

### طراحی سیستم نگهداری تونل مبتنی بر ابزاربندی با استفاده از روش تحلیل برگشتی مستقیم (مطالعه موردی تونل آزاد راه پونه)

#### پژوهشی

سعید کریمی نسب<sup>۱\*</sup>؛ حسین جلالی فر<sup>۲</sup>؛ مسعود رضائزاد<sup>۳</sup>

۱- دانشیار؛ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، Kariminasab@uk.ac.ir

۲- استاد؛ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، jalalfar@uk.ac.ir

۳- دانش‌آموخته کارشناس ارشد؛ مهندسی مکانیک سنگ، شرکت مهندسی مشاور کوشا معدن، mrezaejad68@gmail.com

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۰/۰۳/۰۶؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۰/۰۶/۰۷

شماره صفحات: ۴۱۵ تا ۴۳۰

شناسه دیجیتال (DOR): 20.1001.1.23223111.1399.9.4.6.5

واژگان کلیدی	چکیده
ابزاربندی تحلیل برگشتی تونل پونه نرم‌افزار Phase2 GRC	<p>تحلیل پایداری تونل‌ها و تعیین مشخصات رفتاری توده‌سنگ با استفاده از روش‌های عددی با محدودیت‌هایی از نظر اعتبارسنجی داده‌های ورودی و خروجی همراه است. یکی از روش‌های کاربردی برای حل این مسائل استفاده از سیستم پایش و ابزاربندی در تونل است که با هدف کنترل جابجایی‌ها و ارزیابی پایداری سازه‌های زیرزمینی و مشخصات توده‌سنگ انجام می‌گیرد. یکی از روش‌های تعیین پارامترهای برجا استفاده از ابزار دقیق و انجام تحلیل برگشتی روی داده‌های حاصل از آن است. در این پژوهش، روش مستقیم تحلیل برگشتی براساس الگوریتم جستجوی تک متغیره برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ در تونل پونه استفاده شده است. تحلیل برگشتی مستقیم براساس 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 می‌گیرد. تحلیل‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار Phase2 انجام شده است. براساس این پژوهش چهار ایستگاه همگرایی‌سنج در چهار محدوده مختلف در طول مسیر تونل انتخاب شد، سپس با استفاده از آنالیز حساسیت پارامترهای موثر ژئومکانیکی بر رفتار تونل شامل <math>E, K, C</math> و <math>\phi</math> جهت انجام تحلیل برگشتی بر اساس جابجایی‌های حاصل از ابزاربندی تعیین شد. جابجایی‌های حاصل از مدل عددی با جابجایی‌های ابزاربندی در نواحی فوقانی و تحتانی تونل با استفاده از تابع خطا تعیین و پارامترهای ژئومکانیکی حاصل از انجام تحلیل برگشتی با حداقل میزان خطا بدست آمده است. با استفاده از مدل‌سازی عددی و براساس پارامترهای ژئومکانیکی حین اجرای تونل سیستم نگهداری مقاوم برای تونل طراحی شد. در سیستم نگهداری طراحی شده میزان قطر مش و لتیس و ضخامت شاتکریت کاهش و مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته شاتکریت افزایش یافته است. برای هر محدوده منحنی واکنش زمین (GRC) براساس پارامترهای ژئومکانیکی و عمق روباره تونل رسم شده تا زمان مناسب جهت نصب سیستم نگهداری تعیین شود.</p>

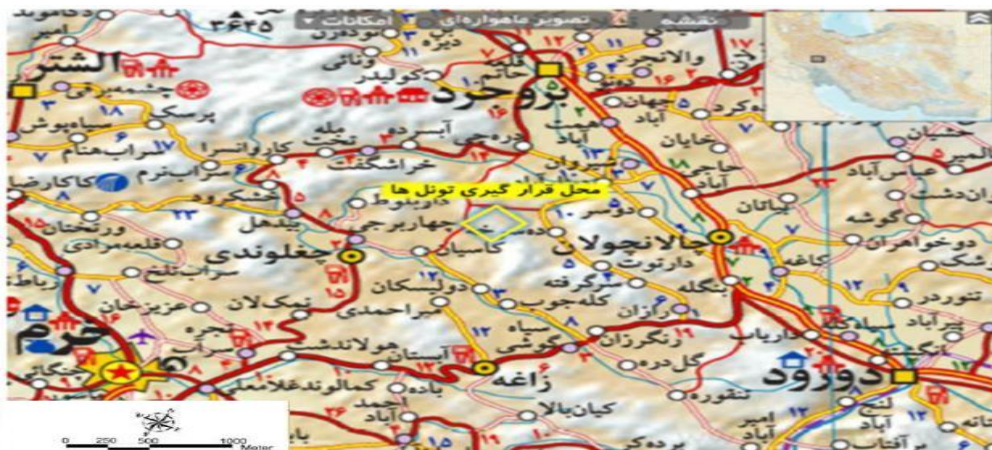
۱- مقدمه  
(ساختارهای زمین‌شناسی، مشخصات ژئومکانیکی سنگ، حالت اولیه تنش، وضعیت آب زیرزمینی، نفوذپذیری و ...) با صحت بالا بسیار دشوار و پرهزینه است. تحلیل پایداری تونل‌ها و تعیین مشخصات رفتاری توده سنگ با استفاده از

به‌دلیل وجود پیچیدگی و تغییرات ناگهانی در مشخصات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی لایه‌های زمین در مراحل اولیه شناسایی، تعیین مقادیر دقیق پارامترهای زمین شامل

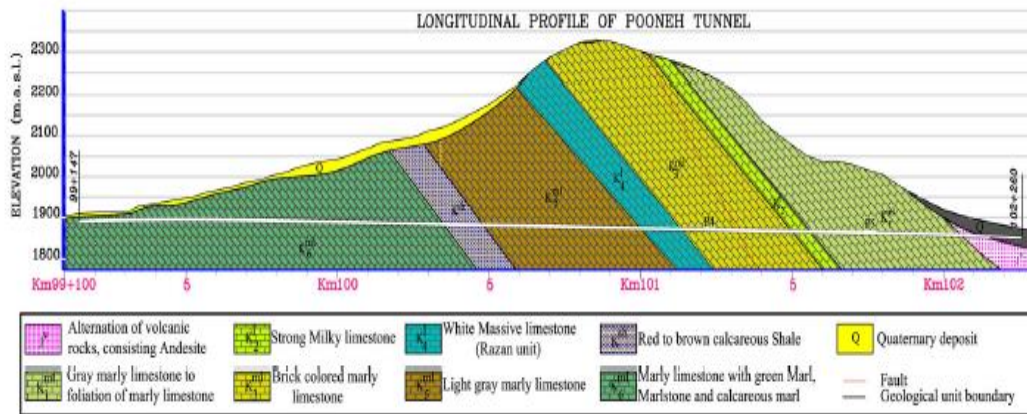
\* کرمان؛ بلوار جمهوری؛ دانشکده فنی مهندسی؛ دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ بخش مهندسی معدن؛ کدپستی: ۷۶۱۸۸-۶۸۲۶۶؛ شماره‌ی تلفن: ۰۳۴-۳۲۱۲۱۰۰۳

های به دست آمده جهت ارزیابی و اصلاح پارامترهای نگهداری اولیه آماده شده است؛ بنابراین اطمینان کافی برای ساخت تونل و زمان نصب نگهداری ثانویه ایجاد شده است. جابجایی مقطع تونل را می‌توان فقط با استفاده از یک همگرایی سنج تعیین کرد؛ بنابراین این کار استفاده از سایر ابزارهای پایش را محدود کرده و هزینه‌های مربوط به عملیات پایش را نیز کاهش داده است (Chunjin, et al., 2015). یزدانی و همکاران روی پارامترهایی مانند مشخصات ژئومکانیکی سنگ‌ها، نرخ کرنش‌ها و پارامترهای درزه‌ها بر اساس جابجایی مغار زیرزمینی نیروگاه سیاه‌بیشه تحلیل برگشتی انجام دادند (Yazdani, et al., 2012). هدف از انجام این تحقیق تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ مسیر تونل پونه، به منظور طراحی سیستم نگهداری تونل در محدوده‌های انتخابی مبتنی بر داده‌های ابزار همگرایی‌سنجی به روش تحلیل برگشتی است. با این روش تخمین دقیق‌تری از خواص ژئومکانیکی و تنش‌های برجا برای محدوده‌های انتخاب شده در تونل به دست آمده که در انتخاب روش حفاری و سیستم نگهداری برای هر محدوده متناسب با شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیک مؤثر بوده است. تعیین زمان مناسب نصب سیستم نگهداری بر اساس رسم منحنی پاسخ زمین (GRC) برای محدوده‌های انتخابی صورت گرفته است. با انتخاب سیستم نگهداری مناسب برای هر محدوده می‌توان در چنین پروژه‌هایی هزینه‌ها را تا حد زیادی کاهش و پایداری نواحی سقف و دیوارهای تونل را تأمین کرد. تونل‌های پونه در کیلومتر ۱۲۰+۹۹ الی ۲۲۰+۱۰۲ (مسیر رفت) و ۱۴۷+۹۹ الی ۲۶۰+۱۰۲ (مسیر برگشت) در قطعه سوم آزادراه خرم‌آباد- اراک حد فاصل شهرهای شازند تا خرم‌آباد واقع شده‌اند. به لحاظ قرارگیری دو تونل در ساختگاه مشترک و دارا بودن مقطع یکسان و همچنین فاصله مناسب از هم تمامی نتایج تحلیل‌ها برای دو تونل یکسان خواهد بود. گستره مورد مطالعه در تقسیم‌بندی ساختاری- رسوبی ایران زمین در ناحیه زاگرس گسل خورده (زاگرس مرتفع) قرار دارد (Pooneh Tunnel Design and Stability Analysis Report, 2014). شکل ۱، موقعیت پروژه را نشان می‌دهد. پروفیل طولی زمین‌شناسی مسیر تونل پونه در شکل ۲، نشان داده شده است.

روش‌های عددی مثل المان محدود، المان مرزی و المان مجزا از نظر اعتبار داده‌های خروجی با محدودیت‌هایی همراه است. یکی از روش‌های کاربردی برای حل این مسائل استفاده از سیستم پایش و ابزاربندی در تونل‌ها است که با هدف کنترل جابجایی‌ها و ارزیابی پایداری سازه‌های زیرزمینی و مشخصات توده‌سنگ انجام می‌گیرد (Dadashzadeh Sayar, et al., 2012). حین طراحی برنامه ابزاربندی و پایش باید از یک سری اصول جهت دسترسی به نتایج کاربردی برای اهداف اجرایی با حداقل هزینه پیروی شود. محل و فاصله ابزارها می‌بایست با در نظر گرفتن ویژگی‌های خاص منطقه انتخاب شوند که وابسته به عواملی مانند چینه‌شناسی، حجم داده و درجه فراوانی موردنیاز (تعداد مراحل خواندن ابزارها) است (ITA Report, 2011). طرح پایش شامل مشخصات مراحل اندازه‌گیری، موقعیت ابزارها و دستورالعمل پایش است. نتایج پایش اغلب تحت تأثیر ابزارها، نصب آن‌ها و اثرات طبیعی منطقه موردنظر است (Wulf, 2014). عملیات پایش قبل، حین و حتی بعد از حفاری تونل جهت تشخیص پارامترهای مهم انجام می‌گیرد. پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ که بر اساس فرضیات اولیه قبل از حفاری تونل تخمین زده شده با نتایج حاصل از اندازه‌گیری ابزارهای پایش مقایسه شده و با استفاده از روش‌های تحلیل برگشتی اصلاحاتی روی آن‌ها صورت می‌گیرد. به طوری که میزان اختلاف بین نتایج پیش‌بینی شده و نتایج اندازه‌گیری شده ابزاربندی به حداقل برسد (Rahimi, et al., 2014). پایش ژئوتکنیکی یکی از مهم‌ترین روش‌ها جهت کنترل امنیت سازه‌های زیرزمینی در مرحله ساخت و بهره‌برداری است. پایش ژئوتکنیکی پروژه‌های مهندسی زیرزمینی اطلاعاتی در مورد پایداری وابسته به زمان، تأثیر زمان و ابعاد فضای سازه روی پایداری سازه آماده می‌کند. علاوه بر این پایش ژئوتکنیکی پروژه زیرزمینی داده‌هایی جهت تحلیل برگشتی روی تغییرشکل‌ها و پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ آماده می‌کند (Qiao, et al., 2016). چنانچه و همکاران با برداشت داده‌های ابزاربندی، پردازش داده‌ها و نهایتاً رسم نمودارهای جابجایی- زمان نرخ تغییرات جابجایی، میزان نشست تاج تونل و همگرایی جابجایی توده‌سنگ اطراف را به وضوح نشان داده‌اند. داده



شکل ۱- موقعیت تونل‌های پونه (Pooneh Tunnel Design and Stability Analysis Report, 2014)

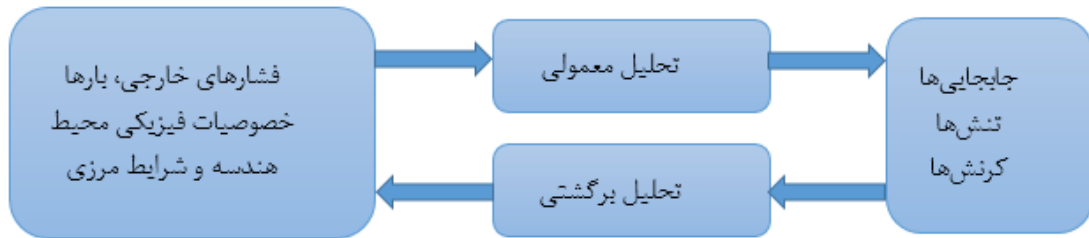


شکل ۲- پروفیل طولی زمین شناسی مسیر تونل پونه (Pooneh Tunnel Design and Stability Analysis Report, 2014)

جایگزین برای حل مسائل تحلیل برگشتی است که می‌توان از آن بجای روش معکوس استفاده کرد. اساس این روش مبتنی بر حداقل نمودن تفاوت موجود بین اندازه‌گیری‌های صحرائی و محاسبه‌شده از مدل عددی است؛ بنابراین در این روش، نیازی به معکوس نمودن معادلات تحلیل تنش نیست (Kazemi, 2006). در تحلیل برگشتی برای مسائل مهندسی سنگ و خاک شرایط نیرو و بارهای خارجی و خواص مکانیکی با توجه به تغییرمکان، تنش و کرنش طی مراحل اجرای پروژه و پس از آن تعیین می‌شود. در تحلیل های عادی شرایط نیرو و خواص مکانیکی اطلاعات ورودی برای تعیین تغییرمکان، تنش و کرنش هستند. شکل ۳، رابطه بین روش معمول تحلیل و روش تحلیل برگشتی را نشان می‌دهد.

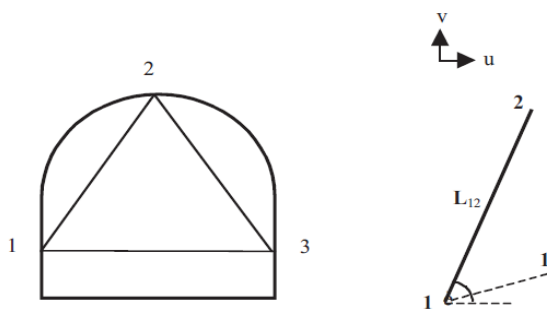
## ۲- روش تحلیل

به‌طور کلی می‌توان تحلیل برگشتی را چنین تعریف کرد: تحلیل برگشتی عبارت است از تکنیکی که قادر است، پارامترهای کنترلی یک سیستم را با تحلیل رفتار خروجی آن پیش‌بینی نماید. موارد مهمی که در تحلیل برگشتی مورد بررسی قرار می‌گیرند شامل، تعیین تنش‌های اولیه و خواص رفتاری سنگ و خاک مورد حفاری با توجه به داده های حاصل از رفتار نگاری با ابزار دقیق است (Sakurai, 1993). روش‌های تحلیل برگشتی اغلب در مهندسی خاک و سنگ به منظور تصحیح اطلاعات طراحی بکار می‌رود. بطور کلی روش‌های تحلیل برگشتی را می‌توان به دو دسته معکوس و مستقیم تقسیم‌بندی کرد. روش مستقیم راه‌حلی



شکل ۳- رابطه بین روش معمول تحلیل و تحلیل برگشتی (Dehghan, 2013)

$\Delta u_1$ : تغییر جابجایی طولی پین شماره ۱ در شروع و پایان مدت زمان قرائت پین  
 $\Delta v_2$ : تغییر جابجایی عرضی پین شماره ۲ در شروع و پایان مدت زمان قرائت پین  
 $\Delta v_1$ : تغییر جابجایی عرضی پین شماره ۱ در شروع و پایان مدت زمان قرائت پین  
 $\theta$ : زاویه بین قطرهای همگرایی سنجی با افق  
 $\Delta l$ : تغییر طول نسبی فاصله بین دو پین همگرایی سنجی  
 شکل ۴، بطور شماتیک پارامترهای معادله ساکورایی را نشان می‌دهد.



شکل ۴- شمایی از رابطه ساکورایی (Sakurai, 1981)

معادله ساکورایی در مورد همگرایی سنجی ایستگاه‌های ۳ و ۵ نقطه‌ای کاربرد دارد و از خطای کمی که در اثر فرضیات ساده کننده در این روش به وجود می‌آید، در تعیین مختصات جابجا شده نقاط صرف نظر می‌کند (Sakurai, 1981).

#### ۴- مدل سازی عددی

در این پژوهش جهت تحلیل برگشتی پارامترهای ژئومکانیکی تونل پونه از نرم‌افزار المان محدود  $Phase^2$  استفاده شده است که بتوان بعد از کالیبراسیون و تدقیق با

در تحلیل برگشتی معکوس و مستقیم برخلاف تحلیل عادی مقادیر به دست آمده یکسان نیستند. علت این است که فرضیات مدل مبتنی بر جابجایی‌ها لحاظ می‌شود و این موضوع باعث می‌شود که پارامترهای به دست آمده یکسان نباشند. تحلیل برگشتی مستقیم براساس 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 می‌گیرد که به صورت رابطه ۱، نشان داده شده است:

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

در رابطه شماره (۱)، پارامترهای  $u_k^*$  مقدار جابجایی اندازه‌گیری شده و  $u_k$  جابجایی محاسبه شده در نقطه  $k$  هستند و پارامتر  $N$  نشان دهنده تعداد نقاط اندازه‌گیری شده است. از مزایای روش مستقیم این است که می‌توان آن را برای معادلات غیرخطی و بدون استفاده از حل معادلات پیچیده ریاضی برای به دست آوردن مقادیر مجهول، بکار برد (Dehghan, 2013).

#### ۳- همگرایی سنجی تونل با استفاده از رابطه ساکورایی

معادله ساکورایی جهت تعیین میزان تغییر طول نسبی بین دو نقطه به صورت رابطه (۲) ارائه شده است.

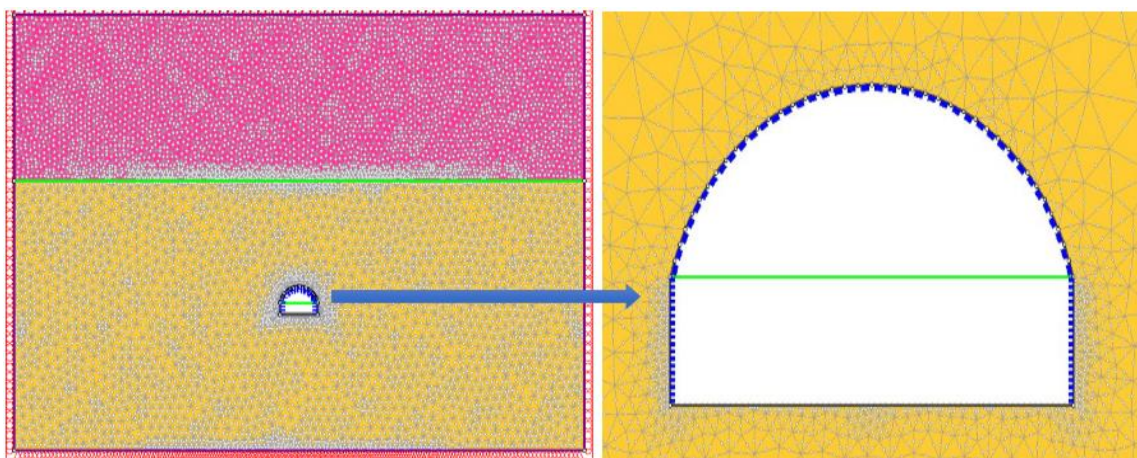
$$\Delta l = (\Delta u_2 - \Delta u_1) \cos \theta + (\Delta v_2 - \Delta v_1) \sin \theta \quad (2)$$

پارامترهای این معادله شامل موارد زیر می‌باشند:

$\Delta u_2$ : تغییر جابجایی طولی پین شماره ۲ در شروع و پایان مدت زمان قرائت پین

دانشیته و ضخامت روباره در مقطع مورد نظر بوده، همچنین جهت تعیین نسبت تنش افقی به قائم از رابطه شئوری استفاده شده است که براساس مدول تغییر شکل‌پذیری و ضخامت روباره است. حفاری تونل در دو مقطع انجام شده و در هر مقطع بلافاصله پس از حفاری سیستم نگهداری موقت متناسب با شرایط اجرایی نصب گردیده است. لازم به ذکر است که سیستم نگهداری تونل ترکیبی از مش، شاتکریت و لیتیس با ابعاد مشخص است که در مدل نیز به صورت ترکیبی در سقف، دیوارها و کف تونل نصب شده است. رفتار مدل به صورت الاستوپلاستیک در نظر گرفته شده و از معیار شکست موهر کولمب استفاده شده است که بیشترین کاربرد را در فرآیند مدل‌سازی دارد. پس از این موارد مدل به تعادل رسیده و براساس مختصات اولیه بین‌های همگرایی‌سنجی مورد استفاده در تونل، این نقاط در محیط تونل جانمایی و جابجایی‌های افقی و قائم برای هر بین به دست آمده است. شکل ۵، مدل ساخته شده متناسب با شرایط اجرایی تونل را نشان می‌دهد.

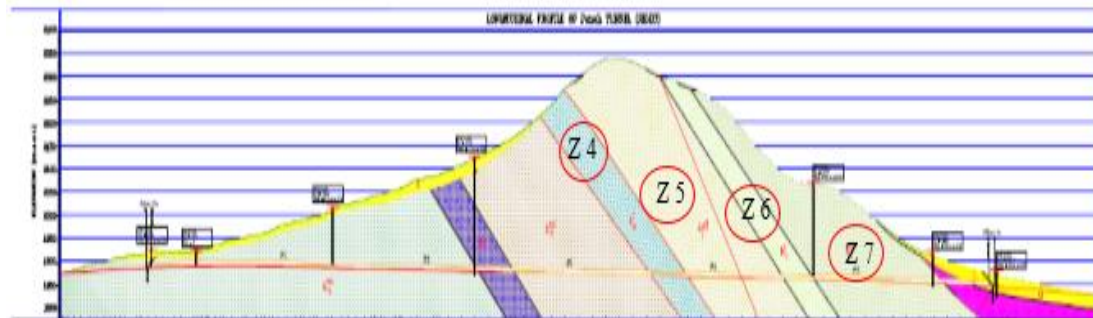
جابجایی‌های ثابت شده همگرایی‌سنجی تاثیر پارامترهای وارده در رفتار تونل را بررسی کرد. نحوه مدل‌سازی متناسب با شرایط اجرایی تونل مذکور بوده، تونل به روش حفاری جدید اتریشی طی دو مرحله به صورت مقطعی حفاری و با توجه به شرایط توده‌سنگ دربرگیرنده محیط سیستم نگهداری موقت بلافاصله نصب شده است. در فرآیند مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار نیز این شرایط اعمال شده، در مدل‌سازی محدوده خارجی اطراف سازه بیش از پنج برابر شعاع تونل تعیین شده تا مرزهای مدل تاثیر چندانی در رفتار توده‌سنگ اطراف سازه بعد از حفاری نداشته باشند و میدان تنش‌های برجا به طور کامل تحت تاثیر حفاری تونل قرار گیرد. مرزهای سمت چپ و راست مدل در جهت افقی بسته و در جهت قائم آزاد هستند و مرز پایینی مدل در هر دو جهت افقی و قائم بسته (محدود) شده‌اند. به لحاظ مش بندی مدل، از مش مثلثی شش‌گه‌ای و به حد کافی ریز استفاده شده تا محاسبات نرم‌افزار دقت کافی را داشته باشند. اعمال شرایط بارگذاری مدل به صورت ثقلی براساس



شکل ۵- تونل مدل‌سازی شده

داده‌های ایستگاه همگرایی‌سنج موجود در هر محدوده انتخاب شدند. در جدول ۱، مشخصات کلی محدوده‌های مورد تحلیل، نمایش داده شده است.

با مطالعه مشخصات محدوده‌های مسیر تونل و بررسی شرایط ایستگاه‌های ابزاربندی، محدوده‌های شماره چهار، پنج، شش و هفت تونل که در شکل ۶، با نمادهای  $z4$  الی  $z7$  نشان داده شده، جهت انجام تحلیل برگشتی با استفاده از



شکل ۶- نمایش محدوده‌های مورد مطالعه در پروفیل طولی تونل (Pooneh Tunnel Design and Stability Analysis Report, 2014)

جدول ۱- مشخصات کلی محدوده‌های مورد تحلیل

محدوده	جنس توده سنگ	طول مسیر (کیلومتر)	روپاره (متر)
چهار	سنگ آهک	۱۰۰+۹۶۰-۱۰۱+۰۹۵	۴۱۱
پنج	سنگ آهک مارنی	۱۰۱+۰۹۵-۱۰۱+۴۴۸	۲۷۸
شش	سنگ آهک	۱۰۱+۴۴۸-۱۰۱+۵۵۷	۲۰۲
هفت	سنگ آهک مارنی	۱۰۱+۵۵۷-۱۰۲+۰۳۶	۱۸۶

### ۵- مدل سازی ایستگاه‌های همگرایی سنجی

در هر محدوده یک ایستگاه همگرایی سنج جهت انجام تحلیل برگشتی انتخاب شد و متناسب با خواص زمین‌شناسی و ژئومکانیکی هر محدوده، مدل سازی هر ایستگاه با نرم افزار انجام شد. در شکل ۷، نقاط نصب پین های همگرایی سنج در محیط تونل و قطرهای همگرایی سنجی بین هر دو پین در مدل عددی که مطابق با شرایط برجا می باشد، نشان داده شده است. مدل سازی عددی بعد از صحت سنجی با شرایط رفتاری تونل انجام شد، بطوریکه با مدل سازی های متعدد و تغییر پارامترهای مؤثر ژئومکانیکی توده سنگ مانند مدول تغییر شکل پذیری، نسبت تنش افقی به قائم، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی متناسب با شرایط توده سنگ و معیار شکست موهر کولمب اختلاف جابجایی ها در بعضی قطرهاى همگرایی سنجی به حداقل ممکن رسیده است. جهت تعیین تغییرات طول هر یک از فواصل بین پین ها از رابطه ساکورایی (رابطه ۲) استفاده شده است.

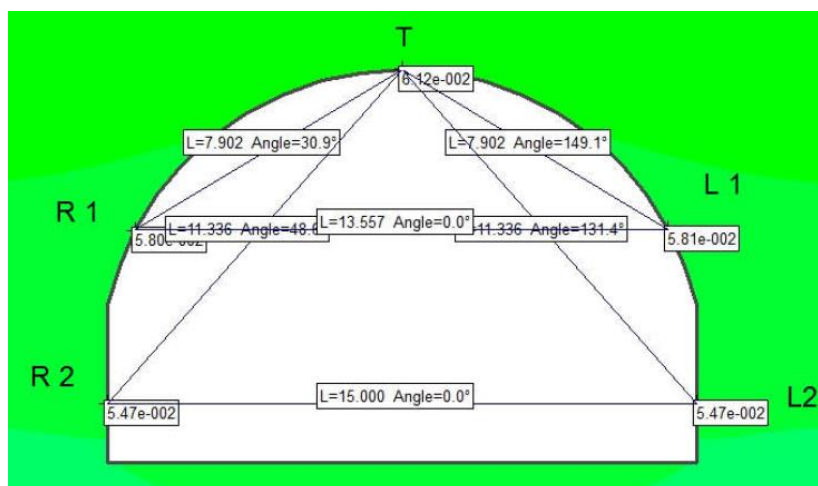
جهت تعیین اختلاف جابجایی اندازه گیری شده بین ابزار همگرایی سنج و مدل عددی، از تابع خطا تحلیل

برگشتی (رابطه ۱) استفاده شده است. با این روش و متناسب با جنس توده سنگ ایستگاه مورد نظر، پارامترهای ژئومکانیکی تغییر خواهند کرد تا بتوان به مطلوب ترین نتایج ممکن رسید و برای هر ایستگاه پارامترهای بهینه را ارائه داد؛ همچنین با تعیین این پارامترها و مقدار جابجایی های به دست آمده برای هر محدوده می توان سیستم نگهداری مناسب را ارائه داد. لازم به ذکر است که پارامترهای ژئومکانیکی در تخمین اولیه جهت طراحی تونل بر اساس روش های تجربی تخمین زده شده که در فرآیند تحلیل حساسیت با تغییر دامنه تغییرات این پارامترها در محدوده قابل قبول، مقدار دقیق آن ها بدست آمد. مدول تغییر شکل پذیری با دامنه تغییر ۲ (۱۲، ۸، ۱۰، ۶، ۴) نسبت به مقدار اولیه افزایش یافته و نسبت تنش افقی به قائم بر اساس رابطه شئوری تعیین شده است. دامنه تغییر چسبندگی نسبت به مقدار اولیه ۵ درصد افزایش و زاویه اصطکاک داخلی با دامنه تغییر ۱ درجه افزایش یافته، با این تغییرات حداقل اختلاف بین جابجایی های حاصل از مدل عددی و ابزار همگرایی سنج بدست آمده است. رابطه شئوری

در جدول ۲، مقدار پارامترهای ژئومکانیکی موثر در تخمین اولیه جهت مدل‌سازی عددی و نتیجه تحلیل حساسیت این پارامترها بر اساس تحلیل برگشتی جابجایی‌های حاصل از ایستگاه‌های همگرایی سنج برای هر محدوده از تونل نشان داده شده است.

به دو پارامتر اساسی مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ و ارتفاع روباره وابسته است که در شکل (۳) نشان داده شده است (Hoek, 2006).

$$K = 0.25 + 7E(0.001 + \frac{1}{H}) \quad (3)$$



شکل ۷- جانمایی پین‌های همگرایی‌سنجی در مدل عددی

جدول ۲- پارامترهای ژئومکانیکی حین طراحی و اجرای تونل

محدوده	پارامترها	مدول تغییر شکل‌پذیری (گیگاپاسکال)	نسبت تنش‌ها	چسبندگی (مگاپاسکال)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
چهار	تخمین اولیه	۱۱	۰/۵	۱/۹	۳۸
	تحلیل حساسیت	۱۵	۰/۵۷	۲/۱	۴۰
پنج	تخمین اولیه	۴/۳	۰/۳۸	۱/۱	۳۰
	تحلیل حساسیت	۱۰	۰/۶	۲	۴۰
شش	تخمین اولیه	۸	۰/۵۸	۱/۱	۴۱
	تحلیل حساسیت	۱۲	۰/۷۵	۱/۳	۴۳
هفت	تخمین اولیه	۵/۷	۰/۵	۰/۸	۳۹
	تحلیل حساسیت	۱۲	۰/۷۵	۱	۴۲

جدول ۳، مقایسه تغییر طول بین پین‌های همگرایی‌سنجی نصب شده در محیط تونل بر اساس مختصات تعیین شده توسط شرکت طراح پروژه حین طراحی تونل و تغییر طول قطرهای همگرایی‌سنجی حاصل از مدل‌سازی عددی را نشان می‌دهد که در شکل ۸، نشان داده شده است؛ همچنین در این جدول درصد اختلاف جابجایی بین پین‌های همگرایی‌سنجی در دو حالت ابزاربندی و مدل عددی با استفاده از تابع خطا (رابطه شماره ۱) محاسبه شده است. مطابق جدول ۳، بیشترین اختلاف جابجایی بین ابزاربندی و مدل عددی مربوط به قطرهایی است که در ناحیه تحتانی تونل قرار گرفته‌اند. دلیل این اختلاف ضعف‌های موجود در عملیات اجرایی تونل از قبیل فاصله زمانی بین حفاری ناحیه تحتانی و فوقانی، فاصله طولی بیش از ۲/۵ برابر قطر تونل بین ایستگاه ابزاربندی و سینه کار تونل

استفاده از تابع خطا (رابطه شماره ۱) محاسبه شده است. مطابق جدول ۳، بیشترین اختلاف جابجایی بین ابزاربندی و مدل عددی مربوط به قطرهایی است که در ناحیه تحتانی تونل قرار گرفته‌اند. دلیل این اختلاف ضعف‌های موجود در عملیات اجرایی تونل از قبیل فاصله زمانی بین حفاری ناحیه تحتانی و فوقانی، فاصله طولی بیش از ۲/۵ برابر قطر تونل بین ایستگاه ابزاربندی و سینه کار تونل

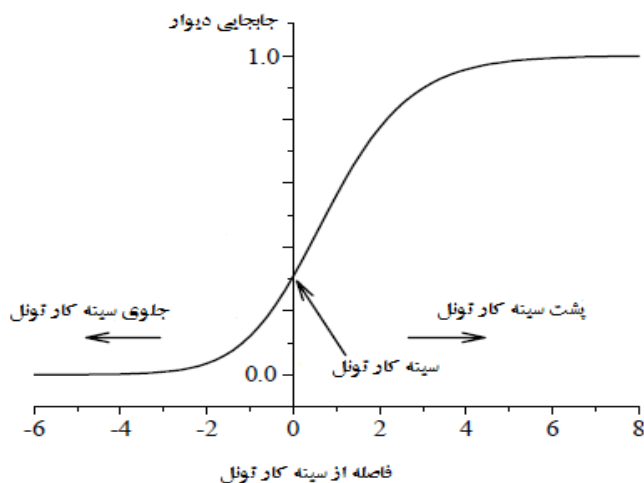
طراحی سیستم نگهداری تونل مبتنی بر ابزاربندی با استفاده از روش تحلیل برگشتی... سعید کریمی نسب و ... ص ۴۱۵-۴۳۰

پنجاه متر بوده که از ۲/۵ برابر قطر تونل بیشتر است. این مطلب را می‌توان بر اساس پروفیل تغییرشکل طولی (LDP) تونل که در شکل شماره ۸ نشان داده شده، توجیه کرد (Vlachopoulos, et al., 2009).

که باعث شده ابزارها درصد قابل توجهی از جابجایی‌های اولیه (بلافاصله بعد از حفاری) را ثبت نکنند. فاصله ایستگاه-های ابزاربندی از سینه کار تونل بطور متوسط

جدول ۳- مقایسه جابجایی بین ابزاربندی و مدل عددی در قطرهای همگرایی سنجی

محدوده	جابجایی/قطر	TR 1 (mm)	TL 1 (mm)	RI LI (mm)	TR 2 (mm)	TL 2 (mm)	R2 L2 (mm)
چهار	ابزاربندی	۱/۶۷	۰/۳	۱/۹۳	۱/۶۵	۱/۴۳	۲/۱
	مدل عددی	۰/۸	۰/۸	۱/۶	۱۴	۱۲	۶
	درصد اختلاف	۰/۵	۰/۸	۰/۰۶	۹۲	۷۸	۷/۲
پنج	ابزاربندی	۰/۵	۰/۵۶	۱/۰۷	۰/۷۱	۰/۳۹	۰/۶۳
	مدل عددی	۰/۸	۱	۰/۳	۱۳	۱۱	۵
	درصد اختلاف	۰/۲	۰/۳	۰/۶	۲۱۲	۲۸۸	۳۰
شش	ابزاربندی	۰/۸	۰/۹	۰/۹۷	۰/۶۸	۰/۵۳	۰/۳۲
	مدل عددی	۱	۱	۱	۷	۵	۴
	درصد اختلاف	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۰۱	۵۸	۳۷	۴۲
هفت	ابزاربندی	۱/۵۲	۲	۰/۹۲	۰/۷۶	۰/۶۸	۰/۷۹
	مدل عددی	۰/۵	۱	۲	۸	۵	۵
	درصد اختلاف	۰/۷	۰/۵	۱/۲	۶۹	۲۷	۲۲



شکل ۸- پروفیل تغییرشکل طولی (LDP) تونل (Zhang, 2008)

## ۶- طراحی سیستم نگهداری

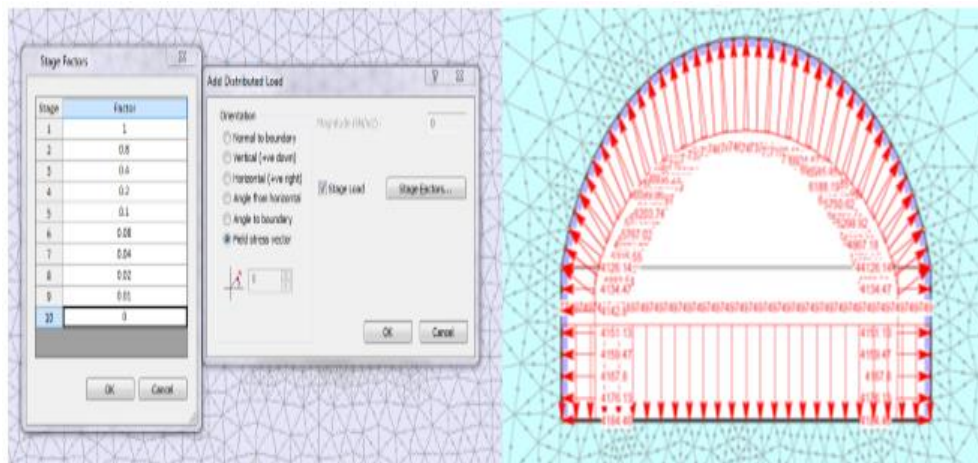
مسیر تونل، در مدل عددی سیستم نگهداری مورد نظر طراحی شده است. برای هر یک از محدوده‌ها به صورت مجزا با توجه به بار اعمالی به تونل و بر اساس دستور موجود در

بر اساس تحلیل برگشتی جابجایی‌های همگرایی سنجی و تغییر پارامترهای ژئومکانیکی، ارتفاع روباره و وضعیت میدان تنش برای محدوده‌های شماره چهار، پنج، شش و هفت در

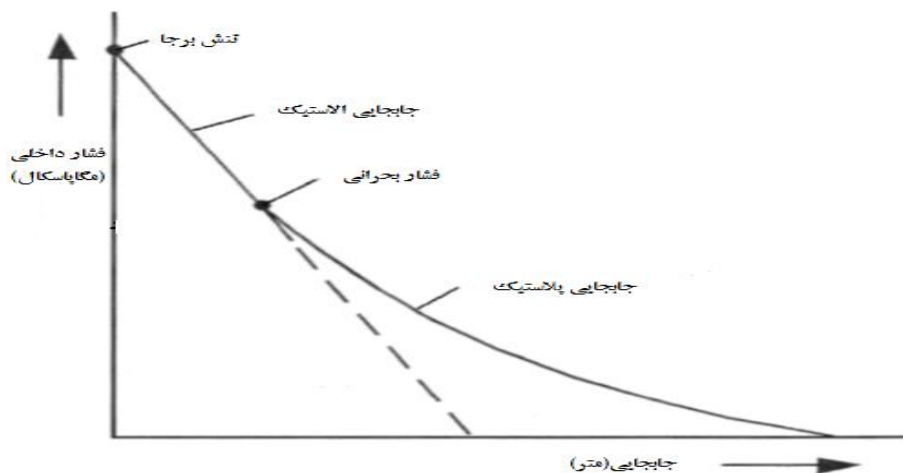


سیستم نگهداری مناسب برای تونل طراحی و نصب گردد، در صورتی‌که جایجایی‌ها وارد ناحیه پلاستیک شوند یا محور افقی را قطع کنند (به تعادل برسند) نصب سیستم نگهداری بی‌تأثیر است. در شکل ۱۰، منحنی پاسخ زمین بطور شماتیک رسم شده که روی آن نواحی الاستیک، پلاستیک و نقطه فشار بحرانی نشان داده شده است (Rocsupport Tutorial Manual, 2009).

نرم‌افزار طی ده مرحله، بار به صورت ضرایبی به سازه اعمال شد که در شکل ۹، نشان داده شده است. با این روش برای نواحی سقف و دیوارهای تونل منحنی پاسخ زمین (GRC) طراحی شد، بر اساس این نمودار نقطه تغییر حالت از وضعیت الاستیک به پلاستیک موسوم به فشار بحرانی تعیین می‌شود. این نقطه در واقع نشان‌دهنده وضعیت تسلیم توده سنگ بوده که می‌بایست قبل از رسیدن سنگ به این شرایط



شکل ۹- اعمال بار داخلی و ضرایب تعدیل بار براساس ارتفاع روباره تونل

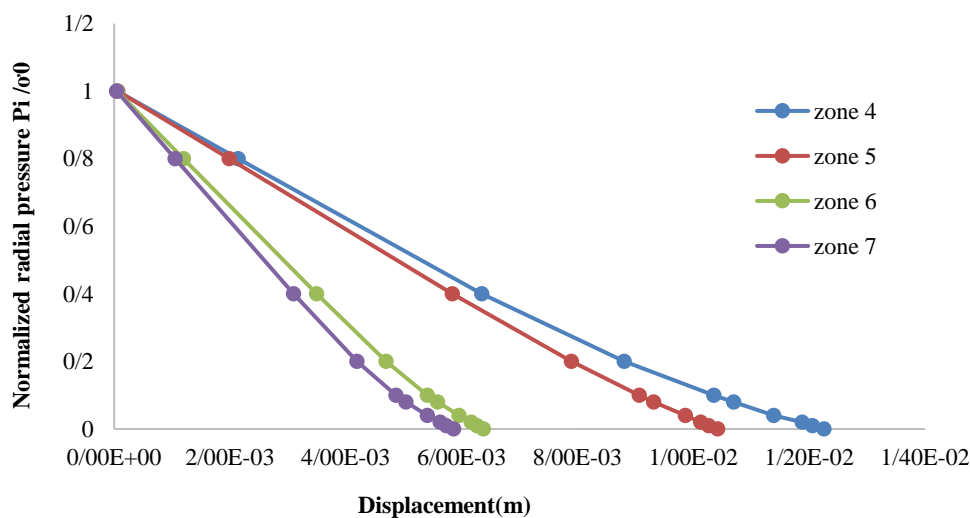


شکل ۱۰- منحنی پاسخ زمین (GRC) (Rocsupport Tutorial Manual, 2009)

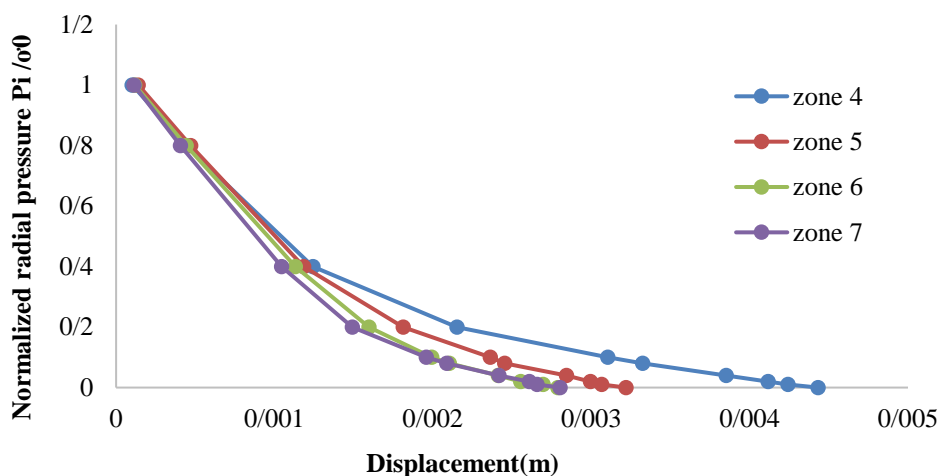
جایجایی شعاعی محیط تونل در محور افقی ترسیم شده است. در این نمودار حالت‌های رفتاری توده‌سنگ دربرگیرنده تونل شامل، رفتار الاستیک، رفتار پلاستیک و نقطه تسلیم براساس تأثیر عمق روباره تونل و پارامترهای ژئومکانیکی هر

در شکل ۱۱ و شکل ۱۲، منحنی پاسخ زمین برای سقف و دیوارهای تونل در هر محدوده بطور مجزا ترسیم شده است. نمودار واکنش زمین براساس نسبت بار وارد بر محیط تونل به فشار داخلی تونل در محور قائم و میزان

محدوده به وضوح تعیین شده که براساس آن می توان زمان مناسب نصب سیستم نگهداری را تعیین کرد.



شکل ۱۱- مقایسه منحنی پاسخ زمین در سقف تونل برای محدوده‌های مختلف (GRC ROOF)



شکل ۱۲- مقایسه منحنی پاسخ زمین در دیوار تونل برای محدوده‌های مختلف (GRC WALL)

نگهداری با مشخصات جدید طراحی و پیشنهاد گردید. در سیستم نگهداری پیشنهادی که براساس شرایط اجرایی پروژه طراحی شده، ضخامت مش، لتیس و شاتکریت کاهش و میزان مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته شاتکریت افزایش داده شده است. در جدول ۴، مشخصات سیستم نگهداری حین طراحی تونل و سیستم نگهداری پیشنهادی براساس شرایط اجرایی تونل نشان داده شده است.

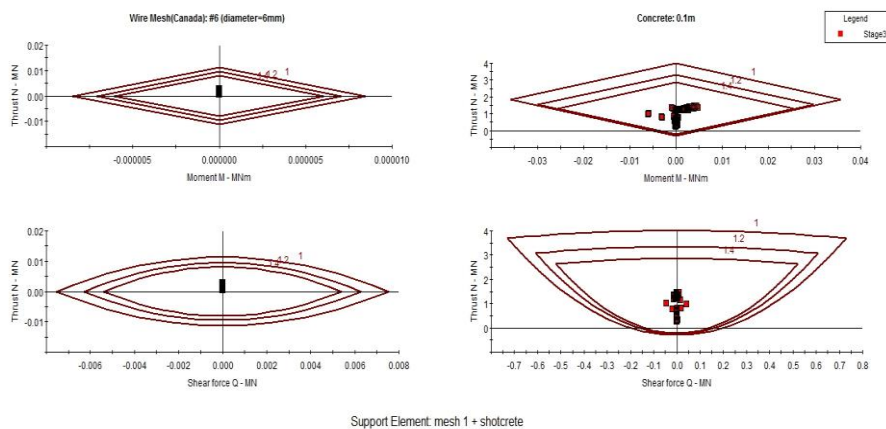
در فاز طراحی براساس نتایج مطالعات طرح تونل پونه، سیستم نگهداری ترکیبی با مشخصات معین در نظر گرفته شده است. در این تحقیق بر اساس پارامترهایی مانند جابجایی‌های حاصل از پین‌های همگرایی سنج نصب شده در سقف و دیوارهای تونل، انجام تحلیل برگشتی جهت تعیین پارامترهای ژئومکانیکی موثر بر رفتار تونل، عمق روباره تونل و تعیین میدان تنش با استفاده از مدل‌سازی عددی سیستم

جدول ۴- مقایسه اجزا سیستم نگهداری حین طراحی تونل و اجرای تونل بر اساس تحلیل برگشتی

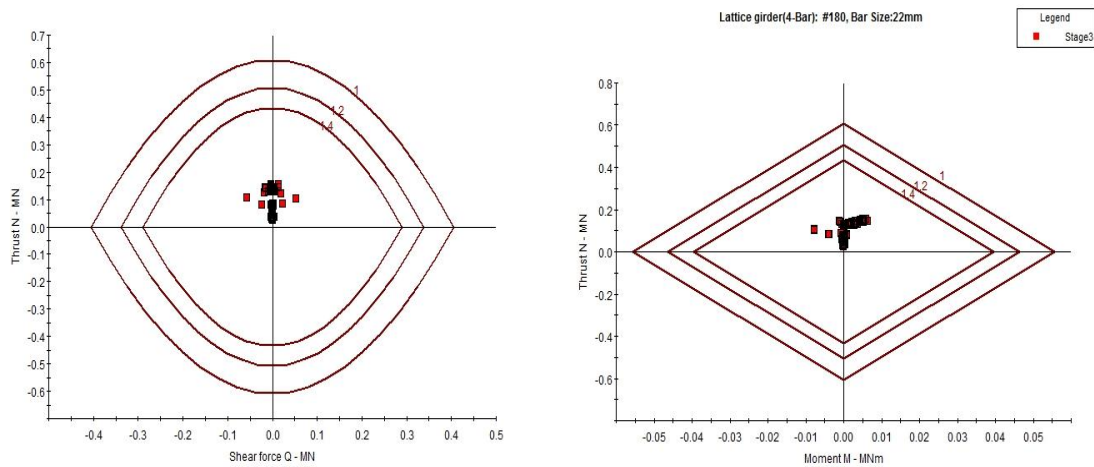
اجزا سیستم نگهداری	مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	ضخامت، قطر (میلی‌متر)
سیستم نگهداری حین طراحی تونل	شاتکریت	۲۱	۳۰۰
	مش (تور سیمی)	۴۰۰	۸
	لتیس گیردر	۴۰۰	۳۲
سیستم نگهداری براساس تحلیل برگشتی	شاتکریت	۴۰	۲۰۰
	مش (تور سیمی)	۴۰۰	۶
	لتیس گیردر	۴۰۰	۲۲

نیروی برشی و نیروی محوری در مقابل ممان خمشی برای مش و شاتکریت و لتیس نشان داده شده است. در این نمودارها مقدار ضریب ایمنی برای هر یک از اجزا سیستم نگهداری بیشتر از ۱/۴ تعیین شده که نشان دهنده مقاومت بالای سیستم نگهداری است. برای تعیین مقدار ضریب اطمینان مجاز سیستم نگهداری طراحی شده، ضریب اطمینان در چند فاز مورد تحلیل قرار گرفت. اعداد ضریب اطمینان در بازه عددی ۱ تا ۲ با دامنه تغییرات ۰/۲ به صورت ۱، ۱/۲، ۱/۴، ۱/۶، ۱/۸ و ۲ تعیین شد. براساس ترسیم منحنی‌های نیروی محوری در مقابل نیروی برشی و نیروی محوری در مقابل ممان خمشی برای هر یک از سیستم‌های نگهداری به صورت مجزا مشخص شد که سیستم نگهداری طراحی شده به ازای ضریب ایمنی ۱/۴ در نواحی مختلف تونل دچار گسیختگی نشده و پایداری لازم را دارد.

در نرم‌افزار *Phase<sup>2</sup>* این قابلیت وجود دارد که نمودارهای نیروی محوری در مقابل نیروی برشی و نیروی محوری در مقابل ممان خمشی برای هر یک از سیستم‌های نگهداری به صورت مجزا ترسیم گردد. شاتکریت دارای مقاومت فشاری بالایی است، اما مقاومت خمشی آن چندان بالا نیست؛ بنابراین شاتکریت همراه با مش به صورت ترکیبی استفاده شده است. در صورتی که مقاومت سیستم نگهداری را بر اساس حداقل مقاومت خمشی شاتکریت در نظر بگیریم، طوری که ضریب ایمنی خمشی شاتکریت در سیستم نگهداری بالاتر از یک باشد، مقاومت سیستم نگهداری حفظ شده و ضریب ایمنی آن قابل قبول است. ضمن اینکه در شرایط واقعی مقاومت سیستم نگهداری ترکیبی مش، شاتکریت و لتیس بالاتر از حالتی است که هر یک از این سیستم‌ها به صورت مجزا استفاده شود. در شکل ۱۳ و شکل ۱۴، به ترتیب نمودارهای نیروی محوری در مقابل



شکل ۱۳- نمودارهای نیروی محوری- ممان خمشی و نیروی محوری- نیروی برشی برای مش و شاتکریت



Support Element: lattice

شکل ۱۴- نمودارهای نیروی محوری - ممان خمشی و نیروی محوری - نیروی برشی برای لتیس گیردر

## ۷- نتیجه گیری

است. در مدل عددی پس از تعیین پارامترهای ژئومکانیکی متناسب با شرایط اجرایی تونل سیستم نگهداری مناسب طراحی و براساس منحنی اندرکنش سنگ و سیستم نگهداری زمان مناسب نصب آن در محیط تونل با توجه به نقطه تسلیم (تغییر حالت الاستیک به پلاستیک) تعیین شد. با ترسیم منحنی پاسخ زمین حالت‌های رفتاری توده سنگ دربرگیرنده تونل برای نواحی سقف و دیوارهای تونل متناسب با عمق روباره، میدان تنش و میزان جابجایی‌ها در هر محدوده تعیین شده است. در سیستم نگهداری پیشنهادی میزان قطر مش از ۸ به ۶ میلی‌متر کاهش، میزان ضخامت لتیس از ۳۲ به ۲۲ سانتی‌متر کاهش و میزان ضخامت شاتکریت از ۳۰ به ۲۰ سانتی‌متر کاهش یافته و مقاومت فشاری شاتکریت از ۲۱ به ۴۰ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته شاتکریت از ۲۲ به ۳۲ گیگاپاسکال افزایش یافته است. با این تغییرات ملاحظه می‌شود، سیستم نگهداری پیشنهادی با توجه به نمودارهای نیروی محوری، نیروی برشی و ممان خمشی قابلیت نگهداری تونل با توجه به مشخصات ژئومکانیکی حاصل از تحلیل برگشتی را دارد. مدل استفاده شده در این پژوهش می‌تواند در شناسایی رفتار ژئوتکنیکی، طراحی روش حفاری و سیستم نگهداری مناسب برای پروژه‌های مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

در این پژوهش شرایط رفتاری چهار محدوده در طول مسیر تونل پونه به لحاظ ژئوتکنیکی بر اساس تحلیل برگشتی جابجایی‌های همگرایی‌سنجی در ایستگاه‌های همگرایی‌سنج نصب شده در هر محدوده بطور مجزا مورد تحلیل قرار گرفت. حین طراحی اولیه تونل با توجه به محدودیت‌های مطالعاتی امکان خطا در تعیین پارامترهای ژئومکانیکی وجود دارد که با استفاده از روش تحلیل برگشتی حین اجرای تونل می‌توان این خطا را اصلاح کرد. پس از انجام تحلیل حساسیت روی پارامترهای مختلف ژئومکانیکی تونل، چهار پارامتر مدول تغییرشکل پذیری، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و نسبت تنش‌های افقی به قائم به عنوان پارامترهای اساسی جهت انجام فرآیند تحلیل برگشتی براساس جابجایی‌های حاصل از ابزاربندی انتخاب شد. با استفاده از مدل‌سازی عددی و کالیبراسیون مدل عددی براساس جابجایی‌های حاصل از نتایج ابزاربندی مقدار پارامترهای ژئومکانیکی موثر برای هر محدوده تونل تعیین شد. با استفاده از تابع خطا میزان اختلاف بین جابجایی‌های اندازه گیری شده با ابزاربندی و مدل‌سازی عددی تعیین و مشخص شد که بیشترین اختلاف جابجایی‌ها مربوط به قسمت تحتانی تونل می‌باشد که علت آن فاصله زمانی حفاری تونل در دو بخش فوقانی و تحتانی و فاصله زیاد بین‌های همگرایی‌سنج ناحیه تحتانی تونل از سینه کار تونل

## ۸- مراجع

- Chunjin, L. Lun, Zh. Shucai, Li. Zhenhao, Xu. Liping, Li. Jing, Wu. Yanhuan, Zh. (2015). Tunnel Monitoring and Measurement Case Study in Qiyueshan Tunnel. *Mechanical and Manufacturing Engineering, 3<sup>rd</sup> International Conference on Material*
- Dadashzadeh Sayar, A. Khalilpasha, M. (2012). Using Extensometer as a Monitoring System, Case Study: Taloun Pilot Tunnel in Tehran- North of Iran Freeway. *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, pp. 1696-1700
- Dehghan, A. (2013). Selecting the Appropriate Design of the Primary Support System of Karaj Metro Tunnel Based on the Results of Instrumentation and Back Analysis Algorithm. *Journal of Tunneling and Underground Space Engineering*
- Hoek, E. (2006). Practical Rock Engineering. *Consulting Engineer Inc, 102-3200 Capilano Crescent North Vancouver, British Columbia Canada V7R 4H7*
- Kazemi, V. (2006). Evaluation of the Stability of Lavark Power House Cavern by Back Analysis. *Master of Science Thesis, Department of Mining Engineering, Bahonar University of Kerman*
- Monitoring and Control in Tunnel Construction. (2011). *International Tunnelling and Underground Space Association, ITA Report*
- Pooneh Tunnel Design and Stability Analysis Report. (2014)
- Qiao, L. Li, Sh. Wang, Zh. Tian, Hao. Bi, Liping. (2016). Geotechnical Monitoring on the Stability of a Pilot Underground Crude- Oil Storage Facility During the Construction Phase in China. *Measurement*, pp. 421-431
- Rahimi, B. Shahriar, K. Sharifzadeh, M. (2014). Evaluation of Rock Mass Engineering Geological Properties Using Statistical Analysis and Selecting Proper Tunnel Design Approach in Qazvin-Rasht Railway Tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, pp. 206-222
- RocSupport Tutorial Manual. (2009). Rock Support Interaction and Deformation Analysis for Tunnels in Weak Rock. *Rocscience Inc.*
- Sakurai, S. (1993). Back Analysis in Rock Engineering, In Hudson(ED). *Comprehensive Rock Engineering*, Vo 14, Chap 19, pp.453-569
- Sakurai, S. (1981). Interpretation of Displacement Measurements. *Proceeding of the International Symposium on Weak Rock, Tokyo*, pp. 751-756
- Vlachopoulos, N. Diederichs, M. S. (2009) Improved Longitudinal Displacement Profiles for Convergence Confinement Analysis of Deep Tunnels. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, pp.131-146
- Wulf, Sch. (2014). Geotechnical Monitoring in Conventional Tunnelling. *Austrian Society for Geomechanics*
- Yazdani, M. Sharifzadeh, M. Kamrani, K. Ghorbani, M. (2012). Displacement Based Numerical Back Analysis for Estimation of Rock Mass Parameters in Siah Bisheh Powerhouse Cavern Using

طراحی سیستم نگهداری تونل مبتنی بر ابزاربندی با استفاده از روش تحلیل برگشتی... سعید کریمی نسب و ... ص ۴۱۵-۴۳۰

Continuum and Discontinuum Approach. *Tunn. Undergr. Space Technol*, pp. 41-48

Zhang, P. Yin, J.J. Nordlund, E. Li, N. (2008). Determination and Verification of the Longitudinal Deformation Profile in a Horse-shoe Shaped Tunnel Using Two-Stage Excavation. *5<sup>th</sup> International Conference and Exhibition on Mass Mining, Lulea Sweden*.

## Design of tunnel support system based on instrumentation data using direct back analysis method (Case study: Pooneh Tunnel, Khorramabad - Arak Freeway)

S. Karimi Nasab<sup>1</sup>; H. Jalalifar<sup>2</sup>; M. Rezanejad<sup>1</sup>

1-Associate Professor; Department of Mining Engineering, Bahonar University of Kerman, kariminasab@uk.ac.ir

2-Professor; Department of Mining Engineering, Bahonar University of Kerman, jalalifar@uk.ac.ir

3-M Sc in Rock Mechanics Engineering; Kusha Mining Consulting Engineering, mrezonejad68@gmail.com

Received: 27 May 2021; Accepted: 28 Aug 2021

DOR: 20.1001.1.23223111.1399.9.4.6.5

### Keywords

Instrumentation  
Back analysis  
Pooneh Tunnel  
Phase2 software  
GRC

### Extended Abstract

#### Summary

Stability analysis of tunnels and determination of behavioral characteristics of rock mass using numerical methods such as finite element, boundary element and discrete element are associated with limitations in terms of validation of input and output data. One of the practical methods to solve these problems is the use of monitoring and instrumentation system in tunnels, which is carried

out with the aim of controlling displacements and assessing the stability of underground structures and rock mass characteristics. In mountainous tunnels, the main purpose is to measure the deformation during tunnel construction and to ensure that ground pressures are controlled on the temporary support system. One of the methods to determine the parameters in situ is to use the instruments and perform back analysis on the resulting data. In this research, the direct method of back analysis based on univariate search algorithm has been used to determine the geomechanical parameters of rock mass in Pooneh Tunnel. Numerical analysis was performed using Phase<sup>2</sup> software. Based on this research, four zones along the tunnel route were selected along with four convergence-measuring stations then by changing the parameters  $E$ ,  $K$ ,  $C$  and  $\phi$  and performing back analysis, the best relationship between tool displacement and modeling results was obtained and a suitable support system was provided accordingly. A ground reaction curve (GRC) is plotted for each zone to determine the appropriate time to install the support system.

### Introduction

During the execution of the structure, instrumentation and behavioral measurement is a suitable tool by which the parameters and assumed conditions of the design can be verified and the performance of the structure and the rock mass or in case of instability due to it can be determined. Monitoring tools installed inside the tunnel should be in a suitable place and as the tunnel excavation advance, ground deformations should be recorded by the tools. Deformation control along with the advance of the tunnel face is an important factor in the overall stability of the tunnel. The purpose of this study is to determine the geomechanical parameters of the rock mass of the Pooneh Tunnel route, in order to design the tunnel support system in selected zones based on convergence tool data by back analysis method. With this method, a more accurate estimate of the geomechanical properties and in situ stresses for the selected zones in the tunnel has been obtained, which has been effective in selecting the excavation method and support system for each zone appropriate to the geological and geotechnical conditions.

### Methodology and Approaches

Direct back analysis is based on reducing the amount of difference between the amount of displacement measured with the displacement calculated from the usual numerical analysis assuming unknown parameters. This is done by a

function called the error function. The Sakurai equation is used to determine the relative length change between two points. In this study, for the back analysis of the geomechanical parameters of the Pooneh Tunnel, Phase<sup>2</sup> finite element software has been used in which the results can be calibrated and checked with the registered convergence displacements to investigate the effect of the parameters on the tunnel behavior. The modeling method is in accordance with the construction conditions of the tunnel and the tunnel is excavated partial face by the new Austrian tunneling method in two stages, and according to the rock mass conditions surrounding the tunnel, the temporary support system is installed immediately. Based on the back analysis of convergence displacements and changes in geomechanical parameters, overburden height and stress field status for zones 4, 5, 6 and 7 in the tunnel path, the support system is designed using the numerical model. The support system designed for the Pooneh Tunnel consists of two layers of mesh (wire mesh), lattice girder and shotcrete, which are installed immediately after the tunnel excavation step.

### **Results and Conclusions**

During the initial design of the tunnel, due to the study limitations, there is a possibility of error in determining the geomechanical parameters, which can be corrected using the method of back analysis during the tunnel construction. In this study, using back analysis method and numerical modeling based on the behavior of the structure during execution, geomechanical parameters were modified to determine the difference in numerical modeling during tunnel design and construction. By recognizing the geotechnical conditions of the zones in the tunnel route, it is possible to determine the excavation methods and support system appropriate to the tunnel conditions. Using numerical modeling, a new support system was designed for the tunnel that has a high safety factor, and also, the ground response curve for each zone was drawn separately in the roof and wall areas of the tunnel to sufficiently understand the behavior of the support system and its proper installation time. The model used in this research can be used to identify geotechnical behavior, design excavation methods and appropriate support system for similar projects.

---