

## تحلیل برگشتی تونل راه آهن قزوین - رشت با استفاده از داده های ابزار نگاری

کامبیز هدایت نسب<sup>۱</sup>، احمد ادیب<sup>۲</sup>، کامران گشتاسبی<sup>۳</sup>، مسعود منجزی<sup>۴</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی استخراج معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، kambiz\_zzzz@yahoo.com

۲- استادیار گروه استخراج معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

۳- دانشیار گروه مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس

۴- دانشیار گروه استخراج معدن، دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۶/۶ تاریخ تصویب: ۱۳۹۰/۱۲/۲۶

### چکیده

انواع مختلفی از تحلیل های عددی مانند روش عناصر محدود، روش عناصر مرزی و روش عناصر مجزا در مکانیک سنگ و در کارهای مهندسی برای طراحی سازه های سنگی مانند تونل ها، حفریات زیرزمینی، شیب ها، فونداسیون سد و ... مورد استفاده قرار می گیرند. در مقاله حاضر، نتایج حاصل از تحلیل برگشتی تونل کوهین واقع در قطعه اول راه آهن قزوین - رشت ارائه شده است. هدف اصلی این مقاله اجرای تحلیل برگشتی تونل یاد شده با استفاده از مدل های عددی است. برای مدل سازی تونل ۲ مقطع مختلف با استفاده از نرم افزار Flac 2D تحلیل شده است، که شامل مقاطع ۳۰+۹۰۰ و ۳۰+۱۵۰ می باشند. برای انجام تحلیل برگشتی، بازه مناسب برای پارامترهای ژئومکانیکی با توجه به آزمایش های انجام شده بر روی مغزه ها، تعیین گردید. با استفاده از روش مستقیم تحلیل برگشتی، خطاهای بدست آمده از مدل ها در چندین گام تصحیح و در نهایت پارامترهای ژئومکانیکی کنترلی در ایستگاه اندازه گیری ۳۰+۱۵۰ به صورت  $E = 0.3 \text{ GPa}$  (مدول الاستیسیته)،  $C = 0.21 \text{ MPa}$  (مقاومت چسبندگی) و  $\phi = 34^\circ$  (زاویه اصطکاک داخلی) و در ایستگاه اندازه گیری ۳۰+۹۰۰ به صورت  $E = 0.3 \text{ GPa}$  (مدول الاستیسیته)،  $C = 0.21 \text{ MPa}$  (مقاومت چسبندگی) و  $\phi = 35^\circ$  (زاویه اصطکاک داخلی) بدست آمده است. پارامترهای ژئومکانیکی بدست آمده از تحلیل برگشتی کاملاً در بازه در نظر گرفته شده قرار گرفته و با نتایج حاصل از آزمایش های انجام شده بر روی مغزه ها، مطابقت دارند. بر این اساس و با توجه به تطابق پارامترهای ژئومکانیکی به دست آمده از تحلیل برگشتی با پارامترهای استفاده شده در طراحی تونل، طراحی تونل و روش ساخت آن مورد تأیید قرار گرفت.

واژگان کلیدی: تحلیل برگشتی، تونل راه آهن قزوین - رشت، ابزار نگاری، نرم افزار Flac 2D

### مقدمه

بوده و تنها در هنگام حفر تونل است که می توان رفتار توده سنگ را به طور کامل ارزیابی نمود.

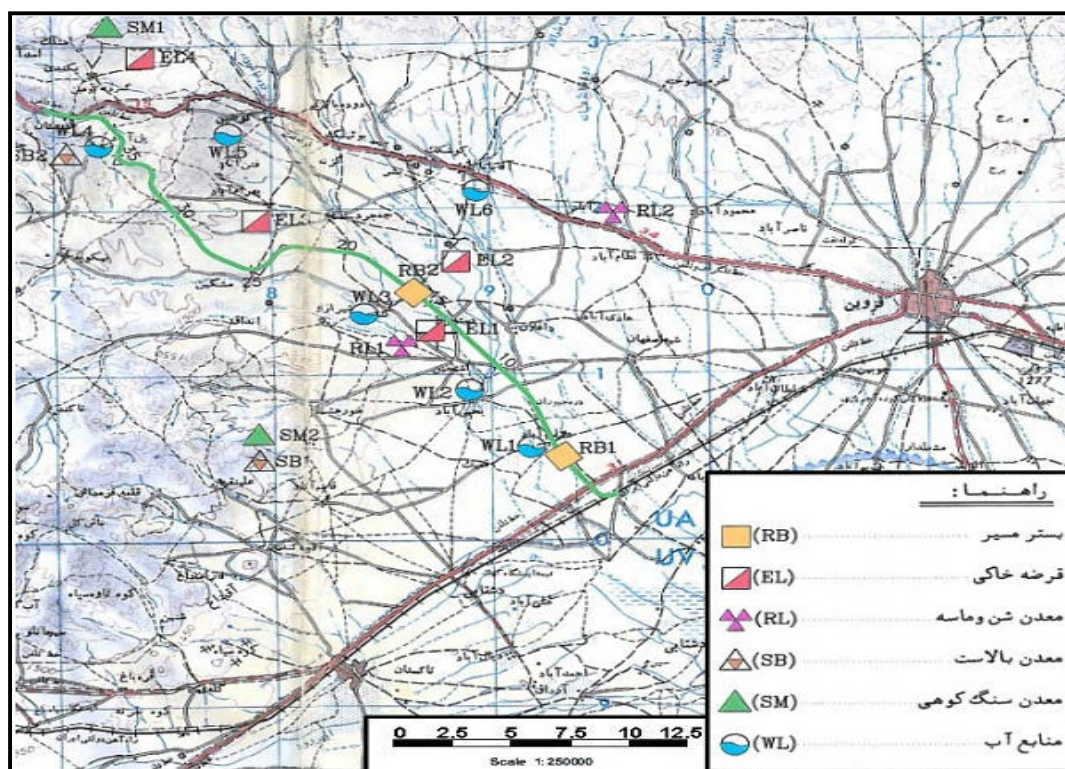
اغلب بدست آوردن مشخصات ژئوتکنیکی کامل زمین توسط اکتشافات ژئوفیزیکی و ژئوتکنیکی غیر ممکن

روی مجموعه داده‌هایی که به اندازه کافی بزرگ اند تعیین نمود.

به منظور 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 طراحی استفاده می‌شوند انجام می‌گیرد [2].

منطقه مورد مطالعه واقع در قطعه اول از راه آهن قزوین - رشت در ناحیه کوهین می‌باشد. این تونل با یک گالری ۱۰۰ متری در بخش ورودی و یک گالری ۱۰ متری در قسمت خروجی، طولی معادل ۱۶۳۵ متر دارد. عرض این تونل ۱۳ متر و ارتفاع آن حدود ۷ متر است. در شکل (۱) موقعیت جغرافیایی تونل کوهین واقع در راه آهن قزوین - رشت ارائه شده است.

کاربرد ابزارهای رفتارنگاری با افزایش دقت قابلیت اعتماد و پایداری آن‌ها گسترش یافته است. اعتبار و قابلیت اطمینان پیشگویی به طور کامل به درستی و دقت داده‌های ورودی در تحلیل بستگی دارد [12]. در حیطه سازه‌های زیرزمینی اندازه‌گیری‌های صورت گرفته بسته به خصوصیات مسئله، با هدف تعیین یکی از پارامترهای کرنش‌ها جابجایی نسبی، تنش در توده سنگ یا پوشش نگهداری، فشار تولید شده در قاب‌های فولادی نیروی گسترش یافته در میل مهارها و فشار منفذی انجام می‌شوند [3]. معمولاً تمایل زیادی برای تعیین جابجایی‌ها (مثلاً همگرایی دیواره‌ها) وجود دارد. زیرا از دید ریاضی پارامترهای جابجایی از عوامل محلی تأثیر کمتری می‌پذیرند. ضروری است برای تعیین مقادیر معرف این پارامترها، مقدار متوسط آن‌ها را از



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی تونل کوهین واقع در قطعه اول راه آهن قزوین - رشت - بندر انزلی

ولی به هنگام بارندگی، چون رس موجود در آن با جذب آب به صورت پلاستیکی در می آید، مقاومت و باربری اش به میزان قابل توجهی کاهش پیدا می کند [۱]. به منظور بدست آوردن اطلاعات مورد نیاز از زمین اطراف، زیرپیی و بستر روسازی کف تونل، ۴ گمانه اکتشافی در طول تونل و یک گمانه در محدوده ترانشه ورودی حفر شد، بر این اساس گمانه های (C.B.H) و (T.B.H1) تا (T.B.H4) به ترتیب در کیلومترهای ۲۹+۸۵۶، ۳۰+۱۳۰، ۳۰+۸۰۰ و ۳۱+۱۴۸ و ۳۱+۵۱۶، به عمق های ۲۳، ۳۱، ۱۰۰، ۷۳ و ۲۵ متر حفاری گردید. بررسی مغزه ها نشان می دهد که کل تونل و کف آن، از تناوب لایه های ماسه سنگ رس دار سست، هوازده و فشرده نشده، ماسه رس دار به همراه مقداری شن، رس و ماسه لای دار و ماسه مارنی همراه شن و رس، تشکیل شده اند [۱] که نتایج آن در جدول (۱) ارائه شده است.

ساختگاه تونل در محدوده کوهین در بخش جنوبی ناحیه رسوبی ساختاری البرز مرکزی قرار دارد. در این منطقه، رسوبات تخریبی - آبرفتی در دامنه ارتفاعات البرز به صورت کنگلومرا و نهشته های آبرفتی نهشته شده اند که نشان دهنده بالآمدگی زمین و وجود محیط رسوبی قاره ای است. در مطالعات مرحله اول تونل کوهین و براساس گمانه های حفر شده در طول محور آن، محدوده این تونل در رسوبات سازند هزار دره قرار دارد و جنس زمین پوشاننده آن از تناوب لایه های ماسه سنگ رس دار (کنگلومرای ریزدانه) فشرده نشده، ماسه رس دار به همراه مقداری شن و رس سنگ تشکیل شده است. خاک های سطحی منطقه بر اثر هوازدگی، به ویژه نوع شیمیایی آن حاوی سنگ های ماسه ای و رسی اند که به لحاظ دانه بندی ماسه ریزدانه رس دار به شمار می آیند. این گونه خاک در حالت بکر و خشک مقاومت نسبتاً خوبی دارد.

جدول ۱- مشخصات گمانه های اکتشافی در قطعه اول تونل کوهین [۱۴]

شماره گمانه	R.Q.D (%)	توصیف	سطح آب زیرزمینی (m)	عمق گمانه (m)
T.B.H ۱	۷۰ - ۱۰	ماسه سنگ هوازده رس دار به رنگ قهوه ای	۹	۳۱
T.B.H ۲	۱۰۰ - ۱۰	ماسه رس دار به رنگ قهوه ای	۴۲	۱۰۰
T.B.H ۳	۱۰۰ - ۲۰	ماسه سنگ رس دار بسیار هوازده و سست	۶۲/۵	۷۳
T.B.H ۴	۷۰ - ۲۰	ماسه سنگ رس دار به رنگ قهوه ای	۲۲/۵	۲۵

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

جدول ۲- پارامترهای مینا برای کنترل نتایج تحلیل برگشتی

C (MPa)	E (GPa)	$\phi$ (°)
۰/۱۸ ~ ۰/۳	۰/۲۴ ~ ۰/۴۲	۳۰ ~ ۳۷

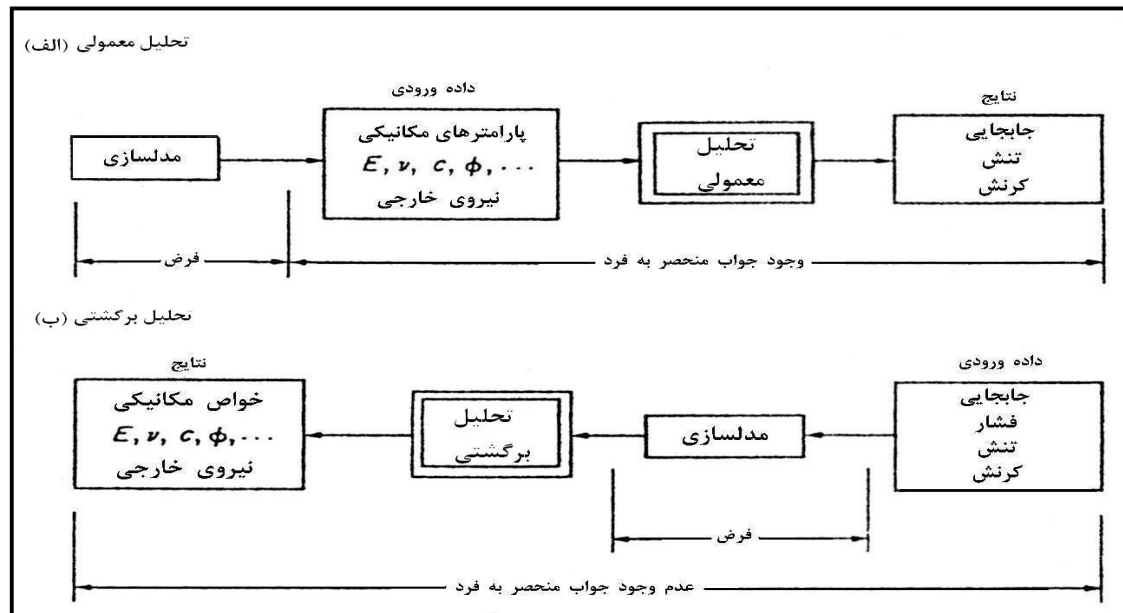
### روش تحقیق

به منظور بررسی پایداری و ارزیابی طراحی ساخت تونل راه آهن قزوین - رشت از روش تحلیل برگشتی استفاده شده است. برای استفاده از این روش از بین ایستگاه‌های همگرایی سنجی نصب شده در داخل تونل، دو ایستگاه همگرایی سنجی ۳۰+۱۵۰ و ۳۰+۹۰۰، که ایستگاه اول در ابتدای تونل و ایستگاه دوم تقریباً در انتهای تونل واقع شده‌اند، انتخاب شد. برای ایستگاه‌های همگرایی سنجی با توجه به گمانه‌های اکتشافی و استفاده از نتایج آزمایش‌های ژئوتکنیکی، چندین مدل اولیه ساخته شده و جابجایی‌های بدست آمده از هر کدام از این مدل‌ها با میانگین جابجایی‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های همگرایی مقایسه شده و خطای تک‌تک آن‌ها محاسبه شده است. با استفاده از روش رگرسیون مدل‌های اولیه در چندین گام 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 زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ ) به عنوان جواب نهایی تحلیل برگشتی بدست آمده است. با مقایسه پارامترهای بدست آمده از تحلیل برگشتی و پارامترهای ژئومکانیکی مورد استفاده در طراحی تونل روش ساخت تونل و طرح اصلی آن مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. تحلیل برگشتی در کل به صورت یک تکنیک که پارامترهای لازم برای کنترل یک سیستم را به وسیله تحلیل رفتار خروجی آن ارائه می‌دهد، تعریف می‌شود. این تکنیک که بر اساس اندازه‌گیری‌های میدانی تنظیم شده به وسیله (Terzaghi&Peck1980) [2] روش مشاهده‌ای نامیده شده و در حقیقت پلی بین واقعیت و پیش‌بینی می‌باشد. تحلیل برگشتی تکنیک مفیدی برای ارزیابی خواص مکانیکی با تکیه بر اندازه‌گیری‌های صورت گرفته بر روی همگرایی اطراف یک فضای زیرزمینی است. مسائل تحلیل برگشتی به دو طریق روش معکوس و روش مستقیم حل می‌شوند، در روش معکوس، فرمول‌بندی ریاضی فقط عکس تحلیل تنش معمولی می‌باشد. این روش به صورت عددی بعضی از پارامترهای مکانیکی یا شرایط بارگذاری را بر اساس جابجایی‌های اندازه‌گیری شده حل می‌کند. روش مستقیم بر اساس یک روند تکراری مقادیر تجربی (آزمایشی) پارامترهای مجهول را بوسیله کوچک کردن توابع خطا تصحیح می‌کند. الگوریتم‌های استاندارد برنامه‌ریزی مانند Simplex یا روش Rosenbrock [4] می‌توانند برای راه حل عددی در روش مستقیم در نظر گرفته شوند. در تحلیل برگشتی مسائل مهندسی سنگ شرایط بارگذاری مانند بارهای خارجی و یا فشارهای

عکس روش تحلیل معمولی می باشد که شرایط بارگذاری و خواص مکانیکی، داده های ورودی برای تعیین جابجایی، تنش و کرنش می باشند. این روش روش معکوس تحلیل برگشتی نامیده می شود.

سنگ و خواص مکانیکی سنگ ها مانند مدول الاستیسیته نسبت پواسون، چسبندگی، زاویه اصطحاک داخلی و ... از جابجایی، کرنش و فشار اندازه گیری شده در طول ساخت و یا بعد از ساخت سازه بدست می آیند. این روند شناسایی و اندازه گیری



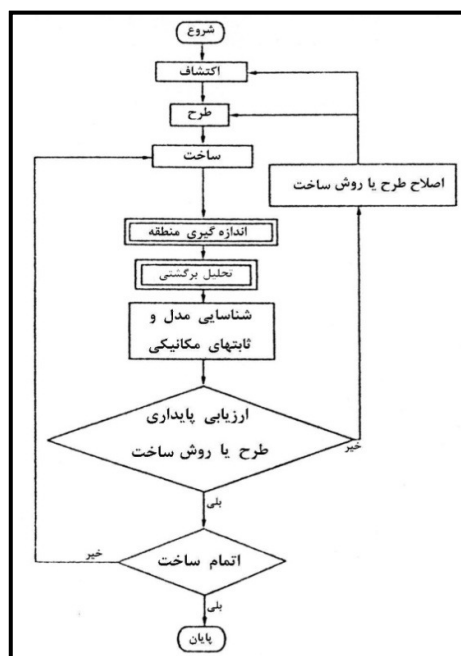
شکل ۲- مقایسه بین تحلیل معمولی (الف) و تحلیل برگشتی (ب) [5]

## بحث

انجام می شود. بنابراین به منظور بدست آوردن یک جواب منحصر به فرد در تحلیل برگشتی توجهات خاصی در ارتباط با انتخاب مدل باید صورت گیرد. مدل باید به اندازه کافی و تا حد ممکن دقیق باشد زیرا هر چه دقت مدل بیشتر باشد رفتار واقعی سنگ را بهتر نشان می دهد. بنابراین مدلسازی در تحلیل برگشتی از اهمیت بیشتری نسبت به تحلیل معمولی برخوردار است. البته باید تأکید شود که در صورت امکان در تحلیل برگشتی مدل نباید فقط فرض شود بلکه باید از داده های واقعی اندازه گیری میدانی به صورت برگشتی محاسبه شود [5].

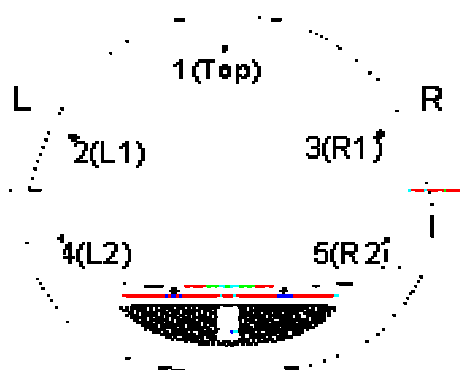
در مهندسی ژئوتکنیک، تحلیل برگشتی یک ابزار قدرتمند برای ارزیابی اطلاعات اندازه گیری شده میدانی می باشد. مقادیر محاسبه شده برگشتی ثابت های مکانیکی و نیروهای خارجی کاملاً به مدل فرض شده بستگی دارند. بنابراین اگر مدل های متفاوت فرض شود داده ورودی مشابه که همان اطلاعات اندازه گیری میدانی می باشد نتایج متفاوتی ارائه می کند. این مسئله نشان می دهد که نتایج تحلیل برگشتی کاملاً بر اساس انتخاب مدل مکانیکی می باشد، لذا یک جواب منحصر به فرد وجود ندارد زیرا مدلسازی بعد از بدست آوردن داده های ورودی

چنانچه از نمودار مربوطه مشاهده می‌گردد، روند تغییرات همگرایی ثبت شده در هر سه جهت قطر راست و چپ و دیواره از روند افزایشی برخوردار بوده و بیشترین میزان همگرایی ثبت شده در آخرین قرائت (۸۶۶/۲۶) در قطر چپ و راست در حدود ۶/۹۲ میلیمتر ثبت گردیده است. مقادیر نرخ همگرایی کاملاً از روند نوسانی برخوردار بوده و البته در قرائت آخر مقدار آن کاهش یافته و نزدیک به صفر شده است. نمودار همگرایی و همچنین نمودار نرخ همگرایی به ترتیب در شکل‌های (۵) و (۶) ارائه شده است.



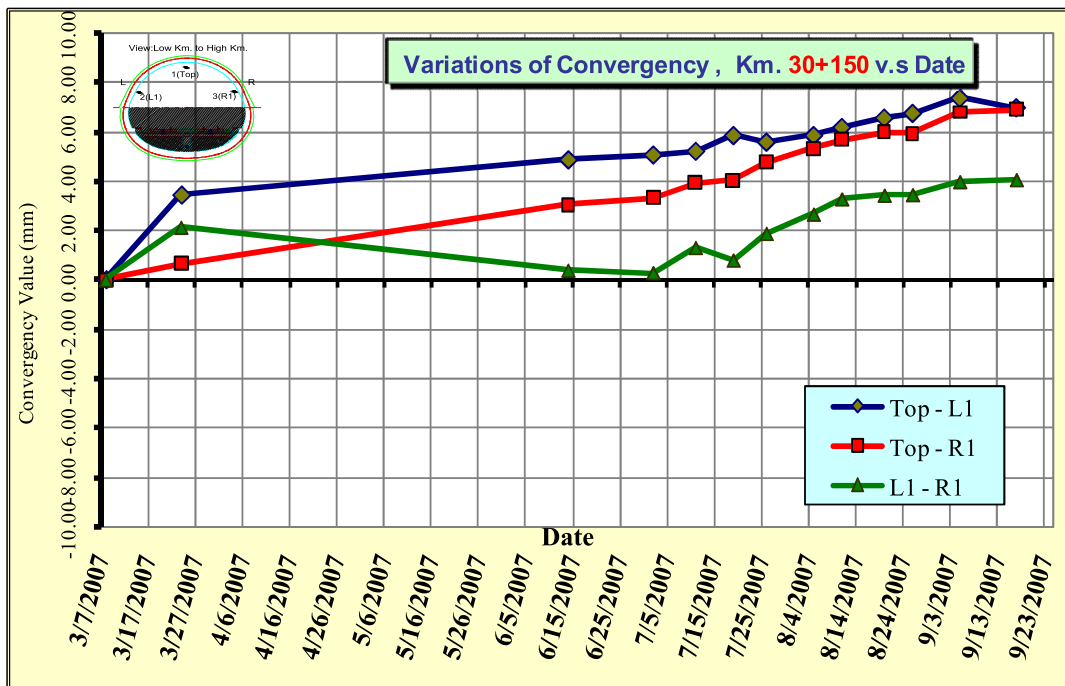
شکل ۳- روند ارزیابی پایداری سازه های سنگی

View: Low Km. to High Km.

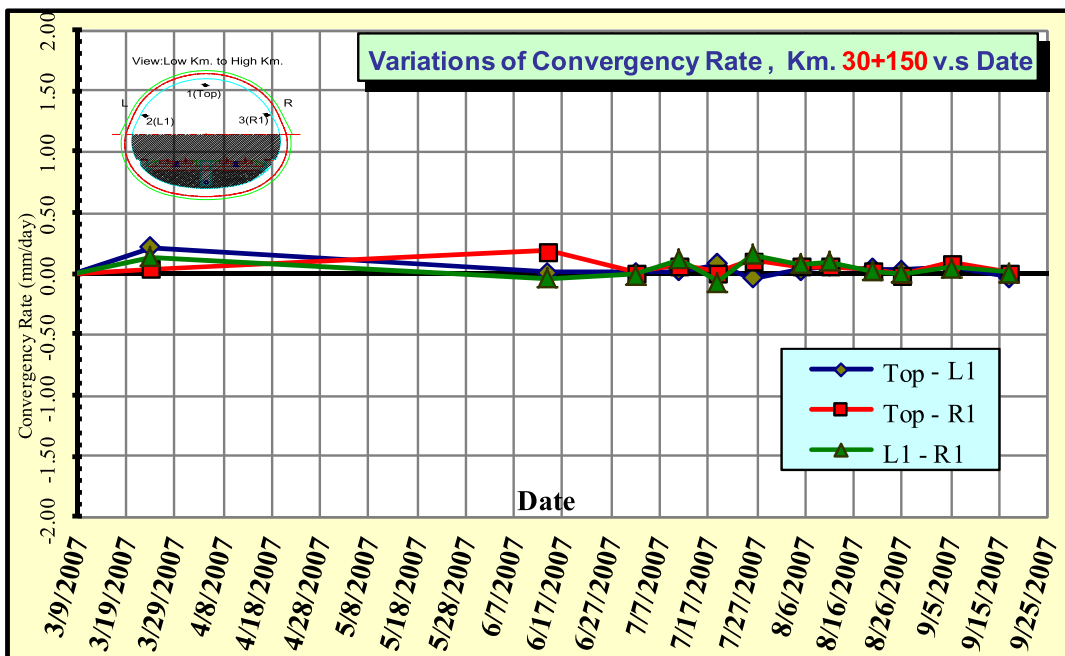


شکل ۴- طرح همگرایی سنجی دیواره‌های تونل که در حالت تکمیل ایستگاه به حالت ۵ نقطه‌ای خواهد بود

به منظور رفتارسنجی تونل قروین - رشت با در نظر گرفتن وضعیت توده سنگ در طول مسیر تونل ایستگاه‌های همگرایی سنج، ایستگاه‌های کرنش سنج بر روی قاب‌های فولادی و کشیدگی سنج چهارنقطه‌ای در توده سنگ دربرگیرنده نصب شده‌اند. در این تونل تعداد ۳۳ ایستگاه همگرایی سنجی مشتمل بر ۱۱۵ پین بر روی قاب‌های فولادی جهت اندازه‌گیری میزان همگرایی و حرکات جداره تونل نصب شده است. ایستگاه‌های فوق هر کدام شامل ۳ پین همگرایی هستند و همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده ۱ پین در سقف و ۲ پین در دیواره‌ها نصب شده است. ارتفاع رویاره در ایستگاه اندازه‌گیری ۳۰+۱۵۰ حدود ۳۳ متر و فاصله بین قاب‌ها ۵۰ سانتیمتر می‌باشد، پشت قاب‌ها تا ارتفاع حداکثر یک متر از پاشنه‌ها بالاشه و مابقی با پوک‌ه معدنی پر شده‌اند.



شکل ۵- نمودار تغییرات همگرایی ایستگاه ۳۰+۱۵۰



شکل ۶- نمودار تغییرات نرخ همگرایی ایستگاه ۳۰+۱۵۰

در واقعیت اتفاق می افتد 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 بوجود آمدن یک سری از اغتشاشات در وضعیت تنش ها و جابجایی ها خواهد شد. در این مرحله لازم است مدل (قبل از حفر تونل) حل شود تا تنش های اولیه ایجاد شوند. منتهی قبل از ایجاد حفره لازم است جابجایی ها صفر شوند تا شرایط واقعی قبل از حفر تونل منظور گردد [6].

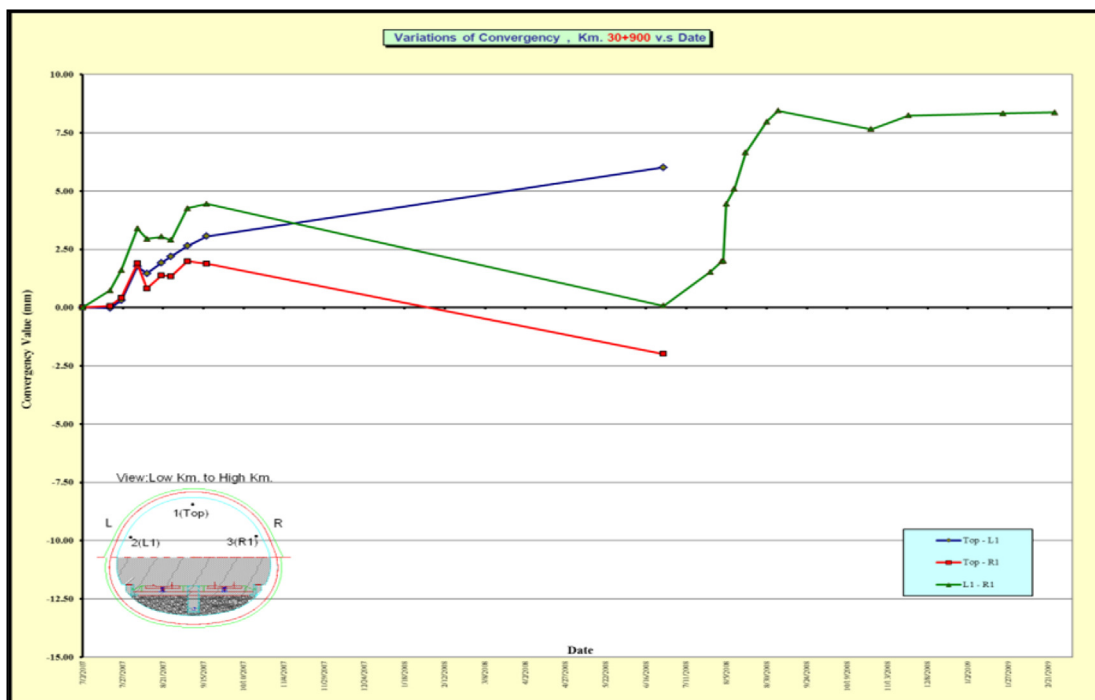
مراحل مدل سازی در تمامی مدل ها بدین گونه بوده است که در مرحله اول ابتدا مقطع Top حفاری شده و سپس سیستم نگهداری که شامل ۲۰ سانتیمتر شاکریت به همراه قاب فولادی IP18 نصب شده است. در مرحله دوم مقطع کف حفاری شده، سپس نگهداری مذکور نصب شده است. شکل های (۸) و (۹) به ترتیب نشان دهنده بردارها و کنتورهای جابجایی در اطراف تونل برای مقطع ۳۰+۱۵۰ و کنتور تنش Syy در اطراف تونل برای مقطع ۳۰+۹۰۰ بعد از نصب سیستم نگهداری کف تونل می باشند.

ارتفاع روباره در ایستگاه همگرایی ۳۰+۹۰۰ حدود ۱۰۴ متر و فاصله بین قاب ها ۸۰ سانتیمتر می باشد. پشت قاب ها تا ارتفاع حداکثر یک متر از پاشنه ها با لاشه و مابقی با پوکه معدنی پر شده اند. تغییرات همگرایی در این ایستگاه در همه اقطار روندی یکنواخت را داراست، تغییرات نرخ همگرایی نیز از تاریخ ۸۶/۰۶/۲۶ روندی یکنواخت و نزدیک به صفر را به ثبت رسانده است که نشان دهنده به وجود آمدن روندی تقریباً پایدار در محدوده ایستگاه می باشد، لذا از این نظر مشکلی مشاهده نمی شود. در شکل (۷) نمودار همگرایی ایستگاه ۳۰+۹۰۰ ارائه شده است. برای طراحی تونل قزوین - رشت به روش عددی از نرم افزار FLAC۵/۰ استفاده شده است [۶]. با توجه به اصول مدل سازی عددی و همچنین ترتیب عملیات اجرایی، مراحل مدل سازی با برنامه FLAC به ترتیب زیر بوده است:

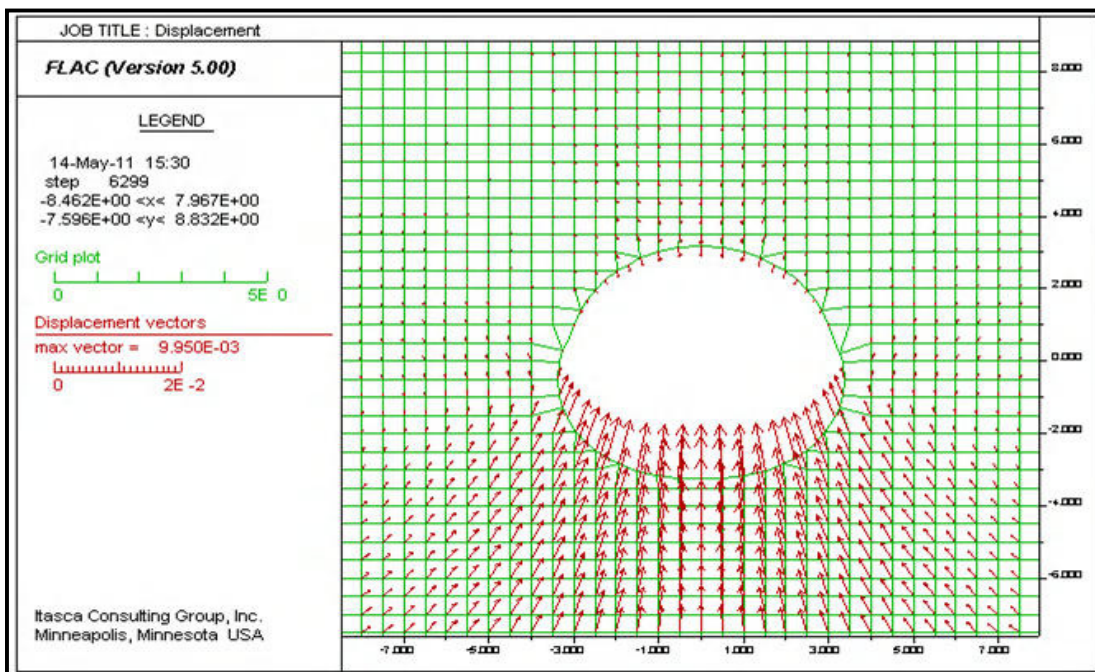
- انتخاب محدوده مناسبی از توده سنگ اطراف تونل
- انتخاب مدل رفتاری و تعیین پارامترهای آن
- اعمال شرایط مرزی و تنش های برجا
- حل مدل تا رسیدن به تعادل قبل از حفاری
- حفر تونل
- حل مدل

در تمامی مدل های عددی بایستی شرایط مرزی را به گونه ای تعیین کرد که با شرایط واقعی زمین قبل از حفر تونل یکسان باشد. جهت اعمال شرایط مرزی واقعی، مرز مدل در نقاط مرزی ثابت شده است. بدین منظور جابجایی در جهت افقی نقاط انتهایی چپ و راست و همچنین جابجایی در جهت قائم نقاط کف مدل صفر شده اند. در ادامه با الگو گرفتن از آنچه که

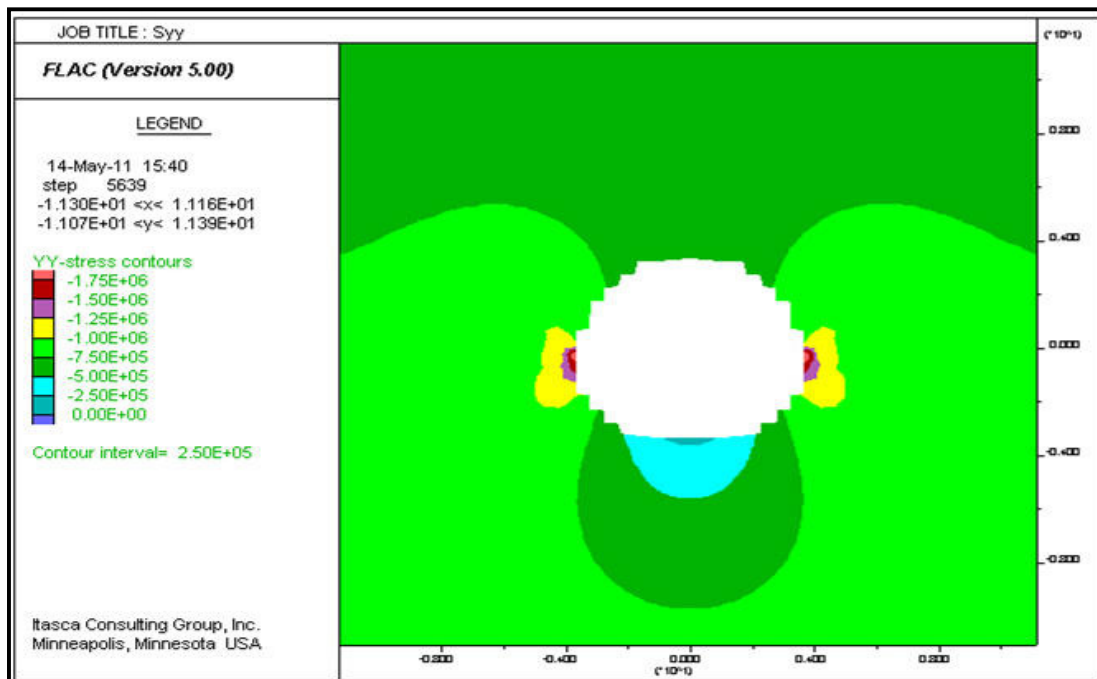




شکل ۷- نمودار تغییرات همگرایی ایستگاه ۳۰+۹۰۰



شکل ۸- بردارهای جابجایی در اطراف تونل بعد از نصب سیستم نگهداری کف تونل (مقطع ۳۰+۱۵۰)



شکل ۹- کنتور تنش  $S_{yy}$  در اطراف تونل بعد از نصب سیستم نگهداری کف تونل (مقطع ۳۰+۹۰۰)

در جدول (۳) داده‌های ورودی تحلیل برگشتی یعنی متوسط جابجایی‌های اندازه‌گیری شده توسط ابزار در ایستگاه‌های همگرایی ۳۰+۱۵۰ و ۳۰+۹۰۰ برای اقطار مختلف ارائه شده است.

جدول ۳- جابجایی‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های

۳۰+۹۰۰ و ۳۰+۱۵۰

قطرهای اندازه‌گیری	ایستگاه اندازه‌گیری ۳۰+۹۰۰	ایستگاه اندازه‌گیری ۳۰+۱۵۰
TL	۱/۳۷۳۴۳۸ mm	۱/۲۳۵۰۵۴ mm
TR	۱/۳۴۴۸۱ mm	۱/۱۹۵۹۴۲ mm
LR	۰/۰۰۳۷۰۹ mm	۰/۰۰۳۹۷۹ mm

برای تعیین داده‌های ورودی تحلیل برگشتی، این داده‌ها به صورت متوسطی از همگرایی‌های ثبت شده در دو ایستگاه واقع در تونل قزوین - رشت تعیین می‌شوند. برای تعیین مقدار متوسط داده‌ها جابجایی‌های ثبت شده در هر دو ایستگاه و در طول هر کدام از قطرها بر حسب زمان قرائت، به صورت جداگانه رسم می‌شود. سپس در هر نمودار به صورت جداگانه، با بررسی و تحلیل نقاط ثبت شده و در نظر گرفتن شرایط واقعی زمین، نقاطی که دارای فاصله زیادی با روند ثبت شده نقاط دیگر در نمودار می‌باشند به عنوان نقاط پرتی که دارای مشکلات احتمالی در هنگام نصب یا قرائت ایستگاه‌های مربوطه‌اند، حذف می‌شوند. در این حالت می‌توان مقدار متوسط جابجایی‌های ثبت شده را با توجه به قرائت‌های انجام شده بدست آورد.

## نتایج

که در رابطه (۱)،  $u_{Rk}$  و  $u'_{Rk}$  به ترتیب جابجایی های محاسبه شده و اندازه گیری شده هستند.

جدول ۴- مدل سازی عددی ایستگاه ۱۵۰+۳۰ و محاسبه میزان خطای هر مدل در گام اول

شماره مدل	خطای کل (%)	$\phi$ (°)	C (MPa)	E (GPa)
۱	۵/۵۶۹	۳۴	۰/۲۱	۰/۲۸
۲	۸/۶۹۵	۳۴	۰/۲۱	۰/۲۹
۳	۶/۱۷۲	۳۷	۰/۳۵	۰/۴۱
۴	۳/۸۹۱	۳۰	۰/۱۴	۰/۲۳
۵	۹/۱۵۴	۳۳	۰/۴۵	۰/۴۲
۶	۱/۲۶۹	۳۱	۰/۲	۰/۳
۷	۲/۳۴۵	۳۵	۰/۱۹	۰/۲۵
۸	۰/۵۹۳	۳۲	۰/۲	۰/۳
۹	۶/۸۷۲	۳۶	۰/۳۹	۰/۴۴
۱۰	۴/۲۴۷	۳۳	۰/۴۶	۰/۲۱
۱۱	۱/۷۴۳	۳۵	۰/۲۳	۰/۳۱
۱۲	۷/۴۸۰	۳۰	۰/۱۳	۰/۴۵
۱۳	۱/۱۵۲	۳۴	۰/۲۲	۰/۳۳
۱۴	۳/۶۲۴	۳۲	۰/۱۷	۰/۳۷
۱۵	۷/۹۶۱	۳۶	۰/۲۱	۰/۴۳

هدف از تحلیل برگشتی، کالیبراسیون تخمین های اولیه از پارامترهای ژئومکانیکی از روی جابجایی ها و بارهای اندازه گیری شده با استفاده از مدل های عددی است [3]. جهت تعیین مقادیر صحیح پارامترهای مجهول، اندازه گیری های موجود باید نیازهای مختلفی را برآورده سازند.

این نیازها الزامات یک برنامه ابزاربندی و شامل موارد زیر می باشند [7]:

- خطای اندازه گیری ها باید به حد کافی کوچک باشند.

- پارامترهای مجهول باید تاثیر محسوسی بر کمیت های اندازه گیری شده داشته باشند.

این امر ما را ملزم به انتخاب دقیق پارامترهای اندازه گیری می کند.

- نباید کمیت های اندازه گیری شده وابسته به ترکیب خطی از پارامترهای مجهول باشند.

در گام اول در بازه تعیین شده برای هر ایستگاه چند مدل عددی ساخته می شود، به طوری که مقادیر پارامترهای اولیه در محدوده فوق قرار گیرند.

سپس خطای تک تک مدل ها با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می شود که در این حالت خطای تک تک مدل ها کمتر از ۱۰ درصد است.

این مقادیر همراه با خطای کل هر مدل به ترتیب در جداول (۴) و (۵) ارائه شده است.

$$\text{رابطه (۱)} \quad \text{Error} = \frac{u_{Rk} - u'_{Rk}}{u'_{Rk}} \times 100$$

جدول ۵- مدل سازی عددی ایستگاه ۳۰+۹۰۰ و محاسبه میزان خطای هر مدل در گام اول

شماره مدل	خطای کل (%)	$\phi$ (°)	C (MPa)	E (GPa)
۱	۸/۴۲۱	۳۱	۰/۱۶	۰/۳۹
۲	۶/۸۱۲	۳۳	۰/۳۲	۰/۴۲
۳	۱/۵۴۳	۳۶	۰/۲	۰/۳
۴	۳/۲۵۶	۳۰	۰/۳۴	۰/۲۱
۵	۱/۱۳۹	۳۵	۰/۳	۰/۲
۶	۵/۳۶۱	۳۲	۰/۱۱	۰/۲۷
۷	۷/۵۱۹	۳۴	۰/۲۱	۰/۲۸
۸	۸/۱۴۲	۳۱	۰/۱۳	۰/۴۵
۹	۳/۹۴۱	۳۳	۰/۱۸	۰/۲۵
۱۰	۶/۴۲۲	۳۰	۰/۴۱	۰/۴۳
۱۱	۵/۸۷۵	۳۴	۰/۲۱	۰/۲۹
۱۲	۸/۹۴۲	۳۵	۰/۱۲	۰/۳۹
۱۳	۰/۷۵۷	۳۳	۰/۲۱	۰/۳
۱۴	۱/۰۸۲	۳۱	۰/۲	۰/۳
۱۵	۴/۵۶۱	۳۶	۰/۴۲	۰/۲۳

در ادامه با استفاده از تکنیک رگرسیون مدل های انتخاب شده اولیه در چندین گام تصحیح می شوند به طوری که در گام نهایی تمامی مدل ها دارای خطایی کمتر از ۰/۵ درصد می باشند.

تصحیحات یاد شده برای هر دو ایستگاه در چند گام انجام می گیرند و طی آن مدل هایی که دارای خطای کمتر از ۰/۵ درصد هستند به ترتیب در جداول (۶) و (۷) خلاصه می شوند.

با توجه به اینکه نسبت خطا در محاسبات Flac به صورت کلی در حدود ۲ ~ ۱ درصد است [8,9] تمامی مدل های نهایی که در جداول (۶) و (۷) ارائه شده است، جواب فرآیند تحلیل برگشتی هستند. همان گونه که مشاهده می شود در هر مدل تمام پارامترهای بدست آمده، در محدوده ای که برای پارامترهای مجهول تعیین شده بود قرار گرفته است. بنابراین می توان محدوده نهایی جواب پارامترهای تحلیل برگشتی را تعیین نمود. در جدول (۸) پارامترهای حاصل از تحلیل برگشتی ارائه شده است.

جدول ۶- مدل های عددی که دارای خطای کمتر از ۰/۵ درصد می باشند (ایستگاه ۳۰+۱۵۰)

شماره مدل	خطای کل (%)	$\phi$ (°)	C (MPa)	E (GPa)
۱	۰/۲۰	۳۴	۰/۲	۰/۳
۲	۰/۲۱۰	۳۴	۰/۱۹	۰/۳
۳	۰/۱۵۹	۳۴	۰/۲۱	۰/۳
۴	۰/۴۲۹	۳۴	۰/۲۲	۰/۳
۵	۰/۳۹۱	۳۴	۰/۲۳	۰/۳
۶	۰/۲۲۲	۳۴	۰/۲۴	۰/۳
۷	۰/۲۶۳	۳۴	۰/۲۵	۰/۳
۸	۰/۲۴۵	۳۳	۰/۲	۰/۳
۹	۰/۴۸۶	۳۵	۰/۲	۰/۳
۱۰	۰/۳۶۶	۳۶	۰/۲	۰/۳
۱۱	۰/۴۵۶	۳۳	۰/۲۱	۰/۳
۱۲	۰/۲۳۰	۳۵	۰/۲۱	۰/۳

جدول ۷- مدل های عددی که دارای خطای کمتر از ۰/۵ درصد می باشند (ایستگاه ۳۰+۹۰۰)

شماره مدل	خطای کل (%)	$\phi$ (°)	C (MPa)	E (GPa)
۱	۰/۳۱۷	۳۴	۰/۲۳	۰/۳
۲	۰/۲۰۸	۳۴	۰/۱۹	۰/۳
۳	۰/۲۰۷	۳۴	۰/۲۱	۰/۳
۴	۰/۲۰۶	۳۴	۰/۲۲	۰/۳
۵	۰/۲۰	۳۵	۰/۲	۰/۳
۶	۰/۲۶۹	۳۴	۰/۲۴	۰/۳
۷	۰/۲۶۹	۳۴	۰/۲۵	۰/۳
۸	۰/۲۶۵	۳۳	۰/۲	۰/۳
۹	۰/۱۴۰	۳۵	۰/۲۱	۰/۳
۱۰	۰/۴۴۳	۳۴	۰/۱۸	۰/۳

### نتیجه گیری

- درستی و صحت نتایج تحلیل برگشتی به طور کامل به دقت داده های ورودی بستگی دارد. بنابراین هر چه اندازه گیری های همگرایی با دقت بیشتری انجام شود، تحلیل برگشتی نتایج دقیق تری ارائه می کند.

- پارامترهای ژئومکانیکی بدست آمده از تحلیل برگشتی، کاملاً در محدوده در نظر گرفته شده  $(E = 0.2 \sim 0.45) C = 0.1 \sim 0.5, \varphi = 30 \sim 37^\circ$  قرار گرفته و با نتایج حاصل از آزمایش های مکانیک سنگ انجام شده بر روی مغزه های حفاری مطابقت دارند.

- هدف اصلی از انجام تحلیل برگشتی صرفاً شناسایی مدل مکانیکی همراه با مقادیر ثابت های مکانیکی نیست بلکه هدف آن ارزیابی طرح اصلی یا روش ساخت سازه مورد نظر می باشد.

- مدل انتخاب شده در تحلیل برگشتی باید به اندازه کافی و تا حد ممکن دقیق باشد، زیرا هر چه دقت مدل بیشتر باشد رفتار واقعی سنگ را بهتر نشان می دهد [10].

- در ایستگاه همگرایی  $30+150$  پارامترهای ژئومکانیکی بدست آمده به صورت زیر می باشد:

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

پارامترهای فوق کاملاً در محدوده مورد نظر قرار گرفته است. همچنین نتایج بدست آمده از تحلیل برگشتی ایستگاه همگرایی  $30+900$  به صورت زیر می باشد:

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

جدول ۸- پارامترهای بدست آمده از تحلیل برگشتی

ایستگاه های  $30+900$  و  $30+150$

ایستگاه	ایستگاه	پارامترهای ژئومکانیکی
$30+150$	$30+900$	
$0/28 - 0/3$	$0/28 - 0/3$	E (GPa)
$0/19 - 0/25$	$0/18 - 0/25$	C (MPa)
$32 - 35$	$33 - 35$	$\varphi$ ( $^\circ$ )

در نهایت با دقت به مدل های نهایی که در جداول شماره های (۶) و (۷) ارائه شده اند، ملاحظه می شود که در جدول (۶) مدل شماره ۳ و در جدول (۷) مدل شماره ۹ دارای کمترین خطا در مقایسه با مدل های نهایی دیگر می باشند. بنابراین می توان پارامترهای حاصل از مدل شماره ۳ را برای ایستگاه همگرایی  $30+150$  و پارامترهای حاصل از مدل شماره ۹ را برای ایستگاه همگرایی  $30+900$  به عنوان جواب نهایی تحلیل برگشتی بصورت جدول (۹) در نظر گرفت.

جدول ۹- پارامترهای ژئومکانیکی ایستگاه های

$30+900$  و  $30+150$

ایستگاه	ایستگاه	پارامترهای ژئومکانیکی
$30+150$	$30+900$	
$0/28 - 0/3$	$0/28 - 0/3$	E (GPa)
$0/19 - 0/25$	$0/18 - 0/25$	C (MPa)
$32 - 35$	$33 - 35$	$\varphi$ ( $^\circ$ )

### منابع

- ۱- گروه مهندسين مشاور هراز راه (۱۳۸۷)، عمليات زیرسازى قطعه يك راه آهن قزوین - رشت، جلد دوم، بخش دوم دفترچه مشخصات فنى خصوصى تونل، ۱۲۱ ص.
- 2- Sakurai.S. (1993) "Back analysis in rock engineering. In: Comprehensive rock engineering", vol.4, Eds: J.A Hudson, Elsevier, pp.543-569.
- 3- Oreste.p.p. (2004), back analysis techniques for the improvement of the understanding of rock in underground constructions, Tunnelling & Underground Space Technology. 74p.
- 4- Rosenbrock.H.H. (1960), an automatic method for finding the greatest or least value of a function. The Computer Journal 3.234p.
- 5- Gioda.G, Sakurai.S. (1987), back analysis procedure for the interpretation of field measurments in geomechanics. Int. J. Numerical Anal. Methods Geomech.11 (6), pp.555-583.
- 6- Itasca consulting Group, Inc, (2000), Flac-fast lagrangian Analysis of Continua. Version4.0, User Manual, Minneapolis, MN, USA.123p.
- 7- Gioda.G. (1985), some remarks on back analysis and characterization problems in geomechanics. In: proceedings of the 5<sup>th</sup> International conference on Mumrical methods in geomechanics, Nagoya, pp. 47-61.
- 8- Jeon.Y.S, Yong.H.S. (2004) "Development of a back analysis algorithm using Flac", Int.J. Rock Mech.Min. Sci.Sym. Sino Rock.254p.
- 9- Karakus.M, Fowell.R.J. (2005), "Back analysis for tunnelling induced ground movements and stress redistribution", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.2.0, pp. 514-524.
- 10- Vardakos.S, Gutierrez.M, Barton.N. (2007), "Back analysis of Shimizu tunnel No.3 by DEM", Tunnelling & Underground Space Technology, Vol 22, pp.401-413.

- با دقت در نتایج بدست آمده مشاهده می شود که مقادیر پارامترهای ژئومکانیکی در هر دو ایستگاه نزدیک به هم می باشند که علت این مسئله مشابه بودن جنس لایه ها و شرایط زمین در هر دو ایستگاه می باشد.

- با توجه با اینکه ساختار کلی تونل در تمام قسمت ها یکسان است و همچنین با توجه به این مسئله که در سنگ دربرگیرنده تونل ناپیوستگی خاصی وجود ندارد، بنابراین می توان پارامترهای بدست آمده از تحلیل برگشتی را به عنوان پارامترهای ژئومکانیکی برای کل تونل در نظر گرفت.

- در تحلیل برگشتی تونل قزوین - رشت از روش مستقیم استفاده شده است. این روش با توجه به مزایایی که دارد ولی دارای گام های تکراری است و زمان بر است.