

تحلیل برگشتی برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی محیط دربرگیرنده تونل انتقال آب به دریاچه ارومیه

مقاله پژوهشی

حامد بخشی^۱، ابوالفضل عبدالمهی پور^{۲*}، علی رضا کارگر^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ؛ دانشکده مهندسی معدن، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران، hbakhshi62@ut.ac.ir

۲- استادیار؛ دانشکده مهندسی معدن، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران، abdollahipour@ut.ac.ir

۳- استادیار؛ دانشکده مهندسی معدن، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران، ar.kargar@ut.ac.ir

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۲/۰۷/۰۱؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۳/۱۲/۰۸

شماره صفحات: ۱۷ تا ۳۲

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2025.13623.1481

واژگان کلیدی	چکیده
تحلیل برگشتی ابزار دقیق رفتارسنجی پارامترهای ژئومکانیکی FLAC3D	اندازه‌گیری پارامترهای ژئومکانیکی همانند چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و مدول الاستیسیته از طریق آزمایش‌های آزمایشگاهی رایج و آزمون‌های برجا در حین اجرای پروژه مشکل و بعضاً غیرممکن است، یکی از بهترین روش‌های ارزیابی این پارامترها انجام تحلیل برگشتی نتایج داده ابزار دقیق است. ترکیب داده‌های ابزار دقیق اطراف مقاطع حفاری و نتایج تحلیل برگشتی موجب اندازه‌گیری دقیق پارامترهای ژئومکانیکی در مسیر تونل می‌شود. در این پژوهش، از روش تحلیل برگشتی و الگوریتم جستجوی تک متغیره مستقیم برای تخمین مجموعه پارامترهای مقاومتی محیط دربرگیرنده سنگ ضعیف و قوی در مسیر تونل انتقال آب به دریاچه ارومیه استفاده شده است. در جریان اجرای تونل‌های دسترسی پروژه تونل، به دلیل وجود مخاطرات زمین‌شناسی در اجرای پروژه، تجهیزات ابزار دقیق و رفتارسنجی کاملی نصب شده در مقاطع مختلف تونل و داده‌های آن مورد پردازش قرار گرفته است. در این پژوهش یک ایستگاه در محدوده سنگ ضعیف و یک ایستگاه در مقطع سنگ قوی انتخاب و تحلیل شده است. در ادامه آنالیز حساسیت پارامترهای ژئومکانیکی شامل E ، C و φ به منظور تعیین میزان تاثیر این پارامترها بر رفتار تونل صورت گرفته است. در این پژوهش، تحلیل عددی با استفاده از نرم افزار $FLAC^{3D}$ انجام و برای محدوده سنگ ضعیف مدول الاستیسیته بین ۲۷۵ تا ۶۵۰ مگاپاسکال، چسبندگی بین ۴۰ تا ۲۰۰ کیلوپاسکال و زاویه اصطکاک داخلی بین ۲۵ تا ۳۵ درجه و برای مقطع سنگ قوی مدول الاستیسیته از ۸۰۰ تا ۵۸۰۰ مگاپاسکال، چسبندگی از ۲۰۰ تا ۴۵۰ کیلوپاسکال و زاویه اصطکاک داخلی از ۲۸ تا ۳۵ درجه برآورد شده است.

۱- مقدمه

آزمایشگاهی و آزمون‌های برجا، اغلب به دلیل تأثیرات مقیاس و معرف بودن با چالش‌هایی مواجه هستند که منجر به عدم قطعیت در پارامترها می‌شود (H. Li et al., 2023). تحلیل برگشتی یک روش سیستماتیک است که برای

برآورد دقیق پارامترهای ژئومکانیکی برای طراحی و ساخت تونل‌ها بسیار مهم است. این پارامترها به طور قابل توجهی بر پایداری و ایمنی سازه‌های زیرزمینی تأثیر می‌گذارند. روش‌های سنتی تعیین این پارامترها، مانند آزمون‌های

شناسایی پارامترهای مدل با تطبیق نتایج پیش‌بینی شده با داده‌های اندازه‌گیری شده از ابزار دقیق میدانی استفاده می‌شود. این روش به ویژه در پروژه‌های تونل‌سازی که نظارت مستمر، داده‌های ارزشمندی را در حین پیشرفت ساخت و ساز ارائه می‌دهد مفید است (Vardakos & Gutierrez, 2012). این فرآیند شامل استفاده از مدل‌های عددی برای تنظیم مکرر پارامترها تا زمانی است که جابجایی‌های پیش‌بینی شده با داده‌های مشاهده شده هماهنگ شوند (Jia et al., 2011; Miranda et al., 2009). روش تحلیل برگشتی به طور گسترده برای تخمین خواص مکانیکی و مقاومتی توده سنگ بر اساس اطلاعات جابجایی اندازه‌گیری میدانی در کاربردهای عملی مهندسی ژئوتکنیک استفاده می‌شود که از این طریق مهندسان می‌توانند تصمیمات آگاهانه گرفته و به طرح‌های بهتری دست یابند (Sakurai & Takeuchi, 1983). تحلیل برگشتی همچنین ابزار مهمی برای تعیین الگوهای حفاری، طرح‌های نگهداری و پارامترهای نگهداری در پروژه‌های مهندسی ژئوتکنیک و زمین‌شناسی و برای جلوگیری از ناپایداری در توده سنگ اطراف است (Zhao et al., 2021).

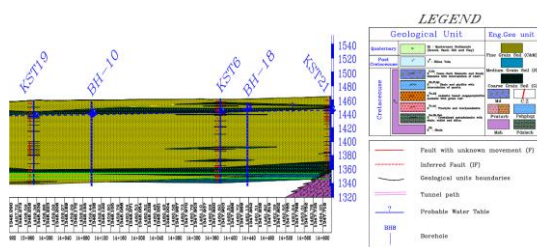
الگوریتم‌های لونبر-مارکوارت، گائوس-نیوتن، بیزین، پاول، روزنبورک و ژنتیک برای به دست آوردن مقادیر بهینه پارامترها از جابجایی‌های اندازه‌گیری شده پیشنهاد شده‌اند (Huang et al., 2009). روش‌های تحلیل برگشتی را می‌توان به دو دسته اصلی تقسیم کرد: روش معکوس و مستقیم (Gioda & Sakurai, 1987). در روش معکوس، معادلاتی که رفتار سیستم را توصیف می‌کنند، به گونه‌ای ایست که پارامترهای مواد به عنوان خروجی و مقادیر اندازه‌گیری شده به عنوان ورودی ظاهر شوند. اولین کاربرد روش معکوس توسط گیودا و مایر برای شناسایی پارامترهای الاستیک و فشار زمین در پوشش تونل انجام شد (Gioda & Maier, 1980). این تابع همراه با یک تابع خطا (مانند حداقل مربعات)، که تابع هدف نیز نامیده می‌شود، استفاده می‌شود که تفاوت بین کمیت‌های مشاهده شده و محاسبه شده را اندازه‌گیری می‌کند. این تابع، که معمولاً غیر خطی است، در یک فرآیند تکراری با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی به حداقل می‌رسد. چندین تکنیک پیشرفته برای افزایش دقت و کارایی تحلیل برگشتی ایجاد شده است. برای مثال، روش بایزی

(Bayesian method) در ترکیب با تحلیل اجزای محدود می‌تواند حرکت زمین را با استفاده از داده‌های همگرایی‌سنج پیش‌بینی کند و در نتیجه موجب کاهش خطاهای اندازه‌گیری‌های جابجایی مطلق شود (Cho et al., 2006). تحلیل برگشتی پارامترهای ژئومکانیکی در مهندسی تونل معمولاً شامل استفاده از مدل‌های عددی پیشرفته مانند روش‌های اجزا محدود (FLAC, ABAQUS) و تکنیک‌های یادگیری ماشین مانند شبکه‌های عصبی است (Cao et al., 2022; Chen & Olarte, 2024; Khetwal & Gutierrez, 2022; C. H. Li et al., 2014). کاربرد روش‌های تحلیل برگشتی در پروژه‌های مختلف تونل تایید شده است. به عنوان مثال، یک روش احتمالاتی تحلیل برگشتی در یک تونل در محیط سنگ قوی مورد استفاده قرار گرفت که بهبود عملکرد پیش‌بینی را هنگام استفاده از انواع ترکیب داده‌های نظارتی نشان می‌دهد (Chen & Olarte, 2024). مزیت اصلی تحلیل برگشتی توانایی آن در ارائه پارامترهای ژئومکانیکی دقیق‌تر است که منجر به طراحی و ساخت بهینه تونل می‌شود. این کار می‌تواند منجر به صرفه جویی قابل توجهی در هزینه شود، مانند کاهش ضخامت شاتریت در ایستگاه‌های مترو تا ۴۳ درصد (Mahmoudi & Rajabi, 2020). با این حال، چالش‌هایی مانند نیاز به مدل‌های سازنده دقیق و در نظر گرفتن توپوگرافی واقعی در شبیه‌سازی‌های عددی برای جلوگیری از خطاهای اساسی باقی می‌ماند (Zhang et al., 2006; Zhu et al., 2024; Ziaei & Ahangari, 2018). پارامترهای ژئومکانیکی که معمولاً در تحلیل برگشتی تونل مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند شامل مدول الاستیسیته و ضریب تنش افقی است (Chen & Olarte, 2024; C. H. Li et al., 2014). پارامترهای دیگری مانند نسبت پواسون، مقدار تنش اولیه، چسبندگی و زاویه اصطکاک نیز برای پیش‌بینی رفتار تونل و ایمنی مهم هستند (Jia et al., 2009; Khetwal & Gutierrez, 2022). خامسی با استفاده از سه نوع سیستم فازی در روش تحلیل برگشتی هوشمند پارامترهای K ، C و E را در خط ۲ مترو کرج بهینه‌سازی نمود (Khamesi, 2011). دهقان و همکاران با مطالعه بر روی تحلیل برگشتی با الگوریتم تک متغیره متناوب، پارامترهای مقاومتی ϕ ، C و E را در تونل متروی کرج بهینه‌سازی نمودند (Dehghan et al., 2010). در این مطالعه، با استفاده از داده‌های ابزار دقیق و نتایج مدلسازی عددی، سعی به تعیین پارامترهای

در طی اجرای تونل دسترسی این طرح سیستم ابزار دقیق نسبتاً کاملی پیاده شد و اطلاعات خوبی از رفتار سنگ ضعیف بدست آمد که از جمله آنها داده‌های همگرایی‌سنجی و میزان نشست سقف تونل است که در این مقاله برای تخمین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ میزبان تونل مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

روند پیشروی بخش سنتی تونل قطعه یک در بخش‌های ابتدایی مسیر تونل با استفاده از روش حفاری تمام مقطع شروع و با ادامه روند پیشروی به دلیل ضعیف بودن پارامترهای مقاومتی مصالح دربرگیرنده تونل و ناپایداری‌های رخ داده، استفاده از ترکیب روش پیش‌نگهداری و روش حفاری چند مرحله‌ای به منظور ادامه روند پیشروی در دستور کار قرار گرفته است.

سازه نگهدارنده مورد استفاده در این مقطع از ۱۵ الی ۳۰ سانتی متر شاتکریت، شبکه فولادی و یا لیتیس با میل‌گرد به قطر ۲۸ میلیمتر و به فواصل ۰/۵ الی ۱ متر از یکدیگر در هر مرحله تشکیل شده است. پروفیل طولی زمین‌شناسی مسیر تونل کانی سیب در شکل ۲، نشان داده شده است.



شکل ۲- پروفیل طولی زمین‌شناسی مسیر تونل (Imen sazan Consulting Engineers, 2016)

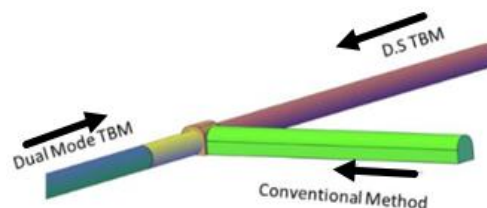
بر اساس نتایج حاصل از گمانه‌های حفاری شده، سنگ‌های در طول مسیر تونل عموماً شیل هستند ولی به طور کلی توده سنگ‌های دربرگیرنده مسیر تونل اصلی از انتهای مغار تا ابتدای پهنه سنگ ضعیف به ترتیب شامل توده سنگ هورنفلس (مقاومت فشاری، شدت درزه‌داری، خردشدگی و هوازدگی آن بشدت متغیر بوده) و شیل با دگرگونی اندک هستند. با ادامه روند پیشروی جنس مصالح دربرگیرنده تونل از توده سنگ شیل شدیداً خردشده به مصالح آبرفتی تغییر می‌یابد.

در جدول ۱، وضعیت زمین‌شناسی مهندسی محدوده مطالعه نشان داده شده است.

ژئومکانیکی یک تونل انتقال آب به کمک تحلیل برگشتی خواهد شد.

۲- معرفی تونل و خصوصیات مکانیکی منطقه مورد مطالعه

تونل انتقال آب گلاس (کانی سیب) به منظور هدایت آب مازاد رودخانه‌ی گلاس به حوضه آبریز دریاچه ارومیه و دشت نقده و تأمین آب زراعی بخش عمده‌ای از این اراضی در محدوده کمربندی دگرگونی و افیولیتی زون سندنجان- سیرجان با مقطع تونل دایره‌ای و قطر تمام شده ۵/۵ متر حفر شده است. انتقال آب این رودخانه از طریق تونلی به طول حدود ۳۵۶۶۱ متر صورت می‌گیرد. این تونل به روش مکانیزه توسط دو دستگاه *TBM* حفاری گردید. قطعه اول تونل توسط ماشین تونل‌زنی دو سپره (*Dual Shield TBM*) از سمت خروجی تونل واقع در شمال شهرستان نقده عملیات حفاری را آغاز نموده و حفاری قطعه دوم نیز توسط ماشین تونل‌زنی دو گانه (*Dual Mode TBM*) (با قابلیت حفاری در محیط سنگی و خاکی) از سمت ورودی تونل واقع در شهرستان پیرانشهر صورت پذیرفت. رخنمون‌های این منطقه را سنگ‌های گوناگونی از لحاظ ترکیب و سن پدید آورده است که به طور عمده در برگیرنده سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی از زمان پرکامبرین تا عهد حاضر است. در نگاه کلی واحدهای سنگی موجود در کیلومتر از ۳ تا ۱۵ تونل کلاس را می‌توان به واحدهای آذرین و کربناته تقسیم‌بندی کرد. در مسیر تونل، محدوده سنگ ضعیف با طول تقریبی ۱،۸۰۰ متر وجود دارد که به لحاظ ژئوتکنیکی دارای شرایط خاصی است. بر اساس نتایج محاسبات (مبتنی بر پارامترهای ژئومکانیکی) مقدار بار وارده از سوی سنگ ضعیف در کیلومتر از ۱۲+۶۲۰ تا ۱۴+۵۸۷ بیش از حد تحمل سپر *TBM* تأمین شده است که بایستی به صورت سنتی حفاری شود. شمای کلی روش اجرا در شکل ۱، نمایش داده شده است.



شکل ۱- شمای کلی روش اجرا

روباره تونل در بخش سنگ ضعیف مسیر، در بیشترین حالت در حدود ۱۱۰ متر است. با توجه به سطح بالایی آب زیرزمینی و رودخانه فوقانی بر روی سنگ ضعیف، این مناطق جزء نقاط پر مخاطره در مسیر حفاری تونل هستند. جنس این لایه از رسوبات هوازده گرانیتی تشکیل شده است. در این مقطع احتمال ریزش و نفوذ آب زیاد است و باید تمهیدات لازم برای عبور از این مناطق اندیشیده شود. بمنظور تعیین پارامترهای مقاومتی (زاویه اصطکاک و چسبندگی) در محدوده سنگ ضعیف، آزمایش‌های برش مستقیم و آزمایش‌های مقاومت فشاری سه محوره بر روی نمونه‌های مختلف صورت گرفته است که نتایج آن در جدول ۴، نشان داده شده است. با توجه به محدوده مقادیر آزمایشگاهی جداول فوق، پارامترهای مقاومتی توده سنگ منطقه مورد مطالعه نیز با کمک نرم افزار Roclab محاسبه و به طور خلاصه در جدول ۵، آورده شده است.

جدول ۱- توصیف‌های واحدهای زمین‌شناسی مهندسی

محدوده	
جنس زمین	خصوصیات
سنگ	سخت، بلوکی و غیر هوازده، پایدار
آبرفت	گراول، ماسه‌ای، سیلت، رس

وجود ابهامات در خصوص مقادیر پارامترهای ژئومکانیکی در مقطع سنگ ضعیف موجب شد تا انجام آزمون‌های برجا از سمت مغار صورت گیرد. جدول ۲ و جدول ۳، نتایج حاصل از طبقه‌بندی در مقطع سنگ قوی براساس آزمون‌های آزمایشگاهی و صحرایی صورت گرفته را نشان می‌دهد.

جدول ۲- نتایج طبقه‌بندی مهندسی مقطع سنگ

	RQD (%)	RMR (1989)	RMR (Basic)	Q	N	GSI	
حداقل	10	30	40	0.03	0.2	30	
حداکثر	60	45	50	0.6	3	40	
متوسط	35	40	45	0.20	1.1	35	

جدول ۳- نتایج حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی و آزمون‌های صحرایی مقطع سنگ

محدوده											
آزمایش فشاری سه محوره						آلتراسونیک					
آزمایش فشاری تک محوری			آزمایش بار سستی بر نقطه‌ای			آلتراسونیک			آلتراسونیک		
σ_c (MPa)	σ_c (MPa)	ν	$E_s 50\%$ (GPa)	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	ϕ °	σ_c (MPa)	σ_c (MPa)	G_d (GPa)	ν	E_d (GPa)
85	63	0.14	49	63	5.9	33	85	63	18	0.25	47
124	171	0.23	82	171	19.2	61	124	171	33	0.34	82
102	120	0.17	68	120	12.6	52	102	120	26	0.32	69

جدول ۴- نتایج حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی و آزمون‌های صحرایی مقطع سنگ ضعیف

آزمون فشاری سه محوره										آزمون برش مستقیم				محدوده						
UU				CU				CD				UnConsolidate				Consolidate				
ϕ		C		ϕ		C		ϕ		C		ϕ			C		ϕ		C	
(°)		(kg/cm ²)		(°)		(kg/cm ²)		(°)		(kg/cm ²)		(°)			(kg/cm ²)		(°)		(kg/cm ²)	
2		0.14		14		0.08		22		0.06		27		0.07		21		0.05		حداقل
14		0.73		27		0.31		32		0.11		30		0.13		32		0.55		حداکثر

جدول ۵- تعیین پارامترهای مقاومتی توده سنگ به کمک نرم افزار Roclab

GSI	D	m_i	Hoek-Brown			Mohr-Coulomb		σ_{tm} (KPa)	σ_{cm} (MPa)	ν	σ_{ci} (MPa)	E_{cm} (GPa)
			M_b	S	a	C (KPa)	φ (Degree)					
30	0.7	19	0.406	3.95E-05	0.522	419	34	-0.007	5.12	0.25	68	1.345

۳- فرآیند تحلیل برگشتی

در مسایل تحلیل برگشتی مربوط به مکانیک سنگ، شرایط فشارها مانند بارهای خارجی و خصوصیات مکانیکی سنگها مثل مدول الاستیسیته، نسبت پواسون، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی از روی جابجاییها، کرنشها و فشارهای اندازه گیری شده در طول اجرای پروژه و پس از آن محاسبه می شوند.

برای انجام تحلیل برگشتی از نرم افزار *FLAC3D* بمنظور محاسبه تنشها و کرنشهای موجود در توده سنگ، همگام با پیشروی فازهای حفاری استفاده شده است. روش بهینه سازی بر مبنای کمینه کردن تابع خطا مطابق معادله (۱) استفاده شده است (Zhang et al., 2006).

$$ERROR(\%) = \frac{\sum_{k=1}^n (u_k - u_k^*)^2}{\sum_{k=1}^n u_k^2} \quad (1)$$

در این رابطه n تعداد نقاط اندازه گیری است، u_k و u_k^* به ترتیب مقدار اندازه گیری شده و مقدار محاسبه شده در نقطه k است.

الگوریتم کاهش خطا، تفاضل بین نتایج حاصل از محاسبات مدل عددی *FLAC3D* و داده های اندازه گیری شده را کمینه می نماید. در این مطالعه روش تحلیل برگشتی بر اساس الگوریتم جستجوی تک متغیره مستقیم مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش، یکی از پارامترهای مجهول در محدوده ای تخمینی تغییر داده می شود، در حالی که سایر پارامترها ثابت نگه داشته می شوند. فرآیند از یک نقطه اولیه x_i در گام تکرار i ام آغاز می گردد و با ثابت در نظر گرفتن $n-1$ پارامتر دیگر، مقدار جدیدی برای پارامتر x_i یعنی x_{i+1} محاسبه می شود. سپس جهت جستجو تغییر کرده و یکی از $n-1$ پارامتر ثابت مرحله قبل، برای تغییر انتخاب می شود. جستجو در هر یک از این جهات به ترتیب انجام می گیرد و با پایان جستجو در تمامی n جهت، یک مرحله کامل از فرآیند

جستجو به اتمام می رسد. این فرآیند به صورت تکراری ادامه می یابد تا زمانی که مقدار تابع خطا به حداقل ممکن برسد. سه پارامتر ژئومکانیکی مدول تغییر شکل پذیری، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی بر اساس نتایج تحلیل برگشتی مستقیم و کمک این الگوریتم جستجو به دست آمد. در مدل سازی عددی انجام شده، مختصات x و y سه نقطه پین های همگرایی نصب شده در تاج و دیواره تونلها مطابق شکل ۳، لحاظ شده است. موقعیت پین های همگرایی در مقطع، شامل نصب ۱ عدد پین در تاج تونل و ۲ عدد پین در دو طرف دیواره است.

از آنجا که انجام تحلیل برگشتی بر مبنای جابجایی پین های نصب شده نسبت به یکدیگر (یعنی همگرایی دیواره ها نسبت به هم و همگرایی تاج و دیواره نسبت به هم) است و در نرم افزار فقط مختصات جابجایی مطلق پین ها را می دهد، برای تطبیق نتایج مدل عددی با نتایج ابزار دقیق در کار تحلیل برگشتی بایستی جابجایی های مطلق منتج از نرم افزار را به جابجایی نسبی (همگرایی)، همانند ابزار دقیق تبدیل کرد. در نتیجه با استفاده از روابط ۲ تا ۴ جابجایی های مطلق پین ها به جابجایی نسبی یا همان همگرایی دیواره ها و تاج تونل نسبت به همدیگر تبدیل می شود.

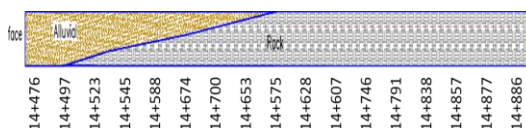
$$U_{(2-3)} = 2 * u \quad (2)$$

$$U_{(1-2)} = \frac{\sqrt{((X_1 - X_2)^2 + (Z_1 - Z_2)^2)}}{\sqrt{((X_1 - (X_2 + u))^2 + ((Z_1 + v) - Z_2)^2)}} \quad (3)$$

$$U_{(1-3)} = \frac{\sqrt{((X_1 - X_3)^2 + (Z_1 - Z_3)^2)}}{\sqrt{((X_1 - (X_3 + u))^2 + ((Z_1 + v) - Z_3)^2)}} \quad (4)$$

که در آن، U_{2-3} همگرایی دیواره های چپ و راست نسبت به هم، U_{1-3} همگرایی تاج تونل نسبت به دیواره راست تونل، U_{1-2} همگرایی تاج تونل نسبت به دیواره چپ تونل، u

۴، مشخص شده است.

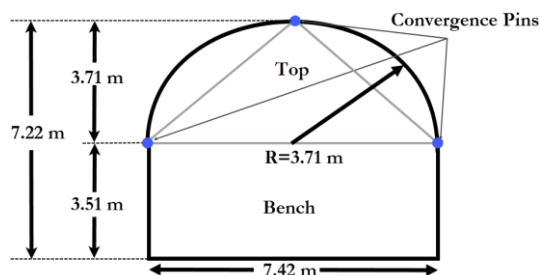


شکل ۴- موقعیت ابزارهای نصب شده در کیلومتر ۱۴+۸۷۷ در تونل

۴-۱- رفتارنگاری ایستگاه در کیلومتر ۱۴+۸۷۷ (محدوده سنگ قوی)

این مقطع به لحاظ سنگشناسی شامل شیل با دگرگونی اندک بوده و بافت آن بسیار ریزدانه است. از نظر زمین شناسی مهندسی، توده سنگ این محدوده شامل توده سنگ با مقاومت بشدت ضعیف، سیاه رنگ، بشدت درزه دار همراه با زون های گسلی شدیداً خردشده و سست می باشد. میزان هوازدگی توده سنگ این محدوده در رده بشدت هوازه قرار می گیرد. طبق رده بندی مهندسی توده سنگ، وضعیت توده سنگ این محدوده بین رده فوق العاده ضعیف تا ضعیف قرار می گیرد. نمودار روند تغییرات و همگرایی پین های همگراسنج در شکل ۵ و شکل ۶، نمایش داده شده است.

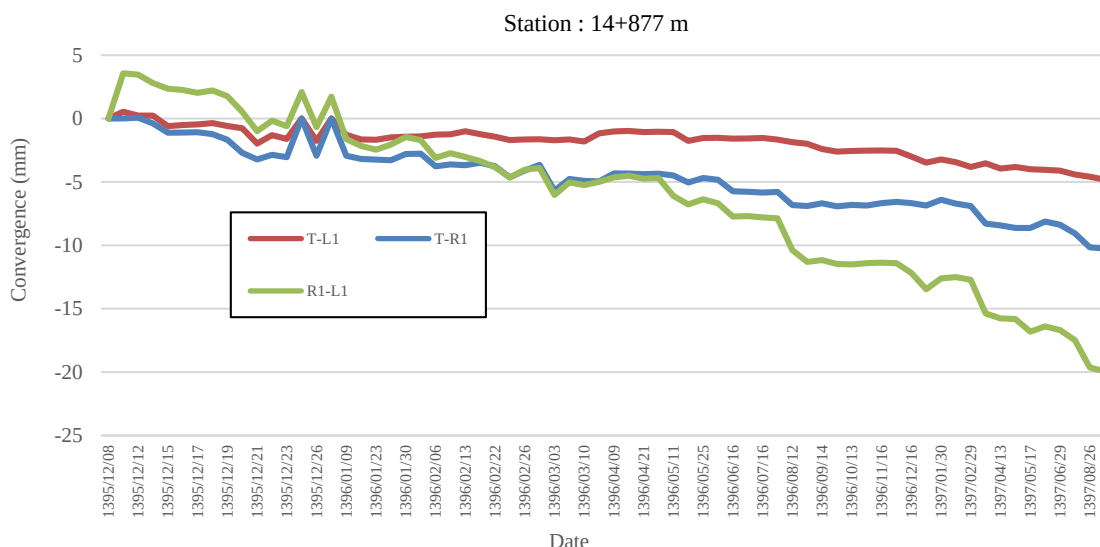
جابجایی نقطه ۲ در جهت x ، ۷ جابجایی نقطه ۱ در جهت Z ، (X_1, Z_1) موقعیت پین نصب شده در تاج تونل و (X_2, Z_2) موقعیت پین در دیواره چپ تونل و (X_3, Z_3) موقعیت پین در دیواره راست تونل است.



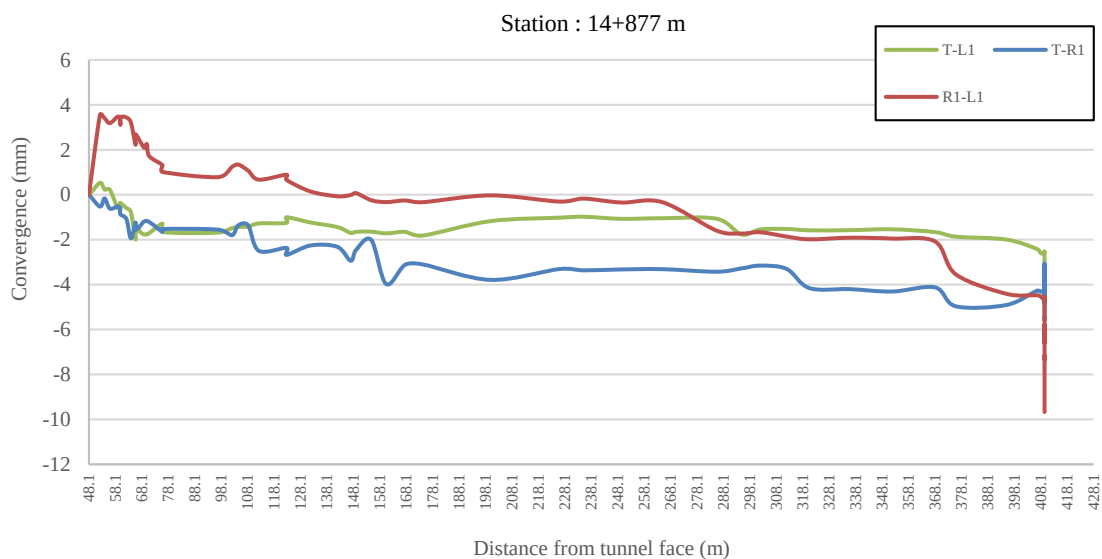
شکل ۳- موقعیت نصب پین در دیواره تونل

۴-۲ رفتارنگاری مسیر تونل

در طول مسیر تونل دسترسی که به روش سنتی حفاری شده، تعداد ۱۸ ایستگاه ابزار دقیق نصب و فعال گردیده است. روند تقریبی ورود تونل از محیط سنگ قوی به محیط سنگ ضعیف و موقعیت ابزارهای نصب شده شامل همگرایی سنج هایی در مترآزهای مختلف در مقطع طولی نشان داده شده در شکل



شکل ۵- روند تغییرات همگرایی نسبت به زمان



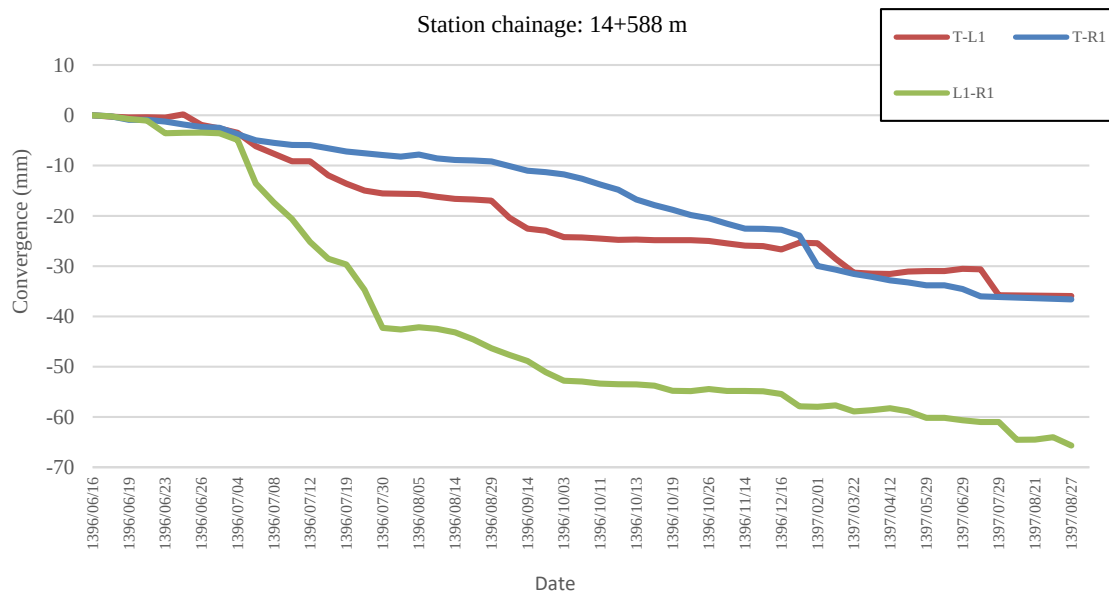
شکل ۶- روند تغییرات همگرایی نسبت به فاصله از سینه کار

محدوده‌ی موردنظر شامل مقاومت بسیار کم، رنگ سیاه، درزه‌داری شدید، و حضور زون‌های به شدت خردشده همراه با گاوهای گسلی ریزدانه و چسبیده است. میزان هوازدگی سنگ ضعیف این محدوده در رده به شدت هوازده تا متوسط قرار می‌گیرد. نمودار روند تغییرات و همگرایی پین‌های همگرانسج در شکل ۷ و شکل ۸، نمایش داده شده است.

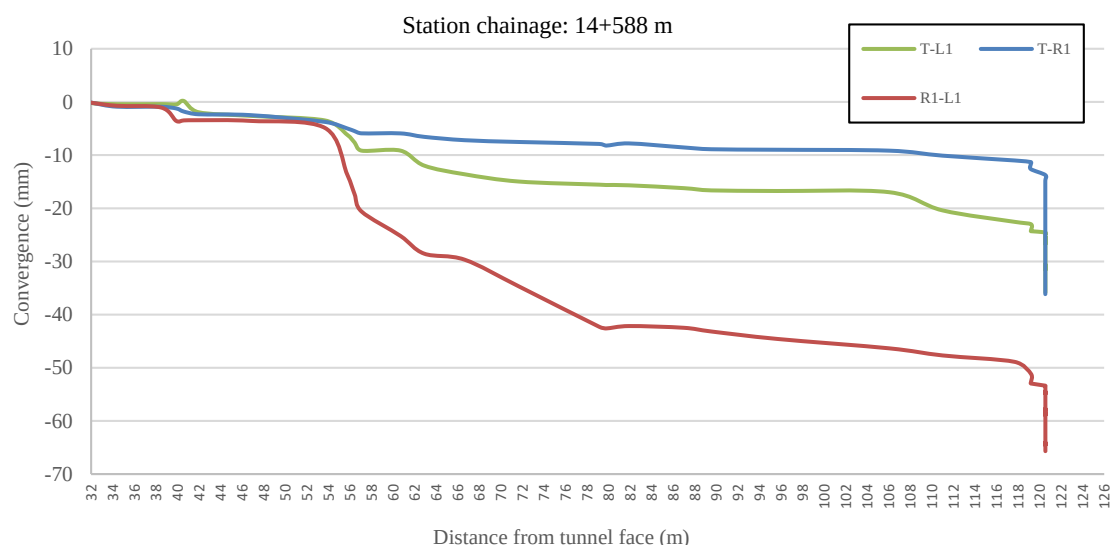
۲-۴- رفتارنگاری ایستگاه در کیلومتر ۱۴+۵۸۸

(محدوده سنگ ضعیف)

مقطع سنگ ضعیف از شیل‌های با دگرگونی اندک و بافت بسیار ریزدانه و متورق تشکیل شده است. به لحاظ زمین‌شناسی مهندسی، خصوصیات مقاومتی سنگ‌های



شکل ۷- روند تغییرات همگرایی نسبت به زمان



شکل ۸- روند تغییرات همگرایی نسبت به فاصله از سینه کار

پارامترهای مقاومتی اولیه مسیر سنگ قوی و ضعیف، ورودی به نرم افزار $FLAC^{3D}$ برای مدل سازی به شرح جدول است: فشار منفذی با در نظر گرفتن ۷۰ متر ارتفاع آب به مدل اعمال شده است. همچنین ارتفاع روباره نیز در هر ایستگاه با توجه به پروفیل طولی مسیر متغیر در نظر گرفته می شود.

۵- مدل سازی عددی

در این تحقیق برای هر ایستگاه به طور جداگانه مدلی مجزا به ابعاد ۱۰، ۴۰ و ۴۰ متر در نرم افزار $FLAC^{3D}$ ساخته شده و هر یک مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. بر این اساس و طبق اطلاعات به دست آمده اولیه و مقادیر جدول ۶، از

جدول ۶- پارامترهای ورودی اولیه محدوده سنگ ضعیف و قوی در مدل عددی

پارامترهای ورودی تحلیل در بخش سنگ قوی				پارامترهای ورودی تحلیل در بخش سنگ ضعیف			
γ (Kg/m ³)	ϕ^0	C(KPa)	E(MPa)	γ (Kg/m ³)	ϕ^0	C(KPa)	E(MPa)
2660	34	419	1345	1600	27	121	107

(σ_h) نیز افقی و تنش فرعی و دارای راستای شمالی جنوبی بوده و تنش قائم (σ_v) تنش متوسط است ($\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$). براساس نتایج آزمایش های برجا، سان گوپتا رابطه ای را برای محاسبه تنش های برجا برای روباره های کمتر از ۴۰۰ متر پیشنهاد داده است. روابط محاسبه تنش های برجا مطابق روابط ۵ تعریف می شود: (Sarikhani-Khorami, 2009; Sing & Goel, 1999)

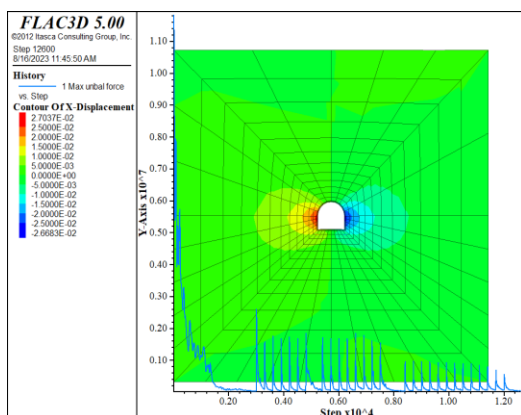
$$\begin{aligned}\sigma_H &= 1.5 + 1.2\sigma_v \\ \sigma_h &= 1 + 0.5\sigma_v \\ \sigma_v &= \gamma Z\end{aligned}\quad (5)$$

براساس رابطه فوق میزان تنش های برجا برای

۶- تعیین مقدار تنش های برجا در مسیر تونل

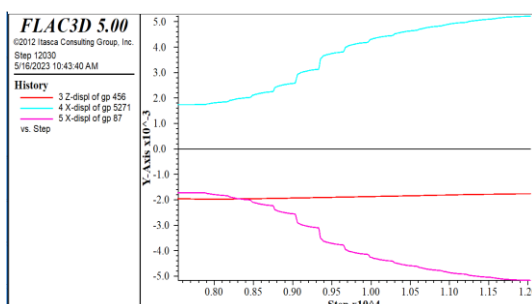
تعیین جهت، بزرگی و نسبت تنش های برجا (k_0) بخش مهمی از روند طراحی سازه های زیرزمینی است. تعیین جهت محور این تنش ها با استفاده از روند ساختارهای بزرگ زمین شناسی نظیر چین ها، وارون سازی داده های مربوط به سازوکار گسل ها یا تحلیل برگشتی گسل ها، سازوکار کانونی زمین لرزه ها صورت گرفته است. بر این اساس با توجه به جهت یابی تنش های اصلی بر اساس داده ها، تنش اصلی بزرگتر (σ_H) افقی و تقریباً دارای راستای شرقی غربی و تنش

تحلیل عددی مطابق شکل ۱۲، به دست آمده است.



شکل ۱۱- جابجایی افقی پس از حفاری در ایستگاه

۱۴+۸۷۷



شکل ۱۲- جابجایی‌های در سقف و دیواره در ایستگاه

۱۴+۸۷۷

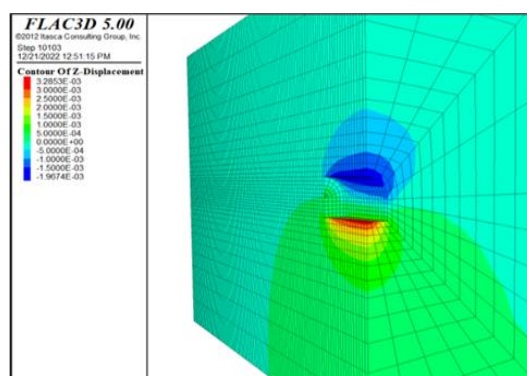
در این تحقیق آنالیز حساسیت و تاثیر سه پارامتر مقاومتی مدول الاستیسیته E ، زاویه اصطکاک داخلی ϕ و چسبندگی C بر روی مدل بر اساس میزان تغییرات جابجایی در تونل انجام گرفته است و میزان تاثیر این پارامترها در شکل ۱۳ تا شکل ۱۵، نمایش داده شده است.

نتایج حاصل از آنالیز حساسیت برای سه پارامتر مدول الاستیسیته، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نشان می‌دهد بیشترین میزان تاثیر در جابجایی و پس از آن تا چسبندگی دارای بیشترین تاثیر است. زاویه اصطکاک نیز کمترین تاثیر را در تغییرات در جابجایی‌ها دارد. که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش مدول الاستیسیته میزان نشست کاهش پیدا می‌کند. البته به تدریج با افزایش مدول الاستیسیته از شدت تاثیر آن بر روی نشست‌های سطحی کاسته شده و شیب نمودار به تدریج کاهش می‌یابد.

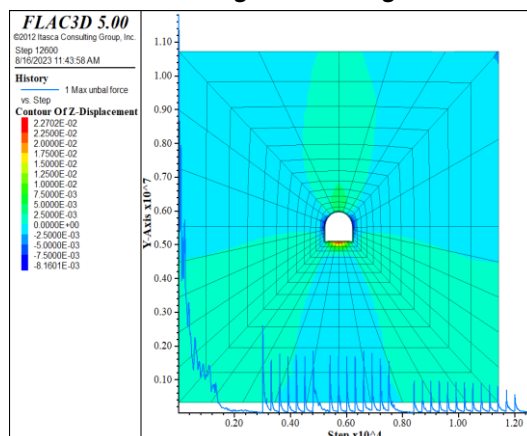
قسمت‌های سنگ قوی از مقدار $0.83/$ الی $1.7/$ متغیر است.

در شکل ۹، هندسه مدل که مطابق داده‌های ورودی اولیه ساخته شده، نمایش داده شده است.

مراحل ساخت مدل عبارت است از: اعمال تنش معادل سربار به صورت شرایط مرزی در بالای مدل، اعمال تنش‌های برجا بر اساس روباره با مترائ متغیر مطابق با پروفیل طولی مسیر، اعمال تراز آب زیرزمینی، اعمال پارامترهای ژئومکانیکی زمین به مدل، حل مدل تا رسیدن به تعادل، ترخیص تنش، حفر بخش فوقانی تونل، نصب سیستم نگهداری بخش فوقانی تونل، حفر بخش تحتانی تونل - تکمیل سیستم نگهداری به این ترتیب و با تکمیل و اجرای مراحل فوق، مقادیر جابجایی افقی و قائم پس از حفاری و نمودار نیروهای متعادل کننده در ایستگاه ۱۴+۸۷۷ مطابق شکل ۱۰ و شکل ۱۱، نمایش داده شده است.



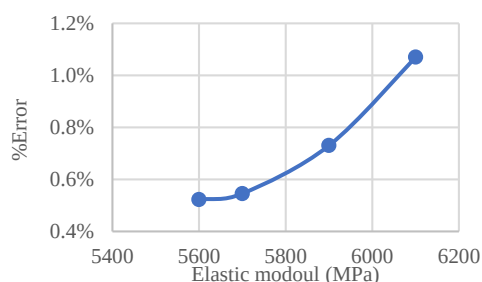
شکل ۹- هندسه مدل ساخت شده



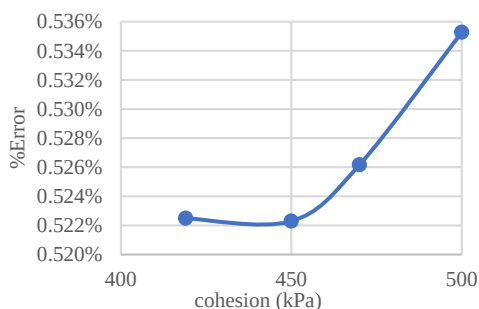
شکل ۱۰- جابجایی قائم پس از حفاری در ایستگاه ۱۴+۸۷۷

پس از کامل شدن فرآیند حفاری و نصب سیستم نگهداری موقت، میزان جابجایی‌های پین‌های همگراسنج در

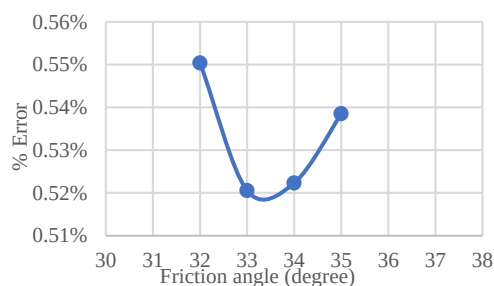
محدوده سنگ قوی (۱۴+۸۷۷) و با استفاده از روش بهینه-سازی کمترین مربعات خطا، در ۶ مرحله تکرار، مدول الاستیسیته ۵۶۰۰ مگاپاسکال و چسبندگی با ۳ مرحله تکرار به میزان ۴۵۰ کیلو پاسکال و زاویه اصطکاک با ۴ مرحله تکرار به مقدار ۳۳ درجه با خطای ۰/۵۲۱ درصد بهینه شده است. نمودار تغییرات تابع خطا نسبت به تغییرات پارامترهای مقاومتی در شکل ۱۶ تا شکل ۱۸، نشان داده شده است. روند تغییرات همگرایی نسبت به زمان در محاسبات عددی در ایستگاه ۱۴+۸۷۷ در شکل ۱۹، آمده است.



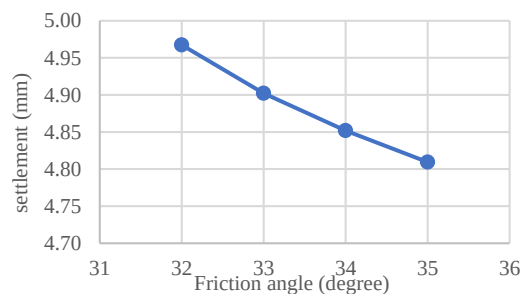
شکل ۱۶-نمودار تابع خطا در مقابل تغییرات مدول الاستیسیته



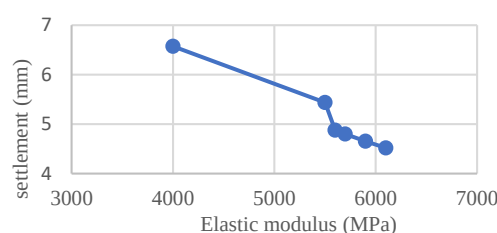
شکل ۱۷- نمودار تابع خطا در مقابل تغییرات چسبندگی



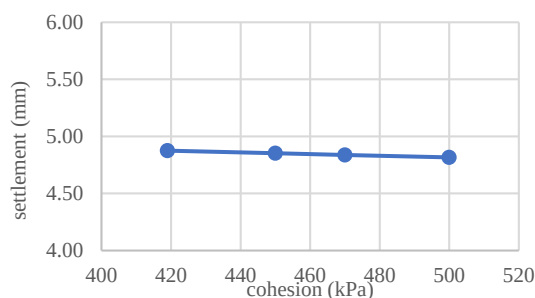
شکل ۱۸-نمودار تابع خطا در مقابل تغییرات زاویه اصطکاک داخلی



شکل ۱۹-نمودار آنالیز حساسیت برای زاویه اصطکاک داخلی



شکل ۲۰-نمودار آنالیز حساسیت برای مدول الاستیسیته



شکل ۲۱-نمودار آنالیز حساسیت برای چسبندگی

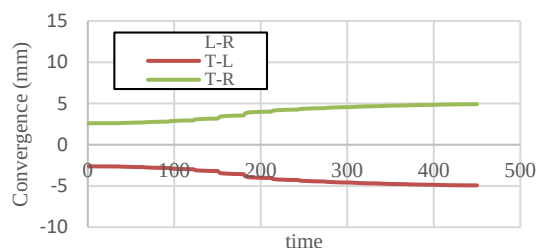
۷- تحلیل برگشتی در محدوده مطالعه

همانطور که گفته شد تحلیل برگشتی در تمام ایستگاه‌ها انجام شد. برای نمونه تحلیل برگشتی و روند انجام شده در یکی از ایستگاه‌های محدوده سنگ قوی و یکی از ایستگاه‌های محدوده سنگ ضعیف در ادامه به تفصیل بررسی می‌شود و سپس نتایج تمام ایستگاه‌ها ارائه خواهد شد.

۷-۱- ایستگاه کیلومتر ۱۴+۸۷۷ (مقطع سنگ قوی)

در جریان مدل‌سازی و انجام تحلیل برگشتی در ایستگاه

سنگ ضعیف مدل اولیه ساخته شده است. همانطور که انتظار می‌رود، میزان جابجایی‌های یال‌ها در نرم افزار مطابقت خوبی با مقادیر واقعی داشته و وضعیت یک موقعیت سنگ ضعیف را به درستی انعکاس داده است. با توجه به روبراه تونل در این ایستگاه مقدار نسبت تنش افقی به قائم حداقل ۰/۸۴ و مقدار نسبت تنش افقی به قائم حداکثر ۱/۷۲ برای مدل در این مقطع اعمال شده است. تحلیل این بخش نیز مشابه بخش سنگ قوی صورت گرفت و مقادیر حاصل از خروجی نرم افزار با مقادیر واقعی مورد مقایسه قرار گرفته است. نمایش جابجایی افقی و قائم بعد از حفاری ایستگاه ۱۴+۵۸۸ در شکل ۲۰ و شکل ۲۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۹- روند تغییرات همگرایی نسبت به زمان در

محاسبات عددی در ایستگاه ۱۴+۸۷۷

نتایج حاصل از تحلیل برگشتی در ایستگاه ۱۴+۸۷۷

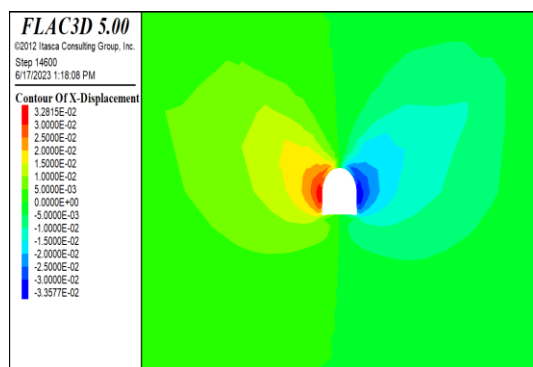
طی ۱۱ گام تکرار، به طور خلاصه به شرح جدول ۷، است.

۷-۲- ایستگاه کیلومتر ۱۴+۵۸۸

در این بخش نیز مطابق مقادیر پارامترهای تحلیلی، بخش

جدول ۷- نتایج تحلیل برگشتی ایستگاه ۱۴+۸۷۷ (محدوده سنگ قوی)

ردیف	مقادیر اندازه گیری شده						خصوصیات مکانیکی			
	مقادیر محاسبه شده در			توسط ابزار			خطا			
	مدل سازی نرم افزار			همگرایی سنج			(mm)			
	U_{T-R}	U_{T-L}	U_{L-R}	U_{T-R}	U_{T-L}	U_{L-R}	K_0	Φ	$C(MPa)$	$E(MPa)$
							(نسبت تنش افقی به قائم)	(degree)		
۱	۱۳/۳۳	۶/۵۷	۶/۶۲	۱۴/۱۷				۳۴	۴۱۹	۴۰۰۰
۲	۱/۰۷	۴/۵۲	۴/۵۵	۹/۵۳	۴/۹۶	۴/۹۹	۱۰/۵۱	۳۴	۴۱۹	۶۱۰۰
۳	۰/۵۳	۴/۸۴	۴/۸۷	۱۰/۲۵			۰/۸۳	۱/۷	۴۷۰	۵۶۰۰
۴	۰/۵۲۶	۴/۹۰	۴/۹۴	۱۰/۳۸				۳۳	۴۵۰	۵۶۰۰



شکل ۲۰- جابجایی افقی بعد از حفاری ایستگاه ۱۴+۵۸۸

مقادیر پارامترهای مقاومتی در گام ۱۶م به جواب بهینه

رسیده است. همان طور که مشاهده می‌شود میزان جابجایی-

های حاصل از خروجی نرم افزار مطابقت بسیار خوبی با مقادیر

واقعی دارد و با کمترین میزان خطا، پارامترهای مجهول بهینه

شده‌اند. در شکل ۲۲ تا شکل ۲۴، میزان تغییرات تابع خطا

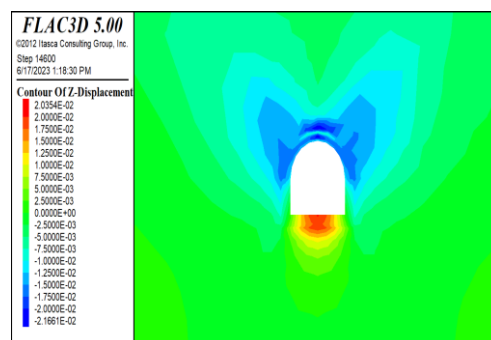
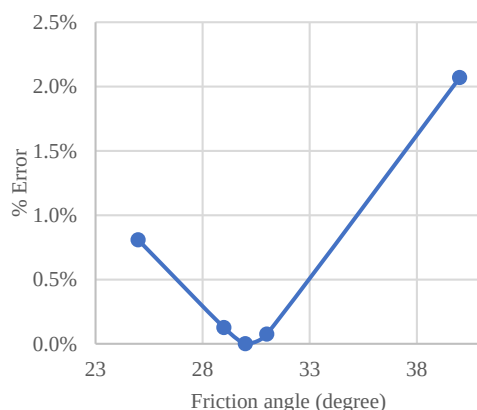
برای مدول الاستیسیته، چسبندگی و زاویه اصطکاک در

کیلومتر ۱۴+۵۸۸ (مقطع سنگ ضعیف) را نمایش داده شده

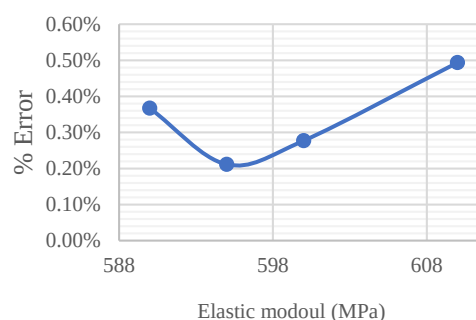
است. در شکل ۲۵، روند تغییرات همگرایی نسبت به زمان در

محاسبات عددی در ایستگاه ۱۴+۵۸۸ نشان داده شده است.

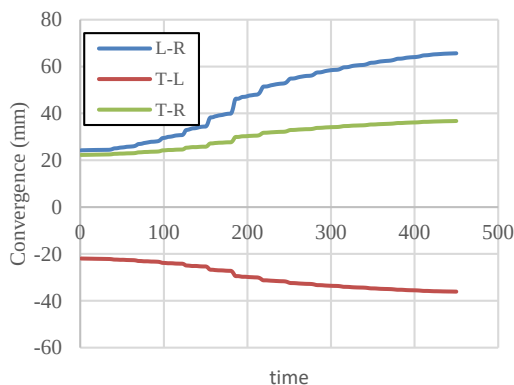
مطابق نتایج بدست آمده حاصل از تحلیل برگشتی مقادیر ابزار دقیق و مدلسازی عددی و همچنین انتظاری که از یک محدوده سنگ ضعیف می‌رود، مدول الاستیسیته کاهش قابل توجهی را نسبت به مقطع سنگ قوی از خود نشان داده است. سه پارامتر ژئومکانیکی در ۱۷ گام تکرار ساخته شده و مقادیر بهینه شده در جدول ۸، آمده است.



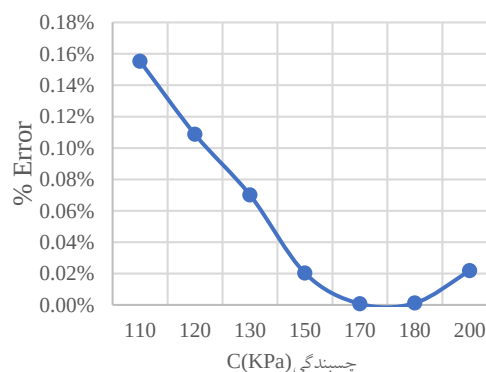
شکل ۲۱- جابجایی قائم بعد از حفاری ایستگاه ۵۸۸+۱۴



شکل ۲۴- نمودار تابع خطا در مقابل تغییرات زاویه اصطکاک داخلی



شکل ۲۲- نمودار تابع خطا در مقابل تغییرات مدول الاستیسیته



شکل ۲۵- روند تغییرات همگرایی نسبت به زمان در محاسبات عددی در ایستگاه ۵۸۸+۱۴

شکل ۲۳- نمودار تابع خطا در مقابل تغییرات چسبندگی

جدول ۸- مقادیر پارامترهای مقاومتی اصلاح شده

خطا (%)	مقادیر محاسبه شده			مقادیر اندازه گیری شده			Φ^0	$C(MPa)$	$E(MPa)$
	در مدل سازی نرم افزار (mm)			توسط ابزار همگرایی سنج (mm)					
۰/۰۰۰۸	۳۶/۷۲	۳۶/۰۸	۶۵/۶۳	۳۶/۶۰	۳۵/۹۵	۶۵/۶۷	۳۰	۱۷۰	۵۹۵

۷-۳- نتایج سایر ایستگاه‌های مسیر

بر اساس روند مشابه آنچه در دو بخش قبل بیان شد، نتایج حاصل از تحلیل برگشتی برای سایر ایستگاه‌های مسیر به کمک داده‌های رفتارنگاری نیز به دست آمد؛ جدول ۹. پارامترهای ژئومکانیکی حاصل از این تحلیل‌ها را ارائه می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود پارامترهای ژئومکانیکی در محدوده سنگ قوی بیشتر است و با نزدیک شدن به محدوده سنگ ضعیف کاهش قابل توجه می‌یابد.

جدول ۹- مقادیر پارامترهای مقاومتی اصلاح شده در سایر

ایستگاه‌ها

ایستگاه	E (MPa)	C (kPa)	ϕ (°)
۸۸۶+۱۴	۵۸۰۰	۲۳۰	۳۵
۸۵۷+۱۴	۲۴۰۰	۴۳۰	۳۴
۸۳۸+۱۴	۱۱۰۰	۳۰۰	۳۴
۷۹۱+۱۴	۸۰۰	۲۰۷	۳۰
۷۴۶+۱۴	۱۲۰۰	۴۳۰	۲۸
۷۲۰+۱۴	۹۰۰	۴۴۰	۳۴
۷۰۰+۱۴	۱۴۵۰	۴۱۹	۳۴
۶۷۴+۱۴	۸۰۰	۲۰۰	۳۳
۶۵۳+۱۴	۱۰۰۰	۷۰۰	۳۳
۶۲۸+۱۴	۱۲۵۰	۴۰۰	۳۴
۶۰۷+۱۴	۱۷۰۰	۳۵۰	۳۴
۵۷۵+۱۴	۶۱۰	۸۰	۳۴
۵۴۵+۱۴	۶۵۰	۲۰۰	۳۵
۵۲۳+۱۴	۵۲۵	۵۰	۲۷
۴۹۷+۱۴	۳۳۰	۴۰	۲۶
۴۷۶+۱۴	۲۷۵	۲۰۰	۲۷

۸- نتیجه‌گیری

تعیین پارامترهای ژئومکانیکی و مقاومتی توده سنگ خصوصاً محدوده سنگ‌های خردشده و بعضاً سنگ ضعیف به دلیل رفتار غیر خطی توده سنگ ضعیف، بسیار مشکل و یا ناممکن است. اما تحلیل برگشتی به کمک رفتارنگاری به عنوان یک روش ساده می‌تواند برای تخمین معقول پارامترهای مقاومتی توده سنگ و همچنین ارزیابی رفتار سازه‌های زیرزمینی با هزینه و زمانی به مراتب بسیار کمتر نسبت به انجام آزمون‌های آزمایشگاهی، استفاده شود.

در این مقاله تحلیل برگشتی با روش تک متغیره‌ی مستقیم که روشی ساده و کاربردی برای داده‌های حاصل از ابزاربندی است، با نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ برای تونل انتقال به دریاچه ارومیه صورت گرفته است. در این فرآیند پارامترهای مقاومتی توده سنگ تعیین و به کمک داده‌های ابزار دقیق و پس از چندین بار تکرار در ساخت مدل، تابع خطا کمینه شده است. نتایج حاصل از آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای مقاومتی نشان داد که پارامتر مدول الاستیسیته و تنش‌های برجا بیشترین تاثیر را بر میزان جابجایی‌ها دارند.

مدول تغییر شکل‌پذیری در مقطع سنگ قوی از ۸۰۰ تا ۵۸۰۰ مگاپاسکال با حداقل خطای ۰/۰۳ درصد و حداکثر ۲/۸ درصد به دست آمده است. در حالی که مقادیر این پارامتر در محدوده سنگ ضعیف بین ۲۷۵ تا ۶۵۰ مگاپاسکال با خطای ۰/۰۰۸ کمینه شده است.

نتایج نشان می‌دهد پارامترهای مذکور با آنچه که توسط آزمون‌های آزمایشگاهی ارائه شده بود مطابقت مناسبی دارد.

جدول ۱۰- سیاهه‌ی نمایه‌ها

نماد	واحد	شرح	نماد	واحد	شرح
E	MPa	مدول الاستیسیته	σ_{cm}	MPa	مقاومت فشاری تک محوره توده سنگ
C	KPa	چسبندگی	σ_{tm}	KPa	مقاومت کششی توده سنگ
φ	Deg.	زاویه اصطکاک داخلی	G_d	GPa	مدول برشی دینامیک
K	-	تنش برجا	E_d	GPa	مدول دینامیک
σ_c	MPa	مقاومت فشاری تک محوره	ν	-	نسبت (ضریب) پواسون
σ_t	MPa	مقاومت کششی	E_s	GPa	مدول استاتیک
γ	Kg/m ³	چگالی	m_b	-	ثابت کاهش یافته ثابت ماده سنگ
σ_{ci}	MPa	مقاومت فشاری تک محوره سنگ بکر	GSI	-	شاخص مقاومت زمین شناسی
m_i	-	ثابت ماده سنگ	D	-	فاکتور اغتشاش

مراجع

- Cao, W., Jiang, Y., Sakaguchi, O., Li, N., & Han, W. (2022). Predication of Displacement of Tunnel Rock Mass Based on the Back-Analysis Method-BP Neural Network. *Geotechnical and Geological Engineering*, 40(2), 531–544. <https://doi.org/10.1007/s10706-021-01874-0>
- Chen, K., & Olarte, A. A. P. (2024a). Probabilistic Back Analysis Based on Nadam, Bayesian, and Matrix-Variate Deep Gaussian Process for Rock Tunnels. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 57(11), 9739–9758.
- Chen, K., & Olarte, A. A. P. (2024b). Probabilistic Back Analysis Based on Nadam, Bayesian, and Matrix-Variate Deep Gaussian Process for Rock Tunnels. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 57(11), 9739–9758.
- Cho, K.-H., Choi, M.-K., Nam, S.-W., & Lee, I.-M. (2006). Geotechnical parameter estimation in tunnelling using relative convergence measurement. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 30(2), 137–155.
- Dehghan, A., Rezaei, F., & Ghanbari, A. (2010). Back-analysis of Karaj metro tunnel to determine geomechanical parameters of the enclosing soil mass. *Engineering Geology*, 3(2).
- Gioda, G., & Maier, G. (1980). Direct search solution of an inverse problem in elastoplasticity: Identification of cohesion, friction angle and in situ stress by pressure tunnel tests. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 15(12), 1823–1848.
- Gioda, G., & Sakurai, S. (1987). Back analysis procedures for the interpretation of field measurements in geomechanics. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 11(6), 555–583.
- Huang, H., Ooka, R., Chen, H., & Kato, S. (2009). Optimum design for smoke-control system in buildings considering robustness using CFD and Genetic Algorithms. *Building and Environment*, 44(11), 2218–2227.
- Imen sazan Consulting Engineers. (2016). Imen sazan Consulting Engineers report- Kani-Sib tunnel.
- Jia, W. Z., Hong, T. L., & Jin, L. Z. (2009a). Three-dimensional nonlinear finite element back-analysis method for rock mass parameters and initial stresses field in tunneling. *Proceedings of the 2nd International Conference on Modelling and Simulation*, ICMS2009, 1, 127–132.
- Jia, W. Z., Hong, T. L., & Jin, L. Z. (2009b). Three-dimensional nonlinear finite element back-analysis method for rock mass parameters and initial stresses field in tunneling. *Proceedings of the 2nd International Conference on Modelling and Simulation*, ICMS2009, 1, 127–132.
- Khamesi, H. (2011). Intelligent back analysis of Line 2 Metro-Karaj using Fuzzy systems [M.Sc.]. Shahrood University of Technology.
- Khetwal, A., & Gutierrez, M. (2022). Assessing the effect of in-situ stress conditions in back-analysis of rock mass parameters of tunnels using machine learning techniques. *56th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*.
- Li, C. H., Peng, J. W., & Zaho, K. (2014). Back analysis of rock parameters based on neural network and FLAC. In *Transit Development in Rock Mechanics* (pp. 299–302). CRC Press.

<https://doi.org/10.1201/b17617-56>

- Li, H., Chen, W., Tan, X., & Tan, X. (2023). Back analysis of geomechanical parameters for rock mass under complex geological conditions using a novel algorithm. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 136, 105099. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105099>
- Mahmoudi, M., & Rajabi, A. M. (2020). Application of numerical back analysis for determination of soil mass specifications during tunnel construction. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(19). <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05935-1>
- Miranda, T., Dias, D., Eclaircy-Caudron, S., Correia, A. G., & Costa, L. (2011). Back analysis of geomechanical parameters by optimisation of a 3D model of an underground structure. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(6), 659–673.
- Sakurai, S., & Takeuchi, K. (1983). Back analysis of measured displacements of tunnels. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 16, 173–180.
- Sarikhani-Khorami, M. (2009). Analysis of Geomechanical Parameters and in situ Stresses of rock mass in the Isfahan - Shiraz railway Tunnel using back Analysis based on displacement monitoring. *Isfahan University of Technology*.
- Sing, B., & Goel, R. K. (1999). *Rock Mass Classification*. Elsevier.
- Vardakos, S., & Gutierrez, M. (2012). Applied back-analysis methods for tunneling using numerical modeling. *46th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium 2012*, 3, 2150–2165.
- Zhang, L. Q., Yue, Z. Q., Yang, Z. F., Qi, J. X., & Liu, F. C. (2006). 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), 636–649. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.12.001>
- Zhao, H., Chen, B., & Li, S. (2021). Determination of geomaterial mechanical parameters based on back analysis and reduced-order model. *Computers and Geotechnics*, 132, 104013.
- Zhu, M., Peng, H., Liang, M., Song, G., Huang, N., Xie, W., & Han, Y. (2024). RC-XGBoost-Based Mechanical Parameters Back Analysis of Rock Mass in Heavily Fractured Tunnel: A Case in Yunnan, China. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 57(4), 2997–3019. <https://doi.org/10.1007/s00603-023-03659-8>.
- Ziaei, A., & Ahangari, K. (2018). The effect of topography on stability of shallow tunnels case study: The diversion and conveyance tunnels of Safa Dam. *Transportation Geotechnics*, 14, 126–135. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.12.001>.

Back analysis to determine geomechanical parameters of the surrounding environment of the water conveyance tunnel to the Urmia Lake

H. Bakhshi¹; A. Abdollahipour^{2*}; A. R. Kargar³

1- MSc Graduated; School of Mining Engineering., College of Engineering, University of Tehran, HBakhshi62@ut.ac.ir

2- Assistant Professor; School of Mining Engineering., College of Engineering, University of Tehran, Abdollahipour@ut.ac.ir

2- Assistant Professor; School of Mining Engineering., College of Engineering, University of Tehran, AR.Kargar@ut.ac.ir

Received: 23 Sep 2023; Accepted: 29 Oct 2024

DOI: 10.22044/tuse.2025.13623.1481

Keywords	Extended Abstract
Back-analysis Geomechanical parameters Tunnel stability Numerical modeling FLAC3D	Summary This research analyzes geomechanical parameters of the Kani Sib Water Conveyance Tunnel using back-analysis. Numerical modeling has been made using FLAC3D software, and a direct univariate optimization algorithm has been used to estimate the deformation modulus, cohesion, and internal friction angle for rocky and alluvial sections. The obtained results have shown the deformation modulus in the ranges of 800–5800 MPa in rocky zones and 275–650 MPa in alluvial zones. These estimates, validated by laboratory data, provide reliable inputs for optimal tunnel designs and reducing costs.

Introduction

Geomechanical parameters significantly impact tunnel stability and safety. Conventional methods, such as laboratory and in-situ tests, are limited by scale effects and sample representation. Back-analysis integrates monitoring data and numerical modeling to address these uncertainties, making it a valuable tool in tunnel engineering. Back-analysis was used in this study to estimate the deformation modulus, cohesion, and internal friction angle of the Kani Sib Tunnel, which has complex geological conditions.

Methodology and Approaches

FLAC3D software modeled tunnel displacements based on monitoring data from convergence pins. A direct univariate search algorithm minimized the error between observed and modeled displacements. Models incorporated key site parameters, such as rock density, groundwater pressure, and in-situ stresses. Sensitivity analysis was performed to determine the influence of deformation modulus, cohesion, and internal friction angle on tunnel behavior.

Results and Conclusions

Back-analysis highlighted distinct differences in geomechanical properties between rocky and alluvial zones. In rocky sections, deformation modulus ranged from 800 to 5800 MPa, cohesion from 200 to 450 kPa, and internal friction angle from 28° to 35°. In alluvial sections, these values dropped significantly, with deformation modulus between 275 and 650 MPa, cohesion from 40 to 200 kPa, and internal friction angle from 25° to 35°. Sensitivity analysis revealed that deformation modulus had the greatest effect on displacements, followed by cohesion and internal friction angle. The results align with laboratory data, confirming back-analysis as an effective method for estimating reliable parameters, enhancing tunnel design, and reducing costs.