

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ

پایان نامه کارشناسی ارشد

برآورد پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ به روش تحلیل برگشتی مبتنی بر

داده‌های رفتارنگاری _ مطالعه موردی: تونل‌های دسترسی مغار نیروگاه سد آزاد

نگارنده: نریمان حبیبی کانی سواران

استاد راهنما

دکتر شکراله زارع

شهریور ۱۳۹۶

شماره ۲۰۴۹۶۲۰۱۴
تاریخ ۹۶/۷/۲۸

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای فریمان حبیبی کانی سواران با شماره دانشجویی ۹۳۰۵۹۷۴ رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ تحت عنوان برآورد پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ به روش تحلیل برگشتی مبتنی بر داده‌های رفتارنگاری _ مطالعه موردی: تونل‌های دسترسی مغار نیروگاه سد آزاد که در تاریخ ۱۳۹۶/۶/۱۹ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با امتیاز خیلی خوب درجه ۱۸) ☒ مردود ☐
نوع تحقیق: نظری ☒ عملی ☐

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	شکراله زارع	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم			—
۳- استاد مشاور			—
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	محمد جهانی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	مجید نیکخواه	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	مرتضی جوادی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر علیرضا عرب امیری

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تصوه: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (بر مدت مجاز تحصیل) می‌تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع

مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم بہ پدر و مادر و لسوزم

و برادران و خواهران

مہربانم...

تقدیر و تشکر

سپاس خداوند که این توانایی را در وجودم نهادی تا در مسیر علم گامی شگوف بردارم و توکل بر تو تنها کلیدی است که در هر مرحله از

زندگی ام به کار می گیرم. به رسم ادب و قدرشناسی، بر خود لازم می دانم از اساتید ارجمند آقایان دکتر شکراله زارع و مهندس

رحمان دارایی که صبورانه پشتیبان و راهنمای من بودند و در طول انجام این پروژه بارها بهانه های مفید و مساعدت ایشان راه را هموار نموده اند

و از هیچ گونه تکلم علمی و علمی دریغ نکرده اند کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم.

همچنین از راهنمایی ها و همکاری های ارزشمند دوستان گرامی آقایان مهندس امین دهقانی، مهران میرزایی، وریا صلواتی، ابوالفضل

لطفی، صمد دانش آموز، مازیار ترابی، امیر صالح نژاد و محمد صالح کامرانی از صمیم قلب تشکر می نمایم و موفقیت روز افزون ایشان را از

دگاه دادگر هستی بخش خواستارم.

تعهد نامه

اینجانب **نریمان حبیبی کانی سواران** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک سنگ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه: **برآورد پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ به روش تحلیل برگشتی مبتنی بر داده های رفتارنگاری** _ مطالعه موردی: **تونل های دسترسی مغار نیروگاه سد آزاد** تحت راهنمایی دکتر **شکراله زارع** متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

طراحی و اجرای سازه‌های بزرگ زیرزمینی، انتخاب شکل هندسی و اندازه مقطع، تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری آن‌ها، تابع خواص ژئومکانیکی و شرایط تنش منطقه است. در صورت داشتن خواص مقاومتی توده سنگ، طراحی و اجرای سازه‌هایی که بر سنگ و یا در سنگ قرار دارند با مشکلات کمتری مواجه خواهند شد. برای دستیابی به این مهم یا باید به‌طور مستقیم و با انجام آزمایش‌های برجا خواص مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری توده سنگ را تعیین کرد و یا با استفاده از نتایج ابزار دقیق و به کمک روش‌های تحلیل برگشتی پارامترهای مقاومتی توده سنگ را ارزیابی کرد. استفاده از روش‌های تحلیل برگشتی می‌تواند در این خصوص بسیار بااهمیت و کم‌هزینه‌تر از انجام آزمایش‌های مستقیم باشد. در این پایان‌نامه هدف اصلی استفاده از روش تحلیل برگشتی برای تدقیق پارامترهای ژئومکانیکی (پارامترهای طراحی) در تونل‌های دسترسی به مغار نیروگاه پروژه سد آزاد با استفاده از داده‌های ابزار دقیق است. برای این کار ابتدا از پارامترهای ژئومکانیکی و محیطی به‌دست‌آمده از نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی به مدل‌سازی دو ایستگاه از مقاطع تونل‌های دسترسی با استفاده از نرم‌افزار $FLAC^{2D}$ پرداخته شده است، که یک ایستگاه از تونل دسترسی اصلی (MAT) و ایستگاه بعدی از تونل دسترسی مغار ترانسفورمر به هد مغار نیروگاه (T4) انتخاب شده است. سپس بر مبنای داده‌های حاصل از ابزار دقیق (همگرایی سنج) و تحلیل برگشتی مستقیم با روش جستجوی تک متغیره متناوب، مقادیر چهار پارامتر ژئومکانیکی شامل مدول الاستیسیته، نسبت تنش‌های برجا، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی برآورد شده است که به ترتیب نتایج آن برای تونل دسترسی MAT، مقادیر ۸/۲ گیگاپاسکال، ۱/۲، ۴۲ درجه و ۱/۸۵ مگاپاسکال و همچنین برای تونل دسترسی T4، مقادیر ۹ گیگاپاسکال، ۱/۷، ۴۳ درجه و ۱/۷ مگاپاسکال برآورد شده است.

کلمات کلیدی: تحلیل برگشتی، روش تک متغیره متناوب، پارامترهای ژئومکانیکی، نرم‌افزار $FLAC^{2D}$

لیست مقالات مستخرج شده از پایان نامه

- حبیبی کانی سواران ن. زارع ش. و دارای ر، (۱۳۹۶) " برآورد پارامترهای مقاومتی توده سنگ اطراف تونل دسترسی اصلی به مغار نیروگاه سد آزاد با روش تحلیل برگشتی "، کنفرانس بین المللی عمران، معماری و شهرسازی ایران معاصر، ۲۵ مرداد ماه، دانشگاه شهید بهشتی تهران.
- حبیبی کانی سواران ن. زارع ش. و دارای ر، (۱۳۹۶) " تحلیل برگشتی داده‌های همگرایی سنجی به منظور تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ در تونل دسترسی به نیروگاه سد آزاد "، کنفرانس بین المللی عمران، معماری و شهرسازی ایران معاصر، ۲۵ مرداد ماه، دانشگاه شهید بهشتی تهران.

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

فصل اول: کلیات

۱-۱	مقدمه	۲
۲-۱	مشخصات عمومی طرح	۳
۱-۲-۱	اهداف اصلی طرح	۴
۲-۲-۱	مولفه های طرح	۴
۳-۱	ضرورت اجرای تحقیق	۵
۴-۱	روش انجام تحقیق	۵
۵-۱	ساختار فصل ها	۶

فصل دوم: رفتارنگاری، تحلیل برکشی و مروری بر مطالعات انجام شده

۱-۲	مقدمه	۱۰
۲-۲	رفتارنگاری و ابزاربندی	۱۱
۱-۲-۲	تعاریف	۱۱
۲-۲-۲	پیشینه علمی رفتارنگاری	۱۱
۳-۲-۲	اهداف کلی سیستم های ابزاربندی و رفتار نگاری	۱۲

- ۴-۲-۲ اساس رفتار نگاری در سازه‌های زیرزمینی و روباز ۱۳
- ۵-۲-۲ طراحی و انتخاب ابزار ۱۴
- ۶-۲-۲ پارامترهای موردسنجش در رفتارنگاری ۱۶
- ۱-۶-۲-۲ معرفی روش ژئودتیک ۱۷
- ۲-۶-۲-۲ معرفی ابزار همگرایی سنج ۱۹
- ۳-۲-۲ مفاهیم روش تحلیل برگشتی ۲۱
- ۱-۳-۲ کلیات روش ۲۱
- ۲-۳-۲ مفهوم تحلیل برگشتی ۲۲
- ۳-۳-۲ تفاوت تحلیل برگشتی و تحلیل عادی ۲۳
- ۴-۳-۲ پیشینه علمی تحلیل برگشتی ۲۶
- ۵-۳-۲ انواع روش‌های تحلیل برگشتی ۳۲
- ۶-۳-۲ تحلیل برگشتی معکوس ۳۳
- ۱-۶-۳-۲ تعیین خواص مکانیکی توده‌های سنگی درزه‌دار با آنالیز برگشتی معکوس... ۳۴
- ۲-۶-۳-۲ تعیین مقاومت توده سنگ و شعاع پلاستیک با داده‌های همگرایی ۳۴
- ۷-۳-۲ تحلیل برگشتی مستقیم ۳۵
- ۱-۷-۳-۲ روش سیمپلکس (چندضلعی انعطاف‌پذیر) ۳۵
- ۲-۷-۳-۲ الگوریتم روزنبرگ ۳۶
- ۳-۷-۳-۲ روش پاول ۳۶

۳۷	۸-۳-۲ تحلیل برگشتی به روش قطعی و احتمالاتی
۳۸	۱-۸-۳-۲ روش بیزین
۳۸	۲-۸-۳-۲ روش فیلتر کالمن
۳۹	۹-۳-۲ تحلیل برگشتی مستقیم با به کارگیری روش بهینه‌سازی
۴۱	۱-۹-۳-۲ روش جستجوی تک متغیره
۴۲	۲-۹-۳-۲ روش جستجوی الگویی
۴۳	۳-۹-۳-۲ روش جستجوی تک متغیره متناوب (جایگزین)
۴۳	۴-۹-۳-۲ بهینه‌سازی با روش حداقل مربعات
۴۴	۱۰-۳-۲ تحلیل برگشتی هوشمند
۴۶	۴-۲ مطالعه موردی: تخمین پارامترهای مقاومتی در تونل متروی قم

فصل سوم: معرفی ساختمانگاه و مطالعات زمین‌شناسی و آزمایشگاهی در مسیر پروژه

۵۴	۱-۳ معرفی ساختمانگاه پروژه
۵۴	۱-۱-۳ مقدمه
۵۵	۲-۱-۳ موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی
۵۶	۲-۳ زمین‌شناسی عمومی
۵۷	۳-۳ زمین‌شناسی مهندسی
۶۰	۱-۳-۳ گسل‌های محدوده ساختمانگاه

۶۰	۲-۳-۳ درزه داری
۶۱	۱-۲-۳-۳ ایستگاه ۱ : اطراف گمانه پیشنهادی (JSS1)T6
۶۲	۲-۲-۳-۳ ایستگاه ۲: اطراف گمانه پیشنهادی (JSS2)
۶۳	۴-۳ آزمایش‌های تعیین پارامترهای سنگ
۶۳	۱-۴-۳ مقدمه
۶۴	۲-۴-۳ گمانه‌های اکتشافی
۶۷	۳-۴-۳ آزمایش‌های آزمایشگاهی
۶۷	۱-۳-۴-۳ نتایج آزمایش‌های تعیین مشخصات فیزیکی
۶۸	۲-۳-۴-۳ نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS)
۶۹	۳-۳-۴-۳ نتایج آزمایش مقاومت فشاری سه محوره
۷۱	۴-۳-۴-۳ نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم (برزیلی)
۷۱	۴-۴-۳ آزمایش‌های صحرایی (برجا)
۷۲	۱-۴-۴-۳ نتایج آزمایش شکست هیدرولیکی
۷۳	۵-۳ جمع‌بندی

فصل چهارم: مدل سازی عددی با $FLAC^{2D}$ و تحلیل برکشی بنی بر داده‌های ابزار دقیق

۷۶	۱-۴ مقدمه
۷۷	۲-۴ روش‌های عددی در حل مسائل ژئومکانیک

۸۰	۱-۲-۴ روش تفاضل محدود (FDM)
۸۲	۲-۲-۴ معرفی نرم افزار $FLAC^{2D}$
۸۳	۳-۴ مراحل مدل سازی تونل ها با نرم افزار $FLAC^{2D}$
۸۵	۱-۳-۴ انتخاب محدوده مناسبی از اطراف تونل
۸۵	۲-۳-۴ انتخاب مدل رفتاری و تعیین پارامترهای آن
۸۷	۳-۳-۴ ترسیم هندسه مقطع تونل
۸۷	۴-۳-۴ اعمال شرایط مرزی و تنش های اولیه
۸۹	۵-۳-۴ حل مدل تا رسیدن به تعادل اولیه (قبل از حفاری)
۹۲	۶-۳-۴ حفاری تونل و اعمال ترخیص تنش متناسب
۹۲	۱-۶-۳-۴ حفر تونل
۹۴	۲-۶-۳-۴ اعمال ترخیص تنش متناسب
۹۷	۷-۳-۴ بررسی پایداری تونل بعد از اعمال ترخیص تنش
۱۰۱	۸-۳-۴ نصب سیستم نگهداری و ترخیص کامل تنش ها
۱۰۴	۴-۴ تجزیه و تحلیل داده های حاصل از ابزار همگرایی سنجی
۱۰۷	۵-۴ تحلیل برگشتی
۱۰۷	۱-۵-۴ انتخاب روش
۱۰۷	۲-۵-۴ انتخاب پارامترهای معلوم و مجهول برای انجام تحلیل برگشتی
۱۰۸	۳-۵-۴ آنالیز حساسیت پارامترها

- ۱-۳-۵-۴ آنالیز حساسیت مدول الاستیسیته (E) ۱۰۹
- ۲-۳-۵-۴ آنالیز حساسیت نسبت تنش‌های برجا (K) ۱۱۰
- ۳-۳-۵-۴ آنالیز حساسیت زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) ۱۱۱
- ۴-۳-۵-۴ آنالیز حساسیت پارامتر چسبندگی (C) ۱۱۲
- ۴-۵-۴ تحلیل برگشتی با استفاده از الگوریتم جستجوی تک متغیره متناوب ۱۱۳
- ۵-۵-۴ تبدیل جابجایی مطلق نرم‌افزار به جابجایی نسبی (همگرایی) ۱۱۴
- ۶-۵-۴ بررسی روند آنالیز برگشتی و اصلاح نتایج ابزار دقیق ۱۱۵
- ۷-۵-۴ نتایج کمینه کردن تابع خطا برای برآورد پارامترهای ژئومکانیکی ۱۱۶
- ۸-۵-۴ جمع‌بندی ۱۲۲

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

- ۱-۵ نتیجه‌گیری ۱۲۶
- ۲-۵ پیشنهادها ۱۲۹
- منابع ۱۳۰

فهرست شکل‌ها

شکل	صفحه
شکل ۱-۱: موقعیت و راه‌های دسترسی به پروژه نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد.....	۳
شکل ۱-۲: اساس رفتار نگاری در سازه‌های زیرزمینی و روباز.....	۱۴
شکل ۲-۲: جایگاه رفتار نگاری در طی مراحل ساخت.....	۱۵
شکل ۲-۳: شماتیک نحوه قرارگیری پین‌های ژئودتیک داخل یک تونل با حفاری بخشی.....	۱۸
شکل ۲-۴: شکل واقعی نحوه قرارگیری پین‌های ژئودتیک در دیواره‌ها و سقف تونل.....	۱۸
شکل ۲-۵: دو نمونه از متر همگرایی سنج.....	۱۹
شکل ۲-۶: انواع پین‌های همگرایی سنجی و نحوه نصب آن در دیواره تونل‌ها.....	۲۰
شکل ۲-۷: ارتباط بین تحلیل عادی و تحلیل برگشتی.....	۲۴
شکل ۲-۸: مقایسه بین تحلیل عادی و تحلیل برگشتی.....	۲۵
شکل ۲-۹: جایگاه تحلیل برگشتی در مراحل ساخت یک سازه.....	۲۶
شکل ۲-۱۰: طرح کلی روش بهینه‌سازی تکرار.....	۴۰
شکل ۲-۱۱: فرآیند جستجوی نقطه بهینه با استفاده از الگوریتم تک متغیره.....	۴۱
شکل ۲-۱۲: طرح اولیه از روش جستجوی الگویی.....	۴۲
شکل ۲-۱۳: روند برنامه در روش تحلیل برگشتی هوشمند.....	۴۵
شکل ۲-۱۴: مقطع عرضی تونل متروی قم و ترتیب حفاری بخش‌های مختلف آن.....	۴۶

- شکل ۲- ۱۵: نمودار جابه‌جایی سقف و دیواره تونل در ایستگاه واقع در کیلو متراژ ۰+۲۱۰..... ۴۸
- شکل ۲- ۱۶: میزان نشست سطح زمین با فاصله از سینه کار در کیلو متراژ ۰+۵۶۵..... ۴۸
- شکل ۲- ۱۷: الف) ابعاد و هندسه، ب) هندسه تمام مقطع با بخش‌های حفاری ۴۹
- شکل ۲- ۱۸: نمودار خطای محاسبه شده با تغییرات نسبت تنش‌های برجا ۵۱
- شکل ۳- ۱: موقعیت گزینه‌های پیشنهادی برای محل احداث نیروگاه برقایی ۵۴
- شکل ۳- ۲: موقعیت جغرافیایی و راه دسترسی به محدوده سد آزاد ۵۵
- شکل ۳- ۳: تصویر ماهواره‌ای از محدوده طرح سد آزاد ۵۶
- شکل ۳- ۴: نمایی از تناوب ماسه‌سنگ‌ها و شیست ۵۹
- شکل ۳- ۵: نمایی از لایه‌های آهک شیلی سبز رنگ دگرگونه ۵۹
- شکل ۳- ۶: نمایی از محدوده گسل F2 ۶۱
- شکل ۳- ۷: پلان گمانه‌های اکتشافی بر روی سازه‌های زیرزمینی مختلف ۶۵
- شکل ۳- ۸: پراکندگی آماری نمونه‌های آزمایشگاهی از واحدهای مختلف زمین‌شناسی ۶۶
- شکل ۴- ۱: طبقه‌بندی محیط: الف) محیط پیوسته ب) محیط ناپیوسته ج) محیط شبه پیوسته .. ۷۸
- شکل ۴- ۲: انواع روش‌های عددی در مکانیک سنگ ۸۰
- شکل ۴- ۳: تصاویری از تونل‌ها، الف) تونل دسترسی MAT ب) تونل دسترسی T4 ۸۳
- شکل ۴- ۴: تصاویری از تونل انتخابی، الف) تونل دسترسی MAT ب) تونل دسترسی T4 ۸۴
- شکل ۴- ۵: مشخصات هندسی تونل‌ها الف) تونل دسترسی MAT ب) تونل دسترسی T4 ۸۷
- شکل ۴- ۶: هندسه مدل و اعمال شرایط مرزی و اولیه برای تونل دسترسی MAT ۸۸

- شکل ۴-۷: هندسه مدل و اعمال شرایط مرزی و اولیه برای تونل دسترسی T4 ۸۹
- شکل ۴-۸: نمودار نیروهای نامتعادل کننده، الف) تونل MAT ب) تونل T4 ۹۰
- شکل ۴-۹: بررسی تعادل اولیه در تونل دسترسی MAT ۹۱
- شکل ۴-۱۰: بررسی تعادل اولیه در تونل دسترسی T4 ۹۱
- شکل ۴-۱۱: کنتورهای تنش عمودی در تعادل اولیه مدل ها، الف) تونل MAT ب) تونل T4 .. ۹۲
- شکل ۴-۱۲: حفاری تونل دسترسی MAT در مدل ساخته شده ۹۳
- شکل ۴-۱۳: حفاری تونل دسترسی T4 در مدل ساخته شده ۹۳
- شکل ۴-۱۴: نمودار ولاچوپولس و دتریچ برای تعیین درصد ترخیص تنش و جابجایی ۹۵
- شکل ۴-۱۵: کنتورهای تنش عمودی بعد از حفاری و اعمال ترخیص تنش در مدل MAT ۹۶
- شکل ۴-۱۶: کنتورهای تنش عمودی بعد از حفاری و اعمال ترخیص تنش در مدل T4 ۹۷
- شکل ۴-۱۷: حداکثر کرنش برشی در اطراف تونل دسترسی MAT بعد از حفاری ۹۹
- شکل ۴-۱۸: کنتورهای جابجایی در اطراف تونل دسترسی MAT بعد از حفاری ۹۹
- شکل ۴-۱۹: حداکثر کرنش برشی در اطراف تونل دسترسی T4 بعد از حفاری ۱۰۰
- شکل ۴-۲۰: کنتورهای جابجایی در اطراف تونل دسترسی T4 بعد از حفاری ۱۰۱
- شکل ۴-۲۱: مدل کردن سیستم نگهداری نصب شده در تونل دسترسی MAT ۱۰۳
- شکل ۴-۲۲: مدل کردن سیستم نگهداری نصب شده در تونل دسترسی T4 ۱۰۳
- شکل ۴-۲۳: نمودار تغییرات جابجایی همگرایی سنج تونل MAT در کیلو متر از ۱+۳۰۰ ۱۰۴
- شکل ۴-۲۴: نمودار تغییرات جابجایی همگرایی سنج تونل T4 واقع در کیلو متر از ۰+۰۰۲ ... ۱۰۵

شکل ۴- ۲۵: نمودار آنالیز حساسیت جابجایی قائم تاج تونل با تغییرات مدول الاستیسیته ۱۰۹

شکل ۴- ۲۶: نمودار آنالیز حساسیت جابجایی افقی دیواره تونل با تغییرات تنش‌های برجا ۱۱۰

شکل ۴- ۲۷: نمودار آنالیز حساسیت جابجایی قائم تاج تونل با تغییرات تنش‌های برجا ۱۱۱

شکل ۴- ۲۸: نمودار آنالیز حساسیت جابجایی قائم تاج تونل با تغییرات زاویه اصطکاک ۱۱۲

شکل ۴- ۲۹: نمودار آنالیز حساسیت جابجایی قائم تاج تونل با تغییرات چسبندگی ۱۱۳

شکل ۴- ۳۰: نمودار تغییرات تابع خطا برحسب تعداد مراحل جستجو در تونل MAT ۱۱۹

شکل ۴- ۳۱: نمودار تغییرات تابع خطا برحسب تعداد مراحل جستجو در تونل T4 ۱۱۹

فهرست جدول‌ها

جدول	صفحه
جدول ۱-۲: مهم‌ترین ابزارهای رفتار نگاری.....	۱۶
جدول ۲-۲: مشخصات واحدهای خاکی در برگیرنده مسیر تونل	۴۷
جدول ۲-۳: محدوده پارامترهای مجهول برای کار تحلیل برگشتی	۵۰
جدول ۲-۴: پارامترهای به دست آمده از روش الگوریتم تک متغیره مستقیم	۵۲
جدول ۳-۱: ویژگی‌های ناپیوستگی‌های سطحی در ایستگاه ۱.....	۶۲
جدول ۳-۲: ویژگی‌های ناپیوستگی‌های سطحی در ایستگاه ۲.....	۶۳
جدول ۳-۳: مشخصات گمانه‌های اکتشافی عمیق حفر شده در سازه‌های سد آزاد	۶۵
جدول ۳-۴: نتایج آزمایش‌های فیزیکی بر روی نمونه‌های سنگ بکر در واحدهای مختلف	۶۸
جدول ۳-۵: نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوره سنگ بکر	۷۰
جدول ۳-۶: نتایج آزمایش سه محوره واحدهای سنگی مختلف.....	۷۰
جدول ۳-۷: نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم (برزلی)	۷۱
جدول ۳-۸: نتایج آزمایش شکست هیدرولیکی در پیرامون مغار نیروگاه	۷۳
جدول ۴-۱: پارامترهای اولیه و مورد نیاز برای مدل‌سازی تونل‌های دسترسی MAT و T4	۸۶
جدول ۴-۲: خصوصیات راک بولت استفاده شده در مدل‌سازی	۱۰۲
جدول ۴-۳: خصوصیات ترکیب مش و شاتکریت استفاده شده در مدل‌سازی	۱۰۲
جدول ۴-۴: مقادیر همگرایی در تونل‌ها قبل و بعد از اعمال ترخیص تنش	۱۱۶

جدول ۴-۵: مراحل تعیین پارامترها در جستجوی تک متغیره متناوب _ تونل MAT ۱۱۷

جدول ۴-۶: مراحل تعیین پارامترها در جستجوی تک متغیره متناوب _ تونل T4 ۱۱۸

جدول ۴-۷: مقادیر همگرایی ها از تحلیل برگشتی و مقایسه با ابزار دقیق _ تونل MAT ۱۲۰

جدول ۴-۸: مقادیر همگرایی ها از تحلیل برگشتی و مقایسه با ابزار دقیق _ تونل T4 ۱۲۲

فصل اول

کلیات

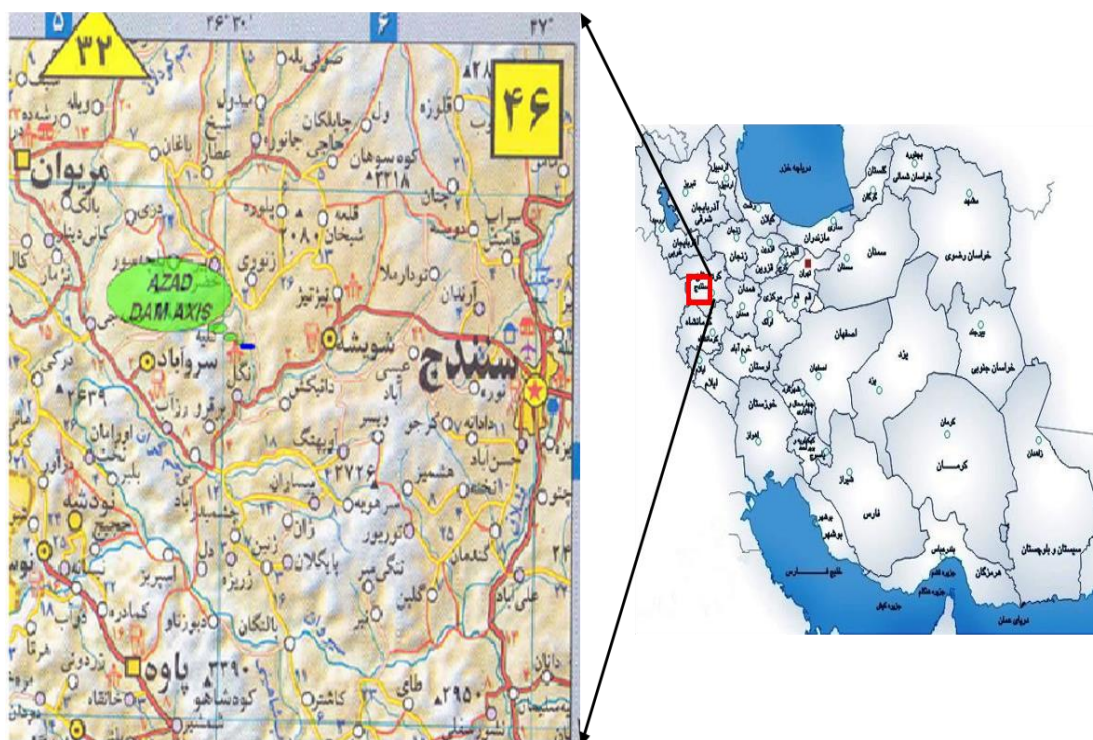
۱-۱ مقدمه

انتخاب شکل هندسی و اندازه مقطع، تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری سازه‌های زیرزمینی، تابع خواص ژئومکانیکی محیط میزبان و شرایط تنش منطقه است. پارامترهای ژئومکانیکی محیط میزبان به‌عنوان مهم‌ترین شاخص‌ها و ابزارهای تحلیل محسوب شده، به‌طوری‌که صحت نتایج به‌طور کامل وابسته به دقت تعیین آن‌ها می‌باشد. به‌منظور تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ دو روش مستقیم و غیرمستقیم وجود دارد. روش مستقیم شامل انجام آزمایش‌های برجا بوده که مستلزم صرف زمان و هزینه بسیار می‌باشد و به‌طورمعمول در پروژه‌های کوچک مقیاس تونل سازی انجام نمی‌گیرد. با توجه به این مهم تخمین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ با استفاده از روش غیرمستقیم از قبیل تحلیل برگشتی داده‌های حاصل از ابزار دقیق امروزه به‌طور وسیعی در پروژه‌ها انجام می‌گیرد.

تحلیل برگشتی عبارت از تکنیکی است که قادر است پارامترهای کنترلی یک سیستم را با تحلیل رفتار خروجی آن پیش‌بینی نماید. روش‌های تحلیل برگشتی به‌تدریج در مهندسی سنگ برای تعیین پارامترهای مکانیکی و هیدرولیکی توده سنگ بر اساس اندازه‌گیری‌های برجا در طول حفاری و یا پس از حفاری، در سازه‌های زیرزمینی و سطحی توسعه‌یافته است. به‌طوری‌که امروزه اغلب در مسایل مهندسی ژئوتکنیک به‌منظور تعیین پارامترهای ناشناخته ژئومکانیکی، سیستم هندسی و شرایط اولیه با به‌کارگیری اندازه‌گیری جابجایی‌ها، تنش یا کرنش در طی حفاری یا ساخت سازه به‌کارگرفته می‌شود. همچنین این تکنیک با استفاده از اطلاعات حاصل از ابزاربندی و رفتار سنجی تونل‌ها و مغارها در زمان حفر و بهره‌برداری، علاوه بر ارزیابی پارامترهای مقاومتی توده سنگ، وضعیت پایداری سازه را نیز مشخص می‌نماید. در حالت کلی انجام یک تحلیل برگشتی مستلزم دو بخش است. بخش اول عبارت است از یک روش تحلیل تنش با استفاده از تکنیک‌های عددی به‌منظور تعیین تنش، کرنش و توزیع جابجایی برای مساله موردنظر و بخش دوم شامل یک الگوریتم مناسب بهینه‌سازی است که اختلاف میان مقادیر اندازه‌گیری شده برجا و داده‌های به‌دست‌آمده از تحلیل تنش را کمینه می‌کند.

۲-۱ مشخصات عمومی طرح

عنوان این طرح سد و نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آزاد است و موقعیت جغرافیایی طرح مورد نظر در غرب کشور و در استان کردستان واقع شده است و از نظر موقعیت جغرافیایی در فاصله بین $34^{\circ},45',00''$ تا $35^{\circ},46',00''$ عرض شمالی و $46^{\circ},05',00''$ تا $48^{\circ},00',00''$ طول شرقی قرار دارد. سد آزاد از انواع سدهای سنگریزه‌ای با هسته رسی به ارتفاع ۱۱۵ متر و حجم مخزن ۲۶۰ میلیون مترمکعب است. دسترسی به محل سد آزاد پس از طی ۷۵ کیلومتر از جاده اصلی سنندج - مریوان و پیمایش ۶ کیلومتر راه دسترسی به سمت شمال شرق و به موازات رودخانه کوماسی امکان‌پذیر است. در شکل (۱-۱) موقعیت و راه‌های دسترسی به طرح نشان داده شده است.



شکل ۱-۱: موقعیت و راه‌های دسترسی به پروژه نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد (شرکت مهندسين مشاور مهاب قدس، ۱۳۹۱)

۱-۲-۱ اهداف اصلی طرح

الف - سد آزاد

۱- هدف نخست آن مهار جریان رودخانه کوماسی (با متوسط آورد سالانه برابر ۴۵۴ میلیون متر مکعب) و تنظیم آب برای استفاده شرب شهر سنندج، انتقال بخشی از آب برای کشاورزی اراضی دشت‌های قروه و دهگلان، تأمین آب زیست‌محیطی پایین‌دست سد و اراضی واقع در حاشیه رودخانه و توسعه اشتغال‌زایی در منطقه می‌باشد.

۲- هدف بعدی آن تولید انرژی برقی از طریق احداث یک نیروگاه با ظرفیت ۱۰ مگاوات در پایین‌دست سد می‌باشد.

ب - نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آزاد

۱- ذخیره انرژی در زمان کم باری شبکه برق سراسری از طریق پمپاژ آب از مخزن سد آزاد به مخزن بالادست به منظور تولید ۵۰۰ مگاوات برق به وسیله ۳ واحد نیروگاهی ۱۷۰ مگاواتی در ساعات اوج مصرف و هموار نمودن منحنی بار شبکه می‌باشد.

۲- اختصاص بخشی از حجم مخزن بالادست به عنوان مخزن بین‌راهی سامانه انتقال آب قروه و دهگلان، برای تأمین آب ۲۴ ساعته سامانه با دبی ۷ مترمکعب بر ثانیه اختصاص یافته است.

۱-۲-۲ مولفه های طرح

مولفه های اجرایی در این طرح شامل مخزن اصلی سد آزاد و سازه‌های وابسته به عنوان مخزن پایین‌دست، مخزن بالادست، مغارهای نیروگاه و ترانسفورماتور، تونل‌ها و شفت‌های آبرسان و تونل‌های دسترسی به این فضاها می‌باشد (شرکت مهندسين مشاور مه‌اب قدس، ۱۳۹۴).

۳-۱ ضرورت اجرای تحقیق

به دلیل طبیعت پیچیده توده سنگ و غیر همگن بودن و همچنین هزینه بالای انجام آزمایش‌های برجا به‌ویژه در پروژه‌های کوچک مقیاس، روش تحلیل برگشتی کاربرد زیادی در تخمین پارامترهای ژئومکانیکی مختلف دارد. با توجه به اینکه تغییر شکل‌های به وجود آمده در اثر حفاری در توده سنگ، با قابلیت اعتماد به نسبت بالا و به آسانی قابل اندازه‌گیری می‌باشند، تحقیقات زیادی برای توسعه روش‌های تحلیل برگشتی بر اساس جابجایی صورت گرفته است. به دلیل اهمیت تعیین پارامترهای ژئومکانیکی و تنش‌های اصلی در توده سنگ، ماهیت ناهمسانگرد توده سنگ و هزینه‌بر بودن انجام آزمایش‌های برجا، روش تحلیل برگشتی می‌تواند با صرف هزینه و وقت کمتری، روشی قابل قبول برای تعیین تنش و تغییر شکل‌پذیری توده سنگ باشد. در این راستا با استفاده از نتایج رفتارسنجی تونل‌های دسترسی به مغار نیروگاه سد آزاد سنندج و به دست آوردن پارامترهای ژئومکانیکی محیط میزبان می‌توان به شناخت رفتار و عکس‌العمل واقعی توده سنگ دربرگیرنده سایر تونل‌های موجود در طرح و کمک به پیش‌بینی رفتار احتمالی آن‌ها در آینده و کفایت و عدم کفایت سیستم‌های نگهداری اشاره نمود.

۴-۱ روش انجام تحقیق

جهت انجام این تحقیق، ابتدا مطالعات کتابخانه‌ای انجام و منابع و اطلاعات مورد نیاز گردآوری شده و داده‌های جابجایی حاصل از رفتارنگاری تونل مورد پردازش قرار می‌گیرد. در این تحقیق، نخست تونل‌های دسترسی مغار نیروگاه سد آزاد در دو ایستگاه از مقطع‌های ابزاربندی شده جدا و از تونل‌های متفاوت و با استفاده از نرم‌افزار $FLAC^{2D}$ که نرم‌افزاری توانا در زمینه تحلیل محیط‌های پیوسته و شبه پیوسته است، مدل‌سازی می‌گردد. داده ورودی برای مدل‌سازی تونل‌ها از نتایج تست‌های آزمایشگاهی روی سنگ بکر اخذ شده از مغزه‌های گمانه‌های اکتشافی به دست آمدند که با استفاده از روابط تجربی و نرم‌افزار Rock Data این داده‌ها به مقادیر داده‌های توده سنگ تبدیل شدند و در نهایت به عنوان داده

ورودی به نرم افزار داده می شود. در مرحله بعد با آنالیز حساسیت روی پارامترهای ورودی نرم افزار، پارامترهایی که در نتایج خروجی نرم افزار (جابجایی ها) حساسیت بیشتری نسبت به بقیه پارامترها دارند، به دست می آیند. سپس با توجه به داده های ابزار دقیق نصب شده در تونل ها (همگرایی سنج)، تحلیل های برگشتی به روش مستقیم تک متغیره متناوب جهت تعیین پارامترهای واقعی محیط میزبان انجام می گیرد.

۱-۵ ساختار فصل ها

این پایان نامه در پنج فصل تدوین شده است که به اختصار در زیر توضیح داده می شود :

فصل اول که شامل کلیاتی راجع به معرفی موضوع، مشخصات عمومی طرح، اهداف طرح، ضرورت و روش انجام تحقیق است.

فصل دوم شامل مباحثی در زمینه رفتارنگاری و ابزاربندی در سازه های زیرزمینی و اهداف آن، مفاهیم و سابقه علمی رفتارنگاری می باشد. همچنین در ادامه این فصل به تشریح روش تحلیل برگشتی، انواع روش های آن، تاریخچه به وجود آمدن روش های تحلیل برگشتی و توسعه آن و مطالعات انجام شده پیشین در این رابطه پرداخته شده است. همچنین در نهایت دو مطالعه موردی که با روش های مختلف تحلیل برگشتی برای برآورد پارامترهای ژئومکانیکی انجام شده، در این فصل آمده است.

فصل سوم شامل سه بخش اصلی است. بخش اول در مورد مشخصات محدوده ساختگاه مورد نظر و موقعیت جغرافیایی و راه های دسترسی پروژه شرح داده شده است. بخش دوم به مطالبی شامل مشخصات زمین شناسی عمومی و زمین شناسی مهندسی محدوده و وضعیت ناپیوستگی ها پرداخته شده است. در بخش سوم هم به مطالبی در مورد بررسی آزمون های آزمایشگاهی و صحرایی که در این پروژه به منظور تعیین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی توده سنگ های دربرگیرنده سازه های طرح سد آزاد انجام شده است، پرداخته می شود.

فصل چهارم نیز شامل دو بخش اصلی است. یک بخش آن شامل مدل سازی دو ایستگاه انتخابی از تونل های دسترسی اصلی (MAT) و تونل دسترسی مغار ترانسفورمر به هد مغار نیروگاه (T4)، با استفاده از نرم افزار $FLAC^{2D}$ است. در این بخش مراحل مدل سازی شامل انتخاب محدوده و ابعاد آن و دادن شرایط مرزی و اولیه به مدل و سپس بررسی تعادل اولیه مدل، حفاری مدل، ترخیص تنش ها و نصب سیستم نگهداری شرح داده می شود.

بخش دوم این فصل شامل تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای ژئومکانیکی تاثیر گذار در نتایج و سپس انجام تحلیل برگشتی بر روی این پارامترها است. در نهایت با استفاده از این روش و تکنیک بهینه سازی تک متغیره متناوب به برآورد پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ اطراف مقاطع تونل ها پرداخته می شود.

فصل پنجم این پایان نامه که شامل نتایج و پیشنهادها است، در آن به مهم ترین نتایج به دست آمده اشاره و پیشنهادهایی برای کارهای آتی ارائه می شود.

فصل دوم

رفتار نگاری، تحلیل برکشی و مروری بر

مطالعات انجام شده

۱-۲ مقدمه

در مراحل اولیه طراحی یک سازه سنگی و یا خاکی، آزمایش‌های آزمایشگاهی و صحرایی، جداول و نمودارهای پیشنهادی ابزار مناسبی برای قضاوت هستند. اما به دلیل محدودیت در انجام آزمایش‌ها و عدم آگاهی از عکس‌العمل توده سنگ یا خاک نمی‌توان نتیجه نهایی گرفت. به همین دلیل باید پس از شروع ساخت سازه در مراحل مختلف، اطلاعات مهندسی از سازه و محیط اطراف آن کامل‌تر شود. رفتارنگاری به عنوان یک روش مشاهده‌ای^۱ سریع‌ترین و ارزان‌ترین روش برای تکمیل این اطلاعات به شمار می‌رود، طوری که حدود نیم تا یک درصد هزینه کل اجرای طرح را شامل می‌شود. در بسیاری از طرح‌ها با انجام رفتارسنجی مناسب، می‌توان از وقوع مشکلات احتمالی جلوگیری کرد. از بین روش‌های مختلف رفتارنگاری، اندازه‌گیری جابجایی‌ها به دلیل سادگی و بیان صریح عکس‌العمل سازه بیش از سایر روش‌ها کاربرد دارد.

مشکل‌ترین کار در طراحی سازه‌های زیرزمینی، تخمین و برآورد تنش‌های اولیه و پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ محیطی است که داده‌های ورودی لازم برای تحلیل توزیع تنش و کرنش در اطراف حفاری‌های زیرزمینی هستند. برای دستیابی به این مهم یا باید به‌طور مستقیم و با انجام آزمایش‌های برجا خواص مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری توده سنگ را تعیین کرد که هم انجام آن هزینه‌بر بوده و هم نتایج آن به دلیل خصوصیات غیر همگن و پیچیده توده سنگ در مکان‌های مختلف متغیر است و یا با استفاده از نتایج ابزار دقیق و به کمک روش‌های تحلیل برگشتی پارامترهای مقاومتی توده سنگ را ارزیابی کرد. استفاده از روش‌های تحلیل برگشتی می‌تواند در این خصوص بسیار بااهمیت و کم‌هزینه‌تر از انجام آزمایش‌های مستقیم باشد. در ادامه این فصل به تفصیل در مورد اصول و مفاهیم رفتارنگاری و روش تحلیل برگشتی بحث می‌شود.

^۱ Observation Method

۲-۲ رفتارنگاری و ابزاربندی

۱-۲-۲ تعاریف

پایش یا رفتارنگاری^۱ حرکات زمین در قبل، در زمان اجرا و بعد از اتمام سازه احداث شده بر روی زمین یا درون زمین رفتارسنجی نامیده می‌شود. وسایلی که برای ثبت تغییرات (اعم از تغییرات طول، حرارت، بار، و ...) به کار می‌رود، ابزار دقیق گفته می‌شود و به‌کارگیری ابزار دقیق در پروژه‌های عمرانی و معدنی ابزاربندی^۲ اطلاق می‌گردد. انواع مختلفی از ابزارها وجود دارد که هر کدام تغییرهای مشخصه‌ای را اندازه‌گیری می‌کنند. ابزار دقیق هم در کارهای روباز و هم در کارهای زیرزمینی استفاده می‌شوند (موسوی و الهیان، ۱۳۹۰).

ابزاربندی و رفتارسنجی وسیله مناسبی است که توسط آن 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 یا اصلاحات در طرح یا روش اجرا صورت می‌گیرد (مهدوری و فتحی سلمی، ۱۳۸۶).

۲-۲-۲ پیشینه علمی رفتارنگاری

تولید ابزارهای ژئوتکنیکی به‌عنوان وسیله‌ای برای رسیدن به مشاهدات صحرائی در سال‌های ۱۹۳۰ و ۱۹۴۰ اتفاق افتاد. در ۵۰ سال اول روی کار آمدن این ابزار یک روند عمومی مشاهده می‌شود. در آن سال‌ها بیشتر برنامه‌های ابزاربندی که اجرا می‌شد، در دست مهندسان سخت‌کوشی بوده که دید واضحی از هدف و انگیزه کافی برای توسعه و پیش برد برنامه داشتند. موفقیت و شکست، هر دو وجود

^۱ Monitoring

^۲ Instrumentation

داشت ولی ارتباط افراد و ابزار هر روز شنیده می‌شد (Dunnicliff, 1993).

اولین تلاش‌های علمی اوایل دهه ۵۰ میلادی (۱۹۵۰) صورت گرفته است. سرآغاز مبانی عملی و علمی آن، سیستم تونل‌سازی اتریشی جدید^۱ (NATM) توسط رابسونیچ^۲ (دهه ۶۰ میلادی) به‌طوری‌که یکی از اصول بنیادی این فلسفه است. محققینی از جمله راسل^۳ (۱۹۸۱)، دانیکیلیف^۴ (۱۹۸۸)، الناهاس^۵ (۱۹۹۲)، بوارد، لکوانت و همکاران (۱۹۸۸)، کایزر^۶ (۱۹۹۴)، رابنستینر^۷ (۱۹۹۶) و اخیراً پیراود^۸ و همکارانش (۱۹۹۸-۲۰۰۰) در خصوص رفتارنگاری و ابزاربندی تحقیقات گسترده‌ای داشته‌اند (Vardakos, 2007).

درواقع رفتارسنجی مراقبت سازه با مشاهده مستقیم یا با استفاده از تجهیزات خاصی است که به‌وسیله آن می‌توان رفتار فضای احداثی در سنگ را به‌طور کمی و کیفی کنترل کرد. نتایج ارزشمند سیستم‌های رفتارسنجی به‌طور مستقیم در روش تحلیل برگشتی استفاده می‌شود و برای به دست آوردن پارامترهای ژئومکانیکی و تنش‌های وارد بر سنگ به کار می‌رود (شاهوردیلو، ۱۳۸۹).

۲-۲-۳ اهداف کلی سیستم‌های ابزاربندی و رفتار نگاری

درواقع هدف کلی ابزاربندی و اندازه‌گیری‌ها، بهینه کردن طراحی و اجرای سازه‌های زیرزمینی است. به عبارت دیگر هدف دستیابی به ایمنی لازم به همراه حداقل هزینه است. اغلب ابزاربندی توده سنگ، به یک یا چند دلیل زیر استفاده می‌شوند (Dunnicliff, 1993):

- شناسایی ویژگی‌های توده سنگ و خاک نظیر مقاومت، دگرشکل پذیری، ناهمگنی و هوازدگی

^۱ New Australian Tunelling Method

^۲ Robcevidc

^۳ Russell

^۴ Dunnicliff

^۵ Elena Haas

^۶ Kaiser

^۷ Robenestiner

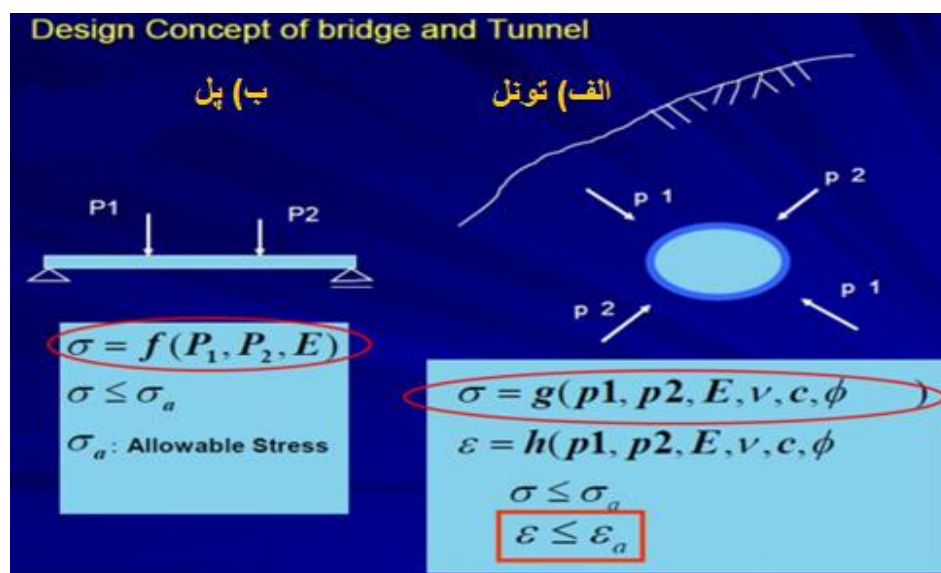
^۸ Piearaod

- شناسایی شرایط و حالت تنش در توده سنگ
- محاسبه واکنش یک سازه ساخته شده به دست بشر که باعث تغییر در یک توده سنگ می شود.
- محاسبه پایداری ساختارهایی که از قبل وجود داشته یا سیستم های نگهداری واقع شده در زون پلاستیک که تحت تاثیر عوامل نامطلوب و آشفته گی ها واقع شده اند.
- اطمینان از ایمنی ساخت عملیات اجرایی به وسیله اعلام هشدار در صورت فرا رفتن تغییر شکل های زمین، فشار آب زیرزمینی و بارهای وارده بر سیستم نگهداری
- رفتارسنجی طولانی مدت توده های زمین شناسی ساختارهای مربوطه که به دست بشر ساخته شده است.
- ثبت مقادیر طبیعی پارامترهای ژئوتکنیکی از قبیل سطح آب زیرزمینی، رویدادهای لرزه ای قبل از شروع پروژه
- کنترل اعتبار فرضیات، مدل های مفهومی و خصوصیات سنگ و خاک به کاررفته در محاسبات طراحی
- کنترل رفتار زمین و فعالیت هایی از قبیل منجمد کردن زمین در طی حفاری چاه، تونل سازی در زمین های سست، تزریق و سیستم نگهداری

۲-۲-۴ اساس رفتار نگاری در سازه های زیرزمینی و روباز

در حالت کلی در پروژه های زیرزمینی رفتار نگاری بر اساس سنجش کرنش و در سازه های روباز اساس رفتار نگاری بر مبنای سنجش تنش قرار دارد. این مهم به دلیل آن است که خصوصیات رفتاری در سازه روباز به مشخصات بار وارده (معلوم) و مشخصات سازه (معلوم) بستگی دارد، پس تنش راحت تر اندازه گیری می شود. اما خصوصیات رفتاری در سازه زیرزمینی به مشخصات بار وارده از طرف زمین (مجهول) و مشخصات مصالح میزبان (مجهول و متغیر) بستگی دارد، پس اندازه گیری تغییر شکل ها یا کرنش ها تحت بار وارده برای سازه زیرزمینی آسان تر و امکان پذیرتر است. در شکل (۱-۲) پارامترهای

قابل اندازه‌گیری برای یک سازه روباز (پل) و یک سازه زیرزمینی (تونل)، به صورت شماتیک نشان داده شده است. در شکل (۱-۲-الف) شماتیکی از یک سازه تونل مشاهده می‌شود و همان‌طور که اشاره شد برای رفتارنگاری این سازه‌ها چون مشخصات بارهای وارده و مشخصات مصالح میزبان تونل نامعلوم است، پس اندازه‌گیری جابجایی‌ها و کرنش‌های ناشی از وارد شدن تنش‌ها برای رفتارنگاری آسان‌تر می‌باشد و در شکل (۱-۲-ب) شماتیکی از سازه پل مشاهده می‌شود، برای رفتارنگاری در این سازه‌ها چون هم مشخصات بار وارده و هم مصالح آن معلوم می‌باشد پس برای رفتارنگاری می‌توان به راحتی تنش‌ها را اندازه‌گیری کرد (Sakurai, 2010).



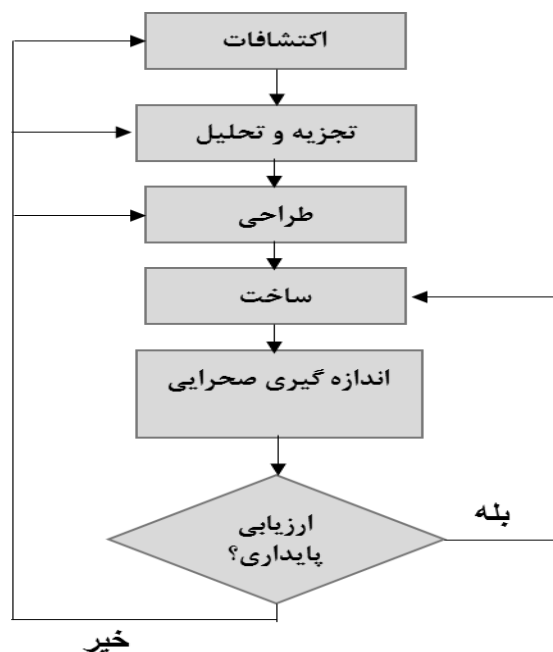
شکل ۲-۱: اساس رفتارنگاری در سازه‌های زیرزمینی و روباز (Sakurai, 2010)

۲-۲-۵ طراحی و انتخاب ابزار

جهت طراحی ابزار موردنیاز ابتدا باید مکانیزمی که رفتار سازه را کنترل می‌کند پیش‌بینی شود. این مکانیزم می‌تواند یک یا چند نوع باشد که انتخاب صحیح آن در اولین قدم اهمیت بسیار دارد. هر ابزاری در پروژه باید جهت کمک به پاسخگویی سوال خاصی انتخاب و نصب شود، اگر سوالی وجود ندارد ابزاری نیاز نیست. قبل از پرداختن به روش‌های اندازه‌گیری باید لیستی از سوال‌هایی که در خلال مراحل طراحی، اجرا و بهره‌برداری وجود خواهد داشت تهیه شود. پس از مراحل فوق، پارامترهایی که باید

رفتارنگاری شوند مشخص گردند. این سوال که مهم‌ترین پارامترها کدام هستند باید پاسخ داده شود و اندازه تغییرها را باید پیش‌بینی نمود. انواع ابزاری که در ابزاربندی به کار می‌روند یکی از مشخصه‌های حرارت، تغییرشکل، سطح آب زیرزمینی، فشار آب منفذی، تنش کل در خاک و تغییرات تنش در سنگ را اندازه‌گیری می‌کنند. قابلیت اعتماد به داده‌ها به ترتیب متغیرهای ذکرشده کاهش می‌یابد. ابزارها به‌صورت نوری، مکانیکی، هیدرولیکی، پنوماتیکی و الکتریکی قرائت را انجام می‌دهند. در شکل (۲-۲) جایگاه رفتارنگاری در طی مراحل ساخت نشان داده شده است. در ضمن باید در ابزاربندی و رفتارنگاری سازه‌ها چهار فاکتور زیر در نظر گرفته شود: (احمدی و شاهوردیلو، ۱۳۸۹).

- اندازه‌گیری بایستی قادر باشد اطلاعاتی را از داخل توده سنگ یا سازه به دست دهد.
- ابزارها بایستی به‌صورت مناسبی توزیع شده باشند.
- ابزارها بایستی به‌اندازه کافی باشند، تا تصمیم‌های مهم بر اساس داده‌های نادرست و پیش‌فرض به کار گرفته نشوند.
- هزینه به‌طور غیرمنطقی بالا نباشند.



شکل ۲-۲: جایگاه رفتارنگاری در طی مراحل ساخت (Sakurai, 2010)

۶-۲-۲ پارامترهای موردسنجش در رفتارنگاری

یک برنامه ابزاربندی شامل نصب، قرائت و تفسیر نتایج می‌باشد. با اجرای یک برنامه رفتارنگاری مناسب در یک پروژه می‌توان هر یک یا ترکیبی از پارامترهای موردنیاز را به دست آورد. پارامترهای موردسنجش در رفتارنگاری و ابزار دقیق‌های متناسب با آن به‌طور کلی در جدول (۱-۲) نشان داده شده است (موسوی و الهیان، ۱۳۹۰).

جدول ۱-۲: مهم‌ترین ابزارهای رفتارنگاری (موسوی و الهیان، ۱۳۹۰).

پارامترهای توده سنگ		پارامترهای سیستم نگهداری	
جابجایی افقی	انحراف سنج ^۱	بار وارده	سلول بارسنج ^۲ سلول کرنش‌سنج ^۳
جابجایی قائم و مایل	کشیدگی سنج گمانه‌ای یک نقطه‌ای ^۴ کشیدگی سنج گمانه‌ای چندنقطه‌ای ^۵ نقاط نشانه میکرو ژئودزی	خیز	انحنای سنج ^۶
همگرایی ^۷	متر نواری دقیق همگرایی سنج و روش نقشه‌برداری ژئودتیک ^۸	همگرایی	متر همگرایی سنج و روش نقشه‌برداری ژئودتیک
فشار آب در درزه	پیزومتر ^۹	جابه‌جایی درزه	درزه سنج ^{۱۰}

^۱ Inclinator

^۲ Load Cell

^۳ Strain Gauge Cell

^۴ Single Point Borehole Extensometer

^۵ Multiple Point Borehole Extensometer

^۶ Curvometer

^۷ Convergence

^۸ Geodetic Surveyor

^۹ Piesometer

^{۱۰} Joint Meter

۱-۶-۲-۲ معرفی روش ژئودتیک

توسعه و استفاده از ابزارهای نقشه‌برداری الکترونیکی و نرم‌افزارهای کامپیوتری در علوم مهندسی روزبه‌روز بیشتر می‌شود. بدین ترتیب رفتارسنجی تغییر شکل‌های داخلی تونل‌ها (همگرایی یا واگرایی) را می‌توان با استفاده از تجهیزات نقشه‌برداری انجام داد. یکی از این روش‌ها در نقشه‌برداری روش ژئودتیک است. به مجموعه روش‌هایی که برای تعیین و ارزیابی کمیت‌هایی که به‌طور مستقیم و یا غیرمستقیم برای بیان شکل هندسی و یا میدان جاذبه زمین به کار گرفته می‌شوند، روش ژئودتیک گفته می‌شود. در روش ژئودتیک بیش‌ترین تمرکز بر روی تجزیه و تحلیل خطاها پیش از سرشکنی و همچنین پس از سرشکنی می‌باشد.

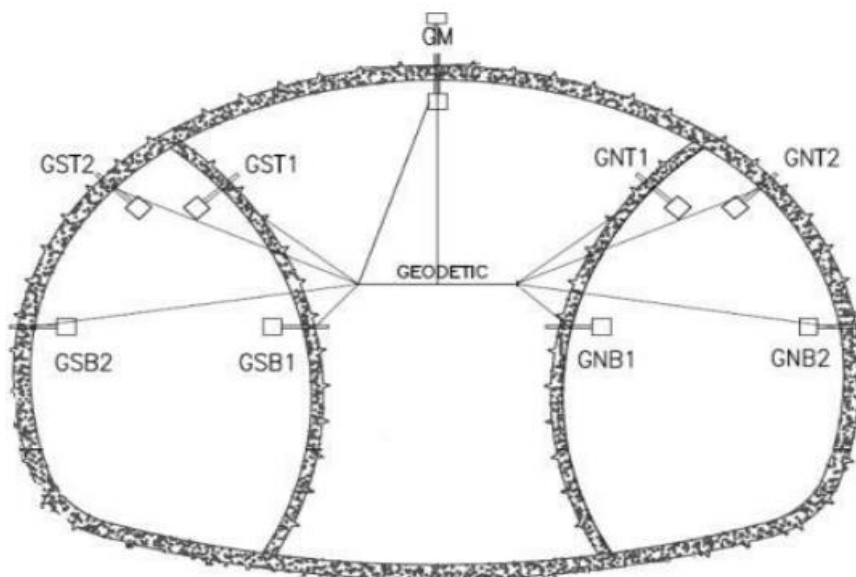
در روش ژئودتیک، رفتارسنجی با استفاده از یک ایستگاه نقشه‌برداری با دقت بالا و به‌وسیله دوربین‌های نوری سه‌بعدی انجام می‌شود. به‌منظور ثبت جابه‌جایی‌های دیواره یک تونل مجموعه‌ای از نقاط نشانه (رفلکتور)^۱ در یک مقطع نصب و در دوره‌های زمانی مختلف توسط دوربین نقشه‌برداری قرائت می‌شود. در این روش تعدادی پین ژئودتیک در دیواره و سقف تونل نصب می‌شود. مختصات سه‌بعدی جابه‌جایی پین‌های ژئودتیک نصب‌شده با استفاده از دوربین‌های نقشه‌برداری توتال استیشن^۲ قرائت می‌شود. برای هر یک از این قرائت‌ها با استفاده از مختصات پایه، جابه‌جایی هر یک از پین‌ها محاسبه می‌شود. شکل (۳-۲) نمای کلی از نحوه قرارگیری پین‌های ژئودتیک داخل یک تونل با حفاری بخشی را نشان می‌دهد (صالحی، ۱۳۹۴).

پین‌های ژئودتیک به دو دسته کلی پین‌های انعکاسی (منشوری) و پین‌های غیرانعکاسی تقسیم می‌شوند. هزینه ساخت و نصب پین‌های غیرانعکاسی حدود یک‌دهم انواع انعکاسی است. شکل (۴-۲)

^۱ Reflector

^۲ Total Station

ژئودتیک های نصب شده در یک تونل را نشان می دهد (صالحی، ۱۳۹۴).



شکل ۲-۳: شماتیک نحوه قرارگیری پین های ژئودتیک داخل یک تونل با حفاری بخشی (موسسه حرا، ۱۳۹۲)



شکل ۲-۴: شکل واقعی نحوه قرارگیری پین های ژئودتیک در دیواره ها و سقف تونل (موسسه حرا، ۱۳۹۲)

۲-۶-۲-۲ معرفی ابزار همگرایی سنج

این ابزار به منظور اندازه‌گیری و برآورد میزان همگرایی و واگرایی ایجاد شده در دیواره تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی استفاده می‌شود. این روش جابجایی نسبی را اندازه‌گیری می‌کند. این ابزار بهتر است قبل از اجرای سیستم نگهداری نصب شود. چنان‌چه به دلیل وجود محدودیت‌هایی در تونل، همگرایی سنج پس از سیستم نگهداری نصب شود، در این صورت جابجایی‌ها پس از نصب سیستم نگهداری اندازه‌گیری می‌شود که نتایج آن برای بررسی پایداری تونل نیز مفید است. یکی از انواع وسایل اندازه‌گیری همگرایی در فضاهای زیرزمینی، متر همگرایی سنج است که در شکل (۲-۵) دو نمونه از آن نشان داده شده است (Dunnicliff, 1993).



(الف)

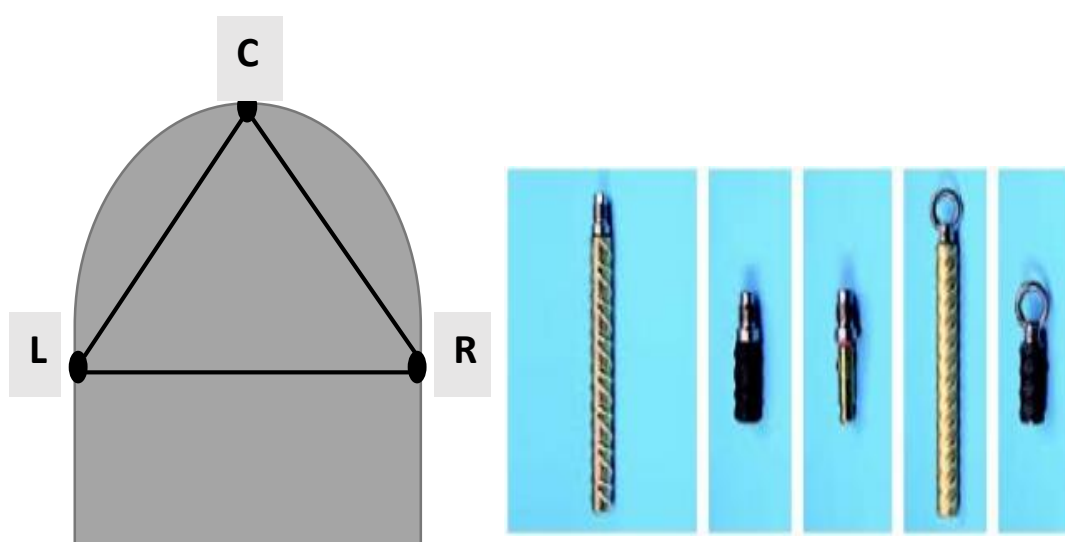


(ب)

شکل ۲-۵: دو نمونه از متر همگرایی سنج (احمدی و شاهوردیلو، ۱۳۸۹)

در همگرایی سنج شکل (۲-۵-الف) مقدار کشش توسط فنر قابل انقباضی کنترل می‌شود و در نوع شکل (۲-۵-ب) کشش با چرخاندن یک طوقه کششی تا زمانی که نشانگر تعبیه شده در متر در موقعیت خود قرار گیرد، کنترل می‌شود. قرائت پس از مرحله کشش انجام می‌شود و دقت تکرارپذیری قرائت در این شیوه در حدود ± 0.13 میلی‌متر در یک دهانه ۱۰ متری است و با افزایش دهانه دقت کاهش می‌یابد.

برای اندازه‌گیری تغییرات فاصله دو نقطه به صورت افقی یا مایل در دیواره فضای زیرزمینی دو میخ (پین) در این نقاط نصب می‌شوند. ابزار اندازه‌گیری همگرایی در بین این دو نقطه قرار می‌گیرد و سپس نوار اندازه‌گیری به یکی از پین‌ها متصل شده و دستگاه به پین دوم وصل و تحت نیروی کشش ثابت قرائت انجام می‌شود. همگرایی سنج‌ها به دستگاه قرائت عقربه‌ای یا دیجیتالی مجهزند. از همگرایی سنج نواری می‌توان برای اندازه‌گیری فواصلی تا ۳۰ متر نیز استفاده کرد. پین همگرایی سنجی در مناطق مختلف به صورت ایستگاه‌های ۳ و ۵ نقطه‌ای نصب می‌شوند. در شکل (۲-۶) انواع پین‌های همگرایی سنجی و شیوه نصب آن در دیواره تونل نشان داده شده است (احمدی و شاهوردیلو، ۱۳۸۹).



شکل ۲-۶: انواع پین‌های همگرایی سنجی و نحوه نصب آن در دیواره تونل‌ها (احمدی و شاهوردیلو، ۱۳۸۹)

۲-۳ مفاهیم روش تحلیل برگشتی

۲-۳-۱ کلیات روش

طراحی سازه در سنگ و خاک به دو طریق انجام می‌گیرد که در عملکرد با هم تفاوت دارند. در روش اول اطلاعات تجربی به‌دست‌آمده از آزمایش‌های صحرایی و آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه به عنوان ویژگی‌های مکانیک سنگ یا خاک در نظر گرفته می‌شود و سپس بر اساس این اطلاعات شروع به ساختن سازه می‌کنند. این روش از نظر زمانی برای دست آوردن پارامترهای مکانیکی سنگ یا خاک دارای محدودیت است. از این رو فرض می‌شود که بعد از طراحی، سنگ همان رفتاری را که در آزمایش‌ها نشان داده، از خود بروز می‌دهد و رفتار سنگ یا خاک منطبق بر همان چیزی است که در طرح آمده است و اگر هم تفاوتی در نوع رفتار موجود در حین ساخت سازه با رفتار سنگ در طراحی دیده شد، تغییری در طرح داده نمی‌شود. به این نوع طرح‌ریزی، طراحی صلب می‌گویند. در این روش هیچ هم‌فکری بین اجراکننده قرارداد، مشاور و طراح پروژه وجود ندارد. با توجه به محدود بودن اطلاعات به‌دست‌آمده از آزمایش‌های برجا و آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه ممکن است در حین انجام پروژه مشکلات پیش‌بینی‌نشده‌ای به وجود بیاید. برای جلوگیری از این مسئله طراحان ممکن است راه‌حلهایی در پیش بگیرند که می‌توان به روش‌های زیر دسته‌بندی شوند (Sakurai, 1983).

۱- یک فاکتور اطمینان بالا در نظر بگیرند.

۲- شرایط فرضی را در طرح خود اضافه کنند که مشکلات احتمالی به وجود آمده در حین کار را در نظر گرفته باشد.

روش اولی باعث می‌شود که طرح از نظر اقتصادی دچار مشکل شود و روش دوم نیز غیرمطمئن می‌باشد. پس برای حل این مسائل باید چه اقدامی را در نظر گرفت؟ در حقیقت جزییات زمین‌شناسی

به راحتی می‌توانند روی رفتار سنگی که نوع رفتار آن پیش‌بینی شده بود تاثیر بگذارند و رفتار آن را به سویی متفاوت از آن چیزی که انتظار می‌رود هدایت کند. برای جلوگیری از مواردی که گفته شد، روشی توسط ترزاقی و پک^۱ (۱۹۴۸) معرفی گردید. این راه‌حل به روش مشاهده‌ای معروف گردید که در کارهای عظیم ژئوتکنیک و ساخت سدها و تونل‌ها به‌کاربرده می‌شود. این کار نیاز به همکاری نزدیک مشاور و اجراکننده طرح دارد و باید سیستم اندازه‌گیری در سازه برپا گردد. حال می‌توان با توجه به نصب این دستگاه‌ها، رفتار سنگ یا خاک را در حین ساخت سازه و بعد از آن مشاهده کرد. می‌توان اطلاعات به دست آورده شده در حین ساخت را با داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها مقایسه کرد و هر نوع تفاوتی بین آن‌ها را تشخیص داد و پارامترهای مربوط به سنگ یا خاک را با توجه به این اختلافات تصحیح کرد. این امر باعث می‌شود که اندازه‌گیری و برداشت جدیدی از سنگ و یا خاک به دست بیاید. این نوع روش طراحی را روش انعطاف‌پذیر می‌نامند.

۲-۳-۲ مفهوم تحلیل برگشتی

به‌طور کلی تحلیل برگشتی روشی است که پارامترهای حاکم بر یک سیستم را با تحلیل رفتار خروجی آن سیستم پیش‌بینی می‌کند. در حالت کلی انجام یک تحلیل برگشتی مستلزم دو بخش است. بخش اول عبارت است از یک روش تحلیل تنش با استفاده از تکنیک‌های عددی به‌منظور تعیین تنش، کرنش و توزیع جابجایی برای مساله موردنظر و بخش دوم شامل یک الگوریتم مناسب بهینه‌سازی است که اختلاف میان مقادیر اندازه‌گیری شده برجا و داده‌های به‌دست‌آمده از تحلیل تنش را کمینه می‌کند. در حوزه سازه‌های زیرزمینی، اندازه‌گیری‌های انجام‌شده برای مسایل خاص به‌طور معمول منطبق بر یکی از پارامترها شامل، کرنش‌ها، جابجایی‌های نسبی، جابجایی‌های مطلق، تنش‌ها در توده سنگ و نگه‌دارنده، فشار نگهداری (قاب‌های فولادی و پیچ سنگ‌ها)، نیروها در انکرها (مونوبارها) و فشار آب زیرزمینی است. بیشتر کارهای انجام‌شده در این زمینه معطوف به اندازه‌گیری جابجایی‌ها (به‌طور مثال اندازه‌گیری

^۱ Terzaghi & Peck

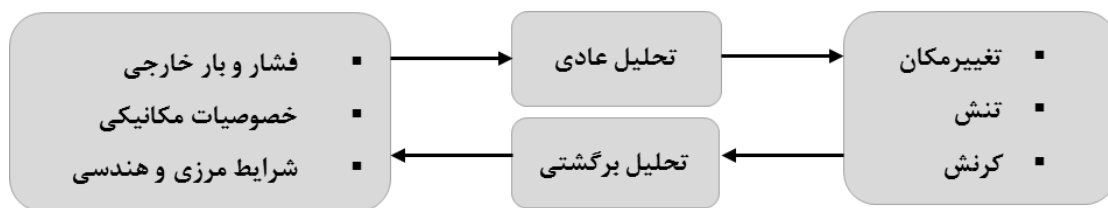
همگرایی دیواره‌ها) بوده است. دلیل این امر این است که از دیدگاه ریاضیاتی، جابجایی پارامتری است که پدیده‌های محلی تأثیر چندانی بر روی آن ندارند. در مقایسه، تنش‌ها و کرنش‌ها پارامترهای دیفرانسیلی بوده و مقادیر آن‌ها از یک نقطه به نقطه دیگر متفاوت است. بنابراین بایستی برای پیدا کردن مقداری که بیانگر تنش و کرنش در توده سنگ باشد، اندازه‌گیری‌های کافی در نقاط مختلف صورت گرفته و از مقادیر میانگین آن‌ها استفاده شود. از طرف دیگر، جابجایی‌های القاشده در توده سنگ در اثر حفاری را می‌توان به سهولت و دقت اندازه‌گیری کرد (شاهوردیلو، ۱۳۸۹).

۲-۳-۳ تفاوت تحلیل برگشتی و تحلیل عادی

همان‌طور که اشاره شد، تحلیل برگشتی معمولاً به‌عنوان روشی تعریف می‌شود که می‌تواند پارامترهای کنترل‌کننده یک سیستم را از تحلیل رفتار خروجی آن سیستم تعیین کند. 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 اندازه‌گیری شده در طول اجرای پروژه و پس از آن محاسبه می‌شوند (Jeon and Yang, 2004).

به عبارتی می‌توان گفت که روش تحلیل برگشتی، عکس روش تحلیل عادی است. به این دلیل که در تحلیل عادی شرایط نیرو و خواص مکانیکی محیط به‌عنوان اطلاعات ورودی برای تعیین تغییر مکان، تنش و کرنش می‌باشند. به همین جهت است که نام این روش را تحلیل برگشتی گذاشته‌اند. ارتباط بین تحلیل‌های عادی و برگشتی در شکل (۲-۷) آمده است (دهقان، ۱۳۹۲).

لازم به تأکید است که تحلیل برگشتی به‌طور دقیق عکس تحلیل عادی نیست، زیرا در تحلیل برگشتی فرضیات اصلی به‌خصوص در مدل‌سازی سنگ می‌تواند تغییر کند. در تحلیل عادی به‌طور معمول یک مدل مکانیکی مشخص به طریقی که بتواند نماینده رفتار سنگ باشد (مثلاً الاستیک،



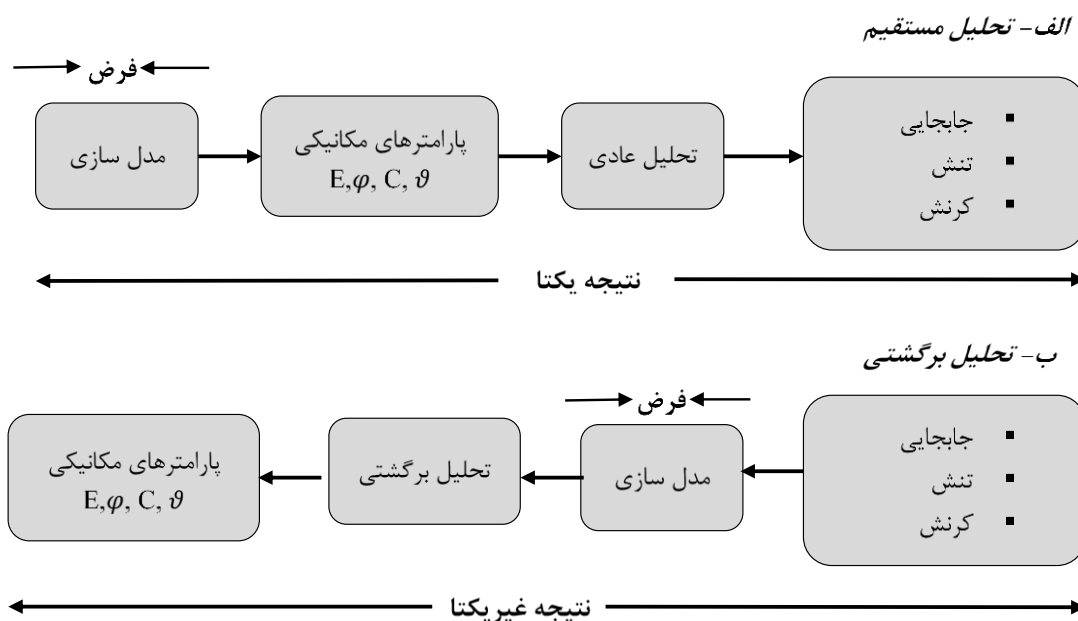
شکل ۲-۷: ارتباط بین تحلیل عادی و تحلیل برگشتی (دهقان، ۱۳۹۲)

الاستوپلاستیک، ویسکوپلاستیک و ...) برای سنگ فرض می‌شود. با فرض این مدل، مقادیر ثابت‌های مکانیکی آن را می‌توان با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی و یا آزمایش‌های برجا تعیین نمود. در تحلیل عادی از این مقادیر به‌عنوان داده‌های ورودی جهت محاسبه تغییر مکان، تنش و کرنش استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که این روش حداقل برای یک مدل معین منجر به نتیجه‌ای یکتا خواهد شد. از طرف دیگر در تحلیل برگشتی مقادیر تغییر مکان، کرنش و فشار از روی اندازه‌گیری‌های صحرایی تعیین‌شده و سپس یک مدل مکانیکی برای محیط فرض می‌شود. با استفاده از نتایج اندازه‌گیری‌های صحرایی به‌عنوان اطلاعات ورودی برای مدل، می‌توان ثابت‌های مکانیکی و نیروهای خارجی را تعیین کرد. ثابت‌های مکانیکی و نیروهای خارجی محاسبه‌شده به‌طور کامل به مدل مکانیکی فرض شده بستگی خواهند داشت. به‌عنوان مثال با فرض مدلی به‌صورت الاستیک، مدول الاستیسیته و نسبت پواسون به دست می‌آید، درحالی‌که با فرض مدل الاستوپلاستیک علاوه بر پارامترهای قبلی، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نیز تعیین می‌شوند. بدین ترتیب علی‌رغم استفاده از داده‌های ورودی یکسان، نتایج متفاوتی برای مدل‌های مختلف به دست خواهد آمد (Zhang et al., 2006).

تفاوت بین تحلیل عادی و تحلیل برگشتی در شکل (۲-۸) بیان‌شده است. مطابق شکل در تحلیل عادی حداقل در مورد اطلاعات ورودی معین نتیجه یکتایی به دست خواهد آمد. حتی در مواردی که رفتار واقعی سنگ با رفتار پیش‌بینی‌شده مدل یکسان نباشد، بازهم یکتا بودن نتیجه مذکور قطعی

است. از طرف دیگر در تحلیل برگشتی واحد بودن نتایج حتمی نیست، و این به آن علت است که عمل مدل سازی پس از تعیین اطلاعات ورودی صورت می گیرد (Sakurai, 1997).

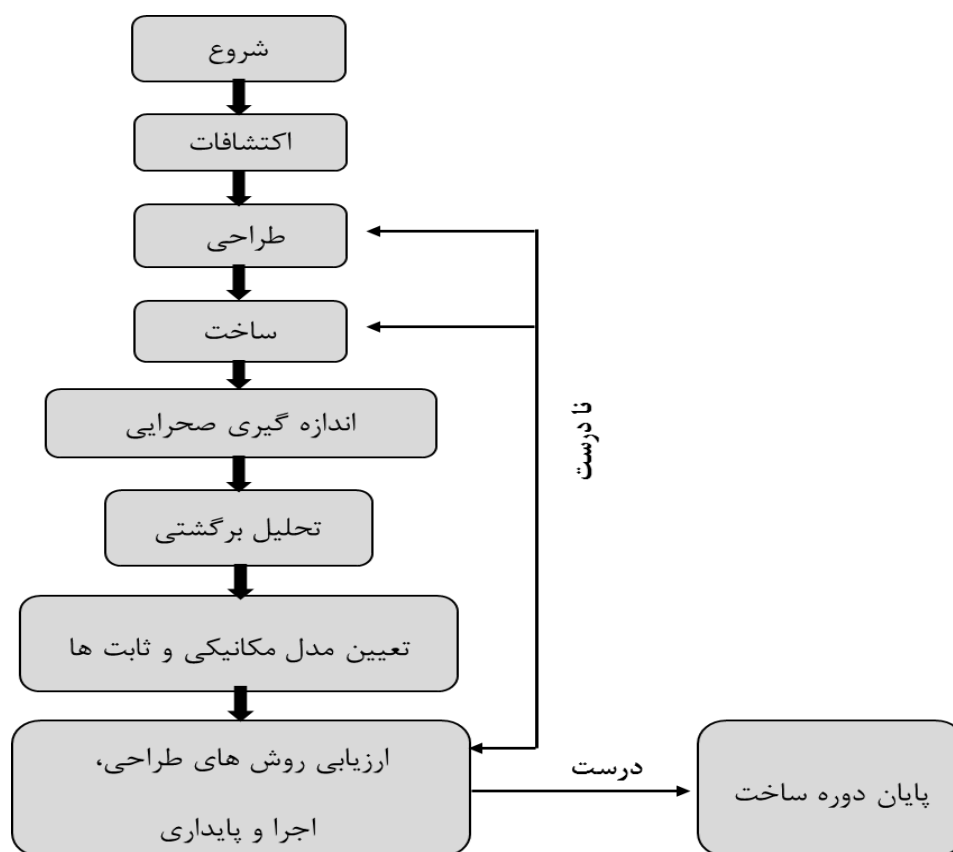
برای به دست آوردن نتایج واحد از یک تحلیل برگشتی باید دقت زیادی اعمال شود تا مدل انتخاب شده نماینده رفتار واقعی محیط باشد. بنابراین مدل سازی در تحلیل برگشتی از اهمیت بیشتری نسبت به تحلیل معمولی برخوردار خواهد بود. باید تاکید کرد که در صورت امکان نباید یک مدل ثابت را برای محیط در نظر گرفت، بلکه باید مدل را نیز به صورت برگشتی از اطلاعات اندازه گیری شده برجا به دست آورد.



شکل ۲-۸: مقایسه بین تحلیل عادی و تحلیل برگشتی (Sakurai, 1997)

هدف تحلیل برگشتی فقط تعیین مدل مکانیکی با مقادیر ثابت های مکانیکی و نیروهای خارجی نیست، بلکه هدف نهایی آن ارزیابی روش های طراحی و ساخت پروژه موردنظر در طی اجرای آن است. در این ارزیابی نتایج تحلیل برگشتی برای بررسی مجدد اطلاعات ورودی به مرحله طراحی و نیز بررسی کفایت روش های اولیه طراحی و ساخت از جنبه های اقتصادی و ایمنی، مورد استفاده قرار

می‌گیرد. مراحل بررسی پایداری یک سازه و مناسب بودن روش‌های طراحی و اجرا در شکل (۲-۹) نمایش داده شده است. با توجه به مطالب فوق که بیانگر ارتباط بین تحلیل برگشتی، اندازه‌گیری‌های صحرایی و روش‌های طراحی و ساخت پروژه می‌باشد، مشخص می‌شود که تحلیل برگشتی باید هم‌زمان و در کنار مرحله ساخت پروژه مورد استفاده قرار گیرد. با این دیدگاه تحلیل برگشتی کاملاً با تحلیل معمولی که قبل از فاز اجرای پروژه انجام می‌شود متفاوت است (Sakurai, 1997).



شکل ۲-۹: جایگاه تحلیل برگشتی در مراحل ساخت یک سازه (Sakurai, 1997)

۲-۳-۴ پیشینه علمی تحلیل برگشتی

آغاز استفاده از روش تحلیل برگشتی در مسایل مختلف مهندسی سنگ و خاک را می‌توان از دهه ۱۹۷۰ دانست. تعیین جابجایی‌ها بر اساس روش‌های تحلیل برگشتی از سال ۱۹۷۰ به‌عنوان موضوع

مهمی پیگیری شده و مطالعات زیادی در راستای توسعه مدل‌های مختلف انجام شده است، در این زمینه در سال ۱۹۸۰ توسط گیودا^۱ تحقیقاتی در جهت تعیین پارامترهای الاستیسیته و تنش‌ها در پوشش تونل انجام داده است. در همان سال گیودا و مایر^۲ روشی برای تخمین پارامترهای مقاومتی و حالت تنش با استفاده از تفسیر نتایج آزمایش‌های فشار آب حفره‌ای در تونل ارائه نموده‌اند. اولین تحقیقات مهم در این رابطه با استفاده از اندازه‌گیری‌های برجا به‌عنوان پارامتر ورودی در تحلیل برگشتی در سال ۱۹۸۳ توسط ساکورایی^۳ و تاکوچی^۴ انجام شده است، به‌طوری‌که ساکورایی را مبدع این روش می‌دانند. هیستاک^۵ در سال ۱۹۸۵ روشی برای تخمین تنش‌های اولیه و ثابت‌های مکانیکی وابسته به زمان زمین، که ترکیبی از روش المان محدود با تکنیک بهینه‌سازی سیمپلکس^۶ می‌باشد، پیشنهاد کرده است.

در سال ۱۹۸۷ ساکورایی و گیودا تحقیقاتی در مورد گسترش روش‌های عددی برای آنالیز برگشتی پارامترهای ژئومکانیکی صحرایی در مورد مسایل تونل زنی انجام دادند. این روش‌ها به‌عنوان ابزاری کاربردی با کاهش عدم اطمینان، اغلب روی پارامترهایی که در طراحی کارهای ژئومکانیکی پیچیده استفاده می‌شوند تاثیر می‌گذارند. همچنین کاربرد روش‌های آنالیز برگشتی در مسایل دینامیکی را بیان کردند که این نوع از مطالعات می‌تواند اهمیت ویژه‌ای در ارتباط با مسایل لرزه‌ای و دینامیکی خاک و سنگ داشته باشد.

در سال ۱۹۹۲ آموزین^۷ و همکارانش یک روش ساده برای تخمین پارامترهای صحرایی در طراحی سیستم نگهداری تونل‌ها ارائه نمودند. در این روش با استفاده از برنامه کامپیوتری NEDRA مقادیر

^۱ Gioda

^۲ Maier

^۳ Sakurai

^۴ Takeuchi

^۵ Hisatake

^۶ Simplex

^۷ Amusin

آزمایشگاهی پارامترهای توده سنگ را با روش تحلیل برگشتی تصحیح کردند. این نرم افزار با حل چند معادله غیرخطی به ترتیب برای سقف، کف و دیواره تونل، مقادیر فاکتورهای تصحیح را محاسبه کرده و با ضرب این فاکتورها در پارامترهای صحرایی (E_m, R_m, φ, Q) پارامترهای اولیه واقعی را تعیین و سپس با استفاده از این پارامترها جابجایی های تونل را محاسبه می نمود.

سووبدا^۱ در سال ۱۹۹۹ روش کنترل مرزی را که مزایای هر دو روش تحلیل برگشتی مستقیم و معکوس برای توسعه یک کد مناسب در انجام تحلیل برگشتی بر روی مدل های ژئومکانیکی پیچیده و بزرگ را دارا بود، ارائه نمود. ماتسون^۲ در سال ۲۰۰۱ از روش های سیمپلکس و روزنبروک^۳ که روش های جستجوی مستقیم می باشند، برای بهینه سازی روش تحلیل برگشتی استفاده کرده است. یانگ و الگمال^۴ در سال ۲۰۰۳ روش نیوتن و یک برنامه بهینه سازی که بر مبنای روش شبه نیوتن قرار داشت، برای تخمین پارامترهای کرنش- تنش برشی از آزمایش های سه محوری به کار برده اند. دنگ^۵ در سال ۲۰۰۱ یک روش تحلیل برگشتی بر اساس حداقل سازی تابع خطا ارائه نموده است.

موریرا^۶ در سال ۲۰۰۳ یک روش تحلیل برگشتی تکراری بر اساس روش المان محدود همراه با تابع خطای احتمال حداکثر و الگوریتم بهینه سازی گوس- نیوتن منتشر کرده است. این روش به طور موفقیت آمیزی در تعیین پارامترهای خاک مورد استفاده قرار گرفته است. ساکورایی در سال ۲۰۰۳ روش جدیدی به منظور تعیین توزیع کرنش اطراف تونل ارائه داده است.

اورست^۷ در سال ۲۰۰۵ روش های تحلیل برگشتی موثری بر پایه ریاضیات را تشریح نموده است، به طوری که بر اساس تعداد ابزار دقیق به کار رفته برای رفتار نگاری توده سنگ و تعداد پارامترهای مجهول

^۱ Swoboda

^۲ Mattsson

^۳ Rosenbrock

^۴ Yang & Elmal

^۵ Deng

^۶ Moreira

^۷ Oreste

که باید تحلیل برگشتی شوند، اصول و کاربرد روش‌های تحلیل برگشتی ریاضی را بیان نموده است. فخمی و همکاران در سال ۲۰۰۴ از تحلیل برگشتی عددی برای تخمین پارامترهای خاک در تونل رسالت استفاده نمودند. هدف اصلی این مطالعه تخمین چسبندگی و تنش‌های افقی خاک بود، تحلیل برگشتی به‌وسیله تطابق دادن نتایج مدل‌سازی عددی با همگرایی اندازه‌گیری شده تونل انجام شد و نشان داد که در تعیین این پارامترها دقت خوبی ارائه می‌دهد.

شانگ^۱ در سال ۲۰۰۲ بر اساس ۱۰۰ مطالعه موردی در پروژه‌های تونل در چین، یک تحلیل برگشتی هوشمند برای بررسی خصوصیات توده سنگ (تنش‌ها و مدول توده سنگ) اطراف تونل‌ها استفاده کرده است، که این تکنیک به‌طور گسترده برای تعیین خواص توده سنگ بر اساس اطلاعات به‌دست‌آمده از تغییر شکل‌ها در حین ساخت تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی استفاده شده است.

هیستاک و همکارانش در سال ۲۰۰۸، برای ارزیابی خصوصیات مکانیکی توده سنگ جلو سینه‌ی کار تونل، یک روش تحلیل برگشتی سه‌بعدی پیشنهاد کرده‌اند، به‌طوری‌که مدول الاستیسیته، ضریب پواسون و شش مولفه تنش برجا از طریق این روش مشخص می‌شوند.

ریچیا^۲ و همکارانش در سال ۲۰۰۸، روش تحلیل برگشتی را برای شناسایی مجموعه پارامترهای ساختاری در شبیه‌سازی سیستم نگهداری حفاریات عمیق شهری استفاده کردند. آن‌ها با کمینه کردن تابع هدف (حداقل مربعات وزنی) با دو الگوریتم پایه و الگوریتم ژنتیک راه‌حل منحصربه‌فرد و بدون اشکالی را ارائه دادند و مزایا و معایب هر دو روش را نیز بیان کردند. در همین سال ۲۰۰۸، مهدوری و فتحی سلمی برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ میزبان خط جنوبی مترو اصفهان از روش تحلیل برگشتی به شیوه مستقیم استفاده کردند، و همچنین برای کاهش اختلاف میان داده‌های ابزار دقیق و مدل‌سازی از روش‌های کمترین مربعات و کمینه کردن تابع خطا بهره بردند.

^۱ Shang

^۲ Rechea

قربانی و شریفزاده در سال ۲۰۰۹ بر اساس تحلیل برگشتی جابجایی‌ها، به ارزیابی پایداری طولانی‌مدت مغار نیروگاه سیاه‌بیشه پرداخته‌اند. در این مطالعه، تحلیل برگشتی مستقیم با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی تک متغیره مبتنی بر جابجایی‌ها، به‌کاررفته است. همچنین در سال ۲۰۱۲ شریفزاده و همکاران جهت اصلاح سیستم نگهداری تونل شبلی از نتایج تحلیل برگشتی و مدل‌سازی عددی استفاده کردند.

موریرا و همکاران^۱ در سال ۲۰۱۳، برای تحلیل برگشتی ساخت یک نیروگاه جدید برق‌آبی در شمال کشور پرتغال از الگوریتم‌های بهینه‌سازی در حفاری نیروگاه استفاده و عملکرد آن‌ها را برای مدل‌های الاستیک و الاستوپلاستیک مورد ارزیابی قراردادند.

لیوژر^۲ و همکاران در سال ۲۰۰۸ مطالعه‌ای در مورد مقایسه رفتار دو تکنیک بهینه‌سازی مختلف در مسایل ژئوتکنیکی ارائه نموده‌اند که این تکنیک‌های بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک و نزول پرشیب می‌باشد. آن‌ها این الگوریتم را به نتایج یک آزمایش فشارسنج و رفتارنگاری یک دیوار ستون صفحه‌ای برای نگهداری حفاری، اعمال نموده‌اند و ثابت کرده‌اند که الگوریتم ژنتیک برای تعیین پارامترهای خاک مناسب است. دنگ و لی در سال ۲۰۰۱ روشی برای تحلیل برگشتی بر اساس جابجایی‌های با استفاده از شبکه‌های عصبی و الگوریتم ژنتیک منتشر کرده‌اند که مدول الاستیک در تحلیل پایداری شیب را مشخص می‌نمود. در این روش، شبکه عصبی برای افزایش کارایی محاسبات، جایگزین محاسبات المان محدود شده و الگوریتم ژنتیک به‌عنوان روش بهینه‌سازی کلی استفاده شده است.

یک روش مشابه توسط پیچلر^۳ در سال ۲۰۰۳ برای تشخیص پارامترهای مدول الاستیک و الاستوپلاستیک اتخاذ شده است. در این کار، الگوریتم ژنتیک نه‌تنها به‌عنوان تکنیک بهینه‌سازی کلی برای پیدا نمودن جواب بهینه مورد استفاده قرار گرفته است، بلکه همچنین برای انتخاب اولیه وزن‌های شبکه

^۱ Moreira, et al.

^۲ Levasseur

^۳ Pichler

برای بهبود روش آموزش نیز استفاده شده است.

یانگ^۱ و همکارانش در سال ۲۰۱۰، یک مدل الاستیکو پلاستیک غیر کششی و یک روش تحلیل برگشتی بهینه شده برای تحلیل پایداری تونل‌ها ارائه نموده‌اند. اوچمانسکی و بزوکا^۲ در سال ۲۰۱۲، از روش شبکه عصبی مصنوعی (ANN) برای تحلیل برگشتی و آنالیز حساسیت پارامترهای خاک در دو تونل مشابه با لاینینگ بتن پاشی شده (SCL) استفاده کرده‌اند.

چانسینگ ژو و همکارانش^۳ در سال ۲۰۱۴، از یک روش جدید موسوم به تحلیل برگشتی بر مبنای الگوریتم اجتماع زنبور عسل مصنوعی (ABC) برای شناسایی پارامترهای ژئومکانیکی بر مبنای جابجایی‌های رفتارنگاری شده استفاده کرده‌اند. نتایج استفاده از این روش در یک تونل دایره‌ای با حل تحلیلی نشان می‌دهد که روشی موثر و دارای عملکرد بهینه‌ای برای جستجوی پارامترهای ژئومکانیکی می‌باشد و موجب بهبود کارایی و دقت تحلیل برگشتی شده و همچنین در اکثر مسایل مهندسی پیچیده کاربرد دارد.

ولیزاده قره آغاجی و یزدانی در سال ۲۰۱۵ با استفاده از تحلیل برگشتی مبتنی بر روش تاگوچی به کالیبره کردن پارامترهای مدل رفتاری خاک سخت شونده بر اساس نتایج آزمایش بارگذاری صفحه‌ای پرداختند. در این تحقیق یک تکنیک جستجوی سیستماتیک برای کالیبراسیون مدل رفتاری بر مبنای روش تاگوچی معرفی شده است. برعکس روش‌های سنتی که رفتار خاک را در بعضی از حالت‌های خاص مبنای کالیبراسیون قرار می‌دادند، رفتار کلی خاک مبنای کار در نظر گرفته می‌شود. از دیگر مزایای این روش آن است که می‌توان مدل رفتاری موردنظر را با استفاده از نتایج هر آزمایش دلخواهی کالیبره کرد. روش آنالیز برگشتی انجام شده در این تحقیق پارامترهای مدل رفتاری مورد نظر خاک (الاستو - پلاستیک) را به طرز موثری کالیبره می‌کند. نتیجه این تحقیق ارائه یک روش کلی برای به

^۱ Yang

^۲ Ochmanski and Bzowka

^۳ Changxing Zhu, et al.

دست آوردن دسته پارامترهای محتمل جهت کالیبراسیون انواع مدل‌های رفتاری بود.

ال وی و همکارانش^۱ در سال ۲۰۱۷ با استفاده از تحلیل برگشتی پارامترهای مقاومت برشی توده سنگ به تحلیل پایداری شیب‌های سنگی که در اثر زلزله القا شده‌اند، پرداختند. ارزیابی پایداری به ترتیب تحت شرایط استاتیکی، دینامیکی و بارش انجام شد. نتایج نشان داد که حالت گسیختگی عمده شیب لغزش در طول یک گسل در منطقه می‌باشد و ریزش‌های محلی توده‌های آویزان در قسمت بالای شیب در اثر بار دینامیکی و بارش اتفاق افتاده است که برای بهبود پایداری شیب نصب راک بولت در بالای شیب پیشنهاد دادند.

۲-۳-۵ انواع روش‌های تحلیل برگشتی

در فرآیند مهندسی، با دو گروه از انتخاب‌ها مواجه هستیم. گروه اول مربوط به روش‌های مدل‌سازی و گروه دوم مربوط به مقادیر عددی داده‌های ورودی می‌باشد. با اینکه انتخاب‌های صورت گرفته در زمینه مدل‌سازی کاملاً وابسته به تجربه و قضاوت مهندسی هستند. ولی انتخاب پارامترهای ورودی کاملاً بستگی به اطلاعات موجود از سیستم حقیقی دارد. در برخی موارد این اطلاعات ضعیف‌تر از آن هستند که بتوان داده‌های ورودی را به طور کامل و دقیق تعیین نمود. برای غلبه بر این مشکل می‌توان از اندازه‌گیری‌های صحرایی در طی مراحل اولیه ساخت با استفاده از تحلیل برگشتی استفاده کرد. روش‌های گوناگونی جهت تحلیل برگشتی در مهندسی سنگ و خاک توسعه یافته که از مسایل الاستیک ساده تا مسایل پیچیده غیرخطی را شامل می‌شود (McKinnon, 2001).

به‌طور کلی روش‌های تحلیل برگشتی را می‌توان به دو دسته معکوس^۲ و مستقیم^۳ تقسیم‌بندی نمود. تقسیم‌بندی دیگر در بین روش‌های تحلیل برگشتی را می‌توان به‌صورت روش‌های قطعی و

^۱ Lv, et al.

^۲ Inverse Approach

^۳ Direct Approach

روش‌های احتمالاتی بیان نمود.

۲-۳-۶ تحلیل برگشتی معکوس

در روش معکوس فرمول‌بندی ریاضی به‌طور دقیق عکس تحلیل عادی است. روش معکوس نیازمند فرمولاسیون معکوس برای تحلیل تنش است. در این روش، معادله‌های هدایت‌کننده مسایل تحلیل تنش، معکوس می‌شوند. به‌طوری‌که تعدادی از مقادیر که در تحلیل تنش مستقیم نامعلوم‌اند، بر اساس اندازه‌گیری‌های موجود، در مجموعه داده‌ها معلوم می‌شوند. درحالی‌که مقادیر دیگری که در یک تحلیل تنش ارزش معلومی دارند در زمره پارامترهای نامعلوم قرار می‌گیرند. در اغلب موارد واقعی، تعداد اندازه‌گیری‌های برجا بیشتر از تعداد پارامترهای نامعلوم است. این امر، ما را به‌سوی حل دستگاه معادلاتی سوق می‌دهد که تعداد معادله‌های آن بیشتر از تعداد مجهول‌های آن است که باید به کمک یک روش کمینه‌سازی مناسب حل شود. با فرض زمین به‌صورت یک مدل مکانیکی با شکل هندسی ساده می‌توان روش‌های حل فرم بسته مانند نظریه الاستیسیته و نظریه پلاستیسیته را به کاربرد. اما برای زمین‌های با شرایط ژئومکانیکی و زمین‌شناسی بسیار پیچیده، استفاده از روش المان محدود مناسب‌تر به نظر می‌رسد. مزیت مهم روش معکوس عدم نیاز آن به تکرار عمل محاسبه‌ای است، به‌طوری‌که زمان محاسبه‌ها به حداقل، کاهش می‌یابد. اما مشکلی که گاهی در روش معکوس پیش می‌آید، آن است که نمی‌توان از مقادیر بسیار پراکنده اندازه‌گیری شده که به‌طور معمول در مسایل مهندسی ژئوتکنیک اتفاق می‌افتد راه‌حلی به دست آورد که از لحاظ عددی همگرا باشد. اعمال این روش برای مسایل غیرخطی نیز مشکل‌هایی همراه دارد (Sakurai et al., 2003) و (حسینی و افضل آقایی، ۱۳۹۱).

۲-۳-۱ تعیین خواص مکانیکی توده‌های سنگی درزه‌دار با آنالیز برگشتی معکوس

اساس این روش توسط تسوشیاما^۱ ارائه شده است، که مطابق تئوری مکانیک شکست می‌باشد. در این روش ابتدا تانسور شکست برای توده سنگ درزه‌دار تعیین می‌شود. این روش رفتار سنگ را الاستیک خطی و محیط را ایزوتروپ فرض می‌کند. مدول الاستیسیته و نسبت پواسون معلوم فرض می‌شود. این روش برای توده سنگ‌های درزه‌دار مناسب می‌باشد و با انجام آنالیز برگشتی از نوع معکوس، روی جابجایی‌ها و بارهای اندازه‌گیری شده، خواص مکانیکی توده سنگ درزه‌دار به دست می‌آید. این روش برای فضاهایی که در چند مرحله حفر می‌شوند کارایی دارد و می‌توان جابجایی‌ها و عکس‌العمل توده سنگ را در مراحل بعدی پیش‌بینی نمود (Kaiser et al., 1990).

۲-۳-۲ تعیین مقاومت توده سنگ و شعاع پلاستیک با استفاده از داده‌های همگرایی

با توجه به این که اگر سنگ حالت الاستیک داشته باشد همگرایی در فاصله ۲ یا ۳ برابر قطر فضای زیرزمینی، از سینه کار منظور می‌شود و اگر رفتار سنگ پلاستیک باشد این فاصله ۳ تا ۱۰ برابر قطر فضای زیرزمینی افزایش می‌یابد، با استفاده از داده‌های همگرایی سنج، منحنی‌های جابجایی برحسب فاصله از سینه کار رسم می‌شود (Tanimoto and Fujiwara, 1998). با استفاده از این منحنی می‌توان شعاع ناحیه پلاستیک را با تقریبی خوب به دست آورد. همچنین با معلوم بودن مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ و زاویه اصطکاک داخلی، مقاومت نهایی توده سنگ با استفاده از معیار هوک و براون قابل ارزیابی است. در نتیجه در این روش داده‌های ورودی، همگرایی اندازه‌گیری شده، مقاومت فشاری تک‌محوری و زاویه اصطکاک داخلی سنگ بوده و هدف به دست آوردن شعاع ناحیه پلاستیک، مقاومت نهایی توده سنگ در نقطه شکست و بار وارده شده به سیستم نگهدارنده می‌باشد.

تحقیقاتی شامل، تحلیل برگشتی تنش‌های اولیه مبتنی بر اجزای محدود (Sakurai, 1983)، تحلیل

^۱ Tsuchiyama

برگشتی فشار زمین^۱ (Jason, 2006)، تعیین چگونگی توزیع فشار روی سیستم نگهداری فضای زیرزمینی با استفاده از تحلیل برگشتی (Gioda, 1985) و آنالیز برگشتی الاستیک برای تعیین مدول الاستیک و بارهای ناشی از حفاری که توسط (Hisataka, 1986) ارائه شده است، نیز جزء روش‌های تحلیل برگشتی معکوس هستند.

۷-۳-۲ تحلیل برگشتی مستقیم

فرمول‌بندی مورد استفاده در روش مستقیم شبیه تحلیل تنش عادی است. اساس روش مستقیم بر مبنای بهینه‌سازی با استفاده از تکرار استوار است. مسئله تحلیل برگشتی با استفاده از رابطه کمینه‌سازی طوری حل می‌شود که مقادیر آزمایشی پارامترهای مجهول در الگوریتم تحلیل تنش، منجر به حداقل شدن اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده می‌شود (Vardakos, 2007).

مزایای این روش عبارت‌اند از:

- آن را می‌توان بدون نیاز به اطلاع از ریاضیات پیچیده برای مسایل غیرخطی به کار برد.
- قابلیت کاربرد الگوریتم‌های استاندارد برنامه‌سازی مانند Simplex و Rosenbrock در آن
- قابلیت استفاده سریع از آن برای زمانی که داده‌ها فراوان و پراکنده باشند.

۱-۷-۳-۲ روش سیمپلکس (چندضلعی انعطاف پذیر)

یک چندضلعی در فضای n بعدی از پارامترهایی که بایستی ارزیابی شوند (متغیرهای آزاد)، مجموعه‌ای از $n+1$ نقطه یا رأس است. به‌طوری‌که n بردار از یک نقطه به نقاط دیگر مستقل خطی باشند. با انتخاب یک چندضلعی یعنی $n+1$ مجموعه از پارامترهای آزمایشی مناسب، تابع خطا در هر رأس تعیین می‌شود. رأسی که دارای بیشترین خطا است توسط مرکز رئوس دیگر منعکس می‌شود.

^۱ Earth Pressure

اگر خطای مربوطه به رأس انعکاس یافته نسبت به خطای سایر رئوس کوچک باشد، رأس خطای حداکثر توسط رأس انعکاس یافته جایگزین می‌شود و فرآیند با این جایگزینی ادامه می‌یابد. در غیر این صورت آزمایش‌های دیگری انجام می‌گیرد، که یا به کاهش خطای میانگین چندضلعی منجر می‌شود و یا باید فرآیند حداقل نمودن قطع گردد (Vardakos, 2007).

۲-۷-۳-۲ الگوریتم روزنبرک^۱

این روش در رده روش‌های جستجوی مستقیم قرار می‌گیرد. ساده‌ترین روند از این نوع، شامل اجرای حداقل نمودن تابع خطا نسبت به هر متغیر است که طی آن متغیرهای باقی‌مانده ثابت نگه‌داشته می‌شوند. این روش‌ها تنها زمانی کارآمد است که برهم‌کنش اندکی بین متغیرها وجود داشته باشد. تابع خطا تقریباً به موازات یک محور، گودی نشان می‌دهد. این امر مبنای روش روزنبرک را مشخص می‌کند که در آن کاهش خطا بر اساس حرکت در راستای محوری قابل‌تغییر، انجام می‌گیرد و در هر گام سعی می‌شود که جهت کلی فرو رفتگی به دست آمده و اولین محور در گام بعدی در این راستا انتخاب شوند (Gioda and Maier, 1980) و (Vardakos, 2007).

۲-۷-۳-۲ روش پاول^۲

این شیوه روشی جدیدتر و پیشرفته‌تر است که در حالت جستجوی مستقیم از مزایای عملی روش ترکیب گرادیان بهره می‌برد. هنگامی که یک نقطه در فضای متغیرهای آزاد از محدوده‌ای فراتر می‌رود، تابع خطا مقدار بزرگی را به خود می‌گیرد و در نتیجه روش حداقل سازی به‌طور خودکار به مسیر بهینه در ناحیه محتمل باز می‌گردد (Gioda and Maier, 1980) و (Vardakos, 2007).

^۱ Rosenbrock

^۲ Powel

۲-۳-۸ تحلیل برگشتی به روش قطعی^۱ و احتمالاتی^۲

روش‌های قطعی را می‌توان هنگامی که اندازه‌گیری‌ها با دقت بالا صورت گرفته یا هنگامی که ساختار ریاضی روش نسبت به خطای احتمالی که ممکن است داده‌های ورودی را تحت تاثیر قرار دهد پایدار باشد، به کار برد. در مقابل، کاربرد روش‌های احتمالاتی هنگامی است که عدم اطمینان در ثبت اندازه‌گیری‌های صورت گرفته تاثیر قابل توجهی در نتایج محاسبات داشته باشد. از آنجاکه اندازه‌گیری‌های صحرایی به عنوان داده‌های ورودی تحلیل برگشتی محسوب می‌شوند، لذا در حالت کلی این اندازه‌گیری‌ها تحت تاثیر خطاهایی قرار می‌گیرند که وابسته به ماهیت کمیت‌های اندازه‌گیری شده (تغییر مکان، کرنش، فشارهای منفذی)، مشخصات وسیله اندازه‌گیری و شرایط موجود در محل هستند. این خطاها تاثیر انکارناپذیری در نتایج تحلیل برگشتی داشته و گاهی ممکن است منجر به محاسبه مقادیری در تحلیل شوند که تفاوت زیادی با مقادیر واقعی داشته باشند. این تاثیر کاملاً به خصوصیات مسئله و روش به کار رفته در حل آن وابسته است. بنابراین تحلیل برگشتی قابل قبول تنها زمانی انجام می‌شود که اندازه‌گیری‌ها با دقت بالا، توسط ابزاری مناسب در اختیار تحلیل‌گر قرار گیرد. با این وجود در بسیاری از موارد مقادیری در دسترس است که تحت تاثیر عوامل مختلف، دارای خطا هستند. آشکار است که در این حالت تعیین کمی خطاهای ورودی بر دقت پارامترهای محاسبه شده تاثیر قابل توجهی خواهد داشت. در روش‌های تحلیل برگشتی احتمالاتی، امکان در نظر گرفتن خطای اندازه‌گیری‌ها در محاسبات وجود دارد. بیشتر این روش‌ها بر مبنای آمار پیشرفته ایجاد شده‌اند و انجام تحلیل‌های آماری با این روش‌ها معمولاً نیاز به یک متخصص آمار دارد. از جمله این روش‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد (Oreste, 2005).

^۱ Stable

^۲ Probabilistic

۲-۳-۸-۱ روش بیزین^۱

روش بیزین جزء روش‌های آماری به شمار می‌رود که برای اولین بار در سال ۱۹۸۷ در زمینه مهندسی سازه و ژئوتکنیک ارائه شد. جنبه شاخص این روش در آن است که می‌توان اطلاعات اولیه را از پارامترهای مجهول، هم‌زمان با اندازه‌گیری‌های صحرایی به دست آورد. این اطلاعات می‌تواند شامل تخمین‌هایی از پارامترهای مجهول بر اساس قضاوت‌های مهندسی باشند. این امر موجب می‌شود که روند تحلیل برگشتی سیری منطقی را طی کند و طراح اطلاعاتی را که بر اساس تجربه، از مسایل مشابه به دست آورده است در روند تحلیل وارد نماید. در واقع روش تحلیل برگشتی بیزین اطلاعات اولیه و اطلاعات حاصل از اندازه‌گیری‌ها را ترکیب نموده و در به دست آوردن بهترین تخمین از پارامترهای مجهول به کار می‌رود. اگر بتوان حدس اولیه‌ای از پارامترها را فرمول‌بندی نمود، در این صورت می‌توان روش تحلیل برگشتی بیزین را هنگامی که پارامترهای مجهول بیش از تعداد اندازه‌گیری برجا باشد نیز به کار برد (Oreste, 2005).

۲-۳-۸-۲ روش فیلتر کالمن^۲

ابتدا از این روش برای تعیین پارامترهای تحکیم خاک استفاده شد و سپس یک الگوریتم تکرارپذیر برای آن در نظر گرفته شد که با استفاده از آن مدول الاستیسیته تحت شرایط بارگذاری به دست می‌آمد. فیلتر کالمن یک روش قوی است که امکان در نظر گرفتن خطای اطلاعات اولیه در تحلیل برگشتی یا همان خطاهای اندازه‌گیری در آن وجود دارد. حل مسایل دوبعدی کرنش صفحه‌ای با اجزا محدود نوعی از فرمول‌بندی فیلتر کالمن است (Kalman, 1960).

^۱ Bayesian

^۲ Kalman Filter

۹-۳-۲ تحلیل برگشتی مستقیم با به کارگیری روش بهینه‌سازی

یکی از روش‌های مناسب پیشنهاد شده برای تحلیل برگشتی روش جستجو مستقیم^۱ می‌باشد، روش جستجو مستقیم، روش بهینه‌سازی بدون محدودیت می‌باشد (Jeon and Yang, 2004). از میان روش‌های بهینه‌سازی موجود که در روش جستجو مستقیم به کار می‌رود روش تک متغیره، تک متغیره جایگزین و روش جستجوی الگویی می‌باشد. جون و یانگ^۲ (2004) برای دستیابی به مناسب‌ترین الگوریتم تحلیل برگشتی از میان روش‌های بهینه‌سازی، سه الگوریتم از روش‌های جستجوی مستقیم را به کاربردند و نتایج آن‌ها را باهم مقایسه کردند. این نتایج نشان داده است، روش تک متغیره و روش تک متغیره جایگزین می‌توانند با موفقیت مقادیر بهینه‌ی پارامترها را صرف‌نظر از مقادیر اولیه‌ی آن‌ها جستجو کنند، در صورتی‌که روش جستجوی الگویی، در برخی از موارد با موفقیت همراه نیست. روش بهینه‌سازی بر مبنای کمینه کردن تابع خطای زیر که به نام تابع هدف نامیده می‌شود استوار است (Jeon and Yang, 2004) (Vardakos, 2007).

$$Error = \frac{\sum_{k=1}^N [u_k - u_k^*]^2}{\sum_{k=1}^N u_k^*} \quad (۱-۲)$$

در این رابطه u_k و u_k^* به ترتیب مقدار اندازه‌گیری شده و مقدار محاسبه‌شده در نقطه k می‌باشند و N نیز تعداد نقاط اندازه‌گیری است. شکل (۱۰-۲) طرح کلی روش بهینه‌سازی تکرار را نمایش می‌دهد. مقدار اولیه که برای پارامتر مجهول X_i به کار می‌رود، مقداری است که معمولاً برای تحلیل معمولی استفاده می‌شود، سپس تابع هدفی که توسط رابطه (۱-۲) ارائه شد که کنترل می‌شود که آیا به حد مجاز همگرا می‌شود یا خیر؟ در صورتی که تابع هدف به حد مجاز همگرا شود، گام تکرار

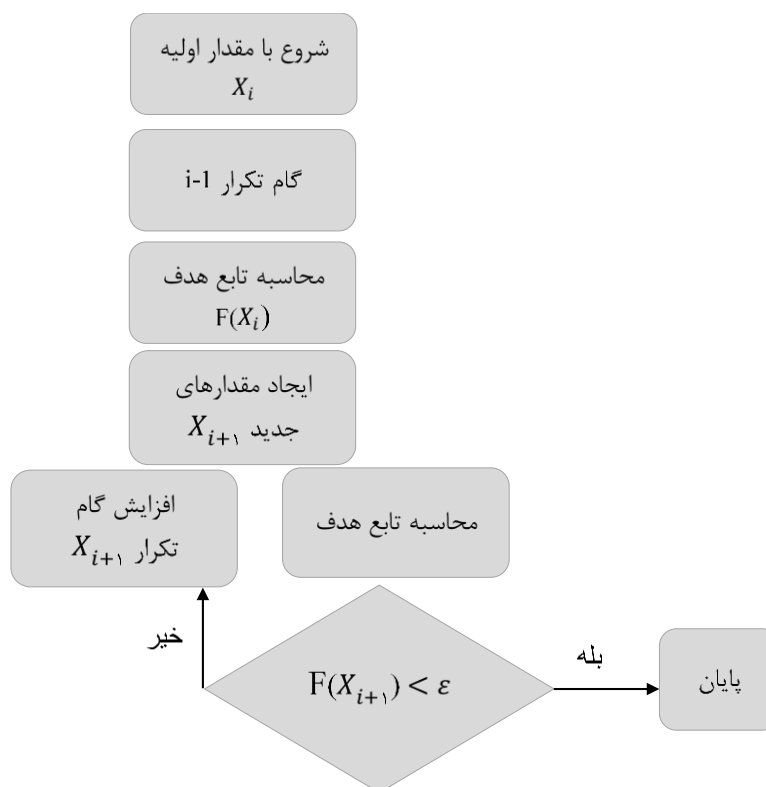
^۱ Direct Search Method

^۲ Joen & Yang

متوقف خواهد شد و در غیر این صورت بعد از اصلاح پارامترها توسط روش بهینه، گام تکرار تا همگرایی شرط مذکور ادامه خواهد یافت. چون و یانگ با مطالعات خود در این زمینه تابع برگشتی برای محاسبه مقدار جدید X_i ، به صورت رابطه (۲-۲) ارائه نمودند.

$$X_{i+1} = X_i + \lambda_i S_i \quad (2-2)$$

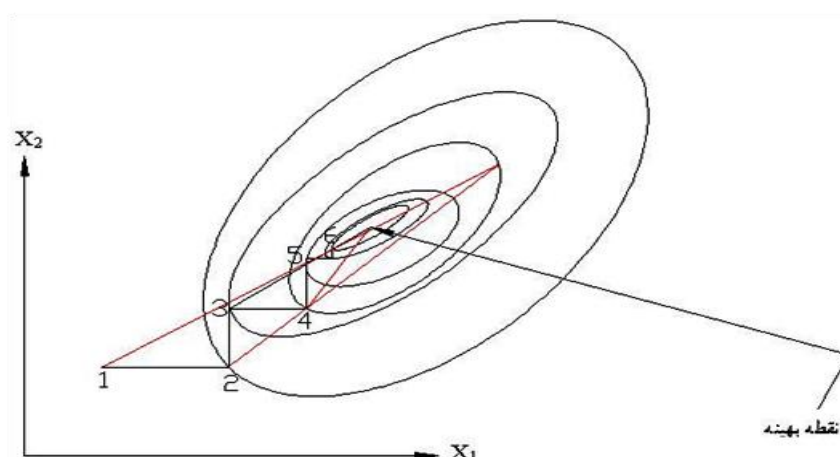
در رابطه بالا، λ_i نسبت بین کمیت (مثلا جابجایی) به دست آمده از مرحله قبلی به کمیت اندازه گیری شده است که به آن طول پله (فاصله گام) می گویند. S_i جهت یا امتداد جستجو است و با توجه به روش مورد استفاده تعیین می شود (Jeon and Yang, 2004).



شکل ۲-۱۰: طرح کلی روش بهینه سازی تکرار (Jeon and Yang, 2004)

۲-۳-۹-۱ روش جستجوی تک متغیره^۱

شکل (۲-۱۱) فرآیند جستجویی را که طی آن نقطه هدف توسط روش جستجوی بهینه به دست می‌آید را نشان می‌دهد. نقاط ۱ و ۲ و ۳ نقاط متوالی هستند که توسط روش تک متغیره به دست آمده‌اند. جستجو برای نقطه بهینه در امتداد موازی با جهات محورهای مختصات می‌باشد. در این روش فقط یک متغیر، تغییر می‌کند و با ایجاد یک سری توالی از تخمین‌های بهبود یافته از آن متغیر، نقطه بهینه را جستجو می‌کند. با شروع کردن از نقطه مرجع X_i در i تکرار و با ثابت نگه‌داشتن $n-1$ متغیر، مقدار متغیر آغازین تغییر می‌کند. بنابراین در هر مرحله از تغییر یک مقدار جدیدی برای X_{i+1} حاصل می‌شود. این جستجو در جهت جدید ادامه پیدا می‌کند. این جهت جدید با تغییر دادن هر یک $n-1$ متغیری که در تکرار قبلی ثابت شده بودند به دست می‌آید. روند جستجو با در نظر گرفتن یک به یک هر یک از جهات‌ها ادامه پیدا می‌نماید. بعد از این که همه n جهت جستجو شدند، اولین چرخه کامل شده است. بنابراین تمام فرآیند بهینه‌سازی متوالی تکرار شده است. این روند تا زمانی که تابع هدف به مقدار حدی نزدیک شود ادامه پیدا می‌نماید. در واقع می‌توان گفت که سعی در کمینه نمودن تابع خطا در امتداد یکی از مولفه‌های اصلی را دارد (Jeon and Yang, 2004) (Vardakos, 2007).



شکل ۲-۱۱: فرآیند جستجوی نقطه بهینه با استفاده از الگوریتم تک متغیره (Jeon and Yang, 2004)

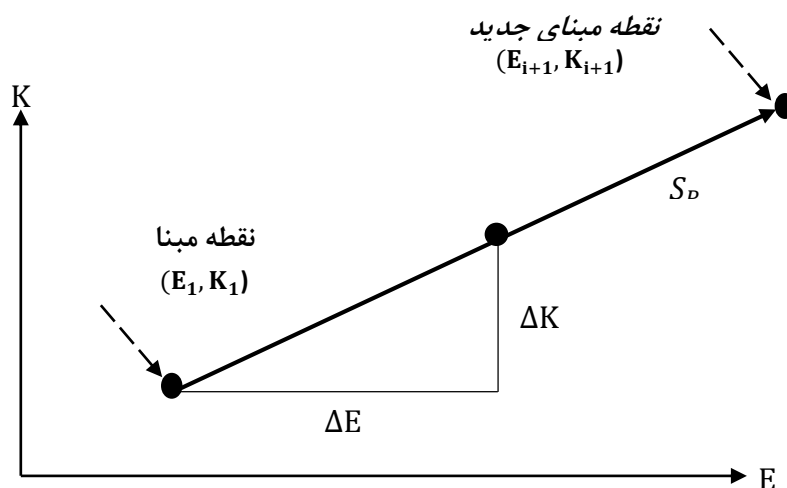
^۱ Univariate Method

۲-۹-۳-۲ روش جستجوی الگویی^۱

روش جستجوی الگویی به عبارت گسترده‌تر همان روش تک متغیره است. در این روش یک پارامتر به صورت تک متغیره، π مرتبه تکرار می‌شود. سپس جستجو کردن نقطه‌ی بهینه موردنظر در امتداد جهت S_p با رابطه زیر به دست می‌آید.

$$S_p = X_i - X_{i-n} \quad (۲-۳)$$

در رابطه بالا مقدار X_i نقطه به دست آمده پس از پایان یک مرحله از انجام روش تک متغیره است و X_{i-n} مقدار متغیر پیش از انجام تحلیل برگشتی است. جهتی که توسط رابطه (۲-۳) تعریف شده است به عنوان جهت الگو نامیده می‌شود. شکل (۲-۱۲) طرح اولیه از روش جستجوی الگویی را با این فرض که هدف، جستجوی مقدار مدول الاستیسیته (E) و نسبت تنش افقی به قائم (K) باشد را با این الگوریتم نشان می‌دهد (Jeon and Yang, 2004).



شکل ۲-۱۲: طرح اولیه از روش جستجوی الگویی (Jeon and Yang, 2004)

^۱ Pattern Search Method

۳-۹-۳-۲ روش جستجوی تک متغیره متناوب^۱ (جایگزین)

روش تک متغیره متناوب (جایگزین) یک روش پیشرفته‌تر است. در واقع می‌توان گفت که این روش مانند روش تک متغیره است با این تفاوت که در زمان واحد چند پارامتر مجهول می‌توانند تغییر کنند. روش این الگوریتم به این صورت است که n گام تک متغیره و n متغیر به‌طور هم‌زمان با یکدیگر تغییر می‌کنند و سپس نتایج حاصل از تغییر پارامترها بررسی می‌شود و این روند تا زمانی که تابع هدف به مقدار حد مجاز همگرا شود ادامه پیدا می‌کند (Jeon and Yang, 2004).

۴-۹-۳-۲ بهینه‌سازی با روش حداقل مربعات^۲

اساس این روش مبتنی بر حداقل نمودن تفاوت موجود بین اندازه‌گیری صحرائی و محاسبه شده از مدل عددی است. در عمل می‌توان تابع خطای $\mathcal{E}$ را برای توصیف تفاوت ذکر شده طبق رابطه (۴-۲) به کار برد.

$$\mathcal{E} = \sum_{i=1}^n (U_{mi} - U_{pi})^2 \quad (4-2)$$

که U_{mi} مقادیر اندازه‌گیری شده و U_{pi} مقادیر پیش‌بینی شده از مدل عددی هستند. واضح است که می‌توان این تعریف را به شکل‌های دیگری مانند قدر مطلق تفاضل حداکثر در رابطه (۴-۲) بیان نمود. در این رابطه تابع خطا وابسته به مقدار U_{pi} حاصل از مدل عددی خواهد بود و مقادیر U_{pi} بستگی به پارامترهای (P) دارد که می‌بایستی از تحلیل برگشتی محاسبه شوند. در نتیجه تحلیل برگشتی برای تعیین مجموعه‌ای از پارامترهای (P) جهت حداقل نمودن خطای $\mathcal{E}$ یا به بیان دیگر تعیین مجموعه‌ای از پارامترها که به ازای آن‌ها مدل عددی بهترین تقریب را از سیستم واقعی نتیجه دهد انجام می‌گیرد.

^۱ Alternative Univariate Method

^۲ Least Squares Method

در حالت کلی خطای به دست آمده توسط رابطه (۲-۴) تابعی غیرخطی و پیچیده از پارامترهای مجهول می‌باشد و روشی تحلیلی برای آن نمی‌توان بیان نمود. بنابراین الگوریتم حداقل این رابطه بایستی با توابع غیرخطی همخوانی داشته باشد و نیازی به ارزیابی تحلیلی گرادیان تابع نداشته باشد. این الگوریتم‌ها روش‌هایی تکراری‌اند که فرآیند حداقل نمودن را تنها با تخمین‌های متوالی تابع خطا انجام می‌دهند (Oreste, 2005).

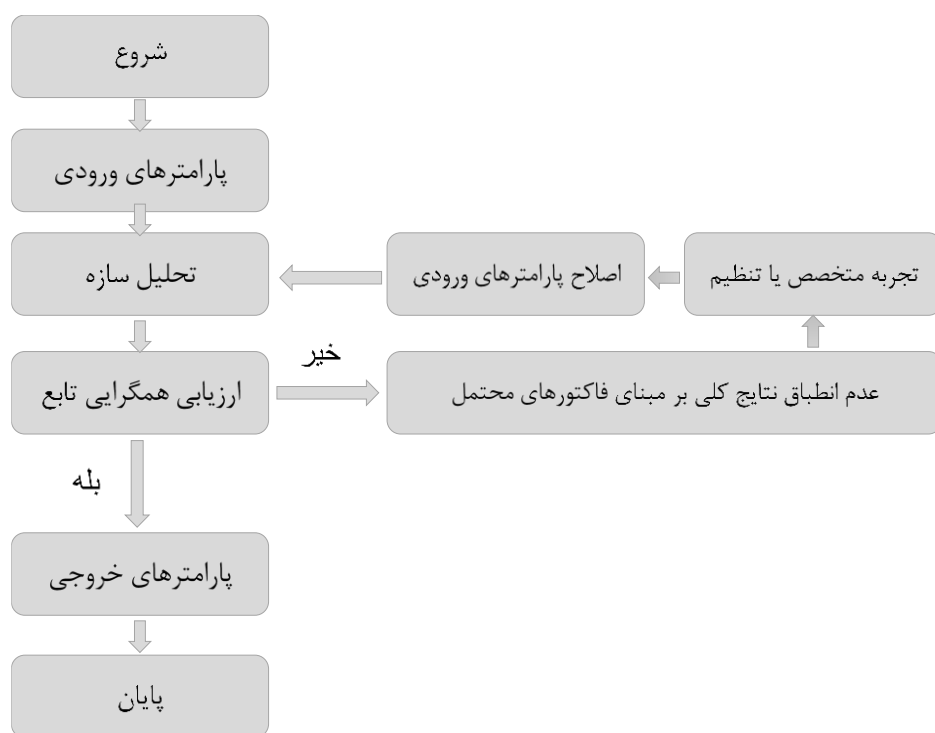
۲-۳-۱۰ تحلیل برگشتی هوشمند^۱

این روش از سال ۱۹۹۱ با کارهایی که لی و هائو در زمینه هوش مصنوعی انجام داده‌اند به وجود آمده است. این روش با به کار بردن روش اجزا مرزی یک روش تحلیلی برگشتی مستقیم بر مبنای آزمون و خطا و تحت نظر دانش متخصص بر مبنای تحلیل‌های مکانیکی می‌باشد. این روش شامل شیوه‌های مختلفی است که از پرکاربردترین برنامه‌هایی که در تحلیل برگشتی هوشمند وجود دارد شکل گرفته است. در این مورد می‌توان به برنامه کامپیوتری BMP90 اشاره نمود. این برنامه از روش تحلیلی بر مبنای موارد مشابه (PTA) استفاده می‌نماید. روش تحلیل بر مبنای مشابه برای مواردی که اطلاعات کاملی از پروژه‌های تونل سازی که در گذشته انجام شده است در دسترس باشد و اطلاعات آن با دقت بالا جمع‌آوری و نگهداری شده باشد، به کار می‌رود (Li et al., 2006).

اصول روش تحلیل برگشتی هوشمند شامل یک زیر برنامه کامپیوتری برای کنترل زیر برنامه کامپیوتری دیگر که شامل روش تحلیل عددی برای پردازش داده‌ها و پس‌خوراند داده‌های جدید است، می‌شود. این روش نیازمند دانش متخصص و قوانین حاکم بر خصوصیات ژئومکانیکی می‌باشد، و درنهایت این که طی دو فرآیند ذکر شده منجر به محاسبه جابه‌جایی در نقاط رفتار سنجی و مطابقت تدریجی آن با داده‌های ثبت شده و نزدیک‌تر شدن این دو پارامتر، یعنی داده‌های به دست آمده از تحلیلی برگشتی و داده‌های ثبت شده از ابزار رفتار نگاری می‌شود. می‌توان گفت که تحلیل برگشتی

^۱ Intelligent Back Analysis

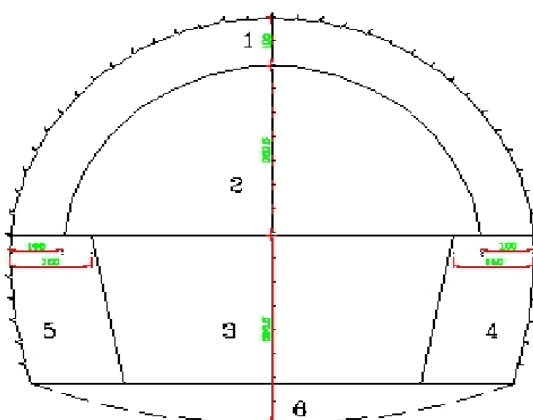
در این روش، نه تنها بستگی به تحلیل‌های مکانیک سنگی دارد، بلکه وابستگی شدیدی به تجربه متخصص نیز دارد. به عبارت دیگر تحلیل‌های مکانیک سنگ و روش هوش مصنوعی با استفاده از برنامه BMP90 ادغام شده‌اند. شکل (۲-۱۳) روند این برنامه را نشان می‌دهد. لازمه استفاده از روش تحلیل برگشتی هوشمند این است که باید داده‌های بسیاری از مکان‌های مختلف در اختیار مهندس طراح باشد تا بتواند تحلیل برگشتی مناسب را بین مشاهدات انجام شده در محل با مشاهداتی که در موارد مشابه انجام شده، از قبیل وضعیت زمینی که قرار است در آن فعالیت آغاز شود، وضعیت سیستم نگهداری موجود با سیستم‌های نگهداری مشابه، ابزارهای استفاده شده و مواردی از قبیل حفر و غیره در اختیار داشته باشد. در صورتی که این ابزار فراهم شود و بتوان موارد مشابه بسیاری را با مدل مورد نظر تطبیق داد، در آن صورت مزیت این روش طبق نظر شیپویی لی که این روش را با سایر روش‌های تحلیلی برگشتی مقایسه نموده است، شامل استفاده سریع و هوشمند، قابل اعتماد بودن و قابلیت استفاده در مدت دوره رفتارسنجی می‌باشد (Li et al., 2006).



شکل ۲-۱۳: روند برنامه در روش تحلیل برگشتی هوشمند (Li et al., 2006)

۴-۲ مطالعه موردی: تخمین پارامترهای مقاومتی در تونل متروی قم

پروژه خط A متروی قم با طولی حدود ۱۴ کیلومتر از محله قلعه کامکار در تقاطع کمربندی آغاز شده و با عبور از خیابان قلعه کامکار و همچنین عبور از ۱۴ ایستگاه و میدان مهم به نام‌های A₁ تا A₁₄ ، در نهایت به میدان ولیعصر می‌رسد. برای حفاری و اجرای مقطع تونل طبق بررسی و تحلیل‌های انجام شده و همچنین ابعاد مقطع و مشخصات خاک در برگزیده تونل متروی قم، دو روش حفاری دیافراگمی میانی^۱ و روش برش حلقه‌ای^۲ پیشنهاد شد که به دلیل سهولت عملیات اجرایی و راندمان بالاتر از روش برش حلقه‌ای برای حفاری استفاده شد. حفاری در دو مرحله به صورت بخش فوقانی و تحتانی اجرا شده است که در شکل (۱۴-۲) به صورت شماتیک نشان داده شده است. بخش ۱ و ۲ در شکل (۱۴-۲) مربوط به حفاری بخش فوقانی و بخش ۳، ۴، ۵ و ۶ مربوط به حفاری بخش تحتانی می‌باشد. برای نگهداری تونل در بخش فوقانی از مش و شاتکریت و نصب شبکه میلگرد استفاده شد و همچنین برای نگهداری بخش تحتانی تونل از نصب و اجرای مش، لتیس و شاتکریت استفاده شد. ابعاد تونل با مقطع نشان داده شده در شکل (۱۴-۲) دارای عرض ۹ متر و ارتفاع ۸/۴۳ متر تشکیل شده است (قاسم‌زاده، ۱۳۹۲).



شکل ۱۴-۲: مقطع عرضی تونل متروی قم و ترتیب حفاری بخش‌های مختلف آن (قاسم‌زاده، ۱۳۹۲)

^۱ Central Diaphragm

^۲ Top Heading and Bench With Ring Cut Method

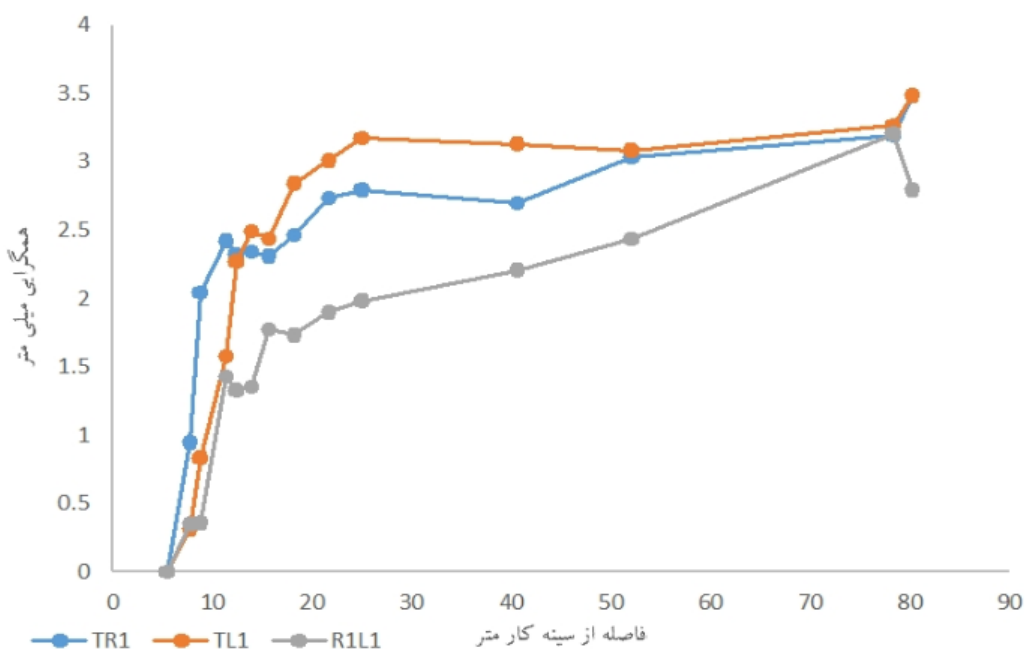
به‌طور کلی مسیر خط A متروی قم در میان نهشته‌های آبرفتی جانمایی شده است و همچنین از دیدگاه زمین ساختاری محدوده مورد مطالعه در زون ایران مرکزی جای گرفته است. تعداد ۱۸ گمانه و ۹ چاهک بر روی مسیر خط A متروی قم حفر شده و در این گمانه و چاهک‌ها آزمایش‌های صحرایی، نمونه‌برداری و آزمایش‌های آزمایشگاهی انجام شده است. با توجه به نتایج مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی، لایه‌های خاک دربرگیرنده مسیر تونل به چهار گونه زمین‌شناسی مهندسی یا واحدهای خاکی تفکیک شده‌اند که این واحدها در جدول (۲-۳) معرفی شده است. یکی از مهم‌ترین فاکتورهای موثر در تونل‌سازی در زمین‌های سست و خاکی، درصد ذرات ریزدانه (رد شده از الک ۲۰۰) و حدود استحکام خاک می‌باشد، در این پروژه نیز اولویت اول به منظور تفکیک واحدهای خاکی، درصد رد شده از الک ۲۰۰ به عنوان مبنا قرار گرفته است.

جدول ۲-۲: مشخصات واحدهای خاکی در برگیرنده مسیر تونل (قاسم‌زاده، ۱۳۹۲)

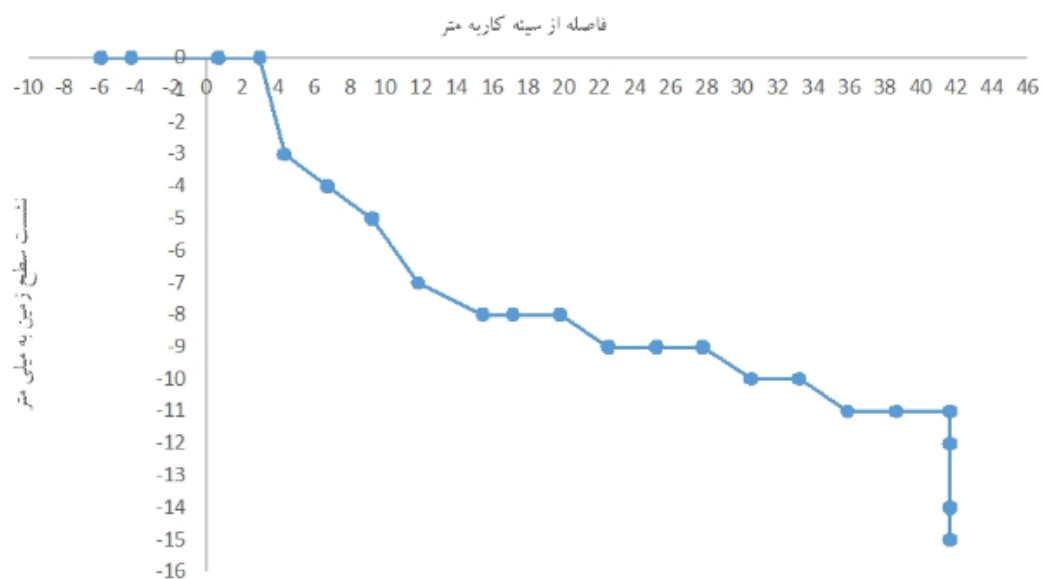
واحد های خاکی	توصیف ژئوتکنیکی	معیار تفکیک واحدهای خاکی	
Qc-1	گراول ماسه‌ای و ماسه گراولی	(۵-۲۰)٪	-
Qc-2	ماسه سیلت و رس دار زیاد با گراول	(۳۵-۶۰)٪	-
Qf-1	سیلت رسی با ماسه ریز	٪۶۰ >	$PI < 7$
Qf-2	رس سیلتی با ماسه	٪۶۰ >	$PI > 7$

در این پژوهش پارامترهای ژئوتکنیکی خاک با روش تحلیل برگشتی مستقیم و استفاده از الگوریتم تک متغیره بر پایه داده‌های ابزار دقیق برای این تونل برآورد شده است. در این تحقیق از اطلاعات حاصل از ابزار همگرایی سنج و نشست سنج استفاده شده است. این تونل شامل چندین ایستگاه همگرایی سنج و نشست سنجی بوده که به عنوان نمونه در شکل (۲-۱۵) نمودار جابجایی تونل نسبت به فاصله از سینه کار در ایستگاه همگرایی سنج واقع در کیلومتر ۲۱۰+۰۰ و در شکل (۲-۱۶)

نمودار میزان نشست سطح زمین نسبت به فاصله از سینه کار در ایستگاه نشست سنجی واقع در کیلومتر ۵۶۵+۰۰ نشان داده شده است.



شکل ۲- ۱۵: نمودار جابه‌جایی‌های سقف و دیواره تونل در ایستگاه همگرایی سنج واقع در کیلومتر ۲۱۰+۰۰

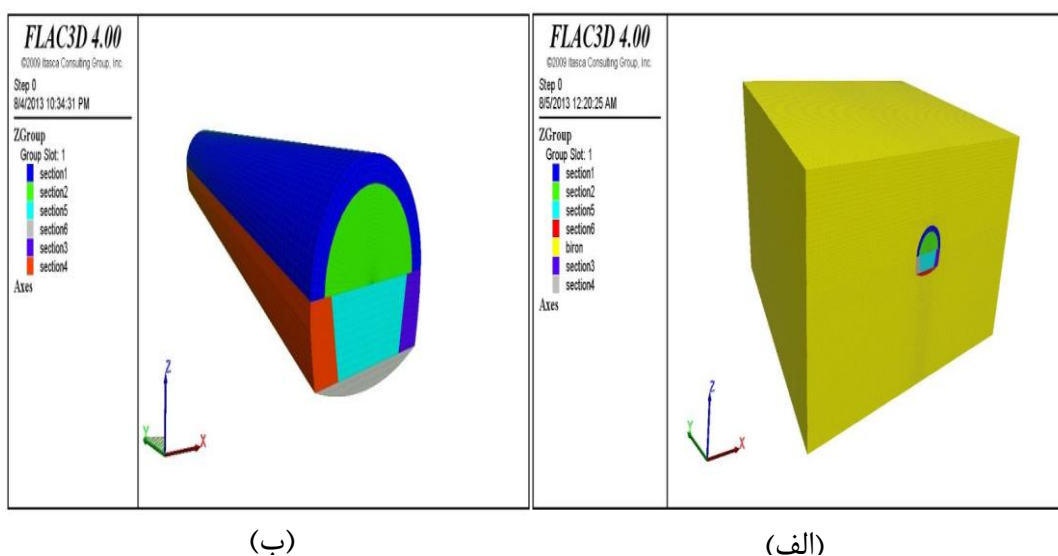


شکل ۲- ۱۶: میزان نشست سطح زمین با فاصله از سینه کار در ایستگاه نشست سنجی در کیلومتر ۵۶۵+۰۰

به‌طوری‌که در شکل (۲-۱۵) منظور از نمودار با نماد اختصاری TR، همگرایی بین سقف و دیواره‌ی سمت راست تونل، نمودار با نماد TL یعنی همگرایی بین سقف دیواره سمت چپ و نمودار با نماد RL منظور همگرایی بین دیواره‌های سمت چپ و راست تونل است.

در ضمن در بین ایستگاه‌های همگرایی سنجی، ایستگاه ۰+۲۱۰ برای تحلیل برگشتی پارامترهای مقاومتی انتخاب شده است. این مقطع در فاصله ۲۱ متری از دهانه تونل قرار گرفته است. مدل عددی دقیقاً مشابه شرایط واقعی زمین ساخته شد و نقاط کنترلی جابجایی، مطابق با شرایط منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شده است.

در این تحقیق با توجه به این‌که محیط پیرامون سازه خاکی می‌باشد، در نتیجه محیط آن پیوسته در نظر گرفته شده است. پس باید برای مدل‌سازی تونل از نرم‌افزاری که قابلیت تحلیل در محیط‌های پیوسته را داشته باشد استفاده شود که برای مدل‌سازی تونل متروی قم از نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ که یکی از نرم‌افزارهای تفاضل محدود برای تحلیل تغییر شکل‌ها و پایداری در پروژه‌های ژئوتکنیکی است، استفاده شده است. در شکل (۲-۱۷) دو نمونه از مدل‌های ساخته شده برای نشان دادن ابعاد، هندسه مدل و بخش‌های حفاری در ایستگاه مذکور نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۷: الف) ابعاد و هندسه تونل مدل‌سازی شده، ب) هندسه تمام مقطع با بخش‌های حفاری

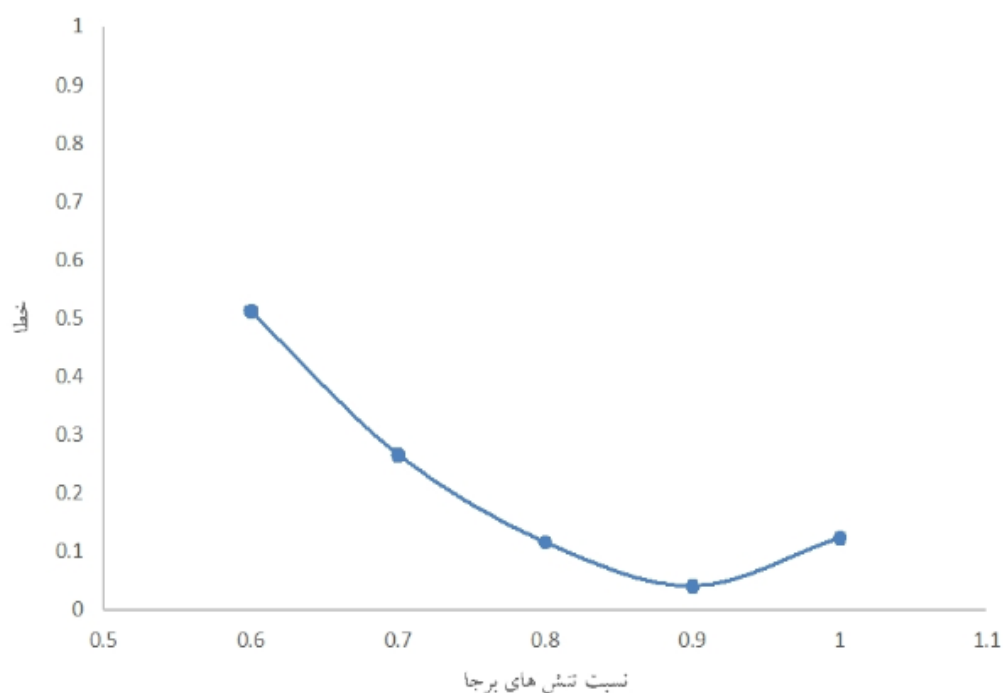
در این پژوهش ابتدا پارامترهای معلوم و مجهول انتخاب شدند و سپس به تحلیل حساسیت پارامترهای مقاومتی مجهول پرداخته شد که بر اساس چهار پارامتر مدول الاستیسیته (E)، نسبت تنش‌های برجا (K)، زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) و چسبندگی (C) انجام شد. در جدول (۲-۴) محدوده هر یک از این پارامترها برای انجام کار تحلیل برگشتی با توجه به تحلیل انجام شده آورده شده است.

جدول ۲-۳: محدوده پارامترهای مجهول برای کار تحلیل برگشتی (قاسم‌زاده، ۱۳۹۲)

پارامترهای مجهول	حداقل	حداکثر	میانگین
مدول تغییرشکل پذیری (MPa)	۱۰	۱۰۰	۵۰
چسبندگی (KPa)	۱۰	۱۰۰	۵۰
زاویه اصطکاک داخلی (Deg)	۱۵	۴۵	۳۰
نسبت تنش‌های برجا (K)	۰/۱	۱	۰/۵

همان‌طور که گفته شد برای تحلیل برگشتی نتایج قرائت‌های انجام شده در تونل متروی قم از روش تحلیل برگشتی مستقیم و الگوریتم جستجوی تک متغیره مقادیر پارامترهای بهینه را جستجو می‌کنند و این تکنیک بهینه‌سازی بر مبنای کمینه کردن تابع خطا می‌باشد. با تغییر پارامترها از مقدار میانگین آن‌ها تحلیل برگشتی شروع و به ازای هر بار تغییر میزان همگرایی از نرم‌افزار به دست می‌آید و سپس با استفاده از تابع خطا میزان خطا ناشی از مقایسه نتایج همگرایی ابزار با نتایج همگرایی نرم‌افزار محاسبه شده است. به‌عنوان نمونه در شکل (۲-۱۸) نمودار میزان خطا با توجه به تغییرات پارامتر نسبت تنش‌های برجا نشان داده شده است، که در این جا کمترین میزان خطا برای نسبت

تنش‌های برجا در مقدار ۰/۹ اتفاق افتاده است.



شکل ۲-۱۸: نمودار خطای محاسبه شده با تغییرات نسبت تنش‌های برجا (قاسم‌زاده، ۱۳۹۲)

در نهایت با مقایسه جابجایی‌های اندازه‌گیری شده توسط همگرایی سنج‌ها و جابجایی‌های محاسبه شده از روش عددی و با به حداقل رساندن تابع خطا و رسیدن به نقطه بهینه، پارامترهای ژئوتکنیکی با استفاده از الگوریتم تک متغیره، برای تونل خط A متروی قم در ایستگاه مذکور به دست آمده است. چنان که با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۲-۵) مشخص است، میزان خطا به ازای مرحله پنجم تحلیل برگشتی به حداقل رسیده و در نتیجه این مرحله شامل پارامترهای بهینه مورد نظر می‌باشد (قاسم‌زاده، ۱۳۹۲).

جدول ۲-۴: پارامترهای به دست آمده از روش الگوریتم تک متغیره مستقیم (قاسم‌زاده، ۱۳۹۲)

مرحله	مدول الاستیسیته (MPa)	نسبت تنش‌ها	چسبندگی (KPa)	زاویه اصطکاک داخلی (Deg)	درصد خطا
۱	۲۵	۰/۸	۳۰	۳۰	۱۱/۷
۲	۲۵	۰/۹	۳۰	۳۰	۴
۳	۲۵	۱	۳۰	۳۰	۱۲/۴
۴	۲۵	۰/۸	۳۰	۲۵	۱/۲
۵	۲۵	۰/۸	۲۰	۳۰	۰/۵
۶	۲۵	۰/۸	۱۰	۳۰	۱۷

فصل سوم

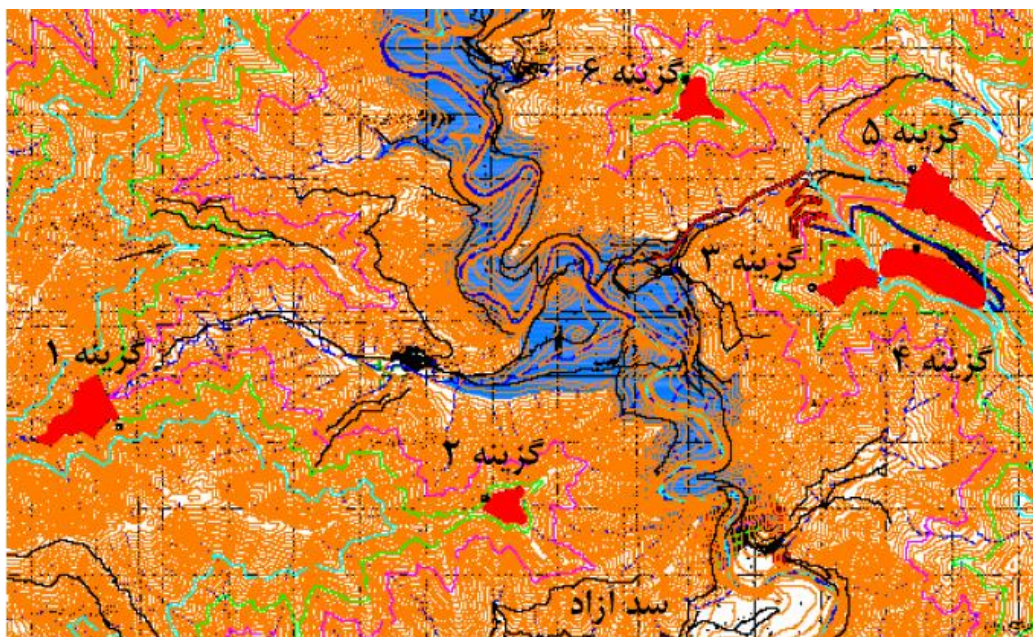
معرفی ساختمان و مطالعات زمین شناسی و آزمایشگاهی

در مسیر پروژه

۱-۳ معرفی ساختگاه پروژه

۱-۱-۳ مقدمه

هدف از مطالعات طرح نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد، بررسی امکان احداث سیستم نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای در محدوده سد مخزنی آزاد و ارزیابی پتانسیل تولید انرژی برقی در این سیستم بوده است. شروع مطالعات مرحله اول در خصوص انتخاب گزینه‌های مختلف احداث نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آغاز شد. در مطالعات مرحله شناخت که توسط شرکت مهندسين مشاور مهتاب قدس تهیه شد، شش گزینه مختلف مورد بررسی قرار گرفت که دو گزینه در ساحل راست سد مخزنی آزاد و چهار گزینه در ساحل چپ جانمایی شده بودند. شکل (۱-۳) موقعیت گزینه‌های پیشنهادی را نشان می‌دهد.



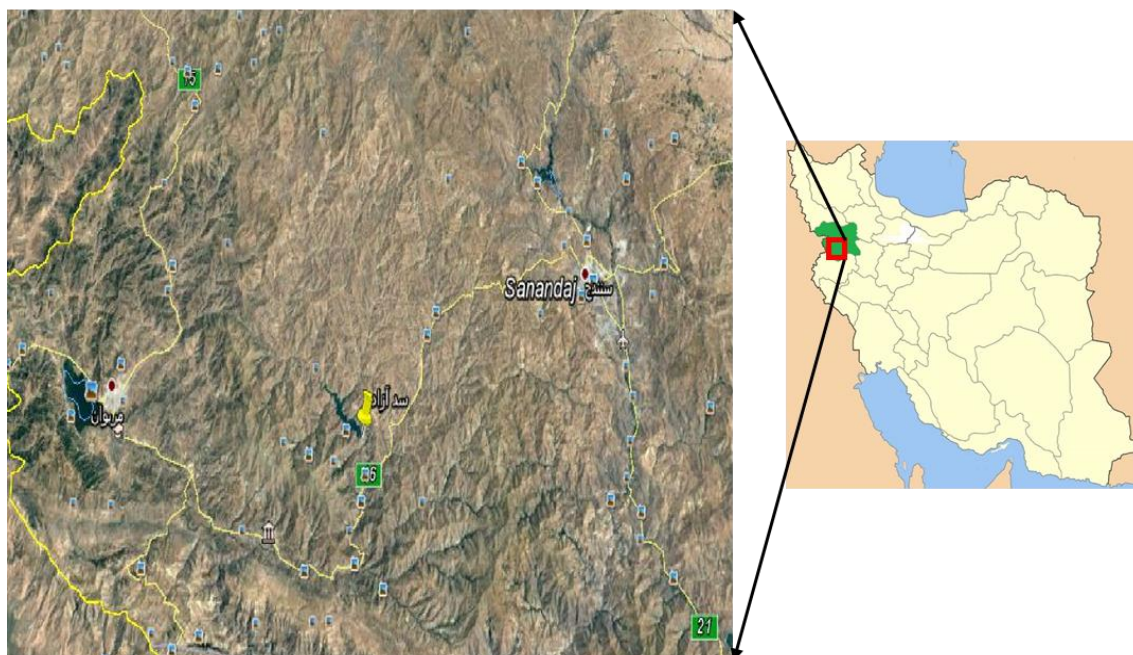
شکل ۱-۳: موقعیت گزینه‌های پیشنهادی برای محل احداث نیروگاه برقی (شرکت مهتاب قدس، ۱۳۹۱)

پس از انجام مطالعات مرحله شناخت و با در نظر گرفتن محدودیت‌های اجرایی در ارتباط با تامین منابع قرضه سد مخزنی آزاد و با توجه به وضعیت سنگ‌شناسی گزینه‌های پیشنهادی مختلف، گزینه ۴ به‌عنوان گزینه برتر انتخاب شد. با توجه به موقعیت قرارگیری این طرح برنامه مطالعات اکتشافی با در

نظر گرفتن موارد فنی و محدودیت‌های زمانی تهیه شد. لذا بر اساس نقشه‌های پایه موجود در زمان شروع پروژه (نقشه‌های توپوگرافی به مقیاس ۱:۵۰۰۰) موقعیت گمانه‌ها تعیین و جهت انجام حفاری‌های اکتشافی به طرح اعلام شد. این حفاری‌ها شامل ۶۰۰ متر حفاری در محدوده مخزن و ۷۹۰ متر حفاری در مسیر سازه و تونل آب بر نیروگاه، در دستور کار مطالعات قرار گرفته شد (شرکت مهندسين مشاور مه‌اب قدس، ۱۳۹۱).

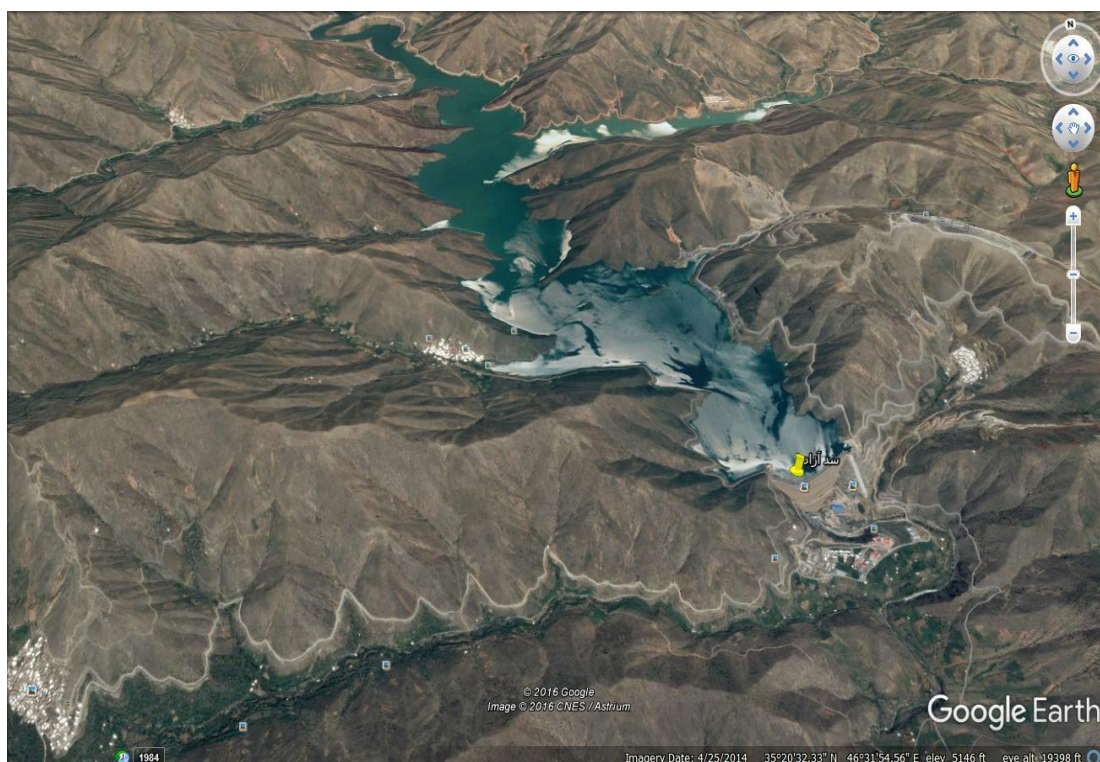
۲-۱-۳ موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی

سد مخزنی آزاد، در استان کردستان و بر روی رودخانه کوماسی (چم گوره) از سرشاخه‌های مهم رودخانه سیروان و در مجاورت روستای بنیدر احداث شده است. دسترسی به محل سد از طریق جاده اصلی سنندج به مریوان (۷۵ کیلومتر از سنندج) و پس از آن ۶ کیلومتر جاده اختصاصی روستای بنیدر صورت می‌گیرد. شکل (۲-۳) موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به سد مخزنی آزاد را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳: موقعیت جغرافیایی و راه دسترسی به محدوده سد آزاد (شرکت مهندسين مشاور مه‌اب قدس، ۱۳۹۱)

همان‌طور که از قبل هم اشاره شده محدوده طرح از نظر موقعیت جغرافیایی در فاصله بین $34^{\circ},45',00''$ تا $35^{\circ},46',00''$ عرض شمالی و $46^{\circ},05',00''$ تا $48^{\circ},00',00''$ طول شرقی قرار دارد. شکل (۳-۳) عکس ماهواره‌ای محدوده سد مخزنی آزاد را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۳: تصویر ماهواره‌ای از محدوده طرح سد آزاد (شرکت مهندسی مشاور مه‌آب قدس، ۱۳۹۱)

۳-۲ زمین‌شناسی عمومی

محدوده موردنظر در زون سنندج - سیرجان واقع شده است. این زون (پهنه) به صورت یک نوار دگرگون شده در امتداد و به موازات روراندگی زاگرس از ارومیه و سنندج در شمال غربی تا سیرجان و اسفندقه در جنوب شرقی کشیده شده است. مشخصات رسوب‌گذاری در این پهنه مانند پهنه ایران مرکزی است، ولی جهت و امتداد کلی آن از امتداد کلی زاگرس پیروی می‌کند. زون سنندج - سیرجان

را می‌توان از ناحیه گلپایگان به دو بخش شمالی و جنوبی تقسیم‌بندی نمود که منطقه مورد مطالعه در واحد شمالی این پهنه واقع شده است. به‌طور کلی پهنه سنندج - سیرجان جزو ناآرام‌ترین پهنه‌های ایران شناخته شده است. در این پهنه سنگ‌های دگرگونه زیاد دیده می‌شود که رخنمون اصلی آن‌ها در ناحیه‌های اسفندقه، حاجی‌آباد، اقلید، آباد، اصفهان، گلپایگان، همدان و مریوان می‌باشد. این زون تا سنوزوئیک فازهای دگرگونی و ماگماتیسم مهمی را پشت سر گذاشته است. بنابراین، می‌توان آن را یک کمربند دگرگونه نیز به شمار آورد که در تریاس پسین (فاز کوهزایی سیمیرین پیشین) شکل گرفته است (درویش زاده، ۱۳۸۹).

سنگ‌های چین‌خورده و دگرگون شده ناشی از کوهزایی سیمیرین پیشین، به وسیله ماسه‌سنگ و شیل تریاس فوقانی به‌طور دگرشیب پوشیده شده است. در این پهنه، دگرشیبی اصلی دوران مزوزوئیک و ترشیر، نظیر آنچه در ایران مرکزی و البرز شناخته شده است دیده می‌شود. سیستم شکستگی‌ها و گسل‌های آن که به حرکات کوهزایی سیمیرین نسبت داده می‌شود، مانند ایران مرکزی بوده و جهت زاگرس را قطع می‌نماید و دگرگونی شدید سیمیرین در اواخر ژوراسیک، به‌ویژه در بخش شمالی پهنه سنندج - سیرجان مشاهده شده است. سنگ‌های کربناته کرتاسه زیرین که توسط یک کنگلومرای قاعده‌ای به‌طور دگرشیب بر روی سنگ‌های قدیمی‌تر شرق تراست زاگرس قرار دارند، حاکی از آن است که بخش‌هایی از بلوک سنندج - سیرجان تقریباً طی ۳۵ میلیون سال (ژوراسیک پایانی - کرتاسه زیرین) خارج از آب باقی‌مانده است (درویش زاده، ۱۳۸۹).

۳-۳ زمین‌شناسی مهندسی

شیب توپوگرافی در مسیر تونل‌های دسترسی به مغار نیروگاه در حدود ۴۰-۵۰ درجه است. دره‌های موجود در مسیر تونل عموماً V شکل‌اند که در مناطق پست عریض‌تر می‌شوند. بلندترین ارتفاعات این محدوده، ارتفاعی در حدود ۱۹۰۰ متر از سطح دریاهای آزاد دارند.

توده سنگ‌های محدوده طرح سد آزاد از دیدگاه چینه‌شناسی عمدتاً از واحدهای ماسه‌سنگ کمی دگرگون شده، ماسه‌سنگ دگرگون شده و شیست، واحد شیستی و ماسه‌سنگ کمی دگرگون شده، فیلیت و ماسه‌سنگ کمی دگرگون شده، میان لایه‌های پراکنده شیست و فیلیت و شیل و آهک شیلی تشکیل شده است. در ادامه به اختصار واحدهای چینه‌شناسی گستره طرح شرح داده می‌شود (شرکت مهندسين مشاور مه‌اب قدس، ۱۳۹۱):

- واحد K^{ss} : شامل لایه‌بندی‌های ضخیم از ماسه‌سنگ‌های دگرگون شده خاکستری تا قهوه‌ای دانه‌درشت با بخش‌هایی از شیست می‌باشد.
- واحد K^{ss-sh} : شامل ترکیبی از ماسه‌سنگ دگرگون شده، شیست و فیلیت همراه با مقدار بیشتری از لایه‌های نازک ماسه‌سنگ دگرگون شده می‌باشد.
- واحد K^{sh-ss} : شامل ترکیبی از شیست، کلسیت فیلیت و ماسه‌سنگ دگرگون شده همراه با مقدار بیشتری از میان لایه‌های نازک خاکستری تا سبز از شیست هستند.
- واحد K^{ph-ss} : شامل ترکیبی از فیلیت‌های متورق سبز تا قهوه‌ای همراه با میان لایه‌هایی نازک از ماسه‌سنگ دگرگون شده هستند.
- واحد K^{ph-ss} : شامل ترکیبی از کلسیت - شیست و کلسیت - فیلیت می‌باشد.
- واحد K^{li} : شامل سنگ آهک دگرگون شده خاکستری تا سبز همراه با شیستوزیته سنگ آهک می‌باشد.
- واحد K^{li-sh} : شامل تناوبی از شیست خاکستری و سنگ آهک دگرگون شده قرمز تا سبز می‌باشد.

به‌عنوان نمونه در شکل‌های (۳-۴) و (۳-۵)، از محدوده طرح سد آزاد به ترتیب تصاویری از واحدهای ماسه‌سنگ دگرگون شده با میان لایه‌های شیست و سنگ آهک شیلی دگرگون شده نشان داده شده است.



شکل ۳-۴: نمایی از تناوب ماسه‌سنگ‌ها و شیست (شرکت مهندسين مشاور مه‌اب قدس، ۱۳۹۱)



شکل ۳-۵: نمایی از لایه‌های آهک شیلی سبز رنگ دگرگونه (شرکت مهندسين مشاور مه‌اب قدس، ۱۳۹۱)

۳-۳-۱ گسل‌های محدوده ساختگاه

محدوده نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد تحت تاثیر فازهای کوهزایی و عملکرد تکتونیکی منطقه، دچار گسلش‌هایی شده است که شاخه‌هایی از مسیر تونل‌های دسترسی و محدوده‌های مخزن سد عبور می‌نمایند. بر اساس مطالعات انجام شده و بررسی تصاویر ماهواره‌ای و کنترل صحرایی، گسل‌های موجود در محدوده سد شناسایی شده‌اند. در مجموع ۱۰ گسل در محدوده مورد مطالعه (شامل مخزن بالادست و مسیر تونل‌ها و سازه‌ها) بر اساس مشاهدات صحرایی و بر مبنای تفاسیر داده‌های ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی شناسایی شده است. برخی از گسل‌ها در بررسی‌های صحرایی جزء گسل‌های فرعی شناسایی شده‌اند که تاثیری در اجرای سازه تونل و محدوده مخزن سد نخواهند داشت و از این رو از توصیف آن‌ها صرف نظر شده است.

این گسل‌ها به نام‌های F1 تا F10 در نقشه‌های زمین‌شناسی ترسیم شده‌اند. راستای گسل‌های F1، F2 و F4 در جهت شمال غرب - جنوب شرق امتداد یافته‌اند و امتداد سایر گسل‌ها شمال شرق - جنوب غرب است. در مسیر تونل‌های دسترسی به مغار نیروگاه تنها گسل‌های F2 و F5 قرار می‌گیرند. این گسل‌ها دارای زون خردشده محدود (حداکثر یک متر) بوده و اغلب توسط نهشته‌های واریزه‌ای پوشیده شده‌اند. امتداد خطی این گسل‌ها تأثیراتی بر زمین ریخت‌شناسی منطقه طرح گذارده و باعث ایجاد پیچ و خم‌هایی در راستای رودخانه، شکل‌گیری آبراهه‌ها و ایجاد خطواره‌های قابل رویت از روی عکس‌های هوایی شده است. شکل (۳-۶) نمایی از محدوده گسل F2 را نشان می‌دهد (شرکت مهندسين مشاور مه‌اب قدس، ۱۳۹۱).

۳-۳-۲ درزه‌داری

در راستای بررسی وضعیت شکستگی‌های سطحی توده‌های سنگی در محل سد و سازه‌های وابسته، اطلاعات مربوط به سیستم درزه‌ها، سطوح لایه‌بندی و سطوح شیستوزیته، مشخصات سطح صفحات

ناپیوستگی، مقدار بازشدگی^۱، فاصله‌داری^۲، طول، مواد پرکننده و نیز کیفیت آب در درزه‌ها در ایستگاه‌های مختلف با بررسی مغزه‌های بازیافتی از گمانه‌های اکتشافی قرائت و ثبت شده است. در ادامه به عنوان نمونه، نتایج دو ایستگاه درزه نگاری آورده شده است (شرکت مهندسين مشاور مهاب قدس، ۱۳۹۱).



شکل ۳-۶: نمایی از محدوده گسل F2 (مهاب قدس، ۱۳۹۱)

۱-۲-۳-۳ ایستگاه ۱: اطراف گمانه پیشنهادی JSS1)T6

اطلاعات این ایستگاه در اطراف گمانه T6 (محدوده ورودی تونل آب‌بر مغار نیروگاه) و در موقعیت جغرافیایی با مختصات 3912704N و 640521E برداشت شده است. بر این اساس ۴ دسته ناپیوستگی شناسایی شده‌اند. دسته درزه J1 به عنوان ناپیوستگی غالب در این ناحیه عمدتاً دارای طولی کمتر از یک متر و بازشدگی کمتر از چند میلی‌متر می‌باشد. در سطوح باز این درزه‌ها آثار پرشدگی کلسیت با

^۱ Aperture

^۲ Spacing

سطوح نامنظم دیده می‌شود. ویژگی ناپیوستگی‌های موجود در ایستگاه اول اطراف گمانه T6 در جدول شماره (۱-۳) نشان داده شده است.

جدول ۳-۱: ویژگی‌های ناپیوستگی‌های سطحی در ایستگاه ۱ (مهاب قدس، ۱۳۹۱)

وضعیت آب	زبری	بازشدگی (mm)	پرشدگی	فاصله‌داری (cm)	طول (m)	جهت شیب (درجه)	شیب (درجه)	نا پیوستگی
خشک	زبر نامسطح	۰/۵-۱۰	کلسیت	۲۰-۶۰	<۱	۳۰۸	۷۲	J1
خشک	زبر مسطح	۰/۵-۱۰	کلسیت و مواد سطحی	۲۰-۶۰	۱-۳	۲۵۳	۹۰	J2
خشک	زبر مسطح	۰/۵-۱۰	کلسیت و مواد سطحی	۲۰-۶۰	۳-۱۰	۱۰۰	۷۶	J3
خشک	زبر مسطح	۰/۵-۱۰	کلسیت و مواد سطحی	۲۰-۶۰	۳-۱۰	۳۹	۸۱	J4

۳-۲-۳-۲ ایستگاه ۲: اطراف گمانه پیشنهادی (JSS2)

اطلاعات این ایستگاه در بخش‌های ابتدایی تونل آبر نیروگاه و در موقعیت جغرافیایی با مختصات 3912830N و 640832E برداشت شده است. بر این اساس ۵ دسته ناپیوستگی شناسایی شده‌اند. دسته درزه J1 به عنوان ناپیوستگی غالب در این ناحیه عمده‌تاً دارای طولی بین یک متر تا ۳ متر و بازشدگی در حدود ۰/۵ تا ۱۰ میلی‌متر می‌باشد. در سطوح باز این درزه‌ها آثار پرشدگی کلسیت با سطوح نامنظم دیده می‌شود. ویژگی ناپیوستگی‌های موجود در ایستگاه دوم در جدول شماره (۲-۳) نشان داده شده است.

جدول ۳-۲: ویژگی‌های ناپیوستگی‌های سطحی در ایستگاه ۲ (مهاب قدس، ۱۳۹۱)

وضعیت آب	زبری	بازشدگی (mm)	پرشدگی	فاصله‌داری (cm)	طول (m)	جهت شیب (درجه)	شیب (درجه)	نا پیوستگی
خشک	زبر نامسطح	۰/۵-۱۰	کلسیت	۲۰-۶۰	۱-۳	۲۱۰	۷۵	J1
خشک	زبر مسطح	۰/۵-۱۰	کلسیت و مواد سطحی	۲۰-۶۰	۱-۳	۳۲۵	۶۰	J2
خشک	زبر مسطح	۰/۵-۱۰	کلسیت و مواد سطحی	۲۰-۶۰	< ۱	۲۴۰	۵۰	J3
خشک	زبر مسطح	۰/۵-۱۰	کلسیت و مواد سطحی	۲۰-۶۰	۳-۱۰	۱۷۰	۶۵	J4
خشک	زبر مسطح	۰/۵-۱۰	کلسیت	۲۰-۶۰	۳-۱۰	۲۶۰	۸۰	J5

۳-۴ آزمایش‌های تعیین پارامترهای سنگ

۳-۴-۱ مقدمه

برای اندازه‌گیری خواص فیزیکی و مکانیکی ماده سنگ و توده سنگ در ساختگاه طرح سد آزاد، برنامه مطالعاتی گسترده‌ای شامل برداشت‌های سطحی زمین‌شناسی، حفر گمانه‌های اکتشافی کوتاه و عمیق، حفر گالری‌های اکتشافی و آزمایش‌های برجا^۱ و آزمون‌های آزمایشگاهی^۲ انجام شده است. در پروژه مذکور، آزمایش‌های آزمایشگاهی انجام شده لیکن به دلیل محدودیت‌ها و مشکلات اجرایی مرتبط با حفاری گمانه‌های عمیق، آزمایش برجا دیلاتومتر و آزمایش جکینگ (به منظور برآورد مدول

^۱ In Situ Tests

^۲ Laboratory Tests

دگرشکل پذیری توده سنگ) اجرا نشد. هرچند از آزمایش‌های برجای در نظر گرفته شده برای ساختگاه نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد، تعداد ۳۵ عدد آزمایش شکست هیدرولیکی^۱ در درون چند تا از گمانه‌های حفاری شده انجام گرفت که نتایج آن‌ها در ادامه ارائه شده است (مهاب قدس، ۱۳۹۱).

۳-۴-۲ گمانه‌های اکتشافی^۲

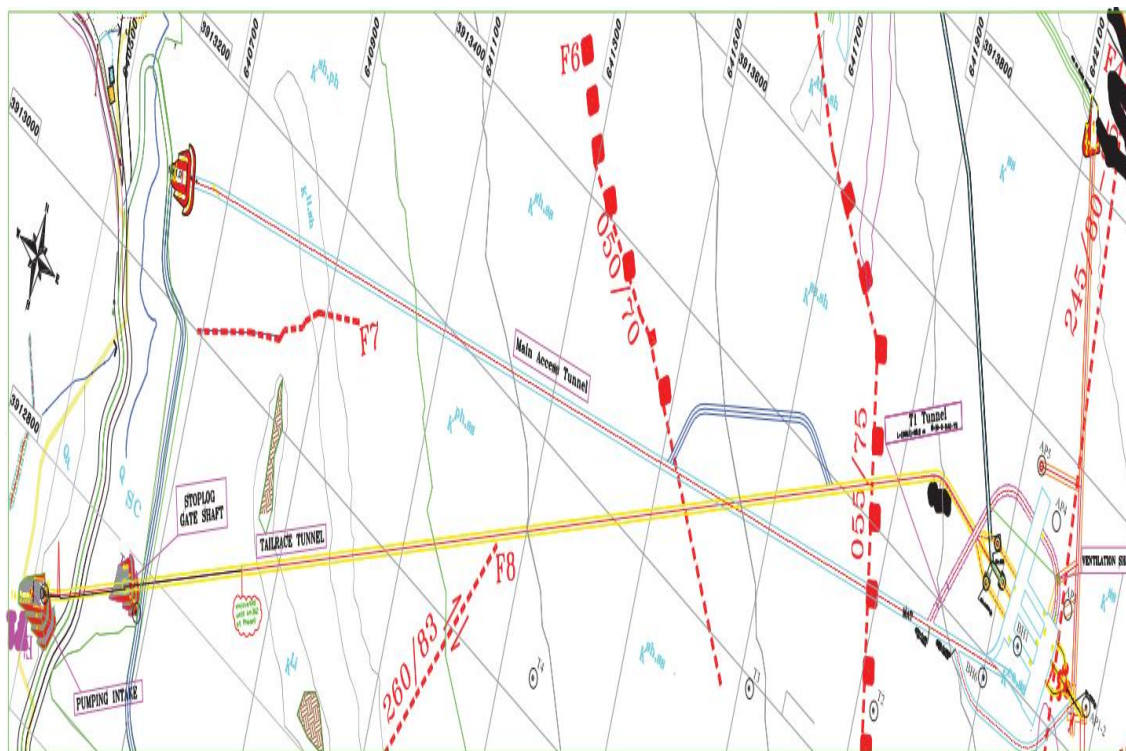
در طی مطالعات مرحله دوم، در مجموع ۴ حلقه گمانه اکتشافی عمیق در محل سازه‌های زیرزمینی، ۴۴ گمانه کوتاه در مسیر تونل‌های دسترسی، ۳ گمانه متوسط در دستک‌های منشعب شده از تونل T1 و ۸ گمانه در محل مخزن بالادست به مترائ کلی ۱۹۰۰ متر حفر شدند. گمانه‌هایی که با پیشوند AP نام‌گذاری شده است، مربوط به محدوده سازه‌های زیرزمینی (مغار نیروگاه، مغار ترانسفورمر، مخزن ضربه‌گیر و شفت اصلی) هستند و گمانه‌های با پیشوند OP، MAT، HF و IAT به ترتیب مربوط به مخزن بالادست، تونل دسترسی، آزمایش شکست هیدرولیکی و تونل دسترسی میانی هستند. هدف از حفر این گمانه‌های اکتشافی، مطالعه شرایط زمین‌شناسی زیرسطحی، ارزیابی کیفیت توده سنگ دربرگیرنده‌ی سازه‌ها، تهیه نمونه‌های مناسب برای انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی و انجام آزمایش‌های درون گمانه‌ای مانند دیلاتومتر، شکست هیدرولیکی و تست فشار آب (لوژان) بوده است. در جدول (۳-۳) مشخصات گمانه‌های عمیق حفر شده در سازه‌های زیرزمینی طرح سد آزاد نشان داده شده است و همچنین در شکل (۷-۳) پلان موقعیت گمانه‌های اکتشافی بر روی سازه‌های زیرزمینی مختلف نشان داده شده است (مهاب قدس، ۱۳۹۱).

^۱ Hydraulic Fracture

^۲ Exploratory Boreholes

جدول ۳-۳: مشخصات گمانه‌های اکتشافی عمیق حفر شده در سازه‌های سد آزاد (مهاب قدس، ۱۳۹۱)

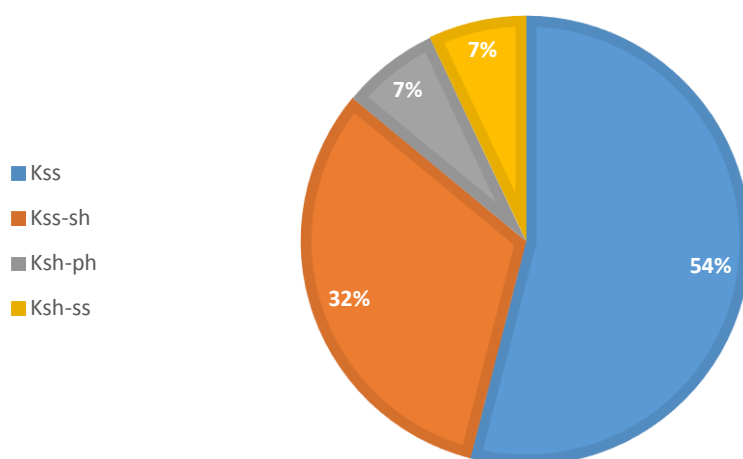
مشخصات زمین‌شناسی			موقعیت	عمق (m)	تراز راس (m)	انحراف از قائم (درجه)	گمانه
واحد	از عمق	تا عمق					
K^{SS}	۰	۲۳۱	ابتدای شفت اصلی	۲۳۱	۱۸۸۶/۸۶	۰	AP1
K^{SS}	۰	۲۹۶	میانه شفت اصلی	۲۹۶	۱۶۴۲/۴۰	۰	AP2
K^{SS}	۰	۳۰۰	مغار نیروگاه	۳۰۰	۱۶۴۵/۶۳	۰	AP3
K^{SS}	۰	۲۹۰	مخزن ضربه‌گیر	۲۹۰	۱۶۵۱/۷۹	۰	AP5



شکل ۳-۷: پلان گمانه‌های اکتشافی بر روی سازه‌های زیرزمینی مختلف (مهاب قدس، ۱۳۹۱)

در هنگام حفر گمانه‌های اکتشافی، نمونه‌های مناسبی از مغزه‌های اکتشافی با هدف انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی مکانیک سنگ اخذ گردید. این نمونه‌ها برای انجام انواع مختلف آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی بر روی ماده سنگ انتخاب شدند. با توجه به قرارگیری سازه‌های زیرزمینی (مغار نیروگاه، مغار ترانسفرمر، شفت اصلی، مخزن ضربه‌گیر، تعدادی از تونل‌های دسترسی) در واحد K^{ss} ، بیش‌ترین حجم گمانه‌ها و همچنین نمونه‌گیری در فضاها و زیرزمینی در این واحد متمرکز بوده است. شکل (۸-۳) پراکندگی نمونه‌های اخذ شده از واحدهای مختلف زمین‌شناسی را در محل سازه‌های زیرزمینی، مسیر تونل‌های دسترسی و مخزن بالادست نشان می‌دهد. این پراکندگی می‌تواند گویای توزیع وزنی سنگ‌های تشکیل دهنده هر واحد در ساختگاه طرح سد آزاد باشد (مهاب قدس، ۱۳۹۱).

واحدهای زمین شناسی محدوده طرح



شکل ۸-۳: پراکندگی آماری نمونه‌های آزمایشگاهی اخذ شده از واحدهای مختلف زمین‌شناسی (مهاب قدس، ۱۳۹۱)

واحد K^{ss} شامل ماسه‌سنگ دگرگون شده با میان لایه‌هایی از شیست و فیلیت می‌باشد و به دلیل تناوب و تکرار لایه‌های ماسه‌سنگی و اسلیتی در این واحد، پارامترهای توده سنگ از خصوصیات این دو نوع سنگ تاثیر می‌پذیرد. با توجه به اینکه امکان تفکیک برای این دو نوع سنگ با توجه به تکرار

مداوم آن‌ها در این واحد وجود نداشته است، بنابراین نحوه انتخاب نمونه‌های آزمایشگاهی به گونه‌ای صورت گرفته که پارامترهای برآورد شده نشان‌دهنده وضعیت موجود و ترکیبی از هر دو نوع سنگ باشد. پس با تلفیق نتایج حاصل از دو نوع سنگ موجود در این واحد، پارامترهای سنگ بکر برای واحد K^{ss} برآورد شد. لازم به ذکر است که برای دیگر واحدها نیز که ترکیبی از دو یا چند نوع سنگ می‌باشند با توجه به تکرار مداوم لایه‌ها، ترکیبی از هر دو نوع لیتولوژی با در نظر گرفتن درصد تکرار هر کدام در برآورد نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفته است.

۳-۴-۳ آزمایش‌های آزمایشگاهی

به‌منظور تعیین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی توده سنگ‌های دربرگیرنده سازه‌های روباز و زیرزمینی طرح سد آزاد، بر روی نمونه‌های اخذ شده از مغزه‌های حفاری، آزمایش‌های مختلف آزمایشگاهی مطابق با روش‌های پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM) و استاندارد مصالح (ASTM) به شرح زیر انجام شد و در ادامه به نتایج چند مورد از این آزمایش‌ها اشاره شده است:

- آزمایش‌های تعیین مشخصات فیزیکی شامل وزن مخصوص، تخلخل، درصد رطوبت و دوام
- آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره^۱ (UCS) با تعیین مدول الاستیسیته و نسبت پواسون
- آزمایش مقاومت فشاری سه محوره^۲
- آزمایش کشش غیرمستقیم (تست برزیلی^۳)
- آزمایش تعیین سرعت عبور امواج فشاری و برشی

۳-۴-۳-۱ نتایج آزمایش‌های تعیین مشخصات فیزیکی

با توجه به جنس سنگ‌های دربرگیرنده سازه‌ها، انجام آزمایش‌های فیزیکی از اهمیت ویژه‌ای

^۱ Uniaxial Compressive Strength Test

^۲ Triaxial Compressive Strength Test

^۳ Brazilian Test

برخوردار است. بنابراین آزمایش‌های تعیین وزن مخصوص، تخلخل، درصد رطوبت بر روی نمونه‌های سنگی انجام گردید. لازم به ذکر است برای سازه‌های زیرزمینی در مجموع ویژگی‌های سه واحد زمین‌شناسی K^{sh-ph} ، K^{ss} و K^{sh-ss} ارائه شده است که این امر به دلیل تشابه خصوصیات ژئومکانیکی این واحدها بوده است. نتایج این آزمایش در جدول (۳-۴) ارائه شده است.

جدول ۳-۴: نتایج آزمایش‌های فیزیکی بر روی نمونه‌های سنگ بکر در واحدهای مختلف (مهاب قدس، ۱۳۹۱)

واحد سنگی	نوع کمیت	دانشسته (gr/cm^3)		آب محتوای اشباع (%)	تخلخل (%)
		خشک	اشباع		
K^{ss}	میانگین	۲/۶۷	۲/۶۹	۰/۸۶	۲/۲۶
	انحراف معیار	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۵۸	۱/۴۵
	حداقل	۲/۴۴	۱۹/۱	۹/۷	۰/۲۹
	حداکثر	۲/۷۶	۱۱۱/۵	۴۷/۸	۸/۱
	تعداد	۲۳۱	۶۶	۶۰	۲۲۹
K^{sh-ph}	میانگین	۲/۷۰	۲/۷۲	۰/۸	۲/۲
	انحراف معیار	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۳	۰/۹
	حداقل	۲/۶۵	۲/۶۱	۰/۲	۰/۵
	حداکثر	۲/۷۶	۲/۷۷	۴/۲	۱/۶
	تعداد	۹۵	۹۵	۹۵	۹۵
K^{sh-ss}	میانگین	۲/۷۳	۲/۷۴	۰/۳	۰/۸
	انحراف معیار	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۱	۰/۳
	حداقل	۲/۶۹	۲/۷۱	۰/۱۵	۰/۴
	حداکثر	۲/۷۷	۲/۷۸	۰/۷	۱/۹
	تعداد	۵۲	۵۲	۵۲	۵۲

۳-۴-۲ نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS)

این آزمایش با هدف برآورد مقاومت فشاری نامحصور در دو حالت رطوبت طبیعی و اشباع انجام

گردید که با استفاده از نتایج این آزمایش‌ها مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و نسبت پواسون سنگ‌های تشکیل دهنده هر واحد اندازه‌گیری شد.

نتایج این آزمایش در جدول (۳-۵) ارائه شده است. با توجه به تغییر شرایط لیتولوژیکی در هر واحد، مقاومت فشاری آن‌ها نیز به دلیل تغییر جنس و کیفیت سنگ تغییر می‌کند، به گونه‌ای که ماسه‌سنگ کمی دگرگون شده دارای بیشترین مقاومت و شیست و فیلیت‌ها دارای کمترین مقاومت می‌باشد. لازم به ذکر است در درون واحد K^{ss} ، به دلیل وجود تناوب لایه‌های ماسه‌سنگی و شیستی، مقاومت تک‌محوری حاصله دارای بازه گسترده‌تری می‌باشد. بر اساس طبقه‌بندی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM)، مقاومت فشاری سنگ‌ها برای واحدهای K^{ss} ، K^{sh-ss} و K^{sh-ph} به ترتیب در بازه‌های با مقاومت متوسط و به نسبت پایین قرار می‌گیرند (مهاب قدس، ۱۳۹۱).

۳-۴-۳ نتایج آزمایش مقاومت فشاری سه محوره

برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی سنگ (چسبندگی و زاویه اصطکاک)، بر روی تعدادی از نمونه‌های اخذ شده آزمایش سه محوری انجام شد. فشارهای جانبی با توجه به شرایط تنش برجا و روباره سنگی در طول مسیر تونل و محل سازه‌های زیرزمینی، جنس سنگ و متناسب با دستگاه‌های آزمایشگاهی تعیین شد. برای تعریف مقاومت برشی سنگ‌ها معیارهای مختلفی ارائه شده است. از آن میان معیار شکست موهر - کولمب و معیار شکست هوک - براون از متداول‌ترین آن‌هاست. در این مطالعات با استفاده از نتایج آزمایش‌های سه محوری و همچنین آزمایش‌های تک‌محوری و برزیلی، پارامترهای هر دو معیار شکست برای نمونه‌های مختلف سنگی برآورد شده است که در جدول (۳-۶) نشان داده شده است (مهاب قدس، ۱۳۹۱).

جدول ۳-۵: نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوره سنگ بکر (مهتاب قدس، ۱۳۹۱)

واحد سنگی	نوع کمیت	مقاومت فشاری (MPa)		مدول یانگ (GPa)		نسبت پواسون	
		طبیعی	اشباع	طبیعی	اشباع	طبیعی	اشباع
K^{ss}	میانگین	۶۹/۹	۶۲	۲۵/۲	۲۴/۷	۰/۲۴	۰/۲۴
	انحراف معیار	۲۴/۷	۲۱/۷	۹/۴	۷/۶	۰/۰۲	۰/۰۲
	حداقل	۲۳/۶	۱۹/۱	۹/۷	۷/۵	۰/۱۸	۰/۱۸
	حداکثر	۱۱۸/۸	۱۱۱/۵	۴۷/۸	۳۸/۲	۰/۲۹	۰/۲۹
	تعداد	۶۲	۶۶	۶۰	۶۳	۶۰	۶۳
K^{sh-ph}	میانگین	۲۷/۵	۲۳/۸	۱۶/۵	۱۱/۵	۰/۲۶	۰/۲۸
	انحراف معیار	۱۰/۵	۱۰/۵	۹/۳	۶/۰	۰/۰۴	۰/۰۳
	حداقل	۱۱/۳	۹/۶	۳/۳	۵/۴	۰/۱۹	۰/۲۳
	حداکثر	۴۹/۵	۴۳/۰	۲۹/۳	۲۶/۵	۰/۳۱	۰/۳۲
	تعداد	۸	۳۱	۷	۳۳	۸	۱۲
K^{sh-ss}	میانگین	۶۹/۶	۶۶/۵	۲۴/۸	۲۲/۹	۰/۲۵	۰/۲۶
	انحراف معیار	۲۴/۳	۲۹/۹	۶/۴	۹/۳	۰/۰۳	۰/۰۳
	حداقل	۴۸/۵	۲۳/۶	۱۷/۵	۸/۹	۰/۲۰	۰/۲۲
	حداکثر	۱۱۹/۷	۱۰۲/۹	۰/۳۵	۳۴/۰	۰/۳۰	۰/۳۱
	تعداد	۷	۱۰	۸	۱۱	۹	۱۲

جدول ۳-۶: نتایج آزمایش سه محوره واحدهای سنگی مختلف (مهتاب قدس، ۱۳۹۱)

واحد سنگی	تعداد آزمایش	معیار موهر - کولمب		معیار هوک - براون		ضریب همبستگی (%)
		C(MPa)	φ	σ_c (MPa)	mi	
K^{ss}	۴۲	۱۳/۱	۴۶	۶۸	۱۳	۴۸
K^{sh-ph}	۳	۶/۲	۴۲	۳۰	۹	۹۰
K^{sh-ss}	۴	۱۷	۴۶	۹۳	۱۱	۷۸

۴-۳-۴ نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم (برزلی)

به منظور تعیین مقاومت کششی سنگ‌ها، بر روی تعدادی از نمونه‌ها آزمایش کشش غیرمستقیم (برزلی) در حالت خشک و اشباع انجام شد. نتایج آزمایش در جدول (۷-۳) آمده است.

جدول ۷-۳: نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم (برزلی)، (MPa) (مهاب قدس، ۱۳۹۱)

واحد سنگی	شرایط نمونه	تعداد آزمایش	میانگین	حداقل	حداکثر	انحراف معیار
K^{ss}	خشک	۵۵	۸/۲	۱/۲	۱۵/۱	۳/۱
	اشباع	۵۵	۶/۷	۱/۴	۱۲/۸	۲/۴
K^{sh-ph}	خشک	۳	۶/۱	۴/۱	۸/۸	۲/۵
	اشباع	۳۸	۳/۳	۱/۳	۹/۴	۱/۹
K^{sh-ss}	خشک	۱۲	۱۰/۳	۵/۱	۱۵/۰	۳/۰
	اشباع	۱۹	۹/۳	۱۸	۱۳/۸	۴/۲

۴-۴-۳ آزمایش‌های صحرایی (برجا)

در ساختگاه نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد، آزمایش‌های صحرایی شامل ۶ آزمایش جکینگ و ۳۰ آزمایش دیلاتومتر برای اندازه‌گیری مدول دگرشکل‌پذیری توده سنگ دربرگیرنده سازه‌های زیرزمینی و ۳۵ عدد آزمایش شکست هیدرولیکی برای اندازه‌گیری میدان تنش برجا پیش‌بینی شده بود. اما به دلیل نامساعد بودن شرایط جداره گمانه‌های عمیق حفر شده در محل سازه‌ها امکان انجام آزمایش‌های دیلاتومتری و جکینگ در این گمانه‌ها میسر نبوده و تصمیم مبنی بر انجام این آزمایش‌ها در گمانه‌های کوتاه گالری‌های اکتشافی گرفته شد. از میان آزمایش‌های برجا، آزمایش شکست هیدرولیکی انجام شده است که نتایج آن در ادامه ذکر شده است.

۳-۴-۱ نتایج آزمایش شکست هیدرولیکی

به منظور اندازه گیری میدان تنش برجا در محدوده ساختگاه نیروگاه تلمبه ذخیره ای سد آزاد از روش شکست هیدرولیکی استفاده شد. روش شکست هیدرولیکی یکی از روش های متداول اندازه گیری میدان تنش های برجای توده سنگ در عمق زمین است که با استفاده از آن می توان مقدار و جهت تنش های اصلی بزرگ تر و کوچک تر را در صفحه ای عمود بر امتداد گمانه تعیین نمود. در این روش اعمال فشار هیدرولیکی به قسمتی از یک گمانه که توسط پکر جدا شده است باعث ایجاد ترک، گسترش شکستگی و یا باز شدن مجدد ترک های موجود می شود. میزان این فشار به میدان تنش برجا بستگی دارد و جهت گسترش ترک ها، نشان دهنده جهت تنش های اصلی است (مهاب قدس، ۱۳۹۱).

در طرح تلمبه ذخیره ای سد آزاد، ۳۵ عدد آزمایش شکست هیدرولیکی به دو روش یکی بر روی سنگ سالم و بکر (HF) و روش دیگر آزمایش بر روی سنگ های درزه دار (HTPF)^۱، در چهار گمانه AP2، HF1، HF2 و HF3 انجام شد، که در مجموع تعداد ۳۳ آزمایش صحیح در این گمانه ها انجام گرفت و از این تعداد ۱۹ آزمایش در حالت HF و ۱۴ آزمایش در حالت HTPF بوده است. در جدول (۳-۸) نتایج نسبت تنش های افقی به قائم و راستای تنش اصلی بزرگ تر برای گمانه های مورد آزمایش ارائه شده است.

همان طور که ملاحظه می شود، بررسی نتایج آزمایش با استفاده از روش HF نشان می دهد که تنش افقی حداکثر σ_H ، تنش اصلی بزرگ تر است و تنش های قائم σ_V و تنش افقی حداقل σ_h به ترتیب تنش های میانه و کوچک تر هستند. در حالی که بررسی نتایج آزمایش با استفاده از روش HTPF نشان می دهد که تنش قائم تنش اصلی بزرگ تر بوده و تنش های افقی به ترتیب تنش های میانه و کوچک تر می باشند (مهاب قدس، ۱۳۹۱).

^۱ Hydraulic Test On Pre-existing Fractures

جدول ۳- ۸: نتایج آزمایش شکست هیدرولیکی در پیرامون مغار نیروگاه (مهتاب قدس، ۱۳۹۱)

روش آزمایش	نسبت تنش افقی حداقل به قائم (k_H)	نسبت تنش افقی حداکثر به قائم (k_H)	راستای تنش افقی حداکثر	ترتیب تنش‌های اصلی
روش HF	۰/۴۵-۰/۵۵	۱-۱/۲	N۹۳-۵۶°	Sh<SV<SH
روش HTPF	۰/۴۵-۰/۵۵	۱-۱/۲	N۸۹-۷۹°	Sh<SH<SV

۳-۵ جمع‌بندی

در این فصل ابتدا به معرفی ساختگاه طرح تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد و موقعیت جغرافیایی آن و همچنین راه‌های دسترسی به آن پرداخته شد. در ادامه اطلاعات مربوط به زمین‌شناسی عمومی و مهندسی طرح و همچنین موقعیت و تعداد گسل‌های محدوده سد آزاد و اطلاعات درزه‌داری به عنوان نمونه در دو ایستگاه آورده شده است. در نهایت موقعیت و تعداد گمانه‌های اکتشافی حفاری شده برای انجام مغزه‌گیری و استفاده از مغزه‌ها در آزمایش‌های تعیین مشخصات سنگ و همچنین اطلاعات و مقادیر مربوط به آزمایش‌های آزمایشگاهی مختلف و آزمایش‌های صحرایی انجام شده برای تعیین پارامترهای توده سنگ محدوده بررسی شده است. در فصل بعدی نیز با استفاده از مقادیر پارامترهای توده سنگ مشخص شده از آزمایش‌های این فصل به مدل‌سازی دو ایستگاه از تونل‌های دسترسی MAT و T4 پرداخته شده است که بر اساس نتایج ابزار دقیق نصب شده در این ایستگاه‌ها و روش تحلیل برگشتی برآورد پارامترهای ژئومکانیکی انجام می‌شود.

فصل چهارم

مدل سازی عددی با استفاده از نرم افزار $FLAC^{2D}$

و تحلیل برکشی مبنی بر داده های ابزار دقیق

امروزه یکی از روش‌های تحلیل و طراحی سازه‌های زیرزمینی استفاده از روش‌های عددی است، روش‌های عددی در حل مسایل مهندسی می‌توانند کاربردهای زیادی داشته باشند. در گذشته به علت نبود امکانات رایانه‌ای کافی و همچنین زمان‌بر بودن انجام محاسبات، بیشتر از روابط تجربی استفاده می‌شد. باید توجه داشت که حل دقیق مسایل ژئومکانیکی با استفاده از روش‌های تجربی و عددی به تنهایی ممکن نیست و ترکیب این دو روش می‌تواند ما را در حل مسایل پیچیده زمین کمک کند. تقریباً تمام روش‌هایی که در تحلیل‌های عددی مانند روش اجزا محدود، تفاضل محدود، اجزای مرزی، اجزا مجزا و روش‌های ترکیبی وجود دارد به‌طور چشم‌گیری در پروژه‌های عظیم و صنعتی، در سنگ یا خاک استفاده می‌شود. اساس روش‌های عددی، تبدیل یک محیط با بی‌نهایت درجه آزادی محدود در تعداد معینی از نقاط محیط است. موقعیت، تعداد و ارتباط نقاط یادشده توسط مش بندی مشخص می‌شود. با بهره‌گیری از نرم‌افزارهای موجود و تعریف دقیق هندسه، شرایط مرزی و خواص مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری توده سنگ می‌توان طراحی قابل قبولی انجام داد. با استفاده از روش‌های عددی می‌توان سازه‌های سطحی و یا زیرزمینی (تونل‌ها، مغارها، شیروانی‌ها و ...) با هر شکل و مقطع را مدل‌سازی کرد و تنش‌ها و جابجایی‌ها در تمام نقاط موردنظر را به دست آورد. یکی از کاربردهای روش‌های عددی استفاده آن‌ها به‌طور مستقیم در تحلیل برگشتی می‌باشد. تحلیل برگشتی مستقیم نیازمند مدل‌سازی عددی و استفاده از روش تحلیل عددی برای دستیابی به پارامترهای خروجی می‌باشد. واقعیتی که نباید فراموش کرد این است که نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی عددی به داده‌های ورودی و فرض‌های ساده‌سازی بستگی دارد. نباید انتظار داشت که از داده‌های ورودی اشتباه نتایج صحیحی به دست آید.

۲-۴ روش‌های عددی در حل مسائل ژئومکانیک

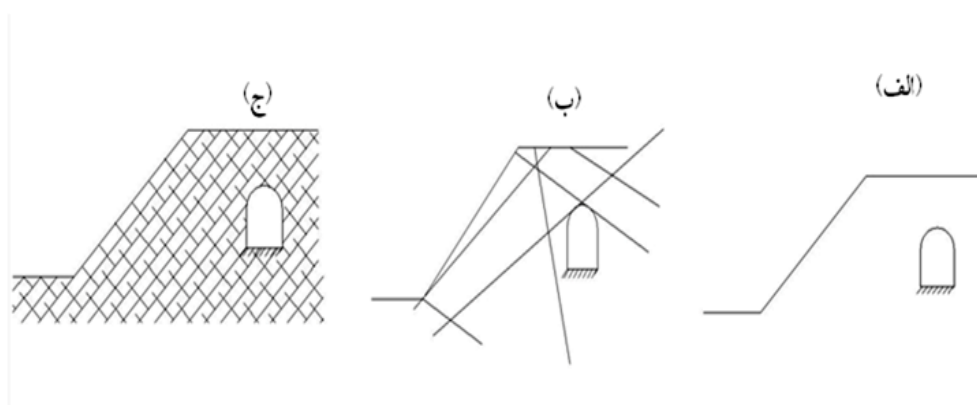
از آنجایی که بیشتر سازه‌های زیرزمینی شکل منظم و ساده‌ای ندارند و از طرفی به علت وجود ناپیوستگی‌ها و نبود شرایط ایزوتروپیک، همگن و الاستیک در توده سنگ استفاده از روش‌های فرم بسته ریاضی برای تعیین تنش‌ها و جابجایی‌ها و گسیختگی‌ها در توده سنگ با محدودیت مواجه شده است، لذا روش‌های عددی برای حل این مشکل از چند دهه پیش جایگزین روش‌های تحلیلی شده‌اند. روش‌های عددی به‌طور گسترده در مدل‌سازی توده سنگ‌ها به کار گرفته می‌شوند. این مدل‌ها با هدف معین کردن رفتار توده سنگ در یک نقطه خاص و یا بررسی کردن جنبه‌های پایداری و اساسی رفتار سنگ‌ها به کار می‌روند. با بررسی اثر نیرو و بارگذاری در این نقاط و تعیین میزان تغییر شکل آن‌ها و با استفاده از درون‌یابی می‌توان تغییر شکل سایر نقاط را به دست آورد. هر المان نشان‌دهنده جزء کوچکی از محیط است که دارای مشخصات هندسی، سازه‌ای و مواد مخصوص به خود است. ارتباط المان‌ها با یکدیگر بر اساس گره‌های مشترک آن‌ها است (Bobet, 2010).

اساس روش‌های عددی، شبیه‌سازی یک محیط با بی‌نهایت درجه آزادی (نظیر توده سنگ) به وسیله محیطی با درجه آزادی محدود در تعداد معینی از نقاط می‌باشد. به‌طوری‌که اثر نیرو و بارگذاری در این نقاط بررسی شده و پس از تعیین میزان تغییر شکل در سایر نقاط با استفاده از روش‌های درون‌یابی محاسبه می‌شود. در بیشتر این مسایل، محیط دارای یک شکل دلخواه بوده که تحت تاثیر بارگذاری ثقلی، تنش‌های برجا، فشار سیال، نیروهای دینامیکی و ... قرار گرفته و از روابط تنش _ کرنش در توده سنگ جهت به دست آوردن تغییر شکل‌ها استفاده می‌شود (Bobet, 2010).

در سال‌های اخیر به منظور طراحی فضاها و بزرگ مقطع، از تحلیل‌های عددی استفاده زیادی شده است. مدل‌سازی عددی یک ابزار ارزشمند جهت درک رفتار توده سنگ، پیش‌بینی مقادیر تغییر شکل ناشی از حفاری، توزیع مجدد تنش، مطالعه و بررسی مکانیزم شکست می‌باشد. در حال حاضر از روش‌های عددی به‌طور گسترده جهت طراحی فضاها و حفار شده در سنگ یا خاک نظیر تونل‌ها،

کارگاه‌ها و معادن زیرزمینی و ... استفاده می‌شود (Jing, 2003)(Bobet, 2010).

انتخاب روش عددی و نرم‌افزار مناسب نیازمند تعیین پیوستگی یا ناپیوستگی محیط است. به‌طور کلی محیطی که سازه در آن یا بر روی آن ساخته می‌شود به سه گروه عمده پیوسته^۱، ناپیوسته^۲ و شبه پیوسته^۳ طبقه‌بندی می‌شود که در شکل (۴-۱) نشان داده شده است (Bobet, 2010).



شکل ۴-۱: طبقه‌بندی محیط‌های ژئومکانیکی: (الف) محیط پیوسته (ب) محیط ناپیوسته (ج) محیط شبه پیوسته (Bobet, 2010)

محیط نوع اول (شکل ۴-۱-الف) طبقه‌بندی برای زمین‌هایی است که شامل سنگ بکر بدون درزه و شکاف است. محیط دوم (شکل ۴-۱-ب) برای توده سنگ‌های درزه‌دار و محیط سوم (شکل ۴-۱-ج) برای سنگ‌های به‌شدت خرد شده و یا توده سنگ‌های هوازده می‌باشد. به دلیل اینکه رفتار نهایی زمین‌های گروه سوم می‌تواند شبیه به رفتار زمین‌های گروه اول باشد، رفتار این گونه زمین‌ها را شبه پیوسته می‌نامند. رفتار مکانیکی محیط نوع اول را می‌توان به کمک تئوری مکانیک محیط پیوسته تحلیل نمود. درحالی‌که برای تحلیل رفتار محیط نوع دوم باید از تئوری‌های مربوط به مکانیک محیط‌های ناپیوسته استفاده نمود. برای تحلیل رفتار محیط نوع سوم می‌توان از تئوری‌های محیط‌های

^۱ Continuum

^۲ Discontinuum

^۳ Pseudo Continuum

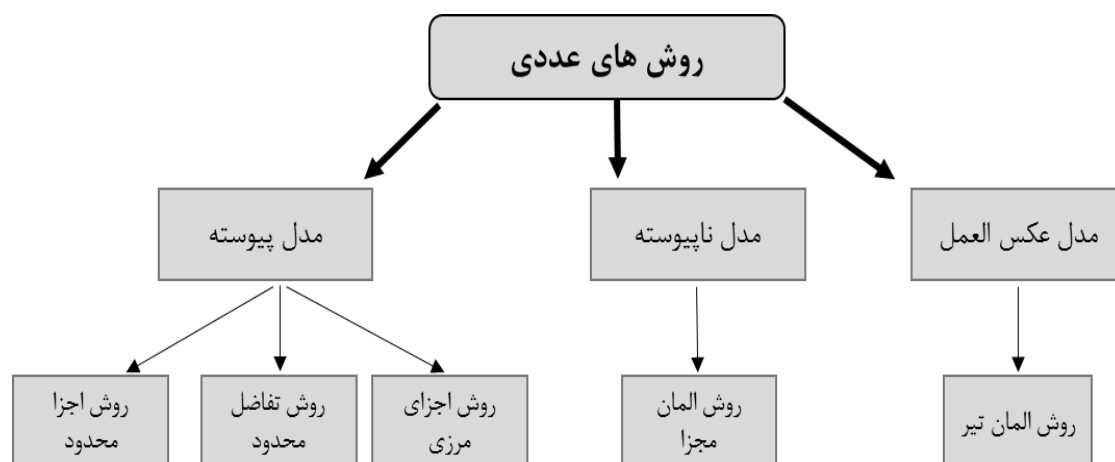
ناپیوسته استفاده کرد، ولی از آنجایی که تعیین موقعیت، ابعاد و خواص مکانیکی تمام سیستم درزه‌های موجود غیرممکن به نظر می‌رسد، روش تحلیل محیط‌های ناپیوسته برای تحلیل رفتار این نوع محیط‌ها کاربرد عملی نخواهد داشت. با توجه به اینکه این محیط‌ها تا حدی شبیه به محیط‌های پیوسته رفتار می‌کنند، جهت تحلیل رفتار آن‌ها می‌توان از تئوری‌های محیط پیوسته استفاده نمود (Bobet, 2010).

از مزایای روش‌های عددی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد :

با استفاده از روش‌های عددی می‌توان تنش‌ها و جابجایی‌ها را در هر نقطه دلخواه سیستم و در هر زمان که لازم باشد به دست آورد. علاوه بر آن می‌توان روند حفاری، نصب سیستم نگهداری و سایر فعالیت‌های ایجاد سازه را در نظر گرفت. همچنین می‌توان تمام عوارض ساختاری نظیر درزه‌ها، انواع ناپیوستگی‌ها، گسل‌ها و لایه‌های مختلف زمین را در مدل لحاظ کرد (Jing, 2003).

روش‌های عددی با وجود این مزیت‌ها، معایب و مشکلاتی نیز دارند. چنان چه خواص فیزیکی و مکانیکی توده سنگ برجا به‌طور دقیق مشخص نباشد، مدل‌سازی عددی نمی‌تواند نتایج قابل قبولی ارائه دهد. با توجه به اینکه بعد از حفر یک فضای زیرزمینی، خواص فیزیکی و مکانیکی توده سنگ تغییر می‌کند، با به کارگیری پارامترهای به دست آمده از آزمایش‌های آزمایشگاهی، نمی‌توان رفتار توده سنگ را به خوبی پیش‌بینی کرد. در مدل‌سازی عددی به دلیل عدم توانایی در شبیه‌سازی تمام زمین و یا حتی یک مجموعه حفاری، تنها بخشی از زمین مدل‌سازی شده و با توجه به مدل مفروض، شرایط مرزی برای مدل ساخته شده تعریف می‌شود. جهت حذف تاثیرات این مرزها در تحلیل تنش، کرنش و تغییرشکل در مجاورت یا در امتداد فضای حفاری، مرزها به اندازه کافی دور از فضا در نظر گرفته می‌شوند که در نتیجه باعث افزایش در تعداد المان‌ها می‌شود (Jing, 2003).

انواع روش‌های عددی که در حل مسایل مکانیک سنگ مورد استفاده قرار می‌گیرد در شکل (۴-۲) آورده شده است که در این مجموعه به دلیل استفاده از نرم‌افزار FLAC که در آن از روش تفاضل محدود استفاده می‌شود، فقط به شرح این روش پرداخته می‌شود (Jing, 2003).



شکل ۴-۲: انواع روش های عددی در مکانیک سنگ (Jing, 2003)

۴-۲-۱ روش تفاضل محدود (FDM)

روش تفاضل محدود یکی از قدیمی ترین روش های عددی است که برای حل یک سری معادلات دیفرانسیل که مقادیر اولیه و شرایط مرزی آن ها مشخص باشد، استفاده شده است. در روش تفاضل محدود هر مشتقی که در دسته معادلات حاکم وجود دارد توسط یک عبارت جبری که برحسب متغیرهای مسئله (مثلا برحسب تنش ها یا جابجایی ها) می باشد، جایگزین می شود. عبارت جبری مورد نظر برحسب مقادیر متغیرها در یک سری نقاط مجزا (نقاط گره ای) است و در نقاط دیگر تعریف نشده است (Jing, 2003).

به طور کلی روش تفاضل محدود شبیه روش المان محدود می باشد و شامل تقسیم مدل به زیر بخش و المان است. اما در این روش شرایط بارگذاری و تحلیل به صورت یک مرحله ای انجام نمی شود. در این روش شرایط بارگذاری و تحلیل مدل در فواصل زمانی بسیار کوتاه انجام شده و در هر مرحله فرض بر آن است که هر المان مستقل عمل می کند. در این روش، معلومات با مجهولات مسئله بر مبنای روابط

^۱ Finite Difference Method

حرکت نیوتن در ریاضیات ارتباط داده می‌شود. در این روش، هر مشتق در معادلات حاکم به‌طور مستقیم توسط یک عبارت جبری که تابع متغیرهای میدان (تنش یا تغییر مکان در نقاط دلخواه در فضا) می‌باشد، جایگزین می‌شود. تغییر مکان‌های جزئی گره‌ها به مختصات گره‌ها اضافه‌شده به صورتی که شبکه با مصالح ارائه شده آن حرکت نموده و تغییرمکان می‌دهد. نام این عمل فرمول‌بندی لاگرانژی است که در این روش به کار می‌رود. بعضی تصور می‌کنند که روش تفاضل محدود به شبکه‌های المانی مستطیلی محدود می‌شود که در واقع این چنین نیست. روش تفاضل محدود را روش صریح^۱ می‌نامند، بدین معنی که المان‌ها به‌طور مجزا تحلیل شده و تاثیر آن‌ها بر المان بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. از مزایای روش تفاضل محدود می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

روش محاسبات به حل معادلات قانون حرکت نیوتن و قوانین بنیانی مواد برجا برمی‌گردد. در این روش امکان تحلیل رفتار محیطی که درگیر زمان است نیز وجود دارد، بنابراین می‌توان مراحل گام‌به‌گام ایجاد گسیختگی در سازه را در هر مرحله داشت. مبنای ریاضی مدل ساده بوده و نیاز به تشکیل ماتریس سختی ندارد، ازاین‌جهت می‌توان تغییر شکل‌های بزرگ را بدون وجود مشکلات کامپیوتری در تحلیل داشت. این روش در تحلیل سیالات، جریان‌ها و هیدرولیک نسبت به روش المان محدود جواب بهتری می‌دهد (Jing, 2003).

از معایب روش تفاضل محدود می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- در تحلیل‌های استاتیکی نسبت به روش المان محدود وقت‌گیر است.
- در تحلیل سازه‌های غیر سیال، نسبت به روش المان محدود ضعیف‌تر است.

^۱ Explicit

۴-۲-۲ معرفی نرم افزار $FLAC^2D$

نرم افزار $FLAC^{2D}$ یک برنامه تفاضل محدود دو بعدی می باشد که می تواند رفتار سازه های ساخته شده از خاک، سنگ یا دیگر موادی را که ممکن است پس از رسیدن به حدود پلاستیک دچار جریان پلاستیک شوند، شبیه سازی کند. محلی که قرار است سازه زیرزمینی یا روباز در آن حفر شود به وسیله شبکه ای از عناصر نمایش داده می شوند. این شبکه توسط کاربر طوری طراحی می شود که بر شکل سازه ی موردنظر منطبق گردد. هر المان مطابق با یک قانون تنش _ کرنش خطی یا غیرخطی و در واکنش به نیروهای وارده یا شرایط مرزی رفتار می کند. اگر تنش ها به اندازه ی کافی زیاد باشند که سبب تسلیم شدن مواد و جریان آن ها شوند، شبکه طراحی شده می تواند مطابق واقعیت (در حالت کرنش بزرگ) تغییر شکل یافته و همراه با مواد ذکر شده حرکت کند. به علاوه این نرم افزار، دارای چندین مدل رفتاری از پیش ساخته شده می باشد که به آن اجازه شبیه سازی عکس العمل های شدیداً غیرخطی و برگشتناپذیر مواد زمین یا مواد مشابه دیگر را می دهد. این برنامه دارای مدل های عددی ویژه ای، جهت شبیه سازی واکنش مکانیکی مواد زمین نیز می باشد. همچنین $FLAC$ دارای مدل های رفتاری از پیش ساخته شده ای می باشد که از مدل فضای خالی برای نمایش حفاری ها در شبکه تا مدل های تسلیم برشی و حجمی برای نمایش رفتار کرنش سختی و کرنش نرمی و نمایش گسیختگی برشی غیرقابل برگشت و غیرخطی را دربر می گیرند. این نرم افزار توانایی مدل سازی سازه هایی از قبیل پوشش های تونل، بولت ها، قطعات تسلیم پذیر یا شمع های صفحه ای که با سنگ یا خاک درون گیر خود، اندرکنش انجام می دهند را دارا است (Itasca, 2011).

^۱ Fast Lagrangian Analysis of Continua

۳-۴ مراحل مدل سازی تونل ها با نرم افزار $FLAC^{2D}$

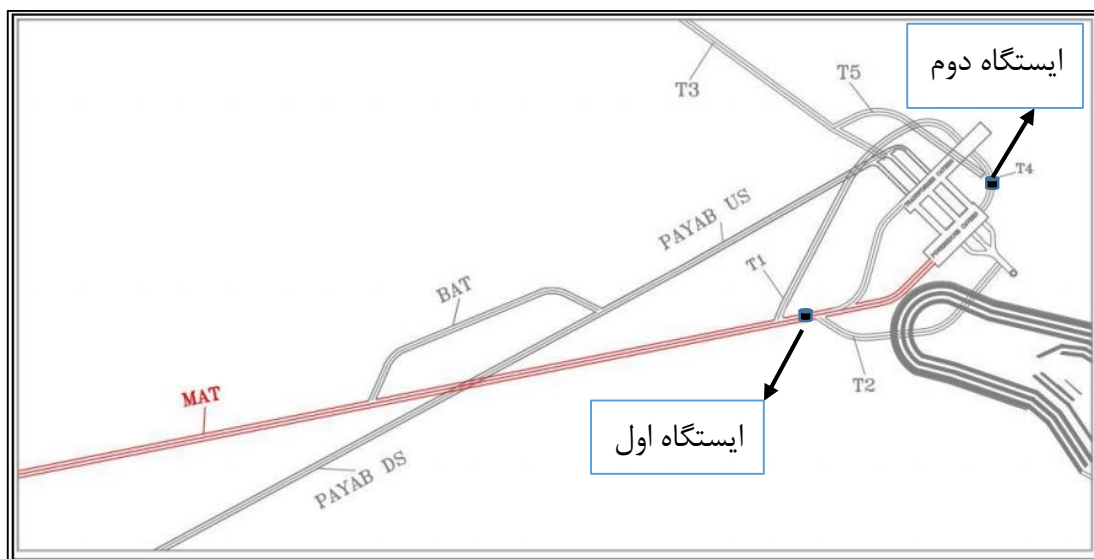
همان طور که از اول اشاره شده است برای انجام این تحقیق از تونل دسترسی های مغار نیروگاه سد آزاد دو ایستگاه مختلف از تونل دسترسی های متفاوت برای مدل سازی و انجام تحلیل برگشتی انتخاب شده است. اولین ایستگاه از کیلو متر ۱+۳۰۰ واقع در تونل دسترسی اصلی (MAT) انتخاب شده است که تونل MAT با طول تقریبی ۱۶۰۰ متر و قطر حفاری ۸/۲ متر یکی از تونل های دسترسی مهم سازه های زیرزمینی به حساب می آید. ایستگاه بعدی واقع در کیلو متر ۰+۰۰۲ تونل دسترسی از مغار ترانسفورمر به هد مغار نیروگاه (T4) می باشد که این تونل دارای طول تقریبی ۸۰ متر و قطر حفاری ۷/۷۰ متر است. در شکل (۳-۴) تصاویری از این دو تونل نشان داده شده است و در شکل (۴-۴) پلان محدوده طرح سد آزاد و موقعیت تونل های دسترسی به مغار نیروگاه و همچنین موقعیت ایستگاه های رفتارنگاری انتخاب شده، نشان داده شده است (مهتاب قدس، ۱۳۹۴).



(ب)

(الف)

شکل ۳-۴: تصاویری از تونل های دسترسی انتخابی، الف) تونل دسترسی MAT ب) تونل دسترسی T4 (مهتاب قدس، ۱۳۹۴)



شکل ۴-۴: تصاویری از تونل‌های دسترسی انتخابی، الف) تونل دسترسی MAT ب) تونل دسترسی T4 (مهتاب قدس، ۱۳۹۴)

به منظور مدل‌سازی مقاطع مورد بررسی در نرم‌افزار $FLAC^{2D}$ از فرض کرنش صفحه‌ای استفاده می‌شود و همچنین برای حذف اثر اندازه ابعاد مدل بر روی نتایج مدل‌سازی عددی، ابعاد آن را باید تا جایی بزرگ در نظر گرفت که اثر شرایط مرزی بر روی تعادل اولیه مدل از بین برود. برای در نظر گرفتن رفتار پلاستیک مصالح زمین، از مدل رفتاری موهر-کولمب استفاده شده است. با توجه به اصول مدل‌سازی عددی و همچنین ترتیب عملیات اجرایی، مراحل مدل‌سازی به ترتیب زیر صورت گرفته است (Itasca, 2011):

- ۱- انتخاب محدوده مناسبی از اطراف تونل
- ۲- انتخاب مدل رفتاری و تعیین پارامترهای آن
- ۳- ترسیم هندسه مقطع تونل
- ۴- اعمال شرایط مرزی و تنش‌های اولیه
- ۵- حل مدل تا رسیدن به تعادل اولیه (قبل از حفاری)
- ۶- حفاری تونل و اعمال ترخیص تنش متناسب
- ۷- بررسی پایداری تونل بعد از ترخیص تنش
- ۸- نصب سیستم نگهداری و ترخیص کامل تنش‌ها

۴-۳-۱ انتخاب محدوده مناسبی از اطراف تونل

در این مرحله از مدل سازی، باید محدوده مناسبی برای مساله در نظر گرفته شود. هر تغییری که در محیط ایجاد می شود، توزیع تنش را در محدوده ای از محیط به نام ناحیه تاثیر تغییر می دهد. وقتی یک سازه در دل زمین حفر می شود قسمتی از خاک و سنگ پیرامون آن دچار تغییر الاستیک و یا پلاستیک می شوند. مرزهای مدل بایستی از محدوده تحت تنش یا تغییر مکان به مقدار کافی دور انتخاب گردد، به طوری که وضعیت تنش ها و تغییر شکل ها در این نقاط قبل و بعد از اعمال تغییرات در مدل تفاوت چندانی نداشته باشد. در مدل سازی عددی مربوط به این تونل های دسترسی روی اندازه های مختلف مدل و تاثیر زون حفاری روی مرزها بررسی انجام گرفت و مناسب ترین ابعاد مدل برای مدل سازی هر دو تونل دسترسی MAT و T4 به یک اندازه و 100×100 متر در نظر گرفته شده است.

۴-۳-۲ انتخاب مدل رفتاری و تعیین پارامترهای آن

چندین مدل رفتاری در برنامه $FLAC^{2D}$ موجود می باشد که بسته به شرایط مسئله می توان از یک یا چند نوع آن استفاده کرد. یکی از این مدل های رفتاری، مدل پلاستیک موهر-کولمب می باشد. این مدل نمایان گر موادی است که تنها در اثر برش به حد تسلیم می رسند. این مدل رفتاری در مکانیک خاک و سنگ برای حالت پلاستیک مدل مرسومی می باشد و در این تحقیق از این مدل رفتاری در مدل سازی تونل ها استفاده شده است. پارامترهای مورد نیاز در مدل پلاستیک موهر-کولمب شامل: چگالی^۱، مدول حجمی^۲، مدول برشی^۳، چسبندگی^۴، زاویه اصطکاک^۵، زاویه اتساع^۶ و مقاومت کششی^۷

^۱ Density

^۲ Bulk Modulus

^۳ Shear Modulus

^۴ Cohesion

^۵ Friction Angle

^۶ Dilation Angle

^۷ Tensile Strength

هستند و اگر هریک از این پارامترها تعریف نشوند، نرم افزار مقدار صفر را برای آن منظور می کند.

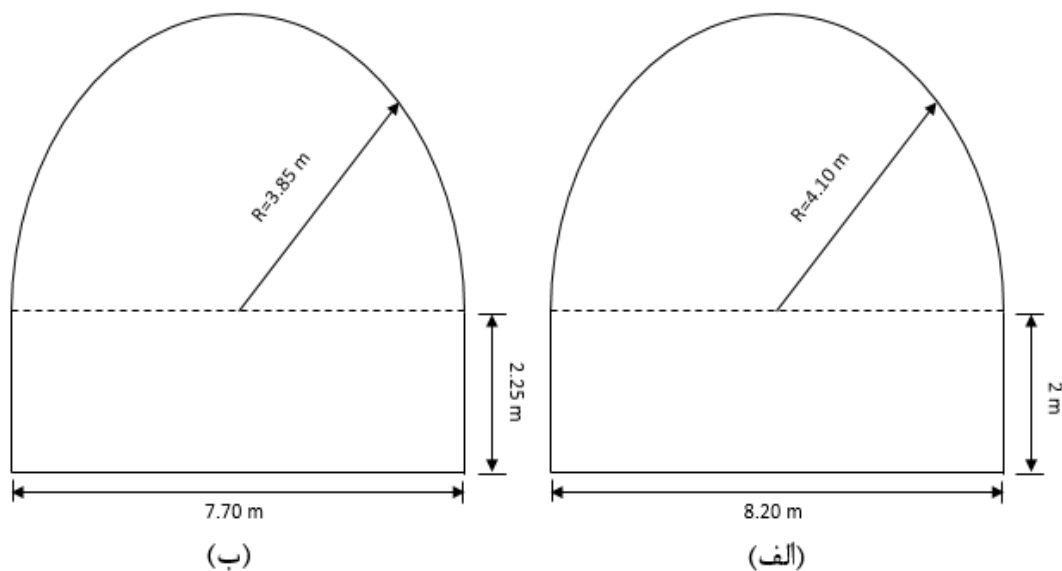
مقدار شتاب گرانش نیز $9/81$ متر بر مجذور ثانیه و مقدار ضریب پواسون، $0/24$ در نظر گرفته شد. همچنین میزان روباره در ایستگاه های مذکور برای تونل های MAT و T4 به ترتیب برابر 460 متر و 400 متر می باشد و جنس سنگ هایی که این دو تونل در آن حفر شده است از واحد زمین شناسی K^{SS} (شامل لایه بندی های ضخیم از ماسه سنگ های دگرگون شده با میان لایه های شیست) می باشد. مقدار نسبت تنش (K) که از آزمایش شکست هیدرولیکی به دست آمده برای هر دو تونل به طور میانگین مقدار $0/5$ در نظر گرفته شد. همچنین مقدار GSI با توجه به مقادیر RMR به دست آمده از آزمایش ها به ترتیب برای تونل دسترسی MAT و T4 مقادیر 53 و 49 در نظر گرفته شد و مقدار فاکتور اغتشاش (D) با توجه به کیفیت حفاری تونل ها، مقدار $0/5$ برای هر دو تونل به دست آمد. سایر پارامترهای اولیه مورد نیاز برای ساختن دو مدل MAT و T4 با توجه به داده های موجود در جدول (۴-۱) به مدل ها اعمال شده است. در ضمن مقادیر این پارامترها یا با توجه به نتایج آزمایش های آزمایشگاهی و صحرایی انجام شده که در فصل سوم موجود است، به دست آمده و یا به کمک نرم افزار Rock Data و روابط تجربی حاصل شده است.

جدول ۴-۱: پارامترهای اولیه و مورد نیاز برای مدل سازی تونل های دسترسی MAT و T4

پارامتر	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	چسبندگی (MPa)	مدول حجمی (GPa)	مدول برشی (GPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	چگالی (kg/m^3)
MAT	۳۹/۷	۱/۷	۴/۰۰۱	۲/۵۱۶	۶/۲	۲۶۷۰
T4	۳۸/۲	۱/۳	۲/۸۲۳	۱/۷۷۶	۴/۴	۲۶۷۰

۳-۳-۴ ترسیم هندسه مقطع تونل

هندسه تونل‌های دسترسی MAT و T4 هر دو به صورت D شکل می‌باشند که دارای عرض دهانه، ارتفاع و طول متفاوت می‌باشند. برای ترسیم شکل تونل‌های مذکور در نرم‌افزار FLAC از ابزارهای گرافیکی که در این نرم‌افزار تعبیه شده استفاده می‌شود که از طریق این ابزار می‌توان اندازه ابعاد شکل هندسی مورد نظر را وارد کرد. شکل (۴-۵) مشخصات هندسی این تونل‌ها را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.

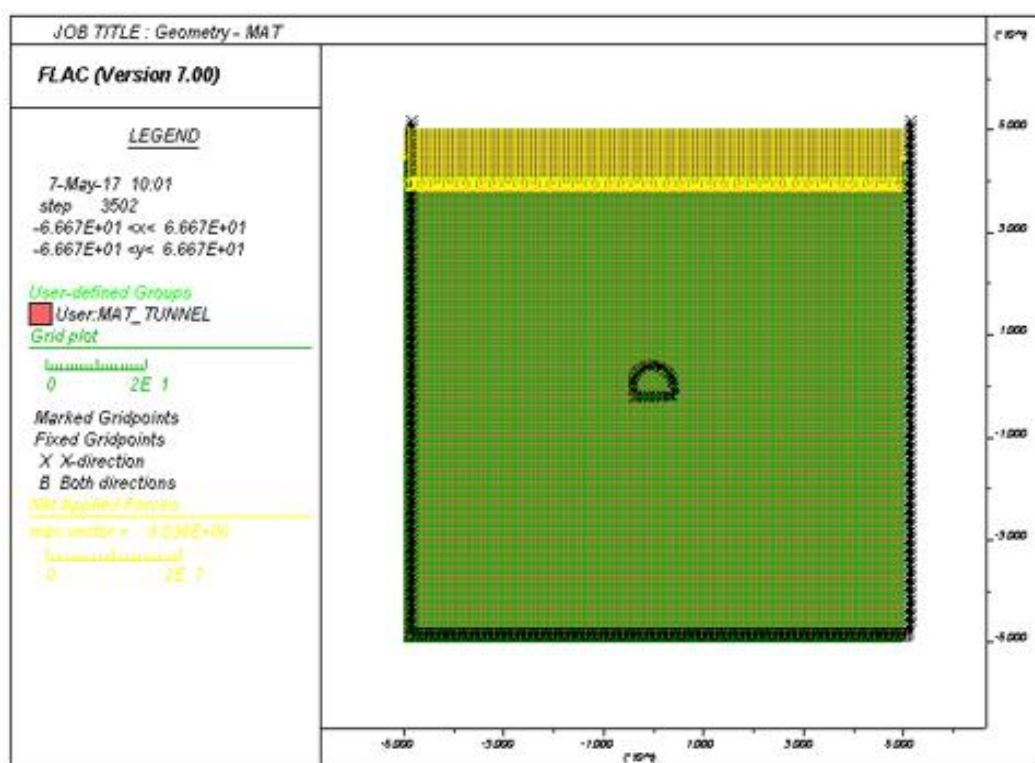


شکل ۴-۵: مشخصات هندسی مقاطع تونل‌ها (الف) تونل دسترسی MAT (ب) تونل دسترسی T4

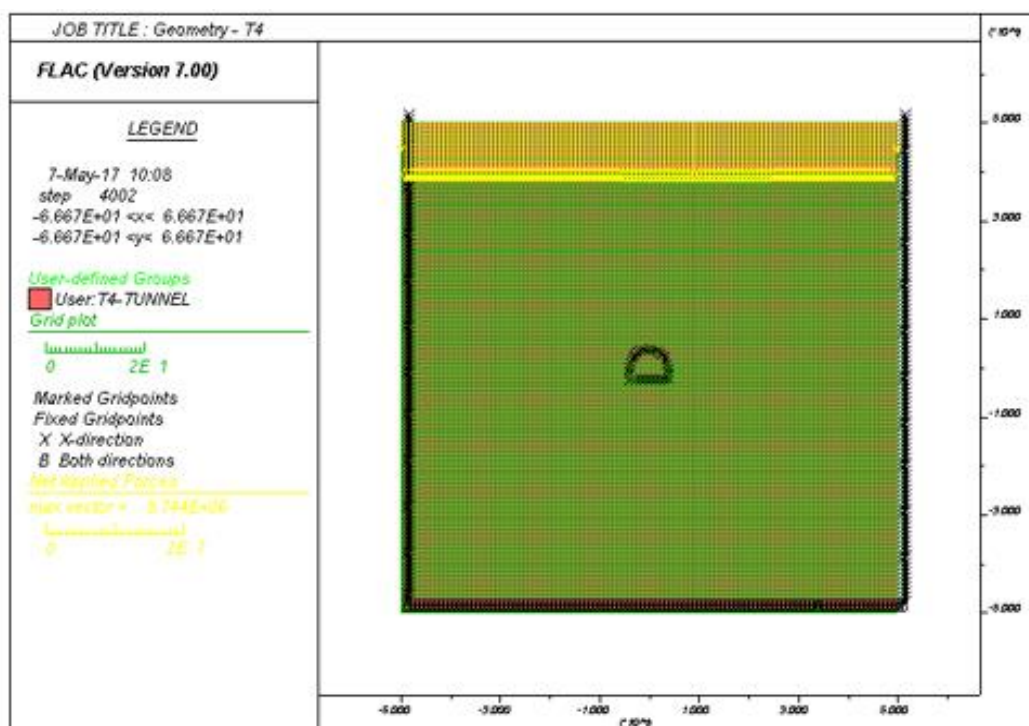
۴-۳-۴ اعمال شرایط مرزی و تنش‌های اولیه

در نرم‌افزارهایی که بر مبنای تفاضل محدود و یا اجزا محدود می‌باشند برخلاف نرم‌افزارهای مبتنی بر روش اجزا مرزی، مرزهای مصنوعی تاثیر قابل توجهی در شرایط فیزیکی مدل، بر نتایج تحلیل‌های عددی می‌گذارند. به طوری که باعث ایجاد خطاهای انکارناپذیری می‌گردند. در نرم‌افزار FLAC این قابلیت به کاربر داده شده است که شرایط مرزی در مرزهای مصنوعی را به صورت تنش و جابجایی اعمال نماید. در تمامی مدل‌های عددی بایستی شرایط مرزی را به گونه‌ای تعیین کرد که با شرایط واقعی زمین قبل

از حفر تونل یکسان باشد. ثابت کردن مرز مدل به نحوی که جابجایی نقاط مرزی صفر باشد، راه حلی برای اعمال شرایط مرزی واقعی است. بدین منظور جابجایی در جهت افقی نقاط انتهایی دیواره چپ و راست مدل و همچنین جابجایی در جهت افقی و قائم نقاط کف مدل صفر شده‌اند. در سازه‌هایی که در زمین حفر می‌شوند، اهمیت تنش‌های برجا از هر پارامتر دیگری بیشتر می‌باشد. یکی از شرایط صحیح مدل‌سازی در نرم‌افزار FLAC اعمال صحیح تنش‌های برجا می‌باشد. در مورد تونل‌های دسترسی مغار نیروگاه سد آزاد ارتفاع روباره برای تونل MAT و T4 به ترتیب برابر ۴۶۰ و ۴۰۰ متر می‌باشد و با توجه به این که در صورت مدل‌سازی تمامی ارتفاع روباره، حجم و زمان محاسبات بسیار افزایش می‌یابد، برای تونل MAT و T4 به ترتیب ۴۵/۹ و ۴۶/۱۵ متر از روباره مدل‌سازی شده و بقیه ارتفاع روباره به صورت بار گسترده و به صورت حاصل ضرب ارتفاع در چگالی مواد به مدل اعمال شده است. شکل‌های (۴-۶) و (۴-۷) نمایی از هندسه مدل و اعمال شرایط مرزی و تنش‌های اولیه و اعمال بار گسترده قبل از حفاری را به ترتیب برای تونل دسترسی MAT و T4 را نشان می‌دهند.



شکل ۴-۶: هندسه مدل و اعمال شرایط مرزی و اولیه برای تونل دسترسی MAT

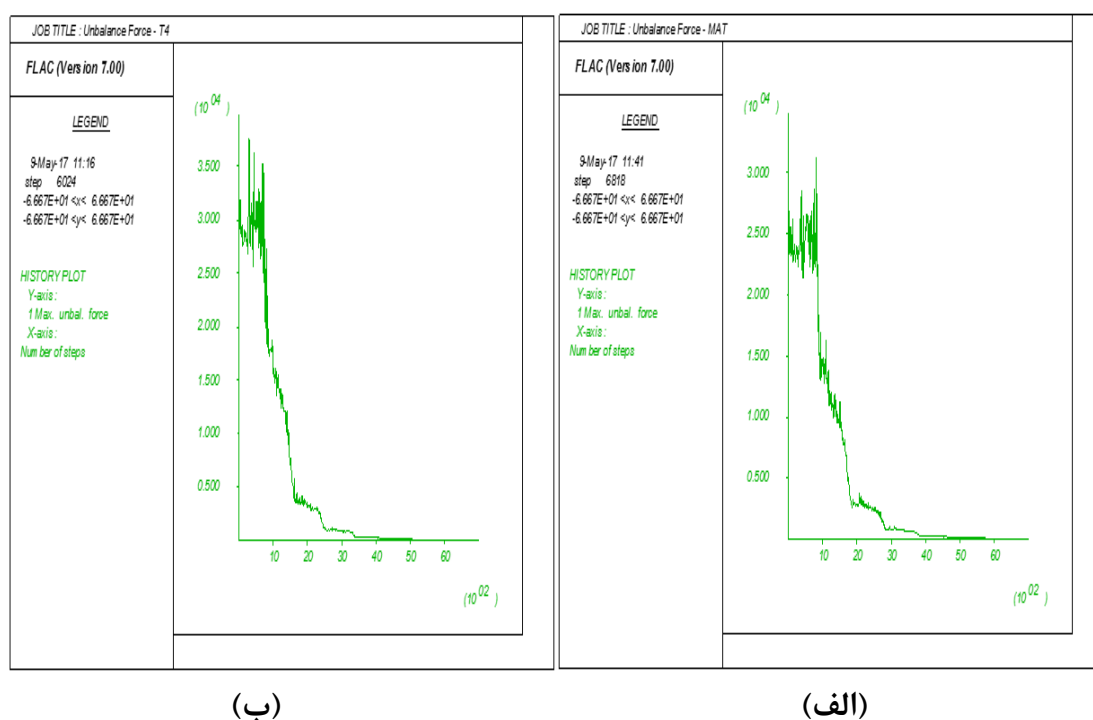


شکل ۴-۷: هندسه مدل و اعمال شرایط مرزی و اولیه برای تونل دسترسی T4

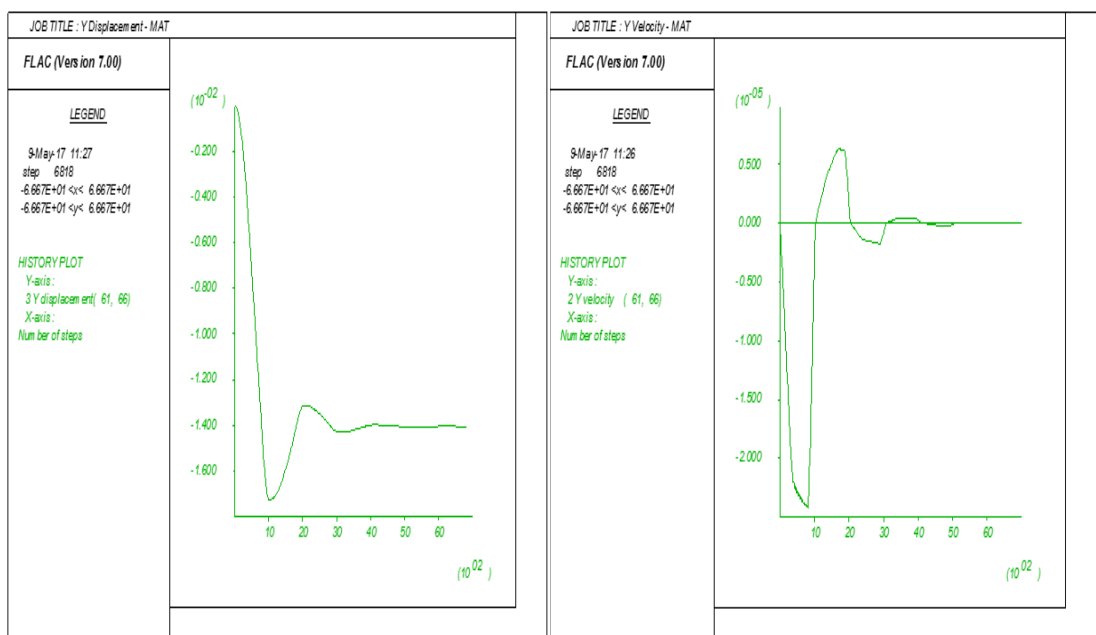
۴-۳-۵ حل مدل تا رسیدن به تعادل اولیه (قبل از حفاری)

پیش از این که حفاری مدل آغاز گردد، مدل اجرا می‌شود، این کار برای تطبیق شرایط برجا با شرایط مدل‌سازی و بر اساس پیشنهاد (ITASCA) صورت می‌گیرد. سوالی که اینجا مطرح می‌گردد این است که آیا مدل‌سازی صحیح صورت گرفته است؟ برای این منظور برای اطمینان از اینکه مدل‌سازی صحیح صورت گرفته فاکتورهایی توسط (ITASCA) پیشنهاد شده است. ثابت شدن جابجایی‌ها پس از حل، به صفر میل کردن نیروهای نامتعادل کننده و سرعت گرهی و در صورت وجود تنش‌های برجا، یکنواخت شدن کنتورهای تنش‌های برجا از عوامل اصلی برای اثبات حل صحیح مساله می‌باشد. با توجه به اینکه تا این مرحله خصوصیات ژئومکانیکی، شرایط مرزی و تنش‌های برجا در مدل اعمال شده‌اند، لازم است کاری کرد تا شرایط واقعی طبیعت قبل از حفر تونل منظور شود که در این حالت مدل به تعادل اولیه رسیده و شرایط طبیعی را دارا خواهد بود. گام اول برای رسیدن به تعادل زمانی به دست می‌آید که نسبت نیروهای نامتعادل کننده باید کمتر از ۰/۰۰۱ بوده و نمودار آن

به صفر میل کند. همان طور که در شکل (۴-۸) دیده می شود، نمودار نیروهای نامتعادل به ترتیب برای تونل های MAT و T4 در نهایت به صفر میل کرده است. سپس برای اطمینان از اینکه جریان پلاستیک در مدل رخ نداده است، باید جابجایی و سرعت گره ها را در مدل کنترل کرد. برای این کار از نمودارهای تاریخچه سرعت و تاریخچه جابجایی می توان بهره جست. در صورتی که مدل به تعادل میل نماید، باید سرعت در گره ها به صفر و جابجایی ها ثابت شوند. در شکل (۴-۹) و (۴-۱۰) نمودارهای جابجایی و سرعت گرهی در جهت y در تاج تونل، به ترتیب برای تونل های MAT و T4 نشان داده شده است. در نهایت می توان کنتورهای تنش عمودی یا افقی را برای اطمینان از به تعادل رسیدن مدل بررسی کرد که در حالت تعادل مدل باید این کنتورهای تنش به صورت یکنواختی قرار بگیرند. در شکل (۴-۱۱) کنتورهای تنش عمودی برای تونل های MAT و T4 نشان داده شده است و این شکل ها نیز به تعادل رسیدن مدل را تایید می کنند.



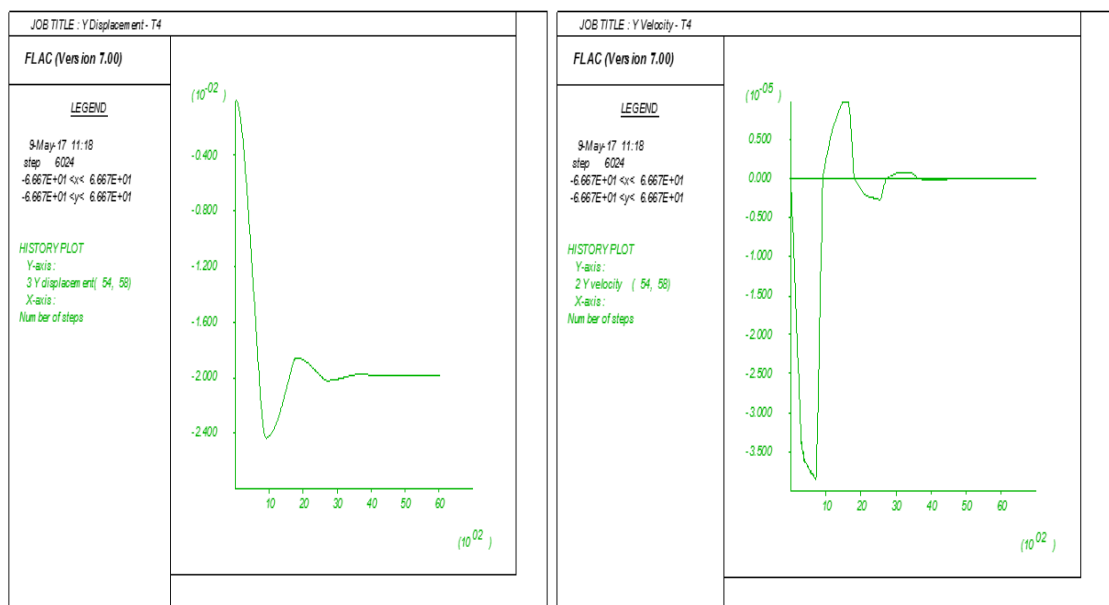
شکل ۴-۸: نمودار نیروهای نامتعادل کننده در تعادل اولیه مدل ها، (الف) تونل MAT (ب) تونل T4



(ب)

(الف)

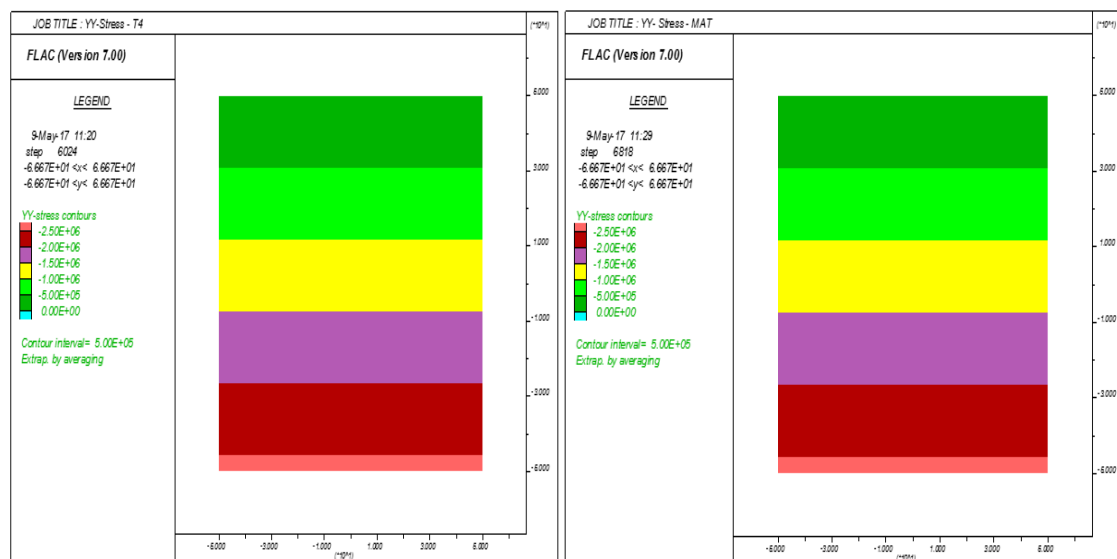
شکل ۴-۹: بررسی تعادل اولیه در تونل دسترسی MAT با نمودارهای، الف) تاریخچه سرعت گرهی در تاج تونل در جهت y ب) تاریخچه جابجایی در تاج تونل در جهت y



(ب)

(الف)

شکل ۴-۱۰: بررسی تعادل اولیه در تونل دسترسی T4 با نمودارهای، الف) تاریخچه سرعت گرهی در تاج تونل در جهت y ب) تاریخچه جابجایی در تاج تونل در جهت y



(ب)

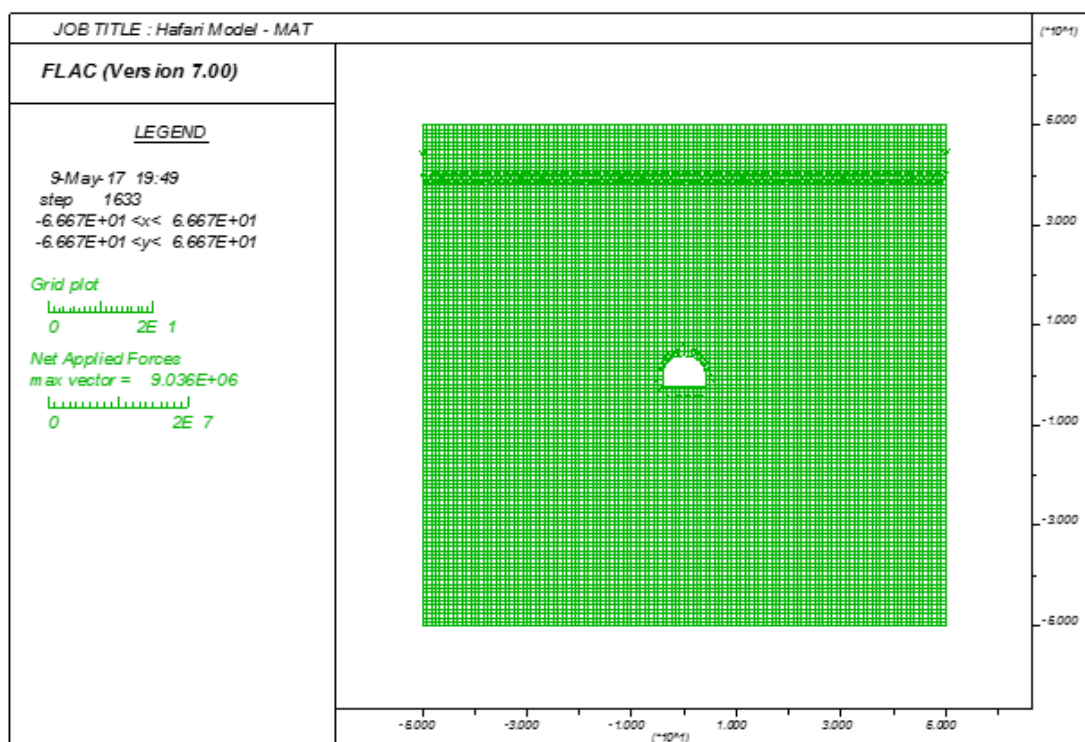
(الف)

شکل ۴-۱۱: کنتورهای تنش عمودی در تعادل اولیه مدل‌ها، (الف) تونل MAT (ب) تونل T4

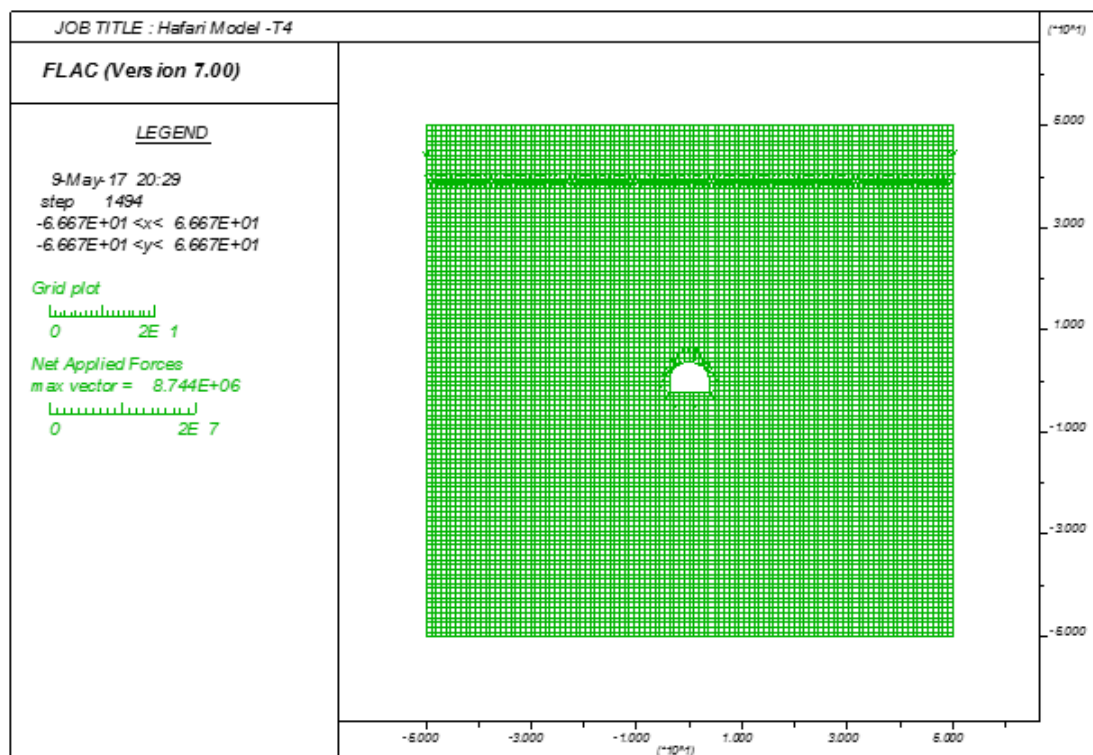
۴-۳-۶ حفاری تونل و اعمال ترخیص تنش متناسب

۴-۳-۶-۱ حفر تونل

پس از ایجاد تعادل اولیه در مدل، تونل‌ها باید به صورت صحیح حفر شوند. حفاری تونل‌های دسترسی مغار نیروگاه سد آزاد به روش چالزنی و آتشیاری صورت گرفته است و در روز یک سیکل کاری کامل انجام شده است و حفر آن به صورت تمام مقطع و تک‌مرحله‌ای آتشیاری شده است. در ضمن گام حفاری (پیشروی) در هر سیکل کاری برای تونل دسترسی MAT و T4، با توجه به امکانات و دستگاه‌های چالزنی به‌طور متوسط ۳ متر می‌باشد. اکنون باید در مدل‌ها نیز این حفاری به آن صورت که در واقعیت انجام شده است، یعنی به صورت یک جا و تک‌مرحله‌ای در نرم‌افزار اعمال شود. شکل‌های (۴-۱۲) و (۴-۱۳) به ترتیب حفاری شدن تونل‌های دسترسی MAT و T4 را در مدل‌های ساخته شده با FLAC نشان می‌دهند.



شکل ۴-۱۲: حفاری تونل دسترسی MAT در مدل ساخته شده



شکل ۴-۱۳: حفاری تونل دسترسی T4 در مدل ساخته شده

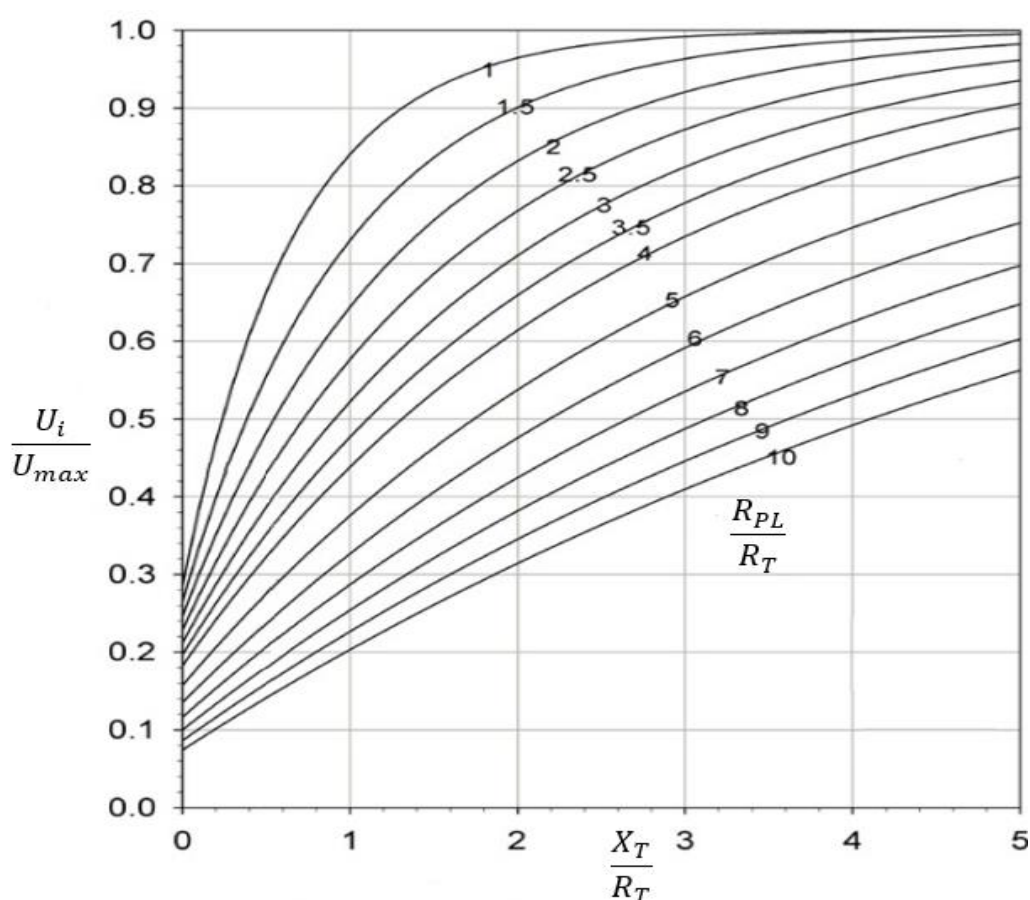
۴-۳-۶-۲ اعمال ترخیص تنش متناسب

در واقع بلافاصله بعد از حفاری تونل، در اثر تنش‌های القایی به وجود آمده و بارهای وارده به تونل، همگرایی در دیواره‌ها و سقف تونل اتفاق می‌افتد و این همگرایی معادل میزان ترخیص تنش است. اعمال این ترخیص تنش تا قبل از نصب سیستم نگهداری اولیه در مدل عددی، می‌تواند مساله بعد سوم که همان تاثیر گام پیشروی و فاصله سینه کار از نگهداری اولیه است را در مسائل دو بعدی حل کند. وقتی سیستم نگهداری در نزدیکی سینه کار نصب می‌شود، همه بار روی این سیستم منتقل نمی‌شود، بلکه قسمتی از بار که در اطراف فضای حفاری توزیع مجدد یافته، توسط خود سینه کار تحمل می‌شود. با پیشروی تونل، تاثیر سینه کار کاهش یافته و سیستم نگهداری باید مقدار بیش‌تری از بار را تحمل کند. لحاظ نمودن وقفه زمانی بین حفر تونل تا نصب نگهداری، تاثیر به سزایی در کاهش حجم سیستم نگهداری دارد. چراکه بخش قابل‌توجهی از تغییر شکل توده سنگ در همین فاصله زمانی رخ داده و در اثر این تغییر شکل بخش عمده‌ای از تنش‌های القایی رها (ترخیص) شده و در نهایت فشار وارد بر سیستم نگهداری کاهش می‌یابد. اگر در مدل عددی به این فاصله زمانی توجه نشود، مسلماً ناپیوستگی انتظار جواب قابل‌قبول از آن را داشت.

در این پژوهش از روش ولاچوپولس و دتریچ^۱ (۲۰۰۹)، برای تعیین درصد ترخیص تنش و محاسبه جابجایی تونل قبل از نصب سیستم نگهداری استفاده شده است. برای استفاده از این روش به یک سری اطلاعات شامل حداکثر جابجایی در تاج تونل با اعمال ترخیص تنش کامل، شعاع زون پلاستیک، شعاع معادل تونل و طول گام حفاری (فاصله از سینه کار) نیاز است که مقادیر حداکثر جابجایی تاج تونل و شعاع زون پلاستیک از نرم‌افزار FLAC به دست می‌آید و اطلاعات شعاع تونل و گام حفاری را

^۱ Vlachopoulos and Diederich

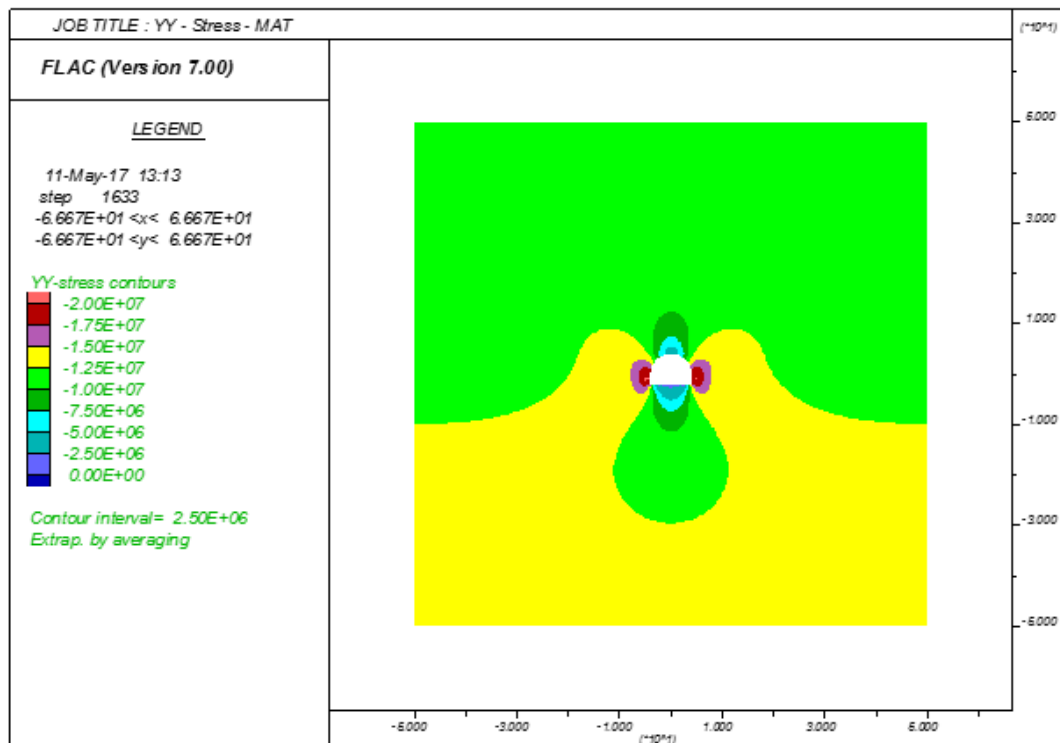
از قبل داریم. سپس همه این اطلاعات در نمودار شکل (۴-۱۴) که برای این روش ارائه کرده‌اند، استفاده می‌شود تا مقدار جابجایی اولیه در تاج تونل (U_i)، از روی محور قائم نمودار که نسبت جابجایی اولیه به جابجایی حداکثر در تاج تونل ($\frac{U_i}{U_{max}}$) می‌باشد، حاصل شود و در نهایت از مقدار U_i درصد ترخیص تنش را که معادل است با این مقدار جابجایی برای تونل به کمک نرم‌افزار FLAC به دست می‌آید (Vlachopoulos and Diederich, 2009).



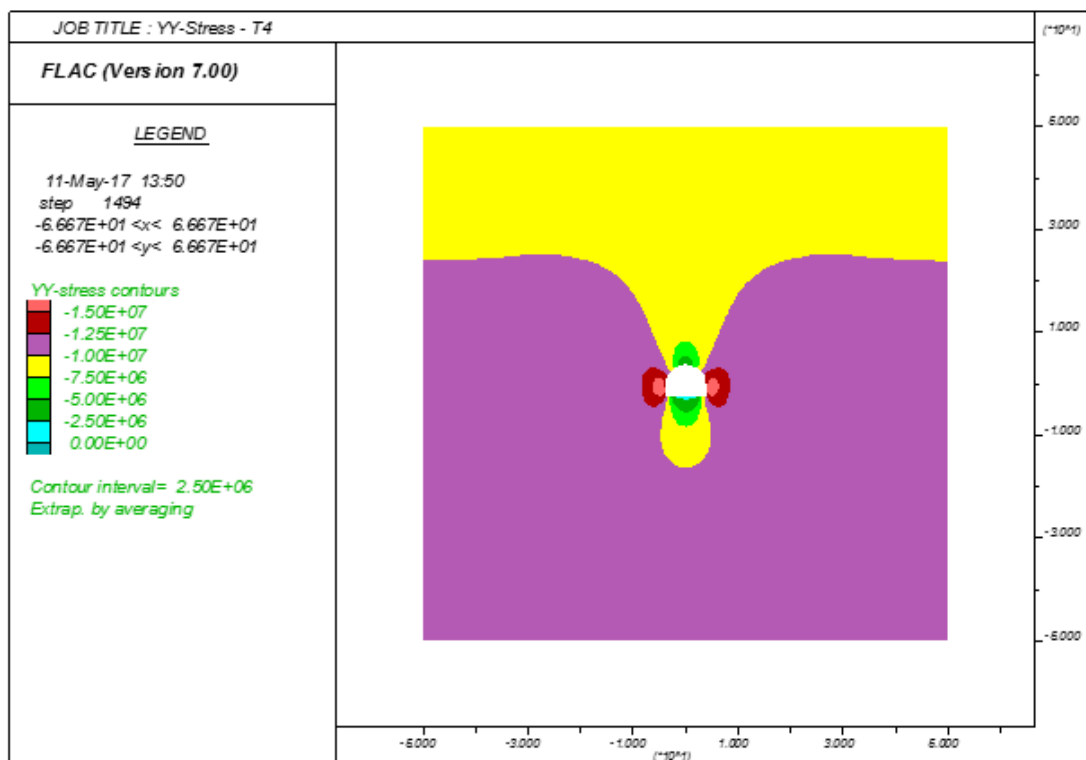
شکل ۴-۱۴: نمودار ارائه شده ولاچوپولس و دتریچ برای تعیین درصد ترخیص تنش و جابجایی تاج تونل قبل از نگهداری (Vlachopoulos and Diederich, 2009)

در این نمودار R_{PL} شعاع زون پلاستیک، R_T شعاع معادل تونل و X_T گام حفاری تونل بوده که این مقادیر برای تونل دسترسی MAT به ترتیب برابر ۶، ۳/۶۹ و ۳ متر می‌باشد و همچنین در تونل دسترسی T4 این مقادیر به ترتیب برابر ۶/۵، ۳/۶ و ۳ متر به دست آمده است. حداکثر جابجایی تاج

تونل (U_{max}) با استفاده از نرم‌افزار برای تونل دسترسی MAT و T4 به ترتیب ۱۶/۴۶ و ۲۰/۲۹ میلی‌متر به دست آمده است. با قرار دادن این مقادیر روی محورهای نمودار، مقدار نسبت $\frac{U_i}{U_{max}}$ از محور قائم نمودار به دست آمده که برای تونل MAT مقدار ۰/۶۷ و برای تونل T4 مقدار ۰/۶۴ حاصل شده است و سپس با توجه به این نسبت مقدار مجهول U_i (جابجایی اولیه تاج تونل قبل از نصب نگهداری) برای دو تونل دسترسی MAT و T4، به ترتیب ۱۱/۳ میلی‌متر و ۱۲/۹۸ میلی‌متر به دست می‌آید و در نهایت مقدار ترخیص تنشی که معادل با این مقدار جابجایی در تاج تونل‌ها باشد، با بررسی‌های انجام شده به ترتیب برای تونل دسترسی MAT، ۸۱ درصد ترخیص تنش و برای تونل دسترسی T4، مقدار ۷۹ درصد ترخیص تنش به دست آمد. شکل‌های (۴-۱۵) و (۴-۱۶) کنتورهای تنش عمودی اطراف تونل را بعد از حفاری و اعمال ترخیص تنش، به ترتیب برای مدل‌های تونل دسترسی MAT و T4 را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۵: کنتورهای تنش عمودی بعد از حفاری و اعمال ترخیص تنش در مدل MAT



شکل ۴-۱۶: کنتورهای تنش عمودی بعد از حفاری و اعمال ترخیص تنش در مدل T4

۷-۳-۴ بررسی پایداری تونل بعد از اعمال ترخیص تنش

در این مرحله با اعمال ترخیص تنش‌های به‌دست‌آمده در مرحله قبل، به بررسی پایداری تونل‌های حفاری شده پرداخته می‌شود. ساکورایی روشی را برای ارزیابی پایداری سازه‌های زیرزمینی با توجه به کرنش بحرانی پیشنهاد کرده است که بر اساس نتایج آزمایش‌های فشاری تک‌محوری بر روی سنگ‌های مختلف تعریف می‌شود. ساکورایی و همکارانش روابط (۴-۱) را بین مدول الاستیسیته (E) و کرنش بحرانی در حالت فشار محصور نشده در اطراف تونل (ϵ_c) ارائه کرده‌اند. تراز هشدار خطر I حد بالاست که تونل هیچ‌گونه مشکلی از لحاظ پایداری ندارد و در تراز هشدار خطر III تونل سازی با مشکلات عدیده مواجه شده است و پایداری کوتاه‌مدت را نشان می‌دهد. تراز هشدار خطر II حد متوسط است که به‌عنوان مبنای طراحی نگهداری در تونل‌های مهندسی پیشنهاد شده است (Sakurai, 1981).

$$\begin{aligned} \text{تراز هشدار خطر I} \quad \text{Log } \varepsilon_c &= -0.25 \text{ Log } E - 0.85 \\ \text{تراز هشدار خطر II} \quad \text{Log } \varepsilon_c &= -0.25 \text{ Log } E - 1.22 \quad (۱ - ۴) \\ \text{تراز هشدار خطر III} \quad \text{Log } \varepsilon_c &= -0.25 \text{ Log } E - 1.59 \end{aligned}$$

که در روابط ارائه شده بالا، ε_c کرنش بحرانی و E مدول الاستیسیته برحسب کیلوگرم نیرو بر سانتی متر مربع (kgf/cm^2) است. لازم به ذکر است که یک kg/cm^2 برابر با $۱/۰.۳۳ \text{ kgf/cm}^2$ است. از آنجاکه توده سنگ اطراف تونل‌ها تحت تنش سه محوره قرار دارد، استفاده از ماکزیمم کرنش برشی برای ارزیابی پایداری تونل منطقی‌تر به نظر می‌رسد. در این حالت کرنش برشی بحرانی به عنوان مقدار مجاز استفاده می‌شود. ساکورایی رابطه (۲-۴) را برای محاسبه کرنش برشی بحرانی در حالت سه محوری (۷) با استفاده از کرنش برشی بحرانی در حالت فشاری محصور نشده و نسبت پواسون (ν) پیشنهاد کرد (Sakurai, 1997).

برای ارزیابی پایداری فضای حفاری شده لازم است تا نتایج کرنش‌های برشی حاصل از مدل عددی با کرنش برشی مجاز حول فضای زیرزمینی مقایسه شوند. در صورتی که این کرنش‌ها از کرنش برشی مجاز به واسطه تراز هشدار خطر II که به عنوان مبنای طراحی نگهداری فضاهای زیرزمینی توسط ساکورایی ارائه شده است، کمتر شود، تونل پایدار خواهد بود.

$$\gamma_c = (1 + \nu)\varepsilon_c \quad (۲ - ۴)$$

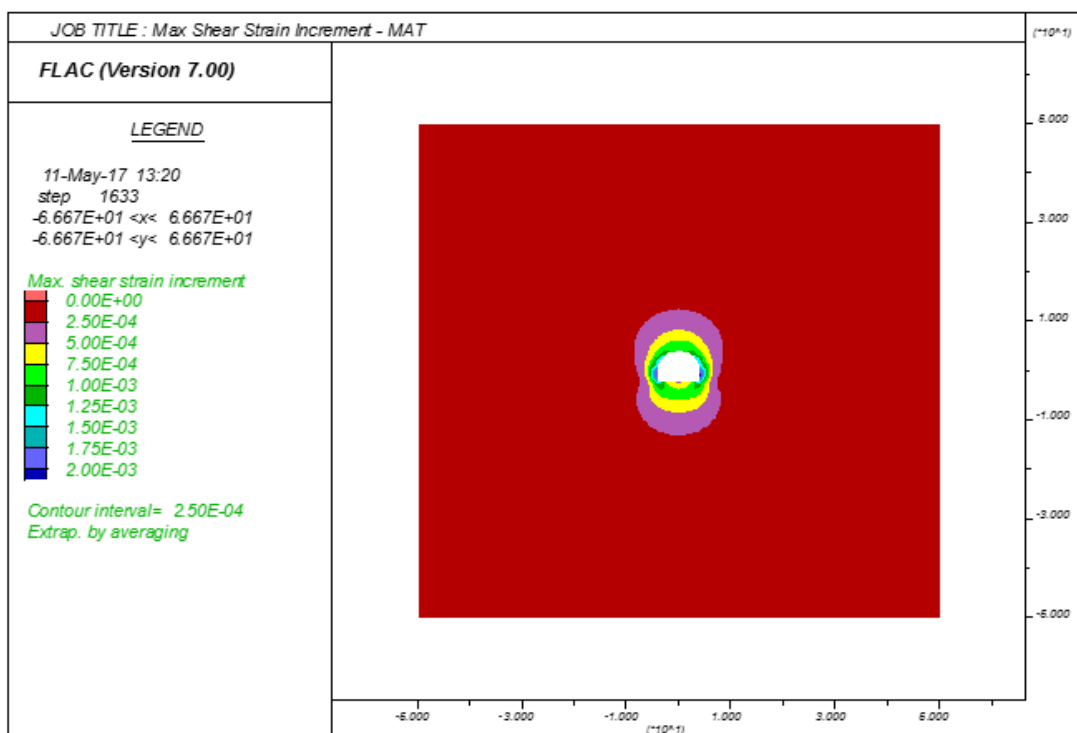
با جای گذاری مقادیر مدول الاستیسیته و نسبت پواسون در رابطه‌های (۱-۴) و (۲-۴)، می‌توان مقادیر کرنش بحرانی در حالت فشاری محصور نشده و همچنین کرنش برشی بحرانی را محاسبه کرد.

الف) محاسبه برای تونل دسترسی MAT:

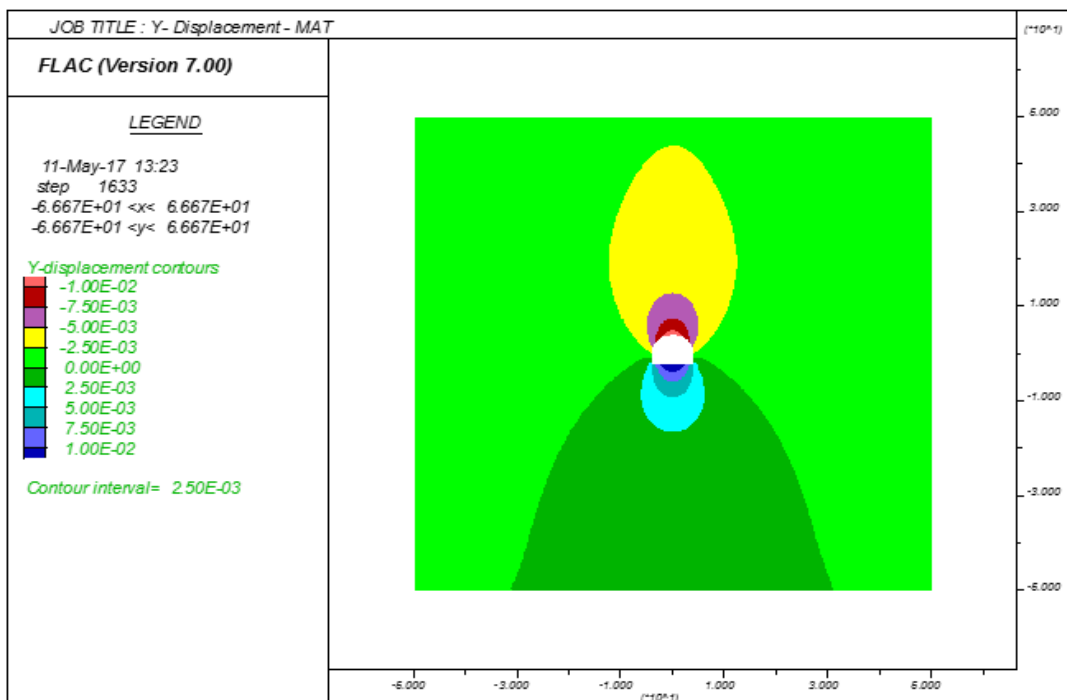
$$\begin{aligned} \log \varepsilon_c &= -0.25 \log E - 1.22 \Rightarrow \varepsilon_c = 3.793 \times 10^{-3} \\ \gamma_c &= (1 + \nu)\varepsilon_c \Rightarrow \gamma_c = 4.704 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

شکل‌های (۱۷-۴) و (۱۸-۴) حداکثر کرنش برشی و کنتور جابجایی‌های به وجود آمده در اطراف

تونل دسترسی MAT بعد از حفاری و در اثر اعمال ترخیص تنش در نرم افزار FLAC را نشان می دهد.



شکل ۴- ۱۷: حداکثر کرنش برشی در اطراف تونل دسترسی MAT بعد از حفاری و اعمال ترخیص تنش



شکل ۴- ۱۸: کنتورهای جابجایی در اطراف تونل دسترسی MAT بعد از حفاری و اعمال ترخیص تنش

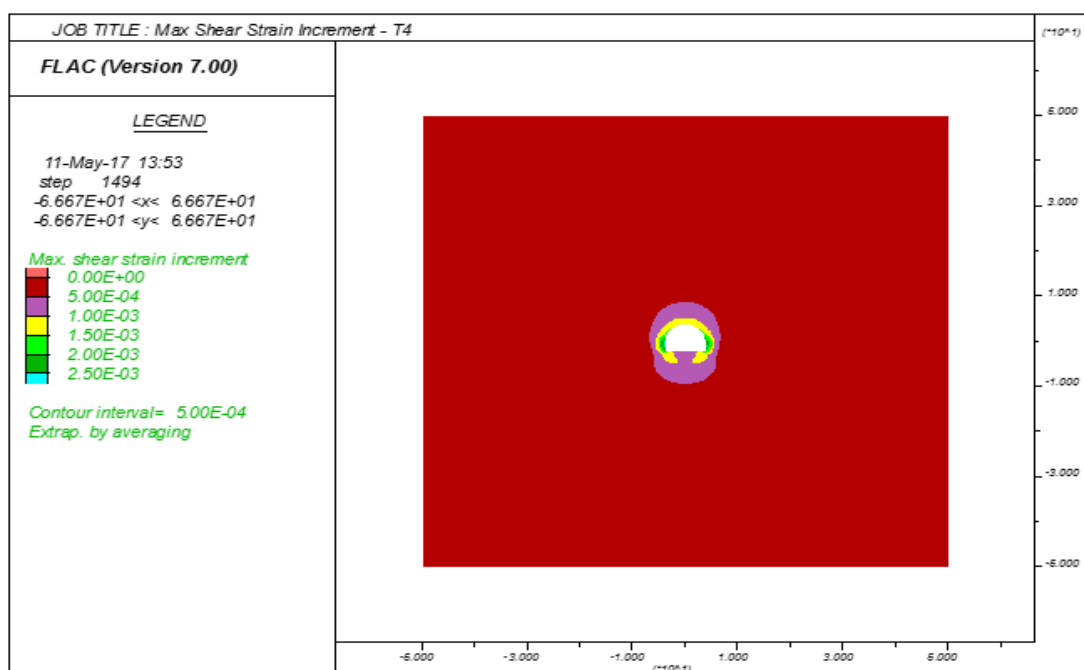
با توجه به شکل (۴-۱۷) حداکثر کرنش برشی به وجود آمده در اطراف فضای حفاری شده تونل برابر با $10^{-3} \times 2/145$ است، که از مقدار بحرانی محاسبه شده در بالا کم‌تر است و می‌توان چنین استنباط کرد که فضای حفاری شده تحت تاثیر ترخیص تنش اعمالی، پایدار است.

(ب) محاسبه برای تونل دسترسی T4:

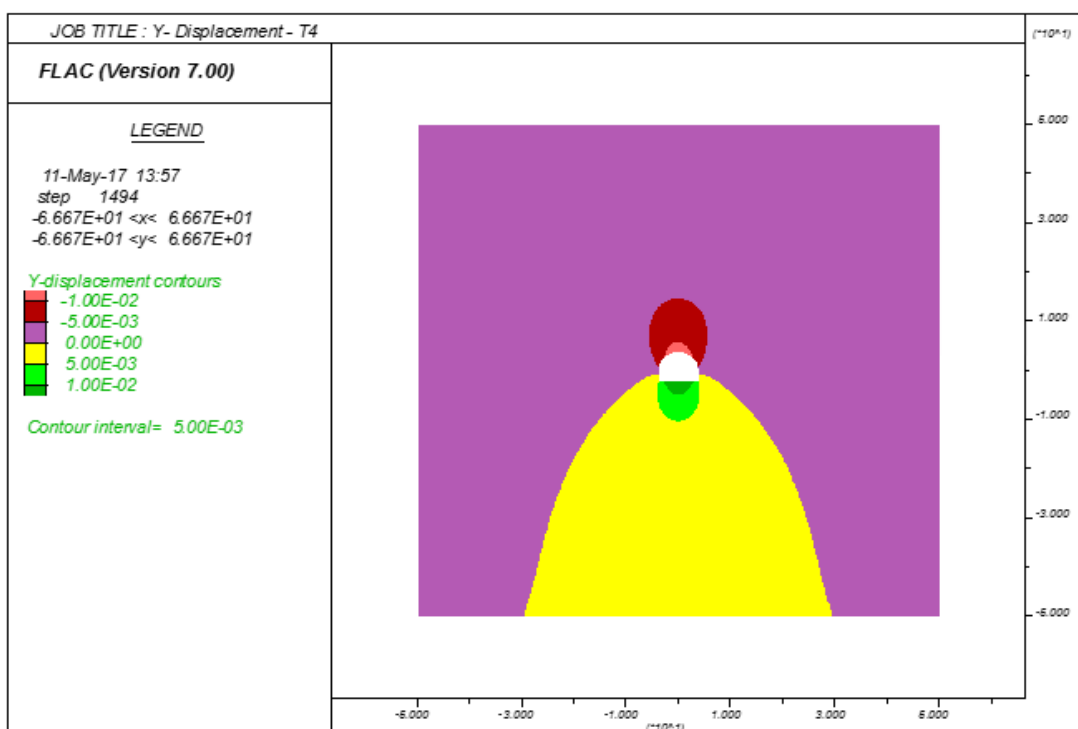
$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.22 \Rightarrow \varepsilon_c = 4.139 \times 10^{-3}$$

$$\gamma_c = (1 + \nu) \varepsilon_c \Rightarrow \gamma_c = 5.132 \times 10^{-3}$$

در شکل‌های (۴-۱۹) و (۴-۲۰) نیز حداکثر کرنش برشی و کنتور جابجایی‌های به وجود آمده برای تونل دسترسی T4، بعد از حفاری و در اثر اعمال ترخیص تنش در نرم‌افزار FLAC نشان داده شده است. در اینجا با توجه به شکل (۴-۱۹) مقدار بیشینه کرنش برشی در اطراف تونل T4 به دست می‌آید که این مقدار برابر با $10^{-3} \times 2/89$ می‌باشد و این در مقایسه با مقدار کرنش برشی بحرانی محاسبه شده در بالا برای تونل T4 کم‌تر است و به این نتیجه می‌توان رسید که این تونل نیز با ترخیص تنش اعمال‌شده پایدار است.



شکل ۴-۱۹: حداکثر کرنش برشی در اطراف تونل دسترسی T4 بعد از حفاری و اعمال ترخیص تنش



شکل ۴-۲۰: کنتورهای جابجایی در اطراف تونل دسترسی T4 بعد از حفاری و اعمال ترخیص تنش

۴-۳-۸ نصب سیستم نگهداری و ترخیص کامل تنش‌ها

بعد از مرحله بررسی پایداری مدل‌های حفاری شده، نوبت به مرحله نصب سیستم نگهداری در تونل‌های مدل‌سازی شده و در نهایت ترخیص کامل تنش‌ها می‌رسد. همان‌طور که گفته شد برای انجام کار تحلیل برگشتی باید هر آنچه را در واقعیت برای ساخت سازه موردنظر اتفاق افتاده در مدل‌سازی نیز آن‌ها را اعمال کرد، تا با دقت بیشتر به نتایج موردنظر رسید. بنابراین در این مرحله نیز هر نوع سیستم نگهداری که در واقعیت برای تونل‌ها اجرا شده است، در مدل‌سازی هم باید سعی شود که آن سیستم نگهداری اعمال شود. برای نگهداری تونل‌های دسترسی MAT و T4، از یک نوع سیستم نگهداری مشابه استفاده شده است که شامل ترکیب مش و شاتکریت با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر و سپس نصب راک بولت‌های تزریقی می‌باشد. در جدول شماره (۴-۲) و (۴-۳) خصوصیات سیستم نگهداری استفاده شده در مدل‌ها آورده شده است.

جدول ۴-۲: خصوصیات راک بولت استفاده شده در مدل سازی

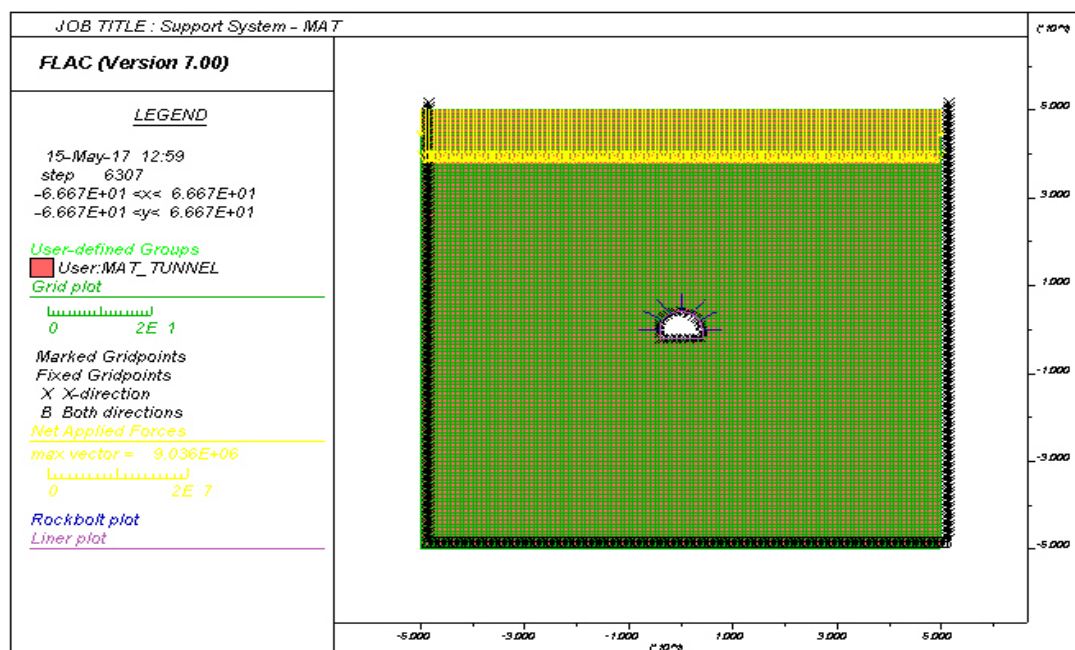
مقدار	خصوصیات
۴ m	طول میلگرد
۲۵ mm	قطر میلگرد
۵۱ mm	قطر چال
۲۰۰ GPa	مدول الاستیسیته
$1/9174e^{-8} \text{ m}^4$	ممان اینرسی
۲×۲ m	آرایش راک بولت
۴۹ Mpa	مقاومت فشاری ۲۸ روزه دوغاب تزریقی
۹ GPa	مدول برشی دوغاب
$2/25 e^5 \text{ N}$	نیروی تسلیم کششی راک بولت

جدول ۴-۳: خصوصیات ترکیب مش و شاتکریت استفاده شده در مدل سازی

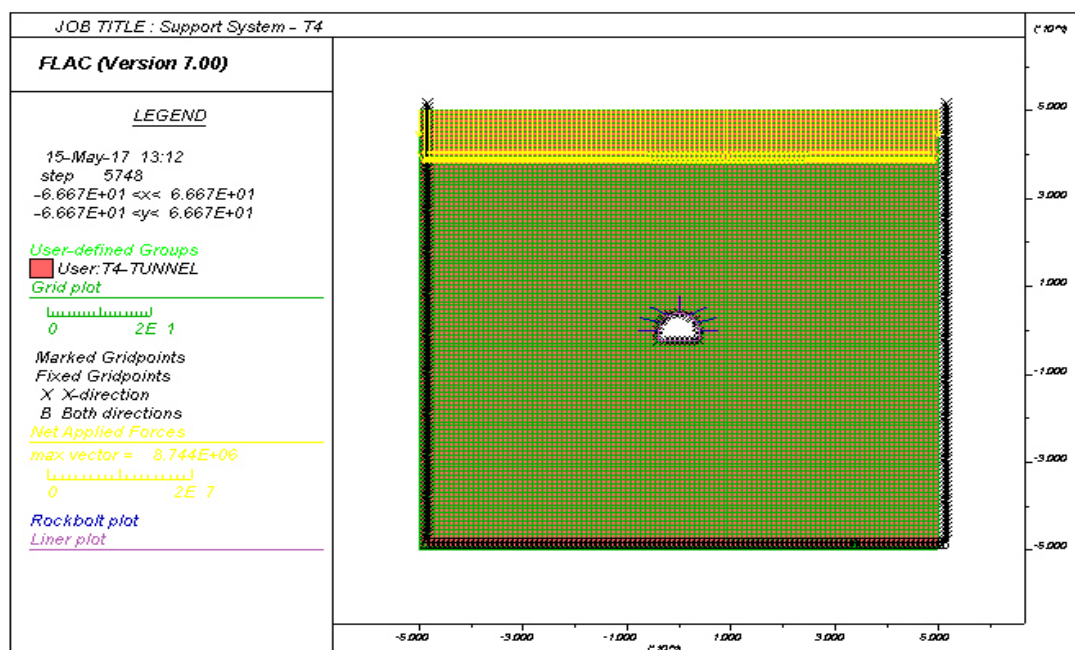
مقدار	خصوصیات
۱۰ cm	ضخامت
۲۸/۴۲ GPa	مدول الاستیسیته
2300 kg/m^3	وزن مخصوص شاتکریت
۰/۲	ضریب پواسون
$7/58 e^{-5} \text{ m}^4$	ممان اینرسی
۳۰ Mpa	مقاومت فشاری ۲۸ روزه شاتکریت

بنابراین سیستم نگهداری مذکور با توجه به خصوصیات که در جدول های بالا برای آن عنوان شده است، به تونل های مدل سازی شده اعمال می شود. در ادامه تنش های باقیمانده ترخیص و به مدل اعمال

می‌شود. شکل‌های (۴-۲۱) و (۴-۲۲) به ترتیب مدل‌های ساخته شده نهایی از تونل دسترسی MAT و T4 را بعد از نصب سیستم نگهداری نشان می‌دهند.



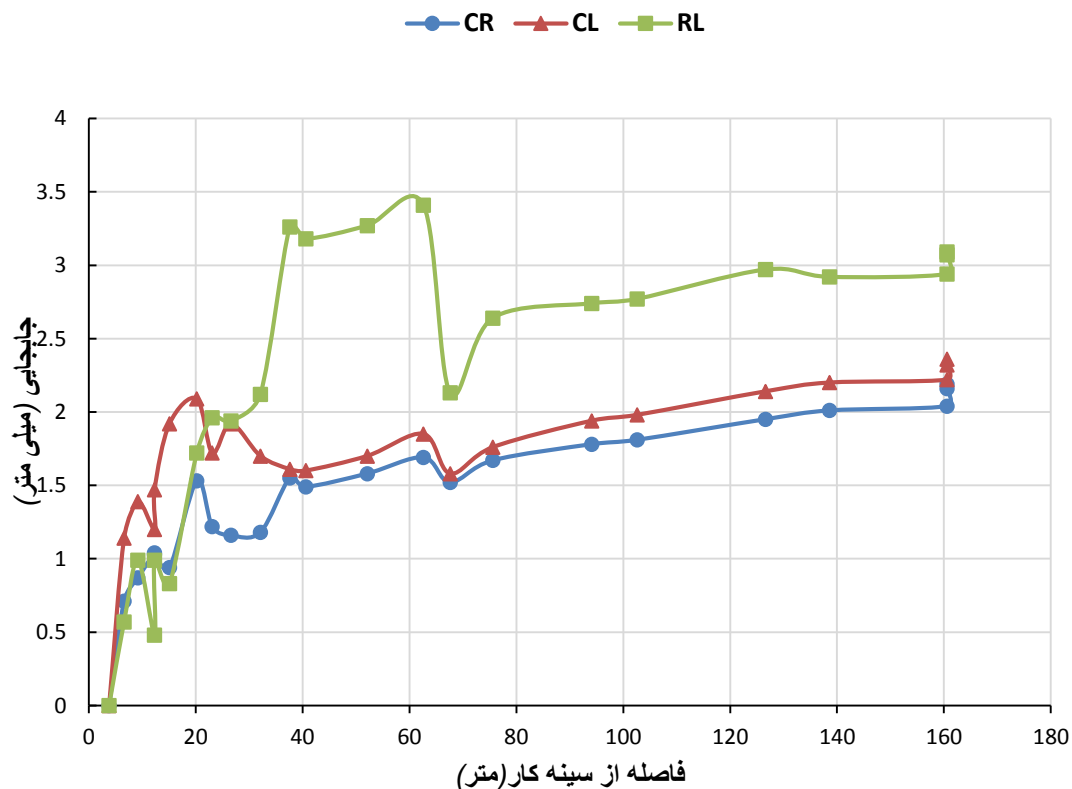
شکل ۴-۲۱: مدل کردن سیستم نگهداری نصب شده در تونل دسترسی MAT



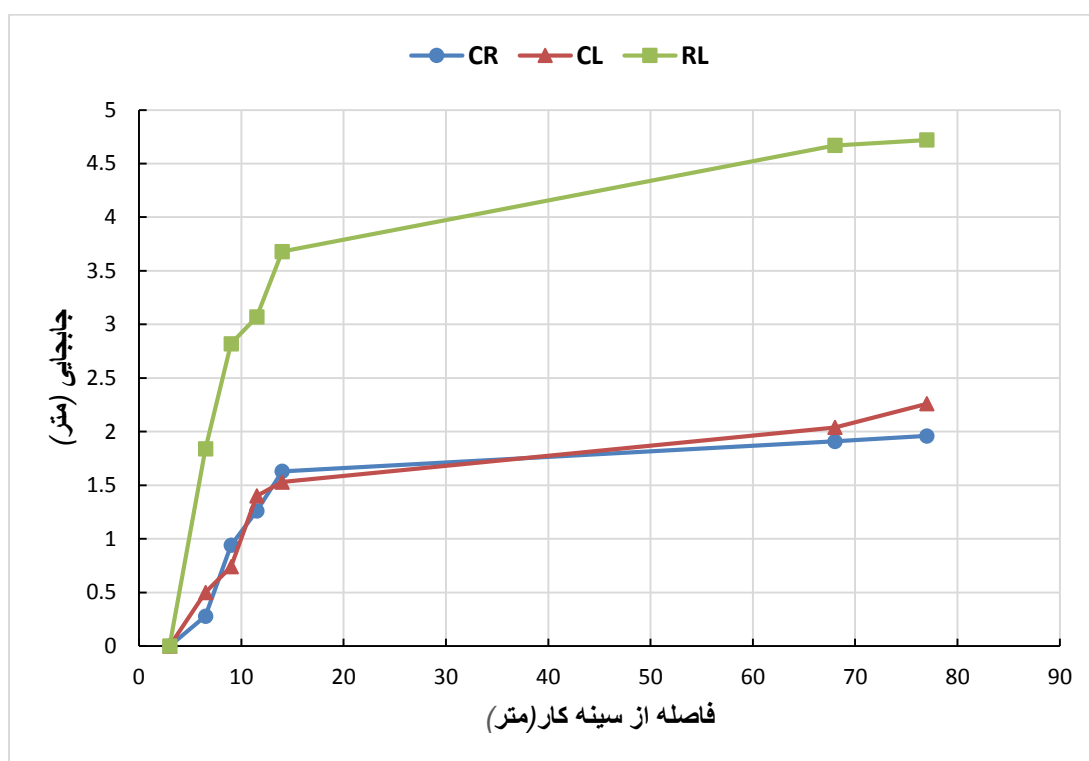
شکل ۴-۲۲: مدل کردن سیستم نگهداری نصب شده در تونل دسترسی T4

۴-۴ تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از ابزار همگرایی سنجی

پس از انتخاب مقاطع مناسب ابزار دقیق و بررسی نتایج آن‌ها و پس از مدل‌سازی تونل‌ها مشابه به شرایط واقعی، برای مقایسه بین نتایج ابزار دقیق و نتایج تحلیل عددی باید پارامترهای ورودی به نرم‌افزار بر اساس پارامترهای ژئومکانیکی منطقه مورد مطالعه انتخاب شود. همان‌طور که از قبل هم گفته شد در تحقیق حاضر، در بین ایستگاه‌های همگرایی سنجی موجود در طرح، ایستگاه با کیلو متر ۱+۳۰۰ از تونل دسترسی MAT، و ایستگاه با کیلو متر ۰+۰۰۲ از تونل دسترسی T4 برای تحلیل برگشتی پارامترهای مقاومتی انتخاب شده است. در شکل (۴-۲۳) نمودار تغییرات جابجایی بر اساس فاصله از سینه کار همگرایی سنج نصب شده در ایستگاه ۱+۳۰۰ واقع در تونل MAT، و در شکل (۴-۲۴) نمودار تغییرات جابجایی بر اساس فاصله از سینه کار همگرایی سنج نصب شده در ایستگاه ۰+۰۰۲ واقع در تونل T4، نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۳ : نمودار تغییرات جابجایی همگرایی سنج نصب شده در تونل MAT واقع در کیلو متر ۱+۳۰۰



شکل ۴-۲۴: نمودار تغییرات جابجایی همگرایی سنج نصب شده در تونل T4 واقع در کیلو متر ۰+۰۰۲

در هر کدام از ایستگاه‌ها فاصله بین پین‌های نصب شده در سقف و دیواره تونل‌ها به‌طور مرتب قرائت شده‌اند که به‌طور اختصاری با اسامی C-R (فاصله سقف تونل با دیواره سمت راست)، C-L (فاصله سقف تونل با دیواره سمت چپ) و R-L (فاصله دیواره سمت راست با دیواره سمت چپ تونل) نام‌گذاری شده است.

تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از همگرایی سنج را می‌توان در دو مرحله بررسی کرد. در مرحله اول بر اساس ظاهر نمودارهای همگرایی می‌توان شرایط پایداری تونل را ارزیابی کرد. به این صورت که مشاهده نمودارهای همگرایی سنجی در شکل‌های (۴-۲۳) و (۴-۲۴) برای ایستگاه‌های مذکور در تونل دسترسی MAT و T4 نشان می‌دهند که از یک روند کلی پیروی می‌کنند، به غیر از نمودار شکل (۴-۲۳) از تونل دسترسی MAT که از حد فاصله سینه کار نزدیک ۴۰ متر نمودار ناگهانی صعود زیاد داشته و در فاصله از سینه کار حدوداً ۷۰ متر نزول ناگهانی داشته ولی بعد از آن باز هم به روند

افزایشی معمولی خود بازگشته است که این صعود و نزول ناگهانی می‌تواند ناشی از خطای قرائت ابزار دقیق باشد. بدین ترتیب که پس از گذشت مدت‌زمانی از نصب ایستگاه همگرایی سنجی و فاصله گرفتن سینه کار از محل آن، جابجایی‌های توده سنگ درون‌گیر تونل کم شده و همگرایی تونل‌ها در حد مشخصی ثابت باقی می‌ماند. به عبارت دیگر سیستم نگهداری مورد استفاده پایداری تونل را تامین می‌نماید و می‌توان به پایداری تونل و ایمنی عملیات اطمینان داشت.

در مرحله دوم بر اساس معیاری که برای قضاوت در مورد ارزیابی جابجایی‌های ثبت شده وجود دارد به بررسی شرایط پایداری تونل‌ها پرداخته می‌شود. مناسب‌ترین روش تفسیر تغییر مکان‌های حاصل از ابزاربندی، استفاده از نرخ یا آهنگ تغییر مکان می‌باشد. تجربه نشان می‌دهد که نرخ‌های تغییر مکان (همگرایی) کمتر از 0.01 mm/day نشان‌دهنده شرایط پایدار می‌باشند، همچنین نرخ‌های تغییر مکان بین 0.01 تا 0.05 mm/day ، اگرچه نرخ‌های بزرگی هستند ولی فقط برای فضاهای زیرزمینی بزرگ (مانند مغارها) خطرناک می‌باشند و در سایر موارد از جمله تونل‌ها نشان‌دهنده شرایط پایدار هستند. اما چنانچه نرخ‌های تغییر مکان بیشتر از 0.05 mm/day باشد، نشان‌دهنده شرایط ناپایدار بوده و بلافاصله بایستی برای نگهداری فضا اقدام شود (مشهد میقانی، ۱۳۸۰).

بنابراین با توجه به بررسی‌های انجام شده و داده‌های موجود برای تونل‌های MAT و T4، نرخ‌های تغییر مکان بین سه پین همگرایی سنج نصب‌شده در سقف و دیواره‌های تونل‌ها در ایستگاه‌های مذکور در بین بازه 0.01 تا 0.05 mm/day به دست آمدند، به‌طوری‌که بیشترین مقدار نرخ تغییر مکان در تونل MAT، تا نزدیک 0.02 mm/day و در تونل T4 تا نزدیک 0.01 mm/day می‌رسد. پس بر اساس معیار نرخ تغییر مکان می‌توان نتیجه گرفت که در این دو ایستگاه، سیستم‌های نگهداری نصب‌شده جواب‌گو بوده و تونل‌ها از شرایط پایداری مطلوبی برخوردار هستند. در مرحله بعد نتایج تحلیل‌های عددی با نتایج ابزار دقیق سنجیده می‌شود و با روش تحلیل برگشتی به تدقیق پارامترهای ژئومکانیکی پرداخته می‌شود.

۴-۵ تحلیل برگشتی

۴-۵-۱ انتخاب روش

از بین روش‌های تحلیل برگشتی که در فصل دوم ارائه شدند، برای انجام تحلیل برگشتی طرح مورد مطالعه با توجه به ویژگی‌هایی از قبیل مدل رفتاری، مقطع سازه، روش حفر و سیستم نگهداری به کاررفته در این پروژه از روش تحلیل برگشتی مستقیم استفاده می‌شود. از ویژگی‌های روش مستقیم این است که نیاز به حل معادلات پیچیده ندارد و همچنین با امکاناتی که در نرم‌افزار متناسب با محیط انتخاب شده وجود دارد، سعی در مدل‌سازی به شرایط واقعی مساله شده است. اما باید توجه داشت که حجم محاسبات با روش تحلیل برگشتی مستقیم بالاست. از ویژگی قابل توجه روش مستقیم که امروزه متداول شده و تا حدودی حجم محاسبات را کاسته است، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی با بهره‌گیری از الگوریتم‌های جستجوی مانند الگوریتم تک متغیره متناوب به منظور ارزیابی پارامترهای کنترل کننده اصلی طراحی است.

۴-۵-۲ انتخاب پارامترهای معلوم و مجهول برای انجام تحلیل برگشتی

برای انتخاب پارامترها در انجام یک تحلیل برگشتی و جهت اطمینان از جواب‌ها و افزایش سرعت تحلیل باید به نکات زیر توجه نمود:

- پارامترهایی انتخاب شوند که تاثیر بیشتری بر روی پایداری حفاری‌های زیرزمینی دارند.
 - پارامترهایی انتخاب شوند که به دست آوردن آن‌ها با استفاده از روش‌های دیگر مشکل است.
 - کاهش تعداد پارامترهای مجهولی که به راحتی شناسایی می‌شوند.
- در تحلیل برگشتی پارامترهایی که بیشترین تغییرات را به وجود می‌آورند انتخاب می‌شوند، از طرفی تعداد آزمایش‌های انجام شده و میزان اعتماد به نتایج آن‌ها در انتخاب پارامترهای مجهول تاثیر خواهد داشت.

برای طراحی و ساخت حفريات زیرزمینی، استحکام و تغییر شکل پذیری توده سنگ و نسبت تنش‌های برجا از مهم‌ترین پارامترها می‌باشند. مدول تغییر شکل پذیری یکی از مهم‌ترین پارامترها در کنترل رفتار تغییر شکل توده سنگ می‌باشد. مقدار و موقعیت تنش‌های اصلی حداقل و حداکثر تاثیر زیادی بر روی پایداری سازه‌های زیرزمینی دارند.

به‌طور تئوری نسبت پواسون در یک محیط الاستیک از ۰ تا ۰/۵ با تغییرات کوچکی تغییر می‌کند. ضریب پواسون و چگالی را می‌توان به‌طور دقیق به وسیله آزمایش‌های مکانیکی و فیزیکی به دست آورد. هوک و براون در سال ۱۹۸۰ با تحلیل داده‌های مربوط به تنش‌های برجای اندازه‌گیری شده در نقاط مختلف جهان ثابت کردند که تنش عمودی به‌صورت تابعی خطی از عمق می‌باشد. بنابراین تنش‌های عمودی را می‌توان با دقت خوبی از رابطه (۳-۴) تخمین زد.

$$\sigma_v = \gamma h \quad (3 - 4)$$

که γ وزن مخصوص توده سنگ و h عمق از سطح زمین می‌باشد. بنابراین نسبت پواسون، چگالی و تنش عمودی به‌صورت پارامترهای معلوم و نسبت تنش‌های برجا، مدول الاستیسیته، زاویه اصطکاک و چسبندگی در تحلیل برگشتی به‌صورت پارامترهای مجهول در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج آزمایش‌های فصل سوم روی توده سنگ میزبان (K^{ss}) برای هر دو ایستگاه، نسبت پواسون محیط ۰/۲۴ و چگالی توده سنگ ۲۶۷۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد.

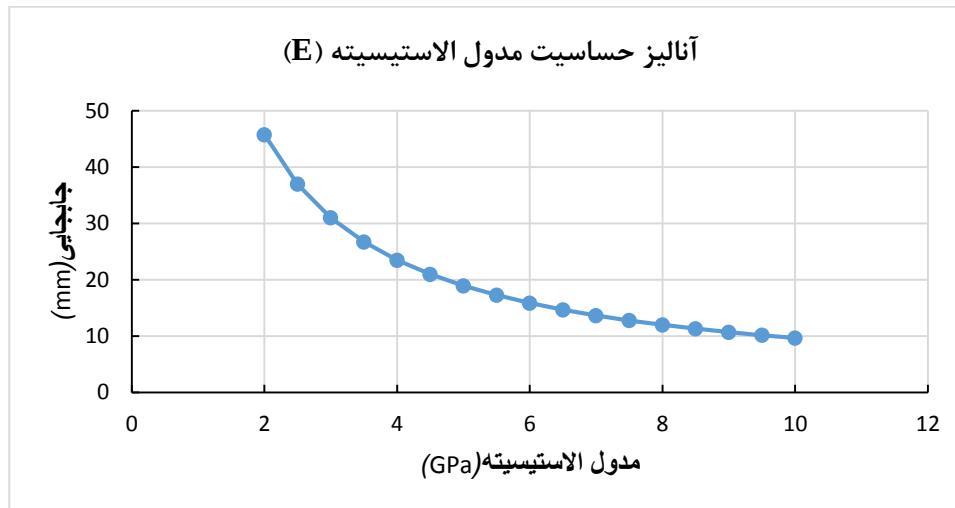
۳-۵-۴ آنالیز حساسیت پارامترها

روشی که امروزه برای بررسی پارامترهای یک سیستم و پی بردن به میزان اثرگذاری آن‌ها در نتیجه کار وجود دارد، انجام آنالیز حساسیت بر روی هر یک از پارامترها و در نهایت مشاهده میزان تغییرات در رفتار نهایی سیستم می‌باشد. در این تحقیق سعی شده است آنالیز حساسیت و تاثیر هر یک پارامترهای مقاومتی به‌عنوان نمونه بر روی مدل تونل دسترسی MAT، بر اساس میزان تغییرات جابجایی در تونل بررسی شود.

در طی این آنالیز حساسیت سعی شده است حتی المقدور با انتخاب نقاط بیشتر، روند تغییرات هر یک به درستی تعیین شود. آنالیز حساسیت بر اساس چهار پارامتر مدول الاستیسیته E ، نسبت تنش‌های برجا K ، زاویه اصطکاک داخلی φ و چسبندگی C انجام گرفته است.

۱-۳-۵-۴ آنالیز حساسیت مدول الاستیسیته (E)

مدول الاستیسیته یکی از مهم‌ترین پارامترهای کنترل‌کننده در رفتار تغییر شکل‌پذیری توده سنگ است. تحلیل برگشتی مدول الاستیسیته از لحاظ ماکروسکوپی بیان‌کننده رفتار تغییر شکل‌پذیری یک حجم از توده سنگ تحت شرایط باربرداری است. در این قسمت با تغییر مقادیر مدول الاستیسیته و بررسی جابجایی‌های قائم اتفاق افتاده در تاج تونل سعی در پی بردن به میزان حساسیت پایداری در مقابل این پارامتر داریم. در شکل (۴-۲۵) نمودار تغییرات نشان داده شده است.

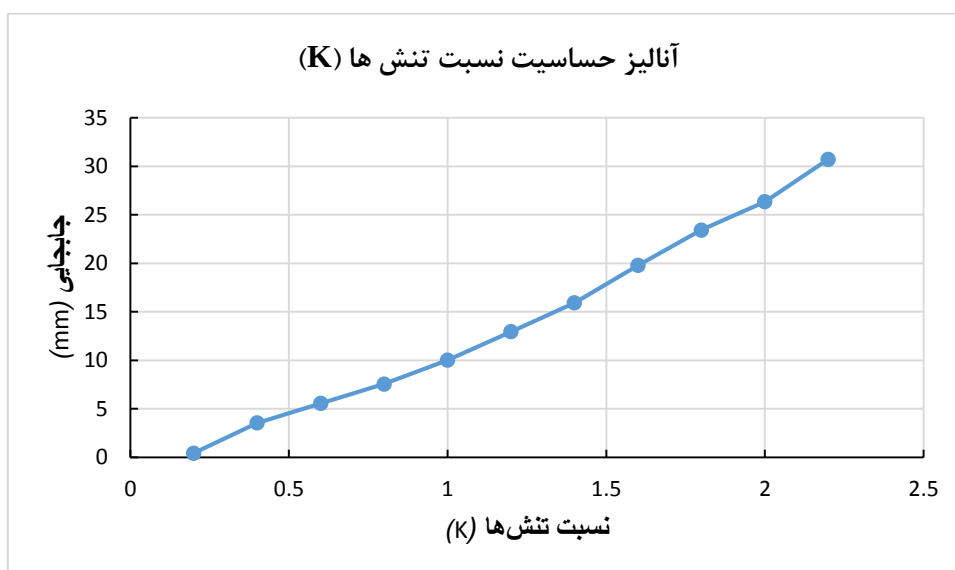


شکل ۴-۲۵: نمودار آنالیز حساسیت جابجایی قائم تاج تونل با تغییرات مدول الاستیسیته

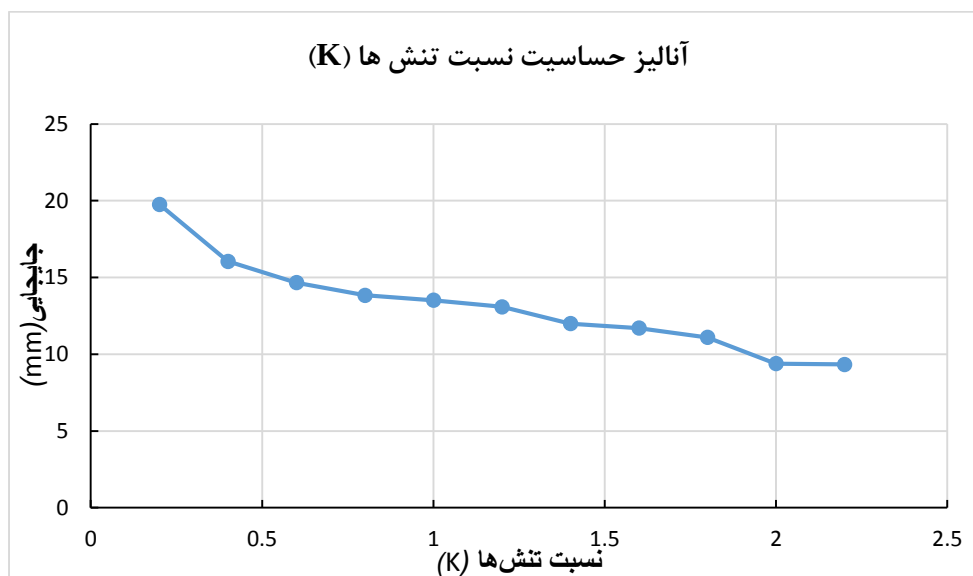
همان‌طور که در نمودار شکل (۴-۲۵) مشاهده می‌شود، مقادیر جابجایی قائم تاج تونل حساسیت زیادی نسبت به تغییرات مدول الاستیسیته دارد و با افزایش مقدار مدول الاستیسیته میزان جابجایی کاهش می‌یابد. در نتیجه با توجه به بازه تغییرات زیاد، این پارامتر به عنوان یک پارامتر مهم و تاثیر گذار در تحلیل برگشتی لحاظ می‌شود.

۴-۵-۳-۲ آنالیز حساسیت نسبت تنش‌های برجا (K)

به‌طور کلی در برنامه‌های عددی که در ژئومکانیک متداول شده، پارامترهای ورودی به دو دسته کلی خصوصیات توده سنگ و شرایط تنش منطقه‌ای تقسیم می‌شوند. در این پروژه از بین پارامترهای خصوصیات توده خاک، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و مدول الاستیسیته انتخاب شده است و برای پارامتر شرایط تنش منطقه‌ای، نسبت تنش‌های برجا (K) انتخاب شده است. مقدار پارامتر نسبت تنش‌ها با توجه به نتایج آزمایش‌ها به‌طور متوسط ۰/۵ در نظر گرفته شده است. در این قسمت نیز با تغییر در مقادیر این پارامتر در یک بازه مشخص و ثابت گذاشتن سایر پارامترها، میزان حساسیت این پارامتر با توجه به جابجایی‌های اتفاق افتاده در سقف تونل و دیواره تونل بررسی می‌شود. در شکل‌های (۴-۲۶) و (۴-۲۷) نمودار تغییرات نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۶: نمودار آنالیز حساسیت جابجایی افقی دیواره تونل با تغییرات نسبت تنش‌های برجا

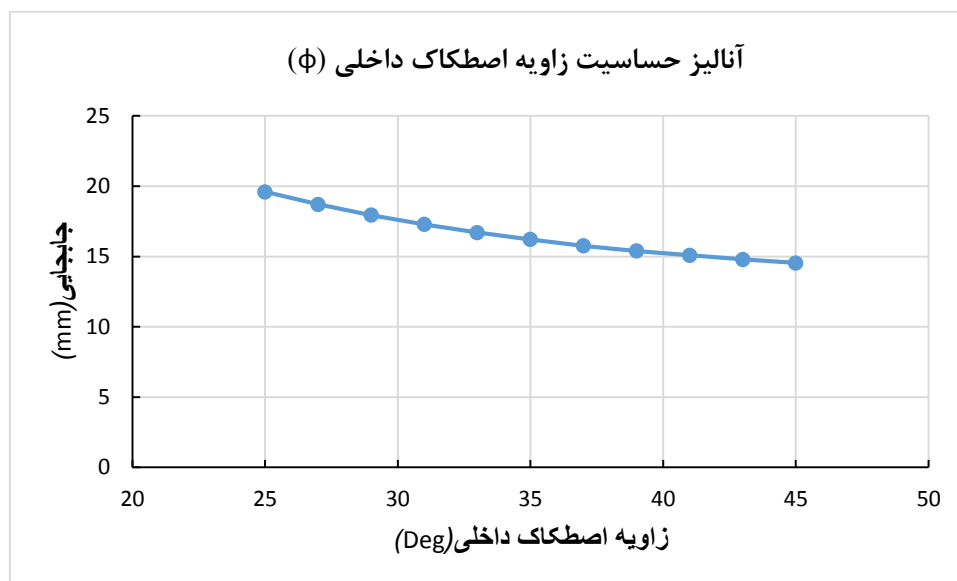


شکل ۴-۲۷: نمودار آنالیز حساسیت جابجایی قائم تاج تونل با تغییرات نسبت تنش‌های برجا

همان‌طور که در نمودار شکل (۴-۲۶) مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت تنش‌های برجا میزان جابجایی افقی در دیواره تونل بسیار افزایش می‌یابد و علت آن افزایش تنش‌های افقی وارده به دیواره با افزایش نسبت تنش‌ها طبق رابطه $K = \frac{\sigma_H}{\sigma_V}$ می‌باشد. همچنین در شکل (۴-۲۷) با افزایش نسبت تنش‌ها مقدار جابجایی در تاج تونل کاهش یافته است و علت آن کاهش تنش‌های قائم وارده به تاج تونل است. پس پارامتر نسبت تنش‌ها نیز با توجه به میزان تغییرات زیاد به‌عنوان پارامتر مهم و حساس در تحلیل برگشتی در نظر گرفته می‌شود.

۳-۳-۵-۴ آنالیز حساسیت زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)

در این قسمت سعی شده است که با تغییر در مقادیر زاویه اصطکاک داخلی سنگ (ϕ) در یک بازه معین، میزان حساسیت این پارامتر را در جابجایی اتفاق افتاده در تاج تونل بعد از حفاری به دست آورد. برای این کار در اینجا نیز تنها پارامتر زاویه اصطکاک داخلی را تغییر می‌دهیم و مابقی پارامترهای تأثیرگذار در رفتار توده سنگ را ثابت در نظر می‌گیریم. نتایج این تحلیل در شکل (۴-۲۸) نشان داده شده است.



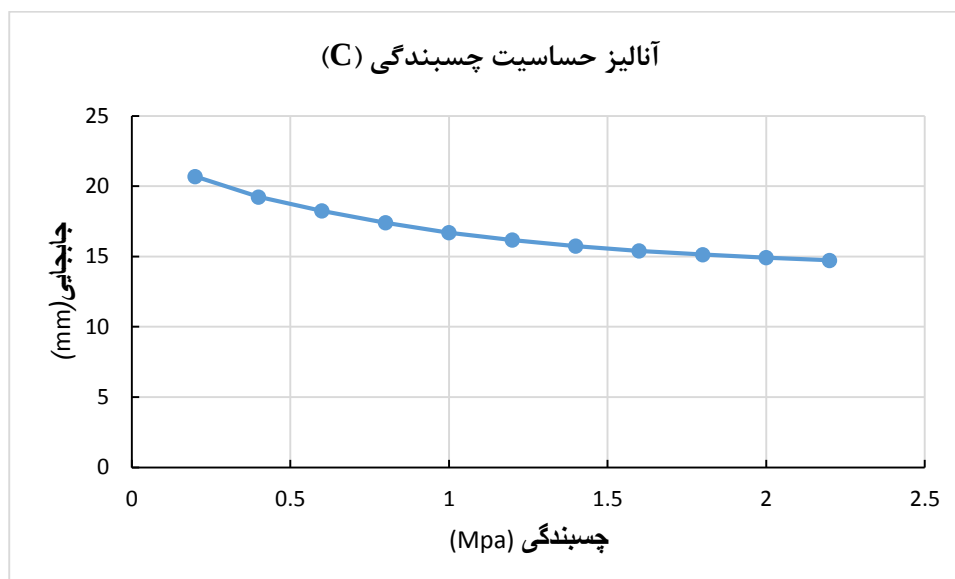
شکل ۴-۲۸: نمودار آنالیز حساسیت جابجایی قائم تاج تونل با تغییرات زاویه اصطکاک داخلی

همان‌طور که در نمودار شکل (۴-۲۸) دیده می‌شود، تغییرات میزان جابجایی به ازای افزایش مقادیر زاویه اصطکاک ناچیز است و با افزایش آن جابجایی‌ها در تاج تونل روند کاهشی دارند. مقدار تغییرات جابجایی با افزایش زاویه اصطکاک از حد ۴۳ درجه به بعد بسیار کمتر می‌شود. پس این پارامتر برای انجام تحلیل برگشتی از حساسیت کمتری برخوردار است.

۴-۳-۵-۴ آنالیز حساسیت پارامتر چسبندگی (C)

پارامتر دیگر که برای انجام آنالیز برگشتی در نظر گرفته شده، پارامتر چسبندگی در توده سنگ است. در این قسمت با تغییر در مقادیر چسبندگی، تاثیرات آن را بر روی جابجایی قائم در تاج تونل بعد از حفاری بررسی می‌کنیم. در شکل (۴-۲۹) نمودار تغییرات مشاهده می‌شود. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود با افزایش مقادیر چسبندگی، میزان جابجایی‌های قائم در تاج تونل کاهش می‌یابد، ولی این تغییرات زیاد چشم‌گیر نیستند. با افزایش پارامتر چسبندگی تا مقادیر بالا و حدوداً بعد از ۱/۸ مگاپاسکال، دیگر تغییری به آن صورت در مقادیر جابجایی دیده نمی‌شود و نمودار به خط افقی تمایل پیدا می‌کند. همان‌طور که در مورد زاویه اصطکاک نیز بیان شد، پارامتر چسبندگی هم برای انجام تحلیل برگشتی

میزان حساسیت کمتری نسبت به سایر پارامترها دارد و تاثیر کمی بر روی تغییر جابجایی دارد.



شکل ۴-۲۹: نمودار آنالیز حساسیت جابجایی قائم تاج تونل با تغییرات چسبندگی

۴-۵-۴ تحلیل برگشتی با استفاده از الگوریتم جستجوی تک متغیره متناوب

در این روش جستجو چهار پارامتر تعیین کننده مدول تغییر شکل پذیری، نسبت تنش ها، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی با انجام تحلیل برگشتی مستقیم قابل دستیابی است. همان طور که از قبل هم اشاره شد، روش تک متغیره متناوب شبیه روش تک متغیره است با این تفاوت که در زمان واحد چند پارامتر مجهول می توانند تغییر کنند و نتایج تغییر این پارامترها هم زمان و با توجه به تابع خطا بررسی شود. ویژگی جالب توجه این روش این است که الگوریتم استفاده شده در این روش نقطه بهینه را صرف از نظر مقدار اولیه به طور موفقیت آمیزی جستجو می نماید. تکنیک بهینه سازی بر مبنای کمینه کردن تابع خطایی که توسط رابطه (۴-۴) تعریف می شود به کار می رود.

$$Error = \frac{\sum_{k=1}^N [u_k - u_k^*]^2}{\sum_{k=1}^N u_k^*} \quad (4-4)$$

در رابطه (۴-۴) تعداد نقاط اندازه‌گیری N می‌باشد، u_k^* و u_k به ترتیب مقدار اندازه‌گیری شده و مقدار محاسبه شده در نقطه k می‌باشد.

به‌طورمعمول نقطه شروع برای جستجو پارامترهای موردنظر، پارامترهایی است که در آنالیز حساسیت پیشنهاد شدند و تاثیرگذارتر بودند و در واقع مقادیری هستند که در طراحی و مدل‌سازی اولیه تونل‌ها از آن‌ها استفاده شده است و در جدول (۴-۱) آورده شده است. بدین منظور نقطه شروع برای تعیین پارامترهای مدول الاستیسیته، نسبت تنش‌ها، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی با استفاده از الگوریتم جستجوی تک متغیره متناوب به ترتیب برای تونل دسترسی MAT، $6/2 \text{ GPa}$ ، $0/5$ ، $39/7$ درجه و $1/7 \text{ MPa}$ و برای تونل دسترسی T4، $4/4 \text{ GPa}$ ، $0/5$ ، $38/2$ درجه و $1/3 \text{ MPa}$ می‌باشد.

۴-۵-۵ تبدیل جابجایی مطلق نرم‌افزار به جابجایی نسبی (همگرایی)

در مدل‌سازی عددی انجام شده، مختصات x و y سه نقطه پین‌های همگرایی نصب‌شده در تاج و دیواره تونل‌ها لحاظ شده است. از آنجاکه انجام تحلیل برگشتی بر مبنای جابجایی پین‌های نصب‌شده نسبت به یکدیگر (یعنی همگرایی دیواره‌ها نسبت به هم و همگرایی تاج و دیواره نسبت به هم) است و در نرم‌افزار فقط مختصات جابجایی مطلق پین‌ها را می‌دهد، برای تطبیق نتایج مدل عددی با نتایج ابزار دقیق در کار تحلیل برگشتی بایستی جابجایی‌های مطلق منتج از نرم‌افزار را به جابجایی نسبی (همگرایی)، همانند ابزار دقیق تبدیل کرد. در نتیجه با استفاده از روابط (۴-۵) و (۴-۶) زیر جابجایی‌های مطلق پین‌ها به جابجایی نسبی یا همان همگرایی دیواره‌ها و تاج تونل نسبت به همدیگر تبدیل می‌شود.

$$U_{L-R} = 2 u \quad (۴ - ۵)$$

$$(۴ - ۶)$$

$$U_{C-R} = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2} - \sqrt{[(X_1 + u) - (X_2 + u)]^2 + [(Y_1 + v) - (Y_2 + v)]^2}$$

در رابطه‌های بالا، U_{L-R} همگرایی دیواره‌های چپ و راست نسبت به هم، U_{C-R} همگرایی تاج تونل نسبت به دیواره راست تونل، u جابجایی نقاط در جهت x ، v جابجایی نقاط در جهت y ، (X_1, Y_1) موقعیت پین نصب‌شده در تاج تونل و (X_2, Y_2) موقعیت پین در دیواره راست تونل می‌باشد (قاسم زاده، ۱۳۹۲).

۴-۵-۶ بررسی روند آنالیز برگشتی و اصلاح نتایج ابزار دقیق

در این مرحله برای انجام مقایسه صحیح بین نتایج ابزار دقیق و همچنین مدل‌سازی عددی، لازم است مقادیر ترخیص تنش توده سنگ را تا زمان آغاز رفتارسنجی اعمال کنیم. این کار شامل دو مرحله است.

مرحله اول: محدود کردن گام‌های حل (اعمال اثر سه بعدی سینه کار): در این مرحله لازم است گام‌های حل در تحلیل عددی نرم‌افزار $FLAC^{2D}$ در مرحله حفاری محدود شوند. همان‌گونه که در اول این فصل بررسی شدند. مقادیر ترخیص تنش برای در نظر گرفتن اثر سه بعدی سینه کار با توجه به رابطه ولاچوپولس و دتريچ به ترتیب برای تونل دسترسی MAT و T4، ۸۱ درصد و ۷۹ درصد محاسبه شد.

مرحله دوم: اصلاح نتایج ابزار دقیق: با توجه به زمان اولین قرائت و فاصله از سینه کار می‌توان آزادی تنش و تغییرشکل را تا زمان اولین قرائت به دست آورد که فاصله از سینه کار تا اولین قرائت برای هر دو ایستگاه مذکور برابر ۳ متر می‌باشد. اکنون میزان همگرایی به وجود آمده به ازای این مقدار ترخیص تنش تا قبل از اولین قرائت ابزار دقیق باید به مقادیر اندازه‌گیری شده همگرایی سنج‌ها اضافه شود تا نتایج ابزار دقیق قابل‌بررسی باشند. نتایج حاصل از این تعدیل در جدول (۴-۴) آورده شده است.

جدول ۴-۴: مقادیر همگرایی در تونل‌ها قبل و بعد از اعمال ترخیص تنش

ضلع قرائت همگرایی سنج	مقادیر اندازه‌گیری شده توسط ابزار همگرایی سنج (میلی‌متر)	اصلاح مقادیر بعد از اعمال ترخیص تنش (میلی‌متر)
تونل دسترسی MAT	R-L	۱۷/۹۴
	C-R	۱۱/۵۲
	C-L	۱۲/۴۲
تونل دسترسی T4	R-L	۲۲/۴۷
	C-R	۹/۳۳
	C-L	۱۰/۷۶

۴-۵-۷ نتایج کمینه کردن تابع خطا برای برآورد پارامترهای ژئومکانیکی

پس از اعمال ترخیص تنش مناسب و مشخص شدن مقادیر همگرایی نقاط ابزار دقیق نسبت به همدیگر، می‌توان فرآیند جستجوی تک متغیره متناوب را برای برآورد پارامترهای طراحی مجهول آغاز کرد. بنابراین با تغییر پارامترهای مجهول در نرم‌افزار و محاسبه مقادیر همگرایی به ازای هر دسته پارامتر و استفاده از رابطه (۴-۴) مقدار خطا به دست می‌آید. به‌طوری‌که مقدار خطا با نزدیک شدن به مقادیر واقعی پارامترها کاهش یافته و با دور شدن از مقادیر واقعی پارامترها افزایش می‌یابد. پس رسیدن به کمینه مقدار خطا یعنی رسیدن به حد بهینه خطا و دسته پارامتری که به ازای این کمینه خطا به‌دست آمده است، دسته پارامتر بهینه و نزدیک‌ترین مقادیر به مقادیر واقعی پارامترها می‌باشند. اکنون مراحل تحلیل برگشتی با کمینه کردن میزان خطا، برای دستیابی به مقادیر بهینه دسته پارامتر مجهول برای تونل دسترسی MAT و T4 به ترتیب در جدول (۴-۵) و (۴-۶) آورده شده است.

جدول ۴-۵: مراحل تعیین پارامترهای مجهول در فرآیند جستجوی تک متغیره متناوب _ تونل دسترسی MAT

مراحل جستجو	مدول الاستیسیته (GPa)	نسبت تنش‌ها (K)	زاویه اصطکاک داخلی (Deg)	چسبندگی (MPa)	تابع خطا
۱	۶/۲۴	۰/۵	۳۹/۷۵	۱/۷۰۷	۱/۹۹۵
۲	۶/۶	۰/۷	۴۰	۱/۷۰۷	۰/۸۹۲
۳	۷	۰/۹	۴۰	۱/۷۵	۰/۲۹۹
۴	۷/۴	۱	۴۱	۱/۸	۰/۱۶۲
۵	۷/۸	۱/۱	۴۱	۱/۸۵	۰/۰۶۲
۶	۸/۲	۱/۲	۴۲	۱/۸۵	۰/۰۱۸
۷	۸/۶	۱/۴	۴۲	۱/۹	۰/۲۴۱
۸	۹	۱/۶	۴۳	۱/۹	۰/۹۱۴
۹	۹/۴	۱/۸	۴۴	۱/۹۵	۱/۹۰

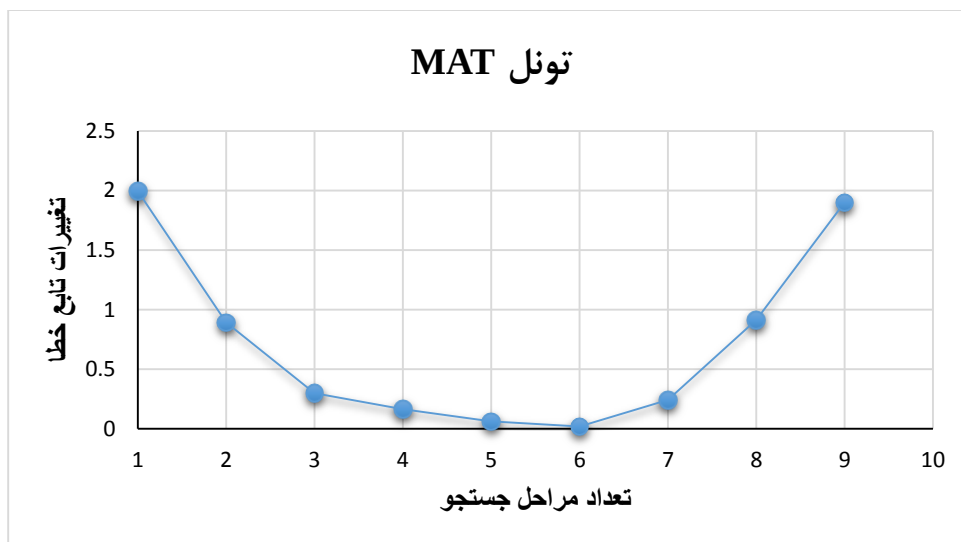
همان‌طور که از نتایج جدول (۴-۵) مشاهده می‌شود، برای تونل دسترسی MAT، پس از ۶ مرحله جستجو و تکرار مدل، میزان تابع خطا به کمترین مقدار خود (۰/۰۱۸) رسیده است و بعد از آن با ادامه مراحل جستجو و تغییر پارامترها میزان تابع خطا افزایش یافته است. به این معنی که پارامترهای ژئومکانیکی بهینه موردنظر برای تونل دسترسی MAT، به ازای مقدار کمینه تابع خطا در دسته پارامتر ششم از جدول (۴-۵) به دست آمده است که مقادیر پارامترهای ژئومکانیکی موردنظر شامل مدول الاستیسیته ۸/۲ گیگاپاسکال، نسبت تنش‌های برجا ۱/۲، زاویه اصطکاک داخلی ۴۲ درجه و چسبندگی توده سنگ ۱/۸۵ مگاپاسکال به دست آمده است.

جدول ۴-۶: مراحل تعیین پارامترهای مجهول در فرآیند جستجوی تک متغیره متناوب _ تونل دسترسی T4

مراحل جستجو	مدول الاستیسیته (GPa)	نسبت تنش‌ها (K)	زاویه اصطکاک داخلی (Deg)	چسبندگی (MPa)	تابع خطا
۱	۴/۴۰۴	۰/۵	۳۸/۲۷	۱/۳۶۳	۳/۵۵
۲	۵	۰/۷	۳۹	۱/۳۶۳	۲/۰۱
۳	۶	۰/۹	۴۰	۱/۴	۱/۱۸
۴	۶/۵	۱/۱	۴۰	۱/۴۵	۰/۵۶۶
۵	۷/۵	۱/۳	۴۱	۱/۵۵	۰/۳۱۵
۶	۸	۱/۵	۴۲	۱/۶۵	۰/۱۲۶
۷	۹	۱/۷	۴۳	۱/۷	۰/۰۵۱
۸	۹/۵	۱/۹	۴۳	۱/۷۵	۰/۱۴۸
۹	۱۰	۲/۱	۴۴	۱/۷۵	۰/۴۷۵
۱۰	۱۰/۵	۲/۳	۴۴	۱/۸	۱/۰۹
۱۱	۱۱	۲/۵	۴۵	۱/۸	۱/۸۱

به همین ترتیب برای تونل دسترسی T4، مقدار تابع خطا پس از ۷ مرحله جستجو و تکرار مدل به حد کمینه خود (۰/۰۵۱) رسیده است و در اینجا هم با ادامه مراحل تکرار مقدار تابع خطا افزایش یافته و در نتیجه پارامترهای ژئومکانیکی موردنظر برای دسته پارامتر هفتم از جدول (۴-۶) در حد بهینه به دست آمده‌اند که مقادیر این پارامترها شامل مدول الاستیسیته ۹ گیگاپاسکال، نسبت تنش‌های برجا ۱/۷، زاویه اصطکاک داخلی ۴۳ درجه و چسبندگی توده سنگ ۱/۷ مگاپاسکال به دست آمده است. در شکل‌های (۴-۳۰) و (۴-۳۱)، نمودارهای تغییرات تابع خطا برحسب تعداد مراحل جستجو پارامترهای مجهول به ترتیب برای تونل دسترسی MAT و T4 نشان داده شده است. همان‌طور که از نمودارها هم

پیدا است، برای تونل MAT، ۹ مرحله جستجو و برای تونل T4، ۱۱ مرحله جستجو برای رسیدن به کمینه خطای پارامترها انجام شده است.



شکل ۴-۳۰: نمودار تغییرات تابع خطا برحسب تعداد مراحل جستجو در تونل دسترسی MAT



شکل ۴-۳۱: نمودار تغییرات تابع خطا برحسب تعداد مراحل جستجو در تونل دسترسی T4

در جدول‌های (۷-۴) و (۸-۴) مقادیر همگرایی‌های محاسبه شده از مراحل جستجوی پارامترها در تحلیل برگشتی به روش الگوریتم تک متغیره متناوب و مقادیر همگرایی‌های اندازه‌گیری شده با ابزار

دقیق و همچنین مقادیر خطا برای هر دسته پارامتر به ترتیب برای تونل دسترسی MAT و T4 آورده شده است.

جدول ۴-۷: مقادیر همگرایی‌های حاصل از مراحل تحلیل برگشتی و مقایسه با مقادیر ابزار دقیق _ تونل MAT

شماره دسته	همگرایی محاسبه شده (mm)			همگرایی ابزار دقیق (mm)			تابع خطا
	U _{C-L}	U _{C-R}	U _{L-R}	U _{C-L}	U _{C-R}	U _{L-R}	
۱	۱۳/۶۵	۱۳/۷۱	۹/۱۵	۱۷/۹۴	۱۱/۵۲	۱۲/۴۲	۱/۹۹۵
۲	۱۳/۴۱	۱۳/۴۳	۱۲/۲۱	۱۷/۹۴	۱۱/۵۲	۱۲/۴۲	۰/۸۹۲
۳	۱۳/۵۴	۱۳/۵۷	۱۵/۲۷	۱۷/۹۴	۱۱/۵۲	۱۲/۴۲	۰/۲۹۹
۴	۱۲/۹۲	۱۲/۹۲	۱۵/۷۹	۱۷/۹۴	۱۱/۵۲	۱۲/۴۲	۰/۱۶۲
۵	۱۲/۷۵	۱۲/۷۸	۱۶/۹۸	۱۷/۹۴	۱۱/۵۲	۱۲/۴۲	۰/۰۶۲
۶	۱۲/۳۱	۱۲/۳۵	۱۷/۶۴	۱۷/۹۴	۱۱/۵۲	۱۲/۴۲	۰/۰۱۸
۷	۱۲/۷۶	۱۲/۸۱	۲۰/۸۳	۱۷/۹۴	۱۱/۵۲	۱۲/۴۲	۰/۲۴۱
۸	۱۳/۲۱	۱۳/۲۱	۲۳/۸۴	۱۷/۹۴	۱۱/۵۲	۱۲/۴۲	۰/۹۱۴
۹	۱۳/۵۶	۱۳/۵۶	۲۶/۵۶	۱۷/۹۴	۱۱/۵۲	۱۲/۴۲	۱/۹۰

با توجه به داده‌های جدول (۴-۷) که مربوط به ایستگاه همگرایی سنجی واقع در کیلومتر ۳۰۰+۱ در تونل دسترسی MAT می‌باشد، حداکثر همگرایی‌های ابزار دقیق بعد از قرائت و اصلاح آن‌ها برای سه ضلع از همگرایی سنج شامل C-L، C-R، L-R به ترتیب مقادیر ۱۷/۹۴، ۱۱/۵۲ و ۱۲/۴۲ میلی‌متر به دست آمده است. بر اساس این داده‌های همگرایی سنجی و با استفاده از تحلیل برگشتی با روش تک متغیره متناوب، پس از نه مرحله تحلیل برگشتی به ازای دسته پارامتر ششم که دارای مقدار تابع خطای کمینه (۰/۰۱۸) می‌باشد، مقادیر همگرایی برای سه ضلع همگرایی سنج به ترتیب ۱۷/۶۴، ۱۲/۳۵ و ۱۲/۳۱ میلی‌متر محاسبه شده است که در مقایسه با مقادیر همگرایی اندازه‌گیری شده با ابزار دقیق

تقریبی خوبی به دست آمده است.

اکنون نحوه استفاده از تابع خطا برای کمینه کردن اختلاف بین همگرایی اندازه گیری شده و همگرایی حاصل از نرم افزار به عنوان نمونه در اینجا برای مرحله پنجم و ششم جستجو پارامترها از تونل دسترسی MAT آورده شده است.

$$E5 = \frac{\sum_{k=1}^N [u_k - u_k^*]^2}{\sum_{k=1}^N u_k^*} = \frac{[(16.98-17.94)^2 + (12.78-11.52)^2 + (12.75-12.42)^2]}{(17.94+11.52+12.42)} = 0.062$$

$$E6 = \frac{\sum_{k=1}^N [u_k - u_k^*]^2}{\sum_{k=1}^N u_k^*} = \frac{[(17.64-17.94)^2 + (12.35-11.52)^2 + (12.31-12.42)^2]}{(17.94+11.52+12.42)} = 0.018$$

همچنین با توجه به داده های جدول (۴-۸) که مربوط به ایستگاه همگرایی سنجی واقع در کیلو متر ۰+۰۰۲ در تونل دسترسی T4 می باشد، حداکثر همگرایی های ابزار دقیق بعد از قرائت و اصلاح آن ها برای سه ضلع از همگرایی سنج شامل C-L، C-R، L-R به ترتیب مقادیر ۲۲/۴۷، ۹/۳۳ و ۱۰/۷۶ میلی متر در نظر گرفته شده است. بر اساس این داده های همگرایی سنجی و با استفاده از تحلیل برگشتی با روش تک متغیره متناوب، پس از یازده مرحله تحلیل برگشتی به ازای دسته پارامتر هفتم که دارای تابع خطای کمینه (۰/۰۵۱) می باشد، مقادیر همگرایی برای سه ضلع همگرایی سنج به ترتیب ۲۲/۰۹، ۱۰/۷۵ و ۱۰/۷۶ میلی متر محاسبه شده است که در اینجا هم در مقایسه با مقادیر همگرایی اندازه گیری شده با ابزار دقیق تقریبی خوبی به دست آمده است.

جدول ۴- ۸: مقادیر همگرایی‌های حاصل از مراحل تحلیل برگشتی و مقایسه با مقادیر ابزار دقیق _ تونل T4

شماره دسته پارامتر	همگرایی محاسبه شده (mm)			همگرایی ابزار دقیق (mm)			تابع خطا
	U _{C-L}	U _{C-R}	U _{L-R}	U _{C-L}	U _{C-R}	U _{L-R}	
۱	۱۵/۴۹	۱۵/۴۸	۲۲/۴۷	۹/۳۳	۱۰/۷۶	۳/۵۵	
۲	۱۵/۷۶	۱۴/۵۱	۲۲/۴۷	۹/۳۳	۱۰/۷۶	۲/۰۱	
۳	۱۸/۳۲	۱۲/۶۳	۱۲/۶۰	۲۲/۴۷	۹/۳۳	۱/۱۸	
۴	۱۹/۰۶	۱۲/۴۵	۱۲/۴۴	۲۲/۴۷	۹/۳۳	۰/۵۶۶	
۵	۱۹/۶۰	۱۱/۴۹	۱۱/۴۹	۲۲/۴۷	۹/۳۳	۰/۳۱۵	
۶	۲۱/۲۲	۱۱/۲۳	۱۱/۲۳	۲۲/۴۷	۹/۳۳	۰/۱۲۶	
۷	۲۲/۰۹	۱۰/۷۵	۱۰/۷۶	۲۲/۴۷	۹/۳۳	۰/۰۵۱	
۸	۲۴/۳۲	۱۱/۰۱	۱۱/۰۱	۲۲/۴۷	۹/۳۳	۰/۱۴۸	
۹	۲۶/۴۴	۱۱/۳۶	۱۱/۳۶	۲۲/۴۷	۹/۳۳	۰/۴۷۵	
۱۰	۲۸/۷۲	۱۱/۸۷	۱۱/۸۷	۲۲/۴۷	۹/۳۳	۱/۰۹	
۱۱	۳۰/۶۵	۱۲/۲۱	۱۲/۲۰	۲۲/۴۷	۹/۳۳	۱/۸۱	

۴-۵-۸ جمع‌بندی

در این تحقیق سعی شده است که نتایج حاصل از قرائت‌های ابزار دقیق با نتایج مدل‌سازی عددی بر اساس مدل رفتاری موهر - کولمب مقایسه شود. با توجه به این که پارامترهای مقاومتی توده سنگ که در مدل‌سازی تونل‌ها استفاده شده است، حاصل از نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی و صحرایی بوده است و از طرفی فرضیات ساده شونده‌ای مانند فرض کرنش صفحه‌ای و یا همسانگرد بودن توده سنگ به‌طور کامل با واقعیت منطبق نیست، بنابراین وجود اختلاف بین داده‌های ابزار دقیق و نتایج دور از

انتظار نیست. اما با کمینه کردن خطا با استفاده از روش جستجوی تک متغیره متناوب سعی در یافتن مقدار بهینه برای پارامترهای ژئومکانیکی شده است. استفاده از تحلیل برگشتی مستقیم با الگوریتم جستجوی تک متغیره متناوب، روشی سریع برای ارزیابی پارامترهای کنترل کننده رفتار سازه می باشد و زمانی این روش مفیدتر واقع می شود که پارامترهای ژئومکانیکی مدل مناسب انتخاب شوند.

در این تحقیق مقادیر پارامترهای ژئومکانیکی موردنظر شامل مدول الاستیسیته، نسبت تنش های برجا، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی توده سنگ با استفاده از روش تحلیل برگشتی به ترتیب برای تونل MAT، برابر $8/2$ گیگا پاسکال، $1/2$ ، 42 درجه و $1/85$ مگاپاسکال و برای تونل T4، به ترتیب مقادیر 9 گیگا پاسکال، $1/7$ ، 43 درجه و $1/7$ مگاپاسکال به دست آمد. در ضمن مقادیر پارامترهای مذکور با آنچه که در جدول (۴-۱) همین فصل با انجام آزمایش ها توسط شرکت مشاور به دست آمده است و به عنوان پارامترهای اولیه در مدل سازی تونل ها استفاده شده است، متفاوت است.

فصل پنجم

نتیجہ گیری و پیشہادہا

۵-۱ نتیجه‌گیری

در این تحقیق برآورد پارامترهای ژئومکانیکی در دو ایستگاه رفتارنگاری از تونل‌های دسترسی به مغار نیروگاه طرح سد آزاد، شامل تونل دسترسی MAT و T4 با استفاده از تحلیل برگشتی مستقیم و الگوریتم تک متغیره متناوب انجام شد. مدل‌سازی عددی تونل‌ها با در نظر گرفتن شکل و هندسه تونل به کمک نرم‌افزار FLAC^{2D} انجام شد و در نهایت نتایج زیر به دست آمد:

- رفتارنگاری یک روش ساده برای ارزیابی رفتار سازه‌های زیرزمینی می‌باشد و این بخش از مسایل مربوط به سنجش رفتار سازه‌ها بایستی مورد توجه بیشتری در رابطه با طراحی و اجرای سازه‌های زیرزمینی قرار گیرد.
- مکان‌هایی که برای نصب ابزار دقیق استفاده می‌شوند باید به گونه‌ای انتخاب شوند که بیان‌کننده رفتار واقعی توده سنگ و یا خاک مورد بررسی باشد.
- زمان‌بندی قرائت‌ها باید مناسب باشد. این فاصله زمانی بر اساس مشاهداتی که در روند قرائت‌ها به دست می‌آید، انتخاب می‌شود. در صورت بروز هرگونه تغییری که در روند قرائت‌ها مشاهده می‌شود، باید این تغییر شناسایی شده و زمان‌بندی قرائت‌ها افزایش یابد و با اقدامات اصلاحی ممکن از قبیل تحکیم نگهداری، تغییر نوع روش حفر و ... سازه زیرزمینی را تقویت نمود.
- در مورد دقت و صحت ابزار دقیق و یا تجهیزاتی که برای ثبت تغییرات به کار می‌روند، باید توجه نمود که از دستورالعمل‌های سازنده ابزار و تجهیزات به‌طور موثری استفاده نمود. باید ابزاری که برای ثبت قرائت‌ها به کار می‌روند، کالیبره شوند. همچنین تغییرات دمایی را مدنظر قرار داد. یک طرح رفتارنگاری مناسب، تابعی مستقیم از ابزار به‌کاررفته در آن می‌باشد.
- برای سازه‌ها و کاربری‌های متفاوتی که آن‌ها دارند، نیاز به ابزار متفاوتی می‌باشد. زمانی یک برنامه رفتارنگاری مناسب واقع می‌شود که ابزار متنوع و با قابلیت‌های گوناگون در آن به کار رود. در تونل‌های دسترسی طرح سد آزاد بیشتر از ابزار همگرایی سنج استفاده شده است

(استفاده از کشیدگی سنج‌ها محدود به نقاط خاصی می‌شود). در صورتی که از ابزاری مانند کرنش‌سنج و بارسنج، که وسایلی ساده و با قابلیت‌های ثبت فشار و بار وارده بر سیستم نگهداری هستند، می‌توان سایر پارامترهای موردنیاز در حین احداث سازه را نیز به دست آورد. در کل استفاده از ابزار متنوع جهت سنجش تغییرات در سازه‌ها، کمک شایانی به تفسیرهای صحیح و به دست آوردن پارامترهای بیشتری از طریق تحلیل برگشتی می‌نماید.

- اگرچه تعیین پارامترهای ژئومکانیکی و مقاومتی زمین پیچیده و مشکل می‌باشد، اما در این تحقیق با توجه به نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی و صحرایی و استفاده از روش تحلیل برگشتی نشان داده شده است که این روش ابزاری قوی برای ارزیابی و بهینه‌سازی پارامترهای ژئومکانیکی و مقاومتی زمین می‌باشد.

- با انجام تحلیل برگشتی پارامترهای ژئومکانیکی می‌توان به پارامترهای ورودی برای تحلیل پایداری، طراحی بهینه نگهداری، تعیین ایمنی نگهداری و مدل‌سازی حفاری و ... پرداخت.
- توده سنگ اطراف تونل‌ها جهت کنترل جابجایی‌ها، با توجه به انجام تحلیل حساسیت بیشتر وابسته به پارامترهای مدول الاستیسیته و نسبت تنش‌های برجا بوده و پس‌ازاین دو به ترتیب زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی بیشترین تاثیر را نشان داد.

- در زمینه کار تحلیل برگشتی مهم‌ترین مساله انتخاب محیطی است که سازه در آن احداث شده است. می‌توان گفت یک برنامه تحلیل برگشتی در صورتی قابل تایید است که محیط از لحاظ پیوسته، ناپیوسته و یا شبه پیوسته بودن بررسی شود. در این تحقیق محیط تونل‌های مدل‌سازی شده با توجه به معیار فاکتور پیوستگی ارائه شده توسط استیل و پالمستروم بررسی شد و محیط پیوسته معادل (شبه پیوسته) در نظر گرفته شد.

- تکنیک‌های بهینه‌سازی که در حل مسائل به‌صورت برگشتی استفاده می‌شوند. روش‌های خوبی برای تعدیل تعداد مدل‌های ساخته شده به‌منظور مقایسه پارامترهای خروجی با قرائت‌های ابزار

دقیق می‌باشند. روش‌های ارائه شده در این تحقیق و سایر روش‌های موجود در این زمینه کمک بسیاری در روند حل مسایل تحلیل برگشتی به صورت مستقیم می‌نمایند.

- بعد از اعمال ترخیص تنش در مدل‌های ساخته شده از تونل دسترسی MAT و T4 برای تحلیل پایداری تونل‌ها از روش کرنش بحرانی و روابط ارائه شده توسط ساکورایی و همکاران استفاده شد و در این روش حداکثر کرنش برشی حاصل از نرم افزار FLAC در هر دو مدل کم‌تر از مقدار کرنش بحرانی حاصل از سطح تراز هشدار خطر II به دست آمد و به عبارت دیگر تونل‌ها به ازای ترخیص تنش اعمالی پایدار بودند.

- با استفاده از روش تحلیل برگشتی مستقیم و روش جستجوی تک متغیره متناوب در دو ایستگاه همگرایی سنجی انتخابی از تونل‌های دسترسی به مغار نیروگاه طرح سد آزاد، پارامترهای ژئومکانیکی موردنظر به شرح زیر برآورد شدند :

- در ایستگاه با کیلو متر اژ ۱+۳۰۰ از تونل دسترسی اصلی (MAT) پارامترهای ژئومکانیکی شامل مدول الاستیسیته ۸/۲ گیگاپاسکال، نسبت تنش‌های برجا ۱/۲، زاویه اصطکاک داخلی ۴۲ درجه و چسبندگی در توده سنگ مقدار ۱/۸۵ مگاپاسکال به دست آمد.

- در ایستگاه با کیلو متر اژ ۰+۰۰۲ از تونل دسترسی مغار ترانسفورمر به هد مغار نیروگاه (T4) پارامترهای ژئومکانیکی شامل مدول الاستیسیته ۹ گیگاپاسکال، نسبت تنش‌های برجا ۱/۷، زاویه اصطکاک داخلی ۴۳ درجه و چسبندگی در توده سنگ مقدار ۱/۷ مگاپاسکال به دست آمد.

- با مقایسه میزان حداکثر همگرایی‌های ثبت شده در تونل‌ها توسط ابزار دقیق با نتایج همگرایی‌های حاصل از نرم افزار بعد از انجام تحلیل برگشتی و تدقیق پارامترها، اختلاف کمی وجود داشت که این موضوع نشانگر صحت مدل‌های ساخته شده در نرم افزار $FLAC^{2D}$ می‌باشد.

۵-۲ پیشنهادها

- ❖ با توجه به این که نتایج رفتارنگاری و تحلیل برگشتی در دو تونل بررسی شده برای این تحقیق نشان‌دهنده آن است که مجموعه سیستم نگهداری و توده سنگ پیرامون به تعادل و پایداری مناسبی رسیده است، پیشنهاد می‌شود که تحلیل‌های دیگر مانند تحلیل دینامیکی و اثرات بارهای زلزله بر روی تونل‌ها بررسی شود.
- ❖ تحلیل وابسته به زمان نیز ازجمله مواردی است که برای این سازه مناسب به نظر می‌رسد، به‌طوری‌که با این تحلیل می‌توان رفتار سازه را نسبت به زمان بهره‌وری موردبررسی قرار داد. همچنین پیشنهاد می‌شود تحلیل خزش نیز انجام شود.
- ❖ در این تحقیق پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ پیرامون تونل‌ها بر اساس روش تحلیل برگشتی مستقیم و الگوریتم بهینه‌سازی تک متغیره متناوب انجام شده است و پیشنهاد می‌شود که این تحقیق با روش‌های دیگر تحلیل برگشتی مجدد انجام شود و نتایج آن باهم مقایسه شود.

منابع

- احمدی م، شاهوردیلو م، (۱۳۸۹) "ابزار دقیق و رفتار نگاری در مهندسی سنگ"، چاپ اول، انتشارات سازمان جهاد دانشگاهی، تهران.
- حسینی م. و افضل آقایی ا، (۱۳۹۱) "تحلیل برگشتی مغار نیروگاه سد سیاه بیشه با استفاده از داده های حاصل از ابزار دقیق" نشریه علمی - پژوهشی مهندسی معدن، شماره ۱۴، دوره ۷، ص ۸۳.
- درویش زاده ع، (۱۳۸۹) "زمین شناسی/ایران" چاپ چهارم، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران.
- دهقان ع.ن، (۱۳۹۲) "انتخاب طرح مناسب سامانه نگهداری اولیه تونل متروی کرج بر مبنای نتایج ابزار دقیق و الگوریتم تحلیل برگشتی" نشریه مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی، شماره ۱، دوره ۲.
- ساریخانی خرمی م، (۱۳۹۰)، پایان نامه ارشد: "تحلیل پارامترهای ژئومکانیکی و تنش های برجای توده سنگ در تونل راه آهن اصفهان - شیراز با استفاده از تحلیل برگشتی بر اساس جابجایی های حاصل از رفتار نگاری با ابزار دقیق"، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- شریف زاده م، و دارای ر، (۱۳۹۰)، "طراحی روش اجرای تونل در سنگ های سست با استفاده از نتایج تحلیل برگشتی مبتنی بر داده های جابجایی حاصل از رفتارنگاری"، نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل، انجمن تونل ایران - تهران.
- شریف زاده م. قربانی م. مسعودی ر. و شریفی بروجردی م، (۱۳۸۸) "تحلیل برگشتی مبتنی بر جابه جایی مغار نیروگاه تلمبه ذخیره ای سیاه بیشه با استفاده از روش اجزای مجزا" نشریه شریف ویژه علوم مهندسی، شماره ۴۷، دوره ۲۵، ص ۴۹.

- صالحی م، (۱۳۹۴)، پایان‌نامه ارشد: "تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری موقت تونل چینگر (حکیم)"، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- قاسم‌زاده ج، (۱۳۹۲)، پایان‌نامه ارشد: "تحلیل برگشتی و تعیین پارامترهای مقاومتی خط A متروی قم به منظور ارزیابی سیستم نگهداری"، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- گزارش رفتارسنجی ژئودتیکی - ژئوتکنیکی پروژه تونل دوقلوی بزرگراه حکیم تهران (تونل چینگر)، (۱۳۹۲)، موسسه حرا.
- گزارش ماهیانه ابزار دقیق پروژه سازه های زیرزمینی سد و نیروگاه تلمبه ذخیره ای آزاد، (۱۳۹۴)، شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس.
- گزارش نهایی مطالعات زمین شناسی و آزمایشگاهی و طراحی های مکانیک سنگی طرح نیروگاه تلمبه ذخیره ای سد آزاد، (۱۳۹۱)، شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس.
- مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران، (۱۳۹۳)، "مطالعه و بررسی نقش پایش تونل‌ها در مراحل طراحی، اجرا و بهره‌برداری"، گزارش شماره ۲۵۰، ۵۳ صفحه.
- مشهد میقانی م، (۱۳۸۰)، "کاربرد همگرایی سنجی به عنوان ساده‌ترین سیستم رفتارنگاری تونل‌ها با مطالعه موردی تونل انتقال آب دشت عباس"، پنجمین کنفرانس تونل ایران، دانشکده فنی دانشگاه تهران.
- موسوی م، و الهیان ب، (۱۳۹۰)، "ابزاربندی و رفتارنگاری در پروژه‌های ژئومکانیکی"، نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل (فضاهای زیرزمینی برای توسعه پایدار)، انجمن تونل ایران - تهران.

- مهدوری س. و فتحی سلمی ا، (۱۳۸۶) "تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ میزبان خط جنوبی مترو اصفهان با استفاده از تحلیل برگشتی" نشریه علمی پژوهشی مهندسی معدن، دوره دوم، شماره چهارم، ص، ۳۷-۴۶.
- ولیزاده قره آغاجی ن، و یزدانی م، (۱۳۹۴)، " کالیبراسیون پارامترهای مدل رفتاری خاک سخت شونده با نتایج آزمایش بارگذاری صفحه با استفاده از تحلیل‌های برگشتی مبتنی بر روش تاگوچی"، کنفرانس سالانه تحقیقات در مهندسی عمران، معماری و شهرسازی و محیط زیست پایدار، تهران.

- Amusin B. C., Shick V. M., and Lama R. D., (1992) "Using Back Analysis to Estimate Geotechnical Field Parameters for the Design of Support Systems for Tunnels" *Tunnelling and Underground Space Technology*, 7(3), pp.281-284.
- Bobet A. (2010) "Numerical methods in geomechanics" *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 35(1B), pp.27-48.
- Deng J.H. and Lee C.F. (2001) "Displacement back analysis for a steep slope at the Three Gorges Project site" *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 38(2), pp.259-268.
- Dunnicliff J. (1993), "Geotechnical instrumentation for monitoring field performance", John Wiley & Sons, New York.
- Fakhimi A., Salehi D. and Mojtabai N. (2004) "Numerical back analysis for estimation of soil parameters in the Resalat Tunnel project" *Tunnelling and Underground Space Technology*, 19(1), pp.57-67.
- Gioda G. and 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), pp.1823-1848.
- Gioda G. and Sakurai S. (1987) "Back analysis procedures for the interpretation of field measurements in geomechanics" *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol.11, pp.555-583.

- Gioda G., (1980) “Indirect identification of the average elastic characteristics of rock masses”, In International Conference on Structural Foundations on Rock, Sydney, Australia (Vol. 1).
- Hisatake M. and Hieda Y. (2008) “Three-dimensional back-analysis method for the mechanical parameters of the new ground ahead of a tunnel face” *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(4), pp.373-380.
- Hisatake M., (1999) “Direct estimation of initial stresses of the ground around a tunnel”, Proceedings of the Numerical Methods in Geomechanics, Balkema, Rotterdam, pp.373-377.
- Itasca Consulting Group Inc., (2011) “FLAC: Fast Lagrangian analysis of continua”, Version 7.0., User’s Manual., Minneapolis, Minnesota, 55401.
- Jeon Y. S. and Yang H. S. (2004) “Development of a back analysis algorithm using FLAC” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41, pp.447-453
- Jing L. (2003) “A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(3), pp.283-353.
- Kaiser P. K., Zou D. and Lang P. A. (1990) “Stress determination by back-analysis of excavation-induced stress changes-a case study” *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 23(3), pp.185-200.
- Kalman R. E. (1960) “A new approach to linear filtering and prediction problems” *Journal of basic Engineering*, 82(1), pp.35-45.
- Levasseur S., Malécot Y., Boulon M. and Flavigny E. (2008) “Soil parameter identification using a genetic algorithm” *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 32(2), pp.189-213.
- Li S., Yang J., Hao W. and Shang Y. (2006) “Intelligent back-analysis of displacements monitored in tunneling” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(7), pp.1118-1127.
- Lv Q., Liu Y. and Yang Q. (2017) “Stability analysis of earthquake-induced rock slope based on back analysis of shear strength parameters of rock mass” *Engineering Geology*, 228, pp.39-49.

- Mattsson H., Klisinski M. and Axelsson K. (2001) "Optimization routine for identification of model parameters in soil plasticity" *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 25(5), pp.435-472.
- McKinnon S. D. (2001) "Analysis of stress measurements using a numerical model methodology" *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38(5), pp.699-709.
- Moreira C. and Almeida e Sousa J., (2004) "Parameters identification: back analysis case study of a shallow tunnel in Oporto, Portugal" *In Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 19. No. 4-5.
- Moreira N., Miranda T., Pinheiro M., Fernandes P., Dias D., Costa L. and Sena-Cruz J. (2013) "Back analysis of geomechanical parameters in underground works using an Evolution Strategy algorithm" *Tunnelling and Underground Space Technology*, 33, pp.143-158.
- Ochmanski M. and Bzowka J. (2012) "Back analysis of SCL tunnels based on artificial neural network" *Architecture, Civil Engineering, Environment-ACEE Journal*, 3, pp.73-81.
- Oreste P. (2005) "Back-analysis techniques for the improvement of the understanding of rock in underground constructions", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20(1), pp.7-21.
- Pichler B., Lackner R. and Mang H. A. (2003) "Back analysis of model parameters in geotechnical engineering by means of soft computing" *International journal for numerical methods in engineering*, 57(14), pp.1943-1978.
- Rechea C., Levasseur S. and Finno R. (2008) "Inverse analysis techniques for parameter identification in simulation of excavation support systems" *Computers and Geotechnics*, 35(3), pp.331-345.
- Sakurai S. (2010), "Field Measurements for Assessing the Stability of Tunnels and Slopes", Past President of ISRM, National Technical University Athens
- Sakurai S. (1981) "Direct strain evaluation technique in construction of underground opening" In The 22nd US Symposium on Rock Mechanics (USRMS). American Rock Mechanics Association.
- Sakurai S., (1997) "lessons learned from field measurements in tunneling", *Tunnelling and underground space technology*, Vol. 12, No. 4, pp. 453-460.

- Sakurai S., Akutagawa S., Takeuchi K., Shinji M. and Shimizu N. (2003) “Back analysis for tunnel engineering as a modern observational method” *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18(2), pp.185-196.
- Sakurai S., and Takeuchi K., (1983) “Back Analysis of Measured Displacements of Tunnels”, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 16/3, pp. 173-180.
- Shang Y.J., Cai J.G., Hao W.D., Wu X.Y. and Li S.H. (2002) “Intelligent back analysis of displacements using precedent type analysis for tunneling” *Tunnelling and underground space technology*, 17(4), pp.381-389.
- Swoboda G., Ichikawa Y., Dong Q. and Zaki M. (1999) “Back analysis of large geotechnical models” *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 23(13), pp.1455-1472.
- Tanimoto C., Fujiwara T., Yoshioka H., Hata K. and Michihiro K. (1988) “Determination of rock mass strength through convergence measurements in tunnelling” *2rid Int. Syrup. on Field Measurements in Geomech*, pp.1069-1078.
- Vardakos S., (2007), PhD. thesis, “Back-analysis methods for optimal tunnel design”, Virginia Polytechnic Institute and State University
- Vlachopoulos N. and Diederichs M. S. (2009) “Improved longitudinal displacement profiles for convergence confinement analysis of deep tunnels” *Rock mechanics and rock engineering*, 42(2), pp.131-146.
- Yang C. X., Wu Y. H. and Hon T. (2010) “A no-tension elastic–plastic model and optimized back-analysis technique for modeling nonlinear mechanical behavior of rock mass in tunneling” *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(3), pp.279-289.
- Yang Z. and Elgamal A. (2003) “Application of unconstrained optimization and sensitivity analysis to calibration of a soil constitutive model” *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 27(15), pp.1277-1297.
- Zhang L. Q., Yue Z. Q., Yang Z. F., Qi J. X., and 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), pp.636-649.

- Zhu C., Zhao H. and Zhao M. (2014) “Back analysis of geomechanical parameters in underground engineering using artificial bee colony” *The Scientific World Journal*, vol. 2014, Article ID 693812, 13 pages.

Abstract

Designing and implementing large underground structures, geometric shapes selection and section size, stability analysis and design of their support system, are subject to geomechanical properties and stress conditions of the region. With the Rock mass resistance properties, the design and implementation of structures on rock or in rock will be less problematic. To achieve this important, or should be determined directly and by performing field tests, the resistance properties and the rock mass deformation, or by using the results of the instrumentation and using the methods of back analysis, the rock mass resistance parameters are evaluated. Using the methods of back analysis can be very important and less costly than performing direct experiments. In this thesis, the main purpose of using the back analysis method is to evaluate the geomechanical parameters (design parameters) in access tunnels to the Cavern Power station of the Azad dam Project, using the instrumentation data. To do this, firstly, the geomechanical and environmental parameters obtained from the laboratory tests results in the modeling of two stations from the access tunnel sections using the FLAC^{2D} software, Which has been selected from the main access tunnel (MAT) station and the next station of the Transformer cavern Access Tunnel to the head of the power station cavern (T4). Then, based on the data obtained from the instrumentation (convergence) and direct return analysis with Alternative Univariate search Method, the values of the four geomechanical parameters including the modulus of elasticity, the ratio of the stresses, the internal angle of friction and cohesion are estimated. The results for the MAT access tunnel, 8.2 GPa, 1.2, 42 degrees, and 1.85 MPa, and also for the T4 access tunnel, are estimated at 9 GPa, 1.7, 43 degrees and 1.7 MPa, respectively.

Keywords

Back Analysis, Alternative Univariate Method, geomechanical parameters, FLAC^{2D} Software



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering
Master of Science in Rock Mechanics Engineering

**Estimating the Geomechanical Parameters of Rock Mass Using
Back Analysis Method Based on Monitoring Data _ Case Study:
Power Station Cavern Access Tunnel in Azad Dam**

By: Nariman Habibi Kani Savaran

Supervisor:

Dr. Shokrollah. Zare

September 2017