بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده معدن

انتخاب نوع حفاری مکانیزه و پوشش سگمنتی تونل انتقال آب سبزکوه به چغاخور

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مکانیک سنگ

مرتضی کرمی

اساتید راهنما:

دکتر لهراسب فرامرزی

دکتر راحب باقرپور

استاد مشاور:

دکتر داراب رئیسی گهروئی

۱۳۸۹

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده معدن

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مکانیک سنگ آقای مرتضی کرمی

تحت عنوان

انتخاب نوع حفاری مکانیزه و پوشش سگمنتی تونل انتقال آب سبزکوه به چغاخور

در تاریخ ۱۳۸۹/۱۲/۲۴ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای اول پایان‌نامه	دکتر لهراسب فرامرزی
۲- استاد راهنمای دوم پایان‌نامه	دکتر راحب باقرپور
۳- استاد مشاور پایان‌نامه	دکتر داراب رئیسی گهروئی
۴- استاد داور خارجی	دکتر محمد علی روشن ضمیر
۵- استاد داور داخلی	مهندس سعید مهدوری

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده — دکتر راحب باقرپور

تشکر و قدردانی

پس از قدردانی از زحمات چندین و چند ساله پدر و مادر گرامیم، بر خود وظیفه می دانم که از جناب آقای دکتر لهراسب فرامرزی و جناب آقای دکتر راحب باقرپور که با راهنمایی‌های ارزنده خویش، موجبات تکمیل این پایان‌نامه را فراهم و چون برادری صمیمی مرا یاری نمودند و نیز از جناب آقای دکتر داراب رئیسی گهروئی که اطلاعات ارزشمندی پیرامون منطقه مورد مطالعه در اختیار من قرار دادند، سپاسگزار باشم. امید دارم که با لطف پروردگار بتوانم اندکی از زحمات این بزرگواران را جبران نمایم.

و در نهایت از تمام دوستانی که ردپایی در ساحل خاطرات تحصیلیم دارند، تشکر نموده و موفقیت روز افزون آنان را از خداوند بزرگ خواستارم.

مرتضی کرمی

زمستان ۸۹

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه به طور مشترک متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

یزدان پاک را سپاس

تقدیم به دو اسطوره صبر و ایثار در زندگیم

پدر و مادر عزیزم

که در برابر وجود پر مهرشان زانوی ادب بر زمین می نهم

و با دلی مملو از عشق و محبت و خضوع بر دستانشان بوسه می زنم

به پاس فداکاری هایشان و به امید جاودانگی شان

فهرست مطالب

عنوان | صفحه

فهرست مطالب هشت
چکیده ۱
فصل اول : مروری بر کلیات و اهداف پایان‌نامه ۲-۵
۱-۱- مقدمه ۲
۱-۲- ضرورت تحقیق و هدف از انجام آن ۳
۱-۳- مروری بر مطالعات و تحقیقات انجام شده ۳
۱-۴- مروری بر فصول پایان‌نامه ۵

فصل دوم : زمین‌شناسی ۶-۲۰
۲-۱- مقدمه ۶
۲-۲- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به منطقه ۷
۲-۳- مطالعات انجام شده ۸
۲-۴- زمین شناسی عمومی ۸
۲-۴-۱. جایگاه زمین شناسی منطقه ۸
۲-۴-۲. زمین ریخت شناسی ۹
۲-۴-۳. چینه شناسی ۱۰
۲-۵- زمین‌شناسی تکتونیکی ۱۲
۲-۵-۱. ناودیس سبزکوه ۱۲
۲-۵-۲. گسل‌ها ۱۳
۲-۵-۳. درزها و شکستگی‌ها ۱۳
۲-۶- هیدروژئولوژی ۱۹
۲-۶-۱. ۲-۶-۱- تراز آب زیرزمینی ۱۹

فصل سوم: طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ مسیر تونل انتقال آب سبزکوه ۲۱ -۳۰
۳-۱- مقدمه ۲۱
۳-۲- آزمایش‌های آزمایشگاهی ۲۱
۳-۳- طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ ۲۲
۳-۳-۱. طبقه بندی بر اساس RMR ۲۳
۳-۳-۲. سیستم رده‌بندی کیفیت توده سنگ Q ۲۶
۳-۳-۳. شاخص مقاومتی زمین شناسی (GSI) ۲۷
۳-۳-۴. رابطه بین RMR و Q ۲۹

فصل چهارم: تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ مسیر تونل سبزکوه **۳۱ -۴۸**
۴-۱- مقدمه ۳۱
۴-۲- مقاومت توده سنگ ۳۱
۴-۳- مدول تغییرشکل پذیری ۳۴
۴-۴- مقاومت چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی ۳۶
۴-۵- زون‌بندی ژئوتکنیکی مسیر تونل انتقال آب سبزکوه ۳۷
۴-۶- تنش‌های برجا و القائی ۳۸
۴-۶-۱. تنش قائم ۴۰
۴-۶-۲. تنش افقی برجا ۴۰
۴-۶-۳. تعیین تنش‌های برجا برای سه زون ژئوتکنیکی مسیر تونل سبزکوه ۴۲
۴-۷- بررسی وضعیت مچاله‌شوندگی ۴۳
۴-۷-۱. روش های تجربی ۴۳
۴-۷-۲. روش های نیمه تجربی ۴۵
۴-۷-۳. تعیین مچاله‌شوندگی برای توده‌های سنگی مسیر تونل انتقال آب سبزکوه ۴۷

فصل پنجم: حفاری مکانیزه و انتخاب TBM **۴۹ -۶۷**
۵-۱- مقدمه ۴۹
۵-۲- حفر تونل با TBM ۴۹
۵-۳- انتخاب TBM ۵۱
۵-۴- انواع TBMهای مورد استفاده جهت حفاری در سنگ سخت ۵۲
۵-۴-۱. TBM گریپری (باز) ۵۴
۵-۴-۲. TBMهای سپری ۵۵
۵-۵- تاثیر مخاطرات ژئوتکنیکی بر عملکرد TBM ۵۸
۵-۶- پارامترهای زمین‌شناسی موثر بر عملکرد TBM ۶۰
۵-۶-۱. ناپایداری دیواره‌های حفاری ۶۰
۵-۶-۲. گسل‌ها ۶۱
۵-۶-۳. شرایط آب زیرزمینی ۶۲
۵-۶-۴. مچاله شوندگی ۶۳
۵-۶-۵. مقاومت فشاری تک‌محوری ۶۴
۵-۶-۶. درزه‌ها و شکستگی‌ها ۶۵
۵-۷- انتخاب TBM مناسب برای حفاری تونل انتقال آب سبزکوه ۶۶

فصل ششم: سگمنت‌های بتنی پیش‌ساخته **۶۸ -۸۷**
۶-۱- مقدمه ۶۸
۶-۲- سگمنت‌های بتنی پیش ساخته ۶۹
۶-۳- پارامترهای هندسی سگمنت ۶۹
۶-۳-۱. ضخامت سگمنت ۷۰

۶-۳-۲. عرض سگمنت ۷۰
۶-۳-۳. طول و تعداد سگمنت‌ها در یک حلقه ۷۱
۶-۴- درزه های مابین سگمنت‌ها ۷۱
۶-۴-۱. درزه های طولی ۷۲
۶-۴-۲. درزه های محیطی ۷۴
۶-۵- بارهای وارد بر سگمنت ۷۵
۶-۵-۱- فشار زمین ۷۶
۶-۵-۲- فشار آب ۷۶
۶-۵-۳- بارهای حین عملیات اجرا ۷۶
۶-۶- انواع سگمنتهای مورد استفاده در تونل‌سازی سپری ۷۷
۶-۶-۱- سگمنت‌های مستطیلی ۷۷
۶-۶-۲- سگمنت‌های ذوزنقه‌ای ۷۸
۶-۶-۳- سگمنت‌های متوازی الاضلاعی ۷۸
۶-۶-۴- سگمنت شش‌ضلعی یا لانه‌زنبوری ۷۹
۶-۶-۵- سگمنت‌های بازشونده ۷۹
۶-۶-۶- سیستم‌های پوشش تسلیمی ۸۰
۶-۷- تزریق فضای خالی پشت سگمنت‌ها ۸۰
۶-۸- طراحی سگمنت‌های بتنی پیش ساخته ۸۱
۶-۸-۱- روش‌های طراحی ۸۳
۶-۸-۲- ضریب ایمنی ۸۴
۶-۹- مشخصات مقاومتی بتن و فولاد برای ساخت سگمنت ۸۴
۶-۱۰- تسلیح فولادی سگمنت ۸۵
۶-۱۰-۱- بتن مسلح ۸۵
۶-۱۰-۲- آئین‌نامه‌های طراحی ۸۵
۶-۱۰-۳- میلگرد فولادی ۸۵
۶-۱۰-۴- ضوابط و محدودیت‌های فولادگذاری ۸۷

فصل هفتم: شرایط آب زیرزمینی ۸۸ -۹۹
۷-۱- مقدمه ۸۸
۷-۲- تونل‌های تحت فشار خارجی آب ۸۸
۷-۲-۱. تونل‌های آب‌بند ۸۹
۷-۲-۲. تونل زهکشی شده ۹۰
۷-۳- نیروهای داخلی ایجاد شده در پوشش بتنی در اثر فشار آب‌زیرزمینی ۹۰
۷-۴- تاثیر زمین‌شناسی منطقه بر جریان آب ورودی به تونل ۹۱
۷-۴-۱- گسل‌ها و شکستگی‌ها ۹۱
۷-۴-۲- کارستی شدن ۹۱
۷-۵- طراحی پوشش تونل ۹۲

۷-۵-۱- نگهداری اولیه ۹۳
۷-۵-۲- نگهداری نهایی ۹۳
۷-۶- عملکرد TBM در شرایط جریان آب زیرزمینی ۹۳
۷-۷- آب‌بندی سگمنت‌های بتنی پیش‌ساخته ۹۴
۷-۷-۱- انواع گسکت‌ها ۹۴
۷-۷-۲- فشارهای اجرایی و آزمایشگاهی وارد بر گسکت‌ها ۹۵
۷-۷-۳- ابعاد شیار قرارگیری گسکت ۹۶
۷-۸- زون تزریق ۹۷
۷-۹- شرایط آب زیرزمینی در منطقه سبزکوه ۹۸

فصل هشتم: تحلیل پایداری و طراحی سگمنت تونل ۱۰۰-۱۱۶
۸-۱- مقدمه ۱۰۰
۸-۲- روش‌های عددی ۱۰۰
۸-۲-۱. انواع روش‌های عددی ۱۰۱
۸-۲-۲. آشنایی با نرم‌افزار FLAC 3D ۱۰۲
۸-۳- تحلیل پایداری تونل انتقال آب سبزکوه ۱۰۳
۸-۳-۱. هندسه مدل ۱۰۳
۸-۳-۲. مدل رفتاری و پارامترهای ژئومکانیکی لازم ۱۰۴
۸-۳-۳. شرایط اولیه و شرایط مرزی ۱۰۴
۸-۳-۴. مدل سازی TBM ۱۰۵
۸-۳-۵. حفاری در مدل ۱۰۶
۸-۳-۶. اضافه‌حفاری ۱۰۷
۸-۳-۷. پوشش سگمنتی بتنی ۱۰۷
۸-۳-۸ تحلیل زون‌های ژئوتکنیکی مسیر تونل انتقال آب سبزکوه ۱۰۸

فصل نهم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۱۷-۱۲۱
۹-۱- نتیجه‌گیری ۱۱۷
۹-۲- پیشنهادات ۱۲۰

پیوست الف : سیستم‌های طبقه‌بندی مهندسی RMR، Q و GSI ۱۲۲
پیوست ب : نمودارهای طراحی ستون بر اساس ACI 318-05 ۱۳۰
مراجع ۱۳۶

چکیده

تونل انتقال آب سبزکوه به طول تقریبی ۱۱ کیلومتر در راستای تقریباً شمالی- جنوبی از ارتفاعات کلار مشرف بر دریاچه سد چغاخور در استان چهارمحال و بختیاری و در حدود ۸۰ کیلومتری جنوب شهرکرد می‌گذرد و هدف نهایی آن انتقال ۹۰ میلیون متر مکعب آب در سال از حوزه سبزکوه به سد چغاخور و تأمین آب مورد نیاز برای مصارف کشاورزی و شرب شهرستان بروجن از طریق افزایش ارتفاع این سد است. هدف اصلی این تحقیق، انتخاب یک TBM مناسب برای حفاری تونل انتقال آب سبزکوه و تعیین پوشش سگمنتی این تونل می‌باشد.

با استفاده از نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی و برداشت‌های صحرایی، توده‌های سنگی مسیر تونل مورد مطالعه بر اساس سیستم‌های طبقه-بندی RMR، Q و GSI طبقه‌بندی شده و پارامترهای ژئومکانیکی توده‌های سنگی با استفاده از روابط تجربی رایج، تخمین زده شده است. در نهایت سه زون ژئوتکنیکی با ویژگی‌های زمین‌شناسی و پارامترهای ژئومکانیکی تقریبا مشابه برای توده‌های سنگی مسیر تونل انتقال آب سبزکوه تعیین گردیده است.

انتخاب TBM مناسب برای حفاری تونل انتقال آب سبزکوه با بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی و پارامترهای ژئومکانیکی هر یک از این سه زون و نیز مطالعه خصوصیات و شرایط کاربرد انواع TBMهای مورد استفاده برای حفاری سنگ انجام شده است. با توجه به پارامترهای ژئومکانیکی هر زون و خصوصیات ماشین انتخاب شده، تحلیل عددی به روش پیوسته و با استفاده از نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ انجام شده است. شرایط تحلیل برای هر کدام از زون‌ها به صورت شرایط خشک و شرایط همراه با آب زیرزمینی بوده است و برای زون‌هایی که تحت فشار بالای هیدرواستاتیک بوده‌اند، تحلیل‌ها با در نظر گرفتن زون پیش‌تزریق انجام شده است. از آنجایی که زون‌های مسیر تونل انتقال آب سبزکوه به واسطه روباره زیاد و نیز خواص ژئومکانیکی ضعیف مستعد پدیده مچاله‌شوندگی هستند، در نظر گرفتن اضافه‌حفاری بهینه برای TBM به منظور جلوگیری از گیر کردن سپر فولادی آن و وارد شدن بارهای فراتر از مقاومت سگمنت‌های بتنی، در تمام تحلیل‌های فوق ضروری است. تعیین میزان میلگرد فولادی لازم برای تسلیح سگمنت‌های پوششی تونل بر اساس آئین‌نامه ACI 318 – 05 انجام گرفته است. در نهایت پس از بررسی نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی، ضخامت و میزان تسلیح فولادی بهینه پوشش سگمنتی بتنی تونل تعیین شده است.

کلمات کلیدی: تونل انتقال آب سبزکوه، حفاری مکانیزه، پارامترهای ژئومکانیکی، تحلیل پایداری، فشار هیدرواستاتیک، پیش تزریق، پوشش سگمنتی.

فصل اول
مروری بر کلیات و اهداف پایان‌نامه

۱-۵- مقدمه

در سال‌های اخیر ایجاد فضاهای زیرزمینی و تونلسازی باعث سهولت کارهای زیرزمینی با کم‌ترین تاثیر بر روی سازه‌های سطح زمین یا ترافیک شده است. حفریات زیرزمینی برای اهداف مختلفی چون حمل و نقل، انبارهای ذخیره، ایستگاه‌ها و تونل‌های مترو، تونل‌های انتقال آب و ...احداث می‌شوند [۱]. همچنین پیشرفت و تکامل صنعت تونلسازی، عمدتاً وابسته به پیشرفت‌هایی است که در زمینه حفاری انجام گرفته است. این پیشرفت‌ها منجر به تحول حفاری تونل از روش‌های سنتی چالزنی و آتشباری به روش‌های مکانیزه و در رأس آن حفاری با TBMها شده است [۲].

یکی از مسائل مهم در طراحی سازه‌های زیرزمینی، شناسایی دقیق و کامل رفتار توده‌سنگ در بر گیرنده تونل است. انجام برداشت‌های سطحی، عمقی و انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی و برجا می‌تواند این نیاز را برطرف سازد. پارامترهای ژئومکانیکی توده‌های سنگی و نیز شرایط تنش در منطقه، نقش اساسی در طراحی و تعیین سیستم نگهداری به روش تجربی و عددی دارد. در صورتی که اجرای حفاری مکانیزه در تونل توجیه شده باشد، این عوامل می‌توانند در انتخاب نوع TBM مناسب و تجهیزات جانبی لازم آن نیز موثر باشند.

تونل انتقال سبزکوه به طول تقریبی ۱۱ کیلومتر از میان توده‌های سنگی شیل، مارن، آهک، دولومیت و ماسه‌سنگ با خصوصیات ژئومکانیکی و شرایط متفاوت ناپیوستگی عبور می‌کند [۳]. انجام طبقه‌بندی مهندسی مسیر تونل برای به دست آوردن دید کلی از وضعیت توده‌های سنگی مسیر تونل ضروری است. از آنجایی که هیچ آزمایش برجایی در

منطقه انجام نشده است، برای تخمین پارامترهای ژئومکانیکی توده‌های سنگی استفاده از آزمایش‌های آزمایشگاهی و روابط تجربی بدست آمده از سیستم‌های طبقه‌بندی مهندسی و نیز دخالت قضاوت مهندسی اجتناب‌ناپذیر است. پس از تعیین این پارامترها و با در نظر گرفتن شرایط زمین‌شناسی، تکتونیکی و ژئوتکنیکی منطقه، مسیر تونل به سه زون تقسیم‌بندی شده است. بر اساس ویژگی‌های این سه زون، TBM مناسب برای حفاری تونل سبزکوه انتخاب شده و پایداری هر زون تحت شرایط خشک و تحت فشار هیدرواستاتیک آب به روش عددی بررسی شده است.

۱-۶- ضرورت تحقیق و هدف از انجام آن

هدف کلی طرح تونل انتقال آب سبزکوه، تأمین آب برای مصارف کشاورزی اراضی پائین دست سد چغاخور، تأمین آب شرب مورد نیاز شهرستان بروجن در سالهای آتی و نیز مصارف صنعتی در این بخش از استان چهارمحال و بختیاری می باشد. برای این منظور طرح افزایش ارتفاع سد چغاخور به میزان ۵ متر برای افزایش حجم مخزن فعلی این سد و همچنین طرح سبزکوه (شامل بند انحرافی، کانال و تونل انتقال آب) به منظور انتقال آب رودخانه سبزکوه به مخزن این سد مورد توجه قرارگرفته است. بنابراین پروژه تونل انتقال آب سبزکوه، به طول تقریبی ۱۱ کیلومتر به منظور انتقال ۹۰ میلیون متر مکعب آب در سال از حوزه سبزکوه به سد چغاخور در استان چهارمحال و بختیاری و در حدود ۸۰ کیلومتری جنوب شهرکرد در حال مطالعه است. تونل مزبور در رقوم ارتفاعی ۲۳۰۰ متر از سطح دریا قرار دارد [۴].

با توجه به طول زیاد تونل و نیز ضرورت اجرای هرچه سریعتر این طرح، اجرای عملیات حفاری تونل به روش مکانیزه با ماشین تونلزنی تمام مقطع توجیه‌پذیر است. بنابراین انتخاب TBM مناسب برای حفاری تونل سبزکوه باید بر اساس شرایط زمین‌شناسی و تکتونیکی غالب در منطقه و نیز با در نظر گرفتن خصوصیات ژئومکانیکی توده‌سنگ مسیر تونل انجام شود.

برای تعیین پوشش نگهداری تونل انتقال آب سبزکوه، از روش‌های عددی بهره گرفته شده است. با توجه به تنوع روش‌های عددی و کاربرد هریک در شرایط خاص، در نظر گرفتن شرایط توده‌های سنگی سه زون تشکیل دهنده مسیر تونل ضروری است. بر این اساس، مناسب‌ترین روش عددی برای تحلیل تحلیل سیستم نگهداری تونل انجام شده است. در ارزیابی نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی سعی شده تا از قضاوت‌های مهندسی نیز کمک گرفته شود.

۱-۷- مروری بر مطالعات و تحقیقات انجام شده

تونل‌سازی در سنگ‌های ضعیف، فرصت‌های ویژه‌ای را برای مهندسین ژئوتکنیک پدید آورده تا در طی آن به نقاط ضعف و قوت خود پی ببرند. زیرا سوئ تفسیر و داوری نادرست در طراحی‌ها، می‌تواند گسیختگی‌های پرهزینه‌ای را به وجود آورد [۵].

طبقه‌بندی توده‌سنگ اساس روش طراحی تجربی تونل بوده و به طور وسیع در مهندسی سنگ به کار رفته است. نخستین طبقه‌بندی را می‌توان به ترزاقی[1] (۱۹۴۶) نسبت داد که بر اساس بار سنگ می‌باشد. از آن زمان به بعد طبقه-بندی مهندسی توده سنگ مبنای کار مهندسی قرار گرفت. دیر[2] و همکاران در سال ۱۹۷۰ یک اندیس کمی مبتنی بر

[1] Terzaghi
[2] Deere

فرایند بازیابی مغزه پیشنهاد کردند. مفهوم RSR که مدلی برای پیشگویی نگهداری زمین است توسط ویکهام[1]، تیدمن[2] و اسکینر[3] در سال ۱۹۷۲ در ایالات متحده پیشنهاد شد. این روش کمّی اولین سیستم کامل طبقه‌بندی مهندسی سنگ پس از کار ترزاقی (۱۹۴۶) می‌باشد. در سال ۱۹۷۴، بارتن[4] طبقه‌بندی مهندسی برای توده سنگ ارائه داد که از روی این طبقه‌بندی نگهداری تونل طراحی می‌شد. بارتن و همکاران در سال ۱۹۸۰ از سیستم طبقه‌بندی Q برای تعیین سیستم نگهداری فضاهای زیرزمینی استفاده نمودند. در سال ۱۹۸۹، بنیاوسکی سیستم طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ را که پیشتر در سال‌های ۱۹۷۳ و ۱۹۷۹تحت عنوان RMR ارائه داده‌بود، اصلاح نمود. در سال ۱۹۹۵ گوئل[5] و همکاران تجارب خود را پیرامون سیستم‌های Q و RMR در هند را منتشر کردند و در سال ۱۹۹۶ همبستگی‌ای را بین Q و RMR پیشنهاد دادند [۶]. هوک[6] و براون[7] (۱۹۹۷) نشان دادند که یک سیستم رده‌بندی باید توده‌های سنگی ضعیف را به صورت غیر خطی رده‌بندی کند تا به واقعیت نزدیکتر باشد. بر این اساس در سال ۱۹۷۳ بینیاوسکی[8] طبقه‌بندی مهندسی را برای توده‌های سنگی درزه‌دار معرفی کرد. طی سال‌های متمادی این سیستم طبقه-بندی تحت عنوان RMR تکمیل شد[۷]. گوئل و همکاران در سال ۱۹۹۲ همبستگی‌ای را بین کیفیت توده سنگ و فشار نگهداری اعمالی پیشنهاد دادند [۸]. هوک (۱۹۹۵) و هوک،کیزر[9] و باودن[10] (۱۹۹۵) شاخص مقاومت زمین-شناسی (GSI) را برای ارزیابی کاهش در مقاومت توده‌های سنگی در شرایط مختلف زمین‌شناسی، ارائه نمودند [۹]. ۱۹۹۸ هوک و بنیسی[11] قابلیت کاربرد شاخص مقاومت زمین‌شناسی را برای طبقه‌بندی توده‌های سنگی بسیار ضعیف و بُرشی نشان دادند [۱۰].

بر اساس این طبقه‌بندی‌های مهندسی روابط تجربی برای تخمین پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ گسترش یافتند که می‌توان به سینگ[12] (۱۹۷۱)، بینیاوسکی (۱۹۷۸) هوک و براون (۱۹۸۰)، ، یدبیر و همکاران (۱۹۸۳)، گوئل (۱۹۹۴)، ترومن[13] (۱۹۹۸)، هوک (۲۰۰۲) ، بارتن (۲۰۰۲) و هوک و دایدریچز[14] (۲۰۰۶) اشاره نمود [۱۱–۱۵]

با مشخص شدن خصوصیات توده‌سنگ و نیز آگاهی از شرایط زمین، می‌توان در مورد روش حفاری تصمیم گرفت. بر این اساس دو روش عمده برای حفاری تونل وجود دارد : روش سنتی چالزنی و آتشباری و روش حفاری مکانیزه. در روش موسوم به روش مکانیزه با استفاده از ماشین آلاتی مانند رودهدر و TBM حفاری تونل با سرعت و ایمنی بیشتر انجام می‌شود. برای تونل‌هایی با مقاطع دایره‌ای شکل و طول زیاد، استفاده از TBM می‌تواند نتایج قابل قبولی داشته باشد.

در صورت انتخاب مناسب این ماشین بر اساس شرایط زمین‌شناسی و تکتونیکی منطقه، پارامترهای ژئومکانیکی توده-سنگ میزبان و با در نظر گرفتن بحث زمان و هزینه اجرا، می‌تواند نرخ پیشروی تونل‌ها را بطور چشمگیری افزایش دهد.

TBMها نسبت به تغییر شرایط زمین، انعطاف‌پذیری زیادی ندارند. بنابراین عملکرد TBM نسبت به تغییر شرایطی مانند نوع سنگ، جریان آب زیرزمینی، وجود گسل و درزه و سایر ویژگی‌های ساختاری بسیار حساس است. بنابراین انتخاب TBMمناسب جهت حفاری تونل با چنین وضعیتی باید با احتیاط انجام شود [۱۶]

---

[1] Wickham
[2] Tiedeman
[3] Skinner
[4] Barton
[5] Goel
[6] Hoek
[7] Brown
[8] Bieniawski
[9] Kaiser
[10] Bawden
[11] Benissi
[12] Singh
[13] Trueman
[14] Diederiches

بارلا[1] در سال ۲۰۰۰ تونلسازی با TBM را تحت شرایط زمین مشکل‌آفرین مورد بررسی قرار داد. در این مطالعه تاثیر شرایط نامطلوب زمین‌شناسی مانند ناپایداری دیواره‌ها، زون‌های گسله و نیز وضعیت مچاله‌شوندگی بر تونلسازی مطالعه شده است [۱۷]. در سال ۲۰۰۲ ساپیگنی[2] و همکاران عملکرد TBM را بر اساس طبقه‌بندی توده‌سنگ تخمین زدند [۱۸]. دالگیچ[3] در سال ۲۰۰۳ تونلسازی در مناطق گسله را در تونلی در ترکیه مورد بررسی قرار داد و شیوه‌های مقابله با این پدیده در تونلسازی با TBM را ارائه نمود [۱۹]. در سال ۲۰۰۴، بناردوس[4] و همکاران روشی را برای تعیین خطرات ژئوتکنیکی برای تونلسازی با TBM در متروی آتن در یونان ارائه دادند [۲۰]. گانگ[5] و همکاران در سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۷، مدل‌هایی را بر اساس مشخصات توده‌سنگ برای پیش‌بینی نرخ نفوذ TBMپیشنهاد دادند [۲۱-۲۳]. یاگیز[6] در سال ۲۰۰۹ و فرخ و رستمی در سال ۲۰۰۹ به ترتیب تاثیر شرایط مختلف ژئوتکنیکی بر تونلسازی با TBM و تاثیر شرایط نامطلوب زمین‌شناسی بر عملکرد TBM را بررسی کردند [۲۳ و ۲۴]. رامونی[7] و آناگنوستو[8] در سال ۲۰۱۰ تونلسازی با TBM را تحت شرایط مچاله‌شوندگی بررسی نمودند [۲۵] و اندرکنش بین سپر، زمین و سیستم نگهداری تونل تحت چنین شرایطی مطالعه شد [۲۶]. همچنین نیروی محوری لازم برای TBM برای غلبه بر اصطکاک ناشی از پدیده مچاله‌شوندگی از روی نمودارهای بی‌بعد به دست آمد [۲۷].

به طور کلی نگهداری تونل به دو صورت نگهداری اولیه و نهایی اجرا می‌شود که با توجه به نوع TBM می‌تواند از شاتکریت، بولت، سگمنت‌های بتنی پیش‌ساخته و لاینینگ درجا متغیر باشد [۲۸]. برای تحلیل سیستم‌های نگهداری استفاده از روش‌های عددی می‌تواند دقت و سرعت بیشتری را در پی داشته باشد و پیچیدگی مساله را تا حدی جبران نماید. در نهایت نتایج بدست آمده باید با توجه به شرایط منطقه و قضاوت‌های مهندسی صحیح و منطقی، تفسیر شوند و سیستم نگهداری با ضریب ایمنی قابل قبول برای تونل انتخاب شود.

۱-۸- مروری بر فصول پایان‌نامه

این پایان‌نامه مشتمل بر ۹ فصل می‌باشد. فصل دوم، مروری است بر مطالعات زمین‌شناسی (عمومی و مهندسی) و اکتشافات ژئوتکنیکی انجام شده در منطقه. در فصل سوم، توده‌های سنگی مسیر تونل انتقال آب سبزکوه بر اساس سیستم‌های طبقه‌بندی مهندسی رایج، طبقه‌بندی شده است. در فصل چهارم، پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ مسیر تونل تخمین زده شده و مسیر تونل به سه زون ژئوتکنیکی تقسیم‌بندی شده است. در فصل پنجم، TBM مناسب برای حفاری تونل انتقال آب سبزکوه انتخاب شده است. فصل ششم مطالعه‌ای است پیرامون سگمنت‌های بتنی پیش‌ساخته. در فصل هفتم شرایط آب زیرزمینی مورد بحث قرار گرفته است. در فصل هشتم با استفاده از روش عددی، پوشش سگمنتی برای هر یک از زون‌های ژئوتکنیکی مسیر تونل تعیین شده است. فصل نهم به جمع‌بندی کلی، پیشنهادات و نتیجه‌گیری نهایی اختصاص داده شده است. در پیوست الف، جزئیات طبقه‌بندی مهندسی به روش RMR و Q بیان شده است. در پیوست ب، نمودارهای بی‌بعد اندرکنش نیروی محوری – ممان خمشی بر اساس آئین‌نامهACI 318-05 آورده شده است.

---

[1] Barla
[2] Sapigni
[3] DalgIç
[4] Benardos
[5] Gong
[6] Yağız
[7] Ramoni
[8] Anagnostou

فصل دوم

زمین شناسی

۲-۷- مقدمه

تأمین آب مورد نیاز برای مصارف کشاورزی و شرب شهرستان بروجن از طریق افزایش ارتفاع سد چغاخور و انتقال آب از رودخانه سبزکوه به دریاچه این سد، هدف کلی پروژه تونل انتقال آب سبزکوه بوده است. اهداف و ضرورتهای بررسی زمین‌شناسی و ژئوتکنیک در مسیرتونل سبزکوه را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود [۳]:

- بررسی‌های ژئومورفولوژی به منظور شناخت عوارض طبیعی، پدیده‌های زمین‌شناسی و در نهایت کمک در انتخاب بهینه مسیر تونل و موقعیت گمانه‌های اکتشافی
- بررسی‌های چینه‌شناسی و زمین‌شناسی ساختمانی همراه با تهیه نقشه زمین‌شناسی برای تفکیک واحدهای مختلف زمین‌شناسی و شناخت مشخصات کلی آن‌ها و همچنین تشخیص عناصر ساختاری مختلف (چینها، گسلها و سیستم‌های درز و شکست) در مسیر تونل
- بررسی‌های هیدروژئولوژی به منظور شناخت وضعیت آب‌های زیرزمینی و نفوذپذیری هر یک از واحدهای مختلف زمین شناسی
- بررسی ویژگی‌های ژئوتکنیکی هر یک از واحدهای زمین شناسی، زون بندی و ارائه مدل‌های زمین شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی در مسیر تونل انتقال آب به منظور دسترسی به ویژگی‌های فیزیکی و مهندسی هر یک از زون‌های ژئوتکنیکی

۲-۸- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به منطقه

تونل سبزکوه به طول تقریبی ۱۱ کیلومتر در راستای تقریباً شمال- جنوب از ارتفاعات کلار مشرف بر دریاچه سد چغاخور می‌گذرد. مختصات جغرافیایی محل ورودی و خروجی در این تونل به شرح زیر می‌باشد :

$$\text{خروجی} \begin{cases} X = 489238.5 \\ Y = 3529508.7 \\ Z = 2280.5 \end{cases} \qquad \text{ورودی} \begin{cases} X = 488565.2 \\ Y = 3519136.2 \\ Z = 2300 \end{cases}$$

دسترسی به ورودی تونل از طریق جاده ناغان- چهارطاق میسر می‌باشد و خروجی تونل سبزکوه نیز در حاشیه جنوبی دریاچه سد چغاخور واقع گردیده است [۳]. موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به منطقه در شکل ۲-۱ نشان داده شده است.

شکل ۲-۱: موقعیت جغرافیای و راه‌های دسترسی به منطقه تونل سبزکوه [۳]

۲-۹- مطالعات انجام شده

در مسیر تونل انتقال آب سبزکوه، ۱۳ گمانه به متراژ ۲۰۲۰ متر مشخص شده است. به دلیل صعب‌العبور بودن موقعیت گمانه ST 306، این گمانه حذف و گمانه‌های مسیر تونل به متراژ ۱۷۷۶ متر در سال ۱۳۸۵ به پایان رسیده است [۳]. مشخصات عمومی گمانه‌های اکتشافی مسیر تونل در جدول ۲-۱ بیان شده است.

جدول ۲- ۱: مشخصات گمانه‌های حفاری شده در مسیر تونل آب سبزکوه [۳]

ردیف	شماره گمانه	عمق گمانه	مختصات x	مختصات y	مختصات z
۱	ST301	۳۰	۴۸۸۵۶۵/۱۵	۳۵۱۹۱۳۶/۱۱	۲۳۰۰
۲	ST302	۹۰	۴۸۸۶۰۵/۸۳	۳۵۱۹۴۷۵/۴۳	۲۳۷۴/۳
۳	ST303	۲۰۰	۴۸۸۷۰۸/۶۹	۳۵۲۰۳۳۳/۴۷	۲۶۲۵
۴	ST304	۲۰۰	۴۸۸۷۷۵/۴۷	۳۵۲۰۸۹۷/۶۸	۲۷۲۰
۵	ST305	۱۵۰	۴۸۸۸۲۸/۱۱	۳۵۲۱۳۳۲/۲۹	۲۹۳۰
۶	ST307	۳۱۹	۴۸۹۴۷۸/۸۹	۳۵۲۶۷۵۸/۴۵	۲۵۹۳/۵
۷	ST308	۲۹۶	۴۸۹۵۳۵/۲	۳۵۲۷۲۲۸/۱۹	۲۵۷۲
۸	ST309	۲۰۰	۴۸۹۵۷۹/۱۶	۳۵۲۷۵۹۴/۹۱	۲۴۷۲/۲
۹	ST310	۱۱۰	۴۸۹۶۶۸/۷۷	۳۵۲۸۳۴۲/۳۷	۲۳۸۸/۵
۱۰	ST311	۸۰	۴۸۹۶۹۲/۸۹	۳۵۲۸۵۴۳/۶	۲۳۵۵
۱۱	ST312	۸۰	۴۸۹۷۳۵/۹۱	۳۵۲۸۹۰۲/۴۹	۲۳۳۶/۷
۱۲	ST313	۶۰	۴۸۹۷۷۹/۱۲	۳۵۲۹۲۶۲/۹۴	۲۲۹۸/۴

۲-۱۰- زمین شناسی عمومی

پژوهش‌های بنیادی به عمل آمده در منطقه زاگرس و همچنین بررسی نقشه‌های زمین شناسی و ساختاری کوچک مقیاس از این منطقه، همگی نشان‌دهنده تحولات زمین‌شناسی و ساختاری بسیار متنوع و بعضاً پیچیده در این محدوده، بالاخص در بخش‌های زاگرس مرتفع می‌باشد. در این بخش ، ویژگی‌ها و جایگاه زمین شناسی منطقه سبزکوه و چغاخور، به همراه تاریخچه تحولات زمین‌شناسی و ساختاری این منطقه بر اساس نقشه‌ها و اطلاعات موجود و هم چنین بررسی‌های صحرائی در این منطقه مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد [۳].

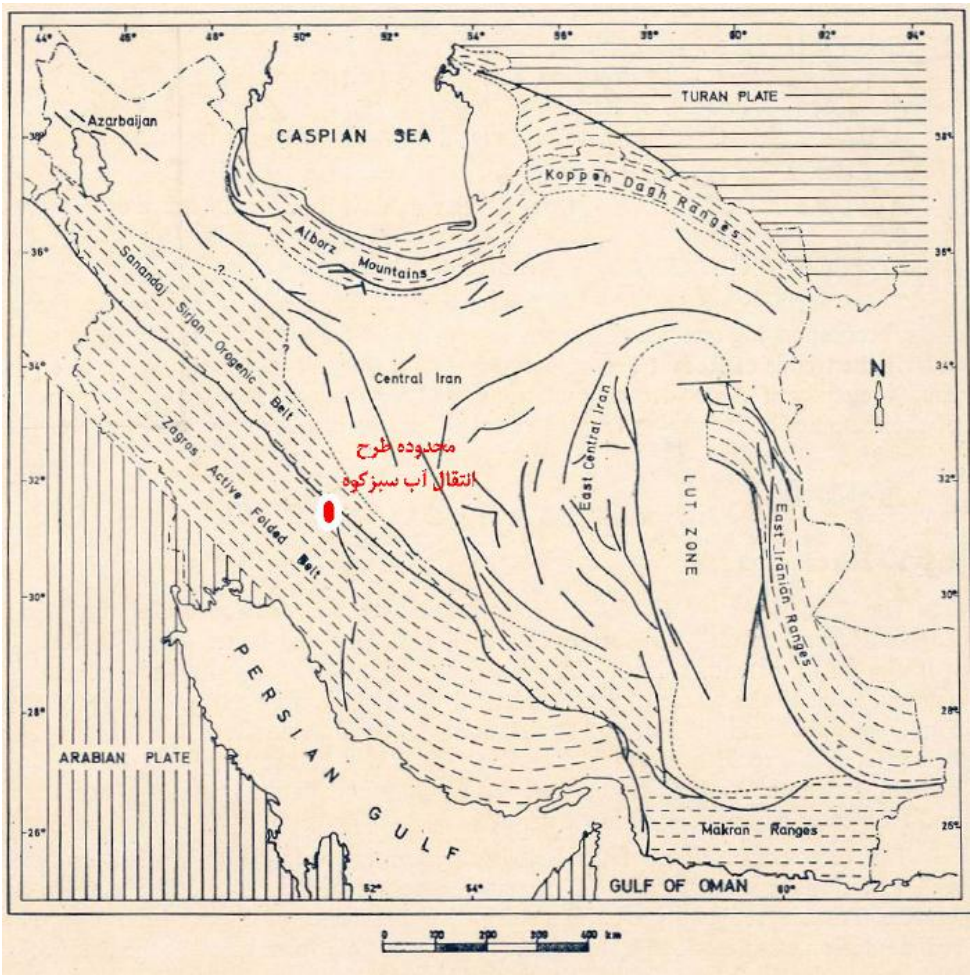
۲-۴-۱- جایگاه زمین شناسی منطقه

از دیدگاه زمین‌شناسی، پهنه ایران‌زمین دارای ویژگی‌ها و سرگذشت زمین‌شناسی بسیار متنوع و گاهی پیچیده می‌باشد. برای اولین بار در سال ۱۹۶۸ اشتوکلین[1]، زمین شناسی ایران را به چند منطقه یا زون ساختاری که دارای وضعیت زمین‌ساختی، ساختار و شرایط محیط رسوبی متفاوتی هستند، تقسیم‌بندی نمود که این نقشه مبنای کار بسیاری از محققین قرار گرفته است. در سال‌های اخیر با مطالعات زمین شناسی دقیق‌تر و استفاده از فرضیه تکتونیک صفحه‌ای، تفسیرهای متفاوت و جامعی توسط نبوی (۱۳۵۵)، افتخار نژاد (۱۳۵۹)، بربریان و کینگ (۱۹۷۸)

[1] Stocklin

و علوی (۱۹۹۹) ارائه شده است [۳]. شکل ۲-۲ محدوده هر یک از واحدهای زمین شناسی ایران را بر اساس نقشه پهنه‌بندی ارائه شده توسط بربریان (۱۹۷۶) نشان می‌دهد.

منطقه مورد مطالعه در حاشیه شمالی رشته کوه‌های زاگرس و در بخش‌های میانی آن قرار گرفته است که در زون ساختاری زاگرس مرتفع[1] واقع شده است. این زون از سمت شمال شرقی به گسل معکوس اصلی زاگرس[2] و از سمت جنوب غرب به گروه گسل‌های بلند زاگرس از جمله گسل زاگرس بلند محدود می‌شود [۳].



شکل ۲- ۲: تقسیم بندی لرزه زمین ساختی ایران [۳]

۲-۴-۲- زمین ریخت شناسی

مطالعات زمین‌ریخت‌شناسی که یکی از بخش‌های بنیادی در مطالعات زمین شناسی مهندسی می‌باشد، علاوه به اینکه می‌تواند نشانگر محدودیت‌های فیزیکی باشد که بعضاً بر سر راه فعالیت‌های عمرانی قرار می‌گیرند، می‌تواند به طور غیر مستقیم بیانگر مشخصات زمین شناسی هر منطقه نیز باشد. زیرا ویژگی‌های زمین‌شناسی و ساختاری هر

[1] High Zagros
[2] Main Zagros Fault

منطقه از جمله مشخصات فیزیکی و مکانیکی واحدهای مختلف همراه با نوع و تعداد عناصر ساختاری (چین‌ها، گسل‌ها، درزه‌ها) از مهم‌ترین عوامل اثرگذار و تعیین کننده در ریخت‌شناسی هر منطقه می‌باشند [۳].
منطقه مورد مطالعه در حاشیه شمالی رشته کوه‌های زاگرس و در محدوده جغرافیای ´۵۸ °۵۰ تا ´۵۱ °۵۰ طول شرقی و جغرافیای ´۵۸ °۳۱ تا ´۴۵ °۳۱ عرض شمالی قرار گرفته است. ریخت غالب این منطقه، کوهستان‌های مرتفع با دره‌های عمیق است و به عنوان کانون آبگیر همیشگی منطقه قابل توجه می‌باشد به طوری که تأمین کننده آب رودخانه‌های کارون، سبزکوه، منج و ... به شمار می‌رود [۳].
از ارتفاعات مهم منطقه می‌توان از کوه کلار (۳۸۳۲ متر)، کوه هزار دره (۳۹۰۰ متر) و سبزکوه (۳۴۵۳ متر) نام برد. اختلاف ارتفاع بلندترین نقطه و پست‌ترین نقطه در این محدوده حدوداً ۱۹۰۰ متر می‌باشد. تالاب‌های چغاخور و سولقان به صورت بلوک‌هایی فرو افتاده و مناطقی پست در شمال ارتفاعات کلار، محل تجمع آب‌های سطحی و زیرزمینی زهکشی شده از آبخوان‌های کارستی منطقه می‌باشند. شیب کلی رودخانه سبزکوه در منطقه مورد مطالعه حدوداً ۳ درصد و تراز بستر آن در ساختگاه بند انحرافی سبزکوه حدوداً ۲۲۸۰ متر می‌باشد [۳].

۲-۴-۳- چینه شناسی

منطقه مورد مطالعه علاوه بر نهشته‌های کواترنری ، متشکل از ۲۵ واحد سنگ چینه‌ای مختلف می‌باشد که سازند نمکی هرمز (اینفراکامبرین) کهن‌ترین آن‌ها و کنگلومرای بختیاری (پلیوسن) جوان‌ترین این واحدها می‌باشد. مهم‌ترین ویژگی این واحدها به شرح زیر می‌باشد که به طور خلاصه در جدول ۲-۲ ارائه شده است [۲].

- **نهشته‌های اینفراکامبرین**

این نهشته‌ها در منطقه، شامل سازند هرمز می‌باشند. سنگ‌شناسی این واحد متشکل از سنگ‌های رسی از جمله شیل، مارن‌های نمک دار، نمک و ماسه‌سنگ است.

- **نهشته‌های پالئوزوئیک**

این نهشته‌ها در منطقه شامل سازندهای باروت، زایگون، لالون، میلا و دالان می باشد که به علت اینکه فقط سازند دالان در بخش خروجی تونل سبزکوه قرار دارد، در زیر به آن اشاره شده است.

- **سازند دالان (P_d^d)**

سنگ شناسی این واحد در منطقه متشکل از دولومیت‌های متبلور توده‌ای، سخت و دیواره‌ساز به رنگ خاکستری روشن می‌باشد. سن این سازند بر اساس میکروفسیل‌های شناسایی شده به پرمین میانی- پسین نسبت داده شده است.

- **نهشته‌های مزوزوئیک**

این نهشته‌ها در منطقه از گروه کازرون شامل سازندهای خانه‌کت و نیریز، گروه خامی شامل سازندهای سرمه و داریان- فهلیان ، گروه بنگستان شامل سازندهای کژدمی و سروک-ایلام و سازندهای گورپی می‌باشد که در زیر مورد بررسی قرار می‌گیرند.