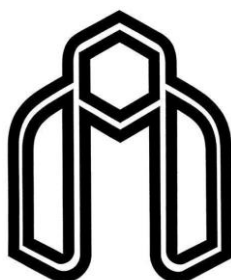


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده معدن و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

پیش‌بینی عملکرد TBM در تونل انتقال آب از سرشاخه‌های دز به رودخانه قمرود

دانشجو:

حسین شریعت علوی

اساتید راهنما:

دکتر محمد عطایی

دکتر رضا خالو کاکائی

استاد مشاور:

مهندس مهدی زورآبادی

تیر ماه ۱۳۸۷

تقدیم به:

پدر و مادر عزیزم

و

برادر و خواهر مهربانم

تقدیر و تشکر:

خداوند بزرگ را سپاس می‌گویم که به اینجانب توفیق داد تا بتوانم این مجموعه را به پایان برسانم و خدمتی هر چند ناچیز به جامعه علمی کشور تقدیم نمایم.

- در ابتدا بر خود لازم می‌دانم از اساتید محترم آقایان دکتر محمد عطایی و دکتر رضا کاگانی که اساتید راهنمای اینجانب بودند صمیمانه تشکر کنم.
- مراتب سپاس و قدردانی خود را از آقای مهندس مهدی زورآبادی که به عنوان مشاور، مراد انجام این پایان نامه بسیاری دادند، دارم.

- بدین وسیله از زحمات اساتید محترم دانشکده معدن و ژئوفیزیک تشکر می‌کنم.
- از آقایان مهندس داوودی راد، مهندس موسوی مدیریت محترم پروژه تونل انتقال آب ذ. - قمرود و مهندس والی نژاد در شرکت مهندسی سایبر که در جمع آوری داده‌های جانبی بکاری کردند، کمال تشکر را دارم.
- از کلیه دوستان خصوصاً آقایان مهندس علی عباسی، کاظم دانش نیا، مرتضی رستمی نیا، پارسا پروین، حامد عمرانی فرد، ابراهیم کریمی، علی سلطانی، رضا خشنود، مهدی زارع، مهدی سجاری که در طی دوران تحصیل یکی از بهترین دوره‌های زندگی‌م را با آن‌ها در فنیایی دوستانه، علمی و فرهنگی گذراندم، سپاسگزارم و قدر دانی می‌کنم.

چکیده

امروزه حفر مکانیزه تونل توسط ماشین‌های تونل‌زنی تمام مقطع کاربرد وسیعی در سطح جهان یافته است. یکی از مسائل مهم در حفاری‌های مکانیزه، بررسی‌های امکان‌سنجی، تعیین هزینه‌های پروژه و زمان‌بندی آن می‌باشد که به تعیین دقیق و صحیح عملکرد دستگاه و بهره‌وری آن بستگی دارد. بررسی عملکرد این ماشین‌ها با توجه به سرمایه اولیه زیاد آن‌ها، یکی از مسائلی است که از جوانب مختلف مورد توجه قرار می‌گیرد. عملکرد دستگاه TBM شامل نرخ نفوذ، ضریب بهره‌وری و نرخ پیشروی است که همه این موارد زمان پروژه را تعیین می‌کنند. به منظور پیش‌بینی عملکرد TBM پارامترهای مختلفی از جمله شرایط زمین‌شناسی، خواص ماده سنگ، شرایط توده سنگ و پارامترهای طراحی و عملیاتی دستگاه TBM (از قبیل اندازه برنده‌ها و فاصله‌داری متوسط آنها، نیروی رانش، گشتاور، RPM (دور بر دقیقه چرخش کله حفار)، توان و مشخصات دیسک) باید مورد توجه قرار گیرد. یکی از پروژه‌های در حال اجرا در کشور ایران تونل انتقال آب قمرود می‌باشد که هدف از اجرای این طرح تأمین آب شرب دراز مدت شهرهای قم، دلیجان، محلات، خمین و گلپایگان می‌باشد. در این پایان‌نامه بر اساس شرایط زمین‌شناسی و با توجه به طول مسیر تونل به انتخاب دستگاه TBM در قطعات ۱ و ۲ تونل انتقال آب قمرود پرداخته شده است. با توجه به این‌که مترژهای زیادی از این ۲ قطعه از زمین‌های نرم و آبرفتی عبور می‌کند که نگهداری فعال جبهه کار ضروری می‌باشد بنابراین

ماشین‌های حفاری مکانیزه از نوع Open، Single Shield و Double Shield که در آن‌ها امکان ایجاد نگهداری فعال جبهه کار وجود نداشته باشد، قابل کاربرد نمی‌باشند و در بین ماشین‌های حفاری مکانیزه در زمین‌های نرم، ماشین تونل‌سازی از نوع سپر تعادلی با فشار زمین (EPBS) که از کارایی بالایی در این زمین‌ها برخوردار می‌باشد، انتخاب شده است. سپس با استفاده از روش‌های Q_{TBM} ، RMI، NTH و CSM عملکرد دستگاه TBM برای هر یک از واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل پیش‌بینی شده و نرخ پیشروی روزانه و زمان اتمام تونل با استفاده از هر یک از روش‌ها به دست آورده شده است. در نهایت با مقایسه میزان نرخ پیشروی روزانه به دست آورده شده توسط این روش‌ها با نتایج واقعی، مشخص شد که پیش‌بینی صورت گرفته توسط مدل‌های NTH و RMI نزدیک‌ترین مقادیر را نسبت به مقادیر واقعی داشته است و با توجه به نتایج دو روش NTH و RMI، زمان اتمام تونل حدوداً ۴ سال و ۶ ماه پیش‌بینی شده است.

کلمات کلیدی: حفاری مکانیزه، پیش‌بینی عملکرد، تونل انتقال آب قمرود، TBM، سپر تعادلی با فشار زمین، Q_{TBM} .

CSM، NTH، RMI

شماره صفحه

عنوان مطالب

فصل اول : کلیات

۲	۱-۱- مقدمه.....
۳	۲-۱- خلاصه‌ای از طرح.....
۳	۳-۱- هدف پایان‌نامه.....
۳	۴-۱- سازمان‌دهی پایان‌نامه.....

فصل دوم : ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئومکانیکی قطعات ۱ و ۲ تونل انتقال

آب قمرود

۶	۱-۲- مقدمه.....
۷	۲-۲- موقعیت جغرافیایی.....
۷	۳-۲- سیمای طرح.....
۷	۴-۲- خلاصه‌ای بر شرایط زمین‌شناسی عمومی مسیر تونل.....
۹	۵-۲- رابطه بین زمین‌شناسی منطقه و مقاومت ویژه.....
۱۱	۶-۲- زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل در قطعات ۱ و ۲.....
۱۶	۷-۲- مطالعات زمین‌شناسی مهندسی.....

۲۱	۸-۲- جمع‌بندی.....
	فصل سوم : روش‌های پیش‌بینی نرخ نفوذ و تعیین ضریب بهره‌وری در ماشین‌های حفاری تمام مقطع (TBM)
۲۳	۱-۳- مقدمه.....
۲۳	۲-۳- مفاهیم اساسی در پیش‌بینی عملکرد TBM.....
۲۴	۱-۲-۳- نرخ نفوذ.....
۲۴	۲-۲-۳- ضریب بهره‌وری.....
۲۴	۳-۲-۳- نرخ پیشروی.....
۲۵	۳-۳- تحلیل مکانیسم برش سنگ توسط برش‌دهنده‌های دیسکی.....
۲۸	۴-۳- معرفی روش‌های پیش‌بینی عملکرد TBM.....
۲۹	۱-۴-۳- روش‌های اولیه تجربی برای پیش‌بینی نرخ نفوذ TBM.....
۳۳	۲-۴-۳- پیش‌بینی نرخ نفوذ با استفاده از روش Q_{TBM}
۳۵	۱-۲-۴-۳- رابطه میان نرخ نفوذ و نرخ پیشروی با Q_{TBM}
۳۷	۲-۲-۴-۳- تخمین زمان اتمام تونل.....
۳۸	۳-۴-۳- پیش‌بینی نرخ نفوذ TBM بر مبنای روش NTH.....
۳۸	۱-۳-۴-۳- مشخصات توده سنگ.....
۳۸	۱-۱-۳-۴-۳- شاخص نرخ حفاری.....
۴۱	۲-۱-۳-۴-۳- اندیس عمر برنده CLI.....
۴۲	۳-۱-۳-۴-۳- تأثیر ناپیوستگی‌ها بر نرخ نفوذ.....
۴۳	۴-۱-۳-۴-۳- شکستگی.....
۴۵	۲-۳-۴-۳- پارامترهای ماشین.....
۴۷	۳-۳-۴-۳- مشخصات دیگر.....
۴۷	۱-۳-۳-۴-۳- نرخ نفوذ پایه.....
۴۹	۲-۳-۳-۴-۳- نرخ نفوذ خالص.....
۴۹	۳-۳-۳-۴-۳- گشتاور مورد نیاز.....
۵۰	۴-۳-۴-۳- نرخ پیشروی ناخالص.....
۵۲	۵-۳-۴-۳- برنده مصرفی.....
۵۵	۴-۴-۳- پیش‌بینی نرخ نفوذ با استفاده از روش RMI.....
۶۱	۱-۴-۴-۳- برآورد و ارزیابی پیشرفت خالص حفاری.....
۶۴	۵-۴-۳- پیش‌بینی بهره‌وری TBM بر مبنای روش CSM.....
	۱-۵-۴-۳- مدل ریاضی مدرسه عالی معدن کلرادو برای تعیین نیروهای روی برش‌دهنده در یک نفوذ مشخص.....
۶۷	۲-۵-۴-۳- تصحیح نرخ نفوذ.....

۶۷	 ۳-۴-۵-۲-۱- شاخص دشواری زمین (GDI)
۶۷	 ۳-۴-۵-۲-۲- اصلاحات پیشنهادی روش CSM برای تخمین نرخ پیشروی
۷۱	 ۳-۵- جمع‌بندی

فصل چهارم : انتخاب دستگاه TBM در قطعات ۱ و ۲ مسیر تونل انتقال آب

قمرود

۷۳	 ۴-۱- مقدمه
۷۳	 ۴-۲- انواع روش‌های حفاری تونل
۷۳	 ۴-۲-۱- حفاری سنتی
۷۳	 ۴-۲-۲- حفاری مکانیزه
۷۴	 ۴-۲-۳- ماشین‌های تونل‌زنی در زمین‌های نرم
۷۷	 ۴-۲-۴- لزوم استفاده از تونل‌زنی با استفاده از سپر بسته
۷۸	 ۴-۳- نام پروژه و وضعیت زمین‌شناسی پروژه و روش حفر شده در دیگر نقاط جهان

۷۸	 ۴-۴- انتخاب گزینه مناسب برای حفاری قطعات ۱ و ۲ تونل انتقال آب قمرود
----	---

۸۰	 ۴-۵- عملکرد ماشین حفاری مکانیزه از نوع سپر تعادلی با فشار زمین (EPBS)
----	---

۸۲	 ۴-۶- مشخصات TBM انتخاب شده برای حفاری قطعات ۱ و ۲ تونل انتقال آب قمرود
۸۳	 ۴-۷- بهینه سازی شرایط خاک در تونل‌سازی با استفاده از ماشین حفاری مکانیزه از نوع EPB

۸۳	 ۴-۷-۱- محصولات مورد استفاده برای تونل‌سازی با EPB
----	---

۸۳	 ۴-۷-۲- تأثیر محصولات به کار رفته
----	--

۸۵	 ۴-۷-۳- مقدار مواد به کار برده شده برای بهینه‌سازی خاک
----	---

۸۶	 ۴-۸- جمع‌بندی
----	---------------------

فصل پنجم : پیش‌بینی عملکرد TBM در قطعات ۱ و ۲ مسیر تونل انتقال آب

قمرود

۸۹	 ۵-۱- مقدمه
----	------------------

۸۹	 ۵-۲- محاسبات پیش‌بینی عملکرد TBM تونل انتقال آب قمرود با استفاده از روش‌های مختلف
----	---

۸۹	 ۵-۲-۱- پیش‌بینی نرخ پیشروی در مناطق آبرفتی
----	--

۹۰	 ۵-۲-۲- محاسبات پیش‌بینی عملکرد TBM با روش Q_{TBM}
----	---

۹۸	 ۵-۲-۳- محاسبات پیش‌بینی عملکرد TBM با روش NTH
----	---

۱۰۸	۴-۲-۵- محاسبات پیش‌بینی عملکرد TBM با روش RMi
۱۱۵	۵-۲-۵- محاسبات پیش‌بینی عملکرد TBM با روش CSM
۱۲۰	۳-۵- مقایسه نتایج
۱۲۳	۴-۵- نتایج واقعی حاصل از حفاری TBM در تونل قمروود
۱۲۴	۵-۵- نتیجه‌گیری
فصل ششم : نتیجه‌گیری و پیشنهادات	
۱۲۷	۱-۶- نتیجه‌گیری
۱۲۹	۲-۶- پیشنهادات
۱۳۲	فهرست منابع

شماره صفحه

عنوان اشکال

فصل دوم : ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئومکانیکی قطعات ۱ و ۲ تونل انتقال آب قمروود

۸	شکل ۱-۲- سیمای طرح تونل انتقال آب دز- قمروود
۱۰	شکل ۲-۲- نقشه ژئوالکتریک قطعات ۱ و ۲ مسیر تونل انتقال آب قمروود

فصل سوم : روش‌های پیش‌بینی نرخ نفوذ و تعیین ضریب بهره‌وری در ماشین‌های حفاری تمام مقطع (TBM)

۲۵	شکل ۱-۳- منطقه خرد شده یا حباب فشار زیر برش‌دهنده‌های دیسکی
۲۶	شکل ۲-۳- نحوه تولید تراشه‌ها و توزیع فشار در منطقه خرد شده
	شکل ۳-۳- فاصله‌داری زیاد برش‌دهنده‌ها و باقی ماندن سنگ خرد نشده بین دو برش‌دهنده
۲۷	شکل ۴-۳- فاصله‌داری کمتر از حد بهینه بین برش‌دهنده، خردشدگی بیش از حد و بروز فرا خردشدگی
۲۷	شکل ۵-۳- فاصله‌داری بهینه و خردشدگی و جهت یافتگی مناسب ترک‌ها
۲۸	شکل ۶-۳- رابطه میان Q ، نرخ پیشروی و نرخ نفوذ
۳۳	شکل ۷-۳- رابطه پیشنهادی میان نرخ پیشروی، نرخ نفوذ و Q_{tbn}
۳۴	شکل ۸-۳- CLI ثبت شده برای سنگ‌های مختلف
۳۵	

۳۶	شکل ۳-۹- برآورد اولیه شیب کاهش سرعت پیشروی (m_1) (-) به عنوان تابعی از مقدار Q.....
۳۷	شکل ۳-۱۰- فلوچارت کلی روش Q_{TBM}
۳۹	شکل ۳-۱۱- DRI ثبت شده برای انواع مختلف سنگ.....
۴۰	شکل ۳-۱۲- آزمون تردی.....
۴۰	شکل ۳-۱۳- اندیس جی سیورز.....
۴۱	شکل ۳-۱۴- نمودار تعریف DRI.....
۴۱	شکل ۳-۱۵- CLI ثبت شده برای سنگ های مختلف.....
۴۲	شکل ۳-۱۶- آزمون سایش.....
۴۳	شکل ۳-۱۷- الف- تأثیر فاصله داری درزه ها روی نرخ نفوذ.....
۴۳	شکل ۳-۱۷- ب- تأثیر شیب درزه ها روی نرخ نفوذ.....
۴۴	شکل ۳-۱۸- درجه بندی فاکتور درزه داری k_s به عنوان یک تابع از فاصله داری درزه ها و شکاف ها، تعدیل k_s برای دیگر مقدارهای DRI نسبت به ۴۹ می باشد.....
۴۶	شکل ۳-۱۹- RPM کله حفار به عنوان تابعی از قطر TBM.....
۴۷	شکل ۳-۲۰- توان مورد نیاز ماشین.....
۴۸	شکل ۳-۲۱- نرخ نفوذ پایه برای 483 mm = قطر کاتر و 70 mm = فاصله داری کاتر.....
۴۸	شکل ۳-۲۲- فاکتور تصحیح برای 483 mm $\neq$ قطر برنده.....
۴۸	شکل ۳-۲۳- فاکتور تصحیح برای 70 mm $\neq$ میانگین فاصله برنده ها.....
۵۰	شکل ۳-۲۴- ثابت برش (C_c) به عنوان تابعی از قطر برنده.....
۵۱	شکل ۳-۲۵- تعمیر و نگهداری به عنوان تابعی از نرخ نفوذ خالص.....
۵۲	شکل ۳-۲۶- عمر پایه حلقه برنده به عنوان تابعی از CLI و قطر برنده.....
۵۳	شکل ۳-۲۷- فاکتور تصحیح برای قطر TBM و شکل کله حفار.....
۵۴	شکل ۳-۲۸- تعداد برنده ها بر روی TBM.....
۵۴	شکل ۳-۲۹- فاکتور تصحیح برای حلقه برنده در مقابل مقدار کوارتز.....
۵۵	شکل ۳-۳۰- فلوچارت کلی روش NTH.....
۵۶	شکل ۳-۳۱- ارتباط بین شاخص نرخ حفاری (DRI) با مقاومت فشاری سنگ.....
۵۸	شکل ۳-۳۲- همبستگی بین فاکتور درزه داری TBM (k_s) و حجم بلوک (V_b)
۶۲	شکل ۳-۳۳- سرعت نفوذ بازای هر دور چرخش TBM.....
۶۳	شکل ۳-۳۴- فاکتور تصحیح K_d برای اندازه تیغه ها.....
۶۳	شکل ۳-۳۵- فاکتور تصحیح K_a برای متوسط فاصله تیغه ها از هم.....
۶۳	شکل ۳-۳۶- فلوچارت کلی روش RMI.....

فصل چهارم : انتخاب دستگاه TBM در قطعات ۱ و ۲ مسیر تونل انتقال آب

قمرود

- شکل ۴-۱- انتخاب ماشین با استفاده از نمودار پیشنهاد شده به وسیله
۷۹Herrenknecht
- شکل ۴-۲- انتخاب ماشین با استفاده از نمودار پیشنهاد شده به وسیله
۷۹Herrenknecht
- شکل ۴-۳- روش عملیاتی دستگاه EPB در ۳ حالت مختلف
۸۱
- شکل ۴-۴- فشارهای وارد بر جبهه کار
۸۱
- شکل ۴-۵- TBM انتخاب شده در قطعات ۱ و ۲ تونل انتقال آب
قمرود
۸۲
- شکل ۴-۶- انواع foam برای ماشین های EPB در ارتباط با خاک های
مختلف
۸۴
- شکل ۴-۷- بهسازی خاک با استفاده از foam
۸۵
- شکل ۴-۸- سیستم تزریق افزایش دهنده ها به فضای جبهه کار
۸۶

فصل پنجم : پیش بینی عملکرد TBM در قطعات ۱ و ۲ مسیر تونل انتقال آب

قمرود

- شکل ۵-۱- آنالیز حساسیت در ارتباط با نرخ پیشروی روش Q_{TBM} نسبت به
پارامترهای مرتبط با آن
۹۴
- شکل ۵-۲- مقایسه تأخیرهای متفرقه در حالت الف) در نظر گرفتن ترکیبی
تأخیرهای روش NTH و CSM ب) تأخیرهای متفرقه به دست آمده از روش
NTH
۱۰۷
- شکل ۵-۳- درصد هر یک از تأخیرها در حالت در نظر گرفتن ترکیبی تأخیرهای
روش NTH و تأخیرهای متفرقه به دست آمده از روش CSM
۱۰۷
- شکل ۵-۴- مقدار نرخ نفوذ در واحدهای مختلف قطعه ۱ مسیر تونل با استفاده از
روش های مختلف
۱۲۱
- شکل ۵-۵- مقدار نرخ نفوذ در واحدهای مختلف قطعه ۲ مسیر تونل با استفاده از
روش های مختلف
۱۲۱
- شکل ۵-۶- مقدار نرخ پیشروی روزانه در واحدهای مختلف قطعه ۱ مسیر تونل با
استفاده از روش های مختلف
۱۲۲
- شکل ۵-۷- مقدار نرخ پیشروی روزانه در واحدهای مختلف قطعه ۲ مسیر تونل با
استفاده از روش های مختلف
۱۲۲

شکل ۵-۸- مقایسه نتایج پیش‌بینی نرخ پیشروی TBM با داده‌های

۱۲۴

واقعی.....

شماره صفحه

عنوان جداول

فصل دوم : ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئومکانیکی قطعات ۱ و ۲ تونل انتقال

آب قمرود

۱۵	جدول ۱-۲- واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل (قطعات ۱ و ۲).....
۱۶	جدول ۲-۲- لیست گمانه‌های حفر شده در قطعه ۱ تونل.....
۱۶	جدول ۳-۲- مشخصات گمانه‌های اکتشافی حفاری شده در قطعه ۲ تونل.....
۱۷	جدول ۴-۲- مشخصات درزه‌های برداشت شده در قطعه ۲ مسیر تونل.....
۱۸	جدول ۵-۲- وضعیت ناپیوستگی‌ها در قطعات ۱ و ۲ مسیر تونل.....
۱۹	جدول ۶-۲- پارامترهای ژئومکانیکی سنگ بکر برای واحدهای مختلف مسیر تونل
۲۰	جدول ۷-۲- پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ برای واحدهای مختلف مسیر تونل

فصل سوم : روش‌های پیش‌بینی نرخ نفوذ و تعیین ضریب بهره‌وری در

ماشین‌های حفاری تمام مقطع (TBM)

۳۸	جدول ۱-۳- پارامترهای ورودی مدل NTH.....
۴۴	جدول ۲-۳- کلاس‌های شکستگی با فاصله نظیر به نظیر بین صفحات ضعیف.....
۴۶	جدول ۳-۳- نیروی محوری مجاز روی برش‌دهنده.....

۵۷	جدول ۳-۴- فاکتور شکل بلوک استفاده شده برای دریافتن حجم بلوک از فاصله‌داری مشخص در طبقه بندی ناپیوستگی NTH
۵۸	جدول ۳-۵- طبقه بندی شمارنده حجمی درزه (J_v)
۵۹	جدول ۳-۶- درجه بندی فاکتور جهت داری درزه برای TBM
۶۰	جدول ۳-۷- فاکتور اندازه درزه و پیوستگی (J_L)
۶۷	جدول ۳-۸- فاکتور f_1 برای رده های مختلف RMR
۷۰	جدول ۳-۹- تأخیرات ناشی از سیستم ترابری
۷۰	جدول ۳-۱۰- تأخیرات ناشی از نصب پوشش

فصل چهارم : انتخاب دستگاه TBM در قطعات ۲۱ مسیر تونل انتقال آب

قمرود

۷۸	جدول ۴-۱- نام پروژه و وضعیت زمین شناسی پروژه و روش انتخاب شده برای حفاری
۸۲	جدول ۴-۲- مشخصات فنی ماشین در تونل انتقال آب قمرود برای قطعات ۲۱ و ۲۰

فصل پنجم : پیش‌بینی عملکرد TBM در قطعات ۲۱ مسیر تونل انتقال آب

قمرود

۹۱	جدول ۵-۱- واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل (قطعات ۲۱ و ۲۰)
۹۲	جدول ۵-۲- داده‌های مربوط به محاسبه پارامتر SIGMA در واحدهای مختلف مسیر تونل
۹۳	جدول ۵-۳- داده‌های مربوط به مقادیر m و m_1 در واحدهای مختلف مسیر تونل
۹۶	جدول ۵-۴- محاسبه Q_{TBM} در واحدهای مختلف مسیر تونل
۹۷	جدول ۵-۵- مقادیر PR و AR برای واحدهای مختلف مسیر تونل
۹۹	جدول ۵-۶- وضعیت ناپیوستگی‌ها و فاکتور شکستگی برای دسته درزه شماره i در قطعات ۲۱ مسیر تونل
۱۰۰	جدول ۵-۷- مقادیر محاسبه شده برای CLI، DRI و K_{DRI} برای واحدهای مختلف مسیر تونل
۱۰۲	جدول ۵-۸- I و i_o ، M_{eqv} ، K_{eqv} محاسبه شده برای هر یک از واحدهای مسیر تونل
۱۰۳	جدول ۵-۹- تأخیرهای در نظر گرفته شده با استفاده از روش NTH برای محاسبه ضریب بهره‌وری
۱۰۴	جدول ۵-۱۰- تأخیرهای متفرقه که با استفاده از روش CSM برای محاسبه ضریب بهره‌وری لحاظ شده است

جدول ۵-۱۱ - ضریب بهره‌وری و نرخ پیشروی روزانه برای واحدهای مختلف قطعات	۱۰۵
۲۱ مسیر تونل.....	
جدول ۵-۱۲ - متوسط عمر حلقه برنده و زمان لازم برای تعویض و بازدید برنده	۱۰۸
.....(T_c)	
جدول ۵-۱۳ - وضعیت ناپیوستگی‌ها در قطعات ۲۱ مسیر تونل.....	۱۰۹
جدول ۵-۱۴ - مقادیر محاسبه شده برای فاکتور شکل بلوک، شمارنده حجمی درزه،	
پارامتر ویژگی درزه و پارامتر درزه‌داری.....	۱۱۰
جدول ۵-۱۵ - M_{eqv} و K_{eqv} محاسبه شده برای هر یک از واحدهای مسیر تونل.....	۱۱۲
جدول ۵-۱۶ - نرخ نفوذ پایه و نرخ نفوذ محاسبه شده برای هر یک از واحدهای	
مسیر تونل.....	۱۱۳
جدول ۵-۱۷ - ضریب بهره‌وری و نرخ پیشروی روزانه برای واحدهای مختلف قطعات	
۲۱ مسیر تونل.....	۱۱۴
جدول ۵-۱۸ - مقدار نفوذ محاسبه شده برای واحدهای مختلف مسیر تونل.....	۱۱۶
جدول ۵-۱۹ - تأخیرهای در نظر گرفته شده با استفاده از روش CSM برای محاسبه	
ضریب بهره‌وری.....	۱۱۷
جدول ۵-۲۰ - تأخیرهای دیگر که با استفاده از روش NTH برای محاسبه ضریب	
بهره‌وری در نظر گرفته شده است.....	۱۱۸
جدول ۵-۲۱ - ضریب بهره‌وری و نرخ پیشروی روزانه برای واحدهای مختلف قطعات	
۲۱ مسیر تونل.....	۱۱۹
جدول ۵-۲۲ - نتایج پیش‌بینی نرخ پیشروی روزانه بر حسب (m/day) در واحدهای	
مختلف مسیر تونل با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی مختلف.....	۱۲۰
جدول ۵-۲۳ - نتایج بررسی عملکرد TBM تونل قمرود.....	۱۲۳
جدول ۵-۲۴ - زمان اتمام قطعات ۲۱ مسیر تونل با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی	
مختلف.....	۱۲۵

تونل‌ها سازه‌های زیرزمینی هستند که با غلبه بر موانع طبیعی نظیر رشته کوه‌ها، رودخانه‌ها، دریاها و ... و بدون توجه به شرایط آب و هوایی امکان حمل و نقل بهتر و در مواقعی آسان‌تر را فراهم می‌آورند. امروزه تونل‌ها به‌عنوان یک سازه مهم در زندگی روزمره جوامع کشورهای توسعه یافته جایگاه ویژه‌ای دارند و دامنه کاربرد آن‌ها بسیار زیاد می‌باشد. از جمله موارد کاربرد آن‌ها، تونل‌های انتقال آب می‌باشد. از آنجایی که منابع عمده آب ایران در مناطق غرب، جنوب غربی و شمال ایران جریان دارند و از دیر باز تأمین آب شرب دراز مدت مناطق مرکزی ایران از مشکلات و مسائل عمده صنعت آب کشور بوده است، از این رو به‌منظور رفع این مشکل لزوم انتقال بین حوزه‌ای آب و حفاری تونل‌های انتقال آب مطرح شده است. با توجه به طول زیاد این تونل‌ها، استفاده از ماشین‌های حفر مکانیزه و به‌ویژه ماشین‌های حفر تمام مقطع تونل^۱ (TBM)، در صورتی که شرایط زمین‌شناسی برای استفاده از آن‌ها مساعد باشد، بهترین گزینه برای حفاری می‌باشند زیرا سرعت حفاری در این گونه ماشین‌ها بسیار بالا می‌باشد.

تونل انتقال آب از سرشاخه‌های رودخانه دز به قمرود از جمله طرح‌های عمرانی بزرگ و ملی محسوب می‌گردد که برای حفر این تونل از ماشین حفاری مکانیزه (TBM) استفاده می‌شود لذا بررسی عملکرد TBM تونل انتقال آب قمرود از جمله مسائلی می‌باشد که بسیار حائز اهمیت است. بدیهی است که با پیش‌بینی معتبر عملکرد دستگاه، می‌توان پروژه را از نظر اقتصادی مورد ارزیابی قرار داد و برنامه زمان‌بندی حفر تونل را ارائه داد.

۱-۲- خلاصه‌ای از طرح

محدوده در برگیرنده تونل انتقال آب دز- قمرود در استان لرستان در فاصله تقریباً ۲۰ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان الیگودرز واقع شده است. تونل انتقال آب قمرود به طول کلی ۳۵/۷ کیلومتر، بخش اصلی پروژه را شامل می‌شود. این تونل برای اجرا به چهار قطعه تقریباً مساوی به طول ۹ کیلومتر تقسیم شده است

^۱ Full Face Tunnel Boring Machine

که اجرای قطعات ۲۰۱ آن از طرف شرکت سهامی آب منطقه‌ای تهران به شرکت سابیر واگذار شده است. تونل انتقال آب قمرود دارای قطر داخلی ۳/۸ متر و ظرفیت ۲۳ متر مکعب در ثانیه و دارای شیب ۰/۱۳ درصد می‌باشد.

۳-۱- هدف پایان‌نامه

برای حفاری قطعات ۲۰۱ مسیر تونل انتقال آب قمرود، با توجه به طول زیاد آن و با در نظر گرفتن شرایط زمین‌شناسی منطقه، انتخاب نوع ماشین حفاری مکانیزه، از مهم‌ترین مسائلی می‌باشد که بایستی بررسی شود. تعیین نرخ نفوذ و نرخ پیشروی دستگاه TBM نیز به منظور ارزیابی هزینه‌ها و ارائه برنامه زمان‌بندی حفر تونل، از اهمیت به‌سزایی برخوردار می‌باشد. لذا در این پایان‌نامه مناسب‌ترین ماشین حفاری مکانیزه برای حفاری قطعات ۲۰۱ تونل انتقال آب قمرود انتخاب شده است و سپس عملکرد TBM در واحدهای مختلف مسیر تونل پیش‌بینی شده است.

۴-۱- سازمان‌دهی پایان‌نامه

پایان‌نامه حاضر مشتمل بر شش فصل می‌باشد. مابقی فصول این پایان‌نامه به شرح ذیل سازمان‌دهی شده است:

- فصل دوم تحت عنوان ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئومکانیکی قطعات ۲۰۱ تونل انتقال آب قمرود می‌باشد که در آن پارامترهای زمین‌شناسی و ژئومکانیکی در واحدهای مختلف مسیر تونل توصیف شده است.
- فصل سوم تحت عنوان روش‌های پیش‌بینی نرخ نفوذ و تعیین ضریب بهره‌وری در ماشین‌های حفاری تمام مقطع (TBM) می‌باشد که در آن روش‌های موجود برای پیش‌بینی عملکرد TBM و پارامترهای مربوط به هر روش معرفی شده است.
- فصل چهارم تحت عنوان انتخاب دستگاه TBM در قطعات ۲۰۱ مسیر تونل انتقال آب قمرود می‌باشد که در این فصل به انتخاب روش حفاری و بهینه‌سازی شرایط خاک در قطعات ۲۰۱ تونل انتقال آب قمرود پرداخته شده است.

- فصل پنجم تحت عنوان پیش‌بینی عملکرد TBM در قطعات ۲ و ۱ مسیر تونل انتقال آب قمرود می‌باشد که در این فصل با استفاده از روش‌های Q_{TBM} ، RMI ، NTH و CSM نرخ نفوذ TBM پیش‌بینی شده است و با در نظر گرفتن تأخیرهایی که در حین کار پیش می‌آید، ضریب بهره‌وری و نرخ پیشروی روزانه در هر یک از واحدهای زمین‌شناسی مسیر تونل تخمین زده شده است و در نهایت زمان لازم برای اتمام پروژه پیش‌بینی شده است.
- فصل ششم نتیجه‌گیری و پیشنهادات می‌باشد که در این فصل نتایج به‌دست آمده مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت پیشنهاداتی نیز ارائه گردید.

۲-۱- مقدمه

منابع عمده آب ایران در مناطق غرب، جنوب غربی و شمال ایران جریان دارند و از دیر باز تأمین آب شرب دراز مدت مناطق مرکزی ایران از مشکلات و مسائل عمده صنعت آب کشور بوده است. از این رو برای رفع این مشکل لزوم انتقال بین حوزه‌ای آب مطرح شده است. یکی از این طرح‌ها، انتقال آب از سرشاخه‌های ناحیه دز به ایران مرکزی است که تونل انتقال آب از رودخانه انوج به قمرود بخش اصلی از این طرح می‌باشد.

طول کل تونل انتقال آب قمرود ۳۵/۷ کیلومتر، با قطر داخلی ۳/۸ متر و دبی آب ۲۳ متر مکعب در ثانیه می‌باشد. با توجه به طول بلند و زمان اجرای تونل، تونل در ۴ قطعه حدوداً ۹ کیلومتری اجرا می‌شود که اجرای قطعات ۲ و ۱ آن از طرف شرکت سهامی آب منطقه‌ای تهران به شرکت سایبر واگذار شده است. لازم به توضیح است که قبلاً اجرای قطعات ۲ و ۱ هر یک جداگانه به عهده پیمانکاران دیگری بوده است که با توجه به مشکلات ناشی از شرایط زمین‌شناسی به‌ویژه در قطعه ۱ و تغییر روش اجرا به روش حفاری مکانیزه با

دستگاه TBM، این امر طی قراردادی جدید به عهده شرکت سابیر گذاشته شد. با توجه به اهمیت شناسایی دقیق تر شرایط زمین شناسی از جمله اقداماتی که توسط شرکت سابیر انجام شد، اقدامات اکتشافی تکمیلی بود که بدین منظور تعداد ۶ حلقه گمانه اکتشافی جدید و همچنین بررسی ژئوفیزیکی به روش سونداژ زنی الکتریک قائم^۲ (VES) با آرایش شولومبرژه به اجرا گذاشته شد. مطالعات ژئوفیزیکی انجام شده شامل ۱۵۰ سونداژ ژئوالکتریک قائم با طول فرستنده جریان $AB=1000(m)$ بوده است که کل مسیر تونل را پوشش می دهد و اعماق حدود ۲۵۰ متر تا ۳۰۰ متر را مورد کاوش قرار می دهد.

۲-۲- موقعیت جغرافیایی

منطقه اجرای طرح بخشی از ناحیه آبریز سرشاخه های دز واقع در استان لرستان و بخشی از ناحیه قمرود واقع در استان های اصفهان و مرکزی می باشد. از دیدگاه جغرافیایی گستره طرح در مختصات جغرافیایی $49^{\circ}13'$ تا $49^{\circ}53'$ طول شرقی و $33^{\circ}02'$ تا $33^{\circ}18'$ عرض شمالی واقع شده است. محل احداث تونل در استان لرستان، در فاصله تقریباً ۲۰ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان الیگودرز واقع شده است (شرکت مهندسی سابیر، ۱۳۸۵).

۲-۳- سیمای طرح

سیمای طرح تونل انتقال آب از رودخانه انوج به قمرود در شکل ۲-۱ نشان داده شده است. به طور کلی این طرح را می توان به چند بخش تقسیم بندی کرد. بخش اول از یک سری بندهای انحرافی تشکیل شده است. بخش دوم این طرح، تونل انتقال آب از رودخانه انوج به مخزن سد گلپایگان است که دارای طولی برابر ۳۵/۷ کیلومتر است. بخش سوم طرح، یک سد خاکی با نام کوچری است. هدف از اجرای این طرح تأمین آب شرب دراز مدت شهرهای قم، دلجان، محلات، خمین و گلپایگان می باشد.

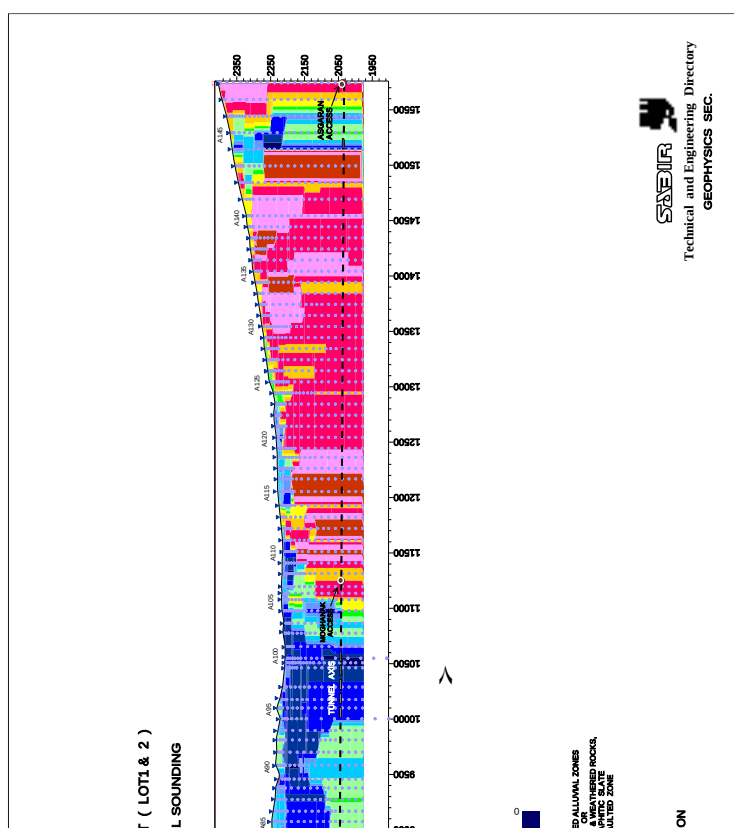
^۲ Vertical Electrical Sounding

بر اساس اطلاعات زمین‌شناسی، مسیر تونل از پیچیدگی‌ها و تغییرات زیادی برخوردار می‌باشد به‌طوری‌که در این مسیر یا زمین‌های نرم آبرفتی شامل خاک ریزدانه اشباع تا سنگ‌های نرم مانند شیل و شیست و اسلیت‌های زغالی و بالاخره سنگ‌های سخت‌تر مانند آهک و دولومیت‌های دگرگون شده و بعضاً سنگ‌های کوارتزیتی و متاولکانیک‌ها برخورد می‌شود. در تمام طول مسیر نیز خط پروژه در زیر سطح آب زیرزمینی قرار دارد که این خود بر پیچیدگی مسائل می‌افزاید (شرکت مهندسی سابیر، ۱۳۸۵).

۲-۵- رابطه بین زمین‌شناسی منطقه و مقاومت ویژه

مقاومت الکتریکی مصالح طبیعی خاک و سنگ تابعی از مجموعه شرایط فیزیکی و شیمیایی آن‌ها می‌باشد و مواردی مانند ویژگی‌های سنگ‌شناسی، بافت و جنس، وضعیت هوازدگی و میزان رطوبت یا شرایط اشباع از مهم‌ترین عواملی هستند که بر روی میزان مقاومت الکتریکی مصالح اثر می‌گذارند.

کار ژئوفیزیکی انجام شده در مسیر تونل شامل اجرای بیش از ۱۵۰ سونداژ ژئوالکتریک با طول فرستنده جریان $AB=1000$ (m) می‌باشد. با این طول فرستنده جریان، به لحاظ تئوریک انتظار می‌رود که تا اعماق ۲۵۰ تا ۳۰۰ متر مورد کاوش قرار گیرد. فاصله سونداژها بر حسب مورد بین ۵۰ تا ۱۵۰ متر انتخاب گردیده است که این امر بسته به شرایط زمین و حساسیت مواضع عبوری از دیدگاه مشاهده تغییرات جانبی بوده است. نقشه ژئوالکتریک مسیر تونل در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. با نگاه به مقطع ژئوالکتریک مشاهده می‌شود که مقادیر مقاومت مخصوص الکتریکی از حدود ۱۰ اهم‌متر تا بیش از ۵۰۰۰ اهم‌متر متغیر می‌باشد که این تغییرات خود مبین شرایط پیچیده زمین‌شناسی از دیدگاه تنوع مصالح طبیعی می‌باشد. به‌طور کلی انتظار می‌رود که مناطق همراه با مقاومت الکتریکی کمتر از ۱۰ اهم‌متر تا حدود ۷۰-۵۰ اهم‌متر مربوط به مصالح آبرفتی اشباع باشد که در صورت ریزدانه بودن (عمدتاً مصالح رسی) حدود پایدینی مقاومت و با تغییر بافت و افزایش میزان ماسه و یا مصالح درشت دانه حدودهای بالاتر مقاومت ظاهر می‌شود. در خصوص مناطق سنگی در مسیر تونل، بخشی از آن‌ها مقاومت مخصوص الکتریکی مشابه با آبرفت‌ها نشان می‌دهند که این مناطق به‌طور نسبی ویژگی‌های فیزیکی ضعیف‌تری نسبت به آبرفت دارند. صرف‌نظر از این قسمت‌ها



شکل ۲-۲ نقشه ژئوالکتریک

بقیه مصالح سنگی مقاومت مخصوص الکتریکی بین حدود ۱۰۰ اهم متر تا بیش از ۵۰۰۰ اهم متر را نشان می‌دهند. با توجه به شناخت از منطقه، مصالح سنگی با مقاومت مخصوص الکتریکی بین حدود ۱۰۰ تا نزدیک به ۵۰۰ اهم‌متر سنگ‌هایی با مقاومت پایین تا متوسط را شامل می‌شوند. مناطق با مقاومت مخصوص

الکتریکی حدود ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ اهم متر سنگ‌هایی با مقاومت متوسط تا نسبتاً خوب و مناطق با مقاومت مخصوص الکتریکی بالاتر از ۱۰۰۰ اهم متر عمدتاً مناطقی با سنگ‌های با کیفیت خوب را شامل می‌شوند. البته در خصوص مناطق با مقاومت مخصوص الکتریکی بالا، به‌طور کلی در طبیعت استثناهایی نیز وجود دارد که همیشه مترادف با سنگ با کیفیت خوب نمی‌باشد. به‌عنوان مثال سنگ‌های با ویژگی‌های ذاتی سخت در شرایط همراه شدن با خردشدگی و درز و شکاف فراوان و بدون حضور آب زیرزمینی، مقاومت الکتریکی بالایی نشان می‌دهند و این در حالی است که توده سنگ ویژگی‌های مهندسی مطلوبی ندارد. اما در منطقه مورد مطالعه با توجه به بالاتر بودن سطح آب زیرزمینی نسبت به تراز تونل به‌هر حال انتظار می‌رود که در حد دقت حاصل از آرایش و فشردگی سونداژهای ژئوالکتریک، چنین مناطقی (مناطق با خرد شدگی قابل توجه) دارای افت مقاومت مخصوص الکتریکی باشند (شرکت مهندسی سابیر، ۱۳۸۵).

۲-۶- زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل در قطعات ۲۱

با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی و مطالعات ژئوفیزیکی انجام شده، قطعات ۲۱ مسیر تونل به واحدهای زمین‌شناسی زیر تقسیم شده است (شرکت مهندسی سابیر، ۱۳۸۶):

کیلومتر ۰+۰۰۰ الی ۰+۳۵۰ : آندزیت

کیلومتر ۰+۳۵۰ الی ۰+۸۰۰ : شیست متوسط با میان لایه‌های سنگ آهک دولومیتی دگرگون شده

کیلومتر ۰+۸۰۰ الی ۰+۹۱۹ : شیست ضعیف با میان لایه‌های سنگ آهک دولومیتی دگرگون شده

کیلومتر ۰+۹۱۹ الی ۱+۹۰۰ : آبرفت (روباره شیستی یا متاولکانیک به اندازه یک تا دو برابر قطر تونل) که بخش اعظم آبرفت، از نوع ریزدانه (ماسه سیلتی رس‌دار تا سیلت ماسه‌ای رس‌دار) تشکیل شده است.

کیلومتر ۱+۹۰۰ الی ۲+۳۰۰ : شیست، متاکوارتزیت، متاگرانودیوریت و متادیوریت همراه با تعداد زون‌های خردشده نسبتاً زیاد

کیلومتر ۲+۳۰۰ الی ۳+۱۰۰ : آبرفت در اکثر نقاط تا زیر خط تراز پروژه ادامه دارد. نکته مهم و تفاوت بارز این زون با ناحیه قبلی وجود ستون آب و مصالح اشباع روباره به میزان تقریباً ۲ برابر زون آبرفتی اول می باشد.

کیلومتر ۳+۱۰۰ الی ۳+۳۶۵۰ : این محدوده شامل شیست سبز با مقاومت متوسط دارای زون های شکسته و خرد شده و متاکوارتزیت مقاوم می باشد. البته توده سنگ های کیلومتراژ ۳+۱۰۰ الی ۳+۲۵۰ و ۳+۵۰۰ الی ۳+۶۵۰ شرایط کیفی بهتری دارند.

کیلومتر ۳+۶۵۰ الی ۴+۶۵۰ : این محدوده شامل متاکوارتزیت مقاوم با میان لایه های شیست با مقاومت متوسط می باشد. وضعیت کیفی توده سنگ این ناحیه بهتر از شرایط موجود در کیلومتراژهای ۱+۹۰۰ الی ۲+۳۰۰ و ۳+۱۰۰ الی ۳+۶۵۰ می باشد.

کیلومتر ۴+۶۵۰ الی ۶+۳۰۰ : این محدوده شامل سنگ آهک متامورفیک و متادیوریت با کیفیت بالا به همراه میان لایه های شیستی می باشد. توده سنگ موجود در این محدوده، کیفیت بسیار بالایی دارد.

کیلومتر ۶+۳۰۰ الی ۶+۷۰۰ : شیست با کیفیت متوسط می باشد. برداشت های ژئوالکتریک افت نسبی شرایط توده سنگ را در این محدوده از تونل ثبت کرده اند و در پروفیل زمین شناسی نیز برای آن شیست با کیفیت متوسط پیش بینی شده است.

کیلومتر ۶+۷۰۰ الی ۷+۴۵۰ : شیست با کیفیت پایین و هوازده می باشد و برداشت های ژئوالکتریک مصالحی شبیه آبرفت و یا توده سنگ های بسیار خرد شده را ثبت کرده اند. برداشت های ژئوالکتریک افت مقاومت الکتریکی شدیدی را در این زون نشان می دهند و شرایطی مانند زون های آبرفتی اوایل تونل برای این ناحیه ثبت شده است. ولی با توجه به توصیفات زمین شناسی موجود در گزارشات ژئوتکنیک، مصالح این محدوده از تونل به آبرفت تشبیه نشده است و برای آن توصیف شیل های خالص یا شیل های زغال دار و یا سنگ های بسیار دگرگون شده ذکر گردیده است. از طرف دیگر وضعیت کیفی توده سنگ های این ناحیه نسبت به سنگ های پیرامون آن (کیلومتراژ ۴+۶۵۰ الی ۶+۷۰۰ و ۷+۴۵۰ الی ۸+۵۰۰) بسیار پایین تر است لذا وجود ساختار تکتونیکی از قبیل گسل در این ناحیه محتمل می باشد. با توجه به نکات فوق الذکر مصالح موجود در این ناحیه به صورت توده سنگ های خرد شده در نظر گرفته می شوند.

کیلومتر ۷+۴۵۰ الی ۸+۷۰۰ : شیست با کیفیت متوسط به بالا همراه با لایه‌هایی از دولومیت و یا کوارتزیت دگرگون شده در این ناحیه وجود دارد.

کیلومتر ۸+۷۰۰ الی ۹+۵۰۰ : این واحد شامل مجموعه‌ای از شیست، آمفیبولیت شیست، فیلیت و اسلیت سبز تا خاکستری می‌باشد. اسلیت سبز تا خاکستری که ضعیف‌ترین دسته شیست‌ها و اسلیت‌ها را شامل می‌شود دارای مقاومت تک محوره کمتر از ۲۵ مگا پاسکال هستند. این توده سنگ در نزدیکی ابتدای قطعه دوم و در مجاورت کنگلومراهای جوان به چشم می‌خورد.

کیلومتر ۹+۵۰۰ الی ۹+۹۰۰ : توصیف ارائه شده برای این محدوده طیف وسیعی از سنگ را در بر می‌گیرد ولی بر اساس اطلاعات حاصل از گمانه‌ها، توده سنگ غالب، کنگلومرای دانه درشت با سیمان رسی و در برخی موارد با سیمان کلسیتی است که در کل در گروه سنگ‌های نرم قرار می‌گیرد.

کیلومتر ۹+۹۰۰ الی ۱۰+۶۰۰ : این محدوده شامل شیست و اسلیت‌های زغال‌دار می‌باشد.

کیلومتر ۱۰+۶۰۰ الی ۱۰+۸۸۶ : این محدوده شامل شیست و اسلیت سبز تا خاکستری با کیفیتی ضعیف و با RQD پایین می‌باشد.

کیلومتر ۱۰+۸۸۶ الی ۱۱+۰۴۴ : این واحد شامل متادولومیت‌های توده‌ای و آهک‌های دولومیتی به همراه رگه‌های کوارتزیتی می‌باشد.

کیلومتر ۱۱+۰۴۴ الی ۱۱+۳۱۵ : این واحد شامل سنگ آمفیبولیت-شیست دگرگون شده- ریزدانه بدون هوازگی- بسیار مقاوم با رگه‌هایی از کلسیت و کوارتز است.

کیلومتر ۱۱+۳۱۵ الی ۱۱+۴۵۱ : این واحد شامل متادولومیت توده‌ای ضخیم و آهک‌های دولومیتی به همراه میان لایه‌های شیستی که ۹۰ درصد آن دولومیت است، می‌باشد. بخش دولومیتی آن دارای رگه‌های کوارتزیتی می‌باشد.

کیلومتر ۱۱+۴۵۱ الی ۱۱+۵۹۶ : این واحد شبیه به آن چه که در کیلومتر ۱۱+۰۴۴ تا ۱۱+۳۱۵ گفته شد، می‌باشد که نسبت به آن اندکی تیره‌تر است.

کیلومتر ۱۱+۵۹۶ الی ۱۱+۹۷۱ : این واحد شامل آهک‌های دولومیتی و متادولومیت تیره رنگ با کریستال‌های ریز بدون هوازدگی و به همراه میان لایه‌های کوارتزی و بسیار قوی می‌باشد که دارای مقاومت بالاتری نسبت به کیلومترهای ۱۰+۸۸۶ الی ۱۱+۰۴۴ و ۱۱+۳۱۵ الی ۱۱+۴۵۱ است.

کیلومتر ۱۱+۹۷۱ الی ۱۲+۲۸۷ : این واحد شبیه به آن‌چه که در کیلومتر ۱۱+۰۴۴ تا ۱۱+۳۱۵ گفته شد می‌باشد. در این واحد گاهی آمفیبولیت شیست‌ها به میکا شیست تبدیل می‌شوند.

کیلومتر ۱۲+۲۸۷ الی ۱۲+۳۴۵ : این واحد شامل آهک‌های دولومیتی و متادولومیت تیره رنگ با کریستال‌های ریز بدون هوازدگی و به همراه میان لایه‌های ضخیم کوارتزی و بسیار قوی می‌باشد که دارای کیفیت بالاتری نسبت به کیلومترهای ۱۰+۸۸۶ الی ۱۱+۰۴۴ و ۱۱+۳۱۵ الی ۱۱+۴۵۱ است.

کیلومتر ۱۲+۳۴۵ الی ۱۴+۹۲۴ : این محدوده شامل شیست و اسلیت همراه با آمفیبولیت، شیست سبز تا خاکستری و شیست‌های تیره می‌باشد. مقاومت تک محوره این سنگ‌ها از ۳۰ تا ۵۸ مگاپاسکال متغیر است. در کل این نوع سنگ شامل شیست‌های سبز - شیست‌های تیره - میکاشیست‌ها و کوارتز است و طول عمده‌ای از مسیر تونل را در بر می‌گیرد. این شیست‌ها دارای کیفیت بهتری نسبت به شیست و اسلیت سبز تا خاکستری می‌باشند.

کیلومتر ۱۴+۹۲۴ الی ۱۵+۲۶۸ : این واحد شامل متاریبولیت همراه با دانه‌های درشت کوارتز است که دارای صفحات شیستوزیته نیز می‌باشد و مقاوم و بدون هوازدگی است. همچنین رگه‌هایی از کلسیت و کوارتز نیز در آن دیده می‌شود.

کیلومتر ۱۵+۲۶۸ الی ۱۵+۳۵۰ : این محدوده شامل آمفیبولیت شیست‌ها با میان لایه‌های نازکی از میکا شیست می‌باشد.

کیلومتر ۱۵+۳۵۰ الی ۱۵+۷۰۶ : این واحد شبیه به آن‌چه که در کیلومتر ۱۴+۹۲۴ الی ۱۵+۲۶۸ گفته شد می‌باشد و نسبت به آن دارای سنگ‌های جوان‌تری می‌باشد.

کیلومتر ۱۵+۷۰۶ الی ۱۶+۴۳۲ : این واحد شامل آمفیبولیت شیست سبز رنگ می‌باشد و شبیه به آن‌چه که در کیلومتر ۱۱+۰۴۴ تا ۱۱+۳۱۵ گفته شد می‌باشد.

کیلومتر ۱۶+۴۳۲ الی ۱۶+۸۸۸ : این محدوده شامل متادیوریت سبز رنگ می‌باشد و جزء سنگ‌های مقاوم در مسیر تونل می‌باشد.

کیلومتر ۱۶+۸۸۸ الی ۱۷+۴۰۳ : این محدوده شامل مرمر خاکستری رنگ توده‌ای است که ریزدانه، ضخیم‌لایه، کریستالی، بدون هوازدگی و مقاوم تا بسیار مقاوم در مسیر تونل می‌باشد.

کیلومتر ۱۷+۴۰۳ الی ۱۸+۱۱۰ : این محدوده شبیه به آن‌چه که در کیلومتراژ ۱۲+۳۴۵ تا ۱۴+۹۲۴ گفته شد می‌باشد.

واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل انتقال آب قمرود (قطعات ۱ و ۲) در جدول ۱-۲ آورده شده است.

جدول ۱-۲- واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل (قطعات ۱ و ۲) (شرکت مهندسی سایبر، ۱۳۸۶)

توده سنگ‌های مسیر تونل	واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل	متراژ (m)
آندزیت	An	۰ - ۳۵۰
شیست متوسط با سنگ آهک دولومیتی دگرگون شده	GSch1	۳۵۰ - ۸۰۰
شیست ضعیف با سنگ آهک دولومیتی دگرگون شده	GSch2	۸۰۰ - ۹۱۹
آبرفت (ماسه سیلتی رس دار تا سیلت ماسه ای رس دار)	all	۹۱۹ - ۱۹۰۰
شیست، متاکوارتزیت، متاگرانودیوریت و متادیوریت همراه با تعداد زونهای خردشده نسبتاً زیاد	GSch3	۱۹۰۰ - ۲۳۰۰
آبرفت (ماسه سیلتی رس دار تا سیلت ماسه ای رس دار)	all	۲۳۰۰ - ۳۱۰۰
شیست دارای زونهای شکسته و خرد شده به همراه متاکوارتزیت مقاوم	GSch4	۳۱۰۰ - ۳۲۵۰
شیست دارای زونهای شکسته و خرد شده به همراه متاکوارتزیت مقاوم	GSch5	۳۲۵۰ - ۳۵۰۰
شیست دارای زونهای شکسته و خرد شده به همراه متاکوارتزیت مقاوم	GSch4	۳۵۰۰ - ۳۶۵۰
متاکوارتزیت مقاوم با میان لایه های شیست با مقاومت متوسط	MQ	۳۶۵۰ - ۴۶۵۰
سنگ آهک متامورفیک و متادیوریت با کیفیت بالا به همراه میان لایه های شیستی	ML	۴۶۵۰ - ۶۳۰۰
شیست با کیفیت متوسط	GSch6	۶۳۰۰ - ۶۷۰۰
شیست با کیفیت پایین و بسیار خرد شده شبیه به آبرفت	GSch7	۶۷۰۰ - ۷۴۵۰
شیست با کیفیت متوسط به بالا	GSch8	۷۴۵۰ - ۸۷۰۰
شیست و اسلیت	Sh3	۸۷۰۰ - ۹۵۰۰
گل‌سنگ، ماسه سنگ و کلنگلومرا	QLa	۹۵۰۰ - ۹۹۰۰
شیست و اسلیت زغال‌دار	Shc	۹۹۰۰ - ۱۰۶۰۰
شیست و اسلیت	Sh3	۱۰۶۰۰ - ۱۰۸۸۶
متادولومیت همراه با آهک‌های دولومیتی	MDL4	۱۰۸۸۶ - ۱۱۰۴۴
آمفیبولیت شیست	AS1	۱۱۰۴۴ - ۱۱۳۱۵
متادولومیت همراه با آهک‌های دولومیتی	MDL5	۱۱۳۱۵ - ۱۱۴۵۱
آمفیبولیت شیست	AS2	۱۱۴۵۱ - ۱۱۵۹۶
متادولومیت همراه با آهک‌های دولومیتی	MDL6	۱۱۵۹۶ - ۱۱۹۷۱
آمفیبولیت شیست	AS3	۱۱۹۷۱ - ۱۲۲۸۷

۱۲۳۸۷ - ۱۲۳۴۵	MDL7	متادولومیت همراه با آهک‌های دولومیتی
۱۲۳۴۵ - ۱۴۹۲۴	Sh5	شیست و اسلیت همراه با آمفیبولیت
۱۴۹۲۴ - ۱۵۲۶۸	Trh1	متاریولیت
۱۵۲۶۸ - ۱۵۳۵۰	Tsh	آمفیبولیت شیست ها با میان لایه های نازکی از میکاشیست
۱۵۳۵۰ - ۱۵۷۰۶	Trh2	متاریولیت
۱۵۷۰۶ - ۱۶۴۳۲	As4	آمفیبولیت شیست
۱۶۴۳۲ - ۱۶۸۸۸	Md	متادیوریت
۱۶۸۸۸ - ۱۷۴۰۳	Tma	مرمر خاکستری و تیره
۱۷۴۰۳ - ۱۸۱۱۰	Sch1	شیست و اسلیت همراه با آمفیبولیت

۷-۲- مطالعات زمین‌شناسی مهندسی

مشخصات گمانه‌های موجود در مسیر تونل در جداول ۲-۲ و ۳-۲ آورده شده است.

جدول ۲-۲- لیست گمانه‌های حفر شده در قطعه ۱ تونل (شرکت مهندسی سایر، ۱۳۸۶)

گمانه	کیلومتر از	فاصله از محور تونل	عمق سنگ بستر	عمق نهایی
TGH-39	۰+۱۶۵	۵۵ NW	۵	۳۵
TGH-42	۰+۷۴۷	۲۳۵ NW	۱۰	۷۰
CH-1	۱+۲۰۰	۰	-	۵۲
CH-2	۱+۴۶۰	۰	-	۴۷/۱
TGH-40	۱+۵۸۱	۱۸۲ NW	۵۵	۷۵
BH-2	۲+۱۳۵	۰	۴۰/۳	۸۵
CH-3	۲+۱۷۳	۰	۶۵	۸۵
TGH-44	۲+۶۳۰	۹۲ NW	-	۱۰۰
BH-3	۲+۸۳۵	۰	-	۹۴
CH-4	۳+۳۳۷	۰	۵۴	۱۰۰
BH-4	۳+۵۸۷	۰	۴۲	۱۰۵
TGH-38	۳+۶۲۷	۱۵۲ NW	۴۵	۱۱۰
TGH-37	۴+۸۵۰	۱۸۲ NW	۵	۱۴۰
CH-5	۴+۶۸۷	۰	۲۰	۱۲۹
BH-5	۵+۹۸۵	۰	۲/۵	۱۹۰

۱۸۵	۶/۲	۱۸۰ NW	۶+۲۱۵	TGH-36
۱۸۵	۶۵	۰	۷+۴۵۳	BH-6
۱۹۲	۸۰	۰	۸+۱۴۰	CH-6
۲۰۰	۱۶۸	(۴) NW	۸+۹۰۰	TGH-46

جدول ۲-۳- مشخصات گمانه‌های اکتشافی حفاری شده در قطعه ۲ تونل (شرکت مهندسی سایبر، ۱۳۸۶)

گمانه	کیلومتر از (m)	عمق گمانه (m)	عمق برخورد با تونل (m)
TGH46	۸+۹۶۰	۲۰۰	۲۰۰-۱۷۰
BH1	۹+۴۹۰	۱۸۰	۱۷۰-۱۵۰
BH3	۱۰+۸۱۵	۱۷۰	۱۶۰-۱۴۰
TGH13	۱۱+۲۵۰	۲۶۰	۱۶۰-۱۴۰
BH4	۱۱+۶۴۵	۲۱۰	۱۷۰-۱۴۰
TGH14	۱۲+۸۰۰	۲۹۰	۲۰۰-۱۷۰
BH5	۱۴+۰۰۰	۴۰	با تونل برخورد نمی‌کند
TGH15	۱۴+۹۵۰	۳۳۵	۳۲۰-۲۸۰
BH7	۱۵+۷۴۰	۵۰	با تونل برخورد نمی‌کند
TGH16	۱۷+۱۵۰	۳۳۵	۲۶۰-۲۳۰

مشخصات درزه‌های برداشت شده در توده سنگ‌های تشکیل‌دهنده قطعه ۲ مسیر تونل در جدول ۲-۴ آورده شده است.

جدول ۲-۴- مشخصات درزه‌های برداشت شده در قطعه ۲ مسیر تونل (شرکت مهندسی سایبر، ۱۳۸۶)

واحد زمین‌شناسی		دسته درزه ۱		دسته درزه ۲		دسته درزه ۳	
آزیموت	زاویه شیب	آزیموت	زاویه شیب	آزیموت	زاویه شیب	آزیموت	زاویه شیب
۱۰۶	۷۰	۳۰۰	۶۰	۴۰	۵۰	MDL5 MDL6 MDL7	
۲۵	۵۵						
As1						MDL8 Tma	
As2							
As3							
۲۳۳	۶۵	۱۰۴	۷۵	۱۹۸	۸۰		

						Md
						Trh1
						Trh2
						Sch1
۴۶	۱۵	۸۰	۹۰	۵۰	۳۵۰	As4
						Tsh

لازم به ذکر است که در قطعه ۱ مسیر تونل، فقط لایه‌بندی در دست می‌باشد.

با توجه به پیچیدگی زمین‌شناسی منطقه احتمال دارد که در اعماق تونل این دسته درزه‌ها با شیب و جهت دیگری ظاهر شوند که لازم است در حین حفاری با برداشت دسته درزه‌ها این آنالیزها دقیق‌تر شود.

وضعیت درزه‌ها در واحدهای مختلف مسیر تونل، با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی موجود مطابق جدول ۵-۲ می‌باشد.

جدول ۵-۲ - وضعیت ناپیوستگی‌ها در قطعات ۱ و ۲ مسیر تونل (شرکت مهندسی سایبر، ۱۳۸۶)

نام واحد	فاصله داری ناپیوستگی‌ها (mm)	زاویه بین محور تونل و امتداد ناپیوستگی	فاکتور بیان کننده زبری سطح درزه (J _r)	فاکتور بیان کننده درجه هوازدگی (J _a)	فاکتور بیان کننده اندازه درزه و پیوستگی (J _L)
An	۴۰۰	۴۰	۲	۱	۱
GSch1	۲۰۰	۴۰	۱/۵	۱	۱
GSch2	۱۰۰	۴۰	۲/۲	۱	۱
all	-	-	-	-	-
GSch3	۱۰۰	۴۰	۱/۲۵	۱	۱
all	-	-	-	-	-
GSch4	۱۰۰	۴۰	۱/۵	۱	۱
GSch5	۱۰۰	۴۰	۱/۵	۱	۱
GSch4	۱۰۰	۴۰	۱/۵	۱	۱
MQ	۲۰۰	۴۰	۱	۱	۱
ML	۱۰۰	۴۰	۲	۱	۱
GSch6	۲۰۰	۴۰	۲/۲	۱	۱

۱	۴	۱/۲۵	۴۰	۵۰	GSch7
۱	۱	۱/۵	۴۰	۲۰۰	GSch8
۱	۱	۲/۲۵	۴۰	۱۰۰	Sh3
۱	۴	۱/۲۵	۴۰	۱۰۰	Qla
۱	۱	۲/۲۵	۴۰	۱۰۰	Shc
۱	۱	۲/۲۵	۴۰	۱۰۰	Sh3
۱	۱	۱	۴۰,۶۰,۷۴	۱۰۰	MDL 4
۱	۱	۲	۲۵	۱۰۰	AS1
۱	۱	۱	۴۰,۶۰,۷۴	۱۰۰	MDL 5
۱	۱	۲	۲۵	۱۰۰	AS2
۱	۱/۵	۱	۴۰,۶۰,۷۴	۲۰۰	MDL 6
۱	۱	۲	۲۵	۱۰۰	AS3
۱	۱/۵	۱	۴۰,۶۰,۷۴	۲۰۰	MDL 7
۱	۱	۱	۲۵	۵۰	Sh5
۲	۱	۲	۱۸,۷۶,۶۷	۲۰۰	Trh1
۱	۱	۲	۱۰,۹۰,۱۵	۱۰۰	Tsh
۲	۱	۲	۱۸,۷۶,۶۷	۲۰۰	Trh2
۱	۱	۲	۱۰,۹۰,۱۵	۱۰۰	As4
۱	۱	۲	۱۸,۷۶,۶۷	۲۰۰	Md
۱	۱/۲۵	۲	۱۸,۷۶,۶۷	۴۰۰	Tma
۱	۱	۱	۱۰,۹۰,۱۵	۵۰	Sch1

پارامترهای ژئومکانیکی برای واحدهای مختلف مسیر تونل مطابق با جداول ۶-۲ و ۷-۲ می باشد.

جدول ۶-۲- پارامترهای ژئومکانیکی سنگ بکر برای واحدهای مختلف مسیر تونل (شرکت مهندسی سایبر، ۱۳۸۶)

متوسط روباره (m)	مقاومت کششی (MPa)	درصد تخلخل	درصد کوارتز	UCS (MPa)	γ (gr/cm ³)	واحدهای زمین شناسی مهندسی مسیر تونل
۵۰	۵/۸۵	۰/۵	۱۵	۶۵	۲/۶۵	An
۵۵	۶/۴	۱/۹۱	۱۰	۴۰	۲/۷۸	GSch1
۵۵	۶	۱/۹۱	۱۰	۳۷/۵	۲/۷۸	GSch2
۷۰	۱/۶	۰/۵	۰/۵	-	۱/۹۴	all
۹۰	۴	۱/۹	۱۵	۴۰	۲/۷۴	GSch3
۸۵	۱/۶	۰/۵	۰/۵	-	۱/۹۴	all
۱۱۰	۴/۱۲۵	۲/۲	۴۰	۳۷/۵	۲/۷	GSch4
۱۱۰	۴/۱۲۵	۲/۲	۴۰	۳۷/۵	۲/۷	GSch5
۱۱۰	۴/۱۲۵	۲/۲	۴۰	۳۷/۵	۲/۷	GSch4

۱۲۰	۴	۲/۲	۴۰	۴۰	۲/۷۲	MQ
۱۹۰	۶/۳	۱/۶	۲۰	۷۰	۲/۷۴	ML
۱۹۵	۶	۱/۷	۱۰	۳۷/۵	۲/۷۶	GSch6
۱۷۰	۲/۴	۱/۷	۰/۵	۱۵	۲/۶	GSch7
۱۷۵	۶/۴	۲/۲	۱۰	۴۰	۲/۷۴	GSch8
۱۸۰	۲/۹۴	۱/۹۱	۳۰	۱۶/۹۲	۲/۸	Sh3
۱۸۰	۱/۶	۰/۵	۰/۵	۱۰	۲/۴	QLa
۱۷۰	۲/۹۴	۱/۹۱	۳۰	۱۶/۹۲	۲/۸	Shc
۱۷۰	۲/۹۴	۱/۹۱	۳۰	۱۶/۹۲	۲/۸	Sh3
۱۷۵	۶/۹۳	۰/۸۲	۳۰	۶۴/۳	۲/۸	MDL4
۲۰۰	۵/۲۶	۰/۴۸	۱۵	۵۸/۳۳	۲/۹۶	AS1
۱۸۰	۶/۹۳	۰/۸۲	۴۰	۶۴/۳	۲/۸	MDL5
۲۰۰	۵/۲۶	۰/۴۸	۱۵	۵۸/۳۳	۲/۹۶	AS2
۱۸۵	۶/۹۳	۰/۸۲	۴۵	۶۴/۳	۲/۸	MDL6
۲۰۰	۵/۲۶	۰/۴۸	۲۵	۵۸/۳۳	۲/۹۶	AS3
۲۰۰	۶/۹۳	۰/۸۲	۵۰	۶۴/۳	۲/۸	MDL7
۲۹۰	۶/۷۶	۱/۱۵	۳۰	۴۰/۲	۲/۸	Sh5
۳۳۵	۳/۹۸	۰/۵۷	۵۵	۷۲/۱۲	۲/۷۳	Trh1
۳۴۰	۵	۱/۱۵	۳۰	۵۷	۲/۸۱	Tsh
۳۸۰	۳/۹۸	۰/۵۷	۵۰	۷۲/۱۲	۲/۷۳	Trh2
۴۰۰	۵/۲۶	۰/۴۸	۴۰	۵۸/۳۳	۲/۹۶	As4
۴۰۰	۵	۰/۴۸	۴۵	۷۰	۲/۸۲	Md
۲۷۰	۶/۶۱	۰/۲۳	۳۵	۷۰/۵۵	۲/۸۱	Tma
۲۶۰	۶/۷۶	۱/۱۵	۳۰	۴۰/۲	۲/۸	Sch1

جدول ۲-۷- پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ برای واحدهای مختلف مسیر تونل (شرکت مهندسی سابیر، ۱۳۸۶)

واحد های زمین شناسی مهندسی مسیر تونل	Q	RQD	مدول الاستیسیته (GPa)	RMR	مقاومت توده سنگ (Mpa)	GSI	m_i	C (MPa)	ϕ (deg)
An	۱/۱۱-۱/۹۴	۴۵	۶/۴-۸/۱	۴۰-۴۵	۲/۹۱۴-۳/۹۱۵	۴۶-۵۰	۲۵	۰/۵۰۶-۰/۵۸۲	۶۰-۶۱
GSch1	۰/۲۱-۳/۳۹	۳۰	۳-۸	۳۰-۵۵	۰/۷-۳/۲۱۶	۳۵-۶۰	۱۲	۰/۲۷-۰/۵۵	۴۶-۵۳
GSch2	۰/۰۶۹-۰/۳۶	۲۵	۱/۵-۳/۲	۲۰-۳۵	۰/۳۵۸-۳/۲۱۶	۲۵-۴۰	۱۲	۰/۲۴-۰/۳۴	۴۱-۴۶/۴
all	-	۱۰	۰/۲-۰/۵	بسیار پایین	۰/۰۳-۰/۰۶	۱۰	۶	۰/۰۶	۲۸-۳۵
GSch3	۰/۱۲۱-۰/۳۶۷	۳۰	۱/۸۷-۳/۳۲	۲۵-۳۵	۰/۶۸۸-۱/۱۵۷	۳۰-۴۰	۱۲	۰/۳۵۷-۰/۴۴۷	۴۱/۵۷-۴۴
all	-	۱۰	۰/۲-۰/۵	بسیار پایین	۰/۰۳-۰/۰۶	۱۰	۶	۰/۰۶	۲۸-۳۵
GSch4	۰/۲۹۴-۰/۸	۴۰	۳/۷۷-۶/۷	۳۳-۴۲	۱/۴۸۸-۲/۷۱	۴۰-۵۰	۱۲	۰/۴۹۶-۰/۶۳۶	۴۶/۷۷-۴۹/۵۵
GSch5	۰/۱۲۱-۰/۳۶۷	۳۰	۱/۸۷-۳/۳۲	۲۵-۳۵	۰/۶۸۸-۱/۱۵۷	۳۰-۴۰	۱۲	۰/۳۵۷-۰/۴۴۷	۴۱/۵۷-۴۴
GSch4	۰/۲۹۴-۰/۸	۴۰	۳/۷۷-۶/۷	۳۳-۴۲	۱/۴۸۸-۲/۷۱	۴۰-۵۰	۱۲	۰/۴۹۶-۰/۶۳۶	۴۶/۷۷-۴۹/۵۵
MQ	۰/۸۹۸-۳/۷۹۳	۵۵	۶/۷-۱۴/۱	۴۳-۵۶	۲/۷۱-۶/۳۸۹	۵۰-۶۵	۱۲	۰/۶۳۶-۱/۰۵۳	۴۹/۵۵-۵۲/۸

۴۶/۷۱-۴۹/۲۵	۱/۷۱۲-۳/۲۵۵	۹	۶۰-۷۵	۸/۱۳۳-۱۸/۹	۵۵-۶۵	۱۵/۵-۲۳/۷	۹۵	۳/۳۹۸-۱۰/۳۱۲	ML
۴۱-۴۶/۴	۰/۲۴-۰/۳۴	۱۲	۲۵-۴۰	۰/۳۵۸-۳/۲۱۶	۲۰-۳۵	۱/۵-۳/۲	۳۰	۰/۰۶۹-۰/۳۶	GSch6
۲۶/۶۲-۳۱/۳۳	۰/۲۷۳-۰/۴۰۵	۱۲	۱۰-۲۰	۰/۰۸۶-۰/۲۳۹	بسیار پایین	۰/۵۵-۰/۹۷	۱۵	۰/۰۱-۰/۰۴	GSch7
۴۹/۵۵-۵۲/۸	۰/۶۳۶-۱/۰۵۳	۱۲	۵۰-۶۵	۲/۷۱-۶/۳۸۹	۴۳-۵۶	۶/۷-۱۴/۱	۵۵	۰/۸۹۸-۳/۷۹۳	GSch8
۲۹/۶۷-۳۲	۰/۳۷-۰/۴۴	۶	۴۰-۴۸	۰/۵۷-۰/۹۲	۳۰-۴۰	۲/۳۳-۳/۷	۴۰	۰/۲۷-۱/۷۶	Sh3
۳۵-۴۰	۰/۰۵-۰/۰۷	۱۲	۱۰-۲۰	۰/۰۳-۰/۱۲	بسیار پایین	۰/۷-۱	۱۰	۰/۰۱۲۵-۰/۰۵	QLa
۲۹/۶۷-۳۲	۰/۳۷-۰/۴۴	۶	۴۰-۴۸	۰/۵۷-۰/۹۲	۳۰-۴۰	۲/۳۳-۳/۷	۴۰	۰/۲۷-۱/۷۶	Shc
۲۸-۳۰	۰/۳۲-۰/۳۷	۶	۳۳-۴۰	۰/۳۶-۰/۵۷	۲۵-۳۵	۱/۲۵-۱/۷۵	۲۵	۰/۲-۱	Sh3
۳۹-۴۱	۰/۴	۹	۳۰-۴۰	۰/۸۵-۲/۱	۳۵-۴۲	۳-۳/۳	۵۵	۰/۹-۶/۷	MDL4
۳۵-۴۰	۰/۲۵-۰/۳۵	۱۲	۳۰-۳۵	۰/۶-۱/۴۴	۳۰-۴۵	۲/۵-۳	۷۰	۰/۵۲-۴/۶۲	AS1
۳۹-۴۱	۰/۴	۹	۳۰-۴۰	۰/۸۵-۲/۱	۳۵-۴۲	۳-۳/۳	۵۵	۰/۹-۶/۷	MDL5
۳۵-۴۰	۰/۲۵-۰/۳۵	۱۲	۳۰-۳۵	۰/۶-۱/۴۴	۳۰-۴۵	۲/۵-۳	۷۰	۰/۵۲-۴/۶۲	AS2
۴۱-۴۳	۰/۴۵	۹	۴۰-۵۰	۱/۸۲-۴/۱	۴۵-۵۵	۵/۵-۵/۸	۸۵	۱/۵۶-۵	MDL6
۳۵-۴۰	۰/۲۵-۰/۳۵	۱۲	۳۰-۳۵	۰/۶-۱/۴۴	۳۰-۴۵	۲/۵-۳	۷۰	۰/۵۲-۴/۶۲	AS3
۴۱-۴۳	۰/۴۵	۹	۴۰-۵۰	۱/۸۲-۴/۱	۴۵-۵۵	۵/۵-۵/۸	۸۵	۱/۵۶-۵	MDL7
۲۸-۳۰	۰/۲-۰/۳	۷	۳۰-۳۵	۰/۵۱-۰/۹۷	۳۳-۴۵	۲-۲/۴	۵۰	۰/۱۹-۱/۸۱۵	Sh5
۴۰-۴۵	۰/۴-۰/۵	۱۸	۴۵-۵۰	۲/۸۵-۴/۵	۳۵-۴۵	۵/۵-۶	۷۵	۳/۱۲۵-۱۲/۳۷۵	Trh1
۲۸-۳۰	۰/۲-۰/۳	۱۲	۳۰-۳۵	۰/۷-۱/۴۴	۳۰-۴۵	۲/۵-۳	۶۰	۳/۵-۱۲	Tsh
۴۰-۴۵	۰/۴-۰/۵	۱۸	۴۵-۵۰	۲/۸۵-۴/۵	۳۵-۴۵	۵/۵-۶	۷۵	۳/۱۲۵-۱۲/۳۷۵	Trh2
۳۵-۴۰	۰/۲۵-۰/۳۵	۱۲	۳۰-۳۵	۰/۶-۱/۴۴	۳۰-۴۵	۲/۵-۳	۷۰	۰/۵۲-۴/۶۲	As4
۲۸-۳۰	۰/۲-۰/۳	۱۸	۳۰-۳۵	۱/۱-۱/۸	۴۰-۵۰	۲/۵-۳/۶	۸۰	۳/۴-۱۲/۴	Md
۴۰-۴۳	۰/۵-۰/۶	۱۱	۵۰-۶۰	۳/۷-۷/۹	۴۰-۶۰	۶-۸	۸۵	۶/۶-۵۹/۴	Tma
۲۸-۳۰	۰/۲-۰/۳	۷	۳۰-۳۵	۰/۵۱-۰/۹۷	۳۳-۴۵	۲-۲/۴	۵۵	۰/۱۹-۱/۸۱۵	Sch1

۲-۸- جمع بندی

منطقه مسیر تونل که در زون دگرگونی سنندج - سیرجان قرار می گیرد تنوع قابل توجهی از دیدگاه شرایط سنگ شناسی دگرگونی داشته و انواع سنگ های با ویژگی های مهندسی گوناگون چون آهک ها و دولومیت های دگرگون شده، اسلیت، شلیست، متاولکانیک و غیره در مسیر تونل مشاهده می شود. این وضعیت در کنار فروافتادگی های زمین ساختی پر شده از آبرفت ریزدانه اشباع که به خصوص در قسمت های ابتدایی قطعه ۱، محور تونل را قطع می کند شرایط پیچیده تری را به وجود آورده است.

سطح آب زیرزمینی در منطقه که عموماً از شرایط توپوگرافی سطحی پیروی می کند بر حسب مورد در اعماق ۱۵ تا ۳۰ متر واقع شده است و در نتیجه خط پروژه به طور کلی در زیر سطح آب زیرزمینی قرار خواهد

داشت. این شرایط از دیدگاه‌های گوناگون و با توجه به شرایط زمین‌شناسی ریسک‌های گوناگون را به وجود می‌آورد که مشکلاتی را در مناطق آبرفتی و در مناطق سنگ‌های سخت درزه‌دار ایجاد خواهد کرد. سنگ‌های نرم و هوازده مسیر نیز اگرچه از دیدگاه استهلاک کم ابزار برنده کله حفار سنگ‌های مناسبی هستند ولی امکان ریزش توده‌های سنگ بر روی سپر^۳ دستگاه TBM وجود خواهد داشت و یا امکان پدیده مچاله شوندگی^۴ در این سنگ‌ها در شرایط وجود روباره بالا افزایش خواهد یافت. در این مناطق اگرچه ماده سنگ نفوذپذیری بسیار پایین دارد ولی در شرایط خردشدگی می‌تواند جبهه کار را به مقدار زیادی با هجوم آب مواجه کند. سنگ‌های سخت مسیر نیز که عمدتاً شامل آهک‌ها و دولومیت‌های دگرگونی و بعضاً سنگ‌های کوارتزیتی می‌باشند از دیدگاه پایداری و مقاومت، سنگ‌های مناسبی می‌باشند ولی از دیدگاه دیگر این سنگ‌ها نیز مشکلات خاص خود را خواهند داشت با این توضیح که از یک سو استهلاک دیسک‌های حفاری و قسمت حلزونی^۵ دستگاه TBM را افزایش خواهند داد و از سوی دیگر در صورت برخورد با سیستم‌های درزه اصلی در این سنگ‌های کربناته، احتمال برخورد با آب فراوان و با فشار بالا وجود خواهد داشت (شرکت مهندسی سابیر، ۱۳۸۵).

۳-۱- مقدمه

در طول چند دهه گذشته تکنولوژی ماشین‌های حفر تمام مقطع تونل^۶ (TBM) توسعه زیادی پیدا کرده است. این ماشین‌ها اکنون به مرحله‌ای رسیده‌اند که می‌توانند در هر نوع سنگ یا خاکی حفر کنند ولی به هر حال حفر با ماشین پرخطر بوده زیرا همیشه امکان روبروشدن با زمینی که ماشین توانایی حفر در آن را ندارد، وجود دارد. نرخ پیشروی با TBM می‌تواند از ۱۵ متر در سال تا ۱۵ کیلومتر در سال متغیر باشد. وقتی

^۳ Shield

^۴ Squeezing

^۵ Screw

^۶ Full Face Tunnel Boring Machine

شرایط زمین خوب باشد TBM می‌تواند ۲ تا ۴ برابر سریع‌تر از آتش‌کاری باشد. به‌عنوان مثال نرخ پیشروی ۲ متر بر ساعت که می‌تواند تا ۰/۰۵ متر بر ساعت در همان پروژه کاهش یابد (Barton et al, 2000). برای طراحی TBM و پیش‌بینی عملکرد آن در ابتدا باید اصول حفاری توسط ابزار برنده بررسی شود. بنابراین در این فصل بعد از شرح مفاهیم اساسی در پیش‌بینی عملکرد TBM به تحلیل مکانیسم برش سنگ توسط برش‌دهنده‌های دیسکی پرداخته شده است و سپس روش‌های مختلف برای پیش‌بینی عملکرد TBM مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۲- مفاهیم اساسی در پیش‌بینی عملکرد TBM

پارامترهای پیش‌بینی عملکرد TBM شامل نرخ نفوذ^۷، ضریب بهره‌وری^۸ و نرخ پیشروی^۹ می‌باشد که در ادامه توضیح داده می‌شود.

۳-۲-۱- نرخ نفوذ

نرخ نفوذ، نرخ پیشروی آنی ماشین است و از هندسه تونل، ویژگی‌های سنگ و پارامترهای ماشین تأثیر می‌پذیرد (Barton et al, 2000).

۳-۲-۲- ضریب بهره‌وری

^۷ Penetration Rate

^۸ Performance Factor

^۹ Advance Rate

نسبت زمان حفر ماشین به کل زمان پروژه یا عملیات روزانه را ضریب بهره‌وری می‌گویند. ضریب بهره‌وری، زمان تکمیل پروژه و به تبع آن هزینه را تحت تأثیر قرار می‌دهد، لذا نقش اساسی در انتخاب شدن یا نشدن حفر مکانیزه به‌عنوان روش حفر بازی می‌کند.

ضریب بهره‌وری به هندسه تونل (قطر تونل، شیب، قوس‌ها)، مدیریت و نگهداری ماشین و ظرفیت سیستم پشتیبانی بستگی دارد. مقادیر پایین بهره‌وری در اثر حفاری در شیب، قوس‌ها و شرایط نامساعد زمین، مدیریت ضعیف و خرابی متعدد ماشین حاصل می‌شوند. از طرف دیگر مقادیر بالای بهره‌وری در تونل‌های نسبتاً مستقیم و دارای شیب کم که با مدیریت، تعمیرات و شرایط مساعد زمین همراه می‌شود به‌دست می‌آید. مواردی که موجب تأخیر در روند حفاری می‌شوند عبارتند از: زمان تعویض برش‌دهنده، تعمیرات زمان‌بندی شده و نشده، جلو راندن ماشین، توقف عملیات به‌خاطر نصب نگهداری یا مشکلات ترابری، قطع برق، تعویض شیفت و زمان نهار، تأخیرهای ناشی از کارگران و مسائل متفرقه. تمام این پارامترها برای تعیین واقعی بهره‌وری باید منظور شوند (Bruland, 1998).

۳-۲-۳- نرخ پیشروی

نرخ پیشروی ماشین از دو پارامتر عمده حفر و نگهداری تأثیر می‌پذیرد. گاهی اوقات هنگام نصب پوشش، امکان حفر وجود ندارد (مثلاً TBM‌های سپردار) یا وجود مناطق برشی که حفر درون آنها بدون تحکیم، امکان گیر افتادن ماشین را زیاد می‌کند و این عوامل باعث کاهش ضریب بهره‌وری می‌شود. نرخ پیشروی به‌صورت زیر تخمین زده می‌شود (Barton et al, 2000).

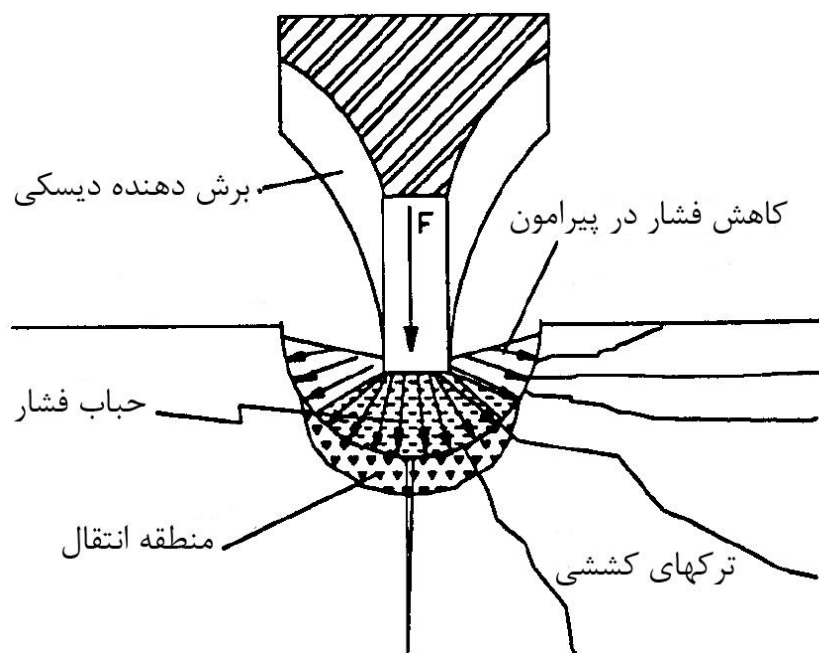
نرخ نفوذ $\times$ ضریب بهره‌وری = نرخ پیشروی

۳-۳- تحلیل مکانیسم برش سنگ توسط برش‌دهنده‌های دیسکی

تاکنون مطالعات زیادی برای توضیح اندرکنش سنگ و ابزار برش انجام شده است. در مطالعات اولیه مشخص شد که هندسه برش‌دهنده‌ها تأثیر زیادی روی نیروهای اعمال شده بر آنها دارد. در

برش‌دهنده‌های دیسکی نیروی وارد بر برش‌دهنده‌ها با افزایش فاصله و عمق نفوذ آن‌ها افزایش می‌یابد. به‌علاوه یک فاصله‌داری بهینه برای یک نرخ نفوذ وجود دارد که در آن انرژی ویژه^{۱۰} کمینه خواهد بود. انرژی ویژه به‌صورت مقدار انرژی لازم برای حفاری یک متر مکعب سنگ تعریف می‌شود. ترک‌های شعاعی و برخی از مشاهدات، مکانیسم شکست را کششی و وجود نیروهای برشی و رخساره‌های برشی در تراشه‌های شکل گرفته، مکانیسم شکست را برشی نشان می‌دهد (Rostami et al,1993).

مطالعاتی که توسط تمامی پژوهشگران صورت گرفته نشان می‌دهد یک منطقه خرد شده^{۱۱} که آن را حباب فشار^{۱۲} می‌گویند، در زیر برش‌دهنده‌های دیسکی هنگامی که در سنگ نفوذ می‌کنند، ایجاد می‌شود. این منطقه واسطه انتقال تنش به محیط سنگ است (شکل ۳-۱) (Rostami et al,1993).



شکل ۳-۱- منطقه خرد شده یا حباب فشار زیر برش‌دهنده‌های دیسکی (Rostami et al,1993)

منطقه خرد شده یا حباب فشار شامل ذرات ریز خرد شده سنگ است که تحت تمرکز شدید تنش در منطقه‌ای بلافاصله زیر برش‌دهنده به‌وجود می‌آیند. ابعاد ذرات از مرکز به طرف سنگ پیرامون که حباب

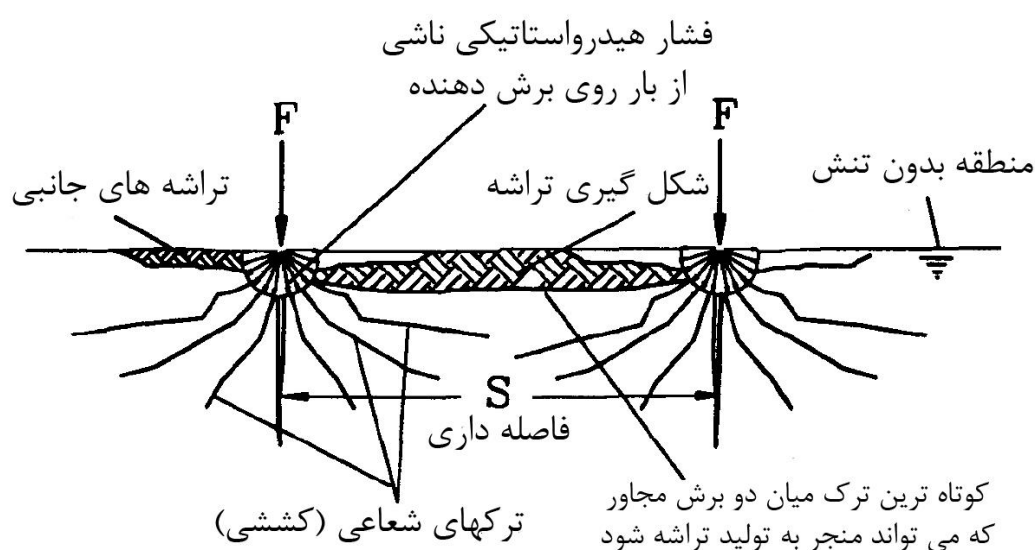
¹⁰ Specific Energy

¹¹ Crushed Zone

¹² Pressure Core

فشار را در برگرفته است، بزرگ‌تر می‌شود. نحوه افزایش ابعاد ذرات سنگ تابعی از هندسه برش‌دهنده و خواص سنگ می‌باشد (Rostami et al,1993).

وقتی یک یا چند ترک دو برش مجاور به هم‌دیگر می‌رسند یا یک سطح آزاد را قطع می‌کنند، می‌گویند تراشه ایجاد می‌شود. طول ترک‌ها تابعی از فشار در منطقه خرد شده و فشار در این منطقه تابعی از نیروی عمود وارد بر برش‌دهنده است (شکل ۳-۲) (Rostami et al,1993).

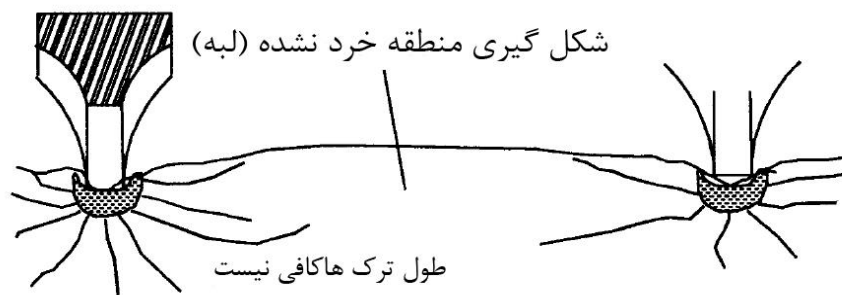


شکل ۳-۲- نحوه تولید تراشه ها و توزیع فشار در منطقه خرد شده (Rostami et al,1993)

ترک‌های شعاعی (کششی) با القا تنش از منطقه حباب فشار ایجاد می‌شوند. این ترک‌ها ناپیوستگی‌های مشخصی هستند که در اطراف حباب فشار قرار دارند. لذا ترک‌های کششی و گسترش آن‌ها می‌تواند به‌عنوان اصلی‌ترین عامل در ایجاد تراشه‌ها و حالت شکست غالب منظور شود. قابل توجه است که ترک‌هایی که اطراف حباب فشار قرار گرفته‌اند، مخصوصاً آن‌هایی که به سطح آزاد می‌رسند، تحت تأثیر نیروی برشی قابل توجهی قرار دارند. لذا در نظر گرفتن یک مکانیسم شکست مرکب به واقعیت نزدیک‌تر است.

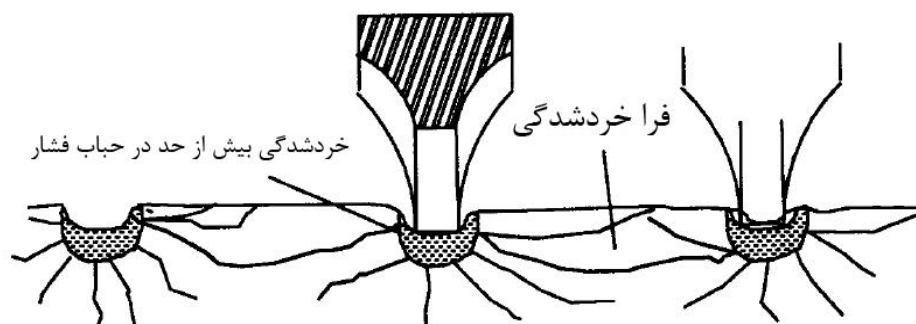
اندرکنش میان دو برش بستگی به فاصله‌داری برش‌دهنده‌ها و زاویه و طول ترک‌ها، میان دو برش مجاور دارد. بر اساس اصول شکست، ترک‌ها می‌توانند در هر جهتی گسترش پیدا کنند. این بدین معنی است که

تراشه‌ها می‌توانند در هر جهتی ایجاد شوند. با این فرض فرا خردشدگی^{۱۳} و ایجاد لبه^{۱۴} (سنگ خرد نشده) میان دو برش‌دهنده قابل توضیح است. در ارتباط با ایجاد لبه، ترک‌ها به سمت رخساره برش گسترش پیدا کرده و به سطح آزاد می‌رسند و تراشه‌های کوچک مثلثی شکل می‌گیرد. این موضوع باعث افت فشار در منطقه خرد شده می‌شود و از گسترش ترک‌ها برای رسیدن به ترک‌های برش مجاور جلوگیری می‌کند و منطقه میان دو برش تقریباً دست نخورده باقی می‌ماند (شکل ۳-۳) (Rostami et al, 1993).



شکل ۳-۳- فاصله‌داری زیاد برش‌دهنده‌ها و باقی ماندن سنگ خرد نشده بین دو برش‌دهنده (Rostami et al, 1993)

این فرآیند می‌تواند با افزایش متوالی نیروی وارد بر برش‌دهنده‌ها ادامه پیدا کند تا وقتی که دو ترک به هم رسیده و تراشه ایجاد شود. اگر نیروی اعمال شده خیلی زیاد باشد ترک‌هایی با طول بزرگ‌تر ایجاد شده و منجر به بروز فرا خرد شدگی می‌شود (شکل ۴-۳) و تراشه‌های ضخیم‌تری پیرامون برش‌دهنده ایجاد می‌شود (Rostami et al, 1993).

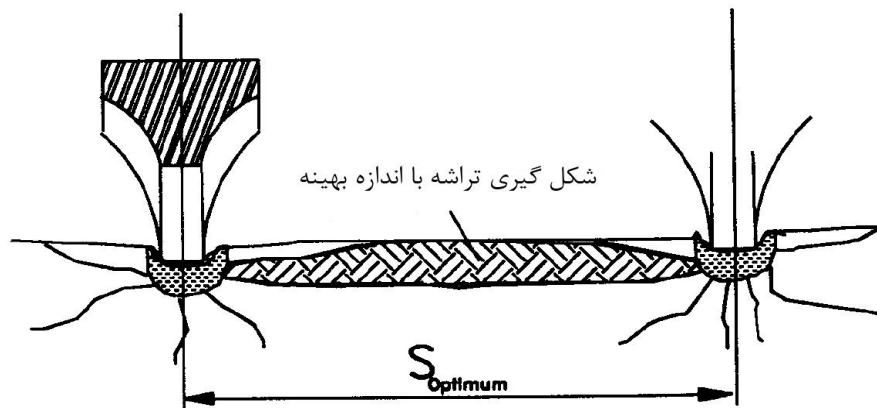


شکل ۴-۳- فاصله‌داری کمتر از حد بهینه بین برش‌دهنده، خردشدگی بیش از حد و بروز

¹³ Over Break

¹⁴ Ridge Forming

وقتی برش‌دهنده‌ها در یک فاصله‌داری بهینه قرار گرفته باشند، ترک‌ها تقریباً در یک مسیر مستقیم که کوتاه‌ترین فاصله میان دو برش‌دهنده و برابر با نصف فاصله‌داری آن‌ها است، گسترش می‌یابند (شکل ۳-۵).



شکل ۳-۵- فاصله‌داری بهینه و خرد شدگی و جهت یافتگی مناسب ترک‌ها (Rostami et al,1993)

۳-۴- معرفی روش‌های پیش‌بینی عملکرد TBM

تا کنون تلاش‌های زیادی به‌منظور گسترش روش‌های پیش‌بینی بهره‌وری و پیش‌بینی دقیق نرخ پیشروی در یک شرایط زمین‌شناسی انجام شده است. در کشورهای مختلف و توسط شرکت‌های مختلف سازنده TBM، دامنه وسیعی از روش‌های پیش‌بینی نرخ نفوذ و ضریب بهره‌وری استفاده می‌شود. اصولاً این روش‌ها بر مبنای تحلیل نظری و داده‌های تجربی بنا نهاده شده‌اند. در حالت کلی می‌توان روش‌های ارائه شده را به دو گروه تقسیم کرد (Rostami et al,1993).

۱- روش‌های کاملاً تجربی

۲- روش‌های تئوری/تجربی

گروه اول بر مبنای داده‌های جمع‌آوری شده از زمین و استفاده از تحلیل رگرسیون میان پارامترهای ماشین، خواص سنگ و نرخ نفوذ حاصل شده‌اند. روش NTH یک نمونه از این روش‌ها است. گروه دیگر بر جزئیات فرآیند برش در سنگ، تحلیل نظری فرآیند شکست سنگ با ابزار مکانیکی و نیروهای وارد بر هر برش‌دهنده

به منظور دستیابی به یک نرخ نفوذ مشخص متمرکز شده‌اند. روش CSM در این گروه قرار می‌گیرد. این روش‌ها می‌توانند در بهینه‌کردن طرح کله حفار به کار گرفته شوند. نیروهای اعمال شده بر برش‌دهنده که توسط این روش‌ها تعیین می‌شوند، می‌تواند در تخمین نیروی محوری^{۱۵}، گشتاور و توان مورد نیاز نیز استفاده شود (Rostami et al, 1993).

در حالت عمومی روش‌های پیش‌بینی نرخ نفوذ و ضریب بهره‌وری بر مبنای قواعد زیر پایه‌گذاری شده‌اند (Nilsen et al, 1993):

الف- داده‌های حاصل از زمین یا آزمایش

ب- آزمایش‌های کوچک مقیاس

ج- آزمایش‌های بزرگ مقیاس

د- روش‌های تجربی

ه- مدل‌های تئوری

به عنوان مثال روش پیش‌بینی NTH ترکیبی از قواعد الف، ب و د است و روش CSM شامل تمامی قواعد ذکر شده می‌شود (Nilsen et al, 1993).

۳-۴-۱- روش‌های اولیه تجربی برای پیش‌بینی نرخ نفوذ TBM

گراهام^{۱۶} در سال ۱۹۷۶ برای سنگ‌هایی که مقاومت فشاری آنها در دامنه ۲۰۰-۱۴۰ مگاپاسکال می‌باشد، رابطه ۳-۱ را ارائه کرد (Ramezanzadeh et al, 2003).

$$P_{Rev} = 3940 F_n / UCS \quad (۳-۱)$$

که در آن:

^{۱۵} Thrust

^{۱۶} Graham

P_{Rev} : میزان نفوذ کله حفار^{۱۷} به میلی متر وقتی کله حفار یک دور می زند.

F_n : نیروی عمودی اعمال شده بر هر برش دهنده بر حسب KN

UCS : مقاومت فشاری تک محوره بر حسب KPa

رگسبورگ^{۱۸} و فیلیپس^{۱۹} در سال ۱۹۷۵ بر مبنای تحلیل عددی، مدلی را ارائه کردند که قطر برش دهنده های دیسکی و نیروی محوری روی آنها، مقاومت فشاری تک محوره و زاویه لبه دیسکها را منظور می کرد. در این مدل ویژگی های توده سنگ از قبیل ناپیوستگی ها در نظر گرفته نمی شود. ساختار این مدل دقیقاً شبیه مدل گراهام می باشد با این تفاوت که زاویه لبه برنده ها نیز در مدل منظور شده است (Nelson et al, 1983).

ازدمیر^{۲۰} در سال ۱۹۷۸ مدلی را ارائه کرد که بر مبنای آن با توجه به قطر، موقعیت، نفوذ و فاصله داری برش دهنده های دیسکی، مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت برشی و زاویه لبه دیسکها، نیروی نرمال و نیروی غلتشی دیسکها محاسبه می شد. این مدل تأثیر ناپیوستگی ها را منظور نمی کرد (Nelson et al, 1983).

فارمر^{۲۱} و گلو سوپ^{۲۲} در سال ۱۹۸۰ رابطه ۲-۳ را برای سنگ های رسوبی ارائه کردند (Nelson et al, 1983).

$$P_{Rev} = 624 F_n / \sigma_{tB} (2-3)$$

که در آن:

P_{Rev} : میزان نفوذ کله حفار به میلی متر وقتی کله حفار یک دور می زند.

σ_{tB} : مقاومت کششی برزیلی بر حسب KPa

F_n : نیروی محوری اعمال شده بر هر برش دهنده بر حسب کیلونیوتن

^{۱۷} Cutter Head

^{۱۸} Roxborough

^{۱۹} Phillips

^{۲۰} Ozdemir

^{۲۱} Farmer

^{۲۲} Glossop

هاگس^{۲۳} برای معدن کاری در معادن زغال رابطه ۳-۳ را ارائه کرد (Nelson et al,1983).

$$P_{Rev} = 1.667(F_n / UCS)^{1.2} \left(\frac{2}{D}\right)^{0.6} \quad (3-3)$$

که در آن:

P_{Rev} : میزان نفوذ کله حفار به میلی متر وقتی کله حفار یک دور می زند.

D : قطر دیسک بر حسب میلی متر (فرض شده است که تنها یک دیسک در هر شیار وجود داشته باشد).

F_n : نیروی عمودی اعمال شده بر هر برش دهنده بر حسب kN

UCS : مقاومت فشاری تک محوره می باشد.

بامفورد^{۲۴} در سال ۱۹۸۴ یک مدل چند متغیره به صورت رابطه ۳-۴ ارائه کرد که در آن نرخ نفوذ به عنوان تابعی از سختی چکش اشمیت، نیروی محوری ماشین، اندیس نفوذ مخروطی^{۲۵} و زاویه مقاومت برشی بیان شده بود. این مدل تنها بر مبنای داده های حاصل از یک تونل حاصل شده بود لذا تأثیر تغییرات قطر تونل را نمی توانست منظور کند (Ramezanzadeh et al,2003).

$$P = 0.535S - 8.49 - 0.00344T - 0.000823N + 0.00137\phi \quad (4-3)$$

که در آن:

P : نرخ نفوذ بر حسب متر بر ساعت

S : سختی چکش اشمیت

T : نیروی محوری ماشین بر حسب تن

N : شاخص نفوذ مخروطی بر حسب نیوتن بر میلی متر

ϕ : زاویه مقاومت برشی بر حسب درجه

^{۲۳} Hughes

^{۲۴} Bamford

^{۲۵} Cone Indentor Index

بوید^{۲۶} در سال ۱۹۸۶ مدلی متفاوت با مدل‌های اشاره شده ارائه کرد. در مدل فرض شده بود که هر متر مکعب توده سنگ برای خردایش به مقدار انرژی خاصی بر حسب KWh نیاز دارد که به آن انرژی ویژه می‌گویند. اگر سطح مقطع تونل و انرژی ماشین مشخص باشد، نرخ نفوذ به راحتی با دانستن انرژی ویژه سنگ محاسبه می‌شود. این مدل معمولاً برای پیش‌بینی نرخ نفوذ ماشین‌های حفار بازویی استفاده می‌شود. رابطه ارائه شده توسط بوید به صورت معادله ۳-۵ می‌باشد (Ramezanzadeh et al, 2003).

$$P = \frac{W \times \eta}{SE \times A} \quad (۳-۵)$$

که در آن:

P : نرخ نفوذ بر حسب متر بر ساعت

W : توان کله حفار بر حسب کیلووات

η : راندمان مکانیکی

SE : انرژی ویژه^{۲۷} بر حسب کیلووات ساعت بر متر مکعب

A : مقطع تونل بر حسب متر مربع

هاگس^{۲۸} در سال ۱۹۸۶ مدلی شبیه مدل گراهام، که نیروی عمودی وارد بر برش‌دهنده‌های دیسکی، مقاومت فشاری تک محوره، دور، تعداد و شعاع برش‌دهنده‌ها را منظور می‌کرد، ارائه کرد. این مدل تأثیرات ناپیوستگی‌ها را منظور نمی‌کرد (Ramezanzadeh et al, 2003).

مدل ارائه شده توسط هاگس به صورت رابطه ۳-۶ می‌باشد که در لایه‌های زغال معتبر است.

$$P = \frac{6T^{1.2}Nn}{\sigma_c^{1.2}r^{0.6}} \quad (۳-۶)$$

که در آن:

^{۲۶} Boid

^{۲۷} Specefic Energy

^{۲۸} Hughes

P : نرخ نفوذ بر حسب متر بر ساعت

T : نیروی محوری وارد بر هر برش‌دهنده بر حسب کیلونیوتن

N : سرعت چرخش کله حفار بر حسب Rev/s

n : تعداد برش‌دهنده‌های دیسکی در هر شیار

σ_c : مقاومت فشاری تک محوره بر حسب مگاپاسکال

r : شعاع متوسط برش‌دهنده‌های دیسکی بر حسب متر

ایناراتو و همکاران^{۲۹} در سال ۱۹۹۱ مدلی را ارائه کردند که در آن با استفاده از امتیاز ساختاری سنگ^{۳۰} و مقاومت فشاری تک محوره (UCS) به پیش‌بینی نرخ نفوذ^{۳۱} پرداختند (Sapigni et al, 2002).

$$PR = 40.41UCS^{-0.44} + 0.047RSR + 3.15 \quad (۷-۳)$$

رابطه ۷-۳ در سنگ‌های با مقاومت فشاری تک محوره ۵۰-۱۵۰ مگاپاسکال به‌دست آمد.

RSR با RMR با معادله ۸-۳ ارتباط دارد:

$$RSR = 0.77RMR + 12.4 \quad (۸-۳)$$

از آنجایی که روش‌های ذکر شده در بالا بسیاری از پارامترها از جمله تأثیرات ناپیوستگی‌ها را در نظر نمی‌گیرد و بسیاری از این روابط در سنگ‌های به‌خصوص به‌دست آمده است، بنابراین از دقت کافی برخوردار نمی‌باشد. در ادامه روش‌هایی که تقریباً تمامی پارامترهای مؤثر در نرخ نفوذ که شامل ویژگی‌های توده سنگ و مشخصات دستگاه می‌باشد، را در نظر گرفته‌اند معرفی می‌شوند.

۳-۴-۲- پیش‌بینی نرخ نفوذ با استفاده از روش Q_{TBM}

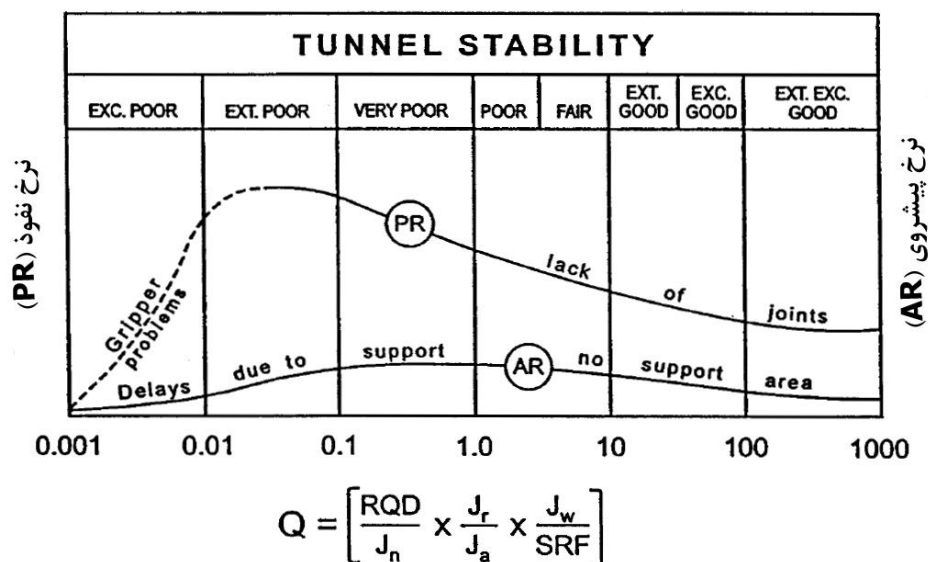
رده بندی Q در سال ۱۹۷۴ بر مبنای تونل‌هایی که توسط آتش‌کاری حفر شده بودند پیشنهاد شد. این رده بندی سنگ‌ها را به شش رده تقسیم می‌کند. مقدار Q از ۰/۰۰۱ در سنگ‌های فشارنده و رس‌ها تا

^{۲۹} Innaurato et al

^{۳۰} Rock Structure Rating

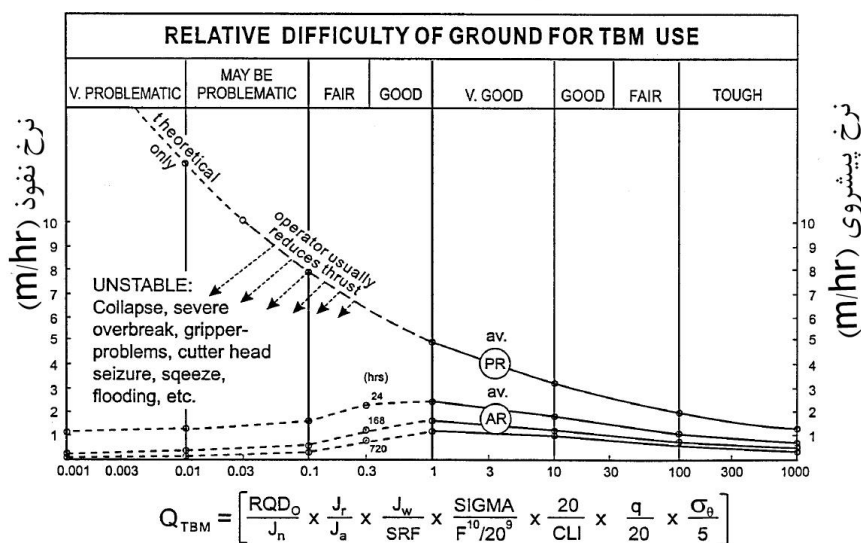
^{۳۱} Penetration Rate

۱۰۰۰ در سنگ‌های سخت بدون درزه متغیر است. هر دو این شرایط برای حفاری مناسب نیستند. متوقف کردن عملیات حفاری، نگهداری و پیش تحکیمی می‌تواند نرخ پیشروی را تا ۰/۲ متر بر ساعت کاهش دهد. مقدار نرخ نفوذ و نرخ پیشروی برای رده‌های مختلف سنگ در قالب یک نمودار در شکل ۳-۶ نشان داده شده است (Barton et al, 2000).



شکل ۳-۶- رابطه میان Q، نرخ پیشروی و نرخ نفوذ (Barton et al, 2000)

رده بندی Q_{TBM} در شکل ۳-۷ نشان داده شده است. صفت‌هایی که در بالای شکل آورده شده است آسان یا مشکل بودن حفاری را نشان می‌دهند.



شکل ۳-۷- رابطه پیشنهادی میان نرخ پیشروی، نرخ نفوذ و Q_{tbn} (Barton et al, 2000)

رابطه کلی روش Q_{TBM} برای پیش‌بینی عملکرد به صورت رابطه ۳-۹ می‌باشد (Barton et al, 2000).

$$Q_{TBM} = \frac{RQD_o}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \times \frac{SIGMA}{F^{10} / 20^9} \times \frac{20}{CLI} \times \frac{q}{20} \times \frac{\sigma_\theta}{5} \quad (۳-۹)$$

که در آن:

RQD, RQD_o ای است که از حفاری در امتداد تونل به دست آمده باشد.

امتیازبندی J_w, J_a, J_r, J_n و SRF تغییر نمی‌کند، فقط J_a, J_r باید به دسته درزه‌هایی نسبت داده می‌شود که در عمل حفاری تونل بیشترین مشارکت را دارند.

F : نیروی متوسط اعمال شده بر برش‌دهنده در یک منطقه به تن نیرو

q : محتوی کوارتز به درصد

σ_θ : تنش در جبهه کار حفاری تونل به MPa

CLI : شاخص عمر برنده

$SIGMA$: مقاومت توده سنگ

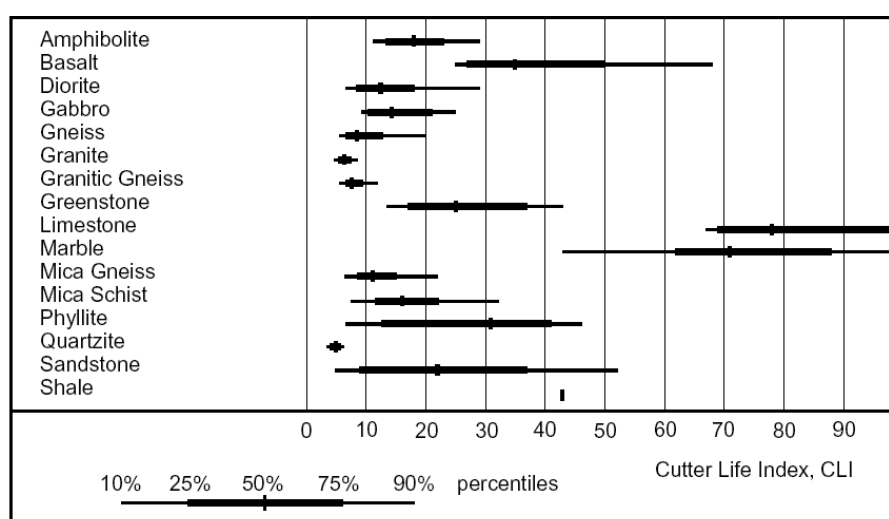
مقاومت توده سنگ از روی مقدار کیفیت توده سنگ (Q) و چگالی سنگ (γ)، طبق رابطه‌های ۳-۱۰ و ۳-۱۱ تخمین زده می‌شود. در واقع هنگامی که زاویه بین سطوح ناپیوستگی با سطح سینه کار بزرگ‌تر از 45° می‌باشد ($\beta > 45^\circ$)، شکستگی که در سنگ در اثر تیغه‌های TBM ایجاد می‌شود را می‌توان توسط $SIGMA_{cm}$ نشان داد و گسیختگی سنگ عمدتاً تحت فشار رخ می‌دهد و در حالی که زاویه بین سطوح ناپیوستگی با سطح سینه کار کوچک‌تر از 45° باشد ($\beta < 45^\circ$)، گسیختگی غالب و برجسته از نوع کششی خواهد بود و شکستگی که در سنگ در اثر تیغه‌های TBM ایجاد می‌شود را می‌توان توسط $SIGMA_{tm}$ نشان داد (Barton et al, 2000).

$$SIGMA = SIGMA_{cm} = 5 \cdot \gamma \cdot Q_c^{\frac{1}{3}} \quad (۱۰-۳)$$

$$SIGMA = SIGMA_{tm} = 5 \cdot \gamma \cdot Q_t^{\frac{1}{3}} \quad (۱۱-۳)$$

که در آن‌ها $Q_c = Q(\frac{\sigma_c}{100})$ و $Q_t = Q(\frac{I_{50}}{4})$: اندیس بار نقطه‌ای^{۳۲} بر حسب مگاپاسکال می‌باشد.

مقدار پارامتر CLI از طریق شکل ۸-۳ قابل تخمین می‌باشد.



شکل ۸-۳- CLI ثبت شده برای سنگ‌های مختلف (Bruland, 1998)

۳-۴-۲-۱- رابطه میان نرخ نفوذ و نرخ پیشروی با Q_{TBM}

رابطه‌ای که میان نرخ نفوذ و Q_{TBM} بر اساس آزمون و خطا به دست آمده است به فرم رابطه ۳-۱۲ می‌باشد (Barton et al, 2000).

(۳-۱۲)

$$PR \approx 5(Q_{TBM})^{-0.2}$$

^{۳۲} Point Load Index

رابطه‌ای که بر مبنای تحلیل میان نرخ نفوذ و نرخ پیشروی به‌دست آمده به‌صورت رابطه ۳-۱۳ می‌باشد (Barton et al, 2000).

$$AR = PR.T^m \quad (۳-۱۳)$$

با استفاده از معادله ۳-۱۳ نرخ پیشروی به‌صورت رابطه ۳-۱۴ محاسبه می‌شود.

$$AR \approx 5(Q_{TBM})^{-0.2}.T^m \quad (۳-۱۴)$$

که در آن T زمان و واحد آن ساعت است.

m ضریبی است که به صورت منفی در فرمول وارد می‌شود و مقدار m با استفاده از رابطه ۳-۱۵ به‌دست می‌آید.

$$m = m_1 \left(\frac{D}{5} \right)^{0.2} \left(\frac{20}{CLI} \right)^{0.15} \left(\frac{q}{20} \right)^{0.1} \left(\frac{n}{2} \right)^{0.05} \quad (۳-۱۵)$$

D : قطر تونل (m)

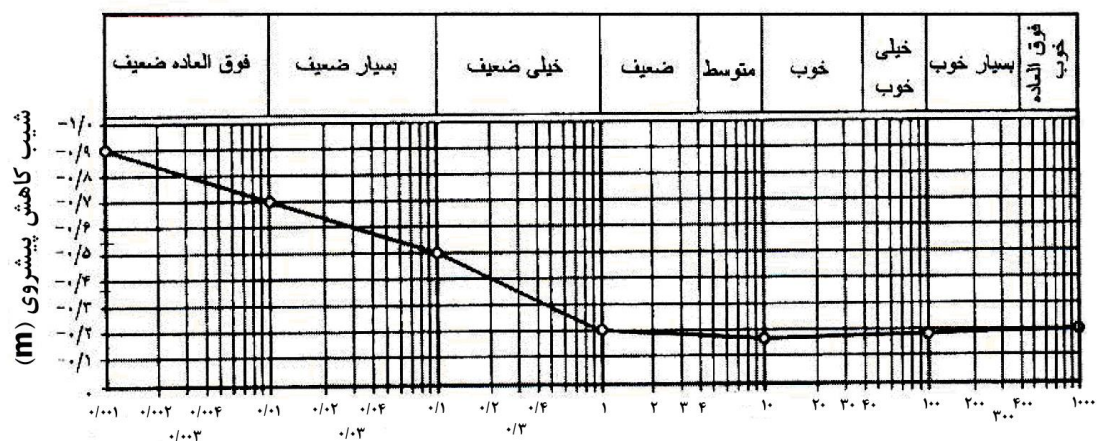
CLI : شاخص عمر برنده

q : درصد کوارتز

n : درصد تخلخل

m_1 : گرادیان منفی که مقدار آن را می‌توان با توجه به شکل ۳-۹ به‌دست آورد.

اگر مقدار n و q صفر باشند مقدار آن‌ها ۰/۵ لحاظ می‌شود (Barton et al, 2000).



$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \times \left(\frac{J_r}{J_d} \right) \times \left(\frac{J_w}{SRF} \right)$$

شکل ۳-۹- برآورد اولیه شیب کاهش سرعت پیشروی (m_1) (-) به عنوان تابعی از مقدار Q (Barton et al, 2000)

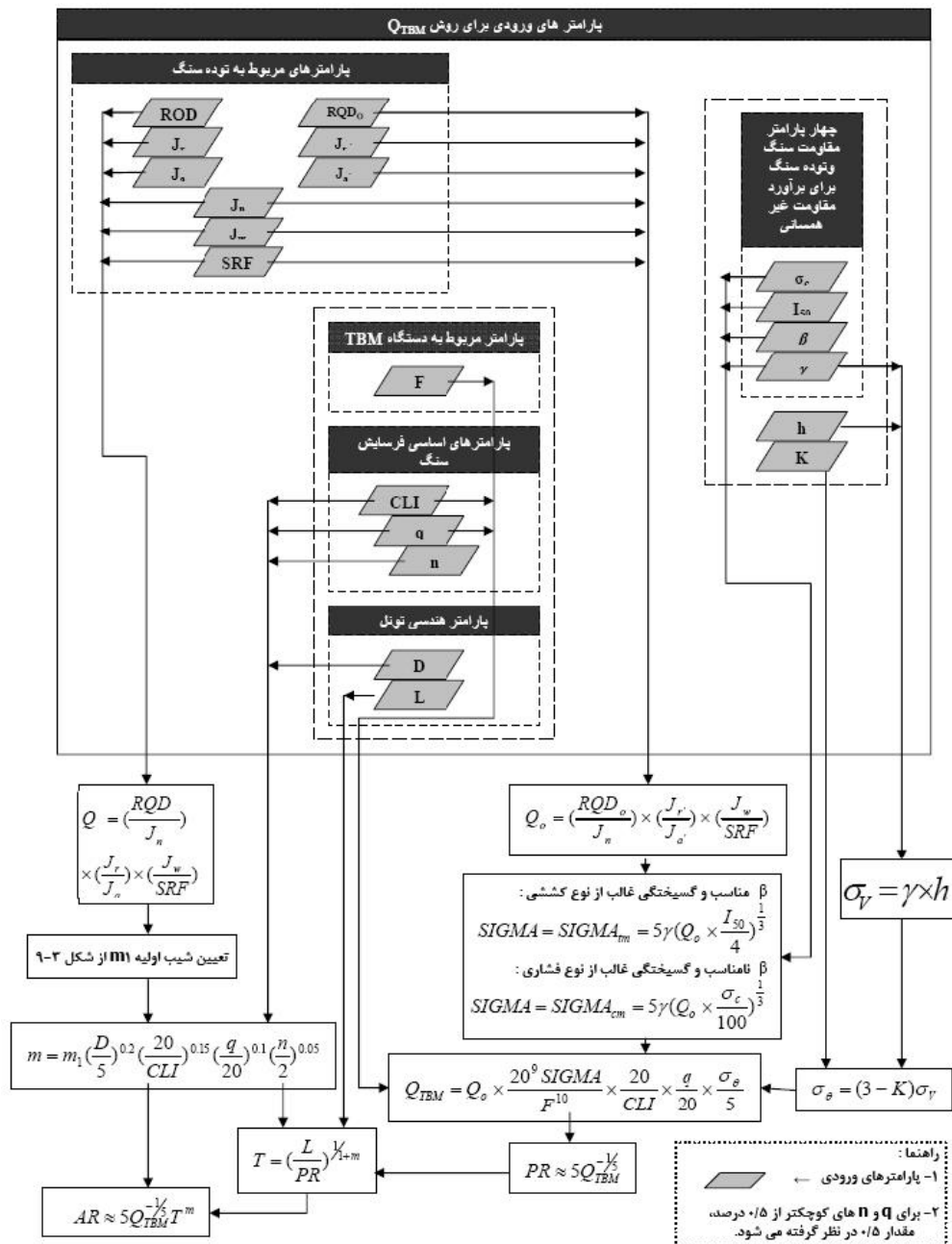
۳-۴-۲- تخمین زمان اتمام تونل

زمان لازم (T) برای حفاری تونلی به طول L با نرخ پیشروی AR برابر L/AR خواهد بود بنابراین خواهیم

داشت (Barton et al, 2000):

$$T = \left(\frac{L}{PR} \right)^{\frac{1}{1+m}} \quad (3-16)$$

فلوچارت کلی روش Q_{TBM} در شکل ۳-۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۰- فلوجارت کلی روش Q_{TBM} (علی تبریزی، ۱۳۸۵)

۳-۴-۳- پیش بینی نرخ نفوذ TBM بر مبنای روش NTH

مدل پیش بینی NTH بر اساس مطالعات کاری و مطالعات آماری از ۳۳ سایت با ۲۳۰ کیلومتر تونل که در کشور نروژ و کشورهای دیگر حفر شده بودند ارائه شده است. داده ها به دقت جمع آوری شده اند و نتایج ارائه شده به عنوان نماینده ای برای تونل سازی سازمان یافته خوب توجه می شود. این مدل امروزه به عنوان یک ابزار کاربردی و مفید برای پیش بینی زمان مصرف شده و هزینه های مصرفی برای TBM ها مورد توجه قرار گرفته است (Bruland, 1998).

این روش بر اساس یک رابطه تجربی میان پارامترهای مکانیکی و زمین‌شناسی سنگ و بهره‌وری ماشین در زمین پایه گذاری شده است. مهم‌ترین مزیت این روش منظور کردن تأثیرات شرایط زمین و خواص سنگ با همه پیچیدگی‌های آن، به‌صورت طبیعی می‌باشد. این بدین معنی است که شرایط زمین، ویژگی‌های سنگ، پارامترهای ماشین و محدودیت‌های عملی همه لحاظ می‌شوند (Bruland,1998). جدول ۱-۳ پارامترهای ورودی و روش NTH را نشان داده است (Rostami et al,1996).

جدول ۱-۳ پارامترهای ورودی مدل NTH (Rostami et al,1996)

پارامترهای ماشین	ویژگی‌های توده سنگ
نیروی محوری روی برش‌دهنده	درزه‌ها، شکستگی‌ها و غیره
RPM سرعت چرخش کله حفار	شاخص نرخ حفاری DRI
فاصله‌داری برش‌دهنده‌ها و توان ماشین	شاخص عمر برش‌دهنده CLI

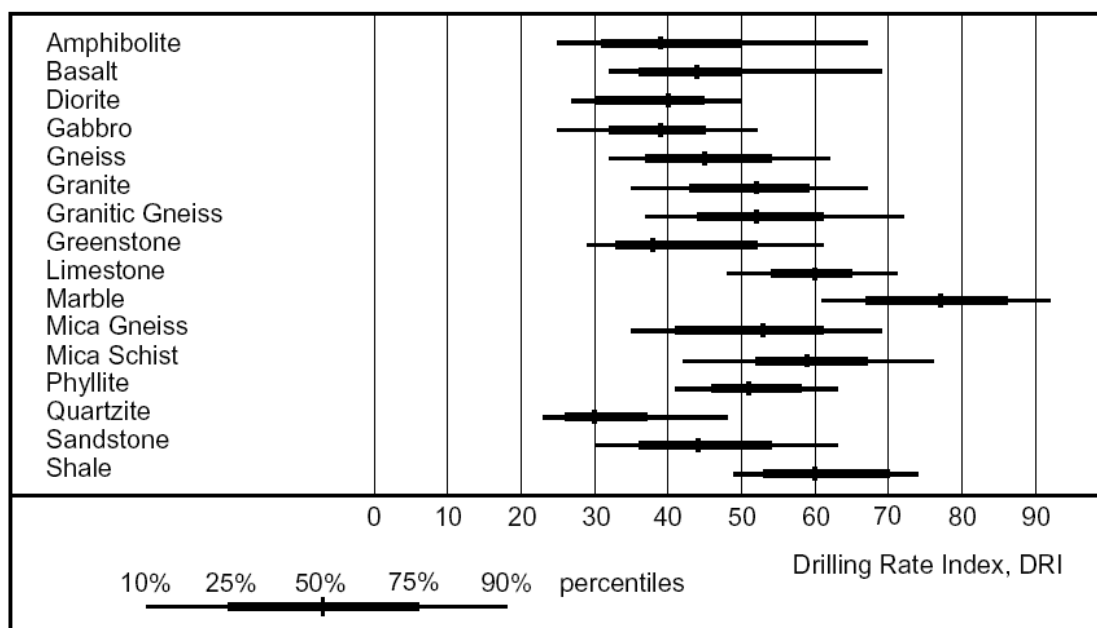
۳-۴-۱-۳-۱- مشخصات توده سنگ

۳-۴-۱-۳-۱- شاخص نرخ حفاری^{۳۳}

یکی از پارامترهای بسیار مهمی که در مدل NTH برای پیش‌بینی عملکرد TBM استفاده می‌شود، شاخص نرخ حفاری (DRI) می‌باشد. این شاخص به نوعی بیان‌گر میزان سختی در حفاری می‌باشد، لذا DRI پائین مربوط به مقاومت فشاری بیشتر خواهد بود.

شاخص‌های نرخ حفاری ثبت شده برای تعدادی سنگ در شکل ۱۱-۳ نشان داده شده است.

^{۳۳} Drilling Rate Index



شکل ۳-۱۱ - DRI ثبت شده برای انواع مختلف سنگ (Bruland, 1998)

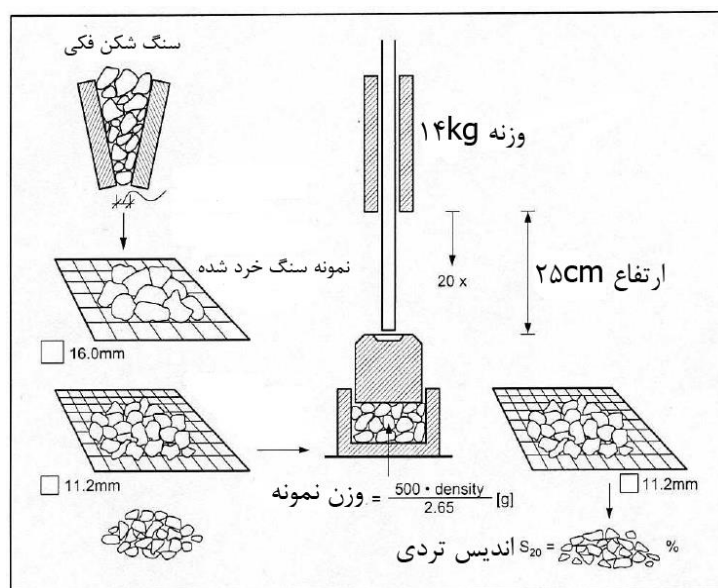
علاوه بر شکل ۳-۱۱ روش آزمایشگاهی نیز برای تعیین DRI دقیق تر موجود می باشد.

آزمایش های مورد نیاز برای تعیین DRI عبارتند از:

الف: آزمون تعیین تردی^{۳۴}

این آزمون اصولاً یک آزمون ضربه است. برای آزمایش ابتدا نمونه سنگ در یک سنگ شکن تا ابعاد ۱۶-۱۱/۲ میلی متر خرد می شود. سپس ۱۸۹ سانتی متر مکعب از سنگ های خرد شده (برای چگالی ۲/۶۵ حدود ۵۰۰ گرم می شود) را در ظرفی که برای این آزمایش طراحی شده است می ریزند (شکل ۳-۱۲). سپس وزنه ۱۴ کیلوگرمی ۲۰ مرتبه از ارتفاع ۲۵ سانتی متری روی نمونه مورد آزمایش رها می شود. نمونه خرد شده از سرند ۱۱/۲ میلی متری عبور داده می شود. شاخص تردی معادل درصد سنگی است که از این سرند عبور می کند که با S₂₀ نمایش داده می شود (Nilsen et al, 1993).

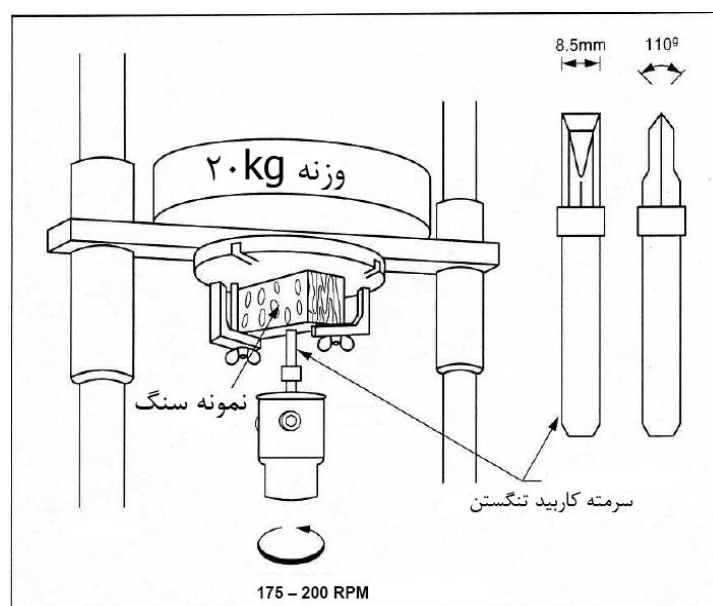
^{۳۴} Brittleness



شکل ۳-۱۲- آزمون تردی (Nilsen et al, 1993)

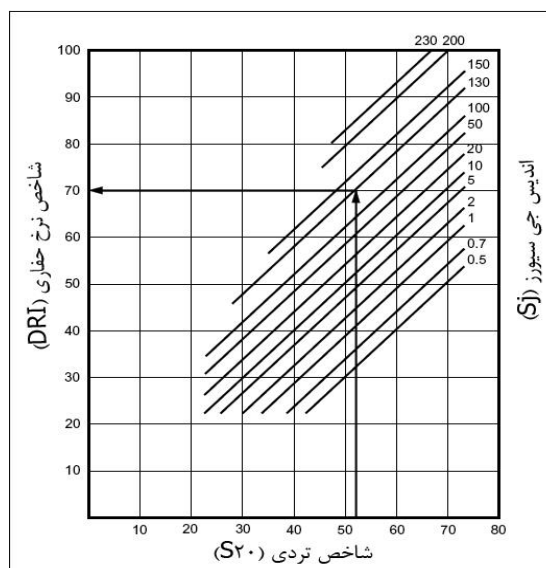
ب: آزمایش اندیس جی سیورز^{۳۵}

این آزمون یک حفاری کوچک مقیاس است (شکل ۳-۱۳). عرض لبه سرشته استفاده شده در حفاری ۸/۵ میلی‌متر و زاویه گوه آن ۱۱۰ گراد می‌باشد. نیروی قائم وارد بر سرشته ۲۰ کیلوگرم نیرو است و نفوذ سرشته بر حسب دهم میلی‌متر بعد از ۲۰۰ دور چرخش اندیس جی سیورز نام دارد که این اندیس را با S_r نمایش می‌دهند (Bruland, 1998).



شکل ۳-۱۳- اندیس جی سیورز (Nilsen et al, 1993)

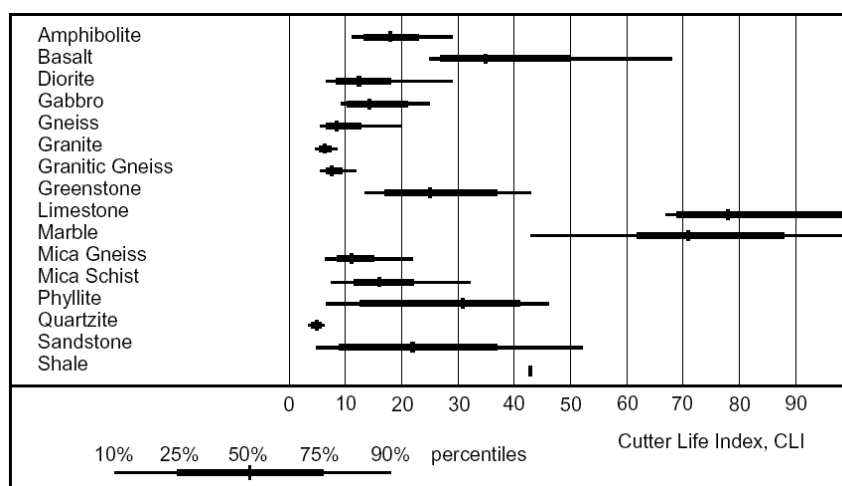
DRI با استفاده از اندیس جی سیورز (S_i) و شاخص تردی (S_{20}) و شکل ۳-۱۴ حاصل می شود (Bruland, 1998).



شکل ۳-۱۴- نمودار تعریف DRI (Bruland, 1998)

۳-۴-۳-۲- اندیس عمر برنده CLI

یکی دیگر از پارامترهای بسیار مهم که در مدل NTH از آن استفاده می شود، CLI یا اندیس عمر برنده می باشد. CLI به صورت مدت زمانی بر حسب ساعات حفاری که برنده های فولادی روی TBM قابل کاربرد هستند، تعریف می شود (AITES, 2000 - ITA). از CLI برای تخمین نرخ تعویض برش دهنده استفاده می شود. CLI ثبت شده برای تعدادی سنگ در شکل ۳-۱۵ نیز نشان داده شده است.

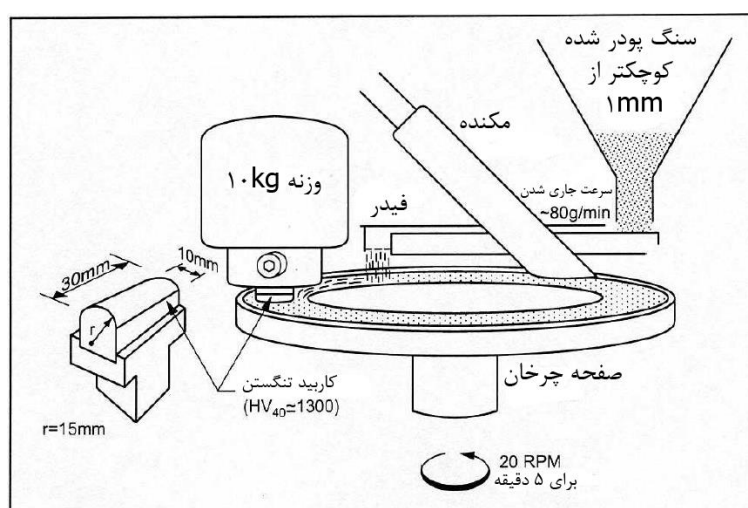


شکل ۳-۱۵- CLI ثبت شده برای سنگ‌های مختلف (Bruland, 1998)

از طرف دیگر برای تعیین دقیق‌تر مقدار CLI می‌توان از روش آزمایشگاهی استفاده کرد. در این روش بر اساس مقادیر اندیس جی‌سیورز (Sj) و آزمون سایش^{۳۶} و با استفاده از رابطه ۳-۱۷، سنگ محاسبه می‌شود (Bruland, 1998) (Nilsen et al, 1993).

$$CLI = 13.84 \times (S_j / AV)^{0.3847} \quad (3-17)$$

برای تعیین میزان سایش، سنگ خرد شده با ابعاد کمتر از یک میلی‌متر روی یک صفحه فولادی چرخان ریخته می‌شود (شکل ۳-۱۶) و مقدار سایش (AV) برابر با مقدار جرم کم شده از قطعه سخت فلزی به میلی‌گرم بعد از ۱۰۰ دور چرخش صفحه می‌باشد (زمان آزمایش ۵ دقیقه است). قطعه فلزی تحت نیروی عمودی ۱۰ کیلوگرم نیرو قرار دارد و طول و عرض آن ۳۰ و ۱۰ میلی‌متر می‌باشد. شعاع پخش‌دگی گوشه‌ها ۱۵ میلی‌متر است (Bruland, 1998).



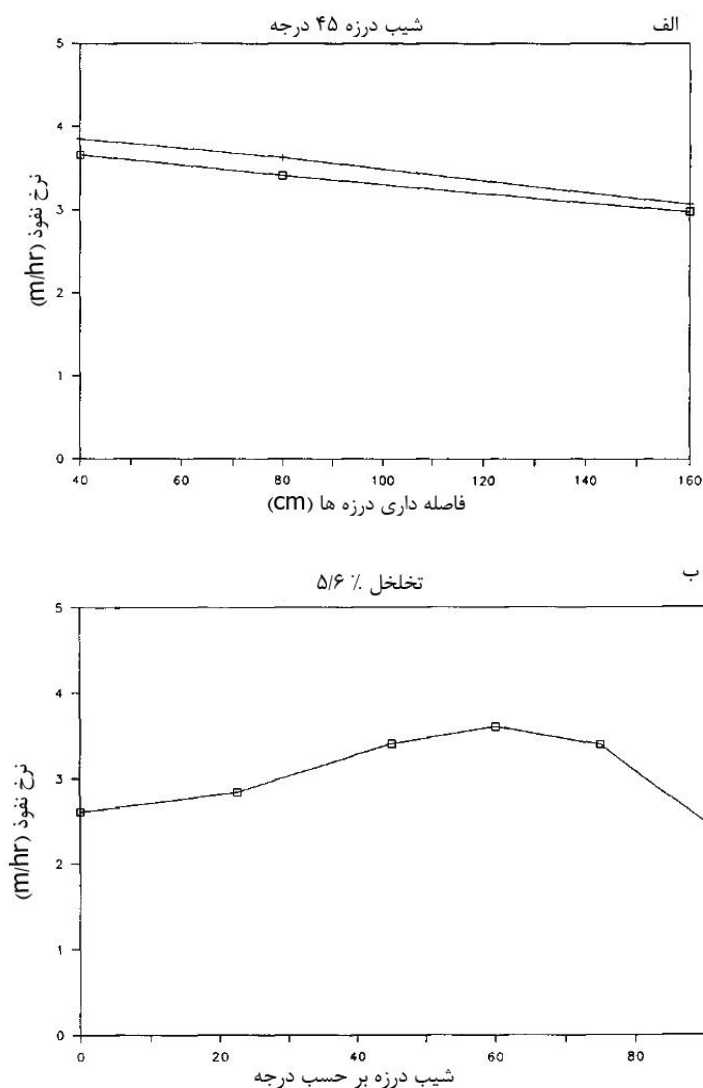
شکل ۳-۱۶- آزمون سایش (Nilsen et al, 1993)

۳-۴-۳-۱-۳- تأثیر ناپیوستگی‌ها بر نرخ نفوذ

در مدل NTH درزه‌ها اهمیت ویژه‌ای دارند. میزان نرخ نفوذ به‌عنوان تابعی از فاصله‌داری درزه‌ها و زاویه درزه‌ها (زاویه میان صفحات لایه‌بندی و محور تونل) در شکل ۳-۱۷ نشان داده شده است. همان‌طوری‌که مشاهده می‌شود با افزایش زاویه میان صفحات لایه‌بندی و محور تونل، نرخ نفوذ افزایش می‌یابد، تا زمانی‌که

^{۳۶} Abrasive value

این زاویه به ۶۰ درجه می‌رسد و بعد از آن نرخ نفوذ کاهش پیدا می‌کند (Nilsen et al, 1993).



شکل ۳-۱۷- الف: تأثیر فاصله‌داری درزه‌ها روی نرخ نفوذ ب: تأثیر شیب درزه‌ها روی نرخ نفوذ (Nilsen et al, 1993)

۳-۴-۱-۳-۴-۳ شکستگی^{۳۷}

شکستگی مهمترین پارامتر نفوذ برای حفر تونل می‌باشد. در این زمینه، شکستگی به معنی شکاف‌ها و درزه‌هایی است که مقاومت برشی کم یا صفر در امتداد صفحات ضعیف دارند. شکستگی توده سنگ با درجه شکستگی (نوع و فاصله‌داری) و زاویه بین محور تونل با صفحات ضعیف، مشخص می‌شود (Bruland, 1998).

شکستگی در کلاس‌هایی ثبت شده است که به فاصله بین صفحات ضعیف اشاره می‌کند. دسته‌بندی‌ها در جدول ۲-۳ نشان داده شده است.

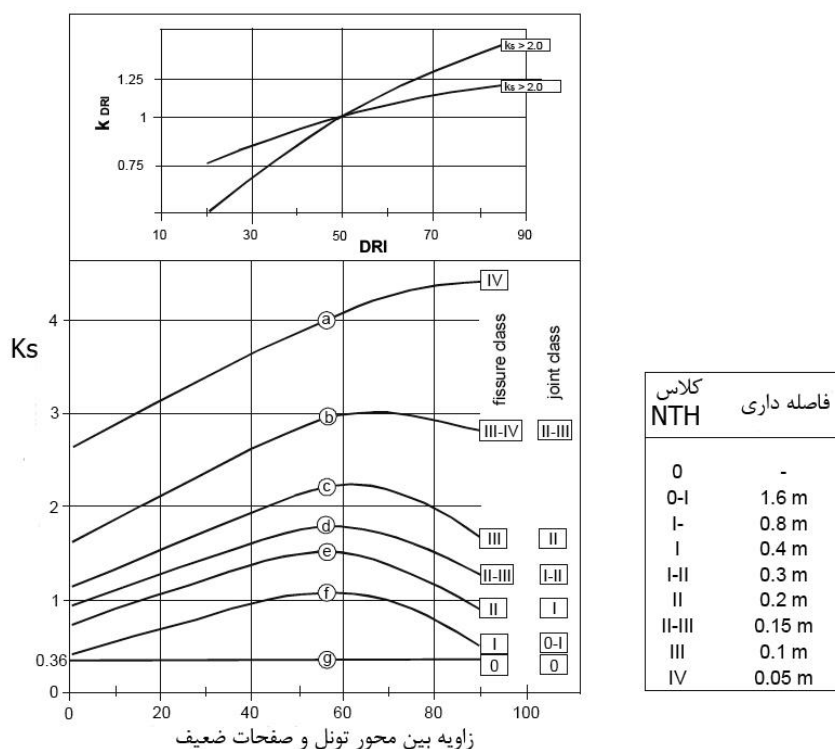
جدول ۲-۳- کلاس‌های شکستگی با فاصله نظیر به نظیر بین صفحات ضعیف (Bruland, 1998)

فاصله بین سطوح ضعیف (cm)	کلاس شکستگی (درزه = S_p / ترک و شکاف = S_t)
-	0
۱۶۰	0-I
۸۰	I-
۴۰	I
۲۰	II
۱۰	III
۵	IV

فاکتور شکستگی^{۳۸} (K_s): اثر کلاس شکستگی و زاویه بین محور تونل و صفحات ضعیف را با هم ترکیب می‌کند که در شکل ۱۸-۳ نشان داده شده است. فاکتور K_s در فرمولی برای محاسبه نرخ نفوذ استفاده می‌شود (ITA – AITES, 2000).

K_s که از شکل ۱۸-۳ تعیین می‌شود، مربوط به سنگی با $DRI=49$ می‌باشد و برای مقادیر دیگر DRI می‌بایست از یک فاکتور تصحیح دیگری به نام K_{DRI} استفاده کرد. برای تعیین K_{DRI} می‌توان از نمودار شکل ۱۸-۳ استفاده کرد (Bruland, 1998).

^{۳۸} Fracturing Factor



شکل ۳-۱۸- درجه بندی فاکتور درزه‌داری K_s به عنوان یک تابع از فاصله‌داری درزه‌ها و شکاف‌ها، تعدیل K_s برای دیگر مقادیرهای DRI نسبت به ۴۹ می‌باشد (Palmstrom, 1995).

فاکتور شکستگی معادل^{۳۹}: مشخصات توده سنگ را به عنوان فاکتور شکستگی K_s تنظیم شده برای مقدار DRI بیان می‌کند (ITA – AITES, 2000).

$$K_{eqv} = K_s \times K_{DRI} \quad (3-18)$$

اگر بیشتر از یک دسته سطوح ضعیف وجود داشته باشد، فاکتور شکستگی کلی عبارتست از) (Bruland, 2002:

$$k_{s-tot} = \left(\sum_{i=1}^n k_{si} \right) - (n-1) \cdot 0.36 \quad (3-19)$$

k_{si} : فاکتور شکستگی برای دسته درزه شماره i

n : تعداد دسته درزه‌ها

فاکتور شکستگی معادل عبارتست از (Bruland, 2002):

^{۳۹} Equivalent Fracturing Factor

$$k_{ekv} = k_{s-tot} \cdot k_{DRI} \quad (20-3)$$

K_{DRI} = فاکتور تصحیح برای 49 $\neq$ DRI

۳-۴-۲- پارامترهای ماشین

الف- نیروی عمودی پایه برنده^{۴۰}: (M_B) نیروی عمودی ناخالص TBM بر روی تعداد برنده‌ها تقسیم می‌شود. بنابراین محاسبه عملی نیروی عمودی برنده در این مدل، به معنی میانگین نیروی عمودی همه برنده‌ها روی کله حفار (KN/cutter) می‌باشد (ITA – AITES, 2000).

حداکثر میانگین نیروی عمودی ناخالص توصیه شده برای TBMها با قطرهای مختلف برنده‌ها در جدول ۳-۳ نشان داده شده است.

جدول ۳-۳- نیروی محوری مجاز روی برش‌دهنده (Nelson et al, 1983)

ماکزیمم نیروی عمودی روی برنده (KN)	قطر برنده	
	in	mm
۱۴۰-۱۶۰	۱۴	۳۵۶
۱۸۰-۲۰۰	۱۵/۵	۳۹۴
۲۲۰-۲۴۰	۱۷	۴۳۲
۲۸۰-۳۰۰	۱۹	۴۸۳

^{۴۰} Basic Cutter Thrust

ب- فاصله برنده‌ها^{۴۱}: میانگین فاصله بین شیارهای برنده روی سطح جبهه کار که برابر است با (ITA – AITES, 2000):

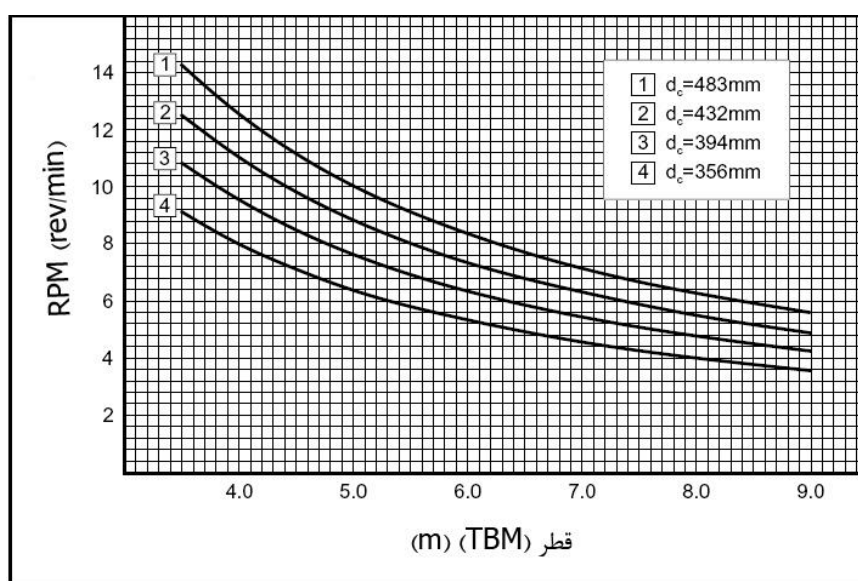
$$\text{فاصله برنده‌ها} = \text{قطر TBM} / (2 \times N) \quad (3-21)$$

که در آن:

N: تعداد برنده‌ها

فاصله برنده‌ها معمولاً در حدود ۷۰ mm است (ITA – AITES, 2000).

ج- RPM کله حفار: RPM کله حفار دوران کامل به‌ازای هر دقیقه را گویند. RPM کله حفار نسبت عکس با قطر کله حفار دارد. RPM کله حفار به‌عنوان تابعی از قطر TBM و قطر برنده‌ها در شکل ۳-۱۹ نشان داده شده است.

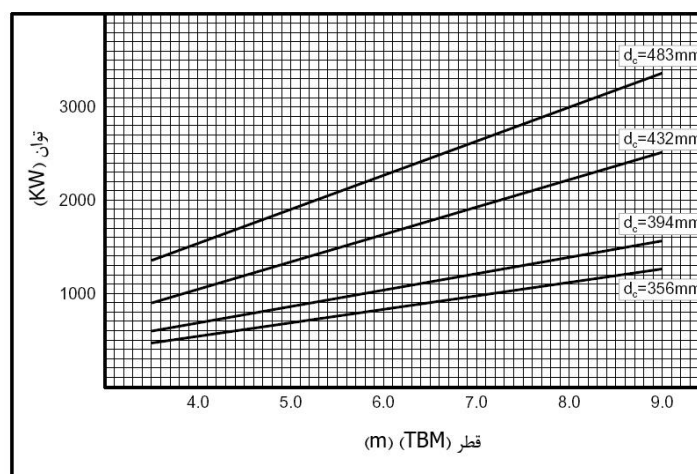


شکل ۳-۱۹ RPM کله حفار به‌عنوان تابعی از قطر TBM (Bruland, 1998)

د- توان نصب شده روی کله حفار (KW): توان کله حفار به بازده موتورهای نصب شده بستگی دارد تا گشتاور ماشین را تأمین کند. با افزایش نفوذ خالص، مقاومت غلتشی و بنابراین تقاضای گشتاور افزایش می‌یابد. وقتی که نفوذ بالا باشد و یا این که TBM در سنگ‌های به‌صورت خرد شده حفاری کند، گشتاور موجود فاکتور

^{۴۱} cutter spacing

محدود کننده می باشد (ITA – AITES, 2000). توان مورد نیاز ماشین به عنوان تابعی از قطر TBM و قطر برنده ها در شکل ۳-۲۰ نشان داده شده است.



شکل ۳-۲۰- توان مورد نیاز ماشین (Bruland, 1998)

۳-۳-۴-۳- مشخصات دیگر

۳-۳-۴-۳-۱- نرخ نفوذ پایه^{۴۲}: نرخ نفوذ پایه (i_o) بر حسب میلی متر به ازای هر دور چرخش می باشد که به عنوان تابعی از نیروی عمودی معادل و فاکتور شکستگی معادل در شکل ۳-۲۱ نشان داده شده است. برای قطرهای برنده متفاوت از ۴۸۳ mm و میانگین فاصله برنده های متفاوت از ۷۰ mm، نیروی عمودی معادل با استفاده از رابطه زیر تعیین می شود (ITA – AITES, 2000).

$$M_{eqv} = M_B \times K_d \times K_a \quad (KN / Cutter) \quad (3-22)$$

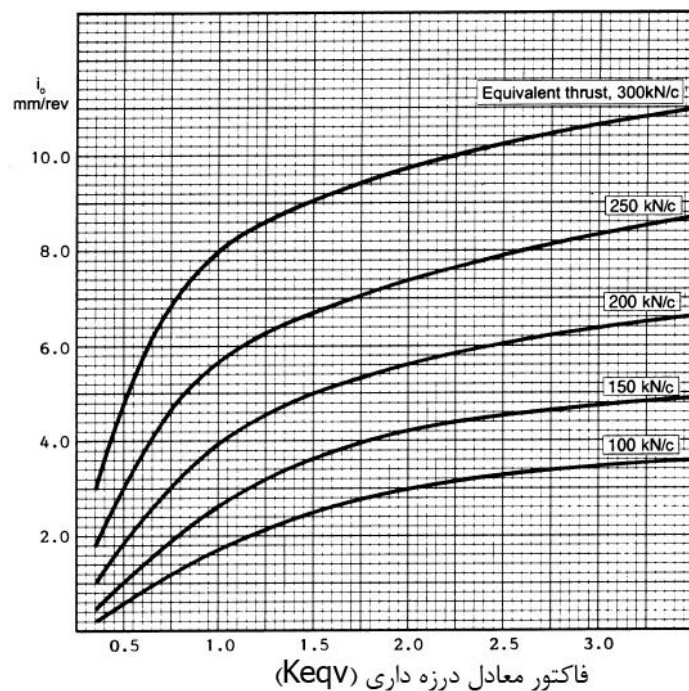
K_d فاکتور تصحیح قطر برنده، K_a فاکتور تصحیح فاصله بین برنده ها می باشد. برای به دست آوردن فاکتورهای K_d و K_a می توان از نمودارهای نشان داده شده در شکل های (۳-۲۲) و (۳-۲۳) یا روابط ۳-۲۳ و ۳-۲۴ استفاده کرد.

$$K_d = 2.35 - 0.0028D_c \quad (3-23)$$

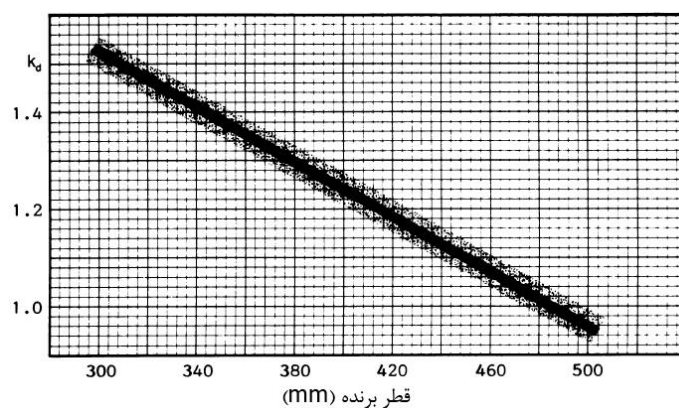
$$K_a = 1.35 - 0.005S_c \quad (3-24)$$

^{۴۲} Basic Penetration Rate

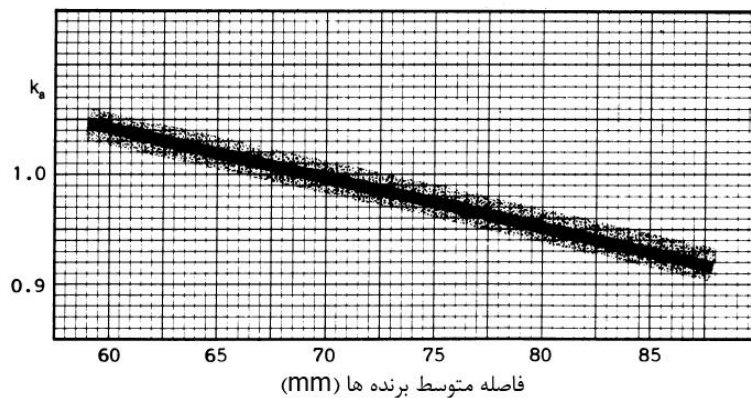
که D_c و S_c به ترتیب قطر و فاصله بین برنده‌ها بر حسب میلی‌متر می‌باشند.



شکل ۳-۲۱- نرخ نفوذ پایه برای 483 mm قطر برنده و 70 mm فاصله داری برنده (Bruland, 2002)



شکل ۳-۲۲- فاکتور تصحیح برای 483 mm قطر برنده $\neq$ (Bruland, 2002)



شکل ۳-۲۳- فاکتور تصحیح برای 70 mm میانگین فاصله برنده‌ها (Bruland, 2002)

علاوه بر نمودارهای شکل‌های (۳-۲۱)، (۳-۲۲) و (۳-۲۳)، می‌توان i_o را از رابطه ۳-۲۵ نیز محاسبه کرد (Palmstrom, 1995).

برای $K_{eq} < 3.5$ داریم:

$$i_o = F \times K_{eq}^G \quad (3-25)$$

$$F = 0.0015 M_{eq}^{1.5} \quad (3-26)$$

$$G = 30 K_{eq}^{-0.5} \times M_{eq}^{-0.8} \quad (3-27)$$

برای $K_{eq} > 3.5$ نیز می‌توان از رابطه تقریبی ۳-۲۸ استفاده کرد.

$$i_o = 0.03 M_{eq} \times K_{eq}^{0.18} \quad (3-28)$$

۳-۴-۳-۲- نرخ نفوذ خالص^{۴۳}: نرخ نفوذ خالص (I) تابعی از نفوذ پایه و rpm کله حفار است (ITA – AITES, 2000).

$$I = i_o \times rpm \times (60/1000) \quad (m/hr) \quad (3-29)$$

۳-۴-۳-۳- گشتاور مورد نیاز^{۴۴}: برای نفوذ خالص بالا یا وقتی که سنگ خیلی خرد شده (دارای شکستگی زیاد) است، بایستی بررسی شود که توان نصب شده بر روی کله حفار، گشتاور کافی برای چرخش کله حفار را می‌دهد. اگر گشتاور کافی را نمی‌دهد، نیروی عمودی بایستی کاهش داده شود تا این که گشتاور مورد نیاز کمتر از ظرفیت نصب شده شود. گشتاور مورد نیاز با فرمول زیر تعیین می‌شود (ITA – AITES, 2000):

$$T_{REQ} = 0.59 \times R_{TBM} \times N_{TBM} \times M \times K_c \quad (KN.m) \quad (3-30)$$

0.59 = موقعیت نسبی برنده میانی بر روی کله حفار

^{۴۳} Net Penetration Rate

^{۴۴} Torque Demand

$$R_{TBM} = \text{شعاع کله حفار}$$

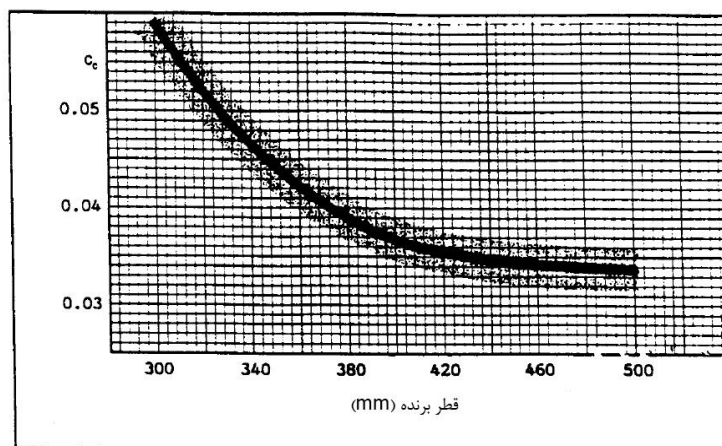
$$N_{TBM} = \text{تعداد برنده‌ها روی کله حفار}$$

$$M = \text{متوسط نیروی عمودی بازای هر برنده}$$

$$K_c = \text{ضریب برش (برای مقاومت غلتشی)}$$

$$K_c = C_c \times i^{0.5}$$

C_c تابعی از قطر برنده است و از شکل ۳-۲۴ به دست می‌آید.



شکل ۳-۲۴- ثابت برش (C_c) به عنوان تابعی از قطر برنده (ITA – AITES, 2000)

۳-۴-۳- نرخ پیشروی ناخالص

نرخ پیشروی ناخالص بر حسب متر بر هفته و به عنوان میانگین برای دوره‌های طولانی‌تر تعیین می‌شود. نرخ پیشروی ناخالص بستگی به نرخ نفوذ خالص، بهره‌وری ماشین و تعداد ساعات کاری در طول هفته دارد. بهره‌وری ماشین، مدت زمان حفاری خالص است که بر حسب درصدی از مدت زمان کلی تونل‌سازی می‌باشد. مدت زمان کلی تونل‌سازی عبارتست از (ITA – AITES, 2000):

زمان حفاری (T_b): که به نرخ نفوذ بستگی دارد.

(۳-۳۱)

$$T_b = \frac{1000}{I}$$

زمان استحکام مجدد دستگاه (T_t): که بستگی به طول پیشروی دارد و معمولاً برای ۱/۵ تا ۲ متر، به طور میانگین ۴ تا ۵ دقیقه می باشد.

(۳۲-۳)

$$T_t = \frac{1000.t_{tak}}{60.l_s}$$

l_s = طول پیشروی (به طور نمونه ۱/۵ تا ۲ متر)

t_{tak} = زمان استحکام مجدد دستگاه (به طور نمونه ۴ تا ۵ دقیقه)

زمان تعویض برنده و بازدید (T_c): بستگی به عمر حلقه برنده و نرخ نفوذ خالص دارد. زمان مورد نیاز برای تعویض برنده ها ممکن است از ۳۰ تا ۶۰ دقیقه به ازای هر برنده تغییر کند.

$$T_c = \frac{1000.t_c}{60.H_h.I} \quad (۳۳-۳)$$

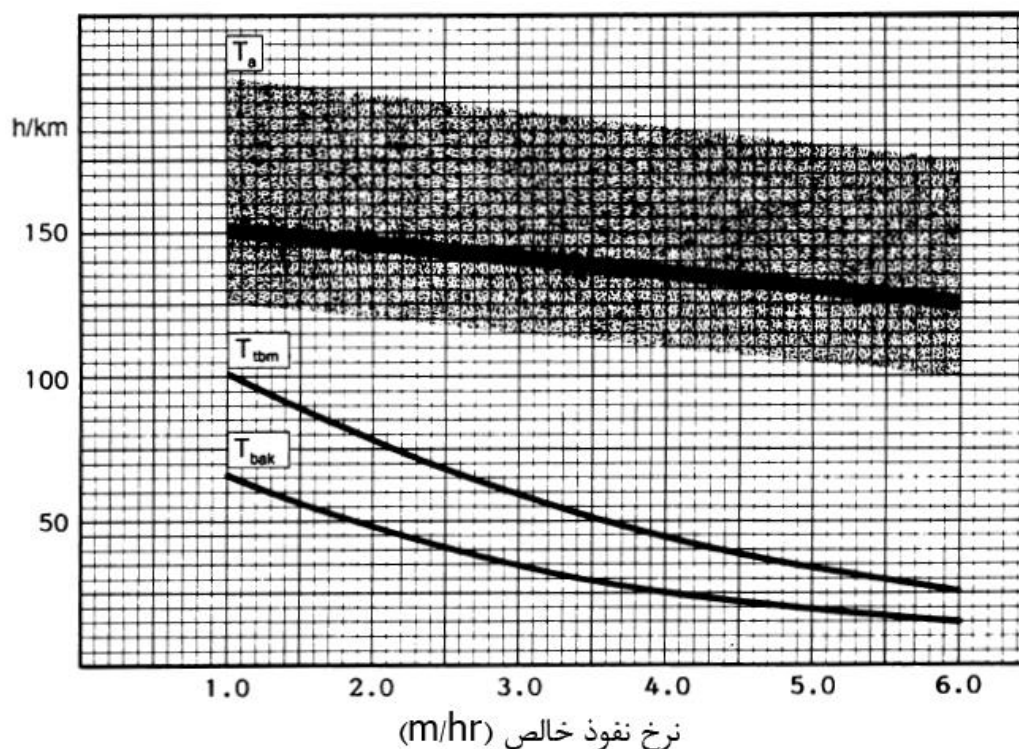
t_c = زمان تعویض برنده (به طور نمونه ۳۰ تا ۶۰ دقیقه)

H_h = متوسط عمر حلقه برنده که در بخش ۳-۳-۳-۵ معرفی شده است.

زمان تعمیر و نگهداری و سرویس دهی TBM (T_{tbm}) و تجهیزات back-up (T_{bak}): زمان مصرف شده برای تعمیر و نگهداری که به نرخ نفوذ بستگی دارد.

زمان متفرقه (T_a): این زمان شامل زمان نگهداری معمولی سنگ در شرایط خوب سنگ، زمان مورد انتظار برای حمل و نقل، ریل گذاری و جاده، نقشه برداری یا حرکت دادن لیزر، آب، کابل الکتریکی، تهویه، تمیز کردن و چیزهای دیگر مثل سفر کردن (رفت و آمد)، تعویض شیفت و غیره می باشد (ITA -)

(AITES, 2000). T_a و T_{tbm} و T_{bak} بر حسب ساعت بر کیلومتر در شکل ۳-۲۵ نشان داده شده است.



شکل ۳-۲۵- تعمیر و نگهداری به‌عنوان تابعی از نرخ نفوذ خالص (ITA – AITES, 2000)

زمان مصرف بر حسب ساعت بر کیلومتر تخمین زده می‌شود و با در نظر گرفتن تمامی تأخیرها، بهره‌وری ماشین به‌صورت رابطه ۳-۳۴ تعریف می‌شود (Bruland, 2002):

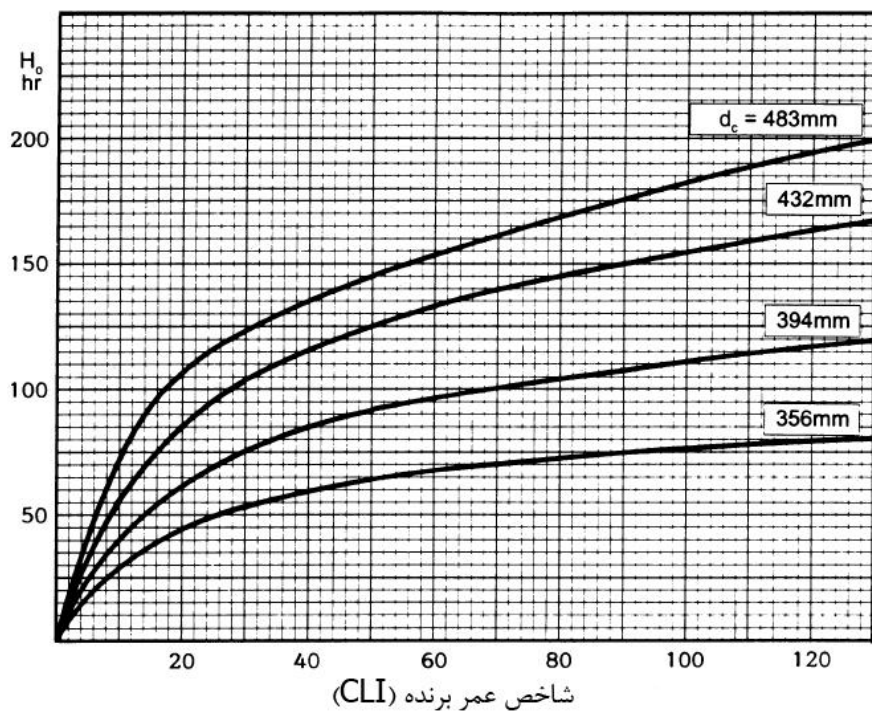
$$u = \frac{100.T_b}{T_b + T_t + T_c + T_{tbm} + T_{bak} + T_a} \quad (34-3)$$

۳-۴-۳-۵- برنده مصرفی

عمر متوسط برش‌دهنده‌ها H_h (بر حسب ساعت) در زمان حفاری برای هر برش‌دهنده به‌صورت رابطه ۳-۳۵ بیان می‌شود (Bruland, 1998).

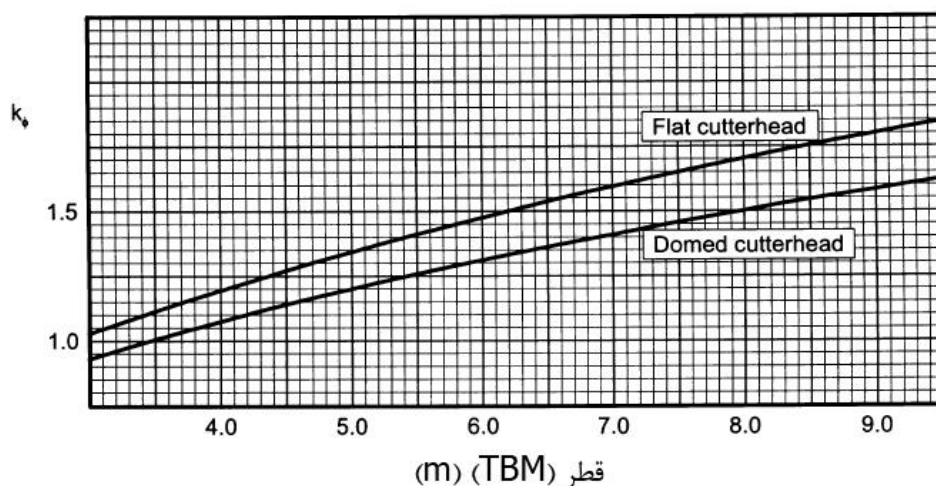
$$H_h = \frac{H_o K_\phi K_Q K_{rpm} K_N}{N_{tbm}} \quad (35-3)$$

که در آن $N_{t\text{bm}}$ تعداد دیسک‌ها، H_o عمر پایه برنده^{۴۵} می‌باشد که مقادیر آن در نمودار ۳-۲۶ آورده شده است.



شکل ۳-۲۶- عمر پایه حلقه برنده به عنوان تابعی از CLI و قطر برنده (Bruland, 1998)

فاکتور تصحیح k_ϕ برای منظور کردن تأثیر قطر TBM و نوع برش‌دهنده لحاظ شده است که با توجه به شکل ۳-۲۷ به دست می‌آید.



^{۴۵} Basic Cutter Ring Life

شکل ۳-۲۷- فاکتور تصحیح برای قطر TBM و شکل کله حفار (Bruland, 1998)

فاکتور تصحیح K_{rpm} برای منظور کردن تأثیر سرعت چرخش کله حفار تعریف شده است. هر چه کله حفار سریع تر بچرخد، سرعت غلتشی برش دهنده بالاتر و عمر برش دهنده کوتاه تر خواهد بود. این فاکتور به صورت رابطه ۳-۳۶ تعریف می شود (Bruland, 1998):

$$K_{rpm} = \frac{50/d_{tbm}}{RPM} \quad (3-36)$$

که در آن RPM سرعت چرخش کله حفار به دور بر دقیقه می باشد و d_{tbm} قطر کله حفار به متر است.

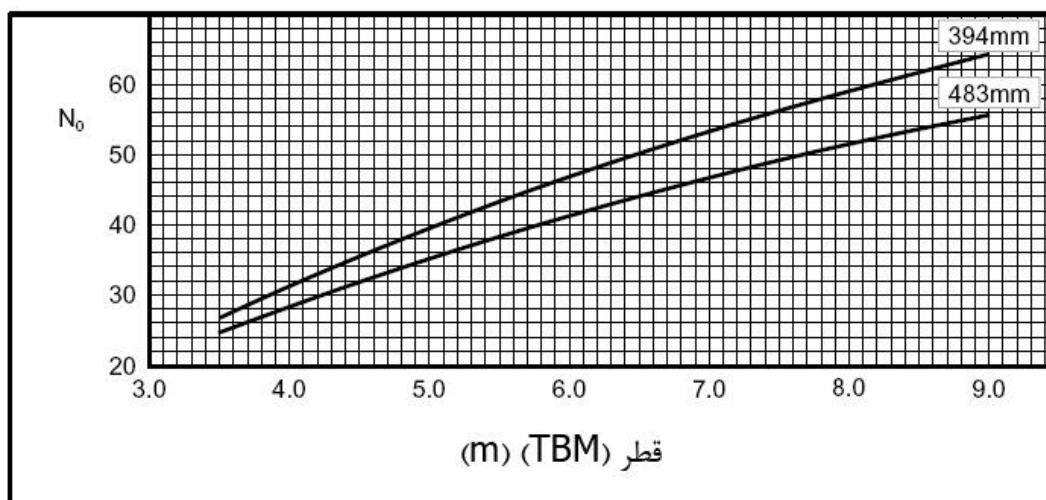
فاکتور تصحیح K_N برای لحاظ کردن تعداد برندها بر روی TBM می باشد که به صورت زیر تعریف می شود (Bruland, 1998):

$$K_N = \frac{N_{tbm}}{N_0} \quad (3-37)$$

d_{tbm} : قطر TBM

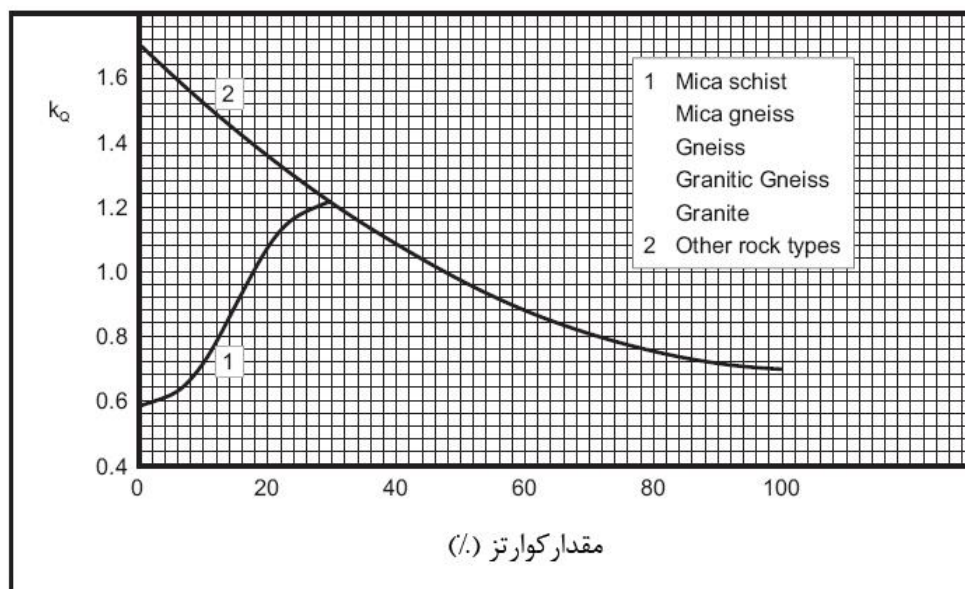
N_0 : تعداد نرمال برندها بر روی TBM که با استفاده از شکل ۳-۲۸ به دست می آید.

N_{tbm} : تعداد برندها بر روی کله حفار



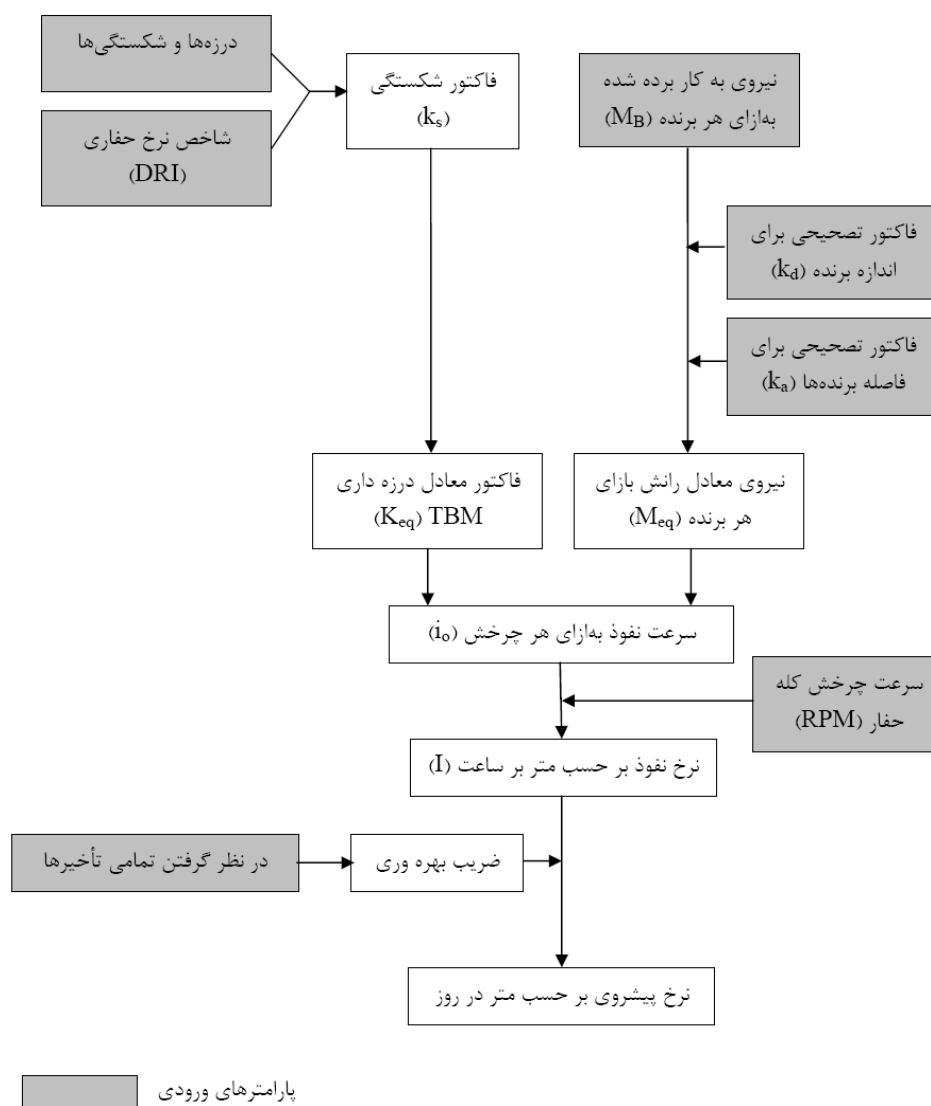
شکل ۳-۲۸- تعداد برنده‌ها بر روی TBM (Bruland, 1998)

برای به‌دست آوردن k_Q می‌توان از نمودار ۳-۲۹ استفاده کرد.



شکل ۳-۲۹- فاکتور تصحیح برای حلقه برنده در مقابل مقدار کوارتز (Bruland, 1998)

فلوچارت کلی روش NTH در شکل ۳-۳۰ نشان داده شده است.

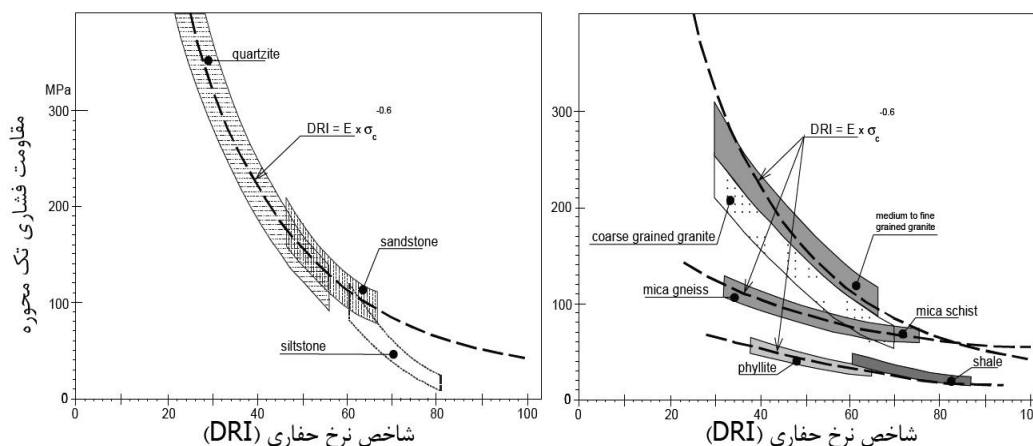


شکل ۳-۳۰- فلوچارت کلی روش NTH (After Bruland, 1998)

۳-۴-۴- پیش‌بینی نرخ نفوذ با استفاده از روش Rmi

از بین مدل‌های متعدد پیش‌بینی عملکرد TBM، مدل NTH (Norwegian Institute of Technology) وابستگی نزدیکی به مدل Rmi و پارامترهای آن دارد و شاید مدل Rmi مدل بر گرفته شده از مدل NTH باشد. مزیت اصلی مدل NTH برای پیش‌بینی عملکرد TBM به‌طور کلی داشتن یک پایگاه اطلاعاتی^{۴۶} تجربی خیلی جامع می‌باشد که تأثیر مهم درزه‌داری توده سنگ را به‌راحتی به حساب آورده است.

روش RMI برای محاسبه فاکتور معادل درزه‌داری، که برای محاسبه نرخ نفوذ مورد استفاده قرار می‌گیرد از شاخص نرخ حفاری^{۴۷} استفاده می‌کند که به صورت رابطه ۳-۳۸ معرفی شده است. این رابطه با توجه به نمودار شکل ۳-۳۱ ارائه شده است. البته برای محاسبه شاخص نرخ حفاری، روش NTH پایگاه اطلاعاتی جامع‌تری را معرفی می‌کند.



شکل ۳-۳۱- ارتباط بین شاخص نرخ حفاری (DRI) با مقاومت فشاری سنگ (Palmstrom, 1995)

$$DRI = E \times \sigma_c^{-0.6} \quad (3-38)$$

که در آن:

E یک ضریب وابسته به مقاومت فشاری تک محوره و نوع سنگ می‌باشد.

برای سنگ‌های غیر شیستی، سنگ سخت (مقاومت فشاری $\sigma_c > 40 \text{ MPa}$) $E=1000$

برای شیست‌های دگرگونی ($\sigma_c = 30 - 150 \text{ MPa}$) $E=750$

برای سنگ‌های رسی ($\sigma_c = 10 - 100 \text{ MPa}$) $E=500$

در روش RMI از V_b (حجم بلوک) برای طبقه بندی درزه و شکاف استفاده می‌شود که از روابط زیر به دست می‌آید (Palmstrom, 1995):

^{۴۷} Drilling Rate Index

$$V_b = \beta \times J_v^{-3} \times \frac{1}{\sin \gamma_1 \times \sin \gamma_2 \times \sin \gamma_3 \times \dots} \quad (\text{سه دسته درزه یا بیشتر}) \quad (39-3)$$

$$V_b = \beta \times J_v^{-3} \quad (\text{کمتر از سه دسته درزه}) \quad (40-3)$$

که در آنها :

V_b : حجم بلوک (m^3)

β : فاکتور شکل بلوک

J_v : شمارنده حجمی درزه (تعداد درزه در یک متر مکعب)

γ_1 و γ_2 و γ_3 و ... : زوایای بین دسته درزه‌ها

برای تعیین فاکتور شکل بلوک (β) از رابطه ۴۱-۳ و یا جدول ۴-۳ استفاده می‌شود (Palmstrom, 1995).

$$\beta = 20 + \frac{21}{n_j} \times \left(\frac{S_{MAX}}{S_{MIN}} \right)^{\left(1 + 0.1 \times \log \left(\frac{S_{MAX}}{S_{MIN}} \right) \right)} \quad (41-3)$$

$n_j=3$ ۳ دسته درزه یا بیشتر

$n_j=2/5$ ۲ دسته درزه + درزه های تصادفی

$n_j=2$ ۲ دسته درزه

$n_j=1/5$ ۱ دسته درزه + درزه های تصادفی

$n_j=1$ ۱ دسته درزه

که S_{MAX} و S_{MIN} به ترتیب بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین بعد بلوک ایجاد شده توسط درزه‌ها می‌باشند.

جدول ۳-۴- فاکتور شکل بلوک استفاده شده برای دریافتن حجم بلوک از فاصله‌داری مشخص در طبقه بندی ناپیوستگی NTH (Palmstrom, 1995)

IV	III-IV	III	II-III	II	I-II	I	0-I	طبقه‌بندی ناپیوستگی NTH
۰/۰۵	۰/۰۷۵	۰/۱	۰/۱۵	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۱/۶	فاصله‌داری ناپیوستگی
		۰/۲	۰/۶	۱/۵	۴	۱۰	۲۰۰	بلوک حجمی هم ارز شده (m ³)
۲۰۰	۲۰۰	۱۷۵	۱۷۵	۱۷۵	۱۵۰	۱۵۰	۵۰	فاکتور شکل بلوک (β)

برای تعیین شمارنده حجمی درزه (J_v)، از روابط ۳-۴۲ و ۳-۴۳ استفاده می‌شود (Palmstrom, 1995).

$$J_v = \sum (1/S_i) \quad \text{(عدم وجود درزه تصادفی)} \quad (۳-۴۲)$$

$$J_v = \sum (1/S_i) + \frac{N_r}{5} \quad \text{(وجود درزه تصادفی)} \quad (۳-۴۳)$$

که در این رابطه:

S: فاصله‌داری هر دسته درزه به متر

N_r: تعداد درزه‌های تصادفی

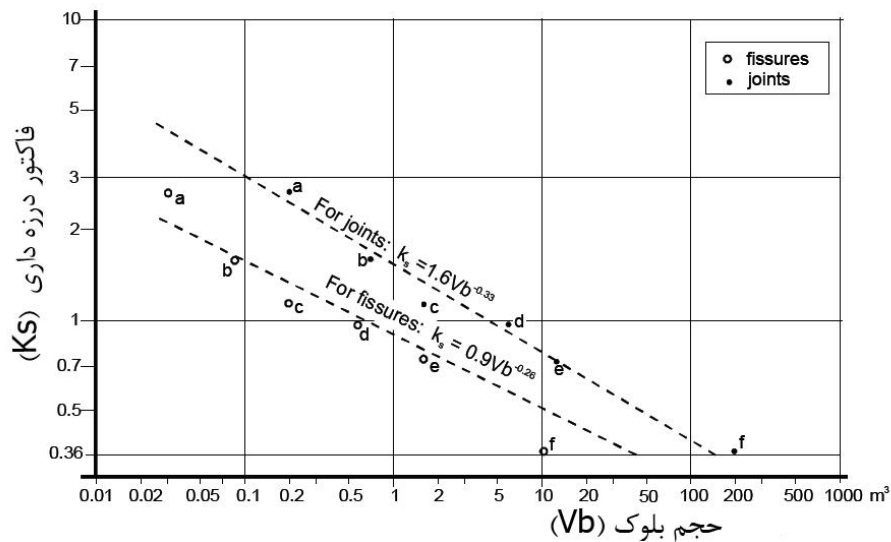
همچنین جدول ۳-۵ طبقه بندی J_v را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۵- طبقه بندی شمارنده حجمی درزه (J_v) (Palmstrom, 1995)

مقدار عددی J _v	اصطلاحات مربوط به J _v	اصطلاحات مرتبط با درزه
< ۰/۳	به شدت کم	توده‌ای
۰/۳-۱	خیلی کم	درزه‌داری خیلی ضعیف
۱-۳	کم	درزه‌داری ضعیف
۳-۱۰	نسبتاً زیاد	درزه‌داری متوسط
۱۰-۳۰	زیاد	درزه‌داری زیاد
۳۰-۱۰۰	خیلی زیاد	درزه‌داری خیلی زیاد

خرد شده	به شدت زیاد	> ۱۰۰
---------	-------------	-------

همبستگی بین k_s و V_b در شکل ۳-۳۲ نشان داده شده است.



شکل ۳-۳۲- همبستگی بین فاکتور درزه‌داری TBM (k_s) و حجم بلوک (V_b) (Palmstrom, 1995)

با توجه به شکل ۳-۳۲ در صورت مواجهه با درزه، فاکتور درزه‌داری TBM (k_s) به صورت رابطه ۳-۴۴ به دست می‌آید:

$$K_s = 1.6 \times C_0 \times V_b^{-0.33} \quad (۳-۴۴)$$

و در صورت مواجهه با شکاف، فاکتور درزه‌داری TBM (k_s) به صورت رابطه ۳-۴۵ به دست می‌آید:

$$K_s = 0.9 \times C_0 \times V_b^{-0.26} \quad (۳-۴۵)$$

که در این رابطه:

V_b : حجم بلوک (m^3)

لازم به توضیح است که درزه‌ها شکستگی‌هایی هستند که می‌توانند همه سطح مقطع تونل را تعقیب کنند. آن‌ها می‌توانند باز باشند یا این که با رس یا کانی‌های ضعیف مانند کلسیت، کلریت یا کانی‌های مشابه پر شوند. ترک‌ها و شکاف‌ها شکستگی‌های ناپیوسته‌ای هستند که می‌توانند فقط قسمتی از سطح مقطع تونل را تعقیب کنند (Bruland, 1998).

C_0 : یک فاکتور بیان گر جهت یافتگی دسته درزه اصلی می باشد. مقادیر C_0 در جدول ۳-۶ ارائه شده است.

جدول ۳-۶- درجه بندی فاکتور جهت داری درزه برای TBM (Palmstrom, 1995)

زاویه بین محور تونل و دسته درزه	$0 - 15^\circ$	$15 - 30^\circ$	$30 - 45^\circ$	$45 - 75^\circ$	$75 - 90^\circ$
مقدار متوسط C_0	۱	$1/25$	$1/5$	$1/75$	$1/5$ ($C_0=1.75$ for $V_b < 0.1 \text{ m}^3$)

قبل از این که پارامتر درزه داری (J_P) درگیر روابط ($3-44$) و ($3-45$) شود لازم است پارامتر ویژگی درزه (J_C) و پارامتر درزه داری (J_P) معرفی شوند.

J_C یک پارامتر توصیف کننده ویژگی درزه می باشد که برای شرایط معمولی درزه، برابر $1/75$ ($J_C=1/75$) و برای شرایط معمولی شکاف، برابر 6 ($J_C=6$) در نظر گرفته می شود و به طور کلی از رابطه زیر به دست می آید (Palmstrom, 1995):

$$J_C = \frac{J_L \times J_R}{J_A} \quad (3-46)$$

که در این رابطه :

J_R : فاکتور بیان کننده زبری سطح درزه (مشابه J_r در سیستم Q)

J_A : فاکتور درجه هوازدگی درزه (مشابه J_a در سیستم Q)

J_L : اندازه درزه و فاکتور پیوستگی که با استفاده از جدول ۳-۷ به دست می آید.

جدول ۳-۷- فاکتور اندازه درزه و پیوستگی (J_L) (Palmstrom, 1995)

درجه بندی J_L برای		اصطلاح و نوع	طول امتداد درزه
درزه های نا پیوسته	درزه های پیوسته		

۶	۳	لایه لایه ، تورق	خیلی کوتاه	$< 0.1 \text{ m}$
۴	۲	درزه	کوتاه	$0.1 - 1 \text{ m}$
۲	۱	درزه	متوسط	$1 - 10 \text{ m}$
۱/۵	۰/۷۵	درزه	طویل	$10 - 30 \text{ m}$
۱	۰/۵	درزه پر شده یا لایه	خیلی طویل	$> 30 \text{ m}$

پارامتر درزه‌داری J_p از رابطه ۳-۴۷ به دست می‌آید:

$$J_p = 0.2\sqrt{J_C} \times V_b^D \quad (47-3)$$

که در آن :

V_b : حجم بلوک (m^3)

D : از رابطه $D = 0.37 \times J_C^{-0.2}$ به دست می‌آید.

همان‌طور که مشخص است در شرایط معمولی درزه ($J_C = 1/75$) پارامتر درزه‌داری به صورت $J_p = 0.265V_b^{0.33}$ می‌شود. بنابراین رابطه (۳-۴۴) را می‌توان بر اساس J_p بسط داد و به رابطه زیر رسید.

$$K_S = 0.424 \times C_0 \times J_p^{-1} \quad (48-3)$$

به‌طور مشابه می‌توان از رابطه (۳-۴۵) (برای شکاف‌ها) به رابطه زیر رسید.

$$K_S = 0.432 \times C_0 \times J_p^{-1} \quad (49-3)$$

با دقت در روابط (۳-۴۸) و (۳-۴۹) ، نزدیکی آن‌ها به هم روشن می‌شود. حتی می‌توان آن‌ها را برابر در نظر گرفت. فاکتور K_S برای سنگ‌های با شاخص نرخ حفاری و چال‌زنی برابر ۴۹ ($DRI=49$) بیان شده است. برای مقادیر دیگر، K_S توسط فاکتور K_{DRI} تعدیل شده است.

$$K_{DRI} = 0.14\sqrt{DRI} \quad (50-3)$$

با استفاده از روابط (۳-۴۸) و (۳-۴۹) ، فاکتور معادل درزه‌داری TBM ، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$K_{eq} = K_S \times K_{DRI} = (0.43 \times C_0 \times J_p^{-1})(0.14 \times \sqrt{DRI}) \quad (51-3)$$

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

پس فاکتور معادل درزه‌داری TBM، برای توده سنگ درزه‌دار به صورت زیر می‌باشد:

$$K_{eq} = (0.43 \times C_0 \times J_p^{-1})(0.14(E \times \sigma_C^{-0.6})^{0.5}) = \frac{0.06 \times C_0 \times \sqrt{E}}{J_p \times \sigma_C^{0.3}} \quad (52-3)$$

برای توده سنگ متراکم ($V_b > \text{approx. } 10 \text{ m}^3$)، K_{DRI} با استفاده از فرمول ۵۳-۳ به دست آورده می‌شود.

$$K_{DRI} = 0.06 DRI^{0.72} = 0.06(E \times \sigma_C^{-0.6})^{0.72} = 0.06 E^{0.72} \times \sigma_C^{-0.43} \quad (53-3)$$

وقتی $k_s = 0/36$ ، فاکتور معادل درزه‌داری TBM، برای سنگ‌های متراکم به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$K_{eq} = K_S \times K_{DRI} = 0.36(0.06 E^{0.72} \times \sigma_C^{-0.43}) = 0.022 E^{0.72} \times \sigma_C^{-0.43} \quad (54-3)$$

۳-۴-۴-۱- برآورد و ارزیابی پیشرفت خالص حفاری

سرعت نفوذ بر حسب هر چرخش (i_o)، از فاکتور معادل درزه‌داری TBM (K_{eq}) و نیروی معادل رانش به‌ازای هر برنده (M_{eq}) در شکل ۳۳-۳ به دست می‌آید. فاکتور M_B برای قطر برنده ۴۸۳ میلیمتر (۱۹ اینچ) و متوسط فاصله بین برنده‌ها ۷۰ میلی‌متر می‌باشد. برای متفاوت شدن ابعاد برنده‌ها، نیروی معادل رانش با استفاده از ضرایب k_d و k_a به صورت رابطه زیر به دست می‌آید:

$$M_{eq} = M_B \times k_d \times k_a \quad (55-3)$$

که در آن :

M_B : نیروی رانش اعمالی به‌ازای هر برنده (KN)

k_d : فاکتور تصحیح برای قطر برنده که از شکل ۳۴-۳ و یا رابطه ۵۶-۳ به دست می‌آید.

k_a : فاکتور تصحیح برای فاصله برنده‌ها که از شکل ۳۵-۳ و یا رابطه ۵۷-۳ به دست می‌آید.

$$k_d = 2.35 - 0.0028 D_c \quad (56-3)$$

$$k_a = 1.35 - 0.005S_c \quad (57-3)$$

D_c : قطر برنده بر حسب میلی‌متر

S_c : فاصله بین برنده‌ها بر حسب میلی‌متر

نرخ خالص پیشروی بر حسب متر بر ساعت از رابطه ۵۸-۳ به دست می‌آید:

$$I = i_0 \times RPM \times (60/1000) \quad (58-3)$$

که مقدار i_0 از شکل ۳-۳۳ به دست می‌آید.

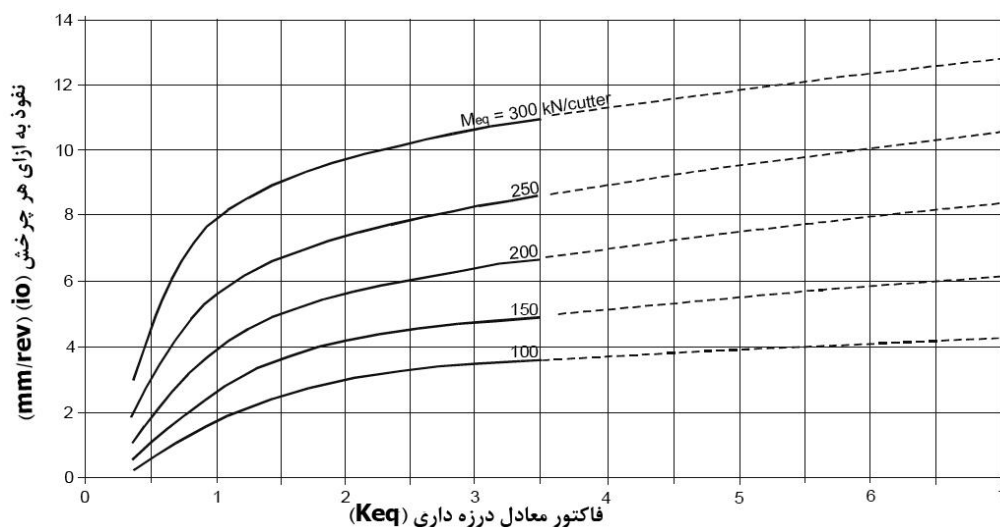
همچنین از رابطه ۵۹-۳ می‌توان i_0 را محاسبه کرد:

$$i_0 = F \times K_{eq}^G \quad (\text{mm/rev}) \quad (59-3)$$

که در آن :

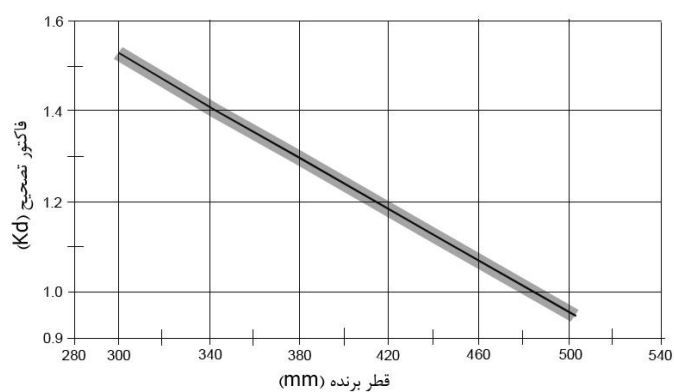
$$F = 0.0015M_{eq}^{1.5}$$

$$G = 30K_{eq}^{-0.5} \times M_{eq}^{-0.8} \quad \text{ف}^{\text{ا}} \quad (\text{FOR } K_{eq} < 3.5)$$

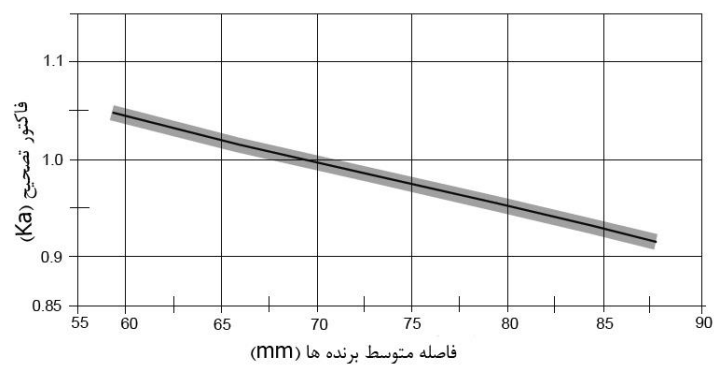


ف^ا یک استنتاج کلی از شکل ۳-۳۳ رابطه $i_0 = 0.03M_{eq} \times K_{eq}^{0.18}$ را برای $K_{eq} \geq 3/5$ نشان می‌دهد.

شکل ۳-۳۳- سرعت نفوذ بازای هر دور چرخش TBM (Palmstrom, 1995)



شکل ۳-۳۴- فاکتور تصحیح K_d برای اندازه تیغه‌ها (Palmstrom, 1995)



شکل ۳-۳۵- فاکتور تصحیح K_a برای متوسط فاصله تیغه‌ها از هم (Palmstrom, 1995)

فلوچارت کلی روش RMI در شکل ۳-۳۶ نشان داده شده است.

مانند مقاومت فشاری و کششی و ترکیب آن‌ها با هندسه برش‌دهنده، تخمینی از نیروهای برش (نیروهای نرمال و غلتشی) می‌دهند (Nelson et al, 1983).

۳-۴-۵-۱- مدل ریاضی مدرسه عالی معدن کلرادو برای تعیین نیروهای روی برش‌دهنده در یک نفوذ مشخص

نیروی برآیند توسط مدرسه عالی معدن کلرادو با استفاده از رابطه ۳-۶۰ محاسبه می‌شود.

(۳-۶۰)

$$F_t = \frac{P^0 \phi RT}{1 + \psi}$$

که در آن:

F_t : نیروی برآیند (lb)

R : شعاع برش‌دهنده (in)

T : ضخامت لبه برش‌دهنده (in)

ψ : ثابتی برای توزیع فشار (معمولاً بین ۰/۲ تا ۰/۲- که با افزایش ضخامت لبه برش‌دهنده افزایش می‌یابد)

ϕ : زاویه تماس میان برش‌دهنده و سنگ

$$\phi = \cos^{-1} \left(\frac{R - P}{R} \right) \quad (۳-۶۱)$$

P : نفوذ در هر چرخش کله حفار (in)

P^0 : فشار در منطقه خرد شده که با توجه به مقاومت سنگ و هندسه برش‌دهنده تخمین زده می‌شود (Rostami et al, 1996).

$$P^0 = f(\sigma_c, \sigma_t, S, T, R, P) \quad (۳-۶۲)$$

σ_c : مقاومت فشاری تک محوره (psi)

σ_t : مقاومت کششی سنگ (psi)

S : فاصله داری میان دیسک‌ها (in)

برای محاسبه فشار در منطقه خرد شده از تحلیل رگرسیون داده‌های موجود یا روابطی که در منابع مختلف ارائه شده است می‌توان استفاده کرد. طبیعتاً استفاده از این روابط به دامنه‌ای که داده‌های بانک اطلاعاتی در آن قرار دارند محدود می‌شود. این محدودیت به‌طور همزمان به ویژگی‌های سنگ، هندسه و اندازه برش‌دهنده اعمال می‌شود. اخیراً این رابطه‌ها برای برش‌دهنده‌های ۱۹-۵ اینچی و سنگ‌های با مقاومت ۲۵۰-۳۰ مگاپاسگال و دامنه‌هایی برای چندین پارامتر دیگر گسترش داده شده‌اند. بر مبنای تحلیل رگرسیون روی داده‌های بانک اطلاعاتی رابطه‌ای برای فشار در منطقه خردشده به‌صورت رابطه ۳-۶۳ حاصل شده است (Rostami et al,1996).

$$P^0 = C_3 \sqrt{\frac{S}{\phi \cdot \sqrt{R \cdot T}}} \cdot \sigma_c^2 \cdot \sigma_t \quad (3-63)$$

در این رابطه C یک ضریب است (حدود ۲/۱۲). دیمانسیون رابطه بالا معادل فشار است. برای تخمین نیروهای نرمال و غلتشی می‌توان از معادلات زیر بهره گرفت (Rostami et al,1996).

$$F_n = F_t \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (3-64)$$

$$F_r = F_t \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (3-65)$$

که در آن:

F_n نیروی نرمال (lb)

F_r نیروی غلتشی (lb)

این رابطه‌ها بر مبنای توزیع یکنواخت فشار در ناحیه تماس به‌دست آمده‌اند. با استفاده از روابط بیان شده می‌توان پارامترهای ماشین را برای یک سنگ مشخص و نرخ نفوذ به‌صورت روابط ۳-۶۶ تا ۳-۷۰ محاسبه کرد (Rostami et al,1996).

۱- محاسبه نیروی محوری کل مورد نیاز

$$(۶۶-۳) \quad Th^* = \sum_1^N F_n \approx N.F_n$$

۲- محاسبه گشتاور

$$(۶۷-۳) \quad Tq^* = \sum_1^N F_{ri}.R_i \approx 0.3.D.N.F_r$$

۳- محاسبه سرعت چرخش کله حفار

$$(۶۸-۳) \quad RPM = \frac{V}{\pi.D}$$

۴- محاسبه توان مور نیاز برای کله حفار

$$(۶۹-۳) \quad HP^* = \frac{Tq^* RPM}{5250}$$

۵- محاسبه توان و نیروی محوری مورد نیاز با منظور کردن راندمان η (مثلاً $Th = \frac{Th^*}{\eta}$)

$$(۷۰-۳) \quad (Th = \frac{Th^*}{\eta})$$

در روابط بالا

D : قطر TBM (m)

N : تعداد برش‌دهنده‌ها

V: سرعت خطی مجاز برش‌دهنده‌ها (برای برش‌دهنده‌های ۱۷ اینچی ۱۵۰ متر بر دقیقه می‌باشد) (Rostami et al,1996)

نرخ نفوذ با استفاده از فاکتورهای که توسط CSM معرفی می‌شوند اصلاح می‌شود (Nelson et al,1983).

۳-۴-۵-۲- تصحیح نرخ نفوذ

۳-۴-۵-۲-۱- شاخص دشواری زمین^{۴۹} (GDI)

^{۴۹} Ground Difficulty Index

ازبیه^{۵۰} و همکارانش در سال ۱۹۹۱ شاخص دشواری زمین را معرفی کردند. این شاخص بر اساس داده‌های مربوط به حفاری در یک تونل با سنگ‌های خیلی متغیر به دست آمده است. در این روش نرخ نفوذی که بر مبنای UCS محاسبه می‌شود، در فاکتور f_1 که بر مبنای رده بندی RMR و طبق جدول ۳-۸ تعیین می‌شود ضرب می‌شود (Nelson et al, 1983).

جدول ۳-۸ - فاکتور f_1 برای رده های مختلف RMR (Nelson et al, 1983)

f_1	کلاس RMR
۱	I
۱/۱	II
۱/۱-۱/۲	III
۱/۳-۱/۴	IV
۰/۷	V

۳-۴-۵-۲- اصلاحات پیشنهادی روش CSM برای تخمین نرخ پیشروی

CSM برای ارزیابی تأثیر توده سنگ بر مبنای RQD براساس یک بانک اطلاعاتی برای سنگ‌های ضعیف ($UCS < 100Mpa$) فاکتور f_1 را برای اصلاح نرخ نفوذ به صورت زیر پیشنهاد می‌کند (Nelson et al, 1983).

$$f_1 = 1.0 + (100 - RQD) / 150 \quad (۷۱-۳)$$

و برای سنگ‌های قوی تر ($UCS \geq 100Mpa$)

$$f_1 = 1.0 + (100 - RQD) / 75 \quad (۷۲-۳)$$

به طور خلاصه اگر نگهداری مورد نیاز تغییر زیادی نداشته باشد با افزایش درزه‌های سنگ نرخ نفوذ افزایش می‌یابد. این موضوع در سنگ‌های خیلی محکم از اهمیت خاصی برخوردار است و می‌تواند نرخ نفوذ را افزایش داده و پروژه را اقتصادی‌تر کند. در سنگ‌های ضعیف ترابری و نگهداری از عوامل عمده تأخیر در پروژه هستند (Nelson et al, 1983).

^{۵۰} Eusebio

اولین تأثیر سایش دیسک‌ها روی هزینه است. لذا اغلب سایش دیسک‌ها به‌عنوان یک موضوع مجزا در قرارداد آورده می‌شود. براساس بانک‌های اطلاعاتی حدود ۱/۵ ساعت برای تعویض هر برش‌دهنده زمان لازم است و اگر چند برش‌دهنده با هم تعویض شوند حدود ۴۰-۳۰ دقیقه زمان برای تعویض هر برش‌دهنده لازم است. اگر جریان آب زیرزمینی زیاد باشد، تعویض برش‌دهنده زمان طولانی‌تری می‌برد. میزان چرخش دیسک‌ها در کله حفار با توجه به موقعیت دیسک‌ها متغیر است. عمر غلتشی دیسک‌های مرکزی که تحت شرایط سختی قرار دارند کمتر می‌باشد و عمر دیسک‌های لبه‌ای به‌خاطر این که مسافت بیشتری را طی می‌کنند کوتاه‌تر است. داده‌های حاصل از بانک‌های اطلاعاتی نشان می‌دهد سایش دیسک‌ها روی نرخ نفوذ تأثیر نمی‌گذارد، مگر هنگامی که قطر برنده‌ها ۴۰ میلی‌متر کاهش یابد. برای مقادیر بیش از ۴۰ میلی‌متر، نرخ نفوذ می‌تواند با افزایش نیروی محوری ثابت نگه داشته شود. اگر نیروی محوری افزایش داده نشود نرخ نفوذ ۲۵-۱۵ درصد کاهش می‌یابد. زمان مورد نیاز برای تعویض برش‌دهنده می‌تواند به صورت درصدی از شیف‌ت بیان شود. برای سنگ‌های غیر ساینده این زمان حدود ۳ درصد شیف‌ت و برای سنگ‌های خیلی ساینده حدود ۲۰ درصد می‌باشد (Nelson et al, 1983).

تأخیر ناشی از تعویض برش‌دهنده می‌تواند برای یک متر حفاری نیز بیان شود. در سنگ‌های غیرساینده این زمان ۰/۰۵-۰/۰۲ ساعت بر متر است و در سنگ‌های خیلی ساینده ۰/۲ ساعت بر متر می‌باشد. در قوس‌ها عمر برش‌دهنده کاهش می‌یابد. CSM معادله‌ای را برای توصیف اثر قوس‌ها روی عمر برش‌دهنده ارائه کرده است. CSM از فاکتور اصلاحی f_2 که در عمر نرمال برش‌دهنده ضرب می‌شود برای به‌دست آوردن عمر برش‌دهنده در مناطق منحنی شکل استفاده می‌کند. فاکتور f_2 به‌صورت زیر تعیین می‌شود (Nelson et al, 1983).

$$f_2 = 1.23 / R \quad (73-3)$$

R : شعاع قوس بر حسب متر

فاکتور f_3 برای منظور کردن تأخیرهای ناشی از جلو راندن ماشین توسط CSM به‌صورت زیر پیشنهاد شده است (Nelson et al, 1983).

$$f_3 = (hr / m) = 0.030(hr / m) + 409(m.hr) / R^2 \quad (74-3)$$

CSM برای منظور کردن تعمیرات خارج از برنامه زمان‌بندی، فاکتور تصحیح f_4 را به صورت زیر معرفی می‌کند (Nelson et al,1983).

f_4 برابر یک ساعت به ازای ۱ ساعت حفاری با ماشین در مرحله آغازین حفاری (کارگران بدون تجربه)

f_4 برابر $0/324$ ساعت به ازای ۱ ساعت حفاری ماشین بعد از آغاز حفاری (کسب تجربه)

تعمیرات زمان‌بندی شده، بررسی کله حفار و روغن کاری حدود $0/067$ ساعت تأخیر در ۱ ساعت حفاری با TBM ایجاد می‌کند.

تأخیرات ناشی از عملیات نقشه‌برداری برای تونل‌های مستقیم $0/033$ ساعت بر متر حفاری شده از تونل می‌باشد. برای قوس‌ها تأخیر ناشی از نقشه‌برداری از رابطه $3-75$ محاسبه می‌شود (Nelson et al,1983).

$$Survey Delay (hr / m) = 0.0033 + 192 / R^2 \quad (3-75)$$

R: شعاع قوس به متر می‌باشد.

به عنوان مثال برای یک تونل با طول ۲۰۰ متر و در قوس با شعاع ۱۵۰ متر تأخیر ناشی از نقشه‌برداری حدود $2/5$ ساعت می‌باشد.

برای مقادیر ناچیز تراوش آب، تأخیر وابسته به آن حدود $0/056$ ساعت بر متر حفاری شده از تونل می‌باشد. در شرایطی که تراوش آب حدود ۳-۴ متر مکعب بر دقیقه در یک متر تونل است، تأخیر ناشی از وجود آب حدود $0/085$ ساعت بر متر حفاری شده از تونل می‌باشد. در نرخ‌های تراوش بالاتر ($15 m^3/min/m$) که عملیات تزریق نیز صورت می‌گیرد، این تأخیر تا ۲ ساعت بر متر حفاری شده از تونل می‌رسد (Nelson et al,1983).

تأخیرات ناشی از سیستم ترابری می‌تواند با توجه به شیب تونل، برای حفاری و سیستم ترابری مورد استفاده تعیین شود. در جدول ۳-۹ برخی راهنمایی‌های کلی در این مورد آورده شده است (Nelson et al,1983).

جدول ۳-۹- تأخیرات ناشی از سیستم ترابری (Nelson et al,1983)

تأخیر hr/m	سیستم ترابری	توصیف تونل
۰/۱۱۵	کامیون	آغاز حفاری مرحله تولید
۰/۰۷۱	نوار نقاله	۱۵- تا ۱- درجه رو به پایین
۰/۰۵۵	واگن و ریل	۱- تا ۳+ درجه
۰/۰۷۱	نوار نقاله	۱۵+ تا ۳+ درجه رو به بالا

تأخیرات ناشی از خدمات‌رسانی نیز به شیب تونل بستگی دارد و به‌صورت رابطه ۳-۷۶ تعیین می‌شود (Nelson et al,1983).

$$Utility\ Delays\ (hr\ /\ m\ of\ tunnel) = 0.030 + 0.0013G \quad (۳-۷۶)$$

G: شیب تونل و واحد آن درجه می‌باشد.

تأخیرات ناشی از نصب پوشش موقت تابعی از کیفیت توده سنگ است. در روش CSM از رده‌بندی RMR برای تعیین تأخیر ناشی از نصب نگهداری استفاده شده است که در جدول ۳-۱۰ آورده شده است.

جدول ۳-۱۰- تأخیرات ناشی از نصب پوشش (Nelson et al,1983)

RMR	تأخیر (ساعت بر متر حفاری شده از تونل)
I	۰
II	۰
III	۰
IV	۰/۰۲۸
V	۰/۰۴۳

تأخیرات کارگری مثلاً تأخیر ناشی از تعویض شیفت و زمان نهار نیز باید ارزیابی شود. CSM منظور کردن حدود ۲ درصد از کل زمان شیفت را برای این تأخیرها پیشنهاد می‌کند. با توجه به اصلاحاتی که ارائه شده است، نرخ نفوذ حاصل شده از روش CSM تعدیل شده و نرخ پیشروی به‌دست می‌آید (Nelson et al, 1983).

۳-۵- جمع‌بندی

برای پیش‌بینی عملکرد TBM ها روش‌های مختلفی ارائه شده است. برخی از این روش‌ها پارامترهایی از جمله تأثیرات ناپیوستگی‌ها و ویژگی‌های دستگاه را در نظر نمی‌گیرد و برخی از این روابط در سنگ‌های به‌خصوص به‌دست آمده است، بنابراین از دقت کافی برخوردار نمی‌باشند. در میان مدل‌های موجود برای پیش‌بینی عملکرد TBM ها، مدل‌های Q_{TBM} ، RMi ، NTH و CSM تقریباً تمامی پارامترهای مؤثر در نرخ نفوذ که شامل ویژگی‌های توده سنگ و مشخصات دستگاه می‌باشد، را در نظر گرفته‌اند. مدل RMi برگرفته شده از مدل NTH می‌باشد و فرضیات این ۲ روش تقریباً مشابه هم می‌باشد. ۲ روش NTH و CSM به‌طور گسترده‌ای در صنعت استفاده می‌شوند و منبع قابل اطمینان‌تری از اطلاعات و پیش‌بینی عملکرد، بوسیله آزمایش برش بزرگ مقیاس برای رفع کردن فرضیات کاری و فراهم کردن اطلاعات بر روی رفتار برش سنگ با استفاده از روش CSM ایجاد می‌شود. در حال حاضر مدل CSM می‌تواند برای تخمین نرخ نفوذ پایه و فراهم کردن قابلیت بهبود طراحی دستگاه استفاده شود و مدل NTH برای تعدیل کردن تخمین CSM و ترکیب کردن تأثیرات ناپیوستگی‌ها و توده سنگ به‌کار برده می‌شود.

تونل انتقال آب از رودخانه دز به قمرود از جمله طرح‌های عمرانی بزرگ و ملی محسوب می‌شود که هدف از اجرای این طرح تأمین آب شرب دراز مدت شهرهای قم، دلجان، محلات، خمین و گلپایگان می‌باشد. انتخاب روش درست حفاری در این پروژه تصمیمی پیچیده بوده که نیاز به در نظر گرفتن بسیاری از فاکتورهای فنی و اقتصادی دارد. برای انتخاب روش حفاری مناسب، اطلاعات و داده‌های مناسب مورد نیاز می‌باشد. در این فصل مختصری در مورد انواع روش‌های حفاری تونل صحبت شده است و سپس TBM مناسب برای حفاری قطعات ۲ و ۱ تونل انتقال آب قمرود انتخاب شده است.

۴-۲- انواع روش‌های حفاری تونل

روش‌های حفر تونل به ۲ دسته سنتی (چال‌زنی و آتش‌کاری) و مکانیزه تقسیم‌بندی می‌شوند.

۴-۲-۱- حفاری سنتی

برای حفاری قطعات ۲ و ۱ تونل انتقال آب قمرود از دو روش حفاری سنتی و حفاری مکانیزه می‌توان استفاده کرد که با توجه به طولانی بودن مسیر تونل و همچنین شرایط زمین‌شناسی موجود و سرعت پایین روش چال‌زنی و آتش‌کاری، امکان به‌کارگیری روش سنتی برای پروژه منتفی بوده و حفاری مکانیزه انتخاب گردید.

۴-۲-۲- حفاری مکانیزه

در سال‌های اخیر همزمان با پیشرفت تکنولوژی، ماشین‌های حفر تونل نیز پیشرفت قابل ملاحظه‌ای یافته‌اند. این ماشین‌ها شامل ماشین‌های تونل‌زنی بازویی^{۵۱} و ماشین‌های تونل‌زنی تمام مقطع^{۵۲} (TBM) می‌باشند.

از آنجایی که در مترائهای زیادی از مسیر تونل نگهداری فعال جبهه کار نیاز می‌باشد که ماشین‌های تونل‌زنی بازویی قادر به انجام این کار نمی‌باشند، بنابراین امکان به‌کارگیری این روش وجود ندارد. از طرفی ماشین‌های

^{۵۱} Boom Type Machine

^{۵۲} Tunnel Boring Machine

تونل‌زنی بازویی معمولاً قابلیت حفاری در سنگ‌هایی با مقاومت فشاری تک محوره ۸۰ تا ۱۰۰ مگاپاسکال را دارا می‌باشند (Rostami et al, 1995) و از آن‌جایی که مقاومت فشاری تک محوره سنگ‌هایی چون متاریولیت، متادولومیت و مرمر نزدیک به ۸۰ مگاپاسکال می‌باشد و ضمناً مقاومت این توده سنگ‌ها در داخل زمین به دلیل فشار محصورشدگی افزایش می‌یابد و همچنین احتمال حضور کانی‌های ساینده مانند کوارتز در این سنگ‌ها زیاد می‌باشد بنابراین امکان به‌کارگیری این روش وجود ندارد.

امروزه ماشین‌های TBM به ۲ دسته کلی حفاری در خاک و حفاری در سنگ تقسیم بندی می‌شوند. با توجه به این‌که طول بسیار زیادی از قطعات ۲ و ۱ از داخل زمین‌های نرم و سست و آبرفتی می‌گذرد که نیاز به نگهداری فعال جبهه کار می‌باشد، بنابراین ماشین‌های حفاری مکانیزه از نوع ماشین تونل‌زنی تمام مقطع بدون سپر^{۵۲}، ماشین تونل‌زنی تمام مقطع سپری منفرد^{۵۴} و ماشین تونل‌زنی تمام مقطع سپری مضاعف^{۵۵} که در آن‌ها امکان ایجاد نگهداری فعال جبهه کار وجود نداشته باشد، قابل کاربرد نمی‌باشند. در نتیجه بایستی یکی از ماشین‌های تونل‌زنی در زمین‌های نرم استفاده شود. بنابراین در ادامه به معرفی اجمالی ماشین‌های حفر تونل در زمین‌های نرم پرداخته می‌شود (ITA – AITES, 2000).

۴-۲-۳- ماشین‌های تونل‌زنی در زمین‌های نرم

ماشین‌های تونل‌زنی در زمین‌های نرم شامل موارد زیر می‌باشند:

الف- ماشین تونل‌زنی با سپر باز^{۵۶}

در این روش، حفاری با استفاده از یک رودهدر انجام می‌شود. روش سپر باز در سنگ‌های چسبنده و به‌طور کلی در زمین‌های خودنگهدار کاربرد دارد. در زمینی که فاقد پتانسیل خود نگهداری است بایستی پیش‌تحکیم مناسب یا پیش نگهداری جبهه کار انجام شود (ITA – AITES, 2000).

^{۵۲} Open TBM

^{۵۴} Single Shield TBM

^{۵۵} Double Shield TBM

^{۵۶} Open Shield

ب- ماشین تونل زنی سپر باز با نگهداری مکانیکی^{۵۷}

سپر باز با نگهداری مکانیکی شبیه به آنچه که در سپر باز توضیح داده شد می باشد. نگهداری جبهه کار در این روش با استفاده از صفحات فلزی انجام می شود و کاربرد آن در سنگ های نرم، زمین نسبتاً چسبنده، به طور کلی در زمین های خودنگهدار و فاقد آب زیر زمینی می باشد (ITA – AITES, 2000).

ج- ماشین تونل زنی سپر بسته با نگهداری مکانیکی^{۵۸}

در این روش کله حفار ۲ نقش اساسی را بازی می کند. اول این که به عنوان کله حفار عمل می کند و دیگری نگهداری جبهه کار می باشد. کاربرد آن در زمین های نرم، نسبتاً چسبنده، به طور کلی در زمین های خودنگهدار و فاقد آب زیر زمینی می باشد (ITA – AITES, 2000).

د- ماشین تونل زنی سپر بسته هوای فشرده^{۵۹}

این روش در زمین های فاقد پتانسیل خودنگهداری و با نفوذپذیری پایین یا متوسط ($K \leq 10^{-4} \text{m/s}$) کاربرد دارد و در مسیرهایی که آب زیرزمینی نیز وجود دارد استفاده می شود. نفوذپذیری بالاتر می تواند به وسیله تزریق دوغاب بنتونیت به جبهه کار حفاری، به طور موضعی کاهش داده شود (ITA – AITES, 2000).

ه- ماشین تونل زنی سپر باز هوای فشرده^{۶۰}

در این روش همانند سپرهای باز، جبهه کار با استفاده از یک رودهدر حفاری می شود. نگهداری جبهه کار با استفاده از هوای فشرده، برای متعادل کردن فشار هیدرواستاتیکی زمین فراهم می شود و کاربرد آن مانند سپر بسته هوای فشرده می باشد (ITA – AITES, 2000).

و- ماشین تونل زنی سپر دوغابی بسته^{۶۱}

^{۵۷} Mechanical Supported Open Shield

^{۵۸} Mechanically Supported Closed Shield

^{۵۹} Compressed Air closed Shield

^{۶۰} Compressed Air Open Shield

^{۶۱} Closed Slurry Shield

در این روش نگهداری جبهه کار با استفاده از فشار تزریق انجام می‌شود. استفاده از دیسک‌ها ماشین را قادر می‌سازد تا در سنگ نیز حفاری کند. نصب سنگ شکن در محفظه حفاری قطعات بزرگ را خرد می‌کند و اجازه عبور آن‌ها را نمی‌دهد. روش مذکور برای زمین‌های با پتانسیل خود نگهداری محدود و وجود آب زیرزمینی مناسب هستند. این روش برای زمین‌های ماسه‌ای و گراول و سیلت درشت دانه، با قابلیت نفوذپذیری آبی بین 10^{-8} تا 10^{-2} متر بر ثانیه استفاده می‌شود. دوغاب مورد استفاده به جابجایی و انتقال مواد، نگهداری جبهه کار و جلوگیری از نشست کمک می‌کند و همچنین ابزار و وسایل را روان و خنک می‌کند. دوغاب شامل یک تعلیقی از بنتونیت در آب با افزودنی‌های مناسب می‌باشد. دوغاب مورد استفاده بایستی نفوذپذیری پایینی داشته باشد بنابراین بیشتر آب از دوغاب خارج می‌شود در نتیجه غلیظ‌تر و نفوذ ناپذیرتر می‌شود.

بازیابی دوغاب به رقیق کردن، اضافه کردن بنتونیت تازه و افزودنی‌هایی مانند پلیمرها و یا تثبیت کننده‌های PH نیاز دارد که این فرآیند در یک کارخانه جداسازی انجام می‌شود (EFNARC, 2001) - (ITA – AITES, 2000).

ز- ماشین تونل‌زنی سپر دوغابی^{۶۲}

در این روش نگهداری جبهه کار با استفاده از فشار تزریق فراهم می‌شود. حفاری با استفاده از یک رودهدر و یا با استفاده از جت‌های فشار آب بالا انجام می‌شود و کاربرد آن شبیه سپر دوغابی بسته می‌باشد (ITA – AITES, 2000).

ح- سپر تعادلی با فشار زمین^{۶۳} (EPBS)

سپر تعادلی با فشار زمین از یک محفظه حفاری^{۶۴} در قسمت پشت کله حفار تشکیل شده است که برای نگهداری جبهه کار ناپایدار، محفظه حفاری با مواد حفاری شده پر می‌شود. در مورد دسترسی به محفظه حفاری، مواد پایین آورده می‌شود. در هنگام استفاده از ماشین حفاری از نوع EPB از افزایشدهایی نیز استفاده می‌شود. یک ماده کمکی مهم، مقدار محدود شده‌ای از بنتونیت می‌باشد که در طی تونل‌سازی به منظور مینیمم کردن نفوذپذیری جبهه کار و یا افزایش در پایداری به کار برده می‌شود. در

^{۶۲} Open Slurry Shield

^{۶۳} Earth Pressure Balance Shield

^{۶۴} excavation chamber

تکنولوژی جدید، تولید بنتونیت به صورت خودکار، در طی کاهش فشار در محفظه حفاری از طریق یک سنسور فشار اتوماتیک می باشد. اگر فشار کاهش پیدا کند، بنتونیت به صورت خودکار به داخل محفظه حفاری پمپ می شود. این روش به خصوص در طی مدت از کارافتادگی و تعطیلات آخر هفته مفید می باشد.

بیشتر کاربرد سپر تعادلی با فشار زمین در زمین های با پتانسیل خود نگهداری محدود و زمین هایی که نیاز به نگهداری دارد می باشد. برای حفاری در سیلت ها یا رس های با ماسه، مارن و شیست رس دار استفاده می شوند. هنگامی که مسیر تونل دارای سنگ های سخت باشد، دیسک ها نیز بر روی دستگاه EPB قرار می گیرند.

در زمین های سایشی و سخت از افزاینده های مخصوص بر روی کله حفر و نقاله مارپیچی^{۶۵} استفاده می شود.

کله حفر EPB غالباً به صورت هیدرولیکی کار می کند و معمولاً آهسته و با گشتاور بالا می چرخد. ماشین تونل سازی از نوع EPB، برای حمل و نقل مواد حفاری شده از نقاله مارپیچی استفاده می کند که اجازه می دهد فشار به صورت تدریجی کاهش پیدا کند (EFNARC, 2001) - (ITA – AITES, 2000).

۴-۲-۴- لزوم استفاده از تونل زنی با استفاده از سپر بسته

با توجه به این که خط پروژه به طور کلی در زیر سطح آب زیرزمینی قرار دارد و این شرایط از دیدگاه های گوناگون و با توجه به شرایط زمین شناسی ریسک های گوناگون را بوجود می آورد، که در مناطق آبرفتی تونل به شکلی خاص و در مناطق سنگ های سخت درزه دار به گونه ای دیگر عمل خواهد کرد. در سنگ های نرم مسیر نیز امکان ریزش توده های سنگ وجود خواهد داشت. در این مناطق اگرچه ماده سنگ نفوذپذیری بسیار پایین دارد ولی در شرایط خردشدگی می تواند جبهه کار را به مقدار زیادی با هجوم آب مواجه کند. سنگ های سخت مسیر نیز که عمدتاً شامل آهک ها و دولومیت های دگرگونی و بعضاً سنگ های کوارتزیتی می باشند در صورت برخورد با سیستم های درزه اصلی در این سنگ های کربناته، احتمال برخورد با آب فراوان و با فشار بالا وجود خواهد داشت. با توجه به موارد ذکر شده استفاده از سپرهای به صورت بسته

^{۶۵} Screw conveyor

الزامی می‌باشد. بنابراین بایستی بین سپر بسته با نگهداری مکانیکی، سپر بسته هوای فشرده، سپر دوغابی بسته و سپر تعادلی با فشار زمین گزینه مناسب انتخاب شود.

۴-۳- نام پروژه و وضعیت زمین‌شناسی پروژه و روش حفر شده در دیگر نقاط جهان

در جدول ۴-۱ روش به کار رفته برای بعضی از پروژه‌های حفاری در نقاط مختلف جهان به همراه شرایط زمین‌شناسی آن‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که از جدول مذکور مشاهده می‌شود در جبهه کارهای مختلط و تونل‌هایی که از زمین‌های نرم و سنگ‌های سخت عبور می‌کنند از روش EPB به همراه دیسک استفاده شده است.

جدول ۴-۱- نام پروژه و وضعیت زمین‌شناسی پروژه و روش انتخاب شده برای حفاری
(Dr.Martin Herrenknecht)

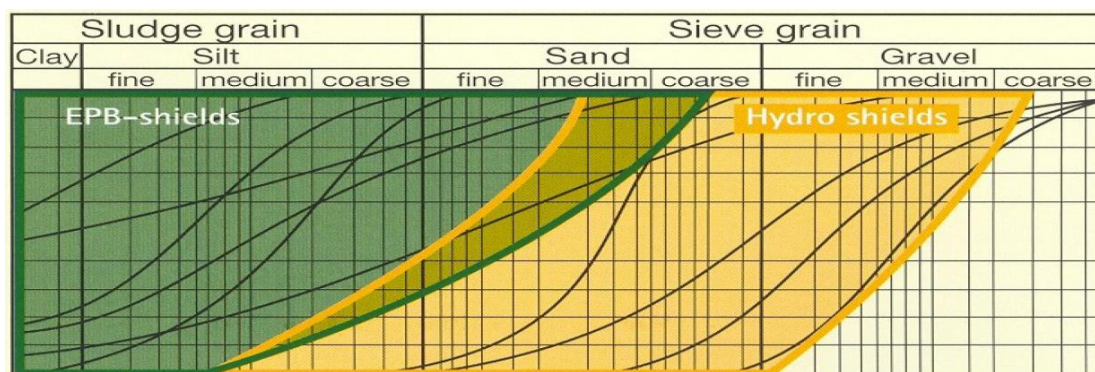
شرایط زمین‌شناسی	ماشین به کار رفته	قطر حفاری (m)	نام پروژه
گچ، ماسه، رس، آهک	EPB Shield	۱۱/۵۶۵	Socatop/France
رس، کنگلومرا و سنگ‌های با مقاومت بیشتر از ۷۰ مگاپاسکال	EPB Shield	۶/۲۵	Guangzhou/China
رس، سیلت، ماسه سنگ، آبرفت، کنگلومرا، گرانیت	EPB Shield	۴/۴۵ و ۴/۸۸	Singapore
مخلوط رس و شن، گچ	EPB Shield	۹/۳۳	Madrid
ماسه، رس، ماسه سیلتی رس دار، رس با لایه‌هایی از ماسه	EPB Shield	۹/۷۷۵	Botleespoortunnel/Netherlands
گرانیت باتولیت خیلی سخت و رس ماسه‌ای و sandy gravel به علاوه لایه‌های پگماتیکی و رگه‌هایی از سنگ آلبیتی	EPB Shield	۸/۹	Porto/Portugal

۴-۴- انتخاب گزینه مناسب برای حفاری قطعات ۲۱ تونل انتقال آب قمروود

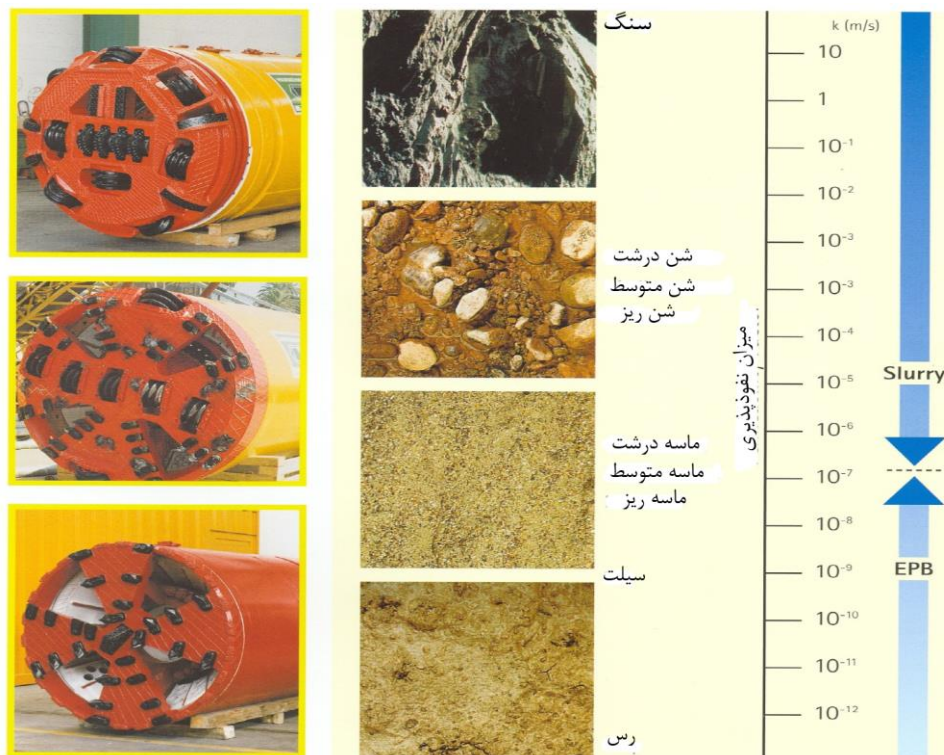
با توجه به این‌که در سنگ‌های نرم احتمال هجوم آب به سینه کار در شرایط خردشدگی وجود دارد و در سنگ‌های سخت مسیر تونل نیز در صورت برخورد با سیستم‌های درزه اصلی احتمال برخورد با آب فراوان و

فشار آب بالا وجود دارد بنابراین استفاده از سپر بسته با نگهداری مکانیکی و سپر هوای فشرده مناسب نمی‌باشد. ضمن این‌که روش‌های سپر بسته با نگهداری مکانیکی و سپر هوای فشرده کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند و بیشتر از نوع سپر دوغابی و سپر تعادلی با فشار زمین در صنعت استفاده می‌شود.

در شکل‌های ۴-۱ و ۴-۲ محدوده کاری سپرهای دوغابی نشان داده شده است و با توجه به این‌که مسیر تونل در مترازهایی از واحدهای آبرفتی که حاوی رس و سیلت می‌باشد عبور می‌کند و کاربرد سپر دوغابی در این زمین‌ها محدود می‌باشد بنابراین انتخاب این ماشین مناسب نمی‌باشد. همچنین روش سپر دوغابی به تجهیزات گسترده‌ای برای فرآیند بازیابی دوغاب بنتونیت از خاک حفاری شده نیاز دارد که هزینه آن بالا می‌باشد و هزینه دفع حجم زیادی از خاک حفاری شده به طریقه‌ای که از لحاظ محیطی مساعد باشد بالا می‌باشد.



شکل ۴-۱- انتخاب ماشین با استفاده از نمودار پیشنهاد شده به وسیله Herrenknecht (Subang, 2006)



شکل ۴-۲- انتخاب ماشین با استفاده از نمودار پیشنهاد شده به وسیله Herrenknecht (Subang, 2006)

TBM از نوع EPB قابلیت حفاری در زمین‌های رسی و سیلتی و شیبست‌دار را دارد و برای حفاری در سنگ‌های سخت مسیر نیز دیسک‌ها بر روی دستگاه EPB قرار می‌گیرند. بنابراین ماشین حفاری مکانیزه از نوع EPB برای حفاری قطعات ۱ و ۲ تونل انتقال آب قمرود بهترین گزینه می‌باشد.

۴-۵- عملکرد ماشین حفاری مکانیزه از نوع سیر تعادلی با فشار زمین (EPBS)

TBM از نوع EPB قابلیت کار در ۳ حالت باز^{۶۶}، نیمه بسته^{۶۷} و بسته^{۶۸} را دارد و می‌باشد. همان‌طوری که در شکل ۴-۳ نشان داده شده است در حالت بسته تمام فضای محفظه حفاری با مواد حفاری شده پر می‌شود. حالت نیمه بسته در صورتی که زمین پایدارتر باشد و چسبندگی کافی داشته باشد مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این حالت قسمتی از فضای محفظه حفاری با مواد حفاری شده پر می‌شود و در قسمت خالی این فضا، از هوای فشرده استفاده می‌شود تا از ناپایداری جبهه کار ممانعت به عمل آید. نرخ پیشروی بالاتر و میزان سایش کمتر ابزار و همین‌طور مصرف افزاینده‌های کمتر در حالت نیمه

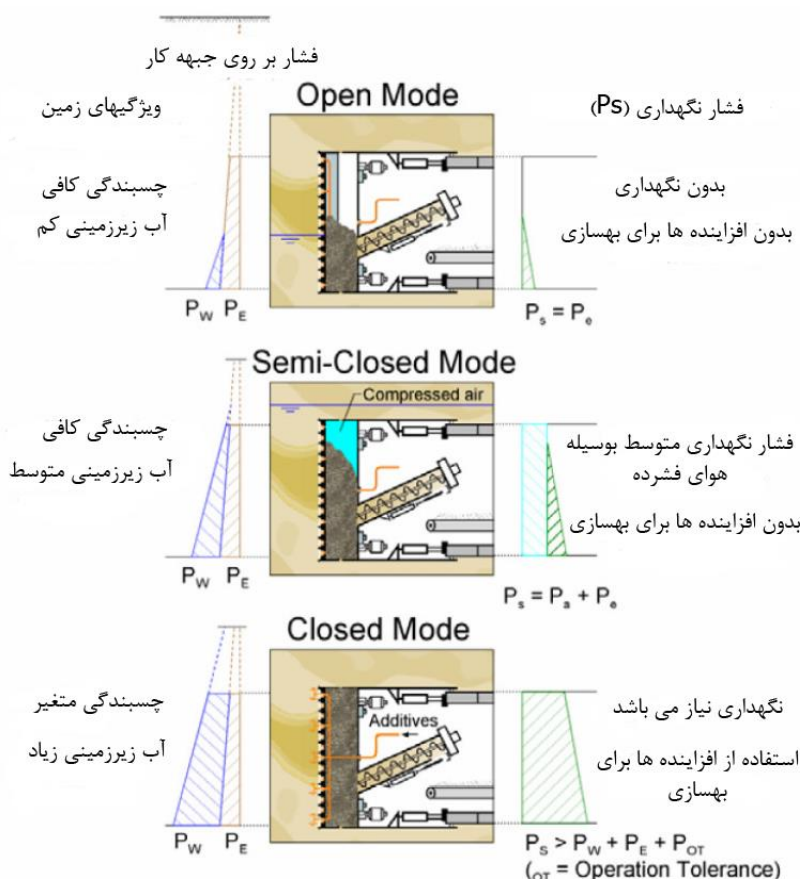
^{۶۶} Open

^{۶۷} Semi-Closed Mode

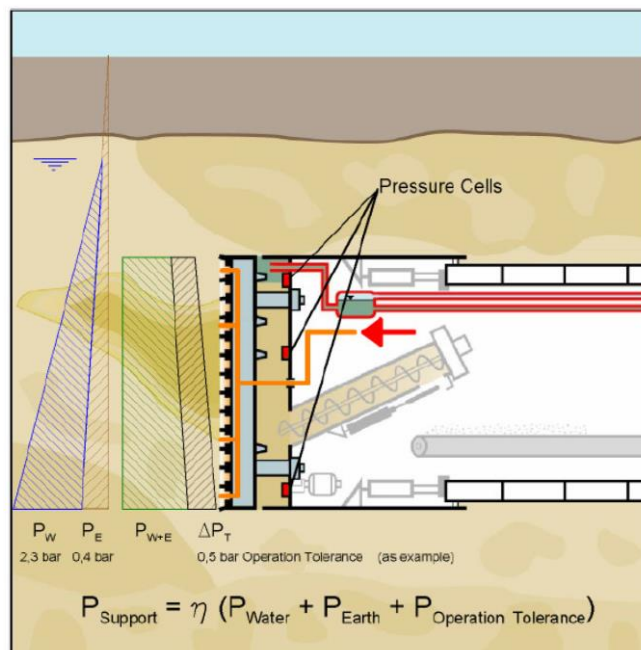
^{۶۸} Closed Mode

بسته، از مزیت‌های این حالت می‌باشد. اگر جبهه کار نیاز به نگهداری فعال نداشته باشد، روش باز نامیده می‌شود. این حالت برای سنگ‌های سخت‌تر می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین می‌توان گفت که دستگاه EPB که در آن از دیسک استفاده شده است و در ۳ حالت ذکر شده در بالا قابلیت کاربرد داشته باشد، می‌تواند در زمین‌هایی مانند ماسه، سیلت، شن دانه‌ریز، ماسه سیلته رس‌دار و سیلت رس‌دار کاربرد داشته باشد و برای حفاری در سنگ‌های سخت مسیر تونل نیز از کارآیی لازم برخوردار باشد (Babendererde.S, et al, 2005).

فشارهایی که بر جبهه کار وارد می‌شود ناشی از فشار زمین و فشار آب می‌باشد در نتیجه تحقیق برای تعیین فشار آب و فشار زمین مورد نیاز می‌باشد. فشارهایی که بر جبهه کار وارد می‌شود در شکل ۴-۴ نشان داده شده است.



شکل ۴-۳- روش عملیاتی دستگاه EPB در ۳ حالت مختلف (Babendererde.S, et al, 2005)



شکل ۴-۴- فشارهای وارد بر جبهه کار (Babendererde.S, et al, 2005)

۴-۶- مشخصات TBM انتخاب شده برای حفاری قطعات ۲۱ تونل انتقال آب قمرود

مشخصات فنی TBM تونل انتقال آب قمرود (قطعات ۲۱) در جدول ۴-۲ آورده شده است و نمایی از TBM به کار گرفته شده در قطعات ۲۱ تونل انتقال آب قمرود در شکل ۴-۵ نشان داده شده است.

جدول ۴-۲- مشخصات فنی ماشین در تونل انتقال آب قمرود برای قطعات ۲۱ (شرکت مهندسی سابیر، ۱۳۸۶)

مشخصات فنی ماشین	واحد	اندازه / تعداد
قطر حفاری	m	۴/۶۹
توان کله حفاری	kw	۱۲۵۰
نیروی رانش پیشروی	KN	۳۱۹۰۰
گشتاور پیچش اسمی	KNm	۱۷۳۱
سرعت دوران کله حفاری	rpm	۶/۳۵
حداکثر توان نصب شده	kw	۲۱۰۰

۶۰۰	mm	قطر Screw Conveyor
۲۰۰	m ³ /h	ظرفیت Screw Conveyor
۲۹		تعداد برنده‌ها



شکل ۴-۵- TBM انتخاب شده در قطعات ۱ و ۲ تونل انتقال آب قمرود (شرکت مهندسی سابیر، ۱۳۸۶)

۴-۷- بهینه‌سازی شرایط خاک در تونل‌سازی با استفاده از ماشین حفاری مکانیزه از نوع EPB

تونل‌سازی با ماشین حفاری مکانیزه از نوع EPB معمولاً به استفاده از افزودنی‌هایی نیاز دارد تا حفاری، نگهداری و حمل و نقل مواد حفاری شده به‌صورت اقتصادی امکان‌پذیر شود. در ادامه محصولاتی که برای تونل‌سازی با EPB مورد استفاده قرار می‌گیرند و تأثیر محصولات به‌کار رفته و مقدار مورد نیاز توضیح داده شده است.

۴-۷-۱- محصولات مورد استفاده برای تونل‌سازی با EPB

بهینه‌سازی خاک به‌وسیله اضافه کردن foam یا افزودنی‌هایی می‌تواند دست‌یافتنی شود. foam ترکیبی از هوا، آب، عامل کف‌ساز و افزاینده‌های مناسب می‌باشد. انتخاب نوع foam و افزودنی‌ها وابستگی زیادی به نوع خاک و همچنین ویژگی‌های TBM دارد. انواع دیگری از افزودنی‌ها مخصوص پراکندگی برای اجتناب از

مشکلات کلوخه‌شدن می‌باشند. افزودنی‌های ضد سایش در کله حفار برای کاهش سایش استفاده می‌شوند. بنتونیت و دیگر افزودنی‌ها برای اجتناب از جداسازی و برای کاهش نفوذپذیری خاک استفاده می‌شوند. آب همچنین ممکن است در بعضی مواقع استفاده شود (EFNARC,2001).

۴-۷-۲- تأثیر محصولات به کار رفته عبارتست از:

- ❖ foam : برای نگهداری فشار، روان سازی مؤثر بر روی خاک، کاهش نفوذ پذیری، پایین آوردن گشتاور، پراکندگی رس و کاهش سایش استفاده می‌شود.
 - ❖ عامل پراکندگی: بیشتر برای خاک با رس بالا استفاده می‌شود.
 - ❖ افزودنی‌های دیگر: به خاطر عملکرد مؤثر بر روی خاک‌های غیر چسبنده، پایداری و تثبیت foam و خاک، نگهداری و حفاظت آب، تأثیرات چسبندگی به کار برده می‌شوند.
 - ❖ عوامل ضد سایش: به خاک‌های خیلی ساینده یا تشکیلات سنگی، برای کاهش سایش کله حفار و ابزار آن و نقاله ماریچی اضافه می‌شوند.
- پارامترهای کلیدی در ارتباط با foam عبارتند از (EFNARC,2001):

- غلظت مواد فعال در سطح در محلول کف ساز^{۶۹} (C_F) که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C_F = 100 \times (\text{foaming} / \text{جرم مواد فعال در سطح در محلول foaming})$$

- نسبت انبساط foam^{۷۰} (FER) که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{FER} = \text{حجم محلول foaming} / \text{حجم هوای فشرده شده}$$

- نسبت تزریق foam^{۷۱} (FIR) که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{FIR} = 100 \times (\text{حجم بر جای خاک حفاری شده} / \text{حجم foam (در ۱ اتمسفر)})$$

با استفاده از شکل ۴-۶ می‌توان نوع foam برای خاک‌های مختلف را انتخاب نمود.

^{۶۹} Concentration of Surfactant Agent in Water (foaming solution)

^{۷۰} Foam Expansion Ratio

^{۷۱} Foam Injection Ratio

Soil	انواع foam			تزریق foam		دیگر افزاینده های تونل		
	A	B	C	C _F	FIR	عامل پراکندگی	تثبیت و پایداری foam	تثبیت و پایداری خاک
Clay	◆			+	+	++	-	-
Sandy clay – silt	◆	◆		+	+	+	-	-
Sand – clayey silt	◆			+	++	o	+	-
Sand	◆	◆		++	+++	-	++	++
Clayey gravels		◆		++	++	-	+++	+
Sandy gravels		◆		+++	+++	-	+++	+++

شکل ۴-۶- انواع foam برای ماشین های EPB در ارتباط با خاک های مختلف (EFNARC,2001)

- معمولاً واجب نیست
- O معمولاً نیازی نیست اما گاهی اوقات استفاده می شود
- + در مقدارهای کم مفید می باشد
- ++ در مقدارهای زیاد مفید می باشد
- +++ شدیداً در مقدارهای زیاد توصیه شده

❖ foam نوع A: ظرفیت پراکنده کردن بالا (شکستن پیوستگی و حالت زنجیری رسی)

❖ foam نوع B: همه منظوره، با پایداری متوسط

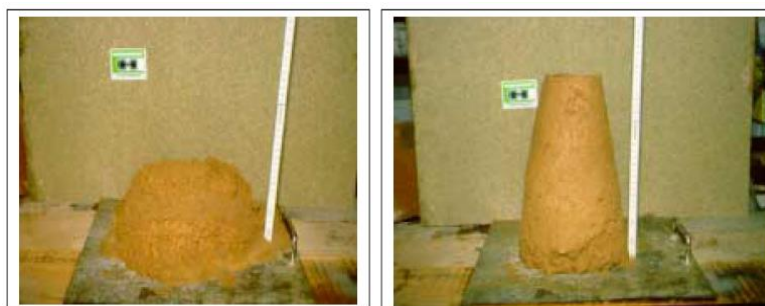
❖ foam نوع C: پایداری و تثبیت بالا و ویژگی های ضد جداسازی (تفکیک)، برای توسعه و حفظ

چسبندگی خاک و همچنین تا حد امکان غیر قابل نفوذ شدن آن.

بهسازی خاک از طریق افزاینده ها، باعث چسبندگی مصنوعی موقتی و همچنین کاهش نفوذپذیری می شود.

خاک فوراً چسبنده می شود که برای تکنولوژی EPB لازم می باشد (EFNARC,2001). بهسازی خاک با استفاده از

foam در شکل ۴-۷ نشان داده شده است.



شکل ۴-۷- بهسازی خاک با استفاده از foam (شکل سمت راست با foam می باشد) (Dr.Martin Herrenknecht)

۴-۷-۳- مقدار مواد به کار برده شده برای بهینه سازی خاک:

محلول foaming: غلظت محلول foaming (C_F) معمولاً در رنج ۰/۵ تا ۵ درصد می باشد و در بیشتر موارد حدود ۳ درصد می باشد. این غلظت شدیداً وابسته به مقدار آبی که در خاک تزریق می شود و یا مقدار آبی که قبلاً در خاک وجود داشته است می باشد و به علاوه به فعالیت و پایداری foam استفاده شده در تونل بستگی دارد (EFNARC, 2001).

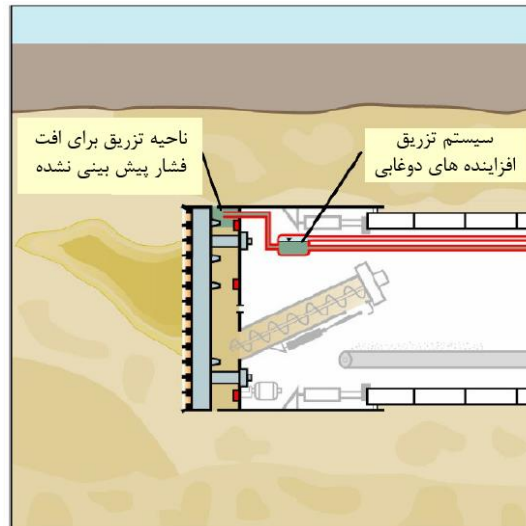
نسبت انبساط foam (FER): FER بایستی بین ۵ تا ۳۰ درصد باشد و در بیشتر موارد حدود ۱۰ درصد می باشد. نسبت تزریق foam (FIR): FIR می تواند ۱۰ تا ۸۰ درصد باشد، که در بیشتر موارد ۳۰ تا ۶۰ درصد می باشد. مقدار آب خاک یا مقدار آب تزریق شده نقشی اساسی را دارد.

افزایش پلیمر: در بعضی موارد پلیمرها می توانند برای بهبود پایداری foam و تنظیم کردن غلظت خاک عبوری از میان محفظه حفاری و یا نقاله مارپیچی اضافه شوند. غلظت استفاده شده بایستی بین ۰/۱ تا ۵ درصد در محلول foaming باشد.

اضافه کردن تثبیت کننده ها: این افزایشها بایستی اساساً از تفکیک و جداسازی جلوگیری کنند. غلظت آنها بایستی بین ۰/۱ تا ۵ درصد در محلول foaming باشد.

دیگر افزایشها: غلظت دیگر افزایشها تونل مانند محصولات ضد سایش یا ضد کلوخه شدن بستگی به نوع افزایشها دارد و تابعی از آن می باشند (EFNARC, 2001).

همان طوری که در شکل ۴-۸ مشخص می باشد هنگامی که مقدار فشار در جبهه کار از حد مشخصی کمتر می شود آن گاه دوغاب بنتونیت به طور اتوماتیک تزریق می شود تا این که میزان فشار در جبهه کار تنظیم شود.



شکل ۴-۸- سیستم تزریق افزایش دهنده ها به فضای جبهه کار (Babendererde.S, et al, 2005)

۴-۸- جمع بندی

- ❖ با توجه به طول مسیر تونل انتقال آب قمرود و با توجه به این که مترائهای زیادی از قطعات ۲ و ۱ تونل، از زمین های نرم و آبرفتی عبور می کند که نگهداری فعال جبهه کار ضروری می باشد، بنابراین امکان به کارگیری روش های سنتی و ماشین حفار بازویی و ماشین های تونل زنی از نوع ماشین تونل زنی تمام مقطع بدون سپر، ماشین تونل زنی تمام مقطع سپری منفرد و ماشین تونل زنی تمام مقطع سپری مضاعف که قابلیت ایجاد نگهداری لازم در جبهه کار را نداشته باشند، وجود ندارد.
- ❖ سپرهای دوغابی بسته در زمین های ماسه، گراول و سنگ کاربرد دارند ولی در زمین های سیلت و رس دار مشکل دارند و همچنین جدا کردن رس در کارخانه جداسازی مشکل می باشد و نیاز به تجهیزات گسترده ای دارد که هزینه های آن بالا می باشد. بنابراین سپر دوغابی گزینه مناسبی برای حفر قطعات ۲ و ۱ تونل انتقال آب قمرود نمی باشد.
- ❖ دستگاه EPB معرفی شده قابلیت کاربرد در زمین هایی مانند خاک چسبنده تا سنگ های پایدارتر و سخت تر که تحت شرایط آب زیرزمینی نیز قرار دارند، را دارا می باشد. بنابراین ماشین حفاری تمام مقطع از نوع EPB برای کل مسیر تونل مناسب می باشد.

❖ در هنگام استفاده از دستگاه EPB بهینه‌سازی خاک به وسیله اضافه کردن foam یا افزودنی‌هایی می‌تواند دست یافتنی شود. هدف از استفاده از این مواد اولاً حفظ فشار نگهداری لازم در محفظه حفاری می‌باشد. آن‌ها همچنین گشتاور و سایش را کاهش خواهند داد و به حمل و نقل مواد حفاری شده کمک می‌کنند.

۵-۱- مقدمه

در این فصل با استفاده از ۴ روش Q_{TBM} ، RMI، NTH و CSM نرخ نفوذ و نرخ پیشروی روزانه برای هر یک از واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل انتقال آب قمرود (قطعات ۱ و ۲) که در جدول ۵-۱ آورده شده است، محاسبه شده است. آنگاه مقدار نرخ پیشروی روزانه تخمین زده شده توسط این روش‌ها با مقدار نرخ پیشروی واقعی در ۳ واحد زمین‌شناسی ابتدای تونل که حفاری آن انجام شده است مقایسه شده تا مشخص گردد که نتایج کدام یک از این روش‌ها دقیق‌تر می‌باشد. در انتها نیز زمان اتمام تونل تخمین زده شده است.

۵-۲- محاسبات پیش‌بینی عملکرد TBM تونل انتقال آب قمرود با استفاده از روش‌های مختلف

در این بخش ابتدا در مورد مناطق آبرفتی که قسمتی از مسیر تونل انتقال آب قمرود از آن عبور می‌کند صحبت شده است و سپس به پیش‌بینی نرخ نفوذ و نرخ پیشروی در واحدهای دیگر مسیر تونل پرداخته شده است.

۵-۲-۱- پیش‌بینی نرخ پیشروی در مناطق آبرفتی

لازم به ذکر است که در طولی از مسیر تونل که از مناطق آبرفتی عبور می‌کند هیچ‌کدام از روش‌های ذکر شده قادر به پیش‌بینی نرخ نفوذ نمی‌باشد و برای این مناطق از نتایج کارهای گذشته استفاده شده است.

در واحدهای آبرفتی میزان نفوذ واقعی حدود ۲۰ تا ۵۰ میلی‌متر در دقیقه می‌باشد. در این نوع زمین‌ها به دلیل تأخیرات ناشی از محدود شدن سرعت حفاری (از آنجایی که در آبرفت‌ها، TBM به صورت روش بسته^{۷۲} یا نیمه بسته^{۷۳} کار می‌کند) و به منظور کاهش میزان گشتاور^{۷۴} و جریان برق مصرفی، میزان نیروی عمودی کاهش می‌یابد و در مجموع پیشروی نیز کاهش می‌یابد (Carroll, 2004). به عبارتی با در نظر گرفتن میانگین این مقدار یعنی ۳۵ میلی‌متر در دقیقه، آن‌گاه نرخ نفوذ معادل ۲/۱ متر بر ساعت می‌شود و با در نظر گرفتن ضریب بهره‌وری ۱۶ تا ۲۰ درصد، که بستگی به نوع خاک و میزان چسبندگی آن و مقدار نفوذ آب و میزان تجربه کارکنان دارد، مقدار نرخ پیشروی روزانه در واحدهای آبرفتی برابر با ۸/۰۶ تا ۱۰/۰۸ متر در روز خواهد بود. در عمل نیز مقدار نرخ پیشروی روزانه در حدود ۷-۱۰ متر در روز به دست آورده شده است.

۵-۲-۲- محاسبات پیش‌بینی عملکرد TBM با روش Q_{TBM}

واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل انتقال آب قمرود (قطعات ۱ و ۲) در جدول ۵-۱ آورده شده است.

پارامترهای مورد نیاز برای به دست آوردن مقدار Q_{TBM} که برای محاسبه نرخ نفوذ و نرخ پیشروی استفاده می‌شود در جداول ۵-۲ تا ۵-۴ آورده شده است.

پارامتر SIGMA که معرف مقاومت توده سنگ مسیر تونل می‌باشد برای واحد اول زمین‌شناسی مسیر تونل (An) به صورت زیر تعیین گردید.

$$Q_{c-Low} = Q_{Low} \left(\frac{\sigma_c}{100} \right) = 1.11 \left(\frac{65}{100} \right) = 0.722$$

$$Q_{c-High} = Q_{High} \left(\frac{\sigma_c}{100} \right) = 1.94 \left(\frac{65}{100} \right) = 1.26$$

$$SIGMA_{Low} = 5.7 \cdot Q_{c-Low}^{\frac{1}{3}} = 5 \times 2.65 \times (0.722)^{\frac{1}{3}} = 11.88$$

^{۷۲} Close mode

^{۷۳} Semi-closed mode

^{۷۴} Torque

$$SIGMA_{High} = 5 \cdot \gamma \cdot Q_{C-High}^{\frac{1}{3}} = 5 \times 2.65 \times (1.26)^{\frac{1}{3}} = 14.31$$

پارامتر SIGMA برای هر یک از واحدهای زمین‌شناسی مسیر تونل محاسبه شده است که نتایج آن در جدول ۵-۲ ارائه شده است.

جدول ۵-۱- واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل (قطعات ۱ و ۲) (شرکت مهندسی سایبر، ۱۳۸۶)

متراژ (m)	واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل	توده سنگ‌های مسیر تونل
۰ - ۳۵۰	An	آندزیت
۳۵۰ - ۸۰۰	GSch1	شیست متوسط با سنگ آهک دولومیتی دگرگون شده
۸۰۰ - ۹۱۹	GSch2	شیست ضعیف با سنگ آهک دولومیتی دگرگون شده
۹۱۹ - ۱۹۰۰	all	آبرفت (ماسه سیلتی رس دار تا سیلت ماسه ای رس دار)
۱۹۰۰ - ۲۳۰۰	GSch3	شیست، متاکوارتزیت، متاگرانودیوریت و متادیوریت همراه با تعداد زونهای خردشده نسبتاً زیاد
۲۳۰۰ - ۳۱۰۰	all	آبرفت (ماسه سیلتی رس دار تا سیلت ماسه ای رس دار)
۳۱۰۰ - ۳۲۵۰	GSch4	شیست دارای زونهای شکسته و خرد شده به همراه متاکوارتزیت مقاوم
۳۲۵۰ - ۳۵۰۰	GSch5	شیست دارای زونهای شکسته و خرد شده به همراه متاکوارتزیت مقاوم
۳۵۰۰ - ۳۶۵۰	GSch4	شیست دارای زونهای شکسته و خرد شده به همراه متاکوارتزیت مقاوم
۳۶۵۰ - ۴۶۵۰	MQ	متاکوارتزیت مقاوم با میان لایه های شист با مقاومت متوسط
۴۶۵۰ - ۶۳۰۰	ML	سنگ آهک متامورفیک و متادیوریت با کیفیت بالا به همراه میان لایه های شیستی
۶۳۰۰ - ۶۷۰۰	GSch6	شیست با کیفیت متوسط
۶۷۰۰ - ۷۴۵۰	GSch7	شیست با کیفیت پایین و بسیار خرد شده شبیه به آبرفت
۷۴۵۰ - ۸۷۰۰	GSch8	شیست با کیفیت متوسط به بالا
۸۷۰۰ - ۹۵۰۰	Sh3	شیست و اسلیت
۹۵۰۰ - ۹۹۰۰	QLa	گل‌سنگ، ماسه سنگ و کلنگلومرا
۹۹۰۰ - ۱۰۶۰۰	Shc	شیست و اسلیت زغال‌دار
۱۰۶۰۰ - ۱۰۸۸۶	Sh3	شیست و اسلیت
۱۰۸۸۶ - ۱۱۰۴۴	MDL4	متادولومیت همراه با آهک‌های دولومیتی
۱۱۰۴۴ - ۱۱۳۱۵	AS1	آمفیبولیت شیست
۱۱۳۱۵ - ۱۱۴۵۱	MDL5	متادولومیت همراه با آهک‌های دولومیتی
۱۱۴۵۱ - ۱۱۵۹۶	AS2	آمفیبولیت شیست
۱۱۵۹۶ - ۱۱۹۷۱	MDL6	متادولومیت همراه با آهک‌های دولومیتی
۱۱۹۷۱ - ۱۲۲۸۷	AS3	آمفیبولیت شیست
۱۲۲۸۷ - ۱۲۳۴۵	MDL7	متادولومیت همراه با آهک‌های دولومیتی
۱۲۳۴۵ - ۱۴۹۲۴	Sh5	شیست و اسلیت همراه با آمفیبولیت
۱۴۹۲۴ - ۱۵۲۶۸	Trh1	متاریولیت
۱۵۲۶۸ - ۱۵۳۵۰	Tsh	آمفیبولیت شیست ها با میان لایه های نازکی از میکاشیست
۱۵۳۵۰ - ۱۵۷۰۶	Trh2	متاریولیت

۱۵۷۰۶ - ۱۶۴۳۲	As4	آمفیبولیت شیست
۱۶۴۳۲ - ۱۶۸۸۸	Md	متادیوریت
۱۶۸۸۸ - ۱۷۴۰۳	Tma	مرمر خاکستری و تیره
۱۷۴۰۳ - ۱۸۱۱۰	Sch1	شیست و اسلیت همراه با آمفیبولیت

جدول ۵-۲- داده‌های مربوط به محاسبه پارامتر SIGMA در واحدهای مختلف مسیر تونل

نام واحد	γ (gr/cm ³)	UCS (MPa)	Q _{Low}	Q _{High}	Q _{C-Low}	Q _{C-High}	SIGMA _{Low}	SIGMA _{High}
An	۲/۶۵	۶۵	۱/۱۱	۱/۹۴	۰/۷۲۲	۱/۲۶	۱۱/۸۸	۱۴/۳۱
GSch1	۲/۷۸	۴۰	۰/۲۱	۳/۳۹	۰/۰۸۴	۱/۳۶	۶/۰۹	۱۵/۲۹
GSch2	۲/۷۸	۳۷/۵	۰/۰۶۹	۰/۳۶	۰/۰۲۶	۰/۱۴	۴/۱۱	۷/۱۳
all	-	-	-	-	-	-	-	-
GSch3	۲/۷۴	۴۰	۰/۱۲۱	۰/۳۶۷	۰/۰۴۸	۰/۱۵	۴/۹۹	۷/۲۳
all	-	-	-	-	-	-	-	-
GSch4	۲/۷	۳۷/۵	۰/۲۹۴	۰/۸	۰/۱۱۰	۰/۳۰	۶/۴۷	۹/۰۴
GSch5	۲/۷	۳۷/۵	۰/۱۲۱	۰/۳۶۷	۰/۰۴۵	۰/۱۴	۴/۸۲	۶/۹۷
GSch4	۲/۷	۳۷/۵	۰/۲۹۴	۰/۸	۰/۱۱۰	۰/۳۰	۶/۴۷	۹/۰۴
MQ	۲/۷۲	۴۰	۰/۸۹۸	۳/۷۹۳	۰/۳۵۹	۱/۵۲	۹/۶۷	۱۵/۶۳
ML	۲/۷۴	۷۰	۳/۳۹۸	۱۰/۳۱۲	۲/۳۷۹	۷/۲۲	۱۸/۲۹	۲۶/۴۸
GSch6	۲/۷۶	۳۷/۵	۰/۰۶۹	۰/۳۶	۰/۰۲۶	۰/۱۴	۴/۰۸	۷/۰۸
GSch7	۲/۶	۱۵	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۰۲	۰/۰۱	۱/۴۹	۲/۳۶
GSch8	۲/۷۴	۴۰	۰/۸۹۸	۳/۷۹۳	۰/۳۵۹	۱/۵۲	۹/۷۴	۱۵/۷۴
Sh3	۲/۸	۱۶/۹۲	۰/۲۷	۱/۷۶	۰/۰۴۶	۰/۳۰	۵	۹/۳۵
Qla	۲/۴	۱۰	۰/۰۱۲۵	۰/۰۵	۰/۰۰۱	۰/۰۱	۱/۲۹	۲/۰۵
Shc	۲/۸	۱۶/۹۲	۰/۲۷	۱/۷۶	۰/۰۴۶	۰/۳۰	۵	۹/۳۵
Sh3	۲/۸	۱۶/۹۲	۰/۲	۱	۰/۰۳۴	۰/۱۷	۴/۵۳	۷/۷۴
MDL 4	۲/۸	۶۴/۳	۰/۹	۶/۷	۰/۵۸	۴/۳	۱۱/۶۷	۲۲/۷۸
AS1	۲/۹۶	۵۸/۳۳	۰/۵۲	۴/۶۲	۰/۳	۲/۶۹	۹/۹۴	۲۰/۶۰

۲۲/۷۸	۱۱/۶۷	۴/۳	۰/۵۸	۶/۷	۰/۹	۶۴/۳	۲/۸	MDL 5
۲۰/۶۰	۹/۹۴	۲/۶۹	۰/۳	۴/۶۲	۰/۵۲	۵۸/۳۳	۲/۹۶	AS2
۲۰/۶۶	۱۴/۰۱	۳/۲۲	۱	۵	۱/۵۶	۶۴/۳	۲/۸	MDL 6
۲۰/۶۰	۹/۹۴	۲/۶۹	۰/۳	۴/۶۲	۰/۵۲	۵۸/۳۳	۲/۹۶	AS3
۲۰/۶۶	۱۴/۰۱	۳/۲۲	۱	۵	۱/۵۶	۶۴/۳	۲/۸	MDL 7
۱۲/۶۰	۵/۹۴	۰/۷۳	۰/۰۷۶	۱/۸۱۵	۰/۱۹	۴۰/۲	۲/۸	Sh5
۲۸/۳۱	۱۷/۹۰	۸/۹	۲/۳	۱۲/۳۷۵	۳/۱۲۵	۷۲/۱۲	۲/۷۳	Trh1
۲۶/۶۷	۱۷/۶۹	۶/۸	۲	۱۲	۳/۵	۵۷	۲/۸۱	Tsh
۲۸/۳۱	۱۷/۹۰	۸/۹	۲/۳	۱۲/۳۷۵	۳/۱۲۵	۷۲/۱۲	۲/۷۳	Trh2
۲۰/۶۰	۹/۹۴	۲/۶۹	۰/۳	۴/۶۲	۰/۵۲	۵۸/۳۳	۲/۹۶	As4
۲۸/۹۸	۱۸/۸۳	۸/۷	۲/۳۸	۱۲/۴	۳/۴	۷۰	۲/۸۲	Md
۴۸/۸۰	۲۳/۴۶	۴۱/۹	۴/۶۶	۵۹/۴	۶/۶	۷۰/۵۵	۲/۸۱	Tma
۱۲/۶۰	۵/۹۴	۰/۷۳	۰/۰۷۶	۱/۸۱۵	۰/۱۹	۴۰/۲	۲/۸	Sch1

مقدار m_1 (گرادیان منفی) با توجه به شکل ۳-۹ و مقدار Q تعیین گردید. شاخص عمر برنده (CLI) نیز با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی موجود و با استفاده از شکل ۳-۸ به‌دست آورده شده و با توجه به درصد کوارتز (q) و درصد تخلخل (n)، مقدار m که ضریبی است منفی و برای محاسبه نرخ پیشروی استفاده می‌شود برای واحد اول زمین‌شناسی مسیر تونل (An) به‌صورت زیر محاسبه شده است.

$$m = m_1 \left(\frac{D}{5} \right)^{0.2} \left(\frac{20}{CLI} \right)^{0.15} \left(\frac{q}{20} \right)^{0.1} \left(\frac{n}{2} \right)^{0.05} = (-0.2) \left(\frac{4.69}{5} \right)^{0.2} \left(\frac{20}{35} \right)^{0.15} \left(\frac{15}{20} \right)^{0.1} \left(\frac{0.5}{2} \right)^{0.05} = -0.16$$

$$m = m_1 \left(\frac{D}{5} \right)^{0.2} \left(\frac{20}{CLI} \right)^{0.15} \left(\frac{q}{20} \right)^{0.1} \left(\frac{n}{2} \right)^{0.05} = (-0.2) \left(\frac{4.69}{5} \right)^{0.2} \left(\frac{20}{35} \right)^{0.15} \left(\frac{15}{20} \right)^{0.1} \left(\frac{0.5}{2} \right)^{0.05} = -0.16$$

در هر یک از واحدهای زمین‌شناسی مسیر تونل، مقادیر محاسبه شده m در جدول ۵-۳ نشان داده شده است.

جدول ۵-۳- داده‌های مربوط به مقادیر m_1 و m در واحدهای مختلف مسیر تونل

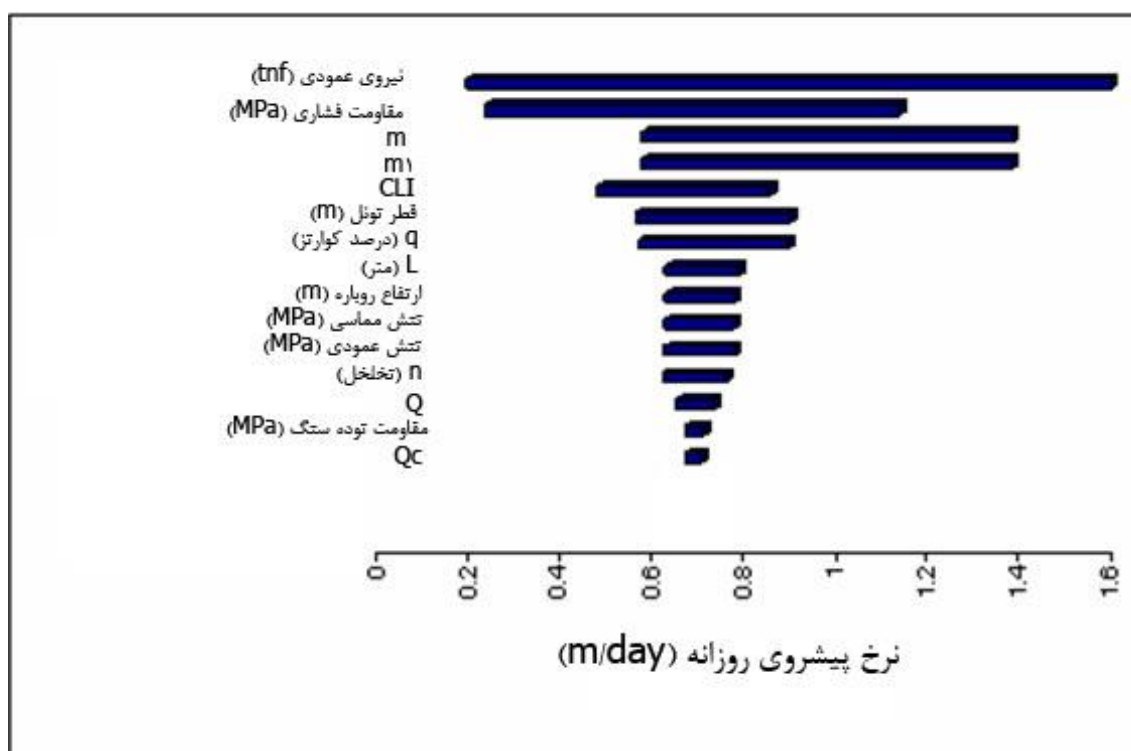
نام واحد	m_1	CLI	$q(\%)$	$n(\%)$	m
----------	-------	-----	---------	---------	-----

(-./16) - (-./16)	./5	15	35	(-./2) - (-./2)	An
(-./32) - (-./14)	1/91	1.	55	(-./4) - (-./18)	GSch1
(-./40) - (-./25)	1/91	1.	70	(-./53) - (-./33)	GSch2
-	-	-	-	-	all
(-./43) - (-./29)	1/9	15	30	(-./48) - (-./32)	GSch3
-	-	-	-	-	all
(-./31) - (-./31)	2/2	25	30	(-./32) - (-./32)	GSch4
(-./45) - (-./33)	2/2	25	35	(-./48) - (-./35)	GSch5
(-./31) - (-./31)	2/2	25	30	(-./32) - (-./32)	GSch4
(-./22) - (-./19)	2/2	25	20	(-./21) - (-./18)	MQ
(-./15) - (-./14)	1/6	2.	50	(-./18) - (-./17)	ML
(-./44) - (-./27)	1/7	1.	40	(-./53) - (-./33)	GSch6
(-./4) - (-./33)	1/7	./5	55	(-./68) - (-./57)	GSch7
(-./18) - (-./15)	2/2	1.	40	(-./21) - (-./18)	GSch8
(-./33) - (-./18)	1/91	25	45	(-./37) - (-./2)	Sh3
(-./37) - (-./31)	./5	./5	55	(-./68) - (-./57)	Qla
(-./33) - (-./18)	1/91	25	45	(-./37) - (-./2)	Shc
(-./36) - (-./18)	1/91	25	45	(-./4) - (-./2)	Sh3
(-./16) - (-./13)	./82	2.	70	(-./21) - (-./17)	MDL 4
(-./22) - (-./14)	./48	15	45	(-./28) - (-./18)	AS1
(-./17) - (-./14)	./82	3.	70	(-./21) - (-./17)	MDL 5
(-./22) - (-./14)	./48	15	45	(-./28) - (-./18)	AS2
(-./17) - (-./14)	./82	25	65	(-./2) - (-./17)	MDL 6
(-./23) - (-./15)	./48	25	45	(-./28) - (-./18)	AS3
(-./17) - (-./14)	./82	40	65	(-./2) - (-./17)	MDL 7
(-./35) - (-./18)	1/15	25	40	(-./4) - (-./2)	Sh5
(-./18) - (-./17)	./57	45	25	(-./18) - (-./17)	Trh1
(-./16) - (-./15)	1/15	25	40	(-./18) - (-./17)	Tsh
(-./18) - (-./17)	./57	45	25	(-./18) - (-./17)	Trh2
(-./24) - (-./14)	./48	3.	45	(-./28) - (-./17)	As4
(-./15) - (-./14)	./48	25	45	(-./18) - (-./17)	Md
(-./14) - (-./13)	./23	25	70	(-./18) - (-./17)	Tma

Sch1	(-۰/۴) - (-۰/۲)	۴۰	۲۵	۱/۱۵	(-۰/۳۵) - (-۰/۱۸)
------	-----------------	----	----	------	-------------------

حال بایستی مقدار نیروی عمودی^{۷۵} به‌ازای هر برنده (F) و تنش مماسی در جبهه‌کار تونل (σ_θ) محاسبه گردد.

برای تعیین مهمترین پارامتری که بیشترین تأثیر را بر روی نرخ پیشروی در روش Q_{TBM} دارد، اقدام به انجام آنالیز حساسیت با استفاده از نرم افزار @Risk شد. نتایج این آنالیز در شکل ۵-۱ نشان داده شده است. همان‌طوری که از این شکل مشاهده می‌گردد مهمترین پارامتری که بیشترین تأثیر را بر روی نرخ پیشروی دارد نیروی عمودی به‌ازای هر برنده (F) می‌باشد که تعیین دقیق آن نیاز به آزمایش دارد. بنابراین می‌توان گفت که نتایج روش Q_{TBM} خیلی زیاد به مقدار نیروی عمودی به‌ازای هر برنده بستگی دارد که با توجه به انجام نشدن آزمایشات لازم، مقدار دقیق آن در واحدهای مختلف مسیر تونل در دست نمی‌باشد. در نتیجه جواب‌های این روش از دقت کافی برخوردار نمی‌باشد. مقادیر نیروی F با توجه به تجربیات مهندسين شرکت سابیر در جدول ۵-۴ آورده شده است.



^{۷۵} Thrust

شکل ۵-۱- آنالیز حساسیت در ارتباط با نرخ پیشروی روش Q_{TBM} نسبت به پارامترهای مرتبط با آن (نرم افزار @Risk)

مقدار σ_θ برای واحد اول زمین شناسی مسیر تونل (An) و با به کار بردن رابطه شئوری برای به دست آوردن نسبت تنش افقی به قائم (K) به صورت زیر محاسبه شده است.

$$\sigma_\theta = (3 - K) \times \sigma_v = (3 - 1.3) \times 0.027 \times 50 = 2.28 \text{ (MPa)}$$

$$K = 0.25 + 7E_h \left(0.001 + \frac{1}{Z} \right) = 0.25 + 7 \times 7.2 \times \left(0.001 + \frac{1}{50} \right) = 1.3$$

که E_h مدول تغییر شکل پذیری بر حسب گیگاپاسکال و Z ارتفاع بر حسب متر می باشد.

حال با مشخص بودن مقدار Q ، $SIGMA$ ، F ، CLI ، σ_θ و q ، مقدار Q_{TBM} برای واحد (An) به صورت زیر محاسبه شده است.

$$Q_{TBM-Low} = Q_0 \times \frac{SIGMA_{Low}}{F^{10} / 20^9} \times \frac{20}{CLI} \times \frac{q}{20} \times \frac{\sigma_\theta}{5} = 1.11 \times \frac{11.88}{(10.6^{10} / 20^9)} \times \frac{20}{35} \times \frac{15}{20} \times \frac{2.28}{5} = 73.82$$

$$Q_{TBM-High} = Q_0 \times \frac{SIGMA_{High}}{F^{10} / 20^9} \times \frac{20}{CLI} \times \frac{q}{20} \times \frac{\sigma_\theta}{5} = 1.94 \times \frac{14.31}{(10.6^{10} / 20^9)} \times \frac{20}{35} \times \frac{15}{20} \times \frac{2.28}{5} = 155.41$$

مقدار σ_θ و Q_{TBM} برای هر یک از واحدهای زمین شناسی مسیر تونل محاسبه شده است که نتایج آن در جدول ۴-۵ نشان داده شده است.

جدول ۵-۴- محاسبه Q_{TBM} در واحدهای مختلف مسیر تونل

نام واحد	Q	SIGMA	F(tnf)	CLI	σ_θ (MPa)	q(%)	Q_{TBM}
An	۱/۱۱-۱/۹۴	۱۱/۸۸-۱۴/۳۱	۱۰/۶	۳۵	۲/۲۸	۱۵	۷۳/۸۲-۱۵۵/۴۱
GSch1	۰/۲۱-۳/۳۹	۶/۰۹-۱۵/۳۹	۱۰/۶	۵۵	۳/۱۰	۱۰	۴/۱۲-۱۶۷/۹۷
GSch2	۰/۰۶۹-۰/۳۶	۴/۱۱-۷/۱۳	۱۰/۶	۷۰	۳/۷۵	۱۰	۰/۸۷-۷/۸۶
all	-	-	-	-	-	-	-
GSch3	۰/۱۲۱-۰/۳۶۷	۴/۹۹-۷/۲۳	۱۰/۶	۳۰	۶/۳۷	۱۵	۱۱/۰۱-۴۸/۳۴
all	-	-	-	-	-	-	-
GSch4	۰/۲۹۴-۰/۸	۶/۴۷-۹/۰۴	۱۰/۶	۳۰	۷/۰۸	۲۵	۶۴/۱۷-۲۴۳/۷۹
GSch5	۰/۱۲۱-۰/۳۶۷	۴/۸۲-۶/۹۷	۱۰/۶	۳۵	۷/۶۲	۲۵	۱۸/۱۴-۷۹/۶۳
GSch4	۰/۲۹۴-۰/۸	۶/۴۷-۹/۰۴	۱۰/۶	۳۰	۷/۰۸	۲۵	۶۴/۱۷-۲۴۳/۷۹
MQ	۰/۸۹۸-۳/۷۹۳	۹/۶۷-۱۵/۶۳	۱۰/۶	۲۰	۶/۷۱	۳۵	۵۸۲/۷۷-۳۹۷۹/۰۲
ML	۳/۳۹۸-۱۰/۳۱۲	۱۸/۲۹-۲۶/۴۸	۲۰	۵۰	۹/۷۰	۲۰	۲/۴۱-۱۰/۵۹
GSch6	۰/۰۶۹-۰/۳۶	۴/۰۸-۷/۰۸	۱۰/۶	۴۰	۱۴/۴۶	۱۰	۵/۸۲-۵۲/۷۰
GSch7	۰/۰۱-۰/۰۴	۱/۴۹-۲/۳۶	۱۰	۵۵	۱۱/۹۹	۰/۵	۰/۰۲-۰/۱۱
GSch8	۰/۸۹۸-۳/۷۹۳	۹/۷۴-۱۵/۷۴	۱۰/۶	۴۰	۱۱/۰۸	۱۰	۱۳۸/۵۱-۹۴۵/۷۳
Sh3	۰/۲۷-۱/۷۶	۵-۹/۳۵	۱۰	۴۵	۱۲/۲	۲۵	۹۳/۹۸-۱۱۴۴/۴۱
Qla	۰/۰۱۲۵-۰/۰۵	۱/۲۹-۲/۰۵	۱۰	۵۵	۱۲/۷	۰/۵	۰/۰۲-۰/۱۲
Shc	۰/۲۷-۱/۷۶	۵-۹/۳۵	۱۰	۴۵	۱۱/۵	۲۵	۸۸/۵۳-۱۰۷۷/۹۹
Sh3	۰/۲-۱	۴/۵۳-۷/۷۴	۱۰	۴۵	۱۱/۹	۲۵	۶۱/۵۲-۵۲۶/۰۶
MDL 4	۰/۹-۶/۷	۱۱/۶۷-۲۲/۷۸	۱۹/۶	۷۰	۱۳/۸	۲۰	۰/۴۷-۶/۸۱
AS1	۰/۵۲-۴/۶۲	۹/۹۴-۲۰/۶۰	۱۹/۶	۴۵	۱۵/۳	۱۵	۰/۳۲-۵/۹۴
MDL 5	۰/۹-۶/۷	۱۱/۶۷-۲۲/۷۸	۱۹/۶	۷۰	۱۳/۱	۳۰	۰/۷۲-۱۰/۵۲

۰/۳۲-۵/۹۴	۱۵	۱۵/۳	۴۵	۱۹/۶	۹/۹۴-۲۰/۶۰	۰/۵۲-۴/۶۲	AS2
۱/۸۶-۸/۸۰	۳۵	۱۲/۹	۶۵	۱۹/۶	۱۴/۰۱-۲۰/۶۶	۱/۵۶-۵	MDL 6
۰/۵۴-۹/۸۹	۲۵	۱۵/۳	۴۵	۱۹/۶	۹/۹۴-۲۰/۶۰	۰/۵۲-۴/۶۲	AS3
۲/۳۱-۱۰/۹۴	۴۰	۱۴/۱	۶۵	۱۹/۶	۱۴/۰۱-۲۰/۶۶	۱/۵۶-۵	MDL 7
۸۷/۸۲-۱۷۸۰/۰۳	۲۵	۲۱/۸	۴۰	۱۰/۶	۵/۹۴-۱۲/۶۰	۰/۱۹-۱/۸۱۵	Sh5
۱۴/۷۵-۹۲/۴۲	۴۵	۲۲/۹	۲۵	۲۱	۱۷/۹۰-۲۸/۳۱	۳/۱۲۵-۱۲/۳۷۵	Trh1
۱۲/۰۶-۶۲/۳۶	۲۵	۲۵/۵	۴۰	۱۹/۶	۱۷/۶۹-۲۶/۶۷	۳/۵-۱۲	Tsh
۱۶/۸۲-۱۰۵/۴۱	۴۵	۲۷/۲	۲۵	۲۱	۱۷/۹۰-۲۸/۳۱	۳/۱۲۵-۱۲/۳۷۵	Trh2
۱/۳۱-۲۴/۱۷	۳۰	۳۱/۱	۴۵	۱۹/۶	۹/۹۴-۲۰/۶۰	۰/۵۲-۴/۶۲	As4
۶/۵۱-۳۶/۵۶	۲۵	۲۹/۸	۴۵	۲۱	۱۸/۸۳-۲۸/۹۸	۳/۴-۱۲/۴	Md
۶/۴۷-۱۲۱/۰۶	۲۵	۱۹	۷۰	۲۱	۲۳/۴۶-۴۸/۸۰	۶/۶-۵۹/۴	Tma
۷۸/۵۶-۱۵۹۲/۲۴	۲۵	۱۹/۵	۴۰	۱۰/۶	۵/۹۴-۱۲/۶۰	۰/۱۹-۱/۸۱۵	Sch1

با در دست داشتن مقدار Q_{TBM} و در نظر گرفتن ۳ شیفت کاری در روز و ۸ ساعت به‌ازای هر شیفت کاری، مقادیر نرخ نفوذ (PR) و نرخ پیشروی (AR) برای واحد (An) به‌صورت زیر تعیین گردید.

$$PR \approx 5(Q_{TBM})^{-0.2} = 5(73.82)^{-0.2} = 2.12$$

$$PR \approx 5(Q_{TBM})^{-0.2} = 5(155.41)^{-0.2} = 1.82$$

زمان لازم (T) برای حفاری واحد (An) که دارای طول L می‌باشد به‌صورت زیر به‌دست آمده است.

$$T = \left(\frac{L}{PR} \right)^{\frac{1}{1+m}} = \left(\frac{350}{2.12} \right)^{\frac{1}{1+(-0.16)}} = 452.77$$

$$T = \left(\frac{L}{PR} \right)^{\frac{1}{1+m}} = \left(\frac{350}{1.82} \right)^{\frac{1}{1+(-0.16)}} = 541.10$$

$$AR = PR.T^m = 2.12 \times 452.77^{-0.16} = 0.77$$

$$AR = PR.T^m = 1.82 \times 541.10^{-0.16} = 0.65$$

مقادیر نرخ نفوذ و نرخ پیشروی روزانه برای هر یک از واحدهای مسیر تونل مطابق با جدول ۵-۵ می‌باشد.

جدول ۵-۵- مقادیر PR و AR برای واحدهای مختلف مسیر تونل

نام واحد	Q _{TBM}	PR	AR	نرخ پیشروی روزانه (m/day)
An	۷۳/۸۲-۱۵۵/۴۱	۲/۱۲-۱/۸۲	۰/۷۷-۰/۶۵	۱۷/۰
GSch1	۴/۱۲-۱۶۷/۹۷	۳/۷۷-۱/۷۹	۰/۴۱-۰/۷۲	۱۳/۶
GSch2	۰/۸۷-۷/۸۶	۵/۱۴-۳/۳۱	۰/۶۱-۰/۹۹	۱۹/۳
all	-	۲/۱	۰/۳۴	۸/۱
GSch3	۱۱/۰۱-۴۸/۳۴	۳/۰۹-۲/۳۰	۰/۰۸-۰/۲۹	۴/۳
all	-	۲/۱	۰/۳۴	۸/۱
GSch4	۶۴/۱۷-۲۴۳/۷۹	۲/۱۸-۱/۶۷	۰/۳۴-۰/۵۰	۱۰/۱
GSch5	۱۸/۱۴-۷۹/۶۳	۲/۸۰-۲/۰۸	۰/۰۷-۰/۲۰	۳/۳
GSch4	۶۴/۱۷-۲۴۳/۷۹	۲/۱۸-۱/۶۷	۰/۳۴-۰/۵۰	۱۰/۱
MQ	۵۸۲/۷۷-۳۹۷۹/۰۲	۱/۴۰-۰/۹۵	۰/۲۲-۰/۱۹	۴/۹
ML	۲/۴۱-۱۰/۵۹	۴/۱۹-۳/۱۲	۱/۴۲-۱/۰۸	۳۰/۰
GSch6	۵/۸۲-۵۲/۷۰	۳/۵۲-۲/۲۶	۰/۰۹-۰/۳۳	۵/۰
GSch7	۰/۰۲-۰/۱۱	۱۱/۳۵-۷/۸۴	۰/۷۳-۰/۸۲	۱۸/۵
GSch8	۱۳۸/۵۱-۹۴۵/۷۳	۱/۸۶-۱/۲۷	۰/۴۷-۰/۳۸	۱۰/۱
Sh3	۹۳/۹۸-۱۱۴۴/۴۱	۲/۰۲-۱/۲۲	۰/۱۱-۰/۳۰	۴/۹
Qla	۰/۰۲-۰/۱۲	۱۱/۰۴-۷/۶۳	۱/۳۱-۱/۲۷	۳۱/۰
Shc	۸۸/۵۳-۱۰۷۷/۹۹	۲/۰۴-۱/۲۴	۰/۱۲-۰/۳۱	۵/۱
Sh3	۶۱/۵۳-۵۲۶/۰۶	۲/۱۹-۱/۴۳	۰/۱۵-۰/۴۵	۷/۲
MDL 4	۰/۴۷-۶/۸۱	۵/۸۲-۳/۴۱	۳/۰۴-۱/۸۹	۵۹/۲
AS1	۰/۳۲-۵/۹۴	۶/۲۷-۳/۵۰	۲/۱۵-۱/۷۰	۴۶/۲
MDL 5	۰/۷۲-۱۰/۵۲	۵/۳۳-۳/۱۲	۲/۷۳-۱/۷۰	۵۳/۲
AS2	۰/۳۲-۵/۹۴	۶/۲۷-۳/۵۰	۲/۵۷-۱/۸۹	۵۳/۴
MDL 6	۱/۸۶-۸/۸۰	۴/۴۲-۳/۲۴	۱/۸۱-۱/۴۷	۳۹/۴
AS3	۰/۵۴-۹/۸۹	۵/۶۶-۳/۱۶	۱/۶۷-۱/۴۰	۳۶/۹
MDL 7	۲/۳۱-۱۰/۹۴	۴/۲۳-۳/۱۰	۲/۴۸-۱/۸۹	۵۲/۴
Sh5	۸۷/۸۲-۱۷۸۰/۰۳	۲/۰۴-۱/۱۲	۰/۰۴-۰/۲۱	۳/۰
Trh1	۱۴/۷۵-۹۲/۴۲	۲/۹۲-۲/۰۲	۱/۰۶-۰/۷۳	۲۱/۵
Tsh	۱۲/۰۶-۶۲/۳۶	۳/۰۴-۲/۱۹	۱/۶۳-۱/۱۵	۳۳/۳
Trh2	۱۶/۸۲-۱۰۵/۴۱	۲/۸۴-۱/۹۷	۱/۰۲-۰/۷۰	۲۰/۷
As4	۱/۳۱-۲۴/۱۷	۴/۷۳-۲/۶۴	۰/۹۹-۱/۰۳	۲۴/۲
Md	۶/۵۱-۳۶/۵۶	۳/۴۴-۲/۴۳	۱/۴۵-۱/۰۳	۲۹/۸

۲۹/۰	۱/۵۷-۰/۸۵	۳/۴۴-۱/۹۲	۶/۴۷-۱۲۱/۰۶	Tma
۴/۵	۰/۰۹-۰/۲۹	۲/۰۹-۱/۱۴	۷۸/۵۶-۱۵۹۲/۲۴	Sch1

با توجه به نتایج به دست آمده با استفاده از این روش، می توان نتیجه گرفت که نتایج این روش در زمین های نرم جواب گو نمی باشد. زیرا اگر قرار باشد که نرخ پیشروی های روزانه به دست آورده شده توسط این روش صحیح باشند آن گاه با در نظر گرفتن ۳۰۰ روز کاری در سال، پروژه در طی ۲۴۷۵/۲۴ روز یا به عبارت بهتر طی ۸ سال و ۳ ماه به اتمام می رسد که از لحاظ اقتصادی بهینه نمی باشد.

۵-۲-۳- محاسبات پیش بینی عملکرد TBM با روش NTH

پارامترهای مورد نیاز برای به دست آوردن نرخ نفوذ و نرخ پیشروی با استفاده از این روش، در جداول ۵-۶ تا ۸ آورده شده است.

همان طوری که در بخش ۳-۴-۳ اشاره شد برای محاسبه پیش بینی نرخ پیشروی با روش NTH نیاز به وضعیت ناپیوستگی ها و ویژگی های توده سنگ و پارامترهای ماشین می باشد.

وضعیت درزه ها در واحدهای مختلف مسیر تونل مطابق جدول ۵-۶ می باشد. با توجه به اطلاعات زمین شناسی موجود و با استفاده از شکل ۳-۱۸ فاکتور شکستگی برای واحد An، ۰/۹۸ محاسبه شده است و سپس فاکتور شکستگی کلی به صورت زیر محاسبه شده است.

$$k_{s-tot} = \left(\sum_{i=1}^n k_{si} \right) - (n-1).0.36 = 0.98 - (1-1) \times 0.36 = 0.98$$

فاکتور شکستگی کلی برای هر یک از واحدهای مسیر تونل محاسبه شده است که نتایج آن در جدول ۵-۶ نشان داده شده است.

جدول ۵-۶- وضعیت ناپیوستگی‌ها و فاکتور شکستگی برای دسته درزه شماره ۱ در قطعات ۱ و ۲ مسیر تونل

نام واحد	فاصله داری ناپیوستگی‌ها (mm)	طبقه بندی سنگ	زاویه بین محور تونل و امتداد ناپیوستگی	k_{s1}	k_{s2}	k_{s3}	k_{s-tot}
An	۴۰۰	I	۴۰	۰/۹۸	-	-	۰/۹۸
GSch1	۲۰۰	II	۴۰	۱/۴	-	-	۱/۴
GSch2	۱۰۰	III	۴۰	۱/۹۵	-	-	۱/۹۵
all	-	-	-	-	-	-	-
GSch3	۱۰۰	III	۴۰	۱/۹۵	-	-	۱/۹۵
all	-	-	-	-	-	-	-
GSch4	۱۰۰	III	۴۰	۱/۹۵	-	-	۱/۹۵
GSch5	۱۰۰	III	۴۰	۱/۹۵	-	-	۱/۹۵
GSch4	۱۰۰	III	۴۰	۱/۹۵	-	-	۱/۹۵
MQ	۲۰۰	II	۴۰	۱/۴	-	-	۱/۴
ML	۱۰۰	III	۴۰	۱/۹۵	-	-	۱/۹۵
GSch6	۲۰۰	II	۴۰	۱/۴	-	-	۱/۴
GSch7	۵۰	IV	۴۰	۳/۶۵	-	-	۳/۶۵
GSch8	۲۰۰	II	۴۰	۱/۴	-	-	۱/۴
Sh3	۱۰۰	III	۴۰	۱/۹۵	-	-	۱/۹۵
Qla	۱۰۰	IV	۴۰	۳/۶۵	-	-	۳/۶۵
Shc	۱۰۰	III	۴۰	۱/۹۵	-	-	۱/۹۵
Sh3	۱۰۰	III	۴۰	۱/۹۵	-	-	۱/۹۵
MDL 4	۱۰۰	III	۴۰، ۶۰، ۷۴	۲/۱	۲/۲۹	۱/۹۸	۵/۶۵
AS1	۱۰۰	III	۲۵	۱/۶۵	-	-	۱/۶۵

۵/۶۵	۱/۹۸	۲/۲۹	۲/۱	۴۰.۶۰.۷۴	III	۱۰۰	MDL 5
۱/۶۵	-	-	۱/۶۵	۲۵	III	۱۰۰	AS2
۳/۴۸	۱/۴	۱/۵	۱/۳	۴۰.۶۰.۷۴	II	۲۰۰	MDL 6
۱/۶۵	-	-	۱/۶۵	۲۵	III	۱۰۰	AS3
۳/۴۸	۱/۴	۱/۵	۱/۳	۴۰.۶۰.۷۴	II	۲۰۰	MDL 7
۳/۲۸	-	-	۳/۲۸	۲۵	IV	۵۰	Sh5
۳/۰۶	۱/۰۳	۱/۳	۱/۴۵	۱۸.۷۶.۶۷	II	۲۰۰	Trh1
۳/۷۸	۱/۴۵	۱/۷	۱/۳۵	۱۰.۹۰.۱۵	III	۱۰۰	Tsh
۳/۰۶	۱/۰۳	۱/۳	۱/۴۵	۱۸.۷۶.۶۷	II	۲۰۰	Trh2
۳/۷۸	۱/۴۵	۱/۷	۱/۳۵	۱۰.۹۰.۱۵	III	۱۰۰	As4
۳/۰۶	۱/۰۳	۱/۳	۱/۴۵	۱۸.۷۶.۶۷	II	۲۰۰	Md
۱/۹۸	۰/۷	۰/۹	۱/۱	۱۸.۷۶.۶۷	I	۴۰۰	Tma
۹/۶۳	۳/۰۵	۴/۴	۲/۹	۱۰.۹۰.۱۵	IV	۵۰	Sch1

مقادیر مربوط به شاخص نرخ حفاری (DRI) و شاخص عمر برنده (CLI) نیز با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی موجود و همین‌طور با استفاده از شکل‌های ۳-۱۱ و ۳-۱۵ به‌دست آورده شده است. با مشخص بودن مقادیر DRI و با استفاده از نمودار ۳-۱۸ مقدار K_{DRI} برای $DRI \neq 49$ برای هر یک از واحدهای زمین‌شناسی مسیر تونل محاسبه گردیده است که نتایج آن در جدول ۵-۷ نشان داده شده است.

جدول ۵-۷- مقادیر محاسبه شده برای CLI، DRI و K_{DRI} برای واحدهای مختلف مسیر تونل

نام واحد	CLI	DRI	K_{DRI}
An	۲۵	۵۰	۱
GSch1	۵۵	۶۰	۱/۱۵
GSch2	۷۰	۶۰	۱/۱۵
all	-	-	-
GSch3	۳۰	۵۰	۱
all	-	-	-

•/۹۵	۴۵	۳۰	GSch4
۱	۵۰	۲۵	GSch5
•/۹۵	۴۵	۳۰	GSch4
•/۹	۴۰	۲۰	MQ
۱/۱۵	۶۰	۵۰	ML
۱/۱	۵۵	۴۰	GSch6
۱/۲	۶۵	۵۵	GSch7
۱	۵۰	۴۰	GSch8
۱/۱	۵۵	۴۵	Sh3
۱/۲	۶۵	۵۵	Qla
۱/۱	۵۵	۴۵	Shc
۱/۱	۵۵	۴۵	Sh3
۱/۱۵	۶۰	۷۰	MDL 4
۱	۵۰	۴۵	AS1
۱/۱۵	۶۰	۷۰	MDL 5
۱	۵۰	۴۵	AS2
۱/۱۵	۶۰	۶۵	MDL 6
۱	۵۰	۴۵	AS3
۱/۱۵	۶۰	۶۵	MDL 7
۱	۵۰	۴۰	Sh5
۱	۵۰	۲۵	Trh1
۱/۱۵	۶۰	۴۰	Tsh
۱	۵۰	۲۵	Trh2
۱	۵۰	۴۵	As4
۱	۵۰	۴۵	Md
۱/۱۵	۶۰	۷۰	Tma

۱	۵۰	۴۰	Sch1
---	----	----	------

k_{eqv} با داشتن k_{s-tot} و K_{DRI} برای واحد An به صورت زیر محاسبه شده است.

$$k_{ekv} = k_{s-tot} \cdot k_{DRI} = 0.98 \times 1 = 0.98$$

مقادیر k_{eqv} برای واحدهای زمین‌شناسی مسیر تونل در جدول ۵-۸ آورده شده است.

نیروی رانش به‌ازای هر برنده (M_B) با توجه به جدول ۳-۳ برابر با ۲۳۰ KN/Cutter می‌باشد. با در نظر گرفتن قطر برنده‌ها برابر ۴۳۲ mm و فاصله بین برنده‌ها برابر ۶۵ mm، فاکتورهای تصحیحی k_d و k_a به صورت زیر محاسبه شده است.

$$K_d = 2.35 - 0.0028D_c = 2.35 - 0.0028 \times 432 = 1.14$$

$$K_a = 1.35 - 0.005S_c = 1.35 - 0.005 \times 65 = 1.03$$

M_{eqv} برای واحدهای زمین‌شناسی مسیر تونل به صورت زیر محاسبه شده است.

$$M_{eqv} = M_B \times K_d \times K_a = 230 \times 1.14 \times 1.03 = 268.65 \quad (KN / Cutter)$$

حال با مشخص بودن k_{eqv} و M_{eqv} ، مقدار نرخ نفوذ پایه (i_o) برای واحد An به صورت زیر محاسبه شده است. می‌توان i_o را با استفاده از k_{eqv} و M_{eqv} و استفاده از نمودار ۳-۲۱ نیز به دست آورد.

$$i_o = F \times K_{eq}^G = 6.61 \times 0.98^{0.35} = 6.57$$

$$F = 0.0015M_{eq}^{1.5} = 0.0015 \times 268.65^{1.5} = 6.61$$

$$G = 30K_{eq}^{-0.5} \times M_{eq}^{-0.8} = 30 \times 0.98^{-0.5} \times 268.65^{-0.8} = 0.35$$

با در نظر گرفتن $RPM = 6.35 \frac{rev}{min}$ ، مقدار نرخ نفوذ (I) برای واحد An به صورت زیر به دست می آید.

$$I = i_o \times rpm \times (60/1000) = 6.57 \times 6.35 \times (60/1000) = 2.5 \quad (m/hr)$$

مقادیر نرخ نفوذ پایه (i_o) و نرخ نفوذ (I) برای واحدهای مختلف مسیر تونل در جدول ۵-۸ نشان داده شده است.

جدول ۵-۸ - K_{eqv} ، M_{eqv} و I محاسبه شده برای هر یک از واحدهای مسیر تونل

نام واحد	K_{eqv}	M_{eqv}	F	G	i_o	I (m/hr)
An	۰/۹۸	۲۶۸/۸۵	۶/۶۱	۰/۳۵	۶/۵۷	۲/۵۰
GSch1	۱/۶۱	۲۶۸/۸۵	۶/۶۱	۰/۲۷	۷/۵۲	۲/۸۶
GSch2	۲/۲۴	۲۶۸/۸۵	۶/۶۱	۰/۲۳	۷/۹۵	۳/۰۳
all	-	-	-	-	-	-
GSch3	۱/۹۵	۲۶۸/۸۵	۶/۶۱	۰/۲۴	۷/۷۹	۲/۹۷
all	-	-	-	-	-	-
GSch4	۱/۸۵	۲۶۸/۸۵	۶/۶۱	۰/۲۵	۷/۷۲	۲/۹۴
GSch5	۱/۹۵	۲۶۸/۸۵	۶/۶۱	۰/۲۴	۷/۷۹	۲/۹۷
GSch4	۱/۸۵	۲۶۸/۸۵	۶/۶۱	۰/۲۵	۷/۷۲	۲/۹۴
MQ	۱/۲۶	۲۶۸/۸۵	۶/۶۱	۰/۳۰	۷/۰۹	۲/۷۰
ML	۲/۲۴	۲۶۸/۸۵	۶/۶۱	۰/۲۳	۷/۹۵	۳/۰۳
GSch6	۱/۵۴	۲۶۸/۸۵	۶/۶۱	۰/۲۸	۷/۴۵	۲/۸۴
GSch7	۴/۳۸	۲۶۸/۸۵	۶/۶۱	۰/۱۶	۱۰/۵۲	۴/۰۱
GSch8	۱/۴۰	۲۶۸/۸۵	۶/۶۱	۰/۲۹	۷/۲۹	۲/۷۸
Sh3	۲/۱۵	۲۶۸/۸۵	۶/۶۱	۰/۲۳	۷/۹۰	۳/۰۱
QIa	۴/۳۸	۲۶۸/۸۵	۶/۶۱	۰/۱۶	۱۰/۵۲	۴/۰۱
Shc	۲/۱۵	۲۶۸/۸۵	۶/۶۱	۰/۲۳	۹/۲۵	۳/۵۳
Sh3	۲/۱۵	۲۶۸/۸۵	۶/۶۱	۰/۲۳	۷/۹۰	۳/۰۱
MDL 4	۶/۵۰	۲۶۸/۸۵	۶/۶۱	۰/۱۳	۱۱/۳۰	۴/۳۰

۲/۸۸	۷/۵۵	۰/۲۷	۶/۶۱	۲۶۸/۸۵	۱/۶۵	AS1
۴/۳۰	۱۱/۳۰	۰/۱۳	۶/۶۱	۲۶۸/۸۵	۶/۵۰	MDL 5
۲/۸۸	۷/۵۵	۰/۲۷	۶/۶۱	۲۶۸/۸۵	۱/۶۵	AS2
۳/۹۴	۱۰/۳۵	۰/۱۷	۶/۶۱	۲۶۸/۸۵	۴/۰۰	MDL 6
۲/۸۸	۷/۵۵	۰/۲۷	۶/۶۱	۲۶۸/۸۵	۱/۶۵	AS3
۳/۹۴	۱۰/۳۵	۰/۱۷	۶/۶۱	۲۶۸/۸۵	۴/۰۰	MDL 7
۳/۸۱	۹/۹۹	۰/۱۹	۶/۶۱	۲۶۸/۸۵	۳/۲۸	Sh5
۳/۱۳	۸/۲۳	۰/۲۰	۶/۶۱	۲۶۸/۸۵	۳/۰۶	Trh1
۴/۰۰	۱۰/۵۱	۰/۱۶	۶/۶۱	۲۶۸/۸۵	۴/۳۵	Tsh
۳/۱۳	۸/۲۳	۰/۲۰	۶/۶۱	۲۶۸/۸۵	۳/۰۶	Trh2
۳/۹۰	۱۰/۲۵	۰/۱۸	۶/۶۱	۲۶۸/۸۵	۳/۷۸	As4
۳/۱۳	۸/۲۳	۰/۲۰	۶/۶۱	۲۶۸/۸۵	۳/۰۶	Md
۳/۰۴	۷/۹۷	۰/۲۳	۶/۶۱	۲۶۸/۸۵	۲/۲۸	Tma
۴/۶۲	۱۲/۱۳	۰/۱۱	۶/۶۱	۲۶۸/۸۵	۹/۶۳	Sch1

با توجه به مطالب بیان شده در بند ۳-۴-۳ و ۳-۴-۵ و با در نظر گرفتن تأخیرهای موجود (این تأخیرها بر حسب ساعت در جداول ۵-۹ و ۵-۱۰ آورده شده است) ضریب بهره‌وری برای هر یک از واحدهای زمین‌شناسی مسیر تونل مطابق با جدول ۵-۱۱ برآورد شده است.

با در دست داشتن نرخ نفوذ در هر یک از واحدهای زمین‌شناسی مسیر تونل و با به‌دست آوردن ضریب بهره‌وری در هر واحد، به محاسبه نرخ پیشروی در هر یک از واحدهای زمین‌شناسی پرداخته شد که نتایج آن در جدول ۵-۱۱ آورده شده است.

جدول ۵-۹- تأخیرهای در نظر گرفته شده با استفاده از روش NTH برای محاسبه ضریب بهره‌وری

نام واحد	(T _b) زمان حفاری	تأخیرات ناشی از نصب پوشش (h)	T _t (تأخیر ناشی از استحکام مجدد دستگاه) (h)	(T _c) زمان لازم برای تعویض و بازدید برنده	متوسط TBM(T _{tbm}) بر حسب ساعت	متوسط back up (T _{bak}) بر حسب ساعت	متوسط T _a بر حسب ساعت
An	۱۳۹/۹۰	۸۹/۷۴	۱۴/۵۸	۱۳/۳۵	۲۴/۱۵	۱۴	۵۰/۴

ᄡᄢ/ᄠ	ᄠᄵ/ᄠᄵ	ᄢᄠ/ᄢᄵ	ᄠᄢ/ᄠᄢ	ᄠᄠ/ᄠᄵ	ᄠᄵᄵ/ᄢᄠ	ᄠᄵᄠ/ᄠᄢ	GSch1
ᄠᄶ/ᄶᄶ	ᄶ/ᄠᄶᄵ	ᄠ/ᄠᄶ	ᄢ/ᄠᄠ	ᄶ/ᄠᄶ	ᄢᄠ/ᄵᄠ	ᄢᄠ/ᄢᄠ	GSch2
-	-	-	-	-	-	-	all
ᄵᄶ/ᄶ	ᄠᄶ/ᄶ	ᄢᄶ/ᄶ	ᄠᄢ/ᄶᄠ	ᄠᄶ/ᄶᄠ	ᄠᄢ/ᄵᄶ	ᄠᄢᄶ/ᄠᄶ	GSch3
-	-	-	-	-	-	-	all
ᄢᄠ/ᄢ	ᄵ/ᄵᄵ	ᄠ/ᄠᄵ	ᄵ/ᄵᄶ	ᄶ/ᄢᄵ	ᄢᄠ/ᄶᄶ	ᄵᄠ/ᄠᄠ	GSch4
ᄢᄵ/ᄢᄵ	ᄠ	ᄠᄵ/ᄢᄵ	ᄠ/ᄠᄠ	ᄠᄠ/ᄶᄢ	ᄶᄶ/ᄠᄠ	ᄠᄶ/ᄢᄠ	GSch5
ᄢᄠ/ᄢ	ᄵ/ᄵᄵ	ᄠ/ᄠᄵ	ᄵ/ᄵᄶ	ᄶ/ᄢᄵ	ᄢᄠ/ᄶᄶ	ᄵᄠ/ᄠᄠ	GSch4
ᄠᄶᄠ	ᄢᄠ	ᄶᄵ	ᄵᄶ/ᄠᄢ	ᄶᄠ/ᄶᄠ	ᄢᄵᄶ/ᄶᄠ	ᄢᄶᄠ/ᄠᄠ	MQ
ᄢᄢᄠ	ᄵᄠ/ᄠᄵ	ᄠᄠ	ᄶᄠ/ᄶᄵ	ᄶᄠ/ᄠᄵ	ᄶᄢᄢ/ᄠᄠ	ᄵᄶᄶ/ᄠᄵ	ML
ᄵᄶ	ᄠᄶ/ᄶ	ᄢᄶ/ᄠ	ᄠᄢ/ᄠᄠ	ᄠᄶ/ᄶᄠ	ᄠᄢ/ᄵᄶ	ᄠᄶᄠ/ᄠᄠ	GSch6
ᄠᄠᄢ/ᄵ	ᄠᄠ/ᄠᄵ	ᄢᄢ/ᄠᄵ	ᄠᄢ/ᄢᄠ	ᄢᄠ/ᄢᄵ	ᄠᄠᄢ/ᄢᄠ	ᄠᄠᄠ/ᄠᄠ	GSch7
ᄠᄠᄶ/ᄢᄵ	ᄶᄶ/ᄢᄵ	ᄠᄠ/ᄠᄵ	ᄢᄠ/ᄠᄶ	ᄵᄢ/ᄠᄠ	ᄢᄢᄠ/ᄵᄠ	ᄶᄵᄠ/ᄢᄶ	GSch8
ᄠᄠᄢ/ᄠᄠ	ᄢᄠ	ᄵᄢ	ᄢᄵ/ᄢᄠ	ᄢᄢ/ᄢᄢ	ᄢᄠᄠ/ᄠᄢ	ᄢᄶᄵ/ᄠᄠ	Sh3
ᄵᄶ/ᄠᄠ	ᄠᄠ	ᄠᄠ	ᄠ/ᄠᄠ	ᄠᄶ/ᄶᄠ	ᄠᄢ/ᄵᄶ	ᄠᄠ/ᄠᄠ	Qla
ᄠᄵ/ᄠᄠ	ᄢᄠ	ᄢᄵ/ᄠ	ᄠᄠ/ᄠᄵ	ᄢᄠ/ᄠᄠ	ᄠᄠᄠ/ᄶᄠ	ᄠᄠᄠ/ᄵᄶ	Shc
ᄶᄠ/ᄠᄶ	ᄠᄠ/ᄠᄠ	ᄠᄠ/ᄵᄠ	ᄠᄠ/ᄠᄵ	ᄠᄠ/ᄠᄢ	ᄠᄢ/ᄢᄢ	ᄠᄵ/ᄠᄠ	Sh3
ᄢᄠ/ᄵᄶ	ᄢ/ᄠᄠᄢ	ᄶ/ᄢᄢ	ᄢ/ᄠᄢ	ᄶ/ᄵᄠ	ᄶᄠ/ᄵᄠ	ᄢᄶ/ᄠᄠ	MDL 4
ᄢᄠ/ᄶᄠ	ᄠᄠ/ᄠᄢᄠ	ᄠᄵ/ᄠᄠᄠ	ᄠ/ᄢᄶ	ᄠᄠ/ᄢᄠ	ᄶᄠ/ᄶᄠ	ᄠᄶ/ᄠᄶ	AS1
ᄠᄠ/ᄶᄠ	ᄢ/ᄢᄶᄶ	ᄵ/ᄶᄶ	ᄢ/ᄠᄠ	ᄵ/ᄶᄠ	ᄢᄶ/ᄠᄠ	ᄢᄠ/ᄶᄠ	MDL 5
ᄢᄠ/ᄵᄠ	ᄵ/ᄢᄶᄵ	ᄠ/ᄵᄵᄵ	ᄶ/ᄶᄠ	ᄶ/ᄠᄶ	ᄢᄠ/ᄠᄠ	ᄵᄠ/ᄢᄠ	AS2
ᄵᄠ/ᄠᄵ	ᄠ/ᄢᄠᄵ	ᄠᄶ/ᄠᄠᄵ	ᄠ/ᄠᄠ	ᄠᄵ/ᄶᄢ	ᄠᄶ/ᄠᄵ	ᄠᄵ/ᄠᄠ	MDL 6
ᄶᄶ/ᄠᄠ	ᄠᄠ/ᄶᄠᄢ	ᄠᄠ/ᄶᄶᄶ	ᄠᄠ/ᄶᄠ	ᄠᄢ/ᄠᄠ	ᄠᄠ/ᄠᄢ	ᄠᄠᄠ/ᄠᄠ	AS3
ᄠᄠ/ᄠᄠ	ᄠ/ᄶᄵ	ᄢ/ᄶᄠ	ᄠ/ᄵᄠ	ᄢ/ᄶᄢ	ᄠᄶ/ᄠᄠ	ᄠᄶ/ᄠᄠ	MDL 7
ᄢᄶᄠ/ᄠᄶ	ᄶᄠ/ᄶᄢᄢ	ᄠᄢᄠ/ᄢᄠᄢ	ᄶᄠ/ᄵᄠ	ᄠᄠᄠ/ᄶᄶ	ᄶᄶᄠ/ᄢᄠ	ᄶᄠᄠ/ᄠᄠ	Sh5
ᄶᄠ/ᄠᄢ	ᄠᄠ/ᄶᄠᄶ	ᄢᄢ/ᄠᄶ	ᄠᄶ/ᄠᄠ	ᄠᄶ/ᄢᄢ	ᄠᄠ/ᄢᄠ	ᄠᄠᄠ/ᄠᄶ	Trh1
ᄠᄠ/ᄢᄢ	ᄠ/ᄠᄶᄠ	ᄢ/ᄶᄠᄠ	ᄢ/ᄠᄶ	ᄢ/ᄶᄢ	ᄢᄠ/ᄠᄢ	ᄢᄠ/ᄶᄠ	Tsh
ᄶᄠ/ᄶᄠ	ᄠᄢ/ᄠᄠᄶ	ᄢᄢ/ᄠᄠᄶ	ᄠᄠ/ᄢᄠ	ᄠᄶ/ᄠᄢ	ᄠᄠ/ᄢᄠ	ᄠᄢᄢ/ᄵᄠ	Trh2

۱۰۰/۹۱	۱۸/۸۷۶	۳۳/۳۹۶	۱۹/۲۱	۳۰/۲۵	۱۸۶/۱۵	۱۸۵/۹۷	As4
۶۳/۳۸	۱۵/۵۰۴	۲۹/۱۸۴	۱۳/۸۹	۱۹	۱۱۶/۹۲	۱۴۵/۴۹	Md
۷۲/۱۰	۱۸/۰۲۵	۳۳/۴۷۵	۱۳/۸۸	۲۱/۴۶	۱۳۲/۰۵	۱۶۹/۶۸	Tma
۸۹/۷۹	۱۴/۸۴۷	۲۶/۱۵۹	۱۵/۲۴	۲۹/۴۶	۱۸۱/۲۸	۱۵۳/۰۴	Sch1

جدول ۵-۱۰- تأخیرهای متفرقه که با استفاده از روش CSM برای محاسبه ضریب بهره‌وری لحاظ شده است

نام واحد	تأخیرهای ناشی از جلو راندن ماشین (h)	تأخیرات ناشی از عملیات نقشه برداری (h)	تأخیرات ناشی از کسب تجربه (h)	تأخیرات ناشی از بررسی تاج حفار و روغن کاری (h)	تأخیر ناشی از تراوش آب (h)	تأخیرات ناشی از خدمات رسانی با توجه به شیب تونل (h)	تأخیرات ناشی از سیستم ترابری (h)	تأخیرات کارگری مثلاً تأخیر ناشی از تعویض شیفت و زمان نهار (h)
An	۱۱/۰۷	۱/۱۶	۱۸۵/۲	۹/۳۷	۱/۹۶	۱۰/۵۳	۱۹/۲۵	۲۲/۳۸
GSch1	۱۴/۲۴	۱/۴۹	۲۰۸/۰	۱۰/۵۳	۲۲۵	۱۳/۵۴	۲۴/۷۵	۲۵/۱۴
GSch2	۳/۷۶	۰/۳۹	۵۲/۰	۲/۶۳	۱۱۹	۳/۵۸	۶/۵۴۵	۶/۲۹
all	-	-	-	-	-	-	-	-
GSch3	۱۲/۶۵	۱/۳۲	۱۷۸/۵	۹/۰۳	۳۴	۱۲/۰۴	۲۲	۲۱/۵۸
all	-	-	-	-	-	-	-	-
GSch4	۴/۷۵	۰/۵۰	۶۷/۵	۳/۴۲	۱۲/۷۵	۴/۵۱	۸/۲۵	۸/۱۶
GSch5	۷/۹۱	۰/۸۳	۱۱۱/۶	۵/۶۵	۲۱/۲۵	۷/۵۲	۱۳/۷۵	۱۳/۴۸
GSch4	۴/۷۵	۰/۵۰	۶۷/۵	۳/۴۲	۱۲/۷۵	۴/۵۱	۸/۲۵	۸/۱۶
MQ	۲۱/۶۴	۳/۳۰	۴۸۹/۹	۲۴/۷۹	۸۵	۳۰/۱۰	۵۵	۵۹/۲۰
ML	۵۲/۲۰	۵/۴۵	۷۲۱/۳	۳۶/۵۰	۱۴۰/۲۵	۴۹/۶۶	۹۰/۷۵	۸۷/۱۶
GSch6	۱۲/۶۵	۱/۳۲	۱۸۶/۷	۹/۴۵	۴۰۰	۱۲/۰۴	۲۲	۲۲/۵۶
GSch7	۲۳/۷۳	۲/۴۸	۲۴۷/۷	۱۲/۵۳	۷۵۰	۲۲/۵۷	۴۱/۲۵	۲۹/۹۳
GSch8	۳۹/۵۵	۴/۱۳	۵۹۶/۱	۳۰/۱۷	۷	۳۷/۶۲	۶۸/۷۵	۷۲/۰۴
Sh3	۲۵/۳۱	۲/۶۴	۳۵۱/۸۸	۱۷/۸۱	۶۸	۲۴/۰۸	۴۴	۴۲/۵۲
Qla	۱۲/۶۵	۱/۳۲	۱۳۲/۱۱	۶/۶۹	۳۴	۱۲/۰۴	۲۲	۱۵/۹۶
Shc	۲۲/۱۵	۲/۳۱	۲۶۲/۸۹	۱۳/۳۰	۵۹/۵	۲۱/۰۷	۳۸/۵	۳۱/۷۷

۱۵/۲۰	۱۵/۷۳	۸/۶۱	۲۴/۳۱	۶/۳۷	۱۲۵/۸۰	۰/۹۴	۹/۰۵	Sh3
۵/۸۷	۸/۶۹	۴/۷۶	۱۳/۴۳	۲/۴۶	۴۸/۶۱	۰/۵۲	۵	MDL 4
۱۵/۰۷	۱۴/۹۰۵	۸/۱۶	۲۷۱	۶/۳۱	۱۲۴/۶۶	۰/۸۹	۸/۵۷	AS1
۵/۰۶	۷/۴۸	۴/۰۹	۱۳۶	۲/۱۲	۴۱/۸۴	۰/۴۵	۴/۳۰	MDL 5
۸/۰۶	۷/۹۷۵	۴/۳۶	۱۴۵	۳/۳۸	۶۶/۷۰	۰/۴۸	۴/۵۹	AS2
۱۵/۳۱	۲۰/۶۲۵	۱۱/۲۹	۳۷۵	۶/۳۷	۱۲۵/۸۸	۱/۲۴	۱۱/۸۶	MDL 6
۱۷/۵۷	۱۷/۳۸	۹/۵۱	۳۱۶	۷/۳۶	۱۴۵/۳۶	۱/۰۴	۱۰	AS3
۲/۳۵	۳/۱۹	۱/۷۵	۴/۹۳	۰/۹۹	۱۹/۴۷	۰/۱۹	۱/۸۳	MDL 7
۱۰۸/۴۳	۱۴۱/۸۴۵	۷۷/۶۲	۲۱۹/۲۱۵	۴۵/۴۱	۸۹۷/۲۸	۸/۵۱	۸۱/۵۹	Sh5
۱۷/۵۶	۱۸/۹۲	۱۰/۳۵	۳۴۴	۷/۳۵	۱۴۵/۳۲	۱/۱۴	۱۰/۸۸	Trh1
۳/۲۸	۴/۵۱	۲/۴۷	۸۲	۱/۳۷	۲۷/۱۲	۰/۲۷	۲/۵۹	Tsh
۱۸/۱۷	۱۹/۵۸	۱۰/۷۱	۳۵۶	۷/۶۱	۱۵۰/۳۹	۱/۱۷	۱۱/۲۶	Trh2
۲۹/۷۵	۳۹/۹۳	۲۱/۸۵	۷۲۶	۱۲/۴۶	۲۴۶/۲۲	۲/۴۰	۲۲/۹۷	As4
۲۳/۲۸	۲۵/۰۸	۱۳/۷۲	۳۸/۷۶	۹/۷۵	۱۹۲/۶۳	۱/۵۰	۱۴/۴۳	Md
۲۷/۱۵	۲۸/۳۲۵	۱۵/۵۰	۴۳/۷۷۵	۱۱/۳۷	۲۲۴/۶۶	۱/۷۰	۱۶/۲۹	Tma
۲۴/۴۹	۳۸/۸۸۵	۲۱/۲۸	۶۰/۰۹۵	۱۰/۲۵	۲۰۲/۶۳	۲/۳۳	۲۲/۳۷	Sch1

جدول ۵- ۱۱- ضریب بهره‌وری و نرخ پیشروی روزانه برای واحدهای مختلف قطعات ۱ و ۲ مسیر تونل

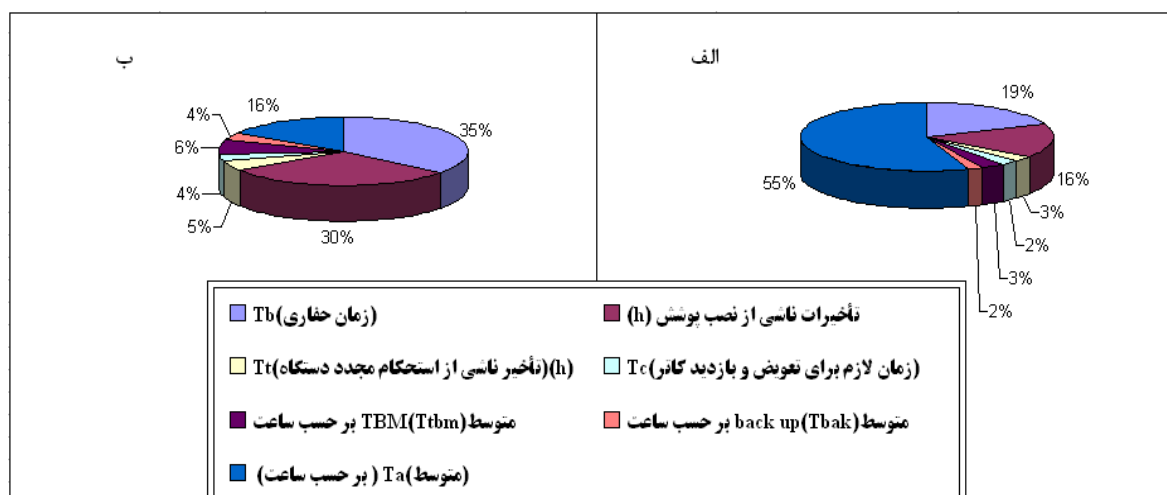
در نظر گرفتن تأخیرهای روش NTH		در نظر گرفتن تأخیرهای روش‌های CSM و NTH		I (m/hr)	نام واحد
نرخ پیشروی روزانه (m/day)	ضریب بهره‌وری (%)	نرخ پیشروی روزانه (m/day)	ضریب بهره‌وری (%)		
۲۴/۲۷	۴۰	۱۵/۰۹	۲۵	۲/۵۰	An
۲۶/۲۶	۳۸	۱۲/۴۱	۱۸	۲/۸۶	GSch1
۲۷/۰۷	۳۷	۱۰/۰۹	۱۴	۳/۰۳	GSch2
۸/۰۶	۱۶	۸/۰۶	۱۶	۲/۱	all
۲۶/۴۶	۳۷	۱۶/۰۷	۲۳	۲/۹۷	GSch3
۸/۰۶	۱۶	۸/۰۶	۱۶	۲/۱	all
۲۶/۲۸	۳۷	۱۵/۹۶	۲۳	۲/۹۴	GSch4

۲۶/۴۲	۳۷	۱۶/۰۵	۲۳	۲/۹۷	GSch5
۲۶/۲۸	۳۷	۱۵/۹۶	۲۳	۲/۹۴	GSch4
۲۴/۸۰	۳۸	۱۴/۹۴	۲۳	۲/۷۰	MQ
۲۶/۸۹	۳۷	۱۶/۳۳	۲۲	۳/۰۳	ML
۲۶/۱۱	۳۸	۹/۸۱	۱۴	۲/۸۴	GSch6
۳۱/۰۴	۳۲	۱۱/۲۰	۱۲	۴/۰۱	GSch7
۲۵/۷۹	۳۹	۱۶/۲۹	۲۴	۲/۷۸	GSch8
۲۶/۶۱	۳۷	۱۶/۱۹	۲۲	۳/۰۱	Sh3
۳۱/۱۶	۳۲	۱۹/۵۶	۲۰	۴/۰۱	Qla
۲۹/۰۳	۳۴	۱۷/۹۸	۲۱	۳/۵۳	Shc
۲۶/۶۱	۳۷	۱۶/۱۹	۲۲	۳/۰۱	Sh3
۳۲/۳۱	۳۱	۲۰/۳۷	۲۰	۴/۳۰	MDL 4
۲۶/۲۶	۳۸	۹/۸۷	۱۴	۲/۸۸	AS1
۳۲/۲۱	۳۱	۱۱/۴۵	۱۱	۴/۳۰	MDL 5
۲۶/۲۶	۳۸	۹/۸۷	۱۴	۲/۸۸	AS2
۳۰/۶۱	۳۲	۱۱/۱۱	۱۲	۳/۹۴	MDL 6
۲۶/۱۸	۳۸	۹/۸۶	۱۴	۲/۸۸	AS3
۳۰/۵۶	۳۲	۱۹/۲۷	۲۰	۳/۹۴	MDL 7
۲۹/۹۶	۳۳	۱۸/۸۴	۲۱	۳/۸۱	Sh5
۲۶/۵۸	۳۵	۱۰/۰۹	۱۳	۳/۱۳	Trh1
۳۰/۸۶	۳۲	۱۱/۱۷	۱۲	۴/۰۰	Tsh
۲۶/۵۸	۳۵	۱۰/۰۹	۱۳	۳/۱۳	Trh2
۳۰/۳۲	۳۲	۱۱/۰۶	۱۲	۳/۹۰	As4
۲۷/۱۳	۳۶	۱۶/۶۰	۲۲	۳/۱۳	Md
۲۶/۸۳	۳۷	۱۶/۳۲	۲۲	۳/۰۴	Tma
۳۳/۲۸	۳۰	۲۱/۱۵	۱۹	۴/۶۲	Sch1

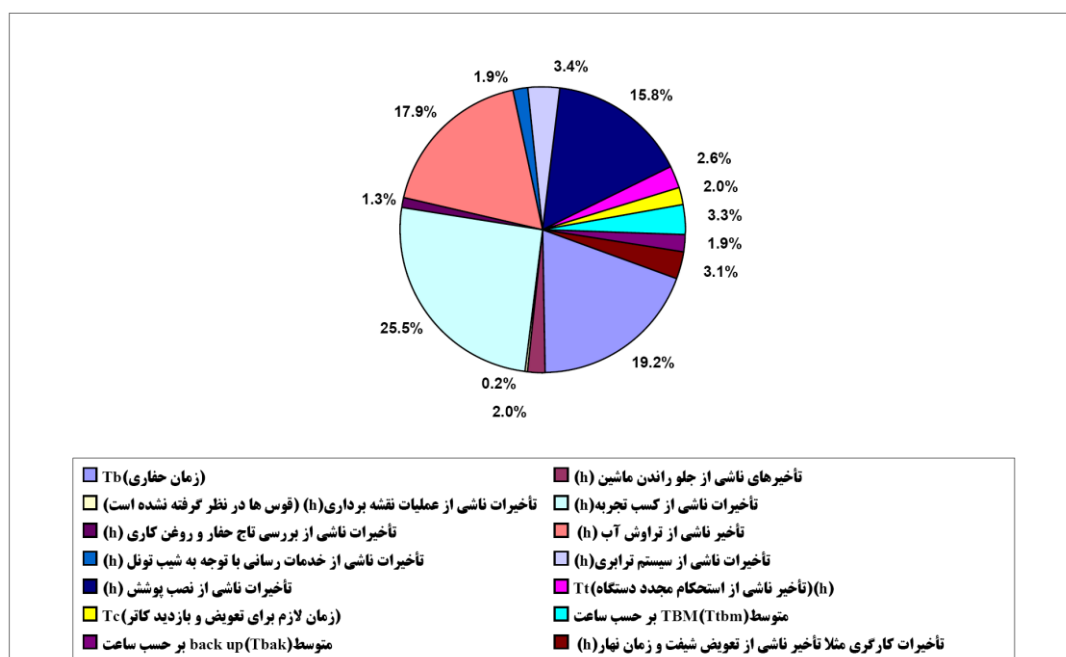
لازم به ذکر است که برخی از تأخیرها در روش NTH آورده شده‌اند و برخی دیگر از تأخیرها با استفاده از روش CSM لحاظ می‌شوند و برخی از تأخیرها در هر دو روش لحاظ شده‌اند (تأخیرهای متفرقه با استفاده از

روش CSM از دقت بیشتری برخوردار می‌باشد). همان‌طوری‌که در جدول ۵-۱۱ مشاهده می‌شود ضریب بهره‌وری در ۲ حالت برای هر یک از واحدها محاسبه شده است. در حالت اول تأخیرهای روش NTH در نظر گرفته شده‌اند ولی به‌جای تأخیرهای متفرقه مطرح شده در روش NTH، تأخیرهای مطرح شده در روش CSM در نظر گرفته شده‌اند زیرا روش CSM تأخیرهای متفرقه را با دقت بیشتری شامل می‌شود. در حالت دوم فقط تأخیرهای مطرح شده در روش NTH لحاظ شده‌اند یعنی تأخیرهای متفرقه با استفاده از روش NTH در نظر گرفته شده‌اند. متوسط ضریب بهره‌وری در حالت اول تقریباً ۱۸/۲۴ درصد می‌شود در صورتی‌که در حالت دوم متوسط ضریب بهره‌وری ۳۴/۳۵ درصد می‌شود.

با توجه به این‌که حالت اول تمامی تأخیرهای متفرقه را با دقت بیشتری شامل می‌شود (تأخیرهای دیگری نیز ممکن است در حین کار پیش بیاید) بنابراین حالت اول احتمالاً دقیق‌تر می‌باشد. در ضمن در حالت اول پروژه در ۱۳۳۲/۵۱ روز یعنی حدوداً ۴ سال و ۶ ماه به پایان می‌رسد و در حالت دوم در طی ۸۰۷/۶۳ روز یعنی حدوداً ۲ سال و ۹ ماه تمام می‌شود. مقدار تأخیرها در ۲ حالت ذکر شده در شکل‌های ۵-۲ و ۵-۳ نشان داده شده است.



شکل ۵-۲- مقایسه تأخیرهای متفرقه در حالت الف) در نظر گرفتن ترکیبی تأخیرهای روش NTH و CSM (ب) تأخیرهای متفرقه به دست آمده از روش NTH



شکل ۵-۳- درصد هر یک از تأخیرها در حالت در نظر گرفتن ترکیبی تأخیرهای روش NTH و تأخیرهای متفرقه به دست آمده از روش CSM

مقادیر (T_c) یعنی زمان لازم برای تعویض و بازدید برنده در روش NTH با استفاده از مطالب بیان شده در بند ۳-۴-۵ محاسبه شده است که نتایج آن در جدول ۵-۱۲ آورده شده است.

جدول ۵-۱۲- متوسط عمر حلقه برنده و زمان لازم برای تعویض و بازدید برنده (T_c)

نام واحد	زمان لازم برای تعویض هر برنده (min)	فاکتور تصحیحی برای عمر حلقه برنده پایه	فاکتور تصحیحی برای قطر TBM	فاکتور تصحیحی برای سرعت کله حفار	فاکتور تصحیحی برای تعداد برنده	فاکتور تصحیحی برای مقدار کوارتز	متوسط عمر حلقه برنده (H_h) (h/cutter)	زمان لازم برای تعویض و بازدید برنده (T_c)
An	۵۵	۱۱۰	۱/۳	۱/۷	۰/۸۱	۱/۴۴	۹/۶۰	۱۳/۳۵

12/02	11/98	1/52	0/81	1/7	1/3	130	55	GSch1
2/79	12/90	1/52	0/81	1/7	1/3	140	55	GSch2
33/13	12/93	1/64	0/81	1/7	1/3	130	55	all
13/48	9/17	1/44	0/81	1/7	1/3	105	55	GSch3
27/02	12/93	1/64	0/81	1/7	1/3	130	55	all
5/56	8/40	1/32	0/81	1/7	1/3	105	55	GSch4
8/78	8/80	1/32	0/81	1/7	1/3	110	55	GSch5
5/56	8/40	1/32	0/81	1/7	1/3	105	55	GSch4
56/73	5/98	1/16	0/81	1/7	1/3	85	55	MQ
48/45	10/31	1/36	0/81	1/7	1/3	125	55	ML
12/19	10/60	1/52	0/81	1/7	1/3	115	55	GSch6
13/27	12/93	1/64	0/81	1/7	1/3	130	55	GSch7
38/94	10/60	1/52	0/81	1/7	1/3	115	55	GSch8
25/37	9/60	1/32	0/81	1/7	1/3	120	55	Sh3
7/08	12/93	1/64	0/81	1/7	1/3	130	55	Q1a
18/95	9/60	1/32	0/81	1/7	1/3	120	55	Shc
9/07	9/60	1/32	0/81	1/7	1/3	120	55	Sh3
2/92	11/54	1/36	0/81	1/7	1/3	140	55	MDL 4
8/24	10/48	1/44	0/81	1/7	1/3	120	55	AS1
2/80	10/36	1/22	0/81	1/7	1/3	140	55	MDL 5
4/41	10/48	1/44	0/81	1/7	1/3	120	55	AS2
9/18	9/49	1/16	0/81	1/7	1/3	135	55	MDL 6
10/48	9/60	1/32	0/81	1/7	1/3	120	55	AS3
1/50	9/00	1/1	0/81	1/7	1/3	135	55	MDL 7
67/50	9/20	1/32	0/81	1/7	1/3	115	55	Sh5
16/80	5/99	1/04	0/81	1/7	1/3	95	55	Trh1
2/04	9/20	1/32	0/81	1/7	1/3	115	55	Tsh
17/38	5/99	1/04	0/81	1/7	1/3	95	55	Trh2
19/21	8/88	1/22	0/81	1/7	1/3	120	55	As4
13/89	9/60	1/32	0/81	1/7	1/3	120	55	Md
13/88	11/20	1/32	0/81	1/7	1/3	140	55	Tma
15/24	9/20	1/32	0/81	1/7	1/3	115	55	Sch1

۵-۲-۴- محاسبات پیش‌بینی عملکرد TBM با روش Rmi

پارامترهای مورد نیاز برای به‌دست آوردن نرخ نفوذ و نرخ پیشروی با استفاده از این روش، در جداول ۵-۱۳ تا ۵-۱۶ آورده شده است.

روش Rmi نیز همانند روش NTH برای محاسبه نرخ پیشروی، وضعیت ناپیوستگی‌ها را در نظر می‌گیرد. وضعیت درزه‌ها در واحدهای مختلف مسیر تونل، با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی موجود مطابق جدول ۵-۱۳ می‌باشد.

جدول ۵-۱۳- وضعیت ناپیوستگی‌ها در قطعات ۱ و ۲ مسیر تونل

نام واحد	فاصله داری ناپیوستگی‌ها (mm)	طبقه بندی سنگ	زاویه بین محور تونل و امتداد ناپیوستگی	فاکتور بیان کننده اندازه درزه و پیوستگی (J _L)	فاکتور بیان کننده زبری سطح درزه (J _R)	فاکتور بیان کننده درجه هوازدگی (J _A)
An	۴۰۰	I	۴۰	۱	۲	۱
GSch1	۲۰۰	II	۴۰	۱	۱/۵	۱
GSch2	۱۰۰	III	۴۰	۱	۲/۲	۱
all	-	-	-	-	-	-
GSch3	۱۰۰	III	۴۰	۱	۱/۲۵	۱
all	-	-	-	-	-	-
GSch4	۱۰۰	III	۴۰	۱	۱/۵	۱
GSch5	۱۰۰	III	۴۰	۱	۱/۵	۱
GSch4	۱۰۰	III	۴۰	۱	۱/۵	۱
MQ	۲۰۰	II	۴۰	۱	۱	۱
ML	۱۰۰	III	۴۰	۱	۲	۱
GSch6	۲۰۰	II	۴۰	۱	۲/۲	۱
GSch7	۵۰	IV	۴۰	۱	۱/۲۵	۴
GSch8	۲۰۰	II	۴۰	۱	۱/۵	۱
Sh3	۱۰۰	III	۴۰	۱	۲/۲۵	۱
Qla	۱۰۰	IV	۴۰	۱	۱/۲۵	۴
Shc	۱۰۰	III	۴۰	۱	۲/۲۵	۱
Sh3	۱۰۰	III	۴۰	۱	۲/۲۵	۱
MDL 4	۱۰۰	III	۴۰،۶۰،۷۴	۱	۱	۱

۱	۲	۱	۲۵	III	۱۰۰	AS1
۱	۱	۱	۴۰,۶۰,۷۴	III	۱۰۰	MDL 5
۱	۲	۱	۲۵	III	۱۰۰	AS2
۱/۵	۱	۱	۴۰,۶۰,۷۴	II	۲۰۰	MDL 6
۱	۲	۱	۲۵	III	۱۰۰	AS3
۱/۵	۱	۱	۴۰,۶۰,۷۴	II	۲۰۰	MDL 7
۱	۱	۱	۲۵	IV	۵۰	Sh5
۱	۲	۲	۱۸,۷۶,۶۷	II	۲۰۰	Trh1
۱	۲	۱	۱۰,۹۰,۱۵	III	۱۰۰	Tsh
۱	۲	۲	۱۸,۷۶,۶۷	II	۲۰۰	Trh2
۱	۲	۱	۱۰,۹۰,۱۵	III	۱۰۰	As4
۱	۲	۱	۱۸,۷۶,۶۷	II	۲۰۰	Md
۱/۲۵	۲	۱	۱۸,۷۶,۶۷	I	۴۰۰	Tma
۱	۱	۱	۱۰,۹۰,۱۵	IV	۵۰	Sch1

با توجه به جدول ۳-۴ فاکتور شکل بلوک (β) برای واحد An و هر یک از واحدها در نظر گرفته شده است. شمارنده حجمی درزه (J_v) نیز به صورت زیر برای واحد An محاسبه شده است.

$$J_v = \sum (1/S_i) = 1/(400 \times 10^{-3}) = 2.5$$

حال با مشخص بودن فاکتور شکل بلوک و شمارنده حجمی درزه به محاسبه مقدارهای حجم بلوک (V_b)، پارامتر ویژگی درزه (J_c) و پارامتر درزه‌داری (J_p) در واحد An پرداخته شد.

$$V_b = \beta \times J_v^{-3} = 150 \times 2.5^{-3} = 9.6$$

$$J_c = \frac{J_L \times J_R}{J_A} = \frac{1 \times 2}{1} = 2$$

$$J_p = 0.2 \sqrt{J_c} \times V_b^D = 0.2 \times \sqrt{2} \times 9.6^{0.32} = 0.59$$

$$D = 0.37 \times J_c^{-0.2} = 0.37 \times 2^{-0.2} = 0.32$$

مقدارهای شمارنده حجمی درزه (J_v)، حجم بلوک (V_b)، پارامتر ویژگی درزه (J_c) و پارامتر درزه‌داری (J_p) برای واحدهای مختلف مسیر تونل محاسبه شده است که نتایج آن در جدول ۵-۱۴ نشان داده شده است.

جدول ۵-۱۴- مقادیر محاسبه شده برای فاکتور شکل بلوک، شمارنده حجمی درزه، پارامتر ویژگی درزه و پارامتر درزه‌داری

نام واحد	فاکتور شکل بلوک (θ)	شمارنده حجمی درزه (J_v)	J_c	D	V_b	J_p
An	۱۵۰	۲/۵	۲	۰/۳۲	۹/۶	۰/۵۹
GSch1	۱۷۵	۵	۱/۵	۰/۳۴	۱/۴	۰/۲۷
GSch2	۱۷۵	۱۰	۲/۲	۰/۳۲	۰/۱۷۵	۰/۱۷
all	-	-	-	-	-	-
GSch3	۱۷۵	۱۰	۱/۲۵	۰/۳۵	۰/۱۷۵	۰/۱۲
all	-	-	-	-	-	-
GSch4	۱۷۵	۱۰	۱/۵	۰/۳۴	۰/۱۷۵	۰/۱۴
GSch5	۱۷۵	۱۰	۱/۵	۰/۳۴	۰/۱۷۵	۰/۱۴
GSch4	۱۷۵	۱۰	۱/۵	۰/۳۴	۰/۱۷۵	۰/۱۴
MQ	۱۷۵	۵	۱	۰/۳۷	۱/۴	۰/۲۳
ML	۱۷۵	۱۰	۲	۰/۳۲	۰/۱۷۵	۰/۱۶
GSch6	۱۷۵	۵	۲/۲	۰/۳۲	۱/۴	۰/۳۳
GSch7	۲۰۰	۲۰	۰/۳۱	۰/۴۷	۰/۰۲۵	۰/۰۲
GSch8	۱۷۵	۵	۱/۵	۰/۳۴	۱/۴	۰/۲۷
Sh3	۱۷۵	۱۰	۲/۲۵	۰/۳۱	۰/۱۷۵	۰/۱۷
Qla	۲۰۰	۱۰	۰/۳۱	۰/۴۷	۰/۲	۰/۰۵
Shc	۱۷۵	۱۰	۲/۲۵	۰/۳۱	۰/۱۷۵	۰/۱۷
Sh3	۱۷۵	۱۰	۲/۲۵	۰/۳۱	۰/۱۷۵	۰/۱۷
MDL 4	۱۷۵	۱۰	۱	۰/۳۷	۰/۱۷۵	۰/۱۰
AS1	۱۷۵	۱۰	۲	۰/۳۲	۰/۱۷۵	۰/۱۶
MDL 5	۱۷۵	۱۰	۱	۰/۳۷	۰/۱۷۵	۰/۱۰
AS2	۱۷۵	۱۰	۲	۰/۳۲	۰/۱۷۵	۰/۱۶
MDL 6	۱۷۵	۵	۰/۶۷	۰/۴۰	۱/۴	۰/۱۹
AS3	۱۷۵	۱۰	۲	۰/۳۲	۰/۱۷۵	۰/۱۶
MDL 7	۱۷۵	۵	۰/۶۷	۰/۴۰	۱/۴	۰/۱۹
Sh5	۲۰۰	۲۰	۱	۰/۳۷	۰/۰۲۵	۰/۰۵
Trh1	۱۷۵	۵	۴	۰/۲۸	۱/۴	۰/۴۴
Tsh	۱۷۵	۱۰	۲	۰/۳۲	۰/۱۷۵	۰/۱۶
Trh2	۱۷۵	۵	۴	۰/۲۸	۱/۴	۰/۴۴

۰/۱۶	۰/۱۷۵	۰/۳۲	۲	۱۰	۱۷۵	As4
۰/۳۲	۱/۴	۰/۳۲	۲	۵	۱۷۵	Md
۰/۵۴	۹/۶	۰/۳۴	۱/۶	۲/۵	۱۵۰	Tma
۰/۰۵	۰/۰۲۵	۰/۳۷	۱	۲۰	۲۰۰	Sch1

فاکتور C_0 که بیانگر جهت یافتگی دسته درزه اصلی می‌باشد، برای هر یک از واحدهای مسیر تونل با توجه به جدول ۳-۶ برآورد شده است. با توجه به اطلاعات زمین شناسی موجود مقدار DRI برای واحد An به صورت زیر محاسبه شده است. مقادیر DRI برای هر یک از واحدهای زمین شناسی مهندسی مسیر تونل در جدول ۵-۱۵ آورده شده است.

$$DRI = E \times \sigma_C^{-0.6} = 1000 \times 65^{-0.6} = 81.7$$

E یک ضریب وابسته به مقاومت فشاری تک محوره و نوع سنگ می‌باشد که برای واحد An که از نوع سنگ‌های غیر شیستی و سخت می‌باشد برابر ۱۰۰۰ است.

با مشخص شدن پارامترهای ذکر شده در بالا مقدار K_{eqv} برای واحد An به صورت زیر محاسبه شده است.

$$K_{eq} = \frac{0.06 \times C_0 \times \sqrt{E}}{J_p \times \sigma_C^{0.3}} = \frac{0.06 \times 1.5 \times \sqrt{1000}}{0.59 \times 65^{0.3}} = 1.39$$

نیروی رانش به ازای هر برنده (M_B) با توجه به جدول ۳-۳ برابر با ۲۳۰ KN/Cutter می‌باشد. با در نظر گرفتن قطر برنده‌ها برابر ۴۳۲ mm و فاصله بین برنده‌ها برابر ۶۵ mm، فاکتورهای تصحیحی k_d و k_a به صورت زیر محاسبه شده است.

$$K_d = 2.35 - 0.0028D_c = 2.35 - 0.0028 \times 432 = 1.14$$

$$K_a = 1.35 - 0.005S_c = 1.35 - 0.005 \times 65 = 1.03$$

M_{eqv} برای واحدهای زمین شناسی مسیر تونل به صورت زیر محاسبه شده است.

$$M_{eqv} = M_B \times K_d \times K_a = 230 \times 1.14 \times 1.03 = 268.65 \quad (KN / Cutter)$$

مقادیر M_{eqv} و K_{eqv} برای هر یک از واحدهای مسیر تونل محاسبه شده است که نتایج آن در جدول ۵-۱۵ نشان داده شده است.

جدول ۵-۱۵ - M_{eqv} و K_{eqv} محاسبه شده برای هر یک از واحدهای مسیر تونل

نام واحد	UCS (MPa)	DRI	C_o	K_{eqv}	M_{eqv}
An	۶۵	۸۱/۷	۱/۵	۱/۳۹	۲۶۸/۸۵
GSch1	۴۰	۸۲	۱/۵	۲/۹۷	۲۶۸/۸۵
GSch2	۳۷/۵	۸۵/۲	۱/۵	۴/۸۶	۲۶۸/۸۵
all	-	-	-	-	-
GSch3	۴۰	۸۲	۱/۵	۶/۷۵	۲۶۸/۸۵
all	-	-	-	-	-
GSch4	۳۷/۵	۸۵/۲	۱/۵	۶/۱۵	۲۶۸/۸۵
GSch5	۳۷/۵	۸۵/۲	۱/۵	۶/۱۵	۲۶۸/۸۵
GSch4	۳۷/۵	۸۵/۲	۱/۵	۶/۱۵	۲۶۸/۸۵
MQ	۴۰	۸۲	۱/۵	۳/۶۰	۲۶۸/۸۵
ML	۷۰	۵۸/۶	۱/۵	۴/۲۷	۲۶۸/۸۵
GSch6	۳۷/۵	۸۵/۲	۱/۵	۲/۵۲	۲۶۸/۸۵
GSch7	۱۵	۹۸/۵	۱/۵	۴۴/۷۲	۲۶۸/۸۵
GSch8	۴۰	۸۲	۱/۵	۲/۹۷	۲۶۸/۸۵
Sh3	۱۶/۹۲	۱۳۷	۱/۵	۶/۰۹	۲۶۸/۸۵
Qla	۱۰	۱۲۶	۱/۵	۱۹/۱۳	۲۶۸/۸۵
Shc	۱۶/۹۲	۱۳۷	۱/۵	۶/۰۹	۲۶۸/۸۵
Sh3	۱۶/۹۲	۱۳۷	۱/۵	۶/۰۹	۲۶۸/۸۵
MDL 4	۶۴/۳	۸۲	۱/۷۵	۹/۰۷	۲۶۸/۸۵
AS1	۵۸/۳۳	۶۵	۱/۲۵	۳/۷۶	۲۶۸/۸۵
MDL 5	۶۴/۳	۸۲	۱/۷۵	۹/۰۷	۲۶۸/۸۵
AS2	۵۸/۳۳	۶۵	۱/۲۵	۳/۷۶	۲۶۸/۸۵

۲۶۸/۸۵	۵/۰۹	۱/۷۵	۸۲	۶۴/۳	MDL 6
۲۶۸/۸۵	۳/۷۶	۱/۲۵	۶۵	۵۸/۳۳	AS3
۲۶۸/۸۵	۵/۰۹	۱/۷۵	۸۲	۶۴/۳	MDL 7
۲۶۸/۸۵	۱۳/۲۸	۱/۲۵	۸۲	۴۰/۲	Sh5
۲۶۸/۸۵	۲/۰۹	۱/۷۵	۷۷	۷۲/۱۲	Trh1
۲۶۸/۸۵	۳/۰۳	۱	۶۶	۵۷	Tsh
۲۶۸/۸۵	۲/۰۹	۱/۷۵	۷۷	۷۲/۱۲	Trh2
۲۶۸/۸۵	۳/۰۱	۱	۶۵	۵۸/۳۳	As4
۲۶۸/۸۵	۲/۹۴	۱/۷۵	۷۸	۷۰	Md
۲۶۸/۸۵	۱/۷۱	۱/۷۵	۷۸	۷۰/۵۵	Tma
۲۶۸/۸۵	۱۰/۶۲	۱	۸۲	۴۰/۲	Sch1

با توجه به K_{eqv} و M_{eqv} به دست آورده شده به محاسبه نرخ نفوذ پایه (i_0) در واحد An به صورت زیر پرداخته شد. می توان i_0 را با استفاده از K_{eqv} و M_{eqv} و استفاده از نمودار ۳-۳۳ نیز به دست آورد.

$$i_0 = F \times K_{eq}^G = 6.61 \times 1.39^{0.29} = 7.27 \quad (mm/rev)$$

$$F = 0.0015 M_{eq}^{1.5} = 0.0015 \times 268.85^{1.5} = 6.61$$

$$G = 30 K_{eq}^{-0.5} \times M_{eq}^{-0.8} = 30 \times 1.39^{-0.5} \times 268.85^{-0.8} = 0.29$$

سپس با در نظر گرفتن $RPM = 6.35 \frac{rev}{min}$ ، مقدار نرخ نفوذ برای واحد An به صورت زیر محاسبه شده است.

$$I = i_0 \times RPM \times (60/1000) = 7.27 \times 6.35 \times (60/1000) = 2.77$$

مقادیر نرخ نفوذ پایه (i_0) و نرخ نفوذ (I) محاسبه شده برای هر یک از واحدهای مسیر تونل در جدول ۵-۱۶ نشان داده شده است.

جدول ۵-۱۶- نرخ نفوذ پایه و نرخ نفوذ محاسبه شده برای هر یک از واحدهای مسیر تونل

نام واحد	F	G	i_0	I (m/hr)
An	۶/۶۱	۰/۲۹	۷/۲۷	۲/۷۷

۳/۱۳	۸/۲۰	۰/۲۰	۶/۶۱	GSch1
۳/۲۲	۸/۴۵	۰/۱۵	۶/۶۱	GSch2
۲/۱۰	–	–	–	all
۳/۲۴	۸/۵۰	۰/۱۳	۶/۶۱	GSch3
۲/۱۰	–	–	–	all
۳/۲۴	۸/۴۹	۰/۱۴	۶/۶۱	GSch4
۳/۲۴	۸/۴۹	۰/۱۴	۶/۶۱	GSch5
۳/۲۴	۸/۴۹	۰/۱۴	۶/۶۱	GSch4
۳/۱۷	۸/۳۳	۰/۱۸	۶/۶۱	MQ
۳/۲۰	۸/۴۱	۰/۱۷	۶/۶۱	ML
۳/۰۷	۸/۰۷	۰/۲۲	۶/۶۱	GSch6
۶/۰۹	۱۵/۹۹	۰/۰۵	۶/۶۱	GSch7
۳/۱۳	۸/۲۰	۰/۲۰	۶/۶۱	GSch8
۳/۲۴	۸/۴۹	۰/۱۴	۶/۶۱	Sh3
۳/۱۷	۸/۳۳	۰/۰۸	۶/۶۱	Qla
۳/۲۴	۸/۴۹	۰/۱۴	۶/۶۱	Shc
۳/۲۴	۸/۴۹	۰/۱۴	۶/۶۱	Sh3
۳/۲۴	۸/۴۹	۰/۱۱	۶/۶۱	MDL 4
۳/۱۸	۸/۳۵	۰/۱۸	۶/۶۱	AS1
۳/۲۴	۸/۴۹	۰/۱۱	۶/۶۱	MDL 5
۳/۱۸	۸/۳۵	۰/۱۸	۶/۶۱	AS2
۳/۲۲	۸/۴۶	۰/۱۵	۶/۶۱	MDL 6
۳/۱۸	۸/۳۵	۰/۱۸	۶/۶۱	AS3
۳/۲۲	۸/۴۶	۰/۱۵	۶/۶۱	MDL 7
۳/۲۱	۸/۴۳	۰/۰۹	۶/۶۱	Sh5
۳/۰۰	۷/۸۷	۰/۲۴	۶/۶۱	Trh1
۳/۱۳	۸/۲۲	۰/۲۰	۶/۶۱	Tsh
۳/۰۰	۷/۸۷	۰/۲۴	۶/۶۱	Trh2
۳/۱۳	۸/۲۱	۰/۲۰	۶/۶۱	As4
۳/۱۲	۸/۲۰	۰/۲۰	۶/۶۱	Md
۲/۹۰	۷/۶۱	۰/۲۶	۶/۶۱	Tma
۳/۲۳	۸/۴۷	۰/۱۰	۶/۶۱	Sch1

با توجه به مطالب بیان شده در بند ۳-۴-۳ و ۳-۴-۵ و با در نظر گرفتن تأخیرهای موجود، ضریب بهره‌وری برای هر یک از واحدهای زمین‌شناسی مسیر تونل مطابق با جدول ۵-۱۷ برآورد شده است.

با در دست داشتن نرخ نفوذ در هر یک از واحدهای زمین‌شناسی مسیر تونل و با به‌دست آوردن ضریب بهره‌وری در هر واحد، به محاسبه نرخ پیشروی در هر یک از واحدهای زمین‌شناسی پرداخته شد که نتایج آن در جدول ۵-۱۷ نشان داده شده است.

جدول ۵-۱۷ - ضریب بهره‌وری و نرخ پیشروی روزانه برای واحدهای مختلف قطعات ۱ و ۲ مسیر تونل

نام واحد	I (m/hr)	ضریب بهره‌وری (%) با در نظر گرفتن ترکیبی تأخیرهای روش‌های CSM و NTH	نرخ پیشروی روزانه (m/day)	ضریب بهره‌وری (%) با در نظر گرفتن تأخیرهای روش NTH	نرخ پیشروی روزانه (m/day)
An	۲/۷۷	۲۴	۱۶/۲۱	۳۹	۲۵/۶۰
GSch1	۳/۱۳	۱۷	۱۲/۹۳	۳۶	۲۷/۲۹
GSch2	۳/۲۲	۱۳	۱۰/۳۱	۳۶	۲۷/۷۵
all	۲/۱۰	۱۶	۸/۰۶	۱۶	۸/۰۶
GSch3	۳/۲۴	۲۲	۱۶/۹۳	۳۵	۲۷/۵۳
all	۲/۱۰	۱۶	۸/۰۶	۱۶	۸/۰۶
GSch4	۳/۲۴	۲۲	۱۶/۸۹	۳۵	۲۷/۴۳
GSch5	۳/۲۴	۲۲	۱۶/۹۰	۳۵	۲۷/۴۸
GSch4	۳/۲۴	۲۲	۱۶/۸۹	۳۵	۲۷/۴۳
MQ	۳/۱۷	۲۲	۱۶/۵۱	۳۵	۲۶/۷۱
ML	۳/۲۰	۲۲	۱۶/۸۶	۳۶	۲۷/۵۲
GSch6	۳/۰۷	۱۴	۱۰/۱۰	۳۶	۲۶/۹۲
GSch7	۶/۰۹	۹	۱۲/۷۱	۲۶	۳۷/۵۶
GSch8	۳/۱۳	۲۳	۱۷/۵۸	۳۶	۲۷/۱۹
Sh3	۳/۲۴	۲۲	۱۶/۹۱	۳۵	۲۷/۴۹
Qla	۳/۱۷	۲۲	۱۶/۸۴	۳۶	۲۷/۶۰
Shc	۳/۲۴	۲۲	۱۶/۹۱	۳۵	۲۷/۴۹
Sh3	۳/۲۴	۲۲	۱۶/۹۱	۳۵	۲۷/۴۹
MDL 4	۳/۲۴	۲۲	۱۶/۹۶	۳۶	۲۷/۶۳
AS1	۳/۱۸	۱۳	۱۰/۲۳	۳۶	۲۷/۳۷
MDL 5	۳/۲۴	۱۳	۱۰/۲۸	۳۵	۲۷/۵۲
AS2	۳/۱۸	۱۳	۱۰/۲۳	۳۶	۲۷/۳۷
MDL 6	۳/۲۲	۱۳	۱۰/۲۶	۳۵	۲۷/۴۱
AS3	۳/۱۸	۱۳	۱۰/۲۲	۳۶	۲۷/۲۹
MDL 7	۳/۲۲	۲۲	۱۶/۸۳	۳۵	۲۷/۳۳

۲۷/۳۶	۳۶	۱۶/۸۲	۲۲	۳/۲۱	Sh5
۲۵/۸۳	۳۶	۹/۸۹	۱۴	۳/۰۰	Trh1
۲۷/۰۰	۳۶	۱۰/۱۵	۱۴	۳/۱۳	Tsh
۲۵/۹۱	۳۶	۹/۹۰	۱۴	۳/۰۰	Trh2
۲۶/۹۱	۳۶	۱۰/۱۳	۱۳	۳/۱۳	As4
۲۶/۸۵	۳۶	۱۶/۴۸	۲۲	۳/۱۲	Md
۲۶/۲۸	۳۸	۱۵/۸۸	۲۳	۲/۹۰	Tma
۲۷/۴۲	۳۵	۱۶/۸۷	۲۲	۳/۲۳	Sch1

متوسط ضریب بهره‌وری برای حالت در نظر گرفتن ترکیبی تأخیرهای روش NTH و تأخیرهای متفرقه به‌دست آمده از روش CSM، تقریباً ۱۸/۳ درصد می‌شود در صورتی که در حالت در نظر گرفتن تأخیرهای متفرقه با استفاده از روش NTH این مقدار برابر با ۳۴/۴ درصد می‌شود که با توجه به این که حالت اول تمامی تأخیرهای متفرقه را با دقت بیشتری شامل می‌شود، بنابراین حالت اول احتمالاً دقیق‌تر می‌باشد. در ضمن در حالت اول پروژه در ۱۳۴۲/۵۳ روز یعنی حدوداً ۴ سال و ۶ ماه به پایان می‌رسد و در حالت دوم در طی ۸۱۴/۴۸ روز یعنی حدوداً ۲ سال و ۹ ماه تمام می‌شود.

۵-۲-۵- محاسبات پیش‌بینی عملکرد TBM با روش CSM

پارامترهای مورد نیاز برای این روش شامل UCS (مقاومت فشاری تک محوره)، σ_t (مقاومت کششی)، RQD، قطر دیسک‌ها و نیروی عمودی (KN/Cutter) می‌باشد. قطر دیسک‌ها ۴۳۲ mm می‌باشد. بقیه پارامترها در جدول ۵-۱۸ آورده شده است. به‌علت انجام نشدن آزمایشات مربوطه، با استفاده از رابطه فارمر و گلو سوپ (۲-۳) مقدار نفوذ پایه را محاسبه کرده و آن‌گاه با استفاده از روش CSM و با به‌کار بردن فاکتورهای اصلاحی این روش، مقدار نفوذ محاسبه شده است. مقدار نفوذ پایه در واحد An و با استفاده از رابطه فارمر و گلو سوپ به‌صورت زیر به‌دست آمده است.

$$P_{Rev} = \frac{624F_n}{\sigma_{tB}} = \frac{624 \times 106}{5850} = 11.31 \times 1.367 = 15.45 \quad (mm/rev)$$

مقدار نفوذ محاسبه شده برای واحدهای مختلف مسیر تونل در جدول ۵-۱۸ نشان داده شده است.

جدول ۵-۱۸- مقدار نفوذ محاسبه شده برای واحدهای مختلف مسیر تونل

نام واحد	UCS (MPa)	RQD	مقاومت کششی (MPa)	نیروی عمودی (KN)	فاکتور اصلاحی ۱ برای روش CSM	مقدار نفوذ پایه (mm/rev)	مقدار نفوذ (m/hr)
An	۶۵	۴۵	۵/۸۵	۱۰۶	۱/۳۶۷	۱۵/۴۵	۵/۸۹
GSch1	۴۰	۳۰	۶/۴	۱۰۶	۱/۴۶۷	۱۵/۱۶	۵/۷۸
GSch2	۳۷/۵	۲۵	۶	۱۰۶	۱/۵	۱۶/۵۴	۶/۳۰
all	-	-	-	-	-	-	-
GSch3	۴۰	۳۰	۴	۱۰۶	۱/۴۶۷	۲۴/۲۵	۹/۲۴
all	-	-	-	-	-	-	-
GSch4	۳۷/۵	۴۰	۴/۱۲۵	۱۰۶	۱/۴	۲۲/۴۵	۸/۵۵
GSch5	۳۷/۵	۳۰	۴/۱۲۵	۱۰۶	۱/۴۶۷	۲۳/۵۲	۸/۹۶
GSch4	۳۷/۵	۴۰	۴/۱۲۵	۱۰۶	۱/۴	۲۲/۴۵	۸/۵۵
MQ	۴۰	۵۵	۴	۱۰۶	۱/۳	۲۱/۵۰	۸/۱۹
ML	۷۰	۹۵	۶/۳	۲۰۰	۱/۰۳۳	۲۰/۴۷	۷/۸۰
GSch6	۳۷/۵	۳۰	۶	۱۰۶	۱/۴۶۷	۱۶/۱۷	۶/۱۶
GSch7	۱۵	۱۵	۲/۴	۱۰۶	۱/۵۶۷	۴۳/۱۸	۱۶/۴۵
GSch8	۴۰	۵۵	۶/۴	۱۰۶	۱/۳	۱۳/۴۴	۵/۱۲

۱۱/۳۲	۲۹/۷۱	۱/۴	۱۰۰	۲/۹۴	۴۰	۱۶/۹۲	Sh3
۲۳/۷۷	۶۲/۴۰	۱/۶	۱۰۰	۱/۶	۱۰	۱۰	Qla
۱۱/۳۲	۲۹/۷۱	۱/۴	۱۰۰	۲/۹۴	۴۰	۱۶/۹۲	Shc
۱۲/۱۳	۳۱/۸۴	۱/۵	۱۰۰	۲/۹۴	۲۵	۱۶/۹۲	Sh3
۸/۷۴	۲۲/۹۴	۱/۳	۱۹۶	۶/۹۳	۵۵	۶۴/۳	MDL 4
۱۰/۶۳	۲۷/۹۰	۱/۲	۱۹۶	۵/۲۶	۷۰	۵۸/۳۳	AS1
۸/۷۴	۲۲/۹۴	۱/۳	۱۹۶	۶/۹۳	۵۵	۶۴/۳	MDL 5
۱۰/۶۳	۲۷/۹۰	۱/۲	۱۹۶	۵/۲۶	۷۰	۵۸/۳۳	AS2
۷/۴۰	۱۹/۴۱	۱/۱	۱۹۶	۶/۹۳	۸۵	۶۴/۳	MDL 6
۱۰/۶۳	۲۷/۹۰	۱/۲	۱۹۶	۵/۲۶	۷۰	۵۸/۳۳	AS3
۷/۴۰	۱۹/۴۱	۱/۱	۱۹۶	۶/۹۳	۸۵	۶۴/۳	MDL 7
۴/۹۷	۱۳/۰۵	۱/۳۳۳	۱۰۶	۶/۷۶	۵۰	۴۰/۲	Sh5
۱۴/۶۳	۳۸/۴۱	۱/۱۶۷	۲۱۰	۳/۹۸	۷۵	۷۲/۱۲	Trh1
۱۱/۸۰	۳۰/۹۸	۱/۲۶۷	۱۹۶	۵	۶۰	۵۷	Tsh
۱۴/۶۳	۳۸/۴۱	۱/۱۶۷	۲۱۰	۳/۹۸	۷۵	۷۲/۱۲	Trh2
۱۰/۶۳	۲۷/۹۰	۱/۲	۱۹۶	۵/۲۶	۷۰	۵۸/۳۳	As4
۱۱/۳۲	۲۹/۷۰	۱/۱۳۳	۲۱۰	۵	۸۰	۷۰	Md
۸/۳۱	۲۱/۸۱	۱/۱	۲۱۰	۶/۶۱	۸۵	۷۰/۵۵	Tma
۴/۸۵	۱۲/۷۲	۱/۳	۱۰۶	۶/۷۶	۵۵	۴۰/۲	Sch1

حال با به کار بردن تأخیرها که در جداول ۵-۱۹ و ۵-۲۰ آورده شده است، ضریب بهره‌وری برای هر یک از واحدهای زمین‌شناسی مسیر تونل مطابق با جدول ۵-۲۱ برآورد شده است.

جدول ۵-۱۹- تأخیرهای در نظر گرفته شده با استفاده از روش CSM برای محاسبه ضریب بهره‌وری

نام واحد	(Tb) زمان حفاری	تأخیرهای ناشی از جلو راندن ماشین (h)	تأخیرات ناشی از عملیات نقشه برداری(h)	تأخیرات ناشی از کسب تجربه(h)	تأخیرات ناشی از بررسی تاج حفار و روغن کاری (h)	تأخیر ناشی از تراوش آب (h)	تأخیرات ناشی از خدمات رسانی با توجه به شیب تونل (h)	تأخیرات ناشی از سیستم ترابری(h)	تأخیرات ناشی از نصب پوشش (h)	تأخیرات کارگری مثلاً تأخیر ناشی از تعویض شیفت و زمان نهار(h)	(Tc) زمان لازم برای تعویض و بازدید برنده
An	۵۹/۴۵	۱۱/۰۷	۱/۱۶	۷۸/۷۱	۳/۹۸	۱/۹۶	۱۰/۵۳	۱۹/۲۵	۸۹/۷۴	۹/۵۱	۲۸
GSch1	۱۰۳/۳۶	۱۴/۲۴	۱/۴۹	۱۳۶/۸۴	۶/۹۲	۲۲۵	۱۳/۵۴	۲۴/۷۵	۱۱۵/۳۸	۱۶/۵۴	۱۸
GSch2	۲۵/۷۹	۳/۷۶	۰/۳۹	۳۴/۱۴	۱/۷۳	۱۱۹	۳/۵۸	۶/۵۴۵	۳۰/۵۱	۴/۱۳	۴/۷۶
all	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GSch3	۵۷/۴۲	۱۲/۶۵	۱/۳۲	۷۶/۰۲	۳/۸۵	۳۴	۱۲/۰۴	۲۲	۱۰۲/۵۶	۹/۱۹	۳۲
all	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GSch4	۲۳/۹۴	۴/۷۴	۰/۵۰	۳۱/۷۰	۱/۶۰	۱۲/۷۵	۴/۵۱	۸/۲۵	۳۸/۴۶	۳/۸۳	۲۲/۵
GSch5	۳۸/۰۹	۷/۹۰	۰/۸۳	۵۰/۴۳	۲/۵۵	۲۱/۲۵	۷/۵۲	۱۳/۷۵	۶۴/۱۰	۶/۰۹	۳۷/۵
GSch4	۲۳/۹۴	۴/۷۴	۰/۵۰	۳۱/۷۰	۱/۶۰	۱۲/۷۵	۴/۵۱	۸/۲۵	۳۸/۴۶	۳/۸۳	۲۲/۵
MQ	۱۶۱/۹۵	۳۱/۶۴	۳/۳۰	۲۱۴/۴۳	۱۰/۸۵	۸۵	۳۰/۱۰	۵۵	۲۵۶/۴۱	۲۵/۹۱	۱۵۰
ML	۴۲۴/۸۹	۵۲/۱۹	۵/۴۵	۵۶۲/۵۵	۲۸/۴۷	۱۴۰/۲۵	۴۹/۶۶	۹۰/۷۵	۴۲۳/۰۸	۶۷/۹۸	۱۶۵
GSch6	۸۸/۶۵	۱۲/۶۵	۱/۳۲	۱۱۷/۳۷	۵/۹۴	۴۰۰	۱۲/۰۴	۲۲	۱۰۲/۵۶	۱۴/۱۸	۱۶
GSch7	۱۰۶/۳۷	۲۳/۷۳	۲/۴۸	۱۴۰/۸۴	۷/۱۳	۷۵۰	۲۲/۵۷	۴۱/۲۵	۱۹۲/۳۱	۱۷/۰۲	۳۰
GSch8	۳۲۳/۹۱	۳۹/۵۵	۴/۱۳	۴۲۸/۸۵	۲۱/۷۰	۷	۳۷/۶۲	۶۸/۷۵	۳۲۰/۵۱	۵۱/۸۳	۵۰
Sh3	۱۴۲/۳	۲۵/۳۱	۲/۶۴	۱۸۸/۳۸	۹/۵۳	۶۸	۲۴/۰۸	۴۴	۲۰۵/۱۳	۲۲/۷۶	۹۶
Qla	۵۴	۱۲/۶۵	۱/۳۲	۷۱/۴۵	۳/۶۲	۳۴	۱۲/۰۴	۲۲	۱۰۲/۵۶	۸/۶۳	۱۶
Shc	۱۲۴/۵	۲۲/۱۵	۲/۳۱	۱۶۴/۸۳	۸/۳۴	۵۹/۵	۲۱/۰۷	۳۸/۵	۱۷۹/۴۹	۱۹/۹۲	۸۴
Sh3	۴۷/۵	۹/۰۵	۰/۹۴	۶۲/۸۶	۳/۱۸	۲۴/۳۱	۸/۶۱	۱۵/۷۳	۷۳/۳۳	۷/۶۰	۳۴/۳
MDL 4	۳۶/۷	۵	۰/۵۲	۴۸/۵۶	۲/۴۶	۱۳/۴۳	۴/۷۶	۸/۶۹	۴۰/۵۱	۵/۸۷	۱۹
AS1	۵۳/۶	۸/۵۷	۰/۸۹	۷۱	۳/۵۹	۲۷۱	۸/۱۶	۱۴/۹۰۵	۶۹/۴۹	۸/۵۸	۲۱/۷
MDL 5	۳۱/۶	۴/۳۰	۰/۴۵	۴۱/۸۰	۲/۱۲	۱۳۶	۴/۰۹	۷/۴۸	۳۴/۸۷	۵/۰۵	۲۰/۴
AS2	۲۸/۷	۴/۵۹	۰/۴۸	۳۷/۹۹	۱/۹۲	۱۴۵	۴/۳۶	۷/۹۷۵	۳۷/۱۸	۴/۵۹	۱۱/۶
MDL 6	۱۰۳/۹	۱۱/۸۶	۱/۲۴	۱۳۶/۲۰	۶/۸۹	۳۷۵	۱۱/۲۹	۲۰/۶۲۵	۹۶/۱۵	۱۶/۴۶	۵۶/۳

AS3	۶۲/۵	۱۰	۱/۰۴	۸۲/۷۹	۴/۱۹	۳۱۶	۹/۵۱	۱۷/۳۸	۸۱/۰۳	۱۰	۳۱/۶
MDL 7	۱۵/۹	۱/۸۳	۰/۱۹	۲۱/۰۷	۱/۰۷	۴/۹۳	۱/۷۵	۳/۱۹	۱۴/۸۷	۲/۵۵	۹/۳
Sh5	۶۸۶/۷	۸۱/۵۹	۸/۵۱	۹۰۹/۲۲	۴۶/۰۱	۲۱۹/۲۱۵	۷۷/۶۲	۱۴۱/۸۴۵	۶۶۱/۲۸	۱۰۹/۸۸	۳۰۹/۵
Trh1	۴۹	۱۰/۸۸	۱/۱۴	۶۴/۹۴	۳/۲۹	۳۴۴	۱۰/۳۵	۱۸/۹۲	۸۸/۲۱	۷/۸۵	۵۸/۵
Tsh	۱۴/۷	۲/۵۹	۰/۲۷	۱۹/۵۲	۰/۹۹	۸۲	۲/۴۷	۴/۵۱	۲۱/۰۳	۲/۳۶	۹/۸
Trh2	۵۰/۸	۱۱/۲۶	۱/۱۷	۶۷/۲۱	۳/۴۰	۳۵۶	۱۰/۷۱	۱۹/۵۸	۹۱/۲۸	۸/۱۲	۵۷
As4	۱۴۳/۷	۲۲/۹۷	۲/۴۰	۱۹۰/۲۱	۹/۶۳	۷۲۶	۲۱/۸۵	۳۹/۹۳	۱۸۶/۱۵	۲۲/۹۹	۱۰۸/۹
Md	۸۵	۱۴/۴۳	۱/۵۰	۱۱۲/۵۰	۵/۶۹	۳۸/۷۶	۱۳/۷۲	۲۵/۰۸	۱۱۶/۹۲	۱۳/۶۰	۶۸/۴
Tma	۱۳۰/۳	۱۶/۲۹	۱/۷۰	۱۷۲/۵۸	۸/۷۳	۴۳/۷۷۵	۱۵/۵۰	۲۸/۳۲۵	۱۳۲/۰۵	۲۰/۸۶	۶۱/۸
Sch1	۱۹۳/۱	۲۲/۳۷	۲/۳۳	۲۵۵/۶۴	۱۲/۹۴	۶۰/۰۹۵	۲۱/۲۸	۳۸/۸۸۵	۱۸۱/۲۸	۳۰/۸۹	۸۴/۸

جدول ۵-۲۰- تأخیرهای دیگر که با استفاده از روش NTH برای محاسبه ضریب بهره‌وری در نظر گرفته شده است

نام واحد	T_t (تأخیر ناشی از استحکام مجدد دستگاه) (h)	متوسط T_{tbm} (TBM) بر حسب ساعت	متوسط T_{bak} (back up) بر حسب ساعت	متوسط T_a بر حسب ساعت
An	۱۴/۵۸	۵۲/۵۰	۱۴	۶۴/۷۵
GSch1	۱۸/۷۵	۶۷/۵	۱۸	۸۳/۲۵
GSch2	۴/۹۶	۱۷/۸۵	۴/۷۶	۲۲/۰۲
all	-	-	-	-
GSch3	۱۶/۶۷	۶۰	۱۶	۷۴
all	-	-	-	-
GSch4	۶/۲۵	۲۲/۵	۶	۲۷/۷۵
GSch5	۱۰/۴۲	۳۷/۵	۱۰	۴۶/۲۵
GSch4	۶/۲۵	۲۲/۵	۶	۲۷/۷۵
MQ	۴۱/۶۷	۱۵۰	۴۰	۱۸۵
ML	۶۸/۷۵	۲۴۷/۵۰	۶۶	۳۰۵/۲۵
GSch6	۱۶/۶۷	۶۰	۱۶	۷۴
GSch7	۳۱/۲۵	۱۱۲/۵۰	۳۰	۱۳۸/۷۵
GSch8	۵۲/۰۸	۱۸۷/۵۰	۵۰	۲۳۱/۲۵
Sh3	۳۳/۳۳	۱۲۰	۳۲	۱۴۸

۷۴	۱۶	۶۰	۱۶/۶۷	Qla
۱۲۹/۵	۲۸	۱۰۵	۲۹/۱۷	Shc
۵۲/۹۱	۱۱/۴	۴۲/۹۰	۱۱/۹۲	Sh3
۲۹/۲۳	۶/۳	۲۳/۷۰	۶/۵۸	MDL 4
۵۰/۱۳۵	۱۰/۸	۴۰/۶۵	۱۱/۲۹	AS1
۲۵/۱۶	۵/۴	۲۰/۴۰	۵/۶۷	MDL 5
۲۶/۸۲۵	۵/۸	۲۱/۷۵	۶/۰۴	AS2
۶۹/۳۷۵	۱۵	۵۶/۲۵	۱۵/۶۳	MDL 6
۵۸/۴۶	۱۲/۶	۴۷/۴۰	۱۳/۱۷	AS3
۱۰/۷۳	۲/۳	۸/۷۰	۲/۴۲	MDL 7
۴۷۷/۱۱۵	۱۰۳/۲	۳۸۶/۸۵	۱۰۷/۴۶	Sh5
۶۳/۶۴	۱۳/۸	۵۱/۶۰	۱۴/۳۳	Trh1
۱۵/۱۷	۳/۳	۱۲/۳۰	۳/۴۲	Tsh
۶۵/۸۶	۱۴/۲	۵۳/۴۰	۱۴/۸۳	Trh2
۱۳۴/۳۱	۲۹	۱۰۸/۹۰	۳۰/۲۵	As4
۸۴/۳۶	۱۸/۲	۶۸/۴۰	۱۹	Md
۹۵/۲۷۵	۲۰/۶	۷۷/۲۵	۲۱/۴۶	Tma
۱۳۰/۷۹۵	۲۸/۳	۱۰۶/۰۵	۲۹/۴۶	Sch1

با در دست داشتن نرخ نفوذ در هر یک از واحدهای زمین شناسی مسیر تونل و با در نظر گرفتن ضریب بهره‌وری در هر واحد، به محاسبه نرخ پیشروی در هر یک از واحدهای زمین‌شناسی پرداخته شد که نتایج آن در جدول ۵-۲۱ آورده شده است.

جدول ۵-۲۱- ضریب بهره‌وری و نرخ پیشروی روزانه برای واحدهای مختلف قطعات ۱ و ۲ مسیر تونل

نام واحد	مقدار نفوذ (m/hr)	ضریب بهره‌وری (%) با در نظر گرفتن ترکیبی تأخیرهای NTH و CSM	نرخ پیشروی روزانه (m/day)	ضریب بهره‌وری (%) با در نظر گرفتن تأخیرهای روش CSM	نرخ پیشروی روزانه (m/day)
An	۵/۸۹	۱۵	۲۱/۳۰	۱۹	۴۶/۸۱
GSch1	۵/۷۸	۱۱	۱۵/۱۰	۱۳	۱۷/۶۷

۱۳/۱۸	۹	۱۱/۶۹	۸	۶/۳۰	GSch2
۸/۰۶	۱۶	۸/۰۶	۱۶	۲/۱۰	all
۲۹/۳۶	۱۳	۲۲/۸۷	۱۰	۹/۲۴	GSch3
۸/۰۶	۱۶	۸/۰۶	۱۶	۲/۱۰	all
۲۶/۳۸	۱۳	۲۱/۰۳	۱۰	۸/۵۵	GSch4
۲۶/۷۸	۱۲	۲۱/۲۸	۱۰	۸/۹۶	GSch5
۲۶/۳۸	۱۳	۲۱/۰۳	۱۰	۸/۵۵	GSch4
۲۶	۱۳	۲۰/۷۹	۱۱	۸/۱۹	MQ
۲۷/۰۱	۱۴	۲۱/۴۲	۱۱	۷/۸۰	ML
۱۳/۱۱	۹	۱۱/۶۴	۸	۶/۱۶	GSch6
۱۵/۲۷	۴	۱۳/۳۱	۳	۱۶/۴۵	GSch7
۲۶/۰۸	۲۱	۲۰/۸۳	۱۷	۵/۱۲	GSch8
۲۹/۷۵	۱۱	۲۳/۱۱	۹	۱۱/۳۲	Sh3
۳۹/۴۳	۷	۲۸/۵۶	۵	۲۳/۷۷	Qla
۲۹/۷۵	۱۱	۲۳/۱۱	۹	۱۱/۳۲	Shc
۲۰/۳۱	۱۰	۲۳/۴۵	۸	۱۲/۱۳	Sh3
۲۷/۴۸	۱۳	۲۱/۷۲	۱۰	۸/۷۴	MDL 4
۱۴/۱۵	۶	۱۲/۴۵	۵	۱۰/۶۳	AS1
۱۳/۲۰	۶	۱۱/۷۱	۶	۸/۷۴	MDL 5
۱۴/۱۵	۶	۱۲/۴۵	۵	۱۰/۶۳	AS2
۱۲/۸۳	۷	۱۱/۴۱	۶	۷/۴۰	MDL 6
۱۳/۹۸	۵	۱۲/۳۲	۵	۱۰/۶۳	AS3
۲۴/۸۴	۱۴	۲۰/۰۳	۱۱	۷/۴۰	MDL 7
۲۱/۹۲	۱۸	۱۸/۱۰	۱۵	۴/۹۷	Sh5
۱۳/۹۵	۴	۱۲/۲۹	۳	۱۴/۶۳	Trh1
۱۴/۰۱	۵	۱۲/۳۴	۴	۱۱/۸۰	Tsh
۱۴/۰۳	۴	۱۲/۳۶	۴	۱۴/۶۳	Trh2
۱۳/۵۹	۵	۱۲/۰۱	۵	۱۰/۶۳	As4
۲۸/۶۸	۱۱	۲۲/۴۶	۸	۱۱/۳۲	Md
۲۷/۰۱	۱۴	۲۱/۴۳	۱۱	۸/۳۱	Tma
۲۱/۶۶	۱۹	۱۷/۹۲	۱۵	۴/۸۵	Sch1

متوسط ضریب بهره‌وری برای حالت در نظر گرفتن ترکیبی تأخیرهای روش‌های NTH و CSM، تقریباً ۹/۱۱ درصد می‌شود در صورتی که در حالت در نظر گرفتن تأخیرهای روش CSM و بدون در نظر گرفتن تأخیرهای ناشی از روش NTH این مقدار برابر با ۱۰/۹۵ درصد می‌شود. از آنجایی که روش CSM با دقت بیشتری

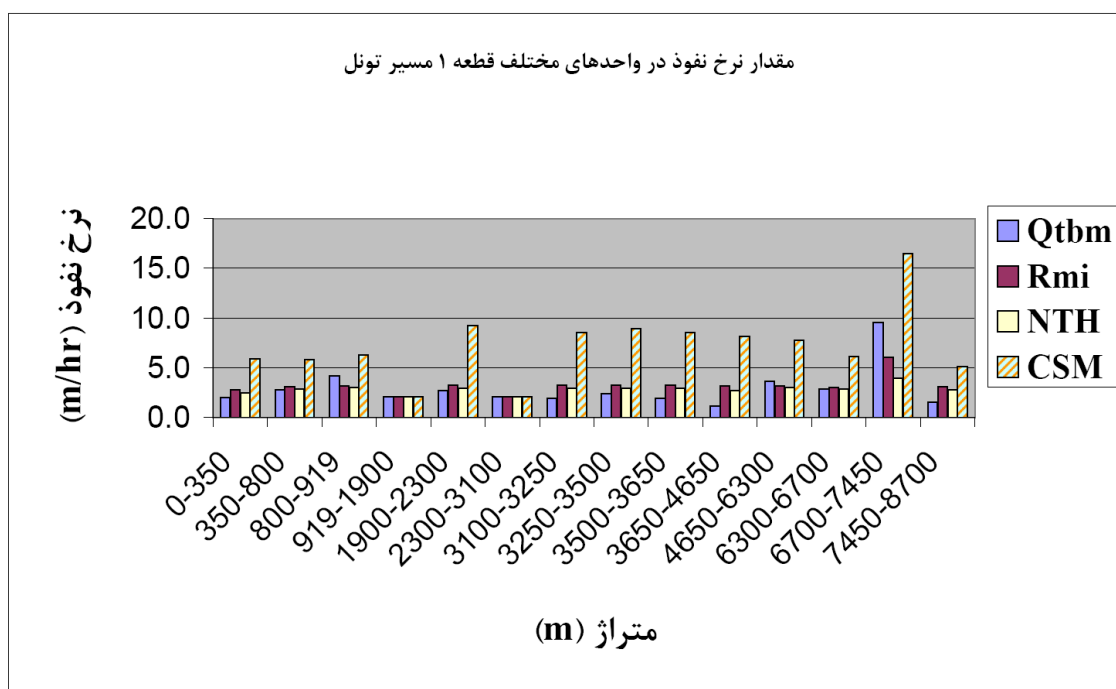
تأخیرهای متفرقه را لحاظ کرده است، بنابراین با به کار بردن این تأخیرها در کنار تأخیرهای ناشی از روش NTH، محاسبات احتمالاً دقیق تر می باشد. در ضمن در حالت اول پروژه در ۱۱۵۱/۶۵ روز یعنی حدوداً ۳ سال و ۱۰ ماه به پایان می رسد و در حالت دوم در طی ۹۹۴/۰۳ روز یعنی حدوداً ۳ سال و ۴ ماه تمام می شود.

۵-۳- مقایسه نتایج

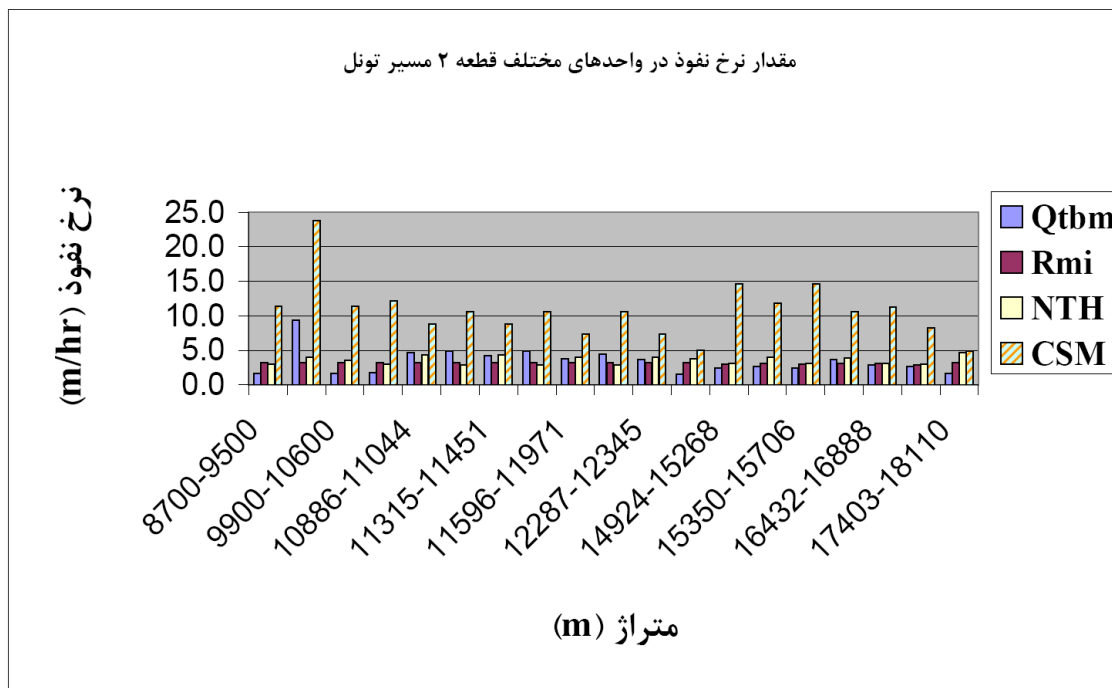
نتایج پیش بینی نرخ پیشروی روزانه با استفاده از هر یک از روش ها در جدول ۵-۲۲ آورده شده است. مقدار نرخ نفوذ بر حسب متر بر ساعت و نرخ پیشروی روزانه بر حسب متر بر روز، در واحدهای مختلف مسیر تونل با استفاده از روش Q_{TBM} ، RMI، NTH و CSM در نمودارهای ۵-۴ تا ۵-۷ نشان داده شده است. جدول ۵-۲۲- نتایج پیش بینی نرخ پیشروی روزانه بر حسب (m/day) در واحدهای مختلف مسیر تونل با استفاده از مدل های پیش بینی مختلف

واحدهای زمین شناسی مهندسی مسیر تونل	روش Q_{TBM}	روش RMI	روش NTH	روش CSM
An	۱۷/۰	۱۶/۲۱	۱۵/۰۹	۲۱/۳۰
GSch1	۱۳/۶	۱۲/۹۳	۱۲/۴۱	۱۵/۱۰
GSch2	۱۹/۳	۱۰/۳۱	۱۰/۰۹	۱۱/۶۹
all	۸/۱	۸/۰۶	۸/۰۶	۸/۰۶
GSch 3	۴/۳	۱۶/۹۳	۱۶/۰۷	۲۲/۸۷
all	۸/۱	۸/۰۶	۸/۰۶	۸/۰۶
GSch4	۱۰/۱	۱۶/۸۹	۱۵/۹۶	۲۱/۰۳
GSch5	۳/۳	۱۶/۹۰	۱۶/۰۵	۲۱/۲۸
GSch4	۱۰/۱	۱۶/۸۹	۱۵/۹۶	۲۱/۰۳
MQ	۴/۹	۱۶/۵۱	۱۴/۹۴	۲۰/۷۹
ML	۳۰/۰	۱۶/۸۶	۱۶/۳۳	۲۱/۴۲
GSch 6	۵/۰	۱۰/۱۰	۹/۸۱	۱۱/۶۴
GSch 7	۱۸/۵	۱۲/۷۱	۱۱/۲۰	۱۳/۳۱
GSch 8	۱۰/۱	۱۷/۵۸	۱۶/۲۹	۲۰/۸۳
Sh3	۴/۹	۱۶/۹۱	۱۶/۱۹	۲۳/۱۱
QIa	۳۱/۰	۱۶/۸۴	۱۹/۵۶	۲۸/۵۶

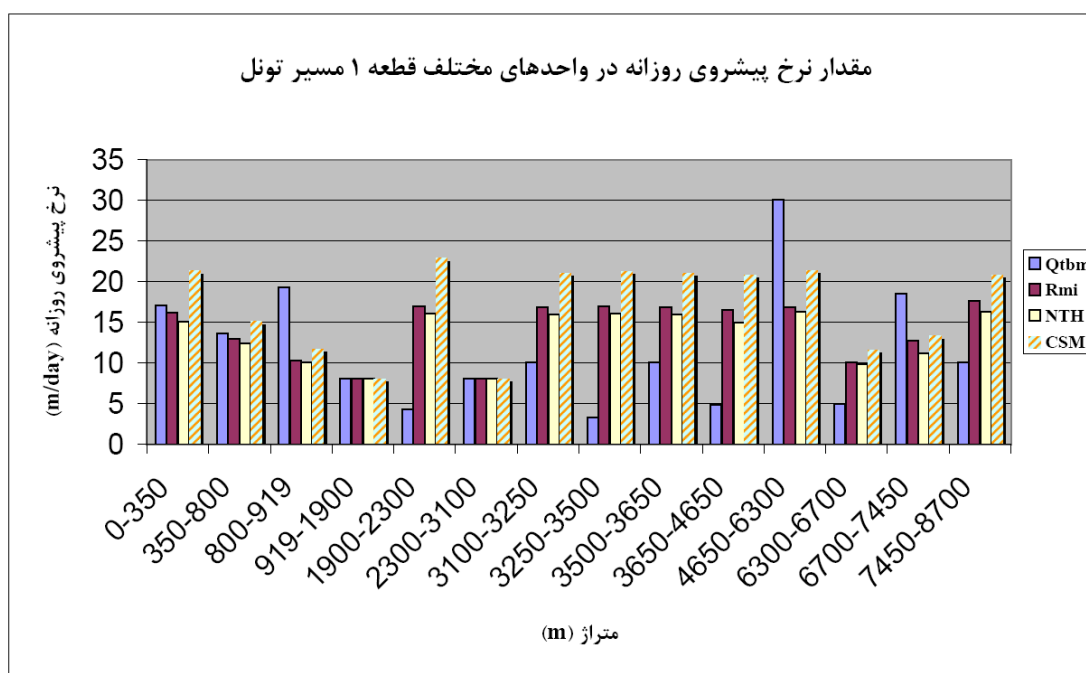
۲۳/۱۱	۱۷/۹۸	۱۶/۹۱	۵/۱	Shc
۲۳/۴۵	۱۶/۱۹	۱۶/۹۱	۷/۲	Sh3
۲۱/۷۲	۲۰/۳۷	۱۶/۹۶	۵۹/۲	MDL 4
۱۲/۴۵	۹/۸۷	۱۰/۲۳	۴۶/۲	AS1
۱۱/۷۱	۱۱/۴۵	۱۰/۲۸	۵۳/۲	MDL 5
۱۲/۴۵	۹/۸۷	۱۰/۲۳	۵۳/۴	AS2
۱۱/۴۱	۱۱/۱۱	۱۰/۲۶	۳۹/۴	MDL 6
۱۲/۳۲	۹/۸۶	۱۰/۲۲	۳۶/۹	AS3
۲۰/۰۳	۱۹/۲۷	۱۶/۸۳	۵۲/۴	MDL 7
۱۸/۱۰	۱۸/۸۴	۱۶/۸۲	۳/۰	Sh5
۱۲/۲۹	۱۰/۰۹	۹/۸۹	۲۱/۵	Trh1
۱۲/۳۴	۱۱/۱۷	۱۰/۱۵	۳۳/۳	Tsh
۱۲/۳۶	۱۰/۰۹	۹/۹۰	۲۰/۷	Trh2
۱۲/۰۱	۱۱/۰۶	۱۰/۱۳	۲۴/۲	As4
۲۲/۴۶	۱۶/۶۰	۱۶/۴۸	۲۹/۸	Md
۲۱/۴۳	۱۶/۳۲	۱۵/۸۸	۲۹/۰	Tma
۱۷/۹۲	۲۱/۱۵	۱۶/۸۷	۴/۵	Sch1



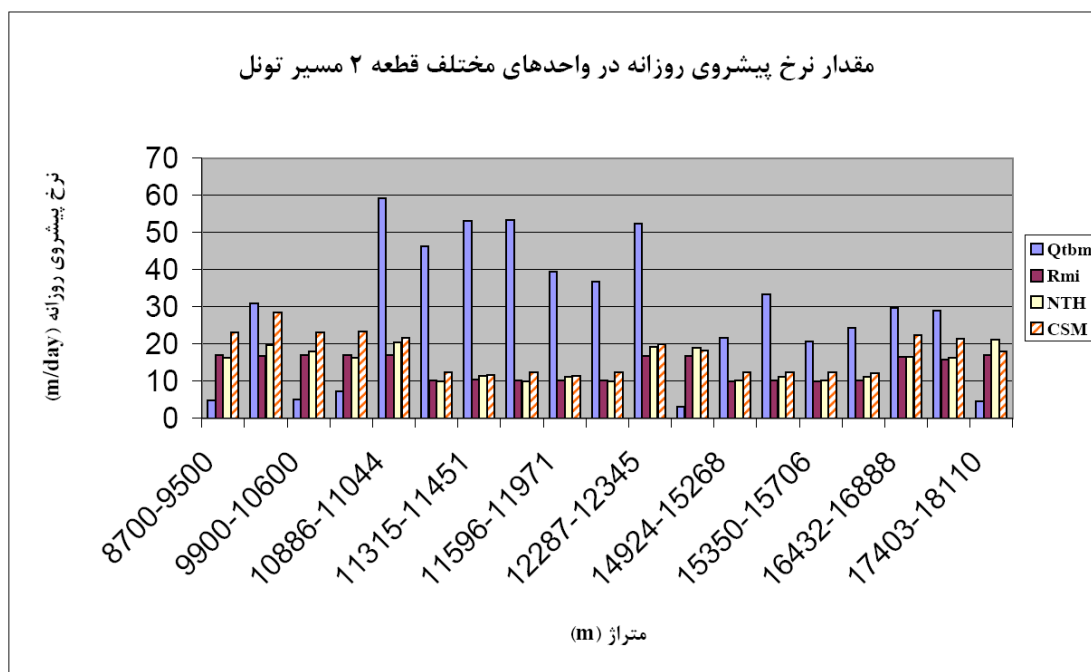
شکل ۴-۵- مقدار نرخ نفوذ در واحدهای مختلف قطعه ۱ مسیر تونل با استفاده از روش‌های مختلف



شکل ۵-۵- مقدار نرخ پیشروی در واحدهای مختلف قطعه ۲ مسیر تونل با استفاده از روش‌های مختلف



شکل ۶-۵- مقدار نرخ پیشروی روزانه در واحدهای مختلف قطعه ۱ مسیر تونل با استفاده از روش‌های مختلف



شکل ۵-۷- مقدار نرخ پیشروی روزانه در واحدهای مختلف قطعه ۲ مسیر تونل با استفاده از روش‌های مختلف

همان‌طوری که در اشکال ۴-۵ تا ۷-۵ مشاهده می‌شود نرخ نفوذهای محاسبه شده به‌وسیله روش‌های Q_{TBM} ، R_{Mi} و NTH در بعضی از واحدهای زمین‌شناسی به همدیگر نزدیک می‌باشند، اما نرخ پیشروی‌های روزانه به‌دست آورده شده توسط روش Q_{TBM} با نرخ پیشروی‌های روزانه به‌دست آورده شده توسط روش‌های R_{Mi} و NTH تفاوت قابل ملاحظه‌ای دارد.

نرخ نفوذها و نرخ پیشروی‌های روزانه به‌دست آورده شده توسط روش‌های NTH و R_{Mi} به همدیگر بسیار نزدیک می‌باشند زیرا در واقع مدل R_{Mi} برگرفته شده از مدل NTH می‌باشد و فرضیات این ۲ روش تقریباً مشابه هم می‌باشد.

نرخ نفوذهای روش CSM نیز به‌علت انجام نشدن آزمایشات لازم، با بقیه روش‌ها اختلاف بسیار زیادی دارد. ضمن این‌که مقدار نرخ نفوذهای محاسبه شده توسط روش CSM در بسیاری از واحدها خیلی زیاد می‌باشد که در عمل به‌دست آوردن چنین نرخ نفوذهایی امکان‌پذیر نمی‌باشد و گشتاور موجود یکی از فاکتورهای محدود کننده می‌باشد.

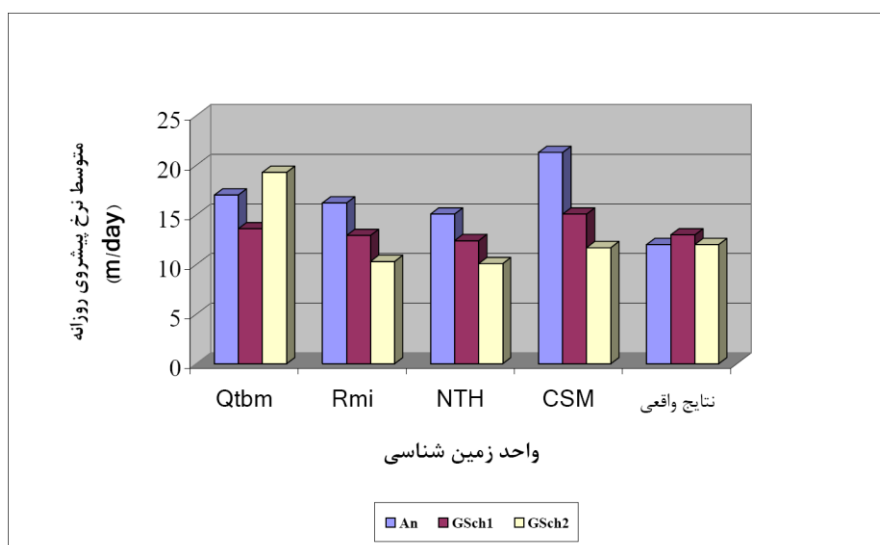
برای مشخص شدن این‌که نتایج کدامیک از این روش‌ها دقیق‌تر می‌باشد لازم است که مقدارهای به‌دست آورده شده با مقدارهای واقعی مقایسه شود.

۵-۴- نتایج واقعی حاصل از حفاری TBM در تونل قمرود

ماشین حفاری مکانیزه تونل قمرود تا به حال در واحدهای An (که شامل سنگ‌های آندزیت می‌باشد)، GSch1 (که شامل شیست متوسط با میان لایه های سنگ آهک دولومیتی دگرگون شده می‌باشد) و GSch2 (که شامل شیست ضعیف با میان لایه های سنگ آهک دولومیتی دگرگون شده می‌باشد) پیشروی داشته که متوسط نرخ پیشروی روزانه TBM در این واحدهای زمین‌شناسی و نتایج پیش‌بینی توسط ۴ روش Q_{TBM} ، RMi، NTH و CSM در جدول ۵-۲۳ و نمودار ۵-۸ آورده شده است. لازم به ذکر است که در واحد An از آنجایی که در ابتدای مسیر تونل قرار دارد و تعداد سگمنت‌های زده شده کم می‌باشد، بنابراین امکان اعمال نیروی عمودی کافی وجود ندارد و در نتیجه نرخ پیشروی کاهش پیدا کرده است.

جدول ۵-۲۳- نتایج بررسی عملکرد TBM تونل قمرود

نرخ پیشروی (m/day)			مدل
GSch2	GSch1	An	
۱۹/۳	۱۳/۶	۱۷	Q_{TBM}
۱۰/۳۱	۱۲/۹۳	۱۶/۲۱	RMi
۱۰/۰۹	۱۲/۴۱	۱۵/۰۹	NTH
۱۱/۷	۱۵/۱	۲۱/۳	CSM
۱۲	۱۳	۱۲	نتایج واقعی



شکل ۵-۸- مقایسه نتایج پیش‌بینی نرخ پیشروی TBM با داده‌های واقعی

۵-۵- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج واقعی به‌دست آمده و مقدارهای پیش‌بینی شده مشاهده می‌شود که هر چه از واحد An به سمت GSch2 پیش می‌رویم و زمین نرم‌تر و سنگ‌ها ضعیف‌تر می‌شوند، نتایج روش Q_{TBM} از واقعیت دور می‌شوند. از آنجایی که در ادامه مسیر تونل باز هم واحدهایی که دارای سنگ‌های ضعیف می‌باشند وجود دارد، بنابراین نتایج به‌دست آورده شده توسط این روش دقیق نخواهند بود.

همان‌طور که در شکل ۵-۸ ملاحظه می‌شود نتایج پیش‌بینی صورت گرفته توسط مدل NTH و RMI نزدیک‌ترین مقادیر را نسبت به مقادیر واقعی داشته است.

نتایج روش CSM به‌علت انجام نشدن آزمایشات لازم دور از واقعیت است. البته این روش در واقع روش CSM نیست چون که اساس کار روش CSM بدین صورت است که با تغییر دادن مشخصات ماشین و مشخصات کاترها به تخمین نیروی مورد نیاز و نرخ نفوذ و تعیین انرژی ویژه بهینه، با استفاده از آزمایش می‌پردازد در صورتی که در این جا با استفاده از یکی از روش‌های تجربی که توسط فارمر و گلوسوپ ارائه شده است و خیلی از پارامترها را در نظر نمی‌گیرد، به تخمین نرخ نفوذ پایه پرداخته شد و سپس با به کار بردن اصلاحات روش CSM و تعیین ضریب بهره‌وری، نرخ پیشروی روزانه محاسبه شده است، بنابراین نمی‌توان به نتایج این روش اعتماد کرد.

زمان اتمام تونل با استفاده از هر یک از روش‌ها در جدول ۵-۲۴ آورده شده است و با اعتماد به نتایج روش‌های NTH و RMI می‌توان تخمین زد که پروژه در طی مدت ۴ سال و ۶ ماه به پایان خواهد رسید.

جدول ۵-۲۴- زمان اتمام قطعات ۱ و ۲ مسیر تونل با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی مختلف

	تعداد روز کاری برای اتمام پروژه		مدت زمان لازم برای اتمام پروژه	
	سال	ماه		
روش Q_{TBM}	۲۴۷۵/۲۴	۸	۳	
روش RMI	۱۳۴۲/۵۳	۴	۶	
روش NTH	۱۳۳۲/۵۱	۴	۶	
روش CSM	۱۱۵۱/۶۵	۳	۱۰	

با توجه به نرخ نفوذهای پایه محاسبه شده توسط هر یک از روش‌ها در واحدهای مختلف قطعات ۱ و ۲ مسیر تونل، ماکزیمم مقدار نرخ نفوذ پایه برآورد شده (mm/rev) ۱۶ با استفاده از روش RMI و (mm/rev) ۱۲/۱۳ با استفاده از روش NTH می‌باشد که حتی با در نظر گرفتن (mm/rev) ۱۶ و با استفاده از رابطه ۳-۳۰ میزان گشتاور مورد نیاز، (KNm) ۱۲۹۱/۹۶ می‌شود و با در نظر گرفتن بازدهی ۷۵ درصد، این مقدار برابر با (KNm) ۱۷۳۱/۶ می‌شود و با توجه به این که TBM انتخاب شده توسط شرکت سایبر، گشتاور آن (KNm) ۱۷۳۱ می‌باشد، بنابراین مشکلی وجود ندارد. ضمن این که میزان توان مورد نیاز نیز (KW) ۱۱۴۵/۴۸ برآورد می‌شود که با توجه به این که میزان توان کله حفار TBM انتخاب شده توسط شرکت سایبر، (KW) ۱۲۵۰ می‌باشد، بنابراین در این زمینه نیز هیچ گونه محدودیتی وجود نخواهد داشت.

$$T_{REQ} = 0.59 \times R_{TBM} \times N_{TBM} \times M \times K_c = 0.59 \times 2.325 \times 29 \times 230 \times 0.035 \times 16^{0.5}$$

$$= 1291.96 / 0.75 = 1722.6 \quad (KN.m)$$

$$P = 1722.6 \times 2\pi \times 6.35 / 60 = 1145.48 \quad (KW)$$

از آن جایی که حداکثر مقدار نرخ نفوذ محاسبه شده با استفاده از روش‌های NTH و RMI به ترتیب برابر با ۴/۶۲ و ۶/۰۹ متر بر ساعت می‌باشد و با توجه به این که سطح مقطع تونل نیز ۱۷/۲۸ متر مربع می‌باشد، بنابراین

مقدار ۱۰۵/۲۴ متر مکعب در ساعت بایستی مواد خرد شده انتقال داده شود و از آنجایی که ظرفیت TBM انتخاب شده ۲۰۰ متر مکعب در ساعت می‌باشد، بنابراین در این زمینه نیز مشکلی وجود نخواهد داشت.

۶-۱- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به انتخاب روش حفاری برای قطعات ۲۱ مسیر تونل انتقال آب قمرود پرداخته شد و سپس با استفاده از روش‌های مختلف پیش‌بینی عملکرد TBM، نرخ نفوذ و نرخ پیشروی روزانه برای هر یک از واحدهای زمین‌شناسی مسیر تونل محاسبه شد. نتایج به‌دست آمده از این تحقیق عبارتند از:

- مسیر تونل از زمین‌های نرم آبرفتی تا سنگ‌های نرم مانند شیل و شیست و اسلیت‌های زغالی و بالاخره سنگ‌های سخت‌تر مانند آهک و دولومیت‌های دگرگون شده و بعضاً سنگ‌های کوارتزی و متاولکانیک‌ها می‌گذرد. با توجه به مشکلات ناشی از شرایط زمین‌شناسی به‌ویژه در قطعه ۱ و با توجه به طول مسیر تونل و با توجه به این‌که مترآژهای زیادی از این ۲ قطعه از زمین‌های نرم و آبرفتی عبور می‌کند که نگهداری فعال جبهه کار ضروری می‌باشد، بنابراین امکان به‌کارگیری روش‌های سنتی و ماشین‌حفر بازویی و ماشین‌های تونل‌زنی از نوع ماشین تونل‌زنی تمام مقطع بدون سپر، ماشین تونل‌زنی تمام مقطع سپری منفرد و ماشین تونل‌زنی تمام مقطع سپری مضاعف وجود ندارد. از بین ماشین‌های حفاری مکانیزه در زمین‌های نرم، ماشین تونل‌سازی سپردار از نوع EPB که در ۳ حالت باز، نیمه بسته و بسته کار می‌کند و از کارآیی بالایی در این زمین‌ها برخوردار می‌باشد، گزینه مناسب برای حفاری قطعات ۲۱ مسیر تونل می‌باشد.

- با استفاده از نتایج به‌دست آمده با استفاده از روش Q_{TBM} ، می‌توان نتیجه گرفت که نتایج این روش در زمین‌های نرم و با مقاومت فشاری نسبتاً پایین جواب‌گو نمی‌باشد. زیرا اگر قرار باشد که نرخ

پیشروی‌های روزانه به‌دست آورده شده توسط این روش صحیح باشند آن‌گاه با در نظر گرفتن ۳۰۰ روز کاری در سال، پروژه در طی ۲۴/۲۴۷۵ روز یا به عبارت بهتر طی ۸ سال و ۳ ماه به اتمام می‌رسد که از لحاظ اقتصادی بهینه نمی‌باشد. ضمناً نتایج به‌دست آورده شده توسط این روش با نتایج واقعی تطابق ندارد.

- روش CSM نیز با توجه به این که نیاز به آزمایشاتی برای به‌دست آوردن نرخ نفوذ پایه (i_0) دارد، نتایج آن دقیق نمی‌باشد. هر چند که در این تحقیق ما با به کار بردن رابطه فارمر و گلوسوپ، نرخ نفوذ پایه را به‌دست آوردیم و سپس با استفاده از فاکتورهای اصلاحی روش CSM میزان نرخ نفوذ و نرخ پیشروی را محاسبه کردیم.
- نتایج روش‌های RMI و NTH نسبتاً دقیق بوده و نتایج آن‌ها به همدیگر نزدیک می‌باشند. مزیت اصلی مدل NTH نسبت به روش RMI برای پیش‌بینی عملکرد TBM، داشتن یک پایگاه اطلاعاتی تجربی خیلی جامع می‌باشد که تأثیر مهم درزه‌داری توده سنگ را به راحتی به حساب آورده است.
- روش CSM نسبت به روش NTH به‌طور کامل‌تری به پیش‌بینی ضریب بهره‌وری پرداخته است و تأخیرهای متفرقه را با دقت بیشتری لحاظ کرده است. به‌طوری که در روش RMI و NTH، هنگامی که برای محاسبه ضریب بهره‌وری از تأخیرهای متفرقه به‌دست آمده از روش CSM (با در نظر گرفتن ترکیبی تأخیرهای روش‌های NTH و CSM) استفاده می‌کنیم، متوسط ضریب بهره‌وری حدوداً ۱۸/۲۷ درصد به‌دست می‌آید و پروژه در طی تقریباً ۴ سال و ۶ ماه به اتمام می‌رسد. در صورتی که با در نظر گرفتن تأخیرهای متفرقه با استفاده از روش NTH، متوسط ضریب بهره‌وری حدوداً ۳۴/۳۷ درصد می‌شود و پروژه در طی ۲ سال و ۹ ماه به پایان می‌رسد. نظر به این که در حالت اول، نتایج به‌دست آورده شده در ۳ واحد زمین‌شناسی ابتدای تونل که حفاری شده است، با نتایج واقعی تطابق بیشتری دارد و ضمناً در پروژه‌های مشابه به علت تأخیرهای پیش آمده و توقف‌های دستگاه، متوسط ضریب بهره‌وری در عمل برابر با ۱۶-۱۴ درصد برآورد گردیده است، بنابراین در این جا می‌توان گفت که حالت اول بسیار دقیق‌تر می‌باشد و می‌توان پیش‌بینی کرد که پروژه در طی مدت حدوداً ۴ سال و ۶ ماه به اتمام خواهد رسید.
- یکی از پارامترهای ورودی در روش‌های RMI و NTH شاخص نرخ حفاری (DRI) می‌باشد که برای محاسبه DRI، روش NTH پایگاه اطلاعاتی جامع‌تری را معرفی می‌کند.

- در کنار محدودیت‌های ناشی از گشتاور موجود، ظرفیت سیستم برداشتن توده خرد شده، مخصوصاً برای ماشین‌های با قطر زیاد ممکن است فاکتور محدود کننده باشد. با توجه به تحلیل‌هایی که انجام داده شد، با در نظر گرفتن نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و میزان گشتاور مورد نیاز و مقدار موادی که در ساعت بایستی حمل و نقل شود و مقایسه آن‌ها با ظرفیت TBM انتخاب شده، مشکلی در این زمینه وجود ندارد.
- در صورتی که آزمایشات لازم انجام شود، مدل CSM می‌تواند برای تخمین نرخ نفوذ پایه و فراهم کردن قابلیت بهبود طراحی دستگاه استفاده شود و مدل NTH برای تعدیل کردن تخمین CSM و ترکیب کردن تأثیرات ناپیوستگی‌ها و توده سنگ به کار برده شود. در هر حال منبع قابل اطمینان تری از اطلاعات و پیش‌بینی عملکرد، به‌وسیله آزمایش برش بزرگ مقیاس برای رفع کردن فرضیات کاری و فراهم کردن اطلاعات بر روی رفتار برش سنگ ایجاد می‌شود.

۶-۲- پیشنهادات

با انجام این تحقیق پیشنهاداتی به شرح زیر ارائه می‌شود:

- به‌خاطر این‌که روش NTH بر مبنای داده‌های بانک اطلاعاتی ناشی از پروژه‌های تکمیل شده پیشین بنا نهاده شده است، بایستی با توسعه روزافزون تکنولوژی ماشین‌های حفاری و همین‌طور پروژه‌های مشابه، این روش نیز توسعه پیدا کند تا بتوان پیش‌بینی دقیق‌تری را با استفاده از این روش انجام داد.
- ضریب بهره‌وری و نرخ پیشروی دستگاه TBM در واحدهای مختلف مسیر اندازه‌گیری شده و با مقادیر پیش‌بینی شده مقایسه شود و امکان به‌کارگیری روش‌های ارائه شده در چنین زمین‌هایی مورد بررسی قرار گیرد.
- وابستگی نرخ نفوذ به فاصله‌داری و شرایط درزه‌ها کاملاً شناخته شده است. در واقع شکستگی‌ها در توده سنگ یک مزیت برای نرخ پیشروی می‌باشند، تا زمانی که سنگ نیاز به نگهداری نداشته باشد. از آنجایی که سیستم درزه‌ها در عمق ممکن است متفاوت باشد، بنابراین بایستی این تغییرات در

حین حفاری در نظر گرفته شده و در روش‌های پیش‌بینی عملکرد، به‌ویژه روش‌های NTH و RMI لحاظ شوند.

- یکی از مسائلی که می‌تواند در زمان اتمام تونل تأثیر فراوانی داشته باشد، مسئله مچاله‌شوندگی و امکان گیرکردن TBM می‌باشد که بایستی مناطق با پتانسیل مچاله‌شوندگی در مسیر تونل شناسایی شده و تمهیدات لازم از جمله انجام اضافه حفاری کافی و روان‌کاری سطح خارجی سپر در نظر گرفته شود.

فهرست منابع

[۱] شرکت سهامی ساختمان سد و تأسیسات آبیاری سابیر، (۱۳۸۵)، مطالعات ژئوفیزیک به روش ژئوالکتریک قطعه اول و دوم

[۲] شرکت سهامی ساختمان سد و تأسیسات آبیاری سابیر، (۱۳۸۶)، چکیده گزارشات زمین‌شناسی و مکانیک سنگ قطعه ۱ تونل انتقال آب قمرود

[۳] شرکت سهامی ساختمان سد و تأسیسات آبیاری سابیر، (۱۳۸۶)، چکیده گزارشات زمین‌شناسی و مکانیک سنگ قطعه ۲ تونل انتقال آب قمرود

[۴] تبریزی، علی، ۱۳۸۵، طراحی سیستم حمل و نقل حین اجرای تونل انتقال آب از سد امیرکبیر به تصفیه خانه شماره ۶ تهران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

[5] Babendererde, S., Hoek, E., Marinos, P.G. and Cardoso, A.S., 2005, "EPB-TBM Face Support Control in the Metro do Porto Project, Portugal", Proceedings 2005 Rapid Excavation & Tunneling Conference, Seattle.

- [6] Barton, N. and Itoh, J., 2000, *"TBM Performance Estimation in Rock Using Q_{TBM} "*, Fuji Research Institute Corporation.
- [7] Bruland, A., 1998, *"Hard Rock Tunnel Boring, Doctoral Thesis"*, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- [8] Bruland, A., 2002, *"Prediction Model For Performance and Costs"*, The Norwegian University of Science and Technology.
- [9] Carroll, J. O., 2004, *"EPB Tunneling"*, Parsons Brinckerhoff Co. Spatial Publication.
- [10] EFNARC, 2001, *"Specification and Guidelines For The Use of Specialist Products For Soft Ground Tunneling"*, Achieving The Highest Standards.
- [11] Gamuda, JV., 2006, *"The Selection of The Working Methods and Tunnel Boring Machines For The Smart Project"*, International Conference and Exhibition on Tunneling and Trenchless Technology.
- [12] Herrenknecht, M. and Rehm, U., 2002, *"Earth Pressure Balanced Shield Technology"*.
- [13] Herrenknecht, M., Rehm, U., Liebler, B. and Herrenknecht, AG., 2003, *"Tunnelling In Changing Geology"*, Proceedings German-Chinese-Polish Symposium Environmental Engineering, PP 523-533, www.Herrenknecht.Com.
- [14] ITA / AITES Working Group No. 14, 2000, *"Recommendations and Guidelines for Tunnel Boring Machines (TBMs)"*, www.ita-aites.org, PP:1-118.
- [15] Nilsen, B. and Ozdemir, L., 1993, *"Hard Rock Tunnel Boring Prediction and Field Performance"*, Chapter 52, RETC Conference Proceedings, June 13-17, Boston, MA, USA.
- [16] Palmstrom, A., 1995, *"RMI Parameters Applied In Prediction of Tunnel Boring Penetration"*, A Rock Mass Characterization System For Rock Engineering Purposes, PhD Thesis, Oslo University, Norway.

- [17] Ramezanzadeh, A., Rostami, J. and Kastner, R., 2004, *"Performance Prediction Models for Hard Rock Tunnel Boring Machines"*, 6th Tunneling Conference, Tehran, Iran.
- [18] Rostami, J. and Ozdemir, L., 1993, *"A New Model For Performance Prediction of Hard Rock TBMS"*, Chapter 50, RETC Conference Proceedings, June 13-17, Boston, MA.
- [19] Rostami, J., 1995, *"Mini-Disk Equipped Road header Technology For Hard Rock Mining"*, Colorado School of Mines, USA.
- [20] Rostami, J., Ozdemir, L. and Nilson, B., 1996, *"Comparison Between CSM and NTH Hard Rock TBM Performance Prediction Models"*.
- [21] Sapigni, M., Berti, M., Bethaz, E., Busillo, A. and Cardone, G., 2002, *"TBM Performance Estimation Using Rock Mass Classifications"*, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences Vol. 39, pp 771–788.
- [22] *"Tunnel Boring Machine Performance Concepts and Performance Prediction"*, 1997, www.Sciencedirect.Com

فصل اول

کلیات

فصل دوم

ویژگی های زمین شناسی و ژئوکانیکی قطعات ۱ و ۲ تونل انتقال آب قمرود

فصل سوم

روش های پیش بینی نرخ نفوذ و تعیین ضریب بهره‌وری در ماشین های حاری تمام مقطع

(TBM)

فصل چهارم

انتخاب دستگاه TBM در قطعات ۱ و ۲ مسیر تونل انتقال آب

مردود

فصل پنجم

پیش بینی عملکرد TBM در قطعات ۱ و ۲ مسیر تونل انتقال آب قمرود

فصل ششم

نتیجه گیری و پیشنهادات

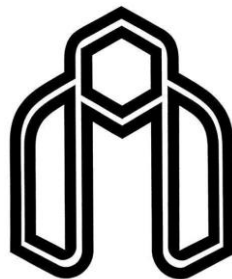
فهرست منابع

Abstract

Nowadays tunnel mechanized boring by full face tunnel boring machines has extra use in the world. One of important factors in mechanized borings is feasibility researches, project costs and scheduling determination that depend on machine performance and utilization accurate and true determination. Performance research of this machines due to high preliminary cost of them is one of the factors that of several points is noticed. TBM machine performance is consists of penetration rate, utilization coefficient and advance rate that all of these determine project time. For TBM performance prediction must be noticed on several parameters such as geology conditions, intact rock properties , rock mass characteristics, design and operational parameters of TBM machine such as cutter size, average spacing of cutters, thrust, torque, cutterhead RPM (round per minute of cutter head), power and cutter properties. One of the projects in IRAN country is Qomroud water transfer tunnel that the main goal of this project is to providing of water for cities, Qom, Delijan, Mahallat, Khomein and Golpaygan. In this thesis based on geology conditions and due to tunnel path length is payed on TBM machine selection in 1&2 sections of Qomroud water

transfer tunnel. since large chainages of this two sections passes of soft and alluvium grounds, and because it is necessary face active maintenance, thus mechanized boring machines don't used from type open shield, single shield and double shield that in those creation possible of face active maintenance don't existed and of between mechanized boring machines in soft grounds, the tunneling machine from type Earth Pressure Balance Shield (EPBS) is elected that has high efficiency in this grounds. Then with use of Q_{TBM} , RMi, NTH and CSM ways TBM machine performance predicted for each tunnel pass engineering geology units and daily advance rate and tunnel accomplishment time is calculated by each above ways. Ultimately with comparable calculated daily advance rate values by this ways with real values was determined that performed prediction by NTH and RMi ways has been closest values than real values. In regarding to results of NTH and RMi ways tunnel accomplishment time has been predicted about four years and six months.

Key Words: Mechanized boring, Performance Prediction, Qomroud water transfer tunnel, Earth Pressure Balance Shield, Q_{TBM} , RMi, NTH, CSM.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining Engineering and Geophysics

Master of Science in Mining Exploitation Engineering

TBM performance prediction in Dez - Qomroud water transfer tunnel

Student:

H. shariatalavi

Supervisors:

Dr. M. Ataei

Dr. R. Kakaei

Advisor:

M. Zoorabadi

July 2008