

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



پردیس بین‌المللی خوارزمی

پایان نامه کارشناسی ارشد استخراج مواد معدنی

پیش بینی نرخ نفوذ (TBM) در تونل انتقال آب کانی سیب

نگارنده: محسن اولادی عباس آبادی

اساتید راهنما:

دکتر محمد عطائی

دکتر رضا خالوکاکایی

استاد مشاور:

دکتر عباس آقاجانی بزاز

بهمن ۱۳۹۷

شماره: ۲۳۵۴۷/۹۶/۲
تاریخ: ۱۳۹۷/۱۲/۱۱

باسمه تعالی



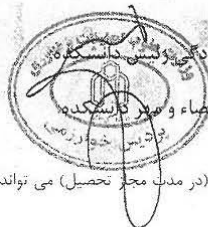
مدیریت تحصیلات تکمیلی

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 محسن اولادی عباس آبادی با شماره دانشجویی: ۹۴۳۷۲۶۴ رشته: معدن گرایش: استخراج تحت عنوان: پیش بینی نرخ نفوذ TBM در پروژه تونل انتقال آب گانی سبب که در تاریخ ۱۳۹۷/۱۱/۱۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: ...) ☒ مردود ☐
نوع تحقیق: نظری ☒ عملی ☐

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	محمد عطایی	استاد	
۲- استاد راهنمای دوم	رضا خالو کاکایی	استاد	
۳- استاد مشاور			
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	علی عباس نژاد	استاد یار	
۵- استاد ممتحن اول	فرهنگ سرشکی	استاد	
۶- استاد ممتحن دوم	رامین رفیعی	استاد یار	



نام و نام خانوادگی دانشجو: ...
تاریخ و امضاء و مهر دانشکده: ...
تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم به

آنان که ناتوان شدند تا ما به توانایی برسیم، موهایشان سپید شد تا ما رو سفید شویم.
تقدیم به پدر و مادر عزیز و مهربانم که در سختی ها و دشواری های زندگی، همواره یاور و دلسوز و خداکار و
پشتیبانی محکم و مطمئن برایم بوده اند.

سپاسگزاری از

استادی که سپیدی را بر تخته سیاه زندگی نگاشت و تار مویی از او به پای آموختن سیاه نماند.
باسپاس فراوان از زحمات جناب دکتر محمد عطائی و جناب دکتر رضا خالوکا کاپی که در مدت
انجام این پایان نامه نهایت کمک را به اینجانب داشته اند.

تعمدنامه

اینجانب محسن اولادی عباس آبادی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن گرایش استخراج مواد معدنی دانشکده پردیس / مجازی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه پیش بینی نرخ نفوذ TBM در پروژه تونل انتقال آب کانی سیب تحت راهنمایی جناب آقایان دکتر محمد عطایی و دکتر رضا خالو کاکایی 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 پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

پیش‌بینی عملکرد TBM قسمت بااهمیت هر پروژه با TBM است. این به خاطر نیاز کلی برای ارزیابی هزینه و برنامه زمان‌بندی در هر مرحله از طراحی پروژه تونل و توسعه اطلاعات لازم برای مقایسه قابل‌اعتماد بین انواع روش‌های حفر تونل است. در گذشته برای پیش‌بینی راندمان و عملکرد ماشین حفاری تونل مدل‌های فراوانی توسعه داده شده‌اند و در بیشتر این مدل‌ها به سرعت نفوذ و در برخی به سرعت پیشروی نیز اشاره شده است. عدم وجود تنها یک روش واحد برای مدل کردن عملکرد TBM در پروژه‌ها بدیهی می‌باشد که برای این پیش‌بینی روش‌های متفاوتی بر اساس شرایط زمین و پارامترهای مربوط به دستگاه تعیین می‌شود. پروژه انتقال آب کانی سیب از دو قطعه تونل انتقال آب تشکیل شده است که قطعه ۲ تونل گلاس به طول حدود ۲۰۶۶۰ متر از بخش میانی تونل گلاس در محدوده ارتفاعات جنوب روستای خورنج در متراژ ۱۵۰۰۰ متر شروع و تا دهانه خروجی تونل ادامه می‌یابد. هدف حفاری تونل گلاس انتقال بخشی از آب رودخانه لایین که سرشاخه اصلی رود گلاس می‌باشد به سمت حوضه آبریز دریاچه ارومیه و دشت نقده است. این تونل به روش مکانیزه با دستگاه تمام مقطع حفار (TBM)، حفاری خواهد شد. در این پژوهش از شرایط زمین مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS) و از پارامترهای ماشین تراست (Thrust)، چرخش کله حفار (rpm)، گشتاور (Torque) و توان (Power) در نظر گرفته شده است. هدف از انجام این پژوهش پیش‌بینی نرخ نفوذ دستگاه حفار TBM در پروژه انتقال آب کانی سیب می‌باشد که برای این منظور رگرسیون خطی، رگرسیون غیرخطی و مدل‌سازی استنتاج عصبی_فازی بکار گرفته شده است که در نتیجه پنج رابطه خطی، یک رابطه غیرخطی و یک مدل استنتاج فازی_عصبی داریم که از میان این روابط و مدل، بهترین رابطه در نظر گرفته شده است.

کلمات کلیدی: ماشین حفار تمام مقطع، پیش‌بینی، تونل، نرخ نفوذ

فهرست مطالب

۱	فصل اول کلیات
۲	۱-۱- مقدمه
۳	۲-۱- سابقه موضوع
۵	۳-۱- هدف انجام تحقیق
۵	۴-۱- ضرورت انجام تحقیق
۶	۵-۱- ساختار پایان نامه
۷	فصل دوم سابقه موضوع
۸	۱-۲- مقدمه
۸	۲-۲- مدل پیش‌بینی NTH
۱۱	۱-۲-۲- ویژگی‌های توده سنگ و مقاومت فشاری در NTH
۱۲	۲-۲-۲- ویژگی‌های درزه‌داری در NTH
۱۴	۳-۲-۲- سرعت نفوذ خالص (PR)
۱۵	۳-۲- روش‌های مدل کردن عصبی-فازی
۱۶	۱-۳-۲- شبکه‌های عصبی مصنوعی (Artificial Neural Network) ANN
۱۶	۲-۳-۲- مدل‌های عصبی-فازی
۱۷	۳-۳-۲- انتخاب ساختار مدل در روش عصبی-فازی
۱۹	فصل سوم بررسی موقعیت جغرافیایی پروژه ...
۲۰	۱-۳- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به محدوده مورد مطالعه
۲۱	۲-۳- انواع ماشین‌های تمام مقطع حفر تونل (TBM)
۲۴	۳-۳- زمین‌شناسی ساختمانی محدوده مورد مطالعه (گزارشات شرکت مهندسین مشاور ایمن سازان، ۱۳۹۳)
۲۴	۱-۳-۳- مطالعات ژئوتکنیکی انجام شده در تونل مورد مطالعه
۲۵	۲-۳-۳- واحدهای زمین‌شناسی مهندسی محدوده مورد مطالعه تونل
۲۸	۳-۳-۳- ناپیوستگی‌های محدوده مورد مطالعه
۲۸	۴-۳-۳- تعیین پارامترهای ژئومیکانیکی سنگ بکر محدوده مورد مطالعه
۲۹	فصل چهارم بررسی نرخ نفوذ TBM
۳۰	۱-۴- مقدمه
۳۰	۲-۴- معرفی پارامترهای در نظر گرفته شده در پروژه مورد مطالعه
۳۲	۳-۴- روش تحقیق
۳۲	۱-۳-۴- دسته‌بندی داده‌ها

۳۴	۲-۳-۴- بررسی تأثیر پارامترها به روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA)
۳۵	۳-۳-۴- آزمون همبستگی (Corlation)
۳۵	۴-۳-۴- پیش‌بینی نرخ نفوذ با رگرسیون خطی
۴۰	۵-۳-۴- پیش‌بینی نرخ نفوذ با رگرسیون غیرخطی
۴۱	۶-۳-۴- پیش‌بینی نرخ نفوذ با روش استنتاج فازی-عصبی ANFIS
۴۵	فصل پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۴۶	نتیجه‌گیری
۴۷	پیشنهادهات
۴۸	فهرست منابع
۴۸	منابع انگلیسی

فهرست اشکال

شکل ۱-۲	نمودار تعریف DIR	۱۰
شکل ۲-۲	زاویه بین محور تونل و صفحه‌های ناپیوستگی	۱۴
شکل ۱-۳	تصویر ماهواره‌ای قطعه ۲ تونل گلاس و تونل دسترسی	۲۰
شکل ۲-۳	راه‌های دسترسی به قطعه ۲ تونل گلاس	۲۱
شکل ۱-۴	نمودار آنالیز مولفه‌های اصلی (PCA)	۳۴
شکل ۲-۴	نمودار آزمون رابطه (۱-۴)	۳۶
شکل ۳-۴	نمودار آموزش رابطه (۱-۴)	۳۶
شکل ۴-۴	نمودار آزمون رابطه (۲-۴)	۳۷
شکل ۵-۴	نمودار آموزش رابطه (۲-۴)	۳۷
شکل ۶-۴	نمودار آزمون رابطه (۳-۴)	۳۸
شکل ۷-۴	نمودار آموزش رابطه (۳-۴)	۳۸
شکل ۸-۴	نمودار آزمون رابطه (۴-۴)	۳۹
شکل ۹-۴	نمودار آموزش رابطه (۴-۴)	۳۹
شکل ۱۰-۴	نمودار آزمون رابطه (۵-۴)	۴۰
شکل ۱۱-۴	نمودار آموزش رابطه (۵-۴)	۴۰
شکل ۱۲-۴	نمودار آزمون رابطه غیرخطی	۴۱
شکل ۱۳-۴	نمودار آموزش رابطه غیرخطی	۴۱
شکل ۱۴-۴	مدل‌سازی آموزش ANFIS	۴۲
شکل ۱۵-۴	نمودار مدل‌سازی آموزش ANFIS	۴۲
شکل ۱۶-۴	مدل‌سازی آزمون ANFIS	۴۳
شکل ۱۷-۴	نمودار آزمون ANFIS	۴۳

فهرست جداول

جدول ۱-۲	درجه شکستگی‌ها	۱۳
جدول ۱-۳	مشخصات گسل‌های موجود در تونل (شرکت مهندسين مشاور ايمن سازان، ۱۳۹۳)	۲۴
جدول ۲-۳	گمانه‌های حفاری‌شده در محدوده تونل (شرکت مهندسين مشاور ايمن سازان، ۱۳۹۳)	۲۵
جدول ۳-۳	توصیف‌های میدانی واحدهای زمین‌شناسی موجود در محدوده مورد مطالعه	۲۶
جدول ۴-۳	متراژ شروع و پایان و طول حفاری تونل در هر کدام از واحدهای مهندسی را نشان می‌دهد.	۲۷
جدول ۱-۴	جدول داده‌ها	۳۱
جدول ۲-۴	داده‌های آزمایش	۳۳
جدول ۳-۴	آزمون همبستگی	۳۵
جدول ۴-۴	جدول تحلیل معناداری رگرسیون رابطه (۱-۴)	۳۶
جدول ۵-۴	جدول تحلیل معناداری رگرسیون رابطه (۲-۴)	۳۷
جدول ۶-۴	جدول تحلیل معناداری رگرسیون رابطه (۳-۴)	۳۸
جدول ۷-۴	جدول تحلیل معناداری رگرسیون رابطه (۴-۴)	۳۹
جدول ۸-۴	جدول تحلیل معناداری رگرسیون رابطه (۵-۴)	۴۰

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

ماشین حفار تمام مقطع تونل (TBM) از مهم‌ترین ماشین‌های حفار می‌باشد که در شرایط متفاوت زمین‌شناسی قابل استفاده است. در ابتدا وقتی TBM به صنعت معرفی شد دلیل اصلی آن ناکارآمدی ماشین‌های حفار در شرایط زمین‌شناسی متفاوت و سرعت پایین حفاری آن‌ها در سنگ سخت با مقاومت بالا بوده است. لذا با ورود TMB تحول زیادی در سرعت حفاری ماشین‌های حفار به وجود آمد. از آنجایی که سرعت حفاری در هر پروژه بسیار حائز اهمیت است، لذا یکی از شاخص‌های ارزیابی عملکرد TBM پیش‌بینی نرخ نفوذ این دستگاه است. تکامل و گسترش این دستگاه‌ها سبب شده است که آهنگ پیشروی تونل‌ها در حد قابل توجهی افزایش یابد. اولین دستگاه TBM در سال ۱۸۴۶ میلادی در ایتالیا ساخته شد. در سال ۱۸۵۱ میلادی چارلز ویلسون یک ماشین حفاری با تیغه‌های دیسکی اختراع کرد. ماشین‌های حفر تونل در سنگ سخت بعد از جنگ جهانی دوم درست زمانی که آقای جیمز رابینز در سال ۱۹۴۷ میلادی به عنوان مشاور فنی در یک شرکت زغالی دستگاهی برای حفر زغال طراحی کرد وارد بازار شدند. تیغه‌های برشی اولین بار در سال ۱۹۵۷ میلادی بر روی TBM برای حفاری نصب شدند و باعث گسترش استفاده از این دستگاه در حفر سازندهای زیرزمینی با ساختار سخت شدند. عملکرد TBM جدید پیشرفت‌های زیادی را در تکنولوژی حفر تونل در زمین‌های به‌طور متناوب خیلی سخت و نسبتاً نرم فراهم کرده است. در این رابطه می‌توان به نیروی رانش ۴۰ تا ۵۰ کیلو نیوتن در شروع سال‌های ۱۹۷۹ میلادی و حداکثر ۳۰۰ کیلو نیوتن در ماشین‌های سنگ سخت امروز اشاره کرد که در یک دوره ماهانه یکسان نرخ نفوذ از چند ده متر به چند صد متر افزایش یافته است.

امروز حفر تونل به‌طور موفقیت‌آمیز در سنگ‌هایی با مقاومت تک‌محوری متجاوز از ۳۰۰ مگا پاسکال به قطرهای بیش از ۱۰ متر انجام می‌شود. درواقع TBM ها به مرحله از پیشرفت رسیده‌اند که یک تونل عملاً می‌تواند در هر سنگ و زمینی حفر شود. با این وجود پیش‌بینی عملکرد قسمت با اهمیت هر پروژه با TBM است.

این به خاطر نیاز کلی برای ارزیابی هزینه و برنامه زمان‌بندی در هر مرحله از طراحی پروژه تونل و همچنین توسعه اطلاعات لازم برای یک مقایسه قابل‌اعتماد بین انواع روش‌های حفر تونل است در گذشته برای پیش‌بینی راندمان و عملکرد ماشین حفاری تونل مدل‌های فراوانی توسعه داده شده‌اند و در بیشتر این مدل‌ها به سرعت نفوذ توجه شده است و در برخی به سرعت پیشروی نیز اشاره شده است عدم وجود تنها یک روش واحد برای مدل کردن عملکرد TBM در پروژه‌ها بدیهی می‌باشد که برای این پیش‌بینی روش‌های متفاوتی بر اساس شرایط زمین که پارامترهای مرتبط با ویژگی‌های ماده سنگ و توده سنگ در این دسته قرار می‌گیرد که می‌تواند به ویژگی‌هایی از جمله مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت کششی برزیلی، شاخص بار نقطه‌ای، شکنندگی و تردی، شاخص‌های ساینده‌گی، فاصله ناپیوستگی زاویه بین محور تونل و صفحات ضعف، طبقه‌بندی توده سنگ از قبیل RQD, RMR و غیره اشاره کرد و پارامترهای مربوط به دستگاه می‌توان نیروی رانش، گشتاور، rpm، مشخصات کاترها، تعداد کاترها، نحوه قرارگیری کاترها اشاره کرد. در این تحقیق به پیش‌بینی نرخ نفوذ TBM در پروژه تونل انتقال آب کانی سیب می‌پردازیم که طول این تونل ۳۶ کیلومتر و از دو قطعه یکی به طول ۱۵ کیلومتر و دیگری به طول ۲۱ کیلومتر تشکیل شده است.

در این پروژه به علت تفاوت‌های زمین‌شناسی از EPB\Open Mode , Double Shield TBM استفاده می‌شود که ما در تحقیق موردنظر به پیش‌بینی نرخ نفوذ در تونل خروجی این پروژه که همان‌طور که گفته شد ۲۱ کیلومتر می‌باشد می‌پردازیم. در این تونل از دستگاه Double Shield TBM استفاده شده است.

۱-۲- سابقه موضوع

به‌طور کلی در پیش‌بینی نرخ پیشروی از دو پارامتر ویژگی‌های توده سنگ و پارامترهای ماشین استفاده می‌شود و افراد زیادی با استفاده از روش‌های متفاوت به پیش‌بینی نرخ پیشروی پرداخته‌اند که به بررسی برخی از آن‌ها می‌پردازیم:

هوارث (Howarth, 1986) یک کار آزمایشگاهی انجام داده است و به این نتیجه رسیده که شکست در توده سنگ در عملکرد TBM تأثیرگذار است و مقیاس شکست سنگ باید در نظر گرفته شود و سنگ‌های دارای شکست متوسط می‌توانند عملکرد TBM را بهبود ببخشند.

گانگ و همکارانش (Gang et Al, 2005) به مطالعه مدل‌سازی عددی جهت‌گیری و فضا سازی مشترک پرداختند و به نتایج خوبی رسیدند که نتایج این مدل‌سازی نشان می‌دهد هرچقدر زاویه بین محور تونل و شکستگی‌های توده سنگ کاهش یابد نرخ نفوذ افزایش می‌یابد.

بارتن (Barton, 2000) در یک تحقیق میدانی با استفاده از یکسری پارامترهای توده سنگ از قبیل پارامترهای Q و مقاومت تک‌محوری و پارامترهای ماشین از قبیل قطر ماشین و متوسط بار کاتر موفق به ارائه یک مدل برای پیش‌بینی نرخ پیشروی شده است.

ژائو و همکارانش (Zhao et Al, 2007) یک شبکه خنثی و دسته‌جمعی را توسعه دادند تا رابطه بین شاخص خاص قابلیت حفاری توده سنگ (SRMBI) و چهار ویژگی تأثیرگذار توده سنگ (قدرت تراکم سنگ، شکنندگی سنگ، فضا سازی، جهت‌گیری مشترک) را تثبیت نمایند.

حسن‌پور همکاران (Hasanpour et Al, 2011) با در نظر گرفتن پارامترهای توده سنگ از قبیل مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS) و خواص درزه‌داری سنگ (RQD) و پارامترهای عملکرد ماشین به‌خصوص شاخص نفوذ FPI به مطالعه در مورد پیش‌بینی نرخ نفوذ پرداختند و نمودارهایی تجربی برای عملکرد TBM پیشنهاد دادند.

فرخ و همکاران (Farrokh et Al, 2012) با استفاده از یک پایگاه جامع از سوابق حفاری به‌وسیله TBM در بیش از ۳۰۰ پروژه به تجزیه و تحلیل مدل‌های متفاوت پرداخته و با توجه به اطلاعات این پایگاه به توسعه یک مدل ساده‌تر پرداخته‌اند. در این مدل به‌اندازه گیری تأثیر عوامل توده سنگ مانند مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS)، قطر تونل و انحنای کله حفار (RPM) متمرکز شده‌اند.

۱-۳- هدف انجام تحقیق

در تمام پروژه‌ها برنامه زمان‌بندی از مهم‌ترین برگ خریدهای پروژه می‌باشد. در پروژه تونل انتقال آب کانی سیب از آن جهت که این پروژه جهت احیای دریاچه ارومیه تعریف شده است و با توجه شرایط نامناسب دریاچه ارومیه برنامه زمان‌بندی بسیار مهم می‌باشد. هدف از انجام این تحقیق پیش‌بینی نرخ نفوذ دستگاه تمام مقطع حفر تونل می‌باشد و این تحقیق از این جهت حائز اهمیت است که پیش‌بینی نرخ نفوذ دستگاه در برنامه زمان‌بندی و پشتیبانی TBM جایگاه ویژه‌ای دارد و با پیش‌بینی عملکرد دستگاه می‌توان با تسریع در پشتیبانی به برنامه زمان‌بندی کمک کرد.

۱-۴- ضرورت انجام تحقیق

از طرفی مشکل کمبود آب در کشور و از طرف دیگر افزایش نیاز به آب آشامیدنی و صنعتی موجب گردیده تا برای جلوگیری از کمبود آب در آینده پروژه‌های گسترده‌ای در زمینه تونل‌های انتقال آب طراحی و اجرا شوند. در این پروژه‌ها ماشین‌های حفاری تمام مقطع به دلیل سرعت بالای حفاری جایگاه ویژه‌ای را به خود اختصاص داده‌اند.

با توجه به افزایش به کارگیری این ماشین‌ها توانایی پیش‌بینی عملکرد آن‌ها به خصوص در پروژه‌های بلندمدت به دلیل تأثیرگذاری در میزان هزینه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. در این تحقیق به بررسی عملکرد ماشین حفار تمام مقطع تونل انتقال آب کانی سیب که این پروژه جهت احیای دریاچه ارومیه و آبیاری دشت نقده تعریف شده است می‌پردازیم. دریاچه ارومیه یکی از نادرترین و ارزشمندترین اکوسیستم و ذخیره‌گاه‌های زیستی ایران و جهان است. این دریاچه در خطر خشک شدن کامل قرار دارد.

طی ۱۳ سال گذشته ۶ متر کاهش سطح داشته است عوامل برون‌زای انسان‌ساخت چون افزایش جمعیت و توسعه کشاورزی، تأثیر بسیار بسزایی در خشک شدن این دریاچه داشته‌اند. اختصاص منابع آبی منطقه به بخش کشاورزی و برداشت غیرمجاز از آب‌های زیرزمینی در پی حفر چاه از دلایل خشک شدن این دریاچه

می‌باشند یکی از طرح‌هایی که برای نجات دریاچه ارومیه مطرح شده انتقال آب از نقاط دیگر به دریاچه ارومیه است. یکی از پروژه‌هایی که در سال‌های اخیر جهت احیای دریاچه ارومیه تعریف شده است پروژه تونل انتقال آب کانی سیب می‌باشد که هدف از حفاری این تونل انتقال بخشی از آب رودخانه لاورین که سرشاخه اصلی رود گلاس می‌باشد به سمت حوضه آبریز دریاچه ارومیه و دشت نقده است.

۱-۵- ساختار پایان‌نامه

فصل اول شامل کلیات شامل مقدمه، سابقه موضوع، هدف انجام تحقیق، ضرورت انجام تحقیق و ساختار پایان‌نامه می‌باشد. در فصل دوم پیشینه موضوع و روش‌های مختلف بررسی نرخ نفوذ ماشین تمام مقطع حفر تونل پرداخته شده است. فصل سوم شامل بررسی موقعیت جغرافیایی پروژه، آشنایی با ماشین تمام مقطع حفر تونل و بررسی ساختار زمین‌شناسی منطقه می‌باشد. در فصل چهارم به بررسی نرخ نفوذ ماشین تمام مقطع حفر تونل در پروژه کانی سیب با استفاده از رگرسیون خطی، رگرسیون غیرخطی و روش استنتاج عصبی-فازی ANFIS پرداخته شده است؛ و در نهایت در فصل پنجم به نتیجه‌گیری و تعیین بهترین رابطه برای نرخ نفوذ دستگاه تمام مقطع حفر تونل در پروژه تونل انتقال آب کانی سیب پرداخته شده است.

فصل دوم

سابقه موضوع

۲-۱- مقدمه

به طور کلی در پیش‌بینی نرخ نفوذ از دو پارامتر، ویژگی‌ها و شرایط زمین و پارامترهای ماشین استفاده می‌شود و افراد زیادی با استفاده از روش‌های متفاوت به پیش‌بینی نرخ نفوذ پرداخته‌اند که به بررسی برخی از آن‌ها می‌پردازیم.

از شرایط زمین می‌توان به ویژگی‌های توده سنگ از قبیل مقاومت ماده سنگ، مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)، مقاومت کششی برزیلی (BTS)، شاخص بار نقطه‌ای (I50)، سفتی (شاخص نفوذ پانچ، شاخص شکست سختی)، سختی و قابلیت چال خوری، شکنندگی، شاخص ساینده‌گی، شرایط توده سنگ و ناپیوستگی‌ها، فاصله ناپیوستگی‌ها، زاویه بین محور تونل و صفحات ضعف، طبقه‌بندی توده سنگ (RMR، Q، GSI) و پارامترهای دیگر از قبیل تنش برجا، شرایط آب‌های زیرزمینی اشاره نمود.

از پارامترهای ماشین می‌توان به نیروی رانش، گشتاور، دور بر دقیقه چرخش کله حفار، توان، مشخصات دیسک از قبیل تعداد دیسک‌ها در کله حفار، هندسه دیسک‌ها، ویژگی مکانیکی دیسک‌ها، ضریب برش، شاخص نفوذ، نسبت فاصله دیسک به نفوذ، نیروی رانش بحرانی و اثر مخصوص اشاره نمود. پارامترهای اشاره‌شده از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در سرعت نفوذ می‌باشند که وسعت این تأثیرات باید با مجموعه داده‌های واقعی اعتبار سنجی شود، این کار با تحلیل کامل آماری داده‌ها انجام می‌گیرد همه پارامترها باید در مقابل سرعت نفوذ نمودارشان رسم شده و داده‌های عددی از طریق رسم نمودار پراکندگی تحلیل شوند.

۲-۲- مدل پیش‌بینی NTH

بر طبق مدل NTH سرعت نفوذ می‌تواند به وسیله ترکیب خواص چالزنی و حفاری مواد سنگی با درزه‌داری توده سنگ و پارامترهای ماشین تخمین زده شود.

از بین مدل‌های متعدد پیش‌بینی عملکرد TBM، مدل NTH وابستگی نزدیکی به مدل RMI (یکی از روش‌های پیش‌بینی عملکرد TBM است) و پارامترهای آن دارد و شاید مدل RMI برگرفته‌شده از مدل NTH باشد؛ بنابراین با بررسی اجمالی مدل NTH در کنار مدل RMI و روشن ساختن برخی مزایا و شبیه بودنش در برخی قسمت‌ها با مدل RMI و همچنین برخی مزیت‌های مدل RMI نسبت به آن می‌توان به تفهیم بهتر مدل کمک کرد. مزیت اصلی مدل NTH برای پیش‌بینی عمل کرده TBM به‌طور کلی داشتن یک پایگاه اطلاعاتی تجربی جامع است که تأثیر مهم درزه‌داری توده سنگ را به‌راحتی به‌حساب آورده است. مدل در ابتدا بر اساس وابستگی‌های تجربی بین پارامترهای زمین‌شناسی، مکانیک سنگینی و عملکرد واقعی تونل زنی قدم برمی‌دارد منحنی‌های زمان و هزینه برای اکثر عملیات تونل زنی توسط جمع‌آوری و آنالیز تعداد زیادی اطلاعات اجرایی تونل و ویژگی‌های توده سنگ برگرفته‌شده از تونل زنی در اروپا پایه‌ریزی شده است، مدل مرتب اصلاح گردیده است تا به‌عنوان اصلاحات TBM و اطلاعات جدید تونل زنی مورد استفاده قرار گیرد مدل امروزی نسخه پنجم بر اساس ۲۳۰ کیلومتر حفر تونل می‌باشد. برداشت صحرایی زمین‌شناسی، نمونه آزمایش سنگ، اساس و پایه پیش‌بینی عملکرد را تشکیل می‌دهد. پیش‌بینی عملکرد مستقیماً به نیروی برشی مورد نیاز بستگی ندارد اما ترجیحاً از اطلاعات فنی و مشخصات ماشین در تخمین عملکرد ماشین استفاده می‌شود. مدل از اطلاعات زیر به‌عنوان ورودی استفاده می‌کند:

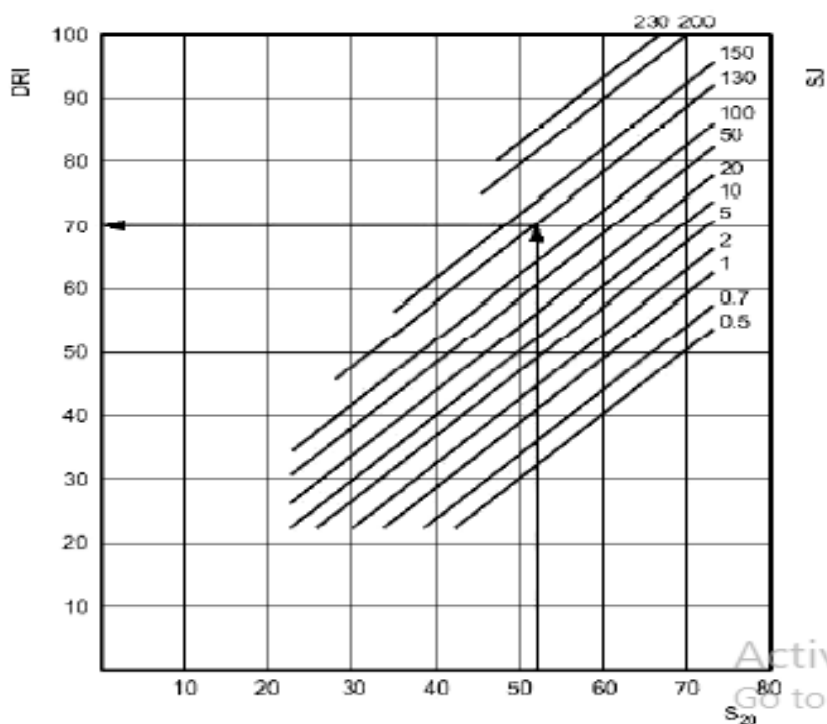
پارامترهای سنگ شامل درزه‌داری، شاخص سرعت چالزنی و حفاری، ساینده‌گی و پارمترهای ماشین شامل شکل و اندازه تیغه، سرعت چرخش کله حفار، انحنای کله حفار، تعداد دیسک‌ها در کله حفار، نیروی رانش و توان به کار گرفته‌شده در ماشین در نظر گرفته‌شده است.

آزمایش‌های زیر برای پی بردن به شاخص سرعت حفاری انجام شده است. (Movinkel, 1986؛ lislerud 1988)

۱- آزمایش تردی: برای آزمایش ابتدا نمونه سنگ در یک سنگ‌شکن تا ابعاد ۱۱.۲ تا ۱۶ میلی‌متر خرد می‌شود. سپس ۱۸۹ سانتی‌متر مکعب از سنگ‌های خردشده را در ظرفی که به این منظور طراحی شده است می‌ریزند.

نمونه مورد آزمایش ۲۰ مرتبه توسط وزنه ۱۴ کیلوگرمی از ارتفاع ۲۵ سانتیمتری تحت خردایش قرار می‌گیرد. شاخص تردی S_{20} معادل درصد سنگی است که پس از خرد شدن توسط ضربه‌ها از سرند ۱۱.۲ میلی‌متری عبور می‌کند.

۲- آزمون مقدار J سیورز: این آزمون یک حفاری مینیاتوری است که عرض لبه سر مته استفاده‌شده در حفاری ۸.۵ میلی‌متر و زاویه گوه آن ۱۱۰ گراد می‌باشد. نیروی قائم وارد بر سر مته ۲۰ کیلوگرم نیرو است و شاخص J سیورز برابر بانفوذ سر مته به دهم میلی‌متر و بعد از ۲۰۰ دور چرخش آن است. این شاخص را با S_r نمایش می‌دهند. شاخص سرعت حفاری با استفاده از شاخص شکنندگی S_{20} و مقدار S_r به کمک شکل ۱ حاصل می‌شود. به‌عنوان مثال سنگی با S_{20} معادل ۵۳ و S_r معادل ۱۳۰ دارای شاخص حفاری معادل ۷۰ خواهد بود.



شکل ۱-۲ نمودار تعریف DIR

۲-۱-۲- ویژگی‌های توده سنگ و مقاومت فشاری در NTH

در یک حفاری مؤثر با TBM که در اثر نیروی رانش بالاتر از نیروی رانش بحرانی سنگ به دست آمد مقاومت ماده سنگ به عنوان یک پارامتر مؤثر در عملکرد حفاری بررسی شده است. مقاومت فشاری تک‌محوری به عنوان ویژگی مهم سنگ در تعیین قابلیت چالزنی و حفاری استفاده شده است. برای سنگ‌هایی با مقاومت فشاری تک‌محوری بین ۱۴۰ تا ۲۰۰ مگا پاسکال آقای گراهام در سال ۱۹۷۶ میلادی پی برد را می‌توان به طور تقریبی به صورت زیر تخمین زد.

$$P = 3.94 \times \frac{T}{\delta_c}$$

P: نفوذ در هر دور چرخش (MM)

T: نیروی رانش به ازای هر تیغه (KN)

δ_c : مقاومت فشاری تک‌محوره (Mpa)

● این روابط تقریبی هستند، برای یک تیغه کله حفار استاندارد با طرح‌های مختلف و انواع کله حفار مورد استفاده، متغیر خواهد بود.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد مدل NTH از شاخص سرعت حفاری DRI استفاده کرده تا ویژگی ماده سنگ را نشان دهد همبستگی بین DRI و مقاومت فشاری ماده سنگ را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$DRI = E \times \delta_c^{-0.6}$$

E یک فاکتور بیانگر گروه‌های گوناگون سنگ‌ها می‌باشد که مقادیر آن به صورت زیر می‌باشد:

● برای سنگ‌های سخت $E = 1000$ ، $\delta_c > 40 \text{ Mpa}$

● برای سنگ‌های رسی $E = 750$ ، $\delta_c = 10 - 100 \text{ Mpa}$

● برای سنگ‌های دگرگونی $E = 500$ ، $\delta_c = 30 - 150 \text{ Mpa}$

۲-۲-۲- ویژگی‌های درزه‌داری در NTH

محققان زیادی همچون (Graham, 1976)، (hustrulid, 1917) در زمینه همبستگی بین مقاومت فشاری سنگ و عملکرد حفاری تحقیق کرده‌اند و روابطی را نیز ارائه داده‌اند اما عده‌ای دیگر از محققان معتقد هستند که معمولاً مقاومت فشاری تک‌محوری شاخص خوب قابلیت حفاری نیست چون خیلی از مدل‌های پیش‌بینی شامل تأثیر درزه‌داری در آن مدل‌ها نیستند.

درزه‌داری اغلب پراهمیت‌ترین پارامتر در ارتباط با قابلیت چالزنی و حفاری و در نتیجه بر روی پیشرفت حفاری تونل می‌باشد. در مدل NTH بیشترین تأکید بر روی درزه‌داری‌های بررسی‌شده در سطح زمین است. مدل انواع درزه‌داری در مدل NTH به صورت زیر است:

- توده سنگ‌هایی با درزه‌داری سیستماتیک

- درزه‌های با جهت موازی (یک دسته)

- شکاف‌ها با جهت‌های موازی (یک دسته)

- دو یا چند دسته درزه یا شکاف

- توده سنگ متراکم

در مورد دیگر انواع مهندسی سنگ توصیف مشخص درزه‌داری، زمانی مهم می‌باشد که اثر آن بر ویژگی توده سنگ چیره باشد. مدل طراحی NTH رخدادهای سه‌بعدی درزه‌داری را نسبتاً شامل شده است، ضریب درزه‌داری که با K_s نشان داده می‌شود تابعی از درجه شکستگی و زاویه بین محور تونل و سطوح ناپیوستگی است که می‌توان آن را از شکل ۱ و جدول شماره ۱ به دست آورد. اگر بیش از یک‌دست درزه موجود باشد ضریب درزه‌داری کل عبارت است از:

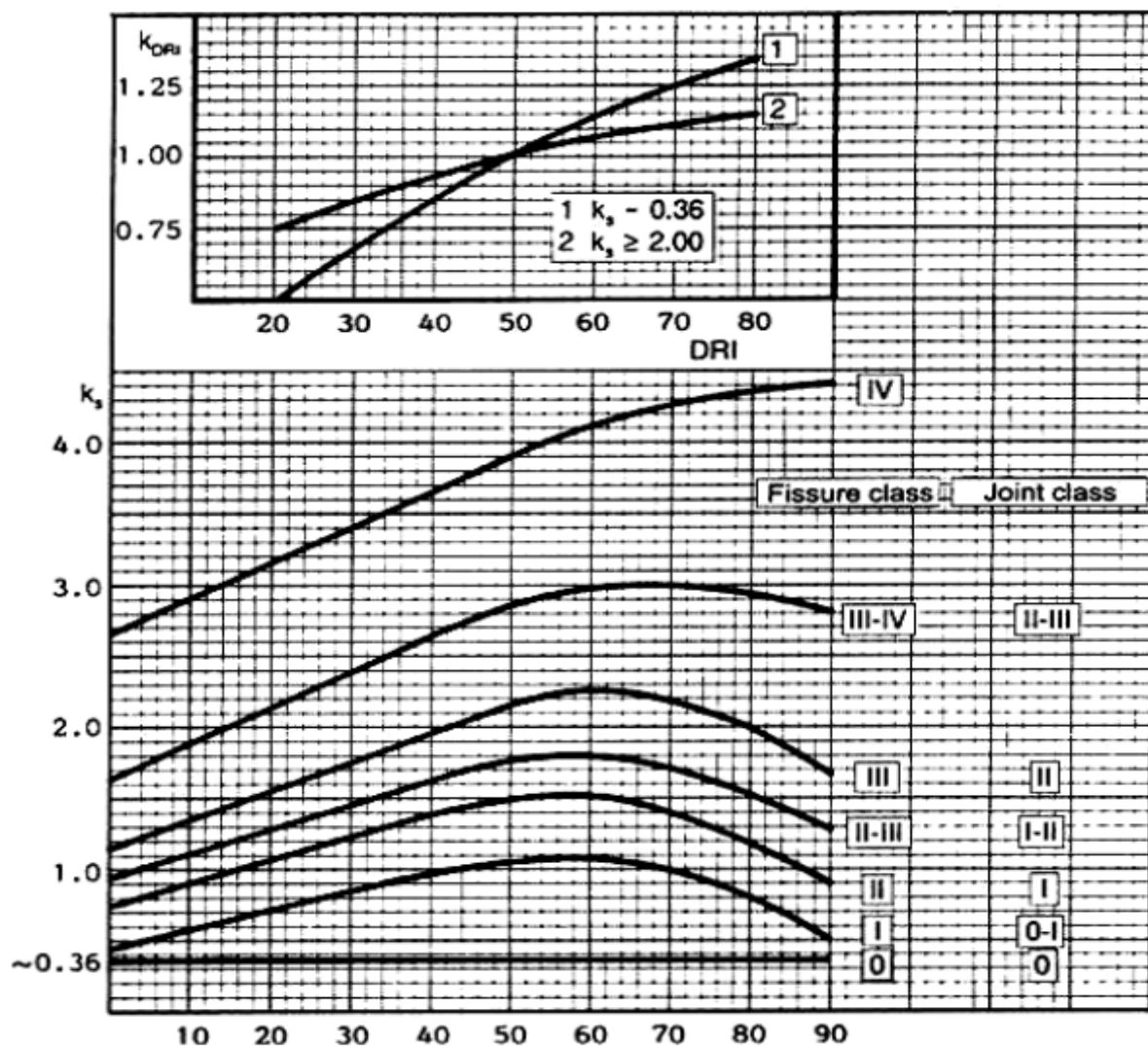
$$K_s = \sum K_{si} - (n - 1)0.36$$

که در آن k_{si} ضریب درزه‌داری دسته‌درزه شماره i ام و n تعداد دسته‌درزه‌ها می‌باشد. ضریب درزه‌داری معادل k_{eq} که برای مقادیر $DIR \neq 49$ تعدیل شده است نیز با تعیین K_{DIR} از نمودار بالایی شکل ۱ با معادله زیر به دست می‌آید:

$$K_{eq} = K_s \times k_{DIR}$$

جدول شماره ۱-۲ درجه شکستگی‌ها

فاصله‌داری صفحات ضعف (m)	درجه شکستگی	
	ریزدرزه	درزه
$> 1/6$	0	0
$1/6$	-	0-I
$0.18 - 1/6$	I	I
$0.14 - 0.18$	II	I-II
$0.12 - 0.14$	II-III	II
$0.11 - 0.12$	III	II-III
$0.105 - 0.11$	III-IV	-
< 0.105	IV	-



شکل ۲-۲ زاویه بین محور تونل و صفحه‌های ناپیوستگی
نمودار بالا نشان‌دهنده تعدیل k_s برای دیگر مقدارهای DIR نسبت به ۴۹ می‌باشد

۲-۲-۳- سرعت نفوذ خالص (PR)

سرعت نفوذ خالص برحسب تابعی از سرعت نفوذ پایه و دور بر دقیقه کله حفار از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$PR = PR_0 \times RPM \times \frac{60}{1000} \text{ (m/hr)}$$

۲-۳- روش‌های مدل کردن عصبی-فازی

در عملکرد ماشین‌های حفاری تمام مقطع تونل عوامل مختلفی نظیر شرایط زمین‌شناسی، خصوصیات توده سنگ، شیب مسیر و همچنین مشخصات ماشین به کاررفته بر میزان کارایی ماشین‌ها تأثیر می‌گذارند. تحلیل کارایی TBM و پژوهش‌های ژئوتکنیکی مبنای بررسی‌های برآورد هزینه و برنامه زمان‌بندی ساخت هر پروژه تونلی است. یکی از راه‌های پیش‌بینی میزان کارایی این ماشین‌ها، تخمین نرخ نفوذ آن‌هاست. استفاده توأم از شبکه عصبی و منطق فازی باعث ارتقاء عملکرد شبکه عصبی در تخمین نرخ نفوذ می‌گردد که ناشی از نگرش فازی به کمیت‌های مربوطه می‌باشد زیرا این کمیت‌ها بیشتر ماهیت فازی دارند. درواقع ورودی شبکه عصبی-فازی، مقاومت فشاری تک‌محوره، شاخص بار نقطه‌ای، نیروی نفوذ هر دیسک، تعداد دور کاترهد در دقیقه و خروجی آن نرخ نفوذ ماشین می‌باشد.

در اینجا تمرکز بر روی چگونگی ساخت یک مدل با استفاده از داده‌ها و همچنین چگونگی استفاده از مدل در تفسیر نتایج و ارزیابی اعتبار مدل نمی‌باشد، بلکه کاربرد روش مدل کردن را برای پیش‌بینی عملکرد TBM تحت واژه‌های سرعت نفوذ و سرعت پیشروی ارائه کرده است. برای این منظور از یک سری مجموعه داده‌ها که دربرگیرنده ۶۴۰ پروژه در سرتاسر جهان می‌باشد استفاده شده است این مجموعه داده‌ها حاوی اطلاعاتی در مورد عملکرد TBM در چهار سطح مختلف می‌باشد که جزئیات اطلاعات ثبت و ارائه شده است.

مدل عصبی-فازی یک الگوریتم متشکل از روش‌های مختلف فازی FL و شبکه عصبی مصنوعی ANN است. ANN تشخیص الگوها و پذیرش روش‌های خودشان را و از عهده برآمدن تغییرات محیطی را ممکن می‌سازد، درحالی‌که FL معیاری دانش بشری، رسیدگی کردن به عدم قطعیت و عدم صحت را ممکن می‌سازد و تصمیم‌گیری و استنتاج را اجرا می‌کند.

چندین روش ترکیبی در مورد نحوه ساخت مدل عصبی-فازی در نشریات مختلف از قبیل شبکه‌های عصبی-فازی، سیستم عصبی-فازی هم‌زمان، مدل‌های همکاری عصبی-فازی، مدل‌های عصبی-فازی ترکیبی آمده است.

۲-۳-۱- شبکه‌های عصبی مصنوعی (Artificial Neural Network) ANN

شبکه عصبی مصنوعی مدل‌های ریاضی ساده‌شده می‌باشند که از ساختارهای بیولوژیکی و کارکردی مغز انسان الهام گرفته شده‌اند. مدل‌های ANN شامل واحدهای فرآیندی مقدماتی به نام رشته‌های عصبی است، رشته‌های عصبی در یک جانمایی‌هایی از قبل تعریف شده به نام لایه‌ها، به هم متصل شده‌اند. معمولاً رشته‌های عصبی در لایه‌های موازی اتصال پیدا می‌کنند. یک جانمایی معمول شبکه شامل لایه ورودی، یک یا چند لایه پنهانی و لایه خروجی می‌باشد و به دو دسته با ناظر و بدون ناظر تقسیم می‌شود. مزیت عمده ANN قابلیت یادگیری فراخوانی و تولید داده‌های آموزش‌یافته به وسیله تعدیل و تعیین وزن‌های ارتباط‌دهنده می‌باشد و مشکل در تفسیر صحیح آنچه ANN از طریق وزن‌های انتقال‌دهنده‌اش آموزش می‌بیند می‌باشد.

۲-۳-۲- مدل‌های عصبی-فازی

مدل‌های عصبی فازی دارای دو جزء اصلی می‌باشد، جز منطقی که شامل مجموعه‌های فازی، منطق فازی و استدلال تقریبی است و جز عددی که شامل شبکه‌های عصبی، دسته‌بندی داده‌ها و آنالیز داده‌ها می‌باشد. در اینجا به توضیح مختصری از این دو جزء می‌پردازیم.

۱- جزء منطقی: جزء منطقی شامل مجموعه‌های فازی، منطق و استدلال تقریبی می‌باشد.

۲- جزء عددی: جز عددی که شامل شبکه‌های عصبی، دسته‌بندی داده‌ها و آنالیز داده‌ها می‌باشد.

۲-۳-۳- انتخاب ساختار مدل در روش عصبی- فازی

انتخاب ساختار مدل بر اساس مطالعات نشریات و آنالیز کامل آماری می‌باشد بر اساس مطالعات صورت گرفته بیشتر فاکتورهای مؤثر بر سرعت نفوذ (PR) در سه کاتگوری زیر قرار می‌گیرد. (Bruines, 1998)

۱- ویژگی‌های توده سنگ

۲- ویژگی‌های ماشین

۳- هندسه تونل

۱- ویژگی‌های توده سنگ: ویژگی‌های توده سنگ توسط ماده سنگ و ساختارهای ناپیوستگی‌های موجود در توده سنگ تعیین می‌شود. بااهمیت‌ترین پارامتر ماده سنگ موجود در داده‌های اولیه و مؤثر بر سرعت نفوذ مقاومت تک‌محوری سنگ می‌باشد به این صورت که مقاومت سنگ بالاتر، سرعت نفوذ پایین‌تر البته ناپیوستگی‌های سست سرعت نفوذ بالاتری را موجب می‌شود.

و نیز باید در نظر گرفت جهت ناپیوستگی‌ها بر سرعت نفوذ تأثیر می‌گذارد و باید توجه شود که دیگر فاکتورها از قبیل جهت ناپیوستگی‌ها و درجه هوازگی ممکن است تأثیر مهمی بر روی عملکرد TBM داشته باشند.

۲- ویژگی‌های ماشین: مهم‌ترین ویژگی ماشین نیروی رانش می‌باشد تعداد تیغه‌های نصب‌شده بر روی TBM اجازه محاسبه حداکثر نیروی رانش به ازای هر تیغه را می‌دهد. این پارامتر در بیشتر مدل‌ها استفاده می‌شود. افزایش نیروی رانش به ازای هر تیغه مزایای زیادی بر روی سرعت نفوذ دارد.

همچنین بیشترین توان و بیشترین نیروی گشتاوری و بیشترین چرخش کل حفار به نیروی رانش مرتبط است. این پارامترها به‌طور عمده به قطر تونل بستگی دارند. بدیهی است که این سطح‌های حداکثر، تنها در نقطه مشخصی از تونل به دست می‌آید.

۳- هندسه تونل: در عملیات واقعی ثابت شده است که هندسه تونل پارامتر مهمی می‌باشد، خیلی از پارامترها از قبیل چرخش کله حفار، نیروی گشتاور و مصرف محلی توان تأثیر گرفته از هندسه تونل است. به‌عنوان مثال چرخش کله حفار توسط اندازه تونل محدود می‌شود چون فاکتورهای محدودکننده سرعت تیغه‌های بیرونی می‌باشد، به‌طوری‌که از آسیب در اثر تنش‌های دینامیکی جلوگیری گردد. همچنین در مورد پایداری نیز هندسه تونل مؤثر است به‌طور کلی می‌توان گفت سرعت نفوذ به ازای طول با افزایش قطر که جزوه هندسه تونل می‌باشد کاهش می‌یابد. در نهایت فاکتورهای زیادی در بهره‌برداری از ماشین‌های حفاری سنگ تأثیر می‌گذارد از جمله این فاکتورها ویژگی‌های توده سنگ ویژگی‌های سنگ سالم و ضعیف، ساختار زمین‌شناسی، ویژگی ماشین، مهارت اپراتور و دانش تخصص می‌باشد. به‌علاوه برهم‌کنش بین ماشین و توده سنگ به‌طور دینامیکی همراه با عدم قطعیت، پیچیدگی غیرخطی بودن و نامشخص بودن است. توده سنگ در بیشتر موارد به‌صورت غیرخطی و غیر پیوسته رفتار می‌کند بدیهی است که در چنین شرایطی مدل کردن عملکرد ماشین به‌وسیله تکنیک‌های ریاضی است که اساس و پایه آن بر روی قوانین اولیه یا استفاده از روش‌های آمار و احتمال باشد دشوار است.

فصل سوم

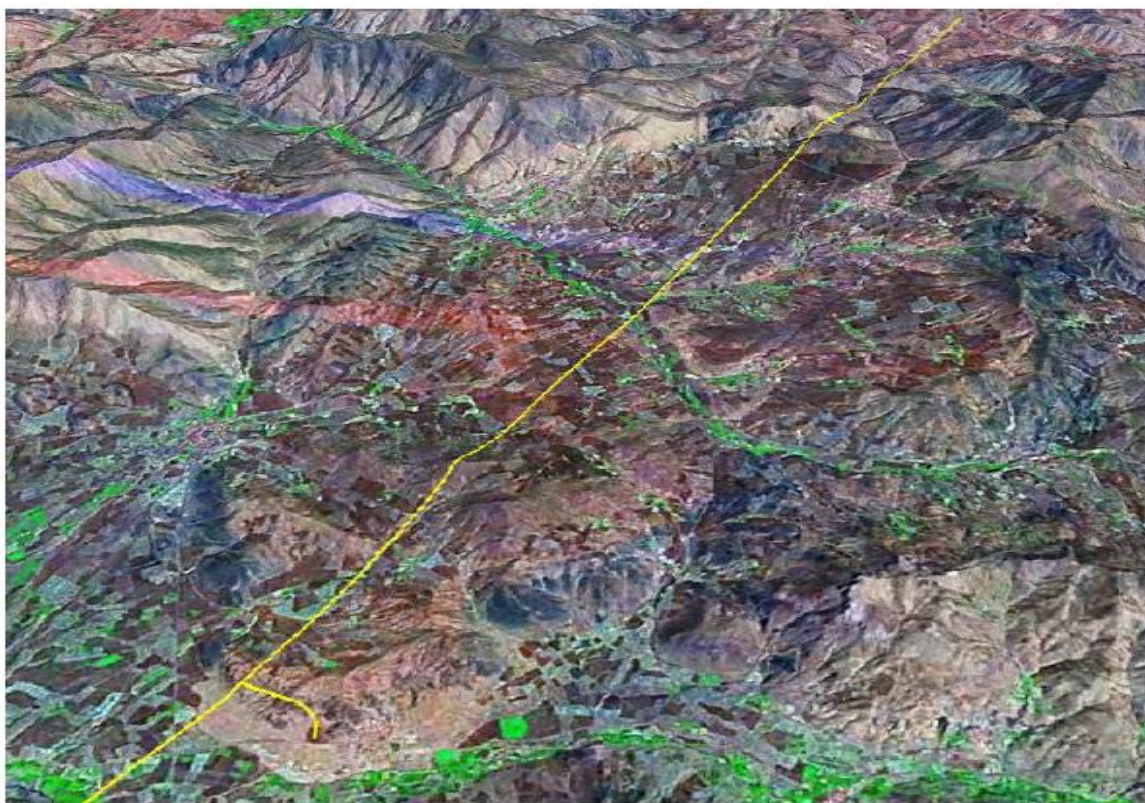
بررسی موقعیت جغرافیایی پروژه

آشنایی با ماشین تمام مقطعه حفر تونل

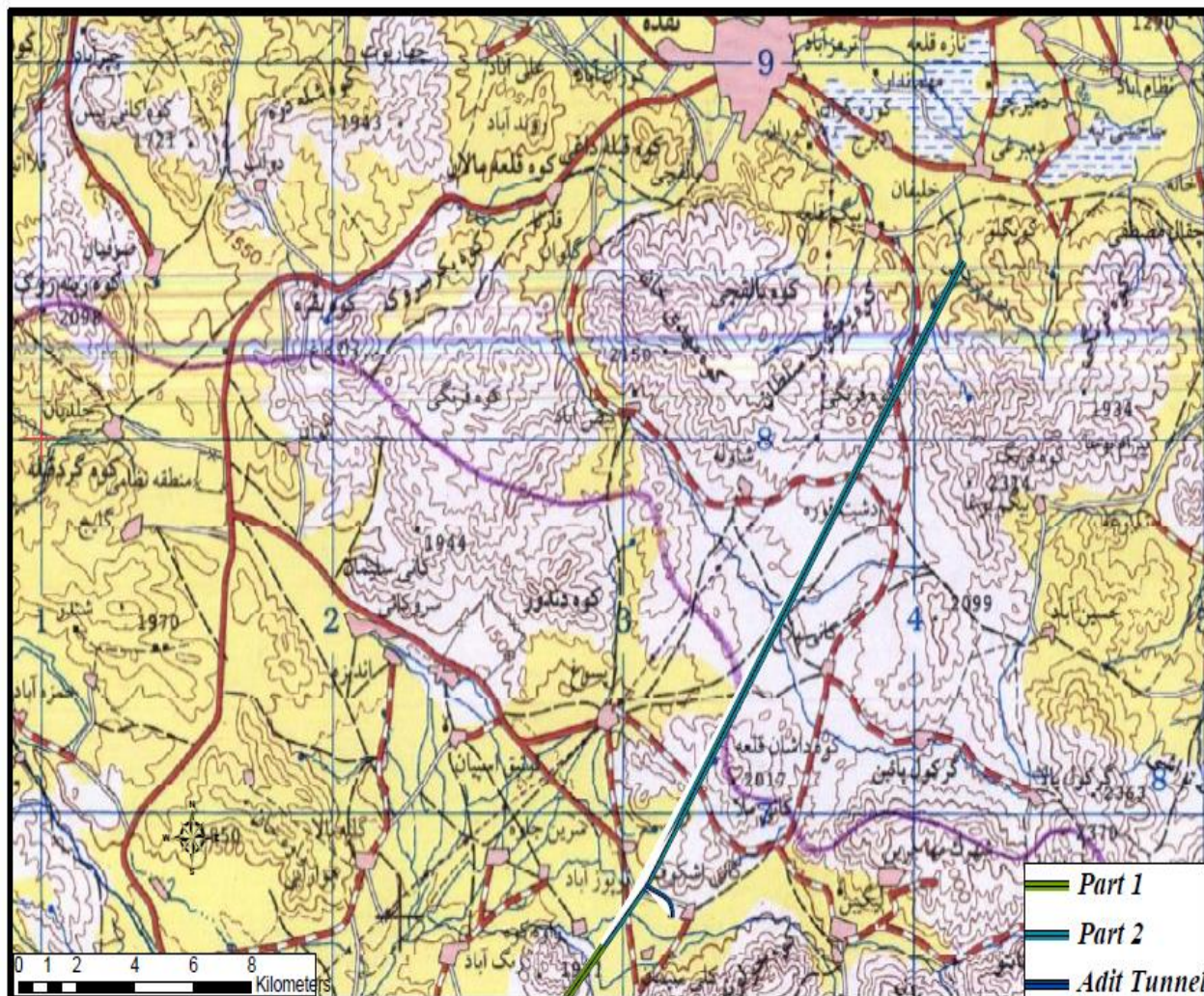
بررسی ساختار زمین شناسی منطقه

۳-۱- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به محدوده مورد مطالعه

پروژه مورد مطالعه در استان آذربایجان غربی حدود ۵۰ کیلومتری شهر ارومیه به سمت پیرانشهر واقع شده است که قطعه ۲ تونل گلاس به طول حدود ۲۰۶۶۰ متر از بخش میانی تونل گلاس در محدوده ارتفاعات جنوب روستای خورنچ در متر اژ ۱۵۰۰۰ متر تونل به مختصات $x=530413.37$ و $y=4067775.91$ شروع و تا دهانه خروجی تونل به مختصات $x=541522.37$ ، $y=4085189.06$ ادامه می‌یابد. دسترسی به محدوده قطعه دو تونل گلاس توسط راه خاکی که از روستای خلیفان و دره چغور به سمت دشت قوره امتداد دارد و راه‌های منتهی به روستاهای محدوده مانند پسوه، فیض‌آباد، خلیفان، دشت قوره، نوزاله و خورنچ صورت می‌گیرد. شکل ۳-۱ نمای گسترده مورد مطالعه را در تصاویر ماهواره‌ای و شکلی ۳-۲ راه‌های دسترسی به آن را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱ تصویر ماهواره‌ای قطعه ۲ تونل گلاس و تونل دسترسی



شکل ۳-۲ راه‌های دسترسی به قطعه ۲ تونل گلاس

۳-۲- انواع ماشین‌های تمام مقطع حفر تونل (TBM)

در سال‌های اخیر با پیشرفت فناوری ماشین‌های حفر تونل نیز پیشرفت قابل ملاحظه‌ای یافته‌اند. امروزه این ماشین‌ها در دودسته کلی حفاری در خاک و حفاری در سنگ تقسیم‌بندی می‌شوند بعضاً آن‌ها را در دودسته کلی ماشین‌های دارای سپر (Shielded machines) و ماشین‌های باز (open machines) نیز دسته‌بندی می‌نمایند. صرف‌نظر از تمام این دسته‌بندی‌ها به دلیل سنگی بودن مسیر تونل کانی سیب در این قسمت به معرفی اجمالی ماشین‌های حفر تونل در سنگ سخت می‌پردازیم.

● ماشین تمام مقطع حفر تونل در زمین‌های سخت به سه نوع زیر تقسیم‌بندی می‌شوند:

۱- ماشین‌های تمام مقطع حفر تونل از نوع باز (Open TBM)

۲- ماشین‌های تمام مقطع حفر تونل تک سپر (Single shield TBM)

۳- ماشین‌های تمام مقطع حفر تونل دوسپر یا تلسکوپی (Double shield or telescopic)

۱- ماشین‌های تمام مقطع حفر تونل از نوع باز (Open TBM)

به‌طور کلی ماشین‌های از نوع باز در مواردی که توده سنگ‌های درون‌گیر تونل از مقاومت کافی جهت تحمل فشار کفشک‌های دستگاه برخوردار باشد و حالت ریزشی نداشته باشند بهترین گزینه است. این ماشین‌ها طراحی‌های متفاوتی دارند ولی در کل دو نوع سیستم دو کفشک و محور اصلی، عمومیت بیشتری در میان سازندگان این ماشین‌ها را دارند. مهم‌ترین مزیت ماشین‌های از نوع باز نسبت به ماشین‌های دو و تک سپر امکان دستیابی به سرعت بالای حفاری است. این ماشین عمل حفاری و نصب و نگهداری موقت را تقریباً هم‌زمان انجام می‌دهند و به همین جهت سرعت بالایی در اجرا دارند. در پروژه‌هایی که امکان حذف لاینینگ نهایی و یا اجرای سریع آن وجود دارد و شرایط سنگ نیز مناسب است این ماشین انتخاب اول است.

۲- ماشین‌های تمام مقطع حفر تونل تک سپر (Single shield TBM)

در ماشین‌های حفر تونل تک سپر حرکت روبه‌جلو از طریق اعمال نیرو توسط جک‌های هیدرولیکی در قطعات بتنی نصب‌شده در انتهای صفحه هست. این ماشین‌ها در شرایطی به کار می‌روند که توده سنگ درون‌گیر تونل به قدری سست باشد که امکان استفاده از کفشک‌ها برای تأمین نیروی پیشروی امکان‌پذیر نباشد. قطعات بتنی در داخل سپر از ریزش دیواره‌های جلوگیری کرده و محیط مناسب برای فعالیت کارگران فراهم می‌شود. سرعت پیشروی ماشین‌ها در زمین‌های سست و ریزشی محدود به سرعت نصب سیستم نگهداری درون سپر است.

در چنین زمین‌هایی به علت مقاومت پایین توده سنگ عمل کندن و حفاری به آسانی و با سرعت انجام می‌گیرد. لزوم نصب نگهداری قطعات بتنی در عمل انجام یک سیکل کامل پیشروی را افزایش می‌دهد.

سینه کار این ماشین‌ها به هر دو صورت باز و بسته می‌تواند طراحی شود که این مورد به میزان آب ورودی جبهه کار بستگی دارد. همان‌طور که ذکر شد این ماشین‌ها در زمین‌های سست و ریزشی استفاده می‌شوند در این زمین‌ها برعکس زمین‌های سخت کفشک‌های ماشین قابل استفاده نیستند چراکه تحت تأثیر فشار، پشت کفشک به درون زمین فرو رفته و ایجاد اشکال می‌کنند. ماشین‌های تک سپر به صورت یک استوانه دارای پوشش بوده که در قسمت جلوی آن کله حفار و در قسمت عقب دستگاه نصب دیوارهای بتنی و جک‌های پیش‌برنده قرار گرفته‌اند.

۳- ماشین‌های تمام مقطع حفر تونل دوسپر یا تلسکوپی (Double shield or telescopic)

برای اولین بار شرکت پیمانکاری Seli از ایتالیا که سابقه طولانی در پروژه‌های حفاری مکانیزه تونل‌ها را دارد ایده ساخت ماشینی با توانایی کار هم در زمین‌های بسیار خرد شده و ضعیف و هم در زمین‌های مناسب را مطرح کرد و این ماشین تحت عنوان ماشین حفار دو سپر یا تلسکوپی توسط شرکت رابینز امریکا ساخته شد. این ماشین دارای دو سپر جلو و عقب است و هم مجهز به کفشک و هم مجهز به جک‌های رانش هست و به همین دلیل توانایی کار هم در زمین‌های ریزشی و هم در زمین‌های با مقاومت مناسب برای کفشک را دارد.

در حالتی که زمین مقاومت مناسب را برای ایجاد رانش با کمک کفشک دارد ماشین می‌تواند به حفاری و سگمنت گذاری مستقل و هم‌زمان بپردازد و به همین دلیل سرعت حفاری ماشین به‌طور تئوریک دو برابر ماشین‌های تک سپر و در عمل در پروژه‌های مشابه ۳۰ درصد بیشتر است. این ماشین‌ها در زمین‌های ریزشی و خرد شده همانند ماشین‌های تک سپر پیشروی می‌کند.

۳-۳- زمین‌شناسی ساختمانی محدوده مورد مطالعه (گزارشات شرکت مهندسین مشاور ایمن سازان، ۱۳۹۳)

به‌طور کلی ساختارهای موجود در محدوده قطعه دو تونل گلاس شامل گسل‌ها ساختارهای ورقه‌ای از قبیل شیستوزیته در واحدهای فیلیتی و اسلیتی، ساختارهای خطی از قبیل خطواره‌ها که در اثر تقاطع دودسته شیستوزیته ایجاد می‌شود و چین‌خوردگی‌ها هست. گسل‌های محدوده مورد مطالعه را می‌توان به گسل‌ها با سازوکارهای مشخص NF1 تا NF3، گسل‌های با اثر مشخص بر روی زمین و سازوکار نامعلوم F1 تا F10 و گسل‌های IF که خطواره‌های ترجیحی هستند که از تصاویر ماهواره‌ای استخراج شده‌اند تفکیک کرد.

جدول ۳-۱ مشخصات گسل‌های موجود در تونل (شرکت مهندسین مشاور ایمن سازان، ۱۳۹۳)

نام گسل	متر از تقاطع	ساز و کار	پهنه گسلی (m)	نام گسل	متر از تقاطع	ساز و کار	پهنه گسلی (m)
IF5	۲۵۲۵۰	-	≈ ۱۰	F1	۳۵۵۲۶	-	۱۰
IF6	۲۴۱۱۴	-	≈ ۱۰	F2	۳۵۴۱۴	-	≈ ۲۰
IF7 (Shavele Beyzabad)	۲۳۷۷۸	-	۱۰۰	F3	۳۴۶۷۸	-	۱۰
IF8	۲۰۷۳۰	-	≈ ۱۰	F4	۳۳۷۰۰	-	۷
IF9	۲۰۳۸۲	-	≈ ۱۰	DSZ1	۳۳۴۳۰	چپ‌گرد	۳۰
NF1	۱۹۹۹۴	نرمال	≈ ۵	F5	۳۳۲۶۶	-	۵
IF10	۱۸۵۴۷	-	≈ ۱۰	F6	۳۲۹۰۳	-	۵
IF11	۱۸۲۸۱	-	≈ ۱۰	F7	۳۲۰۳۲	-	≈ ۱۰
IF12	۱۸۲۴۵	-	≈ ۱۰	IF3	۳۱۶۲۸	-	≈ ۱۰
IF13	۱۷۳۹۳	-	≈ ۱۰	IF4	۳۱۵۶۰	-	≈ ۱۰
NF2	۱۷۰۰۴	نرمال	۲۰	DSZ2	۳۱۴۰۳	راست‌گرد	۳۰
IF14	۱۶۵۶۰	-	≈ ۱۰	F8	۳۰۷۴۳	-	۵
NF3	۱۵۵۸۸	نرمال	۲۰	F9	۲۹۹۹۸	-	۵
IF15	۱۵۱۹۰	-	≈ ۱۰	F10	۲۹۴۰۲	-	۵

۳-۳-۱- مطالعات ژئوتکنیکی انجام شده در تونل مورد مطالعه

در محدوده مورد مطالعه باهدف کسب اطلاعات ژئوتکنیکی مورد نیاز گمانه ژئوتکنیک KST-8 به عمق ۱۶۴.۴ متر توسط آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وزارت راه و شهرسازی به روش دورانی با مغزه گیری ممتد و همراه با انجام آزمایش لوژان حفاری شده است. همچنین KSC-1 نیز به عمق ۱۷۰ متر در محل مغار توسط شرکت

مهندسی صدرا کاوش حفاری شده که آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه این گمانه در حال انجام است. همچنین در مرحله اول مطالعات گمانه‌های BH-13، BH-14، BH-15، BH-16، BH-17، BH-18 به روش دورانی و مغزه گیری ممتد توسط شرکت مادر تخصصی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک انجام شده است. با توجه به جابجایی مسیر تونل گلاس نسبت به مسیر تعیین شده در فاز یک مطالعات، از بین این گمانه‌ها تنها گمانه BH-12 و BH-13 دارای فاصله کمی با محور تونل می‌باشند. موقعیت و مشخصات گمانه‌های مورد استفاده در این گزارش در جدول ۳-۳ ارائه گردیده است.

جدول ۳-۲ گمانه‌های حفاری شده در محدوده تونل (شرکت مهندسين مشاور ايمن سازان، ۱۳۹۳)

No.	Location			Distance From Tunnel Axis (m)	Depth (m)		
	X	Y	Z		Alluvium	Rock	Total
BH-11	529774.7	4068803.5	1477.0	1158	79	16	95
BH-12	533636.2	4072902.5	1670.8	111	11	39	50
BH-13	535321.1	4075142.1	1582.0	117	21	141	162
BH-14	539444.4	4080541.2	1594.3	722	3	157	160
BH-15	540544.4	4082916.8	1510.6	385	-	160	160
BH-16	540924.9	4082916.8	1458.4	706	-	130	130
BH-17	541738.6	4083768.9	1391.0	940	-	50	50
BH-18	528267.0	4068950.0	1450.0	2443	152.5	-	152.5
KST-8	539516.0	4082029.0	1493.0	10	2	162.4	164.4
KSC-1	530604	4067944	1504.5	30	8.2	161.8	170
Total:					124.2	1017.2	1141.4

۳-۲-۳- واحدهای زمین‌شناسی مهندسی محدوده مورد مطالعه تونل

جهت تفکیک واحدهای سنگی از دیدگاه زمین‌شناسی مهندسی علاوه بر ویژگی‌های سنگ‌شناسی تغییرات ساختاری از قبیل ضخامت لایه، میزان خردشدگی، فراوانی ناپیوستگی‌ها و میزان هوازدگی لحاظ می‌گردد. با توجه به برداشت‌های صورت گرفته در مطالعات صحرایی و در نظر گرفتن مقیاس نقشه از نظر زمین‌شناسی قطعه

دو تونل گلاس شامل ۱۲ واحد زمین‌شناسی می‌باشد. بر اساس بررسی‌های زمین‌شناسی مهندسی صورت گرفته و با در نظر گرفتن وجود واحدهای سنگی موجود در مقطع حفاری تونل ۱۱ واحد زمین‌شناسی مهندسی قابل تشخیص است. ویژگی‌های کلی این واحدها در جدول ۳-۴ به‌طور خلاصه ارائه شده است.

جدول ۳-۳ توصیف‌های میدانی واحدهای زمین‌شناسی موجود در محدوده مورد مطالعه

Engineering Geo. Unit	Geological Unit	Rock category	
		Description	Sign*
WMg	Gr	Slightly weak, blocky to irregular, weathered, broken and unstable	C
Mg	Gr	Strong to moderately strong, blocky to massive and unweathered to slightly weathered, stable	A, B
Pgnschmb	K ^{Ga}	Moderately strong, blocky to tabular and slightly weathered, stable	B
Ddsh	K ^{D, Sh}	Moderately strong, blocky and slightly weathered, stable	B
Dshph	K ^{Sh, Fl, Sl}	Moderately strong, blocky to tabular and slightly weathered, stable	B
MI	K ^{LD}	Moderately strong, blocky and slightly weathered, stable	B
PvbDgtu	Db	Moderately strong, blocky and irregular slightly weathered, stable	B - C
Md	K ^{D, Ds}	Moderately strong, blocky and slightly weathered, stable	B
Phschmb	K ^{Hf}	Moderately strong, blocky to columnar and slightly weathered, stable	B
MDg	Gr	Strong, massive to blocky and unweathered, stable	A
C.Z	-	Very weak, crashed, weathered, broken and unstable	D

جدول ۳-۴ مترائ شروع و پایان و طول حفاری تونل در هرکدام از واحدهای مهندسی را نشان می‌دهد.

Engineering geo. Unit	Start (m)	Finish (m)	Length of Excavation (m)
WMg	35210	35661.5	421.5
Mg	33349	35210	1824
Pgnschmb	33302	33349	79
	33239	33276	
	33276	33302	
Ddsch	33157	33239	833
	32031	32761	
	32863	33157	
Dshph	32761	32863	289
MI	31403	31905	1048
	31920	32031	
	30427	30805	
	15000	15788	
Md	30805	31403	2416
	29372	30427	
	31905	31920	
PvaDgtu	29232	29372	15
Phschmb	15788	15981	333
MDg	15981	29232	13006
C.Z	35522	35532	397
	35404	35424	
	34673	34683	
	33696	33703	
	33416	33436	
	33264	33269	
	32901	32906	
	32027	32037	
	31624	31634	
	31555	31565	
	31389	31419	
	30742	30747	
	29996	30001	
	29400	29405	
	25246	25256	
	24110	24120	
	23730	23830	
	20728	20738	
	20379	20389	
	19994	19999	
	18545	18555	
	18279	18289	
	18243	18253	
	17392	17402	
	17000	17020	
	16562	16572	
	15596	15616	
	15239	15249	

۳-۳-۳- ناپیوستگی‌های محدوده مورد مطالعه

در میان‌ساخت‌های متعدد زمین‌شناسی، ناپیوستگی‌ها (لایه‌بندی، گسل‌ها، درز و شکاف) موجود در توده سنگ‌ها بیش از همه در پایداری فضاهای زیرزمینی مؤثر است. ناپیوستگی‌ها ساختارهای هستند که از نظر جهت‌داری، فاصله‌داری و تعداد به تکتونیک و شرایط ساختاری منطقه وابستگی بیشتری دارند. ویژگی‌های مختلف ناپیوستگی توده سنگ در واحدهای زمین‌شناسی مهندسی محدوده مورد مطالعه با استفاده از روش استاندارد ISRM برداشت گردیده تا با استفاده از این اطلاعات خصوصیات سنگ بکر، پارامترهای مهندسی توده سنگ برآورده گردد. برداشت ناپیوستگی‌ها به صورت خطی پنجره‌ای و پراکنده و تا حد ممکن در راستای محور تونل صورت گرفته است. لازم به ذکر است انتخاب محل و نوع ایستگاه‌های برداشت تابع از موجود بودن برون‌زدهای سنگی بوده است. در طبقه‌بندی‌های مهندسی سنگ از جمله RMR دسته ناپیوستگی‌های بحرانی که بیشترین تأثیر را در پایداری فضای‌های زیرزمینی داشته باشد مورد توجه قرار می‌گیرد.

۳-۳-۴- تعیین پارامترهای ژئومیکانیکی سنگ بکر محدوده مورد مطالعه

برای تعیین پارامترهای مقاومتی سنگ‌ها علاوه بر انجام آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های اخذ شده از گمانه‌ها که شامل آزمایش تعیین دانسیته خشک و مرطوب، تخلخل، جذب آب، مقاومت تراکمی تک‌محوری، بار نقطه‌ای، مقاومت فشاری سه محوری، مقاومت کششی، سرعت صوت و ثابت‌های الاستیک دینامیکی، سختی موس، اندیس سایش سرشار و مطالعات مقطع نازک می‌باشد. آزمایش‌های ساده صحرایی بر روی رخنمون‌های سطحی نیز صورت گرفته است. ساده‌ترین آزمون که در این زمینه استفاده شده آزمون شاخص دستی است که با استفاده از چکش زمین‌شناسی و چاقوی جیبی، مقاومت تراکمی تک‌محوری سنگ‌ها را تعیین می‌نماید. این آزمون توسط انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM, 1981) استاندارد شده است. همچنین از چکش اشمیت نیز برای تخمین پارامترهای مقاومتی نمونه سنگ واحدهای مختلف استفاده گردیده است.

فصل چهارم

بررسی نرخ نفوذ TBM

در پروژه تونل انتقال آب کانی سیب

۴-۱- مقدمه

هدف حفاری تونل گلاس انتقال بخشی از آب رودخانه لاورین که سرشاخه اصلی رود گلاس می‌باشد به سمت حوضه آبریز دریاچه ارومیه و دشت نقده است. انتقال آب این رودخانه از طریق تونل گلاس به طول حدود ۳۵۷۰۰ متر صورت می‌گیرد. این تونل به روش مکانیزه با دستگاه تمام مقطع حفار، حفاری خواهد شد. از بالادست مخزن کانی سیب آبگیری می‌نماید و در دامنه شمالی کوهستان بیگم قلعه آب را وارد دشت نقده و حوضه آبریز دریاچه ارومیه خواهد نمود. مقطع تونل انتقال آب گلاس دایره‌ای با قطر تمام‌شده ۵.۵ متر می‌باشد. میزان آب انتقالی به حوضه دشت نقده و ارومیه از طریق این تونل حدود ۶۴۶ میلیون مترمکعب در سال در نظر گرفته شده است. به‌منظور ایجاد چند جبهه حفاری کاهش زمان اجرا و تسهیل در پشتیبانی دستگاه TBM، حفاری تونل گلاس در دو قطعه مجزا توسط دو دستگاه حفار تمام مقطع انجام خواهد شد. دستگاه حفار تونل قطعه یک از طریق تونل دسترسی و مغار که در متراژ حدود ۱۵۴۰۰ متر به روش سنتی حفاری شده مونتاژ و پشتیبانی می‌شود. این پژوهش به بررسی نرخ نفوذ TBM در تونل خروجی این پروژه که طول ۲۰۳۰۰ متر به‌وسیله یک دستگاه Hard Rock TBM انجام می‌شود، می‌پردازد.

۴-۲- معرفی پارامترهای در نظر گرفته شده در پروژه مورد مطالعه

همان‌طور که قبلاً گفته شد پارامترهای مهم که در مطالعه عملکرد دستگاه TBM به کار می‌رود به دودسته اصلی پارامترهای زمین و پارامترهای ماشین تقسیم می‌شود. در این پژوهش از پارامترهای مرتبط با ویژگی‌های ماده سنگ، مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS) و پارامترهای ماشین تراست (Thrust)، چرخش کله حفار (rpm)، گشتاور (torque)، توان (Power)، در نظر گرفته شده است. تعدادی از داده‌ها در جدول ۴-۱ و مابقی در پیوست شماره ۱ ارائه می‌گردد.

جدول ۴-۱ جدول داده‌ها

Date of test	UCS(Mpa)	Thrust(KN)	Rpm(Rev/Min)	Torque(KN/m)	Power(KW)	Penetration(Cm/hr)
94.11.15	74	598	4	1269	1230	229
94.11.19	62	504	4	1161	1203	205
94.11.27	61	740	3	874	954	107
94.12.04	41	443	5	996	1312	218
94.12.05	44	452	4	1042	1048	199
94.12.06	46	380	3	946	979	208
94.12.07	40	435	4	1055	1231	197
94.12.08	31	372	3	877	730	217
94.12.10	28	492	4	921	1017	180
94.12.12	36	423	4	775	1079	239
94.12.21	42	625	5	1151	1500	246
95.01.07	84	641	6	905	1596	162
95.01.13	73	938	5	1293	1551	175
95.01.20	83	697	5	881	1593	118
95.01.23	82	828	5	1033	1341	120
95.02.01	62	809	5	1148	1342	147
95.02.02	41	467	5	871	1320	281

۴-۳- روش تحقیق

۴-۳-۱- دسته‌بندی داده‌ها

در ابتدا داده‌ها را به دودسته داده‌های آزمایش (Test) و داده‌های آموزش (Train) تقسیم می‌کنیم. به این صورت که ۲۵٪ داده‌ها آزمایش و ۷۵٪ داده‌ها، آموزش در نظر گرفته می‌شود.

نحوه انتخاب داده‌های آزمون به این صورت است که حد وسط بین مینیمم و ماکسیمم پارامتر کلیدی که در این پژوهش مقاومت فشاری تک‌محوره می‌باشد را در نظر می‌گیریم. جدول ۴-۲، جدول آزمایش می‌باشد و جدول آموزش در پیوست شماره ۲ ارائه می‌گردد.

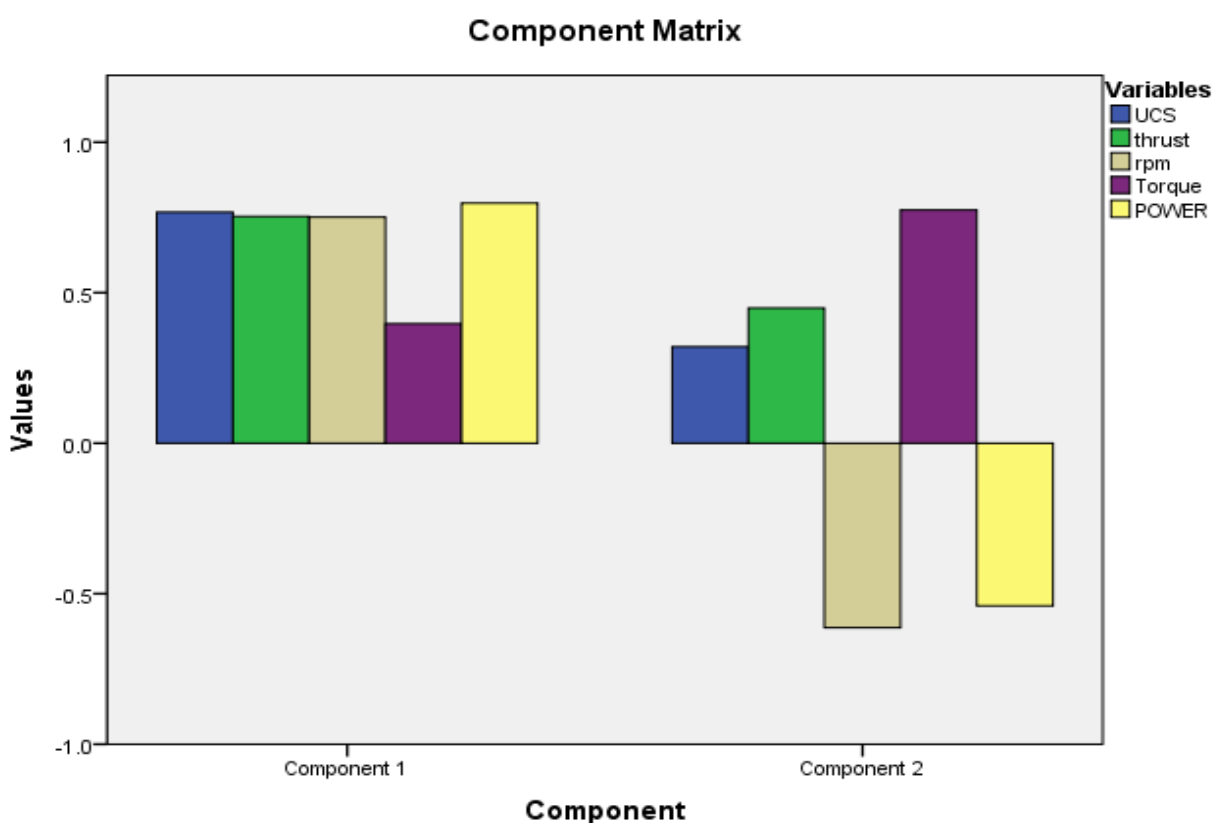
جدول ۲-۴ داده‌های آزمایش

Date of test	UCS(Mpa)	Thrust(KN)	Rpm(rev/min)	torque(KN.m)	POWER(kw)	PR(Cm/hr)
94.11.19	62	504	4	1161	1203	205
94.11.27	61	740	3	874	954	107
95.02.01	62	809	5	1148	1342	147
95.02.05	50	513	5	1076	1393	291
95.10.03	58	656	5	1222	1444	218
95.10.06	59	500	5	1229	1390	224
95.10.07	52	570	5	1201	1419	185
95.10.08	56	442	4	1174	1197	211
95.10.18	57	913	5	1143	1530	124
95.10.20	65	873	6	1357	1632	127
95.10.23	62	750	5	1200	1470	100
95.11.02	54	816	6	1268	1670	225
95.12.06	50	797	3	1150	840	77
95.12.07	56	817	3	1185	998	118
95.12.11	54	801	4	1304	1088	142
95.12.12	55	789	4	1282	1208	153
95.12.14	55	705	4	1342	1177	169
96.01.21	51	656	4	1247	1209	203
96.01.22	56	786	5	1196	1433	161
96.01.27	50	547	3	1215	782	132

۴-۳-۲- بررسی تأثیر پارامترها به روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA)

در این مرحله به تقلیل داده‌ها با بررسی تأثیر پارامترها در نرخ نفوذ می‌پردازیم و پارامترهای کم تأثیر را حذف می‌کنیم. برای بررسی تأثیر پارامترها از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA) استفاده می‌کنیم. برای آنالیز مؤلفه‌های اصلی از نرم‌افزار SPSS استفاده شده است که در اینجا به آن می‌پردازیم.

بازه موردقبول برای تأثیرگذار بودن یک پارامتر در آنالیز مؤلفه‌های اصلی بیشتر بودن مقدار عددی پارامتر از (۰.۵ و -۰.۵) است. با توجه به شکل ۴-۵ گشتاور (Torque) تأثیر چندانی در نرخ نفوذ ندارد و قابل حذف است.



شکل ۴-۱ نمودار آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA)

۴-۳-۳- آزمون همبستگی (Corlation)

جهت به دست آوردن معادله مناسب برای پیش‌بینی نرخ نفوذ و اینکه وجود تمام پارامترها در کنار هم می‌توانند معنی‌دار باشد نیاز به انجام آزمون همبستگی است. در این آزمون در صورتی تمام پارامترها می‌توانند در یک معادله قرار بگیرند که درجه معنی‌داری پارامترهای متناظر کمتر از ۰.۰۵ باشد. در جدول ۳-۴ نتیجه آزمون همبستگی نشان می‌دهد تمام پارامترها می‌توانند در یک معادله قرار بگیرند.

جدول ۳-۴ آزمون همبستگی

Correlations		UCS	thrust	rpm	POWER
UCS	Pearson Correlation	1	.610**	.331**	.368**
	Sig. (2-tailed)		.000	.003	.001
	N	79	79	79	79
thrust	Pearson Correlation	.610**	1	.266*	.333**
	Sig. (2-tailed)	.000		.018	.003
	N	79	79	79	79
rpm	Pearson Correlation	.331**	.266*	1	.910**
	Sig. (2-tailed)	.003	.018		.000
	N	79	79	79	79
POWER	Pearson Correlation	.368**	.333**	.910**	1
	Sig. (2-tailed)	.001	.003	.000	
	N	79	79	79	79

۴-۳-۴- پیش‌بینی نرخ نفوذ با رگرسیون خطی

با استفاده از رگرسیون خطی طبق آزمون همبستگی که تمام پارامترها می‌توانند در کنار هم در یک معادله قرار بگیرند با توجه به اینکه مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS) به‌عنوان پارامتر کلیدی می‌باشد می‌توان معادلاتی تعریف نمود و معنی‌داری آن‌ها را مورد بررسی قرارداد. معادلات رگرسیون خطی در نرم‌افزار SPSS کار شده که در ادامه ارائه می‌گردد.

رابطه (۱-۴) $Pr=270.869+(-0.319 UCS)+(-0.309 Thrust)+(-10.831 rpm)+(0.136 power)$

با توجه به جدول ۴-۴ این رابطه معنادار می باشد زیرا سطح معناداری (sig) کمتر از ۰.۰۵ است.

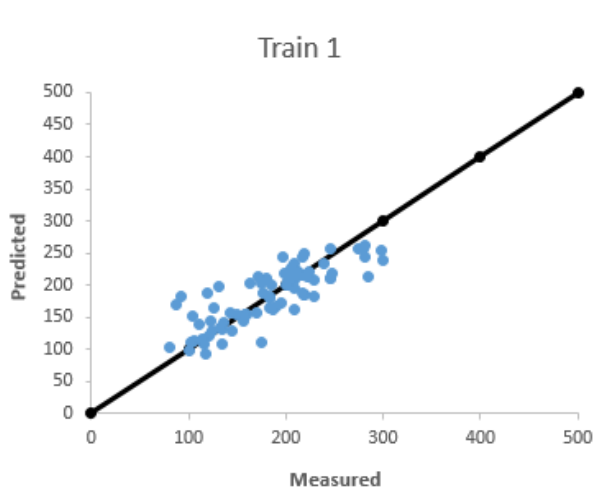
جدول ۴-۴ تحلیل معناداری رگرسیون رابطه (۱-۴)

ANOVA^a

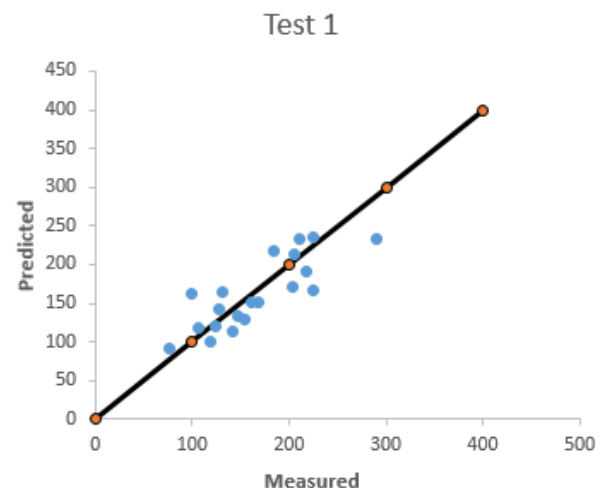
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	154975.627	4	38743.907	39.417	.000 ^b
	Residual	72737.208	74	982.935		
	Total	227712.835	78			

a. Dependent Variable: penetration

b. Predictors: (Constant), POWER, thrust, UCS, rpm



شکل ۳-۴ نمودار آموزش رابطه (۱-۴)



شکل ۲-۴ نمودار آزمون رابطه (۱-۴)

رابطه (۲-۴) $Pr=276.387+(-0.335 UCS)+(-0.305 Thrust)+(0.99 Power)$

با توجه به جدول ۵-۴ این رابطه معنادار می باشد زیرا سطح معناداری (sig) کمتر از ۰.۰۵ است.

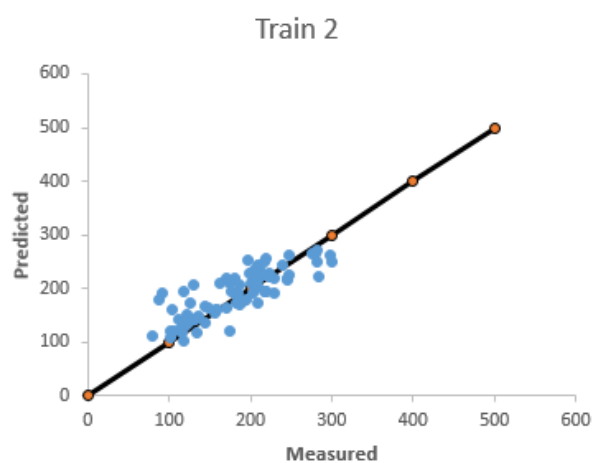
جدول ۵-۴ تحلیل معناداری رگرسیون رابطه (۲-۴)

ANOVA^a

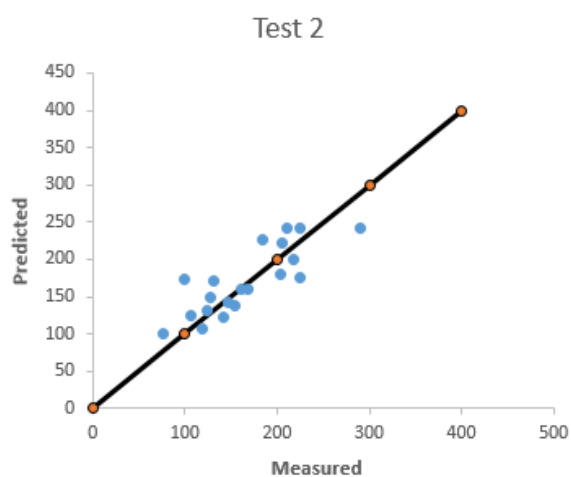
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	153547.934	3	51182.645	51.759	.000 ^b
	Residual	74164.901	75	988.865		
	Total	227712.835	78			

a. Dependent Variable: penetration

b. Predictors: (Constant), POWER, thrust, UCS



شکل ۵-۴ نمودار آموزش رابطه (۲-۴)



شکل ۴-۴ نمودار آزمون رابطه (۲-۴)

$$Pr = 281.254 + (-0.269 \text{ UCS}) + (21.804 \text{ rpm}) + (-0.287 \text{ Thrust})$$

رابطه (۳-۴)

با توجه به جدول ۶-۴ این رابطه معنادار می باشد زیرا سطح معناداری (sig) کمتر از ۰.۰۵ است.

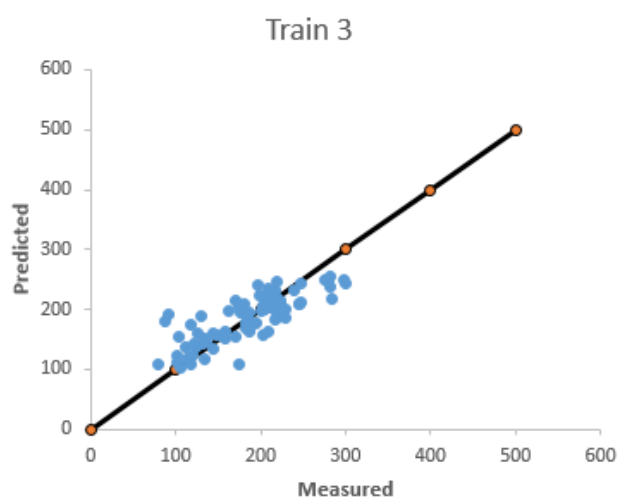
جدول ۶-۴ تحلیل معناداری رگرسیون رابطه (۳-۴)

ANOVA^a

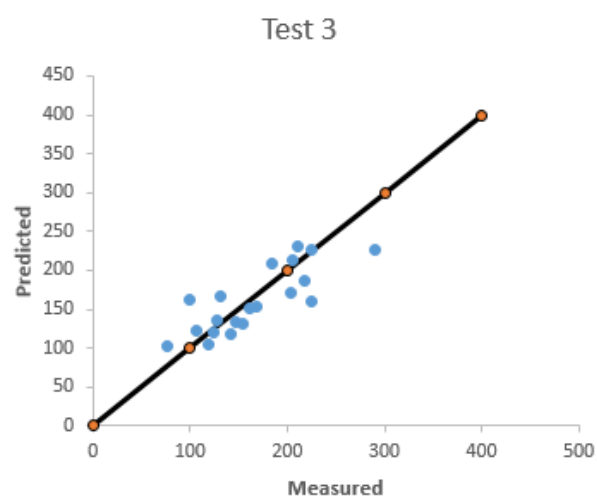
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	138920.870	3	46306.957	39.114	.000 ^b
	Residual	88791.965	75	1183.893		
	Total	227712.835	78			

a. Dependent Variable: penetration

b. Predictors: (Constant), thrust, rpm, UCS



شکل ۷-۴ نمودار آموزش رابطه (۳-۴)



شکل ۶-۴ نمودار آزمون رابطه (۳-۴)

$$Pr = 185.02 + (-1.542 \text{ UCS}) + (18.817 \text{ rpm})$$

رابطه (۴-۴)

با توجه به جدول ۷-۴ این رابطه معنادار می‌باشد زیرا سطح معناداری (sig) کمتر از ۰.۰۵ است.

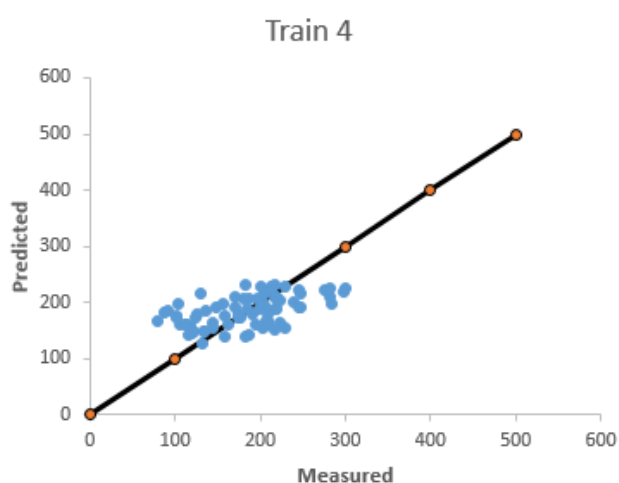
جدول ۷-۴ تحلیل معناداری رگرسیون رابطه (۴-۴)

ANOVA^a

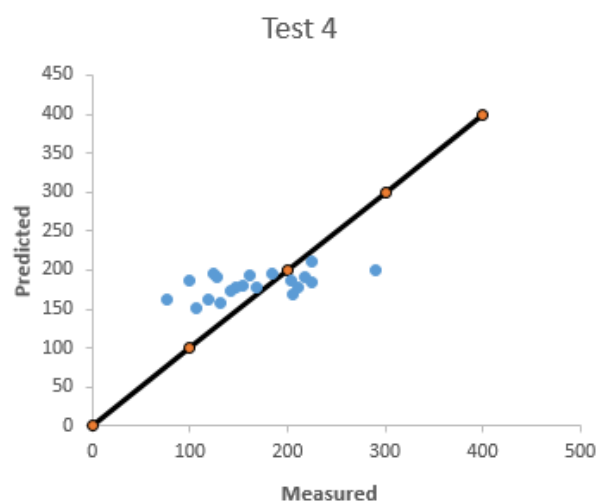
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	61488.820	2	30744.410	14.057	.000 ^b
	Residual	166224.015	76	2187.158		
	Total	227712.835	78			

a. Dependent Variable: penetration

b. Predictors: (Constant), rpm, UCS



شکل ۴-۹ نمودار آموزش رابطه (۴-۴)



شکل ۴-۸ نمودار آزمون رابطه (۴-۴)

$$Pr = 173.738 + (-1.632 \text{ UCS}) + (0.079 \text{ Power})$$

رابطه (۴-۵)

با توجه به جدول ۴-۸ این رابطه معنادار می‌باشد زیرا سطح معناداری (sig) کمتر از ۰.۰۵ است.

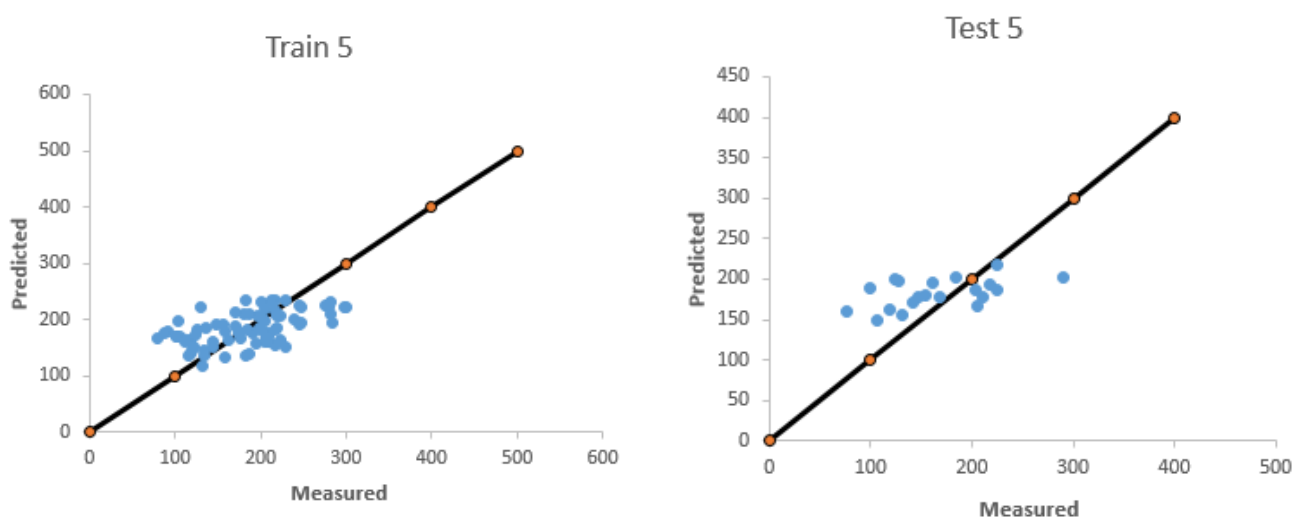
جدول ۸-۴ تحلیل معناداری رگرسیون رابطه (۵-۴)

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	67865.324	2	33932.662	16.133	.000 ^b
	Residual	159847.512	76	2103.257		
	Total	227712.835	78			

a. Dependent Variable: penetration

b. Predictors: (Constant), POWER, UCS



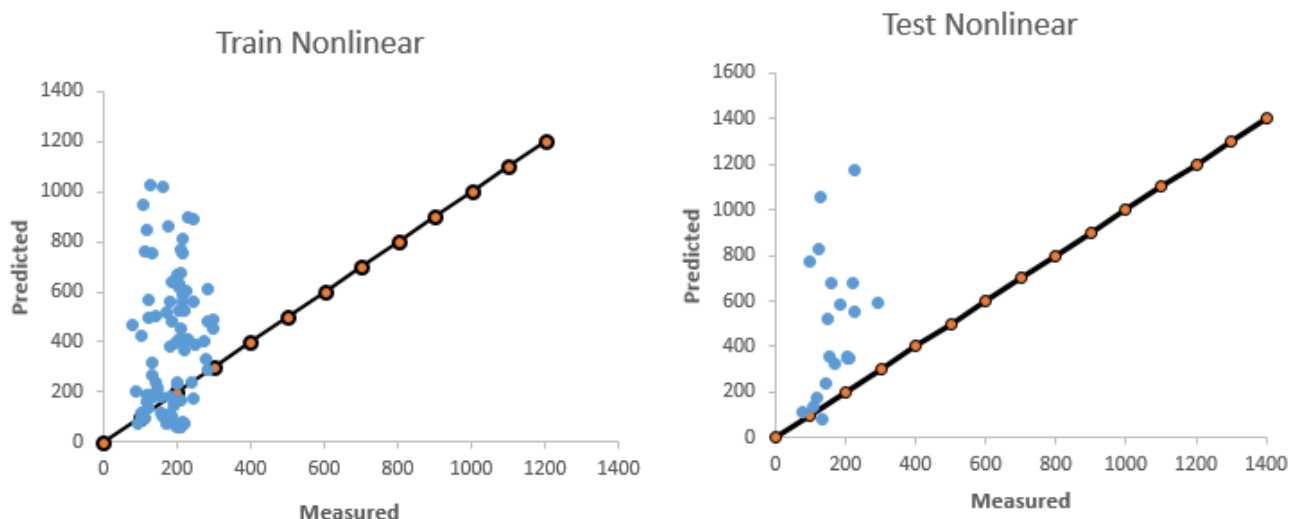
شکل ۴-۱۱ نمودار آموزش رابطه (۵-۴)

شکل ۴-۱۰ نمودار آزمون رابطه (۵-۴)

۴-۳-۵- پیش‌بینی نرخ نفوذ با رگرسیون غیرخطی

در این مرحله به تحلیل داده‌ها با استفاده از رگرسیون غیرخطی پرداخته شده است. برای پیش‌بینی در رگرسیون غیرخطی نیز از نرم‌افزار SPSS استفاده شده است. پیش‌بینی در رگرسیون غیرخطی به صورت سعی و خطا است که بهترین رابطه به دست آمده رابطه زیر می‌باشد. با توجه به نمودارهای زیر و پراکندگی داده‌ها حول نیمساز ربع اول و سوم این نتیجه حاصل شده است که رابطه بین داده‌ها و نرخ نفوذ یک رابطه غیرخطی نمی‌باشد و رابطه زیر، رابطه خوبی نیست.

$$Pr = L_n \text{ UCS} + \text{Thrust}^{**0.5} + \text{rpm}^{**4} + L_n \text{ Power}$$

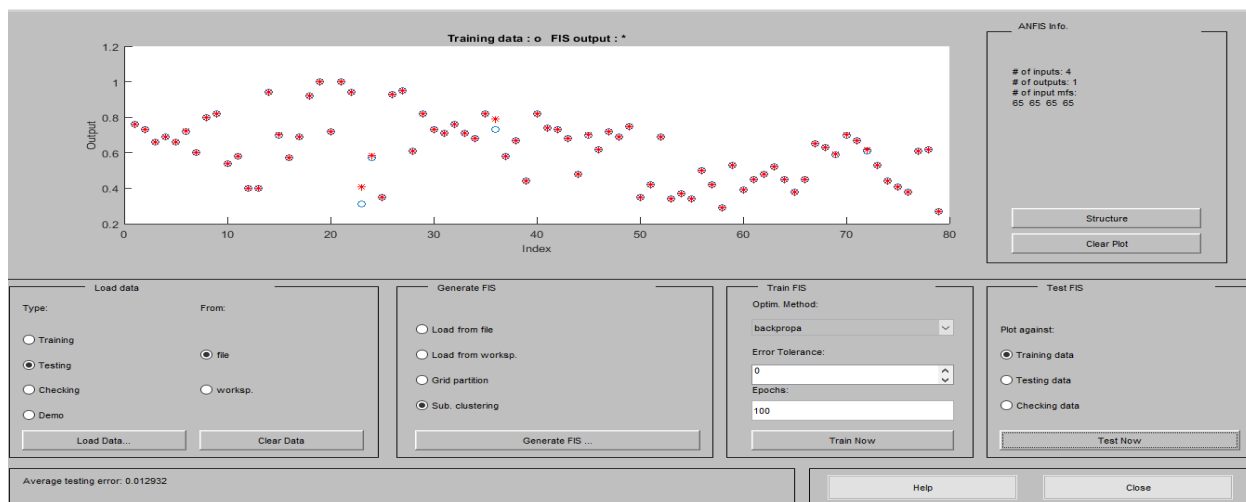


شکل ۴-۱۲ نمودار آزمون رابطه غیرخطی

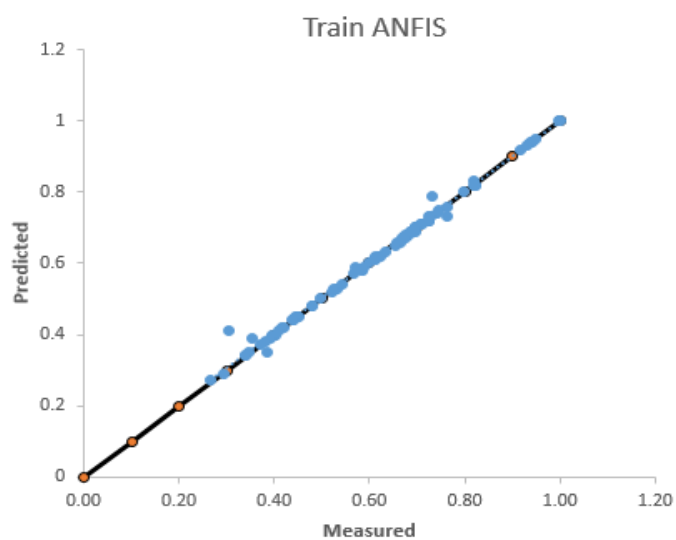
شکل ۴-۱۳ نمودار آموزش رابطه غیرخطی

۴-۳-۶- پیش‌بینی نرخ نفوذ با روش استنتاج فازی-عصبی ANFIS

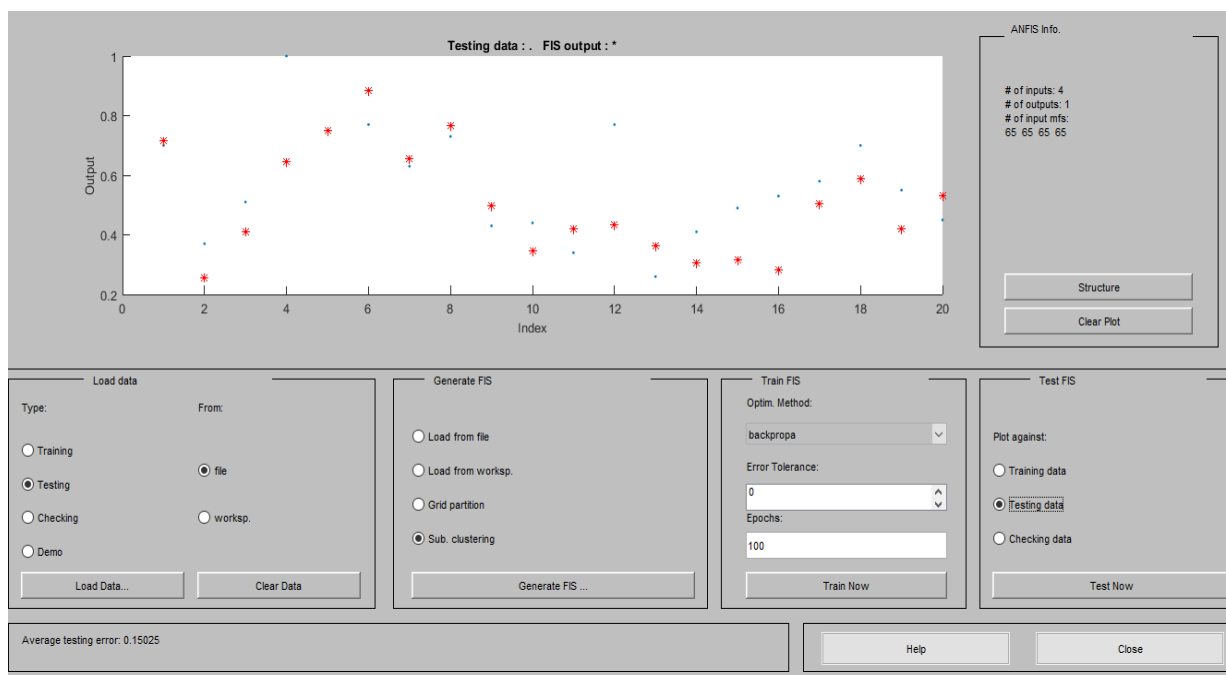
در این مرحله پیش‌بینی نرخ نفوذ به روش استنتاج فازی-عصبی ANFIS در نرم‌افزار متلب (MATLAB) انجام شده است و مدل‌سازی به روی دیتاهای آزمون و دیتاهای آموزش انجام شد سپس نمودار پراکندگی داده‌ها نسبت به نیمساز ربع اول و سوم رسم گردید تا مقایسه بین رابطه‌های رگرسیون خطی و غیرخطی انجام گیرد و بهترین رابطه معرفی شود که نتایج آن در ادامه ارائه می‌گردد.



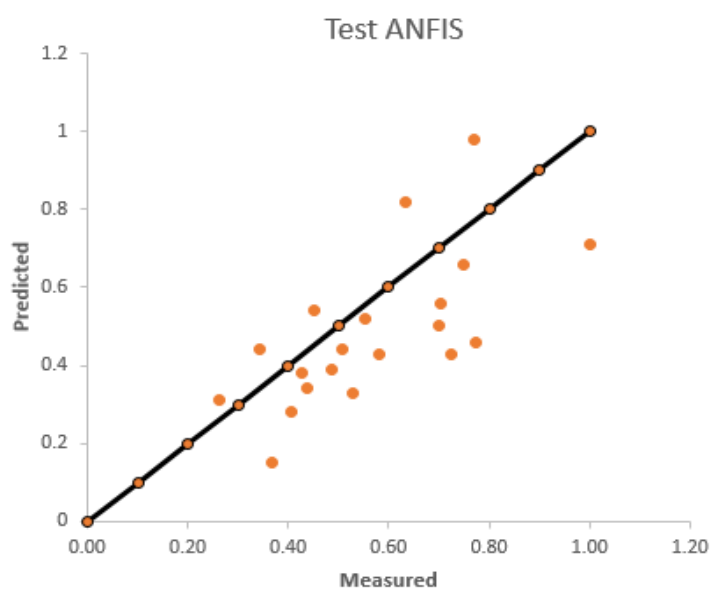
شکل ۴-۱۴ مدل سازی آموزش ANFIS



شکل ۴-۱۵ نمودار مدل سازی آموزش ANFIS



شکل ۴-۱۶ مدل سازی آزمون ANFIS



شکل ۴-۱۷ نمودار آزمون ANFIS

با توجه به نمودارهای رگرسیون خطی، رگرسیون غیرخطی و مدل عصبی-فازی ANFIS، هرچقدر میزان پراکندگی داده‌ها حول نیمساز ربع اول و سوم کمتر باشد رابطه به‌دست‌آمده رابطه بهتری است و با توجه به نمودارها، رابطه (۴-۱) در رگرسیون خطی بهترین رابطه برای پیش‌بینی نرخ نفوذ در این تحقیق است.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتیجه‌گیری

[۱] در ابتدا رابطه بین پارامترهای مستقل و پارامترهای وابسته بررسی و مشخص گردید و مشخص شد رابطه بین پارامترهای مستقل و پارامتر وابسته یک رابطه تک متغیره نیست.

[۲] برای تعیین یک رابطه بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته که همان نرخ نفوذ است داده‌ها به دودسته داده‌های آموزش و داده‌های آزمون تقسیم گردید، در این قسمت ۲۵ درصد داده‌ها آزمون و ۷۵ درصد داده‌ها آموزش در نظر گرفته شد. نحوه انتخاب داده‌های آزمون به این صورت است که حد وسط بین مینیمم و ماکسیمم پارامتر کلیدی که در این پژوهش مقاومت فشاری تک‌محوره است را در نظر گرفتیم و مابقی داده‌ها به‌عنوان داده‌های آموزش تعیین گردید.

[۳] برای تعیین میزان تأثیرگذاری پارامترها بر متغیر وابسته آنالیز مؤلفه‌های اصلی انجام گرفت و در این آنالیز پارامتر گشتاور (Torgue) حذف گردید.

[۴] جهت به دست آوردن معادله مناسب برای پیش‌بینی نرخ نفوذ و اینکه وجود تمام پارامترها در کنار هم در یک رابطه می‌تواند معنی‌دار باشد، آزمون همبستگی انجام گردید و مشخص شد تمام پارامترها می‌توانند در یک معادله قرار بگیرند.

[۵] سپس برای پیش‌بینی نرخ نفوذ با استفاده از رگرسیون خطی پنج رابطه معنی‌دار به دست آمد و نمودار پراکندگی روابط مذکور نسبت به نیمساز ربع اول و سوم رسم گردید. در مرحله بعد تحلیل داده‌ها با رگرسیون غیرخطی انجام گرفت و بهترین رابطه به‌دست‌آمده معرفی گردید و نمودار پراکندگی داده‌ها حول نیمساز ربع اول و سوم رسم گردید. درنهایت پیش‌بینی نرخ نفوذ به روش استنتاج فازی-عصبی ANFIS انجام و مدل به‌دست‌آمده و نمودارهای آن ارائه گردید. درنتیجه با بررسی نمودارها از سه روش مذکور رابطه (۴-۱) با توجه به پراکندگی داده‌ها در نمودار آزمون و نمودار آموزش به‌عنوان بهترین رابطه تعیین گردید.

پیشنهادهات:

برای تحقیقات آتی پیشنهادهای زیر ارائه می گردد.

[۱] در این پژوهش از پارامترهای مقاومت فشاری تک محوره، گشتاور، چرخش کله حفار، تراست و توان دستگاه استفاده گردید. پیشنهاد می شود در پژوهش های آتی تنوع پارامترها بیشتر و از به کارگیری پارامترهای همسو اجتناب گردد.

[۲] این روش تعیین نرخ نفوذ TBM در پروژه تونل انتقال آب کانی سیب استفاده گردید، پیشنهاد می شود از این روش در پروژه های دیگر نیز استفاده گردد.

[۳] در این پژوهش برای تعیین نرخ نفوذ از رگرسیون خطی، رگرسیون غیر خطی و مدل استنتاج فازی-عصبی استفاده گردید. پیشنهاد می شود در مطالعات آتی برای تعیین نرخ نفوذ از الگوریتم های فرا ابتکاری استفاده گردد.

فهرست منابع

[۱] گزارشات شرکت مهندسين مشاور ايمن سازان

منابع انگلیسی

- [2] Zhao, Z., Gong, Q., Zhang, Y., & Zhao, J. (2007). Prediction model of tunnel boring machine performance by ensemble neural networks. *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, 2(2), 123-128
- [3] Farrokh, E., Rostami, J., & Laughton, C. (2012). Study of various models for estimation of penetration rate of hard rock TBMs. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 30, 110-123.
- [4] Barton, N. R. (2000). *TBM tunnelling in jointed and faulted rock*. CRC Press.
- [5] Chiu, S. L. (1994). Fuzzy model identification based on cluster estimation. *Journal of Intelligent & fuzzy systems*, 2(3), 267-278.
- [6] Movinkel, T., & Johannessen, O. (1986). Geological parameters for hard rock tunnel boring. *Tunnels & Tunnelling International*, 18(4).
- [7] Hassanpour, J., Rostami, J., & Zhao, J. (2011). A new hard rock TBM performance prediction model for project planning. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(5), 595-603.
- [8] Gong, Q. M., Zhao, J., & Jiao, Y. Y. (2005). Numerical modeling of the effects of joint orientation on rock fragmentation by TBM cutters. *Tunnelling and underground space technology*, 20(2), 183-191.
- [9] Ribacchi, R., & Fazio, A. L. (2005). Influence of rock mass parameters on the performance of a TBM in a gneissic formation (Varzo Tunnel). *Rock mechanics and rock engineering*, 38(2), 105-127.
- [10] Howarth, D. F., Adamson, W. R., & Berndt, J. R. (1986, April). Correlation of model tunnel boring and drilling machine performances with rock properties. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 23, No. 2, pp. 171-175). Pergamon.

ادامه جدول ۴-۱ جدول داده ها

95.02.04	77	723	5	1180	1428	209
95.02.05	50	513	5	1076	1393	291
95.02.07	41	761	5	1054	1351	170
95.02.08	48	551	4	985	1293	206
95.02.25	29	420	4	977	1271	275
95.03.01	34	434	5	1028	1318	299
95.03.02	30	587	5	1136	1394	217
95.03.04	30	448	5	1036	1217	300
95.03.14	33	433	5	962	1395	282
95.03.24	31	470	3	990	693	92
95.03.28	28	399	3	1139	753	171
95.04.14	46	740	4	988	1269	104
95.04.15	29	400	4	908	1205	279
95.04.19	40	490	4	924	1097	285
95.04.28	29	698	5	1164	1362	183
95.04.31	38	480	3	1211	1011	245
95.06.01	48	524	5	1082	1509	217
95.06.17	39	604	5	1165	1526	213
95.06.18	38	655	5	1250	1553	229
95.06.20	35	593	5	1071	1472	212
95.06.23	37	531	5	1129	1344	205
95.06.27	38	460	5	1031	1405	246
95.08.05	28	472	3	986	717	219
95.08.08	40	464	3	1062	893	175
95.08.18	33	644	5	1202	1423	200
95.08.25	44	672	5	1162	1505	131
95.09.18	49	527	4	1092	1267	247
95.09.20	40	537	4	986	1232	222
95.09.21	40	626	4	1117	1232	218
95.09.29	36	515	4	1060	1064	202
95.09.30	71	710	5	1138	1306	144
95.10.03	58	656	5	1222	1444	218
95.10.04	67	553	5	1213	1318	208
95.10.05	46	638	5	1256	1426	186
95.10.06	59	500	5	1229	1390	224
95.10.07	52	570	5	1201	1419	185
95.10.08	56	442	4	1174	1197	211
95.10.09	80	631	5	1201	1392	217
95.10.10	78	587	5	1255	1428	205

95.10.11	73	532	5	1251	1400	224
95.10.18	57	913	5	1143	1530	124
95.10.19	83	962	5	1252	1659	105
95.10.20	65	873	6	1357	1632	127
95.10.23	62	750	5	1200	1470	100
95.10.28	73	781	6	1266	1614	126
95.11.02	54	816	6	1268	1670	225
95.11.06	72	512	5	1206	1411	206
95.11.12	44	780	3	1154	851	101
95.11.20	49	662	3	1074	864	111
95.11.22	41	722	3	1249	786	102
95.11.24	40	673	4	1205	1062	149
95.11.26	46	705	3	1292	921	125
95.11.30	45	582	4	1203	966	88
95.12.03	42	638	3	1287	926	159
95.12.04	66	797	3	1307	918	117
95.12.06	50	797	3	1150	840	77
95.12.07	56	817	3	1185	998	118
95.12.08	42	693	3	1154	993	135
95.12.11	54	801	4	1304	1088	142
95.12.12	55	789	4	1282	1208	153
95.12.14	55	705	4	1342	1177	169
96.01.11	66	737	4	1260	1079	144
96.01.12	35	677	3	1306	962	157
96.01.13	67	777	4	1299	1008	134
96.01.14	71	763	3	1249	990	115
96.01.16	71	678	4	1226	998	135
96.01.19	45	506	2	1253	717	196
96.01.20	44	579	3	1248	920	190
96.01.21	51	656	4	1247	1209	203
96.01.22	56	786	5	1196	1433	161
96.01.23	42	475	3	1190	790	177
96.01.24	41	413	2	1109	671	209
96.01.25	47	563	2	1253	1049	202
96.01.26	34	507	3	1200	818	184
96.01.27	50	547	3	1215	782	132

96.01.28	66	583	3	1269	861	157
96.01.29	88	710	4	1262	1134	132
96.01.30	82	774	5	1213	1410	122
96.02.06	79	896	5	1241	1498	114
96.02.07	82	646	4	1272	1227	183
96.02.08	84	678	5	1281	1302	186
96.02.11	67	889	5	1058	1300	80

جدول آموزش (Train)

94.11.15	74	598	4	1269	1230	229
94.12.04	41	443	5	996	1312	218
94.12.05	44	452	4	1042	1048	199
94.12.06	46	380	3	946	979	208
94.12.07	40	435	4	1055	1231	197
94.12.08	31	372	3	877	730	217
94.12.10	28	492	4	921	1017	180
94.12.12	36	423	4	775	1079	239
94.12.21	42	625	5	1151	1500	246
95.01.07	84	641	6	905	1596	162
95.01.13	73	938	5	1293	1551	175
95.01.20	83	697	5	881	1593	118
95.01.23	82	828	5	1033	1341	120
95.02.02	41	467	5	871	1320	281
95.02.04	77	723	5	1180	1428	209
95.02.07	41	761	5	1054	1351	170
95.02.08	48	551	4	985	1293	206
95.02.25	29	420	4	977	1271	275
95.03.01	34	434	5	1028	1318	299
95.03.02	30	587	5	1136	1394	217
95.03.04	30	448	5	1036	1217	300
95.03.14	33	433	5	962	1395	282
95.03.24	31	470	3	990	693	92
95.03.28	28	399	3	1139	753	171
95.04.14	46	740	4	988	1269	104
95.04.15	29	400	4	908	1205	279
95.04.19	40	490	4	924	1097	285
95.04.28	29	698	5	1164	1362	183
95.04.31	38	480	3	1211	1011	245
95.06.01	48	524	5	1082	1509	217
95.06.17	39	604	5	1165	1526	213
95.06.18	38	655	5	1250	1553	229
95.06.20	35	593	5	1071	1472	212
95.06.23	37	531	5	1129	1344	205
95.06.27	38	460	5	1031	1405	246
95.08.05	28	472	3	986	717	219
95.08.08	40	464	3	1062	893	175
95.08.18	33	644	5	1202	1423	200
95.08.25	44	672	5	1162	1505	131

95.09.18	49	527	4	1092	1267	247
95.09.20	40	537	4	986	1232	222
95.09.21	40	626	4	1117	1232	218
95.09.29	36	515	4	1060	1064	202
95.09.30	71	710	5	1138	1306	144
95.10.04	67	553	5	1213	1318	208
95.10.05	46	638	5	1256	1426	186
95.10.09	80	631	5	1201	1392	217
95.10.10	78	587	5	1255	1428	205
95.10.11	73	532	5	1251	1400	224
95.10.19	83	962	5	1252	1659	105
95.10.28	73	781	6	1266	1614	126
95.11.06	72	512	5	1206	1411	206
95.11.12	44	780	3	1154	851	101
95.11.20	49	662	3	1074	864	111
95.11.22	41	722	3	1249	786	102
95.11.24	40	673	4	1205	1062	149
95.11.26	46	705	3	1292	921	125
95.11.30	45	582	4	1203	966	88
95.12.03	42	638	3	1287	926	159
95.12.04	66	797	3	1307	918	117
95.12.08	42	693	3	1154	993	135
96.01.11	66	737	4	1260	1079	144
96.01.12	35	677	3	1306	962	157
96.01.13	67	777	4	1299	1008	134
96.01.14	71	763	3	1249	990	115
96.01.16	71	678	4	1226	998	135
96.01.19	45	506	2	1253	717	196
96.01.20	44	579	3	1248	920	190
96.01.23	42	475	3	1190	790	177
96.01.24	41	413	2	1109	671	209
96.01.25	47	563	2	1253	1049	202
96.01.26	34	507	3	1200	818	184
96.01.28	66	583	3	1269	861	157
96.01.29	88	710	4	1262	1134	132
96.01.30	82	774	5	1213	1410	122
96.02.06	79	896	5	1241	1498	114
96.02.07	82	646	4	1272	1227	183
96.02.08	84	678	5	1281	1302	186
96.02.11	67	889	5	1058	1300	80

Abstract

Prediction of TBM performance is the essential part of every TBM project. This is due to principle need of cost evaluation and the related schedule in every part of tunnel project design and needed information regarding development in order to trustable comparison between different methods of tunneling.

In past, multiple methods have been developed for efficiency forecasting and TBM performance and in most of them penetration rate and in some of them progress rate are oriented.

Lack of a unique method in modeling the operation of TBM is obvious, various methods by consideration of earth properties and related parameters of machine have been determined for the mentioned prediction.

Canni sib project consists of 2 water transmission channels which the second section of tunnel -By measure of 20660 m.- commences from the middle part of tunnel glass in orientation of khoranj village's heights of 15000 m. and continues up to tunnel outlet.

The goal of glas tunnel's existences is water transformation of a part of river which is the main branch of glas river to drainage basin of orumieh lake and Naghdeh plain.

This tunnel will be digging by means of TBM system mechanism.

In this research, UCS of earth properties, parameters of of Thrust machine, RPM, TORGE and power have been observed and considered.

This research has been done by aim of penetration rate of TBM forecasting in water transformation of Cani sib and linear regression, SPSS, ANFIS modeling have been used which is in result of 5 linearity, one nonlinear and one anfis model and the best of them has been selected.

Keywords: tunnel boring machin(TBM), Predicted, tunnel ,Penetration rat



Kharazmi International Campus

M.Sc. Thesis in Mineral Exploitation

**Investigation penetration rate tunnel boring
machin(TBM) for kanisib project**

By: Mohsen oladi Abbas Abadi

Supervisors:

Dr. Mohammad Ataei

Dr. Reza Khalou Kakaie

Advisor:

Dr. Abbas Aghajani Bazzazi

January 2018