

### انتخاب طرح مناسب سامانه‌ی نگهداری اولیه‌ی تونل متروی کرج بر مبنای نتایج ابزار دقیق و الگوریتم تحلیل برگشتی

علی نقی دهقان\*

دانشجوی دکترای تخصصی مهندسی معدن؛ گرایش مکانیک سنگ؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۱/۰۹/۱۱؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۰۶/۰۳

واژگان کلیدی	چکیده
روش اجزای محدود تحلیل برگشتی پارامترهای ژئومکانیکی سامانه‌ی نگهداری ابزار دقیق و رفتارسنجی تونل متروی کرج	طراحی و احداث سازه‌های زیرزمینی در بیش‌تر موارد با آگاهی تقریبی از پارامترهای ژئومکانیکی محیط دربرگیرنده انجام می‌شود. با توجه به دشواری برآورد پارامترهای زمین، رفتارنگاری و بکارگیری تحلیل برگشتی روشی سودمند است. هدف از تحلیل برگشتی اصلاح برآوردهای اولیه از پارامترهای ژئومکانیکی زمین است. در این پژوهش پارامترهای ژئومکانیکی خاک توسط تحلیل برگشتی به روش تک‌متغیره‌ی متناوب و بر پایه‌ی داده‌های ابزار دقیق برای تونل خط ۲ متروی کرج برآورد شده است. داده‌های آزمایشگاهی، به عنوان پارامترهای ژئومکانیکی معادل در مدل‌سازی با نرم افزار <i>PLAXIS 3D Tunnel</i> استفاده شده بودند؛ در حالی‌که مقادیر محاسبه شده در تحلیل برگشتی با مقادیر آزمایشگاه مکانیک خاک متفاوت است. بنابراین با استفاده از میانگین پارامترهای حاصل از تحلیل برگشتی، مدل‌ها کالیبره شده و پایداری سه‌بعدی و سامانه‌ی نگهداری اولیه ارزیابی شده است. انتخاب طرح مناسب سامانه‌ی نگهداری موقت، به سبب طراحی و اعمال دو نوع سامانه‌ی نگهداری اولیه برای پایدارسازی قسمت‌های فوقانی تونل از نتایج تحلیل‌ها است. سامانه‌ی نگهداری موقت بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی با ۳۵ سانتی‌متر ضخامت شانکریت محافظه‌کارانه بوده است؛ اما سامانه‌ی نگهداری بر مبنای داده‌های حاصل از تحلیل برگشتی نشان می‌دهد، ضخامت ۲۵ تا ۳۰ سانتی‌متری شانکریت کافی است.

#### ۱- پیشگفتار

اجتناب از مشکلات حمل و نقل و ترافیک سنگین، سبب توسعه‌ی راه‌های زیرزمینی در کلان‌شهرها شده است. برای باز کردن و حفاری تونل‌ها، در مناطق شهری روش‌های متعددی وجود دارد که در این میان روش جدید تونلسازی اطریشی (*NATM*)، اغلب بیش‌ترین انتخاب را به خصوص در زمین‌های نرم به خود اختصاص می‌دهد [1]. برای طراحی و اجرای موفق یک تونل رعایت موارد زیر ضروری و اجتناب‌ناپذیر است:

۱- پایداری: انتخاب روش حفاری و احداث تونل باید

با توجه به شرایط زمین دربرگیرنده انجام شود. پایداری تونل در حین ساخت و تا قبل از اجرای پوشش دائم یکی از مهم‌ترین مسائل است [2] و [3].

۲- جابجایی‌های زمین و تاثیرات آن: به دلیل مشکلات ناشی از نشست بر روی ساختمان‌های سطحی در شهرها لازم است، جابجایی‌ها پیش‌بینی و اثرات آن‌ها بر روی ساختمان‌های موجود در مسیر تونل ارزیابی شود [4].

۳- کارایی سامانه‌ی نگهدارنده: پوشش موقت یا دائم تونل، باید در طول عمر خود توانایی تحمل بارهای وارده بر آن را داشته باشد. بنابراین لازم است که بارهای وارده بر آن

\* تهران؛ میدان پونک؛ انتهای بزرگراه شهید آیت‌الله اشرفی اصفهانی؛ بلوار سیمون بولیوار؛ حصارک؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات؛ ساختمان اداری؛ بلوک سوم؛ طبقه‌ی پنجم؛ باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان؛ شماره‌ی تلفن: ۰۲۱-۴۷۹۱۲۳۰۶؛ رایانامه: [a.dehghan@srbiau.ac.ir](mailto:a.dehghan@srbiau.ac.ir)

اولیه‌ی تونل در خاک دربرگیرنده انجام گرفته است.

## ۲- الگوریتم تحلیل برگشتی

در تحلیل برگشتی برای مسایل مهندسی سنگ و خاک، شرایط نیرو و بارهای خارجی و خواص مکانیکی، با توجه به تغییر مکان، تنش و کرنش در طی مراحل اجرای پروژه و پس از آن تعیین می‌شود. در تحلیل‌های عادی شرایط نیرو و خواص مکانیکی، اطلاعات ورودی برای تعیین تغییر مکان، تنش و کرنش هستند. موارد مهمی که در تحلیل برگشتی مورد بررسی قرار می‌گیرند، تعیین تنش‌های اولیه و خواص رفتاری سنگ و خاک مورد حفاری با توجه به داده‌های حاصل از رفتارنگاری با ابزار دقیق است.

در تحلیل برگشتی می‌توان به دو روش معکوس و مستقیم عمل نمود. در روش معکوس، با معکوس کردن گزاره‌های ریاضی و تحلیل تنش و کرنش محیط دربرگیرنده و نگهداری، ثابت‌های مکانیکی زمین و تنش‌های برجای آن تعیین می‌شود و با توجه به جابجایی‌های اندازه‌گیری شده، تنش‌ها و مشخصه‌های ژئومکانیکی به دست آورده می‌شود. رابطه‌ی بین تحلیل برگشتی معکوس و روش تحلیل عادی را می‌توان در شکل ۱ مشاهده نمود [8] و [9].

در تحلیل برگشتی معکوس و مستقیم، بر خلاف تحلیل عادی، مقادیر به دست آمده یکسان نیستند؛ علت آن است که مدل مورد نظر را با توجه به جابجایی‌ها فرض می‌کنند و این امر باعث می‌شود که پارامترهای بدست آمده یکسان نباشند. تحلیل برگشتی مستقیم بر اساس کاهش مقدار اختلاف بین مقدار جابجایی اندازه‌گیری شده با جابجایی محاسبه شده از تحلیل عددی معمول با فرض پارامترهای مجهول استوار است. این عمل توسط تابعی موسوم به تابع خطا انجام می‌شود که به صورت گزاره‌ی (۱) نشان داده شده است [10]، [11] و [12].

$$Error = \frac{\sum_{k=1}^N [u_k - u_k^*]^2}{\sum_{k=1}^N u_k^*} \quad (1)$$

از مزایای روش مستقیم این است که می‌توان آن را برای معادلات غیر خطی و بدون داشتن نگرانی از حل معادلات پیچیده‌ی ریاضی برای بدست آوردن مقادیر مجهول استفاده نمود. در روش برگشتی مستقیم، سه الگوریتم دارای هماهنگی مناسب با تحلیل برگشتی برای یافتن پارامترهای

پیش از طراحی پوشش تونل تخمین زده شود.

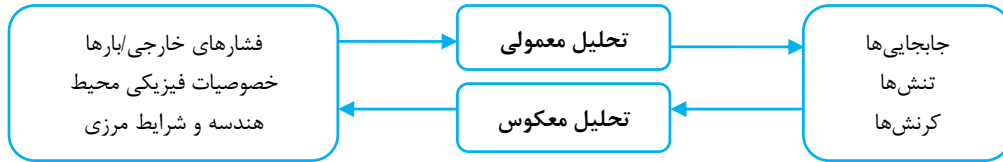
به دلیل پیچیده بودن مسایل و مشکلاتی که در حفاریات زیرزمینی وجود دارد، روش‌های تجربی به تنهایی نمی‌توانند مسایل به وجود آمده را، حل و فصل نمایند. بنابراین اکثر کارشناسان بر این باورند که همزمان با روش‌های تجربی، برای رسیدن به نتایج مطلوب می‌توان از روش‌های عددی نیز استفاده نمود. روش اجزای محدود در سال‌های اخیر و با توجه به ماهیت پیوسته‌ی محیط‌های خاکی، برای ارزیابی پایداری و بررسی تغییر شکل خاک به صورت گسترده به کار برده شده است [5].

برای انجام یک تحلیل عددی با دقت کافی به پارامترهای ژئومکانیکی دقیق و اصلاح شده‌ای از محیط دربرگیرنده‌ی تونل نیاز است. از آنجایی که شناخت خواص رفتاری تونل برای تحلیل پایداری ضروری است، می‌توان از روش کارآمد ابزار دقیق بهره گرفت. هدف از این روش مهار جابجایی‌ها برای ارزیابی پایداری فضاهای زیرزمینی و تعیین خصوصیات محیط است [6]. برای اصلاح برآوردهای اولیه‌ی پارامترهای ژئومکانیکی زمین نیز می‌توان از روش تحلیل برگشتی استفاده نمود.

از جمله اهداف مهم در اجرای تونل در شهرها، به حداقل رساندن مقادیر جابجایی‌ها و مهار آن‌ها در طول زمان اجرا است. در سال‌های اخیر با پیشرفت استفاده از کامپیوتر و همچنین نرم‌افزارهای عددی برای تحلیل‌هایی با سرعت و دقت بالا، پیش‌بینی تغییر مکان‌ها، تنش در خاک یا سنگ در برگیرنده و همچنین بررسی و تغییر نتایج حاصل از آن‌ها برای طراحان تونل به راحتی امکان‌پذیر شده است. برای مثال نرم‌افزار *PLAXIS 3D Tunnel* قابلیت مدل کردن انواع تونل‌ها و بارگذاری‌ها را دارد [7].

در این مقاله تلاش شده است با توجه به محیط دربرگیرنده‌ی تونل که متشکل از چندین لایه‌ی خاک است، پارامترهای ژئومکانیکی شامل مدول کشسانی، نسبت پواسون، چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی ( $\varphi, C, v, E$ ) لایه‌های خاک توسط الگوریتم تحلیل برگشتی بر پایه‌ی داده‌های ابزار دقیق نیز برآورد شود. با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل برگشتی و کالیبره کردن مدل‌ها، تحلیل پایداری تونل متروی کرج با نرم‌افزار *PLAXIS 3D* برای اصلاح و انتخاب طرح مناسب سامانه‌ی نگهداری

ژئومکانیکی شامل روش تک‌متغیره، روش تک‌متغیره‌ی متناوب و روش جستجوی الگویی وجود دارد [9].



شکل ۱- رابطه‌ی بین روش معمول تحلیل و تحلیل برگشتی [5]

بکار بردند و نتایج آن‌ها را با هم مقایسه کردند [11]. این نتایج نشان داده است، روش تک‌متغیره و روش تک‌متغیره‌ی متناوب می‌توانند با موفقیت مقادیر بهینه‌ی پارامترها را صرف نظر از مقادیر اولیه‌ی آن‌ها جستجو کنند؛ در صورتی که روش جستجوی الگویی، در برخی از موارد با موفقیت همراه نیست. الگوریتم به کار رفته در این پژوهش نیز روش تک‌متغیره‌ی متناوب است.

### ۳- موقعیت تونل متروی کرج و وضعیت زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی منطقه

تونل خط ۲ قطعه‌ی یک متروی کرج از کیلومتر ۴+۵۵۰ تا ۴۵۵۰ (متر) تا کیلومتر ۷+۰۴۵ (۷۰۴۵ متر)، واقع در بلوار شهید بهشتی کرج به روش NATM با دو محل دسترسی به تونل در کیلومترهای ۵+۴۲۵ و ۶+۲۲۵ در حال احداث است (شکل ۲)، [۱۱۳]. در این روش حفاری به کمک لودر، بیل مکانیکی و نیروی انسانی انجام می‌گیرد. حفاری و اجرای تونل با روش NATM در سه مرحله بصورت بخش فوقانی، میانی و کناری اجرا می‌شود (شکل ۳). سازه‌ی تونل با مقطع نعل اسبی از بتن مسلح به عرض ۸/۴۰ متر و ارتفاع ۷/۸۰ متر تشکیل شده است و در عمق ۶ تا ۱۲ متری (متوسط ۱۰ متر) از سطح زمین طبیعی قرار دارد (شکل ۴)، [۱۱۴].

شهر کرج بر روی رسوبات آبرفتی جوان شکل گرفته است. این رسوبات حاصل فعالیت رودخانه‌ی کرج و رودخانه‌ها و سیلاب‌های فصلی منشا گرفته از دره‌های موجود در ارتفاعات شمالی هستند. این رسوبات را می‌توان به گروه‌های تراس‌های رودخانه‌های قدیمی، پادگانه‌های جوان و مخروط افکنه‌های جوان تقسیم‌بندی نمود.

تراز ارتفاعی محدوده‌ی احداث خط مترو در حدود ۱۳۰۵ متر از سطح دریای آزاد است. بررسی بر روی

در روش تک‌متغیره، همه‌ی پارامترهای مجهول به جز یکی از آن‌ها ثابت در نظر گرفته می‌شود و با تکرار تحلیل به تعداد  $N-I$  مرتبه، پارامتر مذکور با توجه به گزاره‌ی (۱)، بهینه می‌شود. سپس متغیر بهینه شده ثابت در نظر گرفته می‌شود و پارامترهای دیگری در این چرخه قرار گرفته و در زمان واحد فقط یک پارامتر تکرار می‌شود. روش تک‌متغیره‌ی متناوب مانند روش تک‌متغیره است؛ با این تفاوت که در زمان واحد چند پارامتر مجهول می‌توانند تغییر کنند. این مقدار تا زمانی که تابع خطا به مقادیر حدی خود برسد ادامه پیدا می‌کند [9].

در روش تک‌متغیره، مقدار اولیه‌ی  $XI$  برای متغیر در نظر گرفته می‌شود و در مراحل بعدی برای تغییر پارامتر مجهول از گزاره‌ی (۲) استفاده می‌شود [9].

$$X_{i+1} = X_i + \lambda_i S_i \quad (2)$$

در گزاره‌ی (۲)،  $\lambda_1$  نسبت بین جابجایی به دست آمده از مرحله‌ی قبلی به جابجایی اندازه‌گیری شده است که به آن طول پله می‌گویند [11].  $S_i$  جهت جستجو است و با توجه به روش مورد استفاده تعیین می‌شود. روش جستجوی الگویی به عبارت گسترده‌تر همان روش تک‌متغیره است. در این روش یک پارامتر به صورت تک‌متغیره،  $n$  مرتبه تکرار می‌شود. سپس نقطه‌ی بهینه‌ی مورد نظر در فاصله‌ی  $S_p$  (گزاره‌ی (۳)) به دست می‌آید [6].

$$S_p = X_i - X_{i-n} \quad (3)$$

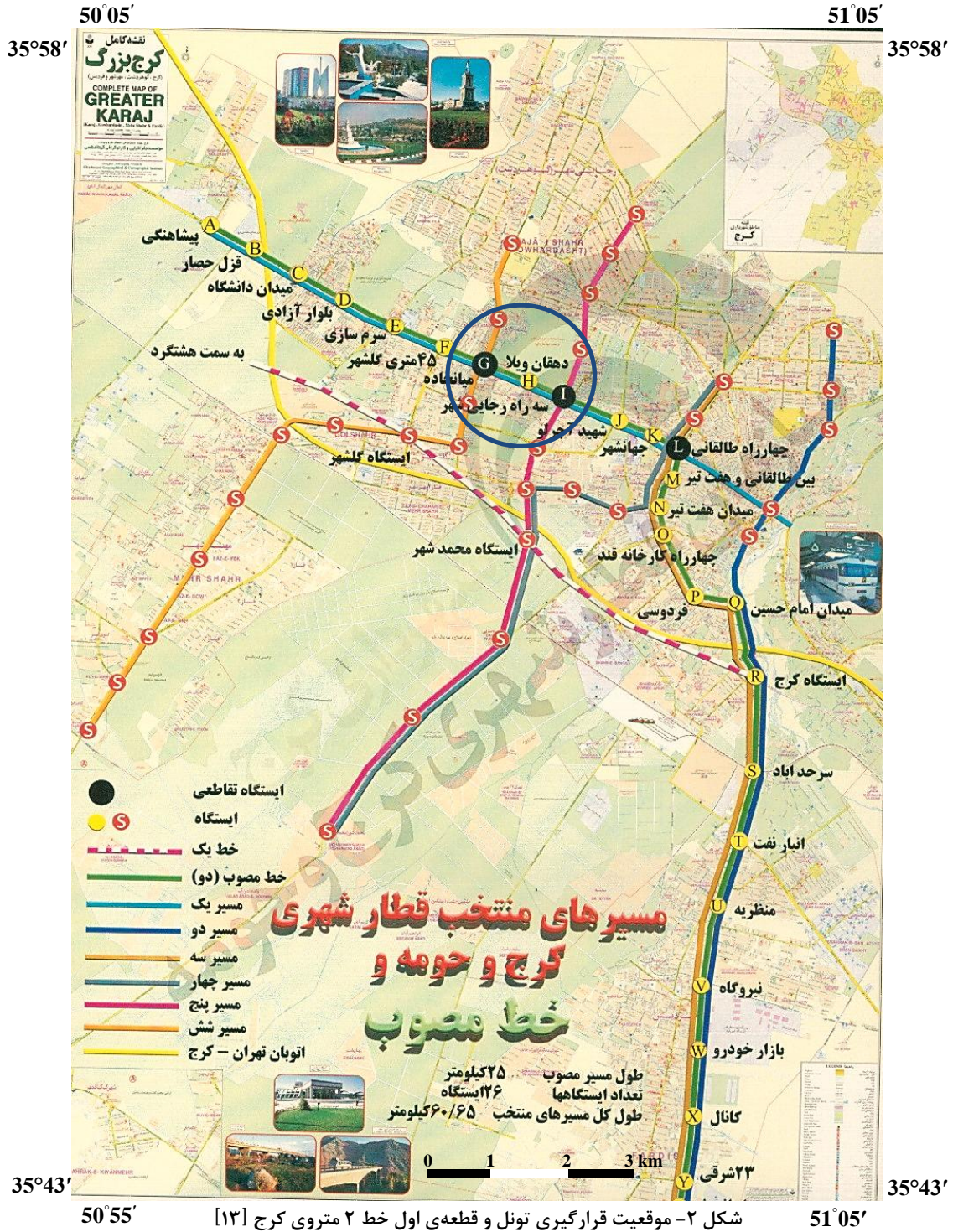
در گزاره‌ی (۳)، مقدار  $X_i$  نقطه‌ی بدست آمده پس از پایان یک مرحله از انجام روش تک‌متغیره است و  $X_{i-n}$  مقدار متغیر پیش از انجام تحلیل برگشتی است [6].

جون و یانگ (Jeon & Yang) برای دستیابی به مناسب‌ترین الگوریتم تحلیل برگشتی از میان روش‌های بهینه‌سازی، سه الگوریتم از روش‌های جستجوی مستقیم را

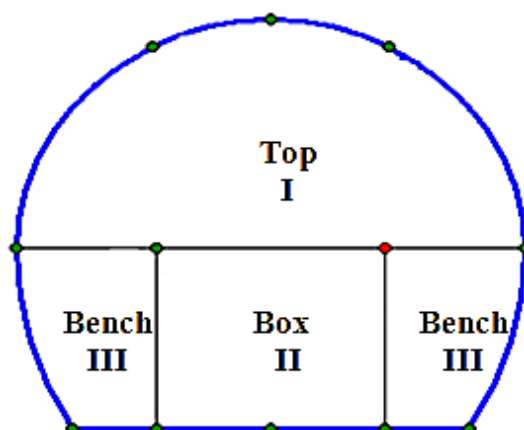
انتخاب طرح مناسب سامانه‌ی نگهداری اولیه‌ی تونل متروی کرج بر مبنای نتایج ابزار دقیق و الگوریتم تحلیل برگشتی: ص ۴۹-۶۴

قسمت‌های مرکزی مخروط افکنه‌ی کرج مصالح ریزدانه‌تر شده است. این مصالح از دیدگاه مکانیکی دارای مقاومت بالایی هستند [۱۵].

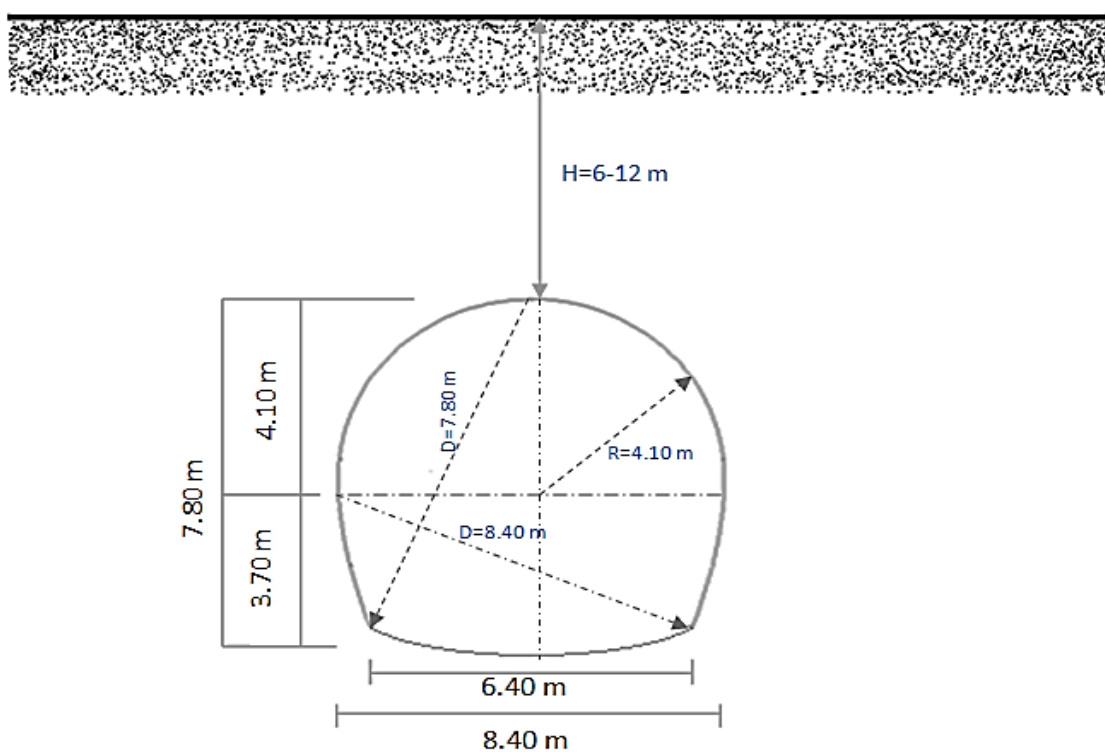
گمانه‌های حفاری شده در این محدوده نشان می‌دهد این رسوبات اغلب از خاک درشت‌دانه‌ی شن و ماسه تشکیل شده و با حرکت به سمت شرق ساختگاه و با دور شدن از



شکل ۲- موقعیت قرارگیری تونل و قطعه‌ی اول خط ۲ متروی کرج [۱۳]



شکل ۳- مقطع عرضی تونل و ترتیب حفاری بخش‌های مختلف آن [۱۴]



شکل ۴- ابعاد هندسی مقطع عرضی تونل [۱۴]

صورت مستقیم در تقسیم‌بندی مذکور وارد شده است. بر این اساس، یک طبقه‌بندی کاربردی برای آبرفت مسیر تونل خط ۲ متروی کرج به دست آمده است و نتایج آن شامل ۶ لایه‌ی رس و سیلت ۱ (C1)، رس و سیلت ۲ (C2)، ماسه ۱ (S1)، ماسه ۲ (S2)، شن ۱ (G1) و شن ۲ (G2) است [۱۶]. این لایه‌ها معرف کل خاک منطقه‌ی مورد مطالعه هستند.

به طور کلی و بر اساس نتایج حاصل از آزمون‌های دانه‌بندی خاک و حدود آتربرگ یک تقسیم‌بندی کلی شامل سه لایه‌ی اصلی رس، سیلت ماسه و شن به دست آمده است [۱۵]. از آنجا که تقسیم‌بندی بر این اساس نمی‌تواند یک قضاوت صحیح مهندسی ارائه دهد، نتایج حاصل از آزمون *SPT* به عنوان یک معیار شناخته شده برای مهندسین، به

مسیر تونل در جدول ۱ نشان داده شده است. در این تحقیق، پارامترهای جدول ۱ به عنوان پارامترهای اولیه در مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است.

آنچه باعث تفاوت در لایه‌های رسی و سیلتی ۱ و ۲، ماسه ۱ و ۲ و شن ۱ و ۲ از یکدیگر می‌شود، مقدار  $N_{SPT}$  است. پارامترهای ژئومکانیکی لایه‌های تشکیل‌دهنده در طول

جدول ۱- پارامترهای ژئومکانیکی لایه‌های موجود در طول مسیر تونل [۱۶]

پارامتر لایه	مدول کشسانی (MPa)	ضریب پواسون -	چسبندگی ( $kN/m^2$ )	زاویه اصطکاک داخلی (Degree)
C1	۱۰-۱۵	۰٫۲۱-۰٫۲۵	۴۰-۴۳	۲۲-۲۴
C2	۱۰-۱۵	۰٫۲۰-۰٫۲۵	۶۵-۷۰	۲۵-۲۸
S1	۱۵-۲۰	۰٫۲۷-۰٫۳۰	۲۷-۳۰	۲۸-۳۰
S2	۲۰-۲۵	۰٫۲۱-۰٫۲۶	۳۰-۳۴	۳۲-۳۵
G1	۳۰-۳۵	۰٫۲۵-۰٫۳۰	۶۸-۷۱	۲۷-۳۰
G2	۳۰-۳۵	۰٫۲۵-۰٫۳۰	۲۸-۳۰	۳۵-۳۸

همگرایی تونل نسبت به زمان و فاصله از جبهه‌ی حفاری فوقانی برای ایستگاه کیلومتر ۴+۵۷۱ نشان داده شده است. به طوری که  $U-US$  همگرایی بین سقف و دیواره‌ی سمت چپ،  $U-UN$  همگرایی بین سقف و دیواره‌ی سمت راست و  $US-UN$  همگرایی بین دیواره‌های سمت چپ و راست است. حفاری فوقانی تونل در ۴ لایه‌ی C1، S1، S2 و G2 انجام گرفته است (شکل ۷ و شکل ۸) و ۱۰ ایستگاه انتخاب شده برای تحلیل برگشتی نیز دقیقاً در همین لایه‌ها با نسبت‌های متفاوت حفاری شده‌اند [۱۷]. با توجه به محیط خاکی پیرامون ایستگاه‌ها برای مدل‌سازی می‌توان از نرم‌افزار PLAXIS 3D که یکی از نرم‌افزارهای اجزای محدود پیشرفته برای تحلیل تغییر شکل‌ها و پایداری در پروژه‌های ژئوتکنیکی به ویژه تونل است، استفاده نمود [7].

در شکل ۷ و شکل ۸، دو نمونه از هندسه‌ی مدل‌های ساخته شده (ایستگاه ۴+۵۷۱ و ۶+۹۶۸)، نشان داده شده است. همچنین برای افزایش سرعت محاسبات و به دلیل تقارن هندسه‌ی مسئله، تونل به صورت نیم‌مقطع در نظر گرفته شده است.

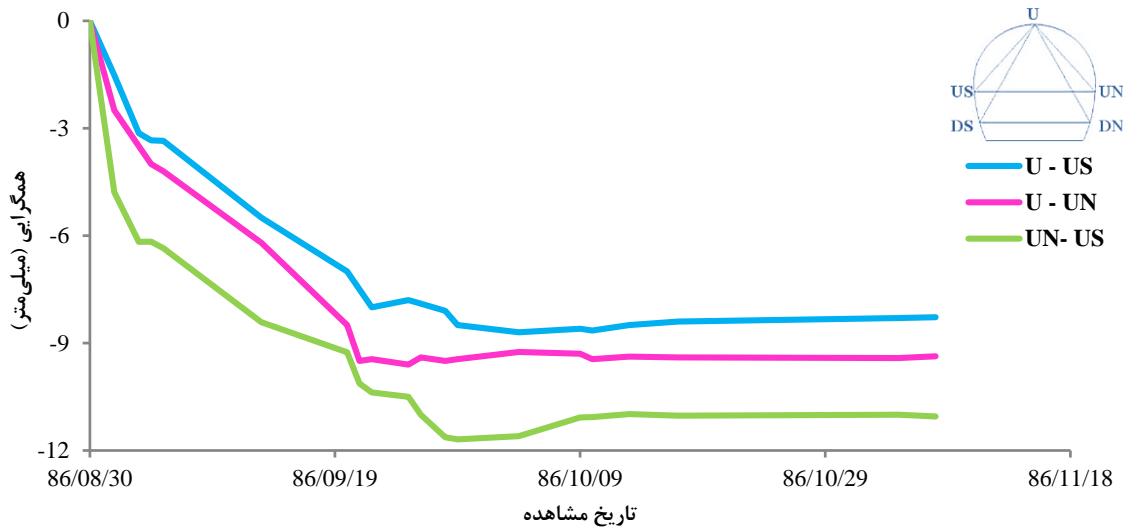
برای هر ۱۰ مدل ارایه شده، ارتفاع ۲۵ متر (Y)، عرض ۲۵ متر (X) و ضخامت ۳۰ متر (Z) در نظر گرفته شده و مش‌بندی مناطق نزدیک تونل، فشرده‌تر از مناطق دورتر از تونل است. در این تحلیل رفتار مصالح خاکی به صورت کشسان-مومسان در نظر گرفته شده و از مدل رفتاری موهر-کلمب استفاده شده است.

#### ۴- تحلیل برگشتی سامانه‌ی نگهداری تونل با استفاده از داده‌های ابزار دقیق

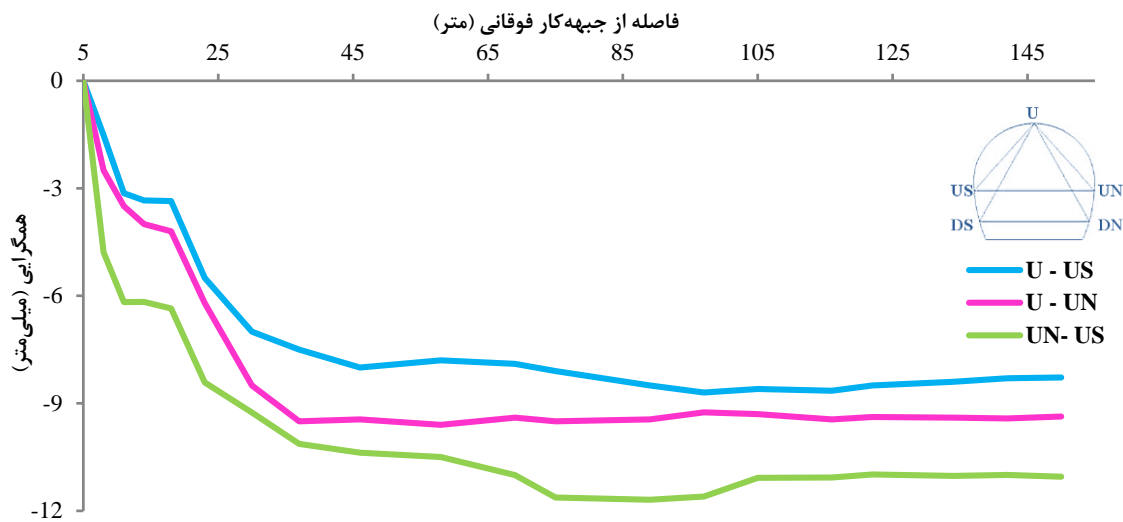
در طول مسیر تونل، با توجه به رده‌بندی مهندسی خاک، محیط دربرگیرنده، دارای لایه‌بندی و ناهمگن است. تحلیل برگشتی انجام شده در این پژوهش بر اساس نتایج حاصل از جابجایی‌های به دست آمده از همگرایی‌سنجی‌های دیواره و سقف تونل است. از آنجایی که تغییر مکان یک نقطه از دیواره‌ی تونل، تغییر شکل سنگ و خاک پیرامون را در بر دارد، نتایج اندازه‌گیری‌ها زیاد پراکنده نیست. بنابراین اندازه‌گیری همگرایی وسیله‌ای موثر برای بررسی رفتار تونل است. همچنین در این پروژه بیش‌ترین حجم اطلاعات موجود و قابل استناد از همگرایی‌سنجی‌های نصب شده در طول مسیر تونل به دست آمده است.

بنابراین با توجه به ایستگاه‌های نزدیک به جبهه‌کارهای حفاری به نظر می‌رسد در ۱۰ ایستگاه همگرایی‌سنجی شامل ایستگاه‌های کیلومتر ۴+۵۷۱، ۴+۹۷۳، ۵+۱۲۱، ۵+۲۵۳، ۵+۳۴۱، ۶+۴۷۸، ۶+۵۳۴، ۶+۹۲۴، ۶+۹۶۸ و ۶+۹۹۴، وترهای همگرایی‌سنجی فوقانی با توجه به حرکت جبهه‌ی حفاری فوقانی روند طبیعی داشته و مقادیر همگرایی‌ها در محدوده‌ی قابل قبول قرار دارند. با دور شدن جبهه‌های حفاری نیز تغییر شکل دیواره و سقف تونل کاهش می‌یابد.

به عنوان نمونه در شکل ۵ و شکل ۶، به ترتیب



شکل ۵- جابجایی‌های اندازه‌گیری شده نسبت به زمان در ایستگاه ۴+۵۷۱



شکل ۶- جابجایی‌های اندازه‌گیری شده نسبت به فاصله از جبهه‌ی حفاری بالایی در ایستگاه ۴+۵۷۱

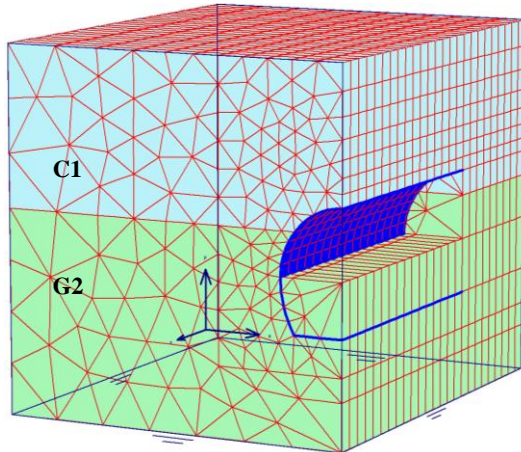
در نرم‌افزار *PLAXIS 3D*، تنش اولیه یا به صورت  $k_0$  روش به صورت روش بارگذاری ثقلی محاسبه می‌شود. روش  $k_0$  زمانی استفاده می‌شود که هندسه‌ی لایه‌بندی در راستای افقی با سطح زمین باشد. همچنین سطح آب زیرزمینی هم به صورت افقی باشد. در عمل مقدار  $k_0$  برای خاک، اغلب بر پایه‌ی زاویه‌ی اصطکاک داخلی با گزاره‌ی تجربی جکی (*Jaky*) محاسبه می‌شود (گزاره‌ی (۴))، [18].

$$K_0 = 1 - \sin\phi \quad (۴)$$

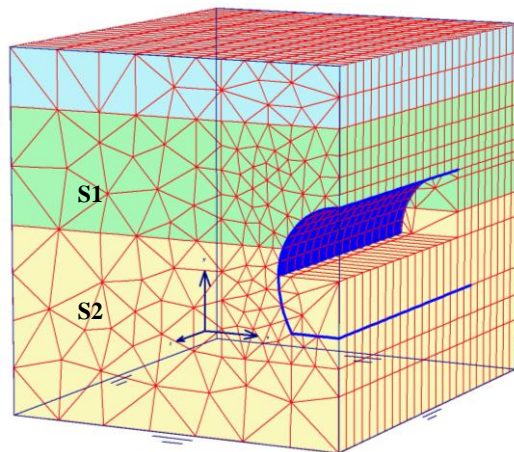
با توجه به محل استقرار تونل در زیر خیابان، در نتیجه وجود سربار حاصل از عبور وسایل نقلیه، با ایجاد یک بار ۲۰ کیلونیوتنی معادل ۲ تن در هر متر مربع، این بارگذاری در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی مدل با بستن جابجایی افقی در مرزهای چپ و راست مدل و بستن جابجایی قائم در مرز پایینی مدل اعمال شده است. پس از تعادل اولیه‌ی مدل، حفر قسمت فوقانی تونل و نصب نگهداری اولیه انجام شده است.

ایستگاه فوق، استفاده شده است و جابجایی‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه شده در دیوار و سقف تونل برای این ۱۰ ایستگاه در جدول ۲ ارایه شده است [۱۷].

در این مطالعه، تنش‌های اولیه ( $K_0$ )، به صورت میانگین روش  $k_0$  و برابر با ۰/۵ در نظر گرفته شده است. برای تحلیل برگشتی از داده‌های همگرایی سنجی ۱۰



شکل ۸- هندسه‌ی مدل عددی ساخته شده در PLAXIS برای ایستگاه ۶+۹۶۸



شکل ۷- هندسه‌ی مدل عددی ساخته شده در PLAXIS برای ایستگاه ۴+۵۷۱

جدول ۲- جابجایی‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه شده در ایستگاه‌ها

درصد خطا	جابجایی‌های محاسبه شده (میلی‌متر)		جابجایی‌های اندازه‌گیری شده (میلی‌متر)		لايه‌های حفاری شده	ایستگاه (کیلومتر از)
	سقف	دیوار	سقف	دیوار		
۰/۱۶	۶۲۰	۱۱/۸۶	۶۲۳	۱۱/۶۹	S2-S1	۴+۵۷۱
۰/۰۱۵	۷۵۰	۱۱/۴۸	۷۵۵	۱۱/۵۰	S1	۴+۹۷۳
۰/۱۴	۷۴۰	۱۱/۱۰	۷۳۶	۱۰/۹۴	S2-C1	۵+۱۲۱
۰/۱۰	۶۷۰	۱۱/۱۶	۶۷۴	۱۱/۰۳	S2-C1	۵+۲۵۳
۰/۰۳۷	۶۸۰	۱۱/۱۲	۶۸۸	۱۱/۱۰	S2	۵+۳۴۱
۰/۰۸۴	۱/۷۵	۳/۰۲	۱/۸۰	۳/۰۶	S1-G2	۴+۴۷۸
۰/۰۴۹	۱/۵۲	۲/۵۴	۱/۵۴	۲/۵۰	S1-G2	۶+۵۳۴
۰/۰۳۰	۱۲/۳۵	۱۳/۶۸	۱۲/۴۳	۱۳/۷۲	C1	۶+۹۲۴
۰/۱۵	۵/۲۰	۷/۸۰	۵/۱۲	۷/۹۲	C1-G2	۶+۹۶۸
۰/۵۶	۵/۱۰	۸/۳۶	۵/۰۲	۸/۱۰	C1-G2	۶+۹۹۴

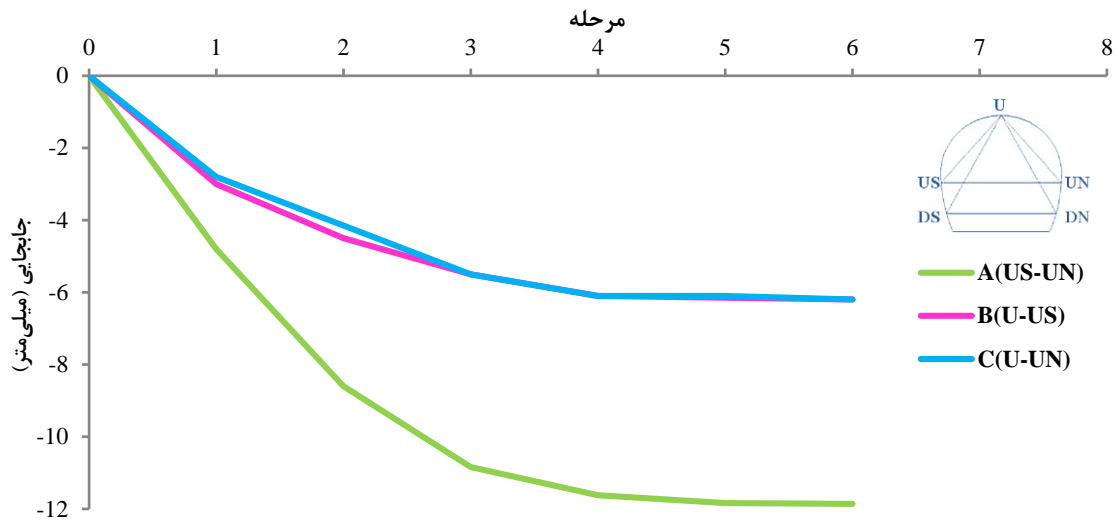
در دیواره و سقف تونل برای ایستگاه ۴+۵۷۱ پس از ۶ مرحله تکرار مدل به ترتیب برابر با ۱۱/۸۶ و ۶/۲۰ میلی‌متر به دست آمده است (شکل ۹). با مقایسه‌ی جابجایی‌های اندازه‌گیری شده توسط همگرایی‌سنجی‌ها (شکل ۵) و جابجایی‌های محاسبه شده از روش عددی (شکل ۹) در ایستگاه ۴+۵۷۱ و با به حداقل رساندن تابع خطا (۰/۱۶) و

در این پژوهش به عنوان نمونه، مراحل تحلیل برگشتی ایستگاه همگرایی‌سنجی ۴+۵۷۱ ارایه شده است. در ایستگاه ۴+۵۷۱، بیش‌ترین جابجایی‌های دیواره و سقف تونل به ترتیب برابر با ۱۱/۶۹ و ۶/۲۳ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است (شکل ۵ و شکل ۶). در ادامه با استفاده از روش تک‌متغیره‌ی متناوب، بیش‌ترین جابجایی‌های محاسبه شده



مقاومتی خاک برای لایه‌های  $CI$ ،  $SI$ ،  $S2$  و  $G2$  به دست آمده است (جدول ۴، جدول ۵، جدول ۶ و جدول ۷).  
با توجه به جدول ۲، خطای نسبی به دست آمده از مقایسه‌ی نهایی بین جابجایی‌های محاسبه شده در بخش بالایی تونل با جابجایی‌های بدست آمده از ایزار بندی تمام ایستگاه‌ها از درصد پایین و قابل قبولی برخوردار است.

رسیدن به نقطه‌ی بهینه (معرف کمترین اختلاف میان جابجایی‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه شده)، مدول کشسانی، ضریب پواسون، چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی با استفاده از الگوریتم تک‌متغیره‌ی متناوب برای لایه‌های  $SI$  و  $S2$  به دست آمده است (جدول ۳). در نهایت با انجام تحلیل برگشتی بر روی تمام ایستگاه‌ها پارامترهای



شکل ۹- جابجایی‌های محاسبه شده در دیواره و سقف تونل برای ایستگاه ۴+۵۷۱

جدول ۳- پارامترهای ژئومکانیکی لایه‌های  $S1$  و  $S2$  طی ۶ مرحله تکرار مدل در ایستگاه ۴+۵۷۱

مرحله	لایه‌ها	مدول کشسانی (MPa)	ضریب پواسون	چسبندگی (kN/m <sup>2</sup> )	زاویه‌ی اصطکاک داخلی (Degree)	درصد خطا
۱	$SI$	۱۸	۰٫۲۷	۲۷	۲۸	۵٫۲۰
	$S2$	۲۰	۰٫۲۱	۳۰	۳۲	
۲	$SI$	۲۸	۰٫۲۸	۲۹	۲۹	۳٫۳۰
	$S2$	۳۰	۰٫۲۳	۳۹	۳۴	
۳	$SI$	۳۷	۰٫۲۹	۳۲	۳۰	۲٫۴۰
	$S2$	۳۸	۰٫۲۶	۴۶	۳۶	
۴	$SI$	۴۰	۰٫۳۰	۳۳	۳۰	۱٫۲۰
	$S2$	۴۵	۰٫۲۸	۵۵	۳۸	
۵	$SI$	۴۲	۰٫۳۰	۳۴	۳۱	۰٫۶۰
	$S2$	۴۸	۰٫۲۹	۵۷	۳۹	
۶	$SI$	۴۳	۰٫۳۰	۳۵	۳۱	۰٫۱۶
	$S2$	۴۹	۰٫۳۰	۵۷	۴۰	

جدول ۴- پارامترهای ژئومکانیکی لایه‌ی C1 در تحلیل برگشتی

مقدار	پارامترهای ژئومکانیکی	مدول کشسانی (MPa)	ضریب پواسون -	چسبندگی (kN/m <sup>2</sup> )	زاویه‌ی اصطکاک داخلی (Degree)
بیش‌ترین	۴۰	۰٫۳۲	۶۴	۳۲	
میانگین	۳۳٫۱۲	۰٫۲۵	۵۸	۲۹٫۲۵	
کمترین	۲۸	۰٫۲۱	۴۳	۲۴	

جدول ۵- پارامترهای ژئومکانیکی لایه‌ی S1 در تحلیل برگشتی

مقدار	پارامترهای ژئومکانیکی	مدول کشسانی (MPa)	ضریب پواسون -	چسبندگی (kN/m <sup>2</sup> )	زاویه‌ی اصطکاک داخلی (Degree)
بیش‌ترین	۴۹	۰٫۳۴	۶۷	۴۳	
میانگین	۴۶٫۱۵	۰٫۳۱	۵۷٫۲۵	۳۳	
کمترین	۳۲٫۲۵	۰٫۲۷	۳۵	۳۱	

جدول ۶- پارامترهای ژئومکانیکی لایه‌ی S2 در تحلیل برگشتی

مقدار	پارامترهای ژئومکانیکی	مدول کشسانی (MPa)	ضریب پواسون -	چسبندگی (kN/m <sup>2</sup> )	زاویه‌ی اصطکاک داخلی (Degree)
بیش‌ترین	۹۵	۰٫۳۰	۷۶	۴۱	
میانگین	۶۵٫۰۶	۰٫۲۶	۶۸٫۸	۳۸٫۲	
کمترین	۳۴٫۲۵	۰٫۲۶	۵۷	۳۵	

جدول ۷- پارامترهای ژئومکانیکی لایه‌ی G2 در تحلیل برگشتی

مقدار	پارامترهای ژئومکانیکی	مدول کشسانی (MPa)	ضریب پواسون -	چسبندگی (kN/m <sup>2</sup> )	زاویه‌ی اصطکاک داخلی (Degree)
بیش‌ترین	۱۵۰	۰٫۳۶	۷۵	۴۰	
میانگین	۱۰۷٫۲۵	۰٫۳۲	۵۸٫۸	۳۸٫۵	
کمترین	۸۳٫۵	۰٫۳۰	۵۶	۳۷	

کرج در ایستگاه‌های مختلف حفاری، ارایه شده است. تونل متروی کرج با مقطع نعل اسبی و در عمق کم (میانگین ۱۰ متر)، طراحی شده است [۱۳]. سامانه‌ی نگهداری موقت در زمان حفاری برای پایدارسازی دیواره و سقف تونل (در تمام طول مسیر تونل)، شامل یک لایه‌ی ۳۵ سانتی‌متری شاتکریت خشک و مسلح به همراه قاب مشبک فولادی با فاصله‌داری ۱۲۰ سانتی‌متر (+ Lattice Girder @ 120 cm) فولادی (35 cm Shotcrete) بوده است. قاب‌های مشبک فولادی بصورت ترکیبی از تیرآهن IPE 160 (تیرآهن نیم‌پهن) و آرماتور در کارگاه کرج ساخته می‌شود. طراحی انجام شده توسط مهندسين مشاور، بر مبنای پارامترهای ژئومکانیکی

پارامترهای ژئومکانیکی حاصل از تحلیل برگشتی با پارامترهای اولیه (پارامترهای آزمایشگاهی) متفاوت هستند و می‌توان از نتایج پارامترهای ژئومکانیکی حاصل از روش تحلیل برگشتی استفاده و الگوی حفاری یا سامانه‌ی نگهداری موقت و دائم را دوباره طراحی و بهینه‌سازی نمود. بنابراین مدل‌ها با استفاده از پارامترهای به دست آمده از تحلیل برگشتی کالیبره شده و برای طراحی و اجرای مراحل دیگر تحلیل پایداری مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

## ۵- تحلیل سه بعدی تونل متروی کرج

در این بخش نتایج تحلیل استاتیکی پایداری تونل متروی

حاصل از آزمایش‌های مکانیک خاک بوده است [۱۹]. بنابراین هدف از تحلیل سه‌بعدی تونل، طراحی مجدد و انتخاب طرح مناسب سامانه‌ی نگهداری موقت تونل متروی کرج با توجه به شرایط ژئوتکنیکی مسیر تونل است.

حفاری تونل به صورت تک مرحله‌ای در قسمت فوقانی در نظر گرفته شده است. مقطع با مدل‌سازی توام خاک و سازه‌ی نگهداری با نرم‌افزار *PLAXIS 3D Tunnel* تحلیل شده است. مرزهای مدل از دو طرف و کف تونل بین ۵ تا ۶ برابر قطر تونل در نظر گرفته شده است. شرایط تکیه‌گاهی در مرزهای قائم دو طرف با استفاده از غلطک‌های افقی و قائم بسته در نظر گرفته شده است. شبکه‌ی اجزای محدود با استفاده از المان مثلثی ۱۵ گرهی و به صورت اتوماتیک ساخته شده است.

در این تحلیل‌ها رفتار خاک به صورت کشسان-مومسان کامل با معیار تسلیم موهر-کولمب در نظر گرفته شده است. حفاری مقطع تونل با المان‌برداری ناحیه‌ی حفاری، مدل‌سازی و اثرات سه‌بعدی ناشی از حرکت جبهه‌کار با کاهش نیروهای گرهی نامتعادل روی مرز حفاری و تغییر شکل و کرنش درون تونل تحلیل شده است. با نصب سامانه‌ی نگهداری، باقی مانده‌ی نیروهای گرهی روی مرز حفاری تا مقدار صفر کاهش می‌یابد. بدین ترتیب تاثیر جبهه‌کار و اعمال نیرو بر سازه‌ی نگهداری مدل‌سازی می‌شود. در حین المان‌برداری قسمتی از مقطع تونل، درصد قابل توجهی از نیروهای نامتعادل گرهی (۷۰ درصد) پیش از فعال‌سازی المان‌های نگهداری به تعادل می‌رسند. پس از فعال‌سازی المان‌های تسلیم نگهدارنده، سایر نیروهای نامتعادل گرهی نیز به تعادل می‌رسند. بدین ترتیب تاثیر المان‌برداری هر یک از قسمت‌های مقطع عرضی تونل در حین حفاری و اعمال نیرو به المان‌های پوشش مدل‌سازی می‌شود.

با برقراری تعادل، تغییر شکل در خاک اطراف تونل و نیروهای وارد بر المان‌های سامانه‌ی نگهداری تعیین می‌شود. بنابراین مراحل مدل‌سازی حفاری و نصب پوشش از مقطع تونل در ۲ مرحله به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

- **مرحله‌ی اول:** حذف المان‌های درون مرز حفاری و آزادسازی بیش‌تر نیروهای نامتعادل گرهی.
- **مرحله‌ی دوم:** فعال‌سازی المان‌های پوشش و آزادسازی

سایر نیروهای نامتعادل گرهی تا برقراری تعادل کامل. تحلیل این مراحل با استفاده از تغییر شکل یا جابجایی و میانگین تنش موثر اطراف تونل انجام می‌گیرد. از آنجایی که تمام حفاری انجام شده در قطعه‌ی اول از خط ۲ متروی کرج تنها در ۴ لایه از ۶ لایه‌ی شناسایی شده، انجام گرفته است (لایه‌های *CI*، *SI*، *S2* و *G2*)، بنابراین تلاش شده با استفاده از میانگین پارامترهای ژئومکانیکی حاصل از این چهار لایه با تحلیل برگشتی، تحلیلی سه بعدی از پایداری و طراحی سامانه‌ی نگهداری موقت تونل انجام گیرد. بنابراین برای انجام تحلیل‌های عددی و با توجه به زمان تحلیل‌ها، از میان ۱۰ ایستگاه همگرایی‌سنجی موجود در طول مسیر تونل تنها ۴ ایستگاه شاخص همگرایی‌سنجی (۴+۵۷۱، ۵+۱۲۱، ۶+۵۳۴ و ۶+۹۶۸) به نمایندگی از سایر ایستگاه‌ها انتخاب شده است. در این ایستگاه‌ها، حفاری فوقانی به صورت تناسبی در لایه‌های *CI*، *SI*، *S2* و *G2* انجام شده است.

همان‌گونه که ذکر شد مدل‌سازی حفاری و نصب پوشش در مقطع تونل، برای هر ایستگاه در دو مرحله انجام می‌گیرد. در این قسمت ابتدا تحلیل عددی صورت گرفته برای یکی از ایستگاه‌های انتخاب شده (۶+۵۳۴) ارایه و در ادامه نتایج تحلیل‌ها برای تمام ایستگاه‌ها آورده شده است. برای ارزیابی پایداری فضای زیرزمینی از گزاره‌ی ارایه شده توسط ساکورایی در سال ۱۹۹۷ استفاده شده است [20]. در این گزاره کرنش بحرانی در حالت فشاری محصور شده در اطراف تونل بر حسب مدول کشسانی محیط بیان شده است (گزاره‌ی (۵)).

$$\log \varepsilon_c = -0.025 \log E - 1.22 \quad (5)$$

با تعیین کرنش بحرانی و با استفاده از گزاره‌ی (۶)، جابجایی مجاز در سقف تونل مشخص می‌شود.

$$\theta = U_c / a\varepsilon \quad (6)$$

بنابراین با انجام تحلیل عددی، در صورتی‌که نشست اندازه‌گیری شده در سقف تونل از جابجایی مجاز بدست آمده از گزاره‌ی ساکورایی بیش‌تر باشد، تونل در شرایط ناپایدار قرار می‌گیرد و در صورتی‌که نشست کمتر از جابجایی مجاز باشد، تونل در شرایط پایدار قرار خواهد گرفت. به همین دلیل برای انجام یک طراحی مناسب باید نشست سقف تونل در محدوده‌ی مجاز قرار گیرد.

گرهی در مرز حفاری به طور کامل دوباره توزیع می‌شوند. ویژگی‌های شاتکریت مسلح با ضخامت ۲۵ و ۳۰ سانتی‌متر برای پایدارسازی تونل (پوشش اولیه یا موقت) در جدول ۹ قابل مشاهده است.

نتایج حاصل از تحلیل مدل مرحله‌ی ۲، شامل تغییر مکان زمین، میانگین تنش‌های موثر اطراف محل بازشدگی، نیروهای وارد بر سامانه‌ی نگهداری در پایان فرآیند ساخت و تکمیل پوشش اولیه در بخش فوقانی تونل در جدول ۱۰، ارایه شده است. تغییر مکان و میانگین تنش موثر در خاک به ترتیب برابر با ۱۷/۶۵ میلی‌متر و ۹۹۲/۸۱ کیلونیوتن بر متر مربع است. این حالت، معرف یک شرایط پایدار در تونل است. به عبارت دیگر، تغییر مکان در سقف تونل در دامنه‌ی مجاز تونل (۱۹/۰۶ میلی‌متر) قرار گرفته و میانگین تنش موثر اطراف تونل نیز افزایش یافته است (شکل ۱۲).

#### ۶- اصلاح سامانه‌ی نگهداری اولیه

همان‌گونه اشاره شد، طراحی اولیه‌ی مهندسین مشاور بر پایه‌ی داده‌های آزمایشگاهی و سامانه‌ی نگهداری مورد استفاده، ۳۵ سانتی‌متر شاتکریت خشک و مسلح بوده است. این سامانه‌ی در تمام طول مسیر خط ۲ قطعه‌ی اول تونل متروی کرج نصب شده است. با توجه به پارامترهای ژئومکانیکی حاصل از تحلیل برگشتی مربوط به محیط دربرگیرنده‌ی تونل در مقطع مورد نظر، پایداری سه‌بعدی و سامانه‌ی نگهداری تونل، مورد بررسی قرار گرفته و دو نوع سامانه‌ی نگهداری اولیه به شرح ذیل طراحی شده است:

1 – Lattice Girder@120 cm + 25 cm Shotcrete

2 – Lattice Girder@120 cm + 30 cm Shotcrete

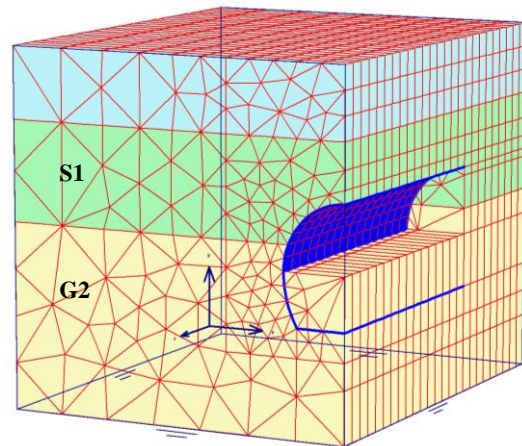
در نوع اول، قاب‌های مشبک فولادی با فاصله‌داری ۱۲۰ سانتی‌متر به همراه ۲۵ سانتی‌متر شاتکریت برای لایه‌های  $G2, SI, S1, S2, G2, SI, S1, S2, G2, CI$  پیشنهاد می‌شود. در نوع دوم، قاب‌های مشبک فولادی با فاصله‌داری ۱۲۰ سانتی‌متر به همراه ۳۰ سانتی‌متر شاتکریت، برای لایه‌های  $CI, S2, S2, CI$  پیشنهاد می‌شود.

طراحی این دو نوع سامانه‌ی نگهداری حاصل مطالعات ژئوتکنیکی، لایه‌بندی دقیق خاک، مدل‌سازی عددی و بکارگیری تحلیل برگشتی است. از آنجایی که این روش بر مبنای داده‌های ابزار دقیق مورد استفاده قرار می‌گیرد، در

#### ۵-۱- نتایج تحلیل پایداری تونل در ایستگاه

##### کیلومتر ۵۳۴+۶

در این ایستگاه، حفاری فوقانی به ترتیب در لایه‌های  $SI$  (لایه‌ی سبزرنگ) و  $G2$  (لایه‌ی زردرنگ) انجام شده است (شکل ۱۰). تحلیل پایداری و طراحی پوشش اولیه در این ایستگاه نیز در ۲ مرحله انجام شده است.



شکل ۱۰- هندسه‌ی مدل عددی ساخته شده در PLAXIS برای ایستگاه ۵۳۴+۶

#### ۵-۱-۱- مرحله‌ی اول: حذف المان‌های درون مرز و

##### آزادسازی ۷۵ درصد از نیروهای نامتعادل گرهی

نتایج تحلیل مرحله‌ی ۱ شامل حفاری بدون نصب نگهداری موقت است. در این حالت تونل در شرایط کاملاً ناپایدار قرار دارد. زیرا مقدار نشست سقف تونل برابر با ۵۲/۶۳ میلی‌متر و از مقدار مجاز آن یعنی ۱۹/۰۶ میلی‌متر بیش‌تر است (جدول ۸). همچنین میانگین تنش‌های موثر اطراف فضای حفاری در خاک پس از مرحله‌ی اول حفاری در بخش فوقانی کم و برابر با ۵۲۹/۴۴ کیلونیوتن بر متر مربع است (شکل ۱۱).

#### ۵-۱-۲- مرحله‌ی دوم: فعال‌سازی المان‌های پوشش و

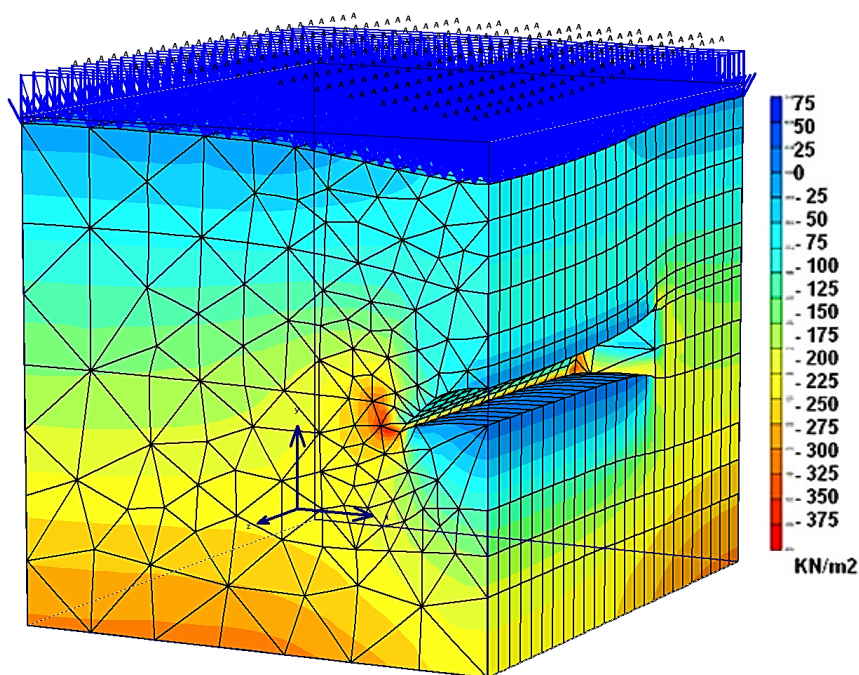
##### آزادسازی بقیه‌ی نیروهای نامتعادل گرهی

در مرحله‌ی دوم با اعمال ۲۵ سانتی‌متر شاتکریت به همراه قاب مشبک فولادی با فاصله‌داری ۱۲۰ سانتی‌متری در قسمت حفاری شده یعنی لایه‌های  $SI$  و  $G2$ ، تلاش می‌شود، تونل به حالت متعادل رسانده شود. در پایان مرحله‌ی دوم با فعال‌سازی المان پوشش، نیروهای نامتعادل

صورتی که داده‌ها بدون خطا یا کم خطا باشند، می‌تواند نتایج با ارزشی در زمینه‌ی تحلیل پایداری، طراحی مجدد سامانه‌ی نگهداری و نوع حفاری تونل ارائه دهد. داده‌های این تحقیق حاصل از همگرایی سنجی‌هایی است که در طول مسیر تونل نصب شده و در مدت زمان معین، بطور دقیق خوانده می‌شوند.

جدول ۸- نتایج تحلیل پایداری سه‌بعدی تونل پیش از نصب پوشش برای ایستگاه‌های مختلف

وضعیت تونل	جابجایی (mm)	جابجایی مجاز (mm)	میانگین تنش موثر $kN/m^2$	ضخامت شاتکریت (cm)	لایه‌های حفاری -	ایستگاه (کیلومتر از)
ناپایدار	۵۱,۸۰	۱۸,۶۳	۴۴۸,۵۸	-	S2,S1	۴+۵۷۱
ناپایدار	۷۲,۸۳	۱۸,۲۷	۳۸۳,۵۳	-	CI,S2	۵+۱۲۱
ناپایدار	۵۲,۶۳	۱۹,۰۶	۵۲۹,۴۴	-	SI,G2	۶+۵۳۴
ناپایدار	۵۷,۲۸	۱۸,۸۹	۵۲۴,۶۰	-	CI,G2	۶+۹۶۸



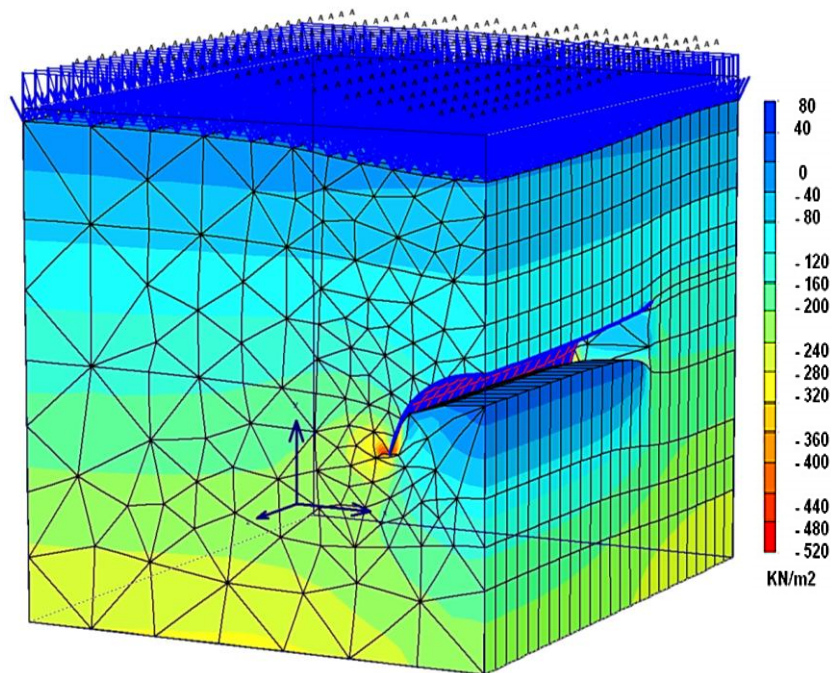
شکل ۱۱- میانگین تنش‌های اصلی در حفاری بخش فوقانی در پایان مرحله‌ی ۱ در ایستگاه ۶+۵۳۴

جدول ۹- مشخصات شاتکریت طراحی شده

ضریب پواسون $\nu$	وزن مخصوص $W$ ( $kN/m$ )	مدول $\times$ سطح مقطع $EA$ ( $kN/m$ )	ممان $\times$ مدول یانگ $EI$ ( $kNm^2/m$ )	ممان اینرسی $I = \frac{BH^3}{12}$	پارامترها ضخامت شاتکریت cm
۰,۲۰	۴,۴۵۰	$۲,۱۸۶ e^6$	$۱,۱۳۸ e^6$	$۱,۳۰ e^{-3}$	۲۵
۰,۲۵	۴,۴۵۰	$۲,۶۲۳ e^6$	$۱,۹۶۷ e^6$	$۲,۵۰ e^{-3}$	۳۰

جدول ۱۰- نتایج تحلیل پایداری سه‌بعدی تونل پس از نصب پوشش برای ایستگاه‌های مختلف

وضعیت تونل	جابجایی (mm)	جابجایی مجاز (mm)	میانگین تنش موثر $kN/m^2$	ضخامت شاتکریت (cm)	لایه‌های حفاری -	ایستگاه (کیلومتر از)
پایدار	۱۶,۵۳	۱۸,۶۳	۷۰,۹	۲۵	S2, S1	۴+۵۷۱
پایدار	۱۶,۸۰	۱۸,۲۷	۱۷۹,۰	۳۰	CI, S2	۵+۱۲۱
پایدار	۱۷,۶۵	۱۹,۰۶	۹۹۲,۸۱	۲۵	SI, G2	۶+۵۳۴
پایدار	۱۵,۶۵	۱۸,۸۹	۱۱۶,۰	۲۵	CI, G2	۶+۹۶۸



شکل ۱۲- میانگین تنش‌های اصلی زمین پس از فعال‌سازی پوشش (مرحله ۲) در ایستگاه ۶+۵۳۴

سانتی‌متر به تعادل رسیده است. بنابراین نمی‌توان نتیجه گرفت که در هر قسمت از تونل که لایه‌های  $CI$  و  $S2$  وجود دارند، ضخامت پوشش باید ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شود. به بیان دیگر، اگر در لایه‌های  $CI$  و  $S2$  (لایه‌های ضعیف‌تر) حفاری صورت گیرد، برای پایداری تونل می‌توان از پوشش ۳۰ سانتی‌متری شاتکریت به همراه قاب مشبک فولادی با فاصله‌داری ۱۲۰ سانتی‌متر استفاده نمود.

#### ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله تحلیل برگشتی با روش تک‌متغیره‌ی متناوب که روشی ساده و کاربردی برای داده‌های حاصل از ابزاربندی است، با نرم‌افزار *PLAXIS 3D Tunnel* برای تونل متروی

با نگاهی اجمالی به هر ۴ ایستگاه مشاهده می‌شود در تمام ایستگاه‌ها به جز ایستگاه ۵+۱۲۱ (حفاری در لایه‌های  $CI$  و  $S2$ )، تونل با نصب ۳۰ سانتی‌متر شاتکریت و قاب مشبک فولادی، پایدار است. در صورتی که در سایر ایستگاه‌ها، تونل با نصب ۲۵ سانتی‌متر شاتکریت و قاب مشبک فولادی به تعادل رسیده است. با توجه به این‌که تونل در هر کدام از این لایه‌ها مانند  $CI$  در ایستگاه ۶+۹۶۸ در کنار  $G2$  حفاری شده ولی با نصب ۲۵ سانتی‌متر شاتکریت به همراه قاب مشبک فولادی با فاصله‌ی ۱۲۰ سانتی‌متر به پایداری رسیده است. همچنین در ایستگاه ۴+۵۷۱ با وجود حفاری در لایه‌های  $SI$  و  $S2$ ، تونل با نصب ۲۵ سانتی‌متر شاتکریت به همراه قاب مشبک فولادی با فاصله‌ی ۱۲۰

محافظه‌کارانه بوده است؛ اما طراحی سامانه‌ی نگهداری بر مبنای پارامترهای ژئومکانیکی حاصل از تحلیل برگشتی بیانگر این است که با توجه به جنس لایه‌های تشکیل‌دهنده‌ی خاک در قسمت‌هایی از مسیر تونل ضخامت ۲۵ سانتی‌متر و در قسمت‌های دیگر ضخامت ۳۰ سانتی‌متر شاکت‌ریت کافی است. آنچه در طراحی سامانه‌ی نگهداری اولیه در این تحقیق نقش تعیین‌کننده‌ای داشته است، استفاده از نتایج تحلیل برگشتی نسبت به نتایج آزمایش‌های مکانیک خاک بوده است.

### ۸- سپاس‌گزاری

از مساعدت‌های بی‌دریغ اساتید گرانقدر جناب آقایان دکتر کامران گشتاسبی، دکتر کاوه آهنگری و دکتر فریدون رضایی تقدیر، تشکر و قدردانی می‌شود.

کرج، خط ۲ قطعه‌ی اول انجام شده است. در این فرآیند پارامترهای ژئومکانیکی محیط در برگیرنده، تعیین شده و به کمک داده‌های ابزار دقیق و پس از چندین بار تکرار مدل، تابع خطا به حداقل رسیده است. نتایج نشان داده است پارامترهای مذکور با آنچه که توسط آزمایش‌های مکانیک خاک ارایه شده بود، متفاوت است. در اثر کالیبره شدن مدل‌ها، تحلیل پایداری سه‌بعدی و طراحی سامانه‌ی نگهداری اولیه‌ی تونل انجام گرفته است و نتیجه‌ی آن طراحی دو نوع سامانه‌ی نگهداری اولیه، متفاوت با طراحی‌های صورت گرفته توسط مهندسین مشاور پروژه است.

در مجموع می‌توان نتیجه گرفت، طراحی سامانه‌ی نگهداری موقت (۳۵ سانتی‌متر شاکت‌ریت) بر مبنای پارامترهای ژئومکانیکی حاصل از آزمایش‌های مکانیک خاک

### ۹- سیاهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح	نماد	واحد	شرح
<i>Error</i>	-	مقدار خطا	$\epsilon_c$	%	کرنش بحرانی
$u_k$	mm	جابجایی محاسبه شده	$I$	-	ممان اینرسی
$u_k^*$	mm	جابجایی اندازه‌گیری شده	$A$	$m^2$	سطح مقطع
$N$	-	تعداد نقاط اندازه‌گیری	$W$	$kN/m/m$	وزن مخصوص
$E$	MPa	مدول کشسانی	$U_c$	-	نشست در سقف تونل
$\nu$	-	ضریب پواسون	$a$	$m$	شعاع تونل
$C$	$kN/m^2$	چسبندگی	$\lambda_i$	-	طول پله
$\varphi$	Degree	زاویه‌ی اصطکاک داخلی	$S_i$	-	جهت جستجو

### ۱۰- منابع‌ها

- [1] Powel, D., Field, D., & Hulsen, R. (2001). Design of An NATM Tunnel for Mission Valley Light Rail-East Extension. In Hansmire & Gowring (Eds.), *Rapid Excavation and Tunnelling Conference Proceedings* (pp. 3-14). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration Incorporated. ISBN: 0873352041.
- [2] Miura, K., Yagi, H., Shiroma, H., & Takekuni, K. (2003). Study on Design and Construction Method for The New Tomei-Meishin Expressway Tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18(2-3), 271- 281. [http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798\(03\)00036-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798(03)00036-1).
- [3] Saveur, J., & Grantz, W. (1997). Structural Design of Immersed Tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 12(2), 93-109. [http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798\(97\)90015-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798(97)90015-8).
- [4] Selby, A. R. (1999). Tunnelling in Soils-Ground Movements, and Damage to Buildings in Workington, UK. *Geotechnical and Geological Engineering*, 17(3-4), 351-371. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1008985814841>.

- [5] Swoboda, G. (1979). Finite Element Analysis of the New Austrian Tunnelling Method. In Wittke (Ed.), *Proceedings of the Third International Conference on Numerical Methods in Geomechanics* (pp. 581-586). Aachen. A. A. Balkema. ISBN: 9061910420.
- [6] Dunicliff, J. (1988). *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*. New York: John Wiley & Sons. ISBN: 0471096148.
- [7] Brinkgreve, R. B. J. (2002). PLAXIS, 3D tunnel, version 1. Lisse: Swets and Zeitlinger Publishers.
- [8] Karakus, M., & Fowell, R. J. (2005). Back Analysis For Tunnelling Induced Ground Movements and Stress Redistribution. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20(6), 514-524. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2005.02.007>.
- [9] Sakurai, S. (1993). Back Analysis in Rock Engineering. In Hudson (Ed.), *Comprehensive Rock Engineering* (pp. 453-569). Vo14, chap19. London: Pergamon Press.
- [10] Zhang, L. Q., Yue, Z. Q., Yang, Z. F., Qi, J. X., & Liu, F. C. (2006). Displacement-Based Back-Analysis Method for Rock Mass Modulus and Horizontal in Situ Stress in Tunneling-Illustrated with A Case Study. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(6), 636-649. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2005.12.001>.
- [11] Jeon, Y. S., & Yang, H. S. (2004). Development of A Back Analysis Algorithm Using FLAC. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(3), 441-442. Proceedings of The ISRM SINOROCK 2004 Symposium. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2003.12.085>.
- [12] Shang, Y. J., Cai, J. G., Hao, W. D., Wu, X. Y., & Li, S. H. (2002). Intelligent Back Analysis of Displacement Using Precedent Type Analysis for Tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 17(4), 381-389. [http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798\(02\)00041-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798(02)00041-X).
- [۱۳] سازمان قطار شهری کرج و حومه. (۱۳۸۴). گزارش اجرای عملیات ساختمانی قطعه‌ی اول قطار شهری کرج.
- [۱۴] دهقان، ع. ن. (۱۳۸۸). تحلیل و طراحی سه‌بعدی تونل خط ۲ متروی کرج بر مبنای نتایج ابزار دقیق و الگوریتم تحلیل برگشتی. پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات.
- [۱۵] مهندسین مشاور دریا خاک پی. (۱۳۸۴). گزارش نهایی مطالعات ژئوتکنیک قطعه‌ی دوم مسیر مصوب متروی کرج و حومه.
- [۱۶] زرنگ‌زاده، س. ص. (۱۳۸۷). مطالعه‌ی خصوصیات مهندسی آبرفت کرج و تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی خاک به منظور احداث پروژه‌ی خط ۲ متروی کرج. پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات.
- [۱۷] خسروتاش، م.، تسکین‌دوست، م.، و کشفی، م. (۱۳۸۶). گزارش تفصیلی رفتارسنجی در حین احداث تونل قطعه‌ی اول خط ۲ متروی کرج و حومه. شرکت مهندسین مشاور تونل راد. ش ۴.
- [18] Jaky, J. (1948). Pressure in Silos. *Proceedings of the Second International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (pp. 103-107). Rotterdam: International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering.
- [۱۹] مهندسین مشاور هگزا. (۱۳۸۴). گزارش مطالعات تونل خط ۲ قطار شهری کرج.
- [20] Sakurai, S. (1997). Lessons Learned from Field Measurements in Tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 12(4), 453-460. [http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798\(98\)00004-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798(98)00004-2).



## Design of the Appropriate Primary Support System of Karaj Subway Tunnel Based on Convergence Data and Back Analysis Algorithm

A. N. Dehghan

Ph.D. Candidate in Mining Engineering; Islamic Azad University; Science and Research Branch

Received: 01 Dec 2012; Accepted: 25 Aug 2013

### Keywords

Finite Element Method (FEM)  
 Back analysis  
 Geomechanical parameters  
 Support system  
 Instrumentation & monitoring  
 Karaj subway tunnel

### Extended Abstract

Back analysis can be used as a reliable method for stability and support structure analysis. In Karaj subway project, primary design and analyses have been conducted by consultant engineers based on soil mechanics laboratory tests and without consideration of geomechanical parameters of each available layer on the rout of tunnel. Therefore, In this research, considering various layers of the surrounded soil mass of

tunnel, achieved geomechanical parameters of these layers have been analyzed by back analysis based on instrumentation results. Then, according to the achieved results and calibrated models, numerical models of three-dimensional stability of tunnel has been used to modify and optimize the tunnel primary support system design.

### Introduction

An exact numerical analysis requires modified and precise geomechanical parameters of surrounding soil mass of the tunnel. Direct method of tunnel stability analysis is not able to evaluate the real soil mass behavioral. Hence, instrumentation is a practical method and the purpose of this method is displacements monitoring to evaluate the stability of underground spaces and determine ground properties.

### Methodology and Approaches

The surrounding soil of the Karaj subway tunnel line 2 in section 1 consists of 6 layers and the geomechanical parameters of the adjacent layers have been estimated by back analysis and convergence data. Stability analysis and primary support design have been carried out based on back analyzed parameters using Plaxis 3D software.

### Results and Conclusions

Geomechanical parameters of surrounding soil mass of the tunnel is determined as a main conclusion of this research. Since this task has been made by the use of instrumentation results, and after several model repetitions, defined error function is minimized. Results indicate that there are differences between mentioned parameters and laboratory resulted parameters. Therefore, models should be calibrated. 3D stability analysis and tunnel temporary support system design have been applied. As a result, two different kinds of temporary support systems have been designed and consultant engineering company has fulfilled the design. Consequently, implemented analysis based on the instrumentation results and back analysis algorithms, in comparison with the primary analysis based on the soil mechanics test results, in existed layers on the rout of tunnel (Karaj alluvium) has higher precision, and could optimize and equalize tunnel temporary support system design.