

ارزیابی دقت روش‌های تجربی و تحلیلی در برآورد آب ورودی به تونل‌های در حال حفر در محیط‌های سنگی (مطالعه موردی: قطعه دوم تونل زاگرس - کرمانشاه)

حمیدرضا ناصری^۱، نرگس بیات^{۲*}، فرشاد علیجانی^۳، مهدی عباسی^۴

۱- استاد گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۲- پژوهشگر پسادکتری هیدروژئولوژی، گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۳- استاد گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۴- کارشناس ارشد زمین‌شناسی شرکت ایمن سازان، تهران، ایران.

دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۰؛ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰

*نویسنده مسئول: nbayat87@yahoo.com

چکیده

برآورد دقیق میزان جریان آب زیرزمینی ورودی به تونل‌ها نقش مهمی در کاهش مخاطرات ژئوتکنیکی، ناپایداری و اثرات زیست‌محیطی دارد. در این پژوهش، میزان جریان آب زیرزمینی ورودی به قطعه دوم تونل زاگرس، به طول ۱۷/۴ کیلومتر در حد فاصل رودخانه کردی‌قاسمان تا خروجی تونل در روستای ازگله، با استفاده از روش‌های تحلیلی و تجربی برآورد شد. نتایج محاسبات با دبی واقعی آب ورودی به تونل که در بخش‌های مختلف اندازه‌گیری شده بود، مقایسه و دقت روش‌ها ارزیابی گردید. نتایج نشان داد هم‌بستگی بین دبی اندازه‌گیری شده و دبی محاسباتی با روابط تحلیلی حدود ۱۴ درصد و با رابطه تجربی هیوور حدود ۶۹ درصد است. توزیع نامناسب گمانه‌های اکتشافی، خطا در تعمیم نتایج و عدم توجه به توسعه هیدرولیکی لایه‌ها از عوامل اصلی بروز خطا در برآوردها بودند. همچنین، شرایط زمین‌شناسی پیچیده و ویژگی‌های هیدروژئولوژیک پهنه‌های خردشده، گسله و کارستی موجب برآورد نادرست هدایت هیدرولیکی معادل توده‌سنگ و در نتیجه اختلاف قابل توجه بین مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی جریان آب شد. نتایج نشان می‌دهد روش‌های تحلیلی و تجربی به‌ویژه در پهنه‌های گسله و کارستی از دقت کافی برخوردار نیستند و لازم است علاوه بر بار و هدایت هیدرولیکی، پارامترهایی نظیر بارندگی، ساختارهای زمین‌شناسی، تغییرات لیتولوژیک و جهت جریان آب زیرزمینی نیز در برآورد جریان آب ورودی به تونل‌ها لحاظ شود.

جریان ورودی به تونل، روش‌های تحلیلی و تجربی، هدایت هیدرولیکی، تونل زاگرس.

واژگان کلیدی

۱- مقدمه

از اساسی‌ترین مسائل در مهندسی تونل است، زیرا دبی‌های بالای می‌توانند موجب بروز مشکلات اجرایی، افزایش مخاطرات ژئوتکنیکی و تأخیر در برنامه حفاری شوند [۲]. در دهه‌های گذشته، پژوهشگران متعددی از جمله گودمن و همکاران [۳]، فریز و جری [۴]، لی [۵]، کارلسرود

هنگامی که تونل‌ها در محیط‌های سنگی و در زیر سطح ایستایی حفر می‌شوند، شکستگی‌ها، درزه‌ها و پهنه‌های گسله مسیرهایی برای نشت و ورود جریان آب به داخل تونل فراهم می‌کنند [۱]. پیش‌بینی میزان جریان آب ورودی به تونل یکی

۱- هدایت هیدرولیکی به عنوان مهم‌ترین پارامتر مؤثر در روابط پیش‌بینی به کار گرفته می‌شود، در حالی که تعیین دقیق آن در محیط‌های ناهمگن بسیار دشوار است.

۲- در اغلب معادلات تحلیلی، محیط همگن و ایزوتروپ فرض می‌شود که با شرایط واقعی توده‌سنگ‌های طبیعی سازگار نیست.

اگرچه مدل‌های عددی توانایی تحلیل جریان آب زیرزمینی از طریق ساختارهای زمین‌شناسی را دارند، این مدل‌ها نیازمند داده‌های دقیق و گسترده برای ایجاد مدل مفهومی هستند. با توجه به پیچیدگی ساختارهای زمین‌شناسی، تهیه داده‌های مورد نیاز و توسعه مدل‌های عددی جامع برای هر پروژه تونلی، فرایندی زمان‌بر و پرهزینه است [۲].

به منظور جمع‌بندی و مقایسه مطالعات انجام‌شده در زمینه برآورد جریان آب زیرزمینی ورودی به تونل‌ها، مهم‌ترین پژوهش‌های پیشین، شامل روش‌های تحلیلی، تجربی، عددی و مطالعات ساختاری، به صورت خلاصه در جدول ۱ ارائه شده است. این جدول چارچوب مناسبی برای تبیین جایگاه پژوهش حاضر در میان مطالعات پیشین فراهم می‌کند.

با وجود مطالعات متعددی که تاکنون در زمینه برآورد جریان آب زیرزمینی ورودی به تونل‌ها انجام شده است (جدول ۱)، بخش عمده این پژوهش‌ها مبتنی بر فرض همگنی و ایزوتروپی محیط بوده و اثر ناهمگنی‌های هیدروژئولوژیکی، توسعه هیدرولیکی شکستگی‌ها، کارست‌شدگی و نقش ساختارهای تکنونیک‌کی به صورت کمی و میدانی مورد توجه قرار نگرفته است. همچنین در بسیاری از مطالعات، صحت‌سنجی نتایج محاسباتی با داده‌های واقعی اندازه‌گیری‌شده در طول حفاری تونل‌ها محدود بوده و ارزیابی دقت روش‌های تحلیلی و تجربی در مقاطع با دبی‌های هجومی بالا، به‌ویژه در پهنه‌های گسله و کارستی، به‌طور نظام‌مند انجام نشده است.

در این پژوهش، برای نخستین‌بار در قطعه دوم تونل زاگرس، عملکرد روش‌های تحلیلی و تجربی رایج در برآورد جریان آب زیرزمینی، با استفاده از داده‌های واقعی اندازه‌گیری‌شده در طول حفاری و در مقاطع مختلف تونل، به صورت مقایسه‌ای ارزیابی می‌شود. نوآوری اصلی این مطالعه، بررسی دقت این روش‌ها در شرایط زمین‌شناسی پیچیده

[۶]، التانی [۷،۸] و لومباردی [۹] با استفاده از روش‌های تحلیلی و روابط تجربی نظیر رابطه هیوور [۱۰] به تخمین جریان آب زیرزمینی ورودی به تونل‌ها پرداخته‌اند. زارعی و همکاران [۱۱] با مقایسه نتایج روش‌های تحلیلی و تجربی با مقادیر واقعی اندازه‌گیری‌شده در تونل سمنان نشان دادند که این روش‌ها به‌ویژه در پهنه‌های گسله از دقت کافی برخوردار نیستند.

مطالعات بعدی نیز بر نقش تعیین‌کننده ساختارهای زمین‌شناسی در برآورد جریان آب ورودی به تونل تأکید کرده‌اند. ناصری و همکاران [۱۲] نشان دادند که ارزیابی جریان‌های مقطعی با دبی بالا در تونل‌های سنگی بر اساس ویژگی‌های ساختاری زمین‌شناسی، نسبت به روش‌های صرفاً تحلیلی و تجربی نتایج واقع‌بینانه‌تری ارائه می‌دهد. در همین راستا، پژوهش‌های جدیدتر نیز بیانگر آن هستند که ناهمگنی هیدروژئولوژیکی، پهنه‌های کارستی و گسله و تغییرات مکانی هدایت هیدرولیکی، از عوامل اصلی اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و واقعی دبی ورودی به تونل‌ها محسوب می‌شوند [۱۳-۱۵].

در هنگام حفاری قطعه دوم تونل انتقال آب زاگرس و به‌ویژه در زمان عبور از سازند ایلام، به دلیل تأثیر گسل‌های متعدد، فراوانی درزه‌ها و شکستگی‌ها و همچنین کارست‌شدگی شدید، میزان آب ورودی در برخی مقاطع به بیش از ۱۵۵ لیتر بر ثانیه در متر رسید [۱۶]. اختلاف قابل‌توجه بین مقادیر برآوردشده و دبی واقعی ورودی به تونل را می‌توان ناشی از استفاده از نتایج آزمایش لوژان برای تعیین هدایت هیدرولیکی معادل توده‌سنگ و نیز عدم توجه کافی به ماهیت کارستی سازندهای مسیر تونل دانست. فرناندز و مون [۱۷] نیز نشان دادند که عواملی نظیر ساختارهای زمین‌شناسی، برآورد نامناسب هدایت هیدرولیکی از آزمون لوژان و افت سطح ایستابی، در بسیاری از روابط تحلیلی کلاسیک لحاظ نشده‌اند.

به‌طورکلی، جریان آب ورودی به تونل یکی از پیچیده‌ترین رفتارهای توده‌سنگ پیرامون حفاری‌های زیرزمینی است و به پارامترهای متعددی از جمله نفوذپذیری توده‌سنگ، شرایط هیدروژئولوژیکی و عوامل زیست‌محیطی وابسته است [۱۸]. در پیش‌بینی جریان آب ورودی به تونل‌های سنگی، دو چالش اساسی وجود دارد [۱۰،۱۱]:

شامل سازندهای کارستی، پهنه‌های خردشده و گسله و تحلیل علل اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و واقعی دبی ورودی است. علاوه بر این، اثر محدودیت‌های داده‌های ژئوتکنیکی و هیدروژئولوژیکی، از جمله استفاده از نتایج آزمایش لوژان برای برآورد هدایت هیدرولیکی معادل توده‌سنگ، به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی خطا مورد تحلیل قرار می‌گیرد. نتایج این پژوهش می‌تواند چارچوبی واقع‌بینانه‌تر برای انتخاب و به‌کارگیری روش‌های برآورد جریان آب ورودی به تونل‌ها در محیط‌های ناهمگن و کارستی فراهم آورد. نحوه انجام پژوهش به صورت فلوچارت در شکل ۱ آورده شده است.

جدول ۱- مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه برآورد جریان آب زیرزمینی ورودی به تونل‌ها

مرجع	سال	نوع تونل / منطقه	روش مورد استفاده	نتیجه یا نکته کلیدی
Goodman et al.	۱۹۶۵	تونل‌های سنگی	تحلیلی	نخستین روابط پایه برآورد دبی ورودی
Heuer	۱۹۹۵	تونل‌های سنگی	تجربی	ارائه رابطه تجربی پرکاربرد برای دبی
Lei	۱۹۹۹	تونل دایره‌ای	تحلیلی	حل تحلیلی جریان پایا به تونل
El Tani	۱۹۹۹	تونل‌های سنگی	تحلیلی-تجربی	تحلیل اثر شرایط هیدروژئولوژیک
El Tani	۲۰۰۳	آبخوان نیمه‌نامحدود	تحلیلی	توسعه مدل تونل دایره‌ای
Zarei et al.	۲۰۱۱	تونل سنگی ایران	زمین‌شناسی-هیدروژئولوژی	نقش ساختارهای زمین‌شناسی در دبی بالا
Fernandez & Moon	۲۰۱۰	تونل سنگی	تحلیلی	کاهش هدایت هیدرولیکی اطراف تونل
Cesano et al.	۲۰۰۳	سنگ‌های شکسته	شاخص ناهمگنی	ارتباط ناهمگنی با دبی ورودی
Park et al.	۲۰۰۸	تونل دایره‌ای	تحلیلی	بازبینی حل Lei
ناصری و همکاران	۱۳۹۶	تونل زاگرس	ساختاری	نقش گسل‌ها در هدایت آب
Liu	۲۰۲۳	جریان غیر داریسی	نیمه‌تجربی	اصلاح روابط کلاسیک
Bayat et al.	۲۰۲۴	تونل نوسود	ساختاری-کارستی	اثر کارست و گسل بر دبی
Li et al.	۲۰۲۴	توده‌سنگ یکنواخت	مدل‌سازی دینامیک	پیش‌بینی دبی حین حفاری
Yao et al.	۲۰۲۵	محیط پیچیده	هوش مصنوعی	افزایش دقت پیش‌بینی دبی



شکل ۱- فلوجارت مراحل انجام پژوهش

مسیر تونل سنگ آهک و شیل می‌باشد (شکل ۲). منطقه مورد مطالعه تحت تأثیر حرکات تکتونیکی جوان زاگرس، چین‌خورده است. سطح محوری تاقدیس‌ها و ناودیس‌ها اغلب قائم و امتداد آن‌ها شمال غرب به جنوب شرق است. دو تاقدیس ازگله و کردی قاسمان و ناودیس S5 جز ساختارهایی هستند که آب ورودی به تونل در آنها زیاد بوده است.

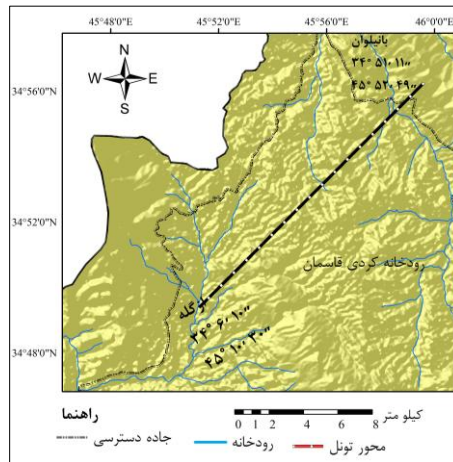
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- روابط تحلیلی در تخمین جریان ورودی به تونل

در روش‌های تحلیلی از قوانین حاکم بر چاه‌ها تبعیت می‌کنند. از آنجایی که تمامی این روش‌ها مبنای تئوریک دارند، نتایج به دست آمده از این روش‌ها بسیار به هم نزدیک می‌باشد. در روش‌های تحلیلی با در نظر گرفتن پارامترهایی نظیر نفوذپذیری توده سنگ، ارتفاع سطح ایستابی و شعاع تونل میزان نفوذ آب به تونل برآورد می‌شود (جدول ۲).

موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی گستره مورد مطالعه

تونل زاگرس بخشی از پروژه تأمین آب دشت‌های گرمسیری غرب کشور است که بخشی از آب رودخانه سیروان را به سمت دشت‌های جنوبی منتقل می‌کند. قطعه دوم تونل با طول ۲۶ کیلومتر در ادامه قطعه اول شروع می‌شود. نقطه شروع حفاری در فاصله تقریبی دو کیلومتری جنوب شرقی بخش ازگله واقع شده است. انتهای تونل در این قطعه نیز در فاصله تقریبی ۳۰۰ متری شمال غربی روستای بانیلوان قرار دارد (شکل ۱). طول بخش حفاری شده از قطعه دوم تونل ۱۷/۴ کیلومتر و قطر آن ۶/۷۳ متر می‌باشد، که به وسیله TBM حفر شده است. تونل زاگرس از میان سنگ آهک‌هایی با شکستگی‌های باز و جریان ورودی بالا عبور می‌کند [۱۹]. بررسی‌ها در طی حفاری تونل نشان داد که جریان‌های هجومی بالا در بخش‌هایی با سازندهای کارستی و شکستگی‌های باز بوده است [۲۰]، عمده لیتولوژی سنگ‌های



شکل ۲ - موقعیت جغرافیایی قطعه دوم تونل زاگرس

جدول ۲- روابط تحلیلی در تخمین جریان ورودی آب زیرزمینی به تونل

توضیحات	رابطه	مرجع
این معادله دارای سه پیش فرض اساسی و اولیه‌ی ذیل است؛ جریان شعاعی، عدم تغییرات قابل توجه لایه‌بندی و اعمال صحیح نفوذپذیری معادل محیط.	$Q = 2\pi K \frac{h}{\ln\left(\frac{2z}{r}\right)}$	گودمن (Goodman et al., 1965) (۱)
این محققین، با جایگزینی Z به جای h در رابطه‌ی (۱) آن را تصحیح نمودند.	$Q = \frac{2\pi Kh}{\ln\left(\frac{2h}{r}\right)}$	فریز و چری (Freeze and Cherry, 1979) (۲)
در این رابطه روش گودمن با اعمال دقیق‌تر شرایط واقعی تصحیح شده است.	$Q = 2\pi K \frac{h}{\ln\left(\frac{h}{r} + \sqrt{\left(\frac{h}{r}\right)^2 - 1}\right)}$	لی (Lei, 1999) (۴)
التانی با بررسی میزان دقت معادلات فوق، رابطه‌ی (۵) را به عنوان یک رابطه‌ی بهینه معرفی نموده است.	$Q = 2\pi K \frac{1 - 3\left(\frac{r}{2h}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{r}{2h}\right)^2\right] \ln\left(\frac{2h}{r} - \left(\frac{r}{2h}\right)^2\right)}$	التانی (El Tani, 1999) (۵)
ترکیبی از رابطه‌ی (۳) و (۱) به منظور کاهش خطا در مورد تونل‌های عمیق و کم عمق (زیر سطح ایستایی) بر اساس مشاهدات میدانی تدوین شده است.	$Q = 2\pi K \frac{h}{\ln\left(\frac{2h}{r} - 1\right)}$	کارلسرود (Karlsruud, 2001) (۶)
در این رابطه روش کارلسرود با اعمال شرایط دقیق‌تر تصحیح شده است.	$Q = 2\pi K \frac{h}{\ln\left(\frac{2h}{r} \left(1 + 0.4\left(\frac{r}{h}\right)^2\right)\right)}$	لومباردی (Lumbardi, 2002) (۷)
در این رابطه التانی با استفاده از روش تغییر شکل مویوس و سری فوریه راه حل تحلیلی جدیدی برای محاسبه جریان به درون تونل‌ها ارائه داده است. که در این رابطه $\lambda = (h/r) - ((h^2/r^2) - 1)^{1/2}$ می باشد	$Q = 2\pi K \frac{\lambda^2 - 1}{\lambda^2 + 1} \frac{\lambda}{\ln \lambda}$	التانی (El Tani, 2003) (۸)
بازبینی و اصلاح روابط تحلیلی کلاسیک برای تونل دایره‌ای زهکشی شده در آبخوان نیمه‌بی‌نهایت.	$Q = \frac{2\pi Kh}{\ln\left(\frac{h}{r} + \sqrt{1 - \left(\frac{h}{r}\right)^2}\right)}$	پارک و همکاران (Park et al., 2008) (۹)
ارائه مدل نیمه‌تحلیلی با در نظر گرفتن جریان غیر دارسی (Non-Darcian) و شعاع تأثیر؛ فرم بسته ساده ندارد ولی روابط صریح ارائه شده‌اند.	$Q = f(K, h, r, n)$	لیو (Liu et al., 2023) (۱۰)

$$Q = \text{میزان نفوذ آب در واحد طول تونل برحسب } (m^3/s/m)$$

$$K = \text{نفوذپذیری معادل در امتداد طول تونل } (m/s)$$

$$r = \text{شعاع تونل } (m)$$

$$h = \text{بار آبی تونل } (m)$$

$$Z = \text{فاصله مرکز تونل تا بالای سنگ } (m)$$

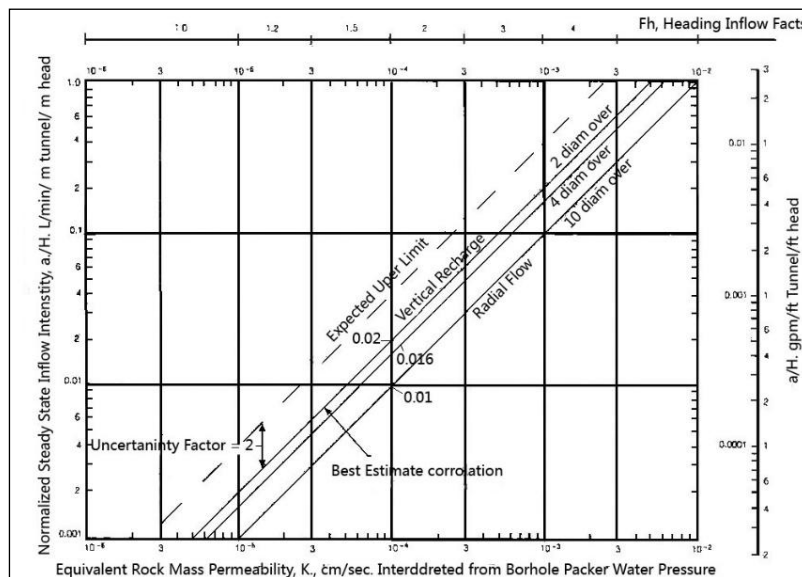
۲-۲- تحلیل داده‌های مورد استفاده در برآورد جریان ورودی به تونل و مقایسه با مقدار مشاهده‌ای

۲-۲-۱- نفوذپذیری

نفوذپذیری معادل توده سنگ اطراف تونل، مهم‌ترین پارامتر مؤثر بر میزان جریان آب ورودی به تونل‌های سنگی محسوب می‌شود. این پارامتر بیانگر توانایی انتقال آب در شبکه شکستگی‌ها، درزه‌ها و فضاهای کارستی توده سنگ بوده و نقش کلیدی در روابط تحلیلی و تجربی برآورد دبی ورودی ایفا می‌کند. در این تحقیق، نفوذپذیری توده سنگ‌ها بر اساس نتایج آزمایش‌های لوژان انجام شده در ۶۰ متر انتهایی گمانه‌های اکتشافی برآورد شده است. نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که تراوایی توده سنگ‌ها در مسیر تونل از بسیار کم تا زیاد متغیر بوده و مقادیر عدد لوژان در بازه صفر تا کمتر از ۴۰ اندازه‌گیری شده است. مقادیر بالای لوژان در محدوده تاق‌دیس‌های ازگله و کردی‌قاسمان بیانگر نفوذپذیری متوسط تا زیاد سازند ایلام در این نواحی است (جدول ۳) [۲۰].

۲-۴- روش تجربی تخمین جریان ورودی به تونل

هیوور [۱۰] دو مؤلفه جریان ناگهانی (qh) و جریان پایدار (qs) برای ورود آب به تونل در نظر گرفت. با استفاده از نمودار تجربی ارائه شده توسط هیوور (شکل ۳) نفوذپذیری معادل توده سنگ در هر پهنه، بر روی محور افقی نمودار مشخص می‌شود، سپس متناظر آن نقطه به وسیله خط Radial Flow بر روی محور عمودی به دست می‌آید. از ضرب این مقدار در بار آبی آن پهنه، متوسط دبی پایدار دراز مدت برای هر پهنه از تونل محاسبه می‌شود، سپس با به دست آوردن تابع F_h از نمودار، جریان در حالت ناگهانی به دست می‌آید. F_h فاکتور جریان آب در جبهه کار است. بر اساس تجارب بدست آمده از پروژه‌های مشابه مقدار F_h معمولاً دامنه‌ای بین ۱-۵ دارد و با نفوذپذیری معادل (K) همان‌طور که در شکل نشان داده شده، مرتبط هستند. بدیهی است توده‌های سنگی تراواتر که تمایل دارند آب خود را راحت‌تر از دست دهند و نفوذپذیری بالاتری دارند هر دو عامل فوق سبب می‌شود که مقدار F_h بزرگتر باشد.



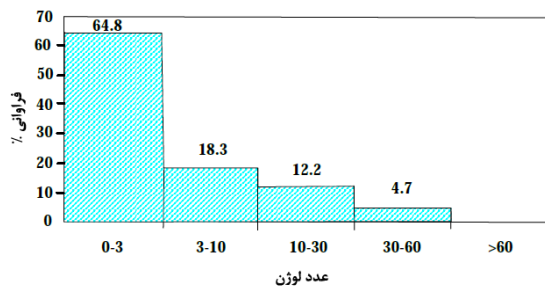
شکل ۳ - رابطه تجربی میان متوسط جریان آب به داخل تونل در حالت پایدار درازمدت (q_s) و تراوایی معادل توده سنگ [10]

$$[10] (K_c)$$

بر اساس مطالعات پیشین، رابطه مشخصی بین میزان جریان آب ورودی به تونل و نفوذپذیری توده سنگ اطراف تونل - که

جدول ۳- رابطه نفوذپذیری سنگ ها و آب ورودی به تونل

وضعیت آب ورودی به تونل	شدید (high inflow)	قابل توجه (Significant inflow)	کم (Low inflow)
متوسط نفوذپذیری توده سنگ (m/s)	بیشتر از 1×10^{-6}	3×10^{-8} تا 1×10^{-6}	$< 3 \times 10^{-8}$
مقدار عدد لوژان	بیشتر از ۳۰	۳۰-۱	کمتر از یک



شکل ۴- درصد کل مقادیر لوژان در گمانه‌های مسیر تونل [۱۹]

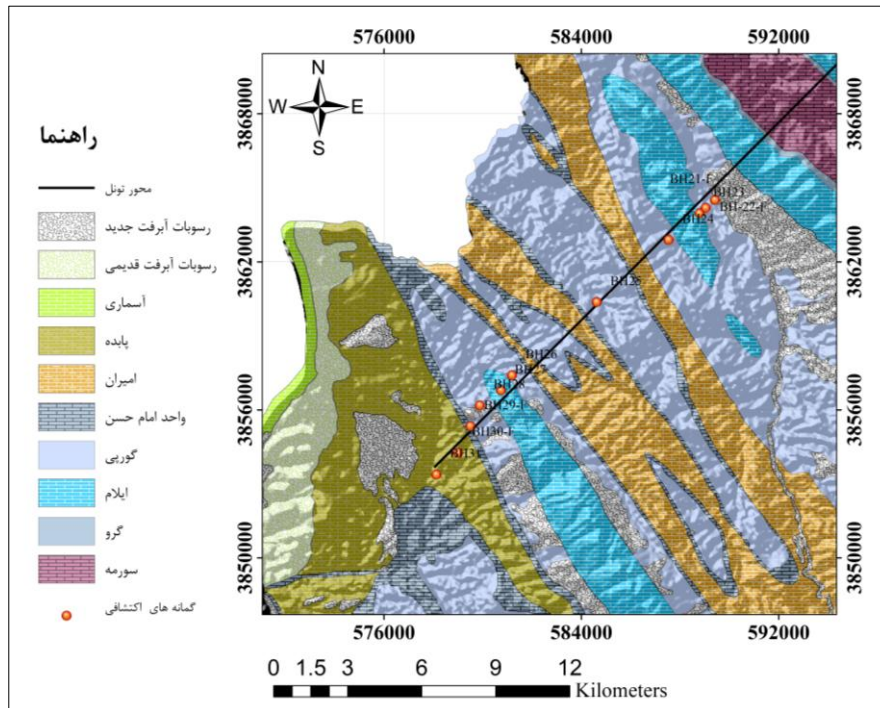
۲-۲-۲- فاصله عمودی محور تونل تا سطح ایستابی

تشخیص تراز آب زیرزمینی از روی موقعیت چشمه‌ها، عمق آب در گمانه‌ها و بالاخره سایر اطلاعات هیدروژئولوژیک منطقه، امکان‌پذیر است. تعداد ۱۳ گمانه اکتشافی در مسیر تونل حفر شده است (شکل ۵). برای به دست آوردن تراز آب زیرزمینی در مسیر تونل از تراز چشمه‌هایی با دبی بالا و گمانه‌های مسیر تونل استفاده شده است. در امتداد محور تونل، یک سطح ایستابی با وصل کردن تراز آب در گمانه‌های حفر شده در مسیر تونل و تعمیم دادن به اطراف رسم شده و همچنین با اندازه‌گیری‌های ارتفاع سطح آب در طول حفاری تونل صحت تراز سطح آب رسم شده مورد بررسی قرار گرفت. بنابراین تراز سطح آب زیرزمینی از روی گمانه‌ها تعیین و برای هر یک از پهنه‌ها یک مقدار میانگین در نظر گرفته شد (جدول ۴).

معمولاً با عدد لوژان یا هدایت هیدرولیکی معادل بیان می‌شود - وجود دارد. این ارتباط به صورت طبقه‌بندی کیفی جریان ورودی در جدول ۳ ارائه شده است [۲۱]. مطابق این طبقه‌بندی، بخش عمده‌ای از مقاطع تونل مورد مطالعه در رده جریان ورودی کم (Low inflow) تا قابل توجه (Significant inflow) قرار می‌گیرند؛ با این حال، در برخی نواحی خاص، به‌ویژه در محدوده تاقدیس ازگله، احتمال مواجهه با جریان‌های ورودی زیاد (High inflow) وجود دارد.

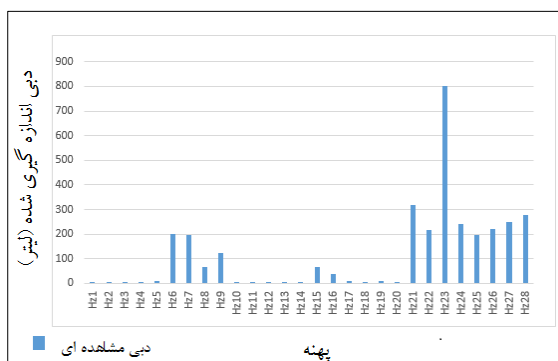
بررسی توزیع آماری مقادیر لوژان در مسیر تونل (شکل ۳) نشان می‌دهد که حدود ۶۴.۸ درصد از آزمایش‌ها دارای نفوذپذیری کمتر از ۳ لوژان، ۱۸/۳ درصد در بازه ۳ تا ۱۰ لوژان، ۱۲/۲ درصد در محدوده ۱۰ تا ۳۰ لوژان و تنها ۴/۷ درصد دارای مقادیر بالاتر از ۳۰ لوژان هستند [۲۲]. این توزیع نشان‌دهنده غالب بودن توده سنگ‌های با نفوذپذیری کم تا متوسط در مسیر تونل است، هرچند حضور نواحی محدود با نفوذپذیری بالا می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش ناگهانی جریان آب ورودی ایفا کند.

به‌منظور تعیین مقدار نفوذپذیری معادل در هر پهنه، از میانگین‌گیری مقادیر لوژان در گمانه‌های واقع در آن پهنه استفاده شده است. در فاصله بین گمانه‌ها و همچنین در برخی نواحی که به دلیل صعب‌العبور بودن منطقه یا محدودیت داده‌ها امکان انجام آزمایش وجود نداشته است، مقادیر نفوذپذیری با توجه به شرایط زمین‌شناسی، لیتولوژی و وضعیت ساختاری منطقه به‌صورت تعمیم‌یافته برآورد شده است.



شکل ۵ - زمین شناسی و گمانه‌های مسیر قطعه دوم تونل زاگرس (۲۳) و (۲۴)

موقعیت تراز آب در گمانه‌ها و مقدار هدایت هیدرولیکی از نتایج آزمایش نفوذپذیری (لوژان) تعیین شد (جدول ۴). شکل ۵ مقدار آب ورودی به سینه کار تونل را نشان می‌دهد. طبق این شکل، بعد از گذر حفر تونل از سازند گرو و با ورود به سازند آهکی ایلام در تاق‌دیس کردی قاسمان و در پهنه ۲۳ مقدار آب ورودی به بیشترین مقدار خود رسیده است.



شکل ۶ - دبی ورودی مشاهده‌ای به قطعه دوم تونل زاگرس

نتایج و بحث

۳-۲-۲- ضخامت روباره
ضخامت روباره تونل با استفاده از نیمرخ مسیر تونل، برای هر یک از پهنه‌ها تعیین شد (شکل ۷).

۴-۲-۲- دبی آب ورودی به تونل

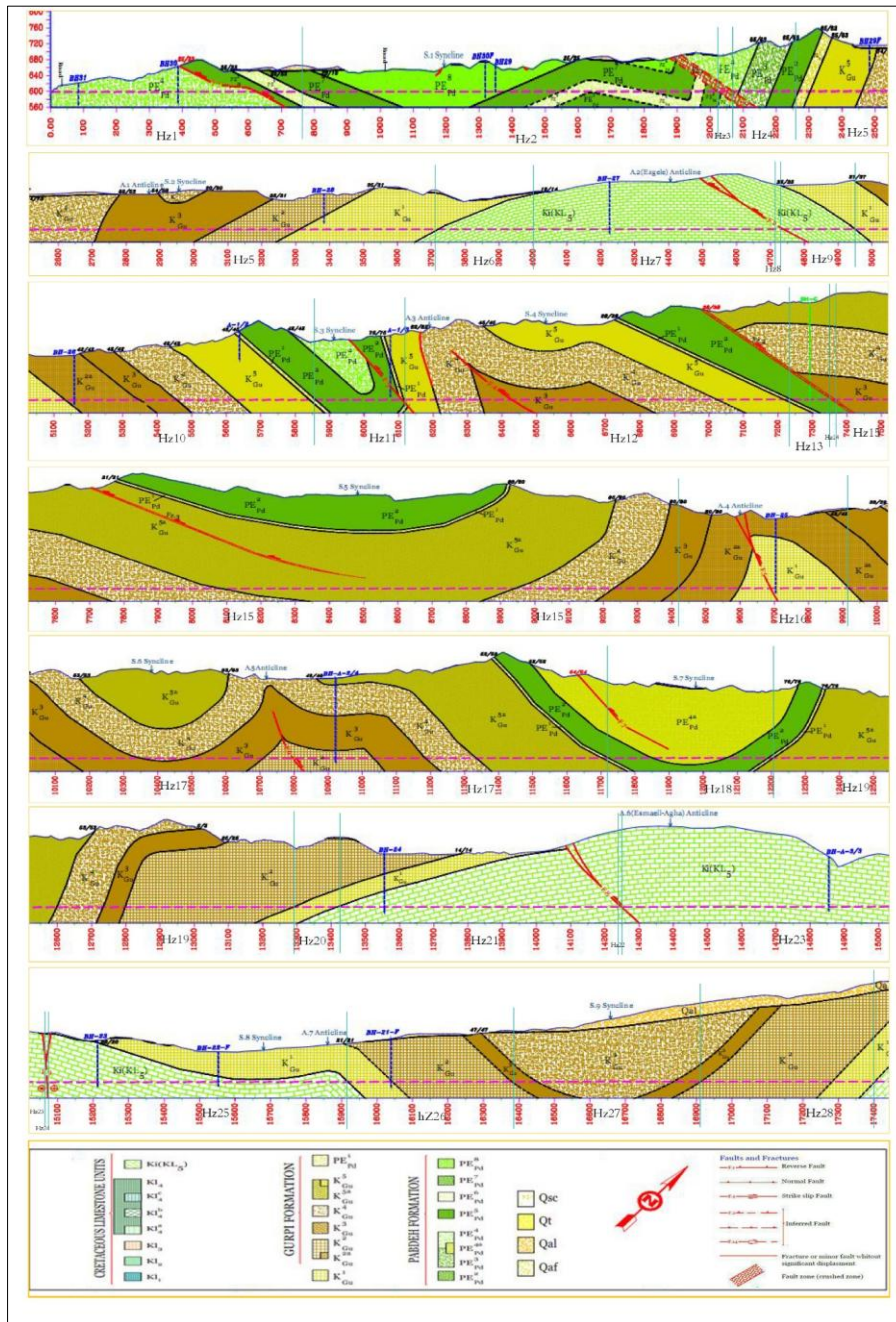
ورود حجم زیاد و ناگهانی آب به درون تونل یکی از مشکلات اصلی در زمان حفاری قطعه دوم تونل زاگرس بوده است. اندازه‌گیری مقدار آب ورودی به تونل نشان داد که تغییرات مقدار آب ورودی به تونل زیاد بوده است به طوری که کمتر از ۰/۵ لیتر در ثانیه در بخش‌های شیلی سازند پایده تا بیش از ۸۰۰ لیتر در ثانیه در بخش‌های آهکی تاق‌دیس کردی قاسمان متغیر بوده است. چون مقادیر پارامترها در طول مسیر حفر تونل متغیر می‌باشد لذا طول مسیر تونل به ۲۸ پهنه تقسیم شد (شکل ۷).

در تفکیک و تعیین این پهنه‌ها معیارهایی چون تغییرات لیتولوژیک (تغییر نوع سازند مسیر تونل)، تغییرات نفوذپذیری با توجه به مقدار لوژان در گمانه‌ها و تغییرات ارتفاع هیدرواستاتیکی آب زیرزمینی مد نظر قرار گرفته است. برای هر یک از پهنه‌ها مقدار ارتفاع سطح ایستابی از روی

۳-۱- تخمین مقدار ورود آب به تونل انتقال آب زاگرس با استفاده از روش‌های تحلیلی و روش تجربی هیوور

تعیین دقیق جریان ورودی به تونل در محیط سنگی در طی حفاری، به لحاظ عدم توانایی در تعیین تمامی عوامل تأثیرگذار بر جریان آب، بسیار مشکل است. با این حال روش‌های متعددی از جمله روش‌های تحلیلی و تجربی برای برآورد جریان آب به داخل تونل‌های سنگی توسعه یافته‌اند.

در این روش‌ها هدایت هیدرولیکی توده سنگ‌های اطراف تونل به عنوان پارامتر مؤثر می‌باشد که از طریق آزمون لوژان به دست می‌آید. پیش‌بینی دقیق نفوذ آب در این محیط‌ها امکان‌پذیر نیست. بر همین اساس در بحث پیش‌بینی نرخ نفوذ آب به درون تونل‌ها و تأثیر شرایط محیط اطراف تونل تحقیقات نسبتاً وسیعی انجام شده است [۲۵-۲۸]. مقدار جریان آب ورودی به قطعه دوم تونل زاگرس با استفاده از روش‌های تحلیلی و تجربی برآورد شد و با مقادیر جریان اندازه‌گیری شده، مقایسه شد.



شکل ۷- مقطع طولی ۱۷/۴ کیلومتر از مسیر قطعه دوم تونل زاگرس (شامل پهنه‌های Hz1 (0+000 km تا 0+775), Hz2 (0+775 تا 4+000), Hz3 (2+015 km تا 2+070), Hz4 (2+070 km تا 2+265), Hz5 (3+715 km تا 4+000), Hz6 (3+715 km تا 4+000), Hz7 (4+000 km تا 4+715), Hz8 (4+715 km تا 4+715), Hz9 (4+735 km تا 4+950), Hz10 (4+950 km تا 5+855), Hz11 (5+855 km تا 7+370), Hz12 (6+110 km تا 7+370), Hz13 (7+235 km تا 7+350), Hz14 (7+350 km تا 7+350), Hz15 (7+370 km تا 7+350), Hz16 (9+415 km تا 9+910), Hz17 (9+910 km تا 9+910), Hz18 (11+715 km تا 12+205), Hz19 (12+205 km تا 11+715), Hz20 (13+290 km تا 13+425), Hz21 (14+240 km تا 14+240), Hz22 (14+240 km تا 14+240), Hz23 (14+250 km تا 15+915), Hz24 (15+065 km تا 15+075), Hz25 (15+075 km تا 15+915), Hz26 (15+915 km تا 16+380), Hz27 (16+910 km تا 16+380) و Hz28 (16+910 km تا 17+400). (km)

جدول ۴- مقادیر به دست آمده برای هر پارامتر در پهنه‌های مختلف مسیر تونل (از سمت دهانه‌ازگله)

شماره پهنه	مترای پهنه		متوسط نفوذپذیری (m/s)	متوسط بار آبی (m)	متوسط ضخامت روباره (m)
	از کیلومتر	تا کیلومتر			
Hz1	۰	۰/۷۷۵	$۱/۵ \times ۱۰^{-۸}$	۴۵	۵۱
Hz2	۰/۷۷۵	۲/۰۱۵	$۲/۵ \times ۱۰^{-۸}$	۷۰	۷۲
Hz3	۲/۰۱۵	۲/۰۷۰	۱×۱۰^{-۶}	۸۵	۹۳/۶۶
Hz4	۲/۰۷۰	۲/۲۶۵	$۱/۵ \times ۱۰^{-۸}$	۱۰۰	۱۱۴/۷۵
Hz5	۲/۲۶۵	۳/۷۱۵	۱×۱۰^{-۷}	۱۱۰	۱۲۳/۵
Hz6	۳/۷۱۵	۴	۸×۱۰^{-۶}	۱۰۵	۹۳
Hz7	۴	۴/۷۱۵	۹×۱۰^{-۶}	۱۲۵	۱۲۳/۸۳
Hz8	۴/۷۱۵	۴/۷۳۵	۳×۱۰^{-۵}	۱۳۰	۱۴۲
Hz9	۴/۷۳۵	۴/۹۵۰	۵×۱۰^{-۶}	۱۴۵	۱۴۹
Hz10	۴/۹۵۰	۵/۸۵۵	۹×۱۰^{-۸}	۱۹۰	۱۵۹
Hz11	۵/۸۵۵	۶/۱۱۰	$۱/۵ \times ۱۰^{-۸}$	۱۹۰	۲۰۲/۲۵
Hz12	۶/۱۱۰	۷/۲۳۵	۱×۱۰^{-۷}	۲۶۰	۲۶۱/۸
Hz13	۷/۲۳۵	۷/۳۵۰	$۱/۵ \times ۱۰^{-۸}$	۳۲۰	۳۲۴/۲۵
Hz14	۷/۳۵۰	۷/۳۷۰	۵×۱۰^{-۷}	۳۳۰	۳۴۲/۳
Hz15	۷/۳۷۰	۹/۴۱۵	۱×۱۰^{-۷}	۳۳۰	۳۱۶
Hz16	۹/۴۱۵	۹/۹۱۰	۸×۱۰^{-۸}	۲۶۰	۲۸۶/۶
Hz17	۹/۹۱۰	۱۱/۷۱۵	$۱/۵ \times ۱۰^{-۷}$	۲۹۵	۲۹۷/۵
Hz18	۱۱/۷۱۵	۱۲/۲۰۵	$۱/۵ \times ۱۰^{-۸}$	۲۵۰	۲۸۷
Hz19	۱۲/۲۰۵	۱۳/۲۹۰	$۱/۵ \times ۱۰^{-۷}$	۲۲۵	۲۱۳
Hz20	۱۳/۲۹۰	۱۳/۴۲۵	$۸/۵ \times ۱۰^{-۸}$	۱۹۰	۱۹۷
Hz21	۱۳/۴۲۵	۱۴/۲۴۰	۲×۱۰^{-۶}	۱۷۰	۲۰۴/۲
Hz22	۱۴/۲۴۰	۱۴/۲۵۰	۳×۱۰^{-۵}	۱۵۰	۲۴۰/۵
Hz23	۱۴/۲۵۰	۱۵/۰۶۵	۲×۱۰^{-۶}	۱۴۰	۱۹۸/۲۵
Hz24	۱۵/۰۶۵	۱۵/۰۷۵	۳×۱۰^{-۵}	۱۱۰	۱۵۸
Hz25	۱۵/۰۷۵	۱۵/۹۱۵	۲×۱۰^{-۶}	۱۰۰	۱۴۲
Hz26	۱۵/۹۱۵	۱۶/۳۸۰	۱×۱۰^{-۷}	۱۳۰	۱۴۷/۶۲
Hz27	۱۶/۳۸۰	۱۶/۹۱۰	۱×۱۰^{-۷}	۱۹۰	۱۹۲/۷۵
Hz28	۱۶/۹۱۰	۱۷/۴	۱×۱۰^{-۷}	۲۶۰	۲۸۵

Hz1 و Hz11 و Hz1 رخ می‌دهد (شکل ۷). همچنین مشخص است که دبی تخمینی در دو آبخوان تاقدیس ازگله و کردی قاسمان بالا و در حد فاصل بین دو تاقدیس در سازند گورپی و پابده (پهنه‌های Hz10 تا Hz20) پایین بوده است، که این بخش‌ها از مسیر تونل با خطر نسبی کمتری به لحاظ هجوم آب زیرزمینی مواجه هستند.

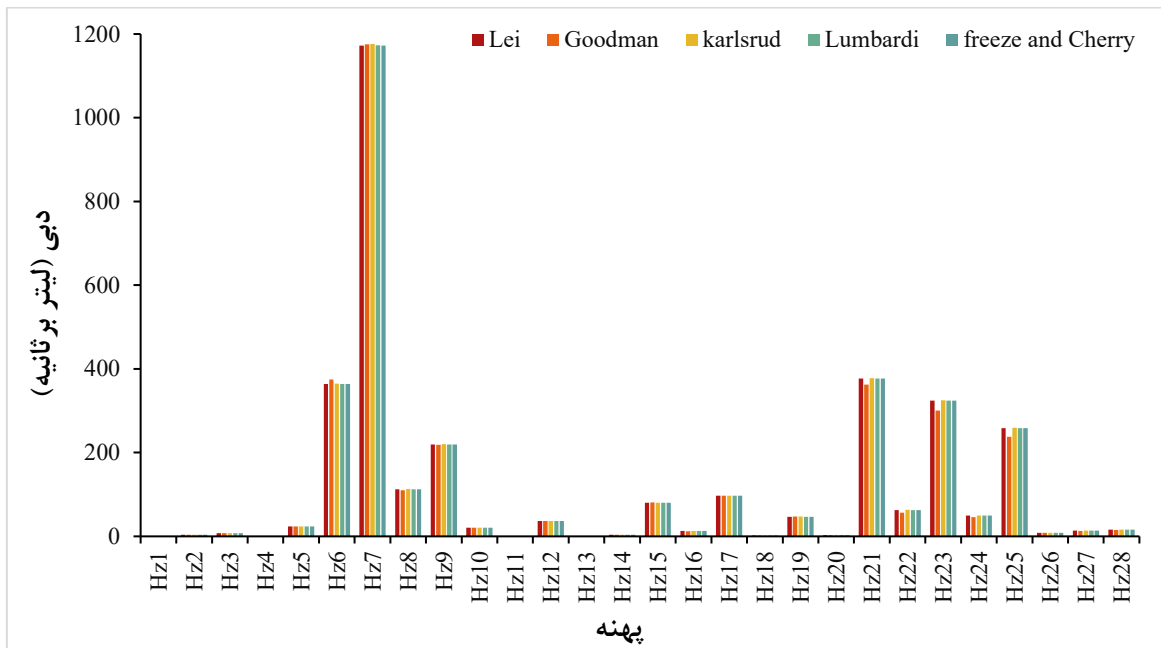
بر اساس روش‌های تحلیلی، مجموع آب ورودی به تونل انتقال آب زاگرس از شروع تونل تا ۱۷۴۰۰ متر حدود ۳۳۲۰ لیتر بر ثانیه پیش‌بینی شد. بر اساس محاسبات، حداکثر هجوم احتمالی آب به ترتیب در پهنه‌های Hz7، Hz21، Hz6 و Hz23 که ناشی از وجود پهنه‌های گسلی و خرد شده و بالا بودن هدایت هیدرولیکی و بار هیدرولیکی در این مقطع‌ها می‌باشد و حداقل آن به ترتیب در پهنه‌های Hz4، Hz13،

شکل ۸ دبی ورود آب به سینه کار تونل انتقال آب زاگرس (q_h) برای هر پهنه را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل بیشترین دبی جریان از سینه کار تونل در پهنه‌های Hz۲۳، Hz۷، Hz۶، و Hz۲۱ و کمترین آن در پهنه‌های Hz۴، Hz۱ و Hz۱۳ رخ می‌دهد.

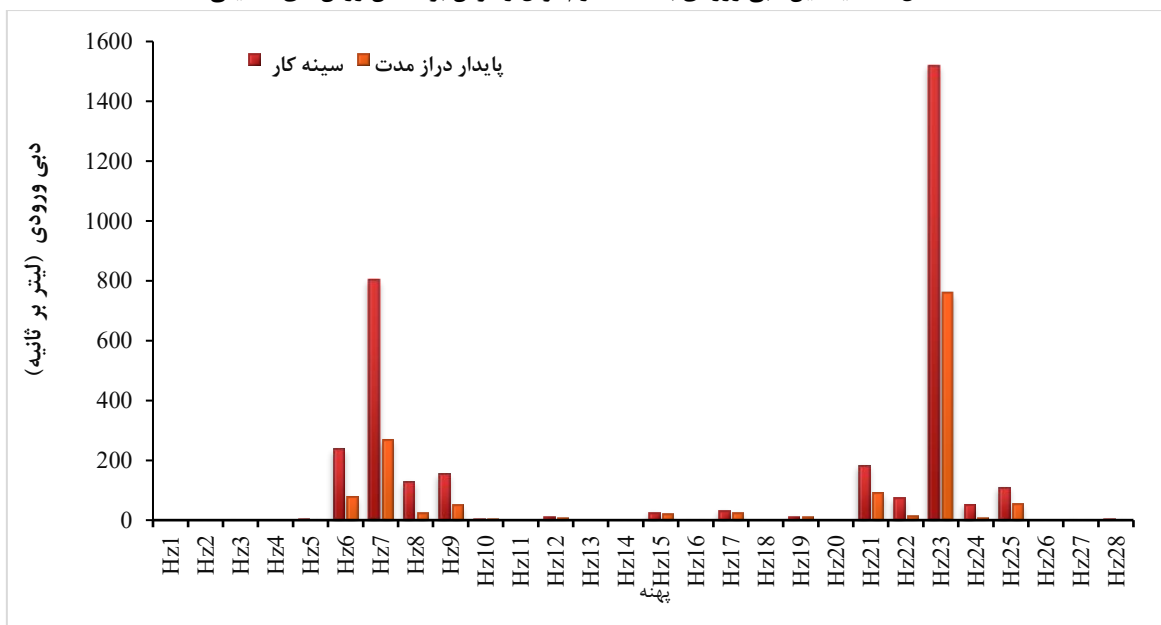
با استفاده از نمودار تجربی ارائه شده توسط هیوور میزان جریان آب ورودی به تونل در حالت پایدار دراز مدت و ناگهانی به دست آورده می‌شود (جدول ۵). بر اساس روش تجربی هیوور، دبی متوسط ورود آب به هر پهنه از تونل انتقال آب زاگرس در حالت پایدار (q_s) محاسبه شده است (شکل ۸). بیشترین دبی در پهنه‌های Hz۲۳، Hz۷، Hz۲۱، Hz۶ و کمترین دبی در پهنه‌های Hz۴، Hz۱۰، Hz۱۳ رخ می‌دهد.

جدول ۵- دبی متوسط پیش‌بینی شده ورود آب در حالت ناگهانی و پایدار در هر پهنه به روش تجربی

شماره پهنه	q_s (lit/s)	F_h	q_h (lit/s)
Hz1	۰/۵۶	۱	۰/۵۶
Hz2	۱/۲۶	۱	۱/۲۶
Hz3	۱/۵۴	۲	۳/۰۸
Hz4	۰/۳۱۲	۱	۰/۳۱۲
Hz5	۴/۳۵	۱/۲	۵/۲۲
Hz6	۷۹/۸	۳	۲۳۹/۴
Hz7	۲۸۶/۱۲۵	۳	۸۰۴/۳۷
Hz8	۲۶	۵	۱۳۰
Hz9	۵۱/۸۱۵	۳	۱۵۵/۴۴
Hz10	۵/۴۳	۱	۵/۴۳
Hz11	۰/۷۶	۱	۰/۷۶
Hz12	۹/۶۷۵	۱/۲	۱۱/۶۱
Hz13	۰/۵۷	۱	۰/۵۷
Hz14	۱/۱	۱/۲	۱/۳۲
Hz15	۲۲/۴۹	۱/۲	۲۶/۹۹
Hz16	۲/۹۷	۱	۲/۹۷
Hz17	۲۷/۰۷۵	۱/۲	۳۲/۴۹
Hz18	۱/۹۶	۱	۱/۹۶
Hz19	۱۱/۹۳۵	۱/۲	۱۴/۳۲
Hz20	۰/۸۱	۱	۰/۸۱
Hz21	۹۲/۰۹۵	۲	۱۸۴/۱۹
Hz22	۱۵	۵	۷۵
Hz23	۷۶۰/۳۹۵	۲	۱۵۲۰/۷۹
Hz24	۱۱	۵	۵۵
Hz25	۵۵/۴۴	۲	۱۱۰/۸۸
Hz26	۱/۸۶	۱/۲	۲/۲۳
Hz27	۳/۱۸	۱/۲	۳/۸۱۶
Hz28	۱/۴۱	۱/۲	۵/۲۹۲



شکل ۸- میانگین دبی ورودی به قطعه دوم تونل زاگرس بر اساس روش‌های تحلیلی



شکل ۹- دبی پیش‌بینی شده ورودی به تونل به روش تجربی در حالت پایدار دراز مدت (qs) و ورود آب از سینه کار (qb)

و اندازه‌گیری شده

طبق مقایسه دبی اندازه‌گیری شده و دبی محاسبه شده از رابطه‌های تحلیلی و تجربی (شکل‌های ۱۰ و ۱۱)، در بسیاری از بخش‌های تونل که پهنه‌های گسله و سازندهای کارستی می‌باشد، اختلاف قابل توجهی وجود دارد. در مترژهای ابتدایی

۲-۳- مقایسه دبی اندازه‌گیری شده و دبی تخمینی از رابطه‌های تحلیلی و رابطه تجربی هیوور

۱-۲-۳- پهنه‌هایی با اختلاف زیاد در دبی محاسباتی

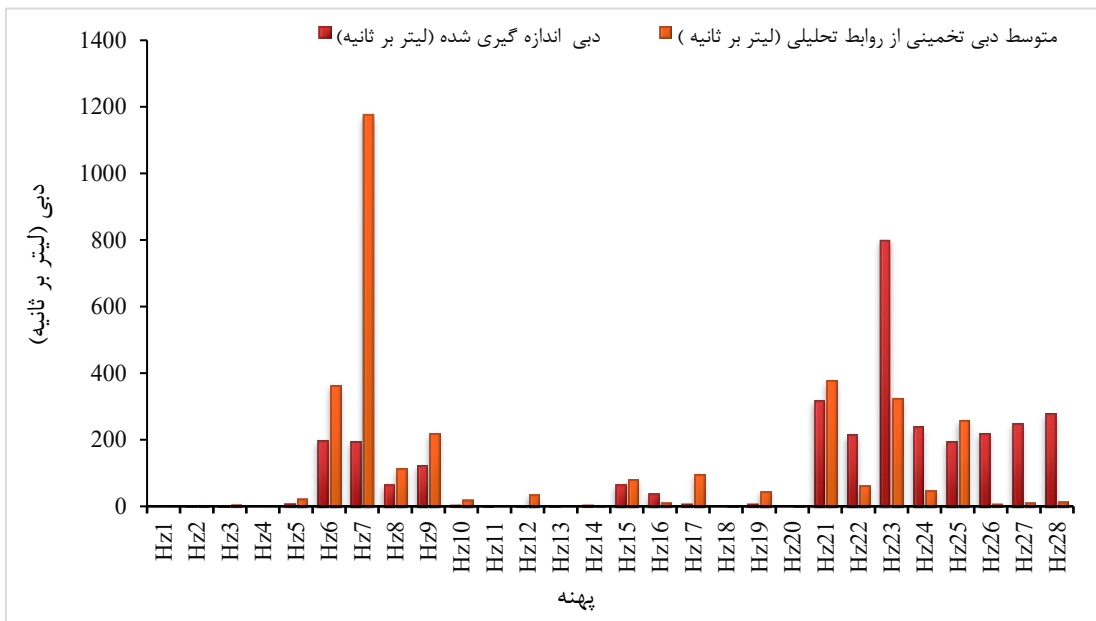
از دو آبخوان تاقدیس کردی قاسمان و ازگله افزایش دبی رخ داده است. نتایج روش‌های تحلیلی و تجربی نشان می‌دهند که مقدار دبی پیش‌بینی شده خیلی کمتر از دبی مشاهده ای است. این روابط در پهنه‌های گسله و خرد شده و همچنین کارستی از دقت لازم برخوردار نیستند به طوری که در بسیاری از بخش‌های تونل که مناطق کارستی و گسله می‌باشد از جمله پهنه‌های Hz6، Hz7 و Hz8 در تاقدیس ازگله که از سازند آهکی ایلام- سروک تشکیل یافته و منطقه کارستی می‌باشد اختلاف زیادی بین دبی حاصل از روابط تحلیلی و تجربی با مقدار دبی واقعی ورودی به تونل وجود دارد. در سازند گورپی نیز به دلیل نفوذپذیری کم افزایشی در دبی آب نداشته است. در محدوده ساختار تاقدیس‌های ازگله در پهنه Hz7، کردی قاسمان پهنه Hz23 و بخصوص در پهنه‌های گسله و درزه‌دار حجم آب قابل توجهی به تونل وارد می‌شود. همچنین ساختارهای مذکور دارای پهنه‌های خرد شده، گسل‌ها و شکستگی‌های فراوانی است که شرایط ورود آب به داخل تونل را فراهم آورده است. با توجه به اینکه تونل زاگرس از سازند های مختلف با هدایت هیدرولیکی متفاوتی عبور می‌کند رفتار این توده سنگ‌ها بسیار متغیر می‌باشد، تعمیم دادن هدایت هیدرولیکی و بار هیدرولیکی به سازند های دیگر و هم چنین عدم توجه به شرایط هیدروژئولوژیک لایه های مختلف موجب ایجاد خطا در محاسبات شده است. در تعیین نفوذ پذیری در امتداد تونل، ارائه آرایش مناسب برای گمانه‌ها و تست‌های فشار آب نقش اساسی را در استفاده از این روش برای تخمین مقدار جریان آب به داخل تونل دارد و توزیع مکانی گمانه‌ها می‌بایست در مسیر تونل بر اساس گسترش واحدهای زمین شناسی و زون‌های خرد شده و گسله طراحی شود. بدیهی است که تعداد فشار آب بایستی متناسب با اهمیت و گسترش طولی واحدهای زمین شناسی پیشنهاد شود. عدم رعایت این موضوع می‌تواند خطای بسیاری را در تخمین نفوذپذیری و در نتیجه تخمین میزان ورودی آب زیرزمینی به تونل ایجاد کند [26].

تونل به علت وجود روباره بسیار کم و بازشدگی زیاد درزه‌ها آب‌های سطحی و زیرسطحی به راحتی به درون تونل نفوذ می‌کنند، با این وجود به دلیل نبود ذخیره بالا در این محدوده، جریان آب بحرانی نیست. در پهنه‌های Hz6، Hz7، Hz8 و Hz9 در تاقدیس ازگله، Hz21، Hz22 و Hz24 در تاقدیس کردی قاسمان که عمده لیتولوژی آن‌ها آهکی و از سازند ایلام تشکیل شده‌اند، اختلاف زیادی بین دبی تخمینی روابط تحلیلی و تجربی با مقدار دبی واقعی به تونل وجود دارد. در پهنه Hz15 در ناودیس S5، در سازند گورپی به علت وجود لایه آبدار دبی به صورت ناگهانی افزایش یافته است و به طور متوسط به 65/57 لیتر بر ثانیه رسیده است که در روابط تحلیلی و تجربی این چنین نیست.

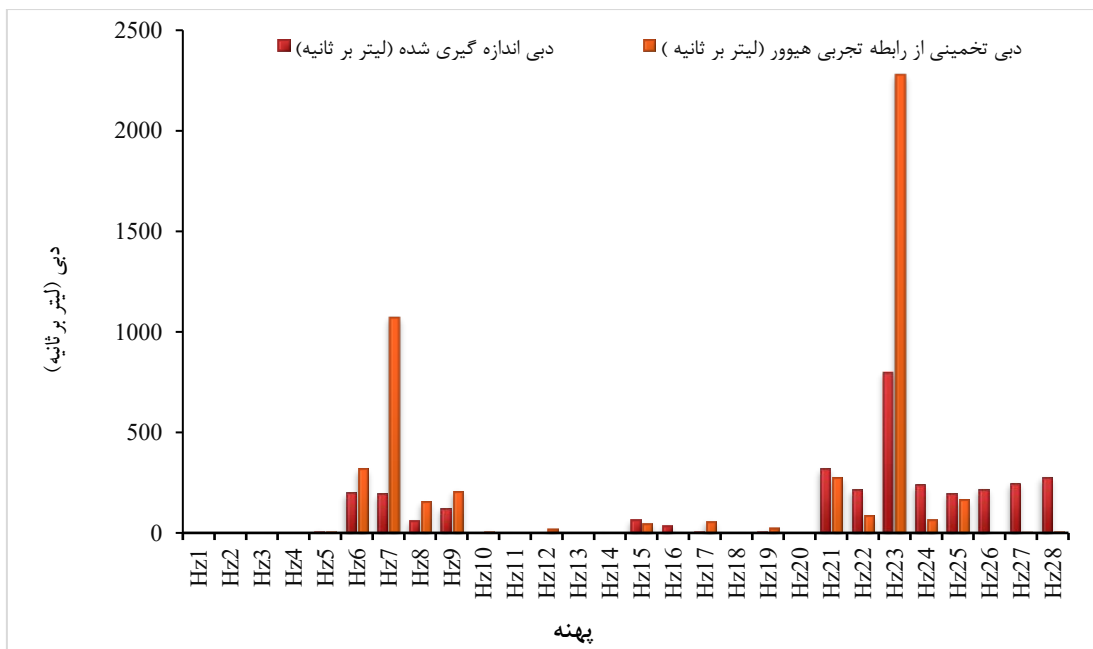
۳-۲-۲- پهنه‌هایی با اختلاف کم در دبی محاسباتی و اندازه گیری شده

در پهنه‌های دیگر تونل از جمله پهنه‌های Hz1، Hz2، Hz3 و Hz4 در مترژهای ابتدایی تونل، پهنه‌های Hz11، Hz12، Hz13 و Hz14 در مترژ 5860 تا مترژ 7370 و پهنه‌های Hz16، Hz17، Hz18، Hz19 و Hz20 در مترژ 9420 تا 13430 جریان ورودی کم است و مشکل ساز نیست. کمترین دبی ورودی به تونل در این پهنه‌ها اتفاق افتاده است، که همخوانی خوبی با آنچه که از روابط تحلیلی و تجربی به دست آمده، دارد. همچنین در سازند گورپی به دلیل نفوذناپذیر بودن افزایشی در دبی آب نبوده است. سازندهای پایده و گورپی (پهنه‌های Hz10 تا Hz20 به استثنای Hz15) با توجه به وجود تناوبی از لایه‌های نازک آهک شیلی و شیل، فاقد ذخیره و هدایت آب زیرزمینی هستند و تشکیل آبخوان در آن‌ها دور از انتظار است

اکثر مشکلات ورود آب زیرزمینی به درون تونل زاگرس مربوط به پهنه‌هایی می‌باشد که حجم آب ورودی بسیار زیاد است و انواع خطرها را به همراه دارد. شناسایی این پهنه‌ها در جهت کاهش خطرها بسیار حائز اهمیت است. اکثر این پهنه‌ها ساختارهای گسله و شکستگی‌ها می‌باشند. در محل عبور تونل



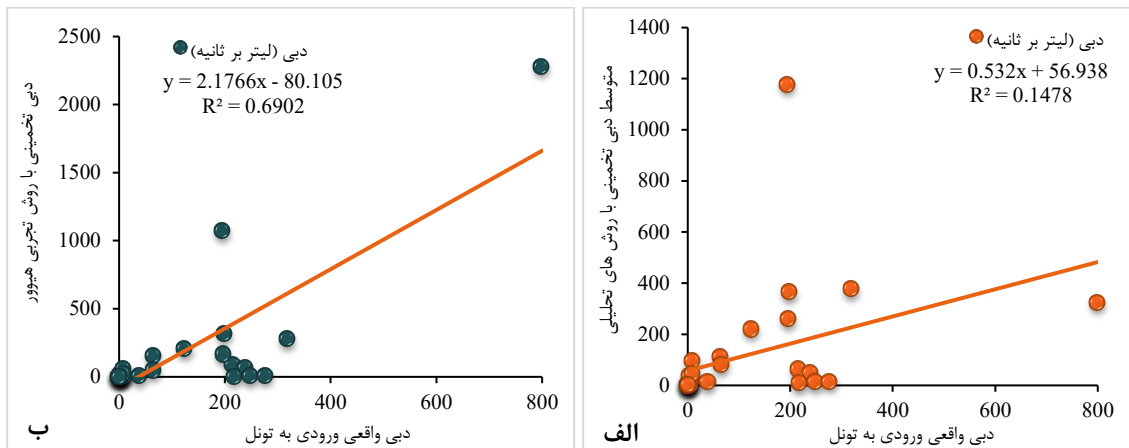
شکل ۱۰- نمودار مقایسه دبی اندازه‌گیری شده با متوسط دبی تخمینی ورودی به تونل با استفاده از روابط تحلیلی



شکل ۱۱- نمودار مقایسه دبی اندازه‌گیری شده با متوسط دبی تخمینی ورودی به تونل با استفاده از رابطه هیوور

رابطه تجربی هیوور ۶۹ درصد است.

با توجه به نمودار هم بستگی بین میزان دبی اندازه‌گیری شده و دبی محاسباتی (شکل ۱۲)، میزان همبستگی بین دبی واقعی به تونل و دبی تخمینی براساس



شکل ۱۲- نمودارهای هم‌بستگی بین دبی تخمینی و دبی واقعی ورودی به تونل: (الف) هم‌بستگی بین متوسط دبی تخمینی

حاصل از روابط تحلیلی و دبی واقعی؛ (ب) هم‌بستگی بین دبی تخمینی بر اساس رابطه تجربی هیور و دبی واقعی.

نشان داده‌اند که روابط تحلیلی مبتنی بر فرض جریان شعاعی پایدار و محیط همگن، در حضور ناهمگنی‌های زمین‌شناسی، شکستگی‌های باز، پهنه‌های گسلی و شرایط کارستی دقت محدودی دارند. همچنین مطالعات جدیدتر [۱۴، ۱۷ و ۲۷] تأکید کرده‌اند که عدم لحاظ توسعه هیدرولیکی لایه‌ها، افت سطح ایستابی ناشی از حفاری، ناهمسانگردی نفوذپذیری و نقش شبکه شکستگی‌ها، منجر به کم‌برآوردی یا بیش‌برآوردی دبی واقعی می‌شود. نتایج این مطالعه که بیشترین اختلاف‌ها را در پهنه‌های گسله و کارستی تونل زاگرس نشان می‌دهد، کاملاً در راستای این یافته‌ها قرار دارد و بیانگر محدودیت کاربرد روابط تحلیلی و تجربی ساده در محیط‌های زمین‌شناسی پیچیده است. در سطح مطالعات داخلی نیز نتایج این پژوهش با تحقیقات انجام‌شده بر روی تونل‌های انتقال آب در ایران تطابق قابل توجهی دارد. پژوهش‌های انجام‌شده نشان داده‌اند که در تونل‌هایی که از سازندهای آهکی کارستی و پهنه‌های گسلی عبور می‌کنند، دبی واقعی آب ورودی به مراتب بیشتر از مقادیر پیش‌بینی‌شده با استفاده از روابط تحلیلی و روش تجربی هیور است [۱۱-۱۲]. این مطالعات تأکید کرده‌اند که تعمیم نفوذپذیری حاصل از آزمون‌های لوژان، به‌ویژه در شرایطی که تعداد گمانه‌ها محدود و توزیع مکانی آن‌ها نامناسب است، موجب ایجاد خطای قابل توجه در برآورد دبی ورودی می‌شود. نتایج مطالعه حاضر نیز نشان داد که در سازندهای کم‌نفوذ مانند گورپی و پابده، تطابق مناسبی بین دبی واقعی و دبی تخمینی وجود دارد، در حالی که در

دبی تخمینی پهنه HzV در روابط تحلیلی و پهنه HzY و Hz۲۳ در رابطه تجربی هیور در مقایسه با سایر پهنه‌ها اختلاف بیشتری را با دبی واقعی دارند.

روش‌های تحلیلی و روش تجربی هیور به بررسی دو پارامتر مهم بار هیدرولیکی و هدایت هیدرولیکی می‌پردازند، در حالی که تأثیر میزان بارندگی، ساختارهای زمین‌شناسی همچون ساختار ناودیس‌ها و پهنه‌های گسله، تغییرات لیتولوژیک و جهت جریان آب زیرزمینی را نیز باید در نظر گرفت. آزمون لوژان متداول‌ترین روش برای تخمین هدایت هیدرولیکی معادل در پروژه‌های تونل‌سازی می‌باشد، با این حال دبی اندازه‌گیری شده در تونل زاگرس نشان داد که برای تخمین دبی، استفاده از هدایت هیدرولیکی برآوردی از طریق آزمایش لوژان چندان مناسب نیست. همچنین به منظور دستیابی به نتایج دقیق‌تر باید به نحوه توزیع گمانه‌های اکتشافی توجه زیادی شود. در این مطالعه به دلیل ناکافی بودن گمانه‌های اکتشافی، نتایج به پهنه‌های بدون گمانه تعمیم داده که موجب ایجاد خطا در محاسبات شد.

نتایج این پژوهش نشان داد که در پهنه‌های گسله، خردشده و کارستی، اختلاف قابل‌توجهی بین دبی اندازه‌گیری‌شده و دبی تخمینی حاصل از روابط تحلیلی و رابطه تجربی هیور وجود دارد و این روش‌ها عموماً قادر به پیش‌بینی دقیق جریان آب ورودی در چنین شرایط پیچیده‌ای نیستند. این یافته با نتایج مطالعات کلاسیک و جدید بین‌المللی همخوانی دارد؛ به‌طوری‌که محققان [۹-۳]

دارد و می‌تواند به‌عنوان یک ابزار تکمیلی در طراحی و مدیریت تونل‌ها مورد استفاده قرار گیرد. نوآوری اصلی مقاله ارائه مقایسه کمی بین روش‌های تحلیلی و تجربی هیوور در تونل‌های با شرایط زمین‌شناسی پیچیده و نشان دادن محدودیت‌های هر روش در پهنه‌های کارستی و گسله است.

پهنه‌های گسله و کارستی اختلاف‌ها چشمگیر است. این موضوع علاوه بر تأیید نتایج مطالعات داخلی پیشین، نشان می‌دهد که پهنه‌بندی هیدروژئولوژیکی مسیر تونل می‌تواند ابزار مؤثری برای شناسایی بخش‌های پرخطر و کاهش عدم قطعیت در پیش‌بینی هجوم آب زیرزمینی باشد.

۴- نتیجه‌گیری

پیش‌بینی میزان جریان ورودی به تونل‌ها در طراحی، به‌ویژه در شرایط هجوم آب زیرزمینی، اهمیت بسیار بالایی دارد. در این مطالعه، توانایی روش‌های تحلیلی و روش تجربی هیوور در برآورد جریان ورودی به تونل زاگرس مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که پیچیدگی زمین‌شناسی مسیر تونل، وجود سازندهای با نفوذپذیری متفاوت، شرایط کارستی و همچنین حضور گسل‌ها و شکستگی‌های متعدد باعث هدایت حجم بالایی از آب به داخل تونل شده‌اند. با مقایسه کمی، هم‌بستگی بین دبی واقعی و دبی محاسباتی در پهنه‌های مختلف قطعه دوم تونل زاگرس مشخص شد، به‌طوری که روش‌های تحلیلی هم‌بستگی حدود ۱۴٪ و روش تجربی هیوور حدود ۶۹٪ را نشان دادند. این مقایسه نشان می‌دهد که پیش‌بینی جریان ورودی در پهنه‌های گسله و کارستی با روش‌های تحلیلی و تجربی دقت کافی ندارد، زیرا حجم زیادی از جریان آب از درزه‌ها یا پهنه‌های گسله و کارستی متمرکز می‌شود، به‌ویژه در پهنه‌های ۷ Hz و ۲۳ Hz. بنابراین، شناسایی دقیق محل و تعیین نفوذپذیری سازندها برای پیش‌بینی رفتار تونل ضروری است، اما انجام آزمایش‌های زمین‌شناسی و حفاری گمانه‌های اکتشافی به‌صورت عملی زمان‌بر و محدود است. این مطالعه نشان می‌دهد که روش تجربی هیوور در پهنه‌های عادی عملکرد بهتری نسبت به روش‌های تحلیلی

۵- سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از موسسه ایمن‌سازان به دلیل در اختیار قرار دادن اطلاعات لازم جهت انجام پژوهش نهایت قدردانی و تشکر را دارند.

۶- فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح
Q	$M^3/S/M$	میزان نفوذ آب در واحد طول تونل
K	M/S	نفوذپذیری معادل در امتداد طول تونل
h	M	بار آبی تونل
Z	M	فاصله مرکز تونل تا بالای سنگ
R	M	شعاع تونل

۷- منابع

- [1] Zimmerman, R.W., Bodvarsson, G.S. (1996). Hydraulic conductivity of rock fractures Transport in Porous Media, vol. 23, 1–30.
- [2] Zarei, H.R., Uromeihy, A., Sharifzadeh, M. (2011). Evaluation of high local groundwater inflow to a rock tunnel by characterization of geological features. Journal of Tunneling and Underground Space Technology. Vol. 26, 364–373. DOI: 10.1016/j.tust.2012.09.005.
- [3] Goodman, R.E., Moye, D.G., Van Schalkwyk, A., & Javandel, I. (1965). Groundwater Inflows During Tunnel Driving. Engineering Geology, vol. 1, 39-56.

- [4] Freeze, R.A., Cherry, J. A. (1979). Groundwater. Englewood Cliffs, NJ: Pretic Hall, vol. 3, 488-491.
- [5] Lei, S. (1999). An Analytical Solution for Steady Flow In to a Tunnel, Groundwater, vol.37, 23-26. DOI: 10.1111/j.1745-6584.1999.tb00953.x.
- [6] Karlsrud, K. (2001). Water Control When Tunneling Under Urban Areas In The Oslo Region. vol. 12, 12-33.
- [7] El Tani, M. (1999). Water Inflow In To Tunnels. Proceedings of the World Tunnel Congress ITA-AITES 1999, Oslo, 61-70, Balkema.
- [8] El Tani, M. (2003). Circular tunnel in a semi- infinit aquifer. Journal of Tunneling and Underground Space Technology, vol. 18, 49-55. DOI: 10.1016/S0886-7798(02)00102-5.
- [9] Lumbardi. (2002). Private Communication with El Tani.
- [10] Heuer, R.E. (1995). Estimating Rock Tunnel Water Inflow. Proceeding of the rapid excavation and tunneling conference. 41-60. ISSN: 10459065.
- [۱۱] زارعی، ح.، ارومیه‌ای، ع.، و شریف‌زاده، م. (۱۳۸۸). پیش‌بینی ورود آب زیرزمینی به درون تونل‌های سنگی با روش‌های تجربی و تحلیلی و مقایسه آن با مقادیر اندازه‌گیری شده (مطالعه موردی تونل سمنان). مجموعه مقالات هشتمین کنفرانس تونل، دانشگاه تربیت مدرس.
- [۱۲] ناصری، ح.ر.، بیات، ن.، ایزدی‌کیان، ل.، و علیجانی، ف. (۱۳۹۶). نقش ساختارهای تکتونیکی در هدایت آب‌های زیرزمینی به قطعه دوم تونل انتقال آب زاگرس - استان کرمانشاه، فصلنامه زمین‌شناسی ایران. سال ۱۱. شماره ۴۵، بهار ۱۳۹۷.
- [13] Li, Z., Li, J., Wan, J., Xiao, J., Feng, H., & Zhan, H. (2024). A dynamic modeling approach to predict water inflow during tunnel excavation in relatively uniform rock masses. Tunnelling and Underground Space Technology, 146, 105668. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105668>.
- [14] Liu, H. B. (2023). Semi-empirical models for predicting stable water inflow and influence radius under non-Darcian flow regime. Journal of Journal of Hydrology. Vol 624 (129574). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129574>.
- [15] Yao, X., et al. (2025). Intelligent prediction of tunnel water inflow in complex geological environments. Tunnelling and Underground Space Technology. Vol 166 (106997). <https://doi.org/10.1016/j.tust.2025.106997>.
- [۱۶] رضایی، س.، سحابی، ف. و معماریان، ح. (۱۳۹۱). بررسی منشا تولید H2S در تونل نوسود (غرب کرمانشاه). نشریه علمی پژوهشی مهندسی معدن، دوره هفتم، شماره پانزدهم.
- [17] Fernandez, G., Moon, J. (2010). Excavation-induced hydraulic conductivity reduction around a tunnel – part 1: Guideline for estimate of groundwater inflow rate. Journal of Tunneling and Underground Space Technology. vol. 25, 560-566. DOI: 10.1016/j.tust.2010.04.001.
- [18] Palmstrom, A., Stille, H. (2007). Ground behavior and rock engineering tools for underground excavations. Journal of Tunneling and Underground Space Technology. vol 22, 363-376. DOI: 10.1016/j.jrmge.2014.04.003.
- [۱۹] موسسه مهندسی مشاور ایمن سازان. (۱۳۸۵). گزارش زمین‌شناسی تکمیلی، هیدروکلیماتولوژی، هیدروژئولوژی، آماربرداری ادواری گمانه‌ها، منابع آب زیرزمینی و ارزیابی دبی ورودی به تونل انتقال آب زاگرس.
- [۲۰] مهندسی مشاور لار. (۱۳۸۳). گزارش مطالعات ژئوتکنیک و لاگ های گمانه های حفاری قطعه دوم تونل نوسود.
- [۲۱] موسسه مهندسی مشاور ایمن سازان. (۱۳۸۵). گزارش زمین‌شناسی و مقطع طولی مسیر قطعه دوم تونل زاگرس.
- [۲۲] طاهری، د.، افتخاری، ع.، و خانی، م. ر. (۱۳۸۵). ارزیابی میزان آب ورودی و لزوم اجرای آب‌بندی قطعه دوم تونل زاگرس"، دومین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه تربیت مدرس.

- [۲۳] شرکت ملی نفت ایران. (۱۳۸۸). نقشه زمین‌شناسی باینگان با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰.
- [۲۴] شرکت ملی نفت ایران. (۱۳۸۸). نقشه زمین‌شناسی قصر شیرین با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰.
- [25] AFTES Working Group. (1989). Recommendations for The Treatment of Water Inflows and Outflows in Operated Underground Structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol 4, 343-407. DOI: 10.1016/0886-7798(89)90084-9.
- [26] 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*, vol 18, 19-34. DOI: 10.1016/S0886-7798(02)00098-6.
- [27] Park, K. H., Owatsiriwong, A., Lee, J. G. (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*. vol 23, 206-209. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2007.02.004>.
- [28] Bayat, N., Sadeghi, E. Nassery, H.R. (2024). Evaluating the characteristics of geological structures in karst groundwater inflow, *Nowsud Tunnel. J. Mt. Sci.* 21, 3434–3452. <https://doi.org/10.1007/s11629-024-8932-1>
- [۲۹] کتیبه، ه. و عالی انوری، ع.، (۱۳۸۵). تخمین جریان نشت آب زیرزمینی به تونل انتقال آب قمرود توسط نرم افزار TunSeep، هفتمین کنفرانس تونل ایران، تهران، انجمن تونل ایران، دانشگاه شریف.
- [30] Liu, H.B., Zhou, J.Q., Li, C., Tan, J., Hou, D., 2023. Semi-empirical models for predicting stable water inflow and influence radius of a tunnel considering non-Darcian effect, *Journal of Hydrology*, 621, 129574, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129574>.



Assessment of Empirical and Analytical Methods for the Estimation of Water Intake into the Section 2 of Zagros Tunnel, Kermanshah, West Iran

Hamid Reza Naseri¹; Narges Bayat²; Farshad Alijani³; Mehdi Abbasi⁴

¹ Professor, Department of Minerals and Groundwater Resources, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

² Postdoc researcher, Department of Minerals and Groundwater Resources, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

³ Associated Professor, Department of Minerals and Groundwater Resources, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

⁴ Senior Geologist, Imen Sazan Company, Tehran, Iran.

Received: 11. November. 2025 Accepted: 21. December. 2025

(*Corresponding author: nbayat87@yahoo.com)

Keywords

Water inflow
Analytical and empirical methods
Hydraulic conductivity
Zagros tunnel

Final English Extended Abstract

Presence of groundwater flow and surface water flow are among negative factors in construction of underground tunnels. Determining of the groundwater inflow rates into the tunnel is necessary for confronting of environmental problems and decreasing the risk of tunnel instabilities and falling. In this paper, the amount of inflow waters into the section 2 of Zagros tunnel, West Iran, have been estimated using analytical and Empirical methods. The results compared to the measured actual data of inflow water into the tunnel in different sections by consideration the abilities of the methods in

prediction. It was revealed that the confidences of analytical and empirical methods are 14% and 69%, respectively. The results show that the hydraulic conductivities of the rock masses, as one of the key parameter in these methods, has an enormous effect on the accuracy of the predictions. Geological condition, hydrogeological properties of faulted and fractured zones, and the type of hydraulic conductivity test procedure could be caused to obtaining the incorrect hydraulic conductivity values and unreliable prediction of water inflow to the tunnel. The high ambiguities appear in fractured zones and cavities with high hydraulic conductivities.

Summary

The amount of input waters into the part 2 of Zagros tunnel were calculated using analytical and experimental methods. The results were compared with the measured actual value of water entered into the tunnel. A large amount of waters inflow to the tunnel is mainly originated from joints, faults, and crushed zones which are somewhat subjected to karstification

Introduction

Heavy inflow leads to more difficult and hazardous tunnel constructing, increasing costs and delays in schedule. There are various methods such as analytical, empirical, semi-empirical, and numerical methods for prediction of groundwater in rock tunnels.

Methodology and Approaches

The purpose of this study is to estimate the amount of input waters inflow to the tunnel using analytical (Lei, Goodman, Freeze and Cherry, El Tani1, Karlsrud, Lombardi, El Tani2) and Heuer experimental methods, and the result is compared with the measured actual value of water entered in to the tunnel.



Results and Conclusions

Field observations and measurements indicate that the analytical solutions and empirical method used in the engineering practice are not consistently accurate in estimating ground water flow into tunnel in fractured and karstic zones. It was revealed that correlation between the measured and calculated water inflow rates using analytical and empirical (Heuer) methods is 14% and 69%, respectively.
