, M.H., Ghorbani, S., 2011. Study of geomorphology karst in Khorramabad city. 7th Iranian Conference on Engineering Geology and Environmental. Shahroud University of Technology, September 2011, p. 9.
- Ghobadi, M.H., Torabi-Kaveh, M., Miri, M., Mahdiabadi, N., 2014. An introduction to the karst geomorphology of the Bisetun–Taqe Bostan historical region (northeast Kermanshah, Iran) with special emphasis on karst development as a serious threat for the UNESCO World Heritage Site. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 74, 1071–1086.
- Goodman, R.E., 1989. Introduction to rock mechanics. John Wiley & Sons, p. 562.
- Gutiérrez, F., Johnson, K.S., Cooper, A.H., 2008. Evaporate karst processes, landforms and problems. *Environmental Geology* 53, 935–936.
- Gutiérrez, F., Mozafari, M., Carbonel, D., Gomez, R., Ræisi, E., 2015. Leakage problems in dams built on evaporites. the case of La Loteta Dam (NE Spain), a reservoir in a large karstic depression generated by interstratal salt dissolution. *Engineering Geology* 185, 139–154.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C.T., Corkum, B., 2002. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. *Proceedings of the Fifth North American Rock Mechanics Symposium* 1, 267–273.
- Huang, X., Li, S., Xu, Z., Guo, M., Chen, Y., 2018. Assessment of a Concealed Karst Cave's Influence on Karst Tunnel Stability: A Case Study of the Huaguoshan Tunnel, China. *Sustainability* 10, 1-26.
- ISRM, 1978. Suggested methods for quantitative description of discontinuities in rock masses. International Society for Rock Mechanics, Commission on Standardization of Laboratory and Field Test. *Int. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomech* 15, 319–368.
- Jiang, C., Zhao, M., Cao, W., 2008. Stability analysis of subgrade cave roofs in karst region. *Journal of Central South University of Technology* 15, 38–44.
- Johnson, K.S., Neal, J.T., 2003. Evaporite Karst and Engineering/Environmental Problems in the United States. *Oklahoma Geological Survey Circular* 109, p. 353.
- Li, L., Tu, W., Shi, S., Chen, J., Zhang, Y., 2016. Mechanism of water inrush in tunnel construction in karst area, *Geomatics. Natural Hazards and Risk* 7, 35-46.
- Maksimovic, G.A., 1969. Pesceri gipsovogo karsta (Caves in gypsum karst). *Abh. V Int. Kong. Spelaeologie, Stuttgart, Germany*.
- Milanovic, P.T., 1981. Karst hydrogeology: U.S., Colorado. *Water Resources Publications*, p. 434.
- Niu, J., Oyediran, I.A., Liu, D., Huang, X., Cui, Z., Wang, H., Shi, X., 2015. Quantitative foundation stability evaluation of urban karst area: Case study of Tangshan, China. *Soils and Foundations* 55, 493–503.
- Parise, M., 2008. Rock failures in karst Landslides and Engineered Slopes – Chen et al. (eds) © 2008 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-41196, 275-280.
- Parise, M., Closson, D., Gutierrez, F., Stevanovic, Z., 2015. Anticipating and managing engineering problems in the complex karst environment. *Environmental Earth Sciences* 74, 7823–7835.
- Sahandi, M., Jafarian, M., Haj Mullah Ali, E., Soheili, M., 1992. Khorramabads Geological map 1:250000. Geological Survey and Mineral Exploration Organization (In Persian).
- Waltham, A.C., Fookes, P.G., 2003. Engineering classification of karst ground conditions. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 36, 101–118.
- Waltham, T., Bell, F., Culshaw, M., 2005. Sinkholes and subsidence. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 383.

- Williams, P.W., 1993. Karst Terrains, Environmental Changes and Human Impact: Cremingen-Destedt, Germany. Catena Supplement 25, p. 268.
- Xeidakis, G.S., Torok, A., Skias, S., Kleb, B., 2004. Engineering geological problems associated with karst terrains: their investigation, monitoring, and mitigation and design of engineering structures on karst terrains. Bulletin of the Geological Society of Greece, Vol. XXXVI, Proceedings of the 10th International Congress, Thessaloniki, April 2004, 1932-1941.



© 2022 Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).