

## محاسبه نرخ مصرف دیسک دستگاه TBM در پروژه انتقال آب کرج - تهران

سید کاظم اورعی<sup>\*</sup>، بهرام صالحی<sup>\*\*</sup>

### چکیده

افزایش مصرف آب آشامیدنی و صنعتی شهر تهران موجب شده است تا برای رفع بحران و پیشگیری از کمبود در ۲۵ سال آتی پروژه های وسیعی طراحی و اجرا شوند. از جمله این طرح ها می توان به پروژه انتقال آب کرج - تهران اشاره کرد. پروژه انتقال آب کرج - تهران با طولی نزدیک به ۱۶۰۰۰ متر و بوسیله دستگاه تمام مقطع حفاری خواهد شد. نوع دستگاه سپری دابل بوده و قطر حفاری ۴/۵۶۶ متر می باشد. ابزار برش علاوه بر تاثیر به سزایی که در نرخ پیشروی دستگاه دارند، در اقتصادی بودن پروژه نیز تاثیر گذار هستند. با توجه به نقش ابزار برش در عملکرد فعالیت های اجرایی حفر تونل در این مقاله به محاسبه عمر مفید ابزار برش با استفاده از دو مدل دانشگاه معدنکاری کلرادو و انستیتو مکانیک سنگ نروژ و همچنین اعتبار سنجی این روش ها پرداخته خواهد شد. این دو روش بر دو مبنای متفاوت آنالیز های ریاضی و مطالعات میدانی بنا نهاده شده اند. به دلیل انجام نگرفتن آزمایش سرشار و وابستگی بالای مدل دانشگاه کلرادو به این شاخص، نتایج حاصل از این روش از دقت لازم برخوردار نمی باشد. در صورتی که پارمترهای مدل NTH قابل سنجش بوده و تعیین آنها نیازمند انجام آزمایشات پیچیده نمی باشد. از این رو در پروژه هایی مانند پروژه تونل انتقال آب کرج - تهران که در اطلاعات اولیه محدودیت هایی وجود دارد استفاده از مدل NTH از اعتبار بیشتری برخوردار است.

**کلمات کلیدی:** TBM، ابزار برش، نرخ مصرف، CSM، RMI، NTH

### ۱- مقدمه

ماشین های تمام مقطع با توجه به قابلیت های بالای خود جایگاه ویژه ای را در مهندسی تونل و حفاری مکانیزه به خود اختصاص داده اند. ابزار برش یکی از پر مصرف ترین ابزار و حساس ترین پارامترهای حفاری در دستگاه های تمام مقطع می باشند. از آغاز بکار گیری دستگاه های تمام مقطع در حفاری فضا های زیر زمینی، ابزار برش همواره در تغییر بوده اند. از دهه ۱۹۹۰ که اوج تکامل این ابزار از نظر هندسی بوده، پیشرفت ها به سمت کیفیت فلزات مورد استفاده در این صنعت سوق داده شده است و امروزه فرآیند متالورژیکی بکار رفته در ساخت ابزار برش بیش از پیش مورد توجه سازندگان این ابزار می باشد. در این مقاله برای تحلیل عملکرد ابزار برش در پروژه تونل انتقال آب

<sup>\*</sup> استاد دانشگاه استرلینگ انگلستان: [sko1@stir.ac.uk](mailto:sko1@stir.ac.uk)

<sup>\*\*</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد استخراج معدن، دانشگاه آزاد، تهران جنوب: [salehi\\_emg@yahoo.com](mailto:salehi_emg@yahoo.com)

کرج - تهران از دو روش انستیتو مکانیک سنگ نروژ و دانشگاه معدنکاری کلرادو استفاده شده و در نهایت سعی خواهد شد مدلی که از اعتبار بیشتری برخوردار می باشد معرفی شود.

## ۲- ابزار برش

ابزار برش به گروه های مختلفی چون برنده های تک دیسکی، چند دیسکی، برنده های نوع توت فرنگی و برنده های چند ردیفی تقسیم می شود. محدوده استفاده این ابزارها از سنگ های متوسط تا بسیار قوی را شامل می شود. هندسه دیسک های برشی به وسیله قطر و پروفیل لبه آنها مشخص می شود. عمق نفوذ دیسک های برشی در داخل سنگ به ازای هر دور دوران کاترهد و فاصله دیسک های برشی هندسه برش توده سنگ را مشخص می کنند. عمر دیسک برشی به عوامل متعددی بستگی دارد که برخی از آنها عبارتند از:

قطر دیسک، جنس سنگ، درصد کوارتز سنگ های مسیر، فاصله داری دیسک، سرعت کاترهد، نیروهای فشاری، فناوری بکاررفته در ایجاد شکل ابزار برش و نوع فولاد، ارتفاع روباره تونل. از ابتدای دهه ۸۰ قطر دیسک ها به طور یکنواخت در حال افزایش می باشد. به طوری که قطر آنها از ۸ اینچ به ۲۰ اینچ افزایش یافته است [۱]. در صورتی که بار ثابتی بر دیسک های برشی اعمال شود، با افزایش قطر آنها، سطح مقطع دیسک بالاتر رفته و سطح تماس دیسک با صخره نیز بیشتر می شود. در نتیجه میزان نفوذ دیسک در صخره کاهش می یابد. البته دیسک های بزرگتر برای اعمال نیروی بیشتر (که نیازمند یاتاقان بزرگتر هستند) ساخته می شوند. دیسک های بزرگتر دارای سرعت دورانی کمتری در یک سرعت دورانی ثابت کاترهد هستند که این به معنای ایجاد گرمای کمتر و عمر بیشتر دیسک می باشد. البته در قطرهای بیش از ۱۷ اینچ افزایش چندان در عملکرد دستگاه و پیشروی دیده نمی شود [۲]. این امر ناشی از نیاز به افزایش قطر لبه دیسک جهت انتقال بار زیاد به سنگ می باشد. با افزایش سرعت کاترهد، با توجه به محدودیت سرعت خطی دیسک های برشی، بدلیل اصطکاک بین سنگ و ابزار برش، گرمایی علاوه بر ظرفیت گرمایی دیسک ایجاد شده و عمر مفید دیسک کاهش می یابد. همچنین با افزایش فاصله میان دیسک های برشی (افزایش فشار وارده بر هر دیسک) نیز عمر مفید دیسک ها کاهش می یابد. با افزایش تنش محصور کننده میزان تنش لازم برای شکست سنگ افزایش یافته که این امر مستلزم افزایش فشار بیشتر بر دیسک های برشی یا کاهش فاصله داری آنها می باشد. هر دو حالت منجر به افزایش نرخ مصرف ابزار برش می شود.

## ۳- مدل های مرسوم محاسبه عمر ابزار برش

برای بیان ارتباط میان پارامترهای موثر در عمر دیسک ها روابط متعددی ارائه شده است. روش اول برگرفته شده از مدل ریاضی پیش بینی نرخ نفوذ مدرسه معدن کلرادو می باشد که عمر دیسک را بر اساس میزان مسافت خطی طی شده بر روی سطح سنگ و عکس العمل سنگ در برابر نیروی اعمال شده محاسبه می نماید (روابط (۱) و (۲)).

$$RL = 6.75 \times 10^6 \times d / (17 \times CAI) \quad (1) \quad h_r = \frac{RL}{60 \times D_{TBM} \times \pi \times rpm} \quad (2)$$

که در آن  $D_{TBM}$ : قطر دستگاه (فوت)،  $RL$ : عمر دیسک برشی (فوت)،  $d$ : قطر دیسک برشی (اینچ)،  $h_r$ : عمر دیسک (ساعت)،  $CAI$ : اندیس سرشار از جدول (۱) بدست می آید [۳]. اندیس سرشار برابر با قطر ناحیه

ساییده شده یک میخ فولادی به دهم میلی متر پس از حرکت به مقدار یک سانتی متر تحت نیروی ۷ کیلوگرم بر روی سنگ می باشد. زاویه راس مخروط میخ فولادی نیز ۹۰ می باشد [۴].

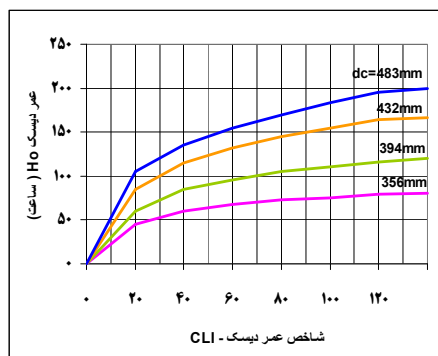
جدول (۱): رابطه بین مقاومت فشاری تک محوره و شاخص سرشار [۳]

CAI	نوع سنگ	CAI	نوع سنگ
۱/۵-۲/۸	شیست	۰/۴-۱	توف
۱/۸-۳/۲	شیست سبز	۱/۸-۳/۲	ماسه سنگ
۱/۶-۲/۸	دیوریت	۱/۷-۳	کنگلو مرا
۲/۸-۳/۹	آندزیت	۰/۴-۲	گابرو
CAI	نوع سنگ	CAI	نوع سنگ

روش دوم مدل RMI بر گرفته شده از مدل پیش بینی نرخ پیشروی NTH می باشد. اساس کار این روش بر نتایج حاصل از بانک اطلاعاتی استوار است. در بانک اطلاعاتی تمامی پارامترها در یک حد بهینه در نظر گرفته شده و شرایط موجود نسبت به آنها سنجیده می شود. در این روش عمر متوسط دیسک ها بر حسب ساعت در زمان حفاری برای هر دیسک از رابطه (۳) محاسبه می شود.

$$H_h = H_o K_D K_{rpm} K_N K_q / N_{TBM} \quad (3)$$

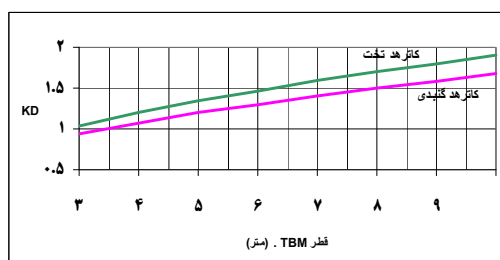
که در آن  $H_h$ : عمر دیسک بر حسب ساعت،  $N$ : تعداد دیسک ها،  $H_o$ : عمر دیسک از شکل (۲)،  $CLI$ : شاخص عمر دیسک و وابسته به خواص ساینده گی سنگ  $K_q$ : فاکتور تصحیح برای منظور کردن وجود کوارتز از شکل (۳)،  $K_D$ : فاکتور تصحیح برای منظور کردن تاثیر قطر TBM از شکل (۴) و  $K_{rpm}$ : فاکتور تصحیح سرعت چرخش کاترهداز رابطه (۴)،  $K_N$ : فاکتور تصحیح فاصله دیسک ها بر مبنای فاصله داری ۶۵ میلی متر که از رابطه (۵) محاسبه می شود.



شکل (۲): مقادیر  $H_o$  برای ابزار برش



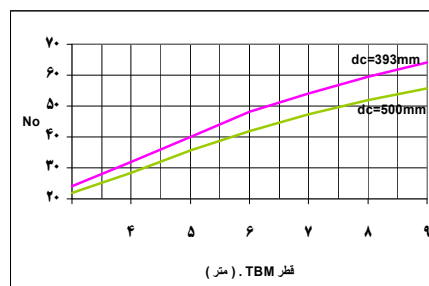
شکل (۳): مقادیر  $K_q$  برای سنگ های مختلف



شکل (۴): مقادیر  $K_D$  برای انواع کله حفار

$$K_{rpm} = 50 / (D \cdot rpm) \quad (۴) \quad K_N = \frac{N_{TBM}}{N_o} \quad (۵)$$

که در آن rpm سرعت چرخش کله حفار (دور بر دقیقه)، D قطر تونل (متر) و  $N_o$  تعداد دیسک های نرمال ( از شکل (۵) ) [۵].



شکل (۵): تعداد دیسک های نرمال

## ۸- محاسبه نرخ مصرف دیسک

نرخ مصرف دیسک می تواند در مسائل فنی کوتاه مدت ، بهره وری کل پروژه و نیز در افزایش هزینه ها سهم بسزایی داشته باشد. زمان مورد نیاز برای تعویض ابزار برش علاوه بر هزینه مورد نیاز جهت تامین تیغه ها، توقف عملیات را در پی خواهد داشت که این توقف زیان های مالی زیادی را به پروژه تحمیل خواهد کرد. بدیهی است تعیین هر چه دقیق تر عمر مفید ابزار برش در موفقیت پروژه

بسیار موثر باشد. در این پروژه مسیر تونل از نظر ساختار به ۹ منطقه تقسیم شده است. مشخصات دستگاه نیز در جدول (۲) آورده شده است. اطلاعات جدول (۲) با توجه به مطاب ذکر شده و داده های موسسه حراء بدست آمده اند.

جدول (۲): محاسبه پارامترهای نرخ مصرف دیسک

واحد های زمین شناسی									پارامتر
Crz ***	Mdg	Tsh	Sts		Gta				
			۲	۱	۴	۳	۲	۱	
مونزو گابرو، مونزو دیوریت	ماسه سنگ، کنگلومرا، توف شیلی	شیل، توف های شیلی، توف و ماسه سنگ	توف سبز، توف های آندزیتی، توف شیلی				لیتولوژی [۶]		
۵>	۵>	۲۵	۲۵	۲۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	q(%) [۶]
۳۰	۹۰	۶۰	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	۱۰۰	۷۵	۴۰	UCS[۶]
۰/۵>	۱/۲	۲/۲	۲/۸	۲/۸	۲/۵	۲	۱/۵	۰/۵	CAI
۱/۷<	۱/۷<	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۴	۱/۴	۱/۴	۱/۴	K <sub>q</sub>
۱/۳									K <sub>D</sub>
۱/۴۰									K <sub>rpm</sub>
۲۵									N <sub>TBM</sub>
۰/۷									K <sub>N</sub> **
۱۰۰<	۱۶	۵۰	۱۱	۱۱	۱۱	۱۶	۳۸	< ۱۰۰	CLI
(۱۷ اینچ) ۴۳۲ میلیمتر									d[۶]

\*: حداکثر سرعت کاترهد ۱۱ دور بر دقیقه است که پیش بینی می شود از ۷۰٪ توان آن (۷،۷ دور بر دقیقه) استفاده شود.

\*\* : N<sub>۰</sub> از شکل (۵) برابر با ۳۶.

\*\*\*: حفاری با انجام عملیات پیش تزریق (سیمان تیپ یک).

با توجه به مقادیر ذکر شده در جدول (۲) و شرایط لیتولوژی مناطق مختلف، نتایج حاصل در جدول (۳) آورده شده است.

جدول (۳): محاسبه نرخ مصرف دیسک

واحد های زمین شناسی									پارامتر
***Crz	Mdg	Tsh	Sts		Gta				
			۲	۱	۴	۳	۲	۱	
			روش RMI						
۱۷۰.<	۷۵	۱۲۰	۶۰	۶۰	۶۰	۷۵	۱۱۰	۱۶۰	H <sub>o</sub>
۱۵/۴	۶/۸	۷/۷	۳/۸	۳/۸	۴/۵	۵/۶	۸/۲	۱۲	H(hours) رای یک تیغه منفرد
۳۸۵	۱۷۰	۱۹۲/۵	۹۵	۹۵	۱۱۲	۱۴۰	۲۰۵	۳۰۰	H(hours) برای کل تیغه ها
روش CMS									
۱۳/۵>	۵/۶	۳/۱	۲/۴	۲/۴	۲/۷	۳/۴	۴/۵	۳/۵	RL(ft)×۱۰. <sup>۶</sup>
۶۰۸>	۲۵۴	۱۳۸	۱۱۰	۱۱۰	۱۲۲	۱۵۲	۶۰۳	۶۰۸	h <sub>r</sub> (hours)

## ۵- نتیجه

به دلیل تنوع ساختار لیتولوژی ناحیه، محدوده پیش بینی برای عمر مفید تیغه ها توسط هر دو روش وسیع می باشد. روش CMS با استناد به معادلات ریاضی و در اختیار داشتن مقدار عددی اندیس سرشار عمر مفید تیغه ها را محاسبه می نماید. به دلیل وابستگی این روش به مقدار شاخص سرشار، تعیین صحیح این اندیس برای دقیق بودن محاسبات ضروری می باشد. پارامترهای مدل RMI قابل سنجش بوده و نیاز به انجام آزمایشات پیچیده ندارد. همانطور که ذکر شد در پروژه مورد بحث آزمایش مربوط به CAI و CLI صورت نگرفته است. بدهی است به دلیل تخمین شاخص سرشار در فرآیند محاسبات، پاسخ بدست آمده بوسیله مدل CSM از دقت لازم برخوردار نمی باشد. اما روش RMI به دلیل بانک اطلاعاتی وسیع خود و عدم وابستگی مستقیم به نتایج آزمای CLI از اعتبار بالایی برخوردار می باشد. از آن رو در مقاله حاضر به نتایج این روش استناد می شود. در نتیجه باید در مواردی که انجام آزمایشات CAI و CLI مقدور نیست، برای محاسبه عمر مفید دیسک ها از مدل انستیتو مکانیک سنگ نروژ استفاده شود. همچنین توصیه می شود در صورت در اختیار داشتن اطلاعات مورد نیاز و اطمینان از دقت آنها از هر دو روش بهره گرفته شود. چرا که هر روش می تواند تنها بخشی از موارد موثر را پوشش دهد. در نظر گرفتن نتایج دو روش مختلف بیانگر رفتار حقیقی دیسک ها در حین حفاری خواهد بود. در انتها شایسته است تا از همکاری بی دریغ موسسه حرا تشکری ویژه بجا آورده شود.

## ۶- منابع

- [1]. *Cutters and Drilling Tools for Tunnelling and Mining*, WIRTH Company, 2006
- [2]. WILLIAMS, *Engineering and Design TUNNELS AND SHAFTS IN ROCK*, Department of the Army U.S. Army Corps of Engineers Washington, DC 20314-1000, 1997
- [3]. A. Bruland *hard rock tunnel boring vol 10 of 10, drillability statistics of drillability tests methods*, 1998
- [4]. Plinninger & Käsling & Thuro, *Wear Prediction in Hardrock Excavation Using the CERCHAR Abrasiveness Index (CAI)*, EUROCK 2004 & 53rd Geomechanics Colloquium. Schubert
- [5]. Bruland. A, *TBM Tunneling, PREDICTION MODEL FOR PERFORMANCE AND COSTS*, The Norwegian University of Science and Technology, 2002

[۶]. اطلاعات موجود در دفتر فنی موسسه حراء، بهار ۱۳۸۶