

Comparison of Parametric and Empirical Approaches for Assessing Tunnel Excavation Impacts on Spring Discharge: A Case Study of the Hezarmasjed Water Conveyance Tunnel

A. Saberinasr^{1*}, F. Ghatrani-nejad¹, M. Dashti Barmaki²

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

(*- Corresponding Author Email: a.saberinasr@scu.ac.ir)

2- Tehran Regional Water Authority, Tehran, Iran

Received: 28 February 2026

Revised: 12 July 2026

Accepted: 22 July 2026

Available Online: 22 July 2026

How to cite this article:

Saberinasr, A., Ghatrani-nejad, F., & Dashti Barmaki, M. (2026). Comparison of parametric and empirical approaches for assessing tunnel excavation impacts on spring discharge: A case study of the Hezarmasjed water conveyance tunnel. *Journal of Soil and Water*, 40(2), 127-151. (In Persian).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2026.98028.1530>

Introduction

Water conveyance tunnels are critical infrastructures for sustainable water supply, particularly in arid and semi-arid regions. However, tunnel excavation can significantly alter groundwater systems, resulting in potential hazards such as sudden groundwater inflow, reduction in aquifer storage, and deterioration of groundwater quantity and quality. In fractured and karstic environments, these impacts may extend over considerable distances and potentially modify regional hydrogeological regimes.

To address these challenges, various predictive approaches have been developed, including numerical modeling, parametric methods, hybrid techniques, and empirical models. Although numerical models can provide detailed insights into groundwater responses to tunnel excavation, their application generally requires extensive datasets and complex calibration procedures, which may limit their applicability in heterogeneous geological settings. Consequently, parametric and empirical approaches, such as the Drawdown Hazard Index (DHI) and Tunnel Impact Score (TIS), have received increasing attention because of their flexibility, simplicity, and suitability for preliminary assessments and real-time decision-making.

The Hezarmasjed water conveyance tunnel, located in northeastern Iran within the Kopet-Dagh tectonic zone, traverses a highly fractured carbonate system hosting numerous springs. Given the dependence of local communities on these springs, assessing the potential impacts of tunnel excavation is essential. This study aims to identify the main controlling factors governing variations in spring discharge and to evaluate spring vulnerability using both the DHI and TIS approaches.

Materials and Methods

The study area is situated in a structurally complex mountainous region characterized by active tectonics, heterogeneous lithology, and significant hydrogeological sensitivity. The tunnel, approximately 8.8 km in length, intersects several geological formations, including carbonate units (Mozduran and Torgan) acting as primary aquifers, and shale-dominated formations with low permeability. Groundwater flow is predominantly controlled by fracture networks and karstification processes, resulting in rapid hydrological responses to precipitation events.

A total of 45 springs were investigated at varying distances from the tunnel axis. Field data included hydrogeological observations, Lugeon permeability tests, and structural analyses. Permeability values generally ranged from $1\text{E-}7$ to $2.5\text{E-}6$ m/s, indicating low to moderate hydraulic conductivity, with higher values in fractured and karstified zones.

Two complementary methods were employed for impact assessment. The DHI method (Dematteis et al., 2001) is a semi-quantitative parametric approach based on seven key parameters, including fracture frequency, rock mass



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

<https://doi.org/10.22067/jsw.2026.98028.1530>

permeability, overburden thickness, plastic zone radius, fault–spring interaction, spring type, and distance from the tunnel. These parameters were normalized and combined to calculate a continuous index representing the risk of spring discharge reduction.

The TIS method (Hassanpour et al., 2021) is an empirical approach that evaluates spring vulnerability based on four main factors: tunnel water inflow (40% weight), hydraulic connectivity (40%), distance from the tunnel (15%), and aquifer recharge capacity (5%). The method provides a classification of impact severity, ranging from negligible to significant discharge reduction.

Results and Discussion

The DHI results indicate that spring vulnerability is primarily controlled by structural and hydrogeological parameters, particularly fracture density and permeability. Calculated DHI values range from 0.1 to 1.5, demonstrating a wide spectrum of potential impacts. Approximately 11% of springs are classified as highly to critically affected ($DHI \geq 0.6$), while the majority (about 89%) are expected to experience minor to moderate discharge reductions. Springs with high DHI values are typically located in highly fractured carbonate formations with strong hydraulic connectivity, where tunnel excavation acts as a drainage boundary, intercepting groundwater flow paths (Vincenzi et al., 2022; Saberinasr & Dashti Barmaki, 2023).

In contrast, springs located in low-permeability formations or at greater distances from the tunnel exhibit minimal sensitivity, with DHI values below 0.2. More than 70% of springs fall within an intermediate range, indicating moderate but persistent reductions due to partial hydraulic connectivity.

The TIS results highlight the importance of dynamic hydrogeological parameters, particularly tunnel water inflow and hydraulic connectivity. TIS values range from 1.6 to 6.9, reflecting significant variability in system response. Approximately 44% of springs are classified as unaffected, 44% experience moderate discharge reduction, and around 12% are subject to significant decline.

High-risk springs, such as Sirzar and Bamchenar, exhibit strong hydraulic connectivity and are located within sensitive recharge zones. Notably, the results indicate that hydraulic connectivity can dominate system behavior even at distances exceeding 1000 m, confirming previous findings that connectivity is more influential than geometric proximity (Hassanpour et al., 2021). Conversely, springs located in areas with higher recharge capacity and weaker hydraulic connectivity show minimal impact, even when tunnel inflow is relatively high. This behavior reflects the buffering capacity of aquifer systems, which can partially compensate for tunnel-induced drainage.

A comparative analysis of the two methods demonstrates that the DHI approach emphasizes intrinsic geological and structural conditions, providing a continuous representation of vulnerability, whereas the TIS method focuses on functional aquifer responses and offers a more practical classification of impact severity. The consistency between both methods in identifying high-risk springs supports the reliability of the integrated approach.

Conclusion

This study demonstrates that tunnel excavation can significantly affect groundwater systems, particularly in fractured and karstic aquifers. The integrated application of DHI and TIS methods provides a comprehensive framework for assessing these impacts.

The DHI method is effective for identifying intrinsic vulnerability and worst-case scenarios, highlighting the role of geological structures, permeability, and fracture density. Approximately 11% of springs are at high to critical risk, while most are expected to experience moderate impacts.

In contrast, the TIS method offers a more operational perspective by incorporating dynamic hydrogeological parameters, classifying springs into significant, moderate, and negligible impact categories. The results emphasize the dominant role of hydraulic connectivity and aquifer recharge capacity in controlling system response.

Overall, the combined use of parametric and empirical approaches enhances the reliability of impact assessments and provides a robust basis for groundwater management in tunnel projects. This integrated methodology is particularly suitable for complex hydrogeological environments where data limitations restrict the application of numerical models.

Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the Fanavaran Tarh Jame Consulting Engineers Company for providing essential datasets, technical documentation, and field measurements that enabled a comprehensive and reliable analysis of the hydrogeological system. Their professional support played a crucial role in the successful completion of this study.

Keywords: Drawdown Hazard Index (DHI), Drying, Groundwater inflow, Hydraulic connectivity, Tunneling Impact on Springs discharge (TIS)

مقاله پژوهشی

جلد ۴۰، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۵، ص. ۱۵۱-۱۲۷

مقایسه روش‌های پارامتریک و تجربی در ارزیابی اثرات حفاری تونل بر آبدی چشمه‌ها: مطالعه موردی تونل انتقال آب هزارمسجد

امیر صابری نصر^{۱*} - فاطمه قطرانی نژاد^۱ - مجید دشتی برمکی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۳۱

چکیده

حفار تونل‌های انتقال آب، اگرچه نقش مهمی در تأمین منابع آبی ایفا می‌کند، اما می‌تواند موجب اختلالات جدی در رژیم هیدروژئولوژیکی و آبدی چشمه‌ها شود. در این پژوهش، اثرات احتمالی حفاری تونل انتقال آب هزارمسجد در شمال شرق ایران بر ۴۵ چشمه پیرامونی، با استفاده از دو رویکرد شاخص خطر افت (DHI) و شاخص اثر تونل بر آبدی چشمه (TIS) مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. منطقه مورد مطالعه در زون ساختاری کپه‌داغ واقع شده و با گسترش سازندهای آهکی مزدوران و تیرگان، شکستگی‌های تکنیکی فعال و تراکم بالای چشمه‌ها شناخته می‌شود. در روش DHI، هفت پارامتر هیدروژئولوژیکی و هندسی شامل نفوذپذیری، فراوانی شکستگی، ضخامت روباره، زون پلاستیک، ارتباط با گسل، نوع چشمه و فاصله از تونل لحاظ شد. در مقابل، روش TIS بر چهار عامل عملکردی شامل شدت آب ورودی به تونل، فاصله چشمه-تونل، ارتباط هیدرولیکی و قابلیت تغذیه مجدد آبخوان متمرکز است. نتایج DHI نشان می‌دهد که حدود ۱۱ درصد از چشمه‌ها در معرض کاهش شدید آبدی تا خشکیدگی کامل قرار دارند، در حالی که اکثریت چشمه‌ها کاهش بخشی یا ناچیز را تجربه خواهند کرد. طبقه‌بندی TIS نیز نشان داد که ۵ چشمه در کلاس افت قابل توجه، ۲۰ چشمه در کلاس افت متوسط و ۲۰ چشمه در کلاس بدون تأثیر قرار می‌گیرند. مقایسه نتایج حاکی از آن است که DHI در تبیین مکانیزم‌های ساختاری نیست و TIS در اولویت‌بندی مدیریتی و پیامدمحور چشمه‌ها کارآمدتر است. استفاده توأمان از این دو روش، چارچوبی قابل اعتماد برای مدیریت مخاطرات هیدروژئولوژیکی پروژه‌های تونل‌سازی فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی: آب ورودی به تونل، ارتباط هیدرولیکی، خشکیدگی، شاخص خطر افت (DHI)، شاخص اثر تونل بر آبدی چشمه (TIS)

مقدمه

کیفیت و کمیت منابع آب زیرزمینی می‌شود (Zheng et al., 2021; Li et al., 2024). در برخی موارد، این تغییرات می‌تواند خسارات قابل توجهی به رژیم هیدروژئولوژیکی منطقه وارد کند (Chen, 2021; Sadique et al., 2025). بر این اساس، پیش‌بینی و ارزیابی مخاطرات در مراحل مختلف طراحی و اجرای تونل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و روش‌های متعددی برای این هدف توسعه یافته‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های پارامتریک مانند ارزیابی اثرات زیست محیطی^۱ (Samimi-Namin et al., 2014; Sun et al., 2025)، روش DHI (Vincenzi et al., 2022; Dematteis et al., 2001)،

حفاری تونل‌های انتقال آب می‌تواند با ایجاد زهکشی آب زیرزمینی پیامدهای مخرب هیدروژئولوژیکی و زیست‌محیطی به همراه داشته باشد که پایداری آبخوان‌ها و معیشت جوامع محلی را با مخاطرات جدی مواجه می‌سازد. از جمله این مخاطرات می‌توان به وقوع هجوم ناگهانی آب زیرزمینی به درون تونل در طول فرآیند حفاری اشاره کرد که علاوه بر ایجاد خسارت به تجهیزات و تأخیر در پیشرفت پروژه، موجب تغییر در تراز آب زیرزمینی، کاهش ظرفیت ذخیره‌سازی آبخوان و تغییر در

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

(*) نویسنده مسئول: Email: a.saberinasr@scu.ac.ir

۲- شرکت آب منطقه‌ای تهران، تهران، ایران

زیرزمینی در شبکه درزه و شکاف‌های نفوذپذیر گردد. با توجه به وابستگی معیشت ساکنین منطقه به چشمه‌ها برای مصارف شرب، کشاورزی و دامداری، و همچنین اهمیت زیست‌محیطی این منابع آبی، شناسایی و مدیریت مخاطرات احتمالی، از اهمیت بالایی برخوردار است. در نتیجه هدف اصلی این مطالعه، شناسایی عوامل کلیدی مؤثر بر تغییرات آبدی منابع آبی در محدود مطالعاتی و تعیین چشمه‌های در معرض خطر کاهش آبدی است. برای دستیابی به این اهداف و ارزیابی اثرات، از دو روش پارامتریک DHI (Dematteis et al., 2001) و روش تجربی TIS (Hassanpour et al., 2021) استفاده خواهد شد.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

تونل انتقال آب هزارمسجد به‌عنوان بخشی از یک پروژه زیرساختی حیاتی، با هدف پایدارسازی تأمین آب شرب کلان‌شهر مشهد و با بهره‌گیری از پتانسیل منابع آب‌های مرزی در شمال شرق کشور طراحی و اجرا گردیده است. این تونل با طول تقریبی ۸۸۰۰ متر، در محدوده استان خراسان رضوی و در فاصله تقریبی ۶۰ کیلومتری شمال شرق مشهد بین شمال شهرستان میامی در روستای نئی تا جنوب سیرزار واقع شده است. پرتال خروجی این تونل در فاصله ۱۳ کیلومتری شمال شهرستان میامی قرار دارد.

زمین‌شناسی منطقه

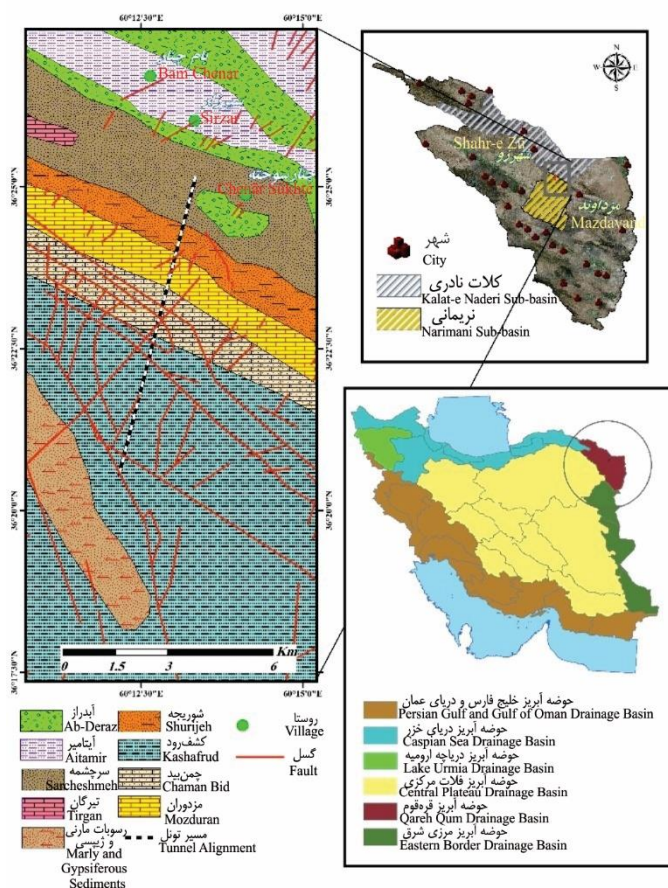
منطقه مورد مطالعه جزئی از حوضه رسوبی کپه‌داغ است که به صورت یک کمربند طویل در شمال خراسان رضوی واقع شده و در ادامه به بخش‌های شمالی ترکمنستان امتداد می‌یابد. این زون از جنوب به کوه‌های بینالود و از شمال به گسل عشق‌آباد—ترکمنستان محدود می‌شود. تشکیل حوضه رسوبی کپه‌داغ به دوره پس از کوهزایی سیمیرین پیشین بازمی‌گردد که همزمان با پایان برخورد بین صفحات ایران و توران رخ داده است (Karimian Torghabeh et al., 2013; Poursoltani, 2021). از نظر زمین‌شناسی این حوضه شرایط مشابهی با زاگرس دارد (Rostami et al., 2021). مانند چین‌خوردگی‌های موجود در منطقه که عمدتاً از نوع نامتقارن بوده و حاصل آخرین حرکات کوهزایی آلپ به شمار می‌روند. روند کلی این چین‌ها در جهت شمال غربی—جنوب شرقی است. به‌طور کلی، در مسیر تونل شش سازند قابل تشخیص بوده که به‌ترتیب از قدیم به جدید عبارتند از: کشف‌رود، چمن‌بید، مزدوران، شورججه، تیرگان و سرچشمه. سازند کشف‌رود در محدوده مورد مطالعه شامل تناوبی از شیل، مارن و ماسه‌سنگ‌های نازک لایه است و بر اساس میزان شیل (از ۱۰ تا ۶۰ درصد) به ۸ قسمت از JK1 تا JK8 تقسیم شده است. سازند چمن‌بید، اگرچه از نظر لیتولوژی شامل مارن تیره، قیری و پیریتی آمونیت‌دار، و لایه‌های نازک

AHP-AI (Samiei & Aalianvari, 2026) و SWING (Ohnishi et al., 2006) اشاره کرد. همچنین روش‌های تجربی مانند روش TIS (Hassanpour et al., 2021) و نیز روش‌های مبتنی بر مدل‌سازی عددی (Zheng et al., 2021) از جمله رویکردهای متداول برای ارزیابی اثرات هیدروژئولوژیکی حفاری تونل به شمار می‌روند. این روش‌ها قادرند تأثیرات احداث تونل بر متغیرهایی همچون آبدی منابع آب زیرزمینی، آبدی رودخانه‌ها و نوسانات سطح آب زیرزمینی را مورد بررسی قرار دهند. با این حال کاربرد مدل‌های عددی در محیط‌های زمین‌شناسی پیچیده، به ویژه در شرایطی که اطلاعات کافی از ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی و ساختارهای مؤثر بر جریان آب زیرزمینی در دسترس نباشد، مستلزم داده‌های میدانی گسترده و مدل مفهومی قابل اعتماد است و نتایج آن‌ها به کیفیت داده‌های ورودی و فرآیند واسنجی وابستگی زیادی دارد. در همین راستا، وینسنزی و همکاران (Vincenzi et al., 2022) در مطالعه‌ای بر روی تونل انحراف نیروگاه برق‌آبی در شمال ایتالیا گزارش کردند که به‌دلیل محدودیت داده‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی، استفاده از رویکرد عددی با عدم قطعیت قابل توجهی همراه بوده است. از این رو، برای ارزیابی اولیه اثرات حفاری تونل بر چشمه‌های منطقه، از رویکرد پارامتریک DHI استفاده کردند. به‌طور کلی، روش‌های پارامتریک و تجربی به‌دلیل سادگی ساختار، عدم نیاز به حل مستقیم معادلات پیچیده جریانات آب زیرزمینی و قابلیت استفاده در شرایط محدودیت داده، ابزارهای مناسبی برای ارزیابی اولیه و مقایسه نسبی میزان آسیب‌پذیری منابع آب محسوب می‌شوند. علاوه بر این، با پیشرفت مطالعات و دستیابی به اطلاعات جدید، پارامترهای این روش‌ها به راحتی قابل بازنگری و به‌روزرسانی هستند. بنابراین، در بسیاری از مطالعات مرتبط با تونل‌سازی (Abedian & Mojiri, 2023; Saberinasr & Dashti Barmaki, 2024) از این روش‌ها به عنوان ابزارهای ارزیابی مقدماتی اثرات حفر سازه زیرزمینی بر منابع آبی پیرامون استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر، کاهش دبی رودخانه هریرود ناشی از احداث سد سلما در افغانستان و افت تراز آب در سد دوستی که از منابع مهم تأمین آب شهر مشهد بوده است و همچنین تغییرات اقلیمی و خشکسالی‌های پی‌پی که منجر به کمبود آب و تنش آبی در منطقه شده است، طرح‌های انتقال آب از سایر حوضه‌های آبی را در اولویت مدیران قرار داده است. یکی از این طرح‌ها، طرح کنترل آب‌های مرزی شمال شرق (بخش شمال شرقی کپه‌داغ) و انتقال آن به حوضه‌های داخلی است که تونل هزارمسجد بخشی از این سامانه انتقال آب است. این پژوهش قصد دارد به بررسی اثرات حفر تونل انتقال آب هزارمسجد بر منابع آب زیرزمینی منطقه بپردازد. وجود ۴۵ چشمه و ساختارهای تکتونیکی متعدد از قبیل درزه و شکستگی در راستای تونل، حاکی از ارتباط معناداری بین ویژگی‌های زمین‌شناسی و جریان آب زیرزمینی در منطقه است. در نتیجه پیش‌بینی می‌شود که حفر تونل مذکور موجب تغییر گرادیان هیدرولیکی و تغییر مسیر جریان آب

هیدروژئولوژی و منابع آبی محدوده

از دیدگاه هیدروژئولوژیکی، سازندهای آهکی مزدوران و تیرگان، برجسته‌ترین سازندهای آهکی و آبدار رخمون یافته در مسیر تونل هستند. خاصیت شکنندگی ذاتی سنگ‌های کربناته در این سازندها به همراه تأثیر عملکرد و فعالیت نیروهای کوهزایی و تکتونیکی، از دلایل وجود درزه، شکستگی و شکاف‌های عمیق و وسیع در این سنگ‌ها بوده است. همچنین فرآیند انحلال و کارستیفیکیشن بر اثر جریان آب‌های سطحی دارای گازکربنیک این ویژگی‌ها را به تدریج بیشتر توسعه می‌دهد. بررسی آبدی چشمه‌های واقع در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد که اکثراً منشأ تغذیه‌ای از آبخوان‌های محلی دارند و در دسته چشمه‌های سطحی طبقه‌بندی می‌شوند؛ به‌گونه‌ای که دبی آن‌ها می‌تواند به‌طور قابل توجه تحت تأثیر بارندگی‌های منطقه باشد و نسبت به تغییرات واکنش سریعی نشان دهند. علاوه بر آن بررسی‌ها نشان می‌دهد، این چشمه‌ها در نیمه شمالی تونل، تراکم بیشتری دارند. چراکه جهت جریان آب زیرزمینی، هم‌جهت با شیب لایه‌های بخش آهکی میانی تونل، به سمت شمال امتداد دارند.

آهکی همراه با مقدار کمی چرت است، اما در مسیر تونل عمدتاً از آهک نازک لایه و آهک مارنی تشکیل شده است. سازند مزدوران نیز در این منطقه متشکل از آهک نازک لایه و آهک مارنی است. هر سه سازند بیان شده متعلق به ژوراسیک هستند. در این منطقه، سازند شورجه از سیلت‌سنگ و ماسه‌سنگ قرمز تا قهوه‌ای، سازند تیرگان از آهک متوسط لایه و سازند سرچشمه از شیل مدادی خاکستری و میان لایه‌های آهک نازک لایه تشکیل شده است. رسوبات عهد حاضر نیز به‌صورت پراکنده و کم‌ضخامت در آبراهه‌ها و مخروط‌افکنه‌ها قابل مشاهده است. بررسی‌های زمین‌شناسی مربوط به مسیر تونل، نشان می‌دهند که سازندهای منطقه در نتیجه تنش‌های تکتونیکی، دچار شکستگی‌های متعددی شده‌اند که اگرچه این زون‌ها از اهمیت ساختاری قابل توجهی برخوردارند اما اغلب به‌دلیل جنس سازندها، از نظر هیدروژئولوژیکی از پتانسل آبگذری محدودی برخوردار می‌باشند. در شکل ۱ موقعیت تونل، وضعیت زمین‌شناسی منطقه و پراکندگی گسل‌ها نمایش داده شده است.

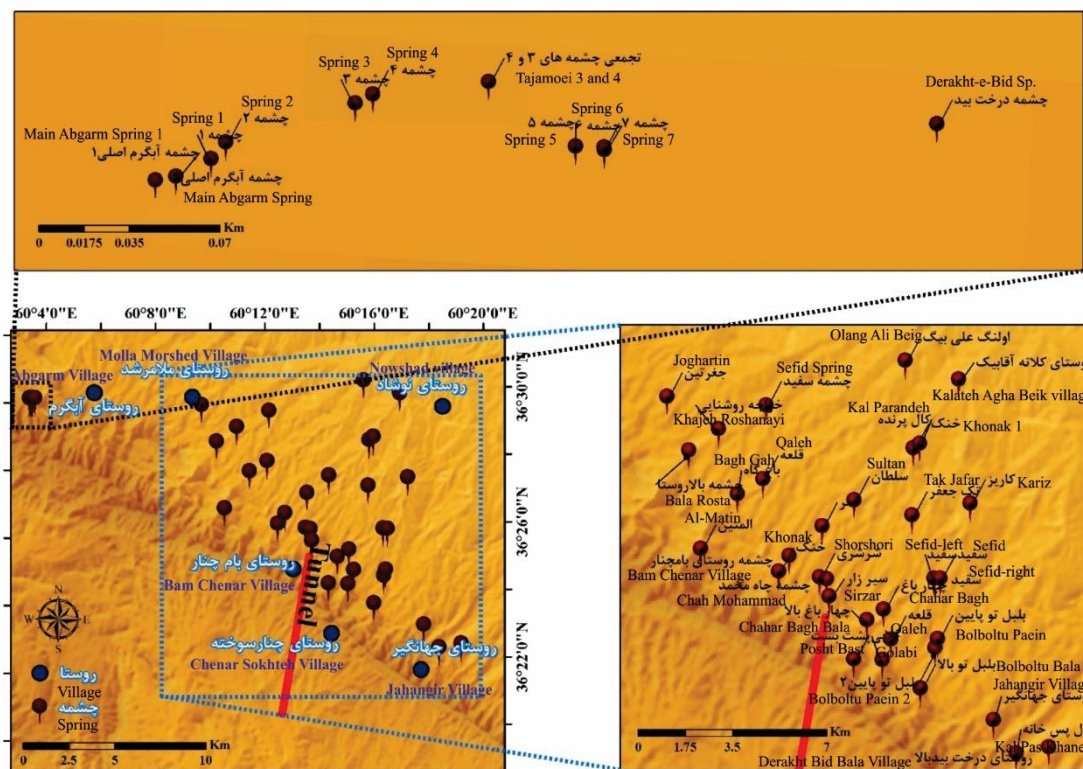


شکل ۱- موقعیت جغرافیایی تونل و نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه

Figure 1- Geographical location of the tunnel and geological map of the study area

چشمه آهکی بامچنار است که در دره‌ای با همین نام و بالای این روستا قرار دارد. بازدید صحرایی از این چشمه نشان می‌دهد که بخشی از آب چشمه توسط لوله برای شرب روستا منتقل شده، بخشی اعظم آب این چشمه توسط کانال برای کشاورزی به اراضی پیرامون روستا منتقل شده و بخش کمی در بستر دره جریان می‌یابد. آبدهی در لوله و کانال بتنی به ترتیب برابر با ۱ و ۲/۲ لیتر بر ثانیه برآورد شده است. در بازه ۳ تا ۵ کیلومتری از طرفین تونل، ۹ دهنه چشمه شناسایی شده است. چشمه‌های قمر و تک‌جعفر با آبدهی متوسط ۱/۵ لیتر بر ثانیه پر آب‌ترین چشمه‌های این بازه به شمار می‌روند. سایر چشمه‌ها آبدهی کمتر از ۱ لیتر بر ثانیه دارند. در بازه ۵ تا ۱۰، ۱۵ دهنه چشمه شناسایی شده است. مهمترین این چشمه‌ها المتین، باغگاه و روستای خواجه روشنایی هستند. در بازه بیش از ۱۰ کیلومتری نیز چندین چشمه وجود دارد که با در نظر گرفتن اهمیت بالای این ارزیابی، ۱۱ دهنه از میان آن‌ها به عنوان نماینده جهت تحلیل‌های هیدروژئولوژیکی انتخاب شدند. این چشمه‌ها در ارتفاعات بالاتر از سطح تراز تونل و از سازند سرچشمه که از مسیر تونل می‌گذرد ظهور یافته‌اند و در سمت شمال غربی تونل هستند. موقعیت جغرافیایی چشمه‌ها در شکل ۲ نمایش داده شده است.

در مقابل، در نیمه جنوبی تونل، چشمه قابل توجهی تا شعاع ۱۰ کیلومتری تونل مشاهده نشده است؛ زیرا سازند شیلی کشف‌رود، واحد اصلی رخنمون یافته در این ناحیه است که نفوذپذیری پایینی دارد. بنابراین، رواناب از طریق آبراهه‌های سطحی به سمت رودخانه‌ها و باتلاق‌های جنوبی محدوده مطالعاتی هدایت می‌شود. این باتلاق‌ها اغلب بر اثر شستشوی خاک به دلیل عدم نفوذ رواناب‌ها ایجاد می‌شوند. نفوذپذیری این واحدهای زمین‌شناختی را می‌توان از طریق دو گمانه حفر شده در مسیر تونل به نام BH-2 و BH-3، مورد ارزیابی قرار داد. نتایج آزمایش لوژان نشان می‌دهد در گمانه BH-3، مقادیر لوژان در اعماق بین ۸۰ تا ۱۰۰ متری، ۱ تا حداکثر ۲ برداشت شده است. این مقادیر در اعماق ۱۱۵ تا ۱۲۰ متری به متوسط ۶ لوژان رسیده و پس از آن دوباره به ۳ لوژان کاهش می‌یابد. بنابراین، با توجه به لیتولوژی شیلی در این گمانه، مقادیر لوژان پایینی برای آن برآورد می‌گردد. علاوه بر این، مقادیر لوژان در گمانه BH-2 حداکثر به ۲ رسیده است. در این پژوهش از چشمه‌های متعددی پیرامون محور تونل استفاده شده است. در محدوده ۳ کیلومتری از محور تونل ۱۰ دهنه چشمه وجود دارد. اغلب چشمه‌های این محدوده نظیر سیرزار، چاه محمد، شرشری و ... آبدهی ناچیزی کمتر از ۰/۱ لیتر بر ثانیه دارند. مهمترین چشمه در این بازه



شکل ۲- موقعیت چشمه‌ها

Figure 2- Springs location

اثر حفر تونل بر منابع آبی مسیر

روش DHI

بر اساس تحلیل‌های هیدروژئولوژیکی، نفوذ آب به داخل تونل عمدتاً تحت تأثیر دو سازوکار اصلی رخ می‌دهد: نخست، تقاطع مسیر تونل با ناپیوستگی‌های هیدرولیکی فعال نظیر درزه‌ها، شکستگی‌ها و گسل‌ها که به‌عنوان مسیرهای ترجیحی جریان آب زیرزمینی عمل می‌کنند؛ و دوم، ایجاد نواحی خردشدگی و زون پلاستیک در اثر تنش‌زدایی و حفاری تونل که موجب افزایش نفوذپذیری موضعی و تغییر مسیر جریان آب می‌شود. در این راستا، دمتیس و همکاران (Dematteis et al., 2001)، روش DHI را به‌عنوان یک روش نیمه کمی و پارامتریک برای ارزیابی احتمال کاهش آبدی چشمه‌ها در اثر هجوم آب به تونل توسعه داده‌اند. این روش بر پایه تحلیل علت و معلولی بین اجزای اصلی سیستم آبخوان - تونل بنا شده و با در نظر گرفتن اندرکنش متقابل پارامترهای هیدروژئولوژیکی و ژئومکانیکی، امکان ارزیابی سیستماتیک پیامدهای حفاری تونل بر منابع آب زیرزمینی را فراهم می‌سازد. ماهیت دینامیک این رویکرد به گونه‌ای است که تغییر در هر پارامتر می‌تواند رفتار سایر مؤلفه‌ها و در نهایت پاسخ کل سیستم را تحت تأثیر قرار دهد. در روش DHI، هفت پارامتر کلیدی برای سنجش حساسیت چشمه‌ها به حفاری تونل در نظر گرفته می‌شود که عبارتند از: (۱) فراوانی شکستگی‌ها^۱ که بیانگر وضعیت شبکه درزه‌ها و ناپیوستگی‌های توده سنگ است و معمولاً با شاخص‌هایی نظیر RQD ^۲، تراکم شکستگی، تداوم، وضعیت پرتشدگی و تمیزی سطوح شکستگی ارزیابی می‌شود؛ این ویژگی‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در هدایت هیدرولیکی توده سنگ دارند. پارامتر فراوانی شکستگی را می‌توان از رابطه RQD (Deere, 1967) و رابطه پالمستروم (Palmstrom, 1982) به دست آورد. در رابطه RQD ، مطابق رابطه ۱ قطعات شکستگی مغزه نسبت به طول گمانه سنجیده خواهند شد. ولی در رابطه پالمستروم (رابطه ۲) در صورتی که به مغزه و گمانه دسترسی وجود نداشته باشد، می‌توان RQD را با شمارش درزه‌های رخنمون‌های مسیر حفاری شده نیز محاسبه کرد. پارامتر J_v بیانگر تعداد درزه‌های موجود در واحد طول است.

$$RQD = \left(\frac{\text{مجموع طول قطعات مغزه سالم} \leq 10 \text{ سانتی‌متر}}{\text{طول کل گمانه}} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$RQD = 115 - 3.3(J_v) \quad (2)$$

(۲) نفوذپذیری توده سنگ^۳ که یکی از مؤثرترین عوامل در برآورد میزان آب ورودی به تونل است و معمولاً به‌دلیل تنوع لیتولوژیکی و

ساختاری در امتداد مسیر تونل، تغییرپذیری بالایی دارد و اغلب با آزمایش‌های صحرایی نظیر لوژان در گمانه‌های اکتشافی تعیین می‌شود. (۳) ضخامت روباره^۴ که به‌عنوان نمایانگر عمق تونل و تنش‌های روباره، بر میزان بازشدگی یا بسته‌شدگی درزه‌ها اثر می‌گذارد؛ به‌طوری‌که افزایش ضخامت روباره عموماً موجب کاهش نفوذپذیری مؤثر و در نتیجه کاهش احتمال افت آبدی چشمه‌ها می‌شود. (۴) شعاع زون پلاستیک^۵ که معرف گستره ناحیه آسیب‌دیده پیرامون تونل است؛ در اثر حفاری ایجاد شده و با افزایش آن، احتمال انحراف مسیر جریان و تشدید نشست آب به داخل تونل افزایش می‌یابد. (۵) پارامتر برخورد چشمه با گسل‌های اصلی^۶ که به موقعیت ساختاری چشمه نسبت به گسل‌ها و زون‌های خردشده اشاره دارد؛ از آنجاکه این ساختارها مسیرهای اصلی انتقال جریان هستند، چشمه‌های واقع در امتداد یا مجاورت آن‌ها نسبت به کاهش آبدی حساس‌ترند. (۶) نوع چشمه^۷ که بر اساس عمق آبخوان تغذیه‌کننده و دبی، چشمه‌ها را به انواع سطحی، حدواسط و عمیق تقسیم می‌کند که هر یک واکنش متفاوتی به تغییرات هیدرولیکی ناشی از حفاری تونل نشان می‌دهند. در نهایت، (۷) فاصله چشمه از محور تونل^۸ که رابطه‌ای معکوس با شدت تأثیرپذیری دارد؛ به‌گونه‌ای که با افزایش فاصله، تغییرات گرادیان هیدرولیکی در محدوده چشمه کاهش یافته و احتمال افت دبی کمتر می‌شود. در شکل ۳ نحوه امتیازدهی به این معیارها ارائه شده است.

وزن‌دهی و هم‌پوشانی در روش DHI

برای محاسبه شاخص DHI، مقادیر هر یک از پارامترهای فوق پس از نرمال‌سازی در بازه صفر تا یک، با ضرایب وزنی مشخص ترکیب می‌شوند و سپس اثر پارامترهای کنترلی مرتبط با موقعیت ساختاری و نوع چشمه به‌صورت ضریب‌های تعدیل‌کننده در رابطه ۳ اعمال می‌گردد:

$$DHI = (41 * FF + 22 * MK + 17 * OV + 20 * PZ) * (IF + 1) * (ST + 1) * (DT + 1) \quad (3)$$

مقدار نهایی DHI، مبنای طبقه‌بندی چشمه‌ها از نظر وضعیت آبدی بوده و طبق جدول ۱ دامنه‌ای از کاهش بسیار اندک تا کاهش شدید و حتی خشکیدگی کامل را شامل می‌شود. بدین ترتیب، این شاخص ابزاری کارآمد برای اولویت‌بندی چشمه‌های در معرض خطر و پشتیبانی از تصمیم‌گیری در طراحی و اجرای پروژه‌های تونل‌سازی از دیدگاه هیدروژئولوژیکی فراهم می‌کند.

5- Plastic Zone Radius (PZ)

6- Main Faults Intersection (IF)

7- Spring type (ST)

8- Distance From The Tunnel (DT)

1- Fracture Frequency (FF)

۲- Rock Quality Designation سنگ یا شاخص کیفیت سنگ

3- Rock Mass Permeability (MK)

4- Overburden (OV)

FF	MK	OV	PZ	IF	ST	DT
فراوانی شکستگی	نفوذپذیری توده سنگ	ضخامت روباره	شعاع زون پلاستیک	برخورد با گسل	نوع چشمه	فاصله چشمه از تونل
Fracture/m شاخص شکستگی	Permeability Degree شاخص درجه نفوذپذیری	Thickness(m) شاخص ضخامت	Radius (m) شاخص شعاع	No بله Yes No	Types نوع Superficial سطحی Intermediate متوسط Deep Flow جریان عمیق	Distance (m) فاصله (متر) >800 600-800 400-600 200-400 100-200 <100
0 0.25 0.5 0.75 1	خیلی کم کم متوسط زیاد	<50 50 100 200 >200	0 10 20 30	0 1	0 0.5 1	0 0.1 0.2 0.4 0.8 1

شکل ۳- امتیازدهی پارامترهای مؤثر در تغییرات آبدهی چشمه‌ها در اثر حفر تونل

Figure 3- Determining the Value of the Effective Parameters in the Changes of the Springs Discharge As A Result of Tunnel Excavation

جدول ۱- توصیف خطر خشکیدگی چشمه بر اساس شاخص DHI

Table 1- Description of Spring drawdown risk based on DHI value

شاخص خطر افت DHI	0.2 >	0.2-0.6	0.6-0.7	0.7 <
طبقه‌بندی خطر Risk class	بدون تا حداقل Null to minimal	کاهش بخشی Partial	کاهش بخشی تا کامل Partial to complete	کامل Complete
توصیف Description	بدون تغییر تا کاهش بسیار اندک آبدهی چشمه No to very slight reduction in spring discharge	کاهش بخشی آبدهی چشمه Partial reduction in spring discharge	کاهش قابل توجه تا توقف کامل آبدهی چشمه Significant to complete reduction in spring discharge	توقف کامل آبدهی چشمه Complete cessation of spring discharge

روش TIS

آب ورودی به تونل: این پارامتر، اثرگذارترین پارامتر روش TIS است. با افزایش هجوم آب به درون تونل، شدت زهکشی منابع آب زیرزمینی و افت تراز آبخوان افزایش می‌یابد. این موارد، باعث می‌شود پیامدهای نامطلوبی برای چشمه‌های وابسته به این آبخوان‌ها به‌وجود آید. حسن پور و همکاران (Hassanpour et al., 2021)، برای اندازه‌گیری این پارامتر، از دو فاکتور بار آبی بالای تونل^۵ و هدایت هیدرولیکی توده سنگ^۶ در محاسبات خود استفاده کرده‌اند. در مطالعه حاضر، هدایت هیدرولیکی توده سنگ بر اساس نتایج آزمایش‌های لوژان انجام‌شده در گمانه‌های اکتشافی تعیین شد. همچنین، بار آبی بالای تونل با استفاده از اندازه‌گیری تراز آب زیرزمینی در دو گمانه اکتشافی

حسن پور و همکاران (Hassanpour et al., 2021)، بر پایه تجربیات حاصل از پنج پروژه تونل سازی در ایران شامل تونل‌های انتقال آب نوسود، قمرو، بازی دراز، کرمان و کرج و با اعتبارسنجی از طریق پروژه خط ۶ مترو تهران، با استفاده از روش تحلیلی سلسله مراتبی^۱، مدل TIS را برای ارزیابی خطر کاهش آبدهی چشمه‌های واقع در پیرامون تونل‌ها ارائه کردند. این مدل بر اساس چهار پارامتر اصلی توسعه یافته که شامل حجم آب ورودی به تونل^۲، فاصله بین چشمه و تونل^۳، ارتباط هیدرولیکی بین تونل و آبخوان^۴ و تغذیه مجدد آبخوان^۵ هستند.

- 5- Aquifer recharge potential (AR)
- 6- Piezometric head above the tunnel (H)
- 7- Rock mass hydraulic conductivity (K)

- 1- AHP
- 2- Water Inflow In Tunnel (TW)
- 3- Distance between spring and tunnel (HD)
- 4- Hydraulic connection effectiveness and origin of water in spring (HC)

هیدروژئولوژیکی و ضریب نفوذپذیری هر زون ارزیابی می شود. امتیاز این پارامتر ۴۰٪ از سهم امتیاز کل TIS را تشکیل می دهد تا از نظر وزن دهی، پارامتر HC هم وزن پارامتر TW قرار گیرد.

قابلیت تغذیه مجدد آبخوان (حساسیت آبخوان): این ارزیابی نشان می دهد که در شرایط مشابه از نظر آب ورودی به تونل، آبخوان هایی که حوضه تغذیه کوچک تر و مخزن با حجم محدودتری دارند، تغییرات سطح آب ناشی از حفاری تونل در آن ها بیشتر مشاهده می شود. این موضوع گویای آسیب پذیری آبخوان بوده و احتمال کاهش آبدی با خشکیدگی چشمه های وابسته به آنها وجود دارد. در مقابل آبخوان های بزرگ با سطح تغذیه وسیع تر، توانایی تحمل و بازیابی بیشتری در مواجهه با کاهش سطح آب دارند. در روش TIS، همانطور که در **جدول ۲-۱** نمایش داده شده است؛ این پارامتر به سه دسته تقسیم بندی می شود که براساس قرارگیری آبخوان در هر یک از این سه دسته نمره ای به پارامتر AR تعلق می گیرد به طور کلی پارامتر مذکور به لحاظ وزنی پنج درصد نمره کل TIS برای هر چشمه را تشکیل می دهد.

وزن دهی و همپوشانی در روش TIS

پس از ارزیابی پارامترهای TIS، بر اساس محیط سنگی تونل و تحلیل شرایط هیدروژئولوژیکی چشمه های مورد مطالعه و تخصیص امتیاز متناسب برای هر پارامتر، مقدار عدد TIS هر چشمه محاسبه می گردد. مقادیر وزنی پارامترهای مختلف توسط حسن پور و همکاران (Hassanpour et al., 2021) پیشنهاد شده است و به شرح **رابطه ۴** می باشد. در نهایت، عدد TIS در مقادیر کمتر از چهار تا بیشتر از هشت، در شش کلاس طبقه بندی می گردد (**جدول ۲-۲**).

$$TIS = 0.4 R_{TW} K_q K_q + 0.15 R_{HD} + 0.4 R_{HC} + 0.05 R_{AR} \quad (4)$$

به طور خلاصه، تفاوت مفهومی دو روش در این است که DHI رویکردی علت محور و ساختاری دارد و بر شرایط زمین شناسی- ژئومکانیکی مؤثر بر نفوذ آب به تونل تأکید می کند، در حالی که TIS رویکردی پیامد محور و عملکردی دارد و شدت زهکشی، ارتباط هیدرولیکی و تاب آوری آبخوان را مبنای ارزیابی قرار می دهد. از نظر پارامترها، DHI جزئی نگرتر و مناسب تحلیل مکانیزم های نشت است، در حالی که TIS ساده تر، مدیریتی تر و مناسب اولویت بندی چشمه ها در مقیاس پروژه محسوب می شود.

و برآورد پروفیل سطح آب زیرزمینی در امتداد مسیر تونل، بر پایه اطلاعات گمانه ها، موقعیت و تراز چشمه ها، توپوگرافی منطقه و شناخت شرایط زمین شناسی و هیدروژئولوژیکی محدوده، محاسبه گردید. مسیر تونل، براساس وضعیت لیتولوژی، تغییرات نفوذپذیری، تغییرات ارتفاعی تراز آب، تعداد و دبی چشمه ها و تکتونیک، زون بندی می شود. هر زون مقادیر معینی برای هدایت هیدرولیکی و بار هیدرولیکی دارد. در مدل TIS برای پارامتر آب ورودی به تونل بر اساس رابطه H-K، پنج حالت مختلف پیشنهاد شده است. بر این مینا تونل می تواند در یکی از پنج حالت خشک^۱، نمناک^۲، مرطوب (خیس)^۳، جریان قطره ای^۴ و جریان^۵ قرار می گیرد. در **جدول ۲-۲** با توجه به حالتی که وضعیت تونل در آن قرار دارد، نمره ای به پارامتر TW اختصاص می یابد که سهم ۴۰ درصدی از نمره کل TIS را تشکیل می دهد. برای پارامتر TW دو ضریب تصحیح K_q و K_i در نظر گرفته شده است. محاسبه هر یک از این ضرایب از طریق نسبت گیری بین دو پارامتر مرتبط صورت می پذیرد. بدین ترتیب که ابتدا نسبت بین پارامترهای مربوطه محاسبه شده و سپس با استفاده از روابط تعریف شده در **جدول ۲-۲** مقدار نهایی هر ضریب در بازه بین صفر تا یک تعیین می گردد.

فاصله بین تونل و چشمه: در مدل TIS، پارامتر فاصله بین تونل و چشمه رابطه معکوس با میزان اثرپذیری چشمه از حفاری تونل دارد؛ به طوری که با افزایش فاصله بین چشمه و تونل، احتمال تأثیر تونل بر چشمه کاهش خواهد یافت. با توجه به مطالعات حسن پور و همکاران (Hassanpour et al., 2021) چشمه های در فاصله کمتر از ۵۰۰ متر تا محور تونل، بیشترین تأثیر را نسبت به فرایند حفاری نشان خواهند داد. در مدل TIS، با افزایش این فاصله، نمره پارامتر HD کاهش می یابد. به طور کلی امتیاز این پارامتر، ۱۵ درصد امتیاز کل TIS را تشکیل می دهد.

ارتباط هیدرولیکی بین تونل و آبخوان: معمولاً ارزیابی و دسته بندی ارتباط هیدرولیکی بین تونل و آبخوان ها بر اساس ویژگی های هیدروژئولوژیکی منطقه و منشأ آبدی چشمه ها صورت می گیرد. این دسته بندی چشمه ها را به سه دسته چشمه عمیق، چشمه نیمه عمیق و چشمه سطحی تقسیم می کند. چشمه های عمیق از آبخوان های عمیق و شاید محبوس تغذیه می شوند و چشمه های سطحی از لایه های سطحی زمین که متأثر از بارندگی ها هستند، سرچشمه می گیرند. حسن پور و همکاران (Hassanpour et al., 2021) در مطالعه خودشان دریافتند که در این میان، چشمه های نیمه عمیق اند که با آبخوان های منطقه ارتباط مستقیم دارند و بیشترین اثرپذیری را از حفاری تونل دریافت می کنند. این پارامتر به ۵ دسته تقسیم بندی شد که با تعیین موقعیت چشمه نسبت به زون های

جدول ۲- A) سیستم ارائه شده برای امتیازدهی و دسته‌بندی پارامترها و ضرایب در روش TIS (B. طبقه‌بندی چشمه‌ها بر اساس شاخص TIS
Table 2- A) Proposed classification system for parameters and coefficients in the TIS method. B) Spring classes based on TIS index (Hassanpour et al., 2021)

الف. پارامترهای طبقه‌بندی، دامنه مقادیر و امتیازدهی آنها						
A. Classification parameters, their range of values and their ratings						
No	Parameter	پارامتر	Weight of Parameter (%) وزن پارامتر (درصد)	Rating of Classes امتیازدهی طبقات		
				0-1	1-3	3-5
				Dry < 0.1 خشک	Damp 0.1-1 نمناک	Wet 1-5 مرطوب
1	TW: Total water inflow in tunnel (lit/s/100m) مجموع آب ورودی به تونل (لیتر بر ثانیه در ۱۰۰ متر)		40	< 0.1	0.25	0.5
				0.5	0.6	0.75
				< 0.1	0.25	0.5
				0.5	0.6	0.75
2	HD: Distance between spring and tunnel (m) فاصله بین تونل و چشمه (متر)		15	> 5000	3000-5000	1000-3000
						500-1000
						< 500
3	HC: Hydraulic connection effectiveness and origin of water in spring اثربخشی ارتباط هیدرولیکی و منشأ آب چشمه		40	Not connected, Deep or superficial springs عدم ارتباط، چشمه‌های عمیق یا سطحی	Partly effective نسبتاً مؤثر	Moderately effective اثربخشی متوسط
						Effective مؤثر
						Very effective خیلی مؤثر
4	AR: Aquifer recharge potential (sensitivity) پتانسیل تغذیه آبخوان		5	Insensitive aquifer, wide recharge area, high annual and monthly precipitation, wet season آبخوان غیر حساس، محدوده تغذیه گسترده، بارش ماهانه و سالانه زیاد، فصل مرطوب	Intermediate حدوسط	Sensitive aquifer, Dry area or dry season آبخوان حساس، منطقه خشک یا فصل خشک
ب. طبقات چشمه بر اساس مجموع امتیازات و مطابق رابطه زیر تعیین می‌شوند:						
B. spring classes are determined from total ratings according to below equation:						
$TIS = 0.4 R_{TW} K_1 K_2 + 0.15 R_{HD} + 0.4 R_{HC} + 0.05 R_{AR}$						
TIS Value	TIS مقدار		< 4	4-5	5-6	6-7
Class number	شماره طبقه		T-I	T-II	T-III	T-IV
Hazard of reduction in spring discharge	خطر کاهش در آبدهی چشمه		Very low خیلی کم	Low کم	Moderate متوسط	High زیاد
Spring behavior	رفتار چشمه		Not reduction عدم کاهش	Possible but not very serious reduction کاهش محتمل، اما نه چندان شدید	Reduction in spring discharge کاهش در آبدهی چشمه	Reduction in spring discharge, may be considerable کاهش در آبدهی چشمه ممکن است قابل توجه باشد
Qs: Spring discharge (lit/s), Lt: Effective length of tunnel in aquifer (m) which water inflow occurs, K ₁ : Correction factor for Lt/HD, K ₂ : Correction factor for TW/Qs.						
Qs: Spring discharge (lit/s), Lt: Effective length of tunnel in aquifer (m) which water inflow occurs, K ₁ : Correction factor for Lt/HD, K ₂ : Correction factor for TW/Qs.						

ارزیابی تأثیر چشمه‌ها با روش DHI

در این بخش با بررسی هفت پارامتر روش DHI و مقادیر اختصاص یافته به هر معیار در هر چشمه میزان خشکیدگی چشمه‌ها ارزیابی شده است.

زون پلاستیک: از آنجایی که اجرای حفاری تونل هزارمسجد به روش مکانیزه انجام می‌شود، شعاع زون پلاستیک در واحدهای زمین‌شناسی مسیر به حداقل ممکن رسیده و از مقادیر ناچیزی برخوردار است. بر اساس ارزیابی‌های صورت گرفته، مقدار این پارامتر کمتر از شعاع حفاری تونل در نظر گرفته شده است و امتیاز مربوط به آن طبق شکل ۳ در کل مسیر تونل، صفر لحاظ می‌شود.

ضخامت روباره: به‌منظور اندازه‌گیری مقادیر ضخامت روباره در طول مسیر تونل هزارمسجد، از پروفیل زمین‌شناسی و محاسبه اختلاف ارتفاع بین تراز هر چشمه (جدول ۴) و تراز تونل (به میزان ۱۱۸۰ متر) در نزدیک‌ترین فاصله ممکن استفاده شد. مقادیر محاسبه شده OV برای هر چشمه در جدول ۸ ارائه شده است.

گردآوری داده‌ها و تعیین پارامترها

پارامترهای مورد نیاز برای اجرای هر دو روش بر اساس داده‌های حاصل از مطالعات صحرایی، نتایج گمانه‌های اکتشافی، آزمایش‌های برجا، نقشه‌های زمین‌شناسی، مدل رقومی ارتفاع (DEM)، تصاویر ماهواره‌ای و تحلیل‌های مکانی در محیط GIS تعیین شدند. در بخش‌هایی از مسیر که داده‌های مستقیم در دسترس نبود، مقادیر پارامترها با استفاده از تشابه واحدهای زمین‌شناسی، شرایط هیدروژئولوژیکی و شواهد صحرایی برآورد گردید. جدول ۳ خلاصه‌ای از منابع داده و روش تعیین هر یک از پارامترهای مورد استفاده در این پژوهش را ارائه می‌دهد.

بحث و نتایج

همانطوری که بیان شده است، تونل انتقال آب هزارمسجد در امتداد مسیر خود از مجاورت ۴۵ چشمه عبور می‌کند. در این بخش با ارزیابی پارامترهای دو روش DHI (Dematteis et al., 2001) و TIS (Hassanpour et al., 2021) به تحلیل تغییرات آبدهی چشمه‌ها و احتمال خشک‌شدگی آنها در برابر عملیات حفاری پرداخته می‌شود.

جدول ۳- منابع داده، داده‌های پایه و روش تعیین پارامترهای مورد استفاده

Table 3- Data sources, Primary data, and methods used for determining the parameters

روش تعیین هر پارامتر Parameter determination method	منبع داده Data source	داده‌های پایه Basic data	پارامتر Parameter
از اختلاف بین محور تونل و تراز هر چشمه در نزدیکترین فاصله افقی بین تونل و چشمه محاسبه شد. Calculated from the elevation difference between each spring and the tunnel axis at the nearest horizontal distance.	پروفیل زمین‌شناسی، DEM و اطلاعات توپوگرافی Geological profile, DEM, and topographic data	تراز محور تونل، تراز چشمه‌ها، مدل رقمی ارتفاع Tunnel-axis elevation, spring elevations, and Digital Elevation Model (DEM)	ضخامت روباره Overburden Thickness
با توجه به اجرای تونل به روش TBM و محدود بودن اختشاش توده‌سنگ نسبت به روش حفاری انفجاری، شعاع زون پلاستیک ناچیز در نظر گرفته شد. Considering that the tunnel was excavated using a TBM and that rock-mass disturbance is limited compared with conventional blasting methods, the plastic-zone radius was assumed to be negligible.	اسناد طراحی پروژه و گزارش مطالعات مکانیک سنگ Project design documents and rock-mechanics investigation reports	روش حفاری تونل و شرایط توده سنگ Tunnel excavation method and rock-mass conditions	شعاع زون پلاستیک Plastic Zone Radius
با تحلیل مکانی در محیط GIS و بررسی هم‌پوشانی یا مجاورت چشمه‌ها با گسل‌های اصلی/فرعی تعیین شد. Determined through spatial analysis in a GIS environment by evaluating the overlap or proximity of springs to major and minor faults.	نقشه زمین‌شناسی، تصاویر هوایی و ماهواره‌ای Geological maps, aerial photographs, and satellite imagery	موقعیت چشمه‌ها و گسل‌ها Locations of springs and faults	ارتباط چشمه با گسل Spring-Fault Relationship
هدایت هیدرولیکی بر اساس نتایج آزمایش‌های لوژان تعیین شد. در بخش‌های فاقد داده، مقادیر با استفاده از تشابه لیتولوژی، شرایط هیدروژئولوژیکی و ویژگی‌های ساختاری واحدهای مشابه برآورد گردید و با تجربیات پروژه‌های مشابه، مقادیر تعدیل شدند. Hydraulic conductivity was determined based on the Lugeon test results. For sections without direct measurements, values were estimated based on lithological similarity, hydrogeological conditions, and structural characteristics of comparable units, and subsequently adjusted using experience from similar projects.	گمانه‌های اکتشافی BH-2 و BH-3 و پیمایش‌های صحرایی Exploratory boreholes BH-2 and BH-3 and field investigations	نتایج آزمایش‌های لوژان Lugeon test results	هدایت هیدرولیکی Hydraulic Conductivity
با استفاده از اندازه‌گیری تراز آب در گمانه‌ها و برآورد پروفیل سطح آب زیرزمینی در امتداد مسیر تونل بر اساس اطلاعات هیدروژئولوژیکی، موقعیت چشمه‌ها و شرایط توپوگرافی تعیین شد. Determined using groundwater-level measurements in the boreholes and estimation of the groundwater-table profile along the tunnel alignment based on hydrogeological information, spring locations, and topographic conditions.	گمانه‌های BH-2، BH-3، DEM، اطلاعات چشمه‌ها و پروفیل زمین‌شناسی Boreholes BH-2 and BH-3, DEM, spring data, and geological profile	تراز آب زیرزمینی در گمانه‌ها، تراز چشمه‌ها و توپوگرافی منطقه Groundwater levels in boreholes, spring elevations, and regional topography	بار آبی بالای تونل Hydraulic Head Above the Tunnel
بر اساس مقادیر RQD و تراکم شکستگی‌های مشاهده‌شده در برداشت‌های صحرایی تعیین شد. Determined based on RQD values and the fracture density observed during field investigations.	مغزه‌های حفاری، مطالعات زمین‌شناسی و پیمایش‌های میدانی Drill cores, geological investigations, and field surveys	مقادیر RQD و پیمایش‌های صحرایی روی محور تونل RQD values and field surveys along the tunnel alignment	فراوانی شکستگی‌ها Fracture Frequency
بر اساس اندازه‌گیری دبی و بررسی ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی هر چشمه تعیین شد. Determined based on discharge measurements and assessment of the hydrogeological characteristics of each spring.	اندازه‌گیری‌های صحرایی Field measurements	دبی اندازه‌گیری شده و ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی Measured discharge and hydrogeological characteristics	نوع چشمه Spring Type
به‌صورت کوتاه‌ترین فاصله افقی بین محور تونل و هر چشمه در محیط GIS محاسبه شد. Calculated in a GIS environment as the shortest horizontal distance between the tunnel axis and each spring.	GPS، تصاویر ماهواره‌ای و GIS GPS, satellite imagery, and GIS	مختصات چشمه‌ها و مسیر تونل Spring coordinates and tunnel alignment	فاصله چشمه تا محور تونل Spring-to-Tunnel-Axis Distance
با استفاده از روابط تحلیلی متداول و معتبر نظیر شامل (Goodman et al. (1965، El Tani (2003 و ... برآورد گردید. Estimated using established analytical relationships, including those proposed by Goodman et al. (1965) and El Tani (2003).	گمانه‌ها، پیمایش صحرایی، پروفیل زمین‌شناسی و توپوگرافی	بار آبی و هدایت هیدرولیکی Hydraulic head and hydraulic conductivity	آب ورودی به تونل Tunnel Water Inflow

جدول ۴- مقادیر تراز ارتفاعی هر چشمه

Table 4- Z-value of each spring

NO ردیف	Spring name نام چشمه	Elevation (m) ارتفاع	NO ردیف	Spring name نام چشمه	Elevation (m) ارتفاع	NO ردیف	Spring name نام چشمه	Elevation (m) ارتفاع
1	سیرزار Sirzar	818	16	سفید Sefid	847	31	روستای درخت بیدبالا Derakht Bid Bala Village	995
2	چشمه چاه محمد Chah Mohammad	1004	17	سفید-چپ Sefid-Left	863	32	اولنگ علی بیگ Olang Ali Beig	578
3	شرشری Shorshori	1015	18	سفید-راست Sefid-Right	863	33	جغرتین Joghartin	944
4	گلایی Golabi	1228	19	تک جعفر Tak Jafar	876	34	روستای کلاته آقاییک Kalateh Agha Beik Village	750
5	چهار باغ Chahar Bagh	915	20	المتین Al-Matin	1339	35	چشمه آبگرم اصلی ۱ Main Abgarm Spring 1	1283
6	چهار باغ بالا Chahar Bagh Bala	1574	21	قلعه Qaleh	829	36	چشمه آبگرم اصلی ۲ Main Abgarm Spring 2	1283
7	خنک Khonak	912	22	باغ گاه Bagh Gah	903	37	چشمه ۱ Spring 1	1283
8	پشت بست Posht Bast	1096	23	کاریز Kariz	746	38	چشمه ۲ Spring 2	1283
9	روستای بامچنار Bam Chenar Village	991	24	جهانگیر Jahangir	1102	39	چشمه ۳ Spring 3	1283
10	قلعه Qaleh	951	25	خنک ۱ Khonak 1	672	40	چشمه ۴ Spring 4	1283
11	قمر Qamar	901	26	کال پرند Kal Parandeh	720	41	تجمعی چشمه‌های ۳ و ۴ Tjamoei 3 and 4	1283
12	بلبل تو بالا Bolboltu Bala	1121	27	چشمه بالاروستا Bala-Rosta	971	42	چشمه ۵ Spring 5	1255
13	بلبل تو پایین Bolboltu Paein	966	28	خواجه روشنایی Khajeh Roshanayi	914	43	چشمه ۶ Spring 6	1255
14	بلبل تو پایین ۲ Bolboltu Paein 2	999	29	کال پس خانه Kal Pas-Khaneh	1196	44	چشمه ۷ Spring 7	1255
15	سلطان Sultan	904	30	چشمه سفید Sefid Sp.	833	45	چشمه درخت بید Derakht-e-Bid Sp.	1267

پروژه‌های مشابه، تراکم گسل‌ها و مقادیر تجربی برای لیتولوژی‌های مختلف، مقادیر نفوذپذیری را تعدیل نمود.

فراوانی شکستگی‌ها: طبق RQD که از گمانه‌های بدست آمده است، براساس برآوردهای صورت گرفته مقادیر پارامتر فراوانی شکستگی بین ۴ تا ۱۰ محاسبه شد. براساس شکل ۳، امتیاز ۰/۴۹ به این پارامتر تعلق می‌گیرد که در محدوده متوسطی قرار دارد. در شکل ۴ نیز مشاهده می‌شود که تعداد چشمه‌ها ارتباط قوی با میزان متوسط درصد فراوانی شکستگی توده سنگ دارد.

نفوذپذیری: داده‌های مرتبط با نفوذپذیری هیدرولیکی در لیتولوژی‌های مختلف، از طریق دو گمانه BH-2 و BH-3، واقع در مسیر پروژه برداشت شده‌اند. در این گمانه‌ها برای ارزیابی واحدهای زمین‌شناسی و ساختارهای موجود در مسیر تونل که فاقد داده کافی در این زمینه بودند، آزمایش لوژان انجام شد. برای تعیین نفوذپذیری، در بقیه بخش‌های تونل که فاقد داده هستند، از تشابه شرایط زمین‌شناسی و هیدرولیکی کمک گرفته شد. همچنین باید به این موضوع اشاره کرد، در زون‌های گسلی، نقاطی که توده سنگ درزه و شکستگی دارد یا در نواحی کارستی مانند سازندهای مزدوران و کلات در انتهای تونل، مقدار لوژان افزایش یافت. در این موارد می‌توان از تجربیات عملی در

جدول ۵- وضعیت برخورد گسل و چشمه
Table 5- Fault-spring interaction status

NO ردیف	Spring name نام چشمه	Fault intersection تقاطع با گسل	NO ردیف	Spring name نام چشمه	Fault intersection تقاطع با گسل	NO ریف	Spring name نام چشمه	Fault intersection تقاطع با گسل
1	سیرزار Sirzar	خیر No	16	سفید Sefid	بله Yes	31	روستای درخت بیدبالا Derakht Bid Bala Village	خیر No
2	چشمه چاه محمد Chah Mohammad	خیر No	17	سفید-چپ Sefid-Left	خیر No	32	اولنگ علی بیگ Olang Ali Beig	خیر No
3	شرشوری Shorshori	بله Yes	18	سفید-راست Sefid-Right	خیر No	33	جغرتین Joghartin	خیر No
4	گلایی Golabi	بله Yes	19	تک جعفر Tak Jafar	خیر No	34	روستای کلاته آقاییک Kalateh Agha Beik Village	خیر No
5	چهار باغ Chahar Bagh	بله Yes	20	المتین Al-Matin	خیر No	35	چشمه آبگرم اصلی ۱ Main Abgarm Spring 1	خیر No
6	چهار باغ بالا Chahar Bagh Bala	خیر No	21	قلعه Qaleh	خیر No	36	چشمه آبگرم اصلی ۲ Main Abgarm Spring 2	خیر No
7	خنک Khonak	خیر No	22	باغ گاه Bagh Gah	خیر No	37	چشمه ۱ Spring 1	خیر No
8	پشت بست Posht Bast	خیر No	23	کاریز Kariz	خیر No	38	چشمه ۲ Spring 2	خیر No
9	روستای بامچنار Bam Chenar Village	خیر No	24	جهانگیر Jahangir	خیر No	39	چشمه ۳ Spring 3	خیر No
10	قلعه Qaleh	خیر No	25	خنک ۱ Khonak 1	خیر No	40	چشمه ۴ Spring 4	خیر No
11	قمر Qamar	خیر No	26	کال پرنده Kal Parandeh	خیر No	41	تجمعی چشمه های ۳ و ۴ Tjamoei 3 and 4	خیر No
12	بلبل تو بالا Bolboltu Bala	خیر No	27	چشمه بالاروستا Bala-Rosta	بله Yes	42	چشمه ۵ Spring 5	خیر No
13	بلبل تو پایین Bolboltu Paein	خیر No	28	خواجه روشنایی Khajeh Roshanayi	خیر No	43	چشمه ۶ Spring 6	خیر No
14	بلبل تو پایین ۲ Bolboltu Paein 2	خیر No	29	کال پس خانه Kal Pas- Khaneh	خیر No	44	چشمه ۷ Spring 7	خیر No
15	سلطان Sultan	خیر No	30	چشمه سفید Sefid Sp.	خیر No	45	چشمه درخت بید Derakht-e-Bid Sp.	خیر No

جدول ۵ نوع چشمه ها از لحاظ برخورد با گسل مشخص شده اند.

نوع چشمه: آبدهی نسبتاً پایین اغلب چشمه های محدوده مطالعه و واکنش سریع آن ها به بارندگی، بیانگر آن است که این چشمه ها عمدتاً توسط آبخوان های محلی با ظرفیت ذخیره محدود تغذیه می شوند. علاوه بر این، شواهد صحرایی، نتایج آزمایش های لوژان و مقادیر نسبتاً پایین نفوذپذیری در بخش عمده مسیر تونل، حاکی از آن است که

برخورد چشمه به گسل: مسیرهای ترجیحی جریان آب زیرزمینی، از گسل ها و زون های خرد شده ناشی از آن ها عبور می کند، به همین خاطر بر اثر برخورد چشمه ها با گسل ها و شکستگی های امتداد مسیر حفاری تونل، آبدهی چشمه ها دچار تغییرات احتمالی خواهند شد. در

نتایج محاسبه شاخص DHI برای ۴۵ چشمه (جدول ۸) اطراف تونل نشان می‌دهد که پاسخ هیدرولوژیکی چشمه‌ها به حفاری تونل، به‌طور مستقیم تابع ترکیب پارامترهای هیدروژئولوژیکی و مهندسی لحاظ شده، در این شاخص است. توزیع مقادیر DHI بیانگر آن است که حدود ۱۱ درصد از چشمه‌ها ($DHI \leq 0.6$) در معرض اثرات قابل توجه تا بحرانی حفاری قرار دارند. در حالی که ۸۹ درصد چشمه‌ها تنها کاهش بخشی و یا ناچیز در آبدی را تجربه خواهند کرد.

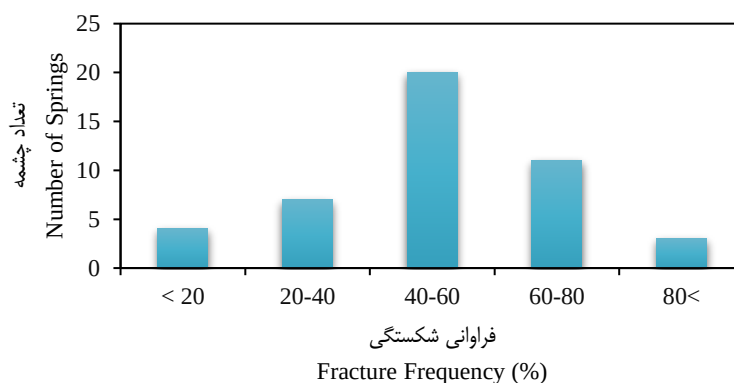
چشمه‌های با DHI بسیار بالا (بیشتر از ۰/۷) نظیر چشمه‌های گلابی ($DHI - 1/48$)، چهار باغ ($DHI - 1/03$) و روستای بامچنار ($DHI - 0/87$) که احتمالاً با خشک شدن کامل مواجه خواهند شد، همگی دارای ویژگی‌های مشترکی هستند. در این چشمه‌ها، نفوذپذیری در حد متوسط تا زیاد و ضریب شکستگی بالا است. ضریب شکستگی بالا حاکی از توسعه شبکه ترجیحی جریان بوده و نفوذپذیری زیاد نیز امکان انتقال سریع افت تراز هیدرولیکی را فراهم می‌نماید. علاوه بر این حداقل یکی از پارامترهای تقویتی نظیر IF و SP نیز در آن‌ها فعال (با امتیاز ۱) است. چنین ترکیب پارامتری موجب می‌شود که تونل به‌عنوان یک مرز زهکشی مؤثر عمل کرده و مسیر تغذیه چشمه‌ها را قطع یا منحرف نماید؛ پدیده‌ای که در مطالعات پیشین نیز به‌عنوان عامل اصلی خشک شدن منابع آبی گزارش شده است (Vincenzi et al., 2022; Saberinasr & Dashti Barmaki, 2023). علاوه بر این چشمه‌هایی نظیر تک‌جعفر و شرشری با DHI حدود ۰/۶ و چشمه ۷ با DHI برابر با ۰/۵۸ اگرچه پیش‌بینی می‌شود که به‌طور کامل خشک نشوند، اما در محدوده ریسک زیاد قرار می‌گیرند و کاهش محسوسی در آبدی را تجربه خواهند کرد.

توسعه کارستی در منطقه محدود بوده و جریان آب زیرزمینی عمدتاً در امتداد شبکه درزه‌ها و شکستگی‌های موجود انجام می‌شود. بنابراین، از دیدگاه هیدروژئولوژیکی، این چشمه‌ها را می‌توان به‌عنوان چشمه‌های محلی با توسعه محدود کارست در نظر گرفت که آبدی آن‌ها بیش از هر چیز تابع شرایط تغذیه، بارندگی و ویژگی‌های ساختاری توده‌سنگ است. بر این اساس و همچنین با توجه به شکل ۳ و جدول ۶ ۲۹ دهنه چشمه، با آبدی کمتر از ۱ لیتر بر ثانیه در زمره چشمه‌های محلی (Local springs) قرار می‌گیرند که از سیستم‌های جریان محلی تغذیه شده و ظرفیت ذخیره محدودی دارند. تنها ۴ دهنه چشمه عمیق و ۱۲ دهنه نیمه عمیق هستند.

فاصله چشمه از محور تونل: موقعیت، ارتفاع چشمه‌ها و فاصله آن‌ها از محور تونل اندازه‌گیری شده و در جدول ۷ ارائه شده است. نزدیکترین چشمه به محور تونل، چشمه سیرزار در فاصله ۶۰۰ متری است و بقیه چشمه‌ها در فواصل بیشتر از ۱۲۲۵ متر قرار دارند که طبق شکل ۳، امتیاز صفر به آن‌ها تعلق می‌گیرد.

جمع‌بندی روش DHI

پس از ارزیابی پارامترهای DHI و محاسبه امتیاز برای هر کدام بر اساس شکل ۳، مقدار عدد DHI با استفاده از رابطه ۳ برای هر چشمه تعیین شد. سپس با توجه به جدول ۱، وضعیت اثرپذیری چشمه‌ها نسبت به حفاری تونل پیش‌بینی و طبقه‌بندی شد. طبق نتایج حاصل شده، تمامی چشمه‌های پیرامون مسیر تونل، تحت تأثیر حفاری قرار گرفته و دچار تغییراتی در آبدی خواهند شد. به‌طور کلی، مقادیر شاخص DHI در بازه بین ۰/۱ تا ۱/۵ متغیر هستند که بیانگر طیف گسترده‌ای از خطر خشکیدگی برای چشمه‌ها است.



شکل ۴- نمودار تعداد چشمه‌ها در برابر فراوانی شکستگی‌ها
Figure 4- Number of Springs versus Fracture Frequency

جدول ۶- مقادیر متوسط آبدهی چشمه‌ها در مسیر تونل

Table 6- Average spring discharge values along the tunnel alignment

NO ردیف	Spring name نام چشمه	Average discharge (L.s ⁻¹) متوسط آبدهی	NO ردیف	Spring name نام چشمه	Average discharge (L.s ⁻¹) متوسط آبدهی	NO ردیف	Spring name نام چشمه	Average discharge (L.s ⁻¹) متوسط آبدهی
1	سیرزار Sirzar	0.01	16	سفید Sefid	0.2	31	روستای درخت بیدبالا Derakht Bid Bala Village	0.01
2	چشمه چاه محمد Chah Mohammad	0.1	17	سفید-چپ Sefid-Left	0.01	32	اولنگ علی بیگ Olang Ali Beig	0.01
3	شرشری Shorshori	0.5	18	سفید-راست Sefid-Right	0.01	33	جغرتین Joghartin	0.01
4	گلابی Golabi	2.5	19	تک جعفر Tak Jafar	1.5	34	روستای کلاته آقاییک Kalateh Agha Beik Village	0.2
5	چهار باغ Chahar Bagh	1.5	20	المتین Al-Matin	16	35	چشمه آبگرم اصلی ۱ Main Abgarm Spring 1	2.4
6	چهار باغ بالا Chahar Bagh Bala	0.01	21	قلعه Qaleh	0.01	36	چشمه آبگرم اصلی ۲ Main Abgarm Spring 2	1.9
7	خنک Khonak	0.5	22	باغ گاه Bagh Gah	2	37	چشمه ۱ Spring 1	1.1
8	پشت بست Posht Bast	0.5	23	کاریز Kariz	0.2	38	چشمه ۲ Spring 2	0.01
9	روستای بامچنار Bam Chenar Village	3.5	24	جهانگیر Jahangir	0.1	39	چشمه ۳ Spring 3	2
10	قلعه Qaleh	0.5	25	خنک ۱ Khonak 1	0.01	40	چشمه ۴ Spring 4	.01
11	قمر Qamar	1.5	26	کال پرند Kal Parandeh	0.01	41	تجمعی چشمه های ۳ و ۴ Tjamoei 3 and 4	26
12	بلبل تو بالا Bolboltu Bala	0.2	27	چشمه بالاروستا Bala-Rosta	0.2	42	چشمه ۵ Spring 5	0.01
13	بلبل تو پایین Bolboltu Paein	0.2	28	خواجه روشنایی Khajeh Roshanayi	2	43	چشمه ۶ Spring 6	2
14	بلبل تو پایین ۲ Bolboltu Paein 2	0.01	29	کال پس خانه Kal Pas-Khaneh	0.5	44	چشمه ۷ Spring 7	4
15	سلطان Sultan	0.5	30	چشمه سفید Sefid Sp.	0.4	45	چشمه درخت بید Derakht-e-Bid Sp.	1.2

باشند.

چشمه‌ها با DHI برابر با بازه ۰/۲ تا ۰/۶ دارند، بیش از نیمی از چشمه‌ها (۳۳) چشمه برابر با حدود ۷۳٪ از کل چشمه‌ها را شامل می‌شود، رفتاری حدوسط نشان می‌دهند. در این گروه، کاهش آبدهی غالباً جزئی اما پایدار است و نشان می‌دهد که اگرچه ارتباط هیدرولیکی کامل با تونل وجود ندارد، اما شبکه شکستگی‌ها و شرایط زمین‌شناسی اجازه انتقال بخشی از جریان آب را می‌دهند. در جدول ۸ نتایج

در مقابل چشمه‌های با DHI کمتر از ۰/۲ عمدتاً در محیط‌های با شکستگی محدود، فاصله بیشتر از تونل و نبود ارتباط هیدرولیکی مستقیم قرار دارند. در این شرایط حفاری تونل تنها موجب اغتشاش موضعی در میدان جریان شده و کاهش آبدهی در حد تغییرات فصلی باقی خواهد ماند. در این دسته چشمه‌های دیگری مانند روستای جهانگیر، درخت بید بالا و اولنگ علی‌بیگ دارای DHI کمتر از ۰/۲ هستند که پیش‌بینی می‌شود کمترین میزان تأثیرپذیری از تونل را داشته

زون‌های هیدروژئولوژیک تعیین شد تا مقادیر H و K مرتبط با هر چشمه، به دست آید. بر این اساس پارامتر TW بر مبنای زون هیدروژئولوژیک مربوطه تعیین و سپس مقادیر K_I و K_q طبق فرمول‌های ارائه شده در جدول ۲-۲ محاسبه شدند. سپس با استفاده از امتیازدهی پارامترهای TIS در جدول ۲-۲ پارامترهای فاصله افقی چشمه تا تراز تونل، ارتباط هیدرولیکی بین آبخوان و تونل و در نهایت پتانسیل تغذیه آبخوان برای هر چشمه تعیین شدند.

پارامترهای شاخص DHI، مقادیر DHI و وضعیت خشکیدگی برای هر چشمه، محاسبه شده است. در شکل ۵ نیز نحوه توزیع شاخص DHI در مسیر تونل هزارمسجد نمایش داده شده است.

نتایج روش TIS

همانند روش DHI، ابتدا مسیر تونل به ۷۰ زون هیدروژئولوژیک تقسیم‌بندی شد. در مرحله بعد، موقعیت هر چشمه نسبت به این

جدول ۷- فاصله هر چشمه از محور تونل

Table 7- Table 7. Distance of Each Spring from the Tunnel Axis

NO ردیف	Spring name نام چشمه	Distance from tunnel (m) فاصله از تونل	NO ردیف	Spring name نام چشمه	Distance from tunnel (m) فاصله از تونل	NO ردیف	Spring name نام چشمه	Distance from tunnel (m) فاصله از تونل
1	سیرزار Sirzar	606	16	سفید Sefid	4446	31	روستای درخت بیدبالا Derakht Bid Bala Village	9053
2	چشمه چاه محمد Chah Mohammad	1226	17	سفید-چپ Sefid-Left	4241	32	اولنگ علی بیگ Olang Ali Beig	9830
3	شرشوری Shorshori	1315	18	سفید-راست Sefid-Right	4238	33	جغرتین Joghartin	9951
4	گلایی Golabi	1339	19	تک جعفر Tak Jafar	4840	34	روستای کلاته آقاییک Kalateh Agha Beik Village	9987
5	چهار باغ Chahar Bagh	2171	20	المتین Al-Matin	5203	35	چشمه آبگرم اصلی ۱ Main Abgarm Spring 1	17455
6	چهار باغ بالا Chahar Bagh Bala	1574	21	قلعه Qaleh	5463	36	چشمه آبگرم اصلی ۲ Main Abgarm Spring 2	17461
7	خنک Khonak	2309	22	باغ گاه Bagh Gah	5471	37	چشمه ۱ Spring 1	17446
8	پشت بست Posht Bast	2388	23	کاریز Kariz	6741	38	چشمه ۲ Spring 2	17444
9	روستای بامچنار Bam Chenar Village	2488	24	جهانگیر Jahangir	6854	39	چشمه ۳ Spring 3	17408
10	قلعه Qaleh	2575	25	خنک ۱ Khonak 1	6936	40	چشمه ۴ Spring 4	17403
11	قمر Qamar	3208	26	کال پرده Kal Parandeh	7190	41	تجمعی چشمه های ۳ و ۴ Tjamoei 3 and 4	17367
12	بلبل تو بالا Bolbolu Bala	3970	27	چشمه بالا روستا Bala-Rosta	7885	42	چشمه ۵ Spring 5	17325
13	بلبل تو پایین Bolbolu Paein	4288	28	خواجه روشنایی Khajeh Roshanayi	7895	43	چشمه ۶ Spring 6	17315
14	بلبل تو پایین ۲ Bolbolu Paein 2	4248	29	کال پس خانه Kal Pas-Khaneh	7897	44	چشمه ۷ Spring 7	17315
15	سلطان Sultan	4303	30	چشمه سفید Sefid Sp.	8010	45	چشمه درخت بید Derakht-e-Bid Sp.	17207

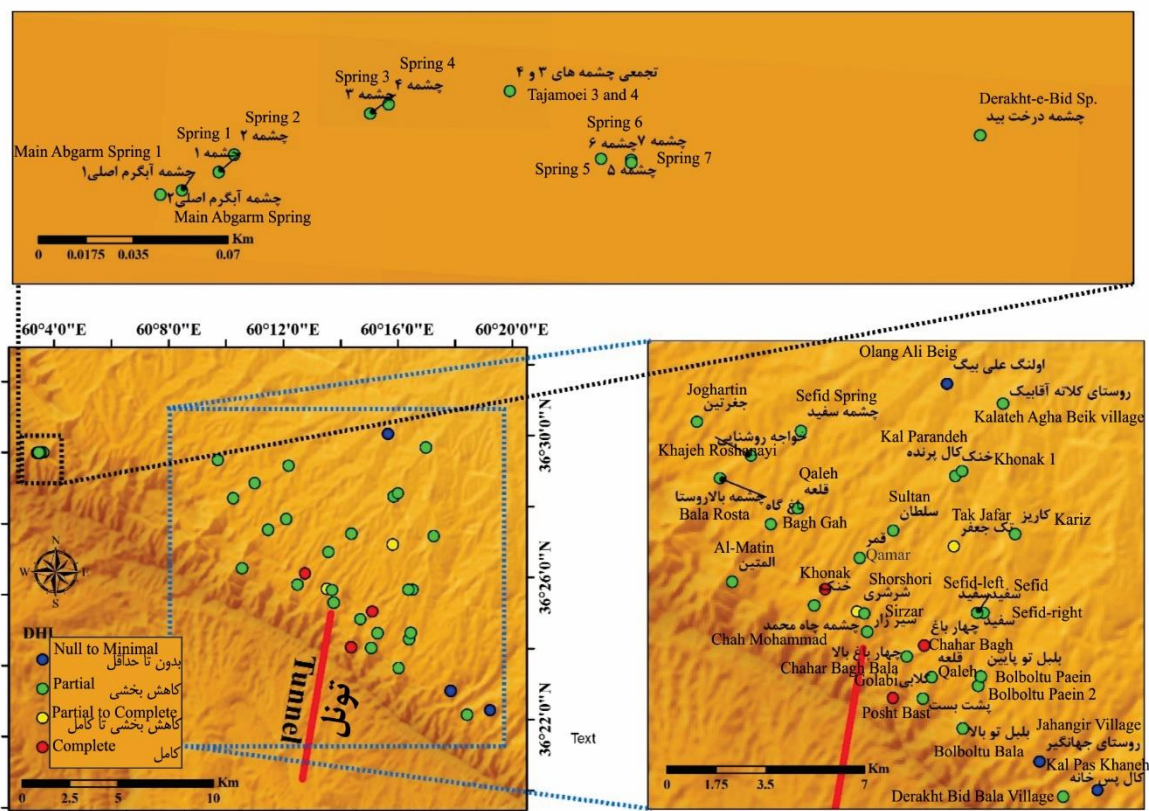
جدول ۸- نتایج محاسبات پارامترهای شاخص DHI، مقادیر DHI و وضعیت خشکیدگی برای هر چشمه
Table 8- Calculated DHI parameters, DHI values, and drying status for each spring

No ردیف	Spring name نام چشمه	MK	FF	OV	PZ	IF	Sp	DT	PI	DHI	وضعیت خشکیدگی Drying status (Risk class)
1	سیرزار Sirzar	0.66	0.52	0.1	0	0	0	0.1	0.38	0.41	کاهش بخشی Partial
2	چشمه چاه محمد Chah Mohammad	0.66	0.33	0.1	0	0	0	0	0.30	0.30	کاهش بخشی Partial
3	شرشری Shorshori	0.66	0.33	0.1	0	1	0	0	0.30	0.60	کاهش بخشی Partial
4	گلابی Golabi	0.33	0.82	0.5	0	1	0.5	0	0.49	1.48	کامل Complete
5	چهار باغ Chahar Bagh	0.33	0.62	0.1	0	1	0.5	0	0.34	1.03	کامل Complete
6	چهار باغ بالا Chahar Bagh Bala	0.33	0.38	0.1	0	0	0	0	0.25	0.25	بدون تا حداقل Null to Minimal
7	خنک Khonak	0.33	0.38	0.1	0	0	0	0	0.25	0.25	بدون تا حداقل Null to Minimal
8	پشت بست Posht Bast	0.33	0.6	0.1	0	0	0	0	0.34	0.34	کاهش بخشی Partial
9	روستای بامچنار Bam Chenar Village	0.66	0.66	0.1	0	0	1	0	0.43	0.87	خشکیدگی کامل Complete
10	قلعه Qaleh	0.33	0.5	0.1	0	0	0	0	0.29	0.29	کاهش بخشی Partial
11	قمر Qamar	0.12	0.4	0.1	0	0	0.5	0	0.21	0.31	کاهش بخشی Partial
12	بلبل تو بالا Bolboltu Bala	0.66	0.3	0.1	0	0	0	0	0.29	0.29	کاهش بخشی Partial
13	بلبل تو پایین Bolboltu Paein	0.33	0.3	0.1	0	0	0	0	0.21	0.21	بدون تا حداقل Null to Minimal
14	بلبل تو پایین ۲ Bolboltu Paein 2	0.33	0.3	0.1	0	0	0	0	0.21	0.21	بدون تا حداقل Null to Minimal
15	سلطان Sultan	0.33	0.82	0.1	0	0	0	0	0.43	0.43	کاهش بخشی Partial
16	سفید Sefid	0.33	0.44	0.1	0	1	0	0	0.27	0.54	کاهش بخشی Partial
17	سفید-چپ Sefid-Left	0.33	0.44	0.1	0	0	0	0	0.27	0.27	کاهش بخشی Partial
18	سفید-راست Sefid-Right	0.33	0.44	0.1	0	0	0	0	0.27	0.27	کاهش بخشی Partial
19	تک جعفر Tak Jafar	0.33	0.82	0.1	0	0	0.5	0	0.43	0.64	کاهش بخشی Partial
20	المتین Al-Matin	0.33	0.35	0.175	0	0	1	0	0.25	0.49	کاهش بخشی Partial
21	قلعه Qaleh	0.33	0.62	0.1	0	0	0	0	0.34	0.34	کاهش بخشی Partial
22	باغ گاه Bagh Gah	0.33	0.33	0.1	0	0	0.5	0	0.22	0.34	کاهش بخشی Partial
23	کاریز Kariz	0.33	0.78	0.1	0	0	0	0	0.41	0.41	کاهش بخشی Partial
24	جهانگیر Jahangir	0.33	0.06	0.1	0	0	0	0	0.11	0.11	بدون تا حداقل Null to Minimal

No ردیف	Spring name نام چشمه	MK	FF	OV	PZ	IF	Sp	DT	PI	DHI	وضعیت خشکیدگی Drying status (Risk class)
25	خنک ۱ Khonak 1	0.33	0.66	0.1	0	0	0	0	0.36	0.36	کاهش بخشی Partial
26	کال پرنده Kal Parandeh	0.33	0.62	0.1	0	0	0	0	0.34	0.34	کاهش بخشی Partial
27	چشمه بالاروستا Bala-Rosta	0.33	0.12	0.1	0	1	0	0	0.14	0.28	کاهش بخشی Partial
28	خواجه روشنایی Khajeh Roshanayi	0.33	0.33	0.1	0	0	0.5	0	0.22	0.34	کاهش بخشی Partial
29	کال پس خانه Kal Pas-Khaneh	0.66	0.12	0.5	0	0	0	0	0.28	0.28	کاهش بخشی Partial
30	چشمه سفید Sefid Sp.	0.33	0.44	0.1	0	0	0	0	0.27	0.27	کاهش بخشی Partial
31	روستای درخت بیدبالا Derakht Bid Bala Village	0.33	0.06	0.1	0	0	0	0	0.11	0.11	بدون تا حداقل Null to Minimal
32	اولنگ علی بیگ Olang Ali Beig	0.33	0.16	0.1	0	0	0	0	0.16	0.16	بدون تا حداقل Null to Minimal
33	جغرتین Joghartin	0.33	0.52	0.1	0	0	0	0	0.30	0.30	کاهش بخشی Partial
34	روستای کالته آقاییک Kalateh Agha Beik Village	0.66	0.22	0.1	0	0	0	0	0.25	0.25	کاهش بخشی Partial
35	چشمه آبگرم اصلی ۱ Main Abgarm Spring 1	0.33	0.42	0.25	0	0	0.5	0	0.29	0.43	کاهش بخشی Partial
36	چشمه آبگرم اصلی ۲ Main Abgarm Spring 2	0.33	0.42	0.25	0	0	0.5	0	0.29	0.43	کاهش بخشی Partial
37	چشمه ۱ Spring 1	0.33	0.32	0.25	0	0	0.5	0	0.25	0.37	کاهش بخشی Partial
38	چشمه ۲ Spring 2	0.33	0.32	0.25	0	0	0	0	0.25	0.25	کاهش بخشی Partial
39	چشمه ۳ Spring 3	0.33	0.32	0.25	0	0	0.5	0	0.25	0.37	کاهش بخشی Partial
40	چشمه ۴ Spring 4	0.33	0.32	0.25	0	0	0	0	0.25	0.25	کاهش بخشی Partial
41	تجمعی چشمه های ۳ و ۴ Tjamoei 3 and 4	0.33	0.32	0.25	0	0	1	0	0.25	0.49	کاهش بخشی Partial
42	چشمه ۵ Spring 5	0.33	0.32	0.5	0	0	0	0	0.29	0.29	کاهش بخشی Partial
43	چشمه ۶ Spring 6	0.33	0.32	0.5	0	0	0.5	0	0.29	0.43	کاهش بخشی Partial
44	چشمه ۷ Spring 7	0.33	0.32	0.5	0	0	1	0	0.29	0.58	کاهش بخشی Partial
45	چشمه درخت بید Derakht-e-Bid Sp.	0.33	0.32	0.375	0	0	0.5	0	0.27	0.40	کاهش بخشی Partial

قابل توجه در میزان حساسیت چشمه‌ها نسبت به فرآیند زهکشی تونل است. بر این اساس، حدود ۲۰ چشمه بدون تأثیر از حفاری، ۲۰ چشمه دچار کاهش آبدهی و ۵ چشمه با کاهش قابل ملاحظه در آبدهی مواجه خواهند شد. در شکل ۶ نمودار نتایج تعداد چشمه‌ها در کلاس‌بندی روش TIS ارائه شده است.

در نهایت با استفاده از رابطه ۴، مقادیر TIS محاسبه شد. سپس بر اساس جدول ۲-B، مقدار اثرپذیری هر چشمه، در کلاس‌بندی مشخص و احتمال خشکیدگی هر چشمه طبقه‌بندی شد. نتایج محاسبات در جدول ۹ ارائه شده‌اند. بر اساس نتایج محاسبه شده، مقادیر TIS در محدوده ۱/۶ تا ۶/۹ تغییر می‌کند که این بازه وسیع، بیانگر تفاوت



شکل ۵- نحوه توزیع شاخص خطر افت (DHI) در مسیر تونل هزارمسجد

Figure 5- Spatial distribution of the drawdown hazard index (DHI) along the Hezar-Masjed tunnel alignment

بوده و اگرچه شدت آب ورودی به تونل قابل توجه است، اما فاصله بیشتر و تا حدودی ظرفیت بالاتر مخزن آبخوان مانع از بروز افت شدیدتر شده است. این رفتار نشان‌دهنده یک پاسخ نیمه‌الاستیک آبخوان به زهکشی تونل است.

حدود نیمی از چشمه‌ها (۲۰ چشمه)، از جمله بلبل تو پایین، سلطان، سفید (چپ و راست)، تک جعفر، روستای جهانگیر، خنک (فاصله دورتر) و اولنگ علی‌بیگ در کلاس عدم تأثیر^۴ طبقه‌بندی شده‌اند و مقادیر TIS آنها عمدتاً کمتر از ۴/۹ است. این چشمه‌ها عمدتاً یا در فاصله‌های زیاد از تونل قرار دارند (بیش از ۴-۵ کیلومتر)، یا در محدوده‌ای با پتانسیل تغذیه مجدد بالاتر و ارتباط هیدرولیکی ضعیف‌تر واقع شده‌اند. مؤید آن است که افزایش فاصله هیدرولیکی و ظرفیت ذخیره آبخوان می‌تواند نقش مؤثری در تضعیف اثرات تونل ایفا کند، حتی در شرایطی که حفاری با دبی‌های قابل توجه همراه باشد. در شکل ۷، نقشه توزیع شاخص TIS در مسیر تونل هزارمسجد نشان داده شده است.

بالاترین مقادیر TIS به چشمه‌های سیرزار ($TIS = ۶/۹$) چشمه چاه محمد و چشمه شرشری ($TIS = ۶/۶$)، چشمه روستای بامچنار ($TIS = ۶/۳$) و بلبل تو بالا ($TIS = ۶/۲$) اختصاص دارد. این چشمه‌ها (۱۳/۳ درصد از کل) همگی در کلاس افت قابل‌ملاحظه در آینده قرار گرفته‌اند. ویژگی مشترک این گروه، ارتباط هیدرولیکی مؤثر^۱ با آبخوان و قرارگیری در مناطق حساس تغذیه‌ای^۲ است. علی‌رغم آن که فاصله برخی از این چشمه‌ها از محور تونل بیش از ۱۰۰۰ متر است، شدت آب ورودی به تونل و نسبت بالای TW/Qs سبب شده اثر حفر تونل بر آینده آنها غالب شود. این یافته با تاکید حسن پور و همکاران (Hassanpour et al., 2021) بر نقش غالب ارتباط هیدرولیکی نسبت به فاصله هندسی از محور تونل همخوانی دارد.

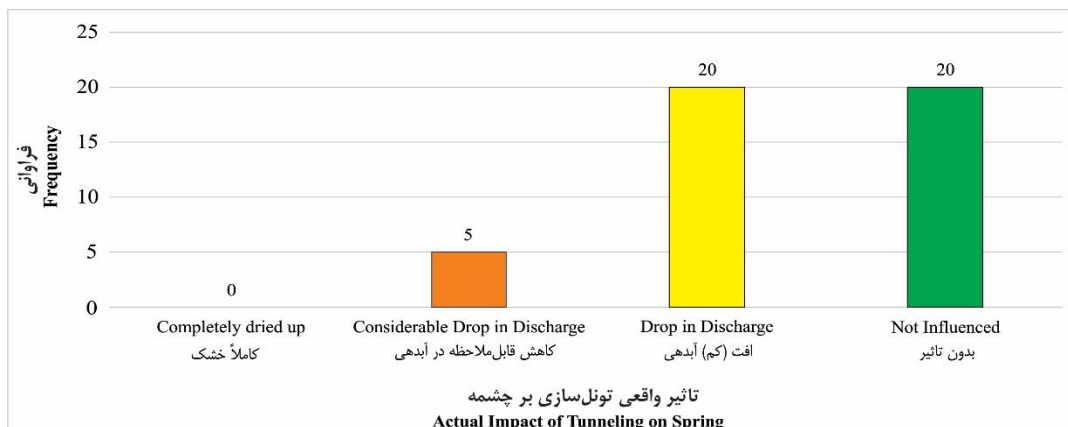
چشمه‌هایی نظیر گلابی، چهارباغ، خنک، پشت‌بست، قلعه، قمر و همچنین مجموعه چشمه‌های آبگرم (اصلی ۱ و ۲) در طبقه افت در آینده قرار می‌گیرند و مقادیر TIS آنها عمدتاً در بازه ۵/۱ تا ۵/۶ است. در این چشمه‌ها (۲۰ چشمه)، ارتباط هیدرولیکی اغلب از نوع نسبتاً مؤثر^۳

3- Moderately effective HC
4- Not influenced

1- Effective HC
2- Sensitive area

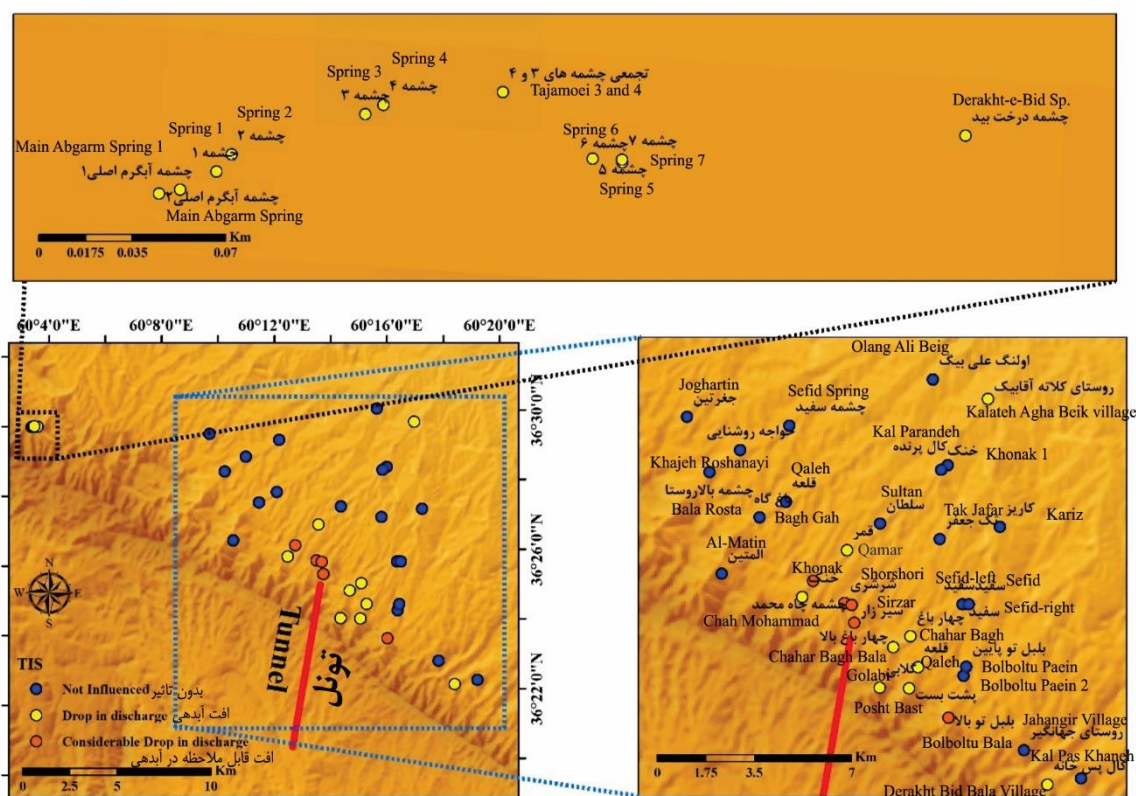
جدول ۹- نتایج محاسبات پارامترهای TIS و محاسبه شاخص TIS
Table 9- result of TIS parameters and TIS index calculations

ردیف No.	Ratings														
	رتبه (برای هر پارامتر)														
	0.4					0.15		0.4			0.05		1		
	New TIS parameters														
	پارامترهای جدید TIS														
Total water inflow (l/s) کل جریان آب ورودی			Lt/Hd		Tw/Qs		Distance فاصله		Hydraulic connection ارتباط هیدرولیکی			Aquifer recharge potential پتانسیل تغذیه آبخوان		TIS	
Value مقدار	Lt (m)	Rating ارزش	Value (×10 ⁻³) مقدار	Kl	Value مقدار	Kq	Value مقدار	Rating ارزش	Class کلاس	MK	Rating ارزش	Class کلاس	Rating ارزش		
1	3.0	20	15.1	33	0.5	3014	1.0	606	6.58	E.	0.6	6.6	sensitive area منطقه حساس	5	6.9
2	3.0	20	15.1	16	0.5	30.1	1.0	1226	4.77	E.	0.6	6.6		5	6.6
3	3.0	20	15.1	15	0.5	6.03	1.0	1315	4.68	E.	0.6	6.6		5	6.6
4	3.0	20	15.1	15	0.5	1.21	1.0	1339	4.66	M.E.	0.3	3.3		5	5.3
5	3.0	20	15.1	9	0.5	2.01	1.0	2171	3.83	M.E.	0.3	3.3		5	5.2
6	3.0	20	15.1	13	0.5	3014	1.0	1574	4.43	M.E.	0.3	3.3		5	5.2
7	3.0	20	15.1	9	0.5	6.03	1.0	2309	3.69	M.E.	0.3	3.3		5	5.1
8	3.0	20	15.1	8	0.5	6.03	1.0	2388	3.61	M.E.	0.3	3.3		5	5.1
9	3.0	20	15.1	8	0.5	0.86	0.9	2488	3.51	E.	0.6	6.6		5	6.3
10	3.0	20	15.1	8	0.5	6.03	1.0	2575	3.43	M.E.	0.3	3.3		5	5.1
11	3.0	20	15.1	6	0.5	2.01	1.0	3208	2.79	M.E.	0.3	3.3		5	5.0
12	3.0	20	15.1	5	0.5	15.07	1.0	3970	2.03	E.	0.6	6.6		5	6.2
13	3.0	20	15.1	5	0.5	15.07	1.0	4288	1.71	M.E.	0.3	3.3		5	4.8
14	3.0	20	15.1	5	0.5	3014	1.0	4248	1.75	M.E.	0.3	3.3		5	4.8
15	3.0	20	15.1	5	0.5	6.03	1.0	4303	1.70	M.E.	0.3	3.3		5	4.8
16	3.0	20	15.1	6	0.5	15.07	1.0	4446	1.55	M.E.	0.3	3.3		5	4.8
17	3.0	20	15.1	5	0.5	3014	1.0	4241	1.76	M.E.	0.3	3.3		5	4.8
18	3.0	20	15.1	5	0.5	3014	1.0	4238	1.76	M.E.	0.3	3.3		5	4.8
19	3.0	20	15.1	4	0.5	2.01	1.0	4840	1.16	M.E.	0.3	3.3		5	4.8
20	3.0	20	15.1	4	0.5	0.19	0.6	5203	0.90	M.E.	0.3	3.3	Intermediate متوسط	2	3.2
21	3.0	20	15.1	4	0.5	3014	1.0	5463	0.77	M.E.	0.3	3.3	sensitive area منطقه حساس	5	4.7
22	3.0	20	15.1	4	0.5	1.51	1.0	5471	0.76	M.E.	0.3	3.3		5	4.7
23	0.1	60	0.2	9	0.5	0.53	0.8	6741	0.13	M.E.	0.3	3.3		5	1.6
24	4.1	135	3.0	20	0.5	40.6	1.0	6854	0.07	M.E.	0.3	3.3		5	2.2
25	4.1	135	3.0	20	0.5	4060	1.0	6936	0.03	M.E.	0.3	3.3		5	2.2
26	2.3	16	14.4	2	0.5	230	1.0	7190	0.00	M.E.	0.3	3.3		5	4.4
27	2.3	16	14.4	2	0.5	11.50	1.0	7885	0.00	M.E.	0.3	3.3		5	4.4
28	2.3	16	14.4	2	0.5	1.15	1.0	7895	0.00	M.E.	0.3	3.3		5	4.4
29	2.3	16	14.4	2	0.5	4.60	1.0	7897	0.00	E.	0.6	6.6		5	5.8
30	2.3	16	14.4	2	0.5	5.75	1.0	8010	0.00	M.E.	0.3	3.3		5	4.4
31	2.3	16	14.4	2	0.5	2300	1.0	9053	0.00	M.E.	0.3	3.3		5	4.4
32	2.3	16	14.4	2	0.5	2300	1.0	9830	0	M.E.	0.3	3.3		5	4.4
33	2.3	16	14.4	2	0.5	230	1.0	9951	0	M.E.	0.3	3.3		5	4.4
34	2.3	16	14.4	2	0.5	11.50	1.0	9987	0	E.	0.6	6.6		5	5.8
35	30.6	59	20.0	3	0.5	12.76	1.0	17455	0	M.E.	0.3	3.3		5	5.6
36	30.6	59	20.0	3	0.5	16.12	1.0	17461	0	M.E.	0.3	3.3		5	5.6
37	30.6	59	20.0	3	0.5	27.84	1.0	17446	0	M.E.	0.3	3.3		5	5.6
38	30.6	59	20.0	3	0.5	30618	1.0	17444	0	M.E.	0.3	3.3		5	5.6
39	30.6	59	20.0	3	0.5	15.31	1.0	17408	0	M.E.	0.3	3.3		5	5.6
40	30.6	59	20.0	3	0.5	30618	1.0	17403	0	M.E.	0.3	3.3		5	5.6
41	30.6	59	20.0	3	0.5	1.18	1.0	17367	0	M.E.	0.3	3.3	Intermediate متوسط	2	5.4
42	30.6	59	20.0	3	0.5	30618	1.0	17325	0	M.E.	0.3	3.3	sensitive area منطقه حساس	5	5.6
43	14.5	42	20.0	2	0.5	7.26	1.0	17315	0	M.E.	0.3	3.3		5	5.6
44	30.6	59	20.0	3	0.5	7.65	1.0	17315	0	M.E.	0.3	3.3		5	5.6
45	30.6	59	20.0	3	0.5	25.52	1.0	17207	0	M.E.	0.3	3.3		5	5.6



شکل ۶- تعداد چشمه‌های مسیر تونل هزارمسجد در کلاس‌بندی روش TIS

Figure 6- Number of springs along the Hezar-Masjed tunnel alignment classified by the TIS method



شکل ۷- نقشه توزیع مکانی شاخص TIS در مسیر تونل هزارمسجد

Figure 7- Spatial distribution map of the TIS index along the Hezar-Masjed tunnel alignment

نتیجه‌گیری

ذاتی چشمه‌ها، دامنه‌ای پیوسته از خطر خشکیدگی را ارائه می‌دهد. توزیع مقادیر این شاخص نشان می‌دهد که حدود ۱۱ درصد از چشمه‌ها ($DHI \geq 0.6$) در معرض اثرگذاری شدید تا بحرانی حفاری قرار دارند، در حالی که اکثریت چشمه‌ها (حدود ۸۹ درصد) کاهش بخشی یا ناچیز در آبدی را تجربه خواهند کرد. در این روش، چشمه‌هایی نظیر گلابی، چهارباغ، و بامچنار به دلیل نفوذپذیری متوسط تا زیاد، تراکم شکستگی

نتایج به‌دست آمده از دو روش TIS و DHI برای مجموعه ۴۵ چشمه اطراف تونل نشان می‌دهد که اگرچه هر دو روش به‌طور کلی الگوی مشابهی از تأثیر حفاری را شناسایی می‌کنند، اما از نظر منطق ارزیابی، حساسیت به پارامترها و نحوه تفسیر ریسک، تفاوت‌های معناداری دارند. روش DHI با تمرکز بر پارامترهای هیدروژئولوژیکی

چشمه‌ها و تکمیل اطلاعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی، توصیه می‌شود. علاوه بر این، در پروژه‌هایی نظیر منطقه مورد مطالعه که مسیر حفاری تونل نهایی شده، به مرحله اجرا درآمده‌اند و امکان تغییر مسیر تونل وجود ندارد، کاهش اثرات حفاری بر منابع آب زیرزمینی مستلزم به‌کارگیری راهبردهای مدیریتی و مهندسی مبتنی بر ریسک است. در این راستا، چشمه‌هایی که بر اساس نتایج روش‌های DHI و TIS در کلاس‌های با خطر بالا یا با احتمال کاهش قابل‌توجه آبدی قرار گرفته‌اند، باید به‌عنوان اولویت اصلی برنامه‌های حفاظتی در نظر گرفته شوند. در این محدوده‌ها، اجرای هدفمند عملیات پیش‌تزریق یا پس‌تزریق در زون‌های دارای نفوذپذیری و شکستگی بالا می‌تواند با کاهش هدایت هیدرولیکی توده‌سنگ، از ایجاد ارتباط هیدرولیکی گسترده بین تونل و آبخوان و در نتیجه کاهش زهکشی آب زیرزمینی جلوگیری کند. هم‌زمان، استقرار یک سامانه پایش مستمر شامل اندازه‌گیری دبی چشمه‌ها، تراز آب زیرزمینی و میزان آب ورودی به تونل، همراه با تعیین مقادیر آستانه برای هر یک از این پارامترها، امکان تشخیص سریع تغییرات غیرعادی و اجرای به‌موقع اقدامات اصلاحی را فراهم می‌سازد. علاوه بر این، استفاده از رویکرد حفاری تطبیقی، به‌گونه‌ای که سرعت پیشروی، روش حفاری و عملیات آب‌بندی متناسب با شرایط هیدروژئولوژیکی مشاهده‌شده در جبهه کار به‌صورت مستمر بازنگری و اصلاح شوند، می‌تواند از توسعه زهکشی ناخواسته در زون‌های حساس جلوگیری کند. تمرکز این اقدامات بر تعداد محدودی از چشمه‌های شناسایی‌شده به‌عنوان منابع پرخطر، ضمن افزایش کارایی برنامه‌های حفاظتی و کاهش هزینه‌های اجرایی، امکان مدیریت هدفمند ریسک را فراهم می‌آورد و می‌تواند احتمال افت شدید آبدی یا خشکیدگی چشمه‌ها را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهد.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله مراتب سپاس و قدردانی عمیق خود را از شرکت مهندسین مشاور فناوران طرح جامع ابراز می‌نمایند که با فراهم‌سازی داده‌ها، اطلاعات فنی و مستندات ارزشمند این پروژه، نقش اساسی در انجام این پژوهش ایفا نمودند. دسترسی به داده‌های میدانی، نتایج مطالعات ژئوتکنیکی و هیدروژئولوژیکی و همچنین همکاری‌های علمی و اجرایی آن مجموعه، زمینه انجام تحلیل‌های دقیق و دستیابی به نتایج قابل اتکا را فراهم ساخت. بی‌تردید، بدون حمایت‌ها و همکاری‌های سازنده آن شرکت، تحقق اهداف این پژوهش امکان‌پذیر نبود.

بالا و فعال بودن پارامترهای تقویتی نظیر ارتباط هیدرولیکی مستقیم یا نوع چشمه به‌عنوان موارد با پتانسیل خشکیدگی کامل شناسایی می‌شوند. بنابراین، DHI بیشتر آسیب‌پذیری ذاتی سامانه چشمه-آبخوان را بازتاب می‌دهد و نسبت به سناریوهای بدبینانه حساسیت بالاتری دارد. در مقابل روش TIS بر مبنای یک سیستم طبقه‌بندی تجربی، چشمه‌ها را در سه کلاس رفتاری مشخص شامل کاهش قابل‌توجه آبدی (۵ چشمه، ۱۱/۱ درصد)، کاهش آبدی (۲۰ چشمه، ۴۴/۴ درصد) و عدم تأثیرپذیری (۲۰ چشمه، ۴۴/۴ درصد) قرار می‌دهد. در این روش نقش پارامترهایی نظیر ارتباط هیدرولیکی مؤثر، فاصله از محور تونل و پتانسیل تغذیه آبخوان برجسته‌تر است و شدت اثر حفاری به‌صورت مستقیم در قالب کاهش آبدی بیان می‌شود. به همین دلیل، برخی چشمه‌هایی که در DHI در رده ریسک بالا قرار می‌گیرند، در TIS صرفاً کاهش آبدی را نشان می‌دهند و لزوماً به‌عنوان موارد بحرانی یا مستعد خشکیدگی طبقه‌بندی نمی‌شوند. این تفاوت مفهومی نشان می‌دهد که دو روش بیش از آن که جایگزین یکدیگر باشند، مکمل یکدیگر هستند. روش DHI ابزار مناسب‌تری برای شناسایی چشمه‌های دارای آسیب‌پذیری ذاتی بالا و اولویت‌بندی مناطق بحرانی است، در حالی که روش TIS شدت پاسخ احتمالی آبدی چشمه‌ها به حفاری تونل را واقع‌بینانه‌تر و کاربردی‌تر منعکس می‌کند. بنابراین، استفاده هم‌زمان از این دو روش می‌تواند ارزیابی جامع‌تر و قابل‌اعتمادتری از اثرات حفاری تونل بر منابع آب در سازندهای سخت، درزه‌دار و شکاف‌دار فراهم کند، به‌ویژه در مراحل اولیه مطالعات امکان‌سنجی که اطلاعات هیدروژئولوژیکی محدود است. با وجود این، هر دو روش صرفاً ابزارهای ارزیابی اولیه محسوب می‌شوند و جایگزین مطالعات تفصیلی هیدروژئولوژیکی و مدل‌سازی عددی نیستند. یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های پژوهش حاضر نیز عدم تعیین محدوده تغذیه چشمه‌ها از طریق آزمون‌های ردیابی و سایر مطالعات صحرایی بود. هرچند انجام این مطالعات می‌تواند ارتباط هیدرولیکی میان تونل و چشمه‌ها را با دقت بیشتری مشخص کند، اما به‌دلیل هزینه و زمان‌بر بودن، در بسیاری از پروژه‌های مقدماتی امکان‌پذیر نیست. از این‌رو، نتایج این پژوهش باید به‌عنوان یک ارزیابی اولیه از آسیب‌پذیری چشمه‌ها تفسیر شوند.

به‌منظور کاهش اثرات احتمالی حفاری تونل بر منابع آب زیرزمینی، انجام مطالعات جامع هیدروژئولوژیکی در مراحل اولیه پروژه، شامل تعیین محدوده تغذیه، ردیابی جریان آب زیرزمینی، پایش آبدی

References

- 1- Abedian, H., & Mojiri, A. (2024). Validation of the drawdown hazard index method for assessing the impact of tunnel excavation on groundwater discharge (Case studies: Cheshmeh Langan Tunnel and Khadangestan Tunnel). In *42nd National Geosciences Congress*, 20–21 February 2024, Geological Survey and Mineral Exploration of Iran & Pars Aryan Zamin Geological Research Center, Tehran, Iran. (In Persian)
- 2- Cesano, D., Olofsson, B., & Bagtzoglou, A.C. (2000). Parameters regulating groundwater inflows into hard rock

- tunnels—a statistical study of the Bolmen tunnel, Sweden. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15(2), 153-165. [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(00\)00043-2](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(00)00043-2)
- 3- Chen, S., Peng, H., Yang, C., Chen, B., & Chen, L. (2021). Investigation of the impacts of tunnel excavation on karst groundwater and dependent geo-environment using hydrological observation and numerical simulation: a case from karst anticline mountains of southeastern Sichuan Basin, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(30), 40203-40216. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13919-1>
 - 4- Deere, D.U., & Miller, R.P. (1966). Engineering classification and index properties for intact rock. Technical Report AFWL-TR-65-116, Air Force Weapons Laboratory, Kirtland Air Force Base, New Mexico.
 - 5- Dematteis, A., Kalamaras, G., & Eusebio, A. (2001). A system approach for evaluating springs drawdown due to tunneling. P.257–264. In AITES-ITA World Tunnel Congress (ed.) Progress in tunnelling after 2000, Vol. 1. World Tunnel Congress 2001, 10–13 June 2001. Milan, Italy.
 - 6- 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). <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02268-5>
 - 7- Karimian-Torghabeh, A., Moussavi-Harami, R., & Mahboubi, A. (2013). Depositional environment and sequence stratigraphy of Pestileigh Formation in Central Kopet Dagh (Dareh-Gaz). *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 22(88), Summer 2013. (In Persian). <https://doi.org/10.22071/gsj.2013.53686>
 - 8- Leopold, L.B., Clarke, F.E., Hanshaw, B.B., & Balsley, J.R. (1971). A procedure for evaluating environmental impact. U.S. Geological Survey Circular 645. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office.
 - 9- Li, Z., Xiao, J., Wan, J., Cheng, J., Feng, H., Zhan, H., Yuan, S., & Huang, K. (2024). A dynamic modeling approach to predict water inflow during tunnel excavation in relatively uniform rock masses. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 146, 105668. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105668>.
 - 10- Ohnishi, Y., Ohtsu, H., Takahashi, K., & Yasuda, T. (2006). Research of observational method on the groundwater in the tunnel excavation using the SWING method. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(3–4), 420. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.12.064>
 - 11- Palmstrom, A. (1982). The volumetric joint count - A useful and simple measure of the degree of rock mass jointing. IAEG congress, New Delhi, 221–228.
 - 12- Poursoltani, M. (2021). Petrography and diagenetic history of the Shurijeh Formation (Late Kimmeridgian–Hautrivian) at Estarkhi section, KopetDagh Basin, NE Iran. *Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches*, 37(2), 119-146. <https://doi.org/10.22108/jssr.2020.124716.1181>
 - 13- Rostami, M., Talebian, M., & Bahroudi, A. (2021). Physical modeling of block rotation and the role of ductile sediments in the structural evolution of Kopeh Dagh and Zagros. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 31(3), 135-144. (In Persian). <https://doi.org/10.22071/gsj.2021.112225.1357>
 - 14- Saberinasr, A., & Dashti Barmaki, M. (2024). Evaluation of hydrogeological impact of Taleghan water conveyance tunnel excavation on the discharge of springs. *Advanced Applied Geology*, 14(3), 829-854. (In Persian). <https://doi.org/10.22055/AAG.2024.47486.2463>
 - 15- Saberinasr, 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*, 4(1), 81-102. (In Persian). <https://doi.org/10.22077/jaaq.2023.6990.1052>
 - 16- Sadique, M.R., Rais, I., Iqbal, O., & Ibrahim, S.M. (2025). Ground settlement due to tunnelling and effect of groundwater table variation and superstructure on the tunnel. *Discover Civil Engineering*, 2, 102. <https://doi.org/10.1007/s44290-025-00259-z>
 - 17- Samiei, S., & Aalianvari, A. (2026). A hybrid AHP-AI framework for assessing and mitigating tunneling impacts on confined spring discharge. *Journal of Hydraulic Structures*, 12(1), 9-19. <https://doi.org/10.22055/jhs.2025.49054.1338>
 - 18- Samimi-Namin, F., Ghafari, H., & Dianati, A. (2014). New model for environmental impact assessment of tunneling projects. *Journal of Environmental Protection*, 5, 530-550. <https://doi.org/10.4236/jep.2014.56056>
 - 19- Sun, H., Le, L., Dai, Y., Rui, Y., Zhu, H., Li, X., Li, X., & Xue, G. (2025). Groundwater environmental effects risk evaluation in mountain tunnel construction: A dynamic decision support system based on fuzzy two-dimensional cloud probability model. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 156, 106276. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.106276>
 - 20- Vincenzi, V., Piccinini, L., Gargini, A., & Sapiigni, M. (2022). Parametric and numerical modeling tools to forecast hydrogeological impacts of a tunnel. *Acque Sotterranee. Italian Journal of Groundwater*, 558, 51–69. <https://doi.org/10.7343/as-2022-558>
 - 21- Zheng, X., Yang, Z., Wang, S., Chen, Y.F., Hu, R., Zhao, X.J., Wu, X.L., & Yang, X.L. (2021). Evaluation of hydrogeological impact of tunnel engineering in a karst aquifer by coupled discrete-continuum numerical simulations. *Journal of Hydrology*, 597, 125765. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125765>
 - 22- Goodman, R.E., Moye, D.G., Van Schaik, R., & Javandel, I. (1965). Groundwater inflow during tunnel driving. College of Engineering, University of California, California.

- 23- El Tani, M. (2003). Circular tunnel in a semi-infinite aquifer. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18(1), 49–55. [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(02\)00102-5](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(02)00102-5)