بررسی تراست لازم حفاری در تونل انتقال آب بهشت‌آباد

*سعید مهدوری؛ دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی معدن
فریماه آیتی؛ گروه زمین‌شناسی دانشگاه پیام نور

تاریخ: دریافت ۹۰/۹/۹ **پذیرش** ۹۱/۱۰/۱۱

چکیده

از چالش‌های اساسی در مقابل حفر تونل، عبور تونل از مناطق با پتانسیل مچاله‌شوندگی شدید است و در صورت کاربرد حفاری مکانیزه، بررسی تراست مورد نیاز حفاری در این مناطق اجتناب‌ناپذیر است. تونل انتقال آب بهشت‌آباد به طول ٦٥ کیلومتر با هدف انتقال سالیانه یک میلیارد مترمکعب آب به بخش ایران مرکزی در حال بررسی است و با توجه به بررسی‌های زمین‌شناسی، در پهنهٔ نوزدهم تونل، پتانسیل مچاله‌شوندگی شدید است. به همین سبب در این مقاله روش‌های ارزیابی تراست لازم بررسی، و مقدار نیروی محوری لازم برای نفوذ در جبههٔ کار محاسبه شده است. سپس نحوهٔ شبیه‌سازی عددی به‌منظور ارزیابی تراست در پهنهٔ مذکور، شرح داده شده و نتایج آن بررسی شده است. هم‌چنین با استفاده از روش رامونی (۲۰۱۰) تراست لازم محاسبه و نتایج آن با شبیه‌سازی عددی مقایسه شده است. با توجه به نتایج مدل‌سازی عددی به‌منظور کاربرد ماشین‌های حفار تمام مقطع سپردوبل در کیلومتر ۳۱٦۰۰-۲۹۰۳۰ و ۳٤۹۰۰-۳۷٤۹۰ در شرایط ژئومکانیکی بیشینهٔ سه سانتی‌متر و در شرایط ژئومکانیکی کمینهٔ ده سانتی‌متر اضافه حفاری لازم است و تصمیم‌گیری در ارتباط با کاربرد ماشین‌های حفار تمام مقطع در کیلومتر ۳۱٦۰۰-۳٤۹۰۰ منوط به حفر گالری اکتشافی و انجام آزمایش‌های تکمیلی به‌منظور تعیین پارامترهای تابع زمان سنگ است.

واژه‌های کلیدی: تونل انتقال آب، گالری اکتشافی، پارامترهای ژئومکانیکی تودهٔ سنگ، مچاله‌شوندگی، تراست، ماشین‌های حفار تمام مقطع، شبیه‌سازی عددی

*نویسنده مسئول smahdevari@cc.ir.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.7.6]

مقدمه

به‌دلیل رشد جمعیت، کم شدن سطح سفره‌های آب زیرزمینی، کاهش کیفیت آب زیرزمینی و تمرکز صنایع مهم مادر در منطقۀ مرکزی ایران، نیاز به آب در این منطقه همواره رو به افزایش بوده است. به‌همیندلیل به‌منظور رفع نیازهای آبی در بخش شرب، صنعت و کشاورزی در ایران مرکزی تونل انتقال آب بهشت‌آباد به‌طول ٦٥ کیلومتر و قطر ٦ متر با آورد سالیانه ۱۰۷۰ میلیون مترمکعب آب از رودخانۀ بهشت‌آباد به رودخانۀ زاینده‌رود، بررسی شده است.

با توجه به روبارۀ تونل، پارامترهای ژئومکانیکی تودۀ سنگ و هم‌گرایی تونل که با راه‌حل‌های تحلیلی تخمین زده شده، امکان بروز مچاله‌شوندگی خیلی شدید در پهنۀ نوزدهم وجود دارد. شیوۀ حفاری در این پهنه مکانیزه است و برای انتخاب صحیح نوع ماشین، اطلاع از میزان تراست[۱] لازم حفاری اجتناب‌ناپذیر است که در این تحقیق بررسی شده است.

روش‌های ارزیابی تراست را می‌توان در سه دسته روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی تقسیم کرد. روش‌های تجربی بر اساس پژوهش‌های آماری بر روی داده‌های حاصل از حفاری و پارامترهای زمین شناسی در پروژه‌هایی خاص بنا شده است و نمودارهایی به‌منظور ارزیابی تراست در شرایط ژئومکانیکی مشابه ارائه شده است[۱]. روش‌های تحلیلی بر مبنای روش حل بسته پایه‌گذاری شده و تنها تخمین اولیه‌ای از تراست لازم برای غلبه بر اصطکاک بدنه ارائه می‌دهد و از تغییرات توزیع تنش در جهت محور تونل صرف‌نظر می‌کند که منجر به ایجاد خطای بسیاری در تخیمن می‌شود [۲]. در روش‌های عددی با بهره‌گیری از شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی توزیع تنش پیرامون سپر تعیین و سپس تراست لازم برای غلبه بر اصطکاک بدنه، با توجه به زاویۀ اصطکاک بین بدنه سپر و زمین و توزیع تنش مذکور تعیین می‌شود. روش ارائه شده به‌وسیلۀ رامونی[۲]در سال ۲۰۱۰ را می‌توان در این دسته تقسیم‌بندی کرد. در این روش، مدل‌سازی با فرض تقارن محوری و برای یک تونل دایروی عمیق، در سنگهای همگن و ایزوتروپیک با میدان تنش هیدرواستاتیک انجام شده است. به دلیل فرض تقارن محوری، نگهداری نصب شده باید متقارن باشد، همچنین در شبیه‌سازی عددی از وزن ماشین صرف‌نظر شده و ماشین در محور تونل منظور شده است. به‌علاوه اضافه‌حفاری پیرامون تونل

۱. Thrust ۲. Ramoni

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.7.6]

یک‌نواخت و متقارن لحاظ شده است. مهم‌ترین پی‌آمد فرض تقارن محوری افزایش سختی سپر و به تبع آن افزایش فشار بر روی سپر است، در نتیجه تراست محاسبه شده در این روش بیش از مقدار واقعی است. علاوه بر این در واقع توزیع تنش پیرامون سپر یک‌نواخت نیست ولی با فرض تقارن محوری این توزیع یک‌نواخت منظور شده و از تغییرات آن در ارتفاع تونل صرف‌نظر شده است[۳].

با توجه به فرضیات ساده کننده روش رامونی، در این تحقیق سعی شده با شبیه‌سازی جزئیات ماشین‌های حفار تمام‌مقطع سپردار، تراست لازم حفاری با استفاده از شبیه‌سازی سه‌بعدی عددی ارزیابی شده و ضمن مقایسه نتایج با تراست محاسبه شده توسط رامونی، ماشین مناسب برای حفاری تونل پیشنهاد شود.

زمین‌شناسی تونل بهشت‌آباد

گسترهٔ ساخت‌گاه تونل در پهنه‌بندی زمین‌شناسی ایران در بخش کوه‌زاد زاگرس واقع است. گسل اصلی زاگرس در اغلب پهنه‌بندی‌های انجام شده در زمین‌شناسی ایران به عنوان مرز بین پهنهٔ سنندج- سیرجان و زاگرس رورانده معرفی شده است. بدین ترتیب 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. با استفاده از برش زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰ مسیر تونل، برداشت‌های زمین‌شناسی مهندسی، وضعیت سنگ‌چینه‌ای، ساختمانی و هیدروژئولوژیکی و بررسی‌های زیرسطحی از طریق حفر ۲۱ حلقه گمانه و مطالعات ژئوفیزیک، مسیر تونل به ۲۹ پهنه تقسیم شده است. با توجه شرایط ژئومکانیکی نامساعد در پهنه نوزدهم تراست مورد نیاز حفاری در این پهنه بررسی شده است.

پهنهٔ نوزدهم تونل انتقال آب بهشت‌آباد از کیلومتر ۲۹۰۳۰ تا ۳۷٤۹۰ گسترش داشته، از سه واحد زمین‌شناسی تشکیل و میزان روباره آن، از ٤۸۰ تا ۷۹۰ متر متغیر است. واحد اول این پهنه از سنگ‌آهک میلونیتی و واحد دوم از ماسه‌سنگ میلونیتی همراه با سیمان آهکی تشکیل شده و از کیلومتر ۳۱٦۰۰ تا ۳٤۹۰۰ گسترش دارد. امکان تفکیک این دو واحد از هم‌دیگر

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.7.6]

وجود نداشته و رخ اسلیتی همراه با ریزچین و ریزگسل به فراوانی در سنگ‌های این واحدها دیده می‌شود. واحد سوم از آهک‌های ماسه‌ای، ماسه‌سنگ‌های کوارتزدار کمی دگرگون شده و شیستوز و آهک‌های مارنی و شیلی کمی دگرگون شده در حد اسلیت و فیلیت تشکیل شده است. این واحد در کیلومتر ۲۹۰۳۰ تا۳۱٦۰۰ و ۳٤۹۰۰ تا۳۷٤۹۰ تونل دیده می‌شود. پارامترهای ژئومکانیکی سنگ بکر میزبان تونل در پهنه نوزدهم بر مبنای آزمایش‌های انجام شده بر روی مغزه‌های حاصل از حفر سه حلقه گمانه و مطالعات آماری انجام شده بر روی نتایج آزمایش‌ها (بیش از صد آزمایش برزیلی و مقاومت فشاری تک محوره) تعیین شده و در جدول ۱ نمایش داده شده است. مقطع زمین شناسی تونل در پهنه نوزدهم در شکل ۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱. پارامترهای ژئومکانیکی سنگ بکر میزبان تونل

کیلومتر	مقاومت کششی (MPa)	مقاومت فشاری تک محوره (MPa)	ضریب پواسون	مدول الاستیک (GPa)	m_i	گمانه
۲۹۰۳۰–۳۱٦۰۰ و ۳۷٤۹۰–۳٤۹۰۰	(۱۲–٤) متوسط ٦	(۲۵–۵۰) متوسط ٤۵	۰/۲۲	۱۱	۷	BH9, TB9A
۳۱٦۰۰–۳٤۹۰۰	(۵–۱) متوسط ۲	(۳۰–۱۰) متوسط ۲۵	۰/۲٤	۷	٦	TB9B

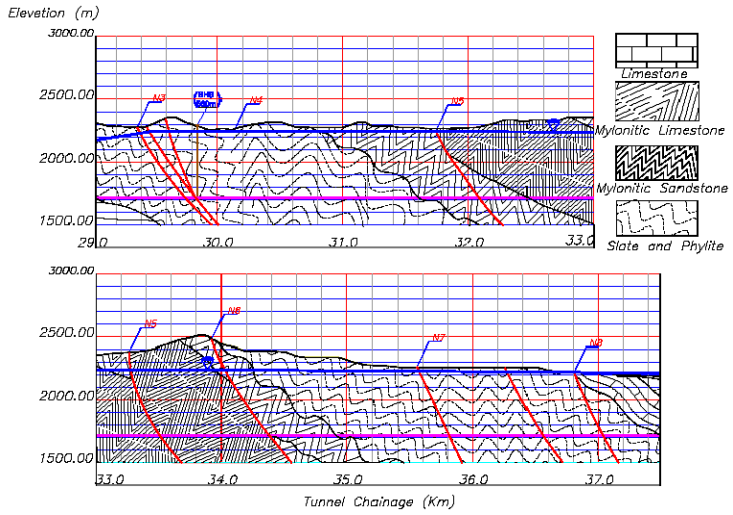
برای تخمین پارامترهای توده سنگ که در شبیه‌سازی عددی استفاده می‌شود، ابتدا با استفاده از طبقه‌بندی‌های مهندسی توده سنگ(RMR'_{89}) ، پارامتر GSI تعیین و سپس با استفاده از روش پیشنهادی هوک و پارامترهای ژئومکانیکی سنگ بکر، پارامترهای توده سنگ ارزیابی و در جدول ۲ نمایش داده شده است[٤].

جدول ۲. پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ میزبان تونل

کیلومتر	GSI	چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی	ضریب پواسون	مدول تغییرشکل (MPa)
۲۹۰۳۰–۳۱٦۰۰ و ۳٤۹۰۰– ۳۷٤۹۰	۳۵ – ٤۵	۱/۵ – ۱/۸	۲۳ – ۲٦	۰/۲۸	۱۲۵۰ – ۲۵۰۰
۳۱٦۰۰–۳٤۹۰۰	۲۵ – ۳۵	۰/۸۰	۲۲	۰/۳۳	۸۰۰

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.7.6]



شکل ۱. مقطع زمین‌شناسی پهنهٔ نوزدهم تونل بهشت‌آباد

مشکلات حفاری در زمین‌های مچاله‌شونده

کواری[۱] هم‌گرایی بیش از ۵ درصد را برای تونل مشکل‌آفرین توصیف می‌کند [۵]، این شرایط بیان‌گر مچاله‌شوندگی شدید تونل است. حفاری سنتی در زمین‌های مچاله‌شونده، از نظر این‌که انعطاف‌پذیری زیادی در ارتباط با افزایش سطح مقطع حفاری وجود دارد بر حفاری مکانیزه برتری دارد. انواع ماشین‌های حفار تمام مقطع با توجه به دامنه تراست متفاوت و وجود داشتن یا وجود نداشتن سپر، با مشکلات متفاوتی در زمین‌های مچاله‌شونده روبرو می‌شوند.

ماشین‌های باز به یک سپر یا سایبان کوچک برای محافظت کله‌حفار[۲] مجهز هستند که کوچک بودن این سایبان نقش مثبتی در کاهش تراست لازم برای حفاری دارد. به‌علاوه دسترسی به جبههٔ کار در مقایسه با ماشین‌های سپردار سریع‌تر و آسان‌تر است. عدم امکان تأمین تراست از طریق چنگ‌زننده‌ها[۳] بزرگ‌ترین مشکلی است که با آن در حفاری با ماشین‌های باز در زمین‌های مچاله‌شونده روبرو می‌شویم. در این شرایط عملیات پیش‌تحکیمی باید قبل از حفاری تونل انجام شود که مستلزم صرف زمان و هزینهٔ زیادی است [٦].

۱. Kovari ۲. Cutter Head ۳. Gripper

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.7.6]

طول سپر در ماشین‌های تک‌سپر بیش از ماشین‌های باز است. به‌همین دلیل احتمال گیرکردن آن‌ها در زمین‌های مچاله‌شونده خیلی بیش‌تر است. سرعت حفاری این ماشین‌ها در زمین‌های ضعیف بیش از ماشین‌های باز است ولی حساسیت آن‌ها به تغییرات شرایط زمین‌شناسی بیش‌تر است. این ماشین‌ها تراست لازم خود برای حفاری را از سگمنت تأمین می‌کنند. طول ماشین‌های سپردوبل بیش از ماشین‌های تک‌سپر است و تراست لازم حفاری را می‌تواند از بدنهٔ تونل، سگمنت یا هر دو تأمین کند. با صرف‌نظر کردن از اثر زمان، هر چه طول سپر بیش‌تر باشد تراست لازم حفاری بیش‌تر است. ولی چون مقدار پیش‌روی ماشین‌های سپردوبل بیش از ماشین‌های تک‌سپر است، هم‌گرایی تونل کم‌تر و در نتیجه بار اعمال شده از طرف زمین بر سپر کم‌تر و تراست لازم برای حفاری در مقایسه با ماشین‌های تک‌سپر کم‌تر خواهد بود. به‌طور کلی می‌توان گفت با توجه زیاد بودن مقدار پیش‌روی ماشین‌های سپر دوبل احتمال گیر کردن آن‌ها نسبت به ماشین‌های تک‌سپر کم‌تر است ولی در صورت گیرکردن ماشین، آزادسازی آن مستلزم صرف زمان و هزینه بیش‌تری در مقایسه با ماشین‌های تک‌سپر است.

روش‌های کاهش تراست لازم حفاری

اجرای اضافه‌حفاری در پهنه‌هایی که در آن‌ها پدیدهٔ مچاله‌شوندگی مشاهده می‌شود به‌منظور کاهش‌تراست، بسیار معمول است. زیرا با اضافه‌حفاری به تونل اجازه داده می‌شود تا حدودی تغییرشکل پیدا کرده و تنش‌ها آزاد شود، که منجر به استفاده از نگه‌داری سبک‌تر و تراست کم‌تر، برای حفاری تونل می‌شود. اگر تونل با روش سنتی حفاری شود، اضافه‌حفاری با سهولت و بودن محدودیت در طول و مقدار اضافه حفاری قابل اجرا است ولی در حفاری مکانیزه، اولاً مقدار اضافه حفاری محدودیت دارد و بیشینه مقدار آن از نقطه‌نظر فنی ۱۵ سانتی‌متر در شعاع است، ثانیاً طولی از تونل که می‌توان اضافه حفاری را در آن اعمال کرد نیز محدودیت دارد. اضافه حفاری معمولاً با یک برش‌دهنده که بر روی محیط کله‌حفار نصب شده و به‌صورت هیدرولیکی یا غیرهیدرولیکی از کله‌حفار خارج می‌شود، انجام می‌شود. در شیوهٔ غیرهیدرولیکی برش‌دهنده به‌صورت دستی خارج شده و با خار در جای خود محکم می‌شود، در این شیوه از

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.7.6]

لحاظ طول با محدودیت کم‌تری مواجه هستیم [۷]. برای انجام اضافه حفاری کله‌حفار باید در مرکز تونل قرار بگیرد، این مورد با جک‌هایی که در زیر کله‌حفار تعبیه شده، محقق می‌شود. کله‌حفار در مرکز تونل قرار گرفته ولی سپر ماشین تحت تأثیر شتاب ثقل، بر روی کف تونل قرار می‌گیرد. در این شرایط برای اضافه‌حفاری ۵ سانتی‌متر، فاصلهٔ بین سپر و زمین در تاج ۱۰ سانتی‌متر و در کف صفر خواهد بود.

روش دیگر برای کاهش تراست لازم حفاری در ماشین‌های سپردار، کاهش قطر سپر با فاصله گرفتن از جبهه‌کار حفاری است. با کم شدن قطر سپر، نیروی محوری اعمال شده بر سپر کاسته شده و به تبع آن تراست لازم حفاری نیز کاهش می‌یابد. حداکثر میزان کاهش قطر سپر از ٦ سانتی‌متر تجاوز نمی‌کند.

روش دیگر کاهش تراست استفاده از بنتونیت به‌منظور کاهش ضریب اصطکاک بین سپر و زمین است. با استفاده از بنتونیت می‌توان ضریب اصطکاک را تا حدود ۵۰ درصد کاهش داد. ضریب اصطکاک دینامیک یا ضریب اصطکاک در شرایطی که ماشین در حال پیش‌روی است را می‌توان به‌طور متوسط ۰/۲۵ و ضریب اصطکاک استاتیک یا ضریب اصطکاک در شرایط سکون ماشین را می‌توان ۰/٤ در نظر گرفت [۱].

بیشینه تراست قابل دست‌یابی در حفاری مکانیزه می‌تواند fh بیشینه ظرفیت باربری زمین پیرامون چنگ‌زننده‌ها، بیشینه ظرفیت باربری سگمنت‌های بتنی و یا حداکثر تعداد جک قابل نصب در سپر محدود شود.

ارزیابی تراست مورد نیاز حفاری

تراست لازم حفاری نتیجه جمع نیروی محوری لازم برای نفوذ در جبهه‌کار و تراست لازم برای غلبه بر اصطکاک بدنه است. به‌منظور ارزیابی تراست لازم حفاری، ابتدا نیروی محوری لازم برای نفوذ در جبههٔ کار محاسبه شده است.

۱. نیروی محوری لازم جهت نفوذ در جبهه‌کار

نیروی محوری لازم برای برش، برابر با مجموع نیروی‌های نرمال بر برش‌دهنده‌ها برای نفوذ در جبهه‌کار است. نیروی نرمال بر هر برش‌دهنده با توجه به توزیع فشار پیرامون

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.7.6]

برش‌دهنده و سطح تماس برش‌دهنده با سنگ ارزیابی می‌شود. رستمی با درنظر گرفتن توزیع یکنواخت فشار پیرامون برش دهنده و با توجه به نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی رابطه ۲ را برای ارزیابی فشار ارائه کرده است[۸].

$$P = 2.12\sqrt[3]{\left(S \times \sigma_c^2 \times \sigma_t\right) \Big/ \left(\varphi\sqrt{RT}\right)} \qquad (۲)$$

که در آن:

S فاصله‌داری برش‌دهنده‌ها، T ضخامت لبۀ برش‌دهنده دیسکی، R شعاع برش‌دهنده دیسکی، σ_c و σ_t به‌ترتیب مقاومت فشاری و کششی سنگ است. φ زاویۀ تماس بین برش‌دهنده دیسکی و سنگ در مقطع طولی است که با استفاده از رابطه ۳ تعیین می‌شود [۸]:

$$\varphi = Cos^{-1}\left(\frac{R - P_n}{R}\right) \qquad (۳)$$

که در آن P_n میزان نفوذ کله‌حفار در جبهۀکار حفاری در یک دور کله‌حفار است.

با در نظر گرفتن پیش‌روی ۳۰۰ متر در ماه و ضریب بهره‌وری ۲۰ درصد، میزان نفوذ در هر دور کله‌حفار به‌طور متوسط ۵ میلی‌متر خواهد بود. با در نظر گرفتن توزیع یک‌نواخت فشار پیرامون برش‌دهنده، نیروی محوری لازم برای برش با استفاده از رابطۀ ٤ محاسبه می‌شود [۸].

$$Th_{Exca.} = N \times P \times R \times \varphi \times T \times Cos(\varphi/2) \qquad (٤)$$

که در آن N تعداد برش دهنده‌های دیسکی است.

بر مبنای نتایج آزمایش‌های انجام شده، برای ارزیابی نیروی محوری لازم برای نفوذ در جبهۀ کار مقاومت فشاری و کششی سنگ‌های میزبان تونل به‌ترتیب ۲۵ و ۲ مگاپاسگال منظور شده است. با استفاده از ۵۰ برش‌دهنده ۱۷ اینچی به‌ضخامت لبه ۱ اینچ، نیروی محوری لازم برای نفوذ در جبهۀ کار ۳ مگانیوتن خواهد بود.

۲. ارزیابی تراست لازم جهت غلبه بر اصطکاک بدنه

به‌منظور ارزیابی تراست، طول سپر برای ماشین‌های سپر دوبل ۱۳ متر و برای ماشین‌های تک سپر ۸ متر و قطر آن‌ها با توجه به قطر تمام شده تونل و ضخامت سگمنت بتنی ۷ متر

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.7.6]

منظور شده است. ضریب اصطکاک در شرایط دینامیک ۰/۲۵ و در شرایط استاتیک ۰/٤ لحاظ شده است.

۲-۱. شبیه‌سازی عددی

به‌منظور ارزیابی تراست لازم جهت غلبه بر اصطکاک بدنه سپر و زمین، اطلاع از توزیع تنش نرمال پیرامون سپر، طول و قطر سپر، وزن ماشین و ضریب اصطکاک میان سپر و زمین، الزامی است. شبیه‌سازی عددی روش مناسبی برای ارزیابی توزیع تنش پیرامون سپر است. در شرایطی که به اندازه کافی از جبهه‌کار حفاری دور باشیم می‌توان با لحاظ کردن شرایط کرنش سطحی، تونل را به صورت دو بعدی مدل کرد ولی برای ارزیابی تراست ماشین‌های حفار تمام مقطع، چون جبهه‌کار بر روی توزیع تنش پیرامون سپر تأثیر می‌گذارد، شرایط کرنش سطحی صادق نبوده و شبیه‌سازی باید به صورت سه بعدی انجام شود. بعلاوه تغییر شکل تونل می‌تواند در یک دوره زمانی کوتاه یا در مدت چند سال اتفاق افتد. تغییر شکل‌های وابسته به زمان در سنگ را خزش می‌نامند و به دلیل سخت بودن ارزیابی پارامترهای کنترل کننده خزش، لحاظ کردن این نوع تغییرشکل در شبیه‌سازی عددی بسیار مشکل است و عملاً از تأثیر زمان بر میزان جابه‌جایی‌ها، در شبیه‌سازی عددی صرف‌نظر می‌شود. لذا نیرویی که توسط شبیه‌سازی عددی تعیین می‌شود بیش از نیرویی است که در عمل بر روی سپر اعمال می‌شود و تراست ارزیابی شده با استفاده از شبیه‌سازی عددی بدون لحاظ کردن اثر زمان محافظه‌کارانه است[۹].

اگر امکان لحاظ کردن تأثیر زمان در شبیه‌سازی عددی وجود داشته باشد یا به عبارت دیگر پارامترهای کنترل کننده خزش ارزیابی شده باشد، می‌توان با توجه به اضافه‌حفاری و پارامترهای ژئومکانیکی سنگ میزبان، پارامتری را با عنوان زمان توقف بحرانی تعریف کرد. اگر زمان توقف ماشین از زمان توقف بحرانی بیشتر شود دیگر تراست ماشین جوابگو برای راه‌اندازی ماشین نخواهد بود، یا به عبارت دیگر تراست ماشین نمی‌تواند بر اصطکاک بدنه ماشین با زمین غلبه کند. هر چه سرعت حفاری قبل از توقف ماشین افزایش یابد، زمان توقف بحرانی افزایش می‌یابد[۱۰].

بعد از ارزیابی توزیع تنش نرمال پیرامون سپر با توجه به مشخصات هندسی سپر و شرایط

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.7.6]

ژئومکانیکی زمین توسط شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی، با انتگرال‌گیری از توزیع تنش نرمال بر روی سطح سپر، نیروی نرمال بر سپر محاسبه شده و تراست لازم جهت غلبه بر اصطکاک با استفاده از رابطۀ ۱ تعیین می‌شود.

$$T = \left(N + W_{Sh}\right) \times \mu \qquad (۱)$$

که در آن:

T تراست لازم برای غلبه بر اصطکاک بدنه، N نیروی نرمال بر سپر، μ ضریب اصطکاک و W_{Sh} وزن سپر است. در مواردی که وزن سپر در شبیه‌سازی عددی منظور می‌شود، چون بر روی توزیع تنش پیرامون سپر تأثیر می‌گذارد، دیگر نیازی به لحاظ کردن آن در رابطۀ ۱ نیست.

به‌منظور شبیه‌سازی، از یک مدل عددی با ابعاد ۵۰*۱۰۰*۱۰۰ متر به‌ترتیب در راستای X، Z و Y استفاده شده است به‌همین دلیل مرزهای مدل عددی به‌اندازۀ کافی دور است و تأثیری بر روی جابه‌جایی‌ها و تنش‌ها پیرامون سپر ندارد. تنش حاصل از مابقی روباره تونل نیز محاسبه شده و در جهت Z بر روی مرز بالایی مدل اعمال شده است. در سایر مرزهای مدل از تکیه‌گاه غلطکی استفاده شده است. در شبیه‌سازی عددی انجام شده برای لحاظ کردن اضافه‌حفاری و کاهش قطر سپر ابتدا هندسه پیرامون تونل با لحاظ کردن اضافه‌حفاری ایجاد شده است. سپس هندسۀ بخش میانی تونل در قسمت مرکزی ایجاد شده و به اندازۀ اضافه‌حفاری به سمت پایین (در راستای محور Z) جابه‌جا شده است تا میزان اضافه‌حفاری در تاج دو برابر و در کف صفر شود(شکل ۲). چگالی بخش میانی با توجه به وزن ماشین محاسبه شده و قطر آن از جبهه‌کار حفاری تا فاصله ۱۳ متری از جبهه‌کار به اندازۀ ٦ سانتی‌متر کاهش یافته است. از فاصلۀ ۱۳ متری جبهه‌کار حفاری تا مرز مدل عددی ساخته شده برای نگه‌داری تونل از المان سازه‌ای پوسته[۱] استفاده شده و مشخصات سازه‌ای آن مطابق با سگمنت بتنی به ضخامت ۳۰ سانتی‌متر لحاظ شده است. به‌منظور ارزیابی نیروی نرمال اعمال شده بر سپر و کله‌حفار از طرف زمین، در جبهۀ کار حفاری و پیرامون بخش میانی از المان سطح مشرک[۲] استفاده شده است. سختی نرمال سطح مشترک با بهره‌گیری از رابطۀ ۵ ارزیابی شده است [۳].

$$K_n = E_s d / R^2 \qquad (۵)$$

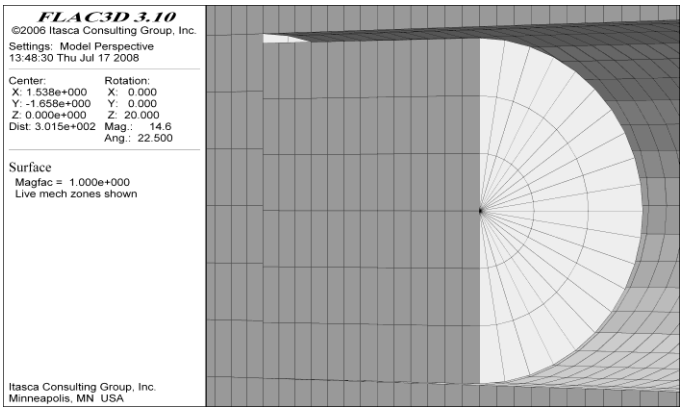
۱. Shell ۲. Interface

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.7.6]

که در آن E_s مدول الاستیک فولاد، d ضخامت سپر و R شعاع سپر است.

با توجه به جهت پیش‌روی و استنباط از قانون نیوتن، برآیند نیروهای وارد بر سپر در امتداد محور تونل باید در سمت پیش‌روی باشد، بنا بر این برای تحقق این امر شبیه‌سازی عددی در دو مرحله انجام شده است. در مرحلهٔ اول فاصلهٔ میان کله‌حفار و جبههٔ کار حفاری صفر لحاظ شده است و سپس نیروی محوری اعمال شده بر کله‌حفار و نیروی اصطکاک بین بدنه سپر و زمین با توجه به تنش‌های نرمال اعمال شده بر فصل مشترک میان سپر ماشین و زمین پیرامون، ارزیابی شده است. اگر نیروی محوری کم‌تر از نیروی اصطکاک بدنه باشد، فرض لحاظ شده صحیح است و برآیند نیروها به سمت پیش‌روی است. تراست لازم حفاری در این شرایط برابر با نیروی اصطکاک بدنه به‌علاوه نیروی محوری لازم برای نفوذ در جبههٔ کار است که حدود ۳ مگانیوتن ارزیابی شده است. در صورتی‌که نیروی محوری بیش از نیروی اصطکاک بدنه باشد، برآیند نیروها در خلاف جهت پیش‌روی است و فرض لحاظ شده صحیح نیست. در این شرایط مرحلهٔ دوم شبیه‌سازی به این صورت انجام شده است.



شکل ۲. نحوهٔ مدل‌کردن اضافه‌حفاری در شبیه‌سازی عددی و تغییرات آن در تاج و کف تونل

ابتدا مدل دیگری بدون لحاظ کردن سپر ساخته و نیروی محوری سه مگانیوتن که برابر با نیروی محوری لازم برای نفوذ در جبههٔ‌کار است به‌صورت نیرویی خارجی گسترده بر روی جبههٔ‌کار حفاری اعمال می‌شود. با اعمال نیروی خارجی امکان جابه‌جایی برای جبههٔ کار فراهم شده و مقدار این جابه‌جایی بعد از به تعادل رسیدن مدل ارزیابی می‌شود. سپس شبیه‌سازی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.7.6]

عددی تکرار شده و سپر در فاصلۀ ارزیابی شده در مرحلۀ قبل نسبت به جبهۀکار قرار داده می‌شود، بعد از به تعادل رسیدن مدل نیروی اصطکاک بدنه محاسبه شده و تراست لازم حفاری برابر با نیروی اصطکاک بدنه به‌علاوه سه مگانیوتن برای نفوذ در جبهۀ کار است.

۲-۲. نتایج شبیه‌سازی عددی

کیلومتر ۳۱٦۰۰-۲۹۰۳۰ و ۳٤۹۰۰-۳۷٤۹۰: با توجه به سه اضافه‌حفاری ۳، ۵ و ۱۰ سانتی‌متر و دو ردۀ پارامتر ژئومکانیکی کمینه و بیشینه که در جدول ۲ نمایش داده شده، شش مدل عددی در پهنه مذکور بررسی شده است که نتایج آن در جدول ۳ نمایش داده شده است. با توجه به‌این‌که در ماشین‌های حفار تمام‌مقطع سپر دوبل با قطر ۷ متر دست‌یابی به تراست ٦۰ تا ۷۰ مگانیوتن امکان‌پذیر است و بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۳ در شرایط ژئومکانیکی کمینه، تنها هنگامی می‌توان از ماشین‌های سپر دوبل یا تک‌سپر استفاده کرد که میزان اضافه‌حفاری ۱۰ سانتی‌متر باشد. اعمال این مقادیر از اضافه‌حفاری تنها در طول‌های محدود ۲۰۰ تا ۳۰۰ متر امکان‌پذیر است، به‌همین دلیل اگر طول مناطق با شرایط ژئومکانیکی کمینه بیش از ۲۰۰ تا ۳۰۰ متر باشد، کاربرد ماشین‌های سپردار مخاطره‌آفرین و نیازمند تمهیدات خاص و زمان‌بر است. تغییرات تراست لازم برای غلبه بر اصطکاک بدنه، برای شرایط ژئومکانیکی کمینه در مقابل طول سپر برای دو اضافه‌حفاری ۳ و ۵ سانتی‌متر در محور قائم سمت چپ و برای اضافه‌حفاری ۱۰ سانتی‌متر در محور قائم سمت راست نمودار شکل ۳ نمایش داده شده است.

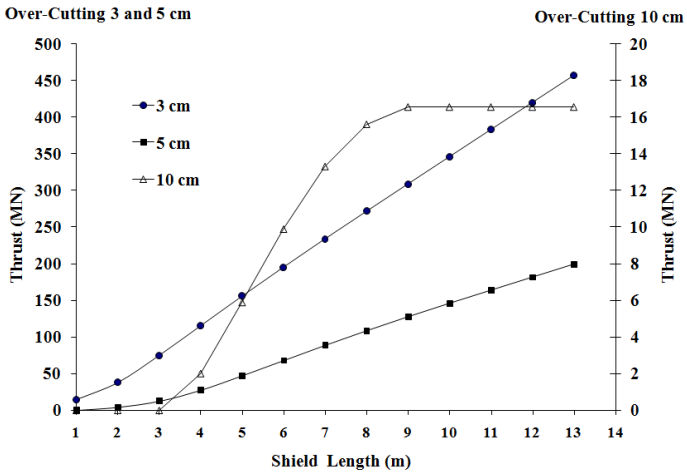
در شرایط ژئومکانیکی بیشینه و اضافه‌حفاری سه سانتی‌متر، بیشینه تراست لازم برای حفاری حدود ۸ مگانیوتن است که در ماشین‌های حفار تمام مقطع تک‌سپر و سپردوبل به‌راحتی قابل دست‌یابی است و نیازی به انجام اضافه‌حفاری‌های ۵ و ۱۰ سانتی‌متر نیست.ولی اگر در همین شرایط ژئومکانیکی، اضافه‌حفاری سه سانتی‌متر حذف شده و صرفاً کاهش قطر سپر به اندازۀ شش سانتی‌متر در طول سپر منظور شود، تراست لازم حفاری حدود ٤۰۰ مگانیوتن خواهد بود و امکان حفاری با ماشین‌های سپردار وجود ندارد. توزیع تنش نرمال پیرامون سپر و جابه‌جایی سقف و کف تونل برای مدل عددی شمارۀ یک که در آن پارامترهای ژئومکانیکی بیشینه و اضافه‌حفاری سه سانتی‌متر است در شکل‌های ٤ و ۵ نمایش داده شده است

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.7.6]

جدول ۳. تراست لازم برای غلبه بر اصطکاک بدنه سپر در کیلومتر ۳۱۶۰۰-۲۹۰۳۰ و ۳۴۹۰۰-۳۷۴۹۰

پارامترهای ژئومکانیکی	شمارهٔ مدل	اضافه حفاری (cm)	تراست (MN) تک‌سپر	تراست (MN) سپردوبل
	۱	۳	۵	۵
بیشینه	۲	۵	۰/٤	۰/۷
	۳	۱۰	۰/٤	۰/۷
	٤	۳	۲۷۰	٤۲۰
کمینه	۵	۵	۱۰۸	۱۸۰
	٦	۱۰	۱۵	۱٦

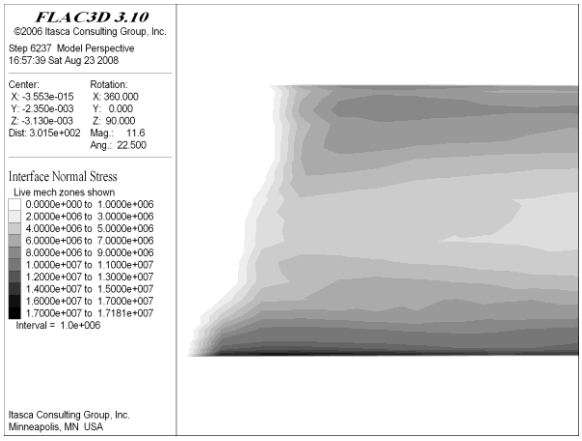


شکل ۳. تغییرات تراست لازم برای غلبه بر اصطکاک بدنه در مقابل طول سپر برای شرایط ژئومکانیکی کمینه در کیلومتر ۳۱۶۰۰-۲۹۰۳۰ و ۳۴۹۰۰-۳۷۴۹۰

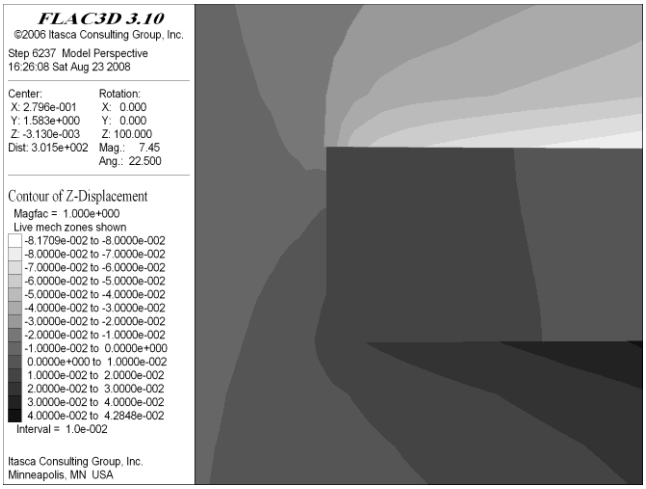
کیلومتر ۳۱۶۰۰-۳۴۹۰۰: در این پهنه سه مدل عددی برای اضافه حفاری‌های ۳، ۵ و ۱۰ سانتی‌متر بررسی شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی در جدول ٤ نمایش داده شده است. مطابق نتایج ارائه شده حتی در اضافه حفاری ده سانتی‌متر هم امکان استفاده از ماشین‌های حفار تمام مقطع تک‌سپر و سپر دوبل وجود ندارد و لازمهٔ حفاری، انجام عملیات پیش‌تحکیمی است. بر اساس بررسی‌های انجام شده با این سطح از اطلاعات، در ٤۰ درصد از پهنه مذکور امکان استفاده از ماشین‌های سپر دوبل و تک‌سپر وجود ندارد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.7.6]



شکل ٤. توزیع تنش نرمال پیرامون سپر برای مدل عددی شمارۀ۱



شکل ٥. جابه‌جایی پیرامون سپر برای مدل عددی شمارۀ ۱

چنان‌که قبلاً اشاره شد تراست محاسبه شده در این تحقیق بیشینه تراست لازم برای حفاری بدون توجه به پارامترهای تابع زمان سنگ است و مقادیر واقعی تراست با توجه به میزان پیش‌روی ماشین و پارامترهای تابع زمان سنگ کم‌تر است، بنا بر این برای تصمیم‌گیری نهایی بر روی کاربرد یا عدم کاربرد ماشین‌های سپردار و تعیین نوع سپر (تک‌سپر یا سپردوبل) باید پارامترهای تابع زمان سنگ میزبان تعیین شده و با استفاده از آن مقادیر تراست واقعی محاسبه شود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.7.6]

جدول ٤. تراست لازم برای غلبه بر اصطکاک بدنه و زمین در کیلومتر ۳۱٦۰۰-۳٤۹۰۰

شماره مدل	اضافه حفاری (cm)	تراست (MN) تک‌سپر	تراست (MN) سپردوبل
۷	۳	۳۸۰	۷۲٦
۸	۵	۳۲۹	٦۳۸
۹	۱۰	۳۲۷	۵٤٤

۲-۳. تخیمن تراست ماشین تک سپر با استفاده از روش رامونی

در روش رامونی نیز از تأثیر زمان بر جابه‌جایی‌ها صرف‌نظر شده و جابه‌جایی کل بدون در نظر گرفتن اثر زمان لحاظ شده است. معیار شکست استفاده شده در این روش نیز موهر-کلمپ است که مقدار ضریب پوآسون را ثابت و برابر با ۰/۲۵ لحاظ کرده است. در شرایطی که زوایهٔ اصطکاک داخلی کوچک‌تر یا مساوی ۲۰ درجه باشد مقدار زاویهٔ اتساع ۱ درجه و در غیر این صورت مقدار آن از رابطه $\psi = \varphi - 20$ محاسبه شده است [۳]. برای ارزیابی تراست لازم برای غلبه بر اصطکاک بدنه سپر، از نمودار نمایش داده شده در شکل ٦ که بیش‌ترین تطابق را با شرایط ژئومکانیکی و مشخصات هندسی ماشین تک‌سپر دارد استفاده شده است. به‌دلیل تطابق نداشتن پارامترهای ژئومکانیکی پهنه ۳٤۹۰۰-۳۱٦۰۰ با پارامترهای ژئومکانیکی لحاظ شده به‌وسیلهٔ رامونی، تراست مذکور صرفاً برای پهنه‌های ۳۱٦۰۰-۲۹۰۳۰ و ۳٤۹۰۰-۳۷٤۹۰ ارزیابی شده است.

پارامترهای ژئومکانیکی استفاده شده برای ارزیابی تراست در جدول ۵ نمایش داده شده است. با استفاده از نمودار اشاره شده، مقادیر F'_r ارزیابی و در جدول ٦ نمایش داده شده است.

با توجه به مشخصات هندسی ماشین تک‌سپر و ضریب اصطکاک بین بدنه سپر و زمین، برای محاسبه تراست لازم برای غلبه بر اصطکاک، مقادیر F'_r در ۹۲۰ ضرب شده است. چنان‌که ملاحظه می‌شود تراست تعیین شده توسط روش رامونی بیش از شبیه‌سازی عددی است و تفاوت بین تراست تعیین شده با این روش و روش عددی با افزایش اضافه‌حفاری و مساعد شدن شرایط ژئومکانیکی به‌صورت تصاعدی افزایش می‌یابد. علت این امر، فرضیات

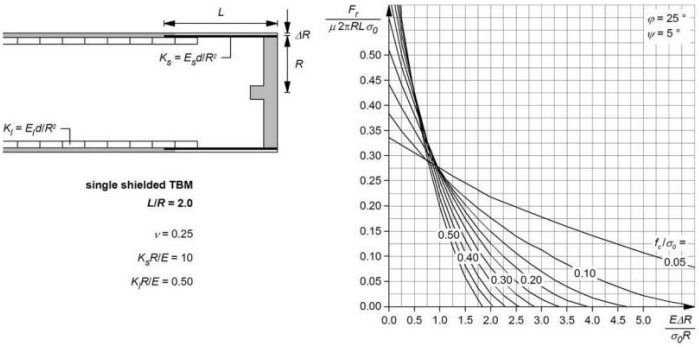
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.7.6]

لحاظ شده در مدل عددی رامونی است که می‌توان به لزوم استفاده از فرض تقارن محوری، که منجر به سختی بیش‌تر سپر در مقایسه با حالت واقعی شده و به تبع آن نیروهای نرمال وارد بر سپر افزایش می‌یابد. اشاره کرد. هم‌چنین در مدل رامونی سپر باید در محور تونل قرار بگیرد که این امر منجر به کاهش تغییر شکل در سقف تونل و به تبع آن افزایش نیروهای نرمال وارد بر سپر می‌شود. علاوه بر این در شبیه‌سازی عددی انجام شده کاهش قطر سپر به اندازه ٦ سانتی‌متر در طول لحاظ شده که در روش رامونی لحاظ نشده است. با توجه به نتایج ارائه شده از روش رامونی می‌توان برای تقریب اولیه تراست در شرایط ژئومکانیکی ضعیف استفاده کرد و استفاده از آن در شرایط ژئومکانیکی متوسط و مقادیر بالای اضافه‌حفاری توصیه نمی‌شود.

جدول ۵. پارامترهای ژئومکانیکی برای ارزیابی تراست با استفاده از روش رامونی

کیلومتر	UCS(MPa)	Phi	Nu	E_m (MPa)
۲۹۰۳۰–۳۱٦۰۰ و ۳٤۹۰۰–۳۷٤۹۰	٥–٦	۲٥	۰/۲٥	۱۲٥۰ – ۲٥۰۰



شکل ٦. مقدار تراست لازم برای غلبه بر اصطکاک بدنه سپر برای ماشین تک سپر[۳]

جدول ٦. تراست لازم برای غلبه بر اصطکاک بدنه سپر در پهنه‌های ۲۹۰۳۰–۳۱٦۰۰ و ۳٤۹۰۰–۳۷٤۹۰

پارامترهای ژئومکانیکی	اضافه حفاری (سانتی‌متر)	F'r	تراست (MN)
	۳	۰/۳۹	۳٥۹
کمینه	٥	۰/۲۹	۲٦۷
	۱۰	۰/۱٤٥	۱۳۳
	۳	۰/۲٦	۲۳۹
بیشینه	٥	۰/۱۲	۱۱۰
	۱۰	۰	۰

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.7.6]

نتیجه‌گیری

در شرایط ژئومکانیکی کمینه در کیلومتر ۳۱۶۰۰-۲۹۰۳۰ و ۳۴۹۰۰-۳۷۴۹۰، تنها هنگامی می‌توان از ماشین‌های سپردار استفاده کرد که میزان اضافه‌حفاری ۱۰ سانتی‌متر و طول زون با شرایط ژئومکانیکی کمینه بیش از سی‌صد متر نباشد. البته ماشین‌های سپردوبل به‌دلیل نرخ‌پیش‌روی بالاتر بر ماشین‌های تک‌سپر برتری دارند. ولی در طول‌های بیش از سی‌صد متر استفاده از ماشین‌های سپردار توصیه نمی‌شود. برای استفاده از ماشین‌های سپردار توصیه می‌شود با حفر گالری اکتشافی، طول بخش‌هایی از پهنه مذکور که دارای شرایط ژئومکانیکی کمینه‌اند تعیین شود.

در شرایط ژئومکانیکی بیشینه در کیلومتر ۳۱۶۰۰-۲۹۰۳۰ و ۳۴۹۰۰-۳۷۴۹۰، اضافه‌حفاری سه سانتی‌متر برای حفاری جواب‌گو است و این مقادیر از اضافه‌حفاری به راحتی در تمام طول پهنه قابل اجرا است.

با مقایسهٔ نتایج روش عددی و روش ارائه شده به‌وسیلهٔ رامونی مشخص شد که تراست تعیین شده با روش رامونی با توجه به فرضیات ساده کننده لحاظ شده بیش‌تر از مقادیر حاصل شده با روش عددی است و با افزایش اضافه‌حفاری و مساعد شدن شرایط ژئومکانیکی تفاوت به مقدار قابل توجه‌ای افزایش می‌یابد. علت این امر بیش‌تر بودن سختی سپر و به‌خصوص یک‌سان بودن اضافه حفاری پیرامون سپر در تقارن محوری است.به‌همین دلیل استفاده از این روش در مقادیر بالای اضافه حفاری توصیه نمی‌شود.

منابع

1. Farrokh E., Rostami J., "Effect of adverse geological condition on TBM operation in Ghomroud tunnel conveyance project", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 24 (4), (2009) 436-446.
2. Cantieni L., Anagnostou G., "The effect of the stress path on squeezing behavior in tunneling", Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 42 (3), (2009) 289-318.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.7.6]

3. Ramoni M., Anagnostou G., "Thrust force requirements for TBMs in squeezing ground", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 25, (2010) 433-455.

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

5. Kovari K., "Rock reformation problems when using full face cutting equipment in rock, Part 2", Tunnel Journal, Vol. 4, (1986) 298-298.

6. Schubert W., "TBM excavation of tunnels in squeezing rock". Lo scavo meccanizzatodi gallerie, (2000) 355-364.

7. Ramoni M., Anagnostou G., "On the feasibility of TBM drives in squeezing ground", ITA, World Tunnel Congress, Seoul, Korea, (2006) 22-27.

8. Rostami J., Ozdemir L., "A new model for performance prediction of hard rock TBMs", Rock Excavation Tunneling Conference (1993) Chapter 50.

9. Ramoni M., Anagnostou G., "The effect of advance rate on shield loading in squeezing ground", Underground space-The 4th dimensions of metropolises, ITA World Tunnel Congress, Prague, Volume 1 (2007) 673-677.

10. Ramoni M., Anagnostou G., "Numerical analysis of the development of squeezing pressure during TBM standstills", 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics (ISRM), Lisbon, Volume 2 (2007) 963-966.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.7.6]