

معرفی طبقه‌بندی ژئومورفولوژیکی مقاومت توده سنگ به عنوان معیاری در برآورد آب ورودی به تونل‌ها

مسعود مرسلی*

^۱ استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

پیش‌بینی میزان هجوم آب‌های زیرزمینی به تونل‌های در حال حفر، یکی از مهم‌ترین مشکلات پروژه‌های تونلی است. روش‌های تجربی و تحلیلی بسیاری وجود دارند که تخمینی از آب ورودی به تونل می‌دهند، اما دقت آنها همواره پایین است. نفوذپذیری و بار آبی از مهم‌ترین فاکتورهای تعیین‌کننده آب ورودی به تونل هستند. به دلیل پیچیدگی‌های شرایط زمین‌شناسی و آب‌زمین‌شناسی سازندهای سخت، بایستی عوامل دیگری نیز در تخمین آب ورودی به تونل مدنظر قرار گیرد. در این مقاله، برای اولین بار، طبقه‌بندی مقاومت ژئومورفولوژیکی توده سنگ (Geomorphological Rock Mass Strength) (GRMS) به عنوان معیاری در تخمین آب ورودی به تونل‌ها مدنظر قرار گرفت. داده‌های مرتبط با دو تونل که در شرایط زمین‌شناسی متفاوتی حفاری شده‌اند، جهت تعیین تأثیر این طبقه‌بندی در پیش‌بینی آب ورودی به تونل مورد استفاده قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که در هر دو تونل، معیار فوق، انطباق قابل توجهی با میزان آب ورودی به تونل‌ها داشته و می‌تواند از این پس در تخمین آب ورودی به تونل مورد توجه قرار گیرد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۰/۱۰/۰۱

کلیدواژه‌ها:

آب زیرزمینی

تونل

طبقه‌بندی ژئومورفولوژیکی

مقاومت توده سنگ

۱- پیش‌نوشتار

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 (West, 1983; Brassington, 1986; Yoo, 2004; Yudan et al., 2006; Morsali et al., 2017). مقدار نشت آب به تونل سرعت حفاری را کاهش داده و حتی ممکن است پروژه را متوقف سازد (Cesano et al., 2000, 2003; Frough et al., 2012; Chiochini and Castaldi, 2011; Hassanpour and Rostami, 2010; Morsali and Rezaie, 2017). با وجود آن که در مسیر تونل‌ها، گمانه‌های اکتشافی حفر می‌شود؛ اما نتایج ژئوتکنیک دارای صحت کافی و جامعیت لازم در پروژه‌ها نیست (Spross and Larsson, 2014). در مطالعات مهندسی پیشین از آغاز حفاری تونل‌ها، بایستی شناخت درستی از مقاطع آب‌دار مسیر پروژه و میزان دبی ورودی داشته باشد تا برنامه‌ریزی‌های لازم را در این زمینه انجام داد. همچنین علاوه بر مشکلات ورود آب به تونل برای حفاری، افت تراز آب در اثر ورود آب به تونل، منجر به تأثیر بر آبدی چشمه‌ها و چاه‌های محدوده نیز می‌شود (Yoo, 2004; Yang et al., 2009; Demattis et al., 2001; Moon and Fernandez, 2010; Chiochini and Castaldi, 2011). در برخی از موارد، ورود آب به تونل همراه با نشت گاز است (Mirmehrabi et al., 2008; Morsali and Rezaie, 2017).

(Saberinasr et al., 2019) لذا این مسئله از اهمیت بالایی برخوردار است. شرایط زمین‌شناسی نقش مهمی در ورود آب به تونل‌ها دارند. (Zarei et al., 2011) نقش ساختارهای زمین‌شناسی در میزان آب ورودی به تونل تأکید کردند. دایک‌ها به عنوان یک سد عمل کرده و عموماً در برخورد حین حفاری با آنها مشکلات زیادی به وجود می‌آید (Font-Capo 2012). روش (Heure (2001) 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. (Coli et al., 2008) 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 (Lo Russo et al., 2013). البته این مسئله مستلزم اطلاعات دقیق است که عموماً در پروژه‌های عمرانی وجود ندارد. جوادی با مدل‌سازی آب در محیط‌های درز و شکاف‌دار، نقش متغیرها و ساختارهای زمین‌شناسی را بسیار مهم معرفی کرد (Sharifzadeh and Javadi, 2017). حفاری‌ها و تزریق‌های پیشرو تأثیر زیادی در کنترل آب‌های زیرزمینی ورودی به تونل دارد (Nilsen, 2014). شناخت شرایط هیدروژئولوژیکی مهم‌ترین راهکار تخمین آب ورودی به تونل است. هر چند مدل‌سازی عددی نتایج دقیقی را در رابطه با آب ورودی به تونل می‌دهد؛ اما

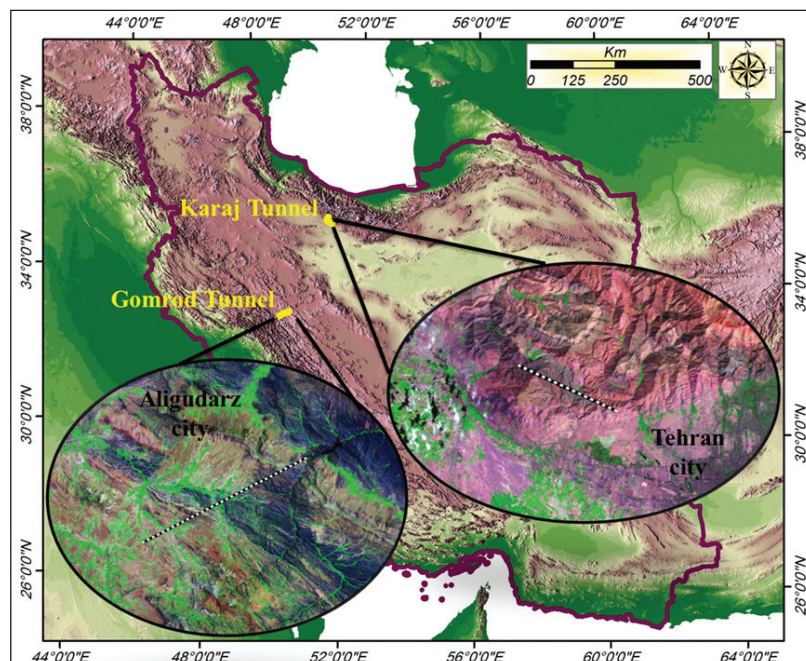
است. منطقه مورد مطالعه در پهنه البرز مرکزی جای گرفته است و با پیچیدگی‌های زمین‌ساختی ناشی از عملکرد گسل‌های رورونده روبه‌رو است. پیشینه روباره تونل حدود ۸۰۰ متر و متوسط آن ۲۵۰ متر می‌باشد. سازند کرج (اوسن میانی تا پسین) با سنگ‌شناسی سنگ‌های آذرآواری و میان‌لایه‌های رسوبی اصلی‌ترین سازند مسیر تونل است (شکل ۲). دایک‌های زیادی در مسیر تونل وجود دارند که می‌توانند نقش زیادی در جریان‌های زیرزمینی ایفا کنند (Sabale and Meshram, 2012).

گسل پورکان - وردیج مهم‌ترین گسل مسیر تونل کرج است. تونل قمرود به عنوان یکی از بزرگ‌ترین تونل‌های کشور جهت انتقال آب از سرشاخه‌های رودخانه دز به سد گلیپایگان به طول ۳۶ کیلومتر حفر گردید. این تونل در زون سندج - سیرجان که شکستگی‌ها و چین‌های بسیار دارد قرار گرفته است. منطقه شامل تناوبی از سازندهای پرکامبرین با سنگ‌شناسی شیست، فیلیت و اسلیت، آهک و دولومیت دگرگون شده و در برخی از مناطق کوارتزیت و متاولکانیک‌ها است (شکل ۳).

از آنجا که این مسئله مستلزم هزینه بسیار و زمان‌بر است؛ بنابراین عملاً نمی‌توان آنها را در پروژه‌های اجرایی کارا دانست (Sharifzadeh and Javadi, 2017). بار آبی و نفوذپذیری، نقش مهمی در آب ورودی به تونل دارد. بار آبی مشاهده شده در گمانه‌های حفاری شده در تونل‌ها نیز نبایستی به عنوان فشار مستقیم در برآوردها محاسبه شود (Morsali et al., 2017). با توجه به اهمیت پیش‌بینی آب ورودی به تونل، استفاده از روش ارائه‌شده در این مقاله به عنوان یک معیار هیدروژئولوژی - زمین‌شناسی مهندسی که تاکنون مورد توجه قرار نگرفته است، می‌تواند به‌خوبی در برآورد آب ورودی به تونل مؤثر واقع شود.

۲- تونل‌های انتقال آب کرج و قمرود

در این مقاله از داده‌های واقعی مرتبط با دو تونل انتقال آب امیرکبیر (کرج) و قمرود استفاده شد (شکل ۱). تونل امیرکبیر به منظور انتقال آب از سد کرج به تهران با طول ۳۰ کیلومتر با استفاده از روش مکانیزه به وسیله ماشین حفار تمام مقطع (TBM) حفر شده



شکل ۱ - موقعیت تونل‌های کرج و قمرود.



شکل ۲- تونل کرج: الف) آب ورودی به تونل در پرتال؛ ب) اندازه‌گیری سطح آب در گمانه‌ها؛ ج) توف‌های کرج در مسیر تونل و د) شیل‌های مسیر.



شکل ۳- تونل قمرود: الف) آب ورودی به تونل در پرتال؛ ب) پمپاژ آب درون تونل؛ ج) شست و فیلت‌های مسیر و د) سنگ‌های کربناته محدوده.

۳- بحث

آب و تراوایی توده سنگ روبرو است. روش‌های تحلیلی را می‌توان در محیط‌های همگن و ایزوتروپ به کار برد، اما این روش‌ها قادر به پیش‌بینی ورود آب به درون تونل‌های سنگی در ساختارهای زمین‌شناسی منفرد مانند زون‌های گسلی نیستند (Gattinoni and Scesi, 2010). آبخوان‌های کارستی شرایط پیچیده‌تری به لحاظ ورودی آب به تونل دارند که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است (Le Mensil et al., 2020). شریف زاده و جوادی با مدل‌سازی آب در محیط‌های درز و شکاف‌دار، نقش پارامترها و ساختارهای زمین‌شناسی را بسیار مهم معرفی نمودند (Sharifzadeh and Javadi, 2017; Zarei et al., 2011). در بسیاری از مواقع گسل‌ها نقش بسزایی در این زمینه دارند. شرایط آب‌های زیرزمینی به‌ویژه در زون‌های گسله از اهمیت بالایی در تونل‌سازی برخوردار است (Shrestha and Panthi, 2014). Nilsen (2014) مطرح نمود که گمانه‌های پیشرو و پیش‌تزیق تأثیرات بسیاری در آب ورودی به تونل دارند. سنگ‌های نفوذی همچون دایک‌ها، کنترل‌کننده جریان آب‌های زیرزمینی هستند و این مسئله بایستی مورد توجه برآورد آب ورودی به تونل قرار گیرد (Sabale and Meshram, 2012). Mabee et al. (2002) نشان دادند که بیشتر زون‌های ورود آب به تونل منطبق با تراکم خطواره‌ها هستند.

افزون بر نرخ جریان و گرانروی سیال تزریق، موقعیت هندسی شکستگی‌ها، بازشدگی شکستگی، سیمان شکستگی و غیره از جمله پارامترهای مؤثر و کلیدی بر روی سازوکار جریان سیال در توده سنگ‌های شکاف‌دار طبیعی می‌باشند (Dehghan et al., 2015). درزه‌های مجاور تونل‌ها ورود آب به تونل‌ها را کانالیزه می‌کنند (Fernandez and Moon, 2010). 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. از آنجا که شناسایی کلیه عوامل مؤثر در ورودی آب به تونل‌ها، به‌ویژه 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 (Farhadian et al., 2016; Katibeh and Aalianvari 2009). این مسئله منجر به خطای بالایی در محاسبات می‌شود.

برای تخمین وضعیت زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی مسیر تونل‌ها، چندین گمانه پیش از شروع حفاری اصلی تونل در محدوده مسیر تونل‌ها حفر شد. از اهداف اصلی این گمانه‌ها، تخمین سطح آب زیرزمینی و نفوذپذیری سنگ‌های مسیر تونل

روش استاندارد و دقیقی برای پیش‌بینی آب ورودی به تونل‌های سنگی وجود ندارد. 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 ویژگی‌های درزه‌ها همچون ادامه داری، فاصله داری، بازشدگی، پرشدگی و ارتباط درزه‌ها با ناپیوستگی‌ها و سنگ‌شناسی 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 به هیدرولوژی منطقه‌ای، ساختارهای زمین‌شناسی و مسیرهای جریانی در ابعاد مقیاس کوچک تا بزرگ دارد. هیدرولوژی منطقه‌ای در ارتباط با ساختارهای زمین‌شناسی، جریان عمومی به سمت تونل‌های در حال حفر را کنترل می‌کنند (Sharifzadeh and Javadi, 2017; Zarei et al. 2011). ساختارهای زمین‌شناسی کنترل‌کننده شرایط جریانی و مرزهای آبخوان‌ها در محیط‌های سنگی هستند (Milanovic, 2007). موارد یاد شده، سبب ایجاد یک محیط آیزوتروپ می‌شود. از طرف دیگر، شرایط مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی آب‌های زیرزمینی در ویژگی‌های توده سنگ تأثیرگذار است که اندرکنش آب و سنگ نامیده می‌شود (Sharifzadeh and Javadi, 2017). نفوذپذیری محدوده تونل با استفاده از آزمون‌های لوژان گمانه‌های ژئوتکنیکی و بار آبی نیز با استفاده از اندازه‌گیری تراز آب در گمانه‌ها برآورد می‌شود.

روش‌های تحلیلی همچون روش‌های گودمن، لی، لومباری، کالسرود و التانی (Raymer, 2005; Font-Capo, 2012; Lachassagne et al., 2015) و تجربی (هوتر) (Heure, 2001) زیادی جهت برآورد ورود آب به تونل معرفی شده‌اند که به دلیل شرایط ناهمسانی (آیزوتروپی) و ناهمگنی (هتروژنی) با واقعیت اختلاف دارند. علت این مسئله، فرضیات ساده‌سازی است که در روش‌های یاد شده قرار دارد. چرا که در این روش‌ها، تونل به عنوان مقطعی دایره‌ای در یک محیط همسان و همگن قرار دارد (Fernandez and Moon, 2010; Butscher, 2012). با افزایش آب ورودی به تونل، روند تغییرات دبی در روش‌های تحلیلی، انطباق بیشتری با واقعیت دارد (مرسلی و همکاران، ۱۳۹۷). 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. به اعتقاد (Kolymbas and Wagner 2007) روش‌های تخمین ورود آب به درون تونل‌های سنگی با عدم قطعیت‌های زیاد، از جمله ارتفاع ستون

(Geomorphological Rock Mass Strength (GRMS)) به عنوان معیاری در تخمین آب ورودی به تونل مورد استفاده قرار گرفت. با در نظر گرفتن ترکیب سنگ، بافت و مقاومت فشاری، وضعیت صفحات لایه‌بندی، هوازدگی، گسل‌ها و درزها، طبقه‌بندی ژئومورفولوژی مقاومت توده سنگ توسط Selby اولین بار ارائه شد (Ford and William, 2007). علاوه بر او، (Ford and William, 2007) آن را یک روش مناسب برای شناخت پتانسیل‌های محیطی کارستی معرفی کردند. این روش در پایداری سقف غارها و فروچاله‌ها مطرح شده است. این مسئله در پروژه‌های معدنی نیز مورد استفاده بوده است (Brady and Brown, 1985). طبقه‌بندی GRMS سلیبی با کمی اصلاح توسط (Ford and William, 2007) در جدول ۱ ارائه شده است.

است. ژرفای آب و نوسان آن در حین حفاری تونل و پس از آن کنترل می‌شود. به دلیل شرایط زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (سازند کرج و دگرگونی‌های قمرود)، نفوذپذیری سنگ‌های اطراف مسیر تونل تقریباً کم است. بر اساس گمانه‌های حفاری شده در تونل‌ها، سطح آب زیرزمینی بالای تونل تقریباً معادل روباره تونل است. در مسیر تونل مناطق کارستی مشاهده نمی‌شود، بنابراین جریان آب به تونل جریان بالا ندارد. لوژان‌های اندازه‌گیری شده در گمانه‌ها نشانگر نفوذپذیری پایین تا متوسط سنگ‌های مسیر تونل‌های کرج و قمرود است. مقدار ورود آب‌های زیرزمینی به داخل تونل، به طور روزانه در حین حفاری تونل‌های کرج و قمرود اندازه‌گیری شد. در این مقاله، برای اولین بار طبقه‌بندی ژئومورفولوژیکی مقاومت توده سنگ

جدول ۱- طبقه‌بندی ژئومورفولوژیکی مقاومت توده سنگ (Ford and Williams, 2007).

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

برای تخمین آب ورودی به تونل، مسیر تونل‌های کرج و قمرود به زون‌های هیدروژئولوژی بر اساس بار آبی و نفوذپذیری تفکیک شد. هر زون دارای یک بار آبی و نفوذپذیری منحصر به خود است. چنان که گفته شد، بار آبی و نفوذپذیری مهم‌ترین عواملی هستند که در روابط تحلیلی و تجربی برای برآورد آب ورودی به تونل مؤثر هستند. اگرچه این فاکتورها بسیار مهم هستند، اما کافی نیستند. ارتباط بین درز و شکاف‌ها در محدوده بالایی تونل بایستی مدنظر قرار گیرد. برای مثال در کیلومتر ۶ تا ۷ تونل کرج بر اساس تراز آب در گمانه‌ها بار آبی روی تونل حدود ۳۰۰ متر برآورد شد. با توجه به نتایج آزمون‌های لوژان و نفوذپذیری به دست آمده، آب ورودی به تونل بیش از ۱۰۰ لیتر در ثانیه برآورد شد. اما در واقعیت و در حین

این طبقه‌بندی در محیط‌های کارستی تاکنون به صورت گسترده مورد استفاده قرار نگرفته است. (Moon and Fernandez, 2010) برای شیل و کوارتزیت‌ها در آفریقای جنوبی آن را مورد بررسی قرار داده‌اند. با استفاده از نتایج برداشت‌های زمین‌شناسی مهندسی و هیدروژئولوژی مسیر تونل‌های کرج و قمرود، طبقه‌بندی GRMS برای تونل‌های یاد شده در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. افزون بر این، رتبه‌بندی کلی مربوط به این تونل‌ها در جدول ۴ نشان داده شده است. جهت‌داری درز و شکاف‌ها ارتباط مستقیمی با جهت جریان‌های آب‌های زیرزمینی دارد. همچنین مقاومت سنگ‌ها به دلیل اثرگذاری بر شکستگی‌ها در تشکیل آب‌خوان‌های محیط‌های سنگی مؤثر است.

گرفته می‌شوند. زمانی که ارتباط بین شکستگی وجود نداشته باشد و یا ضعیف باشد، منجر به پایین آمدن نفوذپذیری کل توده سنگ (حتی اگر نفوذپذیری جزء به جزء بالا باشد) می‌شود. همین مسئله نه تنها در نفوذپذیری بلکه در بار آبی مؤثر هم تأثیرگذار است.

ورود آب به تونل بسیار اندک بود. همچنین در کیلومتر ۱۱ تا ۱۳، ورود آب به تونل حدود ۱۵۰ لیتر بر ثانیه تخمین زده شد که ورود آب به تونل کمتر از ۲۵ لیتر بر ثانیه اندازه‌گیری شد. موارد مشابه این مسئله در برخی از زون‌های دیگر نیز دیده شد. اینها مواردی هستند که در طبقه‌بندی ژئومورفولوژیکی مقاومت توده سنگ در نظر

جدول ۲- طبقه‌بندی ژئومورفولوژیکی مقاومت توده سنگ زون‌های مسیر تونل قم‌رود.

Intact rock strength (N-type Schmidt Hammer 'R')					
Rating	20	18	14	10	5
Tunnel Hydrogeologic zone			H1-H2-H3-H4-H5-H6-H7-H15-H16	H8-H9-H10-H11-H12-H13-H14	
Weathering					
Rating	10	9	7	5	3
Tunnel Hydrogeologic zone		H1-H3-H5-H15-H16	H7-H9-H11-H13		H2-H4-H6-H8-H10-H12-H14
Spacing of fissures					
Rating	30	28	21	15	8
Tunnel Hydrogeologic zone		H1-H3-H4-H5-H6-H7-H15-H16	H9-H11-H13		
Fissure orientations					
Rating	20	18	14	9	2
Tunnel Hydrogeologic zone	H16	H1-H3-H5-H9-H11-H13-	H7-H15	H2-H4-H6-H8-H10-H12-H14	
Width of fissures					
Rating	7	6	5	4	2
Tunnel Hydrogeologic zone	H1-H3-H5-H15-H16	H2-H4-H6-H7-H8-H9-H11-H13	H10-H12-H14		
Continuity of fissures					
Rating	7	6	5	4	1
Tunnel Hydrogeologic zone	H1-H2-H3-H4-H5-H6-H7-H15-H16	H8-H9-H10-H11-H12-H13-H14			
Outflow of groundwater					
Rating	6	5	4	3	1
Tunnel Hydrogeologic zone	H1-H3-H5-H7-H15- H16	H2-H4-H6-H8-H9-H10-H11-H12-H13-H14			

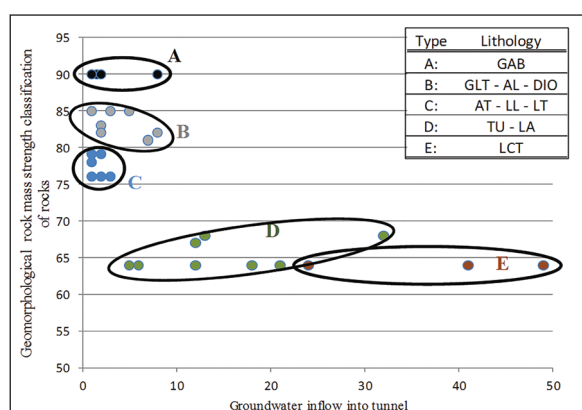
جدول ۳- طبقه‌بندی ژئومورفولوژیکی مقاومت توده سنگ زون‌های مسیر تونل کرج.

Intact rock strength (N-type Schmidt Hammer 'R')					
Rating	20	18	14	10	5
Tunnel Hydrogeologic zone	DIO, GAB, MO	AL, LL, BG, LT, LA, MLT, GT, LLT, AT, CT, GLT, ALT	LC, LCT, TU LA, LT		
Weathering					
Rating	10	9	7	5	3
Tunnel Hydrogeologic zone		DIO, GAB, AL, LL, LC, MLT, MO, LLT, CT, GLT, TU, ALT	LCT, AL, BG, LT, LA, AT, TU, GT, ALT		
Spacing of fissures					
Rating	30	28	21	15	8
Tunnel Hydrogeologic zone	MO	DIO, GAB, AL, LL, BG, LT, LA, MLT, CT, GLT	LCT, LC, LA, MLT, GT, AT, TU, ALT		
Fissure orientations					
Rating	20	18	14	9	2
Tunnel Hydrogeologic zone		GAB, MO	AL, BG, LT, LC, MLT, AT, GL	DIO, LL, LA, LLT, ALT, GT, LCT, TU	
Width of fissures					
Rating	7	6	5	4	2
Tunnel Hydrogeologic zone		BG, LT, T	DIO, GAB, AL, LL, BG, LC, LA, MLT, MO, GT, CT, GLT, ALT, AT, LCT	LA, MLT, TU, ALT	
Continuity of fissures					
Rating	7	6	5	4	1
Tunnel Hydrogeologic zone		AT, CT, TU, ALT, MO	DIO, GAB, LL, BG, LA	LCT, LT, LC, MLT, GT, LLT, GLT	
Outflow of groundwater					
Rating	6	5	4	3	1
Tunnel Hydrogeologic zone		AL, LL, BG, LT, LC, LA, MLT, LLT, AT, CT, GLT, TU, ALT, DIO, GAB, MO	LCT-LA- GT		

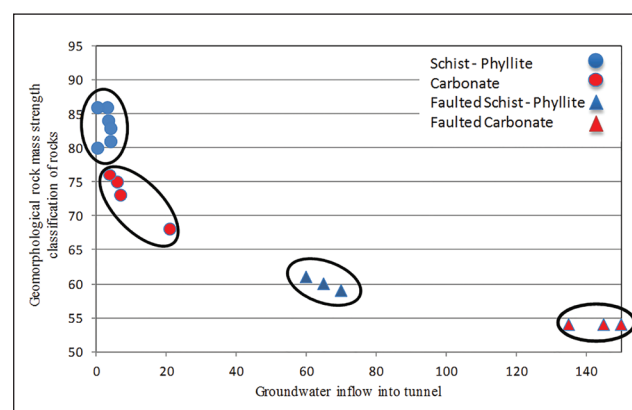
جدول ۴- رتبه بندی و طبقه‌بندی سنگ‌های مسیر تونل کرج و قمرود.

Description	1	2	3	4	5
	Very strong	Strong	Moderate	Weak	Very weak
Rating	91-100	71-90	51-70	26-50	26>
Ghomroud Tunnel		H1-H3-H5-H7-H15	H2-H4-H6-H8-H9-H11-H13-H16	H10-H12-H14	
Karaj Tunnel		DIO-MO-LCT-AL-LL-GAB-BG-IT-IC-MLT-GT-AT-CT-GLT-TU	LA-ALT		

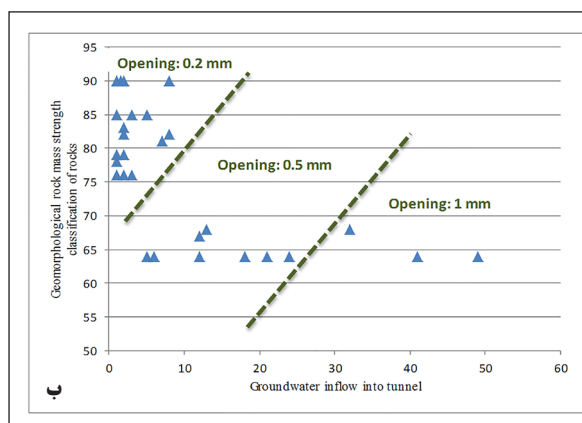
نتایج، تغییرات سنگ‌شناسی در هر دو تونل قابل تفکیک است. علاوه بر این، اثرات گسل و شکستگی، صرف نظر از سنگ‌شناسی، آشکارا قابل مشاهده است. نقش بازشدگی درزه‌ها در آنالیز ارتباط ورودی آب زیرزمینی به تونل و ژئومورفولوژی مقاومت توده سنگ برجسته است. با اندکی افزایش در بازشدگی درزه‌ها، ورودی آب به تونل نیز به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد (شکل ۶). در تونل‌های کرج و قمروود که به طور کلی نفوذپذیری بالایی دیده نمی‌شود، بازشدگی درزه‌ها از ۰/۵ میلی‌متر به بالا، نشانگر افزایش قابل توجه مشکلات آب ورودی به تونل خواهد بود.



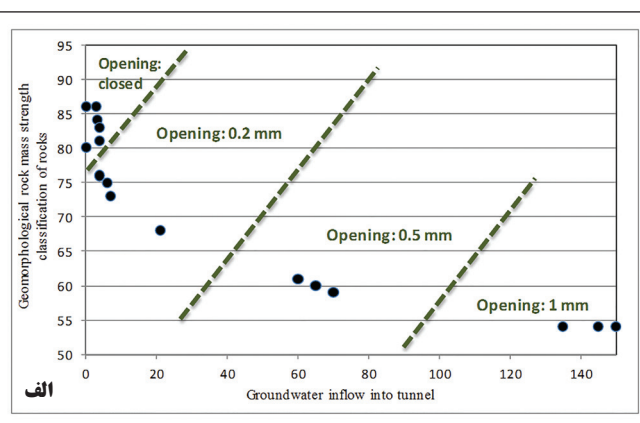
شکل ۵- ارتباط بین طبقه‌بندی GRMS و آب ورودی به تونل کرج در زون‌های مختلف.



شکل ۴- ارتباط بین طبقه‌بندی GRMS و آب ورودی به تونل قمروود در زون‌های مختلف.



ب



الف

شکل ۶- نقش قابل توجه بازشدگی درزه‌ها در ورود آب زیرزمینی به تونل‌های الف) قمروود و ب) کرج.

۴- نتیجه‌گیری

توجهی در رابطه با این معیار و آب ورودی به تونل به دست آمد. به گونه‌ای که با افزایش عدد به دست آمده در طبقه‌بندی یاد شده در هر زون، مقدار آب ورودی به تونل کاهش می‌یابد. بنابراین پیشنهاد می‌شود از این پس، از این معیار در پیش‌بینی آب ورودی به تونل‌ها استفاده شود. در هر دو تونل کرج و قمروود، زمانی که میزان GRMS بیش از ۷۰ است که به معنای سنگ سخت تا بسیار سخت می‌باشد، آب ورودی به تونل عموماً کمتر از ۱۰ لیتر بر ثانیه است. بازشدگی درزه‌ها (به‌ویژه

روش‌های تحلیلی و تجربی بر اساس دو فاکتور اصلی بار آبی و نفوذپذیری آب ورودی به تونل را تخمین می‌زنند. این روش‌ها، برخی از عوامل زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی با اهمیت در سازندهای سخت را مورد توجه قرار نمی‌دهند. در این پژوهش، برای نخستین بار، بین طبقه‌بندی ژئومورفولوژیکی مقاومت توده سنگ (GRMS) و میزان آب واقعی ورودی به تونل‌های کرج (زون البرز) و قمروود (زون سندج- سیرجان) ارتباط برقرار کرده و بررسی و تحلیل انجام شد. ارتباط قابل

استفاده از معیار GRMS می‌توان تخمین دقیق‌تر و واقعی‌تری در کنار روش‌های تجربی و تحلیلی، در برآورد آب ورودی به تونل‌های در حال حفر محیط‌های سنگی داشت.

از ۰/۵ میلی‌متر به بالا، نقش مهمی در آب ورودی به تونل و میزان GRMS ایفا می‌کند. گسل‌ها، شرایط درزه‌ها و سپس سنگ‌شناسی بیشترین نقش را در ورود آب به تونل‌های در حال حفر سازندهای سنگی دارند. بر اساس این پژوهش، با

کتابنگاری

مرسلی، م.، نخعی، م.، رضایی، م.، ناصری، ح.، حسن پور، ح.، ۱۳۹۷- مقایسه روش‌ها و متغیرهای مؤثر در آب ورودی به تونل‌های سازندهای سخت، تونل انتقال آب سد کرج به تهران، نشریه علوم زمین، بهار ۹۷، سال بیست و هفتم، شماره ۱۰۷، صفحه ۱۱۳ تا ۱۲۲.

References

- Brassington, F.C., 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.
- Butscher, C., 2012- Steady-state groundwater inflow into a circular Tunnel, Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 32, November, Pages 158–167, doi.org/10.1016/j.tust.2012.06.007.
- Cesano, D., Bagtzoglou, A.C., Olofsson, B., 2003- Quantifying fractured rock hydraulic heterogeneity and groundwater inflow prediction in underground excavations: the heterogeneity index, Tunnelling and Underground Space Technology 18, 19–34., doi.org/10.1016/S0886-7798(02)00098-6.
- Cesano, D., Olofsson, B., Bagtzoglou, A., 2000- Parameters Regulating Groundwater Inflows into Hard Rock Tunnels--a Statistical Study of the Bolmen Tunnel in Southern Sweden, Tunnelling and Underground Space technology, Vol. 15, No. 2, pp. 153-165, doi.org/10.1016/S0886-7798(00)00043-2.
- Chiocchini, U., and Castaldi, F., 2011- The impact of groundwater on the excavation of Tunnels in two different hydrogeological settings in central Italy, Hydrogeology Journal, 19: 651–669, doi.org/10.1007/s10040-010-0702-1.
- 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, doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.05.002.
- Dehghan, A.N., Goshtasbi, K., Ahangari, K., Jin, Y., 2015- Mechanism of fracture initiation and propagation using a tri-axial hydraulic fracturing test system in naturally fractured reservoirs, European Journal of Environmental and Civil Engineering, doi.org/10.1080/19648189.2015.1056384.
- Demattis, A., Kalamaras, G., Eusebio, A., 2001- A system approach for evaluating spring drawdown due to Tunnelling, Progress in Tunnelling, Milan, Italy.
- Farhadian, H., Katibeh, H., Huggenberger, P., 2016- Empirical model for estimating groundwater flow into Tunnel in discontinuous rock masses, Environmental Earth Science 75:471, DOI 10.1007/s12665-016-5332-z.
- Farhadian, H., Nikvar Hassani, A., Katibeh, H., 2016- Groundwater Inflow Assessment to Karaj Water Conveyance Tunnel, Northern Iran, KSCE Journal of Civil Engineering 0000- 000-:1-10, DOI 10.1007/s12205-016-0995-2.
- Fernandez, G., Moon, J., 2010- Excavation-induced hydraulic conductivity reduction around a Tunnel – Part 2: Verification of proposed method using numerical modeling, Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 25, Issue 5, September 2010, Pages 567-574, doi.org/10.1016/j.tust.2010.04.001.
- Font-Capo, J 2012- Interaction between groundwater and TBM Tunnel Boring Machine- excavated Tunnels, PhD Thesis, Dept Geotechnical Engineering and Geosciences, Universitat Politècnica de Catalunya, UPC-BarcelonaTech, Spain.
- Ford, D.C., and Williams, P.W., 2007- Karst geomorphology & hydrology. Chapman & Hall.
- Frough, O., Torabi, S.R., Tajik, M., 2012- Evaluation of TBM utilization using rock mass rating system: a case study of Karaj-Tehran water conveyance Tunnel, Journal of mining and environmental, Vol. 3, No. 2, 2012, 89-98, doi: 10.22044/JME.2012.86.
- Gattinoni, P., Scesi, L., 2010- An empirical equation for Tunnel inflow assessment: application to sedimentary rock masses, Hydrogeology Journal, Volume 18, Number 8, Page 1797, DOI:10.1007/s10040-010-0674-1.
- Hassanpour, J., Rostami, J., 2010- Predicting TBM performance in second lot of Karaj Water Conveyance Tunnel KARAJ TUNNEL-, Rock Engineering in Difficult Ground Conditions – Soft Rocks and Karst – Vrkljan ed-©2010 Taylor and Francis Group, London, doi.org/10.1007/s00603-009-0060-2.
- Heuer, R.E., 2001- Estimating Rock tunnel water inflow. Geotechnical consulting McHenry.
- Katibeh, H., and Aalianvari, A., 2009- Development of a new method for tunnel site rating from groundwater hazard point of view, Journal of applied sciences 9 (8): 1496-1502.

- Kolymbas, D., and Wagner, P., 2007- Groundwater ingress to tunnels, The exact analytical solution, Tunneling and Underground Space Technology 22 (2007) 23-27, doi.org/10.1016/j.tust.2006.02.001.
- Lachassagne, P, Marechal, J., Bienfait, P., 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. Lei, S., 1999- an analytical solution for steady flow into a Tunnel. Ground Water 37, 23-26, doi.org/10.1007/978-3-319-09054-2_119.
- 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, doi.org/10.5194/hess-25-1259-2021.
- Lo Russo, S.T., Gnani, L., Peila, D., 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 Sciences, 70:2753-2335-x, doi.org/10.1007/s12665-013-2335-x.
- Mabee, S. B., Curry, P.J., and Hardcastle, K., 2002- Correlation Of Lineaments To Groundwater Inflows In A Bedrock Tunnel, Vol. 40, No 1-Groundwater- Pages 37- 43.
- Milanovic, P., 2007- Nowsoud water conveyance Tunnel project, Mission Report, Iran Water and Power Resources Development Company.
- Mirmehrabi, H., Hassanpour, J., Morsali, M., Tarigh Azali, S., 2008- Experiences gained from gas and water inflow toward the Tunnel, Case Study: Aspar Anticline, Kermanshah, Iran, 5th Asian Rock Mechanics Symposium, 24-26 November 2008, Tehran. Iran.
- Moon, J., Fernandez, G., 2010- Effect of Excavation-Induced Groundwater Level Drawdown on Tunnel Inflow in a Jointed Rock Mass, Engineering Geology, Volume 110, Issues 3-4, 9 February 2010, Pages 33-42, doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.09.002.
- Morsali, M. and Rezaei, M., 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.
- 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/qjgegh2016-015.
- Nilsen, B., 2014- Characteristics of water ingress on Norwegian subsea Tunnels, Rock Mechanic and Rock Engineering, May 2014, Volume 47, Issue 3, pp 933-945, doi.org/10.1007/s00603-012-0300-8.
- Raymer, J.H., 2005- Groundwater inflow into hard rock Tunnels: a new look at inflow equations. In Proceeding of the rapid excavation and Tunnelling conference RETC-. Society of Mining and Metallurgy Inc., Society of Mining and Metallurgy Inc pp. 457-468.
- Sabale, P.D., and Meshram, S.A., 2012- Effect of dyke structure on groundwater in between Sangamner and Sinnar area: A Case study of Bhokani dyke, International Journal of Computational Engineering Research, Vol. 2, and Issue 4.
- 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.
- Sharifzadeh, M., and 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].
- Spross, J., and 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.
- 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.
- Yang, F., Lee, C., Kung, W., Yeh, H., 2009- The impact of Tunnelling construction on the hydrogeological environment of Tseng-Wen Reservoir Transbasin Diversion Project” in Taiwan, Engineering Geology, vol.101, pp. 39-58, DOI:10.1016/j.enggeo.2008.07.012.
- Yoo, C., 2004- Interaction between Tunnelling and groundwater, Tunneling and Underground Space Technology 19 2004- 523-524, DOI:10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:2(240).
- Yudan, J., Ranjith, P., Verma, A., Choi, S., Haque, A., 2006- A parametric study on flow of groundwater in fractured porous media: 3D simulation, 4th Asian Rock Mechanics Symposium, Singapore.
- Zarei, H.R., Uromeihy, A., Sharifzadeh, M., 2011- 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, doi.org/10.1016/j.tust.2010.11.007.

Original Research Paper

Introduction of geomorphological rock mass strength classification as a criterion for estimating the groundwater inflow into tunnels

Massoud Morsali^{1*}¹ Assistant Professor, Department of Geology, University of Isfahan, Isfahan, Iran**ARTICLE INFO***Article history:*

Received: 2021 February 22

Accepted: 2021 June 14

Available online: 2021 December 22

Keywords:

Groundwater

Tunnel

Geomorphological classification

Rock mass strength

ABSTRACT

Prediction of groundwater inflow into tunnels during excavation is one of the most important problems of tunneling projects. There are many analytical and empirical methods to predict the amount of groundwater entering the tunnels, which are generally not highly accurate. Permeability and water head are the main affecting parameters in estimation of groundwater inflow in current prediction methods. Due to the complexity of the geological and hydrogeological conditions of hard rock formations, it is necessary to enter other geological factors to estimate groundwater inflow into the tunnel. In this paper, for the first time, Geomorphological Rock Mass Strength (GRMS) classification is used as a criterion for estimating the groundwater entering the tunnel. The obtained data from two tunnels in different geological setting were used to study the effect of rock mass classification parameter on estimation of groundwater entering the tunnel. The results show that for both tunnels, GRMS have a significant correlation with the amounts of groundwater inflow into the tunnels.

* Corresponding author: Massoud Morsali; E-mail: m.morsali@sci.ui.ac.ir

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2021 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

 doi: 10.22071/GSJ.2021.273133.1888

 dor: 20.1001.1.10237429.1400.31.4.9.8

