# تحلیل برگشتی تونل متروی کرج به منظور تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده خاک در برگیرنده

علی نقی دهقان: دانشگاه علوم و تحقیقات تهران
فریدون رضایی: پژوهشکده علوم زمین ایران
علی قنبری: دانشگاه تربیت معلم تهران

**تاریخ:** دریافت ۸۸/۳/۱۰ پذیرش ۸۸/۱۲/۲

## چکیده

در بسیاری از موارد، تحقیق در بارهٔ طراحی و اجرای سازه‌های زیرزمینی منحصراً با تخمین پارامترهای ژئومکانیکی توده خاک انجام می‌شود. بیان کمی و کیفی این پارامترها همانند حالت اولیه تنش‌ها، سطح آب زیرزمینی و نفوذ پذیری بسیار مشکل است. برای رفع چنین مشکلی از پژوهش‌های صحرایی و تکنیک‌های تحلیل برگشتی استفاده می‌شود. هدف این روش‌ها صرفاً تعیین مدل مکانیکی یا مقادیر ثابت‌های مکانیکی و نیروهای خارجی نبوده، بلکه اندازه‌گیری جابه‌جایی‌ها پیرامون سازه‌های زیرزمینی با ابزارهای رفتارنگاری و تعیین بارها بر روی نگهدارنده‌ها و نهایتاً ارزیابی روش‌های طراحی پروژهٔ مورد نظر در طی اجرای آن است. در این مقاله داده‌های حاصل از رفتارسنجی تونل متروی کرج- خط ۲ قطعه اول به طول ۲۴۹۵ متر به‌عنوان داده‌های اولیه تحلیل برگشتی به روش تک متغیره متناوب جهت مدل‌سازی در نرم افزار Plaxis 3D استفاده شده است. نهایتاً با انجام عمل تحلیل برگشتی پارامترهای ژئومکانیکی توده خاک یعنی مدول الاستسیته، مدول پواسون، چسپندگی و زاویه اصطکاک داخلی که متفاوت با مقادیر ارائه شده اولیه است، برآورد شد.

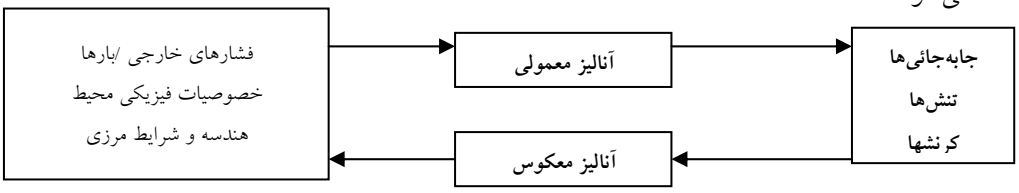
**واژه‌های کلیدی:** تحلیل برگشتی، نرم افزار Plaxis 3D، تونل متروی کرج، روش تک متغیره متناوب.

[ Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2025-12-07 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.1.4 ]

## مقدمه

تحلیل برگشتی عموماً به‌عنوان روشی تعریف می‌شود که می‌تواند پارامترهای کنترل کنندهٔ سیستم را به کمک تحلیل رفتار خروجی آن تأمین کند. این روش بیش از ۲۰ سال است که در زمینه مکانیک خاک و سنگ استفاده می‌شود. در تحلیل برگشتی مسائل خاک و سنگ، هدف اصلی تعیین تنش‌های اولیه و ثابت‌های توده در برگیرنده از داده‌های میدانی اندازه‌گیری شده است[۱۱]،[۱۲]. در تحلیل برگشتی می‌توان به دو روش عمل کرد، روش معکوس و روش مستقیم[۱۳]،[۱۲]. در روش معکوس که یک روش با سابقه طولانی در مهندسی است، با معکوس کردن روابط ریاضی تحلیل تنش و کرنش سیستم تودهٔ خاک و نگهداری، ثابت‌های مکانیکی تودهٔ خاک و تنش برجای آن تعیین می‌شود. و با توجه به جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری شده تنش‌ها و مشخصه‌های ژئومکانیکی را به دست می‌آورند. رابطهٔ بین تحلیل برگشتی معکوس و روش تحلیل معمولی را می‌توان در شکل۱ مشاهده کرد [۱۳]. اما باید توجه داشت که در موارد ساده استفاده از تحلیل برگشتی معکوس بسیار مناسب است ولی معادلات پیچیده و غیرخطی این روش کمی با مشکل مواجه می‌شود. در تحلیل برگشتی معکوس و مستقیم مقادیر به‌دست آمده یک‌سان نیستند این موضوع بدین علت است که مدل مورد نظر را با توجه به جابه‌جایی‌ها فرض می‌کنند و این خود باعث می‌شود که پارامترهای به‌دست آمده یک‌سان نباشند [۱۳]. در روش مستقیم براساس فرض پارامترهای مجهول اولیه و تکرار حل معادلات به روش معمول به تصحیح مقدار نهایی مجهولات به وسیلهٔ کاهش دادن مقدار تابع خطا می‌پردازند [۱۰]. از مزایای روش مستقیم این است که بدون نگرانی از حل معادلات پیچیده ریاضی می‌توان آن را برای به‌دست آوردن مقادیر مجهول معادلات ریاضی استفاده کرد. در این مقاله یکی از الگوریتم‌های تحلیل برگشتی به روش مستقیم که روش تک متغیره متناوب نامیده می‌شود، استفاده شده است.




**شکل ۱. رابطهٔ بین روش معمول تحلیل و تحلیل برگشتی[۱۳]**

[ Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2025-12-07 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.1.4 ]

## روش‌های انجام تحلیل برگشتی

تحلیل برگشتی مستقیم بر اساس کاهش مقدار اختلاف بین مقدار جابه‌جایی اندازه‌گیری شده یا جابه‌جایی محاسبه شده از تحلیل عددی معمول با فرض پارامترهای مجهول استوار است[۱۵]،[۱۲]. این عمل توسط تابعی موسوم به تابع خطا انجام می‌شود که به‌عنوان رابطهٔ(۱) [۱۱] و [۱۴] نشان داده شده اند.

$$\frac{\sum_{K}^{N}=1\left[u_K-u_K^*\right]^2}{\sum_{K}^{N}=1u_K^*}$$ رابطهٔ (۱)

که در رابطهٔ بالا $u_K$ مقدار جابه‌جایی محاسبه شده و $u_K^*$ جابه‌جایی اندازه‌گیری شده در نقطه اندازه‌گیری I هستند. N تعداد نقاط اندازه‌گیری است. در روش تحلیل برگشتی مستقیم سه الگوریتم که هم‌آهنگی مناسبی با تحلیل برگشتی برای یافتن پارامترهای E, υ, c, φ را دارند عبارتند از روش تک متغیره، روش تک متغیره متناوب و روش جستجوی الگویی. در روش تک متغیره همه پارامترهای مجهول بجز یکی ثابت در نظرگرفته می‌شوند و با تکرار تحلیل به اندازهٔ N-۱ مرتبه مقدار پارامتر مذکور را با توجه به معادلهٔ (۱)، بهینه می‌کنند. سپس متغیر بهینه شده ثابت در نظر گرفته می‌شود و پارامترهای دیگری در این چرخه قرار می‌گیرند و در زمان واحد فقط یک پارامتر تکرار می‌شود. روش تک متغیره متناوب مانند روش تک متغیره 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. در روش تک متغیره مقدار اولیه X1 برای متغیر در نظر گرفته می‌شود و در مراحل بعدی برای تغییر پارامتر مجهول از رابطه (۲)[۱۳] استفاده می‌کنند.

$$X_{i+1}=X_i+\lambda_i S_i$$ رابطه (۲)

که در آن $\lambda_i$ نسبت بین جابه‌جایی به‌دست آمده از مرحله قبلی به جابه‌جایی اندازه‌گیری شده است که به آن طول پله می‌گویند [۱۱]. و $S_i$ جهت جستجو است که با توجه به روش استفاده شده تعیین می‌شود. روش جستجوی الگویی به عبارت گسترده‌تر همان روش تک متغیره است، در این روش یک پارامتر به صورت تک متغیره n مرتبه تکرار می‌شود سپس نقطهٔ بهینه مورد نظر در فاصله $S_p$ که در رابطهٔ(۳) [۱۱] معرفی شده است به‌دست می‌آید.

[ Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2025-12-07 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.1.4 ]

$$S_p=X_i-X_{i-n}$$ رابطه (۳)

که در این معادله مقدار $X_i$ نقطه به‌دست آمده پس از پایان یک مرحله از انجام روش تک متغیره است، و $X_{i-n}$ مقدار متغیر قبل از انجام تحلیل برگشتی است. Joen و yang (۲۰۰۴)، به منظور دست‌یابی به مناسب‌ترین الگوریتم تحلیل برگشتی از میان روش‌های بهینه‌سازی، سه الگوریتم از روش‌های جستجوی مستقیم را به‌کار بردند و نتایج آن‌ها را با هم مقایسه کردند [۱۱]، نتایج نشان داد که روش تک متغیره و روش تک متغیره متناوب می‌توانند با موفقیت مقادیر بهینهٔ پارامترها را صرف‌نظر از مقادیر اولیهٔ آن‌ها جستجو کنند، در صورتی که روش جستجوی الگویی، در برخی از موارد با موفقیت همراه نیست. الگوریتم به‌کار رفته در این پژوهش روش تک متغیره متناوب است.

## اعمال الگوریتم روش تک متغیره متناوب در تحلیل برگشتی تونل متروی کرج

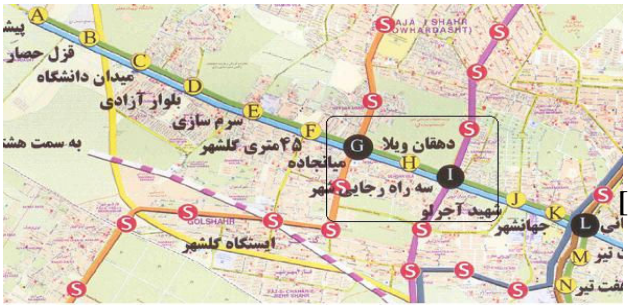
### ۱. موقعیت تونل متروی کرج و وضعیت ژئوتکنیکی منطقه

تونل متروی کرج از کیلومتراژ ۵۵۰+۴ (۴۵۵۰ متر) الی کیلومتر ۰۴۵+۷ (۷۰۴۵ متر)، واقع در بلوار شهید بهشتی کرج به روش جدید اطریشی (NATM) با دو محل دسترسی در کیلومترهای ۴۲۵+۵ و۲۲۵+۶ در حال احداث است شکل[۲]. روش حفاری ناتم (NATM)، معروف به روش حفاری جدید اطریشی است که به کمک لودر، بیل مکانیکی، کامیون و نیروی انسانی انجام می‌گیرد. سازه تونل یک حلقه بیضی شکل(مقطع نعل‌اسبی) از بتن مسلح به عرض ۸/۴۰ متر و ارتفاع ۷/۸۰ متر است که در عمق ۶ تا ۱۲ متری (متوسط ۱۰ متر)، از سطح زمین طبیعی قرار دارد. شهر کرج بر روی رسوبات آبرفتی جوان شکل گرفته است. این رسوبات حاصل فعالیت رودخانه کرج و رودخانه‌ها و سیلاب فصلی منشأ گرفته از دره‌های موجود در ارتفاعات شمالی هستند. این رسوبات را می‌توان به گروه‌های تراس‌های رودخانه‌ای قدیمی، پادگانه‌های جوان و مخروط افکنه‌های جوان تقسیم‌بندی کرد. تراز ارتفاعی محدودهٔ احداث خط مترو حدوداً ۱۳۰۵ متر از سطح دریای آزاد است. بررسی روی گمانه‌های حفاری شده در این محدوده نشان می‌دهد این رسوبات اغلب از خاک درشت دانه شن و ماسه تشکیل شده که با حرکت به سمت شرق ساختگاه و با دور شدن از قسمت‌های مرکزی مخروط افکنه

[ Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2025-12-07 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.1.4 ]

کرج مصالح ریزدانه‌تر شده است، و از دیدگاه مکانیکی دارای مقاومت بالایی است [۳]. به‌طور کلی و بر اساس نتایج حاصل از آزمون‌های دانه‌بندی خاک و حدود آتربرگ یک تقسیم‌بندی کلی به‌دست آمده، که محصول آن سه لایهٔ اصلی، رس و سیلت، ماسه و شن است [۳]. از آن‌جا که تقسیم‌بندی بر این اساس نمی‌تواند یک قضاوت صحیح مهندسی را ارائه دهد، نتایج حاصل از آزمون SPT را که یک معیار شناخته شده برای مهندسین است، به‌طور مستقیم وارد کردیم. بر این اساس یک طبقه‌بندی کاربردی برای آبرفت مسیر تونل متروی کرج- خط۲ بیان شد که نتیجه آن ۶ لایه ، رس و سیلت ۱ (C1)، رس و سیلت ۲ (C2)، ماسه ۱ (S1)، ماسه ۲ (S2)، شن ۱ (G1) و شن ۲ (G2) است [۵]. این لایه‌ها معرف کل خاک منطقهٔ بررسی شده است. آنچه باعث تمییز لایه‌های رسی و سیلتی ۱ و ۲، ماسه ۱ و ۲ و شن ۱ و ۲ از یک‌دیگر می‌شود مقدار $N_{SPT}$ است[۵]. پارامترهای ژئومکانیکی لایه‌های تشکیل دهنده در طول مسیر تونل در جدول۱، نشان داده شده است[۵]. در این تحقیق این پارامترها به‌عنوان پارامترهای اولیه در مدل‌سازی استفاده شده است.




**شکل۲. موقعیت قرارگیری قطعه اول خط۲ متروی کرج[۱]**

**جدول۱. پارامترهای ژئومکانیکی لایه‌های تشکیل دهنده در طول مسیر تونل[۵]**

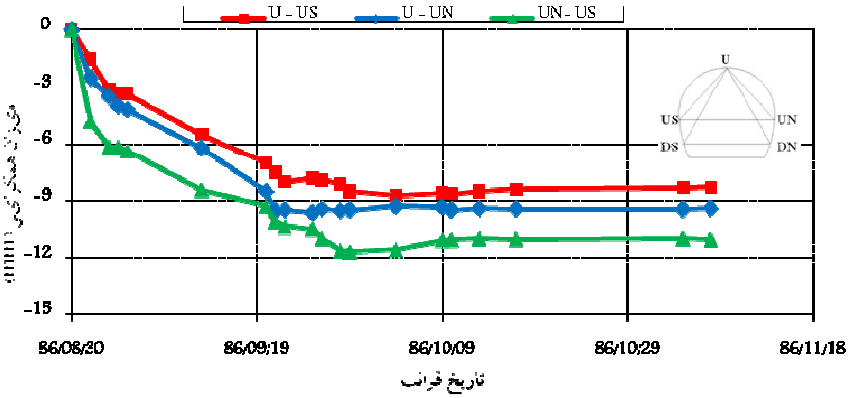
| لایه | مدول الاستسیته E (MPa) | مدول پواسون υ | چسپندگی C $kN/m^2$ | زاویه اصطکاک داخلی φ |
|---|---|---|---|---|
| C1 | - | ۰/۲۱ –۰/۲۵ | ۴۰ –۴۳ | ۲۲–۲۴ |
| C2 | - | ۰/۲۰ –۰/۲۵ | ۶۵ –۷۰ | ۲۵ –۲۸ |
| S1 | ۱۵ –۲۰ | ۰/۲۷ –۰/۳۰ | ۲۷ –۳۰ | ۲۸ –۳۰ |
| S2 | ۲۰ –۲۵ | ۰/۲۱ –۰/۲۶ | ۳۰ –۳۴ | ۳۲ –۳۵ |
| G1 | ۳۰ –۳۵ | ۰/۲۵ –۰/۳۰ | ۶۸ –۷۱ | ۲۷ –۳۰ |
| G2 | ۳۰ –۳۵ | ۰/۲۵ –۰/۳۰ | ۲۸ –۳۰ | ۳۵ –۳۸ |

[ Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2025-12-07 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.1.4 ]

## ۲. تحلیل برگشتی تونل با استفاده از داده‌های ابزار دقیق

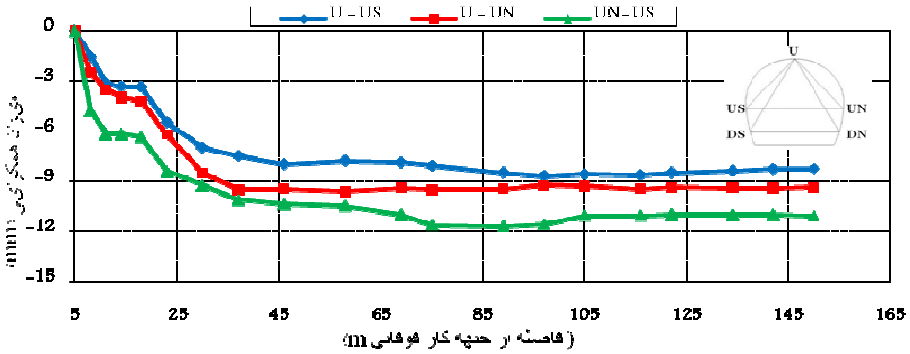
با توجه به رده‌بندی مهندسی خاک که در مسیر تونل انجام شده ، توده خاک دارای شرایط ناهمگن و شامل لایه‌های مختلف توصیف شده است. تحلیل برگشتی صورت گرفته در این تحقیق بر اساس نتایج حاصل از جابه‌جایی‌های قرائت شده با همگرایی‌سنج‌های نصب شده در دیواره و سقف تونل است. بنا بر این با توجه به ایستگاه‌های موجود نزدیک به جبهه کار حفاری به نظر می‌آید که در ایستگاه‌های۴+۵۷۱ و ۶+۹۶۸ (اشکال۳ الی۶)، وترهای هم‌گرایی‌سنجی‌های فوقانی با گذشت زمان و حرکت جبهه حفاری فوقانی روند طبیعی داشته و تغییر شکل دیواره و سقف تونل ناچیز است، در نتیجه مقادیر همگرایی‌ها در محدودهٔ قابل قبولی قرار دارند. همچنین از آن‌جایی که از شواهد بر می‌آید (اشکال ۷ و ۸) حفاری فوقانی تونل بیش‌تر در ۴ لایه C1 (لایه قرمز رنگ)،S1 (لایه سبز رنگ)، S2 (لایه آبی رنگ) و G2 (لایه زرد رنگ) است و این دو ایستگاه نیز دقیقاً در همین لایه‌ها حفاری شده‌اند. در نتیجه این ایستگاه‌ها برای انجام تحلیل برگشتی در نظر گرفته شدند [۲]. بنا بر این با توجه به محیط خاکی پیرامون ایستگاه‌های ذکر شده برای مدل‌سازی می‌توان از نرم افزارPLAXIS 3D استفاده کرد که یکی از نرم افزارهای اجزای محدود پیشرفته برای تحلیل تغییر شکل‌ها و پایداری در پروژه‌های مهندسی ژئوتکنیک، به‌ویژه تونل است[۶]، [۷]، [۸]، [۹]. هندسه مدل‌های ساخته شده با استفاده از این نرم افزار برای دو ایستگاه ۴+۵۷۱ و ۶+۹۶۸ در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است.



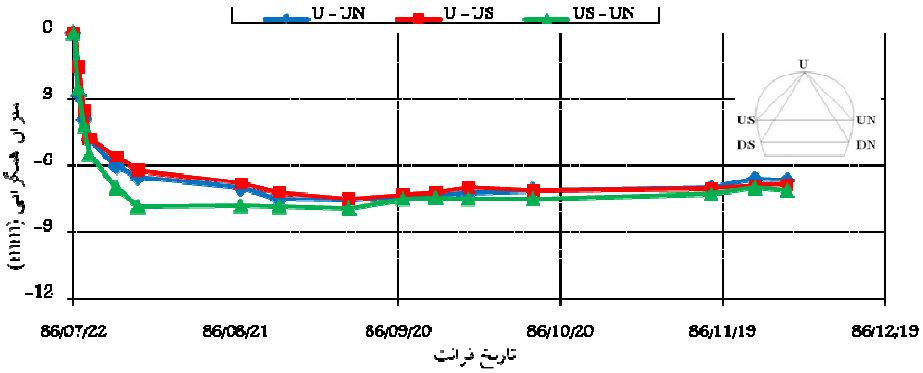

**شکل ۳. نمودار میزان جاب‌جایی‌های اندازه‌گیری شده نسبت به زمان در ایستگاه ۴+۵۷۱**

[ Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2025-12-07 ]

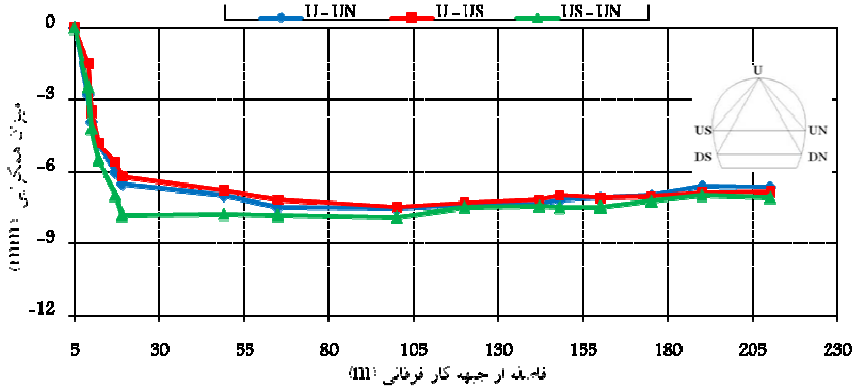
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.1.4 ]




شکل ۴. نمودار میزان جاب‌جایی‌های اندازه‌گیری شده نسبت به جبهه حفاری فوقانی در ایستگاه ۴+۵۷۱



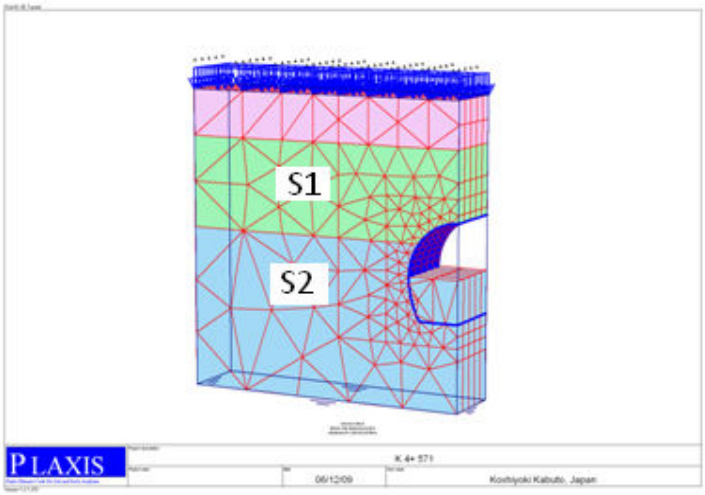

شکل ۵. نمودار میزان جاب‌جایی‌های اندازه‌گیری شده نسبت به زمان در ایستگاه ۶+۹۶۸



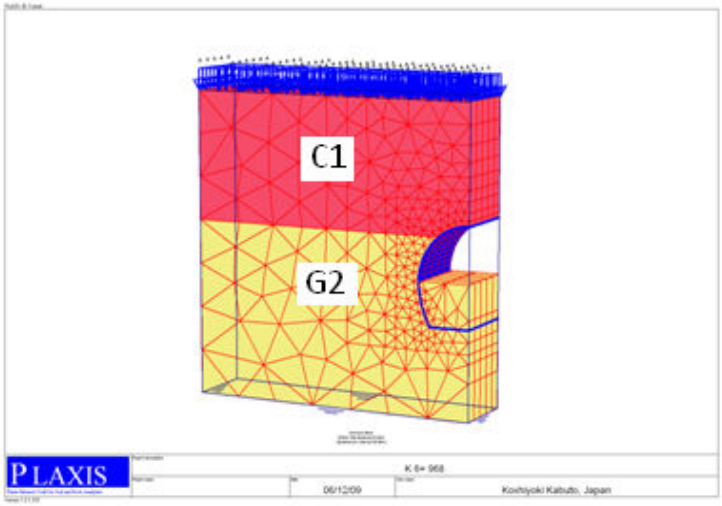

شکل ۶. نمودار میزان جاب‌جایی‌های اندازه‌گیری شده نسبت به جبهه حفاری فوقانی در ایستگاه ۶+۹۶۸

[ Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2025-12-07 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.1.4 ]




**شکل ۷. هندسه مدل عددی ساخته شده در نرم افزار Plaxis برای ایستگاه ۴+۵۷۱**




**شکل ۸. هندسه مدل عددی ساخته شده در نرم افزار Plaxis برای ایستگاه ۶+۹۶۸**

برای هر دو مدل ارائه شده ۲۵ متر عرض و ۲۶ متر ارتفاع در نظر گرفته شده و مش‌بندی مناطق نزدیک تونل فشرده‌تر از مناطق دورتر از تونل است. در این‌جا تحلیل مدل به صورت الاستیک انجام شده و همچنین برای مدل‌سازی رفتار الاستیک مصالح خاک از مدل رفتاری موهر-کولمب استفاده شده است. با توجه به محل استقرار تونل در زیر خیابان و سربار حاصل از عبور وسائل نقلیه، با ایجاد یک بار ۴۰ کیلونیوتنی در هر مترمربع به مدل‌سازی این نکته

[ Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2025-12-07 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.1.4 ]

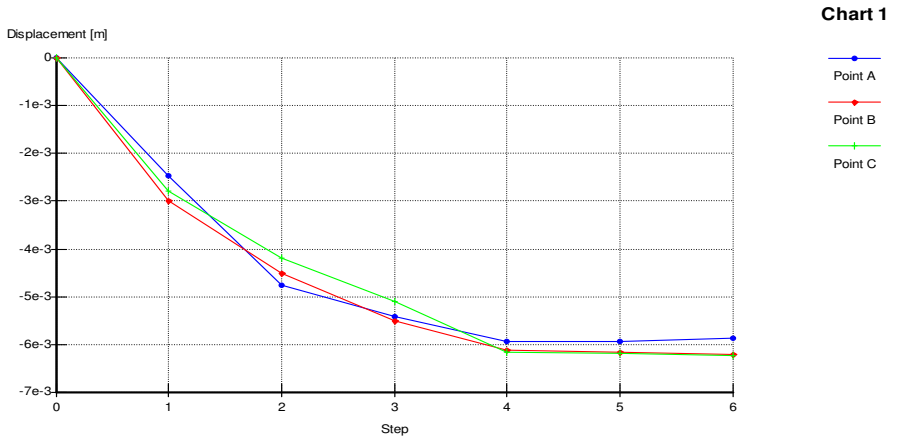
پرداخته شده است. در مدل شرایط مرزی با بستن جابه‌جایی افقی در مرزهای چپ و راست و بستن جابه‌جایی قائم در مرز پائینی اعمال شده است. بعد از تعادل اولیه مدل، حفر قسمت فوقانی تونل و نصب نگه‌داری اولیه انجام می‌گیرد. برای تحلیل برگشتی از داده‌های هم‌گرایی سنجی ایستگاه‌های ۵۷۱+۴ و ۹۶۸+۶ استفاده شد. در ایستگاه ۵۷۱+۴ حداکثر جابه‌جایی‌ها در دیواره و سقف تونل به ترتیب ۱۱/۹۰ و ۶/۲۳ میلی‌متر و در ایستگاه ۹۶۸+۶ حداکثر جابه‌جایی‌ها در دیواره و سقف تونل به ترتیب ۷/۹۲ و ۵/۱۲ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است [۲]. در ادامه با استفاده از روش تک متغیره متناوب میزان حداکثر جابه‌جایی‌های محاسبه شده در دیواره و سقف تونل برای ایستگاه ۵۷۱+۴ پس از ۶ مرحلهٔ تکرار مدل به‌ترتیب ۱۱/۸۷ و ۶/۲۰ (شکل۹)، و برای ایستگاه ۹۶۸+۶ حداکثر جابه‌جایی‌های محاسبه شده در دیوارهٔ و سقف تونل پس از ۷ مرحله تکرار مدل به‌ترتیب ۷/۸۰ و ۵/۲۰ است(شکل۱۰). با مقایسه میزان جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری شده توسط هم‌گرایی سنجی‌ها (اشکال ۳ الی ۶) و جابه‌جایی‌های محاسبه شده از روش عددی (شکل‌های ۹ و۱۰) در ایستگاه‌های ذکر شده، و نهایتاً با به حداقل رساندن تابع خطا و رسیدن به نقطه بهینه(که معرف کم‌ترین اختلاف میان جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه شده است) مقادیر مدول الاستیک، مدول پواسون، چسپندگی و زاویه اصطکاک داخلی با استفاده از الگوریتم تک متغیره متناوب برای لایه‌های C1، S1، S2 و G2 به دست آمدند که نتایج حاصل از آن در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است[۴].

همان گونه که در جداول ۲ و۳، مشاهده می‌شود، پارامترهای ژئومکانیکی بهینه تودهٔ خاک در برگیرنده تونل (پارامترهای E, υ, c, φ)، برای ایستگاه ۵۷۱+۴ پس از شش مرحله تحلیل برگشتی با خطای نسبی ۰/۱ درصد و برای ایستگاه ۹۶۸+۶ پس از هفت مرحله تحلیل برگشتی با خطای نسبی ۰/۲ درصد به‌دست آمدند که خطاهای نسبی به‌دست آمده از هر دو ایستگاه مقدار مناسبی برای تحلیل برگشتی هستند.

[ Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2025-12-07 ]

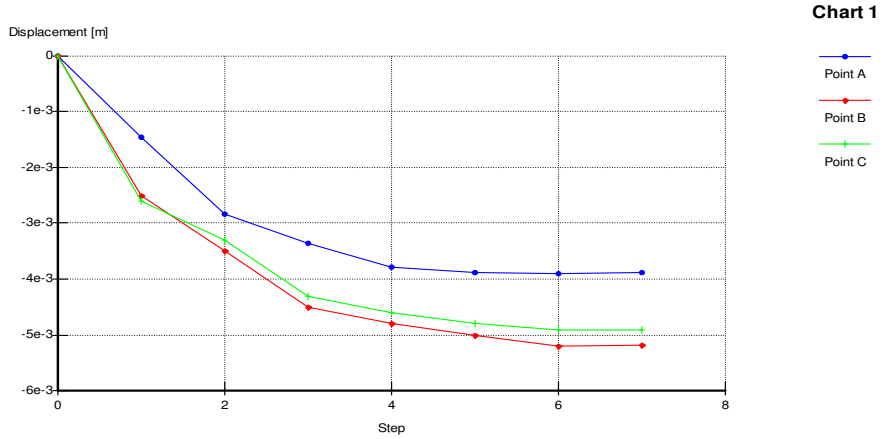
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.1.4 ]

A(US-UN)= ، جابه‌جایی دیوار B(U-US و C(U-UN) جابه‌جایی سقف




**شکل ۹. نمودار میزان جاب‌جایی‌های محاسبه شده دیوار و سقف تونل در ایستگاه ۴+۵۷۱ [۴]**

A(US-UN)= ،جابه‌جایی دیوار B(U-US) و C(U-UN)= جابه‌جایی سقف




**شکل ۱۰. نمودار میزان جاب‌جایی‌های محاسبه شده دیوار و سقف تونل در ایستگاه ۶+۹۶۸ [۴]**

[ Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2025-12-07 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.1.4 ]

**جدول ۲. مقادیر پارامترهای ژئومکانیکی برای لایه‌های S1 و S2 طی ۴ مرحله تکرار مدل در ایستگاه ۴+۵۷۱ [۴]**

| مرحله | لایه‌ها | مدول الاستیک E (MPa) | مدول پواسون υ | چسپندگی C kN/m$^2$ | زاویه اصطکاک داخلی φ | میزان خطا ٪ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | S1 | ۱۸ | ۰/۲۷ | ۲۷ | ۲۸ | ۵/۲ |
| | S2 | ۲۰ | ۰/۲۱ | ۳۰ | ۳۲ | |
| ۲ | S1 | ۲۸ | ۰/۲۸ | ۲۹ | ۲۹ | ۳/۳ |
| | S2 | ۳۰ | ۰/۲۳ | ۳۹ | ۳۴ | |
| ۳ | S1 | ۳۷ | ۰/۲۹ | ۳۲ | ۳۰ | ۲/۴ |
| | S2 | ۳۸ | ۰/۲۶ | ۴۶ | ۳۶ | |
| ۴ | S1 | ۴۰ | ۰/۳۰ | ۳۳ | ۳۰ | ۱/۲ |
| | S2 | ۴۵ | ۰/۲۸ | ۵۵ | ۳۸ | |
| ۵ | S1 | ۴۲ | ۰/۳۰ | ۳۴ | ۳۱ | ۰/۶ |
| | S2 | ۴۸ | ۰/۲۹ | ۵۷ | ۳۹ | |
| ۶ | S1 | ۴۳ | ۰/۳۰ | ۳۵ | ۳۱ | ۰/۱ |
| | S2 | ۴۹ | ۰/۳۰ | ۵۷ | ۴۰ | |

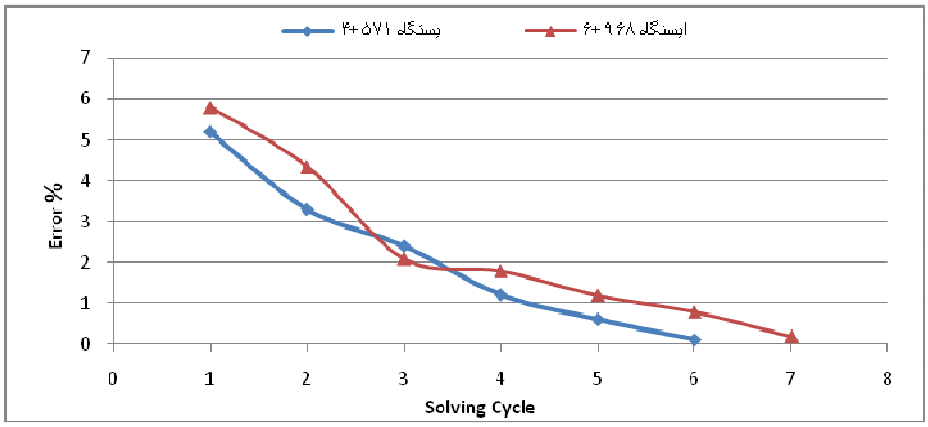
**جدول ۳. مقادیر پارامترهای ژئومکانیکی برای لایه‌های C1 و G2 طی ۵ مرحله تکرار مدل در ایستگاه ۶+۹۶۸ [۵]**

| مرحله | لایه‌ها | مدول الاستیک E (MPa) | مدول پواسون υ | چسپندگی C kN/m$^2$ | زاویه اصطکاک داخلی φ | میزان خطا ٪ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | C1 | ۱۵ | ۰/۲۵ | ۴۰ | ۲۲ | ۵/۸۰ |
| | G2 | ۳۵ | ۰/۲۵ | ۳۰ | ۳۵ | |
| ۲ | C1 | ۲۳ | ۰/۲۷ | ۴۱ | ۲۳ | ۴/۳۵ |
| | G2 | ۵۰ | ۰/۲۶ | ۳۵ | ۳۶ | |
| ۳ | C1 | ۲۷ | ۰/۲۸ | ۴۲ | ۲۴ | ۲/۱۰ |
| | G2 | ۶۵ | ۰/۲۷ | ۴۵ | ۳۷ | |
| ۴ | C1 | ۲۹ | ۰/۲۹ | ۴۳ | ۲۵ | ۱/۸۰ |
| | G2 | ۷۵ | ۰/۲۸ | ۴۸ | ۳۸ | |
| ۵ | C1 | ۳۰ | ۰/۳۰ | ۴۴ | ۲۵ | ۱/۲۰ |
| | G2 | ۸۲ | ۰/۲۹ | ۵۵ | ۳۹ | |
| ۶ | C1 | ۳۱ | ۰/۳۱ | ۴۵ | ۲۴ | ۰/۸ |
| | G2 | ۸۴ | ۰/۳۰ | ۵۷ | ۴۰ | |
| ۷ | C1 | ۳۱/۵۰ | ۰/۳۲ | ۴۵ | ۲۵ | ۰/۲ |
| | G2 | ۸۵ | ۰/۳۰ | ۵۸ | ۴۰ | |

[ Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2025-12-07 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.1.4 ]

نمودار شکل ۱۱روند تغییرات کاهش خطا با تکرار سیکل‌های تحلیل برگشتی را نشان می‌دهند. همان‌طور که از این شکل مشخص است، مدل شش بار برای ایستگاه ۴+۵۷۱ و هفت بار برای ایستگاه ۶+۹۶۸ در طول تحلیل برگشتی مورد نظر تکرار شده است تا به حداقل خطای ممکن برسد.




**شکل۱۱. نمودار کاهش خطا با افزایش تکرار اجرای مدل[۵]**

در حین عمل تحلیل عددی با نرم افزار به منظور برآورد پارامترهای ژئومکانیکی توده خاک در برگیرنده تونل که به روش تحلیل برگشتی و از نوع تک متغیره متناوب انجام شد، حساسیتی از طرف هر کدام از پارامترهای ذکر شده مبنی بر تغییر شکل یا جابه‌جایی سقف و دیواره تونل ملاحضه شد که منجر به افزایش خطا می‌شود. از این‌رو می‌توان این حساسیت را ناشی از اهمیت این پارامترها در تحلیل و طراحی تونل دانست.

## نقاط ضعف و قوت روش تحلیل برگشتی با استفاده از نرم افزار Tunnel Plaxis 3D

برای استفاده از روش تحلیل برگشتی که هدف آن، بررسی مجدد اطلاعات ورودی به مرحله طراحی و نیز بررسی کفایت روش‌های اولیه طراحی و ساخت از جنبه‌های اقتصادی و ایمنی است، توجه به نکات ذیل حائز اهمیت است:

[ Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2025-12-07 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.1.4 ]

۱- انتخاب مدل رفتاری مناسب جهت مدل‌سازی طرح: در تحلیل عادی، حداقل در مورد اطلاعات ورودی معین، نتیجه یک‌سانی به دست خواهد آمد. حتی در مواردی که که رفتار واقعی خاک با روش پیش بینی شده مدل یک‌سان نباشد، باز هم یک‌سان بودن نتیجه قطعی است. از طرف دیگر در تحلیل برگشتی نتیجه به‌دست آمده یک‌سان نخواهد بود، چرا که عمل مدل‌سازی پس از تعیین اطلاعات ورودی صورت می‌گیرد. لذا عمل مدل‌سازی در تحلیل برگشتی بسیار مشکل‌تر از مدل‌سازی در تحلیل عادی است. از این‌رو در این تحقیق برای مدل‌سازی رفتار الاستیک مصالح خاک از مدل موهر کولمب استفاده شده است. چرا که این مدل رفتاری با قابلیت مدل‌سازی اثر فشار همه جانبه تودهٔ خاک و سنگ روی سطح تسلیم و تغییر شکل‌های پلاستیک ایجاد شده، مدل مناسبی جهت ارزیابی محسوب می‌شود. و چنانچه مدل‌سازی فرض شده برای توده خاک متفاوت با واقعیت باشد، نتایج به‌دست آمده برخلاف روش تحلیل عادی، یک‌سان نخواهد بود.

۲- توجه به خطاهای محاسباتی متداول در نرم افزارهای محاسبات عددی: از آن‌جایی که خطاهای محاسباتی توسط نرم افزارهای عددی منجر به ایجاد خطا در خروجی‌ها خواهد شد، لذا در هر مدل‌سازی بایستی از نرم افزارهایی استفاده کرد تا پاسخ‌گوی نیازمندی‌های طرح بوده و عدم دقت‌ها را کاهش دهد. از اینرو در این تحقیق از نرم افزار عددی PLAXIS 3D TUNNEL که یکی از نرم افزارهای اجزای محدود پیشرفته برای آنالیز دگرشکلی و پایداری تونل است، به کارگرفته شده است.

۳- توجه به خطاهای ناشی از اندازه‌گیری ابزارهای دقیق (هم‌گرایی سنجی‌ها): از آن‌جایی که روش تحلیل برگشتی بر پایه اطلاعات ابزار دقیق (هم‌گرایی سنجی) استوار است دقت در قرائت ابزارهای دقیق حایز اهمیت است. بنا بر این در صورتی که اطلاعات انتشار یافته از طرف مشاور طرح دچار نقص و خطا باشد نتیجه آن مسلماً چیزی بجزء خطا در مراحل مختلف تحلیل برگشتی نخواهد بود و در صورت عدم وجود خطا در داده‌های حاصل از ابزار دقیق (هم‌گرایی سنجی)، تحلیل برگشتی به درستی انجام

[ Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2025-12-07 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.1.4 ]

گرفته که نتیجه آن برآورده شدن اهداف رفتارسنجی تونل یعنی اصلاح و بهینه‌سازی طرح حفاری‌ها و یا سیستم نگهداری موقت و دائم تونل خواهد بود.

## نتیجه‌گیری

در این مقاله تحلیل برگشتی با روش تک متغیره متناوب با استفاده از نرم افزار Tunnel Plaxis 3D برای تونل متروی کرج-خط ۲ قطعه اول انجام گرفت و پارامترهای اصلی طراحی تونل یعنی مدول الاستسیته، مدول پوآسون، چسپندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک تعیین گردید. این کار به کمک داده‌های ابزار دقیق و پس از شش و هفت مرحله تکرار مدل بترتیب برای ایستگاه‌های ۵۷۱+۴ و ۹۶۸+۶ برای به حداقل رساندن خطا انجام شد. نتایج نشان داد که پارامترهای مذکور با پارامترهای ژئومکانیکی که در مدل‌سازی اولیه استفاده شدند، متفاوت است. در نتیجه مدل‌ها به کمک داده‌های حاصل از تحلیل برگشتی کالیبره شده‌اند و آماده طراحی و اجرای مراحل دیگر تحلیل پایداری هستند. همچنین، از آن‌جایی که شناخت و برآورد دقیق پارامترهای اصلی طراحی تونل، جهت انجام صرفه‌جویی در وقت، بهینه‌سازی و دقت در امر طراحی و ساخت تونل حائز اهمیت است، آنالیز حساسیت برای اطمینان از صحت کار توصیه می‌شود.

## منابع


۱. سازمان قطارشهری کرج و حومه، گزارش ا جرای عملیات ساختمانی قطعه اول قطار شهری کرج(۱۳۸۴).

۲. خسرو تاش، مهران; تسکین دوست،مسعود; کشفی، مجتبی، گزارش تفصیلی رفتار سنجی در حین احداث تونل قطعه اول خط ۲ متروی کرج و حومه، مهندسین مشاور تونل راد، ش۴(۱۳۸۶).

۳. مهندسان مشاور دریا خاک پی، خرداد، گزارش نهایی پژوهش‌های ژئوتکنیک قطعه دوم مسیر مصوب مترو کرج و حومه(۱۳۸۴).

۴. دهقان، علی نقی، تحلیل و طراحی سه بعدی تونل خط ۲ متروی کرج بر مبنای نتایج ابزار دقیق و الگوریتم تحلیل برگشتی. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم و تحقیقات تهران (۱۳۸۸).


[ Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2025-12-07 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.1.4 ]

۵. زرنگ زاده، سید صدرالدین، بررسی خصوصیات مهندسی آبرفت کرج و تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی خاک به منظور احداث پروژه خط۲ متروی کرج. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم و تحقیقات تهران (۱۳۸۷).

6. Brinkgreve, R.B.J., & Vermeer, P.A., Plaxis Finite Element Code for Soil and Rock Analyses. A.A. Balkema, Rotterdam (2001) 90.

7. Brinkgreve R.B.J., Vermeer P.A. 2001, Plaxis 3D Tunnel (Tutorial manual). Balkema, Lisse, 110 P.

8. Brinkgreve, R.B.J., User manual PLAXIS, Finite Element Code for Soil and Rock Analyses V8 (2002) 420 P.

9. Brinkgreve, R.B.J., & Broere, W., Waterman, D., Plaxis Manual, Version 8, Delft University of Technology & PLAXIS b.v., The Netherlands (2004)144 P.

10. Feng, X.T. Zhang, Z. Sheng, Q. Estimating mechanical rock mass parameters relating to the three Gorges Project Permanent Ship lock using an intelligent back analysis method. Int j of rockMech and Min Sci37. (2000) PP 1039-1054.

11. Jeon, Y.S and Yang, H.S.; “Development of a back analysis algorithm using flac” , Int J of Rock Mech. & Mining Sci. Vol. 41, No.3 (2004).

12. Karakus, M., Fowell, R.J., “Back analysis for tunnelling induced ground movements and stress redistribution”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.20 (2005) 514524.

13. Sakourai, S., Back analysis in rock engineering. In Porc, Comprehensive Rockengineering. (edited by John A.Hadson), Vo14,chap19.pp.453-569. Pergamon Press, London (1993).

[ Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2025-12-07 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.1.4 ]

14. Shang.Y., Intelligent back analysis of displacement using precedent type analysis for Tunneling. Chinese academy of Science Tunnelling and Underground technology, pergamon (2002).

15. Zang, L. Yang, Z. Displacment- based back analysis method for rock mass modulus and horizontal in situ stress in tunneling-illustrated with a case study Chinese Academy of Science. Elsevier (2006).

[ Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2025-12-07 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.1.4 ]