

## پیش‌بینی سرعت نفوذ TBM در حفاری سنگ سخت با استفاده از مدل NTH (مطالعه موردی تونل انتقال آب قمروود)

مرتضی احمدی<sup>۱</sup>، علی همتی شعبانی<sup>۲</sup>، محمد فروغی<sup>۳</sup>

۱- دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، [moahmadi@modares.ac.ir](mailto:moahmadi@modares.ac.ir)

۲- مؤسسه مهندسی مشاور ایمن سازان، قرب قائم، قرارگاه سازندگی خاتم‌الانبیاء

۳- دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، [man\\_foroughi@yahoo.com](mailto:man_foroughi@yahoo.com)

(دریافت ۱۷ خرداد ۱۳۸۵، پذیرش ۲۵ آذر ۱۳۸۵)

### چکیده

حفاری مکانیزه تمام مقطع تونل‌ها توسط ماشین، دارای تاریخچه‌ای نزدیک به پنجاه سال می‌باشد. بررسی عملکرد، بخش مهمی از هر پروژه حفر تونل بوده و می‌تواند نقش اساسی در انتخاب روش و ماشین حفاری داشته باشد. در این مقاله پیش‌بینی سرعت نفوذ TBM بر مبنای روش NTH در تونل قمروود مورد مطالعه قرار گرفته است. مهمترین مزیت این روش منظور کردن تأثیر شرایط زمین و خواص توده‌سنگ می‌باشد. محاسبات انجام گرفته سرعت نفوذ متوسط ۴/۷ متر بر ساعت و سرعت پیشروی متوسط ۲۰ متر در روز را برای دستگاه نشان داده است. بر مبنای پیش‌بینی‌های صورت گرفته حفاری این تونل با احتساب ۲۸ روز کاری در ماه، در مدت ۳۲ ماه به اتمام خواهد رسید. بیشترین سرعت نفوذ ۵/۰۴ متر بر ساعت در لایه‌های متورق ژوراسیک و کمترین سرعت نفوذ ۳/۷۲ متر بر ساعت مربوط به نواحی کوارتزیتی پیش‌بینی شده است. همچنین بیشترین سرعت پیشروی روزانه حدود ۲۲/۷ متر در روز مربوط به واحدهای متورق ژوراسیک و کمترین سرعت پیشروی، حدود ۱۱/۵ متر در روز در نواحی خردشده اطراف گسل‌ها پیش‌بینی شده است. به این ترتیب می‌توان با مقایسه عملکرد TBM و مقادیر پیش‌بینی شده با مدل NTH یک ارتباط مناسب بین عملکرد واقعی و مدل به کار گرفته شده برقرار نموده و برای کارکرد TBM در بخش‌های مختلف مسیر تونل منظور کرد.

### واژه‌های کلیدی

TBM، حفاری مکانیزه، حفاری تمام مقطع تونل، پیش‌بینی سرعت نفوذ، تونل انتقال آب قمروود و مدل NTH.

## ۱- مقدمه

روش حفر مکانیزه تونل کاربرد وسیعی در جهان یافته است. در کشور ما ضمن استفاده موفق از این روش در بسیاری از تونل‌ها بعضاً تجارب ناموفقی در استفاده از این روش‌ها موجود می‌باشد. با توجه به روند رو به افزایش تونل‌های در حال مطالعه و یا در دست اجرا و همچنین اهمیت مدت زمان اجرا در این پروژه‌ها، استفاده از روش‌های مکانیزه اهمیت ویژه‌ای یافته است.

پروژه قطعات سوم و چهارم تونل انتقال آب قمرود نیز یکی از این پروژه‌ها است. تونل انتقال آب قمرود به طول ۳۵۷۵۰ متر و شیب ۰/۱۳ درصد، به منظور انتقال ۲۳ متر مکعب آب در ثانیه از سرچشمه‌های دز به قمرود طراحی شده است. با توجه به شرایط زمین‌شناسی مسیر تونل و مقایسه مزایا و معایب و سرعت حفاری انواع ماشین‌ها، ماشین حفار تونل با سپر تلسکوپی برای اجرای ۱۷۴۰۰ متر از کل طول ۱۷۷۰۰ متری این قطعات، با قطر حفاری ۴/۵۳ و قطر تمام شده ۳/۸ متر انتخاب شده است.

پس از تعیین مشخصات ژئوتکنیکی مسیر و انتخاب دستگاه مناسب برای عملیات حفاری نوبت به پیش‌بینی عملکرد دستگاه می‌رسد. این پیش‌بینی‌ها به منظور تعیین زمان نهایی تکمیل پروژه به کار می‌روند. بدیهی است که نتایج به‌دست آمده با توجه به اطلاعات موجود قبل از حفاری تونل، نمی‌تواند کاملاً قطعی باشند. با این حال از این پیش‌بینی‌ها می‌توان به عنوان ایده‌ای کلی برای عملکرد دستگاه در بخش‌های مختلف مسیر تونل بهره گرفت.

سرعت نفوذ<sup>۱</sup> ماشین در سنگ به هنگام حفاری معمولاً بر حسب میلی‌متر در هر چرخش پیشانی برشی و یا به صورت متر بر ساعت بیان می‌شود. سرعت پیشروی<sup>۲</sup> نیز به صورت میزان پیشروی تونل در مدت معین تعریف می‌شود و ممکن است بر حسب متر در شیفت، متر در روز و یا متر در ماه بیان شود. این دو پارامتر توسط پارامتری به عنوان ضریب بهره‌وری با یکدیگر مرتبط می‌باشند. این شاخص عبارت از درصد زمانی نسبت به زمان کل یک شیفت است که طی آن دستگاه در حال حفاری است. واضح است که چون ماشین همیشه در حال پیشروی نیست لذا سرعت پیشروی همواره کمتر از سرعت نفوذ می‌باشد.

روش‌های پیش‌بینی سرعت نفوذ و پیشروی که در صنعت به کار می‌روند، به دو گروه مدل‌های تجربی، که عمده‌ترین آنها مدل NTH است و روش‌های نیروی برشی، که عمده‌ترین آنها مدل CSM می‌باشد، تقسیم می‌شوند.

## ۲- مدل NTH

مدل NTH توسط انستیتو تکنولوژی نروژ ارائه شده است. این مدل از سال ۱۹۷۵، با شروع حفاری مکانیزه در این کشور ابداع شد و به‌طور پیوسته با در دسترس قرارگرفتن داده‌های جدید اصلاح و تقویت شده است [۱].

روش NTH که مدلی برای پیش‌بینی میزان پیشروی در سنگ سخت می‌باشد، بر مبنای روابط تجربی مابین پارامترهای مکانیکی و زمین‌شناسی سنگ و بهره‌وری ماشین با میزان پیشرفت واقعی تونل پایه‌گذاری شده است، که از مطالعه ۳۳ تونل با طول کلی حدوداً ۲۳۰ کیلومتر بدست آمده است [۲]. این مدل مقبولیت جهانی داشته و به‌طور وسیع در تونل‌سازی اروپا استفاده می‌شود. پارامترهای ورودی این مدل را می‌توان به دو دسته پارامترهای ماشین از جمله نیروی محوری برش‌دهنده‌ها، سرعت چرخش پیشانی برشی و فاصله‌داری برش‌دهنده‌ها و ویژگی‌های توده‌سنگ از جمله ناپیوستگی‌ها و شاخص نرخ حفاری تقسیم کرد [۱]. در ادامه پارامترهای مدل NTH به تفصیل شرح داده شده‌اند.

## ۱-۲- ویژگی‌های توده‌سنگ

۱- شاخص سرعت حفاری<sup>۳</sup> (DRI): این شاخص تابعی از خواص ژئومکانیکی توده‌سنگ است. شاخص سرعت حفاری و شکستگی‌ها دو عاملی هستند که تأثیر مهمی بر سرعت نفوذ دارند. سرعت حفاری از دو آزمون تردی<sup>۴</sup> و مقدار J سیورز<sup>۵</sup> به‌دست می‌آید.

(الف) آزمون تردی: برای آزمایش ابتدا نمونه سنگ در یک سنگ‌شکن تا ابعاد ۱۱/۲ تا ۱۶ میلی‌متر خرد می‌شود. سپس ۱۸۹ سانتی‌متر مکعب از سنگ‌های خردشده را در ظرفی که به این منظور طراحی شده است می‌ریزند. نمونه مورد آزمایش ۲۰ مرتبه توسط وزنه ۱۴ کیلوگرمی از ارتفاع ۲۵ سانتی‌متری تحت خردایش قرار می‌گیرد. شاخص تردی S<sub>20</sub> معادل درصد سنگی است که پس از خردشدن توسط ضربه‌ها از سرنده ۱۱/۲ میلی‌متری عبور می‌کند [۲].

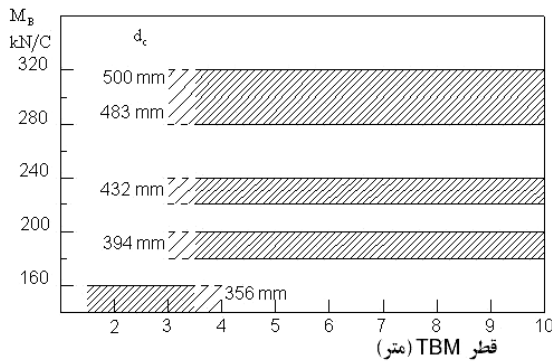
(ب) آزمون مقدار J سیورز: این آزمون یک حفاری مینیا توری است، عرض لبه سرتمه استفاده شده در حفاری ۸/۵ میلی‌متر و زاویه گوه آن ۱۱۰ گراد می‌باشد. نیروی قائم وارد بر سرتمه ۲۰ کیلوگرم نیرو است و شاخص J سیورز برابر با نفوذ سرتمه به دهم میلی‌متر بعد از ۲۰۰ دور چرخش آن است. این شاخص را با S<sub>r</sub> نمایش می‌دهند [۱].

جدول ۱: درجه شکستگی‌ها [۲]

فاصله‌داری صفحات ضعف (m)	درجه شکستگی	
	ریزدوزه	درزه
> ۱/۶	0	0
۱/۶	-	0-I
۰/۸ - ۱/۶	I	I
۰/۴ - ۰/۸	II	I-II
۰/۲ - ۰/۴	II-III	II
۰/۱ - ۰/۲	III	II-III
۰/۰۵ - ۰/۱	III-IV	-
< ۰/۰۵	IV	-

## ۲-۲- پارامترهای ماشین

۱- نیروی محوری اعمال شده بر هر برش‌دهنده ( $M_B$ ):  
نیروی محوری ناخالصی که توسط دستگاه TBM اعمال می‌شود، بین برش‌دهنده‌ها تقسیم می‌شود. در شکل ۳ میزان متوسط نیروی محوری که بر هر برش‌دهنده اعمال می‌شود، برای ماشین‌ها و برش‌دهنده‌هایی با قطر مختلف ( $d_c$ )، نشان داده شده است [۴].

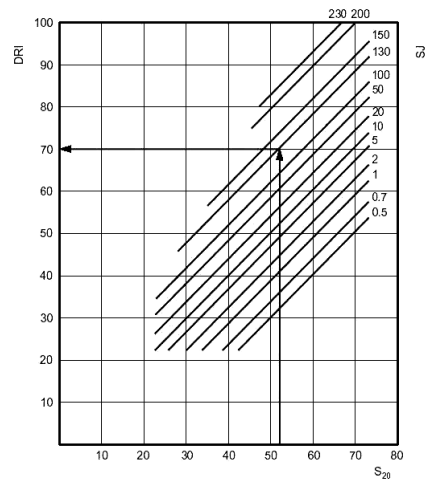


شکل ۳: میزان نیروی محوری اعمالی بر هر برش‌دهنده بر اساس قطر برش‌دهنده و تونل [۴]

۲- فاصله‌داری برش‌دهنده‌ها: متوسط فاصله شکاف حاصل از برش‌دهنده‌ها که همان فاصله‌داری برش‌دهنده‌ها را نشان می‌دهد، برابر با شعاع TBM تقسیم بر تعداد برش‌دهنده‌ها می‌باشد. در روش NTH معمولاً فاصله‌داری، عددی معادل ۷۰ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود [۲].

۳- سرعت چرخش پیشانی برشی: سرعت چرخش پیشانی برشی برحسب دور بر دقیقه (RPM) با قطر پیشانی برشی نسبت معکوس دارد. در شکل ۴ دور بر دقیقه پیشانی برشی به صورت تابعی از قطر TBM و تیغه نشان داده شده است [۴].

شاخص سرعت حفاری با استفاده از شاخص شکنندگی  $S_{20}$  و مقدار  $S_f$  به کمک شکل ۱ حاصل می‌شود. به عنوان مثال سنگی با  $S_{20}$  معادل ۵۳ و  $S_f$  معادل ۱۳۰ دارای شاخص سرعت حفاری معادل ۷۰ خواهد بود.



شکل ۱: نمودار تعریف DRI [۱]

۲- شکستگی‌ها: شکستگی‌ها مهمترین عامل مؤثر در سرعت نفوذ در هنگام حفاری می‌باشند. در اینجا شکستگی به معنی صفحات ناپیوستگی شامل درزه‌ها، ریزدوزه‌ها و ترک‌هایی با مقاومت برشی کم یا بدون مقاومت برشی می‌باشد. شکستگی‌ها با توجه به فاصله‌داری صفحات ضعف در کلاس‌هایی طبقه‌بندی شده‌اند که این طبقه‌بندی در جدول ۱ ارائه شده است.

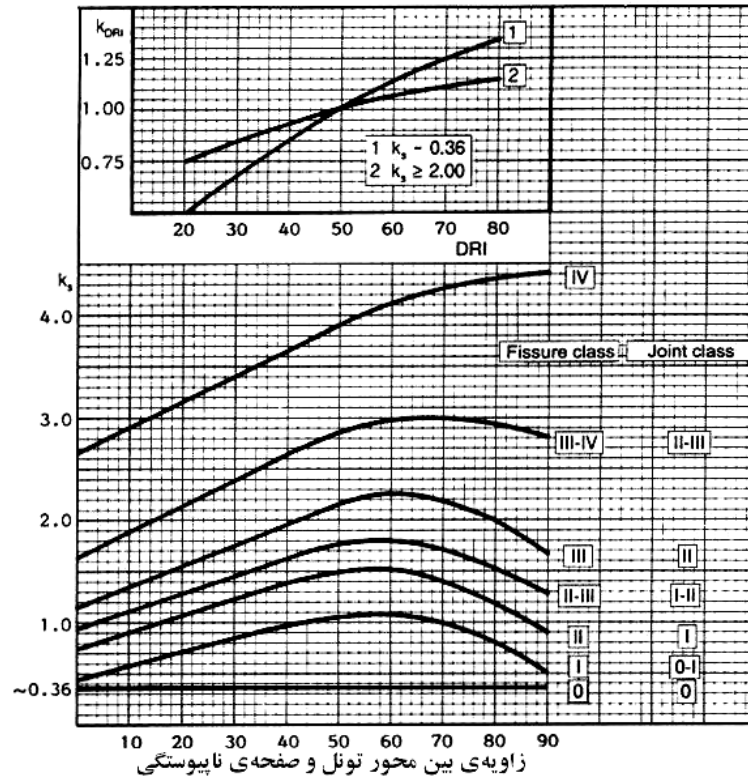
ضریب درزه‌داری: این ضریب که با  $k_s$  نشان داده می‌شود تابعی از درجه شکستگی و زاویه بین محور تونل و سطوح ناپیوستگی است که می‌توان آن را از شکل ۲ به دست آورد. اگر بیش از یک دسته‌دوزه موجود باشد، ضریب درزه‌داری کل عبارت است از [۳]:

$$k_{s-tot} = \sum_{i=1}^n k_{si} - (n-1)0.36 \quad (1)$$

که در آن  $k_{si}$  ضریب درزه‌داری دسته‌دوزه شماره  $i$  ام و  $n$  تعداد دسته‌دوزه‌ها می‌باشد.

ضریب درزه‌داری معادل،  $k_{eq}$ ، که برای مقادیر  $DRI \neq 49$  تعدیل شده است نیز با تعیین  $k_{DRI}$  از نمودار بالایی شکل ۲، توسط معادله زیر به دست می‌آید [۳].

$$k_{eq} = k_{s-tot} \times k_{DRI} \quad (2)$$



شکل ۲: ضریب درزه‌داری به صورت تابعی از فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها برای  $DRI \neq 49$ ، نمودار بالا  $k_{DRI}$  [۳]

ترتیب متفاوت از ۴۸۳ میلی‌متر و ۷۰ میلی‌متر می‌باشد، نیروی پیشران معادل از فرمول زیر محاسبه می‌شود [۳].

$$M_{eq} = M_B \times k_d \times k_a \quad (kN/Cutter) \quad (3)$$

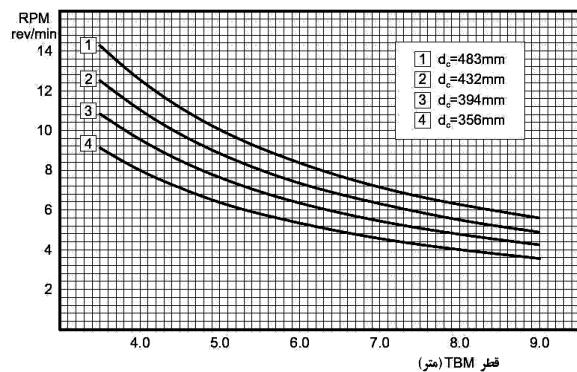
از شکل‌های ۶ و ۷ ضریب‌های تصحیح  $k_d$  برای قطرهای مختلف برش‌دهنده و  $k_a$  برای فاصله‌داری برش‌دهنده‌ها به دست می‌آیند [۳].

۲- سرعت نفوذ خالص (PR): سرعت نفوذ خالص برحسب تابعی از سرعت نفوذ پایه و دور بر دقیقه پیشانی برشی از رابطه زیر به دست می‌آید [۳].

$$PR = PR_0 \times RPM \times \frac{60}{1000} \quad (m/hr) \quad (4)$$

#### ۴-۲- سرعت پیشروی

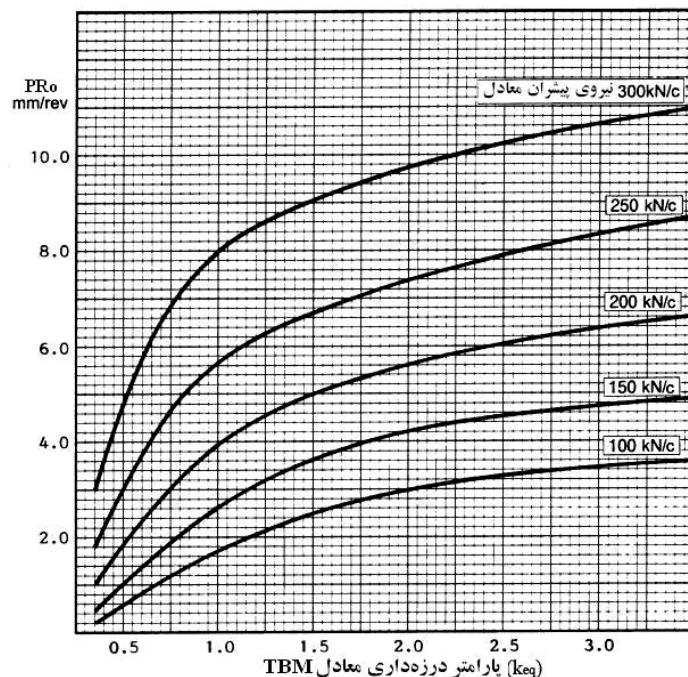
این شاخص به صورت میزان پیشروی تونل در مدت معین تعریف می‌شود و ممکن است برحسب متر در شیفیت، متر در روز و یا متر در ماه بیان شود. واضح است که چون ماشین همیشه در حال پیشروی نیست لذا سرعت پیشروی همواره کمتر از سرعت نفوذ می‌باشد [۵].



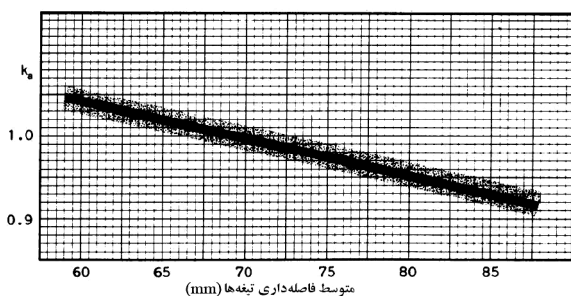
شکل ۴: رابطه سرعت چرخش پیشانی برشی با قطر ماشین و قطر برش‌دهنده [۴]

#### ۳-۲- سرعت نفوذ

۱- سرعت نفوذ پایه ( $PR_0$ ): سرعت نفوذ پایه برحسب میلی‌متر بر هر دور چرخش پیشانی برشی به صورت تابعی از ضریب درزه‌داری معادل TBM ( $k_{eq}$ ) و نیروی پیشران معادل هر برش‌دهنده ( $M_{eq}$ )، بدست می‌آید (شکل ۵). برای قطر برش‌دهنده و فاصله‌داری میانگین برش‌دهنده‌ها که به



شکل ۵: سرعت نفوذ پایه برای قطر برش‌دهنده برابر ۴۸۳ میلی‌متر و فاصله‌داری برش‌دهنده‌های برابر ۷۰ میلی‌متر [۳]



شکل ۷: ضریب تصحیح  $K_a$  برای میانگین فاصله‌داری برش‌دهنده‌ها مخالف ۷۰ میلی‌متر [۳]

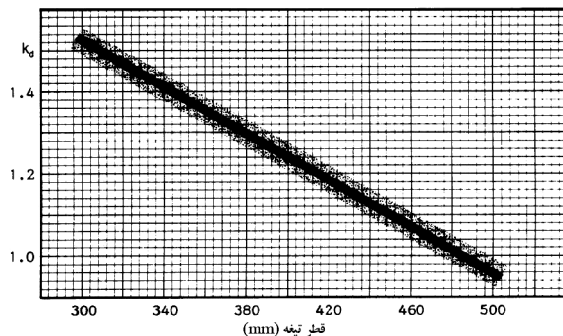
### ۳- شرایط زمین‌شناسی مسیر تونل

براساس نتایج زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل قمرود حدود ۱۷ کیلومتر از ۱۸ کیلومتر قطعات سوم و چهارم، از درون سنگ‌های دگرگونی ژوراسیک که از نظر لیتولوژیکی متشکل از شیل، اسلیت، فیلیت و شیست می‌باشد، عبور می‌کند و یک کیلومتر باقیمانده از سنگ‌های آهکی کرتاسه می‌گذرد. بخش آهکی به لحاظ لیتولوژیکی از آهک‌های توده‌ای میکربیتی که بعضاً دولومیتی هستند و آهک‌های ماسه‌ای لایه‌ای تشکیل شده است. ضخامت روباره در بخش آهکی حدود ۵۰۰ متر و در سایر بخش‌های مسیر تونل بین ۲۵۰ تا ۳۰۰ متر می‌باشد. در طول مسیر تونل در بخش‌های آهکی و غیرآهکی گسل‌های متعددی شناسایی شده که هر

سرعت پیشروی بستگی به سرعت نفوذ خالص، بهره‌وری ماشین و تعداد ساعات کاری در طی زمان معین شده دارد. بهره‌وری ماشین (U)، نسبت زمان خالص حفاری به زمان کل تونل‌سازی است، که برحسب درصد بیان می‌شود. به این ترتیب سرعت پیشروی توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$AR = PR \times U \quad (۶)$$

سرعت پیشروی ماشین در سنگ‌های مختلف به عوامل مختلفی وابسته است که از جمله مهم‌ترین آنها می‌توان به قدرت ماشین، قطر تونل، وضعیت زمین و وجود آب زیرزمینی اشاره کرد [۶].



شکل ۶: ضریب تصحیح  $K_d$  برای قطر برش‌دهنده مخالف ۴۸۳ میلی‌متر [۳]

آن ضریب‌های تصحیح قطر و فاصله‌داری برش‌دهنده‌ها،  $(k_a, k_d)$ ، به ترتیب از شکل‌های ۶ و ۷ تعیین شده است (فاصله‌داری متوسط تیغه‌ها ۷۰cm در نظر گرفته شده و نیروی محوری اعمال شده بر هر برش‌دهنده  $(M_B)$  از شکل ۳ معادل  $230 \text{ kN/c}$  به‌دست آمده است). سرعت چرخش پیشانی برشی برحسب دور بر دقیقه (RPM) که با قطر ماشین نسبت معکوس دارد، از شکل ۴ برحسب قطر دستگاه و قطر برش‌دهنده معادل ۱۰ به‌دست آمده است.

سرعت نفوذ پایه  $(PR_0)$  برحسب نیروی پیشران معادل و ضریب درزه‌داری معادل از طریق شکل ۵ تعیین می‌شود. همچنین برای محاسبه سرعت نفوذ خالص  $(PR)$  از رابطه ۴ بهره گرفته شده که مقادیر آن در جدول ۳ درج شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود براساس این روش سرعت نفوذ در واحدهای مختلف زمین‌شناسی بین حداقل ۳/۷ تا حداکثر ۵/۲ تغییر می‌کند. مقادیر سرعت نفوذ برای واحدهای مختلف زمین‌شناسی در شکل ۸ نشان داده شده است.

برای محاسبه ضریب بهره‌وری ماشین در مدل NTH، رابطه‌ای پیشنهاد شده است، اما محاسبه یا پیش‌بینی بهره‌وری ماشین به سادگی امکان‌پذیر نمی‌باشد. در این راستا مشاوران طراحی پروژه با بهره‌گیری از مقادیر موجود برای پروژه‌های مشابه، برای این پارامتر عددی معادل ۳۰ درصد را مناسب دانسته‌اند. بدیهی است که در نواحی خردشده به دلیل لزوم گمانه‌زنی پیشرو، تزریق تحکیمی بیشتر و در مجموع احتیاط بیشتر هنگام حفاری، این عدد کوچکتر بوده و در این پروژه معادل ۱۵ درصد در نظر گرفته شده است [۷].

کدام دارای یک ناحیه خردشده می‌باشد. پیش‌بینی می‌شود که پهنای ناحیه خردشده اطراف گسل‌ها در سنگ‌های آهکی حدود ۲۰ متر و در سنگ‌های دگرگونی حدود ۵۰ متر باشد. برمبنای نتایج مطالعات صورت گرفته، مسیر قطعات سوم و چهارم تونل قمرود به لحاظ زمین‌شناسی مهندسی و با احتساب نواحی خردشده، به ۹ منطقه مختلف تقسیم‌بندی شده و مشخصات آنها در جدول ۲ آمده است.

#### ۴- بررسی عملکرد ماشین حفر تمام مقطع در تونل قمرود توسط مدل NTH

در اینجا با توجه به شرایط زمین‌شناسی مهندسی پیش‌بینی شده برای مسیر تونل قمرود، به ارزیابی پارامترهای مختلف مدل NTH برای واحدهای زمین‌شناسی مهندسی تفکیک شده پرداخته شده است که نتایج آن به‌طور خلاصه در جدول ۳ درج شده است.

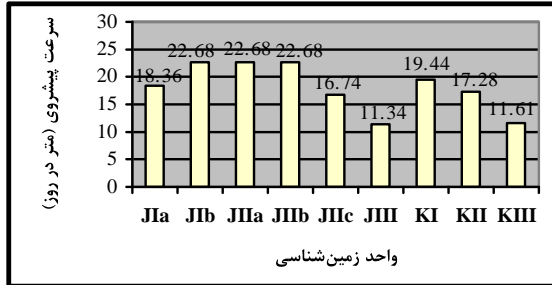
شاخص سرعت حفاری (DRI) برمبنای مقادیر محاسبه شده برای سنگ‌های مختلف [۴] و طبقه‌بندی شکستگی‌ها در هریک از واحدهای زمین‌شناسی و همچنین زاویه آنها با محور تونل، براساس گزارش مشاوران طراحی [۷] در جدول ۳ آورده شده است. ضریب درزه‌داری معادل  $(k_{eq})$  از طریق رابطه ۲ محاسبه شده که برای محاسبه آن، ضریب درزه‌داری  $(k_s)$  و همچنین ضریب تصحیح  $k_{DRI}$  از شکل ۲ به‌دست آمده است. نیروی محوری اعمال شده بر هر برش‌دهنده  $(M_B)$  از شکل ۳ برای ماشین مورد نظر با قطر  $4/53 \text{ m}$  و قطر برش‌دهنده  $432 \text{ mm}$  به‌دست آمده است. نیروی پیشران معادل هر برش‌دهنده  $(M_{eq})$ ، از رابطه ۳ به‌دست آمده که برای محاسبه

جدول ۲: مشخصات توده‌سنگ‌های مسیر تونل [۷]

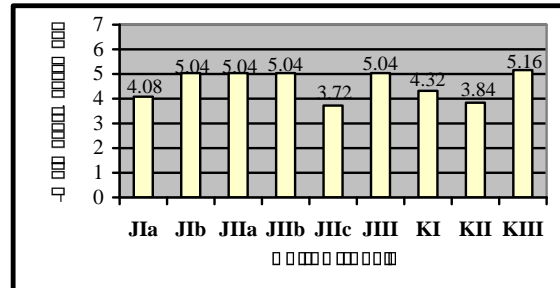
واحد	سنگ‌شناسی	ویژگی زمین‌شناسی مهندسی	میزان حضور در طول تونل (km)	متوسط روباره (m)	C (MPa)	E (GPa)	$\varphi$ (درجه)
KI	آهک مقاوم میکریتی - دولومیتی	سنگ آهک توده‌ای	۰/۵۴	۶۰۰	۴/۴۶	۸/۷	۲۴
KII	آهک رسی - ماسه‌ای	سنگ آهک متورق	۰/۵۴	۶۰۰	۳/۲	۴	۲۸
KIII	واحدهای آهکی	منطقه خردشده	۰/۱۸	۶۰۰	۱/۷	۱/۳	۲۴
JI	تناوب ماسه‌سنگ، شیل و اسلیت	ماسه‌سنگ (a)	۵/۰۴	۳۵۰	۲	۸/۴	۲۶
		شیل - اسلیت (b)	۷/۲	۳۵۰	۳/۱۳	۳	۴۲
JII	تناوب گرافیت‌شیست کوارتز شیست و کوارتزیت	شیستوز توسعه یافته (a)	۱/۸	۲۰۰	۱/۸۵	۲/۸	۲۳
		شیستوز (b)	۲/۱۶	۲۰۰	۱/۹	۳	۲۴
JIII	واحدهای دگرگون	رگه‌ای با ضخامت متغیر (c)	۰/۱۸	۲۰۰	۳/۷۱	۱۳/۳	۴۷
		منطقه خردشده	۰/۵۴	۴۵۰	۱/۹۷	۱/۶	۲۲

سرعت پیشروی متوسط ماشین حدود ۲۰ متر در روز پیش‌بینی شده است. بر مبنای محاسبات صورت گرفته برای سرعت پیشروی در مدل NTH، حفاری این تونل با احتساب ۲۸ روز کاری در ماه، در مدت ۳۲ ماه به اتمام می‌رسد.

با در نظر گرفتن ضریب بهره‌وری می‌توان سرعت پیشروی را در مسیر تونل تخمین زد. با در نظر گرفتن یک روز کاری معادل ۱۵ ساعت، سرعت پیشروی روزانه دستگاه آنچنانکه در جدول ۴ و شکل ۹ درج شده است، پیش‌بینی می‌شود. با توجه به نتایج محاسبات که در جدول ۴ درج شده است



شکل ۹: هیستوگرام پیش‌بینی تغییرات سرعت پیشروی TBM بر حسب متر در روز بر اساس مدل NTH



شکل ۸: هیستوگرام پیش‌بینی تغییرات سرعت نفوذ TBM بر حسب متر بر ساعت

جدول ۳: نتایج پیش‌بینی عملکرد TBM با استفاده از مدل NTH

سرعت نفوذ خالص PR (m/hr)	سرعت نفوذ پایه PR <sub>o</sub> (mm/rev)	نیروی پیشران معادل M <sub>eq</sub> (kN/c)	k <sub>eq</sub>	k <sub>DRI</sub>	k <sub>s</sub>	شکستگی		DRI	پارامتر واحد
						زاویه با تونل	درجه		
۴/۰۸	۶/۸	۲۶۷	۱/۲	۱	۱/۲	۳۰	I درزه	۵۰	J1a
۵/۰۴	۸/۴		۲/۴	۱	۲/۴		II-III درزه	۵۰	J1b
۵/۰۴	۸/۴		۲/۴	۱	۲/۴		II-III درزه	۵۰	J1a
۵/۰۴	۸/۴		۲/۴	۱	۲/۴		II-III درزه	۵۰	J1b
۳/۷۲	۶/۲		۱	۱	۱		I-II ریزدرزه	۵۰	J1c
۵/۰۴	۸/۴		۲/۴	۱	۲/۴		III-IV ریزدرزه	۵۰	J1III
۴/۳۲	۷/۲		۱/۳۸	۱/۱۵	۱/۲		I درزه	۶۰	K1
۳/۸۴	۶/۴		۱/۱۵	۱/۱۵	۱		I-II ریزدرزه	۶۰	K1I
۵/۱۶	۸/۶		۲/۵۲	۱/۰۵	۲/۴		III-IV ریزدرزه	۶۰	K1III

جدول ۴: نتایج پیش‌بینی سرعت پیشروی TBM با استفاده از مدل NTH

مدت زمان حفر (ماه)	طول مسیر (km)	سرعت پیشروی روزانه AR (m/day)	سرعت پیشروی AR (m/hr)	ضریب بهره‌وری U (%)	سرعت نفوذ خالص PR (m/hr)	پارامتر واحد
۹/۸	۵/۰۴	۱۸/۳۶	۱/۲۲	۳۰	۴/۰۸	J1a
۱۱/۳	۷/۲	۲۲/۶۸	۱/۵۱	۳۰	۵/۰۴	J1b
۲/۸	۱/۸	۲۲/۶۸	۱/۵۱	۳۰	۵/۰۴	J1a
۳/۴	۲/۱۶	۲۲/۶۸	۱/۵۱	۳۰	۵/۰۴	J1b
۰/۴	۰/۱۸	۱۶/۷۴	۱/۱۲	۳۰	۳/۷۲	J1c
۱/۷	۰/۵۴	۱۱/۳۴	۰/۷۶	۱۵	۵/۰۴	J1III
۱	۰/۵۴	۱۹/۴۴	۱/۳	۳۰	۴/۳۲	K1
۱/۱	۰/۵۴	۱۷/۲۸	۱/۱۵	۳۰	۳/۸۴	K1I
۰/۶	۰/۱۸	۱۱/۶۱	۰/۷۷	۱۵	۵/۱۶	K1III

## ۵- بحث و تفسیر نتایج

ماشین حفاری مکانیزه تونل قمرود تا این قسمت از تونل، در واحدهای Klm (سنگ آهک توده‌ای و متورق کرتاسه) و II (تناوب ماسه‌سنگ، شیل و اسلیت ژوراسیک) پیشروی داشته که نتایج حاصل از پیشروی TBM در این واحدهای زمین‌شناسی ذیلاً ذکر شده است.

آنچنانکه در عمل مشاهده شده، بیشترین سرعت پیشروی روزانه در واحدهای آهکی کرتاسه ۳۴/۱ متر در روز و در واحد ماسه‌سنگ، شیل و اسلیتی ژوراسیک ۵۲/۷ متر در روز بوده است. اما متوسط سرعت پیشروی واقعی در واحدهای کرتاسه ۱۳/۷ متر در روز و در واحدهای ژوراسیک ۱۱/۹ متر در روز ثبت شده است. متوسط سرعت پیشروی در واحدهای آهکی کرتاسه و همچنین واحدهای ژوراسیک طبق محاسبات صورت گرفته توسط مدل NTH به ترتیب معادل ۱۸/۳۶ و ۲۰/۹ متر در روز پیش‌بینی شده است.

از معضلات استفاده از روش NTH حذف برخی آزمایش‌هایی است که انجام آنها برای به‌دست آوردن داده‌های اولیه الزامی است، اما به دلیل نبود امکانات فنی این آزمایش‌ها در کشور، مقادیر پارامترهای مورد نظر از طریق تخمین آنها از پروژه‌های مشابه صورت گرفته در دیگر نقاط دنیا تعیین شده‌اند.

دیگر مورد قابل بررسی نحوه تعیین مشخصات ناپیوستگی‌ها در مطالعات امکان‌سنجی است. درجه شکستگی‌ها و زاویه آنها با محور تونل دو عاملی هستند که در نتایج پیش‌بینی حاصل از مدل NTH تأثیر به‌سزایی دارند و مسلماً تعیین این دو پارامتر از طریق چند گمانه محدود باعث عدم قطعیت داده‌های ورودی مدل خواهد شد.

## ۶- نتیجه‌گیری

محاسبات انجام گرفته با مدل NTH برای تونل انتقال آب قمرود (با توجه به داده‌های اولیه زمین‌شناسی موجود) نشان می‌دهد که دستگاه موجود توانایی حفر تمام لایه‌های سنگی در این پروژه را دارا می‌باشد.

ملاحظه می‌شود که بیشترین سرعت پیشروی روزانه حدود ۲۲/۷ متر برآورد شده است که مربوط به واحدهای متورق ژوراسیک می‌باشد. کمترین سرعت پیشروی نیز در نواحی خردشده اطراف گسل‌ها حدود ۱۱/۵ متر در روز پیش‌بینی شده است. اما با توجه به شکل ۸ مشاهده می‌شود که سرعت نفوذ

پیش‌بینی شده در این واحدها و همچنین نواحی خردشده حداکثر می‌باشد. اما به دلیل صعوبت حفاری در نواحی خردشده (لزوم گمانه‌زنی پیشرو، تزریق تحکیمی بیشتر و در مجموع احتیاط بیشتر هنگام حفاری) ضریب بهره‌وری در نظر گرفته شده در این نواحی کمتر از سایر مناطق می‌باشد که همین موضوع باعث کمتر شدن سرعت پیشروی پیش‌بینی شده در نواحی خردشده می‌شود.

می‌توان با مقایسه عملکرد TBM و مقادیر پیش‌بینی شده با مدل NTH یک ارتباط مناسب بین عملکرد واقعی و تئوریک برقرار کرد. بدیهی است که نتایج به‌دست آمده از این مدل‌ها با توجه به اطلاعات موجود قبل از حفاری تونل و براساس پیش‌بینی خصوصیات سنگ‌های مسیر تونل به‌دست آمده‌اند و نمی‌توانند کاملاً قطعی باشند. با این حال این پیش‌بینی‌ها می‌توانند ضریب بهره‌وری واقعی دستگاه را در بخش‌های مختلف مسیر تونل ارائه دهند.

## ۷- تقدیر و تشکر

در پایان از زحمات مهندسان و کارکنان مؤسسه مشاوره ایمن سازان و مؤسسه فاطر که در تهیه داده‌های لازم ما را یاری رساندند تشکر می‌شود.

## ۸- مراجع

- [1] ITA WG Mechanized Tunnelling, 2000, "Recommendations and guidelines for tunnel boring machines (TBMs)", pp. 1-118.
- [2] "Tunnel Boring Machine Performance Concepts and Performance Prediction" Appendix C, US Army Corps, EM 1110-2-2901, 30 May 97.
- [3] Amund Bruland, 1998, NTNU: Project Report 1B-98 Hard Rock Tunnel Boring, "Advance Rate and Cutter Wear", The Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- [4] Amund Bruland, 1994, NTH-Anleggsdrift: Project Report 1-94 Hard Rock Tunnel Boring, "Prediction Model for Performance and Costs", The Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- [5] Franklin, John A. & Dusseault, Maurice B., 1989, "Rock Engineering", Mc Graw-Hill Publishing Co. USA.
- [6] Wittaker, Barry N. & Frith Russele. 1990, "Tunnelling, Design, Stability and Construction", The Institution of Mining and Metallurgy.
- [۷] مؤسسه مهندسی مشاور ساحل، ۱۳۸۲، "مجموعه گزارشات طراحی قطعات سوم و چهارم تونل قمرود".

<sup>3</sup> - Drilling Rate Index

<sup>4</sup> - Brittleness Test

<sup>5</sup> - Sievers' J value

<sup>1</sup> - Penetration Rate

<sup>2</sup> - Advance Rate



This document was created with Win2PDF available at <http://www.daneprairie.com>.  
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.