

Assessment of water seepage risk in the Sarploe Zahab water transfer tunnel (T4) using analytical, empirical, and numerical methods

Mohammad Hossein Jowkar¹, Mashalah khamchian^{2✉}, Mohammad Salehi³, Ehsan Mahmoudian Barzi⁴

1. Department of Basic science, Faculty of Engineering geology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2. Department of Basic science, Faculty of Engineering geology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: khamechm@modares.ac.ir

3. Mahab Ghods Consulting Engineering Company, Tehran, Iran.

4. Faculty of Engineering geology, Department of Basic science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 14 February 2026

Accepted 06 August 2026

Keywords:

Sarploe Zahab, Sarab Garm, Seepage, SEEP/W, Tunnel T4

ABSTRACT

One of the major challenges in tunnel engineering is the accurate estimation and prediction of water inflow into tunnels. Although numerous methods have been proposed to evaluate hydraulic behavior and estimate the permeability of soil and rock masses based on their geological structures, these methods still do not provide sufficient accuracy and certainty. In this study, the water inflow rate into different sections of the Sarpol-e Zahab water transfer tunnel (T4) was assessed. As part of the Sirvan River Water Transfer Project, known as the Tropical Water Supply System, the tunnel is approximately 4.3 km long, with a diameter of 6.8 m and inlet and outlet elevations of 552.51 and 549.50 m above sea level, respectively. The assessment was conducted using analytical (Goodman, Karlsrud, and El Tani), empirical (SGR and TIC), and numerical (SEEP/W) methods. The results showed that the estimated water inflow into different tunnel sections ranges from <1 to 161 L/s using the analytical methods, from <1 to 8 L/s using the SGR method, from <1 to 35 L/s using the TIC method, and from <1 to 19 L/s based on numerical modeling. Furthermore, the hydraulic flow components, the influence of the river on the inflow of water into the tunnel and the differences resulting from considering layer-by-layer hydraulic conductivity instead of equivalent hydraulic conductivity were modelled. Finally, by correlating the results with the geological conditions of the study area, it was determined that water inflow may pose a risk at chainages 0+239 and 1+829, and these sections of the tunnel should receive special attention during construction.

Introduction

One of the fundamental challenges in tunnel engineering is the accurate prediction and assessment of groundwater inflow into underground excavations. The magnitude of groundwater inflow is controlled by a wide range of geological, hydrogeological, and engineering factors, which can be generally classified into two main groups. The first group includes intrinsic aquifer-related characteristics, such as rock mass properties (e.g., lithology, permeability, porosity, and structural characteristics), geological conditions (e.g., topography, faults, and discontinuities), and hydrogeological parameters (e.g., groundwater recharge, hydraulic head, and karst features). The second group consists of project-specific factors, including tunnel geometry (e.g., diameter and depth) and construction-related parameters, such as excavation methods and support systems (U.S. Army Corps of Engineers, 1997; Kiraly, 2002; Hwang and Lu, 2007; Yagiz, 2009; Li et al., 2010; Zarei et al., 2011; Frenel et al., 2021; Pan et al., 2022; Su et al., 2022; Li et al., 2024; Hu et al., 2024). Due to the spatial

variability and complexity of geological and hydrogeological conditions along tunnel alignments, the accurate evaluation of all controlling factors remains challenging, and groundwater inflow predictions are inevitably associated with a certain degree of uncertainty.

To reduce these uncertainties in the Sarpol-e Zahab water transfer tunnel (T4), detailed field investigations were conducted to identify and characterize geological discontinuities and fracture systems along the tunnel alignment. Subsequently, analytical, empirical, and numerical approaches were integrated and adapted to the specific geological and hydrogeological conditions of the study area. This integrated methodology enabled the identification of critical tunnel sections susceptible to groundwater inflow and provided a reliable basis for evaluating groundwater-related risks during excavation and construction.

Materials and Methods

The complexity of groundwater inflow into underground structures, arising from heterogeneous

Cite this article: Jowkar, M. H., khamchian, M., Salehi, M., Mahmoudian Barzi, E. (2026). Assessment of water seepage risk in the Sarploe Zahab water transfer tunnel (T4) using analytical, empirical, and numerical methods. *Journal of Engineering Geology*, 20 (2), 167-192. <https://doi.org/10.22034/jeg.2026.11707>

rock mass permeability, variable groundwater flow conditions, and limitations associated with field investigations, has led to the development of various analytical, empirical, and numerical approaches for estimating tunnel water inflow. Analytical solutions proposed by Goodman et al. (1965), Karlsrud (2001), and El-Tani (2003) provide rapid and practical tools for preliminary estimation of groundwater inflow. However, their applicability may be limited under complex geological conditions due to simplified assumptions regarding groundwater flow conditions and rock mass homogeneity. These limitations become particularly important in faulted zones, fractured rock masses, and karstic environments where hydraulic conductivity varies significantly (Ataie-Ashtiani et al., 1999; Peng et al., 2022; Guo et al., 2023).

Considering these limitations, empirical approaches, including the SGR and TIC methods (Katibeh and Alianari, 2009; Zarei et al., 2013), were also applied in this study. Furthermore, numerical modeling using SEEP/W was performed to provide a more realistic representation of groundwater flow by incorporating geological heterogeneity, layer-specific hydraulic conductivity, and site-specific hydrogeological conditions.

Results and Discussion

The comparison of analytical, empirical, and numerical approaches for estimating groundwater inflow into the tunnel (Figure 1) indicates that the SGR and TIC empirical methods provide similar qualitative classifications of tunnel sections; however, their estimated inflow rates show considerable quantitative differences. Furthermore, due to the assumptions associated with El-Tani's analytical solution and the relatively shallow overburden of the tunnel, its applicability to the present case study was limited. Based on permeability measurements and hydrogeological investigations conducted along the

tunnel alignment, the rock mass was classified as having low to moderate permeability. Approximately 75% of the investigated sections exhibited relatively stable groundwater flow conditions, indicating limited hydraulic connectivity of discontinuities and a low potential for significant groundwater inflow. Therefore, numerical modeling, analytical approaches such as Goodman et al. (1965) and Karlsrud (2001), and the SGR empirical method were considered reliable approaches for estimating groundwater inflow under the geological conditions of the Sarpol-e Zahab tunnel.

Furthermore, after defining the tunnel geometry (Fig. 2a) and seepage measurement zones (Fig. 2b), the main hydraulic characteristics, including groundwater velocity vectors (Fig. 2c), flow paths and equipotential lines (Fig. 2d), and pore water pressure distribution (Fig. 2e), were evaluated using SEEP/W numerical simulations. In addition, groundwater inflow rates along different tunnel sections were estimated considering both equivalent hydraulic conductivity (Fig. 2f) and layer-specific hydraulic conductivity (Fig. 2h).

Because the tunnel crosses beneath the Sarab Garm River at chainage 1+829, an additional numerical model was developed to evaluate the influence of the river on groundwater inflow. The simulation results indicated a groundwater inflow rate of approximately 0.023699 m³/s (23.7 L/s). When the river influence was excluded from the model, the estimated inflow decreased to approximately 0.009 m³/s (9 L/s). This difference highlights the contribution of the river to groundwater inflow in the vicinity of the tunnel.

The discrepancy between the total river discharge and the simulated tunnel inflow can be attributed to the fact that only a small fraction of the river flow infiltrates into the subsurface and reaches the tunnel through the defined 2 m × 1 m seepage boundary in the SEEP/W model, whereas the majority of the river discharge continues as surface runoff (Fig. 2j).

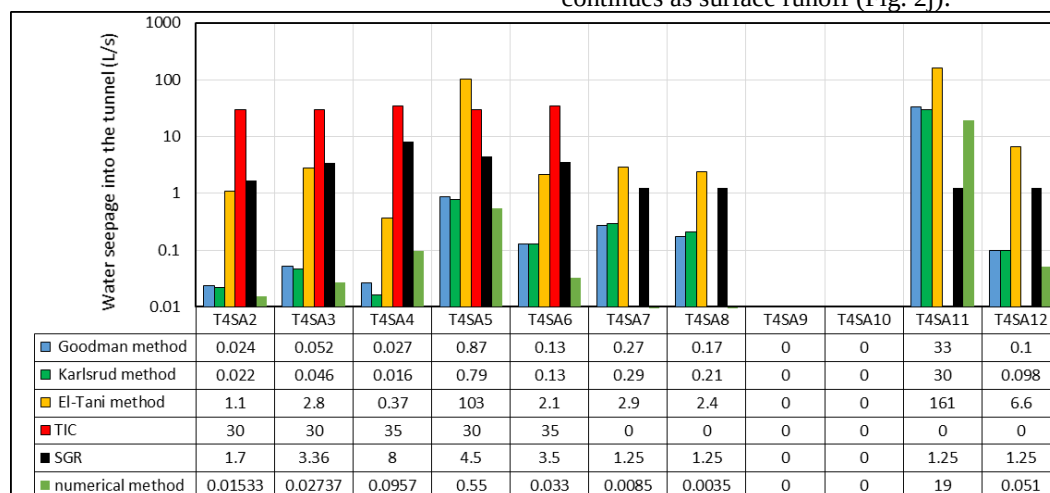


Fig. 1. Comparison of the results estimating water seepage into the T4 tunnel using analytical, experimental, and numerical methods

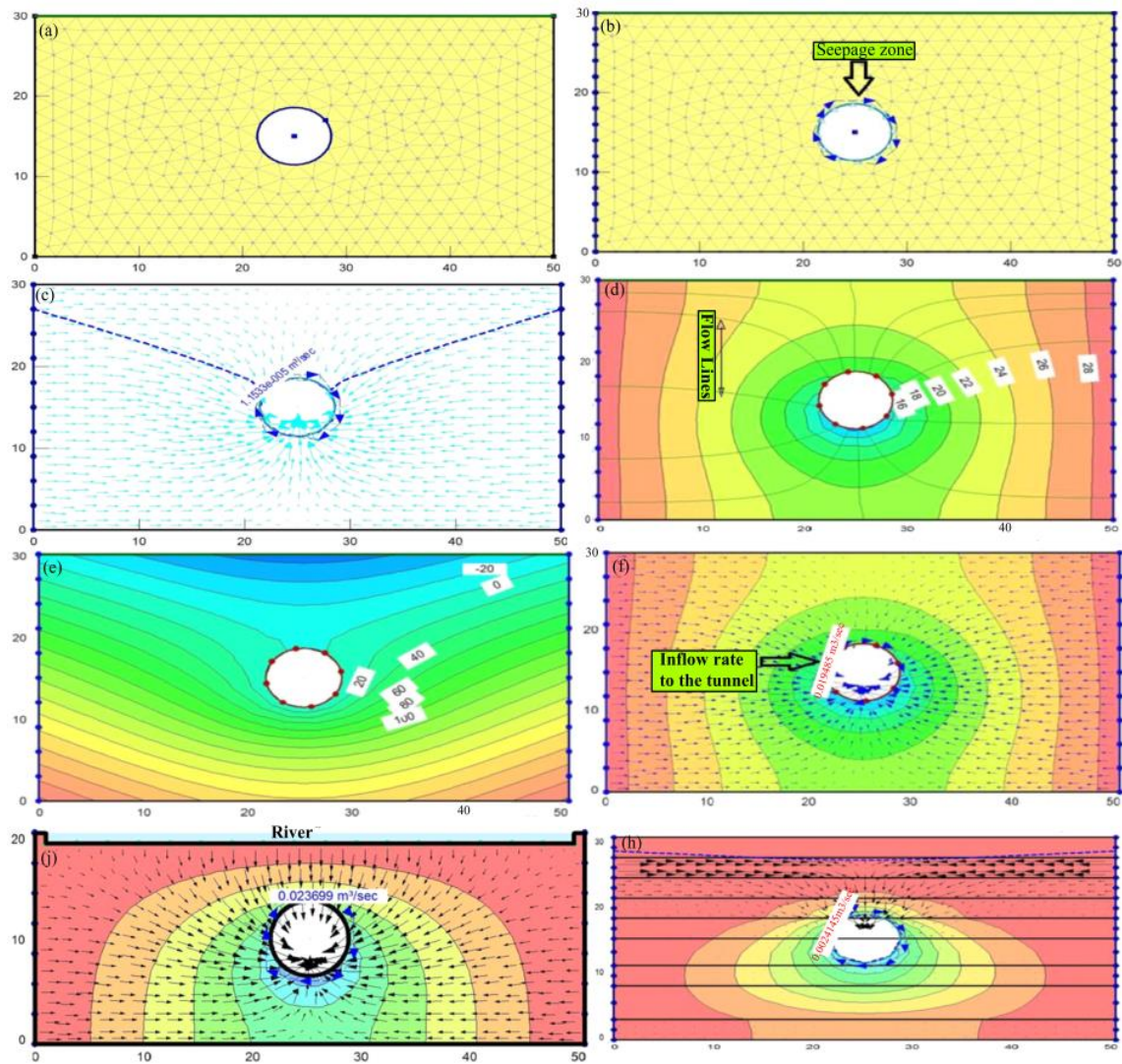


Fig. 2. (a) the geometry of the model in Seep/W software, (b) the creation of the water seepage zone entering the tunnel, (c) the water velocity vectors within the tunnel area, (d) the flow lines and equipotential lines within the tunnel, (e) the pore water pressure in the tunnel area, (f) water seepage into the tunnel at the T4SA11 borehole area (located at km 0+239 of the tunnel), (g) water seepage into the tunnel at the Sarab Garm River area (located at km 1+829 of the tunnel), and (h) water seepage into the tunnel at the T4SA11 borehole area depicted in layer-by-layer hydraulic conduction mode (also at km 0+239 of the tunnel)

Conclusions

In light of the fact that predicting water inflow into tunnels is challenging due to the multitude of influencing factors and inherent uncertainties, this study aimed to predict water inflow into the T4 tunnel of Sarploe Zahab by integrating innovative methods and creative approaches through hybrid models. This integration allowed for the combination of analytical solutions, empirical data, and numerical simulations to overcome the assumptions and limitations of

individual methods, thereby identifying probable and high-risk zones with peak inflow rates. The implementation of results from various analytical, empirical, and numerical methods across different sections of the T4 tunnel indicates a significant risk of water inflow at chainages 0+239 and 1+829. This is attribute to the presence of highly permeable coarse-grained alluvial deposits at chainage 0+239, and the fact that the tunnel alignment at chainage 1+829 passes directly beneath the Sarab Garm River.

ارزیابی خطر ورود آب به تونل انتقال آب سرپل ذهاب (T4) با استفاده از روش‌های تحلیلی، تجربی و عددی

محمدحسین جوکار^۱، ماشاا.. خامه چیان^۲، محمد صالحی^۳، احسان محمودیان بارزی^۴

۱. گروه زمین شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲. گروه زمین شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: khamechm@modares.ac.ir

۳. شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، تهران، ایران.

۴. گروه زمین شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	یکی از چالش‌های اساسی مهندسی تونل، برآورد و پیش‌بینی ورود آب به تونل می‌باشد. اگرچه تاکنون روش‌های متعددی جهت ارزیابی رفتار هیدرولیکی، برآورد و تخمین تراوایی توده‌های خاک و سنگ بسته به ساختار زمین‌شناسی آن‌ها ارائه شده است ولی این روش‌ها همچنان از دقت و قطعیت کافی برخوردار نمی‌باشند. بنابراین در این پژوهش میزان نشت آب به قسمت‌های مختلف تونل انتقال آب سرپل ذهاب (T4) در طول ۴/۳ کیلومتر، قطر ۶/۸ متر و با تراز دهانه‌های ورودی و خروجی تونل از سطح دریا به ترتیب برابر با ۵۵۲/۵۱ و ۵۴۹/۵ متر به عنوان بخشی از طرح انتقال آب محدوده سیروان به مناطق گرمسیری استان‌های کرمانشاه و ایلام با کمک روش‌های تحلیلی (گودمن، کارلسرود و التانی)، روش‌های تجربی (SGR، TIC) و روش عددی (Seep/w) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که میزان آب ورودی به مقاطع مختلف تونل در روش‌های تحلیلی از < 1 تا 16 لیتر بر ثانیه، در روش‌های تجربی SGR (از < 8 تا 1 لیتر بر ثانیه) و TIC (از < 1 تا 35 لیتر بر ثانیه) و در روش عددی نیز از < 1 تا 19 لیتر بر ثانیه متغیر می‌باشد. همچنین مؤلفه‌های جریان هیدرولیکی، تأثیر رودخانه بر میزان آب ورودی به تونل به همراه تفاوت در نظر گرفتن هدایت هیدرولیکی لایه به لایه بجای هدایت هیدرولیکی معادل مورد مدل‌سازی قرار گرفت. در نهایت ضمن تطبیق مسئله با شرایط زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه مشخص گردید ورود آب به تونل می‌تواند در کیلومترهای $0+239$ و $1+829$ خطرناک شود و باید در حین اجرا، به این دو مقطع از تونل توجه ویژه‌ای گردد.

مقدمه

تونل‌ها معمولاً در سه مرحله شامل جریان اولیه، جریان انتقالی و جریان ماندگار رخ می‌دهد. جریان اولیه در اثر اختلاف فشار هیدرواستاتیک و ایجاد گرادیان هیدرولیکی میان آب زیرزمینی و سطح آزاد درون تونل شکل می‌گیرد. با ادامه زهکشی، افت سطح آب زیرزمینی و کاهش ذخیره آبخوان موجب ایجاد جریان انتقالی می‌شود و در نهایت، سیستم به شرایط ماندگار می‌رسد. این روند تا زمانی ادامه می‌یابد که بین نرخ تخلیه آب از تونل و نرخ تغذیه آبخوان تعادل برقرار شود (Hwang and Lu, 2007). نشت آب به داخل تونل‌ها تابعی پیچیده از عوامل ذاتی آبخوان شامل ویژگی‌های توده سنگ، شرایط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی، و عوامل

توسعه زیرساخت‌های زیرزمینی و احداث تونل‌های انتقال آب، به دلیل نقش کلیدی در مدیریت منابع آب و ارتباط حوضه‌های آبریز، امروزه به یکی از حیاتی‌ترین بخش‌های پروژه‌های عمرانی تبدیل شده است. با این حال، اجرای این سازه‌ها به دلیل مواجهه با مخاطراتی نظیر لهیدگی، انفجار سنگ، ورود آب زیرزمینی و نشت سیالات خطرناک، از ریسک‌پذیرترین فعالیت‌های مهندسی به شمار می‌رود. وقوع این پدیده‌ها می‌تواند موجب تأخیر در اجرای پروژه و تحمیل خسارات مالی و انسانی قابل توجه در مراحل ساخت و بهره‌برداری شود (Ardehsir et al., 2014; Zhou et al., 2020; Sheng et al., 2025; Farhadian et al., 2025). ورود آب به

استناد: جوکار، م. ح.، خامه چیان، م.، صالحی، م.، محمودیان بارزی، ا. (۱۴۰۵). ارزیابی خطر ورود آب به تونل انتقال آب سرپل ذهاب (T4) با استفاده از روش‌های تحلیلی، تجربی و عددی. مجله زمین شناسی مهندسی، ۲۰ (۲)، ۱۶۷-۱۹۲. <https://doi.org/10.22034/jeg.2026.11707>

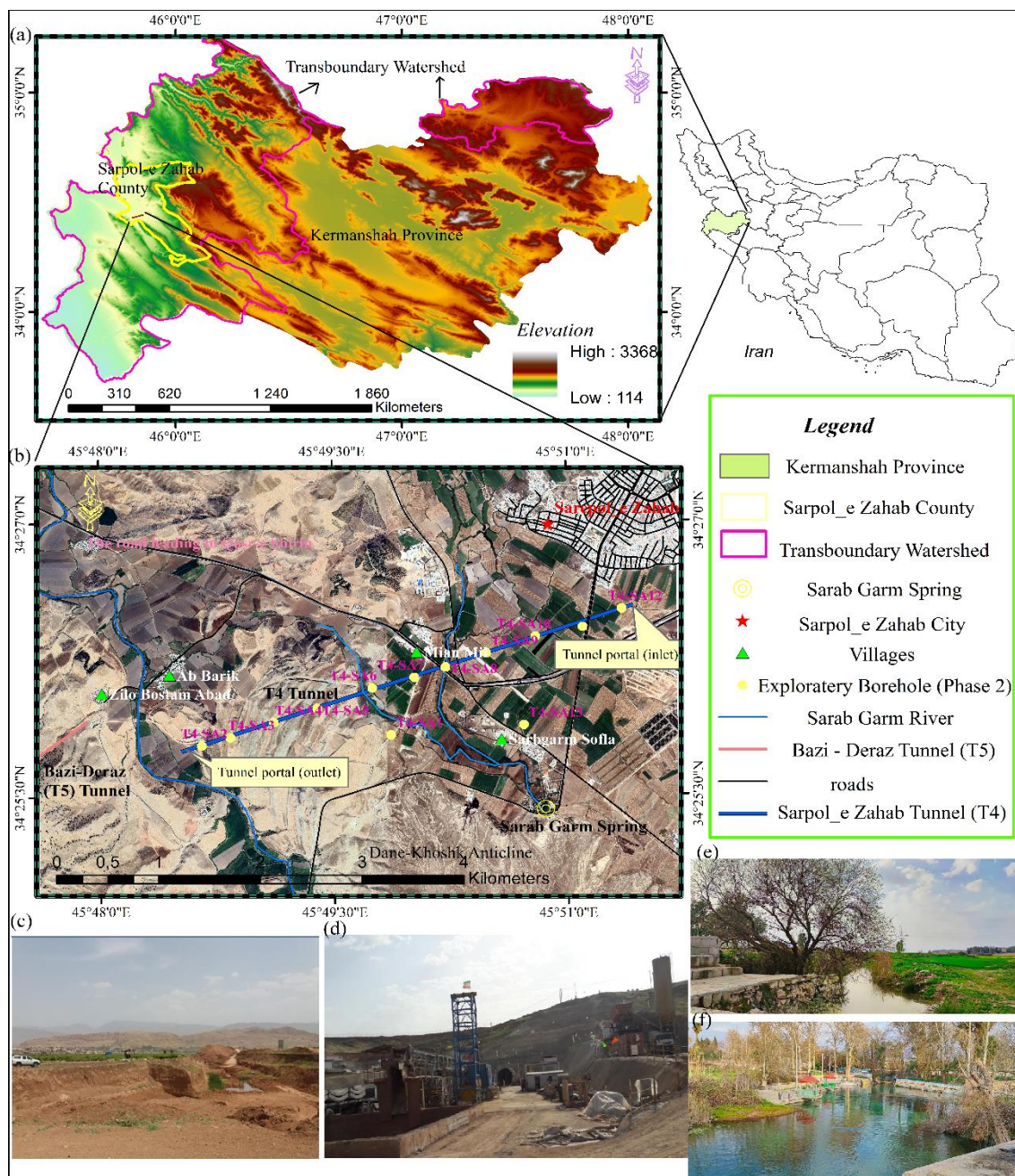
- اجرای مرتبط با مشخصات هندسی تونل و روش‌های حفاری تونل است (U.S. Army Corps of Engineers, 1997; Kiraly, 2002; Hwang and Lu, 2007; Yagiz, 2009; Li et al., 2010; Zarei et al., 2011; Frenelus et al., 2021; Pan et al., 2022; Su et al., 2022; Li et al., 2024; Hu et al., 2024).
- بنابراین تنوع و پیچیدگی این عوامل پیش‌بینی دقیق نشت آب به تونل را با عدم قطعیت‌های جدی مواجه می‌سازد. عدم مدیریت صحیح این پدیده می‌تواند پیامدهای وخیمی نظیر ناپایداری سازه‌ای، تخریب پوشش و خسارات جانی و مالی گسترده‌ای به همراه داشته باشد (Morsali et al., 2018; Tavasoli et al., 2020; Gholizadeh Khasevani et al., 2021).
- متعدد در اجرای پروژه‌های مختلف تونل‌های انتقال آب و متروهای شهری در مقیاس‌های بین‌المللی (Zhou et al., 2020; Langford et al., 2022; Goel and Kale, 2022; Jiajia et Heydari and al., 2022; Sheng et al., 2025; Sharafi, 2017; Joudaki et al., 2017; Naseri et al., 2018; Morsali et al., 2018; Sedaghati et al., 2019; Jafarzadeh et al., 2023; Farhadian et al., 2025)، گواه این واقعیت است که نشت آب به تونل یکی از چالش‌های بنیادین در پایداری فضاهای زیرزمینی محسوب می‌شود. به عنوان نمونه، در تونل نان‌شیبی (Nanshibi) چین، فشار هیدرواستاتیک بیش از ظرفیت باربری پوشش و سیستم آب‌بندی ناکارآمد، منجر به گسترش مسیرهای نشت گردید. در این پروژه، ترکیب فشارهای هیدرواستاتیک و شعاعی با بار سنگ به‌ویژه در پهنه‌های ضعیف پایداری سازه را مختل کرد. علاوه بر این، وجود لایه‌های کارستی در مسیر این تونل موجب نفوذ آب از طریق درزه‌ها و در نهایت بروز آسیب‌های سازه‌ای، بالا آمدن روسازی و هجوم گل‌ولای گردید (Jiajia et al., 2022).
- به‌منظور حل مسئله و کنترل نشت آب در حین حفاری و بهره‌برداری، با توجه به شرایط محیطی و ضرورت‌های زیست‌محیطی، راهکارهای متنوعی اتخاذ شده است که می‌توان آن‌ها را بر اساس مکانیسم عملکرد به چهار دسته کلی تقسیم کرد: ۱. روش‌های تخلیه و زهکشی: شامل طراحی سیستم‌های زهکشی (Yu et al., 2023) و حفر چاه‌های تخلیه (Powers et al., 2007)، روش‌های مسدودسازی و کنترل جریان: شامل ایجاد دیواره‌های بنتونیت (Dixon et al., 2007; Firouzei et al., 2025)، روش انجماد زمین (Orth and Müller, 2013) و تزریق دوغاب سیمان، فوم و رزین‌های آب‌بندی (Borden and Selander, 1972; Panthi and Nilsen, 2005; Safan et al., 2019; Zheng et al., 2019)، ۳. سیستم‌های عایق‌بندی - غشایی: بهره‌گیری از غشاهای ضدآب نظیر پلیمرها، آسفالت، قیر و لاستیک‌های EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer) (Caputo and Huez, 1987; Gong et al., 2022; Li and Gong, 2024) و همچنین سیستم‌های ژئوممبرین HDPE و PVC (Blanco et al., Luciani et al., 2020)، ۴. رویکردهای نوین و ترکیبی: همچون استفاده از سیستم‌های عایق رطوبتی چندلایه (تزریق دوغاب در فضای بین سگمنت‌های نصب‌شده و در محل درزها و اتصال‌ها همراه با نصب لاستیک‌های آب‌بند به‌عنوان یک خط دفاعی ثانویه (Gong et al., 2023)، استفاده از مواد اسپری‌شونده با خواص چسبندگی دوگانه (spray-applied material with double-adhesive properties) در یک سیستم زهکشی ضد آب جدید (Sun et al., 2024) و استفاده از سیستم‌های پیوند دوگانه (Double-bonded systems) و هیدروژل‌های خود ترمیم‌شونده (Wang, 2025).
- در ابتدا، پیچیدگی‌های مرتبط با نفوذپذیری توده سنگ، ماهیت رژیم‌های جریان و محدودیت‌های زمانی، مکانی و هزینه‌ای در مطالعات میدانی، باعث شد تا تحلیل بارهای هیدرولیکی و فشار آب، نرخ نشت و پایداری سازه‌های زیرزمینی مبتنی بر رویکردهای تحلیلی و تجربی باشد (Goodman et al., 1965; Freeze and Cherry, 1979; Inokuma and Ishimura, 1995; Heuer, 1995; Lei, 1999; El-Tani, 1999, 2003; Karlsrud, 2001; Katibeh and Alianari, 2009; Zarei et al., 2013; Perazzelli et al., 2014; Yu et al., 2025).
- یافته‌ها نشان داد که در دبی‌های پایین، روش‌های تجربی دقت بیشتری دارند، اما با افزایش میزان ورود آب، نتایج حاصل از روش‌های تحلیلی با واقعیت انطباق بیشتری می‌یابند (Morsali et al., 2018). به‌موازات پیشرفت در علوم محاسباتی، مدل‌سازی عددی به‌عنوان ابزاری کارآمد جهت شبیه‌سازی دقیق جریان، ارزیابی فشار آب، کمی‌سازی نشت و ارزیابی ریسک اجرا در شرایط پیچیده تکتونیکی و زمین‌شناسی مطرح گردید و نرم‌افزارهای عددی نظیر Seep و FLAC در پروژه‌های متعددی (ازجمله

مسیر تونل انتقال آب سرپل ذهاب (T4) شناسایی و مشخص شدند. این امر منجر به شناسایی مقاطع بحرانی و مستعد ورود آب گردید که مبنای تحلیل‌های عددی قرار گرفتند. در گام بعدی، میزان ورود آب با بهره‌گیری از رویکردی ترکیبی شامل روش‌های تحلیلی، تجربی و مدل‌سازی عددی (در نرم‌افزار SEEP/W) مورد ارزیابی قرار گرفت و در نهایت نتایج این سه رویکرد به‌منظور اعتبارسنجی و تحلیل جامع، با یکدیگر مقایسه شدند.

موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی گستره طرح

تونل‌های سرپل ذهاب (T4) و بازی‌دراز (T5) به ترتیب با طول تقریبی ۴۳۰۰ و ۸۵۰۰ متر، در انتهای بازه سوم از قطعه اول طرح گرمسیری در استان کرمانشاه و در محدوده بین طاق‌دیس‌های پاتاق و بازی‌دراز، واقع در جنوب غربی شهر سرپل ذهاب و جنوب شرقی شهر قصرشیرین، قرار دارند (شکل‌های ۱- a, b). راه دسترسی به ورودی تونل T4 از طریق قسمت شمالی جاده کمربندی قصرشیرین به سرپل ذهاب میسر است. همچنین، دسترسی به خروجی تونل نیز از مسیر آسفالت‌های در امتداد دره رودخانه دیره تا روستای آب‌باریک (به طول ۹ کیلومتر) و در نهایت، طی یک جاده خاکی به طول ۴۰۰ متر صورت می‌گیرد (شکل‌های ۱- a, b). در طرح اولیه، انتقال آب در حدفاصل تونل‌های سرپل ذهاب و بازی‌دراز به‌صورت کانال پیش‌بینی شده بود؛ اما به دلیل چالش‌های اجرایی و محدودیت‌های تملک اراضی، طرح احداث تونل جایگزین کانال گردید که با عنوان تونل T4 نام‌گذاری شد. این تونل با قطر حفاری ۶/۸ متر، ظرفیت انتقال جریان تا حداکثر ۴۲ مترمکعب بر ثانیه را دارا می‌باشد (Mahab Ghodss Consulting Engineering, 2021; Joudaki et al., 2016; Company).

تونل‌های کوهین، امام‌زاده هاشم (ع)، خط ۷ مترو تهران و نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد کردستان) جهت ارزیابی این مسئله به کار گرفته شدند (Mikaeil and Doulati Ardejani, 2008; Moeini-Rudbali et al., 2011; Sedaghati et al., 2019; Gholizadeh Khasevani et al., 2021). در ادامه، با اتخاذ رویکردی تلفیقی، داده‌های زمین‌آماري با مدل عددی (نرم‌افزار Seep/w) برای برآورد فرار آب از تکیه‌گاه سد آزاد کردستان ترکیب گردید و نتایج حاصل از آن با مقادیر آب نشتی از سد و چشمه‌های پایین‌دست صحت‌سنجی شد (Aalianvari et al., 2019). همچنین استفاده ترکیبی از الگوریتم‌های هوشمند (مانند تکامل تفاضلی (Differential Evolution, DE) و الگوریتم متروپولیس تطبیقی بر پایه تکامل تفاضلی (Differe ntial Evolution, DREM) در کنار روش‌های عددی و توسعه آن‌ها ابزاری مؤثر را برای بهینه‌سازی هدایت هیدرولیکی و تعیین پارامترهای نشت در پروژه‌های مشابه فراهم آورد (Ma et al., 2016; Jafarzadeh et al., 2023). با این وجود، امروزه همچنان مسئله ورود آب‌های زیرزمینی به تونل‌ها، به‌ویژه در شرایط زمین‌شناسی پیچیده نظیر وجود تکتونیک فعال، محیط‌های کارستی، شرایط نشت گازهای سولفید هیدروژن و شرایط خاص زمین و هندسه تونل‌ها در محیط اجرا (مانند تونل‌های متقاطع یا زیرآبی)، یک موضوع برجسته در مباحث هیدرولیک مهندسی، هیدروژئولوژی و مکانیک سنگ محسوب می‌شود (Frenelus et al., 2021; Wu et al., 2023; Hu et al., 2024; Chen et al., 2024a, b; Yuzbashi et al., 2024). از این رو، در پژوهش حاضر به‌منظور غلبه بر محدودیت‌های موجود در ارزیابی ورود آب به تونل، ابتدا از طریق جمع‌آوری داده‌های پایه و بازدیدهای میدانی متعدد، سیستم‌های درزه‌ای و ناپیوستگی‌های



شکل ۱. (a) موقعیت تونل T4 در مدل رقومی ارتفاع (DEM) استان کرمانشاه و شهرستان سرپل ذهاب، (b) نمایی از مسیر اجرای تونل T4 در منطقه همراه با موقعیت تلاقی آن با رودخانه و فاصله آن از چشمه سرآب گرم سرپل ذهاب، (c) پادگانه‌های آبرفتی موجود در ورودی تونل T4، (d) موقعیت خروجی تونل T4، (e) رودخانه سرآب گرم و (f) چشمه سرآب گرم در فاصله یک کیلومتری از مقطع تونل

Fig. 1. (a) Location of the T4 tunnel on the digital elevation model (DEM) of Kermanshah Province and Sarpol-e Zahab County, (b) overview of the T4 tunnel alignment in the study area, including its intersection with the river and its distance from the Sarab Garm spring of Sarpol-e Zahab, (c) Existing alluvial terraces at the T4 tunnel inlet, (d) location of the T4 tunnel outlet, (e) Sarab Garm River, and (f) Sarab Garm spring located approximately 1 km from the tunnel section

صورت می‌گیرد (شکل ۱-۳). در مقیاس منطقه‌ای، سازند آسماری

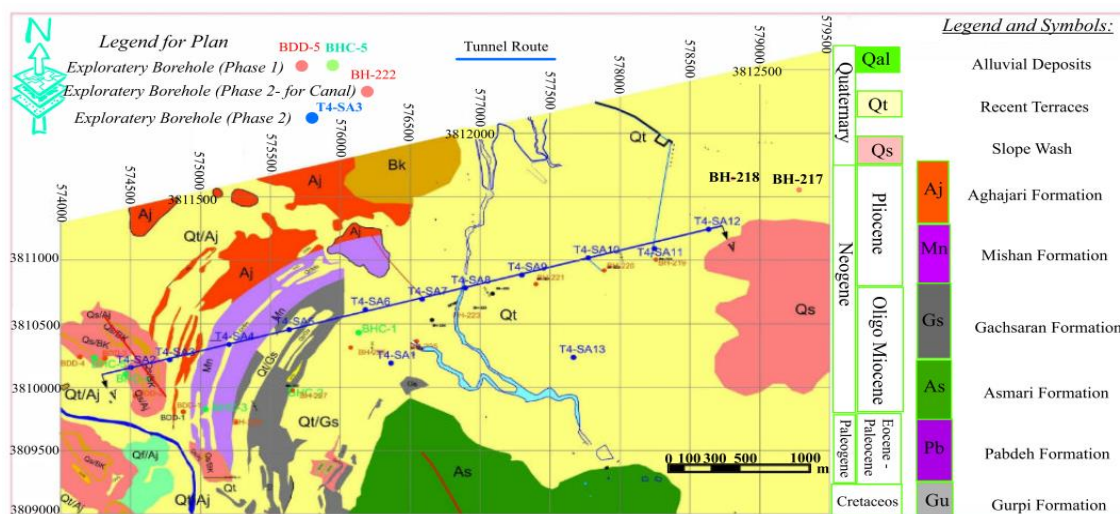
با شدت کارست‌زایی قابل‌توجهی روبروست که آثار این انحلال‌ها به عوارض سطحی، در اکتشافات زیرسطحی (گمانه‌ها) ساختگاه‌های

حفاری از کیلومتر تقریبی ۲+۲۵۰ تونل تا انتهای مسیر (پرتال ورودی) در بخش آبرفتی شامل سیلت و رس همراه با شن و ماسه

تأثیرگذاری عملیات حفاری تونل بر منابع آب (رودخانه و چشمه سراب گرم (شکل‌های 1-e, f) ضروری است مطالعات و پژوهش‌های لازم جهت جلوگیری از تغییر رژیم هیدروژئولوژی منطقه انجام گیرد.

به لحاظ زمین‌شناسی نیز، گستره طرح انتقال آب در منتهی‌الیه شمال باختری زون زاگرس چین‌خورده قرار دارد. به‌نحوی که محدوده تونل انتقال آب سرپل ذهاب (T4) با روند شمال خاوری - جنوب باختری، برشی عمودی از بخش انتهایی طاق‌دیس دانه خشک را در برمی‌گیرد. ورودی تونل در یال شمال شرقی و خروجی آن در یال جنوب غربی این طاق‌دیس می‌باشد و در حدود ۲۲۵۰ متر ابتدایی مسیر آن (از سمت پرتال خروجی تونل) سازندهای آسماری، شهبازان، گچساران، میشان، آغاچاری و بختیاری از قدیم به جدید (الیگوسن تا عهد حاضر) وجود دارد (شکل ۲).

در بندهول و سرپل ذهاب نیز مشهود است. این شرایط زمین‌شناسی با حضور چشمه‌های پرآبی نظیر قلعه شاهین، قره‌بلاغ و به‌ویژه سراب گرم همراه است؛ چشمه سراب گرم در یال شمال شرقی طاق‌دیس دانه خشک واقع شده و به عنوان یکی از سرشاخه‌های رودخانه الوند، دبی متوسط ۱۷۹۲ لیتر بر ثانیه و تخلیه سالانه ۵۶/۵ میلیون مترمکعب را دارا است (Mahab Ghodss Consulting Engineering Company, 2016). این موضوع از آنجا حائز اهمیت است که تونل سرپل ذهاب در کیلومتر ۲+۴۸۰ از سمت پرتال خروجی (۱+۸۲۰ از سمت پرتال ورودی) از زیر رودخانه سراب گرم با جهت عمومی جنوب غربی - شمال شرقی عبور می‌کند. ارتفاع روباره تونل در محل تلاقی با رودخانه حدود ۴/۵ متر و عرض رودخانه حدود ۷ متر بوده و دبی آن نیز حدود ۱ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد (Joudaki et al., 2021). بنابراین به دلیل احتمال



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی محدوده تونل T4 (Mahab Ghodss Consulting Engineering Company, 2016)
Fig. 2. Geological map of the T4 tunnel area (Mahab Ghodss Consulting Engineering Company, 2016)

مورد (Consulting Engineering Company, 2016)

تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. پس از ارزیابی آن‌ها، در ادامه به معرفی هرکدام از روش‌های تحلیلی، تجربی و مدل‌سازی عددی انجام‌شده در این پژوهش جهت برآورد خطر ورود و نشت آب به تونل T4 پرداخته می‌شود.

ارزیابی ویژگی‌های زمین‌شناسی و مکانیک سنگ مسیر

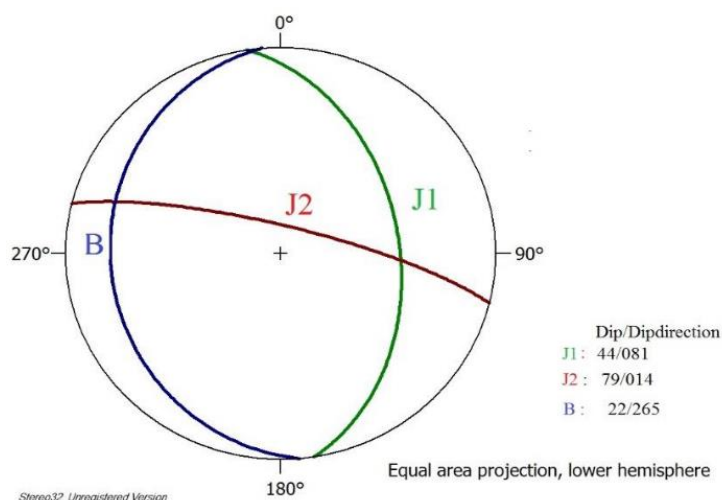
اجرای تونل T4

شناسایی گسل‌ها و ناپیوستگی‌های موجود

مواد و روش‌ها

به دلیل پیچیدگی مسئله و عدم قطعیت روش‌های مختلف در تخمین مقدار نشت آب به تونل در گام اول ویژگی‌های مربوط به شرایط زمین‌شناسی و مکانیک سنگ محدوده اجرای پروژه شامل گسل‌ها و ناپیوستگی‌های موجود در مسیر اجرای تونل و خواص فیزیکی، مکانیکی و هیدرولیکی توده خاک و سنگ در محدوده تونل بر اساس بازدیدهای میدانی و نتایج آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی انجام‌شده توسط مشاور (Mahab Ghodss)

شواهدی مبنی بر وجود گسل‌های فعال (جوان) که موجب تغییر در ساختار آبرفت‌ها شده باشد، مشاهده نگردید. در ادامه، به‌منظور تحلیل ویژگی‌های سیستم ناپیوستگی توده سنگ در مسیر تونل، داده‌های مربوط به سطوح لایه‌بندی و مجموعه درزه‌ها در ایستگاه‌های مختلف (به‌ویژه در مقاطع سنگی و خروجی تونل) گردآوری شد. نتایج حاصل از این مطالعات، حاکی از وجود دو مجموعه درزه و سطح لایه‌بندی با شیب و امتداد مشخص در محدوده تونل T4 مطابق شکل ۳ است.



شکل ۳. تصویر استریوگرافیک سطح ناپیوستگی در محدوده تونل T4

Fig. 3. Stereographic projection of rock mass discontinuities in the T4 tunnel area.

سازندهای سنگی ضعیف است. همچنین مقادیر نسبتاً پایین مدول الاستیسیته (۲/۷-۵/۲ گیگاپاسکال) نشان‌دهنده استعداد نسبی این سازندها برای تغییر شکل در اثر باز توزیع تنش‌های ناشی از حفاری است. تغییرات تخلخل و میزان رطوبت نیز حاکی از آن است که شرایط آب زیرزمینی می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر رفتار مکانیکی این سازندها، به‌ویژه در واحدهای دارای میان لایه‌های رسی، داشته باشد. از دیدگاه تونل‌سازی، این ویژگی‌ها ضرورت پایش مستمر پایداری و به‌کارگیری سامانه‌های نگهداری مناسب را، به‌خصوص در نواحی دارای ناپیوستگی و مستعد ورود آب زیرزمینی، نشان می‌دهد. نهشته‌های آبرفتی نیز به دلیل تخلخل زیاد (۳۷/۵ درصد) و محتوای آب اشباع بالا (۳۲/۲۵ درصد)، از مصالحی سست، با چسبندگی کم و نفوذپذیری بالا تشکیل شده‌اند. این ویژگی‌ها شرایط مناسبی را برای حرکت آب زیرزمینی فراهم کرده و احتمال ورود آب، فرسایش و تغییر شکل در حین حفاری را افزایش می‌دهند.

با حضور فیزیکی در محدوده پروژه و انجام بررسی‌های میدانی مشخص گردید تغییری در روند لایه‌ها در محدوده رخنمون یافته سازندهای زمین‌شناسی در مسیر تونل T4، مشاهده نمی‌شود و لایه‌ها پیوستگی لازم را دارند و بنابراین می‌توان گفت گسلی در محدوده تونل T4 در قسمت‌هایی که سنگ رخنمون دارد دیده نمی‌شود. تنها گسل‌های چپ‌گرد راست‌الغز آن‌هم با جابه‌جایی حدود ۱۰ و ۶ متر در خارج از مسیر تونل وجود داشت. علاوه بر این، در بررسی‌های میدانی صورت‌گرفته در محدوده‌های آبرفتی، هیچ‌گونه

بررسی نتایج آزمایش‌های مکانیک خاک و سنگ

به‌منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی واحد خاکی (آبرفت) و سنگی (سازندهای زمین‌شناسی) در محدوده اجرای تونل با نمونه‌گیری از گمانه‌های اکتشافی، آزمایش‌های مکانیک خاک و سنگ توسط شرکت مه‌اب قدس به شرح جداول ۱ تا ۳ انجام شد (Mahab Ghodss Consulting Engineering Company, 2016). به‌نحوی که تحلیل نتایج آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی مصالح خاکی و سنگی در محدوده اجرای تونل T4 (مطابق جدول ۱) حاکی از آن می‌باشد که سازندهای رسوبی آغاجاری، گچساران و میشان دارای مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری نسبتاً کم تا متوسط (۱۱/۶ تا ۱۵ مگاپاسکال) هستند که بر اساس مبانی و طبقه‌بندی‌های دیر و میلر (Deere and Miller, 1966) و بنی‌اوسکی (Bieniawski, 1973, 1989)، رفتار مقاومتی این

همچنین نسبت فضای خالی زیاد و پیوند ضعیف ذرات می‌تواند بر پایداری جبهه حفاری اثر منفی گذاشته و خطر نشست‌های موضعی را افزایش دهد. از این رو، در حفاری تونل در چنین رسوباتی، کنترل

جدول ۱. نتایج آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی مصالح خاکی و سنگی در محدوده تونل T4 (Mahab Ghodss Consulting Engineering Company, 2016)

Table 1. Physical and mechanical properties of soil and rock materials in the T4 tunnel area (Mahab Ghodss Consulting Engineering Company, 2016)

Formation	Lithology	Dry unit weight (kN/m ³)	Saturated unit weight (kN/m ³)	Saturated Water Content (%)	Porosity (%)	Uniaxial Compressive Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio
Aghajari	Sandstone Siltstone, Claystone	24.3	24.6	5.93	18.5	11.6	2.5	0.27
Gachsaran	Marl, Siltstone, Claystone	23.7	24	5.52	13.07	14.5	7.2	0.3
Mishan	Sandy limestone, Sandstone, Siltstone	24.7	25.1	4.08	12.5	15	4.4	0.27
Alluvial deposits	Sand, Silt, Clay	18.9	19.5	32.25	37.5	—	—	—

Note: Water content was measured following ASTM D2216 (2019). All rock-related parameters, including density, porosity, uniaxial compressive strength, Young's modulus, and Poisson's ratio, were determined in accordance with ISRM Suggested Methods (Ulusay and Hudson, 2007). The physical properties of alluvial deposits were evaluated based on ASTM D7263 (2021).

شکست‌های کنترل‌شده توسط ساختار قرار گیرد. همچنین نتایج آزمایش سه محوری توده‌های سنگی در محدوده اجرای تونل T4 (مطابق جدول ۲) نشان می‌دهد که بر مبنای معیار شکست هوک – براون (Hoek and Brown, 1980, 1997) نمونه سنگ سازند آغاجاری در رده کیفیت متوسط قرار دارد. چنانچه مقاومت این سنگ با افزایش فشار محصورکننده افزایش می‌یابد، که این مسئله حاکی از بهبود پایداری در اعماق یا در شرایط اعمال فشار محصورکننده کافی از سوی سامانه نگهداری است. در ادامه نمونه سنگ سازند گچساران حساسیت بالایی مقاومت سنگ به فشار محصورکننده دارد. چنانچه با افزایش فشار محصورکننده، مقاومت سنگ به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد که این امر نشان‌دهنده افزایش ظرفیت خودنگهداری توده سنگ و پایداری تونل در عمق است. در نهایت تحلیل نتایج مربوط به سازند میشان نشان می‌دهد که یکپارچگی توده سنگ این سازند تحت فشار جانبی به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌یابد. در فرآیند حفاری تونل، این بدان معناست که حتی اعمال یک حمایت اولیه سبک (مانند شاتریت) می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی پایداری جبهه حفاری را افزایش دهد.

در ادامه تحلیل نتایج آزمایش سه محوری نمونه‌های سنگی در محدوده اجرای تونل T4 (مطابق جدول ۲) نشان می‌دهد که بر مبنای معیار شکست موهر – کلمبر براساس مبانی و طبقه‌بندی‌های ارائه‌شده توسط گودمن (Goodman, 1989) و جیگر و همکاران (Jaeger et al., 2007) نمونه سنگ سازند آغاجاری رفتار مقاومتی ترکیبی از اصطکاک و چسبندگی را نشان می‌دهد. زاویه اصطکاک متوسط آن نشان می‌دهد که سنگ دارای مقاومت برشی اولیه است، اما پایداری آن به‌طور قابل‌توجهی به فشار محصورکننده مؤثر که توسط سامانه نگهداری فراهم می‌شود، وابسته است. در ادامه ترکیب زاویه اصطکاک بالا (۴۲ درجه) و چسبندگی قابل‌توجه (۴/۷ مگاپاسکال) نمونه سنگ سازند گچساران نشان‌دهنده مقاومت برشی مناسب و مقاومت در برابر لغزش در طول درزه‌ها است. این ویژگی‌ها شرایط نسبتاً مساعدی برای حفاری تونل فراهم می‌کنند، به شرط آنکه تأثیرات آب زیرزمینی به‌طور مؤثر کنترل شود. در نهایت نتایج نمونه سنگ سازند میشان حاکی از آن است که پایداری عمدتاً توسط مقاومت اصطکاکی کنترل می‌شود. در نتیجه، این سازند ممکن است در نواحی با فشار کم، در معرض ریزش موضعی یا

جدول ۲. نتایج آزمایش سه محوری نمونه‌های سنگی در محدوده تونل T4 (Mahab Ghodss Consulting Engineering Company, 2016)
 Table 2. Results of triaxial compression tests and derived strength parameters (Mahab Ghodss Consulting Engineering Company, 2016).

Formation	Mohr–Coulomb Criteria		Hoek–Brown Criteria	
	ϕ (deg)	C (MPa)	σ_c (MPa)	m
Aghajari	35	3.4	21	20.2
Gachsaran	42	4.7	20	30.7
Mishan	45	3.7	11	21.4

Note: Triaxial compression tests were performed following the ISRM Suggested Methods (Ulusay and Hudson, 2007).

ناپیوستگی است، اما درگیری فیزیکی ناشی از زبری سطح، پایداری کلی توده سنگ را در امتداد این سطوح ارتقا می‌دهد. از دیدگاه تونل‌سازی، این پارامترها حاکی از آن است که علیرغم ضعف ذاتی سنگ بکر، ناپیوستگی‌ها پتانسیل بالایی برای مقاومت در برابر جابه‌جایی بلوک‌های سنگی دارند؛ مشروط بر آنکه تنش نرمال مورد نیاز از طریق اجرای به‌موقع سیستم‌های نگهداری تأمین گردد.

نتایج آزمایش برش سطح درزه سنگ مطابق جدول ۳ نشان می‌دهد که براساس مبانی بارتون (Barton, 1973) سطوح ناپیوستگی دارای ضریب زبری متوسط ($JRC = 8$) و زاویه اصطکاک پایه نسبتاً بالایی ($\phi = 38^\circ$) هستند، که این مقادیر بیانگر مقاومت برشی قابل‌توجه درزه‌ها در برابر لغزش است. مقاومت فشاری دیواره درزه ($JCS = 12$ MPa) اگرچه نشان‌دهنده مقاومت نسبتاً پایین سنگ در لبه‌های

جدول ۳. نتایج آزمایش برش مستقیم سطوح ناپیوستگی سنگ (Mahab Ghodss Consulting Engineering Company, 2016)
 Table 3. Results of direct shear tests on rock joint surfaces (Mahab Ghodss Consulting Engineering Company, 2016)

Basic friction angle, ϕ^0 (deg)	Joint Compressive Strength, JCS (MPa)	Joint Roughness Coefficient, JRC
38	12	8

Note: Direct shear tests were conducted following ISRM Suggested Methods (Ulusay and Hudson, 2007). The Joint Roughness Coefficient (JRC) and Joint Compressive Strength (JCS) were determined based on the empirical system proposed by Barton (1973).

در ژرفای ۲۷ متری آرتزین شده است). تونل در این مقطع از اعماق ۳ تا ۱۰ متر عبور می‌کند و بنابراین مقاطع آرتزین ۱۷ متر پایین‌تر از کف تونل باقی می‌ماند که این امر ریسک فوران آب از کف تونل را به حداقل می‌رساند. بعلاوه در محدوده گمانه‌های T45A9 و T4SA10 تونل در بخش‌های نفوذناپذیر گمانه‌ها حفاری خواهد شد ولی در گمانه T4SA11 آن بخش از گمانه که تونل در آن قرار دارد، نفوذپذیری بالایی دارد. بنابراین احتمال ورود آب از آن مقطع به تونل وجود دارد.

بررسی نتایج آزمایش صحرایی نفوذپذیری به روش‌های لوفران و لوژان

آزمایش نفوذپذیری به روش لوفران (AFNOR, 1992) در گمانه‌های بخش‌هایی آبرفتی مسیر تونل که موقعیت آن‌ها در شکل‌های 1-b و ۲ قابل‌مشاهده است، انجام‌شده که میزان نفوذپذیری در ژرفاهای انجام‌شده در جدول (۴) نشان داده‌شده است (Mahab Ghodss Consulting Engineering Company, 2016). تحلیل نتایج نشان‌دهنده تغییرات هیدرولوژی قابل‌توجهی در طول بخش آبرفتی مسیر تونل است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، میزان نفوذپذیری در واحدهای درشت‌دانه (شن و ماسه) به‌طور محسوسی بالاتر از لایه‌های غنی از رس است. همچنین در گمانه T4SA8 تا ژرفای ۲۵ متری که بخش اصلی مصالح آبرفتی رسی می‌باشد نفوذپذیری بسیار پایین است و در نتیجه این لایه نفوذناپذیر باعث ایجاد یک سفره آبخوان محبوس در ژرفای بیشتر از ۲۷ متری گمانه شده است (به‌طوری‌که گمانه

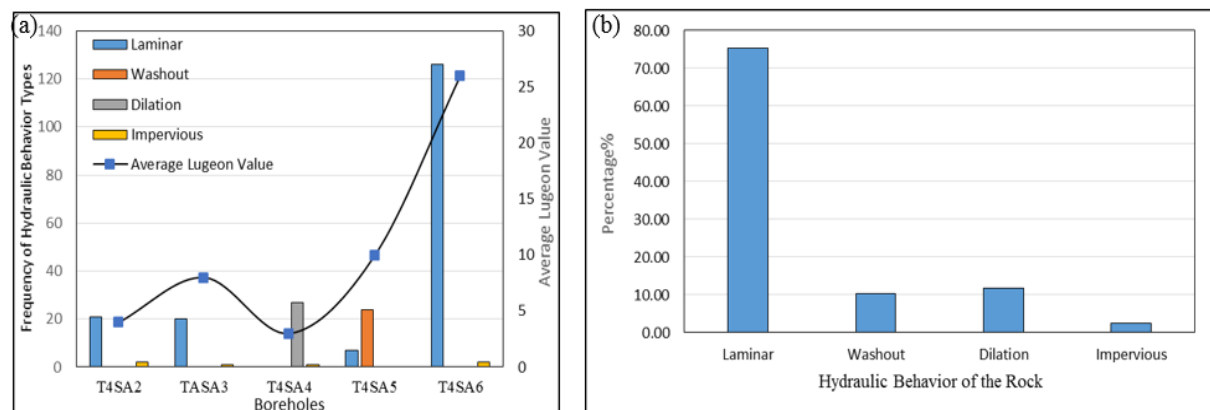
جدول ۴. نتایج آزمایش نفوذپذیری لوفران (Mahab Ghodss Consulting Engineering Company, 2016)

Table 4. Results of Lefranc permeability tests (Mahab Ghodss Consulting Engineering Company, 2016)

Boreholes	Average Permeability (m/s)
T4SA7	2.08×10^{-7}
T4SA8	4.07×10^{-7}
T4SA9	0
T4SA10	0
T4SA11	7.18×10^{-4}
T4SA12	2.05×10^{-6}

از نوع جریان آرام (Laminar) و یکنواخت است. این امر حاکی از آن است که جریان آب بدون ایجاد فرسایش هیدرولیکی درزه‌ها (Wash-out) یا توسعه ناپیوستگی‌ها (Dilation) عبور می‌کند. سهم پدیده‌های شستگی و گشادشدگی هر کدام در حدود ۱۰ درصد برآورد شده که نشان‌دهنده پایداری نسبی مسیرهای جریان در برابر فشارهای هیدرولیکی است. با توجه به لیتولوژی غالب منطقه که شامل سنگ‌های ناتراوا (مارن) و لایه‌های با نفوذپذیری محدود (آهک و ماسه‌سنگ)، درزه‌ها رفتار هیدرومکانیکی پایداری از خود نشان می‌دهند. در نتیجه، پتانسیل نشت آب به داخل تونل در بخش‌های سنگی، محدود و کم‌ریسک ارزیابی می‌شود.

علاوه بر بخش آبرفتی، رفتار هیدرولیکی توده سنگ در محدوده سازه‌های زیرزمینی نیز با استفاده از آزمایش لوژان (Ulusay and Hudson, 2007) در ۵ گمانه اکتشافی مورد ارزیابی قرار گرفت (Mahab Ghodss Consulting Engineering Company, 2016). بر اساس نتایج ارائه‌شده در شکل 4-a، میانگین اعداد لوژان در غالب گمانه‌ها کمتر از ۱۰ واحد است که بیانگر نفوذپذیری کم تا متوسط توده سنگ است. تنها در گمانه T4SA6، این عدد به ۲۶ واحد می‌رسد که احتمالاً ناشی از افزایش تمرکز ناپیوستگی‌ها یا وجود زون‌های خردشده در آن مقطع خاص می‌باشد. تحلیل الگوهای جریان بر اساس تفسیر آزمایش‌های لوژان (شکل 4-b) نشان می‌دهد که حدود ۷۵ درصد از رفتار هیدرولیکی توده سنگ



شکل ۴. نتایج آزمایش نفوذپذیری لوژان در گمانه‌های اکتشافی، (a) رفتار نگاری آزمایش نفوذپذیری همراه با میانگین اعداد لوژان ثبت‌شده و (b) رفتار نگاری تجمعی جریان در طول مسیر تونل

Fig. 4. Results of Lugeon permeability tests in exploratory boreholes: (a) permeability test logs with the average recorded Lugeon values, and (b) cumulative flow logs along the tunnel alignment

دلیل شرایط مرزی متفاوت، فرضیات مختلف و همچنین تفاوت در مدل‌های مفهومی به‌کاررفته برای حل رابطه‌های تحلیلی، مقایسه این روش‌ها با یکدیگر چندان ساده نیست، چون که هر یک از این روش‌ها برای شرایط خاص تعریف‌شده‌اند و در استفاده از آن‌ها باید به فرضیات در نظر گرفته‌شده برای آن‌ها توجه شود (Frenelus et al., 2021; Peng et al., 2022). در این پژوهش جهت مقایسه نتایج روش تحلیلی مقدار نشت ورودی به تونل با روش‌های تجربی

معرفی روش‌های تخمین نشت آب به تونل

معرفی روش‌های تحلیلی

روابط تحلیلی متعددی جهت پیش‌بینی نشت آب به تونل‌ها ارائه‌شده است که عمدتاً بر پایه قانون دارسی و اصل بقای جرم با فرض محیط همگن و ایزوتروپ بنا شده‌اند (Lei, 1999; Shahbazi et al., 2020; Ghorbani et al., 2021). باین‌حال به

Goodman et al., 2001) مجدداً رابطه گودمن و همکاران (Goodman et al., 1965) را برای تونل‌های کم‌عمق (با توجه به عمق روباره تونل T4) با اعمال فرضیاتی همچون، در نظر گرفتن توده سنگ به صورت همگن و همسانگرد، عدم تحت تأثیر بودن سطح آب زیرزمینی بر میزان نشت به صورت رابطه ۲ (جدول ۵) اصلاح کرد. التانی (El-Tani, 2003) مجدداً بر اساس روش تغییر شکل موبیوس (Möbius) و سری فوریه (Fourier Series) راه حل تحلیلی جدیدی برای محاسبه نشت جریان به داخل تونل‌ها ارائه داد (روابط ۳ و ۴ (جدول ۵)).

و عددی در طول مسیر حفر تونل از ۳ روش تحلیلی به شرح جدول ۵ استفاده گردید، زیرا شالوده تمامی روابط تحلیلی، بر پایه اولین رابطه ارائه شده در این زمینه، یعنی رابطه گودمن و همکاران (Goodman et al., 1965) بوده که این رابطه با فرض تونل در زیر سطح ایستایی، جریان‌های حالت پایدار و شعاعی بودن جریان ورودی می‌باشد (رابطه ۱ (جدول ۵)). لیکن محققانی که از این معادله برای ارزیابی میزان آب به درون تونل استفاده می‌کردند معمولاً گزارش داده‌اند که مقدار نشت واقعی آب به درون تونل با آنچه از این رابطه به دست می‌آید در حدود ۳۰-۴۰ درصد متفاوت است (Hwang and Lu, 2007). بنابراین کارلسرود (Karlsrud, 2001) روابط تحلیلی مورد استفاده برای برآورد مقدار نشت آب به تونل

Table 5. Analytical relationships used to estimate water inflow into the tunnel

Equation	Researches	Governing equations and parameters	Applicability / Remark
(1)	Goodman et al. (1965)	$Q_L = \frac{2\pi KH_0}{\ln\left(\frac{2Z}{r}\right)}$ Q_L : Groundwater inflow per unit length (m ³ /sec/m) , K: Hydraulic conductivity (m/s) , r : Tunnel radius (m), H_0 : Depth from the tunnels center line and water head (m), Z: Overburden thickness (m)	Deep Circular tunnel, Homogeneous media, Darcy flow / Mirror method used, Inflow increase slowly with increasing of tunnel diameter
(2)	Karlsrud (2001)	$Q_L = \frac{2\pi Kh}{\ln\left(\frac{2h}{r} - 1\right)}$ The parameters utilized are listed in Equation 1.	Circular deep- seated tunnels ($h/r \geq 3 - 4$), shallow tunnels, Homogeneous media, constant permeability, Darcy glow / semi – empirical equation, there is no influence of Seepage for the water table.
(3-4)	El-Tani (2003)	$Q = 2\pi K \frac{\lambda^2 - 1}{\lambda^2 + 1} \times \frac{h}{\ln \lambda}$ $\lambda = \left(\frac{h}{r}\right) - \left(\frac{h^2}{r^2}\right) - 1)^{1.2}$ The parameters utilized are listed in Equation 1.	Circular tunnels with lining, homogeneous media, Darcy flow / in this equation El – Tani, has applied Mobius transformation method and Fourier series and present a new analytical solution for flow calculation.

روش‌های تجربی و عددی سوق داده شد. بدین منظور، کتیبه و عالی انوری (Katibeh and Alianari, 2009) با استفاده از تجربیات به دست آمده از مطالعه ۱۰ تونل در ایران، روش کیفی و کمی جدیدی برای رده‌بندی ساختگاه تونل‌ها از دیدگاه خطر نشت آب زیرزمینی به نام SGR (Site Groundwater Rating) پیشنهاد کردند. در این روش بر اساس مطالعات اولیه زمین‌شناسی مهندسی و خصوصیات هیدروژئولوژیکی، ساختگاه تونل براساس پارامتر SGR (رابطه ۵) در شش رده کیفی از بی خطر تا بحرانی

معرفی روش‌های تجربی

هرچند روش‌های تحلیلی ارائه شده در جدول ۵، ابزاری سریع برای تخمین‌های اولیه فراهم می‌کنند، اما به دلیل فرض همگنی و ایزوتروپ بودن محیط، در تحلیل شرایط پیچیده نظیر پهنه‌های گسلی، ساختارهای کارستی و تغییرات نفوذپذیری ناشی از حفاری دارای محدودیت هستند (Ataie-Ashtiani et al., 1999; Peng et al., 2022; Guo et al., 2023). بنابراین مطالعات ورود آب به تونل در گام‌های دوم و سوم به ترتیب به سمت

دسته‌بندی می‌شود، که جزئیات این رده‌بندی و امتیازات مربوطه آن نیز در جدول ۶ خلاصه شده است.

$$SGR = [(S1 + S2 + S3 + S4) + S5]S6S7 \quad (5)$$

S4: وجود کارست، S5: ضریب نفوذپذیری خاک (تنها در صورتی که محیط حفاری خاک باشد این ضریب وارد می‌شود)، S6: موقعیت تونل نسبت به سطح ایستابی یا پیژومتریک و S7: میزان و شدت بارش منطقه می‌باشد.

پارامترهای این رابطه عبارت‌اند از S1: امتیاز فراوانی درزه‌ها و بازشدگی آن‌ها، S2: تورق سنگ، S3: عرض زون خردشده و گسله،

جدول ۶. رده‌بندی کمی و کیفی تونل خطر نشت آب بر اساس ضریب SGR (Katibeh and Alianari, 2009)

Table 6. Quantitative and qualitative classification of tunnel water inflow hazard based on the SGR method (Katibeh and Alianari, 2009)

SGR	Group	Water Seepage Rang (lit/s/m)	qualitative explanation
0- 100	I	0-0.04	Safe
100-300	II	0.04-0.1	Low risk
300-500	III	0.1-0.16	Moderately dangerous
500-700	IV	0.16-0.28	Dangerous
700-1000	V	>0.28	High risk
1000<	VI	-	Extremely dangerous

رس لایه‌ها (Clay-Bearing Content, CBC)، مقاومت تک‌محوری (Unconfined Compressive Strength, UCS) و عمق تونل (Tunnel Depth, TD) و امتیازدهی به آن‌ها (بر اساس جدول 7-a)، فضا‌های زیرزمینی به شش رده خیلی کم‌خطر، کم‌خطر، نسبتاً خطرناک، خطرناک، خطر بالا، خطر خیلی بالا و شدیداً خطرناک (مطابق جدول 7-b) تقسیم‌بندی می‌شوند.

در ادامه، زارعی و همکاران (Zarei et al., 2013) سیستم رده‌بندی TIC (Tunnel inflow classification) را به منظور برآورد نشت آب به فضا‌های زیرزمینی با در نظر گرفتن شرایط زمین‌شناسی و طبقه‌بندی توده سنگ ارائه کردند. در این روش با در نظر گرفتن پارامترهایی همچون ترکیب توده سنگ (Rock Mass Composition, RMC)، نوع سنگ (Rock Type, RT)، میزان

جدول ۷. امتیازبندی عوامل مؤثر همراه با رده‌بندی کمی و کیفی خطر نشت آب به تونل براساس روش TIC (Zarei et al., 2013)

Table 7. Scoring of influencing factors along with quantitative and qualitative classification of tunnel water inflow hazard based on the TIC method (Zarei et al., 2013)

on the TIC method (Zareei et al., 2019)

a- Grouping effective factors in estimating water seepage into tunnels using TIC empirical method						
Rock Mass Composition (RMC)	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Group 5	Group 6
Score	2	1.6	11.6	3.9	2	2
Rock Type (RT)	Chemical		Chemi – Clastic		Clastic	
Score	7.1		2.9		1.1	
Uniaxial compressive strength (UCS)	UCS<25		50>UCS>25		UCS>50	
Score	0.6		2.8		5.3	
Clay Bearing Content (CBC)	CBC>35		35 >CBC>5		CBC<5	
Score	1		8.8		6.5	
Tunnel Depth (TD)	TD<200		500>TD>200		TD>500	
Score	4.1		7.3		3.2	
b- Quantitative and qualitative classification water seepage risk in tunnel construction sites using the TIC empirical method						
Tunnel category	I	II	III	IV	V	VI
Tunnel Score	<10	10-25	26-40	41-60	61-80	81-100
Qualitative description of the amount of seepage into the tunnel	Very low risk	Low risk	Moderately risk	High risk	Very high risk	Extremely risk
Amount of seepage into the tunnel	<10	11-60	61-120	121-300	301-800	>800

در مرحله نهایی این پژوهش، به منظور غلبه بر محدودیت روش‌های تحلیلی و تجربی در مواجهه با شرایط پیچیده زمین‌شناسی، از روش

معرفی روش عددی

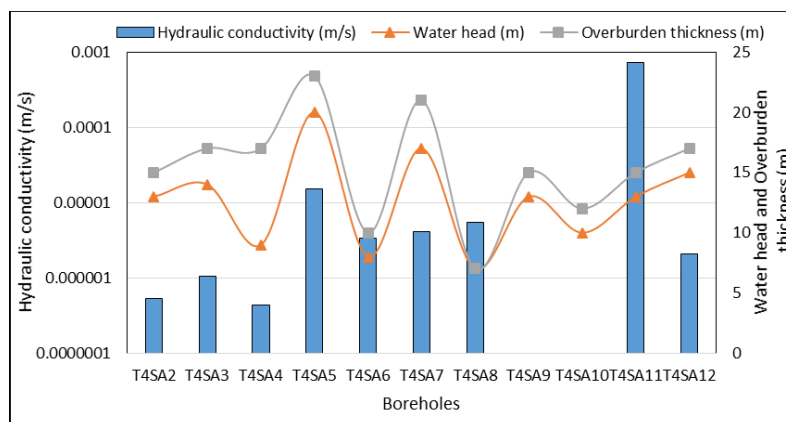
مسئله نشت آب تعدیل کرده و کاربر را در درک هر چه بیشتر مفهوم ورود آب به فضاهای زیرزمینی کمک می‌کند (Aryafar et al., 2007; Arshad and Babar, 2014; Bahrami et al., 2014).

نتایج و بحث

تخمین نشت آب به تونل به روش‌های تحلیلی

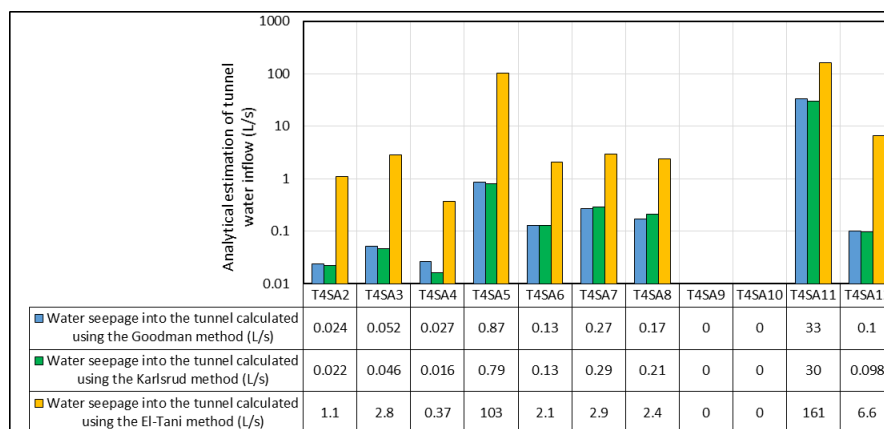
میزان نشت آب به تونل سرپل ذهاب (T4) با استفاده از روابط تحلیلی مندرج در جدول ۵ و در نظر گرفتن شرایط زمین‌شناسی، مکانیک سنگ و شعاع تونل (۳/۴ متر) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که مقدار نشت آب به تونل بر اساس این روش در مجموع بین کمتر از ۱ تا ۱۶۱/۱ لیتر بر ثانیه برآورد می‌شود (شکل ۶). همچنین نتایج نشان داد که روش‌های گودمن و همکاران (Goodman et al., 1965) و کارلسرود (Karlsrud, 2001) مقادیر مشابهی را ارائه می‌کنند، اما روش التانی (El-Tani, 2003) برای برخی مقاطع مقادیر غیرواقعی پیش‌بینی می‌کند و بنابراین برای تخمین دقیق نشت آب به تونل T4 قابل اعتماد نیست.

اجزای محدود جهت تحلیل دقیق جریان نشت به تونل استفاده شد. در این روش مدل به‌عنوان یک محیط پیوسته در نظر گرفته می‌شود و در صورت لزوم ناپیوستگی‌ها به‌صورت مجزا و به تعداد محدود با المان‌های خاص به نام المان فصل مشترک شبیه‌سازی می‌شوند. در نتیجه این عمل، محدوده مدل (زمین دربرگیرنده) به تعداد محدودی المان تقسیم می‌شود که از طریق نقاط گره‌ای در گوشه‌های المان‌ها به هم متصل هستند (Friswell and Mottershead, 1995; Tzamtzis and Asteris, 2004). در این راستا، جهت انجام مدل‌سازی نشت آب به تونل سرپل ذهاب (T4) به روش اجزای محدود از نرم‌افزار SEEP/W (مجموعه Geo-Studio) استفاده گردید. زیرا این نرم‌افزار قابلیت ترسیم تراز عبوری از درون خاک، بردارهای سرعت، ترسیم خطوط جریان و هم‌پتانسیل و محاسبه دبی عبوری برای مقطع مشخص را دارد و همچنین قابلیت این را دارد که مدل گرافیکی را از هر قسمت به قسمت دیگر وارد کند و سپس مدل گرافیکی موجود را برای آنالیز تکمیل کند. بنابراین یکی از قوی‌ترین مدل‌های عددی جهت درک فرایندهای فیزیکی به شمار می‌آید که تصویر ذهنی را نسبت به



شکل ۵. نمودار نیمه لگاریتمی محدوده عوامل مؤثر بر برآورد نشت آب در تونل T4 با روش‌های تحلیلی و عددی

Fig. 5. Semi-logarithmic plot showing the range of factors affecting the estimated water inflow in the T4 tunnel using analytical and numerical methods



شکل ۶. مقایسه نتایج برآورد نشت آب به تونل T4 با استفاده از روش‌های تحلیلی

Fig. 6. Comparison of water inflow estimates for the T4 tunnel obtained using analytical methods.

همچنین، پس از محاسبه امتیاز هریک از پارامترها بر اساس ویژگی‌های مقطع عبوری تونل از سازندهای مختلف زمین‌شناسی بر اساس جدول ۷، مقدار نشت آب به تونل بر اساس روش TIC مطابق جدول ۹ امتیازبندی و رده‌بندی گردید. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که از نظر کیفی، هر دو روش تجربی تونل را در رده بی‌خطر تا کم‌خطر قرار می‌دهند، که با مشاهدات واقعی تطابق دارد. همچنین بر اساس نتایج روش‌های تجربی و مقایسه آن‌ها با داده‌های واقعی موجود در گمانه ۲ و ۳ مشاهده می‌شود که روش SGR نسبت به روش TIC نتایج قابل‌قبول‌تری از لحاظ کمی ارائه می‌کند (شکل ۷).

تخمین نشت آب به تونل به روش‌های تجربی

جهت ارزیابی میزان نشت آب به تونل سرپل ذهاب (T4) با استفاده از روش SGR، به دلیل تنوع فاصله درزه‌ها، بازه $\lambda (1/m) = 0.5 - 1$ برای برآورد فراوانی درزه‌ها در نظر گرفته شد. فشار آب و ضخامت روباره تونل نیز متناسب با مسیر و لیتولوژی سازندها متفاوت انتخاب شد، به‌طوری‌که برای سازند آغاچاری ارتفاع آب ۸ متر و ضخامت روباره ۱۰ متر، برای سازند میشان ارتفاع آب ۲۰ متر، ضخامت روباره ۲۳ متر و برای سازند گچساران ارتفاع آب ۱۵ متر و ضخامت روباره ۱۷ متر در نظر گرفته شد. درنهایت مقادیر نشت آب به تونل با این روش مطابق جدول ۸ محاسبه گردید.

جدول ۸. امتیازدهی عوامل مؤثر در برآورد نشت آب به تونل T4 براساس روش SGR

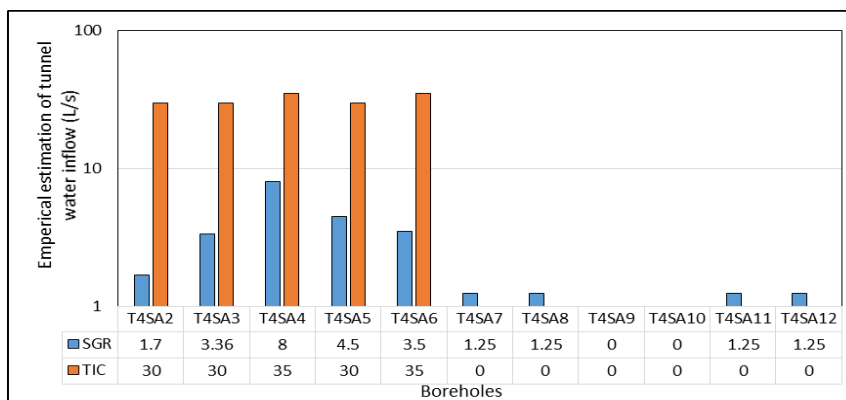
Table 8. Scoring of factors influencing water inflow estimation in the T4 tunnel based on the SGR method.

Formation	Quantitative and Qualitative Assessment of SGR Parameter Ratings										Rating
	S1	س۱	س۲	س۳	S5	S6	S7	SGR	Seepage per Unit Length of the Tunnel	Water Inflow into the Tunnel (L/s)	
Gachsaran	0.29-0.55	0	0	0	0	15	1	4.35 – 8.25	0- 0.04	2.29- 4.36	Safe
Mishan	1.59-3.13					20		31.8 – 62.6		4.95 -9.7	
Aghajari	0.97-1.91					8		7.76-15.28		1.70 -3.6	
Alluvial deposits	0				0.000002	18		0.000036		1.125	

جدول ۹. امتیازدهی عوامل مؤثر در برآورد نشت آب به تونل T4 براساس روش TIC

Table 9. Scoring of factors influencing water inflow estimation in the T4 tunnel based on the TIC method

Formations	Tunnel Depth	Clay Bearing	Uniaxial compressive strength (MPa)	Rock Mass Composition	Rock Type	Total points	Tunnel classification	qualitative description of the Seepage rate	amount of water inflow into the tunnel (L/s)
Gachsaran	3.2	8.8	0.6	3.9	1.1	17.6	II	Low Risk	30-35
Aghajari					2.9	19.4			
Mishan					1.1	17.6			



شکل ۷. مقایسه نتایج روش‌های تجربی برآورد نشت آب به تونل T4

Fig. 7. Comparison of experimental methods for estimating water inflow into T4 tunnel

Seep/W انجام شد. همچنین جهت محاسبه دبی نشت، یک مقطع

کنترلی در اطراف تونل تعریف و میزان جریان عبوری از آن اندازه‌گیری گردید (شکل 8-b). در نهایت نتایج حاصل امکان ارزیابی کمی نرخ نشت آب و بررسی نحوه تمرکز خطوط جریان در اطراف تونل را فراهم ساخت.

بررسی مؤلفه‌های جریان در تونل T4

به منظور تحلیل رفتار هیدرودینامیکی جریان در محدوده تونل T4، مؤلفه‌های اصلی جریان شامل بردارهای سرعت، خطوط جریان و هم‌پتانسیل، توزیع فشار منفذی، اثر رودخانه سراب گرم و تأثیر ناهمگنی هدایت هیدرولیکی با استفاده از نرم‌افزار Seep/W مدل‌سازی شدند (شکل ۸). نتایج نشان می‌دهد همگرایی بردارهای سرعت در مجاورت تونل افزایش می‌یابد که این امر بیانگر تمرکز جریان ناشی از اختلاف هد هیدرولیکی و نقش تونل به عنوان یک مرز نفوذپذیر است (شکل 8-c). در مقابل، در بخش بالایی تونل به علت افت سطح آب زیرزمینی، سرعت جریان ناچیز بوده و عملاً جریان مؤثری مشاهده نمی‌شود. الگوی خطوط جریان و هم‌پتانسیل نیز نشان‌دهنده فشردگی خطوط در مجاورت تونل است که بیانگر

تخمین نشت آب به تونل به روش عددی

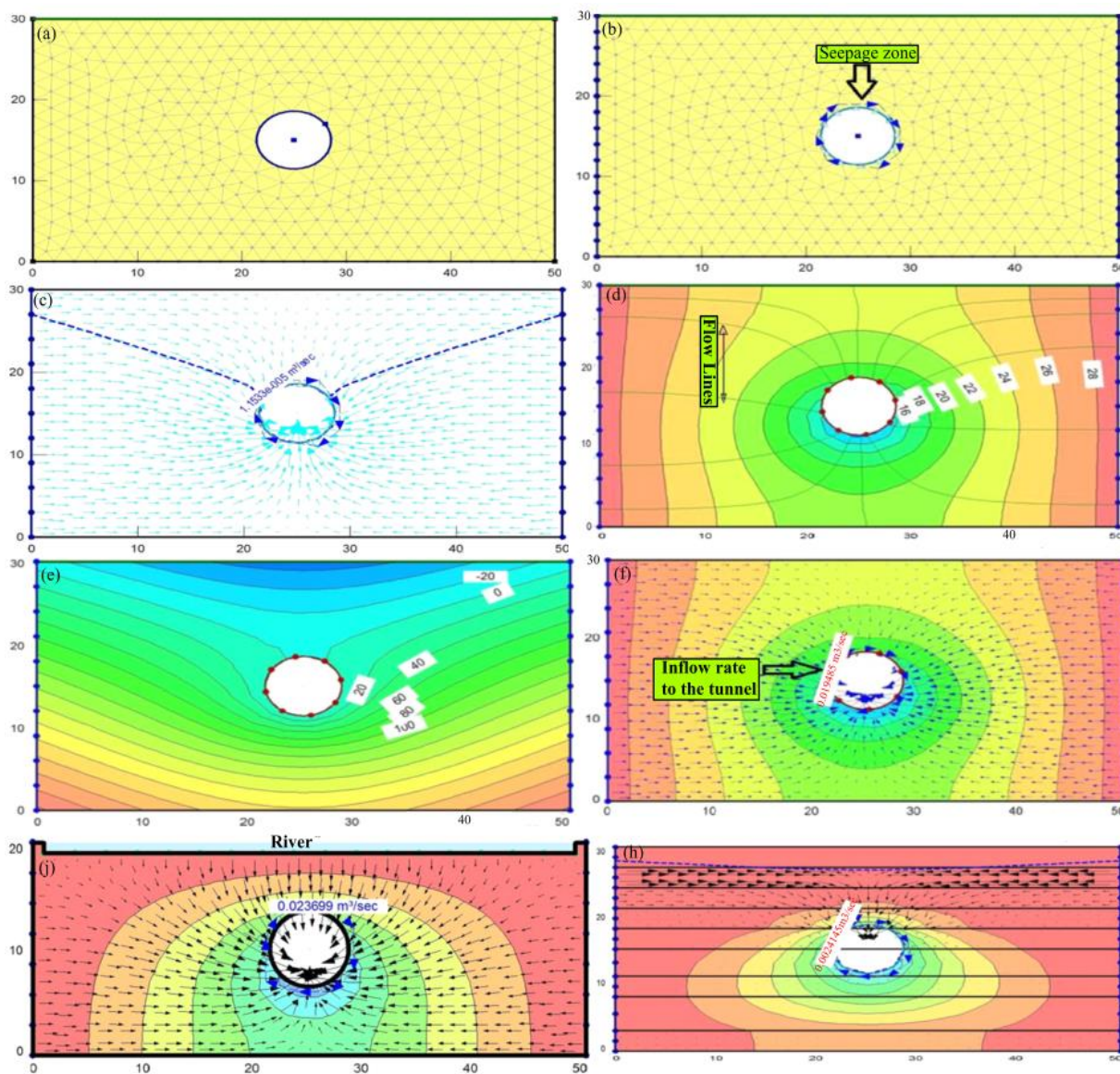
تعریف هندسه و شرایط مرزی تونل T4 در مدل

به منظور شبیه‌سازی و ارزیابی نشت آب به تونل T4، مدل عددی در محیط نرم‌افزار Seep/W به صورت یک مقطع دوبعدی با ابعاد ۵۰ متر طول و ۳۰ متر ارتفاع ایجاد شد (شکل 8-a). شعاع تونل برابر ۳/۴ تعریف و با توجه به مقدار کم سربار تونل، عرض مدل برابر با مقدار واقعی سربار تونل در مقاطع مختلف در نظر گرفته شد. سپس خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی مصالح بر اساس نتایج آزمایشگاهی (جدول ۱) و مطابق با الزامات نرم‌افزار برای شرایط اشباع (Krahn, 2015) در مدل تعریف شد. در ادامه از آنجا که جریان آب تابع اختلاف هد هیدرولیکی است، شرایط مرزی مدل بر اساس وضعیت هیدروژئولوژیکی منطقه تعریف گردید. بدین منظور، سطح آب به صورت هد کل معادل ۲۸ متر در دو طرف مدل اعمال شد و محیط تونل به عنوان مرز زهکش و نفوذپذیر در نظر گرفته شد تا امکان بازسازی رفتار هیدرواستاتیکی توده سنگ و الگوی جریان آب به سمت تونل را فراهم شود. پس از تکمیل هندسه، تعریف مصالح و اعمال شرایط مرزی، تحلیل تراوش در محیط

افزایش گرادیان هیدرولیکی و تمرکز انرژی جریان در این ناحیه می‌باشد (شکل 8-d). بنابراین بیشترین پتانسیل ورود آب به سازه در محیط پیرامونی تونل متمرکز است. تحلیل توزیع فشار منفذی (شکل 8-e) نشان داد که فشار آب در نواحی بالاتر از سطح ایستابی منفی بوده و به دلیل غیراشباع بودن محیط، جریان قابل توجهی در این بخش وجود ندارد. در مقابل، در زیر سطح ایستابی فشار منفذی مثبت است و به همین دلیل دیواره‌ها و کف تونل مهم‌ترین مسیرهای بالقوه ورود آب محسوب می‌شوند. این نتایج ضرورت پیش‌بینی سامانه‌های زهکشی و آب‌بندی در بخش‌های زیر سطح ایستابی را نشان می‌دهد. به‌منظور بررسی تأثیر تغییرات نفوذپذیری، مقطع گمانه T4SA11 که دارای مصالح دانه‌درشت و نفوذپذیری نسبتاً زیاد است به‌صورت جداگانه مدل‌سازی شد. در این مقطع همان‌طور که در شکل 8-f قابل مشاهده است بردارهای سرعت به سمت تونل همگرا هستند به‌طوری‌که تراکم بردارها نزدیک سطح تونل افزایش یافته که این رفتار ضمن سازگاری و تطابق با بافت دانه‌درشت و نفوذپذیر منطقه نشان‌دهنده گرادیان هیدرولیکی زیاد و قدرت بالای جریان ورودی به این محدوده است. به‌نحوی‌که با انجام مدل‌سازی مقدار آب ورودی به تونل در این مقطع، حدود $0/0194$ مترمکعب بر ثانیه به دست آمد. این مقدار در مقایسه با سایر بخش‌های مسیر بیشتر بوده و نشان می‌دهد که لایه‌های آبرفتی و دانه‌درشت می‌توانند به‌عنوان مسیرهای ترجیحی جریان عمل کرده و ریسک نشت آب، شسته‌شدن ریزدانه‌ها و مشکلات اجرایی حفاری را افزایش دهند.

در ادامه با توجه به اینکه در محدوده تونل T4 رودخانه سراب گرم با دبی 1728 لیتر بر ثانیه وجود دارد و به دلیل اینکه مقطع تونل

از زیر این رودخانه عبور می‌کند، جهت برآورد مقدار آبدهی وارده به تونل، با استفاده از نرم‌افزار Seep/w یک میدان نفوذ دوبعدی مدل‌سازی شد؛ در این مدل یک سطح ثابت به طول 2 متر و ارتفاع 1 متر به‌عنوان ناحیه تماس با رودخانه تعریف گردید. نتایج حاکی از آن است که مقدار آب ورودی به مجرای تونل در این محدوده حدود $0/023699$ مترمکعب بر ثانیه (معادل تقریبی $23/7$ لیتر بر ثانیه) می‌باشد. در شرایطی که تأثیر رودخانه سطحی در مدل حذف گردد، مقدار ورودی به تونل کاهش یافته و حدود $0/009$ مترمکعب بر ثانیه (9 لیتر بر ثانیه) برآورد می‌گردد (شکل 8-j). اختلاف بین دبی کل رودخانه و جریان شبیه‌سازی شده وارد تونل بیانگر نقش مؤثر تغذیه سطحی در افزایش نشت آب به تونل در محدوده عبور از رودخانه است. درنهایت، مقایسه نتایج حاصل از استفاده از هدایت هیدرولیکی معادل و هدایت هیدرولیکی لایه‌به‌لایه نشان داد که در نظر گرفتن ناهمگنی واقعی محیط زمین‌شناسی تأثیر قابل توجهی بر برآورد نشت آب دارد. چنانچه در مقطع T4SA11، استفاده از هدایت هیدرولیکی لایه‌به‌لایه دبی ورودی را حدود $0/002$ مترمکعب بر ثانیه برآورد کرد، درحالی‌که استفاده از هدایت هیدرولیکی معادل مقدار $0/0194$ مترمکعب بر ثانیه را نشان داد (شکل 8-h). این اختلاف تقریباً ده برابر نشان‌دهنده اهمیت مدل‌سازی دقیق نیم‌رخ هیدروژئولوژیک و لایه‌های کم نفوذ است و بر این اساس می‌توان گفت در پروژه‌های احداث تونل در محیط‌های زمین‌شناسی ناهمگن، استفاده از هدایت هیدرولیکی میانگین قابل اتکا نیست و مدل‌سازی مبتنی بر ساختار واقعی لایه‌ها ضروری است.



شکل ۸. (a) هندسه مدل عددی در نرم‌افزار Seep/w، (b) تعیین پهنه نشت جریان ورودی به تونل، (c) توزیع بردارهای سرعت جریان آب در محدوده تونل، (d) خطوط جریان و هم‌پتانسیل در محدوده اطراف تونل، (e) توزیع فشار آب منفذی در محدوده تونل، (f) الگوی نشت آب به تونل در محدوده گمانه T4SA11 (کیلومتر ۰+۲۳۹ تونل)، (g) الگوی نشت آب به تونل در محدوده عبور از زیر رودخانه سراب گرم (کیلومتر ۱+۸۲۹ تونل) و (h) الگوی نشت آب به تونل در محدوده گمانه T4SA11 با در نظر گرفتن هدایت هیدرولیکی لایه به لایه (کیلومتر ۰+۲۳۹ تونل)

Fig. 8. (a) Geometry of the numerical model developed in SEEP/W, (b) delineation of the seepage zone and measurement of water inflow into the tunnel, (c) distribution of groundwater flow velocity vectors around the tunnel, (d) flow lines and equipotential lines around the tunnel, (e) distribution of pore-water pressure in the tunnel vicinity, (f) simulated water inflow into the tunnel at borehole T4SA11 (chainage 0+239), (g) simulated water inflow into the tunnel beneath the Sarabe Garm River (chainage 1+829), and (h) simulated water inflow into the tunnel at borehole T4SA11 using layer-specific hydraulic conductivity (chainage 0+239)

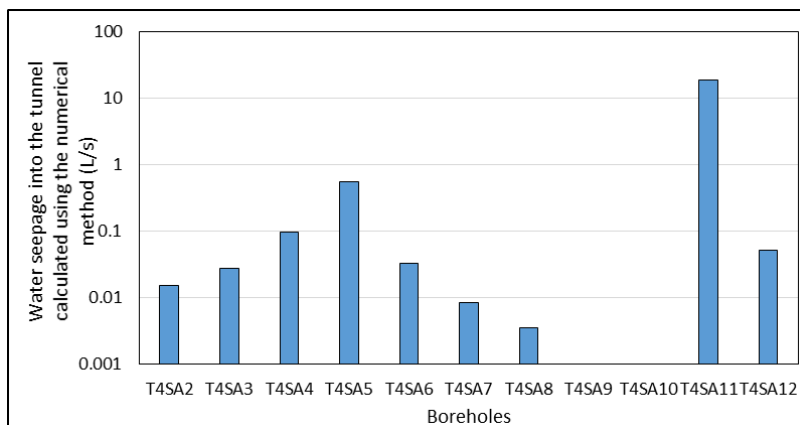
نتایج برآورد نشت آب به تونل به روش عددی

به‌دست‌آمده در شکل ۹، حداکثر نرخ نشت ورودی در محدوده گمانه

T4SA11 برابر با ۱۹ لیتر بر ثانیه پیش‌بینی می‌شود.

با لحاظ کردن پارامترهای مؤثر بر جریان (شکل ۵)، میزان نشت

آب به تونل T4 در نرم‌افزار Seep/W شبیه‌سازی شد. طبق نتایج



شکل ۹. نتایج برآورد نشت آب به تونل در مقاطع مختلف با استفاده از روش عددی

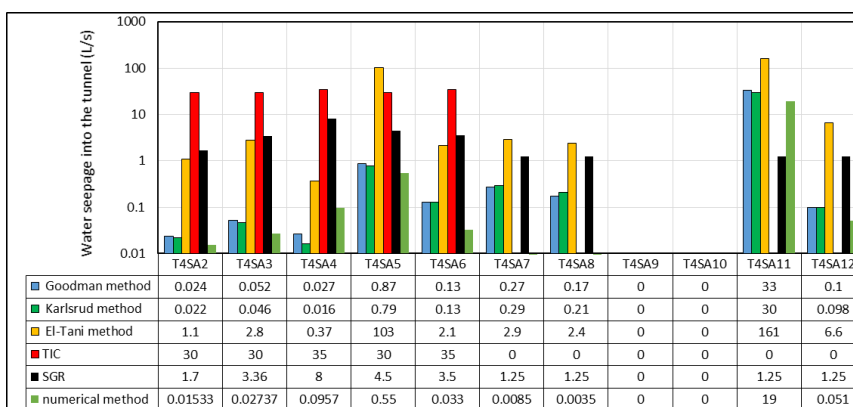
Fig. 9. Numerical estimates of water inflow into the tunnel at different sections

آرام و یکنواخت است، می‌توان استنباط کرد که اغلب درزه‌ها رفتار پایداری داشته و مسیرهای جریان کم‌ریسک هستند؛ در نتیجه خطر نفوذ گسترده آب به تونل بالا نیست. بر این اساس، روش‌های تحلیلی گودمن و همکاران (Goodman et al., 1965)، کارلسرود (Karlsrud, 2001)، روش تجربی SGR و نیز مدل‌سازی عددی، معتبرترین روش‌ها برای تخمین آب ورودی در این ساختگاه محسوب می‌شوند. در نهایت، انطباق نتایج این روش‌ها بر مقاطع مختلف تونل (شکل ۱۱) حاکی از آن است که در کیلومترهای ۲۳۹+ و ۱+۸۲۹، ریسک ورود آب قابل توجه است. علت این امر در مقطع اول، وجود رسوبات آبرفتی درشت‌دانه با نفوذپذیری بالا و در مقطع دوم، عبور تونل از زیر بستر رودخانه است.

مقایسه نتایج تحلیلی، تجربی و عددی در مقاطع مختلف

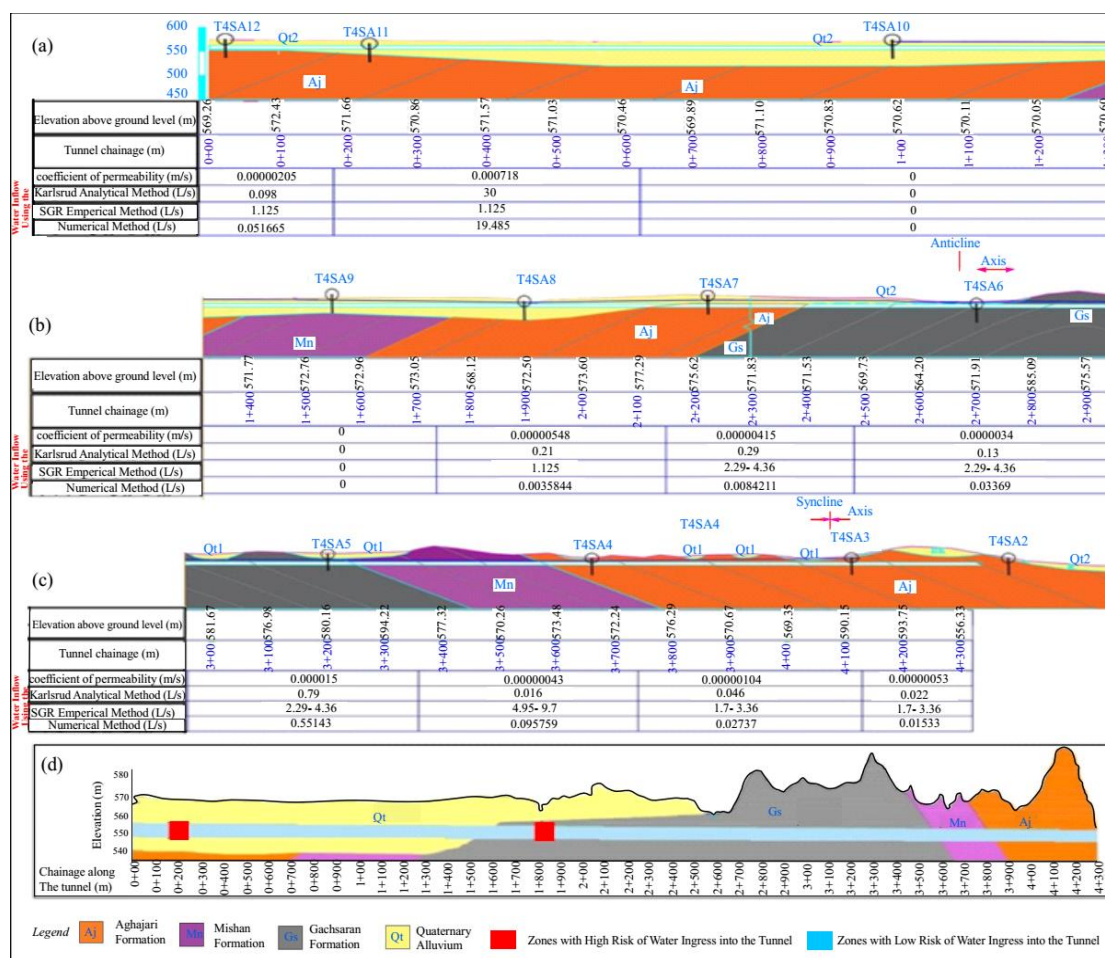
تونل جهت تعیین موقعیت‌های خطرناک ورود آب

مقایسه روش‌های مختلف برآورد آب ورودی به تونل T4 (شکل ۱۰) نشان می‌دهد که اگرچه روش‌های تجربی SGR و TIC از لحاظ کیفی نتایج مشابهی ارائه می‌دهند، اما از نظر کمی تفاوت زیادی با یکدیگر دارند. همچنین با توجه به کم‌عمق بودن تونل، رابطه التانی (El-Tani, 2003) از اعتبار کافی برای این پروژه برخوردار نیست. بر اساس نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری و رفتارنگاری توده سنگ (جدول ۴ و شکل ۴)، ساختگاه تونل در رده نفوذپذیری کم تا متوسط قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه ۷۵ درصد جریان به‌صورت



شکل ۱۰. مقایسه نتایج برآورد نشت آب به تونل T4 به روش‌های تحلیلی، تجربی و عددی

Fig. 10. Comparison of water inflow estimates for the T4 tunnel using analytical, empirical, and numerical methods



شکل ۱۱. انطباق نتایج برآورد نشت آب به روش‌های تحلیلی، تجربی و عددی با پروفیل سازندهای زمین‌شناسی تونل T4 در حداثفصل کیلومترهای: (a) ۰+۰۰ تا ۱+۳۰۰، (b) ۱+۴۰۰ تا ۲+۹۰۰، (c) ۳+۰۰ تا ۴+۳۰۰ و (d) تعیین و جانمایی مناطق پرخطر ورود آب به تونل در طول پروفیل زمین‌شناسی مسیر اجرای آن

Fig. 11. Comparison of water inflow estimates obtained from analytical, empirical, and numerical methods with geological formations along the T4 tunnel chainage: (a) 0+00 to 1+300, (b) 1+400 to 2+900, (c) 3+00 to 4+300, and (d) identification and mapping of high-risk water inflow zones along the geological profile of the tunnel alignment

لوژان)، حاکی از آن است که نتایج حاصل از روش‌های تحلیلی

مبتنی بر تئوری‌های گودمن و کارلسرود تطابق بیشتری با شرایط واقعی ساختگاه داشتند، درحالی‌که تئوری تحلیلی التانی به دلیل ماهیت کم‌عمق بودن تونل، تخمین‌های دقیقی ارائه نمی‌دهد. در تحلیل‌های تجربی، میزان آب ورودی بر اساس شاخص SGR برای مقاطع خاکی ۱/۱۲۵ لیتر بر ثانیه و برای مقاطع سنگی بین ۲/۲۹ تا ۹/۹۷ لیتر بر ثانیه برآورد شد که این مقادیر، تونل را در رده بی‌خطر قرار می‌دهد. همچنین، برآورد جریان بر اساس شاخص TIC در محدوده ۳۰ تا ۳۵ لیتر بر ثانیه قرار گرفت که نشان‌دهنده وضعیت کم‌خطر است. بر اساس روش عددی Seep/w مقدار آب

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ارزیابی میزان نشت آب در مقاطع مختلف تونل T4 با به‌کارگیری مدل‌های تحلیلی، تجربی و شبیه‌سازی عددی (Seep/W) انجام شد. در تحلیل‌های عددی، مؤلفه‌های جریان همچون بردارهای سرعت، خطوط جریان و پتانسیل، مقدار فشار آب منفذی و تأثیر عبور تونل از زیر رودخانه سراب گرم و همچنین در نظر گرفتن هدایت هیدرولیکی لایه به لایه به جای معادل آن مورد بررسی قرار گرفت. برآورد میزان ورود آب به تونل با استفاده از رویکردهای تحلیلی، بازه‌ای بین ۱ تا ۱۶۱ لیتر بر ثانیه را نشان داد. مقایسه این مقادیر با داده‌های میدانی (آزمایش‌های لوفران و

محدوده، ابزارهای برشی دستگاه حفار بازبینی و در صورت نیاز تعویض شوند. همچنین پایش مستمر نشست سطح زمین و تغییرات هیدرولیکی از طریق ابزار دقیق، قبل و حین عبور از زیر رودخانه انجام گیرد. در صورت مشاهده افزایش نشت یا تغییر شکل‌های غیرمجاز، اجرای تزریق تکمیلی و یا تزریق مجدد پشت سگمنت‌ها به منظور افزایش آب‌بندی و پایداری توصیه می‌شود. همچنین اگرچه در محدوده مورد مطالعه گسلی گزارش نشده و غالب مسیر تونل از نظر نشت آب در رده کم‌خطر ارزیابی گردید، اما سابقه لرزه‌خیزی منطقه به‌ویژه زمین‌لرزه ۲۱ آبان ۱۳۹۶ سرپل ذهاب با بزرگی گشتاوری ۷/۳ لزوم بررسی رفتار هیدرومکانیکی تونل T4 را در مطالعات آتی آشکار می‌سازد. بنابراین پیشنهاد می‌گردد، با استفاده از مدل‌های جفت‌شده برهم‌کنش سیال-سازه (FSI) و روش اجزای محدود (FEM) در نرم‌افزارهایی نظیر ABAQUS یا ADINA، مسئله نشت آب تحت بارگذاری دینامیکی در محدوده پژوهش مورد مطالعه قرار گیرد. این رویکرد که عواملی چون دینامیک فشار منفذی، تغییرات گرا دیان نشت و بازتوزیع تنش‌های ناشی از زلزله را به‌طور هم‌زمان لحاظ می‌کند، می‌تواند مبنای دقیقی برای اعتبارسنجی یافته‌های این پژوهش در شرایط بحرانی فراهم آورد. چرا که در طول رویدادهای لرزه‌ای، توزیع تنش در اطراف فضا‌های زیرزمینی تغییر می‌کند و منجر به تغییر شکل و حالت‌های شکست بالقوه مانند فروپاشی تاج طاق (Arch crown)، فروپاشی به سمت داخل و تشکیل اشکال دوزنقه‌ای (Trapezoidal shapes) و تمرکز تنش برشی موضعی، به‌ویژه در پایه و شانه‌های طاق (Foot and shoulders at the arch) می‌شود. علاوه بر این، نشت آب از طریق خاک یا سنگ اطراف یک تونل می‌تواند تحت تأثیر روانگرایی ناشی از زلزله قرار گیرد، که در اثر تنش‌های برشی چرخه‌ای ایجاد می‌شود و فشار آب منفذی را تا نقطه‌ای که تنش مؤثر به صفر می‌رسد، افزایش می‌دهد و در نتیجه خاک مقاومت خود را از دست داده و مانند یک مایع چسبناک رفتار می‌کند. این فرایند می‌تواند منجر به توزیع مجدد تنش و تغییر شکل در سازه‌های زیرزمینی مانند تونل‌ها گردد. با این حال هنوز هیچ راه‌حل واحدی برای در نظر گرفتن سناریوهای پیشگیری از هجوم آب ارائه نشده است. بنابراین در این مسئله، همچنان ارزیابی

ورودی به تونل < 1 تا ۱۹ لیتر بر ثانیه متغیر بوده و نتایج آن از اعتبار قابل قبولی برخوردار است. بعلاوه انجام مدل‌سازی عددی نشان داد که در موقعیت عبوری تونل از زیر رودخانه سراب گرم، مقدار آب ورودی به مجرای تونل در این محدوده حدود ۲۳/۷ لیتر بر ثانیه می‌باشد و در شرایطی که تأثیر رودخانه سطحی در مدل حذف گردد، این مقدار به ۹ لیتر بر ثانیه کاهش می‌یابد. این تفاوت ناشی از آن است که تنها بخش محدودی از جریان رودخانه به‌طور مستقیم وارد مقطع تونل شده و مابقی جریان به‌صورت سطحی منتقل می‌شود. همچنین پیاده‌سازی نتایج روش‌های مختلف تحلیلی، تجربی و عددی در مقاطع مختلف تونل T4 حاکی از آن است که کیلومترهای ۲۳۹+۰ (به دلیل رسوبات آبرفتی درشت‌دانه) و ۸۲۹+۱ (به دلیل عبور از زیر رودخانه)، بحرانی‌ترین نقاط از نظر ریسک ورود آب هستند. در مجموع، نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که برای پیش‌بینی دقیق نشت آب در محیط‌های پیچیده زمین‌شناسی، تکیه بر تنها یک روش کافی نیست و استفاده از یک رویکرد ترکیبی از مدل‌های تحلیلی، تجربی و عددی، بهترین تخمین را از میزان جریان ورودی به تونل ارائه می‌دهد. این رویکرد جامع امکان شناسایی دقیق مناطق پرخطر و اتخاذ تدابیر ایمنی پیشگیرانه در حین حفاری را فراهم می‌سازد. البته در این زمینه هنوز تلاش‌های مداوم برای اصلاح مدل‌های پیش‌بینی نشت آب به تونل از طریق نوآوری در روش‌شناختی و اعتبارسنجی متقابل بر مبنای رفتار واقعی تونل‌های مشابه مورد نیاز است تا بتوان بر اساس آن‌ها بر عدم قطعیت پیش‌بینی این مدل‌ها به‌ویژه در شرایط پیچیده زمین‌شناسی فائق آمد و نتایج خروجی را قابل‌اعتمادتر ارائه کرد.

راهکارهای اجرایی پیشنهادی

با توجه به روباره اندک تونل در محل تقاطع با رودخانه (حدود ۴/۵ متر) و به‌منظور پیشگیری از ناپایداری جبهه‌کار، نشست‌های سطحی و نفوذ مستقیم آب به تراز حفاری، پیشنهاد می‌شود جریان رودخانه پیش از رسیدن دستگاه حفار، از طریق احداث کانال انحرافی و لوله‌گذاری از روی مقطع تونل عبور داده شود. این اقدام علاوه بر تأمین ایمنی حفاری، از تغییرات رژیم هیدرولیکی رودخانه نیز جلوگیری می‌کند. البته پس از انحراف جریان رودخانه به مسیر لوله‌گذاری شده ضروری است پیش از رسیدن جبهه حفاری به این

قدردانی

در پایان از دانشگاه تربیت مدرس و شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس که امکان انجام این پژوهش را فراهم آورده و ما را در انجام آن یاری نموده تشکر و قدردانی می‌گردد.

References

- Alianvari, A., Soltani-Mohammadi, S., & Miri, M. (2019). Estimation of water seepage from Azad dam foundation using multivariate geostatistic and comparison with observed flow. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 28(111), 195-202. (In Persian). <https://doi.org/10.22071/gsj.2018.112706.1363>
- Association Française de Normalisation (AFNOR) Test. (1992). NF P 94-132: Soils: Recognition and testing—Permeability test by water injection in a borehole (Lefranc test). Paris, France: Association Française de Normalisation. <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-p94132>
- Ardeshtir, A., Amiri, M., Ghasemi, Y., & Errington, M. (2014). Risk assessment of construction projects for water conveyance tunnels using fuzzy fault tree analysis. *International Journal of Civil Engineering*, 12(4), 396-412. <https://legacy.iust.ac.ir/ijce/article-1-878-en.html>
- Arshad, I., & Babar, M.M. (2014). Comparison of SEEP/W simulations with field observations for seepage analysis through an earthen dam (case study: Hub Dam-Pakistan). *International Journal of Research*, 1(7), 57-70. <https://etasr.com/index.php/ETASR/article/view/4560>
- Aryafar, A., Doulati Ardejani, F., Singh, R., Shokri, B.J. (2007) Prediction of groundwater inflow and height of the seepage face in a deep open pit mine using numerical finite element model and analytical solutions. *IMWA Symposium*, Cagliari, Italy.
- ASTM D2216. (2019). Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass. West Conshohocken, PA: ASTM International. <https://www.astm.org/d2216-19.html>
- ASTM D7263. (2021). Standard test methods for laboratory determination of density and Unit Weight of Soil Specimens. West Conshohocken, PA: ASTM International. <https://www.astm.org/d7263-21.html>
- Ataie-Ashtiani, B., Volker, R.E., & Lockington, D.A. (1999). Numerical and experimental study of seepage in unconfined aquifers with a periodic boundary condition. *Journal of Hydrology*, 222(1-4), 165-184. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00105-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00105-5)
- Bahrami, S., Doulati Ardejani, F., Aslani, S., & Baafi, E. (2014). Numerical modelling of the groundwater inflow to an advancing open pit mine: Kolahdarvazeh pit, Central Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186(12), 8573-8585. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-4025-x>
- Barton, N. (1973). Review of a new shear-strength criterion for rock joints. *Engineering Geology*, 7(4), 287-332. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(73\)90013-6](https://doi.org/10.1016/0013-7952(73)90013-6)
- Bieniawski, Z.T. (1973). Engineering classification of jointed rock masses. *Civil Engineering*, 15(12), 335-343. https://journals.co.za/content/journal/ce_sajce
- Bieniawski, Z.T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering*. New York: Wiley. New York: Wiley.
- Blanco, M., Castillo, F., Soriano, J., Noval, A. M., Touze, N., Pargada, L., Rico, G., & Aguiar, E. (2012). Comparative study of three different kinds of geomembranes (PVC-P, HDPE, EPDM) used in the waterproofing of reservoirs. In *Proceedings of the 5th European Geosynthetics Congress (EuroGeo5) (Vol. 5, pp. 1-46)*. Valencia, Spain. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00763745>
- Borden, R.C., & Selander, C.E. (1972). Application of epoxy resins in tunnel lining concrete repair. *Journal of the Construction Division*, 98(2), 161-172. <https://doi.org/10.1061/JCCEAZ.0000341>
- Caputo, M., & Huez, H.P. (1987). Tunnel waterproofing using polymeric membranes. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2(1), 83-88. [https://doi.org/10.1016/0886-7798\(87\)90146-5](https://doi.org/10.1016/0886-7798(87)90146-5)
- Chen, Y., Liu, M., Wang, L., Zhou, Z., & Li, H. (2024b). Water inflow prediction and waterproof-drainage system optimization in undersea tunnel. *Marine Georesources & Geotechnology*, 43(1), 101-111. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2024.2317363>
- Chen, Z., Zhuang, D., Yu, B., Ning, Z., Zhan, H., & He, C. (2024a). Seepage interaction mechanism of crossing tunnels and existing tunnels: Model test and numerical analysis. *Transportation Geotechnics*, 46, 101269. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101269>
- Deere, D.U., & Miller, R.P. (1966). *Engineering Classification and Index Properties for Intact Rock*. (Technical Report No. AFWL-TR-65-116). Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Dixon, D.A., Martino, J. B., Vignal, B., Masumoto, K., & Fujita, T. (2007). Overview of the evolution, performance and state of a bentonite-based tunnel seal after 5 years of operation. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 32(8-14), 741-752. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.03.006>
- El-Tani, M. (1999). Water inflow into tunnels, *Proceedings of the World Tunnel Congress ITA-AITES*, Norway, Oslo, pp. 61-70. https://www.researchgate.net/publication/259758906_Water_Inflow_into_Tunnels
- 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)
- دقیقی از شرایط زمین‌شناسی، ژئوهیدرولوژیکی و سازه‌ای مهم و حیاتی است تا بتوان بر اساس آن به یک رویکرد یکپارچه، جهت رفع خطرات فعال شدن گسل، کاهش تجمع فشار منفذی، مدیریت فشارهای هیدرودینامیکی و تغییر شکل‌های ناشی از زلزله و افزایش پایداری و یکپارچگی سازه را در تونل به ارمغان آورد.

- Farhadian, H., Tabrizi, D.S., Yousefi, S., Rezaei, A., & Saeidi, A. (2025). Evaluation of geological hazards along the Karaj water conveyance tunnel using multiple approaches and GIS. *Results in Engineering*, 26, 104758. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104758>
- Firouzei, Y., Hassanpour, J., Peila, D., Tarigh Azali, S. & Rostami, J. (2025). The Significance of Bentonite in Achieving Optimal Conditioning Design for EPB tunneling through rock mass Under Groundwater. *Geopersia*, 15(1), 161–199. <https://doi.org/10.22059/geope.2024.381793.648775>
- Freeze, R.A., & Cherry, J.A. (1979). *Groundwater*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall. 604 pp. <https://gw-project.org/books/groundwater>
- Frenelus, W., Peng, H., & Zhang, J. (2021). Evaluation methods for groundwater inflows into rock tunnels: a state-of-the-art review. *International Journal of Hydrology*, 5(4), 152–168. <https://doi.org/10.15406/ijh.2021.05.00277>
- Friswell, M.I., & Mottershead, J.E. (1995). Finite element modelling. In *Finite Element Model Updating in Structural Dynamics* (pp. 7-35). Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-015-8508-8_2
- Gholizadeh khasevani, S. , Nakhaei, M. & moradi, F. (2020). Groundwater Seepage Assesment at 4/6 km of of Tehran Metro Line 7 Tunnel whit SEEP/W Software and Comparison with Analytical Methods and Obsevatons. *Hydrogeology*, 5(2), 1-15. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/hydro.2020.9218>
- Ghorbani, E., Ghadernejad, S., Emami, D., & Nejati, H. (2021). Estimating groundwater inflow into Dorud-Khorramabad railway tunnel using analytical and numerical methods. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, 55(1), 31-49. <https://doi.org/10.22059/ijmge.2020.306044.594856>
- Goel, S., & Kale, V. (2022). Case study on water ingress in Himalayan tunnel. *International Journal of Engineering Research and Development*, 18(5), 7-11. <https://www.ijerd.com/paper/vol18-issue5/B18050711.pdf>
- Gong, C., Cheng, M., Ge, Y., Song, J., & Zhou, Z. (2023). Leakage mechanisms and countermeasures of an operated underwater shield tunnel based on detailed field inspections: A case study. *Social Science Research Network* (SSRN). <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105892>
- Gong, C., Wang, Y., Ding, W., Lei, M., & Shi, C. (2022). Waterproof performance of sealing gasket in shield tunnel: A review. *Applied Sciences*, 12(9), 4556. <https://doi.org/10.3390/app12094556>
- Goodman, R.E. (1989). *Introduction to Rock Mechanics* (2nd Ed.). New York: John Wiley & Sons. <https://www.wiley.com/en-us/Introduction+to+Rock+Mechanics%2C+2nd+Edition-p-9780471812005>
- Goodman, R.E., Moya, D.G., Van Schalkwyk, A., & Javandel, I. (1965). Ground water inflows during tunnel driving. *Bulletin of the International Association of Engineering Geologists*, 2(1), 39–56. <https://search.worldcat.org/title/Ground-water-inflows-during-tunnel-driving/oclc/373897895>
- Guo, Y.F., Wang, H.N., & Jiang, M.J. (2023). An exact analytical approach for determining the seepage field around underwater twin tunnels with linings. *Transportation Geotechnics*, 42, 101050. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.101050>
- Heuer, R.E. (1995). Estimating rock tunnel water inflow. In *Proceedings of the rapid excavation and tunneling conference* (pp. 41-60). Society for Mining, Metallurgy and Exploration. <https://www.onemine.org/documents/estimating-rock-tunnel-water-inflow>
- Heydari, M., & Sharafi, M. (2017). The role of tectonic structures and stratigraphy in predicting influx of water into the tunnel using remote sensing (Case Study: Nosoud water-transport tunnel, part 1-A). *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 26(104), 69-80. (In Persian). <https://doi.org/10.22071/gsj.2017.50172>
- Hoek, E., & Brown, E. T. (1980). Empirical strength criterion for rock masses. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 106(9), 1013–1035. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0001029>
- Hoek, E., & Brown, E. T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8), 1165–1186. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)80069-X](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)80069-X)
- Hu, K., Yao, L., Liao, J., Wang, H., Luo, J., & Xu, X. (2024). Predicting water inflow in tunnel construction: A fracture network model with non-Darcy flow considerations. *Water*, 16(13), 1885. <https://doi.org/10.3390/w16131885>
- Hwang, J.H., & Lu, C.C. (2007). A semi-analytical method for analyzing the tunnel water inflow. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22(1), 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2006.03.003>
- Inokuma, A., and Ishimura, T. (1995). Earth pressure acting on shield driven tunnels in soft ground. *Proc., Underground Constr. in Soft Ground*, Fujita and Kusakabe, eds., Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 221–224 . https://www.issmge.org/uploads/publications/6/7/1994_047.pdf
- Jaeger, J.C., Cook, N.G.W., & Zimmerman, R.W. (2007). *Fundamentals of Rock Mechanics* (4th Ed.). Blackwell Publishing. ISBN: 978-0-632-05759-7
- Jafarzadeh, A., Saberinasr, A., Hashemnejad, A & Morsali, M . (2023). Uncertainty analysis of numerical simulation of groundwater inflow into Safarood Kerman water transfer tunnel. *Water and Irrigation Management*, 12(4), 675-694. (In Persian) . <https://doi.org/10.22059/jwim.2022.339210.969>
- Jiajia, S., Hu, Z., Li, W., Changan, Z., Xing, S., Zhanquan, L., & Jie, S. (2022). Causes of tunnel diseases in a karst stratum and remediation measures: a case study. *Frontiers in Earth Science*, 10, 882058. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.882058>
- Joudaki V, Ghazifard ó, Haghshenas E. Urban Geology effects of Sarpol-e-Zahab on the sensitivities of the implementation of two civil structures. *Disaster Prev.*

- Manag. Know. 2021; 11 (3) :238-254. (In Persian). <http://dpmk.ir/article-1-413-en.html>
- Joudaki, V., Koohiyan-Afzal, F., Aalianvari, A., Ajalloeiyan, R., & Sohrabi-Bidar, A. (2017). Study of the surface dissolution forms and development of groundwater in the part 4 of Ghomroud tunnel site. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 26(103), 29-40. (In Persian). <https://doi.org/10.22071/gsj.2017.46725>
- Karlsrud, K. (2001). Control of water seepage when tunneling under urban areas in the Oslo region. NFF Publication, 12(4), 27-33. <https://nff.no/wp-content/uploads/sites/2/2020/04/Publication-12.pdf>
- Katibeh, H., & Aalianvari, A. (2009). Development of a new method for tunnel site rating. *Journal of Applied Sciences*, 9(8), 1496-1502. <https://doi.org/10.3923/jas.2009.1496.1502>
- Kiraly, L. (2002). Karstification and groundwater flow. In F. Gabrovšek (Ed.), *Evolution of Karst: From Prekarst to Cessation* (pp. 155-190). Založba ZRC. <https://doi.org/10.3986/9616358634>
- Krahn, J. (2015). Seepage modeling with SEEP/W: An engineering methodology (June 2015 Ed.). Calgary, Alberta, Canada: GEO-SLOPE International Ltd. <https://ottegroup.com/wp-content/uploads/2021/02/seep-modeling-June2015.pdf>
- Langford, J., Holmøy, K.H., Hansen, T.F., Holter, K.G., & Stein, E. (2022). Analysis of water ingress, grouting effort, and pore pressure reduction caused by hard rock tunnels in the Oslo region. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 130, 104762. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104762>
- Lei, S. (1999). An analytical solution for steady flow into a tunnel. *Groundwater*, 37(1), 23-26. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1999.tb00953.x>
- Li, P., Zhang, D., & Zhou, Y. (2010). Study on prediction methods and its influence factors of water inflow into tunnels. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 34(4), 11-15. <https://jdx.bjtu.edu.cn/EN/Y2010/V34/I4/11>
- Li, X., & Gong, Z. (2024). Investigation of long-term waterproof performance and hardness change of EPDM rubber gasket used for shield tunnels. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 36(2), 04023577. <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-16744>
- Li, Z., Xiao, J., Wan, J., Cheng, J., Feng, H., Zhan, H., Yuan, H., & 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>
- Luciani, A., Todaro, C., Martinelli, D., & Peila, D. (2020). Long-term durability assessment of PVC-P waterproofing geomembranes through laboratory tests. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 103, 103499. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103499>
- Ma, C.J., Jiang, A.N., & Wang, Q. (2016). Tunnel engineering seepage parameters intelligent back analysis based on FEM and differential evolution algorithm. *The Open Civil Engineering Journal*, 10(1), 641-652. <https://doi.org/10.2174/1874149501610010641>
- Mahab Ghodss Consulting Engineering Company. (2016). Final report of geological, soil and rock mechanics studies of T4 Sarpol-e Zahab tunnel. Tehran, Iran. (In Persian).
- Mikaeil, R., & Doulati Ardejani, F. (2008). Prediction of groundwater inflow into tunnels using numerical models; a practical case study: Kuhin railway tunnel, Qazvin-Rasht, Iran. *International Journal of Engineering Science*, 19(9), 65-73. <https://www.sid.ir/paper/65611/en>
- Moeini- Rudbali, H., Katibeh, H., & Golabtonchi, A. (2011). Upper Reservoir Seepage Analysis of Azad Dam Pumped Storage Power Station and Selecting the Best Sealing Method. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 43(2), 35-41. (In Persian). <https://doi.org/10.22060/ceej.2012.138>
- Morsali, M., Nakhaie, M., Rezaie, M., Naseri, H.R., & Hassanpour, J. (2018). The comparison of effective variables and methods in water inflow into hard rock tunnels (case study: Karaj dam-Tehran water conveyance tunnel). *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 27(107), 113-122. (In Persian). <https://doi.org/10.22071/gsj.2018.63799>
- Naseri, H., Bayat, N., Izadi Kian, L., & Alijani, F. (2018). The role of tectonic structures in conducting groundwater inflow to the second part of Zagros water tunnel – Kermanshah province. *Iranian Journal of Geology*, 12(45), 39-52. (In Persian). <http://fsh.fatemiyehehiraz.ac.ir/en/Article/9570>
- Orth, W., & Müller, B. (2013). Temporary watertight connection of excavations to existing buildings and temporary waterproofing of structures by ground freezing. *Geomechanics and Tunnelling*, 6(3), 246-260. <https://doi.org/10.1002/geot.201300015>
- Pan, Y.H., Qi, J.R., Zhang, J.F., Peng, Y.X., Chen, C., Ma, H.N., & Ye, C. (2022). A comparative study on steady-state water inflow into a circular underwater tunnel with an excavation damage zone. *Water*, 14(19), 3154. <https://doi.org/10.3390/w14193154>
- Panthi, K.K., & Nilsen, B. (2005). Significance of grouting for controlling leakage in water tunnels: A case from Nepal. In *Proceedings of ITA-AITES 2005 World Tunnelling Congress*, Istanbul, Turkey (pp. 931-937). <https://bnilsen.folk.ntnu.no/ITA2005nepal.pdf>
- Peng, H., Frenelus, W., & Zhang, J. (2022). Key factors influencing analytical solutions for predicting groundwater inflows in rock tunnels. *Water Supply*, 22(11), 7982-8013. <https://doi.org/10.2166/ws.2022.369>
- Perazzelli, P., Leone, T., & Anagnostou, G. (2014). Tunnel face stability under seepage flow conditions. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 43, 459-469. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2014.03.001>
- Powers, J.P., Corwin, A.B., Schmall, P.C., & Kaeck, W.E. (2007). *Construction Dewatering and Groundwater Control: New Methods and Applications* (3rd ed.). Hoboken: John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470168103>
- Safan, M.A., Etman, Z.A., & Konswa, A. (2019). Evaluation of polyurethane resin injection for concrete leak repair. *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00307. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00307>
- Sedaghati, Z., Mikaeil, R., Bakhtavar, E. and Mohammadnejad, M. (2019). Fuzzy Analysis and Risk

- Management of Water Inrush by Numerical Simulation and FMEA under Uncertainty for Emamzade Hashem Tunnel. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 9(19), 1-16. (In Persian). <https://doi.org/10.29252/anm.2019.4861.1127>
- Shahbazi, A., Saeidi, A., & Chesnaux, R. (2020). A review of existing methods used to evaluate the hydraulic conductivity of a fractured rock mass. *Engineering Geology*, 265, 105438. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105438>
- Sheng, D., Tan, F., Zhang, Y., Zhu, H., Zuo, C., & Lv, J. (2025). Safety risk assessment of weak tunnel construction with rich groundwater using an improved weighting cloud model. *Scientific Reports*, 15(1), 16036. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01103-1>
- Su, Y., Huang, Y., Shen, H., Jiang, Y., & Zhou, Z. (2022). An analytical method for predicting the groundwater inflow to tunnels in a fractured aquifer. *Hydrogeology Journal*, 30(4), 1279-1293. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02485-6>
- Sun, X., Shi, C., Xiao, G., Ge, Y., & Cao, C. (2024). A new tunnel drainage system using double-adhesive spray-applied membrane: key parameters and applicable scope. *Discover Civil Engineering*, 1(1), 100. <https://doi.org/10.1007/s44290-024-00105-8>
- Tavasoli O, Mokhtarpour A, Asakereh A, Pishkari A. Numerical Investigation on the effect of the internal water pressure and leakage force on the behavior of tunnel lining. *Iranian Dam and Hydroelectric Powerplant* 2020; 6 (23), 1-12. (In Persian). <http://journal.hydropower.org.ir/article-1-323-en.html>
- Tzamtzis, A.D., & Asteris, P.G. (2004). FE analysis of complex discontinuous and jointed structural systems: Part 1: Presentation of the method-A state-of-the-art review. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 4, 75-92. <https://doi.org/10.56748/ejse.443>
- U.S. Army Corps of Engineers. (1997). *Engineering and Design: Tunnels and Shafts in Rock* (Engineer Manual No. 1110-2-2901). Washington, DC: U.S. Army Corps of Engineers. https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-2901.pdf
- Ulusay, R., and Hudson, J.A. (2007). *The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006*. Ankara, Turkey: International Society for Rock Mechanics (ISRM). <https://isrm.net/isrm/page/show/935>
- Wang, R. (2025). Research progress and performance comparison of tunnel waterproofing materials. *Applied and Computational Engineering*, 182, 93-101. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/2025.MH26490>
- Wu, J., Wu, L., Han, Y.H., Sun, M., & Lu, Y.N. (2023). Numerical investigation of water inflow and seepage characteristics in a tunnel crossing two overlapped parallel faults. *Scientific Reports*, 13(1), 11806. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38986-x>
- Yagiz, S. (2009). Assessment of brittleness using rock strength and density with punch penetration test. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(1), 66-74. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2008.04.002>
- Yu, J., Li, D., Zheng, J., Zhang, Z., He, Z., & Fan, Y. (2023). Analytical study on the seepage field of different drainage and pressure relief options for tunnels in high water-rich areas. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 134, 105018. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105018>
- Yu, J., Zhang, C., & Li, D. (2025). An analytical solution for the steady seepage of localized line leakage in tunnels. *Mathematics*, 13(1), 82. <https://doi.org/10.3390/math13010082>
- Yuzbashi, H., Ahmadi, H., & Behbahani Nia, A. (2024). Evaluation of nutrition and environmental risks of water transfer in Zagros tunnel considering hydrogen sulfide gas leakage. *Journal of Environmental Science and Technology*, 26(9), 119–135. (In Persian). <https://sanad.iau.ir/Journal/jest/Article/835848>
- Zarei, H.R., Uromeihy, A., & Sharifzadeh, M. (2011). Evaluation of high local groundwater inflow to a rock tunnel by characterization of geological features. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(2), 364-373. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2010.11.007>
- Zarei, H.R., Uromeihy, A., & Sharifzadeh, M. (2013). A new tunnel inflow classification (TIC) system through sedimentary rock masses. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 34, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2012.09.005>
- Zheng, K., Yang, X., Chen, R., & Xu, L. (2019). Application of a capillary crystalline material to enhance cement grout for sealing tunnel leakage. *Construction and Building Materials*, 214, 497-505. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.095>
- Zhou, H., Zhao, Y., Shen, Q., Yang, L., & Cai, H. (2020). Risk assessment and management via multi-source information fusion for undersea tunnel construction. *Automation in Construction*, 111, 103050. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103050>