راستی‌سنجی داده‌های ژئوتکنیکی تونل راه آهن قزوین ـ رشت با استفاده از تحلیل برگشتی داده‌های ابزاربندی

*کامبیز هدایت نسب، احمد ادیب؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب
کامران گشتاسبی، مسعود منجزی؛
دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی مهندسی

تاریخ: دریافت ۹۰/۹/۱۶ پذیرش ۹۱/۱۰/۳

چکیده

انواع مختلفی از تحلیل‌های عددی مانند روش عناصر محدود، روش عناصر مرزی و روش عناصر مجزا در مکانیک سنگ و در کارهای مهندسی برای طراحی سازه‌های سنگی مانند تونل‌ها، حفریات زیرزمینی، شیب‌ها، فونداسیون سد و ... استفاده می‌شوند. در این مقاله، نتایج حاصل از تحلیل برگشتی تونل کوهین واقع در قطعهٔ اول راه آهن قزوین ـ رشت ارائه شده است. هدف اصلی این پژوهش اجرای تحلیل برگشتی تونل یادشده با استفاده از مدل‌های عددی است. برای مدل‌سازی تونل ۲ مقطع مختلف با استفاده از نرم‌افزار Flac 2D تحلیل شده است، که شامل مقاطع ۱۵۰+۳۰و ۹۰۰+۳۰ هستند. برای انجام تحلیل برگشتی، بازهٔ مناسب برای پارامترهای ژئومکانیکی با توجه به آزمایش‌های انجام شده بر روی مغزه‌ها، تعیین شد. با استفاده از روش مستقیم تحلیل برگشتی، خطاهای به‌دست آمده از مدل‌ها در چندین مرحله تصحیح و در نهایت پارامترهای ژئومکانیکی کنترلی در ایستگاه اندازه‌گیری ۱۵۰+۳۰ به‌صورت E = 0.3 GPa (مدول الاستیسیته)، C = 0.21 MPa (مقاومت چسبندگی) و $\varphi = 34^{\circ}$ (زاویهٔ اصطکاک داخلی) و در ایستگاه اندازه‌گیری ۹۰۰+۳۰ به‌صورت E= 0.3 GPa (مدول الاستیسیته)، C= 0.21 MPa (مقاومت چسبندگی) و $\varphi = 35^{\circ}$ (زاویهٔ اصطکاک داخلی) به‌دست آمده است. پارامترهای ژئومکانیکی به‌دست آمده از تحلیل برگشتی، کاملاً در بازهٔ در نظر گرفته شده قرار گرفته است و با نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده بر روی مغزه‌ها، مطابقت دارند. بر این اساس و با توجه به تطابق پارامترهای ژئومکانیکی به‌دست آمده از تحلیل برگشتی با پارامترهای استفاده شده در طراحی تونل، طراحی تونل و روش ساخت آن تأیید شد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل برگشتی، تونل راه آهن قزوین ـ رشت، ابزاربندی، نرم‌افزار Flac 2D، پارامترهای ژئومکانیکی

*نویسنده مسئول kambiz_zzzz@gmail.com

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.8.7]

مقدمه

اغلب به‌دست آوردن مشخصات ژئوتکنیکی کامل زمین با اکتشافات ژئوفیزیکی و ژئوتکنیکی غیرممکن است و تنها در هنگام حفر تونل است که می‌توان رفتار تودۀ سنگ را به‌طور کامل ارزیابی کرد. کاربرد ابزارهای رفتارنگاری[۱] با افزایش دقت، قابلیت اعتماد و پایداری آن‌ها گسترش یافته است. اعتبار و قابلیت اطمینان پیش‌گویی به‌طور کامل به‌درستی و دقت داده‌های ورودی در تحلیل بستگی دارد [۲]. در حیطۀ سازه‌های زیرزمینی، اندازه‌گیری‌های صورت گرفته بسته به‌خصوصیات مسئله، با هدف تعیین یکی از پارامترهای کرنش‌ها، جابه‌جایی نسبی، تنش در توده سنگ یا پوشش نگه‌داری، فشار تولید شده در قاب‌های فولادی، نیروی گسترش یافته در میل مهارها[۲] و فشار منفذی انجام می‌شوند [۳]. معمولاً تمایل زیادی برای تعیین جابه‌جایی‌ها (مثلاً هم‌گرایی دیواره‌ها) وجود دارد. زیرا از دید ریاضی پارامترهای جابه‌جایی از عوامل محلی تأثیر کم‌تری می‌پذیرند. برای تعیین مقادیر معرف این پارامترها، ضروری است مقدار متوسط آن‌ها را از روی مجموعه داده‌هایی که به اندازۀ کافی بزرگ هستند، تعیین کرد.به‌منظور غلبه بر این مشکل، اندازه‌گیری‌های میدانی در طول احداث سازه‌ها انجام می‌شود. این اندازه‌گیری‌ها نه فقط برای نشان دادن پایداری سازه‌ها، بلکه برای ارزیابی مجدد داده‌های ورودی پارامترهای ژئومکانیکی و زمین‌شناسی که در تحلیل و طراحی استفاده می‌شوند انجام می‌گیرد [۲].

منطقۀ بررسی شده واقع در قطعۀ اول از راه آهن قزوین ـ رشت در ناحیه کوهین است. این تونل با یک گالری ۱۰۰متری در بخش ورودی و یک گالری ۱۰متری در قسمت خروجی، طولی معادل ۱۶۳۵ متر دارد. عرض این تونل ۱۳ متر و ارتفاع آن حدود ۷ متر است (شکل ۱).

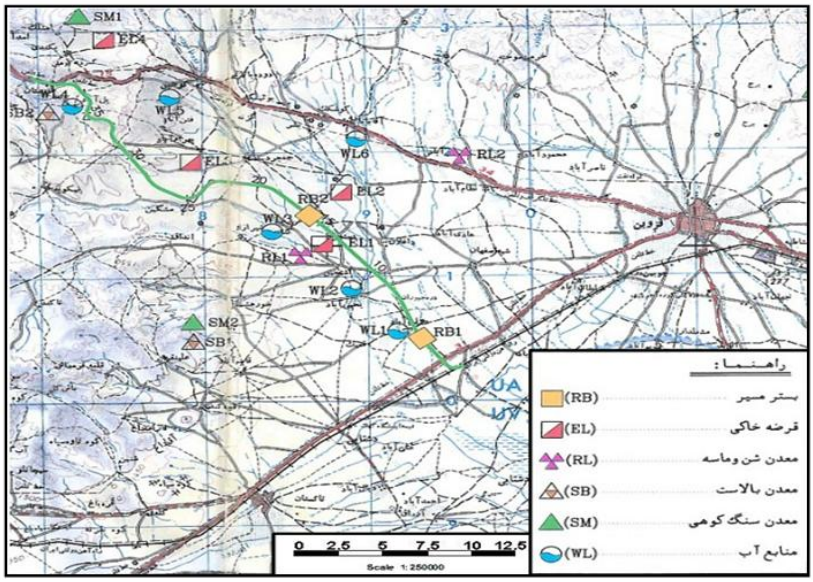
ساختگاه تونل در محدوده کوهین در بخش جنوبی ناحیه رسوبی ساختاری البرز مرکزی قرار دارد. در این منطقه، رسوبات تخریبی ـ آبرفتی در دامنه ارتفاعات البرز به صورت کنگلومرا و نهشته‌های آبرفتی نهشته شده‌اند که نشان‌دهنده بالاآمدگی زمین و وجود محیط رسوبی‌قاره‌ای است. در مطالعات مرحله اول تونل کوهین و براساس گمانه‌های حفر شده در طول محور آن، محدوده این تونل در رسوبات سازند هزاردره قرار دارد و جنس زمین پوشانندۀ

۱. Monitoring ۲. Bolts

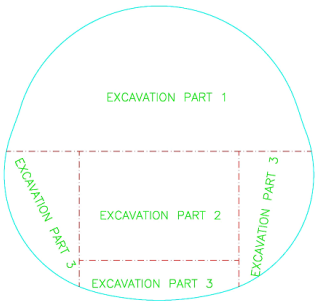
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.8.7]

آن از تناوب لایه‌های ماسه‌سنگ رس‌دار (کنگلومرای ریزدانه) فشرده نشده، ماسهٔ رس‌دار به‌همراه مقداری شن و رس‌سنگ تشکیل شده است. خاک‌های سطحی منطقه بر اثر هوازدگی، به‌ویژه نوع شیمیایی آن، حاوی سنگ‌های ماسه‌ای و رسی‌اند که به‌لحاظ دانه‌بندی ماسه ریزدانه رس‌دار به‌شمار می‌آیند. این گونه خاک در حالت بکر و خشک مقاومت نسبتاً خوبی دارد، ولی به‌هنگام بارندگی، چون رس موجود در آن با جذب آب به‌صورت پلاستیکی در می‌آید، مقاومت و باربری‌اش به میزان چشم‌گیری کاهش پیدا می‌کند [۱]. مقطع شماتیک تونل کوهین مراه سکانس حفاری آن در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی تونل کوهین واقع در قطعهٔ اول راه آهن قزوین ـ رشت ـ بندر انزلی به مقیاس (۱:۲۵۰۰۰۰)



شکل ۲. مقطع شماتیک تونل کوهین

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.8.7]

به‌منظور به‌دست آوردن اطلاعات مورد نیاز از زمین اطراف، زیرپی و بستر روسازی کف تونل، ٤ گمانه اکتشافی در طول تونل و یک گمانه در محدودۀ ترانشه ورودی حفر شد، بر این اساس گمانه‌های (C.B.H) و (T.B.H 1) تا (T.B.H 4) به‌ترتیب در کیلومترهای ۸۵٦+۲۹، ۱۳۰+۳۰، ۸۰۰+۳۰، ۱٤۸+۳۱ و ۵۱٦+۳۱، به عمق‌های ۲۳، ۳۱، ۱۰۰، ۷۳ و ۲۵ متر حفاری شد. بررسی مغزه‌ها نشان می‌دهد که کل تونل و کف آن، از تناوب لایه‌های ماسه‌سنگ رس‌دار سست، هوازده و فشرده نشده، ماسۀ رس‌دار به‌همراه مقداری شن، رس و ماسه لای‌دار و ماسۀ مارنی همراه شن و رس، تشکیل شده‌اند [۱] (جدول ۱).

جدول ۱. مشخصات گمانه‌های اکتشافی در قطعۀ اول تونل کوهین [١٤]

R.Q.D (%)	توصیف	سطح آب زیرزمینی (m)	عمق گمانه (m)	شمارۀ گمانه
۱۰ – ۷۰	ماسه‌سنگ هوازده رس‌دار به رنگ قهوه‌ای	۹	۳۱	۱T.B.H
۱۰ – ۱۰۰	ماسه رس‌دار به رنگ قهوه‌ای	٤۲	۱۰۰	۲T.B.H
۲۰ – ۱۰۰	ماسه‌سنگ رس‌دار بسیار هوازده و سست	٦۲/۵	۷۳	۳T.B.H
۲۰ – ۷۰	ماسه‌سنگ رس‌دار به رنگ قهوه‌ای	۲۲/۵	۲۵	٤T.B.H

از نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی مغزه‌ها در طراحی تونل و کنترل نتایج تحلیل برگشتی استفاده شده است. این داده‌ها مبنایی برای کنترل نتایج تحلیل برگشتی هستند (جدول ۲).

جدول ۲. پارامترهای مبنا برای کنترل نتایج تحلیل برگشتی

φ (°)	E (GPa)	C (MPa)
۳۰ ~ ۳۷	۰/۲٤ ~ ۰/٤۲	۰/۱۸ ~ ۰/۳

روش تحقیق

به‌منظور بررسی پایداری و ارزیابی طراحی ساخت تونل راه آهن قزوین ـ رشت از روش تحلیل برگشتی استفاده شده است. برای استفاده از این روش از بین ایستگاه‌های

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.8.7]

همگرایی‌سنجی نصب شده در داخل تونل، دو ایستگاه هم‌گرایی‌سنجی ۱۵۰+۳۰ و ۹۰۰+۳۰، که ایستگاه اول در ابتدای تونل و ایستگاه دوم تقریباً در انتهای تونل واقع شده‌اند، انتخاب شد.

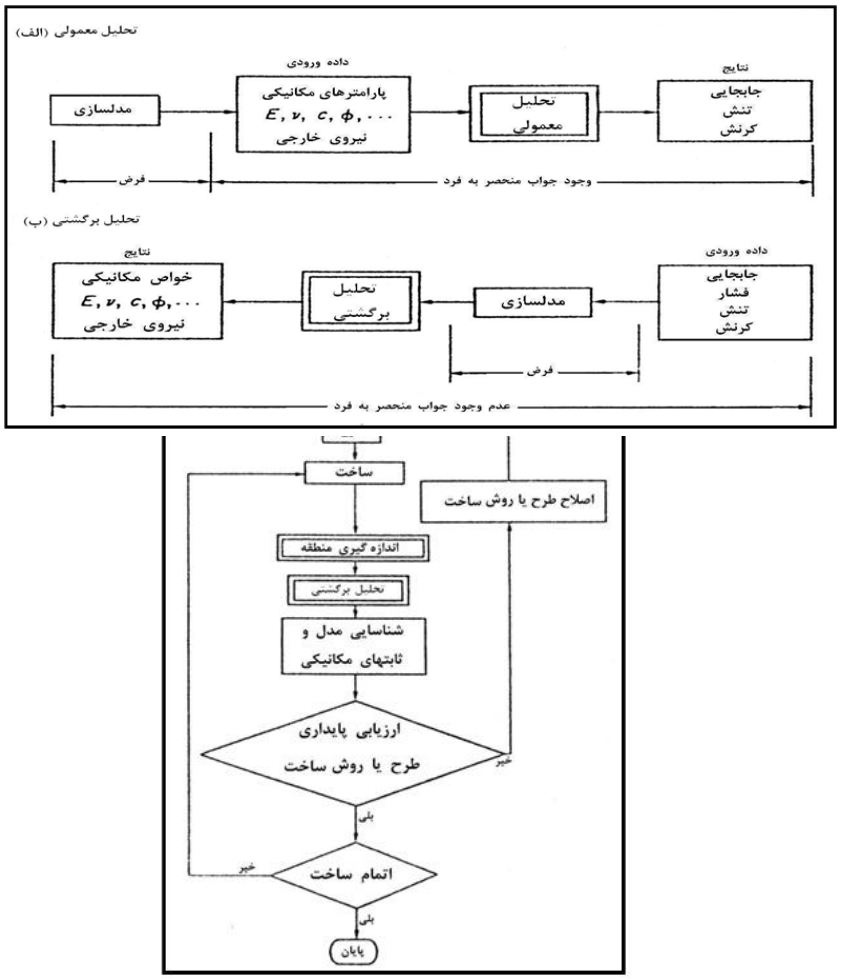
برای ایستگاه‌های هم‌گرایی‌سنجی با توجه به گمانه‌های اکتشافی و استفاده از نتایج آزمایش‌های ژئوتکنیکی، در بازهٔ($E = 0.2 \sim 0.45$ GPa , $C = 0.1 \sim 0.5$ MPa , $\varphi = 30 \sim 37^{\circ}$) چندین مدل اولیه ساخته شده و جابه‌جایی‌های به‌دست آمده هر یک از این مدل‌ها با میانگین جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هم‌گرایی مقایسه شده و خطای تک‌تک آن‌ها محاسبه شده است. با استفاده از روش رگرسیون مدل‌های اولیه در چندین مرحله تصحیح و با کاهش خطای آن‌ها مدل‌های نهایی نتیجه شده است. در نهایت با بررسی و تحلیل مدل‌های نهایی، پارامترهای ژئومکانیکی تونل یعنی مدول الاستیسیته (E)، مقاومت چسبندگی (C) و زاویهٔ اصطکاک داخلی (φ) به‌عنوان جواب نهایی تحلیل برگشتی به‌دست آمده است. با مقایسه پارامترهای به‌دست آمده از تحلیل برگشتی و پارامترهای ژئومکانیکی استفاده شده در طراحی تونل، روش ساخت تونل و طرح اصلی آن بررسی و ارزیابی شده است.

مسائل تحلیل برگشتی به دو طریق روش معکوس و روش مستقیم حل می‌شوند، روش مستقیم براساس روندی تکراری مقادیر تجربی (آزمایشی) پارامترهای مجهول را به‌وسیله کوچک کردن توابع خطا تصحیح می‌کند [٤]. این روند شناسایی و اندازه‌گیری، عکس روش تحلیل معمولی است که شرایط بارگذاری و خواص مکانیکی، داده‌های ورودی برای تعیین جابه‌جایی، تنش و کرنش هستند (شکل ۳).

در مهندسی ژئوتکنیک، تحلیل برگشتی ابزاری قدرتمند برای ارزیابی اطلاعات اندازه‌گیری شده میدانی است. مقادیر محاسبه شده برگشتی ثابت‌های مکانیکی و نیروهای خارجی کاملاً به مدل فرض شده بستگی دارند. بنا بر این اگر مدل‌های متفاوت فرض شود دادهٔ ورودی مشابه که همان اطلاعات اندازه‌گیری میدانی است نتایج متفاوتی ارائه می‌کند. البته باید تأکید شود که در صورت امکان در تحلیل برگشتی مدل نباید فقط فرض شود بلکه باید از داده‌های واقعی اندازه‌گیری میدانی به‌صورت برگشتی محاسبه شود [۵]. روند ارزیابی پایداری سازه‌ها و مناسب بودن روش ساخت و طراحی آن‌ها در شکل ٤ نشان داده شده است.

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.8.7]

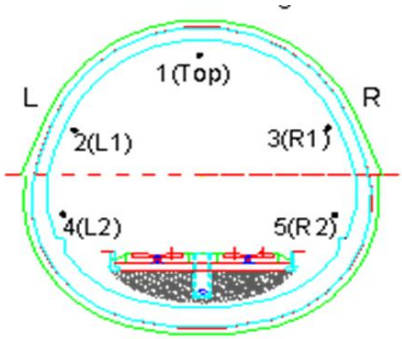


شکل ۳. مقایسه بین تحلیل معمولی (الف) و تحلیل برگشتی (ب)[۵]

به‌منظور رفتارسنجی تونل قزوین ـ رشت با در نظر گرفتن وضعیت تودهٔ سنگ در طول مسیر تونل ایستگاه‌های هم‌گرایی‌سنج، ایستگاه‌های کرنش‌سنج بر روی قاب‌های فولادی و کشیدگی‌سنج چهارنقطه‌ای در تودهٔسنگ در برگیرنده نصب شده‌اند. در این تونل تعداد ۳۳ ایستگاه هم‌گرایی‌سنجی مشتمل بر ۱۱۵ پین بر روی قاب‌های فولادی برای اندازه‌گیری مقدار هم‌گرایی و حرکات جدارهٔ تونل نصب شده است. ایستگاه‌های فوق هر کدام شامل ۳ پین هم‌گرایی هستند که ۱ پین در سقف و ۲ پین در دیواره‌ها نصب شده است (شکل۵).

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.8.7]



شکل ۵. طرح هم‌گرایی‌سنجی دیواره‌های تونل که در حالت تکمیل ایستگاه به حالت ۵ نقطه‌ای است

ارتفاع روباره در ایستگاه اندازه‌گیری ۱۵۰+۳۰ حدود ۳۳ متر و فاصله بین قاب‌ها ۵۰ سانتی‌متر است، پشت قاب‌ها تا ارتفاع حداکثر یک متر از پاشنه‌ها با لاشه و مابقی با پوکه معدنی پر شده‌اند. چنان‌چه از نمودار مربوطه مشاهده می‌شود، روند تغییرات هم‌گرایی ثبت شده در هر سه جهت قطر راست و چپ و دیواره از روند افزایشی برخوردار است و بیش‌ترین میزان هم‌گرایی ثبت شده در آخرین قرائت (۸٦/٦/۲٦) در قطر چپ و راست در حدود ٦/۹۲ میلی‌متر ثبت شده است. مقادیر مقدار هم‌گرایی کاملاً از روند نوسانی برخوردار است و البته در قرائت آخر مقدارآن کاهش یافته و نزدیک به صفر شده است. نمودار هم‌گرایی و هم‌چنین نمودار میزان هم‌گرایی به‌ترتیب در شکل‌های ٦ و ۷ ارائه شده است.

ارتفاع روباره در ایستگاه هم‌گرایی ۹۰۰+۳۰ حدود ۱۰٤ متر و فاصلهٔ بین قاب‌ها ۸۰ سانتی‌متر است. پشت قاب‌ها تا ارتفاع حداکثر یک متر از پاشنه‌ها با لاشه و مابقی با پوکه معدنی پر شده‌اند. تغییرات هم‌گرایی دراین ایستگاه در همهٔ اقطار روندی یک‌نواخت را داراست، تغییرات میزان هم‌گرایی نیز از تاریخ ۸٦/۰٦/۲٦ روندی یک‌نواخت و نزدیک به صفر را به ثبت رسانده است که نشان‌دهندهٔ به‌وجود آمدن روندی تقریباً پایدار در محدودهٔ ایستگاه است، به همین دلیل از این نظر مشکلی مشاهده نمی‌شود. نمودار هم‌گرایی ایستگاه ۹۰۰+۳۰ در شکل ۸ ارائه شده است.

برای طراحی تونل قزوین ـ رشت به‌روش عددی از نرم‌افزار FLAC5.0 استفاده شده است [٦]. با توجه به اصول مدل‌سازی عددی و هم‌چنین ترتیب عملیات اجرایی، مراحل مدل‌سازی با برنامه FLAC بدین‌ترتیب است:

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.8.7]

۱. انتخاب محدودهٔ مناسبی از تودهٔ سنگ اطراف تونل

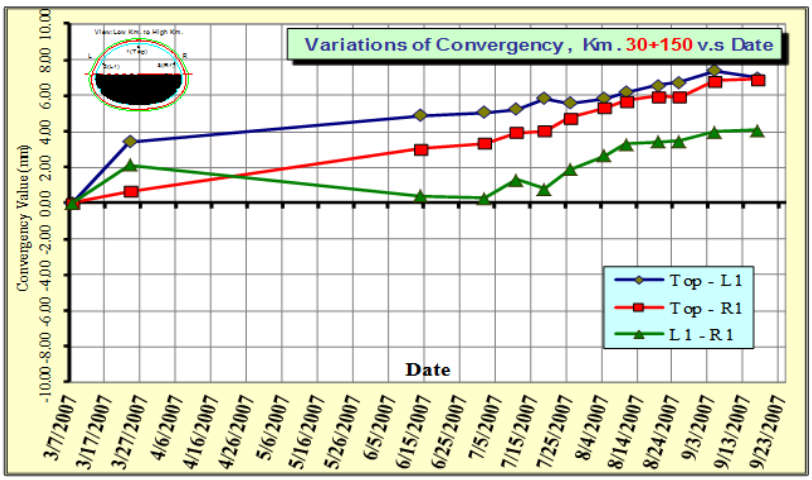
۲. انتخاب مدل رفتاری و تعیین پارامترهای آن

۳. اعمال شرایط مرزی و تنش‌های برجا

٤. حل مدل تا رسیدن به تعادل قبل از حفاری

۵. حفر تونل

٦. حل مدل

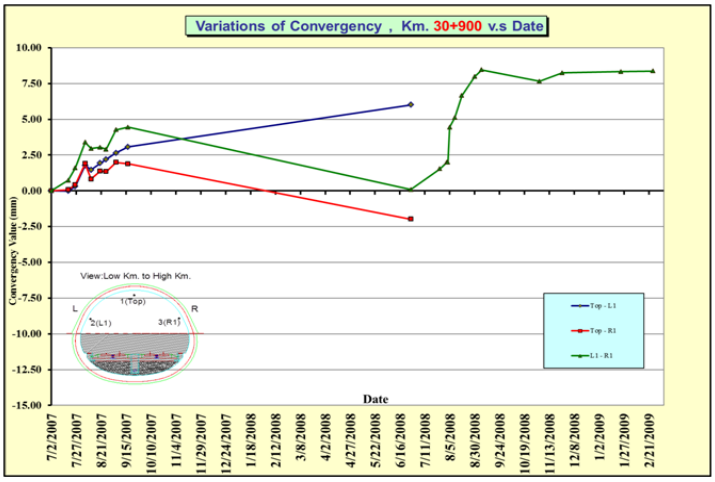


شکل ٦. نمودار تغییرات هم‌گرایی ایستگاه ۱۵۰+۳۰

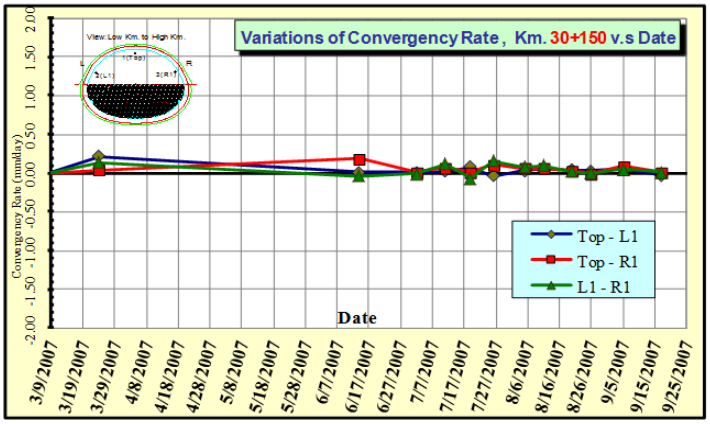
برای انتخاب مدل رفتاری زمین برای تحلیل مقطع تونل تحت بارهای وارده از مدل موهر–کلمب که توانایی مدل کردن رفتار پلاستیک را داراست، استفاده شده است. هم‌چنین برای مدل کردن سیستم نگه‌دارنده از المان تیر در برنامهٔ Flac که دارای رفتار ارتجاعی است استفاده شده است. طراحی سیستم نگه‌داری اولیه به‌نحوی صورت گرفته است که همهٔ بارهای ناشی از هم‌گرایی زمین را تحمل کرده و به ایجاد تعادل در فضای حفاری شده کمک کند.

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.8.7]



شکل ۷. نمودار تغییرات نرخ هم‌گرایی ایستگاه ۳۰+۱۵۰

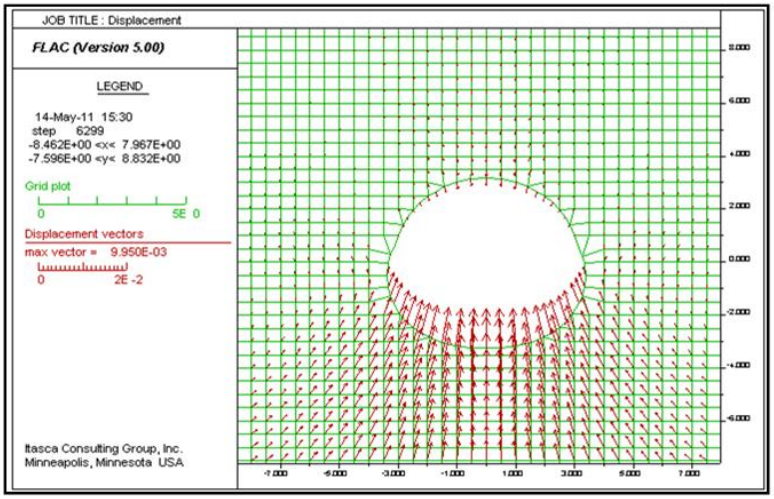


شکل ۸. نمودار تغییرات هم‌گرایی ایستگاه ۳۰+۹۰۰

در تمامی مدل‌های عددی باید شرایط مرزی را به‌گونه‌ای تعیین کرد که با شرایط واقعی زمین قبل از حفر تونل یک‌سان باشد. برای اعمال شرایط مرزی واقعی، مرز مدل در نقاط مرزی ثابت شده است. بدین منظور جابه‌جایی در جهت افقی نقاط انتهایی چپ و راست و هم‌چنین جابه‌جایی در جهت قائم نقاط کف مدل صفر شده‌اند. در ادامه با الگو گرفتن از آن‌چه که در واقعیت اتفاق می‌افتد سعی شده است شرایط مدل هر چه بیش‌تر با واقعیت تطبیق داشته باشد. واقعیت این است که قبل از حفر تونل زمین در تعادل است و حفر تونل باعث به‌وجود آمدن یک سری از اغتشاشات در وضعیت تنش‌ها و جابه‌جایی‌ها خواهد شد. در این

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.8.7]

مرحله لازم است مدل (قبل از حفر تونل) حل شود تا تنش‌های اولیه ایجاد شوند. منتهی قبل از ایجاد حفره لازم است جابه‌جایی‌ها صفر شوند تا شرایط واقعی قبل از حفر تونل منظور گردد [٦]. مراحل مدل‌سازی در تمامی مدل‌ها بدین‌گونه است که در مرحلۀ اول ابتدا مقطع Top حفاری شده و سپس سیستم نگه‌داری که شامل ۲۰ سانتی‌متر شاتکریت به‌همراه قاب فولادی IP18 نصب شده است. در مرحلۀ دوم مقطع کف (بنچینگ[۱]) حفاری شده، سپس نگه‌داری مذکور نصب شده است. برای طراحی مقطع بتنی (شاتکریت خشک همراه با قاب IP18) از روش اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی استفاده شده است. برای کنترل نیروی برشی نیز از روش تنش مجاز استفاده شده است. شکل‌های ۹ و ۱۰ به‌ترتیب نشان‌دهندۀ بردارها و کنتورهای جابه‌جایی در اطراف تونل برای مقطع ۱۵۰+۳۰ و کنتور تنش Syy در اطراف تونل برای مقطع ۹۰۰+۳۰ بعد از نصب سیستم نگه‌داری بنچینگ هستند.

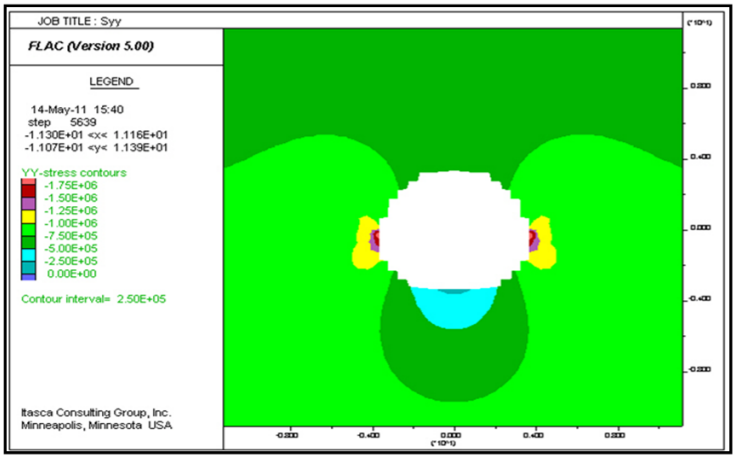


شکل ۹. بردارهای جابه‌جایی در اطراف تونل بعد از نصب سیستم نگه‌داری بنچینگ (مقطع ۱۵۰+۳۰)

۱. Benching

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.8.7]



شکل ۱۰. کنتور تنش Syy در اطراف تونل بَعد از نصب سیستم نگه‌داری بنچینگ (مقطع ۳۰+۹۰۰)

برای تعیین داده‌های ورودی تحلیل برگشتی، این داده‌ها به‌صورت متوسطی از هم‌گرایی‌های ثبت شده در دو ایستگاه واقع در تونل قزوین ـ رشت تعیین می‌شوند. برای تعیین مقدار متوسط داده‌ها، جابه‌جایی‌های ثبت شده در هر دو ایستگاه و در طول هر کدام از قطرها بر حسب زمان قرائت، به‌صورت جداگانه رسم می‌شود. سپس در هر نمودار به‌صورت جداگانه، با بررسی و تحلیل نقاط ثبت شده و در نظر گرفتن شرایط واقعی زمین، نقاطی که فاصلهٔ زیادی با روند ثبت شده نقاط دیگر در نمودار دارند به‌عنوان نقاط پرتی که دارای مشکلات احتمالی در هنگام نصب یا قرائت ایستگاه‌های مربوطه‌اند، حذف می‌شوند. در این حالت می‌توان مقدار متوسط جابه‌جایی‌های ثبت شده را با توجه به قرائت‌های انجام شده به‌دست آورد. داده‌های ورودی تحلیل برگشتی یعنی متوسط جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری شده با ابزار در ایستگاه‌های هم‌گرایی ۱۵۰+۳۰ و ۹۰۰+۳۰ برای اقطار مختلف در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های ۱۵۰+۳۰ و ۹۰۰+۳۰

ایستگاه اندازه‌گیری	ایستگاه اندازه‌گیری	قطرهای
۱/۳۷۳٤۳۸ mm	۱/۲۳۵۰٥٤ mm	TL
۱/۳٤٤۸۱ mm	۱/۱۹٥۹٤۲ mm	TR
۰/۰۰۳۷۰۹ mm	۰/۰۰۳۹۷۹ mm	LR

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.8.7]

نتایج

هدف از تحلیل برگشتی، کالیبراسیون تخمین‌های اولیه از پارامترهای ژئومکانیکی از روی جابه‌جایی‌ها و بارهای اندازه‌گیری شده با استفاده از مدل‌های عددی است [۳] برای تعیین مقادیر صحیح پارامترهای مجهول، اندازه‌گیری‌های موجود باید نیازهای مختلفی را برآورده کنند. این نیازهای یک برنامه ابزاربندی است و عبارتند از [۷]:

- خطای اندازه‌گیری‌ها باید به حد کافی کوچک باشند.
- پارامترهای مجهول باید تأثیر محسوسی بر کمیت‌های اندازه‌گیری شده داشته باشند. این امر ما را ملزم به انتخاب دقیق پارامترهای اندازه‌گیری می‌کند.
- نباید کمیت‌های اندازه‌گیری شده وابسته به ترکیب خطی از پارامترهای مجهول باشند.

در مرحلۀ اول در بازۀ تعیین شده برای هر ایستگاه چند مدل عددی ساخته می‌شود، به‌طوری که مقادیر پارامترهای اولیه در محدودۀ فوق قرار گیرند. سپس خطای تک‌تک مدل‌ها با استفاده از رابطۀ (۱) محاسبه می‌شود که در این حالت خطای تک‌تک مدل‌ها کم‌تر از ۱۰ درصد است. این مقادیر همراه با خطای کل هر مدل به‌ترتیب در جدول‌های ٤ و ۵ ارائه شده است.

$$Error = \frac{u_k - u_k^*}{u_k^*} \times 100$$

که در رابطۀ (۱)، u_k و u_k^* به‌ترتیب جابه‌جایی‌های محاسبه شده و اندازه‌گیری شده هستند.

جدول ٤. مدل‌سازی عددی ایستگاه ۱۵۰+۳۰ و محاسبۀ میزان خطای هر مدل در مرحلۀ اول

خطای کل (٪)	φ (°)	C (MPa)	E (GPa)	شماره مدل
۵/۵٦۹	۳٤	۰/۲۱	۰/۲۸	۱
۸/٦۹۵	۳٤	۰/۲۱	۰/۲۹	۲
٦/۱۷۲	۳۷	۰/۳۵	۰/٤۱	۳
۳/۸۹۱	۳۰	۰/۱٤	۰/۲۳	٤
۹/۱۵٤	۳۳	۰/٤۵	۰/٤۲	۵
۱/۲٦۹	۳۱	۰/۲	۰/۳	٦
۲/۳٤۵	۳۵	۰/۱۹	۰/۲۵	۷

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.8.7]

۰/۵۹۳	۳۲	۰/۲	۰/۳	۸
٦/۸۷۲	۳٦	۰/۳۹	۰/٤٤	۹
٤/۲٤۷	۳۳	۰/٤٦	۰/۲۱	۱۰
۱/۷٤۳	۳۵	۰/۲۳	۰/۳۱	۱۱
۷/٤۸۰	۳۰	۰/۱۳	۰/٤۵	۱۲
۱/۱۵۲	۳٤	۰/۲۲	۰/۳۳	۱۳
۳/٦۲٤	۳۲	۰/۱۷	۰/۳۷	۱٤
۷/۹٦۱	۳٦	۰/۲۱	۰/٤۳	۱۵

جدول ۵. مدل‌سازی عددی ایستگاه ۹۰۰+۳۰ و محاسبهٔ میزان خطای هر مدل در مرحلهٔ اول

خطای کل (٪)	φ (°)	C (MPa)	E (GPa)	شماره مدل
۸/٤۲۱	۳۱	۰/۱٦	۰/۳۹	۱
٦/۸۱۲	۳۳	۰/۳۲	۰/٤۲	۲
۱/۵٤۳	۳٦	۰/۲	۰/۳	۳
۳/۲۵٦	۳۰	۰/۳٤	۰/۲۱	٤
۱/۱۳۹	۳۵	۰/۳	۰/۲	۵
۵/۳٦۱	۳۲	۰/۱۱	۰/۲۷	٦
۷/۵۱۹	۳٤	۰/۲۱	۰/۲۸	۷
۸/۱٤۲	۳۱	۰/۱۳	۰/٤۵	۸
۳/۹٤۱	۳۳	۰/۱۸	۰/۲۵	۹
٦/٤۲۲	۳۰	۰/٤۱	۰/٤۳	۱۰
۵/۸۷۵	۳٤	۰/۲۱	۰/۲۹	۱۱
۸/۹٤۲	۳۵	۰/۱۲	۰/۳۹	۱۲
۰/۷۵۷	۳۳	۰/۲۱	۰/۳	۱۳
۱/۰۸۲	۳۱	۰/۲	۰/۳	۱٤
٤/۵٦۱	۳٦	۰/٤۲	۰/۲۳	۱۵

در ادامه با استفاده از تکنیک رگرسیون مدل‌های انتخاب شده اولیه در چندین مرحله تصحیح می‌شوند، به‌طوری که در مرحلهٔ نهایی تمامی مدل‌ها دارای خطایی کم‌تر از ۰/۵ درصد هستند. اصلاحات یاد شده برای هر دو ایستگاه در چند مرحله انجام می‌گیرند و طی آن

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.8.7]

مدل‌هایی که دارای خطای کم‌تر از ۰/۵ درصد هستند به‌ترتیب در جدول‌های ٦ و ۷ خلاصه می‌شوند.

جدول ٦. مدل‌های عددی که دارای خطای کم‌تر از ۰/۵ درصد هستند (ایستگاه ۱۵۰+۳۰)

شماره مدل	E (GPa)	C (MPa)	φ(°)	خطای کل (٪)
۱	۰/۳	۰/۲	۳٤	۰/۲۰
۲	۰/۳	۰/۱۹	۳٤	۰/۲۱۰
۳	۰/۳	۰/۲۱	۳٤	۰/۱۵۹
٤	۰/۳	۰/۲۲	۳٤	۰/٤۲۹
۵	۰/۳	۰/۲۳	۳٤	۰/۳۹۱
٦	۰/۳	۰/۲٤	۳٤	۰/۲۲۲
۷	۰/۳	۰/۲۵	۳٤	۰/۲٦۳
۸	۰/۳	۰/۲	۳۳	۰/۲٤۵
۹	۰/۳	۰/۲	۳۵	۰/٤۸٦
۱۰	۰/۳	۰/۲	۳٦	۰/۳٦٦
۱۱	۰/۳	۰/۲۱	۳۳	۰/٤۵٦
۱۲	۰/۳	۰/۲۱	۳۵	۰/۲۳۰

جدول ۷. مدل‌های عددی که دارای خطای کم تر از ۰/۵ درصد هستند (ایستگاه ۹۰۰+۳۰)

شماره مدل	E (GPa)	C (MPa)	φ (°)	خطای کل (٪)
۱	۰/۳	۰/۲۳	۳٤	۰/۳۱۷
۲	۰/۳	۰/۱۹	۳٤	۰/۲۰۸
۳	۰/۳	۰/۲۱	۳٤	۰/۲۰۷
٤	۰/۳	۰/۲۲	۳٤	۰/۲۰٦
۵	۰/۳	۰/۲	۳۵	۰/۲۰
٦	۰/۳	۰/۲٤	۳٤	۰/۲٦۹
۷	۰/۳	۰/۲۵	۳٤	۰/۲٦۹
۸	۰/۳	۰/۲	۳۳	۰/۲٦۵
۹	۰/۳	۰/۲۱	۳۵	۰/۱٤۰
۱۰	۰/۳	۰/۱۸	۳٤	۰/٤٤۳

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.8.7]

با توجه به این‌که نسبت خطا در محاسبات Flac به‌صورت کلی در حدود ۲~۱ درصد است [۸]، [۹]. تمامی مدل‌های نهایی که در جدول ٦ و ۷ ارائه شده است، جواب فرآیند تحلیل برگشتی هستند.

چنان‌که مشاهده می‌شود در هر مدل تمام پارامترهای به‌دست آمده، در محدوده‌ای که برای پارامترهای مجهول تعیین شده قرار گرفته است. بنا بر این می‌توان محدودهٔ نهایی جواب پارامترهای تحلیل برگشتی را تعیین کرد. پارامترهای حاصل از تحلیل برگشتی در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۸. پارامترهای به‌دست آمده از تحلیل برگشتی ایستگاه‌های ۱۵۰+۳۰ و ۹۰۰+۳۰

پارامترهای ژئومکانیکی	ایستگاه ۱۵۰+۳۰	ایستگاه ۹۰۰+۳۰
E (GPa)	۰/۲۸ – ۰/۳	۰/۲۸ – ۰/۳
C (MPa)	۰/۱۹ – ۰/۲۵	۰/۱۸ – ۰/۲۵
φ (°)	۳۲ – ۳۵	۳۳ – ۳۵

در نهایت با دقت به مدل‌های نهایی که در جدول‌های ٦ و ۷ ارائه شده‌اند، ملاحظه می‌شود که در جدول ٦ مدل ۳ و در جدول ۷ مدل ۹ دارای کم‌ترین خطا در مقایسه با مدل‌های نهایی دیگر هستند. بنا بر این می‌توان پارامترهای حاصل از مدل ۳ را برای ایستگاه هم‌گرایی ۱۵۰+۳۰ و پارامترهای حاصل از مدل ۹ را برای ایستگاه هم‌گرایی ۹۰۰+۳۰ به‌عنوان جواب نهایی تحلیل برگشتی به‌صورت جدول ۹ در نظر گرفت.

جدول ۹. پارامترهای ژئومکانیکی ایستگاه‌های ۱۵۰+۳۰ و ۹۰۰+۳۰

پارامترهای ژئومکانیکی ایستگاه ۱۵۰+۳۰	پارامترهای ژئومکانیکی ایستگاه ۹۰۰+۳۰
E = ۰/۳ GPa	E = ۰/۳ GPa
C = ۰/۲۱ MPa	C = ۰/۲۱ MPa
φ = ۳٤°	φ = ۳۵°

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.8.7]

نتیجه‌گیری

درستی و صحت نتایج تحلیل برگشتی به‌طور کامل به‌دقت داده‌های ورودی بستگی دارد. بنا بر این هر چه اندازه‌گیری‌های هم‌گرایی با دقت بیش‌تری انجام شود، تحلیل برگشتی نتایج دقیق‌تری ارائه می‌کند.

پارامترهای ژئومکانیکی به‌دست آمده از تحلیل برگشتی، کاملاً در محدودۀ در نظر گرفته شده ($E = 0.24 \sim 0.42$ GPa , $C = 0.18 \sim 0.3$ MPa , $\varphi = 30 \sim 37^\circ$) قرار گرفته‌اند و با نتایج حاصل از آزمایش‌های مکانیک سنگ انجام شده بر روی مغزه‌های حفاری مطابقت دارند.

با توجه به دقت زیادی که در انتخاب مدل برای تحلیل برگشتی تونل قزوین-رشت صورت گرفت، رفتار واقعی سنگ به‌خوبی نشان داده شد [۱۰].

در ایستگاه هم‌گرایی ۱۵۰+۳۰ پارامترهای ژئومکانیکی به‌دست آمده بدین‌صورت است:

$$E = 0.3 \text{ GPa} , C = 0.21 \text{ MPa} , \varphi = 34^\circ$$

پارامترهای فوق کاملاً در محدودG مورد نظر قرار گرفته است. هم‌چنین نتایج به‌دست آمده از تحلیل برگشتی ایستگاه هم‌گرایی ۹۰۰+۳۰ بدین‌صورت است:

$$E = 0.3 \text{ GPa} , C = 0.21 \text{ MPa} , \varphi = 35^\circ$$

با دقت در نتایج به‌دست آمده مشاهده می‌شود که مقادیر پارامترهای ژئومکانیکی در هر دو ایستگاه نزدیک بهم هستند که علت این مسئله مشابه بودن جنس لایه‌ها و شرایط زمین در هر دو ایستگاه است.

با توجه با این‌که ساختار کلی تونل در تمام قسمت‌ها یک‌سان است و هم‌چنین با توجه به این مسئله که در سنگ دربرگیرنده تونل ناپیوستگی خاصی وجود ندارد، بنا بر این می‌توان پارامترهای به‌دست آمده از تحلیل برگشتی را به‌عنوان پارامترهای ژئومکانیکی برای کل تونل در نظر گرفت.

در تحلیل برگشتی تونل قزوین ـ رشت به دلیل استفاده از روش مستقیم، محاسبات دارای گام‌های تکراری و زمان‌بر بود.

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.8.7]

منابع

۱. گروه مهندسین مشاور هرازراه، *عملیات زیرسازی قطعه یک راه آهن قزوین ـ رشت*، جلد دوم، بخش دوم ، دفترچهٔ مشخصات فنی خصوصی تونل (۱۳۸۷).

2. Sakurai S., "Back analysis in rock engineering. In: Comprehensive rock engineering", vol.4, Eds: J. A Hudson, Elsevier (1993)543-569.
3. Oreste p. p., "Back analysis techniques for the improvement of the understanding of rock in underground constructions", Tunnelling & Underground Space Technology (2004).
4. Rosenbrock H. H., "An automatic method for finding the greatest or least value of a function", The Computer Journal 3 (1960).
5. Gioda G., Sakurai S., "Back analysis procedure for the interpretation of field measurments in geomechanics", Int. J. Numerical Anal. Methods Geomech.11(6) (1987) 555-583.
6. Itasca consulting Group, Inc, "Flac–fast lagrangian Analysis of Continua", Version4.0, User Manual, Minneapolis, MN, USA (2000).
7. Gioda G., "Some remarks on back analysis and characterization problems in geomechanics", In: proceedings of the 5th International conference on Mumrical methods in geomechanics, Nagoya (1985) 47-61.
8. Jeon Y. S., Yong H. S., "Development of a back analysis algorithm using Flac", Int.J. Rock Mech.Min. Sci.Sym. Sino Rock (2004).

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.8.7]

9. Karakus M., Fowell R. J., "Back analysis for tunnelling induced ground movements and stress redistribution", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.2.0 (2005) 514-524.
10. Vardakos S., Gutierrez M., Barton N., "Back analysis of Shimizu tunnel No.3 by DEM", Tunnelling & Underground Space Technology, Vol 22 (2007) 401-413.

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.1.8.7]