



Investigating the Effects of the Kerman Water Conveyance Tunnel Construction on the Groundwater Resources Discharge

Amir Saberi-nasr ¹ | Majid Dashti-Barmaki ²

1. Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2. PhD Graduate of Kharazmi University and Expert of Sahel Omid Iranian Consulting Engineers, Tehran, Iran.

✉Corresponding Author: A.saberinasr@scu.ac.ir

Received:
25 November 2023

Accepted:
18 December 2023

Published:
20 January 2024

Keywords:

*Tunnel,
Groundwater,
discharge,
Dematteis method,
Kerman.*

Extended abstract

Introduction

Generally, groundwater studies in the design and construction of tunnels have focused on methods for control of groundwater inflows during excavation and for keeping the completed structure free of water. On the one hand, High groundwater flow into hard rock tunnels and in the other hand the negative hydrogeological impacts of resulting from tunnel drainage over groundwater can be a serious threat. So, identifying the impacts tunnel drainage over groundwater environment before tunnel construction is one of the duties of tunnel hydrogeologists to adopt appropriate countermeasures to minimize the negative influences. The Kerman water conveyance tunnel with an approximate length of 38 km is designed to supply drinking water to the city of Kerman. There are about 242 springs on the tunnel route. So, the main purpose of this study is to investigate the impact of this tunnel excavation on the groundwater resources around it. In this regard, DHI as an applicable method among multiple methods to investigate the effect of the water entering the tunnel on the level of the aquifer and the water sources around the tunnel, each of which has advantages and disadvantages, was used.

Materials And Methods

The studied area is a part of the Cenozoic magmatic arc of Kerman with north-west-south-east strike in which its blocks are separated from each other by faults whose activity has continued until the present era

Cite this article: Saberi-nasr, A. & Dashti-Barmaki, M. (2023). Investigating the Effects of the Kerman Water Conveyance Tunnel Construction on the Groundwater Resources Discharge. *Journal of Aquifer and Qanat Title*, 4 (1), 81-102. DOI: <http://doi.org/10.22077/jaaq.2023.6990.1052>



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee Journal of Aquifer and Qanat. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

In the study area, 242 springs and aqueducts, which the average height of the springs is 2555 meters above sea level, and the average long-term flow of the springs is about 0.473 liters per second, have been identified. In order to assess the impacts caused by Kerman tunnel excavation on groundwater environment, indicators that closely related to reducing the groundwater discharge should be firstly taken into consideration. Based on Dematteis et al. (2001), factors such as fractures frequency (FF), the permeability of the rock mass (MK), the tunnel overburden (OV), the plastic zone around the tunnel (PZ), the distance of the springs from the tunnel (DT), the existence of faults (IF), and the type of groundwater resources (ST) were evaluated. The value of the effective parameters in the changes of the springs discharge as a result of tunnel excavation is presented at Table 1. Table 1. Determining The Value of The Effective Parameters in The Changes of The Spring Discharge As A Result of Tunnel Excavation.

FF	MK	OV	PZ	IF	ST	DT
Fracture/m index	Permeability Degree index	Thickness(m) index	Radius (m) index	No index	Types index	Distance (m) index
20 15 10 5 0	High Medium Low Very Low 0	>200 200 100 50 <50	30 20 10 0	Yes 1 0	Deep Flow Intermediate Superficial 0	<100 100-200 200-400 400-600 600-800 >800
1 0.75 0.5 0.25 0	1 0.66 0.33 0	0.1 0.25 0.5 0.9	1 0.7 0.3 0		1 0.5 0	1 0.8 0.4 0.2 0.1 0

Fig 1. Determining the value of the effective parameters in the changes of the springs discharge as a result of tunnel excavation.

Based on the factors provided by Dematis et al. (2001), a criterion called the drought risk index (DHI) is defined, which is calculated based on the following formula:

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

Based on the DHI obtained and according to Table 2, the probability of drying up of each spring can be estimated.

Table 2. The Relationship Between The DHI Index and Discharge Changes in Groundwater Resources.

DHI	<0.2	0.2-0.6	0.6-0.7	>0.7
Description	Null to minimal drawdown	Partial drawdown	Partial to complete drawdown	Complete drawdown

Results And Discussion

The results of the quantification of the parameters involved in the drying up of springs caused by tunnel excavation are as follows:

FF: The density of fractures is determined in terms of number per square meter from the Rock Quality Designation (RQD). Results shows that RQD of the tunnel rock mass is desirable and only in some parts of the tunnel due to the existence of

many faults, it has a lower and weaker quality. The results show the stronger effect of this factor in the southern part of the tunnel.

MK: Based on the 17 geotechnical boreholes in the tunnel route, Lugeon values are recorded less than one in more than 80% of the drilled boreholes.

OV: The minimum and maximum height of the springs in the study area are 2356 and 3234 meters above sea level, respectively. The level of the tunnel is 2370 meters above sea level.

PZ: Phase2 software was used to determine and analyze the plastic zone in different kilometers of the tunnel route.

IF: The results show that the study area is tectonically very active as more than 80% of the springs are in the position of encountering the fault zone.

ST: According to Meinzer (1923), most of the springs in the study area are in grades 5 to 8 of this classification, and the flow regimes are diffuse.

DT: The results show that the springs in the southern part of the tunnel route are at closer distances to its axis and the possibility of their drying up is higher.

The results of DHI calculations show that out of the total water resources around the tunnel, 52 % with Partial drawdown will face. In general, springs in the southern part of the tunnel face more acute drying conditions.

Conclusion

Hydrogeological studying of Kerman water transfer shows that the zones of water invasion to tunnels, or in other words, the springs' discharge zones are areas where tectonic has had a greater effect. The results of this study show that the likelihood of a decrease in water discharge in the area is significantly due to the tunnel excavation, and one -third of the water resources are likely to experience complete drawdown.



بررسی اثرات حفر تونل انتقال آب کرمان بر آبدهی منابع آبی منطقه

امیر صابری نصر^۱ | مجید دشتی برمکی^۲

۱. استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
۲. دانش آموخته دکتری دانشگاه خوارزمی و کارشناس شرکت مهندسی مشاور ساحل امید ایرانیان، تهران، ایران.

✉ نویسنده مسئول: A.saberinasr@scu.ac.i

چکیده

ساخت سازه‌های زیرزمینی، نظیر حفر تونل‌های انتقال آب، رژیم جریان آب‌های زیرزمینی در منطقه اطراف سازه را به هم زده و موجب کاهش بار هیدرولیکی منابع آب‌های زیرزمینی می‌گردد؛ که تأثیر آن را می‌توان در خشک‌شدگی چشمه‌ها، قنات‌ها و چاه‌های منطقه ملاحظه کرد. از این رو، پیش‌بینی میزان افت تراز و جریان آب زیرزمینی در منابع آبی پیرامون تونل از جمله ملزومات نظارتی در چنین پروژه‌هایی است. تونل انتقال آب کرمان به طول تقریبی ۳۸ کیلومتر به‌منظور تأمین آب شرب شهر کرمان طراحی شده‌است. بر اساس بازدیدهای صحرایی اولیه در منطقه، حدود ۲۴۲ دهنه چشمه در مسیر محور تونل قرار دارد. در این تحقیق از روش دما تیس به‌منظور ارزیابی احتمال تغییرات آبدهی چشمه‌ها بر اثر حفر تونل انتقال آب کرمان به‌عنوان یک روش پیشنهادی استفاده شده‌است. بدین‌منظور فاکتورهای نظیر فراوانی شکستگی‌ها، نفوذپذیری توده سنگ، روباره تونل، زون پلاستیک اطراف تونل، فاصله چشمه‌ها از تونل، وجود گسل‌های اصلی متقاطع بین تونل و منبع آبی و همچنین نوع منبع آبی ارزیابی شد. در نهایت، ضریب خشکیدگی به چهار رده کاهش بسیار اندک یا جزئی (۱)، کاهش بخشی (۲)، کاهش قابل توجه (۳) و خشکیدگی کامل (۴) تقسیم بندی شد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، ۵۲ درصد از منابع آبی با شرایط کاهش بخشی مواجه خواهند شد. ۲۷ درصد از منابع آبی نیز در رده خشکیدگی کامل و مابقی منابع آبی در سایر رده‌ها قرار می‌گیرند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۰/۳۰

کلیدواژه‌ها:

تونل،
آب زیرزمینی،
آبدهی،
روش دما تیس،
کرمان.

مقدمه

بسیار بدتر جلوگیری نمود. در نتیجه، ضرورت دارد تأثیر احداث چنین سازه‌هایی از قبل پیش‌بینی شود تا براساس برنامه‌های مدون به توان ضمن تأمین نیازهای آبی منطقه از تنش‌های اجتماعی و سیاسی در منطقه کاست (Morsali et al., 2018).

برای بررسی اثر آب ورودی به تونل بر تراز سطح ایستابی آبخوان و در نهایت منابع آبی پیرامون تونل، روش‌های چندانی وجود ندارد. برای این گونه مطالعات معمولاً از روش‌های مدل‌سازی عددی (Yoo, 2005; Raposo et al., 2010; Font-Capó, 2012; Zhang et al., 2020; Golian et al., 2021; Vincenzi et al., 2022) و روش پارامتریک نظیر روش ابتکاری دمتیس و همکاران (Dematteis et al., 2001)، روش ابتکاری حسن‌پور و همکاران با عنوان TIS (Hassanpour et al., 2021) و یا ماتریس ارزیابی اهداف اثرات زیست محیطی (Leopold, 1971) استفاده می‌شود. هر کدام از این روش‌ها مزایا و معایب مرتبط با خود را دارند. در روش‌های پارامتریک معادله جریان آب زیرزمینی در نظر گرفته نمی‌شود، اما این امکان را در اختیار کاربران قرار می‌دهند که به راحتی احتمال خطر را برای همه چشمه‌ها ارزیابی کنند. از دیگر مزایای این روش‌ها این است که می‌توان در هر مطالعه موردی، با توجه به داده‌های ورودی در دسترس از آنها استفاده نمود. با این وجود، نتایج تقریبی به دست آمده از این روش‌ها نیاز به ارزیابی و اصلاح در طول پروژه دارند. در مقابل، مدل‌سازی عددی به داده‌های بیشتری (بارها و جریان‌های هیدرولیکی در گستره مناسب، پیچیدگی‌های زمین‌شناسی و...) نیاز دارد و اعتبار نتایج تا حد زیادی به کمیت و کیفیت داده‌ها و اثربخشی فرآیند کالیبراسیون بستگی دارد. با این حال، فرآیند مدل‌سازی امکان ارزیابی مدل مفهومی را با استفاده از معادله جریان آب زیرزمینی فراهم می‌کند که مزیت بزرگی محسوب می‌شود. بسیاری از داده‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی عددی معمولاً در مطالعات تونلی برداشت نمی‌شوند و در ساخت این مدل‌ها ساده‌سازی‌ها و فرضیات زیادی استفاده می‌شود که همین مسئله مدل‌سازی‌ها را با موفقیت چندانی روبه‌رو نمی‌نماید. در طول سالیان اخیر، پژوهش‌های معدودی به مقایسه این دو روش پرداخته‌اند. در یکی از این مطالعات، Vincenzi و همکاران (Vincenzi et al., 2022)، از روش عددی

تونل‌ها، فضاهای زیرزمینی مصنوعی هستند که برای اهداف خاصی، از جمله انتقال آب به کار می‌روند. گسترش روزافزون صنعت تونل‌سازی در کشور، ایران را در زمره کشورهای پرکاربرد در این زمینه قرار داده است. از این رو، مطالعه هر چه بیشتر این سازه پرکاربرد و بررسی مشکل‌ها و خطرهای آن ضروری می‌باشد (Peng et al., 2023; Jiang et al., 2023).

آب‌های زیرزمینی یکی از مهم‌ترین عوامل به وجود آمدن مشکلات در طراحی و پایدارسازی تونل‌ها هستند. امروزه تخمین میزان نفوذ آب زیرزمینی به درون تونل‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است. به عبارتی، پیش‌بینی اثرات یک تونل مشخص بر آبخوان یکی از چالش برانگیزترین وظایف در مطالعات هیدروژئولوژی تونل است. هجوم و نفوذ آب به درون تونل از سینه کار تونل و همچنین از بین سگمنت‌ها محتمل است. بدون تردید ورود جریان آب به تونل‌های در حال ساخت یکی از مسائلی است که ممکن است آثار مخربی بر روند عملیات حفاری (برای مثال کاهش نرخ حفاری) داشته باشد و فعالیت تونل‌سازی را کاملاً تحت تأثیر قرار دهد. به بیانی دیگر، این هجوم و نفوذ، مشکلات و خطرات جدی و عدیده‌ای را برای پرسنل، ماشین‌آلات، پایداری دیواره و سقف تونل به دنبال خواهد داشت. از طرف دیگر، ورود آب به تونل می‌تواند باعث هدر رفتن آب‌های زیرزمینی و کاهش پتانسیل این منابع و یا تغییر مسیر جریان طبیعی آن شود که مورد اخیر، بر میزان تخلیه منابع طبیعی (چشمه‌ها) و یا مصنوعی (قنات‌ها و چاه‌ها) تأثیر می‌گذارد. به‌طور کلی، اثرات بر روی سیستم‌های هیدروژئولوژیکی، تحت شرایط ماندگار و یا غیر ماندگار، شامل خشک شدن چشمه‌ها، افت بار هیدرولیکی، کاهش آبدهی منابع آبی و کاهش دبی جریان پایه رودخانه‌ها است. تغییر در میزان تخلیه این منابع می‌تواند مسائل اقتصادی، اجتماعی را در منطقه به بار آورد که حل این مسائل به‌سادگی امکان‌پذیر نمی‌باشد. پیامدهای مخرب محیط‌زیستی، اقتصادی و اجتماعی اگر در ابتدای پروژه به‌درستی پیش‌بینی شوند، می‌توان با اقدامات مدیریتی صحیح، نظیر آب‌بندی مناسب تونل، تعیین مسیر جایگزین و یا حتی رها کردن پروژه پیش از انجام هزینه‌های سنگین، در چارچوب مثلث زمان-هزینه-منفعت از این پیامدهای مخرب و مشکلات

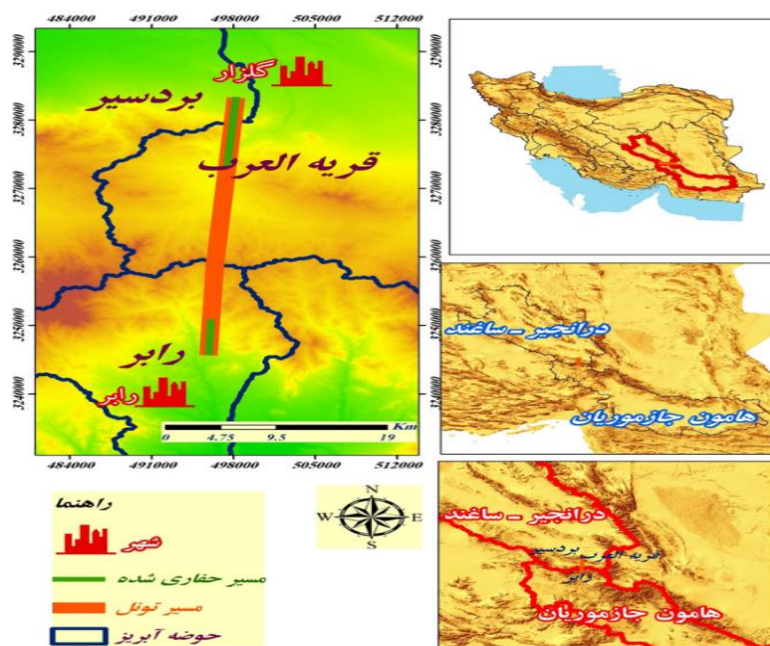
چشمه‌ها پس از حفر تونل با رویکرد مدیریت محیط‌زیست پرداختند و با توجه به تأثیر بالای تونل بر منابع آبی (چشمه‌ها) روند فعلی حفاری تونل را مناسب ندانستند. پروژه تونل سد صفا به گلزار، انتقال آب از سد صفا به شهر کرمان را میسر می‌سازد. این تونل به طول تقریبی ۳۸ کیلومتر از روستای گنجان (که پرتال ورودی در شرق آن واقع می‌باشد) تا محدوده جنوب غربی گلزار (قریه العرب) حفاری خواهد گردید. حفاری تونل از اواخر تابستان ۱۳۹۵ آغاز شده و پس از حفاری نیمی از تونل، به دلیل مشکلات اجتماعی (احتمال خشک شدن منابع آبی) در شرایط فعلی متوقف شده است. بنابراین با توجه به سطح اطلاعات موجود، هدف این مطالعه تعیین تأثیر حفاری این تونل بر منابع آبی پیرامون آن (چاه، چشمه و قنات) با استفاده از روش دما تیس است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

تونل انتقال آب کرمان به طول حدود ۳۸ کیلومتر و راستای شمالی جنوبی با ظرفیت انتقال حداکثر ۲۳ متر مکعب در ثانیه است که در فاز اولیه انتقال سالانه ۶۰ میلیون متر مکعب (بین یک تا ۳ متر مکعب در ثانیه) آب از سد مخزنی صفارود (از سرشاخه‌های هلیل رود) به شهر کرمان را به عهده دارد (شکل ۱).

MODFLOW و دما تیس (DHI) برای ارزیابی تأثیر یک تونل انحراف ۹/۵ کیلومتری برق آبی در سازنده‌ای سخت (در آلپ) در نزدیک رودخانه توسه در شمال ایتالیا بر چشمه‌های مجاور آن استفاده کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که با توجه به مجموعه داده‌های موجود حاصل از روش‌های مختلف میدانی (بررسی‌های زمین‌شناسی، اندازه‌گیری‌های جریان و تراز پیزومتریک، آنالیز هیدروشیمیایی، و تکنیک‌های ایزوتوپی) اگرچه می‌توان تا حد زیادی مدل مفهومی را ارتقا داد؛ اما هنوز برای فرآیند مدل سازی عددی کافی نیست و نمی‌توان نتایج قابل قبولی از مدل دریافت نمود. اما با استفاده از همان داده‌ها می‌توان با روش DHI، به راحتی به ارزیابی تأثیر تونل بر منابع آبی پیرامون پرداخت. استفاده از روش‌های پارامتریک به صورت مرسوم در مطالعات تونلی کشور نیز انجام می‌شود. برای مثال، لطفی‌پور و همکاران (Lotfipour et al., 2017) در پژوهشی به ارزیابی احتمال خشک شدن چشمه سراب گرم در اثر حفر تونل انتقال آب بازی دراز با روش دما تیس پرداختند و به این نتیجه رسیدند که حفر تونل بر این چشمه مهم تأثیری ندارد. همچنین طارمی و اسدنبی‌زاده (Taromi & Asadnabizadeh, 2017) در مطالعه‌ای به بررسی هیدروژئولوژی و زمین‌شناسی مسیر تونل سبز کوه و گستره اطراف آن به منظور پیش‌بینی تغییرات رژیم طبیعی جریان آب زیرزمینی و تأثیرات آن در منابع آبی



شکل ۱. موقعیت تونل انتقال آب کرمان

Fig. 1. Location of Kerman Water Conveyance Tunnel

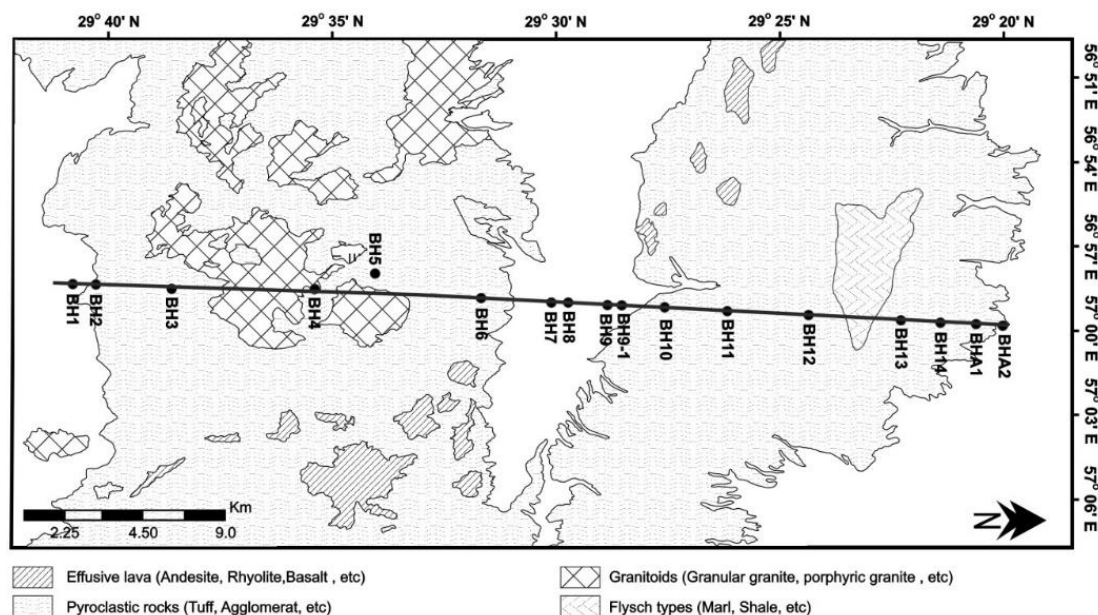
سن ائوسن شناسایی شده است که عبارت‌اند از ۱- کمپلکس هزار ۲- کمپلکس رازک. در الیگومیوسن و در طی فاز پیرنه، با فعالیت فاز مهم ماگماتیسم در منطقه، توده‌های بزرگی از سنگ‌های گرانودیوریتی تا داسیت - آندزیتی نیمه عمیق در طول این گستره جایگزین شده‌اند. این سنگ‌ها را می‌توان به دو دسته اصلی گرانودیوریت‌های نوع جبال بارز و سنگ‌های نیمه عمیق کوه پنج تقسیم کرد. هر دو دسته دارای سن می‌وسن می‌باشند اما نوع کوه پنج کمی جوان‌تر است (Dimitrijevic, 1973). برای مطالعات بیشتر در مورد زمین‌شناسی منطقه می‌توان به مطالعات شفییعی و همکاران (Shafiei et al., 2009) و شفییعی (Shafiei, 2009) مراجعه نمود. نقشه ساده شده زمین‌شناسی منطقه در شکل ۲ ارائه شده است.

گسل‌ها از مهم‌ترین عوارض ساختاری در منطقه مورد مطالعه می‌باشند به شرحی که تعداد ۲۲۶ گسل در محدوده طرح شناسایی شد که عمدتاً دارای روند شرق، شمال شرق - غرب، جنوب غرب می‌باشند (شکل ۳). عمده گسل‌های منطقه نسبت به مسیر تونل عرضی بوده و آن را قطع می‌نمایند. این موضوع می‌تواند موجب افزایش آب ورودی به تونل و کاهش آبدهی منابع آبی منطقه گردد.

در حال حاضر حدود ۱۷ کیلومتر از تونل انتقال آب کرمان (حدود ۵/۳ کیلومتر از قطعه جنوبی و ۱۱/۶ کیلومتر از قطعه شمالی) حفاری شده است. منطقه مورد مطالعه در بخش‌هایی از دو حوضه آبریز هامون - جازموریان و کویر در انجیر می‌باشد. بخش جنوبی تونل در حوضه هامون جازموریان (محدوده مطالعاتی رابر) قرار دارد و دو رودخانه با نام‌های هلیل و بمپور را در خود جای داده است. از سرچشمه‌های هلیل می‌توان به رودخانه گنجان، روسکین و مسیل‌های ارتفاعات شمال غربی حوضه اشاره نمود. بخش شمالی مسیر تونل نیز در حوضه آبریز کویر در انجیر (دو محدوده مطالعاتی قریه العرب و بردسیر) واقع شده است.

زمین‌شناسی عمومی و ساختاری منطقه مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه، بخشی از کمان ماگمایی سنوزوئیک کرمان است. امتداد این نوار در راستای شمال باختری - جنوب خاوری بوده و ساختار داخلی آن بسیار پیچیده است. بلوک‌های این ناحیه توسط گسل‌هایی که فعالیت آن‌ها تا عهد حاضر ادامه داشته است، از یکدیگر جدا می‌شوند. کهن‌ترین نهشته‌های این منطقه، فلیش‌های کرتاسه فوقانی است که در شمال گستره طرح دیده می‌شود و جوان‌ترین نهشته‌های آن نیز رسوبات عهد حاضر می‌باشد. در این گستره دو کمپلکس آتشفشانی با



شکل ۲. نقشه ساده شده زمین شناسی منطقه

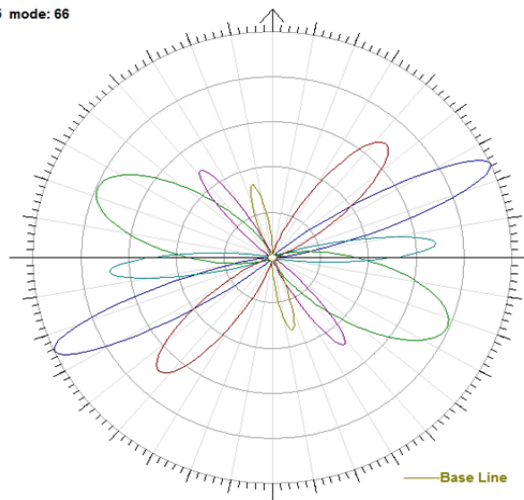
Fig. 2. Simplified Geological Map of The Area

Frequency Gaussians
Total Data: 226 max: 10 min: 0 mean: 88.068 sd: 3.625 mode: 66

RMS = 0.134598069425287

GAUSSIAN PARAMETERS					
#	%	Nor. H.	Max H.	Azimuth	sd
1	18.74	100.00	4.508	65.59°	6.25°
2	34.36	78.84	3.554	-67.36°	14.52°
3	11.36	67.76	3.055	84.84°	5.59°
4	19.45	68.40	3.084	43.29°	9.48°
5	8.371	47.88	2.159	-38.05°	5.83°
6	5.417	31.95	1.440	-14.51°	5.66°

Base Fit Value = 7.99987200153588E-02



شکل ۳. رز دیاگرام گسلها

Fig. 3. Rose Diagram of Faults

عملکرد نیروهای تکتونیکی نفوذپذیری این واحدها افزایش یافته و آبدهی چشمه‌های واقع در لایه‌های بیان شده بیشتر شده‌است. در واقع، چشمه‌های منطقه عمدتاً از آبخوان‌های محلی تغذیه می‌شوند و مخزن آنها جریان‌های نزدیک به سطح یا زیرسطحی هستند؛ به طوری که دبی آنها شدیداً متأثر از بارش منطقه می‌باشد و به سرعت به آن واکنش نشان می‌دهد.

در پهنه خروجی تونل، ۱۸ دهنه چشمه با فواصل ۹۰ تا بیش از ۴۵۰۰ متری از محور تونل قرار دارد که اکثراً چشمه‌های با آبدهی نسبتاً کم هستند. در محدوده بنکوه - غزنین، تعداد ۱۱ دهنه چشمه و ۲ رشته قنات قرار دارد. هیچ کدام از این منابع آبی در فاصله کمتر از ۵۰۰ متری از محور تونل قرار ندارند و اغلب چشمه‌های سطحی با آبدهی کم را شامل می‌شوند. در محدوده‌ای جواران و گلونوئی به ترتیب ۳ و ۶ دهنه چشمه شناسایی شده‌است که چشمه نهرورس با فاصله افقی بیش از ۴ کیلومتر از محور تونل دورترین آنها می‌باشد. نزدیک‌ترین آنها به محور تونل نیز چشمه فلیسی (کندوغان) با فاصله حدود ۷۰۰ متر است. در محدوده سرزه ۱۳ دهنه چشمه و ۴ رشته قنات با آبدهی متوسط شناسایی شده‌است که تنها چشمه بن سرزه و قنات ابراهیم‌آباد در فاصله بیش از ۲ کیلومتری از محور تونل هستند. در محدوده شیرینک ۸

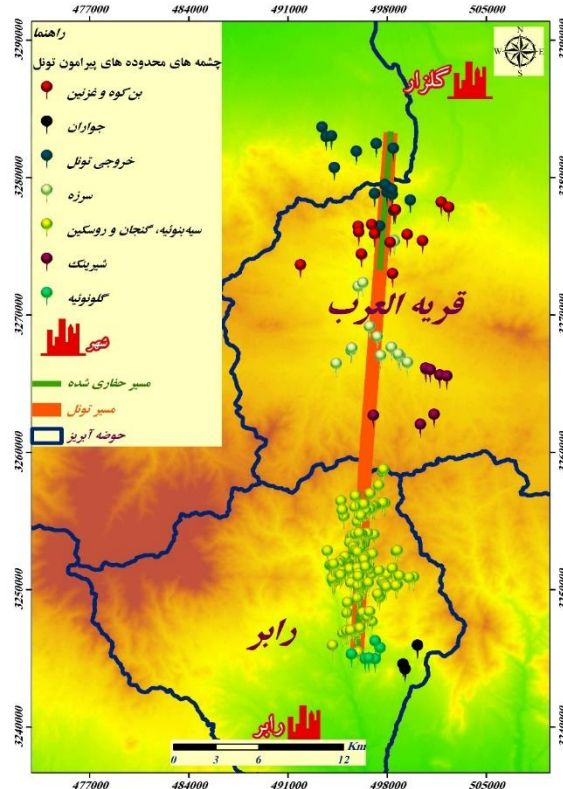
معرفی منابع آبی (چشمه و قنات) محدوده مطالعاتی

در محدوده مطالعاتی تعداد ۲۴۲ دهنه چشمه و رشته قنات شناسایی شده‌است که در چندین پهنه با نامهای چشمه‌های خروجی تونل، بنکوه - غزنین، جواران - گلونوئی، سرزه، شیرینک و سیه بنوئی - گنجان - روسکین (شکل ۴) ظهور یافته‌اند. متوسط ارتفاع چشمه‌ها ۲۵۵۵ متر از سطح دریا می‌باشد و متوسط آبدهی دراز مدت چشمه‌ها حدود ۰/۴۷۳ لیتر در ثانیه، یا به عبارتی حدود ۲۸/۴ لیتر در دقیقه است.

چشمه‌های گسترده مطالعاتی اغلب دارای آبدهی کم می‌باشند و تمرکز آنها در بخش جنوبی مسیر تونل و در مجاورت رودخانه گنجان می‌باشد. پر آب‌ترین چشمه با آبدهی میانگین ۳ لیتر در ثانیه به نام گلی لباس شویی در حوالی گنجان قرار گرفته است. تقریباً تمام چشمه‌های منطقه در کمپلکس آتش‌فشانی رازک، سری هزار، گرانودیوریت‌های نوع جبال بارز و سنگ‌های نیمه عمیق کوه پنج (سازنده‌ای عمدتاً سخت غیرکربناته) قرار دارند. این واحدها عموماً از نفوذپذیری اولیه کمی برخوردار بوده و قابلیت انحلال‌پذیری پایینی دارند. واحدهای مذکور یا فاقد قابلیت تشکیل آبخوان هستند و یا آبخوان ضعیفی را تشکیل می‌دهند که دبی چشمه‌های موجود در آنها عموماً کمتر از یک لیتر بر ثانیه می‌باشد. اما، گاهاً در اثر

برخی همانند چشمه‌های در محمد و باغ مگس بید شیرین روی محور تونل (حداکثر فاصله افقی ۶ متر) قرار دارند و تا فاصله بیش از ۳ کیلومتری تونل (قلعه حیدری و روسکین) نیز ظهور یافته‌اند.

دهنه چشمه وجود دارد که اغلب (به جز چشمه سنگ‌بری) در حریم بیش از ۳ کیلومتری از محور تونل قرار دارند. در نهایت، بیشترین تعداد چشمه به محدوده سیه بنوئیه-گنجان-روسکین با ۱۷۷ دهنه چشمه تعلق دارد که



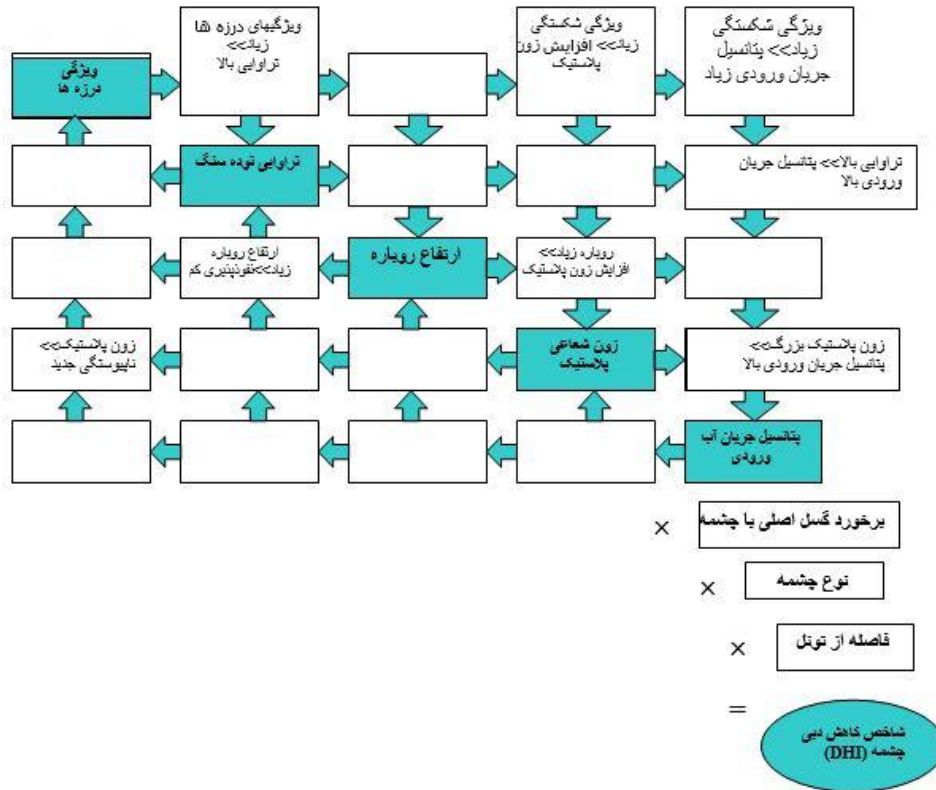
شکل ۴. موقعیت منابع آبی شناسایی شده پیرامون محور تونل

Fig. 4. Location of Identified Water Resources Around The Tunnel Axis

کار برده شده‌است. در این روش، تأثیرات متقابل متغیرهای اساسی برای سیستم تونل - سفره آب زیرزمینی روی یک سطح دودویی از طریق روابط علت و معلولی بررسی می‌شوند. روش مذکور، به دلیل رابطه علت و معلولی دارای ماهیتی دینامیکی است. یعنی تغییر در سطح یک پارامتر باعث ایجاد تغییر در سطح پارامترهای دیگر می‌گردد. این رفتار دینامیکی سیستم در واقع ترکیبی از قواعد سیستم‌های تحلیلی و تجربی می‌باشد که به شناخت بهتر در طراحی منجر می‌شود. به عبارت دیگر، روش دمتیس بر ماتریس برهمکنش باینری استوار است (شکل ۵).

روش دمتیس

به‌طور ساده ورود آب به داخل تونل و در نتیجه ایجاد افت سطح آب زیرزمینی بر اثر دو مکانیسم اصلی و مشترک برخورد تونل با ناپیوستگی‌های هدایت‌کننده جریان آب زیرزمینی و ایجاد پهنه خرد شده در پیرامون این سازه و به تبع آن افزایش احتمالی آب‌های ورودی هدایت شده توسط ناپیوستگی‌ها و مسیرهای جدید به تونل رخ می‌دهد. روش‌های مختلفی جهت بررسی تغییرات آبدی چشمه‌های پیرامون تونل بر اثر حفاری وجود دارد که از جمله آنها می‌توان به روش دمتیس (Dematteis et al., 2001) اشاره کرد. این روش یک آنالیز احتمالی مبتنی بر رویکرد سیستم‌ها است که در مهندسی سنگ به



شکل ۵. ماتریس پیشنهادی برای شاخص خطر کاهش آبدهی چشمه‌ها

Fig. 5. Proposed Matrix for The Risk Index of Reducing The Water Discharge of Springs

وابسته‌است. در شکل ۶، ارزش‌دهی به هر یک از پارامترهای ارائه شده در این روش نمایش داده شده‌است (Dematteis et al., 2001).
براساس فاکتورهای ارائه شده توسط دماتیس، معیاری به نام شاخص خطر خشک‌شدگی (DHI) تعریف می‌شود (رابطه ۱). با توجه به DHI به دست آمده و عطف به جدول ۱، می‌توان احتمال خشک‌شدگی هر منبع آبی را برآورد نمود.

اجزا موجود در قطر اصلی ماتریس، عوامل مؤثر بر آبدهی چشمه و مرتبط با سیستم مهندسی سنگ را نشان می‌دهد. این عوامل (متغیرها) به مقادیر کمی، تبدیل می‌شوند. اجزا قطر فرعی ماتریس ارتباط علت و معلولی را نشان می‌دهد که برای تأثیر هر متغیر بر روی متغیر دیگر می‌توان از قوانین تجربی و تحلیلی استفاده نمود. قسمتی از این طرح ماتریسی بیان کننده پتانسیل جریان ورودی آب در داخل تونل اصلی است که این عوامل به برخورد با گسل اصلی، نوع چشمه و فاصله چشمه از مسیر تونل

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

جدول ۱. ارتباط شاخص DHI و تغییرات آبدهی منابع آبی

DHI	<0.2	0.2-0.6	0.6-0.7	>0.7
Description	Null to minimal drawdown	Partial drawdown	Partial to complete drawdown	Complete drawdown

FF		MK		OV		PZ		IF		ST		DT	
Fracture/m	index	Permeability Degree	index	Thickness(m)	index	Radius (m)	index	No	index	Types	index	Distance (m)	index
20	1	High	1	>200	0.1	30	1	Yes	1	Deep Flow	1	<100	1
15	0.75	Medium	0.66	200	0.25	20	0.7	No	0	Intermediate	0.5	100-200	0.8
10	0.5	Low	0.33	100	0.5	10	0.3			Superficial	0	200-400	0.4
5	0.25	Very Low	0	50	0.9	0	0					400-600	0.2
0	0			<50		0	0					600-800	0.1
												>800	0

شکل ۶ - ارزش‌دهی پارامترهای مؤثر در تغییرات آبدهی چشمه‌ها در اثر حفر تونل

Fig. 6. Determining The Value of The Effective Parameters in The Changes of The Springs Discharge As A Result of Tunnel Excavation

نمود، که یکی از آن‌ها استفاده از فاکتور RQD می‌باشد. از عوامل اصلی و تعیین کننده در مقدار RQD، وضعیت سیستم‌های در زه و شکستگی از جمله نوع و تعداد درزه‌ها و همچنین مقدار هوازدگی و دگرسان توده سنگ می‌باشد. کیفیت توده سنگ‌های تونل در حد مطلوب بوده و تنها در برخی بخش‌های تونل به دلیل وجود گسل‌های متعدد از کیفیت پایین‌تر و ضعیف‌تری برخوردار می‌باشد. جدول ۲ مقادیر شاخص کیفی توده سنگ را در مترهای مختلف مسیر تونل نشان می‌دهد.

نفوذپذیری توده سنگ (MK)

اصلی‌ترین شاخص هیدروژئولوژیک سنگ‌ها می‌باشد؛ میزان تراوایی واحدهای سنگی در مسیر تونل بسیار متغیر است. مقدار تراوایی واحدهای سنگی از نتایج آزمایش‌های صحرایی و به‌ویژه آزمایش‌های لوژان انجام‌شده در این واحدها استخراج می‌شود. اگر آزمایش تراوایی انجام‌شده در واحدهای سنگی منطقه آزمایش لوژان باشد، مطابق با جدول ارائه شده توسط هالزی (Houlsby, 1977)، در صورتی که میزان تراوایی واحدهای سنگی بین ۱ تا ۳ LU باشد، کیفیت تراوایی آن در طبقه بسیار کم تراوا، بین ۳ تا ۱۰ LU در طبقه کم تراوا، بین ۱۰ تا ۳۰ LU در طبقه نیمه‌تراوا و بیش از ۳۰ LU در طبقه تراوا تا بسیار تراوا، قرار می‌گیرد. در مسیر تونل، ۱۷ حلقه گمانه با اهداف ژئوتکنیکی، زمین‌شناسی مهندسی و

نتایج و بحث

با توجه به معرفی پارامترهای روش دماطیس، ابتدا چشمه‌های مسیر تونل مورد ارزیابی قرار گرفته و به هر یک از عوامل مکانیک سنگی و هیدرو ژئولوژی در چشمه‌های مسیر تونل ارزش‌دهی بر اساس شکل ۶ صورت گرفت. سپس، پارامتر DHI برای هر چشمه محاسبه و در نهایت بر اساس DHI به‌دست‌آمده، احتمال خشک‌شدگی هر چشمه برآورد شده و به‌صورت نقشه نمایش داده شده‌است.

فراوانی شکستگی‌ها (FF)

تراکم شکستگی‌ها همواره فاکتور مهمی در محیط‌های سنگی در تعیین آب‌های ورودی به داخل تونل‌ها می‌باشد و برحسب تعداد بر مترمربع محاسبه می‌گردد. می‌توان از شاخص کیفیت توده سنگ (RQD)^۱ در تعیین این فاکتور کمک گرفت (He et al., 2021). علاوه بر این، تداوم و گسترش درزه‌ها و شکستگی‌ها و همچنین پرشدگی (مواد رسی و کلسیتی) و یا تمیز بودن این درزه‌ها می‌تواند بر هدایت جریان آب زیرزمینی تأثیرگذار باشد. برای به‌دست آوردن چگالی شکستگی‌ها باید تعداد شکستگی‌ها بر واحد متر مشخص گردد و به مناطق با چگالی شکستگی بالا ضریب بیشتری اختصاص داد. از شاخص‌های گوناگونی برای شرح دادن چگالی شکستگی‌ها می‌توان استفاده

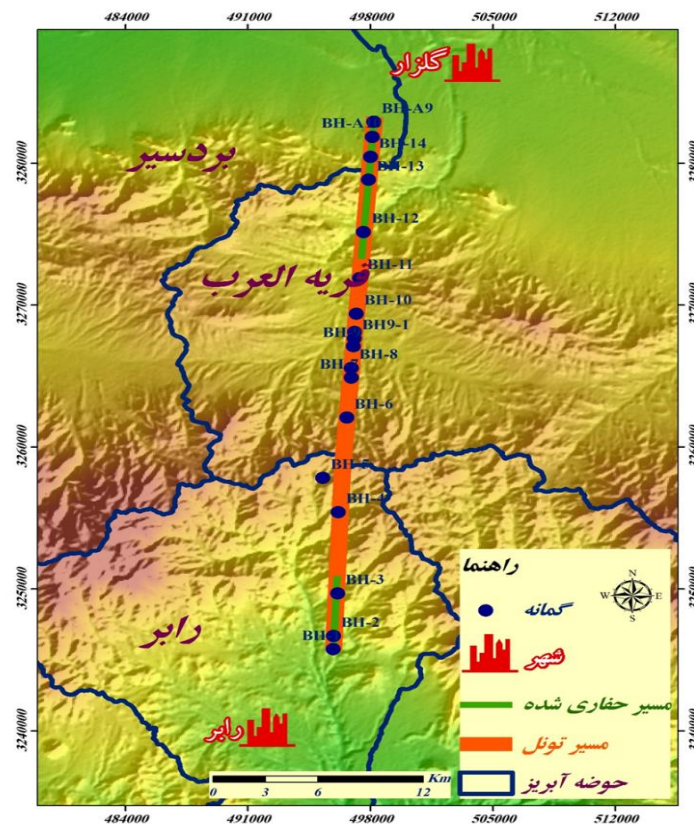
¹ Rock Quality Designation

هیدروژئولوژیکی حفر شده‌است (شکل ۷) که مشخصات آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده‌است.

جدول ۲. وضعیت RQD در مسیر تونل

Table 2. RQD Value in The Tunnel Route

مترآژ مسیر تونل (متر) Tunnel Length (m)		RQD	مترآژ مسیر تونل (متر) Tunnel Length (m)		RQD	مترآژ مسیر تونل (متر) Tunnel Length (m)		RQD
از	تا		از	از		از	از	
۰	۱۵۱۴	۸۵	۱۹۶۵۱	۲۰۰۱۵	۷۵	۲۹۹۹۷	۳۰۱۱۶	۶۵
۱۵۱۴	۳۰۰۰	۱۰۰	۲۰۰۱۵	۲۰۷۸۷	۸۵	۳۰۱۱۶	۳۱۵۶۲	۸۵
۳۰۰۰	۴۵۷۱	۹۰	۲۰۷۸۷	۲۱۲۸۱	۹۰	۳۱۵۶۲	۳۳۱۵۹	۶۰
۴۵۷۱	۶۱۳۸	۶۵	۲۱۲۸۱	۲۱۶۲۳	۸۰	۳۳۱۵۹	۳۴۰۹۳	۸۰
۶۱۳۸	۹۶۷۸	۱۰۰	۲۱۶۲۳	۲۱۷۵۶	۸۰	۳۴۰۹۳	۳۴۳۴۷	۸۰
۹۶۷۸	۱۱۳۵۹	۹۰	۲۱۷۵۶	۲۱۸۵۱	۸۰	۳۴۳۴۷	۳۴۶۹۵	۸۵
۱۱۳۵۹	۱۳۰۷۹	۹۰	۲۱۸۵۱	۲۷۱۰۲	۸۵	۳۴۶۹۵	۳۴۷۶۹	۸۰
۱۳۰۷۹	۱۳۸۰۰	۱۰۰	۲۷۱۰۲	۲۷۳۶۲	۶۰	۳۴۷۶۹	۳۵۲۵۷	۸۰
۱۳۸۰۰	۱۴۷۸۰	۱۰۰	۲۷۳۶۲	۲۷۷۵۳	۸۵	۳۵۲۵۷	۳۵۳۷۷	۸۰
۱۴۷۸۰	۱۵۰۳۷	۱۰۰	۲۷۷۵۳	۲۸۳۵۵	۸۵	۳۵۳۷۷	۳۵۸۷۸	۸۰
۱۵۰۳۷	۱۵۶۶۹	۱۰۰	۲۸۳۵۵	۲۸۴۷۰	۸۰	۳۵۸۷۸	۳۵۹۷۰	۸۵
۱۵۶۶۹	۱۷۹۴۰	۹۵	۲۸۴۷۰	۲۸۸۵۹	۸۰	۳۵۹۷۰	۳۶۴۲۸	۸۵
۱۷۹۴۰	۱۸۹۴۶	۸۵	۲۸۸۵۹	۲۹۳۶۳	۶۵	۳۶۴۲۸	۳۶۵۹۰	۸۵
۱۸۹۴۶	۱۹۶۵۱	۹۵	۲۹۳۶۳	۲۹۹۹۷	۸۵	۳۶۵۹۰	۱۷۸۵۶	۶۰



شکل ۷. موقعیت گمانه‌های مسیر پروژه (در دو محدوده مطالعاتی را بر و قریه العرب)

Fig. 5. The Location of The Boreholes Along The Project Route (in The Two Study Areas of Raber and Qariyat Al-Arab)

جدول ۳. مشخصات گمانه‌های مسیر تونل
Table 3. Specifications of Tunnel Boreholes

اهداف حفاری Drilling targets	عمق گمانه Depth (m)	تراز ارتفاعی Z (m)	عرض UTMY (m)	طول UTMX (m)	نام گمانه Borehole Name	ردیف No.
شناسایی شرایط زیرسطحی پرتال گنجان، شناسایی عمق خاک و سنگ، بررسی شرایط ژئومکانیکی توده سنگ	67	2429	3245751	495875	BH-1	1
شناسایی روند گسل و زون گسله حاصله در عمق، بررسی شرایط ژئومکانیکی توده سنگ، بررسی	81 231	2474 2602	3246702 3249682	495913 496137	BH-2 BH-3	2 3
عمق سطح آب زیرزمینی، دما و میزان شوری آب و بررسی آرتزین بودن منطقه	457	2801	3255406	496163	BH-4	4
شناسایی لایه‌های زیرسطحی و عمق سطح آب زیرزمینی و شناسایی روند گسل‌های موجود در عمق و زون خردشده حاصل از فعالیت گسل	726	2953	3257819	495290	BH-5	5
بررسی سطح آب، شرایط ژئومکانیکی، ساینده‌گی و حفرپذیری توده سنگ	577	2949	3262064	496651	BH-6	6
شناسایی روند گسل لاله‌زار و زون گسله حاصله در عمق، تفکیک دقیق واحدها در عمق، شناسایی عمق سطح آب زیرزمینی	491	2845	3264881	496918	BH-7	7
بررسی شرایط ژئومکانیکی، شناسایی لیتولوژیکی واحد، عمق سطح آب زیرزمینی	397 341	2779 2722	3265566 3267105	496909 497037	BH-8 BH-9	8 9
شناسایی روند گسل سرزه و زون گسله حاصله در عمق، شناسایی عمق سطح آب	312	2685	3267650	497080	BH-9-1	10
تفکیک دقیق لایه‌ها در عمق به دلیل پیچیدگی‌های زمین‌شناسی موجود در این	297 326	2676 2672	3269389 3271895	497197 497392	BH-10 BH-11	11 12
کیلومتراژ، شناسایی روند گسل و زون گسله حاصله در عمق، ردیابی نحوه چین‌خوردگی احتمالی لایه‌ها و شناسایی عمق سطح آب	185 250	2558 2616	3275142 3278823	497608 497897	BH-12 BH-13	13 14
زیرزمینی و بررسی شرایط ژئومکانیکی، ساینده‌گی و حفرپذیری توده سنگ	197	2553	3280433	498017	BH-14	15
شناسایی روند گسل ماده کوه و زون گسله حاصله در عمق	98	2465	3281849	498121	BH-A10	16
شناسایی لایه‌های زیرسطحی و عمق سطح آب زیرزمینی و اندازه‌گیری مقادیر پارامترهای مهندسی توده سنگ	30	2393	3282909	498207	A-9	17

۱۰ اتمسفر) و با توجه به اعماق گمانه در پله‌های رفت و برگشت انجام پذیرفت. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر نفوذپذیری در بیش از ۸۰ درصد گمانه‌های محفوره در محدوده مطالعاتی کمتر از $10^{-7} \times 3$ متر بر ثانیه (۳ لوژان) می‌باشد. به عبارتی دیگر آزمایش لوژان در غالب واحدهای زمین‌شناسی، مقادیر لوژن کمتر از یک را نشان می‌دهد و

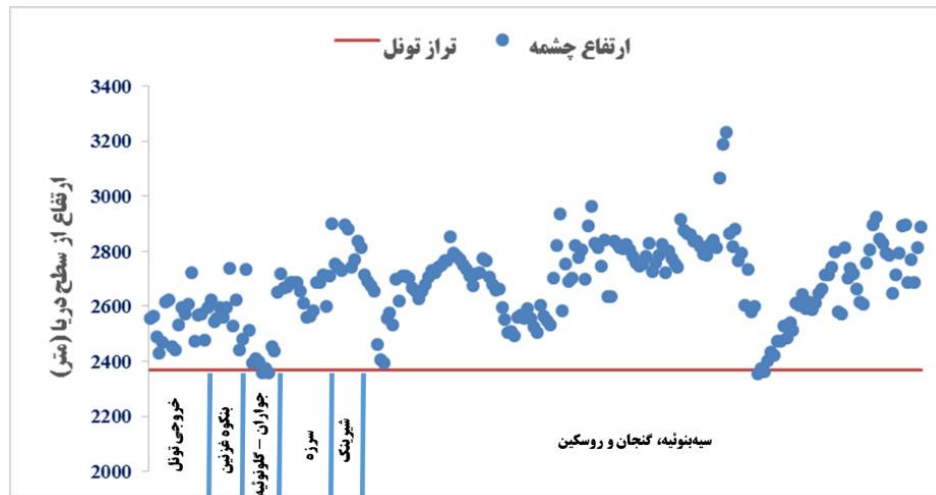
آزمایش لوژان در طبقات سنگی کلیه گمانه‌ها و در فواصل تا حداکثر ۵ متر همراه حفاری انجام شده‌است. کلیه آزمایشات با استفاده از پکر مکانیکی و به روش ساده (Single) و از بالا به پایین انجام شد. اغلب آزمایشات در ۵ پله و با فشارهای مورد نظر دستگاه نظارت (بین ۰ تا

می‌شود و به‌دنبال آن مقدار تراوایی توده سنگ و به‌تبع میزان آب ورودی به تونل کاهش می‌یابد. حداقل و حداکثر ارتفاع چشمه‌ها در محدوده مطالعاتی به‌ترتیب در ترازهای ۲۳۵۶ و ۳۲۳۴ متر از سطح دریا قرار دارد. تراز تونل نیز در ارتفاع ۲۳۷۰ متری از سطح دریا قرار دارد. وضعیت تراز چشمه‌ها و تراز ارتفاعی تونل در شکل ۸ نمایش داده شده‌است.

تنها در حالتی که مقدار در زه داری توده سنگ زیاد می‌شود مقدار لوژان نیز افزایش می‌یابد.

روباره (OV)

به‌طور کلی همواره با افزایش فشار روباره (عمق)، نفوذپذیری کاهش می‌یابد (Ren and GuO, 2014). به‌عبارت دیگر، با افزایش مقدار ارتفاع روباره تنش برجا در درون مقطع سنگ افزایش می‌یابد، درزه‌های آن بسته‌تر



شکل ۸. موقعیت ارتفاعی چشمه‌های مسیر نسبت به تراز محور تونل

Fig. 8. The Spring Level of The Tunnel Route Relative to The Level of Tunnel Axis

استفاده از روش‌های تجربی (هوک و براون و شوری) نسبت تنش افقی به قائم تخمین و در تحلیل لحاظ شده‌است. با توجه به ماهیت توده سنگ‌های مسیر تونل، در تحلیل مذکور مدل رفتاری الاستوپلاستیک فرض شد. نتایج این تحلیل در جدول ۴ آمده‌است.

وضعیت برخورد چشمه با گسل (IF)

گسل‌ها و زون‌های خردشده ناشی از عملکرد آن‌ها، معمولاً مجاری ایده‌آل برای جریان آب زیرزمینی به‌شمار می‌روند، لذا وجود گسل‌ها و زون‌های خردشده در مسیر تونل و ارتباط آن با چشمه‌ها از عواملی است که می‌تواند آبدهی چشمه‌ها را متأثر از حفر تونل نماید. بررسی‌ها نشان می‌دهد که برخی از چشمه‌ها در مجاورت و برخی از آنها در برخورد با گسل‌های اصلی منطقه می‌باشند. محدوده مطالعاتی از نظر تکتونیک بسیار فعال است به شرحی که بیش از ۸۰ درصد چشمه‌ها در موقعیت برخورد به زون گسلی قرار دارند (شکل ۹).

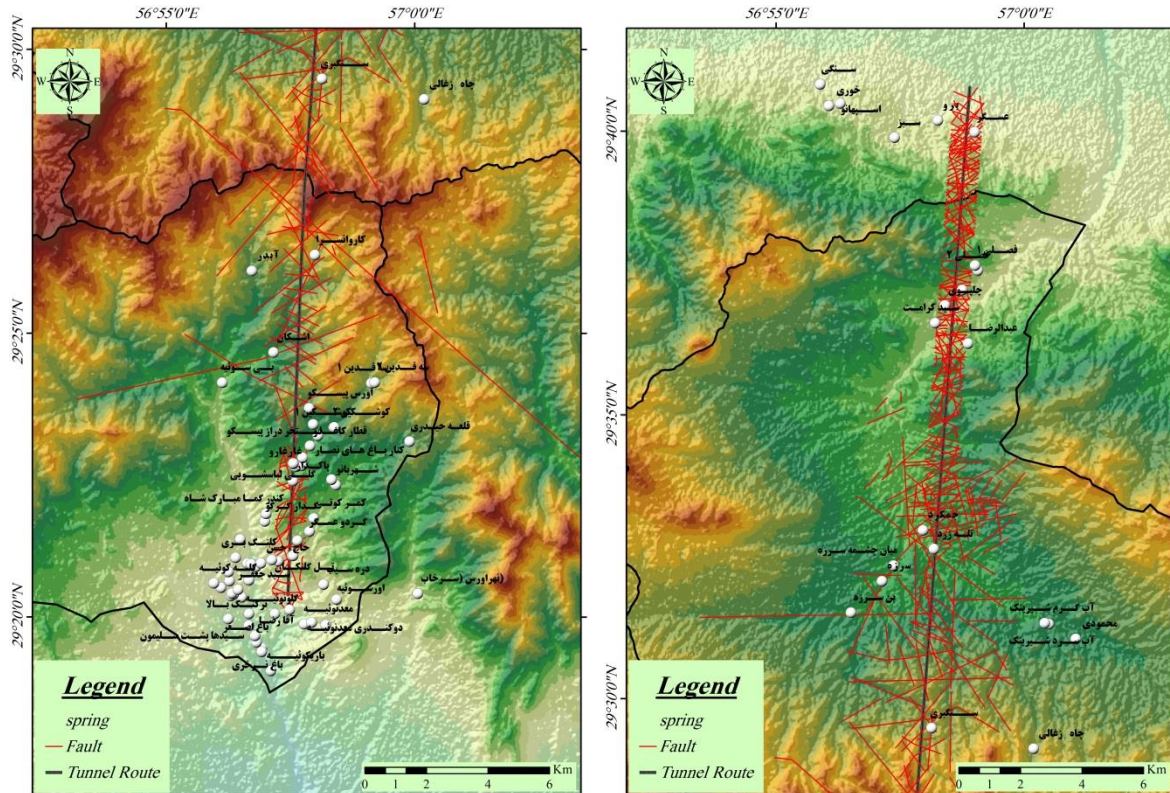
ناحیه پلاستیک (PZ)

تأثیر تونل بر سنگ‌های اطراف، همچون ایجاد شکستگی‌های جدید در اطراف تونل است. به بیانی دیگر، زون پلاستیک ناحیه‌ای است پیرامون تونل که پس از احداث آن ایجاد شده و منجر به شکل گرفتن ناپیوستگی‌های جدید در توده‌های سنگی اطراف تونل و به‌تبع عاملی جهت افزایش تراوایی این توده‌ها (Zhang et al., 2021) می‌شود.

برای تعیین و تحلیل زون پلاستیک در کیلومترهای مختلف مسیر تونل از نرم‌افزار Phase2 استفاده شد. توده سنگ‌های دربرگیرنده تونل به‌عنوان یک محیط پیوسته با پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ در نظر گرفته شده‌است. برای هر مدل، ضمن تعریف هندسه فضای مربوطه و میزان بار ثقلی حاصل از وزن روباره، شرایط تنش و پارامترهای مقاومت برشی و تغییر شکل‌پذیری، تعیین و در تحلیل به کار گرفته شده‌است. ضمناً با

جدول ۴. تعیین شعاع زون پلاستیک با استفاده از نرم‌افزار Phase2
 Table 4. Determining The Plastic Zone Radius Using Phase 2 Software

مترای مسیر تونل (متر) Tunnel Length (m)		زون پلاستیک Plastic Zone	مترای مسیر تونل (متر) Tunnel Length (m)		زون پلاستیک Plastic Zone	مترای مسیر تونل (متر) Tunnel Length (m)		زون پلاستیک Plastic Zone	مترای مسیر تونل (متر) Tunnel Length (m)		زون پلاستیک Plastic Zone
از From	تا To		از From	تا To		از From	تا To		از From	تا To	
۰	۱۳۲	۰/۰۰۰۰	۱۸۲۷۹	۱۹۰۰۰	۰/۳۹۷۵	۲۸۱۲۹	۲۸۲۴۰	۰/۰۰۰۰	۳۴۱۹۳	۳۴۲۷۹	۰/۰۰۰۰
۱۳۲	۶۲۲	۰/۰۰۰۰	۱۹۰۰۰	۱۹۴۹۰	۰/۳۱۷۵	۲۸۲۴۰	۲۸۳۵۵	۰/۰۶۷۵	۳۴۲۷۹	۳۴۳۴۷	۰/۰۰۰۰
۶۲۲	۸۵۳	۰/۰۰۰۰	۱۹۴۹۰	۱۹۹۸۱	۰/۲۶۷۵	۲۸۳۵۵	۲۸۴۷۰	۰/۰۵۷۵	۳۴۳۴۷	۳۴۴۸۲	۰/۰۰۰۰
۸۵۳	۱۴۰۵	۰/۰۰۰۰	۱۹۹۸۱	۲۰۲۳۸	۰/۲۲۷۵	۲۸۴۷۰	۲۸۸۵۹	۰/۰۶۷۵	۳۴۴۸۲	۳۴۶۷۰	۰/۰۰۰۰
۱۴۰۵	۱۶۵۶	۰/۰۰۰۰	۲۰۲۳۸	۲۰۸۷۱	۰/۳۶۷۵	۲۸۸۵۹	۲۹۳۸۹	۰/۲۲۷۵	۳۴۶۷۰	۳۴۷۶۹	۰/۰۰۷۵
۱۶۵۶	۱۸۲۵	۰/۰۰۰۰	۲۰۸۷۱	۲۲۰۰۶	۰/۹۶۷۵	۲۹۳۸۹	۲۹۵۲۰	۰/۰۰۰۰	۳۴۷۶۹	۳۵۱۵۰	۰/۰۰۰۰
۱۸۲۵	۲۰۹۲	۰/۰۰۰۰	۲۲۰۰۶	۲۳۱۴۱	۰/۸۶۷۵	۲۹۵۲۰	۲۹۷۶۰	۰/۰۰۰۰	۳۵۱۵۰	۳۵۲۵۷	۰/۰۰۰۰
۲۰۹۲	۲۷۴۳	۰/۰۰۰۰	۲۳۱۴۱	۲۴۵۱۵	۰/۴۴۷۵	۲۹۷۶۰	۲۹۸۸۶	۰/۰۰۰۰	۳۵۲۵۷	۳۵۳۷۷	۰/۰۰۰۰
۲۷۴۳	۲۹۰۱	۰/۰۳۲۵	۲۴۵۱۵	۲۴۸۵۲	۰/۴۲۷۵	۲۹۸۸۶	۳۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۳۵۳۷۷	۳۵۵۹۶	۰/۰۰۰۰
۲۹۰۱	۴۶۸۰	۰/۰۰۰۰	۲۴۸۵۲	۲۵۱۱۷	۰/۰۴۷۵	۳۰۰۰۰	۳۰۱۲۰	۰/۱۳۷۵	۳۵۵۹۶	۳۵۷۲۴	۰/۰۰۰۰
۴۶۸۰	۶۷۱۴	۰/۰۱۲۵	۲۵۱۱۷	۲۶۱۳۱	۰/۱۳۷۵	۳۰۱۲۰	۳۰۴۴۰	۰/۰۰۰۰	۳۵۷۲۴	۳۵۸۷۸	۰/۰۰۰۰
۶۷۱۴	۸۱۹۸	۰/۰۰۰۰	۲۶۱۳۱	۲۶۵۵۱	۰/۰۲۷۵	۳۰۴۴۰	۳۰۷۱۰	۰/۰۰۰۰	۳۵۸۷۸	۳۵۹۷۱	۰/۰۰۰۰
۸۱۹۸	۹۷۶۹	۰/۰۴۲۵	۲۶۵۵۱	۲۶۷۲۵	۰/۰۰۰۰	۳۰۷۱۰	۳۱۵۶۰	۰/۰۰۰۰	۳۵۹۷۱	۳۶۰۷۶	۰/۰۰۰۰
۹۷۶۹	۱۰۶۱۹	۱/۲۹۲۵	۲۶۷۲۵	۲۶۸۵۸	۰/۰۴۷۵	۳۱۵۶۰	۳۲۵۷۲	۰/۰۹۷۵	۳۶۰۷۶	۳۶۱۴۱	۰/۰۰۰۰
۱۰۶۱۹	۱۱۳۳۸	۱/۸۸۲۵	۲۶۸۵۸	۲۶۹۵۳	۰/۰۰۰۰	۳۲۵۷۲	۳۲۶۵۰	۰/۰۰۰۰	۳۶۱۴۱	۳۶۲۰۹	۰/۰۰۰۰
۱۱۳۳۸	۱۱۸۸۳	۰/۰۵۲۵	۲۶۹۵۳	۲۷۱۰۲	۰/۰۰۰۰	۳۲۶۵۰	۳۳۱۵۹	۰/۰۲۷۵	۳۶۲۰۹	۳۶۳۴۹	۰/۰۰۰۰
۱۱۸۸۳	۱۴۸۷۸	۰/۰۸۲۵	۲۷۱۰۲	۲۷۳۶۰	۰/۲۷۷۵	۳۳۱۵۹	۳۳۵۲۰	۰/۰۰۰۰	۳۶۳۴۹	۳۶۴۲۹	۰/۰۰۰۰
۱۴۸۷۸	۱۵۱۰۴	۰/۲۶۲۵	۲۷۳۶۰	۲۷۷۵۳	۰/۰۰۰۰	۳۳۵۲۰	۳۳۷۰۲	۰/۰۰۰۰	۳۶۴۲۹	۳۶۵۹۰	۰/۰۰۰۰
۱۵۱۰۴	۱۶۵۵۹	۰/۲۱۲۵	۲۷۷۵۳	۲۷۸۷۶	۰/۰۰۰۰	۳۳۷۰۲	۳۳۹۷۵	۰/۰۰۰۰	۳۶۵۹۰	۳۶۷۰۳	۰/۰۰۰۰
۱۶۵۵۹	۱۷۰۰۰	۰/۱۵۲۵	۲۷۸۷۶	۲۷۹۷۰	۰/۰۰۰۰	۳۳۹۷۵	۳۴۱۸۶	۰/۰۰۰۰	۳۶۷۰۳	۳۶۹۳۷	۰/۰۰۰۰
۱۷۰۰۰	۱۸۲۷۹	۰/۱۲۷۵	۲۷۹۷۰	۲۸۱۲۹	۰/۰۶۷۵	۳۴۱۸۶	۳۴۱۹۳	۰/۰۳۷۵	۳۶۹۳۷	۳۷۸۵۷	۰/۰۰۰۰



شکل ۹. وضعیت شکستگی‌ها و گسل‌های برداشت شده در مطالعات صحرایی پیرامون محور تونل و موقعیت منابع آبی
Fig. 9. The Location of Fractures and Faults Measured in Field Studies around the Tunnel Axis and the Location of Groundwater Resources

نوع چشمه (ST)

بارندگی و دیگر منابع تغذیه و مشخصات هیدرولیکی لایه آبدار نیز بستگی دارد. بر این اساس، اکثر چشمه‌های منطقه در زمره درجات ۵ و ۶، و برخی از چشمه‌ها در درجات ۷ و ۸ این طبقه‌بندی قرار می‌گیرند (شکل ۱۰). کم آبی چشمه‌ها نشان می‌دهد که علی‌رغم تک تونیک فعال منطقه، گسترش در زه و شکاف‌ها و مجاری باز در منطقه خیلی زیاد نیست، جریان‌ات افشان بوده و عمده چشمه‌ها از نوع سطحی هستند.

فاصله چشمه از محور تونل (DT)

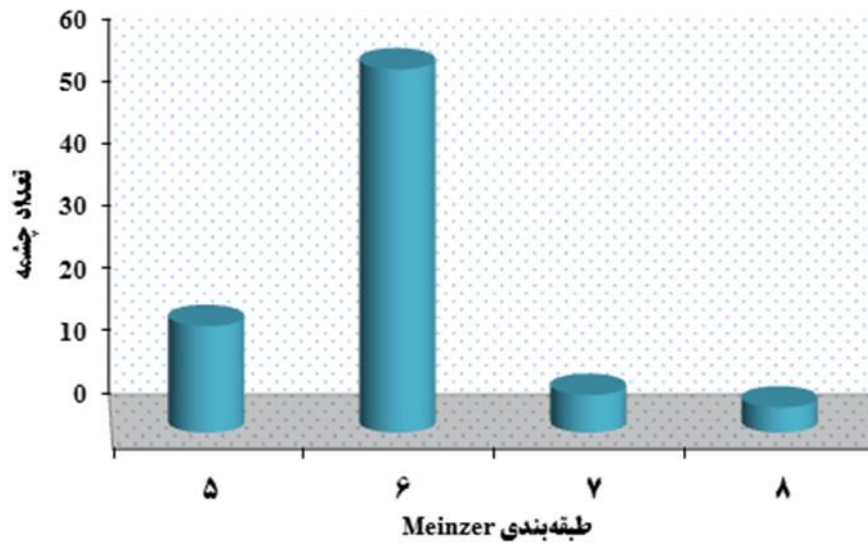
آبدهی چشمه‌ها بر حسب میزان دوری و نزدیکی به مسیر تونل از تأثیرپذیری متفاوتی برخوردار است. به‌طور کلی هرچه فاصله چشمه از محور تونل دورتر باشد کمتر تحت تأثیر احداث این سازه قرار می‌گیرد. شکل ۱۱ فاصله منابع آبی از محور تونل را نشان می‌دهد.

چشمه‌ها از لحاظ میزان آبدهی به سه دسته: ۱- چشمه‌هایی که از آبخوان محلی تغذیه می‌شوند، به‌صورت سطحی می‌باشند و آبدهی آن‌ها کمتر از یک لیتر بر ثانیه است، ۲- چشمه‌هایی که از یک جریان عمیق با ذخیره بالا تغذیه می‌شوند و آبدهی آن‌ها متجاوز از چند لیتر بر ثانیه است، و ۳- چشمه‌های حد واسط که آبدهی متوسطی دارند، تقسیم می‌شوند. در حقیقت هر چقدر چشمه از مخزن عمیق‌تر تغذیه گردد، بیش‌تر متأثر از حفر تونل خواهد بود.

مینزر (Meinzer, 1923) چشمه‌ها را بر اساس آبدهی به هشت طبقه تقسیم کرده است (جدول ۵). بر طبق این طبقه‌بندی چشمه‌های با آبدهی بالا (درجات بالا) اکثراً در سازندهایی با نفوذپذیری بالا، مثل سازندهای آهکی دارای حفرات انحلالی بالا، رسوبات آبرفتی دانه درشت یا در بازالت‌های متخلخل تشکیل می‌شود. مقدار آبدهی چشمه‌ها به بزرگی منطقه تغذیه بالادست آن‌ها، میزان

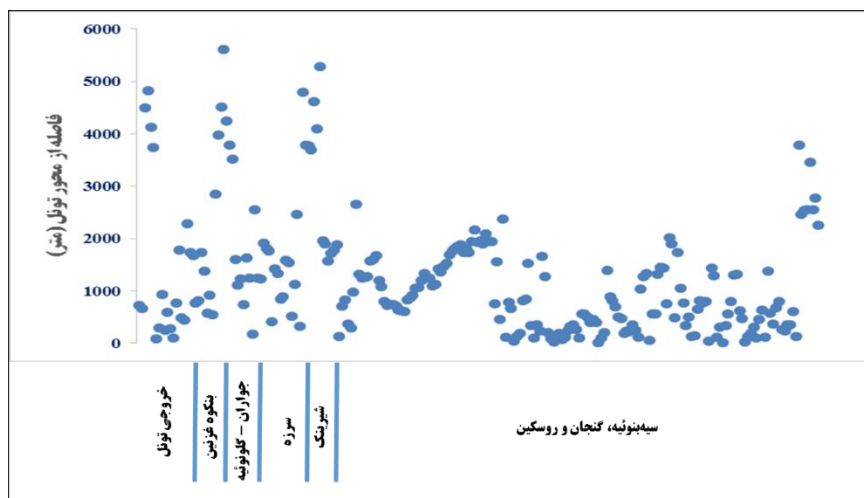
جدول ۵. طبقه‌بندی مینزر (Meinzer, 1923) برای چشمه‌ها
 Table 5. Meinzer's Classification (Meinzer, 1923) for Springs

رده چشمه Spring Class	دبی چشمه Spring Discharge
۱	>۲۸۰۰
۲	۲۸۰-۲۸۰۰
۳	۲۸-۲۸۰
۴	۶/۳-۲۸
۵	۰/۶۳-۶/۳
۶	۰/۰۶۳-۰/۶۳
۷	۰/۰۰۸-۰/۰۶۳
۸	<۰/۰۰۸



شکل ۱۰. طبقه‌بندی چشمه‌های منطقه بر اساس طبقه‌بندی مینزر

Fig 10. Classification of Springs in The Region Based on The Meinzer's Classification



شکل ۱۱. فاصله منابع آبی از محور تونل

Fig 11. The Distance of Groundwater Resources from the Tunnel Axis

دارند. بنابراین، شاخص IF از اهمیت بالایی در خشک شدن منابع آبی منطقه برخوردار است. در این میان، تنها منابع آبی محدود جواران - گلونوئیه اثر تکنیکی کمتری از محیط گرفته‌اند. همان گونه که بیان شد نوع منبع آبی اعم از سطحی یا عمقی (یا حد فاصل این دو) تأثیر مهمی در خشک شدگی آن خواهد داشت. بررسی‌ها نشان می‌دهد که عمده چشمه‌ها از نوع سطحی هستند و جریانات کانالی دارای چشمه‌ها با آبدهی بزرگ در این محدوده وجود ندارد. بنابراین، اکثر چشمه‌ها و قنات‌های واقع در محدوده مطالعاتی، شاخص ST برابر با ۰/۵ را به خود اختصاص داده‌اند. پارامتر فاصله منبع آبی از محور تونل در این روش (DT)، نشان می‌دهد که چشمه‌ها و قنات‌ها در فواصل روی محور تونل تا فاصله بیش از ۵ کیلومتر از آن قرار دارند و شاخص در بازه عددی ۰ تا ۱ جای گرفته است.

احتمال خشک‌شدگی و یا کاهش آبدهی منابع آبی پیرامون مسیر تونل

با توجه به تعریف پارامترهای بررسی‌شده، منابع آبی مسیر تونل مورد ارزیابی نهایی قرار گرفته و به هر یک از پارامترهای ذکر شده، در منابع آبی مسیر تونل ارزش‌دهی صورت گرفت. این ارزش‌دهی با توجه به محیط سنگی دربرگیرنده تونل و وضعیت هیدروژئولوژی چشمه‌ها و قنات‌های منطقه و تخصیص امتیازی درخور به هر یک از این عوامل صورت گرفت، نتایج DHI به صورت دایره‌ای در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. دایره‌های بزرگ‌تر نشانگر DHI بزرگ‌تر و در نتیجه افزایش احتمال بیشتر تأثیرپذیری آبدهی منبع آبی می‌باشد. بر این اساس، احتمال کاهش آبدهی منابع آبی منطقه (شامل چشمه و قنات) در اثر حفر تونل قابل‌ملاحظه بوده و احتمالاً یک سوم از چشمه‌ها با خشک شدگی کامل مواجه می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که از کل منابع آبی پیرامون تونل، ۵۲ درصد با شرایط کاهش بخشی و کمی بیش از ۱ درصد با شرایط کاهش بسیار اندک مواجهند. در محدوده‌های جواران - گلونوئیه و نیز بنکوه - غزنین، تمامی منابع آبی در این دو رده قرار دارند و در صورت حفر تونل، چشمه‌ها با شرایط عادی و غیر بحرانی مواجهند. در محدوده خروجی تونل، شاخص DHI بین ۰/۱ تا بیش از ۱ متغیر است و برخی از چشمه‌ها با احتمال بالای خشک شدگی (خشک شدگی کامل) مواجه هستند (شکل ۱۳). چشمه‌ها

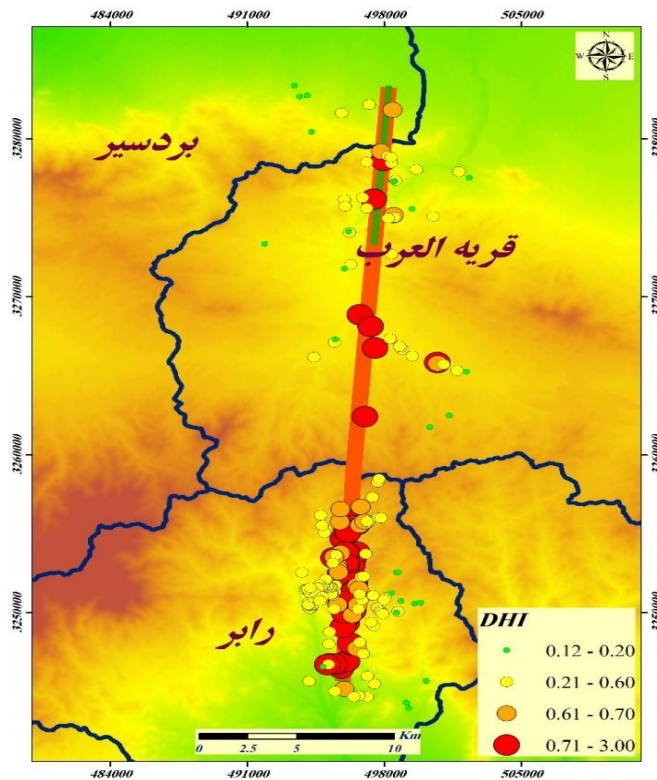
ارزیابی عوامل مؤثر بر احتمال خشک‌شدگی و یا کاهش آبدهی چشمه‌ها

در این تحقیق از روش دمتیس به منظور ارزیابی احتمال تغییرات آبدهی چشمه‌ها بر اثر حفر تونل به عنوان یک روش پیشنهادی استفاده شده است. در روش مذکور، از سه متغیر سیستم مهندسی سنگ (FF, OV, PZ, MK) و سه متغیر اساسی که خصوصیات خود چشمه (منبع آبی) را دربر می‌گیرند (DT, ST, IF)، استفاده گردیده است که هر کدام شرایط خاصی را ارائه می‌نمایند. مقادیر شاخص FF از روی RQD سنگ‌های مسیر تونل برآورد شده است. نتایج نشان می‌دهد که در چشمه‌های محدوده خروجی تونل و جواران، همچنین محدوده سرزه و شیرینک FF دارای مقادیر نسبتاً کم ۰/۱ تا ۰/۲ متغیر است. این در حالی است که در محدوده بنکوه - غزنین و گلونوئیه این مهم به میزان ۰/۲ افزایش یافته در محدوده سیه‌بنوئیه، گنجان و روسکین مقادیر بالاتر رفته تا ۰/۳۸ نیز می‌رسد. این تحلیل نشان دهنده اثر بیشتر این عامل در بخش جنوبی تونل خواهد بود.

مقادیر نفوذپذیری در مسیر تونل (شاخص MK) از آزمایشات لوژان به دست آمده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر نفوذپذیری در بیش از ۸۰ درصد گمانه‌های محفوره در محدوده مطالعاتی ۳ لوژان می‌باشد. شاخص MK برآورد شده در محدوده مطالعاتی از ۰ تا ۰/۴ متغیر است. بیشترین میزان این شاخص متعلق به محدوده سیه‌بنوئیه، گنجان و روسکین و کمترین آن متعلق به محدوده جواران است. ضخامت روباره هر چشمه (OV) با توجه به توپوگرافی منطقه و محدوده اطراف چشمه‌ها و ارتفاع محور تونل از سطح دریا‌های آزاد، تعیین شده است. مقادیر این شاخص در محدوده مطالعاتی از ۰/۱ تا ۰/۵ برآورد شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد شاخص ۰/۱ با روباره بیش از ۲۰۰ متر به اکثر چشمه‌های محدوده مطالعاتی تعلق دارد. مقادیر شاخص زون پلاستیک (PZ) با استفاده از نرم‌افزار phase2 ارائه شده است. بر این اساس، شاخص ۰ بیشترین تعداد را در این کلاس به خود اختصاص داده است. حداکثر شعاع زون پلاستیک به شعاع ۱۰ متری می‌رسد و این شاخص اهمیت چندانی در برآورد پارامتر خشک شدگی ندارد. محدوده مطالعاتی از نظر تکنیکی بسیار فعال است به شرحی که بیش از ۸۰ درصد چشمه‌ها در موقعیت برخورد به زون گسلی قرار

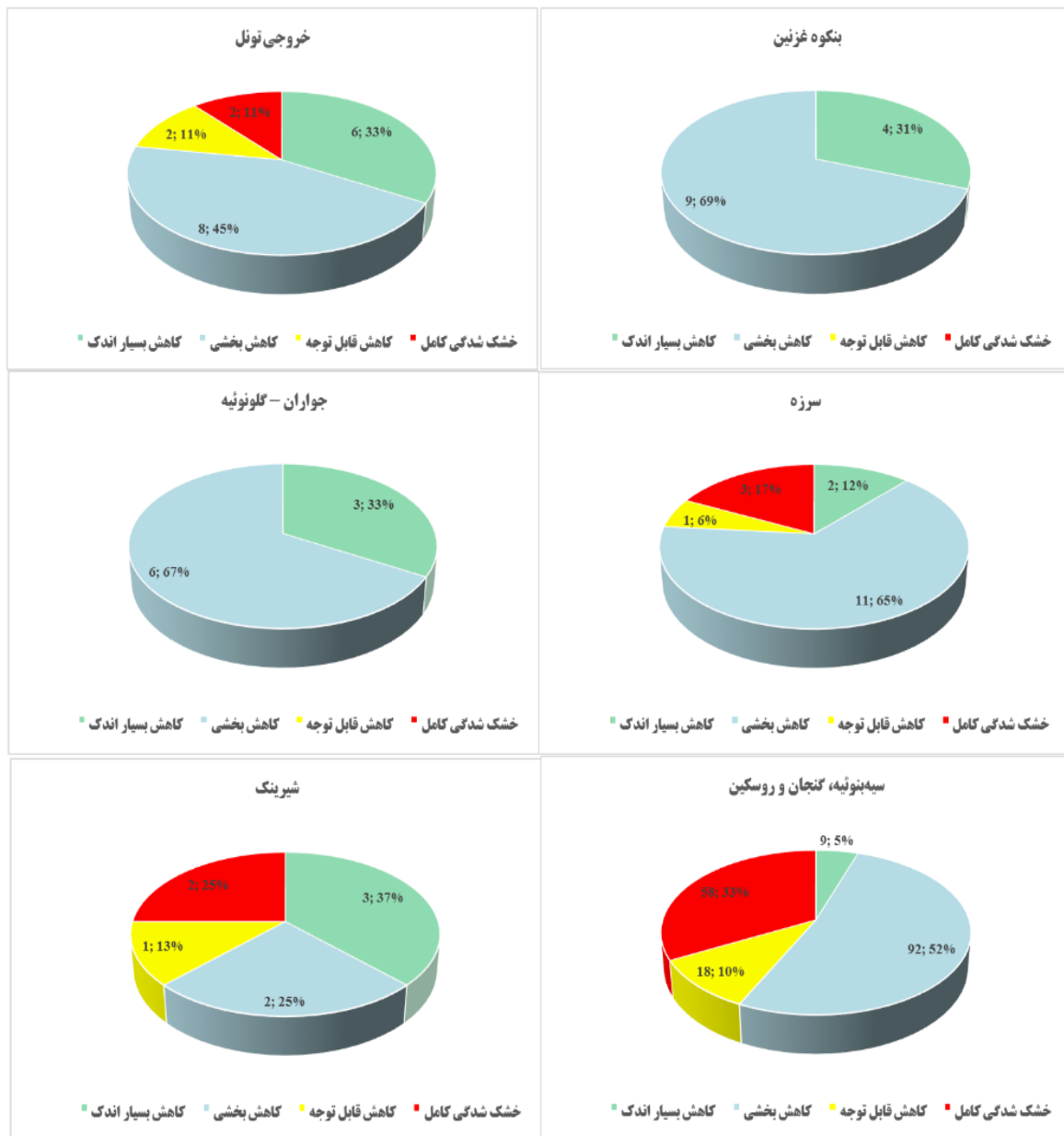
چشمه‌های محدوده سیه‌بنوئیه-گنجان-روسکین تشکیل داده‌اند که اکثراً در نزدیکی محور تونل قرار دارند. این خود دلیلی مبرهن بر اثر بیشتر حفاری بر منابع آبی این محدوده خواهد بود به شرحی که یک سوم این منابع آبی با خطر خشکیدگی کامل مواجهند.

و قنات‌های محدوده‌های سرزه، شیرینک و سیه‌بنوئیه-گنجان-روسکین از شرایط حاد تری برخوردارند به شرحی که بیش از یک سوم منابع آبی محدوده آخر دچار خشک شدگی کامل خواهند شد (شکل ۱۳). باید توجه داشت که بیش از ۷۰ درصد منابع آبی پیرامون تونل را



شکل ۱۲. نتایج شاخص DHI برای منابع آبی محدوده مورد مطالعه

Fig 12. Results of The DHI Index for Groundwater Resources of The Study Area



شکل ۱۳. وضعیت کاهش آبدهی یا خشک شدگی چشمه‌ها در محدوده‌های مطالعاتی

Fig 13. The Percentage of Groundwater Depletion or drying up of Groundwater Resources in The Study Areas

روش پارامتری دمتیس و همکاران (Dematteis et al., 2001) مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس مطالعات انجام‌گرفته، محدوده مطالعاتی از نظر تکتونیکی بسیار فعال می‌باشد به شرحی که تقاطع گسل و محل ظهور چشمه‌ها به‌عنوان یکی از پارامترهای مهم روش دمتیس در آن بسیار مشهود است. از طرفی، آزمایش لوژان در غالب واحدهای زمین‌شناسی، مقادیر لوژن کمتر از یک را نشان می‌دهد و تنها در حالتی که مقدار درزه‌داری توده سنگ زیاد می‌شود مقدار لوژان نیز افزایش می‌یابد. بنابراین، زون‌های هجوم آب به تونل یا به‌عبارتی دیگر

نتیجه‌گیری

پروژه تونل انتقال آب کرمان به طول تقریبی ۳۸ کیلومتر، انتقال آب از سد صفا به شهر کرمان را میسر می‌سازد. این تونل در بخش‌هایی از دو حوضه آبریز هامون - جازموریان در جنوب و کویر در انجیر در شمال قرار دارد. اگر چه آبدهی منابع آبی واقع در مسیر این تونل، متوسط و کم است اما شناسایی ۲۴۲ دهنه منبع آبی پیرامون آن حاکی از اهمیت ویژه این منابع آبی از نظر هیدروژئولوژیکی و به‌تبع مخاطرات اجتماعی است. بر این اساس، احتمال خشک‌شدگی چشمه و قنات‌های پیرامون تونل بر اساس

چشمه‌ها را کاهش می‌دهد. چشمه‌های واقع در بخش جنوبی در فواصل نزدیک‌تر نسبت به محور تونل قرار دارند و احتمال خشکیدگی بیشتری دارند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که احتمال کاهش آبدهی منابع آبی منطقه در اثر حفر تونل قابل‌ملاحظه بوده و احتمالاً یک سوم از منابع آبی با خشک‌شدگی کامل مواجه می‌شوند. این اثر در چشمه‌های بخش جنوبی تونل مشهود تر است؛ بنابراین، مخاطرات اجتماعی در این بخش بیشتر خواهد بود.

زون‌های کاهش آبدهی چشمه‌ها مناطقی است که تکتونیک اثر بیشتری بر آن گذاشته است. پارامتر مهم دیگر در این روش، ارتباط بین چشمه و تونل از نظر تراز ارتفاعی است که بیانگر میزان بار آبی و روباره خواهد بود. به هر حال، با افزایش مقدار ارتفاع روباره میزان آب ورودی به تونل و احتمال خشکیدگی چشمه نیز کاهش می‌یابد. شرایط زون پلاستیک با شعاع کمتر از ۱۰ متر و نوع چشمه که بیشتر از نوع چشمه‌های سطحی و محلی هستند مخاطرات هیدروژئولوژیکی و احتمال خشکیدگی

منابع

- Lotfipour, A., Hassanpour, J., Cheshomi, A., & Morsali, M. (2017). *Determination of the effect of tunnel boring activities on Sarab-Garm spring drawdown in Bazi-Deraz water conveyance tunnel*. The 35th Earth Sciences Meeting, 19-21 Feb. (2017), The Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Tehran, Iran. [In Persian].
- Meinzer, O. E. (1923). *Outline of ground-water hydrology, with definitions*, Publication Subtype USGS Numbered Series, Water Supply Paper 494. U.S. Geological Survey, Washington, D.C., USA.
- Morsali, M., Nakhaie, M., Rezaie, M., Naseri, H. R., & Hassanpour, J. (2018). The comparison of effective variables and methods in water inflow into hard rock tunnels (Case study: Karaj dam-Tehran water conveyance tunnel). *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 27(107), 113-122. [in Persian]
- Peng, F. L., Qiao, Y. K., & Yang, C. (2023). Building a knowledge graph for operational hazard management of utility tunnels. *Expert Systems with Applications*, 223, 119901.
- Raposo, J. R., Molinero, J., & Dafonte, J. (2010). Quantitative evaluation of hydrogeological impact produced by tunnel construction using water balance models, *Engineering Geology*, 116(3-4), 323-332.
- Ren, J., & Guo, P. (2014). A New Mathematical Model for Pressure Transient Analysis in Stress-Sensitive Reservoirs, *Mathematical Problems in Engineering*, 1-14.
- Shafiei, B. (2010). Lead isotope signatures of the igneous rocks and porphyry copper deposits from the Kerman Cenozoic magmatic arc (SE Iran), and their magmatic-metallogenetic implications, *Ore Geol Rev* 38:27-36.
- Shafiei, B., Haschke, M., & Shahabpour, J. (2009). Recycling of orogenic arc crust triggers porphyry Cu mineralization in Kerman Cenozoic arc rocks, southeastern Iran. *Mineralium Deposita*, 44, 265-283.
- Taromi, M., & Asadnabizadeh, M. (2017). Interaction Effects of Sabzkuh Tunnel Excavation
- Dematteis, A., Kalamaras, G., & Eusebio, A. (2001). A system approach for evaluating springs drawdown due to tunneling. In *World Tunnel Congress AITES-ITA, Patron, Bologna*, 1, 257-264.
- Dimitrijevic, M. D. (1973). *Geology of Kerman Region*: Institute for Geological and Mining Exploration and Institution of Nuclear and Other Mineral Raw Materials, Beograd-Yugoslavia, Geological. *Survey of Iran, Rept Yu/52*.
- Font-Capó, J. (2012). *Interaction between groundwater and TBM (Tunnel Boring Machine) excavated tunnels*. PhD Thesis, Hydrogeology Group, (GHS) Institute of Environmental Assessment and Water Research (IDAEA), Spanish Research Council (CSIC), Dept Geotechnical Engineering and Geosciences, Polytechnic University of Catalonia, Catalonia, Spain.
- Golian, M., Abolghasemi, M., Hosseini, A., & Abbasi, M. (2021). Restoring groundwater levels after tunneling: a numerical simulation approach to tunnel sealing decision-making, *Hydrogeology Journal*, 29, 1611-1628.
- Hassanpour, J., Lotfipour, A., & Morsali, M. (2021). Introduction of an empirical classification system for evaluating tunneling impact on the discharge of springs (TIS) in the surrounding areas. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(7), 5725-5742.
- He, M., Zhang, Z., & Li, N. (2021). Prediction of fracture frequency and RQD for the fractured rock mass using drilling logging data. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80, 4547-4557.
- Houlsby, A. C. (1977). Engineering of grout curtains to standards. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103(9), 953-970.
- Jiang, Y., Zhou, F., Lin, J., Li, J., Qi, Y., Li, X.,... & Zhou, P. (2023). Evolution mechanism of tunnel water and sand inrush considering water-rich sandy dolomite hazard-causing structures. *Engineering Failure Analysis*, 153, 107554.

and Ground Water Resources: (Environmental Management Approach). *Journal of Environmental Geology*, 40, 83-95. [In Persian].

Vincenzi, V., Piccinini, L., Gargini, A., & Sapigni, M. (2022). Parametric and numerical modeling tools to forecast the hydrogeological impacts of a tunnel. *Acque Sotteranee-Italian Journal of Groundwater*, 11(1), 51-69.

Yoo, C. (2005). Interaction between tunneling and groundwater—numerical investigation using three dimensional stress–pore pressure coupled analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering*, 131(2), 240-250.

Zhang, J., Xi, C., Zhang Q., & Wang M. (2021). Study on Stability and Plastic Zone Distribution of Tunnel with Thin Carbonaceous Slate at Different Dip Angles, *Shock and Vibration*, 2021, 1-10.

Zhang, L., Zhao, D., Wu, J., Yang, W., Wang, W., & Xin, D. (2020). Prediction of water inflow in Tsingtao subsea tunnel based on the superposition principle. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 97, 103243.