

Research Article

Evaluation of hydrogeological impact of Taleghan Water Conveyance Tunnel excavation on the discharge of springs

Amir Saberinasr^{1*}, Majid Dashti Barmaki²

1- Geology group, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2- PhD, Department of Applied Geology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran. Expert of Fannavarán Tarh Jame Consulting Engineers, Tehran, Iran

Keywords: Discharge reduction, Taleghan water transfer tunnel, DHI and TIS methods, Groundwater resources.

1-Introduction

Taleghan Water Transfer Project is one of the water supply and development projects for drinking water needed for the provinces of Tehran and Alborz. The Taleghan water transfer tunnel is designed as a part of this project and is in the initial stages of implementation. The present study is focused on the eastern section of this tunnel, which is 15.9 km long. Predicting the hydrogeological impacts in the mechanized tunneling such as water inflow into the tunnel and its impact on the springs' discharge rate are essential tasks to perform before the design and construction of a tunnel. Therefore, the current study aim is to evaluate the hydrogeological impact of this Tunnel excavation (the eastern section with 15.9 km long) on the discharge of springs. So, 23 main and selected springs along the tunnel route have been investigated.

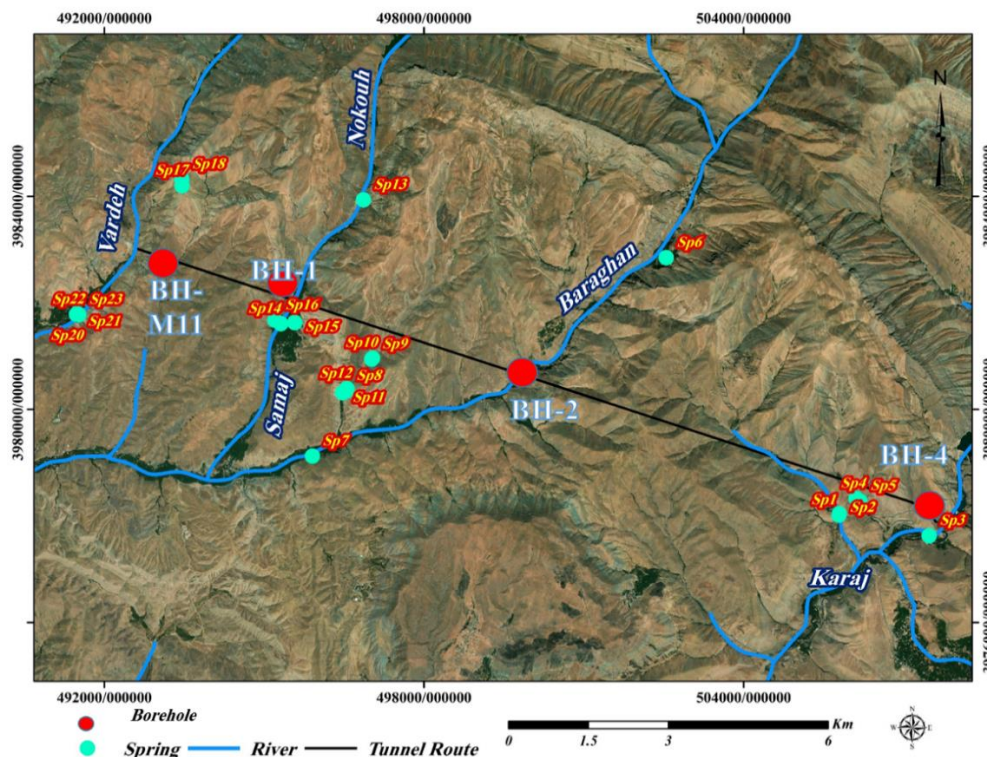


Fig. 1. Springs and boreholes of the study area

* Corresponding author: a.saberinasr@scu.ac.ir

DOI: 10.22055/aag.2024.47486.2463

Received: 2024-07-19

Accepted: 2024-11-12

2-Material and methods

There are a few methods for evaluating the risk of decreasing the springs' discharge rate including the Drawdown Hazard Index or DHI (Demattis et al., 2001) and Tunneling Impacts on Springs or TIS (Hassanpour et al., 2021).

2-1- DHI method

In the first method (DHI), parameters such as fracture frequency (FF), main faults intersection (IF), plastic zones (PZ), distance from tunnel (DT), spring type (ST), overburden thickness (OV), and permeability (MK) is used to evaluate the effect of tunnel excavation on springs. The weighting of these parameters is described in the following equation (Eq1). The results obtained in this method are classified into four categories (Table 1).

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

Table 1. The relationship between DHI index and springs discharge variation

DHI Value	< 0.2	0.2 – 0.6	0.6 – 0.7	> 0.7
Description	Very low reduction in spring discharge	Partial reduction in spring discharge	Considerable reduction in spring discharge	Complete drying of spring

In the second method (TIS), the model was developed based on four important parameters such as the volume of water inflow toward the tunnel (TW), the distance between spring and tunnel (HD), hydraulic connectivity (HC), and aquifer recharge potential (AR). The weighting of these parameters and their overlap is described in the following equation (Eq 2). The results obtained in this method are classified into six categories (Table 2).

$$TIS=0.4 R_{TW}K_IK_q+0.15R_{HD}+0.4 R_{HC}+0.05R_{AR} \quad \text{Equation 2}$$

Table 2. The relationship between TIS index and springs discharge variation

TIS	< 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8	> 8
Class numer	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	T-6
Hazard of reduction in spring discharge	Very low	Low	Moderate	High	Very high	Ext. high
Spring behavior	No reduction	Possible but not very serious reduction	Reduction in spring discharge	Reduction in spring discharge, may be considerable	Considerable reduction in spring discharge	Complete drying of spring

3-Results and discussions

Based on DHI, the probability of drying up of springs, it seems that about half of the springs are in the range of partial reduction in spring discharge, and very low reduction in spring discharge will occur in three water resources (Sp6, Sp17, and Sp18). On the other hand, complete drying and considerable reduction in spring discharge may occur in 7 and 2 springs, respectively (Fig 2).

In the TIS model, more stable conditions are observed in terms of underground water resources affected by tunnel excavation. The results show that about half of the springs are in the range of possibility of Reduction in spring discharge (moderate risk) and only four springs (Sp6, Sp13, Sp17, and Sp18) will face the possibility of conditions no reduction of spring discharge. On the other hand, no water source will face complete drying conditions in this index, and a considerable reduction in spring discharge may occur in 4 springs (Fig 3).

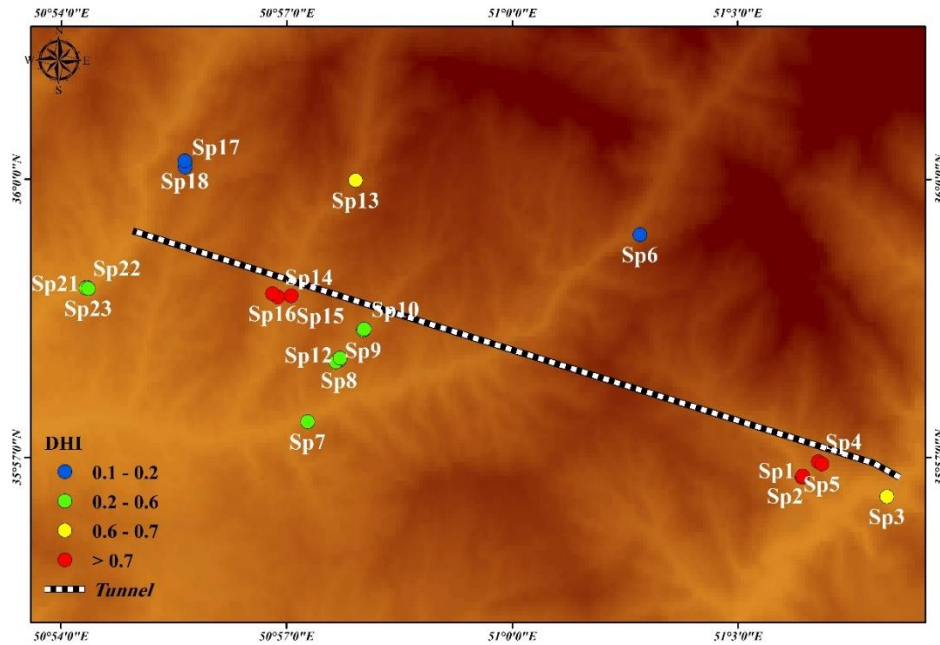


Fig. 2. Distribution map of DHI index in the study area

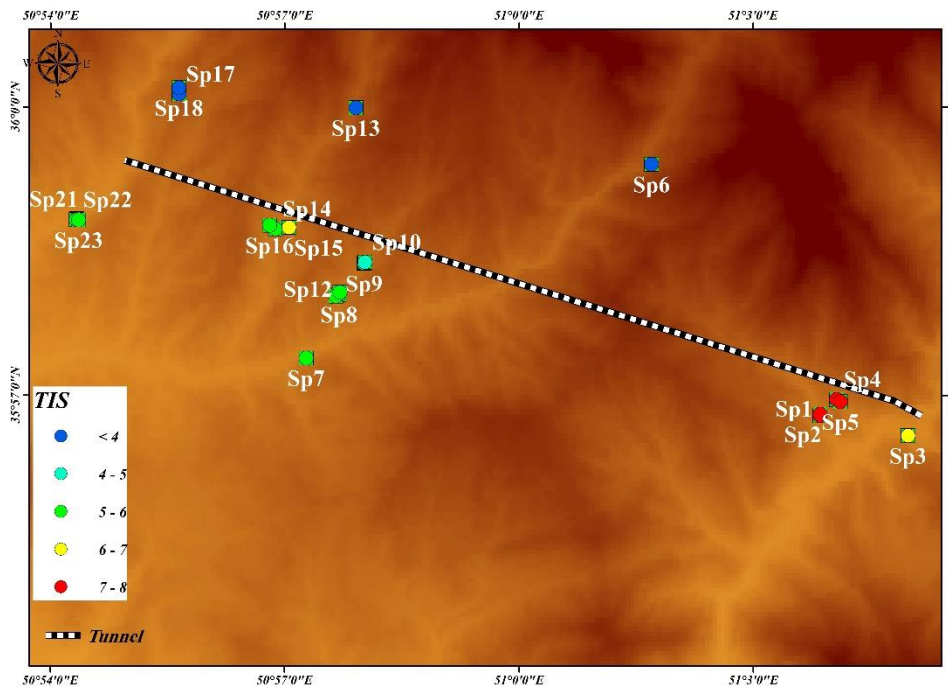


Fig. 3. Distribution map of TIS index in the study area

4-Conclusion

The results of this study show that the probability of the decrease in the spring discharge in the region due to tunnel excavation in both methods is largely the same, although the DHI method expresses more critical conditions. The use of DHI and TIS parametric methods to investigate possible future conditions of groundwater resources caused by the excavation of water transfer tunnels and other similar structures will help to predict social risks during the project.

5-References

- Dematteis, A., Kalamaras, G., Eusebio, A., 2001. A system approach for evaluating springs drawdown due to tunneling -AITES-ITA 2001 World Tunnel Congress: Progress in tunnelling after 2000 – 257-264 PP. Milano, 10-13 June 2001
- 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. Bulletin of Engineering Geology and the Environment 80(7), 5725-5742.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Saberinasr, A., Dashti Barmaki, M., 2024. Evaluation of hydrogeological impact of Taleghan Water Conveyance Tunnel excavation on the discharge of springs. Adv. Appl. Geol. 14(3), 829-854.

DOI: 10.22055/aag.2024.47486.2463

URL: https://aag.scu.ac.ir/article_19723.html

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

ارزیابی تأثیر هیدروژئولوژیک حفاری تونل انتقال آب طالقان بر آبدهی چشمه‌ها

امیر صابری نصر*

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

مجید دشتی برمکی

گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، کارشناس شرکت مهندسی مشاور فناوران طرح جامع

* a.saberinasr@scu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۲

چکیده

پیش‌بینی نادرست کاهش آبدهی چشمه‌ها در اثر حفر تونل می‌تواند چالش‌های اجتماعی، فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی ایجاد کند. از این رو، در این تحقیق تأثیر حفاری تونل انتقال آب طالقان - مقطع شرقی - بر چشمه‌های اطراف با روش‌های DHI و TIS بررسی شده است. مطالعه‌ای بر روی ۲۳ چشمه اطراف تونل انجام شد. در روش DHI، متغیرهای مختلفی مانند فراوانی شکستگی، نفوذپذیری توده سنگ، ضخامت روباره، شعاع زون پلاستیک، برخورد با گسل‌های اصلی، نوع چشمه و فاصله چشمه از تونل در یک مدل کاملاً جفت شده ادغام شدند. همچنین مدل TIS بر اساس چهار پارامتر مهم شامل حجم آب ورودی به سمت تونل، فاصله چشمه و تونل، ارتباط هیدرولیکی و پتانسیل تغذیه آبخوان ادغام شد. نتایج نشان داد که بر اساس روش TIS هیچ منبع آبی به‌طور کامل خشک نخواهد شد، در حالی که در روش DHI، هفت چشمه در منطقه مورد مطالعه خشک خواهند شد. در کل، نتایج نشان می‌دهد که روش DHI شرایط بحرانی‌تری را نسبت به روش TIS در نظر می‌گیرد. در نهایت، با توجه به اهمیت پیش‌بینی تأثیر تونل بر منابع آبی اطراف، استفاده ترکیبی از روش‌های DHI و TIS پیش از حفاری تونل‌های انتقال آب پیشنهاد می‌شود.

کلمات کلیدی: کاهش آبدهی، تونل انتقال آب، روش‌های DHI و TIS، منابع آب زیرزمینی، طالقان

۱- مقدمه

زیرزمینی به‌طور مداوم کاهش یافته و مشکلاتی مانند عدم بهره‌وری بهینه چاه‌ها و چشمه‌های سطحی، کاهش آبدهی چشمه‌ها و قنات‌های پر آب بزرگ، خشک شدن مخازن آب سطحی، و نیز نشست زمین ایجاد می‌شود. همه این رخدادها عواقب جدی برای محیط‌زیست، مانند کاهش یا حتی ناپدید شدن پوشش گیاهی منطقه، و همچنین اثر منفی بر معیشت ساکنان منطقه دارد (Tang et al., 2023; Zhang et al., 2024). پیامدهای مخرب محیط‌زیستی، اقتصادی و اجتماعی ناشی از احداث چنین سازه‌هایی را 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 کاهش داد و حتی با پیش‌بینی صحیح از پیامدهای مخرب و مشکلات بسیار بدتر جلوگیری نمود. تجزیه و تحلیل آماری نشان می‌دهد که ۵۸ درصد از مخاطرات زمین‌شناسی در تونل‌ها توسط آب‌های زیرزمینی ایجاد می‌شود (Chen et al., 2023). به‌هرحال، اجرای هر پروژه ممکن است آثار مخربی به همراه داشته باشد؛

اگرچه تونل‌های انتقال آب در تمامی جوامع به ارتقای پیشرفت اجتماعی کمک می‌کنند، اما ممکن است منجر به تخریب محیط آب‌های زیرزمینی پیرامون شوند. به‌طور کلی، سازه‌های زیرزمینی زیر سطح ایستابی در معرض نشست و هجوم آب زیرزمینی هستند (Mossmark et al., 2017) و پیامدهای این امر در سازه‌های زیرزمینی متعددی در داخل کشور، نظیر تونل نوسود، کرمان، کانی سیب و ... تجربه و مورد مطالعه قرار گرفته است. از نظر تاریخی، مطالعات آب زیرزمینی مرتبط با طراحی و ساخت سازه‌های زیرزمینی بزرگ نظیر تونل‌های انتقال آب عمدتاً بر روش‌هایی برای کنترل جریان آب زیرزمینی در حین حفاری (آب ورودی به تونل) متمرکز شده‌اند. باین‌حال، در چند دهه اخیر، تأثیرات این‌گونه فعالیت‌ها بر محیط‌زیست به یک موضوع مهم تبدیل شده است (Liu et al., 2015). به عبارتی دیگر، حین حفاری چنین سازه‌هایی، حجم زیادی از آب‌های زیرزمینی هدر می‌رود که از آن تحت عنوان آب ورودی به تونل یاد می‌شود. همگام با هدررفت این آب‌ها، سطح آب‌های

اهمیت این منابع آبی برای مصارف شرب و کشاورزی اهالی منطقه، لازم است که پیش از ادامه حفاری و نزدیک شدن به این منابع آبی مهم، تأثیر حفاری تونل بر این منابع پیش‌بینی گردد تا در صورت امکان تدابیر لازم برای مدیریت آن اندیشیده شود. بنابراین هدف این مطالعه ارزیابی تأثیر حفاری بخش شرقی تونل انتقال آب طالقان بر منابع آب پیرامونی با دو روش مرسوم Dematteis و همکاران (Dematteis et al., 2001) و Hassanpour و همکاران (Hassanpour et al., 2021) است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- محدوده مورد مطالعه

قطعه شرقی تونل طالقان، به طول تقریبی ۱۵/۹ کیلومتر و قطر تمام‌شده داخلی ۳/۸ متر، به‌عنوان بخشی از سامانه کلی انتقال حقابه‌های آب شرب استان‌های البرز و تهران از سد طالقان طراحی شده است. منطقه مورد مطالعه واقع در استان البرز است که از غرب به برغان، ورده و آغشت، از شرق به سد امیرکبیر و رودخانه کرج، از شمال نیز به ارتفاعات البرز و روستاهای وامکوه، دروان و بریان چال و از جنوب به شهرهای کرج و رجایی‌شهر و روستاهای خوارس، درسر و سرهه محدود می‌شود. پرتال خروجی تونل قطعه شرقی، در مجاورت روستای خوزنکلا در محدوده بند تنظیمی سد امیرکبیر و پرتال ورودی در شمال شرق کردان، دره بالاتر از امامزاده عبدالقاهر، واقع گردیده است.

۲-۲- زمین‌شناسی عمومی و ساختاری منطقه مطالعاتی

گستره طرح بخشی از زون ساختاری البرز (البرز مرکزی) است. مطابق نظر Stocklin (۱۹۷۴)، ارتفاعات البرز مرکزی در محدوده مطالعاتی در زیرپهنه ترشیری جنوبی زون البرز مرکزی قرار می‌گیرد (شکل ۱). از مشخصات این زیرپهنه، توالی‌های بسیار ضخیم رسوبی- آتشفشانی ائوسن و راندگی و بالآمدگی آن در امتداد پهنه راندگی جنوبی ارتفاعات البرز است. در ائوسن میانی، این زیرپهنه به‌صورت یک حوضه رسوبی نسبتاً عمیق بوده است که در آن واحدهای رسوبی- آتشفشانی مختلف سازند کرج در محیط متلاطم مخروط‌افکنه‌های آبرفتی زیردریایی نهشته شده‌اند. از اواخر همین دوره، حوضه بسته شده و شروع به بالا آمدن نموده است. نرخ این بالآمدگی بسیار زیاد بوده و حتی در عهد حاضر نیز ادامه دارد، به‌طوری‌که راندگی واحدهای رسوبی- آتشفشانی سازند کرج بر روی نهشته‌های جوان کواترنری نیز در منطقه کاظم‌آباد در شرق کلاک گزارش

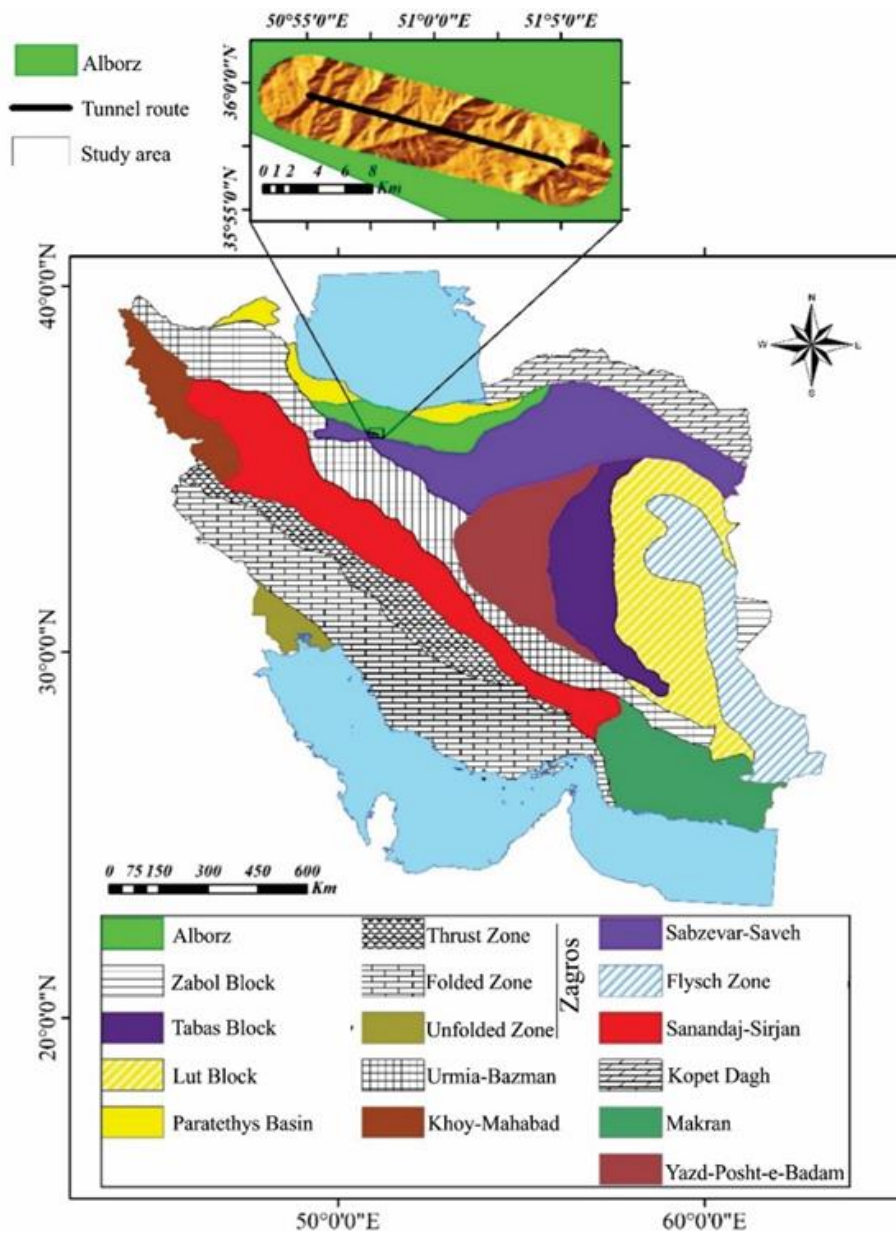
بنابراین، ضروری است که بررسی تأثیر آب ورودی به تونل بر تراز سطح ایستابی آبخوان و درنهایت منابع آبی پیرامون تونل در ابتدای پروژه‌ها انجام گیرد.

برای ارزیابی تأثیر آب ورودی به تونل بر تراز سطح ایستابی آبخوان و نیز منابع آبی پیرامون تونل (نظیر چاه، چشمه و قنات)، روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است که از جمله می‌توان به روش‌های مدل‌سازی، نظیر مدل بیلان آب (Raposo et al., 2010)، ماتریس ارزیابی اهداف اثرات زیست‌محیطی (Leopold, 1971)، مدل عددی (Yoo, 2005; Font-Capó, 2012; Zhang et al., 2020; Golian et al., 2021, Lv et al., 2022)، مدل‌های تصادفی (Gokdemir et al., 2022)، یا روش‌های پارامتریک نظیر روش ابتکاری Dematteis و همکاران (Dematteis et al., 2001) و روش تجربی Hassanpour و همکاران (Hassanpour et al., 2021)، و یا تلفیقی از این روش‌ها (Vincenzi et al., 2022) اشاره کرد. در این میان، روش‌های پارامتریک به دلیل اینکه از معادلات جریان آب زیرزمینی استفاده نمی‌کنند و برای هر پروژه با توجه به داده‌های در دسترس قابل ارزیابی هستند، و نیز در طول اجرای پروژه، قابلیت اصلاح دارند، روش‌های کاربردپذیرتری محسوب می‌شوند. این در حالی است که در مدل‌سازی عددی به حجم داده بیشتری (بارها و جریان‌های هیدرولیکی در گستره مناسب، تعیین شرایط مرزی، پیچیدگی‌های زمین‌شناسی و ...) نیاز است و اعتبار نتایج تا حد زیادی به کمیت و کیفیت داده‌ها و اثربخشی فرآیند کالیبراسیون بستگی دارد. طبق مطالعه Vincenzi و همکاران (Vincenzi et al., 2022) استفاده از روش عددی MODFLOW برای ارزیابی تأثیر یک تونل انحراف ۹/۵ کیلومتری برق‌آبی در سازندهای سخت (در آلپ) در نزدیک رودخانه Toce در شمال ایتالیا بر چشمه‌های مجاور آن نیازمند اطلاعات بسیاری بود که قابل دسترسی نیستند و مدل‌سازی عددی، نتایج قابل قبولی را به دست نمی‌دهد. از این رو، آن‌ها از روش پارامتریک DHI برای ارزیابی تأثیر تونل بر منابع آبی پیرامون استفاده کردند.

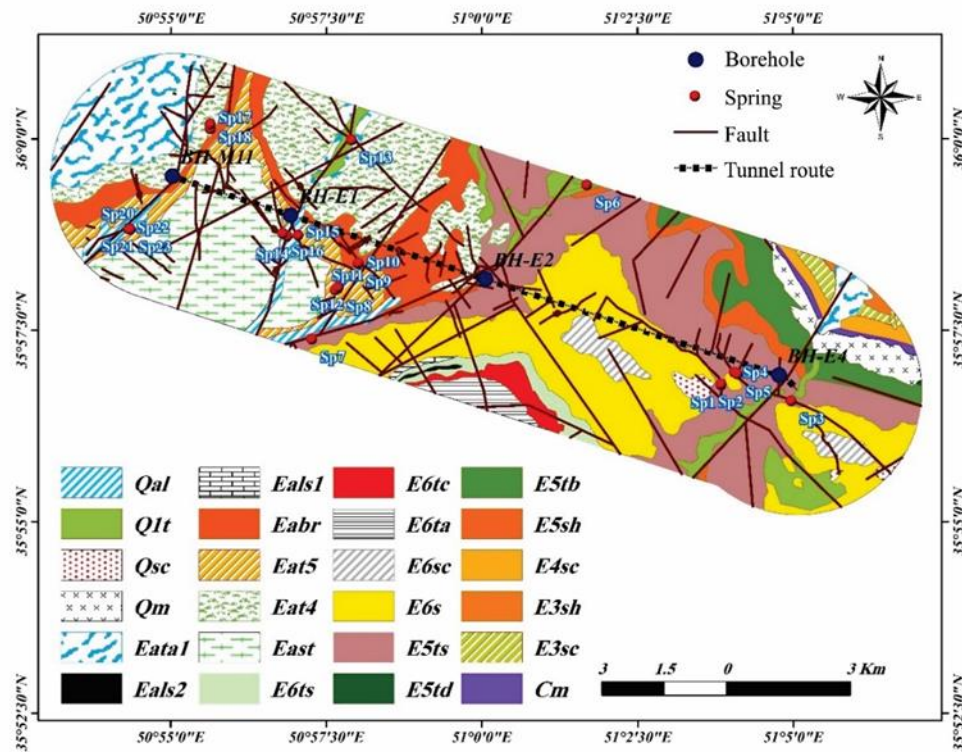
تونل انتقال آب طالقان به‌عنوان بخشی از سامانه انتقال حقابه‌های آب شرب استان‌های البرز و تهران از سد طالقان طراحی شده و در مراحل ابتدایی اجرا است. مطالعه حاضر بر روی قطعه شرقی این تونل به طول ۱۵/۹ کیلومتر متمرکز شده است. با توجه به وجود ۲۳ دهنه چشمه در مجاورت این تونل و

شمال تهران، راندگی باغستان، امامزاده داود، مشاء و طالقان است؛ اما در مقیاس محلی مشتمل بر دو نوع گسلش است. یک سیستم گسلش امتدادلغز در طول مسیر که دره‌های عمیق و دگرشکلی‌های کوچک را ایجاد کرده‌اند؛ و سیستم دیگر، گسلش معکوس که محدود به شرق محدوده هست و در ادامه به سمت غرب تحلیل می‌رود.

شده است (Berberian et al., 1993). مطابق شکل ۲، واحدهای سنگی گستره مورد مطالعه در مجموع از نهشته‌های رسوبی و آذرآواری از قبیل شیل، شیل توفی، توف سبز آبی، توف سبز تا سفید اسیدی، توف خاکستری، ماسه سنگ، ماسه توفی، آگلومرا، افق‌های اندکی از سنگ‌های آتشفشانی تشکیل شده که به بخش توف بالایی از سازند کرج تعلق دارند (جدول ۱). منطقه از نظر تکتونیکی و در مقیاس کلی متأثر از گسل‌های



شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعاتی در زون‌های ساختاری ایران
Fig. 1. The location of the study area in the structural zones of Iran



شکل ۲- نقشه هیدروژئولوژی محدوده مطالعاتی
Fig. 2. Hydrogeological map of the study area

جدول ۱- خصوصیات لیتولوژیکی محدوده مطالعاتی
Table 1. Lithological description of the study area

Row	Geological Unit	Lithology	Row	Geological Unit	Lithology
1	<i>Qal</i>	Recent alluvium and flood plains	13	<i>E6tc</i>	Green-yellow tuffite, conglomerate with intercalations of limestone
2	<i>Q1t</i>	Old terraces	14	<i>E6ta</i>	Porphyritic trachyandesite-trachybasalt
3	<i>Qsc</i>	Scree	15	<i>E6sc</i>	Sandstone, conglomerate, shale
4	<i>Qm</i>	Moraine	16	<i>E6s</i>	Grey-brown shale, siltstone and sandstone
5	<i>Eata1</i>	Trachyandesitic to trachytic lava and breccia	17	<i>E5ts</i>	Greenish tuff and tuffaceous siltstone
6	<i>Eals2</i>	Cream Nummulitic sandy tuffaceous limestone	18	<i>E5td</i>	Hyalotrachyandesite, trachyte-dacite, tuff breccia
7	<i>Eals1</i>	White Nummulitic bearing, oolitic limestone	19	<i>E5tb</i>	Green tuff, tuff breccia, tuffite with intercalations of tuffaceous siltstone
8	<i>Eabr</i>	Turbidites (braccia, tuff and tuffite)	20	<i>E5sh</i>	Shale with intercalations of tuffite and tuffaceous sandstone
9	<i>Eat5</i>	Green ash tuff, tuffite, tuffaceous siltstone and shale	21	<i>E4sc</i>	Sandstone, conglomerate, green tuff
10	<i>Eat4</i>	Silty and laminated tuff, shale and siltstone	22	<i>E3sh</i>	Shale with intercalations of tuffaceous sandstone and siltstone
11	<i>East</i>	Shale, laminated tuff, siltstone and tuffaceous sandstone	23	<i>E3sc</i>	Tuffaceous sandstone, microconglomerate with intercalation of tuffite
12	<i>E6ts</i>	Tuffaceous sandstone, yellowish platy tuffite, shale	24	<i>Cm</i>	Medium-thin bedded limestone with intercalations of shale

۲-۳- معرفی منابع آبی (چشمه) محدوده مطالعاتی

تونل انتقال آب طالقان در مسیر خود از چشمه‌های زیادی عبور می‌کند که عمدتاً مشتمل بر نشتاب‌های واقع در دره‌های گسلی و در مسیر آبراهه‌ها هستند و اغلب دارای آبدهی کم می‌باشند. با این حال، این چشمه‌ها آب آشامیدنی ساکنین شهر و روستاهای مجاور را تأمین می‌کنند و در مناطق روستایی نیز به مصرف کشاورزی می‌رسند. در این مطالعه، به بررسی ۲۳ دهنه چشمه اصلی و منتخب در طول مسیر تونل پرداخته شده است (شکل ۲). مشخصات چشمه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. در شرقی‌ترین محدوده مورد بررسی و در مجاورت رودخانه کرج (پرتال شرقی تونل با نام خوزنکلا)، پنج دهنه چشمه ظهور یافته است که وظیفه تأمین آب شرب و کشاورزی روستاهای خوزنکلا،

آدران و ملک‌آباد را به عهده دارند و در زمره پرآب‌ترین چشمه‌های محدوده مطالعاتی محسوب می‌شوند. دره شین شینی، در حوالی ۱۱ کیلومتری مسیر تونل از محل پرتال خوزنکلا قرار دارد. نمای کلی منابع آبی این دره، حاکی از ظهور چشمه و نشتاب‌های زیاد در دامنه دره می‌باشد. در این دره، هفت دهنه چشمه انتخاب شده است که اکثراً در کف آبراهه و از نوع چشمه‌های درز و شکافی هستند. از سرشاخه‌های رودخانه برغان، رودخانه سمج (نوکوه) است که در دره‌ای واقع در آبادی سرهه واقع شده است. در این دره که مسیر تونل را در ۱۲/۵ کیلومتری از پرتال خوزنکلا قطع می‌کند، تعداد چهار دهنه چشمه انتخاب شده است. در نهایت، در غربی‌ترین دره محدوده مطالعاتی (دره ورده) تعداد هفت دهنه چشمه انتخاب گردیده است.

جدول ۲- مشخصات چشمه‌های محدوده مطالعاتی

Table 2. Springs characteristics of the study area

Row	Spring	UTMy	UTMx	Formation	Avg. Discharge (lit/sec)	Area
1	Sp1	3978015	505792	E5ts	1.40	Khozankola
2	Sp2	3978041	505799	E5ts	1.50	
3	Sp3	3977627	507487	E5ts	1.20	
4	Sp4	3978326	506113	E5ts	2.60	
5	Sp5	3978279	506185	E5ts	3.20	
6	Sp6	3982848	502551	Q1t	2.50	
7	Sp7	3979121	495906	E5ts	0.15	Shinshini Valley
8	Sp8	3980344	496537	Eat5	1.20	
9	Sp9	3980944	497021	Eabr	1.00	
10	Sp10	3980966	497038	Eabr	1.60	
11	Sp11	3980311	496475	Eat5	1.30	
12	Sp12	3980387	496555	Eat5	1.50	Sorheh Valley
13	Sp13	3983934	496865	Q1t	0.02	
14	Sp14	3981609	495312	Qal	0.70	
15	Sp15	3981632	495576	Qal	1.00	
16	Sp16	3981674	495203	Qal	0.60	
17	Sp17	3984201	493458	Eat4	2.20	
18	Sp18	3984320	493455	Eat4	0.02	Vardeh Valley
19	Sp19	3981789	491497	Qal	1.00	
20	Sp20	3981800	491492	Qal	1.00	
21	Sp21	3981798	491495	Qal	0.30	
22	Sp22	3981784	491478	Qal	0.50	
23	Sp23	3981777	491523	Qal	0.20	

۲-۴- هیدروژئولوژی مسیر تونل

گستره البرز و به‌ویژه محدوده طالقان از نظر نوع چشمه‌ها از جمله منابع آبی با تعداد و پراکندگی زیاد و آبدهی کم نسبت

به محدوده زاگرس هستند. بنابراین، با توجه به اینکه چشمه‌های واقع در این محدوده مطالعاتی از نوع درز و شکافی و در مسیر دره‌های گسلی هستند (شکل ۲) و احتمال اثر حفر تونل بر آن‌ها

روش‌هایی است که معیارهایی را جهت بررسی احتمال تغییر آبدهی چشمه‌ها در اثر حفر تونل ارائه نموده است. به عقیده وی، معیارهایی همانند فراوانی شکستگی‌ها (Fracture frequency, FF)، نفوذپذیری توده سنگ (Rock mass permeability, MK)، ضخامت روباره (Overburden, OV)، اثر زون پلاستیک (Plastic zone radius, PZ)، وضعیت برخورد چشمه به گسل (Main faults intersection, IF)، نوع چشمه (Spring type, ST) و فاصله چشمه از محور تونل (Distance from the tunnel, D) بر احتمال کاهش آبدهی چشمه‌های پیرامون تونل مؤثرند. روش دما تیس (DHI) یک آنالیز احتمالی مبتنی بر رویکرد سیستم‌هاست که در آن، 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 هست که به شناخت بهتر در طراحی منجر می‌شود. در ادامه معیارهای مذکور در محدوده مطالعاتی شرح داده می‌شوند.

۲-۵-۱-۱- فراوانی شکستگی‌ها (FF)

تراکم شکستگی‌ها (تعداد شکستگی‌ها بر واحد متر) که به‌عنوان معیار اثرگذار در محیط‌های سنگی در تعیین آب‌های ورودی به داخل تونل‌هاست را می‌توان از کیفیت توده سنگ (RQD) استخراج کرد. همچنین، پیوستگی 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. از عوامل اصلی و تعیین‌کننده در مقدار RQD، وضعیت سیستم‌های درزه و شکستگی از جمله تعداد درزه‌ها و همچنین مقدار هوازدگی و دگرسانی توده سنگ می‌باشد. از طرفی برای درک بهتر وضعیت تراکم درزه در مسیرهای جریان چشمه‌ها، تهیه نقشه تراکم گسل‌ها و شکستگی‌ها کمک شایانی خواهد کرد. بنابراین، پارامتر فراوانی شکستگی بر اساس این دو معیار تعیین خواهد شد.

وجود دارد. از مهم‌ترین اطلاعات هیدروژئولوژی در ارزیابی تأثیر تونل‌های انتقال آب بر منابع آب پیرامونشان، نفوذپذیری و تغییرات تراز آب بالای تونل (بار آبی) است که اغلب از مطالعات گمانه‌های حفر شده در مسیر تونل و آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌های صورت گرفته در آن‌ها استخراج می‌شوند. در مسیر تونل انتقال آب طالقان (قطعه شرقی)، چهار گمانه حفر شده است (شکل ۲) که اطلاعات آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. به‌طور کلی، در منطقه مطالعاتی، آزمایش‌های لوژان در گمانه‌های E1، E2 و E4 انجام گرفته است. در گمانه‌های E1 و E2، به ترتیب میزان ۱۲ و ۱۱ آزمون لوژان انجام شده است که نتایج حاکی از مقادیر لوژان کمتر از ۱ در این گمانه‌ها است. اما نتایج حاصل از ۷ آزمون لوژان در گمانه E4، حاکی از این است مقادیر لوژان تا حدود ۳ می‌باشد. بر اساس اطلاعات برداشت شده از گمانه‌ها، بازدیدهای صحرائی و بررسی وضعیت لیتولوژی مسیر، قطعه شرقی تونل به ۸۷ زون هیدروژئولوژیکی تقسیم شده که اطلاعات مربوط به آن در جدول ۴ ارائه گردیده است. زون بندی‌ها بر اساس دو مؤلفه اصلی مشتمل بر لیتولوژی سازندی و محدوده‌های با ساختار متفاوت (اعم از پهنه خرد شده گسل‌ها و عوارضی نظیر دایک‌ها و توده‌های آذرین) انجام شده است. در مسیر تونل شرقی طالقان، تعداد ۳۹ گسل شناسایی شده است که ۳۷ مورد آن‌ها از نوع امتدادلغز هستند. پهنه خرد شده این گسل‌ها حد اصل ۱۰ تا ۳۰ متر است و هر کدام به‌عنوان یک زون هیدروژئولوژیکی مجزا شناخته شده است. هر بخش سازندی حدفاصل این پهنه‌های خردشده نیز یک زون هیدروژئولوژیکی محسوب می‌شود.

۲-۵-۲- اثر حفر تونل بر منابع آبی مسیر

۲-۵-۱-۲- روش دما تیس (Drawdown Hazard Index, DHI)

سازوکارهایی نظیر برخورد تونل با ناپیوستگی‌های هدایت‌کننده جریان آب زیرزمینی و وجود پهنه خردشده گسلی در پیرامون این سازه سبب افزایش احتمالی آب‌های ورودی هدایت‌شده توسط ناپیوستگی‌ها و مسیرهای جدید به تونل خواهد شد و بالطبع آبدهی منابع آبی پیرامون را تحت تأثیر قرار خواهد داد. روش شاخص خطر افت یا روش همان روش معروف به Dematteis و همکاران (Dematteis et al., 2001) از جمله

جدول ۳- مشخصات گمانه‌های حفر شده در مسیر قطعه شرقی تونل طالقان

Table 3. Properties of boreholes in the eastern part of Taleghan tunnel

Row	Borehole	UTMx	UTMy	Diameter(m)	Depth(m)	Number of Leugeon test	Water depth (m)
1	BH-E4	507179	3978252	3	170	7	68
2	BH-E1	495378	3982115	4	192	12	42
3	BH-E2	500085	3980576	4	340	11	204
4	BH-M11	492518	3983062	4	36	0	28

جدول ۴- برآورد مقادیر H (تراز پیزومتری بالای تونل) و K (هدایت هیدرولیکی) در زون‌های هیدروژئولوژیکی

Table 4. Estimating the values of H (piezometric level at the top of the tunnel) and K (hydraulic conductivity) in hydrogeological zones

Zone	H.Z.	H(m)	Water	K (m/sec)	Zone	H.Z.	H(m)	Water	K (m/sec)
Hz-1	251	76	1701	4.3E-08	Hz-45	177	260	1885	2.0E-08
Hz-2	319	80	1705	3.5E-08	Hz-46	5	280	1905	8.0E-07
Hz-3	35	104	1729	1.5E-06	Hz-47	404	224	1849	2.0E-07
Hz-4	505	136	1761	8.7E-09	Hz-48	18	192	1817	2.0E-06
Hz-5	58	152	1777	1.5E-06	Hz-49	138	197	1822	8.0E-08
Hz-6	152	208	1833	4.3E-08	Hz-50	5	202	1827	1.0E-06
Hz-7	96	160	1785	1.5E-06	Hz-51	120	204	1829	2.0E-08
Hz-8	192	172	1797	6.1E-08	Hz-52	10	205	1830	2.5E-06
Hz-9	24	170	1795	1.5E-06	Hz-53	7	224	1849	1.1E-06
Hz-10	382	168	1793	1.7E-08	Hz-54	93	228	1853	2.0E-07
Hz-11	14	160	1785	1.7E-07	Hz-55	299	236	1861	1.5E-07
Hz-12	678	155	1780	4.3E-08	Hz-56	190	240	1865	1.0E-07
Hz-13	16	135	1760	2.0E-07	Hz-57	279	240	1865	1.0E-07
Hz-14	732	120	1745	7.0E-08	Hz-58	8	160	1785	6.0E-07
Hz-15	683	110	1735	2.6E-08	Hz-59	257	140	1765	3.0E-08
Hz-16	14	108	1733	1.5E-06	Hz-60	169	100	1725	5.0E-08
Hz-17	189	125	1750	8.7E-08	Hz-61	382	79	1704	8.0E-08
Hz-18	17	149	1774	3.5E-07	Hz-62	68	64	1689	1.2E-06
Hz-19	168	169	1794	1.7E-08	Hz-63	304	72	1697	8.0E-08
Hz-20	242	200	1825	2.6E-08	Hz-64	50	80	1705	5.0E-07
Hz-21	859	268	1893	2.6E-08	Hz-65	92	88	1713	2.0E-08
Hz-22	28	308	1933	2.5E-06	Hz-66	22	96	1721	3.0E-07
Hz-23	756	320	1945	8.7E-09	Hz-67	90	144	1769	1.5E-07
Hz-24	12	360	1985	8.0E-07	Hz-68	56	160	1785	2.0E-06
Hz-25	996	348	1973	8.7E-09	Hz-69	241	200	1825	2.0E-07
Hz-26	5	340	1965	1.5E-07	Hz-70	18	232	1857	1.2E-06
Hz-27	80	280	1905	2.5E-07	Hz-71	335	260	1885	1.0E-07
Hz-28	8	231	1856	3.0E-07	Hz-72	18	216	1841	1.3E-06
Hz-29	103	212	1837	1.0E-07	Hz-73	324	180	1805	2.0E-07
Hz-30	5	125	1750	7.0E-08	Hz-74	19	148	1773	1.1E-06
Hz-31	63	117	1742	2.6E-08	Hz-75	187	132	1757	7.0E-07
Hz-32	768	112	1737	2.6E-08	Hz-76	47	120	1745	2.2E-06
Hz-33	184	172	1797	7.8E-08	Hz-77	82	104	1729	3.0E-07
Hz-34	10	181	1806	1.0E-07	Hz-78	13	96	1721	1.5E-07
Hz-35	516	188	1813	1.0E-08	Hz-79	142	96	1721	3.0E-08
Hz-36	9	192	1817	1.2E-06	Hz-80	36	144	1769	2.5E-06
Hz-37	430	190	1815	3.0E-08	Hz-81	215	240	1865	9.0E-08
Hz-38	25	189	1814	9.0E-07	Hz-82	32	200	1825	1.2E-06
Hz-39	303	187	1812	8.0E-08	Hz-83	165	184	1809	5.0E-07
Hz-40	8	208	1833	1.5E-06	Hz-84	16	208	1833	9.0E-08
Hz-41	155	181	1806	2.0E-07	Hz-85	135	240	1865	6.0E-08
Hz-42	9	200	1825	1.5E-06	Hz-86	11	108	1733	6.0E-07
Hz-43	64	204	1829	3.0E-07	Hz-87	495	72	1697	5.0E-08
Hz-44	6	240	1865	1.5E-06					

H(m): Hydraulic Head above the tunnel; Tunnel Elevation: 1625 m.a.s.l

۲-۱-۵-۲- وضعیت برخورد چشمه با گسل پدیدآورنده (IF)

پس از فراوانی گسل، عامل دوم مرتبط با گسل‌ها، برخورد چشمه با امتداد گسل است. گسل‌ها و مناطق خردشده ناشی از عملکرد آن‌ها، معمولاً مجاری ایده‌آل برای جریان آب زیرزمینی بشمار می‌روند و می‌توانند آبدهی چشمه‌های متأثر از حفر تونل را افزایش دهند. بنابراین، به طور پیش‌فرض به نظر می‌رسد که چشمه‌های گسلی در تقاطع با تونل باشند، در درجه خطر بیشتری از خشکیدگی نسبت به سایر چشمه‌ها قرار بگیرند.

۲-۱-۵-۳- ضخامت روباره (OV)

با افزایش مقدار ارتفاع روباره، تنش برجا در درون مقطع سنگ افزایش می‌یابد، درزه‌های آن بسته‌تر می‌شود و به دنبال آن مقدار نفوذپذیری توده سنگ و بالطبع میزان آب ورودی به تونل کاهش می‌یابد. به منظور دستیابی به مقادیر ضخامت روباره در طول مسیر حفاری تونل قطعه شرقی، از پروفیل زمین‌شناسی و از محاسبه اختلاف تراز چشمه با تراز تونل در نزدیک‌ترین فاصله با آن استفاده شده است. فرمول امتیازدهی به پارامتر ضخامت روباره در جدول ۵ ارائه شده است.

۲-۱-۵-۴- نفوذپذیری توده سنگ (MK)

هدایت هیدرولیکی و میزان تراوایی از بحرانی‌ترین و حساس‌ترین پارامترها در برآورد آب ورودی به تونل و اثر متقابل آن یعنی احتمال خشکیدگی منابع آبی پیرامون به شمار می‌آید؛ به‌ویژه آن‌که سیستم جریان آب زیرزمینی در آبخوان‌های درزه‌وشکاف‌دار برقرار باشد. اساساً خصوصیات هیدرودینامیکی آبخوان می‌تواند مبتنی بر آزمون‌های صحرائی، آنالیزهای آزمایشگاهی، قضاوت‌های کارشناسی و یا جداول تجربی موجود در این زمینه، به‌طور تخمینی تعیین گردد. در مباحث حفاری تونل در محیط‌های سنگی، آزمایش‌های نفوذپذیری لوژان در گمانه‌های مسیر کمک

شایانی به آگاهی از میزان تراوایی سنگ‌های مختلف محدوده مطالعاتی و وضعیت تراوایی بخش‌های خردشده خواهد کرد. بر اساس تقسیم‌بندی Houlby (۱۹۷۶)، در سنگ‌های با تراوایی بسیار کم مقادیر لوژان کمتر از ۱، تراوایی کم بین ۱ تا ۳ LU، در لایه‌های نیمه‌تراوا بین ۳ تا ۱۰ LU، در سنگ‌های تراوا بین ۱۰ تا ۳۰ LU و در نهایت در سنگ‌های بسیار تراوا این مقادیر بیش از ۳۰ LU خواهد بود. شاخص امتیازدهی به این پارامتر بر اساس جدول ۵ است.

۲-۱-۵-۵- زون پلاستیک (PZ)

زون پلاستیک ناحیه‌ای است پیرامون تونل که پس از احداث آن ایجاد می‌شود و منجر به شکل گرفتن ناپیوستگی‌های جدید در توده‌های سنگی اطراف دیواره تونل و بالطبع عاملی جهت افزایش نفوذپذیری این توده‌ها می‌شود.

۲-۱-۵-۶- نوع چشمه (ST)

به‌طور کلی، چشمه‌های با حوضه آبخیز بالاتر، آبدهی بیشتر و مخزن عمیق‌تر، بیشتر تحت تأثیر حفاری تونل قرار می‌گیرند. از طرفی، چشمه‌های با آبدهی کمتر از یک لیتر بر ثانیه از آبخوان‌های محلی تغذیه می‌شوند و آبدهی چشمه‌های عمیق‌تر تا چند لیتر بر ثانیه نیز می‌تواند برسد. بنابراین، نوع چشمه می‌تواند در احتمال خشکیدگی ناشی از حفاری تونل مؤثر باشد. سیستم امتیازدهی به این پارامتر در جدول ۵ ارائه شده است.

۲-۱-۵-۷- فاصله چشمه از محور تونل (D)

تأثیرپذیری چشمه‌های پیرامون مسیر تونل با فاصله اقلیدسی بین این دو رابطه مستقیم دارد به‌طوری که هر چه فاصله چشمه از محور تونل دورتر باشد کمتر تحت تأثیر احداث این سازه قرار می‌گیرد. بنابراین، این پارامتر به‌عنوان یکی از معیارهای روش دما‌تیس مطرح شده است. نحوه امتیازدهی به این پارامتر در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵- امتیازدهی به پارامترهای فاصله چشمه از محور تونل (DT)، نوع چشمه (ST)، ضخامت روباره (OV) و نفوذپذیری (MK) در روش DHI
Table 5. Scoring parameters affecting DHI: distance from tunnel (DT), spring type (ST), overburden thickness (OV) and permeability (MK)

Distance (m)	< 100	100-200	200-400	400-600	600-800	> 800	Spring type	Superficial	intermediate	Deep
DT index	1	0.8	0.4	0.2	0.1	0	ST index	0	0.5	1
Overburden thickness	> 200	100-200	50 - 100	< 50	Permeability	Very Low	Low	Medium	High	
OV index	0.1	0.25	0.5	0.9	MK index	0	0.33	0.66	1	

آب ورودی به تونل (TW): با توجه به اینکه با افزایش آب ورودی به تونل، احتمال افزایش تأثیرات شدیدتر و مخرب تر بر منابع آب زیرزمینی بیشتر خواهد شد، این پارامتر به عنوان پارامتر مؤثر در خشک شدن چشمه‌ها مدنظر قرار گرفته است. محاسبه آب ورودی به تونل (TW) با استفاده از دو پارامتر بار آبی (H) و هدایت هیدرولیکی توده سنگ (K) توسط Hassanpour و همکاران (Hassanpour et al., 2021) پیشنهاد شده است. بنابراین، لازم است بر اساس اطلاعات گمانه‌های حفار شده در مسیر تونل، مقادیر نفوذپذیری (K) و ارتفاع آب بالای تونل (H) برای محاسبه آب ورودی به تونل ارائه شوند. در مطالعه حاضر، اطلاعات مربوط به بار آبی و همچنین ضریب نفوذپذیری سنگ بر اساس مشاهده رخنمون‌ها و آزمایش‌های برجا (تراز آب بالای تونل در گمانه‌ها و ترسیم تراز فرضی آب در کل مسیر) قابل برآورد بوده و جمع‌آوری شده است. ضریب نفوذپذیری پیش‌تر در روش دما تیس استفاده شده است. در مدل TIS برای پارامتر آب ورودی به تونل (TW) پنج رده مختلف پیشنهاد شده است. بر این مبنای، تونل می‌تواند در یکی از پنج حالت خشک، نمناک، مرطوب (خیس)، جریان قطره‌ای و جریانی قرار گیرد. در مدل TIS بر اساس اینکه تونل در کدام یک از این حالت‌ها قرار داشته باشد نمره‌ای به پارامتر TW اختصاص می‌یابد. پس از آن، ضرایب تصحیح KI و Kq بین صفر تا یک با استفاده از روابط ۲ و ۳ و نیز جدول ۷ اعمال خواهد شد.

$$K_q \propto \frac{TW}{Q_s} \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$K_I \propto \frac{L_t}{HD} \quad (\text{رابطه ۳})$$

۵-۲-۱-۸- وزن دهی و همپوشانی در روش DHI:

پس از بررسی پارامترهای DHI با توجه به محیط سنگی دربرگیرنده تونل قطعه شرقی و وضعیت هیدروژئولوژی چشمه‌های مورد مطالعه و تخصیص امتیاز متناسب برای هر پارامتر، مقدار عدد DHI برای هر چشمه محاسبه می‌گردد. روش نرمالایز کردن پارامترها، بین مقادیر صفر و یک، در جدول ۶ ارائه شده است. روش وزن دهی به پارامترهای مختلف، استفاده از ماتریس برهمکنش باینری است و از رابطه ۱ بهره می‌گیرد. (رابطه ۱)

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

در نهایت بر اساس DHI به دست آمده و با توجه به جدول ۶ می‌توان احتمال خشک‌شدگی هر چشمه را برآورد نمود.

۵-۲-۲- روش TIS

Hassanpour و همکاران (۲۰۲۱) بر اساس تجربیات حاصل از پنج پروژه تونل‌سازی در زون‌های مختلف زمین‌شناسی ایران مشتمل بر تونل‌های انتقال آب نوسود، قمرود، بازی دراز، کرمان و کرج و اعتبار سنجی به وسیله پروژه خط ۶ مترو تهران، مدل جدیدی برای برآورد تأثیر تونل‌سازی بر چشمه‌ها، تحت عنوان مدل معرفتی کردند. ایشان از چهار پارامتر اصلی آب ورودی به تونل، فاصله بین چشمه تا محور تونل، ارتباط هیدرولیکی بین تونل و محیط آبخوان و در نهایت قابلیت تغذیه مجدد آبخوان برای بررسی اثر حفر تونل بر منابع آبی پیرامون استفاده کردند. در تونل انتقال آب طالقان وضعیت هر پارامتر به صورت زیر بررسی شده است.

جدول ۶- ارتباط شاخص DHI و تغییرات آبدهی چشمه‌ها

Table 6. The relationship between DHI index and springs discharge variation

DHI Value	< 0.2	0.2 – 0.6	0.6 – 0.7	> 0.7
Description	Very low reduction in spring discharge	Partial reduction in spring discharge	Considerable reduction in spring discharge	Complete drying of spring

جدول ۷- پیشنهادهای روش TIS برای برداشت مقادیر Kq و KI

Table 7. TIS method suggestions for extracting Kq and KI values

TW/Qs	Kq	Lt/HD	KI
<0.1	0.5	<0.1	0.5
0.25	0.6	0.25	0.6
0.5	0.75	0.5	0.75
0.75	0.9	0.75	0.9
>0.1	1	>0.1	1

۵-۲-۲-۳- قابلیت تغذیه مجدد و حساسیت آبخوان

(AR)

با افزایش میزان آسیب‌پذیری آبخوان ناشی از حفاری تونل، کاهش آبدهی بیشتری در چشمه‌های منشأ گرفته از آن آبخوان مورد انتظار است. بر این اساس و در شرایط یکسان از نظر هجوم آب به تونل، آبخوانی بیشتر آسیب می‌بیند که حوضه آبرگیر و مخزن کوچک‌تری داشته باشد، بنابراین سریعاً این آسیب خود را به صورت افت سطح آب در آبخوان و به دنبال آن خشک شدن چشمه‌های منشأ گرفته از آبخوان نشان خواهد داد. از طرفی سفره‌های آب زیرزمینی بزرگ دارای سطح تغذیه بزرگ‌تری هستند که می‌تواند در بارندگی‌ها حجم آب بیشتری را به آن آبخوان وارد کرده و روند تغذیه مجدد را سرعت بخشد. بنابراین برای بررسی این پارامتر، ابتدا در نظر گرفته می‌شود که چه آبخوانی و چه مقدار تحت تأثیر حفاری قرار می‌گیرد و در وهله دوم سنجش می‌گردد آبخوانی که تحت تأثیر احتمالی قرار گرفته در صورت آب‌بند شدن دیواره تونل بعد از تکمیل حفاری و قطع کامل جریان آب زیرزمینی به داخل تونل، چقدر زمان نیاز دارد تا به وضعیت سابق خود برگردد. از این رو، اگر قابلیت تغذیه مجدد آبخوان بالا باشد یا اینکه آبخوان تأثیر کمی از حفاری دریافت می‌کند، ریسک تأثیر حفاری تونل بر چشمه‌ها کاهش خواهد یافت. در روش TIS سه دسته‌بندی برای این پارامتر در نظر گرفته شده است که براساس قرارگیری آبخوان در هر یک از این سه دسته نمره‌ای به پارامتر AR تعلق می‌گیرد (جدول ۸).

۵-۲-۲-۱- فاصله بین تونل و چشمه (HD)

در مدل TIS، پارامتر فاصله چشمه از محور تونل، همانند روش دماطیس، یکی از مؤلفه‌های اصلی خواهد بود. در این مدل هرچه فاصله بین چشمه تا تونل کاهش پیدا کند، نمره پارامتر HD کاهش خواهد یافت و هر چه این فاصله کمتر شود، نمره این بخش افزایش خواهد یافت. با توجه به تجربیات Hassanpour و همکاران (۲۰۲۱)، چشمه‌های با فاصله کمتر از ۵۰۰ متر تا محور تونل، بیشترین تأثیر را از حفاری خواهند گرفت. جدول ۸ امتیاز طبقات بین فاصله چشمه تا محور تونل‌های انتقال آب را بیان می‌کند.

۵-۲-۲-۲- ارتباط هیدرولیکی بین تونل و آبخوان

(HC)

از جمله پارامترهای مؤثر در روش دماطیس، نوع چشمه است به طوری که در این پارامتر چشمه‌ها به سه نوع مخزن عمیق، حد واسط و چشمه‌های سطحی تقسیم شدند. در روش TIS نیز این معیار با اعمال ضریب ارتباط هیدرولیکی بین چشمه و آبخوان با تونل اعمال شده است. به عقیده Hassanpour و همکاران (۲۰۲۱)، از این بین تنها چشمه‌های با منشأ نیمه‌عمیق هستند که با آبخوان‌های منطقه ارتباط دارند و حفاری تونل در این آبخوان‌ها قادر است بر آبدهی این‌گونه چشمه‌ها تأثیر بگذارد. آن‌ها این پارامتر را به پنج دسته تقسیم کردند (جدول ۸). ارتباط هیدرولیکی بین تونل و چشمه، با مشخص کردن موقعیت چشمه نسبت به زون‌های هیدروژئولوژیکی و ضریب نفوذپذیری هر زون (MK) صورت می‌گیرد.

جدول ۸- امتیاز طبقات مختلف: فاصله چشمه تا محور تونل، ارتباط هیدرولیکی بین تونل با چشمه و حساسیت و قابلیت تغذیه مجدد آبخوان در مدل TIS

Table 8. Scores of different classes in TIS method: distance of the spring to the tunnel, hydraulic connection between the tunnel and the spring, and the sensitivity and ability to recharge the aquifer.

Distance between spring and tunnel (m)	Distance (m)	> 5000	3000 - 5000	1000 - 3000	500 - 1000	< 500
	Score	0-1	1-3	3-5	5-7	7-10
Hydraulic connection effectiveness and origin of water in spring	Hydrogeological status	Very effective	Effective	Moderately effective	Partly effective	Not connected,
	Score	0-1	1-3	3-5	5-7	7-10
potential recharge (sensitivity)	Sensitivity	Sensitive aquifer, dry area or dry season		Intermediate	Insensitive aquifer, wide recharge area, high annual and monthly precipitation, wet season	
	Score	5-10		3-5	0-3	

۵-۲-۴- وزن دهی و همپوشانی در روش TIS:

پس از بررسی پارامترهای TIS با توجه به محیط سنگی دربرگیرنده تونل قطعه شرقی و وضعیت هیدروژئولوژی چشمه‌های مورد مطالعه و تخصیص امتیاز متناسب برای هر پارامتر، مقدار عدد TIS برای هر چشمه محاسبه می‌گردد. مقادیر وزن دهی به پارامترهای مختلف توسط حسن پور و همکاران (Hassanpour et al., 2021) پیشنهاد شده است و به شرح رابطه ۴ می‌باشد. در نهایت، عدد TIS در مقادیر کمتر ۴ تا بیشتر ۸ در شش کلاس طبقه‌بندی می‌گردد (جدول ۹).
(رابطه ۴)

$$TIS = 0.4 R_{TW} K_I K_q + 0.15 R_{HD} + 0.4 R_{HC} + 0.05 R_{AR}$$

۳- بحث و نتایج

تونل انتقال آب طالقان در مسیر خود از چشمه‌های بسیاری می‌گذرد و از این رو حفاری در این سازه می‌تواند این منابع آبی را تحت تأثیر قرار دهد. در این مطالعه، اثر حفر تونل بر روی ۲۳ دهنه چشمه پیرامون قطعه شرقی تونل که در حریم ۳ کیلومتری از مسیر تونل ظهور یافته‌اند مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا، از دو روش DHI (Dematteis et al., 2001) و TIS (Hassanpour et al., 2021) استفاده شده است.

جدول ۹- ارتباط شاخص TIS و تغییرات آبدهی چشمه‌ها

Table 9. The relationship between TIS index and springs discharge variation

TIS	< 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8	> 8
Class numer	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	T-6
Hazard of reduction in spring discharge	Very low	Low	Moderate	High	Very high	Ext. high
Spring behavior	No reduction	Possible but not very serious reduction	Reduction in spring discharge	Reduction in spring discharge, may be considerable	Considerable reduction in spring discharge	Complete drying of spring

۳-۱-۲- ضخامت زون پلاستیک (PZ) :

با توجه به این موضوع که حفاری تونل به صورت مکانیزه می‌باشد، شعاع زون پلاستیک در واحدهای زمین‌شناسی مسیر بسیار ناچیز خواهد بود، بنابراین، با توجه به این موضوع شعاع زون پلاستیک کمتر از شعاع تونل در نظر گرفته شده است و امتیاز آن برای واحدهای موجود در مسیر صفر در نظر گرفته می‌شود.

۳-۱-۳- ضخامت روباره (OV)

با توجه به موقعیت ارتفاعی چشمه‌ها نسبت به تراز تونل (شکل ۳)، مقادیر شاخص ضخامت روباره هر چشمه (OV) در محدوده مطالعاتی از ۰/۱ تا ۰/۵ برآورد شده است. نتایج نشان می‌دهد که اکثر چشمه‌های پیرامون تونل، در محدوده روباره کمتر از ۲۰۰ متر و شاخص ۰/۱ تعلق دارد.

۳-۱-۴- فاصله چشمه از تونل (D)

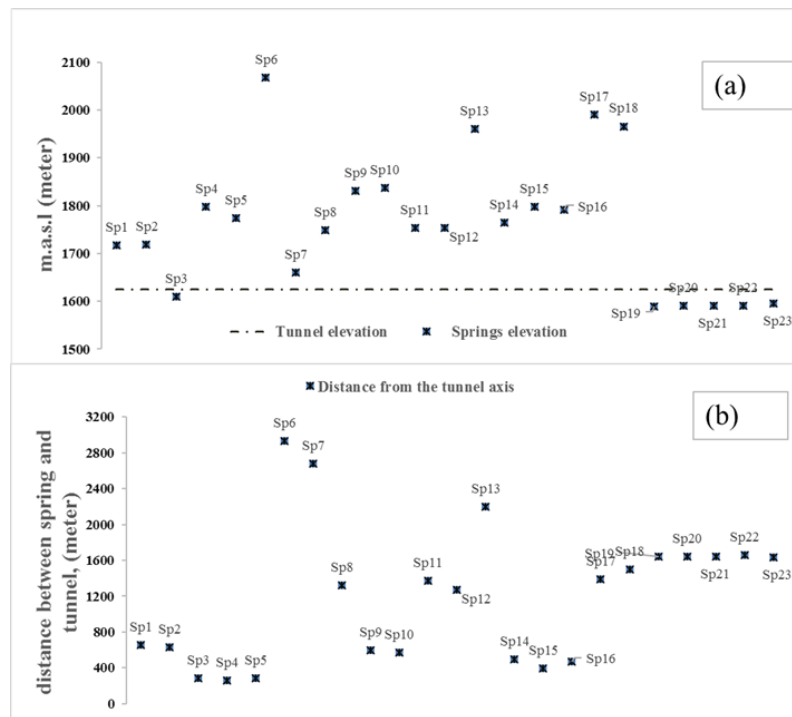
شاخص فاصله چشمه از محور تونل (D) (شکل ۳) حاکی از این است که کمتر از نیمی از این منابع آبی، در فاصله کمتر از ۸۰۰ متر از محور تونل قرار دارند و امتیاز بیش از صفر به خود اختصاص می‌دهند.

۳-۱-۳- نتایج روش DHI

در روش DHI، از سه متغیر سیستم مهندسی سنگ مشتمل بر نفوذپذیری (MK)، زون پلاستیک (PZ) و ضخامت روباره چشمه (OV) و چهار متغیر مرتبط با چشمه مشتمل بر تراکم گسل‌ها (FF)، برخورد یا عدم برخورد به گسل (IF)، نوع چشمه (ST) و فاصله چشمه تا محور تونل (D) استفاده شده است. نتایج ارزیابی هر متغیر در ادامه ارائه شده است.

۳-۱-۳-۱- نفوذپذیری (MK) :

نتایج نشان می‌دهد که در مسیر تونل طالقان (قطعه شرقی)، نفوذپذیری معادل واحدهای مورد اشاره از حداکثر ۶- $10 \times 2/5$ (۲۵ لوژان) تا حداقل ۹- $10 \times 8/6$ متر در ثانیه (کمتر از ۱ لوژان) متغیر است. همچنین سطح آب در تمامی گمانه‌ها پایش شده است. در نتیجه، مقدار شاخص MK بر اساس شرایط زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی از ۰/۱ تا ۰/۵ متغیر است. با توجه به این که اکثر چشمه‌های محدوده مطالعاتی درز و شکافی و در محدوده خردشده گسل‌ها قرار دارند، مقادیر MK معمولاً بیش از ۰/۳ برآورد شده است.



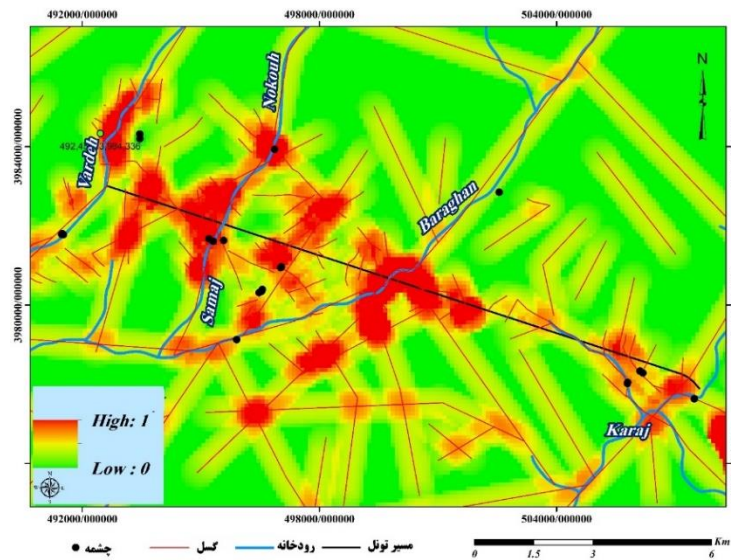
شکل ۳- (a) موقعیت ارتفاعی چشمه‌ها (متر) و (b) فاصله چشمه از محور تونل (متر)
 Fig. 3. (a) Springs elevation (meter) and (b) distance between spring and tunnel (meter)

متر و تابع Line Density در محیط ArcMap بهره گرفته شده است. از این رو، دو شاخص FF و IF عوامل تأثیرگذار در ظهور چشمه‌ها و نیز در خشک شدن آن‌ها در اثر حفر تونل محسوب می‌شوند. بر اساس داده‌های کیفیت توده سنگ در گمانه‌های مسیر تونل (شکل ۵)، می‌توان پیش‌بینی نمود که کیفیت سنگ بکر مسیر تونل در حد مطلوب است. ولی در برخی بخش‌های تونل به دلیل وجود گسل‌های متعدد از کیفیت پایین‌تر و ضعیف‌تری برخوردار می‌باشد. جدول ۱۰ مقادیر شاخص کیفی توده سنگ را در مترهای مختلف مسیر تونل نشان می‌دهد. مقادیر شاخص تراکم شکستگی (FF) در این روش، بین صفر تا یک متغیر خواهد بود. مقادیر شاخص FF که از مقادیر RQD در گمانه‌های مسیر و تلفیق آن با نقشه تراکم گسل‌ها پیشنهاد شده‌اند، بین ۰/۰۱ تا ۰/۵۸ متغیر است. همچنین، از بین ۲۳ چشمه محدوده مطالعاتی، تنها ۵ دهنه آن برخورد مستقیم با گسل ندارند و از مجموع ۲۳ چشمه واقع در پیرامون تونل، ۱۸ دهنه در تقاطع با گسل‌ها قرار دارند و این نشانگر تکتونیک فعال منطقه است. در این روش، شاخص IF به صورت باینری صفر (عدم برخورد به گسل) و یک (برخورد به گسل) متغیر است.

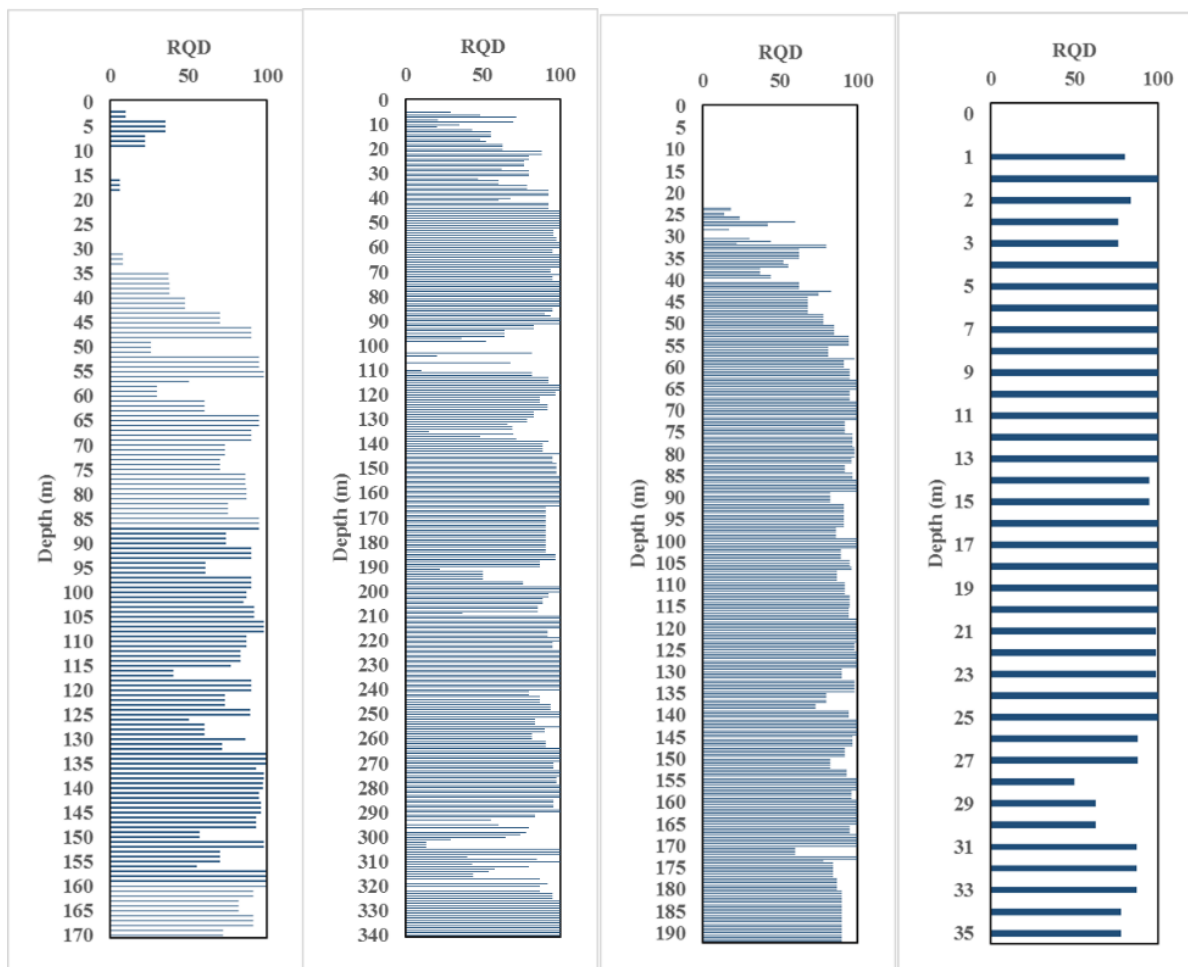
۳-۱-۵- فراوانی شکستگی (FF) و وضعیت برخورد چشمه‌ها با گسل (IF):

دو شاخص FF و IF نشان‌دهنده میزان فعالیت تکتونیک در منطقه هستند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که محدوده پیرامون قطعه شرقی تونل طالقان از چند دره گسلی (از شرق به غرب دره‌های شین‌شینی، سرهه و ورده) تشکیل شده است که وجود همین گسل‌ها در توف‌های کرج منجر به ظهور چشمه‌های درز و شکافی متعدد و اغلب نشتاب در مسیر آبراهه‌ها شده است. اکثر گسل‌های محدوده مطالعاتی از نوع امتدادلغز هستند که به عنوان معابر انتقال آب شناخته می‌شوند این عناصر ساختاری از جمله پارامترهای با اثر مستقیم بر تغییرات آبدی چشمه‌ها به ویژه سازندهای سخت می‌باشد چرا که این منابع آبی از درز و شکاف‌های متأثر از گسل برونزد دارند. با توجه به اینکه از اثر این پارامترها در عمق اطلاعات چندانی وجود ندارد به سیمای سطحی نظیر نقشه تراکم شکستگی (تراکم شکستگی) و محل تقاطع گسل و چشمه توجه شده است.

نقشه تراکم گسل‌ها در شکل ۴ ارائه شده است. برای استخراج نقشه تراکم خطواره (شکل ۴)، از تصویر باند ۷ ماهواره لندست ۹ (Landsat 9 ETM+) با قدرت تفکیک زمینی ۳۰



شکل ۴- نقشه تراکم گسل‌ها در محدوده مطالعاتی
Fig. 4. Density map of faults in the study area



شکل ۵- نمودار کیفیت توده سنگ (RQD) در گمانه‌های حفر شده مسیر تونل
Fig. 5. Rock quality designation (RQD) diagram in the drilled boreholes of the tunnel route

جدول ۱۰- مقادیر کیفیت توده سنگ (RQD) در مسیر تونل

Table 10. Rock quality designation (RQD) values in the tunnel path

Tunnel path parts (m)			Tunnel path parts (m)			Tunnel path parts (m)		
From	To	RQD %	From	To	RQD %	From	To	RQD %
0	50	70	4880	4980	100	11430	11630	50
50	80	30	4980	5400	100	11630	11770	80
80	100	10	5400	5830	100	11770	11820	90
100	430	90	5830	6210	80	11820	11905	100
430	800	75	6210	6470	70	11905	12150	100
800	1820	100	6470	7670	40	12150	12170	100
1820	1890	65	7670	8440	40	12170	12340	60
1890	2050	80	8440	8440	60	12340	13230	100
2050	3050	50	8440	8830	60	13230	13330	60
3050	3300	60	8830	10010	75	13330	13530	80
3300	3450	80	10010	10540	60	13530	15640	100
3450	4520	100	10540	11290	60	15640	15810	80
4520	4880	50	11290	11430	80	15810	15900	50

۳-۱-۶- نوع چشمه (ST)

اغلب چشمه‌های مورد مطالعه در زمره چشمه‌های سطحی (کمتر از ۱ لیتر در ثانیه) و متوسط (چند لیتر در ثانیه) جای می‌گیرند. آنچه از آبدهی چشمه‌ها و واکنش آن‌ها به بارش مشخص است نشان‌دهنده این است که اکثر این منابع آب زیرزمینی، از نوع چشمه‌های سطحی تا حد واسط هستند و مقادیر شاخص ST در این منابع برابر یا کمتر از ۰/۵ است.

بر اساس رابطه ۱، و از همپوشانی شاخص‌های مختلف در این روش، احتمال خشکیدگی چشمه‌ها در طبقات مختلف (ارائه شده در جدول ۶) تعیین شده است. نتایج نشان می‌دهد که حدود نیمی از چشمه‌ها در محدوده کاهش بخشی آبدهی قرار گرفته‌اند و تنها سه دهنه چشمه (Sp6، Sp17 و Sp18) با احتمال کاهش بسیار اندک آبدهی مواجه خواهند شد (شکل ۶ و شکل ۷). از طرفی، خشکیدگی کامل و کاهش قابل توجه آبدهی به ترتیب در ۷ و ۲ دهنه چشمه ممکن است رخ دهد.

در ارزیابی تأثیر منابع آبی پیرامون تونل طالقان، نتایج نهایی روش DHI (شکل ۷)، با استفاده از معادله ۱ محاسبه شده و از ۰/۱ تا ۱/۳ متغیر بود. وضعیت آبدهی منابع آبی منطقه مورد مطالعه بر اساس روش دمتیس (جدول ۶) به کلاس‌های زیر تقسیم شد: کاهش ناچیز در آبدهی (۰/۲ <)، کاهش بخشی از آبدهی (۰/۶-۰/۲)، کاهش بخش قابل‌ملاحظه‌ای از آبدهی

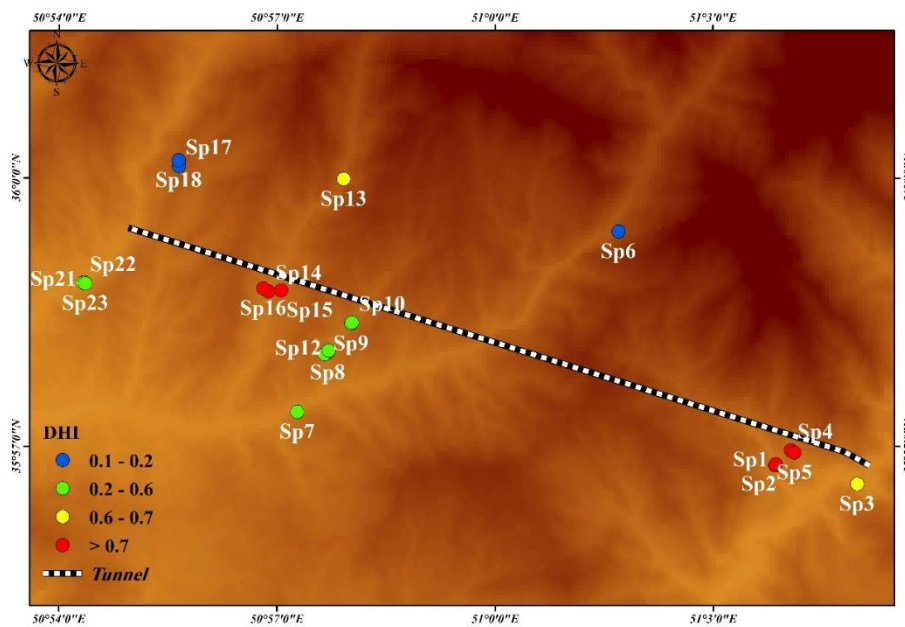
(۰/۷-۰/۶) و خشک شدن کامل (۰/۷ >). نتایج محاسبه شاخص DHI (شکل ۶ و ۷) نشان داد که حدود ۳۹ درصد از چشمه‌های مورد بررسی، معادل ۹ چشمه، یا با کاهش شدید آبدهی مواجه شده و یا به‌طور کامل خشک خواهند شد. به‌عبارت‌دیگر، حدود ۳۰ درصد (۷ چشمه) و ۹ درصد (۲ چشمه) از چشمه‌ها به ترتیب در دو کلاس خشک‌شدگی کامل و کاهش بخش قابل‌ملاحظه‌ای از آبدهی قرار خواهند گرفت. علاوه بر این، یافته‌ها نشان می‌دهد که حدود ۶۱ درصد چشمه‌ها (۱۴ مورد) یا تحت تأثیر حفاری تونل قرار نمی‌گیرند (۱۳ درصد) و یا با کاهش بخشی از آبدهی مواجه خواهند شد (۴۸ درصد).

به‌طور خاص، منطقه با تأثیر بالا از حفاری تونل عمدتاً در بخش ابتدایی تونل، نزدیک رودخانه کرج و بخش میانی نزدیک به انتهای تونل، در مجاورت رودخانه سمج متمرکز شده است؛ جایی که تراکم شکستگی‌ها و نفوذپذیری به‌طور کلی زیاد و فاصله چشمه‌ها نسبت به محور تونل بسیار کم است. از سوی دیگر، اغلب بخش میانی و انتهایی مسیر تونل، شاخص خطر افت آب زیرزمینی بسیار پایینی را نشان می‌دهد، زیرا فاصله چشمه‌ها و روباره تونل بیشتر است و همچنین با توجه به لیتولوژی، نفوذپذیری کاهش یافته و چشمه‌ها از نوع سطحی هستند.

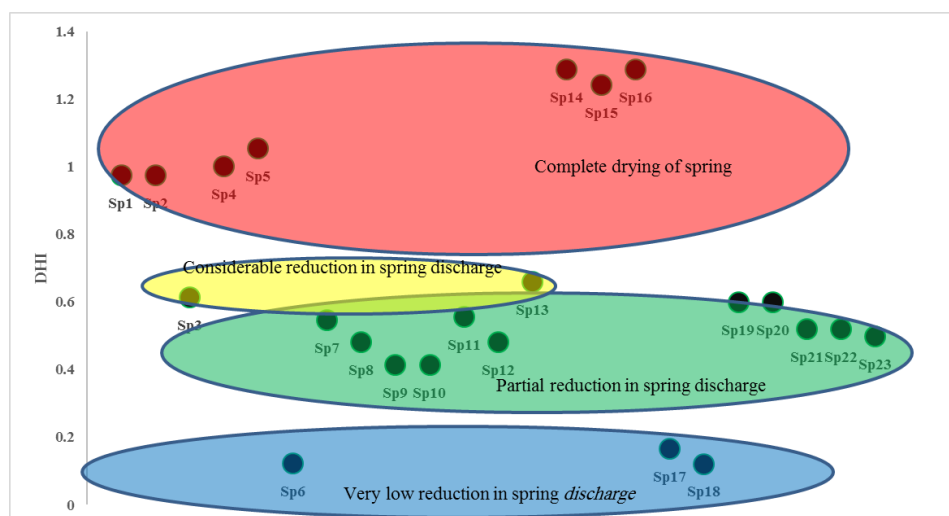
۳-۲- روش TIS

در روش TIS، چهار پارامتر اصلی شامل آب ورودی به تونل، فاصله بین چشمه تا محور تونل، ارتباط هیدرولیکی بین تونل و محیط آبخوان و در نهایت قابلیت تغذیه مجدد آبخوان، برای بررسی اثر حفر تونل انتقال آب طالقان (قطعه شرقی) بر منابع آبی پیرامون استفاده شده است. در گام اول، مقادیر TW تعیین

شد. هر چشمه در زون هیدروژئولوژیکی خاصی قرار گرفته است و مقادیر H (تراز پیزومتری بالای تونل) و K (هدایت هیدرولیکی بر اساس آزمایش‌های لوژان) در آن محاسبه شده است (جدول ۱). مقادیر TW با استفاده از زون هیدروژئولوژیکی مرتبط با هر چشمه تعیین شده است. سپس مقادیر تصحیح Kq و KI به دست آمده است.



شکل ۶- نقشه توزیع شاخص DHI در محدوده مطالعاتی
Fig. 6. Distribution map of DHI index in the study area



شکل ۷- نتایج روش DHI در محدوده مطالعاتی
Fig. 7. The results of DHI index in the study area

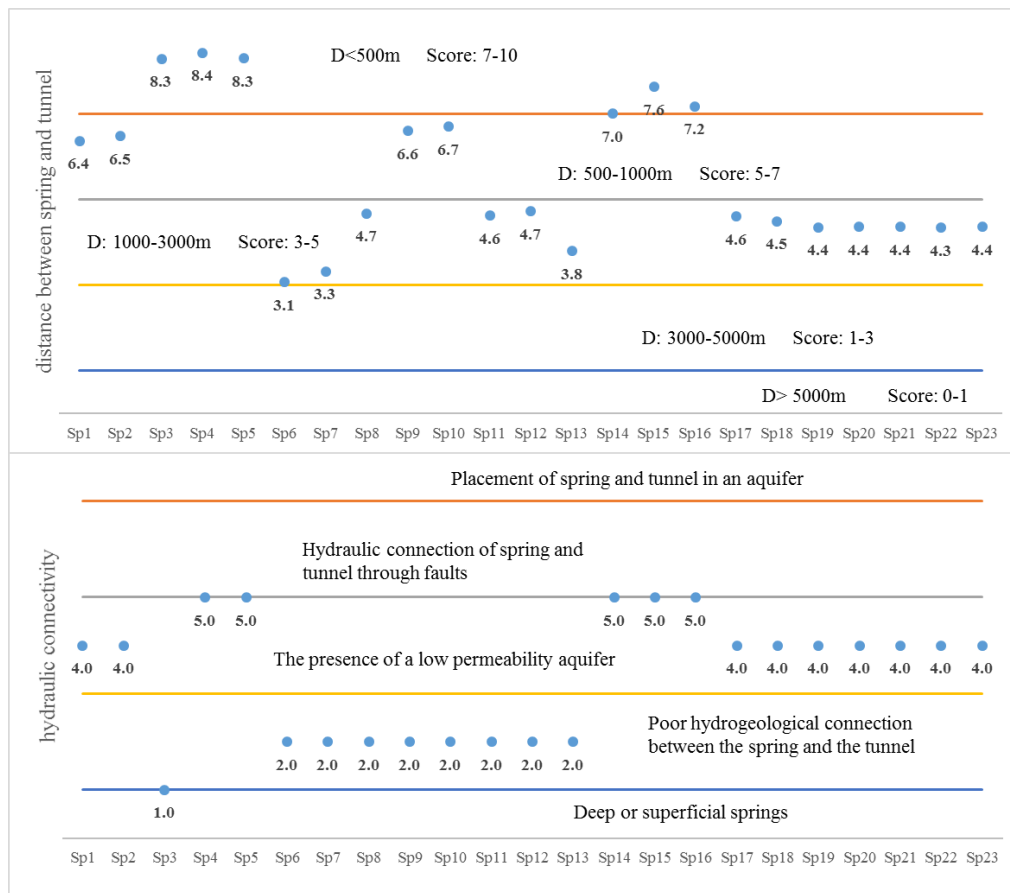
جدول ۱۱- نتایج پارامترهای مربوط به آب ورودی در شاخص TIS
Table 11. The results of parameters related to water inflow in the TIS index

Spring	HD	Qs	TW	Lt (m)	Q(l/s/100m)	R _{TW}	Lt/Hd	K _I	TW/Qs	K _q
Sp1	656	1.4	30	96	31	20	0.15	0.5	21	1.0
Sp2	629	1.5	30	96	31	20	0.15	0.5	20	1.0
Sp3	285	1.2	8	35	23	20	0.12	0.5	7	1.0
Sp4	261	2.6	8	24	33	20	0.09	0.5	3	1.0
Sp5	283	3.2	8	24	33	20	0.08	0.5	3	1.0
Sp6	2930	2.5	3	966	0	0	0.33	0.6	1	1.0
Sp7	2678	0.15	1	5	20	20	0.00	0.5	7	1.0
Sp8	1319	1.2	1	5	20	20	0.00	0.5	1	0.9
Sp9	599	1	1	8	13	13	0.01	0.5	1	1.0
Sp10	573	1.6	1	8	13	13	0.01	0.5	1	0.8
Sp11	1370	1.3	1	5	20	20	0.00	0.5	1	0.9
Sp12	1273	1.5	1	5	20	20	0.00	0.5	1	0.9
Sp13	2195	0.02	7	80	9	9	0.04	0.5	350	1.0
Sp14	498	0.7	8	68	12	12	0.14	0.5	11	1.0
Sp15	394	1	8	68	12	12	0.17	0.5	8	1.0
Sp16	470	0.6	8	68	12	12	0.14	0.5	13	1.0
Sp17	1389	2.2	2	135	1	1	0.10	0.5	1	1.0
Sp18	1502	0.02	2	135	1	1	0.09	0.5	100	1.0
Sp19	1645	1	1.5	11	14	14	0.01	0.5	2	1.0
Sp20	1640	1	1.5	11	14	14	0.01	0.5	2	1.0
Sp21	1639	0.3	1.5	11	14	14	0.01	0.5	5	1.0
Sp22	1661	0.5	1.5	11	14	14	0.01	0.5	3	1.0
Sp23	1637	0.2	1.5	11	14	14	0.01	0.5	8	1.0

نشان‌دهنده آبخوان حساس (محدوده خشک) و شرایط بسیار حساس (با امتیاز ۷) است.

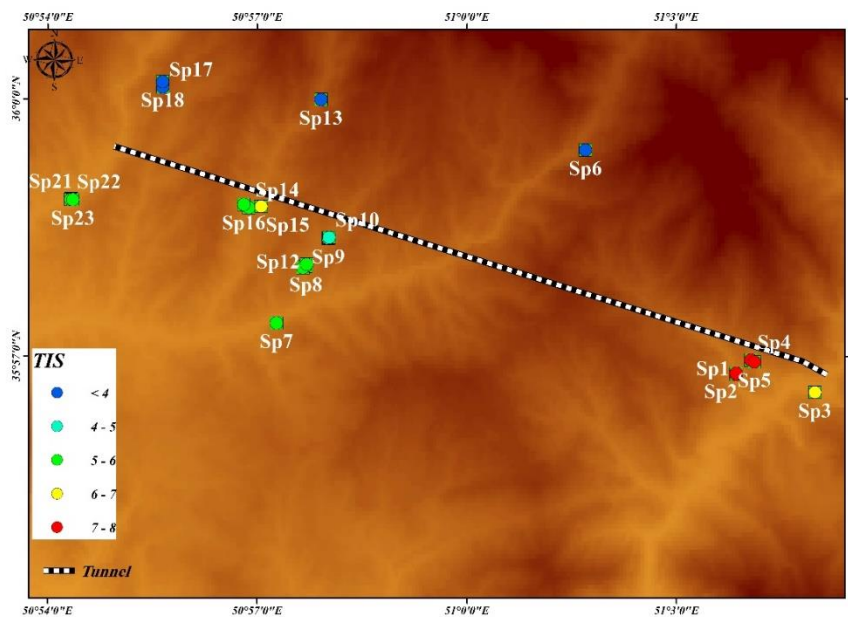
بر اساس رابطه ۴، و از همپوشانی شاخص‌های مختلف در این روش، احتمال خشکیدگی چشمه‌ها محاسبه شد. شکل ۹، نقشه توزیع شاخص TIS در قطعه شرقی تونل طالقان را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که حدود نیمی از چشمه‌ها در محدوده احتمال کاهش آبدهی (خطر متوسط و کلاس ۳ شاخص) قرار گرفته‌اند و تنها چهار دهنه چشمه (Sp13، Sp17 و Sp18) با احتمال شرایط بدون کاهش آبدهی مواجه خواهند شد. از طرفی، هیچ منبع آبی با شرایط خشکیدگی کامل در این شاخص مواجه نخواهد شد و کاهش قابل توجه آبدهی در ۴ دهنه چشمه ممکن است رخ دهد.

سپس مقادیر شاخص فاصله بین چشمه از محور تونل بر اساس جدول ۸ محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد که بیش از نیمی از چشمه‌ها در فاصله ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ متری از تونل قرار دارند و امتیاز ۳ تا ۵ را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۸). ارتباط هیدرولیکی بین تونل و چشمه (HC) با مشخص کردن موقعیت چشمه نسبت به زون‌های هیدروژئولوژیکی و ضریب نفوذپذیری هر زون (MK) صورت گرفت (جدول ۸). بر این اساس، چشمه‌های محدوده مطالعاتی در دو طبقه ارتباط ضعیف هیدروژئولوژیکی بین چشمه - تونل و وجود یک آبخوان کم‌نفوذپذیر بین چشمه - تونل قرار گرفتند (شکل ۸). در نهایت، شاخص قابلیت تغذیه مجدد و حساسیت آبخوان (AR)



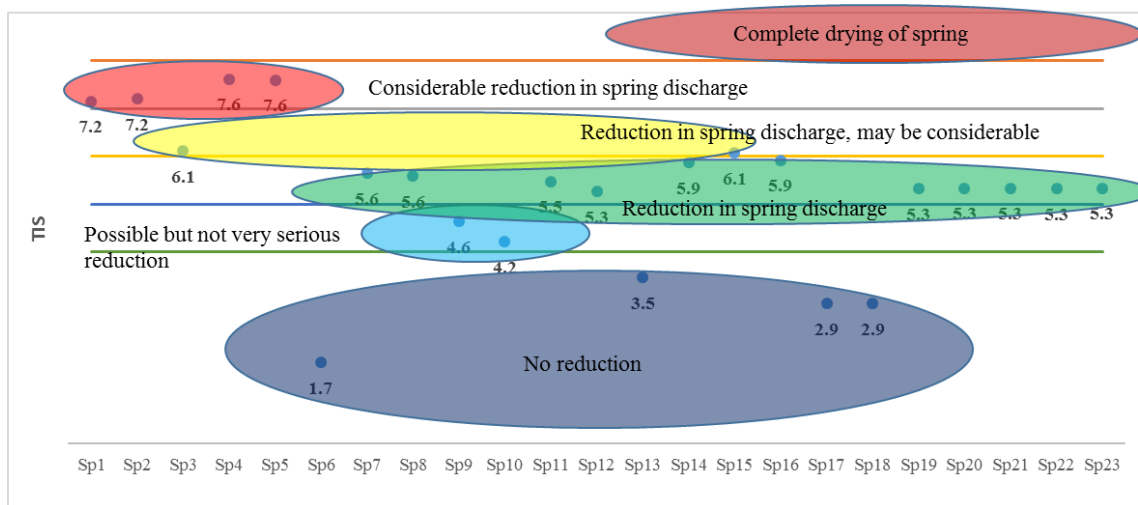
شکل ۸- امتیاز شاخص فاصله چشمه‌ها و ارتباط هیدرولیکی آن‌ها با تونل در روش TIS

Fig. 8. Scores related to the distance of springs and their hydraulic connection with tunnel in TIS method



شکل ۹- نقشه توزیع شاخص TIS در محدوده مطالعاتی

Fig. 9. Distribution map of TIS index in the study area



شکل ۱۰- نتایج روش TIS در محدوده مطالعاتی
Fig. 10. The results of TIS index in the study area

بین روش‌های مختلف توصیه می‌شود؛ زیرا چنین مطالعاتی، شباهت‌ها و تفاوت‌های مدل‌ها و شاخص‌های متنوع را نشان می‌دهد و به محققین مختلف کمک می‌کند تا بهترین روش‌های کاربردی را انتخاب کنند و بهترین عملکرد را در یک آبخوان خاص و یک سازه مشخص داشته باشند.

۴- نتیجه‌گیری

قطعه شرقی تونل انتقال آب طالقان به طول تقریبی ۱۵/۹ کیلومتر در حدفاصل روستای ورده و پایین‌دست سد امیرکبیر به‌عنوان بخشی از سامانه انتقال حقابه‌های آب شرب استان‌های البرز و تهران از سد طالقان طراحی شده است. اگرچه چشمه‌های واقع در مسیر این تونل اکثراً به‌صورت نشتاب و با آبدهی کم هستند اما شناسایی ۲۳ دهنه چشمه مهم پیرامون آن حاکی از اهمیت ویژه این منابع آبی از نظر هیدروژئولوژیکی و بالطبع مخاطرات اجتماعی است. بر اساس مطالعات انجام گرفته، وجود دره‌های گسلی شین‌شینی، سرهه و ورده حاکی از تکتونیک فعال در این محدوده مطالعاتی است که خود عامل به وجود آورنده چشمه‌های متعدد و نشتاب‌های درز و شکافی شده‌اند. علاوه بر آن، اگرچه آزمایش لوژان در غالب واحدهای زمین‌شناسی، مقادیر لوژان کمتر از یک تا حداکثر سه را نشان می‌دهد اما در شرایط افزایش درزه در توده سنگ، احتمال افزایش نفوذپذیری دور از ذهن نخواهد بود. بنابراین، احتمال کاهش شدید آبدهی و حتی خشک‌شدن چشمه‌ها در پیرامون تونل دور از ذهن نخواهد بود. از طرفی، تنها تکتونیک عامل

محدوده شاخص ارزیابی TIS بین ۱/۷ تا ۷/۶ بود که مطابق با معادله ۴ به‌دست آمد. این شاخص نسبت به شاخص DHI دارای تقسیم‌بندی جزئی‌تری است و مطابق جدول ۸، به شش کلاس خطر افت دبی چشمه شامل، بسیار کم (< 4)، کم (۵-۴)، متوسط (۶-۵)، زیاد (۷-۶)، خیلی زیاد (۸-۷) و به‌شدت بالا (> 8) طبقه‌بندی شده است. بر اساس ارزیابی‌های انجام شده (شکل ۹ و ۱۰)، رده‌های خیلی کم، کم، متوسط، بالا و خیلی بالا به ترتیب ۱۷ درصد (۴ مورد)، ۹ درصد (۲ مورد)، ۴۸ درصد (۱۱ مورد)، ۹ درصد (۲ مورد) و ۱۷ درصد (۴ مورد) را به خود اختصاص دادند. بر اساس شاخص TIS، ۶ چشمه، معادل ۲۶ درصد منابع آبی ارزیابی شده، با کاهش خیلی زیاد تا زیاد در آبدهی روبرو خواهند شد. ۴۸ درصد چشمه‌ها، کاهش متوسطی در آبدهی را تجربه خواهند کرد و ۲۶ درصد منابع آبی نیز یا تحت تأثیر حفاری قرار نخواهند گرفت و یا تأثیر کمی را تجربه خواهند نمود. تفاوت بین دو شاخص در این بود که شاخص TIS در کلاس‌های بسیار کم و کم چشمه‌های بیشتری را پوشش می‌دادند (۲۶ درصد در مقایسه با ۱۳ درصد)، درحالی‌که شاخص DHI در کلاس بالا (خشک‌شدگی کامل و کاهش بخش قابل‌ملاحظه‌ای از آبدهی) چشمه‌های بیشتری (۳۹ درصد در مقایسه با ۲۶ درصد) را پوشش می‌داد. در کلاس متوسط، نتایج هر دو روش یکسان بود و تفاوت معنی‌داری نشان نداد (۴۸ درصد برای هر دو روش).

درنهایت، مقایسه بین روش‌های مختلف مفید ارزیابی می‌گردد و برای بررسی تأثیر منابع آبی از حفاری تونل، مقایسه

حفری بر منابع آبی کمک می‌کند و به محققان توصیه می‌شود که هر دو روش را برای تحلیل دقیق‌تر مورد استفاده قرار دهند. در واقع، هر دو روش نقاط قوت و ضعف خاص خود را دارند و استفاده از هر دو می‌تواند به بررسی جامع‌تری از تأثیرات حفاری تونل بر منابع آبی کمک کند. این مقایسه می‌تواند به محققان در انتخاب بهترین روش برای شرایط خاص و اهداف مطالعه کمک کند. علیرغم همه مزایای استفاده از روش توأمان DHI و TIS در پیش‌بینی اثر حفر تونل بر منابع آبی پیرامون، این روش‌ها با محدودیت‌های مختلفی مواجه است که از جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ارائه اطلاعات نادرست و عدم همکاری برخی از روستاییان در شناسایی چشمه‌ها و منشأ قنوات
- نبود اطلاعات کافی در ارتباط با رفتار هیدرودینامیکی سازندهای مختلف در مسیر تونل
- عدم وجود بانک داده از منابع آب زیرزمینی (چشمه) در محدوده مطالعاتی

- وابستگی شدید به نوع و خصوصیات زمین‌شناسی منطقه است. در سنگ‌های نفوذپذیر یا با شکستگی زیاد، دبی آب ممکن است به‌طور ناگهانی عمل کند و این روش نتواند روش درستی ارائه دهد.

- وابستگی شدید به خصوصیات هیدروژئولوژیکی زمین نظیر نفوذپذیری، تخلخل و شکستگی‌های زیرسطحی
- عدم دقت در شرایط ناپایدار (برای مثال بارش شدید و پر آب شدن چشمه‌ها)

- محدودیت در پیش‌بینی بلندمدت نظیر تغییرات اقلیمی و سطح آب در بلندمدت
- تداخل منابع آبی با یکدیگر

در مطالعات تونل‌های انتقال آب، پایش چشمه‌های پیرامون پیش، حین و پس از حفاری در دستور کار قرار دارد که مبنای حقوقی دارد و می‌تواند در شکایات احتمالی بهره‌برداران و ذینفعان به آن اشاره کرد. در این راستا، چشمه‌های با احتمال خشکیدگی بیشتر در تواتر زمانی و دقت بیشتر پایش قرار دارند. برای مثال، ممکن است پایش چشمه با آبدهی کم، فاصله زیاد تا تونل و فاقد مالک به‌صورت فصلی انجام شود اما چشمه‌های که در مدل‌های DHI و TIS با احتمال خشکیدگی کامل مواجه بوده و مالک دارد تحت پایش ماهانه آبدهی قرار می‌گیرد.

اثرگذار بر این رخداد نخواهد بود و مسلماً عوامل مختلفی در این مهم دخیل خواهند بود. بنابراین، مطالعه احتمال خشک‌شدگی چشمه‌های منتخب پیرامون قطعه شرقی تونل با دو روش پارامتریک DHI (Dematteis et al., 2001) و TIS (Hassanpour et al., 2021) انجام شده است. دو عامل میزان نفوذپذیری سنگ‌های منطقه و زون‌های خردشده و فاصله چشمه‌ها از محور تونل، در هر دو روش، از جمله پارامترهای مؤثر در ارزیابی محسوب می‌شوند. با این حال، مقادیر آب ورودی به تونل در زون هیدروژئولوژیکی مرتبط با هر چشمه و پتانسیل تغذیه مجدد پس از حفاری از جمله پارامترهایی است که در روش TIS به آن توجه شده است. از طرفی، روش DHI به پارامترهای مختلفی نظیر تراکم گسل‌ها و شکستگی‌ها، برخورد یا عدم برخورد گسل با محل ظهور چشمه، ضخامت روباره چشمه بر تراز تونل و نوع چشمه پرداخته است.

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که احتمال روند کاهش آبدهی چشمه‌های منطقه در اثر حفر تونل در هر دو روش تا حد زیادی با هم همخوانی دارند، هرچند روش DHI شرایط بحرانی‌تری را بیان می‌کند. به عبارتی، در روش TIS، هیچ منبع آبی با خشکیدگی کامل مواجه نخواهد شد، درحالی‌که این شرایط در روش DHI در مورد هفت دهنه چشمه محدوده مطالعاتی رخ خواهد داد. از طرفی، نتایج نشان می‌دهد که چشمه‌های Sp6، Sp17 و Sp18 در هر دو روش در رده کمترین خطر کاهش آبدهی قرار گرفته‌اند. این رخداد در مورد چشمه Sp13 در روش TIS نیز رخ می‌دهد.

استفاده از روش‌های پارامتریک DHI و TIS با هدف بررسی شرایط احتمالی آینده منابع آب زیرزمینی ناشی از حفاری تونل‌های انتقال آب و سایر سازه‌های مشابه، به پیش‌بینی مخاطرات اجتماعی در طول پروژه کمک خواهد کرد. روش TIS بیشتر بر روی فاصله و ارتباط هیدرولیکی تمرکز دارد و برای تحلیل جزئی‌تر از تقسیم‌بندی شش کلاسی استفاده می‌کند. اما روش DHI به‌طور کلی تأثیر بیشتری را برای کاهش آبدهی پیش‌بینی کرده و در کلاس‌های خشکیدگی کامل و کاهش بخش قابل‌ملاحظه‌ای از آبدهی چشمه‌های بیشتری را شناسایی کرده است. به‌طور کلی، روش DHI نسبت به روش TIS شرایط بحرانی‌تری را پیش‌بینی می‌کند و از این رو، مقایسه بین این دو روش به فهم بهتر و انتخاب مناسب‌ترین روش برای ارزیابی تأثیر

مراجع

- Berberian, M., Ghoreishi, M., Ravesh, B.A. Ashjaei, A.M., 1983. Seismotectonic and Earthquake Fault Hazard Investigations in the Tehran Region. Geological Survey of Iran 56.
- Chen, Z., He, C., Zhang, Y., Xu, Z., Li, Z., Yu, B., 2023. The impact of formation heterogeneity on water discharge and groundwater depletion of an excavated tunnel. *Journal of Hydrology* 627, Part A, 130403. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130403>.
- Dematteis, A., Kalamaras, G., Eusebio, A., 2001. A system approach for evaluating springs drawdown due to tunneling -AITES-ITA 2001 World Tunnel Congress: Progress in tunnelling after 2000, 257-264. Milano, 10-13 June 2001.
- 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, Universitat Politècnica de Catalunya, UPC-BarcelonaTech.
- Gokdemir, C., Li, Y., Rubin, Y., Li, X., 2022. Stochastic modeling of groundwater drawdown response induced by tunnel drainage. *Engineering Geology* 297, 106529. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106529>.
- 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. <https://10.1007/s10040-021-02315-1>.
- 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. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 80(7), 5725-5742. <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02268-5>.
- Houlsby, A.C., 1976. Routine interpretation of the Lugeon water-test. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 9(4), 303-313. <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEG.1976.009.04.03>.
- Leopold, L.B., Frank, E.C., Bruce, B.H., James, R.B., 1971. A procedure for evaluating environmental impact. U.S. Geological Survey Circular 645, Washington D.C., U.S. Dep. Of the Interior. <https://doi.org/10.3133/cir645>
- 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* 1. <https://doi.org/10.1155/2015/149265>.
- Lv, Y., Jiang, J., Chen, L., Hu, W., Jiang, Y., 2022. Elaborate simulation and predication of the tunnel drainage effect on karst groundwater field and discharge based on Visual MODFLOW. *Journal of Hydrology* 612, Part A, 128023. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128023>.
- Mossmark, F., Annertz, K.K., Ericsson, L.O. Norin, M., 2017. Hydrochemical impact of construction of the western section of the Hallandsås rail tunnel in Sweden. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 76, 751–769. <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0962-7>
- 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. <https://10.1016/j.enggeo.2010.09.014>.
- Stocklin, J., 1974. Possible Ancient Continental Margin in Iran. In: Burke, C.A. and Drake, C.L., (Eds.), *The Geology of Continental Margins*, Springer, New York 873-887 PP. https://doi.org/10.1007/978-3-662-01141-6_64
- Tang, Y.G., Zhang, Q., Qi, J. H., Xu, M., Li, X., Qu, C. H., Yi, L., Wang, D., 2023. Change Analysis of Karst Landforms, Hydrogeological Conditions and Effects of Tunnel Excavation on Groundwater Environment in Three Topography Grades in China. *Water* 15, 207, 1-24. <https://doi.org/10.3390/w15010207>.
- Vincenzi, V., Piccinini, L., Gargini, A., Sapigni, M., 2022. Parametric and numerical modeling tools to forecast hydrogeological impacts of a tunnel. *Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater* 558, 51 – 69. <https://10.7343/as-2022-558>.

- Yoo, Chungsik. 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. [https://10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:2\(240\)](https://10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:2(240)).
- 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. <https://10.1016/j.tust.2019.103243>
- Zhang, Y., Tan, F., Zuo, C., Feng, X., Jiao, Y., 2024. Effects of granite stratum with different weathering levels on water discharge in metro tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology* 150, 105833. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105833>.