Kharazmi University

Journal of Engineering Geology

Journal home page https://jeg.khu.ac.ir

OPEN ACCESS

Online ISSN 2981-1600

Sabzkuh Tunnel Excavation and Its Interaction with Environment Hazards in the Zagros zone, Iran

Majid Taromi[1]✉, Abbas Eftekhari[2], Jafar Khademi Hamidi[3], Mahdi Saeidi[4], Reza Zarifpoor[5]

1. Young Researchers and Elite Club, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: majid.taromi@yahoo.com
2. Mining Engineering Department, Faculty of Engineering, Kashan University, Kashan, Iran. E-mail: msc.eftekhari@yahoo.com
3. Mining Engineering Department, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: jafarkhademi@modares.ac.ir
4. School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: me_saeidi@yahoo.com
5. Mining Engineering Department, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. E-mail: rzarifpoor@yahoo.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 14 April 2025
Accepted 23 November 2025

Keywords:
Solaghan fault, Water inrush, TBM selection, Geological model, Environment.

ABSTRACT

The Sabzkuh Water Conveyance System was planned as an inter-basin water transfer project in the Sabzkuh region of the Chaharmahal and Bakhtiari province, a tributary of the Karun River. Initially, the project included a diversion dam, an open canal, and a tunnel. However, in the initial feasibility studies, the potential environmental risks to the Choghakhor lagoon, ecosystem and regional groundwater resources were not given sufficient consideration.Only due to land acquisition problems in the Chahartagh forest area, the tunnel route was changed and the channel was also removed. Consequently, the project was scaled down to comprise only a diversion dam and a 11-kilometre-long tunnel. This is while the geological and environmental risks of the project area were not fully investigated in the selection of the final route. After 484 meters of excavation, the Solaqan fault was encountered and a sudden inrush of water with a flow rate of 100 liters per second and the liquefaction of the excavation front caused the TBM to get stuck. Subsequently, the drainage of water caused the drying of the Aloqareh spring and the depletion of the Shirkoshteh spring, and negative environmental and social consequences for the region. To release the TBM, two side galleries were constructed and grouting and drainage were carried out. Ultimately, the tunnel excavation operation was stopped due to the problems that arose. The challenges that arose in this project indicate the need for a comprehensive study and planning in the selection of the route and TBM, as well as environmental, economic and social assessments at all stages and examining their interaction with each other.

Introduction

The 11-kilometer-long Sabzkuh Water Transfer Tunnel in the Zagros Mountains of Iran was designed to be constructed using two methods: conventional (T1) and mechanized (T2). However, several factors prevented the development of a comprehensive geological model for this project, including (1) complex geology, (2) the tunnel alignment passing through high mountains, (3) overburden exceeding one kilometer, and (4) environmental constraints-prevented development of a comprehensive geological model. Therefore, the geological interpretation was subject to uncertainty and contained local gaps. Despite these limitations, the model showed numerous potential hazards along the tunnel route, such as slip surfaces, fractured and faulted zones, raveling, squeezing, water inrush, mixed-face conditions, karst, rock burst, and gassy ground. Several of these hazards were encountered during the excavation of the conventional section (T1) (Eftekhari et al., 2014; Taromi et al., 2017). However, given the short length of this

Cite this article: Taromi, M., Eftekhari, A., Khademi Hamidi, J., Saeidi, M., Zarifpoor, R., (2025). Sabzkuh Tunnel Excavation and Its Interaction with Environment Hazards in the Zagros zone, Iran. Journal of Engineering Geology, 19 (3), 462-494. https//doi.org/10.22034/JEG.2025.19.3.1015453

© The Author(s).
Publisher: Kharazmi University.
DOI: https//doi.org/10.22034/JEG.2025.19.3.1015453

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.6.3]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1015453]

section (350 m), their impact on overall project cost and schedule remained limited (Taromi et al., 2018). In contrast, the mechanized excavation (T2) faced serious challenges that ultimately led to the project being stopped.

Geology

According to the tectonic divisions of Iran, the study area is located in the northern margin of the Zagros Mountains and in its central parts, within the structural zone of the Zagros or High Zagros (HZ). This zone is bounded by the Main Reverse Zagros Fault (MRZF) to the northeast and by the group of major Zagros faults, including the High Zagros Fault (HZF) to the southwest.

The study area is located south of Choghakhor lagoon, at the entrance to the tunnel excavation. It extends 3,500 metres and has relatively mild topography. The area consists mostly of fault zones and is located in the higher part of the Zagros Mountains. There is also higher seismic activity in this area compared to other parts. This section contains two thrusts of the Solaghan faults and the Avardegan fault, as well as several branching faults (see Fig. 1).

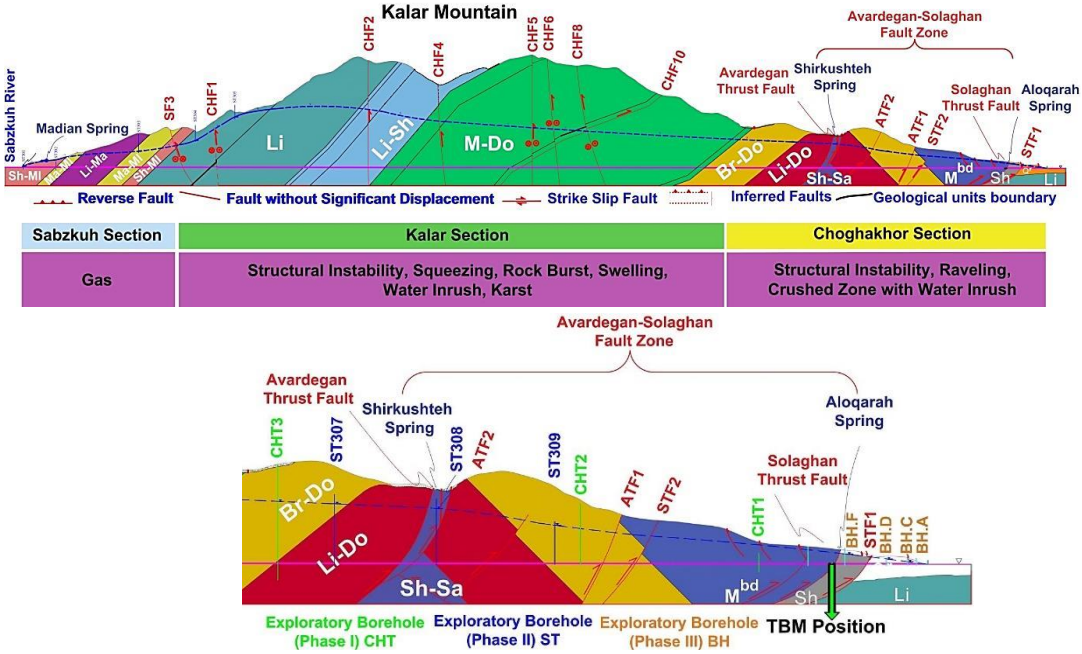


Fig. 1. Sabzkuh tunnel route: (a) longitudinal geological profile and Hazard, (b) Study area modified after (Taromi et al., 2018)

Interaction of tunnel excavation and springs

In order to investigate the effects of tunnel excavation on water resources (such as wells, springs, and qanats), the Drawdown Hazard Index DHI (Dematteis et al., 2001) and the Tunneling Impacts on Springs (TIS) method (Hassanpour et al., 2021) were used.

The Khanekat Formation and the Mesozoic Shear Dolomite in the Choghakhor section have a very high potential for groundwater to rush into the tunnel due to the crushing of rock and the development of a shear zone caused by the main Solaghan and Avardegan faults. The distribution of springs in this section clearly demonstrates the significance of these faults in relation to groundwater discharge in the region. Table 1 summarises the characteristics of the springs in the Choghakhor region and the predicted impact of tunnel excavation on their discharge rates.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.6.3]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1015453]

Table 1. Characteristics of springs in the studied hydrogeological area.

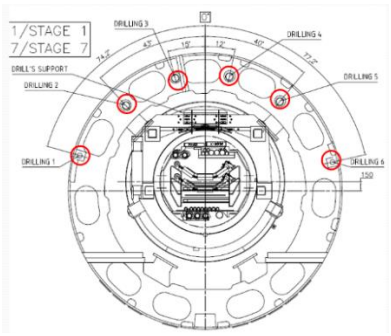
No.	Spring	horizontal distance of springs to tunnel axis (m)	Q (lit/s)	Method		Predicted behavior of spring during of tunneling
				DHI	TIS	
1	Galogerd	4000	42	0.13	4.5	Very low reduction in spring discharge
2	Shesh Dong	5111	15	0.13	3.5	Very low reduction in spring discharge
3	Kheder Abad	1147	3	0.20	6.9	Considerable reduction in spring discharge
4	Ab Barik	2657	27	0.20	5.95	Partial reduction in spring discharge
5	Choghayurd	3369	30	0.17	5	Partial reduction in spring discharge
6	Tange Siah (Sibak)	4827	252	0.04	3.65	Very low reduction in spring discharge
7	Ahmad Abad (Sybak)	3746	326	0.18	4.09	Partial reduction in spring discharge
8	Shir Koshted	262	130	0.62	8.85	Complete drying of spring
9	Aloghareh (Saki Abad)	47	70	0.78	9.65	Complete drying of spring

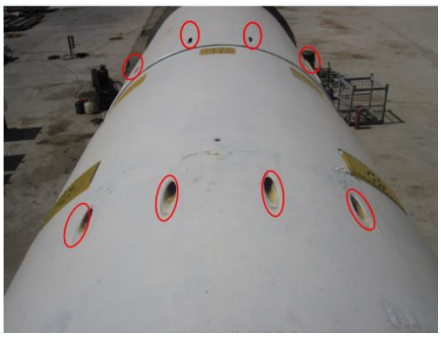
TBM Features

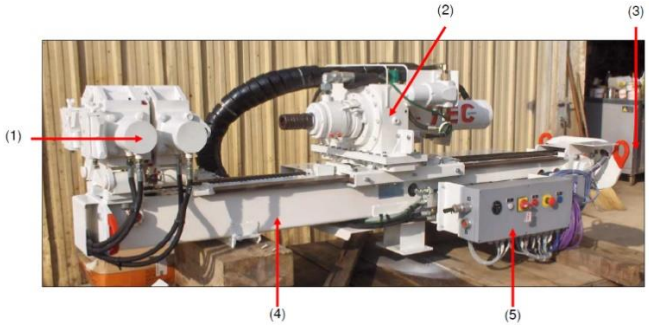
According to the geological model of the tunnel route, sufficient and professional knowledge of all the factors that directly and indirectly affect tunnel excavation is required for tunnelling in this area. In this regard, the Sabzkuh Tunnel TBM was designed with the following capabilities after examining the possible risks in similar formations and the experiences gained from them:- Ability to overcut up to 110 mm, which can be increased to 150 mm in the crown section.

- Increased cutterhead efficiency in soft ground by installing knife bit
- Increased cutterhead torque to more than double that of DS TBM excavators (at the level of EPB machines of this diameter at 4000 kN/m)
- Possibility of long-term drilling using the Single Mode method for soft ground
- Significant increase in thrust force, about 2550 kN (close to EPB machines of the same diameter)
- Ability to inject various types of resin and foam at the front bumper in a 360-degree manner and at the end bumper up to 180 degrees
- Equipped with high waterproof electrical system and panels (IP65)
- Equipped with anti-gas system for all panels
- Capable of drilling with casing and sampling from the ground at the front of the excavation
- Ability to drill a leading borehole with an angle of 8 to 13 degrees, stabilizing crushed zones and forward fault using grout and foam injection up to 40 meters in length (Fig. 2)
- Use of universal segments with gaskets for sealing
- Installation of a valve on the shield for use when stuck
- 30% increase in the sealing rate of the shield compared to similar machines

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.6.3]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1015453]







(1) Guillotine
(2) Rotation head
(3) Lifting ring
(4) Drill shaft
(5) Electric cabinet

Fig. 2. Probe drilling system specification of the TBM

Collapse in Tunnel and Solution

After excavation of 458 meters, encountering a loose and weak zone along with a strong water flow at the tunnel face caused the fault zone materials to flow towards the cutterhead (Fig. 3). The collapse of these materials, as well as the washing-out of fine materials due to water inflow, created cavity and led to the development of an unstable zone above the shield. Under these conditions, the increased volume of material in front of TBM and the fall of large rock blocks onto the cutterhead prevented the machine from generating sufficient torque to rotate the cutterhead and collect the, excavated material causing the TBM to get stuck. The instability created a cavity approximately 5 m in height and 10 m in width in front of the cutterhead.

Fig. 3. Flow of fault zone mud and water towards the TBM cutterhead

In mechanized tunneling projects, there are generally two practical solutions to address soil inflow into the tunnel:

First method: Stabilization through the chambers on the TBM

Second method: Using a service tunnel (bypass)

Initial attempts to pass through the collapse zone using the chambers on the TBM were unsuccessful. The next step to cross the collapse zone was to excavate two galleries on sides of the shield (Fig. 4).

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.6.3]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1015453]

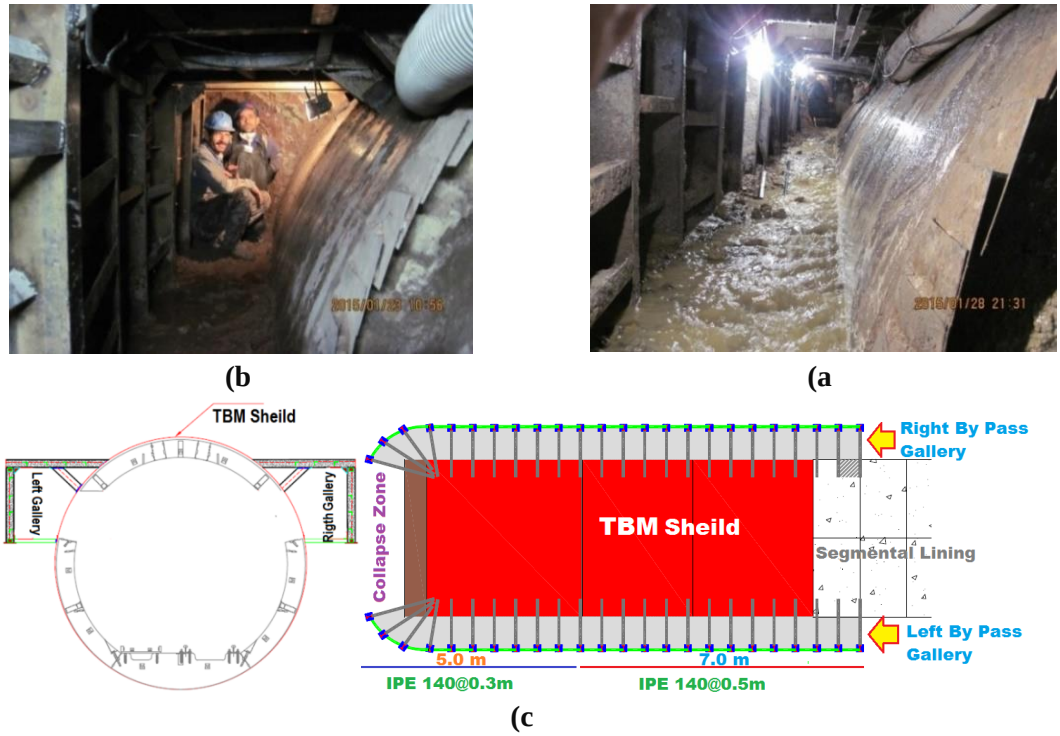


Fig. 4. Bypass gallery excavation: (a) right side of TBM, (b) left side, (c) plan and section of bypass gallery

Conclusion

The preparation of a comprehensive geological model, the selection of an appropriate water transfer route, and the determination of the most suitable transfer method (pipeline, canal, tunnel, etc.) are essential elements in the technical planning of inter-basin water transfer projects. In the case of the tunnel method, selection of TBM with the highest probability of success is the most difficult and effective stage in planning and risk management for mechanized tunneling in complex and challenging ground conditions. Planning in this regard should consider: (1) achieving an appropriate advance rate, (2) the possibility of passing through critical points along the tunnel route, and (3) minimizing environmental impacts.

Insufficient consideration of technical and environmental factors during the excavation of the Sabzkuh tunnel disrupted the hydrogeological balance of the aquifers and reducing the discharge of local springs . Crossing the fault zone was achieved using side access galleries and chemical injection. However, the reduction and drying of the springs caused negative environmental consequences and social dissatisfaction, which ultimately led to the project stopping.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.6.3]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1015453]

نشریه زمین شناسی مهندسی
Journal home page https://jeg.khu.ac.ir
دانشگاه خوارزمی
دسترسی آزاد
شاپا الکترونیکی ۲۹۸۱-۱۶۰۰

اندرکنش حفاری تونل سبزکوه و مخاطرات زیست‌محیطی در ناحیه زاگرس ایران

مجید طارمی[۱]✉، عباس افتخاری[۲]، جعفر خادمی حمیدی[۳]، مهدی سعیدی[۴]، رضا ظریف‌پور[۵]

۱. باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، تهران، ایران. رایانامه: majid.taromi@yahoo.com
۲. دکتری مهندسی معدن، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران. رایانامه: msc.eftekhari@yahoo.com
۳. دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: jafarkhademi@modares.ac.ir
۴. کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: me_saeidi@yahoo.com
۵. کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: rzarifpoor@yahoo.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۲

کلیدواژه‌ها:
گسل سولقان، هجوم آب، انتخاب TBM، مدل زمین، محیط زیست.

چکیده

سامانه انتقال آب سبزکوه به عنوان یک طرح انتقال آب بین حوضه‌ای در منطقه سبزکوه استان چهارمحال و بختیاری و از سرشاخه‌های رود کارون برنامه‌ریزی شد. این طرح در ابتدا شامل بند انحرافی، کانال روباز و تونل بود. در مطالعات امکان‌سنجی و اولیه به مخاطرات زیست‌محیطی ناشی از اجرای طرح بر تالاب چغاخور، اکوسیستم و منابع آب زیرزمینی منطقه، به قدر کفایت اهمیت داده نشد. تنها به دلیل مشکلات تملک زمین در منطقه جنگلی چارطاق، مسیر تونل تغییر کرد و کانال نیز حذف شد. در این راستا، کلیات طرح به بند انحرافی و تونل به طول ۱۱ کیلومتر افزایش پیدا کرد. این در حالیست که در انتخاب مسیر نهایی نیز مخاطرات زمین‌شناسی و زیست محیطی محدوده طرح به طور کامل بررسی نشد. پس از ۴۸۴ متر حفاری، برخورد به گسل سولقان و هجوم یکباره آب با دبی ۱۰۰ لیتر بر ثانیه و روان شدگی جبهه کار حفاری، موجب گیرکردن ماشین حفاری شد. در ادامه، زهکشی آب موجب خشک شدن چشمه آلوقره و کم آب شدن چشمه شیرکشته و تبعات زیست‌محیطی و اجتماعی منفی در منطقه شد. در این راستا، آزادسازی TBM با ساخت دو گالری کناری و تزریق و زهکشی انجام شد. در نهایت با توجه به مشکلات به وجود آمده عملیات حفاری تونل متوقف شد. چالش‌های به وجود آمده در این پروژه، لزوم بررسی جامع و برنامه‌ریزی در انتخاب مسیر و TBM همچنین ارزیابی زیست‌محیطی در تمام مراحل و بررسی اندرکنش آن‌ها با یکدیگر را نشان می‌دهد.

مقدمه

توزیع ناهمگونی مکانی و زمانی منابع آب، افزایش جمعیت در برخی مناطق، افزایش خسارت ناشی از سیلاب‌ها و خشک‌سالی‌ها، پروژه‌های انتقال آب بین حوضه‌ای را به عنوان یکی از روش‌های کاهش بحران در کنار دیگر روش‌ها در ایران مطرح کرده است. با این حال، با توجه به پیچیده بودن این پروژه‌ها به علت تعدد مسائل درگیر نظیر عوامل اجتماعی، اقتصادی، فنی، زیست-محیطی و قانونی، اجرای این پروژه‌ها با مشکلات زیادی مواجه است (Zhuang, 2016; Tien Bui et al., 2020; Bozorg-Haddad et al., 2019). بدیهی است با توجه به طولانی بودن مسیر و نیاز به احداث سازه‌های سنگین، سرمایه‌گذاری در انتقال آب بین حوضه‌ای نیز بسیار زیاد است. از طرف دیگر به علت گستردگی مناطق تحت تأثیر و نیاز به نگرش جامع و دراز مدت در برآورد منافع، هزینه‌ها، ریسک‌ها، مسائل حقابه‌بران، محیط‌زیست و مسائل سیاسی و اجتماعی این رویکرد، چالش مهمی را در برابر برنامه‌ریزان، مدیران، طراحان و پیمانکاران ایجاد

استناد: طارمی، م.، افتخاری، ع.، خادمی حمیدی، ج.، سعیدی، م.، ظریف‌پور، ر. (۱۴۰۴). اندرکنش حفاری تونل سبزکوه و مخاطرات زیست‌محیطی در ناحیه زاگرس ایران. مجله زمین شناسی مهندسی، ۱۹ (۳)، ۴۶۲-۴۹۴. https://doi.org/10.22034/JEG.2025.19.3.1015453

ناشر: دانشگاه خوارزمی. © نویسندگان.
CC BY NC

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.6.3]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1015453]

می‌کند (Teymouri Yeganeh, 2022; Hemmati et al., 2022).

به علت گستردگی و تنوع روش‌های اجرایی و عوامل فنی مختلف در پروژه‌های انتقال آب بین حوضه‌ای، انتخاب بهترین روش با حداقل ریسک از اهمیت بالایی برخوردار است. در این راستا در مناطق کوهستانی با مخاطرات زمین‌شناسی پیچیده، حفاری مکانیزه تونل به دلیل نرخ بالای پیشروی و ایمنی مناسب یکی از پرکاربردترین روش‌هاست (Barton, 2000) با وجود مزایای فراوان این روش، عملکرد مناسب آن کاملاً تحت تأثیر شناخت شرایط زمین است (Lin et al., 2022; Wu et al., 2023). این در حالی است که حتی با انجام مطالعات مناسب، در تعدادی از شرایط زمین‌شناسی پیچیده به‌ویژه در مناطق کوهستانی، روش حفاری مکانیزه نیز موفقیت‌آمیز یا اقتصادی نباشد. این موضوع ممکن است به دلیل انتخاب و راهبری نامناسب ماشین حفاری مکانیزه تونل (Tunnel Boring Machine, TBM)، نرخ پایین پیشروی و طولانی شدن پروژه، تحمیل هزینه‌های اضافی ناشی از تاخیرات زمانی، تغییر رژیم هیدرولیکی منطقه و تأثیرات زیست‌محیطی منفی باشد. بنابراین انتخاب نوع TBM و قابلیت‌های آن، با در نظر گرفتن شرایط آب زیرزمینی و زمین‌شناسی مسیر تونل از پارامترهای اصلی در برنامه‌ریزی و مدیریت پروژه‌های تونل‌زنی مکانیزه است (Shang et al., 2006; Shaterpour-Mamaghani et al., 2016; Bäppler, 2016; Bakhshandeh Amnieh et al., 2016; Alp and Apaydin, 2019).

از طرف دیگر در یک تونل بلند با شرایط پیچیده زمین‌شناسی به خصوص در نواحی کوهستانی، نمی‌توان انتظار لایه‌های یکنواخت در سرتاسر مسیر را داشت. حفاری تونل در این نواحی به دلیل دسترسی ناکافی به مسیر تونل و/یا شرایط متنوع و تغییرپذیر زمین، با محدودیت‌هایی در تهیه مدل زمین‌شناسی جامع روبرو است (Home, 2016; Goel, 2016). مثال‌های زیادی از تونل‌های حفاری‌شده در این نواحی وجود دارد که با چالش‌هایی همانند: برخورد به زون‌های گسله و خردشده، هجوم آب، جبهه کار مختلط، گل گرفتگی، انفجار سنگ، همگرایی، زمین‌های رونده، سطح لغزش، انتشار گاز و ... مواجه بوده است (Dalgic, 2003; Wang et al., 2019; Eftekhari and Aalianvari, 2019; Gong et al., 2016; Diwakar et al. 2022; Taherian, 2023; Shayan et al., 2025).

به‌عنوان مثال، از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۸، در مجموع ۹۷ مورد حادثه زمین‌شناسی، طی ساخت تونل در مناطق کوهستانی چین رخ داد. این حوادث منجر به ۳۹۳ مورد مرگ و میر، ۴۶۷ مورد جراحت و ۵۱ مورد مفقودی شده است (Wang et al., 2020). مطالعات اولیه کامل از شرایط زمین در جلوگیری از چنین رویدادهای نامطلوب و به حداقل رساندن خسارات مرتبط با آن بسیار مهم است (Wang et al., 2025). این اطلاعات در مراحل مختلف ساخت تونل از جمله انتخاب روش‌های حفاری و بهینه‌سازی طراحی تونل در مرحله قبل از ساخت (Wang and Zhang, 2023)، پیش‌بینی پارامترهای عملیاتی طی فرآیند ساخت (Fu and Zhang, 2021) و تخصیص منابع اضطراری در واکنش به مخاطرات زمین‌شناسی (Wan et al., 2021) قابل بهره‌برداری است.

بنابراین در پروژه‌های تونل‌زنی مکانیزه در زمین‌های با شرایط متنوع و تغییرپذیر، بررسی‌های زمین‌شناسی به منظور حداقل کردن ریسک‌ها در برنامه‌ریزی مراحل امکان‌سنجی، طراحی، ساخت و بهره‌برداری ضروری است (Zhang et al., 2025). از طرف دیگر به دلیل

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.6.3]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10154453]

تأثیرگذاری قابل توجه ماشین حفار در تونل‌زنی مکانیزه، به منظور دستیابی به ایمنی کافی و جنبه‌های فنی مورد نیاز پروژه، احتیاج به راه‌حل‌های مهندسی برای تغییر در عملکرد TBM مطابق با شرایط زمین وجود دارد (Wang et al., 2017). از این‌رو لازم است تا ماشین‌های حفاری از انعطاف‌پذیری بیشتری برخوردار باشند. در این راستا استفاده از ماشین‌های حفار چندگانه یا چند حالته (Multi-mode or hybrid machines) در موفقیت یک پروژه تونل‌زنی در این نواحی ضروری است (Bäppler, 2016).

یکی از چالش‌های اصلی در حفاری تونل‌های بلند در مناطق کوهستانی با تکتونیک فعال، برخورد به زون‌های گسله و خردشده و هجوم آب است (Goel, 2016; Lin et al., 2025; Shayan et al., 2025). حفاری مکانیزه در برخورد با این نواحی با مشکلاتی همانند: (۱) فشار و بارهای وارده زیاد روی TBM، (۲) انباشته شدن مواد در فضای خالی بین سپر جلویی و تلسکوپی یا محیط حفاری و سپرها و افزایش ریسک گیر افتادن و (۳) ناپایداری، ریزش جبهه کار و ایجاد حفرات، همراه است. از طرف دیگر، در صورت هجوم آب به همراه گل و لای و/یا مصالح ضعیف، مشکلات ناپایداری دو چندان می‌شود (Bayati and Khademi Hamidi, 2017). مثال‌های متعددی از حفر تونل با TBM در دنیا وجود دارد که هجوم آب زیرزمینی داخل تونل باعث بروز مشکلات جدی در عملیات حفاری یا حتی توقف عملیات شده است (Goel, 2016). علاوه بر این، افت آب‌های زیرزمینی ناشی از ورود آب از تونل منجر به از دست رفتن منابع آب زیرزمینی و عدم تعادل در محیط زیست می‌شود که می‌تواند فجایع زیست‌محیطی و اکولوژیکی جدی به بار آورد (Gokdemir et al., 2022). بنابراین، پیش‌بینی دقیق جریان آب ورودی به تونل و محدوده نفوذ آب‌های زیرزمینی برای تضمین ایمنی ساخت و ساز و حفاظت از محیط آب‌های زیرزمینی اطراف در پروژه‌های تونل بسیار مهم است. در این راستا، بررسی اندرکنش حفاری تونل و منابع آب زیرزمینی از جنبه های مختلفی در برنامه‌ریزی ساخت سازه‌های زیرزمینی قابل بررسی است. این اثرات می‌تواند از جهت تأثیر در فرآیند حفاری و ناپایداری جبهه کار، تأثیر روی رژیم هیدرولیکی منطقه و اثرات زیست محیطی ناشی از آن باشد (Gattinoni et al., 2014). از آنجایی که هرگونه تخلیه آب زیرزمینی، سیستم جریان آب‌های زیرزمینی را دچار تغییر می‌کند متعاقباً می‌تواند اثراتی به پوشش گیاهی، آب‌های سطحی، دریاچه‌ها، باتلاق‌ها، چشمه‌ها و قنوات به همراه داشته باشد (Vincenzo et al., 2009; Gisbert et al., 2009). در این راستا بررسی چشمه‌های حساس و مهم که در منطقه مورد مطالعه قرار گرفته‌اند و رژیم هیدرولیکی حاکم بر منطقه در ارزیابی اثرات ساخت تونل بر منابع آبی مجاور بسیار مهم هستند (Dalgic, 2003; Vincenzo et al., 2009; Anna et al., 2003; Liu et al., 2015). بنابراین، ارزیابی راهبردی محیط‌زیست (Strategic Environmental Assessment, SEA) قبل از شروع عملیات اجرایی و حین ساخت می‌تواند در به حداقل رساندن این اثرات منفی کارساز باشد.

اثرات روی منابع آب زیرزمینی در یک منطقه ناشی از حفاری زیرزمینی به وسیله ابزارهایی همانند: (۱) انتخاب مناسب مسیر تونل، (۲) انتخاب TBM با قابلیت‌ها و انعطاف‌پذیری بالا، (۳) پیش‌بینی راهکارهای جبرانی قبل از حفاری و (۴) به وسیله نصب پوشش بتنی غیرقابل نفوذ، کاهش می‌یابد (Rodriguez & Blanco,

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.6.3]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10154453]

2012). با این حال این اقدامات تنها زمانی می‌توانند به کار گرفته شوند که به درستی تشخیص داده شوند، اگرچه همین مسئله کاری بسیار دشوار است (Yang et al., 2009). در این راستا با توجه به نوع زمین همچنین امکانات و قابلیت‌های TBM، روش‌های مختلفی برای عبور از نواحی گسله و آب‌دار متداول هستند. به طور کلی این تمهیدات در دو مرحله: (۱) قبل از برخورد به زون گسله و ریزش و (۲) پس از برخورد به آن، تقسیم می‌شوند.

در صورت مناسب بودن اطلاعات زمین‌شناسی همچنین امکانات و قابلیت‌های TBM، با استفاده از روش‌های زهکشی و پیش تزریق با مواد شیمیایی هیدرواکتیو و/یا پایه سیمانی با ایجاد یک کنگلومرای مصنوعی ناحیه پیش‌رو بهسازی می‌شود (Jayanath et al., 2025). همچنین با تنظیم فشار دستگاه و راهبری مناسب آن از طریق کاهش نیروی تراست و سرعت چرخش، آشفتگی در ناحیه خردشده و گسله کاهش یافته و ارتعاش کاترهد و بارگذاری دینامیکی روی کاترها به حداقل می‌رسد. با رعایت این موارد عبور از زون‌های گسله، پیش از شروع ناپایداری جبهه کار و ریزش آن، با ریسک کمتری همراه است (Gong et al., 2016). از طرف دیگر در صورت برخورد به زون گسله و ریزش آن نیز دو راهکار اصلی: (۱) زهکشی و تزریق از داخل ماشین (Paltrinieri et al., 2016) و (۲) حفر تونل گالری دسترسی (در بهترین حالت در مرکز و بالای تونل) و انجام عملیات بهسازی و آزادسازی ماشین از طریق آن، وجود دارد (Goel, 2016).

تونل انتقال آب سبزکوه به طول ۱۱ کیلومتر در رشته کوه‌های زاگرس ایران به دو روش سنتی (T1) و مکانیزه (T2) طراحی و برنامه‌ریزی شد. در پروژه تونل سبزکوه با توجه به (۱) پیچیدگی زمین‌شناسی منطقه، (۲) عبور مسیر تونل از کوه‌های بلند و مناطق صعب‌العبور و پوشیده از برف در تمام مدت سال، (۳) روباره زیاد که از یک کیلومتر نیز تجاوز می‌کرد، (۴) مشکلات تملک زمین از سوی کارفرما به منظور حفاری گمانه و مطالعات ژئوفیزیک و (۵) محدودیت‌های زیست‌محیطی، امکان تهیه مدل زمین‌شناسی جامع وجود نداشت. بنابراین مدل زمین‌شناسی با عدم قطعیت و در پاره‌ای مناطق با کاستی‌هایی همراه بود. با این حال، مدل زمین‌شناسی منطقه مخاطرات زیادی از جمله: سطوح لغزش، زون‌های خردشده و گسله، زمین‌های رونده، همگرایی، هجوم آب، سینه‌کار مختلط، کارست، انفجار سنگ و برخورد به گاز در طول مسیر تونل را نشان داد (Saeidi et al., 2012; Taromi and Eghbali, 2017). در این راستا عوامل هیدروژئولوژی و هیدرولوژی مرتبط با آب‌های سطحی و زیرزمینی به منظور رسیدن به بهترین راه‌حل‌ها و جلوگیری از آسیب‌های زیست‌محیطی و تأثیرات آن در حفاری تونل نیز با پایش چشمه‌ها و منابع آبی منطقه پیش از شروع و حین حفاری بررسی شد. تعدادی از این مخاطرات در حفاری بخش سنتی تونل (T1) مشاهده شد (Eftekhari et al., 2014; Taromi et al., 2015; Taromi et al., 2017; Zarei et al., 2019). این در حالیست که به دلیل طول کم حفاری بخش سنتی (۳۵۰ متر:T1)، تأثیرات قابل توجهی بر هزینه و زمان پروژه نداشت (Taromi et al., 2018). با این حال، حفاری مکانیزه (T2) را با چالش‌های جدی مواجه کرد و موجب توقف پروژه شد.

در این مقاله، برنامه‌ریزی نامناسب در انتخاب مسیر تونل سبزکوه بدون در نظر گرفتن مخاطرات آن از جمله برخورد: (۱) به زون‌های خردشده و گسله آب‌دار و (۲) اندرکنش حفاری تونل بر رژیم هیدرولیکی، منابع آب

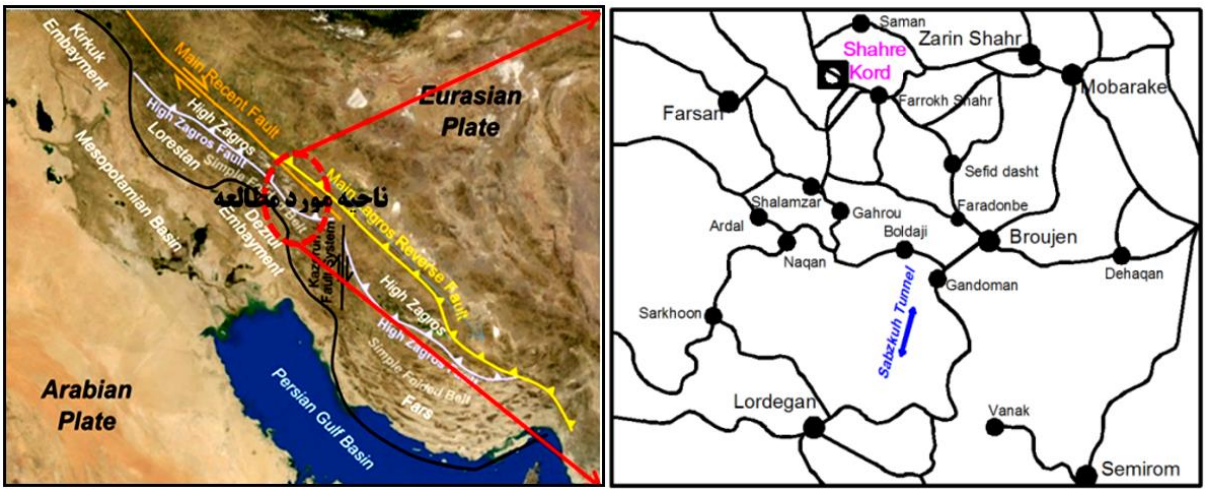
[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.6.3]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10154453]

زیرزمینی، چشمه‌های مسیر تونل و اثرات زیست‌محیطی منفی ناشی از آن بررسی شده است. در ادامه، به دلیل مدل زمین‌شناسی پیچیده منطقه، عدم قطعیت‌های آن و ناکافی بودن مطالعات در برخورد به زون گسله و خردشده آبدار سولقان موجب ریزش تونل و گیر افتادن TBM شد. در این راستا، راهکارهای انجام‌شده به منظور آزادسازی TBM با حفاری گالری‌های دسترسی کناری و تزریق شیمیایی ارائه شد.

معرفی پروژه

سامانه انتقال آب سبزکوه به چغاخور ترکیبی از سد انحرافی، تونل و کانال در استان چهارمحال بختیاری و در حدود ۶۸ کیلومتری جنوب شهرکرد برنامه‌ریزی شد (شکل ۱). در مطالعات امکان‌سنجی و اولیه طرح، با توجه به بررسی‌های اقتصادی و فنی انجام شده ترکیبی از کانال و تونل به ترتیب به طول‌های ۴۵۰۰ و ۸۵۵۰ متر به عنوان گزینه اول انتخاب شد (Hashemi et al., 2004). با این حال، در ادامه روند مطالعات به لحاظ عبور مسیر کانال از (۱) محدوده حفاظت‌شده حیات وحش سبزکوه، (۲) تهدید پوشش جنگلی منطقه چارطاق و گونه‌های گیاهی و (۳) در نهایت مشکلات تملک زمین، کانال روباز حذف و بر مسیر تونل اضافه شد (گزینه نهایی). در این راستا طول تونل به ۱۱ کیلومتر افزایش یافت (شکل ۲).

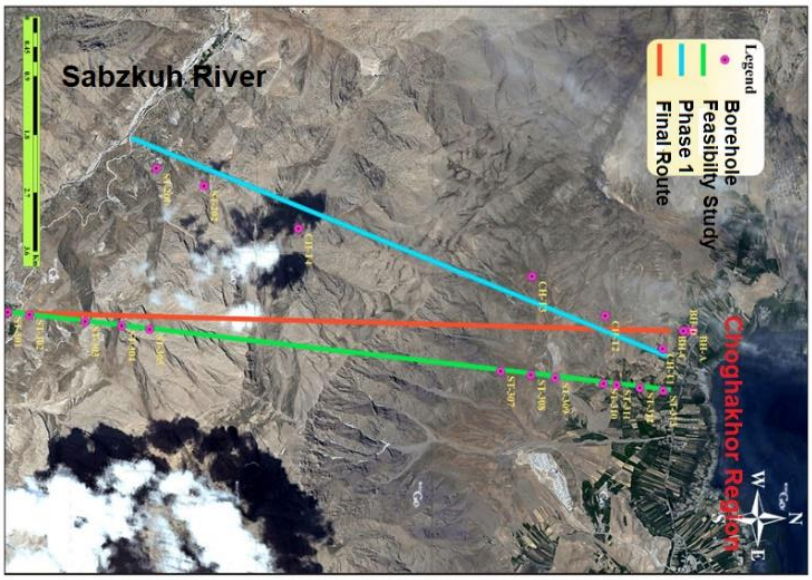
این سیستم، وظیفه انتقال آب از رودخانه سبزکوه به سد چغاخور را بر عهده دارد. بیشینه این دبی مطابق با نتایج مطالعات برنامه‌ریزی منابع آب، ۷ تا ۱۴ مترمکعب بر ثانیه است. هدف طرح، کنترل سیلاب حوضه رودخانه سبزکوه به عنوان یکی از سرشاخه‌های اصلی رود کارون و انتقال ۷۵ میلیون متر مکعب آب به حوضه چغاخور به‌وسیله تونل به منظور تأمین آب آشامیدنی و صنعتی و همچنین توسعه و بهبود کشاورزی در منطقه، به ویژه شهرستان بروجن است.



شکل ۱. موقعیت تونل انتقال آب سبزکوه (Eftekhari et al., 2014 and Taromi et al., 2018)

Fig. 1. Sabzkuh tunnel location modified after (Eftekhari et al., 2014 and Taromi et al., 2018)

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.6.3]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10154453]



شکل ۲. گزینه‌های مسیر سامانه انتقال آب سبزکوه

Fig. 2. Sabzkuh water conveyance system route options

این تونل با راستای شمال- جنوب از ارتفاعات کلار که جزیی از رشته کوه زاگرس عبور می‌نماید. تونل دارای طول ۱۱ کیلومتر، شیب ۰/۰۰۱ و حداکثر روباره ۱۱۴۶ متر است. همچنین تونل در رقوم ارتفاعی حدود ۲۳۰۰ متر از سطح دریا قرار دارد. در حالی‌که بلندترین قله‌ها در مسیر تونل ۳۵۵۰ متر از سطح دریا ارتفاع دارند.

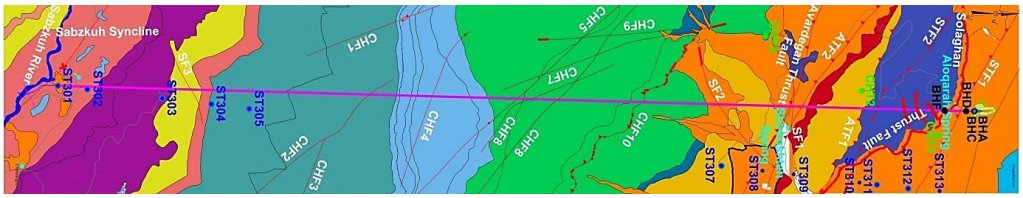
زمین‌شناسی

با توجه به تقسیم‌بندی‌های زمین‌ساختی ایران، منطقه مورد مطالعه در حاشیه شمالی رشته کوه‌های زاگرس و در بخش-های میانی آن، در پهنه ساختاری راندگی زاگرس یا زاگرس مرتفع (High Zagros, HZ) واقع شده است. این پهنه از سمت شمال خاور به گسل اصلی معکوس زاگرس (Main Reverse Zagros Fault, MRZF) و از سمت جنوب باختر به گروه گسل‌های بلند زاگرس از جمله گسل زاگرس بلند (High Zagros Fault, HZF) محدود می‌شود. این پهنه از کمربند زاگرس غالباً شامل واحدهای پالئوزوئیک و مزوزوئیک است و گسترش واحدهای سنوزوئیک و جوان‌تر در آن محدودتر است. غالب چینه‌شناسی مسیر تونل نیز از این قاعده مستثنی نبوده و برگیرنده واحدهای سنگی دوران اول و دوم است. در شکل ۳ پلان و مقطع عرضی واحدهای زمین‌شناسی و گسل‌های مسیر تونل و محدوده مورد مطالعه نشان داده شده است.

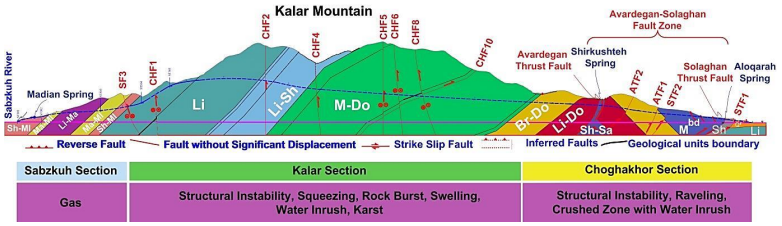
[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.6.3]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10115453]

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.6.3]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10015453]

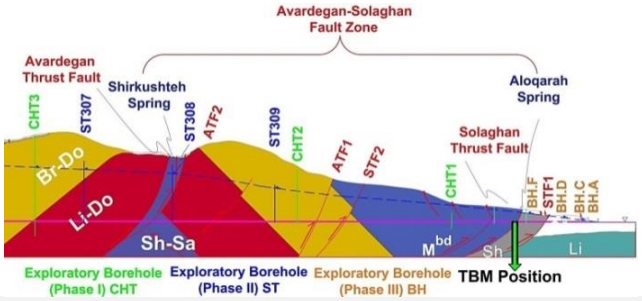
(a)



(b)



(c)

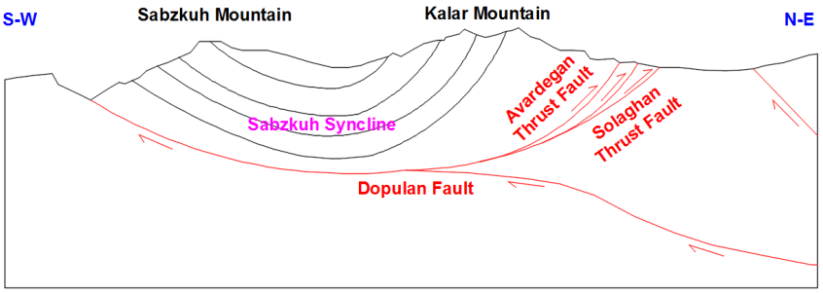


شکل ۳. مسیر تونل سبزکوه: a) پلان، b) پروفیل زمین‌شناسی مسیر تونل c) محدوده مورد مطالعه (Taromi et al., 2018)

Fig. 3. Sabzkuh tunnel route: a) Plan, b) longitudinal geological profile and Hazard, c) Study area modified after (Taromi et al., 2018)

واحدهای سنگی تشکیل‌دهنده ۳ کیلومتر ابتدایی مسیر حفاری تونل شامل دولومیت و آهک‌های دولومیتی به همراه شیل‌های خاکستری رنگ است که تحت تأثیر فرآیندهای تکتونیکی گسل‌های راندگی آوردگان و سولقان دچار شکستگی‌ها و خردشدگی‌های فراوان شده‌اند (جدول ۱). در ۷ کیلومتر انتهایی مسیر حفاری تونل، تغییرات سنگ‌شناسی به صورت منظم بوده و به ترتیب شامل مارن و مارن آهکی سازند گورپی، آهک‌های سروک - ایلام، آهک و آهک مارنی کژدمی، دولومیت و آهک دولومیتی سازندهای داریان - فهلیان، سورمه و نیریز است (Karami et al., 2014).

مورفولوژی غالب در محدوده مورد مطالعه شامل ارتفاعات بلندی است که عموماً بوسیله دره‌هایی عمیق از یکدیگر جدا شده‌اند. بالا آمدگی ارتفاعات کلار در امتداد گسل‌های سولقان و آوردگان، فروافتادگی بلوک چغاخور در بخش‌های شمالی این گسل و همچنین عملکرد فرسایشی شدید رودخانه سبزکوه در نهشته‌های گورپی در امتداد محور ناودیس سبزکوه، مورفولوژی کلی این محدوده را رقم زده‌اند. اجزای زمین‌ریخت - ساختاری، محدوده مورد مطالعه به ترتیب از سمت جنوب به شمال شامل: (۱) ناودیس سبزکوه، (۲) رودخانه سبزکوه، (۳) بخش کوهستانی کلار و (۴) فروافتادگی چغاخور هستند (شکل ۴).



شکل ۴. اجزای زمین‌ریخت - ساختاری محدوده مورد مطالعه

Fig. 4. Geomorphology and structre of study area

مخاطرات زمین‌شناسی

مدل زمین‌شناسی مسیر تونل نشان‌دهنده وقوع مخاطرات زمین‌شناسی همانند برخورد با گسل‌ها، مناطق ضعیف و خردشده، ریزش و سقوط بلوک‌های سنگی در تونل، هجوم آب، لهیدگی، انفجار سنگ، وقوع زمین‌لرزه‌های مخرب، وجود گازهای مضر و خطرناک و تورم است. در این میان، برخورد به گسل‌ها و زون‌های خردشده، هجوم آب، کم آب شدن و خشک شدن چشمه‌ها بیش‌ترین سهم مخاطرات را در فرآیند ساخت بخش چغاخور تونل سبزکوه در بر دارند (Ghadimi and Tahghighi, 2019). هر کدام از این مخاطرات تأثیرات مختلفی را در فرآیند حفاری و/یا در محیط‌زیست منطقه ایجاد خواهند کرد. بنابراین بررسی اندرکنش حفاری تونل، مدل زمین و محیط‌زیست از اهمیت به سزایی برخوردار است. در این راستا انتخاب TBM با قابلیت‌های عبور از این نواحی با کمترین تأثیرات منفی یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در برنامه-ریزی و مدیریت پروژه تونل‌های بلند است.

شایان و همکاران (Shayan et al., 2025) با بررسی تجربیات حاصل از ۲۰ پروژه‌ی تونل‌سازی مکانیزه در ایران، چالش‌های پیش روی تونل‌سازی در مناطق گسلی را طبقه‌بندی کرده است. این مطالعه با در نظر گرفتن عوامل کلیدی تأثیرگذار (از جمله ویژگی‌های گسل، سنگ‌شناسی، روباره، فشار آب‌های زیرزمینی، کیفیت توده سنگ، قطر تونل و نوع دستگاه) و با استفاده از سیستم مهندسی سنگ، یک چارچوب طبقه‌بندی جامع برای رتبه‌بندی خطرات زمین‌شناسی در این مناطق ارائه می‌دهد. سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی، مناطق گسلی را به پنج دسته‌ی غیر مشکل‌ساز، کمی مشکل‌ساز، مشکل‌ساز، بسیار مشکل‌ساز و بسیار مشکل‌ساز/بحرانی طبقه‌بندی می‌کند که منعکس‌کننده چالش‌های تونل‌سازی در طول ساخت‌وساز است. این طبقه‌بندی چارچوبی برای ارزیابی اولیه رویدادهای خطرناک بالقوه در مناطق گسلی، انتخاب ماشین‌آلات و روش‌های ساخت مناسب و پیش‌بینی عملکرد ماشین‌آلات در این مناطق ارائه می‌دهد. در این طبقه‌بندی، هجوم آب (Water Ingress)، اثرات حفاری تونل بر چشمه‌ها (Impact on Springs)، ریزش تونل (Tunnel Collapse)، زمین بلوکی (Blocky Ground)، برخورد به گازهای خطرناک (Toxic gas emission) و مچاله شوندگی (Squeezing Condition) به عنوان اصلی‌ترین مخاطرات در زون‌های گسله ایران، شناسایی شده‌اند. از لحاظ شدت این مخاطرات در مناطق گسلی به پنج دسته، از غیر مشکل‌ساز تا بحرانی (I, II, III, IV, V)، طبقه‌بندی می‌شوند که منعکس‌کننده چالش‌های مختلف تونل‌سازی در طول ساخت‌وساز است. مطابق با این طبقه‌بندی هجوم آب و اثرات حفاری تونل بر چشمه‌ها مخاطرات اصلی حفاری تونل سبزکوه با طبقه بحرانی (V) هستند.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.6.3]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10154453]

گسل‌ها و زون‌های خردشده

ساختارهای اصلی در مسیر تونل شامل ناودیس سبزکوه و گسل‌های اصلی سولقان، آوردگان و چهارطاق (با طول بیش از ۱۰ کیلومتر) است (شکل ۴). همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، در تقاطع با مسیر تونل علاوه بر گسل‌های اصلی حدود ۱۲ گسل فرعی نیز شناسایی شده‌اند. گسل‌های فرعی با طول کمتر از ۱۰ کیلومتر (گسل‌های F) در واقع شاخه‌های اصلی گسل‌های دسته اول به شمار می‌روند. اگرچه سازوکار غالب این گسل‌ها فشاری تا فشاری - امتدادلغز است ولی بسته به نوع واحدهای سنگی قطع‌شده توسط این گسل‌ها، ضخامت پهنه‌های متأثر و خردشده آن‌ها از ۵ الی ۱۵۰ متر متفاوت است.

هجوم آب

در مسیر تونل سبزکوه وجود سنگ‌های آهکی و دولومیتی در سازندهای سخت و عوامل تکتونیکی و میزان بارش سالیانه بالا، شرایط انحلال‌پذیری را در منطقه فراهم آورده است. با این حال، وجود سیمان‌های کارستی نسبتاً کم در منطقه و حضور چشمه‌های متعدد با آبدهی بالا که اغلب از نوع گسلی هستند نشان‌دهنده آن است که تراوایی غالب سازندها در منطقه، بیش‌تر ناشی فعالیت‌های تکتونیکی است و فرآیند انحلال‌پذیری نقش دوم را در تراوایی سازندها بر عهده دارد. بنابراین زون‌های با پتانسیل انحلال‌پذیری و همچنین زون‌های خرد شده و گسله، در بخش گسترده‌ای از مسیر تونل دارای پتانسیل بالایی برای ورود آب به داخل تونل هستند که برخی از آن‌ها از نظر هجوم آب به داخل تونل وجود دارد. سازند خانه‌کت و دولومیت برشی مزوزوئیک در بخش چغاخور به دلیل وجود خردشدگی و ایجاد زون برشی توسط گسل‌های اصلی سولقان و آوردگان، پتانسیل بسیار بالایی برای هجوم آب زیرزمینی به داخل تونل را فراهم نموده است. در محدوده مورد مطالعه (شکل ۳c)، انشعابات گسل‌های اصلی سولقان و آوردگان باعث راندگی واحدهای آهکی سازند تریاس روی شیل‌های میکادار کامبرین شده است. به این ترتیب چشمه‌های متعددی همانند آلوقره و شیرکشته با روند تقریباً خطی در امتداد این گسل و در واقع از مرز واحدهای نفوذپذیر (سنگ مخزن) و لایه‌های ناتراوا (شیل‌های میکادار کامبرین) در سطح ظاهر گردیده است (شکل ۵).

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.6.3]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10115453]

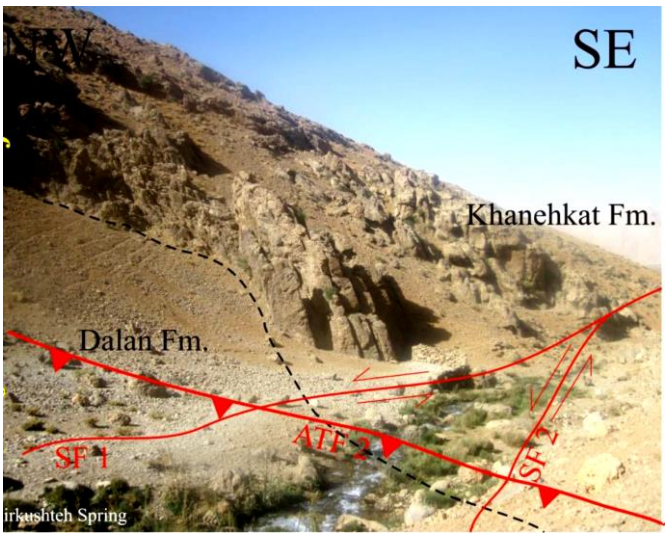
جدول ۱. واحدهای زمین‌شناسی مسیر تونل

Table 1. The characteristics of geological units along the tunnel route

واحد زمین‌شناسی مهندسی	واحد چینه‌شناسی	سازند	توصیف سنگ‌شناسی	رده پایداری	دامنه تراوایی	RQD (%)	GSI	N	Q
(**Sh-Ml**)	K_g^{Sh-Ml}	Gurpi	مارن و آهک‌های مارنی و بین لایه‌های شیلی به رنگ خاکستری	D	کم تراوا	۳۵-۴۰	۴۳-۴۸	۳/۴-۸/۴	۰/۷۹-۰/۷۹
	K_i^{Sh-Ml}	Ilam	شیل و مارن سبز تا سیاه رنگ و نازک لایه						
(**Ma-Ml**)	K_g^{Ml}	Gurpi	مارن و آهک‌های مارنی با بین لایه‌های فسیل‌دار	C	کم تراوا تا نیمه تراوا	۴۵-۵۰	۴۸-۵۲	۴/۹-/۵/۵	۰/۹۹-۱/۱۰
	K_i^{Ml}	Ilam	آهک‌های مارنی به رنگ کرم تا کرم روشن و نازک لایه و همراه با ندول‌های چرتی در بعضی لایه‌ها						
(**Li-Ma**)	K_g^{L-Ml}	Gurpi	آهک و مارن و همراه با ندول‌های چرتی به رنگ سبز تیره تا خاکستری همراه با بین لایه‌های شیلی	C	نیمه تراوا	۶۰-۷۰	۵۰-۵۴	۳/۱۷-۳/۴	۳/۱۷-۳/۷
(**Li**)	K_{i-s}^{L}	Ilam-Sarvak	آهک‌های چرتی کرم رنگ همراه با بین لایه‌های از شیل سبز رنگ و متوسط لایه	B	نیمه تراوا تا تراوا	۵۵-۶۰	۵۶-۶۲	۴/۵۸-۵	۴/۵۸-۵
	K_s^{L-Sh}	Sarvak	آهک‌های کرم رنگ همراه با بین لایه-های از شیل و نازک تا متوسط لایه						
(**Li-Sh**)	K_s^{Sh2}		شیل و بین لایه‌های مارنی و سبز تا خاکستری روشن و نازک تا متوسط لایه	C	نیمه تراوا تا تراوا	۵۵-۶۰	۵۳-۵۷	۲/۶۹-۲/۹۳	۱/۰۸-۱/۱۷
	K_s^{L}		آهک و آهک‌های مارنی شیز تا خاکستری روشن و نازک تا متوسط لایه						
	K_s^{Sh1}		شیل و بین لایه‌های از مارن و آهک سبز رنگ و نازک لایه						
	K_k^{Ml}	Kagdumi	مارن و آهک‌های مارنی و بین لایه‌های شیلی و نازک لایه						
	K_k^{L}		آهک‌های خاکستری روشن و نازک و متوسط لایه						

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.6.3]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10154453]

(M-Do)	$K_{d\text{-}f}^{L\text{-}D}$	Darian-Fahlian	آهک‌های اربیتولین‌دار و بافت اسفنجی و همراه با حفرات انحلالی خاکستری تا قهوه‌ای رنگ و متوسط لایه	B	نیمه تراوا تا تراوا	۵۰-۶۰	۵۵-۶۰	۲/۲۹-۲/۵
	$J_{sm\text{-}n}^{D}$	Surmeh-Nyriz	دولومیت خاکستری با لایه‌بندی ضخیم تا توده‌ای					
	$J_{sm\text{-}n}^{Md}$		دولومیت، مارن و آهک‌های مارنی سبز تا قهوه‌ای روشن و نازک تا متوسط لایه					
(Br-Do)	T_{kh}^{d}	Khanehkat	دولومیت خاکستری تا خاکستری روشن نازک تا متوسط لایه	C	نیمه تراوا تا تراوا	۴۰-۴۵	۳۳-۳۸	۱/۴۸-۱/۸۷
(Do-Li)	P_{d}^{D}	Dalan	آهک‌های خاکستری تیره و متبلور توده‌ای همراه با لایه‌های از شیل و لایه-های تبخیری	B	نیمه تراوا تا تراوا	۴۰-۵۰	۴۶-۵۰	۳/۶۷-۴/۵۸
(Sh-Sa)	$C_{pl}^{Sh\text{-}S}$		شیل‌های میکادار خاکستری تیره با بین لایه‌های از ماسه‌سنگ‌های قرمز رنگ و نازک لایه	D	ناتراوا تا کم تراوا	۳۰-۳۵	۲۸-۳۲	۲/۲۲-۲/۵۲
(CZ)			ناحیه با پتانسیل خردشدگی شدید	E	هجوم آب	۲۰<	۱۵-۳۵	۰/۷۵-۷/۵



شکل ۵. تقاطع گسل‌های SF1، SF2 و ATF2 در محل چشمه شیرکشته

Fig. 5. Intersection of SF1, SF2 and ATF2 faults at Shirkoshteh spring

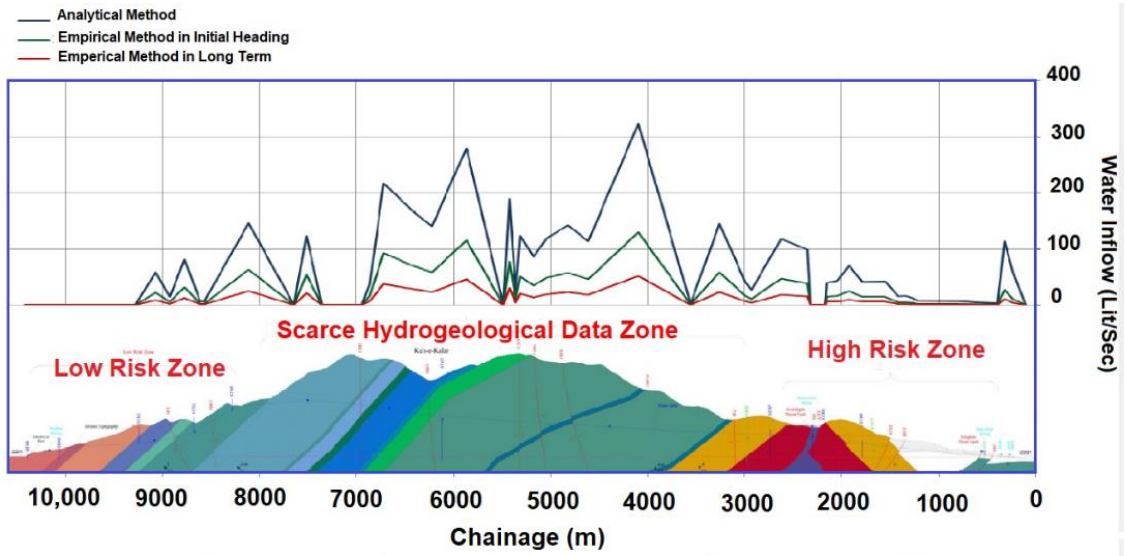
[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.6.3]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10115453]

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.6.3]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10115453]

پیش‌بینی آب ورودی به تونل

تاکنون محققان زیادی در سراسر جهان معادلات مختلفی برای محاسبه میزان تخلیه آب‌های زیرزمینی به سازه‌های زیرزمینی ارائه داده‌اند. اکثر این معادلات بر اساس یکی از روش‌های تجربی، تحلیلی یا عددی هستند. روش تجربی روشی است که توسط هیور (Heuer, 1995) پایه‌ریزی و در ادامه توسط رایمر (Raymer, 2001) توسعه داده شده است. این روش بر اساس تجربیات به‌دست‌آمده از تونل‌های دیگر که در شرایط هیدروژئولوژیکی مشابه حفر شده‌اند و بر اساس اطلاعات هیدروژئولوژیکی موجود (آزمایش‌های درجا، اقدامات شیمیایی و فیزیکی و غیره) استوار است (Dematteis et al., 2001). رویکرد تحلیلی مبتنی بر کاربرد فرمول Dupuit، با اصلاحاتی در هندسه لایه‌های آبخوان، مساحت ورودی و کاهش نفوذپذیری مرتبط با تغییرات هد هیدرولیکی و تنش مؤثر در اطراف تونل‌های عمیق است. جریان آب ورودی به تونل‌ها را می‌توان با استفاده از روش‌های عددی نیز مدل‌سازی کرد و میزان نشت به تونل‌ها را می‌توان با توجه به شرایط مختلف محل محاسبه کرد. این روش‌ها به داده‌های جامعی در مورد شرایط محل نیاز دارند. روش‌های عددی کاملاً پیچیده هستند و کاربرد آن‌ها زمان‌بر است. با این حال، نتایج در مقایسه با روش‌های تحلیلی دقیق‌تر هستند.

به‌منظور پیش‌بینی مقدار آب ورودی به تونل سبزکوه از روش‌های تحلیلی و تجربی استفاده شد. در روش تجربی، جریان آب ورودی به تونل در دو حالت: (۱) بلافاصله بعد از حفر تونل در سینه کار (Initial Heading Inflow) و (۲) جریانی که از جداره تونل وارد می‌شود (Long Term Steady State)، بررسی شد. در شکل (۶)، زون‌بندی پتانسیل ریسک هجوم آب برمبنای مطالعات میدانی ارائه شده است. مطابق با بررسی‌های انجام شده ناحیه مورد مطالعه (محدوده‌ی بخش چغاخور) به دلیل زون گسله سولقان -آوردگان از لحاظ هجوم یکباره آب از ریسک بالایی برخوردار است. همچنین همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، احجام بدست آمده از روش‌های تحلیلی به مراتب بیشتر از روش تجربی است. این اختلاف بیشتر ناشی از تأثیر تغییر تراوایی محیط بخصوص در زون‌های خرد شده گسلی است.



شکل ۶. پیش‌بینی حجم آب ورودی به تونل

Fig. 6. Predicting the volume of water ingress the tunnel

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.6.3]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10115453]

اندرکنش حفاری تونل و چشمه‌ها

تأثیری که حفاری تونل ممکن است بر منابع آب سطحی داشته باشد، نقش مهمی در طراحی و ساخت تونل، به ویژه در مناطق کوهستانی، ایفا می‌کند. این اثرات باید به منظور اتخاذ اقدامات کاهش و جبران کافی، کمی‌سازی شوند.

به‌منظور بررسی تأثیرات حفاری تونل بر تراز سطح ایستابی آبخوان منطقه همچنین منابع آبی (نظیر چاه، چشمه و قنات)، روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است. روش‌های شاخص خطر افت (Drawdown Hazard Index, DHI) (Dematteis et al., 2001) و اثر تونل‌زنی بر چشمه‌ها (Tunneling Impacts on Springs, TIS) (Hassanpour et al., 2021) از متداول‌ترین و کارآمدترین روش‌ها در این زمینه هستند. این روش‌های پارامتری، جایگزین برای رویکردهای تحلیلی یا عددی است که به شناسایی تأثیرات احتمالی در شرایط پیچیده زمین‌شناسی به کارفرمایان کمک می‌کند. کاربردهای آن در پروژه‌های متعدد، اثربخشی بالای آن را در ارائه ارزیابی‌های تأثیرات احتمالی بر یک اکوسیستم وابسته به آب زیرزمینی بر اساس یک مدل مفهومی هیدروژئولوژیکی قوی، با داده‌های نسبتاً کم و در زمان کوتاه نشان داده است. این روش‌ها، امکان برجسته‌سازی موارد ویژه، شناسایی نیاز به تحقیقات بیشتر و احتمالاً مطالعات بیشتر از طریق مدل‌سازی جریان را فراهم می‌کند. این در حالیست که روش‌های عددی اغلب به دلیل محدودیت‌های زیر، که معمولاً در پروژه‌های تونل‌سازی به ویژه در مناطق کوهستانی با شرایط پیچیده زمین‌شناسی وجود دارد، استفاده نمی‌شوند:

- یافته‌های زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی که توسط مطالعات ژئوتکنیکی در تونل‌سازی مورد استناد قرار می‌گیرند، معمولاً در یک مساحت محدود نزدیک به محور مسیر تونل بررسی می‌شوند. این محدودیت، مانع از مدل‌سازی سه‌بعدی قابل اعتماد اندرکنش تونل و محیط می‌شود. این شکاف‌ها در مدل‌سازی سه‌بعدی، سطح غیرقابل قبولی از عدم قطعیت را در شرایط جریان تونل ایجاد کند.
- مقیاس آزمایش‌های هدایت هیدرولیکی گمانه، که ورودی هیدرودینامیکی را به مدل‌های جریان ارائه می‌دهند، عموماً از نظر حجم آزمایش‌شده (مثلاً در حد دسی‌متر مکعب) در مقایسه با حجم درگیر در سیستم‌های جریان مورد نظر (مثلاً در حد کیلومتر مکعب) محدود است.
- بازسازی دقیق ساختارهای زمین‌شناسی با پتانسیل نفوذپذیری بالا، مانند مناطق گسلی و مناطق خردشده که قادر به ایجاد تداخل هیدرولوژیکی در فاصله هستند، به ندرت با قابلیت اطمینان خوب در مقیاس مربوطه مورد نظر می‌توانند مدل‌سازی شوند.

بنابراین، روش‌های DHI و TIS (به عنوان یک روش ملی و متناسب با شرایط زمین‌شناسی کشور) در کاربردهای متعدد خود طی تجربیات به دست آمده طی سالیان اخیر، ثابت کرده‌اند که یک روش جایگزین مؤثر برای رویکردهای عددی هستند (Dematteis et al., 2025).

در ادامه بررسی‌های انجام‌شده بر مبنای هر دو روش و تأثیرات آن بر منابع آبی محدوده مورد مطالعه ارائه شده است.

روش شاخص خط افت (DHI)

در روش DHI، برای دامنه تغییرات هریک از عوامل، ارزش‌گذاری لازم درنظر گرفته شد. ضمن اینکه وزن مناسب برای هر عامل نیز تعیین گردیده است. این عوامل را می‌توان در دو گروه معرفی کرد. گروهی که به ویژگی پهنه سنگی و خصوصیات مهندسی این پهنه مربوط می‌شود و شامل ویژگی

درزه‌ها و فراوانی آن‌ها (Fracture Frequency, FF)، تراوایی توده سنگ (Rock Mass Permeability, MK)، ارتفاع روباره (Overburden, OV) و اثر ناحیه خمیری (Plastic Zone Radius, PZ) است. گروه دوم شامل فاصله چشمه از محور تونل (Distance Between the Spring and the Tunnel Axis, DT)، وضعیت برخورد با گسل (Intersection with Fault and Crushed Zones, IF) و نوع چشمه از نظر آبدهی (Spring Type, ST) و با وزن یکسان است.

با بررسی وضعیت هیدروژئولوژی و زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه، پارامترهای DHI برای هر چشمه محاسبه شده است. به‌منظور وزن‌دهی پارامترها از رابطه (۱) استفاده شده است. نتایج بررسی‌های بعمل آمده در جدول (۲) ارائه شده است.

$$DHI=(41*FF+22*MK+17*OV+20*PZ)*(IF+1)*(ST+1)*(DT+1) \quad (1)$$

روش اثر تونل‌زنی بر چشمه‌ها (TIS)

این روش بر اساس تجربیات به‌دست آمده از پنج پروژه تونل‌زنی در زون‌های مختلف زمین‌شناسی ایران (تونل‌های انتقال آب نوسود، قمرود، بازی دراز، کرمان و کرج و اعتبارسنجی به‌وسیله پروژه خط ۶ مترو تهران) مدل جدیدی را برای برآورد تأثیر تونل‌سازی بر چشمه‌ها ارائه کرده است. این مدل مشتمل بر چهار پارامتر اصلی (۱) حجم آب ورودی به تونل (Volume of Water Inflow Toward the Tunnel)، (۲) فاصله بین چشمه تا محور تونل (Distance Between Spring and Tunnel)، (۳) ارتباط هیدرولیکی بین تونل و محیط آبخوان (Hydraulic Connectivity) و (۴) قابلیت تغذیه مجدد آبخوان (Aquifer Recharge Potential) است. موقعیت چشمه‌ها در این بخش به خوبی نقش گسل‌های مذکور را در تخلیه آب‌های زیرزمینی منطقه نشان می‌دهد. مشخصات چشمه‌های بخش چغاخور و اثرات حفاری تونل بر آن‌ها در جدول (۲) ارائه شده است. با توجه به عدم قطعیت‌ها در برخی از متغیرها و مشاهدات میدانی در ارزیابی مذکور (نظیر موقعیت تراز مظهر چشمه نسبت به تراز تونل) جمع‌بندی نتایج حاصل از محاسبه شاخص مخاطرات آبدهی آن دسته از چشمه‌های مهم منطقه که در فاصله ۵ کیلومتری از محور تونل واقع هستند مورد بازنگری و قضاوت مهندسی قرار گرفت و تغییرات آبدهی این دسته از چشمه‌ها در جدول (۲) ارائه شد.

جدول ۲- مشخصات چشمه‌های محدوده هیدروژئولوژیکی مورد مطالعه

Table 2. Characteristics of springs in the studied hydrogeological area.

ردیف	نام چشمه	فاصله از محور تونل (متر)	آبدهی (لیتر بر ثانیه)	روش بررسی		جمع‌بندی
				TIS	DHI	
۱	گلوگرد	۴۰۰۰	۴۲	۴/۵	۰/۱۳	کاهش جزئی
۲	شش دانگ	۵۱۱۱	۱۵	۳/۵	۰/۱۳	کاهش جزئی
۳	کاریز خدرآباد	۱۱۴۷	۳	۶/۹	۰/۲۰	کاهش زیاد
۴	آب باریک	۲۶۵۷	۲۷	۵/۹۵	۰/۲۰	کاهش محسوس
۵	چغایورد	۳۳۶۹	۳۰	۵	۰/۱۷	کاهش محسوس
۶	تنگ سیاه	۴۸۲۷	۲۵۲	۳/۶۵	۰/۰۴	کاهش جزئی
۷	احمدآباد	۳۷۴۶	۳۲۶	۴/۰۹	۰/۱۸	کاهش محسوس
۸	شیر کشته	۲۶۲	۱۳۰	۸/۸۵	۰/۶۲	کاهش بسیار زیاد تا مرز خشک شدن
۹	آلو قره	۴۷	۷۰	۹/۶۵	۰/۷۸	کاهش بسیار زیاد تا مرز خشک شدن

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.6.3]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10115453]

نتایج بررسی نشان می‌دهد که ۵ چشمه در محدوده مورد مطالعه به طور جدی تحت تأثیر حفاری تونل قرار می‌گیرند. آبدهی مجموع این چشمه‌ها حدود ۸۰۰ لیتر بر ثانیه بوده و منبع استفاده کشاورزی و آب شرب بیش از ۱۰ روستا در منطقه می‌باشند. خشک شدن و/یا کم آب شدن این چشمه‌ها بر اکوسیستم و کشاورزی و دام‌پروری منطقه تأثیرات قابل توجهی دارد. همچنین معضلات اجتماعی فراوانی را ایجاد خواهد کرد.

انتخاب TBM و مدل زمین

وجود مناطق گسلی در مسیر پروژه‌های تونل‌سازی مکانیزه، هنگام استفاده از یک دستگاه مناسب، با توجه به قابلیت‌های TBM های پیشرفته و مجهز، همیشه مشکل‌ساز نیست. نمونه‌هایی از مناطق با گسل‌های اصلی وجود دارد که TBM بدون مشکل قابل توجهی از آن‌ها عبور کرده است. پایداری خوب جبهه کار تونل و فشار کم آب در سنگ‌های اطراف ممکن است عبور روان از منطقه گسلی را تسهیل کند. به عنوان مثال، حسن‌پور و همکاران (Hassanpour et al., 2017) عملکرد دستگاه را در منطقه گسلی نسبتاً وسیع پورکان-وردیج در مسیر تونل انتقال آب کرج (قطعه ۲) بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که منطقه گسلی نه تنها مانع پیشروی دستگاه نشده، بلکه عملکرد آن را نیز بهبود بخشیده است. از طرف دیگر، تجربه تونل‌سازی در گسل‌هایی همانند زاگرس مرتفع و زاگرس اصلی همانند تونل نوسود، بازی دراز و کوهرنگ، احتمال برخورد با مناطق گسله، کارستی و هجوم مقادیر فراوان آب به داخل تونل را نشان داده است. تجربیات به دست آمده از حفاری تونل در این مناطق نشان می‌دهد که پیش‌بینی سطح خطر برای گسل‌های شناخته‌شده قبل از انتخاب TBM با انجام مطالعات میدانی و در نظرگرفتن احتمال شرایط غیرمنتظره برای پیمانکاران تونل‌سازی به کاهش تاخیرات و هزینه‌ها کمک شایان توجهی می‌کند. این رویکرد نه تنها ایمنی و کارایی را بهبود می‌بخشد، بلکه به انتخاب روش‌های اجرایی آگاهانه‌تر در شرایط زمین‌شناسی پیچیده نیز کمک می‌کند. به عنوان مثال، برای پروژه‌هایی که از مناطق گسله وسیع و متعدد همانند تونل کوهرنگ عبور می‌کنند (مناطق با طبقه‌بندی بحرانی) استفاده از ماشین حفاری نوع باز و روش‌های تونل‌سازی سنتی (همانند انفجاری) توصیه نمی‌شود. ناسازگاری و عدم تناسب طراحی ماشین حفار شرکت کاواساکی شرکت پیمانکاری کومه‌گایی ژاپن با شرایط زمین‌شناسی ساختگاه باعث عدم موفقیت پروژه شد. در حالی که TBM با قابلیت‌های لازم برای تزریق و بهسازی پیرامون تونل، حفاری گمانه‌های زهکشی و پوشش بتنی آب‌بند در موفقیت پروژه‌های تونل‌زنی در این نواحی تأثیر چشمگیری داشته است. سیستم پشتیبان نیز باید تجهیزان لازم برای انتقال آب از محدوده جبهه کار تونل داشته باشد. از طرف دیگر با توجه به احتمال لهیدگی زمین در برخی از سازندهای زمین‌شناسی مسیر تونل، پیشانی برش دهنده باید قابلیت ایجاد اضافه حفاری را در شرایط مورد نیاز داشته باشد تا مانع از گیر افتادن دستگاه در شرایط لهیدگی و آماسی گردد. همچنین با توجه به گلی شدن بعضی از واحدها و میان لایه‌های سنگی و مشکلات مربوط به آن، سپر دستگاه بایستی بسته بوده تا از ورود آب و مصالح جلوگیری کند. با جمع‌بندی موارد بالا درمی‌یابیم در حفاری مکانیزه در مناطق با مخاطرات زمین‌شناسی پیچیده همانند مناطق گسله وسیع با خردشدگی زیاد و احتمال هجوم آب، استفاده از دستگاه حفار سپر ترکیبی (EPB-Hard Rock) اجتناب‌ناپذیر است.

در این راستا با بررسی مخاطرات احتمالی در سازندهای مشابه و تجربیات به دست آمده از آن‌ها، TBM تونل سبزکوه با قابلیت‌های زیر طراحی شد:

- قابلیت انجام اضافه حفاری تا ۱۱ سانتیمتر که در قسمت تاج به ۱۵ سانتیمتر قابل افزایش است (شکل ۷).

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.6.3]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10154453]

- طراحی پله‌ای سپرها از لحاظ قطر خارجی به‌منظور استفاده کمتر از قابلیت اضافه حفاری در مناطق بحرانی، با توجه به بروز ایجاد مشکلات فراوان در اجرا به جهت افزایش قطر حفاری و ناپایداری‌های ناشی از آن.
- قابلیت لیفتینگ کاترهد جهت کنترل انحراف ممتد دستگاه به سمت پایین در هنگام افزایش قطر حفاری.
- افزایش کارایی کاترهد در زمین‌های نرم با تعبیه knife bit
- افزایش گشتاور کاترهد به بیش از دو برابر میزان ماشین‌های حفار DS.TBM (در حد دستگاه‌های EPB در این قطر به میزان ۴۰۰۰ کیلو نیوتن بر متر)
- امکان حفاری طولانی مدت با استفاده از روش Single Mode جهت استفاده در زمین‌های نرم
- افزایش قابل ملاحظه نیروی تراست، در حدود ۲۵۵۰ کیلو نیوتن (نزدیک به دستگاه‌های هم قطر از نوع EPB)
- قابلیت آبکشی بالا تا ۲۵۰ لیتر بر ثانیه (شکل ۸)
- قابلیت تزریق انواع رزین و فوم در سپر جلو به صورت ۳۶۰ درجه و در سپر انتهایی تا ۱۸۰ درجه (شکل ۹)
- مجهز بودن سیستم برقی و تابلوها به خاصیت ضدآب بالا (IP65)
- مجهز بودن کلیه تابلوها به سیستم ضد گاز
- قابلیت حفاری با غلاف‌گذاری، نمونه‌گیری از زمین جبهه کار حفاری
- حفاری گمانه پیشرو با زاویه ۸ تا ۱۳ درجه، پایدارسازی پهنه خرد شده و گسله پیش رو با استفاده از تزریق دوغاب و فوم تا طول ۴۰ متر
- استفاده از سگمنت‌های یونیورسال به همراه گسکت به جهت آب‌بندی
- تعبیه دریچه روی سپر جهت استفاده در زمان گیرکردن
- افزایش ۳۰ درصدی میزان آب‌بندی سپر دستگاه نسبت به دستگاه‌های مشابه

شکل ۷. قابلیت اضافه حفاری ماشین حفار در مناطق فشردگی
Fig. 7. Over cutting system for squeezing zone

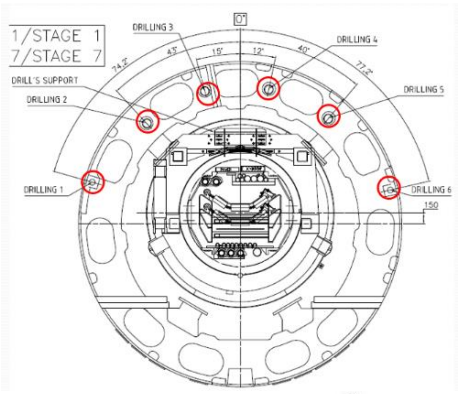
شکل ۸. تجهیزات سیستم پمپاژ انتقال آب از جبهه کار حفاری
Fig. 8. Equipment to pumping system from the tunnel face

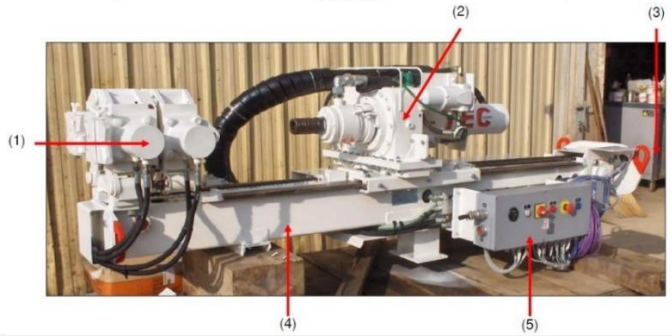
چالش‌های حفاری مکانیزه

در حفاری بخش ابتدایی تونل سبزکوه (T1:350m) با مخاطرات زمین‌لغزش و نواحی آبدار گسله در ناحیه آبرفتی با لایه‌بندی متناوب شیب‌دار، سه ریزش سنگین اتفاق افتاد. استفاده از رویکرد ADECO-RS برای عبور از این چالش‌ها، تجربیات جدیدی از اجرای تونل در این نواحی و راهکارهای عبور از مناطق ریزشی را برای اولین بار برای صنعت تونل‌سازی در ایران ارائه کرد (Taromi et al., 2018).

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.6.3]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10115453]

پیش از شروع عملیات حفاری مکانیزه به منظور شناخت بهتر زون خردشده گسل سولقان، گمانه BH-F در متراژ ۴۷۶ حفاری شد. این گمانه با فاصله عمودی ۶ متر از محور تونل در سازند میلا به عمق ۵۳ متر در نهشته‌های آبرفتی و ۲۲ متر در واحدهای سنگی اغلب از جنس سیلت استون و ماداستون ضعیف حفاری شده است. این گمانه در حین حفاری در عمق ۲۳/۵ متری به سطح آب زیرزمینی برخورد کرده و تراز آب تا عمق ۱۹/۶ متری بالا آمد. مشخصات این گمانه و آزمایش‌ها انجام شده روی آن در جدول زیر نشان داده شده است. شاخص کیفی توده سنگ در این منطقه در رده بسیار ضعیف قرار دارد (شکل ۱۰).

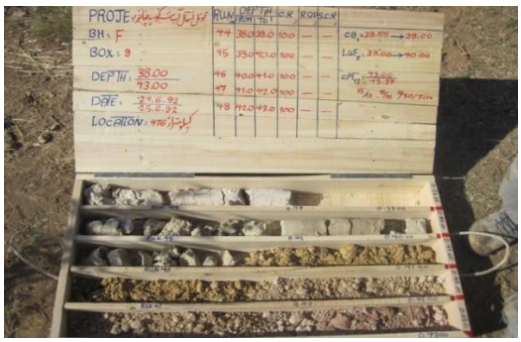




۱) Guillotine
۲) چکش دورانی
۳) Lifiting ring
۴) شفت حفاری
۵) کابین الکترونیکی

شکل ۹. مشخصه‌های سیستم حفاری پیشرو TBM

Fig. 9. Probe drilling system specification of TBM



BH-F	Depth (m)	Angle (deg.)	CPT	Lufran	Lugan	RQD (%)	Rock quality	Alluvium (m)	Rock (m)
	75	90	15	10	3	25	poor	53	22

شکل ۱۰. مشخصات زمین‌شناسی گمانه BH-F

Fig. 10. BH-F Borehole specification

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.6.3]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10015453]

حفاری مکانیزه تونل از متراژ ۳۵۰ شروع شد. طی پیشروی بیش از ۱۳۵ متر، حفاری بدون هیچ‌گونه چالشی با سرعت قابل قبولی ادامه یافت (شکل ۱۱). با شروع حفاری مکانیزه، از کیلو متراژ ۴۸۵+۰ مقطع تونل وارد شیل‌های هوازده پالئوزوئیک شد. در این محدوده دولومیت‌های برشی سازند خانه‌کت دوره تریاس که تحت تأثیر شدید گسل سولقان قرار گرفته است، در تونل مشاهده شد. مشاهدات حفاری و صحرایی نشان داد که این واحد به طورکلی برشی بوده و با توجه به گسترش بسیار زیاد این واحد در سطح، در بسیاری از قسمت‌ها فرسایش بسیار شدید باعث شده تا سیمان کلسیتی واحدهای نامقاوم نیز از بین رفته و خاک سفید رنگی در برخی بخش‌ها برجای گذارد. با این حال به دلیل قابلیت‌های مناسب دستگاه با کنترل جریان آب ورودی و گشتاور و نیروی تراست، حفاری بدون چالش ادامه پیدا کرد. در متراژ ۴۸۵+، هجوم شدید و یکباره آب در جلوی سینه کار، موجب جریان یافتن مصالح زون گسلی به سمت کاترهد گردید. تخلیه این مصالح و همچنین شستشوی مصالح ریزدانه در اثر جریان آب به داخل تونل، باعث به وجود آمدن فضای خالی و گسترش زون ناپایدار و شعاع پلاستیک در بالای کاترهد دستگاه شد. در این شرایط، افزایش حجم مصالح جلوی کله حفاری و نیز سقوط بلوک‌های سنگی بزرگ روی کاترهد، باعث شد TBM گشتاور لازم برای چرخاندن کاترهد و جمع‌آوری مصالح ریزشی توسط بیلچه-های دستگاه را نداشته باشد. در چنین شرایطی، جریان ناگهانی آب با فشار زیاد در زون گسله نیز سبب کاهش زمان ایستایی سینه‌کار و حرکت مصالح پرکننده گسل با سرعتی بیشتر از سرعت حفاری و حرکت TBM شد. روند سریع جریان یافتن مواد پرکننده گسل به همراه جریان آب به درون تونل باعث شکل‌گیری حفرات خالی و دودکش مانند در تاج تونل و گیر افتادن دستگاه شد (شکل ۱۲). بر اساس گمانه‌های ۲۱ متری حفاری شده در موقعیت ساعت یک و یازده دستگاه، ضخامت فضای خالی و زون خردشده حدود ۵ متر و ارتفاع آن حدود ۱۰ متر تخمین زده شد.

شکل ۱۱. وضعیت سینه کار حفاری قبل از برخورد به زون ریزشی
Fig. 11. The condition of the excavation face before collapse zone

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.6.3]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10154453]

شکل ۱۲. جریان یافتن مصالح زون گسله به سمت کاترهد ماشین حفار

Fig. 12. Flow of fault zone mud and water towards the cutter of the TBM

آزادسازی کاترهد و گذر از زون ریزشی

به طور کلی در پروژه‌های تونل‌سازی مکانیزه به منظور مقابله با زمین‌های ریزشی به داخل تونل دو راهکار عملی به صورت زیر وجود دارد:

روش اول: پایدارسازی از طریق محفظه‌های موجود روی دستگاه TBM

روش دوم: استفاده از تونل سرویس (By pass)

ابتدا اقدامات اولیه در خصوص آزادسازی کاترهد از طریق محفظه‌های موجود روی دستگاه در دستور کار قرار گرفت. به منظور تحکیم و پایدارسازی زون ریزشی و در نهایت پر کردن فضای خالی ایجادشده استفاده از سیمان و/یا فوم به صورت مجزا یا ترکیبی پیشنهاد شد. تحکیم با استفاده از افزودنی سیمان علی‌رغم هزینه کم‌تر و روش اجرای آسان‌تر با مخاطراتی همراه است که استفاده از آن را در این مورد به دلایل زیر غیرقابل پذیرش کرد:

۱- جریان شدید آب و عدم امکان گیرش سیمان

۲- بازگشت دوغاب به سمت سپرها و کاترهد TBM با خطر جدی سیمانی شدن و مسدود شدن TBM (بدترین سناریو).

بنابراین استفاده از فوم پلی‌یورتان به عنوان گزینه نهایی انتخاب شد. عملیات آزادسازی کاترهد با استفاده از فوم شامل موارد زیر بود:

- احیا و بازگشایی کلیه لوله‌های تزریق و زهکشی تعبیه شده در Front Shield
- تزریق فوم در فضای بالای کاترهد، از طریق منافذ تزریق Front Shield
- لوله‌گذاری و تزریق فوم از سپر تلسکوپی با استفاده رادهای خود حفار فایبرگلاس
- ریزش‌برداری از داخل کاترهد و تمیزکاری بیلچه‌ها

در ماشین‌های سپردار به دلیل وجود سپر فلزی امکان حفاری از طریق نقاط دلخواه در سقف و دیواره امکان‌پذیر نمی‌باشد و تنها از طریق سوراخ‌های تعبیه شده در سپر و از فضای میان دیسک کاترها امکان حفاری و تزریق وجود خواهد داشت. این سوراخ‌ها در دستگاه حفاری پروژه چغاخور در بالای سپر ۴ عدد و در طرفین هر کدام ۱ عدد می‌باشد. در محیط سپرجلویی TBM چغاخور نیز ۱۲ سوراخ وجود دارد که به دلیل عدم وجود فضای کافی امکان حفاری در آن‌ها با دستگاه‌های حفار معمول وجود نداشت. شیب سوراخ‌های گریپر شیلد ۸ درجه است و در صورتیکه گمانه‌ها با زاویه ۸ درجه حفر گردد در فاصله ۱۰ متری از محل حفاری و بالای کاترهد، گمانه فاصله‌ای معادل ۱/۴ متر از سقف تونل پیدا می‌کنند.

علی‌رغم قابلیت‌های تعبیه شده در TBM به دلایل زیر استفاده از روش اول موفقیت‌آمیز نبود:

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.6.3]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10015453]

- گسترش زیاد زون ناپایدار و شعاع پلاستیک و ایجاد حفره به ارتفاع ۱۰ متر بالای سپر
- عدم امکان تمیزکاری بیلچه‌ها و باز کردن دیسک کاتر جهت تخلیه مصالح ریزشی سینه‌کار و تمیزکاری درون کاتر و شیلد به دلیل ورود مصالح مجدد
- جریان شدید و هجوم آب زیرزمینی با دبی ۱۰۰ لیتر بر ثانیه و عدم امکان گیرش فوم پلی یورتان و شستشوی فوم‌های تزریق‌شده (شش محصول مختلف از شرکت‌های سازنده در این پروژه استفاده شد)
- با ازدیاد طول گمانه‌های پیش تحکیم، فاصله آن‌ها از سقف تونل بیشتر شده و کارایی خود را به جهت کاهش شعاع تزریق گمانه‌ها از دست داد. به نحوی که در ۱۰ متری سینه‌کار فاصله از سقف تونل ۲/۸ متر و در ۲۰ متری این فاصله به ۴/۲ متر رسید.

پس از عدم موفقیت پایدارسازی از طریق محفظه‌های موجود روی دستگاه TBM، اقدام بعدی جهت آزادسازی کاترهد حفر دو گالری به صورت همزمان از دو طرف دیواره تونل در تراز سگمنت S4 و در انتهای سپر دوم و ادامه آن تا کاترهد و آزادسازی دستگاه بود (شکل ۱۳). مزیت حفر دو گالری همزمان شامل موارد زیر است:

۱- زهکشی محدوده کاترهد و بالای سپر از طریق دو گالری و کاهش حجم آب زهکشی از هر گالری که نتیجه آن سهولت حفاری هر گالری است.

۲- در صورت برخورد یک گالری به زون ریزشی و یا حجم آب زیاد می‌توان از گالری دوم جهت دسترسی به کاترهد استفاده کرد.

برای این منظور در انتهای سپر دوم و در موقعیت ساعت ۱۰ تونلی با ارتفاع ۱/۲۰ متر و عرض ۰/۸ متر حفاری و در فواصل ۰/۵ قاب‌گذاری و تحکیم شد. با این حال به دلیل هجوم آب زیاد (۸۰ لیتر بر ثانیه) امکان عملیات اجرایی نیز از طریق این تونل میسر نشد. از این‌رو یک تونل دسترسی دیگر با همان مشخصات در موقعیت ساعت ۲ حفاری و عملیات بهسازی و آزادسازی TBM از طریق آن انجام شد. به طوری که پس از حفر تونل دسترسی دوم، عملیات پایدارسازی سقف تونل اصلی در بالای کاترهد با استفاده از قاب چینی کامل بالای سپر و پر کردن فضای بالای آن با پوکه و سایر مصالح مجاز نظیر یونولیت و ...، آزادسازی کاترهد به خوبی عملیاتی گردید.

در نهایت به منظور شروع دوباره عملیات حفاری مراحل زیر به منظور تحکیم سینه‌کار و فضاهای خالی موجود انجام شد:

۱- پر کردن فضای بین کاترهد و سینه‌کار رسی (نیمه پایینی کاترهد) و همچنین مقابل کاترهد در نیمه بالایی با استفاده از یوینولیت به منظور ایجاد تکیه‌گاه برای پوکه چینی در سینه‌کار

۲- جانمایی لوله‌های تزریق فایبرگلاس برای تزریق فوم، پشت قاب‌های جلوی کاترهد.

۳- پوکه چینی زیر قاب‌ها به ترتیب از سمت چپ و به صورت متراکم همزمان با آن تعبیه لوله‌های تزریق فوم

۴- پس از اطمینان از پر شدن فضاهای خالی جلو کاترهد و بالای قاب‌ها، تزریق فوم به داخل سینه‌کار و سقف و همچنین روی سپر به صورت شعاعی (حداقل ۲ متر) از داخل گالری‌ها

۵- چالزنی و تزریق دوغاب در سینه‌کار از داخل گالری‌ها در پشت فوم سینه‌کار به عمق حداقل ۳ متر.

۶- خارج کردن یونولیت‌های تعبیه شده در جلو کاترهد

۷- راه‌اندازی مجدد کاترهد و حصول اطمینان از آزاد بودن آن

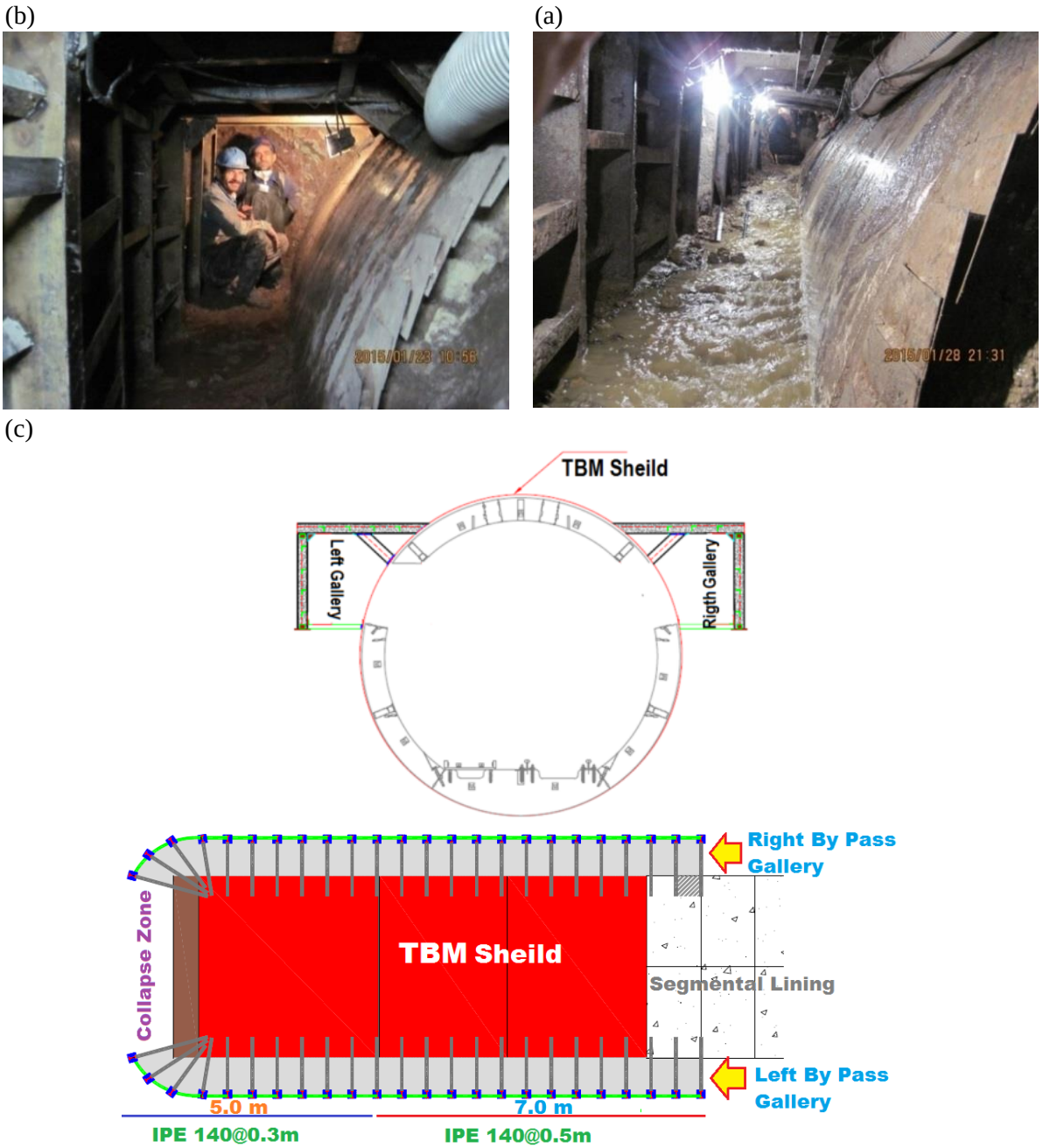
۸- ایجاد ستون زیر حداقل پنج ردیف از قاب‌های انتهایی هر دو تونل سرویس، در فاصله ۴۰ سانتیمتری از سپر به منظور جدا کردن ایمن اتصالات قاب‌ها از سپر

۹- تزریق دوغاب بنتونیت در ناحیه اتصال سپر با زمین از داخل گالری‌ها به منظور کاستن از اصطکاک سپر و زمین

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.6.3]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10115453]

۱۰- پر کردن فضاهای خالی مابین سپر و قاب‌ها در داخل گالری‌ها با استفاده از یونولیت، پوکه چینی و در صورت نیاز تزریق فوم

۱۱- خارج کردن تمام قطعات فلزی اعم از لوله، مش، تیرآهن و ... که در مقطع حفاری قرار داشت با رعایت اصول ایمنی و جایگزین کردن آن با پوکه، فوم و یونولیت



شکل ۱۳. گالری‌های By Pass حفاری‌شده در کنار TBM، (a) گالری دسترسی سمت راست، (b) گالری دسترسی سمت چپ، (c) پلان و مقطع عرضی گالری‌های دسترسی

Fig. 13. By pass gallery excavation in (a) right ,(b) left of TBM, (c) plan and section of by pass gallery

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.6.3]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10115453]

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.6.3]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10154453]

راه‌حل کاربردی

در روش حفاری مکانیزه تونل در نواحی کوهستانی با پیچیدگی و عدم قطعیت‌ها، یکی از روش‌های شناسایی کاربردی به منظور پیش‌بینی سریع عوارض زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی در فضاهای خرد شده و گسلی، فناوری نوین Tunnel Seismic Prediction, TSP است. اگر چه با استفاده از این روش تنها محدوده‌های کوچکی از مسیر حفاری شناسایی می‌شود با این حال در کاهش ریسک بسیار مؤثر است. نمونه‌هایی موفقیت‌آمیز استفاده از این روش در پروژه‌های تونل‌زنی در ایران و جهان وجود دارد (Joudaki et al., 2018; Liu et al., 2025). در پروژه تونل سبزکوه، به دلیل روباره زیاد و صعب‌العبور بودن مناطق کوهستانی و عدم امکان حفاری گمانه و سایر روش‌های شناسایی سطحی ژئوفیزیکی، استفاده از روش‌های شناسایی از داخل تونل می‌توان کاربردی باشد. با انجام دوره‌ای و متوالی روش TSP در نواحی محتمل و مخاطره‌آمیز (پیش از وقوع مخاطرات زمین‌شناسی)، اطلاعات مفیدی جهت کنترل روند حفاری و اندیشیدن تمهیدات لازم می‌توان به دست آورد. اعضا تیم فنیِ حفاری می‌توانند با تلفیق نتایج TSP با دیگر روش‌ها و قابلیت‌های موجود ماشین حفار (حفر گمانه پیشاهنگ، کنترل روند تغییرات پارامترهای عملیاتی دستگاه حفار، بازدید سینه‌کار) ، شرایط توده سنگ‌هایی ادامه مسیر را با دقت هرچه بیشتر، پیش‌بینی نمایند.

حفاری تونل و محیط‌زیست

شدت و اهمیت جنبه‌های زیست‌محیطی طرح‌های انتقال آب بین حوضه‌ای همانند سامانه انتقال سبزکوه، تابع شرایط حوزه مبدأ است. این موارد شامل: (۱) شرایط هیدروژئولوژیکی منابع آب حوضه مبدأ (رودخانه سبزکوه و مسیر تونل)، (۲) شرایطی اقلیمی و جوی رودخانه سبزکوه و منطقه تالاب بین‌المللی چغاخور و (۳) شرایط اکولوژیکی منطقه جنگلی چارطاق و چغاخور است.

در طرح‌های انتقال آب بین حوضه‌ای همانند سامانه انتقال آب سبزکوه، مطالعات هیدروژئولوژیکی از اهمیت بالایی برخوردار است. این موضوع به دلیل شدت مشکلات فنی - اجرایی و زیست‌محیطی و به تبع آن عواقب اقتصادی سنگین تحمیلی بر کارفرمایان است. عواقب اقتصادی تحمیلی بر این پروژه‌ها از دو جنبه قابل بررسی است. رویکرد اول، تأثیر آن بر زمان‌بندی و تاخیرات و هزینه‌های عبور از این مخاطرات به دلیل کمبود مطالعات و شناخت ناکافی است. رویکرد دوم، شدت و وسعت بالا و عدم امکان کنترل و علاج بخشی مناسب در عبور از نواحی با ریسک بالای هیدروژئولوژی است. در این رویکرد به دلیل تأثیرات آن بر منابع آبی منطقه در یک وسعت زیاد، نارضایت‌های مختلف اجتماعی و گاها سیاسی در نهایت ممکن است منجر به تعطیلی پروژه نیز شود.

طرح انتقال آب موسوم به «قمرود» یکی از بزرگ‌ترین پروژه‌های انتقال آب کشور است. این طرح که انتقال سالانه ۱۸۱ میلیون مترمکعب آب از سرچشمه‌های الیگودرز به شهرهای مرکزی نظیر قم، ساوه، دلیجان، گلپایگان و سایر مناطق را هدف قرار داده در حالی به پایان رسید که پیامدهای آن برای جوامع محلی فاجعه‌بار بوده است. مطابق با داده‌های محلی اجرای این پروژه به خشک شدن یا کاهش محسوس منابع آبی زیرزمینی در حدود ۱۶ روستای مسیر منجر شده و مهاجرت بخش زیادی از جمعیت روستایی را در پی داشته است. در مناطق روستایی بحران کم‌آبی نه‌تنها پیامدهای اقتصادی و زیست‌محیطی به دنبال دارد بلکه منجر به گسست‌های اجتماعی عمیق نیز می‌شود. پراکندگی جغرافیایی سکونت‌گاه‌های روستایی، نبود زیرساخت‌های یکپارچه و ظرفیت محدود نهادهای محلی، امکان مدیریت بحران را به‌شدت تضعیف کرده است. گروه‌های آسیب‌پذیر نظیر سالمندان، زنان و کودکان، بیش از دیگران در معرض

تبعات چنین بحران‌هایی قرار دارند. در چنین شرایطی، ضرورت مدیریت یکپارچه و مبتنی بر شواهد منابع آبی بیش از پیش احساس می‌شود.

بررسی تجربیات مشابه در استان چهارمحال و بختیاری از جمله طرح انتقال آب بین حوضه‌ای تونل کوهرنگ ۳، اثرات مخرب زیست‌محیطی را نشان می‌دهد. این طرح دارای اثرات منفی زیادی بود. علاج‌بخشی و جبران بیشتر این آثار و پیامدهای آن به ویژه زهکش‌شدن منابع آب زیرزمینی ناشی از حفر تونل غیرممکن است. از دلایل عمده اثرات اجتماعی این طرح، مهاجرت ساکنین منطقه بیرگان است. از دیگر اثرات زیست محیطی احداث تونل کوهرنگ ۳، همسایگی و مجاورت با یکی از مناطق حفاظت‌شده و شکار ممنوع (منطقه قیصری) است. تأثیرات حفاری این تونل بر منابع کارستی، چشمه‌ها، چاه‌ها و قنوات منطقه بسیار چشمگیر بود که کشاورزی و دام‌پروری سنتی و صنعتی منطقه را به شدت تحت تأثیر خود قرار داد.

در طراحی سامانه انتقال آب سبزکوه، علی‌رغم تغییر سازه کانال به تونل به منظور کاهش تأثیرات منفی روی کاربری اراضی جنگلی منطقه حفاظت‌شده چارطاق، تغییرات غیرمستقیم کاربری اراضی در طرح سامانه انتقال آب سبزکوه به دلیل طول مسیر و نوع اراضی مسیر، وسیع است. به‌نحوی‌که بخشی از این تغییرات در اراضی منطقه حفاظت‌شده سبزکوه و چارطاق بواسطه کاهش آب رودخانه و منابع هیدرولوژیکی وابسته و بخشی به‌واسطه خشک شدن چشمه‌ها و قنوات در محدوده چغاخور و روستاهای آن به واسطه حفاری تونل اتفاق افتاد. تأثیرات منفی بر روی منابع آب مبدأ بسیار گسترده و تأثیرگذار است که برخی از این موارد به شرح زیر هستند:

- کاهش آب‌های سطحی و افت سطح آب سفره‌های زیرزمینی در مسیر تونل
- ناپایداری اکوسیستم رودخانه سبزکوه و تغییر رژیم رودخانه‌ها در مبدأ
- کاهش حق‌آبه‌های محیط‌زیست در مبدأ
- کاهش حق آبه‌های کشاورزی در منطقه چغاخور

از اهم تأثیرات اجرای سامانه انتقال آب سبزکوه بر اکوسیستم‌های طبیعی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

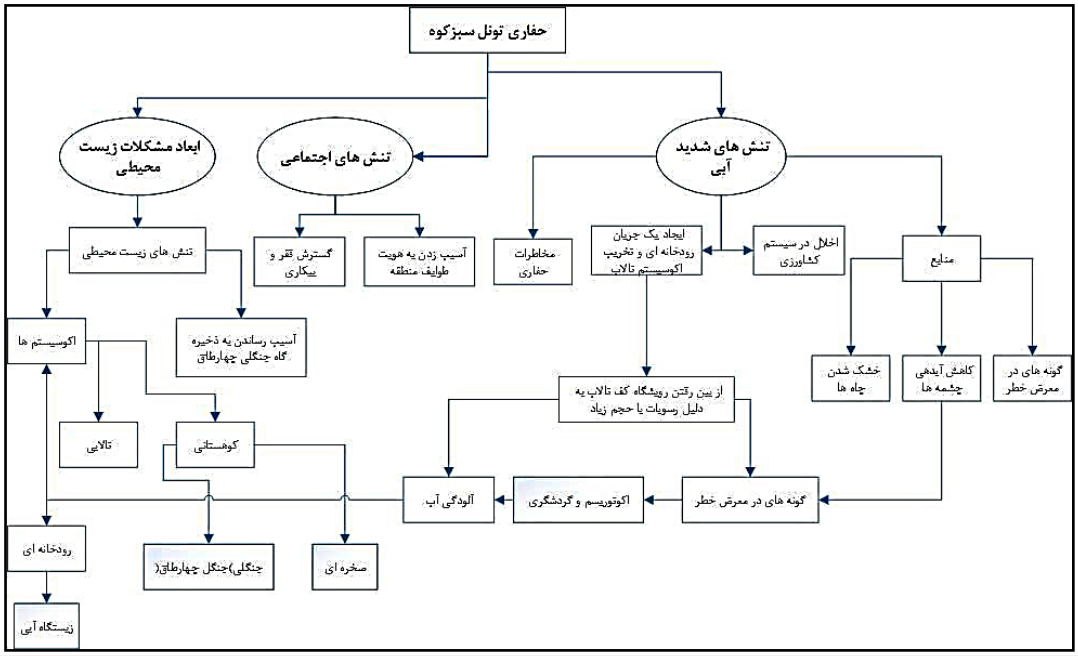
- احتمال افزایش مهاجرت گونه‌های آبی و پرندگان درحوضه رودخانه سبزکوه
- احتمال آلودگی آب در تالاب بین‌المللی چغاخور به واسطه پساب ناشی از حفاری تونل با TBM
- کاهش جمعیت آبزیان در حوضه رودخانه سبزکوه
- ورود گونه‌های غیر بومی به اکوسیستم‌های آبی حوضه تالاب بین‌المللی چغاخور
- تأثیر روی گونه‌های جانوری و پوشش گیاهی منطقه چارطاق که زیستگاه گونه‌های ارزشمند و کمیاب و در معرض خطر انقراض شامل، کل، بز وحشی و خرس قهوه‌ای است.
- مهاجرت کشاورزان منطقه و تأثیرات منفی بر دامپروی عشایری
- نارضایتی‌های اجتماعی

از دلایل عدم موفقیت طرح سامانه انتقال آب سبزکوه، عدم مطالعات پایه کافی و مکان‌یابی نادرست مسیر است.

در شکل ۱۴ ابعاد مشکلات زیست‌محیطی منطقه مورد مطالعه ناشی از اثرات متقابل حفاری تونل و منابع آب زیرزمینی نشان داده شده است.

با جمع‌بندی مطالعات زمین‌شناسی و هیدرژئولوژی همچنین مشخصات ماشین حفار مکانیزه، مشخص شد که ادامه حفاری، تأثیرات زیست‌محیطی قابل توجهی را در مسیر تونل ایجاد می‌کند که با مخاطرات زیادی همراه است. بنابراین ادامه حفاری تونل با این روش متوقف شد.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.6.3]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10115453]



شکل ۱۴. پیامدهای اجتماعی و زیست‌محیطی حفاری تونل سبزکوه

Fig. 14. Social and environmental repercussion of the Sabzkouh tunnel excavation

نتیجه‌گیری

- طرح‌های انتقال آب بین حوضه‌ای، به‌طور مستقیم، مدیریت حوضه مبدأ و مقصد را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تأثیرات طرح‌های انتقال آب بین حوضه‌ای در ابعاد فنی، اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و گاهاً سیاسی دسته‌بندی می‌شوند. بنابراین، برای بررسی جامع و کامل تأثیرات این پروژه‌ها بایستی از طیف گسترده‌ای از متخصصان بهره چست. در این راستا ضروری است که تأثیرات این طرح‌ها در بازه‌های زمانی مختلف از زمان اجرا تا بهره‌برداری بررسی شود. حتی اگر در صورت رعایت کلیه مسائل فنی با کمترین تأثیرات در زمان اجرا، ابعاد بلند مدت اجرای این طرح‌ها بر اقتصاد و محیط زیست همچنین تأثیرات اجتماعی می‌تواند بسیار چالش برانگیز باشد.
- طرح انتقال آب سبزکوه، اگرچه در کوتاه مدت موجب کاهش مشکلات کم آبی در حوضه مقصد خواهد شد، اما در بلندمدت باعث تضعیف شرایط زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی در استان چهارمحال و بختیاری خواهد شد. این مسئله به ویژه در کشور ما که در دوره‌های بلند مدت خشکسالی قرار دارد و این طرح‌ها با هدف تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت صورت از حوضه مبدأ می‌گیرد، مشهودتر خواهد بود.
- تهیه مدل زمین‌شناسی جامع، انتخاب مسیر و روش انتقال آب مناسب (خط لوله، کانال، تونل و ...)، سه رکن اساسی در برنامه‌ریزی فنی طرح‌های انتقال آب بین حوضه‌ای است. در صورت روش انتقال آب با تونل، انتخاب ماشین حفاری مناسب با بیشترین احتمال موفقیت، سخت‌ترین و تأثیرگذارترین مرحله در برنامه‌ریزی و مدیریت ریسک یک پروژه تونل‌زنی مکانیزه در نواحی پیچیده و مشکل‌دار است. برنامه‌ریزی در این خصوص باید با در نظر گرفتن (۱) نرخ پیشروی مناسب، (۲) امکان عبور از میان نقاط بحرانی مسیر تونل و (۳) کاهش تأثیرات زیست محیطی باشد.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.6.3]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10115453]

- مدل زمین‌شناسی زاگرس مرتفع نشان می‌دهد که عوامل زمین‌شناختی اثرات قابل توجهی بر وضعیت منابع آب زیرزمینی دارند. در بین این عوامل، نقش گسل‌ها بسیار بارز است. عبور مسیر تونل سبزکوه از مرز پهنه‌های زمین ساختی زاگرس مرتفع با سه گسل اصلی و بیش از ۱۲ تعداد گسل فرعی است. این گسل‌ها با توجه به تغییراتی که در توالی لایه‌ها و نقش مهمی که صفحات گسلی و شکستگی‌ها در نفوذ آب‌های جاری ایجاد کرده‌اند، بر وضعیت فراوانی آب زیرزمینی و توسعه‌های زون‌های خردشده و ریزشی اثرگذار بوده‌اند. در ادامه، انتخاب مسیر با ریسک بالای مواجهه با مخاطرات و ناکافی بودن مطالعات، حفاری تونل را با چالش‌های زیادی مواجه کرد.
- به دلیل ناکافی بودن بررسی ابعاد فنی و زیست‌محیطی سامانه انتقال آب سبزکوه در مرحله فنی و اجرایی، پس از شروع حفاری، این مخاطرات ضمن ایجاد موانع جدی در فرآیند حفاری و گیر افتادن TBM، موجب برهم خوردن تعادل هیدروژئولوژیکی آبخوان‌ها و خشک شدن چشمه‌های مهمی مانند چشمه آلوقره، و کم آب شدن چشمه شیرکشته شد. عبور از زون گسله و آزادسازی ماشین حفاری با حفاری گالری‌های دسترسی کناری و تزریق شیمیایی انجام شد. با این حال، خشک‌شدن چشمه‌ها تأثیرات منفی زیست‌محیطی و نارضایتی اجتماعی را در منطقه در پی داشت که در نهایت منجر به توقف پروژه شد.

References

Anna, L., Fahy, M., Bianchi, R., McKeown, M., & Chatoian, J. (2003). Effects of tunneling on the groundwater resources of the southwestern San Bernardino Mountains, California, CA. Proceedings of the International Conference on Groundwater in Fractured Rocks, International Association of Hydrogeologists, Prague.

Alp, M., & Apaydin, A. (2019). Assessment of the factors affecting the advance rate of the tunnel Gerede, the longest and one of the most problematic water transmission tunnels of Turkey. Tunnelling and Underground Space Technology, 89, 157–169.

Bäppler, K. (2016). New developments in TBM tunnelling for changing grounds. Tunnelling and Underground Space Technology. 57, 18–26. DOI: 10.1016/j.tust.2016.01.014

Bakhshandeh Amnieh, H., Zamzam, M. S., & Mozdianfard, M.R. (2016). Geological hazards analysis in urban tunneling by EPB machine (case study: Tehran subway line 7 tunnel). Int. J. Min. & Geo-Eng. 50(1), 23-36. https://doi.org/10.22059/IJMGE.2016.57306

Barton, N. (2000). Tunnelling in Jointed and Faulted Rock (1st edition). CRC Press

Bozorg-Haddad, O., Abutalebi, M., Chu, X., & Loáiciga, H.A. (2019). Assessment of potential of intraregional conflicts by developing a transferability index for inter-basin water transfers, and their impacts on the water resources. Environmental Monitoring and Assessment, 192 (40). https://doi.org/10.1007/s10661-019-8011-1

Bayati, M., & Khademi Hamidi, J. (2017). A case study on TBM tunnelling in fault zones and lessons learned from ground improvement. Tunnelling and Underground Space Technology, 63, 162-170. https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.12.006

Dalgıc, S. (2003). Tunneling in fault zones, Tuzla tunnel, Turkey. Tunnelling and Underground Space Technology, 18 (5), 453-465. https://doi.org/10.1016/S0886-7798(03)00045-2

Diwakar, KC., Gautam, K., Dangi, H., Kadel, S., & Hu, L. (2022). Challenges in Tunneling in the Himalayas: A Survey of Several Prominent Excavation Projects in the Himalayan Mountain Range of South Asia. Geotechnics, 2(4), 802-824. https://doi.org/10.3390

Dematteis, A., Kalamaras, G., & Eusebio, A. (2001). A systems approach for evaluating springs drawdown due to tunneling. Presented at the

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.6.3]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10154453]

AITES/ITA World Tunnel Congress 2001, 9–12 June 2001, Milan, Italy

Dematteis, A., Pugliese, E., & Gargini, A. (2025). Evaluating the impact of tunnelling on surface-water resources: update of the Drawdown Hazard Index (DHI) method. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, Vol. 58 qjegh2025-041. https://doi.org/10.1144/qjegh2025-041

Eftekhari, A. , Taromi, M., & Saeidi, M. (2014). Uncertainties and Complexities of the Geological Model in Slope Stability: a Case Study of Sabzkuh Tunnel. International Journal of Mining and Geo-Engineering, 48(1), 69-79. doi: 10.22059/ijmge.2014.51807

Eftekhari, A., & Aalianvari, A. (2019). An overview of several techniques employed to overcome squeezing in mechanized tunnels; a case study. Geomechanics and Engineering, 18 (2), 215-224. http://dx.doi.org/10.12989/gae.2019.18.2.215

Fu, X., & Zhang, L. (2021). Spatio-temporal feature fusion for real-time prediction of TBM operating parameters: A deep learning approach. Automation in Construction, 132: 103937

Gattinoni, P., Pizzarotti, E., & Scesi, L. (2014). Engineering geology for underground (Edition Number 1). Springer Berlin, Heidelberg.

Ghadimi, C.A., & Tahghighi, H. (2019). Numerical finite element analysis of underground tunnel crossing an active reverse fault: A case study on the Sabzkouh segmental tunnel. Geomech. Geoengin., 14, 155–166. https://doi.org/10.1080/17486025.2019.1573323

Gisbert, J., Vallejos, A., González, A., & Pulido-Bosch, A. (2009). Environmental and hydrogeological problems in karstic terrains crossed by tunnels: a case study. Environmental Geology, 58(2), 347–357. https://doi.org/10.1007/s00254-008-1609-1

Goel, R.K. (2016). Experiences and lessons from the use of TBM in the Himalaya – a review. Tunnelling and Underground Space Technology, 57, 277–283. https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.02.015

Gong, Q., Yin, L., Ma, H., & Zhao, J. (2016). TBM tunnelling under adverse geological conditions: an overview. Tunnelling and Underground Space Technology, 57, 4–17. https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.04.002

Gokdemir, C., Li, Y., Rubin, Y., & Li, X. (2022). Stochastic modeling of groundwater drawdown response induced by tunnel drainage. Eng. Geol. 297, 106529.

Hashemi, M., Ajalloeian, R., & Moghaddas, Sh. (2004). Rock mass characterization for an underground excavation support system: the sabzkuh water conveyance tunnel, Iran. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41(1), 858-863. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.03.148

Hassanpour, J., Lotfipoor, A. & Morsali, M. (2021). Introduction of an empirical classification system for evaluating tunneling impact on the discharge of springs (TIS) in the surrounding areas. Bull Eng Geol Environ **80**, 5725–5742. https://doi.org/10.1007/s10064-021-02268-5

Hassanpour, J., Mohammadyari, Z., & Cheshomi, A., (2017). Locating the Poorkan-Vardij Fault zone in the second lot of Karaj water conveyance tunnel using actual TBM performance and operational parameters. J. Rock Mech. 2, 67–74 (in Persian).

Heuer, R. E. (1995). Estimating Rock Tunnel Water Inflow. RETC Proceedings, p. 41–60 (Chapter 3).

Hemmati, A. , Ghorbani, K., & Ebrahimi, K. (2022). Assessment of inter-basin water transfer projects damages in Iran. Water and Irrigation Management, 12(1), 139-156. doi: 10.22059/jwim.2022.336494.955

Home, L. (2016). Hard rock TBM tunneling in challenging ground: Developments and lessons learned from the field. Tunnelling and Underground Space Technology, 57, 27-32. https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.01.008

Jayanath, M.G.S., Jayasena, H.A.H. & Gunaratna, B. (2025). Challenges and implications of deep tunnel construction in Uma Oya: a geo-engineering, environmental, and socio-political perspective. Discov Civ Eng 2, 134. https://doi.org/10.1007/s44290-025-00296-8

joudaki,V., Sohrabi-bidar, A., Ajalloeian, R., Amini, N. & Thomas, D. (2018). Evaluation of Tunnel Seismic Prediction (TSP) Test Results based on Geological Observations and Analysis of the Parameters of the EPB Hard Rock Machine. Scientific Quarterly Journal of Iranian

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.6.3]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1015453]

Association of Engineering Geology, 11 (Number 2), 15-31.

Karami, M., Bagherpur, R., Raisi Gahrooee, D., & Faramarzi, L. (2014). The Influence of Geological Features and Geomechanical Properties of Rock Mass on TBM Selection for Sabzkouh water conveyance tunnel. Journal of Engineering Geology, 8 (2), 2169-2198. http://jeg.khu.ac.ir/article-1-414-en.html

Liu, J., Liu, D., & Song, K. (2015). Evaluation of the influence caused by tunnel construction on groundwater environment: a case study of Tongluoshan Tunnel, China. Advances in Materials Science and Engineering, 2015, Article ID 149265, 14 pages. https://doi.org/10.1155/2015/149265

Lin, P., Yu, T.F., Xu, ZH., Shao, R.Q., & Wang, W.Y. (2022). Geochemical, mineralogical, and microstructural characteristics of fault rocks and their impact on TBM jamming: a case study. Bull Eng Geol Environ 81(1):64. https://doi.org/10.1007/s10064-021-02548-0

Liu, Wj., Luan, Xb., Liu, Y. Ma, Hh., Chen,Y., Wang, Zh. & Liu, X. (2025). Construction of tunnel three-dimensional advanced geological prediction technology system and application of disaster prevention and control. Appl. Geophys. https://doi.org/10.1007/s11770-025-1260-6

Lin, P., Kang, J. & Xu, Z. (2025). A new optimization method of initial support for TBM tunnel crossing fault zone based on deformation control contribution. Bull Eng Geol Environ 84, 90. https://doi.org/10.1007/s10064-025-04122-4

Paltrinieri, E., Sandrone, F., & Zhao, J. (2016). Analysis and estimation of gripper TBM performances in highly fractured and faulted rocks. Tunnelling and Underground Space Technology, 52, 44–61. http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2015.11.017

Raymer, J.H. (2001). Predicting groundwater inflow into hard-rock tunnels: estimating the high-end of the permeability distribution. RETC Proc. 1027–1038 Chapter 83.

Rodriguez, R., & Blanco, A. (2012). Inquiry into the interactions between the works on the holy 837 family temple and the construction of a high Speedy rail tunnel between the Sants and La Sagrera stations in Barcelona. Revista de Obras Publicas, 159(3529),7-30.

Saeidi, M., Eftekhari, A., & Taromi, M. (2012). Evaluation of rock burst potential in Sabzkuh water conveyance tunnel, Iran: a case study. 7th Asian Rock Mechanics Symposium, ARMS, Korea.

Shang, Y., Wang, S., Yang, Z., & WU, F. (2006). Lessons from one tunnel boring machine project in Kunming city, China. The Geological Society of London, IAEG2006, United Kingdom.

Shaterpour-Mamaghani, A., Tumac, D., & Avunduk, E. (2016). Double shield TBM performance analysis in difficult ground conditions: a case study in the Gerede water tunnel, Turkey. Bull Eng Geol Environ, 75, 251–262. https://doi.org/10.1007/s10064-015-0743-8.

Shayan, F., Uromeihy, A., & Hassanpour, J. (2025). Classification framework for engineering geological challenges in fault zones during TBM tunneling: Insights from mechanized projects in Iran, Engineering Geology, 358. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2025.108382

Taherian, A. (2023). TBM Tunneling Hazards Identification and Mitigation Methods Through Subterranean Rivers: An Evaluation of Nowsud Tunnel in the Iran. Geotechnical and Geological Engineering, 28-11-2022, Technical Note.

Taromi, M., Eftekhari, A., & Saeedi, M. (2015). A study of the reinforcement effect of IPE Arc Support Technique (IAST) -a case study of Sabzkuh tunnel. Journal of Engineering Geology, 9 (1) ,2559-2574. http://jeg.khu.ac.ir/article-1-1714-en.html

Taromi, M., & Eghbali, A. H. (2017). Investigation of tunneling hazards in difficult and complex ground with the integration of geological and geophysical studies - case study of Sabzkuh tunnel. Civil Infrastructure Researches, 3(1), 39-49. doi: 10.22091/cer.2017.2031.1081

Taromi, M., Eftekhari, A., Khademi Hamid, J., & Aalianvari, A. (2017). A discrepancy between observed and predicted NATM tunnel behaviors and updating: a case study of the Sabzkuh tunnel. Bull Eng Geol Environ , 76, 713–729. https://doi.org/10.1007/s10064-016-0862-x

Taromi, M., Eftekhari, A., Khademi Hamid, J., & Eghbali, A. H. (2018). Tunnel design and

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.6.3]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10154S3]

construction process in difficult ground conditions with Analysis of Controlled Deformations (ADECO) approach; a Case Study. International Journal of Mining and Geo-Engineering, 52(2), 149-160. doi: 10.22059/ijmge.2018.235548.594679

Teymouri Yeganeh, M. (2022). An Overview of Inter-basin Water Transfer Projects in the World and Its Impact on Environmental, Economic and Social Factors. Journal of Water and Sustainable Development, 9(2), 57-68. doi: 10.22067/jwsd.v9i2.2202.1121

Tien Bui, D., Talebpour Asl, D., Ghanavati, E., Al-Ansari, N., Khezri, S., Chapi, K., Amini, A., & Thai Pham, B. (2020). Effects of inter-basin water transfer on water flow condition of destination basin. sustainability, 12(1), 338. https://doi.org/10.3390/su12010338

Vincenzo, V., Gargini, A., & Goldscheider, N. (2009). Using tracer tests and hydrological observations to evaluate effects of tunnel drainage on groundwater and surface waters in the Northern Apennines (Italy). Hydrogeology Journal, 17(10), 135–150. https://doi.org/10.1007/s10040-008-0371-5

Wang, G.-F., Lyu, H.-M., Shen, J. S., Lu, L.-H., Li, G., & Arulrajah, A. (2017). Evaluation of environmental risk due to metro system construction in Jinan, China. International Journal of Environmental Research and Public Health, 14(10), 1114. https://doi.org/10.3390/ijerph14101114

Wang, Y., Chang, H., Wang, J., Shi, X., & Qiu, J. (2019). Countermeasures to treat collapse during the construction of road tunnel in fault zone: a case study from the Yezhuping Tunnel in south Qinling, China. Environmental Earth Sciences, 78, 464. https://doi.org/10.1007/s12665-019-8481-z.

Wang, X., Lai, J., Qiu, J., Xu, W., Wang, L., & Luo, Y. (2020). Geohazards, reflection and challenges in Mountain tunnel construction of China: a data collection from 2002 to 2018. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 11(1), 766–785. https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1747554

Wan, F., Guo, H., Li, J., Gu, M., Pan, W., & Ying, Y. (2021). A scheduling and planning method for geological disasters. Applied Soft Computing, 111: 107712

Wang, Z., & Zhang, B. (2023). Key technical innovations in the construction of Baihetan Hydropower Station Project. Front. Eng. Manag. 10, 367–372. https://doi.org/10.1007/s42524-023-0253-5

Wang, P., Zhang, Ss., & Chen, Wd. (2025). A comprehensive analysis method for adverse geology in tunnels based on geological information and multi-source geophysical data. Appl. Geophys. 22, 43–52. https://doi.org/10.1007/s11770-025-1174-3

Wu, Q., Liu, Y.X., Tang, H.M., Kang, J.T., Wang, L.Q., Li, C.D., Wang, D., & Liu, Z.Q. (2023). Experimental study of the influence of wetting and drying cycles on the strength of intact rock samples from a red stratum in the Three Gorges Reservoir area. Eng Geol 314:107013. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107013

Yang, F. R., Lee, C., Kung, W.J., & Yeh, H. F. (2009). The impact of tunneling construction on the hydrogeological environment of 'Tseng-Wen Reservoir Transbasin Diversion Project' in Taiwan. Engineering Geology, 103(1-2), 39-58. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.07.012

Zarei, H., Moarefvand, P. & Salmi, E.F. (2019). Numerical modeling of umbrella arch technique to reduce tunnelling induced ground movements. Environ Earth Sci, 78, 291. https://doi.org/10.1007/s12665-019-8302-4

Zhang, L., Wang, Y., & Fu, X. (2025). Geological risk prediction under uncertainty in tunnel excavation using online learning and hidden Markov model. Front. Eng. Manag. 12, 447–466. https://doi.org/10.1007/s42524-024-0082-1

Zhuang, W. (2016). Eco-environmental impact of inter-basin water transfer projects: a review. Environ Sci Pollut Res, (23), 12867–12879. https://doi.org/10.1007/s11356-016-6854-3

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-05-22]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.6.3]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10154453]