

تکمیل روش SGR با داده‌های واقعی در برآورد آب ورودی به تونل‌های سنگی

مسعود مرسلی

دکتری هیدروژئولوژی، استادیار گروه زمین شناسی، دانشگاه اصفهان

دریافت: ۱۳۹۹/۱ پذیرش: ۱۴۰۰/۵

چکیده

روش استاندارد کاملی برای برآورد حجم دقیق و مکان‌های ورودی آب زیرزمینی که ممکن است در تونل‌های سنگ دیده شود وجود ندارد. سیستم رتبه بندی ساختگاه تونل از نظر ورود آب (SGR) بر اساس بررسی‌های اولیه صحرایی به منظور طبقه بندی کمی تونل از دیدگاه نشت آب زیرزمینی است. در این سیستم رتبه بندی، پارامترهایی مانند درزه داری، شیبستویته، مناطق خرد شده، کارستیفیکاسیون، نفوذپذیری خاک، بار آبی بالای تونل و بارندگی سالانه ارزیابی می‌شود. اما این روش با توجه به شرایط زمین شناسی و هیدروژئولوژی نیاز تکمیل سازی دارد. برخی از پارامترها باید اصلاح و حتی حذف شده و برخی از پارامترهای جدید نیز باید پیشنهاد شوند. در این مقاله، روش SGR با توجه به پارامترهای جدید بهینه شده است. در این تحقیق، با توجه به تجارب حفاری‌های واقعی تونل کرمان و کرج، صحت روش SGR بررسی شد. دو پارامتر حذف و سایر پارامترها تغییراتی یافت. در نتیجه، روش بهینه شده SGR معرفی می‌شود. نتایج SGRM در مقایسه با نتایج SGR اولیه، به داده‌های واقعی به دست آمده از تونل‌های فوق نزدیک‌تر است. بنابراین، این روش به عنوان یک روش جدید برای تخمین ورودی آب به تونل معرفی شده می‌شود.

واژگان کلیدی

آب زیرزمینی، آب ورودی به تونل، روش SGR، بهینه سازی، هیدروژئولوژی

۱- مقدمه

یکی از دلایل اصلی پرداختن به ورود آب‌های زیرزمینی به تونل‌ها، اهمیت فوق العاده‌ای است که می‌تواند در طی اجرای پروژه، چه به لحاظ اقتصادی و چه به لحاظ فنی (مشکلات اجرایی و زیست‌محیطی و تأخیر در اجرا) موجب مشکلات فراوانی شود. هجوم و نشت آب به تونل‌های در حال حفر محیط‌های سنگی یکی از اصلی‌ترین چالش‌های این صنعت است. روش دقیقی برای پیش‌بینی آب ورودی به تونل تاکنون ارائه نشده است، زیرا معیارهای تأثیرگذار در این زمینه بسیار زیاد و پیچیده هستند. هجوم آب‌های زیرزمینی به تونل‌ها، تأثیرات زیادی در پروژه‌های عمرانی همچون تونل‌ها دارد. [1], [2], [3], [4] مقدار نشت می‌تواند تمامی طراحی‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مقدار نشت آب به تونل سرعت حفاری را کاهش داده و حتی ممکن است پروژه را متوقف سازد [5], [6]

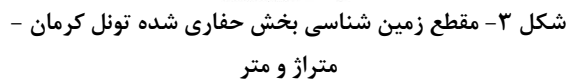
وجود آنکه در مسیر تونل‌ها، گمانه‌های اکتشافی حفر می‌شود؛ اما نتایج ژئوتکنیک دارای صحت کافی و جامعیت لازم در پروژه‌ها نیست [7]. مهندسی تونل‌ها، قبل از آغاز حفاری بایستی شناخت درستی از مقاطع آبدار مسیر پروژه و میزان دبی ورودی داشته باشد تا برنامه‌ریزی‌های لازم را در این زمینه انجام داد. علاوه بر مشکلات ورود آب به تونل برای حفاری، افت تراز آب در اثر ورود آب به تونل، منجر به تأثیر بر آبدهی چشمه‌ها و چاه‌های محدوده نیز می‌شود [8]. [9] در برخی از موارد، ورود آب به تونل همراه با نشت گاز است [10], [6] لذا این مسئله از اهمیت بالایی برخوردار است. دایک‌ها به عنوان یک سد عمل کرده و عموماً در برخورد حین حفاری با آنها مشکلات زیادی بوجود می‌آید [11]. روش هوئر [12] به عنوان یک روش تجربی بر پایه اطلاعات نفوذپذیری آزمایش‌های لوژان بنا شده است. هوئر با بررسی نتایج واقعی آب ورودی به تونل، به این نتیجه

رسید که معمولاً میزان آب واقعی کمتر از میزان آب برآوردی توسط روابط است. کولی و همکاران [13] به نقش چگونگی انتخاب هدایت هیدرولیکی در آب‌های ورودی به تونل پرداخت. او استفاده از آزمون لوژان را، به تنهایی، برای انتخاب هدایت هیدرولیکی کافی ندانست. در سال‌های گذشته، ورود آب زیرزمینی به تونل را می‌توان با استفاده از مدل بیلان منطقه نیز پیش‌بینی کرد [14]. البته این مسئله مستلزم اطلاعات دقیق است که عموماً در پروژه‌های عمرانی وجود ندارد. شریف زاده و جوادی با مدل‌سازی آب در محیط‌های درز و شکافدار، نقش متغیرها و ساختارهای زمین‌شناسی را بسیار مهم معرفی کرد [15]. حفاری‌ها و تزریق‌های پیشرو تأثیر زیادی در کنترل آبهای زیرزمینی ورودی به تونل دارد [16]. هر چند مدل‌سازی عددی نتایج دقیقی را در رابطه با آب ورودی به تونل می‌دهد؛ اما از آنجا که این مسئله مستلزم هزینه بسیار و زمان‌بر است؛ بنابراین عملاً نمی‌توان آن‌ها را در پروژه‌های اجرایی کارا دانست [15]. بر طبق نظر مرسلی و همکاران، بار آبی مشاهده شده در گمانه‌های حفاری شده در تونل‌ها نیز نایستی به عنوان فشار مستقیم در برآوردها محاسبه شود [4]. به طور کلی دبی آب ورودی به تونل بستگی به فشار آب (پتانسیل بار آبی اطراف تونل) و نفوذپذیری سنگ‌های محدوده دارد. نفوذپذیری سنگ‌ها مرتبط با خصوصیات درزه‌ها همچون ادامه داری، فاصله داری، بازشدگی، پرشدگی و ارتباط درزه‌ها با ناپیوستگی‌ها و لیتولوژی است. محل تلاقی درزه‌ها و گسل‌ها با یکدیگر از مستعدترین مناطق نشت آب است. نوع، طول و ارتباط بین درزه‌ها مهمترین تأثیر را در نفوذپذیری سازندهای سخت دارد. در دیدگاه وسیع‌تر، ورود آب زیرزمینی به حفاریات زیرزمینی بستگی به هیدرولوژی منطقه‌ای، ساختارهای زمین‌شناسی و مسیرهای جریانی در ابعاد مقیاسهای کوچک تا بزرگ دارد. هیدرولوژی منطقه‌ای در ارتباط با ساختارهای زمین‌شناسی، جریان عمومی به سمت تونل‌های در حال حفر را کنترل می‌کنند [17] [15]. زارعی و همکاران بر نقش ساختارهای زمین‌شناسی در میزان آب ورودی به تونل تأکید کردند [17]. ساختارهای زمین‌شناسی کنترل‌کننده شرایط جریانی و مرزهای آبخوان‌ها در محیط‌های سنگی هستند [18]. موارد فوق باعث ایجاد یک محیط آنیزوتروپ را می‌شود. از طرف دیگر شرایط مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی آبهای زیرزمینی در خصوصیات توده سنگ تأثیر گذار است که اندرکنش آب و سنگ نامیده می‌شود. نفوذپذیری محدوده تونل با استفاده آزمون‌های لوژان گمانه‌های ژئوتکنیکی و بار آبی نیز با استفاده از اندازه‌گیری تراز آب در گمانه‌ها برآورد می‌شود. روش‌های تحلیلی (گودمن، لی، لومباری، کالسرود و التانی) [19] [11] و تجربی (هوئر) [12] زیادی جهت برآورد ورود آب به تونل معرفی شده‌اند که به دلیل شرایط ناهمسانی و ناهمگنی با واقعیت اختلاف دارند. علت این مسئله، فرضیات ساده‌سازی است که در روش‌های

فوق قرار دارد. چرا که در این روش‌ها، تونل به عنوان مقطعی دایره‌ای در یک محیط همسان و همگن قرار دارد [20]. در حال حاضر استفاده از روش‌های عددی در تحلیل جریان سیال به درون توده سنگ گسترش یافته اما در عمل، برای طراحان تونل وقت‌گیر و پرهزینه هستند. روش‌های تحلیلی را می‌توان در محیط‌های همگن و ایزوتروپ بکار برد، اما این روش‌ها قادر به پیش‌بینی ورود آب به درون تونل‌های سنگی در ساختارهای زمین‌شناسی منفرد مانند زون‌های گسلی نیستند. آبخوان‌های کارستی شرایط پیچیده‌تری به لحاظ ورودی آب به تونل دارند که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است [21]. در بسیاری از مواقع گسل‌ها نقش بسزایی در این زمینه دارند. شرایط آب‌های زیرزمینی مخصوصاً در زون‌های گسله از اهمیت بالایی در تونل‌سازی برخوردار است. نیلسن مطرح نمود که گمانه‌های پیشرو و پیش تزریق مهم‌ترین تأثیرات بسیاری در آب ورودی به تونل دارد [16]. سنگ‌های نفوذی همچون دایک‌ها، کنترل‌کننده جریان آب‌های زیرزمینی دارند و این مسئله بایستی مورد توجه برآورد آب ورودی به تونل قرار گیرد. میبای و همکاران نشان دادند که بیشتر زون‌های ورود آب به تونل منطبق با تراکم خطواره‌ها هست [22]. علاوه بر نرخ جریان و ویسکوزیته سیال تزریق، موقعیت هندسی شکستگی‌ها، بازشدگی شکستگی، سیمان شکستگی و غیره از جمله پارامترهای مؤثر و کلیدی بروی مکانیسم جریان سیال در توده سنگ‌های شکافدار طبیعی می‌باشند [24] [23]. درزه‌های مجاور تونل‌ها ورود آب به تونل‌ها را کانالیزه می‌کنند [20]. ورودی آب‌های زیرزمینی در تونل‌ها به شرایط زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی بستگی دارد. یک روش استاندارد برای برآورد حجم دقیق و مکان ورودی آب زیرزمینی وجود ندارد. ورود آب‌های زیرزمینی به تونل‌ها به شرایط زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی منطقه بستگی دارد. از آنجا که شناسایی کلیه عوامل مؤثر در ورودی آب به تونل‌ها، به ویژه در مرحله حفاری غیرممکن است، پیش‌بینی دقیق میزان ورودی آب دشوار است. بنابراین، برای محاسبه میزان نشت به داخل تونل‌ها باید از روش‌های تحلیلی با چند ساده‌سازی و فرضیات استفاده شود [25]. این مسئله منجر به خطای بالایی در محاسبات می‌شود. لذا روش‌های تخمین جدیدتر که بر پایه اطلاعات بدست آمده از نتایج واقعی حفاری تونل‌ها هستند در توسعه این علم نقش مؤثری خواهند داشت. در این تحقیق با استفاده از نتایج واقعی، روش بهینه شده ای معرفی شده است.

۲- تونل‌های کرج و کرمان

در این مقاله از داده‌های واقعی مرتبط با دو تونل امیرکبیر (کرج) و کرمان استفاده شد (شکل ۱). تونل امیرکبیر به‌منظور انتقال آب از سد کرج به تهران با طول ۳۰ کیلومتر با استفاده از روش



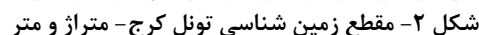
هیچ یک از روش‌های تحلیلی منجر به پیش بینی دقیق میزان ورودی آب به تونل نمی‌شود. از این رو، نیاز به یافتن راه‌حل‌های دقیق‌تر است که با ماهیت زمین شناسی این پدیده سازگار باشد. کتیبه و عالی انوری برای طبقه‌بندی تونل از نظر کمی از نظر خطر نشست آب زیرزمینی، برای اولین بار در سال ۲۰۰۹ سیستم درجه را بر اساس تحقیقات *SGR (Site Groundwater Rating)* بندی [26] ارائه دادند.

در این [26] توسط کتیبه و عالی انوری معرفی شد. SGR در روش
روش با امتیازدهی به یکسری عوامل، نهایتاً یک ساختگاه، از جنبه
نفوذ و یا هجوم آب زیرزمینی به مقطع تونل (پیش از حفاری آن)
مورد رده‌بندی و ارزیابی اولیه قرار می‌گیرد. این عوامل عبارتند از:
فراوانی درزه‌ها، بازشدگی درزه‌ها، شیفستوزیته، مناطق خرد شده و
گسله، کارستیفیکاسیون، ضریب نفوذپذیری خاک، موقعیت تونل
نسبت به سطح ایستابی یا پیژومتریک، میزان و شدت بارش منطقه.
سعی بر آن است که ساختگاه تونل با توجه به SGR در روش
پارامترهای فوق، از جنبه خطر نشست آب زیرزمینی و چگونگی آن
مورد ارزیابی قرار گیرد.

طول تونل از نظر خطر نشت آب زیرزمینی به ۶ کلاس تقسیم ، شرایط تونل با توجه به پارامترهای SGR می‌شود. با توجه به روش اصلی خطر نشت آب زیرزمینی و نحوه انجام آن ارزیابی می‌شود. برخی از پارامترها باید اصلاح و حتی حذف شوند و برخی از پارامترهای جدید نیز باید پیشنهاد شوند. در واقع ، این روش باید تکمیل شود. پارامترهای هیدروژئولوژیکی موثری در ورودی آب به تونل وجود دارد که در نظر گرفته نمی‌شوند.

<i>SGR</i>	<i>Tunnel rating</i>	<i>Class</i>	<i>Inflow (Liters/sec/m)</i>
0-100	No risk	1	0-0.04
100-300	Low risk	2	0.04-0.1
300-500	Moderate risk	3	0.1-0.16
500-700	Risky	4	0.16-0.28
700-1000	High risk	5	0.28
>1000	Critical	6	0.28<

تونل کرمان به طول ۳۸ کیلومتر، یکی از بلندترین تونل‌های خاورمیانه است. این تونل قرار است آب سد صفا (شهر رابر) را به کرمان منتقل کند. تونل از دو جبهه شمالی و جنوبی حفاری می‌شود. فعالیت‌های ماسگامی ائوسن و الیگوسن مجموعه‌های آذرین رازک و هزار را شامل آندزیت بازالت، آندزیت، تراکی آندزیت، تراکی بازالت و توف را در منطقه بوجود آورده است (شکل ۳). متوسط بار آبی بر روی تونل حدود ۱۰۰ متر می‌باشد.



امتیاز ساختگاه از نقطه نظر پتانسیل نفوذ و یا هجوم آب زیرزمینی به فضای حفر شده در هر مقطع مورد نظر تونل، برآورد می‌گردد. بدین منظور عوامل اصلی که پیش از این ذکر شد، با توجه به شرایط خاص ساختگاه، امتیازدهی شده و نهایتاً امتیاز کلی ساختگاه (SGR) از جمع و یا ضرب امتیاز عوامل مذکور به دست می‌آید. در این راستا دو تقسیم‌بندی کلی وجود دارد که عبارتند از: حفر تونل در زون‌های اشباع و زونهای غیر اشباع. همچنین از نقطه نظر جنس ساختگاه نیز دو تقسیم‌بندی کلی ساختگاههای سنگی و خاکی مطرح است. با در نظر گرفتن نکات فوق، محاسبه ضریب SGR ساختگاه از رابطه زیر صورت می‌پذیرد:

$$SGR = [(S_1 + S_2 + S_3 + S_4) + S_5]S_6S_7$$

پارامترهای S_1 تا S_7 در ادامه شرح داده می‌شوند

محاسبه امتیاز فراوانی درزه‌ها و باز شدگی آن‌ها، S_1

هر تونل در طی مسیر خود درزه‌های سنگ مورد حفر را قطع می‌کند. توده سنگ مسیر حفر یک تونل ممکن است دارای یک، دو و یا چندین دسته درزه باشد. هر دسته درزه دارای فراوانی و باز شدگی مربوط به خود می‌باشد. با توجه به آن که میزان نشست آب به تونل با توان یکم فراوانی درزه‌ها رابطه مستقیم دارد. لذا امتیاز مربوط به هر درزه نیز به طور خطی با افزایش فراوانی آن درزه، افزایش می‌یابد. همچنین تأثیر باز شدگی دسته درزه بر میزان هجوم آب به مقطع تونل قابل ملاحظه است، چرا که ضریب نفوذپذیری یک درزه با توان دوم باز شدگی آن رابطه مستقیم دارد. لذا محاسبه S_1 که منتج از فراوانی و متوسط باز شدگی هر دسته درزه می‌باشد از رابطه زیر پیشنهاد می‌شود [26].

$$S_1 = 25 \times \left(\sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i g e_i^2}{12v} b \right)$$

در رابطه فوق پارامترها عبارتند از:

λ_i فراوانی دسته درزه λ_m بر حسب $1/m$

e_i متوسط باز شدگی هیدرولیکی مؤثر دسته درزه λ_m در عمق مورد نظر بر حسب متر

g شتاب جاذبه زمین بر حسب $\frac{m}{s^2}$

v ویسکوزیته دینامیکی سیال مورد نظر بر حسب $\frac{m^2}{s}$

b ضریبی معادل ۱ بوده و واحد آن $\frac{s}{m}$ می‌باشد که وظیفه بدون بعد کردن S_1 را به عهده دارد. ضریب ۲۵ در معادله فوق وظیفه نرمالیزه کردن را به عهده دارد.

شیستوزیته، S_2

به‌طور معمول سنگ‌های دارای رس در طی فرآیندهای تکتونیکی دچار پدیده شیستوزیته (تورق) می‌گردند. این پدیده موجب

خردشدگی توده سنگ می‌شود به‌گونه‌ای که سنگ به طور معمول، به‌راحتی در امتداد صفحات تورق جدا می‌شود. تورق موجب افزایش ضریب نفوذپذیری توده سنگ می‌شود، هرچند که ناپیوستگی ناشی از پدیده مذکور به‌تنهایی خود قابل‌شناسایی و تفکیک از سایر ناپیوستگی‌ها نمی‌باشد. از طرفی با توجه به باز شدگی بسیار اندک ناپیوستگی‌های ناشی از شیستوزیته، ضریب نفوذپذیری حاصله کوچک می‌باشد و همچنین وجود کانی‌های رسی در سنگ مادر نیز بر کاهش این نفوذپذیری تأثیر مثبت می‌گذارد. لذا حتی در توده سنگ‌هایی که کاملاً تحت پدیده شیستوزیته قرار گرفته‌اند، ضریب نفوذپذیری قابل ملاحظه نیست. بایستی سعی شود که این پدیده در رده‌بندی ساختگاه مدنظر قرار گیرد. بسته به شدت و نوع شیستوزیته، ضریب S_2 آن به‌طور تخمینی بین یک (درجه کمتر) الی پنج (درجه بیشتر) پیشنهاد می‌شود [26].

زونهای خرد شده S_3

زون‌های خرد شده و گسله عمدتاً ناشی از عملکردهای تکتونیکی بوده که موجب ایجاد شکستگی‌های عمده و بزرگ می‌شوند. در بسیاری از سنگ‌ها، عملکرد گسل و وجود زون خرد شده، موجب افزایش قابل ملاحظه نفوذپذیری و آب‌گذری می‌شود. هر چند که این نفوذپذیری به نوع سنگ گسله شده نیز بستگی دارد. بدین معنی که در سنگ‌های دارای مقادیر قابل ملاحظه کانی‌های رسی، آزاد شدن کانی‌ها و ذرات رسی موجب انسداد نسبی درز شکاف‌ها و ناپیوستگی‌ها می‌گردد و از تراوایی به وجود آمده می‌کاهد. ولی در سایر سنگ‌ها این تراوایی از اهمیت بیشتری برخوردار است. حتی در سنگ‌های کربناته خصوصاً آهک‌ها، حرکت مداوم آب زیرزمینی و انحلال سنگ (کارستیفیکاسیون)، موجب افزایش مضاعف تراوایی و قابلیت آب‌گذری می‌گردد که در جای خود مدنظر قرار خواهد گرفت. بنابراین می‌توان گفت که تراوایی و قابلیت آب‌گذری از زون‌ها گسله و خرد شده نه تنها به بزرگی زون خرد شده بستگی دارد، بلکه به جنس سنگ نیز وابسته است. زون‌های خرد شده در محیط اشباع آب زیرزمینی قادرند که مقادیر قابل ملاحظه آب را به سمت تونل هدایت کرده و لذا دارای اهمیت بسیار زیادی می‌باشند. در محیط غیر اشباع نیز این قابلیت وجود دارد. البته بدیهی است نسبت به محیط اشباع از درجه اهمیت پایین‌تری برخوردار است. در محیط غیر اشباع در هنگام نفوذ آب به زون‌های خرد شده (ناشی از بارش‌های جوی و یا ذخایر آب سطح‌الارضی) مقادیر قابل توجهی از آب می‌تواند به سمت تونل هجوم آورد، هر چند که در سایر موارد هجوم آب ممکن است قابل ملاحظه نباشد. بر اساس SGR و روش‌های تحلیلی و عددی، نشست آب زیرزمینی در تونل در مناطق خرد شده متمرکز است (جدول ۳).

با توجه به توضیحات فوق تخمین ضریب S_5 بر حسب ضریب نفوذپذیری (k) به کمک رابطه زیر پیشنهاد می‌شود:

$$S_5 = k \times c$$

k ضریب نفوذپذیری بر حسب $\frac{m}{day}$ و c برابر واحد بوده و بر حسب $\frac{day}{m}$ در فرمول منظور می‌گردد. بدین ترتیب ضریب S_5 به صورت بی بعد به دست می‌آید. به عنوان مثال اگر ضریب نفوذپذیری یک خاک ماسه‌ای ریزدانه $3 \frac{m}{day}$ باشد آنگاه ضریب S_5 آن برابر سه به دست می‌آید.

بار آبی، S_6

از دیگر عوامل مؤثر بر نفوذ آب زیرزمینی به داخل تونل، ارتفاع آب زیرزمینی است. این بار آبی بر حسب اختلاف ارتفاع سطح ایستابی یا پیژومتریک نسبت به محور تونل سنجیده می‌شود. معادلات تحلیلی ارائه شده برای تخمین میزان نفوذ آب زیرزمینی به تونل‌های حفر شده در مقاطع سنگی نشان می‌دهند که نفوذ آب به تونل با نسبت هد به لگاریتم طبیعی (نپرین) هد رابطه مستقیم دارد و لذا تخمین پارامتر S_6 از رابطه زیر پیشنهاد می‌گردد:

$$S_6 = \frac{H}{\ln(H)} \times d$$

H (ارتفاع آب بر روی تونل) بر حسب متر بوده و d ضریب واحدی است که بر حسب $\frac{1}{m}$ است. برای تونل‌های حفر شده در بالای سطح ایستابی پارامتر S_6 برابر واحد در نظر گرفته می‌شود [26].

بارندگی، S_7

پارامتر میزان بارش تنها در موقعی تأثیرگذار خواهد بود که تونل در زون غیر اشباع حفر گردد. در چنین شرایطی نفوذ آب از سطح زمین و یا از طریق شکستگی‌ها و گسل‌ها می‌تواند مقادیر قابل ملاحظه‌ای آب را به سمت تونل هدایت کند هر چند که نفوذ این آب، همانند حالتی که تونل در زون اشباع حفر شده باشد، دائمی نبوده و صرفاً ناشی از حرکت بارش‌های جوی پس از هر بارش به سمت تونل می‌باشد. البته بایستی توجه کرد که مدت زمانی که طول می‌کشد که آب بارش به تونل برسد متفاوت است و می‌تواند بسته به عمق تونل نسبت به سطح زمین، میزان تراوایی روباره و طول مسیر حرکت آب از زون تغذیه تا محل تونل، از چند دقیقه تا حتی چند ماه متغیر باشد.

رابطه زیر برای تخمین ضریب S_7 که بیانگر نقش میزان بارش منطقه در نفوذ آب به تونل حفر شده در زون غیر اشباع می‌باشد پیشنهاد می‌شود:

$$S_7 = \frac{P_y}{5000} \quad \text{تونل در زون غیر اشباع:}$$

جدول ۲- روش تخمین S_3 در مناطق خرد شده

Type of rock	Crashed zone width	S_3
Clay base rocks	Czw	$\text{Log}(10\text{Czw}) * b * 2$
Other rock type	Czw	$\text{Log}(10\text{Czw}) * b * 100$

b is the unit factor(1/m), Czw is the crash zone width

کارستیفیکاسیون S_4

این پدیده در سنگ‌های آهکی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است هرچند که در بعضی از سنگ‌ها از جمله دولومیت، ژئوسیت و حتی مارن هم می‌توان چنین پدیده‌ای را کم و بیش مشاهده کرد. در مارن‌ها به واسطه آزاد شدن ذرات رسی پس از انحلال آهک و انسداد شکاف‌ها توسط آن‌ها، پدیده کارستی شدن گسترش چندانی نمی‌یابد و لذا از اهمیت ناچیزی برخوردار است.

در دولومیت‌ها، پدیده کارستیفیکاسیون اهمیت کمتری دارد. ایجاد حفرات کارستی که بعضی از مواقع به ابعاد چند ده متر و در مواردی به بیش از چند صد متر می‌رسد. لذا در صورتی که حفرات کارستی حاوی آب باشند ممکن است مقادیر بسیار زیادی آب زیرزمینی را به سمت تونل هدایت نمایند. در صورت برخورد به چنین حفراتی در حین حفاری تونل، خطرات زیادی می‌تواند متوجه افراد، تجهیزات و روند حفاری شود. بدین دلیل ضریب S_4 نیز همانند ضریب S_3 (متعلق به زون‌های خرد شده) از اهمیت بالایی برخوردار است که بسته به شدت و گسترش پدیده کارستی شدن از مقدار ۱۰ (درجه کم) الی ۱۰۰ (درجه زیاد) پیشنهاد می‌شود [26].

نفوذپذیری خاک، S_5

در صورتی که تونل در محیط خاکی حفر گردد ضریب S_5 اضافه می‌شود. در چنین حالتی، ضرایب S_1 تا S_4 برابر صفر می‌شود. زیرا آن ضرایب همگی متعلق به محیط سنگی می‌باشند. ضریب نفوذپذیری سنگ در محاسبه ضرایب S_1 تا S_4 مد نظر قرار گرفته است.

در محیط‌های خاکی، با افزایش ضریب نفوذپذیری، قابلیت آب‌گذری خاک نیز افزایش یافته و هجوم آب به مقاطع تونل بیشتر می‌شود. میزان آب‌گذری لایه‌های خاک و آب زیرزمینی ورودی به تونل، با ضریب نفوذپذیری رابطه مستقیم دارد. در دانه‌بندی یکنواخت خاک، با افزایش ابعاد دانه‌ها ضریب نفوذپذیری خاک بیشتر می‌شود. هر چند که در یک خاک دارای دانه‌بندی گسترده، علی‌رغم وجود دانه‌های درشت، ممکن است که ضریب نفوذپذیری بسیار پایین باشد، زیرا دانه‌های کوچک‌تر فضای خالی بین دانه‌های بزرگ‌تر را پر می‌کنند و در نتیجه از تراوایی خاک می‌کاهند. تعیین نفوذپذیری خاک از روش‌های متفاوتی (از جمله آزمایش پمپاژ، آزمایش لوفران و...) صورت می‌پذیرد.

S7<1

آب ورودی برآورد شده حدود ۲۵ تا ۵۰ درصد بار آب مشاهده شده در گمانه‌ها است [4]. علاوه بر این، نسبت بار آب موثر به بار آب اندازه گیری شده، در مقاطع تونلی که کیفیت توده سنگ پایین است، احتمالاً به دلیل افزایش جریان مجرا در مقادیر پایین‌تر GSI (Geological Strength Index)، کمتر است.

S3

در محیط غیر اشباع در هنگام نفوذ آب به زون‌های خرد شده (ناشی از بارش‌های جوی و یا ذخایر آب سطح‌الارضی) مقادیر قابل توجهی از آب می‌تواند به سمت تونل هجوم آورد، هر چند که در سایر موارد هجوم آب ممکن است قابل ملاحظه نباشد. بنابراین حتی در مواردی که تونل در محیط غیر اشباع نیز حفر شود از اهمیت زون‌های اشباع در انتقال و نفوذ آب به تونل ناپستی غافل شد. ساختار هر گونه گسل باید جداگانه بررسی شود. وجود یک هسته نفوذ ناپذیر در ساختار گسل باعث می‌شود آبخوان‌های دو سمت آن جدا شود. این مسئله در تونل ۲ کرج از گسل پورکان-وردیج مشاهده شده است. در این منطقه، قبل از حفر تونل به گسل پورکان-وردیج، آب قابل توجهی وارد تونل نمی‌شود. هسته گسل نیز مشکلی نداشت. اما پس از عبور از منطقه گسل، حجم آب بیش از ۱۰۰ لیتر در ثانیه وارد تونل می‌شود. این مسئله نشان دهنده عملکرد آن است که گسل همچون یک سد عمل کرده است. در بسیاری از موارد، رفتار هیدرولیکی گسل‌ها باعث می‌شود که آنها به عنوان یک مجرا برای عبور جریان و به عنوان موانعی در برابر جریان یا ترکیبی از هر دو عمل کنند. با بررسی مشخصات هر گسل، باید عرض ناحیه خرد شده با توجه به وضعیت هیدروژئولوژیکی تعیین شود. با افزایش تراکم شکستگی در مناطق ریزش، اندازه قطعه‌های حفاری تونل، عمدتاً توسط فاصله و جهت شکستگی‌ها کنترل می‌شود [3]. این مسئله باعث افزایش ورودی آب به تونل می‌شود.

S4

این پارامتر ارائه شده در رابطه با کارست، کیفی بوده و پیشنهاد می‌شود که با استفاده از طبقه‌بندی فورد و ویلیامز ارقام واقعی تر به صورت کمی، محاسبه شده و به صورت کسری از ۱۰۰ در روش SGR اضافه شود. با بررسی میزان آب ورودی به تونل و ارقام به دست آمده از طریق طبقه بندی فورد و ویلیامز ارتباط قابل توجهی بین آنها مشاهده شد. لذا پیشنهاد می‌شود از این معیار در برآورد آب ورودی به تونل از نظر میزان کارستی شدن استفاده شود (جدول ۴) [27].

تونل در زون اشباع: $S7=1$

در رابطه فوق P_y بارندگی سالانه برحسب میلی‌متر می‌باشد و چنانچه دیده می‌شود حداکثر مقدار $S7$ برابر ۱ می‌باشد که در حالتی رخ می‌دهد که بارندگی سالانه برابر یا بیشتر از ۵۰۰۰ میلی‌متر بوده و یا آنکه تونل در درون زون اشباع حفر گردد.

۴- روش SGR توسعه یافته (SGRm)

با توجه به شرایط هیدروژئولوژی، زمین شناسی و نتایج حفاری واقعی صورت گرفته، برای اصلاح و تکمیل روش SGR باید به نکته زیر توجه شده و مد نظر قرار گیرد:

S1

پیشنهاد می‌شود علاوه بر موارد مطرح شده بر اساس روش SGR در محاسبه $S1$ ، بایستی مقدار شیب درزه‌ها نسبت به تونل نیز مورد توجه قرار گیرد. در واقع در صورتی که درزه‌ها عمودی باشند، توانایی انتقال آب به تونل بیشتر است. هر چه شیب درزه‌ها بیشتر شود، مخاطرات آب ورودی به تونل بیشتر است. در صورتی که شیب درزه‌های مسیر تونل بیش از ۶۰ باشد، بیشترین مخاطرات، شیب بین ۳۰ تا ۶۰ مخاطرات متوسط و کمتر از ۳۰ درجه، کمترین مخاطرات را دارد. این مسئله در تونل کرج تجربه شد. زمانی که شیب لایه‌ها ۳۰ تا ۴۰ درجه (متراژ ۱۳۵۰۰ تا ۱۵۰۰۰)، آب ورودی به تونل حدود ۱۰۰ لیتر بر ثانیه شد. این عدد در مقابل آب ورودی به تونل در لایه‌های تقریباً افقی در متراژهای حدود ۱۱۰۰۰ تا ۱۳۵۰۰ بسیار اندک است. زمانی که شیب لایه‌ها بیشتر از ۳۰ تا ۴۰ درجه است، ورود آب به تونل عملاً بیشتر از حالت افقی است [4]. لذا بایستی بحث شیب لایه‌ها به نوعی در روابط وارد شود. به‌عنوان مثال با افزایش شیب لایه‌ها، مقدار بار آبی مؤثر افزایش می‌یابد. همچنین راستای درزه‌ها نیز اهمیت زیادی دارد. در صورتی که راستای تونل و درزه‌ها بر هم عمود باشد، احتمال ورود آب به تونل بیشتر است. درصد‌های ارائه شده در رابطه با شیب را می‌توان به حالت معکوس به امتداد نیز تعمیم داد.

در واقع بایستی پارامتر لایه‌بندی به‌جای این پارامتر و یا همراه با آن مد نظر قرار گیرد. چراکه لایه‌بندی سنگ‌ها پس از شکستگی‌ها، از عوامل اصلی جریان آب‌های زیرزمینی است. لایه‌بندی‌های عمودی نقش بیشتری نسبت به لایه‌بندی‌هایی که به افقی نزدیک می‌شوند دارند. در حالی که شرایط کلی دو منطقه یکسان است [4]. همچنین با افزایش شیب لایه‌ها، میزان هد آب مؤثر افزایش می‌یابد. بنابراین، شیب لایه‌ها باید به گونه‌ای وارد روابط شود. بار آب مؤثر بر اساس

افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش روباره، مقدار درصد تشابه بار آبی محاسباتی نسبت به مشاهداتی کاهش می‌یابد [4].

S7

ورود آب به تونل رابطه مستقیمی با بارندگی دارد. لذا در صورتی که قرار بر استفاده از این پارامتر باشد، بایستی در زون‌های اشباع نیز مد نظر قرار گیرد. اما در مجموع پیشنهاد می‌شود این پارامتر حذف گردد. ورود آب زیرزمینی به تونل با افزایش بارندگی‌ها افزایش چشمگیری می‌یابد. این در حالی است که بارندگی‌ها معمولاً افزایش جزئی بار آبی را نشان می‌دهند که به صورت تئوری نمی‌تواند منجر به افزایش آب قابل توجهی به تونل شود. نفوذپذیری نیز وابسته به محیط سنگ بوده و ثابت است. لذا بایستی به میزان بارندگی‌ها در منطقه توجه کرد. این مسئله را می‌توان ناشی از پالس آب ناشی از بارندگی در محیط هیدروژئولوژی محدوده مسیر تونل دانست. این پارامتر در واقع در بار آبی (S6) اعمال شده است.

در مجموع، در این تحقیق، با توجه به روشهای SGR ارائه شده توسط کتیبه و عالی انوری [26] و با توجه به نکات تکمیلی ارائه شده، محاسبه ضریب SGR به عنوان یک مکمل SGRM به شرح زیر پیشنهاد می‌شود:

$$SGRM = [Sm1 + Sm2 + Sm3 + Sm4] Sm6$$

مقایسه مقادیر SGR و SGRM در تونلهای کرج و کرمان در جدول ۴ نشان داده شده است. پارامترهای S5 و S7 حذف شدند. مقادیر دیگر با توجه به مفاهیم توصیف شده و نتایج مشاهدات و برداشتهای میدانی اصلاح شده است. نقش برخی از تغییرات بسیار چشمگیر است. در حقیقت، تغییرات فوق از نظر منطق زمین شناسی و هیدروژئولوژی بسیار مناسب است. در هر دو تونل کرج (شکل ۴) و تونل کرمان (شکل ۵)، مقادیر SGR و SGRM به همراه مقادیر واقعی اندازه گیری شده ورودی آب به تونل مقایسه شد. دبی ورودی آب به داخل تونل روزانه اندازه گیری می‌شود و با توجه به منطقه حفاری، میزان تخلیه برای هر منطقه هیدروژئولوژی تعیین می‌شود. همانطور که در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است، نتایج روش SGRM نسبت به نتایج روش اولیه SGR به نتایج واقعی نزدیکتر هستند. این مسئله تأثیرات بیشتری به ویژه در منطقه گسله و برخی ساختارهای زمین شناسی خاص دارد.

جدول ۴- طبقه بندی ژئومورفولوژیکی توده سنگ

Geomorphological rock mass strength classification and ratings					
Intact rock strength (N-type Schmidt Hammer 'R')					
Parameter	100-60	60-50	50-40	40-35	35-10
Rating	20	18	14	10	5
Weathering					
Parameter	Unweathered	Slightly	Moderately	Highly	Completely
Rating	10	9	7	5	3
Spacing of fissures					
Parameter	>3 m	3-1 m	1-0.3 m	300-50 mm	<50 mm
Rating	30	28	21	15	8
Fissure orientations					
Parameter	Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very unfavourable
Rating	20	18	14	5	2
Width of fissures					
Parameter	<0.1mm	0.1-1mm	1-5mm	5-20 mm	>20 mm
Rating	7	6	5	4	2
Continuity of fissures					
Parameter	None continuous	Few continuous	Continuous, no infill	Continuous, thin infill	Continuous, thick infill
Rating	7	6	5	4	1
Outflow of groundwater					
Parameter	None	Trace	Slight	Moderate	Great
Rating	6	5	4	3	1
Total rating and classification					
Parameter	1	2	3	4	5
Parameter	Very strong	Strong	Moderate	Weak	Very weak
Rating	100-91	90-71	70-51	50-26	<26

S5

پیشنهاد می‌شود پارامتر S5 از این روش حذف شود. چرا که محاسبات روش‌های محیط‌های سنگی و خاکی بسیار متفاوت است. از طرفی در صورتی که محیط حفاری خاکی باشد، تخمین تمام موارد متفاوت‌تر است. به طور کلی، روش SGR نباید در محیط‌های آبرفتی استفاده شود. پارامتر مربوط به خاک باید در محاسبه سنگ حذف شود تا خطاها کاهش یابد.

S6

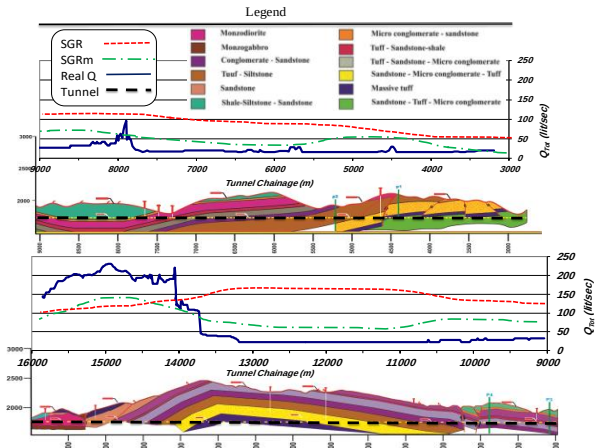
بار آب یکی از عوامل اصلی در پایداری تونل است [28]. مون و فرناندز (۲۰۱۰) نشان دادند که افت سطح آب متناسب با ورودی آب در حین حفاری است و روند آن را به عنوان یک پارامتر برای پیش بینی ورودی آب معرفی کرد [20]. طبق نتایج مرسلی و همکاران بار آبی اندازه گیری شده در گمانه‌ها نباید به عنوان بار واقعی مؤثر بر تونل در نظر گرفته شود [4]. در این تحقیق از شاخص GSI به عنوان شاخصی در مقایسه بار آبی محاسباتی و بار آبی مشاهده شده در گمانه‌ها استفاده شد. طبقه‌بندی GSI جهت تعیین کیفیت توده سنگ ارائه شده است [29]. تراز آب مشاهده شده در گمانه‌های مسیر تونل، نبایستی به عنوان بار آبی مستقیم در روابط لحاظ گردد. پیچیدگی‌های سازندهای سخت عامل اصلی در این زمینه است. بر طبق یافته‌های این تحقیق، حدود ۳۰ الی ۵۰ درصد بار آبی مشاهده شده در گمانه‌ها بایستی به عنوان بار آبی در محاسبات در نظر گرفته شود. با افزایش ارتباط بین درز و شکاف‌ها، این درصد افزایش و با کاهش این ارتباطات، این درصد کاهش می‌یابد. این مسئله مخصوصاً در تونل‌های با عمق بیشتر بایستی بیشتر مورد توجه قرار گیرد. شاهدهی که در این زمینه می‌توان استفاده کرد، مقدار GSI است. در مسیر تونل کرج با ارتباط بین GSI، به بار آبی مؤثر به این نتیجه رسیده شد که با افزایش GSI نسبت مقدار تخمین به مقدار H مشاهداتی در گمانه‌ها افزایش می‌یابد. درواقع با افزایش کیفیت توده سنگ، تناسب بار آبی مقدار محاسباتی و مشاهداتی در گمانه‌ها

۵- نتیجه گیری

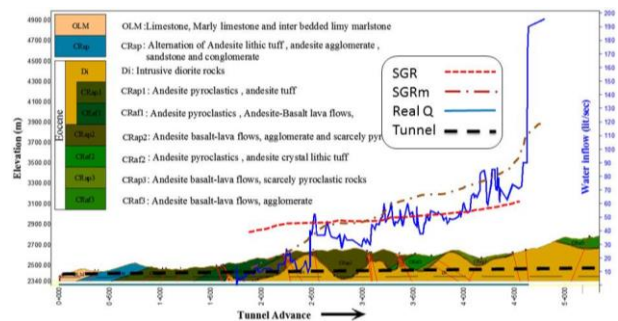
با توجه به ناکارآمدی روشهای تحلیلی در تخمین ورود آب به تونل، روش SGR به عنوان یک روش جدید برای کاهش خطاهای روشهای تحلیلی، ناشی از تجارب قبلی معرفی شده است. نتایج حاصل از روش SGR، علی رغم داشتن دقت بیشتر در مقایسه با روشهای تحلیلی، باز هم اختلاف زیادی با نتایج واقعی نشان داد. علت آن نادیده گرفتن از برخی از مفاهیم هیدروژئولوژی و زمین شناسی است. در این تحقیق، با توجه به تجارب حفاری تونل کرمان و کرج، صحت اعتبارسنجی‌های روش SGR بررسی و تکمیل شد. دو پارامتر از هفت پارامتر معرفی شده در روش SGR، که مربوط به نفوذ پذیری خاک (به دلیل شرایط خاص در تشکیل سنگ سخت) و اثر باران (به دلیل تأثیر آن بر روی بار آبی) حذف گردید. مقدار شیب درزه ها در پارامتر S1، لایه‌بندی به جای شیب‌توزیته در پارامتر S2، محاسبه وضعیت نوع منطقه خرد شده در پارامترهای S3 (بررسی ساختار هر گسل به طور جداگانه)، استفاده از طبقه بندی ژئومورفولوژی مقاومت سنگ به جای معیارهای نسبی کارست، استفاده از ضریب ۳۰ تا ۵۰ درصد بار آب اندازه گیری شده در گمانه‌ها و استفاده از معیارهای طبقه بندی GIS در پارامتر S6، از جمله تغییرات وارد شده در این مقاله است. در نتیجه، روش بهینه سازی شده (SGRM) معرفی می‌شود. نتایج SGRM مقایسه با نتایج SGR به نتایج واقعی نزدیکتر است. بنابراین، این روش به عنوان یک روش جدید برای تخمین ورودی آب به تونل توصیه می‌شود.

۶- سپاس‌گزاری

از مهندسین مشاور ساحل امید ایرانیان به دلیل همکاری‌های صورت گرفته سپاسگزاری می‌شود.



شکل ۴- مقادیر آب ورودی به تونل بر اساس SGR، SGRm و دبی واقعی اندازه گیری شده در تونل کرج- متراژ



شکل ۵- مقادیر آب ورودی به تونل بر اساس SGR، SGRm و دبی واقعی اندازه گیری شده در تونل کرمان- متراژ

جدول ۳- جزئیات مقادیر SGR و SGRm در دو تونل بررسی شده

الف- تونل کرمان

SGR												
Zone	L(m)	H(m)	k (m/day)	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	SGR q (l/s/m)	Q(lit/s)
HG1	670	100	0.0432	5.4E-05	2	1.398	10	0.0432	21.715	0.04	11.675	31.289
HG2	700	110	0.006	1.8E-05	2	2.000	10	0.006	23.402	0.04	13.111	36.710
HG3	1280	120	0.0864	2.7E-05	1	2.352	10	0.0864	25.065	0.04	13.474	68.985
HG4	960	150	0.00864	4.5E-04	1	2.000	10	0.00864	29.936	0.048	18.693	71.782

SGRm												
Zone	L(m)	H(m)	k (m/day)	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	SGRm q (l/s/m)	Q(lit/s)
HG1	670	30	0.0432	3.3E-05	1	2.000	6	-	8.820	-	3.175	8.510
HG2	700	80	0.006	1.5E-05	2	3.204	12	-	18.256	-	12.563	35.178
HG3	1280	90	0.0864	3.3E-05	4	3.690	15	-	20.001	-	18.153	92.943
HG4	960	150	0.00864	5.4E-04	3	3.204	22	-	29.936	-	33.774	129.691

ب- تونل کرج

SGR												
Zone	L(m)	H(m)	k (m/day)	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	SGR q (l/s/m)	Q(lit/s)
HG1	670	100	0.0432	5.4E-05	2	1.398	10	0.0432	21.715	0.04	11.675	31.289
HG2	700	110	0.006	1.8E-05	2	2.000	10	0.006	23.402	0.04	13.111	36.710
HG3	1280	120	0.0864	2.7E-05	1	2.352	10	0.0864	25.065	0.04	13.474	68.985
HG4	960	150	0.00864	4.5E-04	1	2.000	10	0.00864	29.936	0.048	18.693	71.782

SGRm												
Zone	L(m)	H(m)	k (m/day)	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	SGRm q (l/s/m)	Q(lit/s)
HG1	670	30	0.0432	3.3E-05	1	2.000	6	-	8.820	-	3.175	8.510
HG2	700	80	0.006	1.5E-05	2	3.204	12	-	18.256	-	12.563	35.178
HG3	1280	90	0.0864	3.3E-05	4	3.690	15	-	20.001	-	18.153	92.943
HG4	960	150	0.00864	5.4E-04	3	3.204	22	-	29.936	-	33.774	129.691

۷- منابع‌ها

[1] West, G., (1983) Comparisons between real and predicted geology in tunnels: examples from recent

cases, Quarterly Journals of Engineering Geology and Hydrogeology, doi: 10.1144/GSL.ENG.1983.016.02.04.

- [2] Brassington, FC, (1986) The inter-relationship between changes in groundwater conditions and engineering construction, Quarterly Journals of Engineering Geology and Hydrogeology, doi: 10.1144/GSL.ENG.1986.003 .01.04.
- [3] Zolfaghari, M., Mokhtari, E., Morsali, M., (2011) Geological evidences of collapse zones in TBM tunneling; a case study of Ghomroud water conveyance tunnel, IRAN, Asian Tunnelling symposium, ATS11-02113.
- [4] Morsali, M., Nakhaei, M., Rezaei, M., Nasery, H., and Hassanpour, J., (2017) A New Approach of Water head estimation based on water inflow into the tunnel (Case study: Karaj water conveyance tunnel), Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology. DOI: 10.1144/qjgeh2016-015.
- [5] Frough, O., RahmanTorabi, S., Tajik, M., (2012) Evaluation of TBM Utilization Using Rock Mass Rating System: A Case Study of Karaj-Tehran Water Conveyance Tunnel (Lots 1 and 2), Journal of Mining and Environment (JME).
- [6] Morsali, Massoud, Rezaei, Mohsen, (2017) Assessment of H2S emission hazards into tunnels: the Nosoud tunnel case study from Iran, Journal of Environmental Earth Sciences, DOI: 10.1007/s12665-017-6493-0.
- [7] Spross, J., Larsson, S., (2014) On the observational method for groundwater control in the Northern Link tunnel project, Stockholm, Sweden, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, ISSN 1435-9529, E-ISSN 1435-9537, Vol. 73, no 2, 401-408 p.
- [8] Demattis, A., Kalamaras, G., Eusebio, A., (2001) A system approach for evaluating spring drawdown due to Tunnelling, Progress in Tunnelling, Milan, Italy.
- [9] Moon, J. & Fernandez, G. (2010) Effect of excavation-induced groundwater level drawdown on tunnel inflow in a jointed rock mass. Engineering Geology, 110, 33–42.
- [10] Saberinasr, A., Morsali M., Hashemnejad A., Hassanpour, J., (2019) Determining the origin of groundwater elements using hydrochemical data (case study: Kerman water conveyance tunnel), Environmental Earth Sciences, (2019) 78:198, doi.org/10.1007/s12665-019-8182-7.
- [11] Font-Capo, J., (2012) Interaction between groundwater and TBM (Tunnel Boring Machine) excavated tunnels, Ph.D. Thesis, Department of Geotechnical engineering and Geosciences, Universitat Politècnica de Catalunya, UPC-BarcelonaTech.
- [12] Heuer, RE., (1995) Estimating rock Tunnel water inflow. In Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference pp. 41-60-. SOCIETY FOR MINING, METALLOGY and EXPLORATION, INC.
- [13] Coli, N., Pranzini, G., Alfi, A., Boerio, V., (2008) Evaluation of Rock-Mass Permeability Tensor and Prediction of Tunnel Inflows by Means of Geostructural Surveys and Finite Element, Engineering Geology, 02812; No of Pages 11.
- [14] Lo Russo, S., Gnani L., Peila D., Suozzi E., (2013) Rough evaluation of the water-inflow discharge in abandoned mining tunnels using a simplified water balance model: the case of the Cogne iron mine (Aosta Valley, NW Italy), Environmental Earth Science, 10.1007/s12665-013-2335-x.
- [15] Sharifzadeh, M., Javadi, M., (2017) Groundwater and Underground Excavations: from Theory to Practice [Series: Rock Mechanics and Engineering, volume 3, Chapter 10, Editor: Xia-Ting Feng; CRC Press].
- [16] Nilsen, Bjorn, (2014) Characteristics of water ingress on Norwegian subsea tunnels, Rock Mechanic and Rock Engineering, May 2014, Volume 47, Issue 3, pp 933-945.
- [17] Zarei, H.R., Uromeihy, A., Sharifzadeh, M., (2010) Evaluation Of High Local Groundwater Inflow To A Rock Tunnel By Characterization Of Geological Features, Tunneling and Underground Space Technology, Volume 26, Issue 2, March 2011, Pages 364-373.
- [18] Milanovic, P., (2007) Nowsoud Water Conveyance Tunnel Project, Mission Report, Iran Water & Power Resources Development Company.
- [19] Lachassagne, P., Marechal, J.C., Bienfait, p., Lacquement, F., Lamotte, C., (2015) Computing the Water Inflows Discharge and Assessing the Impacts of Tunnels Drilled in Hard Rocks: The A89 (France) Motorway Case Study, Engineering Geology for Society and Territory, volume 3.
- [20] Fernandez, G., and Moon, J., (2010) Excavation-Induced Hydraulic Conductivity Reduction Around A Tunnel – Part 2: Verification Of Proposed Method Using Numerical Modeling, Tunneling And Underground Space Technology, Volume 25, Issue 5, September 2010, Pages 567-574.
- [21] Le Mensil, M., Moussa, R., Charlier, J.B., Caballero, Y., (2020) Impact of karst areas on runoff generation, lateral flow and interbasin groundwater flow at the storm- event timescale, Hydrology and earth system sciences, Doi: 10.5194/hess-2020-229
- [22] Mabey, B., Pritch, A., Hardcastle, K., (2002) Correlation of Lineaments to Ground Water Inflows in a Bedrock Tunnel, Ground Water 40(1):37-43, DOI: 10.1111/j.1745-6584.2002.tb02489.x
- [23] Dehghan, A., Goshtasbi, K., Ahangari, Yan, J., (2014) Experimental investigation of hydraulic fracture propagation in fractured blocks, Bull Eng Geol Environ 74, 887–895 (2015). <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0665-x>.
- [24] Dehghan, A., An experimental investigation into the influence of pre-existing natural fracture on the

behavior and length of propagating hydraulic fracture, Engineering Fracture Mechanics,

Volume 240, 2020, 107330, ISSN 0013-7944, <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107330>.

[25] Farhadian, H., Katibeh, H., (2015) Groundwater Seepage Estimation into Amirkabir Tunnel Using Analytical Methods and DEM and SGR Method, World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering Vol:9, No:3, 2015.

[26] Katibeh, H., Aalianvari, A., (2009) Development of a new method for tunnel site rating from groundwater hazard point of view. J. App. Sci. 9, pp. 1496-1502.

[27] Ford, D.C., Williams, P.W., (2007) Karst geomorphology & hydrology. Chapman & Hall

[28] Bour, Komeil, and Goshtasbi Goharizi, Kamran, (2019) Study of Convergence Confinement Method curves considering pore-pressure effect, Journal of Mining and Environment (JME), DOI: 10.22044/jme.2019.7888.1654.

[29] Hoek, E., Marinos, P., Benissi, M., 1998, Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses, The case of the Athens Schist Formation, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 57 (2), 151–160.