Archive of SID

نشریه علمی-پژوهشی "مهندسی معدن"

Iranian Journal of Mining Engineering (IRJME)

دوره چهارم، شماره هفتم، سال۱۳۸۸، صفحه ٦٣ تا ٧١

Vol. 3, No. 6, 2009, pp.63-71

بررسی دبی آب نشتی از تونل انتقال آب بهشت‌آباد با استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی

سعید مهدوری[1×]، مسعود هاشمی[2]، فضه آیتی[3]

۱- مربی دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، Smahdevari@cc.iut.ac.ir

۲- مهندسان مشاور زایندآب

۳- دانشگاه پیام نور شهرکرد

(دریافت ۲۲ دی ۱۳۸٦، پذیرش ۱۷ مرداد ۱۳۸۸)

چکیده

تونل انتقال آب بهشت‌آباد به طول تقریبی ۶۵ کیلومتر طویل‌ترین تونل انتقال آب ایران با رژیم جریان تحت فشار است. در کیلومترهای ابتدایی و انتهایی تونل به دلیل پایین بودن سطح ایستابی احتمال خارج شدن آب از تونل وجود دارد. در این مقاله ابتدا تونل پهنه‌بندی و ضرایب تراوایی، هد خارجی آب و پارامترهای ژئومکانیکی پهنه‌ها بررسی شده است. سپس روش تحلیلی فرناندز معرفی و به طور مختصر توضیح داده شده و دبی آبی نشتی از تونل و ایستابی آب در مرز پوشش و زمین با بهره‌گیری از آن تعیین شده است. بیشینه دبی آب خروجی از تونل برابر با ۱۱/۴ لیتر بر ثانیه در واحد طول تونل است. در بخش‌هایی از تونل که توسط قطعات بتنی پیش‌ساخته نگهداری شده، ضریب نفوذپذیری معادل با استنباط از قانون دارسی و با توجه به هندسه قطعات بتنی تعیین شده است. در ادامه نحوه تحلیل تراوش توسط نرم‌افزار FLAC تشریح و نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و روش تحلیلی با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج تطابق خوبی با هم داشتند ولی به هر حال روش‌های عددی به دلیل امکان منظور کردن جزئیات مدل مانند تاثیر زهکش‌ها، توالی و شیب لایه‌ها و امکان انجام تحلیل در حالت گذرا بر روش‌های تحلیلی برتری دارند.

کلمات کلیدی

تونل بهشت آباد، تحلیل تراوش، روش فرناندز، FLAC

× عهده‌دار مکاتبات

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

تونل انتقال آب بهشت آباد به طول تقریبی ۶۴۹۳۰ متر با هدف انتقال آب از حوضه آبریز کارون به فلات مرکزی ایران مورد مطالعه قرار گرفته است. این تونل با راستای جنوب غربی- شمال شرقی از محل خروجی دره درکش ورکش در نزدیکی شهر اردل شروع شده و در بالادست سد چم آسمان به پایان می‌رسد.

از ورودی تونل تا حوالی کیلومتر ۱۷، مسیر تونل در پهنه زاگرس رورانده و از آن پس تا خروجی تونل در پهنهٔ سنندج- سیرجان قرار می‌گیرد. از ورودی تونل به سمت خروجی کوه‌های سوخته، هزارگزی، جهان‌بین، نسار، تنگ صیاد و تخت شاهلرا به ترتیب با حداکثر میزان روباره ۱۲۶۰،۶۹۳، ۷۵۵، ۸۰۰، ۸۴۵ و ۱۰۷۰ متر قرار گرفته‌اند. این نواحی مرتفع حدود ۴۰ کیلومتر از مسیر تونل انتقال (نزدیک به ۶۰٪) را تشکیل می‌دهند. دشت‌های کیار، شلمزار، شمس‌آباد، فرخ‌شهر و چرمهین نیز با روباره میانگین بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ متر حدود ۲۰ کیلومتر از مسیر (نزدیک به ۳۰٪) و مابقی یعنی ۵ کیلومتر انتهایی تونل در دشت چرمهین کمتر از ۲۰۰ متر روباره دارد. نیم‌رخ تونل از کیلومتر ۰ تا ۶ همراه با تغییرات سطح ایستابی در شکل ۱ نمایش داده شده است.

این تونل برخلاف اکثر تونل‌های انتقال آب موجود با رژیم جریان تحت فشار در دست طراحی است، لذا بر خلاف تونل‌های انتقال آب با جریان آزاد، در کیلومترهای ابتدایی و انتهایی تونل به دلیل پایین بودن سطح ایستابی امکان فرار آب از تونل وجود دارد. در این تحقیق تغییرات دبی آب خروجی از تونل و ایستابی آب در مرز پوشش و زمین با توجه به تغییرات سطح ایستابی و تراوایی سنگ میزبان با استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی بررسی شده است.

۲- پهنه‌بندی مسیر تونل

در پهنه‌بندی زمین‌شناسی مهندسی گستره مسیر تونل انتقال آب به فلات مرکزی ایران، موارد پایه زیر مورد توجه قرار گرفته است

۱- برش زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰ مسیر تونل

۲- برداشت‌های زمین‌شناسی مهندسی در امتداد مسیر تونل

۳- وضعیت سنگ- چینه‌ای، ساختمانی و هیدروژئولوژیکی هر قسمت

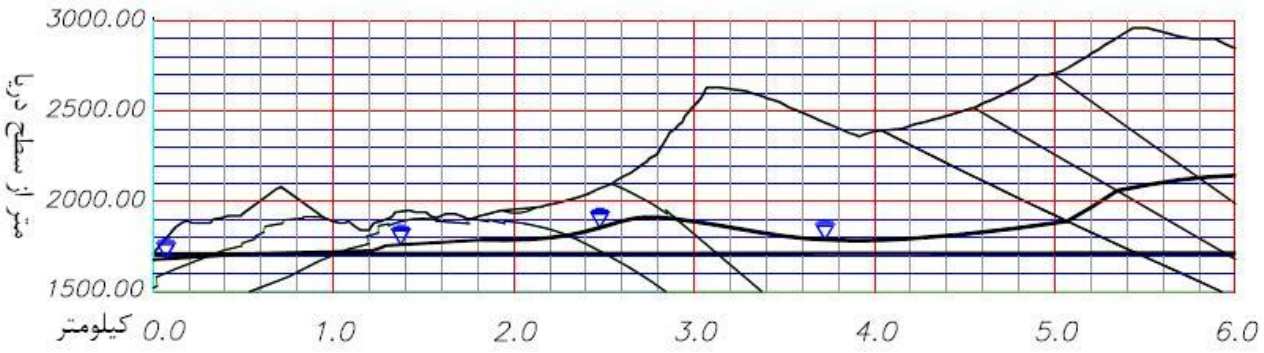
۴- بررسی‌های زیر سطحی از طریق حفر گمانه‌ها، مطالعه مغزه‌های بدست آمده از حفاری و آزمایش‌های برجا

۵- بررسی‌های زیر سطحی از طریق انجام مطالعات ژئوفیزیکی

در نتیجه تلفیق موارد فوق نهایتاً ۳۱ پهنه مشخص شده است. با توجه حداکثر ایستابی داخلی ۷۲ متر برای تونل تنها در کیلومترهای ۰ تا ۵۹۴۰ و ۵۴۷۲۰ تا ۶۴۹۳۰ امکان تراوش آب از تونل به خارج وجود دارد که در این مقاله مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. سنگ میزبان، ضرایب تراوایی و ایستابی آب خارجی بیشینه و کمینه برای پهنه‌های اشاره شده در جدول ۱ نمایش داده شده است[۱].

۳- بررسی میزان تراوش آب و ایستابی آب در مرز پوشش و سنگ

اگر یک پوشش تراوا برای یک توده سنگ ناتراوا در نظر گرفته شود، ایستابی آب در مرز پوشش و سنگ به ایستابی داخل تونل نزدیک خواهد بود و مقدار تراوش آب توسط تراوایی توده سنگ کنترل خواهد شد. حال اگر یک پوشش ناتراوا برای یک سنگ تراوا در نظر گرفته شود. ایستابی آب بر روی پوشش معادل ایستابی سفره آب زیرزمینی خواهد بود و میزان تراوش آب از تونل قابل چشم‌پوشی است.



شکل ۱: نیم‌رخ تونل از کیلومتر ۰ تا ۶

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱: مقادیر هد آب خارجی و ضرایب تراوایی در پهنه‌هایی که آب از داخل به خارج می‌تواند جریان یابد[۱]

شماره پهنه	نوع سنگ	متراژ پهنه	ضریب تراوایی (m/s)		ایستایی آب (متر)	
			کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه
۱	آهک ضخیم لایه	۳۳۰-۰	$۱۰^{-۴}$	$۱۰^{-۲}$	۰	۷۲
۲	آهک تا آهک مارنی	۱۰۲۰-۳۳۰	$۱۰^{-۷}$	$۱۰^{-۴}$	۰	۷۲
۳	آهک و دولومیت ضخیم لایه	۱۸۰۰-۱۰۲۰	$۱۰^{-۴}$	$۱۰^{-۲}$	۰	۷۲
۴	آهک و دولومیت ضخیم لایه	۲۵۰۰-۱۸۰۰	$۱۰^{-۴}$	$۱۰^{-۲}$	۳۴	۷۵
۵	آهک تا آهک مارنی	۳۱۳۰-۲۵۰۰	$۱۰^{-۵}$	$۱۰^{-۴}$	۳۴	۲۰۰
۶	آهک ضخیم لایه توده‌ای	۵۴۵۰-۳۱۳۰	$۱۰^{-۴}$	$۱۰^{-۲}$	۵۸	۸۰
۷	کنگلومرا، ماسه‌سنگ، لای‌سنگ	۵۹۴۰-۵۴۵۰	$۱۰^{-۷}$	$۱۰^{-۵}$	۵۸	۳۲۰
۳۰	توف آندزیتی، آندزیت	۶۳۰۸۰-۵۴۷۲۰	$۱۰^{-۸}$	$۱۰^{-۵}$	۶۰	۶۵
۳۱	ماسه‌سنگ و شیل	۶۴۹۳۰-۶۳۰۸۰	$۱۰^{-۱۰}$	$۱۰^{-۷}$	۱۰	۱۵

پارامترهای اساسی که بر روی میزان تراوش آب و فشار آب حفره‌ای تاثیر می‌گذارند عبارتند از:

توپوگرافی و تراز آب زیرزمینی در طول تونل، استعداد سنگ‌های پیرامون تونل برای انحلال و فرسایش، دگرشکل‌پذیری توده سنگ و تراوایی توده سنگ.

بررسی مقدار تراوش آب از تونل و ایستابی آب در مرز پوشش و سنگ در دو مرحله انجام شده است، در مرحله اول با استفاده از روش تحلیلی معرفی شده توسط فرناندز دبی آب نشتی از تونل و ایستابی آب در مرز پوشش و زمین بررسی و در مرحله دوم نتایج حاصل از روش تحلیلی با نتایج مدل‌سازی عددی توسط نرم‌افزار FLAC مقایسه شده است.

۳-۱- مرحله اول: روش تحلیلی فرناندز

معرفی روش

در این روش پوشش و محیط اطراف آن همگن و متجانس درنظر گرفته شده، لذا نرخ جریان و ایستابی محاسبه شده ممکن است تا حدودی با آنچه در عمل مشاهده می‌شود تفاوت داشته باشد ولی به هر حال مدل ارائه شده برای تحلیل حساسیت بر روی متغیرها بسیار مناسب است.

نرخ تراوش آب در واحد طول تونل می تواند توسط رابطه ۱ ارزیابی شود.

$$q_L = \frac{2\pi k_L (h_i - h_{w1})}{\ln \frac{b}{a_1}} \qquad (۱)$$

که در آن:

h_i ایستابی آب داخل تونل، h_{w1} ایستابی آب در مرز پوشش و سنگ، k_L تراوایی پوشش، b و a_1 شعاع خارجی و داخلی تونل و q_L نرخ تراوش آب در واحد طول تونل است[۳].

اندرکنش مکانیکی پوشش و زمین

با در نظر گرفتن رفتار الاستیک زمین و پوشش، کرنش محیطی پوشش را می‌توان از رابطه ۲ به دست آورد.

$$\varepsilon_{\theta L} = \frac{\gamma_w (h_i - h_0)}{M} \times \frac{(1+\nu_m)}{E_m} \qquad (۲)$$

$$M = 1 + \frac{E_L}{E_m}\frac{t_L}{a}(1+\nu_m)$$

که در آن:

a فاصله مرکز تونل تا وسط پوشش، E_m و ν_m مدول الاستیک و ضریب پوآسون زمین و h_0 هد سطح ایستابی بر روی تونل است[۴].

برای بتن ساده بدون ترک t_L ضخامت پوشش و E_L مدول الاستیک پوشش است. اگر بتن ساده ترک طولی داشته باشد t_L و E_L صفر منظور می‌شود. برای بتن مسلح E_L برابر با مدول الاستیک فولاد به کار رفته در پوشش، منظور شده و t_L برابر با ضخامت معادل فولاد به کار رفته در پوشش است.

فشار اولیه‌ای که به توده سنگ پیرامون منتقل می‌شود از رابطه ۳ قابل ارزیابی است[۴].

$$P_r = \frac{\gamma_w (h_i - h_0)}{M} \qquad (۳)$$

www.SID.ir

Archive of SID

قبل از شکل‌گیری حالت تراوش پایدار فشار مکانیکی P_r می‌تواند تنش موثری در نظر گرفته شود که در مرز پوشش و زمین عمل می‌کند. با تراوش آب یک فشار هیدرواستاتیکی دیگر در مرز پوشش و زمین اعمال می‌شود که برابر با $\Delta P_{w1}=\gamma_w(h_{w1}-h_0)$ است. تا زمانی که این فشار از P_r کمتر است تماس پوشش و زمین برقرار است. در این شرایط بخشی از ایستابی داخلی تونل که توسط پوشش مستهلک می‌شود از رابطه $(\gamma_w(h_i-h_0)-P_r)$ محاسبه می‌شود. ولی در شرایطی که $\Delta P_{w1}>P_r$ باشد پوشش از زمین جدا شده و فاصله‌ای میان آنها ایجاد می‌شود. در این شرایط بخشی از ایستابی داخلی تونل که توسط پوشش مستهلک می‌شود از رابطه $\gamma_w(h_i-h_{w1})$ محاسبه شده و کرنش محیطی در این شرایط با استفاده از رابطه ۴ تعیین می‌شود[۴].

$$\varepsilon_{\theta L}=\frac{\gamma_w(h_i-h_{w1})a}{E_S t_S} \qquad (۴$$

اندرکنش مکانیکی هیدرولیکی پوشش و زمین پیرامون

در شرایطی که کرنش محیطی کمتر از $۱/۵\times۱۰^{-۶}$ باشد، تراوایی پوشش بتنی ساده را می‌توان $۱/۷\times۱۰^{-۶}$ سانتی‌متر بر ثانیه در نظر گرفت، در شرایطی که کرنش محیطی بیشتر از $۱/۵\times۱۰^{-۴}$ باشد ترک‌های طولی در پوشش به وجود می‌آید و تراوایی را بازشدگی ترک‌های طولی کنترل می‌کند. با توجه به تراوش آرام آب در ترک‌ها، در این شرایط ضریب تراوایی را می‌توان از رابطه ۵ محاسبه کرد.

$$k_L=\alpha\varepsilon_{\theta L}^3 \qquad \alpha=\frac{\gamma_w}{12\mu}S^2 \qquad (۵$$

که در آن:

S فاصله‌داری ترک‌ها، μ گرانروی دینامیکی آب و γ_w چگالی آب است.

در بتن‌های غیرمسلح تنها دو ترک به موازات صفحات حداقل تنش اتفاق می‌افتد. لذا فاصله‌داری ترک‌ها در این حالت برابر با $S=\pi a_1$ است که در آن a_1 شعاع داخلی تونل است. در بتن‌های مسلح فاصله‌داری ترک‌ها از رابطه $S=d/10\rho$ قابل ارزیابی است که در آن ρ درصد آرماتور مقطع و d قطر آرماتور است[۵].

تعیین دبی آب خروجی از تونل و ایستابی آب در مرز پوشش و سنگ

دبی آب خروجی و ایستابی آب در مرز پوشش و زمین با توجه به شیوه حفاری در هر پهنه ارزیابی شده است. شیوه حفاری در پهنه‌های ۱ و ۳۱ سنتی و در مابقی پهنه‌ها مکانیزه است. ضخامت پوشش در حالت حفاری سنتی و مکانیزه به ترتیب شامل ۴۰ سانتی‌متر بتن مسلح برجا و ۳۵ سانتی‌متر سگمنت بتنی پیش‌ساخته است.

با توجه به قانون دارسی مقدار دبی عبوری از طول واحد پوشش از رابطه ۶ قابل ارزیابی است.

$$q_L=(2\pi\times K_L\times(h_a-h_i))/\ln(b/a_1) \qquad (۶$$

که در آن:

K_L تراوایی معادل پوشش، h_i و h_a ایستابی آب داخلی و خارجی تونل برحسب متر است.

از طرف دیگر دبی آب گذرنده از طول واحد پوشش سگمنتی توسط مجموعه ترک‌های طولی، عرضی و تراوایی سگمنت کنترل می‌شود. از دبی آب عبوری از سگمنت‌ها و ترک‌های عرضی به خاطر ناچیز بودن صرف‌نظر می‌کنیم. دبی عبوری از ترک‌های طولی با توجه به جریان خطی درون ترک و رابطه دارسی ویسباخ به صورت زیر ارزیابی می‌شود.

$$\Delta h_l=h_a-h_i=\frac{64}{\mathrm{Re}}\times\frac{(b-a_1)}{D_h}\times\frac{V^2}{2g}$$

$$\xrightarrow{D_h=\frac{4A}{P}=\frac{4w}{2}=2w} V=\frac{\gamma_w w^2\Delta h_l}{8\mu(b-a_1)} \qquad (۷$$

$$\Rightarrow q_L=n\times\frac{\gamma_w w^3\Delta h_l}{8\mu(b-a_1)}$$

که در آن:

w عرض ترک، μ گرانروی دینامیکی و n تعداد قطعات سگمنت است.

با مساوی قرار دادن رابطه ۶ و ۷ تراوایی معادل پوشش سگمنتی توسط رابطه ۸ محاسبه می‌شود.

$$K_L=\frac{n\gamma_w w^3\ln(b/a_1)}{16\pi\mu(b-a_1)} \qquad (۸)$$

بازشدگی ترک‌ها توسط کرنش محیطی پوشش کنترل می‌شود.

مقادیر ایستابی آب خارجی و تراوایی توده سنگ در هر پهنه مطابق با جدول ۱ و مقادیر دگرشکل‌پذیری و ضریب پوآسون توده سنگ مطابق جدول ۲ لحاظ شده است. در پهنه‌های ۱، ۲ و ۳ ایستابی آب خارجی ابتدا برابر با صفر است ولی تحت تاثیر آبگیری مخزن سد، به تدریج افزایش یافته و در نهایت برابر با ایستابی آب داخلی می‌شود. تغییرات دبی آب خروجی از تونل با توجه به افزایش تدریجی تراز آب خارجی برای پهنه‌های ۱، ۲ و ۳ برای تراوایی‌های بیشینه و کمینه در

www.SID.ir

Archive of SID

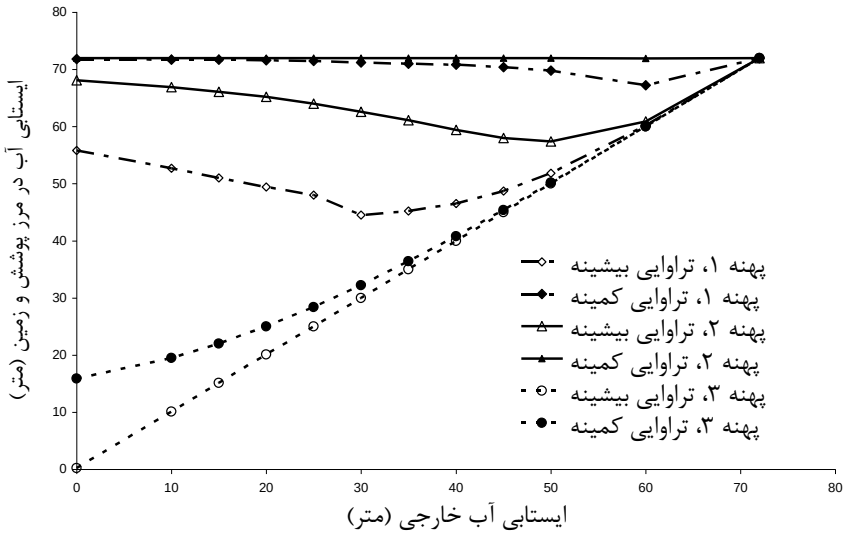
جدول ۳ نمایش داده شده است. و همچنین ایستابی آب در مرز پوشش و زمین برای پهنه‌های مذکور، با توجه به افزایش تدریجی تراز آب خارجی برای تراوایی‌های بیشینه و کمینه در نمودار شکل ۲ نمایش داده شده است.

در پهنه یک از پوشش بتنی برجا به منظور نگهداری تونل استفاده شده و ایستابی آب در مرز پوشش زمین توسط ایستابی خارجی کنترل می‌شود. در این شرایط به دلیل پایین بودن تراوایی پوشش در مقایسه با زمین، میزان تلفات هیدرولیکی در سیال حین عبور از پوشش بالا بوده و در واقع ایستابی آب در مرز پوشش و زمین، ناشی از ایستابی آب داخلی صفر است. به دلیل کم بودن دبی آب نشتی از تونل و بالا بودن تراوایی زمین نیز میزان تلفات هیدرولیکی در پیرامون تونل ناچیز و تقریباً برابر با صفر بوده و ایستابی آب در مرز پوشش و زمین برابر با ایستابی آب خارجی است. حال اگر تراوایی زمین کاهش یابد، میزان تلفات هیدرولیکی در پیرامون تونل افزایش یافته و با توجه به رژیم جریان (از داخل به خارج تونل) ایستابی آب در مرز پوشش و زمین افزایش می‌یابد (شکل۲). در پهنه ۳ نیز تراوایی پوشش در مقایسه با تراوایی زمین پایین است و شرایطی مشابه پهنه ۱ حکم‌فرما است. در پهنه ۳ از قطعات بتنی پیش‌ساخته به منظور نگهداری تونل استفاده شده و تراوایی آن بیش از تراوایی پوشش بتنی برجا است و دبی آب نشتی از تونل نیز بیشتر از پهنه یک است (جدول۳).

در پهنه ۲ تراوایی سنگ میزبان نسبتاً پایین و تراوایی پوشش با توجه به دگرشکل‌پذیری سنگ میزبان نسبتاً بالا است، لذا برخلاف پهنه ۱ و ۳ دبی آب نشتی از تونل توسط سنگ میزبان کنترل می‌شود. در این شرایط میزان تلفات هیدرولیکی در سیال حین عبور از پوشش ناچیز بوده و ایستابی آب در مرز پوشش و زمین، ناشی از ایستابی آب داخلی قابل توجه است. ایستابی آب در مرز پوشش و زمین حاصل جمع ایستابی آب خارجی و ایستابی ناشی از ایستابی آب داخلی است. با افزایش ایستابی آب خارجی، کرنش محیطی پوشش کاهش و به تبع آن تراوایی پوشش کاهش یافته و ایستابی ناشی از ایستابی آب داخلی در مرز پوشش و زمین کاهش می‌یابد، حال اگر میزان این کاهش بیشتر از افزایش ایستابی آب خارجی باشد، ایستابی آب در مرز پوشش و زمین با افزایش ایستابی آب خارجی کاهش می‌یابد ولی چون تراوایی پوشش از حداقل $1/7e^{-8}$ متر بر ثانیه کمتر نخواهد شد. در نهایت با افزایش ایستابی آب خارجی، ایستابی آب در مرز پوشش و زمین افزایش یافته و برابر با ایستابی آب خارجی می‌شود. در این شرایط به دلیل کم بودن تراوایی پوشش، ایستابی آب در مرز پوشش و زمین، ناشی از ایستابی آب داخلی صفر است (شکل ۲).

جدول ۲: مقادیر دگرشکل‌پذیری و ضریب پوآسون توده سنگ در هر پهنه

شماره پهنه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۳۰	۳۱
دگرشکل پذیری GPa	۳/۳	۵/۴	۲۰/۷	۲۰/۷	۵/۴	۱۸/۲	۵/۳	۸/۴	۰/۷
ضریب پوآسون	۰/۲۹	۰/۲۴	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۲۴	۰/۲۴	۰/۲۹	۰/۲۵	۰/۳۷



شکل۲: تغییرات ایستابی آب در مرز پوشش و زمین با توجه به افزایش تدریجی تراز آب

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۳: دبی آب خروجی از واحد طول تونل بر حسب لیتر بر ثانیه با توجه به افزایش تراز آب خارجی

پهنه	تراوایی	ایستابی آب خارجی بر حسب متر										
		۰	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰	۴۵	۵۰	۶۰	۷۲
۱	$۱۰^{-۲}$	۲/۲۷	۱/۲۵	۰/۸۹	۰/۶۲	۰/۴۱	۰/۲۶	۰/۱۶	۰/۰۹	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۱	۰
	$۱۰^{-۴}$	۲/۱۲	۱/۱۸	۰/۸۵	۰/۵۹	۰/۴۰	۰/۲۶	۰/۱۶	۰/۰۹	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۱	۰
۲	$۱۰^{-۴}$	۱۱/۴	۹/۵	۸/۶	۷/۶	۶/۵	۵/۵	۴/۴	۳/۲	۲/۲	۱/۲	۰/۱۵	۰
	$۱۰^{-۷}$	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰۹	۰/۰۰۸	۰/۰۰۷	۰/۰۰۶	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	۰/۰۰۴	۰/۰۰۲	۰
۳	$۱۰^{-۲}$	۳/۵	۱/۹	۱/۳	۰/۹	۰/۶	۰/۴	۰/۲	۰/۱	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۰۱	۰
	$۱۰^{-۴}$	۲/۷	۱/۶	۱/۲	۰/۸	۰/۶	۰/۴	۰/۲	۰/۱	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۰۱	۰

دامنه تغییرات دبی آب نشتی از تونل و ایستابی آب در مرز پوشش و زمین برای پهنه‌های ۴ تا ۳۱ با توجه به اینکه ایستابی آب خارجی در این پهنه‌ها مستقل از آبگیری مخزن سد است در جدول ۵ نمایش داده شده است. حداکثر ایستابی آب خارجی برابر با ۷۲ متر منظور شده است، زیرا هنگامی که ایستابی خارجی بیش از ۷۲ متر می‌شود جهت جریان آب از خارج به داخل تونل خواهد بود و این مورد خارج از موضوع بحث تحقیق است. در پهنه ۳۱ به دلیل بالا بودن تراوایی پوشش میزان استهلاک هد درون پوشش ناچیز است.

جدول ۵: دامنه تغیرات دبی آب نشتی از تونل و ایستابی آب در مرز پوشش و زمین برای پهنه‌های ۴ تا ۳۱

پهنه	دبی آب نشتی در واحد طول تونل (لیتر بر ثانیه)	دبی آب نشتی در طول پهنه (لیتر بر ثانیه)	ایستابی آب در مرز پوشش و زمین (متر)
۴	۰ – ۰/۲۷	۰ – ۱۸۹	۳۴ – ۷۲
۵	۰ – ۴/۵۹	۰ – ۲۸۹۲	۶۱/۴ – ۷۲
۶	۰ – ۰/۰۱	۰ – ۲۳	۵۸ – ۷۲
۷	۰ – ۰/۱۴	۰ – ۶۸	۶۶/۴۹ – ۷۲
۳۰	۰ – ۰/۰۴	۰ – ۳۳۴	۶۲/۴۰ – ۷۲
۳۱	۰ – ۰/۰۱	۰ – ۱۸	۷۲

۳-۲- مرحله دوم: مدلسازی عددی

برای مقایسه روش تحلیلی و مدل‌سازی عددی، از نتایج حاصل از روش تحلیلی برای پهنه ۱ استفاده شده است. با توجه به اینکه پوشش تعریف شده توسط المان ساختاری Beam در نرم‌افزار FLAC ناتراوا است، لذا برای بررسی تاثیر پوشش در دبی آب نشتی از تونل و ایستابی آب در مرز پوشش و زمین، از یک زون حلقوی پیرامون تونل (شکل ۳) که ضخامت و تراوایی آن معادل ضخامت و تراوایی پوشش است بهره برده شده است. تراوایی پوشش در شرایطی که ایستابی خارجی برابر با صفر و ده متر آب است به ترتیب $۶/۳e^{-۷}$ متر بر ثانیه و $۴/۰۲e^{-۷}$ متر بر ثانیه لحاظ شده که مطابق با تراوایی استفاده شده در روش تحلیلی است. ایستابی داخلی آب در تاج تونل برابر با ۷۲ متر آب لحاظ شده است. و با توجه به شعاع تونل ایستابی آب در کف تونل ۷۸ مترآب منظور شده است. قابل ذکر است که در روش تحلیلی از تغییرات ایستابی آب داخلی در تونل صرف نظر شده است. در تحلیل‌های تراوش، معمولاً برای اطمینان از وقوع تراوش ماندگار در مدل، از تابع qratio که با استفاده از زبان برنامه نویسی Fish در محیط FLAC تعریف شده، استفاده می‌شود. در این تابع دبی آب ورودی و خروجی از مش‌ها[۱] در هر سیکل محاسبه و در تاریخچه‌های[۲] جریان ورودی[۳] و خروجی[۴] ثبت می‌شود، زمانیکه دبی آب ورودی و خروجی با یکدیگر برابر شد حالت تراوش ماندگار در مدل ایجاد شده است[۲].

با توجه به ایستابی آب خارجی صفر و ده متر و تراوایی‌های $۱e^{-۲}$ متر بر ثانیه و $۱e^{-۴}$ متر بر ثانیه برای سنگ میزبان، چهار مدل عددی ساخته شده که در ادامه نتایج آن بررسی می‌شود.

مدل اول: ایستابی آب خارجی صفر، تراوایی سنگ میزبان $۱e^{-۲}$ متر بر ثانیه

دبی آب نشتی از تونل در نیمه بالایی تونل ۱/۸۶ و در نیمه پایینی تونل ۲/۲۹ لیتر بر ثانیه در واحد طول تونل است، مطابق شکل ۴ فشار آب حفره‌ای در مرز پوشش و زمین برابر صفر است. در این مدل به دلیل بالا بودن تراوایی زمین، آب خارج شده از پوشش بلافاصله تحت تاثیر ثقل به سمت پایین حرکت می‌کند(شکل ۵).

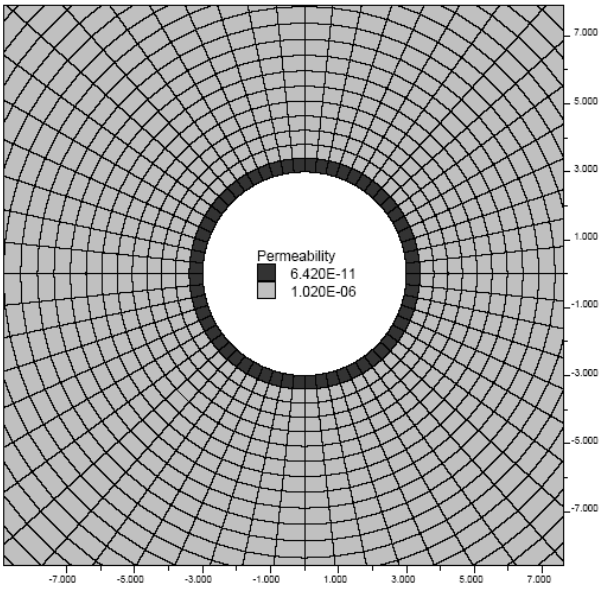
مدل دوم: ایستابی آب خارجی صفر، تراوایی سنگ میزبان $۱e^{-۴}$ متر بر ثانیه

www.SID.ir

Archive of SID

اگرچه تراوایی سنگ میزبان کاهش پیدا کرده است ولی چون دبی آب نشتی از تونل توسط تراوایی پوشش کنترل می‌شود، عملاً مقدار آن تغییر محسوسی نکرده و دبی آن در نیمه بالایی تونل ۱/۷۷ و در نیمه پایینی تونل ۱/۸۵ لیتر بر ثانیه در واحد طول تونل است. مطابق شکل ۶ توزیع فشار آب حفره‌ای در مرز پوشش و زمین، یکنواخت نبوده و از چهار متر آب در تاج تونل تا یک متر آب در کف تونل تغییر می‌کند. همانگونه که ملاحظه می‌شود با کم شدن تراوایی زمین فشار آب حفره‌ای در مرز پوشش و زمین در مقایسه با مدل اول افزایش یافته است، لذا در شرایطی که نگرانی از ایجاد ترکهای کششی در پوشش ناشی از ایستابی آب داخلی وجود دارد، می‌توان با انجام عملیات تزریق پیرامون تونل و کاهش تراوایی سنگ پیرامون تونل، فشار آب حفره‌ای در مرز پوشش و زمین را افزایش داد و از ایجاد ترکهای کششی جلوگیری کرد.

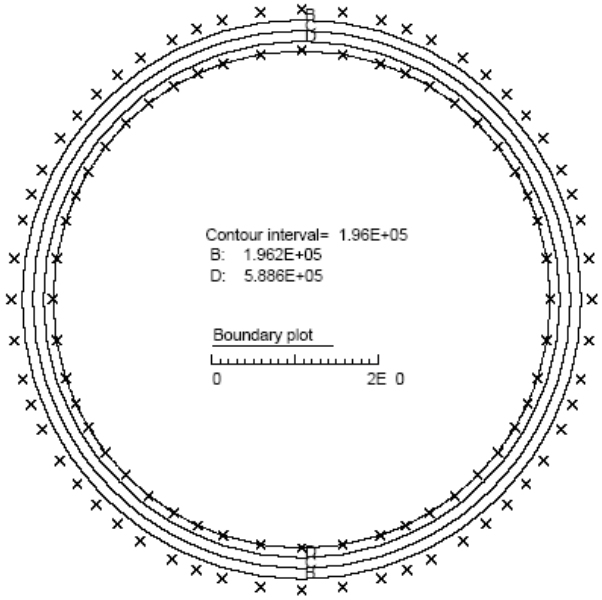
اطلاع از توزیع فشار آب حفره‌ای پیرامون تونل فاکتور مهمی برای طراحی پوشش است که روش تحلیلی فرناندز از تعیین آن عاجز است. در شکل ۶ برای وضوح بیشتر فشارهای بیش از چهار متر آب که درون پوشش واقع می‌شوند حذف شده است.



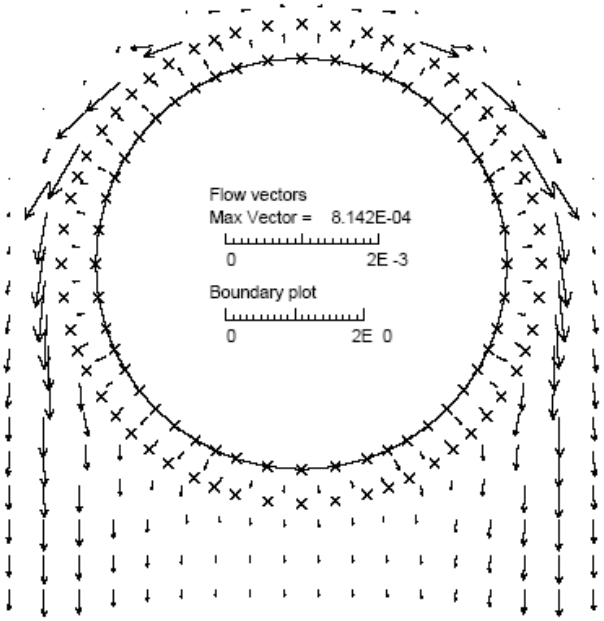
شکل ۳: مش‌بندی تونل همراه با زون حلقوی پیرامون تونل

مدل سوم: ایستابی آب خارجی ده متر آب، تراوایی سنگ میزبان $1e^{-2}$ متر بر ثانیه

دبی آب نشتی از تونل در این حالت در نیمه بالایی تونل ۱/۲۶ و در نیمه پایینی تونل ۱/۲۳ لیتر بر ثانیه در واحد طول تونل است. دبی آب نشتی در نیمه بالایی و پایینی تونل تقریباً برابر است که علت آن یکسان بودن تفاوت ایستابی آب داخلی و خارجی است. فشار آب حفره‌ای در مرز پوشش و زمین برابر با ۱۰ متر آب است و مقدار تلفات اصطکاکی ناشی از تراوش آب درون پوشش برابر با ۶۲/۶ متر آب است. تاریخچه جریان ورودی در مقابل جریان خروجی که بیانگر ایجاد حالت تراوش ماندگار در مدل است در شکل ۷ نمایش داده شده است.



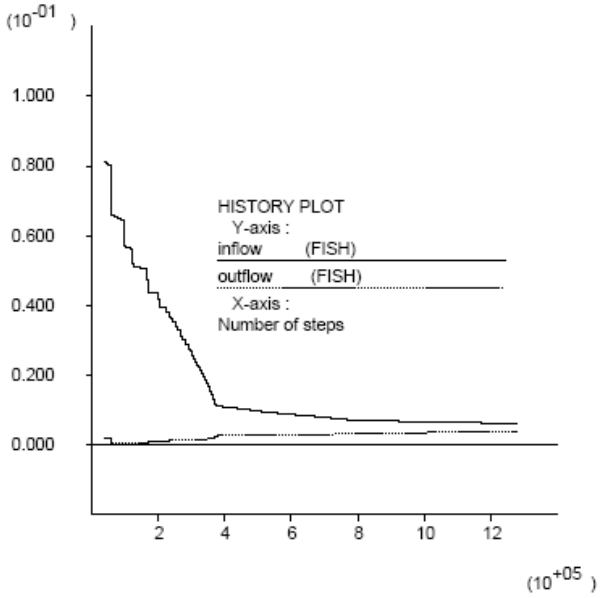
شکل ۴: تغییرات فشار آب حفره ای در مدل اول



شکل ۵: خطوط جریان آب در مدل اول

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۷: تاریخچه جریان ورودی و خروجی برای مدل سوم

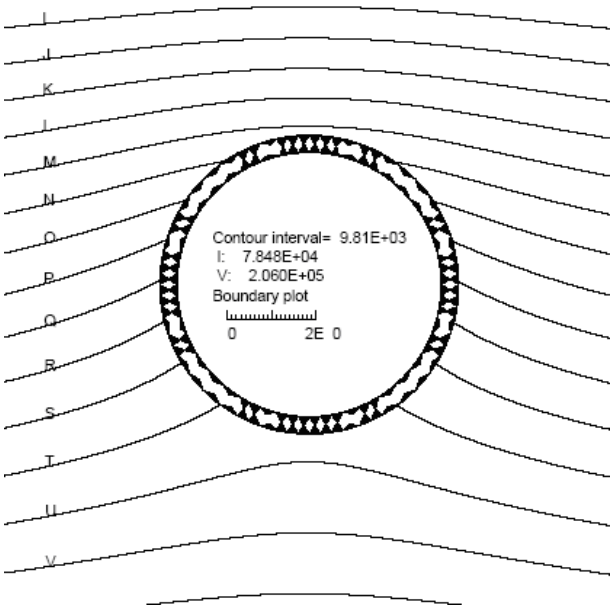
مدل چهارم: ایستابی آب خارجی ده متر آب، تراوایی سنگ میزبان $1e^{-4}$ متر بر ثانیه

دبی آب نشتی از تونل در این حالت در نیمه بالایی تونل ۱/۱۶ و در نیمه پایینی تونل ۱/۱۲ لیتر بر ثانیه در واحد طول تونل است. فشار آب حفره‌ای پیرامون تونل، تحت تاثیر ایستابی داخلی افزایش یافته است، همانگونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، فشار آب حفره‌ای در کف تونل در محدوده وسیع‌تری نسبت به تاج تونل افزایش یافته است. مقدار افزایش فشار آب حفره‌ای حدوداً چهار متر آب در کف و سه متر آب در تاج است.

۴- مقایسه نتایج روش تحلیلی فرناندز و عددی

نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی بر روی پهنه ۱ که شامل دبی آب نشتی از تونل و فشار آب حفره ای در مرز پوشش و زمین است در جدول ۶ نمایش داده شده است.

همانگونه که ملاحظه می‌شود نتایج روش تحلیلی و عددی تطابق خوبی با همدیگر دارند ولی به هر حال روش تحلیلی قادر به تعیین توزیع فشار پیرامون تونل نخواهد بود. بعلاوه اگر زمین غیرهمگن بوده و تراوایی‌های متفاوتی داشته باشد (به عنوان مثال در سنگهای رسی) یا بخواهیم علاوه بر تاثیر پوشش تاثیر زون تزریق هم لحاظ کنیم، روش‌های تحلیلی ناکارآمد هستند.



شکل ۸:تغییرات فشار آب حفره‌ای در مدل چهارم

جدول ۶: مقایسه دبی آب نشتی و فشار آب حفره‌ای محاسبه شده توسط روش‌های عددی و تحلیلی

مدل		دبی آب نشتی (لیتر بر ثانیه)		فشار آب حفره‌ای (متر آب)	
		عددی	تحلیلی	عددی	تحلیلی
۱	تاج	۱/۸۶	۲/۲۷	۰	۰
	کف	۲/۲۹		۰	
۲	تاج	۱/۷۷	۲/۱۲	۴	۵
	کف	۱/۸۵		۱	
۳	تاج	۱/۲۶	۱/۲۵	۱۰	۱۰
	کف	۱/۲۳		۱۰	
۴	تاج	۱/۱۶	۱/۱۸	۱۳	۱۳/۳
	کف	۱/۱۲		۱۴	

۵-نتیجه‌گیری

نتایج روش‌های تحلیلی و عددی تطابق خوبی با یکدیگر داشتند، لذا با اطمینان می‌توان روش‌های عددی را در شرایط پیچیده‌تر به کار برد.

در بررسی تراوش آب با استفاده از مدل عددی می‌توان کلیه پیچیده‌گی‌های موجود در مدل را اعمال کرد و به عنوان مثال می‌توان نحوه تاثیر زهکش‌ها را بر الگوی جریان در پیرامون تونل با منظور کردن مش‌های با نفوذپذیری بیشتر لحاظ کرد، درحالیکه مدل‌های تحلیلی ارائه شده تنها برای محیط‌های همگن و متجانس قابل استفاده هستند.

www.SID.ir

Archive of SID

با استفاده از روش‌های عددی می‌توان به توزیع فشار آب حفره‌ای پیرامون تونل پی برد که می‌تواند کمک شایانی به طراحی دقیق پوشش کند. مطابق با مدل‌سازی عددی انجام شده توزیع فشار آب حفره‌ای پیرامون تونل، یک توزیع غیریکنواخت است که در روش‌های تحلیلی این توزیع یکنواخت در نظر گرفته می‌شود. توزیع غیریکنواخت فشار آب حفره‌ای می‌تواند پایداری پوشش را به خطر بیندازد.

با کاهش ضریب نفوذپذیری زمین هد آب در مرز پوشش و زمین افزایش یافته و به هد داخلی تونل نزدیک می‌شود، لذا برایند فشار داخلی و خارجی به صفر نزدیک شده و می‌توان در طراحی پوشش از بار ناشی از آب صرفنظر کرد و به عبارت دیگر، در زمین‌های نفوذناپذیر نگرانی از بابت فشار آب اعمال شده بر پوشش وجود ندارد.

در مناطقی که ضریب نفوذپذیری سنگ میزبان زیاد است ایستابی آب در مرز پوشش و زمین به صفر نزدیک شده و این احتمال وجود دارد که تحت تاثیر ایستابی داخلی ترک‌های کششی در پوشش ایجاد شود و با خوردگی در آرماتورها، پایداری پوشش به خطر افتد. در این شرایط با تزریق می‌توان ایستابی آب در مرز پوشش و زمین را افزایش داد و از ایجاد ترک‌های کششی جلوگیری کرد.

منابع

[۱] آقایی؛ ۱۳۸۶؛ "**گزارش مکانیک سنگ سیمای طرح پروژه آبرسانی به فلات مرکزی ایران**"؛ مهندسان مشاور زاینده‌آب، وزارت نیرو.

[2] FLAC User's Guide; 2001; "*Fluid-Mechanical Interactions*"; Itasca Consulting Group, Inc.

[3] Goodman R. E.; 1980; "*Introduction to rock mechanics*"; John Wiley and Sons; New York.

[4] G. Fernandez; 1994; "*Behavior of Pressure Tunnels and Guidelines for Liner Design*"; *Journal of Geotechnical Engineering*; Vol. 120, No. 10, pp. 1768-1791.

[5] Hendron A. J., Fernandez G., Lenzini P. and Hendron M. A.; "*Design of pressure tunnels*" the art and science of geotechnical engineering at the dawn of the twenty first century; Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 161-192.

پی‌نوشت‌ها

[1] Grids
[2] History
[3] Inflow
[4] Outflow

www.SID.ir

Archive of SID

www.SID.ir