

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

رساله دکتری

**مدلسازی تاثیر پارامترهای توده سنگ بر بهره‌وری
ماشین‌های حفاری تمام مقطع در سنگ سخت**

امید فروغ

استاد راهنما

دکتر سید رحمان ترابی

بهمن ۱۳۹۱

با سپاس از آنکه جان را فکرت آموخت.

بدین وسیله از راهنمایی و همراهی بی‌دریغ استاد محترم راهنما آقای دکتر سید رحمان ترابی کمال تشکر و سپاس را دارم. از داورهای محترم آقایان دکتر عبدالهادی قزوینیان، دکتر کورش شهریار، دکتر فرهنگ سرشکی و دکتر محمد عطایی و همچنین نماینده محترم تحصیلات تکمیلی دانشکده آقای دکتر رضا کاکایی سپاسگذاری می‌نمایم. از مساعدت‌های کلیه اساتید دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود به خصوص آقایان دکتر سید اسماعیل جلالی، دکتر احمد رمضان‌زاده و همچنین دکتر یاگزیز تشکر قدردانی و می‌نمایم. از کلیه پرسنل خوب دانشگاه صنعتی شاهرود به ویژه آقای شاه‌حسینی تشکر می‌نمایم.

از آقایان مهندسین صادقطریق‌زلی، مجید تاجیک، آرمان نوین، حمید توکلی، محمد اروچی، اسماعیل فصیحی و دکتر مسعود زارعبه خاطر همراهی‌ها و مساعدت‌هایشان و همچنین از آقایان مهندسین غلامرضا شمسی و رامین بهمنی به خاطر پشتیبانی‌های ارزشمندشان قدردانی می‌نمایم.

در خاتمه از خانواده عزیز و کلیه دوستان گرامیم به خاطر تمامی همراهی‌ها، دلگرمی‌هایشان سپاسگزاری می‌نمایم.

تعهد نامه

اینجانب امید فروغ دانشجوی دوره دکتری رشته **مهندسی استخراج معدن** دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله مدلسازی تاثیر پارامترهای توده سنگ بر بهره‌وری ماشین-های حفاری تمام مقطع در سنگ سخت متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این رساله 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 پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی رساله تاثیرگذار بوده‌اند رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. 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 نمی‌باشد.

چکیده

امروزه به طور گسترده‌ای از ماشین‌های حفاری تمام مقطع تونل (Tunnel Boring Machine) در پروژه‌های تونل سازی استفاده می‌شود. از آغاز حفاری مکانیزه، مطالعات زیادی برای پیش‌بینی عملکرد TBM انجام شده است. پیش‌بینی نرخ پیشروی TBM یک امر مهم در تخمین هزینه‌های یک پروژه مکانیزه است. ضریب بهره‌وری تاثیر به‌سزایی در نرخ پیشروی TBM دارد. شناخت عوامل موثر بر بهره‌وری از این نظر که می‌تواند تخمین دقیق‌تری از مدت زمان اجرای تونل را نشان دهد، اهمیت دارد. با وجود این که شرایط نامساعد زمین یکی از عوامل اصلی پایین آمدن بهره‌وری TBM است، تحقیقات قابل توجهی برای اندازه‌گیری تاثیر پارامترهای توده‌سنگ بر بهره‌وری TBM انجام نشده است. هدف از این تحقیق بررسی تاثیر پارامترهای توده‌سنگ و شرایط نامناسب زمین‌شناسی در حفاری مکانیزه می‌باشد.

برای این منظور ابتدا شرایط نامساعد توده‌سنگ و نحوه تاثیر آنها بر عملیات تونلسازی مورد بررسی قرار گرفته و سپس یک پایگاه داده‌ای در دو سطح با استفاده از داده‌های تونل انتقال آب کرج (قطعه یک) به طول ۱۶ کیلومتر، تونل انتقال آب کرج (قطعه ۲) به طول کلی ۱۴ کیلومتر که ۱۱ کیلومتر آن در زمان انجام این تحقیق حفاری شده است و همچنین تونل انتقال آب قمرود (قطعات ۳ و ۴) به طول ۱۸ کیلومتر تشکیل داده شده است. تاثیر شرایط توده‌سنگ بر توقفات TBM با استفاده از روش‌های آماری، سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) و فازی مدلسازی شده و نتایج آنها با هم مقایسه شده است. در مدلسازی آماری از RMR و در مدلسازی فازی و RES پارامترهای توده‌سنگ شامل شرایط پایداری، وضعیت درزه‌ها، آب زیرزمینی و عوامل موثری مانند وجود رس، ساینده‌گی توده‌سنگ، وجود گازهای سمی و شرایط لهدگی استفاده شده است.

تحلیل رگرسیون توابع مختلف نشان داد که قوی‌ترین رابطه بین توقفات مربوط به شرایط توده‌سنگ (Ground and Rock mass Related Downtimes) بر حسب ساعت بر متر و RMR به صورت یک رابطه درجه ۲ با ضریب همبستگی آن ۰/۶۲ می‌باشد. مدلسازی این توقفات با استفاده از ترکیب سیستم‌های مهندسی سنگ (Rock Engineering Systems) و تحلیل رگرسیون نیز بیانگر یک رابطه درجه ۲ با ضریب رگرسیون ۰/۸۵ بین GRRD (h/m) و اندیس توقفات مربوط به شرایط توده‌سنگ (GRDi) بوده است. مدلسازی فازی رابطه این توقفات با پارامترهای توده‌سنگ را ضریب همبستگی ۰/۹۷ نشان داد.

رابطه به دست آمده از روش آماری به دلیل ساده‌تر بودن می‌تواند به راحتی برای تخمین اولیه میزان توقفات ناشی از شرایط توده‌سنگ به کار گرفته شود. روش RES-آماری به دلیل اینکه عوامل مختلف زمین‌شناسی و پارامترهای توده‌سنگ را در نظر می‌گیرد و رابطه به دست آمده از آن نیز تنها با محاسبه اندیس توقفات به راحتی قابل استفاده است، می‌تواند پیش‌بینی قابل قبولی از توقفات را ارائه دهد. روش فازی پیش‌بینی دقیق

تری ارائه می‌دهد که البته در این تحقیق به عنوان یک روش کنترلی در کنار دو روش دیگر مورد استفاده قرار گرفته است.

با توجه به بررسی‌های انجام شده و نتایج حاصل از آنها، پیشنهاد شده است با ثبت دقیق اطلاعات زمین-شناسی و عملکرد TBM، تهیه پایگاه داده‌هایی از توقفات دستگاه حفاری مربوط به زمین و عملیات اجرایی و همچنین شرایط زمین‌شناسی و پارامترهای توده‌سنگ درونگیر تونل می‌تواند زمینه بررسی و ارائه مدل جامع‌تری از توقفات را با توجه به اندرکنش شرایط زمین و دستگاه حفاری فراهم سازد. با استفاده از این پایگاه داده‌ای می‌توان طبقه‌بندی سیستم‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ موجود را به منظور کاربرد در پیش‌بینی توقفات TBM اصلاح نمود.

وضعیت	مشخصات مقاله	ردیف
ISI منتشر شده	OmidFrough, S. RahmanTorabi, 2013, An Application of Rock Engineering Systems for Estimating TBM Downtimes , Engineering Geology Journal	۱
ISC منتشر شده	OmidFrough, S. RahmanTorabi, Majid Tajik, 2012, Evaluation of TBM Utilization Using Rock Mass Rating System: A Case Study of Karaj-Tehran Water Conveyance Tunnel (Lots 1 and 2) , Journal of Mining and Environment	۲
کنفرانس منتشر شده	MohajerMansori, SeidRahmanTorabi, OmidFrough, and Kamran Goshtasbi, 2008, Influence of Intact Rock Parameters on TBM Penetration Rate in Karaj-Tehran Water Conveyance Tunnel , ISRM International Symposium, ARMS5	۳
کنفرانس منتشر شده	OmidFrough, S. RahmanTorabi, SaffetYagiz, Majid Tajik, 2012, Effect of Rockmass Conditions on TBM Utilization Factor in Karaj – Tehran Water conveyance tunnel , World Tunneling Congress, Thailand	۴
کنفرانس منتشر شده	امید فروغ، سید رحمان ترابی، احمد رمضان زاده، ۱۳۹۰، تأثیر شرایط توده سنگ بر توقفات TBM در تونل انتقال آب کرج ، نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل، ۱۳۹۰	۵
علمی پژوهشی اصلاحات داور ارسال شده است	امید فروغ، سید رحمان ترابی، فرهنگ سرشکی، سید اسماعیل جلالی، پیش بینی نرخ پیشروی TBM با استفاده از سیستم‌های مهندسی سنگ ، نشریه علمی پژوهشی مهندسی تونل و فضاهاى زیرزمینی	۶

فهرست مطالب

فصل اول کلیات.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- ضرورت انجام تحقیق.....	۲
۳-۱- روش تحقیق و محدودیت‌ها.....	۴
فصل دوم حفاری مکانیزه در سنگ سخت.....	۷
۱-۲- مقدمه.....	۸
۲-۲- انواع ماشین‌های حفر تونل در سنگ.....	۸
۱-۲-۲- ماشین‌های حفر تونل از نوع روباز.....	۹
۲-۲-۲- ماشین‌های حفر تک سپره.....	۱۰
۳-۲-۲- ماشین‌های حفر تونل با سپر تلسکوپی.....	۱۲
۳-۲- عملکرد TBM.....	۱۴
۴-۲- عوامل موثر بر بهره‌وری.....	۱۵
فصل سوم مدل‌های پیش‌بینی عملکرد و مطالعات انجام شده.....	۱۷
۱-۳- مقدمه.....	۱۸
۲-۳- مدل‌های پیش‌بینی عملکرد TBM.....	۱۸
۱-۲-۳- مدل‌های تجربی.....	۱۹
۲-۲-۳- مدل‌های تئوری - تجربی.....	۲۷
۳-۳- مدل‌های اصلی پیش‌بینی عملکرد TBM.....	۲۹
۱-۳-۳- مدل CSM.....	۲۹
۲-۳-۳- مدل NTNU.....	۳۴
۱-۳-۳- مدل Q _{TBM}	۳۶
۴-۳- سایر مطالعات انجام شده.....	۳۸
۵-۳- بحث در مورد مدل‌های پیش‌بینی عملکرد.....	۴۱
۱-۵-۳- مدل‌های تجربی و تئوری - تجربی.....	۴۱
۲-۵-۳- مدل‌های CSM ، NTNU و Q _{TBM}	۴۱

۴۲	۶-۳- ضریب بهره‌وری در مدل‌های مختلف
۴۴	۷-۳- استفاده از طبقه‌بندی‌های مهندسی سنگ در پیش‌بینی عملکرد TBM
فصل چهارم توقفات مربوط به پارامترهای توده‌سنگ	
۴۷	فصل چهارم توقفات مربوط به پارامترهای توده‌سنگ
۴۸	۱-۴- مقدمه
۴۸	۲-۴- توقفات مربوط به شرایط توده‌سنگ
۵۹	۳-۴- تاثیر توقفات مربوط به توده‌سنگ بر بهره‌وری
فصل پنجم مطالعات موردی و تشکیل پایگاه داده‌ها	
۶۲	فصل پنجم مطالعات موردی و تشکیل پایگاه داده‌ها
۶۳	۱-۵- مقدمه
۶۳	۲-۵- مطالعات موردی
۶۳	۱-۲-۵- تونل انتقال آب کرج قطعه ۱
۷۹	۲-۲-۵- تونل انتقال آب کرج قطعه ۲
۹۰	۳-۲-۵- تونل انتقال آب قمرود (قطعه ۳ و ۴)
۱۰۰	۳-۵- تشکیل پایگاه داده‌ها
۱۰۱	۱-۳-۵- سطح بندی داده‌ها
۱۰۱	۲-۳-۵- داده‌های سطح اول
۱۰۶	۳-۳-۵- داده‌های سطح دوم
۱۰۸	۳-۵- بررسی تونل‌های مورد مطالعه
فصل ششم ارائه مدل پیش‌بینی	
۱۰۹	فصل ششم ارائه مدل پیش‌بینی
۱۱۰	۱-۶- مقدمه
۱۱۱	۲-۶- روش آماری
۱۱۱	۱-۲-۶- تحلیل آماری داده‌های سطح اول
۱۱۵	۲-۲-۶- تحلیل آماری داده‌های سطح دوم
۱۲۷	۳-۶- مدل‌سازی با استفاده از سیستم‌های مهندسی سنگ - آماری
۱۲۷	۱-۳-۶- مروری بر مطالعات انجام شده با استفاده از RES
۱۲۸	۲-۳-۶- رویکرد سیستمی
۱۳۰	۳-۳-۶- مدل‌سازی RES - آماری
۱۳۹	۴-۳-۶- نتایج مدل پیش‌بینی RES - آماری
۱۴۱	۴-۶- مدل‌سازی فازی
۱۴۲	۱-۴-۶- توابع عضویت
۱۴۲	۲-۴-۶- استنتاج فازی

۱۴۳ارائه مدل پیش‌بینی با استفاده از مدل‌سازی فازی
۱۴۸نتایج نتایج مدل‌سازی فازی
۱۴۹مقایسه نتایج مدل‌سازی با روش‌های مختلف
۱۵۵فصل هفتم نتایج و پیشنهادات
۱۵۶۱-۷- نتایج
۱۵۸۲-۷- پیشنهادات
۱۶۰منابع
۱۶۷پیوست‌ها

فهرست جدول‌ها

جدول ۳-۱- پارامترهای مورد نیاز برای به دست آوردن RME_{07}	۲۴
جدول ۳-۲- ضریب F_E در مدل RME	۲۵
جدول ۳-۳- ضریب F_A در مدل RME	۲۶
جدول ۳-۴- تاخیرات سیستم ترابری.....	۳۳
جدول ۳-۵- تاخیر ناشی از نصب نگهداری موقت.....	۳۳
جدول ۳-۶- پارامترهای استفاده شده در مدل $NTNU$	۳۴
جدول ۳-۷- تخمین m_1 با استفاده از Q توده سنگ.....	۳۸
جدول ۳-۸- مدل‌های پیش‌بینی عملکرد TBM	۴۳
جدول ۳-۹- مقایسه عوامل موثر بر ضریب بهره‌وری در مدل‌های $NTNU$ ، CSM و Q_{TBM}	۴۵
جدول ۴-۱- عوامل مربوط به زمین که موجب کاهش ضریب بهره‌وری می‌شوند.....	۴۹
جدول ۴-۲- نمونه‌ای از شرایط گیرافتادگی و توقفات مربوطه.....	۵۶
جدول ۵-۱- مشخصات دستگاه حفاری تونل انتقال آب کرج - تهران.....	۶۵
جدول ۵-۲- واحدهای توده‌سنگی مسیر تونل کرج ۱.....	۶۶
جدول ۵-۳- تاخیرات به وجود آمده دلیل شرایط زمین‌شناسی (کرج ۱).....	۶۸
جدول ۵-۴- زمان‌های حفاری و توقف، ضریب بهره‌وری و میزان نرخ نفوذ (کرج ۱).....	۶۹
جدول ۵-۵- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه در واحد $Gta1-1$	۷۱
جدول ۵-۶- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه در واحد $Gta1-2$	۷۲
جدول ۵-۷- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه در واحد $Gta12$	۷۲
جدول ۵-۸- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه در واحد $Gta13$	۷۲
جدول ۵-۹- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه در واحد $Gta14$	۷۳
جدول ۵-۱۰- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه در واحد $Sts-1$	۷۳
جدول ۵-۱۱- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه در واحد $Sts-2$	۷۳
جدول ۵-۱۲- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه در واحد Mdg	۷۴
جدول ۵-۱۳- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه در واحد Tsh	۷۴
جدول ۵-۱۴- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه در واحد Cz	۷۴
جدول ۵-۱۵- واحد توده‌سنگی مسیر تونل کرج ۲.....	۸۱
جدول ۵-۱۶- تاخیرات به وجود آمده دلیل شرایط زمین‌شناسی (کرج ۲).....	۸۲
جدول ۵-۱۷- ۱۷ زمان‌های حفاری و توقف، ضریب بهره‌وری و میزان نرخ نفوذ (کرج ۲).....	۸۳
جدول ۵-۱۸- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه در واحد MG	۸۴

- جدول ۵-۱۹- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه در واحد SC..... ۸۴
- جدول ۵-۲۰- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه در واحد SC2..... ۸۴
- جدول ۵-۲۱- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه در واحد MO..... ۸۵
- جدول ۵-۲۲- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه در واحد GT..... ۸۵
- جدول ۵-۲۳- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه در واحد Cz2..... ۸۵
- جدول ۵-۲۴- مشخصات دستگاه حفاری تونل انتقال آب قمرود..... ۹۱
- جدول ۵-۲۵- واحد توده‌سنگی مسیر تونل قمرود..... ۹۲
- جدول ۵-۲۶- زمان‌های حفاری و توقف، ضریب بهره‌وری و میزان نرخ نفوذ (قمرود)..... ۹۴
- جدول ۵-۲۷- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه در واحد K1..... ۹۴
- جدول ۵-۲۸- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه در واحد K2..... ۹۴
- جدول ۵-۲۹- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه در واحد K3..... ۹۵
- جدول ۵-۳۰- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه در واحد J1..... ۹۵
- جدول ۵-۳۱- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه در واحد J2..... ۹۵
- جدول ۵-۳۲- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه در واحد J3..... ۹۶
- جدول ۵-۳۳- میانگین پارامترهای عملکرد دستگاه حفاری (قمرود)..... ۹۸
- جدول ۵-۳۴- سطح داده‌های به دست آمده در تونل‌های مختلف..... ۱۰۱
- جدول ۵-۳۵- زمان توقفات و تاخیرات ... در داده‌های سطح ۱..... ۱۰۵
- جدول ۵-۳۶- داده‌های به دست آمده به تفکیک واحدهای توده‌سنگی..... ۱۰۵
- جدول ۵-۳۷- داده‌های به دست آمده در تونل‌های مختلف در داده‌های سطح ۲..... ۱۰۶
-
- جدول ۶-۱- نتایج بررسی ضریب خطی پیرسون داده‌های سطح ۱..... ۱۱۳
- جدول ۶-۲- روابط به دست آمده با استفاده از تحلیل رگرسیون (سطح ۱)..... ۱۱۳
- جدول ۶-۳- نتایج بررسی ضریب خطی پیرسون داده‌های سطح ۲..... ۱۱۶
- جدول ۶-۴- روابط به دست آمده با استفاده از تحلیل رگرسیون (سطح ۲)..... ۱۱۶
- جدول ۶-۵- روابط توقفات مربوط به شرایط توده سنگ بر اساس RMR..... ۱۱۷
- جدول ۶-۶- نتایج تحلیل رگرسیون (ROP, Ar U)..... ۱۲۱
- جدول ۶-۷- روابط به دست آمد بین RMR ضریب بهره‌وری و نرخ پیشروی..... ۱۲۱
- جدول ۶-۸- توصیف رتبه‌های قراردادی در ماتریس اندرکنش به روش EQS..... ۱۳۰
- جدول ۶-۹- امتیاز دهی پارامترهای موثر..... ۱۳۲
- جدول ۶-۱۰- پارامترهای موثر بر توقفات در واحدهای مختلف توده‌سنگ..... ۱۳۳
- جدول ۶-۱۱- ماتریس اندرکنش..... ۱۳۳
- جدول ۶-۱۱- ماتریس اندرکنش..... ۱۳۴
- جدول ۶-۱۲- محاسبه اندیس توقفات ... (GRDi)..... ۱۳۶

۱۳۷	جدول ۶-۱۳- نتایج تحلیل رگرسیون GRDi و GRRD
۱۳۸	جدول ۶-۱۴- روابط به دست آمده توقعات بر اساس اندیس توقعات
۱۴۵	جدول ۶-۱۵- متغیرهای ورودی و توابع عضویت آنها
۱۴۸	جدول ۶-۱۶- نتایج پیش‌بینی توقعات بر اساس مدل فازی
۱۵۲	جدول ۶-۱۷- مقایسه مدل‌های ساخته شده

فهرست شکل‌ها

- شکل ۲-۱- محدوده کاری ماشین‌های حفر تونل در سنگ ۹
- شکل ۲-۲- ماشین‌های حفر تونل از نوع باز ۱۰
- شکل ۲-۳- ماشین حفر تونل از نوع باز (تونل البرز) ۱۰
- شکل ۲-۴- ماشین‌های حفر تک سپره ۱۱
- شکل ۲-۵- ماشین‌های حفر تک سپره TheunHinboun expansion project ۱۲
- شکل ۲-۶- ماشین‌های حفر تونل با سپر تلسکوپی ۱۳
- شکل ۲-۷- دستگاه حفاری با سپر تلسکوپی (پروژه‌های قمرود و کرج) ۱۳
- شکل ۳-۱- تعیین DRI به وسیله آزمایش SJ و S₂₀ ۲۵
- شکل ۳-۲- زمان توقفات متفرقه و تعمیرات ۳۶
- شکل ۳-۳- تخمین اولیه m با استفاده از Q توده سنگ ۳۷
- شکل ۳-۴- پیش‌بینی نرخ پیشروی بر اساس RMR ۳۹
- شکل ۴-۱- ریزش توده سنگ خرد شده روی کاترهد (تونل کرج ۱) ۵۰
- شکل ۴-۲- تزریق دوغاب از سطح زمین به منظور بهسازی زمین (تونل کرج ۱) ۵۰
- شکل ۴-۳- تزریق دوغاب از سطح زمین به منظور بهسازی زمین (تونل کرج ۱) ۵۰
- شکل ۴-۳- عملیات بهسازی زمین (تونل قمرود) ۵۱
- شکل ۴-۴- شکستگی دیسک کاتر به دلیل درزه و شکاف توده سنگ (تونل نوسود ۲) ۵۲
- شکل ۴-۵- درصد زمان‌های حفاری و توقف در دو پروژه مکانیزه ۵۳
- شکل ۴-۶- جریان آب بر روی نوار نقاله (تونل کرج ۲) ۵۴
- شکل ۴-۷- جریان آب در تونل البرز ۵۴
- شکل ۴-۸- گل‌گرفتگی دیسک کاتر (تونل کرج ۱) ۵۵
- شکل ۴-۹- چسبیدن زمین به شیلد و سگمنت در اثر پدیده لهیدگی (تونل قمرود ۳ و ۴) ۵۷
- شکل ۴-۱۰- حفاری دور سپر به منظور آزادسازی آن (تونل قمرود ۳ و ۴) ۵۷
- شکل ۴-۱۱- شرایط آب زیرزمینی و گاز (تونل نوسود ۲) ۵۸
- شکل ۴-۱۲- میانگین درصد زمان‌های حفاری و توقف‌ها در ۱۰ تونل مکانیزه ۵۹
- شکل ۴-۱۳- هیستوگرام درصد زمان‌های حفاری و توقف‌ها در ۱۰ تونل مکانیزه ۵۹
- شکل ۴-۱۴- میانگین درصد زمان‌های حفاری و توقف‌ها در پروژه‌های کرج و قمرود ۶۰
- شکل ۴-۱۵- هیستوگرام درصد زمان‌های حفاری و توقف‌ها در پروژه‌های کرج و قمرود ۶۱

- شکل ۵-۱- موقعیت تونل انتقال آب کرج قطعه ۱ ۶۴
- شکل ۵-۲- دستگاه حفاری مورد استفاده در تونل کرج ۱ ۶۵
- شکل ۵-۳- پروفیل زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل کرج ۱ ۶۵
- شکل ۵-۴- بازدید از سینه کار، تونل کرج ۱ ۶۷
- شکل ۵-۵- هیستوگرام فراوانی داده‌های مورد استفاده ... (کرج ۱) ۷۵
- شکل ۵-۶- هیستوگرام فراوانی داده‌های مربوط به پارامترهای عملکرد (کرج ۱) ۷۶
- شکل ۵-۷- زمان‌های کاری و توقفات TBM (کرج ۱) ۷۷
- شکل ۵-۸- زمان‌های کاری و توقفات TBM در واحدهای مختلف (کرج ۱) ۷۷
- شکل ۵-۹- موقعیت تونل انتقال آب کرج قطعه دوم ۷۹
- شکل ۵-۱۰- تصاویر TBM قبل و پس از اورهال (کرج ۲) ۸۰
- شکل ۵-۱۱- انتقال TBM از قطعه ۱ به قطعه ۲ پس از اورهال (کرج ۲) ۸۰
- شکل ۵-۱۲- پروفیل زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل کرج ۲ ۸۱
- شکل ۵-۱۳- سایت کرج ۲، تعویض کاترهد TBM بازدید سینه کار و ... (کرج ۲) ۸۳
- شکل ۵-۱۴- هیستوگرام داده‌های مربوط به پارامترهای عملکرد (کرج ۲) ۸۶
- شکل ۵-۱۵- هیستوگرام فراوانی داده‌های مورد استفاده (کرج ۲) ۸۷
- شکل ۵-۱۶- زمان‌های کاری و توقفات TBM (کرج ۲) ۸۸
- شکل ۵-۱۷- زمان‌های کاری و توقفات TBM در واحدهای مختلف (کرج ۲) ۸۹
- شکل ۵-۱۸- موقعیت تونل انتقال آب قمرود ۹۰
- شکل ۵-۱۹- TBM مورد استفاده در تونل قمرود (قطعات ۳ و ۴) ۹۱
- شکل ۵-۲۰- پروفیل زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل قمرود ۹۳
- شکل ۵-۲۱- بازدید از عملیات اجرایی و سینه کار (تونل قمرود) ۹۶
- شکل ۵-۲۲- هیستوگرام داده‌های تونل قمرود ۹۷
- شکل ۵-۲۳- زمان‌های کاری و توقفات TBM در واحدهای مختلف (قمرود) ۹۸
- شکل ۵-۲۴- زمان‌های کاری و توقفات TBM در واحدهای مختلف (قمرود) ۹۹
- شکل ۵-۲۵- هیستوگرام فراوانی داده‌های سطح ۱ ۱۰۲
- شکل ۵-۲۶- ادامه هیستوگرام فراوانی داده‌های سطح ۱ ۱۰۳
- شکل ۵-۲۷- ادامه هیستوگرام فراوانی داده‌های سطح ۱ ۱۰۴
- شکل ۵-۲۸- هیستوگرام فراوانی داده‌های داده‌های سطح ۲ ۱۰۷
- شکل ۶-۱- تحلیل باقی مانده‌ها برای رابطه تعویض دیسک کاتر با RMR ۱۱۴
- شکل ۶-۲- تحلیل باقی مانده‌ها برای رابطه بهسازی زمین با RMR ۱۱۴
- شکل ۶-۳- تحلیل باقی مانده‌ها برای رابطه تعویض کاتر با RQD ۱۱۵

- شکل ۴-۶- تحلیل باقی مانده‌ها برای رابطه بهسازی زمین با UCS ۱۱۵
- شکل ۵-۶- رابطه $GRRD (h/m)$ و RMR (تابع درجه ۲) ۱۱۷
- شکل ۶-۶- رابطه $GRRD (h/m)$ و RMR (تابع معکوس) ۱۱۷
- شکل ۷-۶- رابطه $GRRD (\%)$ و RMR (تابع درجه ۲) ۱۱۸
- شکل ۸-۶- رابطه $GRRD (\%)$ و RMR (تابع معکوس) ۱۱۸
- شکل ۹-۶- تحلیل باقی مانده‌ها برای رابطه $GRRD (h/m)$ با RMR تابع درجه ۲ ۱۱۹
- شکل ۱۰-۶- تحلیل باقی مانده‌ها برای رابطه $GRRD (\%)$ با RMR تابع درجه ۲ ۱۱۹
- شکل ۱۱-۶- تحلیل باقی مانده‌ها برای رابطه $GRRD (h/m)$ با RMR تابع معکوس ۱۱۹
- شکل ۱۲-۶- تحلیل باقی مانده‌ها برای رابطه $GRRD (\%)$ با RMR تابع معکوس ۱۲۰
- شکل ۱۳-۶- رابطه RMR و U ۱۲۲
- شکل ۱۴-۶- رابطه RMR و AR ۱۲۲
- شکل ۱۵-۶- تحلیل باقی مانده‌ها برای رابطه RMR با U ۱۲۳
- شکل ۱۶-۶- تحلیل باقی مانده‌ها برای رابطه RMR با AR ۱۲۳
- شکل ۱۷-۶- مقایسه $GRRD (h/m)$ پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده (رابطه درجه ۲) ۱۲۴
- شکل ۱۸-۶- مقایسه $GRRD (h/m)$ پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده (تابع معکوس) ۱۲۴
- شکل ۱۹-۶- مقایسه $GRRD (\%)$ پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده (رابطه درجه ۲) ۱۲۵
- شکل ۲۰-۶- مقایسه $GRRD (\%)$ پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده (تابع معکوس) ۱۲۵
- شکل ۲۱-۶- مقایسه ضریب بهره‌وری پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده ۱۲۶
- شکل ۲۲-۶- مقایسه نرخ پیشروی پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده ۱۲۶
- شکل ۲۳-۶- ماتریس اندرکنش برای دو پارامتر A و B ۱۲۹
- شکل ۲۴-۶- نمودار علت - اثر ۱۳۵
- شکل ۲۵-۶- هیستوگرام شدت اندرکنش پارامترها ۱۳۵
- شکل ۲۶-۶- هیستوگرام توزیع $GRDi$ ۱۳۷
- شکل ۲۷-۶- رابطه درجه دو $GRRD (h/m)$ و $GRDi$ ۱۳۸
- شکل ۲۸-۶- رابطه درجه دو $GRRD (\%)$ و $GRDi$ ۱۳۸
- شکل ۲۹-۶- تحلیل باقی مانده‌ها برای رابطه $GRRD (h/m)$ با $GRDi$ ۱۳۹
- شکل ۳۰-۶- تحلیل باقی مانده‌ها برای رابطه $GRRD (\%)$ با $GRDi$ ۱۳۹
- شکل ۳۱-۶- مقایسه $GRRD (h/m)$ پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده (مدل RES) ۱۴۰
- شکل ۳۲-۶- مقایسه $GRRD (\%)$ پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده (مدل RES) ۱۴۰
- شکل ۳۳-۶- مدل شماتیک منطق فازی ۱۴۱
- شکل ۳۴-۶- مدل فازی و داده‌های ورودی و خروجی ۱۴۴
- شکل ۳۵-۶- تابع عضویت متغیر خروجی ($GRRD$) ۱۴۴
- شکل ۳۶-۶- صفحه ویرایش قوانین فازی ۱۴۷

- شکل ۶-۳۷- نمایشگر قوانین فازی ۱۴۷
- شکل ۶-۳۸- مقایسه $GRRD(h/m)$ واقعی و مقدار پیش‌بینی شده (مدل فازی) ۱۴۸
- شکل ۶-۳۹- مقایسه $GRRD(h/m)$ واقعی و پیش‌بینی شده (مدل آماری) ۱۴۹
- شکل ۶-۴۰- مقایسه $GRRD(h/m)$ واقعی و پیش‌بینی شده (مدل RES) ۱۵۰
- شکل ۶-۴۱- مقایسه $GRRD(h/m)$ واقعی و پیش‌بینی شده (مدل فازی) ۱۵۰
- شکل ۶-۴۲- مقایسه مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده در واحدهای مختلف ۱۵۱
- شکل ۶-۴۳- مقایسه $GRRD(h/m)$ واقعی و ترند مقادیر پیش‌بینی شده ۱۵۲

فصل اول کلیات

اولین تلاش برای ساخت ماشین‌های حفاری تونل قبل از سال ۱۸۵۰ انجام شد. تکنولوژی این ماشین‌ها به سرعت پیشرفت کرد به طوری که امروزه می‌توان آنها را در شرایط متنوعی از سنگ‌ها با نرخ پیشروی بالا به کار برد. در حال حاضر نرخ پیشروی TBMها به بیش از ۱۰۰۰ متر در ماه رسیده است. با این وجود هنوز نیز در برخی از پروژه‌های حفاری مکانیزه، نرخ پیشروی بسیار پایین و حتی توقفات طولانی به علت شرایط نامناسب زمین‌شناسی به چشم می‌خورد.

به همین دلیل پیش‌بینی عملکرد TBM یا به عبارت دیگر تخمین نرخ نفوذ، ضریب بهره‌وری و نرخ پیشروی به منظور محاسبه زمان و هزینه پروژه از اهمیت زیادی برخوردار است. برای این منظور مطالعات زیادی صورت گرفته و مدل‌های گوناگونی نیز توسعه یافته است اما به طور کلی در این مطالعات بیشتر به بررسی نرخ نفوذ پرداخته شده است. در مدل‌های CSM، NTNU و Q_{TBM} روش‌های تخمین ضریب بهره‌وری به صورت‌های مختلفی ارائه شده‌اند. در هر کدام از این مدل‌ها عوامل متفاوتی شامل شرایط زمین و یا پارامترهای حفاری در نظر گرفته شده ولی به طور کلی تاثیر توام دو یا چند عامل نادیده گرفته شده است. از طرف دیگر برخی از پارامترهای توده‌سنگ ممکن است به طور همزمان بر عملکرد TBM تاثیر بگذارند که این موضوع باید مورد توجه قرار گیرد.

هدف از این تحقیق بررسی تاثیر پارامترهای توده‌سنگ و شرایط نامناسب زمین‌شناسی در حفاری مکانیزه و ارائه رابطه‌ای بین توقفات دستگاه حفاری که به علت شرایط توده‌سنگ رخ می‌دهد و شرایط توده‌سنگ درونگیر تونل، می‌باشد.

۱-۲- ضرورت انجام تحقیق

شناخت عوامل موثر بر بهره‌وری از این نظر که می‌توان تخمین دقیق‌تری از بهره‌وری و به دنبال آن زمان اجرای تونل را به دست آورد، اهمیت دارد. واضح است که پیش‌بینی نرخ پیشروی TBM یک امر مهم در تخمین هزینه‌های یک پروژه حفاری مکانیزه است. هزینه‌های نیروی انسانی، بالاسری‌ها و

سرمایه‌گذاری برای تجهیزات و مصالح که به میزان زیادی به عمر پروژه وابسته‌اند، تاثیر زیادی بر هزینه‌ها دارند. بنابراین مدت زمان پیش‌بینی شده برای تخمین هزینه‌های یک پروژه حفاری مکانیزه، تعیین کننده است.

تونلسازی در شرایط نامساعد زمین امری دشوار بوده و در بسیاری موارد باعث بروز توقفات طولانی مدت در اجرای پروژه می‌شود به طوری‌که مهمترین توقفات و یا نرخ پیشروی بسیار پایین به علت شرایط نامساعد زمین‌شناسی بوده است. این موضوع هم در پروژه‌های داخلی و هم در پروژه‌های خارجی به وضوح دیده شده است. بنابر این مدلی که بتواند سهم شرایط زمین‌شناسی و پارامترهای توده‌سنگ را در توقفات TBM و یا کاهش بهره‌وری آن مشخص نماید می‌تواند در تخمین زمان پروژه، هزینه‌های حفاری و پیش‌بینی تمهیدات مورد نیاز برای کاهش این توقفات کمک قابل توجهی نماید.

در سال‌های اخیر تعداد زیادی از تونل‌های طولیل انتقال آب در ایران به روش مکانیزه حفاری شده و یا در حال حفاری می‌باشند. بعضی از این پروژه‌ها موفق بوده بعضی با مشکلاتی همراه بوده‌اند. آغاز حفاری مکانیزه تونل‌های انتقال آب تقریباً در یک بازه زمانی بوده است. تجربیات حاصل از این پروژه‌ها می‌تواند از بسیاری از نارسایی‌های که قبلاً رخ داده در پروژه‌های آتی جلوگیری کند. این موضوع مستلزم ثبت تجربیات پروژه‌های اتمام یافته و پروژه‌های در حال اجرای فعلی است.

داده‌های حاصل از این تونل‌ها از این جهت حائز اهمیت هستند که بیانگر شرایط زمین‌شناسی و تکتونیکی ایران هستند. مدل‌های موجود پیش‌بینی نرخ پیشروی بر اساس اطلاعات تونل‌هایی که در شرایط زمین‌شناسی مشخصی حفاری شده‌اند، توسعه یافته‌اند. به عنوان مثال مدل NTNU براساس داده‌های حاصل از حفاری تونل در سنگ‌های سخت اسکاندیناوی توسعه یافته و تاثیر شرایط زمین بر بهره‌وری در این مدل نیز تابعی از شرایط این نوع سنگ‌ها است. اگرچه استفاده از این مدل‌ها که سال‌ها به طور موفق در پروژه‌های تونلسازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، امری لازم است، اما مطالعه تاثیر شرایط زمین بر بهره‌وری TBM با توجه به تفاوت زمین‌شناسی و شرایط اجرا در ایران لازم به نظر می‌رسد.

مطالعه پروژه‌های مکانیزه اجرا شده یا در حال اجرای کشور نشان دهنده این امر است که بهره‌وری این تونل‌ها پایین تر از میزانی بوده که امکان تحقق آن وجود داشته است. دستیابی به نرخ پیشروی بالا در مقاطعی از زمان اجرا در این تونل‌ها نشان می‌دهد که می‌توان به رکوردهای بالاتری نیز دست یافت. مطالعه ضریب بهره‌وری در این تونل‌ها می‌تواند مسائلی که باعث دستیابی به رکوردهای بالای حفاری شده را در کنار مشکلاتی که باعث کاهش نرخ پیشروی و حتی توقفات طولانی مدت پروژه‌ها شده است، به صورت علمی مورد بررسی قرار دهد و تجربیات لازم را به صورت مدون در اختیار مجامع علمی صنعتی کشور قرار دهد.

با وجود این که شرایط نامساعد زمین یکی از عوامل اصلی پایین آمدن بهره‌وری TBM است، تحقیقات قابل توجهی برای اندازه‌گیری تاثیر پارامترهای توده‌سنگ بر بهره‌وری TBM انجام نشده است. به طور کلی داده‌هایی که در اکثر پروژه‌های تونلسازی ثبت می‌شوند با هدف مطالعات بهره‌وری دستگاه حفاری جمع‌آوری نمی‌شوند. بخصوص پیمانکاران به منظور جلوگیری از ادعاهای آتی کارفرمایان و مشاوران علاقه چندانی به ارائه این اطلاعات از خود نشان نمی‌دهند. بنابر این لازمه چنین مطالعاتی ارتباط تنگاتنگ و مستقیم با پروژه‌های مکانیزه می‌باشد.

۱-۳- روش تحقیق و محدودیت‌ها

به طور کلی این تحقیق شامل پنج مرحله اصلی است. مرحله اول مطالعات کتابخانه‌ای، مرحله دوم جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز از پروژه‌های مکانیزه تونلسازی با بررسی پروژه‌های اجرا شده و در حال اجرا و مطالعات میدانی، مرحله سوم سازمان دهی و دسته بندی اطلاعات و تشکیل پایگاه داده‌ها، مرحله چهارم تحلیل داده‌ها و ارائه مدل و مرحله آخر جمع بندی نتایج و ارائه پیشنهادات می‌باشد. به منظور تشکیل پایگاه داده‌ها ابتدا داده‌ها با توجه به اطلاعاتی که می‌توانند به منظور تحلیل مورد استفاده قرارگیرند، سطح بندی شده است. با توجه به گزارش‌های زمین‌شناسی، نقشه‌ها و برداشت‌های زمین‌شناسی، مشاهدات و بررسی‌ها و مطالعات میدانی انجام شده و همچنین گزارش‌های کارگاهی و

داده‌های زمان اجرا، پایگاه داده‌های متناسب با سطح اطلاعات، تشکیل داده شده است. در مرحله بعدی با استفاده از این پایگاه داده‌ای، به بررسی رابطه بین شرایط زمین‌شناسی و پارامترهای توده-سنگ با توقفات و یا بهره‌وری دستگاه حفاری پرداخته شده است.

به منظور مطالعه تاثیر شرایط توده‌سنگ بر بهره‌وری و یا به عبارتی دیگر میزان توقفات آن از طبقه‌بندی مهندسی سنگ (RMR) و پارامترهای کیفی توده‌سنگ استفاده شده است. طبقه‌بندی RMR اگر چه به منظور طراحی نگهداری توسعه‌یافته‌اند اما پارامترهای مختلف توده‌سنگ مانند شرایط ناپیوستگی‌ها، آب زیرزمینی و مقاومت سنگ بکر در امتیازدهی آنها دخالت دارند. البته شرایطی مانند وجود رس و مصالح چسبیده، تصاعد گازهای سمی و همچنین ساینده‌گی سنگ در آنها وجود ندارد که با استفاده از مطالعات میدانی به صورت کیفی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

مهمترین محدودیت‌های این تحقیق را می‌توان به دو گروه تقسیم‌بندی کرد. محدودیت اول، به دست آوردن اطلاعات مورد نیاز از توده‌سنگ در مقاطع مختلف زمین‌شناسی می‌باشد. پروژه‌های مطالعه شده در این تحقیق همگی توسط دستگاه حفاری با سپر دوگانه یا Double Shield TBM حفاری شده‌اند. لذا روابط به دست آمده نیز در تونل‌هایی که با این نوع دستگاه حفاری می‌شوند، نتایج قابل قبولتری ارائه خواهند داد. باید در نظر داشت در تونل‌هایی که با دستگاه‌های حفاری دو سپره حفاری می‌شوند، تهیه نقشه‌های چون ساخت زمین‌شناسی مهندسی به طوریکه بتواند کلیه پارامترهای توده‌سنگ را در برگیرد، وجود ندارد. دوم، ثبت توقفات TBM بر اثر به شرایط توده‌سنگ به صورت تفکیک شده انجام نمی‌شود.

در این تحقیق پروژه‌های کرج ۱ و ۲، قمرود ۳ و ۴، نوسود ۲، قمرود ۱ و البرز مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته‌اند. در این بررسی‌ها مشخص شد اطلاعات ثبت شده از برخی از این تونل‌ها برای تحلیل‌های مورد نظر کافی نیستند. بنابر این تنها داده‌های تونل انتقال آب کرج (قطعه یک) به طول ۱۶ کیلومتر، تونل انتقال آب کرج (قطعه ۲) به طول ۱۴ کیلومتر که ۱۱ کیلومتر آن در زمان انجام این تحقیق حفاری شده است و همچنین تونل انتقال آب قمرود (قطعات ۳ و ۴) به طول ۱۸ کیلومتر

استفاده شده است. در ادامه، این تونل‌ها به اختصار کرج ۱، کرج ۲ و قمرود نامیده می‌شوند. پارامتر اصلی مورد مطالعه در این تحقیق توقفات مربوط به توده‌سنگ و شرایط زمین‌شناسی است که به اختصار "توقفات مربوط به شرایط توده‌سنگ" نامیده می‌شود. در این تحقیق برای مطالعه تاثیر شرایط زمین و پارامترهای توده‌سنگ بر ضریب بهره‌وری در حفاری مکانیزه، از روش‌های آماری، سیستم‌های مهندسی سنگ و مدلسازی فازی استفاده شده است. همچنین با استفاده از داده‌های موجود سایر پارامترهای عملکرد TBM مانند نرخ پیشروی و نرخ نفوذ نیز در تونل‌های مورد مطالعه مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. شایان ذکر است که متن خروجی و نتایج نرم افزارهای مورد استفاده در بعضی از شکل-ها و جدول‌ها انگلیسی بوده که به همان صورت در متن گنجانده شده است.

مطابق آنچه بیان شد، در فصل یک این پایان‌نامه، کلیات و علل نیاز به تحقیق و محدودیت‌های آن بیان شده است. در فصل دوم حفاری مکانیزه و لزوم پیش‌بینی عملکرد بررسی شده و در فصل سوم مدل‌های پیش‌بینی عملکرد TBM مورد بحث قرار گرفته است. در فصل چهارم شرایط نامناسب توده-سنگ که موجب توقفات حفاری و پایین آمدن ضریب بهره‌وری TBM می‌شوند معرفی شده‌اند. در فصل پنجم تونل‌های مورد مطالعه در این تحقیق معرفی شده و پایگاه داده‌ای تشکیل داده شده با استفاده از داده‌های آنها نیز بررسی شده است. در فصل ششم با استفاده از پایگاه داده‌ای تشکیل داده شده رابطه توقفات دستگاه حفاری با شرایط زمین و پارامترهای توده‌سنگ با روش‌های آماری، سیستم‌های مهندسی سنگ و منطق فازی مدلسازی شده و نتایج آنها با هم مقایسه شده است. در نهایت در فصل هفتم نتایج حاصل از تحقیق بیان شده و پیشنهادهایی به منظور مطالعات آتی ارائه شده است.

فصل دوم
حفاری مکانیزه
در سنگ سخت

ایده ساخت ماشین‌های حفاری تونل به قبل از سال ۱۸۵۰ بر می‌گردد. اولین ماشین حفاری تمام مقطع^۱ (TBM) که مشخصاتی مانند TBM های امروزی داشت توسط چارلز ویلسون^۲ در سال ۱۸۵۱ ساخته شد (Maidl et al., 2008). جیمز رابینز^۳ در سال ۱۹۵۴ اولین ماشین حفاری تمام مقطع نسل امروز را ساخت. ماشین‌های اولیه از نوع ماشین‌های حفر تونل باز بوده که با تغییراتی بر روی آنها دستگاه‌های حفاری تمام مقطع از نوع سپردار ساخته شد. اولین ماشین حفاری دو سپره در سال ۱۹۷۲ به کار گرفته شد. ایده این ماشین توسط شرکت Seli ایتالیا مطرح شده و با همکاری شرکت رابینز ساخته شد. تاریخچه ساخت و پیشرفت ماشین‌های حفاری تونل در سنگ سخت در منابع مختلف از جمله (Maidl et al., 2008) به تفصیل بیان شده است. امروزه به طور گسترده انواع ماشین‌های حفاری تمام مقطع با توجه به شرایط زمین‌شناسی و نیازهای پروژه برای حفاری تونل‌ها در سنگ سخت و خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲-۲- انواع ماشین‌های حفر تونل در سنگ

تقسیم‌بندی‌های مختلفی از سوی انجمن بین‌المللی تونل (ITA) و شرکت‌های سازنده برای انواع TBM ارائه شده است که بعضاً دارای اختلافات جزئی هستند. اما به طور کلی ماشین‌های حفر تونل تمام مقطع در دو گروه حفاری در زمین‌های نرم و حفاری در سنگ سخت تقسیم‌بندی می‌شوند. در شکل ۱-۲ بر اساس این تعریف، محدوده کاری این ماشین‌ها مشخص شده است. این محدوده کاری از سوی شرکت رابینز آمریکا پیشنهاد شده است (Askilsrud, 1996). ماشین‌های حفر تونل در سنگ سخت^۴ به انواع ذیل تقسیم‌بندی می‌شوند (Maidl et al., 2008).

^۱ Tunnel Boring Machine

^۲ Charles Wilson

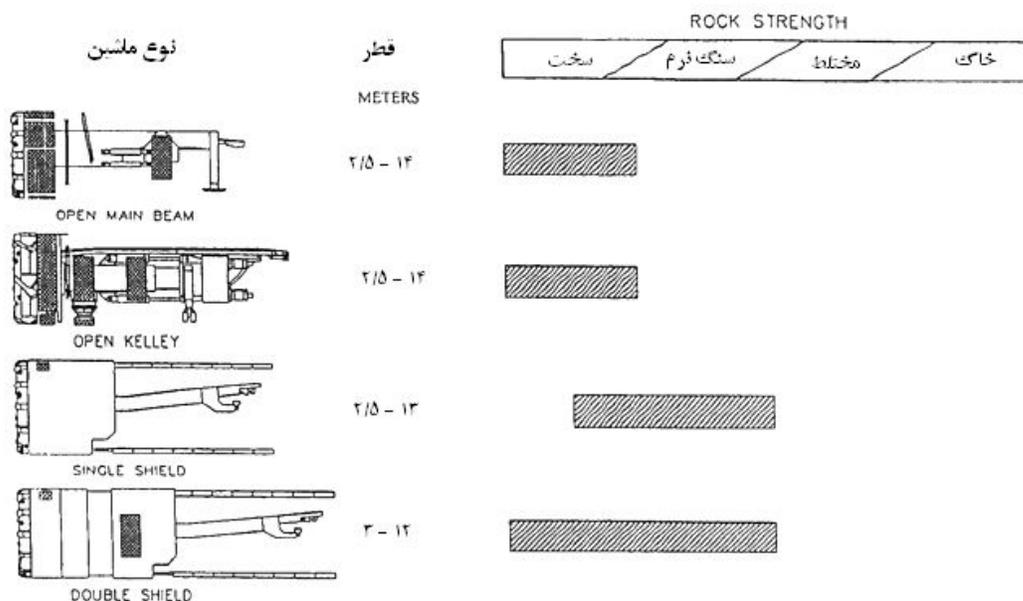
^۳ James S. Robbins

^۴ Hard Rock TBM

۱- ماشین‌های حفر تونل باز (Open TBM)

۲- ماشین‌های حفر تونل تک‌سپره (Single Shield TBM)

۳- ماشین‌های حفر تونل دوسپره (Double Shield or Telescopic Shield TBM)

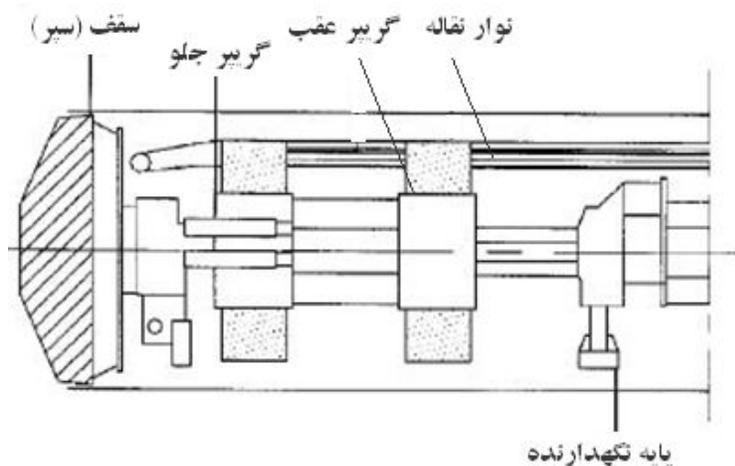


شکل ۱-۲- محدود کاری ماشین‌های حفر تونل در سنگ (Askilsrud, 1996)

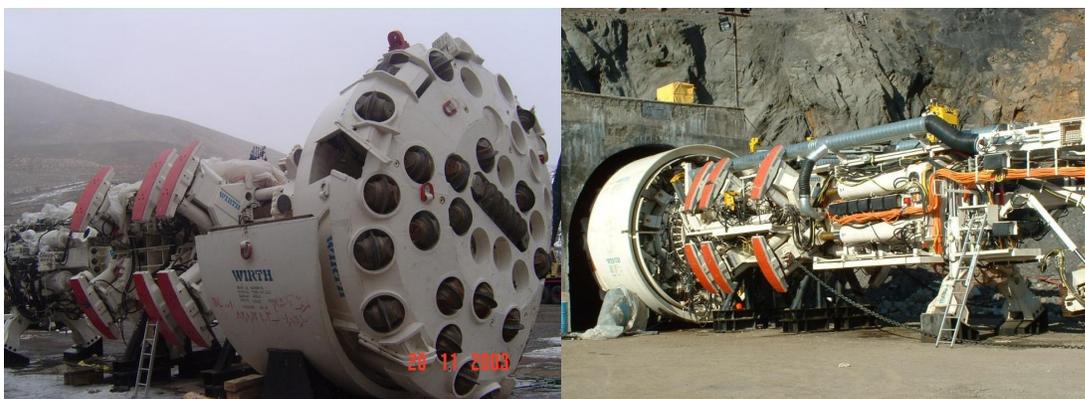
۱-۲-۲- ماشین‌های حفر تونل از نوع باز

به طور کلی ماشین‌های حفر تونل از نوع باز که به آنها Gripper TBM نیز گفته می‌شود، در شرایطی به کار برده می‌شوند که توده سنگ درونگیر تونل دارای زمان پابرجایی متوسط تا بالا باشد. کاربرد این ماشین‌ها وقتی تونل نیاز به نگهداری مانند بولت، شاتکریت و یا قاب ندارد، بسیار اقتصادی است (Maidl et al., 2008). پیشنهاد شده است این ماشین‌ها در شرایطی استفاده شوند که توده سنگ درونگیر تونل از مقاومت کافی برای تحمل فشار گریپر TBM برخوردار بوده و حالت ریزشی نیز نداشته باشد (Askilsrud, 1996). به عنوان یک تخمین اولیه این نوع ماشین برای شرایطی که حدود ۸۰ تا ۹۰ درصد مسیر تونل نیاز به نگهداری نداشته باشد، مناسب است. این TBM در مقاومت سنگ از ۱۰۰ تا ۳۰۰ مگاپاسکال، RQD ۵۰ تا ۱۰۰ درصد و فاصله‌داری درزه‌ها بیش از ۶۰ سانتیمتر کارایی مناسبی دارد (Girmscheid and Schexnayder, 2003). مهمترین مزیت ماشین‌های باز نسبت به

ماشین‌های سپردار، امکان دستیابی به سرعت‌های بالای حفاری است (Askilrud, 1996). بخش-
های اصلی ماشین‌های حفر تونل از نوع باز در شکل ۲-۲ و ۳-۲ نشان داده شده است (AFTES, 2003).
(2003).



شکل ۲-۲- ماشین‌های حفر تونل از نوع باز (AFTES, 2003)

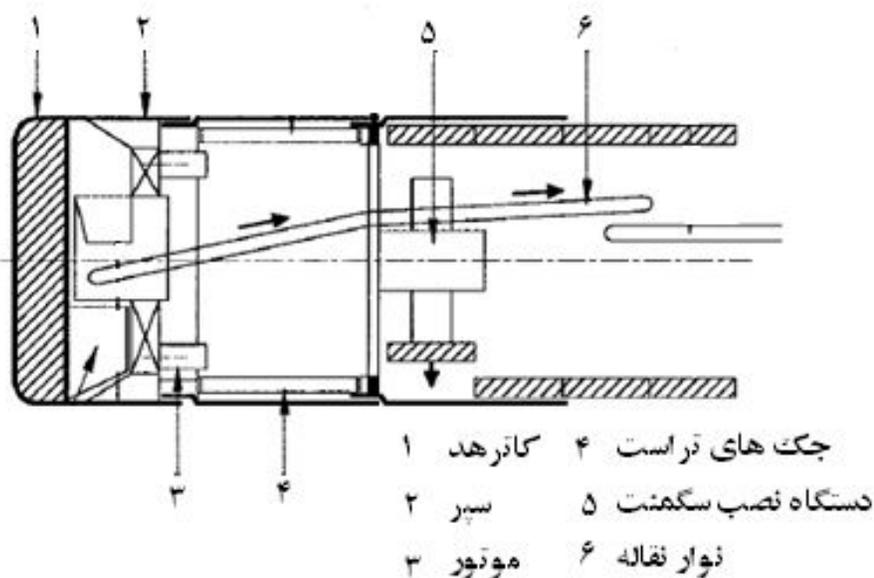


شکل ۳-۲- ماشین حفر تونل از نوع باز (تونل البرز)

۲-۲-۲- ماشین‌های حفر تک سپره

ماشین‌های حفر تک سپره به صورت یک استوانه دارای پوشش هستند که در قسمت جلوی آن،
کله حفاری (Cutter head) و در قسمت عقب، دستگاه نصب سگمنت و جک‌های پیش‌برنده قرار دارد
(Askilrud, 1996). این نوع ماشین‌ها برای حفاری در توده‌سنگ‌هایی که از زمان خود ایستایی

کوتاهی برخوردارند و به خاطر ضعیف بودن سنگ، امکان استفاده از گریپر برای تامین نیروی پیشروی وجود ندارد، استفاده می‌شوند (Maidl et al., 2008 and Askilsrud, 1996). این نوع ماشین در مقاومت سنگ حدود ۵۰ مگاپاسکال، RQD حدود ۵۰ درصد و فاصله‌داری درزه‌ها در حدود ۵۵ تا ۶۵ سانتیمتر کارایی بهتری دارد (Girmscheid and Schexnayder, 2003). در ماشین‌های حفاری تک سپره، فشار لازم برای حفاری، از طریق اعمال نیرو توسط جک‌های هیدرولیکی بر قطعات بتنی نصب شده در انتهای سپر، تامین می‌شود (Askilsrud, 1996). بخش‌های اصلی ماشین‌های حفر تک‌سپره در شکل ۲-۴ و در شکل ۲-۵ نمونه‌ای از این نوع TBM نشان داده شده است.



شکل ۲-۴- ماشین‌های حفر تک سپره (AFTES, 2003)

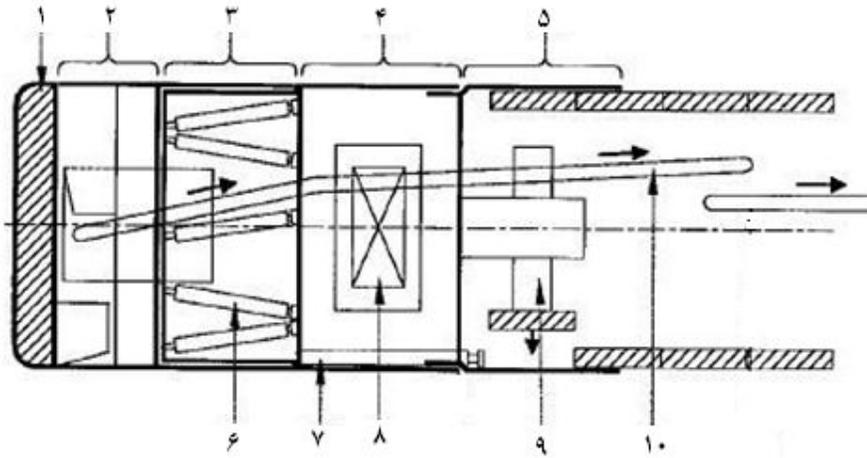


شکل ۲-۵- ماشین‌های حفر تک سپره پروژه Theun Hinboun، لائوس (therobbinscompany.com)

۲-۲-۳- ماشین‌های حفر تونل با سپر تلسکوپی

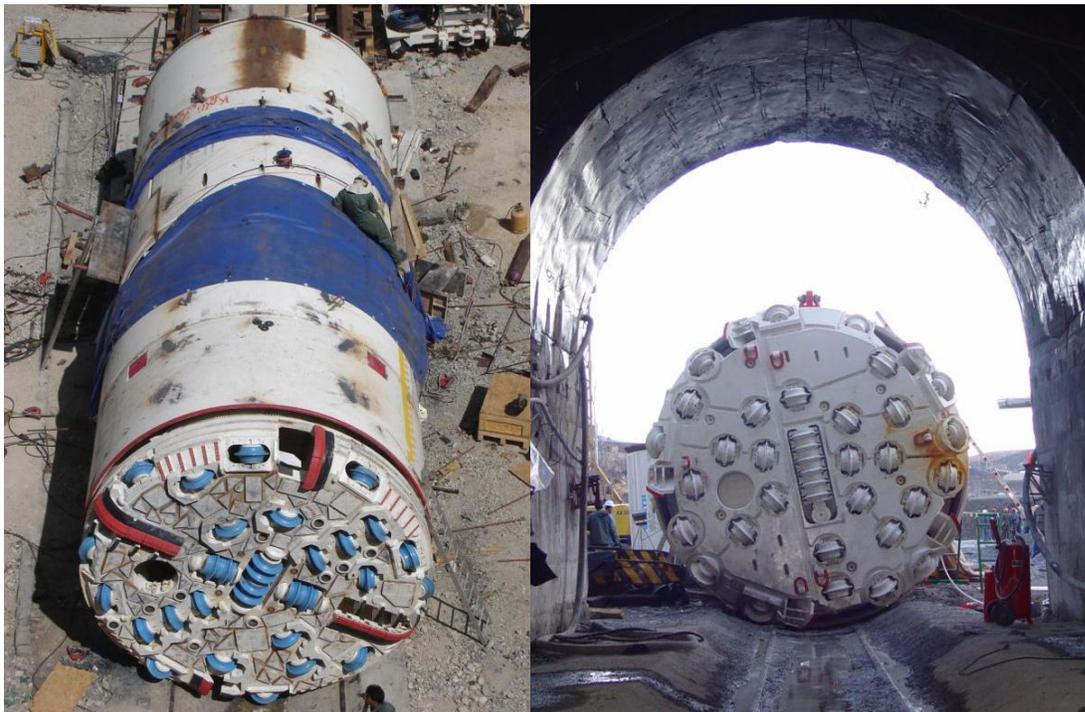
برای اولین بار شرکت پیمانکاری Seli از ایتالیا که سابقه‌ای طولانی در پروژه‌های حفاری مکانیزه تونل دارد، ایده ساخت ماشینی با توانایی کار در زمین‌های بسیار خرد شده و ضعیف و نیز در زمین‌های با مقاومت مناسب را با بهبود ماشین‌های تک سپره مطرح کرد. این ماشین تحت عنوان ماشین حفر تونل با سپر تلسکوپی توسط کارخانه رابینز امریکا ساخته شد (Askilrud, 1996).

این نوع TBM دو سپر اصلی جلو و عقب دارد و مجهز به هر دو سیستم تامین رانش با گریپر (همانند ماشین‌های باز) و با جک‌های رانش (همانند ماشین‌های تک سپره) است. به همین دلیل هم توانایی کار در زمین‌های ریزشی و هم در زمین‌های با مقاومت مناسب برای گریپ کردن را دارد. در حالتی که زمین مقاومت مناسب برای ایجاد رانش با تکیه گریپر بر دیواره‌های تونل را داشته باشد، ماشین می‌تواند به حفاری و سگمنت گذاری همزمان بپردازد (Askilrud, 1996 AFTES,). (Maidl et al., 2003, 2008). در شکل ۲-۶ بخش‌های اصلی ماشین‌های حفر تونل با سپر تلسکوپی و در شکل ۲-۷ نمونه‌هایی از این نوع TBM نشان داده شده است.



- | | |
|---------------|---------------------|
| ۱ کاترهد | ۶ جک های تراست اصلی |
| ۲ سپر جلو | ۷ جک های تراست کمکی |
| ۳ سپر تلسکوپی | ۸ گریپر |
| ۴ سپر گریپر | ۹ دستگاه نصب سنگمن |
| ۵ سپر دنباله | ۱۰ نوار نقاله |

شکل ۲-۶- ماشین های حفر تونل با سپر تلسکوپی (AFTES, 2003)



شکل ۲-۷- دستگاه حفاری با سپر تلسکوپی (سمت راست پروژه قمرود و سمت چپ پروژه کرج)

۲-۳- عملکرد TBM

پارامترهای مربوط به عملکرد شامل نرخ پیشروی^۱، نرخ نفوذ^۲ و ضریب بهره‌وری^۳ است. نرخ پیشروی TBM به زمان خالص حفاری، میزان نفوذ دستگاه حفاری در واحد زمان، زمان فعالیت‌های تونلسازی، تعمیرات و نگهداری دوره‌ای، زمان تاخیرات عملیاتی و همچنین توقفات مربوط به شرایط نامناسب زمین بستگی دارد.

نرخ نفوذ نسبت طول حفاری شده به مدت زمانی است که حفاری به صورت پیوسته انجام می‌شود. نرخ نفوذ به ازای پیشروی ماشین به ازای یک دور چرخش کاترهد نیز بیان می‌شود. روابط ذیل تعریف نرخ نفوذ را نشان می‌دهند.

$$ROP_{(m/h)} = L_{(m)} / T_{(hour)} \quad (1-2)$$

$$ROP_{(mm/rev)} = 1000 ROP_{(m/h)} / 60 \text{ RPM} \quad (2-2)$$

ضریب بهره‌وری نسبت زمان حفاری به کل زمان عملیات تونلسازی است که به صورت روزانه، هفتگی، ماهانه، برای کل طول تونل و یا برای بخش‌های مختلف تونل مانند واحدهای مختلف زمین-شناسی به تفکیک برآورد می‌شود. در محاسبه ضریب بهره‌وری، زمان کل عملیات به صورت‌های مختلفی بیان می‌شود. به عنوان مثال در بعضی موارد این زمان از شروع سفارش ماشین تا برچیدن کارگاه محاسبه می‌شود. در حالت کلی این زمان از شروع حفاری تونل تا پایان حفاری آن در نظر گرفته می‌شود که در این تحقیق نیز از این روش استفاده شده است. نرخ پیشروی نسبت طول واقعی حفاری شده به کل زمان حفاری، عملیاتی و توقفات و یا به عبارتی دیگر برابر با حاصل ضرب نرخ نفوذ در ضریب بهره‌وری است.

$$ROP \times U = AR \quad (3-2)$$

۲-۴- عوامل موثر بر بهره‌وری

¹Advance Rate (AR)

²Rate Of Penetration (ROP)

³Utilization factor (U)

ضریب بهره‌وری یکی از پارامترهای موثر در عملکرد TBM است که تاثیر مستقیم بر کاهش یا افزایش نرخ پیشروی دارد. بهره‌وری پایین در اثر حفاری در شیب و قوس، شرایط نامساعد زمین، مدیریت ضعیف و یا خرابی‌های متناوب ماشین حاصل می‌شود. از طرف دیگر بهره‌وری بالا معمولاً در ساخت تونل‌های مستقیم و کم شیب در شرایط مساعد زمین به همراه مدیریت خوب و تعمیر و نگهداری مناسب به دست می‌آید.

زمان‌های توقف ماشین معمولاً شامل زمان تعویض دیسک‌ها، تعمیرات زمان‌بندی شده و موردی، دیوارگیری مجدد^۱، توقف به خاطر نصب نگهداری یا مشکلات ترابری، قطع برق، تعویض شیفت، زمان صرف غذا، تاخیرهای کارکنان و عوامل متفرقه است. تمام این پارامترها برای تعیین ضریب بهره‌وری TBM باید در نظر گرفته شوند (Rostami and Ozdemir, 1993). اگرچه TBM به منظور انجام حفاری پیوسته ساخته شده است اما معمولاً زمان حفاری آن کمتر از ۵۰ درصد زمان کاری است (Laughton, 1998). به طور کلی توزیع زمانی عملیات حفاری مکانیزه در سنگ شامل موارد ذیل است.

- زمان حفاری
- زمان نصب نگهداری یا سگمنت گذاری
- زمان دیوارگیری مجدد
- تزریق شن نخودی^۲ و دوغاب در پشت سگمنت (دستگاه‌های سپر دار)
- تعمیر و نگهداری ماشین و سیستم پشتیبانی و بازدیدهای دوره‌ای
- توقف به دلیل خرابی سیستم‌های هیدرولیک، برق، مکانیک،
- زمان تعویض کاترها
- توقف به خاطر تاخیرات سیستم ترابری
- توقف به خاطر نبود وسایل یدکی و تجهیزات و خدمات فنی

¹ Regripping

² Pea gravel

- زمان یادگیری پرسنل (در ابتدای پروژه)

- توقفات به خاطر شرایط نامساعد زمین مانند ریزش‌ها، جریان آب، تصاعد گاز و ...

اگرچه کلیه عوامل مذکور می‌تواند سهمی در تاخیرات و توقفات حفاری داشته باشد اما یکی از مهمترین عوامل توقف حفاری و یا به عبارتی دیگر، کاهش ضریب بهره‌وری، حفاری در شرایط نامساعد زمین است. تونلسازی در چنین شرایطی معمولاً امری دشوار بوده و در بسیاری موارد باعث بروز توقفات طولانی مدت در اجرای پروژه می‌شود به طوریکه مهمترین توقفات و یا نرخ پیشروی بسیار پایین در شرایط نامساعد زمین‌شناسی رخ داده است.

فصل سوم

مدل‌های پیش‌بینی عملکرد TBM و مطالعات انجام شده

مطالعات زیادی برای پیش‌بینی عملکرد TBM انجام شده است. نتیجه بسیاری از این مطالعات تنها ارائه مدلی برای پیش‌بینی نرخ نفوذ بوده است. در بعضی از این مطالعات علاوه بر نرخ نفوذ، ضریب بهره‌وری نیز در نظر گرفته شده و در نهایت مدلی برای پیش‌بینی نرخ پیشروی ارائه شده است. اگرچه پیش‌بینی نرخ نفوذ موضوع این تحقیق نیست اما با توجه به این که مطالعات کمی در مورد پیش‌بینی ضریب بهره‌وری انجام شده و از طرف دیگر به خاطر لزوم تخمین نرخ نفوذ در پیش‌بینی نرخ پیشروی، در این بخش مدل‌هایی که تنها برای این منظور ارائه شده‌اند نیز به طور مختصر معرفی شده‌اند. مدل‌های CSM^1 ، $NTNU^2$ و Q_{TBM} که جامع‌تر و پر کاربردتر از سایر مدل‌های پیش‌بینی نرخ پیشروی هستند و از طرف دیگر روابطی برای پیش‌بینی ضریب بهره‌وری نیز در آنها ارائه شده است، به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۳-۲- مدل‌های پیش‌بینی عملکرد TBM

به طور کلی می‌توان مدل‌های پیش‌بینی عملکرد TBM را در دو گروه اصلی ذیل تقسیم‌بندی نمود (Rostami et al., 1997).

- مدل‌های تجربی که بر اساس اندازه‌گیری نرخ پیشروی TBM و بعضی از خصوصیات توده سنگ توسعه یافته‌اند.
 - مدل‌های تئوری - تجربی که بر اساس تست‌های آزمایشگاهی و نیروی برش توسعه یافته‌اند.
- هر کدام از این مدل‌ها مزایا و همچنین معایب یا به عبارتی دیگر محدودیت‌هایی دارند. در ادامه این مدل‌ها و تحقیقات انجام شده در مورد عملکرد TBM بررسی می‌شود.

¹Colorado School of Mines

²Trondheim Norwegian University of Science and Technology

۳-۲-۱- مدل‌های تجربی

این مدل‌ها به دو گروه که یا بر اساس مطالعات آزمایشگاهی و یا بر اساس اطلاعات پروژه‌های اجرا شده بنا شده‌اند، تقسیم‌بندی می‌شوند. این مدل‌های تجربی بر مبنای نرخ پیشروی اندازه‌گیری شده ماشین در انواع معین توده‌سنگ توسعه یافته‌اند. گراف‌ها و روابط پیشنهادی این مدل‌ها معمولاً به وسیله آنالیز رگرسیون بین خصوصیات توده‌سنگ، شرایط زمین، پارامترهای ماشین و نرخ نفوذ به دست می‌آید (Rostami et al., 1997). از این مدل‌ها می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود.

- تارکوی در سال ۱۹۷۳ با مطالعه بر روی سنگ‌هایی نظیر سنگ آهک، شیل، ماسه سنگ شیست و دولومیت نرخ نفوذ آنها تخمین زد. (Tarkoy, 1973).

$$ROP = 0.076 \text{ to } 3.72 \text{ m/h} \quad (۱-۳)$$

- گراهام^۱ در سال ۱۹۷۶ برای سنگ‌های با مقاومت فشاری تک محوری بین ۱۴۰ و ۲۰۰ مگاپاسکال، نرخ نفوذ را به طور تقریبی از رابطه زیر تخمین زد (USACE, 1997).

$$P_{rev} = 3940 F_n / UCS \quad (۲-۳)$$

که در آن:

P_{Rev} نفوذ به ازای هر دور چرخش کاترهد (mm/rev).

F_n نیروی رانش به ازای هر دیسک (KN) و

UCS مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر (MPa) می‌باشند.

^۱Graham

- فارمر و گلوپ^۱ در سال ۱۹۸۰ رابطه زیر را برای تعیین تقریبی نرخ نفوذ در سنگ‌های رسوبی ارائه کردند (USACE, 1997).

$$P_{rev} = 624F_n / \sigma_{tB} \quad (3-3)$$

که در آن:

P_{Rev} میزان نفوذ کاترهد به میلی متر به ازای یک دور چرخش،

σ_{tB} مقاومت کششی برزیلی بر حسب MPa و

F_n نیروی محوری اعمال شده بر هر دیسک بر حسب KN می‌باشند.

- نلسون^۲ و همکاران در سال ۱۹۸۳ با استفاده از اطلاعات حین اجرای ۴ تونل در سنگ‌های رسوبی رابطه‌ای را برای پیش‌بینی نرخ نفوذ بر اساس سختی سایشی ارائه نمود (Nelson et al., 1983).

$$P_{rev} = 10.45 - 1.19 H_A \quad (4-3)$$

که در آن:

P_{Rev} نفوذ به ازای هر دور چرخش کاترهد (mm/rev) و

H_A سختی سایشی که توسط تارکوی و هندرون^۳ ارائه شده است، می‌باشد.

¹ Farmer - Glossop

² Nelson

³ Tarkoy and Hendron

- بامفورد^۴ در سال ۱۹۸۴ با مطالعه بر روی عملکرد TBM در دو تونل که از سنگ‌های متنوعی تشکیل شده بودند، رابطه‌ای را به شکل زیر برای پیش‌بینی نرخ نفوذ بر اساس سختی سایشی ارائه نمود (Bamford 1984).

$$ROP = 0.535 S - 8.49 - 0.00344 T - 0.00023 N + 0.00137 \phi s \quad (۵-۳)$$

که در آن:

ROP نرخ نفوذ (m/h)،

S عدد چکش اشمیت،

T نیروی تراست ماشین (t)،

N شاخص نفوذ مخروطی^۵ (N/mm) و

ϕs زاویه اصطکاک داخلی (degree) می‌باشند.

- هیوز^۶ در سال ۱۹۸۶ رابطه‌ای را بر اساس حفاری در سنگ‌های پیرامونی لایه‌های زغال سنگ ارائه نمود. فرض شده است تنها یک دیسک با حرکت بر روی سنگ (زغال) شیار ایجاد می‌کند (Hughes, 1986).

$$P_{rev} = 1.667 (Fn / UCS)^{1.2} \times (2 / D)^{0.6} \quad (۶-۳)$$

که در آن:

P_{rev} نفوذ به ازای هر دور چرخش کاترهد (mm/rev) و D قطر دیسک (mm) می‌باشند.

- اینائورتو^۷ و همکاران در سال ۱۹۹۱ رابطه بین نرخ نفوذ، RSR (عدد طبقه‌بندی ویکه‌هام) و مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بکر ایجاد کردند که به صورت زیر است (Innaurato et al. 1991).

⁴ Bamford

⁵ Cone Indenter Index

⁶ Hughes

⁷ Innaurato

$$P_{rev} = 40.41 UCS^{-0.44} + 0.045RSR + 3.15 \quad (7-3)$$

با توجه به رابطه بالا، مقدار نرخ نفوذ بر حسب متر بر ساعت از رابطه ۳-۸ به دست می‌آید.

$$ROP = P_{rev} \times RPM \times 60 \quad (8-3)$$

در رابطه فوق علاوه بر مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بکر (بر حسب MPa) از سیستم طبقه‌بندی توده‌سنگ RSR استفاده شده که خود با توجه به مجموعه‌ای از پارامترهای توده‌سنگ به دست می‌آید. این سیستم طبقه‌بندی برای تحلیل پایداری و طراحی نگهداری تونل‌های سنتی ارائه شده است (Innaurato et al. 1991).

- پالمستروم در سال ۱۹۹۵ مدلی بر پایه شاخص توده‌سنگ RMI ارائه داد. در این مدل که هماهنگی زیادی با مدل NTNU دارد، از سه دسته پارامتر اصلی مقاومت سنگ بکر، درزه‌داری و نیروی وارد بر دیسک‌ها زیر برای پیش‌بینی عملکرد استفاده شده است (Palmstrom, 1994).

- یاگیز^۱ در سال ۲۰۰۷ با ارزیابی تاثیر خواص توده‌سنگ در عملکرد TBM، یک معادله تجربی برای تخمین عملکرد TBM بر اساس داده‌های به دست آمده از تونل انتقال آب کوئینز ۳ (مرحله دوم) بطول حدود ۷/۵ کیلومتر ارائه داد. وی رابطه‌ای را بر اساس خواص سنگ بکر، شاخص آزمایش پانچ و شرایط درزه‌ها با $(r = 0.82)$ ارائه داد (رابطه ۳-۹).

$$ROP = 1.093 + 0.029 PSI - 0.003UCS + 0.437 \text{Log}(\alpha) - 0.219 DPW \quad (9-3)$$

وی ابتدا به طور جداگانه نرخ نفوذ را برای هر کدام از خواص مهندسی سنگ به صورت رابطه‌ای ارائه نمود. سپس با تلفیق خواص سنگ، مدلی به دست آورد که بیشترین ضریب همبستگی را داشت (Yagiz, 2007).

یاگیز در سال ۲۰۰۹ با دو تکنیک رگرسیون غیر خطی و شبکه‌های عصبی مصنوعی مدلی برای مرتبط کردن عملکرد TBM با پارامترهای توده‌سنگ شامل مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت

^۱Yagiz

کششی برزیلی، اندیس تردی، فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها و زاویه آلفا ارائه نمود. مدل رگرسیونی به دست آمده مطابق رابطه ذیل می‌باشد (Yagiz, 2009).

$$ROP = 0.076 + 0.139UCS + 0.524 BI + 0.633 \alpha^{0.205} - 0.234 DPW \quad (10-3)$$

پارامترهای به کار رفته در این روابط به شرح ذیل است.

ROP: نرخ نفوذ (m/h)،

PSI: شاخص بیشترین شیب در نمودار نیرو-جابجایی در آزمایش پانچ،

UCS: مقاومت فشاری تک‌محوره (MPa)،

BI: مقاومت کششی برزیلی (MPa)،

α : زاویه بین محور تونل و صفحه ناپیوستگی در سطح تونل (Degree) و

DPW: فاصله بین صفحات ضعف در سطح مقطع تونل (m) می‌باشند.

- بیناوسکی در سال ۲۰۰۶ مدلی را برای پیش‌بینی میانگین نرخ پیشروی TBM براساس قابلیت حفاری توده‌سنگ، RME^8 ، ارائه و در سال ۲۰۰۷ آنرا به روز نمود. پارامترهایی که برای به دست آوردن RME مورد نیاز می‌باشد در جدول ۱-۲ آورده شده است (Bieniawski, 2007).
- نحوه امتیازدهی RME مانند سیستم طبقه‌بندی RMR است. پارامترهای مورد نیاز شامل مقاومت فشاری تک محوری، قابلیت چالخوری^۹، شرایط ناپیوستگی‌ها در سینه‌کار، زمان خود ایستایی و شرایط آب زیرزمینی است (Bieniawski, 2007). قابلیت چالخوری به وسیله دو آزمایش سختی سطحی^{۱۰} و آزمایش تردی^{۱۱} تعیین می‌شود. شکل ۳-۱ نحوه تعیین DRI را به وسیله این دو آزمایش نشان می‌دهد (Bruland, A, 1998).

⁸ Rock Mass Excavability

⁹ DRI (Drilling Rate Index)

¹⁰ Sievers' J Value, SJ

¹¹ Brittleness Value, S₂₀

جدول ۱-۳- پارامترهای مورد نیاز برای به دست آوردن RME_{07} (Bieniawski, 2007)

Uniaxial Compressive Strength of Intact Rock [0-25 points]										
σ_c (MPa)	<5		5-30		30-90		90-180		>180	
Average rating	4		14		25		14		0	
Drillability [0-15 points]										
DRI	>80		80-65		65-50		50-40		<40	
Average rating	15		10		7		3		0	
Discontinuities at Tunnel Face [0-30 points]										
Homogeneity		Number of joints per meter					Orientation with respect to tunnel axis			
Homogeneous		Mixed	0-4	4-8	8-15	15-30	>30	Perpendicular	Oblique	Paralell
Average rating	10	0	2	7	15	10	0	5	3	0
Stand-Up Time [0-25 points]										
Hours	<5		5-24		24-96		96-192		>192	
Average rating	0		2		10		15		25	
Groundwater Inflow [0-5 points]										
Liters/sec	>100		70-100		30-70		10-30		<10	
Average rating	0		1		2		4(0)		5	

* For argillaceous rocks.

اگر امتیاز هر کدام از پارامترهای پنج گانه این جدول صفر باشد، میانگین نرخ پیشروی بدون توجه به RME به دست آمده از جدول ۱-۳، کمتر از ۲ متر در روز در نظر گرفته می‌شود. رابطه بین

RME و میانگین نرخ پیشروی (ARA) مطابق روابط ذیل است (Bieniawski, 2007).

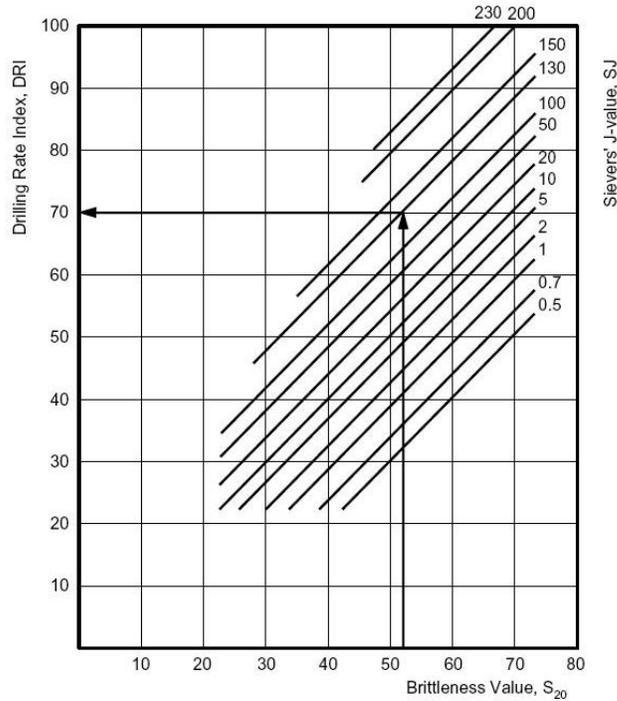
$$ARA_T = 0.813 \times RME_{07} - 32.56 \quad (\sigma_c < 45) \quad (11-3)$$

$$ARA_T = 0.597 \times RME - 24.88 \quad (\sigma_c > 45) \quad (12-3)$$

نرخ پیشروی متوسط تئوری با توجه به ضرایب تصحیح مطابق رابطه ۱۳-۳ خواهد بود. در این

رابطه ARA_T نرخ پیشروی تئوری و ARA_R نرخ پیشروی پیش‌بینی واقعی می‌باشد.

$$ARA_T = ARA_R / (F_E \cdot F_A \cdot F_d) \quad (13-3)$$



شکل ۳-۱- تعیین DRI به وسیله آزمایش SJ و S_{20} (Bruland, A, 1998)

روابط فوق برای تونل‌های با قطر ۱۰ متر توسعه داده شده است. ضریب F_d برای تصحیح قطر تونل ارائه شده است که با استفاده از فرمول ذیل محاسبه می‌شود. در این رابطه D قطر تونل بر حسب متر است. ضرایب F_E و F_A در جدول‌های ۳-۲ و ۳-۳ ارائه شده است (Bieniawski, 2007b).

$$F_d = -0.007D^3 + 0.1637D^2 - 1.2859D + 4.5158 \quad (3-14)$$

جدول ۳-۲- ضریب F_E (Bieniawski, 2007b)

F_E	تأثیر مدیریت نفرات
۰/۸۸	ناکارآمد
۱	کارآمد
۱/۱۵	بسیار کارآمد

جدول ۳-۳- ضریب F_A (Bieniawski, 2007b)

F_A	طول حفاری شده تونل
-------	--------------------

(کیلومتر)	
۰/۶۸	۰/۵
۰/۸۰	۱
۰/۹۰	۲
۱/۰۰	۴
۱/۰۸	۶
۱/۱۲	۸
۱/۱۶	۱۰
۱/۲۰	۱۲

در این مدل پارامترهای زیادی مانند مقاومت فشاری نامحصور، قابلیت چالخوری، شرایط ناپیوستگی‌ها در سینه کار، زمان خود ایستایی و شرایط آب زیرزمینی در نظر گرفته شده که می‌تواند نقطه قوت آن باشد. از طرف دیگر تاثیر تجربه پرسنل، عمق قطر تونل به صورت ضرایب تصحیح در آن لحاظ شده است که می‌تواند تا حدی معرف تاثیر شرایط بر بهره‌وری دستگاه باشد. اما در این مدل، نرخ نفوذ و ضریب بهره‌وری به تفکیک پیش‌بینی نمی‌شود.

• گونگ و ژائو در سال ۲۰۰۹ داده‌های گرفته شده از تونلی در سنگاپور و به کمک تحلیل رگرسیون غیرخطی به منظور پیش‌بینی عملکرد TBM رابطه‌ای را برای تخمین نرخ نفوذ ارائه کردند (Gong and Zhao, 2009). در نهایت مدل رگرسیونی غیرخطی و چند متغیره زیر برای ارتباط بین اندیس ویژه قابلیت حفاری و پارامترهای توده‌سنگ به صورت معادله زیر ارائه دادند.

$$BI = 37.06 UCS^{0.26} + Bi^{-0.1} (0.84e^{-0.05Jv} + e^{-0.09\sin(\alpha + 30)}) \quad (15-3)$$

که در آن BI: اندیس ویژه قابلیت حفاری توده‌سنگ (kN/cutter/mm/rev)، UCS: مقاومت فشاری تک محوری سنگ (MPa)، Bi: اندیس تردی سنگ، Jv: تعداد درزه در هر متر مکعب، α : زاویه بین محور تونل و صفحه درزه (درجه) می‌باشد.

- حسن پور و همکاران در سال ۲۰۰۹ با مطالعه حدود ۹ کیلومتر از تونل انتقال آب کرج که در سنگ‌های پیروکلاستیک حفاری شده است، رابطه بین اندیس نرخ نفوذ میدانی^۱ و مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بکر و فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها ارائه نمود (Hassanpour et al., 2009).

$$FPI = \exp(0.005 UCS - 0.002 A^{-2} + 2.338) \quad R^2 = 0.583 \quad (۱۶-۳)$$

در این رابطه FPI اندیس نرخ نفوذ میدانی (mm/rev) $FPI = F_n / P_{rev}$ ، UCS مقاومت فشاری تک-محوره (MPa) و A فاصله بین ناپیوستگی‌ها در سطح مقطع تونل (m) می‌باشد.

- خادمی و همکاران در سال ۲۰۱۰ یک مدل آماری برای پیش‌بینی عملکرد TBM بر مبنای پایگاه داده‌ای تشکیل داده شده از بخشی از تونل نوسود، بر اساس اندیس نفوذ میدانی (FPI) و پارامترهای ورودی RMR ارائه نمودند. (Khademi et al., 2010).

$$FPI = 4.785 + 0.107 UCS + 0.09RQD + 0.633 JC - 0.234 \text{Log } \alpha \quad (۱۷-۳)$$

FPI: اندیس نرخ نفوذ میدانی، UCS: مقاومت فشاری تک‌محوره (MPa)، JC: امتیاز شرایط درزه‌ها در RMR و α : زاویه بین محور تونل و صفحه ناپیوستگی در سطح تونل (Degree)

۳-۲-۲- مدل‌های تئوری-تجربی

این مدل‌ها که روابطی را برای پیش‌بینی عملکرد TBM ارائه می‌دهند بر اساس مطالعاتی که بر مبنای نیروی کاتر و مطالعاتی که بر مبنای انرژی ویژه استوارند، تقسیم‌بندی شده‌اند. از این نوع مدل‌ها می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود.

- راکسبورو و فیلیپس^۱ در سال ۱۹۷۵ بر اساس اصول کلی هندسه کاتر یک رابطه تئوری برای محاسبه نیروی غلتشی دیسک کاترهای V شکل ارائه نمودند. این رابطه به شرح ذیل است (Roxborough and Phillips, 1975).

^۱ Field Penetration Index (FPI)

$$F_n = 4\sigma_c \tan \frac{\phi}{2} \sqrt{DP^3 - P^4} \quad (18-3)$$

در این رابطه F_n نیروی عمودی موثر برکاتر، σ_c مقاومت تک محوری سنگ بکر، D قطر دیسک، P میزان نفوذ و ϕ زاویه نوک کاتر گوه‌ای شکل است. نیروی غلتشی از رابطه ذیل تخمین زده می‌شود.

$$F_R = 4\sigma_c P^2 \tan \frac{\phi}{2} \quad (19-3)$$

- سنودن^۲ و همکاران در سال ۱۹۸۲ رابطه‌ای را بر اساس نیروهای قائم و غلتشی ارائه نمودند. آنها از یک دیسک منفرد V شکل با قطر ۲۰۰ میلی‌متر استفاده کردند تا نشان دهند با بهینه نمودن فاصله کاترها، نسبت به نفوذ کاتر در هر دور چرخش، انرژی ویژه برش به حداقل می‌رسد. آنها رابطه ذیل را بین نرخ نفوذ و نیروی های قائم و غلتشی برای گروهی از سنگ‌های بریتانیا پیشنهاد نمودند (Snowdon et al., 1982).

$$F_{NORMAL} / F_{ROLLING} = 21.71 \times P_{rev}^{-0.656} \quad (20-3)$$

- سانویو^۱ در سال ۱۹۸۵ با فرض مدلی بر اساس نیاز به تنش کششی برای تشکیل تراشه، معادلاتی را برای تخمین نیروی کاتر معرفی نمود (Sanio, 1985).

$$F_n = 2 p \tan (\phi / 2) \sigma \quad (21-3)$$

در این رابطه ϕ زاویه راس کاتر و σ تنش هیدرواستاتیک در ناحیه خرد شده و p میزان نفوذ می‌باشد. سانویو یک فرمول برای تخمین فشار ناحیه خرد شده از سختی شکاف و همچنین توسعه آن برای در نظر گرفتن اثر درزه‌ها با در نظر گرفتن یک معادله به عنوان جهت‌داری درزه، پیشنهاد نمود (Sanio, 1985). روابط فوق برای کاترهای V شکل که امروزه کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند، توسعه داده شده‌اند.

¹Roxborough and Phillips

²Snowdon

¹Sanio

- بوید^۲ در سال ۱۹۸۶ مدلی با دیدگاه کاملاً متفاوت ارائه نمود. فرض شده که انرژی ویژه‌ای برای خرد کردن توده سنگ نیاز است. اگر سطح مقطع تونل و توان کاری دستگاه حفاری مشخص باشد، نرخ نفوذ را می‌توان از رابطه ذیل به دست آورد (Boyd, 1986).

$$ROP = (HP \times UCS) / (\alpha \times A) \quad (22-3)$$

در این رابطه ROP نرخ نفوذ (m/h)، HP توان کاترهد بر حسب اسب بخار، UCS مقاومت فشاری تک‌محوره (MPa)، α زاویه بین محور تونل و صفحه ناپیوستگی در سطح تونل (Degree)، A فاصله بین صفحات ضعف در سطح مقطع تونل (m) می‌باشد.

- ساتو^۱ و همکاران در سال ۱۹۹۱ مطالعات سانپو را ادامه داد با این تفاوت که به جای برش خطی از برش دورانی استفاده نمود و رابطه ذیل را ارائه نمود (Sato et al., 1991).

$$F = k \times P^a \times S^b \quad (23-3)$$

در این رابطه F نیرو، k ضریب برش، P نفوذ، a ضریب نفوذ (حدود ۰/۵ تا ۱)، S فاصله‌داری دیسک‌ها، و b ضریب فاصله‌داری (حدود ۰/۵) می‌باشد.

۳-۳- مدل‌های اصلی پیش‌بینی عملکرد TBM

امروزه مدل‌های CSM، NTNU و Q_{TBM} پرکاربردترین مدل‌های پیش‌بینی عملکرد TBM هستند که مبانی متفاوتی دارند. در این بخش به بررسی این مدل‌ها پرداخته می‌شود.

۳-۳-۱- مدل CSM

این مدل تئوری - تجربی طی مطالعاتی در دانشکده معدن کلرادو توسعه یافته و اولین نسخه آن توسط اوزدمیر و همکاران در سال ۱۹۷۷ ارائه شده است (Ozdemir, 1977). این مدل نیروی مورد نیاز

²Boyd
¹Sato

برش سنگ را در یک مقدار نفوذ معین برحسب میلیمتر بر دور کاترهد، بر مبنای هندسه برش و شکل دیسک کاتر تخمین میزند.

مدل CSM بر مبنای بانک اطلاعاتی حاصل از آزمایش بزرگ مقیاس برش خطی^۱ بر روی انواع سنگ بنا شده است (Rostami, et al., 1997). این مدل به صورت مستقیم تاثیر ناپیوستگی‌های توده‌سنگ را در نظر نمی‌گیرد اما اصلاحاتی برای لحاظ نمودن تاثیر شرایط توده‌سنگ در پیش‌بینی عملکرد TBM در این مدل توسط یاگیز، شیما^۲ و رمضان زاده پیشنهاد شده است (Ramezanzadeh et al, 2008).

مطالعات نشان می‌دهد که هندسه کاتر تاثیر زیادی روی نیروهای اعمال شده بر آن دارد. در دیسک کاترها، نیروی وارد بر کاتر با افزایش فاصله دو کاتر مجاور و عمق نفوذ آنها افزایش می‌یابد. همچنین یک فاصله داری بهینه برای یک نرخ نفوذ معین وجود دارد که در آن انرژی ویژه حداقل است. در زیر دیسک کاترها، هنگامی که در سنگ نفوذ می‌کنند یک منطقه خرد شده که حباب فشار^۳ نامیده می‌شود، تشکیل می‌شود. این ناحیه تنش را به سنگ منتقل می‌کند. شکل این منطقه مشخص نشده است اما به منظور ساده سازی دایره فرض می‌شود (Rostami and Ozdemir, 1993).

برای تعیین مقدار فشار ناحیه خرد شده که برای گسترش ترک‌ها میان دو برش مجاور کافی باشد، یک راه حل کلی به دست نیامده است. اما برای تخمین فشار می‌توان از رابطه میان نیروهای برش و پارامترهای برش استفاده نمود. برای این منظور از بانک اطلاعاتی که بر مبنای آزمایش برش خطی در سنگ‌های مختلف و با هندسه‌های مختلف برش تهیه شده، استفاده شده است. این بانک اطلاعاتی شامل فشار تخمین زده شده، فاصله‌داری و عمق نفوذ، قطر و عرض لبه آن، مقاومت فشاری و کششی سنگ است. روابط مورد نیاز برای تخمین عمق نفوذ دیسک در سنگ از تحلیل رگرسیون این داده‌ها به دست آمده است (Rostami and Ozdemir, 1993).

¹Linear Cutting Test

²Cheema

³Pressure Bulb

رستمی در سال ۱۹۹۷ در روش CSM روابط زیر را به صورت موفق در پروژه‌های مختلف استفاده کرد. در این رابطه C ثابتی است که مقدار آن حدود ۲/۱۲ است.

$$P^0 = C_3 \sqrt{\frac{S}{\Phi \sqrt{RT}}} \sigma_c^2 \sigma_t \quad (24-3)$$

$$F_n = F_t \cos(\Phi/2) \quad , \quad F_r = F_t \sin(\Phi/2) \quad (25-3)$$

رستمی همچنین روابطی برای محاسبه تراست موردنیاز، گشتاور چرخشی، سرعت چرخش کاترهد و توان مورد نیاز ارائه نموده است (Rostami, et al., 1997 and Rostami, and Ozdemir 1993). بعضی از محققین مانند شیما در سال ۱۹۹۹ و یاگیز در سال ۲۰۰۲ روابطی را برای تصحیح نرخ نفوذ پیش‌بینی شده توسط مدل CSM با در نظر گرفتن شرایط توده‌سنگ ارائه نمودند. رمضان‌زاده نیز روابطی برای تصحیح نرخ نفوذ پیش‌بینی شده توسط مدل CSM پیشنهاد نمود (Ramezanzadeh et al., 2008).

• بهره‌وری در مدل CSM

موسسه مکانیک زمین دانشکده معدن کلرادو رابطه‌ای را بر اساس RQD برای لحاظ نمودن اثر توده‌سنگ توسعه داده است (USACE, 1997).

$$MPaF1 = 1 + (100 - RQD) / 150 \quad UCS < 110 \quad (26-3)$$

$$MPaF1 = 1 + (100 - RQD) / 75 \quad UCS \geq 110 \quad (27-3)$$

فرسایش دیسک‌ها نیز علاوه بر بالا بردن هزینه باعث کاهش نرخ پیشروی می‌شود. بر اساس بانک اطلاعاتی این مدل، زمان تعویض یک دیسک ۱/۵ ساعت در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که چند دیسک هم‌زمان تعویض شوند، زمان تعویض هر دیسک به ۳۰ تا ۴۰ دقیقه کاهش می‌یابد. در صورت وجود آب زیرزمینی این زمان بیشتر می‌شود (USACE, 1997).

بر اساس پایگاه داده‌ای موسسه مکانیک زمین دانشکده معدن کلرادو، فرسایش دیسک‌ها تا زمانی که قطر دیسک‌ها تا حدود ۴۰ میلیمتر کاهش نیافته تأثیری بر نرخ نفوذ ندارد. زمان توقف به منظور

تعویض دیسک در سنگ‌های غیر ساینده حدود ۳ درصد زمان شیفت است که در سنگ‌های ساینده تا ۲۰ درصد نیز افزایش می‌یابد. زمان تعویض دیسک همچنین به صورت ساعت بر متر نیز بیان می‌شود. این زمان در سنگ‌های غیر ساینده ۰/۰۲ تا ۰/۰۵ ساعت بر متر و در سنگ‌های ساینده ۰/۲ ساعت بر متر است (USACE, 1997). مدل CSM ضریب F2 را برای تصحیح عمر کاتر در مسیرهای قوسی بر اساس شعاع قوس برحسب متر برای توده‌سنگ با $RQD=100$ ، پیشنهاد نموده است.

$$F2=1 - 23/R \quad (28-3)$$

این مدل بر مبنای بانک اطلاعاتی خود، تاخیرات مرتبط با دیوارگیری مجدد^۱ را توسط رابطه ذیل پیشنهاد می‌کند. در این رابطه R شعاع قوس تونل برحسب متر است.

$$F3 \text{ (hr/m)} = 0.030 \text{ (hr/m)} + (409 \text{ m/hr}) / R^2 \quad (29-3)$$

برای در نظر گرفتن تعمیرات پیش‌بینی نشده ضریب F4 برحسب ساعت تاخیر پیشنهاد شده است. این ضریب در شروع حفاری (زمان آموزش) ۱ ساعت بر ساعت حفاری ماشین است. در ادامه حفاری این زمان ۰/۳۲۴ ساعت در نظر گرفته شده است. زمان تعمیرات دوره ای ۰/۰۶۷ ساعت بر ساعت حفاری ماشین است. تاخیرات نقشه‌برداری ۰/۰۰۳۳ ساعت بر متر حفاری TBM در نظر گرفته می‌شود. در قوس‌ها این زمان از رابطه ذیل به دست می‌آید.

$$\text{Survey delay} = 0.0033 + 192 / R^2 \quad \text{h/m} \quad (30-3)$$

تاخیری که به خاطر وجود مقادیر کم آب می‌توان توقع داشت، در حدود ۰/۰۰۵۶ ساعت بر متر حفاری است. برای شرایطی که مقدار آب به ۳ تا ۴ مترمکعب بر دقیقه بر متر طول تونل برسد، این تاخیر به حدود ۰/۰۸۵ ساعت بر متر حفاری می‌رسد. در دبی‌های بالاتر که عملیات تزریق نیز انجام می‌شود این تاخیر افزایش می‌یابد. به عنوان مثال وقتی مقدار آب به ۱۳ تا ۱۵ مترمکعب بر دقیقه بر

¹Regripping

متر طول تونل می‌رسد، این تاخیر به ۲ ساعت می‌رسد. تاخیرات ناشی از تخلیه مواد حفاری شده با توجه به شیب تونل و جهت حفاری در جدول ۳-۴ آورده شده است (USACE, 1997).

جدول ۳-۴- تاخیرات سیستم ترابری (USACE, 1997)

تاخیر (h/m)	روش حمل و نقل	شرایط تونل
۰/۱۱۵	کامیون	شروع حفاری تونل
۰/۰۷۱	نوارنقاله	۱۵- درجه تا ۱- درجه به سمت پایین
۰/۰۵۶	قطار	۱- درجه تا ۳+ درجه
۰/۰۷۱	نوارنقاله	۳+ درجه تا ۱۵+ درجه به سمت بالا

تاخیرات ناشی از لجستیک تونل نیز به شیب تونل (G، شیب تونل بر حسب درجه) بستگی دارد که مطابق رابطه زیر است.

$$\text{Utility delays} = 0.030 + 0.0013G \quad \text{h/m} \quad (3-31)$$

تاخیر ناشی از نصب نگهداری موقت در ارتباط با RMR در جدول ۳-۵ آورده شده است. این مدل تاخیرات ناشی از تعویض شیفت، ناهار و غیره را به طور کلی ۲/۵ درصد زمان شیفت پیشنهاد می‌کند (USACE, 1997).

جدول ۳-۵- تاخیر ناشی از نصب نگهداری موقت (USACE, 1997)

تاخیر (h/m)	کلاس RMR
۰	I, II, III
۰/۰۲۸	IV
۰/۰۴۳	V

۳-۳-۲- مدل NTNU

این مدل که به طور گسترده‌ای در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد، توسط دانشگاه علوم و تکنولوژی تروندهایم توسعه پیدا کرده است. مدل NTNU پس از شروع حفاری مکانیزه در نروژ توسعه پیدا کرده و با استفاده از اطلاعات جدید به روز شده است. این مدل بر مبنای اطلاعات سیستماتیک ۳۵ پروژه، بیش از ۲۵۰ کیلومتر تونل توسعه یافته است. جدول ۳-۶ پارامترهای این روش را به طور خلاصه نشان می‌دهد (Bruland, 1998b).

جدول ۳-۶- پارامترهای استفاده شده در مدل NTNU (Bruland, 1998b)

پارامترهای سنگ	پارامترهای ماشین
شکستگی‌ها، درزه‌داری و غیره شاخص میزان چالزنی (DRI)، سایندگی (AV) و CLI	نیروی رانش دیسک سرعت چرخش کاترهد فاصله ابزار برنده توان نسبی

نرخ نفوذ از روابط ذیل به دست می‌آید.

$$i_0 = (M_{ekv} / M_1)^b \quad (\text{mm/rev}) \quad (3-32)$$

$$I_0 = i_0 \text{RPM} (60 / 1000) \quad (\text{m/h}) \quad (3-33)$$

پارامترهای به کار رفته در این رابطه به شرح ذیل است.

i_0 نرخ نفوذ (mm/rev)

I_0 نرخ نفوذ (m/h)

M_1 نیروی رانش بحرانی (kN/c)، نیرویی که در آن، مقدار نفوذ ۱ میلیمتر بر دور کاترهد باشد.

M_{ekv} نیروی معادل پشت هر دیسک کاتر (kN/c)

b ضریب نفوذ

نیروی رانش بحرانی و ضریب نفوذ با توجه به گراف‌های ارائه شده در این مدل تعیین می‌شوند

(Bruland, 1998b).

• بهره‌وری در مدل NTNU

برای به دست آوردن بهره‌وری در این مدل، زمان عملیات مختلف بر حسب ساعت بر کیلومتر بیان می‌شود. ضریب بهره‌وری TBM از رابطه ذیل به دست می‌آید (Bruland, 1998b).

$$U = (100 T_b) / (T_b + T_t + T_c + T_{tbm} + T_{bak} + T_a) \% \quad (34-3)$$

T_b حفاری واحد که ساعت بر کیلومتر : با توجه به نرخ نفوذ (I_n) از رابطه ذیل به دست می‌آید.

$$T_b = 1000 / I_n \quad (h / km) \quad (35-3)$$

T_t دیوارگیری مجدد : این زمان به طول هر کورس جک‌های تراست بستگی دارد که از رابطه ذیل به دست می‌آید. در این رابطه I_s طول هر گام حفاری (معمولاً بین ۱/۵ تا ۲ متر) و T_{tak} زمان هر بار دیوارگیری است.

$$T_t = (1000 T_{tak}) / (60 I_s) \quad (h / km) \quad (36-3)$$

T_c زمان بازدید و تعویض دیسک کاترها: با توجه به عمر دیسک کاترها H_h ، نرخ نفوذ I_n و زمان مورد نیاز برای تعویض هر دیسک t_c به دست می‌آید.

$$T_c = (1000 t_c) / (60 H_h I_n) \quad (h / km) \quad (37-3)$$

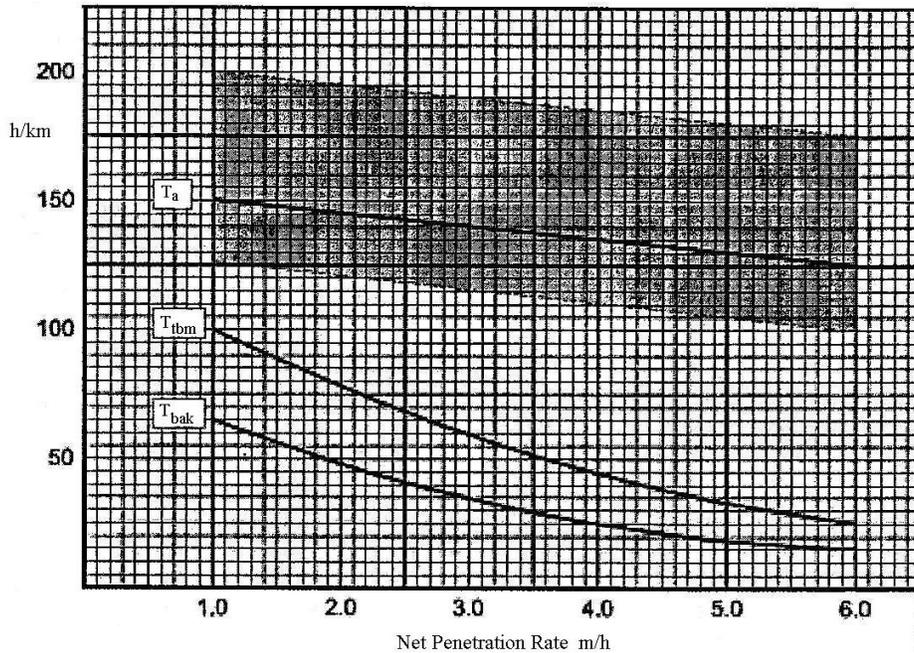
این زمان برای دیسک‌های با قطر ۱۷ اینچ و کمتر، ۴۵ دقیقه و برای دیسک‌های با قطر ۱۹ اینچ و بیشتر ۶۰ دقیقه پیشنهاد شده است (Bruland, 1998b).

T_{tbm} زمان تعمیر و سرویس ماشین

T_{bak} زمان تعمیر و سرویس سیستم پشتیبانی

T_a زمان توقفات متفرقه شامل زمان انتظار قطارهای خالی، نقشه برداری، نصب سیستم برق و غیره

که از شکل ۲-۳ به دست می‌آید (Bruland, 1998b).



شکل ۳-۲- زمان توقفات متفرقه و تعمیرات (Bruland, 1998b)

۳-۳-۳- مدل Q_{TBM}

این مدل توسط نیک بارتن^۱ در سال ۱۹۹۹ به منظور تخمین نرخ نفوذ و نرخ پیشروی TBM با مطالعه ۱۴۵ تونل و بر اساس سیستم طبقه‌بندی توده‌سنگ Q بنا شده است. تاثیر جهت‌داری ناپیوستگی‌ها، مقاومت فشاری و کششی سنگ بکر، شاخص عمرکاتر CLI و درصد کوارتز سنگ و پارامترهای موثر اندرکنش بین سنگ و ماشین در آن در نظر گرفته شده است (Barton, 1999). رابطه ذیل نحوه محاسبه Q_{TBM} را نشان می‌دهد (Barton, 2000).

$$Q_{TBM} = \left(\frac{RQD_0}{J_n} \right) \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \left(\frac{J_w}{SRF} \right) \left(\frac{SIGMA}{F^{10}/20^9} \right) \left(\frac{20}{CLI} \right) \left(\frac{q}{20} \right) \left(\frac{\sigma_\theta}{5} \right) \quad (3-38)$$

$$PR = Q_{TBM}^{(-1/5)} \quad (m/h) \quad (3-39)$$

در این روابط RQD_0 شاخص کیفی سنگ در جهت محور تونل، J_n عدد مربوط به تعداد دسته درزه، J_r عدد مربوط به زبری سطح درزه‌ها J_r و J_a و J_a عدد مربوط به دسته درزه‌ای است که به حفاری کمک

^۱Nick Barton

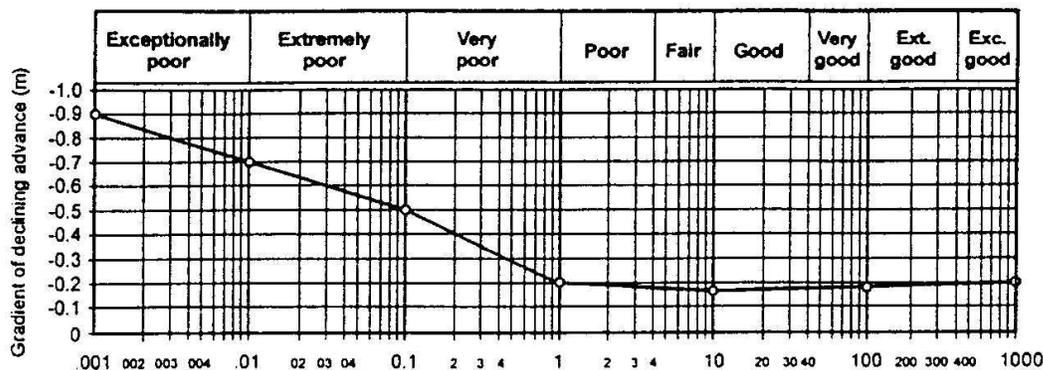
می‌کند)، J_a عدد مربوط به هوازدگی و دگرسانی درزه‌ها J_w عدد مربوط به وضعیت آب درزه‌ها، SRF ضریب کاهش تنش، F نیروی رانش میانگین یا نیروی متوسط وارد بر هر دیسک کاتر، SIGMA مقاومت توده‌سنگ، CLI شاخص عمر دیسک کاتر، q درصد کوارتز و σ_0 تنش دوبعدی وارد بر تونل است.

• بهره‌وری در مدل Q_{TBM}

در این مدل ضریب بهره‌وری با رابطه ذیل تعریف می‌شود.

$$U = T^m \quad (3-40)$$

در این رابطه T بر حسب ساعت و m با استفاده از شکل ۳-۳ به دست می‌آید. پارامتر m تابعی از Q توده‌سنگ است.



$$\text{Rock mass quality } Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \times \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \times \left(\frac{J_w}{SRF} \right)$$

شکل ۳-۳- تخمین اولیه m با استفاده از Q توده سنگ (Barton, 2000)

مقادیر اولیه m با توجه به Q توده‌سنگ، مطابق رابطه ذیل اصلاح می‌شود. در این رابطه این مقدار با توجه به مقادیر CLI، درصد کوارتز و تخلخل تصحیح شده و نسبت به قطر ۵ متر نرمال شده است. مقدار m_1 نیز با استفاده از جدول ۳-۷ به دست می‌آید (Barton, 1999).

$$m = m_1 \left(\frac{D}{5}\right)^{0.2} \left(\frac{20}{CLI}\right)^{0.15} \left(\frac{q}{20}\right)^{0.1} \left(\frac{n}{2}\right)^{0.05}, U = T^m \quad (41-3)$$

جدول ۳-۷- تخمین m_1 با استفاده از Q توده سنگ (Barton, N., 1999)

۱۰۰۰	۱۰۰	۱۰	۱	۰/۱	۰/۰۱	۰/۰۰۱	Q
-۰/۲۱	-۰/۱۹	-۰/۱۷	-۰/۲۲	-۰/۵	-۰/۷	-۰/۹	m_1

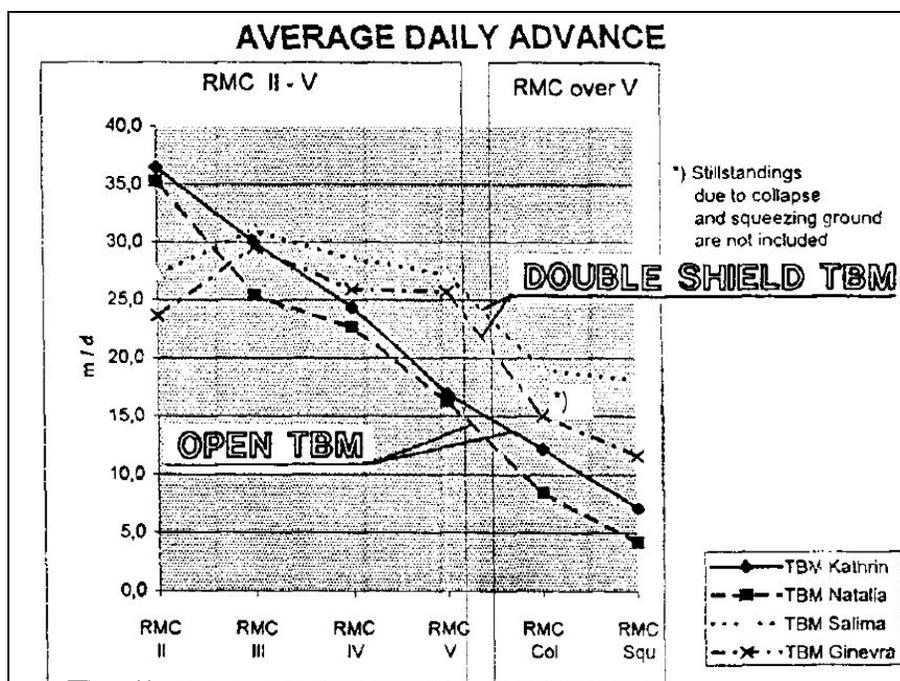
همانطور که در رابطه فوق مشاهده می‌شود، چهار عامل قطر تونل (D)، مقدار کوارتز سنگ (q)، تخلخل (n) و شاخص عمر دیسک کاتر (CLI) بر مقدار شیب منفی m تاثیر می‌گذارند. اثر قطر تونل به این دلیل است که در تونل‌های بزرگتر، نیاز به نگهداری افزایش می‌یابد و این موضوع باعث کاهش ضریب بهره‌وری می‌شود. سایر عوامل بر روی زمان تعویض دیسک‌ها تاثیر می‌گذراند (Barton, 2000).

۳-۴- سایر مطالعات انجام شده

بعضی از محققین با استفاده از روش‌هایی مانند روش‌های عددی، شبکه عصبی و مدلسازی فازی برخی از خواص سنگ بکر و یا طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ مطالعاتی را در مورد تاثیر شرایط توده-سنگ، وضعیت درزه‌ها، بر نرخ نفوذ و یا عملکرد TBM انجام داده‌اند که در ذیل به مواردی از آنها اشاره می‌شود.

گرانروی^۱ و همکاران در سال ۱۹۹۵ نموداری را برای نشان دادن رابطه نرخ پیشروی و کلاس توده‌سنگ بر اساس RMR پیشنهاد کردند که در شکل ۳-۴ نشان داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که نرخ پیشروی در RMR class III برای D.S. TBM حداکثر می‌باشد. در حالیکه نرخ پیشروی در کلاسهای I و V به حداقل می‌رسد (Grandori, et al., 1995).

^۱Grandori



شکل ۳-۴- پیش‌بینی نرخ پیشروی بر اساس RMR (Grandori, et al., 1995)

عبدالجلیل در سال ۱۹۹۸ طی مطالعات خود بر روی نرخ پیشروی روابط تخمین نرخ نفوذ را بر اساس زمان شیفت، زمان کار TBM و طول حفاری شده تقسیم‌بندی نمود (Abd Al-Jalil, 1998). گریمما و همکاران در سال ۲۰۰۰ با تقسیم‌بندی عوامل موثر بر نرخ نفوذ به سه گروه توده‌سنگ، خواص ماشین و هندسه تونل، با استفاده از روش عصبی- فازی هیبریدی مدلی را برای تخمین نرخ نفوذ و نرخ پیشروی TBM ارائه کردند (Grima, 2000).

ساپینی^۱ و همکارانش در سال ۲۰۰۲ با مطالعه بر روی ۱۴ کیلومتر تونل در کوه‌های آلپ نتیجه گرفتند که نرخ پیشروی مناسب برای ماشین‌ها در محدوده RMR بین ۴۰ تا ۷۰ و Q بین ۵ تا ۱۵ به دست می‌آید. از طرف دیگر مطالعات آنها نشان داد پایین‌ترین نرخ پیشروی مربوط به سنگ‌های خیلی ضعیف ($RMR < 30-40$) و خیلی مقاوم ($RMR > 70-80$) می‌باشد (Sapigni et al., 2002).

تعدادی از محققین بر روی تاثیر ناپیوستگی‌ها بر نرخ نفوذ مطالعاتی انجام داده‌اند. در مدل‌های NTNU و Q_{TBM} نیز به نحوی این مسئله در نظر گرفته شده‌است. گونگ و همکاران در سال‌های

^۱Sapigni

۲۰۰۴ و ۲۰۰۵ تاثیر جهت‌داری درزه‌ها و همچنین تاثیر فاصله‌داری درزه‌ها بر خردایش سنگ توسط TBM را با مدل سازی عددی مورد مطالعه قرار دادند (Gong, et al., 2004 and 2005).
بناردوس نرخ پیشروی TBM را با استفاده از پارامترهایی مانند RMR ، UCS ، RQD و همچنین با در نظر گرفتن ضریب پایداری، شرایط آب زیرزمینی و عمق تونل، با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی تخمین زد (Benardos et al., 2004a). با در نظر گرفتن پارامترهای مقاومتی سنگ بکر در بخشی از قطعه اول تونل انتقال آب کرج مطالعه دیگری برای پیش‌بینی نرخ نفوذ با استفاده از روش‌های آماری انجام شد (Mansori, et al., 2009).

از محدود مطالعاتی که به منظور تخمین ضریب بهره‌وری انجام شده است می‌توان به مطالعات کیم و لاوتون اشاره نمود. کیم در سال ۲۰۰۴ به منظور تعیین ضریب بهره‌وری از مدل منطق فازی^{۱۲} استفاده نمود. برای این منظور هر دو روش ممدانی و سوگنو را به کار برد. پارامترهای ورودی مورد استفاده شامل قطر تونل، RMR ، RQD و آب زیرزمینی بوده که برای تخمین ضریب بهره‌وری به کار برده شدند. داده‌های مورد نظر از سه تونلی که با Open TBM حفاری شده‌اند گردآوری شده بود (Kim, 2004). لاوتون در سال ۱۹۹۸ به ارزیابی تاثیر شرایط مختلف توده‌سنگ بر عملکرد TBM پرداخته است (Laughton, 1998).

۳-۵- بحث در مورد مدل‌های پیش‌بینی عملکرد

۳-۵-۱- مدل‌های تجربی و تئوری - تجربی

گروهی از مدل‌های مورد بررسی، با استفاده از پارامترهای مقاومتی سنگ بکر، روابطی برای پیش-بینی نرخ نفوذ ارائه داده‌اند که تنها در محدوده مشخصی از نظر مقاومت سنگ و یا جنس آن به کار

¹² Fuzzy Logic Model

می‌روند. رابطه ارائه شده توسط یاگیز شرایط ناپیوستگی‌ها را نیز در نظر می‌گیرد. گروهی دیگر از مدل‌ها با استفاده از کلاس‌های طبقه‌بندی مهندسی سنگ مانند RSR به صورت کلی نرخ نفوذ را پیش‌بینی می‌کنند.

برخی از مدل‌های تئوری - تجربی بر اساس دیسک کاترهای V شکل ارائه شده‌اند. در حال حاضر این نوع کاترها به خاطر افت بازدهی پس از کند شدن لبه آن، مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. به طور کلی این روابط بر اساس نیروی پشت کاتر و پارامترهای مقاومتی سنگ بکر توسعه یافته‌اند. تنها بویید در ۱۹۸۶ زاویه بین محور تونل و صفحه ناپیوستگی را به عنوان عاملی موثر در نرخ نفوذ در نظر گرفته است. ساتو نیز به تاثیر فاصله داری کاترها در نرخ نفوذ توجه نموده است.

به طور کلی این مدل‌ها برای پیش‌بینی نرخ نفوذ توسعه یافته‌اند. حتی در مدل‌های تجربی نیز از تجربیات پروژه‌های مورد مطالعه برای تخمین بهره‌وری و نرخ پیشروی دستگاه حفاری استفاده نشده است. در مدل RME نیز تنها تاثیر تجربه پرسنل، عمق و قطر تونل به صورت ضرایب تصحیح لحاظ شده است.

۳-۵-۲- مدل‌های CSM ، NTNU و QTBM

مدل‌های CSM ، NTNU پرکاربردترین روش‌های پیش‌بینی نرخ پیشروی می‌باشند. مدل QTBM نیز از مقبولیت نسبی برخوردار است. این مدل‌ها مبنای متفاوتی دارند و معمولاً در یک پروژه دو روش در کنار هم به کار می‌روند. مدل CSM بر اساس آزمایش برش خطی که می‌تواند نیروهای مورد نیاز برای برش سنگ و پارامترهای مربوط به آنرا اندازه گیری کند، بنا شده است. با این روش می‌توان با در نظر گرفتن مشخصات ماشین، نیروی مورد نیاز برای دستیابی به عملکرد تعیین شده را به دست آورد. در این مدل تاثیر ناپیوستگی‌ها در نرخ نفوذ TBM در نظر گرفته نمی‌شود (Rostami et al., 1997).

مدل NTNU براساس عملکرد TBM در پروژه‌های اجرا شده و داده‌هایی مانند پارامترهای عملیاتی ماشین و خصوصیات توده‌سنگ توسعه یافته است. در این مدل، نرخ نفوذ نسبت به شرایط ناپیوستگی‌ها بسیار حساس است و از طرف دیگر جزئیات نیروهای برشی را شامل نمی‌شود (Rostami et al., 1997).

روش Q_{TBM} بر اساس روش طبقه بندی توده‌سنگ Q بنا شده است و در مجموع پارامترهایی زیادی را در بر می‌گیرد به طوری که بعضی پارامترهای به کار رفته در آن با هم همپوشانی دارند. تعداد زیادی از پارامترهای مورد نیاز Q_{TBM} از سیستم Q که اساساً به منظور تحلیل پایداری و تخمین نگهداری مورد نیاز توسعه یافته، گرفته شده است. در این مدل اثر متقابل ماشین و توده‌سنگ را در نظر گرفته نشده است (Sapigni et al., 2002 and Rostami et al., 1997). مدل‌های پیش‌بینی عملکرد TBM به طور خلاصه در جدول ۳-۸ آورده شده است.

۳-۶- ضریب بهره‌وری در مدل‌های مختلف

همانطور که بیان شد، اکثر مدل‌های پیش‌بینی عملکرد TBM تنها به ارائه رابطه‌ای برای تخمین نرخ نفوذ توسعه یافته‌اند. در مدل‌های CSM، NTNU و Q_{TBM} روش‌هایی برای تخمین ضریب بهره‌وری ارائه شده‌است. در هر کدام از آنها ممکن است مواردی در نظر گرفته شده باشد که در سایر مدل‌ها در نظر گرفته نشده و یا اهمیت بیشتر یا کمتری داده شده باشد.

جدول ۳-۸- مدل‌های پیش‌بینی عملکرد TBM (Frough et al., 2012)

روش	پارامترهای در نظر گرفته شده	مدل / رفرنس
تجربی	سختی سنگ بکر	Tarkoy (1973)
تئوری - تجربی	نیروی برش (کاترهای V شکل)	Roxborough and Phillips (1975)
تجربی	مقاومت فشاری تک محوره سنگ بکر	Graham (1976)

تئوری - تجربی	نیروی برش	Ozdemir (1977)
تجربی	مقاومت کششی سنگ بکر	Farmer et al (1980)
تئوری - تجربی	نیروی برش (کاترهای V شکل)	Snowdon et al. (1982)
تئوری - تجربی	نیروی برش (کاترهای V شکل)	Sanio (1985)
تئوری - تجربی	نیروی برش	Sato et al. (1991)
تجربی	طبقه بندی توده سنگ RSR	Innaurato et al. (1991)
تئوری - تجربی	نیروی برش و پارامترهای سنگ بکر	Rostami and Ozdemir (1993)
تجربی	طبقه بندی توده سنگ RMI	Palmstrom (1995), RMI
تجربی	پارامترهای توده سنگ، نیروی برش و فاصله‌داری دیسک‌ها	Bruland (1999), NTNU
تجربی	طبقه بندی توده سنگ Q	Barton (2000), Q _{TBM}
تجربی	بهبود مدل CSM با در نظر گرفتن پارامترهای توده‌سنگ	Yagiz (2002), MCSM
تجربی	پارامترهای توده‌سنگ	Bieniawski (2007), RME
تجربی	مقاومت سنگ بکر و خصوصیات ناپیوستگی‌ها	Yagiz (2008)
تجربی	پارامترهای توده‌سنگ	Gong and Zhao (2009)
تجربی	محاسبه اندیس نفوذ میدانی با استفاده از خصوصیات توده‌سنگ	Hassanpour et al. (2009)
تجربی	محاسبه اندیس نفوذ میدانی با استفاده از خصوصیات توده‌سنگ	Khademi et al. (2010)

در مدل Q_{TBM}، پارامتر موثر در بهره‌وری (m) تابعی از Q توده‌سنگ است. که با توجه به چهار عامل قطر تونل، مقدار کوارتز سنگ، تخلخل و شاخص عمر دیسک کاتر تصحیح می‌شود. عامل اول به طور غیرمستقیم نشان دهنده تاثیر زمان نصب سیستم نگهداری است و سایر عوامل بر زمان تعویض کاترها موثر هستند. در این مدل عواملی مانند لجستیک، حمل و نقل، تعمیر و نگهداری و سایر شرایط زمین مانند آب زیرزمینی در تخمین ضریب بهره‌وری در نظر گرفته نشده است.

در مدل NTNU زمان‌های بازدید و تعویض کاترها، تعمیر و نگهداری، تاخیرات ناشی از سیستم حمل و نقل و غیره با استفاده از روابط و نمودارهایی که قبلاً نشان داده شده است، تخمین زده می‌شود. در این مدل عواملی مانند تاثیر شرایط نامناسب زمین بر زمان نصب سیستم نگهداری لحاظ نشده است.

در مدل CSM مجموعه عوامل زیادی مانند RQD، به منظور لحاظ نمودن تاثیر خواص توده-سنگ، آب زیرزمینی، شعاع و طول قوس مسیر تونل و سایر تاخیرات برای تخمین بهره‌وری در نظر

گرفته می‌شود. در این مدل برای بعضی از عوامل مقدار مشخصی پیشنهاد شده و بعضی دیگر به وسیله روابط ارائه شده است.

هر کدام از این مدل‌ها به عوامل خاصی پرداخته‌اند ولی به طور کلی به تاثیر توام دو یا چند عامل به صورت توام اشاره مشخصی نشده است. به عنوان مثال در مدل CSM زمان پیشنهادی برای تعویض کاترها در دو حالت تعویض یک کاتر و یا چند کاتر به صورت هم زمان، ارائه شده است اما در شرایط وجود آب تنها این نکته ذکر شده است که این زمان‌ها باید افزایش داده شوند. در جدول ۳-۹ عوامل موثر بر ضریب بهره‌وری در مدل‌های CSM، NTNU و Q_{TBM} مقایسه شده‌اند.

۳-۷- استفاده از طبقه‌بندی‌های مهندسی سنگ در پیش‌بینی عملکرد TBM

اگرچه سیستم‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ به منظور انتخاب سیستم نگهداری توسعه یافته‌اند اما در بسیاری از مطالعات انجام شده از آنها به منظور پیش‌بینی عملکرد TBM استفاده شده است. به عنوان مثال اینائورتو و همکاران رابطه بین RSR، مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بکر و نرخ نفوذ به دست آوردند. پالمستروم در سال ۱۹۹۵ مدلی بر پایه شاخص توده‌سنگ (RMI) ارائه داد. بینیاوسکی در سال ۲۰۰۶ مدلی را برای پیش‌بینی میانگین نرخ پیشروی TBM براساس قابلیت حفاری توده‌سنگ، RME، ارائه نمود به طوریکه نحوه امتیازدهی تا حد زیادی مانند سیستم طبقه‌بندی RMR است.

جدول ۳-۹- مقایسه عوامل موثر بر ضریب بهره‌وری در مدل‌های
CSM، NTNU و Q_{TBM} (فروغ و همکاران ۱۳۹۰)

Q _{TBM}	NTNU	CSM	عوامل موثر بر بهره‌وری	
اثر توده‌سنگ در Q لحاظ شده است	خیر	(تاثیر ناپیوستگی‌ها)	RQD	شرایط زمین
	خیر	(زمان نصب نگهداری)	RMR	
	خیر	خیر	Q	
	خیر	بله	آب زیرزمینی	
بله (شاخص عمر دیسک)	(تابعی از نرخ نفوذ) بله	بله	سایندگی سنگ / تعویض دیسک کاتر	هندسه تونل
خیر	خیر	بله	قوس مسیر تونل	
بله	خیر	خیر	قطر تونل	
خیر	خیر	(تاثیر در لجستیک)	شیب تونل	مدیریت و پشتیبانی
خیر	بله	بله	نقشه برداری	
خیر	(نصب سیستم برق)	بله	لجستیک	
خیر	بله	بله	ترابری	
خیر	بله	خیر	تعمیر و نگهداری TBM	
خیر	بله	خیر	تعمیر و نگهداری Back up	
خیر	خیر	بله	تعمیرات پیش‌بینی نشده	
خیر	بله	بله	دیوارگیری مجدد	

مدل Q_{TBM} نیز بر اساس سیستم طبقه‌بندی توده‌سنگ Q بنا شده است. گراندوری در سال ۱۹۹۵ و ساینی در سال ۲۰۰۲ رابطه نرخ پیشروی و کلاس توده‌سنگ براساس RMR را مورد مطالعه قرار دادند. خادمی و همکاران نیز در سال ۲۰۰۹ ضمن مطالعه تاثیر پارامترهای مختلف طبقه‌بندی‌های توده‌سنگ در پیش‌بینی عملکرد TBM با استفاده از چهار پارامتر ورودی RMR به همراه زاویه بین محور تونل و صفحه ناپیوستگی در سطح تونل، رابطه‌ای را برای پیش‌بینی اندیس نفوذ میدانی پیشنهاد کردند.

این طبقه‌بندی‌ها اگرچه به منظور پیش‌بینی پایداری توده‌سنگ و پیشنهاد سیستم‌های نگهداری توسعه یافته‌اند اما با توجه به این که از پارامترهای مختلف توده‌سنگ برای امتیازدهی آنها استفاده می‌شود، می‌توانند نماینده شرایط توده‌سنگ بوده و تاثیر آن را بر عملکرد TBM نشان دهند. اما باید در نظر داشت که در نرخ نفوذ و نرخ پیشروی، تنها پارامترهای توده‌سنگ تاثیرگذار نیست بلکه

پارامترهای ماشین نیز در این موضوع بسیار موثر هستند. این طبقه‌بندی‌ها محدودیت‌هایی نیز دارند. به عنوان مثال امتیاز دهی RMR به وسیله پارامترهای مختلفی مانند مقاومت تک محوره سنگ بکر، RQD، فاصله‌داری و شرایط ناپیوستگی‌ها، آب زیرزمینی و جهت داری ناپیوستگی‌ها نسبت به محور تونل انجام می‌شود. یک امتیاز مشخص RMR ممکن است با ترکیبات مختلف پارامترهای مذکور به دست آید که هر کدام اثرات متفاوتی بر حفاری مکانیزه دارند. مثلاً در دو توده‌سنگ با امتیاز $RMR=50$ ممکن است شرایط ناپیوستگی‌ها، مقاومت سنگ و یا آب زیرزمینی متفاوت باشد.

موارد فوق نشان می‌دهد که در مورد ضریب بهره‌وری نیز باید توجه نمود که تاثیر شرایط توده-سنگ بیشتر در توقفات ناشی از پارامترهای توده‌سنگ اهمیت دارد. توقفات مربوط به تعمیر و نگهداری، سیستم‌های هیدرولیکی و مکانیکی، نبود لوازم یدکی، قطع برق، تاخیرات ترابری و مانند آنها، ارتباطی با شرایط توده‌سنگ ندارند. اما با توجه به اینکه بسیاری از محققین اذعان داشته‌اند که بیشترین توقفات TBM در هنگام حفاری در زون‌های ناپایدار و ریزشی رخ می‌دهد، در پیش‌بینی توقفات ناشی از شرایط توده‌سنگ می‌توان با اطمینان بیشتری از طبقه‌بندی مهندسی سنگ استفاده نمود. اگرچه شرایط نامساعدی مانند تصاعد گازهای سمی، وقوع پدیده لهیدگی، وجود رس و یا سایندگی سنگ که سهم قابل توجهی در توقفات حفاری دارند، در آنها لحاظ نشده است.

فصل چهارم

توقفات مربوط به پارامترهای توده‌سنگ و شرایط نامساعد زمین

همانطور که در فصل ۲ بیان شد، ضریب بهره‌وری به عوامل مدیریتی، هندسه تونل (مانند قطر، شیب، قوس‌ها و غیره) و شرایط زمین‌شناسی (مانند پارامترهای توده‌سنگ، شرایط درزه‌ها، آب زیرزمینی و شرایط نامساعد زمین) بستگی دارد. به عنوان مثال تاخیرات سیستم ترابری که موجب توقف حفاری می‌شود ممکن است بر اثر عوامل مدیریتی باشد. اما توقف حفاری به دلیل مشکلاتی نظیر ریزش و ناپایداری، آب زیرزمینی و تعویض بیش از حد کاترها به علت ساینده‌گی سنگ، مربوط به شرایط زمین و توده‌سنگ درونگیر تونل است. همچنین کاهش بهره‌وری به خاطر وجود قوس در مسیر تونل را نیز می‌توان از عوامل مربوط به تونل دانست. شرایط نامساعد زمین‌شناسی را باید یکی از عوامل عمده کاهش بهره‌وری که بعضاً به توقفات بلند مدت و یا کاهش شدید نرخ پیشروی منجر می‌شود، در نظر گرفت.

۴-۲- توقفات مربوط به شرایط توده‌سنگ

علت بسیاری از توقفات و تاخیرات حفاری در پروژه‌های مکانیزه برخورد با شرایط نامطلوب زمین بوده است^{۱۳} (GRRD). با توجه به تجربیات موجود و مطالعات انجام شده بعضی از عوامل مربوط به زمین که موجب کاهش ضریب بهره‌وری می‌شوند در جدول ۴-۱ آورده شده است. اهمیت این موضوع زمانی بیشتر است که چند عامل هم زمان در مقطعی از تونل وجود داشته باشد. به عنوان مثال، یکی از عوامل مهم مربوط به تاثیر شرایط توده‌سنگ، بروز انواع ناپایداری‌ها و ریزش‌ها است. به طوری که در بعضی موارد لازم است سنگ‌های حاصل از ریزش به روش سنتی برداشته شده و فضای باقیمانده نگهداری شود تا امکان ادامه حفاری TBM فراهم گردد. وجود آب زیرزمینی نیز ممکن است این ناپایداری‌ها را تشدید کند (Laughton, 1998). از طرف دیگر هجوم آب

¹³ Geology and Rock mass Related Downtimes

به تونل خود ممکن است باعث توقف حفاری به منظور آبکشی و یا تزریق پیشرو شود. وجود آب به همراه رس باعث گرفتگی دیسک کاترها شده که باید زمانی صرف تمیز کردن آن‌ها شود.

جدول ۴-۱- عوامل مربوط به زمین که موجب کاهش ضریب بهره‌وری می‌شوند

ردیف	عامل	تاثیر مستقیم	تاثیر غیر مستقیم
۱	ناپایداری زمین و ریزش	توقف به علت تزریق پیشرو و یا آزاد نمودن TBM از ریزش	افزایش زمان نصب نگهداری (سگمنت)
۲	سایندگی سنگ	افزایش زمان تعویض دیسک کاترها	فرسایش ثانویه ابزار فرسوده
۳	درزه و شکاف نامساعد	احتمال گیر افتادن کاترهد و توقف برای آزاد نمودن آن	احتمال خرابی دیسک کاترها
۴	وجود آب زیرزمینی	توقف به علت آب کشی و تزریق آب‌بندی	افزایش زمان نصب نگهداری، تزریقات تماسی و کاهش راندمان به علت شرایط کار در آب
۵	مصالح حفاری رسی و چسبیده	گل اندود شدن کاترهد و توقف به علت تمیز کردن آن	افزایش زمان تخلیه مصالح به علت چسبندگی آن
۶	شرایط لهیدگی و آماسی	توقف به علت گیر افتادن TBM	افزایش زمان نصب نگهداری
۷	شرایط سینه کار مختلط	ممکن است توقف به علت چند عامل تواما رخ دهد	احتمال خرابی کاترها
۸	وجود گاز	توقف برای کاهش غلظت گاز تا عیار مجاز، سایر موارد بسته به نوع گاز	کاهش راندمان مثلاً به علت کار کردن به همراه ماسک

ریزش و ناپایداری یکی از اصلی‌ترین علت‌های توقفات در حفاری مکانیزه می‌باشد. برای مثال می‌توان به توقف تونلسازی در متراژ ۲۱۱ تونل کرج ۱ اشاره نمود. در این مقطع عملیات تونلسازی به دلیل ریزش برداری، بهسازی زمین و آزاد سازی کاترهد به مدت ۲۰ روز متوقف شد. در شکل‌های ۴-۱ و ۴-۲ ریزش توده‌سنگ خرد شده روی کاترهد و تزریق دوغاب از سطح زمین به منظور بهسازی توده‌سنگ، در این بخش از تونل نشان داده شده است.

در تونل قمرود نیز در شرایط ریزشی و همچنین در توده‌سنگ‌های پر درزه و شکاف، با استفاده از حفاری چال‌های پیشرو و تزریق فوم، اقدام به بهسازی زمین شد. در شکل ۴-۳ مراحل عملیات حفاری و تزریق نشان داده شده است. در این تونل توقفات متعددی نیز به دلیل گیرافتادن ناشی از

لهیدگی رخ داده است البته در شرایطی که توده‌سنگ از کیفیت خوبی برخوردار بوده، رکورد ۱۰۰۰ متر حفاری در ماه نیز در این تونل ثبت شده است.

شرایط ناپیوستگی‌ها و درزه و شکاف نامساعد نیز می‌تواند علاوه بر گیرانداختن کاترهد، باعث آسیب زدن به دیسک کاترها شود. در شکل ۴-۴ نمونه از شکستگی صدفی دیسک کاتر به دلیل درزه و شکاف توده‌سنگ در تونل نوسود (قطعه ۲) نشان داده شده است.



شکل ۴-۱- ریزش توده‌سنگ خرد شده روی کاترهد (تونل کرج ۱)



شکل ۴-۲- تزریق دوغاب از سطح زمین به منظور بهسازی زمین (تونل کرج ۱)

حفاری چالهای پیشرو (Probe drilling)



بستن لوله و اتصالات مربوط به تزریق به راد



دستگاه تزریق فوم دو جزئی



درزه و شکاف پر شده به وسیله فوم

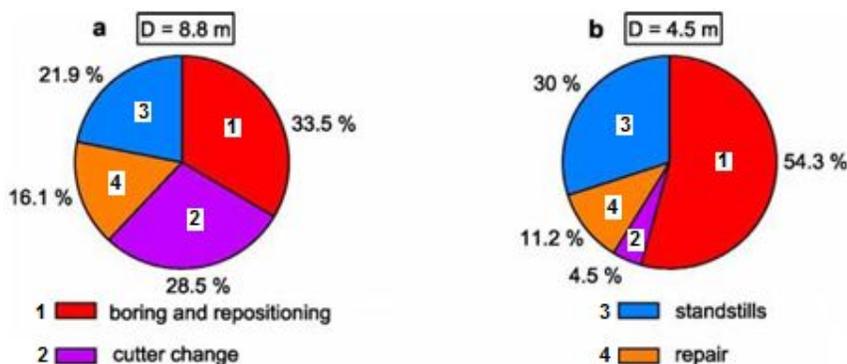


شکل ۴-۳- عملیات بهسازی زمین (تونل قمرود)



شکل ۴-۴ - شکستگی دیسک کاتر به دلیل درزه و شکاف توده‌سنگ (تونل نوسود ۲)

عامل اصلی فرسایش دیسک کاترها کوارتز و سایر کانی‌های موجود در سنگ است ولی تعویض‌های متوالی کاترها به بافت سنگ، بلوکی بودن توده‌سنگ و شرایط سینه کار مختلط نیز بستگی دارد (Laughton, 1998). درصد زمان‌های حفاری و توقف‌های دو تونل که اولی با قطر ۸/۸ متر در گنیس و دومی با قطر ۴/۵ متر در ماسه سنگ و مارن حفاری شده‌اند، در شکل ۴-۵ مقایسه شده است. زمان تعویض کاترها در تونل اول ۲۸/۵ درصد و زمان حفاری ۳۳/۵ درصد است. در حالیکه در تونل دوم زمان تعویض کاترها ۴/۵ درصد و زمان حفاری ۵۴/۳ درصد است (Wittke, 2007). این مثال نشان دهنده تاثیر سایندگی سنگ در توقفات حاصل از تعویض کاترهاست.



شکل ۴-۵- درصد زمان‌های حفاری و توقف در دو پروژه مکانیزه (Wittke, 2007)

وجود جریان آب زیرزمینی یکی دیگر از شرایطی است که باعث کاهش بهره‌وری می‌شود. جریان آب علاوه بر ایجاد اختلال در کلیه فعالیت‌هایی که در TBM و سیستم پشتیبانی انجام می‌شود، باعث انباشتن مصالح حفاری شده در داخل سپر و محدوده نصب سگمنت شده و همچنین فشار آب مانع تزریق شن نخودی به پشت سگمنت می‌شود. جریان آب باعث ایجاد مشکل در امر تخلیه و انتقال مصالح حفاری، خرابی دستگاه‌ها و کاهش راندمان نفرات شده و همچنین باعث می‌شود که بخشی از زمان کاری صرف آبکشی از محدوده سپر و سیستم پشتیبانی و یا بهسازی زمین به وسیله حفاری پیشرو و تزریق آب بندی و یا تحکیمی شود. وجود آب در کنار مصالح رسی به این مشکلات می‌افزاید. در تونل نوسود ۲، در زمان حفاری در سازند ایلام، دبی آب خروجی در دهانه تونل به ۳۲۰ لیتر بر ثانیه و با ورود تونل به سازند گورپی، علیرغم اینکه پیش بینی می‌شد جریان آب کاهش یابد، دبی جریان آب به ۸۳۵ لیتر بر ثانیه رسید. علت این امر وجود یک تاقدیس با شکستگی و درزه شکاف فراوان در مسیر تونل بود. در تونل البرز، دبی آب در متر ۴۵۰۰ تونل به حدود ۴۱۶۰۰ لیتر بر دقیقه رسید که این حجم آب باعث غرق شدن سیستم ریلی، ایجاد مشکل برای حمل و نقل مصالح و نفرات می‌شد. از طرف دیگر ارتفاع آب در کف تونل به حدی بود که فاصله چندانی با کابل‌های برق نداشت و احتمال بروز مشکلات در سیستم برق و خطرات ناشی از آن پروژه را تهدید می‌کرد (شرکت تالون).

در تونل کرج ۲ نیز مشکل آب زیرزمینی وجود داشت. در شکل ۴-۶ جریان آب بر روی نوار نقاله در تونل کرج ۲ و شکل ۴-۷ جریان آب در تونل البرز نشان داده شده است.



شکل ۴-۶- جریان آب بر روی نوار نقاله (تونل کرج ۲)



شکل ۴-۷- جریان آب در تونل البرز

وجود رس و کانی‌های چسبنده باعث بروز پدیده گل گرفتگی^۱ می‌شوند که رهایی از آن مستلزم صرف بخشی از زمان کاری می‌شود. گل گرفتگی کاترهد باعث بسته شدن دریچه‌های تخلیه مصالح حفاری شده که موجب تجمع این مصالح در جلوی کاترهد شده و از طرف دیگر باعث قفل شدن دیسک کاترها و فرسایش نامتقارن آنها می‌شود. مشکل تخلیه و حمل مصالح نیز از دیگر اثرات نامطلوب حفاری در محیط‌های رس دار می‌باشد. در شکل ۴-۸ نمونه‌ای از گل گرفتگی در تونل کرج ۱ نشان داده شده است. از تونل نوسود ۲ نیز می‌توان به عنوان مثال دیگر در این مورد نام برد. در این تونل زمانی که حفاری در سنگ‌های آهکی رسی، شیلی و ماسه سنگ آهکی انجام شده است، به علت وجود رس و شیل، این پدیده رخ داده است. سرویس‌ها و تمیزکاری برنامه ریزی نشده کاترهد برای آزاد کردن کاترها و باکت‌ها تاثیر زیادی بر کاهش بهره‌وری داشته، این فعالیت حدود ۲۵ درصد از زمان کاری را به خود اختصاص داده بود.



شکل ۴-۸- گل گرفتگی دیسک کاتر (تونل کرج ۱)

^۱Clogging

پدیده لهیدگی باعث گیر افتادن سپر می‌شود. در شرایطی که حفاری در توده سنگ با پتانسیل لهیدگی انجام می‌شود، در صورت بروز وقفه در عملیات حفاری، احتمال گیر افتادن TBM افزایش می‌یابد. در این شرایط دستگاه حفاری به نیروی تراست بسیار بالایی برای پیشروی نیاز دارد. در برخی موارد لازم است به منظور آزادسازی دستگاه حفاری، محدوده اطراف آن حفاری شده تا دستگاه بتواند به حرکت خود ادامه دهد. نمونه‌ای از شرایط گیر افتادگی و توقفات مربوطه در جدول ۴-۲ آورده شده است. در زمان اجرای قطعات سوم و چهارم تونل انتقال قمرود، به دلیل ریزش و گیرافتادن TBM بر اثر پدیده لهیدگی، از اسفند ۸۳ تا شهریور ۸۵ تنها ۲۷۷ متر از تونل حفاری شد (البته همه این زمان صرف آزاد نمودن دستگاه حفاری نشده است). از طرف دیگر در قبل و بعد از این زمان نیز دستگاه حفاری به علت گیرافتادن‌های متناوب متوقف شده است. نمونه‌ای از چسبیدن زمین درونگیر تونل به سپر در شرایط لهیدگی و عملیات حفاری به منظور آزادسازی سپر در تونل قمرود در شکل‌های ۴-۹ و ۴-۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۴-۲- نمونه‌ای از شرایط گیرافتادگی و توقفات مربوطه در تونل قمرود (ساحل ۱۳۸۳ تا ۱۳۸۸)

ایتم	گیرافتادگی اول	گیرافتادگی دوم
موقعیت (از دهانه خروجی)	۲۲۵۵	۲۵۳۷
تاریخ گیر افتادن	۸۳/۳/۲۴	۸۳/۵/۱۹
تاریخ آزاد سازی	۸۳/۵/۷	۸۳/۵/۲۴
زمان توقف (روز)	۱۳	۵
نیروی تراست در زمان گیر افتادن (KN)	۱۳۰۱۸	۱۵۵۰
نیروی تراست پس از آزاد سازی (KN)	۷۲۰۰	۱۱۶۰۰
جنس سنگ	گرافیت شیست	گرافیت شیست با بین لایه‌های نرم و کوارتزیت

تصادف گازهای مضر مانند H_2S و متان از عوامل مهم تاثیر گذار بر بهره‌وری می‌باشند. وجود این گازها علاوه بر خطرات جانی، قابلیت اشتعال و انفجار، باعث می‌شود شرایط کاری دشوار شده و راندمان افراد کاهش یابد. همچنین زمان مجاز کاری، در شرایط گاز دار کمتر از زمان معمول کاری می‌باشد که خود یکی از عوامل کاهش بهره‌وری است. از طرف دیگر این گازها خورنده بوده و به

قطعات حساس الکترونیکی دستگاه حفاری آسیب می‌زنند که خود باعث بروز توقفات ناخواسته می-

شود.



شکل ۴-۹- چسبیدن زمین به شیلد و سگمنت در اثر پدیده لهیدگی (تونل قمرود ۳ و ۴)



شکل ۴-۱۰- حفاری دور سپر به منظور آزادسازی آن (تونل قمرود ۳ و ۴)

در هنگام حفاری در شرایط گاز دار لازمست افراد از ماسک و یا کپسول هوا استفاده نمایند. بهبود تهویه و بهسازی زمین به منظور جلوگیری از نشت گاز از دیگر راهکارهای مواجهه با این شرایط است. در شرایطی که نشت گاز به همراه جریان آب زیرزمینی رخ می‌دهد، آبکشی و پمپاژ آب حاوی گاز قبل از تصاعد آن از اهمیت بیشتری برخوردار است. در شکل ۴-۱۱ شرایط کاری (استفاده از کپسول هوا) در زمان تصاعد گازهای سمی و جریان آب زیرزمینی، در تونل نوسود ۲ نشان داده شده است. در این تونل تصاعد گاز به همراه جریان آب زیرزمینی یکی از علت‌های توقف طولانی عملیات تونلسازی بوده است.



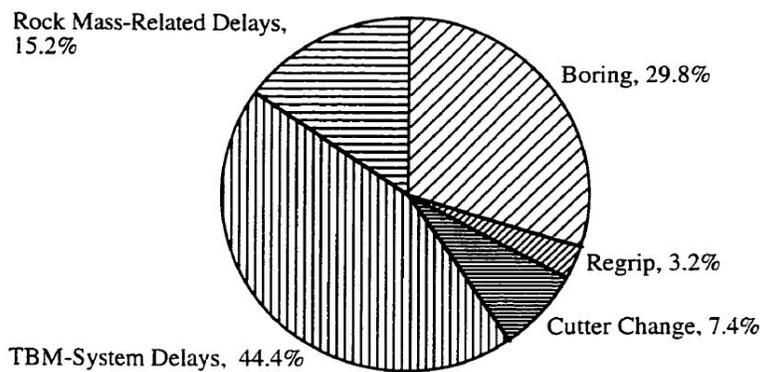
شکل ۴-۱۱- شرایط آب زیرزمینی و گاز - کار با استفاده از کپسول هوا و ماسک (تونل نوسود ۲)

در تونل البرز نیز تصاعد گازهای سمی و قابل انفجار موجب توقفات زیادی شد. شدت تصاعد گاز در این تونل به حدی بود که در بعضی موارد پیمانکار مجبور می شد عملیات حفاری را متوقف نموده، سیستم برق را قطع کرده و تونل را تخلیه نماید. در بعضی موارد نیز ورود افراد تنها با استفاده از کپسول اکسیژن امکان پذیر بود. در این تونل گاز سولفید هیدروژن به بیش از ۵۰۰ ppm، گاز منواکسید کربن به ۵۰۰ ppm و گاز متان به ۱۰۰ lel^۱ نیز رسیده بود. میزان مجاز این سه گاز به ترتیب سولفید هیدروژن ۱۰ ppm، گاز منواکسید کربن ۳۵ ppm و گاز متان ۲۰٪^۱ می باشد (Wenner 2009). به عنوان مثال نشت گاز سولفور هیدروژن با غلظت ۷۰ ppm و گاز CO تا ۲ تا ۴ ppm در محدوده متر از ۲۹۹۰-۲۸۹۵ مربوط به زون تاثیر یک گسل، باعث شد عملیات اجرایی در این تونل به مدت ۱۶ روز متوقف شود (گینیوسکی ۱۳۸۶).

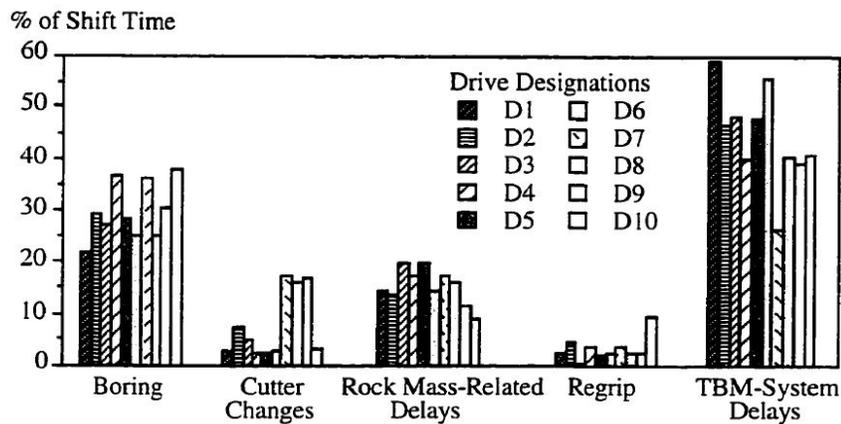
۴-۳- تاثیر توقفات مربوط به توده سنگ بر بهره‌وری

در شکل‌های ۴-۱۲ و ۴-۱۳ سهم توقفات مربوط به توده سنگ نشان داده شده است. در این شکل‌ها میانگین درصد زمان‌های حفاری و توقف‌های ۱۰ تونل مکانیزه و هیستوگرام این زمان‌ها به صورت مجزا نشان داده شده است (Laughton, 1998). در این مورد عوامل کاهش بهره‌وری به چهار عامل دیوارگیری مجدد، تعویض کاتر، تعمیر و نگهداری و شرایط زمین و توده سنگ تقسیم‌بندی شده است. همانطور که مشاهده می‌شود میانگین زمان بهره‌وری در این پروژه‌ها حدود ۳۰ درصد و حداکثر بهره‌وری نیز کمتر از ۴۰ درصد است. سهم توقفات حفاری به خاطر شرایط توده سنگ حدود ۱۵ درصد کل زمان و حدود ۲۲ درصد زمان‌های توقف است. اگر تاثیر پارامترهای توده سنگ بر فرسایش زود هنگام دیسک کاترها و در نتیجه افزایش زمان تعویض آنها نیز در نظر گرفته شود، این سهم افزایش بیشتری از خود نشان می‌دهد.

^۱ Lower Explosive Limit

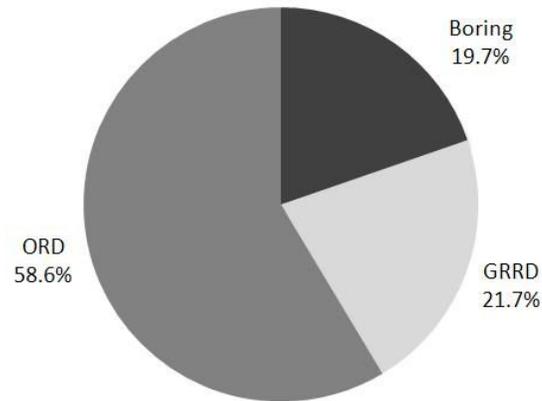


شکل ۴-۱۲- میانگین درصد زمان‌های حفاری و توقف‌ها در ۱۰ تونل مکانیزه (Laughton, 1998)

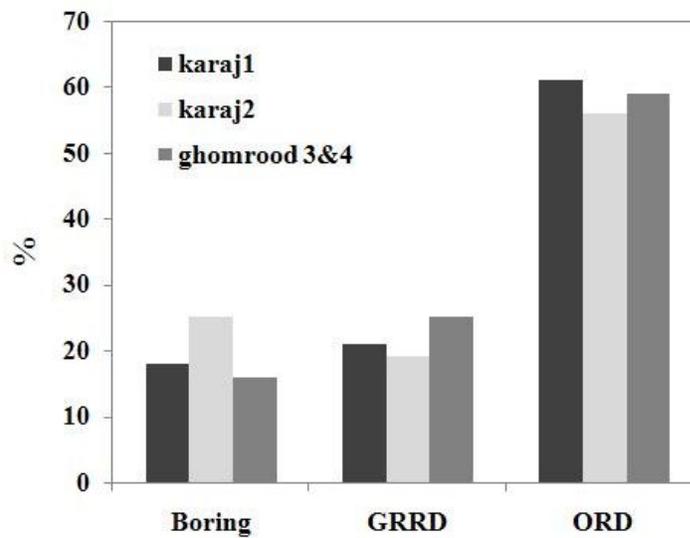


شکل ۴-۱۳- هیستوگرام درصد زمان‌های حفاری و توقف‌ها در ۱۰ تونل مکانیزه (Laughton, 1998)

در شکل ۴-۱۴ سهم توقفات مربوط به توده سنگ در سه پروژه کرج ۱، کرج ۲ و قمرود ۳ و ۴ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود میانگین زمان بهره‌وری در این پروژه‌ها حدود ۲۰ درصد است. سهم توقفات مربوط به شرایط توده‌سنگ حدود ۲۲ درصد کل زمان عملیات است. در این نمودار سهم توقفات طولانی مدت تونل قمرود از اسفند ۸۳ تا شهریور ۸۵ لحاظ نشده است. در شکل ۴-۱۵ درصد زمان حفاری و توقف در این سه تونل به تفکیک نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۴- میانگین درصد زمان‌های حفاری و توقف‌ها در سه پروژه کرج ۱، کرج ۲ و قمرود ۳ و ۴



شکل ۴-۱۵- هیستوگرام درصد زمان‌های حفاری و توقف‌ها در سه پروژه کرج ۱، کرج ۲ و قمرود ۳ و ۴

همانطور که در نمودارهای ارائه شده مشاهده شد به طور میانگین در پروژه‌های داخلی و خارجی بررسی شده حدود ۲۰ درصد زمان توقفات در حفاری مکانیزه مربوط به شرایط توده‌سنگ است. البته باید در نظر داشت که در بعضی موارد توقفات طولانی مدتی به بخاطر این شرایط رخ داده است. به عنوان مثال در تونل قمرود به دلیل شرایط لهیدگی و ریزش‌های متوالی و در تونل نوسود به دلیل تصاعد گاز و جریان آب توقفات بسیار طولانی اتفاق افتاده است.

فصل پنجم
مطالعات موردی
و تشکیل پایگاه داده‌ها

۵-۱- مقدمه

در چند سال گذشته حفاری تونل به روش مکانیزه در ایران توسعه یافته و تعداد زیادی تونل انتقال آب مکانیزه با این روش اجرا شده و یا در حال حفاری می‌باشند. داده‌های حاصل از این تونل‌ها از این جهت حائز اهمیت هستند که بیانگر شرایط زمین‌شناسی و تکتونیکی ایران هستند. به منظور تشکیل پایگاه داده‌ها، ابتدا با توجه به اطلاعاتی که می‌توانند به منظور تحلیل مورد استفاده قرار گیرند، داده‌ها سطح بندی شده و سپس با استفاده از این پایگاه داده‌ای، رابطه‌ای بین شرایط زمین‌شناسی و پارامترهای توده‌سنگ با توقعات و یا بهره‌وری دستگاه حفاری مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور بررسی تاثیر شرایط توده‌سنگ زمین بر بهره‌وری TBM سه پروژه تونل‌سازی مکانیزه مورد مطالعه قرار گرفته تا از داده‌های به دست آمده از آنها، برای مدلسازی این امر استفاده شود.

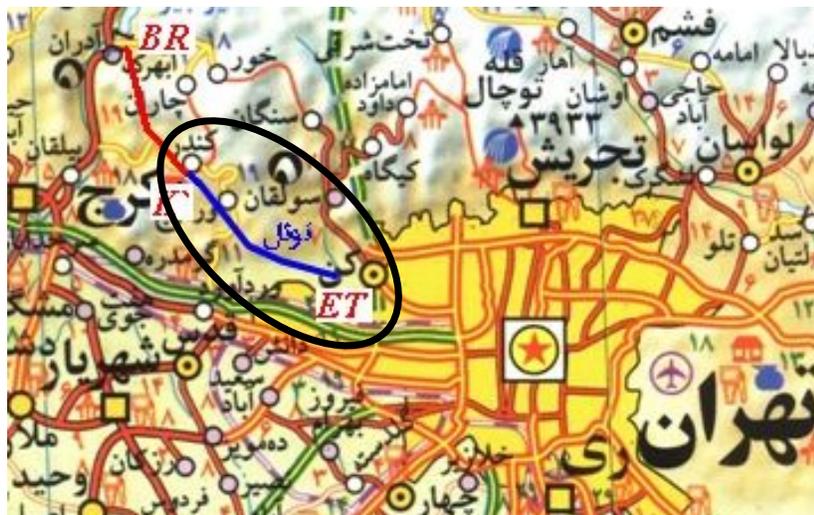
۵-۲- مطالعات موردی

مطالعات انجام شده بر روی پروژه‌های مکانیزه کرج ۱، کرج ۲ و قمرود ۳ و ۴ شامل جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز با بررسی مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و نقشه‌های زمین‌شناسی و چون ساخت تونل، جمع‌آوری داده‌های میدانی، بررسی عملکرد TBM در واحدهای توده‌سنگی مختلف در زمان اجرا و تحلیل آماری داده‌های به دست آمده بوده است.

۵-۲-۱- تونل انتقال آب کرج قطعه ۱

قطعه اول تونل انتقال آب از سد امیرکبیر به تصفیه خانه شماره ۶ تهران با طول حدود ۱۶ کیلومتر و با ظرفیت آبرسانی ۱۶ متر مکعب در ثانیه، بخشی از پروژه‌ای است که با هدف آبرسانی به غرب تهران تعریف شده است (قطعه 'ET-K'). موقعیت این تونل در شکل ۵-۱ نشان داده شده است. مونتاز TBM و آماده‌سازی آن برای حرکت به سمت سینه کار حفاری از فروردین ۱۳۸۵ آغاز شده و حفاری

مکانیزه در تاریخ ۲۸ مرداد ۸۵ شروع شده است. حفاری مکانیزه این تونل در خرداد ماه ۸۸ به پایان رسید.



شکل ۵-۱- موقعیت تونل انتقال آب کرج قطعه ۱

این تونل با طولی برابر $16042/308$ متر و شیب $0/00137$ (۰/۱۳۷٪) با استفاده از D.S.TBM با قطر حفاری $4/665$ متر اجرا شده است (شکل ۵-۲). مشخصات دستگاه حفاری مذکور در جدول ۵-۱ آورده شده است. حدود 140 متر ابتدایی این تونل با استفاده از رودهدر حفاری شده است. همچنین حدود 190 متر انتهای آن نیز با روش چالزنی و آتشیاری و با مقطع بزرگتر اجرا شده که از این فضا برای لجستیک قطعه ۲ تونل نیز استفاده شده است. پوشش نهایی تونل به وسیله قطعات پیش‌ساخته بتنی (۵ قطعه + کلید) با ضخامت 25 سانتیمتر تامین شده است.

در طرح اولیه قطعه 'ET-K' با طول 15980 متر توسط یک دستگاه TBM حفاری شده و از شفت خروجی 'K' که قرار بود تنها برای دمونتاژ TBM استفاده شود، خارج گردد. جانمایی و مشخصات این شفت نیز بر این اساس در نظر گرفته شده بود. در ادامه قرار بر این شد که قطعه دوم تونل نیز با TBM قطعه اول حفاری شود. بنابر این باید از شفت 'K' به عنوان محل لجستیک قطعه دوم تونل نیز استفاده می‌شد. به همین دلیل تغییراتی در موقعیت و هندسه مسیر اعمال شد تا مناسب کاربری مورد نظر شود و نقطه دیگری به عنوان دسترسی میانی انتخاب شد تا بتواند الزامات کاربری جدید را تامین

نماید (نقطه "K"). برای دسترسی به نقطه "K" لازم بود مسیر تونل قطعه یک در بخش انتهایی آن تغییر کند. برای این منظور در کیلومتر ۱۴+۳۰۰ با یک قوس به شعاع ۵۰۰۰ متر مسیر تونل به سمت نقطه خروجی فعلی تغییر داده شد. به این ترتیب طول تونل به ۱۶۰۴۲/۳۰۸ متر رسید (ساحل ۱۳۸۷).

جدول ۵-۱- مشخصات دستگاه حفاری تونل انتقال آب کرج - تهران

پارامتر	مقدار
قطر ماشین (m)	۴/۶۶
قطر دیسک کاتر (mm)	۴۳۲
فاصله‌داری دیسک کاترها (mm)	۷۰
تعداد دیسک کاتر	۳۱
توان کاترهد (KW)	۱۲۵۰
سرعت کاترهد (RPM)	۱۱
گشتاور کاترهد (KN-m)	۲۵۰۰
حداکثر فشار پشت کاترهد (KN)	۱۷۰۰۰



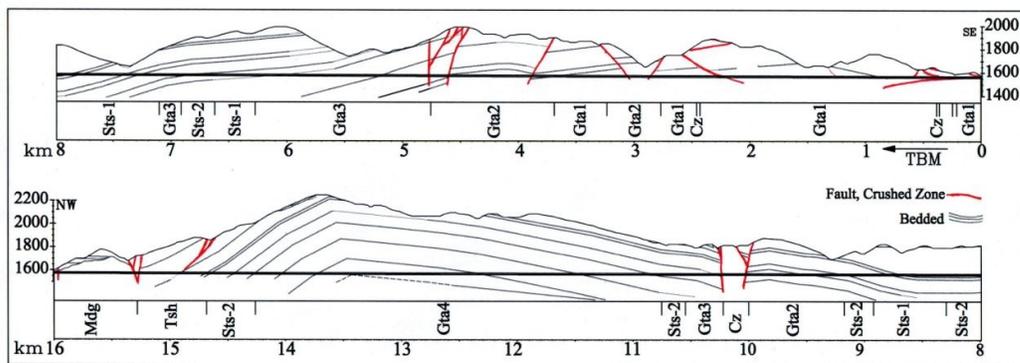
شکل ۵-۲- دستگاه حفاری مورد استفاده در تونل کرج ۱

۵-۲-۱-۱- زمین شناسی مسیر تونل

محدوده تونل در دامنه جنوبی البرز مرکزی واقع است که در بخش جنوبی زیر پهنه کرج-سولقان قرار گرفته است. این تونل در سازند البرز واقع شده سنگ‌های تشکیل دهنده منطقه عمدتاً از جنس رسوبات آذر آوارای شامل توف سبز، توف برشی، توف سیلتی ماسه سنگ‌های توفی و توده‌های نفوذی مونزو دیوریت و مونزو گابرو، کنگلومرای ریز دانه، بخش‌های سیلت و گدازه و حتی آگلومرایی می‌باشند. از طرف دیگر توده‌های نفوذی و دایک‌های آذرین نیز در میان واحدهای رسوبی یا در راستای برخی از گسل‌ها بیرون زده‌اند. بخش ابتدایی مسیر تونل بین دو پهنه گسلی نسبتاً بزرگ شمال تهران (پهنه راندگی کرج-فرحزاد) و پورکان-وردیج قرار گرفته است. این گسل‌ها با جهت شیب عمومی شمال - شمال خاوری بلوک‌های شمالی خود را رو به جنوب رانده‌اند. پروفیل زمین‌شناسی مهندسی تونل در شکل ۵-۳ نشان داده شده‌است. در مجموع ۱۰ واحد توده‌سنگ در مسیر تونل قابل شناسایی و تفکیک از یکدیگر می‌باشند که در جدول ۵-۲ معرفی شده‌اند (ساحل ۱۳۸۳).

جدول ۵-۲- واحدهای توده‌سنگی مسیر تونل کرج ۱ (ساحل ۱۳۸۳ و ساحل ۱۳۸۳ب)

واحد توده‌سنگی	طول (متر)	RMR	آب زیرزمینی	توضیحات
Gta1-1	۱۳۳۴	۳۵	خشک	لایه‌بندی نازک، تا حدی خرد شده، تا ناپایدار
Gta1-2	۱۴۷۵	۵۰	خشک	لایه‌بندی نازک تا ضخیم، تا حدی خرد شده، تا حدی ناپایدار
Gta2	۲۲۵۵	۴۹	مرطوب تا خیس	لایه‌بندی ضخیم، پایدار
Gta3	۱۷۸۴	۶۴	مرطوب تا خیس	لایه‌بندی ضخیم، پایدار
Gta4	۳۵۱۴	۷۵	مرطوب تا خیس	لایه‌بندی ضخیم، پایدار
Sts1	۱۷۹۰	۵۷	جریان موضعی	لایه‌بندی نازک تا ضخیم، تا حدی خرد شده، تا حدی ناپایدار
Sts2	۱۷۶۲	۷۲	مرطوب تا خیس	لایه‌بندی ضخیم، پایدار
Tsh	۵۰۷	۶۳	خیس	لایه‌بندی ضخیم، تا حدی خرد شده، پایدار
Mdg	۶۸۲	۴۶	خیس	لایه‌بندی نازک تا ضخیم، تا حدی ناپایدار
Cz	۵۸۱	۲۱	خیس تا جریان	واحدهای خردشده، کاملاً ناپایدار



شکل ۵-۳- پروفیل زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل کرج ۱ (ساحل ۱۳۸۳ و ساحل ۱۳۸۳ ب)

۵-۲-۱-۲- پایگاه داده‌های تونل کرج ۱

اطلاعات مورد استفاده شامل گزارش‌ها و نقشه‌های زمین‌شناسی مهندسی، نقشه‌های چون ساخت، گزارش‌های روزانه حفاری و اپراتوری، مشاهدات، مطالعات میدانی، بازدید سینه کار (شکل ۴-۵) و داده‌های جمع‌آوری شده در زمان اجرا در مدت ۱۰۱۶ روز، از کیلومتر ۰+۱۵۸ تا ۱۵+۸۴۲ می‌باشد.



شکل ۴-۵- بازدید از سینه کار، تونل کرج ۱ (زون‌های ناپایدار، سینه کار مختلط و کلاگینگ)

با توجه به این داده‌ها زمان‌های حفاری، توقفات، توقفات ناشی از شرایط توده‌سنگ، نرخ نفوذ، بهره‌وری و نرخ پیشروی و همچنین شرایط توده‌سنگ شامل طبقه‌بندی ژئومکانیکی، شرایط آب زیرزمینی، وجود رس، سینه کار مختلط و غیره در واحدهای مختلف توده‌سنگی به دست آمده است و برای آن یک پایگاه داده‌ای تشکیل داده شده است. زمان‌های توقف ثبت شده در زمان اجرای تونل شامل زمان حفاری و زمان‌های توقفی که به علل گوناگون رخ داده ثبت شده است. با توجه به موضوع تحقیق، زمان‌های توقفی که در ارتباط با پارامترهای مختلف توده‌سنگ و شرایط زمین‌شناسی است محاسبه شده است. برای این که بتوان میزان توقفات در واحدهای مختلف را که طول‌های متفاوتی دارند با هم مقایسه نمود، میزان توقفات بر مبنای ساعت بر متر و یا درصدی از کل زمان محاسبه شده است. این زمان‌ها شامل توقف به منظور تمیز کردن کاترهد و بازرسی دیسک کاترها، ریزش برداری، تعویض دیسک کاتر، بهسازی زمین، تاخیرات نصب سگمنت، تاخیرات مربوط به نشت آب زیرزمینی، حفاری‌های پیشرو و همچنین زمان حفاری می‌باشد. این زمان‌ها در جدول ۳-۵ آورده شده است.

جدول ۳-۵- تاخیرات به وجود آمده به دلیل شرایط زمین‌شناسی به ازای هر متر حفاری (کرج ۱)

بازدید و تمیزکاری کاترهد (h/m)	ریزش برداری (h/m)	تعویض کاتر (h/m)	بهسازی زمین (h/m)	نصب سگمنت (h/m)	جریان آب (h/m)	حفاری پیشرو (h/m)	واحد	ردیف
۰/۰۲۶	۰/۰۳۵	۰/۰۰۲	۰/۰۱۳	۰/۲۳۹	۰/۰۰۰	۰/۰۰۸	Gta-1-1	۱
۰/۰۴۳	۰/۰۰۷	۰/۰۳۰	۰/۰۳۱	۰/۰۴۴	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	Gta-1-2	۲
۰/۰۸۶	۰/۰۰۰	۰/۰۵۲	۰/۰۳۷	۰/۰۲۶	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	Gta-2	۳
۰/۱۰۶	۰/۰۰۳	۰/۱۹۲	۰/۰۰۸	۰/۰۱۹	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	Gta-3	۴
۰/۱۸۲	۰/۰۰۸	۰/۱۵۳	۰/۰۱۶	۰/۰۱۶	۰/۰۰۶	۰/۰۰۰	Gta-4	۵
۰/۱۲۹	۰/۰۱۵	۰/۰۲۷	۰/۰۴۴	۰/۰۲۴	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	Sts-1	۶
۰/۱۴۵	۰/۰۰۱	۰/۰۵۷	۰/۰۳۰	۰/۰۲۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	Sts-2	۷
۰/۱۵۳	۰/۰۰۹	۰/۰۴۸	۰/۰۰۷	۰/۰۱۵	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	Tsh	۸
۰/۱۱۲	۰/۰۰۰	۰/۰۲۶	۰/۰۱۳	۰/۰۱۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	Mdg	۹
۰/۲۱۷	۱/۴۴۶	۰/۰۱۱	۰/۱۳۴	۰/۰۷۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	Cz	۱۰

در جدول ۴-۵ نیز زمان‌های حفاری، توقف، ضریب بهره‌وری، نرخ نفوذ و نرخ پیشروی میانگین در واحدهای مختلف آورده شده است. زمان‌های توقف ثبت شده که مربوط به شرایط توده‌سنگ بوده‌اند نیز در ادامه توضیح داده شده است.

جدول ۴-۵ زمان‌های حفاری و توقف، ضریب بهره‌وری و میزان نرخ نفوذ (کرج ۱)

واحد	دوره حفاری (روز)	مجموع توقفات (%)	ORD (%)	GRRD (%)	بهره‌وری (%)	متوسط نرخ پیشروی (m/day)	متوسط نرخ نفوذ (m/h)
Gta1-1	۸۴	۷۷/۱۳	۵۵/۶۸	۲۱/۴۵	۲۲/۸۷	۱۵/۸۸	۲/۸۹
Gta1-2	۸۹	۷۸/۵۵	۶۷/۸۵	۱۰/۷۰	۲۱/۴۵	۱۶/۵۷	۳/۲۲
Gta2	۱۱۴	۷۸/۶۴	۶۲/۰۵	۱۶/۵۹	۲۱/۳۶	۱۹/۷۸	۳/۸۶
Gta3	۸۹	۷۸/۴۵	۵۱/۰۴	۲۷/۴۱	۲۱/۵۵	۲۰/۰۴	۳/۸۷
Gta4	۲۵۷	۸۳/۸۰	۶۲/۰۴	۲۱/۷۶	۱۶/۲۰	۱۳/۶۷	۳/۵۲
Sts1	۱۰۱	۸۳/۸۸	۶۶/۱۵	۱۷/۷۳	۱۶/۱۲	۱۷/۷۲	۴/۵۸
Sts2	۱۱۲	۸۳/۱۰	۶۶/۴۸	۱۶/۶۲	۱۶/۹۰	۱۵/۷۳	۳/۸۸
Mdg	۳۴	۸۴/۴۹	۷۴/۳۵	۱۰/۱۴	۱۵/۵۱	۱۴/۹۳	۴/۰۱
Tsh	۵۱	۸۴/۳۷	۷۱/۴۷	۱۲/۹۰	۱۵/۶۳	۱۳/۳۷	۳/۵۶
Cz	۸۵	۹۱/۱۹	۳۷/۶۱	۵۳/۵۹	۸/۸۱	۶/۸۴	۳/۲۴

تمیزکاری کاترهد و بازدید دیسک کاترها: این زمان شامل بازدید و تمیزکاری کاترهد می‌باشد. در شرایط ریزشی و یا وجود رس یا سایر کانی‌های چسبنده در سنگ حفاری شده، دفعات بازدید و تمیزکاری افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به میزان ریزش و یا مقدار رس موجود در سنگ، به خصوص در شرایطی که آب زیرزمینی نیز وجود داشته باشد زمان تمیزکاری افزایش می‌یابد. از جمله عوامل دیگری که باعث افزایش دفعات بازدید کاترهد می‌شود، حفاری در سنگ‌های ساینده است. در این شرایط لازم است به طور مرتب دیسک‌ها از نظر میزان سایش و یا خرابی مورد بررسی قرار گیرند. بنابر این می‌توان این طور بیان نمود که این زمان رابطه مستقیم با شرایط ریزشی، وجود رس یا کانی‌های چسبنده، وجود آب زیرزمینی و همچنین سایندگی توده‌سنگ دارد.

ریزش برداری (آزاد نمودن کاترهد): این زمان به طور مشخص مربوط به آزاد سازی کاترهد در نواحی ریزشی است. در هنگام وقوع ریزش، کاترهد به وسیله بلوک‌های کوچک و بزرگی که در اثر ریزش شده‌اند قفل شده و امکان چرخیدن را از دست می‌دهد. در این شرایط علاوه بر بهسازی سینه-کار برای شروع مجدد حفاری، لازم است کاترهد آزاد شده و از سنگ‌های ریزشی تمیز شود. با توجه به آنچه بیان شد، این زمان با میزان ناپایداری و حجم ریزش ارتباط مستقیم دارد.

تعویض دیسک کاترها: هرچه سنگ ساینده‌تر باشد، عمر دیسک کاترها کوتاهتر بوده و در نتیجه در فواصل زمانی کوتاه‌تری تعویض می‌شوند. ساینده‌گی ممکن است به وجود کانی‌های ساینده در سنگ بکر، وجود بین لایه‌های ساینده و شرایط سینه کار مختلط (به طوری که لایه‌های قوی و ضعیف به طور متناوب در سینه کار وجود داشته باشند) مربوط باشد. در هر صورت در زمانی که توده سنگ به طور کلی ساینده بوده و یا باعث خرابی دیسک کاترها شود، این زمان افزایش می‌یابد.

بهسازی زمین: در نواحی ریزشی، زون‌های گسلی و یا وجود آب زیرزمینی به نحوی که امکان حفاری وجود نداشته باشد و یا پس از وقوع ریزش به منظور ایجاد شرایطی که بتوان حفاری را مجدداً آغاز نمود لازمست سینه کار به وسیله تزریق دوغاب و یا انواع فوم بهسازی شود. تزریق ممکن است به وسیله حفاری پیشرو و یا تزریق از طریق لوله‌هایی که از کاترهد به بخش ریزشی کشیده شده است انجام شود. زمانی که صرف عملیات بهسازی زمین می‌شود، در ارتباط با شرایط پایداری زمین می‌باشد.

نصب سیستم نگهداری (سگمنت های بتنی): با توجه به این که در TBM های سپردار سگمنت-های بتنی که همزمان نقش نگهداری دائم و موقت در داخل سپر نصب می‌شوند، این طور به نظر می‌رسد که زمانی صرف نصب آنها می‌شود به شرایط زمین ارتباطی نداشته باشد. اما در عمل در شرایطی که زمین ناپایدار بوده و یا نواحی که ریزش رخ داده است زمانی که صرف نصب سگمنت می‌شود از میانگین زمان نصب در شرایط عادی بیشتر است. این موضوع به دو عامل انحرافات دستگاه حفاری در این نواحی و جابجا شدن سگمنت‌های نصب شده قبلی نسبت به محور تونل می‌باشد. در

چنین شرایطی نصب رینگ سگمنت دشوارتر بوده و معمولا رینگ‌های نصب شده از کیفیت نصب پایین تری برخوردارند. البته در TBM های باز با توجه به افزایش میزان نگهداری موقت، بدیهی است که زمان نصب نیز افزایش می‌یابد.

توقفات ناشی از وجود آب زیرزمینی: با توجه به مقدار آب، توقفات ناشی از وجود آب زیرزمینی از ایجاد وقفه در عملیات تا توقف کامل عملیات تونلسازی متغیر است. یکی از متداول‌ترین عوامل تاخیرات، مربوط به تمیز کاری خرده‌سنگ‌ها یا گل لایی است که توسط آب به داخل سپر آورده می‌شود. در شرایطی که جریان شدید آب وجود داشته باشد، عملیات آبکشی ممکن است باعث توقف کامل حفاری شود. همچنین وجود آب زیرزمینی در نواحی ریزشی و یا در شرایطی که کانی‌های رسی وجود دارد، باعث افزایش مشکلات مربوط به آنها نیز می‌شود.

حفاری پیشرو: حفاری پیشرو با استفاده از دستگاه حفاری تعبیه شده در TBM به منظور بررسی شرایط سینه کار در نواحی که حفاری با مخاطرات زمین‌شناسی مانند وجود شرایط ریزشی گسل‌ها و غیره روبرو است، انجام می‌شود. از طریق حفاری پیشرو، تزریق به منظور بهسازی زمین نیز انجام می‌شود.

در شکل ۵-۵ هیستوگرام فراوانی داده‌ها و در جدول‌های ۵-۵ تا ۵-۱۴ خروجی نرم‌افزار SPSS که نشان دهنده بررسی آماری زمان‌های حفاری و توقف در واحدهای مختلف که هر کدام ناشی از شرایط زمین و توده‌سنگ می‌باشند، ارائه شده است.

جدول ۵-۵- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه در واحد Gta1-1

	BORING	CLEAN	CLEAR	CUTTER	IMPROVE	WATER	PROB	SUPPORT
N (day)	84	84	84	84	84	84	84	84
Mean	5.4892	.4067	.5596	.0377	.2112	.0000	.1310	3.8085
Median	5.5100	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	3.3550
Std. Error of Mean	.26185	.16401	.20661	.03774	.10009	.00000	.13095	.31051
Minimum	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
Maximum	12.92	9.50	10.75	3.17	5.92	.00	11.00	10.52
Range	12.92	9.50	10.75	3.17	5.92	.00	11.00	10.52
Std. Deviation	2.39988	1.50322	1.89365	.34588	.91731	.00000	1.20020	2.84589
Variance	5.759	2.260	3.586	.120	.841	.000	1.440	8.099

جدول ۵-۶- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه در واحد Gta1-2

	BORING	CLEAN	CLEAR	CUTTER	IMPROVE	WATER	PROB	SUPPORT
N (day)	89	89	89	89	89	89	89	89
Mean	5.1490	.7181	.1151	.5048	.5075	.0000	.0000	.7213
Median	5.9500	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
Std. Error of Mean	.28108	.25907	.06973	.22398	.28886	.00000	.00000	.13778
Minimum	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
Maximum	10.00	17.67	6.00	14.25	19.00	.00	.00	5.89
Range	10.00	17.67	6.00	14.25	19.00	.00	.00	5.89
Std. Deviation	2.65166	2.44409	.65783	2.11300	2.72509	.00000	.00000	1.29979
Variance	7.031	5.974	.433	4.465	7.426	.000	.000	1.689

جدول ۵-۷- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه در واحد Gta2

	BORING	CLEAN	CLEAR	CUTTER	IMPROVE	WATER	PROB	SUPPORT
N (day)	114	114	114	114	114	114	114	114
Mean	5.1258	1.6919	.0095	1.0264	.7348	.0000	.0000	.5193
Median	5.3750	.2500	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
Std. Error of Mean	.20552	.25021	.00947	.24185	.17191	.00000	.00000	.09720
Minimum	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	-.40
Maximum	10.08	12.92	1.08	16.00	9.42	.00	.00	5.98
Range	10.08	12.92	1.08	16.00	9.42	.00	.00	6.38
Std. Deviation	2.19434	2.67147	.10115	2.58221	1.83550	.00000	.00000	1.03786
Variance	4.815	7.137	.010	6.668	3.369	.000	.000	1.077

جدول ۵-۸- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه در واحد Gta3

	BORING	CLEAN	CLEAR	CUTTER	IMPROVE	WATER	PROB	SUPPORT
N (day)	89	89	89	89	89	89	89	89
Mean	5.1727	2.1236	.0609	3.8463	.1687	.0000	.0000	.3789
Median	5.7000	1.6700	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
Std. Error of Mean	.27379	.21470	.04307	.75509	.06628	.00000	.00000	.07833
Minimum	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
Maximum	9.17	12.00	3.75	24.00	4.25	.00	.00	4.09
Range	9.17	12.00	3.75	24.00	4.25	.00	.00	4.09
Std. Deviation	2.58291	2.02546	.40633	7.12349	.62530	.00000	.00000	.73901
Variance	6.671	4.102	.165	50.744	.391	.000	.000	.546

جدول ۵-۹- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه در واحد Gta4

	BORING	CLEAN	CLEAR	CUTTER	IMPROVE	WATER	PROB	SUPPORT
N (day)	257	257	257	257	257	257	257	257
Mean	3.8891	2.4894	.1060	2.0934	.2212	.0869	.0000	.2246
Median	4.0800	2.0800	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
Std. Error of Mean	.11632	.12855	.03759	.31013	.04933	.04178	.00000	.02745
Minimum	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	-.35
Maximum	8.17	13.17	5.58	24.00	5.83	7.17	.00	2.49
Range	8.17	13.17	5.58	24.00	5.83	7.17	.00	2.84
Std. Deviation	1.86471	2.06082	.60259	4.97173	.79086	.66979	.00000	.44002
Variance	3.477	4.247	.363	24.718	.625	.449	.000	.194

جدول ۵-۱۰- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه در واحد Sts-1

	BORING	CLEAN	CLEAR	CUTTER	IMPROVE	WATER	PROB	SUPPORT
N (day)	101	101	101	101	101	101	101	101
Mean	3.8680	2.2848	.2632	.4867	.7879	.0156	.0000	.4169
Median	4.0000	1.9200	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
Std. Error of Mean	.19787	.20047	.11796	.16323	.19881	.01564	.00000	.09360
Minimum	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
Maximum	8.33	7.33	8.17	9.75	12.33	1.58	.00	7.02
Range	8.33	7.33	8.17	9.75	12.33	1.58	.00	7.02
Std. Deviation	1.98859	2.01475	1.18552	1.64044	1.99802	.15722	.00000	.94072
Variance	3.955	4.059	1.405	2.691	3.992	.025	.000	.885

جدول ۵-۱۱- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه در واحد Sts2

	BORING	CLEAN	CLEAR	CUTTER	IMPROVE	WATER	PROB	SUPPORT
N (day)	112	112	112	112	112	112	112	112
Mean	4.0567	2.2821	.0157	.9032	.4678	.0000	.0000	.3197
Median	4.4200	2.2500	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
Std. Error of Mean	.15476	.15510	.00859	.23648	.12097	.00000	.00000	.06923
Minimum	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
Maximum	7.83	6.50	.75	15.92	8.25	.00	.00	5.39
Range	7.83	6.50	.75	15.92	8.25	.00	.00	5.39
Std. Deviation	1.63778	1.64147	.09087	2.50264	1.28025	.00000	.00000	.73262
Variance	2.682	2.694	.008	6.263	1.639	.000	.000	.537

جدول ۵-۱۲- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه در واحد Mdg

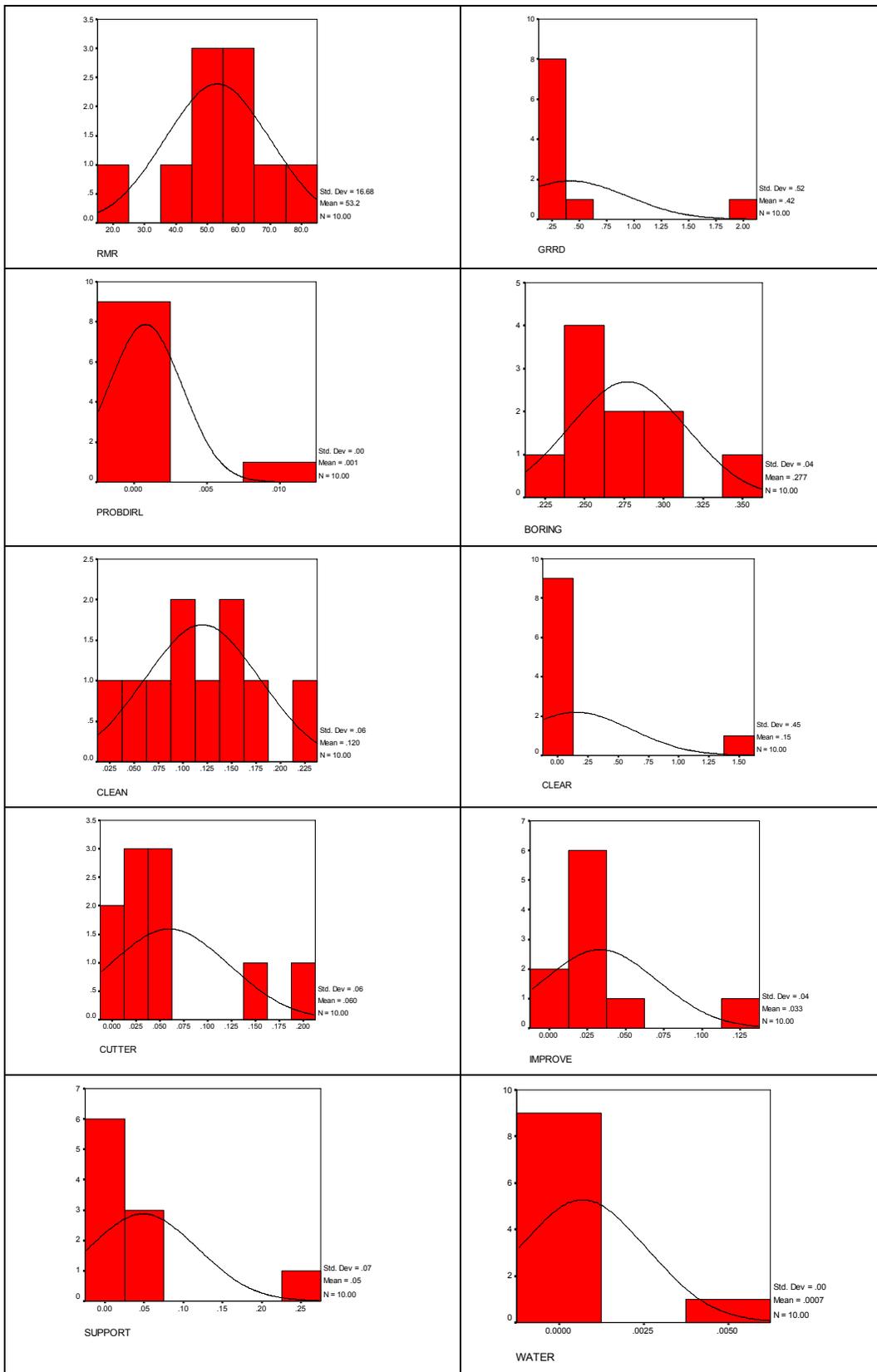
	BORING	CLEAN	CLEAR	CUTTER	IMPROVE	WATER	PROB	SUPPORT
N (day)	34	34	34	34	34	34	34	34
Mean	3.7230	1.6765	.0000	.3848	.1936	.0000	.0000	.0882
Median	3.7083	1.2917	.0000	.0000	.0417	.0000	.0000	.0000
Std. Error of Mean	.27022	.21334	.00000	.24401	.05800	.00000	.00000	.03066
Minimum	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
Maximum	7.17	5.00	.00	7.33	1.58	.00	.00	.58
Range	7.17	5.00	.00	7.33	1.58	.00	.00	.58
Std. Deviation	1.57564	1.24397	.00000	1.42282	.33817	.00000	.00000	.17878
Variance	2.483	1.547	.000	2.024	.114	.000	.000	.032

جدول ۵-۱۳- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه در واحد Tsh

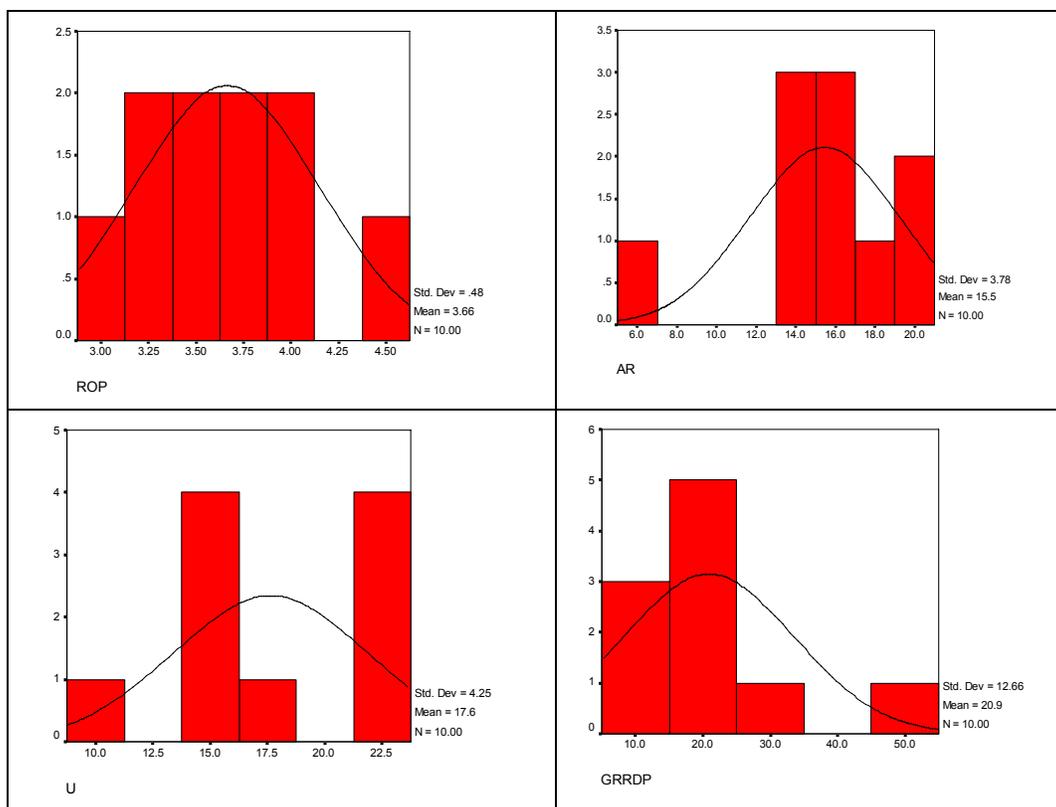
	BORING	CLEAN	CLEAR	CUTTER	IMPROVE	WATER	PROB	SUPPORT
N (day)	51	51	51	51	51	51	51	51
Mean	3.7516	2.0457	.1192	.6390	.0969	.0000	.0000	.1949
Median	4.1700	1.6700	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
Std. Error of Mean	.21487	.19946	.07908	.22558	.02649	.00000	.00000	.04054
Minimum	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
Maximum	6.17	6.00	3.00	6.50	.83	.00	.00	.95
Range	6.17	6.00	3.00	6.50	.83	.00	.00	.95
Std. Deviation	1.53445	1.42441	.56474	1.61098	.18919	.00000	.00000	.28953
Variance	2.355	2.029	.319	2.595	.036	.000	.000	.084

جدول ۵-۱۴- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه در واحد Cz

	BORING	CLEAN	CLEAR	CUTTER	IMPROVE	WATER	PROB	SUPPORT
N (day)	85	85	85	85	85	85	85	85
Mean	2.1138	1.4844	9.8896	.0755	.9195	.0000	.0000	.4916
Median	.3300	.0000	2.5000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
Std. Error of Mean	.27710	.47707	1.14454	.05320	.27895	.00000	.00000	.14336
Minimum	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
Maximum	7.50	24.00	24.00	3.42	12.00	.00	.00	7.64
Range	7.50	24.00	24.00	3.42	12.00	.00	.00	7.64
Std. Deviation	2.55476	4.39834	10.55215	.49052	2.57182	.00000	.00000	1.32168
Variance	6.527	19.345	111.348	.241	6.614	.000	.000	1.747



شکل ۵-۵- هیستوگرام فراوانی داده‌های مورد استفاده مربوط به زمان‌های توقف، حفاری و امتیاز توده‌سنگ (کرج ۱)



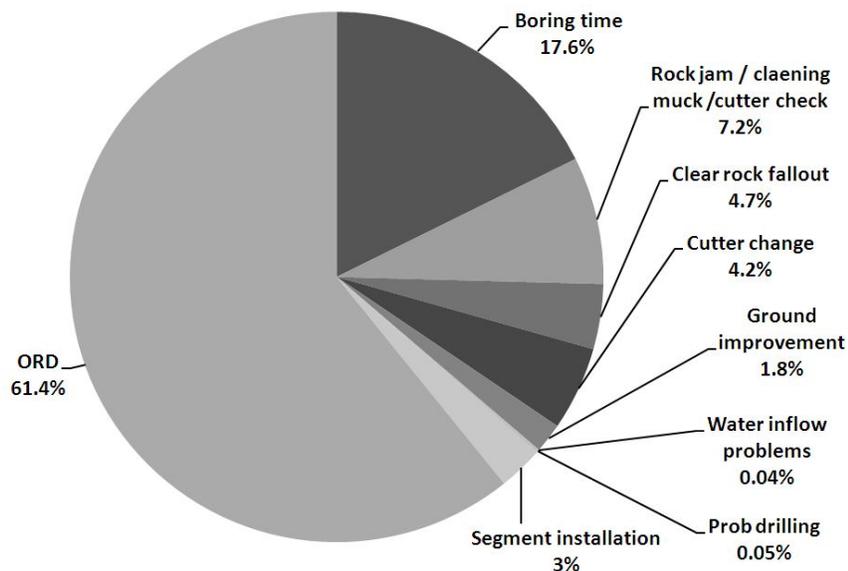
شکل ۵-۶- هیستوگرام فراوانی داده‌های مربوط به پارامترهای عملکرد (کرج ۱)

۵-۲-۱-۳- بررسی عملکرد TBM

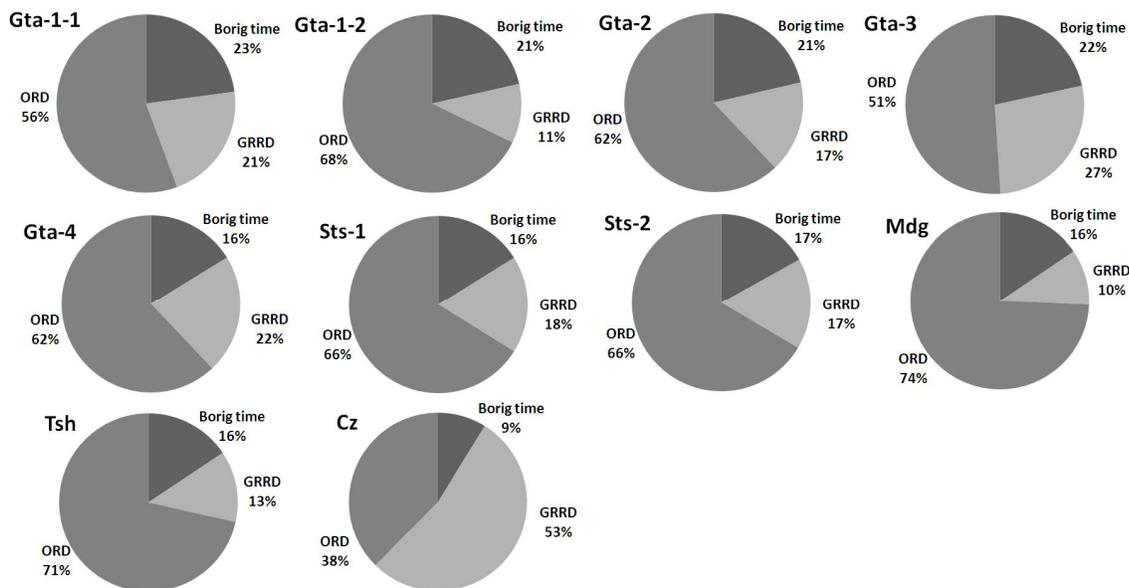
حداکثر نرخ نفوذ روزانه در این تونل $7/3$ متر بر ساعت، حداکثر نرخ پیشروی روزانه $38/9$ متر بر روز و حداکثر بهره‌وری روزانه نیز $53/8$ درصد بوده است. همچنین میانگین نرخ نفوذ و نرخ پیشروی روزانه در این تونل به ترتیب $3/32$ متر بر ساعت و $15/4$ متر بر روز بوده است. زمان‌های کاری و توقفات TBM در این تونل در شکل ۵-۷ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، $17/64$ درصد این زمان به حفاری اختصاص یافته است. حدود ۲۱ درصد توقفات نیز مرتبط با شرایط توده-سنگ بوده است.

به منظور بررسی عملکرد دستگاه حفاری، زمان‌های حفاری و توقف آن در واحدهای مختلف توده-سنگ به تفکیک مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۵-۸ ضریب بهره‌وری و زمان توقفات در واحدهای مختلف توده‌سنگ مسیر تونل با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود،

توقفاتی که به علت تعمیر و نگهداری، لجستیک، حمل و نقل (ORD) به وجود آمده است، بیشترین سهم را داشته است. کمترین توقفات مربوط به شرایط توده سنگ (GRRD) در واحدهای Gta1-2 (۵۰٪) و (RMR = ۶۳) Mdg به دست آمده است.



شکل ۵-۷- زمان‌های کاری و توقفات TBM (کرج ۱)



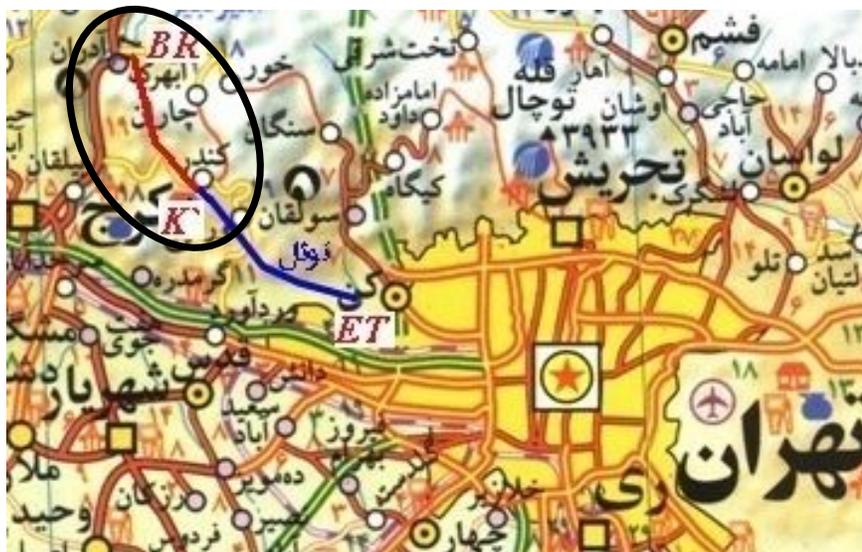
شکل ۵-۸- زمان‌های کاری و توقفات TBM در واحدهای مختلف (کرج ۱)

در این تونل به طور کلی حدود ۲۱ درصد توقفات به خاطر شرایط توده‌سنگ رخ داده است. کمترین توقفات مربوط به شرایط توده‌سنگ در واحدهای Gta1-2 (RMR = ۵۰) و Mdg (۶۳) = (RMR) به دست آمده است.

عواملی مانند وجود سینه کار مختلط، رس و آب زیرزمینی نیز در بروز توقفات TBM موثرند. مقایسه میانگین توقفات در کل تونل با این شرایط نشان می‌دهد وجود این عوامل تا حد زیادی می‌توانند توقفات ناخواسته را افزایش دهند. این مسئله در شرایط ریزشی و یا وجود آب زیرزمینی تاثیر فوق‌العاده‌ای از خود نشان می‌دهد. در صورتی که طول زیادی از مسیر تونل در شرایط ریزشی حفاری شود، میزان توقفات به خاطر ریزش برداری و یا بهسازی زمین به شدت افزایش می‌یابد.

۵-۲-۲- تونل انتقال آب کرج قطعه دوم

قطعه دوم تونل انتقال آب از سد امیرکبیر به تصفیه خانه شماره ۶ تهران با طول حدود ۱۴ کیلومتر بخش دیگری از پروژه آبرسانی به غرب تهران است (قطعه BR-K). موقعیت این تونل در شکل ۵-۹ نشان داده شده است.



شکل ۵-۹- موقعیت تونل انتقال آب کرج قطعه دوم

تونل کرج ۲ از حوالی روستای کندر (K)، با طول برابر ۱۳۴۷۰/۸ متر و شیب طولی ۰/۰۰۱۳۷ با استفاده از D.S.TBM با قطر حفاری ۴/۶۶۵ متر تا پایین دست سد تنظیمی کرج (BR) اجرا شده است. داده‌های مورد استفاده از مترژ ۱۳۵ تا مترژ ۱۰۶۳۹ می‌باشد که این بخش از تونل تا پایان آبان ۱۳۹۰ حفاری شده است (شروع حفاری آبان ۱۳۸۸). حفاری این تونل در تاریخ ۱۱ اردیبهشت ۱۳۹۱ به پایان رسید. حدود ۱۳۳ متر ابتدایی این تونل با قطر بیشتر و با استفاده از روش حفاری و آتشباری حفاری شده است که از این فضا برای لجستیک تونل استفاده شده است. این تونل با همان TBM قطعه اول تونل کرج پس از اورهال و تعویض کاترهد، حفاری می‌شود. بنابراین مشخصات هندسی تونل مشابه قطعه اول می‌باشد. در شکل ۵-۱۰ تصاویر TBM قبل و پس از اورهال و در شکل ۵-۱۱ انتقال آن از قطع ۱ به قطعه ۲ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۰- تصاویر TBM قبل و پس از اورهال (کرج ۲)

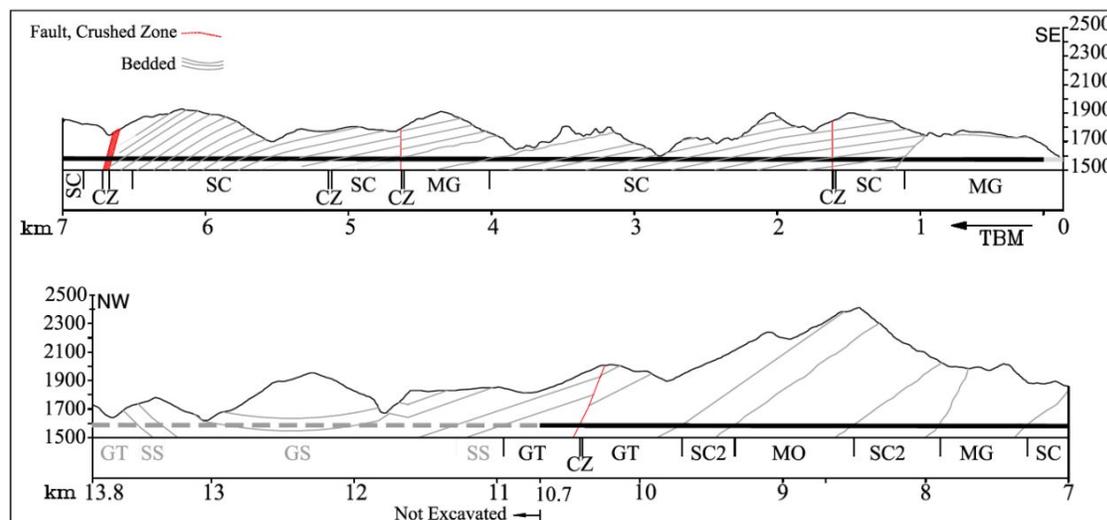


شکل ۵-۱۱- انتقال TBM از قطعه ۱ به قطعه ۲ پس از اورهال (کرج ۲)

۵-۲-۲-۱- زمین شناسی مسیر تونل

واحدهای توده‌سنگی تشکیل دهنده مسیر تونل دارای منشاهای گوناگونی می‌باشند. برخی واحدها سنگ‌های رسوبی هستند. این توده‌های سنگی بیشتر شامل ماسه سنگ و سیلت استون می‌باشند. واحدهای دارای منشا آذرآواری نیز بخشی از مسیر تونل را در بر می‌گیرند که شامل توف و ماسه سنگ توفی است. همچنین بخش بزرگی از مسیر از سنگ‌های آذرین که شامل مونزودیوریت، مونزوگابرو، میکروگابرو و برش لاوایی آندزیتی تشکیل شده است (ساحل ۱۳۸۸).

با توجه به مطالعات زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی انجام شده در مراحل مختلف و با در نظر گرفتن تکرار واحدها در قسمت‌های مختلف مجموعاً در محدوده مورد مطالعه، ۸ واحد توده‌سنگی قابل تفکیک است. پروفیل زمین‌شناسی مهندسی تونل در شکل ۵-۱۲ نشان داده شده‌است. واحدهای توده‌سنگی در بخش حفاری شده تونل در جدول ۵-۱۵ معرفی شده‌اند (ساحل ۱۳۸۸).



شکل ۵-۱۲- پروفیل زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل کرج ۲ (ساحل ۱۳۸۸)

جدول ۵-۱۵- واحد توده‌سنگی مسیر تونل کرج ۲ (ساحل ۱۳۸۸)

واحد توده‌سنگی	طول (متر)	RMR	آب زیرزمینی	توضیحات
MG	۳۸۴۴	۶۷	خشک تا خیس	بلوکی، بلوک‌های بزرگ، دارای دو دسته درزه، هوازگی کم، پایدار
SC	۳۹۰۱	۴۰	خشک تا خیس	دارای لایه‌بندی، بلوک‌های متوسط، دارای سه دسته درزه، هوازگی متوسط، تقریباً ناپایدار
SC2	۲۶۹	۴۵	مرطوب تا خیس	دارای لایه‌بندی، بلوک‌های متوسط، دارای سه دسته درزه، هوازگی متوسط، تقریباً ناپایدار
MO	۸۳۷	۶۷	خشک تا چکیدن	بلوکی، بلوک‌های بزرگ، دارای سه دسته درزه، هوازگی کم، پایدار
GT	۱۰۲۷	۵۰	مرطوب تا جریان	دارای لایه‌بندی، بلوک‌های متوسط، دارای سه دسته درزه، هوازگی متوسط، تقریباً ناپایدار
Cz2	۳۸۱	۳۰	چکیدن تا جریان	دارای لایه‌بندی، بلوک‌های کوچک، دارای چهار دسته درزه، هوازگی زیاد، ناپایدار

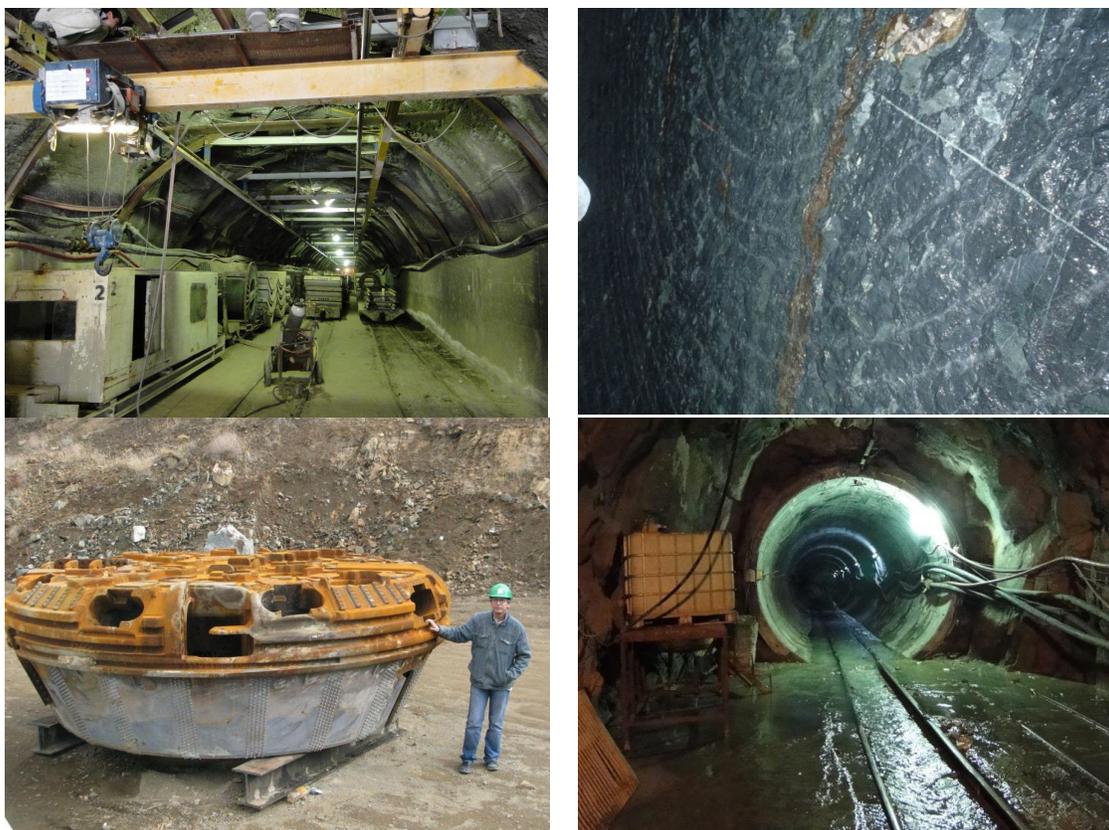
* واحدهای SS و GS در محدوده حفاری شده تونل واقع نشده‌اند.

۵-۲-۲-۲- پایگاه داده‌های تونل کرج قطعه ۲

اطلاعات مورد استفاده شامل گزارش‌ها و نقشه‌های زمین‌شناسی مهندسی، نقشه‌های چون ساخت، گزارش‌های روزانه حفاری و اپراتوری، مشاهدات و داده‌های جمع‌آوری شده در زمان اجرا در مدت ۷۳۰ روز، از کیلومتر ۱۳۵+ تا ۱۰+۶۳۹ انجام شده است. در شکل ۵-۱۳ بازدیدهای انجام شده از این تونل نشان داده شده است. با توجه با این داده‌ها زمان‌های حفاری، توقفات، توقفات ناشی از شرایط زمین‌شناسی، نرخ نفوذ، بهره‌وری و نرخ پیشروی و همچنین شرایط توده‌سنگ شامل طبقه-بندی ژئومکانیکی، شرایط آب زبرزمینی، وجود رس، سینه کار مختلط و غیره در واحدهای مختلف توده‌سنگی به دست آمده است و برای آن یک پایگاه داده‌ای تشکیل داده شده است. این زمان‌ها در جدول ۵-۱۶ آورده شده است. در جدول ۵-۱۷ نیز زمان‌های حفاری، توقف، ضریب بهره‌وری، نرخ نفوذ و نرخ پیشروی میانگین در واحدهای مختلف آورده شده است. در جدول های ۵-۱۸ تا ۵-۲۳ خروجی نرم‌افزار SPSS که نشان دهنده بررسی آماری زمان‌های توقف در واحدهای مختلف که هر کدام ناشی از شرایط زمین و توده‌سنگ ارائه شده است.

جدول ۵-۱۶- تاخیرات به وجود آمده به دلیل شرایط توده‌سنگ به ازای هر متر حفاری (کرج ۲)

$\hat{\sigma}_t^2$	واحد	حفاری پیشرو (h/m)	جریان آب (h/m)	نصب سگمنت (h/m)	بهسازی زمین (h/m)	تعویض کاتر (h/m)	ریزش برداری (h/m)	بازدید و تمیزکاری کاتر (h/m)
۱	MG	۰/۰۰۰	۰/۰۱۷	۰/۰۴۰	۰/۰۰۰	۰/۰۴۶	۰/۰۰۱	۰/۱۶۸
۲	SC	۰/۰۰۰	۰/۰۳۸	۰/۰۲۴	۰/۰۰۰	۰/۰۶۸	۰/۰۰۳	۰/۱۶۱
۳	SC2	۰/۰۰۰	۰/۰۱۸	۰/۰۱۷	۰/۰۰۰	۰/۰۶۸	۰/۰۰۱	۰/۲۳۲
۴	MO	۰/۰۰۰	۰/۰۰۷	۰/۰۱۴	۰/۰۰۰	۰/۱۲۲	۰/۰۰۴	۰/۲۰۱
۵	Cz-2	۰/۰۰۰	۰/۰۰۵	۰/۰۰۷	۰/۰۰۰	۰/۰۴۳	۰/۰۰۰	۰/۱۲۳
۶	GT	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۷	۰/۰۰۰	۰/۰۷۳	۰/۰۰۰	۰/۱۴۵



شکل ۵-۱۳- سایت کرج ۲، تعویض کاترهد TBM بازدید سینه کار و جریان آب زیرزمینی (کرج ۲)

جدول ۵-۱۷- زمان‌های حفاری و توقف، ضریب بهه وری و میزان نرخ نفوذ (کرج ۲)

متوسط نرخ نفوذ (m/h)	متوسط نرخ پیشروی (m/day)	بهره وری (%)	GRRD (%)	ORD (%)	مجموع توقفات (%)	دوره حفاری (روز)	واحد
۳/۴۰۹	۱۲/۸۱۳	۱۵/۶۶۰	۱۴/۵۱۶	۶۹/۸۲۴	۸۴/۳۴۰	۳۰۰	MG
۳/۳۵۳	۱۵/۳۵۹	۱۹/۰۸۳	۱۸/۸۳۱	۶۲/۰۸۶	۸۰/۹۱۷	۲۵۴	SC
۲/۴۷۷	۱۷/۰۷۰	۲۸/۷۰۸	۳۶/۹۶۵	۳۴/۳۲۷	۷۱/۲۹۲	۳۸	SC2
۲/۱۷۷	۱۳/۰۸۰	۲۵/۰۳۰	۳۰/۲۲۶	۴۴/۷۴۴	۷۴/۹۷۰	۶۴	MO
۳/۷۴۵	۲۱/۱۷۳	۲۳/۵۵۷	۳۵/۰۱۲	۴۱/۴۳۱	۷۶/۴۴۳	۱۸	GT
۲/۷۶۵	۱۸/۳۴۷	۲۷/۶۴۴	۳۴/۶۶۱	۳۷/۶۹۵	۷۲/۳۵۶	۵۶	Cz2

جدول ۵-۱۸- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه در واحد MG

	BORING	CLEAN	CLEAR	CUTTER	IMPROVE	WATER	PROB	SUPPORT
N	300	300	300	300	300	300	300	300
Mean	3.7587	2.1510	.0129	.5942	.0000	.2160	.0000	.5109
Median	3.4500	2.0400	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
Std. Error of Mean	.15673	.10974	.00406	.09161	.00000	.05371	.00000	.05192
Minimum	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
Maximum	11.60	11.25	.80	13.33	.00	7.83	.00	5.43
Range	11.60	11.25	.80	13.33	.00	7.83	.00	5.43
Std. Deviation	2.71467	1.90067	.07039	1.58667	.00000	.93023	.00000	.89923
Variance	7.369	3.613	.005	2.518	.000	.865	.000	.809

جدول ۵-۱۹- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه در واحد SC

	BORING	CLEAN	CLEAR	CUTTER	IMPROVE	WATER	PROB	SUPPORT
N	254	254	254	254	254	254	254	254
Mean	4.5798	2.4763	.0478	1.0400	.0000	.5862	.0000	.3663
Median	5.0750	2.2500	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
Std. Error of Mean	.16122	.12041	.01068	.13596	.00000	.12253	.00000	.04626
Minimum	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
Maximum	10.47	12.00	1.17	13.25	.00	15.75	.00	5.63
Range	10.47	12.00	1.17	13.25	.00	15.75	.00	5.63
Std. Deviation	2.56939	1.91894	.17023	2.16687	.00000	1.95277	.00000	.73722
Variance	6.602	3.682	.029	4.695	.000	3.813	.000	.543

جدول ۵-۲۰- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه در واحد SC2

	BORING	CLEAN	CLEAR	CUTTER	IMPROVE	WATER	PROB	SUPPORT
N	38	38	38	38	38	38	38	38
Mean	6.8895	3.3774	.0395	.9582	.0000	.1274	.0000	.1955
Median	6.7400	2.5000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
Std. Error of Mean	.37953	.41836	.02380	.28347	.00000	.05807	.00000	.08539
Minimum	1.80	.42	.00	.00	.00	.00	.00	.00
Maximum	12.48	10.17	.83	6.67	.00	1.50	.00	2.40
Range	10.68	9.75	.83	6.67	.00	1.50	.00	2.40
Std. Deviation	2.33960	2.57893	.14671	1.74744	.00000	.35797	.00000	.52637
Variance	5.474	6.651	.022	3.054	.000	.128	.000	.277

جدول ۵-۲۱- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه در واحد MO

	BORING	CLEAN	CLEAR	CUTTER	IMPROVE	WATER	PROB	SUPPORT
N	64	64	64	64	64	64	64	64
Mean	6.0075	2.1877	.0248	1.5870	.0000	.0377	.0000	.3630
Median	7.0850	1.8300	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
Std. Error of Mean	.48886	.28266	.01098	.30199	.00000	.03283	.00000	.08598
Minimum	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
Maximum	10.93	10.33	.42	10.83	.00	2.08	.00	2.75
Range	10.93	10.33	.42	10.83	.00	2.08	.00	2.75
Std. Deviation	3.91089	2.26131	.08787	2.41594	.00000	.26260	.00000	.68787
Variance	15.295	5.114	.008	5.837	.000	.069	.000	.473

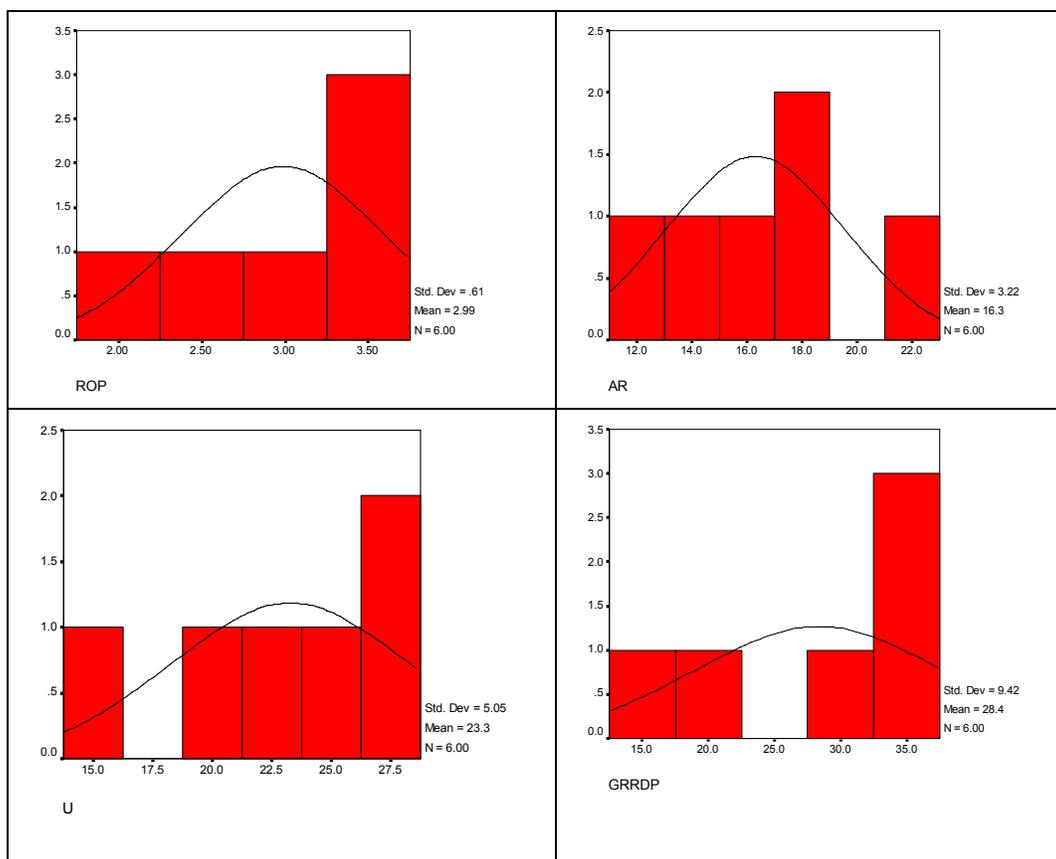
جدول ۵-۲۲- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه در واحد GT

	BORING	CLEAN	CLEAR	CUTTER	IMPROVE	WATER	PROB	SUPPORT
N	56	56	56	56	56	56	56	56
Mean	6.6345	2.6620	.0045	1.3332	.0000	.0000	.0000	.1330
Median	6.9100	2.2900	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
Std. Error of Mean	.42210	.24752	.00446	.33179	.00000	.00000	.00000	.04589
Minimum	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
Maximum	12.10	9.08	.25	13.50	.00	.00	.00	2.36
Range	12.10	9.08	.25	13.50	.00	.00	.00	2.36
Std. Deviation	3.15869	1.85228	.03341	2.48288	.00000	.00000	.00000	.34339
Variance	9.977	3.431	.001	6.165	.000	.000	.000	.118

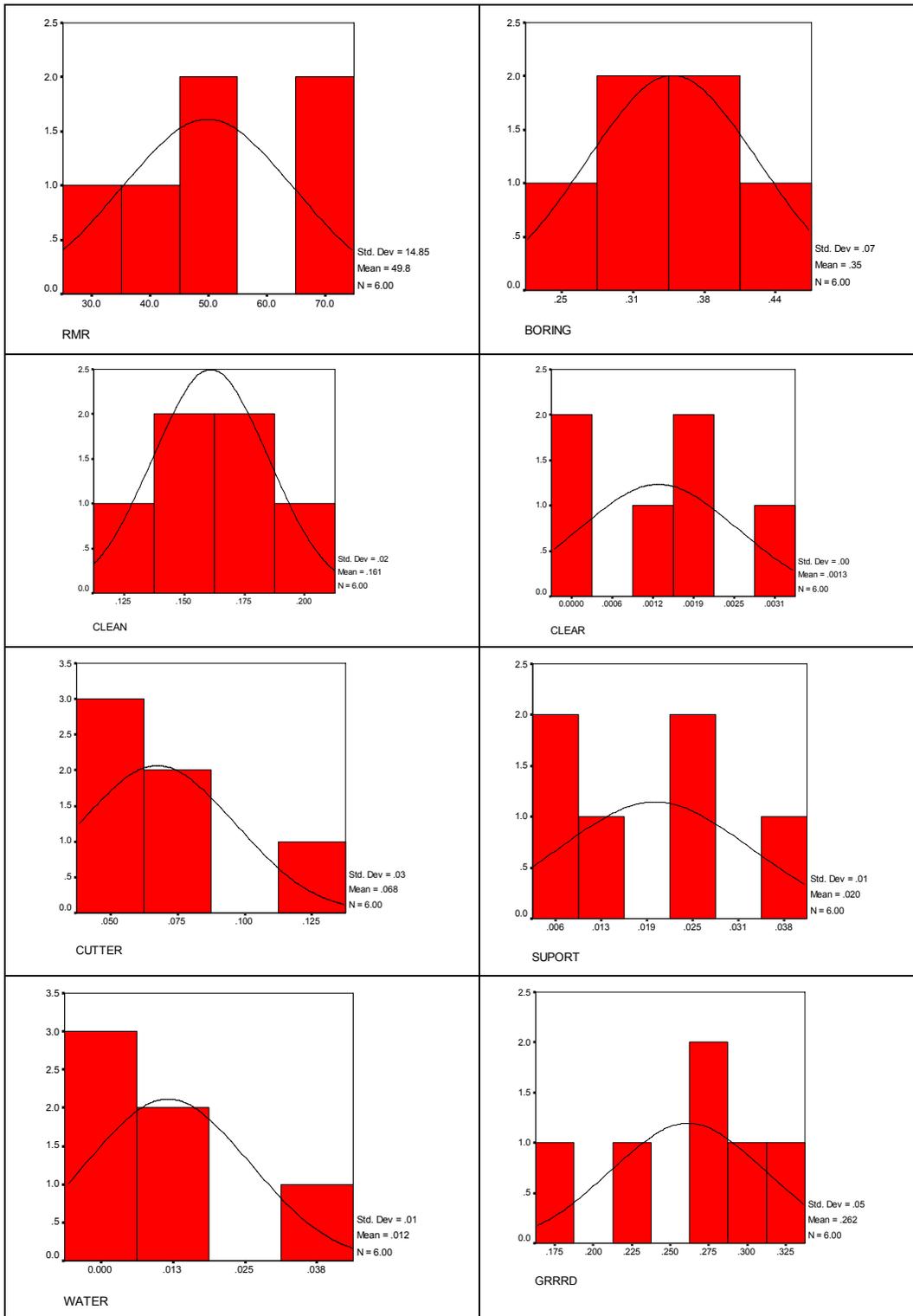
جدول ۵-۲۳- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه در واحد Cz2

	BORING	CLEAN	CLEAR	CUTTER	IMPROVE	WATER	PROB	SUPPORT
N	18	18	18	18	18	18	18	18
Mean	5.6528	2.6800	.0044	.8656	.0000	.1067	.0000	.1950
Median	5.7750	2.7500	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.1450
Std. Error of Mean	.27116	.26391	.00444	.39777	.00000	.05260	.00000	.05754
Minimum	2.97	.25	.00	.00	.00	.00	.00	.00
Maximum	7.78	4.58	.08	4.75	.00	.75	.00	.86
Range	4.81	4.33	.08	4.75	.00	.75	.00	.86
Std. Deviation	1.15044	1.11967	.01886	1.68760	.00000	.22316	.00000	.24414
Variance	1.324	1.254	.000	2.848	.000	.050	.000	.060

در شکل‌های ۵-۱۴ و ۵-۱۵ نیز هیستوگرام فراوانی داده‌های مورد نظر نشان داده شده است. در جدول ۴ نیز زمان‌های حفاری و توقف، ضریب بهره‌وری و میزان نرخ نفوذ در واحدهای مختلف توده-سنگ آورده شده است.



شکل ۵-۱۴- هیستوگرام فراوانی داده‌های مربوط به پارامترهای عملکرد

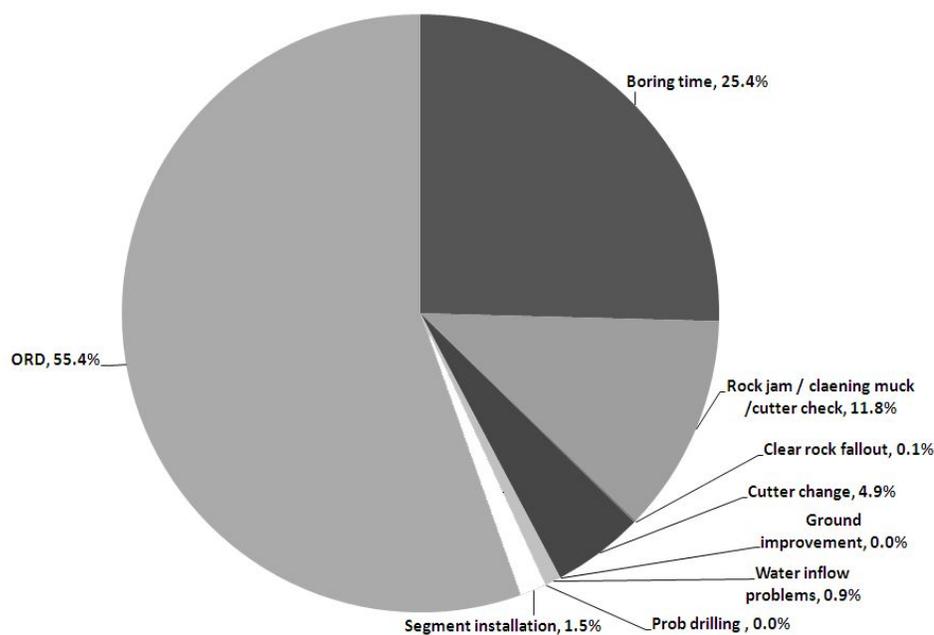


شکل ۵-۱۵- هیستوگرام فراوانی داده‌های مورد استفاده مربوط به زمان های توقف، حفاری و امتیاز توده‌سنگ

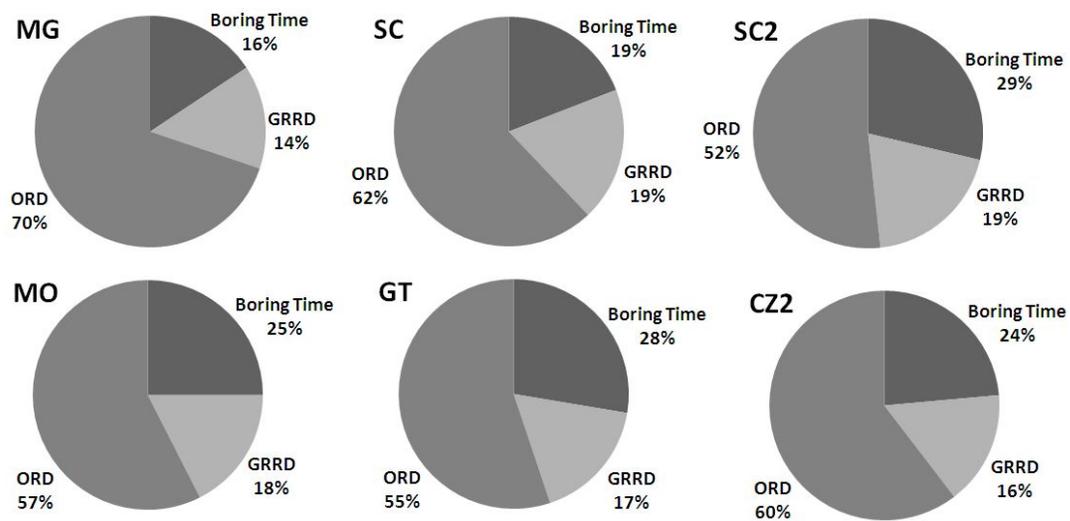
۵-۲-۳- بررسی عملکرد TBM در تونل کرج ۲

با توجه به پایگاه داده‌ای تشکیل داده شده، حداکثر نرخ نفوذ روزانه در این تونل ۶/۶۳ متر بر ساعت، حداکثر نرخ پیشروی روزانه ۳۹/۰۳ متر بر روز و حداکثر بهره‌وری روزانه نیز ۵۲/۰۳ درصد بوده است. همچنین میانگین نرخ نفوذ و نرخ پیشروی روزانه در این تونل به ترتیب ۲/۷۷ متر بر ساعت و ۱۵/۶ متر بر روز بوده است.

زمان‌های کاری و توقفات TBM در این تونل در شکل ۵-۱۶ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، ۲۵/۴ درصد این زمان به حفاری اختصاص یافته است. حدود ۱۹ درصد توقفات نیز مرتبط با شرایط توده‌سنگ بوده است. در شکل ۵-۱۷ ضریب بهره‌وری و زمان توقفات در واحدهای مختلف مسیر تونل با یکدیگر مقایسه شده‌اند.



شکل ۵-۱۶- زمان‌های کاری و توقفات TBM (کرج ۲)



شکل ۵-۱۷- زمان‌های کاری و توقفات TBM در واحدهای مختلف (کرج ۲)

۵-۲-۳- تونل انتقال آب قمرود (قطعات ۳ و ۴)

یکی از اجزای اصلی سیستم انتقال آب از سرشاخه های حوزه دز به قمرود، تونل انتقال آب قمرود می باشد. این تونل به طول ۳۵۷۵۰ متر و قطر تمام شده ۳/۸ متر، امکان انتقال $۲۳\text{m}^3/\text{s}$ آب را فراهم می کند. ارتفاع کف تونل از سطح دریا در ابتدا و انتها به ترتیب ۲۰۵۵ و ۲۰۱۱ متر می باشد. جریان آب درون تونل بصورت ثقلی و از نوع جریان آزاد می باشد.

تونل قمرود از نظر موقعیت جغرافیایی در حد فاصل دو شهرستان گلپایگان و الیگودرز قرار گرفته است. این تونل ۳۶ کیلومتری از حوالی روستای برم و دعله ابراهیم در جنوب الیگودرز شروع و تا روستای سراب هنده در ۲۵ کیلومتری جنوب غرب گلپایگان ادامه می یابد و در مسیر خود از زیر روستاهای گندمینه، مغانک و شاپور آباد عبور می نماید. دسترسی به بخش خروجی تونل (انتهای قطعه چهارم) از طریق گلپایگان و جاده دسترسی به سد گلپایگان و روستای سراب هنده میسر است که در شکل ۵-۱۸ نشان داده شده است (ساحل ۱۳۸۱).



شکل ۵-۱۸- موقعیت تونل انتقال آب قمرود

قطعه ۳ و ۴ این تونل با استفاده از D.S.TBM با قطر حفاری ۴/۵۳ متر اجرا شده است. دستگاه حفاری مورد استفاده در شکل ۵-۱۹ نشان داده شده است. مشخصات دستگاه حفاری مذکور نیز در جدول ۵-۲۴ آورده شده است. پوشش نهایی تونل به وسیله قطعات پیش‌ساخته بتنی با آرایش هگزاگونال با ضخامت ۲۵ سانتیمتر تامین شده است. البته از سمت دهانه خروجی ۳۷۶ متر ابتدایی این تونل با استفاده از روش چالزنی و آتشیاری حفاری شده است (فروغ و همکاران ۱۳۸۴).

جدول ۵-۲۴- مشخصات دستگاه حفاری تونل انتقال آب قمرود

مقدار	پارامتر
۴/۵۳	قطر ماشین (m)
۴۳۲	قطر دیسک کاتر (mm)
۷۵	فاصله‌داری دیسک کاترها (mm)
۳۶	تعداد دیسک کاتر
۱۱۲۰	توان کاترهد (KW)
۱۲	سرعت کاترهد (RPM)
۱۶۰۰	گشتاور کاترهد (KN/m)
۱۸۰۰۰	حداکثر فشار پشت کاترهد (KN)



شکل ۵-۱۹- TBM مورد استفاده در تونل قمرود (قطعات ۳ و ۴)

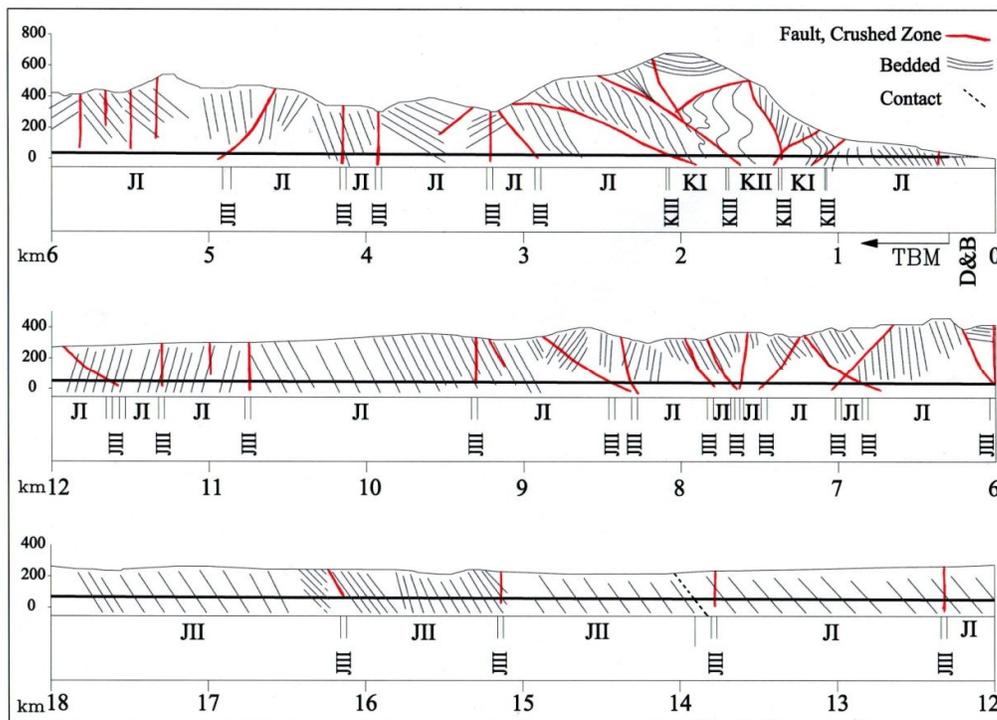
۵-۲-۳-۱- زمین شناسی مسیر تونل

منطقه مورد مطالعه درون پهنه سنندج - سیرجان قرار گرفته است. جوانترین ساختارهای اصلی زمین شناسی منطقه با روند شمال غرب - جنوب شرق شکل گرفته‌اند که بطور کلی با راستای پهنه اصلی سنندج - سیرجان همانندی دارند.

بر اساس نتایج به دست آمده از مطالعات زمین‌شناسی، در بخش مورد مطالعه از مسیر تونل (کیلومتر ۱۸+۰۰۰ تا ۳۴+۵۵۰)، صرف نظر از رسوبات و نهشته‌های واریزه‌ای سطحی، ۶ واحد توده-سنگی شناسایی شده‌است. این واحدها شامل ماسه سنگ‌های ریزدانه کوارتزار با درجه دگرگونی اندک، شیل و اسلیت‌های متورق، شیست‌های گرافیتی، شیست‌های کوارتز و میکا دار و رگه‌های کوارتزی می‌باشند. در انتهای این بخش از تونل نیز آهک‌های متورق و نیمه متورق و آهک‌های رسی- ماسه ای نازک تا متوسط لایه قرار گرفته‌اند. پروفیل زمین‌شناسی مهندسی این تونل در شکل ۵-۲۰ نشان داده شده است. مشخصات توده‌سنگ درونگیر تونل قمرود در جدول ۵-۲۵ آورده شده است (ساحل ۱۳۸۱).

جدول ۵-۲۵- واحد توده‌سنگی مسیر تونل قمرود (ساحل ۱۳۸۱)

واحد توده‌سنگی	طول (متر)	RMR	آب زیرزمینی	توضیحات
KI	۲۹۷/۶۶۹	۵۴	مرطوب تا خیس	توده‌ای تا لایه‌های ضخیم، تقریباً پایدار
KII	۵۹۵/۳۴۰	۴۱	مرطوب تا خیس	لایه‌بندی نازک تا متوسط، تقریباً پایدار
KIII	۱۵۵/۸۳۹	۲۱	چکیدن تا جریان	نواحی خرد شده K1 و K2، ناپایدار
JI	۱۰۶۲۶/۱۶۴	۳۸	مرطوب تا خیس	شیستوز، احتمالاً ناپایدار
JII	۴۳۳۴/۴۰۴	۴۱	مرطوب تا خیس	شیستوز، احتمالاً ناپایدار
JIII	۹۳۸/۲۷۱	۲۴	چکیدن تا جریان	نواحی خرد شده JI و JII، ناپایدار



شکل ۵-۲۰- پروفیل زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل قمرود (ساحل ۱۳۸۱)

۵-۲-۳-۲- پایگاه داده‌های تونل قمرود

اطلاعات مورد استفاده شامل گزارش‌ها و نقشه‌های زمین‌شناس مهندسی، نقشه‌های چون ساخت، گزارش‌های روزانه حفاری و توزیع زمانی فعالیت‌ها، بازدیدهای کارگاهی در زمان اجرا از اردیبهشت ۸۳ تا اسفند ۸۶ که شامل ۹۱۲ روز، از مترای ۷۲۰ تا ۱۸۰۱۳ (۱۷۰۱۸/۹۲ متر) انجام شده است. در این مطالعه ۲۷۷ متر حفاری شده در زمان توقف طولانی مدت پروژه از اسفند ۸۳ تا شهریور ۸۵ در نظر گرفته نشده است. در شکل ۵- ۲۱ نمونه‌هایی از بازدیدهای انجام شده از این تونل نشان داده شده است.

با توجه به این داده‌ها زمان‌های حفاری، توقفات، توقفات ناشی از شرایط زمین‌شناسی، نرخ نفوذ، بهره‌وری و نرخ پیشروی و همچنین شرایط توده‌سنگ شامل طبقه‌بندی ژئومکانیکی، شرایط آب زبرزمینی، وجود رس، سینه کار مختلط و غیره در واحدهای مختلف توده‌سنگی به دست آمده است و برای آن یک پایگاه داده‌ای تشکیل داده شده است. در این تونل توقفات مربوط به شرایط زمین به

تفکیک ثبت نشده است. در جدول ۵-۲۶ نیز که نشان دهنده بررسی آماری زمان‌های حفاری و توقف، ضریب بهره‌وری و میزان نرخ نفوذ بر اساس خروجی نرم‌افزار SPSS در واحدهای مختلف زمین‌شناسی مهندسی آورده شده است. در جدول‌های ۵-۲۷ تا ۵-۳۲ بررسی آماری زمان‌های توقف مربوط به توده سنگ و پارامترهای عملکرد TBM، ارائه شده است. در شکل ۵-۲۲ نیز هیستوگرام فراوانی داده‌های مورد نظر نشان داده شده است.

جدول ۵-۲۶- زمان‌های حفاری و توقف، ضریب بهره‌وری و میزان نرخ نفوذ (قمرود)

واحد	دوره حفاری (روز)	GRRD (%)	بهره‌وری (%)	متوسط نرخ پیشروی (m/day)	متوسط نرخ نفوذ (m/h)
KI	۳۱	۱۲/۲۸	۱۴/۷۶	۹/۶۰	۲/۷۱
KII	۳۸	۱۲/۷۵	۱۹/۷۲	۱۵/۶۷	۳/۳۱
KIII	۱۴	۲۷/۹۷	۱۴/۳۷	۱۱/۱۳	۳/۲۳
JI	۵۲۹	۲۶/۴۴	۱۶/۴۱	۲۰/۰۹	۵/۱۰
JII	۱۸۹	۱۴/۹۸	۱۷/۴۵	۲۲/۹۳	۵/۴۸
JIII	۱۱۰	۴۷/۳۴	۸/۵۹	۸/۹۴	۴/۳۴

جدول ۵-۲۷- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه و پارامترهای عملکرد TBM در واحد K1

	ROP	U	AR	GRRD
N	31	31	31	31
Mean	1.9434	14.7625	.4001	2.9355
Median	2.2960	10.6940	.3810	3.8000
Std. Error of Mean	.23129	2.45271	.06857	.32966
Minimum	.00	.00	.00	.00
Maximum	3.57	44.44	1.17	4.80
Range	3.57	44.44	1.17	4.80
Std. Deviation	1.28776	13.65611	.38177	1.83549
Variance	1.658	186.489	.146	3.369

جدول ۵-۲۸- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه و پارامترهای عملکرد TBM در واحد K2

	ROP	U	AR	GRRD
N	38	38	38	38
Mean	2.5503	19.7149	.6528	3.0579
Median	3.1140	22.6390	.7775	3.7500
Minimum	.00	.00	.00	.00
Maximum	4.44	40.90	1.42	5.90
Range	4.44	40.90	1.42	5.90
Std. Deviation	1.48684	13.31779	.43834	1.80669
Variance	2.211	177.364	.192	3.264

جدول ۵-۲۹- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه و پارامترهای عملکرد TBM در واحد K3

	ROP	U	AR	GRRD
N	14	14	14	14
Mean	1.7294	14.3650	.4638	6.7143
Median	1.6905	14.3750	.2845	4.1000
Minimum	.00	.00	.00	.00
Maximum	4.20	39.44	1.31	24.00
Range	4.20	39.44	1.31	24.00
Std. Deviation	1.71288	14.46514	.49936	7.88668
Variance	2.934	209.240	.249	62.200

جدول ۵-۳۰- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه و پارامترهای عملکرد TBM در واحد J1

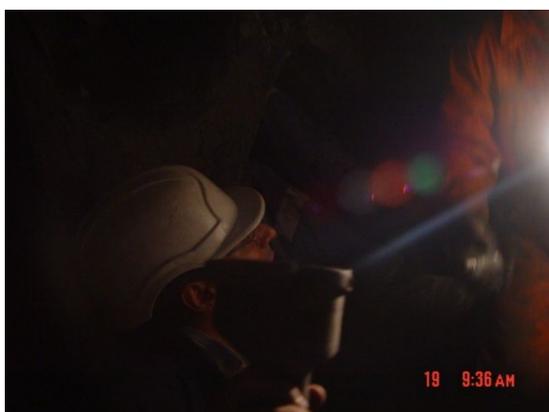
	ROP	U	AR	GRRD
N	529	529	529	529
Mean	3.8505	16.4145	.8370	6.3448
Median	4.7330	18.8890	.9820	3.8000
Minimum	.00	.00	.00	.00
Maximum	25.26	44.79	2.20	24.00
Range	25.26	44.79	2.20	24.00
Std. Deviation	2.67139	11.93232	.61434	7.36709
Variance	7.136	142.380	.377	54.274

جدول ۵-۳۱- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه و پارامترهای عملکرد TBM در واحد J2

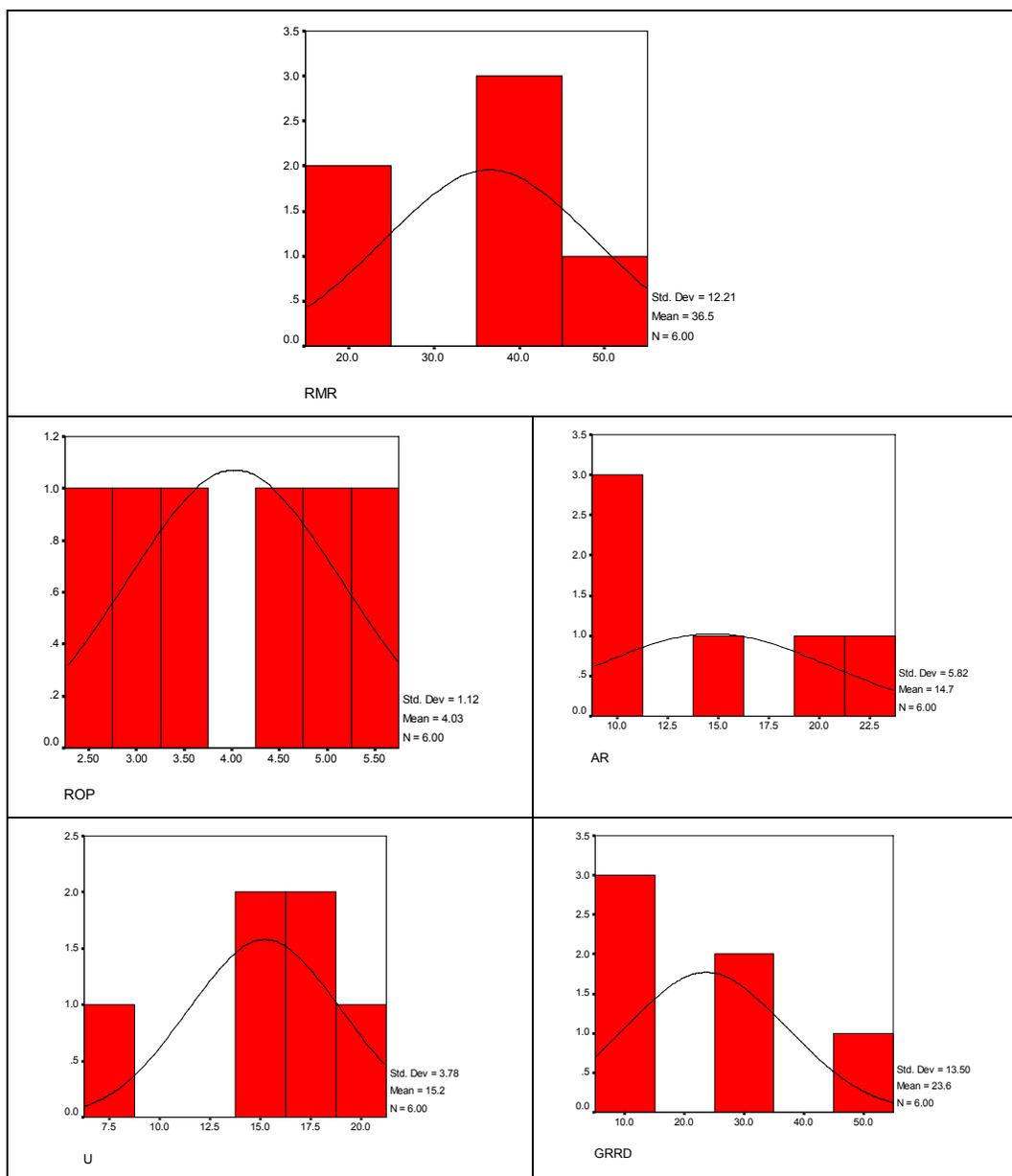
	ROP	U	AR	GRRD
N	189	189	189	189
Mean	4.9878	17.4515	.9556	3.5937
Median	5.5680	18.3330	1.0660	3.8000
Minimum	.00	.00	.00	.00
Maximum	7.84	36.67	1.86	5.00
Range	7.84	36.67	1.86	5.00
Std. Deviation	1.87437	8.42905	.45793	1.28963
Variance	3.513	71.049	.210	1.663

جدول ۵-۳۲- بررسی آماری زمان‌های توقف روزانه و پارامترهای عملکرد TBM در واحد J3

	ROP	U	AR	GRRD
N	110	110	110	110
Mean	1.6663	8.5852	.3724	11.3609
Median	.0000	.0000	.0000	4.4000
Minimum	.00	.00	.00	.00
Maximum	7.01	42.01	1.85	24.00
Range	7.01	42.01	1.85	24.00
Std. Deviation	2.24261	12.19213	.56047	10.66222
Variance	5.029	148.648	.314	113.683



شکل ۵-۲۱- بازدید از عملیات اجرایی و سینه کار (تونل قمرود)
(پایین سمت چپ: واحد شیلی، آزادسازی شیلد. راست: سینه کار واحد آهکی)



شکل ۵-۲۲- هیستوگرام فراوانی داده‌های تونل قمرود

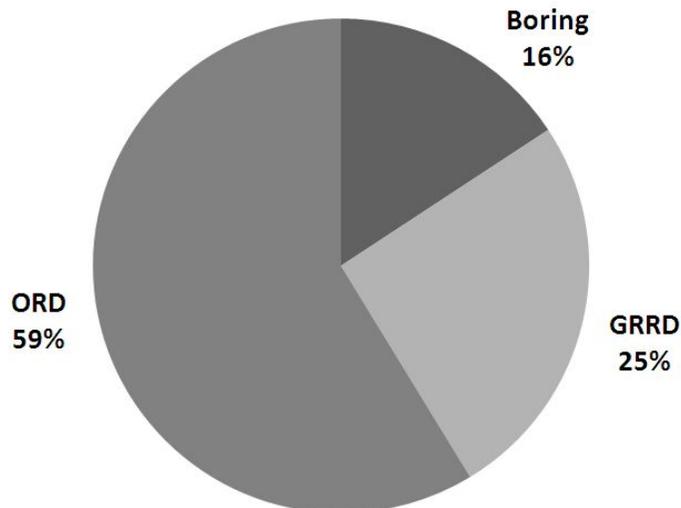
۵-۲-۳- بررسی عملکرد TBM تونل قمرود

در محدوده مورد مطالعه، حداکثر نرخ نفوذ روزانه ۸/۱۳۳ متر بر ساعت، حداکثر نرخ پیشروی روزانه ۵۲/۷۳۸ متر بر روز و حداکثر بهره‌وری روزانه نیز ۴۴/۷۹۲ درصد بوده است. در جدول ۵-۳۳ میانگین پارامترهای عملکرد دستگاه حفاری نشان داده شده است. در شکل ۵-۲۳ توزیع زمانی

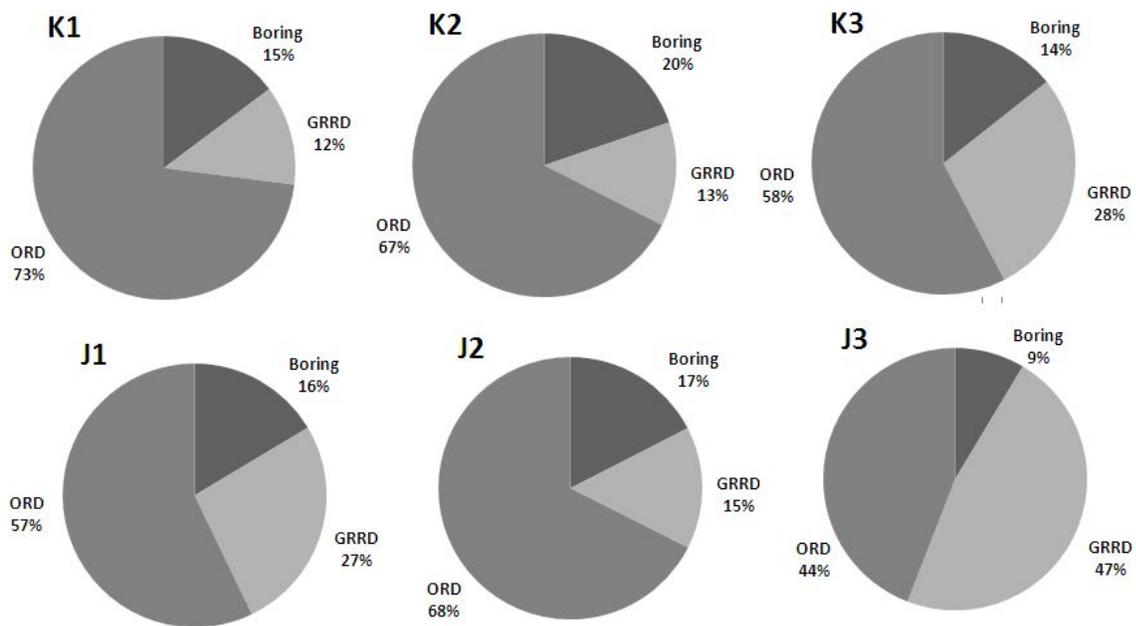
توقفات و حفاری تونل نشان داده شده است. در شکل ۵-۲۴ نیز این زمان‌ها به تفکیک برای واحدهای مختلف زمین‌شناسی مهندسی نشان داده شده است.

جدول ۵-۳۳- میانگین پارامترهای عملکرد دستگاه حفاری (قمرود)

توضیح	توقفات (%)	بهره‌وری (%)	میانگین نرخ پیشروی (m/d)	میانگین نرخ نفوذ (m/h)
بدون در نظر گرفتن توقفات طولانی مدت	۸۴/۳	۱۵/۷	۱۸/۷	۴/۹



شکل ۵-۳۳- زمان‌های کاری و توقفات TBM در واحدهای مختلف (قمرود)



شکل ۵-۲۴- زمان‌های کاری و توقفات TBM در واحدهای مختلف (قمرود)

۵-۳- تشکیل پایگاه داده‌ها

بر مبنای داده‌های به دست آمده از تونل‌ها و سطح اطلاعات آنها، پایگاه داده‌های آماری تشکیل داده شده تا در تحلیل‌هایی که به منظور ارائه روابطی به منظور پیش بینی میزان توقفات دستگاه حفاری در شرایط مختلف زمین‌شناسی ارائه می‌شوند مورد استفاده قرار گیرند. همانطور که در بررسی پروژه‌های مورد مطالعه مشاهده شد، به منظور تهیه پایگاه داده‌ها ابتدا با توجه به سطح داده‌های به دست آمده یک پایگاه داده‌ای مستقل برای هر تونل تشکیل داده شده است. در مرحله بعد با توجه به سطح‌بندی داده‌ها، پایگاه داده‌های نهایی که ماحصل مجموعه داده‌های پروژه‌های مورد بررسی است، تشکیل داده شده است. روند این کار به شرح ذیل است.

- بررسی گزارش‌های روزانه حفاری به منظور به دست آوردن نرخ نفوذ، نرخ پیشروی و بهره‌وری روزانه
 - بررسی گزارش‌های توزیع زمانی روزانه به منظور به دست آوردن زمان‌های کاری و توقف (در تونل‌های کرج ۱ و ۲ این زمان‌ها به تفکیک علت این توقفات جمع آوری شده است).
 - بررسی گزارش‌های زمین‌شناسی، زمین‌شناسی مهندسی، نقشه‌های زمین‌شناسی مهندسی و چون ساخت، به منظور تفکیک واحدهای توده‌سنگ و مشخص نمودن موقعیت شرایط نامناسب زمین در طول مسیر تونل.
 - تدقیق شرایط زمین و توده‌سنگ با توجه به بازدیدهای انجام شده از سینه کار، وضعیت مصالح حفاری شده، وجود آب زیرزمینی و شرایط تونل بعد از حفاری و سگمنت گذاری در طول دوره اقامت در سایت و بازدیدهای دوره‌ای بعدی.
 - بررسی گزارش‌های ماهانه کارگاه به منظور تکمیل روند مطالعات انجام شده.
- با توجه به موارد بیان شده، میانگین نرخ نفوذ، پیشروی، ضریب بهره‌وری، توقفات مربوط به شرایط توده‌سنگ بر حسب ساعت بر متر و درصد زمانی، برای هر واحد توده‌سنگی محاسبه شده است.

۵-۳-۱- سطح بندی داده‌ها

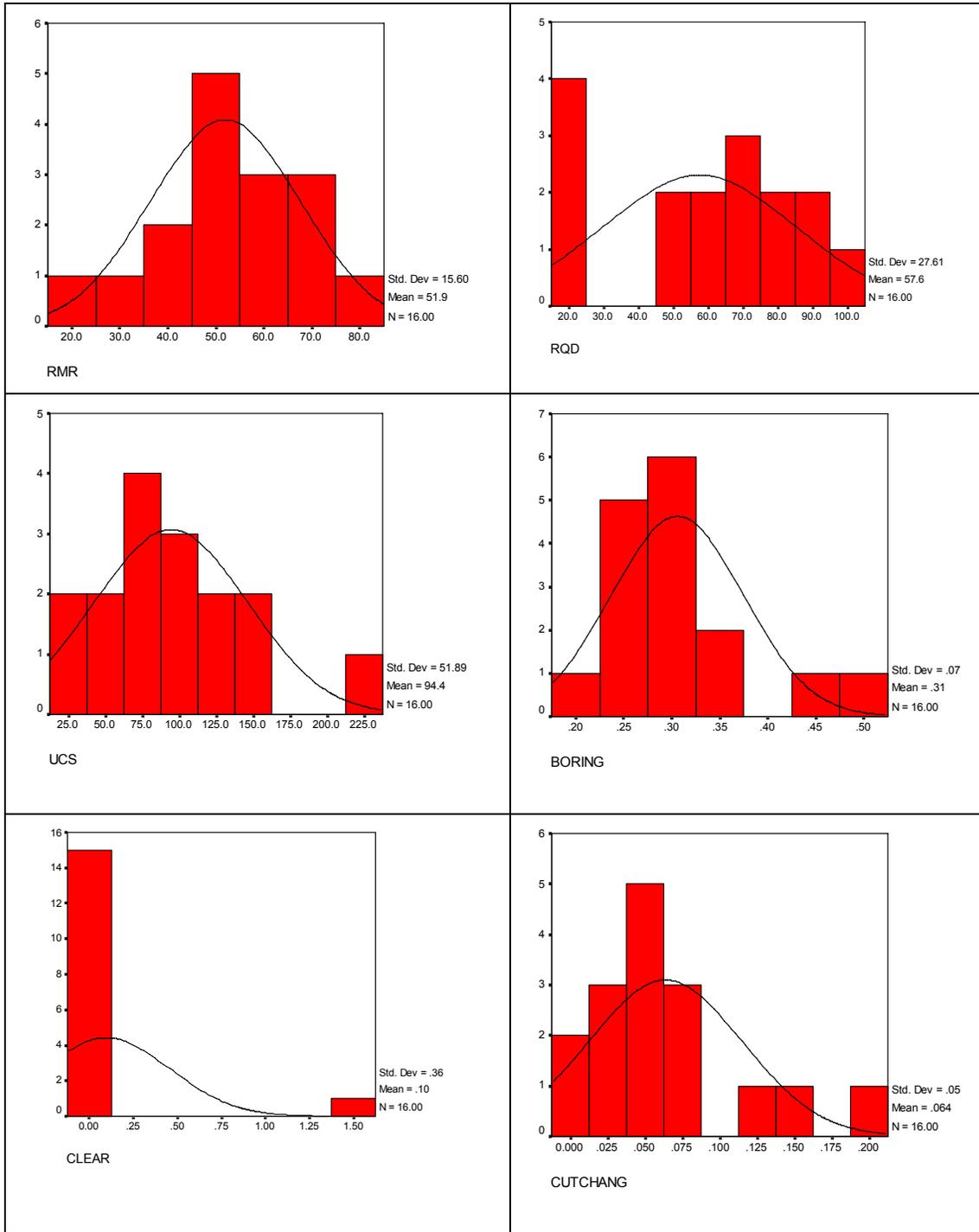
داده‌های مورد استفاده بر حسب میزان اطلاعات به ۲ سطح تقسیم‌بندی شده‌اند. سطح اول تنها شامل تونل‌های کرج ۱ و کرج ۲ می‌باشد. در این دو تونل با توجه به داده‌های جمع‌آوری شده، توقفات مربوط به توده‌سنگ و شرایط زمین به صورت مجزا محاسبه شده است. سطح دوم شامل تونل-های کرج ۱، کرج ۲ تونل و قمرود (قطعات ۳ و ۴) است که در آن توقفات ناشی از شرایط زمین به صورت کلی تعیین شده است (جدول ۶-۳۴).

جدول ۶-۳۴- سطح داده‌های به دست آمده در تونل‌های مختلف

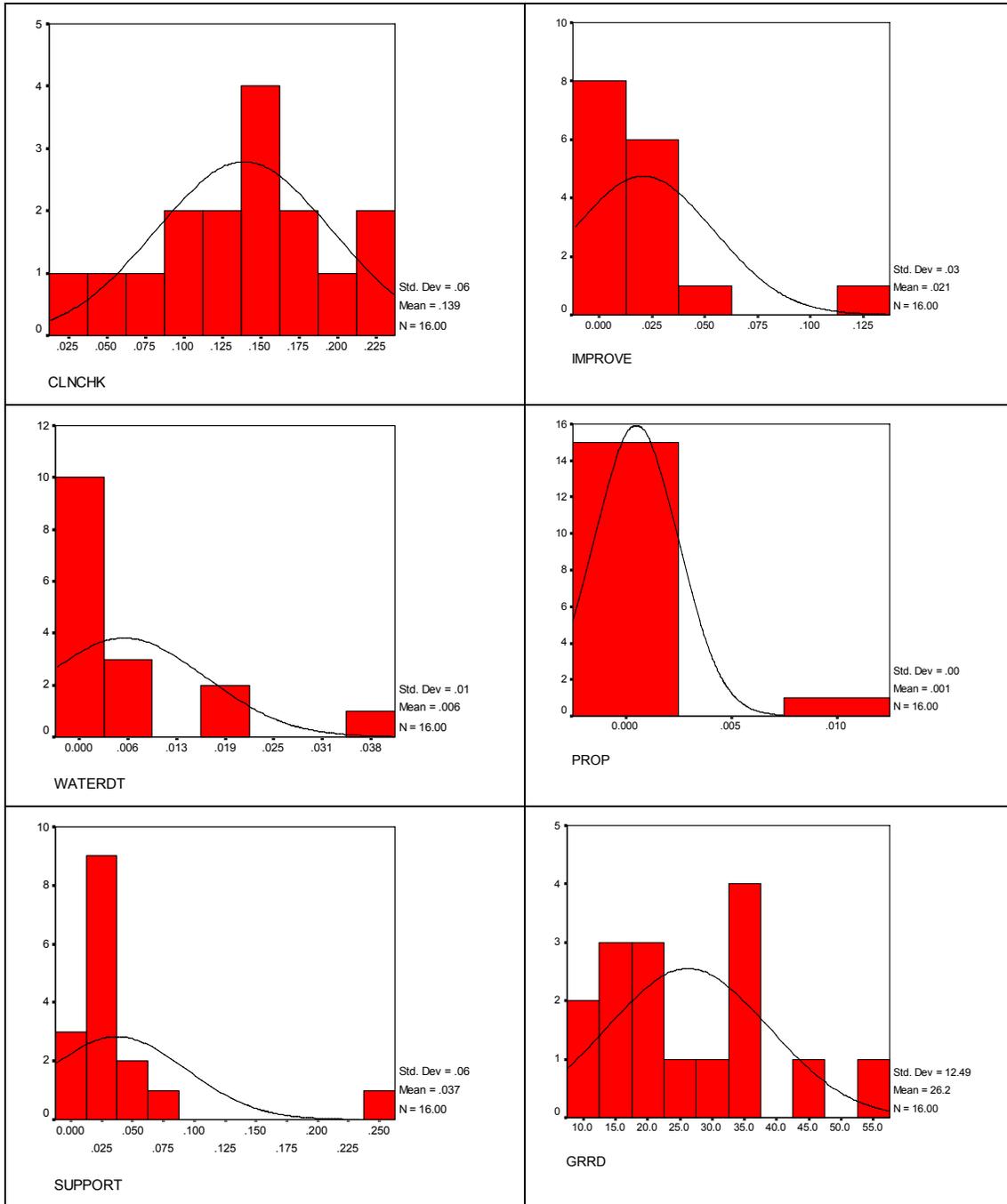
سطح	ROP	U	AR	GRRD	GRRD تفکیک شده	تونل مورد مطالعه	مجموع طول تونل مورد مطالعه
سطح یک	بله	بله	بله	بله	بله	کرج ۱ و کرج ۲	۳۰ کیلومتر
سطح دو	بله	بله	بله	بله	خیر	کرج ۱، کرج ۲ و قمرود	۴۵ کیلومتر

۵-۳-۲- داده‌های سطح اول

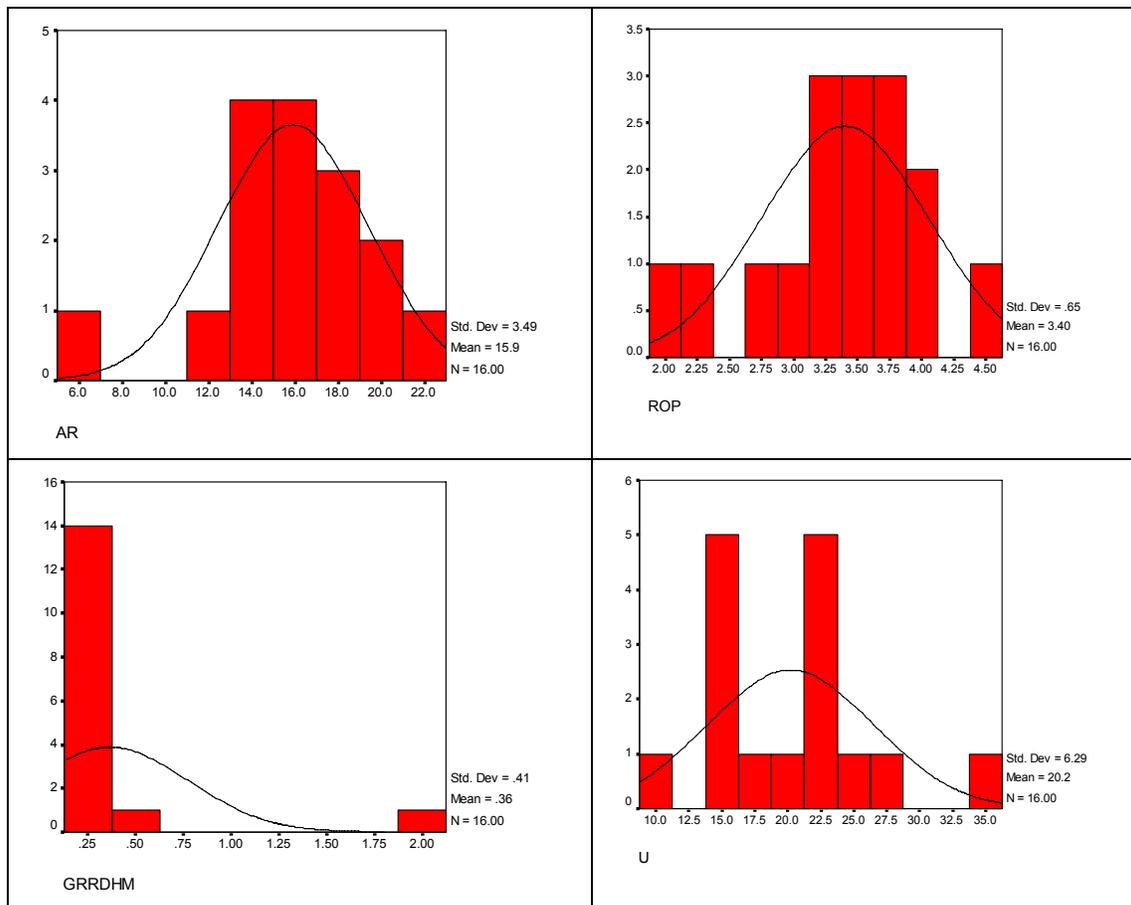
داده‌های سطح اول مربوط به قطعات ۱ و ۲ تونل انتقال آب کرج است. در این دو تونل توقفات مربوط به توده‌سنگ و شرایط زمین به صورت مجزا مشخص شده است. زمان‌های توقف در این سطح به تفکیک شامل زمان توقف به منظور تمیز کردن کاترهد و بازرسی دیسک کاترها، ریزش برداری، تعویض دیسک کاتر، بهسازی زمین، تاخیرات نصب سگمنت، تاخیرات مزبور به نفوذ آبهای زیرزمینی، حفاری‌های اکتشافی و همچنین زمان حفاری می‌باشد. هیستوگرام فراوانی داده‌های سطح ۱ در شکل-های ۵-۲۵ تا ۵-۲۷ نشان داده شده است. در جدول‌های ۶-۳۵ و ۶-۳۶ نیز داده‌های به دست آمده استفاده به تفکیک واحدهای توده‌سنگی آورده شده است.



شکل ۵-۲۵- هیستوگرام فراوانی داده‌های سطح ۱



شکل ۵-۲۶- ادامه هیستوگرام فراوانی داده‌های سطح ۱



شکل ۵-۲۷- ادامه هیستوگرام فراوانی داده‌های سطح ۱

جدول ۶-۳۵- زمان توقفات و تاخیرات مربوط به شرایط توده‌سنگ در داده‌های سطح ۱

بازدید و تمیزکاری کاترهد (h/m)	ریزش بررداری (h/m)	تعویض کاتر (h/m)	بهسازی زمین (h/m)	نصب سگمنت (h/m)	جریان آب (h/m)	حفاری پیشرو (h/m)	واحد	ردیف
۰/۰۲۶	۰/۰۳۵	۰/۰۰۲	۰/۰۱۳	۰/۲۳۹	۰/۰۰۰	۰/۰۰۸	Gta-1-1	۱
۰/۰۴۳	۰/۰۰۷	۰/۰۳۰	۰/۰۳۱	۰/۰۴۴	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	Gta-1-2	۲
۰/۰۸۶	۰/۰۰۰	۰/۰۵۲	۰/۰۳۷	۰/۰۲۶	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	Gta-2	۳
۰/۰۰۶	۰/۰۰۳	۰/۱۹۲	۰/۰۰۸	۰/۰۱۹	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	Gta-3	۴
۰/۱۸۲	۰/۰۰۸	۰/۱۵۳	۰/۰۱۶	۰/۰۱۶	۰/۰۰۶	۰/۰۰۰	Gta-4	۵
۰/۱۲۹	۰/۰۱۵	۰/۰۲۷	۰/۰۴۴	۰/۰۲۴	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	Sts-1	۶
۰/۱۴۵	۰/۰۰۱	۰/۰۵۷	۰/۰۳۰	۰/۰۲۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	Sts-2	۷
۰/۱۵۳	۰/۰۰۹	۰/۰۴۸	۰/۰۰۷	۰/۰۱۵	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	Tsh	۸
۰/۱۱۲	۰/۰۰۰	۰/۰۲۶	۰/۰۱۳	۰/۰۱۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	Mdg	۹
۰/۲۱۷	۱/۴۴۶	۰/۰۱۱	۰/۱۳۴	۰/۰۷۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	Cz	۱۰
۰/۱۶۸	۰/۰۰۱	۰/۰۴۶	۰/۰۰۰	۰/۰۴۰	۰/۰۱۷	۰/۰۰۰	MG	۱۱
۰/۱۶۱	۰/۰۰۳	۰/۰۶۸	۰/۰۰۰	۰/۰۲۴	۰/۰۳۸	۰/۰۰۰	SC	۱۲
۰/۲۳۲	۰/۰۰۱	۰/۰۶۸	۰/۰۰۰	۰/۰۱۷	۰/۰۱۸	۰/۰۰۰	SC2	۱۳
۰/۲۰۱	۰/۰۰۴	۰/۱۲۲	۰/۰۰۰	۰/۰۱۴	۰/۰۰۷	۰/۰۰۰	MO	۱۴
۰/۱۲۳	۰/۰۰۰	۰/۰۴۳	۰/۰۰۰	۰/۰۰۷	۰/۰۰۵	۰/۰۰۰	Cz-2	۱۵
۰/۱۴۵	۰/۰۰۰	۰/۰۷۳	۰/۰۰۰	۰/۰۰۷	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	GT	۱۶

جدول ۶-۳۶- داده‌های به دست آمده به تفکیک واحدهای توده‌سنگی در داده‌های سطح ۱

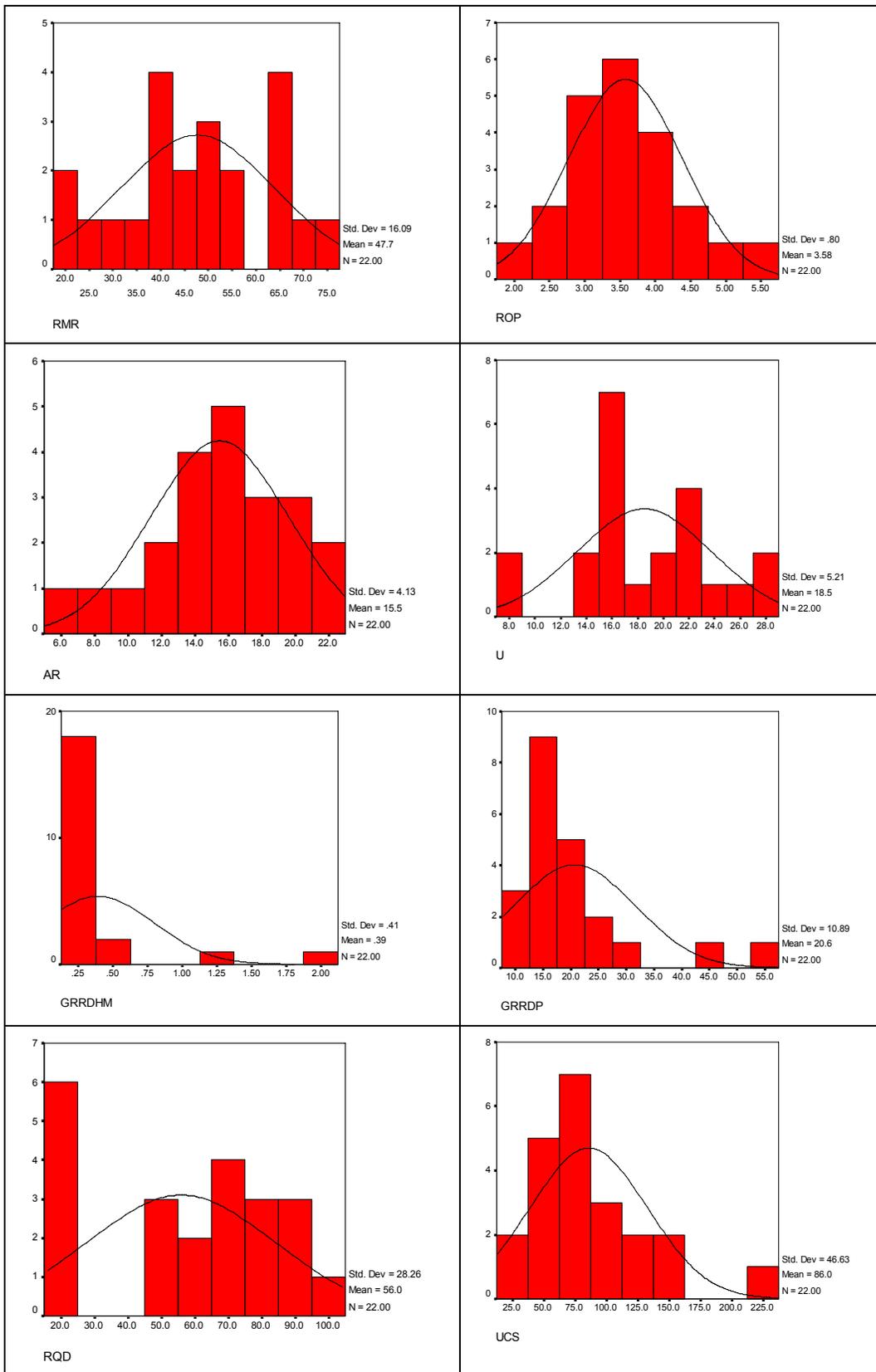
RMR	RQD	UCS (MPa)	متوسط نرخ نفوذ (m/h)	متوسط نرخ پیشروی (m/d)	بهره‌وری (%)	دوره حفاری (day)	طول (m)	واحد
۳۵	۱۵	۵۵	۲/۸۹	۱۵/۸۸	۲۲/۸۷	۸۴	۱۳۳۳/۵۸	Gta-1-1
۵۰	۲۲	۱۰۰	۳/۲۲	۱۶/۵۷	۲۱/۴۵	۸۹	۱۴۷۴/۸۴	Gta-1-2
۴۹	۴۵	۷۵	۳/۸۶	۱۹/۷۸	۲۱/۳۶	۱۱۴	۲۲۵۵/۳۰	Gta-2
۶۴	۷۰	۱۰۰	۳/۸۷	۲۰/۰۴	۲۱/۵۵	۸۹	۱۷۸۳/۵۹	Gta-3
۷۵	۹۵	۱۵۰	۳/۵۲	۱۳/۶۷	۱۶/۲۰	۲۵۷	۳۵۱۳/۶۳	Gta-4
۵۷	۶۰	۱۲۰	۴/۵۸	۱۷/۷۲	۱۶/۱۲	۱۰۱	۱۷۹۰/۱۱	Sts-1
۷۲	۸۵	۱۵۰	۳/۸۸	۱۵/۷۳	۱۶/۹۰	۱۱۲	۱۷۶۲/۰۳	Sts-2
۴۶	۵۰	۵۰	۴/۰۱	۱۴/۹۳	۱۵/۵۱	۳۴	۶۸۱/۷۸	Tsh
۶۳	۷۰	۹۰	۳/۵۶	۱۳/۳۷	۱۵/۶۳	۵۱	۵۰۷/۴۶	Mdg
۲۱	۱۵	۱۵	۳/۲۴	۶/۸۴	۸/۸۱	۸۵	۵۸۱/۲۷	Cz
۶۷	۸۷	۱۲۵	۳/۴۱	۱۲/۸۱	۱۵/۶۶	۳۰۰	۳۸۴۳/۹۳	MG
۴۰	۶۲	۷۵	۳/۳۵	۱۵/۳۶	۱۹/۰۸	۲۵۴	۳۹۰۱/۱۸	SC
۴۵	۷۰	۷۵	۲/۴۸	۱۷/۰۷	۲۸/۷۱	۳۸	۶۴۸/۶۵	SC2
۶۷	۸۰	۲۲۵	۲/۱۸	۱۳/۰۸	۲۵/۰۳	۶۴	۸۳۷/۱۲	MO
۳۰	۱۵	۳۰	۳/۷۵	۲۱/۱۷	۲۳/۵۶	۱۸	۳۸۱/۱۲	Cz-2
۵۰	۸۰	۷۵	۲/۷۷	۱۸/۳۵	۲۷/۶۴	۵۶	۱۰۲۷/۴۴	GT

جدول ۵-۳-۳- داده‌های سطح دوم

همانطور که بیان شد، داده‌های سطح دو مربوط به تونل انتقال آب قمرود (قطعات ۳ و ۴) می‌باشد که در آن توقفات ناشی از شرایط زمین به صورت کلی تعیین شده است. البته داده‌های تونل‌های انتقال آب قطعه اول و دوم کرج نیز این بخش را پوشش می‌دهد. بنابر این داده‌های سطح دو در مجموع از ۳ تونل با طول کلی ۴۵ کیلومتر شامل ۲۲ واحد توده‌سنگی به دست آمده است. در جدول ۶-۳۷ داده‌های مورد نظر آورده شده است. هیستوگرام فراوانی داده‌های سطح ۲ در شکل ۵-۲۸ نشان داده شده است.

جدول ۶-۳۷- داده‌های به دست آمده در تونل‌های مختلف در داده‌های سطح ۲

ردیف	واحد	RMR	طول (m)	دوره حفاری (روز)	GRRD (%)	GRRD (h/m)	بهره‌وری (%)	متوسط نرخ پیشروی (m/d)	متوسط نرخ نفوذ (m/h)
۱	Cz	۲۱	۵۸۱/۲۷۰	۸۵	۵۳/۵۸۵	۱/۸۸۱	۸/۸۰۷	۶/۸۳۸	۳/۲۳۵
۲	Gta-1-1	۳۵	۱۳۳۳/۵۸۰	۸۴	۲۱/۴۴۹	۰/۳۲۴	۲۲/۸۷۳	۱۵/۸۷۶	۲/۸۹۲
۳	Tsh	۴۶	۶۸۱/۷۸۰	۵۱	۱۲/۸۹۸	۰/۲۳۲	۱۵/۶۳۲	۱۳/۳۶۸	۳/۵۶۳
۴	Gta-2	۵۹	۲۲۵۵/۳۰۰	۱۱۴	۱۶/۵۸۹	۰/۲۰۱	۲۱/۳۵۷	۱۹/۷۸۳	۳/۸۶۰
۵	Gta-1-2	۵۰	۱۴۷۴/۸۴۰	۸۹	۱۰/۶۹۶	۰/۱۵۵	۲۱/۴۵۴	۱۶/۵۷۱	۳/۲۱۸
۶	Sts-1	۵۷	۱۷۹۰/۱۱۰	۱۰۱	۱۷/۷۳۰	۰/۲۴۰	۱۶/۱۱۷	۱۷/۷۲۴	۴/۵۸۲
۷	Mdg	۶۳	۵۰۷/۴۶۰	۳۴	۱۰/۱۴۰	۰/۱۶۳	۱۵/۵۱۳	۱۴/۹۲۵	۴/۰۰۹
۸	Gta-3	۶۴	۱۷۸۳/۵۹۰	۸۹	۲۷/۴۰۹	۰/۳۲۸	۲۱/۵۵۴	۲۰/۰۴۰	۳/۸۷۴
۹	Sts-2	۷۲	۱۷۶۲/۰۳۰	۱۱۲	۱۶/۶۱۸	۰/۲۵۴	۱۶/۹۰۱	۱۵/۷۳۲	۳/۸۷۹
۱۰	Gta-4	۷۵	۳۵۱۳/۶۳۰	۲۵۷	۲۱/۷۵۷	۰/۳۸۲	۱۶/۲۰۵	۱۳/۶۷۲	۳/۵۱۵
۱۱	MG	۶۷	۳۸۴۳/۹۳۰	۳۰۰	۱۴/۵۰۳	۰/۲۷۲	۱۵/۶۶۰	۱۲/۸۱۳	۳/۴۰۹
۱۲	SC	۴۰	۳۹۰۱/۱۸۰	۲۵۴	۱۸/۸۳۱	۰/۲۹۴	۱۹/۰۸۳	۱۵/۳۵۹	۳/۳۵۳
۱۳	SC2	۴۵	۶۴۸/۶۵۰	۳۸	۱۹/۵۷۳	۰/۲۷۵	۲۸/۷۰۸	۱۷/۰۷۰	۲/۴۷۷
۱۴	MO	۶۷	۸۳۷/۱۲۰	۶۴	۱۷/۴۹۸	۰/۳۲۱	۲۵/۰۳۰	۱۳/۰۸۰	۲/۱۷۷
۱۵	CZ2	۳۰	۳۸۱/۱۲۰	۱۸	۱۶/۰۵۲	۰/۱۸۲	۲۳/۵۵۷	۲۱/۱۷۳	۳/۷۴۵
۱۶	GT	۵۰	۱۰۲۷/۴۴۰	۵۶	۱۷/۲۲۰	۰/۲۲۵	۲۷/۶۴۴	۱۸/۳۴۷	۲/۷۶۵
۱۷	K1	۵۴	۲۹۷/۶۶۹	۳۱	۱۲/۲۷۹	۰/۳۰۷	۱۴/۷۶۳	۹/۶۰۲	۲/۷۱۰
۱۸	K2	۴۱	۵۹۵/۳۴۰	۳۸	۱۲/۷۵۰	۰/۱۹۵	۱۹/۷۱۵	۱۵/۶۶۷	۳/۳۱۱
۱۹	K3	۲۱	۱۵۵/۸۳۹	۱۴	۲۷/۹۶۶	۰/۶۰۳	۱۴/۳۶۵	۱۱/۱۳۱	۳/۲۲۹
۲۰	J1	۳۸	۱۰۶۲۶/۱۶۴	۵۲۹	۲۶/۴۳۸	۰/۳۱۶	۱۶/۴۱۴	۲۰/۰۸۷	۵/۰۹۹
۲۱	J2	۴۱	۴۳۳۴/۴۰۴	۱۸۹	۱۴/۹۷۵	۰/۱۵۷	۱۷/۴۵۱	۲۲/۹۳۳	۵/۴۷۵
۲۲	J3	۲۴	۹۸۳/۲۷۱	۱۱۰	۴۷/۳۳۸	۱/۲۷۱	۸/۵۸۵	۸/۹۳۹	۴/۳۳۸



شکل ۵-۲۸- هیستوگرام فراوانی داده‌های داده‌های سطح ۲

۵-۴- بررسی تونل‌های مورد مطالعه

همانطور که بیان شد ۳ تونل کرج ۱، کرج ۲ و قمرود ۳ و ۴ به منظور مطالعه تاثیر پارامترهای توده‌سنگ و شرایط زمین بر توقفات TBM و یا به عبارتی دیگر بر ضریب بهره‌وری در نظر گرفته شده است. سطح ۲ داده‌ها مبنای مدل‌سازی رابطه بین توقفات و شرایط توده‌سنگ در نظر گرفته است. علاوه بر داده‌های کمی ارائه شده در این فصل، بسیاری از خصوصیات توده‌سنگ و شرایط زمین به صورت کیفی برداشت شده است که در جای خود به آن اشاره می‌شود. از آن جمله می‌توان به وجود رس، پدیده لهیدگی، سینه‌کار مختلط اشاره نمود.

یکی از ویژگی‌های پایگاه داده‌ای تشکیل داده شده این است که از نظر سنگ‌شناسی واحدهای توده‌سنگی متنوعی، شامل انواع سنگ‌های رسوبی، آذرین، دگرگونی و آذرآواری را در بر می‌گیرد. مسیر تونل کرج ۱ عمدتاً سنگ‌های آذر آوارای مانند انواع توف‌ها، رسوبی مانند کنگلومرای ریزدانه و آذرین مانند مونزو گابرو تشکیل شده است. در تونل کرج ۲ تنوع سنگ‌ها در برگیرنده سنگ‌های آذرین شامل مونزودیوریت، مونزوگابرو و رسوبی مانند ماسه‌سنگ و سیلت استون می‌باشد. در تونل قمرود نیز سنگ‌های رسوبی آهکی و انواع سنگ دگرگونی مانند شیست‌های گرافیتی، شیست‌های کوارتز وجود دارد. همچنین باید یادآور شد که هر ۳ تونل با استفاده از DB TBM حفاری و سگمنت گذاری شده‌اند.

فصل ششم

ارائه مدل پیش بینی

توقعات مربوط به شرایط توده سنگ

همانطور که بیان شد مدل‌ها و روابط زیادی بر مبنای روش‌های مختلف آماری، تجربی و یا هوش مصنوعی به منظور پیش‌بینی نرخ نفوذ و در بعضی موارد نرخ پیشروی توسعه داده شده است. اما در این مطالعات پیش‌بینی ضریب بهره‌وری کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از طرف دیگر مطالعات انجام شده به منظور بررسی توقفات دستگاه حفاری که بر اثر شرایط نامناسب زمین‌شناسی و پارامترهای توده‌سنگ درونگیر تونل روی می‌دهد و تاثیر مستقیمی بر میزان بهره‌وری TBM دارد، بسیار نادر بوده است. در این فصل با استفاده از پایگاه داده‌هایی که بر مبنای مطالعات انجام شده روی تونل-های کرج قطعه ۱، کرج قطعه ۲ و قمرود قطعات ۳ و ۴ تشکیل داده شده است، مدل‌های پیش‌بینی توقفات مربوط به شرایط توده‌سنگ با استفاده از روش‌های تحلیل آماری، سیستم‌های مهندسی سنگ و مدلسازی فازی ارائه شده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

آمار یک شاخه از ریاضیات است که شامل جمع آوری، تجزیه و تحلیل، تفسیر و نمایش گروه‌هایی از داده‌های عددی می‌باشد. به عبارت دیگر یک آماردان می‌تواند براساس مجموعه‌ای از اطلاعات و بر مبنای مدل‌های ریاضی و مدل‌های نظریه احتمال، پیشگویی کند. یعنی به یاری اطلاعات گذشته، نحوه رفتار یک فرآیند را در آینده پیش‌بینی نماید. اغلب پدیده‌های طبیعی، غیر حتمی‌اند. علم آمار، عمدتاً با شرایطی سر و کار دارد که در آنها وقوع یک پیشامد به طور حتمی قابل پیش‌بینی نیست. در حقیقت، کارکرد علم آمار، ارائه استنتاج‌ها بر مبنای اطلاعات ناکامل است.

یکی از انواع روش‌های تحقیق توصیفی (غیر آزمایشی) تحقیق همبستگی است. در این نوع تحقیق رابطه میان متغیرها بر اساس هدف تحقیق تحلیل می‌گردد. تحقیقات همبستگی را می‌توان بر حسب هدف به سه دسته مطالعه همبستگی دو متغیری، تحلیل رگرسیون و تحلیل ماتریس همبستگی تقسیم کرد.

در تحلیل رگرسیون هدف پیش‌بینی تغییرات یک یا چند متغیر وابسته (ملاک) با توجه به تغییرات متغیرهای مستقل (پیش‌بین) است. در تحقیقاتی که از تحلیل رگرسیون استفاده می‌شود، هدف معمولاً پیش‌بینی یک یا چند متغیر ملاک از یک یا چند متغیر پیش‌بین است. چنانچه هدف پیش‌بینی یک متغیر ملاک از چند متغیر پیش‌بین باشد از مدل رگرسیون چندگانه استفاده می‌شود. در صورتی که هدف، پیش‌بینی همزمان چند متغیر ملاک از متغیرهای پیش‌بین یا زیر مجموعه‌ای از آنها باشد از مدل رگرسیون چند متغیری استفاده می‌شود (سرمد و همکاران ۱۳۷۶).

۶-۲-۱- تحلیل آماری داده‌های سطح اول

در فصول قبلی، شرایط زمین‌شناسی و عملکرد دستگاه حفاری در قطعات ۱ و ۲ تونل انتقال آب کرج مورد بررسی قرار گرفته و داده‌های این دو تونل به عنوان داده‌های سطح ۱ دسته بندی شدند. همانطور که بیان شد، در این پایگاه داده‌ای، تنها زمان‌های توقف TBM که در ارتباط با پارامترهای مختلف توده‌سنگ و شرایط زمین‌شناسی بوده، محاسبه شده است. برای این که بتوان میزان توقفات

در واحدهای مختلف را که هر کدام بخشی از مسیر تونل را با طول متفاوت در بر گرفته است، با هم مقایسه نمود، میزان این توقفات بر مبنای ساعت بر متر در نظر گرفته شده است. این زمان‌ها شامل زمان توقف به منظور تمیز کردن کاترهد و بازرسی دیسک کاترها، ریزش برداری، تعویض دیسک کاتر، بهسازی زمین، تاخیرات نصب سگمنت، تاخیرات مربوط به نشتنو یا جریان آب‌های زیرزمینی، حفاری-های اکتشافی پیشرو و همچنین زمان خالص حفاری می‌باشد. داده‌های سطح یک از این جهت که جزئیات توقفات مربوط به شرایط توده‌سنگ را نشان می‌دهد حائز اهمیت است. اما محدود بودن این داده‌ها امکان تحلیل گسترده و به دست آوردن روابطی که بتواند هر کدام از توقفات را به تفکیک پیش بینی نماید، میسر نمی‌کند (داده‌های سطح یک در جدول‌های ۴-۳۴ و ۴-۳۵ آورده شده است). با این حال با توجه به اطلاعات موجود به تحلیل این داده‌ها پرداخته شده است.

به منظور بررسی وجود رابطه خطی بین متغیر مستقل و وابسته، ضریب خطی پیرسونمورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این بررسی‌ها در جدول ۶-۱ آورده شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، زمان ریزش برداری با RMR رابطه خطی و معکوس دارد. زمان تعویض کاتر با هر ۳ متغیر مستقل رابطه خطی و مستقیم دارد. زمان نصب سگمنت نیز با RQD رابطه خطی و معکوس دارد. سایر موارد با متغیرهای مستقل مورد نظر رابطه غیرخطی دارند.

رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته یا به عبارت دیگر، روابط مختلف بین پارامترهای موجود توده‌سنگ با توقفات و تاخیرات ناشی از شرایط زمین‌شناسی با استفاده از تحلیل رگرسیون مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج آن در پیوست آورده شده است. از تحلیل رگرسیون چند متغیره داده‌های سطح ۱ رابطه معناداری به دست نیامد. روابطی که معنا دار بوده و از ضریب همبستگی بالاتری برخوردار بوده‌اند، در جدول ۶-۲ آورده شده است.

جدول ۶-۱- نتایج بررسی ضریب خطی پیرسون داده‌های سطح ۱

UCS Sig.(2-tailed)	RQD Sig.(2-tailed)	RMR Sig.(2-tailed)	پارامتر
۰/۵۳۵	۰/۸۵۳	۰/۵۷۸	نرخ نفوذ
۰/۱۱۰	۰/۵۸۵	۰/۶۴۳	ضریب بهره وری
۰/۴۴۴	۰/۸۹۰	۰/۴۶۱	نرخ پیشروی
۰/۲۷۶	۰/۶۷۲	۰/۷۹۵	زمان حفاری
۰/۴۹۴	۰/۰۷۶	۰/۷۹۹	بازدید تمیزکاری کاترهد
۰/۱۱۴	۰/۱۰۴	۰/۰۳۳	ریزش برداری
۰/۰۴۹	۰/۰۱۷	۰/۰۲۵	تعویض کاتردیسک
۰/۲۲۹	۰/۰۹۰	۰/۱۲۵	بهسازی زمین
۰/۸۶۱	۰/۳۵۹	۰/۷۸۳	آب زیرزمینی
۰/۴۵۲	۰/۱۱۴	۰/۲۷۷	حفاری پیشرو
۰/۳۱۷	۰/۰۴۱	۰/۱۴۴	نصب سگمنت

جدول ۶-۲- روابط به دست آمده با استفاده از تحلیل رگرسیون

رابطه	R ²	R ² adj.	Sig. F	F
Cutter change (h/m) = 3.9 × 10 ⁻⁵ RMR ^{1.799}	۰/۳۳۱	۰/۲۸۳	۰/۰۱۹	۶/۹۴
Ground improvement(h/m) = -0.03 + (2.393/RMR)	۰/۴۰۱	۰/۳۵۸	۰/۰۰۸	۹/۳۸
Cutter change (h/m) = 0.0005 RQD ^{1.141}	۰/۵۰۹	۰/۴۷۳	۰/۰۰۲	۱۴/۴۹
Ground improvement(h/m) = 0.0056 + (1.646/ UCS)	۰/۵۵۲	۰/۵۲۰	۰/۰۰۱	۱۷/۲۵

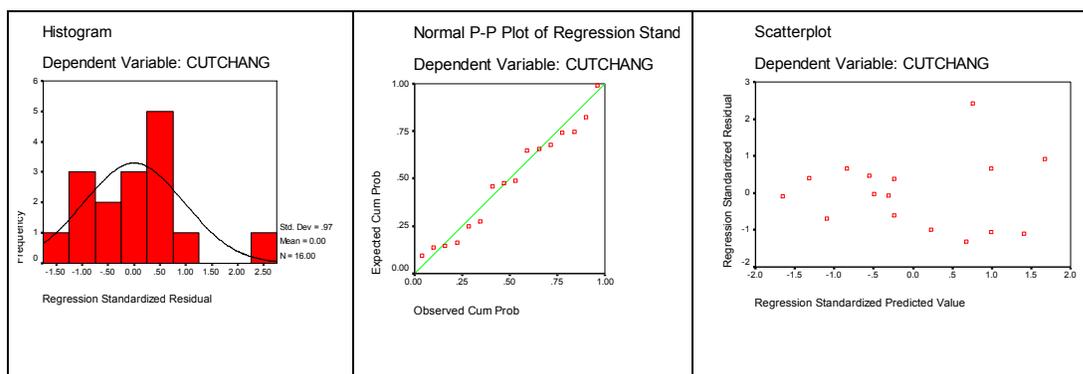
پس از تحلیل رگرسیون، باید به بررسی فرض‌ها پرداخت. با بررسی توزیع باقیمانده‌ها می‌توان صدق بودن فرض‌ها را تعیین کرد. تفاوت بین مقدار مشاهده شده متغیر وابسته و مقداری که توسط رگرسیون پیش‌بینی می‌شود، باقی مانده است. برای بررسی نرمال بودن، نمودار نرمال پلات رگرسیون مورد بررسی قرار می‌گیرد. در صورتیکه باقیمانده‌ها به‌جامعه نرمال متعلق داشته باشند، با بستن نقاط نزدیک خط مستقیم قرار گیرند (قزوینیان و همکاران، ۱۳۸۶).

هنگامی رابطه دو متغیر بررسی می‌شود معمولاً مشخص نیست که آیا در داده‌ها فرض‌های لازم برای تحلیل رگرسیون صادق است یا خیر. بخش مهمی از تحلیل رگرسیون بررسی فرض‌های خطی بودن، نرمال بودن، ثابت بودن واریانس و مستقل بودن مشاهدات است. با بررسی توزیع باقیمانده می‌

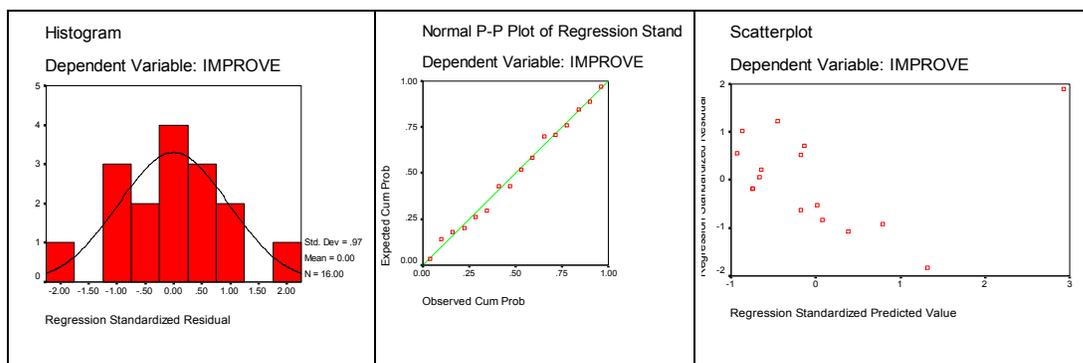
توان صادق بودن فرض‌ها را تعیین کرد. اگر این فرض‌ها صادق باشند، باقی مانده‌ها باید مشخصات زیر را داشته باشند.

- باید توزیع آنها نرمال و میانگین خطا برابر با صفر باشد.
- باید واریانس آنها برای تمام مقادیر متغیر مستقل ثابت باشد.
- هنگامی که باقی مانده‌ها را در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده قرار می‌گیرند، نباید الگویی مشاهده شود.

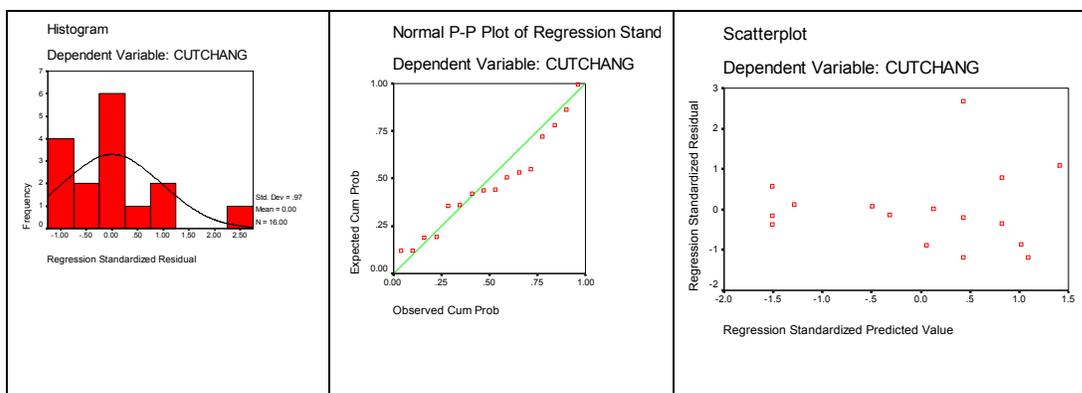
به منظور بررسی و تحلیل باقی مانده برای هر متغیر سه نمودار ترسیم شده که به ترتیب در شکل-های ۱-۶ تا ۴-۶ نشان داده شده است. همانطور که در شکل‌های مذکور مشاهده می‌گردد نتایج حاصل از نمودارهای مذکور نرمال بودن خطا، میانگین خطا برابر با صفر و ثابت بودن واریانس خطا را تایید می‌نماید.



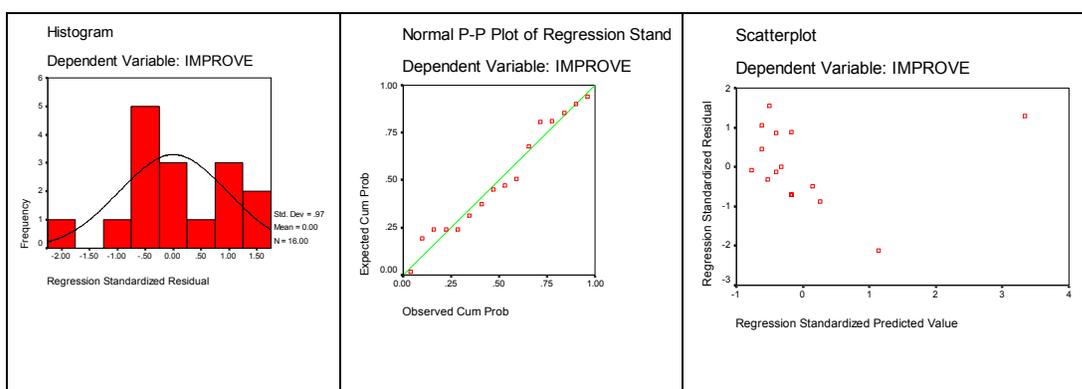
شکل ۱-۶- تحلیل باقی مانده‌ها برای رابطه تعویض دیسک کاتر با RMR



شکل ۲-۶- تحلیل باقی مانده‌ها برای رابطه بهسازی زمین با RMR



شکل ۶-۳- تحلیل باقی مانده‌ها برای رابطه تعویض کاتر با RQD



شکل ۶-۴- تحلیل باقی مانده‌ها برای رابطه بهسازی زمین با UCS

۶-۲-۲- تحلیل آماری داده‌های سطح دوم

همانطور که بیان شد، داده‌های سطح دو مربوط به تونل انتقال آب قمرود (قطعات ۳ و ۴) می‌باشد که در آن توقعات ناشی از شرایط زمین به صورت کلی تعیین شده است. داده‌های تونل‌های انتقال آب قطعه اول و دوم کرج نیز که در سطح بالاتری قرارداد، می‌تواند در این بخش مورد استفاده قرار گیرد (داده‌های سطح یک در جدول ۴-۳۶ آورده شده است). روابطی که با استفاده از تحلیل رگرسیون به دست آمده است در جدول ۶-۵ آورده شده است.

نتایج بررسی وجود رابطه خطی بین متغیر مستقل و وابسته، با استفاده از ضریب خطی پیرسون مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج آن در جدول ۶-۳ آورده شده است. همانطور که در این

جدول مشاهده می‌شود، توقعات مربوط به شرایط توده سنگ با RMR رابطه خطی داشته اما سایر موارد سایر موارد رابطه غیرخطی دارند.

جدول ۶-۳- نتایج بررسی ضریب خطی پیرسون داده‌های سطح ۲

پارامتر	RMR Sig.(2-tailed)
نرخ نفوذ	۰/۶۶۶
ضریب بهره‌وری	۰/۲۹۶
نرخ پیشروی	۰/۴۷۵
GRRD (h/m)	۰/۰۱۳
GRRD (%)	۰/۰۱

۶-۲-۱- رابطه RMR با توقعات مربوط به شرایط توده‌سنگ

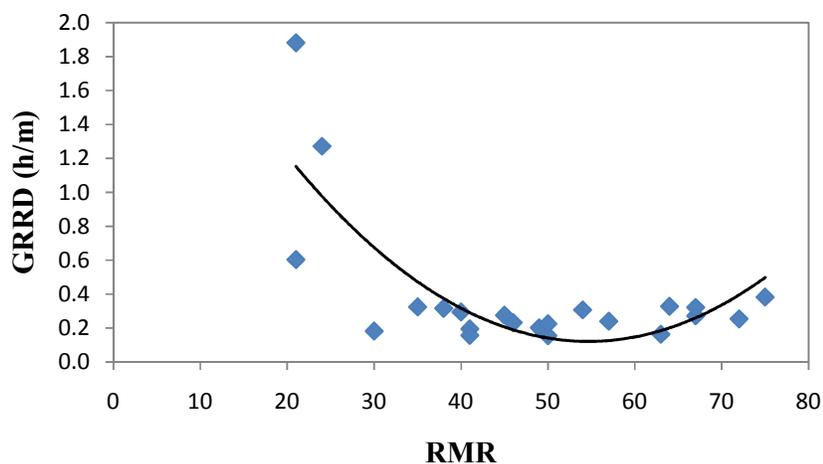
به منظور به دست آوردن رابطه بین RMR و توقعات مربوط به شرایط توده‌سنگ، توابع مختلفی با استفاده از تحلیل رگرسیون مورد بررسی قرار گرفته است که در جدول ۶-۴ آورده شده است. روابط معناداری که درجه همبستگی بالاتر به دست آمده‌اند در جدول ۶-۵ آورده شده است. نمودار روابط به دست آمده در شکل‌های ۶-۵ تا ۶-۸ نشان داده شده است.

جدول ۶-۴- نتایج تحلیل رگرسیون و روابط مختلف به دست آمده

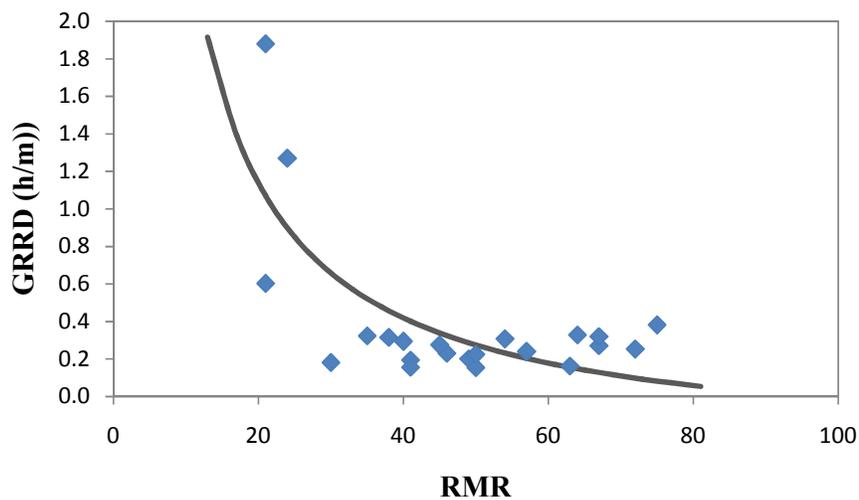
Sig f.	F	R ² Adjust	R ²	تابع	متغیر وابسته	متغیر مستقل
۰/۰۱۳	۷/۴۵	۰/۲۴	۰/۲۷	Lin	GRRD (h/m)	RMR
۰/۰۰۲	۱۳/۲۹	۰/۳۷	۰/۳۹	Log		
۰/۰۰۰۱	۲۱/۷۶	۰/۴۹	۰/۵۲	Inv		
۰/۰۰۰۱	۱۵/۲۸	۰/۵۸	۰/۶۲	Qua		
۰/۰۰۴	۱۰/۵	۰/۳۱	۰/۳۴	Pow		
۰/۰۳۰	۵/۴۵	۰/۱۷۵	۰/۲۱۴	Exp		
۰/۰۱۰	۸/۲۰	۰/۲۲۵	۰/۲۹۱	Lin	GRRD (%)	RMR
۰/۰۰۱	۱۴/۱۲	۰/۳۸۵	۰/۴۱۴	Log		
۰	۲۱/۷۳	۰/۴۹۷	۰/۵۲۱	Inv		
۰	۱۵/۸۷	۰/۵۸۶	۰/۶۳	Qua		
۰/۰۰۳	۱۱/۳۰	۰/۳۲۹	۰/۳۶۱	Pow		
۰/۰۱۸	۶/۶۷	۰/۲۱۲	۰/۲۵۰	Exp		

جدول ۵-۶- روابط پیش‌بینی توقفات مربوط به شرایط توده‌سنگ بر اساس RMR

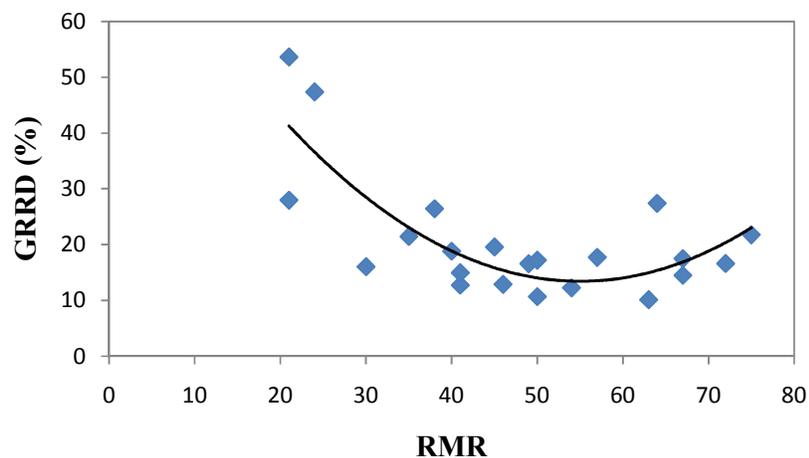
$GRRD (h/m) = 0.000911 RMR^2 - 0.0996 RMR + 2.84$	$R^2 = 0.62$
$GRRD(\%) = 0.024 RMR^2 - 2.644 RMR + 86.174$	$R^2 = 0.63$
$GRRD (h/m) = -0.301 + (28.8/RMR)$	$R^2 = 0.52$
$GRRD(\%) = 2.154 + (770.8/RMR)$	$R^2 = 0.52$



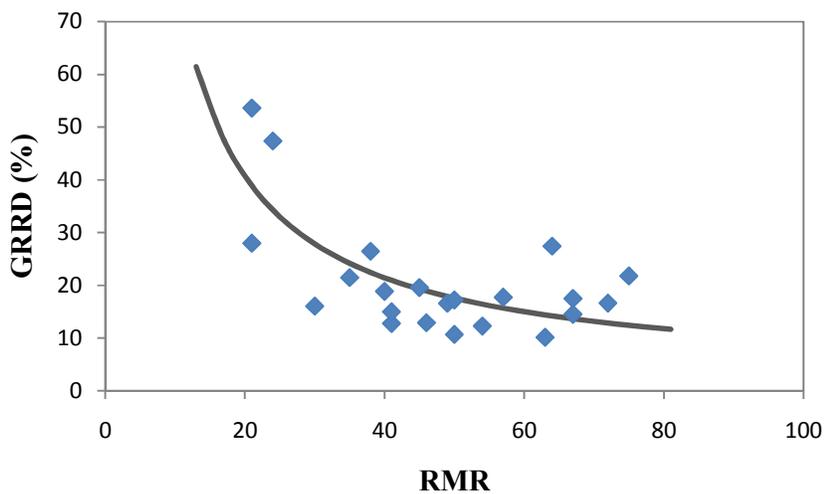
شکل ۵-۶- رابطه RMR و GRRD (h/m) (تابع درجه ۲)



شکل ۶-۶- رابطه RMR و GRRD (h/m) (تابع معکوس)

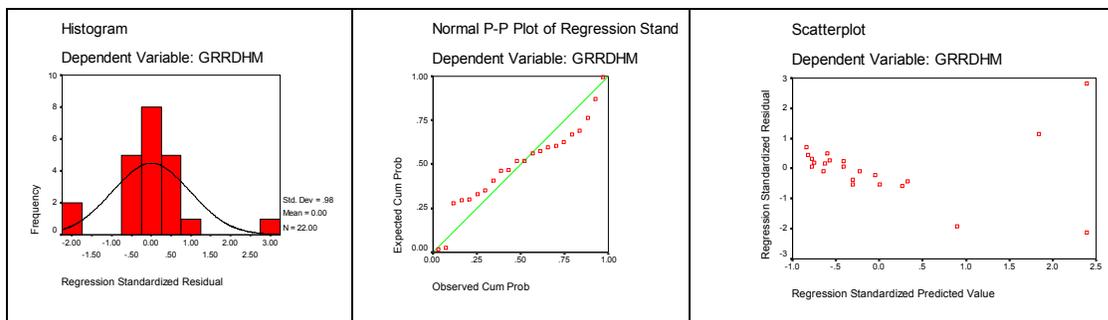


شکل ۶-۷- رابطه GRRD(%) و RMR (تابع درجه ۲)

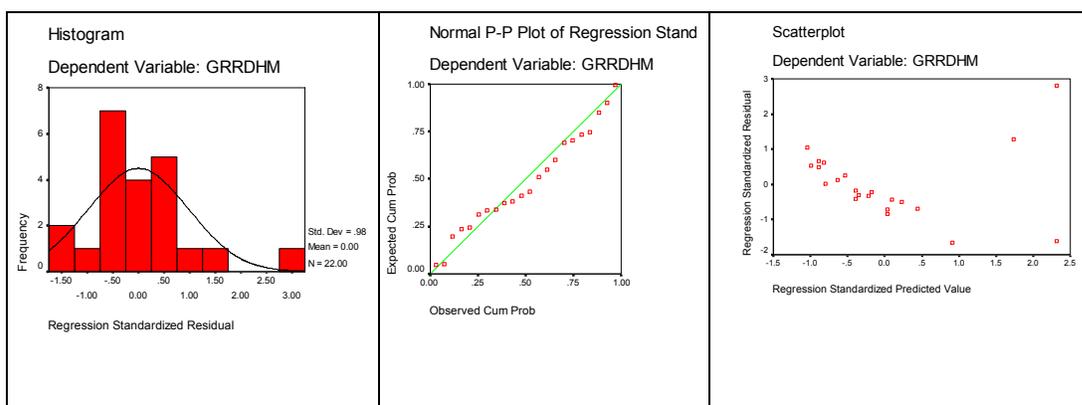


شکل ۶-۸- رابطه GRRD(%) و RMR (تابع معکوس)

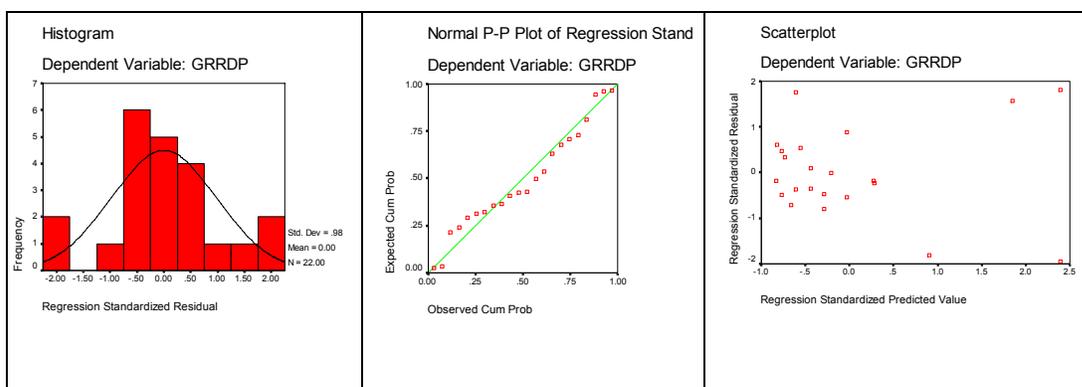
به منظور بررسی و تحلیل باقی مانده برای هر متغیر سه نمودار ترسیم شده که به ترتیب در شکل - های ۶-۹ تا ۶-۱۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نتایج حاصل از نمودارهای مذکور نرمال بودن خطا، میانگین خطا برابر با صفر و ثابت بودن واریانس خطا را تایید می‌نماید.



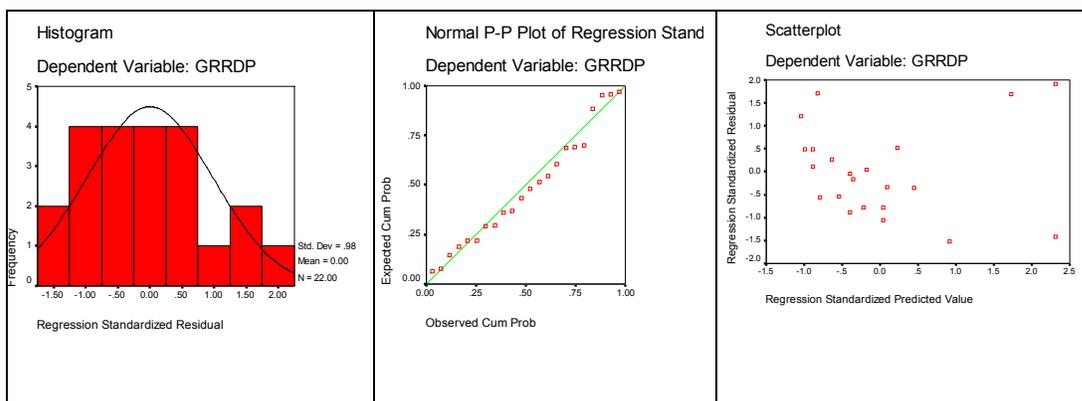
شکل ۶-۹- تحلیل باقی مانده‌ها برای رابطه (GRRD h/m) با RMR تابع درجه ۲



شکل ۶-۱۰- تحلیل باقی مانده‌ها برای رابطه (GRRD %) با RMR تابع درجه ۲



شکل ۶-۱۱- تحلیل باقی مانده‌ها برای رابطه (GRRD h/m) با RMR تابع معکوس



شکل ۶-۱۲- تحلیل باقی مانده‌ها برای رابطه (GRRD %) با RMR تابع معکوس

۶-۲-۲-۲- رابطه RMR با نرخ نفوذ، ضریب بهره‌وری و نرخ پیشروی

رابطه RMR با نرخ نفوذ، ضریب بهره‌وری و نرخ پیشروی نیز با استفاده از تحلیل رگرسیون بررسی شده است. نتایج به دست آمده در جدول ۶-۶ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، بین RMR و ROP رابطه معناداری به دست نیامده است.

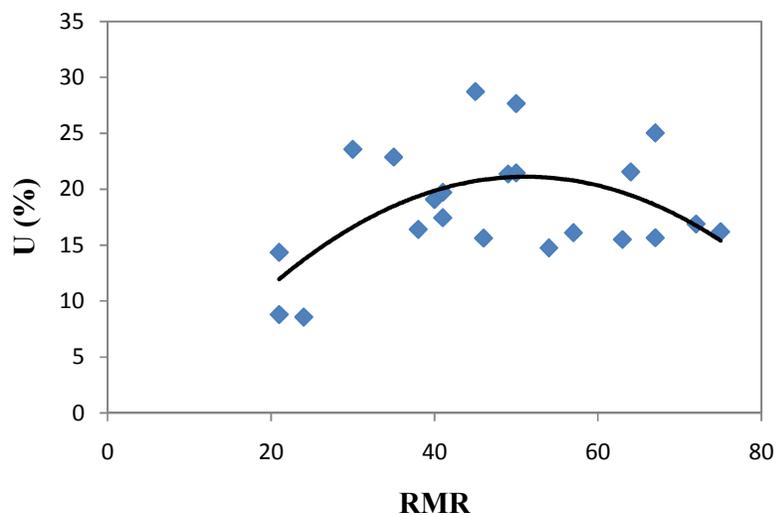
همچنین این جدول نشان می‌دهد رابطه RMR با ضریب بهره‌وری و نرخ پیشروی به صورت یک تابع درجه ۲ تعریف می‌شود. همانطور که قبلاً نیز بیان شد، به طور کلی توقعات مربوط به شرایط توده سنگ در RMR بین ۴۵ تا ۶۵ به حداقل می‌رسد، طبیعی است که ضریب بهره‌وری و نرخ پیشروی نیز در این بازه به حداکثر مقدار خود برسد (شکل های ۶-۱۳ و ۶-۱۴). این روابط در جدول ۶-۷ آورده شده که البته یک از دلایل مهم R^2 نسبتاً پایین روابط به دست آمده، این است که بخشی از توقعات و یا کاهش بهره‌وری مربوط به ماشین، مدیریت و راهبری آن می‌باشد.

در جدول ۶-۶- نتایج تحلیل رگرسیون (ROP, AR, U)

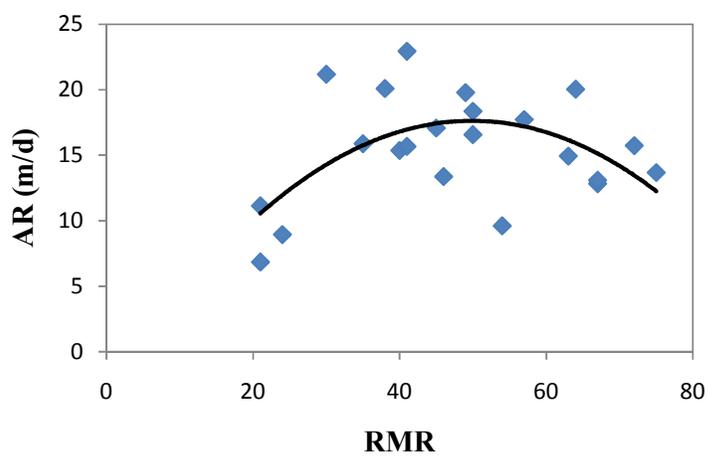
Sig f.	F	R ² Adjust	R ²	تابع	متغیر وابسته	متغیر مستقل
۰/۶۶۶	۰/۱۹۲	-۰/۰۴	۰/۰۰۹	Lin	ROP (m/h)	RMR
۰/۷۲۱	۰/۱۳۱	-۰/۰۴	۰/۰۰۶	Log		
۰/۸۱۲	۰/۵۸۳	-۰/۰۵	۰/۰۰۳	Inv		
۰/۹۰۰	۰/۱۰۶	-۰/۰۹	۰/۰۱۱	Qua		
۰/۶۸۲	۰/۱۷۳	-۰/۰۴	۰/۰۰۹	Pow		
۰/۶۵۱	۰/۲۱۱	-۰/۰۴	۰/۰۱۰	Exp		
۰/۲۹۶	۱/۱۵۰	۰/۰۰۷	۰/۰۵۴	Lin	U (%)	RMR
۰/۱۳۱	۲/۴۷۱	۰/۰۶۵	۰/۱۱	Log		
۰/۰۵۲	۴/۲۴۹	۰/۱۳۴	۰/۱۷۵	Inv		
۰/۰۲۹	۴/۲۸۸	۰/۲۳۸	۰/۳۱۱	Qua		
۰/۰۵	۴/۳۶۷	۰/۱۳۸	۰/۱۷۹	Pow		
۰/۱۴۸	۲/۲۶۶	۰/۰۵۷	۰/۱۰۲	Exp		
۰/۴۷۵	۰/۵۲۹	-۰/۰۲	۰/۰۲۶	Lin	AR (m/d)	RMR
۰/۲۲۰	۱/۶۰۳	۰/۰۲۸	۰/۰۷۵	Log		
۰/۰۸۰	۳/۳۹۱	۰/۱۰۲	۰/۱۴۵	Inv		
۰/۰۲۷	۴/۳۹۰	۰/۲۴۴	۰/۳۱۶	Qua		
۰/۰۹۴	۳/۰۹۲	۰/۰۹۰	۰/۱۳۴	Pow		
۰/۲۵۹	۱/۳۵۲	۰/۰۱۶	۰/۰۶۳	Exp		

جدول ۶-۷- روابط به دست آمد بین RMR و ضریب بهره‌وری و نرخ پیشروی

$U (\%) = -0.01 RMR^2 + 1.03 RMR - 5.24$	$R^2 = 0.311$
$AR(m/d) = -0.008 RMR^2 + 0.845 RMR - 3.442$	$R^2 = 0.316$

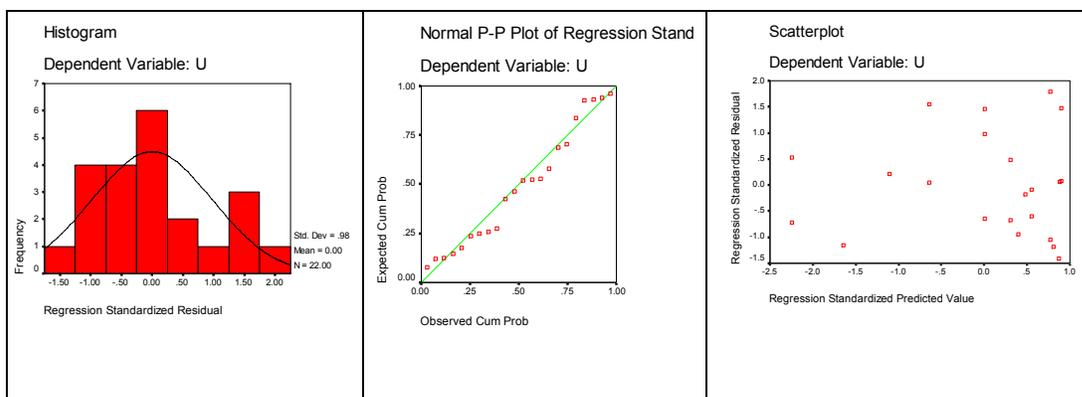


شکل ۶-۱۳- رابطه U و RMR

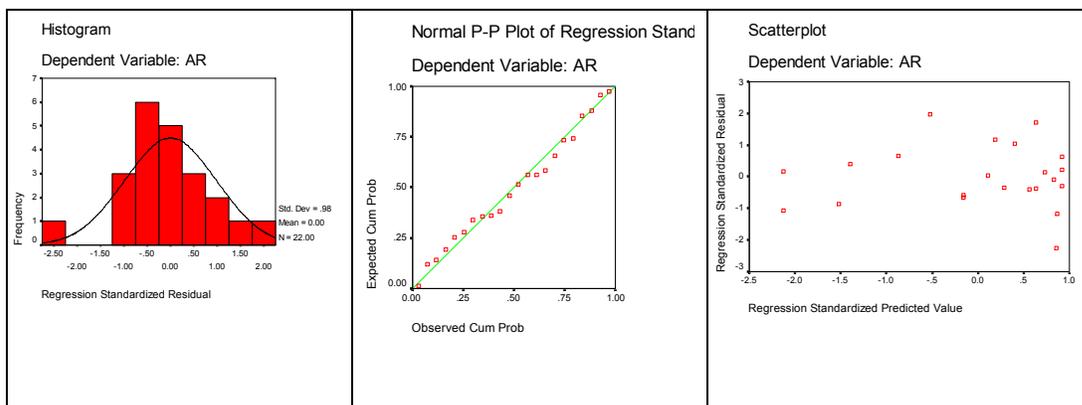


شکل ۶-۱۴- رابطه AR و RMR

به منظور بررسی و تحلیل باقی مانده برای هر متغیر سه نمودار ترسیم شده که به ترتیب در شکل- های ۶-۱۵ و ۶-۱۶ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود. نتایج حاصل از نمودارهای مذکور نرمال بودن خطا، میانگین خطا برابر با صفر و ثابت بودن واریانس خطا را تایید می نماید.



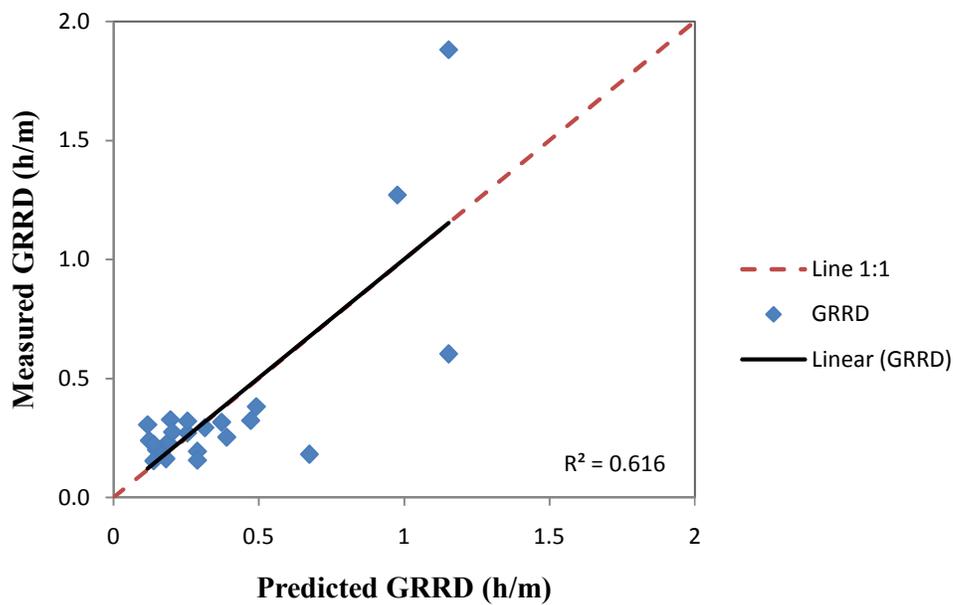
شکل ۶-۱۵- تحلیل باقی مانده‌ها برای رابطه U با RMR



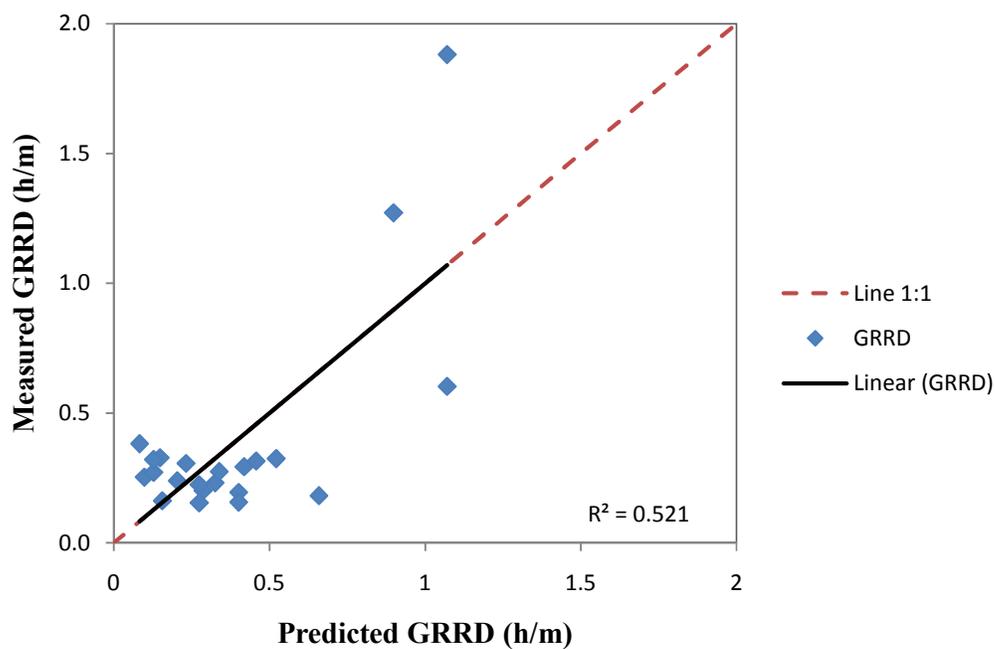
شکل ۶-۱۶- تحلیل باقی مانده‌ها برای رابطه AR با RMR

۶-۲-۲-۲- نتایج مدل‌های آماری سطح ۲

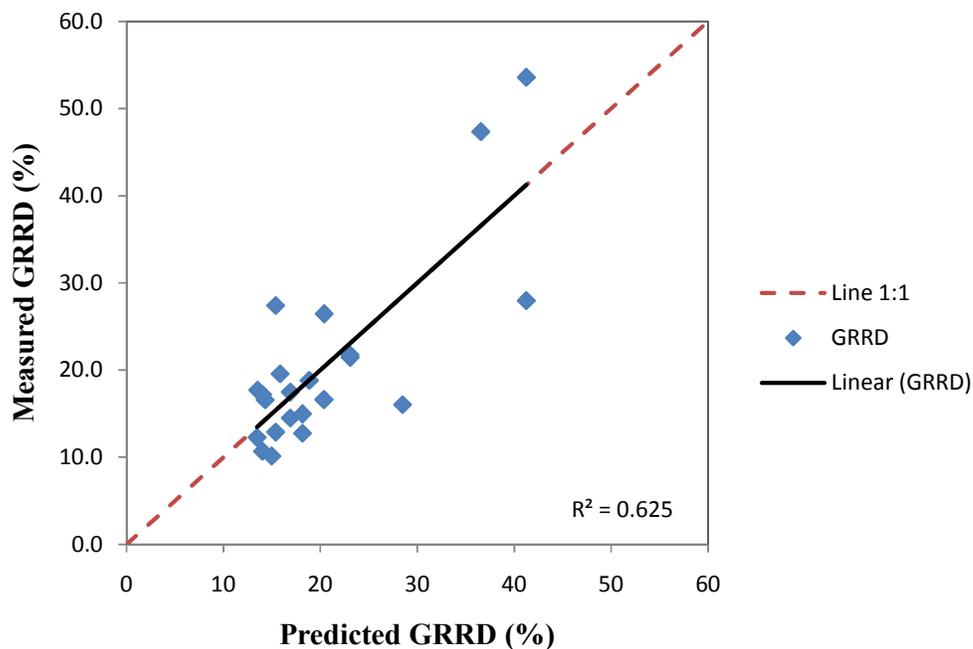
در شکل‌های ۶-۱۷ تا ۶-۲۲ نتایج به دست آمده از مدل‌های آماری با مقادیر واقعی مقایسه شده- اند. به جز شکل ۶-۲۲ در کلیه شکل‌ها خط برازش شده بسیار نزدیک به خط ۱:۱ می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که نقاط به دست آمده به فواصل متناسبی در دو طرف این خط پراکنده شده- اند.



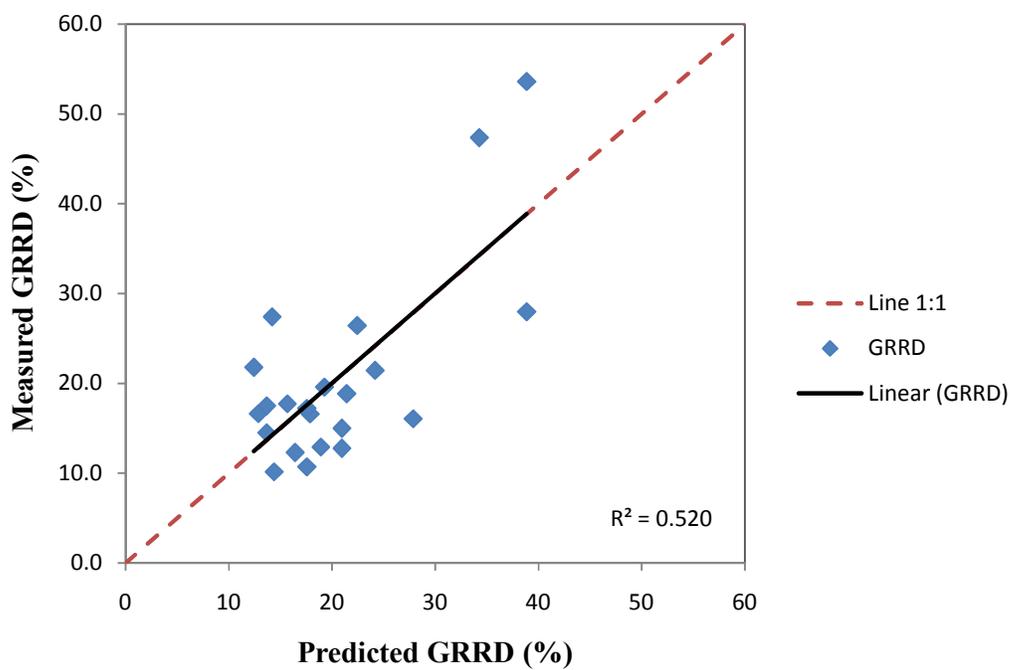
شکل ۶-۱۷- مقایسه GRRD (h/m) پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده (رابطه درجه ۲)



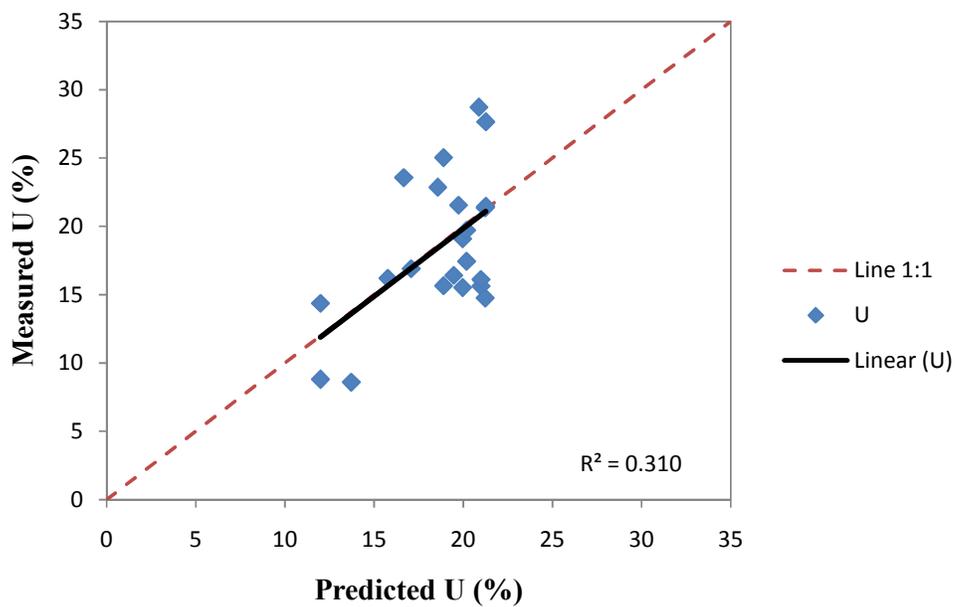
شکل ۶-۱۸- مقایسه GRRD (h/m) پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده (تابع معکوس)



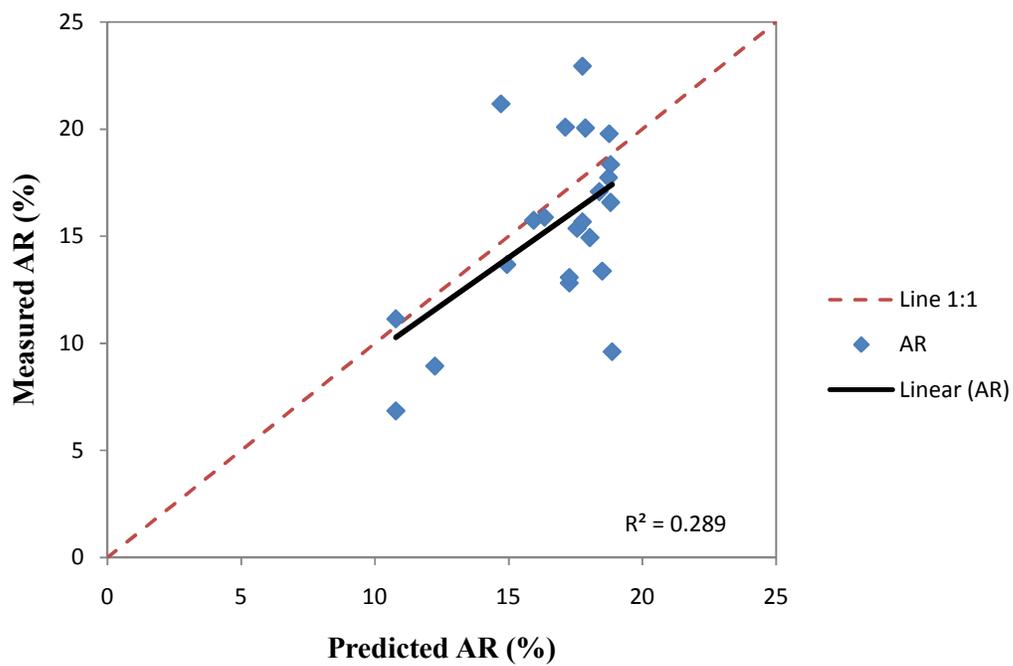
شکل ۶-۱۹- مقایسه GRRD (%) پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده (رابطه درجه ۲)



شکل ۶-۲۰- مقایسه GRRD (%) پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده (تابع معکوس)



شکل ۶-۲۱- مقایسه ضریب بهره‌وری پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده



شکل ۶-۲۲- مقایسه نرخ پیشروی پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده

۳-۶- مدلسازی با استفاده از سیستم‌های مهندسی سنگ - آماری

به منظور در نظر گرفتن شرایط زمین‌شناسی زمین درونگیر تونل و تاثیر توام عوامل مختلفی که در بروز توقفات ناشی از شرایط توده‌سنگ و شرایط زمین‌شناسی موثرند، در این بخش با استفاده از سیستم‌های مهندسی سنگ و ماتریس اندرکنش اثر متقابل پارامترهای توده‌سنگ بر یکدیگر در نظر گرفته شده و مدلی برای پیش‌بینی توقفات مربوط به این شرایط ارائه شده است. این روش از رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ^{۱۴} که به عنوان یک روش سیستمی در تحلیل و رده‌بندی پروژه‌های مهندسی سنگ مطرح است، استفاده شده است.

۳-۶-۱- مروری بر مطالعات انجام شده با استفاده از RES

سیستم‌های مهندسی سنگ برای اولین بار توسط هادسون در سال ۱۹۹۲ معرفی شد و از آن زمان به طور گسترده‌ای در حل مسائل مهندسی به کار رفته است. این روش در مطالعات زیست محیطی، مدیریت زباله‌ها و پسماندها، طراحی فاضلاب شهری، آلودگی هوا، پایداری شیب و طراحی سازه‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته است.

بررسی میزان خطرات زیست محیطی ناشی از دفع زباله‌های هسته‌ای، میزان آلودگی‌های حوزه آبریز رودخانه‌ها، اکوسیستم‌های جنگلی، مدیریت زباله‌های هسته‌ای و آلودگی هوا ناشی از ترافیک شهری نمونه‌هایی از کاربرد این روش می‌باشد (KhaloKakaie and Zare 2010 and Zare et al., 2011).

این روش همچنین در مهندسی سنگ نیز کاربردهای زیادی داشته است. از آن جمله می‌توان به کاربرد آن در تحلیل پایداری شیب‌ها طراحی تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی مانند انتخاب محل ساخت نیروگاه زیرزمینی توسط شانگو همکاران در سال ۲۰۰۰ (Shang et al., 2000)، ارزیابی ریسک‌های ژئوتکنیکی در حفر تونل متروی آتن توسط بناردوس و کالیامپاکوس در سال ۲۰۰۴ (Benardos and

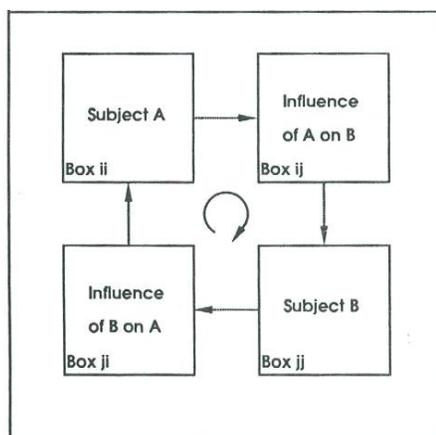
^{۱۴}Rock Engineering Systems (RES)

Kaliampakos, 2004b)، ارزیابی ناپایداری تونل‌ها توسط شین و همکاران در سال ۲۰۰۹ اشاره کرد (Shin et al., 2009).

۶-۳-۲- رویکرد سیستمی

در این رویکرد، ماتریس‌های اندرکنش ابزاری قوی هستند که تاثیر متقابل پارامترهای موثر بر یکدیگر را نشان می‌دهند. معمولا ماتریس‌ها به منظور جمع‌آوری ضرایب مجزا استفاده شده و اندرکنش بین درایه‌ها را برجسته می‌سازند (Hudson and Harrison, 1992). در ماتریس اندرکنش پارامترهای موثر روی قطر اصلی ماتریس قرار می‌گیرند و اندرکنش پارامترها با یکدیگر بر حسب آن با کدگذاری، در عناصر غیر قطری ماتریس مشخص می‌شود. در شناسایی پارامترهای بحرانی، مسیرهای تاثیرگذار، حلقه‌های برگشتی و ارزیابی تکنیک‌های انتخابی مهندسی از ماتریس اندرکنش استفاده می‌شود (Hudson, 1992).

اندرکنش دو پارامتر A و B در شکل ۶-۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، پارامتر A در درایه بالا سمت چپ و پارامتر B در درایه پایین سمت راست ماتریس قرار داده شده‌اند. درایه بالا سمت راست تاثیر A روی B و درایه پایین سمت چپ تاثیر B روی A را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، ماتریس اندرکنش بر اساس قرار دادن پارامترهای اصلی در قطر اصلی و اندرکنش‌ها در درایه‌های غیراصلی بنا شده است (Hill & Warfield, 1972; Hudson, 1992a).



شکل ۶-۲۳- ماتریس اندرکنش برای دو پارامتر A و B (Hudson, 1992a)

ماتریس‌های اندرکنش ابزاری قوی به منظور استفاده در رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) و نشان دادن مکانیزم‌های تاثیر عوامل اصلی بر یکدیگر می‌باشند. با این حال، بایستی چگونگی عددی‌سازی^{۱۵} اهمیت پارامترها در نظر گرفته شود. برای این منظور نیاز به روشی برای کدگذاری ماتریس اندرکنش است که از این طریق چگونگی تاثیر پارامترها بر روی یکدیگر به سبب مکانیزم‌های موجود به صورت عددی بیان گردد. طبق نظر هادسون، پنج روش مختلف برای کدگذاری ماتریس اندرکنش وجود دارد. این روش‌ها شامل روش دوتایی^{۱۶}، روش کدگذاری دوم به روش نیمه عددی خبره (ESQ^{۱۷})، روش استفاده از شیب نمودار پارامترها، روش تطبیقی از یک رویکرد سیستمی مستقیم و روش صریح^{۱۸} می‌باشد (زارع، ۱۳۹۱).

روش ESQ در میان سایر روش‌ها، تا حد زیادی موفق بوده و تاکنون از بیشترین کاربرد برخوردار بوده است. این روش در حقیقت نوع تعمیم‌یافته‌ای از روش دوتایی است که دارای پنج کلاس کدگذاری از ۰ تا ۴ می‌باشد (جدول ۶-۸). این روش کدگذاری، از حساسیت بیشتری نسبت به روش دوتایی که به صورت بسیار ساده تنها روشن یا خاموش بودن درایه‌ها را تعیین می‌نمود، برخوردار است. ضعف اصلی این روش مربوط به تغییرپذیری بسیار زیاد آن در تخصیص کلاس‌ها به درایه‌ها می‌باشد که آن

^۱Quantification

^{۱۶} Binary

^{۱۷} Expert Semi-Quantitative

^{۱۸} Explicit

را در تشریح کامل مکانیزم‌های مربوطه ناتوان ساخته است. از طرفی در این روش، عمل کدگذاری توسط یک کارشناس و یا گروهی از کارشناسان انجام می‌گیرد که این مسئله باعث ذهن‌گرایی^{۱۹} کدگذاری‌ها و نتایج به دست آمده می‌گردد. با این حال، به دلیل عدم وجود یک روش مرسوم دیگر برای پوشش این ضعف و نیز سادگی استفاده از آن، در حال حاضر این روش از بیشترین کاربرد برخوردار است (زارع، ۱۳۹۱).

جدول ۶-۸- توصیف رتبه‌های قراردادی در ماتریس اندرکنشیه روش EQS (Hudson, 1992)

کد	توصیف اندرکنش
صفر	تاثیری ندارد
۱	تاثیر بسیار کمی دارد
۲	تاثیر کمی دارد
۳	تاثیر زیاد دارد
۴	تاثیر بسیار زیاد دارد

زمانی که مجموع مقادیر عددی هر سطر (علت) و مجموع مقادیر هر ستون (اثر) به محورهای مختصات منتقل شوند، نمودار علت - اثر را پدید می‌آورند. در این نمودار پارامترهایی که در بخش پایین - راست نمودار قرار می‌گیرند، بر روی سیستم تسلط دارند و پارامترهای واقع در بالا سمت چپ تحت اثر سیستم قرار دارند. هیستوگرام شدت اندرکنش‌ها نیز نشان می‌دهد کدام پارامترها بیشترین اندرکنش را در سیستم دارند (Frough and Torabi 2013).

۶-۳-۳- مدلسازی RES - آماری

به منظور ارائه مدلی برای تخمین توقعات مربوط به توده‌سنگ و شرایط نامساعد زمین (GRRD) با استفاده از RES از اطلاعات تونل‌های کرج ۱، کرج ۲ و قمرود استفاده شده است. برای این منظور علاوه بر شرایط کیفی زمین درونگیر تونل، پارامترهای توده‌سنگ نیز در ماتریس اندرکنش در

¹⁹Subjectivity

نظر گرفته شده است. به این ترتیب با در نظر گرفتن پارامترهای موثر بر این توقفات، اندرکنش و تاثیر آنها بر یکدیگر نیز در این مدل لحاظ شده است. امتیازدهی به این پارامترها بر اساس جدول ۶-۹ انجام شده است. پارامترهای موثر بر توقفاتکه در جدول ۶-۱۰ آورده شده است، با توجه به جدول ۴-۱ پارامترهای در نظر گرفته شده به طور مختصر توضیح داده می شود.

- ناپایداری احتمالی: یکی از مهمترین عوامل تاثیرگذار بر توقفات دستگاه حفاری است که بر اساس زمان خودپایداری تونل تقسیم بندی شده است.
- فاصله داری ناپیوستگی ها: این پارامتر علاوه بر تاثیر در شرایط پایداری یکی از عوامل مهم در گیرافتادن کاترهد می باشد. در صورت وجود آب زیرزمینی می تواند یکی از پارامترهای کنترل کننده میزان جریان آب نیز به شمار رود. فاصله داری ناپیوستگی ها با توجه به تقسیم بندی RME و برحسب تعداد درزه در مترمکعب توده سنگ در نظر گرفته شده است.
- جهت داری ناپیوستگی ها: این پارامتر نیز تاثیر زیادی در شرایط پایداری تونل دارد و با توجه به تقسیم بندی RME امتیازدهی شده است.
- مقاومت فشاری تک محوره سنگ بکر: مهمترین پارامتر مقاومتی سنگ بوده که بر روی سایر عوامل در نظر گرفته شده نظیر پایداری نیز تاثیر دارد. این پارامتر نیز با توجه به تقسیم بندی RME در نظر گرفته شده است.
- شرایط آب زیرزمینی: آب زیرزمینی علت اصلی توقفات TBM در بسیاری از پروژه ها بوده است. تجربه در پروژه های مختلف نشان داده است که جریان آب می تواند مشکلات زیادی ایجاد نماید در حالیکه وجود آب به صورت نم یا رطوبت تاثیری بر عملیات اجرایی حفاری مکانیزه ندارد.
- وجود رس و کانی های چسبنده: وجود رس و کانی های چسبنده علاوه بر ایجاد پدیده کلاگینگ بارگیری و حمل مصالح حاصل از حفاری را نیز دچار اختلال می نماید. وجود رس در مجاورت آب این دو معضل را افزایش می دهد.

- سایندگی سنگ: کانی‌های ساینده مانند کوارتز در توده‌سنگ و همچنین وجود رگه‌های کوارتزی در بین لایه نرم از عوامل فرسایش و یا خرابی ابزار برشی می‌باشند.
- لهیدگی: پدیده لهیدگی باعث گیر افتادن سپر و کاترهد شده که ممکن است زمان زیادی صرف آزاد سازی آنها شود.
- سینه‌کار مختلط: سینه‌کار مختلط علاوه بر گیر انداختن کاترهد، ممکن است باعث افزایش نرخ فرسایش ابزار حفاری و حتی آسیب دیدن آن شود.
- تصاعد گازهای سمی: گازهای سمی علاوه بر خطرات جانی، با توجه به استفاده از تجهیزاتی مانند ماسک و کپسول هوا باعث کاهش راندمان پرسنل نیز می‌شود. با توجه به نوع گاز در مواردی خردگی و آسیب تجهیزات الکترونیکی باعث بروز تاخیرات و توقفات ناخواسته می‌شود. کاهش بازدهی تهویه نیز از دیگر اثرات آن می‌باشد.

جدول ۶-۹- امتیازدهی پارامترهای موثر

پارامتر	علامت	امتیاز دهی			
		صفر	۱	۲	۳
ناپایداری احتمالی*	P1	>۴۸	۴۸ - ۱۲	۱۲ - ۵	۵ >
فاصله‌داری ناپیوستگی*	P2	صفر - ۴	۸ - ۴	۱۵ - ۸	۲۰ - ۱۵
جهت‌داری ناپیوستگی*	P3	عمود	مایل	موازی	
مقاومت فشاری*	P4	>۱۸۰	۱۸۰ - ۹۰	۹۰ - ۳۰	۳۰ >
شرایط آب زیرزمینی	P5	خشک	مرطوب	جریان	
وجود رس	P6	ندارد	کم	زیاد	
سایندگی سنگ	P7	کم	متوسط	زیاد	
لهیدگی	P8	ندارد	کم	زیاد	
سینه کار مختلط	P9	ندارد	دارد		
تصاعد گازهای سمی	P10	ندارد	کم	زیاد	

* بر اساس طبقه بندی (RME (Bieniawski 2007)

ناپایداری احتمالی بر مبنای زمان خود ایستایی بر حسب ساعت

فاصله‌داری ناپیوستگی بر مبنای تعداد درزه در هر مترمکعب

مقاومت فشاری سنگ بکر بر حسب مگاپاسکال

جدول ۶-۱۰- پارامترهای موثر بر توقفات در واحدهای مختلف توده‌سنگ

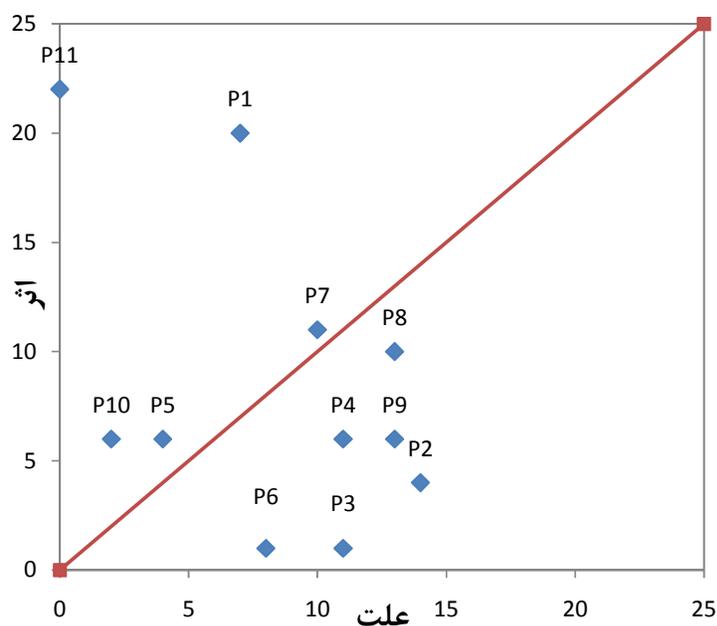
ردیف	واحد	زمان خود ایستایی (h)	فاصله‌داری ناپیوستگی (j/m ³)	جهت‌داری ناپیوستگی نسبت به تونل	UCS (MPa)	آب زیرزمینی	رس	سایندگی	لهیدگی	سینه‌کار مختلط	وجود گاز
۱	Cz	۰	>۲۰	مایل	<۳۰	خشک	زیاد	کم	کم	دارد	ندارد
۲	Gta-1-1	۱۲-۵	۲۰-۱۵	مایل	۹۰-۳۰	خشک	زیاد	کم	ندارد	دارد	ندارد
۳	Tsh	>۴۸	۱۵-۸	مایل	۹۰-۳۰	آبدار	ندارد	متوسط	ندارد	ندارد	ندارد
۴	Gta-2	>۴۸	۱۵-۸	مایل	۹۰-۳۰	خشک	کم	کم	ندارد	ندارد	ندارد
۵	Gta-1-2	>۴۸	۱۵-۸	مایل	۱۸۰-۹۰	خشک	ندارد	کم	ندارد	دارد	ندارد
۶	Sts-1	>۴۸	۸-۴	مایل	۱۸۰-۹۰	جریان	ندارد	متوسط	ندارد	ندارد	ندارد
۷	Mdg	>۴۸	۸-۴	مایل	۹۰-۳۰	آبدار	ندارد	کم	ندارد	ندارد	ندارد
۸	Gta-3	>۴۸	۸-۴	مایل	۱۸۰-۹۰	آبدار	ندارد	کم	ندارد	ندارد	ندارد
۹	Sts-2	>۴۸	۴-۰	مایل	۱۸۰-۹۰	آبدار	ندارد	متوسط	ندارد	ندارد	ندارد
۱۰	Gta-4	>۴۸	۴-۰	مایل	۱۸۰-۹۰	آبدار	ندارد	کم	ندارد	ندارد	ندارد
۱۱	MG	>۴۸	۴-۰	مایل	۱۸۰-۹۰	آبدار	ندارد	کم	ندارد	ندارد	ندارد
۱۲	SC	۴۸-۱۲	۴-۰	مایل	۹۰-۳۰	آبدار	ندارد	کم	ندارد	ندارد	ندارد
۱۳	SC2	۴۸-۱۲	۴-۰	مایل	۹۰-۳۰	آبدار	ندارد	کم	ندارد	ندارد	ندارد
۱۴	MO	>۴۸	۴-۰	مایل	>۱۸۰	آبدار	ندارد	کم	ندارد	ندارد	ندارد
۱۵	Cz-2	۰	>۲۰	مایل	<۳۰	آبدار	ندارد	کم	ندارد	ندارد	ندارد
۱۶	GT	>۴۸	۴-۰	مایل	۹۰-۳۰	جریان	ندارد	کم	ندارد	ندارد	ندارد
۱۷	K1	>۴۸	۴-۰	مایل	۹۰-۳۰	آبدار	ندارد	کم	ندارد	ندارد	ندارد
۱۸	K2	۴۸-۱۲	۸-۴	مایل	۹۰-۳۰	آبدار	ندارد	کم	ندارد	ندارد	ندارد
۱۹	K3	۰	>۲۰	مایل	۹۰-۳۰	جریان	ندارد	کم	ندارد	ندارد	ندارد
۲۰	J1	۴۸-۱۲	۲۰-۱۵	مایل	۹۰-۳۰	آبدار	ندارد	متوسط	دارد	دارد	ندارد
۲۱	J2	۴۸-۱۲	۱۵-۸	مایل	۹۰-۳۰	آبدار	ندارد	متوسط	کم	دارد	ندارد
۲۲	J3	۰	>۲۰	مایل	۹۰-۳۰	جریان	ندارد	کم	دارد	ندارد	ندارد

به منظور تشکیل ماتریس اندرکنش علاوه بر ۱۰ پارامتر بیان شده، پارامتر یازدهم یعنی توقفات بالقوه مربوط به شرایط توده‌سنگ نیز در قطر اصلی ماتریس گنجانده می‌شود (جدول ۶-۱۱). کد گذاری ماتریس نیز با روش ESQ و با استفاده از نظر سنجی از ۸ کارشناس خبره انجام شده است. عدد گنجانده شده در این جدول، میانگین امتیاز این کارشناسان می‌باشد. لازم به ذکر است این کارشناسان از بین مهندسين با تجربه کارگاهی در حفاری مکانیزه که تجربه برخورد با شرایط نامساعد زمین را داشته‌اند، کارشناسان مجرب طراحی و زمین‌شناس و اساتید دانشگاه که در زمینه حفاری مکانیزه فعالیت‌های تحقیقاتی داشته‌اند انتخاب شده‌اند. مجموع تمام کدهای سطر با عنوان علت C و مجموع تمام کدهای ستون به عنوان معلول E برای هر پارامتر محاسبه شده است.

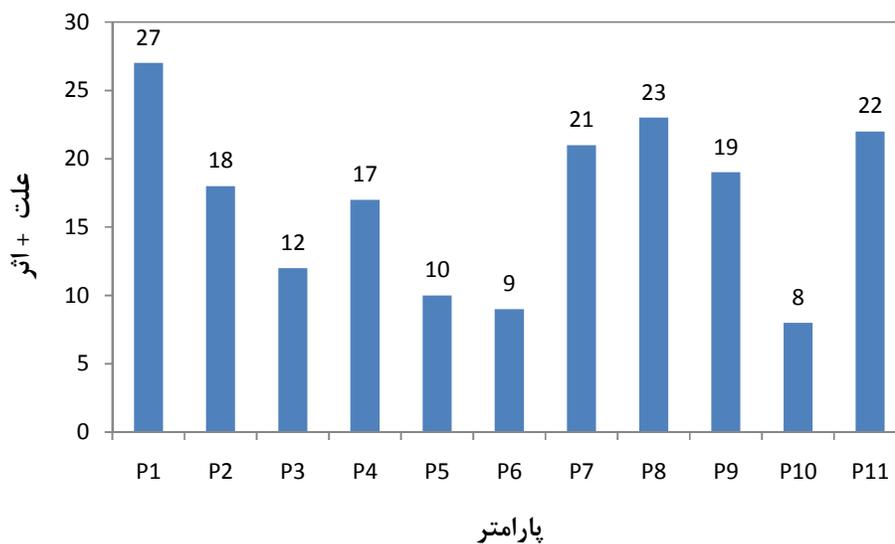
جدول ۶-۱۱- ماتریس اندرکنش

اثر											$\sum C$	
علت	P1	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۳	۷
	۴	P2	۰	۰	۱	۰	۱	۳	۱	۲	۲	۱۴
	۳	۰	P3	۰	۱	۱	۱	۲	۱	۱	۱	۱۱
	۳	۱	۰	P4	۱	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۱۱
	۰	۰	۰	۱	P5	۰	۰	۰	۱	۰	۲	۴
	۲	۰	۰	۰	۱	P6	۱	۱	۰	۱	۲	۸
	۳	۱	۰	۱	۰	۰	P7	۱	۱	۰	۳	۱۰
	۳	۱	۰	۲	۱	۰	۲	P8	۰	۱	۳	۱۳
	۲	۰	۰	۲	۱	۰	۳	۲	P9	۱	۲	۱۳
	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	P10	۲	۲
	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	P11	۰
$\sum E$	۲۰	۴	۱	۶	۶	۱	۱۱	۱۰	۶	۶	۲۲	

در شکل‌های ۶-۲۴ و ۶-۲۵ به ترتیب نمودار علت - اثر و هیستوگرام شدت اندرکنش پارامترها نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۶-۲۴ مشاهده می‌شود، پارامتر شماره ۱۱ یا همان توقفات مربوط به شرایط توده‌سنگ کاملاً تحت اثر سیستم قرار دارد. از طرف دیگر فاصله‌داری و جهت‌داری ناپیوستگی‌ها، بیشترین تاثیر را بر سیستم دارند. وجود گاز، رس و کانی‌های چسبنده و آب زیرزمینی کمترین اندرکنش را در سیستم دارند. با به دست آوردن مجموع علت و معلول (C+E) برای هر پارامتر می‌توان هیستوگرام شدت اندرکنش را رسم کرد (شکل ۶-۲۵). این شکل نشان می‌دهد ناپایداری بالقوه، لهیدگی و سینه کار مختلط (پارامترهای ۱، ۷، ۸ و ۹) بیشترین اندرکنش را در سیستم دارند بطوریکه تغییر اندک در آنها تاثیر زیادی در سیستم می‌گذارد.



شکل ۶-۲۴- نمودار علت - اثر



شکل ۶-۲۵- هیستوگرام شدت اندرکنش پارامترها

به منظور محاسبه اندیس توقفات مربوط به شرایط توده سنگ که از این پس (GRDi) نامیده می-
 شود، برای هر واحد توده سنگ، از رابطه ۱ استفاده شده است. بطوریکه i مربوط به پارامترهای ۱ تا ۱۰
 بوده و Z واحد توده سنگ مورد نظر را نشان می دهد. همچنین a_i ضریب وزنی هر کدام از پارامترها می-

باشد که با استفاده از رابطه ۶-۲ محاسبه می‌شود. در این رابطه m حداکثر مقدار P_{ij} و P_{ij} امتیاز

اختصاص داده شده به هر پارامتر می‌باشد. جدول ۶-۱۲ نحوه محاسبه GRDi را نشان می‌دهد.

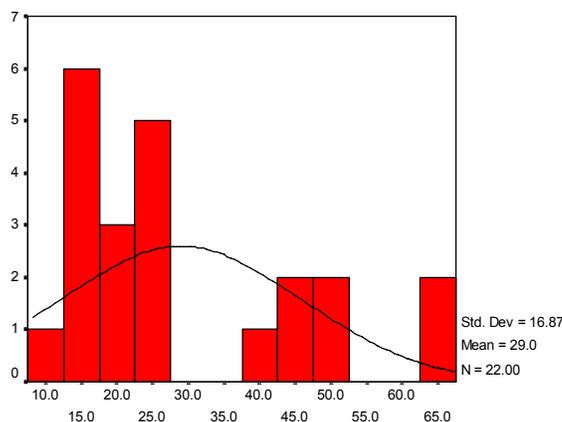
$$a_i = \frac{1}{MP_{ij}} \times \frac{(C+E)}{\sum_i (C+E)} \% \text{ (Hudson 1992) (۱-۶)}$$

$$GRDi_j = \sum_{i=1}^{10} a_i \times P_{ij} \text{ (Hudson 1992) (۲-۶)}$$

جدول ۶-۱۲- محاسبه اندیس توقفات مربوط به پارامترهای توده‌سنگ و شرایط زمین (GRDi)

ردیف	واحد	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	GRDi
۱	Cz	۴	۴	۱	۳	۰	۱	۱	۰	۲	۰	۶۳/۷۲
۲	Gta-1-1	۲	۳	۱	۲	۰	۱	۰	۰	۲	۰	۴۲/۸۹
۳	Tsh	۰	۲	۱	۲	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۲۴/۹۰
۴	Gta-2	۰	۲	۱	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۴/۸۴
۵	Gta-1-2	۰	۲	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۲۲/۶۶
۶	Sts-1	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۲	۰	۰	۲۵/۷۱
۷	Mdg	۰	۱	۱	۲	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱۹/۱۱
۸	Gta-3	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱۵/۶۵
۹	Sts-2	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱۵/۹۶
۱۰	Gta-4	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱۲/۹۱
۱۱	MG	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱۲/۹۱
۱۲	SC	۱	۰	۱	۲	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۲۰/۴۸
۱۳	SC2	۱	۰	۱	۲	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۲۰/۴۸
۱۴	MO	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۹/۴۵
۱۵	CZ2	۴	۴	۱	۳	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۴۷/۲۶
۱۶	GT	۰	۰	۱	۲	۰	۰	۰	۲	۰	۰	۲۳/۳۷
۱۷	K1	۰	۰	۱	۲	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱۶/۳۶
۱۸	K2	۱	۱	۱	۲	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۲۳/۲۲
۱۹	K3	۴	۴	۱	۲	۰	۰	۰	۲	۰	۰	۵۰/۸۱
۲۰	J1	۱	۳	۱	۲	۱	۱	۲	۱	۰	۰	۵۰/۰۵
۲۱	J2	۱	۲	۱	۲	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۴۰/۹۰
۲۲	J3	۴	۴	۱	۲	۰	۰	۲	۲	۰	۰	۶۳/۶۲
Max Pij		۴	۴	۳	۳	۲	۱	۲	۲	۲	۲	
$\frac{(C+E)}{\sum_i C + \sum_i E} \%$		۱۶/۴۶	۱۰/۹۸	۷/۳۲	۱۰/۳۷	۶/۱۰	۵/۴۹	۱۲/۸۰	۱۴/۰۲	۱۱/۵۹	۴/۸۸	۱۰۰
ai		۴/۱۲	۲/۷۴	۲/۴۴	۳/۴۶	۳/۰۵	۵/۴۹	۶/۴۰	۷/۰۱	۵/۷۹	۲/۴۴	

شکل ۶-۲۶ توزیع پارامتر GRDi را به عنوان متغیر مستقل نشان می‌دهد. برای بررسی رابطه بین توقفات و اندیس توقف، روابط مختلف با استفاده از تحلیل رگرسیون به دست آمده است که در جدول ۶-۱۳ آورده شده است. بهترین نتیجه به دست آمده مربوط به رابطه درجه دو می‌باشد که در شکل-های ۶-۲۷ و ۶-۲۸ نشان داده شده است. در جدول ۶-۱۴ نیز روابط به دست آمده آورده شده است.



GRDi

شکل ۶-۲۶- هیستوگرام توزیع GRDi

جدول ۶-۱۳- نتایج تحلیل رگرسیون GRDi و GRRD

Sig f.	F	R ² Adjust	R ²	تابع	متغیر وابسته	متغیر مستقل
.0007	16/12	.42	.44	Lin	GRRD (h/m)	GRDi
.01	8/07	.25	.29	Log		
.07	3/59	.11	.15	Inv		
.00	53/58	.833	.849	Qua		
.029	5/47	.175	.214	Pow		
.003	11/83	.34	.37	Exp		
.00	21/41	.493	.517	Lin	GRRD (%)	GRDi
.004	10/77	.316	.350	Log		
.039	4/84	.154	.195	Inv		
.00	52/02	.829	.846	Qua		
.008	8/72	.269	.304	Pow		
.00	16/65	.427	.454	Exp		

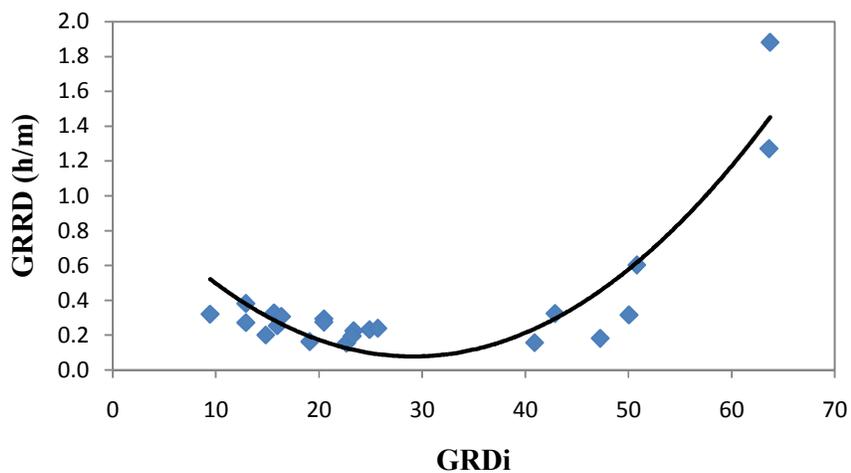
جدول ۶-۱۴- روابط به دست آمده توقفات بر اساس اندیس توقفات

$$\text{GRRD}(h/m) = 0.001147 \text{GRDi}^2 - 0.0667 \text{GRDi} + 1.052$$

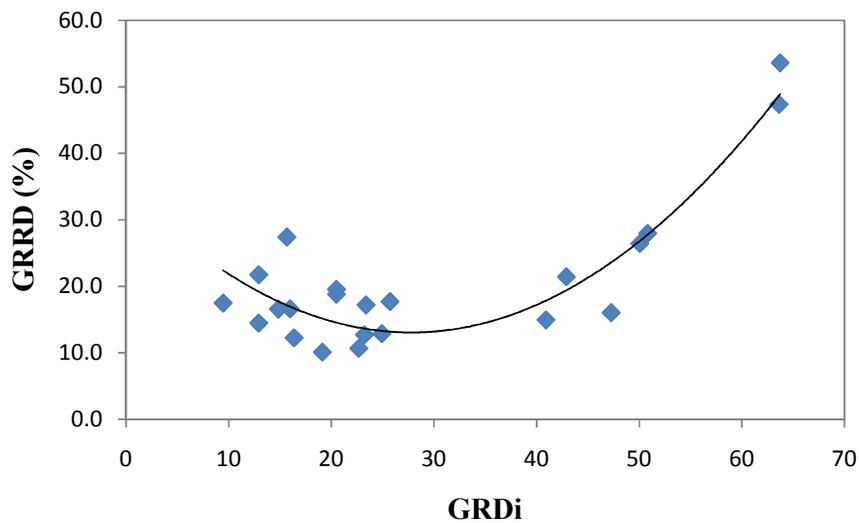
$$R^2 = 0.849$$

$$\text{GRRD}(\%) = 0.028\text{GRDi}^2 - 1.54\text{GRDi} + 34.48$$

$$R^2 = 0.846$$

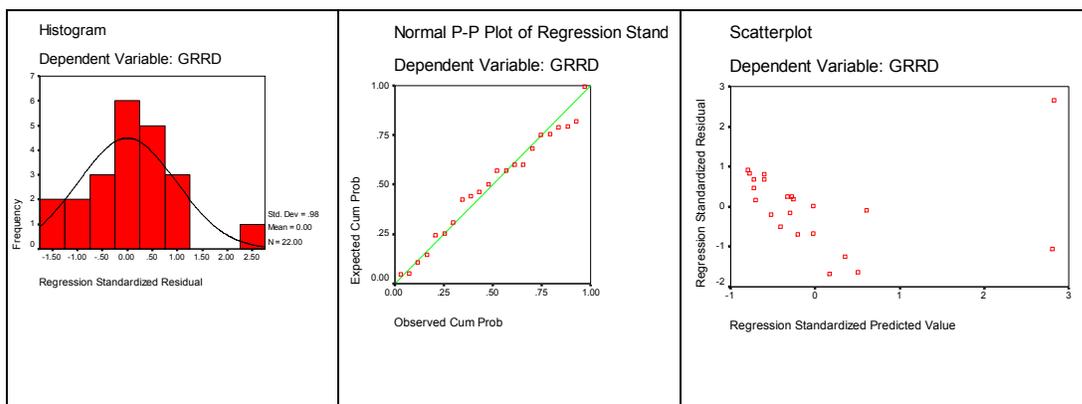


شکل ۶-۲۷- رابطه درجه دو GRRD(h/m) و GRDi

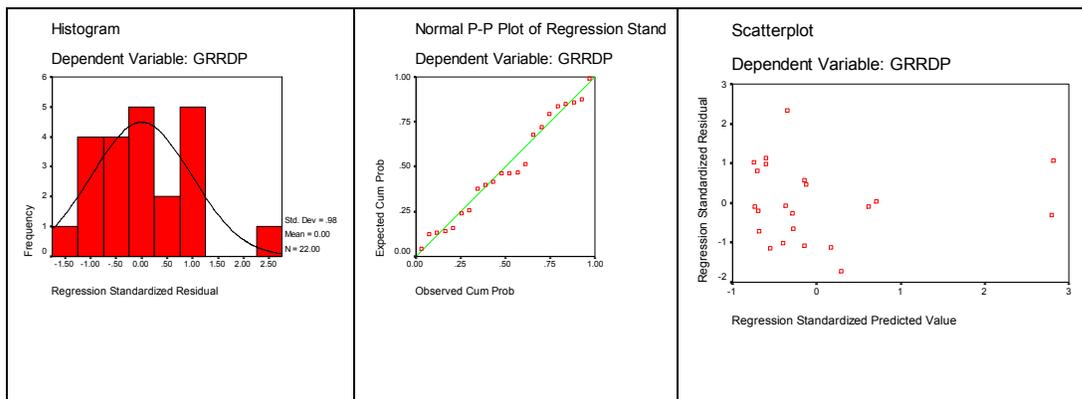


شکل ۶-۲۸- رابطه درجه دو GRRD(%) و GRDi

به منظور بررسی و تحلیل باقی مانده برای هر متغیر سه نمودار ترسیم شده که به ترتیب در شکل- های ۲۹-۶ و ۳۰-۶ نشان داده شده است. نتایج حاصل از نمودارهای مذکور نرمال بودن خطا، میانگین خطا برابر با صفر و ثابت بودن واریانس خطا را تایید می‌نماید.



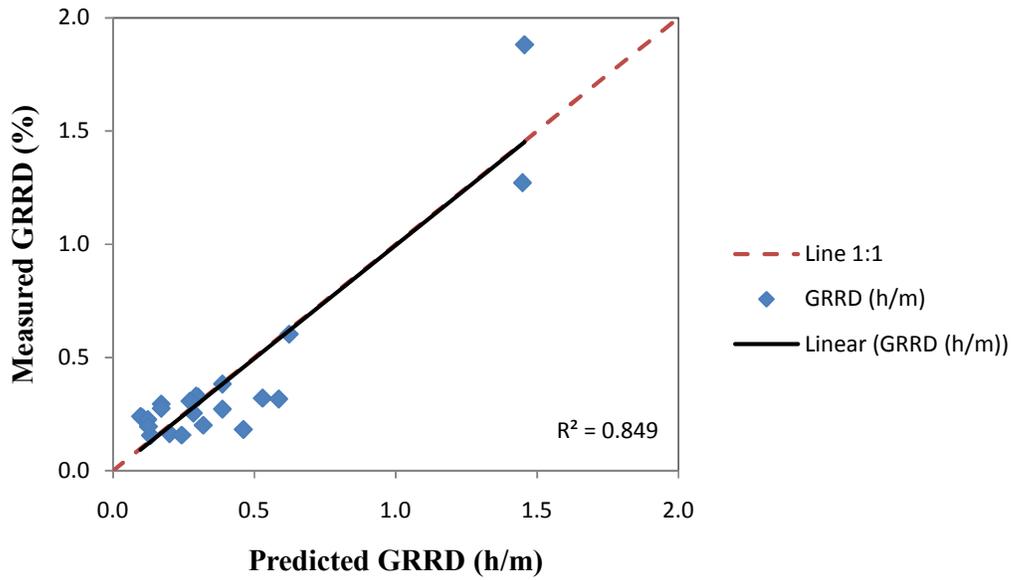
شکل ۲۹-۶- تحلیل باقی مانده‌ها برای رابطه GRRD(h/m) با GRDi



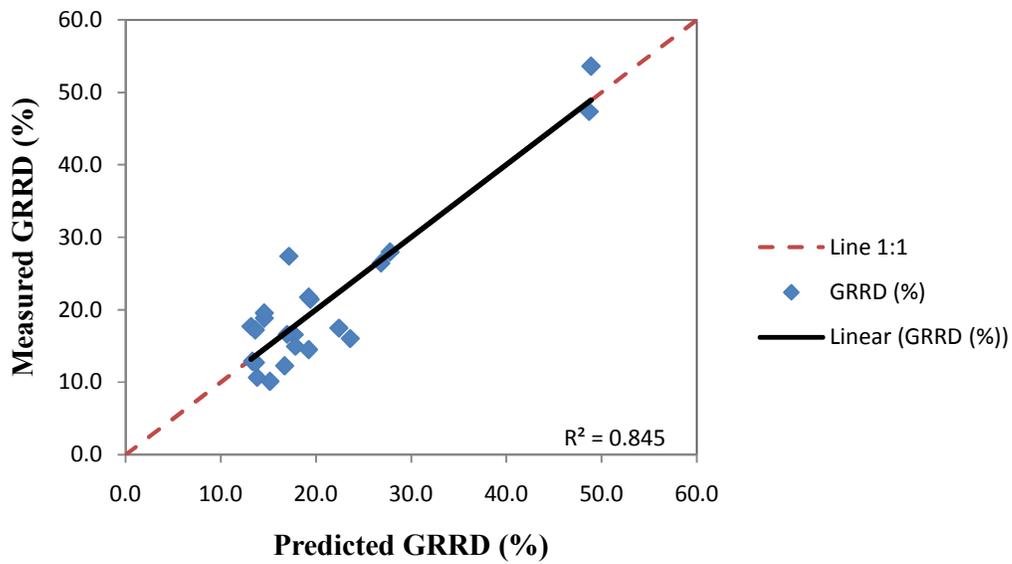
شکل ۳۰-۶- تحلیل باقی مانده‌ها برای رابطه GRRD(%) با GRDi

۴-۳-۶- نتایج مدل پیش‌بینی RES - آماری

در شکل‌های ۳۱-۶ تا ۳۲-۶ نتایج به دست آمده از روابط اندیس توقفات بر حسب ساعت بر متر و درصد با مقادیر واقعی مقایسه شده‌اند. در کلیه شکل‌ها خط برازش شده بسیار نزدیک به خط ۱:۱ می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که نقاط به دست آمده به فواصل متناسبی در دو طرف این خط پراکنده شده‌اند.



شکل ۳۱-۶- مقایسه GRRD (h/m) پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده (مدل RES)

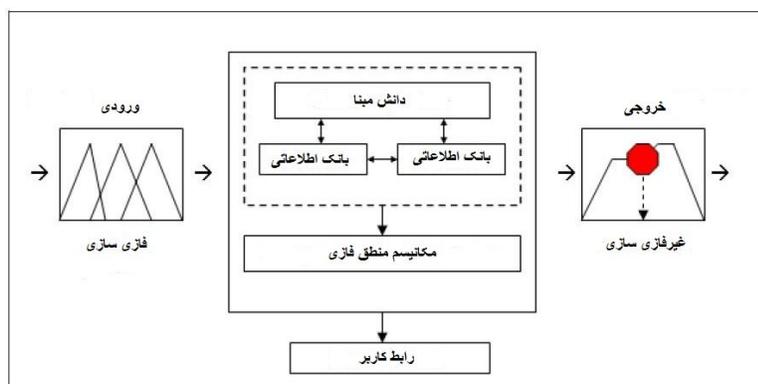


شکل ۳۲-۶- مقایسه GRRD (%) پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده (مدل RES)

۶-۴- مدلسازی فازی

منطق فازی، نخستین بار در سال ۱۹۶۵ توسط لطفی زاده معرفی شد. در حال حاضر این نظریه، به یک ابزار مهم برای مدل سازی سیستم های پیچیده و مبهم، تبدیل شده است. از آنجا که این روش با عدم قطعیت- هاسروکار دارد، مدل های حاصله نیز طبیعتاً دارای عدم قطعیت اند. در منطق فازی، از امیو وجود ندارد که این امر ز شها صفر یا یک باشند، زیرا صحت وجود گزاره ها درجه ای است. به طور کلی منطق فازی برای اید و نوع عدم قطعیت در پدیده های توان به کار برد. نوع اول نشان ساز وضع بار و دانش انسانیدر شناخت پدیده ها است نوع دوم مصراحت و عدم شفافیت در تبطبا یک پدیده های ویژگی خاص، مربوط است.

منطق فازی بر اساس تئوری مجموعه های فازی بنا شده است. مرزهای یک مجموعه فازی مشخص نیست و اعضای آن می توانند به صورت جزئی و بر اساس درجه عضویت در آن قرار گیرند. هدف منطق فازی نگاشت از فضای ورودی به فضای خروجی است. برای این کار از دستورات اگر- آنگاه که آنرا عنوان قواعد فازی می نامند، استفاده می شود (کیا، ۱۳۸۹). این قواعد به متغیرها و مشخصات تشریح کننده آنها ارجاع می کنند. در استنتاج فازی ابتدا مقادیر بردار ورودی تفسیر شده و سپس بر مبنای قواعد وارد شده، مقادیر بردار خروجی تعیین می شود (کیا، ۱۳۸۹ ب). در شکل ۶-۳۳ مدل شماتیک منطق فازی نشان داده شده است.



شکل ۶-۳۳- مدل شماتیک منطق فازی (Kim, 2004)

۶-۴-۱- توابع عضویت^{۲۰}

فازی کردن معیارهای عددی در محاسباتی که در تعیین رتبه‌بندی دارای ابهاماتی هستند، مفید است. ساختار این توابع به این صورت است که اساس تکیه‌گاه هر فاصله تا طبقه‌بندی مجاور گسترش پیدا می‌کند (رفیعی و همکاران ۱۳۸۸). تابع عضویت یک منحنی است که نحوه نگاشت هر نقطه از فضای ورودی را با یک مقدار عضویت که بین ۰ و ۱ می‌باشد، تعریف می‌کند. این تابع می‌تواند هر نوع منحنی با شکل دلخواه باشد. به طور کلی یازده نوع تابع عضویت داخلی وجود دارد که از چند تابع اساسی ساخته شده‌اند. توابع اساسی شامل توابع خطی قطعه‌ای، توزیع گاوسی، منحنی‌های سیگموئید و منحنی‌های چند جمله‌ای درجه ۲ و ۳ می‌باشند. ساده‌ترین نوع تابع عضویت از خطوط مستقیم تشکیل شده که از آن جمله می‌توان توابع عضویت مثلثی و ذوزنقه ای را نام برد (کیا، ۱۳۸۹ ب).

۶-۴-۲- استنتاج فازی

استنتاج فازی، روند ایجاد رابطه‌بین داده‌های ورودی و خروجی با استفاده از منطق فازی است. استنتاج فازی شامل توابع عضویت، عملیات منطقی قواعد اگر-آنگاه می‌باشد. فرایند استنتاج فازی شامل پنج بخش فازی سازی متغیرهای ورودی، اعمال عملگرهای منطقی، دلالت فرض بر نتیجه، تجمیع نتایج و غیر فازی سازی خروجی می‌باشد. دو نوع سیستم استنتاج که بیشتر در منطق فازی استفاده می‌شود نوع مدانی^{۲۱} و نوع سوگنو^{۲۲} نامیده می‌شوند.

روش مدانی معمولترین روش فازی است که از جمله نخستین سیستم‌های کنترل بوده که بر پایه تئوریم مجموعه-های فازی به وسیله ابراهیم مدانیدر سال ۱۹۷۵ ارائه شده است. در استنتاج مدانی، توابع عضویت خروجی مجموعه فازی، غیر فازی شده و مرکز جرم تابع دو بعدی محاسبه می‌شود. در بسیاری از مواقع استفاده از یک عدد تنها به عنوان تابع عضویت خرو جین نسبت به مجموعه‌های توزیع شده، کافی است. این نوع از خروجی، بعضی مواقع تابع عضویت خرو جیگانها نامیده می‌شود و می‌تواند به عنوان یک مجموعه فازی یدر

²⁰Membership functions

²¹Mamdani

²²Sugeno

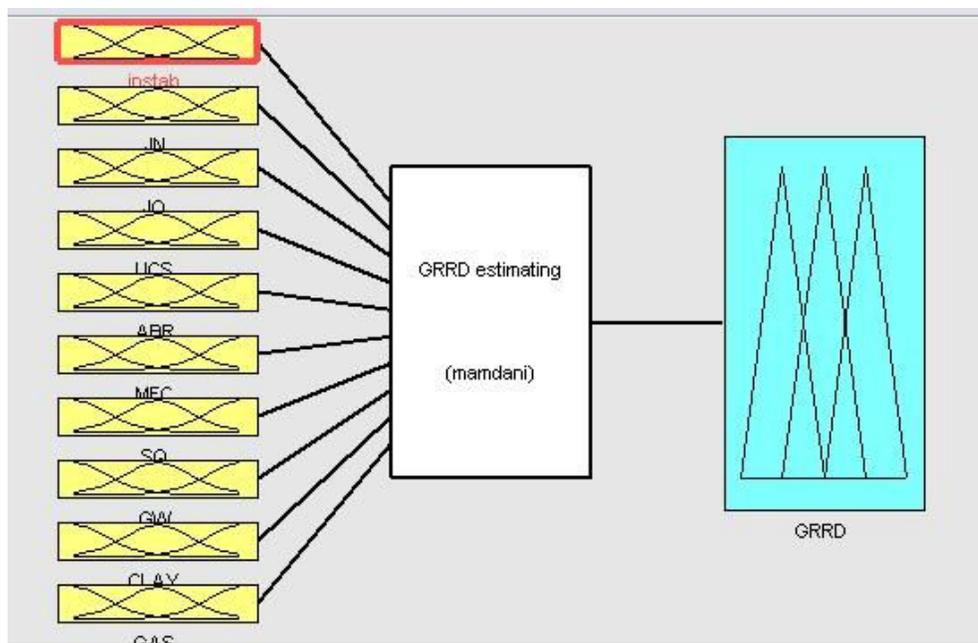
مرحله قبل از غیرفازی سازی تلقی شود. این امر به دلیل این که به میزان زیادیم حساباتلازم را به وسیله ممتد مدانی ساده ترمی کند، راندمان پروسه غیرفازی سازی را افزایش می دهد.

استنتا جفازیسوگنودر سال ۱۹۸۵ معرفی شده است. به طور کلی، سیستم های نوع سوگنومی می توانند هر سیستم استنتا جفازیسوگنودر آن توابع عضویت خرو جی خطی یا ثابت اند مدل کنند. در این روش، دوشاخا و لپروسه- های استنتا جفازیسوگنودر یک نورودی ها و به کار گیری پراتور فازی، مانند روش ممدانی است. تفاوت اصلیا این روش با روش ممدانی در این است که توابع عضویت خرو جی سوگنومیا خطی هستند و یا ثابت. سیستم استنتا جفازیسوگنومیا بر این پایه درونیا بینر مسیستم- های خطی که باید در فضا ورودی بکار گرفته شوند، بسیار مناسب است (کیا، ۱۳۸۹ و ۱۳۸۹ ب).

۶-۴-۳- ارائه مدل پیش بینی با استفاده از مدلسازی فازی

به منظور ارائه یک مدل پیش بینی با استفاده از مدلسازی فازی برای تخمین توقفات مربوط به توده سنگ و شرایط نامساعد زمین (GRRD) از داده های ارائه شده در بخش ۶-۳-۳ (جدول ۶-۱۹) استفاده شده است. پارامترهای ورودی شامل ناپایداری احتمالی، فاصله داری ناپیوستگی ها، جهت داری ناپیوستگی ها، مقاومت فشاری تک محوره سنگ بکر، شرایط آب زیر زمینی، وجود رس و کانی های چسبنده، ساینده گی سنگ، لهیدگی، سینه کار مختلط و تصاعد گازهای سمی می باشد (شکل ۶-۳۴).

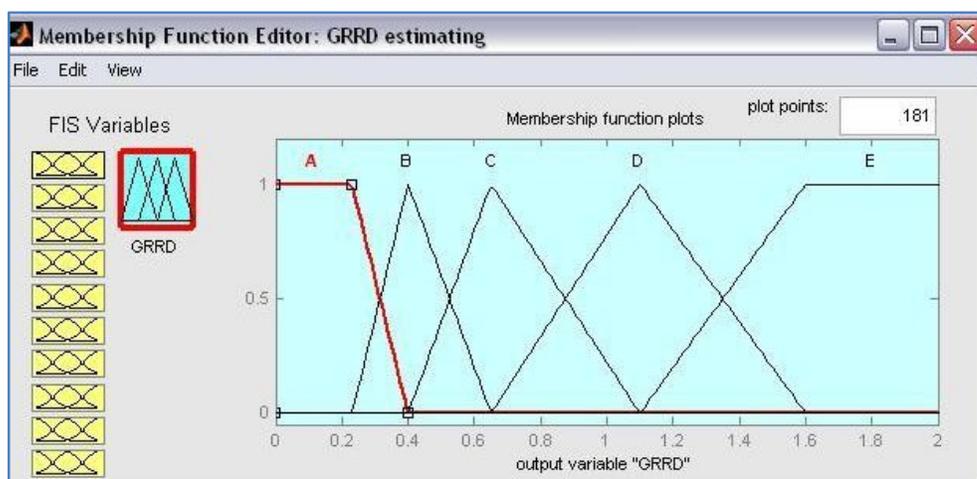
از نرم افزار Matlab-R2009 برای منظور مدلسازی فازی توقفات مربوط به شرایط توده سنگ استفاده شده است.



شکل ۳۴-۶- مدل فازی و داده‌های ورودی و خروجی

۱-۳-۴-۶- فازی سازی متغیرها

برای فازی سازی متغیرها از توابع عضویت مثلثی و ذوزنقه‌ای استفاده شده است. مطابق نظر گریما این توابع برای مسائل زمین شناسی پیشنهاد شده‌اند (Grima, 2000). در جدول ۱۵-۶ متغیرهای مورد نظر و توابع عضویت آنها و در شکل ۳۵-۶ تابع عضویت خروجی نشان داده شده است.



شکل ۳۵-۶- تابع عضویت متغیر خروجی (GRRD)

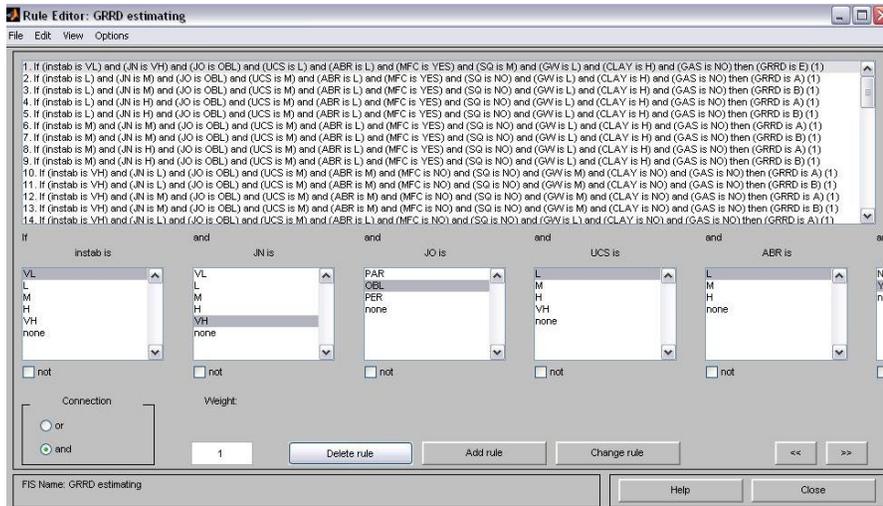
جدول ۶-۱۵- متغیرهای ورودی و توابع عضویت آنها

تابع عضویت	توصیف	پارامتر
	<p>بر مبنای زمان خود ایستایی و طبقه بندی RME تقسیم بندی شده است.</p>	<p>ناپایداری احتمالی</p>
	<p>با توجه به طبقه بندی RME و برحسب تعداد درزه در مترمکعب توده سنگ در نظر گرفته شده است.</p>	<p>فاصله داری ناپیوستگی ها</p>
	<p>با توجه به طبقه- بندی RME تقسیم- بندی شده است.</p>	<p>جهت داری ناپیوستگی ها</p>
	<p>با توجه به طبقه- بندی RME تقسیم- بندی شده است.</p>	<p>مقاومت فشاری تک محوره سنگ بکر</p>
	<p>به سه وضعیت خشک، دارای آب و وجود جریان آب تقسیم- بندی شده است.</p>	<p>شرایط آب زیرزمینی</p>

ادامه جدول ۶-۱۵- متغیرهای ورودی و توابع عضویت آنها

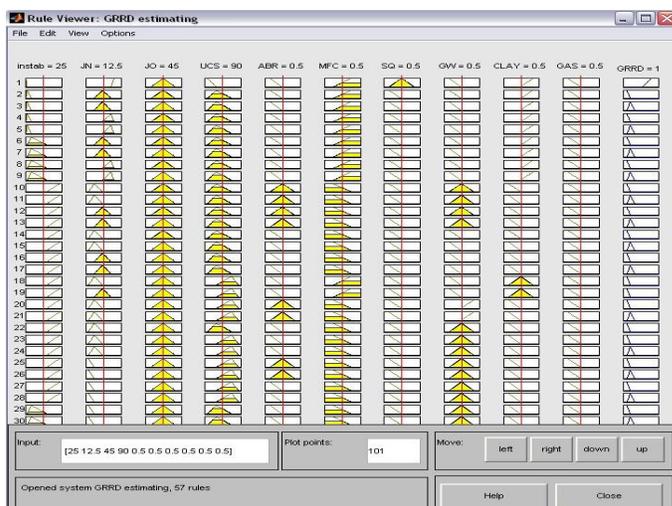
تابع عضویت	توصیف	پارامتر
	<p>وجود رس و به سه وضعیت بدون رس، کانی‌های رس دار و دارای رس زیاد چسبنده تقسیم‌بندی شده است.</p>	
	<p>ساینده سنگ به سه وضعیت ساینده کمی، ساینده متوسط و ساینده زیاد تقسیم بندی شده است.</p>	
	<p>لهیدگی به سه وضعیت بدون پتانسیل لهیدگی، لهیدگی خفیف و لهیدگی زیاد تقسیم‌بندی شده است.</p>	
	<p>سینه‌کار مختلط به دو وضعیت بدون سینه‌کار مختلط و وجود سینه‌کار مختلط تقسیم بندی شده است.</p>	
	<p>تصادد گازهای سمی به سه وضعیت بدون گاز، وجود گاز و مقادیر زیاد گاز تقسیم‌بندی شده است.</p>	

پس تعیین نوع و تعداد توابع عضویت پارامترهای ورودی و خروجی قوانین فازی نوشته شده و با توجه به تعداد متغیرها و توابع عضویت، حذف قوانین تکراری و قوانینی که احتمال وقوع آنها وجود ندارد، برای بررسی این مطالعه موردیتعداد ۵۷ قانون ممکن برای مدل فازی تنظیم شده است. بعضی از قوانین با توجه به پارامترهای متناظر به صورت منطقی رخ نمی‌دهند. مثلا اگر شرایط دیگر که تعیین کننده پایداری تونل هستند در شرایط خوبی باشند (مقاومت تک محوره، شرایط درزه‌ها، آب زیرزمینی، ...) امکان این که تونل در شرایط بسیار ناپایدار قرار گیرد وجود ندارد (Khademi 2009). این قوانین در پیوست آورده شده است. در شکل ۶-۳۶ صفحه ویرایش قوانین فازی و در شکل ۶-۳۷ نمایشگر قوانین فازی نوشته شده نشان داده است.



شکل ۶-۳۶- صفحه ویرایش قوانین فازی

²³If-then rules



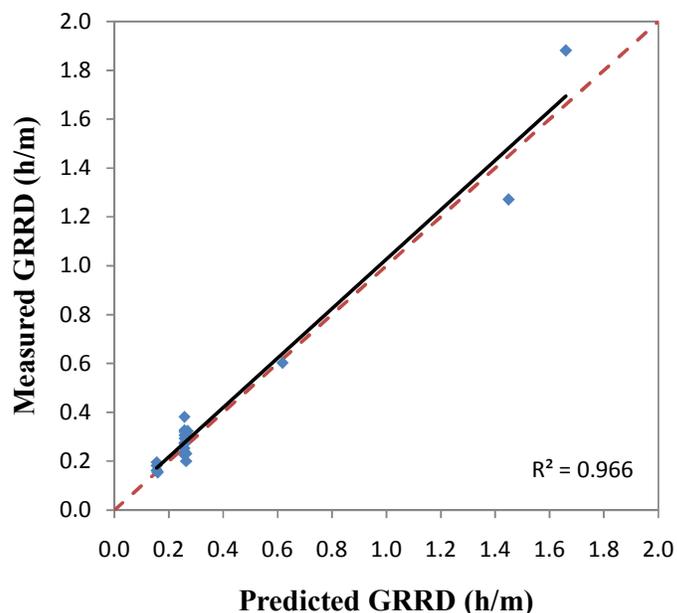
شکل ۶-۳۷- نمایشگر قوانین فازی

۶-۴-۳- نتایج مدل‌سازی فازی

پس از اجرای مدل، نتایج پیش‌بینی توقفات ناشی از شرایط توده‌سنگ به دست آمده است. نتایج در جدول ۶-۱۶ آورده شده است. در شکل ۶-۳۸ مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از مدل فازی داده‌های واقعی نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، خط برازش شده نزدیک به خط ۱:۱ می‌باشد.

جدول ۶-۱۶- نتایج پیش‌بینی توقفات بر اساس مدل فازی

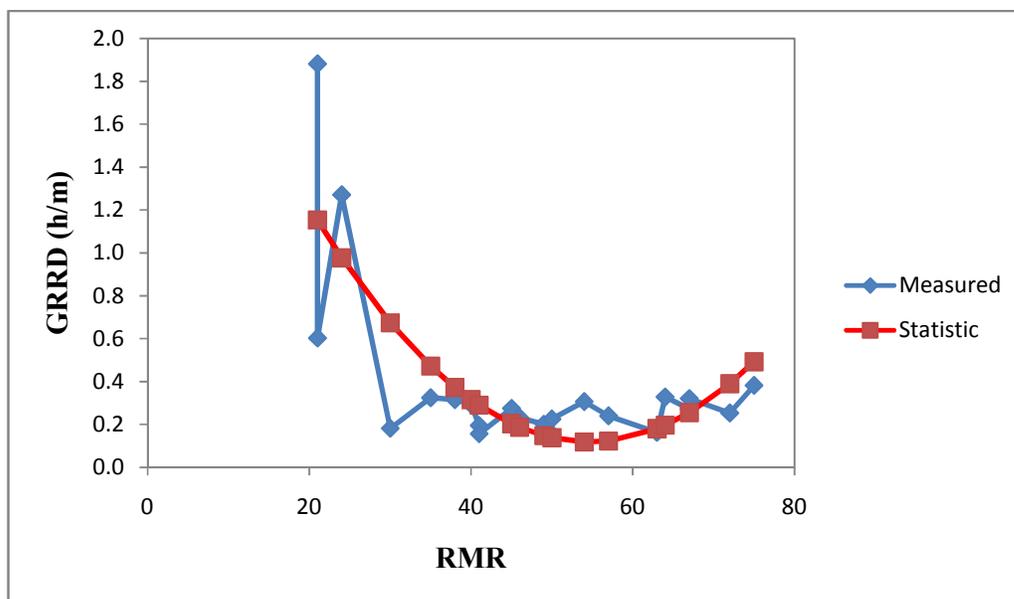
مقدار پیش‌بینی شده	واحد	مقدار پیش‌بینی شده	واحد
۰/۲۵۸	SC	۱/۶۶	Cz
۰/۲۵۸	SC2	۰/۲۶۹	Gta-1-1
۰/۲۵۸	MO	۰/۲۶۴	Tsh
۰/۱۵۶	CZ2	۰/۲۶۴	Gta-2
۰/۲۵۸	GT	۰/۱۵۹	Gta-1-2
۰/۲۵۸	K1	۰/۲۵۸	Sts-1
۰/۱۵۶	K2	۰/۱۵۶	Mdg
۰/۶۱۸	K3	۰/۲۵۸	Gta-3
۰/۲۶۴	J1	۰/۲۵۸	Sts-2
۰/۱۵۹	J2	۰/۲۵۸	Gta-4
۱/۴۵	J3	۰/۲۵۸	MG



شکل ۶-۳۸- مقایسه GRRD (h/m) واقعی و مقدار پیش‌بینی شده با استفاده از مدل فازی

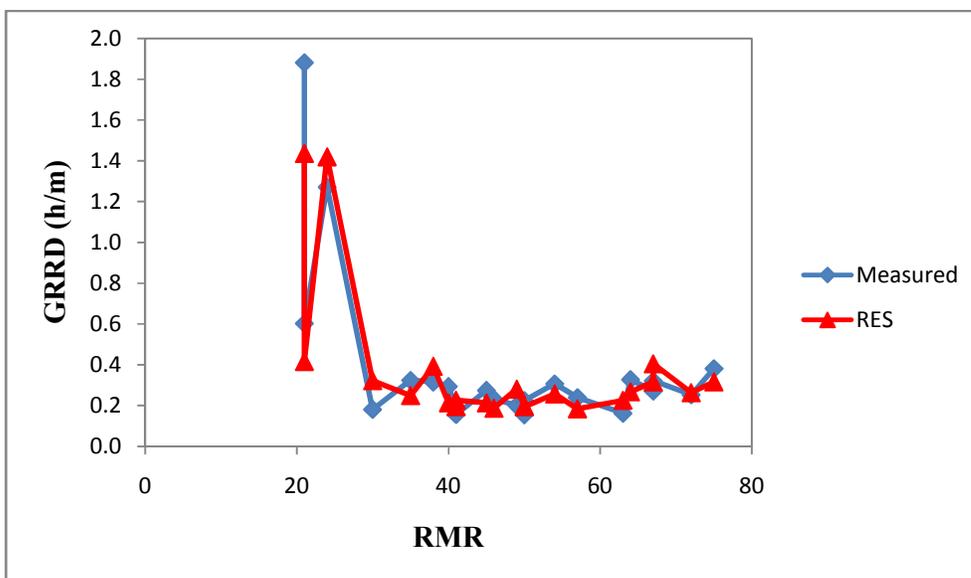
۶-۵- مقایسه نتایج مدل‌سازی با روش‌های مختلف

به منظور مدل‌سازی تاثیر شرایط توده‌سنگ بر توقفات مربوط به آن در حفاری مکانیزه و ارائه یک مدل پیش‌بینی، از روش‌های آماری RES و مدل‌سازی فازی استفاده شده است. در روش آماری با توجه به محدودیت داده‌ها، از امتیاز طبقه‌بندی RMR که در واقع پارامترهای مختلفی از توده‌سنگ که در برگیرنده مقاومت تک‌محوری سنگ بکر، شرایط و هندسه ناپیوستگی‌ها و وضعیت آب زیرزمینی می‌باشد استفاده شده است. اگرچه در این حالت عوامل مهم تاثیرگذاری مانند وجود رس، ساینده‌گی، وجود گازهای سمی، لهیدگی و سینه کار مختلط در نظر گرفته شده و یا به طور مستقیم تاثیر آنها لحاظ نمی‌شود، اما نتایج حاصل از مدل آماری تطابق خوبی را با مقادیر واقعی نشان داده است. شکل ۶-۳۹ مقایسه GRRD (h/m) واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده با مدل آماری را نشان می‌دهد.

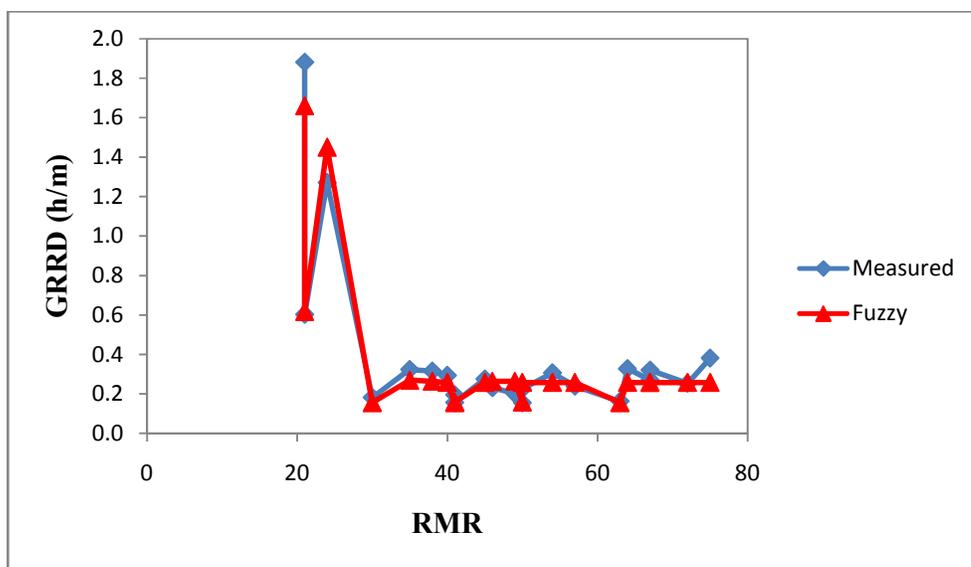


شکل ۶-۳۹- مقایسه GRRD (h/m) واقعی و پیش‌بینی شده با مدل آماری در RMR های مختلف

به منظور در نظر گرفتن عواملی مانند وجود رس، ساینده‌گی و غیره و همچنین لحاظ نمودن اندرکنش این عوامل، از سیستم‌های مهندسی سنگ - آماری به منظور مدلسازی توقفات مذکور استفاده شد. همچنین با توجه به عدم قطعیت‌ها در داده‌های ورودی، یک مدل فازی نیز برای این منظور ساخته شد. نتایج این دو روش در RMR های مختلف با مقادیر واقعی مقایسه شده که در شکل‌های ۶-۴۰ و ۶-۴۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مقادیر پیش‌بینی شده تطابق خوبی با داده‌های واقعی دارند. از طرف دیگر نتایج این دو مدل نسبت به روش آماری که روند کلی تغییرات نسبت به RMR را نشان می‌دهد، تخمین دقیق‌تری را ارائه می‌دهند.



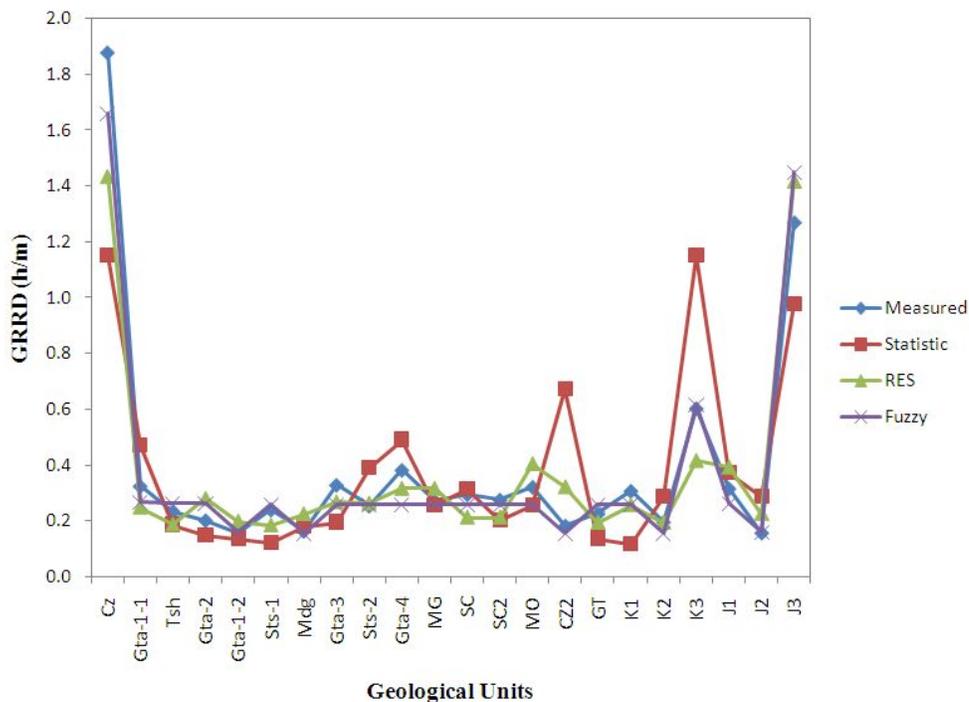
شکل ۶-۴۰- مقایسه GRRD (h/m) واقعی و پیش‌بینی شده با مدل RES در RMR های مختلف



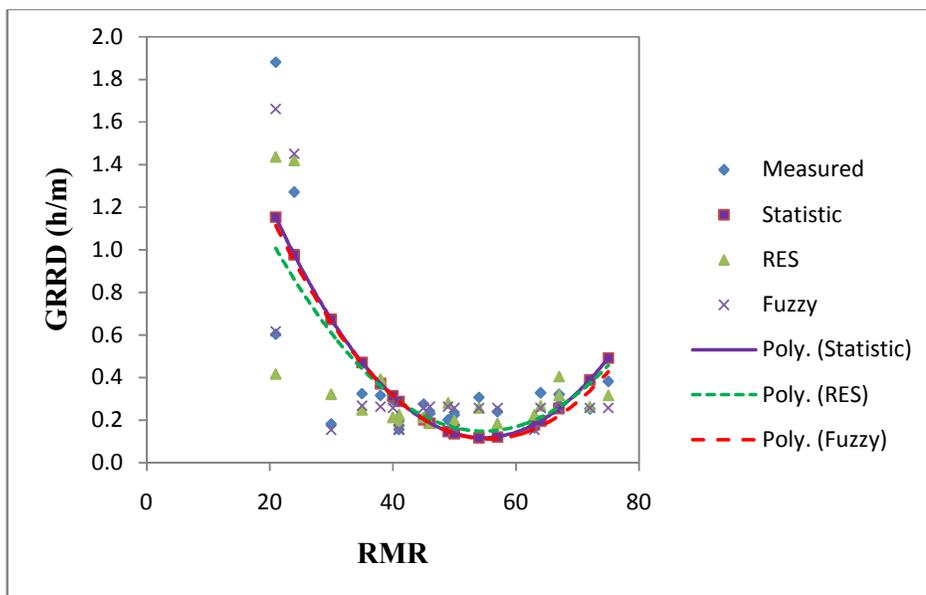
شکل ۶-۴۱- مقایسه GRRD (h/m) واقعی و پیش‌بینی شده با مدل فازی در RMR های مختلف

مقادیر واقعی توقفات با مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از روش‌های مذکور، در شکل ۶-۴۲ مقایسه شده است. در این شکل نیز مشاهده می‌شود که هر سه روش تخمین خوبی از زمان توقفات را نشان می‌دهند اما روش RES و فازی پیش‌بینی دقیق‌تری را نسبت به روش آماری نشان می‌دهند. در شکل ۶-۴۳ ترند تغییرات مقادیر پیش‌بینی شده از روش‌های مذکور نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، روند کلی تغییرات مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از سیستم‌های مهندسی سنگ و

فازی نیز مانند منحنی حاصل از روش آماری بوده (منحنی درجه ۲) بوده و کمترین توقفات در RMR های بین ۴۵ تا ۶۵ به دست آمده است.



شکل ۶-۴۲- مقایسه GRRD (h/m) واقعی و پیش‌بینی شده با مقادیر پیش‌بینی شده در واحدهای مختلف



شکل ۶-۴۳- مقایسه GRRD (h/m) واقعی و ترند مقادیر پیش‌بینی شده

صحت مدل‌های به دست آمده و چگونگی انطباق آنها با استفاده از روش‌های اندازه‌گیری آماری مانند میانگین مربعات خطاها^۱ (RMSE) و فاکتور درستی، کنترل شده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند (روابط ۱-۶ و ۲-۶). RMSE میانگین مقادیر خطا را بدون توجه به جهت آن نشان می‌دهد. فاکتور درستی^۲ (A_f) اختلاف پراکندگی میانگین داده‌های پیش‌بینی شده و واقعی را نشان می‌دهد. هر چه این مقدار به عدد یک نزدیک باشد، تطابق بیشتری بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد (Basant et al. 2010). جدول ۶-۱۶ نتیجه مقایسه این مدل‌ها را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج بسیار نزدیک به هم است و هر ۳ مدل از فاکتور درستی بالایی برخوردارند. میانگین مربعات خطاها نیز در این مدل‌ها بسیار پایین به دست آمده است.

1- Root Mean Square Error

2- Accuracy factor

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_{pred,i} - y_{obs,i})^2}{N}} \quad (۳-۶)$$

$$A_f = 10^{\sum_{i=1}^N \frac{\log\left(\frac{y_{pred,i}}{y_{obs,i}}\right)}{N}} \quad (۴-۶)$$

در این روابط RMSE میانگین مربعات خطاها، A_f فاکتور درستی، y_{pred} مقادیر پیش‌بینی شده،

y_{obs} مقادیر واقعی و N تعداد داده‌ها می‌باشد. (Basant et al. 2010).

جدول ۶-۱۷ - مقایسه مدل‌های ساخته شده

مدل	A_f	RMSE	R^2
آماري	0.98858	0.25612	0.62
آماري - RES	0.99961	0.12406	0.85
فازي	0.93997	0.07503	0.97

به طور کلی می‌توان اینطور بیان نمود که رابطه به دست آمده از روش آماری به دلیل ساده‌تر بودن می‌تواند به راحتی برای تخمین اولیه میزان توقفات ناشی از شرایط توده‌سنگ به کار گرفته شود. روش RES- آماری به دلیل اینکه عوامل مختلف زمین‌شناسی و پارامترهای توده‌سنگ را در نظر می‌گیرد و رابطه به دست آمده از آن نیز تنها با محاسبه اندیس توقفات به راحتی قابل استفاده است، می‌تواند پیش‌بینی قابل قبولی از توقفات را ارائه دهد. روش فازی اگرچه پیش‌بینی دقیق‌تری ارائه می‌دهد اما در این تحقیق تنها به عنوان یک روش کنترلی در کنار دو روش دیگر مورد استفاده قرار گرفته است. در زمانیکه نیاز باشد یک مدل کلی بر مبنای منطق فازی نوشته شود، باید کلیه قوانین فازی نوشته شود تا مدل جامعیت داشته باشد.

فصل هفتم

نتایج و پیشنهادات

۷-۱-نتایج

در این تحقیق توقفات TBM مربوط به شرایط توده سنگ در ۳ تونل با مجموع طول ۴۵ کیلومتر شامل ۲۲ واحد توده سنگیبا استفاده از سیستم طبقه بندی مهندسی توده سنگ RMR و همچنین شرایطی مانند لهیدگی، تصاعد گازهای مضر یا سمی، سینه کار مختلط و یا وجود رس در توده سنگ، با استفاده از تحلیل رگرسیون، سیستم های مهندسی سنگ و همچنین مدلسازی فازیمورد بررسی قرار گرفته است.

- بر مبنای داده های به دست آمده از تونل های بررسی شده و سطح اطلاعات موجود، یک پایگاه داده های آماری تشکیل داده شده تا در تحلیل هایی که به منظور ارائه روابطی به منظور پیش بینی میزان توقفات دستگاه حفاری در شرایط مختلف زمین شناسی ارائه می شوند، مورد استفاده قرار گیرند. ابتدا با توجه به سطح داده های به دست آمده یک پایگاه داده ای مستقل برای هر تونل تشکیل داده شده و سپس با توجه به سطح بندی داده ها، پایگاه داده های نهایی که حاصل مجموعه داده های پروژه های مورد بررسی است، تشکیل داده شده است. اطلاعات مورد استفاده از گزارش ها و نقشه های زمین شناس مهندسی، نقشه های چون ساخت، گزارش های روزانه حفاری و اپراتوری، مشاهدات، بازدیدهای میدانی و داده های جمع آوری شده از سایت به دست آمده است. این بررسی در ۲ سطح از داده های به دست آمده از این تونل ها انجام شده و نتایج ذیل به دست آمده است.
- بررسی تونل های مورد مطالعه نشان داد که به طور کلی کمترین توقفات مربوط به شرایط توده سنگ در RMR بین ۴۵ تا ۶۵ به دست آمده است.
- در مطالعات آماری از تحلیل رگرسیون استفاده شده است. در این تحلیل، هدف پیش بینی تغییرات یک یا چند متغیر وابسته با توجه به تغییرات متغیرهای مستقل است. در داده های سطح ۱، رابطه هریک از توقفات مربوط به شرایط توده سنگ، به تفکیک با RMR، RQD و

UCS مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل رگرسیون نشان داد که قوی ترین روابط به دست آمده به شرح ذیل می باشد.

$$\begin{aligned} \text{Cutter change (h/m)} &= 0.0005 \text{ RQD}^{1.141} & R^2 &= 0.509 \\ \text{Ground improvement(h/m)} &= 0.0056 + (1.646/ \text{UCS}) & R^2 &= 0.552 \end{aligned}$$

• در داده های سطح ۲، از مجموع روابط به دست آمده با استفاده از تحلیل رگرسیون، قوی ترین روابط به شرح ذیل به دست آمده است.

$$\begin{aligned} \text{GRRD (h/m)} &= 0.000911 \text{ RMR}^2 - 0.0996 \text{ RMR} + 2.84 & R^2 &= 0.62 \\ \text{GRRD(\%)} &= 0.024 \text{ RMR}^2 - 2.644 \text{ RMR} + 86.174 & R^2 &= 0.63 \end{aligned}$$

• به منظور در نظر گرفتن اندرکنش و تاثیر پارامترهای موثر بر توقفات مربوط به شرایط توده-سنگ بر یکدیگر، از سیستم های مهندسی سنگ استفاده شده است. پارامترهای مورد نظر شامل ناپایداری احتمالی، فاصله داری ناپیوستگی ها، جهت داری ناپیوستگی ها، مقاومت فشاری تک محوره سنگ بکر، شرایط آب زیر زمینی، وجود رس و کانی های چسبنده، ساینده گی سنگ، لپیدگی، سینه کار مختلط و تصاعد گازهای سمی می باشد.

• با استفاده از سیستم های مهندسی سنگ- تحلیل رگرسیون، اندیس توقفات مربوط به شرایط توده سنگ (GRDi) برای هر واحد توده سنگ محاسبه شده است. تحلیل رگرسیون توقفات مربوط به شرایط توده سنگ بر حسب ساعت بر متر و همچنین بر حسب درصد و GRDi روابط مختلفی را ارائه داد. توابعی که قوی ترین رابطه را نشان دادند به شرح ذیل می باشند.

$$\begin{aligned} \text{GRRD(h/m)} &= 0.001147 \text{ GRDi}^2 - 0.0667 \text{ GRDi} + 1.052 & R^2 &= 0.849 \\ \text{GRRD(\%)} &= 0.028 \text{ GRDi}^2 - 1.54 \text{ GRDi} + 34.48 & R^2 &= 0.846 \end{aligned}$$

• با توجه به عدم قطعیت ها از مدلسازی فازینیز برای پیش بینی توقفات مربوط به شرایط توده-سنگ استفاده شده است. البته در این تحقیق تنها به عنوان یک روش کنترلی در کنار دو روش دیگر مورد استفاده قرار گرفته است. مدلسازی فازی نیز تطابق بسیار خوبی با مقادیر واقعی

نشان داده است ($R^2=0.97$). در صورتی که یک مدل جامع و فراگیر مدنظر باشد، باید کلیه قوانین فازی نوشته شود.

مقایسه این روش‌ها نشان می‌دهد که روش سیستم‌های مهندسی سنگ - تحلیل رگرسیون و مدلسازی فازی پیش‌بینی دقیق‌تری را نسبت به روش آماری نشان می‌دهند. البته روند کلی تغییرات مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از سیستم‌های مهندسی سنگ و فازی نیز مانند منحنی حاصل از روش آماری بوده است. در نهایت باید توجه نمود که با سطح دقت داده‌های مربوط به شرایط توده‌سنگ در مراحل اولیه هر پروژه، استفاده از مدل آماری مبتنی بر RMR و مدل سیستم‌های مهندسی سنگ - آماری که از داده‌های کیفی نیز بهره می‌گیرد می‌تواند تخمین خوبی از میزان توقفات مربوط به شرایط توده‌سنگ در واحدهای مختلف توده-سنگ ارائه دهد.

پروژه‌های مطالعه شده در این تحقیق همگی توسط دستگاه حفاری با سپر دوگانه حفاری شده‌اند. با توجه به تفاوت‌های انواع TBM که قبلاً به آنها اشاره شده است، روابط به دست آمده نیز در تونل‌هایی که با این نوع دستگاه حفاری می‌شوند، کاربرد خواهند داشت و یا حداقل توقع می‌رود در این تونل‌ها نتیجه بهتری را ارائه دهند.

۷-۲- پیشنهادات

با توجه به این که یکی از عوامل اصلی توقفات در حفاری مکانیزه شرایط نامساعد زمین شناسی می‌باشد، تهیه پایگاه داده‌هایی از توقفات دستگاه حفاری مربوط به زمین و عملیات اجرایی و همچنین شرایط زمین‌شناسی و پارامترهای توده‌سنگ درونگیر تونل می‌تواند زمینه بررسی و ارائه مدل جامع‌تری از توقفات را با توجه به اندرکنش شرایط زمین و دستگاه حفاری فراهم سازد. اگرچه موضوع این تحقیق مدلسازی تاثیر پارامترهای توده‌سنگ بر بهره‌وری است

اما باید در نظر داشت که شرایط و امکانات دستگاه حفاری، مدیریت و تجربه تیم حفاری نیز بر این توقفات تاثیر گذار است. بنابر این پیشنهادات ذیل را می توان عنوان نمود.

- توسعه پایگاه داده ای جامع:

به طوریکه علاوه بر پارامترهای ماشین و نرخ نفوذ، توقفات، علل توقفات و شرایط توده سنگ در آن ثبت شده باشد. بنابر این در صورت ایجاد پایگاه داده ای مشتمل بر کلیه پارامترهای حفاری و شرایط متنوع زمین می توان مدل جامعی نه تنها برای پیش بینی توقفات مربوط به شرایط توده سنگ بلکه برای پیش بینی ضریب بهره وری ارائه نمود.

همچنین با جمع آوری اطلاعات مربوط به سایر توقفات و تاخیرات مانند توقفات مربوط به تعمیر و نگهداری، نبود خدمات فنی، تاخیرات سیستم ترابری و عوامل مربوط به راهبری دستگاه حفاری و غیره علاوه بر توقفات مربوط شرایط توده سنگ، می توان مدل جامعی به منظور پیش بینی ضریب بهره وری ارائه داد.

- اصلاح سیستم های طبقه بندی مهندسی سنگ و یا توسعه یک سیستم جدید:

پیشنهاد می شود سیستم های طبقه بندی مهندسی سنگ اصلاح شود به طوری که کلیه عوامل تاثیر گذار بر قابلیت حفاری دستگاه حفاری و همچنین توقفات دستگاه حفاری در آن در نظر گرفته شود. به عنوان مثال سیستم طبقه بندی RMR را می توان با ضرایبی که می تواند اثر شرایطی مانند لهیدگی، تصاعد گازهای مضر یا سمی، سینه کار مختلط و یا وجود رس در توده سنگ لحاظ نماید، اصلاح نمود. البته باید در نظر داشت برای این منظور به پایگاه داده ای جامع که کلیه شرایط مورد نظر را در برگیرد توسعه داد. به این ترتیب می توان مدل آماری دقیق تری برای پیش بینی توقفات مربوط به شرایط توده سنگ ارائه نمود.

فهرست منابع

- Abd Al-Jalil, Y. Q., 1998, "Analysis of Performance of Tunnel Boring Machine-Based System", PhD Thesis, University of Texas
- AFTES, 2000, "New Recommendation on Choosing Mechanized Tunnelling Techniques", Aftes
- Alber, M, 2000, "Advance rates of hard rock TBMs and their effects on project economics", Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 15, Number 1
- Askilrud, O. G., 1996, "Hard Rock Tunnel Boring Machine Mechanical Tunneling", Short Course in Colorado School of Mine, Atlas CopcoRabbins Inc., Colorado
- Bamford, W.E., 1984, "Rock test indices are being successfully correlated with tunnel boring machine performance", 5th Australian tunneling conference, Sydney, October, pp. 213-218
- Basant N., G. Sh., Malik A., Singh K. P., 2010, "Linear and Nonlinear Modeling for Simultaneous Prediction of Dissolved Oxygen and Biochemical Oxygen Demand of the Surface Water- A Case Study", Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, pp. 172–180
- Benardos, A.G., Kaliampakos, D.C., 2004a, "Modelling TBM performance with artificial neural networks", Tunnelling and Underground Space Technology
- Benardos, A.G., Kaliampakos, D.C. 2004b, "A methodology for assessing geotechnical hazards for TBM tunneling- Illustrated by the Athens Metro, Greece" International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41(6), pp 987-999
- Barton, N., 1999, "TBM Performance Estimation in Rock Using Q_{TBM} ", Tunnel & Tunnelling International, No. 9
- Barton, N., 2000 "TBM Tunnelling in jointed and faulted Rock", A. A. Balkema /Rotterdam /Brookfield, Holland
- Bieniawski Z. T., Celada B., Galera J. M., 2007, "TBM Excavability; Prediction and Machine and Rock interaction" RETC, Toronto

- Bieniawski Z. T., 2007b, "Predicting TBM Excavability", Tunnel & Tunnelling International
- Boyd, R.J., 1986, Hard rock continuous mining machine: mobile miner MM-120. In: Howarth, D.F., et al. (Ed.), Rock Excavation Engineering Seminar, Dept. Mining and Met. Eng, University of Queensland.
- Bruland, A, 1998, "Drillability Test Method", Hard Rock Tunnel Boring Machine, Vol. 8 of 10, PhD Thesis, Trondheim Norwegian University of Science and Technology, NTNU
- Bruland, A, 1998b, "Advance Rate and Cutter Wear, Hard Rock Tunnel Boring Machine, Vol. 3 of 10, PhD Thesis, Trondheim Norwegian University of Science and Technology, NTNU
- Farokh E, Rostami J, 2009, "Effect of Adverse Geological Condition on TBM Operation in Ghomroud Tunnel Conveyance Project", Tunnelling and Underground Space Technology
- Frough O., Torabi S. R., Yagiz S., Tajik M., 2012, "Effect of Rockmass Conditions on TBM Utilization Factor in Karaj – Tehran Water conveyance tunnel", World Tunneling Congress, Thailand
- Frough O., Torabi S. R., 2013, "An Application of Rock Engineering Systems for Estimating TBM Downtimes", Engineering Geology Journal, (Accepted)
- Girmscheid, G., Schexnayder, C., 2003, "Tunnel Boring Machines", Practice Periodical on Structural Design and Construction
- Gong, Q. M., Zhao, J., Jiao, Y. Y., 2004, "Numerical modeling of the effects of joint orientation on rock fragmentation by TBM cutters", Tunnelling and Underground Space Technology
- Gong, Q. M., Jiao, Y. Y., Zhao, J, 2005, "Numerical modelling of the effects of joint spacing on rock fragmentation by TBM cutters", Tunnelling and Underground Space Technology
- Gong, Q.M., Zhao, J., 2009, "Development of a rock mass characteristics model for TBM penetration rate prediction", Int. J. Rock Mech. Min. Sci, 46(1), pp8-18.
- Grandori, R., Jager, M., Antonini, F., Vigl, L., 1995, "Evinos-Mornos Tunnel Greece, Construction of a 30 Km Long Hydraulic Tunnel in Less Than Three Years Under the Most Adverse Geological Condition", RETC, San Francisco,
- Grima, M. A., Bruines, P.A., Verhoef, P.N.W., 2000, Modelling tunnel boring machine performance by neuro-fuzzy methods, Tunnell. Undergr. Space Technol. 15 (3), 259–269

- Hassanpour, J., Rostami, J., Khamechian, M., Tavakoli, H.R., 2009, "TBM Performance Analysis in Pyroclastic Rocks: Case History of Karaj Water Conveyance Tunnel", *Rock Mechanics and Rock Engineering Journal*
- Hudson, J.A. 1992. *Rock Engineering Systems, Theory and Practice*. Ellis Horwood Ltd, Chichester.
- Hudson, J.A., Harrison, J.P. 1992, "A new approach to studying complete rock engineering problems", *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 25:93-105.
- Hughes, H.M., 1986. The Relative Cuttability of Coal-measures Stone. *Min. Sci. Technol.* 3 (2), pp. 95-109.
- Innaurato, N. et al., 1991, "Forecasting and effective TBM performances in a rapid excavation of a tunnel in Italy", proceeding of 7th International Congress on Rock Mechanics, pp. 1009-1014 Aachen, Germany
- JafarKhademiHamidi, KouroshShahriar, BahramRezai, HadiBejari, 2009, "Application of Fuzzy Set Theory to Rock Engineering Classification Systems: An Illustration of the Rock Mass Excavability Index", *Rock Mech Rock Eng.* 43:335–350
- KhademiHamidi, J., Shahriar, K., Rezai, B., Rostami, J., 2010, "Performance prediction of hard rock TBM using Rock Mass Rating (RMR) system", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(4), 333-45
- KhaloKakaie, R., ZareNaghadehi, M., 2012, "The assessment of rock slope instability along the Khosh-Yeylagh main road (Iran) using a systems approach", *Environment Earth Science* 67, 665–668
- Kim, T., 2004, "Development of a Fuzzy Logic Based Utilization Predictor Model for Hard Rock Tunnel Boring Machines", PhD Thesis, Colorado School of Mines
- Laughton, C., 1998, "Evaluation and Prediction of Tunnel Boring Machine Performance in variable rock Masses ", PhD Thesis, The University of Texas,
- Maidl, B., Schmid, L., Ritz, W., Herrenknecht, M., 2008, "Hardrock Tunnel Boring Machines", Ernst & Sohn
- Mansori, M., Torabi, S. R., Frough, O, Goshtasbi, K, 2008, "Influence of Intact Rock Properties on TBM Penetration Rate in Karaj-Tehran Water Conveyance Tunnel", *ISRM International Symposium*, Tehran

- Mikaeil, R., Frough, O., KhaloKakaei, R., Ataei, M., 2009, "Prediction of TBM Penetration Rate with Generalized Regression Neural Network in Hard Rock Condition", 8th International Congress of Civil Engineering, Shiraz
- Nelson, P., O'Rourke, T.D., Kulhawy, F.H., 1983, "Factors affecting TBM penetration rates in sedimentary rocks", 24th U.S. Symposium on Rock Mechanics, USA
- Palmstrom, A., 1994, "RMi Parameters Applied in Prediction of Tunnel Boring Penetration, A Rock Mass Characterization for Rock Engineering Purposes PhD thesis", Norway
- Ramezanzadeh A., Rostami J., Tadic D., 2008, "Impact of Rock Mass Characteristics on Hard Rock Tunnel Boring Machine Performance", 13th Australian Tunnelling Conference
- Rostami, J., Ozdemir, L., 1993, "A new model for performance prediction of hard rock TBMs", RETC conference proceedings, Boston
- Rostami, J., Ozdemir, L. & Nilson, B., 1997, "Comparison Between CSM and NTH Hard Rock TBM Performance Prediction models", Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA
- Roxborough, F.F., Phillips, H.R., 1975. Rock excavation by disc cutter. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 12
- Sapigni, M., Berti, M., Bethaz, E., Busillo, A., Cardone, G., 2002, "TBM performance estimation Using Rock mass Classification", international Journal of Rock Mechanic and Mining Sciences, Vol.39
- Sanio, H.P. 1985, "Prediction of the Performance of Disc Cutters in Anisotropic Rock", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics
- Sato, K., Gong F., Itakura, K., 1991, "Prediction of Disc Cutter Performance using a Circular RockCutting Ring," 1st International Mine Mechanization and Automation Symposium, Colorado School of Mines, USA
- Shang, Y.J., Wang, S.J., Li, G.C., Yang, Z.F. 2000, "Retrospective case example using a comprehensive suitability index (CSI) for siting the Shisan-Ling power station", China. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 37, pp 839-853
- Shin, H., Kwon, Y., Jung, Y., Bae, G., Kim, Y. 2009, "Methodology for quantitative hazard assessment for tunnel collapses based on case histories in Korea", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 46(6), pp1072-1087

Sharp, W. R., Kennedy, E. R., Little, W. E., 1983, "Estimating Tunneling Costs Using an Interactive Computer Model", RETC, Chicago

Skagius, K., Wiborgh, M., Strom, A., Moren, L. 1997, "Performance assessment of the geosphere barrier of a deep geological repository for spent fuel- The use of interaction matrices for identification, structuring and ranking of features, events and processes", Nuclear Engineering and Design 176: pp155-162.

Snowdon, A., R., Ryley D., M., Temporal, J., 1982, "Study of Disc Cutting in Selected British Rocks," International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics

Tarkoy, Peter J., 1973, "Predicting TBM Penetration Rate in Selected Rock Types", Ninth Canadian Symposium on Rock Mechanics, Montreal, Canada

US Army Corp of Engineers (USACE), 1997, "Engineering and Design Tunnels and Shafts in Rocks", Appendix C, Department of the Army

Wenner, D, Wannemacher, H, 2009, Alborz Service Tunnel in Iran: TBM Tunneling in Difficult Ground Conditions and its Solutions, 8th Iranian Tunneling Conference

Wittke, W., 2007, "Stability Analysis and Design for Mechanized Tunneling", Geotechnical Engineering in Research and Practice, WBI-PRINT 6

www.therobbinscompany.com/case-study/heun-hinboun

Yagiz, S., 2007, "Utilizing rock mass properties for predicting TBM performance in hard rock condition", Tunnelling and Underground Space Technology

Yagiz, S., 2009, "Assessment of brittleness using rock strength and density with punch penetration test", Tunnelling and Underground Space Technology, 24, pp 66-74.

ZareNaghadehi, M., Jimenez, R., KhaloKakaie, R., Jalali, S.M.Esmaeil, 2011, "A probabilistic systems methodology to analyze the importance of factors affecting the stability of rock slopes". Engineering Geology 118 (3-4), 82-92.

رفیعی رامین، عطایی محمد، فروغ امید، ۱۳۸۸، "بهینه سازی سیستم نگهداری تونل عسلویه - پارسیان با

استفاده از منطق فازی"، سومین کنفرانس مهندسی معدن ایران

زارع نقدهی، مسعود، (۱۳۹۱)، رساله دکتری، "بهبود رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) به منظور ارزیابی پتانسیل ناپایداری شیب‌های سنگی معادن روباز"، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

ساحل، ۱۳۸۱، "گزارش زمین‌شناسی مهندسی تونل انتقال آب قمرود، قطعات سوم و چهارم"، پروژه انتقال آب از سرشاخه‌های دز به قمرود، مهندسین مشاور ساحل

ساحل، ۱۳۸۳، "گزارش زمین‌شناسی مهندسی تونل"، پروژه تونل انتقال آب از سد امیرکبیر به تصفیه‌خانه شماره ۶ تهران - قطعه ET-K`، مهندسین مشاور ساحل

ساحل، ۱۳۸۳، "گزارش تحلیل پایداری تونل"، پروژه تونل انتقال آب از سد امیرکبیر به تصفیه‌خانه شماره ۶ تهران - قطعه ET-K`، مهندسین مشاور ساحل

ساحل، ۱۳۸۷، "گزارش مسیریابی تونل"، پروژه تونل انتقال آب از سد امیرکبیر به تصفیه‌خانه شماره ۶ تهران - قطعه ET-K`، مهندسین مشاور ساحل

ساحل، ۱۳۸۸، "گزارش زمین‌شناسی مهندسی تونل"، پروژه تونل انتقال آب از سد امیرکبیر به تصفیه‌خانه شماره ۶ تهران - قطعه K`-BR، مهندسین مشاور ساحل

سرمد زهره، بازرگان عباس، حجازی الهه، روش‌های تحقیق در علوم رفتاری، ۱۳۷۶، موسسه نشر آگه

شرکت تالون، گزارش‌های کارگاهی تونل البرز، کارگاه تونل البرز

فروغ امید، باسلیقه فرنوش، آراسته محمد، ۱۳۸۴، "بازنگری طراحی پوشش بتنی ۳۷۶ متر تونل ابتدایی قطعات سوم و چهارم تونل انتقال آب قمروود"، دومین کنفرانس ملی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران،

فروغ، امید، ترابی، سید رحمان، رمضان زاده، احمد، YagizSaffet، (۱۳۹۰)، "تاثیر شرایط توده سنگ بر توقفات TBM در تونل انتقال آب کرج"، نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل قزوینیان، عبدالهادی، رسولی، وامقی، نورانی، رضا، (۱۳۸۶)، "کاربرد روش های آماری چند متغیره در تخمین مقاومت فشاری تک محوره سنگ با استفاده از آزمایش های غیر مستقیم"، سومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران

کیا، س.مصطفی، (۱۳۸۹)، "منطقفازیدر MATLAB"، چاپاول، تهران: کیانرایانهسبز

کیا، س.مصطفی، (۱۳۸۹ب)، "محاسبات نرمدر MATLAB"، چاپاول، تهران: کیانرایانهسبز

گینیوسکی ایوان، ۱۳۸۶، گزارش بازدید ایوان گینیوسکی از کارگاه تونل البرز

پیوست‌ها

• ضریب خطی پیرسون داده‌های سطح ۱

		RMR
BORING	Pearson Correlation	-.071
	Sig. (2-tailed)	.795
	N	16
CLNCHK	Pearson Correlation	.069
	Sig. (2-tailed)	.799
	N	16
CLEAR	Pearson Correlation	-.535(*)
	Sig. (2-tailed)	.033
	N	16
CUTCHANG	Pearson Correlation	.558(*)
	Sig. (2-tailed)	.025
	N	16
IMPROVE	Pearson Correlation	-.400
	Sig. (2-tailed)	.125
	N	16
WATERDT	Pearson Correlation	-.075
	Sig. (2-tailed)	.783
	N	16
PROP	Pearson Correlation	-.290
	Sig. (2-tailed)	.277
	N	16
SUPPORT	Pearson Correlation	-.382
	Sig. (2-tailed)	.144
	N	16
ROP	Pearson Correlation	.151
	Sig. (2-tailed)	.578
	N	16
AR	Pearson Correlation	.199
	Sig. (2-tailed)	.461
	N	16
U	Pearson Correlation	.126
	Sig. (2-tailed)	.643
	N	16

* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

	RQD
--	-----

BORING	Pearson Correlation	.115
	Sig. (2-tailed)	.672
	N	16
CLNCHK	Pearson Correlation	.456
	Sig. (2-tailed)	.076
	N	16
CLEAR	Pearson Correlation	-.421
	Sig. (2-tailed)	.104
	N	16
CUTCHANG	Pearson Correlation	.586(*)
	Sig. (2-tailed)	.017
	N	16
IMPROVE	Pearson Correlation	-.438
	Sig. (2-tailed)	.090
	N	16
WATERDT	Pearson Correlation	.246
	Sig. (2-tailed)	.359
	N	16
PROP	Pearson Correlation	-.411
	Sig. (2-tailed)	.114
	N	16
SUPPORT	Pearson Correlation	-.514(*)
	Sig. (2-tailed)	.041
	N	16
ROP	Pearson Correlation	-.050
	Sig. (2-tailed)	.853
	N	16
AR	Pearson Correlation	.038
	Sig. (2-tailed)	.890
	N	16
U	Pearson Correlation	.148
	Sig. (2-tailed)	.585
	N	16

* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

		UCS
BORING	Pearson Correlation	.290
	Sig. (2-tailed)	.276

	N	16
CLNCHK	Pearson Correlation	.184
	Sig. (2-tailed)	.494
	N	16
CLEAR	Pearson Correlation	-.411
	Sig. (2-tailed)	.114
	N	16
CUTCHANG	Pearson Correlation	.499(*)
	Sig. (2-tailed)	.049
	N	16
IMPROVE	Pearson Correlation	-.319
	Sig. (2-tailed)	.229
	N	16
WATERDT	Pearson Correlation	.048
	Sig. (2-tailed)	.861
	N	16
PROP	Pearson Correlation	-.202
	Sig. (2-tailed)	.452
	N	16
SUPPORT	Pearson Correlation	-.267
	Sig. (2-tailed)	.317
	N	16
ROP	Pearson Correlation	-.168
	Sig. (2-tailed)	.535
	N	16
AR	Pearson Correlation	.206
	Sig. (2-tailed)	.444
	N	16
U	Pearson Correlation	.415
	Sig. (2-tailed)	.110
	N	16

* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

• نتایج تحلیل رگرسیون داده‌های سطح ۱

Independent: RMR

Dependent	MthRsqd.f.	F	Sigf	b0	b1	b2
BORING LIN	.005	14	.07	.795	.3222	-.0003
BORING LOG	.003	14	.04	.845	.3472	-.0106
BORING INV	.001	14	.02	.903	.3005	.2557

BORING	QUA	.011	13	.07	.930	.2739	.0018	-2.E-05
BORING	POW	.010	14	.13	.719	.3756	-.0579	
BORING	EXP	.013	14	.18	.674	.3240	-.0015	
CLNCHK	LIN	.005	14	.07	.799	.1261	.0003	
CLNCHK	LOG	.000	14	1.8E-03	.967	.1466	-.0019	
CLNCHK	INV	.010	14	.15	.706	.1251	.6583	
CLNCHK	QUA	.155	13	1.19	.335	.3244	-.0086	8.9E-05
CLNCHK	POW	.012	14	.16	.691	.0610	.1806	
CLNCHK	EXP	.032	14	.47	.505	.0871	.0067	
CUTCHANG	LIN	.311	14	6.32	.025	-.0318	.0018	
CUTCHANG	LOG	.283	14	5.51	.034	-.2433	.0787	
CUTCHANG	INV	.237	14	4.36	.056	.1244	-2.8181	
CUTCHANG	QUA	.322	13	3.09	.080	.0172	-.0003	2.2E-05
CUTCHANG POW	.331	14	6.94	.020	3.9E-05	1.7988		
CUTCHANG	EXP	.330	14	6.89	.020	.0055	.0399	
IMPROVE	LIN	.160	14	2.67	.125	.0655	-.0009	
IMPROVE	LOG	.264	14	5.03	.042	.2147	-.0497	
IMPROVE INV	.401	14	9.38	.008	-.0308	2.3931		
IMPROVE	QUA	.443	13	5.18	.022	.2256	-.0080	7.2E-05
1 IMPROVE	POW							
1 IMPROVE	EXP							
WATERDT	LIN	.006	14	.08	.783	.0084	-5.E-05	
WATERDT	LOG	.002	14	.02	.883	.0104	-.0012	
WATERDT	INV	.000	14	9.3E-04	.976	.0060	-.0096	
WATERDT	QUA	.019	13	.12	.884	-.0024	.0004	-5.E-06
1 WATERDT	POW							
1 WATERDT	EXP							
SUPPORT	LIN	.146	14	2.40	.144	.1089	-.0014	
SUPPORT	LOG	.148	14	2.42	.142	.2800	-.0623	
SUPPORT	INV	.130	14	2.09	.171	-.0119	2.2802	
SUPPORT	QUA	.156	13	1.20	.333	.1580	-.0036	2.2E-05
SUPPORT	POW	.114	14	1.79	.202	.6307	-.8501	
SUPPORT	EXP	.097	14	1.50	.241	.0567	-.0174	

Notes:

1 Dependent variable has non-positive values; no equation estimated.

Independent: RQD

Dependent	MthRsqd.f.	F	Sigf	b0	b1	b2		
BORING	LIN	.013	14	.19	.672	.2895	.0003	
BORING	LOG	.006	14	.08	.782	.2764	.0076	
BORING	INV	.001	14	.02	.888	.3092	-.1220	
BORING	QUA	.029	13	.19	.827	.3165	-.0012	1.5E-05
BORING	POW	.001	14	.02	.898	.2875	.0106	
BORING	EXP	.007	14	.09	.765	.2894	.0006	
CLNCHK	LIN	.208	14	3.67	.076	.0850	.0009	
CLNCHK	LOG	.169	14	2.85	.114	.0046	.0347	
CLNCHK	INV	.120	14	1.92	.188	.1635	-.9180	

CLNCHK	QUA	.217	13	1.80	.205	.1020	1.2E-06	9.2E-06
CLNCHK	POW	.277	14	5.36	.036	.0214	.4516	
CLNCHK	EXP	.298	14	5.95	.029	.0637	.0115	
CUTCHANG	LIN	.344	14	7.34	.017	.0008	.0011	
CUTCHANG	LOG	.316	14	6.46	.023	-.1019	.0426	
CUTCHANG	INV	.277	14	5.36	.036	.0967	-1.2519	
CUTCHANG	QUA	.348	13	3.47	.062	.0113	.0005	5.7E-06
CUTCHANG	POW	.509	14	14.49	.002	.0005	1.1418	
CUTCHANG	EXP	.476	14	12.69	.003	.0091	.0271	
IMPROVE	LIN	.192	14	3.32	.090	.0515	-.0005	
IMPROVE	LOG	.208	14	3.67	.076	.1085	-.0226	
IMPROVE	INV	.206	14	3.64	.077	.0022	.7057	
IMPROVE	QUA	.212	13	1.74	.213	.0663	-.0014	8.1E-06
1 IMPROVE	POW							
1 IMPROVE	EXP							
WATERDT	LIN	.060	14	.90	.359	.0004	9.3E-05	
WATERDT	LOG	.068	14	1.02	.331	-.0098	.0040	
WATERDT	INV	.065	14	.97	.342	.0090	-.1230	
WATERDT	QUA	.079	13	.55	.588	-.0040	.0003	-2.E-06
1 WATERDT	POW							
1 WATERDT	EXP							
SUPPORT	LIN	.265	14	5.04	.041	.0976	-.0010	
SUPPORT	LOG	.325	14	6.75	.021	.2211	-.0473	
SUPPORT	INV	.361	14	7.92	.014	-.0040	1.5645	
SUPPORT	QUA	.348	13	3.47	.062	.1484	-.0039	2.8E-05
SUPPORT	POW	.253	14	4.73	.047	.2852	-.6493	
SUPPORT	EXP	.225	14	4.06	.064	.0544	-.0150	

Notes:

1 Dependent variable has non-positive values; no equation estimated.

Independent: UCS

Dependent	MthRsqd.f.	F	Sigf	b0	b1	b2		
BORING	LIN	.084	14	1.28	.276	.2697	.0004	
BORING	LOG	.023	14	.33	.576	.2366	.0159	
BORING	INV	.004	14	.06	.816	.3106	-.2866	
BORING	QUA	.327	13	3.16	.076	.3645	-.0017	9.2E-06
BORING	POW	.010	14	.14	.715	.2615	.0311	
BORING	EXP	.052	14	.77	.396	.2751	.0009	
CLNCHK	LIN	.034	14	.49	.494	.1202	.0002	
CLNCHK	LOG	.000	14	6.0E-03	.939	.1472	-.0018	
CLNCHK	INV	.049	14	.72	.409	.1259	.8363	
CLNCHK	QUA	.172	13	1.35	.292	.1795	-.0011	5.8E-06
CLNCHK	POW	.001	14	.02	.887	.1063	.0341	
CLNCHK	EXP	.042	14	.61	.449	.0995	.0023	
CUTCHANG	LIN	.249	14	4.63	.049	.0170	.0005	
CUTCHANG	LOG	.233	14	4.26	.058	-.1018	.0378	
CUTCHANG	INV	.158	14	2.63	.127	.0853	-1.3499	

CUTCHANG	QUA	.252	13	2.18	.152	.0093	.0007	-8.E-07
CUTCHANG	POW	.252	14	4.71	.048	.0012	.8279	
CUTCHANG	EXP	.240	14	4.43	.054	.0165	.0102	
IMPROVE	LIN	.102	14	1.58	.229	.0403	-.0002	
IMPROVE	LOG	.286	14	5.60	.033	.1403	-.0273	
IMPROVE	INV	.552	14	17.25	.001	-.0056	1.6460	
IMPROVE	QUA	.196	13	1.58	.243	.0690	-.0008	2.8E-06
1	IMPROVE	POW						
1	IMPROVE	EXP						
WATERDT	LIN	.002	14	.03	.861	.0048	9.6E-06	
WATERDT	LOG	.011	14	.15	.700	-.0015	.0017	
WATERDT	INV	.021	14	.31	.589	.0074	-.1009	
WATERDT	QUA	.010	13	.07	.935	.0022	6.8E-05	-3.E-07
1	WATERDT	POW						
1	WATERDT	EXP						
SUPPORT	LIN	.071	14	1.08	.317	.0646	-.0003	
SUPPORT	LOG	.070	14	1.05	.322	.1364	-.0226	
SUPPORT	INV	.044	14	.65	.434	.0247	.7805	
SUPPORT	QUA	.081	13	.57	.579	.0796	-.0006	1.5E-06
SUPPORT	POW	.047	14	.69	.419	.0813	-.2892	
SUPPORT	EXP	.037	14	.54	.476	.0311	-.0032	

Notes:

1 Dependent variable has non-positive values; no equation estimated.

Dependent variable.. CUTCHANG **Method.. POWER**

Listwise Deletion of Missing Data

Multiple R .57567
R Square .33139
Adjusted R Square .28363
Standard Error .91783

Analysis of Variance:

	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	1	5.845498	5.8454977
Residuals	14	11.793790	.8424136

F = 6.93899 Signif F = .0196

----- Variables in the Equation -----

Variable	B	SE B	Beta	T	Sig T
RMR	1.798785	.682859	.575666	2.634	.0196
(Constant)	3.9010531956E-05	.000104		.374	.7139

Dependent variable.. IMPROVE **Method.. INVERSE**

Listwise Deletion of Missing Data

Multiple R .63334
R Square .40112
Adjusted R Square .35834
Standard Error .02689

Analysis of Variance:

	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	1	.00677830	.00677830
Residuals	14	.01012014	.00072287

F = 9.37697 Signif F = .0084

----- Variables in the Equation -----

Variable	B	SE B	Beta	T	Sig T
RMR	2.393084	.781496	.633340	3.062	.0084
(Constant)	-.030790	.018142		-1.697	.1118

Dependent variable.. CUTCHANG **Method.. POWER**

Listwise Deletion of Missing Data

Multiple R .71319
R Square .50863
Adjusted R Square .47354
Standard Error .78683

Analysis of Variance:

	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	1	8.9719585	8.9719585
Residuals	14	8.6673292	.6190949

F = 14.49206 Signif F = .0019

----- Variables in the Equation -----

Variable	B	SE B	Beta	T	Sig T
RQD	1.141828	.299941	.713186	3.807	.0019
(Constant)	.000515	.000608		.847	.4114

Dependent variable.. SUPPORT **Method.. INVERSE**

Listwise Deletion of Missing Data

Multiple R .60102
R Square .36122
Adjusted R Square .31560
Standard Error .04652

Analysis of Variance:

	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	1	.01713532	.01713532
Residuals	14	.03030168	.00216441

F = 7.91687 Signif F = .0138

----- Variables in the Equation -----

Variable	B	SE B	Beta	T	Sig T
RQD	1.564470	.556020	.601018	2.814	.0138
(Constant)	-.004024	.018720		-.215	.8329

Dependent variable.. CUTCHANG **Method.. POWER**

Listwise Deletion of Missing Data

Multiple R .50177
R Square .25177
Adjusted R Square .19833
Standard Error .97094

Analysis of Variance:

	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	1	4.441090	4.4410897
Residuals	14	13.198198	.9427284

F = 4.71089 Signif F = .0477

----- Variables in the Equation -----

Variable	B	SE B	Beta	T	Sig T
UCS	.827946	.381461	.501769	2.170	.0477
(Constant)	.001156	.001951		.592	.5630

Dependent variable.. IMPROVE **Method.. INVERSE**

Listwise Deletion of Missing Data

Multiple R .74300

R Square .55204
 Adjusted R Square .52005
 Standard Error .02325

Analysis of Variance:

	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	1	.00932868	.00932868
Residuals	14	.00756976	.00054070

F = 17.25306 Signif F = .0010

----- Variables in the Equation -----

Variable	B	SE B	Beta	T	Sig T
UCS	1.646007	.396277	.742997	4.154	.0010
(Constant)	-.005599	.008615		-.650	.5263

• ضریب خطی پیرسون داده‌های سطح ۲

Correlations

		RMR	GRRD
RMR	Pearson Correlation	1	-.539(**)
	Sig. (2-tailed)	.	.010
	Sum of Squares and Cross-products	5434.364	-1984.883
	Covariance	258.779	-94.518
	N	22	22
GRRD	Pearson Correlation	-.539(**)	1
	Sig. (2-tailed)	.010	.
	Sum of Squares and Cross-products	-1984.883	2492.232
	Covariance	-94.518	118.678
	N	22	22

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Correlations

		RMR	GRRDHM
RMR	Pearson Correlation	1	-.521(*)
	Sig. (2-tailed)	.	.013

GRRDHM	Sum of Squares and Cross-products	5434.364	-71.653
	Covariance	258.779	-3.412
	N	22	22
	Pearson Correlation	-.521(*)	.1
	Sig. (2-tailed)	.013	.
	Sum of Squares and Cross-products	-71.653	3.478
	Covariance	-3.412	.166
	N	22	22

* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Correlations

		RMR	ROP
RMR	Pearson Correlation	1	-.098
	Sig. (2-tailed)	.	.666
	Sum of Squares and Cross-products	5434.364	-26.473
	Covariance	258.779	-1.261
	N	22	22
ROP	Pearson Correlation	-.098	1
	Sig. (2-tailed)	.666	.
	Sum of Squares and Cross-products	-26.473	13.553
	Covariance	-1.261	.645
	N	22	22

Correlations

		RMR	AR
RMR	Pearson Correlation	1	.161
	Sig. (2-tailed)	.	.475
	Sum of Squares and Cross-products	5434.364	223.778

AR	Covariance	258.779	10.656
	N	22	22
	Pearson Correlation	.161	1
	Sig. (2-tailed)	.475	.
	Sum of Squares and Cross-products	223.778	357.577
	Covariance	10.656	17.027
	N	22	22

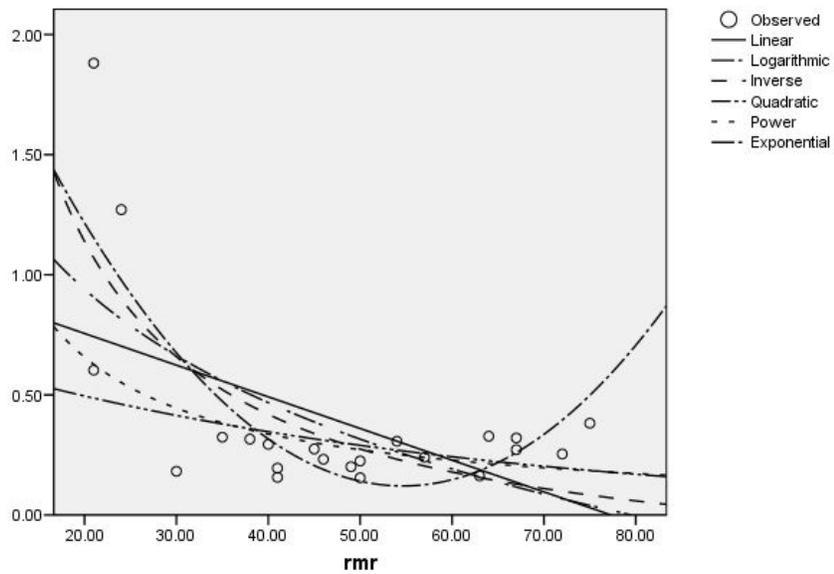
Correlations

		RMR	U
RMR	Pearson Correlation	1	.233
	Sig. (2-tailed)	.	.296
	Sum of Squares and Cross-products	5434.364	410.705
	Covariance	258.779	19.557
	N	22	22
U	Pearson Correlation	.233	1
	Sig. (2-tailed)	.296	.
	Sum of Squares and Cross-products	410.705	570.670
	Covariance	19.557	27.175
	N	22	22

Independent: RMR

• تحلیل رگرسیون داده‌های سطح ۲

grrdhm



Model Summary

R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
.785	.617	.576	.265

The independent variable is rmr.

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	2.145	2	1.072	15.288	.000
Residual	1.333	19	.070		
Total	3.478	21			

The independent variable is rmr.

Coefficients

	Unstandardized	Standardized	t	Sig.

	Coefficients		Coefficients		Std. Error
	B	Std. Error	Beta	B	
rmr	-.100	.021	-3.938	-4.698	.000
rmr ** 2	.001	.000	3.467	4.136	.001
(Constant)	2.843	.477		5.967	.000

Model Summary

R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
.722	.521	.497	.289

The independent variable is rmr.

ANOVA

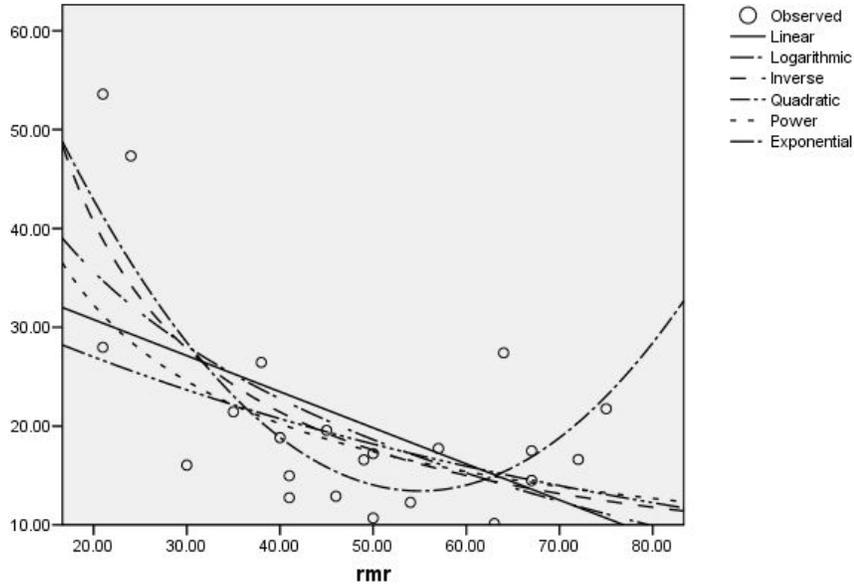
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	1.812	1	1.812	21.768	.000
Residual	1.665	20	.083		
Total	3.478	21			

The independent variable is rmr.

Coefficients

	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t		Sig.
	B	Std. Error	Beta	B	Std. Error	
1 / rmr	28.805	6.174	.722	4.666	.000	
(Constant)	-.301	.160		-1.878	.075	

grrd



Model Summary

R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
.791	.626	.586	7.008

The independent variable is rmr.

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	1559.021	2	779.511	15.871	.000
Residual	933.211	19	49.116		
Total	2492.232	21			

The independent variable is rmr.

Coefficients

	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t		Sig.
	B	Std. Error	Beta	B	Std. Error	
rmr	-2.644	.561	-3.904	-4.712		.000
rmr ** 2	.024	.006	3.414	4.121		.001
(Constant)	86.174	12.610		6.834		.000

Model Summary

R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
.722	.521	.497	7.728

The independent variable is rmr.

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	1297.758	1	1297.758	21.729	.000
Residual	1194.474	20	59.724		
Total	2492.232	21			

The independent variable is rmr.

Coefficients

	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta	B	Std. Error
1 / rmr	770.797	165.355	.722	4.661	.000
(Constant)	2.154	4.296		.501	.622

MODEL: MOD_3.

—

Independent: RMR

Dependent	MthRsqd.f.	F	Sigf	bound	Upper			
					b0	b1	b2	
ROP	LIN	.010	20	.19	.666	3.8105	-.0049	
ROP	LOG	.007	20	.13	.721	4.2313	-.1718	
ROP	INV	.003	20	.06	.812	3.4760	4.2479	
ROP	QUA	.011	19	.11	.900	3.5717	.0064	-
.0001								
ROP	POW	.009	20	.17	.682	4.3000	-.0546	
ROP	LGS	.010	20	.21	.651	.2675	1.0014	
AR	LIN	.026	20	.53	.475	13.5224	.0412	
AR	LOG	.074	20	1.60	.220	4.1726	2.9753	
AR	INV	.145	20	3.39	.080	19.1842	-154.05	
AR	QUA	.316	19	4.39	.027	-3.4429	.8451	-.0085
AR	POW	.134	20	3.09	.094	4.9403	.2901	
AR	LGS	.063	20	1.35	.259	.0840	.9953	
U	LIN	.054	20	1.15	.296	14.9106	.0756	
U	LOG	.110	20	2.47	.132	1.1219	4.5742	
U	INV	.175	20	4.25	.053	23.6517	-213.96	
U	QUA	.311	19	4.29	.029	-5.2406	1.0304	-.0101
U	POW	.179	20	4.37	.050	4.7871	.3447	
U	LGS	.102	20	2.27	.148	.0754	.9939	

• تحليل رگرسيون مدل RES

Model Summary and Parameter Estimates

Dependent Variable: grrdhm

Equation	Model Summary					Parameter Estimates		
	R Square	F	df1	df2	Sig.	Constant	b1	b2
Linear	.446	16.120	1	20	.001	-.077	.016	
Logarithmic	.288	8.077	1	20	.010	-.868	.391	
Inverse	.153	3.599	1	20	.072	.699	-6.702	
Quadratic	.849	53.588	2	19	.000	1.052	-.067	.001
Power	.215	5.471	1	20	.030	.058	.516	
Exponential	.372	11.834	1	20	.003	.158	.022	

The independent variable is grdi.

Model Summary and Parameter Estimates

Dependent Variable: grrdp

Equation	Model Summary					Parameter Estimates		
	R Square	F	df1	df2	Sig.	Constant	b1	b2
Linear	.517	21.413	1	20	.000	7.198	.464	
Logarithmic	.350	10.769	1	20	.004	-16.481	11.551	
Inverse	.195	4.837	1	20	.040	30.002	-202.737	
Quadratic	.846	52.022	2	19	.000	34.478	-1.541	.028
Power	.304	8.722	1	20	.008	4.879	.419	
Exponential	.454	16.648	1	20	.001	11.472	.017	

The independent variable is grdi.

• پرسش نامه

خواهشمند است میزان تاثیر هر کدام از شرایط و خصوصیات توده سنگ را بر دیگری با امتیاز دهی از صفر تا ۴ مشخص نمایید به طوری که امتیاز صفر نشان دهنده عدم تاثیر و امتیاز ۴ نشان دهنده حداکثر تاثیر است. توضیح این که موارد ذیل به عنوان عوامل تاثیر گذار بر توقفات TBM در نظر گرفته شده اند.

تاثیر هر ستون بر سطر:

۱	فاصله داری ناپیوستگی ها	جهت داری ناپیوستگی ها	مقاومت فشاری سنگ بکر	ساینده سنگ	سینه کار مختلط	شرایط آماس و لهیدگی	وجود آب	وجود رس یا کانی های چسبنده	وجود گاز
									پایداری

۲	پایداری	جهت داری ناپیوستگی ها	مقاومت فشاری سنگ بکر	ساینده سنگ	سینه کار مختلط	شرایط آماس و لهیدگی	وجود آب	وجود رس یا کانی های چسبنده	وجود گاز
									فاصله داری ناپیوستگی ها

۳	پایداری	فاصله داری ناپیوستگی ها	مقاومت فشاری سنگ بکر	ساینده سنگ	سینه کار مختلط	شرایط آماس و لهیدگی	وجود آب	وجود رس یا کانی های چسبنده	وجود گاز
									جهت داری ناپیوستگی ها

۴	پایداری	فاصله داری ناپیوستگی ها	جهت داری ناپیوستگی ها	ساینده سنگ	سینه کار مختلط	شرایط آماس و لهیدگی	وجود آب	وجود رس یا کانی های چسبنده	وجود گاز
									مقاومت فشاری سنگ بکر

۵	پایداری	فاصله داری ناپیوستگی ها	جهت داری ناپیوستگی ها	مقاومت فشاری سنگ بکر	سینه کار مختلط	شرایط آماس و لهیدگی	وجود آب	وجود رس یا کانی های چسبنده	وجود گاز
									سایندگی سنگ

۶	پایداری	فاصله داری ناپیوستگی ها	جهت داری ناپیوستگی ها	مقاومت فشاری سنگ بکر	سایندگی سنگ	شرایط آماس و لهیدگی	وجود آب	وجود رس یا کانی های چسبنده	وجود گاز
									سینه کار مختلط

۷	پایداری	فاصله داری ناپیوستگی ها	جهت داری ناپیوستگی ها	مقاومت فشاری سنگ بکر	سایندگی سنگ	سینه کار مختلط	وجود آب	وجود رس یا کانی های چسبنده	وجود گاز
									شرایط آماس و لهیدگی

۸	پایداری	فاصله داری ناپیوستگی ها	جهت داری ناپیوستگی ها	مقاومت فشاری سنگ بکر	سایندگی سنگ	سینه کار مختلط	شرایط آماس و لهیدگی	وجود رس یا کانی های چسبنده	وجود گاز
									وجود آب

۹	پایداری	فاصله داری ناپیوستگی ها	جهت داری ناپیوستگی ها	مقاومت فشاری سنگ بکر	سایندگی سنگ	سینه کار مختلط	شرایط آماس و لهیدگی	وجود آب	وجود گاز
									وجود رس یا کانی های چسبنده

۱۰	پایداری	فاصله داری ناپیوستگی ها	جهت داری ناپیوستگی ها	مقاومت فشاری سنگ بکر	سایندگی سنگ	سینه کار مختلط	شرایط آماس و لهیدگی	وجود آب	وجود رس یا کانی های چسبنده
									وجود گاز

لطفا میزان تاثیر هر کدام از شرایط زمین و خصوصیات توده سنگ را بر توقفات TBM با امتیاز دهی از صفر تا ۴ مشخص نمایید. به طوری که امتیاز صفر نشان دهنده عدم تاثیر و امتیاز ۴ نشان دهنده حداکثر تاثیر است. توضیح این که توقفات باعث کاهش ضریب بهره وری TBM می شود.

وجود گاز	وجود رس یا کانی های چسبنده	وجود آب	شرایط آماس و لهیدگی	سینه کار مختلط	ساینده سنگ	مقاومت فشاری سنگ بکر	جهت داری ناپیوستگی ها	فاصله داری ناپیوستگی ها	پایداری	توقفات TBM

Abstract

In recent years, TBMs are widely used in tunneling projects all over the world. Since the mechanized tunneling started a wide variety of performance prediction models have been developed. Most of the prediction models have considered only penetration rate. Some models have been developed for prediction of TBM advance rate and have suggested some relationships for estimating utilization factor. In TBM tunneling projects, prediction of the advance rate is very important as it has a big influence on the duration of the project and the costs and utilization factor also has a great effect in advance rate. Different Rock mass conditions have a great role in on TBM downtimes and each effect may reduce machine utilization. The main goal of this research is the study of effect of rock mass condition on utilization factor.

In order to model the effect of geology and rock mass conditions on TBM downtimes (GRRD), a thorough database based on three long water conveyance tunnels in Iran has developed. Developed database contains maps, detailed engineering geology information and daily site reports including length of excavated tunnel in each rock mass units, daily boring time and advance and different rock mass related downtimes. To achieve this, detailed maps, engineering geology reports and the daily site reports of study cases including Karaj-Tehran water conveyance tunnel (lot-1 length: 16 km and lot-2 length: 11 km of 14 km) and Ghomrood water conveyance tunnel (lots 3 and 4 length: 18 km). This effect has been modeled by using regression analysis, combination of Rock Engineering Systems (RES)-regression analysis and Fuzzy logic methods.

Various regression equations were developed between GRRD and RMR and some meaningful significant relationships were achieved. After statistical analysis, the quadratic equation showed the correlation between RMR and GRRD more accurately with the coefficient of determination 0.62. Using RES method the geology and rock mass related downtimes index (GRDi) were calculated and then regression analysis was performed. In this approach, GRDi values are independent input variables whereas the measured GRRD is a dependent variable. The maximum coefficient of determination ($R^2 = 0.85$) was obtained in quadratic equation. Also Fuzzy logic method is capable to model GRRD with a good coefficient of determination ($R^2 = 0.97$). Comparing these 3 models shows that regression analysis is easier to use but RES-regression model is capable to consider more effective qualitative parameters such as poisonous gases, mixed face condition, existing clay, squeezing and rock abrasion.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining Geophysics and petroleum

Modeling of Rock Mass Parameters Effect on Hard Rock TBMs Utilization Factor

Omid Frough

Supervisor

Dr Seyed Rahamn Torabi

Jan. 2013