

روش‌های عددی و تحلیلی در بررسی تأثیر اجرای رینگ تزریق پیرامون تونل در کاهش آب ورودی به آن

علی عالی انوری^{۱*}؛ مجید مسعودی^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، ali_aalianvari@Kashanu.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری تخصصی، گروه معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، Masoudi@Staff.Kashanu.ac.ir

(دریافت ۲۸ آذر ۱۳۹۳، پذیرش ۱۶ اسفند ۱۳۹۴)

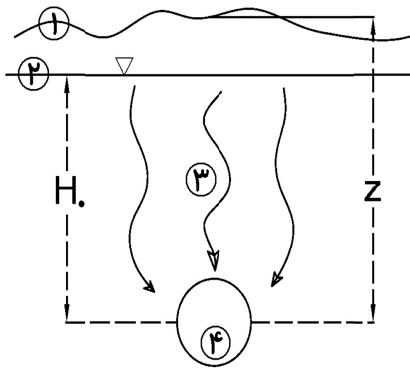
چکیده

پس از آب‌گیری سدها، تونل انحراف آن به‌طور کامل تحت تأثیر تراز آب مخزن سد قرار می‌گیرد بنابراین پیش‌بینی مقدار آب ورودی به تونل بسیار مهم است. در این مقاله، با استفاده از مدل‌های تحلیلی و روش محاسباتی المان محدود، مقدار نشت آب به درون تونل، در دو حالت قبل از ایجاد رینگ تزریق و پس از آن تخمین زده شده است. به‌منظور بررسی میزان دقت مدل‌های تحلیلی و عددی، از نتایج میزان نشت آب ثبت شده در تونل انحراف آب سد آزاد استفاده شد. روند تغییرات مقادیر تحلیلی و عددی نشت در طول تونل در حد قابل قبولی یکسان بوده، اما مقدار آن‌ها در برخی از نواحی اختلاف قابل توجهی دارد که بیشتر ناشی از هندسه‌ی مدل و شرایط مرزی است. میزان متوسط نشت آب به درون تونل با استفاده از روابط تحلیلی قبل و پس از تزریق در گستره‌ی تونل (طول ۴۹۶ متری)، محاسبه شد و مشاهده شد که میزان نشت میانگین قبل از تزریق ۱۶۱/۷۰ لیتر بر ثانیه بوده که با ایجاد رینگ تزریق به طول ۴ متر پیرامون این تونل، این میزان به ۱۱/۲ لیتر بر ثانیه کاهش یافت. همچنین با استفاده از مدل‌سازی عددی میزان نشت برآورد شد. این بررسی‌ها نیز نشان داد که مقدار آب ورودی به تونل بدون در نظر گرفتن المان آب‌بند در حدود ۳۷/۸ لیتر بر ثانیه است که با مدل‌کردن رینگ تزریق پیرامون آن، مقدار نشت به ۲۲ لیتر بر ثانیه کاهش یافت. بررسی و مقایسه نتایج، با مقدار واقعی آب اندازه‌گیری شده درون تونل سد آزاد پس از تزریق (۱۸ لیتر بر ثانیه)، نشان داد که در میان مدل‌ها، مدل‌سازی عددی با ۲۲/۲۲ درصد خطا، بهترین روش برای تخمین نشت آب است. بعد از آن مدل‌های تحلیلی روستن‌گرین با ۲۸/۶۶ درصد خطا و واگورکت با ۳۶/۲۱ درصد، خطای کمتری در برآورد نشت آب دارد. مدل NFF با ۹۴/۴۴ درصد خطا، ضعیف‌ترین روش در پیش‌بینی میزان نشت است.

کلمات کلیدی

تونل، جریان ورودی، تزریق دوغاب، المان محدود

تحلیلی حاکم بر جریان آب به سمت تونل‌ها قبل از عملیات تزریق را نشان می‌دهد. شکل ۱ نشان‌دهنده کلیاتی در ارتباط با پارامترهای مورد استفاده در روابط ارائه شده در جدول ۱ است.



شکل ۱: معرفی پارامترهای مورد استفاده در روابط ارائه شده در جدول ۱، ۱. سطح زمین؛ ۲. سطح ایستابی ۳. محیط حرکت آب. پارامتر نفوذپذیری معادل، K، در این محیط محاسبه و تعیین می‌شود، ۴. محیط درون تونل [۸]

معادلات تحلیلی ارائه شده در شرایط ذیل از حیثه اعتبار ساقط می‌شوند؛

۱. جریان عبوری از توده سنگ اطراف تونل به صورت شعاعی به داخل تونل نباشد.
 ۲. تغییرات لایه‌بندی در توده سنگ اطراف تونل بسیار شدید باشد.
 ۳. نفوذپذیری توده سنگ به طور صحیحی مشخص نشده باشد.
- التانی در سال ۲۰۰۳ با بررسی هر کدام از روابط بالا، نتایج آن‌ها و مقایسه با میزان واقعی نفوذ آب به تونل، میزان دقت این روابط را با توجه به عمق ساختگاه تونل، مورد ارزیابی قرار داده است. این ارزیابی با بهره‌گیری از رابطه ۱ انجام شده است [۳]:

$$\Delta = \frac{Q_{ap} - Q}{Q} \quad (1)$$

که در آن، Q_{ap} ، میزان تقریبی نفوذ آب، یعنی همان Q_L در روابط ۱ تا ۶ است؛ Q ، میزان واقعی نفوذ آب و Δ ، خطای نسبی ناشی از محاسبه نفوذ آب به تونل‌ها در مورد هر یک از روابط تحلیلی است.

۱-مقدمه

بدون تردید جریان آب به درون تونل‌های در حال ساخت یکی از مسائلی است که می‌تواند آثار مخرب فراوانی بر روند عملیات داشته و فعالیت تونل‌سازی را به طور کامل تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین لازم است محل و مقدار جریان آب به داخل تونل پیش‌بینی شده و در ملاحظات تونل‌سازی در نظر گرفته شود. مهم‌ترین مشکلات ناشی از نشت آب به درون تونل، شامل کاهش پایداری توده سنگ اطراف تونل، اعمال فشار اضافه بر سیستم نگهدارنده دائم و موقت، تأثیرات تخریبی بر وضعیت ژئومکانیکی سنگ، توقف یا کاهش سرعت عملیات اجرایی و در نهایت ایجاد خطرات جانی و مالی است. برای جلوگیری از ورود آب به درون تونل راه‌کارهای فراوانی وجود دارد یکی از مهم‌ترین فعالیت‌ها، ایجاد دیواره یا رینگ تزریقی با نفوذپذیری کم پیرامون تونل با استفاده از عملیات تزریق است [۱].

در اکثر پروژه‌های اجرایی تونل، تعیین میزان تزریق مناسب، محاسبه و طراحی محدوده بهینه رینگ تزریق در اطراف تونل یکی از مهم‌ترین مشکلات پیش روی تونل‌سازی است چون تزریق بیش از اندازه مستلزم صرف هزینه و وقت اضافی است و در مقابل تزریق کم و ناکافی نیز باعث عقیم ماندن پروژه به-سازی تونل شده و مشکلات نشت آب به درون تونل حل نمی‌شود.

در این تحقیق به منظور بررسی کارایی مدل‌های تحلیلی ارائه شده برای محاسبه نشت آب به درون تونل، مقدار آب ورودی به تونل انحراف سد آزاد پیش و بعد از عملیات تزریق با معادلات تحلیلی حاکم بر جریان آب به درون تونل محاسبه می‌شود و پس از آن با استفاده از روش عددی المان محدود، مقدار آب ورودی به تونل در حالات بالا ارزیابی می‌شود. سپس با استفاده از داده‌های واقعی اندازه‌گیری شده، کارایی مدل‌های بالا ارزیابی شده‌اند [۲].

۲- معرفی روابط و مدل‌های تحلیلی پیش‌بینی کننده میزان نشت آب در تونل

۲-۱- مدل‌های پیش‌بینی کننده میزان نشت آب قبل از عملیات تزریق

روش‌های تحلیلی با تکیه بر معادلات حاکم بر جریان آب به سمت تونل‌ها، با در نظر گرفتن پارامترهایی نظیر نفوذپذیری توده سنگ، ارتفاع سطح ایستابی، شعاع تونل و غیره به تخمین میزان نفوذ آب به تونل‌ها می‌پردازند. جدول ۱ معادلات

جدول ۱: معادلات تحلیلی حاکم بر جریان آب به سمت تونل‌ها قبل از تزریق

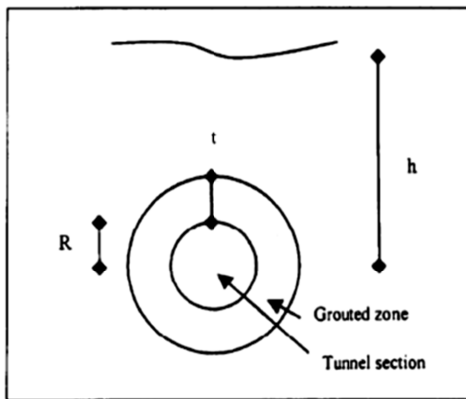
| ردیف | مرجع | توضیحات |
|------|----------------------------------|--|
| ۲ | گودمن [۳] (۱۹۶۵) | $Q = 2\pi K \frac{h}{\ln(\frac{2z}{r})}$ |
| ۳ | فریز و چری [۱۰] (۱۹۷۹) | $Q = \frac{2\pi KH_o}{\ln(\frac{2H_o}{r})}$ |
| ۴ | اودا و سوگیو [۶] (۱۹۸۰) | $q_{inj} = \frac{2\pi K [H - (\frac{PC}{\gamma W} - s)]}{a + (S-R)}$ $\ln \left[\frac{(E^2 + (S-R)^2)^{0.5}}{a - (S-R)} \right]$ $a = \left[\frac{S^2 + R^2}{((S+R)^2 + E)^{0.5} ((S-R)^2 + E)^{0.5}} \right]^{0.5}$ |
| ۵ | کیتامورا و اویشیما [۶] (۱۹۸۶) | $q_{inj} = \frac{2\pi kH}{\ln(\frac{4H}{R})}$ |
| ۶ | بارتون و دیگران [۱] (۱۹۸۶) | $q_{inj} = \frac{2\pi k \cdot g \cdot p_r}{\mu \log(2H/R)}$ |
| ۷ | واگورکت [۱۶] (۱۹۹۳) | $q_{inj} = \frac{2\pi k(H-R)}{\ln(\frac{2H}{R}) + 1}$ |
| ۸ | هیپور [۴] (۱۹۹۵) | $Q_L = \frac{2\pi KH_o}{\ln(\frac{2z}{r})} \times \frac{1}{8}$ |
| ۹ | لی [۷] (۱۹۹۹) | $Q = 2\pi K \frac{h}{\ln(\frac{h}{r} + \sqrt{(\frac{h}{r})^2 - 1})}$ |
| ۱۰ | کارلسرود [۱۲] (۲۰۰۳) | $Q = 2\pi K \frac{h}{\ln(\frac{2h}{r} - 1)}$ |
| ۱۱ | التانی [۹] (۲۰۰۳) | $Q = 2\pi Kh \frac{1 - 3(\frac{r}{2h})^2}{[1 - (\frac{r}{2h})^2] \ln(\frac{2h}{r} - (\frac{r}{2h})^2)}$ |

ثانیه) و Q, Q_L : میزان نفوذ آب در واحد طول تونل است (مترمکعب بر ثانیه).

با توجه به شکل ۲ که به نوعی نشان دهنده مقدار Δ در برخی از روابط بیان شده است، می‌توان گفت هر چه عمق تونل نسبت به سطح ایستابی بیشتر باشد، دقت روابط افزایش می‌یابد. اغلب محاسبات، ضریب نفوذپذیری معادل محیط و تراز آب با

در این معادلات H_0 ، فاصله مرکز تونل تا سطح ایستابی (متر)؛ z ، ضخامت روباره (متر)؛ r ، شعاع تونل (متر)؛ K ، ضریب نفوذپذیری معادل محیط سنگ در امتداد جریان نشت (متر بر

می‌شود. در اثر احداث این رینگ تزریق یافته، میزان نشت آب به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. در جدول ۲ مهمترین روابطی که توسط محققین مختلف، برای تخمین میزان نشت آب در تونل پس از تزریق ارائه شده است معرفی می‌شود.



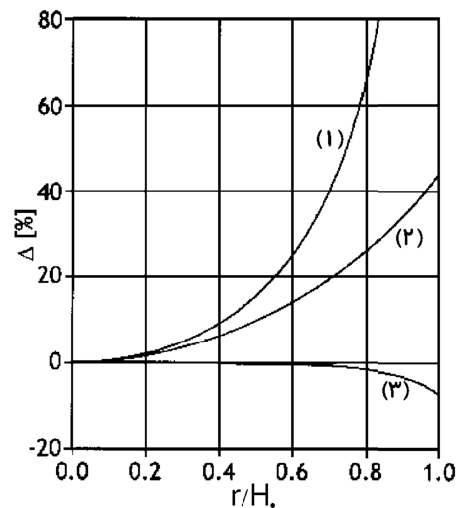
شکل ۳: وضعیت تونل و فضای تزریق یافته در اطراف آن [۴]

۳- مطالعه موردی: تونل انحراف آب سد آزاد

سد مخزنی آزاد، در استان کردستان و بر روی رودخانه کوماسی (چم گوره) از سرشاخه‌های مهم رودخانه سیروان و در مجاورت روستای بنی در دست احداث است. محدوده سد آزاد و نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آزاد بر اساس تقسیم‌بندی زمین ساختی - لرزه زمین ساختی ایران (بربریان ۱۹۷۶) در زون سنندج - سیرجان قرار می‌گیرد. به‌طور کلی محدوده دربرگیرنده گزینه‌های انتخابی طرح از نظر سنگ‌شناسی اغلب شامل واحدهای شیست، فیلیت کلسیتی و فیلیت کوارتزی است. این سنگ‌ها به لحاظ تراوایی کم تا متوسط قرار دارند. در شکل ۴، مقطع زمین‌شناسی در امتداد محور تونل نشان داده شده است.

توجه به اطلاعات ژئوتکنیکی به‌دست‌آمده از گمانه‌های مختلف به‌ویژه گمانه‌های مطالعاتی، کسب می‌شوند. حفاری این قبیل گمانه‌ها اغلب قبل از آغاز حفاری تونل و در مسیر تقریبی حفر آن انجام می‌شود. اطلاعات به‌دست‌آمده از این گمانه‌ها منبع اصلی داده‌های ورودی محاسبات هستند. ارکان اصلی این اطلاعات عبارتند از [۵]:

۱. میزان ضریب نفوذپذیری به‌دست آمده از آزمایش لوژن در گمانه‌ها؛
۲. وضعیت زمین‌شناسی به‌خصوص از نظر لیتولوژی؛
۳. وضعیت ژئوتکنیکی مغزه‌ها به‌ویژه از نظر فاصله‌داری درزه ها، شاخص کیفی توده سنگ.



شکل ۲: خطای نسبی ناشی از هر کدام از روابط تحلیلی ۱ تا ۳ نسبت به شعاع تونل و ارتفاع سطح ایستابی (التانی، ۲۰۰۳؛ با اعمال اندکی تغییر). ۱. رابطه‌ی لی؛ ۲. رابطه‌ی گودمن؛ ۳. رابطه‌ی التالی [۷]

با تبدیل مقادیر لوژن به ضریب نفوذپذیری و محاسبه‌ی میزان متوسط آن‌ها در طول هر گمانه، می‌توان به پارامتر K که به عنوان ضریب نفوذپذیری معادل در محیط سنگ در روابط بالا استفاده شده است، دست‌یافت.

۲-۲ مدل‌های پیش‌بینی‌کننده میزان نشت آب، پس از عملیات تزریق

عملیات تزریق در تونل به‌منظور کاهش میزان نشت آب در آن انجام می‌شود. این فرآیند با تشکیل یک حلقه تزریقی در اطراف دیواره تونل با ضخامت مشخص، مطابق شکل ۳ انجام

جدول ۲: روابط تحلیلی بیان شده برای تخمین میزان نشست پس از تزریق

| شماره رابطه | نام ارائه دهنده رابطه | رابطه ارائه شده | توضیحات |
|-------------|------------------------------------|--|---|
| ۱۲ | آلبرتز و گوستافسون [۱۸]۱ (۱۹۸۳) | $q_{inj} = \frac{2\pi H k b}{\ln\left(\frac{4H}{D}\right) + 2\left(\frac{K}{K_g}\right)\left(\frac{t}{D}\right)}$ | |
| ۱۳ | آلبرتز و گوستافسون [۱۸]۲ (۱۹۸۳) | $q_{inj} = \pi \cdot D \cdot b \cdot \frac{H}{t} \cdot K_g$ | $K_i \ll k$ |
| ۱۴ | واگورکت [۱۶] (۱۹۹۳) | $q_{inj} = \frac{2\pi K_g L H}{\ln\left(\frac{R+t}{R}\right) + \xi}$ | $K \geq 10^{-6} \text{ m/s}$ $= k / 10K_i$ |
| ۱۵ | هاوکینز [۱۴] (۲۰۰۰) | $q_{inj} = \frac{2\pi K H L}{\ln\left(\frac{2H}{r_t}\right) + \left(\frac{K}{K_g} - 1\right) \ln\left(\frac{1+t}{r_t}\right) + \xi}$ | |
| ۱۶ | واگورکت و دالمالم [۱۶] (۲۰۰۱) | $q_{inj} = \frac{2\pi K L (H - R)}{\ln\left(\frac{2H}{R}\right) + \xi}$ | عمق سقف تونل بزرگتر از شعاع تونل |
| ۱۷ | اریکسون [۲] (۲۰۰۲) | $q_{inj} = \frac{2\pi K_g (H - R)}{\ln\left(\frac{R+t}{R}\right) + \frac{K_g}{K} \xi}$ | |
| ۱۸ | معادله NFF [۱۱] (۲۰۰۶) | $q_{inj} = \pi K H \left(\frac{2}{\ln\left(\frac{r+t}{r}\right)}\right)$ | |
| ۱۹ | گوستافسون و هاوکینز [۱۸] (۲۰۰۹) | $q_{inj} = \frac{2\pi T_{tot} H / L}{\ln\left(\frac{2H}{r_t}\right) + \left(\frac{T_{tot}}{T_{inj}} - 1\right) \ln\left(1 + \frac{t}{r_t}\right) + \xi}$ | |
| ۲۰ | روسنگرین [۱۵] (۲۰۱۰) | $q_{inj} = \frac{2\pi K_g H}{\ln\left(\frac{R+t}{R}\right) + \left(\frac{K_g}{K}\right) \ln\left(\frac{2H}{R+t}\right) + \xi}$ | |

که در آن:

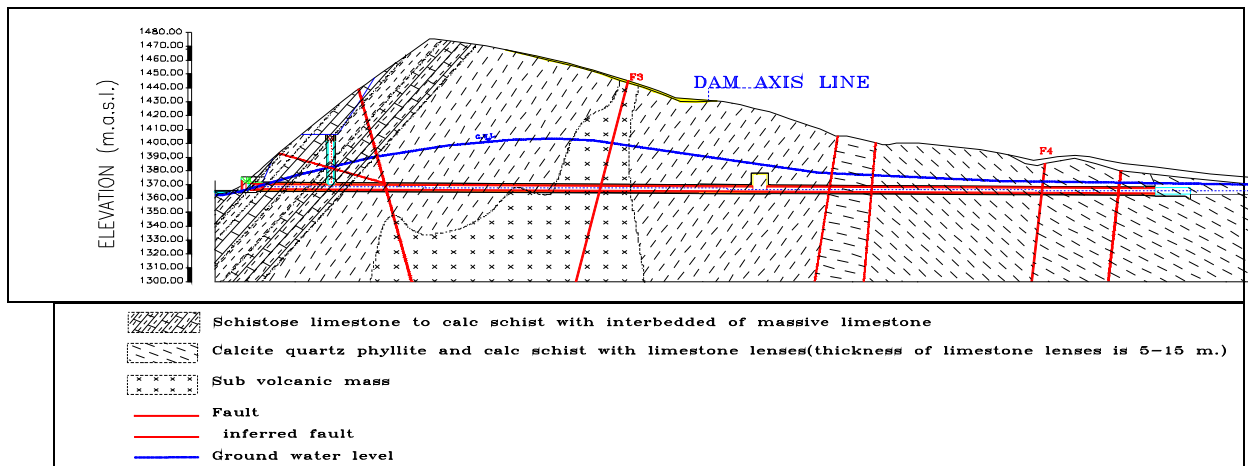
T_{tot} ، ضریب آبگذری تونل تزریق نشده، T_{inj} ، ضریب آبگذری تونل پس از تزریق درزه‌ها، H ، عمق مرکز تونل زیر سطح آب زیرزمینی، R ، شعاع تونل، L ، طول تونل، t ، ضخامت ناحیه‌ی تزریق شده سنگ اطراف تونل، K_g ، فاکتور پوسته (بین ۰-۱)، K ، ضریب نفوذپذیری ناحیه تزریق یافته، K_g ، ضریب نفوذپذیری توده‌سنگ بیرون از منطقه تزریق یافته، h ، هد آب، D ، قطر تونل، T ، وسعت ناحیه تزریق یافته، b ، میزان بازشدگی شکستگی‌های تزریق یافته.

رودخانه کوماسی در پایین دست مخزن نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای آزاد، زهکش اصلی منطقه بوده و کلیه آب‌های سطحی منطقه (محدوده مخزن نیروگاه)، در نهایت به سمت این رودخانه هدایت می‌شوند. بستر رودخانه کوماسی در تمامی مسیر خود از میان واحدهای شیستی و فیلیتی عبور می‌کند و همراه واحدهای آهک شیستی و فیلیت‌ها در رقوم بالاتری نسبت به

تراز آب دریاچه قرار می‌گیرد.

تونل انحراف سد آزاد در تکیه‌گاه راست قرار گرفته‌است. این تونل با قطر داخلی ۵ متر و طول ۴۹۶ متر و ارتفاع ۱۳۶۵٫۹۷ متر در دهانه ورودی دارد که با شیب ۰/۶ درصد به سمت خروجی امتداد می‌یابد. رقوم خروجی تونل ۱۳۶۳ است.

آب رودخانه کوماسی در بالا دست فراز بند وارد تونل انحراف خواهد شد. ورودی تونل انحراف در میان تناوب سنگ‌های آهک شیستی، شیست‌های آهکی و فیلیت قرار می‌گیرد و این مجموعه تا کیلومتر ۰+۶۰ تا ۰+۶۵ ادامه می‌یابد. در ادامه مسیر تونل انحراف از میان سنگ‌های دگرگونی فیلیتی عبور می‌کند که عدسی‌ها و عدسی‌های آهک شیستی با ضخامت‌های محدود دارد. علاوه بر آن دایک‌ها و زبانه‌های آذرین با ترکیب نیمه‌عمقی به صورت پراکنده، بخش‌های مختلف مسیر تونل را به صورت محدود قطع می‌کند.



شکل ۴: مقطع زمین شناسی در امتداد محور تونل [۲۴]

۴- نتایج مدل سازی

۴-۱- نتایج مدل های تحلیلی

با توجه به اطلاعات موجود در سایت تونل انحراف آب سد آزاد، میزان نشت آب قبل و پس از تزریق، از بین روابط معرفی شده، با استفاده از روابط ممکن، محاسبه شد. اطلاعات فنی مورد نیاز در برآورد تحلیلی نشت در جدول ۳ ارائه شده است و نتایج محاسبات در جدول ۴ و ۵ آمده است.

جدول ۳: اطلاعات فنی مورد نیاز در برآورد تحلیلی نشت

| نام پارامتر | مقدار مورد نظر |
|--|---------------------------|
| شعاع تونل (R) | ۳ متر |
| طول تونل (L) | ۶۰۰ متر |
| هد آب (H) | ۴۰ متر |
| فاکتور پوسته (K _s) | ۴ |
| ضریب نفوذپذیری قبل از تزریق (K) | ۰/۰۰۰۰۰۵۲ متر بر ثانیه |
| ضریب نفوذپذیری پس از تزریق (K _g) | ۰/۰۰۰۰۰۰۳۹ متر بر ثانیه |
| ضریب آب گذاری قبل از تزریق (T=K _s .b) | ۰/۰۰۰۱۷۶ مترمربع بر ثانیه |
| ضریب آب گذاری پس از تزریق (T=K _g .b) | ۰/۰۰۰۰۲۳ مترمربع بر ثانیه |

۴-۲- نتایج مدل سازی عددی

با تعیین شرایط مرزی (شامل مرزهایی با هد ثابت، جریان ثابت و یا مرزهای بدون جریان)، وضعیت نفوذپذیری محیط نشت، موقعیت تونل و مقطع آن به عنوان پارامترهای ورودی یک روش محاسبات عددی، می توان میزان هد آب زیرزمینی در نقاط مختلف محیط اشباع را در حالت پایدار محاسبه کرد و سپس با توجه به آن مقادیر میزان نشت آب به درون تونل را ارزیابی کرد. به منظور مدل سازی و برآورد نشت، تعیین هندسه مدل و ارائه شرایط مرزی بسیار مهم است بنابراین به منظور بهره گیری از روش عددی، پس از بررسی پارامترهای زمین شناسی واحدهای مختلف سنگی (جدول ۳)، هندسه هر مقطع از تونل تعیین شده و مدل اجرا شد در واقع ابعاد هندسی هر مقطع باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا شرایط حاکم بر مرزها و خصوصیات آن با دقت قابل قبولی به وضعیت واقعی نزدیک شود. با توجه به سطح کیفی محاسبات از جنبه ی مقایسه با نتایج تحلیلی، گستره ی هندسی هر مقطع به صورت مستطیل در نظر گرفته شد که مرز بالایی آن به عنوان سطح زمین با جریان ورودی ثابت بر اساس بیلان هیدرولوژیک محلی فرض شد. نرم افزار مورد استفاده از مجموعه نرم افزارهای GeoStudio بوده که با استفاده از روش عددی المان محدود به بررسی مقدار نشت آب به درون تونل می پردازد. این نرم افزار توانایی ارائه به تفکیک اطلاعات هر کدام از واحدهای زمین شناسی و همچنین منطقه تحت تأثیر تزریق را دارد که در مدل ساخته شده همه ویژگی های واحدهای مختلف در نرم افزار وارد شده اند.

جدول ۴: میزان جریان ورودی آب محاسبه شده از روابط مختلف در حالت قبل از تزریق (اعداد به صورت لیتر بر ثانیه بر متر در یک ستون و در ستون دیگر به صورت لیتر بر ثانیه است)

| نام ارائه دهنده رابطه | میزان جریان ورودی آب محاسبه شده (m ³ /s/m) | مقدار آب ورودی به کل تونل (lit/sec) |
|-----------------------|---|-------------------------------------|
| گودمن | $398/0.31 \times 10^{-6}$ | ۱۹۷/۴۲ |
| فریز و چری | $398/478 \times 10^{-6}$ | ۱۹۷/۶۴ |
| هیوور | $49/753 \times 10^{-6}$ | ۲۴/۶۷ |
| لی | $398/2.2 \times 10^{-6}$ | ۱۹۷/۵۰ |
| کارلسرود | $402/743 \times 10^{-6}$ | ۱۹۹/۷۵ |
| التانی-۱ | $397/128 \times 10^{-6}$ | ۱۹۶/۹۷ |
| التانی-۲ | $395/310 \times 10^{-6}$ | ۱۹۶/۰۷ |
| واگورکت | $165/987 \times 10^{-6}$ | ۸۲/۳۲ |
| کیتامورا و اوهشیما | $328/697 \times 10^{-6}$ | ۱۶۳/۰۳ |

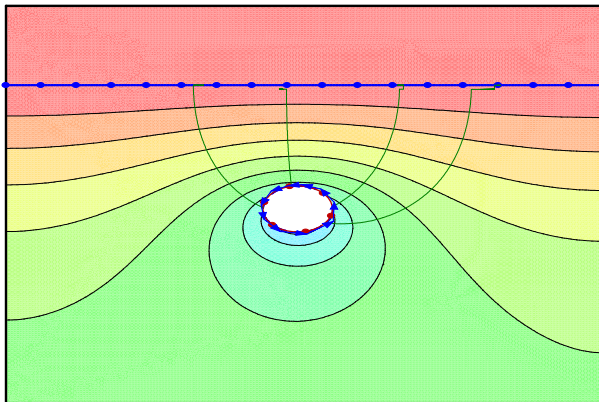
جدول ۵: میزان جریان ورودی آب محاسبه شده از روابط مختلف در حالت پس از تزریق (اعداد به صورت لیتر بر ثانیه بر متر در یک ستون و در ستون دیگر به صورت لیتر بر ثانیه است)

| نام ارائه دهنده رابطه | میزان جریان ورودی آب محاسبه شده (m ³ /sec/m) | مقدار آب ورودی به کل تونل (lit/sec) |
|-----------------------|---|-------------------------------------|
| گوستافسون و هاوکینز | $0/988 \times 10^{-6}$ | ۰/۴۹ |
| روسنگرین | $18/63 \times 10^{-6}$ | ۹/۲۴ |
| هاوکینز | $2/228 \times 10^{-6}$ | ۱/۱۰۵ |
| اریکسون | $64/840 \times 10^{-6}$ | ۳۲/۱۶ |
| معادله NFF | $89/269 \times 10^{-6}$ | ۴۴/۲۷۷ |
| واگورکت ودالاما | $10/291 \times 10^{-6}$ | ۵/۱۰۴ |
| آلبرتز و گوستافسون | $0/527 \times 10^{-6}$ | ۰/۲۶۱ |
| آلبرتز و گوستافسون | $0/592 \times 10^{-6}$ | ۰/۲۹۳ |
| واگورکت | $15/893 \times 10^{-6}$ | ۷/۸۸۲ |

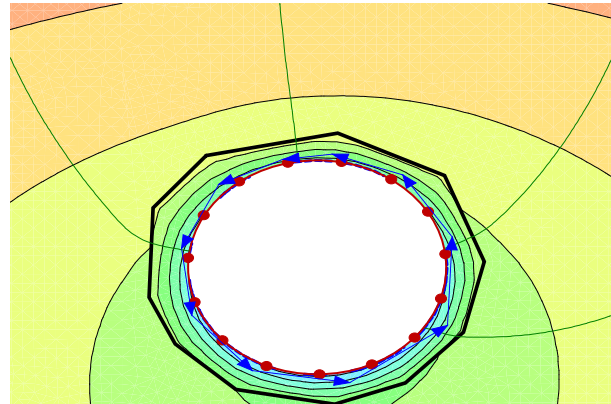
مدل ساخته شده متشکل از حدود ۱۲۰۰ المان است و برای انجام محاسبات در حدود ۱۴۰۰۰ گره بررسی شده است (شکل‌های ۵ و ۶).

با توجه به نتایج مدل‌سازی عددی، مقدار آب ورودی به تونل در هر متر آن بدون در نظر گرفتن المان آب‌بند در حدود ۳۷،۸ لیتر بر ثانیه برآورد شده است که با مدل کردن پرده تزریق پیرامون آن مقدار نشت به ۲۲ لیتر بر ثانیه برای طول ۴۹۶ متری تونل کاهش خواهد یافت.

شرایط مرزی به گونه‌ای انتخاب شد که دو مرز جانبی چپ و راست و مرز تحتانی به‌عنوان مرزهای فاقد جریان در نظر گرفته شده‌اند. موقعیت تونل با توجه به شرایط توپوگرافی و ایستابی بروی محور تقارن عمودی این مستطیل مستقر شد. میزان گستره‌ی هر مستطیل با توجه به طول تأثیر گمانه‌ی مربوطه تعیین شده است. المان‌های بکاررفته در مش‌بندی درون هر مدل، از نوع المان‌های مثلثی ۱۵ گرهی هستند. هر



شکل ۶: مدل تهیه شده بدون در نظر گرفتن المان آب بند پیرامون تونل



شکل ۵: مدل تهیه شده با در نظر گرفتن المان آب بند پیرامون تونل

محیط ناپیوسته باوجود شکستگی‌ها و ناپیوستگی‌های فراوان است. در بین مدل‌ها، مدل NFF و مدل‌های آلبرتز و گوستافسون به دلیل ساده‌سازی بیشتر و در نظر گرفتن پارامترهای تأثیرگذار کمتر، خطای بیشتری نشان می‌دهند.

انتقاد و ایراد دیگری که بر این مدل‌ها وارد است این است که در این روابط، محیط سنگی اطراف تونل را به صورت یکپارچه با وضعیت کیفی و نفوذپذیری یکسان در نظر گرفته شده و نشست آب و نیز حرکت دوغاب سیمانی در تمام جهات به صورت یکسان و مانند فضای یک دیسک در اطراف گمانه به صورت شعاعی است، در حالی که به دلیل تفاوت لیتولوژیکی واحدهای مختلف سنگی، نفوذپذیری این واحدها متفاوت است و می‌بایست در مدل‌ها و روابط تحلیلی در نظر گرفته شوند. از سوی دیگر در روابط ارائه شده وجود عارضه‌ها و ساختارهای زمین‌شناسی مانند گسل‌ها در نظر گرفته نشده‌اند که در مدل‌سازی عددی قابل مدل شدن هستند.

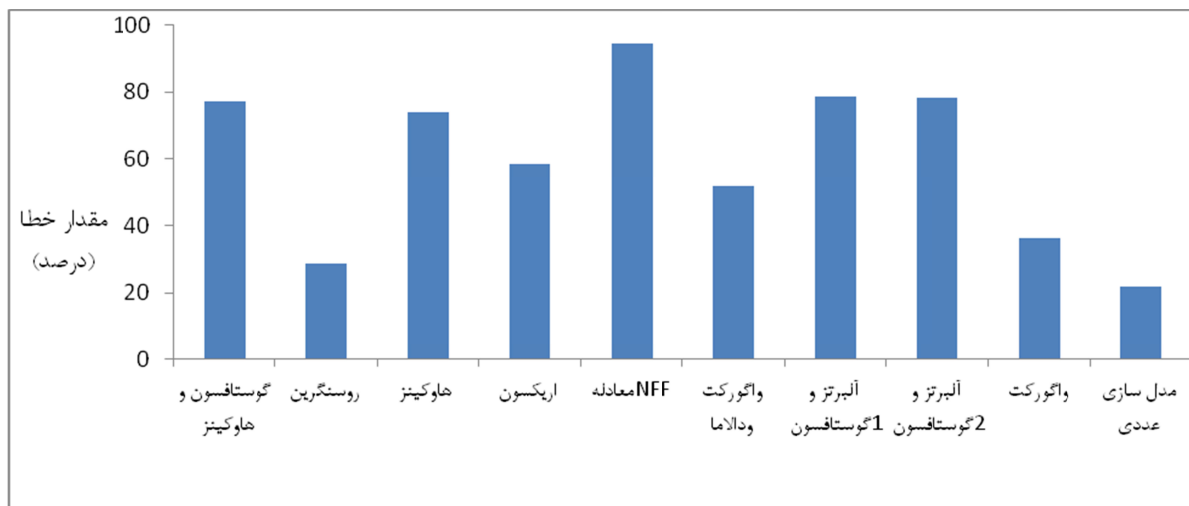
از سوی دیگر در روابط تحلیلی ناپیوستگی‌ها، درزه و شکاف‌های موجود در توده سنگ به صورت مجزا و بدون هیچ رابطه‌ای با یکدیگر فرض شده‌اند در صورتیکه در واقعیت، در میان ناپیوستگی‌ها ارتباط هیدرولیکی برقرار است که تراوایی توده سنگ را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین با در نظر گرفتن دلایل ارائه شده می‌توان علت خطای محاسباتی با روش‌های تحلیلی را توجیه کرد.

۴-۳- بحث و نتایج

با توجه به مجموع محاسبات انجام شده به منظور تخمین میزان نشست آب در تونل با استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی و مقایسه با میزان نشست واقعی ثبت شده در تونل انحراف سد آزاد که در حدود ۱۸ لیتر بر ثانیه است، خطای مدل‌ها در برآورد میزان نشست با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد. در شکل ۷ روند تغییرات میزان خطای محاسباتی نشان داده شده است.

$$E = (Q_{\text{real}} - Q_m) / Q_{\text{real}} \quad (21)$$

در رابطه ۲۱، Q_{real} میزان نشست واقعی و Q_m میزان نشست محاسباتی از مدل‌هاست. لازم به ذکر است مقدار نشست واقعی در حالت قبل از تزریق اندازه‌گیری نشده است و اطلاعات آن در دسترس نیست از این رو، خطاهای اندازه‌گیری شده در حالت پس از تزریق قابل محاسبه است. با توجه به نتایج شکل ۷، مشاهده می‌شود که در بین مدل‌های تحلیلی و عددی معرفی شده، مدل‌سازی عددی با ۲۲/۲۲ درصد خطا در مقایسه با میزان نشست واقعی، بهترین مدل برای تخمین نشست آب است و مدل NFF با ۹۴/۴۴ درصد خطا، ضعیف‌ترین مدل در پیش‌بینی میزان نشست است. دلیل متفاوت بودن مقادیر خطای محاسباتی از مدل‌های مختلف، اختلاف در مقدار پارامترهای مؤثر در برآورد میزان نشست است. مدل‌های تحلیلی بیان شده محیط تزریق را یک محیط پیوسته در نظر گرفته‌اند و با این پیش‌فرض ارائه شده‌اند. در حالی که توده سنگ یک



شکل ۷: روند تغییرات میزان خطای محاسباتی با استفاده از مدل‌های تحلیلی و عددی

۵- نتیجه گیری

آنچه در این مقاله بررسی شد تلاشی به منظور برآورد میزان نشت آب ورودی به تونل است. بدین منظور مهم‌ترین روابط تحلیلی ارائه شده توسط محققین مختلف معرفی و بررسی شدند و برای اعتبارسنجی این روابط از نتایج میزان نشت آب ثبت شده در تونل انحراف آب سد آزاد استفاده شد. میزان متوسط نشت آب به درون تونل با استفاده از روابط تحلیلی قبل و پس از تزریق در گستره‌ی تونل در طول ۴۹۶ متری، محاسبه و مشاهده شد که به‌طور میانگین میزان نشت، قبل از تزریق ۱۶۱/۷۰ لیتر بر ثانیه بوده که با ایجاد رینگ تزریق به طول ۴ متر پیرامون این تونل، این میزان به ۱۱/۲ لیتر بر ثانیه کاهش یافت. سپس به‌منظور بررسی تأثیر ایجاد رینگ تزریقی در کاهش نشت آب ورودی به تونل، از تحلیل‌های ریاضی و عددی استفاده شد و با توجه به میزان نشت واقعی ثبت شده در تونل انحراف سد آزاد پس از تزریق، که در حدود ۱۸ لیتر بر ثانیه است خطای مدل‌های معرفی شده در برآورد نشت آب محاسبه شد. نتایج نشان داد که مدل‌سازی عددی با ۲۲/۲۲ درصد خطا در مقایسه با میزان نشت واقعی، بهترین مدل برای تخمین نشت آب است. بعد از آن مدل‌های تحلیلی روسنگرین با ۲۸/۶۶ درصد خطا و واگورکت با ۳۶/۲۱ درصد کمترین خطا را در برآورد نشت آب داشتند. لازم به ذکر است مدل NFF با ۹۴/۴۴ درصد خطا، ضعیف‌ترین مدل در پیش‌بینی میزان نشت است. دلیل وجود این مقادیر خطا در محاسبات نیز فرضیاتی مانند در نظر گرفتن توده سنگ به‌عنوان یک محیط پیوسته و یکپارچه فرض کردن محیط سنگی اطراف تونل با وضعیت

کیفی و نفوذی یکسان است و نیز پیش‌فرض آنکه ناپیوستگی‌ها و درزه و شکاف‌های موجود در توده سنگ به‌صورت مجزا بوده که هیچ رابطه‌ای با یکدیگر ندارند.

مراجع

- [1]. Barton, N.; Quadros, E.; 2003; "Improve understanding of high pressure pre-grouting effects for tunnels in jointed rock", ISRM 2003 – Technology roadmap for rock mechanics, South Africa Ins. of Min and Met.
- [2]. Eriksson, E.; Stille, H.; Andersson, J.; 2000, "Numerical calculations for prediction of grout spread with account for filtration and varying aperture" Tunneling and Underground Space Technology Elsevier Science Ltd.
- [3]. Raymer, J.H.; 2001; "Predicting groundwater inflow into hard-rock tunnels: Estimating the high-end of the permeability distribution", Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference
- [4]. Heuer, R.E.; 1995; "Estimating rock-tunnel water inflow", Proceeding of the Rapid Excavation and Tunneling Conference, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc.
- [5]. Raymer, J.H.; 2002; "Estimating Ground water Inflow into Hard -Rock Tunnels-The Problem of Permeability", RETC.
- [6]. Lohman, S.W.; 1972; "Ground-water hydraulics", U.S. Geological Survey, Professional Paper 708.
- [7]. Lei, S.; 1999; "An analytical solution for steady flow into a tunnel", Ground Water, Vol. 37, pp 23–26.

- [20].Dalmalm, T.; 1999;“*Grouting Experiences-Correlation Between Grouted Volume and Geology, Mainly from Arlandaban*”. Division of Soil and Rock Mechanics. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- [21].Hassanpour, J.; 2003;“*Estimation of water inflow into tunnel using water pressure test(Qomrud tunnel)*”. 6th tunnel conferences Iran.
- [22].Aalianvari, A.; 2005;“*Estimation of water inflow into hard rock tunnel (Qomrud tunnel)*”. Ms.c thesis, Amirkabir university.
- [23].Katibeh, H. Aalianvari, A.; 2006;“*Estimation of water inflow into hard rock tunnel using Tunseep software)*”. 7th tunnel conference, Iran
- [24].Mahab Ghodss Consulting Eng.; 2012;“*Azad dam geology report*”
- [8].El Tani, M.; 1999; “*Water inflow into tunnels*”, Proceedings of the World Tunnel Congress, ITA-AITES, Oslo, pp. 61–70.
- [9].El Tani, M. (2003) “*Circular tunnel in a semi-infinite aquifer*”, Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 18, pp 49–55.
- [10].Freeze, R.A.; Cherry, J.A.; 1979; “*Groundwater Englewood*”, New Jersey, Prentice-Hall Inc.
- [11].Wang, F.; Anderson, M.; 1982; “*Introduction to groundwater modeling – Finite difference and finite element method*”, San Francisco.
- [12].Hernqvist, L., Fransson, A., Gustafson, G.; 2009; “*Analyses of the grouting results for a section of the APSE tunnel at Aspö Hard Rock Laboratory*”. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science & Geomechanical Abstracts, vol. 46, pp.439-449.
- [13].Butron, C., Gustafson, G., Fransson, A., Funehag, J.; 2010; “*Drip sealing of tunnels in hard rock: A new concept for the design and evaluation of permeation grouting*”. Tunneling and Underground Space Technology, vol. 25, pp.114-121.
- [14].Brantberger, H. ;Stille, H. & Eriksson, M.; 2000; “*Controlling Grout Spreading in Tunnel Grouting, g-Analyses and Developments of the GIN-Method*”. Tunneling and Underground Space Technology, Vol.15, No.4, pp.343-362.
- [15].Rosengren, Sievanen et al.; 2002;“ *Hard Rock Tunnel Grouting Practice in Finland, Sweden, and Norway*”, pp.70-80.
- [16].Vagverket, G.; 1993; “*Rock Technical Instructions for Project, Groundwater, Sealing and Infiltration*”. Report ANV0004, Stockholm, Sweden.
- [17].Dalmalm, T.; 2001; “*Grouting Prediction Systems for Hard Rock- Based on Active Design*”. Licenciate thesis. Division of Soil and Rock Mechanics. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- [18].Gustafson, G. ,Stille, H.; 1996;“*Prediction of Groutability from Grout Properties and Hydrogeological Data*”. Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 11, No. 3, pp. 325-332.
- [19].Brantberger, M., Dalmalm, T. ,Eriksson, M. &Stille, H.; 1998;“*Steering Factors of Tightness Around a Pregouted Tunnel*”. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.