تحلیل تراوش در تونل انتقال آب چشمه روزیه در مرحله ساخت و بهره‌برداری با بهره‌گیری از شبیه‌سازی عددی

علی احمدزاده، راحب باقرپور، سعید مهدوری؛
دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

تاریخ: دریافت ۹۳/۱۰/۱۳ پذیرش ۹٤/۵/۳۱

چکیده

با توجه به قرارگیری بخش عمدهٔ ایران در ناحیهٔ خشک و بیابانی حفر تونل‌های انتقال آب امری اجتناب‌ناپذیر است. یکی از چالش‌های اساسی در ساخت این تونل‌ها ورود آب به آن در مرحلهٔ ساخت و بهره‌برداری است. تونل انتقال آب چشمهٔ روزیه به‌طول ۳۲۰۰ متر بخشی از طرح انتقال آب به شهر سمنان است که در ۳۰ کیلومتری شمال شرق سمنان ساخته شده است. بر اساس اطلاعات حاصل از گمانه‌های حفاری شده، تونل از نقطه‌نظر ژئومکانیکی به ۸ پهنه تقسیم شده که در این تحقیق بعد از بررسی پارامترهای ژئومکانیکی و هیدروژئولوژیکی تونل با توجه به دبی آب ورودی به تونل در حین ساخت ضریب نفوذپذیری سنگ میزبان تونل در هر پهنه با استفاده از تحلیل برگشتی و بر اساس نتایج شبیه‌سازی عددی ارزیابی شده است. در ادامه برررسی پارامتری بر ضخامت زون تزریق، ضریب نفوذپذیری پوشش و زون تزریق در هر پهنه انجام شده است. بر اساس نتایج این پژوهش، تأثیر تغییرات ضخامت زون تزریق بر دبی آب ورودی به تونل ناچیز است. از این رو، با فرض ضخامت ۳ متر برای زون تزریق، ضریب نفوذپذیری سنگ میزبان بعد از تزریق ارزیابی شده است. تزریق سیمان می‌تواند نفوذپذیری سنگ میزبان را از ۱۰ تا ۱۰۰۰ مرتبه بسته به نفوذپذیری اولیه سنگ کاهش دهد. دبی آب ورودی به تونل در هر پهنه با استفاده از تحلیل توأمان هیدرومکانیکی نیز محاسبه شد. نتایج تحلیل نشان داد که دبی ورودی به تونل در تحلیل توأمان ۵۰ تا ۷۰ درصد کم‌تر از تحلیل هیدرولیکی است.

واژهای کلیدی: تحلیل توأمان هیدرومکانیکی، شبیه‌سازی عددی، تونل چشمه روزیه، تراوش آب.

* **نویسنده مسئول** smahdevari@cc.iut.ac.ir

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.8.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3405]

مقدمه

با گسترش جوامع شهری و به تبع آن افزایش نیازهای آبی در بخش شرب، صنعت و کشاورزی مدیریت منابع آب از طریق احداث سد و حفر تونل‌های انتقال آب مخصوصاً در کشور ایران که در ناحیهٔ خشک و کم آب قرار گرفته است امری اجتناب‌ناپذیر است. در حفر تونل با چالش‌های زیادی مواجه می‌شویم که یکی از این چالش‌ها هجوم آب به تونل حین حفاری آن است. جریان‌های شدید آب باعث بروز مشکلات فراوان مانند کاهش ضریب پایداری، تأخیر در برنامهٔ زمان‌بندی، زوال سیستم نگه‌داری و کاهش خواص ژئومکانیکی سنگ می‌شود [۱]–[۸].

از اثرات جانبی هجوم آب به تونل می‌توان به نشست سطحی تحت تأثیر تحکیم لایه‌های فوقانی، ناپایداری تونل و خشک شدن چشمه‌ها به‌عنوان اثرات اجتماعی آن اشاره کرد [۲]، [٤]، [۹]. در جدول ۱ به برخی از حوادث اتفاق افتاده حین حفاری تونل ناشی از هجوم آب اشاره شده است. از این رو، تخمینی مناسب از دبی آب وارده به تونل در طراحی، تعیین روش‌های اجرا و نیز پیش‌بینی هزینه‌ها بسیار مفید خواهد بود. محققان بسیاری به بررسی دبی آب ورودی به تونل توجه کرده‌اند. پژوهش‌های انجام شده در این زمینه را می‌توان در سه دستهٔ تحلیلی، تجربی و عددی قرار داد. روش‌های تحلیلی معمولاً در محیطی همگن و هم‌سان‌گرد با اعمال شرایط مرزی خاص و حل معادلات دیفرانسیل جریان، دبی آب ورودی به تونل را ارزیابی می‌کنند [۲]، [٤]، [۹]، [۱۲]، [۲٤].

روش‌های تحلیلی، ساده و سریع است ولی دقت کافی در برآورد دبی آب در تودهٔ سنگ‌های ناهمگن ندارند و لازمهٔ استفاده از این روش‌ها اعمال فرضیات ساده‌کننده‌ای در ارتباط با هندسه تونل، شرایط مرزی و رفتار مصالح است و امکان لحاظ کردن پیچیدگی‌های موجود در محیط تراوش وجود ندارد.

روش‌های تجربی با استفاده از اطلاعات مربوط به پروژه‌های پیشین و برقراری ارتباط میان دبی آب ورودی به سازه زیرزمینی و ملاحظات زمین‌شناسی سعی در برآورد دبی آب ورودی به تونل در بررسی‌های موردی مشابه دارند [۲۵].

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.8.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3405]

جدول ۱. مشکلات پیش آمده ناشی از وجود آب در تونل

نام پروژه	عامل حادثه	منبع
تونل پیش‌آهنگ پینگ لین[1] در تایوان	ریزش ناگهانی به‌دلیل ورود آب زیرزمینی	[۱]
تونل گام‌جونگ[2] در کره جنوبی	جریان آب به درون تونل از طریق درزه‌ها و گسل‌ها	[۳]
تونل انتقال آب نوسود در غرب کرمانشاه	وجود زون گسله، ناپایداری دیواره تونل، وجود آب در طول تونل	[٦]
تونل خدمات‌رسانی البرز، آزادراه تهران–شمال	گاز متان، مچاله شوندگی زمین و جریان شدید آب به تونل	[۷]
تونل یان چیون[3] در تایلند	ورود جریان زیاد آب زیرزمینی	[۵]
تونل گوهرنگ	هجوم آب به تونل	[۸]
تونل‌های ۱ و ۳ نیروگاه هیدرولیکی جین‌پینگ[4] II، چین	تنش برجای بالا و فشار و جریان بالای آب زیرزمینی	[۱۰]
تونل بزرگراه شانگهای زیر رودخانه هانگپو[5]	جریان شدید آب	[۱۱]

پژوهش‌های قبلی نشان داده است که تفاوت زیادی میان دبی ارزیابی شده بر اساس روش‌های تجربی و مقادیر واقعی وجود دارد [۲٦]. هم‌چنین بیان خصوصیات زمین‌شناسی به‌صورت کمی و بررسی ارتباط آن با دبی آب ورودی به تونل، زمان‌بر و گران است.

به برآورد دبی آب ورودی به تونل با استفاده از تحلیل‌های هیدرولیکی یا توأمان هیدرومکانیکی در روش‌های عددی بیش‌تر توجه شده است. مشروط بر این‌که درک خوبی از شرایط مرزی مدل و داده‌های ورودی مدل عددی وجود داشته باشد روش‌های عددی چه در محیط پیوسته یا ناپیوسته ابزار مناسبی برای ارزیابی دبی آب ورودی به تونل و تحلیل توأمان هیدرومکانیکی است. لازمهٔ تحلیل تراوش در محیط ناپیوسته دانستن هندسه درزه‌ها شامل شیب، جهت شیب، پایایی و مشخصات هیدرولیکی درزه‌ها شامل بازشدگی، زبری و پرشدگی است که دست‌یابی به این گونه از اطلاعات در بیش‌تر پروژه‌های تونل‌سازی عملاً غیرممکن

1. Pinglin
2. Gumjong
3. Yungchuen
4. Jinping
5. Huangpu

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.8.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3405]

یا بسیار هزینه‌بر و وقت‌گیر است و غالب تحلیل‌های تراوش انجام شده در محیط ناپیوسته بر یک درزه یا دسته درزه با فرض جریان آرام انجام شده است [۲۷]، [۲۸]، [۲۹]. از این رو، انجام تحلیل‌های هیدرومکانیکی در محیط پیوسته با استفاده از یک ضریب نفوذپذیری معادل بسیار رایج است [۳۰]، [۳۱]، [۳۲].

روش‌های تجربی برآورد دبی آب ورودی به تونل صرفاً در موارد مشابه کاربرد دارد و در صورت تطابق نداشتن با موارد ثبت شده در بانک اطلاعاتی روش تجربی، استفاده از آن‌ها خطای زیادی دارد. روش‌های تحلیلی نیز در محیطی هموژن و هم‌سان‌گرد و تونل‌های دایره‌ای قابل کاربرد است و قادر به‌منظور کردن پیچیدگی‌های زمین‌شناسی نیستند. از این رو، روش‌های عددی ابزار مناسبی برای ارزیابی دبی آب ورودی به تونل هستند مشروط بر این‌که داده‌های ورودی مدل با دقت ارزیابی و امکان کالیبراسیون مدل وجود داشته باشد.

در اغلب پژوهش‌های انجام شده با بهره‌گیری از شبیه‌سازی عددی تأثیر نگه‌داری در تحلیل لحاظ نشده است [۲۷]، [۲۸]، [۳۰] یا صرفاً رفتار پوشش بتنی یا شاتکریت در حالت هیدرومکانیکی مد نظر قرار گرفته است [۳۱]، [۳۲] و پژوهش‌های اندکی تأثیر ضخامت و نفوذپذیری زون تزریق یا پوشش بتنی را در دبی آب ورودی به تونل بررسی کرده است [۳۱].از این رو، در این تحقیق ابتدا تونل انتقال آب چشمه روزیه معرفی و بر اساس برداشت‌های زمین‌شناسی، گمانه‌های حفاری شده و آزمون‌های انجام شده، تونل از نقطه نظر ژئومکانیکی و هیدرولیکی پهنه‌بندی شده است. سپس با استفاده از تحلیل برگشتی و دبی آب ورودی به تونل حین اجرا و بعد از بهره‌برداری، ضریب نفوذپذیری سنگ میزبان و ضخامت زون تزریق ارزیابی و تأثیر تحلیل توأمان هیدرومکانیکی بر دبی آب ورودی به تونل ارزیابی شده است.

زمین‌شناسی

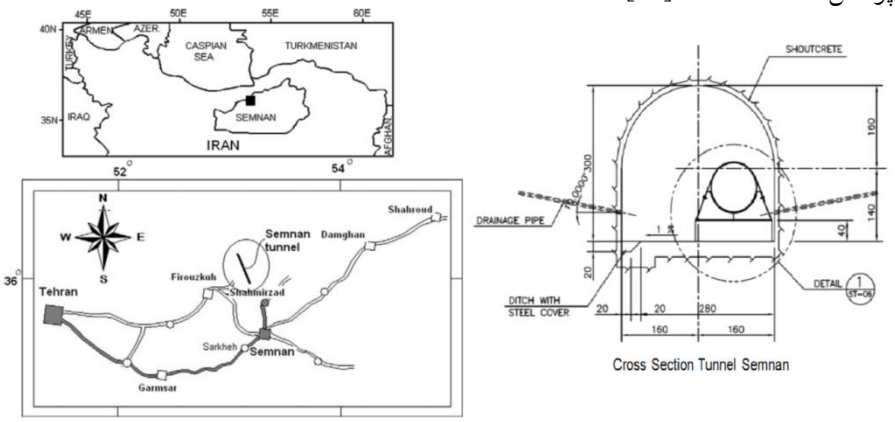
۱. موقعیت و زمین‌شناسی تونل

تونل انتقال آب سمنان به قطر ۳/۲ متر و طول ۳۲۰۰ متر با هدف انتقال آب شرب از چشمه روزیه به شهر سمنان در ۳۰ کیلومتری شمال شرق سمنان ساخته شده است (شکل ۱).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.8.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3405]

سطح مقطع تونل نعل اسبی است و برای انتقال آب از یک لوله فولادی با قطر ۱ متر که در کف تونل قرار گرفته استفاده شده است.

تونل در سنگ‌های رسوبی دورهٔ کامبرین و سنزوئیک حفاری شده است. توالی سنگ‌های دورهٔ کامبرین ترکیبی از سنگ آهک، دولومیت، سیلت، شیل و ماسه‌سنگ است که حدود ۷۵ درصد از مسیر تونل را پوشش داده است و مابقی آن با سنگ‌های دوران سنزوئیک مانند توف پوشش داده شده است [۳۳].



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و مشخصات مقطع عرضی تونل سمنان [۳۳]

با توجه به برداشت‌های سطحی و داده‌های حاصل از حفاری چهار حلقه گمانه، تونل از نقطه‌نظر زمین‌شناسی به ۸ پهنه تقسیم شده که در شکل ۲ نمایش داده شده است. ارزیابی خواص ژئومکانیکی سنگ‌های میزبان تونل بر اساس آزمایش روی مغزه‌های حاصل از حفاری انجام شده و برای طبقه‌بندی مهندسی تودهٔ سنگ از روش‌های تجربی RMR_{89} و GSI بهره برده شده است. نتایج حاصل از طبقه‌بندی‌های مهندسی تودهٔ سنگ و مقاومت فشاری سنگ بکر برای هر پهنه در شکل ۲ نمایش داده شده است.

۲. هیدروژئولوژی تونل

از دیدگاه هیدروژئولوژی تونل از واحد شهمیزاد عبور می‌کندکه این واحد از شمال به‌وسیلهٔ گسل رورانده بشم و از جنوب به‌وسیلهٔ گسل مارل و شیل محدود می‌شود. این واحد از دو سفرهٔ آب زیرزمینی کربناته و ماسه‌سنگی تشکیل شده که ارتباط میان آن‌ها بر اساس

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.8.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3405]

تحلیل‌های هیدروژئولوژی تأیید شده است. تراز سطح ایستابی در امتداد تونل با توجه به تراز آب در گمانه‌های حفاری شده، تراز چشمه‌ها و قنوات منطقه ارزیابی شده است (شکل ۲). به‌منظور تعیین قابلیت هدایت هیدرولیکی سنگ میزبان تونل، در ٦۳ گمانه آزمون لوژان انجام شده است. بر اساس نتایج این آزمون‌ها بیش‌ترین مقادیر هدایت هیدرولیکی در منطقه مربوط به سنگ‌های آهک و دولومیت است. مقادیر قابلیت هدایت هیدرولیکی مربوط به هر پهنه در شکل ۲ نمایش داده شده است [۲٦].

شبیه‌سازی عددی

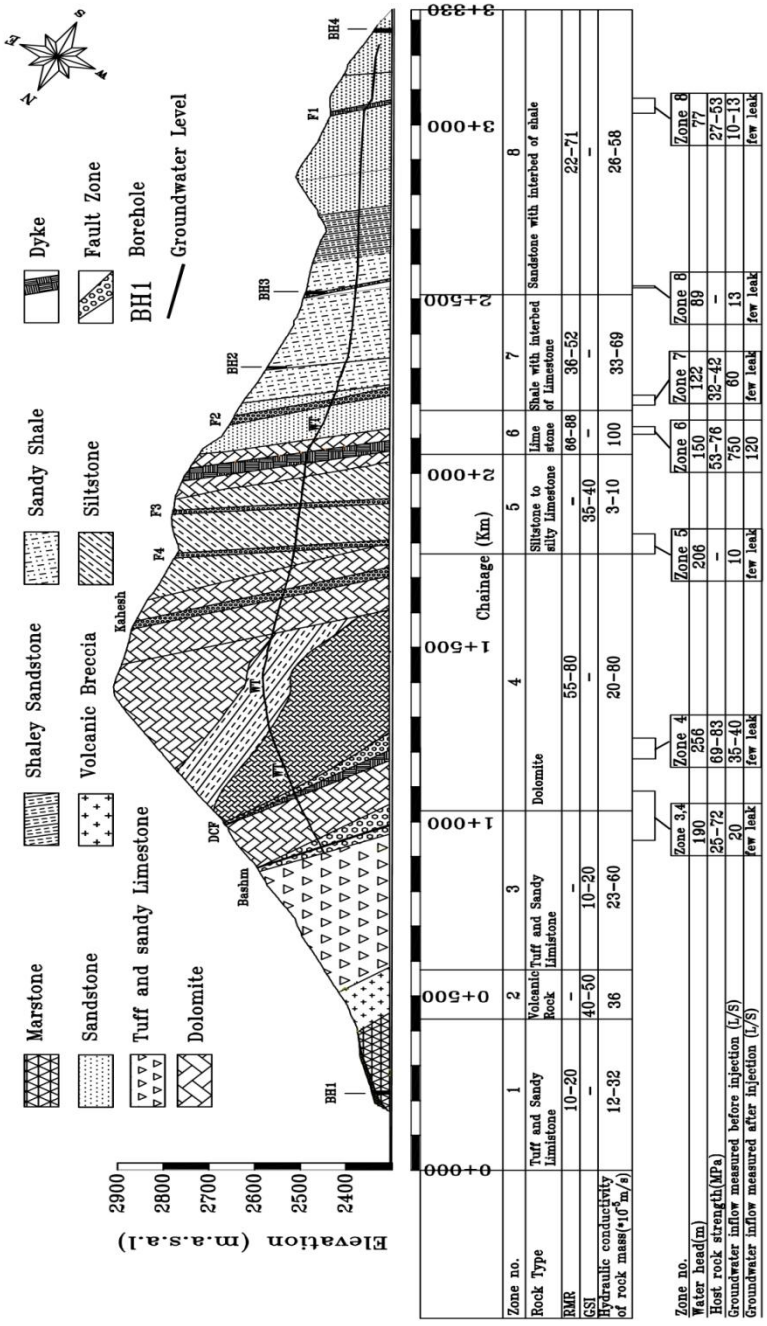
۱. هندسه تونل و شرایط مرزی

مطابق پیشنهاد پالمسترم در شرایطی که نسبت دهانه تونل به ابعاد متوسط بلوک‌های سنگی حاصل از برخورد دسته درزه‌ها کم‌تر از ٦ یا بیش از ۳۰ باشد تحلیل عددی می‌تواند در محیط پیوسته انجام شود [۳٤]. هم‌چنین لازمهٔ انجام تحلیل عددی در محیط ناپیوسته، اطلاع دقیق از مشخصات هندسی، مکانیکی و هیدرولیکی دسته‌درزه‌های موجود در محیط است که در اغلب پروژه‌های ژئومکانیکی دسترسی به این سطح از اطلاعات مقدور نیست. از این رو، با توجه به ملاحظات زمین‌شناسی مهندسی، سنگ میزبان تونل به‌عنوان محیطی پیوسته معادل، لحاظ شده و بر مبنای نتایج حاصل از طبقه‌بندی مهندسی سنگ و آزمایش‌های انجام شده روی مغزه‌ها، پارامترهای ژئومکانیکی تودهٔ سنگ میزبان تونل با استفاده از روش پیشنهاد شدهٔ هوک و دیدریچ برای هر پهنه ارزیابی و در جدول ۲ نمایش داده شده است [۳۵].

به‌منظور شبیه‌سازی عددی از نرم افزارFLAC[1] که بر اساس روش عددی تفاضل محدود پایه‌گذاری شده، استفاده شده است. با توجه به این‌که دبی آب ورودی به تونل در دورهٔ ساخت مستقل از دبی آب ورودی از جبهه‌کار و در فواصل دور از جبهه‌کار (بیش از ۵ برابر قطر تونل) اندازه‌گیری شده است نیازی به‌منظور کردن تأثیر جبهه‌کار در تحلیل عددی وجود ندارد. از این رو، شبیه‌سازی به‌صورت دوبعدی (کرنش سطحی) انجام شده است. هندسه تونل به‌همراه شرایط مرزی هیدرولیکی و مکانیکی در شکل ۳ نمایش داده شده است. فاصله مرزهای مکانیکی تا مرکز تونل به‌گونه‌ای تعیین می‌شوند که بر توزیع تنش و جابه‌جایی‌ها پیرامون تونل تأثیر نداشته باشد.

1. Fast Lagrange Analysis of Continuum

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.8.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3405]



Zone no.	1	2	3	4	5	6	7	8
Rock Type	Tuff and Sandy Limestone	Volcanic Rock	Tuff and Sandy Limestone	Dolomite	Siltstone to silty Limestone	Lime stone	Shale with interbed of Limestone	Sandstone with interbed of shale
RMR	10–20	–	–	55–80	–	60–88	36–52	22–71
GSI	–	40–60	10–20	–	35–40	–	–	–
Hydraulic conductivity of rock mass($*10^{-8}$m/s)	12–32	36	23–60	20–80	3–10	100	33–69	26–58

Zone no.	Zone 3,4	Zone 4	Zone 5	Zone 6	Zone 7	Zone 8	Zone 8
Water head(m)	190	256	206	150	122	89	77
Host rock strength(MPa)	25–72	69–83	–	53–76	32–42	–	27–53
Groundwater inflow measured before injection (L/S)	20	35–40	10	750	60	13	10–13
Groundwater inflow measured after injection (L/S)	few leak	few leak	few leak	120	few leak	few leak	few leak

شکل ۲. پروفیل زمین شناسی تونل انتقال آب چشمه روزیه [۳۳]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3405] [DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.8.0] [Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

جدول ۲. پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ میزبان تونل در هر پهنه [۳۳]

شمارهٔ پهنه	زاویهٔ اصطکاک داخلی (درجه)	مدول تغییر شکل (GPa)	ضریب پوآسون	چسبندگی (kPa)
۱	۳۸	۰/۸	۰/۳۵	۳۰۰
۲	٤٥	٤/٤	۰/۲٥	٦۷۰
۳	۲۸	۰/۷	۰/۳٥	٥٥۰
٤	٤۲	۱۸/٥	۰/۲۲	۳٦۰۰
٥	۳۰	۱/۸	۰/۲۷	۱۰۲۰
٦	٤۷	۱۷/٥	۰/۲۲	۲۹۰۰
۷	۳۸	۳/۷	۰/۲٥	۸۹۰
۸	۳۹	۲/۲	۰/۲٦	۸۰۰

در عمل مرزهای هیدرولیکی در مکانی قرار دارد که تغییرات سطح ایستابی تحت تأثیر زهکشی تونل قابل چشم‌پوشی باشد. از این رو، در این مکان می‌توان فشار آب حفره‌ای و درصد اشباع را ثابت در نظر گرفت. شایان ذکر است که درصد اشباع در المان‌های زیر سطح ایستابی ۱۰۰٪ لحاظ شده و فشار آب حفره‌ای مطابق با سطح ایستابی ارزیابی شده است. در شرایطی که مرزهای هیدرولیکی بیش از حد به تونل نزدیک باشد دبی آب ورودی به تونل بیش از واقع تخمین زده می‌شود که علت این امر افزایش شیب هیدرولیکی با نزدیک شدن مرزهای هیدرولیکی به تونل است. از طرف دیگر اگر مرزهای هیدرولیکی از تونل بیش از حد مورد نیاز دور باشد، باعث افزایش زمان حل مدل و صرف هزینه بیش‌تر است. از این رو، به‌منظور تعیین بهینه محل مرزهای هیدرولیکی، دبی آب ورودی به تونل با بهره‌گیری از مدل‌های عددی با ابعاد ٤۰×٤۰ تا ۱۸۰×۱۸۰ متر ارزیابی شد (شکل ٤). چنان‌که ملاحظه می‌شود با افزایش ابعاد مدل و یا به‌عبارت دیگر دور شدن مرزهای هیدرولیکی دبی آب ارزیابی شده به‌وسیلهٔ مدل عددی کاهش یافته و زمانی که عرض مدل به ۱۲۰ متر می‌رسد تقریباً ثابت باقی می‌ماند. از این رو، مرزهای هیدرولیکی در فاصلهٔ ٦۰ متری از مرکز تونل منظور شده است. در شبیه‌سازی از المان‌های مثلثی با کرنش ثابت CST[1] استفاده شده است. به‌منظور کاهش خطا، اندازه مش‌های پیرامون تونل در مدل عددی ۱٥ سانتی‌متر لحاظ شده که

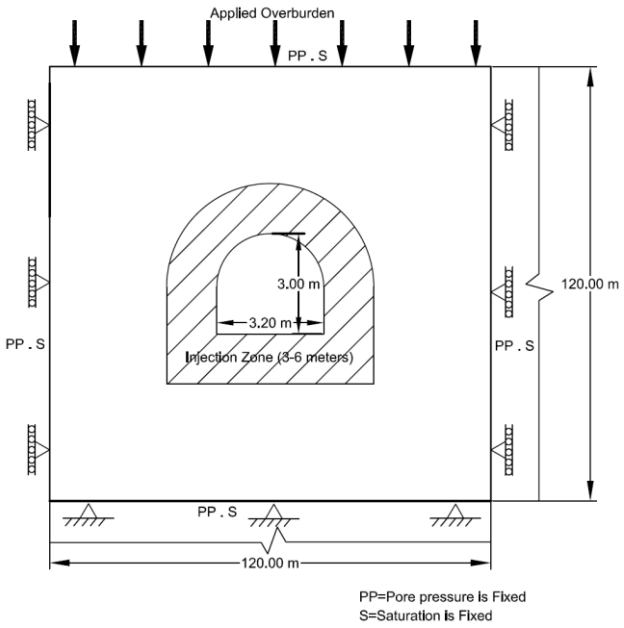
1. Constant Strain Triangular

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.8.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3405]

مقدار آن با نزدیک شدن به مرزهای مدل به‌تدریج افزایش می‌یابد. علت افزایش تدریجی اندازهٔ مش‌ها با دور شدن از مرز تونل کاهش زمان محاسبات است.

به‌دلیل سهولت در ارزیابی پارامترهای ورودی معیار شکست موهر-کلمب و مفهوم فیزیکی قابل درک آن‌ها، در اغلب شبیه‌سازی‌های عددی از این معیار به‌عنوان معیار شکست استفاده می‌شود. در تحقیق حاضر نیز معیار شکست استفاده شده معیار موهر-کلمب است که پارامترهای ورودی این معیار برای هر پهنه در جدول ۲ نمایش داده شده است.

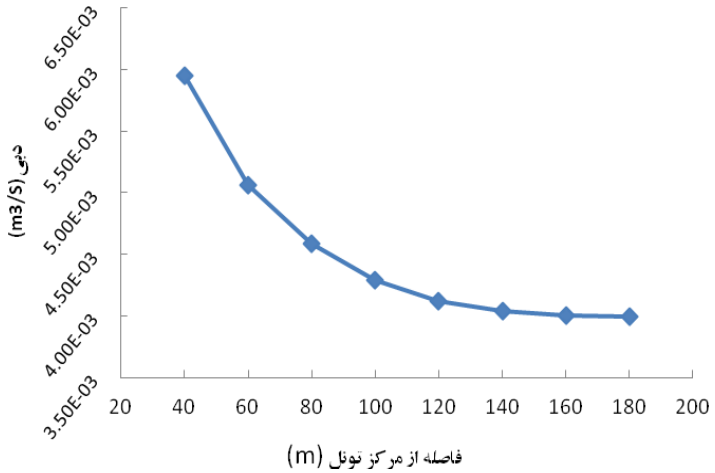
در نرم افزار FLAC از المان ساختاری تیر[1] برای شبیه‌سازی نگه‌داری‌هایی مانند پوشش بتنی، شاتکریت و قاب فولادی استفاده می‌شود که عنصری ناتروا است. به‌دلیل این‌که پوشش نصب شده در تونل تراوا است، از این رو، برای شبیه‌سازی پوشش بتنی و زون تزریق از عناصر نفوذپذیر CST استفاده شده و ضخامت آن معادل ضخامت پوشش بتنی و زون تزریق منظور شده است (شکل ۳).



شکل ۳. هندسه شماتیک و شرایط مرزی مدل عددی

1. Beam

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.8.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3405]



شکل ٤. تأثیر جانمایی مرز هیدرولیکی بر دبی آب ورودی به تونل در شبیه‌سازی عددی

پوشش بتنی الاستیک فرض شده و مدول تغییرشکل و ضریب پوآسون آن به‌ترتیب ۲۰ GPa و ۰/۲ منظور شده است. برای زون تزریق معیار شکست پلاستیک موهر-کلمب انتخاب شده است. به‌دلیل عدم قطعیت‌های موجود از تغییرات خواص مکانیکی تودهٔ سنگ تحت تأثیر تزریق صرف‌نظر شده است و فقط تغییرات نفوذپذیری در شبیه‌سازی عددی لحاظ شده و خواص مکانیکی آن معادل خواص مکانیکی پهنه منظور شده است.

با توجه به مراحل ساخت تونل شبیه‌سازی عددی بدین‌ترتیب انجام شده است:

الف) ساخت هندسه مدل، اعمال تنش‌های برجا مطابق با روباره تونل، فشار آب حفره‌ای مطابق با سطح ایستابی در هر پهنه، خواص هیدرولیکی و مکانیکی مطابق با معیار شکست موهر-کلمب، شرایط مرزی هیدرولیکی(فشار آب حفره‌ای و اشباع در مرز مدل تغییر نمی‌کند) و مکانیکی و شتاب ثقل برابر با ۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه.

ب) بررسی تعادل هیدرومکانیکی مدل به‌منظور صحت‌سنجی شرایط مرزی، تنش‌های برجا و فشار آب حفره‌ای اعمال شده در مدل عددی (اگر شرایط مذکور به درستی اعمال نشده باشد مدل عددی نیروی نامتعادل خواهد داشت).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.8.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3405]

ج) حفر تونل، صفر کردن فشار آب حفره‌ای در مرز تونل، ثابت کردن فشار آب حفره‌ای و اشباع در مرز تونل و انجام تحلیل هیدرولیکی به‌منظور ارزیابی دبی آب وردی به تونل. شایان ذکر است که دبی ارزیابی شده با نرم‌افزار FLAC در واحد سطح محاسبه شده و به‌صورت بردار برای هر المان نمایش داده می‌شود. از این رو، برای ارزیابی دبی آب ورودی به تونل به‌طور متوسط، دبی آب ورودی با توجه به سطح هر المان محاسبه شده و مجموع دبی آب وردی به تونل از المان‌های پیرامون تونل به‌عنوان دبی آب متوسط لحاظ شده است. با توجه به این‌که مدل‌سازی به‌صورت دو بعدی و تحت شرایط کرنش سطحی انجام شده است بعد دوم المان‌ها برابر با یک متر منظور شده است. مدل هنگامی از نقطه نظر هیدرولیکی تعادل دارد یا به‌عبارت دیگر حالت تراوش پایدار در مدل حاکم شده است که مجموع دبی‌های ورودی و خروجی از یک المان برابر باشد. که به این منظور می‌توان از متغیر qratio که در نرم‌افزار FLAC با استفاده از زبان برنامه‌نویسی Fish تعریف شده است استفاده کرد [۳۶].

د) مقایسه دبی آب ارزیابی شده به‌وسیلهٔ شبیه‌سازی عددی با دبی واقعی در هر پهنه و تغییر ضریب نفوذپذیری سنگ میزبان تا دست‌یابی به دبی واقعی.

ه) بازیابی مدل از حالت تعادل اولیه (ب)، حفر تونل، حل مدل تا رسیدن به تعادل، اعمال پوشش بتنی و زون تزریق با تغییر در خواص مکانیکی و هیدرولیکی المان‌های پیرامون تونل، اعمال ضریب نفوذپذیری محاسبه شده در بند د برای سنگ میزبان و انجام تحلیل هیدرولیکی به‌منظور برآورد دبی آب ورودی به تونل بعد از تزریق و پوشش تونل.

و) تحلیل حساسیت بر تغییرات ضخامت و نفوذپذیری زون تزریق و پوشش بتنی و بررسی میزان تأثیر آن بر دبی آب ورودی به تونل.

ز) ارزیابی ضخامت و نفوذپذیری زون تزریق با توجه به دبی آب ورودی به تونل در مرحله بهره‌برداری.

ح) بازیابی مدل از حالت تعادل اولیه، حفر تونل، حل مدل تا رسیدن به تعادل، اعمال پوشش بتنی و زون تزریق و انجام تحلیل هیدرومکانیکی به‌منظور برآورد دبی آب وردی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.8.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3405]

به تونل، ضریب نفوذپذیری زون تزریق معادل ضریب نفوذپذیری ارزیابی شده در بند ز و ضریب نفوذپذیری سنگ میزبان معادل ضریب نفوذپذیری ارزیابی شده در بند د و ضخامت زون تزریق ۳ متر لحاظ شده است.

۲. برآورد ضریب نفوذپذیری سنگ میزبان با بهره‌گیری از شبیه‌سازی عددی

با توجه به دبی آب ورودی به هر پهنه هیدرولیکی (شکل ۲) حین حفاری تونل و انجام تحلیل برگشتی بر اساس کمینه کردن مربعات خطا، ضریب نفوذپذیری سنگ میزبان در هر پهنه ارزیابی و در جدول ۳ نمایش داده شده است. تابع خطا با توجه به تفاضل دبی اندازه‌گیری شده و ارزیابی شده به‌وسیلهٔ مدل عددی مطابق رابطه (۱) تعریف شده است.

$$f = (Q_m - Q_c)^2 \qquad f_n = (Q_m - Q_c)^2 / Q_m^2 \qquad (۱)$$

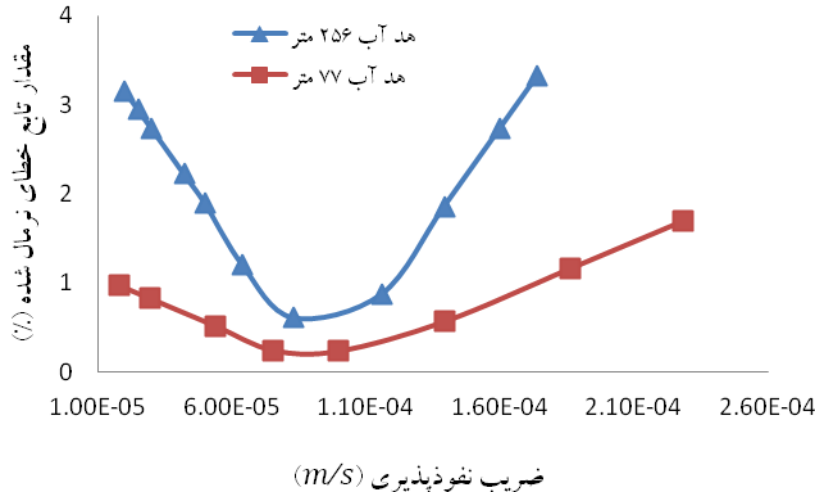
که در آن: f تابع خطا، f_n تابع خطای نرمال شده، Q_m دبی اندازه‌گیری شده و Q_c دبی ارزیابی شده به‌وسیلهٔ مدل عددی است.

در شکل ۵ مقادیر توابع خطای محاسبه شده برای پهنه‌های ۲ و ۷ در مقابل ضریب نفوذپذیری نمایش داده شده است. به‌دلیل تفاوت در شرایط هیدروژئولوژی پهنه‌های ۲ و ۷ دبی آب ورودی به تونل و به تبع آن مرتبه تابع خطا متفاوت است. از این رو، به‌منظور نمایش تغییرات تابع خطا برای دو پهنه مذکور در قالب یک نمودار و حفظ وضوح نمودار، مقدار توابع خطا به دبی اندازه‌گیری شده در هر پهنه نرمال شده است.

۳. تخمین نفوذپذیری و ضخامت زون تزریق

به‌منظور کنترل دبی آب ورودی به تونل از تزریق بهره برده شده است. ضخامت زون تزریق از ۳ تا ٦ متر متغیر است [۳٤]. از این رو، بررسی پارامتری بر ضخامت زون تزریق و نفوذپذیری آن انجام شده است. با توجه به تحلیل‌های انجام شده تغییرات ضخامت زون از ۳ تا ٦ متر تأثیر چندانی بر دبی آب ورودی به تونل ندارد و بیشینه تأثیر آن بر دبی آب ورودی به تونل هنگامی که نفوذپذیری زون تزریق 8×10^{-6} متر بر ثانیه باشد، ۲/۵ درصد است (شکل ٦). دبی نمایش داده شده در شکل ٦ با فرض نفوذپذیری 10^{-7} متر بر ثانیه برای

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.8.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3405]



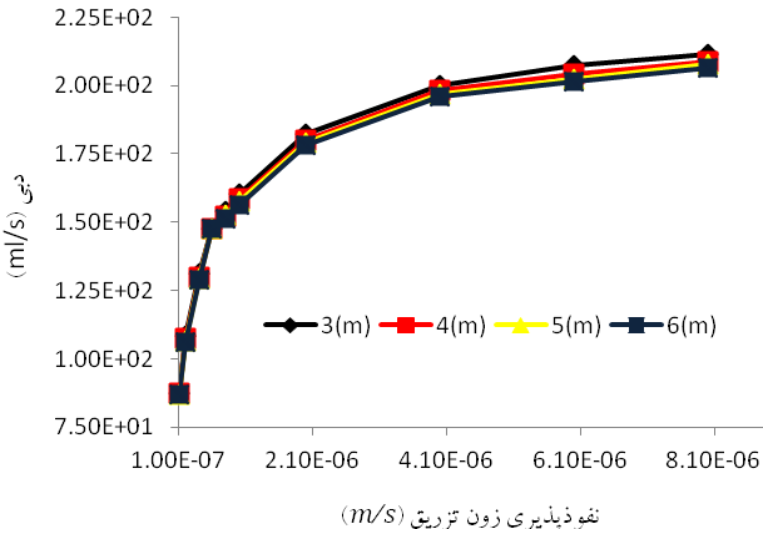
شکل ۵. مقدار تابع خطای نرمال شده برای پهنه‌های ۲ و ۷

جدول ۳. ضریب نفوذپذیری ارزیابی شده برای سنگ میزبان بر اساس تحلیل برگشتی

پهنه هیدرولیکی	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷
تراز سطح ایستابی (متر)	۱۹۰	۲٥٦	۲۰٦	۱٥۰	۱۲۲	۸۹	۷۷
دبی آب ورودی(لیتر بر ثانیه)	۲۰	۳٥-٤۰	۱۰	۷٥۰	٦۰	۱۳	۱۰-۱۳
ضریب نفوذپذیری ارزیابی شده متر بر ثانیه($\times ۱۰^{-٥}$)	٦/۳۹۸	۹/٤۹۸	۳/۰۰۰	۳۰۳/٦۷	۳۳/۸۳٥	۸/۸۷۰	۹/٤٥۳

پوشش بتنی برآورد شده است. کاملاً واضح است که با افزایش ضریب نفوذپذیری زون تزریق تأثیر ضخامت زون تزریق بر دبی آب ورودی به تونل افزایش می‌یابد. تغییرات دبی با افزایش ضخامت زون تزریق از ۳ به ٦ متر هنگامی‌که نفوذپذیری پوشش بتنی و زون تزریق برابر باشد ۰/٤ درصد و هنگامی‌که نفوذپذیری پوشش بتنی هشتاد برابر نفوذپذیری زون تزریق باشد، ۲/٥ درصد است. این موضوع بیانگر این است که افزایش نسبت ضریب نفوذپذیری پوشش به زون تزریق منجر به افزایش نقش ضخامت زون تزریق در کنترل دبی آب ورودی به تونل می‌شود ولی به هرحال باز مرتبه تغییرات دبی در مقایسه با تغییرات نفوذپذیری پوشش بتنی ناچیز است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.8.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3405]



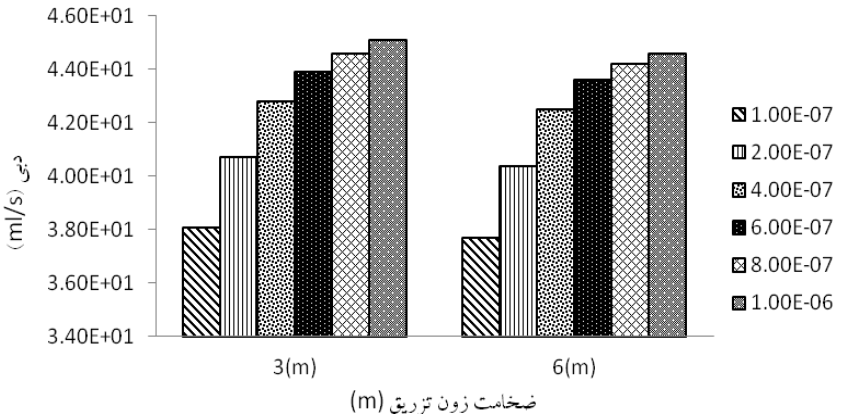
شکل ٦. تأثیر نفوذپذیری زون تزریق بر دبی آب ورودی به تونل برای پهنه ۵

در شکل ۷ نفوذپذیری پوشش بتنی 10^{-8} متر بر ثانیه لحاظ شده است. بیشینه تفاوت در دبی آب ورودی به تونل در شرایطی که ضخامت زون تزریق ۲ برابر شود و نفوذپذیری زون تزریق 10^{-7} متر بر ثانیه باشد، برابر با ۰/۹۵ درصد است. هم‌چنین با افزایش نفوذپذیری زون تزریق تأثیر ضخامت زون تزریق بر دبی ورودی بیش‌تر می‌شود که حداکثر تفاوت دبی به مقدار ۳/۳ درصد می‌رسد. به‌طورکلی می‌توان بیان کرد که کاهش نفوذپذیری پوشش بتنی می‌تواند تأثیر افزایش ضخامت زون تزریق بر دبی آب ورودی به تونل را افزایش دهد. برای سایر پهنه‌ها نیز روند مشابهی برای تغییرات دبی آب ورودی به تونل مشاهده شده است.

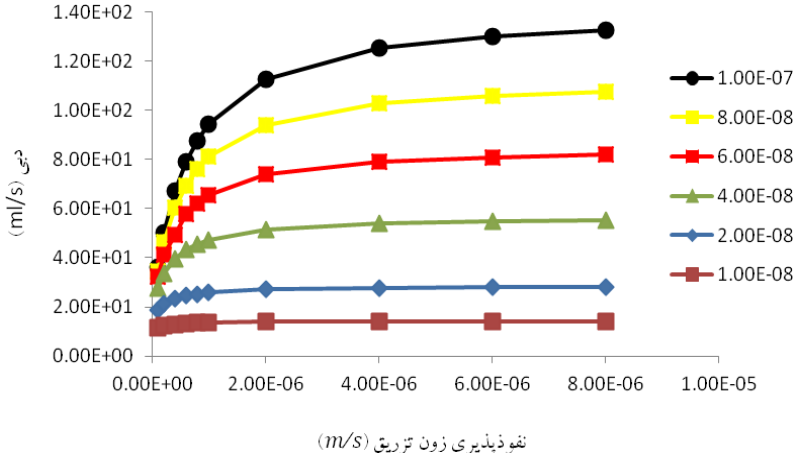
در شکل ۸ تأثیر نفوذپذیری پوشش بتنی بر دبی آب ورودی به تونل در پهنه ۷ نمایش داده شده است. در برآورد دبی آب ورودی به تونل ضخامت زون تزریق ۳ متر منظور شده است. واضح است که با افزایش نفوذپذیری پوشش بتنی، نقش نفوذپذیری زون تزریق در کنترل دبی آب ورودی به تونل بارزتر می‌شود و به‌طورکلی می‌توان بیان کرد که نفوذپذیری زون تزریق هنگامی در کنترل دبی آب ورودی به تونل نقش دارد که مقدار آن از ۵۰ برابر نفوذپذیری پوشش بتنی فراتر نرود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.8.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3405]

بر اساس تحلیل‌های انجام می‌توان بیان کرد که به‌طورکلی تأثیر تغییرات ضخامت زون تزریق از ۳ تا ٦ متر بر دبی آب ورودی به تونل ناچیز است. از این رو، با فرض این‌که ضخامت زون تزریق ۳ متر باشد ضریب نفوذپذیری هر پهنه بعد از تزریق با توجه به دبی آب ورودی به تونل بعد از تزریق و انجام تحلیل برگشتی ارزیابی شده است. مقادیر ضریب نفوذپذیری برای هر پهنه بعد از تزریق و نسبت ضریب نفوذپذیری بعد از تزریق به نفوذپذیری اولیه سنگ در جدول ۲ نمایش داده شده است



شکل ۷ تأثیر نفوذپذیری زون تزریق بر دبی آب ورودی به تونل در پهنه ۲



شکل ۸. تأثیر نفوذپذیری پوشش بتنی بر دبی آب ورودی به تونل در پهنهٔ ۷

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.8.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3405]

شایان ذکر است که دبی آب ورودی به تونل در بخش عمده آن بعد از ترزیق کم‌تر ۱ لیتر بر ثانیه برآورد شده و فقط در پهنه ٤ دبی آب وردی به تونل قابل توجه است و مقدار آن ۱۲۰ لیتر بر ثانیه است. چنان‌که در جدول ٤ نمایش داده شده است در بخش عمدهٔ تونل تزریق مقدار نفوذپذیری سنگ را حدود ۱۰۰۰ مرتبه کاهش داده است ولی در پهنه ٤ تنها ۱۰ مرتبه نفوذپذیری سنگ کاهش پیدا کرده است که بیان‌گر کارآیی نداشتن یا کفایت تزریق در این پهنه است. به‌عبارت دیگر هر چه دبی آب ورودی به تونل افزایش یابد کارآیی تزریق در کنترل دبی آب وردی به تونل کم‌تر می‌شود. این موضوع در پهنه‌های ٤ و ٥ کاملاً مشهود است.

در پهنه‌هایی که با نشت خفیف روبرو هستیم، نفوذپذیری پوشش بتنی به‌دلیل ضخامت ناچیز و ضریب نفوذپذیری تقریباً معادل زون تزریق (1E-7 تا 1E-8 m/s) نقشی در کنترل دبی آب وردی به تونل ندارد. در پهنه ٤ درصورتی‌که ضریب نفوذپذیری پوشش بتنی (1E-7 تا 1E-8 m/s) که ضریب نفوذپذیری اغلب پوشش‌های بتنی است لحاظ شود [۱۸]، دبی آب ورودی به تونل مستقل از نفوذپذیری زون تزریق و کم‌تر از ۱۲۰ لیتر بر ثانیه است و در فصل مشترک زون تزریق و پوشش بتنی هد استاتیکی بالایی تقریباً معادل با تراز ایستابی ایجاد خواهد شدکه منجر به تخریب پوشش بتنی می‌شود. با توجه به مشاهدات انجام شده در تونل و ملاحظات بیان شده، در این پهنه از نقش پوشش بتنی در کنترل دبی آب ورودی به تونل صرف‌نظر شده ونفوذپذیری آن معادل نفوذپذیری زون تزریق لحاظ شده است.

جدول ٤. ضریب نفوذپذیری ارزیابی شده برای هر پهنه بعد از تزریق

پهنه هیدرولیکی	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷
دبی آب ورودی بعد از تزریق (لیتر بر ثانیه)	ن. خ.	ن. خ.	ن. خ.	۱۲۰	ن. خ.	ن. خ.	ن. خ.
ضریب نفوذپذیری ($\times 10^{-8}$)متر بر ثانیه	٤/۸	٤/۸	٤/۸	۳۲۰۰۰	٤۸	٤/۸	٤/۸
نسبت نفوذپذیری سنگ میزبان به زون تزریق	۱۳۲۰	۱۹٦۰	٦۳۰	۱۰	۷۱۰	۱۸۲۰	۱۹٦۰

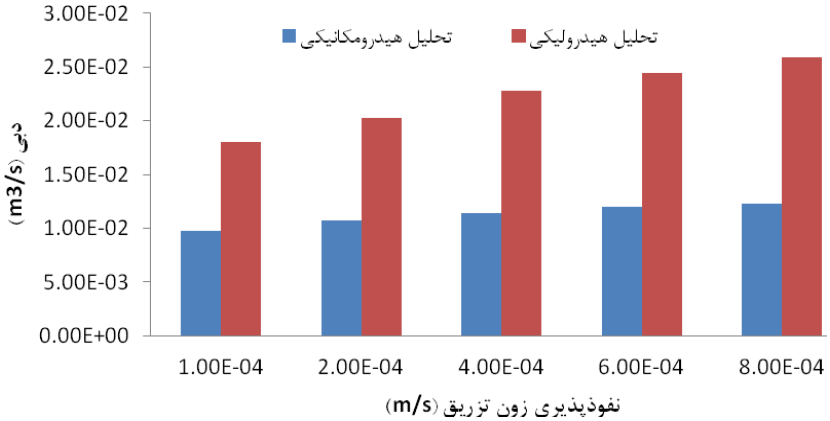
ن. خ.: نشت خفیف (کم‌تر از یک لیتر بر ثانیه)

٤. تحلیل توأمان

بررسی پارامتری با استفاده از شبیه‌سازی عددی توأمان هیدرومکانیکی بر دبی آب ورودی به تونل بعد از تزریق انجام شده است. در شکل ۹ دبی آب ورودی به تونل در دو حالت

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.8.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3405]

تحلیل هیدرومکانیکی و هیدرولیکی در مقابل ضریب نفوذپذیری زون تزریق نمایش داده شده است. واضح است که تحلیل توأمان هیدرومکانیکی، دبی آب ورودی به تونل را کم‌تر از تحلیل هیدرولیکی برآورد می‌کند و اختلاف میان دبی‌های برآورد شده در دو حالت با افزایش ضریب نفوذپذیری زون تزریق افزایش یافته و حداکثر به ۵۲ درصد می‌رسد. گراف مذکور برای پهنه هیدرولیکی ٤ که سطح آب در تراز ۱٤۵۰ متری قرار دارد رسم شده است. به‌دلیل این‌که در مابقی پهنه‌ها بعد از تزریق نشت خفیف گزارش شده است، تفاوت دبی ورودی به تونل در حالت هیدرولیکی و هیدرومکانیکی معنادار نیست ولی به هر حال در سایر پهنه‌ها نیز روند مشابهی مشاهده شده و میزان دبی در تحلیل هیدرومکانیکی تا ۷۰ درصد کاهش داشته است.



شکل ۹. تغییرات دبی آب ورودی به تونل در دو حالت تحلیل توأمان و غیر توأمان در پهنه ٤

نتیجه‌گیری

تأثیر تغییرات ضخامت زون تزریق در مقایسه با نفوذپذیری پوشش و زون تزریق بر دبی آب ورودی به تونل ناچیز است. یکی از دلایل این امر دامنه تغییرات محدود ضخامت زون تزریق در مقایسه با تغییرات نفوذپذیری است.

با افزایش نسبت نفوذپذیری پوشش به زون تزریق، نقش ضخامت زون تزریق در کنترل دبی آب ورودی به تونل بارزتر می‌شود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.8.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3405]

تزریق می‌تواند نفوذپذیری سنگ را از ۱۰ تا ۱۰۰۰ مرتبه کاهش دهد و هر چه نفوذپذیری اولیه سنگ کم‌تر باشد کارآیی تزریق در کاهش نفوذپذیری کم‌تر است.

در تحلیل توأمان هیدرومکانیکی دبی آب ورودی به تونل کم‌تر از تحلیل هیدرولیکی برآورد شده است، علت این امر می‌تواند کاهش گرادیان هیدررولیکی تحت تأثیر تحلیل توأمان و منظور کردن تنش‌های ثقلی باشد.

تفاوت میان دبی برآورد شده در تحلیل توأمان با تحلیل هیدرولیکی با افزایش نفوذپذیری زون تزریق افزایش می‌یابد و به‌طورکلی دبی برآورد شده در تحلیل توأمان ۵۰ تا ۷۰ درصد کم‌تر از تحلیل غیرتوأمان است

منابع

1. Tseng, Dar-Jen, Tsai, Bin-Ru, Chang, Lung-Chen,"A case study on ground treatment for a rock tunnel with high groundwater ingression in Taiwan",Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 16 (2001) 175-183.
2. El Tani Mohammed, "Circular tunnel in a semi-infinite aquifer", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 18 (2003) 49-55.
3. Song W.K., Hamm S., Cheong J., "Estimation of groundwater discharged into a tunnel", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 21 (2006) 1-7.
4. Kolymbas D., Wagner P., "Groundwater ingress to tunnels the exact analytical solution" Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 22 (2007) 23-27.
5. Wang T. ., Jeng F.S., Lo W.,"Mitigating large water ingresses into the new Yungchuen tunnel, Taiwan", Bulletin of Engineering Geology and Environment, Vol. 70 (2011) 173-186.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.8.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3405]

6. Shahriar K., Sharifzadeh M., Khademi H. J.,"Geotechnical risk assessment based approach for rock TBM selection in difficult ground conditions", International Journal of Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 23 (2008) 318-325.

7. Wenner, Dieter, Wannenmacher, Helmut, "Alborz service tunnel in Iran: TBM tunnelling in difficult ground conditions and its solutions", 1st Regional and 8th Iranian Tunneling Conference, 18-20 May, Tehran, Iran, (2009) 1-12.

8. Zarei H.R., Uromeihy A., Sharifzadeh M.,"Identifying geological hazards related to tunneling in Carbonate Karstic rocks-Zagros, Iran", Arabian Journal of Geosciences, Vol. 5, (2012) 457-464.

9. Park Kyung Ho, Adisorn Owatsiriwong, Joo Gong Lee, "Analytical solution for steady-state groundwater inflow into a drained circular tunnel in a semi-infinite aquifer: A revisit", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 23 (2008) 206-209.

10. Gong Q.M., Yin L.J., She Q.R., "TBM tunneling in marble rock masses with high in situ stress and large groundwater inflow: A case study in China", Bulletin of Engineering Geology and Environment, Vol. 72 (2013) 163-172.

11. Huai-Na Wu, Run-Qiu Huang, Wen-Juan Sun, Shui-Long Shen, Ye-Shuang Xu, Yan-Bin Liu, Shou Ji Du, "Leaking behavior of shield tunnels under the Huangpu River of Shanghai with induced hazards", Natural Hazards, Vol. 70 (2014) 1115-1132.

12. Goodman R.E., Moye D.G., Van Schalkwyk A., Javandel I., "Groundwater inflows during tunnel driving", Bulletin of the International Association of Engineering Geologists, Vol. 2 (1965) 39-56.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.8.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3405]

13. Franklin J.A., Zhang L., "Prediction of water flow into rock tunnels: An analytical solution assuming an hydraulic conductivity gradient", International journal of Rock Mechanics and Mining Science, Vol. 30 (1993) 37-46.
14. Lei Shizhong, "An analytical solution for steady flow into a tunnel", Atomic Energy Control Board, Vol. 37 (1999) 23-26.
15. Shin J.H., Lee I.M., Shin Y.J., "Elasto-plastic seepage induced stresses due to tunneling" International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 35 (2011) 1432-1450.
16. Ming Huang fu, Wang Meng-Shu, Tan Zhong-Sheng, Wang Xiu-Ying, "Analytical solutions for steady seepage into an underwater circular tunnel", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 25 (2010) 391-396.
17. Fernandez G., "Behavior of pressure tunnels and guidelines for liner design", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120 (1994) 1768-1791.
18. Schleiss A., "Design of reinforced concrete linings of pressure tunnels and shafts for external water pressure", International Journal on Hydropower and Dams, Vol. 4 (1997).
19. Perrochet P., "Confined flow into a tunnel during progressive drilling", Journal of Ground Water, Vol. 43 (2005) 943-946.
20. Perrochet P., Antonio D., "Modeling transient discharge into a tunnel drilled in a heterogeneous formation", Journal of Ground Water, Vol. 45 (2007) 786-790.
21. Preisig G., Dematteis A., Torri R., Monin N., Milnes E., Perrochet P., "Modeling discharge rates and ground settlement induced by tunnel

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.8.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3405]

excavation", Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 47 (2014) 869-884.

22. Marechal J.C., Lanini S., Aunay B., Perrochet P.,"Analytical solution for modeling discharge into a tunnel drilled in a heterogeneous unconfined aquifer", Journal of Ground Water, Vol. 52 (2014) 597-605.
23. Bobet A., "Characteristic curves for deep circular tunnels in poroplastic rock", Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 43 (2010) 185-200.
24. Carranza-Torres C., Zhao J., "Analytical and numerical study of the effect of water pressure on the mechanical response of cylindrical lined tunnels in elastic and elasto-plastic porous media", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 46 (2009) 531-547.
25. Heuer R.E., "Estimating rock-tunnel water inflow", Proceeding of the Rapid Excavation and Tunneling Conference, San Francisco, (1995) 41-60.
26. Zarei H.R., Uromeihy A., Sharifzadeh M., "Evaluation of high local groundwater inflow to a rock tunnel by characterization of geological features", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 26 (2011) 364-373.
27. Jing L., Ma Y., Fang Z., "Modeling of fluid flow and solid deformation for fractured rocks with discontinuous deformation analysis (DDA) method", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 38 (2001) 343-355.
28. Sharifzadeh M., Karegar S., Ghorbani M., "Influence of rock mass properties on tunnel inflow using hydromechanical numerical study", Arabian Journal of Geosciences, Vol. 6 (2013) 169-175.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.8.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3405]

29. Chen H., Zhao Z., Sun J., "Coupled hydro-mechanical model for fractured rock masses using the discontinuous deformation analysis", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 38 (2013) 506-516.

30. Ohtsu H., Ohnishi Y., Taki H., Kamemura K., "A study on problems associated with finite element excavation analysis by the stress-flow coupled method", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 23 (1999) 1473-1492.

31. Yoo C., "Interaction between tunneling and groundwater-Numerical investigation using three dimensional stress-Pore pressure coupled analysis", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 131 (2005) 240-250.

32. Graziani A., Boldini D., "Influence of hydro-mechanical coupling on tunnel response in clays", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 138 (2012) 415-418.

۳۳. مهندسین مشاور مهاب قدس، *گزارش تونل انتقال آب چشمه روزیه*، تهران (۱۳۸٤).

34. Palmström A., "RMi - A System for characterizing rock mass strength for use in rock engineering", Journal of Rock Mechanics and Tunnelling Technology, Vol. 1 (1995) 69-108.

35. Hoek E., Diederichs M.S., "Empirical estimation of rock mass modulus", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 43, (2006) 203-215.

۳٦. مهدوری س.، هاشمی م.، آیتی ف.، *بررسی دبی آب نشتی از تونل انتقال آب بهشت‌آباد با استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی*، نشریه علمی پژوهشی مهندسی معدن، سال چهارم، شمارهٔ ۷ (۱۳۸۸).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.8.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3405]