

بررسی تاثیر شرایط زمین‌شناسی و پارامترهای عملیاتی بر عمر دیسک برشی در تونل انتقال آب قمرود

پژوهشی

ابراهیم فرخ*

۱- استادیار؛ دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک)، e.farrokh@aut.ac.ir

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۹/۰۱/۰۵؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۹/۰۵/۲۵

شماره صفحات: ۱۶۳ تا ۱۸۳

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2020.9499.1391

واژگان کلیدی	چکیده
ماشین تونل‌زنی عمر دیسک برشی امتیاز توده‌سنگ مقاومت تک محوری پارامترهای عملیاتی	یکی از عوامل مهم تاثیرگذار روی هزینه‌های تمام شده و زمان لازم برای اجرای یک پروژه‌ی تونل‌سازی با دستگاه حفاری <i>TBM</i> ، میزان عمر دیسک‌های برشی است. از جمله مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار روی عمر دیسک برشی، پارامترهای زمین‌شناسی (از جمله امتیاز توده‌سنگ، مقاومت تک محوری ماده‌سنگ) و پارامترهای عملیاتی (از جمله نیروی عمودی و نیروی غلتشی اعمال شده به دیسک برشی) است. در این پژوهش با به کارگیری اطلاعات زمین‌شناسی و عملیاتی حفر تونل در طول ۱۸ کیلومتر قطعات ۳ و ۴ تونل انتقال آب قمرود، به بررسی تاثیر پارامترهای یاد شده روی عمر دیسک‌های برشی با استفاده از تحلیل آماری پرداخته شده است. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که با افزایش نیروی عمودی و نیروی غلتشی، میزان عمر دیسک برشی کاهش می‌یابد. در این مطالعه، بهترین نتیجه تحلیل‌های آماری انجام شده روی اطلاعات حفاری برای برآورد عمر دیسک برشی، به یک ترکیب از نیروی غلتشی، اندیس نفوذ میدانی و مقاومت تک محوری ماده‌سنگ، با ضریب تعیین ۷۵ درصد، منتهی شده است. با توجه به شرایط غالب زمین‌شناسی مسیر تونل قمرود در قطعات ۳ و ۴، فرمول به‌دست آمده عمدتاً برای شرایط زمین‌شناسی ضعیف تا متوسط توده‌سنگ، کارایی بهتری خواهد داشت.

۱- مقدمه

روی عمر دیسک‌های برشی انجام شده است که در آن‌ها عموماً با استفاده از خواص مقاومتی (مثلاً مقاومت تک محوری ماده‌سنگ) و خواص ساینده‌گی ماده‌سنگ (مثلاً شاخص سایش سرشار، *(CAI)* به برآورد عمر دیسک‌های برشی (با واحدهای مختلف) پرداخته شده است (*Farrokh & Kim, 2018*)، (*Yang, et al., 2015*)، (*Hassanpour, et al., 2014*)، (*Farrokh, et al., 2013*)، (*Rostami, 2008*)، (*Bruland, 1998*)

عمر دیسک‌های برشی در ارتباط مستقیم با هزینه‌ها و زمان تکمیل یک پروژه تونل‌سازی مکانیزه است. در این زمینه، برآورد صحیح این پارامتر می‌تواند کمک موثری در برآورد نرخ مصرف دیسک‌های برشی، زمان تعویض آن‌ها و هزینه‌های مربوطه داشته باشد. از این‌رو، برآورد پارامتر عمر دیسک برشی یا شاخص‌های مرتبط با آن، برای مهندسان تونل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در سالیان اخیر، مطالعات زیادی در ارتباط با بررسی پارامترهای تاثیرگذار

* تهران؛ خیابان حافظ؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن؛ طبقه‌ی پنجم؛ کدپستی: ۳۶۱۹۹۵۱۶۱؛ صندوق پستی: ۴۴۱۳ - ۱۵۸۷۵؛ شماره‌ی تلفن: ۶۴۵۴۲۹۵۲-

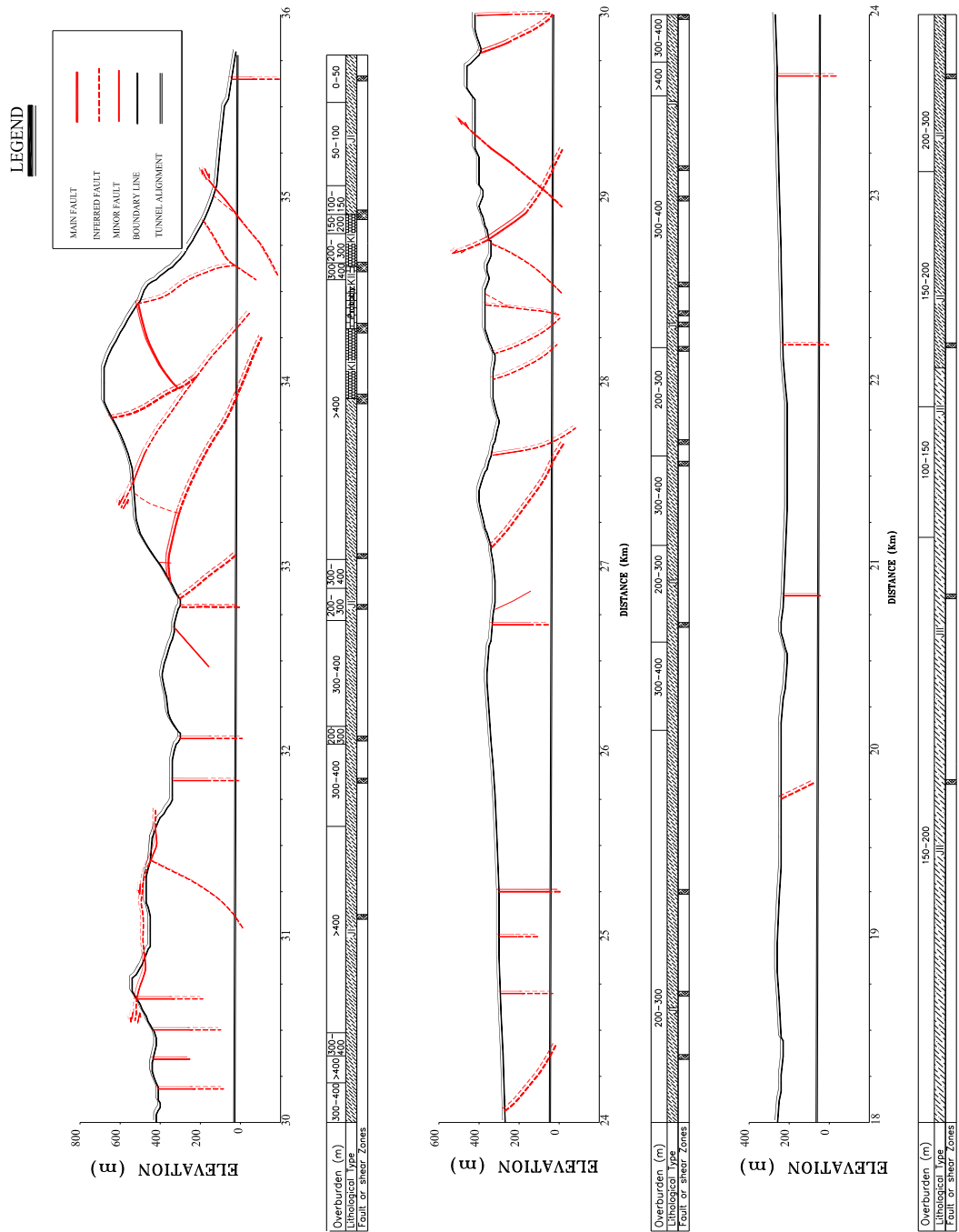
(Kim, 2018). با توجه به موارد یاد شده، برای بهبود عملکرد مدل‌ها و روابط تجربی ارایه شده توسط محققان مختلف و برای ارایه زمینه‌های تحقیقاتی جدید، همچنان لازم است که با استفاده از اطلاعات دقیق برداشت شده در پروژه‌های تونلی مختلف، اثر پارامترهای مهمی که تاکنون مورد توجه اساسی قرار نگرفته است، مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور، در این پژوهش برای بررسی اثر ترکیبی پارامترهای عملیاتی یاد شده در کنار پارامترهای زمین‌شناسی روی عمر دیسک برشی، یک بانک اطلاعاتی از پارامترهای زمین‌شناسی و پارامترهای عملیاتی برداشت شده حین اجرای ۱۸ کیلومتر انتهایی تونل انتقال آب قمرود (قطعات ۳ و ۴)، توسعه داده شده است و بر اساس آن به بررسی روابط بین پارامترهای یاد شده و دو پارامتر مقیاس بندی شده عمر دیسک برشی با واحد متر مکعب سنگ حفاری شده به ازای یک میلی‌متر سایش دیسک برشی و تعداد کیلومتر غلتش دیسک برشی به ازای یک میلی‌متر سایش دیسک برشی برای دیسک‌های ۱۷ اینچی پرداخته شده است.

۲- شرح پروژه

تونل انتقال آب قمرود دارای طولی حدود ۴۵ کیلومتر و قطر حفاری ۴/۵ متر است که با سه ماشین حفاری *TBM* اجرا شده است. قسمت مورد بررسی در این پژوهش، مربوط به طول ۱۸ کیلومتر انتهایی این تونل در قطعات سوم و چهارم می‌شود. شکل ۱، مقطع طولی زمین‌شناسی قطعات مربوطه را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج به‌دست آمده از مطالعات زمین‌شناسی صورت گرفته در محدوده مورد نظر، ۵ واحد زمین‌شناسی مهندسی مورد شناسایی قرار گرفته است. در جدول ۱، ویژگی‌های واحدهای زمین‌شناسی مهندسی، معرفی شده است. بر این اساس، مشاهده می‌شود که عمده طول تونل در واحدهای دگرگون یافته دوره ژوراسیک (شامل ماسه سنگ‌های ریزدانه کوارتزار با درجه دگرگونی اندک، شیل و اسلیت‌های متورق، شیست‌های گرافیتی، شیست‌های کوارتز و میکا دار و رگه‌های کوارتزیستی) قرار گرفته است. یک قسمت کمتر از ۲ کیلومتر مسیر تونل نیز در واحدهای آهکی و دولومیتی متورق و نیمه متورق دوره کرتاسه قرار دارد. به لحاظ طبقه‌بندی امتیاز توده‌سنگ (*RMR*)، عمده توده‌سنگ‌های مسیر تونل در طبقات ضعیف تا متوسط قرار

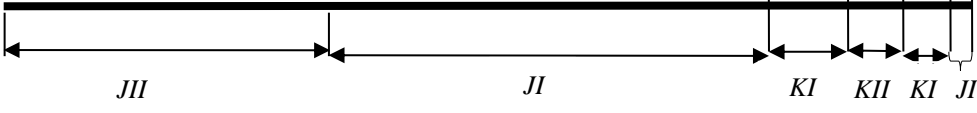
(Maidl, (Frenzel, 2011, 2012), (Rostami, 1997) (Wang, et al., (Gehring, 1995), et al., 2008) (Wan, (Zhao, 2015), (Yang, et al., 2015) 2012) (Du, et al., 2015), (Jin, et al., 2011), et al., 2002). در بیشتر این مطالعات، تمرکز اصلی روی استفاده از یک شاخص ساینده‌گی سنگ برای برآورد عمر دیسک‌های برشی یا نرخ مصرف آن‌ها بوده است (Paez, 2014) (Gehring, 1995) (Rostami, et al., 2005) (Hassanpour, et al., 2014). نکته قابل توجه این است که در روابط تجربی توسعه یافته توسط این محققان، پارامترهای عملیاتی *TBM* و اطلاعات طراحی دیسک‌های برشی (قطر، ظرفیت نیروی عمودی و ...)، عموماً در نظر گرفته نشده است. این می‌تواند یکی از علل اساسی قانع کننده نبودن میزان دقت برآورد این مدل‌ها برای صنعت و مهندسان تونل باشد (Liu, et al., 2017). (Schneider, et al., 2012). مهم‌ترین پارامترهای عملیاتی تأثیر گذار روی عمر دیسک‌های برشی شامل، نیروهای عمودی و غلتشی اعمال شده به دیسک‌های برشی و تعداد دور کله حفار است که باید در نظر گرفته شود. در کنار موارد یادشده، انتخاب واحد شاخص عمر دیسک برشی برای برآورد صحیح مصرف دیسک برشی، از اهمیت زیادی برخوردار است. در این زمینه پنز (Paez, 2014) از واحد کیلومتر به ازای مصرف یک دیسک برای دسته بندی کیفی شاخص عمر دیسک‌های برشی ۱۷ اینچی استفاده کرده است. فرنزل (Frenzel, 2005) از واحد مترمکعب به ازای مصرف یک دیسک برای ارایه یک رابطه بین عمر دیسک‌های برشی ۱۷ اینچی و شاخص سرشار استفاده کرده است. گرینگ (Gehring, 1995) از واحد میلی‌گرم به ازای یک متر پیمایش دیسک برشی برای توصیف شاخص سایش ویژه دیسک برشی استفاده کرده است و در نهایت برولند (Bruland, 1998) از واحد ساعت حفاری به ازای تعویض یک دیسک برشی برای برآورد عمر متوسط دیسک‌های برشی استفاده کرده است. واحد به کار گرفته شده توسط گرینگ (Gehring, 1995)، از جمله جامع‌ترین واحدهای به کار گرفته شده در تحقیقات مختلف است. علت این موضوع، در نظر گرفتن پارامترهای مختلف طراحی (مانند موقعیت دیسک‌های برشی روی کاترهد، عرض لبه و قطر دیسک برشی و ارتفاع مجاز سایش) است (Farrokh &

می‌گیرند. محدوده مورد مطالعه درون پهنه سندج - سیرجان قرار گرفته است که یک پهنه دگرگون یافته با زون‌های تکتونیزه و گسلی است.



شکل ۱- مقطع زمین‌شناسی تونل انتقال آب قمرود (قطع‌ات ۳ و ۴)

جدول ۱- پارامترهای مقاومتی و موقعیت واحدهای مختلف لیتولوژی در قطعات ۳ و ۴ تونل انتقال آب قمرود (SCE, 2002)



مسیر تونل		گونه لیتولوژیکی						گونه‌های لیتولوژیکی به ترتیب قرارگیری در مسیر تونل
								گونه‌های لیتولوژیکی به ترتیب قرارگیری در مسیر تونل
								توصیف
واحدهای دگرگون و نیمه دگرگون	گرافیت شیست و کوارتز شیست (JIIIa) و کوارتزیت (JIIIb) و کوارتزیت (JIIIc)	ماسه سنگ و شیل و اسلیت (JIb)	آهک‌های مقاوم میکربیتی که در بخش‌هایی دولومیتی شده‌اند	واحدهای خرد شده آهکی	آهک‌های رسی - ماسه‌ای و آهک‌های اربیتولیندار	آهک‌های مقاوم میکربیتی که در بخش‌هایی دولومیتی شده‌اند	ماسه سنگ و شیل و اسلیت (JIb)	
کیلومتر شروع	۳۳+۹۲۰	۲۲+۸۶	۳۳+۹۲۰	۳۴+۲۹۸	۳۴+۹۱۸	۳۴+۶۳۶	۳۴+۹۱۸	۳۶
کیلومتر پایان	۱۸	۱۸	۲۲+۸۶	۳۳+۹۲۰	۳۳+۹۲۰	۳۴+۲۹۸	۳۴+۶۳۶	۳۴+۹۱۸
حد اکثر ارتفاع روباره (m)	۴۲۵	۲۰۰	۶۶۵	۶۶۵	۶۶۵	۵۷۰	۳۲۰	۱۵۰
زیر واحدهای زمین‌شناسی	ندارد	JIIIc	JIIIb	JIIIa	JIb	JIa	ندارد	ندارد
σ_{ci}^* (MPa)	۳۰	۱۰۰	۵۰	۴۵	۴۰	۶۰	۷۵	۵۰
پارامتر m_i	۹	۲۰	۷	۷	۹	۱۹	۱۳	۱۳
RMR**			۵۵-۳۰				۷۵-۳۰	۵۵-۳۰
ν ***							۰/۲۵	
γ **** (Kg/m ³)							۲۷۰۰	
E***** (GPa)	۱/۳	۱۱/۲	۲/۷	۲/۵	۲/۷	۷/۷	۹/۷	۱/۳

* متوسط مقاومت تک محوری ماده سنگ

** امتیاز توده سنگ

*** ضریب یواسون توده سنگ

**** وزن مخصوص توده سنگ

***** مدول یانگ توده سنگ

۲-۱- مشخصات ماشین تونل‌زنی

در شکل ۲، نمایی از ماشین تونل‌زنی قطعات ۳ و ۴ تونل قمرود، نشان داده شده است. این ماشین از نوع سپر تلسکوپی است و کله حفار آن شامل، ۳۵ دیسک برشی با قطر ۱۷ اینچ یا ۴۳۲ میلی‌متر است. مشخصات فنی کله حفار ماشین تونل‌زنی در جدول ۲، نشان داده شده است.

۲-۲- بانک اطلاعاتی عملکرد TBM

اطلاعات به‌دست آمده از برداشت‌های روزانه حین اجرای تونل انتقال آب قمرود، در قالب یک بانک اطلاعاتی گردآوری شده است. این بانک اطلاعاتی با هدف بررسی روابط بین پارامترهای مختلف زمین‌شناسی و پارامترهای عملیاتی TBM با شاخص‌های عمر ابزار برشی تهیه شده است. طول مورد بررسی در این بانک اطلاعاتی، ۱۸ کیلومتر است و شامل، ۱۲۹ داده برداشت روزانه می‌شود.

این بانک اطلاعاتی شامل، پارامترهای مقاومت تک محوری سنگ (UCS)، عدد امتیاز توده‌سنگ RMR، نیروی عمودی اعمال شده به دیسک برشی (F_n)، نیروی غلطشی

اعمال شده به دیسک برشی (Fr)، نفوذ دیسک برشی در هر دور چرخش کاترهد (p) و شاخص نفوذ میدانی (FPI) (روابط ۱-۲) است.

شکل ۳، توزیع پارامترهای یاد شده را در این بانک اطلاعاتی نشان می‌دهد. نمودارهای جعبه‌ای UCS، RMR، p ، FPI، F_n و Fr دارای دامنه‌ای به‌ترتیب ۱۵ تا ۱۲۰، ۲۸ تا ۷۵ MPa، ۴/۵ تا ۲۴ mm، ۲/۹ تا ۴۰/۹ kN/mm/rev تا ۶۵ تا ۲۰۵ kN و ۴ تا ۱۴ هستند.

$$p = \frac{1000 PR}{60 RPM} \quad (1)$$

$$FPI = \frac{F_n}{p} \quad (2)$$

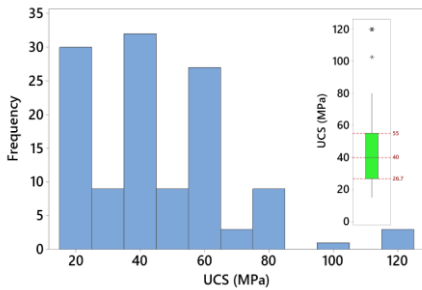
در این روابط PR نرخ نفوذ بر حسب RPM mm/hr سرعت چرخش کاترهد بر حسب rev/min، p میزان نفوذ دیسک برشی در هر دور چرخش کاترهد بر حسب mm/rev است، FPI شاخص نفوذ میدانی بر حسب kN/mm/rev و F_n نیروی عمودی دیسک برشی بر حسب kN.



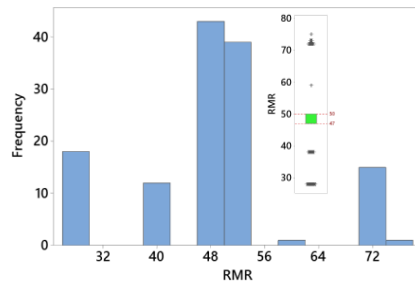
شکل ۲- نمایی از کله حفار ماشین تونل‌زنی تونل قمرود

جدول ۲- مهم‌ترین مشخصات ماشین حفاری تونل‌زنی در پروژه قمرود

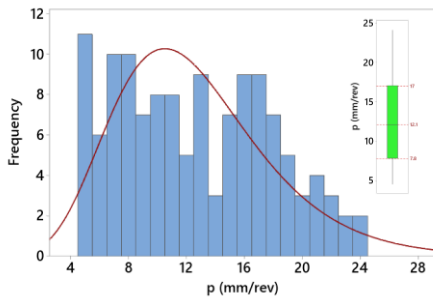
شرح	پارامتر
سپر تلسکوپی	نوع <i>TBM</i>
۴/۵۳ متر	قطر حفاری
۱۱ متر	طول سپرها
۱۹۹۰۰ کیلو نیوتن	حداکثر نیروی پیشران
۲۲۰ کیلو نیوتن	ظرفیت تحمل دیسک‌های برشی
۳۵ عدد	تعداد دیسک‌های برشی
۷۵ میلی‌متر	فاصله‌داری متوسط دیسک‌های برشی ناحیه میانی کله حفار
۱۰۰ تن	وزن ماشین و سپرها



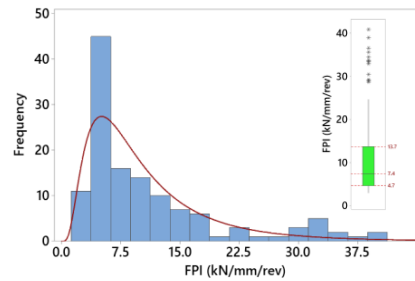
(ب) مقاومت فشاری تک محوری



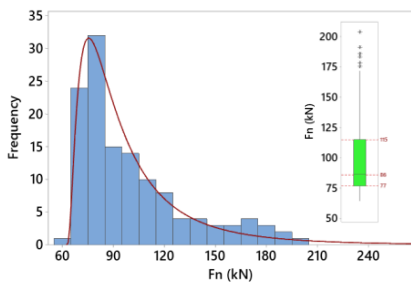
(الف) امتیاز توده‌سنگ



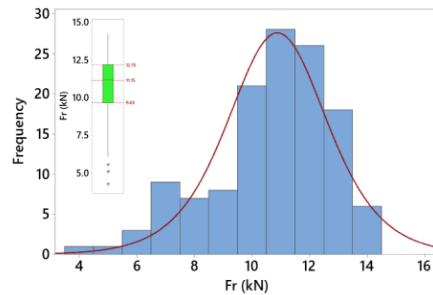
(ت) نفوذ ابزار برشی



(پ) شاخص نفوذ میدانی



(ج) نیروی عمودی دیسک برشی



(ث) نیروی غلطکی دیسک برشی

شکل ۳- توزیع پارامترهای اصلی موجود در بانک اطلاعاتی

۳- بررسی فاکتورهای عمر دیسک‌های برشی

در تونل قمرود

در صنعت تونلسازی، عمر دیسک برشی به مقدار زمان حفاری مرتبط با یک دیسک برشی از نقطه نصب تا تعویض آن اطلاق می‌شود. عمر دیسک‌های برشی، ارتباط مستقیم با میزان سایش حلقه فولادی نصب شده روی دیسک برشی دارد. سایش حلقه فولادی نیز به عوامل مختلفی وابسته است که می‌توان به دو دسته کلی، عوامل زمین‌شناسی (مقاومت ماده سنگ، شاخص‌های سایش، امتیاز توده سنگ و غیره) و پارامترهای عملیاتی و طراحی ماشین حفاری (موقعیت نصب دیسک برشی روی کله حفار، تعداد چرخش کله حفار، نیروهای عمودی و غلتشی، سختی فولاد دیسک برشی، قطر دیسک برشی و غیره) اشاره کرد.

در بررسی عمر دیسک‌های برشی و هزینه‌های مربوطه، فاکتورهای زیر دارای اهمیت هستند (Bruland, 1998):

- میزان متوسط عمر دیسک برشی که با توجه به جنس سنگ با واحدهای مختلفی از جمله hr/c (Hh) (ساعت حفاری به ازای تعویض یک دیسک برشی)، Km/c (Hk) (میزان مسافت چرخشی هر دیسک برشی)، m^3/c (Hf) (حجم حفاری شده به ازای تعویض یک دیسک برشی)، یا m/c (Hm) (متر از حفاری به ازای تعویض یک دیسک برشی) نشان داده می‌شود.
- عمر دیسک برشی در موقعیت‌های مختلف قرارگیری دیسک‌های برشی روی کله حفار
- دلایل عمده تعویض دیسک‌های برشی
- میزان سایش لبه دیسک برشی
- میزان مصرف قطعات یدکی دیسک برشی
- نسبت رینگ‌های تعویضی به توپی‌ها
- هزینه تعویض یک دیسک کاتر با توجه به نسبت فوق

با توجه به اطلاعات جمع آوری شده از برداشت‌های زمین‌شناسی حین اجرا و اطلاعات طراحی ماشین حفاری، تعدادی از پارامترهای یاد شده برای واحدهای مختلف زمین‌شناسی مسیر تونل قمرود محاسبه شده است که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود.

۳-۱- تعداد تعویض دیسک برشی در هر موقعیت

این مورد برای بررسی اصول طراحی کله حفار در ارتباط با طرح موقعیت‌های مختلف دیسک‌ها (شکل ۴) مفید است. دیسک‌های برشی روی کله حفار را می‌توان به لحاظ موقعیت و عملکرد به چهار گروه تقسیم بندی کرد.

۱- دیسک‌های برشی ناحیه مرکزی

۲- دیسک‌های برشی ناحیه میانی

۳- دیسک‌های برشی ناحیه قوس‌دار

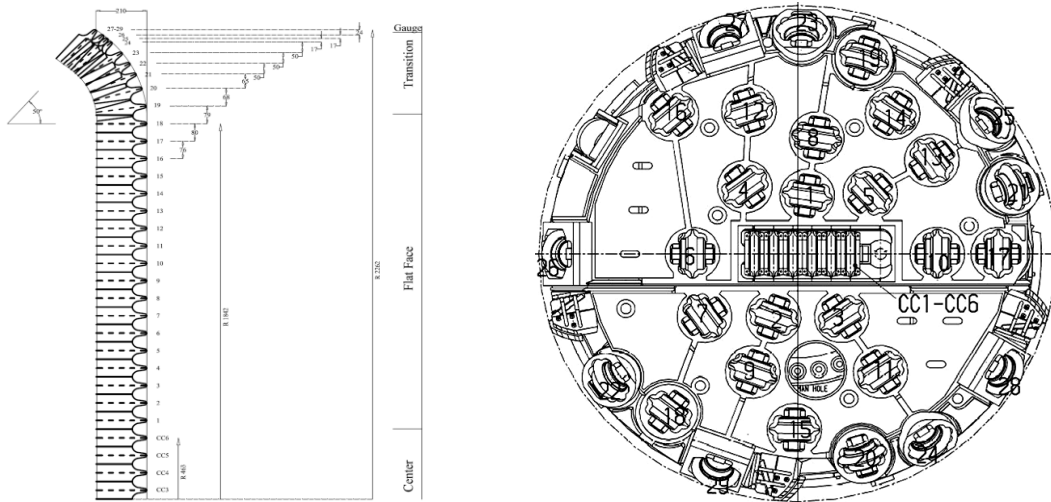
۴- دیسک‌های برشی پیرامونی

در شکل ۵، موقعیت و نمای دیسک‌های برشی گروه‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل ملاحظه می‌شود، نوع دیسک‌های برشی گروه مرکزی کاملاً با گروه‌های دیگر متفاوت است. از جمله مهم‌ترین خصوصیت این گروه، داشتن عملکرد سایشی متفاوت به لحاظ نزدیک بودن به مرکز کله حفار است. دیسک‌های برشی گروه ناحیه میانی، کاملاً عمود بر کله حفار هستند. زاویه انحراف (زاویه لبه دیسک برشی نسبت به سطح کله حفار) دیسک‌های برشی گروه‌های ناحیه قوس‌دار و پیرامونی به تدریج از ۹۰ درجه به حدود ۴۰ درجه تغییر پیدا می‌کند.

در نمودار شکل ۶، تعداد دیسک‌های برشی تعویض شده در هر موقعیت آورده شده است. همان‌گونه که در این نمودار مشاهده می‌شود، با افزایش فاصله دیسک برشی از مرکز، تعداد تعویض و به عبارت دیگر، مصرف دیسک‌ها افزایش می‌یابد، به طوری که بیشترین مقدار مربوط به دیسک‌های پیرامونی و کمترین آن، مربوط به دیسک‌های مرکزی است. این موضوع به دلایل زیر است:

- به دلیل فاصله بیشتر از مرکز کله حفار، طول مسیری بیشتر است که دیسک برشی پیرامونی در حین چرخش کاتر هد می‌پیماید (جدول ۳).
- زاویه متفاوت دیسک‌های برشی با سطح کله حفاری در ناحیه قوس‌دار و پیرامونی می‌تواند باعث اعمال نیروهای جانبی به این دیسک‌ها شود (جدول ۳).
- حد سایش مجاز برای دیسک‌های نواحی قوس‌دار و پیرامونی کمتر است (جدول ۳).

بررسی تاثیر شرایط زمین‌شناسی و پارامترهای عملیاتی بر عمر دیسک برشی...، ابراهیم فرخ، ص ۱۶۳-۱۸۳



ب) روی مقطع کله حفار

الف) روی سطح کله حفار

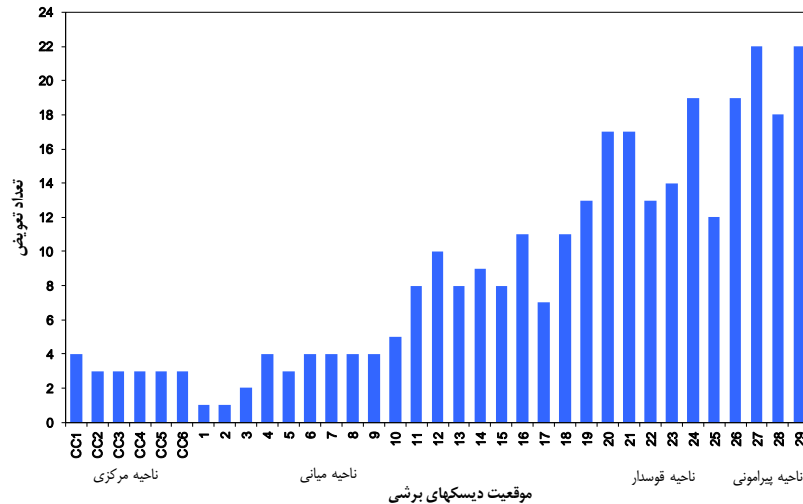
شکل ۴- طرح موقعیت‌های مختلف دیسک‌های برشی روی کله حفار



شکل ۵- انواع مختلف دیسک‌های برشی روی کله حفار

شود، ارتفاع لبه آن‌ها نسبت به دیسک‌های مجاور بیشتر شود و نیروهای بیشتری به آن‌ها وارد شود؛ بنابراین علت تعویض کمتر دیسک‌های ۱ تا ۳ در شکل ۶، انتقال نیرو از این دیسک‌ها به دیسک‌های تعویض شده مرکزی است.

لازم به ذکر است، به دلیل اعمال نیروهای جانبی زیاد به دیسک‌های مرکزی و برای افزایش راندمان حفاری در قسمت مرکز تونل، دیسک‌های ناحیه مرکزی عموماً زودتر از دیسک‌های مجاور خود تعویض می‌شوند که این باعث می‌



شکل ۶- تعداد دیسک‌های برشی تعویض شده در هر موقعیت در حفاری ۱۸ کیلومتر از طول تونل (بین کیلومتر ۳۶ تا ۱۸)

جدول ۳- ویژگی‌های دیسک‌های برشی‌های مختلف

زاویه نسبت به کله حفار (درجه)	فاصله از مرکز (cm)	حد مجاز سایش (mm)	گروه دیسک‌های برشی
۹۰	۵ تا ۴۶	۳۰	دیسک‌های برشی ناحیه مرکزی
۹۰	۵۳ تا ۱۸۱	۳۰	دیسک‌های برشی ناحیه میانی
۹۰-۴۰	۱۸۹ تا ۲۲۰	۳۰	دیسک‌های برشی ناحیه قوس‌دار
۴۰	۲۲۳	۱۵	دیسک‌های برشی پیرامونی

برشی) و Hr (طول پیمایش به ازای سایش یک میلی‌متر از لبه دیسک برشی) استفاده شده است. برای محاسبه Hr از رابطه (۳) می‌توان استفاده کرد.

$$Hr = 2\pi r \left(\frac{L}{pT_l} \right) \quad (3)$$

در این رابطه r فاصله شعاعی دیسک برشی بر حسب L mm طول حفاری شده تونل از موقعیت نصب تا موقعیت تعویض دیسک برشی بر حسب p mm نفوذ دیسک برشی بر حسب T_l mm/rev ارتفاع سایش یافته شعاعی دیسک برشی بر حسب Hr mm طول پیمایش به ازای سایش یک

۲-۳- عمر دیسک‌های برشی برای موقعیت‌های مختلف

عموماً برای مقایسه بهتر عمر دیسک‌های برشی در موقعیت‌های مختلف قرارگیری روی کله حفار، از واحدهای مقیاس بندی شده استفاده می‌شود. با توجه به اینکه، طول پیمایش دیسک‌ها و ارتفاع سایش مجاز دیسک‌های مختلف موجود روی کله حفار متفاوت است، می‌توان عمر دیسک برشی را با این دو پارامتر مقیاس بندی کرد. بر این اساس در این مطالعه از دو واحد $m^3/c/mm$ (حجم سنگ برجای حفاری شده به ازای سایش یک میلی‌متر از لبه دیسک

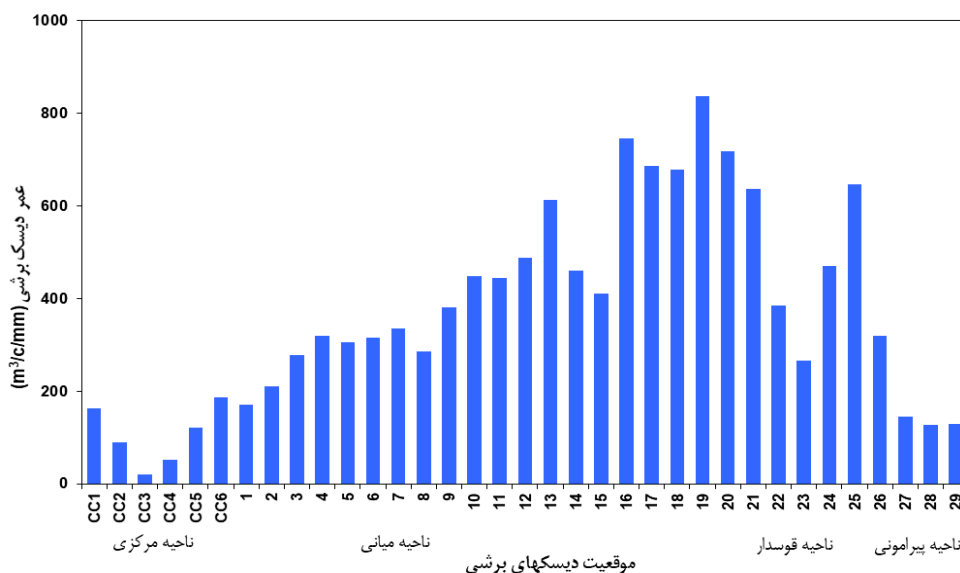
تنش خطی کمتر را به همراه داشته باشد. با توجه به اینکه بررسی اثر این موضوع به صورت جزئی با اطلاعات فقط یک تونل امکان‌پذیر نیست، در ادامه از واحد عمر متوسط دیسک‌های برشی برای کل دیسک‌های کله حفار استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که با توجه به اختلاف کمتر مقادیر عمر دیسک‌های برشی با واحد $km/c/mm$ برای موقعیت‌های مختلف قرار گیری روی کله حفار، در ادامه از این واحد در محاسبات استفاده می‌شود.

۳-۳- سایش متوسط دیسک‌های برشی

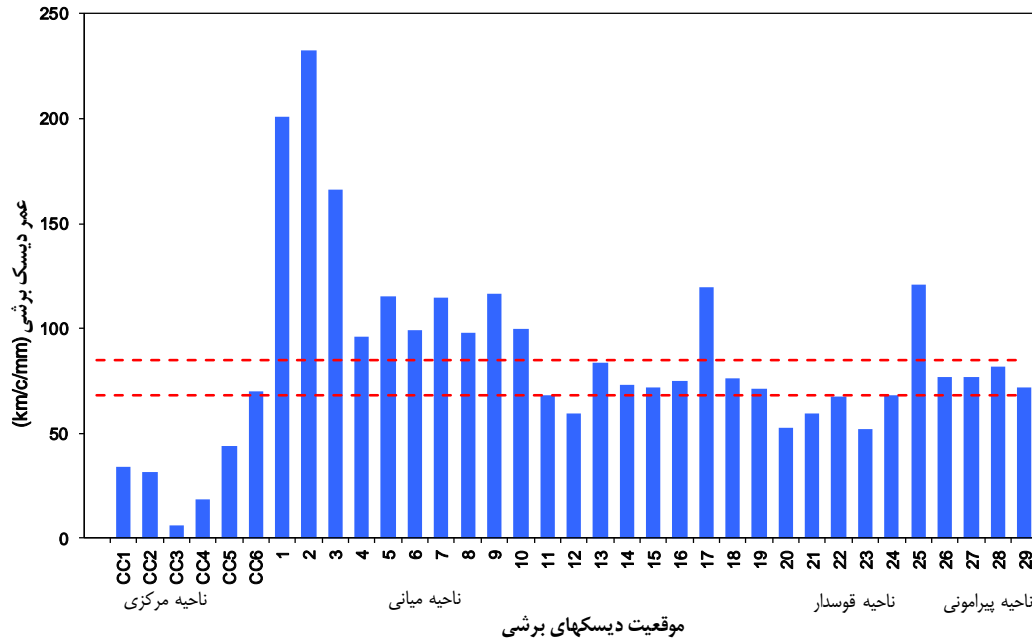
در حالت طبیعی، نرخ سایش دیسک‌های برشی به سمت دیسک‌های برشی محیطی افزایش می‌یابد. میزان سایش مجاز دیسک‌های برشی محیطی کمتر است؛ چرا که اولاً نیاز به تامین قطر حفاری است و ثانياً افزایش بیش از حد سایش دیسک برشی محیطی، منجر به ایجاد شرایط نامناسب برای دیسک‌های برشی محیطی جدید تعویض شده در زمان شروع مجدد حفاری می‌شود. میزان حداکثر سایش مجاز دیسک‌های برشی پیرامونی در این پروژه، ۱۵ میلی‌متر بوده و میزان حداکثر سایش مجاز سایر دیسک‌های برشی، ۳۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. میزان سایش واقعی دیسک‌های برشی به صورت تقریبی در گروه‌های مختلف در جدول ۴، ارایه شده است.

میلی‌متر از لبه دیسک برشی بر حسب $km/c/mm$

در نمودار شکل ۷، متوسط عمر دیسک‌های برشی در موقعیت‌های مختلف قرارگیری روی کله حفار آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مقادیر عمر دیسک‌های برشی بر حسب $m^3/c/mm$ مقادیر یکسانی را برای دیسک‌های برشی مختلف، نشان نمی‌دهد (شکل ۷)، اما بر حسب واحد $km/c/mm$ دیسک‌های برشی ۱۰ تا ۲۹، دارای عمر متوسط نسبتاً یکسان و بر اساس سطح اطمینان، ۹۵ درصد بین ۶۸ تا ۸۵ هستند (شکل ۸). البته مقادیر مرتبط با دیسک‌های ناحیه مرکزی، بسیار کمتر از ۵۰ و مقادیر دیسک‌های مجاور ناحیه مرکزی به نسبت بالاتر از ۸۰ هستند. این اختلاف در مورد دیسک‌های ناحیه مرکزی می‌تواند به دلیل نوع متفاوت تماس دیسک‌های ناحیه مرکزی با زمین به علت کم بودن شعاع چرخش باشد. نکته دیگر، قرارگیری ۶ دیسک مرکزی روی یک امتداد شعاعی است که می‌تواند منجر به اعمال تنش زیاد بر محور دیسک‌های ناحیه مرکزی شود که روی یک امتداد قرار دارند. این تمرکز تنش باعث توسعه ترک‌ها به بیرون ناحیه مرکزی می‌شود و میزان درگیری دیسک‌های مجاور را کم می‌کند. عموماً تعداد دیسک‌های ناحیه مرکزی ۴ یا ۸ (یک گروه چهارتایی و دو دیسک برشی دوقلو) انتخاب می‌شود. انتخاب طرح‌های یاد شده می‌تواند به نسبت طرح ۶ تایی، تمرکز



شکل ۷- عمر دیسک‌های برشی بر حسب $m^3/c/mm$



شکل ۸- عمر دیسک‌های برشی بر حسب $km/c/mm$

جدول ۴- میزان سایش واقعی در گروه‌های مختلف دیسک‌های برشی

طول تقریبی حفاری بر حسب متر برای مقدار سایش ۱ میلی‌متر	سایش متوسط تقریبی هنگام تعویض (mm)	گروه دیسک‌های برشی
۲۶۰	۲۲	دیسک‌های برشی ناحیه مرکزی
۱۳۰	۲۱/۷	دیسک‌های برشی ناحیه میانی
۵۰ تا ۶۰	۲۰	دیسک‌های برشی ناحیه قوس‌دار
۵۰ تا ۶۰	۱۴/۷	دیسک‌های برشی پیرامونی

۴-۳- دلایل عمده تعویض

عوامل مختلفی می‌تواند منجر به تعویض دیسک‌های برشی شوند. در این پروژه از طبقه‌بندی زیر برای مشخص کردن دلایل مهم تعویض استفاده شده است:

۱- سایش معمولی (سایشی که منجر به کاهش یکنواخت قطر دیسک برشی در جهات مختلف می‌شود)

۲- شکستن رینگ نگهدارنده به دلیل اعمال ضربات دینامیکی

۳- گیرکردن دیسک برشی که منجر به سایش نامتقارن آن می‌شود،

۴- شکستن دیسک

۵- نشستی روغن

۶- بریدن پیچ نگهدارنده دیسک برشی

در عکس شکل ۹، چند نمونه از انواع دیسک‌های تعویض شده در این پروژه با دلایل سایش متقارن و نامتقارن رینگ و شکستگی رینگ نشان داده شده است.

در شکل ۱۰، تعداد دیسک‌های برشی تعویض شده با علل سایشی و غیر سایشی از یکدیگر جدا شده‌اند. بر این اساس مشاهده می‌شود که تعداد دیسک‌های برشی آسیب دیده (عوامل غیر سایشی) در ناحیه قوس‌دار و پیرامونی بیشتر است.

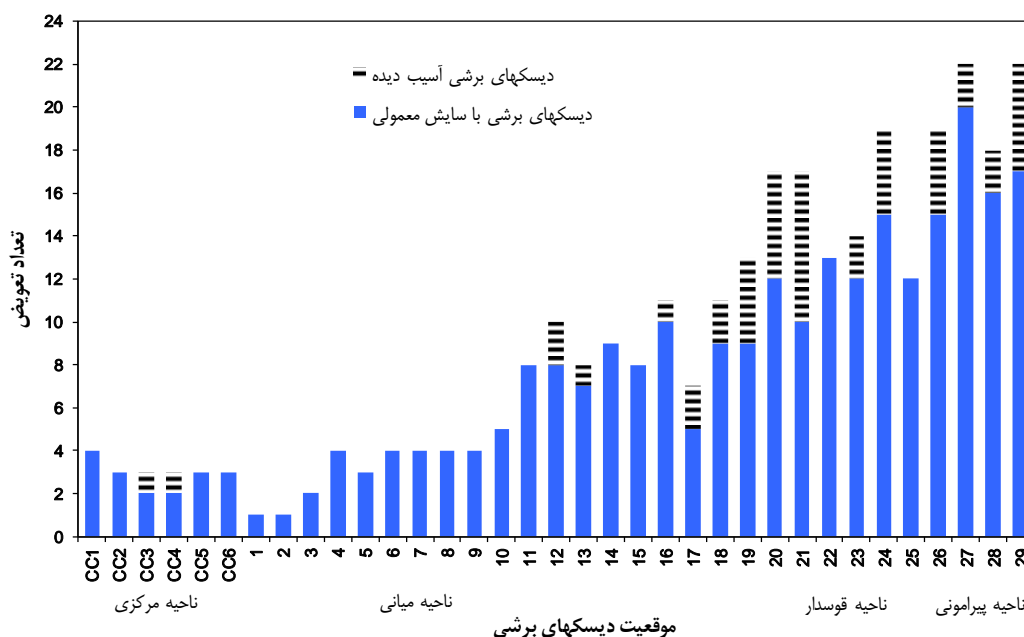


پ) سایش نامتقارن

ب) سایش معمولی

الف) شکستگی دیسک

شکل ۹- دلایل عمده تعویض دیسک‌های برشی



شکل ۱۰- تعداد دیسک‌های برشی تعویضی تا مترائز ۱۸۰۰۰ با جدا کردن دیسک‌های برشی آسیب دیده از سایشی

۳-۵- عمر دیسک برشی در زون‌های مختلف زمین‌شناسی

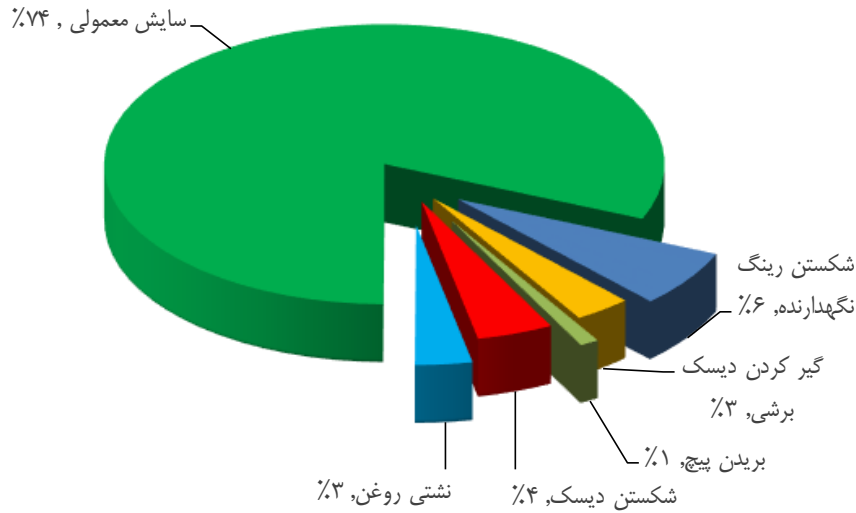
همان‌گونه که در نمودار شکل ۱۲، نشان داده شده است، با افزایش مقاومت و ساینده‌گی زمین، میزان عمر دیسک برشی کاهش می‌یابد. موضوع دیگری که در زمین‌های مختلف روی میزان و نحوه آسیب دیدگی و سایش دیسک کاترها تأثیرگذار است، تنوع سنگ‌ها در جبهه کار، ناپیوستگی‌های موجود در جبهه کار و همگن بودن یا نبودن زمین است. به طوری که در سنگ‌های همگن و سخت، مصرف دیسک کاترها در اثر سایش یکنواخت رینگ فولادی است. در زمین‌های نرم با میان لایه‌های سخت و ساینده یا در

یکی از دلایل این موضوع، افزایش نسبی سرعت خطی دیسک‌های برشی این موقعیت‌ها (به دلیل افزایش شعاع نصب آن‌ها روی کاترهد) و در نتیجه انتقال انرژی دینامیکی بیشتر از سینه کار ناهموار به آن‌ها است. درصد دیسک‌های برشی آسیب دیده در طول ۱۸ کیلومتر بر اساس اطلاعات شکل ۱۰، ۱۵ درصد است.

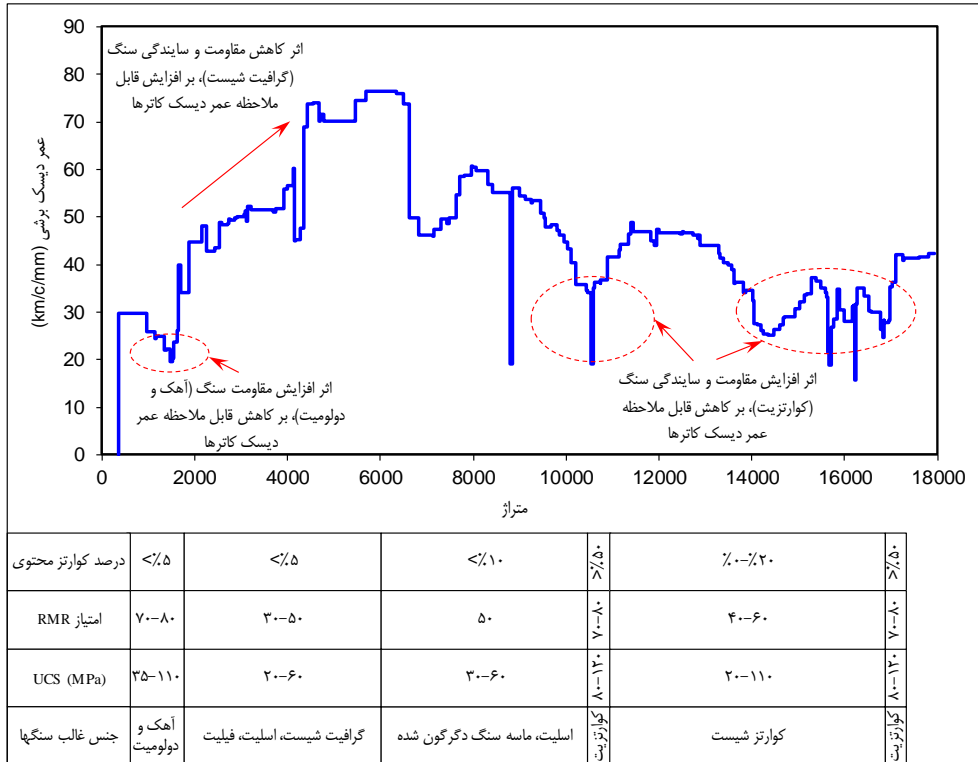
در شکل ۱۱، دلایل تعویض دیسک‌های برشی (که اطلاعات آن تنها تا مترائز ۵۰۰۰ موجود است)، آورده شده است. با توجه به وجود سازند آهکی نسبتاً مقاوم (با مقاومت تک محوری نزدیک به ۱۰۰ مگاپاسکال) در این بخش، سهم عوامل غیر سایشی در تعویض دیسک‌های برشی (۲۵ درصد)، بیشتر از کل مسیر است (۱۵ درصد).

دیسک کاتر، فرسایش نامتقارن رینگ به همراه تخریب قسمت مرکزی دیسک کاتر به وقوع می‌پیوندد.

سنگ‌های نسبتاً سخت دارای ناپیوستگی و سطوح ضعیف یا میان‌لایه‌های ضعیف، شکستن رینگ و در سنگ‌های خیلی ساینده و سخت و سنگ‌های رس دار، در اثر گیر کردن هاب



شکل ۱۱- دسته‌بندی دیسک‌های برشی تعویض شده تا متر از ۵۰۰۰ (تعداد کل دیسک‌های برشی: ۷۸ عدد)



شکل ۱۲- عمر دیسک برشی در طول مسیر حفاری شده

- شیب‌ها (شامل شیب، گرافیت شیب و ..) و اسلیت
 - کوارتز شیب، کلریت شیب
 پارامترهای عمر دیسک برشی در طول زون‌های زمین‌شناسی در جدول ۵، آورده شده است.
 همان‌گونه که مشاهده می‌شود با کاهش مقاومت (از مقادیر نزدیک به 110 MPa به مقادیر کمتر از 60 MPa) و کوارتز محتوای سنگ (از مقادیر نزدیک به ۲۰ تا ۵۰ درصد به مقادیر کمتر از ۵ درصد)، شاخص عمر دیسک برشی افزایش می‌یابد. اثر نوع سنگ بر شاخص عمر دیسک برشی در شکل ۱۲، برای واحدهای زمین‌شناسی ذکر شده، نشان داده شده است.

در طول قطعات ۳ و ۴ تونل انتقال آب قمرود، عمده مصرف دیسک کاترها (۸۵ درصد)، به صورت سایش متقارن رینگ‌ها بوده است و فقط در چند مورد، گیر کردن هاب و سایش نا متقارن و معدودی نیز، شکستن دیسک‌ها ثبت شده است. این عمدتاً به علت غالب بودن شرایط نسبتاً همگن و ضعیف توده‌سنگ‌ها در طول مسیر تونل بوده است.
 به‌منظور بررسی عمر دیسک‌های برشی در سنگ‌های مختلف، با توجه به شباهت پارامترهای مقاومتی و ساینده‌گی واحدهای مختلف، طول مسیر تونل به چهار زون کلی به صورت زیر تقسیم‌بندی شده است.

- آهک و دولومیت
- کوارتزیت

جدول ۵- پارامترهای عمر دیسک برشی در طول زون‌های زمین‌شناسی

ردیف	نوع سنگ غالب	مقاومت تک محوری (MPa)	شاخص ساینده‌گی سرشار	نرخ نفوذ (m/h)	Hr (km/c/mm)
۱	کوارتزیت	۸۰-۱۲۰	۷/۳	۲/۵	۴۵/۲
۲	آهک و دولومیت	۳۵-۱۱۰	۲/۱۸-۳/۱۲	۳/۱	۵۶
۳	کوارتز شیب و شیب سبز	۲۰-۱۱۰	-	۴/۲	۶۵/۸
۴	سایر (شیب‌ها، اسلیت و ...)	۲۰-۶۰	۲/۷-۲/۸	۴/۲	۹۰/۲
۵	کل مسیر تونل تا متر ۱۸۰۰۰			۴/۱	۸۴/۷

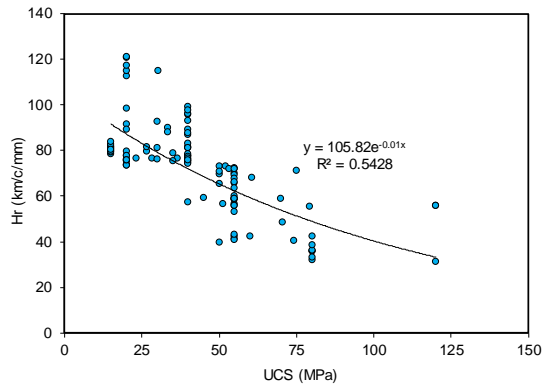
۴- توسعه رابطه جدید برای برآورد عمر دیسک برشی

هدف اصلی از این مطالعه، ایجاد یک مدل جدید پیش‌بینی شاخص عمر دیسک برشی در توده‌سنگ‌های دگرگون شده با کیفیت توده‌سنگ عمدتاً ضعیف تا متوسط است. به این منظور، یک بانک اطلاعاتی از داده‌های زمین‌شناسی برداشت شده (شامل داده‌های مرتبط با مقاومت تک محوری سنگ مرتبط با قطعات سنگی بزرگ موجود در مصالح حفاری (بر اساس نتایج آزمایش چکش اش‌میت) و برداشت‌های روزانه سینه کار برای امتیاز توده‌سنگ) و پارامترهای عملیاتی *TBM* برای ۱۸ کیلومتر از طول تونل ایجاد شد.

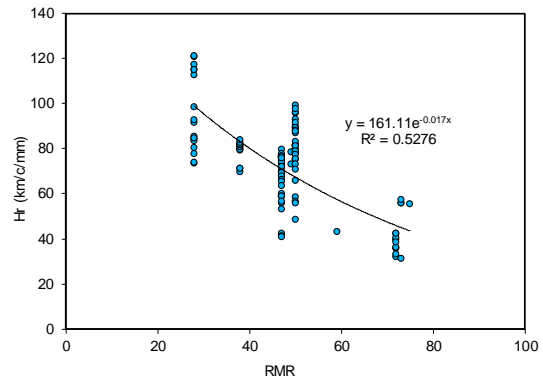
۴-۱- آنالیز رگرسیون ساده

با استفاده از آنالیز رگرسیون ساده می‌توان رابطه تجربی

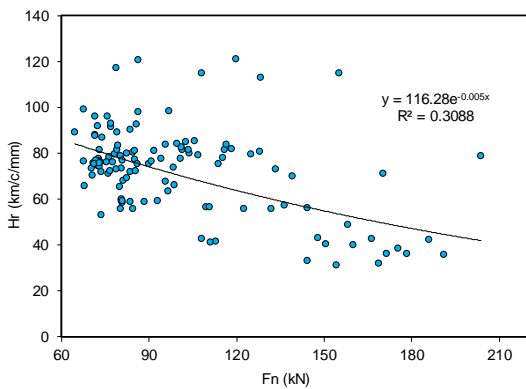
ساده بین متغیر هدف و یک متغیر مستقل را بررسی کرد.
 شکل ۱۳، روابط رگرسیون ساده بین شاخص عمر دیسک برشی و پارامترهای مختلف بانک اطلاعاتی از جمله *UCS*، *RMR*، *Fr*، *Fn* و *FPI* را نشان می‌دهد. *Fr*، *FPI* به ترتیب بیانگر نیروی متوسط عمودی دیسک برشی، نیروی متوسط غلتشی دیسک برشی و شاخص نفوذ میدانی است (رابطه ۱) (Farrokh, et al., 2012).
 همان‌طور که نشان داده شده است، از بین پارامترهای مورد بررسی، بهترین ضریب تعیین متعلق به مقاومت تک محوری و امتیاز توده‌سنگ است. افزایش پارامترهای نشان داده شده، باعث کاهش شاخص عمر دیسک برشی می‌شود. نکته قابل ملاحظه که در مطالعات دیگر کمتر مورد توجه قرار گرفته، اثر قابل ملاحظه پارامترهای عملیاتی (یعنی *Fr*، *FPI*) بر عمر دیسک برشی است.



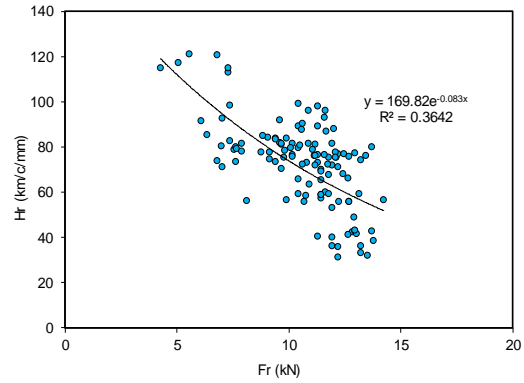
ب) مقاومت تک محوری توده‌سنگ



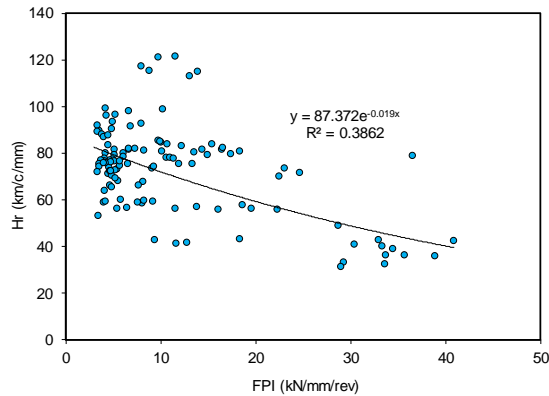
الف) امتیاز توده‌سنگ



ت) نیروی عمودی دیسک برشی



پ) نیروی غلطشی دیسک برشی



ث) شاخص نفوذ میدانی

شکل ۱۳- تحلیل‌های رگرسیون ساده بین شاخص عمر دیسک برشی (Hr) و سایر پارامترها

۴-۲- تجزیه و تحلیل رگرسیون چندگانه

پارامترهای موثر روی پارامتر، مورد ارزیابی استفاده می‌شود. در این مطالعه از نرم‌افزار تحلیل آماری *Minitab* استفاده شده است. با توجه به نتایج تحلیل رگرسیون ساده، ۵ پارامتر

از آنالیز رگرسیون چندگانه برای بررسی اثر ترکیبی

خطی می‌شود. در تحلیل‌های رگرسیون چند جمله‌ای از دو معیار مقدار پارامتر سطح معناداری کمتر از ۰/۰۵ (که نشان دهنده اهمیت بالای یک پارامتر و معنادار بودن رابطه بین پارامتر وابسته (یا ورودی) و پارامتر هدف در روش تحلیل رگرسیون چندگانه است) و ضریب تورم واریانس (VIF) کمتر از ۱۰ (که بیانگر همبستگی کم بین پارامترهای وابسته است) برای تحلیل معناداری یک رابطه رگرسیون چندگانه مورد استفاده قرار گرفته است. بر این اساس، خلاصه بهترین نتایج به‌دست آمده از این تحلیل‌ها در جدول ۶، آورده شده است.

اشاره شده در شکل ۱۳، به عنوان متغیرهای وابسته مورد استفاده قرار گرفتند. در تحلیل‌های انجام شده، از گزینه‌های آنالیز مرحله‌ای و آنالیز بهترین ترکیب‌های چند جمله‌ای استفاده شده است. برای اصلاح نرمال بودن توزیع مقادیر خطاهای برآورد، از لگاریتم طبیعی تمامی پارامترها (به‌عنوان مثال $Ln(Hr)$ به جای Hr) در تحلیل‌ها استفاده شده است. لازم به ذکر است که این نحوه از فرایند نرمال سازی، عموماً در تحلیل پارامترهای عملکرد TBM (به‌عنوان مثال مدل CSM (Rostami, 1997)) استفاده شده است. یکی از مزایای مهم این فرایند، این است که تابع به‌دست آمده غیر

جدول ۶- نتایج آنالیزهای رگرسیون چندگانه

شماره مدل	مدل	ضریب تعیین R^2 (درصد)
۱	$H_r = \frac{5219}{F_n^{0.5562} F_r^{0.7557}}$	۶۴
۲	$H_r = \frac{747}{FPI^{0.2346} F_r^{0.7952}}$	۶۶
۳	$H_r = \frac{4188}{F_n^{0.465} F_r^{0.526} UCS^{0.2022}}$	۷۳
۴	$H_r = \frac{4188}{FPI^{0.199} F_r^{0.559} UCS^{0.2011}}$	۷۵

گیرد، این است که توزیع مقادیر مقاومت فشاری تک محوری (UCS) و امتیاز توده‌سنگ (RMR) در این پروژه نشان می‌دهد که غالب توده‌سنگ‌ها دارای RMR کمتر از ۶۰ (طبقه‌بندی ضعیف تا متوسط بر اساس $Bieniawski$, 1989) و UCS کمتر از ۵۰-۶۰ مگا پاسکال (طبقه ضعیف تا متوسط بر اساس طبقه‌بندی $ISRM$ (1979)) است. از این رو، فرمول‌های به‌دست آمده برای این شرایط، کارکرد بهتری خواهد داشت.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی پارامترهای مرتبط با عمر دیسک‌های برشی در تونل انتقال آب قمرود (قطعات ۳ و ۴) پرداخته شده است. در این زمینه هدف اصلی، بررسی

از بین مدل‌های نشان داده شده در جدول ۶، بهترین مدل رگرسیون متعلق به ترکیب پارامترهای F_r ، FPI ، Fr ، UCS و Hr با ضریب تعیین ۷۵ درصد است. نکته قابل ملاحظه این است که افزایش شاخص‌های مقاومتی و پارامترهای عملیاتی مورد اشاره، همگی باعث کاهش عمر دیسک برشی می‌شود. مدل شماره ۱ در جدول ۶، نشان می‌دهد که درصد عمده‌ای از تغییرات Hr (۶۴ درصد)، توسط دو پارامتر عملیاتی Fr و F_n کنترل می‌شود. این خود بیانگر اهمیت بالای تأثیر پارامترهای عملیاتی TBM روی شاخص عمر دیسک‌های برشی است که در مطالعات قبلی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این نتیجه می‌تواند به یک تغییر اساسی در توسعه روابط مربوطه در آینده منجر شود. نکته مهمی که درباره نتایج این پژوهش باید مورد توجه قرار

بهترین رابطه بین شاخص عمر دیسک برشی و مقاومت فشاری تک محوری وجود دارد (با ضریب تعیین ۵۴ درصد). بر اساس آنالیزهای رگرسیون چندگانه، بهترین رابطه برای برآورد شاخص عمر دیسک برشی شامل، Fr ، FPI و UCS با ضریب تعیین ۷۵ درصد به‌دست آمده است.

لازم به ذکر است که در روابط توسعه یافته در این پژوهش، تأثیر پارامترهای ساینده‌ی سنگ در نظر گرفته نشده است. علی‌رغم وجود قسمت‌هایی از طول تونل در سنگ‌های کوارتزیتی با درصد کوارتز محتوای بالای ۵۰ درصد (حدود ۱۵۰ متر) و سنگ‌های آهکی و دولومیتی با مقاومت تک محوری نزدیک به ۱۰۰ مگاپاسکال (حدود ۱۲۰۰ متر)، غالب مسیر تونل در توده‌سنگ‌های شیستی و اسلیتی عمدتاً ضعیف تا متوسط با RMR بین ۳۰-۶۰ و با درصد کوارتز محتوای کمتر از ۲۰ درصد قرار دارد. از این رو، روابط پیشنهادی برای شرایط با مقاومت تک محوری ضعیف تا متوسط و کوارتز محتوای کم، جواب‌های بهتری به‌دست می‌دهد. در شرایط سنگ‌های بسیار ساینده و مقاوم، نتایج این مدل‌ها باید با نتایج سایر مدل‌های توسعه یافته در این زمینه که حاوی شاخص‌های سایشی (همانند شاخص سرشار) است، مقایسه شود. مزیت مهم روابط توسعه یافته در این پژوهش، در نظر گرفتن پارامترهای عملیاتی TBM است که در سایر مدل‌ها و روابط کمتر به آن‌ها توجه شده است. نتایج به‌دست آمده می‌تواند افق جدیدی برای توسعه آزمایش‌های آزمایشگاهی برای بررسی نیروهای عمودی و غلطشی (که عموماً در برآورد شاخص‌های عمر دیسک برشی در نظر گرفته نمی‌شوند)، در برابر محققان صنعت تونل قرار دهد. مولف در این زمینه قصد دارد، در آینده بر مبنای نتایج به‌دست آمده، بررسی‌های آزمایشگاهی جامعی را در این زمینه انجام دهد.

پارامترهای عملیاتی TBM (همانند سرعت چرخش TBM ، نیروی عمودی و غلتشی دیسک‌های برشی و میزان نفوذ دیسک‌های برشی) با در نظر گرفتن یک شاخص عمر مقیاس بندی شده با در نظر گرفتن دو پارامتر اصلی طول پیمایش دیسک برشی و ارتفاع سایش یافته دیسک‌ها است. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد، پارامتر عمر متوسط دیسک‌های برشی در موقعیت‌های مختلف قرارگیری روی کله حفار برای عمده دیسک‌های ناحیه میانی و پیرامونی دارای مقادیری برابر با ۶۸ تا ۸۵ $km/c/mm$ هستند. البته مقادیر مرتبط با دیسک‌های ناحیه مرکزی و دیسک‌های مجاور ناحیه مرکزی، متفاوت از مقادیر یاد شده است. این اختلاف به دلیل نوع متفاوت تماس این دیسک‌ها با زمین به‌علت کم بودن شعاع چرخش یا تمرکز تنش قابل توجه دیسک‌های ناحیه مرکزی و تأثیر آن بر دیسک‌های مجاور است.

بر اساس طبقه‌بندی دلایل تعویض دیسک‌های برشی، حدود ۱۵ درصد دیسک‌ها با دلایل غیر سایشی تعویض شده‌اند که عمدتاً مربوط به ناحیه قوس‌دار و پیرامونی هستند. این به دلیل اعمال ضربات دینامیکی بیشتر در این نواحی است که باعث ایجاد آسیب‌های غیر سایشی بیشتر می‌شود. آنالیز شاخص‌های عمر دیسک برشی در زون‌های مختلف زمین‌شناسی نشان می‌دهد که با کاهش مقاومت و ساینده‌ی سنگ، شاخص‌های عمر دیسک برشی افزایش می‌یابند.

نتایج آنالیزهای رگرسیون ساده بین پارامترهای زمین‌شناسی، پارامترهای عملیاتی و شاخص عمر دیسک برشی نشان می‌دهد که RMR ، UCS ، FPI ، Fr ، F_n و RMR از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر شاخص عمر دیسک برشی است. افزایش این پارامترها باعث کاهش شاخص عمر دیسک برشی می‌شود. نتایج این تحلیل‌ها نشان می‌دهد که

۶-مراجع

- Bieniawski, Z.T. (1989). *Engineering rock mass classifications: a complete manual*. John Wiley & Sons, New York.
- Bruland, A. (1998). *Hard rock tunnel boring*. Ph.D. Thesis, The Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.

- Du, L.J., Ji, S.S., Zuo, L.F., Kong, H.X., Xu, J.L., Du, Y.L. (2015). *Wear and consumption of large diameter disc cutters for hard rock TBM under giant porphyritic granite. J China Coal Soc*, 40(12), 2974–2978.
- Farrokh, E., & Kim, D.Y. (2018). *A discussion on hard rock TBM cutter wear and cutterhead intervention interval length evaluation. Tunn Undergr Space Technol*, 81, 336-357.
- Farrokh, E., Rostami, J. & Laughton, C. (2012). *Study of various models for estimation of penetration rate of hard rock TBMs. Tunn Undergr Space Technol*, 30: 110-123.
- Farrokh, E., Rostami, J., & Askilrud, O.G. (2013). *A discussion on TBM cutter change time and cutter life. SME Annual Meeting*.
- Frenzel, C. (2005) *Mechanical tunneling in hard rock. Performance and wear predictions. Lecture at the TU Munich*.
- Frenzel, C., (2012). *Modeling uncertainty in cutter wear prediction for tunnel boring machines. GeoCongress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering*, 3239–3247.
- Frenzel, C. (2011). *Disc cutter wear phenomenology and their implications on disc cutter consumption for TBM. In: 45th American Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. San Francisco, USA*.
- Gehring, K. (1995). *Prognosis of advance rates and wear for underground mechanized excavations. Felsbau*, 13(6), 439–448.
- Hassanpour, J., Rostami, J., Azali, S.T., & Zhao, J. (2014). *Introduction of an empirical TBM cutter wear prediction model for pyroclastic and mafic igneous rocks; a case history of Karaj water conveyance tunnel, Iran. Tunn Undergr Space Technol*, 43, 222–231.
- ISRM. (1979). *Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials, International Journal of Rock Mechanics and Mining*, 16, 135-140.
- Jin, Y.Q., Liu, Z.H., Yang, L., Zheng, G.S. (2011). *Analyzing the cause of TBM disc cutter wear in Yintao project No.9 tunnel. Constr Mech*, 6, 79–81.
- Liu, Q.S., Liu, J.P., Shi, K., Pan, Y.C., Zhang, X., Peng, X., Gong, Q.M., Du, L.J. (2017). *A wear rule and cutter life prediction model of a 20-in. tbm cutter for granite: a case study of a water conveyance tunnel in china. Rock Mech Rock Eng*.
- Maidl, B., Schmidz, L., Ritz, W., & Herrenknecht, M. (2008). *Hard rock tunnel boring machines. Wiley, New York*.
- Paez, C.V.G. (2014). *Performance, wear and abrasion in excavation mechanized tunneling in heterogeneous land. PhD thesis, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)*.
- Rostami, J. (1997). *Development of a force estimation model for rock fragmentation with disc cutters*

- through theoretical modeling and physical measurement of crushed zone pressure. Dissertation, Colorado School of Mines.*
- Rostami, J. (2008). *Hard rock TBM cutterhead modelling for design and performance prediction. Geomechanik und Tunnelbau, 1(1), 18-28.*
- Rostami, J., Ozdemir, L., Bruland, A., & Dahl, F. (2005). *Review of issues related to cerchar abrasivity testing and their implications on geotechnical investigations and cutter cost estimates. - In: HUTTON, J. D. (Hrsg.): RETC 2005 proceedings, S. 738 - 751, Littleton (Society for Mining, Metallurgy and Exploration).*
- SCE (2002). *Ghomrud tunnel geological engineering report for lots 3 and 4. Iran.*
- Schneider, E., Thuro, K., Galler, R. (2012). *Forecasting penetration and wear for TBM drives in hard rock—results from the ABROCK research project. Geomech Tunn, 5(5), 537–546.*
- Wan, Z.C., Sha, M.Y., Zhou, Y.L. (2002). *Study on disc cutters for hard rock (1)-Application of TB880E TBM in Qinling tunnel. Mod Tunnel Technol, 39(5), 1–11.*
- Yang, Y.D., Chen, K., Li, F.Y., & Zhou, J.J. (2015). *Wear prediction model of disc cutter. J China Coal Soc, 40(6), 1290–1296.*
- Zhao, Z.X. (2015). *Research on the wear of TBM disc cutter during the excavating of the mountain tunnel. Chin J Undergr Space Eng, 11(S1), 367–372.*

A Study of Cutter Life and Its Influential Factors in Ghomrud Water Conveyance Tunnel

E. Farrokh¹

1- Assistant Professor; Faculty of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology (Polytechnic),
e.farrokh@aut.ac.ir

Received: 24 Mar 2020; Accepted: 25 Aug 2020
DOI: 10.22044/tuse.2020.9499.1391

Keywords

TBM
Cutter Life
RMR
UCS
Operational Parameters

Extended Abstract

Summary

Cutter life is one of the major hard rock TBM performance parameters that has a direct effect on the total cost and completion time of a tunneling project. Major influential factors of the cutter life include geological parameters as well as operational and design characteristics. In this regard, the operational parameters are not deeply investigated in combination with

other factors mentioned above. In this paper, the results of statistical analyses of the cutter life information of Ghomrud water conveyance tunnel project (lots 3 and 4) along with its influential factors are presented. The results show the cutter rolling and normal force are among the most influential factors of the TBM operational parameters. An attempt to make a relationship between combination of these two factors along with uniaxial compressive strength (UCS) leads to a multi regression formula with a coefficient of determination of 75%.

Introduction

The life of disc cutters is directly related to the cost and time of completion of a mechanized tunneling project. In this regard, accurate estimation of this parameter can be an effective aid in estimating the consumption rate of disc cutters, their replacement time, and related costs. Therefore, estimating the disc cutter life parameter or related indicators is of special importance for tunnel engineers. In recent years, many studies have been conducted to investigate the parameters affecting the life of disc cutters using the strength properties (e.g. UCS) and abrasion properties of rock material (e.g. CAI). In the experimental relationships developed by the researchers, the operational parameters of TBM and the design information of disc cutters (i.e. diameter, normal force capacity, etc.) are generally not considered. This can be one of the main reasons for the unconvincing estimate of these models in the view of tunnel engineers. In order to improve the performance of these models, it is necessary to use field data collected in various tunnel projects to thoroughly examine the effect of important parameters that have not been considered so far. For this purpose, in this paper, to investigate the combined effect of normal force and rolling force along with the geological parameters on the disc cutter life, a database of geological and operational parameters of Ghomrud water transfer tunnel (lots 3 and 4) has been set up to develop formulas for two scaled parameters of disc cutter life with the unit of one cubic meter per millimeter of disc cutter wear and the number of kilometers of disc cutter rolling distance per one millimeter of cutter wear.

Methodology and Approaches

A database of daily information of geological and operational parameters of TBM tunneling has been set up for Ghomrud tunnel project lots 3 and 4. The length studied in this database is 18 km and it includes 129 records of daily data. This database includes the parameters of UCS, RMR, normal force applied to the disc cutter (F_n), rolling force (F_r), penetration per each revolution (p), and field penetration index (FPI). The major methodologies used in this paper include simple and multiple regression analysis using Minitab software.

Results and Conclusions

The results of the analyses made in this study show that the average life parameter of disc cutters in different positions on the cutter head for the discs in the face and peripheral areas is obtained equal to values from 68 to 85 km / c / mm. The values associated with the discs in the central area and the discs adjacent to the central area are different from the above-mentioned values. This difference is due to the different type of contact of these discs with the ground due to the small radius of rotation and/or stress concentration in this area. Analysis of disc cutter life indices in different geological zones shows that as the compressive strength and quartz content of rock decrease, disc cutter life indices increase. The results of simple regression analysis between geological parameters, operational parameters, and disc cutter life index show that F_n , F_r , FPI , UCS , and RMR are the most important parameters affecting the disc cutter life index. An increase in these parameters causes a reduction in the disc cutter life index. The results also show that the regression relationship between disc cutter life index and uniaxial compressive strength contains a coefficient of determination of 54%. Based on multiple regression analyzes, the best relationship for estimating disc cutter life index including F_r , FPI , and UCS is obtained with a coefficient of determination of 75%. It should be noted that in the relationships developed in this paper, the effect of rock abrasion parameters is not considered. It is also important to note that the majority of the tunnel length consists of schist and slate rocks with RMR value between 30-60 and quartz content less than 20%. Therefore, the proposed relationships give better answers for conditions with weak to moderate uniaxial strength and low content quartz.
