

تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ میزبان خط جنوبی مترو اصفهان با استفاده از تحلیل برگشتی

سعید مهدوری^{۱*}، ابراهیم فتحی سلمی^۲

۱. دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی معدن، Smahdevari@cc.iut.ac.ir

۲. دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی معدن

(دریافت ۱۰ بهمن ۱۳۸۶، پذیرش ۴ خرداد ۱۳۸۷)

چکیده

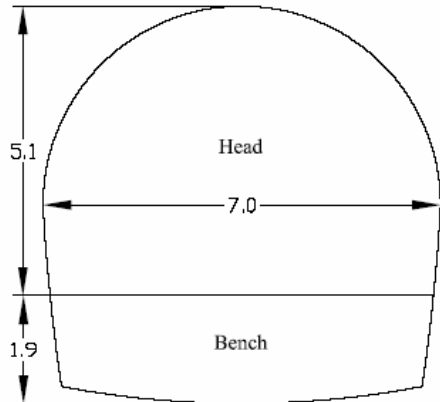
در این تحقیق ابتدا پارامترهای ژئومکانیکی سنگ‌های میزبان خط جنوبی مترو اصفهان بررسی شده است. سپس هدف از ابزاربندی تشریح شده و ابزارهای نصب شده در خط مذکور معرفی و برخی از نتایج ابزارها، ارائه شده است. روش‌های انجام تحلیل برگشتی و بهینه‌سازی آن بیان و مزایا و معایب هر روش بررسی شده است. در ادامه به نحوه مدل‌سازی عددی به صورت سه بعدی اشاره شده است. تحلیل برگشتی برای تعیین پارامترهای مدول تغییر شکل، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی سنگ میزبان تونل انجام شده و با بهره‌گیری از روش بهینه‌سازی حداقل مربعات و مدل‌های عددی ساخته شده، زاویه اصطکاک داخلی ۳۰ درجه، چسبندگی ۱۵۰ کیلوپاسگال و مدول تغییر شکل ۱/۵ گیگاپاسگال تعیین شده است. با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی حداقل مربعات وزن‌دار و کمینه کردن بیشینه خطا، زاویه اصطکاک داخلی ۳۵ درجه، چسبندگی ۲۵۰ کیلوپاسگال و مدول تغییر شکل ۱/۵ گیگاپاسگال تعیین شده است. کمترین حساسیت تابع خطا به مقدار زاویه اصطکاک داخلی و بیشترین حساسیت آن به مدول تغییر شکل و چسبندگی است. علت عدم حساسیت به زاویه اصطکاک داخلی می‌تواند ناشی از کم بودن روباره تونل باشد.

کلمات کلیدی

قطار شهری اصفهان، تحلیل برگشتی، کشیدگی سنج، *FLAC 3D*

۱- مقدمه

با توجه به توسعه صنعتی و اجتماعی شهر اصفهان، قطار شهری به عنوان یکی از ملزومات شهرهای صنعتی می‌تواند نقش اساسی در سهولت رفت و آمد، کاهش ترافیک و آلودگی هوا داشته باشد. شبکه قطار شهری اصفهان از دو بخش درون شهری و برون شهری تشکیل شده است. بخش درون شهری شامل دو خط شمالی - جنوبی و شرقی - غربی است. طول خط شمالی - جنوبی ۲۰/۳ کیلومتر بوده و از پنج قطعه شمال غرب، شمالی، میانی، شرقی - آزادی و جنوبی تشکیل شده است. قطعه‌های شمالی و شمال غرب به طول مجموع ۱۰/۳ کیلومتر به شیوه کند و پوش^۱ حفاری می‌شود. قطعه میانی به طول ۵/۵ کیلومتر توسط سپر EPB و قطعه‌های شرقی - آزادی و جنوبی به طول مجموع ۴/۴ کیلومتر توسط رودهدر حفاری می‌شود. بخش درون شهری شبکه قطار شهری در شکل ۱ نمایش داده شده است [۱].

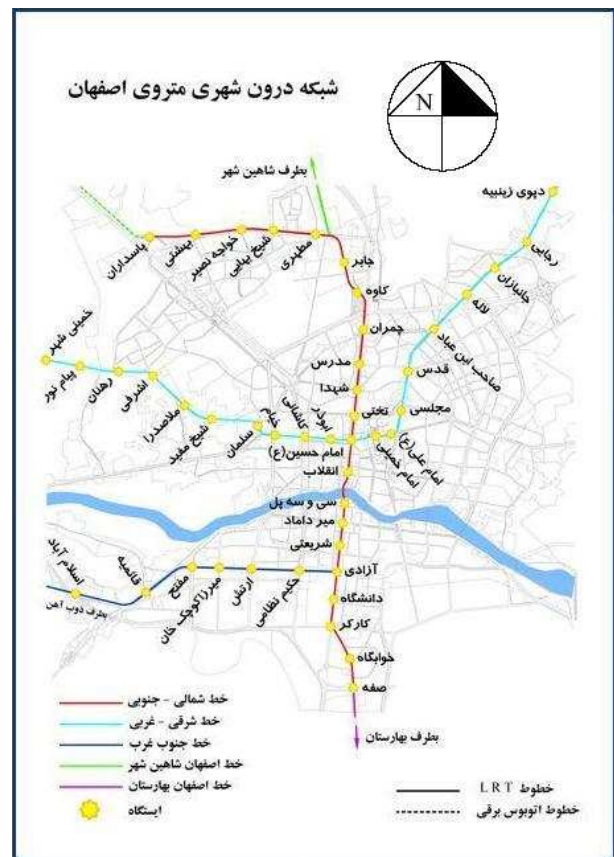


شکل ۲: هندسه تونل در قطعه جنوبی مترو اصفهان [۱]

۲- پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ میزبان تونل

بر اساس نتایج حاصل از گمانه‌های حفاری شده، سنگ‌هایی که در طول تونل با آن مواجه می‌شویم عموماً شیل و ماسه‌سنگ هستند. در این سنگ‌ها نسبت سرعت امواج برشی به فشاری حدود ۰/۶ تا ۰/۷ است که با توجه به معیار تجربی ارائه شده توسط تورنک^۲ و همکارانش [۲]، این سنگ‌ها در رده سنگ‌های شکافدار^۳ قرار دارد. در بررسی‌های میکروسکوپی انجام شده بر روی مقاطع نازک، درصد سیلیس حدود ۲۰ تا ۴۰ درصد تعیین شده که بیانگر سختی بالای شیل و ماسه‌سنگ است. توان سایندگی ماسه‌سنگ حتی در حفاری گمانه‌ها نیز قابل توجه بوده و باعث ساییدگی سرتمه و لوله مغزه‌گیر شده است. بر اساس نتایج آزمون‌های بار نقطه‌ای و مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت فشاری متوسط شیل و ماسه‌سنگ به ترتیب ۱۸ و ۵۰ مگاپاسگال بدست آمده است [۱].

پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ میزبان تونل با استفاده از روش ارائه شده توسط هوک محاسبه شده است [۳]. نتایج حاصل از طبقه‌بندی‌های مهندسی Q و RMR سنگ میزبان تونل، مقادیر GSI، مدول تغییر شکل توده سنگ، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ در جدول ۱ نمایش داده شده است. چون حفاری تونل توسط رودهدر انجام می‌شود فاکتور آشفستگی سنگ که توسط هوک معرفی شده، صفر منظور شده است.



شکل ۱: شبکه درون شهری قطار شهری اصفهان [۱]

در این تحقیق پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ میزبان قطعه جنوبی مورد بررسی قرار گرفته است. این قطعه با دو تونل رفت و برگشت مجزا با مقطع نعل اسبی و قطر داخلی ۶ متر از ایستگاه

جدول ۱: پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ میزبان تونل [۱]

نوع سنگ	RMR	Q	GSI	E_m (Gpa)	C(kpa)	ϕ
ماسه سنگ	۳۷	۰/۳۳	۴۵	۵/۲۶	۲۵۰	۳۴
شیل و ماسه سنگ	۳۰	۰/۰۹۹	۳۸	۲/۸۹	۱۵۰	۲۹
شیل	۲۵	۰/۰۳۶	۳۰	۱/۳۲	۷۷	۲۲
شیل و ماسه سنگ خرد شده	۱۸	۰/۰۱۱	۲۵	۰/۷۲	۵۰	۲۱
ماسه سنگ خرد شده	۱۳	۰/۰۰۵۵	۲۰	۰/۱۸	۱۸	۱۹

۳- ابزاربندی تونل

۳-۱- هدف از ابزاربندی

پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ که برای طراحی سازه‌های زیرزمینی به کار می‌رود معمولاً به طور غیر مستقیم با استفاده از پارامترهای ژئومکانیکی سنگ بکر و طبقه‌بندی‌های مهندسی محاسبه می‌شوند یا به طور مستقیم توسط آزمون‌های بر جای گران قیمت تعیین می‌شوند. لذا به طور معمول اطلاعات کاملاً دقیقی از وضعیت واقعی زمین و پارامترهای لازم در دست مهندس طراح نیست.

در زمان اجرا، ابزاربندی و رفتارسنجی وسیله مناسبی است که توسط آنها می‌توان پارامترها و شرایط فرض شده طراحی را تایید و عملکرد سازه و توده سنگ را ارزیابی کرد و یا در صورت وقوع ناپایداری به علت آن پی برد. اگر شرایط واقعی زمین با شرایط پیش‌بینی شده اختلاف چشم‌گیری داشته باشد، بر اساس مشاهدات و نتایج ابزار دقیق، تغییرات و اصلاحات در طرح یا روش اجرا صورت می‌گیرد.

ایمینی نیز در کارهای زیرزمینی از ضروریات اساسی است که با رفتارسنجی توده سنگ و کنترل رفتار آن می‌توان مشکلات ایمنی را تشخیص داده و در جلوگیری و رفع آنها اقدام کرد و در برخورد با مسائلی نظیر نشست ساختمان‌های مجاور در تونل‌های شهری بهتر عمل کرد.

آگاهی از تغییر مکان‌ها، توزیع تنش و بارهای وارد بر سیستم نگهداری از طریق رفتارسنجی باعث صرفه‌جویی قابل ملاحظه در هزینه اجرای طرح می‌شود، این صرفه‌جویی ناشی از عدم طراحی محافظه‌کارانه و عدم تاخیر در اجرا و بهره‌داری است. قابل ذکر است که هزینه متعارف ابزاربندی تنها حدود ۰/۵ تا ۱ درصد کل هزینه اجرای طرح است.

۳-۲- انواع ابزارها

پارامترهایی که توسط ابزار مورد سنجش و ارزیابی قرار می‌گیرد را می‌توان در دو دسته کلی قرار داد، دسته اول پارامترهای مربوط به توده سنگ است که شامل جابه‌جایی،

فشار آب حفره‌ای و تغییرات تنش می‌شود و دسته دوم پارامترهای مربوط به سیستم نگهداری است مانند جابه‌جایی و بار وارده بر سیستم نگهداری، برای ارزیابی این پارامترها می‌توان از ابزارهایی چون کشیدگی‌سنج^۴، انحراف‌سنج^۵، همگرایی‌سنج^۶، سلول فشار^۷، بارسنج میل مهار^۸ و غیره بهره برد. از میان روشهای متفاوت رفتارسنجی، اندازه‌گیری جابه‌جایی حفريات زیرزمینی از همه مفیدتر است، این امر دو علت دارد:

اولاً جابجایی کمی است که مستقیماً اندازه‌گیری و به طور پیوسته رفتارسنجی می‌شود و اندازه‌گیری آن نسبتاً آسان است. در مقابل، تنش‌ها را باید به‌طور غیر مستقیم و با کمک سایر اندازه‌گیری‌ها محاسبه کرد ضمن آنکه رفتارسنجی مستمر آن دشوار است. ثانیاً اندازه‌گیری جابجایی اطلاعاتی را در مورد حرکت کلی توده سنگ در بازه زمانی اندازه‌گیری، ارائه می‌کند.

۳-۳- ابزارهای نصب شده در تونل مترو اصفهان

در تونل غربی قطعه جنوبی مترو اصفهان از ایستگاه‌های همگرایی سنج ۵ نقطه‌ای و کشیدگی‌سنج ۳ نقطه‌ای جهت ارزیابی جابه‌جایی‌ها استفاده شده است. چون ایستگاه‌های همگرایی‌سنج بعد از جبهه‌کار نصب می‌شوند، بخشی از جابه‌جایی تونل انجام شده که مقدار آن تابعی از زمان و فاصله از جبهه‌کار و پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ است. برای استفاده از داده‌های حاصل از ایستگاه‌های همگرایی‌سنج در تحلیل برگشتی باید مقدار جابه‌جایی تونل قبل از نصب ابزار مشخص باشد. چون امکان تعیین دقیق مقدار جابه‌جایی پیرامون تونل، قبل از نصب همگرایی‌سنج‌ها وجود نداشت، از جابه‌جایی‌های ثبت شده توسط همگرایی‌سنج‌ها در تحلیل برگشتی استفاده نشده است. ایستگاه‌های کشیدگی‌سنج از سطح زمین و قبل از جبهه‌کار تونل ایجاد شده است لذا جابه‌جایی اندازه‌گیری شده توسط کشیدگی‌سنج‌ها برابر با کل جابه‌جایی به وقوع پیوسته در تونل بوده و می‌توان در تحلیل برگشتی از آن استفاده کرد. فاصله از جبهه‌کار، محل نصب،

مجدد قرار داد و اختلاف بین رفتار واقعی و پیش‌بینی شده سازه مورد نظر را به حداقل رساند.

به طور کلی روش‌های تحلیل برگشتی را می‌توان به دو دسته مستقیم و معکوس تقسیم کرد [۴].

در روش معکوس فرمول‌بندی ریاضی دقیقاً عکس تحلیل عادی است، در این روش تعداد مقادیر اندازه‌گیری شده باید بیشتر از مقادیر مجهول باشد تا بتوان از تکنیک‌های بهینه‌سازی استفاده کرد. مزیت این روش عدم نیاز به عملیات تکراری و کم بودن زمان محاسبات است و مشکل عمده این روش آن است که در مسائل مهندسی ژئوتکنیک به دست آوردن روش حلی که از لحاظ عددی پایدار باشد مشکل است [۴]. در روش مستقیم با استفاده از سعی و خطا اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده به حداقل ممکن کاهش یافته و مجهولات مورد نظر ارزیابی می‌شوند. این روش زمان‌بر بوده ولی برای مسائل غیرخطی و پیچیده ژئوتکنیک مناسب است [۵]. در این تحقیق از روش مستقیم برای تحلیل برگشتی استفاده شده است.

برای ارزیابی کاهش اختلاف میان مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده نیز روش‌های متفاوتی وجود دارد که عبارتند از روش‌های چیشو^۱، کمینه کردن بیشینه خطا^۱ و کمترین مربعات^{۱۱}، در این تحقیق از روش‌های کمترین مربعات و

تاریخ نصب و طول رادها در جدول ۲ نمایش داده شده است. علاوه جابه‌جایی‌های ثبت شده توسط کشیدگی‌سنج شماره ۲ در مقابل فاصله از جبهه کار در شکل ۳ نمایش داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، با فاصله گرفتن جبهه کار از محل نصب کشیدگی‌سنج میزان جابه‌جایی‌ها ثابت شده است. بیشینه جابه‌جایی ثبت شده توسط کشیدگی‌سنج‌ها در هر نقطه ملاک سنجش در مدل‌سازی عددی بوده است.

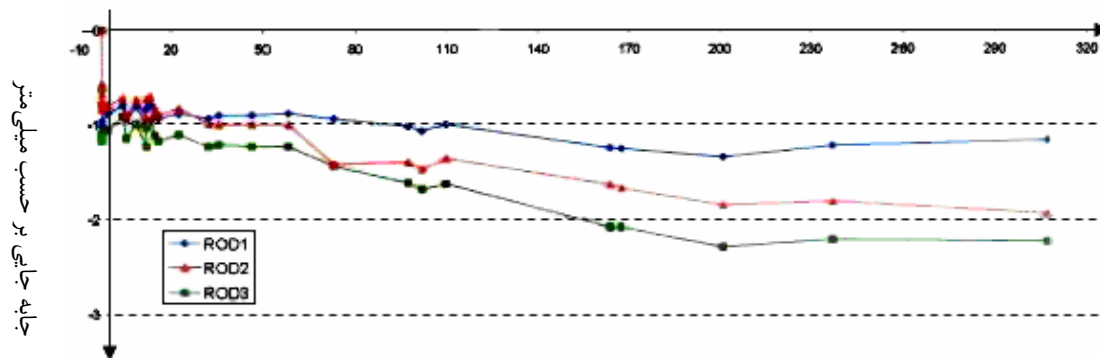
۴- تحلیل برگشتی

در حال حاضر به طور وسیع از روش‌های عددی برای طراحی سازه‌های زیرزمینی نظیر تونل، مغار، فوندانسیون سدها و نظایر آن استفاده می‌شود، ولی اعتبار این طراحی به دقت اطلاعات ورودی و اینکه تا چه حد بیانگر رفتار واقعی سنگ باشند بستگی دارد. بیان دقیق و کمی ساختارهای زمین‌شناسی، پارامترهای ژئومکانیکی سنگ‌های برجا، میدان تنش اولیه، سطح آب زیرزمینی و نفوذپذیری کار دشواری است. لذا دور از انتظار نیست که علی‌رغم استفاده از بررسی‌های زمین‌شناسی دقیق و تحلیل‌های عددی پیچیده، رفتار واقعی سازه‌های مذکور، متفاوت با رفتار پیش‌بینی شده آنها باشد.

با ابزاربندی سازه و تحلیل برگشتی می‌توان اطلاعات زمین‌شناسی و پارامترهای ژئومکانیکی ورودی را مورد ارزیابی

جدول ۲: مشخصات کشیدگی‌سنج‌های نصب شده در تونل غربی خط جنوبی مترو اصفهان [۱]

فاصله از جبهه کار (متر)	تاریخ نصب	طول رادها بر حسب متر			محل نصب	کشیدگی‌سنج
		راد ۳	راد ۲	راد ۱		
-۱۱/۶۷	۸۳/۲/۱۹	۱۰/۲۵	۹/۲۵	۶	۹+۲۱۰ کیلومتر	۱
-۴/۶۷	۸۳/۶/۱۸	۸	۷	۳	۹+۴۶۰ کیلومتر	۲
-۹۶/۲۵	۸۳/۷/۱۴	۶	۵	۲/۵	۹+۶۰۰ کیلومتر	۳
-۴۸/۴۷	۸۳/۱۱/۱۷	۶/۲	۵/۲	۲/۵	۹+۸۰۰ کیلومتر	۴



فاصله از جبهه کار بر حسب متر

شکل ۳: جابه‌جایی‌های ثبت شده توسط کشیدگی‌سنج شماره ۲ در مقابل فاصله از جبهه کار [۱]

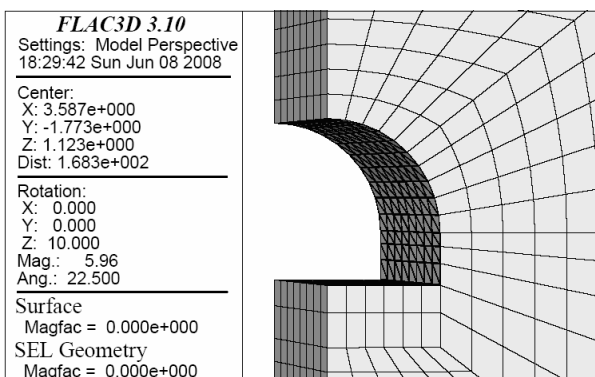
گونه‌های انجام شده که یک گره دقیقاً در آن مختصات وجود داشته باشد.

برای نگهداری تونل، از ۲۰ سانتی‌متر شاکریت با مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۲۱ مگاپاسگال، مش و قاب میلگردی^{۱۲} که در فواصل دو متری نصب می‌شود استفاده شده است. برای مدل کردن نگهداری از المان سازه‌ای Shell بهره برده شده است. مشخصات این المان شامل ضخامت، ضریب پواسون و مدول الاستیک است که در مدل‌های عددی ساخته شده مقادیر معادل آنها با توجه به نگهداری نصب شده در تونل به ترتیب ۲۱ سانتی‌متر، ۰/۲۵ و ۱۰/۵ گیگاپاسگال لحاظ شده است.

همانطور که قبلاً ذکر شد حفاری تونل در دو مرحله و به صورت سقف‌کنی و پله‌کنی انجام می‌شود، بعد از انجام عملیات سقف‌کنی نگهداری موقت نصب شده و با انجام عملیات پله‌کنی نگهداری موقت تکمیل می‌شود.

در مدل‌سازی عددی، برای تعیین زمان نصب نگهداری، جابه‌جایی‌های ثابت شده توسط کشیدگی‌سنج‌ها مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که حدود ۵۰ درصد از کل جابه‌جایی‌ها قبل از نصب نگهداری انجام شده است (شکل ۳).

لذا در کلیه مدل‌های عددی ساخته شده ابتدا بدون منظور کردن نگهداری، چرخه‌ای^{۱۳} که در آن ۵۰ درصد جابه‌جایی‌های کل محقق شده، تعیین شد. سپس فرایند مدل‌سازی تکرار و تا چرخه مذکور، مدل را حل کرده و بعد از آن نگهداری موقت در قسمت تاج تونل نصب شده است (شکل ۴)، بعد از به تعادل رسیدن مدل، بخش پله حفاری و نگهداری موقت تکمیل شده است (شکل ۵) و بعد از تعادل نهایی مدل، جابه‌جایی نقاط شاهد^{۱۴} با جابه‌جایی ثابت شده توسط کشیدگی‌سنج‌ها مقایسه شده است.



شکل ۴: حفاری بخش تاج تونل و نصب نگهداری موقت

در بخش‌هایی از تونل که زیر سطح ایستابی قرار گرفته برای محاسبه تنش‌های برجا از چگالی غوطه‌ور استفاده شده است.

کمینه کردن بیشینه خطا استفاده شده است. اگر فرض کنیم u_i جابه‌جایی قرائت شده توسط ابزار دقیق برای n نقطه و u'_i جابه‌جایی محاسبه شده توسط مدلسازی عددی در نقاط نظیر باشد، در این صورت تابع خطا f مطابق با روش حداقل مربعات به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود [۶].

$$f = \sum_{i=1}^n (u_i - u'_i)^2 \quad (1)$$

البته استفاده از این شیوه بهینه‌سازی ممکن است اشکالاتی نیز داشته باشد، به عنوان مثال اگر جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری شده توسط ابزار دارای درجه اهمیت یکسانی نباشند یا جابه‌جایی اندازه‌گیری شده توسط ابزار در یک یا چند نقطه تفاوت بارزی با دیگر نقاط داشته باشد و مقدار تابع خطا عملاً توسط آن نقاط کنترل شود. در این شرایط می‌توان تابع خطا را به صورت وزن‌دار مطابق رابطه ۲ تعریف کرد.

$$f = \sum_{i=1}^n a_i (u_i - u'_i)^2 \quad (2)$$

در شرایطی که نقاط شاهد، دارای درجه اهمیت یکسانی برای ما باشند و نخواهیم مقدار تابع خطا توسط چند نقطه شاهد با جابه‌جایی بیشینه کنترل شود، مقدار ضریب a_i می‌تواند توسط رابطه ۳ تعیین شود.

$$a_i = \left| \frac{u_1 - u'_1}{u_i - u'_i} \right|^b \quad (3)$$

که در آن:

u_1 و u'_1 به ترتیب جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری شده توسط ابزار و محاسبه شده توسط مدل در نقطه‌ای با کمترین جابه‌جایی است، به این ترتیب مقدار ضریب a_i برای نقطه‌ای با کمترین جابه‌جایی برابر با یک و برای سایر نقاط با توجه مقدار تابع خطا برای آن نقطه کمتر از یک خواهد بود. ضمناً مقدار ضریب a_i ثابت نبوده و در هر مرحله با توجه به نتایج مدل‌سازی عددی تعیین می‌شود. قابل ذکر است که در این تحقیق برای نقاط شاهد درجه اهمیت یکسانی قائل شده‌ایم. مقدار ضریب b بسته به نتایج مدل‌سازی عددی می‌تواند مساوی، کمتر یا بیشتر از یک باشد.

۵- مدل‌سازی عددی

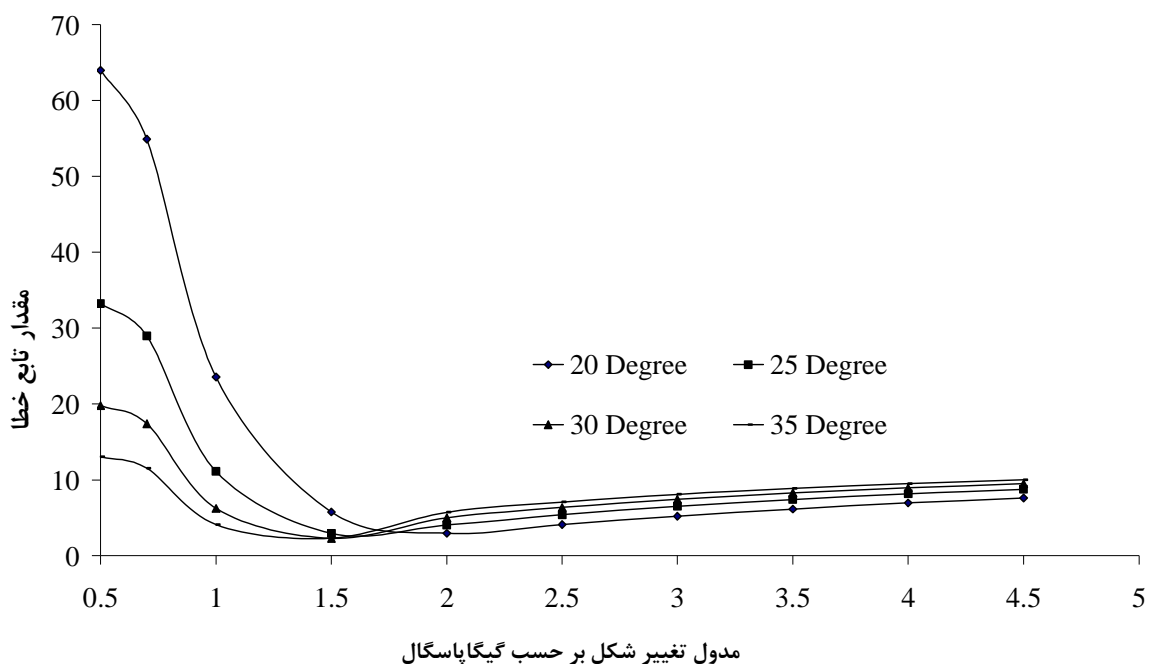
برای مدل‌سازی عددی از نرم افزار FLAC3D استفاده شده است. در این نرم‌افزار زمانی که نقاط شاهد با استفاده از مختصات آنها تعریف می‌شوند، نزدیکترین گره به مختصات مذکور به عنوان گره شاهد منظور می‌شود. لذا برای اینکه نقطه شاهد دقیقاً در مختصات مورد نظر قرار گیرد مش‌بندی مدل به

پارامترهای ژئومکانیکی متفاوت و بررسی روند تغییرات تابع خطا انجام می‌شود.

تخمین پارامترهای مذکور در دو مرحله انجام شده است، در مرحله اول از تکنیک بهینه‌سازی کمترین مربعات خطا و در مرحله دوم از تکنیک‌های کمترین مربعات خطا وزن‌دار و کمینه کردن بیشینه خطا استفاده شده است. تخمین اولیه دامنه تغییرات مدول تغییر شکل، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی با توجه به پارامترهای توده سنگ ارائه شده در جدول ۱ انجام شده و در جریان مدل‌سازی عددی با توجه به نتایج مدل‌سازی و مقدار تابع خطا، دامنه تغییرات اصلاح شده است. تغییرات مدول تغییر شکل از ۰/۵ تا ۵/۵ گیگاپاسگال، چسبندگی ۱۰۰ تا ۳۰۰ کیلوپاسگال و زاویه اصطکاک داخلی ۲۰ تا ۳۵ درجه منظور شده است.

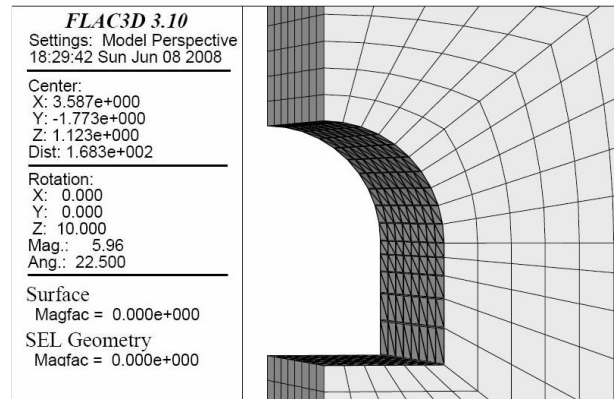
۶-۱- مرحله اول

در این مرحله تابع خطا مطابق با رابطه ۱ تشکیل و مقدار کمینه آن زمانی محقق شده که زاویه اصطکاک داخلی ۳۰ درجه، مدول تغییر شکل ۱/۵ گیگاپاسگال و چسبندگی ۱۵۰ کیلوپاسگال است. مقدار تابع خطا در مقابل مدول تغییر شکل برای چسبندگی‌های ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسگال به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ و مقدار آن در مقابل چسبندگی برای مدول تغییر شکل ۱/۵ گیگاپاسگال در شکل ۷ نمایش داده شده است.



شکل ۵: مقدار تابع خطا مرحله اول در مقابل مدول تغییر شکل برای چسبندگی ۱۰۰ کیلوپاسگال

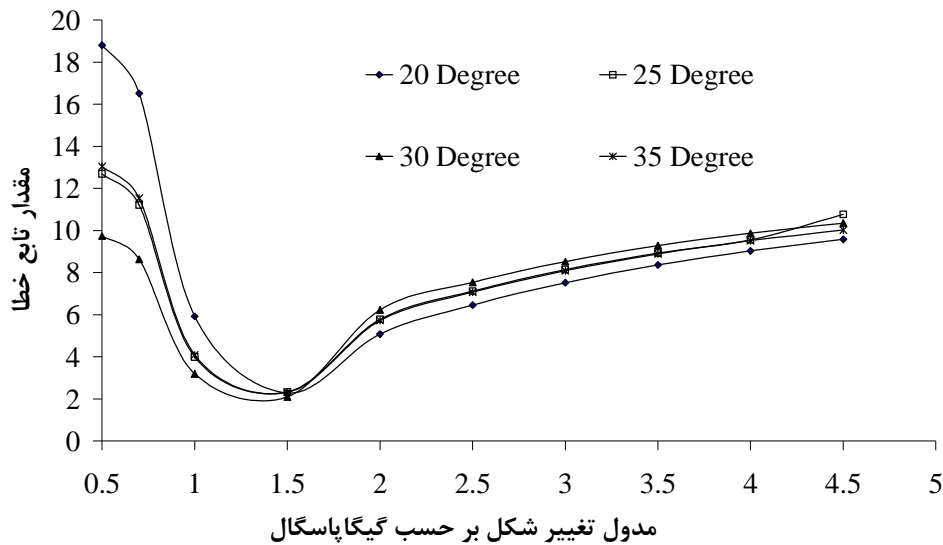
سطح ایستایی معمولاً در عمق سه متری از سطح زمین واقع شده است. تنش‌های بر جای قائم برابر با تنش‌های ثقلی و نسبت تنش افقی به قائم با توجه به حفاری تونل در آبرفت‌های جوان سطحی برابر با ۰/۳۸ لحاظ شده است.



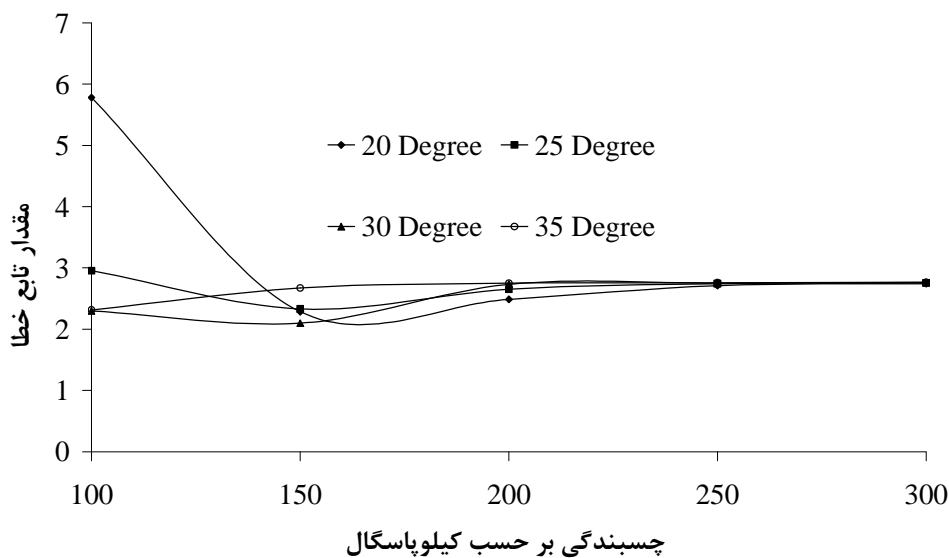
شکل ۴: حفاری کف تونل و تکمیل نگهداری موقت

۶- نتایج حاصل از تحلیل برگشتی

هدف از انجام تحلیل برگشتی تخمین پارامترهای مدول تغییر شکل، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ میزبان تونل با کمینه کردن اختلاف میان جابه‌جایی‌های ثابت شده توسط کشیدگی سنج‌ها و محاسبه شده توسط مدل‌های عددی است. این عمل از طریق ایجاد مدل‌های عددی مکرر با



شکل ۶: مقدار تابع خطا مرحله اول در مقابل مدول تغییر شکل برای چسبندگی ۱۵۰ کیلوپاسگال



شکل ۷: مقدار تابع خطا مرحله اول در مقابل چسبندگی برای مدول تغییر شکل ۱/۵ گیگاپاسگال

۲-۶- مرحله دوم

در این مرحله با تعریف تابع خطا مطابق رابطه ۲ و تعیین ضریب b در رابطه ۳ به گونه‌ای که نتایج روش کمینه کردن بیشینه خطا و کمترین مربعات خطای وزن دار یکسان شود، پارامترهای ژئومکانیکی چسبندگی، مدول تغییر شکل و زاویه اصطکاک داخلی به ترتیب ۲۵۰ کیلوپاسگال، ۱/۵ گیگاپاسگال و ۳۵ درجه، ارزیابی شده است. مقدار ضریب b برابر با ۰/۷۵ لحاظ شده است. تغییرات تابع خطا در مقابل زاویه اصطکاک داخلی برای چسبندگی ۲۵۰ کیلوپاسگال و مدول تغییر شکل ۱/۵ گیگاپاسگال در شکل ۸ نمایش داده شده است. همچنین

مقدار تابع خطا در مقابل مدول تغییر شکل برای چسبندگی‌های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ کیلوپاسگال به ترتیب در شکل‌های ۹ تا ۱۱ نمایش داده شده است.

۳-۶- مقایسه نتایج مراحل اول و دوم

برای مقایسه نتایج مراحل اول و دوم از اختلاف بین جابه‌جایی ثبت شده توسط نقاط شاهد در مدل عددی و جابه‌جایی ثبت شده توسط اتساع سنج‌ها، استفاده شده است. مقدار این اختلاف بر جابه‌جایی ثبت شده توسط اتساع سنج متناظرش تقسیم شده و مقادیر بیشینه، کمینه و متوسط آن

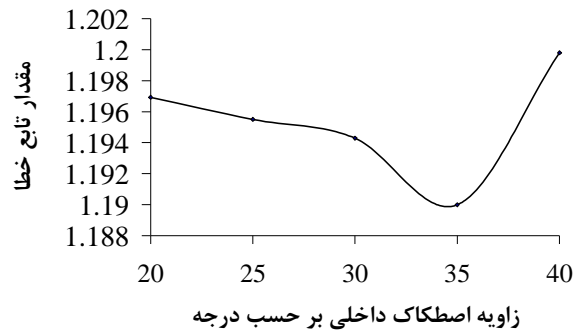
همانگونه که مشاهده می‌شود دامنه تغییرات درصد اختلاف و مقادیر متوسط و بیشینه آن در روش حداقل مربعات وزن دار کمتر است.

۷- نتیجه‌گیری

با استفاده از روش بهینه‌سازی حداقل مربعات خطا مقادیر مدول تغییرشکل، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی سنگ‌های میزبان تونل به ترتیب ۱/۵ گیگاپاسگال، ۳۰ درجه و ۱۵۰ کیلوپاسگال تعیین شده است.

با تعیین وزن‌ها در روش بهینه‌سازی حداقل مربعات وزن دار به گونه‌ای که نتایج این روش و روش کمینه کردن بیشینه خطا یکسان شود، پارامترهای ژئومکانیکی مدول تغییرشکل، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی به ترتیب ۱/۵ گیگاپاسگال، ۳۵ درجه و ۲۵۰ کیلوپاسگال ارزیابی شده است.

حساسیت تابع خطا به زاویه اصطکاک داخلی کم بوده و هر چه مقدار چسبندگی افزایش می‌یابد حساسیت کمتر هم می‌شود، علت این موضوع می‌تواند کم بودن روباره تونل و کمتر شدن تأثیر عبارت $\sigma_{\eta} \tan \phi$ با افزایش چسبندگی در ملاک شکست موهر باشد. ولی حساسیت تابع خطا به تغییرات چسبندگی و مدول تغییرشکل قابل توجه است.

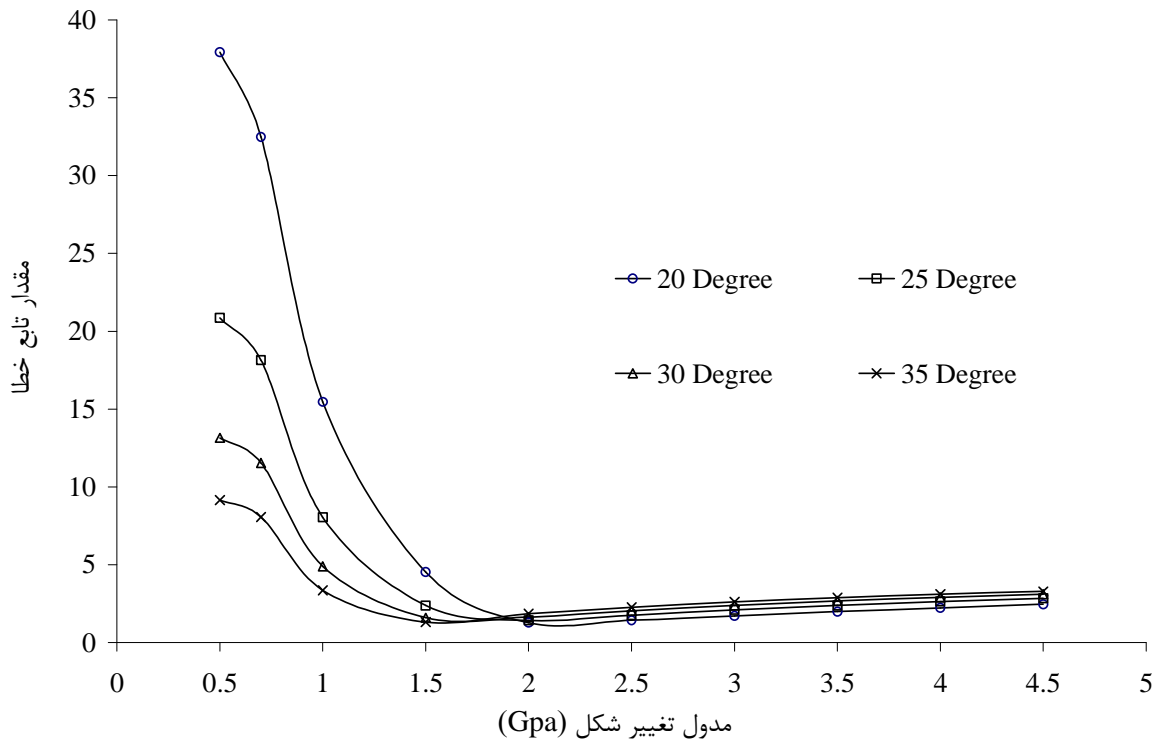


شکل ۸: تغییرات تابع خطا مرحله دوم در مقابل زاویه اصطکاک داخلی

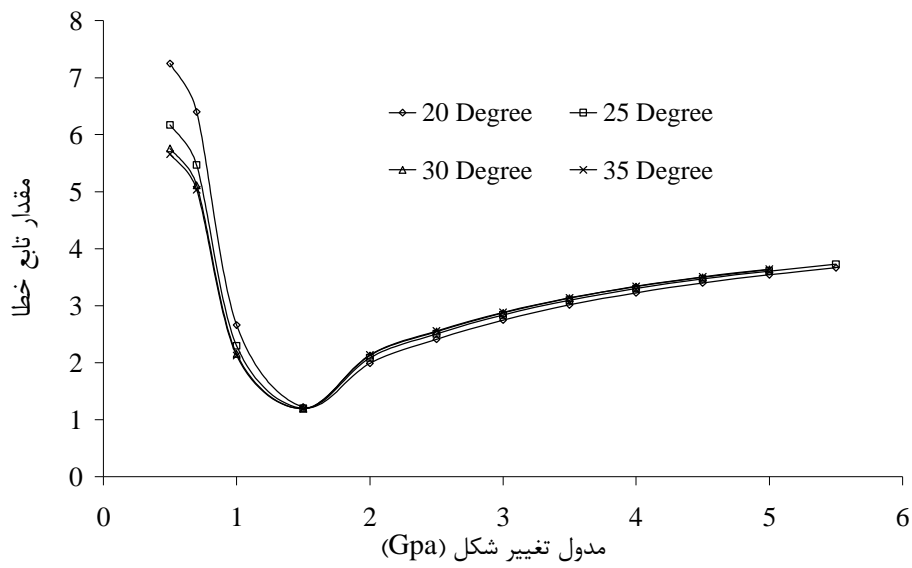
برحسب درصد برای پارامترهای ژئومکانیکی پیشنهاد شده در مراحل اول و دوم تحلیل برگشتی، در جدول ۳ نمایش داده شده است.

جدول ۳: مقایسه نتایج مراحل اول و دوم تحلیل برگشتی

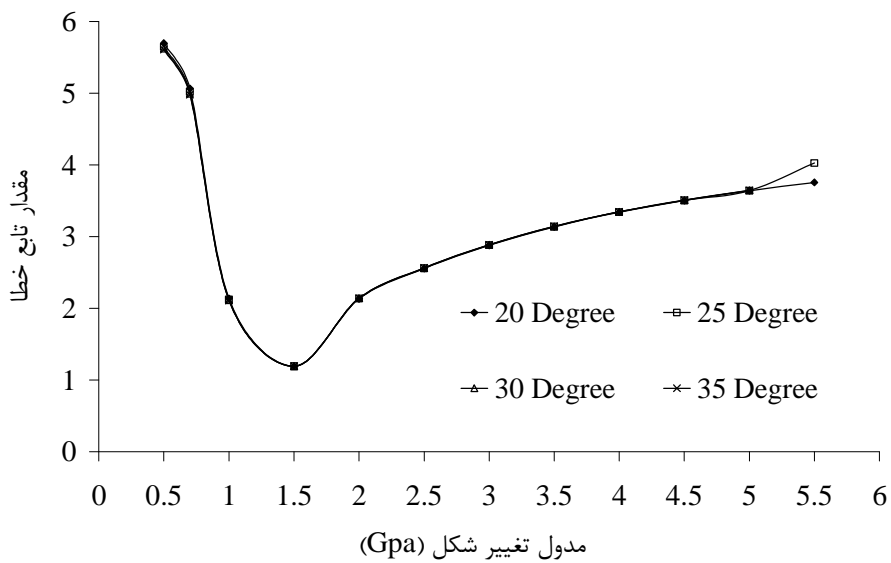
اختلاف بر حسب درصد			پارامترهای ژئومکانیکی		
Average	Max	Min	C (Kpa)	Phi (Degree)	E (Gpa)
۶/۱۰	۱۶/۱۵	۱/۱۵	۱۵۰	۳۰	۱/۵
۵/۸۸	۱۴/۲۳	۱/۷۷	۲۵۰	۳۵	۱/۵



شکل ۸: مقدار تابع خطا مرحله دوم در مقابل مدول تغییر شکل برای چسبندگی ۱۰۰ کیلوپاسگال



شکل ۹: مقدار تابع خطا مرحله دوم در مقابل مدول تغییر شکل برای چسبندگی ۲۰۰ کیلوپاسگال



شکل ۱۰: مقدار تابع خطا مرحله دوم در مقابل مدول تغییر شکل برای چسبندگی ۲۵۰ کیلوپاسگال

۸- منابع

- International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, vol. 28, Issue 11, pp.1141-1165.
- [5] Shunsuke Sakurai, Shinichi Akutagawa, Kunifumi Takeuchi, Masato Shinji, Norikazu Shimizu, 2003, "*Back analysis for tunnel engineering as a modern observational method*", Tunneling and Underground Space Technology, Volume 18, Issues 2-3, April-June 2003, Pages 185-196.
- [6] Y. J. Shang, J. G. Cai, W. D. Hao, X. Y. Wu, S. H. Li, 2002, "*Intelligent back analysis of displacements using precedent type analysis for tunneling*", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 41, Supplement 1, May 2004, Pages 750-755.
- [1] سازمان قطارشهری اصفهان و حومه، ۱۳۸۳، "گزارش نهائی مطالعات ژئوتکنیک"، حدفاصل ایستگاه میدان آزادی تا ایستگاه صفه
- [2] Tourenq C., Fourmaintraux D., Denis A., 1971, "*Propagation des ondes et discontinuités des roches*", Proceedings of the International Society of Rock Mechanics, Symposium on Rock Fracture, ISRM, Nancy, France.
- [3] Marinou, P and Hoek E., 2000, "*GSI - A geologically friendly tool for rock mass strength estimation*", Proc. Geo. Eng. 2000 Conference, Melbourne. 1422-1442.
- [4] Xia-Ting Feng, Hongbo Zhao and Shaojun Li, 2004, "*A new displacement back analysis to identify mechanical geo-mechanical parameters based on hybrid intelligent methodology*",

- 1- Cut and Cover
- 2- Tourenq
- 3- Fissured Rock
- 4- Extensometer
- 5- Inclinator
- 6- Convergence Meter
- 7- Pressure Cell
- 8- Anchor Load Cell
- 9- Chebyshev
- 10- Minimax
- 11- Least Square
- 12- Lattice Girder
- 13- Step
- 14- History