Archive of SID

سومین کنفرانس سالانه پژوهش های معاری، شهرسازی و مدیریت شهری
The third annual conference for research in architecture,urban planning and urban management

تاثیر آنالیز برگشتی در تحلیل تونل‌ها

حمیدرضا شیخ انصاری، محمدصادق سبط الشیخ انصاری

1_ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک تهران مرکزی hamidrezasansari@gmail.com
2_ معاون فناوری پارک علم و فناوری البرز msadegh.ansari@yahoo.com

چکیده

استفاده از رفتارسنجی و نتایج ابزار دقیق اطراف مقاطع حفاری در آنالیز برگشتی باعث می‌شود تا پارامترهای اولیه به صورت دقیق بدست آمده و تحلیل درستی از مدلسازی انجام شده داشته باشیم. لذا عدم دسترسی و دستیابی مهندسین و دست اندرکاران حوزه شهری در صنعت تونل‌سازی و فضاهای زیرزمینی به مطالعات اولیه دقیق ژئوتکنیکی و ژئومکانیکی باعث می شود تا دقت کافی برای انجام تحلیل‌های ضروری انجام نشود و متحمل هزینه‌های زیاد انسانی و اقتصادی در این زمینه گردیم. در این مقاله سعی شده تا با تعریف اولیه آنالیز برگشتی لزوم استفاده از آن با چند مثال بیان گردد.

کلمات کلیدی: آنالیز برگشتی، تونل، ابزار دقیق، ژئوتکنیک

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

تعیین خواص ژئومکانیکی برجای خاک و سنگ یکی از مشکل‌ترین بخش‌های طراحی سازه‌های زیرزمینی است. آنالیز برگشتی تکنیک مفیدی برای ارزیابی این خواص با تکیه بر اندازه گیری‌های صورت گرفته بر روی همگرائی اطراف یک فضای زیرزمینی است [12].

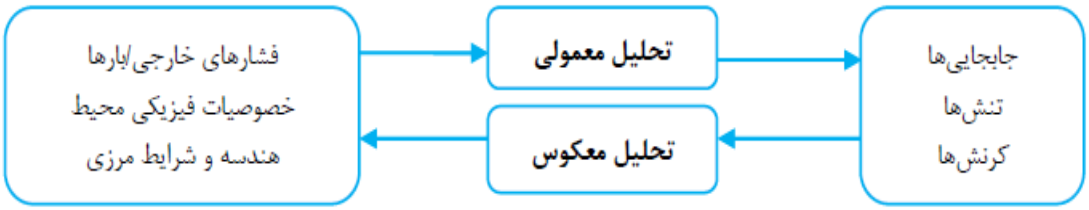
هدف از آنالیز برگشتی، کالیبراسیون تخمین‌های اولیه از پارامترهای ژئومکانیکی از روی جابجایی‌ها و بارهای اندازه‌گیری شده با استفاده از مدل‌های عددی است. برای انجام یک آنالیز برگشتی ملزومات ذیل باید انتخاب شوند [12,13]:

* یک مدل محاسباتی مناسب که قادر باشد تنش‌ها و کرنش‌های موجود در توده سنگ را همگام با پیشروی فازهای حفاری تعیین کند.
* تابع خطا
* الگوریتمی برای کاهش خطا (تفاضل) موجود بین نتایج حاصل از محاسبات مدل عددی و داده‌های اندازه گیری شده بر جا.

لزوم ارائه روش‌های دقیق آنالیز مقاطع حفاری شده در بررسی وضعیت نگهدارنده‌های موقت و طراحی نگهدارنده‌های دائم برای مقاطع زیرزمینی کاملاً مشهود است .با بهینه‌سازی نگهدارنده‌های موقت و به تعادل رساندن محیط پس از حفاری، دیگر نیازی به طراحی پوشش‌های دائمی پرهزینه نخواهد بود و صرفاً با توجه به کاربری سازه اقدام به اعمال نگهدارنده دائمی صورت خواهد گرفت و این امر در صرف جویی هزینه طرح‌های عمرانی و معدنی بزرگ کاملاً قابل توجه و مفید خواهد بود.

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[11].

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. رابطه بین تحلیل برگشتی معکوس و روش تحلیل عادی را میتوان در شکل 1 مشاهده نمود[6,7].



شکل1 _ رابطه بین روش تحلیل معمول و تحلیل برگشتی[15]

www.SID.ir

Archive of SID

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 گزاره 1 نشان داده شده است[8,9,10,11].

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

نتایج طراحی‌های انجام شده بوسیله ابزار دقیق در حین حفر تونل و مترو مورد بررسی قرار گرفته و کاستی‌های آن اصلاح میشود. در این مرحله عمده اهداف از نظر پایداری میباشد. ابتدا تشخیص پایداری فضای زیرزمین و تهیه داده‌های لازم برکنترل کیفیت اجرا میباشد که پس ازآن تایید یا اصلاح رفتارهای مختلف برای توده خاک و یا سنگ با توجه به نوع ژئوتکنیک منطقه احداث است. باید دقت کرد که اغلب میتوان نتایج ارزشمندی را از چگونگی واکنش زمین با استفاده از مشاهدات عینی و اطلاعاتی که بوسیله ابزار دقیق ثبت میشود را بدست آورد. اطلاعاتی که در عملیات زیرزمینی معمولا باید ثبت شوند عبارتند از [5]:

*نشر لرزه‌ها و ریز لرزه‌ها
*جابجایی‌ها و نسبت‌های سطح زمین
*تغییرات تنش نرمال در نقطه‌ای در داخل زمین
*حرکت در امتداد یا در عرض یک درز یا شکستگی منفرد
*جابجایی یا همگرایی نسبی دو نقطه در مرز یک فضای حفاری شده
*تغییرات بار وارده بر سیستم نگهداری همچون شمع‌ها ،پیچ سنگ‌ها، بتن

در زمینه تاثیر آنالیز برگشتی در تونل‌ها نمونه‌های فراوانی میتوان بیان نمود که از جمله آن‌ها میتوان به:

1_ تونل راه‌آهن زرقان شیراز

2_ تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی خط 2 مترو کرج

3_ استفاده از تحلیل برگشتی در تخمین پارامترهای خاک در پروژه تونل‌های بزرگراه رسالت

4_ تحلیل پایداری پایه سنگی بین مغار نیروگاه و گالری شیرهای ورودی در نیروگاه آبی کارون

www.SID.ir

Archive of SID

تونل راه‌آهن زرقان شیراز

تونل هفتم قطعه 22 راه آهن اصفهان _ شیراز (تونل زرقان شیراز) به طول تونل 1295 متر در فاصلهٔ حدود 20 کیلومتری شمال _ شمال شرق شیراز و در قسمت شرقی کوه آصف و به فاصلهٔ کمتر از 2 کیلومتر در غرب اتوبان شیراز _ مرودشت واقع است که شمای آن در شکل شماره 3 نشان داده شده است[3] .

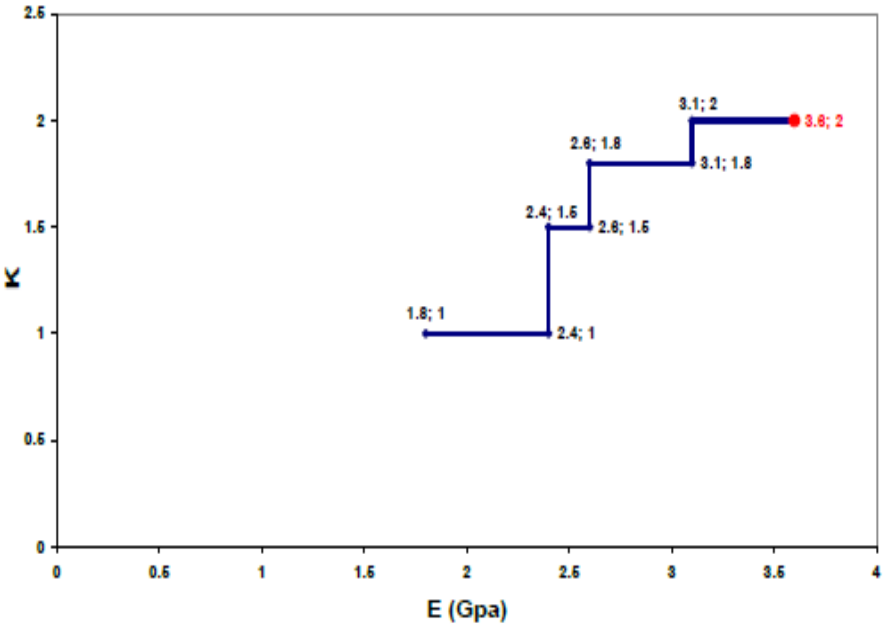
برای تحلیل برگشتی تونل راه FLAC در این مقاله، الگوریتم روش تک متغیره با استفاده از نرم افزار و (E) آهن زرقان شیراز مورد استفاده قرار گرفت و پارامترهای اصلی طراحی یعنی مدول الاستیسیته تعیین شدند. به کمک داده‌های ابزار دقیق و پس از هشت بار تکرار مدل، (K) نسبت تنش افقی به قائم تابع خطای تعریف شده به حداقل رسید. نتایج نشان داد که پارامترهای مذکور با آنچه که توسط شرکت مشاور ارائه شده بود متفاوت است که روند تحلیل برگشتی آن در شکل 2 نشان داده شده است. در نتیجه مدل کالیبره شده است و آماده طراحی و اجرای مراحل دیگر تحلیل پایداری میباشد[3].

شمارهٔ اجرا	E (GPa)	K= σh / σv	خطا (mm)
۱	۱/۸	۱	۵/۹۵
۲	۲/۴	۱	۵/۶۸
۳	۲/۴	۱/۵	۲/۳۴
۴	۲/۶	۱/۵	۲/۳۲
۵	۲/۶	۱/۸	۱/۶۸
۶	۳/۱	۱/۸	۱/۴۴
۷	۳/۱	۲	۱/۲۹
۸	۳/۶	۲	۱/۱۲

جدول 1 _ نتایج تحلیل برگشتی پارامترهای E و K [16]

www.SID.ir

Archive of SID



شکل2 _ روند تحلیل برگشتی انجام شده در ایستگاه S17 [16]

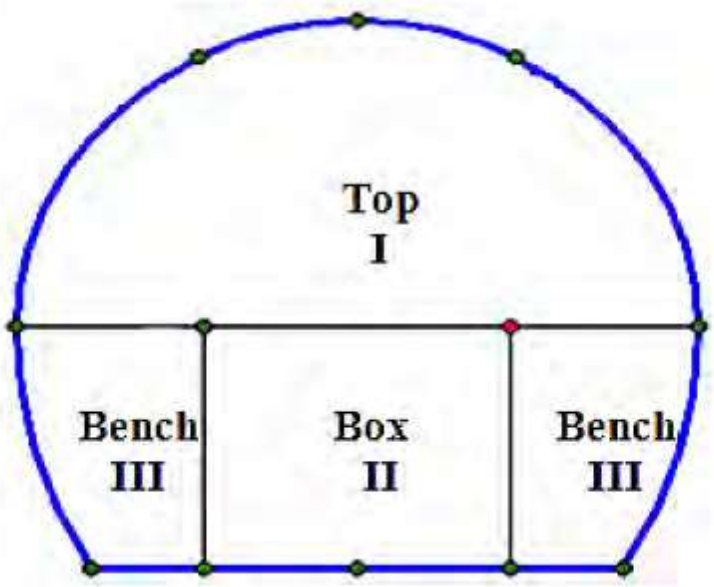
شکل3 _ تونل زرقان شیراز

www.SID.ir

Archive of SID

پارامترهای ژئوتکنیکی خط 2 مترو کرج

مسیر خط 2 متروی کرج (شکل 5) به طول 28 کیلومتر از منطقه کمال‌شهر شروع شده و پس از عبور از خیابان شهید بهشتی (قزوین سابق) وطالقانی جنوبی، و امتداد تا میدان امام حسین، به سمت ایستگاه مترو کرج _ صادقیه گسترش یافته و سپس تا منطقه ملارد ادامه می یابد که مقطع عرضی این تونل در شکل 4 قابل مشاهده است[1,2].



شکل 4 _ مقطع عرضی تونل و ترتیب بخش های مختلف حفاری آن [17]

جهت تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی بهینه تونل مترو خط 2 کرج از نرم افزار FLAC استفاده شده است. با توجه به داده‌های مدل ساخته شده توسط آنالیز بازگشتی و با استفاده از ابزار دقیق با کمترین خطا، مقادیر پارامترهای بهینه به صورت نسبت تنش‌ها 0.5، زاویه اصطکاک داخلی 30 درجه و ضریب پواسون 0.3 بدست آمد. لذا نتایج حاصل از تحلیل عددی صورت گرفته نشان می‌دهد که پارامترهای محاسبه شده توسط این تحلیل درصد قابل قبولی به پارامترهای واقعی منطقه نزدیک میباشد. لذا میتوان از تحلیل برگشتی به عنوان راهکاری کم‌هزینه در تحلیل داده رفتارنگاری و محاسبه داده‌های ژئوتکنیکی بهینه نام برد[2].

www.SID.ir

Archive of SID

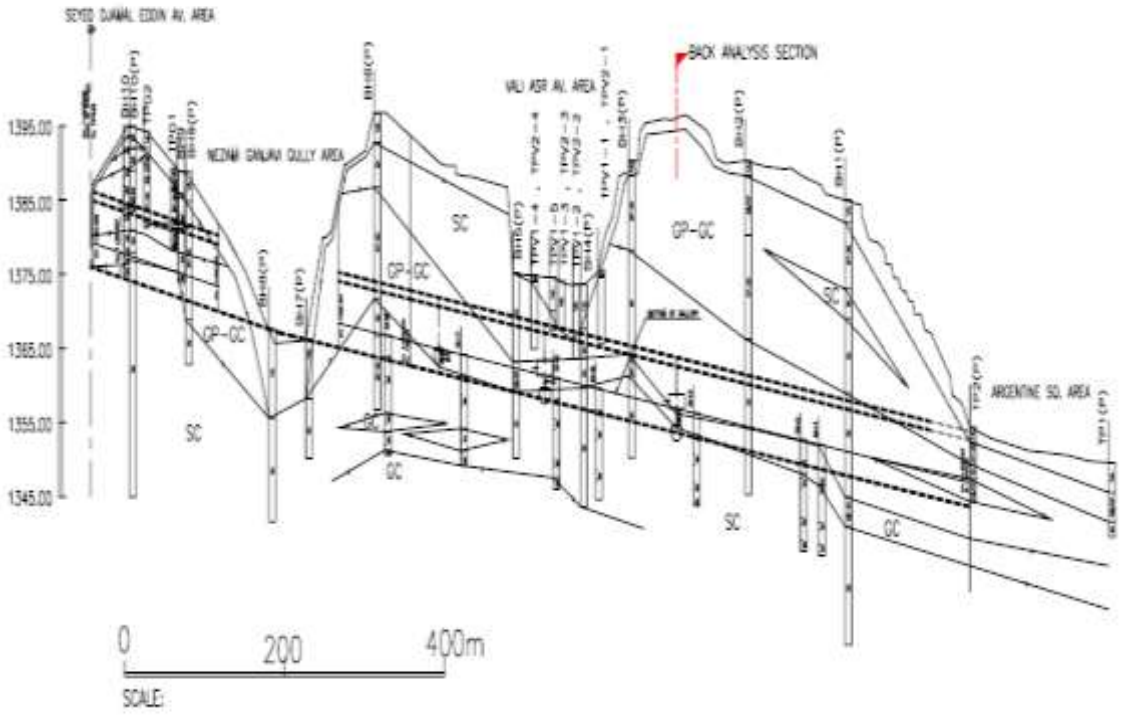
شکل5 _ نمایی از مراحل نگهداری و مقطع تونل بعد از بتن ریزی نهایی در تونل خط 2 مترو کرج [2]

تونل های بزرگراه رسالت

تونل‌های بزرگراه رسالت شامل دو تونل موازی به قطر حفاری بالغ بر 16.5 متر میباشد که با فاصله‌ای کمتر از 3.5 متر از یکدیگر قرار گرفته و در تهران میباشند که پروفیل طولی آن در شکل 6 نشان داده شده است. به موازات بازنگری مطالعات و طراحی‌ها و انجام آزمایش‌های تکمیلی ژئوتکنیک، نتایج همگرایی سنجی‌های انجام شده در مراحل حفر گالری‌های جانبی تونل شمالی از نقطه نظر مطرح شده، مورد توجه قرار گرفت. این اطلاعات شامل همگرایی سنجی هر یک از گالری‌ها طی از سطح زمین (Extensometer) حفاری و تأثیر حفر گالری مجاور بر روی گالری اول و کشیدگی‌سنجی تا تاج گالری میباشد.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل6 _ پروفیل طولی تونل‌های بزرگراه رسالت [14]

همچنین چسبندگی اندازه‌گیری شده در تحلیل برگشتی کمتر از نتایج آزمایشات برجا در این مقطع میباشد. علت این مسئله را میتوان در عوامل زیر جستجو نمود:

* اثر مقیاس بزرگتر در تحلیل برگشتی نسبت به آزمایشات برجا

* تاثیر رطوبت و اشباع بودن برخی نقاط در اطراف تونل و رفتار نیمه زهکشی خاک در این نواحی

* پائین بودن مدول ارتجاعی واقعی در نواحی زیر پی پوشش اولیه که در رژیم بارگذاری قرار دارند نسبت به مدول ارتجاعی متوسط فرض شده باعث آن گردیده است که با کاهش مقاومت خاک این تقریب جبران گردد

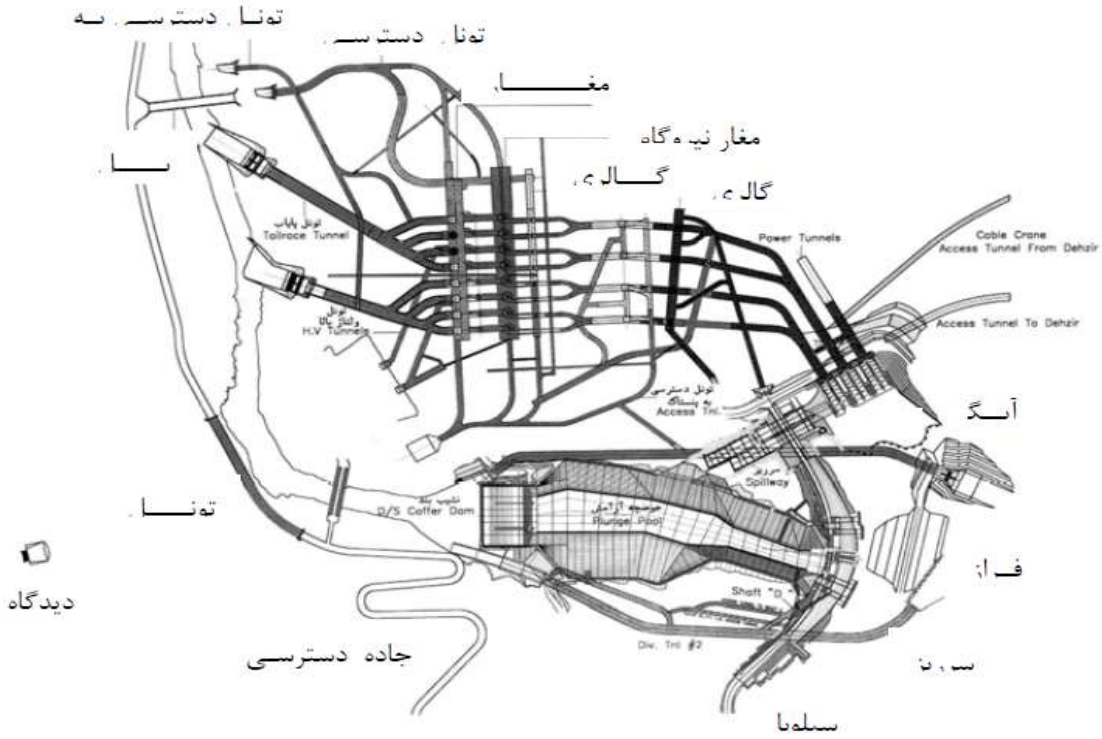
* تاثیر زمان و خزش در خاک در دوره اندازه‌گیری که در نتایج تحلیل برگشتی مستتر است.
* ساده بودن مدل رفتاری بکار رفته نسبت به رفتار واقعی خاک.
* تقریب در محاسبه باربری پی پوشش‌ها بدلیل ابعاد شبکه محاسباتی.

www.SID.ir

Archive of SID

سد و نیروگاه کارون 3

سد و نیروگاه برق آبی کارون 3 در جنوب غربی ایران، در استان خوزستان بر روی رودخانه کارون واقع و در حال احداث میباشد. این نیروگاه شامل 8 توربین 250 مگاواتی و قابل توسعه به3000 مگاوات است. مجموعه نیروگاه در ساحل راست رودخانه کارون در نزدیکی تونل انحراف آب شماره یک قرار گرفته است. شکل 7 شمایی از جانمایی سد و مجموعه فضاهای زیرزمینی این نیروگاه را نشان می‌دهد. نیروگاه برق آبی کارون 3 دارای یک مغار اصلی نیروگاه و یک گالری بزرگ در فاصله 20 متری بالادست آن به منظور نصب شیرهای ورودی میباشد.



شکل7 _ جانمایی سد و مجموعه فضاهای زیرزمینی [18]

بر مبنای نتایج حاصله از این ابزاربندی و ابزارهای موجود در طرح تحلیل برگشتی و تحلیل مستقیم عددیکه در جدول شماره 2 ملاحظه می گردد، فضا اجرا شد ابزاربندی سیستماتیک موجود، جابجایی‌هایی را نشان داد که انگیزه بررسی بیشتر و دقیق‌تر پایداری پایه توسط یک برنامه ابزاربندی و تحلیل پایداری خاص شد. نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که بخش‌هایی از پایه کرنش نسبتا زیادی را متحمل شده و در این بخش‌ها نصب نگهداری بیشتر توصیه میشود.

www.SID.ir

Archive of SID

پارامتر	مقادیر اولیه	مقادیر محاسبه شده
مدول یانگ توده سنگ	۵ – ۱۵ گیگاپاسکال	۵/۵ گیگاپاسکال
ضریب پواسون توده سنگ	۰/۲ تا ۰/۳	۰/۳
نسبت تنش افقی به قائم	----	۰/۵
مقدار تنش اصلی بزرگتر	----	ثقلی
زاویه تنش اصلی بزرگتر با خط قائم	----	۱۵ درجه
مدول برشی	۳/۲ تا ۸/۰ گیگاپاسکال	۳/۸ گیگاپاسکال
مدول حجمی	۵/۳ تا ۱۳/۳ گیگاپاسکال	۸/۳ گیگاپاسکال
مدول یانگ	۱۰ تا ۲۰ گیگاپاسکال	۱۰ گیگاپاسکال
ضریب پواسون	۰/۲ تا ۰/۳	۰/۳
سختی عمودی سطح درزه‌ها	۳/۲ گیگاپاسکال بر متر	۱/۶ گیگاپاسکال بر متر
سختی برشی سطح درزه‌ها	۰/۸ تا ۱/۲ گیگاپاسکال بر متر	۰/۵ گیگاپاسکال بر متر
زاویه اصطکاک سطح درزه‌ها	۳۰ تا ۴۵ درجه	۲۵ درجه

جدول2 _ پارامترهای ژئومکانیکی سنگ و درزه ها [18]

نتیجه گیری

* با معرفی آنالیز برگشتی دید خوبی نسبت به پارامترهای اصلی ژئوتکنیکی و ژئومکانیکی از جمله چسبندگی، مدول الاستیسیته و ... در طی مراحل ساخت یک تونل مشاهده گردید.

* تاثیر و لزوم استفاده از آنالیز برگشتی در انواع تونل ها نشان داد که این نوع تحلیل از بسیاری جهات مخصوصا از لحاظ اقتصادی بسیار مفید میباشد.

مراجع

1_ سابیر، خلاصه گزارش پروژه قطار شهری کرج و حومه، 1388.

2_ صفی صمغ آبادی, رضا، ۱۳۹۰، تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی خاک تونل متروی خط 2 کرج با استفاده از آنالیز برگشتی، نهمین همایش ملی تونل، تهران، انجمن تونل ایران، http://www.civilica.com/Paper-ITC09-ITC09_021.html

3_ انفرادی, نیما و کورش شهریار، ۱۳۸۶، برآورد پارامترهای اصلی طراحی تونل با استفاده از الگوریتم تحلیل برگشتی (تونل راه آهن زرقان شیراز)، سومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، http://www.civilica.com/Paper-IRMC03-IRMC03_052.html

4_انفرادی، نیما، بررسی نتایج ابزار دقیق و تحلیل برگشتی تونل زرقان شیراز و ارائهٔ طرح نگهداری موقت، پایان نامه کارشناسی ارشد استخراج معدن، دانشکده معدن و متالوژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

www.SID.ir

Archive of SID

5_ مقصودی, علیرضا؛ بهزاد کلانتری و محسن خانی زاده بهابادی، ۱۳۹۲، بررسی عملکرد ابزار دقیق در تونلها و متروها، اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک، اردبیل، دانشگاه محقق اردبیلی، http://www.civilica.com/Paper-GEOTEC01-GEOTEC01_616.html

6_ Karakus, M., and R. J. Fowell. "Back analysis for tunnelling induced ground movements and stress redistribution." Tunnelling and Underground Space Technology 20.6 (2005): 514-524.

7_ Sakurai, S. "Back analysis in rock engineering, Comprehensive rock engineering (, Hudson JA, et al..), 543–569." (1993).

8_ Zhang, L. Q., et al. "A 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 (2006): 636-649.

9_ Jeon, Y. S., and H. S. Yang. "Development of a back analysis algorithm using FLAC." International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 41 (2004): 447-453.

10_ Shang, Y. J., et al. "Intelligent back analysis of displacements using precedent type analysis for tunneling." Tunnelling and underground space technology 17.4 (2002): 381-389.

11_ دهقان, علی نقی، ۱۳۹۲، انتخاب طرح مناسب سامانهی نگهداری اولیهی تونل متروی کرج بر مبنای نتایج ابزاردقیق و الگوریتم تحلیل برگشتی، فصلنامه مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی 2 (1)، http://www.civilica.com/Paper-JR_TUSE-JR_TUSE-2-1_006.html

12_ موسوی, مهدی و محمدتقی همزبان قراملکی، ۱۳۸۵، آنالیز برگشتی جهت تحلیل رفتار زون رسی در تونل پردیس، هفتمین کنفرانس تونل ایران، تهران، انجمن تونل ایران، دانشگاه شریف، http://www.civilica.com/Paper-ITC07-ITC07_034.html

13_ Oreste, Pierpaolo. "Back-analysis techniques for the improvement of the understanding of rock in underground constructions." Tunnelling and Underground Space Technology 20.1 (2005): 7-21.

14_ صالحی, داود و احمدعلی فخیمی، ۱۳۸۲، استفاده از تحلیل برگشتـــی در تخمین پارامترهای خاک در پروژه تونلهای بزرگراه رسالت، ششمین کنفرانس تونل ایران، تهران، دانشگاه علم و صنعت، عمران، http://www.civilica.com/Paper-ITC06-ITC06_02.html

15_ Swoboda, G. "Finite element analysis of the new austrian tunnelling method (NATM)." Proceedings of the 3rd International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Aachen. Vol. 2. 1979.

16_ انفرادی، نیما، بررسی نتایج ابزار دقیق و تحلیل برگشتی تونل زرقان شیراز و ارائهٔ طرح نگهداری موقت، پایان نامه.

17_ دهقان، ع. ن. تحلیل و طراحی سه‌بعدی تونل خط ۲ متروی کرج بر مبنای نتایج ابزار دقیق و الگوریتم تحلیل برگشتی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، ۱۳۸۸.

18_ جعفری, احمد؛ مهدی موسوی و رضا مسعودی، ۱۳۸۰، تحلیل پایداری پایه سنگی بین مغار نیروگاه و گالری شیرهای ورودی در نیروگاه آبی کارون3، پنجمین کنفرانس تونل ایران، تهران، دانشگاه تهران، فنی، http://www.civilica.com/Paper-ITC05-028_8551632982.html

www.SID.ir

Archive of SID

www.SID.ir