

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

رساله دکتری تخصصی مکانیک سنگ:

توسعه مدل پیش‌بینی سایش دیسک‌های برشی در حفاری سنگ‌های
درزه‌دار با ماشین‌های تونل‌زنی تمام مقطع با نگرشی بر مدلسازی عددی

نگارنده:

مرتضی کرمی

استاد راهنما:

دکتر شکراله زارع

استاد مشاور:

دکتر جمال رستمی

شهریور ۱۴۰۰

فرم ۱۱ صورتجلسه دفاع

این اثر با افتخار تقدیم می شود به

همسر نازنین و پسر دلبندم

تشکر و قدردانی

خداوند بزرگ را سپاسگزارم که مرا یاری کرد تا چون ذره‌ای ناچیز به سوی آفتاب علم - هرچند اندک - برخیزم.

صمیمانه از محضر اساتید ارجمندم جناب آقایان دکتر شکراله زارع و دکتر جمال رستمی تشکر میکنم که در نهایت بردباری، راهنمای اینجانب در تمامی مراحل این تحقیق بودند.

از همسر مهربان و پسرک شیرینم و نیز از پدر و مادر عزیزم که در تمامی سال‌های زندگی، همراه و همراز من بوده و هستند بی‌نهایت سپاسگزارم.

از داوران محترم جناب آقایان دکتر مجید نیکخواه، دکتر سید محمد اسماعیل جلالی و دکتر رحمان ترابی که زحمت مطالعه و داوری این تحقیق را بر عهده داشتند، کمال تشکر را دارم.

و در پایان از تمامی اساتید بزرگوار و پرسنل با اخلاق دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک خصوصاً جناب آقای شاه‌حسینی (دفتر دانشکده)، جناب آقای رجبی (آموزش دانشکده)، جناب آقای دکتر امیر جولایی، جناب آقای دکتر عین‌الله عامری و همچنین جناب آقای مهندس جاری (مدیر پروژه محترم تونل انتقال آب کرمان) صمیمانه تشکر می‌کنم.

تعمدنامه

اینجانب **مرتضی کرمی** دانشجوی دوره دکتری رشته **مهندسی معدن- مکانیک سنگ** دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **توسعه مدل پیش‌بینی سایش دیسک‌های برشی در حفاری سنگ‌های درزه‌دار با ماشین‌های تونل‌زنی تمام مقطع با نگرشی بر مدلسازی عددی تحت راهنمایی دکتر شکراله زارع** متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

چکیده:

با پیشرفت صنعت تونلسازی در یک قرن اخیر، استفاده از ماشین‌های حفاری مکانیزه تونل برای حفاری تونل‌های طویل، تونل‌های کوهستانی، تونل‌های شهری، تونل‌های تاسیسات زیربنایی و حتی در معادن زیرزمینی، به دلیل سرعت بالای حفاری و شرایط ایمنی مناسب، مرسوم و تا حدی اجتناب‌ناپذیر شده است. از آنجایی که هزینه سرمایه‌گذاری این روش نسبت به سایر روش‌های رایج تونلسازی بسیار بیشتر بوده بنابراین ضروری است تا با بررسی مسائل مختلف، هزینه‌های اجرایی آینده رصد شود تا مشکلات غیرمترقبه و پیش‌بینی نشده، عملکرد TBM و نهایتاً برنامه‌ریزی طرح را تحت تاثیر قرار ندهد. یکی از مسائل مهم و موثر بر عملکرد TBM، فرسودگی سایشی دیسک‌کاترها در طی فرایند حفاری سنگ ساینده و مقاوم است. فرسودگی سایشی دیسک‌کاتر که در اثر کاهش تدریجی و یکنواخت قطر دیسک‌کاتر ایجاد می‌شود ناشی از اندرکنش سنگ- ماشین در طی حفاری است و عوامل مختلفی می‌تواند این پدیده را تشدید کند و عمر سایشی دیسک‌کاتر را کاهش دهد. خصوصیات درزه‌داری سنگ از مهم‌ترین این عوامل است که در صورت لحاظ شدن در روابط نظری و تجربی، می‌تواند نتایج محافظه‌کارانه در پیش‌بینی عمر سایشی دیسک‌کاتر را اصلاح کند و به نتایج واقعی نزدیکتر نماید.

در این تحقیق بر اساس پایگاه داده‌ای که از پروژه تونل انتقال آب کرمان به دست آمده تأثیر خصوصیات مختلف سنگ و درزه‌ها بر فرسودگی سایشی دیسک‌کاتر و عمر آن مطالعه شده است. در بخش اول این تحقیق، عوامل مختلف موجود در پایگاه داده به روش آماری تحلیل شده‌اند و نهایتاً پارامترهایی که بیشترین همبستگی را با عمر سایشی دیسک‌کاتر داشته‌اند برای ارائه مدل تجربی پیش‌بینی عمر دیسک‌کاتر با استفاده از رگرسیون غیرخطی چندمتغیره انتخاب شده‌اند. این پارامترها شامل ضریب خردشدگی کل توده‌سنگ، مقاومت توده‌سنگ و شاخص سایش سرشار است. طبق مدل تجربی ارائه شده با ضریب همبستگی ۰,۸۰۰، عمر سایشی دیسک‌کاتر با ضریب خردشدگی کل توده‌سنگ رابطه مستقیم داشته و با مقاومت توده‌سنگ و شاخص سرشار سنگ رابطه عکس دارد. اعتبارسنجی این مدل بر اساس داده‌های دردسترس در دو مقطع زمین‌شناسی تونل آب‌بر نیروگاه پروژه چند منظوره اوما اويا در کشور سریلانکا بوده که نتایج ارائه شده توسط مدل تجربی با نتایج واقعی ثبت شده در پروژه خصوصاً در مقاطع شدیداً خردشده و درزه‌دار تطابق خوبی دارد.

در بخش دوم این تحقیق و به عنوان گام اول مدل سازی عددی، تاثیر پارامترهای مختلف بر عمر سایشی دیسک کاتر و سازوکار خردایش سنگ توسط TBM به کمک نرم افزار تجاری اجزای گسسته 3DEC که توسط شرکت آیتسکا توسعه یافته مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه نتایج مدل سازی دینامیکی حفاری دیسک کاتر تکی در سنگ بکر (بدون درزه) با نتایج مدل نظری CSM حاکی از اختلاف اندک و قابل قبول نتایج با یکدیگر است. پس از این صحت سنجی و در گام دوم مدل سازی عددی، با افزودن درزه ها به مدل عددی و انجام تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای مختلف عملیاتی TBM، درزه داری سنگ و هندسه دیسک کاتر نشان داده شد که افزایش RPM کاترهد، شعاع نصب دیسک کاتر بر روی کاترهد و نیز کاهش فاصله داری درزه ها باعث افزایش نفوذ TBM در سنگ و بهبود عملکرد آن می شود. همچنین فرسودگی سایشی دیسک کاتر با افزایش نرخ نفوذ، RPM کاترهد، فاصله داری درزه ها، کندی لبه دیسک کاتر و همچنین با کاهش شعاع نصب دیسک کاتر بر روی کاترهد افزایش می یابد. در این مدل، درزه ها با زاویه ۴۵ تا ۶۰ درجه نسبت به راستای نفوذ دیسک کاتر (یا پیشروی TBM) بیشترین تاثیر را در افزایش خردایش سنگ و کاهش تنش فون میز القایی در دیسک کاتر دارد. به عبارت دیگر، در چنین شرایط درزه داری، سرعت پیشروی TBM حداکثر بوده و دیسک کاترها دیرتر دچار فرسودگی سایشی می شوند. در گام نهایی مدل سازی عددی، تحلیل عددی حفاری توده سنگ تونل انتقال آب کرمان با TBM در مقیاس واقعی نشان می دهد که در توده سنگ هایی با شرایط خردشدگی بیشتر، تنش فون میز القایی در دیسک کاترها کمتر بوده و در نتیجه، فرسودگی سایشی دیسک کاترها نیز کمتر خواهد بود. علاوه بر این، بررسی سازوکار شکست سنگ نشان می دهد که تشکیل و گسترش زون خرد شده در سنگ در اثر اعمال نیروهای دیسک کاتر ابتدا در اثر تسلیم برشی رخ داده و با تداوم عملیات حفاری، گسیختگی کششی مضاف بر گسیختگی برشی منجر به خردایش سنگ و پیشروی TBM می شود.

کلمات کلیدی:

فرسودگی سایشی دیسک کاتر، عمر سایشی دیسک کاتر، شرایط درزه داری، مدل پیش بینی تجربی، تحلیل عددی دینامیکی، ماشین حفاری مکانیزه تمام مقطع تونل

لیست مقالات مستخرج از رساله:

- Tracking of disc cutter wear in TBM tunneling, a case study of Kerman Water Conveyance Tunnel, Morteza Karami, Shokrollah Zare, Jamal Rostami, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01931-7>
- Study of Common Wear Prediction Models for Hard Rock TBM Disc Cutters and Comparison with Field Observation in Kerman Water Conveyance Tunnel, Morteza Karami, Shokrollah Zare, Jamal Rostami, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01987-5>
- Introducing an Empirical Model for Prediction of Disc Cutters Life for TBM Application in Jointed Rocks, Morteza Karami, Shokrollah Zare, Jamal Rostami, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02166-w>

فهرست

فصل اول: کلیات	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- بیان مسئله	۲
۳-۱- ضرورت انجام تحقیق	۳
۴-۱- فرضیات تحقیق	۴
۵-۱- مراحل انجام تحقیق	۵
۶-۱- ساختار رساله	۶
فصل دوم: مبانی فرسودگی سایشی دیسک کاتر	۹
۱-۲- مقدمه	۱۰
۲-۲- دیسک کاتر TBM	۱۰
۳-۲- سازوکار فرسودگی دیسک کاترها	۱۲
۴-۲- انواع فرسودگی دیسک کاترها	۱۳
۵-۲- حد مجاز فرسودگی سایشی دیسک کاتر و نرخ آن	۱۴
۶-۲- عوامل موثر بر فرسودگی سایشی دیسک کاترها	۱۸
۱-۶-۲- ساینده‌گی سنگ	۱۹
۲-۶-۲- مقاومت فشاری سنگ	۲۰
۳-۶-۲- شرایط درزه‌داری سنگ	۲۱
۷-۲- پیش بینی فرسودگی سایشی دیسک کاتر	۲۲
فصل سوم: پیشینه مطالعات فرسودگی سایشی دیسک کاتر در حفاری سنگ	۲۵
۱-۳- مقدمه	۲۶
۲-۳- آزمایش‌های ساینده‌گی سنگ	۲۶
۱-۲-۳- مقیاس سختی موس	۲۶
۲-۲-۳- محتوی معادل کوارتز (EQC)	۲۷
۳-۲-۳- آزمایش ویکرز و ارائه عدد سختی ویکرز (VHN)	۲۷

۲۹.....	۴-۲-۳-آزمایش سایش دانشگاه علم و تکنولوژی نروژ (NTH/NTNU)
۳۱.....	۵-۲-۳- شاخص سایش سرشار (CAI)
۳۳.....	۵-۲-۳- شاخص سایش سنگ (RAI)
۳۵.....	۶-۲-۳- آزمایش جدید سایش (NAT) و شاخص فرسودگی دیسک (DWI)
۳۹.....	۷-۲-۳-آزمایش سایش فروروی غلتشی (RIAT)
۴۲.....	۳-۳- مدل های پیش بینی فرسودگی دیسک کاتر
۴۲.....	۱-۳-۳- مدل گهرینگ (۱۹۹۵)
۴۳.....	۲-۳-۳- مدل CSM (۱۹۹۷)
۴۴.....	۳-۳-۳- مدل NTNU (۱۹۹۸)
۴۵.....	۴-۳-۳- مدل میدل و همکاران (۲۰۰۱)
۴۵.....	۵-۳-۳- مدل بیناوسکی (۲۰۰۶)
۴۷.....	۶-۳-۳- مدل حسن پور و همکاران (۲۰۱۴)
۴۸.....	۴-۳- مدل سازی عددی فرایند برش سنگ و فرسودگی سایشی دیسک کاتر
۵۵.....	۵-۳- جمع بندی
۵۷.....	فصل چهارم: جمع آوری داده های میدانی
۵۸.....	۱-۴- مقدمه
۵۸.....	۲-۴- پایگاه داده
۵۹.....	۳-۴- تونل انتقال آب کرمان
۶۱.....	۴-۴- تحلیل آماری پایگاه داده
۶۶.....	۵-۴- جمع بندی
۶۷.....	فصل پنجم: تأثیر خصوصیات سنگ درزه دار بر عمر سایشی دیسک کاترها
۶۸.....	۱-۵- مقدمه
۶۸.....	۲-۵- پارامترهای موثر بر عمر سایشی دیسک کاتر
۶۹.....	۱-۲-۵- پارامترهای سنگ بکر
۷۰.....	۲-۲-۵- پارامترهای توده سنگ

۷۰.....	۵-۲-۱- مقاومت فشاری توده سنگ.....
۷۱.....	۵-۲-۲- ضریب خردشدگی کل توده سنگ.....
۷۳.....	۵-۳- رگرسیون خطی تک متغیره.....
۷۵.....	۵-۴- مدل تجربی جدید پیش بینی عمر سایشی دیسک کاتر.....
۷۹.....	۵-۵- اعتبارسنجی مدل تجربی جدید پیش بینی عمر دیسک کاتر.....
۸۶.....	۵-۶- جمع بندی.....
۸۹.....	فصل ششم: مدل سازی عددی تاثیر مشخصات هندسی درزه ها بر فرسودگی سایشی دیسک کاترها.....
۹۰.....	۶-۱- مقدمه.....
۹۰.....	۶-۲- معرفی نرم افزار اجزای گسسته 3DEC.....
۹۰.....	۶-۳- مدل سازی عددی فرسودگی سایشی دیسک کاتر.....
۹۱.....	۶-۳-۱- مدل سازی عددی برش سنگ بکر توسط دیسک کاتر تکی.....
۹۱.....	۶-۳-۱-۱- هندسه مدل.....
۹۲.....	۶-۳-۱-۲- معیار رفتاری و خصوصیات مواد.....
۹۴.....	۶-۳-۱-۳- شرایط مرزی.....
۹۶.....	۶-۳-۱-۴- نیروهای برش دیسک کاتر به عنوان خروجی مدل.....
۹۹.....	۶-۳-۱-۵- حجم ناحیه گسیخته شده و تنش فون میزز القایی به عنوان خروجی مدل.....
۱۰۱.....	۶-۳-۲- مدل سازی عددی برش سنگ درزه دار توسط دیسک کاتر تکی.....
۱۰۱.....	۶-۳-۲-۱- پارامترهای عملیاتی دیسک کاتر.....
۱۰۶.....	۶-۳-۲-۲- شرایط درزه داری سنگ.....
۱۰۸.....	۶-۳-۲-۳- خصوصیات هندسی دیسک کاتر.....
۱۱۱.....	۶-۳-۲- مدل سازی عددی برش سنگ درزه دار توسط کاترهد.....
۱۲۲.....	۶-۴- جمع بندی.....
۱۲۵.....	فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهادها.....
۱۳۱.....	مراجع.....

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: فرایند گسترش ترک در اثر عملکرد دیسک کاتر ۴
- شکل ۱-۲: انواع مرسوم دیسک کاتر: (الف) مقطع ثابت؛ (ب) گوه‌ای ۱۱
- شکل ۲-۲: اجزای اصلی تشکیل دهنده دیسک کاتر مقطع ثابت ۱۲
- شکل ۳-۲: سازوکارهای سایش در ابزار برش بر اساس نوع حرکت نسبی ابزار برش و جسم ساینده ۱۲
- شکل ۴-۲: دسته‌بندی انواع فرسودگی دیسک کاترها ۱۳
- شکل ۵-۲: انواع فرسودگی دیسک کاترها ۱۴
- شکل ۶-۲: گروه‌بندی دیسک کاترها بر روی کاترهد بر حسب موقعیت نصب آن‌ها ۱۶
- شکل ۷-۲: اندازه‌گیری میزان فرسودگی سایشی دیسک کاتر ۱۶
- شکل ۸-۲: نرخ سایش یک نمونه دیسک کاتر در سنگ سخت در طی ساعات کارکرد TBM ۱۷
- شکل ۹-۲: تعداد تعویض دیسک کاتر بر حسب نوع فرسودگی و موقعیت دیسک کاتر در پروژه گرانیته بوکیت تیمه در سنگاپور ۱۸
- شکل ۱۰-۲: تاثیر مقاومت فشاری سنگ بر متوسط عمر سایشی دیسک کاتر ۱۷ اینچی در سنگ‌های مختلف ۲۰
- شکل ۱۱-۲: اثر مقاومت فشاری تک‌محوری بر عمر دیسک کاترها در پروژه تونل انتقال آب قم‌رود ۲۱
- شکل ۱۲-۲: تغییرات مصرف دیسک کاتر در سنگ‌هایی با درجه خردشدگی متفاوت ۲۲
- شکل ۱-۳: آزمایش سختی ویکرز ۲۹
- شکل ۲-۳: آزمایش مقدار سایش کاتر فولادی (AVS) ۳۰
- شکل ۳-۳: دستگاه آزمایش سرشار ۳۲
- شکل ۴-۳: نمونه مقادیر RAI و دامنه آن برای سنگ‌های مختلف ۳۴
- شکل ۵-۳: ارتباط بین CAI و RAI ۳۵
- شکل ۶-۳: پیکره‌بندی اولیه آزمایش جدید سایش ۳۷
- شکل ۷-۳: همبستگی بین شاخص DWI و شاخص‌های CAI، CLI و AVS ۳۷
- شکل ۸-۳: قاب اندازه‌گیری میکرومتری برای دیسک کاتر در آزمایش جدید سایش در مقیاس بزرگ ۳۸
- شکل ۹-۳: همبستگی DWI و CAI با افت وزنی ویژه دیسک کاتر ۳۹
- شکل ۱۰-۳: مقایسه نتایج آزمایش RCM و روابط پیشنهادی ۳۹
- شکل ۱۱-۳: آزمایش سایش فروروی غلتشی ۴۰
- شکل ۱۲-۳: افت وزنی و میزان فروروی دیسک‌ها در سنگ‌های مختلف طی آزمون RIAT ۴۱
- شکل ۱۳-۳: مقایسه نتایج آزمون RIAT با شاخص‌های CAI، AVS و CLI ۴۱
- شکل ۱۴-۳: چارتی برای پیش‌بینی عمر سایشی دیسک کاتر برای سنگ‌های آذرین و مافیک ۴۸
- شکل ۱۵-۳: مسیر حرکت دیسک کاتر در مدل‌سازی عددی ۴۹
- شکل ۱۶-۳: تغییرات نیروهای برشی دیسک کاتر در مدل عددی بر حسب زمان ۵۲
- شکل ۱۷-۳: ترک‌های ایجاد شده در سنگ تحت شرایط مختلف تحلیل عددی ۵۳
- شکل ۱۸-۳: توزیع تنش در سنگ و دیسک کاتر در تحلیل عددی ۵۴

- شکل ۳-۱۹: ناحیه تماس بین یک تک دیسک و سنگ و نیروهای برش (نرمال، غلتشی و جانبی) دیسک کاتر ۵۵
- شکل ۳-۲۰: فرایند عملیات برش توسط یک تک دیسک با روش المان محدود ۵۵
- شکل ۴-۱: (الف) زمین‌شناسی ایران؛ (ب) موقعیت پروژه تونل انتقال آب کرمان ۶۲
- شکل ۴-۲: مقطع طولی زمین‌شناسی قطعه شمالی تونل انتقال آب کرمان ۶۳
- شکل ۴-۳: سهم واحدهای زمین‌شناسی مختلف تونل انتقال آب کرمان در تکمیل پایگاه داده ۶۴
- شکل ۴-۴: تغییرات نیروی پیشران TBM در ۶ کیلومتر ابتدایی قطعه شمالی تونل انتقال آب کرمان ۶۴
- شکل ۴-۵: تغییرات گشتاور TBM در ۶ کیلومتر ابتدایی قطعه شمالی تونل انتقال آب کرمان ۶۵
- شکل ۴-۶: تغییرات نرخ نفوذ TBM در ۶ کیلومتر ابتدایی قطعه شمالی تونل انتقال آب کرمان ۶۵
- شکل ۴-۷: تغییرات سرعت چرخش کاترهد TBM در ۶ کیلومتر ابتدایی قطعه شمالی تونل انتقال آب کرمان ۶۵
- شکل ۵-۱: چیدمان دیسک کاترها بر روی کاترهد TBM تونل انتقال آب کرمان ۶۹
- شکل ۵-۲: محاسبه ضریب خردشدگی (K_s) ۷۲
- شکل ۵-۳: همبستگی بین پارامترهای سنگ بکر و توده‌سنگ با عمر سایشی دیسک کاتر در تونل انتقال آب کرمان ۷۶
- شکل ۵-۴: چارت پیش‌بینی عمر سایشی دیسک کاتر بر اساس مدل تجربی جدید به ازای $CAI=3$ ۷۷
- شکل ۵-۵: چارت پیش‌بینی عمر سایشی دیسک کاتر بر اساس مدل تجربی جدید به ازای $CAI=4$ ۷۷
- شکل ۵-۶: چارت پیش‌بینی عمر سایشی دیسک کاتر بر اساس مدل تجربی جدید به ازای $CAI=5$ ۷۸
- شکل ۵-۷: چارت پیش‌بینی عمر سایشی دیسک کاتر بر اساس مدل تجربی جدید به ازای $CAI=6$ ۷۸
- شکل ۵-۸: مقایسه عمر سایشی واقعی و پیش‌بینی شده توسط مدل تجربی پیشنهادی در تونل انتقال آب کرمان ۷۹
- شکل ۵-۹: نقشه سنگ‌شناسی و تکتونیکی سریلانکا و زمین‌شناسی تونل HRT در پروژه اوما اویا ۸۰
- شکل ۵-۱۰: کاترهد TBM دوسپری استفاده شده برای حفاری تونل HRT در پروژه اوما اویا ۸۱
- شکل ۵-۱۱: مقطع طولی زمین‌شناسی تونل HRT در پروژه اوما اویا ۸۳
- شکل ۵-۱۲: شرایط توده‌سنگ بر اساس مپینگ زمین‌شناسی ۸۴
- شکل ۵-۱۳: جهت‌داری دسته درزه‌ها نسبت به محور تونل HRT ۸۴
- شکل ۵-۱۴: تعداد دیسک کاتر تعویض شده در اثر فرسودگی سایشی در منطقه A بر حسب موقعیت نصب روی کاترهد ۸۵
- شکل ۵-۱۵: تعداد دیسک کاتر تعویض شده در اثر فرسودگی سایشی در منطقه B بر حسب موقعیت نصب روی کاترهد ۸۵
- شکل ۵-۱۶: نتایج اعتبارسنجی مدل تجربی در تونل HRT پروژه اوما اویای سریلانکا ۸۷
- شکل ۵-۱۷: تخمین عمر دیسک کاتر با استفاده از چارت‌های پیش‌بینی در تونل HRT ۸۸
- شکل ۶-۱: ابعاد هندسه مدل و وزن‌بندی دیسک کاتر و سنگ برای تحلیل عددی برش سنگ بکر توسط دیسک کاتر تکی ۹۲
- شکل ۶-۲: سطح تسلیم معیارهای رفتاری در دستگاه تنش‌های اصلی: (الف) موهر-کولمب؛ (ب) فون میزز ۹۳
- شکل ۶-۳: طرح شماتیک شرایط مرزی و سرعت‌های اعمالی در مدل عددی فرایند برش سنگ ۹۵
- شکل ۶-۴: تغییرات نیروی عمودی دیسک کاتر در مدل نظری CSM و مدل عددی اجرا شده توسط 3DEC ۹۷
- شکل ۶-۵: تغییرات نیروی غلتشی دیسک کاتر در مدل نظری CSM و مدل عددی اجرا شده توسط 3DEC ۹۸
- شکل ۶-۶: تغییرات نیروی جانبی دیسک کاتر در مدل عددی اجرا شده توسط 3DEC ۹۸

- شکل ۶-۷: محدوده گسیختگی زون‌های سنگ و تنش فون میزز القایی در دیسک کاتر در حین عملیات برش سنگ..... ۱۰۰
- شکل ۶-۸: هندسه مدل ساخته شده در نرم‌افزار 3DEC برای تحلیل عددی برش سنگ درزه‌دار توسط یک دیسک کاتر تکی..... ۱۰۲
- شکل ۶-۹: میزان توسعه محدوده خردشده در سنگ درزه‌دار تحت نرخ نفوذ متفاوت..... ۱۰۳
- شکل ۶-۱۰: تنش فون میزز در دیسک کاتر پس از گذشت ۱ ثانیه از زمان تحلیل دینامیکی در سنگ درزه‌دار..... ۱۰۴
- شکل ۶-۱۱: تغییرات حجم محدوده خردشده در سنگ درزه‌دار و تنش فون میزز در دیسک کاتر نسبت به نرخ نفوذ آن..... ۱۰۵
- شکل ۶-۱۲: تغییرات حجم محدوده خردشده در سنگ درزه‌دار و تنش فون میزز در دیسک کاتر نسبت به RPM آن..... ۱۰۶
- شکل ۶-۱۳: تغییرات حجم زون گسیخته شده در سنگ درزه‌دار و تنش فون میزز در دیسک کاتر نسبت به زاویه دسته درزه..... ۱۰۷
- شکل ۶-۱۴: تغییرات حجم محدوده خردشده در سنگ درزه‌دار و تنش فون میزز در دیسک کاتر نسبت به فاصله‌داری درزه‌ها..... ۱۰۸
- شکل ۶-۱۵: تغییرات حجم محدوده خردشده در سنگ درزه‌دار و تنش فون میزز در دیسک کاتر نسبت به شعاع نصب آن..... ۱۰۹
- شکل ۶-۱۶: نحوه لحاظ کاهش قطر دیسک کاتر و افزایش عرض لبه آن در مدل‌سازی فرسودگی سایشی دیسک کاتر..... ۱۱۱
- شکل ۶-۱۷: تغییرات حجم محدوده خردشده در سنگ درزه‌دار و تنش فون میزز در دیسک کاتر نسبت به کندی لبه آن..... ۱۱۱
- شکل ۶-۱۸: هندسه مدل ساخته شده توسط نرم‌افزار 3DEC برای تحلیل عددی حفاری توده‌سنگ با کاترهد TBM..... ۱۱۴
- شکل ۶-۱۹: مدل عددی سنگ درزه‌دار در واحدهای زمین‌شناسی: (الف) RT-1؛ (ب) RT-4..... ۱۱۴
- شکل ۶-۲۰: توسعه زون گسیخته شده در واحد زمین‌شناسی RT-1 در اثر حفاری TBM در طی ۱۰ ثانیه زمان دینامیکی..... ۱۱۶
- شکل ۶-۲۱: توسعه زون گسیخته شده در واحد زمین‌شناسی RT-4 در اثر حفاری TBM در طی ۱۰ ثانیه زمان دینامیکی..... ۱۱۷
- شکل ۶-۲۲: حجم زون خرد شده و عمق نفوذ محاسبه شده در تحلیل عددی در مقیاس واقعی..... ۱۱۸
- شکل ۶-۲۳: جدایش بلوک‌های سنگی از سطح سینه کار تونل در اثر پیشروی کاترهد در مدل عددی..... ۱۱۹
- شکل ۶-۲۴: نمودار نوسانی تنش فون میزز نسبت به زمان تحلیل دینامیکی در واحد زمین‌شناسی RT-1..... ۱۱۹
- شکل ۶-۲۵: نمودار نوسانی تنش فون میزز نسبت به زمان تحلیل دینامیکی در واحد زمین‌شناسی RT-4..... ۱۲۰
- شکل ۶-۲۶: مقدار متوسط تنش فون میزز برای گروه‌های مختلف دیسک کاتر در واحدهای زمین‌شناسی RT-1 و RT-4..... ۱۲۰
- شکل ۶-۲۷: ارتباط بین عمر سایشی دیسک کاتر با ضریب خردشدگی کل و متوسط تنش فون میزز..... ۱۲۱

فهرست جداول

جدول ۳-۱: سختی کانی‌ها بر اساس مقیاس‌های مختلف.....	۲۸
جدول ۳-۲: طبقه‌بندی ساینده‌گی سنگ روی کاتر فولادی.....	۳۱
جدول ۳-۳: طبقه‌بندی ساینده‌گی بر اساس شاخص CAI.....	۳۳
جدول ۳-۴: طبقه‌بندی ساینده‌گی سنگ بر اساس RAI.....	۳۵
جدول ۳-۵: ضرایب تصحیح فرسودگی دیسک کاتر.....	۴۴
جدول ۳-۶: امتیازدهی پارامترهای ورودی شاخص RME.....	۴۶
جدول ۴-۱: مشخصات TBM مورد استفاده در حفاری قطعه شمالی تونل انتقال آب کرمان.....	۶۰
جدول ۴-۲: خصوصیات سنگ‌شناسی واحدهای زمین‌شناسی قطعه شمالی تونل انتقال آب کرمان.....	۶۱
جدول ۴-۳: مشخصات آماری پارامترهای تشکیل دهنده پایگاه داده.....	۶۴
جدول ۵-۱: خصوصیات سنگ بکر و عمر سایشی دیسک کاتر در واحدهای زمین‌شناسی تونل انتقال آب کرمان.....	۶۹
جدول ۵-۲: خصوصیات توده‌سنگ در واحدهای زمین‌شناسی تونل انتقال آب کرمان.....	۷۰
جدول ۵-۳: طبقه‌بندی شکستگی‌ها بر اساس فاصله بین صفحات ضعف.....	۷۲
جدول ۵-۴: خصوصیات درزه‌ها و خردشدگی برای واحدهای زمین‌شناسی مهندسی قطعه شمالی تونل انتقال آب کرمان.....	۷۳
جدول ۵-۵: روابط مربوط به همبستگی پارامترهای سنگ بکر و توده‌سنگ با عمر سایشی دیسک کاتر در تونل انتقال آب کرمان.....	۷۴
جدول ۵-۶: خلاصه تحلیل آماری با استفاده از رگرسیون چندمتغیره غیر خطی با SPSS.....	۷۷
جدول ۵-۷: ویژگی‌های ژئومکانیکی مناطق منتخب A و B در پروژه اوما اوپای سریلانکا.....	۸۲
جدول ۵-۸: ویژگی دسته‌درزه‌ها و پارامترهای لازم برای اعتبارسنجی مدل تجربی ارائه شده.....	۸۲
جدول ۶-۱: خصوصیات در نظر گرفته شده برای دیسک کاتر و سنگ در مدل عددی.....	۹۴
جدول ۶-۲: مقایسه نیروهای برشی به‌دست آمده از روشهای نظری و عددی.....	۹۸
جدول ۶-۳: خصوصیات اعمالی در مدل تحلیل حساسیت.....	۱۰۲
جدول ۶-۴: پارامترهای ژئومکانیکی واحدهای زمین‌شناسی منتخب برای تحلیل عددی در مقیاس واقعی.....	۱۱۳
جدول ۶-۵: خصوصیات دیسک کاتر و سنگ درزه‌دار برای مدل‌سازی عددی حفاری کاترهد در مقیاس واقعی.....	۱۱۳

فصل اول

کلیات

فرسودگی^۱ دیسک کاترهای ماشین حفاری مکانیزه تمام مقطع تونل^۳ (TBM) در طی حفاری در سنگ موضوع بسیار مهمی است که بخش زیادی از هزینه‌های اجرایی یک تونل را شامل می‌شود. طبق برآوردهای آماری در پروژه‌های واقعی، هزینه تامین و تعویض دیسک کاترهای یک TBM حداقل معادل یک پنجم هزینه‌های پروژه است. علاوه بر این زمان لازم برای تعویض این دیسک کاترها می‌تواند بالغ بر یک سوم زمان لازم برای تکمیل پروژه باشد (یانگ و همکاران^۴ ۲۰۱۵). فرسودگی دیسک کاتر بطور عام شامل فرسودگی سایشی^۵ (کاهش یکنواخت قطر دیسک کاتر در طی حفاری) و فرسودگی غیرسایشی^۶ (خرابی‌ها و تغییرات غیرهمگن در مقطع دیسک کاتر) بوده و تابعی از سنگ‌شناسی، خصوصیات مقاومتی سنگ بکر، شرایط ناپیوستگی‌ها، خصوصیات هندسی دیسک کاتر و پارامترهای عملیاتی TBM است. شرایط ناپیوستگی‌ها مانند شیب و فاصله‌داری درزه‌ها، تعداد درزه در واحد حجم، بازشدگی و مواد پرکننده بین ناپیوستگی‌ها موجب تغییر مقاومت سنگ شده و متعاقباً سازوکار شکست سنگ و فرسودگی دیسک کاتر را تحت تاثیر قرار می‌دهد. هدف از این تحقیق، صرفاً بررسی عمر سایشی دیسک کاتر در سنگ درزه‌دار در اثر فرسودگی سایشی بوده و از بررسی سایر انواع فرسودگی صرف‌نظر شده است. در این فصل، بیان مسئله، ضرورت انجام تحقیق و مراحل انجام آن توضیح داده شده است.

۱-۲- بیان مسئله

در طی فرآیند حفر تونل با TBM و با اعمال نیروهای پیشران^۷ و گشتاور^۸ لازم به کاترهد^۹ دیسک کاترهای کاترهد ضمن نفوذ در سنگ بر روی سطح سینه‌کار تونل می‌غلطند و به طور پیوسته، زون خرد شده‌ای را در زیر دیسک کاترها ایجاد کرده و توسعه می‌دهند. به مرور زمان و با تداوم عملیات برش سنگ توسط دیسک کاترها، ترک‌ها از سمت زون خرد شده آغاز شده و به سمت جوانب و به داخل توده سنگ گسترش می‌یابند. علاوه بر این،

¹ Wear

² Disc Cutter

³ Tunnel Boring Machine

⁴ Yang et al.

⁵ Normal Wear

⁶ Abnormal Wear

⁷ Thrust Force

⁸ Torque

⁹ Cutterhead

¹ Crushed Zone

برخی از ترک‌ها نیز به سطح آزاد سینه کار تونل رسیده و یا به ترک‌های ناشی از عملکرد دیسک‌کاترهای مجاور، متصل شده و تراشه‌های حفاری را تشکیل می‌دهند (شکل (۱-۱)) (چو و همکاران،^۲ ۲۰۱۰). در طی فرایند خردایش سنگ، تنش‌هایی در دیسک‌کاترها القا شده و نهایتاً موجب فرسودگی سایشی دیسک‌کاترها می‌شود. در صورتی که میزان فرسودگی سایشی دیسک‌کاتر که به عنوان اختلاف بین شعاع اولیه دیسک‌کاتر و شعاع آن پس از عملیات حفاری تونل تعریف می‌شود، به حد خاصی برسد (آستانه تعویض)، آن دیسک‌کاتر دیگر کارایی چندانی برای برش سنگ را نداشته و باید در اولین فرصت تعویض گردد تا کارایی حفاری TBM تحت تاثیر قرار نگیرد. با توجه به اهمیت موضوع، ارائه مدل تجربی جهت پیش‌بینی عمر سایشی دیسک‌کاتر در سنگ درزه‌دار ضروری به نظر می‌رسد. برای بررسی این مسئله لازم است تا پایگاه داده^۳ جامعی متشکل از خصوصیات سنگ بکر و شرایط درزه‌داری سنگ از یک پروژه واقعی تهیه و با استفاده از روش‌های آماری و مدل‌سازی عددی به بررسی موضوع پرداخته شود.

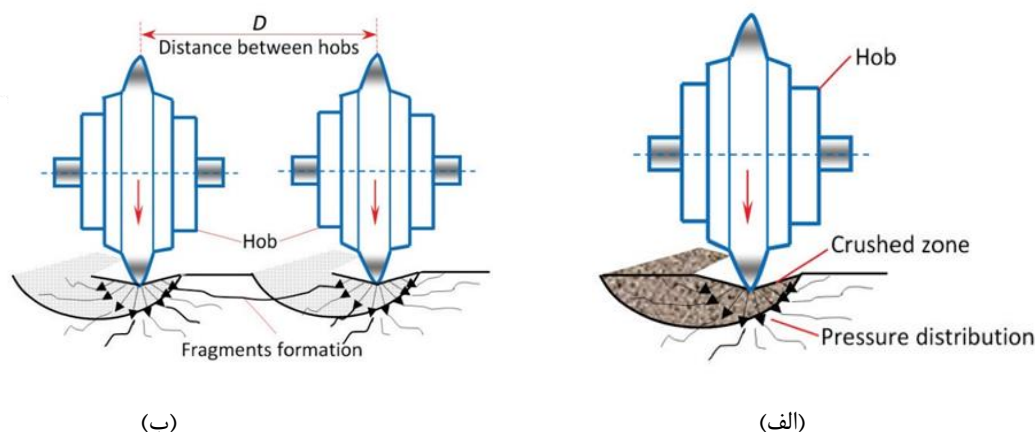
۳-۱- ضرورت انجام تحقیق

از مدل‌های پیش‌بینی فرسودگی دیسک‌کاتر می‌توان برای تخمین عمر دیسک‌کاتر در پروژه‌های تونلسازی با TBM استفاده کرد. در مدل‌هایی که تا اکنون برای ارزیابی عمر دیسک‌کاترها ارائه شده، کمتر به نقش درزه‌های توده‌سنگ در فرسودگی دیسک‌کاتر پرداخته شده است. برای بهبود این مدل‌ها لازم است مدل جدیدی با تلفیق مناسب عامل‌های مؤثر بر فرسودگی دیسک‌کاتر در سنگ درزه‌دار در حین حفاری TBM ارائه گردد.

¹ Chip

² Cho et al.

³ Database



شکل ۱-۱: فرایند گسترش ترک در اثر عملکرد دیسک کاتر: (الف) توزیع فشار ناشی از یک تک دیسک؛ (ب) تشکیل تراشه حفاری بین دو دیسک کاتر مجاور (چو و همکاران، ۲۰۱۰)

۴-۱- فرضیات تحقیق

هر تحقیقی با توجه به شرایط و امکانات در دسترس با محدودیت‌هایی مواجه است که این مسئله شامل این تحقیق نیز می‌شود. برای برطرف کردن این محدودیت فرضیاتی لحاظ شده است. مهم‌ترین این فرضیات به شرح ذیل می‌باشند:

- ۱- نوع ماشین حفاری مکانیزه تمام مقطع تونل، ماشین حفاری در سنگ سخت است.
- ۲- از مطالعه فرسودگی غیرسایشی (یا تخریبی) دیسک کاتر شامل خرابی یا تاقان، نشت روغن، قارچی شدگی، لب پر شدگی، صاف شدگی و غیره چشم‌پوشی شده است.
- ۳- دیسک کاترهای مورد مطالعه در این تحقیق، صرفاً از نوع دیسک کاترهای مقطع ثابت^۱ (CCS) بوده و از پرداختن به فرسودگی دیسک کاترهای گوه‌ای^۲ صرف‌نظر شده است.
- ۴- در تحلیل عددی، میزان توسعه زون پلاستیک تحت بارگذاری دینامیکی دیسک کاترها معادل با زون خرد شده در سنگ در اثر برش دیسک کاترها در پروژه واقعی است.

^۱ Hard Rock TBM

^۲ Constant Cross Section Disc cutter

^۳ V-shaped Disc Cutter

۵- در مدل سازی عددی، تنش فون میزز القایی در دیسک کاتر در حین شبیه سازی عملیات حفاری متناسب با میزان فرسودگی آن است. به عبارت دیگر، مقادیر بالای تنش فون میزز در دیسک کاتر به شدت بالای فرسودگی سایشی در آن دلالت دارد.

۶- در شبیه سازی عددی، خصوصیات هندسی دسته درزه ها که شامل شیب، جهت شیب و فاصله داری است به طور یکنواخت در مدل اعمال شده و از بررسی درزه ها به صورت شبکه گسسته شکستگی^۱ (DFN) صرف نظر شده است.

۵-۱- مراحل انجام تحقیق

در این تحقیق طبق مراحل ذیل به بررسی موضوع پرداخته شده است:

۱- مطالعات کتابخانه ای

در گام اول مطالعات و تحقیقات انجام شده مرتبط با موضوع، مورد بررسی قرار گرفته تا از نتایج حاصله در راستای این تحقیق استفاده گردد.

۲- جمع آوری داده های زمین شناسی و TBM

در این مرحله به منظور درک عوامل مؤثر بر فرسودگی سایشی دیسک کاتر در سنگ های درزه دار، داده های واقعی ثبت شده در پروژه تونل انتقال آب کرمان (قطعه شمالی) جمع آوری شده و به صورت یک پایگاه داده ثبت شده است.

۳- تحلیل کیفی و کمی داده ها

برای بررسی تجربی تأثیر عوامل مؤثر توده سنگ (سنگ بکر و درزه ها) بر فرسودگی سایشی دیسک کاترها، ابتدا به تحلیل کیفی و کمی داده ها با استفاده از نرم افزار تحلیل آماری IBM SPSS 25 پرداخته شده است.

¹ Discrete Fracture Network

۴-مدل سازی عددی

از آنجایی که امکان بررسی پارامترهای اساسی درزه‌ها بر سایدیگی دیسک‌کاترها صرفاً با تکیه بر داده‌های واقعی ثبت شده در پروژه تونلسازی ممکن نیست، سعی شده است تا با استفاده از مدل‌سازی عددی حفاری تک دیسک و نیز مدل‌سازی کاترهد در مقیاس واقعی، تاثیر خصوصیات هندسی درزه‌ها (جهت‌داری و فاصله‌داری) نسبت به راستای حفاری مطالعه شود. این مدل‌سازی‌ها به روش ناپیوسته و به کمک نرم‌افزار تجاری 3DEC توسعه یافته توسط شرکت آیتسکا^۱ انجام شده است. برای صحت‌سنجی مدل عددی از روابط نظری مدل مدرسه معدن کلرادو^۲ (CSM) و برای اعتبارسنجی از داده‌های واقعی پروژه تونل آب‌بر نیروگاه پروژه چندمنظوره اوماوایا^۳ در کشور سریلانکا استفاده شده است.

۵- نتیجه گیری و جمع‌بندی

در مرحله آخر نتایج حاصل از بررسی‌های انجام شده در مراحل قبل، ارائه گردیده است.

۱-۶- ساختار رساله

این تحقیق شامل هفت فصل می‌باشد که در فصل اول ضرورت مساله، هدف انجام پژوهش، فرضیات در نظر گرفته شده و روش تحقیق بیان شده است. در فصل دوم به تعاریف مفاهیم و مبانی مرتبط با فرسودگی سایشی دیسک‌کاتر و عوامل موثر بر عمر سایشی آن پرداخته می‌شود. در فصل سوم و با هدف مطالعات کتابخانه‌ای به ارائه و بررسی آخرین یافته‌های تحقیقات سایر پژوهشگران در خصوص فرسودگی سایشی دیسک‌کاتر در سنگ و مدل‌های پیش‌بینی ارائه شده در این خصوص، پرداخته شده است. فصل چهارم این تحقیق شامل جمع‌آوری داده‌ها از پروژه تونل انتقال آب کرمان، نحوه گروه‌بندی و تشکیل بانک داده و سپس تحلیل کیفی آن می‌باشد. در فصل پنجم، مدل تجربی پیش‌بینی عمر سایشی دیسک‌کاتر در واحدهای زمین‌شناسی پروژه تونل انتقال آب کرمان ارائه شده

¹ Itasca

² Colorado School of Mines

³ Uma Oya

است. در فصل ششم، با استفاده از روش عددی به مدل سازی حفاری دیسک کاتر تکی و مجموعه دیسک کاترها (کاترهد) به منظور بررسی نقش خصوصیات هندسی درزه ها شامل شیب درزه و فاصله داری آن بر سازوکار برش سنگ و فرسودگی سایشی دیسک کاتر پرداخته شده است. در مدل سازی عددی سعی شده است تا حرکت واقعی دیسک کاترها (چرخش، دوران و نفوذ) بر روی مسیر برش دایره ای شبیه سازی گردد. در فصل هفتم نیز جمع بندی و پیشنهادها ارائه شده است.

فصل دوم

مبانی فرسودگی سایشی دیسک کاتر

۲-۱- مقدمه

امروزه به دلیل مزایای حفاری مکانیزه نظیر هزینه اجرایی کمتر، زمان‌بندی کوتاه‌تر و ایمنی بیشتر، حفر تونل‌های طویل بدون استفاده از تکنولوژی حفاری مکانیزه تمام مقطع اقتصادی نخواهد بود. اما بهره‌گیری از این مزایا، مستلزم مطالعات دقیق زمین‌شناسی و مکانیک‌سنگ قبل و حین اجرای پروژه است. در کشور ایران نیز با توجه به روند رو به افزایش تعداد تونل‌های در حال مطالعه و یا در دست اجرا و لزوم توجه به زمان‌بندی کوتاه‌تر اجرا، استفاده از حفاری مکانیزه اهمیت ویژه‌ای یافته است.

در حفاری سنگ سخت با ماشین حفر تونل، سازوکار خردایش سنگ‌های سینه‌کار متأثر از دوران کاترهد و حرکت غلتشی دیسک‌کاترها بر روی سینه‌کار تونل است و در اثر اندرکنش سنگ-ماشین، دیسک‌کاترها به مرور زمان و با پیشروی تونل دچار فرسودگی می‌شوند. فرسودگی عامل اصلی تعویض دیسک‌کاترها است زیرا در غیر این صورت، سرعت پیشروی TBM و کارایی سیستم حفاری به طور چشمگیری کاهش یافته و نهایتاً زمان و هزینه ساخت تونل از پیش‌بینی‌های اولیه فراتر خواهد رفت (اشنایدر و همکاران، ۲۰۱۰).

۲-۲- دیسک‌کاتر TBM

به دلیل ضرورت دوام بسیار بالا، دیسک‌کاترها معمولاً از کربید تنگستن ساخته شده و به عنوان یک ابزار غلتشی خردکننده سنگ بر روی کاترهد TBM نصب می‌شوند (چو و همکاران، ۲۰۱۰). در فرایند چرخش کاترهد TBM، این دیسک‌ها با سنگ در تماس قرار گرفته و تحت عمل نیروی پیشران و گشتاور کاترهد، ضمن نفوذ در سنگ، بر روی آن غلتیده و سنگ سخت را خرد می‌کنند (برولند، ۱۹۹۸؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۵). نوع، تعداد، قطر، فاصله‌داری و چیدمان این دیسک‌کاترها بر روی کاترهد TBM تابعی از شرایط زمین‌شناسی پروژه و قطر TBM است که در صورت عدم طراحی بهینه، کارایی برش تحت تاثیر قرار خواهد گرفت (رستمی و ازدمیر،

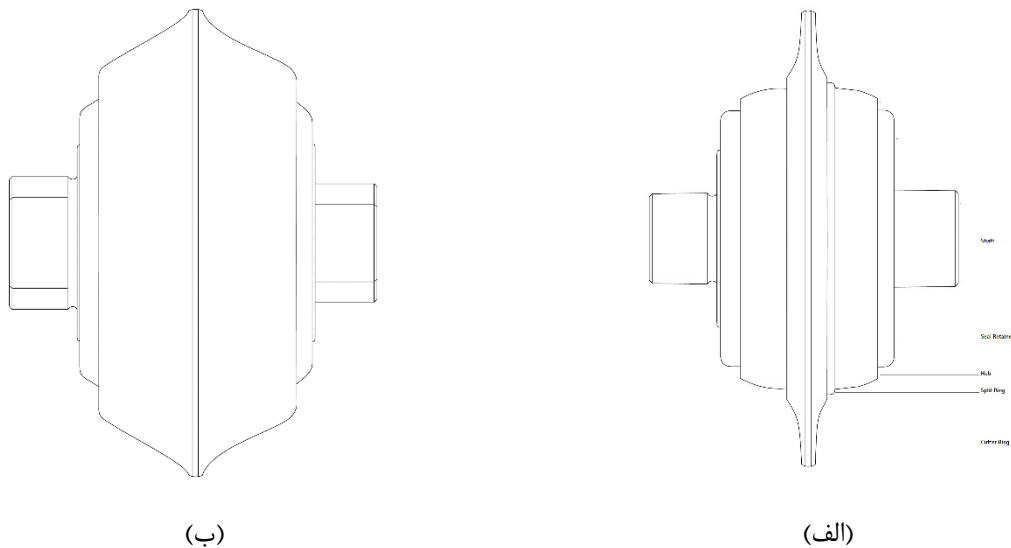
¹ Schneider et al.

² Bruland

³ Wang et al.

⁴ Ozdemir

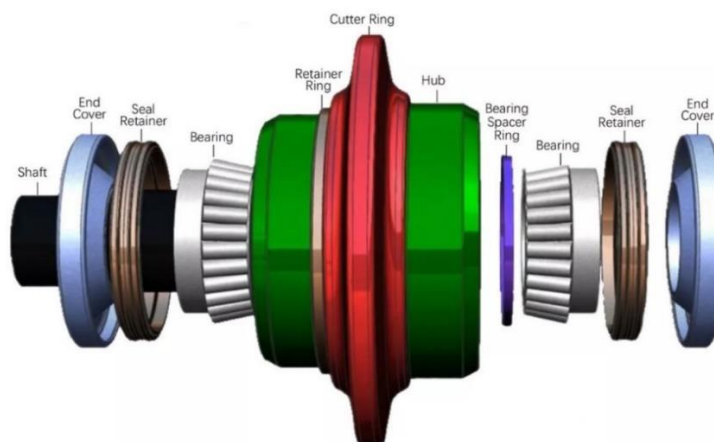
۱۹۹۳؛ آکاراوغلو و همکاران^۱؛ ۲۰۰۸). به طور ایده‌آل، یک دیسک کاتر باید مقاومت مکانیکی و متالورژی لازم در برابر بارهای وارده در حین حفاری سنگ را داشته باشد تا به مرور زمان، دچار فرسودگی، خستگی و خوردگی نشود و با صرف کمترین سطح از انرژی، به بیشترین نرخ نفوذ در سنگ نائل گردد (برتولوسی و همکاران، ۲۰۰۵). این در حالی است که در واقعیت، دیسک کاترها در اثر حفاری فرسوده می‌شوند که بیشتر ناشی از شرایط سنگ ساینده و مقاوم است. در شکل (۱-۲)، دو نوع مرسوم دیسک کاتر یعنی دیسک کاتر مقطع ثابت و دیسک کاتر گوه‌ای نشان داده شده است. باید خاطر نشان شد که تکنولوژی ساخت دیسک کاتر از اواخر دهه هفتاد میلادی به دلیل کارایی بالای برش و دوام بیشتر به سمت تولید دیسک کاترهای مقطع ثابت رفته است (آکاراوغلو و همکاران، ۲۰۰۸). در شکل (۲-۲) اجزای اصلی دیسک کاتر نوع مقطع ثابت نشان داده شده است.



شکل ۲-۱: انواع مرسوم دیسک کاتر: (الف) مقطع ثابت؛ (ب) گوه‌ای

¹ Acaroglu et al.

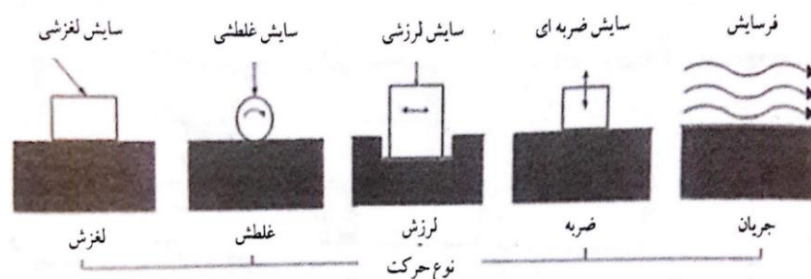
² Bortolussi et al.



شکل ۲-۲: اجزای اصلی تشکیل دهنده دیسک کاتر مقطع ثابت

۲-۳- سازوکار فرسودگی دیسک کاترها

فرسودگی سایشی دیسک کاترها در حین حفاری توده سنگ یکی از انواع اصلی فرسودگی دیسک کاترهای نصب شده بر روی TBM بوده که سازوکار اصلی این نوع فرسودگی در شکل (۲-۳) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل ملاحظه می شود، این سازوکار با توجه به حرکت نسبی جسم ساینده نسبت به ابزار برشی به پنج گروه اساسی شامل سایش لغزشی، سایش غلتشی، سایش لرزشی، سایش ضربه ای، سایش جریانی تقسیم می شوند که به ترتیب در اثر حرکات لغزشی، غلتشی، لرزشی، ضربه ای و جریانی جسم ساینده ایجاد می شوند. در حفاری با TBM بیشتر سه سازوکار سایش لغزشی، غلتشی و ضربه ای در فرسودگی ابزار برش موثر می باشند (میدل و همکاران، ۲۰۰۸).

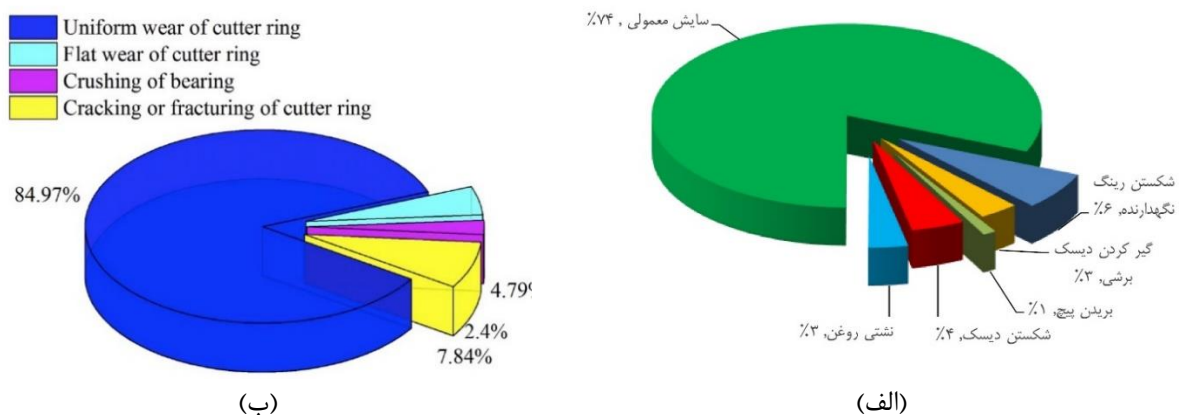


شکل ۲-۳: سازوکار سایش در ابزار برش بر اساس نوع حرکت نسبی ابزار برش و جسم ساینده (میدل و همکاران، ۲۰۰۸)

¹ Maidl et al.

۴-۲- انواع فرسودگی دیسک کاترها

در هر دیسک کاتر دو بخش اصلی وجود دارد که عبارتند از حلقه فولادی و بدنه اصلی دیسک کاتر که حاوی یاتاقان و سایر قسمت‌های یک دیسک کاتر کامل می‌باشد. با توجه به اجزای تشکیل‌دهنده یک دیسک کاتر، انواع فرسودگی در دیسک کاترها را می‌توان به سه نوع اصلی فرسودگی سایشی حلقه فولادی، فرسودگی غیرسایشی (تخریبی) حلقه فولادی و خرابی سایر بخش‌های دیسک کاتر به ویژه یاتاقان تقسیم‌بندی نمود. نوع اول در قالب فرسودگی سایشی و نوع دوم و سوم به عنوان فرسودگی غیرسایشی یا تخریبی طبقه‌بندی می‌شوند. بر طبق مطالعات آماری در پروژه‌های مختلف تونلسازی، بیش از ۷۰ درصد فرسودگی‌های دیسک کاتر از نوع فرسودگی سایشی است و بیشترین مورد فرسودگی غیرسایشی در اثر شکستن رینگ یا دیسک کاتر اتفاق می‌افتد (شکل ۲-۴) (فرخ، ۱۳۹۹؛ سو و همکاران؛ ۲۰۲۰).



شکل ۲-۴: دسته‌بندی انواع فرسودگی دیسک کاترها: (الف) تونل انتقال آب قمرود ایران (فرخ، ۱۳۹۹) (ب) تونل خط ۶ مترو شنژن چین (سو و همکاران، ۲۰۲۰)

در شکل (۲-۵) مواردی از انواع فرسودگی دیسک کاتر نشان داده شده است (سو و همکاران، ۲۰۲۰). معمولاً دیسک کاترهایی با کیفیت مناسب فولاد، دچار فرسودگی سایشی شده و در مقابل، دیسک کاترهایی از جنس فولاد

¹ Su et al.

نامرغوب، به صورت غیرسایشی یا تخریبی فرسوده می‌شوند (برولند، ۱۹۹۸). در این تحقیق از پرداختن به فرسودگی غیرسایشی صرف‌نظر شده و صرفاً به مطالعه و بررسی فرسودگی سایشی بسنده شده است.



(ب)



(الف)



(ت)



(پ)

شکل ۲-۵: انواع فرسودگی دیسک‌کاترها (الف) سایش یکنواخت کاتر؛ (ب) صاف شدگی کاتر؛ (پ) خردشدگی یاتاقان؛ (ت)

ترک‌خوردگی و شکست کاتر (سو و همکاران، ۲۰۲۰)

۲-۵- حد مجاز فرسودگی سایشی دیسک‌کاتر و نرخ آن

زمانی که فرسودگی سایشی یک دیسک‌کاتر به حد خاصی برسد باید دیسک‌کاتر فرسوده با دیسک‌کاتر جدید تعویض شود. این در حالی است که فرسودگی غیرسایشی ممکن است تعویض زودهنگام را به دیسک‌کاتر

تحمیل کند. از آنجایی که دیسک کاترها بر روی کاترهد در چهار ناحیه مرکزی، میانی، قوسدار و پیرامونی نصب می‌شوند، بنابراین حد مجاز فرسودگی سایشی دیسک کاترها تابعی از موقعیت نصب آن‌ها است. در شکل (۲-۶) موقعیت نصب دیسک کاترها بر روی یک کاترهد نشان داده شده است (فرخ، ۱۳۹۹). حد مجاز فرسودگی سایشی برای دیسک کاترهای مرکزی و پیرامونی TBM به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار در نظر گرفته می‌شود. زیرا فرسودگی سایشی دیسک کاترهای پیرامونی به دلیل موقعیت آن‌ها و نیز احتمال کوچک‌تر شدن مقطع حفاری و گیر افتادن سپر فولادی TBM از اهمیت بالایی برخوردار بوده و هیچگونه اهمالی در این خصوص جایز نیست. ماکزیمم حد مجاز فرسودگی سایشی برای دیسک کاترهای ۱۷ و ۱۹ اینچی به ترتیب برابر با ۲۵ و ۳۰ میلیمتر است (فرنزل و همکاران، ۲۰۰۸).

در پروژه‌های تونلسازی، اندازه‌گیری واقعی فرسودگی سایشی دیسک کاترها زمانی انجام می‌شود که حفاری TBM به خاطر تعمیر و نگهداری دوره‌ای دستگاه متوقف شده باشد. این اندازه‌گیری به وسیله یک ابزار مدرج ساده مطابق شکل (۲-۷) انجام می‌شود. به کمک این ابزار می‌توان میزان فرسودگی سایشی دیسک کاتر را بر حسب میلی‌متر اندازه‌گیری نمود و در صورتی که ساییدگی آن به حد مجاز رسیده باشد، دیسک کاتر تعویض شود. از دیسک کاترهای فرسوده شده می‌توان در نواحی داخلی نیز استفاده کرد به شرط آن که میزان ساییدگی دیسک کاتر بیش‌تر از حد مجاز آن ناحیه نباشد. در شکل (۲-۸) نرخ سایش و تغییر در ارتفاع سایش حلقه یک دیسک کاتر با مقطع ثابت و قطر ۴۸۳ میلی‌متر که در ناحیه میانی یک کاترهد نصب بوده است، بر حسب ساعت کارکرد ماشین نشان داده شده است (برولند، ۱۹۹۸).

¹ Frenzel Et Al.



شکل ۲-۶: ناحیه‌بندی دیسک‌کاترها بر روی کاترهد بر حسب موقعیت نصب آن‌ها (فرخ، ۱۳۹۹)



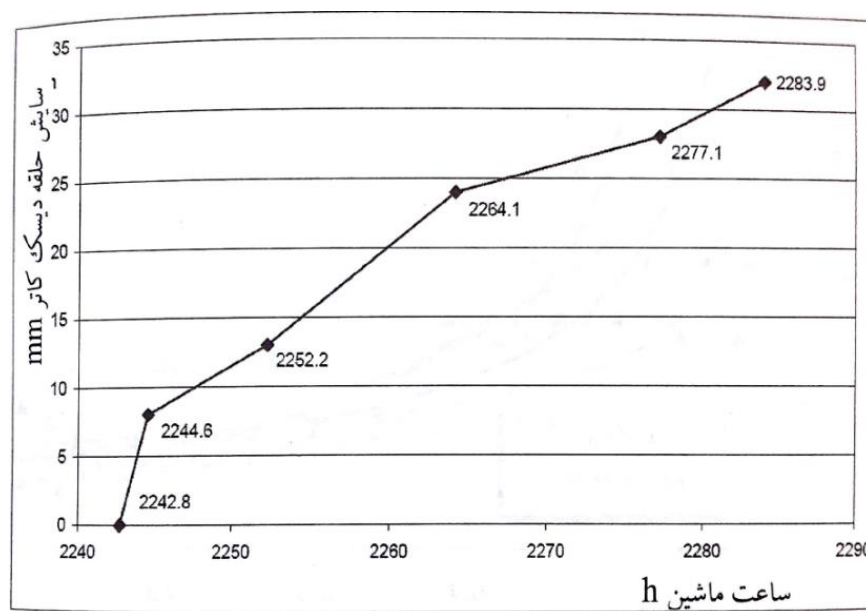
(ب)



(الف)

شکل ۲-۷: اندازه‌گیری میزان فرسودگی سایشی دیسک‌کاتر: (الف) دیسک کاتر سالم؛ (ب) دیسک کاتر فرسوده شده

برای آگاهی از میزان مصرف دیسک کاتر در طول پروژه، تعداد تعویض و یا تعمیر دیسک کاتر در کارگاه ثبت می شود (اوگری و اُرس^۱، ۲۰۱۲). در شکل (۲-۹) نمونه‌ای از ثبت داده‌های مربوط به تعداد تعویض دیسک کاتر بر حسب نوع فرسودگی (سایشی و غیرسایشی) و موقعیت نصب دیسک کاتر بر روی کاترهد نشان داده شده است (کو^۲ و همکاران، ۲۰۲۰). این نمودار که مربوط به یک پروژه تونلسازی مکانیزه در گرانیت بوکیت تیماه^۳ در سنگاپور بوده حاکی از آن است که تعداد تعویض‌های ناشی از فرسودگی سایشی بیش از فرسودگی غیرسایشی می‌باشد.

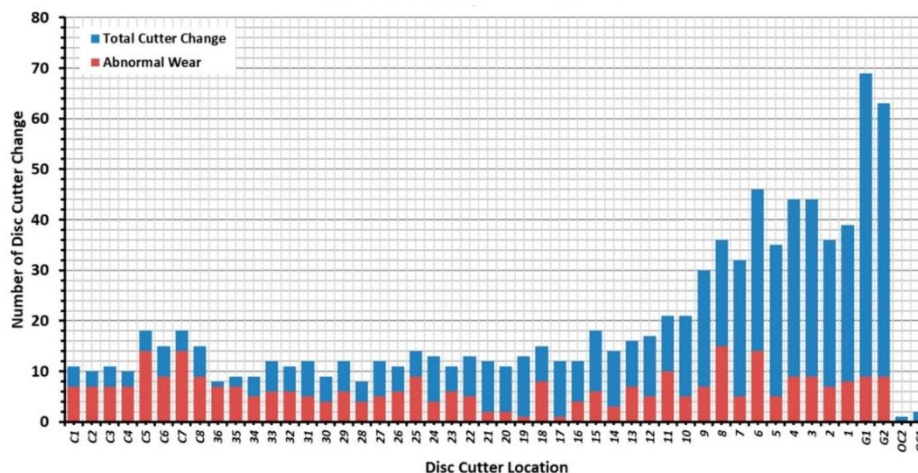


شکل ۲-۸: نرخ سایش یک نمونه دیسک کاتر در سنگ سخت در طی ساعات کارکرد TBM (برولند، ۱۹۹۸)

¹ Oggeri and Oreste

² Ko et al.

³ Bukit Timah Granite



شکل ۲-۹: تعداد تعویض دیسک کاتر بر حسب نوع فرسودگی و موقعیت دیسک کاتر در پروژه گرانیته بوکیت تیمه در سنگاپور (کو و همکاران، ۲۰۲۰)

۲-۶- عوامل موثر بر فرسودگی سایشی دیسک کاترها

عوامل موثر بر فرسودگی سایشی دیسک کاترها عمدتاً در قالب دو دسته اصلی شامل پارامترهای مربوط به توده سنگ و پارامترهای اجرایی TBM تقسیم‌بندی می‌شوند. از مهم‌ترین پارامترهای موثر توده سنگ بر فرسودگی سایشی دیسک کاتر می‌توان به ساینده‌گی، مقاومت فشاری و شرایط درزه‌داری سنگ اشاره نمود. این در حالی است که نیروی پیشران TBM، نرخ نفوذ و دور کاترهد و غیره از جمله پارامترهای موثر TBM هستند که می‌توانند بر نرخ فرسودگی سایشی دیسک کاتر تاثیر بگذارند. از آنجایی که پارامترهای اجرایی TBM مستقل از شرایط زمین‌شناسی و خصوصیات توده سنگ نیست و یک اپراتور مجرب این پارامترها را متناظر با عکس‌العمل زمین و با هدف بیشترین کارایی حفاری و کمترین آسیب به دستگاه تنظیم می‌کند، بنابراین در این تحقیق از پرداختن به پارامترهای اجرایی TBM صرف‌نظر شده و صرفاً به مهم‌ترین عوامل موثر بر فرسودگی سایشی دیسک کاتر از جانب توده سنگ پرداخته می‌شود.

۲-۶-۱- سایندگی سنگ

سایندگی سنگ نقش بسیار مهمی در سازوکار فرسودگی سایشی دیسک‌کاترها در تونلسازی در سنگ سخت داشته و مستقیماً می‌تواند بر روی هزینه و برنامه زمان‌بندی پروژه تاثیر بگذارد (نیلسن^۱ و همکاران، ۲۰۰۶). بنابراین ارزیابی عمر دیسک‌کاتر غالباً بر اساس شاخص‌های مبتنی بر سایندگی سنگ است (هیون و همکاران، ۲۰۱۶).

اولین گام برای درک نقش سایندگی سنگ در فرسودگی سایشی دیسک‌کاتر، تحلیل پتروگرافی برای تعیین ترکیب کانی‌شناسی سنگ با توجه ویژه به محتوی کوارتز^۲ و سایر کانی‌های ساینده مانند فلدسپار و سیلیکات‌های ورقه‌ای است (اوگری و آرست، ۲۰۱۲). علاوه بر ترکیب کانی‌شناسی، سایندگی سنگ در سنگ‌های رسوبی به درجه سیمان‌شدگی سنگ‌ها نیز بستگی دارد. تعیین سایندگی سنگ نه تنها بر اساس شاخص‌های مبتنی بر محتوی کوارتز یا کانی‌های ساینده انجام می‌شود بلکه آزمایش‌های مکانیکی مختلفی می‌تواند برای شناسایی درجه سایندگی سنگ به کار رود (هیون و همکاران، ۲۰۱۶).

تانیموتو و همکاران^۴ (۲۰۰۶) بر اساس خصوصیات ماسه‌سنگ‌ها، محتوی کوارتز و شکل تراشه‌ها در کنار پارامترهایی مانند مقاومت فشاری تک‌محوری، آزمایش بار نقطه‌ای و تصاویر پلاریزه میکروسکوپی، روابطی بین فرسودگی سایشی دیسک‌کاتر و خصوصیات زمین‌شناسی ارائه کردند. در این مطالعه مشخص شد که فرسودگی شدید دیسک‌کاتر ناشی از ماسه‌سنگ‌هایی حاوی کوارتز زیاد و ماتریکس سخت است. علاوه بر این، مشخص شد که تراشه‌های نازک و پهن بیشترین تاثیر بر فرسودگی دیسک‌کاترها را دارند زیرا پهن‌شدگی تراشه‌های حفاری ارتباط مستقیمی با محتوی کوارتز در سنگ دارد (جیان و همکاران^۵، ۲۰۱۵).

¹ Nilsen et al.

² Hyun et al.

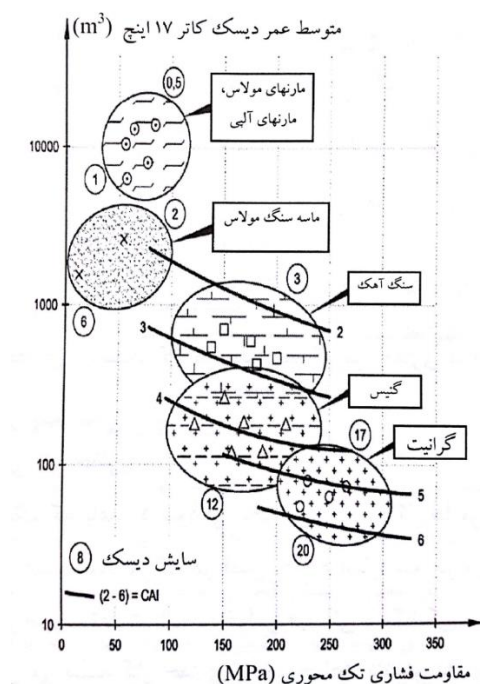
³ Quartz Content

⁴ Tanimoto et al.

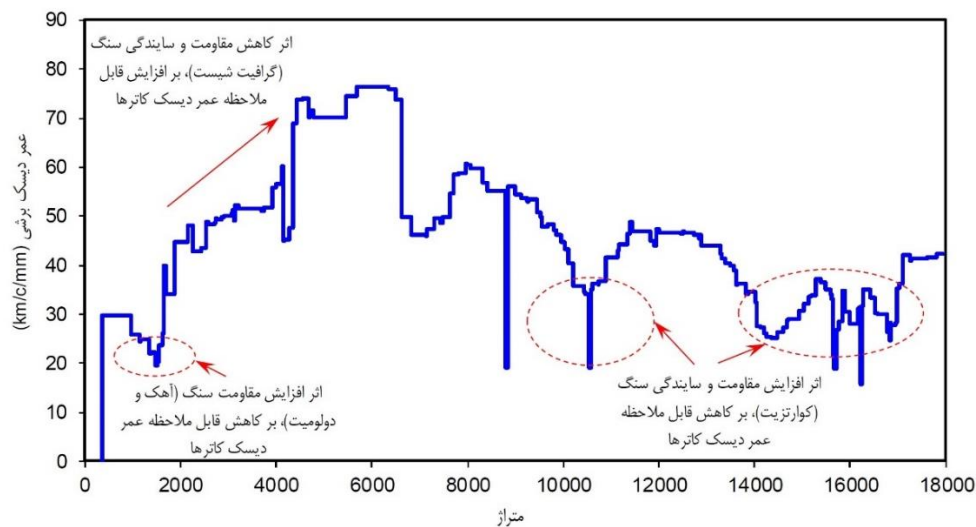
⁵ Jian et al.

۲-۶-۲- مقاومت فشاری سنگ

میدل و همکاران (۲۰۰۸) نشان دادند که در سنگ‌های مختلف، متوسط عمر دیسک کاتر با قطر ۱۷ اینچ با افزایش مقاومت فشاری سنگ کاهش می‌یابد (شکل (۲-۱۰)). فرخ (۱۳۹۹) با بررسی عمر سایشی دیسک کاترها در طی حفاری تونل قمرود نشان داد که مقاومت فشاری سنگ سینه کار تونل می‌تواند تاثیر چشمگیری بر عمر دیسک کاتر داشته باشد (شکل (۲-۱۱)).



شکل ۲-۱۰: تاثیر مقاومت فشاری سنگ بر متوسط عمر سایشی دیسک کاتر ۱۷ اینچی در سنگ‌های مختلف (میدل و همکاران، ۲۰۰۸)

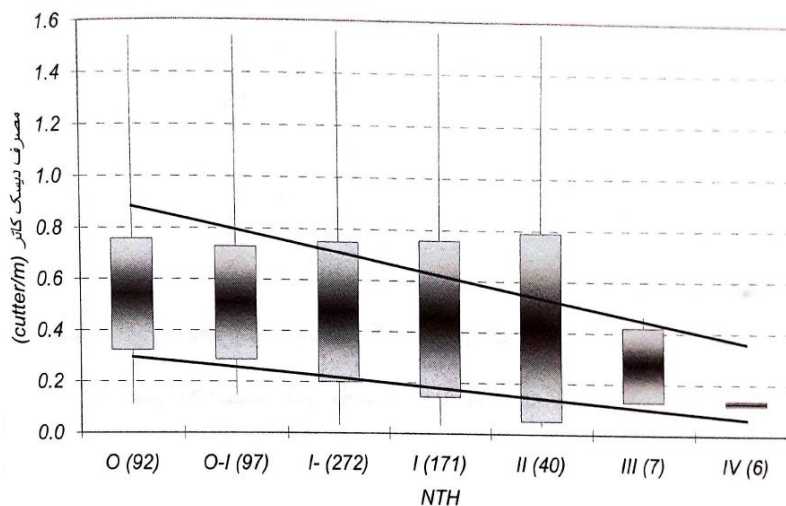


درصد کوارتز محتوی	<۵٪	<۵٪	<۱۰٪	>۵۰٪	۲۰٪-۵۰٪	>۵۰٪
امتیاز RMR	۷۰-۸۰	۳۰-۵۰	۵۰	۷۰-۸۰	۴۰-۶۰	۷۰-۸۰
UCS (MPa)	۳۵-۱۱۰	۲۰-۶۰	۳۰-۶۰	۸-۱۲	۲۰-۱۱۰	۸-۱۲
جنس غالب سنگها	آهک و دولومیت	گرافیت شیبست، اسلیت، فیلیت	اسلیت، ماسه سنگ دگرگون شده	کوارتزیت	کوارتز شیبست	کوارتزیت

شکل ۲-۱۱: اثر مقاومت فشاری تک محوری بر عمر دیسک کاترها در پروژه تونل انتقال آب قمرود (فرخ، ۱۳۹۹)

۲-۶-۳- شرایط درزه داری سنگ

پارامتر مهم دیگری که می تواند بر فرسودگی سایشی دیسک کاترها و عمر آنها موثر باشد، شرایط درزه داری سنگ است که شامل جهت داری، فاصله داری، تعداد درزه در واحد حجم سنگ، RQD و غیره می باشد. معمولاً هرچه سنگ سالم تر و بدون شکستگی یا ناپیوستگی باشد، مصرف دیسک کاترها در آن بیشتر خواهد بود. همانگونه که در شکل (۲-۱۲) مشاهده می شود با افزایش مقدار ضریب خردشدگی ارائه شده توسط دانشگاه علم و تکنولوژی نروژ (NTH/NTNU) که به معنی کاهش فاصله داری درزه ها و خردشدگی بیشتر توده سنگ است، از مصرف دیسک کاترها در آن توده سنگ کاسته شده است (حسن پور و همکاران، ۲۰۱۱).



شکل ۲-۱۲: تغییرات مصرف دیسک کاتر در سنگ‌هایی با شدت خردشدگی متفاوت (حسن‌پور و همکاران، ۲۰۱۱)

۲-۷- پیش‌بینی فرسودگی سایشی دیسک کاتر

به لحاظ نظری با افزایش نیروهای دیسک کاتر، نوک کاتر فرسوده شده و عرض لبه آن افزایش می‌یابد. در این صورت با ثابت ماندن نیروی اعمالی از جانب TBM، تنش وارده از دیسک کاتر به سنگ کاهش یافته و انرژی ویژه برای خردایش سنگ افزایش می‌یابد. با توجه به اندرکنش پیچیده دیسک کاتر-سنگ، مدل منحصر بفرد و موثری برای شناسایی مستقیم فرسودگی دیسک کاتر وجود ندارد و مشکلات مطالعه و پیش‌بینی فرسودگی دیسک کاتر افزایش می‌یابد (وانگ و همکاران، ۲۰۱۵). در این خصوص و در طی سالهای اخیر، مدل‌های پیش‌بینی متنوعی بر اساس پارامترهای ورودی خاص برای تخمین فرسودگی سایشی دیسک کاتر و عمر آن توسعه یافته‌اند. مدل‌های پیش‌بینی فرسودگی سایشی دیسک کاتر را می‌توان در سه گروه اصلی مدل‌های نظری، آزمایشگاهی و تجربی طبقه‌بندی کرد. مدل‌های نظری با توجه به سازوکار شکست سنگ و بر اساس معادلات نیرو و انرژی در حین برش و با بهره‌گیری از نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی توسعه یافته‌اند. این در حالی است که مدل‌های تجربی با برقراری همبستگی بین شرایط زمین‌شناسی، خصوصیات توده سنگ و پارامترهای اجرایی TBM با مقادیر واقعی فرسودگی سایشی دیسک کاترها در پروژه‌های مختلف تونلسازی و بر اساس شاخص‌های مختلف سایش که در

آزمایشگاه و بر مبنای استانداردهای خاص پیشنهاد شده توسعه یافته‌اند. استفاده از هر مدل باید مبتنی بر درک کامل از فرضیات و محدودیت‌های مدل و نیز آگاهی کامل از شرایط پروژه باشد تا یک پیش‌بینی مناسب از میزان و نرخ فرسودگی سایشی دیسک‌کاترهای TBM انجام شود. در فصل بعدی به طور مفصل به مدل‌های پیش‌بینی عمر سایشی دیسک‌کاتر و نیز شاخص‌های سایش متداول در مدل‌ها پرداخته خواهد شد.

فصل سوم

پیشینه مطالعات فرسودگی سایشی دیسک کاتر در حفاری سنگ

۳-۱- مقدمه

در فصل دوم به مبانی فرسودگی دیسک‌کاترها اشاره و عوامل اصلی فرسودگی سایشی دیسک‌کاترهای TBM در حین حفاری توده‌سنگ بیان شد. در این فصل به معرفی آزمایش‌های رایج برای تعیین ساینده‌گی سنگ و مدل‌هایی که بر اساس شاخص‌های مختلف برای پیش‌بینی فرسودگی دیسک‌کاترها توسعه یافته و نیز به مطالعات عددی ارائه شده در این خصوص پرداخته خواهد شد. این فصل شامل مهم‌ترین مطالعات انجام شده توسط محققین پیشین در ارتباط با فرسودگی سایشی دیسک‌کاترهای TBM است.

۳-۲- آزمایش‌های ساینده‌گی سنگ

برای پیش‌بینی فرسودگی سایشی دیسک‌کاتر در تونلسازی مکانیزه با TBM می‌توان از طریق آزمایش‌های مختلف برای برآورد ساینده‌گی سنگ و میزان آن در قالب شاخص‌های سایش استفاده کرد که پلینینگر و رسترنر^۱ (۲۰۰۸) به طور مفصل به آن‌ها اشاره کرده‌اند. البته تنها تعداد معدودی از این آزمایش‌ها مانند آزمایش ارائه شده در دانشگاه علم و تکنولوژی نروژ^۲ (NTNU) و مدرسه معدن کلرادو (CSM) مستقیماً به پیش‌بینی فرسودگی سایشی دیسک‌کاتر در تونلسازی سنگ سخت منجر شده‌اند (فرنزل و همکاران، ۲۰۰۸).

۳-۲-۱- مقیاس سختی موس

همه سنگ‌ها متشکل از کانی‌هایی با سختی خراشی مشخص هستند. بدیهی است که با افزایش درصد کانی‌های با سختی بیشتر در ترکیب کانی‌شناسی یک سنگ، درجه ساینده‌گی آن سنگ نیز افزایش می‌یابد (حسن‌پور و همکاران، ۲۰۱۴). برای تعریف سختی خراشی، از مقیاس سختی موس^۳ استفاده می‌شود که توسط فردریک موس^۴ معدن‌شناس آلمانی در سال ۱۸۱۲ میلادی پایه‌گذاری و ثبت شد. طبق جدول (۳-۱)، این مقیاس استاندارد بین ۱ تا ۱۰ است که در آن، عدد ۱ به نرم‌ترین کانی و عدد ۱۰ به سخت‌ترین کانی نسبت داده می‌شود. در فرایند حفاری مکانیزه، سنگ‌هایی که شامل کانی‌هایی با سختی‌های بالاتری هستند می‌توانند

¹ Plinninger and Restner

² Norwegian University of Science and Technology

³ Mohs Hardness Scale

⁴ Friedrich Mohs

فرسودگی سایشی دیسک کاتر TBM را افزایش دهند. باید خاطر نشان شد که سختی موس تا کنون به طور مستقیم به عنوان ورودی در هیچ مدل پیش‌بینی فرسودگی دیسک کاتر به کار نرفته و صرفاً محدود به تخمین اولیه فرسودگی سایشی است.

۳-۲-۲- محتوی معادل کوارتز (EQC)

محتوی معادل کوارتز^۱ (EQC) طبق رابطه (۱-۳) برابر با حاصلضرب مقدار کانی در سنگ بر حسب درصد (A) در عدد ساینده‌گی رزیوال^۲ (R) است. عدد ساینده‌گی رزیوال یک مقیاس سختی در کانی‌شناسی است که به افتخار زمین شناس اتریشی آگوست کارل رزیوال^۳ نامگذاری شده است. سختی رزیوال روشی کمی بر اساس تحلیل پتروگرافی بوده و با خراشیدن یک سطح صیقلی تحت یک بار مشخص با استفاده از یک خراشنده با هندسه خاص انجام می‌شود. نهایتاً سختی رزیوال بر اساس حجم ماده کنده شده محاسبه می‌شود (ثرو،^۴ ۱۹۹۷). در جدول (۱-۳) مقادیر سختی رزیوال برای کانی‌های ارزیابی شده در مقیاس موس ارائه شده است.

$$EQC = \sum_{i=1}^n A_i \times R_i \quad (1-3)$$

۳-۲-۳- آزمایش ویکرز و ارائه عدد سختی ویکرز (VHN)

آزمایش سختی ویکرز^۵ در سال ۱۹۲۱ توسط روبرت ال. اسمیت^۶ و جورج ای. سندلند^۷ در شرکت ویکرز به عنوان جایگزینی برای روش برینل^۸ جهت سنجش سختی مواد توسعه یافت (میرز و چاولا؛^۹ ۲۰۰۸). این آزمایش یک سختی میکرو دندانه‌ای را برای ماده (کانی، سنگ و فلز) ارائه می‌دهد که طبق تعریف، برابر با نسبت بار اعمالی از طریق ایندنتور^{۱۰} بر حسب کیلوگرم به سطح ناحیه تماس بر حسب میلی‌متر مربع است. در این آزمایش، میزان فروروی ایندنتور به داخل نمونه سنگی توسط میکروسکوپ تخمین زده می‌شود. در جدول (۱-۳) مقادیر سختی

¹ Equivalent Quartz Contact

² Rosiwal Abrasiveness

³ August Karl Rosiwal

⁴ Thuro

⁵ Vickers Hardness Test

⁶ Robert L. Smith

⁷ George E. Sandland

⁸ Brinell Method

⁹ Meyers and Chawla

¹⁰ Indentor

ویکرز برای کانی‌های مورد سنجش در مقیاس موس ارائه شده است. به مانند سختی موس این سختی نیز تنها در تعیین اولیه فرسودگی کاتر نقش دارد (نیلسن و همکاران، ۲۰۰۶). از آنجایی که یک سنگ متشکل از کانی‌های مختلف با مقادیر درصدی متفاوت است، بنابراین پارامتر دیگری تحت عنوان عدد سختی ویکرز سنگ (VHNR) تعریف شده است. این پارامتر طبق رابطه (۲-۳) برابر با حاصلضرب عدد سختی ویکرز یک کانی بر حسب kg/mm^2 (VHN) در مقدار همان کانی در ترکیب یک سنگ خاص بر حسب درصد (A) می‌باشد (ادبایو و اکویل، ۲۰۰۷).

$$VHNR = \sum_{i=1}^n VHN_i \times A_i \quad (2-3)$$

جدول ۳-۱: سختی کانی‌ها بر اساس مقیاس‌های مختلف

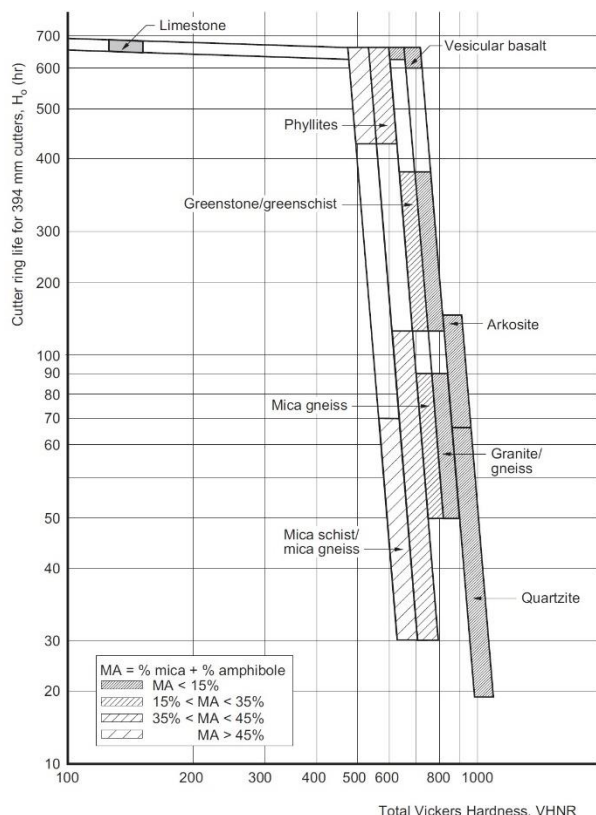
کانی	آزمون خراشیدن	مقیاس سختی موس	مقیاس سختی رز یوال	سختی ویکرز (kg/mm^2)
تالک	با ناخن خراشیده می‌شود	۱	۰,۰۵	۲۷
ژپس	با ناخن خراشیده می‌شود	۲	۱,۲۵	۶۱
کلسیت	با سکه مسی خراشیده می‌شود	۳	۴,۵	۱۵۷
فلوریت	به آسانی با چاقو خراشیده می‌شود	۴	۵	۳۱۵
آپاتیت	همچنان با چاقو خراشیده می‌شود	۵	۵,۵	۵۳۵
ارتوکلز	با سوهان فولادی خراشیده می‌شود	۶	۳۷	۸۱۷
کوارتز	شیشه را می‌خراشد	۷	۱۲۰	۱۱۶۱
توپاز	کوراتز را می‌خراشد	۸	۱۷۵	۱۵۶۷
کروندوم	توپاز را می‌خراشد	۹	۱۰۰۰	۲۰۳۵
الماس	کروندوم را می‌خراشد	۱۰	۱۴۰۰۰	۱۰۰۰۰

برولند (۱۹۹۸) با بررسی اطلاعات جمع‌آوری شده از چندین پروژه تونلسازی در نروژ و سایر نقاط جهان، دامنه تغییرات عمر دیسک کاتر (بر حسب ساعت) را بر اساس عدد سختی ویکرز برای سنگ‌های مختلف پیشنهاد نمود (شکل (۳-۱)). همانگونه که در این نمودار مشاهده می‌شود، سنگ‌های فیلیتی با عدد سختی ویکرز سنگ

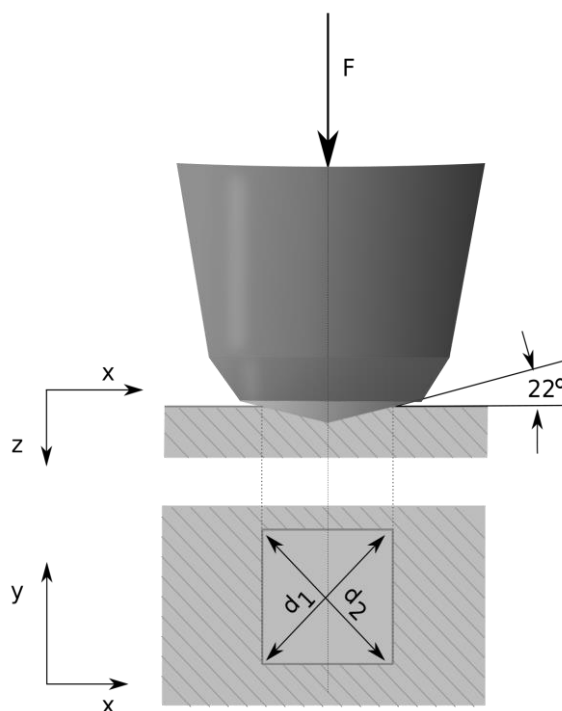
¹ Vickers Hardness Number

² Adebayo and Okewale

حدود ۵۰۰ تا ۶۰۰ در مقایسه با سنگ‌های گرانیتی و گنیسی با عدد سختی ویکرز سنگ بیشتر از ۷۰۰، شدت ساینده‌گی کمتری داشته و عمر دیسک‌کاترها برای حفاری در آن‌ها بیشتر است.



(ب)



(الف)

شکل ۳-۱: آزمایش سختی ویکرز: (الف) روش آزمایش؛ (ب) ارتباط بین عمر دیسک‌کاتر و عددی سختی ویکرز سنگ برای سنگ‌های مختلف (برولند، ۱۹۹۸)

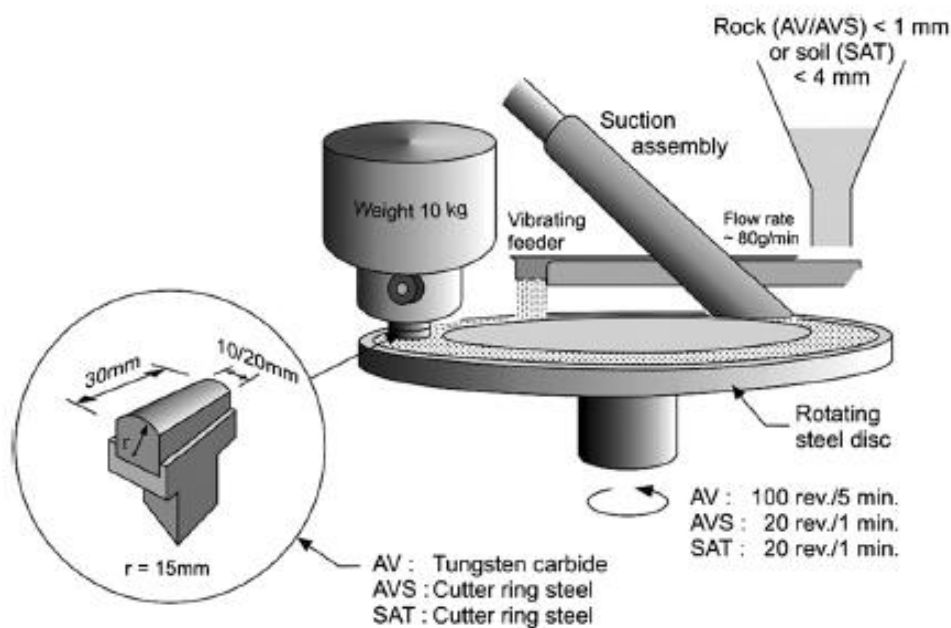
۳-۲-۴- آزمایش سایش دانشگاه علم و تکنولوژی نروژ (NTH/NTNU)

یکی از مشهورترین و پرکاربردترین آزمایش‌های بررسی فرسودگی سایشی دیسک‌کاتر، روشی است که در دهه هشتاد میلادی توسط دانشگاه علم و تکنولوژی نروژ (NTH/NTNU) برای تعیین مقدار سایش کاتر فولادی^۱ (AVS) توسعه یافته است (برولند، ۱۹۹۸). برای تعیین AVS در این آزمایش، سایش دیسک فولادی که تحت بار ۱۰ کیلوگرم قرار دارد بر اثر تماس با نمونه سنگی خرد شده با ابعاد دانه‌های کوچک‌تر از یک میلی‌متر که بر

^۱ Abrasion Value Cutter Steel

روی صفحه دوار می‌چرخد، اندازه‌گیری می‌شود. مقدار سایش کاتر فولادی یا AVS برابر با کاهش وزن تیغه بعد از ۲۰ دور چرخش دیسک (در یک دقیقه) بر حسب میلی‌گرم است. در شکل (۳-۲) جزئیات روش آزمایش NTNU نشان داده شده است (دال و همکاران، ۲۰۱۲). مقادیر AVS در پایگاه داده ۲۶۲۱ نمونه‌ای NTNU/SINTEF، از صفر (غیر قابل اندازه‌گیری) در سنگ آهک تا ۶۸٫۵ در کوارتزیت قرار دارد. بر اساس این شاخص، ساینده‌گی سنگ مطابق جدول (۳-۲) طبقه‌بندی می‌شود (دال و همکاران، ۲۰۱۲). یکی دیگر از نتایج این آزمایش، تعیین شاخص عمر کاتر^۲ (CLI) است که طبق رابطه (۳-۳) با استفاده از نتایج آزمایش‌های SJ و AVS تعیین می‌شود. SJ بیانگر سختی سطح سنگ است که به عنوان میانگین عمق سوراخکاری با یک سرمه ۸٫۵ میلی‌متری در طی ۲۰۰ دور چرخش بر حسب ۰٫۱ میلی‌متر تعریف می‌شود (کو و همکاران، ۲۰۲۰).

$$CLI = 13.84 \left(\frac{SJ}{AVS} \right)^{0.3847} \quad (3-3)$$



شکل ۳-۲: آزمایش مقدار سایش کاتر فولادی (AVS) (دال و همکاران، ۲۰۱۲)

¹ Dahl et al.

² Cutter Life Index

جدول ۳-۲: طبقه‌بندی ساینده‌ی سنگ روی کاتر فولادی (دال و همکاران، ۲۰۱۲)

مقدار سایش کاتر فولادی (میلی‌گرم)	ساییدگی کاتر فولادی
$\leq 44,0$	بی‌نهایت زیاد
$36,0 - 44,0$	بسیار زیاد
$26 - 35,9$	زیاد
$13,0 - 25,9$	متوسط
$4,0 - 12,9$	کم
$1,1 - 3,9$	بسیار کم
$1,0 \geq$	بی‌نهایت کم

۳-۲-۵- شاخص سایش سرشار (CAI)

شاخص بسیار رایج برای ارزیابی فرسودگی دیسک‌کاتر، شاخص سایش سرشار^۱ است که در دهه هفتاد میلادی جهت کاربرد در معادن زغال فرانسه توسعه یافت و در سال‌های بعد، محققان زیادی بر روی تاثیر شرایط زمین‌شناسی، پتروگرافی سنگ و نیز خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آن بر این شاخص مطالعه کردند (آیدین^۲، ۲۰۱۸). آزمایش سایش سرشار نسبت به آزمایش پیچیده سایش NTNU، ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر بوده و به همین دلیل، به طور گسترده به کار گرفته می‌شود. علیرغم وجود استاندارد فرانسوی بر اساس سازمان استاندارد فرانسه^۳ (AFNOR) و پیشنهاد انجمن آمریکایی آزمایش و مواد^۴ (ASTM) برای انجام این آزمایش، به خاطر وجود چندین اصلاحیه بر روی آزمایش و عدم پوشش برخی نکات اصلی در استاندارد، اختلافات فاحشی در مقادیر اندازه‌گیری شده CAI برای نمونه‌های سنگی مشابه در کل دنیا ثبت شده است (فرنزل و همکاران، ۲۰۰۸).

برای یکپارچه‌سازی روش انجام این آزمایش و پرهیز از چندگانگی، انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ^۵ (ISRM) دستورالعمل واحدی برای انجام این آزمایش و تفسیر نتایج آن ارائه کرده است (ISRM، ۲۰۱۳). طبق این دستورالعمل، یک پین فولادی^۶ با نوک مخروطی شکل با زاویه راس ۹۰ درجه و سختی راکول^۷ ۵۵ تحت بار

^۱ Cerchar Abrasivity Index

^۲ Aydin

^۳ French Standardization Association

^۴ American Society for Testing And Materials

^۵ International Society for Rock Mechanics

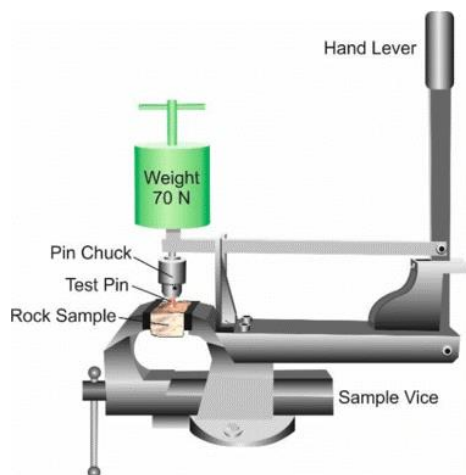
^۶ Steel Pin

^۷ Rockwell Hardness

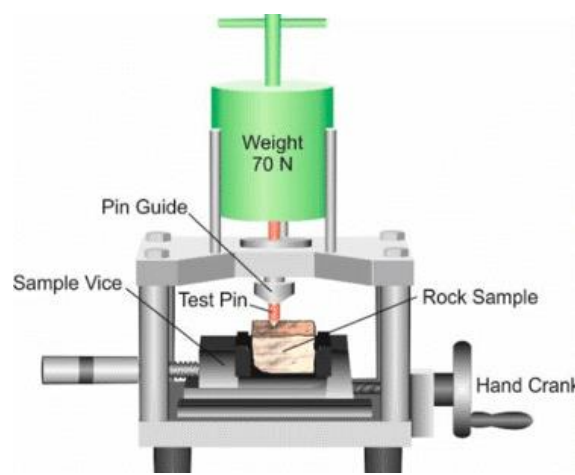
استاتیکی ۷۰ نیوتن بر روی سطح یک نمونه سنگی قرار گرفته و به میزان ۱۰ میلی‌متر بر روی سطح زبر یا صاف سنگ حرکت داده می‌شود. زمان توصیه شده برای اجرای این آزمایش ۱ یا ۱۰ ثانیه بسته به نوع وسیله اجرای آزمایش است. پس از اتمام آزمایش، قطر نوک پین فولادی که در طی آزمایش تغییر شکل یافته مطابق رابطه (۳-۴) اندازه‌گیری شده و شاخص سایش سرشار تعیین می‌گردد. در شکل (۳-۳) دو دستگاه رایج برای انجام این آزمایش نشان داده شده است که بر اساس سرشار (۱۹۸۶) و وست^۱ (۱۹۸۹) توسعه یافته‌اند (پلنینگر و دولمان^۲، ۲۰۱۶). بر طبق این شاخص، هرچه سنگ ساینده‌تر باشد CAI بالاتری دارد (اوگری و اُرسِت، ۲۰۱۲). از این رو مقدار CAI را می‌توان به طور مستقیم به عمرسایشی دیسک کاتر در تونلسازی مکانیزه نسبت داد (کوپفرل و همکاران^۳، ۲۰۱۵). در جدول (۳-۳) طبقه‌بندی ساینده‌گی سنگ بر اساس CAI ارائه شده است (آلبر^۴، ۲۰۱۴).

$$CAI = 10 \frac{d}{c} \quad (۳-۴)$$

که در آن CAI شاخص سایش سرشار (بدون واحد)، d قطر پین تغییر شکل یافته بر حسب میلی‌متر و c ضریب تصحیح واحد برابر با ۱ میلی‌متر است.



(ب)



(الف)

شکل ۳-۳: دستگاه آزمایش سرشار: (الف) بر اساس سرشار؛ (ب) بر اساس وست (پلنینگر و دولمان، ۲۰۱۶)

¹ West

² Dullmann

³ Kupfrele et al.

⁴ Alber

جدول ۳-۳: طبقه‌بندی ساینده‌گی بر اساس شاخص CAI (آلبر، ۲۰۱۸)

ساینده‌گی	ASTM	ISRM
بینهایت کم	غیر قابل اندازه‌گیری	۰,۱-۰,۴
بسیار کم	۰,۳-۰,۵	۰,۵-۰,۹
کم	۰,۵-۱,۰	۱,۰-۱,۹
متوسط	۱,۰-۲,۰	۲,۰-۲,۹
زیاد	۲,۰-۴,۰	۳,۰-۳,۹
بسیار زیاد/بینهایت زیاد	۴,۰-۶,۰	۴,۰-۴,۹
بینهایت زیاد/کوارتزیتی	۶,۰-۷,۰	$5 \leq$

برخی از محققان نشان داده‌اند که میزان مقاومت سنگ بر روی مقدار CAI تاثیر می‌گذارد (دلیئورمانلی، ۲۰۱۲؛ الامین^۲ و والر^۳، ۱۹۹۴). همچنین یارعلی و همکاران (۲۰۰۸) با مطالعه سنگ‌های رسوبی سیلیکاتی، عواملی همچون کانی‌شناسی سنگ، نوع سیمان، درجه سیمان‌شدگی، محتوی کوارتز و میانگین سایز دانه‌های کوارتز که از روی مقاطع نازک تعیین می‌شوند را به عنوان پارامترهای موثر بر CAI معرفی نمودند. مطالعه مشابهی توسط مرادیزاده و همکاران (۲۰۱۳) نشان داد که عوامل مختلفی مانند شرایط سطح سنگ، درصد کوارتز، محتوی معادل (EQC)، شاخص بار نقطه‌ای اصلاح شده بر اساس ابعاد^۴ (Is50)، و محتوی رطوبت (W%) می‌تواند بر مقدار شاخص سایش سرشار موثر باشد.

۳-۲-۵- شاخص سایش سنگ (RAI)

شاخص سایش سنگ^۵ (RAI) در سال ۲۰۰۲ توسط پلینینگر در کشور آلمان ارائه شد و به دلیل سهولت تعیین پارامترهای ورودی آن و محاسبه سریع آن، کاربرد زیادی در پروژه‌ها دارد. رابطه کلی این شاخص به صورت رابطه (۳-۵) است (پلینینگر، ۲۰۱۰).

$$RAI = \sum_{i=1}^n A_i \cdot S_i \cdot UCS \quad (3-5)$$

¹ Deliormanli

² Al -Ameen

³ Waller

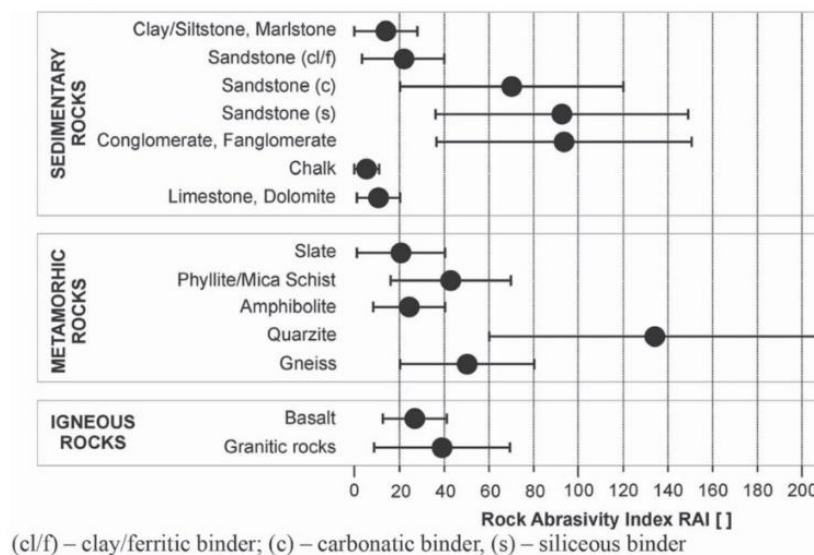
⁴ The Size-Corrected Point Load Strength Index

⁵ Rock Abrissivness Index

که در آن RAI شاخص سایش سنگ، A مقدار کانی i بر حسب درصد، S سختی رزیوال کانی i با در نظر گرفتن عدد ۱۰۰ برای کوارتز و UCS مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ بر حسب مگاپاسکال است. این شاخص اصلاحیست بر محتوی معادل کوارتز و علاوه بر سنگ سخت، در انواع سنگ ضعیف نیز کاربرد دارد. در شکل (۴-۳)، دامنه مقادیر به دست آمده به عنوان شاخص سایش سنگ در سنگ‌های مختلف ارائه شده است. علاوه بر این، در جدول (۴-۳) طبقه‌بندی ساینده‌ی سنگ بر اساس شاخص RAI ارائه شده است. در شکل (۵-۳) همبستگی بین شاخص سایش سنگ و شاخص سایش سرشار از طریق نتایج آزمایش‌های صورت گرفته بر روی ۶۰ نمونه سنگ نشان داده شده است. علاوه بر این همبستگی، شوماخر^۱ (۲۰۰۴) یک رابطه جذری کاربردی برای ارتباط دو پارامتر CAI و RAI مطابق رابطه (۶-۳) ارائه نمود.

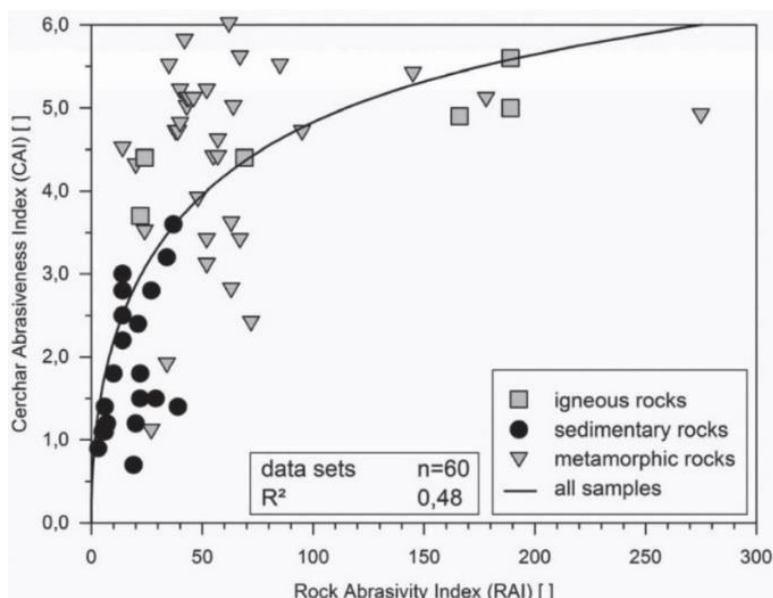
$$CAI = 0.9 \sqrt[3]{RAI} \quad (۶-۳)$$

که در آن RAI شاخص سایش سنگ و CAI شاخص سایش سرشار است.



شکل ۴-۳: نمونه مقادیر RAI و دامنه آن برای سنگ‌های مختلف (پلینینگر، ۲۰۱۰)

¹ Schumacher



شکل ۳-۵: ارتباط بین CAI و RAI (پلنینگر، ۲۰۱۰)

جدول ۳-۴: طبقه‌بندی ساینده‌ی سنگ بر اساس RAI (پلنینگر، ۲۰۱۰)

طبقه‌بندی	RAI
غیر ساینده	<۱۰
کمی ساینده	۱۰-۳۰
ساینده	۳۰-۶۰
بسیار ساینده	۶۰-۱۲۰
بینهایت ساینده	>۱۲۰

۳-۲-۶- آزمایش جدید سایش (NAT) و شاخص فرسودگی دیسک (DWI)

در موسسه مهندسی و ساخت هیوندای^۱ دو نوع آزمایش جدید سایش^۲ (NAT) در مقیاس کوچک و بزرگ با هدف اصلاح شاخص سایش سرشار توسعه یافته است. در شکل (۳-۶) تجهیزات آزمایش کوچک مقیاس نشان داده شده است. دو عیب اساسی آزمایش سرشار را می‌توان محدود بودن طول خراش و نیز توسعه نامنظم فرسودگی بر روی نوک پین فولادی برشمرد. در آزمایش سایش سرشار، قطر نوک پین در مقایسه با ناهمواری‌های سطحی سنگ بسیار کوچک است و همین باعث توسعه نامنظم فرسودگی بر روی نوک آن و صعوبت قرائت قطر آن می‌شود. برای حل این مشکل، یک جسم سایشی به شکل دیسک مشابه با دیسک کاتر نوع مقطع ثابت طراحی شده و پس

^۱ Hyundai Engineering and Construction

^۲ New Abrasion Test

از آزمایش، افت وزنی دیسک به عنوان شاخص فرسودگی دیسک^۱ (DWI) مشابه روش اندازه‌گیری AVS در آزمایش NTNU تعیین می‌شود (فرخ و کیم، ۲۰۱۸).

در شکل (۷-۳) همبستگی میان شاخص DWI و شاخص‌های CAI، AVS و CLI برای پنج نمونه سنگ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود ارتباط خوبی بین شاخص‌های DWI و AVS و CLI برقرار بوده ولی چنین همبستگی بین DWI و CAI وجود ندارد (فرخ و کیم، ۲۰۱۸). علاوه بر آزمایش جدید سایش در مقیاس کوچک، آزمایش جدید سایش در مقیاس بزرگ به عنوان روشی مستقیم برای شبیه‌سازی حفاری و فرایند غلتش دیسک در مقیاس واقعی بر روی سطح تازه سنگ با استفاده از یک ماشین برشی چرخشی^۳ (RCM) توسعه یافته است. از آنجایی که آزمایش بزرگ مقیاس معمولاً زمان‌بر است بنابراین هدف اصلی آن، کالیبراسیون نتایج آزمایش کوچک مقیاس جدید سایش است. در این آزمایش، ابزار دقیق مناسبی برای اندازه‌گیری میزان کاهش قطر دیسک‌کاتر بر حسب میکرون مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل (۸-۳) ساختار کلی دستگاه و روش اندازه‌گیری قطر اولیه دیسک‌کاتر و تعیین میزان کاهش آن نشان داده شده است (فرخ و کیم، ۲۰۱۸).

افت وزنی ویژه کاتر^۴ (Scwl) برابر با افت وزنی دیسک‌کاتر بر حسب گرم در هر متر مکعب از حفاری مکانیزه است. مقایسه نشان داده شده در شکل (۱۰-۳) حاکی از آن است که آزمون بزرگ مقیاس RCM به خوبی توانسته نتایجی نزدیک به نتایج واقعی ارائه کند.

$$Scwl = 1.6335 \times e^{0.6 \times CAI} \quad (۷-۳)$$

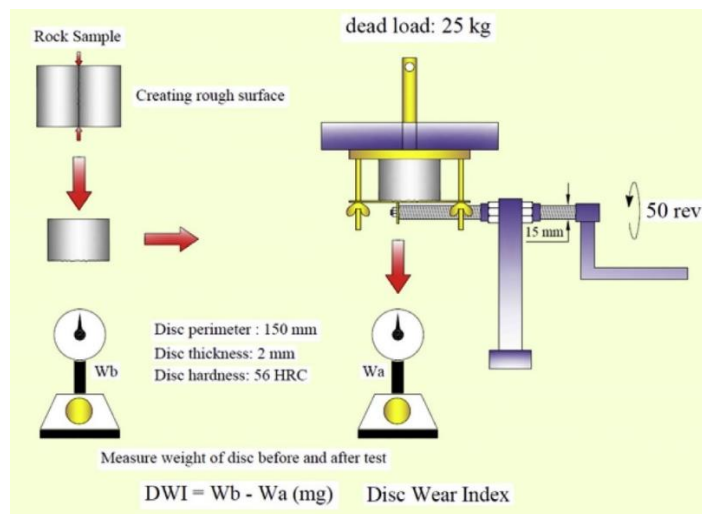
$$Scwl = 6.7018 \times DWI^{0.4352} \quad (۸-۳)$$

^۱ Disc Wear Index

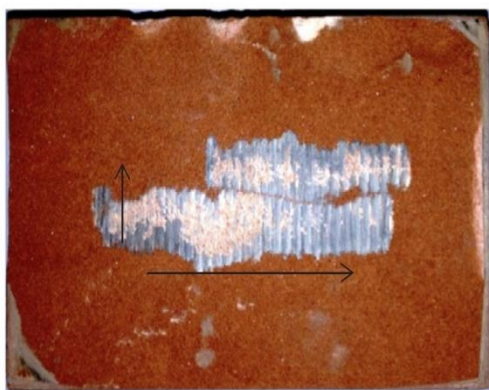
^۲ Kim

^۳ Rotary Cutting Machine (Rcm)

^۴ Specific cutter weight loss



(الف)



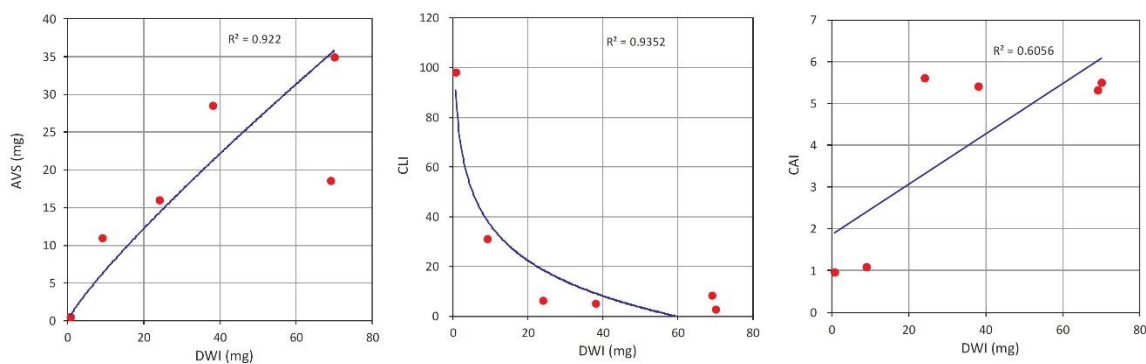
(پ)



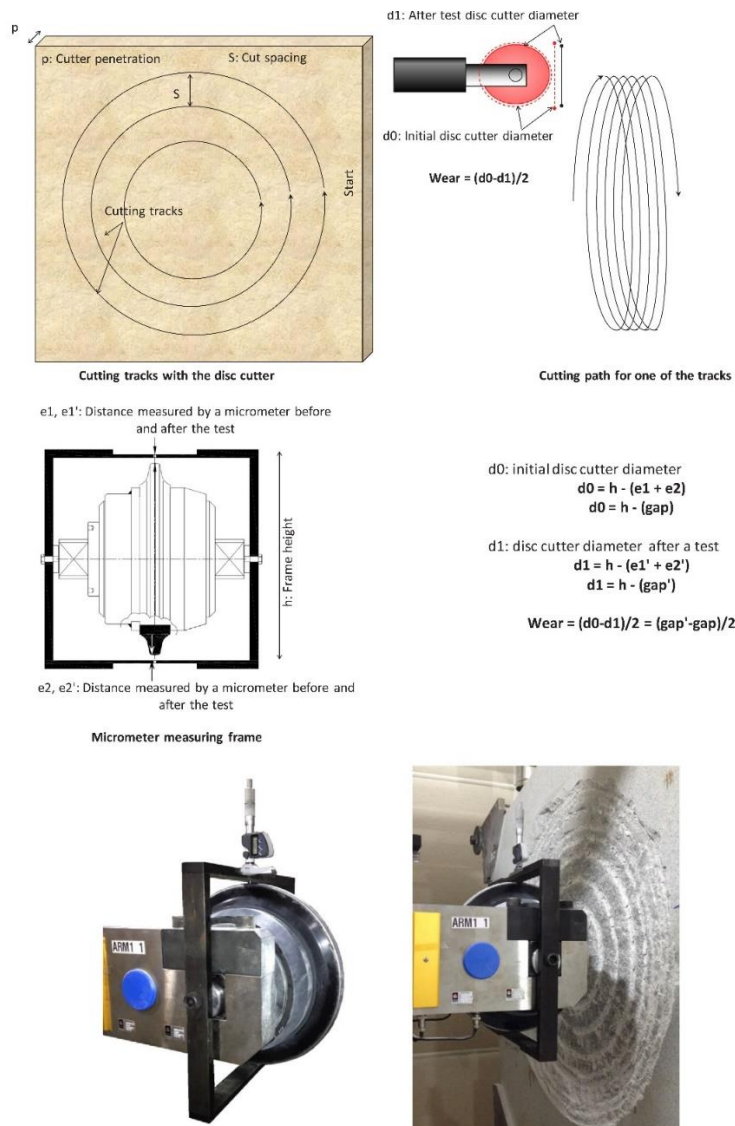
(ب)

شکل ۳-۶: پیکره‌بندی اولیه آزمایش جدید سایش: (الف) روش انجام آزمایش و اندازه‌گیری DWI؛ (ب) دستگاه آزمایش جدید؛

(پ) سطح نمونه سنگ پس از آزمایش (فرخ و کیم، ۲۰۱۸)

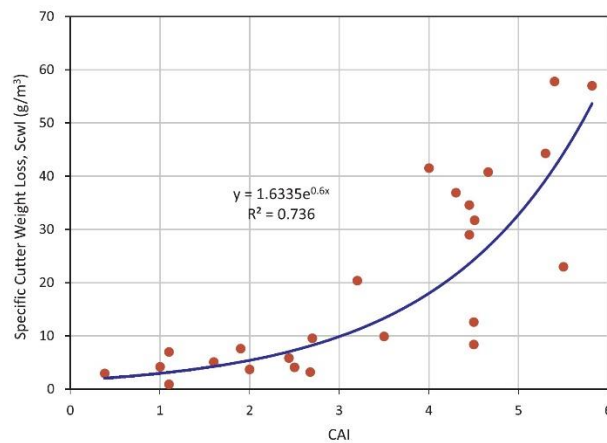


شکل ۳-۷: همبستگی بین شاخص DWI و شاخص‌های AVS، CLI و CAI (فرخ و کیم، ۲۰۱۸)

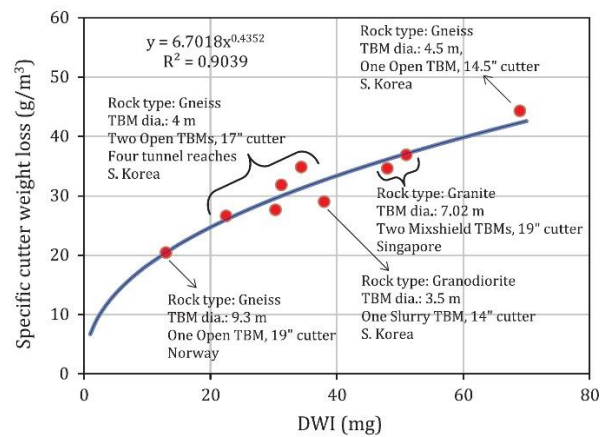


شکل ۳-۸: قاب اندازه‌گیری میکرومتری برای دیسک‌کاتر در آزمایش جدید سایش در مقیاس بزرگ (فرخ و کیم، ۲۰۱۸)

¹ Frame

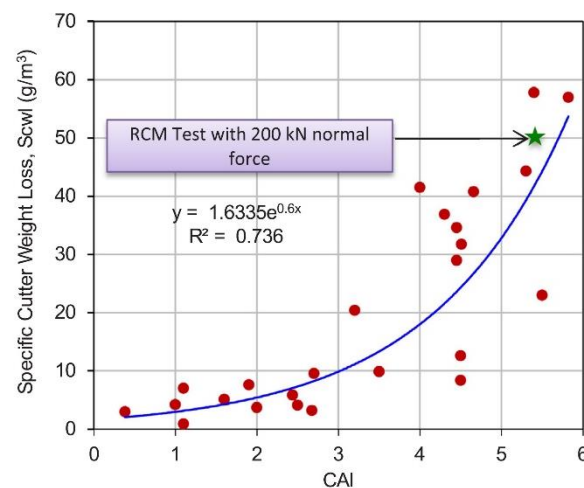


(ب)

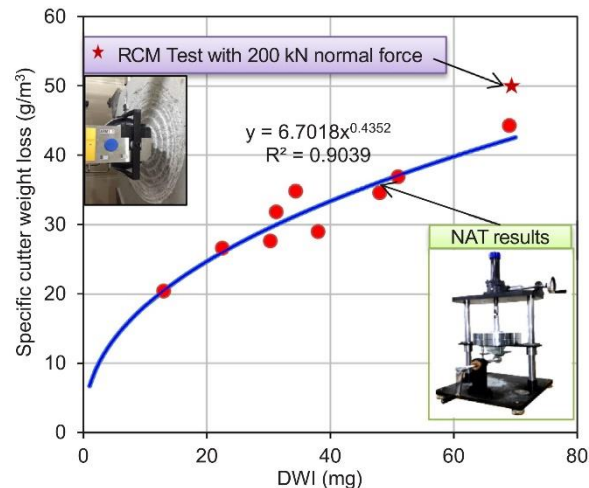


(الف)

شکل ۳-۹: همبستگی DWI و CAI با افت وزنی ویژه دیسک کاتر (فرخ و کیم، ۲۰۱۸)



(ب)



(الف)

شکل ۳-۱۰: مقایسه نتایج آزمایش RCM و روابط پیشنهادی: (الف) مقایسه بین نتیجه آزمایش RCM و رابطه پیشنهاد شده توسط آزمون جدید سایش NAT؛ (ب) مقایسه بین نتیجه آزمایش RCM و رابطه جدید (فرخ و کیم، ۲۰۱۸)

۳-۲-۷-آزمایش سایش فروروی غلتشی (RIAT)

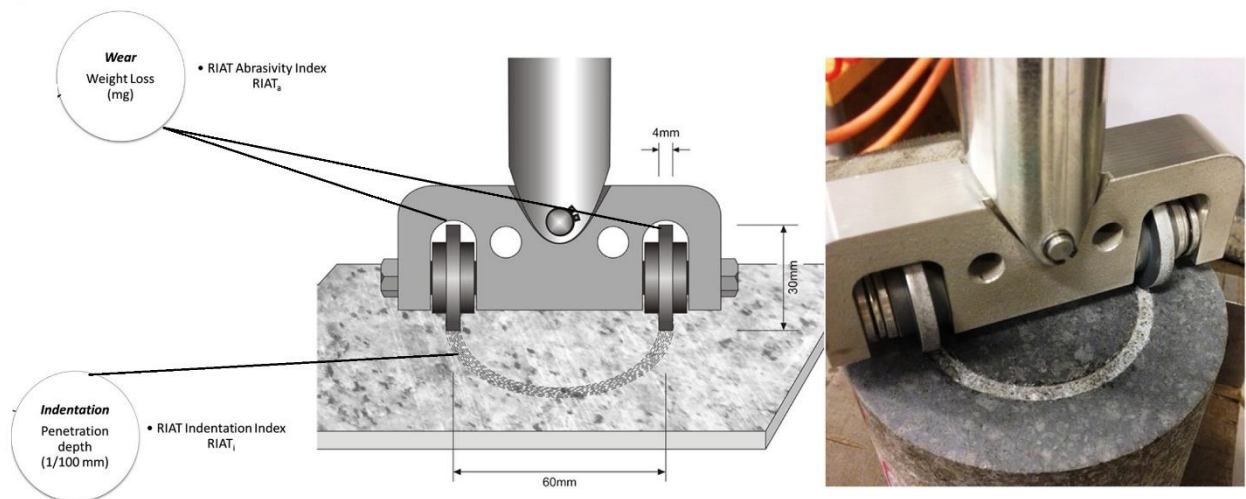
مکیاس^۱ و همکاران (۲۰۱۵) روشی برای تعیین ساینده سنگ توسعه داده‌اند که تا حدود زیادی توانسته رفتار واقعی سایش سنگ را در طی حفاری TBM سنگ سخت شبیه‌سازی کند. این روش تحت عنوان آزمایش سایش فروروی غلتشی^۲ (RIAT) با استفاده از یک رینگ کاتر مینیاتوری^۳ تحت بار محوری ۱۲۵۰ نیوتن، سرعت غلتشی ۴۰ دور در دقیقه و در طی ۳۰ دقیقه انجام می‌شود (شکل ۳-۱۱). در نتیجه این آزمایش، دو شاخص

^۱ Macias et al.

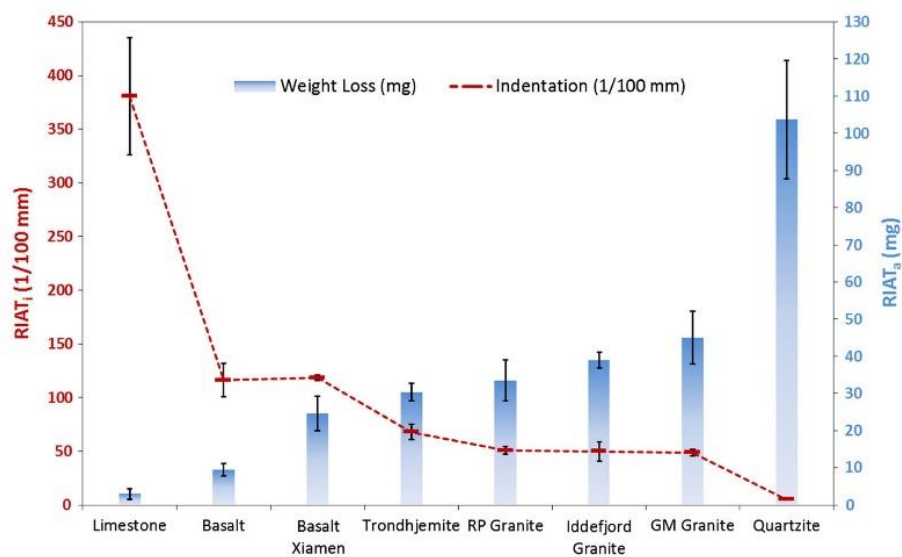
^۲ Rolling Indentation Abrasion Test

^۳ Miniature Ring Cutter

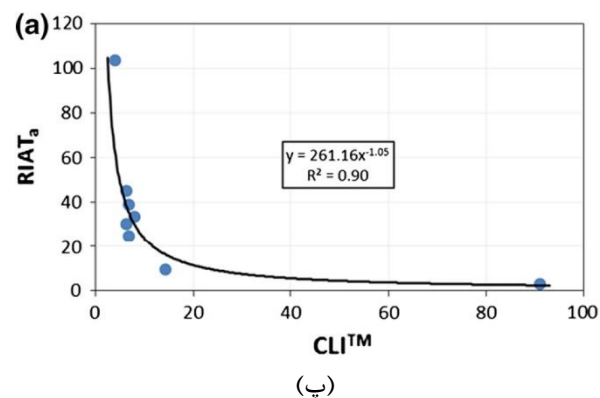
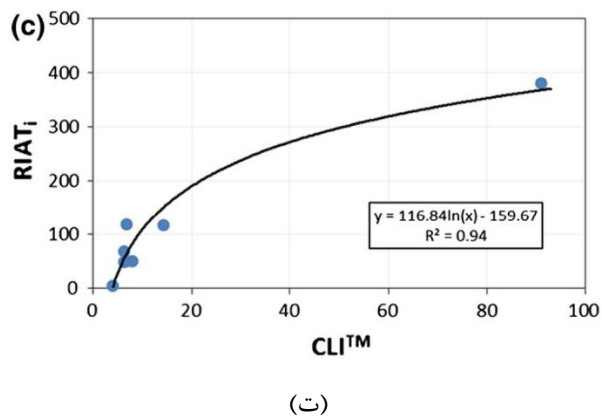
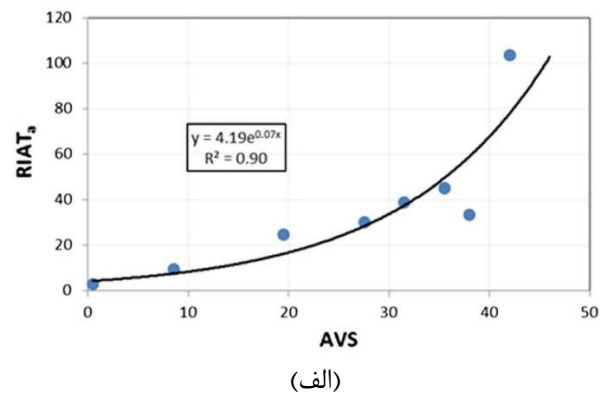
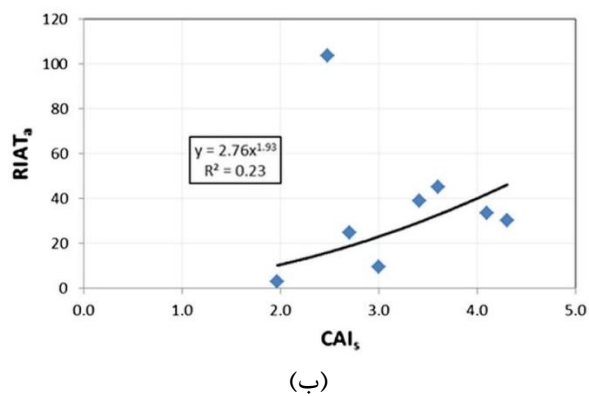
سایش و فروروی قابل ارائه است. شاخص سایش RIAT ($RIAT_a$) به عنوان افت وزنی رینگ کاترهای مینیاتوری بر حسب میلی گرم در طی آزمایش است. همچنین شاخص فروروی RIAT ($RIAT_i$) به عنوان مقدار متوسط ده اندازه گیری توزیع شده به طور مساوی از عمق فروروی کاتر در سنگ بر حسب 0.01 میلی متر تعریف می شود. در شکل (۳-۱۲) افت وزنی دیسک کاتر (میلی گرم) و میزان فروروی آن (0.01 میلی متر) در چند نوع مختلف سنگ طی آزمایش RIAT نشان داده شده است. علاوه بر این، در شکل (۳-۱۳) شاخص های سایش و فروروی به دست آمده از آزمایش RIAT با نتایج آزمایش های رایج سایش مقایسه شده است. طبق این نتایج مشخص است که بر خلاف همبستگی مناسب شاخص های آزمون RIAT با آزمون NTNU، همبستگی خوبی بین CAI و شاخص های آزمون RIAT مشاهده نمی شود (مکیاس و همکاران، ۲۰۱۵).



شکل ۳-۱۱: آزمایش سایش فروروی غلتشی (مکیاس و همکاران، ۲۰۱۵)



شکل ۳-۱۲: افت وزنی و میزان فروروی دیسک‌ها در سنگ‌های مختلف طی آزمون RIAT (مکیاس و همکاران، ۲۰۱۵)



شکل ۳-۱۳: مقایسه نتایج آزمون RIAT با شاخص‌های AVS، CAI و CLI (مکیاس و همکاران، ۲۰۱۵)

۳-۳- مدل‌های پیش‌بینی فرسودگی دیسک‌کاتر

پس از ورود ماشین‌های تونل‌زنی در عملیات تونلسازی در سنگ سخت، مدل‌های پیش‌بینی متعددی برای تخمین و ارزیابی عملکرد TBM و فرسودگی سایشی دیسک‌کاترها توسعه یافتند که به مرور زمان تکمیل‌تر و به روزتر شدند. مطالعاتی مانند ازدمیر و همکاران (۱۹۷۷)^۱، لیسلرود^۱ (۱۹۸۸)، اوندت^۲ (۱۹۸۹)، نلسون^۳ و همکاران (۱۹۹۴)، برولند (۲۰۰۰)، رستمی (۲۰۰۵ و ۲۰۰۷)، میدل و همکاران (۲۰۰۸)، بینیاوسکی و همکاران (۲۰۰۹)^۴ و فرنزل (۲۰۱۱) نمونه‌هایی از تلاش محققان برای توسعه مدل‌های پیش‌بینی نرخ فرسودگی هستند (فرنزل و همکاران، ۲۰۱۱). اشنایدر و همکاران^۵ (۲۰۱۲) مهم‌ترین نقطه ضعف در بیشتر این مدل‌ها را وجود تنها یک شاخص سایش به عنوان پارامتر ورودی مدل و نادیده گرفتن تاثیر پارامترهایی مانند شکستگی‌های توده‌سنگ برشمرده‌اند. در ادامه به مهم‌ترین و رایج‌ترین مدل‌های پیش‌بینی عمر سایشی دیسک‌کاترها و میزان فرسودگی آن‌ها به طور خلاصه اشاره می‌شود.

۳-۳-۱- مدل گهرینگ (۱۹۹۵)

گهرینگ^۶ در سال ۱۹۹۵ از بررسی داده‌های مربوط به پروژه‌های مختلف، معادله‌ای ساده با ضریب همبستگی ۰,۷ بین CAI و افت وزنی ناشی از فرسودگی دیسک‌کاتر بر حسب میلی گرم فولاد بر متر غلتش (v_s) برقرار کرده که در رابطه (۳-۹) ارائه شده است. بعدها، میدل و همکاران (۲۰۰۱) این مدل را با لحاظ ضریب ۰,۶۵ به جای ۰,۷۴ برای در نظر گرفتن بهبود وضعیت آلیاژ فولاد اصلاح نمود (رابطه (۳-۱۰)). در این مدل عمر سایشی دیسک‌کاتر طبق رابطه (۳-۱۱) تعیین می‌شود (کو و همکاران، ۲۰۱۴).

$$v_s = 0.74CAI^{1.93} \quad (۳-۹)$$

$$v_s = 0.65CAI^{1.93} \quad (۳-۱۰)$$

$$H_f = \frac{\Delta G \cdot p \cdot D^2}{4\bar{D} \cdot v_s \cdot N} \quad [m^3/cutter] \quad (۳-۱۱)$$

^۱ Lislerrud

^۲ Ewendt

^۳ Nelson et al.

^۴ Bieniawski et al.

^۵ Schneider et al.

^۶ Gehring

که در آن H_f عمر دیسک کاتر بر حسب حجم حفاری تونل (متر مکعب)، ΔG افت جرمی دیسک کاتر بر حسب گرم، p عمق نفوذ دیسک کاتر بر حسب میلی متر، D قطر TBM بر حسب متر، $\bar{D}$ میانگین قطر چرخش دیسک کاتر برابر با $0.6D$ و N تعداد دیسک کاتر روی کاترهد است.

۳-۳-۲- مدل CSM (۱۹۹۷)

مدل CSM که در مدرسه معدن کلرادو توسط رستمی (۱۹۹۷) توسعه یافته است که با استفاده از شاخص آزمایشگاهی CAI و متوسط مسافت غلتش یک کاتر می تواند عمر دیسک کاتر را تخمین بزند و برای تخمین سایر پارامترهای فرسودگی مانند تعداد کل کاترهای مورد نیاز، هزینه کاترها بر واحد حجم سنگ حفاری شده، هزینه کل کاترها، زمان تعویض کاتر و تاخیرات اجرایی نیز کاربرد دارد. روابط اصلی در این مدل طبق روابط (۳-۱۲) تا (۳-۱۶) تعریف می شوند (کو و همکاران، ۲۰۱۴).

$$CL = \frac{2054}{CAI} \frac{D_c}{432} \quad [km] \quad (3-12)$$

$$\bar{s}_i = \frac{0.6D\pi}{1000} \quad [km] \quad (3-13)$$

$$U_c = \frac{CL \cdot \bar{k}}{\bar{s}_i} \quad (3-14)$$

$$\bar{k} = \sum g k_k k_v \quad (3-15)$$

$$H_f = \frac{\pi D^2}{4} \cdot U_c \cdot \frac{p}{1000} \cdot \frac{2S}{1000D} \quad [m^3/cutter] \quad (3-16)$$

که در آن H_f عمر سایشی دیسک کاتر بر حسب حجم حفاری تونل (متر مکعب)، CL حداکثر مسافت خطی غلتش یک دیسک کاتر پیش از فرسودگی و تعویض بر حسب کیلومتر، CAI شاخص سایش سرشار، D_c قطر دیسک کاتر بر حسب میلی متر، $\bar{s}_i$ میانگین مسافت چرخش دیسک کاترها بر حسب کیلومتر، D قطر TBM بر حسب متر، U_c ماکزیمم تعداد چرخش دیسک کاتر به دور محور خود تا پیش از زمان تعویض، p عمق نفوذ بر حسب میلی متر، S فاصله بین دیسک کاترها بر حسب میلی متر، $D/2S$ تقریباً برابر با تعداد دیسک کاترها بر روی

کاترهد، $\bar{k}$ ضریب تصحیح فرسودگی دیسک کاتر وابسته به ناحیه نصب آن بر روی کاترهد و g نسبت وزنی تعداد دیسک کاترهای مرکزی، میانی و پیرامونی است ($\sum g = 1$). ضمناً k_k و k_v بر اساس اطلاعات جدول (۳-۵) تعیین می‌شوند. اگر اطلاعاتی در مورد تعداد دیسک کاترها وجود نداشته باشد، ضریب تصحیح $\bar{k}$ برابر با ۰/۶۷ در نظر گرفته می‌شود (کو و همکاران، ۲۰۱۴).

جدول ۳-۵: ضرایب تصحیح فرسودگی دیسک کاتر (کو و همکاران، ۲۰۱۴)

ناحیه نصب	k_k	k_v
دیسک کاتر مرکزی	۰,۵۶	۱,۰
دیسک کاتر میانی	۰,۷۶	۱,۰
دیسک کاتر پیرامونی	۰,۹۲	۰,۵۴

۳-۳-۳ مدل NTNU (۱۹۹۸)

مدل NTNU در سال ۱۹۸۸ توسط برولند و همکاران ارائه و در سال ۱۹۹۸ توسط برولند به روز شد. مدل NTNU پیشنهادی اجرایی بیشتری نسبت به مدل CSM دارد و بر اساس تعداد زیادی داده میدانی از پروژه‌های مختلف حاصل شده است. این مدل از نمودارهای خاص و روابط ساده‌ای برای پیش‌بینی عمر دیسک کاتر و هزینه آن استفاده می‌کند. پارامتر ورودی این مدل، شاخص عمر کاتر (CLI) است (برولند، ۱۹۹۸). در این مدل، عمر سایشی دیسک کاتر طبق رابطه (۳-۱۷) تعیین می‌شود (کو و همکاران، ۲۰۱۴).

$$H_f = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{H_0 k_D k_Q k_{RPM} k_N}{N} \cdot p \cdot \text{RPM} \cdot \frac{60}{1000} \quad [\text{m}^3/\text{cutter}] \quad (3-17)$$

که در آن H_f عمر دیسک کاتر بر حسب حجم حفاری تونل (متر مکعب)، D قطر TBM بر حسب متر، H_0 متوسط عمر پایه دیسک کاتر متناسب با شاخص عمر کاتر (CLI)، p عمق نفوذ دیسک کاتر بر حسب میلی‌متر و RPM تعداد دور کاترهد است. ضمناً k_D ، k_Q ، k_{RPM} و k_N به ترتیب ضرایب تصحیح برای قطر ماشین، درصد کوارتز، دور دستگاه و تعداد دیسک کاترها هستند که با مراجعه به برولند (۱۹۹۸) تعیین می‌شوند.

۳-۳-۴- مدل میدل و همکاران (۲۰۰۱)

میدل و همکاران (۲۰۰۱) نشان دادند که فرسودگی سایشی ابزارها با شاخص سایش سرشار (CAI) و مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ (UCS) در ارتباط است. طبق این مدل، فرسودگی ابزار می‌تواند بسیار کم در بعضی از سنگ‌های ضعیف با عدد CAI حدود ۲ و بسیار زیاد در گرانیتهایی با مقاومت زیاد با شاخص سایش سرشار تقریباً ۶ باشد. بر اساس این مدل، نرخ فرسودگی ویژه دیسک‌کاتر^۱ (SDCWR) (بر حسب متر مکعب حفاری به ازای یک دیسک) به وسیله مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ (بر حسب MPa) و CAI طبق روابط (۳-۱۸) تا (۳-۲۲) تعیین می‌شود (میدل و همکاران، ۲۰۰۱).

$$CAI=2: SDCWR \cong 10^{(0.000020\sigma_c^2 - 0.0088\sigma_c + 3.9944)} \quad (3-18)$$

$$CAI=3: SDCWR \cong 10^{(0.000007\sigma_c^2 - 0.0056\sigma_c + 3.1889)} \quad (3-19)$$

$$CAI=4: SDCWR \cong 10^{(0.000010\sigma_c^2 - 0.0037\sigma_c + 2.8387)} \quad (3-20)$$

$$CAI=5: SDCWR \cong 10^{(0.000010\sigma_c^2 - 0.0037\sigma_c + 2.4669)} \quad (3-21)$$

$$CAI=6: SDCWR \cong 10^{(0.000005\sigma_c^2 - 0.0037\sigma_c + 2.2371)} \quad (3-22)$$

۳-۳-۵- مدل بیناوسکی (۲۰۰۶)

بیناوسکی و همکاران در سال ۲۰۰۶ شاخص قابلیت حفاری توده‌سنگ^۲ (RME) را ابتدا در کنگره جهانی تونل^۳ (WTC) در سئول و سپس با انجام برخی اصلاحات در سال ۲۰۰۷ در کنفرانس حفاری و تونلسازی سریع^۴ (RETC) در تورنتو ارائه نمودند. سرانجام در سال ۲۰۰۸ این شاخص با توسعه چند رابطه خاص برای پیش‌بینی سرعت TBM‌های باز، تک‌سپری و دوسپری در کنگره جهانی تونل در آگرا^۵ ارائه شد (جدول (۳-۶)). از مزایای

¹ Specific Disk Cutter Wear Rate

² Rock Mass Excavability Index

³ World Tunnel Congress

⁴ Rapid Excavation & Tunneling Conference

⁵ Agra

این شاخص می‌توان به اختصاص ۱۰ نمره از RME به همگنی سینه‌کار، تخمین پیشروی ماشین‌های تونل‌زنی در مناطق گسله و تخمین مصرف دیسک کاتر اشاره کرد (بینیاوسکی و همکاران، ۲۰۰۹).

جدول ۳-۶: امتیازدهی پارامترهای ورودی شاخص RME (بینیاوسکی و همکاران، ۲۰۰۹)

مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ بکر (۰ تا ۲۵ امتیاز)									
σ_c (MPa)		>5		۵-۳۰		۳۰-۹۰		۹۰-۱۸۰	
امتیاز		۴		۱۴		۲۵		۱۴	
حفرپذیری (۰ تا ۱۵ امتیاز)									
DRI		>80		۶۵-۸۰		۵۰-۶۵		۴۰-۵۰	
امتیاز		۱۵		۱۰		۷		۳	
ناپوستگی در جلوی سینه‌کار تونل (۰ تا ۳۰ امتیاز)									
همگنی			تعداد درزه در متر					جهت‌داری نسبت به محور تونل	
همگن		مختلط		۰-۴		۴-۸		۸-۱۵	
امتیاز		۱۰		۰		۲		۷	
زمان پایداری (۰ تا ۲۵ امتیاز)									
ساعت		<5		۵-۲۴		۲۴-۹۶		۹۶-۱۹۲	
امتیاز		۰		۲		۱۰		۱۵	
جریان آب زیرزمینی									
لیتر/ثانیه		>100		۷۰-۱۰۰		۳۰-۷۰		۱۰-۳۰	
امتیاز		۰		۱		۲		۴	

مصرف دیسک کاتر (W_f) برای سه سطح از شاخص سایش سرشار یعنی $CAI > 3$ ، $CAI > 3$ ، $CAI > 3$ ، $CAI < 1.5$ طبق مدل RME برای سنگ‌هایی با مقاومت فشاری بیش از ۴۵ مگاپاسکال به ترتیب طبق روابط (۳-۲۳) تا (۳-۲۵) قابل محاسبه است (بینیاوسکی و همکاران، ۲۰۰۹).

$$W_f \text{ (cutter / m}^3\text{)} = \frac{7.10^6}{RME^{4.8}} \quad (3-23)$$

$$W_f \text{ (cutter / m}^3\text{)} = \frac{628}{RME^{2.77}} \quad (3-24)$$

$$W_f \text{ (cutter / m}^3\text{)} = \frac{15}{RME^{1.96}} \quad (3-25)$$

۳-۳-۶- مدل حسن پور و همکاران (۲۰۱۴)

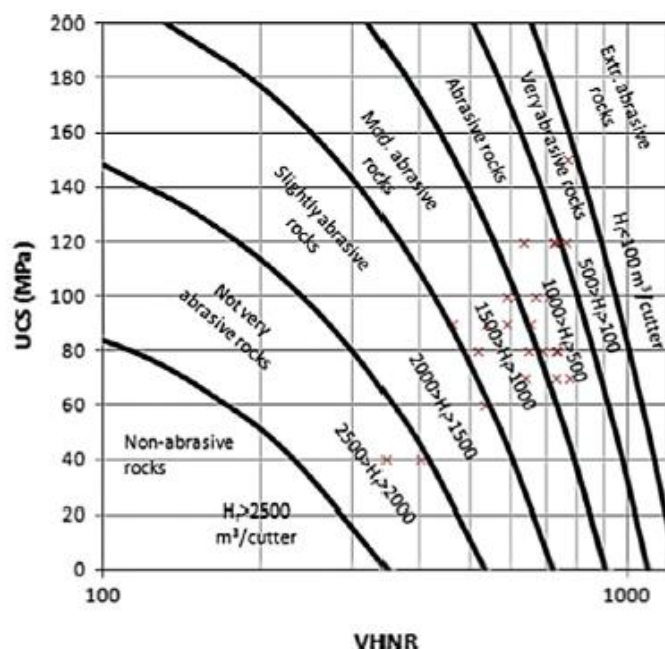
حسن پور و همکاران (۲۰۱۴) مدلی بر اساس شرایط زمین شناسی برای پیش بینی فرسودگی سایشی دیسک کاتر ارائه دادند. پایگاه داده مربوط به این مدل شامل فرسودگی واقعی دیسک کاتر و داده های زمین شناسی برای مقاطع مختلف تونل انتقال آب کرج در ایران بوده که پس از انجام تحلیل های آماری، مدل تجربی ارائه شده است. حسن پور و همکاران (۲۰۱۴) شاخص ساینده گی^۱ (ABI) را به عنوان شاخصی جدید بر اساس عدد سختی ویکرز سنگ (VHNR) و مقاومت فشاری تک محوری سنگ (UCS) به صورت رابطه (۳-۲۶) معرفی نمودند. در این مدل، با استفاده از تحلیل های رگرسیونی ساده و چندمتغیره، مدل های پیش بینی عمر دیسک کاتر برای سنگ های پیروکلاستیک و مافیک به ترتیب به صورت روابط (۳-۲۷) و (۳-۲۸) با ضرایب رگرسیون ۰,۶۸۳ و ۰,۶۹۳ ارائه شد. در شکل (۳-۱۴) نموداری برای پیش بینی عمر سایشی دیسک کاتر بر اساس رابطه (۳-۲۸) نشان داده شده است (حسن پور و همکاران، ۲۰۱۴).

$$ABI = VHNR \cdot \left(\frac{UCS}{100} \right) \quad (۳-۲۶)$$

$$H_f = -940.1 \ln(ABI) + 6939.4 \quad (۳-۲۷)$$

$$H_f = -2.669 VHNR - 7.891 UCS + 3430.955 \quad (۳-۲۸)$$

^۱ Abrasiveness Index

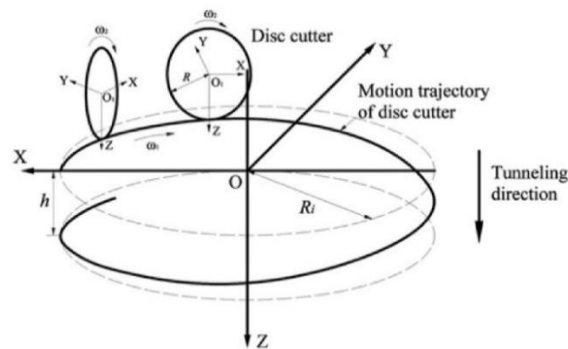


شکل ۳-۱۴: چارتی برای پیش بینی عمر سایشی دیسک کاتر برای سنگهای آذرین و مافیک (حسن پور و همکاران، ۲۰۱۴)

۳-۴- مدل سازی عددی فرایند برش سنگ و فرسودگی سایشی دیسک کاتر

به طور کلی شبیه سازی کامل حرکت دیسک کاتر مستلزم در نظر گرفتن حرکت چرخشی دیسک کاتر حول محور خود، حرکت دورانی دیسک کاتر حول محور تونل بر روی سنگ و نهایتاً حرکت نفوذی دیسک کاتر به داخل سنگ است (شکل (۳-۱۵)) (لی و همکاران، ۲۰۲۰). روش های مختلف مدل سازی عددی بیشتر با هدف بررسی فرایند برش سنگ توسط دیسک کاتر در حفاری مکانیزه به کار رفته اند که در ادامه به طور خلاصه به پیشینه این مطالعات اشاره می شود. هرچند برخی از این مطالعات منحصر در خصوص فرسودگی دیسک کاتر بوده که با تفصیل بیشتری به آنها پرداخته شده است.

¹ Li et al.



شکل ۳-۱۵: مسیر حرکت دیسک کاتر در مدل سازی عددی (لی و همکاران، ۲۰۲۰)

تان و همکاران^۱ (۱۹۹۸) از روش ناپیوستگی جابجایی^۲ (DDM) برای شبیه سازی انتشار ترک ناشی از نیروی برشی دیسک کاتر استفاده کرد. در سال ۲۰۰۵ و ۲۰۰۶، گونگ و همکاران^۳ اثر فاصله داری و جهت داری درزه ها را بر خرد شدن سنگ توسط دیسک کاترهای TBM با استفاده از نرم افزار UDEC بررسی کرد. پارک و همکاران^۴ (۲۰۰۶) برای ارزیابی اثر فشار جانبی و فاصله بین دیسک کاترهای TBM بر خرد شدن سنگ، یک مدل ناهمگن^۵ دو بعدی را با استفاده از نرم افزار FLAC تحلیل نمود. روجک^۶ (۲۰۰۷) و روجک و همکاران (۲۰۱۱) از روش اجزای گسسته برای شبیه سازی فرایند برش سنگ استفاده کرد. چو و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از روش اجزای محدود و نرم افزار AUTODYN-3D فرایند برش سنگ در آزمایش دستگاه برش خطی^۷ (LCM) را شبیه سازی کرده و تأثیر فاصله داری دیسک کاترها بر نیروهای برش را بررسی کرد. ما و همکاران^۸ (۲۰۱۱) با استفاده از کد اجزای محدود (RFPA2D) بر اساس نظریه آماری و مکانیک آسیب، اثر تنش محصورکننده جانبی بر عملکرد دیسک کاترها را بررسی کرد. بجاری و خادمی حمیدی (۲۰۱۲) از نرم افزار UDEC برای بررسی تأثیر فاصله داری و جهت داری درزه ها بر خرد شدن سنگ و روند تشکیل تراشه ها استفاده کرد. مون و او^۹ (۲۰۱۲) نرم افزار تجاری دو بعدی DEM PFC2D را برای شبیه سازی برش سنگ های بکر تحت نسبت های

^۱ Tan et al.

^۲ Displacement Discontinuity Method

^۳ Gong et al.

^۴ Park et al.

^۵ Heterogeneous

^۶ Rojek

^۷ Linear Cutting Machine

^۸ Ma et al.

^۹ Moon and Oh

مختلف فاصله برش دیسک به عمق نفوذ (s/p) به کار برد. مندوزا^۱ (۲۰۱۳) از نرم افزار PFC3D برای تخمین نیروهای برش دیسک کاترها حین خرد کردن سنگ استفاده کرد. ژائو و همکاران^۲ (۲۰۱۴) اندرکنش بین اجزای TBM و خصوصیات توده سنگ را به صورت عددی شبیه سازی و تحلیل کرد. لیو و همکاران^۳ (۲۰۱۵) روند خرد شدن سنگ توسط دیسک کاتر در زمین های مختلط^۴ را با استفاده از روش عددی منی فولد^۵ (NNM) مطالعه کرد. سان و همکاران^۶ (۲۰۱۵) از روش های عددی برای بررسی سازوکار خردایش سنگ و نهایتا چیدمان بهینه دیسک کاترها بر روی کاترهد TBM استفاده کرد. لی و دو^۷ (۲۰۱۶) از کد تجاری LS-DYNA بر اساس روش اجزای محدود، برای شبیه سازی فرایند دینامیکی برش سنگ و نیز تجزیه و تحلیل ناحیه پلاستیک متأثر از عملکرد دیسک کاتر در سنگ استفاده کرد و تغییرات نیروهای برشی دیسک کاتر را در طی فرایند خرد شدن سنگ نسبت به زمان مدل سازی نشان داد (شکل (۳-۱۶)). مقدار این نیروها با میزان نرخ نفوذ دیسک کاتر در سنگ نسبت مستقیم دارد. لی و همکاران (۲۰۱۶) سازوکار خرد شدن سنگ با دیسک کاتر گوه ای را با مدل عددی ذرات پیوندی^۸ (BPM) بررسی کرد. ژای و همکاران^۹ (۲۰۱۶ و ۲۰۱۷) از یک روش نوین عددی بدون مش^{۱۰} تحت عنوان دینامیک عمومی ذرات^۱ (GPD) برای مطالعه اثر درزه ها بر عملکرد دیسک کاترهای TBM استفاده کرد. آن ها در سال ۲۰۱۹ با شبیه سازی شکست سنگ توسط دیسک کاتر TBM با روش GPD3D تحت تنش های جانبی مختلف دریافتند که با افزایش تنش جانبی نیروهای لازم برای ایجاد ترک، افزایش یافته و بیشینه زاویه ترک ها نیز کاهش می یابد. لایرا و همکاران^۲ (۲۰۱۷) چندین مدل عددی برای شبیه سازی آزمون آزمایشگاهی برش سنگ توسط یک دیسک کاتر تکی را بر اساس روش اجزای گسسته / اجزای محدود (DEM/FEM) ارائه نمود و ضمن مقایسه نتایج عددی، نظری و واقعی، تحلیل حساسیتی بر روی پارامترهای هندسی دیسک کاتر،

¹ Mendoza

² Zhao et al.

³ Liu et al.

⁴ Mixed Grounds

⁵ numerical manifold method

⁶ Sun et al.

⁷ Li and Du

⁸ Bonded particle model

⁹ Zhai et al.

¹ Mesh-Free

¹ General Particle Dynamics

¹ Labra et al.

سرعت برش، سرعت نفوذ و فاصله بین دیسک کاترها انجام داد. محمدنژاد و همکاران (۲۰۱۷) با تلفیق روش‌های اجزای محدود و اجزای گسسته فرایند برش سنگ توسط دیسک کاتر را مطالعه نمود. گوئیجو و کائی‌یوان^۱ (۲۰۱۸) با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS شبیه‌سازی دینامیکی و مکانیکی فرایند برش سنگ توسط دیسک کاتر را مطالعه کرد. لیو و همکاران (۲۰۱۹) از روش اجزای گسسته برای مطالعه روش‌های عددی و آزمایشگاهی برش دیسک کاتر TBM تحت شرایط تنش محصورکننده بالا استفاده کردند. ژائو و همکاران^۲ (۲۰۱۹) برای بررسی ساییدگی دیسک کاتر، آزمایش‌های غلتشی برشی^۳ را با نرم‌افزار ANSYS و با در نظر گرفتن جهت‌داری و فاصله‌داری درزه‌ها شبیه‌سازی نمود. ژانگ و همکاران^۴ (۲۰۲۰) سازوکار خرد شدن سنگ‌های مختلف را با استفاده از PFC3D و آزمایش‌های فیزیکی بررسی نمود و شروع و انتشار ترک را برای تشکیل تراشه‌های سنگی توسط دیسک کاتر در زمین‌های مختلط مطالعه کرد. بر اساس این مطالعه، افزایش نرخ نفوذ، تعداد چرخش کاترهد و بهینه شدن فاصله بین دیسک کاترها موجب افزایش تراکم ترک‌ها در سنگ شده و در نسبت فاصله‌داری دیسک کاتر به نفوذ (S/P) برابر با ۲۵، انرژی ویژه خردایش سنگ کمینه می‌شود (شکل (۳-۱۷)).

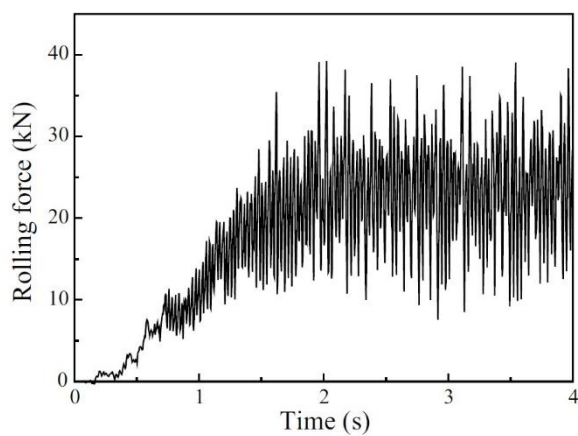
جیان و همکاران (۲۰۱۵) فرایند خردایش سنگ‌ها توسط دیسک کاتر و فرسودگی سایشی آن‌ها را با نرم‌افزار ANSYS مدل کردند. طبق این مدل‌سازی، توزیع تنش در لبه دیسک کاترها به گونه‌ای است که مقدار تنش در ناحیه تماس بین دیسک کاتر و سنگ بیشینه است (شکل (۳-۱۸-الف)). از آنجایی که معمولا در یک جسم ایزوتروپ و یکنواخت، ناحیه تنش ماکزیمم بیشترین مقدار فرسودگی سایشی را داراست، بنابراین می‌توان دریافت که لبه دیسک کاتر بیشترین مقدار فرسودگی را در حین خرد کردن سنگ متحمل می‌شود که با پیشرفت فرسودگی در دیسک کاتر و افزایش سطح تماس بین سنگ و دیسک کاتر، تنش اعمالی به سطح سنگ کاهش می‌یابد و متعاقبا کارایی خردایش سنگ نیز کمتر می‌شود (شکل (۳-۱۸-ب و پ) (جیان و همکاران، ۲۰۱۵)).

¹ Guiju and Caiyuan

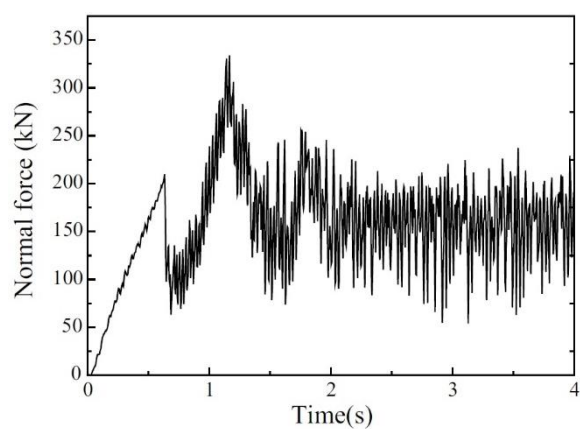
² Zhao et al.

³ Rolling Boring Tests

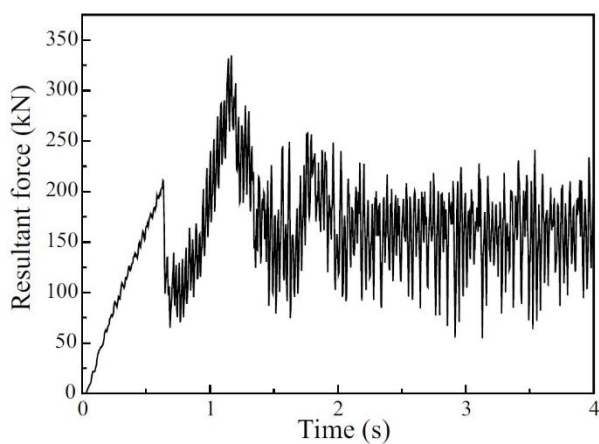
⁴ Zhang et al.



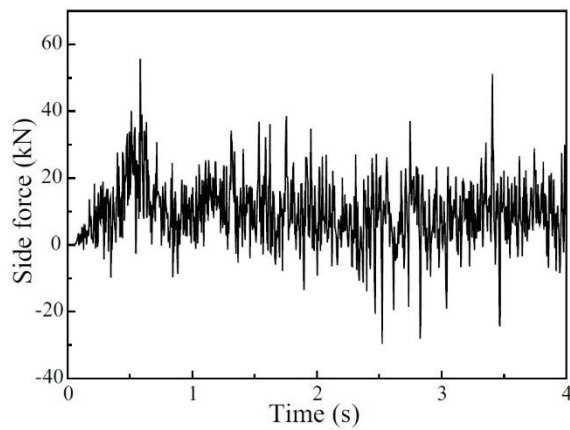
(ب)



(الف)

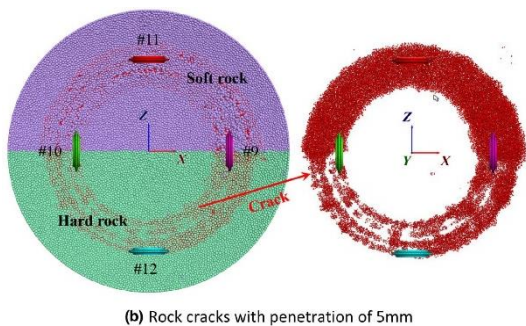


(ت)



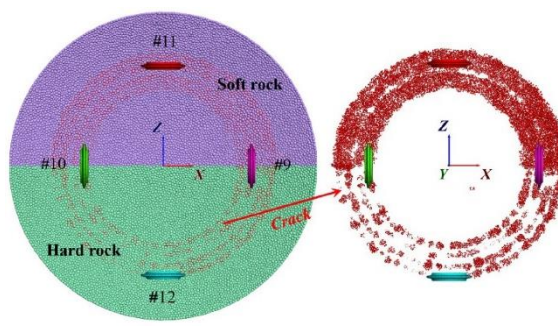
(پ)

شکل ۳-۱۶: تغییرات نیروهای برشی دیسک کاتر در مدل عددی بر حسب زمان: (الف) نیروی نرمال؛ (ب) نیروی غلتشی؛ (پ) نیروی جانبی؛ (ت) نیروی برآیند (لی و دو، ۲۰۱۶)



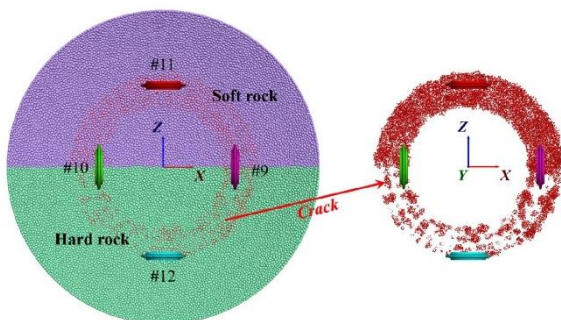
(b) Rock cracks with penetration of 5mm

(ب)



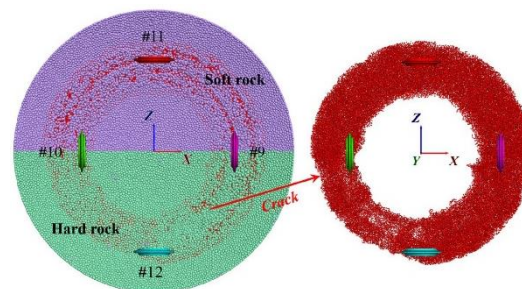
(a) Rock cracks with penetration of 3mm

(الف)



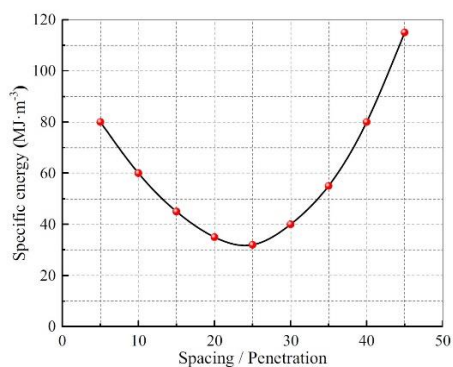
(a) Cutter spacing reduced by 20%

(ت)

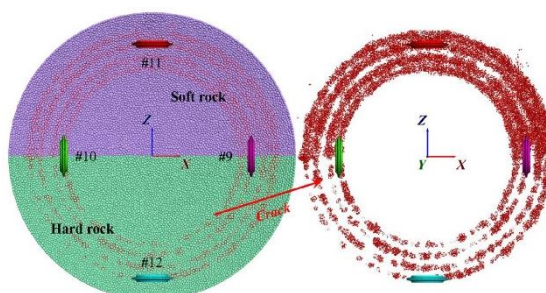


(b) Cutter spacing increased by 20%

(پ)

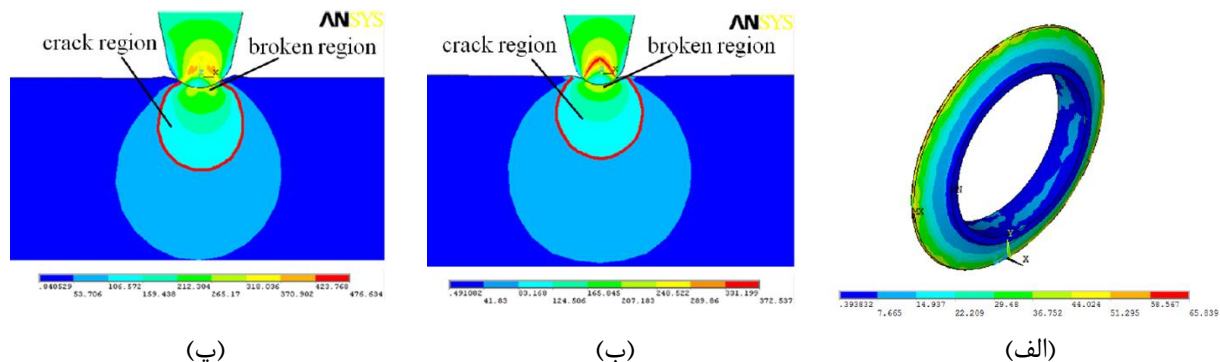


(ج)



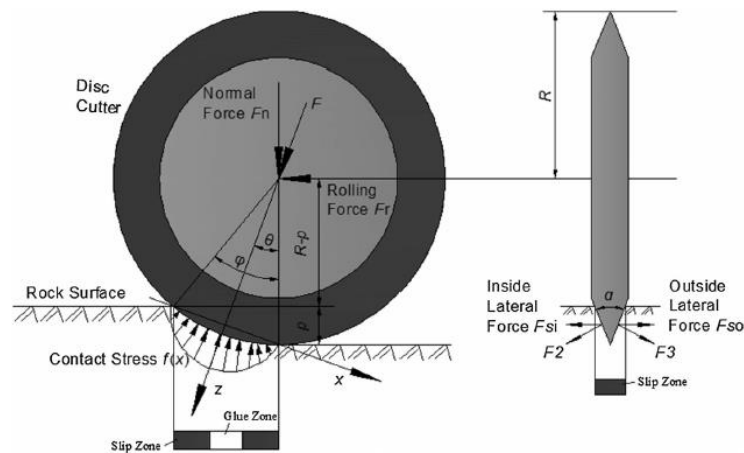
(ث)

شکل ۳-۱۷: ترک‌های ایجاد شده در سنگ تحت شرایط مختلف تحلیل عددی (الف) نرخ نفوذ ۳ میلی‌متر طی یک دور چرخش کاترهد؛ (ب) نرخ نفوذ ۵ میلی‌متر طی یک دور چرخش کاترهد؛ (پ) نرخ نفوذ ۳ میلی‌متر طی سه دور چرخش کاترهد؛ (ت) کاهش ۲۰ درصدی فاصله‌داری دیسک‌ها نسبت به شرایط تحلیل (الف)؛ (ث) افزایش ۲۰ درصدی فاصله‌داری دیسک‌ها نسبت به شرایط تحلیل (الف)؛ (ج) تغییرات انرژی ویژه حفاری سنگ با نسبت فاصله‌داری/نفوذ (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۰)



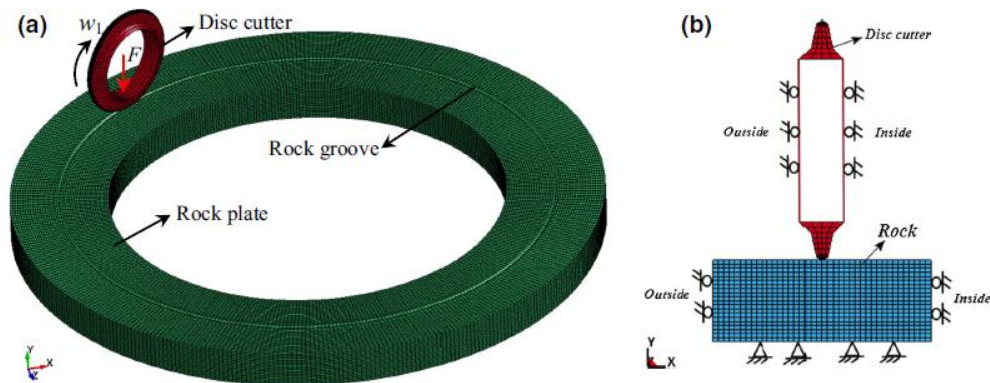
شکل ۳-۱۸: توزیع تنش در سنگ و دیسک کاتر در تحلیل عددی (الف) توزیع تنش روی لبه دیسک کاتر؛ (ب) توزیع تنش در گنیس با دیسک بدون فرسودگی؛ (پ) توزیع تنش در گنیس ماگماتیکی در اثر حفاری دیسک فرسوده (جیان و همکاران، ۲۰۱۵)

یانگ و همکاران (۲۰۱۵) مدل عددی را بر اساس روش اجزای محدود دینامیکی صریح به کمک نرم افزار ANSYS/LS DYNA، برای ارزیابی نیروهای برش و فرسودگی دیسک کاتر در فرایند تونلسازی ارائه نمود که در آن مسیر دایره‌ای شکل برای در نظر گرفتن مسیر واقعی دوران دیسک کاترهای TBM فرض شد. طبق این فرض که برخلاف روش‌های حل مرسوم است (حرکت دیسک کاتر بر روی مسیر مستقیم)، نیروهای جانبی دیسک کاتر تکی دیگر متقارن نیست. طی این مدل‌سازی عددی مشخص شد که نیروهای برشی جانبی دیسک کاتر، قویاً بر میزان فرسودگی دیسک کاتر تاثیر می‌گذارد و نهایتاً یک مدل نظری برای پیش‌بینی نیروی برش دیسک کاتر ارائه شد که ضرایب تصحیحی برای مسیر دایره‌ای دوران دیسک کاتر و فرسودگی دیسک کاتر در آن اعمال شده است. نتیجه این مدل‌سازی این بود که میزان فرسودگی دیسک کاترها با عمق نفوذ در یک مسافت معینی از حفاری، فاصله نصب دیسک کاترها نسبت به مرکز کاترهد و نیز با نیروی نرمال وارد بر دیسک کاتر نسبت مستقیم دارد (یانگ و همکاران، ۲۰۱۵). در شکل (۳-۱۹) ناحیه تماس بین سنگ و دیسک کاتر بر اساس نظریه‌های کلاسیک و هندسه برش نشان داده شده است. مطابق این شکل، توزیع فشار در ناحیه تماس سنگ-دیسک کاتر تابع هندسه برش (قطر و عمق نفوذ) است. در شکل (۳-۲۰) فرایند عملیات برش توسط یک دیسک کاتر تکی بر روی یک مسیر دایره‌ای و همچنین شرایط مرزی دیسک کاتر نشان داده شده است (یانگ و همکاران، ۲۰۱۵).



شکل ۳-۱۹: ناحیه تماس بین یک تک دیسک و سنگ و نیروهای برش (نرمال، غلتشی و جانبی) دیسک کاتر (یانگ و همکاران،

(۲۰۱۵)



شکل ۳-۲۰: فرایند عملیات برش توسط یک تک دیسک با روش اجزای محدود (ب) شرایط مرزی (یانگ و همکاران، ۲۰۱۵)

۳-۵- جمع بندی

در این فصل به مهم ترین مطالعات انجام شده توسط محققین پیشین در ارتباط با فرسودگی سایشی دیسک کاترهای TBM پرداخته شد. این مطالعات در دو بخش عمده آزمایش های ساینده سنگ و مدل های پیش بینی عمر سایشی دیسک کاتر ارائه شد. در بخش اول، شاخص های اصلی ساینده سنگ بیان شده و در بخش دوم، کاربرد این شاخص ها در مدل های تجربی رایج نشان داده شده است. در صورت انتخاب مناسب این مدل های تجربی بر اساس خصوصیات پروژه و نیز با در نظر گرفتن خصوصیات اصلی بانک داده ها قادر هستند تا عمر سایشی دیسک

کاترها را تخمین بزنند. علاوه بر این، بر اساس مدل‌های عددی و با در نظر گرفتن خصوصیات واقعی مساله و نیز شرایط مرزی مناسب، می‌توان روند فرسودگی سایشی دیسک‌کاترها را بررسی نمود. البته در همه حالات تحلیل آزمایشگاهی، تجربی و عددی، عدم در نظر گرفتن شرایط درزه‌داری سنگ می‌تواند باعث اختلاف عمر سایشی پیش‌بینی شده با عمر سایشی واقعی شود.

فصل چهارم

جمع آوری داده‌های میدانی

۴-۱- مقدمه

به منظور بررسی تأثیر خصوصیات درزه‌داری توده‌سنگ بر فرسودگی سایشی دیسک‌کاترهای TBM باید اطلاعات واقعی شامل داده‌های زمین‌شناسی، سنگ‌شناسی و اجرایی TBM از یک یا چند پروژه تونلسازی مکانیزه جمع‌آوری شده و با دسته‌بندی این اطلاعات، پایگاه داده جامع و کاربردی تشکیل شود. در این تحقیق، پروژه تونل انتقال آب کرمان به عنوان منبع اصلی داده‌ها انتخاب شده است. در این فصل پس از بیان مشخصات کلی پروژه تونل انتقال آب کرمان به تحلیل کیفی و کمی پایگاه داده با استفاده از نرم‌افزار SPSS پرداخته شده است.

۴-۲- پایگاه داده

با توجه به موضوع تحقیق که بر ارزیابی فرسودگی سایشی دیسک‌کاتر در سنگ‌های درزه‌دار تأکید دارد، اطلاعات لازم برای تشکیل پایگاه داده شامل دو گروه اساسی خصوصیات سنگ بکر و مشخصات درزه‌های توده‌سنگ است. خصوصیات سنگ بکر شامل مقاومت فشاری تک‌محوری، ساینده‌گی و غیره و مشخصات درزه‌های توده‌سنگ شامل جهت‌داری، فاصله‌داری، تداوم، و غیره بوده که در فاز مطالعات پروژه به صورت صحرایی و آزمایشگاهی برداشت و ثبت شده‌اند. این داده‌ها در هر زمان از عملیات اجرایی قابلیت تدقیق داشته و شرایط سینه‌کار می‌تواند در اصلاح آن مفید واقع شود. داده‌های اولیه به وسیله روش‌های مختلف آماری پردازش شده و نهایتاً داده‌های موثر در قالب یک پایگاه داده برای اهداف مختلف می‌تواند مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. تجزیه و تحلیل این داده‌ها معمولاً با نرم‌افزارهای با قابلیت تحلیل آماری مانند اکسل^۱، SPSS و متلب^۳ انجام می‌شود (خسروی، ۱۳۹۹).

در این تحقیق برای جمع‌آوری داده‌های اولیه از گزارش‌های زمین‌شناسی مهندسی در حین اجرای تونل، گزارش‌های مربوط به اطلاعات برداشت‌های صحرایی و آزمون‌های آزمایشگاهی انجام شده و نیز نقشه‌های چون‌ساخت^۴ در پروژه تونل انتقال آب کرمان استفاده شده است.

^۱ Statistical Package for the Social Sciences

^۲ Excel

^۳ Matlab

^۴ As Built

۴-۳- تونل انتقال آب کرمان

شهر کرمان، مرکز استان کرمان در جنوب شرقی ایران در حاشیه کویر لوت در طول جغرافیایی ۵۷ درجه و ۵ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۰ درجه و ۱۷ دقیقه قرار دارد. ارتفاع متوسط مرکز شهر کرمان از سطح دریا ۱۷۶۰ متر می‌باشد. این شهر در قسمت شمال شرقی دشت کرمان واقع شده و در قسمت‌های جنوب و غرب آن ارتفاعات جوپار، پلوار و جفتان با حدود ۴۰۰۰ متر ارتفاع قرار دارد. محدوده مطالعه طرح انتقال آب کرمان در شمال غربی حوزه آبریز جازموریان به مساحت تقریبی ۱۰ هزار کیلومتر مربع می‌باشد. تونل انتقال آب کرمان با ۳۸ کیلومتر طول از سد صفارود برای تأمین آب شهر کرمان در حال احداث می‌باشد که از دو قطعه شمالی و جنوبی و یک تونل دسترسی تشکیل شده است. قطعه شمالی به طول حدود ۱۸٫۷ کیلومتر، با قطر تمام شده ۳/۹ متر و با شیب ۱۳۶/۰- درصد از موقعیت حدود ۱۹+۲۰۰ متر شروع می‌شود که وظیفه آن انتقال آب با جریان آزاد از تراز ۲۳۹۰/۶۶ به دهانه خروجی (تراز ۲۳۶۵/۳۹) است. قطعه جنوبی نیز با قطر تمام شده ۴/۵ متر و با طول حدود ۱۹/۲ کیلومتر و شیب ۰/۰۶ درصد از دهانه ورودی (تراز ۲۳۷۸/۷۳ متر از سطح دریا) تا روستای سرزه ادامه دارد. حفاری دو قطعه تونل با دو TBM از نوع سنگ سخت دوسپری ساخت شرکت هرکنشت^۱ آلمان انجام می‌شود. برای دمونتاز و خروج دو ماشین و همچنین جهت رفع محدودیت‌های هیدرولیکی در قطعه تحت فشار، یک تونل دسترسی پیش‌بینی شده است. قطعات هر ماشین بعد از دمونتاز از تونل دسترسی خارج می‌شود. این تونل به شکل نعل اسبی و با عرض تمام شده ۵/۴ و با شیب منفی ۱۱/۴ درصد، طولی در حدود ۲۶۱۲ متر خواهد داشت و به صورت سنتی حفر خواهد شد. مشخصات TBM قطعه شمالی در جدول (۴-۱) ارائه شده است (گزارش زمین‌شناسی مهندسی، ۱۳۹۵).

^۱ Herrenknecht

جدول ۴- ۱: مشخصات TBM مورد استفاده در حفاری قطعه شمالی تونل انتقال آب کرمان (گزارش زمین‌شناسی مهندسی، ۱۳۹۵)

پارامتر	واحد	مقدار
قطر حفاری	متر	۴/۶۵
قطر تمام شده	متر	۳/۹
تعداد دیسک‌کاترها	حلقه	۲۷
قطر دیسک‌کاترها	میلی‌متر	۴۳۲ و ۴۸۳
متوسط فاصله دیسک‌کاترها	سانتی‌متر	۶۲
حداکثر نیروی پیشران	کیلو نیوتن	۱۶۹۱۳
حداکثر نیروی گشتاور	کیلو نیوتن‌متر	۱۷۲۵
حداکثر گشتاور	دور بر دقیقه	۱۴

زمین‌شناسی محدوده مورد بررسی طرح و منطقه کرمان از نظر چینه‌شناسی و ساختاری پیچیده است. توده‌های سنگی از نظر سنی احتمالاً به پرکامبرین تا عهد حاضر تعلق دارند. همچنین بررسی ناحیه‌ای سنگ‌های ائوسن در زیر پهنه‌های کمان ماگمایی ارومیه بزمان، شمال باختر ایران مرکزی، پهنه لوت، زون سنندج سیرجان و کوه‌های خاور ایران، می‌تواند بیانگر ویژگی‌های عمومی این سنگ‌ها باشد. در شمال باختری ایران مرکزی، برون‌زدهای ائوسن با اندکی تغییر، ویژگی‌هایی نزدیک به ائوسن البرز دارند به گونه‌ای که گاه واژه‌های فجن، زیارت و کرج، همچنان در این نواحی کاربرد دارد. در جنوب باختری کرمان، سنگ‌های ائوسن به طور عمده خاستگاه آتشفشانی دارند که نشانگر نهشت زیاد مواد آتشفشانی و ستبر شدن سریع لایه‌ها در فاصله زمانی کوتاه می‌باشد. در مجموع ۹ واحد زمین‌شناسی مهندسی در بخش شمالی و ۱۳ واحد نیز در بخش جنوبی تونل شناسایی و از یکدیگر تفکیک شده‌اند. کل مسیر تونل تناوبی از واحدهای آهکی، ماسه سنگ، شیل، ماسه سنگ توفی، آندزیت بازالت، توف، لیتیک توف، گدازه‌های آندزیت بازالتی، سیلستون، دایک آندزیت بازالت، ماسه سنگ می‌باشد. در شکل (۴-۱) نمایی از زمین‌شناسی منطقه‌ای و تصویر ماهواره‌ای مسیر تونل و در شکل (۴-۲) مقطع طولی زمین‌شناسی قطعه شمالی تونل انتقال آب کرمان نشان داده شده است (گزارش زمین‌شناسی مهندسی، ۱۳۹۵). در جدول (۴-۲) خصوصیات سنگ‌شناسی واحدهای زمین‌شناسی قطعه شمالی تونل ارائه شده است.

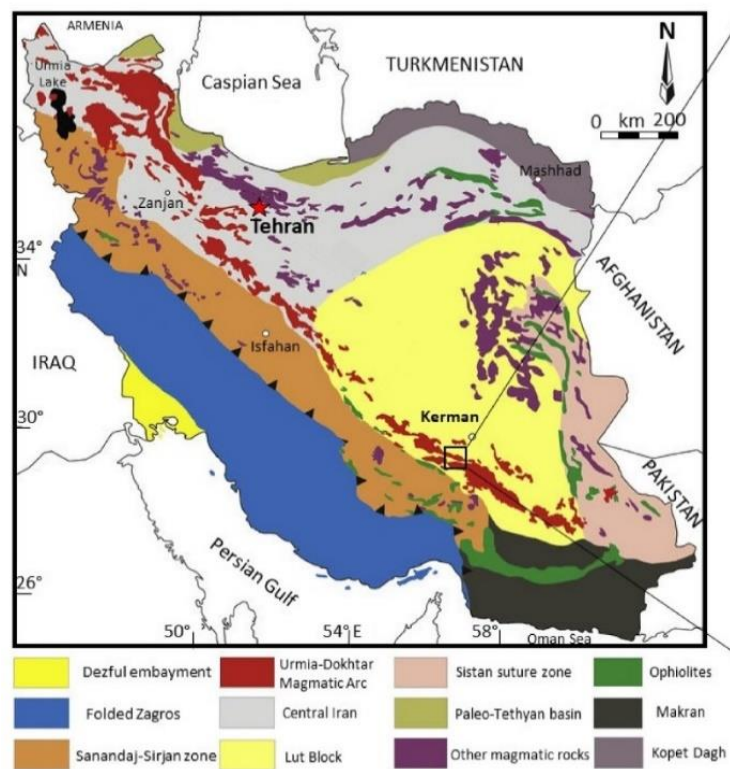
۴-۴- تحلیل آماری پایگاه داده

با توجه به اینکه از داده‌های قطعه شمالی تونل انتقال آب کرمان به عنوان پایگاه داده این تحقیق استفاده شده است بنابراین درصد حجم داده از هر کدام از واحدهای زمین‌شناسی مهندسی در شکل (۳-۴) در مقایسه با طول کل هر واحد در مسیر تونل نشان داده شده است. بر اساس این شکل، نسبت مناسبی بین طول واحد و حجم داده‌های آن در پایگاه داده برقرار است. از آنجایی که در یک عملیات حفاری منطقی، پارامترهای اجرایی TBM متأثر از پارامترهای زمین است، پیشروی بهینه با کمترین آسیب به دستگاه و دیسک‌کاتر زمانی محقق خواهد شد که پارامترهای اجرایی توسط اپراتور، متناسب با شرایط سینه‌کار انتخاب و اعمال شوند.

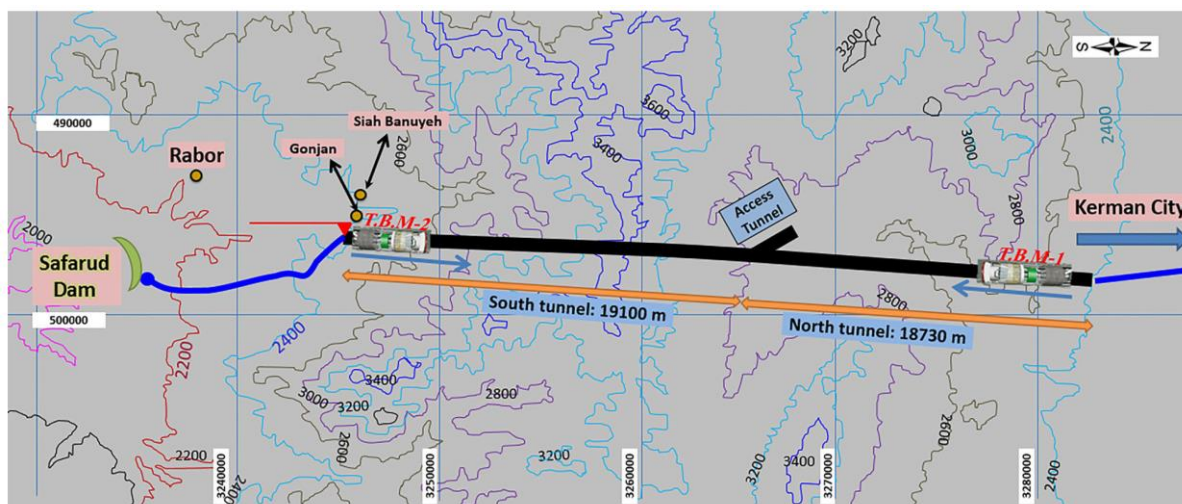
بنابراین در این تحقیق از مطالعه پارامترهای اجرایی در فرسودگی سایشی دیسک‌کاتر به دلیل وابستگی آن‌ها به پارامترهای زمین صرف‌نظر شده و صرفاً به تحلیل تاثیر خصوصیات زمین (سنگ و درزه) در فرسودگی دیسک‌کاتر پرداخته شده است. در جدول (۳-۴) مشخصات آماری پارامترهای تشکیل دهنده پایگاه داده در این تحقیق ارائه شده است. علاوه بر این، در شکل‌های (۴-۴) تا (۷-۴) به ترتیب نیروی پیشران، گشتاور، نرخ نفوذ و سرعت چرخش کاترهد TBM در ۶ کیلومتر ابتدایی قطعه شمالی تونل نشان داده شده است.

جدول ۴-۲: خصوصیات سنگ‌شناسی واحدهای زمین‌شناسی قطعه شمالی تونل انتقال آب کرمان

واحد زمین‌شناسی مهندسی	طول کل (متر)	پیشینه روباره (متر)	متوسط درصد کانی‌ها (%)				شاخص سایش سرشار
			کوارتز	فلدسپار	کلسیت و کانی‌های ثانویه	سایر کانی‌ها با سختی بیشتر از ۴ موس	
RT1	۱۷۰۰	۲۹۰	۳۰	۲۰	۰	۵۰	۳,۵-۴,۵
RT2	۵۶۰	۲۰۰	۲۵	۵۰	۵	۲۰	۳-۴
RT3	۲۷۸۵	۲۵۰	۱۰	۸۰	۵	۵	۳,۵-۵
RT4	۹۴۰	۳۹۵	۱۵	۲۵	۵	۴۵	۱,۵-۲
RT5	۷۰	۳۰۰	۵	۷۰	۰	۲۵	۳,۵-۴
RT6	۲۵۴۰	۴۰۰	۱۰	۰	۸۵	۵	۱,۵>
RT7	۱۳۶۵	۳۱۵	۴۵	۱۰	۲۵	۰	۱,۵
RT8	۵۶۰	۳۶۰	۳۰	۳۰	۲۰	۱۵	۲,۵
RT9	۴۷۰	۳۵۰	۰	۰	۱۰۰	۰	۱,۵

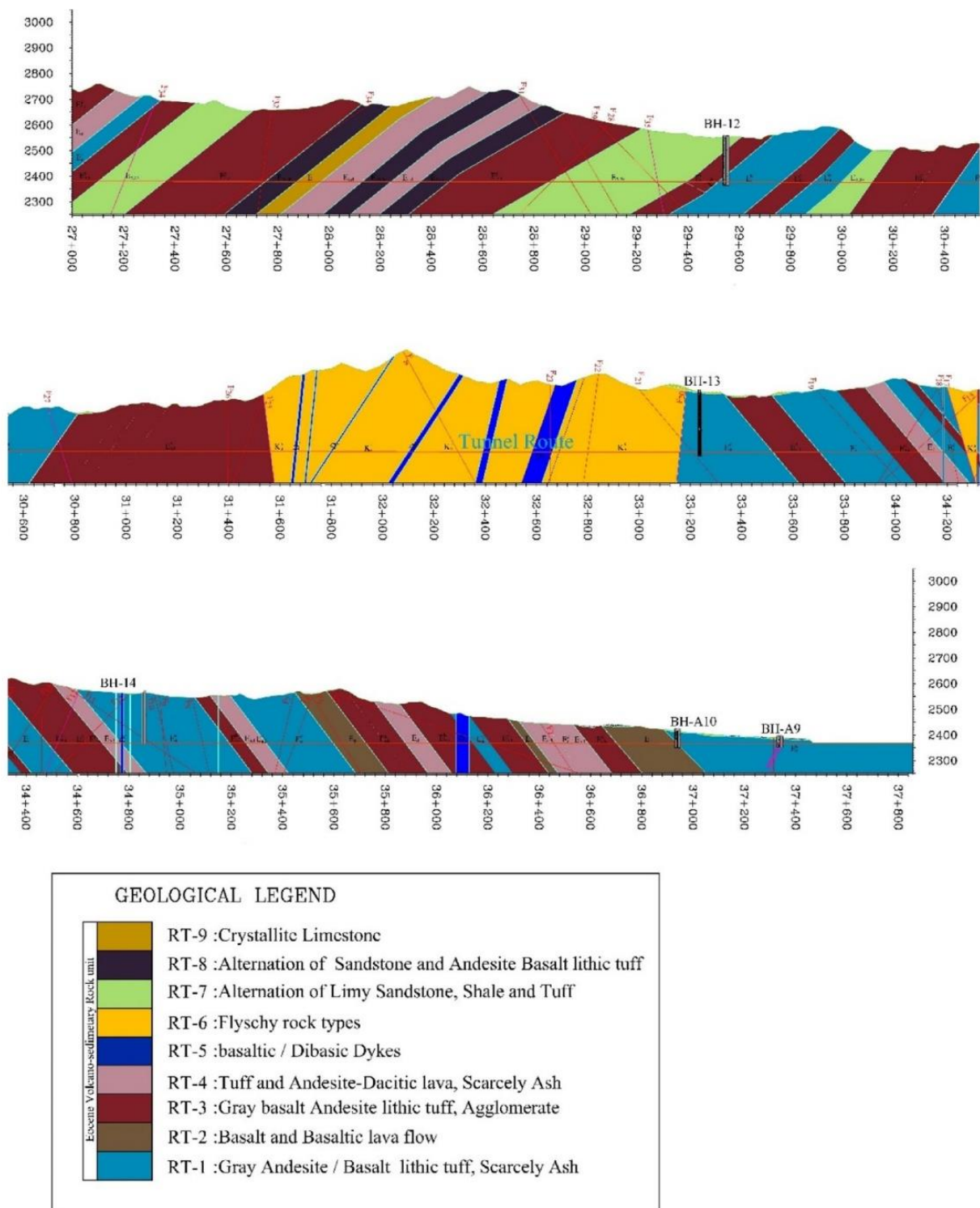


(الف)



(ب)

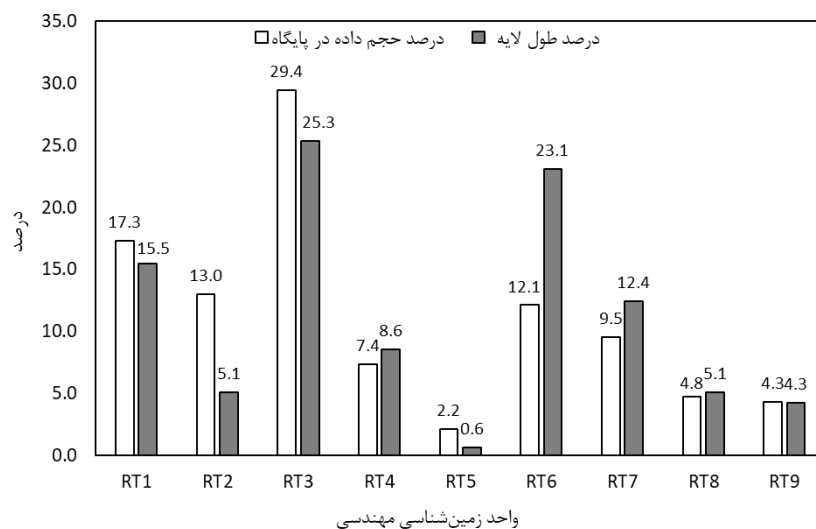
شکل ۴-۱: (الف) زمین‌شناسی ایران (آقاباتی، ۲۰۰۴)؛ (ب) موقعیت پروژه تونل انتقال آب کرمان (دهنوی و همکاران، ۲۰۲۱)



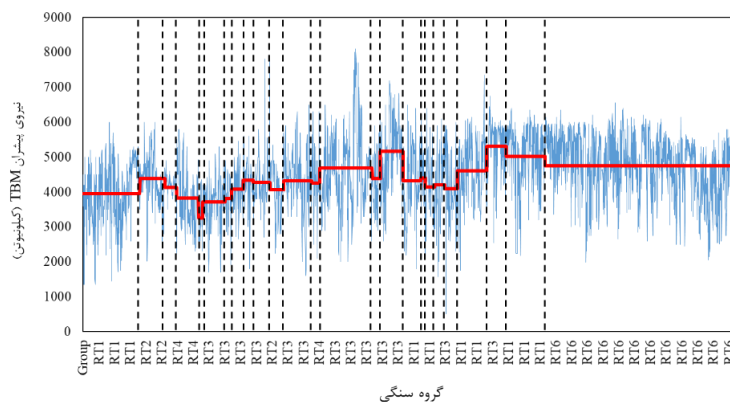
شکل ۴-۲: مقطع طولی زمین‌شناسی قطعه شمالی تونل انتقال آب کرمان (گزارش زمین‌شناسی مهندسی، ۱۳۹۵)

جدول ۳-۴: مشخصات آماری پارامترهای تشکیل دهنده پایگاه داده

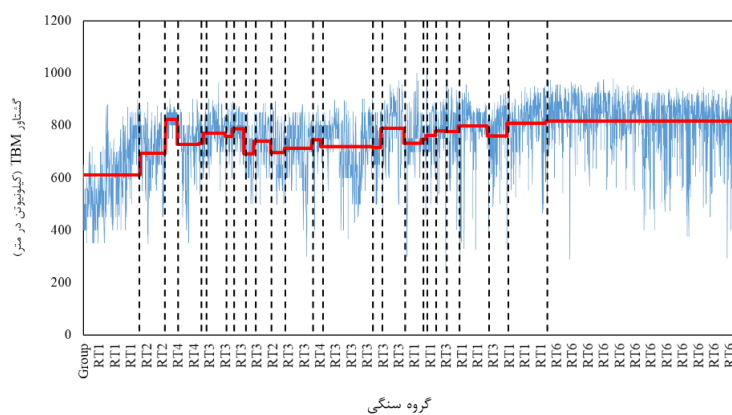
پارامتر	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	جهت شیب درزه (درجه)	زاویه شیب درزه (درجه)	فاصله‌داری درزه (متر)	بیوستگی درزه (سانتی‌متر)	بازشدگی (میلی‌متر)	JRC	RQD
تعداد داده	۲۳۱	۲۳۱	۲۳۱	۲۳۱	۲۳۱	۲۳۱	۲۳۱	۲۳۱
مقدار حداقل	۲۲	۵	۱۰	۰,۲۵	۱,۵	۰	۹	۴۰
مقدار حداکثر	۲۱۵	۳۵۵	۸۵	۵	۱۰	۵	۱۳	۱۰۰
متوسط	۱۴۵	۱۸۳	۶۱	۱,۲	۱,۲	۲,۶	۱۱,۳	۸۴
انحراف معیار	۷۸	۱۲۱	۳۴	۰,۹	۲,۴	۱,۶	۴,۳	۲۶
دامنه تغییرات	۱۶۰	۳۵۰	۸۰	۴,۷۵	۸,۵	۵	۴	۶۰



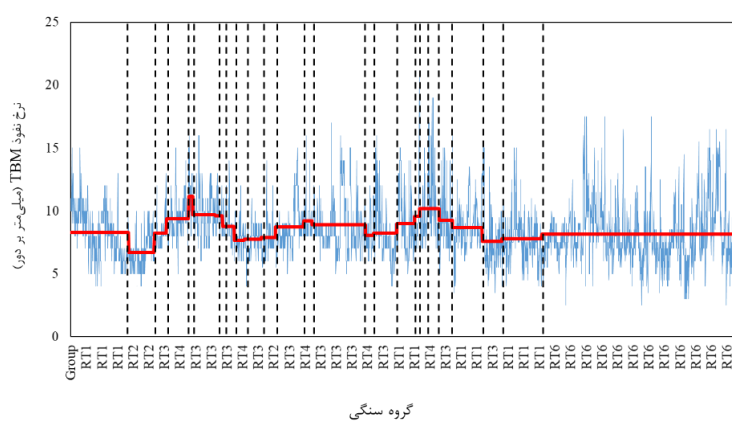
شکل ۳-۴: سهم واحدهای زمین‌شناسی مختلف تونل انتقال آب کرمان در تکمیل پایگاه داده



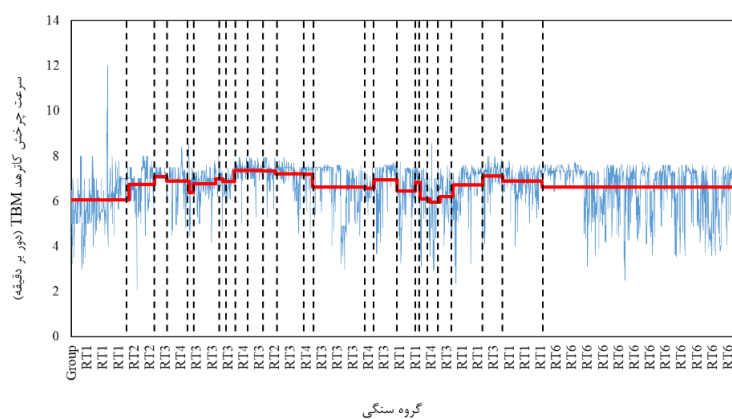
شکل ۴-۴: تغییرات نیروی پیشران TBM در ۶ کیلومتر ابتدایی قطعه شمالی تونل انتقال آب کرمان



شکل ۴-۵: تغییرات گشتاور TBM در ۶ کیلومتر ابتدایی قطعه شمالی تونل انتقال آب کرمان



شکل ۴-۶: تغییرات نرخ نفوذ TBM در ۶ کیلومتر ابتدایی قطعه شمالی تونل انتقال آب کرمان



شکل ۴-۷: تغییرات سرعت چرخش کاترهد TBM در ۶ کیلومتر ابتدایی قطعه شمالی تونل انتقال آب کرمان

۴-۵- جمع بندی

در این فصل به جمع‌آوری اطلاعات میدانی و تشکیل یک پایگاه داده دقیق و جامع بر اساس گزارش‌های تونل انتقال آب کرمان به منظور ارزیابی عوامل موثر بر فرسودگی سایشی دیسک‌کاتر پرداخته شده است. این پایگاه داده شامل خصوصیات سنگ‌های آذرین و ناپیوستگی‌های موجود در آن است. تحلیل آماری داده‌های ژئومکانیکی نشان می‌دهد که در این پایگاه داده، توده‌سنگ ضعیف تا بسیار قوی با خصوصیات ساینده‌گی کم تا زیاد و با شرایط خردشدگی اندک تا زیاد وجود دارد. ضمناً به دلیل وابستگی پارامترهای اجرایی به پارامترهای زمین در حین حفاری از ورود پارامترهای اجرایی در پایگاه داده برای پیش‌بینی فرسودگی سایشی دیسک‌کاترها صرف‌نظر شده است.

فصل پنجم

تأثیر خصوصیات سنگ درزه‌دار بر عمر سایشی دیسک‌کاترها

۵-۱- مقدمه

هدف اصلی این تحقیق ارائه مدل تجربی برای پیش‌بینی عمر سایشی دیسک‌کاترهای TBM در سنگ‌های درزه‌دار است. اهمیت این موضوع در پیش‌بینی هزینه‌های حفاری و ارائه برنامه زمانبندی مناسب برای تکمیل پروژه تونل می‌باشد. در این فصل به بررسی عوامل موثر توده‌سنگ بر عمر سایشی دیسک‌کاترها پرداخته می‌شود. مهم‌ترین عوامل توده‌سنگ شامل مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ بکر و توده‌سنگ، عدد ویکرز سنگ، شاخص سایش سرشار و مشخصات هندسی درزه‌ها شامل شیب درزه، زاویه درزه نسبت به جهت پیشروی TBM، فاصله‌داری درزه‌ها، بازشدگی درزه‌ها، نوع و میزان پرشدگی درزه‌ها و تداوم آن‌ها است. در این فصل ضمن بررسی و شناسایی عوامل موثر بر عمر سایشی دیسک‌کاترها طبق پایگاه داده تهیه شده از گزارش‌های فنی و آزمایشگاهی تونل انتقال آب کرمان، مدل تجربی بر اساس موثرترین پارامترها پیشنهاد شده و نهایتاً بر اساس مقاطعی از تونل آب‌بر نیروگاه اوما اوپا در سریلانکا اعتبارسنجی شده است.

۵-۲- پارامترهای موثر بر عمر سایشی دیسک‌کاتر

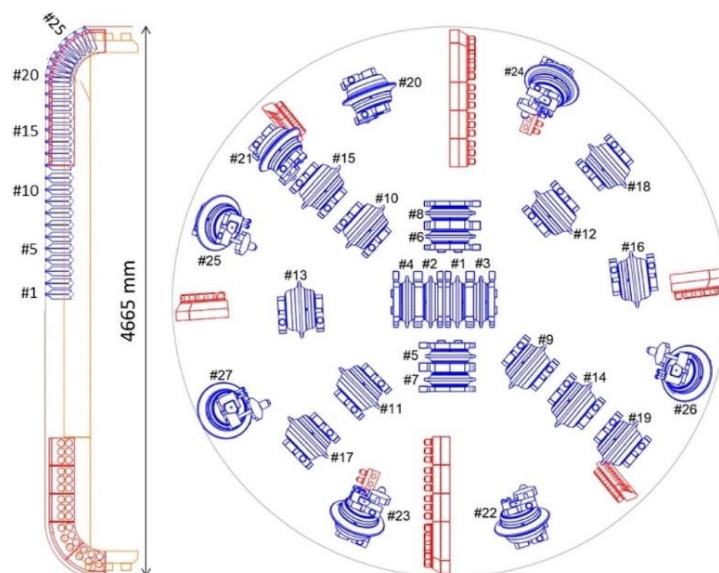
دیسک‌کاترهای مورد استفاده بر روی کاترهد TBM تونل انتقال آب کرمان شامل ۲۷ دیسک‌کاتر ۱۷ و ۱۹ اینچی است که تعداد ۸ دیسک‌کاتر (۱۷ اینچی) از نوع دوقلو در مرکز کاترهد و ۱۹ دیسک‌کاتر (۱۹ اینچی) نیز از نوع تکی بوده که در نواحی میانی، قوس‌دار و پیرامونی کاترهد نصب شده‌اند (شکل (۵-۱)). حد فرسودگی سایشی دیسک‌کاترها در نواحی مرکزی، میانی، قوسی و پیرامونی به ترتیب ۲۵، ۲۰، ۱۵ و ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده که در حین بازرسی‌های دوره‌ای کاترهد، میزان فرسودگی سایشی با ابزار خاص اندازه‌گیری شده و در صورت رسیدن به حد فرسودگی سایشی تعویض می‌شوند (شکل (۲-۷)). عمر سایشی دیسک‌کاتر به عنوان میزان حجم حفاری شده توسط یک دیسک‌کاتر تا پیش از تعویض آن تعریف می‌شود. از طرفی، فرسودگی سایشی برابر با تعداد دیسک‌کاترهای تعویض شده برای حفاری حجم معینی از سنگ است. در جدول (۵-۱) عمر سایشی دیسک‌کاترهای TBM در واحدهای زمین‌شناسی مهندسی قطعه شمالی تونل انتقال آب کرمان ارائه شده است.

۵-۲-۱- پارامترهای سنگ بکر

پارامترهای سنگ بکر که در پایگاه داده تونل انتقال آب کرمان ثبت شده‌اند شامل مقاومت فشاری سنگ بکر، عدد سختی ویکرز سنگ و شاخص سایش سرشار است. همانگونه که در فصل ۳ بیان شد، این سه پارامتر بر اساس انجام آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی و بر مبنای استانداردهای موجود تعیین می‌شوند. در جدول (۵-۱) مقادیر پارامترهای سنگ بکر در واحدهای زمین‌شناسی مهندسی قطعه شمالی تونل انتقال آب کرمان ارائه شده است.

جدول ۵-۱: خصوصیات سنگ بکر و عمر سایشی دیسک‌کاتر در واحدهای زمین‌شناسی تونل انتقال آب کرمان

واحد زمین‌شناسی مهندسی	UCS _i (MPa)	VHNR	CAI	عمر سایشی دیسک‌کاتر (m ³ /cutter)
RT1	۱۳۵	۵۵۰	۳٫۵	۶۳۱٫۹
RT2	۱۲۰	۷۸۰	۳٫۵	۵۶۲٫۸
RT3	۱۲۵	۳۸۰	۴٫۲۵	۷۵۶
RT4	۱۱۰	۶۲۰	۱٫۷۵	۸۰۲٫۷
RT5	۱۸۵	۷۹۶	۳٫۷۵	۴۰۵٫۹
RT6	۱۲۰	۳۵۰	۱٫۵	۷۳۴٫۴
RT7	۹۰	۵۷۰	۱٫۵	۸۶۲٫۲
RT8	۱۳۵	۶۱۰	۲٫۵	۵۹۸٫۶
RT9	۱۲۰	۲۶۵	۱٫۵	۵۳۴٫۴



شکل ۵-۱: چیدمان دیسک‌کاترها بر روی کاترهد TBM تونل انتقال آب کرمان

۵-۲-۲- پارامترهای توده سنگ

علاوه بر خصوصیات سنگ بکر، ویژگی درزه‌ها شامل جهت‌داری، فاصله‌داری، تداوم (P_f)، تراکم حجمی درزه (J_v)، RQD و GSI در پایگاه داده تونل کرمان ثبت شده که می‌توان تاثیر این پارامترها را بر عمر سایشی دیسک‌کاترها بررسی کرد. علاوه بر این، با استفاده از مفهوم خردشدگی کل توده سنگ (k_{s-tot}) که توسط برولند (۱۹۹۸) بر اساس فاصله‌داری درزه‌ها و زاویه آن‌ها نسبت به پیشروی تونل ارائه شده و نیز مقاومت توده سنگ (UCS_{rm}) که توسط هوک و براون (۲۰۱۹) بر اساس مقاومت فشاری سنگ بکر و GSI مطرح شده، می‌توان پارامترهای جامع‌تری در تحلیل‌های آماری وارد نمود. در جدول (۵-۲) پارامترهای توده سنگ برای واحدهای زمین‌شناسی تونل انتقال آب کرمان ارائه شده است. در ادامه به طور خلاصه به نحوه تعیین پارامترهای مقاومت فشاری توده سنگ و ضریب خردشدگی توده سنگ به عنوان پارامترهای تلفیقی پرداخته می‌شود.

۵-۲-۲-۱- مقاومت فشاری توده سنگ

مقاومت فشاری توده سنگ بر اساس مقاومت فشاری سنگ بکر و شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) طبق رابطه (۵-۱) قابل محاسبه است (هوک و براون، ۲۰۱۹). در جدول (۵-۲) مقاومت فشاری توده سنگ برای واحدهای زمین‌شناسی مهندسی قطعه شمالی تونل انتقال آب کرمان ارائه شده است.

جدول ۵-۲: خصوصیات توده سنگ در واحدهای زمین‌شناسی تونل انتقال آب کرمان

واحد زمین‌شناسی مهندسی	UCS_{rm}	P_f (m)	J_v	k_{s-tot}	GSI
RT1	۲۲	۳,۸۰	۳	۱,۴۳	۶۰-۶۵
RT2	۱۶,۵	۲,۹۸	۳,۵	۱,۷۱	۶۰-۶۵
RT3	۱۳	۳,۸۶	۳,۸	۲,۵۱	۵۰-۵۵
RT4	۱۰	۳,۱۶	۳,۱	۲,۰۶	۶۰-۶۵
RT5	۲۳	۲,۹۶	۲,۲	۱,۵۵	۶۰-۶۵
RT6	۱۴	۳,۵۰	۲,۷	۱,۸۱	۶۵-۷۰
RT7	۷,۵	۳,۴۱	۳,۱	۲,۶۳	۵۵-۶۵
RT8	۱۶,۵	۲,۸۴	۳,۷	۱,۲۱	۵۵-۶۵
RT9	۱۶	۲,۶۳	۲,۲	۱,۰۷	۵۵-۶۵

$$UCS_{rm} = UCS_i \left(\exp \left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D_b} \right) \right)^a \quad (۱-۵)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right) \quad (۲-۵)$$

که در آن UCS_i مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ بکر (MPa)، UCS_{rm} مقاومت توده‌سنگ (MPa)، GSI شاخص مقاومت زمین‌شناسی، D_b ضریب آسیب‌دیدگی ناشی از انفجار که در حفاری مکانیزه با TBM برابر صفر بوده و نهایتاً a ثابت معیار هوک و براون است.

۵-۲-۲-۲- ضریب خردشدگی کل توده‌سنگ

برای در نظر گرفتن توامان فاصله‌داری درزه‌ها و زاویه آن‌ها نسبت به جهت حفاری TBM، از ضریب خردشدگی کل توده‌سنگ (k_{s-tot}) طبق رابطه (۳-۵) استفاده می‌شود که توسط برولند (۱۹۹۸) ارائه و سپس توسط مکیاس و همکاران (۲۰۱۴) بطور جزئی اصلاح شد. ضریب خردشدگی کل توده‌سنگ تلفیقی از ضرایب خردشدگی هر درزه (k_s) است که پس از محاسبه زاویه α از رابطه (۴-۵) و تعیین طبقه‌بندی درزه از جدول (۵-۳)، از روی نمودارهای (۲-۵) تعیین می‌شود. در جدول (۴-۵) خصوصیات درزه‌ها و ضریب خردشدگی کل برای واحدهای زمین‌شناسی مهندسی قطعه شمالی تونل انتقال آب کرمان ارائه شده است.

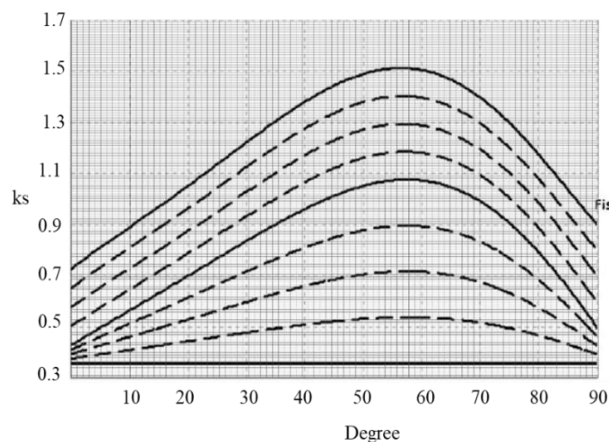
$$k_{s-tot} = \left(\sum_{i=1}^n k_{si} \right) - (n-1) \times 0.36 \quad (۳-۵)$$

$$\alpha = \left| \arcsin(\sin \alpha_f \cdot \sin(\alpha_t - \alpha_s)) \right| \quad (۴-۵)$$

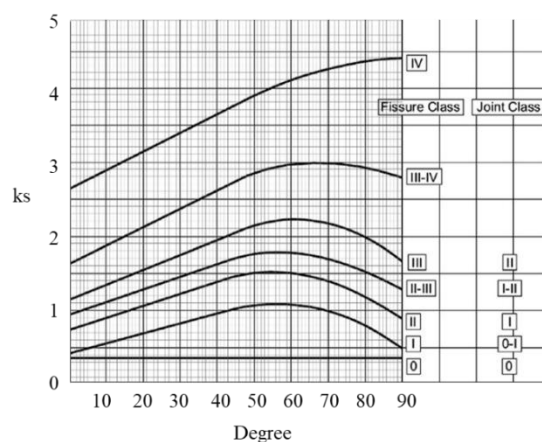
که در آن k_{s-tot} ضریب خردشدگی کل توده‌سنگ، k_{si} ضریب خردشدگی برای دسته درزه i ام، n تعداد دسته درزه، α_s زاویه امتداد صفحات ضعف، α_f زاویه شیب صفحات ضعف و α_t آزمون محور تونل است.

جدول ۵-۳: طبقه‌بندی شکستگی‌ها بر اساس فاصله بین صفحات ضعف (برولند ۱۹۹۸؛ مکیاس و همکاران، ۲۰۱۴)

طبقه‌بندی شکستگی (درزه/شکاف)	فاصله متوسط بین صفحات ضعف	محدوده فاصله (cm)
0	∞	۲۴۰- ∞
0+	۱۹۰	۱۶۰-۲۴۰
0-I	۱۴۰	۱۱۰-۱۶۰
I-	۹۰	۶۰-۱۱۰
I	۴۰	۳۷,۵-۶۰
I+	۳۵	۳۲,۵-۳۷,۵
I-II	۳۰	۲۷,۵-۳۲,۵
II-	۲۵	۲۲,۵-۲۷,۵
II	۲۰	۱۷,۵-۲۲,۵
II-III	۱۵	۱۲,۵-۱۷,۵
III	۱۰	۸,۷۵-۱۲,۵
III-IV	۷,۵	۶,۲۵-۸,۷۵
IV	۵	۴-۶,۲۵



(ب)



(الف)

شکل ۵-۲: محاسبه ضریب خردشدگی (k_s) (الف) بر اساس زاویه بین محور تونل و صفحه ضعف و طبقه‌بندی شکستگی؛ (ب) منحنی‌های درونیایی شده برای طبقه‌بندی‌های پایین شکستگی (یعنی درزه‌های گروه 0-I و شکافهای گروه 0-II) (مکیاس و همکاران، ۲۰۱۴).

جدول ۵-۴: خصوصیات درزه‌ها و خردشدگی برای واحدهای زمین‌شناسی مهندسی قطعه شمالی تونل انتقال آب کرمان

واحد زمین‌شناسی مهندسی	جهت‌داری (جهت شیب / شیب)			فاصله‌داری (سانتی‌متر)			ضریب خردشدگی		
	دسته درزه اول	دسته درزه دوم	دسته درزه سوم	دسته درزه اول	دسته درزه دوم	دسته درزه سوم	k_{s1}	k_{s2}	k_{s3}
RT1	۷۳/۱۰۵	۷۶/۳۵۳	۶۴/۰۱۵	۱۲۰	۱۷۰	۱۲۰	۰,۵۳	۰,۶	۱,۰۲
RT2	۵۲/۰۱۹	۸۴/۱۳۰	۸۴/۲۸۰	۱۲۰	۱۳۰	۱۷۵	۱,۰۳	۰,۸۵	۰,۵۵
RT3	۸۱/۱۲۳	۴۵/۰۱۱	۶۵/۲۰۲	۸۰	۸۰	۱۲۰	۰,۹۸	۱,۲	۱,۰۵
RT4	۶۷/۲۱۷	۸۲/۰۹۰	۷۸/۱۳۵	۱۳۰	۱۴۰	۱۰۰	۱,۰۵	۰,۵۵	۱,۱۸
RT5	۸۰/۲۸۵	۸۵/۱۶۰	۷۵/۰۱۵	۱۳۰	۱۵۰	۱۷۰	۰,۵۵	۱,۰۷	۰,۶۵
RT6	۸۱/۱۳۵	۰۹/۰۶۸	۸۱/۰۷۴	۱۰۰	۱۵۰	۱۰۰	۱,۱۳	۰,۶	۰,۸
RT7	۲۱/۱۹۸	۸۱/۲۹۷	۵۸/۰۰۹	۵۰	۱۰۰	۵۰	۰,۹۷	۰,۸۸	۱,۵
RT8	۵۶/۱۲۱	۴۰/۲۹۲	۷۴/۰۱۷	۱۲۰	۱۳۰	۱۷۵	۰,۶۷	۰,۵۶	۰,۷
RT9	۵۶/۱۲۱	۴۰/۲۹۲	۷۴/۰۱۷	۱۷۵	۱۸۰	۱۸۰	۰,۵۵	۰,۵۲	۰,۷۲

۵-۳- رگرسیون خطی تک متغیره

با مشخص شدن پارامترهای منتخب سنگ بکر و توده‌سنگ مطابق بخش‌های ۵-۲-۱ و ۵-۲-۲ لازم است تا با تحلیل رگرسیونی خطی تک متغیره نسبت به شناسایی عوامل موثر بر عمر سایشی دیسک کاتر اقدام نمود. در شکل (۵-۳) همبستگی هر کدام از پارامترهای منتخب با عمر سایشی دیسک کاتر تونل انتقال آب کرمان بر اساس رگرسیون خطی تک متغیره نشان داده شده است. همچنین در جدول (۵-۵) روابط این همبستگی‌ها و ضرایب رگرسیون مربوطه ارائه شده است. طبق جدول (۵-۵)، بیشترین مقدار ضریب رگرسیون به ترتیب مربوط به مقاومت فشاری توده‌سنگ، ضریب خردشدگی کل توده‌سنگ و شاخص سرشار سنگ بکر است. سایر همبستگی‌ها ضرایب رگرسیونی بالایی نداشته و از گروه پارامترهای مستقل مدل تجربی خارج می‌شوند. علاوه بر ضریب همبستگی اندک، مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ بکر در قالب مقاومت توده‌سنگ به صورت غیر مستقیم در مدل تجربی اعمال خواهد شد. از طرفی، خردشدگی کل توده‌سنگ با در نظر گرفتن جهت حفاری، پارامتر مناسب‌تری نسبت به تراکم حجمی درزه‌ها است که صرفاً با توجه به فاصله بین درزه‌ها تعریف می‌شود. همچنین پارامتر تداوم درزه به علت چشم‌پوشی از جهت حفاری TBM نمی‌تواند معرف خوبی برای خصوصیات درزه‌داری سنگ باشد. شاخص

سایش سرشار نیز به خاطر ضریب همبستگی بیشتر نسبت به عدد سختی ویکرز سنگ ارجحیت می‌یابد. بنابراین پارامترهای CAI و UCS_{rm} و k_{s-tot} به عنوان پارامترهای ورودی مدل تجربی پیش‌بینی عمر سایشی دیسک‌کاتر در نظر گرفته می‌شوند. در جدول (۵-۵) علاوه بر ضریب همبستگی، از شاخص‌های آماری دیگری مانند ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE) و درصد خطای نسبی مطلق (AE) برای ارزیابی آماری روابط همبستگی استفاده شد. طبق این شاخص‌های آماری، پارامترهای مقاومت فشاری توده‌سنگ، ضریب خردشدگی کل و شلخص سایش سرشار کمترین مقادری را نسبت به سایر پارامترها دارا هستند و برای ارائه مدل تجربی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در روابط (۵-۱۳) تا (۵-۱۵) این شاخص‌های آماری معرفی شده‌اند.

جدول ۵-۵: روابط مربوط به همبستگی پارامترهای سنگ بکر و توده‌سنگ با عمر سایشی دیسک‌کاتر در تونل انتقال آب کرمان

شماره رابطه	رابطه همبستگی	ضریب همبستگی (R^2)	RMSE	NRMSE	AE
(۵-۵)	$H_f = -24.93 UCS_{rm} + 1037.9$	۰,۷۴۳۰	۶۹,۷	۰,۱۰۶	۹,۷۱
(۶-۵)	$H_f = -4.629 UCS_i + 1240.6$	۰,۶۶۷۷	۷۹,۲	۰,۱۲۱	۱۰,۳۵
(۷-۵)	$H_f = 205.3 k_{s-tot} + 289.34$	۰,۵۶۴۰	۹۰,۸	۰,۱۳۵	۱۳,۳۰
(۸-۵)	$H_f = -97.84 CAI + 912.51$	۰,۴۷۲۲	۹۹,۹	۰,۱۵۲	۱۴,۷۲
(۹-۵)	$H_f = 191.74 P_f + 33.525$	۰,۳۱۹۷	۱۱۳,۴	۰,۱۸۱	۱۴,۱۴
(۱۰-۵)	$H_f = 109.73 J_v + 321.48$	۰,۱۹۵۴	۱۲۳,۳	۰,۱۸۱	۱۴,۷۲
(۱۱-۵)	$H_f = -0.257 VHNR + 795.03$	۰,۱۰۶۱	۱۳۰,۰	۰,۲۲۳	۱۷,۱۷

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \right)} \quad (۱۲-۵)$$

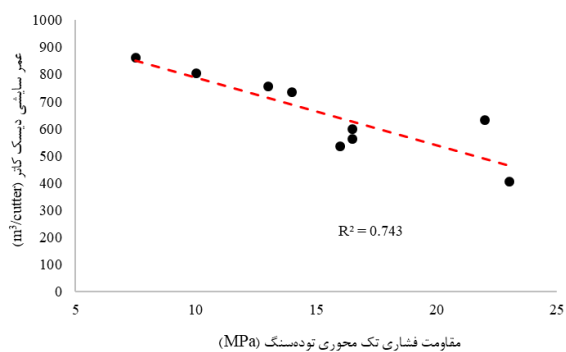
$$NRMSE = RMSE / O_{ave} \quad (۱۳-۵)$$

$$AE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|O_i - P_i|}{O_i} \quad (۱۴-۵)$$

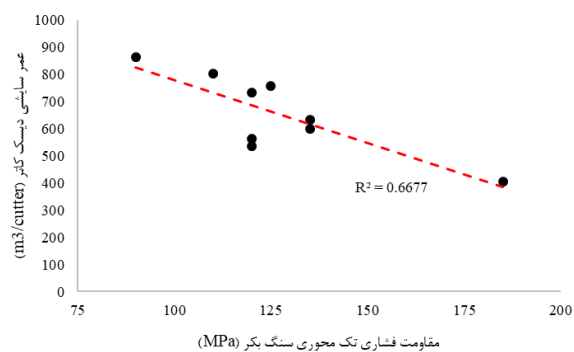
۵-۴- مدل تجربی جدید پیش‌بینی عمر سایشی دیسک‌کاتر

برای ارائه مدل تجربی پیش‌بینی عمر سایشی دیسک‌کاتر از پارامترهای موثر بر سایشی دیسک‌کاتر که در بخش قبل مورد مطالعه قرار گرفته استفاده می‌شود. مدل ارائه شده باید به نحوی باشد که در عین سادگی رابطه، پارامترهای اصلی سنگ درزه‌دار را در بر داشته و ضریب همبستگی بالایی را ارائه کند. در رابطه (۵-۱۵) مدل تجربی پیش‌بینی عمر سایشی دیسک‌کاتر ارائه شده است. این مدل که بر اساس رگرسیون چند متغیره غیرخطی ارائه شده دارای ضریب همبستگی ۰,۸۰۰ است. مطابق مدل ارائه شده در رابطه (۵-۱۵)، عمر سایشی دیسک‌کاتر با خردشدگی کل توده‌سنگ نسبت مستقیم داشته و با مقاومت توده‌سنگ و شاخص سایش سرشار نسبت عکس دارد. در جدول (۵-۶) خلاصه تحلیل آماری با استفاده از رگرسیون چندمتغیره غیرخطی با SPSS ارائه شده است. برای سهولت و تسریع در استفاده از مدل تجربی جدید و بر مبنای رابطه این مدل، چارتهایی بر اساس مقاومت توده‌سنگ و ضریب خردشدگی کل به ازای مقادیر مختلف شاخص سرشار (یعنی ۳، ۴، ۵ و ۶) در شکل‌های (۵-۴) تا (۵-۷) ارائه شده است. در این چارتهای پیش‌بینی، مقدار عمر سایشی دیسک‌کاتر به تفکیک رنگ‌بندی، درجه‌بندی شده است. در شکل (۵-۸) مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی عمر سایشی دیسک‌کاتر برای واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل انتقال آب کرمان مقایسه شده است. آنچه که در این شکل مشخص است این است که پراکندگی نقاط در اطراف خط مطلوب (خط $Y=X$) بسیار کم است. علاوه بر مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده توسط رابطه (۵-۱۵)، مقادیر پیش‌بینی شده توسط چند مدل رایج نیز در شکل (۵-۸) ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود برای شرایطی که سایشی سنگ کم است و عمر سایشی دیسک‌کاتر بالاتر است، پراکندگی پیش‌بینی عمر دیسک‌کاتر توسط مدل‌های تجربی رایج نیز بیشتر است.

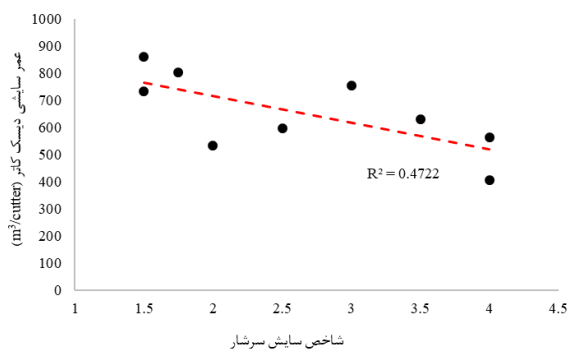
$$H_f = 963 \frac{k_{s-tot}^{0.32}}{UCS_{rm}^{0.15} CAI^{0.20}} [m^3/cutter] \quad R^2=0.800 \quad (5-15)$$



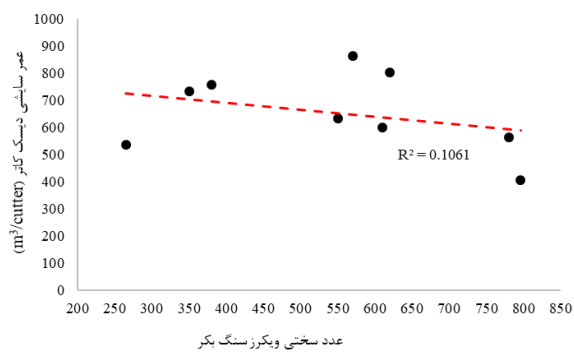
(ب)



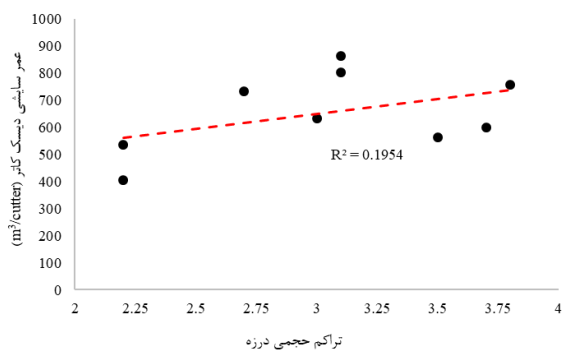
(الف)



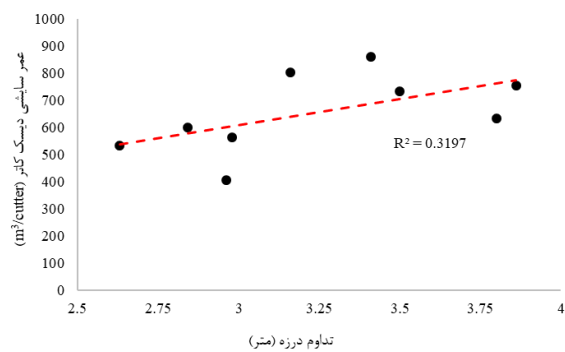
(ت)



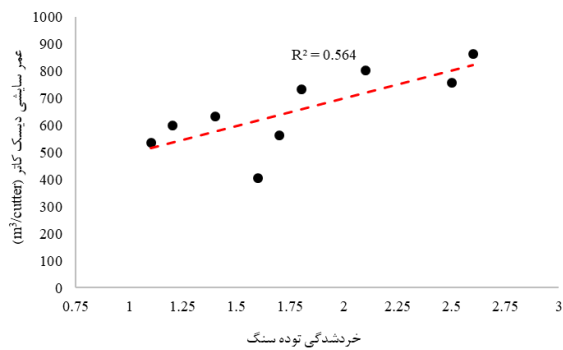
(پ)



(ج)



(ث)

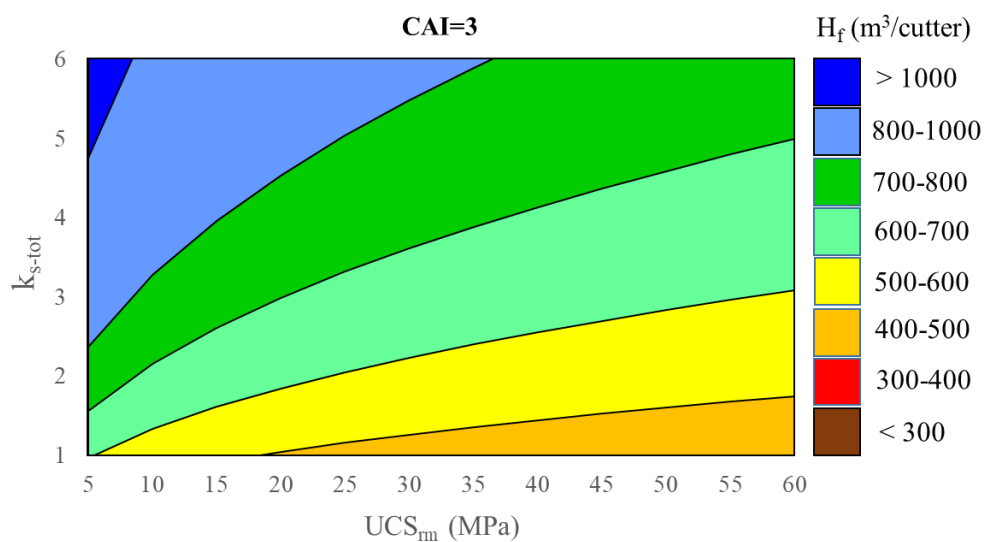


(چ)

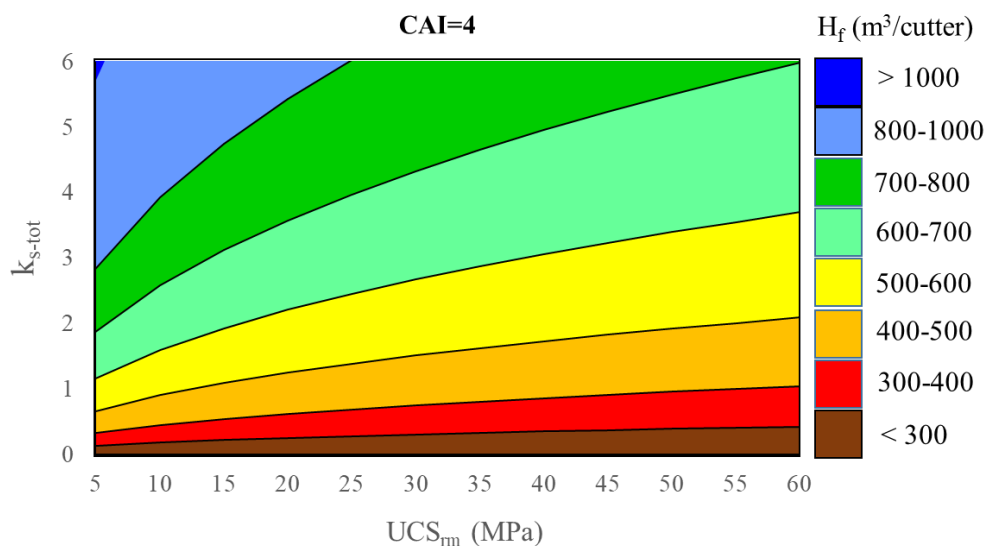
شکل ۵-۳: همبستگی بین پارامترهای سنگ بکر و توده سنگ با عمر سایشی دیسک کاتر در تونل انتقال آب کرمان

جدول ۵-۶: خلاصه تحلیل آماری با استفاده از رگرسیون چندمتغیره غیرخطی با SPSS

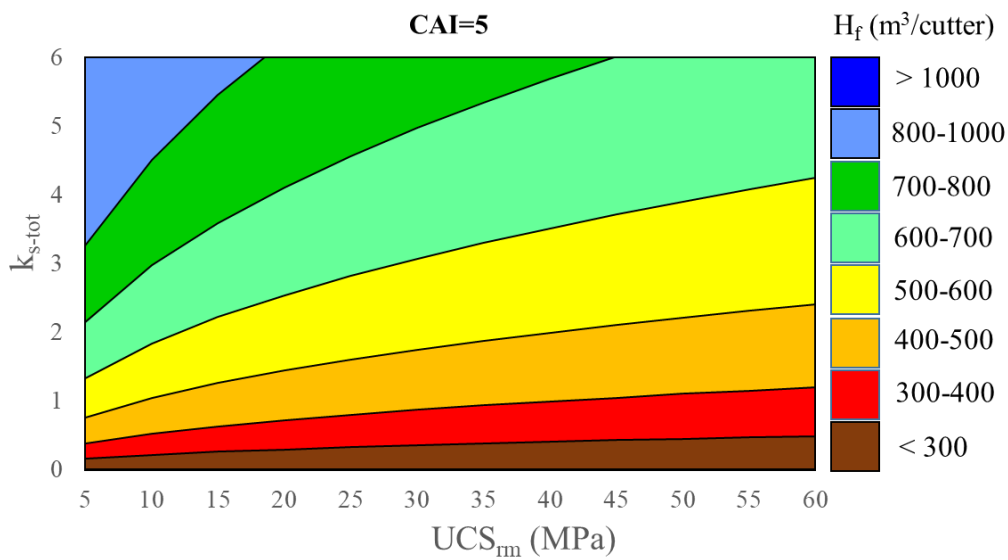
پارامتر	مقدار تخمینی	خطای استاندارد	سطح اطمینان ۹۵ درصد	
			کران بالا	کران پایین
ضریب ثابت	۹۶۳	۷۸۳,۶۱	۲۹۷۷,۲۶	-۱۰۵۱,۳۶
k_{s-tot}	۰,۳۲	۰,۲۷	۱,۰۱	-۰,۳۷
UCS_{rm}	-۰,۱۵	۰,۳۱	۰,۶۵	-۰,۹۴
CAI	-۰,۲۰	۰,۲۰	۰,۳۲	-۰,۷۲



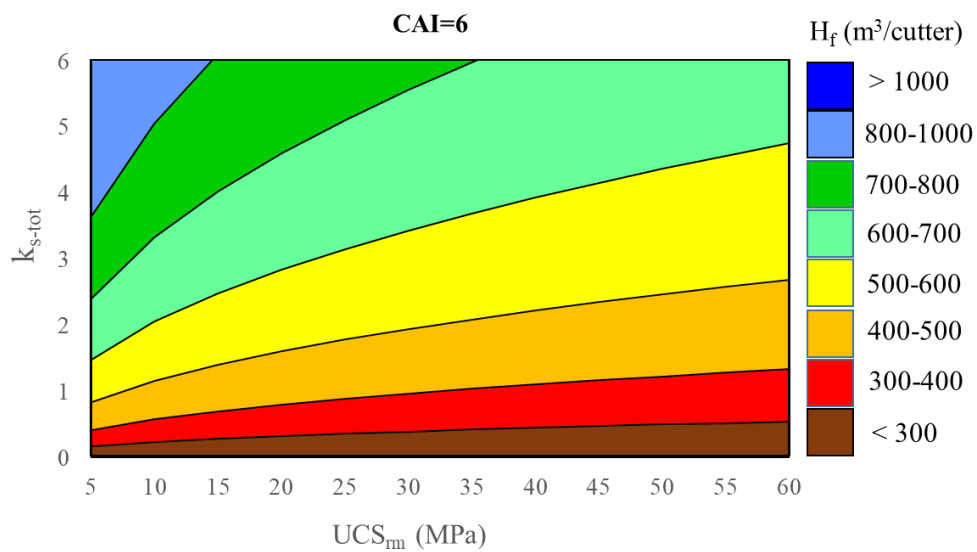
شکل ۵-۴: چارت پیش‌بینی عمر سایشی دیسک‌کاتر بر اساس مدل تجربی جدید به ازای $CAI=3$



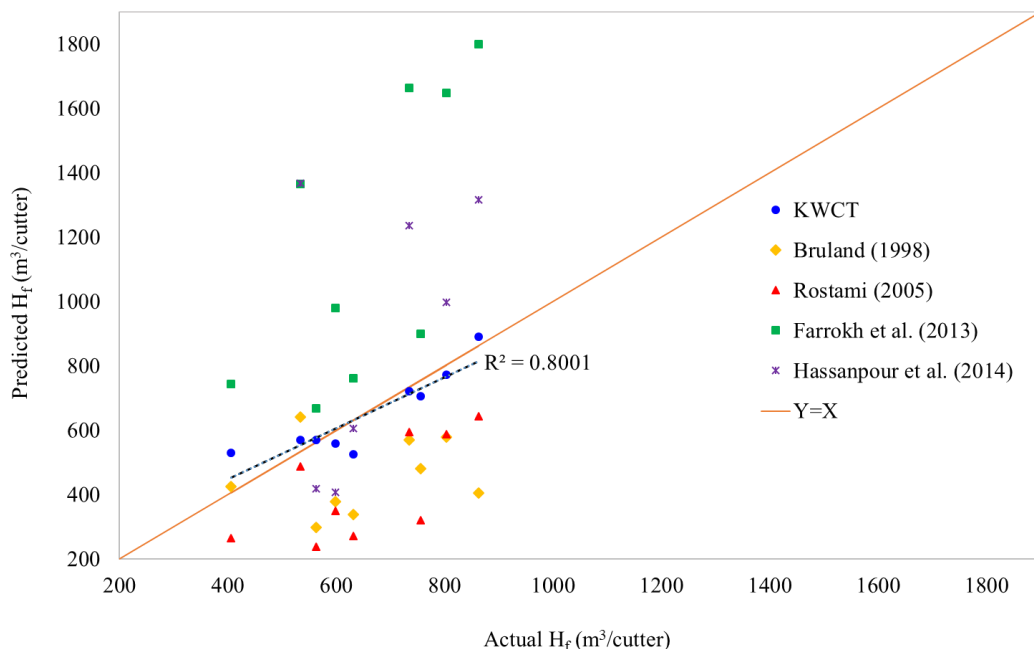
شکل ۵-۵: چارت پیش‌بینی عمر سایشی دیسک‌کاتر بر اساس مدل تجربی جدید به ازای $CAI=4$



شکل ۵-۶: چارت پیش‌بینی عمر سایشی دیسک‌کاتر بر اساس مدل تجربی جدید به ازای CAI=5



شکل ۵-۷: چارت پیش‌بینی عمر سایشی دیسک‌کاتر بر اساس مدل تجربی جدید به ازای CAI=6



شکل ۵-۸: مقایسه عمر سایشی واقعی و پیش‌بینی شده توسط مدل تجربی پیشنهادی در تونل انتقال آب کرمان

۵-۵- اعتبارسنجی مدل تجربی جدید پیش‌بینی عمر دیسک‌کاتر

برای اعتبارسنجی مدل تجربی پیش‌بینی عمر سایشی دیسک‌کاترها در سنگ‌های درزه‌دار (رابطه ۵-۱۵)، از داده‌های ثبت شده در تونل آب‌بر نیروگاه^۱ (HRT) در پروژه توسعه چند منظوره اوما اویا^۲ (UOMDP) واقع در کشور سریلانکا استفاده می‌شود. پروژه توسعه چند منظوره اوما اویا یا اختصاراً پروژه اوما اویا در بخش جنوب شرقی منطقه کوهستانی مرکزی سریلانکا در استان اووا^۳ واقع شده است (شکل ۵-۹). پروژه اوما اویا دارای سه تونل اصلی شامل تونل ارتباطی^۴ (LT)، تونل آب‌بر نیروگاه و تونل پایاب^۵ (TRT) و دو سد واقع در پاهولپولا^۶ و دایرآبا^۷ است. آب از مخزن سد پاهولپولا از طریق تونل LT به مخزن دایرآبا منتقل می‌شود. تونل HRT آب را از مخزن سد دایرآبا به نیروگاه زیرزمینی منتقل می‌کند و نهایتاً آب تخلیه شده از نیروگاه از طریق تونل TRT به رودخانه الیکوتا آرا^۸ که از شاخه‌های کیریندی اویا^۹ است، هدایت می‌شود. طول و آزمون HRT به ترتیب تقریباً ۱۵,۲۹

¹ Headrace Tunnel

² Uma Oya multipurpose development project

³ Uva

⁴ Link Tunnel

⁵ Tailrace Tunnel

⁶ Puhulpola

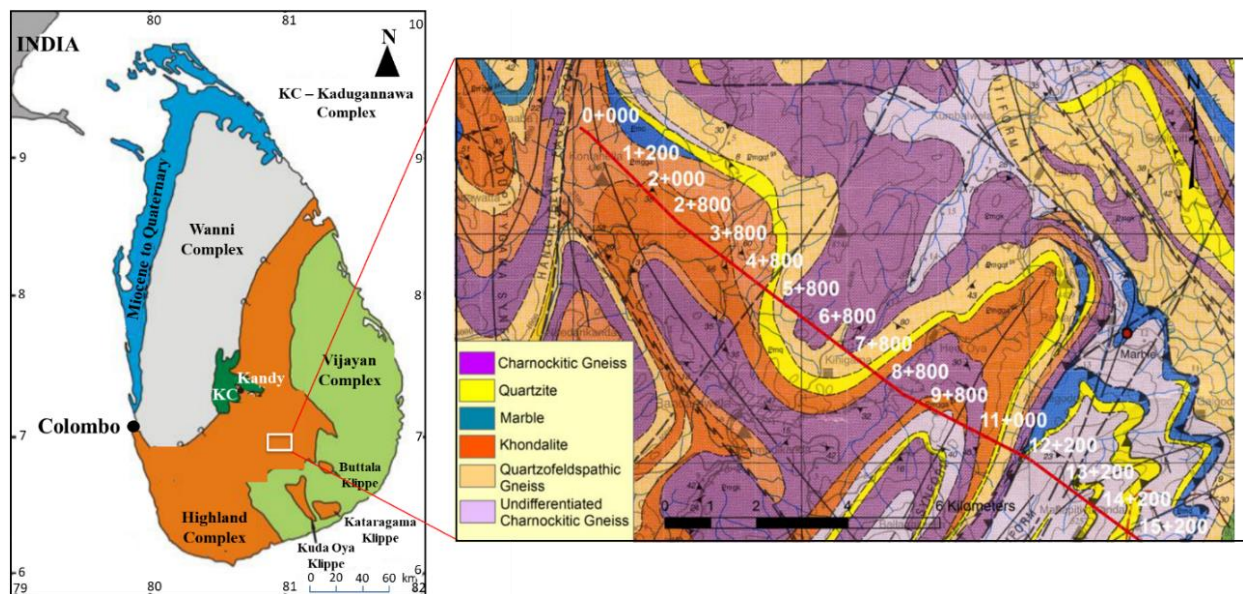
⁷ Dyaaba

⁸ Alikota Ara

⁹ Kirindi Oya

کیلومتر و ۳۰۷,۳۱ درجه است. قطر TBM های دوسپری سنگ سخت مورد استفاده برای حفاری HRT ۴,۳ متر است. همچنین مطابق شکل (۵-۱۰) تعداد دیسک کاترهای نصب شده بر روی کاترهد ۲۷ عدد است (گوناتیلاکه و همکاران، ۲۰۱۶).

زمین‌شناسی عمومی منطقه با تغییرات کانی‌شناسی، گرانولیت‌های پاراگنیس^۲ و ارتوگنیس^۳ تکتونیکی مخلوط (به ترتیب سنگ‌های رسوبی دگرگونی و آذرین دگرگونی) معرفی می‌شود. انواع سنگ‌های پروژه عبارتند از گنیس گارنت - سیلیمانیت - بیوتیت - گرافیت (کندالیت)، گارنت - بیوتیت گنیس، گنیس کوارتز - فلدسپاتیک، کوارتزیت‌ها، سنگ مرمر / کالک-گنیس، گنیس شارنوکیت و گنیس‌های تمایز نیافته شامل سنگ‌های مختلط آذرین و رسوبی است که در شکل (۵-۹) نشان داده شده است (گوناتیلاکه و همکاران، ۲۰۱۶).

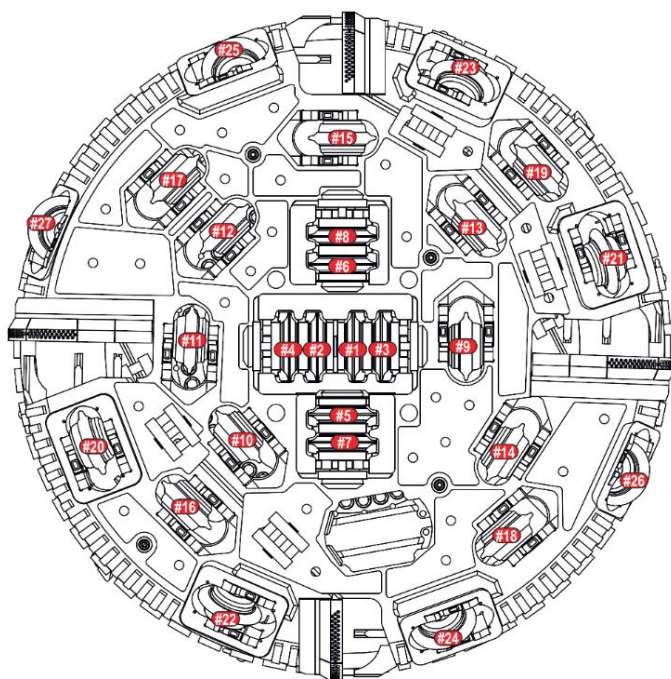


شکل ۵-۹: نقشه سنگ‌شناسی و تکتونیکی سریلانکا و زمین‌شناسی تونل HRT در پروژه اوما اویا (گوناتیلاکه و همکاران، ۲۰۱۶)

¹ Gunatilake et al.

² Para Gneissic Granulite

³ Ortho Gneissic Granulite



شکل ۵- ۱۰: کاترهد TBM دوسپری استفاده شده برای حفاری تونل HRT در پروژه اوما اوپا (گوناتیلاکه و همکاران، ۲۰۱۶)

برای اعتبارسنجی مدل تجربی ارائه شده در رابطه (۵-۱۵)، دو منطقه A و B در مسیر HRT بر اساس موجودیت و دقت اطلاعات انتخاب شدند (کادرهای آبی رنگ در شکل (۵-۱۱)). با توجه به فاصله و تراکم درزه‌ها در این مناطق و همچنین نوع سنگ‌ها، منطقه A را می‌توان به عنوان یک منطقه نسبتاً توده‌ای و سالم در نظر گرفت که خصوصیات مقاومت آن همانند سنگ بکر سالم است. از طرف دیگر، منطقه B یک توده‌سنگ خردشده و بلوکی است. شکل (۵-۱۲) نقشه مپینگ زمین‌شناسی تونل HRT را در مناطق A و B نشان می‌دهد که نمای خوبی از وضعیت توده‌سنگ در این مناطق را ارائه می‌دهد. خصوصیات سنگ بکر و توده‌سنگ در این مناطق در جدول (۵-۷) ارائه شده است (گوناتیلاکه و همکاران، ۲۰۱۶). منطقه B از لحاظ زمین‌شناسی از چندین لایه سنگی تشکیل شده است و بنابراین خصوصیات به طور جداگانه برای هر لایه ارائه شده است. در جدول (۵-۸) مشخصات درزه‌ها در دو منطقه A و B و پارامترهای لازم برای پیش‌بینی عمر سایشی دیسک‌کاترهای TBM بر اساس مدل تجربی ارائه شده در رابطه (۵-۱۵) بیان شده است. با توجه به وجود چند لایه سنگی متفاوت در

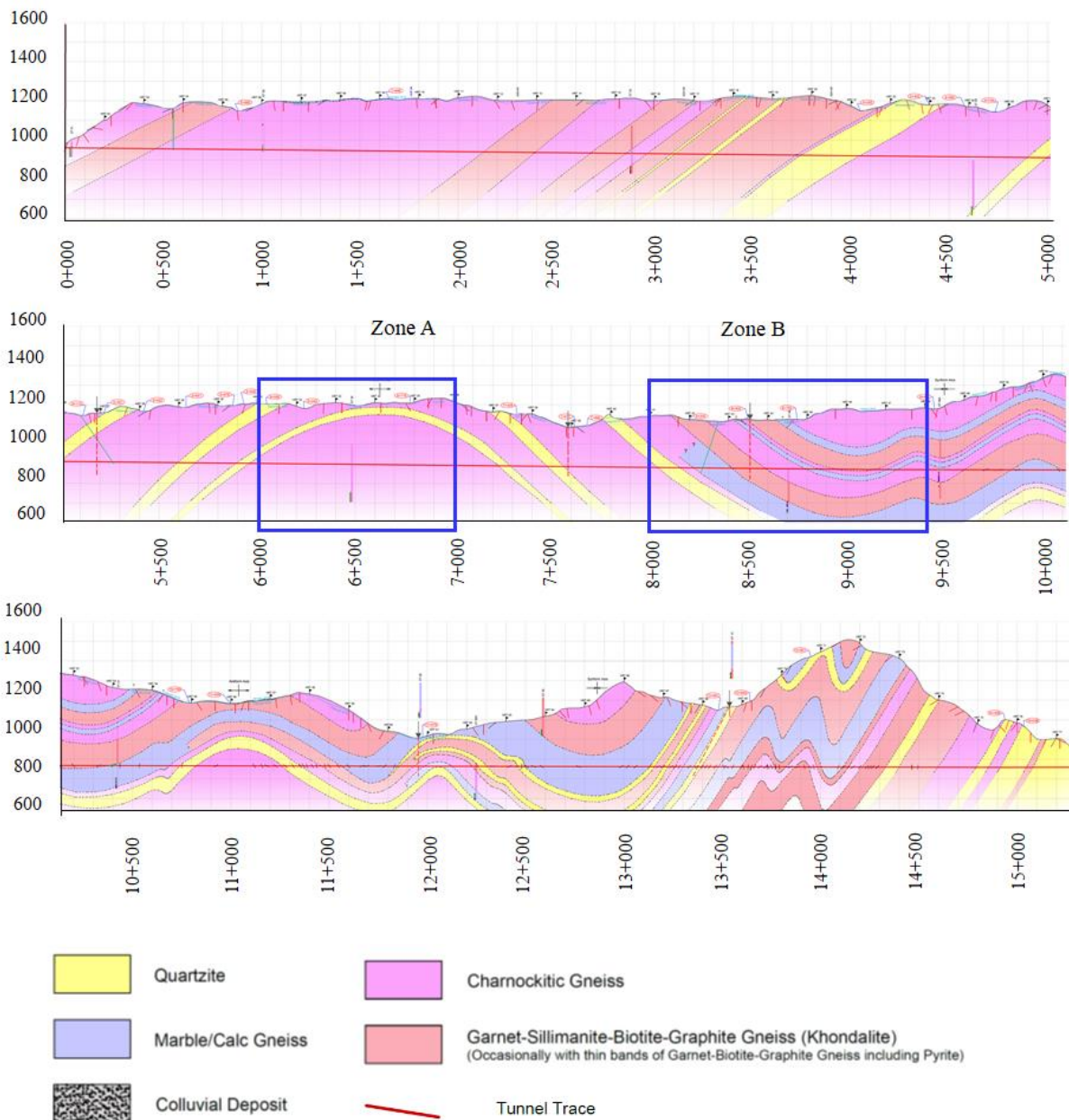
منطقه B، مقاومت توده سنگ و شاخص سایش سرشار بر اساس میانگین وزنی محاسبه شده است. علاوه بر این، در شکل (۵-۱۳) زاویه بین درزه‌ها و محور تونل HRT برای هر دو منطقه A و B نشان داده شده است.

جدول ۵-۷: ویژگی‌های ژئومکانیکی مناطق منتخب A و B در پروژه اوما اوپای سریلانکا (گوناتیلاکه و همکاران، ۲۰۱۶)

منطقه	کیلومتر از	نوع سنگ	طول (m)	بیشینه روباره (m)	UCSi (MPa)	CAI	GSI	UCS _{rm} (MPa)
A	۶۰۰۰-۷۰۰۰	گنیس شارنوکیتی	۱۰۰۰	۳۴۷	۲۵۰	۵	۷۰-۷۵	۵۴,۱
		گنیس شارنوکیتی	۵۳۰	۳۰۰	۲۵۰	۵	۶۰-۶۵	۳۰,۸
B	۸۰۰۰-۹۴۳۰	کندالیت	۴۰۰	۳۰۰	۲۵۰	۵	۶۰-۶۵	۳۰,۸
		مرمر/کالک گنیس	۴۰۰	۲۰	۷۵	۱,۵	۶۰-۶۵	۹,۲
		کوارتزیت	۱۰۰	۲۶۰	۲۰۰	۴,۵	۶۰-۶۵	۲۴,۷

جدول ۵-۸: ویژگی دسته‌درزه‌ها و پارامترهای لازم برای اعتبارسنجی مدل تجربی ارائه شده در رابطه (۵-۱۵) (گوناتیلاکه و همکاران، ۲۰۱۶)

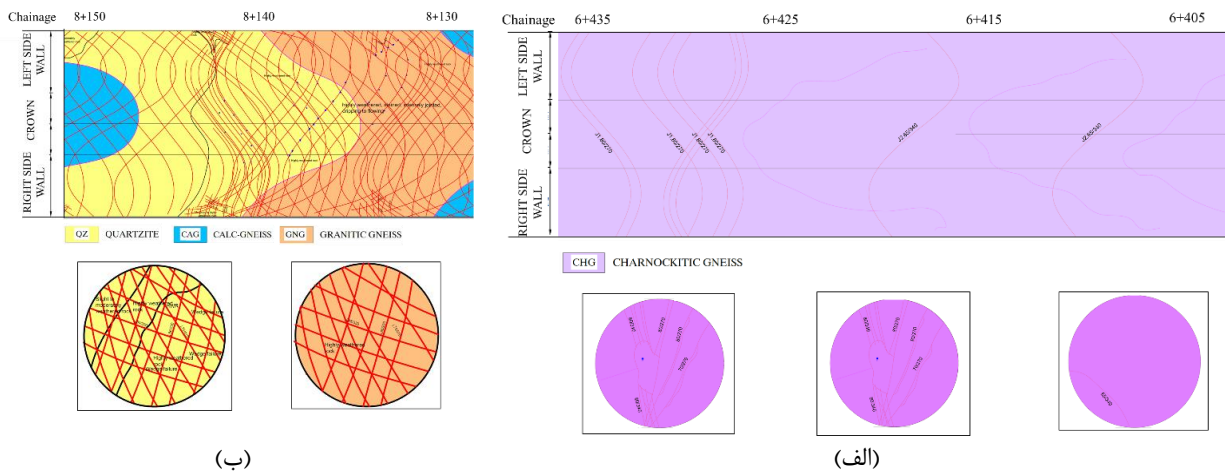
منطقه	جهت‌داری درزه‌ها (جهت شیب/شیب)			طبقه‌بندی شکستگی			پارامترهای لازم برای اعتبارسنجی و مقایسه				
	دسته اول	دسته دوم	دسته سوم	دسته اول	دسته دوم	دسته سوم	K _{s-tot}	UCS _{rm} (MPa)	CAI	UCS _i (MPa)	VHNR
A	۷۰/۱۴۰	۸۰/۳۴۵	۸۰/۲۷۵	+0	+0	+0	۰٫۷	۵۴٫۱	۵	۲۵۰	۸۶۵
B	۸۰/۱۸۰	۷۲/۳۴۵	۸۲/۲۳۵	I-0	+0	I-0	۱٫۳۵	۲۴٫۴	۴	۱۹۵	۷۲۰



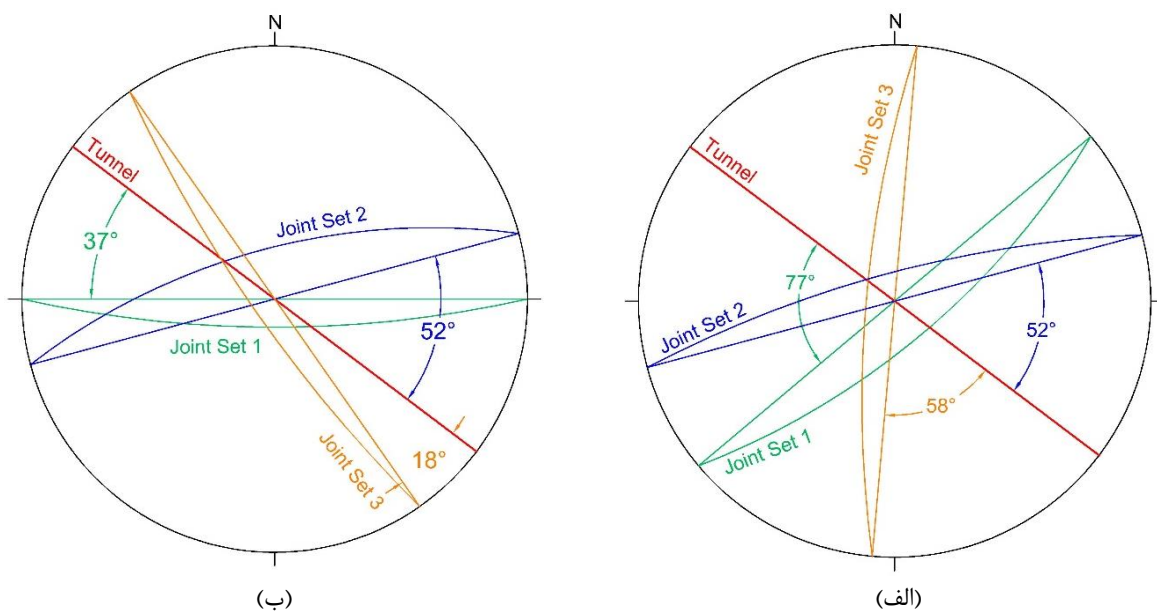
شکل ۵-۱۱: مقطع طولی زمین‌شناسی تونل HRT در پروژه اوما اوپا؛ کادرهای آبی‌رنگ شامل مناطقی است که برای اعتبارسنجی مدل تجربی ارائه شده در رابطه (۵-۱۵) استفاده شده است (گوناتیلاکه و همکاران، ۲۰۱۶)

در شکل‌های (۵-۱۴) و (۵-۱۵) میزان مصرف واقعی دیسک‌کاتر به ترتیب در مناطق A و B بر حسب موقعیت نصب دیسک‌کاتر بر روی کاترهد نشان داده شده است. طبق این شکل، تعداد دیسک‌کاتر تعویض شده به دلیل فرسودگی سایشی در مناطق A و B به ترتیب ۵۰ و ۴۱ عدد است. از آنجایی که در پایگاه داده تونل انتقال آب کرمان، مفهوم عمر واقعی دیسک‌کاتر بر اساس تعداد دیسک‌کاتر تعویض شده در اثر ساییدگی در طی حفاری

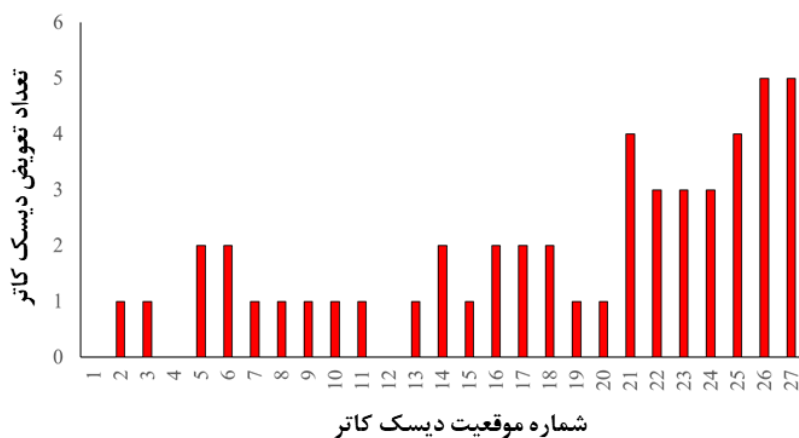
حجم معینی از تونل در سنگ تعریف شده، عمر واقعی دیسک کاتر برای دو منطقه A و B طبق روابط (۵-۱۴) و (۵-۱۵) تعیین می شود.



شکل ۵-۱۲: شرایط توده سنگ بر اساس مپینگ زمین شناسی: (الف) منطقه A؛ (ب) منطقه B

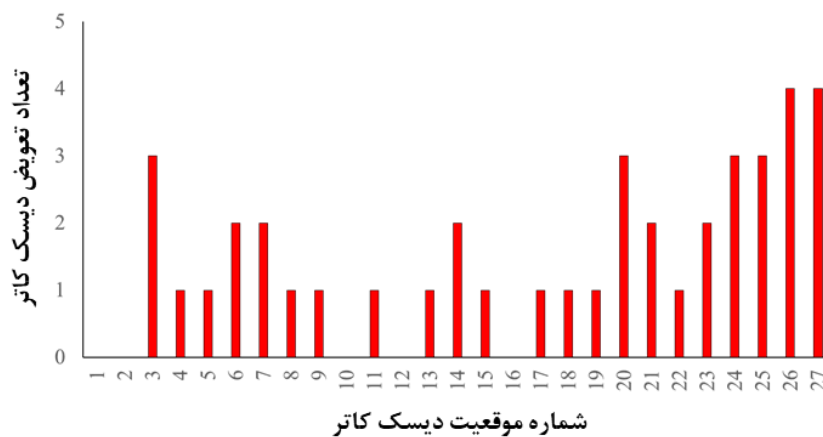


شکل ۵-۱۳: جهت داری دسته درزه ها نسبت به محور تونل HRT: (الف) منطقه A؛ (ب) منطقه B



شکل ۵-۱۴: تعداد دیسک کاتر تعویض شده در اثر فرسودگی سایشی در منطقه A بر حسب موقعیت نصب روی کاترهد (مجموعاً

۵۰ عدد)



شکل ۵-۱۵: تعداد دیسک کاتر تعویض شده در اثر فرسودگی سایشی در منطقه B بر حسب موقعیت نصب روی کاترهد (مجموعاً

۴۱ عدد)

$$H_f|_{\text{zone A}} = \frac{(\pi \times 4.3^2 / 4) \times 1000}{50} = 290.4 \text{ m}^3/\text{cutter} \quad (۵-۱۱)$$

$$H_f|_{\text{zone B}} = \frac{(\pi \times 4.3^2 / 4) \times 1430}{41} = 506.5 \text{ m}^3/\text{cutter} \quad (۵-۱۲)$$

در شکل (۵-۱۶) مقایسه‌ای بین عمر واقعی و پیش‌بینی شده دیسک کاترها بر اساس مدل تجربی ارائه شده

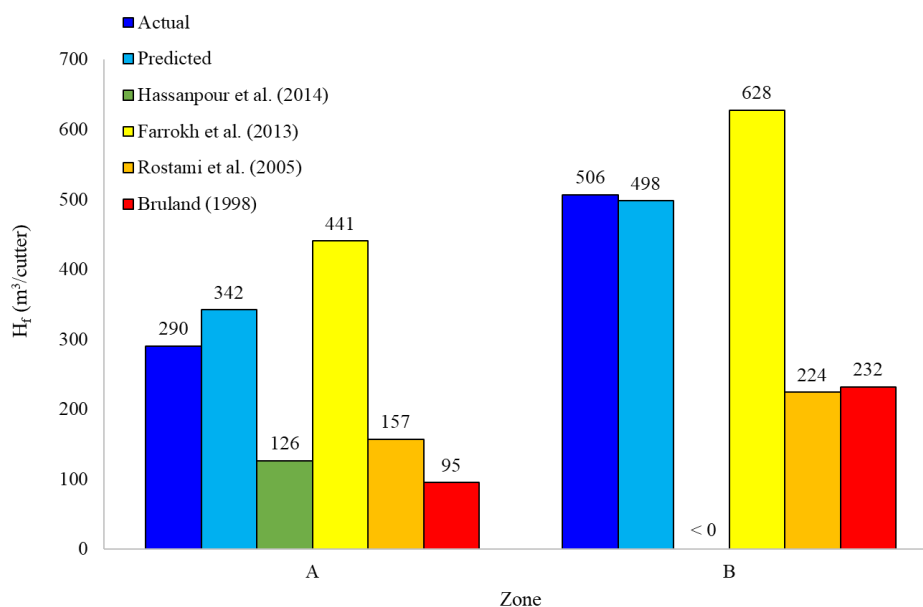
در رابطه (۵-۱۵) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تفاوت بین عمر واقعی و پیش‌بینی شده

بسیار کم است. این اختلاف برای منطقه بلوکی B و منطقه توده‌ای A به ترتیب حدود ۲٪ و ۱۸٪ است. مطابق شکل (۵-۱۶)، مقادیر پیش‌بینی شده عمر سایشی برای دو منطقه A و B توسط چند مدل تجربی رایج نیز نشان داده شده است. بر این اساس، مدل تجربی ارائه شده در این تحقیق کمترین اختلاف را با مقادیر واقعی عمر دارد. علاوه بر این، مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل تجربی فرخ و همکاران (۲۰۱۳) بیش از مقادیر واقعی عمر سایشی دیسک‌کاتر بوده و اصطلاحاً بیش تخمین است. این در حالی است که مدل‌های برولند (۱۹۹۸) و رستمی و همکاران (۲۰۰۵) عمر دیسک‌کاتر را دست پایین تخمین زده‌اند. مدل تجربی حسن‌پور و همکاران (۲۰۱۴) مقادیری مابین مدل‌های برولند (۱۹۹۸) و رستمی و همکاران (۲۰۰۵) به عنوان عمر سایشی دیسک‌کاتر ارائه می‌دهد ولی بر اساس این مدل، عمر سایشی پیش‌بینی شده برای دیسک‌کاتر در منطقه B غیر قابل قبول است. اساساً محدودیت مدل حسن‌پور (۲۰۱۴) به دلیل ماهیت خطی آن در برخورد با مقادیر بالای VHNR و UCS_i است (ABI بسیار بالا) که مقادیر پیش‌بینی شده منفی و غیر منطقی است. نتیجه مطالعه موردی برای اعتبارسنجی مدل تجربی ارائه شده در این تحقیق نشان می‌دهد که این مدل توانایی خوبی برای پیش‌بینی عمر دیسک‌کاترها در سنگ‌های درزه‌دار دارد و می‌تواند با دقت قابل قبولی در سایر پروژه‌ها مورد استفاده قرار گیرد. در شکل (۵-۱۷) عمر سایشی دیسک‌کاترها برای دو منطقه A و B در تونل HRT با استفاده از چارت‌های پیش‌بینی مدل تجربی این تحقیق تخمین زده شده است. طبق این نمودارها می‌توان پیش‌بینی معقول و سریعی از عمر سایشی دیسک‌کاترها داشت.

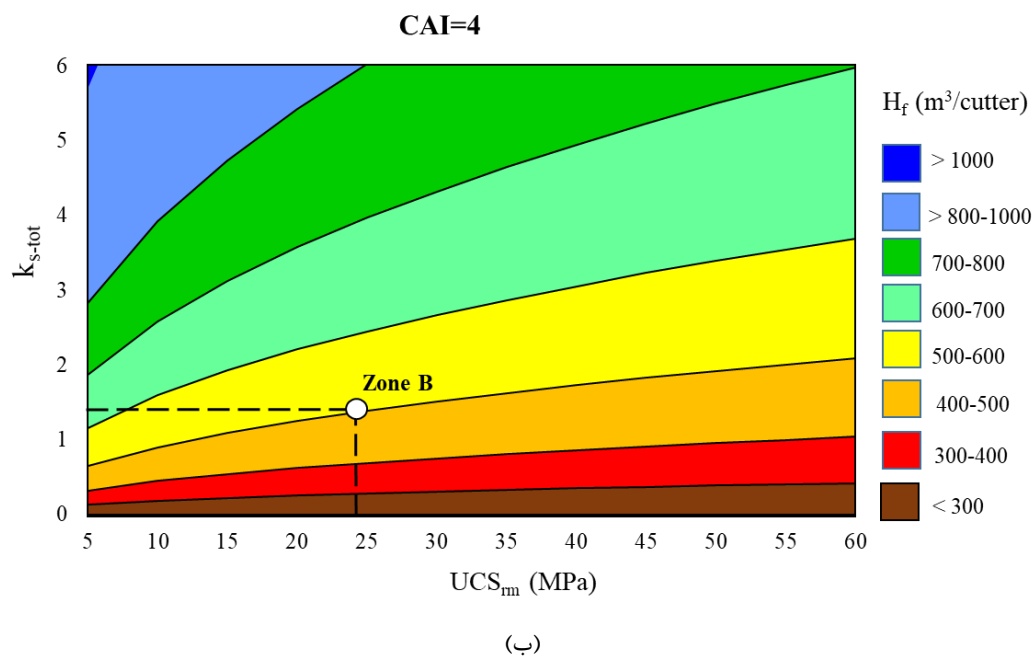
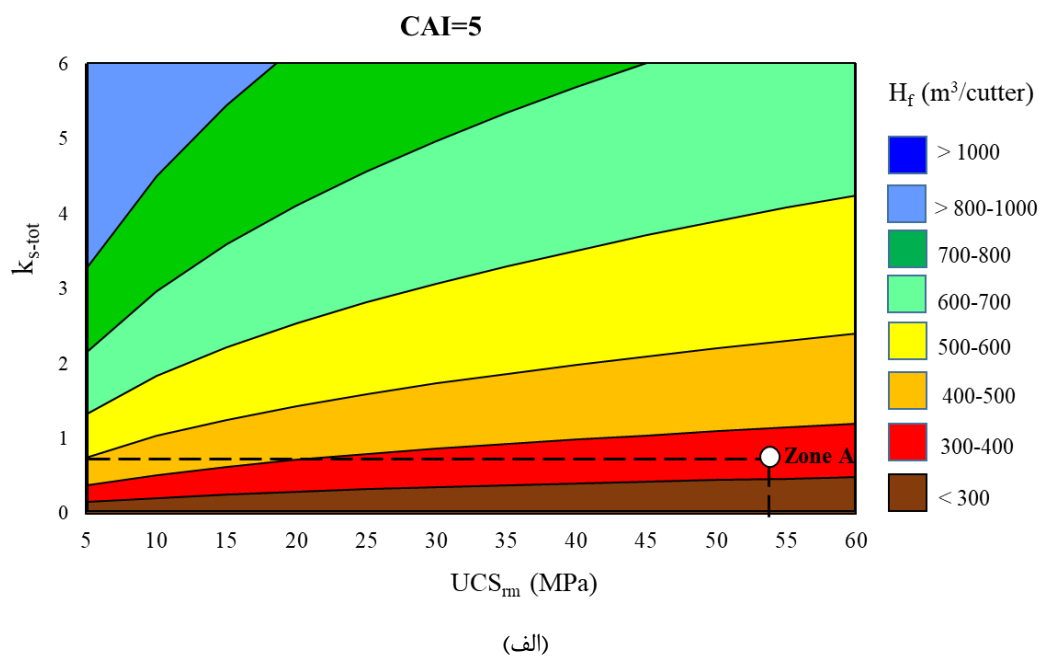
۵-۶- جمع بندی

در بررسی پارامترهای سنگ بکر و توده‌سنگ که بر عمر سایشی دیسک‌کاترهای TBM موثر است می‌توان عوامل مختلفی مانند مقاومت فشاری تک‌محوری، شاخص سایش سرشار، فاصله‌داری درزها، تراکم حجمی درزه، جهت‌داری درزها و غیره را برشمرد. از طرفی پارامترهای تلفیقی بر اساس خصوصیات سنگ‌بکر و شرایط درزها مانند مقاومت توده‌سنگ و ضریب خردشدگی کل توده‌سنگ را می‌توان برای جامعیت بیشتر پارامترها طبق منابع معتبر محاسبه و در پایگاه داده‌ها وارد نمود. با ایجاد همبستگی خطی تک متغیره بین این پارامترها و عمر سایشی

دیسک کاترھا در تونل انتقال آب کرمان، پارامترهای موثر بر عمر سایشی بر اساس بیشترین مقدار ضریب همبستگی انتخاب می‌شوند. این پارامترھا شامل مقاومت توده سنگ، ضریب خردشدگی کل توده سنگ و شاخص سایش سرشار است که منجر به ارائه مدل تجربی پیش‌بینی عمر سایشی دیسک کاتر با ضریب همبستگی ۰,۸۰۰ می‌شود. در این رابطه افزایش مقاومت فشاری و شاخص سایش سرشار موجب کاهش عمر سایشی دیسک کاترھا شده و با افزایش خردشدگی سنگ، عمر دیسک کاترھا افزایش می‌یابد. بیشترین همبستگی عمر سایشی دیسک کاترھا با مقاومت توده سنگ می‌باشد. اعتبارسنجی مدل تجربی بر اساس داده‌های تونل HRT در پروژه اوماویا در سریلانکا نشان می‌دهد که این مدل در سنگ‌های بسیار درزه‌دار و خرد شده نتایج نزدیکتری به واقعیت ارائه می‌کند و نسبت به سایر مدل‌های تجربی رایج، کمترین انحراف را با عمر سایشی واقعی دیسک کاترھا دارد. ضمناً برای سهولت استفاده از مدل تجربی جدید، چارتهایی بر اساس مقاومت توده سنگ و ضریب خردشدگی کل توده سنگ به ازای مقادیر مختلف شاخص سایش سرشار ارائه شده است.



شکل ۵-۱۶: نتایج اعتبارسنجی مدل تجربی در تونل HRT پروژه اوماویای سریلانکا



شکل ۵-۱۷: تخمین عمر دیسک کاتر با استفاده از چارت‌های پیش‌بینی در تونل HRT: (الف) منطقه A؛ (ب) منطقه B

فصل ششم

مدل سازی عددی تاثیر مشخصات هندسی درزه ها بر فرسودگی سایشی دیسک کاترها

۶-۱- مقدمه

عوامل مختلفی می‌تواند بر فرسودگی سایشی دیسک‌کاترهای TBM تاثیر بگذارند. تعیین این عوامل و میزان تاثیر آن‌ها بر فرسودگی و عمر سایشی دیسک‌کاترها می‌تواند با صرف هزینه و زمان زیاد و صرفاً با تجهیزات آزمایشگاهی و یا پایش برجا مهیا گردد. در این تحقیق برای ارزیابی تاثیر شرایط درزه‌داری سنگ بر فرسودگی سایشی دیسک‌کاترها از روش اجزای گسسته به وسیله نرم‌افزار 3DEC نسخه ۵ استفاده شده است. در این مدل‌سازی با در نظر گرفتن شرایط دینامیکی برای تحلیل، سرعت‌های واقعی دیسک‌کاتر در نظر گرفته شده و سازوکار شکست سنگ و فرسودگی سایشی دیسک‌کاترها با لحاظ درزه‌داری سنگ بررسی شده است.

۶-۲- معرفی نرم‌افزار اجزای گسسته 3DEC

نرم‌افزار 3DEC یک برنامه شبیه‌سازی عددی سه بعدی بر اساس روش اجزای گسسته برای تجزیه و تحلیل مسائل ناپیوسته مانند سنگ درزه‌دار است. این نرم‌افزار شامل زبان برنامه نویسی داخلی FISH است که کاربر را قادر می‌سازد متغیرها و توابع جدیدی تعریف کند و پاسخ سنگ درزه‌دار به بارهای استاتیکی و دینامیکی را تحلیل کند. در این نرم‌افزار بلوک‌های مجزا به صورت ماده صلب و یا انعطاف‌پذیر عمل کرده و جابجایی‌های بزرگ درزه‌ها و همچنین چرخش بلوک‌ها قابل تجزیه و تحلیل است. بلوک‌های صلب را می‌توان با مش‌بندی به اجزای تفاضل محدود تقسیم کرد به گونه‌ای هر جزء مطابق با یک قانون تنش-کرنش خطی و یا غیرخطی از پیش تعریف شده رفتار کند. علاوه بر این، جابجایی‌های نسبی ناپیوستگی‌ها نیز تابعی از روابط جابجایی-نیروی خطی و غیرخطی در جهات عمودی و برشی است.

۶-۳- مدل‌سازی عددی فرسودگی سایشی دیسک‌کاتر

از آنجایی که در پروژه‌های واقعی و نیز در آزمون‌های آزمایشگاهی، امکان ثبت و پایش همه پارامترهای موثر بر سایشی سایشی دیسک‌کاتر و شکست سنگ وجود ندارد، استفاده از روش‌های عددی و تحلیل نرم‌افزاری با هدف تعیین نیروهای برش دیسک‌کاتر و فرایند تشکیل و توسعه ترک در سنگ در حین شکست سنگ و نیز

بررسی فرسودگی سایشی دیسک کاتر مورد قبول عام واقع شده است. در گام اول مدل سازی عددی در این تحقیق، ابتدا حفاری سنگ بکر (بدون درزه) با دیسک کاتر تکی در یک مسیر برش دایره ای تحت عنوان مدل اولیه شبیه سازی شده و با نتایج مدل نظری CSM مقایسه شده است. در ادامه درزه هایی با مشخصات هندسی متفاوت (جهت داری و فاصله داری) به مدل اضافه شده و حرکت واقعی دیسک کاتر شامل چرخش حول محور دیسک، دوران حول محور تونل و نفوذ در راستای پیشروی دیسک کاتر در مدل عددی شبیه سازی شده است. این مدل نیز همانند مدل اولیه با دیسک کاتر تکی انجام شده است. نهایتاً در مدل نهایی، حفاری توده سنگ درزه دار با TBM مدل سازی شده است و شرایط شکست سنگ و فرسودگی سایشی دیسک کاترها بررسی شده است. در مدل نهایی، از اطلاعات مربوط به دو مقطع از تونل انتقال آب کرمان برای مقایسه نتایج عددی با نتایج واقعی استفاده شده است.

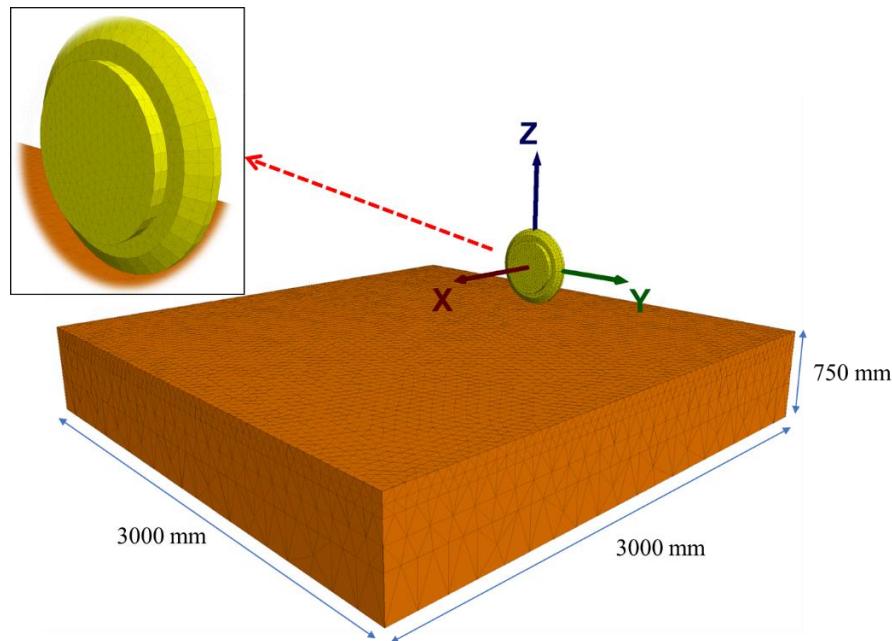
۶-۳-۱- مدل سازی عددی برش سنگ بکر توسط دیسک کاتر تکی

به عنوان اولین گام در مدل سازی عددی حفاری سنگ توسط کاترهد TBM، فرایند برش سنگ توسط دیسک کاتر تکی با نرم افزار 3DEC استفاده شده است. هدف از این مدل سازی، مقایسه نتایج عددی با مدل نظری CSM است که بر اساس روابط تحلیلی، نیروهای برش دیسک کاتر را محاسبه می کند. به دلیل اعمال سرعت های چرخشی، دوران و نفوذ به دیسک کاتر، مبنای حل این مدل به روش دینامیکی است. ضمناً برای همسان سازی شرایط تحلیل روش عددی با شرایط مفروض در مدل CSM، از در نظر گرفتن درزه های سنگ صرف نظر شده است. در ادامه به صورت گام به گام به مراحل ساخت، مقداردهی و حل مدل توسط نرم افزار 3DEC اشاره شده است.

۶-۳-۱-۱- هندسه مدل

مدل عددی شامل دو هندسه اساسی یعنی دیسک کاتر و سنگ بوده که قرار است با اعمال شرایط مرزی به آن ها، عملیات برش سنگ مدل شود. دیسک کاتر تکی مدل شده از نوع مقطع ثابت با قطر ۱۷ اینچ (۴۳۲ میلی متر) و ضخامت لبه ۱۹ میلی متر به صورت می باشد. برای زون بندی این دو هندسه از زون های چهاروجهی با چهار راس،

شش یال و چهار وجه مثلثی استفاده شده که بزرگترین بُعد زون در دیسک کاتر و سنگ به ترتیب ۲ و ۵ سانتی متر است. در شکل (۶-۱) ابعاد هندسه مدل و زون بندی دیسک کاتر و سنگ در تحلیل عددی برش سنگ بکر توسط دیسک کاتر تکی در نرم افزار 3DEC نشان داده شده است.



شکل ۶-۱: ابعاد هندسه مدل و زون بندی دیسک کاتر و سنگ برای تحلیل عددی برش سنگ بکر توسط دیسک کاتر تکی

۶-۳-۱-۲- معیار رفتاری و خصوصیات مواد

به منظور مدل سازی فرآیند شکست دینامیکی سنگ توسط دیسک کاتر تکی، از معیار رفتاری موهر - کولمب برای سنگ و معیار فون میزز^۱ برای دیسک کاتر استفاده شده است. معیار موهر - کولمب یک مدل ریاضی برای توصیف رفتار مواد شکننده یا ترد^۲ بوده که در مهندسی ژئوتکنیک، برای بیان مقاومت برشی خاک های چسبنده-اصطکاکی و سنگ تحت تأثیر تنش های برشی و عمودی به کار می رود (رابطه (۶-۱)). از طرف دیگر، معیار فون میزز به خوبی می تواند رفتار مواد نرم^۳ مانند انواع فلزات و آلیاژها را شبیه سازی کند. طبق معیار فون میزز، یک ماده زمانی شروع به تسلیم می کند که ناوردای دوم^۴ تنش انحرافی^۵ به یک مقدار بحرانی برسد (رابطه

¹ Von Mises Criterion

² Brittle Materials

³ Ductile Materials

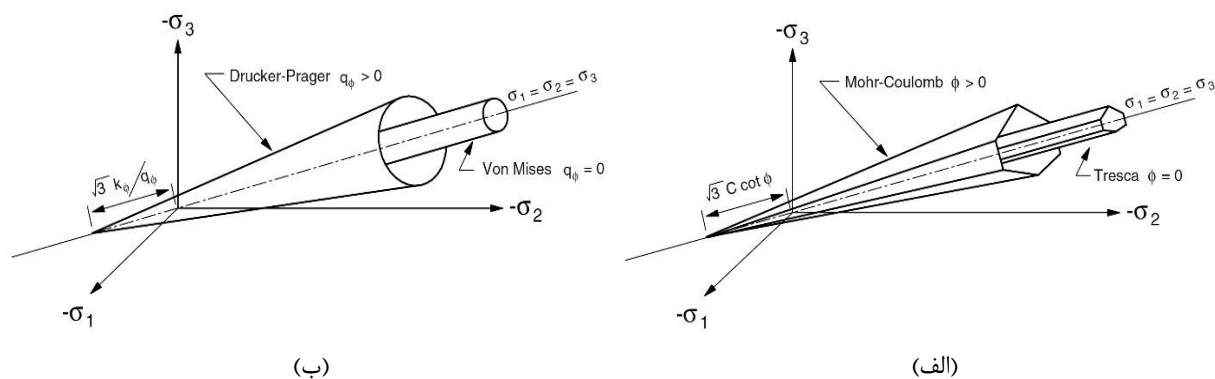
⁴ Second Invariant

⁵ Deviatoric Stress

(۲-۶)). باید خاطر نشان شد که در نرم افزار 3DEC، با فرض مقدار صفر برای ضریب اصطکاک در معیار رفتاری دراکر-پراگر، معیار رفتاری فون میزز حاصل می شود. علاوه بر این، در این نرم افزار می توان کانتورهای تنش فون میزز را برای زون های دیسک کاتر نمایش داد. به عنوان یکی از فرضیات اصلی در این تحقیق، مقدار تنش های فون میزز در دیسک کاتر متناسب با میزان فرسودگی سایشی آن است. به عبارت دیگر، هرچه تنش فون میزز القایی در دیسک کاتر بیشتر باشد می توان پتانسیل فرسودگی سایشی دیسک کاتر تحت آن شرایط خاص را بیشتر دانست. این فرض کمک شایانی در مطالعه اثر شرایط مختلف بر فرسودگی سایشی دیسک کاتر دارد که در بخش های آتی این فصل به آن پرداخته خواهد شد. در شکل (۲-۶) سطح تسلیم معیارهای رفتاری موهر-کولمب و فون میزز در دستگاه تنش های اصلی نشان داده شده است. در جدول (۱-۶) خصوصیات دیسک کاتر و سنگ برای صحت سنجی تحلیل عددی ارائه شده است. این خصوصیات به صورت فرضی و بر اساس مقادیر منطقی تعریف شده و صرفاً برای مقایسه نتایج تحلیل عددی و مدل نظری CSM تحت شرایط تقریباً یکسان است.

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (۱-۶)$$

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (۲-۶)$$



شکل ۲-۶: سطح تسلیم معیارهای رفتاری در دستگاه تنش های اصلی: (الف) موهر-کولمب؛ (ب) فون میزز

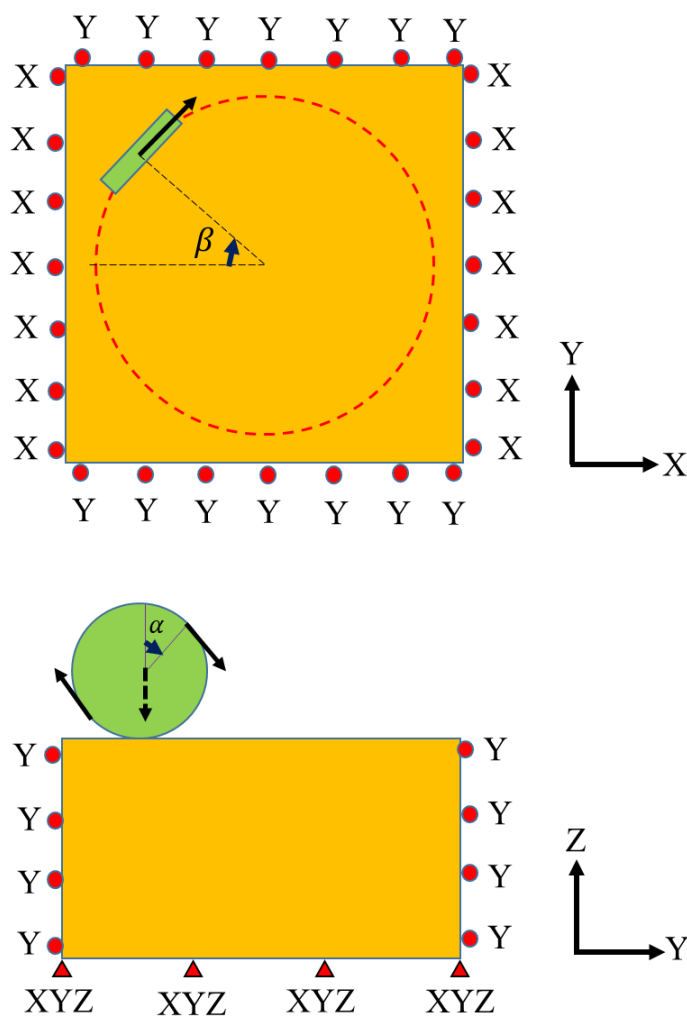
¹ Contour

جدول ۶-۱: خصوصیات در نظر گرفته شده برای دیسک کاتر و سنگ در مدل عددی

نوع ماده	پارامتر (واحد)	مقدار
سنگ	مدل رفتاری (-)	موهر - کولمب
	چگالی (kg/m^3)	۲۵۰۰
	مدول الاستیسیته (GPa)	۱۰
	ضریب پواسون	۰,۲۲
	اصطکاک داخلی (درجه)	۳۵
	چسبندگی (MPa)	۰,۱
دیسک کاتر	مدل رفتاری (-)	فون میزز
	چگالی (kg/m^3)	۷۰۰۰
	مدول الاستیسیته (GPa)	۲۱۰
	ضریب پواسون	۰,۳
	چسبندگی (MPa)	۶۰۰

۶-۳-۱-۳- شرایط مرزی

شرایط مرزی اعمالی در مدل سازی عددی برش سنگ بکر توسط دیسک کاتر تکی توسط نرم افزار 3DEC به صورت شماتیک در شکل (۶-۳) نشان داده شده است. طبق شکل (۶-۱) وجه پایینی سنگ در سه جهت متعامد X، Y و Z محدود شده و امکان حرکت ندارد (تکیه گاه مفصلی). همچنین وجوه جانبی سنگ به گونه ای ثابت شده که دیواره های موازی با محور Y (دارای بردار عمودی (۰،۰،۱)) و محور X (دارای بردار عمودی (۰،۱،۰)) به ترتیب در جهات X و Y ثابت شده اند (تکیه گاه غلتکی). علاوه بر این جابجایی وجه بالایی سنگ که تحت تاثیر فرایند برش دیسک کاتر بوده کاملاً آزاد است. در خصوص شرایط مرزی دیسک کاتر وضعیت کمی متفاوت است. به دلیل حرکت دینامیکی دیسک کاتر، دیسک کاتر داری حرکت چرخشی حول محور خود (پیکان های ممتد در صفحه XY)، حرکت دورانی حول محور تونل فرضی (پیکان ممتد در صفحه XY) و نفوذ در سنگ (پیکان مقطع در صفحه YZ) است. سرعت چرخشی و دورانی دیسک کاتر به صورت تابعی از زمان و متناسب با موقعیت زاویه ای دیسک کاتر (α و β) تعریف می شود. علاوه بر این نرخ نفوذ دیسک کاتر را می توان در راستای منفی محور Z و به صورت یک عدد ثابت در نظر گرفت. در روابط (۶-۳) تا (۶-۵) سرعت های اعمالی به دیسک کاتر ارائه شده است.



شکل ۶-۳: طرح شماتیک شرایط مرزی و سرعت‌های اعمالی در مدل عددی فرایند برش سنگ

$$V_{ro} = R_d \omega_{ro} \quad (۳-۶)$$

$$V_{re} = R_{re} \omega_{re} \quad (۴-۶)$$

$$V_a = \text{cte.} \quad (۵-۶)$$

که در آن V_{ro} ، V_{re} و V_a به ترتیب برابر سرعت چرخش دیسک کاتر، دوران دیسک کاتر حول محور تونل و نرخ نفوذ دیسک کاتر، R_d شعاع دیسک کاتر، ω_{ro} و ω_{re} به ترتیب سرعت زاویه‌ای چرخش و دوران دیسک کاتر و cte. عدد ثابت است.

۶-۳-۱-۴- نیروهای برش دیسک کاتر به عنوان خروجی مدل

در مدل سازی عددی نیروهای برش شامل نیروهای عمودی، غلتشی و جانبی در دیسک کاتر در طی زمان برش سنگ به صورت تاریخچه^۱ ثبت شده و نتایج عددی با روابط نظری مدل CSM که در روابط (۶-۶) و (۷-۶) ارائه شده مقایسه می شود.

$$F_n = CTR \phi \sqrt{\frac{\sigma_c^2 \sigma_t s}{\phi \sqrt{RT}}} \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (۶-۶)$$

$$F_r = CTR \phi \sqrt{\frac{\sigma_c^2 \sigma_t s}{\phi \sqrt{RT}}} \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (۷-۶)$$

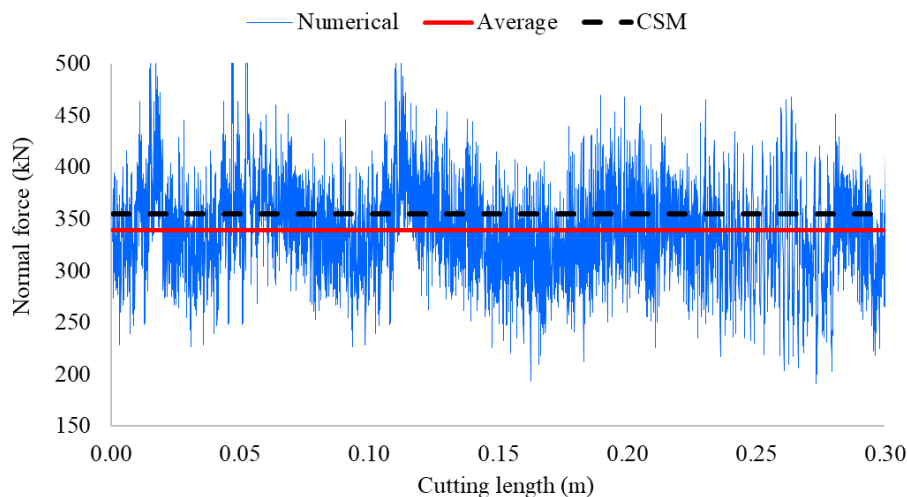
که در آن F_n نیروی عمودی دیسک کاتر، F_r نیروی غلتشی دیسک کاتر، C ضریب ثابت (۲،۱۲)، T عرض لبه دیسک کاتر، R شعاع دیسک کاتر، σ_c مقاومت فشاری تک محوری سنگ، σ_t مقاومت کششی سنگ، s فاصله بین دیسک کاترهای مجاور، ϕ زاویه تماس برابر با $\cos^{-1}\left(\frac{R-p}{R}\right)$ که p نرخ نفوذ دیسک کاتر است. در سیستم بین المللی، آحاد طول، مقاومت و زاویه به ترتیب میلی متر، مگاپاسکال و رادیان است.

در فرآیند صحت سنجی مدل عددی، نیروهای برشی دیسک کاتر (نیروی عمودی و غلتشی) پس از ۰،۳ متر برش سنگ در مدل عددی محاسبه شده و مقادیر متوسط آن با نتایج مدل نظری CSM مقایسه شده است. مطابق با شکل (۴-۶)، متوسط نیروی عمودی به دست آمده در روش عددی و مدل CSM به ترتیب ۳۳۹ و ۳۵۵ کیلونیوتن است که اختلاف نسبی آنها کمتر از ۵ درصد است. همچنین بر اساس شکل (۵-۶)، متوسط نیروی غلتشی محاسبه شده در روش عددی و مدل CSM به ترتیب ۴۷/۵ و ۵۱/۶ کیلونیوتن است که اختلاف نسبی آنها حدود ۸ درصد است. در جدول (۲-۶) نتیجه صحت سنجی مدل عددی بر اساس مقایسه نتایج آن با نتایج مدل نظری CSM ارائه شده است. بنابراین با توجه به اختلاف کمتر از ۱۰ درصد بین نتایج متوسط عددی و نظری، مدل ساخته شده در این تحقیق را می توان معتبر دانست و با افزودن شرایط درزه داری سنگ و هندسه

¹ History

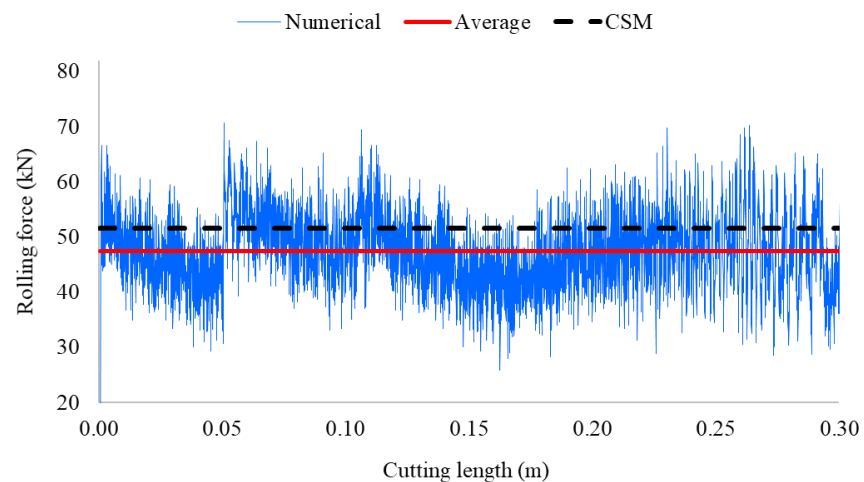
سایر دیسک‌کاترهای کاترهد مطابق با TBM تونل انتقال آب کرمان، از آن برای شبیه‌سازی برش توده‌سنگ استفاده نمود. با توجه به اختلاف موجود بین نتایج حاصل از روش عددی و مدل CSM به نظر می‌آید که مدل CSM محافظه‌کارانه باشد. چنانچه این موضوع توسط توماچ و بالجی^۱ (۲۰۱۵) نیز بیان شده است.

لازم به ذکر است که در مدل عددی به دلیل حرکت دورانی دیسک‌کاتر بر روی یک مسیر دایره‌ای، دیسک‌کاتر تحت نیروی جانبی قرار دارد (شکل ۶-۶)). در مدل نظری CSM، با فرض مسیر برش خطی برای برش دیسک (یعنی شعاع دوران بی‌نهایت است)، از محاسبه نیروی جانبی چشم‌پوشی شده است. با توجه به تغییر موقعیت دیسک‌کاتر نسبت به زمان دینامیکی، نیروهای برشی محاسبه شده توسط مدل‌سازی عددی، نوسانی بوده که برخلاف مدل CSM است که مقادیر ثابتی را ارائه می‌کند. در مقایسه با روش‌های نظری و حتی آزمایشگاهی که نیروهای برشی دیسک‌کاترها بر اساس پارامترهای محدود هندسی دیسک‌کاتر و مقاومت سنگ تعیین می‌شوند، مدل‌سازی عددی می‌تواند به خوبی تأثیر پیچیدگی‌های زمین‌شناسی، شرایط هندسی دیسک‌کاتر و سایر شرایط خاص را در محاسبه نیروهای برشی تحلیل کند.

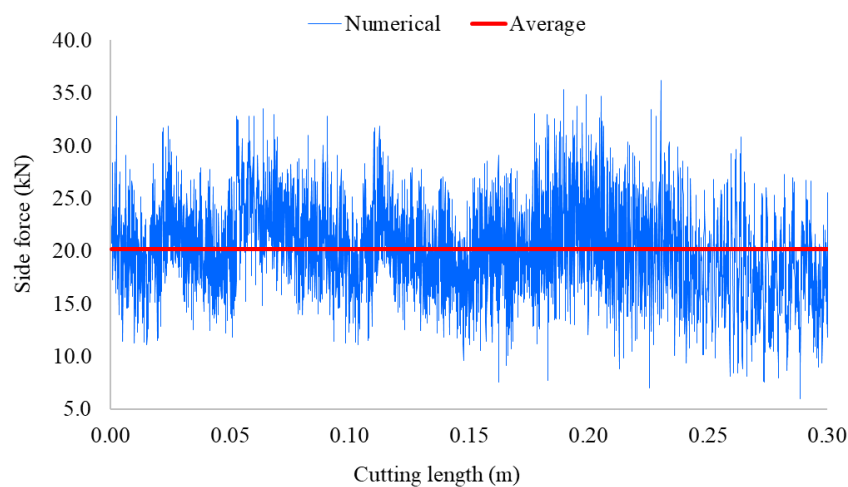


شکل ۶-۴: تغییرات نیروی عمودی دیسک‌کاتر در مدل نظری CSM و مدل عددی اجرا شده توسط 3DEC

¹ Tumac and Balci



شکل ۶-۵: تغییرات نیروی غلتشی دیسک کاتر در مدل نظری CSM و مدل عددی اجرا شده توسط 3DEC



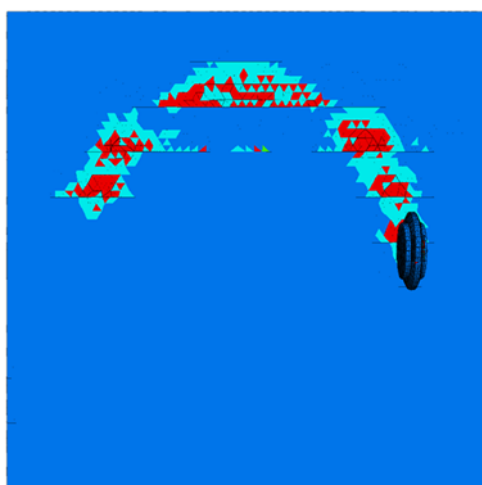
شکل ۶-۶: تغییرات نیروی جانبی دیسک کاتر در مدل عددی اجرا شده توسط 3DEC

جدول ۶-۲: مقایسه نیروهای برشی به دست آمده از روش‌های نظری و عددی

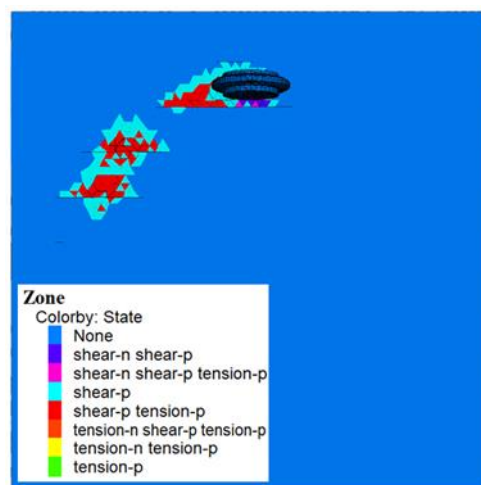
نیروهای برشی دیسک کاتر (کیلو نیوتن)				
نیرو	مدل عددی (متوسط)	مدل عددی (بیشینه)	مدل CSM	انحراف بین نیروی متوسط عدد و نیروی CSM (%)
عمودی	۳۳۹	۵۰۱	۳۵۵	۴,۵
غلتشی	۴۷,۵	۷۲	۵۱,۶	۷,۹
جانبی	۲۱	۳۶,۵	-	-

۶-۳-۱-۵- حجم ناحیه گسیخته شده و تنش فون میزز القایی به عنوان خروجی مدل

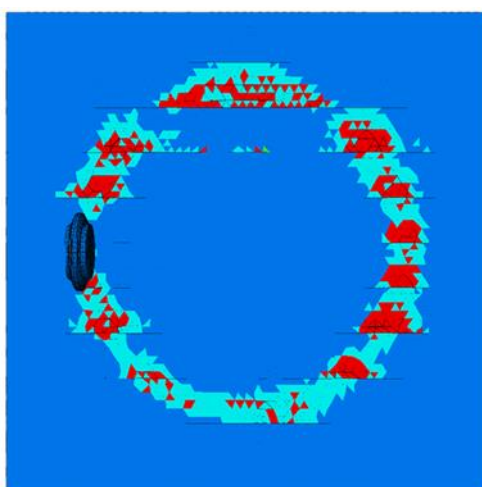
با اعمال نیروهای برشی از جانب دیسک کاتر به سنگ، تنش‌ها در سنگ گسترش یافته که در صورت فراتر رفتن مقادیر این تنش‌ها از مقدار مقاومت سنگ، ترک‌های موضعی در آن تشکیل و توسعه می‌یابد. توسعه این ترک‌ها منجر به تشکیل محدوده خردشده (پلاستیک) در سنگ خواهد شد. این محدوده دارای ظرفیت باربری بسیار کم و یا فاقد آن است که در عمل، سنگ این محدوده به صورت تراشه‌های حفاری از سینه‌کار تونل جدا می‌شوند. در مدل عددی مطابق معیار رفتاری موهر-کولمب، محدوده خردشده در اثر دو نوع گسیختگی برشی و کششی تشکیل می‌شوند. در طی تحلیل مدل توسط نرم‌افزار 3DEC، وضعیت تسلیم (پلاستیسیته) هر زون دائما بررسی شده که در صورت تحقق شرایط تسلیم، زون ممکن است شامل یکی از حالات گسیختگی برشی یا کششی و یا هر دوی آن باشد. در هر لحظه از زمان تحلیل دینامیکی، وضعیت هر زون تسلیمی با پسوندهای P (برای زمان گذشته) و n (برای زمان حال) نشان داده می‌شود که به ترتیب حاکی از آن است که زون، قبلا گسیخته شده و یا در حال حاضر در حال گسیختگی است. در شکل (۶-۷)، محدوده خردشده ناشی از چرخش، دوران و نفوذ دیسک کاتر و وضعیت گسیختگی زون‌ها در سنگ نشان داده شده است. حجم محدوده گسیخته شده را می‌توان با FISH که کد برنامه‌نویسی 3DEC است مشخص نمود. مسلما با تغییر شرایط تحلیل دیسک کاتر و سنگ، حجم محدوده گسیخته شده تغییر می‌یابد که می‌تواند به عنوان خروجی مهم در تجزیه و تحلیل عددی مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این تنش فون میزز القایی در دیسک کاتر، تابع شرایط مختلف مساله از جمله سرعت‌های اعمالی به دیسک، مشخصات مقاومتی توده سنگ و دیسک کاتر، وضعیت تنش و غیره می‌باشد که در هر لحظه از زمان تحلیل دینامیکی، قابل رویت و مطالعه است. این تنش‌ها در المان‌های تشکیل دهنده دیسک کاتر القا شده و می‌توان مقدار متوسطی را برای آن در هر لحظه در نظر گرفت. در شکل (۶-۷-ث) این تنش در دیسک به عنوان خروجی نرم‌افزار 3DEC نمایش داده شده است. به وسیله کد FISH، می‌توان مقدار متوسط تنش فون میزز را در هر لحظه ثبت و نسبت به زمان تحلیل، نشان داد.



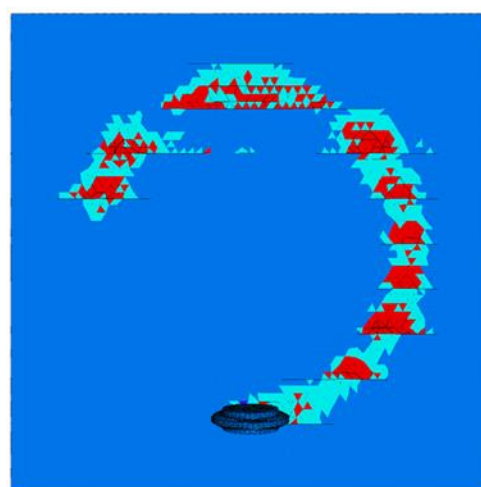
(ب)



(الف)

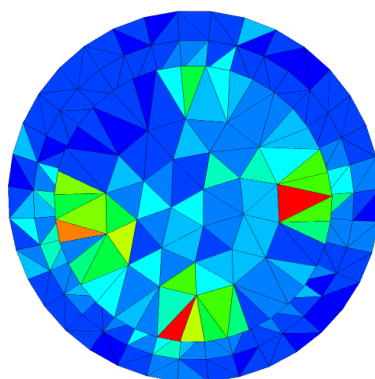
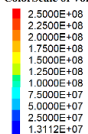


(ت)



(پ)

ColorScale of Von Mises Stress



(ث)

شکل ۶-۷: محدوده گسیختگی زون‌های سنگ در موقعیت‌های زاویه‌ای مختلف دیسک کاتر طی زمان تحلیل دینامیکی: (الف) موقعیت زاویه‌ای ۹۰ درجه؛ (ب) موقعیت زاویه‌ای ۱۸۰ درجه؛ (پ) موقعیت زاویه‌ای ۲۷۰ درجه؛ (ت) موقعیت زاویه‌ای ۳۶۰ درجه؛ (ث) تنش فون میزز القایی در المان‌های دیسک کاتر در حین عملیات برش سنگ

۶-۳-۲- مدل سازی عددی برش سنگ درزه دار توسط دیسک کاتر تکی

در بخش ۶-۳-۱ با مقایسه نتایج اصلی مدل عددی ساخته شده توسط نرم افزار 3DEC با مدل نظری CSM نتیجه گرفته شد که این مدل با قبول فرضیاتی می تواند برای بررسی سازوکار خردایش سنگ و فرسودگی سایشی دیسک کاتر مورد استفاده قرار گیرد و تاثیر شرایط مختلف در حفاری سنگ درزه دار توسط دیسک کاتر و TBM مورد مطالعه قرار گیرد. در این بخش از تحقیق، تاثیر خصوصیات توده سنگ (جهت داری و فاصله داری درزه ها)، پارامترهای عملیاتی دیسک کاتر یا TBM (سرعت دوران و نفوذ کاترهد) و نیز اثر شرایط هندسی دیسک کاتر (شعاع نصب و کندی دیسک کاتر) بر فرایند خردایش سنگ و فرسودگی سایشی دیسک کاتر بررسی شده که در ادامه به آن پرداخته می شود. مقادیر این خصوصیات در صورتی که هدف تحلیل حساسیت نباشند به صورت جدول (۶-۳) فرض می شود در غیر این صورت در محدوده مجاز و منطقی تغییر خواهد کرد. در این جدول خصوصیات مقاومتی درزه ها نیز که در همه مدل های عددی تحلیل حساسیت یکسان بوده ارائه شده است. در شکل (۶-۸) هندسه مدل ساخته شده در نرم افزار 3DEC برای تحلیل عددی فرایند برش سنگ درزه دار توسط یک دیسک کاتر تکی نشان داده شده است.

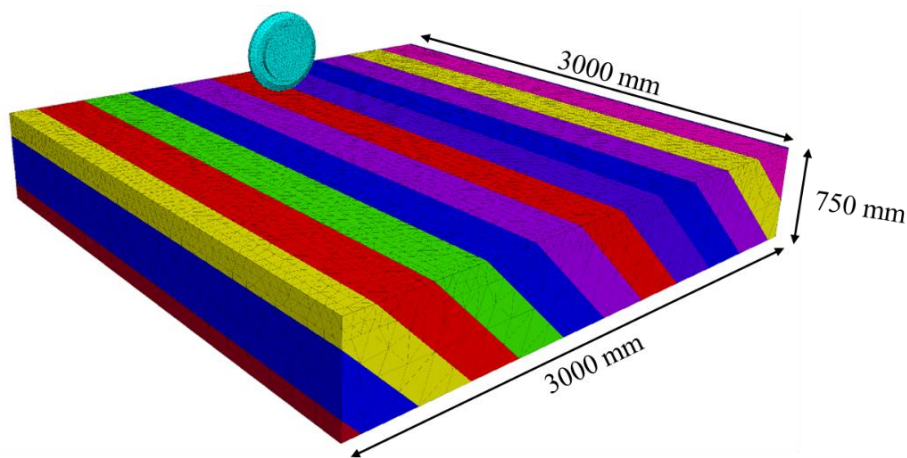
۶-۳-۲-۱- پارامترهای عملیاتی دیسک کاتر

نرخ نفوذ و سرعت دوران دیسک کاتر حول محور تونل (RPM) دو پارامتر اصلی عملیاتی دیسک کاتر یا TBM است که در صورت تنظیم آنها توسط اپراتور مجرب منطبق بر شرایط مقاومتی توده سنگ و زمین شناسی سینه کار تونل، می تواند کارایی برش دیسک کاتر و یا حفاری TBM را بهبود بخشد. با این حال جینگ و همکاران^۱ (۲۰۱۹) نشان دادند که تأثیر نرخ نفوذ دیسک کاتر بر عملکرد TBM از تاثیر سرعت دورانی کاترهد بیشتر بوده است. در ادامه، تحلیل حساسیت این دو پارامتر و تأثیر آنها بر فرایند خردایش سنگ و فرسودگی سایشی دیسک کاتر تک ارائه می شود.

¹ Jing et al.

جدول ۶-۳: خصوصیات اعمالی در مدل تحلیل حساسیت (به شرط آن که این خصوصیات تحت تحلیل حساسیت نباشند)

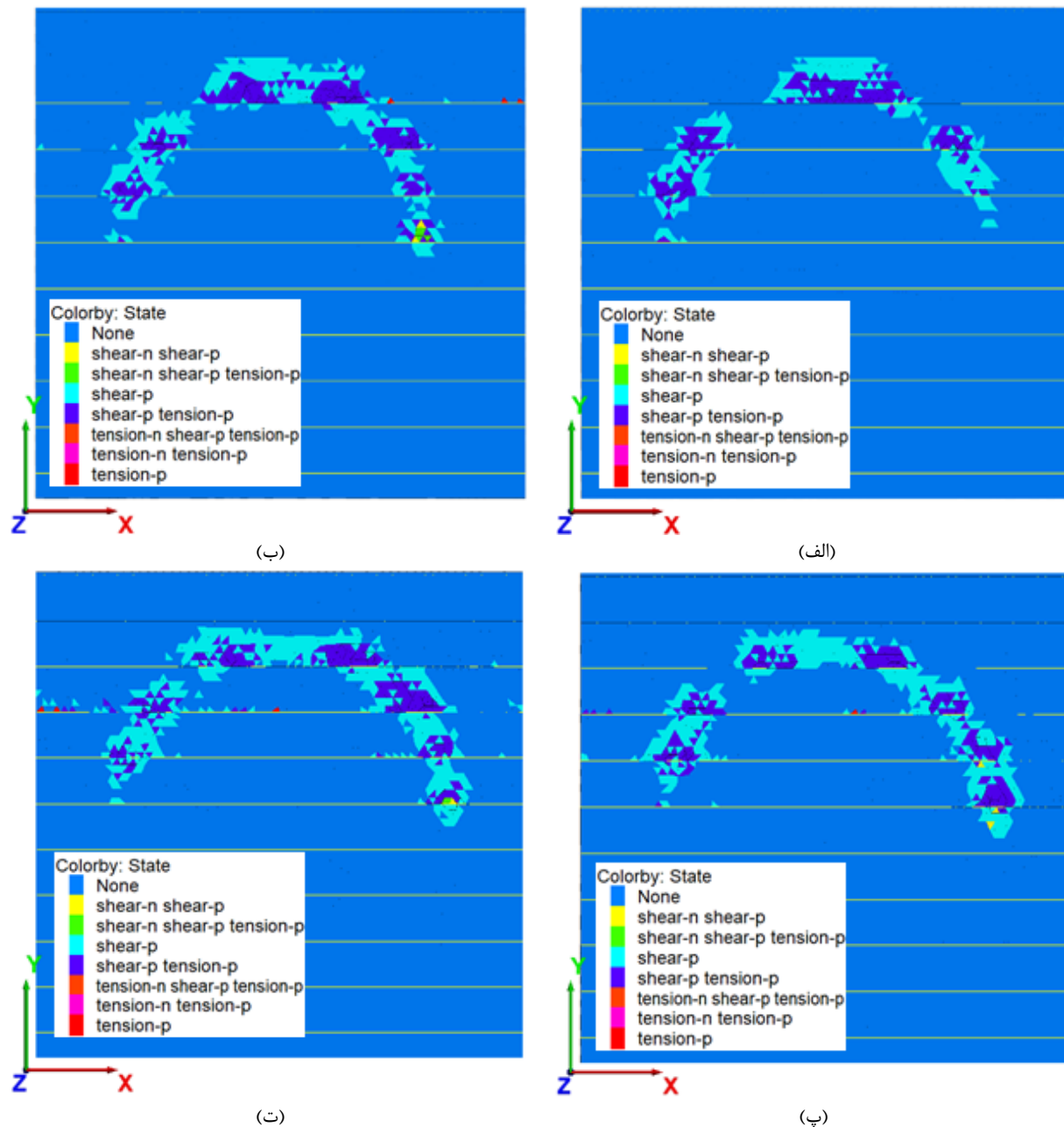
پارامتر	واحد	مقدار	دامنه تغییرات	گام تغییرات
سرعت دوران دیسک کاتر حول محور تونل	دور بر دقیقه	۲	۱۰-۲	۲
نرخ نفوذ دیسک کاتر	میلی متر	۱۰	۲۰-۵	۵
شعاع دوران دیسک کاتر	متر	۱	۱,۵-۰,۵	۰,۵
زاویه درزه‌ها نسبت به جهت نفوذ دیسک کاتر	درجه	۴۵	۹۰-۰	۱۵
فاصله‌داری درزه‌ها نسبت به یکدیگر	میلی متر	۲۰۰	۸۰۰-۲۰۰	۱۵۰
مدل رفتاری درزه	-	لغزشی کولمب	-	-
سختی عمودی	Pa/m	۱e۱۰	-	-
سختی برشی	Pa/m	۱e۹	-	-
زاویه اصطکاک	درجه	۲۵	-	-



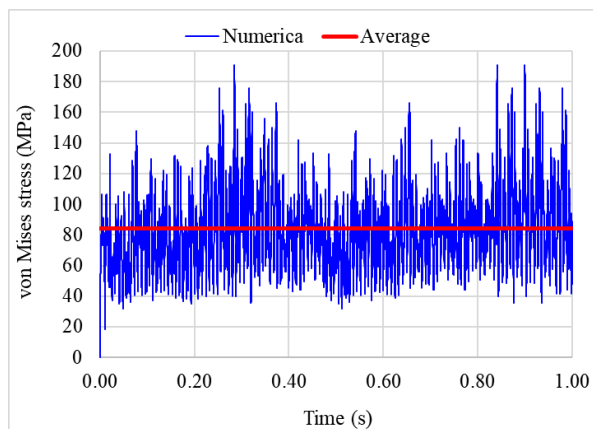
شکل ۶-۸: هندسه مدل ساخته شده در نرم‌افزار 3DEC برای تحلیل عددی برش سنگ درزه‌دار توسط یک دیسک کاتر تکی

نرخ نفوذ به عنوان سرعت فروروی دیسک کاتر در داخل سنگ در جهت محور تونل در هر بار چرخش حول مرکز تونل تعریف می‌شود. از آنجا که مجموعه دیسک کاترها بر روی کاترهد نصب می‌شوند، از این تعریف می‌توان به عنوان پیشروی TBM در هر دور چرخش کاترهد نیز استفاده کرد. با افزایش نرخ نفوذ، نیروهای عمودی و غلتشی و در نهایت انرژی مورد نیاز برای فرایند برش افزایش می‌یابد، در حالی که انرژی ویژه می‌تواند کاهش یابد. در این مطالعه، سرعت نفوذ دیسک کاتر ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده که نرخ نفوذ ۵ میلی‌متر مربوط به حفاری در سنگ‌های سخت و نرخ نفوذ ۲۰ میلی‌متر برای حفاری در سنگ‌های ضعیف است. در شکل (۶-۹) توسعه گسیختگی در سنگ درزه‌دار برای نرخ نفوذهای متفاوت در حالتی که دیسک کاتر به موقعیت زاویه‌ای

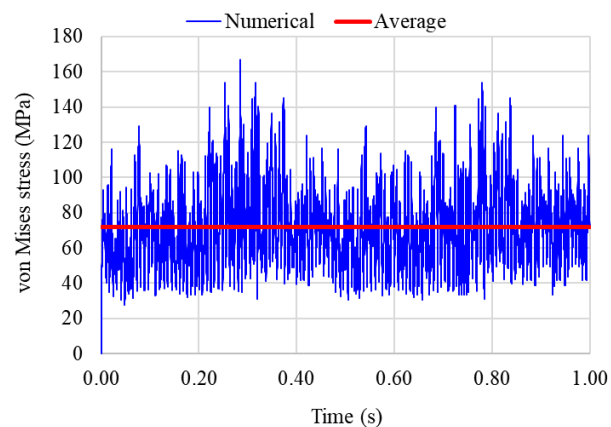
(wt) ۱۸۰ درجه رسیده نشان داده شده است. همچنین در شکل (۶-۱۰) تنش فون میزز القایی در دیسک کاتر پس از گذشت ۱ ثانیه از زمان دینامیکی تحلیل برای نرخ نفوذهای متفاوت نشان داده شده است. در این شکل و برای مقایسه حالات مختلف تحلیل، مقدار متوسط تنش فون میزز با یک خط قرمز ممتد مشخص شده است.



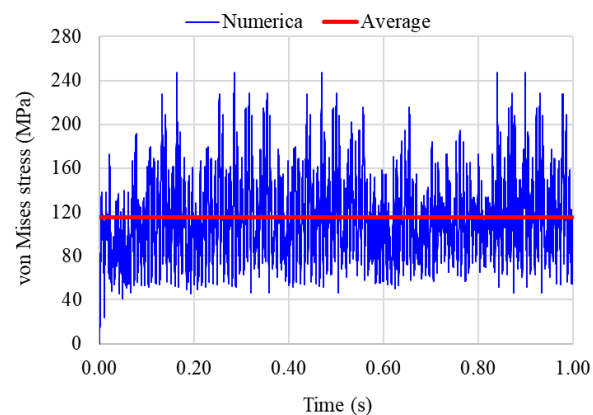
شکل ۶-۹: میزان توسعه محدوده خردشده در سنگ درزه دار تحت نرخ نفوذ متفاوت: (الف) نرخ نفوذ برابر با ۵ میلی متر؛ (ب) نرخ نفوذ برابر با ۱۰ میلی متر؛ (پ) نرخ نفوذ برابر با ۱۵ میلی متر؛ (ت) نرخ نفوذ برابر با ۲۰ میلی متر



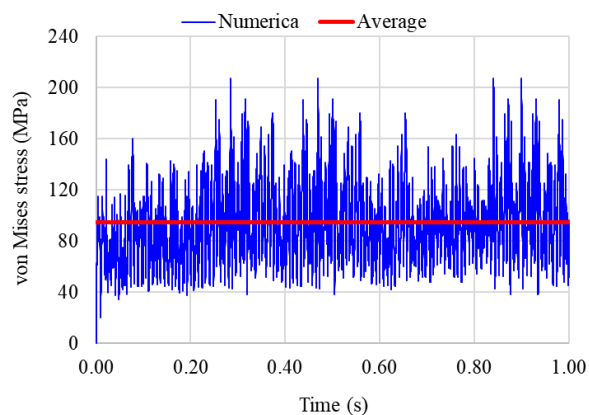
(ب)



(الف)



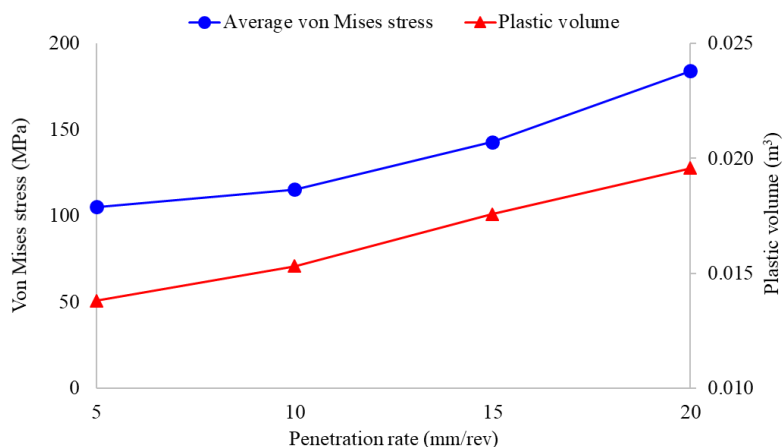
(ت)



(پ)

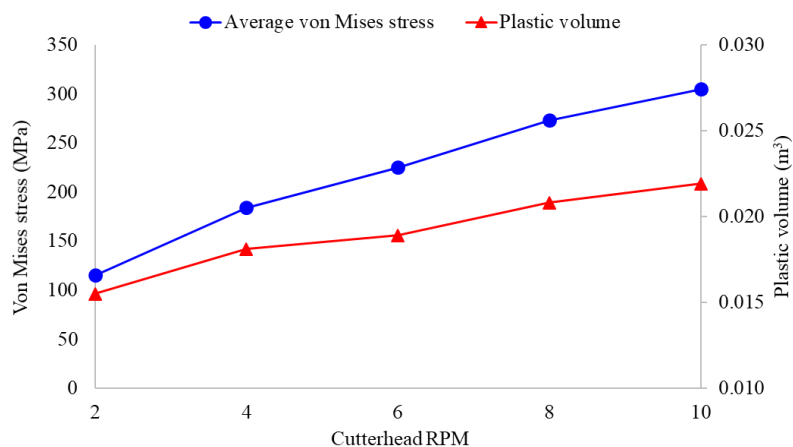
شکل ۶-۱۰: تنش فون میزز در دیسک کاتر پس از گذشت ۱ ثانیه از زمان تحلیل دینامیکی در سنگ درزه دار: (الف) نرخ نفوذ برابر با ۵ میلی متر؛ (ب) نرخ نفوذ برابر با ۱۰ میلی متر؛ (پ) نرخ نفوذ برابر با ۱۵ میلی متر؛ (ت) نرخ نفوذ برابر با ۲۰ میلی متر

در شکل (۶-۱۱) نتایج مربوط به تحلیل حساسیت حجم محدوده خردشده در سنگ درزه دار و مقدار متوسط تنش فون میزز در دیسک کاتر به ازای نرخ نفوذ متفاوت پس از یک دور دوران کامل دیسک کاتر نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشهود است حجم محدوده خردشده در سنگ درزه دار رابطه مستقیمی با میزان نرخ نفوذ دیسک کاتر و نهایتاً سرعت پیشروی TBM دارد. از طرفی تنش فون میزز در دیسک کاتر نیز که دلالت بر فرسودگی سایشی دیسک کاتر دارد با افزایش نرخ نفوذ، مرتباً افزایش می یابد. بنابراین می توان گفت که با افزایش نرخ نفوذ TBM در سنگ درزه دار، کارایی برش TBM بهبود می یابد ولی دیسک کاترها زودتر دچار فرسودگی سایشی می شوند.



شکل ۶-۱۱: تغییرات حجم محدوده خردشده در سنگ درزه‌دار و تنش فون میزز در دیسک کاتر نسبت به نرخ نفوذ آن پس از یک دور دوران کامل

سرعت دوران دیسک کاتر یا RPM برابر با تعداد چرخش دیسک کاتر حول محور تونل در طی یک دقیقه است و زمانی که TBM به آرامی پیشروی کرده و سنگ را می‌کند، حائز اهمیت است (کیم و همکاران ۲۰۲۰). در شکل (۶-۱۲) نتایج مربوط به تحلیل حساسیت حجم محدوده خردشده در سنگ درزه‌دار و مقدار متوسط تنش فون میزز در دیسک کاتر به ازای سرعت دوران متفاوت دیسک کاتر پس از یک دور دوران کامل نشان داده شده است. مشابه تحلیل حساسیت مربوط به نرخ نفوذ، افزایش سرعت دوران دیسک کاتر حول محور تونل یا RPM کاترهد، حجم محدوده خردشده در سنگ درزه‌دار و نیز مقدار متوسط تنش فون میزز در دیسک کاتر افزایش می‌یابد. این بدان معنی است که علیرغم افزایش کارایی دیسک کاتر یا TBM در خردایش سنگ درزه‌دار، دیسک کاترها زودتر دچار فرسودگی سایشی می‌شوند.



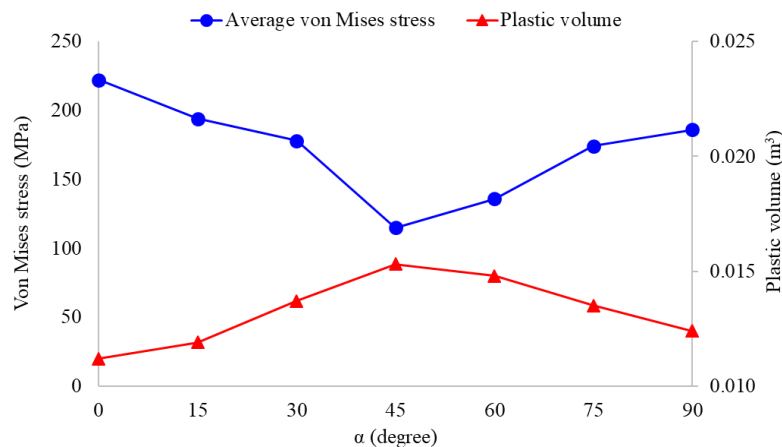
شکل ۶-۱۲: تغییرات حجم محدوده خردشده در سنگ درزه دار و تنش فون میزز القایی در دیسک کاتر نسبت به RPM آن پس از یک دور دوران کامل

۶-۳-۲-۲- شرایط درزه داری سنگ

یکی از تفاوت‌های بارز توده سنگ با سنگ بکر وجود ناپیوستگی‌ها و درزه‌ها است. خصوصیات درزه‌ها بر اساس پارامترهای فضایی (شیب و جهت شیب)، هندسی (بازشدگی و فاصله داری) و نیز فیزیکی (زبری، پرشدگی) بیان می‌شود. در این قسمت از تحقیق، تأثیر زاویه درزه‌ها نسبت به راستای نفوذ دیسک کاتر و نیز تأثیر فاصله داری درزه‌ها بر فرایند برش دیسک کاتر و فرسودگی سایشی دیسک کاتر توسط شبیه سازی عددی تحلیل شده است. با توجه به دوران دیسک کاتر حول محور تونل، عملاً راستای درزه‌ها در هر لحظه نسبت به راستای غلتش دیسک کاتر متغیر است و تحلیل عددی این پارامتر نمی‌تواند نتایج مناسبی در پی داشته باشد، کما اینکه در مطالعات پیشین توسط محققین مختلف بر این موضوع اشاره شده است (گونگ و همکاران، ۲۰۰۵ و ۲۰۰۶). در این تحقیق، مدل سازی درزه‌ها فقط بر اساس یک دسته درزه با مشخصات کاملاً یکنواخت انجام شده و از تجزیه و تحلیل درزه‌ها به صورت شبکه گسسته شکستگی (DFN) چشم پوشی شده است.

اثر زاویه درزه‌ها نسبت به محور تونل (α) بر فرایند خرد شدن سنگ و فرسودگی سایشی دیسک کاترها با تغییر زاویه از صفر درجه (درزه‌های موازی با محور تونل) تا ۹۰ درجه (درزه‌های عمود بر محور تونل) و با ثابت ماندن

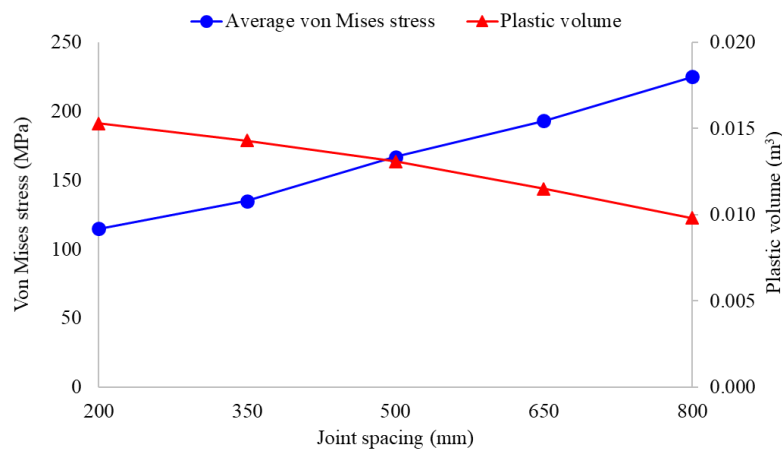
فاصله‌داری درزه‌ها (یعنی ۲۰۰ میلی‌متر) ارزیابی شده است. در شکل (۶-۱۳) نتایج مربوط به تحلیل حساسیت حجم محدوده خردشده در سنگ درزه‌دار و مقدار متوسط تنش فون میزز در دیسک‌کاتر تحت زاویه متفاوت درزه (α) پس از یک دور دوران کامل حول محور تونل نشان داده شده است. مطابق شکل (۶-۱۳)، برای α بین ۴۵ درجه تا ۶۰ درجه، حجم منطقه خردشده بیشینه بوده و بنابراین، پیشرفت TBM تحت این شرایط می‌تواند بیشترین باشد. علاوه بر این، متوسط تنش فون میزز در دیسک‌کاتر در این محدوده به حداقل رسیده است. این خروجی با نتایج واقعی تونلسازی مکانیزه که در مدل پیش‌بینی نیروژی منعکس شده است همخوانی دارد (برولند، ۲۰۰۰).



شکل ۶-۱۳: تغییرات حجم زون گسیخته شده در سنگ درزه‌دار و تنش فون میزز در دیسک‌کاتر نسبت به زاویه دسته درزه (α) پس از یک دور دوران کامل

برای ارزیابی اثر فاصله‌داری درزه‌ها بر عملکرد TBM، فاصله درزه‌ها از ۲۰۰ میلی‌متر (درزه‌های نزدیک) تا ۸۰۰ میلی‌متر (درزه‌ها با فاصله زیاد) تغییر کرده و زاویه درزه‌ها نسبت به راستای نفوذ دیسک‌کاتر ۴۵ درجه است. در شکل (۶-۱۴) نتایج مربوط به تحلیل حساسیت حجم محدوده خردشده در سنگ درزه‌دار و مقدار متوسط تنش فون میزز در دیسک‌کاتر تحت فاصله‌داری متفاوت دسته درزه پس از یک دور دوران کامل دیسک‌کاتر نشان داده شده است. مطابق شکل (۶-۱۴)، با کاهش فاصله‌داری درزه‌ها، حجم محدوده خردشده در سنگ درزه‌دار افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، درزه‌های نزدیکتر منجر به سهولت برش دیسک‌کاتر می‌شود. این موضوع می‌تواند

پیشروی TBM را افزایش دهد. از طرف دیگر، عمر سایشی دیسک کاترها در سنگ‌های شدیداً درزه‌دار بیشتر است زیرا تحت تنش فون میزز کمتری قرار می‌گیرند.



شکل ۶-۱۴: تغییرات حجم محدوده خردشده در سنگ درزه‌دار و تنش فون میزز در دیسک کاتر نسبت به فاصله‌داری درزه‌ها پس از یک دور دوران کامل

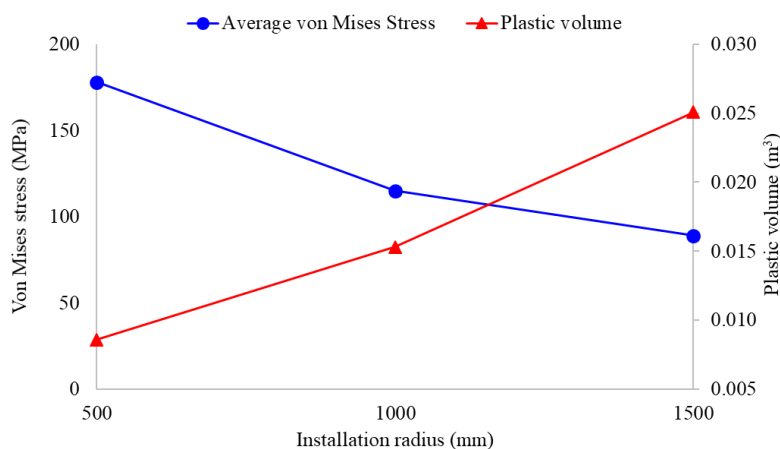
۶-۳-۲-۳- خصوصیات هندسی دیسک کاتر

مهم‌ترین خصوصیات هندسی دیسک کاتر شامل شعاع نصب دیسک بر روی کاترهد و کندی لبه آن در اثر فرسودگی سایشی است که در این قسمت، اثر این خصوصیات بر فرایند خرد شدن سنگ و فرسودگی سایشی دیسک کاتر به روش عددی تحلیل حساسیت شده است.

همانطور که پیشتر ارائه شد، دیسک کاترها عامل انتقال نیروهای TBM به سنگ هستند. نیروی پیشران و گشتاور TBM بسته به چیدمان دیسک‌ها بر روی کاترهد و موقعیت شعاعی نصب آن‌ها، به دیسک‌ها اعمال می‌شود. توزیع نیروهای اعمالی به سنگ از طریق دیسک کاترها می‌تواند یکنواخت و یا غیر یکنواخت باشد. به عبارت دیگر، فاصله بین دیسک کاترها می‌تواند چگالی بار وارده را در قسمت‌های مختلف سطح تونل تغییر دهد. فاصله مطلوب بین دیسک کاترها در زمان طراحی کاترهد تعیین می‌شود و بر این اساس، هر دیسک کاتر نسبت به مرکز کاترهد در شعاع خاصی نصب می‌گردد. با افزایش شعاع نصب دیسک کاتر و دور شدن از مرکز کاترهد، طول مسیری که دیسک کاتر بر روی سطح تونل در طی فرایند برش طی می‌کند افزایش یافته و نتیجتاً تعداد تعویض‌های

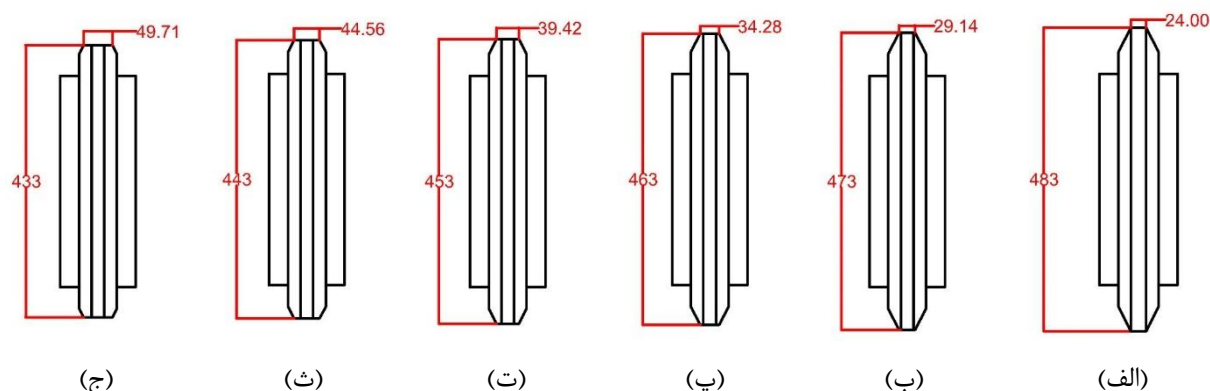
دیسک کاتر نیز افزایش می یابد. در این تحقیق، عملکرد دیسک کاترها با شعاع نصب ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ میلی متر بررسی شده است. در شکل (۶-۱۵) تأثیر شعاع نصب دیسک کاتر بر حجم محدوده خردشده در سنگ و مقدار متوسط تنش فون میزز در دیسک کاترها نشان داده شده است.

مطابق شکل (۶-۱۵)، با افزایش شعاع نصب دیسک کاتر حجم محدوده خردشده در سنگ افزایش می یابد. این امر به دلیل طولانی شدن مسیر دوران دیسک کاتر کاملاً بدیهی بوده زیرا طول مسیر برش متناسب با شعاع نصب دیسک کاتر است. علاوه بر این، متوسط تنش فون میزز در دیسک کاتر با کاهش شعاع نصب افزایش می یابد. به عبارت دیگر، دیسک کاترهای نصب شده در بخش‌های داخلی کاترهد، تحت تنش بیشتری نسبت به دیسک کاترهای بیرونی تر دارند. بنابراین، برای جلوگیری از کاهش عمر دیسک کاترها و نیز بهبود عملکرد آنها در خردایش سنگ، طراحان و تولیدکنندگان TBM ترجیح می دهند تا تعداد دیسک کاترها را در مرکز کاترهد افزایش دهند، اما به دلیل فضای محدود برای چیدمان دیسک کاترها، عملاً نمیتوان از دیسک کاترها با فاصله داری کوچکتر استفاده کرد. به دلیل فضای محدود در مرکز کاترهد، اغلب از دیسک کاترهای دوقلو برای کاهش فاصله بین دیسک کاترها استفاده می شود.

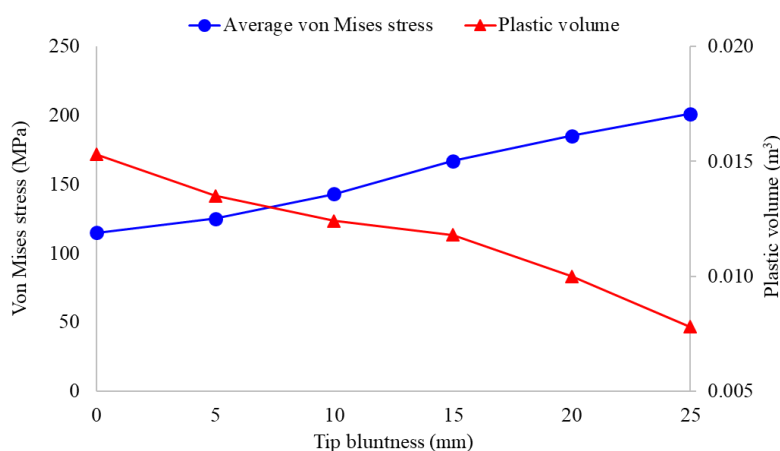


شکل ۶-۱۵: تغییرات حجم محدوده خردشده در سنگ درزه دار و تنش فون میزز در دیسک کاتر نسبت به شعاع نصب آنها پس از یک دور دوران کامل

همانطور که پیشتر اشاره شد، فرسودگی سایشی دیسک کاتر برابر با کاهش یکنواخت قطر دیسک کاتر و افزایش تدریجی عرض لبه آن است. تأثیر اصلی فرسودگی سایشی دیسک کاتر مستقیماً بر کارایی برش سنگ است به طوری که می تواند عملکرد TBM را به میزان قابل توجهی کاهش دهد. در این مطالعه، قطر دیسک کاترها از مقدار اولیه (D_0) ۴۸۳ میلی متر به مقدار ثانویه (D_1) ۴۷۳، ۴۶۳، ۴۵۳، ۴۴۳ و ۴۳۳ میلی متر کاهش یافته و در نتیجه باعث افزایش عرض لبه آن شده است. به عبارت دیگر، در مدل سازی عددی هندسه دیسک کاتر به تدریج از حالت بدون ساییدگی به حالت ساییدگی کامل (یعنی فرسودگی سایشی برابر با ۲۵ میلی متر) تغییر می یابد و تأثیر آن بر فرایند خردایش سنگ و اندرکنش سنگ-دیسک کاتر ارزیابی می شود. در شکل (۶-۱۶) تغییر هندسه دیسک کاتر به عنوان مرجعی برای هندسه مدل عددی نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در سنگ های مقاوم، هندسه لبه دیسک کاترها به دلیل فرسودگی سایشی شدید جوانب دیسک کاترها نسبت به بخش میانی، به صورت محدب ساییده می شود. در مدل سازی عددی از این پدیده که ناشی از توزیع نامتقارن تنش بر روی دیسک کاتر است (لین و همکاران ۲۰۲۰) صرف نظر می شود. در شکل (۶-۱۷) تغییرات حجم محدوده خردشده در سنگ و مقدار متوسط تنش فون میز در دیسک کاترها نسبت به تغییرات هندسه دیسک کاتر نشان داده شده است. مطابق شکل (۶-۱۷) با افزایش فرسودگی سایشی دیسک کاتر، حجم محدوده خردشده در سنگ کاهش می یابد. از طرف دیگر، متوسط تنش فون میز در دیسک کاترهای فرسوده تر بیشتر است. این نتیجه، اهمیت تعویض به موقع دیسک کاترهای فرسوده را نشان می دهد. به عبارت دیگر، اگر دیسک کاترهای فرسوده یک کاترهد در زمان مناسب تعویض نشوند، عملکرد TBM به دلیل عدم توانایی مجموعه دیسک کاترها در برش موثر سنگ کاهش می یابد. علاوه بر این، با وارد شدن تنش های بیش از حد به مجموعه، دیسک کاترهای سالم در مجاورت دیسک کاترهای فرسوده دچار بارگذاری مضاعف شده و سریعتر از عمر اسمی خود فرسوده می شوند.



شکل ۶-۱۶: نحوه لحاظ کاهش قطر دیسک کاتر و افزایش عرض لبه آن در مدل سازی فرسودگی سایشی دیسک کاتر: (الف) بدون سایش؛ (ب) سایشی معادل ۵ میلی متر؛ (پ) سایشی معادل ۱۰ میلی متر؛ (ت) سایشی معادل ۱۵ میلی متر؛ (ث) سایشی معادل ۲۰ میلی متر؛ (ج) سایشی معادل ۲۵ میلی متر



شکل ۶-۱۷: تغییرات حجم محدوده خردشده در سنگ درزه دار و تنش فون میزز در دیسک کاتر نسبت به کندی لبه آن در اثر فرسودگی سایشی پس از یک دور دوران کامل

۶-۳-۲- مدل سازی عددی برش سنگ درزه دار توسط کاترهد

پس از اینکه تاثیر پارامترهای مختلف بر حفاری دیسک کاتر تکی در سنگ درزه دار بررسی شد، باید حفاری مجموعه دیسک کاترها به صورت واحد در قالب کاترهد TBM مورد تحلیل عددی قرار گیرد. در این قسمت، بر اساس هندسه کاترهد TBM تونل انتقال آب کرمان و چیدمان دیسک کاترهای آن، مدل عددی مجددا ساخته شده و با اعمال خصوصیات رفتاری به دیسک کاترها و نیز اعمال شرایط مرزی به آن ها حفاری TBM شبیه سازی

شده است. مشابه حالت تک دیسک، حرکت دیسک کاترها شامل سه حرکت اساسی چرخش تک دیسک کاترها حول محور خود، دوران مجموعه دیسک کاترها حول محور تونل و نهایتاً پیشروی کاترهد در راستای موازی با محور تونل است. برای در نظر گرفتن شرایط درزه‌داری سنگ، دو مقطع از مسیر تونل انتقال آب کرمان در واحدهای زمین‌شناسی RT-1 و RT-4 در نظر گرفته شده و بر اساس آن، هندسه درزه‌ها ساخته شده است. معیار انتخاب این دو واحد بر اساس معیار خردشدگی کل سنگ (k_{s-tot}) و داده‌های در دسترس عمر سایشی دیسک کاترها است. مشخصات این دو واحد در جدول (۴-۶) ارائه شده است. از آنجایی که اجرای مدل عددی در ابعاد واقعی و مش‌بندی ریز بسیار زمانبر است، لذا تحلیل نتایج به دست آمده از تحلیل دینامیکی صرفاً پس از دوران کاترهد به میزان یک دور کامل صورت پذیرفته است. انتخاب یک دور دوران کاترهد برای این است که بتوان نقش RPM را در حفاری مقاطع زمین‌شناسی اعمال نمود.

شکل (۶-۱۸) هندسه و ابعاد مدل را نشان می‌دهد که توسط 3DEC برای تجزیه و تحلیل عددی حفاری توده‌سنگ با کاترهد TBM ساخته شده است. این شکل شامل چیدمان دیسک کاترهای TBM تونل انتقال آب کرمان بر اساس شکل (۵-۱) است. ویژگی‌های در نظر گرفته شده برای درزه‌ها برای هر دو واحد زمین‌شناسی RT-1 و RT-4 یکسان فرض شده و پارامترهای ورودی در مدل عددی مطابق جدول (۶-۵) اعمال می‌شوند. در شکل (۶-۱۹) صفحات درزه برای واحدهای زمین‌شناسی RT-1 و RT-4 مطابق خصوصیات ارائه شده در جدول (۴-۶) نشان داده شده است. همانطور که در جدول (۴-۶) ارائه شده است k_{s-tot} یا ضریب خردشدگی کل توده‌سنگ برای واحد زمین‌شناسی RT-4 بیشتر از واحد RT-1 است که در شکل (۶-۱۹) کاملاً مشخص است.

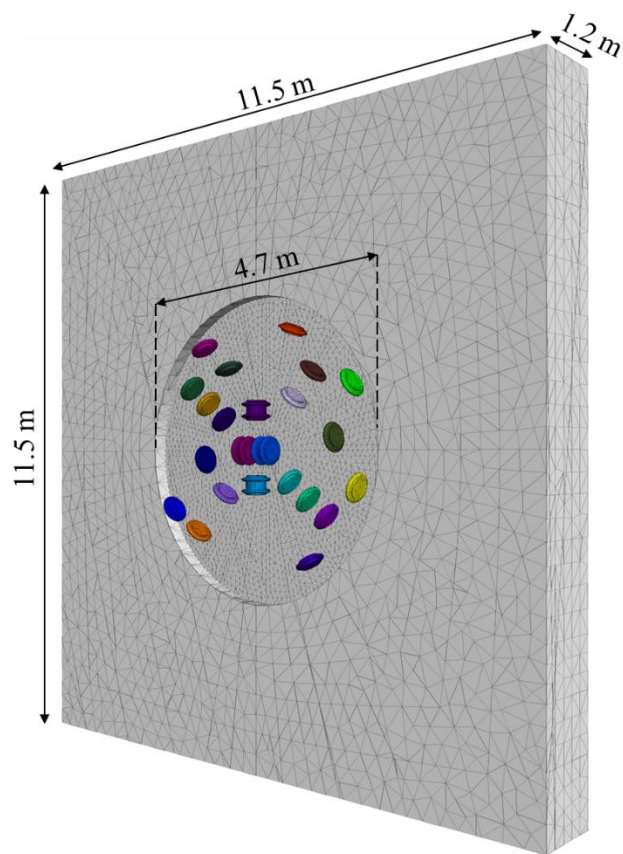
جدول ۴-۶: پارامترهای ژئومکانیکی واحدهای زمین‌شناسی منتخب برای تحلیل عددی در مقیاس واقعی

H _f (m ³ /cutter)	CAI	UCS _{rm} (MPa)	ks-tot	طبقه‌بندی شکستگی			فاصله‌داری (cm)			جهت‌داری (شیب/جهت شیب)			بیشینه روباره (m)	واحد زمین‌شناسی
				J3	J2	J1	J3	J2	J1	J3	J2	J1		
۶۳۱,۹	۳,۵	۲۲	۱,۴۳	0-I	0+	0-I	۱۲۰	۱۷۰	۱۲۰	۰۱۵/۶۴	۳۵۳/۷۶	۱۰۵/۷۳	۲۹۰	RT1
۸۰۲,۷	۱,۷۵	۱۰	۲,۰۶	I-	0-I	0-I	۱۰۰	۱۴۰	۱۷۰	۱۳۵/۷۸	۰۹۰/۸۲	۲۱۷/۶۷	۳۹۵	RT4

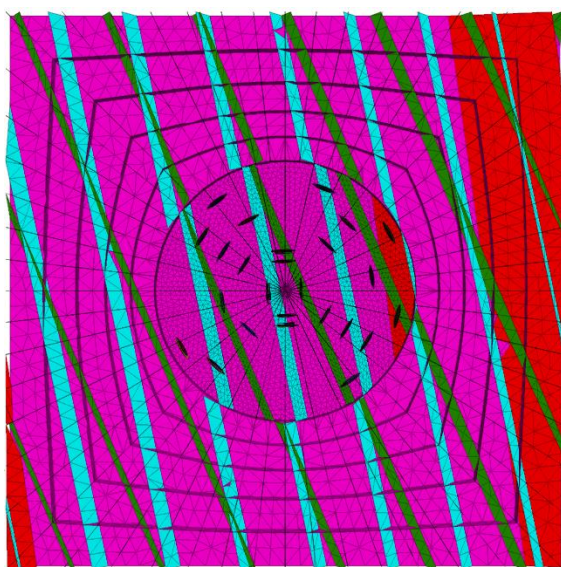
J1, J2, و J3 سه دسته درزه غالب هستند

جدول ۴-۵: خصوصیات دیسک‌کاتر و سنگ درزه‌دار برای مدل‌سازی عددی حفاری کاترهد در مقیاس واقعی

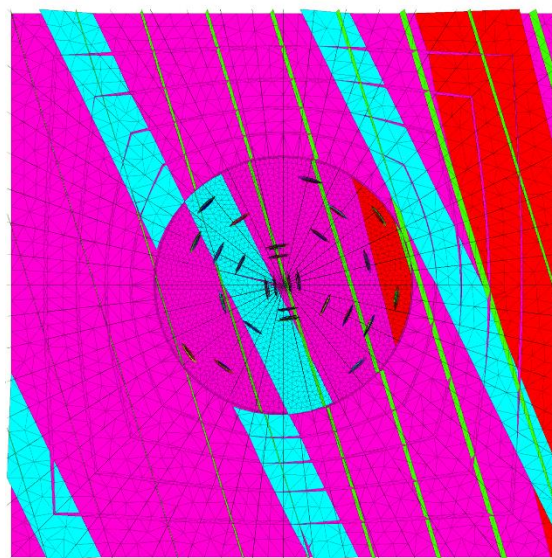
واحد	RT4	RT1	پارامتر
دور بر دقیقه	۶	۵	سرعت دوران کاترهد (RPM)
میلی‌متر بر دور	۱۰	۱۰	نرخ نفوذ
GPa	۱۵	۱۵	مدول الاستیسیته
MPa	۰,۲۲	۰,۲۲	نسبت پواسون
MPa	۰,۱	۰,۱	مقاومت چسبندگی
Degree	۴۲	۴۵	اصطکاک داخلی
Kg/m3	۲۷۰۰	۲۷۰۰	چگالی
MPa	۱۱۰	۱۳۵	مقاومت فشاری تک‌محوری
MPa	۸	۱۲	مقاومت کششی سنگ
-	لغزشی کولمب	لغزشی کولمب	معیار رفتاری درزه‌ها
Pa/m	۱e۱۰	۱e۱۰	سختی عمودی درزه
Pa/m	۱e۹	۱e۹	سختی برشی درزه
درجه	۳۰	۳۴	زاویه اصطکاک درزه



شکل ۶-۱۸: هندسه مدل ساخته شده توسط نرم افزار 3DEC برای تحلیل عددی حفاری توده سنگ با کاترهد TBM



(ب)

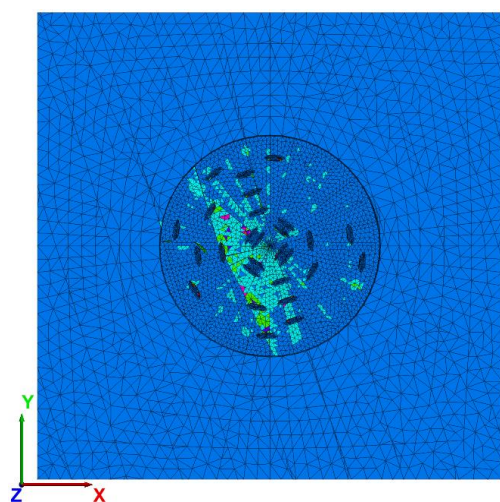


(الف)

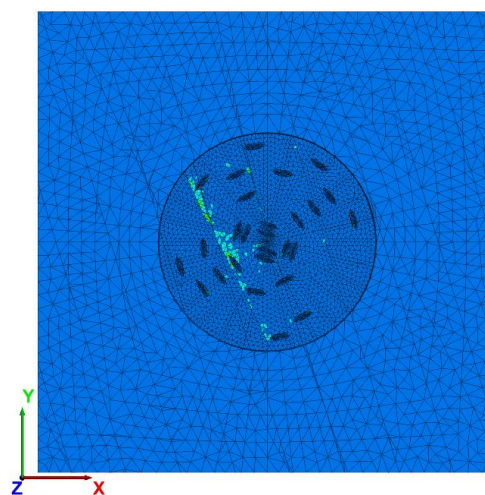
شکل ۶-۱۹: مدل عددی سنگ درزه دار در واحدهای زمین شناسی: (الف) RT-1؛ (ب) RT-4

در شکل‌های (۶-۲۰) و (۶-۲۱) تشکیل و توسعه محدوده خردشده در سنگ درزه‌دار در اثر دوران کاترهد (مجموعه دیسک کاترها) به ترتیب برای واحدهای زمین‌شناسی RT-1 و RT-4 در مدل عددی نشان داده شده است. در ابتدای دوران کاترهد، مناطق گسیخته شده در اثر تنش‌های برشی ایجاد شده و با تداوم دوران (ادامه حفاری)، شکست‌های کششی و برشی-کششی در سنگ ایجاد می‌شود. در شکل (۶-۲۲) حجم محدوده خردشده در واحدهای زمین‌شناسی RT-1 و RT-4 در اثر اعمال سرعت‌های چرخشی، دورانی و نفوذی به دیسک کاترها نشان داده شده است.

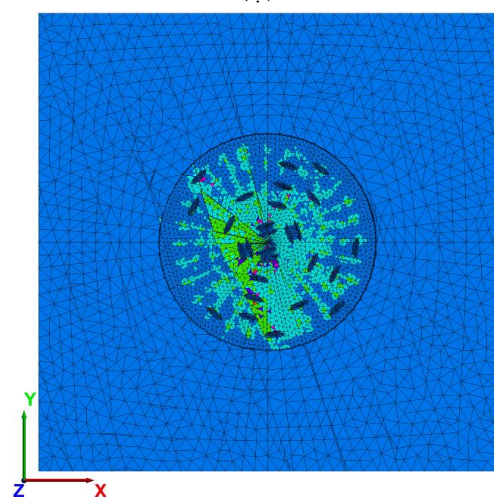
طبق شکل (۶-۲۲) حجم محدوده خردشده در واحد RT-4 از واحد RT-1 بیشتر است. حجم زون خردشده در سنگ مجموع حجم زون‌هایی است که به حد تسلیم برشی، کششی و یا هر دو رسیده‌اند و به عنوان مناطق تحت تأثیر حفاری TBM شناخته می‌شوند. بر اساس شکل (۶-۲۲-الف) حجم زون خردشده در واحدهای RT-1 و RT-4 به ترتیب ۰/۲۳ و ۰/۳۲ مترمکعب است. این بدان معنی است که مقدار سنگ خرد شده در واحد RT-4 حدود ۴۰٪ بیشتر از واحد RT-1 است. این اختلاف به دلیل تفاوت موقعیت فضایی درزه‌ها است که در واحد زمین‌شناسی RT-4 شرایط مساعدتری را برای خردایش سنگ فراهم نموده است. در شکل (۶-۲۲-ب)، عمق نفوذ متوسط کاترهد که برابر با حاصل تقسیم حجم زون خردشده بر سطح تونل است نشان داده شده است. از آنجا که در تحلیل عددی دینامیکی، نرخ نفوذ دیسک کاترها به عنوان یکی از پارامترهای ورودی مدل معادل ۱۰ میلی‌متر بر دور اعمال شده است، می‌توان دریافت که در اثر درزه‌داری سنگ، عمق نفوذ از میزان نفوذ اسمی کاترهد بیشتر است. عمق نفوذ برای واحدهای زمین‌شناسی RT-1 و RT-2 به ترتیب ۱۲ و ۱۷ میلی‌متر تعیین شده است. از طرف دیگر، خردشدگی مقطع RT-4 ناشی از جهت‌داری و فاصله دسته درزه‌ها تأثیر زیادی در عمق نفوذ کاترهد در این واحد داشته است. به عبارت دیگر، شکستگی بیشتر سنگ باعث نفوذ عمیق و آسان‌تر کاترهد TBM می‌شود. در نتیجه کارایی حفاری TBM و نیز عمر سایشی دیسک کاترها افزایش می‌یابد. برای مقایسه، می‌توان گفت که عمق نفوذ در واحد RT-4 حدود ۴۰٪ بیشتر از واحد RT-1 تحت نیروی پیشران یکسان است.



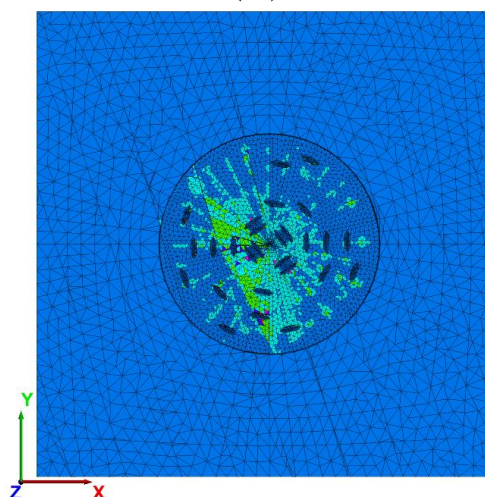
(ب)



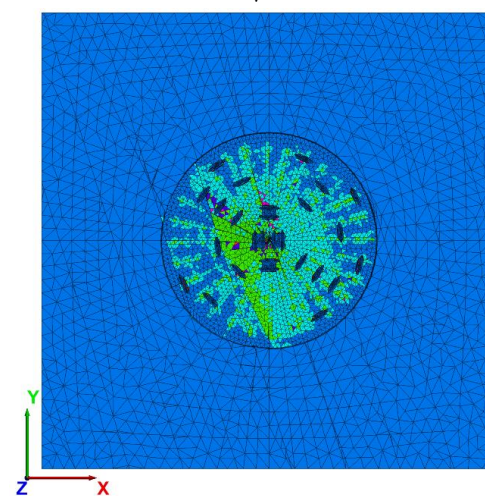
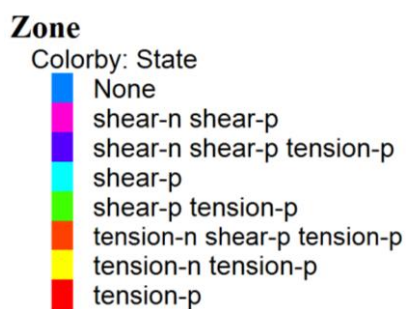
(الف)



(ت)



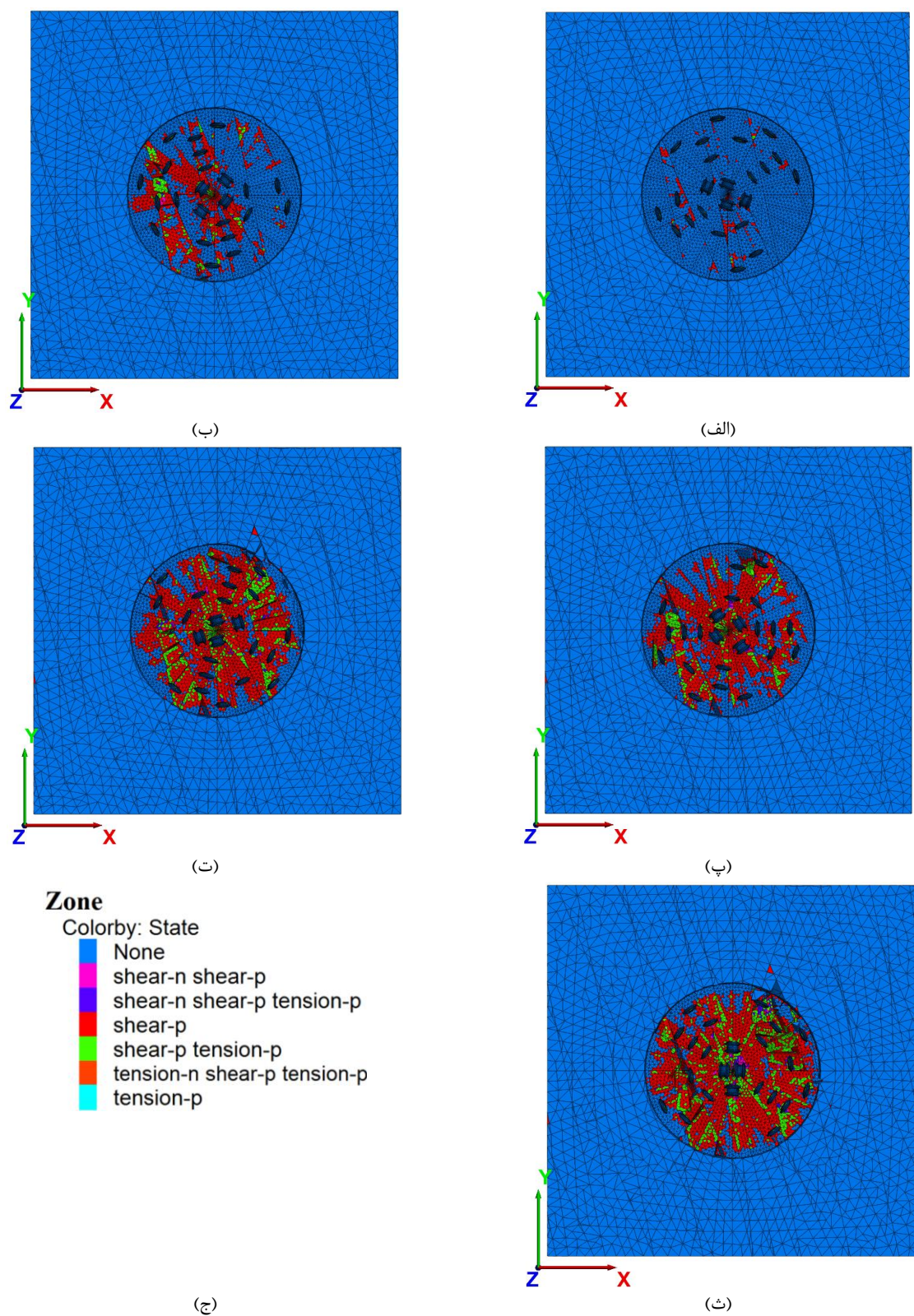
(پ)



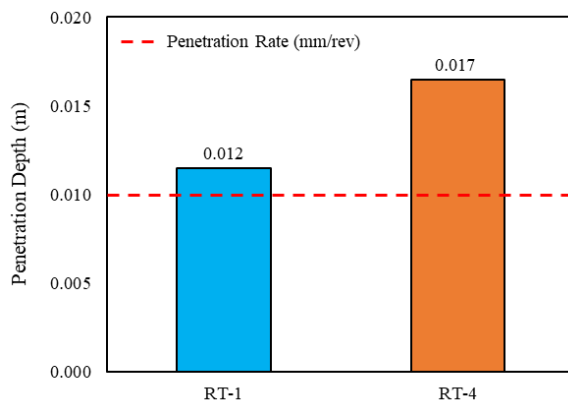
(ث)

(ج)

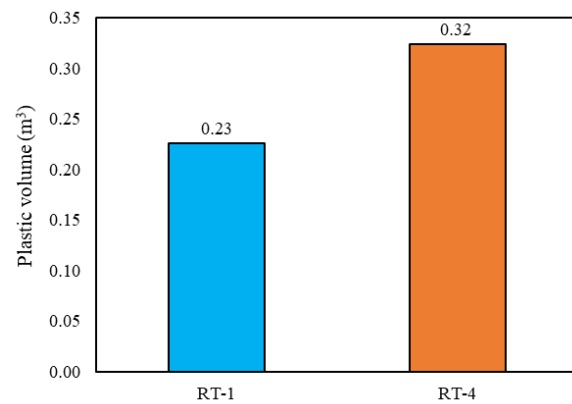
شکل ۶-۲۰: توسعه زون گسیخته شده در واحد زمین‌شناسی RT-1 در اثر حفاری TBM در طی ۱۲ ثانیه زمان دینامیکی (یک دوران کامل): (الف) ثانیه سوم؛ (ب) ثانیه پنجم؛ (پ) ثانیه هفتم؛ (ت) ثانیه دهم؛ (ث) ثانیه دوازدهم؛ (ج) راهنمای رنگی



شکل ۶-۲۱: توسعه زون گسیخته شده در واحد زمین‌شناسی RT-4 در اثر حفاری TBM در طی ۱۰ ثانیه زمان دینامیکی (یک دوران کامل): (الف) ثانیه دوم؛ (ب) ثانیه چهارم؛ (پ) ثانیه ششم؛ (ت) ثانیه هشتم؛ (ث) ثانیه دهم؛ (ج) راهنمای رنگی



(ب)

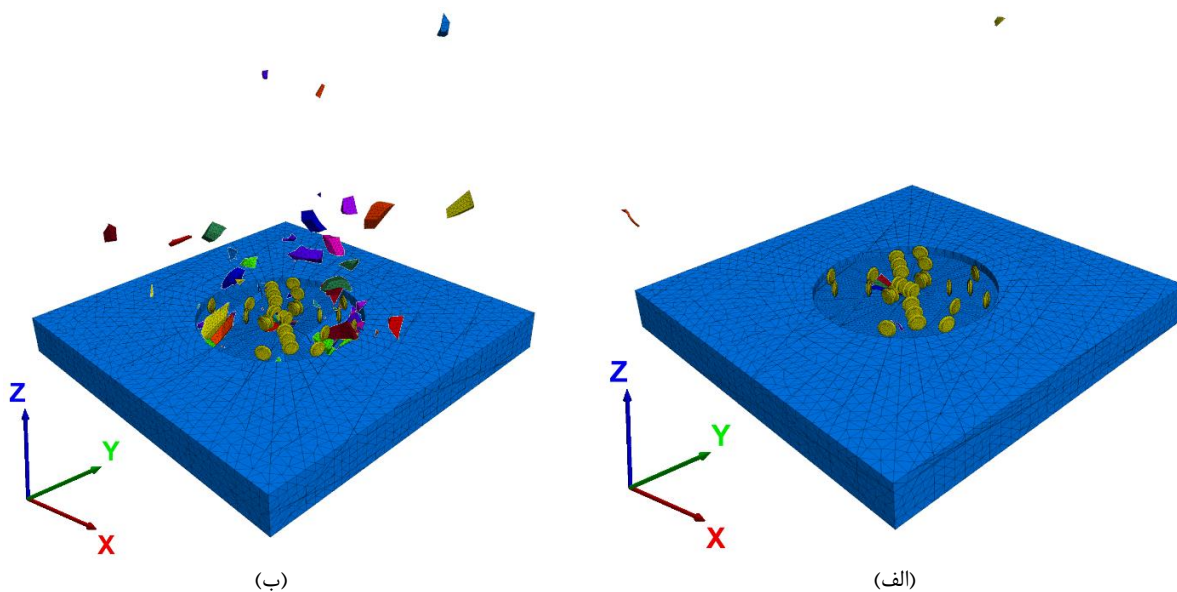


(الف)

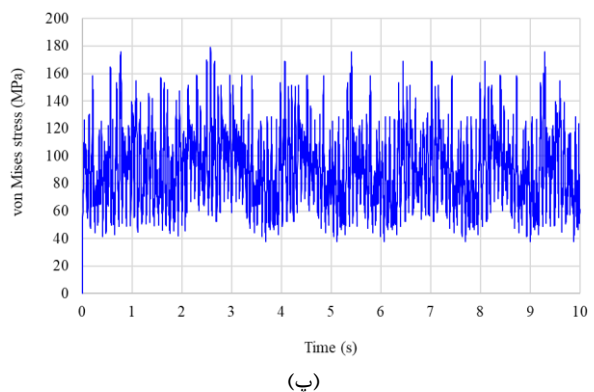
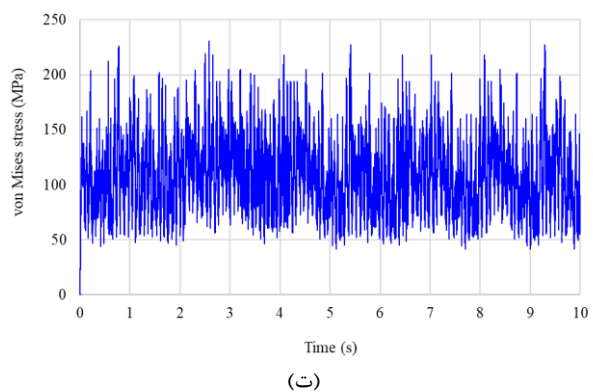
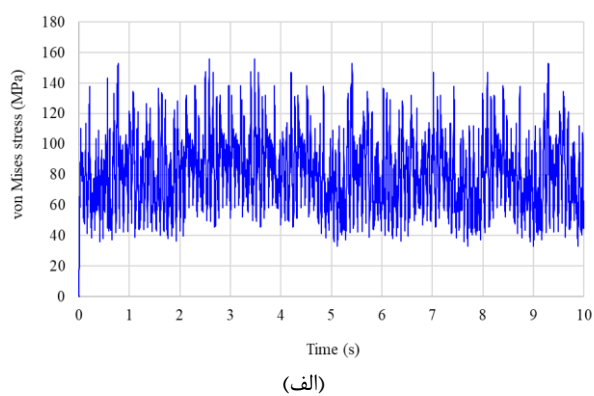
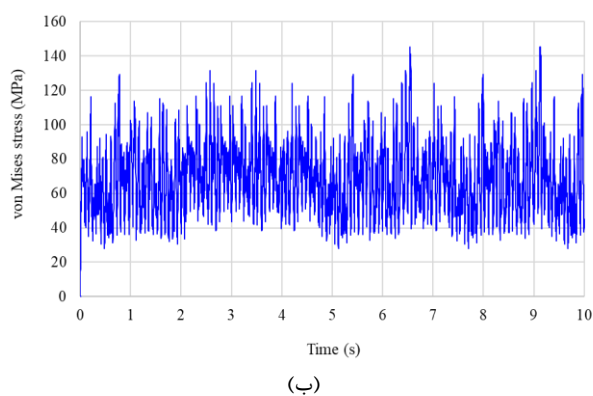
شکل ۶-۲۲: حجم زون خرد شده و عمق نفوذ محاسبه شده در تحلیل عددی در مقیاس واقعی

در شکل (۶-۲۳) جدایش بلوک‌ها از سطح سینه کار تونل برای واحدهای زمین‌شناسی RT-1 و RT-4 نشان داده شده است. این بلوک‌های سنگی که در اثر تقاطع صفحات درزه تشکیل شده‌اند، به دلیل نیرویی اعمالی از جانب دیسک‌کاترها از موقعیت خود جدا شده‌اند. جابجایی بلوک‌ها بر روی صفحات درزه تحت تأثیر سختی عمودی و برشی درزه‌ها است. در واحد زمین‌شناسی RT-1 تنها دو بلوک کوچک از سطح تونل جدا شده و جابجایی مابقی بلوک‌ها، کمتر از ۱۰ سانتی‌متر است. این در حالی است که در واحد زمین‌شناسی RT-4 تعداد بلوک‌هایی با جابجایی بیشتر از ۱۰ سانتی‌متر بسیار بیشتر از واحد RT-1 است. این پدیده به دلیل خردشدگی توده‌سنگ است که توسط ضریب خردشدگی کل توده‌سنگ بیان می‌شود.

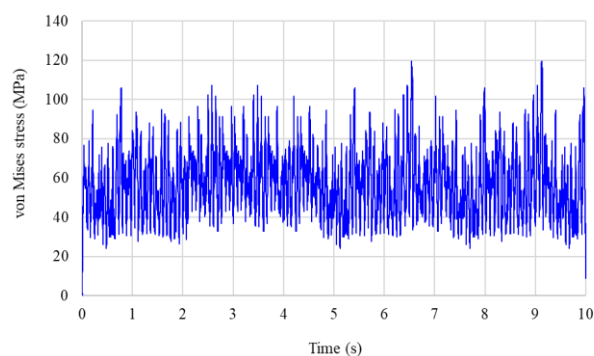
شکل (۶-۲۴) و (۶-۲۵) تنش‌های فون میزز وارده به دیسک‌کاترهای منتخب ناحیه مرکزی (دیسک‌کاتر شماره ۱-۳)، میانی (دیسک‌کاتر شماره ۱۳)، قوسی (دیسک‌کاتر شماره ۲۳) و پیرامونی (دیسک‌کاتر شماره ۲۶) را برای واحدهای زمین‌شناسی RT-1 و RT-4 نشان می‌دهند. این نمودارها به دلیل حرکت دینامیکی دیسک‌کاترها نوسانی بوده ولی در طی زمان تحلیل، می‌توان به هر نمودار مقدار متوسطی را اختصاص داد. در این صورت می‌توان مطابق شکل (۶-۲۶) مقادیر متوسط تنش‌های فون میزز را برای دیسک‌کاترهای منتخب گروه‌های مختلف دیسک‌کاتر TBM در واحدهای RT-1 و RT-4 پروژه تونل انتقال آب کرمان نشان داد. با توجه به شکل (۶-۲۶)، مقدار متوسط تنش فون میزز از سمت دیسک‌کاتر میانی به سمت دیسک‌کاترهای پیرامونی افزایش می‌یابد. تنها



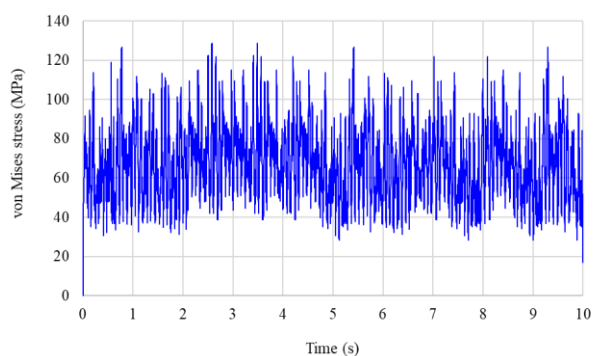
شکل ۶-۲۳: جدایش بلوک‌های سنگی از سطح سینه کار تونل در اثر پیشروی کاترهد در مدل عددی برای واحد زمین‌شناسی: (الف) RT-1؛ (ب) RT-4



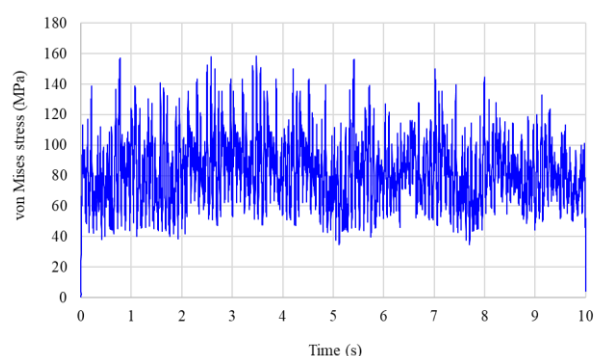
شکل ۶-۲۴: نمودار نوسانی تنش فون میزز نسبت به زمان تحلیل دینامیکی در واحد زمین‌شناسی RT-1 برای: (الف) دیسک کاتر شماره ۱-۳؛ (ب) دیسک کاتر شماره ۱۳؛ (پ) دیسک کاتر شماره ۲۳؛ (ت) دیسک کاتر شماره ۲۶



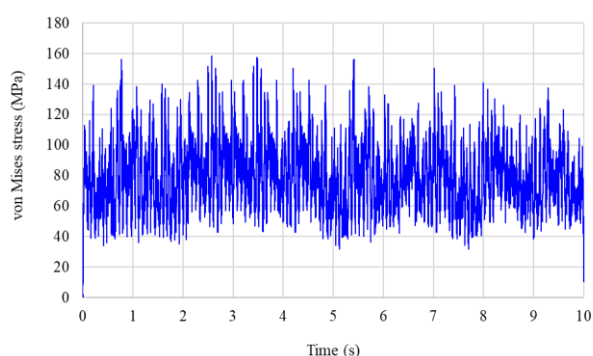
(ب)



(الف)

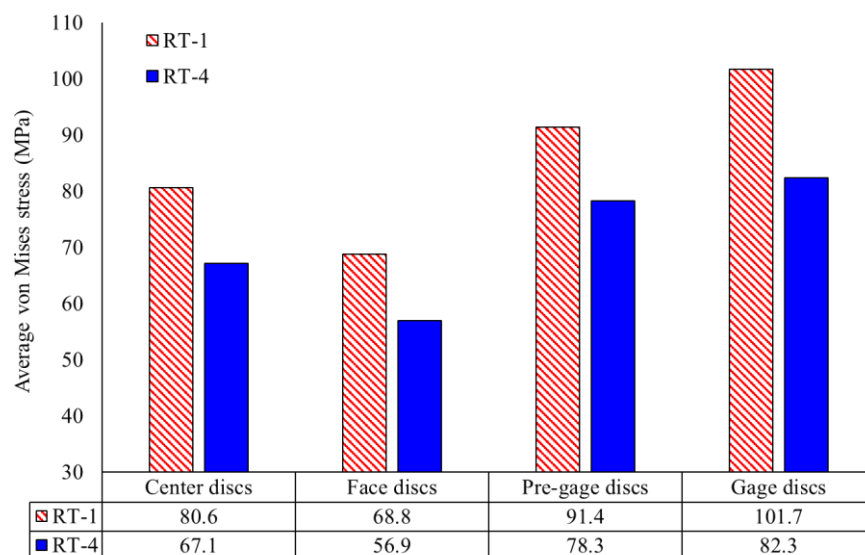


(ت)



(پ)

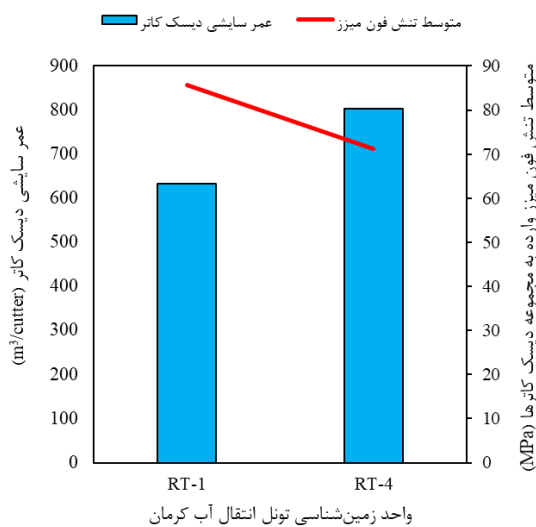
شکل ۶-۲۵: نمودار نوسانی تنش فون میزز نسبت به زمان تحلیل دینامیکی در واحد زمین‌شناسی RT-4 برای: (الف) دیسک کاتر شماره ۱-۳؛ (ب) دیسک کاتر شماره ۱۳؛ (پ) دیسک کاتر شماره ۲۳؛ (ت) دیسک کاتر شماره ۲۶



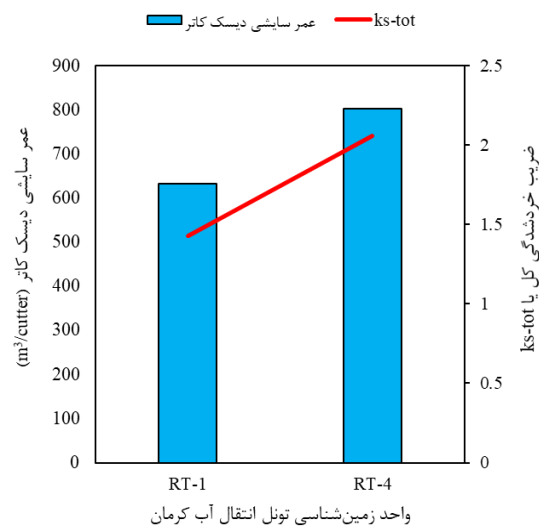
شکل ۶-۲۶: مقدار متوسط تنش فون میزز برای گروه‌های مختلف دیسک کاتر در واحدهای زمین‌شناسی RT-4 و RT-1

استثنا، دیسک کاترهای مرکزی هستند که از این روند پیروی نمی کنند و مقادیر بیشتری نسبت به دیسک کاترهای میانی دارند. علاوه بر این، متوسط تنش فون میزز در واحد RT-1 حدود ۱۶ تا ۲۳ درصد بیشتر از واحد RT-4 است.

در شکل (۶-۲۷) ارتباط بین عمر سایشی دیسک کاتر در واحدهای زمین شناسی RT-1 و RT-4 با متوسط تنش فون میزز در مجموعه دیسک کاترها و نیز ضریب خردشدگی کل توده سنگ نشان داده شده است. عمر سایشی دیسک کاترها بیشتر در جدول (۳-۶) ارائه شده است و متوسط تنش فون میزز مجموعه دیسک کاترها نیز بر اساس شکل (۶-۲۶) قابل محاسبه است. بر طبق این شکل، افزایش خردشدگی توده سنگ می تواند منجر به افزایش عمر سایشی دیسک کاتر (کاهش فرسودگی سایشی) گردد. از طرفی تنش های فون میزز اعمالی به دیسک کاترها نیز می تواند عاملی موثر بر عمر سایشی دیسک کاتر تلقی گردد زیرا با کاهش مقدار تنش، عمر سایشی دیسک کاترها افزایش می یابد.



(ب)



(الف)

شکل ۶-۲۷: ارتباط بین عمر سایشی دیسک کاتر با ضریب خردشدگی کل و متوسط تنش فون میزز

۴-۶- جمع‌بندی

در این فصل به بررسی عددی تأثیر خصوصیات درزه (زاویه و فاصله‌داری درزه) بر عمر سایشی دیسک‌کاتر و فرایند خردایش سنگ درزه‌دار پرداخته شده است. در این مدل‌سازی، حرکت واقعی دیسک‌کاتر شامل چرخش حول محور دیسک، دوران حول محور تونل و نفوذ در راستای محور تونل اعمال شده است. در راستای مدل‌سازی عددی به عنوان گام اول، حفاری سنگ بکر با دیسک‌کاتر تکی مدل شده و به مقایسه میانگین نیروی عمودی و غلتشی حاصل از مدل عددی با نتایج به‌دست آمده در مدل نظری CSM پرداخته شده است. آنچه که مشهود است، وجود اختلاف اندک و قابل‌قبول بین نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با مدل نظری CSM است. در گام دوم، مدل عددی پیشین با در نظر گرفتن شرایط درزه‌داری سنگ جهت تحلیل حساسیت اثر پارامترهای مختلف از قبیل نرخ نفوذ و RPM کاترهد، فاصله‌داری درزه‌ها و زاویه درزه‌ها نسبت به راستای پیشروی تونل، شعاع نصب دیسک‌کاترها و کندی لبه آن بر فرسودگی سایشی دیسک‌کاترها و پیشروی TBM استفاده شده است. بر طبق این تحلیل حساسیت، نرخ پیشروی TBM مستقیماً متناسب با حجم زون خردشده در سنگ است و افزایش نرخ نفوذ، RPM کاترهد، شعاع نصب دیسک‌کاتر و همچنین کاهش فاصله‌داری بین درزه‌ها باعث افزایش پیشروی TBM در سنگ و بهبود عملکرد آن می‌شود. همچنین، تنش‌های فون میزز القایی در دیسک‌کاترها در زمان حفاری TBM عامل فرسودگی سایشی است.

به عنوان نتیجه مدل‌سازی گام دوم، فرسودگی سایشی دیسک‌کاتر با افزایش نرخ نفوذ، RPM کاترهد، فاصله‌داری بین درزه‌ها، کندی لبه دیسک‌کاتر افزایش یافته و با افزایش شعاع نصب دیسک‌کاتر کاهش می‌یابد. نتایج مدل‌سازی عددی گام دوم بیانگر این است که درزه‌ها با زاویه ۴۵ تا ۶۰ درجه بیشترین تأثیر را در افزایش خردایش سنگ و کاهش تنش فون میزز القایی در دیسک‌کاتر دارد. به عبارت دیگر، در این شرایط درزه‌داری، سرعت پیشروی TBM حداکثر بوده و دیسک‌کاترها دیرتر دچار فرسودگی سایشی می‌شوند. در گام سوم مدل‌سازی که به مدل‌سازی حفاری کاترهد TBM تونل انتقال آب کرمان در مقیاس واقعی پرداخته شده، مقایسه نتایج عددی با نتایج واقعی حاکی از آن است که خردشدگی کل توده‌سنگ می‌تواند عامل مناسبی برای تعیین عمر

سایشی دیسک کاتر باشد. به عبارت دیگر در توده سنگ‌ها با شرایط خردشدگی بیشتر، تنش فون میزز اعمالی به دیسک کاترها کمتر بوده و عمر سایشی دیسک کاترها بیشتر خواهد بود. علاوه بر این با چشم‌پوشی از دیسک کاترهای مرکزی می‌توان گفت که روند تنش فون میزز از سمت دیسک کاترهای میانی به دیسک کاترهای پیرامونی کاترهد افزایشی بوده و دیسک کاترهای پیرامونی بیشتر در معرض فرسودگی سایشی قرار دارند. در خصوص سازوکار شکست سنگ نیز می‌توان گفت که محدوده خردشده در سنگ در اثر تسلیم برشی اتفاق افتاده و با تداوم حفاری، شکست کششی نیز در معیت شکست برشی منجر به خردایش سنگ و پیشروی TBM می‌شود.

فصل هفتم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۷-۱- نتیجه‌گیری

تونلسازی مکانیزه با TBM یکی از دست‌آوردهای مهم صنعت تونلسازی در طی یک قرن اخیر است که به دلیل مزایای متعدد از جمله سرعت زیاد، کارایی بالا و ایمنی مناسب توانسته گزینه اول در حفاری تونل‌های عمیق و طویل باشد. از طرفی به دلیل ایجاد کمترین آشفتگی و مزاحمت برای سازه‌های سطحی در مناطق شهری، این روش حفاری مورد استفاده روز افزون قرار گرفته است. پیش‌بینی فرسودگی سایشی دیسک‌کاترها و یا عمر سایشی آن در طول حفاری تونل یکی از موضوعات مهم در برآورد اولیه هزینه‌ها، مدیریت تامین تجهیزات و برنامه‌ریزی و کنترل پروژه می‌باشد.

در این تحقیق بررسی تجربی تاثیر پارامترهای موثر بر عمر سایشی دیسک‌کاترها نشان می‌دهد که:

۱- عدم در نظر گرفتن شرایط درزه‌داری سنگ در مدل‌های تجربی پیش‌بینی عمر دیسک‌کاتر باعث می‌شود که نتایج تخمینی با نتایج واقعی انحراف و اختلاف داشته‌باشد. درصد این اختلاف گاهی چندان زیاد است که ضروری است تا پارامترهای مناسب درزه‌داری در یک مدل تجربی جدید وارد شود. تخمین عمر دیسک‌کاتر بر این اساس موجب می‌شود که زمان و هزینه در یک پروژه به درستی برنامه‌ریزی و مدیریت شود.

۲- ضریب خردشدگی کل توده‌سنگ، مقاومت فشاری توده‌سنگ و شاخص سایش سرشار بیشترین همبستگی را با عمر سایشی دیسک‌کاتر داشته‌اند (به ترتیب برابر با ۰,۵۶، ۰,۶۷، ۰,۴۷) و به عنوان پارامترهای ورودی مدل تجربی پیش‌بینی عمر سایشی دیسک‌کاتر انتخاب می‌شوند. مدل ارائه شده برای پیش‌بینی عمر سایشی دیسک‌کاتر دارای ضریب همبستگی ۰/۸ است.

۳- شاخص سایش سرشار همبستگی بالاتری نسبت به عدد سختی ویکرز سنگ با عمر سایشی دیسک‌کاتر نشان می‌دهد (ضریب همبستگی ۰,۴۷ در برابر ۰,۱۱). علاوه بر این تداوم درزه به دلیل ضریب همبستگی کم با عمر

سایشی (یعنی ۰,۳۲ برای تداوم درزه). در مدل تجربی پیش‌بینی وارد نشده است. همچنین سایر روش‌های ارزیابی آماری نیز نتیجه مشابهی را در تعیین پارامترهای موثر بر عمر دیسک کاتر دارند.

۴- ضریب خردشدگی کل توده‌سنگ به دلیل در نظر گرفتن همزمان فاصله‌داری درزه و جهت‌داری آن‌ها نسبت به پیشروی TBM پارامتر مناسبی برای در نظر گرفتن شرایط درزه‌داری سنگ است.

۵- در مدل تجربی ارائه شده در این تحقیق، افزایش مقاومت فشاری و شاخص سایش سرشار موجب کاهش عمر سایشی دیسک‌کاترها شده و با افزایش خردشدگی کل توده‌سنگ، عمر دیسک‌کاترها افزایش می‌یابد.

۶- نتیجه اعتبارسنجی مدل تجربی نشان می‌دهد که این مدل در سنگ‌های بسیار درزه‌دار و خرد شده نتایج نزدیک‌تر به واقعیت ارائه می‌کند و نسبت به سایر مدل‌های تجربی رایج، کمترین انحراف را با عمر سایشی واقعی دیسک‌کاترها دارد.

۷- برای سهولت استفاده از مدل تجربی جدید، چارتهایی بر اساس مقاومت توده‌سنگ و ضریب خردشدگی کل به ازای مقادیر مختلف شاخص سایش سرشار ارائه شده است.

همچنین تحلیل عددی فرایند برش سنگ درزه‌دار با دیسک‌کاتر تکی و همچنین با کاترهد TBM در مقیاس واقعی نشان می‌دهد که:

۸- برای شبیه‌سازی کامل عملکرد دیسک‌کاتر باید حرکت آن که شامل چرخش حول محور دیسک‌کاتر، دوران حول محور تونل و نفوذ در راستای محور تونل است در مدل عددی اعمال شود.

۹- مدل‌سازی عددی برش سنگ بکر با دیسک‌کاتر تکی نشان می‌دهد که میانگین نیروی عمودی و غلتشی دیسک‌کاتر اختلاف کمی با نتایج مدل نظری CSM دارد.

۱۰- تغییرات نیروی جانبی دیسک‌کاتر به واسطه حرکت دورانی آن حول مرکز تونل را می‌توان با در نظر گرفتن حرکت دیسک‌کاتر بر روی یک مسیر برش دایره‌ای تخمین زد.

۱۱- بر اساس تحلیل حساسیت انجام شده در مدل سازی برش سنگ درزه دار توسط دیسک کاتر تکی، افزایش نرخ نفوذ، RPM کاترهد، شعاع نصب دیسک کاتر و همچنین کاهش فاصله داری بین درزه ها باعث افزایش نفوذ TBM در سنگ و بهبود عملکرد آن می شود.

۱۲- فرسودگی سایشی دیسک کاتر با افزایش نرخ نفوذ، RPM کاترهد، فاصله داری بین درزه ها، کندی لبه دیسک کاتر و همچنین با کاهش شعاع نصب دیسک کاتر افزایش می یابد.

۱۳- درزه ها با زاویه ۴۵ تا ۶۰ درجه نسبت به نفوذ دیسک کاتر یا پیشروی TBM، بیشترین تأثیر را در افزایش خردایش سنگ و کاهش تنش فون میز القایی در دیسک کاتر دارد. به عبارت دیگر، در این شرایط درزه داری، سرعت پیشروی TBM بیشینه بوده و دیسک کاترها دیرتر دچار فرسودگی سایشی می شوند.

۱۴- مدل سازی حفاری کاترهد TBM تونل انتقال آب کرمان در مقیاس واقعی نشان می دهد که در توده سنگ ها با شرایط خردشدگی بیشتر، تنش فون میزز اعمالی به دیسک کاترها کمتر بوده و عمر سایشی دیسک کاترها بیشتر خواهد بود.

۱۵- مقدار تنش فون میز از سمت دیسک کاترهای میانی به دیسک کاترهای پیرامونی کاترهد افزایشی بوده و دیسک کاترهای پیرامونی، بیشتر در معرض فرسودگی سایشی قرار دارند.

۱۶- بر اساس سازوکار عددی شکست سنگ، تشکیل و گسترش زون خرد شده در سنگ در ابتدا در اثر شکست برشی رخ داده و سپس با تداوم عملیات حفاری، شکست کششی نیز به این سازوکار کمک می کند.

۷-۲- پیشنهادها

برای بررسی عمر سایشی دیسک کاتر و یا عوامل موثر بر فرسودگی سایشی آن در تونلسازی مکانیزه با TBM پیشنهاد می‌گردد:

۱- پایگاه داده جامعی از مشخصات سنگ بکر و خصوصیات درزه‌ها در پروژه‌های مختلف تونلسازی با دامنه سنگ‌های متفاوت (آذرین، رسوبی و دگرگونی) تشکیل شده و ارتباط این پارامترها با عمر سایشی دیسک کاتر تعیین گردد.

۲- نمونه‌های درزه‌دار توسط بتن و یا سایر مصالح مناسب در مقیاس آزمایشگاهی تهیه و تاثیر فاصله‌داری و جهت درزه‌ها بر عمر سایشی ابزار مطالعه شود. از درز سرد بین لایه‌های بتن برای شبیه‌سازی درزه‌های سنگ می‌توان استفاده کرد.

۳- تحقیقات مشترک بین دانشکده‌ای می‌تواند منجر به بسط مفاهیم مربوط به دیسک کاتر مقاوم و کارا در برابر شرایط نامساعد تونلسازی و نهایتاً ساخت نمونه دیسک کاتر در مقیاس آزمایشگاهی گردد.

۴- پیشنهاد می‌شود که از روابط تحلیلی ساییدگی فلز ایده گرفته شود و روابط تحلیلی برای ساییدگی دیسک کاتر در سنگ ارائه شود.

۵- از شبکه شکستگی مجزا (DFN) برای شبیه‌سازی درزه‌ها در مدل عددی استفاده شود.

۶- در خصوص ابزارهای هشدار فرسودگی دیسک کاتر و اخطار به اپراتور در زمان مناسب مطالعه و بررسی شود.

مراجع

فرخ، ابراهیم. (۱۳۹۹). بررسی تاثیر شرایط زمین‌شناسی و پارامترهای عملیاتی بر عمر دیسک برشی در تونل انتقال آب قمرود. مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی، ۹(۲)، ۱۸۳-۱۶۳.

گزارش زمین‌شناسی مهندسی تونل انتقال آب کرمان، (۱۳۹۵)، مؤسسه مهندسين مشاور ساحل (چاپ نشده)

Acaroglu, O., Ozdemir, L., Asbury, B., (2008) A fuzzy logic model to predict specific energy requirement for TBM performance prediction. Tunn. Undergr. Space Technol. 23 (5), 600–608.

Adebayo, B., & Okewale, I. A. (2007) Analysis of the potential of some Nigerian rocks to wear drill bit. Aust J Technol, 11, 1-5.

AFNOR (2000) Rock - determination of the rock abrasiveness - part 1: scratching-test with a pointed tool. Paris.

Al –Ameen, S.I., & Waller, M.D. (1994) The influence of rock strength and Abrasive mineral content on the Cerchar Abrasive Index. Eng Geo. Vol: 36. pp 293-301.

ASTM D7625-10 Standard Test Method for Laboratory Determination of Abrasiveness of Rock Using the CERCHAR

Aydın, H. (2019) Investigating the effects of various testing parameters on Cerchar abrasivity index and its repeatability. Wear, 418, 61-74.

Bejari H, Hamidi JK (2013) Simultaneous effects of joint spacing and orientation on TBM cutting efficiency in jointed rock masses. Rock mechanics and rock engineering 46(4):897-907.

Bieniawski, Z. T., Celada, B., Galera, J. M., & Tardáguila, I. (2009) Prediction of cutter wear using RME. Universidad Politecnica de Madrid, Spain.

Bortolussi, A., Ciccu, R., Grosso, B., Loddo, C., Pistis, S., & Vašek, J. (2006) Improvement of disk cutters performance in the excavation of small tunnels. Proceedings CAMI and MPES2005, Calgary.

Bruland, A. (1998) Hard rock tunnel boring: vol 1–10 (Doctoral dissertation, Norwegian university of science and technology (NTNU)).

Cerchar - Centre d'Études et Recherches de Charbonnages, The Cerchar Abrasiveness Index, Verneuil, 1986.

Cho, J. W., Jeon, S., Yu, S. H., & Chang, S. H. (2010) Optimum spacing of TBM disc cutters: A numerical simulation using the three-dimensional dynamic fracturing method. Tunnelling and Underground Space Technology, 25(3), 230-244.

- Dahl, F., Bruland, A., Jakobsen, P. D., Nilsen, B., & Grøv, E. (2012) Classifications of properties influencing the drillability of rocks, based on the NTNU/SINTEF test method. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 28, 150-158.
- Dehnavi, R. N., Sadeghi, M., Sifferlinger, N. A., & Hasanpour, R. (2021) Evaluating the Efficiency of a New Cutterhead Design to Counteract the Drawbacks of Excavation through Very Hard Rocks. *BHM Berg-und Hüttenmännische Monatshefte*, 1-8.
- Deliormanlı, A. H. (2012) Cerchar abrasivity index (CAI) and its relation to strength and abrasion test methods for marble stones. *Construction and Building Materials*, 30, 16-21.
- Ewendt, G. (1989) Erfassung der Gesteinsabrasivität und Prognose des Werkzeugverschleißes beim maschinellen Tunnelvortrieb mit Diskenmeißeln. *Bochumer Geologische und Geotechnische Arbeiten*, 33.
- Farrokh, E., & Kim, D. Y. (2018) A discussion on hard rock TBM cutter wear and cutterhead intervention interval length evaluation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 81, 336-357.
- Frenzel, C., Käsling, H., & Thuro, K. (2008) Factors influencing disc cutter wear. *Geomechanik und Tunnelbau*, 1(1), 55-60.
- Geological and geotechnical studies, Uma Oya multipurpose development projects (2019), Farab, energy & water (Unpublished)
- Gong, QM, Jiao YY, Zhao J (2006) Numerical modelling of the effects of joint spacing on rock fragmentation by TBM cutters. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 21(1):46–55.
- Gong, QM, Zhao J, Jiao YY (2005) Numerical modeling of the effects of joint orientation on rock fragmentation by TBM cutters. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 20(2):183–191.
- Guiju, Z., & Caiyuan, X. (2018) Analysis of stress distribution of disc cutter under different tunnelling parameters. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 16(sup1), 49-53.
- Gunatilake, J., Dhamagunawardena, H.A., Pitawala, A., Malawiarachchi, S.P., Jayathissa, H.A.G., Bandara, K.N., Ranasooriya, J. (2016) Additional Geological, Geotechnical, Hydrogeological and Geophysical Investigations along Headrace Tunnel. Uma Oya Multipurpose Development Project, Department of Geology, University of Peradeniya.
- 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. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 43, 222-231.
- Hassanpour, J., Rostami, J., Zhao, J. (2011) A New Hard Rock TBM Performance Prediction model for Project Planning. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26, 595-603.

- Hyun, K., Farrokh, E., Kim, D., Kyung, S. (2016) Hard-Rock TBM Cutter Life Evaluation: A Case Study of NS3 Project Mixshield TBM. ITA-AITES World Tunnel Congress (WTC 2016).
- Jian, S., Peng, Z., Yuhou, W., Jinmei, Y., Defang, Z., & Min, L. (2015) Stress and Wear Analysis of the Disc Cutter of Rock Tunnel Boring Machine. *Open Mechanical Engineering Journal*, 9, 721-725.
- Gehring, K., (1995) Design criteria for TBMs with respect to real rock pressure. in *Proceedings of the Tunnel Boring Machines: Trends in Design and Construction of Mechanized Tunneling*, pp. 43–53, Hagenberg, Austria.
- Kim, K., Kim, J., Ryu, H., Rehman, H., Jafri, T. H., Yoo, H., & Ha, S. (2020) Estimation method for TBM cutterhead drive design based on full-scale tunneling tests for application in utility tunnels. *applied sciences*, 10(15), 5187.
- Ko, T. Y., & Lee, S. S. (2020) Effect of rock abrasiveness on wear of shield tunnelling in bukit timah granite. *Applied Sciences*, 10(9), 3231.
- Ko, T. Y., Yoon, H. J., & Son, Y. J. (2014) A comparative study on the TBM disc cutter wear prediction model. *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, 16(6), 533-542.
- Kupferle, J., Rottger, A., Theisen, W., & Alber, M. (2015) abrasivity of rock and soil. *International Conference on Stone and Concrete Machining (ICSCM)*, Vol. 3, pp. 262-271.
- Labra, C., Rojek, J., & Onate, E. (2017) Discrete/finite element modelling of rock cutting with a TBM disc cutter. *Rock mechanics and rock engineering*, 50(3), 621-638.
- Li H, Du E (2016) Simulation of rock fragmentation induced by a tunnel boring machine disk cutter. *Advances in Mechanical Engineering* 8(6):1-11.
- Li J., Huang Y., Zhang X., Sun Y., Guo J. (2020) Research on wear prediction of disc cutter based on friction work principle. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 1-12.
- Li XF, Li HB, Liu YQ, Zhou QC, Xia X (2016) Numerical simulation of rock fragmentation mechanisms subject to wedge penetration for TBMs. *Tunnelling and Underground Space Technology* 53: 96-108.
- Lin L, Xia Y, Zhang X (2020) Wear Characteristics of TBM Disc Cutter Ring Sliding against Different Types of Rock. *KSCE Journal of Civil Engineering* 24(10):3145-3155.
- Lislerud, A. (1988) Hard rock tunnel boring: prognosis and costs. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 3(1), 9-17.

- Liu XW, Wei L, Lei GF, Liu QS (2015) Numerical manifold simulation for rock fragmentation process under TBM double cutters in mixed ground. *Meitan Xuebao/J. Chin. Coal Soc.* 40(6):1225-1234.
- Alber, M., Yarıalı, O., Dahl, F., Bruland, A., Käsling, H., Michalakopoulos, T. N., ... & Özarslan, A. (2013) ISRM suggested method for determining the abrasivity of rock by the CERCHAR abrasivity test. In *The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007-2014* (pp. 101-106). Springer, Cham.
- Ma H, Yin L, Ji H (2011) Numerical study of the effect of confining stress on rock fragmentation by TBM cutters. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 48(6):1021-1033.
- Macias, F. J., Dahl, F., & Bruland, A. (2016) New rock abrasivity test method for tool life assessments on hard rock tunnel boring: the rolling indentation abrasion test (RIAT). *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(5), 1679-1693.
- Maidl, B., Schmidz, L., Ritz, W., Herrenknecht, M. (2008) *Hard Rock Tunnel Boring Machines*. Ernst and Sohn, Berlin, p. 343.
- Mendoza JA (2013) Considerations for discrete element modeling of rock cutting. PhD Thesis. University of Pittsburgh, Pittsburgh, PA.
- Meyers, M. A., & Chawla, K. K. (2008) *Mechanical behavior of materials*. Cambridge university press.
- Mohammadnejad, M., Liu, H., Dehkhoda, S., & Chan, A. (2017) Numerical investigation of dynamic rock fragmentation in mechanical cutting using combined FEM/DEM. In *ISRM 3rd Nordic Rock Mechanics Symposium-NRMS 2017*. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- Moon T, Oh J (2012) A study of optimal rock-cutting conditions for hard rock TBM using the discrete element method. *Rock mechanics and rock engineering* 45(5):837-849.
- Moradizadeh, M., Ghafoori, M., Lashkaripour, G., & Azali, S. T. (2013) Utilizing Geological Properties for Predicting Cerchar Abrasiveness Index (CAI) in Sandstones. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Volume 3, Issue 9, pp. 99-109.
- Nelson, P. P., Al-Jalil, Y. A., & Laughton, C. (1994) Tunnel boring machine project data bases and construction simulation. *Geotechnical Engineering Report GR94-4*, The University of Texas at Austin, Austin, Texas, 78712.
- Nilsen, B., Dahl, F., Holzhäuser, J., & Raleigh, P. (2006) Abrasivity testing for rock and soils. *T & T international, (AVR)*, 47-49.

- Oggeri, C., & Oreste, P. (2012) The Wear of Tunnel Boring Machine Excavation Tools in Rock. *American Journal of Applied Sciences*, 9(10), 1606.
- Ozdemir, L., Miller, R. and Wang, F.-D. (1977) Mechanical tunnel boring prediction and machine design. Annual report, Colorado School of Mines. Golden: National Science Foundation.
- Park GI, Jang SH, Choe SU, Jeon SW (2006) Prediction of the optimum cutting condition of TBM disc cutter in Korean granite by the linear cutting test. In *Proceedings of the Korean Society for Rock Mechanics conference* 217-236.
- Plinninger J, Düllmann J (2016) Rock Mass Scale Effects on Tool Wear in Hardrock Tunnel- ling – practically significant and scientifically neglected? 45.Geomechanik-Kolloquium TU Bergakademie Freiberg at: Freiberg/Sachsen Volume: 2016-02
- Plinninger, R. J. (2010) Hardrock abrasivity investigation using the Rock Abrasivity Index (RAI). Williams, et al., (Eds.), *Geologically Active*, Taylor & Francis, London, 3445-3452.
- Plinninger, R. J., & Restner, U. (2008) Abrasiveness testing, quo vadis? a commented overview of abrasiveness testing methods. *Geomechanics and Tunnelling*, 1(1), 61-70.
- Rojek J (2007) Discrete element modelling of rock cutting. *Computer Methods in Materials Science* 7(2):224-230.
- Rojek J, Onate E, Labra C, Kargl H (2011) Discrete element simulation of rock cutting. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 48(6):996-1010.
- 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. PhD Thesis. Colorado School of Mines.
- 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. *Proceedings of the RETC*: 738-751.
- Schneider, E., Spiegl, M., Türtscher, M., & Leitner, W. (2010). Penetration, cutter wear and rate of advance for TBM operations in hard rock. *Tunnel International Journal For Subsurface Use*, (7), 43.
- Schneider, E., Thuro, K., & Galler, R. (2012) Forecasting penetration and wear for TBM drives in hard rock—Results from the ABROCK research project/Prognose von Penetration und Verschleiß für TBM-Vortriebe im Festgestein—Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt ABROCK. *Geomechanics and Tunnelling*, 5(5), 537-546.
- Schumacher, L. (2004) Auslegung und Einsatzbedingungen von Tunnelvortriebsmaschinen im Hartgestein. - *Felsbau*, 22, 3: 21–28, Essen (Glückauf).

- Su, W., Li, X., Jin, D., Yang, Y., Qin, R., & Wang, X. (2020) Analysis and prediction of TBM disc cutter wear when tunneling in hard rock strata: a case study of a metro tunnel excavation in Shenzhen, China. *Wear*, 446, 203190.
- Sun B, Guo W, Zhu DH, Song LW (2015) Multi-objective Optimization Design of Tunnel Boring Machine's Edge Cutter Layout based on well-balanced Wear. In *Proceedings of the 14th IFToMM World Congress* (pp. 43-47). doi:10.6567/IFToMM. 14TH.WC. FA.024.
- Tan XC, Kou SQ, Lindqvist PA (1998) Application of the DDM and fracture mechanics model on the simulation of rock breakage by mechanical tools. *Engineering Geology* 49(3-4):277-284.
- Tanimoto, C., Yamanaka, S., Tsusaka, K., Nakane, T., Hirano, M., Kanzaki, H., Iwata, S. (2006) A study on cutter wear and mechanical properties of rocks in tunneling with a TBM. *JOURNAL-SOCIETY OF MATERIALS SCIENCE JAPAN*, 55(1), 29.
- Thuro, K. (1997) Drillability prediction: geological influences in hard rock drill and blast tunnelling. *Geologische Rundschau*, 86(2), 426-438.
- Tumac, D., & Balci, C. (2015) Investigations into the cutting characteristics of CCS type disc cutters and the comparison between experimental, theoretical and empirical force estimations. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 45, 84-98.
- Wang, L., Kang, Y., Zhao, X., & Zhang, Q. (2015) Disc cutter wear prediction for a hard rock TBM cutterhead based on energy analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 50, 324-333.
- Yang H, Wang H, Zhou X (2015) Analysis on the Rock–Cutter Interaction Mechanism During the TBM Tunneling Process. In: *Rock Mech Rock Eng*. DOI 10.1007/s00603-015-0796-9
- Yaralı, O., Yaşar, E., Bacak, G., & Ranjith, P. G. (2008) A study of rock abrasivity and tool wear in coal measures rocks. *International Journal of Coal Geology*, 74(1), 53-66.
- Zhai SF, Zhou XP, Bi J, Qian QH (2017) Validation of GPD to model rock fragmentation by TBM cutters. *International Journal of Geomechanics*, 17(6). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000829](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000829)
- Zhai SF, Zhou XP, Bi J, Xiao N (2016) The effects of joints on rock fragmentation by TBM cutters using General Particle Dynamics. *Tunnelling and Underground Space Technology* 57:162-172.
- Zhang Z, Aqeel M, Li C, Sun F (2019) Theoretical prediction of wear of disc cutters in tunnel boring machine and its application. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11.1:111-120.
- Zhao K, Janutolo M, Barla G, Chen G (2014) 3D simulation of TBM excavation in brittle rock associated with fault zones: The Brenner Exploratory Tunnel case. *Engineering geology* 181:93-111.

Zhao, Y., Yang, H., Chen, Z., Chen, X., Huang, L., & Liu, S. (2019) Effects of jointed rock mass and mixed ground conditions on the cutting efficiency and cutter wear of tunnel boring machine. *Rock mechanics and rock engineering*, 52(5), 1303-1313.

Abstract

Due to the development of the tunneling industry in the last century and due to the high tunneling speed and proper safety conditions, the Tunnel Boring Machines (TBM) are widespread used for boring the long mountain tunnels, urban tunnels, infrastructure tunnels and even underground mines. Since the investment cost of the TBM tunneling is higher than other common tunneling methods, it is necessary to consider various issues to predict future costs so that unexpected and unforeseen problems do not affect the performance of TBM and ultimately project planning. One of the most important and effective issues on the TBM performance is the normal wear of the TBM disc cutters during the boring process of the abrasive and strong rocks. Disc cutter's normal wear is defined as a gradual and uniform decreasing in the disc diameter due to the rock-TBM interaction. Different factors may worsen this condition and reduce the wear life of the disc cutter. Rock joint properties are one of the most important factors that, if considered in theoretical and experimental relationships, can modify the conservative results of the life predicting models.

In this research, based on the database obtained from the Kerman water conveyance tunnel project, the effect of the different properties of the jointed rocks on the life of the disc cutter has been studied. In the first part of this study, various factors in the database were statistically analyzed and finally the parameters that had the highest correlation with the life of the disc cutter were selected to provide an experimental model for predicting the life of the disc cutter using multivariate nonlinear regression. These parameters include the total fracturing factor of the rock mass, the rock mass strength and the Cerchar abrasivity index. According to the proposed empirical model with a correlation coefficient of 0.800, the life of the disc cutter is directly related to the fracturing factor of the rock mass and is inversely related to the rock mass strength and Cerchar abrasivity index. The validation of this model is based on the available data in two geological sections of the headrace tunnel in the Uma Oya multipurpose project in Sri Lanka which has shown that the predicted results has good agreement with the actual recorded results, especially in severely fractured and fully jointed rocks.

In the second part of this research and as the first step of the numerical modeling, the effect of the different parameters on the life of the disc cutter and the rock crushing mechanism has been investigated by 3DEC commercial software developed by Itasca. For validating, the numerical results of the dynamic boring of a single disc in the intact rock (without joints) have been compared with the results of CSM theoretical model. This comparison shows negligible differences between numerical and theoretical approaches. After this validation and as the second step of the numerical modeling, the joints are added to the numerical model and the sensitivity analyses have been executed on the TBM operational parameters, rock joints and disc cutter geometry. As results, increasing the disc cutter penetration rate, cutterhead RPM, installation radius of the disc cutter on the cutterhead as well as decreasing joints' spacing may increase TBM penetration into the rock and improve its performance. Also, the normal wear of the disc cutter increases by increasing the penetration rate, cutterhead RPM, joints' spacing, and bluntness of the disc cutter and also by decreasing the installation radius of the disc cutter on the cutterhead. In this model, the joints with angle of 45 to 60 degrees' respect to the direction of the disc cutter penetration have the greatest effect on increasing the crushing of the rock and reducing the induced von Mises stress in the disc cutter. In other words, in such joint conditions, the TBM advances rapidly and the disc cutters wear out slower. In the final step of the numerical modeling, the operation of the TBM in Kerman water conveyance tunnel was modeled numerically in real scale which shows rocks with more fracturing

conditions, the induced von Mises stresses in disc cutters are less and as a result, normal wear of disc cutters will be less. In addition, the study of rock failure mechanism shows that the initiation and extension of the plastic zones in the rock due to the application of the disc cutter forces occurred due to shear yield firstly and then, by continuing boring process, the tensile yield in addition to shear yield lead to the rock fragmentation and TBM advancement.

Keywords: Tunnel Boring Machine, Normal Wear, Jointed Rock, Empirical Prediction Model, Numerical Analysis.



Shahrood University of
Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

Ph.D. Thesis in Rock Mechanics

Development of a wear prediction model for TBM disc cutters in jointed rocks by considering the numerical analysis

By: Morteza Karami

Supervisor:
Dr. Sokrollah Zare

advisor:
Dr. Jamal Rostami

September, 2021