مقایسه روش‌ها و متغیرهای مؤثر در آب ورودی به تونل‌های سازندهای سخت، تونل انتقال آب سد کرج به تهران

مسعود مرسلی[۱*]، محمد نخعی[۲]، محسن رضایی[۲]، حمیدرضا ناصری[۳] و جعفر حسن‌پور[۴]

[۱]دکترا، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
[۲]دانشیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
[۳]استاد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
[۴]استادیار، دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۲۸/ ۱۰/ ۱۳۹۵ تاریخ پذیرش: ۲۱/ ۰۳/ ۱۳۹۶

چکیده

بخش اول تونل انتقال آب کرج به طول ۱۶ کیلومتر برای انتقال آب از سد امیرکبیر به تصفیه‌خانه تهران در سازند کرج حفاری شد. برای برآورد میزان نفوذ آب به درون تونل‌ها، روش‌ها و روابط متفاوتی وجود دارد. ورود آب به تونل توسط روش‌های تحلیلی و تجربی برآورد شد و اندازه‌گیری روزانه آب واقعی ورودی به تونل اختلافاتی را با این روش‌ها نشان داد. در این پژوهش، بر پایه مقایسه میان ارقام واقعی و پیش‌بینی‌های صورت گرفته، روابطی برای شرایط مشابه آب‌زمین‌شناختی ارایه شد. روش‌های تحلیلی، ارقام بالاتری را نسبت به پیش‌بینی‌ها نشان دادند که بر پایه این مطالعات، افزون بر نفوذپذیری و بار آبی که در این روش‌ها وجود دارد؛ ساختارهای زمین‌شناسی، بارش و شیب لایه‌ها در ورود آب زیرزمینی به تونل مؤثرند. بیشترین حجم ورود آب به تونل کرج در ساختارهای زمین‌شناسی همچون چین‌ها، گسل‌ها، دایک‌ها و درزه‌های باز صورت گرفته که در بیشتر مواقع نیز انطباق زمانی قابل توجهی با بارندگی‌ها داشته است.

کلیدواژه‌ها: ورود آب زیرزمینی، روش‌های تحلیل و تجربی، متغیرهای آب‌زمین‌شناختی، ساختارهای زمین‌شناسی، تونل، ایران.

***نویسنده مسئول:** مسعود مرسلی
E-mail: massoud.morsali@gmail.com

۱- پیش‌نوشتار

با پیشرفت جوامع بشری و افزایش جمعیت، استفاده از فضای زیرزمینی روز به روز گسترده‌تر و گوناگون‌تر می‌شود. یکی از انواع پرکاربرد فضاهای زیرزمینی تونل‌ها هستند که برای اهداف مختلفی همچون ترابری و انتقال آب و فاضلاب ساخته می‌شوند. برای طراحی ایمن‌تر و اقتصادی‌تر تونل‌ها، نیاز به دانش مکانیک سنگ، زمین‌شناسی، اقتصاد، آمار و سایر علوم مرتبط است که گوناگونی رشته‌ها، طراحی این فضاها را مشکل و پیچیده می‌کند. با توجه به گسترش نیازهای کشور، ساخت تونل‌ها در زمین‌های مختلف و با شرایط پیچیده رو به گسترش است. یکی از مواردی که همواره تحلیل‌ها را با عدم قطعیت همراه می‌کند؛ شرایط زمین‌شناسی و وجود آب زیرزمینی است. در هنگام حفاری سنگ‌های مسیر تونل، آب زیرزمینی از راه شکستگی‌ها و درزه‌ها به تونل نفوذ می‌کند؛ اما از آنجا که تعیین همه متغیرها و عوامل مؤثر بر نفوذ آب امکان‌پذیر نیست؛ پیش‌بینی دقیق نفوذ آب به تونل هم مشکل است. از آنجا که نفوذ آب به تونل سبب وارد شدن خساراتی به تجهیزات ساخت تونل، کارکنان، روند اجرای کار و ... می‌شود؛ مهندسان و طراحان تونل باید پیش از آغاز حفاری مشخص کنند که چه میزان آب زیرزمینی به درون تونل وارد می‌شود و به پیمانکاران و اجراکنندگان اطلاع دهند. آگاهی از میزان نفوذ و ورود آب زیرزمینی می‌تواند در انتخاب روش حفاری مناسب و به ویژه مسیریابی اولیه تونل‌ها و همچنین طراحی و اندازه پمپ مورد نیاز برای خروج آب از تونل مؤثر باشد. همچنین افت سطح آب زیرزمینی در اثر ورود آب به تونل سبب کاهش آبدهی و خشک شدن منابع آبی سطح زمین و مشکلات زیست‌محیطی می‌شود. باید توجه داشت که برآورد نکردن یا اشتباه در برآورد آب ورودی به تونل، سبب وارد شدن هزینه‌های غیرضروری و خارج از برنامه به پروژه خواهد شد. این مشکلات و روش‌های حل آنها، همچنین هر گونه تأخیر احتمالی در برآورد میزان نفوذ آب و هزینه‌های اجرایی تونل با یکدیگر رابطه مستقیم دارند. در واقع با افزایش هجوم آب به تونل‌ها، هزینه‌های عملیاتی هم به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. نمونه‌هایی از این موارد در تونل‌های نوسود، کوهرنگ و کرج دیده شده است. این مسئله، اهمیت مطالعات زمین‌شناسی و آب‌زمین‌شناسی را در پروژه‌های عمرانی نشان می‌دهد.

۲- اهمیت موضوع

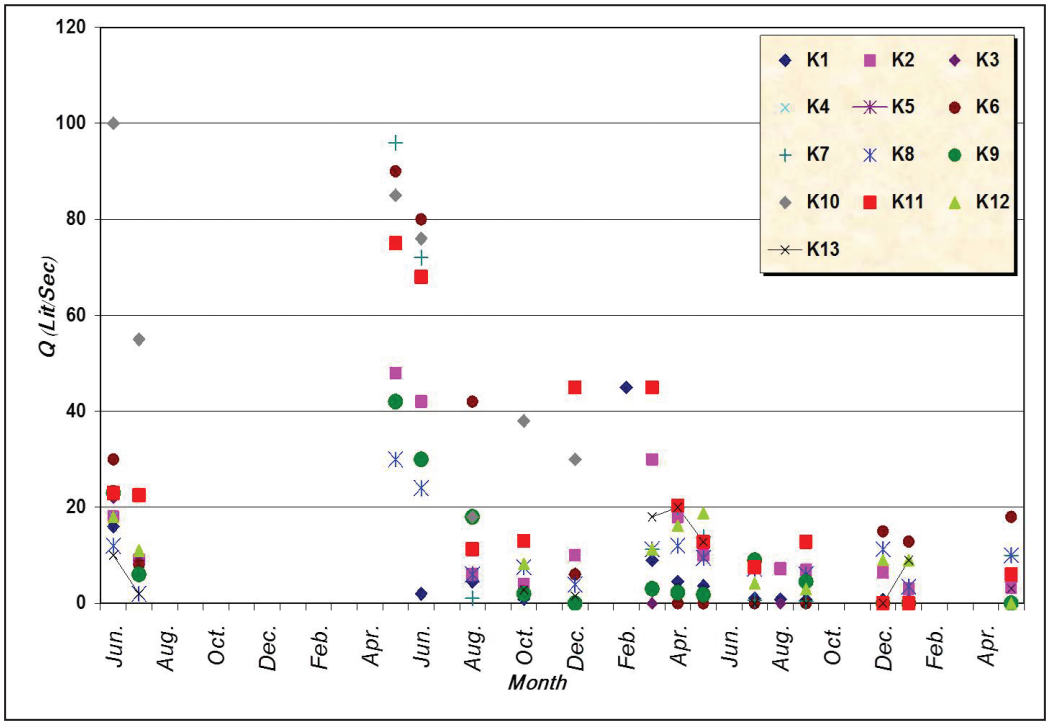
مطالعات آب‌زمین‌شناسی در پروژه‌های حفاری تونل، جزو مطالعات بنیادین است. یکی از دلایل اصلی پرداختن به این موضوع، اهمیت فوق‌العاده‌ای است که می‌تواند در طی اجرای پروژه‌های عمرانی، چه از دید اقتصادی و چه از دید فنی سبب مشکلات فراوانی شود. هجوم آب‌های زیرزمینی به تونل‌ها، تأثیرات زیادی در پروژه‌های عمرانی همچون تونل‌ها دارد (West, 1983; Brassington, 1986). مقدار نشت ورودی به تونل، همه طراحی‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Lee and Nam, 2001). ایجاد محیط نامناسب کار، ریزش تونل و مدفون یا غرقاب شدن ماشین حفار و تجهیزات حفاری از مشکلاتی است که ارتباط مستقیم با مقدار و سازوکار ورود آب دارد. این مخاطرات سبب کاهش سرعت حفاری، افزایش هزینه‌ها و زمان ساخت می‌شوند (Liu et al., 1997; Dematties et al., 2005; Kolymbas and Wagner, 2007; Tseng et al., 2001; Yudan et al., 2006; Park et al., 2008; Li et al., 2008; Zareifard and Fahimifar, 2014; Lachassagne et al., 2015). ورود آب زیرزمینی در برخی از مناطق کشور همچون تونل البرز (Wenner and Wannenmacher, 2009) و تونل نوسود (Mirmehrabi et al., 2008; Morsali and Rezaei, 2017) همراه با گاز سولفید هیدروژن گزارش شده است.

۳- پیشینه مطالعاتی

ورود آب به تونل وابسته به شرایط زمین‌شناختی و آب‌زمین‌شناختی منطقه است. روش استانداردی برای برآورد آب ورودی به تونل‌ها وجود ندارد (Kaneshiro and Schmidt, 1995). مطالعات آب‌زمین‌شناسی در محیط‌های سازندهای سخت پیچیدگی‌های بسیاری دارد. علت این امر، وجود جریان آب زیرزمینی در محیط‌های غیر افشان است (Liebel et al., 2012). با وجود آنکه در مسیر تونل‌ها، گمانه‌های اکتشافی حفر می‌شود؛ اما نتایج ژئوتکنیک دارای درستی کافی و جامعیت لازم در پروژه‌ها نیست (Spross and Larsson, 2014). بسیاری از طراحی‌های مهندسی تونل نیازمند برآورد آب ورودی در هنگام حفاری است. این مسئله در روش، نوع و برنامه‌ریزی حفاری‌ها بسیار مؤثر است. از مهم‌ترین و

اولین روابطی که برای برآورد میزان نفوذ آب به درون تونل‌ها مورد استفاده قرار می‌گرفت؛ معادله Goodman et al. (1965) است. ایشان معادله خود را بر پایه جریان پایدار و با استفاده از معادلات دارسی و قانون بقای جرم ارائه دادند. پیش از آنها، رابطه‌ای برای تونل‌های افقی اشباع و همگن ارائه شد. Freeze and Cherry (1979) اولین تصحیحات را روی معادله Goodman et al. (1965) انجام دادند. تصحیحات آنها بر پایه تغییر مفهوم بار آبی در آب ورودی به تونل بود. سپس اعلام شد معادله Goodman et al. (1965) تا ۶۰ درصد خطا دارد. Heuer (2001) 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. او بر پایه همین موارد ضریب هوئر را به معادلات اضافه کرد. Raymer (2005) با استفاده از نتایج ورود آب به چاه، آب ورودی به تونل را مورد بررسی قرار داد. Karlsrud (2001) نیز با کمی تفاوت به نتایج مشابهی رسید. Lombardi et al. (2002) با اعمال تغییراتی رابطه Karlsrud (2001) را تکمیل کردند. El Tani (2003) برآوردی را برای تونل‌هایی با عدم افت سطح آب مطرح کرد و معادله جامع‌تری را مورد توجه قرار داد. او در معادله خود از همه روابطی که ارائه شده بود؛ به نوعی استفاده کرد. Cesano et al. (2003) مطرح کردند که ورود آب به تونل نه تنها به ساختار و هدایت هیدرولیکی، بلکه به روباره تونل‌ها نیز وابسته است. در شرایط انتقالی معادله ژاکوب پایه معادله‌های تحلیلی ارائه شده است. این معادله برای برآورد نرخ جریان انتقالی در یک چاه تحت افت ثابت ارائه شده است. Coli et al. (2008) به نقش چگونگی انتخاب هدایت هیدرولیکی در آب‌های ورودی به تونل پرداختند. آنها استفاده از آزمون لوژان را، به تنهایی، برای انتخاب هدایت هیدرولیکی کافی ندانستند. Li et al. (2008) در رابطه با فشار حفرات پیرامون تونل با آب ورودی به تونل پژوهش کرد. نفوذپذیری غیر قابل اعتمادترین و پیچیده‌ترین متغیر در برآورد آب ورودی به تونل است (Ameli, 2006). باید مشخص شود که نفوذپذیری توده نزدیک سنگ پیرامون تونل تا چه باندی باید مورد توجه قرار گیرد و بررسی شود. در سال‌های گذشته، افزون بر مسئله آب ورودی به تون، اهمیت تأثیرات آن هم بسیار مورد توجه قرار گرفته و مطالعات زیادی روی آن انجام شده است (Gattinoni and Scesi, 2010). برای هر کدام از این مسائل، اهمیت شناخت آب‌زمین‌شناختی بسیار مهم است. Liu et al. (1997) از تجزیه‌های شیمیایی نیز برای تأثیرگذاری ورود آب به تونل در منابع آبی پیرامون استفاده کرد. Custodio and Llamas (2005) بحث ورود آب به تونل را در آبخوان‌هایی با ستبرای محدود مطرح کرد. در سال‌های گذشته، ورود آب زیرزمینی به تونل را می‌توان با استفاده از مدل بیلان منطقه نیز پیش‌بینی کرد (Lo Russo et al., 2013). این مسئله مستلزم اطلاعات دقیق است که عموماً در پروژه‌های عمرانی وجود ندارد. خلاصه‌ای از روابط و فرضیات ارائه شده در جدول ۱ آمده است. نقش ساختارهای زمین‌شناسی در پتانسیل آب ورودی به تونل توسط Zarei et al. (2011) بررسی شد. جریان آب زیرزمینی در محور تاقدیس‌ها و ناودیس‌ها شدت بیشتری دارد (Milanovic, 2007). جوادی با مدل‌سازی آب در محیط‌های درز و شکاف‌دار، نقش متغیرها و ساختارهای زمین‌شناسی را بسیار مهم معرفی کرد (Sharifzadeh and Javadi, 2017). 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 (Sharifzadeh and Javadi, 2017).

یکی دیگر از مخاطرات تونل و آب‌های زیرزمینی کاهش آبدهی چشمه‌های مسیر تونل‌هاست (Yoo, 2004; Yang et al., 2009; Demattis et al., 2005). در واقع افزون بر مشکلات درون تونل، تأثیرپذیری و افت تراز آب منطقه سبب کاهش آبدهی چشمه‌های مسیر تونل می‌شود (Moon and Fernandez, 2010; Chiocchini and Castaldi, 2011). این مسئله اثرات زیست‌محیطی و اجتماعی زیادی دارد و بسیار مهم است. مشابه این مسئله در تونل کرج نیز دیده شد (شکل ۱).



شکل ۱- کاهش تدریجی چشمه‌های مسیر تونل کرج.

جدول ۱- خلاصه‌ای از روابط تحلیلی.

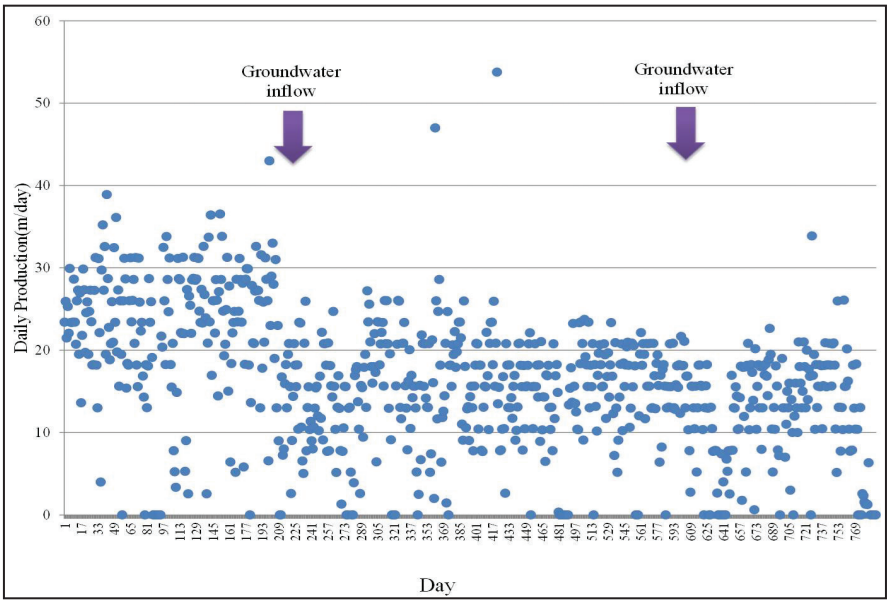
مرجع	رابطه		توضیحات
Goodman et al. (1965)	$Q = 2\pi K \frac{h}{\ln(\frac{2z}{r})}$	(۱)	این معادله دارای سه پیش‌فرض بنیادین و اولیه است: جریان شعاعی، عدم تغییرات قابل توجه لایه‌بندی و اعمال صحیح نفوذپذیری معادل محیط.
Freeze and Cherry (1979)	$Q = \frac{2\pi K H_o}{\ln(\frac{2H_o}{r})}$	(۲)	این پژوهشگران با جایگزینی z به‌جای H_0 در رابطه گودمن آن را تصحیح کردند.
Heuer (2001)	$Q_L = \frac{2\pi K H_o}{\ln(\frac{2z}{r})} \times \frac{1}{8}$	(۳)	ضریب کاهش هوئر (مقدار یک هشتم) و تغییراتی در مخرج به‌منظور تصحیح رابطه ۲ اعمال شده است.
Li et al. (2008)	$Q = 2\pi K \frac{h}{\ln(\frac{h}{r} + \sqrt{(\frac{h}{r})^2 - 1})}$	(۴)	در این رابطه روش گودمن با اعمال دقیق‌تر شرایط واقعی تصحیح شده است.
El Tani (2003)	$Q = 2\pi K \frac{1 - 3(\frac{r}{2h})^2}{[1 - (\frac{r}{2h})^2]\ln(\frac{2h}{r} - (\frac{r}{2h})^2}$	(۵)	این پژوهشگر با بررسی میزان دقت معادلات بالا، رابطه‌ی ۵ را به‌عنوان یک رابطه بهینه معرفی کرده است.
Karlsrud (2001)	$Q = 2\pi K \frac{h}{\ln(\frac{2h}{r} - 1)}$	(۶)	ترکیبی از رابطه ۳ و ۱ به‌منظور کاهش خطا در مورد تونل‌های ژرف و کم‌ژرفا (زیر سطح ایستابی) بر پایه مشاهدات میدانی تدوین شده است.
Lombardi (2002)	$Q = 2\pi k \frac{h}{\mathrm{h}\ \frac{2h}{r}\left(1 + 0.4\left(\frac{r}{h}\right)^2\right)}$	(۷)	در این رابطه روش کارلسرود با اعمال شرایط دقیق‌تر تصحیح شده است.
El Tani (2003)	$Q = 2\pi k \frac{\lambda^2 - 1}{\lambda^2 + 1} \frac{h}{\mathrm{h}\ \lambda}$	(۸)	در این رابطه با استفاده از روش تغییر شکل موبیوس و سری فوریه راه‌حل تحلیلی جدیدی برای محاسبه جریان به درون تونل‌ها ارائه شده که در این رابطه $\lambda = (h/r) - (\ h^2/r^2) - 1)^{1/2}$ است.

همچنین ورود آب زیرزمینی به تونل سبب کاهش نرخ حفاری می‌شود (Hassanpour and Rostami, 2010). کاهش نرخ حفاری به معنای افزایش هزینه‌های اجرای پروژه‌هاست (Frough et al., 2012). دو مقطع از تونل کرج که نرخ حفاری به‌طور قابل ملاحظه‌ای در آنها کاهش یافت؛ دقیقاً منطبق با هجوم آب زیرزمینی به تونل بوده‌اند (شکل ۲).

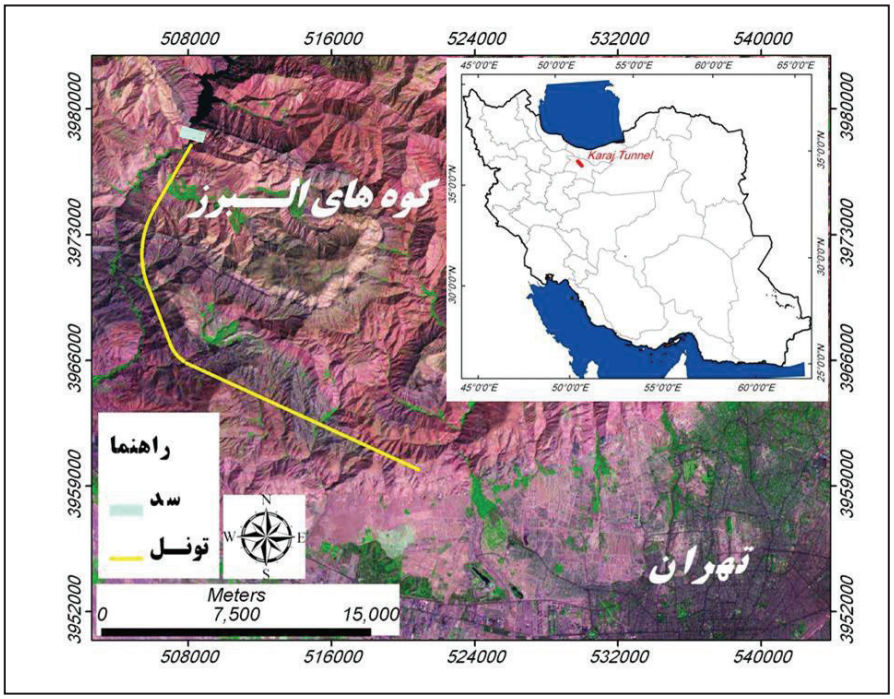
۴- تونل انتقال سد کرج به تهران

تونل امیرکبیر (سد امیرکبیر به تهران) به‌منظور انتقال آب آشامیدنی تهران از سد امیرکبیر اجرا شد. طول تقریبی تونل ۳۰ کیلومتر است که در دو قطعه مجزا و با استفاده از روش مکانیزه به وسیله ماشین حفار تمام مقطع (TBM) حفر شد. منطقه مورد مطالعه از دید موقعیت زمین‌ساختی، در پهنه البرز مرکزی جای دارد و بنابراین

می‌توان انتظار داشت که با پیچیدگی‌های زمین‌ساختی ناشی از عملکرد گسل‌های رورانده روبه‌رو باشد. موقعیت تونل در شکل ۳ نشان داده شده است. گسل پورکان وردیج اصلی‌ترین گسل منطقه است که سبب ورود آب بیش از ۲۰۰ لیتر بر ثانیه در توف‌های کرج شد. تداوم آب ورودی به تونل در توف‌های کرج قابل‌توجه بود. اثرات خشک‌شدگی ناشی از ورود آب به تونل به بیش از ۲ کیلومتر نیز رسید. در ناودیس ارنگه در انتهای مسیر آب ورودی به تونل افزایش قابل توجهی یافت.



شکل ۲- تأثیر ورود آب زیرزمینی به تونل و کاهش نرخ حفاری.



شکل ۳- موقعیت تونل انتقال آب کرج.

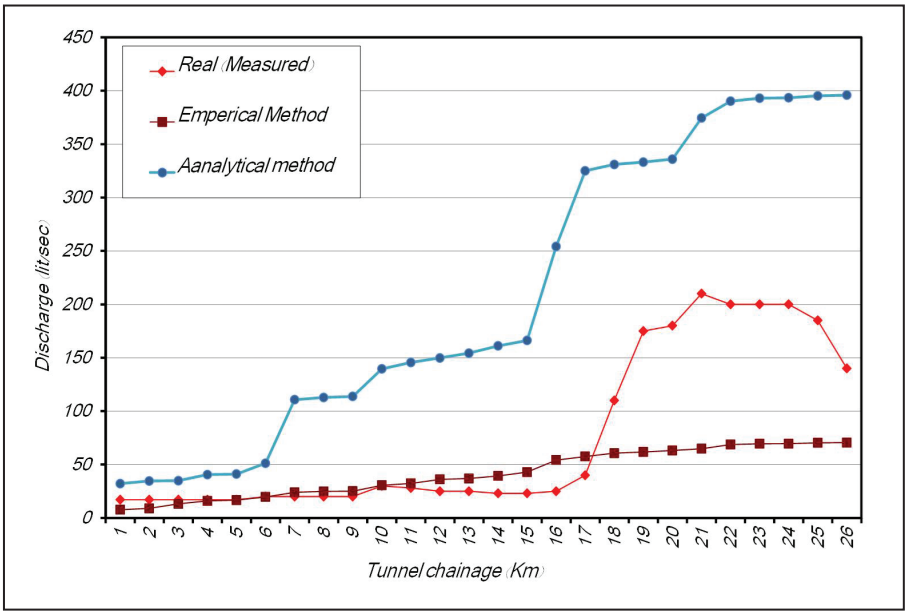
۵- بحث

عوامل مؤثر بر میزان آب ورودی به تونل شامل هدایت هیدرولیکی، بار آبی، شعاع تونل، ستبرای آبخوان، ضریب ذخیره و ژرفای تونل هستند. مهم‌ترین عامل مؤثر در میزان آب نفوذی به تونل، نفوذپذیری توده سنگی است. نفوذپذیری یک توده سنگی می‌تواند از مکانی به مکان دیگر تغییرات زیادی پیدا کند. دقیق‌ترین راه اندازه‌گیری نفوذپذیری آزمایش پمپاژ است. در این آزمایش باید به پراکندگی مناسب پیزومترهای پیرامون چاه پمپاژ توجه شود. متأسفانه انجام این آزمایش با محدودیت‌هایی همچون هزینه‌بر بودن روبه‌رو است (Heuer, 2001). در پروژه‌های عمرانی، رایج‌ترین روش اندازه‌گیری نفوذپذیری، آزمایش‌های فشار آب است. این روش این برتری را دارد که اقتصادی است و می‌توان آن را در گمانه‌های اکتشافی انجام داد. آزمایش فشار آب یا لوژن (Lugeon, 1933) برای برآورد میدانی هدایت هیدرولیکی به کار برده می‌شود. طی آزمایش لوژن ضریب نفوذپذیری میانگین در طول مورد آزمایش درون گمانه ارزیابی می‌شود. این ضریب نفوذپذیری تحت تأثیر ویژگی‌های ساختاری همانند درزه‌های با بازشدگی زیاد قرار دارد و هیچ گونه جهت‌یابی فضایی ندارد (Illman et al., 2003). داده‌های آزمایش لوژن برای تعیین هدایت هیدرولیکی و اطلاعات جریان سیال در مقاطع مختلف نزدیک گمانه استفاده می‌شود. نفوذپذیری به دست آمده توسط آزمایش‌های فشار آب، نفوذپذیری واقعی

توده سنگ نیست بلکه یک نفوذپذیری معادل است. برای برآورد نفوذپذیری توده سنگ، بیش از ۱۰۰ آزمایش لوژن در ۱۵ گمانه در طول مسیر تونل انجام شد. اگر چه این تعداد آزمایش برای تعیین دقیق نفوذپذیری کافی نیست؛ ولی می‌تواند دید کلی از نفوذپذیری توده‌های سنگی مسیر به دست دهد. مقادیر نفوذپذیری به دست آمده از مطالعات میدانی با استفاده از شرایط درزه‌ها و چشمه‌ها، مقدار و توزیع نشت آب‌ها و موقعیت زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی، بیش از حد معمول برآورد شد. ژرفای زیر آب زیرزمینی به دلیل رشد فزاینده فشار لیتواستاتیک که موجب بسته شدن درزه‌ها می‌شود؛ عامل تأثیرگذار مهمی در هدایت هیدرولیکی توده‌های سنگی است. بر پایه داده‌های آزمایش لوژن و شرایط آب‌زمین‌شناختی سنگ‌های آذرآواری بلوکی و درزه‌دار، نفوذپذیری سنگ‌های پیرامون تونل در حدود ۰/۰۰۰۰۰۱ تا ۰/۰۰۰۰۰۰۰۱ متر بر ثانیه برآورد شد.

عامل اصلی دیگر مؤثر در ورود آب به تونل، بار آبی روی محور تونل است. این عامل نیز با استفاده از گمانه‌های مسیر تونل و شرایط آب‌زمین‌شناختی برآورد می‌شود. بار آبی مؤثر معمولاً کمتر از بار آبی مشاهداتی در گمانه‌هاست (Morsali et al., 2017). در روابط برآوردی جریان پایدار فرض شده است؛ اما در شرایط واقعی، زمانی که ورود آب به تونل رخ می‌دهد، تراز آب زیرزمینی شروع به افت می‌کند. این مسئله در تونل نوسود و تونل کرمان به روشنی دیده شد.

برای برآورد آب ورودی به تونل، مسیر تونل کرج به ۲۶ پهنه آب‌زمین‌شناسی بر پایه بار آبی و نفوذپذیری تفکیک شد. هر پهنه دارای یک بار آبی و نفوذپذیری منحصر به خود است. حجم کل آب ورودی به تونل بر پایه روش‌های تحلیلی ۳۹۵ و بر پایه روش تجربی حدود ۷۰ لیتر بر ثانیه به دست آمد. آب ورودی محاسباتی به تونل بر پایه روش تحلیلی و تجربی به همراه آب ورودی به تونل واقعی اندازه‌گیری شده در شکل ۴ نمایش داده شده‌اند. آب ورودی به تونل به‌صورت روزانه اندازه‌گیری شد (شکل ۵).



شکل ۴- مقادیر ورودی واقعی و برآوردی آب ورودی به تونل.

شکل ۵- الف) حجم آب ورودی به تونل کرج در محل پرتال؛ ب) ورود آب به تونل از میان سگمنت‌ها.

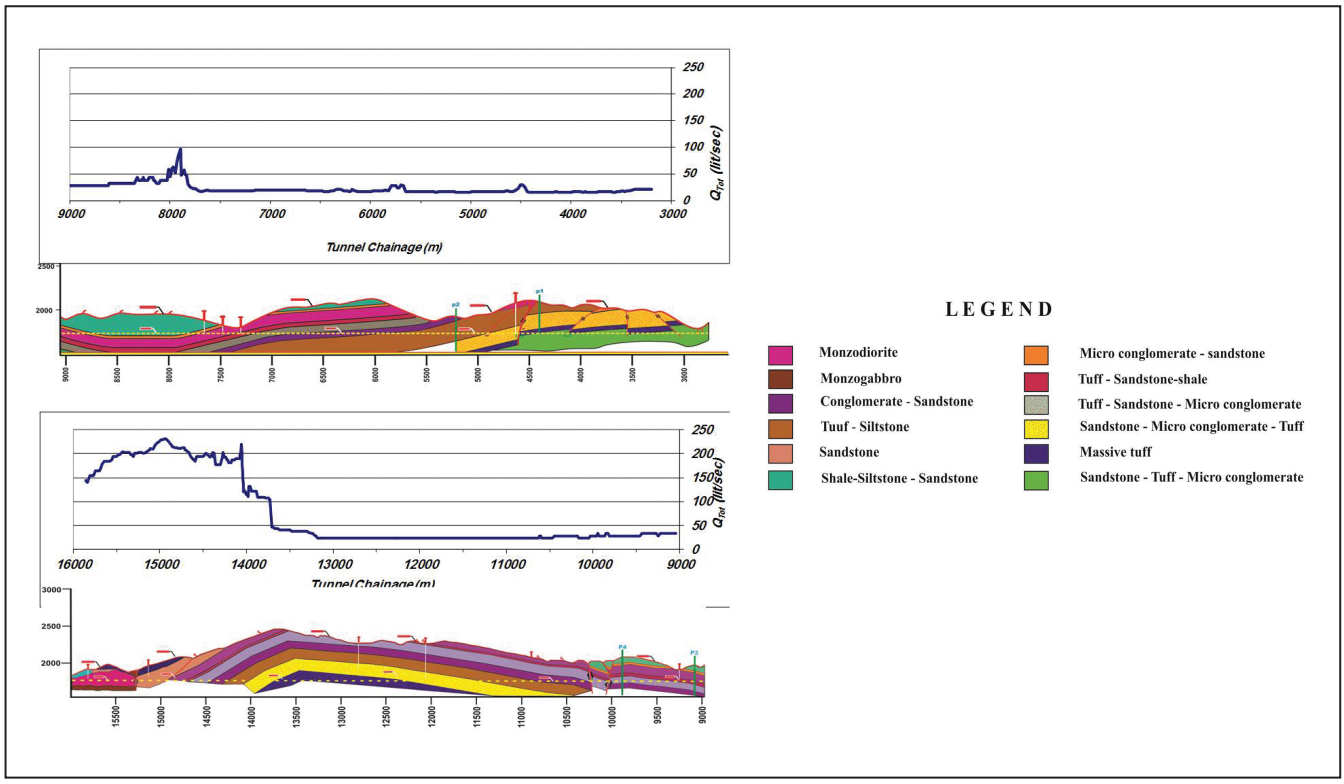
مجموع آب ورودی به تونل در سینه کار تونل و ورودی از راه سگمنت‌ها به‌عنوان ورود آب به تونل در نظر گرفته می‌شود. همچنین مقادیر واقعی آب ورودی به تونل به همراه نیمرخ زمین‌شناسی مسیر تونل در شکل ۶ ارائه شده است. پیش از متراژ ۱۳۵۰۰، همه مقادیر واقعی ورود آب به تونل، کمتر از برآوردها هستند. اما با ورود آب قابل توجه به تونل، عدد آب واقعی ورودی به تونل میان روش‌های تحلیل و روش‌های تجربی قرار گرفت. در مجموع مقدار آب ورودی به تونل هیچ‌گاه بیشتر از روش‌های تحلیلی نشد. روند افزایش آب واقعی ورودی به تونل با روش تحلیلی مشابهت بیشتری نشان می‌دهد. ضریب انطباق هر دو روش قابل قبول هستند. ارتباط میان روش تجربی و داده‌های واقعی و روش‌های تحلیلی و داده‌های واقعی توسط دو رابطه نمایی دیده می‌شود. این روابط می‌توانند به عنوان یک شاخص در شرایط زمین‌شناسی و آب‌زمین‌شناسی مشابه مورد توجه قرار گیرند و به کار آیند (شکل ۷).

چنان‌که گفته شد؛ بار آبی و نفوذپذیری مهم‌ترین عوامل دخیل در روابط تحلیلی و تجربی برای برآورد آب ورودی به تونل هستند. هر چند این عوامل بسیار مهم هستند اما کافی نیستند. باید ارتباط میان درز و شکاف‌ها در محدوده بالایی تونل مد نظر قرار گیرد. برای نمونه در کیلومتر ۶ تا ۷ تونل کرج بر پایه 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.

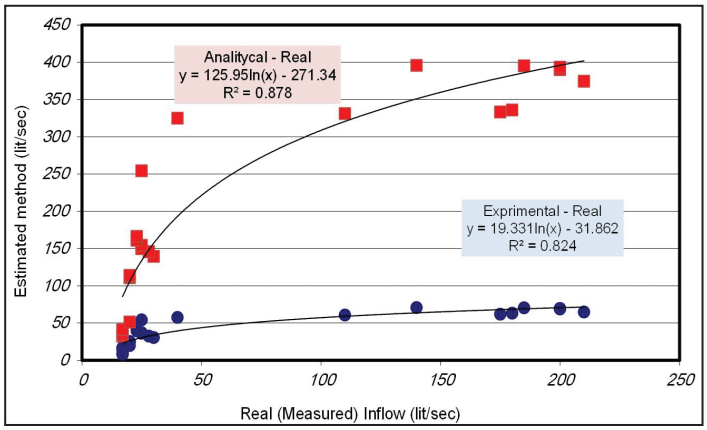
اما در واقعیت و در هنگام ورود آب به تونل بسیار کم بود. همچنین در کیلومتر ۱۱ تا ۱۳، ورود آب به تونل حدود ۱۵۰ لیتر بر ثانیه برآورد و ورود آب به تونل کمتر از ۲۵ لیتر بر ثانیه اندازه‌گیری شد. موارد مشابه این مسئله در دیگر جاها هم دیده شد. زمانی که ارتباط میان شکستگی وجود نداشته و یا ضعیف باشد، سبب پایین آمدن نفوذپذیری کل توده سنگ می‌شود (حتی اگر نفوذپذیری جزبه‌جز بالا باشد). همین مسئله نه تنها در نفوذپذیری بلکه در بار آبی مؤثر هم تأثیرگذار است. بنابراین باید نقش بار آبی در این گونه مواقع کاهش یابد.

در مسیر تونل کرج، دره وردیج و دره هلوپر دو ناحیه از مناطق اصلی هستند که آب ورودی به تونل کرج قابل توجه شد. در این نواحی ورود آب به تونل بسیار بیشتر از حجم پیش‌بینی‌شده بود. برخی از ساختارهای زمین‌شناسی همچون چین‌خوردگی‌ها نقش بسزایی در این حجم آب ورودی به تونل دارند.

در مسیر تونل کرج، منطقه وردیج یک ناودیس با ترکیب سنگی میکروبرش و منطقه هلوپر یک تاقدیس با ترکیب سنگی آذرآواری است. در دیگر نواحی این ترکیب سنگی‌ها وجود دارند؛ اما هجوم آب به تونل وجود ندارد. بنابراین ساختارهایی همچون تاقدیس‌ها و ناودیس‌ها نقش قابل توجهی در ورود آب به تونل‌ها دارند. بیشتر ورود آب به تونل کرج مرتبط با ساختارهایی همچون چین‌ها، گسل‌ها، دایک‌ها و درزه‌های باز بود.



شکل ۶- مقدار آب ورودی به تونل به همراه نیمرخ زمین‌شناسی.



شکل ۷- ارتباط میان روش‌های تحلیلی و تجربی با مقدار واقعی آب ورودی به تونل در مسیر تونل کرج.

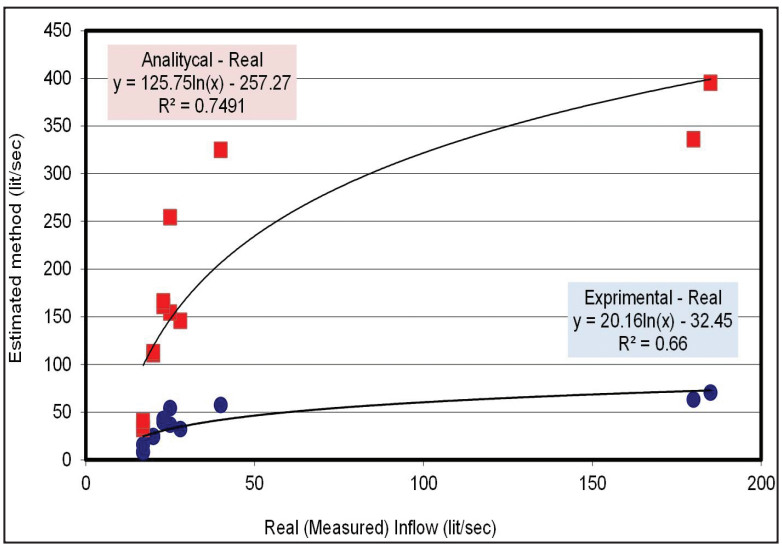
گسل‌ها و دایک‌ها (به ویژه گسل‌ها) به‌عنوان ساختارهای زمین‌شناسی در ورود آب زیرزمینی به تونل کرج، نقش بسزایی داشته‌اند. شرایط آب‌های زیرزمینی به ویژه در پهنه‌های گسلی اهمیت بالایی در تونل‌سازی دارد (Shrestha and Panthi, 2014). Nilsen (2014) مطرح کرد که گمانه‌های پیشرو و پیش تزریق تأثیرات بسیاری در آب ورودی به تونل دارند. سنگ‌های نفوذی همچون دایک‌ها، کنترل کننده جریان آب‌های زیرزمینی هستند و این مسئله باید مورد توجه برآورد آب ورودی به تونل قرار گیرد (Sabale and Meshram, 2012). Mabee et al. (2002) نشان دادند که بیشتر پهنه‌های ورود آب به تونل منطبق با تراکم خطواره‌هاست.

افزون بر نرخ جریان و گرانروی سیال تزریق، موقعیت هندسی شکستگی‌ها، بازشدگی شکستگی، سیمان شکستگی و ... از جمله متغیرهای کلیدی مؤثر بر سازوکار جریان سیال در توده سنگ‌های شکاف‌دار طبیعی هستند (Dehghan et al., 2015). درزه‌های مجاور تونل‌ها ورود آب به تونل‌ها را کانالیزه می‌کنند (Fernandez and Moon, 2010).

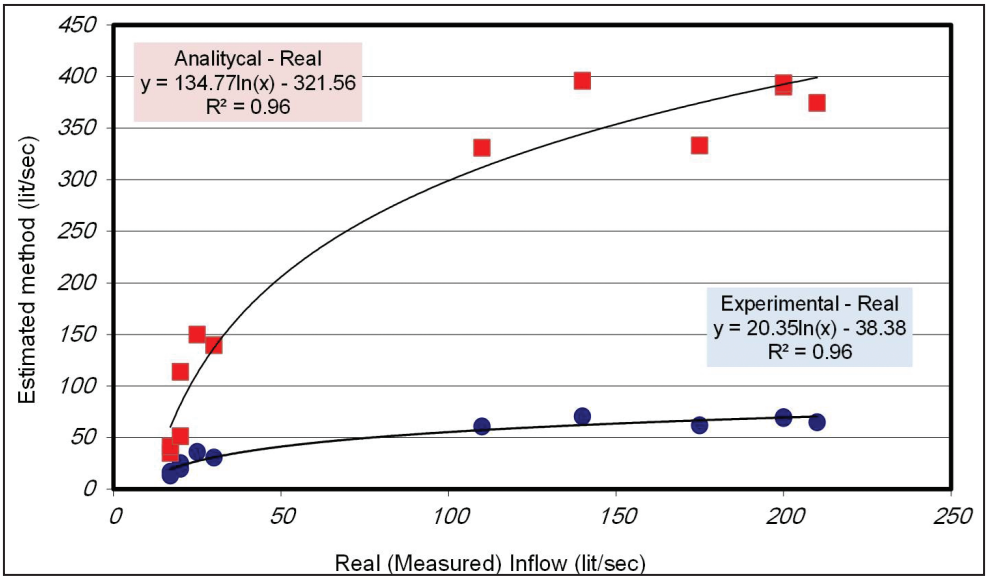
دایک‌ها می‌توانند سد یا مجاری آب باشند. بسته به شکستگی‌ها و جنس دایک‌ها، دایک‌های دولریتی، رس‌های مونت‌موریلونیتی تشکیل می‌دهند و سد ایجاد می‌کنند. دایک‌های شکستگی‌دار هم می‌توانند به عنوان مجاری آب رفتار کنند. ساختارهایی همچون دایک‌ها به دلیل نفوذپذیری متفاوت از عوامل کنترل کننده آب‌های زیرزمینی در مسیر تونل‌ها هستند (Sabale and Meshram, 2012). سنگ‌های درونی همچون مونزوگابرو و مونزودیوریت در مسیر تونل کرج به‌صورت دایک در سنگ‌های آذرآواری سازند کرج نفوذ کرده‌اند. در این سنگ‌ها فضای میان کانی‌های بلورین کوچک می‌شود. از سوی دیگر شمار آنها نیز کمتر و همچنین غیر مرتبط با هم می‌شوند. بنابراین تخلخل در این نواحی پایین می‌آید. این دایک‌ها تنها در مواقعی که شکاف‌دار شوند می‌توانند آب کمی را عبور دهند. بنابراین دایک‌ها در بسیاری مواقع می‌توانند به عنوان یک سد زیرزمینی رفتار کنند. در تونل کرج در برخی مواقع پیش از برخورد به دایک‌ها و در برخی از مواقع پس از برخورد به آنها آب ورودی به تونل افزایش یافت. این مسئله به روشنی نقش سدمانند دایک‌ها را در مسیر تونل نشان می‌دهد. Font-Capo (2012) هم اشاره به این دارد که دایک‌ها نقش سد دارند و پس از حفاری دستگاه از دایک‌ها آب ورودی به تونل افزایش یافته است. از سوی دیگر در تونل انتقال آب کرمان دایک‌ها عکس نقشی را ایفا می‌کنند که در تونل کرج داشتند. به آن معنا که دایک‌ها دارای شکستگی‌های فراوانی بودند و در زمان حفاری در محدوده دایک‌ها نسبت به پیش و پس از آن، آب بیشتری وارد تونل شد. بنابراین دایک‌ها می‌توانند نقش دوگانه‌ای ایفا کنند که این مسئله باید مورد توجه قرار گیرد. دو رویکرد اصلی در رویارویی با پیش‌بینی جریان آب به تونل و گسل‌ها وجود دارد. دسته اول از راه تعیین نفوذپذیری و با استفاده از روابط تجربی و تحلیلی سعی در برآورد آب ورودی به تونل داشته‌اند. پژوهش‌هایی نیز که روی جنبه‌های کمی تغییرات نفوذپذیری در عرض پهنه گسلی انجام شده است (Wibberley and Shimamoto, 2002)؛ در راستای این چنین بررسی‌ها به شمار می‌آیند. دسته دوم سعی در برقرار کردن ارتباط میان ساختارهای زمین‌شناسی روی جریان آب به تونل کرده‌اند (Zarei et al., 2011). شکل ۸ نمایشگر مقادیر آب واقعی و پیش‌بینی شده در پهنه‌های آب‌زمین‌شناختی با شرایط خاص زمین‌شناسی همچون گسل‌ها و چین‌خوردگی‌هاست و شکل ۹ پهنه‌هایی با شرایط آب‌زمین‌شناختی عادی و بدون پدیده‌های یاد شده را نشان می‌دهد. چنان‌که ملاحظه می‌شود، همبستگی در پهنه‌های آب‌زمین‌شناختی عادی بسیار بیشتر از پهنه‌های خاص است. بنابراین روابط یاد شده در مناطق آب‌زمین‌شناختی عادی اعتبار بیشتری در مقایسه با مناطق گسلی و دارای چین‌خوردگی دارند. این مسئله به پیچیدگی جریان آب در سازندهای سخت مرتبط است که زمانی که ساختارهای زمین‌شناسی نیز به آن افزوده می‌شود؛ پیچیدگی‌ها افزایش می‌یابد و پیش‌بینی‌ها مشکل‌تر می‌شود.

مقدار شیب لایه‌های زمین‌شناسی نیز عامل مهمی در ورود آب زیرزمینی به تونل است. زمانی که شیب لایه‌ها ۳۰ تا ۴۰ درجه (متراژ ۱۳۵۰۰ تا ۱۵۰۰۰) بود؛ آب ورودی به تونل حدود ۱۰۰ لیتر بر ثانیه شد. این عدد در برابر آب ورودی به تونل در لایه‌های تقریباً افقی در متراژهای حدود ۱۱۰۰۰ تا ۱۳۵۰۰ بسیار کم است. زمانی که شیب لایه‌ها بیشتر از ۳۰ تا ۴۰ درجه باشد؛ ورود آب به تونل عملاً بیشتر از حالت افقی است. بنابراین باید بحث شیب لایه‌ها به نوعی در روابط وارد شود. برای نمونه با افزایش شیب لایه‌ها، مقدار بار آبی مؤثر افزایش می‌یابد.

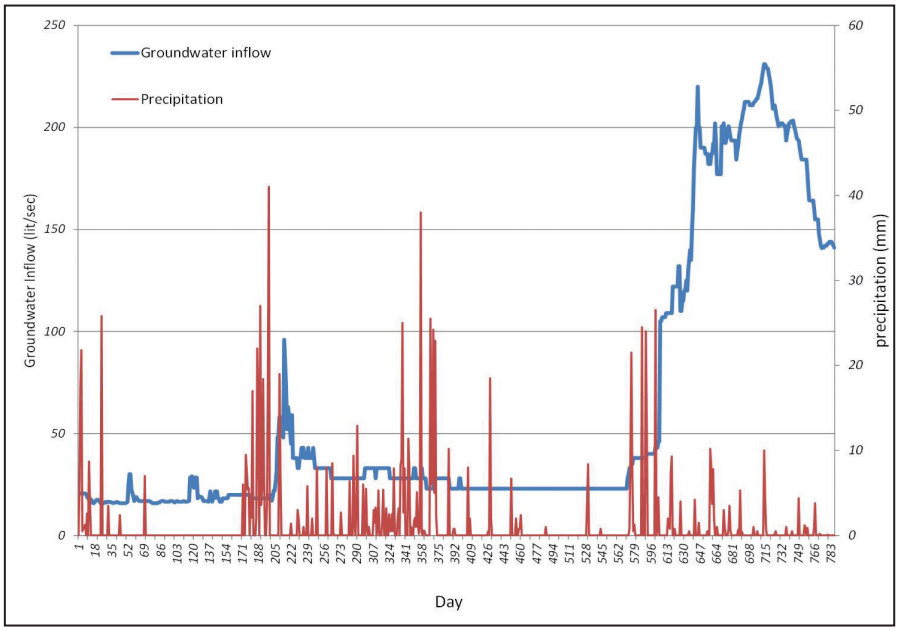
عامل دیگری که در روابط برآوردها دیده نشده؛ مقدار بارندگی است. تغییرات آب‌وهوایی و بارندگی‌ها، نقش قابل توجهی در ورود آب به تونل دارند. ورود آب به تونل در سنگ‌های یکسان در فصول مختلف متفاوتی است. تغییرات آب‌وهوایی و زمان حفاری متغیر هستند؛ اما روش‌های برآورد متغیر نیستند. مطابق شکل ۱۰ بیشترین آب ورودی به تونل منطبق با فصل‌های زمستان و بهار بوده است. اگر چه بارندگی‌ها سبب افزایش بار آبی خواهند شد؛ اما مقدار افزایش بار آبی با افزایش آب ورودی به تونل متناسب نیست.



شکل ۸- رابطه میان روش‌های تحلیلی و تجربی در پهنه‌های هیدروژئولوژیکی با شرایط خاص زمین‌شناسی.



شکل ۹- رابطه میان روش‌های تحلیلی و تجربی در پهنه‌های هیدروژئولوژیکی عادی.



شکل ۱۰- ارتباط میان بارندگی و ورود آب به تونل.

۶- نتیجه‌گیری

برآورد صحیح آب ورودی به تونل اهمیت فراوانی در پروژه‌های تونلی دارد. روش‌های تحلیلی (گودمن، لی، لومباری، کالسرود و التانی) و تجربی (هوئر) زیادی برای برآورد ورود آب به تونل وجود دارد. همه این روش‌ها بر پایه دو عامل اصلی نفوذپذیری و بار آبی استوار است. برآورد این عامل‌ها مشکل است و به راحتی امکان‌پذیر نیست. پس از حفاری تونل انتقال آب کرج، روش‌های پیش‌بینی و اندازه‌گیری‌های واقعی مقایسه شدند. تا زمانی که آب ورودی به تونل کم بود؛ روش‌های تجربی به واقعیت نزدیک‌تر بودند و از درستی قابل‌قبول‌تری داشتند. با افزایش آب ورودی به تونل روند روش‌های تحلیلی با واقعیت تطابق بیشتری نشان داد. از سوی دیگر درستی برآوردها در پهنه‌های آب‌زمین‌شناختی با شرایط خاص زمین‌شناسی همچون گسل‌ها، تاقدیس‌ها و ناودیس‌ها، کمتر از پهنه‌های آب‌زمین‌شناختی بدون این شرایط به دست آمد. علت این امر افزایش پیچیدگی‌های جریان آب در محیط سازندهای سخت است. سو و مقدار شیب لایه‌ها نیز با وجود آنکه در روش‌های تحلیلی و تجربی دیده نشده؛ در مقدار آب ورودی به تونل مؤثر است. با افزایش مقدار شیب لایه‌ها، ورود آب به تونل در شرایط مشابه افزایش یافته است. همچنین ورود آب به تونل در بسیار از مواقع با بارندگی‌ها ارتباط قابل‌توجهی را نشان می‌دهد. بنابراین با در نظر گرفتن موارد یاد شده، می‌توان برآورد دقیق‌تری از پیش‌بینی آب ورودی به تونل به دست آورد.

References

Ameli, A., 2006- Estimation of water inflow into a tunnel during construction, Tunnelling Association of Canada Proceedings.

Brassington, F. C., 1986- the inter-relationship between changes in groundwater conditions and engineering construction, Quarterly Journals of Engineering Geology and Hydrogeology.

Cesano, D., Bagtzoglou, A. C. and Olofsson, B., 2003- Quantifying fractured rock hydraulic heterogeneity and groundwater inflow prediction in underground excavations: the heterogeneity index, Tunnelling and Underground Space Technology 18 2003, 19–34.

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 2011, 19: 651–669.

Coli, N., Pranzini, G., Alfi, A. and Boerio, V., 2008- Evaluation of Rock-Mass Permeability Tensor and Prediction of Tunnel Inflows By Means Of Geostructural Surveys and Finite Element, Engineering Geology, Engineering Geology, 02812; No of Pages 11.

Custodio, E. and Llamas, M. G., 2005- Idrologia sotterranea, Dario Flaccovio Editore.

Dehghan, A. N., Goshtasbi, K., Ahangari, K. and 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.

Dematttis, A., Kalamaras, G. and Eusebio, A., 2005- A system approach for evaluating spring drawdown due to tunneling, Progress in tunneling, Milan, Italy.

El Tani, M., 2003- Circular tunnel in a semi-infinite aquifer, Tunnelling and Underground Space Technology 18, 49–55.

Fernandez, G. and 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.

Font-Capo, J., 2012- Interaction between groundwater and TBM Tunnel Boring Machine, excavated tunnels, Ph.D. Thesis, Department of Geotechnical engineering and Geosciences, Universitat Politecnica de Catalunya, UPC-BarcelonaTech.

Freeze, R. A., and Cherry, J. A., 1979- Groundwater, Prentice-Hall, Englewood cliffs, New Jersey.

Frough, O., Torabi, S. R. and 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.

Gattinoni, P. and Scesi, L., 2010- An analytical equation for tunnel inflow assessment: application to sedimentary rock masses. Hydrogeology journal. 15, 201-211.

Goodman, R. E., Moye, D. G., Van Schalkwyk, A. and Javandel, I., 1965- Ground water inflows during tunnel driving. Bull. Ass. Eng. Geologists 2, 35–56.

Hassanpour, J. and Rostami, J., 2010- Predicting TBM performance in second lot of Karaj Water Conveyance Tunnel KWCT,, Rock Engineering in Difficult Ground Conditions – Soft Rocks and Karst – Vrkljan ed,©2010 Taylor & Francis Group, London.

Heuer, R., 2001- Estimating Rock tunnel water inflow. Geotechnical consulting McHenry.

Illman, W. A., Neuman, S. P., Vesselinov, V. and Guzman, A. G., 2003 Strong evidence for permeability scale effect in fractured rock, Groundwater Engineering – Recent Advances, Kono, Nishigaki & Komatsu eds,, Swets & Zeitlinger, Lisse, ISBN 90 5809 395 9.

Kaneshiro, J. and Schmidt, B., 1995- Fracture and shatter zone inflow into hard rock tunnels Case histories, Balkema, Rotterdam. Permission to Distribute - American Rock Mechanics Association.

Karlsrud, K., 2001- Water control when tunneling under urban areas in the Olso region. NFF publication No. 12, 4, 27–33, NFF.

Kolymbas, D. and Wagner, P., 2007- Groundwater ingress to tunnels – The exact analytical solution, Tunnelling and Underground Space Technology Volume 22, Issue 1, January 2007, Pages 23-27.

Lachassagne, P., Marechal, J., Bienfait, P. and 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.

Lee, I. M. and Nam, S. W., 2001- the study of seepage forces acting on the tunnel lining and tunnel face in shallow tunnels, Tunneling and Underground Space Technology 16 (2001). 31_40.

Li, D., Lia, X., Lib, C., Huanga, B., Gongaand, F. and Zhang., W., 2008- Case Studies Of Groundwater Flow Into Tunnels And An Innovative Water-Gathering System For Water Drainage, Tunnelling And Underground Space Technology, Volume 24, Issue 3, May 2009, Pages 260-268.

Liebel, H. T., Huber, K., Frengstad, B. S., Ramstad, R. K. and Brattli, B., 2012- Thermal response testing of a fractured hard rock aquifer with and without induced groundwater flow, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, ISSN 1435-9529, E-ISSN 1435-9537, Vol. 71, no 3, 435-445 p.

Liu, J., Elsworth, D. and Brady, B., 1997- Analytical evaluation of post excavation hydraulic conductivity field around a tunnel, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. Vol. 34, No. 3-4, 1997 ISSN 0148-9062.

Lo Russo, S. T., Gnavi, L. and 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.

Lombardi, G., 2002- Private communication.

Lugeon, M., 1933- Barrages ET géologie. Dunod, Paris.

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 & Power Resources Development Company.

Mirmehrabi, H., Hassanpour, J., Morsali, M. and 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. and 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.

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.

Morsali, M., Nakhaei, M., Rezaei, M., Hassanpour, J. and Nasery, H., 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.

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.

Park, K., Owatsiriwong, A. and Lee, J., 2008- Analytical solution for steady-state groundwater inflow into a drained circular tunnel in a semi-infinite aquifer: A revisit, Tunneling and Underground Space Technology 21 2008, 420.

Raymer, J. H., 2005- groundwater inflow into hard rock tunnels: a new look at inflow equations, RETC proceeding.

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.

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].

Shrestha, P. K. and Panthi, K. K., 2014- Groundwater effect on faulted rock mass: an evaluation of Modikhola pressure tunnel in the Nepal Himalaya, Tunneling and Underground Space Technology, 26:364-373.

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.

Tseng, D. R., Tsai, B. R. and Chang, L. C., 2001- a case study on ground treatment for a rock tunnel with high groundwater ingression in Taiwan, Tunnelling and Underground Space Technology 16 Ž2001. 175_183.

Wenner, D. and Wannenmacher, H., 2009- Alborz Service tunnel in Iran: TBM tunnelling in difficult ground conditions and its Solutions, Amberg Engineering Ltd., 1st Regional and 8th Iranian Tunneling Conference, Tehran, Iran.

West, G., 1983- Comparisons between real and predicted geology in tunnels: examples from recent cases, Quarterly Journals of Engineering Geology and Hydrogeology.

Wibberley, Ch. and Shimamoto, T., 2002- Internal structure and permeability and of major strike-slip fault zone: the median tectonic line in Mie prefecture, southwest Japan, Journal of Structural Geology 25, 59, 78.

Yang, F., Lee, C., Kung, W. and Yeh, H., 2009- the impact of tunneling construction on the hydrogeological environment of Tseng-Wen Reservoir Transbasin Diversion Project" in Taiwan, Engineering Geology, vol.101, pp. 39-58.

Yoo, C., 2004- Interaction between tunnelling and groundwater, Tunnelling and Underground Space Technology 19 2004, 523–524.

Yudan, J., Ranjith, P., Verma, A., Choi, S. and 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. and 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.

Zareifard, M. and Fahimifar, A., 2014- Effect of seepage forces on circular openings excavated in Hoek–Brown rock mass based on a generalised effective stress principle, European Journal of Environmental and Civil Engineering.

The comparison of effective variables and methods in water inflow into hard rock tunnels (Case study: Karaj dam-Tehran water conveyance tunnel)

M. Morsali[1*], M. Nakhaie[2], M. Rezaie[2], H. R. Naseri[3] and J. Hassanpour[4]

[1]Ph.D., Faculty of Earth Science, Kharazmi University, Tehran, Iran

[2]Associate Professor, Faculty of Earth Science, Kharazmi University, Tehran, Iran

[3]Professor, Faculty of Earth Science, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

[4]Assistant Professor, Faculty of Geology, College of Science, Tehran University, Tehran, Iran

Received: 2017 January 17 Accepted: 2017 June 11

Abstract

Tehran- Karaj water conveyance tunnel (part 1), 16 kilometers in length, in the Karaj formation was excavated in order to convey the water from the Amir-Kabir dam to the Tehran refinery plant. The hydrogeology studies of the Karaj tunnel were done to discover the affecting parameters on the groundwater inflow into the tunnel. Groundwater inflow was estimated by means of empirical and analytical methods. Daily measurements of inflow rate show that there are some differences between the calculated and the observed inflow value. In this research, based on the comparison between the observed and calculated groundwater inflow, some relations have been derived for similar hydrogeological conditions. In many hydrogeological conditions, the analytical equations are supervised on empirical formula. According to this research, addition to permeability and water head; geological structure, Precipitation and bedding dip have a significant effect in water inflow into tunnels. Also, most of groundwater inflow along the Karaj tunnel is largely related to the main geological features, such as folds, faults, dykes and open fractures and inflow is correlated with precipitation.

Keywords: Groundwater inflow, Empirical and analytical methods, Hydrogeological parameters, Geological structures, Tunnel, Iran

For Persian Version see pages 113 to 122

*Corresponding author: M. Morsali; E-mail: massoud.morsali@gmail.com

Created with nitroPDF professional
download the free trial online at nitropdf.com/professional