

بررسی تاثیر خصوصیات درزه‌ها بر روی جریان پایدار آب ورودی به تونل مطالعه‌ی موردی: تونل سوم کوه‌رنگ

یادداشت فنی

رامین رفیعی^{۱*}؛ احمد رمضان‌زاده^۲؛ فرهنگ سرشکی^۳؛ اسماعیل موحدی‌نژاد^۴

۱- دانشجوی دکترای تخصصی مهندسی معدن؛ گرایش استخراج؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ دانشگاه شاهرود

۲- استادیار؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ دانشگاه شاهرود

۳- دانشیار؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ دانشگاه شاهرود

۴- کارشناس ارشد مکانیک سنگ؛ مهندسین مشاور زاینده‌آب

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۱/۱۱/۳۰؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۲۱

واژگان کلیدی	چکیده
تونل کوه‌رنگ ۳ اجزای گسسته نرخ جریان آب خصوصیات درزه‌ها بازشدگی درزه	بدون تردید جریان آب در پروژه‌های تونلسازی یکی از مسائلی است که می‌تواند آثار مخرب فراوانی بر طرح داشته و فعالیت تونلسازی را کاملاً تحت تاثیر قرار دهد. بنابراین لازم است محل و مقدار جریان آب به درون تونل تا حد امکان پیش‌بینی و در ملاحظات تونلسازی در نظر گرفته شود. از سوی دیگر تجربیات گذشته نشان داده است پیش‌بینی دقیق مقدار نفوذ آب در تونل‌های حفر شده در سنگ به دلیل عدم در نظر گرفتن تمامی عوامل تاثیرگذار بر جریان آب به خصوص شرایط و خصوصیات ناپیوستگی‌ها امکان‌پذیر نیست. در این مقاله برای مدلسازی تاثیر خصوصیات ناپیوستگی‌ها بر روی نرخ جریان آب ورودی به تونل در مقطع کیلومتراژ ۱+۸۹۷ تا ۱+۹۵۰ تونل کوه‌رنگ ۳، از نرم‌افزار اجزای گسسته‌ی UDEC استفاده و با تغییر خصوصیات ناپیوستگی‌های منطقه، نرخ جریان ورودی به تونل بررسی شده است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داده است تغییر خصوصیات ناپیوستگی‌ها در نرخ جریان پایدار آب در تونل دارای تاثیر بسزایی است و از میان این خصوصیات، میزان بازشدگی درزه، بیش‌ترین تاثیر را بر نرخ جریان آب ورودی به تونل دارد.

۱- پیشگفتار

بیش‌ترین شیب هیدرولیکی باشد [1].
در سازندهای سخت، حرکت آب در مسیر درزه‌ها، شکاف‌ها و ناپیوستگی‌ها و همواره در جهت شیب هیدرولیکی است [2]. پیش‌بینی دقیق نفوذ آب در محیط‌های سنگی به لحاظ عدم توانایی در تعیین تمامی عوامل تاثیرگذار بر جریان آب (خصوصیات ناپیوستگی‌ها) امکان‌پذیر نیست؛ بر همین اساس در بحث پیش‌بینی نرخ نفوذ آب به درون تونل‌ها و تاثیر شرایط محیط اطراف تونل تحقیقات نسبتاً وسیعی انجام شده است [3]، [4] و [5]. مطالعات ایندرا راتنا (*Indraratna*) و همکارانش [6] بر روی

برای احداث سازه‌های زیرزمینی یا طراحی معادن، تحلیل حرکت آب‌های زیرزمینی در محدوده‌ی مورد نظر مسئله‌ای ضروری است. در این تحلیل‌ها باید رفتار آب‌های زیرزمینی منطقه مورد بررسی قرار گرفته و امکان هر نوع تغییر در رفتار و رژیم جریان و تاثیر آن بر عملیات احداث، بهره‌برداری و نگهداری سازه مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. بررسی رفتار آب‌های زیرزمینی پس از احداث سازه‌های زیرزمینی از آن جهت حائز اهمیت است که حرکت آب همواره در جهتی است که دارای کوتاه‌ترین مسیر و

دارند. این ساختارها سیستم‌های به هم پیوسته‌ای از ناپیوستگی‌ها هستند و از نظر نوع شامل سطوح لایه‌بندی، درزه‌های ساختاری و گاهی سایر ساختارها نظیر حفره‌ها هستند.

۳- مولفه‌های جریان آب به درون تونل

از آن‌جا که آب زیرزمینی بیشتر در میان درزه‌های مسطح و صفحه‌ای جریان دارد، می‌توان پذیرفت که مناسب‌ترین مدل برای جریان در توده‌سنگ، جریان ورقه‌ای (*Sheet Flow*) در میان درزه‌ها است؛ اما عدم امکان تعریف دقیق سیستم درزه‌های صفحه‌ای مرتبط با هم، در یک تونل قبل از اجرا باعث عدم کارایی این روش می‌شود. بنابراین با در نظر گرفتن ماهیت اطلاعات که معمولاً قبل از اجرای تونل در دسترس است، به نظر می‌رسد استفاده از روش‌های تحلیلی بر اساس مفاهیم جریان آب در محیط‌های متخلخل مفیدتر است [11].

- در تخمین نفوذ آب به درون تونل می‌توان دو مولفه‌ی جریان به سمت تونل را در نظر گرفت (شکل ۱)، [12]:
- جریان اولیه در جبهه‌کار با علامت q_h (*Initial Heading Inflow*) که بلافاصله پس از حفر تونل، در جبهه‌کار به وقوع می‌پیوندد.
 - جریان پایدار بلندمدت با علامت q_s (*Long Terms Steady State Flow*) که در طول زمان اجرا و بهره‌برداری حاکم است.

۳-۱- جریان آب اولیه در جبهه‌کار

بدیهی است که جریان آب در جبهه‌کار بلافاصله پس از حفاری بیشتر از جریان در حالت پایدار درازمدت یعنی جریان در حالت تعادل است. دلایل این امر را می‌توان به شرح زیر برشمرد [12]:

- وجود جریان سه‌بعدی در جبهه‌کار تونل
- گرادیان هیدرولیکی بالاتر در جبهه‌کار
- کاهش ذخیره‌ی آب

۳-۲- جریان آب در حالت پایدار

برای تخمین جریان آب در حالت پایدار، دو حالت جریان قائم و جریان شعاعی مورد توجه قرار می‌گیرد (شکل ۲). جریان قائم زمانی صادق است که منبع تغذیه یا حجم زیادی

جریان آب تک‌فازی در شکاف سنگ و مطالعات گاتینونی (*Gattinoni*) و همکارانش [7] بر روی مدل‌سازی جریان آب در تک‌درزه همراه با نقاط تماس مختلف، از جمله این مطالعات است. یکی دیگر از روش‌های تخمین جریان آب ورودی به تونل معادلات تحلیلی هستند که به دلیل بهره‌گیری از ساده‌سازی‌ها و فرضیات عملی، کاربرد زیادی در محاسبه‌ی نشت آب به تونل‌ها دارند [8].

علاوه بر روش‌های تحلیلی که بیانگر تخمینی کلی از وضعیت نشت هستند، با استفاده از روش‌های عددی نظیر اجزای محدود (*FEM*)، اختلاف محدود (*FDM*)، اجزای گسسته (*DEM*) و حجم محدود (*FVM*) نیز می‌توان وضعیت نشت به محیط تونل را شبیه‌سازی و سپس مقادیر نشت در نواحی مختلف ساختگاه محاسبه نمود [9]. با توجه به اینکه نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی به دلیل در نظر گرفتن شرایط محیطی حاکم، به واقعیت نزدیک‌تر است، استفاده از این روش‌ها در تحلیل جریان آب ورودی به تونل توصیه می‌شود. در این پژوهش سعی شده است علاوه بر اعتبارسنجی روش‌های عددی و تحلیلی با استفاده از داده‌های واقعی در منطقه، میزان تاثیر پارامترهای درزه بر روی نرخ جریان آب ورودی به تونل مورد بررسی قرار گیرد.

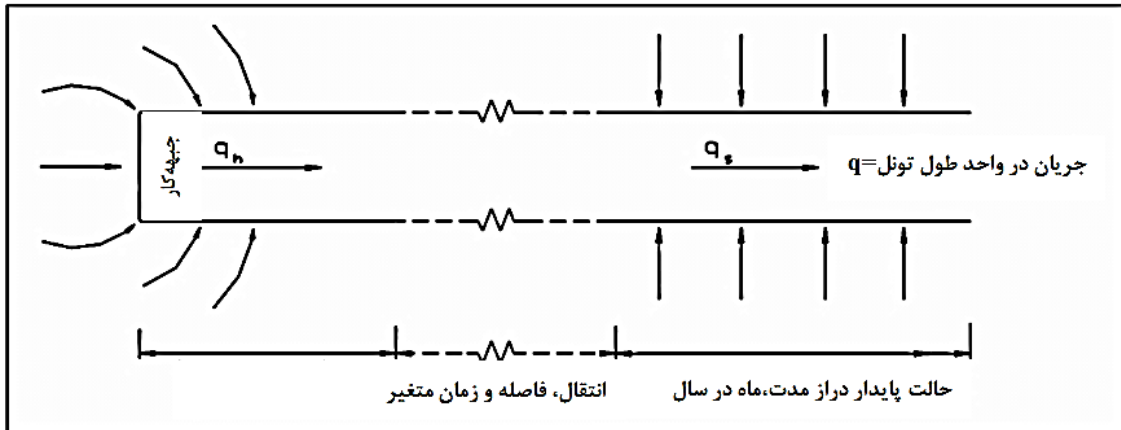
۲- ساختارهای هدایت‌کننده‌ی جریان

در بیشتر پروژه‌های تونلسازی، مصالح سنگی نسبتاً ناتراوا هستند و حفرات بین دانه‌ای عامل مهمی برای نفوذ آب به درون تونل محسوب نمی‌شوند. جریان آب در تونلسازی و نفوذ آن به درون تونل معمولاً از طریق ناپیوستگی‌های موجود در توده‌سنگ‌ها صورت می‌گیرد. بر این اساس عوامل و ساختارهای کنترل‌کننده‌ی جریان آب را می‌توان به دو گروه تقسیم‌بندی نمود [10]:

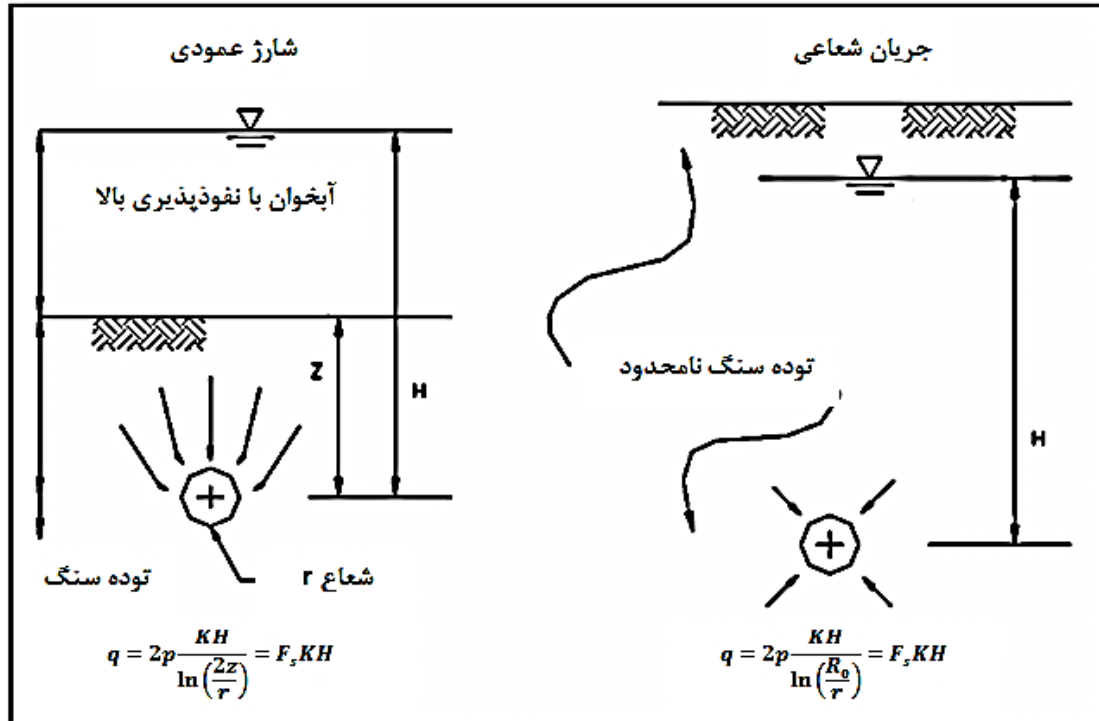
- ساختارهای منفرد (*Singular Structures*)
این ساختارها سرچشمه‌های موضعی هستند که نفوذ آب به درون تونل از طریق آن‌ها از نظر مقدار قابل توجه است. گسله‌های حاوی برش‌های دانه‌ای تمیز، توده سنگ‌های بسیار خرد شده، درزه‌های منفرد باز و تیوب‌های گدازه‌ای از جمله‌ی این ساختارها محسوب می‌شوند.
- ساختارهای منشعب (*Distributed Structures*)
ساختارهای منشعب معمولاً در سراسر توده‌سنگ وجود

کاملاً در یک آبخوان محصور نفوذ کرده) توسعه یافته است، استفاده نمود. این مدل در مورد تونل‌هایی که منبع تغذیه‌ی آن‌ها ضخامت زیادی دارد، صادق است. محاسبات نشان داده است تنها هنگامی که Z در مدل جریان قائم خیلی کوچک است تفاوت بین این دو حالت قابل توجه است [12].

از آب در یک تراز ثابت، نزدیک به تونل باشد. برای مثال هنگامی که تونل زیر یک دریاچه یا آبخوان بسیار تراوا قرار دارد. جریان شعاعی آب به سمت تونل همانند جریان آب به سمت چاه‌های پمپاژ است. برای تخمین جریان می‌توان از همان معادله‌ای که برای تخمین جریان در اطراف چاه‌ها (که



شکل ۱- نمایش شماتیک دو مولفه‌ی جریان آب به درون تونل [12]



شکل ۲- مدل‌های مختلف جریان آب: جریان قائم در تونل‌های کم عمق و جریان شعاعی در تونل‌های عمیق [12]

۴- زمین‌شناسی منطقه‌ی مورد مطالعه

تونل انتقال آب کوه‌رنگ ۳ برای انتقال آب رودخانه‌ی بیرگان (کوه‌رنگ) و سیلاب‌های فصلی از سرشاخه‌های رود کارون به دشت زاینده‌رود و ایران مرکزی، برای تامین آب کشاورزی، صنعتی و شرب در منطقه‌ی کوه‌رنگ در دست ساخت است. مشخصات فنی طرح در جدول ۱ و خصوصیات ژئومکانیکی مقطع مورد مطالعه در جدول ۲ و جدول ۳ آورده شده است. در این مقطع مقدار روباره ۲۵۰ متر و سطح آب زیرزمینی ۲۰۰ متر است. دبی آب ورودی به تونل ۴ لیتر بر دقیقه اندازه‌گیری شده است [۱۳].

جدول ۱- مشخصات فنی طرح

پارامتر	مقدار
تراز کف دهانه‌ی ورودی تونل	۲۲۰۰ متر از سطح دریا
تراز کف دهانه‌ی خروجی تونل	۲۱۸۲ متر از سطح دریا
قطر حفاری تونل	۴٫۹ متر (نعل اسبی)
قطر نهایی تونل	۴٫۱ متر (دایره‌ای)
شیب کف تونل	۰٫۰۰۷۴۲
طول تونل	۲۳۴۰۹ متر
رژیم هیدرولیکی تونل	تحت فشار
حداکثر دبی قابل انتقال	۴۴٫۵ متر مکعب بر ثانیه
نوع پوشش	بتن مسلح به ضخامت ۰٫۴ متر
حداکثر روباره‌ی تونل	۱۳۴۰ متر زیر کوه زراب

نهبسته‌های جوان‌تر شده است، زون گسله‌ی زراب در دولومیت‌های تریاس، گسل لاغرک جنوبی و گسل لاغرک شمالی در آهک‌های کارستی سروک، گسل نعلاشک‌نان در محل تماس مارن‌های گورپی با آهک‌های آبدار سروک [۱۳].

جدول ۲- خصوصیات ژئومکانیکی مقطع

پارامتر	مقدار
نوع سنگ	آهک
مقاومت فشاری تک محوره (MPa)	۴۰-۵۰
وزن مخصوص (Kg/m^3)	۲۵۷۰
زاویه‌ی اصطکاک (Degree)	۴۵
ضریب پواسون	۰٫۲۵
RMR	۴۵
Q	۵
RQD	۴۰-۵۰

جدول ۳- مشخصات ناپیوستگی‌های مقطع

پارامتر درزه	دسته‌ی درزه ۱	دسته‌ی درزه ۲
جهت‌داری (Degree)	-۵۰	۳۰
فاصله‌داری (m)	۰٫۸	۰٫۵
سختی برشی (GPa/m)	1×10^{10}	1×10^{10}
سختی نرمال (GPa/m)	1×10^{10}	1×10^{10}
بازشدگی (m)	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۰۵
نفوذپذیری (I/MPa.S)	۳۰۰	۳۰۰

۵- تخمین جریان آب ورودی به تونل

برای تخمین نفوذ آب به درون تونل بدون پوشش آب‌بند از روش‌های تحلیلی، تجربی و عددی استفاده می‌شود.

۵-۱- روش‌های تحلیلی

روش‌های تحلیلی متعددی برای پیش‌بینی نرخ آب ورودی به درون تونل‌ها وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش‌های گودمن (Goodman) [11]، کارلسرود (Karlsrud) [14]، ال تانی (El Tani) [15] و لی (Lei) [16] اشاره نمود. روش‌های تحلیلی از قوانین حاکم بر جریان آب در اطراف چاه‌ها پیروی می‌کنند. از آنجا که تمامی این روش‌ها دارای مبانی تئوریک هستند، نتایج به دست آمده در این روش‌ها نزدیک به هم هستند. مجموعه‌ای از این نوع معادلات در جدول ۴ آورده شده است. این معادلات در

تونل سوم کوه‌رنگ از نظر تقسیمات چینه‌شناسی ایران در زون زاگرس بلند واقع شده و از سازندهای مختلف عبور می‌نماید. زمین‌شناسی تونل از سمت ورودی به سمت خروجی تونل به ترتیب شامل: مارن‌های سبز دریاچه‌ای آب شیرین، مارن‌های قرمز تشکیل‌دهنده میوسن، آهک‌های کارستی کرتاسه (زون گسله‌ی شهریار)، دولومیت‌های تریاس، آهک‌های کرتاسه‌ی پایینی و آهک‌های کرتاسه‌ی میانی (سروک)، مارن‌های کرتاسه‌ی بالایی (سازند گورپی)، کنگلومرای پالئوسن، آهک‌های نازک‌لایه و ضخیم‌لایه‌ی ائوسن و آهک‌های توده‌ای الیگومیوسن (سازند آسماری) است [۱۳].

گسل‌های بزرگی مسیر تونل سوم کوه‌رنگ را قطع می‌کنند از جمله: گسل شهریار که به صورت یک زون گسله باعث راندگی آهک‌های کرتاسه‌ی شهریار بر روی

واقعی آب به سمت تونل تقریباً یک هشتم مقادیر جریان آب محاسبه شده از روابط تحلیلی است [18].

برای رفع این مسئله در شکل ۳ رابطه‌ی تجربی بین متوسط جریان آب به درون تونل در حالت پایدار بلندمدت و تراوایی معادل توده‌سنگ حاصل از آزمایش‌های فشار آب استاندارد با پکر، پیشنهاد شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود در این نمودار جریان پایدار بر حسب ارتفاع سطح آب (H) نرمال شده است. شکل ۳ رابطه‌ی تجربی میان جریان واقعی (اندازه‌گیری شده) آب به سمت تونل و نتایج آزمایش‌های فشار آب گمانه‌های اکتشافی، در پروژه‌های مختلف را نشان می‌دهد و مبنای تئوری ندارد [18].

۵-۳- روش‌های عددی

در روش‌های عددی، به طور معمول از نرم‌افزارهای مختلفی که قابلیت کاربرد در این زمینه را دارند می‌توان بهره برد. در این نرم‌افزارها با ارائه‌ی شرایط مرزی (مرزهای هد ثابت، جریان ثابت و یا فاقد جریان) و معرفی ویژگی‌های هیدروپنوماتیکی لایه‌ی آبدار و نیز مختصات هندسی لایه‌ها، موقعیت تونل و مقطع آن، میزان هد آب زیرزمینی در نقاط مختلف یک لایه‌ی آبدار و نشت آب به درون تونل محاسبه می‌شود.

شرایط زیر معتبر نیستند [17]:

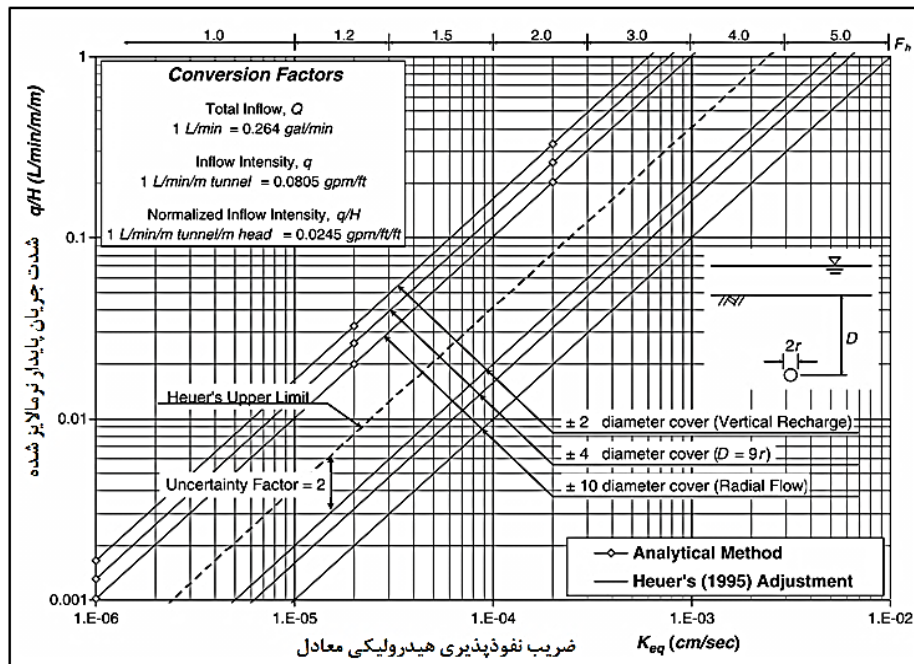
- جریان عبوری از تونل به صورت قائم باشد.
- لایه‌بندی در اطراف تونل بسیار متغیر باشد.
- نفوذپذیری توده‌سنگ اندازه‌گیری نشده باشد.

جدول ۴- معادلات تحلیلی تخمین جریان آب ورودی

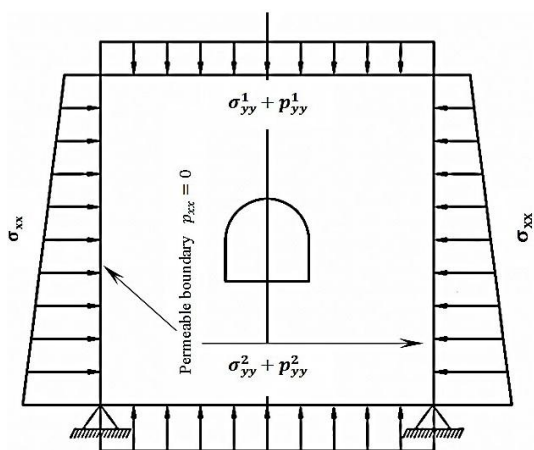
روش	گزاره‌ی تحلیلی
Goodman	$q = \frac{2\pi Kh}{\ln\left(\frac{2h}{r}\right)}$
Karlsrud	$q = \frac{2\pi Kh}{\ln\left(\frac{2h}{r} - 1\right)}$
Lei	$q = \frac{2\pi Kh}{\ln\left(\frac{h}{r} + \sqrt{\frac{h^2}{r^2} - 1}\right)}$
El Tani	$q = \frac{2\pi Kh}{\left(1 + 0.4 + \left(\frac{r}{h}\right)^2\right) \ln\frac{2h}{r}}$

۵-۲- روش‌های تجربی

تجربه نشان داده است جریان آب به سمت تونل در حالت پایدار بلندمدت معمولاً بسیار کمتر از مقداری است که با فرض نفوذپذیری معادل حاصل از تست‌های فشار آب و با استفاده از روابط تحلیلی محاسبه می‌شود. به نظر جریان



شکل ۳- رابطه‌ی میان جریان متوسط پایدار و تراوایی معادل توده‌سنگ [18]

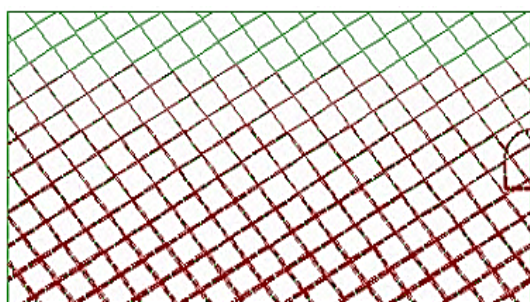


شکل ۴- شرایط مرزی اعمال شده به مدل

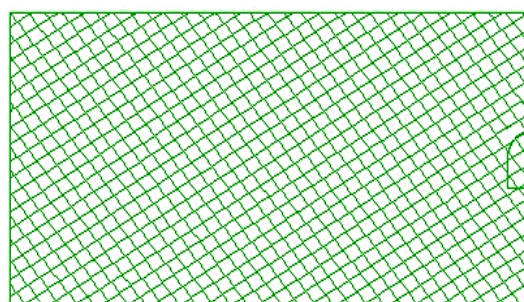
به دلیل حجیم بودن محاسبات و متقارن بودن مقطع تنها نیمی از آن مدل شده است. پس از کالیبره کردن مدل، مطالعه‌ی پارامتری برای بررسی تاثیر خصوصیات درزه بر روی جریان آب ورودی به تونل انجام شده است. در شکل ۵ و شکل ۶ کانتورهای جریان و فشار آب قبل و پس از حفاری آورده شده است.

روش‌های عددی برخلاف روش‌های تحلیلی از سادگی محاسباتی برخوردار نیستند. همچنین به اطلاعات جامعی از محیط ساختگاه تونل نیاز دارند و از ساده‌سازی‌ها و فرضیات کمتری برخوردار هستند؛ در نتیجه روش‌های عددی بسیار پیچیده‌تر بوده و بکارگیری آن‌ها نیز بسیار زمان‌بر است. اما نتایج دقیق‌تری را نسبت به روش‌های تحلیلی ارائه می‌نمایند. بدیهی است صحت محاسبات انجام شده توسط نرم‌افزار بستگی به صحت مقادیر پارامترهای ورودی دارد [19].

در این پژوهش برای بررسی تاثیر پارامترهای درزه بر روی جریان آب ورودی به تونل، مدل عددی مقطع مورد نظر در نرم‌افزار UDEC بر اساس خصوصیات ژئومکانیکی و پارامترهای درزه‌های موجود (جدول ۲ و جدول ۳) مدل‌سازی و ابعاد مدل ساخته شده 200×100 در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی در محیط UDEC با تعریف هندسه و مش‌بندی متناسب، معرفی خواص سنگ و خصوصیات ناپیوستگی‌ها و اعمال شرایط مرزی مناسب (شکل ۴) می‌توان تحلیل جریان را انجام داد.

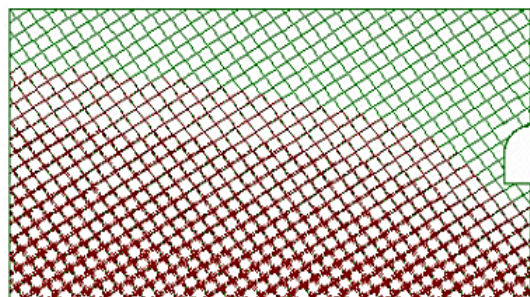


ب- فشار ($Max\ Pressure = 9.995E+05$)

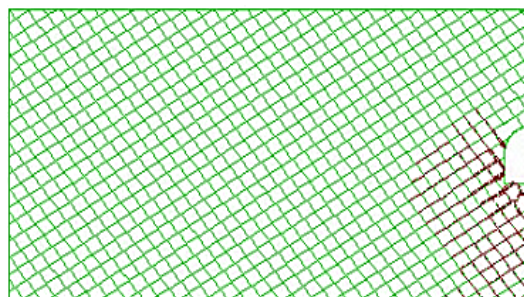


الف- جریان ($Max\ Flow\ Rate = 00E+00$)

شکل ۵- کانتورهای جریان آب و فشار آب پیش از حفاری



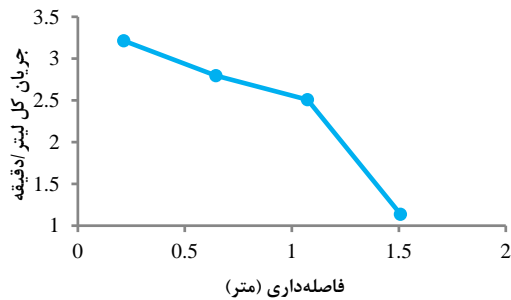
ب- فشار ($Max\ Pressure = 9.994E+05$)



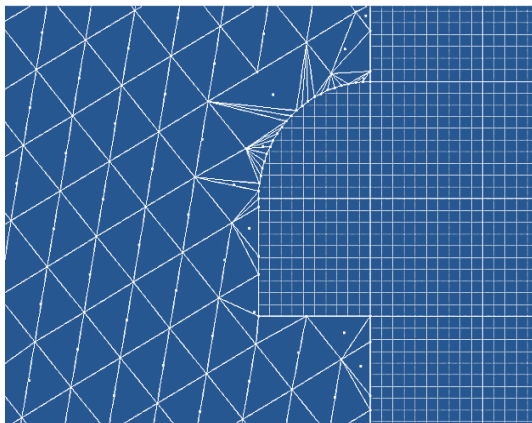
الف- جریان ($Max\ Flow\ Rate = 5.050E-05$)

شکل ۶- کانتورهای جریان و فشار آب پس از حفاری

گنجاندن تاثیر بازشدگی در طول دیواره‌ی درزه بر روی مدل معکبی انجام شده است. بدین منظور، نامنظمی‌های موجود در طبیعت به صورت سگمنت‌هایی کوچک روی صفحات موازی مدل می‌شود [6].



شکل ۷- تغییرات جریان کل آب ورودی نسبت به فاصله‌داری ناپیوستگی



شکل ۸- ابعاد بلوک‌ها در مرز تونل: فاصله‌داری ۰٫۵



شکل ۹- ابعاد بلوک‌ها در مرز تونل: فاصله‌داری ۱٫۵ متر

۶- بررسی تاثیر خصوصیات ناپیوستگی بر روی جریان آب ورودی به تونل

خصوصیات تاثیرگذار ناپیوستگی‌ها بر روی جریان آب ورودی به تونل به شرح ذیل است:

- بازشدگی
- زبری
- فاصله‌داری
- تنش‌های برشی و نرمال
- جهت‌داری

با توجه به این‌که امکان مدل‌سازی زبری در نرم‌افزار وجود ندارد از بررسی تاثیر آن بر روی نرخ جریان آب صرف نظر شده است.

۶-۱- بررسی تاثیر فاصله‌داری ناپیوستگی بر روی جریان آب

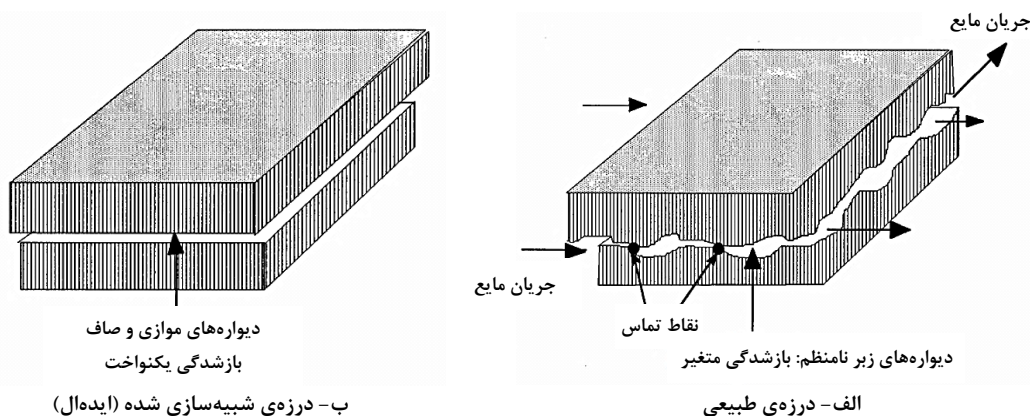
برای بررسی تاثیر فاصله‌داری ناپیوستگی بر روی جریان آب، فاصله‌داری دسته‌درزه‌ی یک از مقدار ۰٫۸ متر به مقادیر ۰٫۵، ۱ و ۱٫۵ متر در مدل، تغییر داده شده است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود با افزایش فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها مقدار نرخ جریان ورودی به تونل کاهش می‌یابد. با توجه به افزایش فاصله‌داری، ابعاد بلوک‌ها در واحد سطح بیش‌تر شده و چگالی درزه‌های اطراف تونل کم و تعداد درزه‌ی کمتری دیواره‌ی تونل را قطع می‌کند (شکل ۸ و شکل ۹)؛ در نتیجه نرخ جریان آب ورودی به تونل از ۳٫۲ لیتر بر دقیقه به ۱٫۲ لیتر بر دقیقه کاهش یافته است.

۶-۲- بررسی تاثیر بازشدگی ناپیوستگی بر روی جریان آب

بازشدگی درزه یکی از پارامترهای کلیدی تعیین خصوصیات جریان در توده‌سنگ است (شکل ۱۰). اندازه‌گیری توزیع بازشدگی درزه به دو صورت انجام می‌پذیرد [6]:

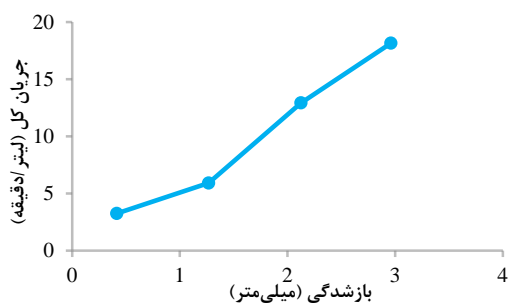
- روش مستقیم (بازشدگی مکانیکی)
- روش غیرمستقیم (بازشدگی هیدرولیکی)

درزه‌ها در طبیعت دارای سطحی زبر، دیواره‌هایی نامنظم و دارای چندین نقطه‌ی تماس در طول دیواره‌ی درزه هستند. برای بررسی تاثیر بازشدگی درزه بر روی جریان آب، تک‌درزه‌ها به صورت دیواره‌های صاف و بدون زبری شبیه‌سازی می‌شوند (شکل ۱۰). بررسی‌های متعددی برای



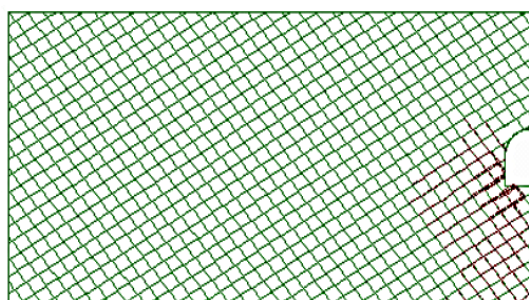
شکل ۱۰- جریان درون تک‌درزه [9]

جابجایی‌های برشی افزایش می‌یابد.

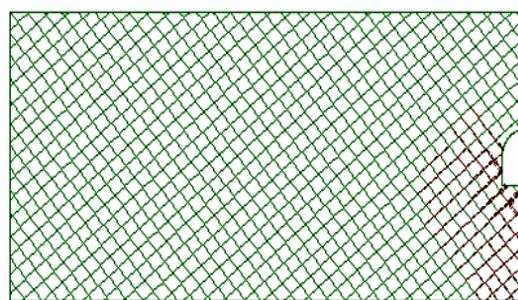


شکل ۱۱- تغییرات جریان کل نسبت به تغییرات بازشدگی

برای بررسی تاثیر بازشدگی ناپیوستگی بر روی جریان آب، بازشدگی دسته‌ی درزه‌ی دو از ۰.۵ میلی‌متر به ۲، ۱ و ۳ میلی‌متر تغییر داده شده است. با افزایش بازشدگی صفحات درزه، نرخ جریان ورودی به تونل از ۳ لیتر بر دقیقه به ۱۸ لیتر بر دقیقه افزایش یافته است. این تغییرات در شکل ۱۱ و شکل ۱۲ قابل ملاحظه است. با توجه به این‌که توزیع بازشدگی درزه، با تنش‌های برشی یا نرمال تغییر می‌کند؛ در نتیجه قابلیت انتقال درزه وابسته به شدت این تنش‌ها است. مطالعات آزمایشگاهی نشان داده است قابلیت انتقال درزه در تنش‌های نرمال کاهش می‌یابد ولی در اثر



ب- بازشدگی ۳ میلی‌متر ($Max\ Flow\ Rate=1.747E+00$)



الف- بازشدگی ۱ میلی‌متر ($Max\ Flow\ Rate=5.357E-03$)

شکل ۱۲- کانتورهای جریان در اطراف تونل

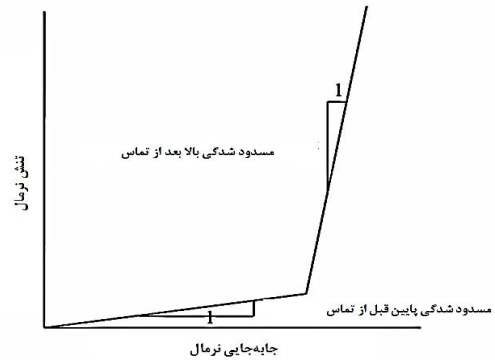
بدون هیچگونه تغییری در سختی، در تنش کنترل‌شده‌ی نرمال بوجود می‌آید؛ در نتیجه اتساع برشی در طول لغزش بین ۲ سطح زیر که با هندسه‌ی درزه کنترل می‌شود، اتفاق می‌افتد و بازشدگی درزه افزایش می‌یابد. هیستوگرام فراوانی توزیع بازشدگی درزه در اثر تغییر شکل برشی در شکل ۱۴

تغییر شکل درزه‌ها در اثر تنش‌های نرمال، رفتار مسدودکننده از خود نشان می‌دهد. قبل از اینکه سطح درزه‌ها با هم تماس پیدا کند، تغییر شکل مسدودکننده‌ی قابل توجهی اتفاق می‌افتد (شکل ۱۳)، [19].
تغییر شکل برشی در اثر لغزش بلوک بالایی درزه

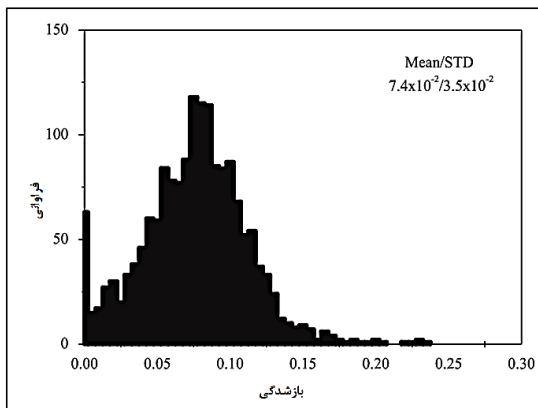
۳-۶- بررسی تاثیر جهت‌داری ناپیوستگی بر روی جریان آب

برای بررسی تاثیر جهت‌داری ناپیوستگی بر روی نرخ جریان ورودی به تونل زاویه‌ی دسته‌درزه‌ی یک ثابت در نظر گرفته شده و جهت‌داری دسته‌درزه‌ی دوم از ۳۰ درجه به ۴۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ تغییر داده شده است. همان طور که در شکل ۱۵ نشان داده شده است، زمانی‌که زاویه‌ی دسته‌درزه بین ۵۰ تا ۷۰ درجه قرار می‌گیرد، نرخ جریان آب ورودی به تونل حداکثر مقدار را خواهد داشت؛ زیرا در این حالت امتداد درزه‌ها، عمود بر دیواره‌ی تونل قرار می‌گیرد و حداکثر جریان به داخل تونل هدایت می‌شود. شکل ۱۶ مدل‌های ساخته شده در جهت‌داری ۴۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه نشان می‌دهد.

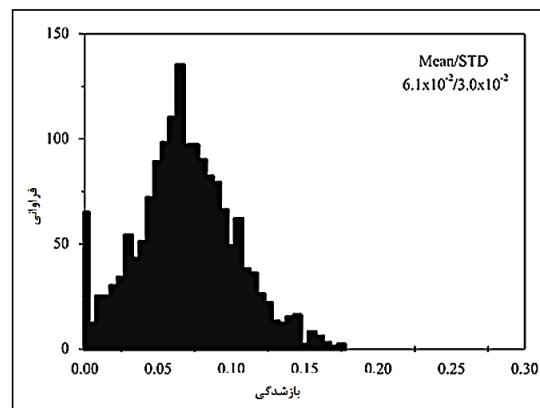
نشان داده شده است. با افزایش تغییر شکل برشی مقادیر میانگین و انحراف معیار توزیع بازشدگی‌ها افزایش پیدا کرده است.



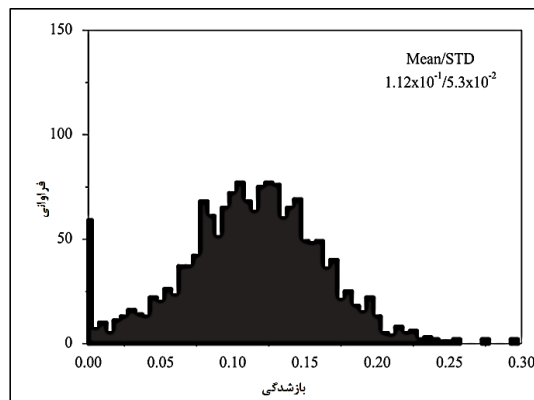
شکل ۱۳- منحنی بار-جابجایی برای شبیه‌سازی تاثیر تنش نرمال بر روی بازشدگی درزه [19]



ب- پس از تغییر شکل برشی (1 mm)



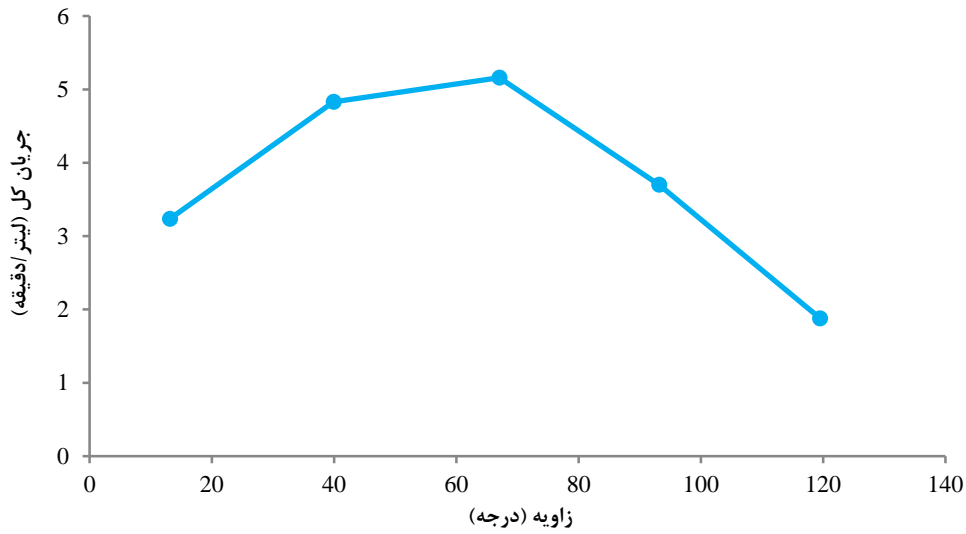
الف- بدون تغییر شکل برشی



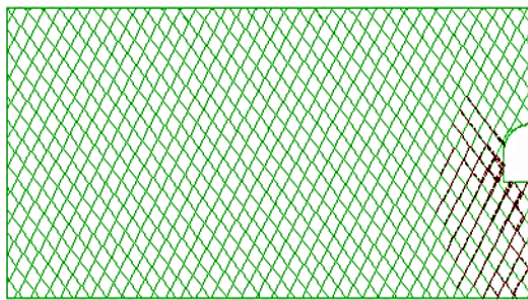
ب- پس از تغییر شکل برشی (2 mm)

شکل ۱۴- هیستوگرام فراوانی توزیع بازشدگی درزه در اثر تغییر شکل برشی [19]

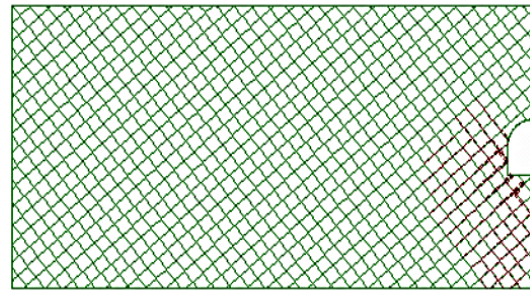
بررسی تاثیر خصوصیات درزه‌ها بر روی جریان پایدار آب ورودی به تونل - مطالعه‌ی موردی: تونل سوم کوه‌رنگ : ص ۱۵۵-۱۶۷



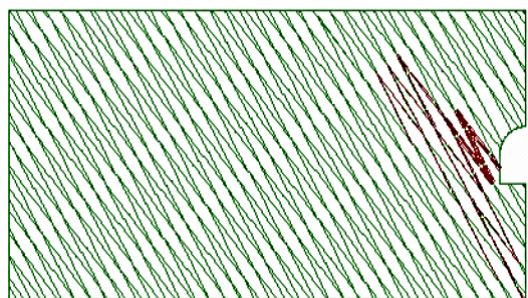
شکل ۱۵- تغییرات جریان کل با تغییرات جهت‌داری درزه



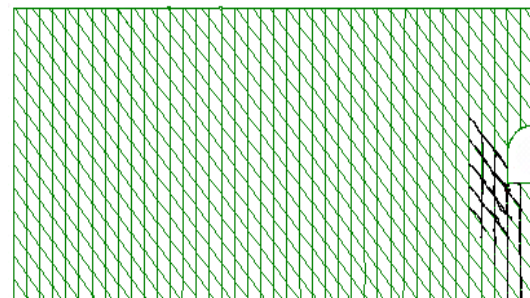
ب- جهت‌داری ۶۰ درجه ($Max\ Flow\ Rate=5.563E-03$)



الف- جهت‌داری ۴۰ درجه ($Max\ Flow\ Rate=5.357E-05$)



ت- جهت‌داری ۱۲۰ درجه ($Max\ Flow\ Rate=6.687E-06$)



پ- جهت‌داری ۹۰ درجه ($Max\ Flow\ Rate=1.330E+00$)

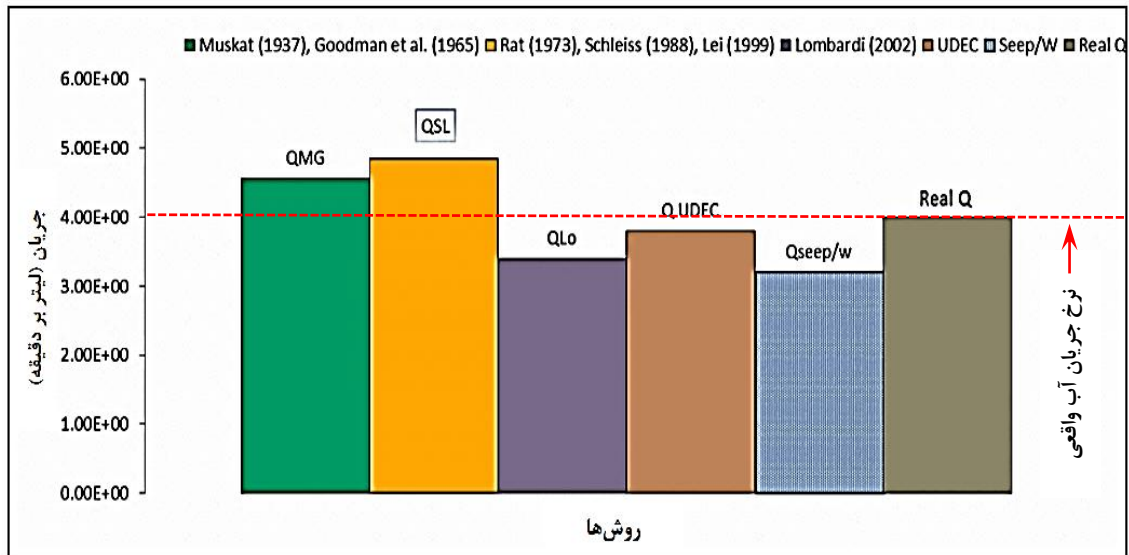
شکل ۱۶- مدل‌های با جهت‌داری‌های مختلف

محاسبه و با مقادیر نرخ جریان حاصل از مدلسازی عددی و مقادیر واقعی نرخ جریان (که در حین حفر تونل کوه‌رنگ ۳ وجود داشته) مقایسه شده است (شکل ۱۷). همان‌طور که

۷- اعتبارسنجی نتایج مدلسازی عددی

برای اعتبارسنجی نتایج، مقادیر نرخ جریان ورودی به تونل با استفاده از روش‌های تحلیلی ارایه شده در جدول ۴

مشاهده می‌شود، نرخ جریان ورودی به تونل حاصل از مدلسازی عددی (۳/۸ لیتر بر دقیقه) به مقدار واقعی نرخ جریان (۴ لیتر بر دقیقه) نزدیک‌تر از مقادیر حاصل از روش‌های تحلیلی است.



شکل ۱۷- مقایسه‌ی نرخ جریان محاسبه شده (عددی و تحلیلی) با نرخ جریان واقعی

توجهی داشته است (۶ برابر). علاوه بر این با افزایش زاویه‌ی دسته‌درزه‌ی یک از ۳۰ درجه تا ۱۲۰ درجه نسبت به امتداد تونل، بیش‌ترین مقدار جریان ورودی به تونل در زاویه‌ی بین ۵۰ تا ۷۰ درجه اتفاق افتاده است؛ زیرا در این حالت امتداد درزه‌ها عمود بر دیواره‌ی تونل قرار می‌گیرد و حداکثر جریان به درون تونل هدایت می‌شود. با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش از میان خصوصیات ناپیوستگی‌ها، پارامتر بازشدگی درزه، بیش‌ترین تاثیر را در نرخ جریان آب ورودی به تونل دارد؛ بنابراین اندازه‌گیری و در نظر گرفتن این پارامتر در مطالعات پایه و طراحی‌ها در تونلسازی توصیه می‌شود.

۸- نتیجه‌گیری

با توجه به مشکلات ناشی از هجوم آب به درون تونل پیش‌بینی نرخ جریان واقعی به تونل در طراحی‌ها بسیار حائز اهمیت است. بدین منظور در این مقاله به بررسی تاثیر پارامترهای درزه (جهت‌داری، بازشدگی و فاصله‌داری) بر روی نرخ جریان پایدار آب پرداخته شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داده است که با افزایش فاصله‌داری درزه‌ها نرخ جریان ورودی به تونل به دلیل افزایش ابعاد بلوک‌های تشکیل شده کاهش می‌یابد. با افزایش بازشدگی درزه از ۱ میلی‌متر به ۳ میلی‌متر، جریان ورودی به تونل افزایش قابل

۹- سیاهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح	نماد	واحد	شرح
q_s	lit/min	جریان پایدار آب در تونل	q_h	lit/min	جریان اولیه‌ی آب در جبهه‌کار
r	m	شعاع تونل	K	-	ضریب نفوذپذیری سنگ
q	lit/min	آب ورودی	h	m	فاصله از مرکز تونل تا سطح ایستایی

۱۰- منابع‌ها

- [1] Song, W. K., Hamm, S. Y., & Cheong, J. Y. (2006). Estimation of Groundwater Discharged into a Tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(3-4), 460. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2005.12.098>.

- [2] Raymer, J. H. (2001). Predicting Groundwater Inflow into Hard-Rock Tunnels: Estimating the High-End of The Permeability Distribution. *Rapid Excavation and Tunneling Conference* (pp. 1027-1038). ISSN: 10459065.
- [3] AFTES Working Group. (1989). Recommendations for The Treatment of Water Inflows and Outflows in Operated Underground Structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 4(3), 343-407. [http://dx.doi.org/10.1016/0886-7798\(89\)90084-9](http://dx.doi.org/10.1016/0886-7798(89)90084-9).
- [4] 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(1), 19-34. [http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798\(02\)00098-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798(02)00098-6).
- [5] 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. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(2), 206-209. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2007.02.004>.
- [6] Indraratna, B., Ranjith, P. G., & Gale, W. (1999). Single Phase Water Flow Through Rock Fractures. *Geotechnical & Geological Engineering*, 17(3-4), 211-240. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1008922417511>.
- [7] Gattinoni, P., Scesi, L., & Terrana, S. (2009). Water Flow in Fractured Rock Masses: Numerical Modeling for Tunnel Inflow Assessment. *EGU General Assembly Conference Abstracts* (pp. 468). Bibliographic Code: [2009EGUGA..11..468G](http://dx.doi.org/10.1023/A:1008922417511).
- [8] Zhang, L., & Franklin, J. (1993). Prediction of Water Flow into Rock Tunnels: An Analytical Solution Assuming An Hydraulic Conductivity Gradient. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 30(1), 37-46. [http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062\(93\)90174-C](http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(93)90174-C).
- [9] Aalianvari, A., Katibeh, H., & Mahmudabadi, H. (2009). Estimation of Equivalent Permeability in Amirkabir Tunnel Alignment with Neural Network. *21st International Mining Congress and Exhibition of Turkey* (pp. 6-8). ISSN: 1409-8288.
- [10] Berkowitz, B. (2002). Characterizing Flow and Transport in Fractured Geological Media: A Review. *Advances in Water Resources*, 25(8-12), 861-884. [http://dx.doi.org/10.1016/S0309-1708\(02\)00042-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0309-1708(02)00042-8).
- [11] Goodman, R. E., Moye, D. G., Van Schalkwyk, A., & Javandel, I. (1964). *Ground Water Inflows During Tunnel Driving*. College of Engineering, University of California.
- [12] Shin, Y. J., Kim, B. M., Shin, J. H., & Lee, I. M. (2010). The Ground Reaction Curve of Underwater Tunnels Considering Seepage Forces. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(4), 315-324. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2010.01.005>.
- [۱۳] مهندسین مشاور زاین‌آب. (۱۳۸۴). تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری اولیه‌ی تونل سوم کوهرنگ.
- [14] Karlsrud, K., & Kvelde, V. (2002). Control of Water Leakage When Tunnelling under Urban Areas in The Oslo Region. *Proceedings of the Second International Conference on Soil Structure Interaction in Urban Civil Engineering: Planning and Engineering for the Cities of Tomorrow*. ISBN: 3000091696.
- [15] El Tani, M. (2003). Circular Tunnel in a Semi-Infinite Aquifer. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18(1), 49-55. [http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798\(02\)00102-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798(02)00102-5).
- [16] Lei, S. (1999). An Analytical Solution for Steady Flow into a Tunnel. *Ground water*, 37(1), 23-26. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-6584.1999.tb00953.x>.
- [17] Hwang, J. H., & Lu, C. C. (2007). A Semi-Analytical Method for Analyzing The Tunnel Water Inflow. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22(1), 39-46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2006.03.003>.

- [18] Heuer, R. E. (1995). Estimating Rock Tunnel Water Inflow. *Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference* (pp. 41-60). ISSN: 10459065.
- [19] Crandall, D., Bromhal, G., and Karpyn, Z. T. (2010). Numerical Simulations Examining The Relationship between Wall-Roughness and Fluid Flow in Rock Fractures. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(5), 784-796. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2010.03.015>.

Investigation of the Influence of Joints Properties on the Steady State Water Flow into the Tunnel - A Case Study: Koohrang 3 Tunnel

Technical Note

R. Rafiee¹; A. Ramezanzadeh²; F. Sereshki³; E. Movahedinejad⁴

1- Ph.D. Candidate in Mining Eng.; Faculty of Mining Eng., Petroleum, and Geophysics; University of Shahrood

2- Assistant Professor; Faculty of Mining Eng., Petroleum, and Geophysics; University of Shahrood

3- Associate Professor; Faculty of Mining Eng., Petroleum, and Geophysics; University of Shahrood

4- M.Sc. in Rock Mechanics; Supervisor of Zayand-Ab Consulting Engineering Company

Received: 18 Feb 2013; Accepted: 12 Mar 2014

Keywords

Koohrang 3 tunnel
Discrete element method
Water flow rate
Joint properties
joint aperture

Extended Abstract

Water flow in tunneling projects is one of the main issues that can affect the plan and activity of the tunneling. Therefore, it is necessary to predict the location and the amount of water flow into the tunnel. Past experience have shown that the accurate prediction of water flow in the excavated tunnels is not possible due to the lack of consideration all influencing factors,

especially the properties and condition of joints. In this paper, in order to investigate the effect of joints properties on the water flow rate, the cross sections of Koohrang 3 from 1+897 to 1+950 km have been modeled using UDEC software. By changing the properties of joints, the flow water rate into the tunnel has been assessed. The results of this study have shown that changing the properties of joints has significant influence on the steady state water flow. Among these properties, the aperture of joint has the most significant effect on water flow rate in the tunnel.

Introduction

Analysis of water flow is necessary for construction of underground structures. In this analysis, the possibility of any kind of change in the ground water behavior and flow rate should be considered. In this paper, the effect of joints properties on the water flow rate using numerical modeling has been studied.

Methodology and Approaches

Joints properties have great influence on the water flow rate into tunnels. In order to investigate the effect of joints characteristics on the water flow rate, the cross sections of Koohrang 3 tunnel have been modeled using UDEC software. By changing the joints properties in the tunnel, the water flow rate into the tunnel has been assessed. Finally, The water flow rates obtained from the numerical modeling results has been compared with the values obtained from the analytical methods.

Results and Conclusions

The results of this study have shown that the increase of the joint spacing reduce the water flow rate into the tunnel due to the increase of size of formed blocks. In addition, increase of the joint aperture substantially increases the amount of water flow into the tunnel. Moreover, by increasing the joint orientation from 30 to 120 degrees, the maximum water flow occurs at the angle between 50 and 70 degrees. According to the results of this investigation on the joints properties, the joint aperture has the greatest effect on the water flow rate into the tunnel.