

## بررسی دبی آب نشتی از تونل انتقال آب بهشت آباد با استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی

سعید مهدوری<sup>۱\*</sup>، مسعود هاشمی<sup>۲</sup>، فضا آیتی<sup>۳</sup>

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

۲- مهندسان مشاور زاینده‌آب

۳- دانشگاه پیام نور شهرکرد

(دریافت ۲۲ دی ۱۳۸۶، پذیرش ۱۷ مرداد ۱۳۸۸)

### چکیده

تونل انتقال آب بهشت‌آباد به طول تقریبی ۶۵ کیلومتر طول‌ترین 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 داری 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

## 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 رورونده و از آن پس تا خروجی تونل در پهنه سنندج-سیرجان قرار می‌گیرد. از ورودی تونل به سمت خروجی کوه‌های سوخته، هزارگری، جهان‌بین، نثار، تنگ صیاد و تخت شاهلرا به ترتیب با حداکثر میزان روباره ۶۹۳، ۱۲۶۰، 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.

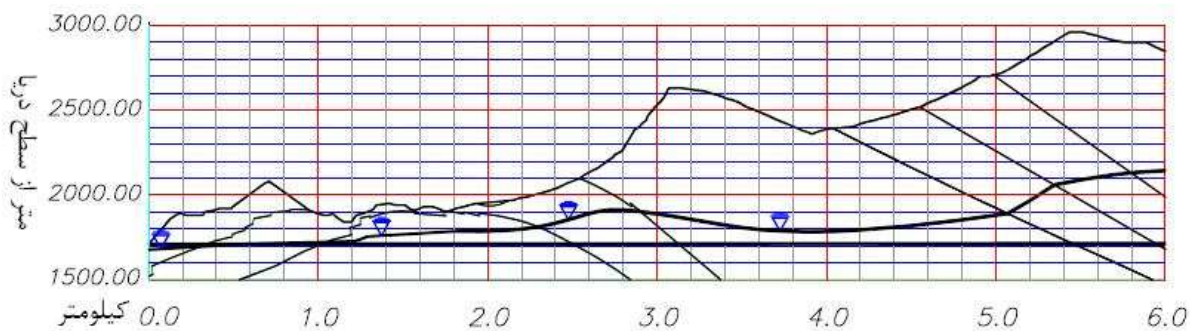
## ۲- پهنه‌بندی مسیر تونل

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

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	متر از پهنه	ضریب تراوایی (m/s)		ایستایی آب (متر)	
			کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه
۱	آهک ضخیم لایه	۳۳۰-۰	$10^{-4}$	$10^{-2}$	۰	۷۲
۲	آهک تا آهک ماری	۱۰۲۰-۳۳۰	$10^{-7}$	$10^{-4}$	۰	۷۲
۳	آهک و دولومیت ضخیم لایه	۱۸۰۰-۱۰۲۰	$10^{-4}$	$10^{-2}$	۰	۷۲
۴	آهک و دولومیت ضخیم لایه	۲۵۰۰-۱۸۰۰	$10^{-4}$	$10^{-2}$	۳۴	۷۵
۵	آهک تا آهک ماری	۳۱۳۰-۲۵۰۰	$10^{-5}$	$10^{-4}$	۳۴	۲۰۰
۶	آهک ضخیم لایه توده‌ای	۵۴۵۰-۳۱۳۰	$10^{-4}$	$10^{-2}$	۵۸	۸۰
۷	کنگومرا، ماسه‌سنگ، لای سنگ	۵۹۴۰-۵۴۵۰	$10^{-7}$	$10^{-5}$	۵۸	۳۲۰
۳۰	توف آندزیتی، آندزیت	۶۳۰۸۰-۵۴۷۲۰	$10^{-8}$	$10^{-5}$	۶۰	۶۵
۳۱	ماسه‌سنگ و شیل	۶۴۹۳۰-۶۳۰۸۰	$10^{-10}$	$10^{-7}$	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 ایستایی 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 ایستایی 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.

#### 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.

$$\epsilon_{\theta L} = \frac{\gamma_w (h_i - h_0)}{M} \times \frac{(1 + \nu_m)}{E_m} \quad (2)$$

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

که در آن:

$a$  فاصله مرکز تونل تا وسط پوشش،  $E_m$  و  $\nu_m$  مدول الاستیک و ضریب پواسون زمین و  $h_0$  هد سطح ایستایی 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].

$$P_r = \frac{\gamma_w (h_i - h_0)}{M} \quad (3)$$

#### ۳-۱- مرحله اول: روش تحلیلی فرناندز

##### معرفی روش

در این روش پوشش و محیط اطراف آن همگن و متجانس در نظر گرفته شده، لذا نرخ جریان و ایستایی 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 می‌تواند توسط رابطه ۱ ارزیابی شود.

$$q_L = \frac{2\pi k_L (h_i - h_{w1})}{\ln \frac{b}{a_1}} \quad (1)$$

که در آن:

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.

$$q_L = (2\pi \times K_L \times (h_a - h_i)) / \ln(b/a_1) \quad (6)$$

که در آن:

$K_L$  تراوایی معادل پوشش،  $h_a$  و  $h_i$  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.

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

$$\frac{D_h = \frac{4A}{P} = \frac{4w}{2} = 2w}{\rightarrow V = \frac{\gamma_w w^2 \Delta h_l}{8\mu(b-a_1)}} \quad (7)$$

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

که در آن:

$w$  عرض ترک،  $\mu$  گرانیوی دینامیکی و  $n$  تعداد قطعات سگمنت است.

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

$$K_L = \frac{n\gamma_w w^3 \ln(b/a_1)}{16\pi\mu(b-a_1)} \quad (8)$$

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 پواسون 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 آبیگری 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 جدول ۳ نمایش داده شده است. و همچنین ایستابی آب در

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  $P_r = \gamma_w (h_{w1} - h_0)$  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].

$$\varepsilon_{\theta L} = \frac{\gamma_w (h_i - h_{w1}) a}{E_s t_s} \quad (4)$$

اندرکنش مکانیکی هیدرولیکی پوشش و زمین پیرامون

در شرایطی که کرنش محیطی کمتر از  $1/5 \times 10^{-6}$  باشد، تراوایی پوشش بتنی ساده را می‌توان  $1/7 \times 10^{-6}$  سانتی‌متر بر ثانیه در نظر گرفت، در شرایطی که کرنش محیطی بیشتر از  $1/5 \times 10^{-4}$  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.

$$k_L = \alpha \varepsilon_{\theta L}^3 \quad \alpha = \frac{\gamma_w}{12\mu} S^2 \quad (5)$$

که در آن:

$S$  فاصله‌داری ترک‌ها،  $\mu$  گرانیوی دینامیکی آب و  $\gamma_w$  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  $\rho$  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

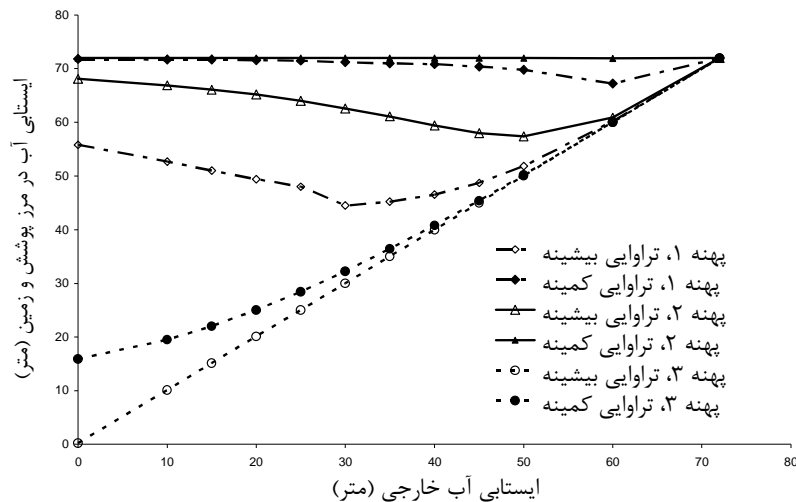
در پهنه ۲ تراوایی سنگ میزبان نسبتاً پایین و تراوایی پوشش با توجه به دگرشکل‌پذیری سنگ میزبان نسبتاً بالا است، لذا برخلاف پهنه ۱ و ۳ دبی آب نشتی از تونل توسط سنگ میزبان کنترل می‌شود. در این شرایط میزان تلفات هیدرولیکی در سیال حین عبور از پوشش ناچیز بوده و تراوایی آب در مرز پوشش و زمین، ناشی از تراوایی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

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 تراوایی آب در مرز پوشش زمین توسط تراوایی 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 تراوایی آب در مرز پوشش و زمین، ناشی از تراوایی 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 تراوایی آب در مرز پوشش و زمین برابر با تراوایی 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) تراوایی آب در مرز پوشش و زمین افزایش می‌یابد (شکل ۲). 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 (جدول ۳).

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

شماره پهنه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۳۰	۳۱
دگرشکل‌پذیری 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



شکل ۲: تغییرات ایستابی آب در مرز پوشش و زمین با توجه به افزایش تدریجی تراز آب

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

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

ده متر آب است به ترتیب  $6/3e^{-7}$  متر بر ثانیه و  $4/02e^{-7}$  متر بر ثانیه لحاظ شده که مطابق با تراوایی استفاده شده در روش تحلیلی است. ایستایی داخلی آب در تاج تونل برابر با ۷۲ متر آب لحاظ شده است. و با توجه به شعاع تونل ایستایی آب در کف تونل ۷۸ متر آب منظور شده است. قابل ذکر است که در روش تحلیلی از تغییرات ایستایی 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<sup>۱</sup> در هر سیکل محاسبه و در تاریخچه‌های<sup>۲</sup> جریان ورودی<sup>۳</sup> و خروجی<sup>۴</sup> ثبت می‌شود، زمانیکه دبی آب ورودی و خروجی با یکدیگر برابر شد حالت تراوش ماندگار در مدل ایجاد شده است [۲].

با توجه به ایستایی آب خارجی صفر و ده متر و تراوایی‌های  $1e^{-2}$  متر بر ثانیه و  $1e^{-4}$  متر بر ثانیه برای سنگ میزبان، چهار مدل عددی ساخته شده که در ادامه نتایج آن بررسی می‌شود.

#### مدل اول: ایستایی آب خارجی صفر، تراوایی سنگ میزبان $1e^{-2}$ متر بر ثانیه

دبی آب نشتی از تونل در نیمه بالایی تونل  $1/86$  و در نیمه پایینی تونل  $2/29$  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: ایستایی آب خارجی صفر، تراوایی سنگ میزبان $1e^{-4}$ متر بر ثانیه

دامنه تغییرات دبی آب نشتی از تونل و ایستایی آب در مرز پوشش و زمین برای پهنه‌های ۴ تا ۳۱ با توجه به اینکه ایستایی آب خارجی در این پهنه‌ها مستقل از آبیگری مخزن سد است در جدول ۵ نمایش داده شده است. حداکثر ایستایی آب خارجی برابر با ۷۲ متر منظور شده است، زیرا هنگامی که ایستایی 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.

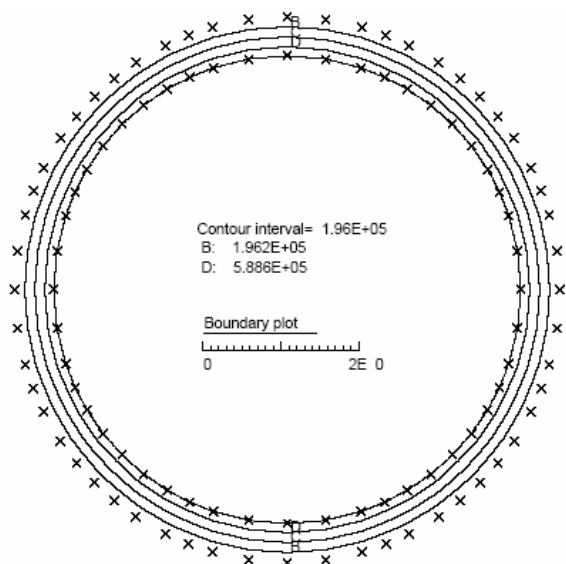
جدول ۵: دامنه تغییرات دبی آب نشتی از تونل و ایستایی آب در مرز پوشش و زمین برای پهنه‌های ۴ تا ۳۱

پهنه	دبی آب نشتی در واحد طول تونل (لیتر بر ثانیه)	دبی آب نشتی در طول پهنه (لیتر بر ثانیه)	ایستایی 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

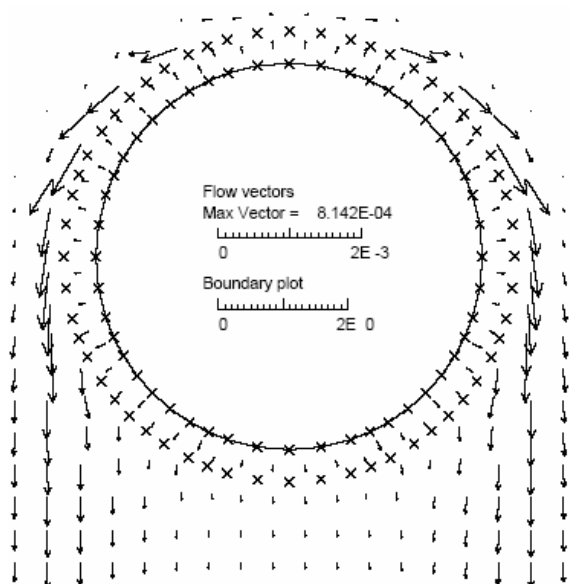
#### ۳-۲- مرحله دوم: مدل‌سازی عددی

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 ایستایی 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 ایستایی خارجی برابر با صفر 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.



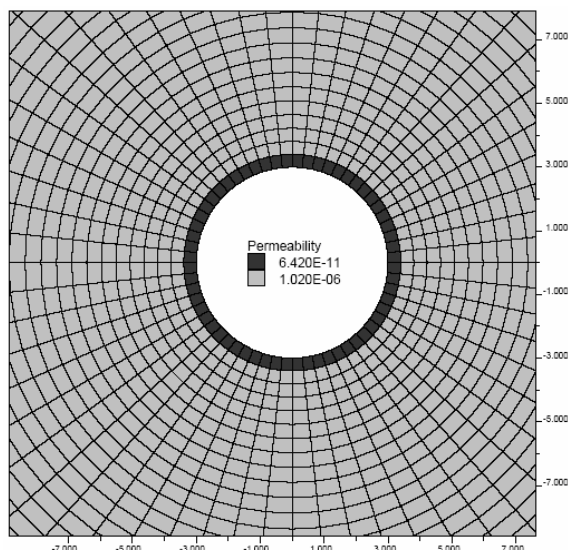
شکل ۴: تغییرات فشار آب حفره‌ای در مدل اول



شکل ۵: خطوط جریان آب در مدل اول

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 ایستایی 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.

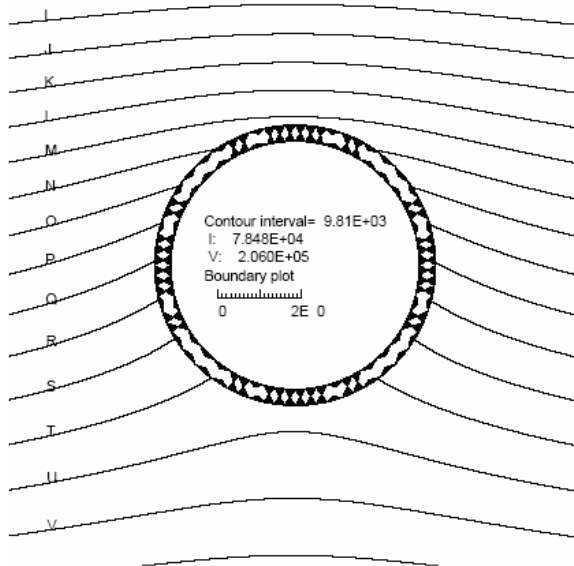
اطلاع از توزیع فشار آب حفره‌ای پیرامون تونل فاکتور مهمی برای طراحی پوشش است که روش تحلیلی فرناندز از تعیین آن عاجز است. در شکل ۶ برای وضوح بیشتر فشارهای بیش از چهار متر آب که درون پوشش واقع می‌شوند حذف شده است.



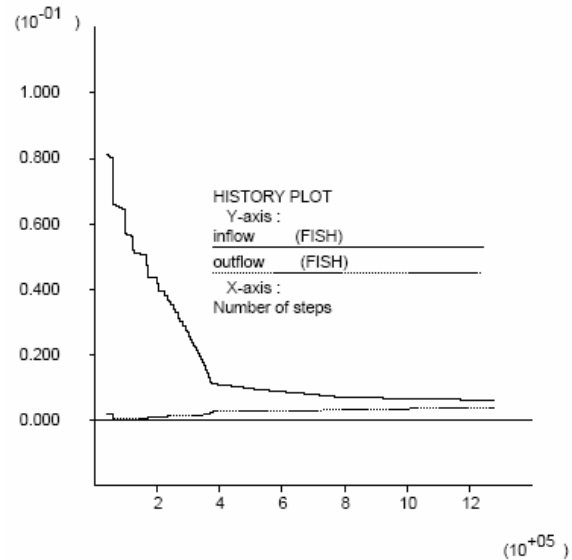
شکل ۳: مش‌بندی تونل همراه با زون حلقوی پیرامون تونل

مدل سوم: ایستایی 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 ایستایی آب داخلی و



شکل ۸: تغییرات فشار آب حفره‌ای در مدل چهارم



شکل ۷: تاریخچه جریان ورودی و خروجی برای مدل سوم

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)	
	تحلیلی	عددی	تحلیلی	عددی
۱	۲/۲۷	۱/۸۶	۰	۰
	۲/۲۹	۲/۲۹	۰	۰
۲	۲/۱۲	۱/۷۷	۵	۴
	۱/۸۵	۱/۸۵	۱	۱
۳	۱/۲۵	۱/۲۶	۱۰	۱۰
	۱/۲۳	۱/۲۳	۱۰	۱۰
۴	۱/۱۸	۱/۱۶	۱۳/۳	۱۳
	۱/۱۲	۱/۱۲	۱۳/۳	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.

مدل چهارم: ایستابی آب خارجی ده متر آب، تراوایی سنگ میزبان  $10^{-4}$  متر بر ثانیه

دبی آب نشتی از تونل در این حالت در نیمه بالایی تونل  $1/16$  و در نیمه پایینی تونل  $1/12$  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 حفره‌ای 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.



## 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

- <sup>1</sup> Grids  
<sup>2</sup> History  
<sup>3</sup> Inflow  
<sup>4</sup> Outflow

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 برآیند 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 ایستایی آب در مرز پوشش و زمین به صفر نزدیک شده و این احتمال وجود دارد که تحت تاثیر ایستایی داخلی ترک‌های کششی در پوشش ایجاد شود و با خوردگی در آرماتورها، پایداری پوشش به خطر افتد. در این شرایط با تزریق می‌توان ایستایی آب در مرز پوشش و زمین را افزایش داد و از ایجاد ترک‌های کششی جلوگیری کرد.

