

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه مهندسی استخراج معدن

تعیین قابلیت حفاری معادن سنگ آهن سنگان با استفاده از

طبقه بندی مهندسی توده سنگ

دانشجو: رضا فرخاری

اساتید راهنما

دکتر حسین میرزائی نصیرآباد

دکتر فرهنگ سرشکی

استاد مشاور:

مهندس عبدالرئوف مشهور

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریورماه ۱۳۹۱



دانشگاه گیلان

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

شماره :

تاریخ :

ویرایش :

بسمه تعالی

فرم صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات معاونت عالی و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد حاتم / آقای رضا فرخاری رشته معدن گرایش استخراج تحت عنوان تعیین قابلیت حفاری معادن سنگ آهن سنگان با استفاده از طبقه بندی مهندسی توده سنگ که در تاریخ ۱۳۹۱/۶/۲۷ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه : عالی) ☒ قابل امتیاز ☒ دفاع مجدد ☐ مردود ☐

۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد ارجمند	دکتر حسین میرزائی نصیرآباد	استادیار	
	دکتر فرهنگ سرشکی	دانشیار	
۲- استاد مشاور	مهندس عبدالرئوف مشهور	کارشناسی ارشد	
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر محمد کاراموزیان	استادیار	
۴- استاد ممتحن	پروفسور محمد عطائی	استاد	
۵- استاد ممتحن	دکتر سپدر حمان ترابی	دانشیار	

رئیس دانشکده :

تقدیم بہ

پدر و مادر عزیز و دلسوز

و، محترمہ ربانعم

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت‌های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند. و سلام و درود بر محمد(ص) و خاندان پاک او(علیهم‌السلام).

از اساتید بزرگوارم؛ جناب آقای دکتر میرزائی نصیرآباد و آقای دکتر سرشکی که، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از پدر و مادر عزیز و دلسوز... این دو معلم بزرگوارم... که همواره بر کوتاهی و درستی من، قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت‌هایم گذشته‌اند و برایم در تمام عرصه‌های زندگی یار و یاور بی-چشم‌داشت بوده‌اند، نهایت سپاس را دارم.

از همسر صبور و مهربانم که با تحمل دشواری‌ها، سبب شد تا در کمال آسودگی خیال و فراغت بال، این تحقیق را به انجام برسانم، صمیمانه سپاسگزارم.

از آقای مهندس نادر زیاری، مسئول آزمایشگاه مکانیک سنگ که در طول انجام آزمایشات، از هیچ کمکی دریغ نکردند، کمال تشکر را دارم.

از اساتید محترم دانشکده، که در یک سال گذشته زحمات زیادی را کشیدند، بسیار سپاسگزارم. از پرسنل زحمتکش مجموعه معادن سنگ‌آهن سنگان، بالاخص آقایان مهندس علی عرب و مهندس محمد کوشش، که در کمک به انجام این تحقیق از هیچ کوششی دریغ نکردند، کمال تشکر را دارم.

از مجموعه شرکت مهندسی کاوشگران، به خصوص آقایان مهندس مهدی کمالی، مهندس رامین زنگنه و مهندس مهدی قویدل کمال تشکر را دارم. همچنین از دوستان خود، جواد قاسمی و حامد طاهری که در طول انجام پایان‌نامه کمک نمودند، متشکرم.

تعهد نامه

اینجانب رضا فرخاری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تعیین قابلیت حفاری معادن سنگ آهن سنگان با استفاده از طبقه بندی مهندسی توده سنگ تحت راهنمایی دکتر حسین میرزائی نصیر آباد و دکتر فرهنگ سرشکی متعهد می شوم.

- 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 می باشد 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.

تاریخ: ۱۳۹۱/۷/۲۴

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 می باشد . 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 نمی باشد.

چکیده

با توجه به هزینه بالا و ماشین آلات گران قیمت، شناخت تمامی پارامترهای دخیل در حفاری و بهینه سازی آن، شرایط را برای استخراج بهینه فراهم می سازد. شناخت محیط حفاری و خصوصیات توده سنگ برجا، کمک بسیار زیادی به انتخاب نوع سیستم حفاری، تعیین تعداد ماشین آلات حفاری، ارزیابی توان تولید معدن و پیش بینی سرعت حفاری خواهد نمود. عوامل متعددی در امر حفاری دخیل اند. برخی از این عوامل با قابلیت حفاری رابطه مستقیم و برخی دیگر رابطه عکس دارند.

معادن سنگ آهن سنگان در جنوب شرقی استان خراسان رضوی واقع شده است. جهت تعیین قابلیت حفاری در این معادن، دو تا از معادن فعال این مجموعه با نام های باغک و دردوی انتخاب شده است. به منظور انجام تحقیق در این معادن، ابتدا ترازهای مختلف هر کدام از این معادن بر اساس پارامترهای مطرح شده در سیستم رده بندی RD_i، زون بندی شده اند، که معدن باغک به ۳۱ زون و معدن دردوی به ۲۲ زون تقسیم شده است. سپس در هر یک از معادن، چهار زون جهت جمع آوری نمونه و ثبت سرعت حفاری انتخاب شده اند. مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت بار نقطه ای، چگالی و تخلخل هر کدام از این نمونه ها مشخص شده است. علاوه بر این، بافت، سختی موس، سختی اشمیت، فاصله داری، شیب داری و پرشدگی درزه ها در تمامی زون ها مشخص شده است. از آنجایی که یکی از پارامترهای مهمی که باید در سیستم رده بندی RD_i تعیین شود، مقاومت فشاری تک محوره است و تعیین این پارامتر برای تمامی ۵۳ زون امری هزینه بر می باشد، بنابراین در این تحقیق ابتدا سختی اشمیت برای تمامی زون ها تعیین گردیده است، آنگاه پس از تعیین رابطه بین مقاومت فشاری تک-محوره و چکش اشمیت و همچنین رابطه بین مقاومت بار نقطه ای و چکش اشمیت در چهار زون انتخابی در هر یک از معادن، مشخص شد که، ضریب همبستگی بین مقاومت بار نقطه ای و چکش اشمیت در هر دو معدن نسبت به ضریب همبستگی مقاومت فشاری تک محوره و چکش اشمیت در زون های تعیین شده بیشتر می باشد. با استفاده از رابطه بین مقاومت بار نقطه ای و چکش اشمیت،

مقاومت فشاری تمام زون‌ها که یکی از پارامترهای ورودی سیستم رده‌بندی RDi می‌باشد، محاسبه شده است.

علاوه بر این‌ها، پس از محاسبه اندیس قابلیت حفاری (RDi) و ثبت سرعت حفاری در زون‌های تعیین شده، رابطه بین اندیس قابلیت حفاری و سرعت حفاری در هر یک از معادن به طور جداگانه به دست آمده است.

نهایتاً پس از محاسبه اندیس قابلیت حفاری برای تمام زون‌ها و با استفاده از رابطه بین اندیس قابلیت حفاری و سرعت حفاری، سرعت در تمام زون‌ها در هر دو معدن به دست آمده است. همچنین، زون‌بندی نهایی در این معادن بر اساس میانگین وزنی طول پیمایش انجام شده، و در هر دو معدن ۱۲ زون همراه با اندیس قابلیت حفاری و سرعت متوسط حفاری مشخص شده است. با توجه به مطالب گفته شده می‌توان قبل از حفاری، سرعت حفاری را با استفاده از سیستم رده‌بندی RDi هم به صورت کیفی و هم کمی تعیین کرده و با اطلاع از وضعیت هر زون، سراغ حفاری در آن رفت.

کلید واژه: طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ، قابلیت حفاری، معادن سنگ آهن سنگان

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

- ارائه یک رابطه تجربی بین اندیس سختی و مقاومت فشاری تک محوری سنگ (مطالعه موردی: معدن سنگ آهن سنگان)، شانزدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، دانشگاه شیراز.
- تخمین قابلیت نفوذ سرمته های دورانی در توده سنگ های معادن سنگ آهن سنگان، اولین کنفرانس فناوری های معدنکاری ایران (یزد، ۱۵ تا ۱۷ شهریور ۱۳۹۱).

۱	مقدمه.....	۱
۲	۱.۱ مقدمه.....	۱.۱
۳	۲.۱ هدف و ضرورت انجام تحقیق.....	۲.۱
۴	۳.۱ ساختار پایان نامه.....	۳.۱
۵	۲ عوامل مؤثر بر قابلیت حفاری توده سنگ.....	۲
۶	۱.۲ مقدمه.....	۱.۲
۷	۲.۲ تجهیزات حفاری.....	۲.۲
۸	۱.۲.۲ بار پشت مته.....	۱.۲.۲
۱۲	۲.۲.۲ سرعت چرخش مته.....	۲.۲.۲
۱۴	۳.۲.۲ فلاشینگ.....	۳.۲.۲
۱۵	۴.۲.۲ مشخصات سر مته.....	۴.۲.۲
۱۸	۳.۲ پارامترهای ژئوتکنیکی.....	۳.۲
۳۰	۱.۳.۲ خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ماده سنگ.....	۱.۳.۲
۳۰	۱.۱.۳.۲ اندازه و شکل دانه ها.....	۱.۱.۳.۲
۳۲	۲.۱.۳.۲ ارزیابی کمی بافت سنگ.....	۲.۱.۳.۲
۴۰	۳.۱.۳.۲ درجه سیمانی شدن و نوع ماتریکس.....	۳.۱.۳.۲
۴۱	۴.۱.۳.۲ چگالی.....	۴.۱.۳.۲
۴۴	۵.۱.۳.۲ تخلخل.....	۵.۱.۳.۲
۴۷	۶.۱.۳.۲ مقاومت فشاری تک محوره.....	۶.۱.۳.۲
۵۵	۷.۱.۳.۲ سختی اشمیت.....	۷.۱.۳.۲
۵۹	۸.۱.۳.۲ مقاومت کششی.....	۸.۱.۳.۲
۶۳	۹.۱.۳.۲ سختی.....	۹.۱.۳.۲
۶۴	۱۰.۱.۳.۲ ساینده گی.....	۱۰.۱.۳.۲
۶۵	الف- اندیس سایش سورشار.....	الف- اندیس سایش سورشار
۶۶	ب- اندیس سایش ضربه دینامیکی.....	ب- اندیس سایش ضربه دینامیکی
۶۶	پ- فاکتور ساینده گی شیمازک.....	پ- فاکتور ساینده گی شیمازک
۷۴	۱۱.۱.۳.۲ خواص الاستیسیته و پلاستیسیته.....	۱۱.۱.۳.۲
۷۶	۱۲.۱.۳.۲ تردی.....	۱۲.۱.۳.۲
۸۲	۱۳.۱.۳.۲ کار تخریب.....	۱۳.۱.۳.۲
۸۴	۲.۳.۲ توده سنگ.....	۲.۳.۲
۸۷	۱.۲.۳.۲ پارامترهای هندسی ناپیوستگی ها.....	۱.۲.۳.۲
۸۷	الف- تأثیر فاصله داری درزه ها بر نرخ نفوذ.....	الف- تأثیر فاصله داری درزه ها بر نرخ نفوذ
۹۰	ب- تأثیر شیب درزه ها بر سرعت حفاری.....	ب- تأثیر شیب درزه ها بر سرعت حفاری
۹۴	۲.۲.۳.۲ پارامترهای زمین شناسی.....	۲.۲.۳.۲
۹۴	الف- تأثیر گسل خوردگی بر سرعت حفاری.....	الف- تأثیر گسل خوردگی بر سرعت حفاری

۹۴	ب- چین خوردگی.....
۹۴	پ- جهت‌داری.....
۹۶	ت- هوازدگی.....
۱۰۱	۴.۲ عوامل خدماتی و عملیاتی.....
۱۰۳	۵.۲ نتیجه‌گیری.....
۱۰۵	۳ سیستم‌های رده‌بندی ارائه شده در زمینه قابلیت حفاری.....
۱۰۶	۱.۳ مقدمه.....
۱۰۶	۲.۳ طبقه‌بندی ویلبور.....
۱۰۶	۱.۲.۳ سختی.....
۱۰۷	۲.۲.۳ بافت.....
۱۰۸	۳.۲.۳ شکستگی.....
۱۰۸	۴.۲.۳ ساخت.....
۱۱۰	۳.۳ رده‌بندی توده‌های سنگی بر اساس قابلیت تراشه‌شدن.....
۱۱۳	۴.۳ اندیس قابلیت نفوذ در سنگ‌ها (R _{Pi}).....
۱۱۵	۵.۳ اندیس قابلیت حفاری توده‌سنگ (R _{Di}).....
۱۱۹	۶.۳ نتیجه‌گیری.....
۱۲۰	۴ معرفی معادن سنگ آهن سنگان.....
۱۲۱	۱.۴ مقدمه.....
۱۲۲	۲.۴ موقعیت جغرافیایی و شرایط آب و هوایی منطقه سنگان.....
۱۲۳	۳.۴ تاریخچه معدن.....
۱۲۴	۴.۴ زمین‌شناسی.....
۱۲۵	۵.۴ معدن باغک.....
۱۲۵	۱.۵.۴ موقعیت جغرافیایی.....
۱۲۶	۲.۵.۴ ژئومورفولوژی.....
۱۲۶	۳.۵.۴ آب و هوا.....
۱۲۷	۴.۵.۴ زمین‌شناسی.....
۱۲۹	۵.۵.۴ استخراج معدن.....
۱۳۰	۶.۴ معدن دردوی.....
۱۳۰	۱.۶.۴ موقعیت جغرافیایی و ژئومورفولوژی.....
۱۳۱	۲.۶.۴ زمین‌شناسی.....
۱۳۲	۳.۶.۴ استخراج معدن.....
۱۳۳	۷.۴ جمع‌بندی.....
۱۳۵	۵ تعیین قابلیت حفاری معادن باغک و دردوی.....
۱۳۶	۱.۵ مقدمه.....

۱۳۸.....	۲.۵ تعیین قابلیت حفاری توده سنگ در معدن باغک.....
۱۳۸.....	۱.۲.۵ زون بندی.....
۱۴۱.....	۲.۲.۵ اندازه گیری پارامترهای مربوط به ماده سنگ.....
۱۴۱.....	۱.۲.۲.۵ برداشت نمونه.....
۱۴۳.....	۲.۲.۲.۵ مقاومت فشاری تک محوره.....
۱۴۷.....	۴.۲.۲.۵ تعیین سختی و بافت.....
۱۵۰.....	۵.۲.۲.۵ تعیین سختی اشمیت.....
	۶.۲.۲.۵ تعیین ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوره و مقاومت بار نقطه ای با سختی اشمیت در زون های انتخابی.....
۱۵۲.....	۷.۲.۲.۵ چگالی و تخلخل.....
۱۵۴.....	۳.۲.۵ پارامترهای مربوط به توده سنگ.....
۱۵۵.....	۴.۲.۵ ثبت سرعت حفاری در زون های انتخابی.....
۱۶۰.....	۵.۲.۵ محاسبه اندیس قابلیت حفاری در زون های انتخابی.....
۱۶۱.....	۶.۲.۵ ارتباط بین RDi و سرعت حفاری.....
۱۶۲.....	۷.۲.۵ امتیازدهی به هر کدام از زون ها بر اساس سیستم رده بندی RDi.....
۱۶۸.....	۸.۲.۵ زون بندی نهایی توده سنگ های معدن باغک.....
۱۷۰.....	۳.۵ تعیین قابلیت حفاری توده سنگ های معدن دردوی.....
۱۷۰.....	۱.۳.۵ زون بندی.....
۱۷۲.....	۲.۳.۵ اندازه گیری پارامترهای مربوط به ماده سنگ.....
۱۷۲.....	۱.۲.۳.۵ برداشت نمونه.....
۱۷۳.....	۲.۲.۳.۵ مقاومت فشاری تک محوره.....
۱۷۴.....	۳.۲.۳.۵ مقاومت بار نقطه ای.....
۱۷۶.....	۴.۲.۳.۵ تعیین سختی و بافت.....
۱۷۸.....	۵.۲.۳.۵ تعیین سختی اشمیت.....
	۶.۲.۳.۵ تعیین ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوره و مقاومت بار نقطه ای با سختی اشمیت در زون های انتخاب شده.....
۱۷۹.....	۷.۲.۳.۵ چگالی و تخلخل.....
۱۸۲.....	۳.۳.۵ پارامترهای مربوط به توده سنگ.....
۱۸۵.....	۴.۳.۵ ثبت سرعت حفاری در زون های انتخابی.....
۱۸۶.....	۵.۳.۵ محاسبه اندیس قابلیت حفاری در زون های مختلف معدن دردوی.....
۱۸۷.....	۶.۳.۵ ارتباط بین RDi و سرعت حفاری.....
۱۸۸.....	۷.۳.۵ امتیازدهی به هر کدام از زون ها بر اساس سیستم RDi.....
۱۹۳.....	۸.۳.۵ زون بندی نهایی توده سنگ های معدن دردوی.....
۱۹۵.....	۴.۵ مقایسه بین پارامترهای مختلف در معادن باغک و دردوی.....

۵.۵	جمع‌بندی و نتیجه‌گیری.....	۱۹۷
۶	نتیجه‌گیری و پیشنهادات.....	۱۹۹
۱.۶	نتیجه‌گیری.....	۲۰۰
۲.۶	پیشنهادهای.....	۲۰۲
	منابع.....	۲۰۴
۷	پیوست.....	۲۰۹
۱.۷	آزمایش سختی ویکرز.....	۲۱۰
۱.۱.۷	عدد سختی ویکرز.....	۲۱۱
۲.۱.۷	مقدار نیرو در آزمایش ویکرز.....	۲۱۱
۲.۷	جداول مربوط به زون‌های معدن باغک.....	۲۱۱
۳.۷	جداول مربوط به زون‌های معدن دردوی.....	۲۲۵
۴.۷	جداول مربوط به پارامترهای اندازه‌گیری شده جهت به دست آوردن چگالی و تخلخل.....	۲۳۴
۵.۷	جداول مربوط به مشخصات نمونه‌های تهیه شده جهت انجام مقاومت فشاری تک‌محوره و مقاومت بار	
	نقطه‌ای.....	۲۳۶

- شکل ۱-۲- پارامترهای مؤثر در قابلیت حفاری توده سنگ و سایش تجهیزات (Thuro, 1997)..... ۷
- شکل ۲-۲- شکل کلی تغییرات سرعت حفاری نسبت به تغییرات بار پشت مته (Jimeno et al, 1995)..... ۹
- شکل ۳-۲- تأثیر بار پشت مته در سیستم حفاری ضربه‌ای بر سرعت نفوذ برای فشارهای مختلف هوای فشرده در سنگ تاونیت (یاوری، ۱۳۸۱)..... ۱۱
- شکل ۴-۲- تأثیر بار پشت مته در سیستم حفاری دورانی بر سرعت نفوذ برای انواع سنگ‌های مختلف (یاوری، ۱۳۸۱)..... ۱۱
- شکل ۵-۲- ارتباط بین متوسط بار پشت مته و نرخ نفوذ (Yasar et al, 2011)..... ۱۲
- شکل ۶-۲- ارتباط بین دور مته و سرعت حفاری (بار روی مته ثابت است) (اصانلو، ۱۳۸۲)..... ۱۳
- شکل ۷-۲- اثر سرعت چرخش بر نرخ نفوذ برای بارهای محوری مختلف در سنگ دولومیت (یاوری، ۱۳۸۱)..... ۱۳
- شکل ۸-۲- تأثیر افزایش فشار هوا به روی سرعت حفاری (استوار، ۱۳۸۳)..... ۱۵
- شکل ۹-۲- انواع سرمته‌های ۶، ۷، ۸ و ۹ دکه‌ای با سیستم‌های فلاشینگ متفاوت مورد استفاده در سنگ‌های سخت (Thuro, 1997)..... ۱۶
- شکل ۱۰-۲- انواع سرمته‌های مورد استفاده در سیستم‌های حفاری ضربه‌ای- چرخشی (Thuro, 1997)..... ۱۷
- شکل ۱۱-۲- تأثیر قطر بر سرعت چالزنی (jimeno et al, 1995)..... ۱۷
- شکل ۱۲-۲- ارتباط بین قطر مته و بار روی مته (اصانلو، ۱۳۸۲)..... ۱۸
- شکل ۱۳-۲- ارتباط بین اندیس زبری و نرخ نفوذ در سنگ آهک (Altindag, 2003)..... ۳۱
- شکل ۱۴-۲- ارتباط بین متوسط اندازه خرده‌های حفاری و نرخ نفوذ در سنگ آهک (Altindag, 2003)..... ۳۱
- شکل ۱۵-۲- مفهوم فاکتور زاویه (Ersoy & Waller, 1995)..... ۳۴
- شکل ۱۶-۲- شمای کلی یک مقطع نازک برای محاسبه ضریب بافت (Ersoy & Waller, 1995)..... ۳۵
- شکل ۱۷-۲- ارتباط ضریب بافت و سرعت حفاری اکتشافی در سه نوع سرمته مختلف (Ersoy & Waller, 1995)..... ۳۷
- شکل ۱۸-۲- رابطه بین سرعت حفاری و ضریب بافت (Howarth & Rowlands, 1987)..... ۳۷
- شکل ۱۹-۲- رابطه بین ضریب بافت و مقاومت فشاری تک‌محوره (Howarth & Rowlands, 1987)..... ۳۹
- شکل ۲۰-۲- نمایش مقاومت بافت در برابر شکست در حال بارگذاری با یک نفوذگر گوه‌ای (Howarth & Rowlands, 1987)..... ۴۰
- شکل ۲۱-۲- ارتباط چگالی سنگ و سرعت حفاری دورانی (Kahraman et al, 2000)..... ۴۳
- شکل ۲۲-۲- ارتباط چگالی سنگ و سرعت حفاری ضربه‌ای (Kahraman et al, 2003)..... ۴۳
- شکل ۲۳-۲- ارتباط بین چگالی و نرخ نفوذ (Bilim, 2011)..... ۴۴
- شکل ۲۴-۲- رابطه سرعت حفاری با تخلخل و چگالی در ماسه‌سنگ (Thuro, 1997)..... ۴۵
- شکل ۲۵-۲- رابطه عمر سرمته و تخلخل در ماسه‌سنگ (Thuro, 1997)..... ۴۵
- شکل ۲۶-۲- رابطه سرعت حفاری با تخلخل و چگالی خشک سنگ (Thuro et al, 2002)..... ۴۶
- شکل ۲۷-۲- ارتباط میان نرخ نفوذ و تخلخل (Bilim, 2011)..... ۴۶

شکل ۲-۲۸- رابطه سرعت حفاری و مقاومت فشاری در نمونه‌ای از ماسه‌سنگ (Akun & Karpuz, 2005)	۴۸
شکل ۲-۲۹- رابطه بین اندیس قابلیت حفاری و مقاومت فشاری در دو نوع سرمته (Kahraman et al, 2000)	۴۸
شکل ۲-۳۰- رابطه سرعت حفاری ضربه‌ای و مقاومت فشاری (Kahraman et al, 2003)	۴۹
شکل ۲-۳۱- ارتباط بین مقاومت فشاری تک‌محوره و نرخ نفوذ در سیستم‌های حفاری چرخشی	۴۹
شکل ۲-۳۲- رابطه بین سرعت حفاری ضربه‌ای و مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ (حسینی و عطائی، ۱۳۸۸)	۵۰
شکل ۲-۳۳- رابطه بین مقاومت فشاری تک‌محوره و نرخ نفوذ (Yasar et al, 2011)	۵۱
شکل ۲-۳۴- رابطه بین سرعت حفاری ضربه‌ای در تونل‌ها و مقاومت فشاری سنگ‌های اسلیتی و کوارتزیتی در کشور آلمان (Thuro & Spaun, 1996)	۵۱
شکل ۲-۳۵- ارتباط بین نرخ نفوذ و مقاومت فشاری تک‌محوره (Bilim, 2011)	۵۲
شکل ۲-۳۶- ارتباط اندیس قابلیت حفاری و مقاومت بار نقطه‌ای (Kahraman et al, 2000)	۵۳
شکل ۲-۳۷- ارتباط مقاومت بار نقطه‌ای و سرعت حفاری ضربه‌ای (Kahraman et al, 2003)	۵۳
شکل ۲-۳۸- ارتباط بین مقاومت بار نقطه‌ای و نرخ نفوذ در سیستم‌های حفاری چرخشی	۵۴
شکل ۲-۳۹- رابطه بین مقاومت بار نقطه‌ای و نرخ نفوذ (Bilim, 2011)	۵۴
شکل ۲-۴۰- ارتباط عدد چکش اشمیت و اندیس قابلیت حفاری (Kahraman et al, 2000)	۵۶
شکل ۲-۴۱- ارتباط عدد چکش اشمیت و سرعت حفاری ضربه‌ای (Kahraman et al, 2003)	۵۶
شکل ۲-۴۲- ارتباط بین سختی اشمیت و نرخ نفوذ در کوارتزیت (Denkhaus, 2003)	۵۷
شکل ۲-۴۳- ارتباط بین سختی اشمیت و نرخ نفوذ در شیل (Denkhaus, 2003)	۵۷
شکل ۲-۴۴- ارتباط بین سختی اشمیت و نرخ نفوذ در سیستم‌های حفاری چرخشی	۵۸
شکل ۲-۴۵- ارتباط بین سختی اشمیت و نرخ نفوذ (Bilim, 2011)	۵۸
شکل ۲-۴۶- ارتباط مقاومت کششی و سرعت حفاری دورانی (Kahraman et al, 2000)	۶۰
شکل ۲-۴۷- ارتباط مقاومت کششی و سرعت حفاری ضربه‌ای (Kahraman et al, 2003)	۶۰
شکل ۲-۴۸- ارتباط مقاومت کششی و سرعت حفاری ضربه‌ای در تونل‌سازی (Thuro & Spaun, 1996)	۶۱
شکل ۲-۴۹- ارتباط بین مقاومت کششی برزلی و نرخ نفوذ در سیستم‌های حفاری چرخشی (Bilgin & Kahraman, 2003)	۶۱
شکل ۲-۵۰- رابطه بین سرعت حفاری ضربه‌ای و مقاومت کششی برزلی سنگ (حسینی و عطائی، ۱۳۸۸)	۶۲
شکل ۲-۵۱- ارتباط بین مقاومت کششی برزلی و نرخ نفوذ (Bilim, 2011)	۶۲
شکل ۲-۵۲- نمایی از دستگاه سایش سورشار (Tunnels & Tunnelling International, 2006)	۶۶
شکل ۲-۵۳- رابطه میزان ساینده‌ی رزینال سنگ با استفاده از سختی موس (Thuro, 1997)	۶۸
شکل ۲-۵۴- ارتباط بین اندیس سایش سورشار و کوارتز محتوی (Plinninger & Thuro, 2004)	۶۸
شکل ۲-۵۵- ارتباط بین اندیس سایش سورشار و کوارتز محتوی (Plinninger & Thuro, 2004)	۶۹

- شکل ۲-۵۶- رابطه شاخص ساینده‌گی سنگ RAI و عمر سرمته (Thuro & Plinninger, 2003)..... ۷۰
- شکل ۲-۵۷- رابطه میزان کوارتز محتوی و عمر سرمته در انواع سنگ‌های طبیعت (Thuro & Plinninger, 2003)..... ۷۱
- شکل ۲-۵۸- رابطه عمر سرمته با درصد کوارتز محتوی در سنگ‌های مختلف دانه-دانه با کوارتز محتوی معادل (Thuro & Plinninger, 2003)..... ۷۲
- ۲-۵۹- ارتباط بین شاخص سایش سنگ و اندیس سایش سورشار (Plinninger & Thuro, 2004)..... ۷۳
- شکل ۲-۶۰- ارتباط سرعت حفاری و مدول الاستیسیته سنگ‌ها (Thuro & Spaun, 1996)..... ۷۴
- شکل ۲-۶۱- ارتباط قابلیت حفاری و مدول الاستیسیته سنگ‌ها در حفاری دورانی (Kahraman et al, 2000)..... ۷۵
- شکل ۲-۶۲- ارتباط قابلیت حفاری و مدول الاستیسیته سنگ‌ها در حفاری ضربه‌ای (Kahraman et al, 2003)..... ۷۵
- شکل ۲-۶۳- رابطه بین سرعت حفاری ضربه‌ای و مدول الاستیسیته سنگ (حسینی و عطائی، ۱۳۸۸)..... ۷۶
- شکل ۲-۶۴- ارتباط بین تردی B_1 و B_2 (Kahraman, 2002)..... ۷۷
- شکل ۲-۶۵- ارتباط بین تردی B_1 و B_3 (Kahraman, 2002)..... ۷۸
- شکل ۲-۶۶- ارتباط بین تردی B_2 و B_3 (Kahraman, 2002)..... ۷۸
- شکل ۲-۶۷- ارتباط بین نرخ نفوذ و تردی B_1 در TBM (Kahraman, 2002)..... ۷۹
- شکل ۲-۶۸- ارتباط بین نرخ نفوذ و تردی B_2 در TBM (Kahraman, 2002)..... ۷۹
- شکل ۲-۶۹- ارتباط بین نرخ نفوذ و تردی B_1 در سیستم حفاری چرخشی (Kahraman, 2002)..... ۸۰
- شکل ۲-۷۰- ارتباط بین نرخ نفوذ و تردی B_2 در سیستم حفاری چرخشی (Kahraman, 2002)..... ۸۰
- شکل ۲-۷۱- ارتباط بین نرخ نفوذ و تردی B_3 در سیستم حفاری ضربه‌ای (Kahraman, 2002)..... ۸۱
- شکل ۲-۷۲- ارتباط بین اندیس قابلیت حفاری و B_1 (Thuro & Spaun, 1996)..... ۸۱
- شکل ۲-۷۳- برآورد کار تخریب ویژه از منحنی تنش کرنش یک نمونه سنگ تحت فشار تک محوره (Thuro, 1997)..... ۸۲
- شکل ۲-۷۴- رابطه بین نرخ نفوذ و کار تخریب در ۲۳ نمونه سنگ در جبهه کار تونل (Thuro and Spaun, 1996)..... ۸۳
- شکل ۲-۷۵- ارتباط بین کار تخریب و نرخ نفوذ (Thuro and Spaun, 1996)..... ۸۳
- شکل ۲-۷۶- ارتباط بین فاصله‌داری درزه‌ها با نرخ نفوذ در سنگ آهک (Thuro, 1997)..... ۸۸
- شکل ۲-۷۷- رابطه سرعت حفاری با فراوانی درزه‌ها (Akun & Karpuz, 2005)..... ۸۸
- شکل ۲-۷۸- رابطه سرعت حفاری با فاصله‌داری درزه‌ها (Hoseinie et al, 2008)..... ۸۹
- شکل ۲-۷۹- ارتباط بین RQD و نرخ نفوذ در ماسه‌سنگ (Akun & Karpuz, 2005)..... ۹۰
- شکل ۲-۸۰- توزیع بار پشت مته در سطح درزه‌های شیب‌دار (حسینی و همکاران، ۱۳۸۵)..... ۹۱
- شکل ۲-۸۱- رابطه بین سرعت حفاری و شیب درزه‌ها (Hoseinie et al, 2008)..... ۹۲
- شکل ۲-۸۲- رابطه بین سرعت حفاری و ابعاد پرکننده درزه‌ها (Hoseinie et al, 2008)..... ۹۳
- شکل ۲-۸۳- عملیات چالزنی با توجه به جهت‌داری متفاوت برگ‌وارگی (Thuro, 1997)..... ۹۵

- شکل ۲-۸۴- ارتباط بین نرخ نفوذ، مقاومت کششی و زاویه شیب برگ‌وارگی (Thuro, 1997)..... ۹۶
- شکل ۲-۸۵- ارتباط بین مقاومت فشاری تک‌محوره و درجه هوازده‌گی گرانیت (زیاد، متوسط، کم) (Thuro et al, 2002)..... ۹۷
- شکل ۲-۸۶- رابطه بین نرخ نفوذ و درجه هوازده‌گی گرانیت در چال‌های انفجاری (Thuro et al, 2002)..... ۹۸
- شکل ۲-۸۷- رابطه بین مقدار مصرف مواد منفجره و درجه هوازده‌گی در گرانیت (Thuro et al, 2002)..... ۹۸
- شکل ۲-۸۸- ارتباط بین درجه هوازده‌گی با چگالی خشک و تخلخل (Thuro et al, 2002)..... ۹۹
- شکل ۲-۸۹- رابطه مقاومت فشاری تک‌محوره در مقابل چگالی خشک و تخلخل (Thuro et al, 2002)..... ۱۰۰
- شکل ۲-۹۰- نرخ حفاری در مقابل چگالی خشک و تخلخل (Thuro et al, 2002)..... ۱۰۱
- شکل ۲-۹۱- تأثیر عوامل غیر وابسته به چالزنی بر سرعت کل چالزنی (یاوری، ۱۳۸۳)..... ۱۰۳
- شکل ۴-۱- جانمایی آنومالی‌های مختلف معدن سنگ‌آهن سنگان (www.simp.ir)..... ۱۲۲
- شکل ۴-۲- موقعیت جغرافیایی سنگان (www.simp.ir)..... ۱۲۳
- شکل ۴-۳- دورنمایی از معدن باغک..... ۱۲۶
- شکل ۴-۴- پهنه‌های ساختاری- رسوبی ایران و موقعیت محدوده مورد مطالعه دردوی- باغک (معدنکاو، ۱۳۸۸)..... ۱۲۸
- شکل ۴-۵- نمایی از پیت نهایی معدن باغک (کاوشگران، ۱۳۹۱)..... ۱۳۰
- شکل ۴-۶- دورنمایی از معدن دردوی..... ۱۳۱
- شکل ۴-۷- نمایی از پیت نهایی معدن دردوی (کاوشگران، ۱۳۹۱)..... ۱۳۳
- شکل ۵-۱- مراحل مختلف انجام مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی..... ۱۳۷
- شکل ۵-۲- زون‌بندی معدن باغک..... ۱۳۹
- شکل ۵-۳- نمودار ستونی درصد خاک و سنگ‌های مختلف..... ۱۴۱
- شکل ۵-۴- نمونه‌های جمع‌آوری شده جهت انجام آزمایش و انتقال آنها به آزمایشگاه دانشگاه صنعتی شاهرود..... ۱۴۲
- شکل ۵-۵- زون‌های انتخاب شده جهت جمع‌آوری نمونه از معدن باغک..... ۱۴۲
- شکل ۵-۶- تهیه نمونه‌های استوانه‌ای..... ۱۴۳
- شکل ۵-۷- آماده‌سازی نمونه‌ها جهت عملیات بارگذاری..... ۱۴۴
- شکل ۵-۸- بارگذاری فشاری نمونه دولومیت..... ۱۴۴
- شکل ۵-۹- آزمایش مقاومت بار نقطه‌ای نمونه شماره ۲ سنگ مگنتیت معدن باغک..... ۱۴۶
- شکل ۵-۱۰- نمونه شماره ۲ سنگ مگنتیت معدن باغک قبل و بعد از بارگذاری..... ۱۴۶
- شکل ۵-۱۱- نمونه سنگ‌ها به همراه جعبه سختی موس..... ۱۴۷
- شکل ۵-۱۲- نمودار ستونی درصد سختی موس در معدن باغک..... ۱۴۹
- شکل ۵-۱۳- نمودار ستونی درصد انواع بافت در معدن باغک..... ۱۵۰
- شکل ۵-۱۴- نمودار ارتباط بین مقاومت فشاری تک‌محوره و چکش اشمیت در معدن باغک..... ۱۵۲
- شکل ۵-۱۵- نمودار ارتباط بین مقاومت بار نقطه‌ای و چکش اشمیت در معدن باغک..... ۱۵۳
- شکل ۵-۱۶- نمودار ستونی درصد مقاومت فشاری تک‌محوره در معدن باغک..... ۱۵۴

شکل ۵-۱۷- ابزار مورد استفاده برای تعیین چگالی و تخلخل.....	۱۵۵
شکل ۵-۱۸- پرشدگی درزه‌ها توسط میکا.....	۱۵۶
شکل ۵-۱۹- نمودار ستونی درصد فاصله‌داری درزه‌ها در معدن باغک.....	۱۵۷
شکل ۵-۲۰- نمودار ستونی درصد زاویه‌داری بین امتداد چال و سطح درزه در معدن باغک.....	۱۵۸
شکل ۵-۲۱- دستگاه حفاری TYI368A در حال حفاری و کمپرسورهای هوای فشرده در معدن باغک...۱۶۰	۱۶۰
شکل ۵-۲۲- نمودار ارتباط بین RD _i و سرعت حفاری در معدن باغک.....	۱۶۲
شکل ۵-۲۳- تصویری از زون شماره ۲۵ (هماتیت) معدن باغک.....	۱۶۳
شکل ۵-۲۴- تصویری از زون شماره ۱۱ (مگنتیت کم‌عیار) معدن باغک.....	۱۶۴
شکل ۵-۲۵- امتیاز RD _i زون‌های مختلف معدن باغک.....	۱۶۶
شکل ۵-۲۶- تخمین سرعت حفاری زون‌های مختلف معدن باغک با استفاده از اندیس حفاری RD _i	۱۶۷
شکل ۵-۲۷- نمودار ستونی درصد اندیس قابلیت حفاری در معدن باغک.....	۱۶۷
شکل ۵-۲۸- زون‌بندی نهایی توده‌سنگ‌های معدن باغک بر اساس شاخص قابلیت حفاری (RD _i).....	۱۶۸
شکل ۵-۲۹- زون‌بندی نهایی توده‌سنگ‌های معدن باغک بر اساس سرعت حفاری.....	۱۶۹
شکل ۵-۳۰- زون‌بندی معدن دردوی.....	۱۷۰
شکل ۵-۳۱- درصد انواع سنگ‌های معدن دردوی.....	۱۷۱
شکل ۵-۳۲- زون‌های تعیین شده جهت جمع‌آوری نمونه از معدن دردوی.....	۱۷۳
شکل ۵-۳۳- بارگذاری فشاری نمونه توف کربنات‌دار آذرآواری.....	۱۷۴
شکل ۵-۳۴- آزمایش مقاومت بار نقطه‌ای نمونه شماره ۱ سنگ هماتیت معدن دردوی.....	۱۷۵
شکل ۵-۳۵- نمونه شماره ۱ سنگ هماتیت معدن دردوی، قبل و بعد از بارگذاری.....	۱۷۵
شکل ۵-۳۶- نمودار ستونی درصد سختی موس در معدن دردوی.....	۱۷۷
شکل ۵-۳۷- نمودار ستونی مربوط به میزان بافت‌های مختلف در معدن دردوی.....	۱۷۸
شکل ۵-۳۸- نمودار ارتباط بین مقاومت فشاری تک‌محوره و چکش اشمیت در معدن دردوی.....	۱۸۰
شکل ۵-۳۹- نمودار ارتباط بین مقاومت بار نقطه‌ای و چکش اشمیت در معدن دردوی.....	۱۸۰
شکل ۵-۴۰- نمودار ستونی درصد مقاومت فشاری تک‌محوره در معدن دردوی.....	۱۸۱
شکل ۵-۴۱- پرشدگی گرانیات توسط کلسیت در معدن دردوی.....	۱۸۳
شکل ۵-۴۲- نمودار ستونی درصد فاصله‌داری درزه‌ها در معدن دردوی.....	۱۸۴
شکل ۵-۴۳- نمودار ستونی درصد زاویه‌داری بین امتداد چال و سطح درزه در معدن باغک.....	۱۸۴
شکل ۵-۴۴- دستگاه حفاری Roc L8 در حال حفاری در معدن دردوی.....	۱۸۶
شکل ۵-۴۵- نمودار ارتباط بین RD _i و سرعت حفاری در معدن دردوی.....	۱۸۸
شکل ۵-۴۶- تصویری از زون شماره ۱ (مگنتیت پرعیار) معدن دردوی.....	۱۸۹
شکل ۵-۴۷- تصویری از زون شماره ۱۹ (گرانیات آلتره) معدن دردوی.....	۱۹۰
شکل ۵-۴۸- مقدار شاخص RD _i در زون‌های مختلف معدن دروی.....	۱۹۲
شکل ۵-۴۹- تخمین سرعت حفاری در زون‌های مختلف معدن دردوی.....	۱۹۲
شکل ۵-۵۰- نمودار ستونی درصد اندیس قابلیت حفاری در معدن دردوی.....	۱۹۳

-
- شکل ۵-۵۱- زون‌بندی نهایی توده‌سنگ‌های معدن دردوی بر اساس شاخص قابلیت حفاری (RDi) ۱۹۴
- شکل ۵-۵۲- زون‌بندی نهایی توده‌سنگ‌های معدن دردوی بر اساس سرعت حفاری ۱۹۴
- شکل ۷-۱- آزمایش سختی ویکرز ۲۱۰

جدول ۱-۲- بار پیشنهادی برای قطرهای مختلف در سنگ‌های سخت (اصائلو، ۱۳۸۲).....	۸
جدول ۲-۲- پارامترهای مؤثر بر قابلیت حفاری (Thuro, 1997; Ersoy & Waller, 1995).....	۱۹
جدول ۳-۲- تحقیقات انجام شده در زمینه تأثیر پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ بر قابلیت حفاری.....	۲۷
جدول ۴-۲- روش وزن‌دهی به تفاوت‌های زاویه‌های دانه‌های کشیده (Ersoy & Waller, 1995).....	۳۴
جدول ۵-۲- چگالی برخی از کانی‌های شاخص در حفاری (فهیمی‌فر و سروش، ۱۳۸۰).....	۴۲
جدول ۶-۲- سختی کانی‌ها بر اساس مقیاس موس (وفائیان، ۱۳۷۶).....	۶۳
جدول ۷-۲- رابطه بین سختی موس و مقاومت فشاری تک‌محوره (Jimeno et al, 1995).....	۶۴
جدول ۸-۲- امتیازدهی به توده‌سنگ در رابطه با فاصله‌داری درزه‌ها (Hoseinie et al, 2008).....	۸۹
جدول ۹-۲- امتیازدهی به توده‌سنگ در رابطه با شیب درزه‌ها (زاویه بین امتداد چال و سطح درزه) (Hoseinie et al, 2008).....	۹۲
جدول ۱۰-۲- امتیازدهی به توده‌سنگ در رابطه با پرکننده درزه‌ها (زاویه بین امتداد چال و سطح درزه) (Hoseinie et al, 2008).....	۹۳
جدول ۱-۳- مقیاس سختی موس (Wilbur, 1982).....	۱۰۷
جدول ۲-۳- سختی (Wilbur, 1982).....	۱۰۷
جدول ۳-۳- بافت (Wilbur, 1982).....	۱۰۸
جدول ۴-۳- شکستگی (Wilbur, 1982).....	۱۰۸
جدول ۵-۳- شکل (Wilbur, 1982).....	۱۰۹
جدول ۶-۳- جدول رده بندی توده‌های سنگی بر اساس قابلیت تراشه شدن (محمدی و همکاران، ۱۳۸۳).....	۱۱۱
جدول ۷-۳- جدول امتیازدهی به پارامترها و تعیین اندیس قابلیت نفوذ در سنگ‌ها (حسینی، ۱۳۸۷).....	۱۱۴
جدول ۸-۳- پیش‌بینی قابلیت نفوذ در سنگ و نیز قابلیت ماشین‌کاری بر اساس RPi (حسینی، ۱۳۸۷).....	۱۱۴
جدول ۹-۳- جدول امتیازدهی به پارامترها و تعیین اندیس قابلیت حفاری توده‌سنگ‌ها (RD _i) (Hoseini et al, 2008).....	۱۱۷
جدول ۱۰-۳- پیش‌بینی سرعت حفاری بر اساس RD _i (Hoseini et al, 2008).....	۱۱۸
جدول ۱-۴- مشخصات ذخیره و عیار معدن باغک (کاوشگران، ۱۳۸۹).....	۱۲۹
جدول ۲-۴- پارامترهای طراحی برای محدوده کانسار باغک (کاوشگران، ۱۳۸۹).....	۱۲۹
جدول ۳-۴- مشخصات ذخیره و عیار معدن دردوی (کاوشگران، ۱۳۸۹).....	۱۳۲
جدول ۴-۴- پارامترهای طراحی برای محدوده کانسار دردوی (کاوشگران، ۱۳۸۹).....	۱۳۳
جدول ۱-۵- زون‌بندی معدن باغک همراه با جنس سنگ‌ها.....	۱۴۰
جدول ۲-۵- نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره در معدن باغک.....	۱۴۵
جدول ۳-۵- نتایج آزمایش مقاومت بار نقطه‌ای در معدن باغک.....	۱۴۶
جدول ۴-۵- مقدار سختی موس نمونه‌های سنگی معدن باغک.....	۱۴۸
جدول ۵-۵- بافت نمونه‌های سنگی معدن باغک.....	۱۴۹
جدول ۶-۵- سختی اشمیت نمونه‌های سنگی معدن باغک.....	۱۵۱

جدول ۵-۷- نتایج آزمایش چگالی و تخلخل معدن باغک.....	۱۵۵
جدول ۵-۸- سرعت حفاری در زون‌های مورد نظر معدن باغک.....	۱۵۹
جدول ۵-۹- مشخصات دستگاه‌های حفار و کمپرسورهای هوای فشرده معدن باغک.....	۱۵۹
جدول ۵-۱۰- اندیس قابلیت حفاری برای زون‌های مشخص شده معدن باغک.....	۱۶۱
جدول ۵-۱۱- مشخصات زون شماره ۲۵ معدن باغک.....	۱۶۳
جدول ۵-۱۲- مشخصات زون شماره ۱۱ معدن باغک.....	۱۶۴
جدول ۵-۱۳- جدول امتیازات نهایی بر اساس سیستم طبقه‌بندی RDi در معدن باغک.....	۱۶۵
جدول ۵-۱۴- جنس سنگ‌های زون‌های مختلف معدن دردوی.....	۱۷۱
جدول ۵-۱۵- نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره در معدن دردوی.....	۱۷۴
جدول ۵-۱۶- نتایج آزمایش مقاومت بارنقطه‌ای در معدن دردوی.....	۱۷۵
جدول ۵-۱۷- مقدار سختی موس نمونه‌های سنگی معدن دردوی.....	۱۷۶
جدول ۵-۱۸- بافت نمونه‌های سنگی معدن دردوی.....	۱۷۷
جدول ۵-۱۹- سختی اشمیت نمونه‌های معدن دردوی.....	۱۷۹
جدول ۵-۲۰- نتایج آزمایش چگالی و تخلخل در معدن دردوی.....	۱۸۲
جدول ۵-۲۱- سرعت حفاری در زون‌های مورد نظر معدن دردوی.....	۱۸۵
جدول ۵-۲۲- مشخصات دستگاه حفار در معدن دردوی.....	۱۸۵
جدول ۵-۲۳- اندیس قابلیت حفاری برای زون‌های مشخص شده معدن دردوی.....	۱۸۷
جدول ۵-۲۴- مشخصات زون شماره ۱ معدن دردوی.....	۱۸۹
جدول ۵-۲۵- مشخصات زون شماره ۱۹ معدن دردوی.....	۱۹۰
جدول ۵-۲۶- جدول امتیازات نهایی بر اساس سیستم طبقه‌بندی RDi در معدن دردوی.....	۱۹۱
جدول ۵-۲۷- مقایسه درصد انواع بافت در دو معدن باغک و دردوی.....	۱۹۵
جدول ۵-۲۸- مقایسه درصد مقاومت فشاری تک‌محوره در دو معدن باغک و دردوی.....	۱۹۶
جدول ۵-۲۹- مقایسه درصد سختی موس در دو معدن باغک و دردوی.....	۱۹۶
جدول ۵-۳۰- مقایسه درصد فاصله‌داری درزه‌ها در دو معدن باغک و دردوی.....	۱۹۶
جدول ۵-۳۱- مقایسه درصد زاویه بین امتداد چال و سطح درزه در دو معدن باغک و دردوی.....	۱۹۷
جدول ۵-۳۲- مقایسه درصد شاخص کیفیت حفاری (RDi) در دو معدن باغک و دردوی.....	۱۹۷
جدول ۷-۱- معدن باغک، زون شماره ۲.....	۲۱۲
جدول ۷-۲- معدن باغک، زون شماره ۳.....	۲۱۲
جدول ۷-۳- معدن باغک، زون شماره ۵.....	۲۱۳
جدول ۷-۴- معدن باغک، زون شماره ۶.....	۲۱۳
جدول ۷-۵- معدن باغک، زون شماره ۷.....	۲۱۴
جدول ۷-۶- معدن باغک، زون شماره ۹.....	۲۱۴
جدول ۷-۷- معدن باغک، زون شماره ۱۰.....	۲۱۵
جدول ۷-۸- معدن باغک، زون شماره ۱۱.....	۲۱۵

فهرست جداول

جدول ۷-۹- معدن باغک، زون شماره ۱۲.....	۲۱۶
جدول ۷-۱۰- معدن باغک، زون شماره ۱۳.....	۲۱۶
جدول ۷-۱۱- معدن باغک، زون شماره ۱۴.....	۲۱۷
جدول ۷-۱۲- معدن باغک، زون شماره ۱۵.....	۲۱۷
جدول ۷-۱۳- معدن باغک، زون شماره ۱۶.....	۲۱۸
جدول ۷-۱۴- معدن باغک، زون شماره ۱۷.....	۲۱۸
جدول ۷-۱۵- معدن باغک، زون شماره ۱۸.....	۲۱۹
جدول ۷-۱۶- معدن باغک، زون شماره ۱۹.....	۲۱۹
جدول ۷-۱۷- معدن باغک، زون شماره ۲۰.....	۲۲۰
جدول ۷-۱۸- معدن باغک، زون شماره ۲۱.....	۲۲۰
جدول ۷-۱۹- معدن باغک، زون شماره ۲۳.....	۲۲۱
جدول ۷-۲۰- معدن باغک، زون شماره ۲۴.....	۲۲۱
جدول ۷-۲۱- معدن باغک، زون شماره ۲۵.....	۲۲۲
جدول ۷-۲۲- معدن باغک، زون شماره ۲۶.....	۲۲۲
جدول ۷-۲۳- معدن باغک، زون شماره ۲۷.....	۲۲۳
جدول ۷-۲۴- معدن باغک، زون شماره ۲۸.....	۲۲۳
جدول ۷-۲۵- معدن باغک، زون شماره ۲۹.....	۲۲۴
جدول ۷-۲۶- معدن باغک، زون شماره ۳۰.....	۲۲۴
جدول ۷-۲۷- معدن باغک، زون شماره ۳۱.....	۲۲۵
جدول ۷-۲۸- معدن دروی، زون شماره ۱.....	۲۲۵
جدول ۷-۲۹- معدن دروی، زون شماره ۲.....	۲۲۶
جدول ۷-۳۰- معدن دروی، زون شماره ۴.....	۲۲۶
جدول ۷-۳۱- معدن دروی، زون شماره ۵.....	۲۲۷
جدول ۷-۳۲- معدن دروی، زون شماره ۶.....	۲۲۷
جدول ۷-۳۳- معدن دروی، زون شماره ۷.....	۲۲۸
جدول ۷-۳۴- معدن دروی، زون شماره ۸.....	۲۲۸
جدول ۷-۳۵- معدن دروی، زون شماره ۹.....	۲۲۹
جدول ۷-۳۶- معدن دروی، زون شماره ۱۰.....	۲۲۹
جدول ۷-۳۷- معدن دروی، زون شماره ۱۱.....	۲۳۰
جدول ۷-۳۸- معدن دروی، زون شماره ۱۲.....	۲۳۰
جدول ۷-۳۹- معدن دروی، زون شماره ۱۳.....	۲۳۱
جدول ۷-۴۰- معدن دروی، زون شماره ۱۵.....	۲۳۱
جدول ۷-۴۱- معدن دروی، زون شماره ۱۷.....	۲۳۲
جدول ۷-۴۲- معدن دروی، زون شماره ۱۸.....	۲۳۲

جدول ۴۳-۷ - معدن دروی، زون شماره ۱۹.....	۲۳۳
جدول ۴۴-۷ - معدن دروی، زون شماره ۲۱.....	۲۳۳
جدول ۴۵-۷ - معدن دروی، زون شماره ۲۲.....	۲۳۴
جدول ۴۶-۷ - پارامترهای مربوط به چگالی نمونه‌های معدن باغک.....	۲۳۴
جدول ۴۷-۷ - پارامترهای مربوط به چگالی نمونه‌های معدن دردوی.....	۲۳۵
جدول ۴۸-۷ - مشخصات نمونه‌های معدن باغک جهت اندازه‌گیری مقاومت فشاری تک‌محوره.....	۲۳۶
جدول ۴۹-۷ - مشخصات نمونه‌های معدن دردوی جهت اندازه‌گیری مقاومت فشاری تک‌محوره.....	۲۳۶
جدول ۵۰-۷ - مشخصات نمونه‌های معدن باغک جهت اندازه‌گیری مقاومت بار نقطه‌ای.....	۲۳۷
جدول ۵۱-۷ - مشخصات نمونه‌های معدن دردوی جهت اندازه‌گیری مقاومت بار نقطه‌ای.....	۲۳۷

فصل اول

مقدمه

۱.۱ مقدمه

عملیات حفاری در معادن از اهمیت بسیار زیادی برخوردار می‌باشد. در معدنکاری روباز، حفاری به عنوان اولین مرحله عملیات استخراج نقش بسیار تعیین کننده‌ای بر سایر مراحل استخراج دارد.

حفاری به معنی نفوذ^۱ در سنگ است. نفوذ در سنگ گاهی به منظور خرد کردن آن‌ها صورت می‌گیرد که با حفر چال‌های انفجاری^۲ و قرار دادن مواد منفجره در داخل آن‌ها و انفجار این مواد انجام می‌شود. این نوع حفاری را حفاری استخراجی^۳ می‌نامند. البته حفاری در معادن فقط به منظور استخراج نیست، بلکه قبل یا هنگام استخراج برای اکتشاف نیز انجام می‌پذیرد، که ممکن است به منظور کشف و پی بردن به وجود کانی یا ماده معدنی، یا پی بردن به شرایط کیفی سنگ‌ها با تهیه نمونه یا مغزه صورت گیرد (حفاری اکتشافی^۴) (اصانلو، ۱۳۸۲).

تورو^۵ در سال ۱۹۹۷، بیان کرد که، قابلیت حفاری اصطلاحی است که، تأثیر پارامترهای مختلف مؤثر بر عملکرد حفاری و سایش ابزار را توصیف می‌کند (Thuro, 1997).

روستان^۶ در سال ۱۹۹۸، قابلیت حفاری^۷ را به صورت زیر بیان نمود: مقاومت سنگ یا ترکیب کانی‌شناسی آن در برابر نفوذ، که توسط پارامترهای مختلف مهندسی سنگ، مانند: سختی، ساینده‌گی، بافت، ساخت و ویژگی‌های شکستگی آن کنترل می‌شود (Rustan, 1998).

¹ Penetration

² Blastholes

³ Production drilling

⁴ Exploration drilling

⁵ Thuro

⁶ Rustan

⁷ Drillability

حسینی و همکارانش در سال ۲۰۰۹، قابلیت نفوذ^۸ و قابلیت حفاری را به صورت تأثیر همزمان پارامترهای فیزیکی، مکانیکی و بافتی سنگ بر نرخ نفوذ سیستم‌های حفاری بیان کرد (Hoseinie et al, 2009).

۲.۱ هدف و ضرورت انجام تحقیق

امروزه کاربرد حفاری نیازمند شناخت کافی از عملیات آن می‌باشد تا امکان کاهش هزینه وجود داشته باشد. یک تخمین خوب و دقیق از میزان چالزنی برای بهینه سازی طول عمر و برنامه‌ریزی اقتصادی در هر پروژه حفاری در سنگ ضروری به نظر می‌رسد (Bilgesu, 1997).

بنابراین با توجه به هزینه بالا و ماشین‌آلات گران قیمت، شناخت تمامی پارامترهای دخیل در حفاری و بهینه‌سازی آن، شرایط را برای استخراج بهینه فراهم می‌سازد. شناخت محیط حفاری و خصوصیات توده‌سنگ برجا کمک بسیار زیادی به انتخاب نوع سیستم حفاری، تعیین تعداد ماشین-آلات حفاری، ارزیابی توان تولید معدن و پیش‌بینی سرعت حفاری خواهد بود (Hoseinie et al, 2008).

همچنین هزینه کل حفاری می‌تواند، با استفاده از پیش‌بینی نرخ نفوذ حفاری تخمین زده شود. همچنین می‌توان از این پیش‌بینی به منظور انتخاب مناسب‌ترین نوع ماشین حفاری برای شرایط مورد نظر استفاده کرد (Kahraman, 1999).

با توجه به مطالب بیان شده، این نتیجه را می‌توان بیان کرد که، عوامل متعددی در امر حفاری دخیل‌اند. برخی از عوامل بیان شده با قابلیت حفاری رابطه مستقیم و برخی دیگر رابطه عکس دارند که به تفصیل در فصل بعد به آن‌ها اشاره خواهد شد.

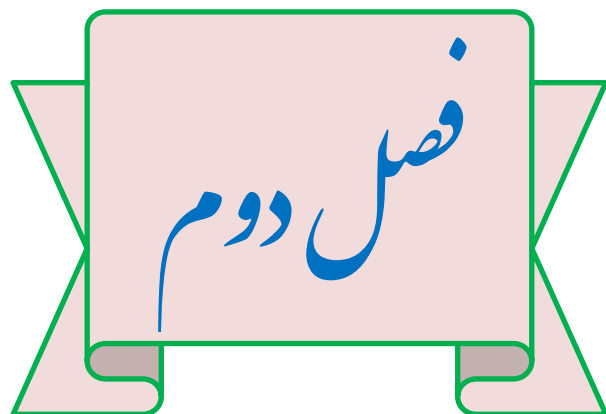
⁸ Penetrability

معادن سنگ آهن سنگان دارای وسعت زیاد و حجم بالای حفاری می باشد. با توجه به اینکه در این معادن، برای ارزیابی قابلیت حفاری توده سنگ زون های مختلف ساختاری، مطالعه ای صورت نگرفته است. لذا به نظر می رسد، جهت رسیدن به یک حفاری مطلوب باید مراحل زیر را طی نمود:

- تعیین عوامل مؤثر بر سرعت حفاری در معادن روباز.
- طبقه بندی توده سنگ های ترازهای مختلف معادن باغک و دردوی با استفاده از سیستم رده بندی RD_i.
- زون بندی معادن باغک و دردوی جهت تعیین قابلیت حفاری.
- ارائه یک رابطه ریاضی جهت تعیین سرعت حفاری در زون های مختلف این دو معدن.

۳.۱ ساختار پایان نامه

در این پایان نامه، در فصل دوم، پس از مروری بر مطالعات پیشین، عوامل متعددی از دستگاه حفار، مشخصات ماده سنگ و مشخصاتی از توده سنگ و محیط حفاری که به طور مستقیم یا غیر مستقیم بر قابلیت حفاری تأثیرگذارند، بیان شده است. در فصل سوم، چند مورد از سیستم های رده بندی که در زمینه قابلیت حفاری ارائه شده، آورده شده و پس از بررسی مزایا و معایب هر یک، سیستم رده بندی مناسب جهت تعیین قابلیت حفاری معادن باغک و دردوی انتخاب شده است. سپس در فصل چهارم به معرفی معادن سنگ آهن سنگان پرداخته شده است. در ادامه در فصل پنجم، تمامی مراحل که جهت تعیین قابلیت حفاری این معادن طی شده، بیان شده است، که در نهایت یک رابطه ریاضی، جهت تعیین سرعت حفاری در هر یک از معادن، تعیین شده و پس از زون بندی نهایی معادن مورد نظر، سرعت در هر یک از این زون ها به دست آمده است. در پایان، در فصل ششم، ابتدا نتایجی که از این تحقیق می توان گرفت ارائه شده، سپس پیشنهاداتی که جهت بهبود کار به نظر می رسد، ذکر شده است.



عوامل مؤثر بر قابلیت جاری توده-

سند

۱.۲ مقدمه

در معدنکاری روباز، حفاری به عنوان اولین مرحله عملیات استخراج نقش بسیار تعیین کننده‌ای بر سایر مراحل استخراج داشته و به عنوان بخش تفکیک ناپذیر عملیات استخراجی در معادن به شمار می‌رود. تاکنون روش مناسب‌تری برای جایگزینی این عملیات پیدا نشده است.

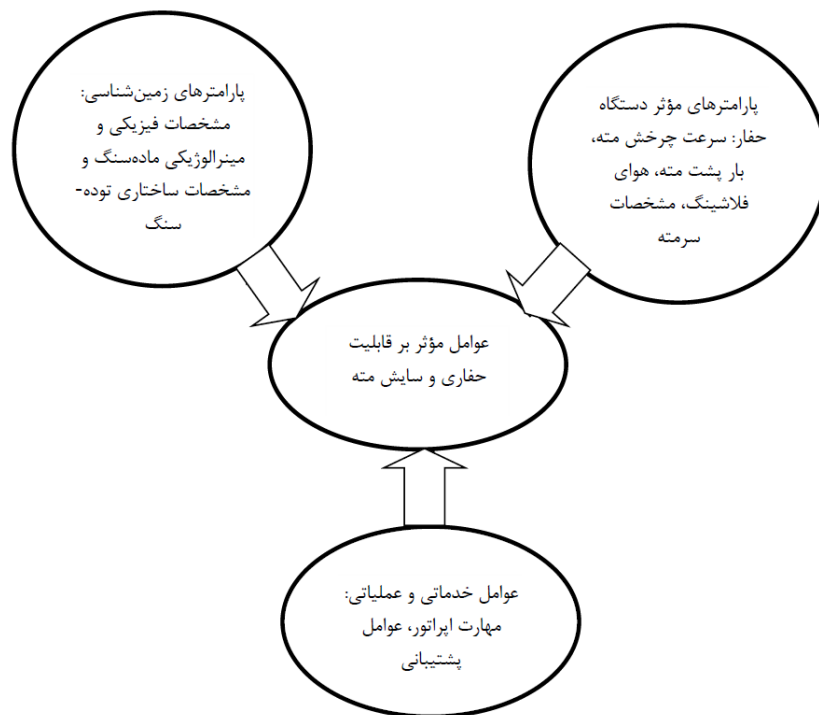
عملیات حفاری در معادن از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. حفاری و آتشیاری از مهم‌ترین مراحل عملیاتی در معادن روباز به شمار می‌رود. با پیشرفت تکنولوژی و علوم، این عملیات نیز به طریق علمی‌تر و با اصول پایدارتر اجرا می‌شود (کمالی و مهترپور، ۱۳۸۰).

برآورد قابلیت حفاری سنگ از جمله نیازهای مرحله طراحی و برنامه‌ریزی یک پروژه می‌باشد. به منظور دستیابی به یک برآورد خوب از قابلیت حفاری، باید عوامل مؤثر و میزان تأثیر آن‌ها را شناخت. بنابراین باید توجه داشت که در عملیات حفاری، عوامل متعددی بر میزان نفوذ تأثیرگذارند. برخی از این عوامل با تجهیزات به کار رفته مرتبط بوده و برخی دیگر مرتبط با پارامترهای سنگ می‌باشند.

این عوامل را می‌توان به دو گروه تقسیم کرد (Yarali & Kahraman, 2011; Yasar et al, 2011):

- عوامل قابل کنترل مانند: قطر و نوع سرمته، بار پشت مته، سرعت چرخش مته و فلاشینگ.
 - عوامل غیر قابل کنترل مانند: مشخصات سنگ و شرایط زمین‌شناسی.
- تورو^۱ در سال ۱۹۹۷، عوامل عمده مؤثر بر قابلیت حفاری را به سه دسته تجهیزات حفاری، پارامترهای ژئوتکنیکی و عوامل خدماتی و پشتیبانی، طبقه‌بندی نمود. در شکل (۱-۲)، می‌توان این عوامل را مشاهده نمود (Thuro, 1997).

¹.Thuro



شکل ۲-۱- پارامترهای مؤثر در قابلیت حفاری توده سنگ و سایش تجهیزات (Thuro, 1997)

همانطور که اشاره شد، تجهیزات حفاری که به عنوان پارامترهای قابل کنترل شناخته می‌شوند، پارامترهای مختلف دستگاه و سرمته را شامل می‌شوند. در مقابل، پارامترهای ژئوتکنیکی به عنوان پارامترهای غیر قابل کنترل معرفی شده و شامل خواص مختلف سنگ بکر و توده سنگ می‌باشند. عوامل خدماتی و پشتیبانی، نیز به معنای مدیریت مناسب عملیات، استفاده صحیح و نگهداری مستمر تجهیزات و ابزارها، نیروی کارگری و نظارت، تأمین انرژی، محل کار، آب و هوا و مواردی از این قبیل می‌باشد (معماریان و همکاران، ۱۳۸۵؛ یآوری، ۱۳۸۱).

در ادامه به توضیح مختصر هر یک از عوامل فوق پرداخته خواهد شد.

۲.۲ تجهیزات حفاری

هارتمن در کتاب اصول مهندسی معدن خود، متغیرهای اجرایی (عوامل مربوط به تجهیزات حفاری)، را به میزان زیادی قابل کنترل دانسته و این متغیرها را به دو دسته تقسیم کرده است (یآوری، ۱۳۸۱):

- توان دستگاه حفاری، انرژی ضربه زن و فرکانس ضربه (تعداد ضربات سرشته در واحد زمان)،

سرعت چرخش مته، بار پشت مته و میله مته

- خصوصیات و سرعت جریان سیال در گردش

در ادامه به شرح مهم ترین عوامل اشاره شده در بالا، پرداخته می شود.

۱.۲.۲ بار پشت مته

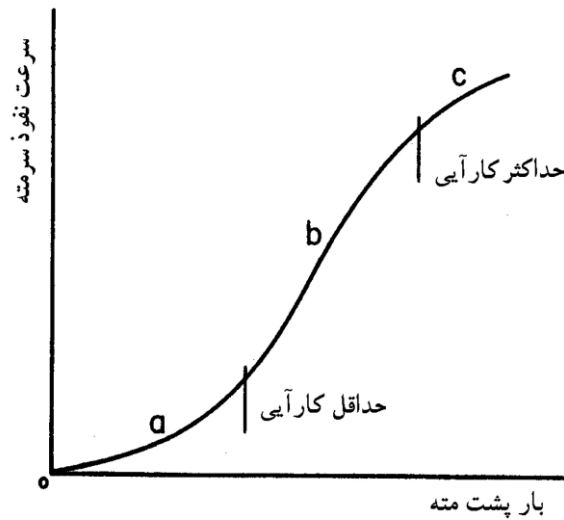
بار پشت مته^۱، عبارتست از مقدار باری که به مته وارد می آید و از این طریق موجب کنترل مسیر (از نظر انحراف مسیر چالزنی توسط مته) و افزایش مقدار چالزنی می گردد. اندازه آن بستگی به قطر مته، نوع سیستم چالزنی، مقاومت سنگ و نوع سرشته دارد و مقدار آن از عدد دو رقمی تا ۱۴۳۰ کیلوگرم به ازای هر سانتی متر مته (۸۰۰۰ پوند به ازای هر اینچ مته)، متغیر است. در جدول (۱-۲)، مقدار بار پیشنهادی برای تعدادی از انواع مته ها بر حسب قطر برای سنگ های سخت ارائه شده است. جهت افزایش سرعت حفاری به بار روی مته مناسب نیاز است تا ماشین بتواند بر مقاومت فشاری سنگ غلبه کند (اصانلو، ۱۳۸۲).

جدول ۱-۲- بار پیشنهادی برای قطرهای مختلف در سنگ های سخت (اصانلو، ۱۳۸۲)

قطر مته (اینچ)	بار پشت مته پیشنهادی (کیلوگرم)
۵	۹۰۷۰
۷	۱۵۸۷۲
۹	۲۷۲۱۰
۱۲	۳۴۰۱۲
۱۵	۵۴۴۲۰

کلیه منحنی های به دست آمده بین سرعت حفاری و بار پشت مته در سنگ های مختلف، عموماً شکل ظاهری یکسان و نسبتاً مشابهی دارند. با این وصف می توان شکل کلی تغییرات سرعت حفاری نسبت به تغییرات بار پشت مته را به صورت شکل (۲-۲)، نشان داد.

¹ Thrust



شکل ۲-۲- شکل کلی تغییرات سرعت حفاری نسبت به تغییرات بار پشت مته (Jimeno et al, 1995)

سه حالت مختلف برای کار سرشته‌ها وجود دارد:

الف- بار پشت مته کم

ب- بار پشت مته مناسب

ج- بار پشت مته زیاد

حداقل بار پشت مته، که با مقادیر کمتر از آن سنگ حفر نمی‌شود، از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$E_{mi} = 28.5 \times RC \times D \quad (۱-۲)$$

که در آن:

E_{mi} : حداقل بار پشت مته

RC : مقاومت فشاری سنگ (MPa)

D : قطر سرشته (in)

حداکثر بار پشت مته که با مقادیر بیش از آن سرشته گیر می‌کند، دو برابر مقدار قبلی فرض

می‌شود:

$$E_m = 2 \times E_{mi}$$

(۲-۲)

که در آن: E_m حداکثر بار پشت مته می باشد.

مقدار بار پشت مته حدی که سرمته می تواند تحمل کند و به قطر سرمته نیز بستگی دارد، از

معادله زیر به دست می آید:

$$E_L = 810 \times D^2$$

(۳-۲)

که در آن E_L بار پشت مته حدی اعمال شده به سرمته می باشد (Jimeno et al, 1995).

هارتمن در کتاب اصول مهندسی معدن خود، تأثیر بار پشت مته را بر سرعت نفوذ سیستم های حفاری

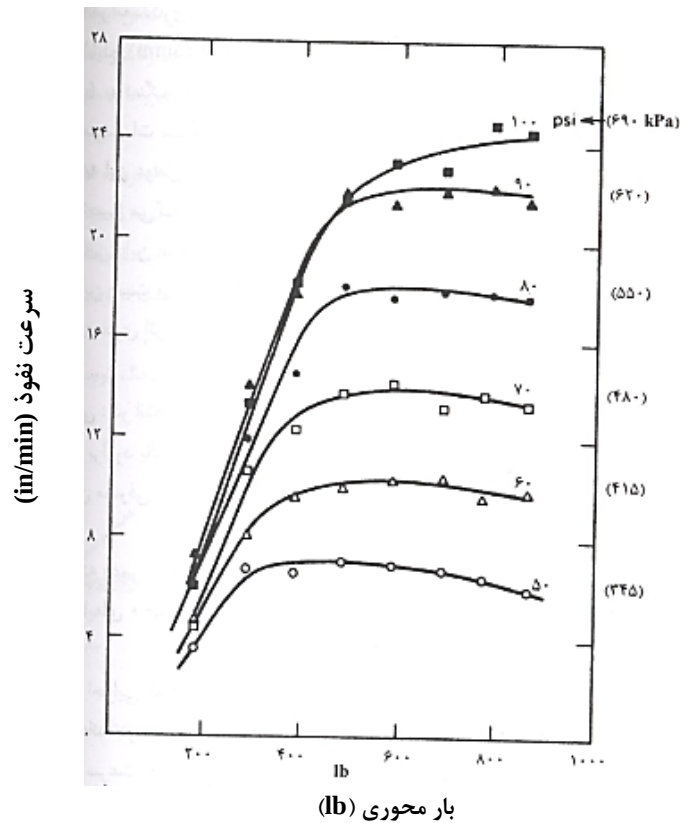
ضربه ای و دورانی، به صورت اشکال (۳-۲) و (۴-۲)، بیان کرده است.

در شکل (۳-۲)، تأثیر بار پشت مته، در سیستم حفاری ضربه ای بر سرعت نفوذ، برای فشارهای

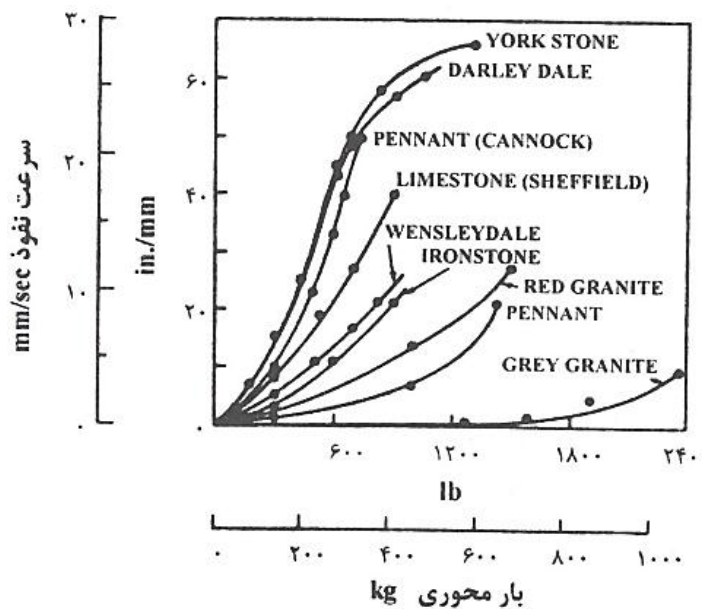
مختلف هوای فشرده در سنگ تآکونیت و در شکل (۴-۲)، تأثیر بار پشت مته در سیستم حفاری

دورانی بر سرعت نفوذ، در سنگ های مختلف با قطر سرمته ۴۳ میلی متر و سرعت دوران ۱۸۰ دور بر

دقیقه، مشاهده می شود.

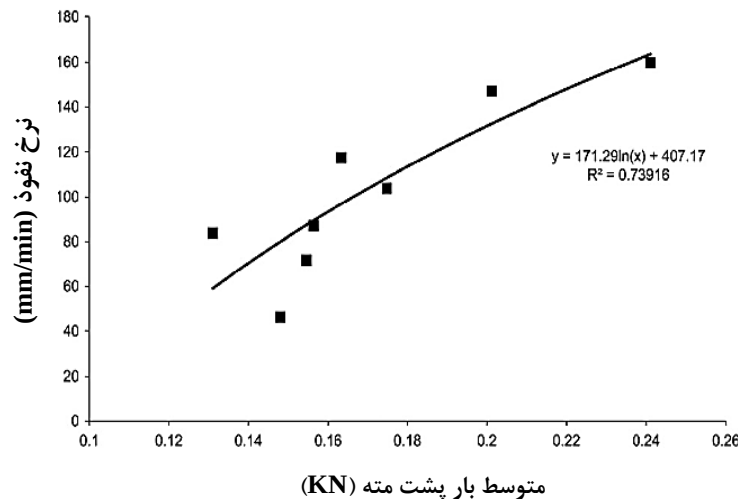


شکل ۲-۳- تأثیر بار پشت مته در سیستم حفاری ضربه‌ای بر سرعت نفوذ برای فشارهای مختلف هوای فشرده در سنگ تاکنونیت (باوری، ۱۳۸۱)



شکل ۲-۴- تأثیر بار پشت مته در سیستم حفاری دورانی بر سرعت نفوذ برای انواع سنگ‌های مختلف (باوری، ۱۳۸۱)

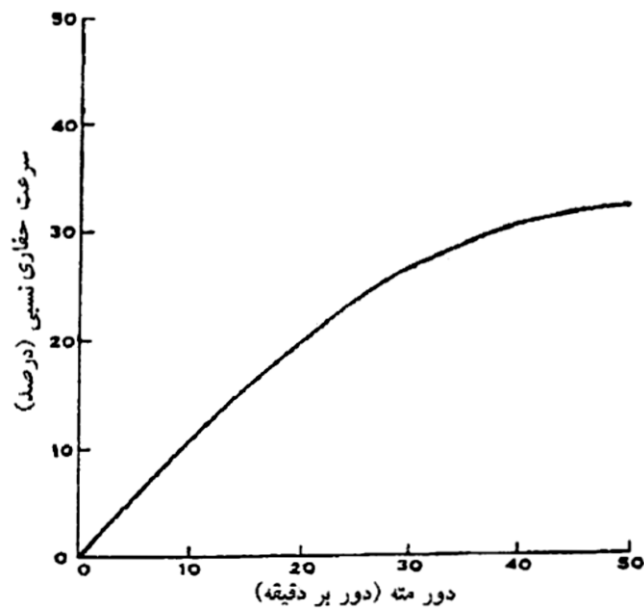
یاشار و همکارانش در سال ۲۰۱۱، رابطه بین بار پشت مته و نرخ نفوذ را در آزمایشگاه، بر روی نمونه‌های سیمانی به صورت شکل زیر به دست آوردند. همانطور که در شکل (۲-۵) مشاهده می‌شود، با افزایش بار پشت مته، نرخ نفوذ نیز افزایش یافته است (Yasar et al, 2011).



شکل ۲-۵- ارتباط بین متوسط بار پشت مته و نرخ نفوذ (Yasar et al, 2011)

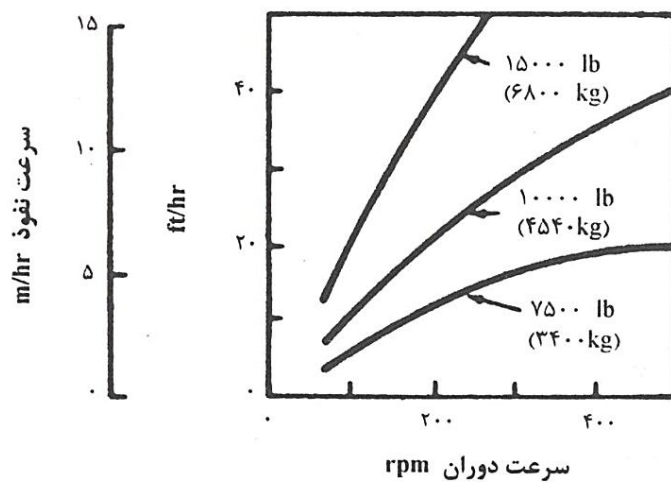
۲.۲.۲ سرعت چرخش مته

تعداد چرخش یا دور مته از اهمیت به‌سزایی در سرعت حفاری برخوردار است. این بدان علت است که، نفوذ در سنگ در اثر تماس مته با سنگ حاصل می‌شود و هر چه تعداد تماس بیشتر باشد، مقدار انرژی منتقل شده به سنگ نیز زیادتر است و لذا به نظر می‌رسد که با افزایش دور مته، سرعت حفاری نیز باید افزایش یابد. اما بین افزایش دور مته و سرعت حفاری رابطه کاملاً خطی مستقیم وجود ندارد. کاهش تعداد دور مته به دلیل کاهش تعداد تماس سر مته با سنگ موجب کاهش سرعت حفاری می‌شود. بالعکس افزایش تعداد چرخش مته موجب ازدیاد سرعت حفاری می‌شود. اما اگر تعداد دور مته در هر دقیقه بیش از حد افزایش یابد، به دلیل عدم تماس کافی سر مته با سنگ و عدم انتقال کامل انرژی، سرعت حفاری نه تنها ممکن است سیر صعودی نداشته باشد، بالعکس ممکن است ثابت مانده یا کاهش یابد، به عبارت دیگر بین افزایش دور مته در دقیقه و سرعت حفاری رابطه خطی مستقیم وجود ندارد (شکل ۲-۶) (اصانلو، ۱۳۸۲).



شکل ۲-۶- ارتباط بین دور مته و سرعت حفاری (بار روی مته ثابت است) (اصانلو، ۱۳۸۲)

همچنین هارتمن در کتاب اصول مهندسی معدن خود، تأثیر سرعت چرخش مته بر نرخ نفوذ را در سیستم حفاری دورانی برای سنگ دولومیت، به صورت شکل (۲-۷)، بیان کرده است.



شکل ۲-۷- اثر سرعت چرخش بر نرخ نفوذ برای بارهای محوری مختلف در سنگ دولومیت (یاوری، ۱۳۸۱)

۳.۲.۲ فلاشینگ

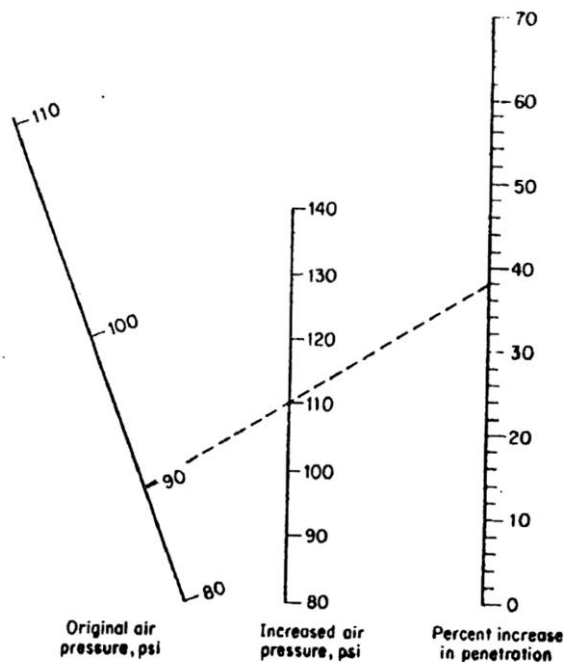
برای خروج ریزه‌های حفاری از ته چال از سیال‌هایی مانند هوای فشرده و آب استفاده می‌شود. لازم است که سرعت ماده شستشو از سرعت نهایی سقوط بزرگترین ذره جدا شده و یا کانی، بزرگتر باشد. در این صورت سنگ و یا کانی خرد شده بلافاصله از ته چال جدا شده و سرشته با سنگ و یا کانی ته چال تماس حاصل می‌کند و سرعت نفوذ تحت شرایط مساوی به حداکثر می‌رسد. در غیر این صورت سرشته ضربات خود را بر روی ریزه‌های حفاری جدا شده، که هنوز در ته چال باقی مانده‌اند وارد آورده و به ریزتر نمودن آن‌ها می‌پردازد، تا با توجه به ابعاد ریزه‌های حفاری، حمل آن‌ها از چال امکان‌پذیر شود (استوار، ۱۳۸۳).

از مهم‌ترین وظایف هوای فلاشینگ می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- خنک کردن و روغن کاری سرشته

- بیرون راندن خرده‌های چالزنی (Jimeno et al, 1995)

به تجربه ثابت شده که افزایش فشار هوا، موجب افزایش سرعت حفاری در سنگ خواهد شد. در شکل (۲-۸)، ملاحظه می‌شود که اگر فشار هوای ماشین حفاری از ۹۰ پوند بر اینچ مربع به ۱۱۰ پوند بر اینچ مربع افزایش یابد (شرایط حفاری از نظر نوع سنگ و اپراتور یکسان است)، مقدار نفوذ مته حفاری، ۳۸ درصد افزایش خواهد یافت (استوار، ۱۳۸۳).



شکل ۲-۸- تأثیر افزایش فشار هوا به روی سرعت حفاری (استوار، ۱۳۸۳)

همچنین اگر مقدار هوای فلاشینگ کمتر از میزان مورد لزوم باشد، اثرات منفی زیر ایجاد خواهد شد:

- کاهش سرعت چالزنی
- افزایش بار پشت مته مورد نیاز جهت ادامه چالزنی
- افزایش آسیب‌های وارده به دستگاه چالزنی به دلیل افزایش گشتاور چرخشی لازم جهت چرخاندن سرمته
- افزایش سایش سازه‌ها، لوله چالزنی و سرمته (Jimeno et al, 1995).

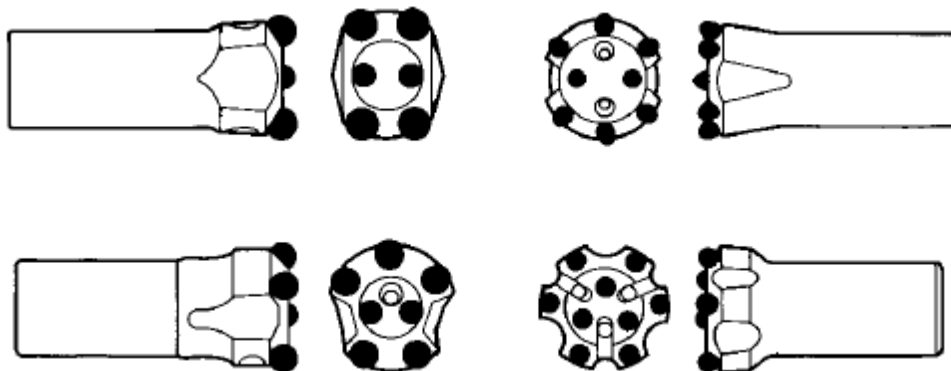
۴.۲.۲ مشخصات سرمته

سرمته حفاری به عنوان یک بخش حساس و بسیار مهم، تأثیرات چشمگیری در راندمان، سرعت و هزینه‌های حفاری دارد. تماس مستقیم دستگاه و سنگ توسط سرمته برقرار شده و لذا

سرعت حفاری و میزان قابلیت خردشوندگی سنگ به طور مستقیم به شکل، نوع و اندازه سرمته مربوط می شود (اصانلو، ۱۳۸۲).

در بین سرمته های مورد استفاده در ماشین های چالزنی ضربه ای، سرمته های دکه های از جایگاه ویژه ای برخوردارند. در اغلب شرایط زمین شناسی از سرمته های دکه ای استفاده می شود، بنابراین در اینجا به توضیح این نوع سرمته ها پرداخته می شود (معماریان و همکاران، ۱۳۸۵).

شکل (۲-۹)، سرمته های دکه ای سیستم های حفاری ضربه ای- چرخشی را در حفاری های زیرزمینی نشان می دهد (Thuro, 1997).

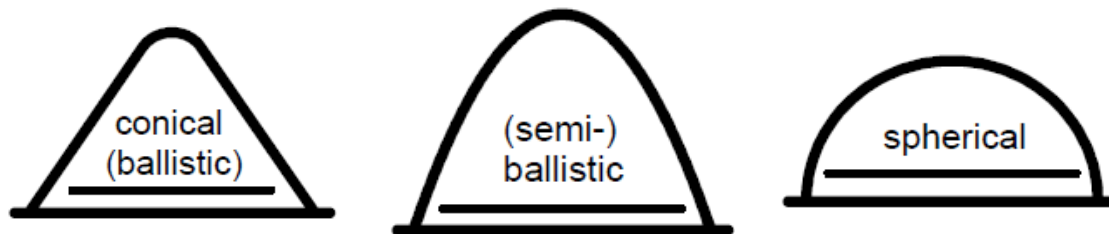


شکل ۲-۹- انواع سرمته های ۶، ۷، ۸ و ۹ دکه ای با سیستم های فلاشینگ متفاوت مورد استفاده در سنگ های سخت

(Thuro, 1997)

سرمته دکه ای از خمیره ای که ابزار واقعی چالزنی، یعنی دکه ها را در میان گرفته تشکیل شده است. این دکه ها از آلیاژ بسیار سخت کاربید- تنگستن و خمیره کبالت درست شده است و دارای سختی ۹/۵ در مقیاس موس می باشند. خواص این سرمته ها می تواند از طریق تفاوت تعداد دکه های نصب شده، ترکیب ساخت، شکل، هندسه و جانمایی دکه ها، کیفیت لحیم کاری و فولاد سرمته ها، سوراخ های شستشو و شیارهای زهکشی، با شرایطی که در محل وجود دارد، منطبق شود (Thuro, 1997).

در شکل (۲-۱۰)، سه نوع دکمه اصلی که در سرمت‌های سیستم‌های حفاری ضربه‌ای- دورانی استفاده می‌شود، نشان داده شده است.



ج- دکمه مخروطی شکل

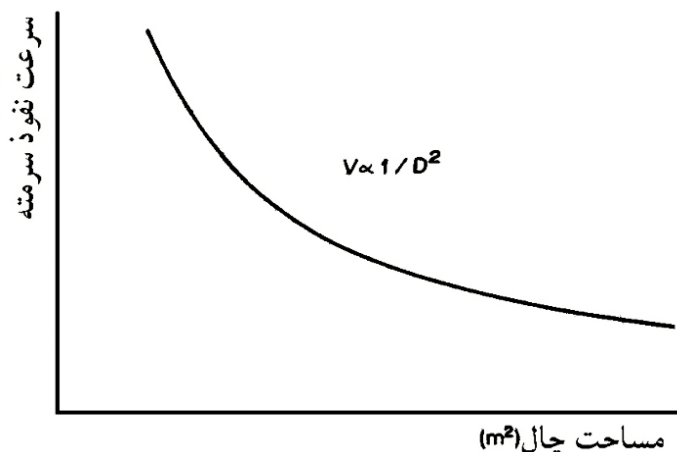
ب- دکمه نیمه گلوله‌ای شکل

الف- دکمه کروی شکل

شکل ۲-۱۰- انواع سرمت‌های مورد استفاده در سیستم‌های حفاری ضربه‌ای- چرخشی (Thuro, 1997)

قطر سرمت و در نهایت قطر چال نیز، یک پارامتر مهم در سرعت حفاری می‌باشد. هر چه قطر چال کمتر باشد، سرعت چالزنی بیشتر خواهد بود (استوار، ۱۳۸۳).

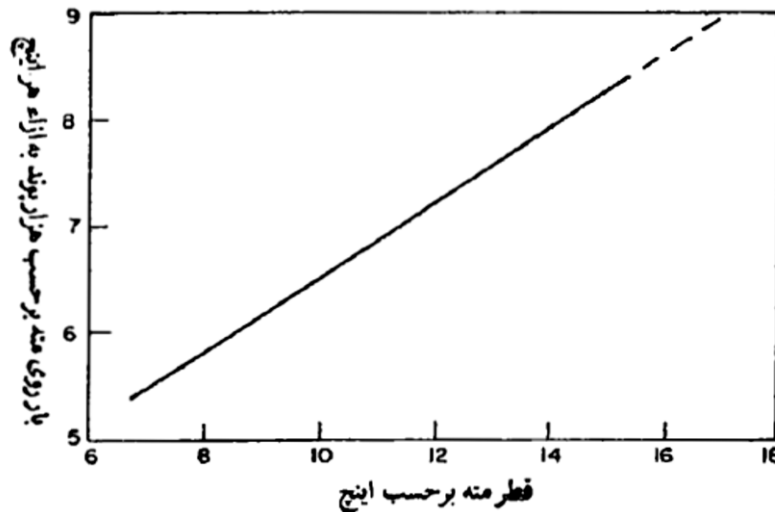
همانطور که در شکل (۲-۱۱)، مشاهده می‌شود، سرعت حفاری با عکس مجذور قطر متناسب است.



شکل ۲-۱۱- تأثیر قطر بر سرعت چالزنی (jimeno et al, 1995)

اندازه مته در تعیین بار پشت مته مؤثر است. از آنجایی که مته‌های با قطر بیشتر ظرفیت تحمل‌پذیری فشار بیشتری دارند، لذا بار بیشتری را می‌توانند تحمل کنند. به عنوان مثال برای مته‌های با قطر چهار اینچی می‌توان تا دو برابر مته‌های دو اینچی بار اعمال کرد. این امر می‌تواند از عواملی باشد که در سیستم چرخشی بار زیادتری مورد استفاده قرار می‌گیرد، چون در این نوع

سیستم، قطر مته‌ها معمولاً زیادتر از قطر مته‌های سیستم ضربه‌ای است. شکل (۲-۱۲)، ارتباط بین قطر مته و بار روی مته را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۲- ارتباط بین قطر مته و بار روی مته (اصانلو، ۱۳۸۲)

به دلیل افزایش سرعت حفاری نمی‌توان به طور دلخواه، در مته‌های قطور از بار روی مته زیاد استفاده کرد. بار روی مته زیاد موجب استهلاک مته و کاهش عمر آن و در نتیجه افزایش هزینه مته می‌گردد. ذکر این نکته نیز ضروری است که هزینه مته از عوامل مؤثر در تعیین هزینه حفاری است و تا ۶۰ درصد هزینه‌ها را می‌تواند شامل شود (اصانلو، ۱۳۸۲).

۳.۲ پارامترهای ژئوتکنیکی

همانطور که اشاره شد، دسته دوم از عوامل مؤثر بر قابلیت حفاری که به عنوان عوامل غیر قابل کنترل محسوب می‌شوند، خصوصیات ژئوتکنیکی سنگ می‌باشند. به طور کلی خصوصیات سنگ در زمینه نرخ نفوذ، به چهار دسته خصوصیات بافتی، مکانیکی، ساختاری و هوازدهی تقسیم می‌شوند، که می‌توان خصوصیات ساختاری و هوازدهی را در یک قالب و به عنوان مشخصات مربوط به توده‌سنگ در نظر گرفت. به همین دلیل باید سه بعد از ویژگی‌های سنگ شناسایی شود (معماریان و همکاران، ۱۳۸۵):

- ترکیب کانی شناسی و بافت سنگ

- ماده سنگ و رفتار مکانیکی آن

- توده سنگ (ساختمان و شرایط آن).

دو ویژگی اول وابستگی زیادی به یکدیگر دارند، به گونه‌ای که خصوصیات بافتی سنگ‌ها به وضوح بر رفتار مکانیکی و قابلیت حفاری تأثیر می‌گذارد.

همچنین شرایط توده سنگ وابستگی بسیار زیادی به تاریخچه زمین شناسی، وضعیت هوازدگی، تجزیه هیدروترمال و ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها دارد (Thuro, 1997).

بنابراین پارامترهای مؤثر بر قابلیت حفاری را می‌توان در دو گروه، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ماده سنگ و شرایط توده سنگ بررسی نمود. در جدول (۲-۲) نیز، پارامترهای مختلفی از ترکیب کانی شناسی و بافت سنگ، ماده سنگ و توده سنگ، که قابلیت حفاری را تحت تأثیر قرار می‌دهند، ذکر شده است.

جدول ۲-۲- پارامترهای مؤثر بر قابلیت حفاری (Thuro, 1997; Ersoy & Waller, 1995)

کانی	ترکیب کانی میکرو فابریک	اندازه و شکل دانه‌ها، درجه جهت یافتگی، میزان قفل شدگی، تناسب نسبی دانه‌ها، ضریب بافت، کانی‌های محتوی، مقدار کوارتز معادل، نوع و جنس خمیره، نوع سیمان و درجه سیمان شدن، تخلخل، ارتباط مرز و نقاط برخورد دانه‌ها و ...
سنگ	رفتار الاستیک- پلاستیک خواص مکانیکی سنگ	کارتخرب، مقاومت فشاری، مدول یانگ، مقاومت کششی، ساینده‌گی، سختی، نسبت بین مقاومت فشاری به کششی، چگالی سنگ، فشار منفذی و ...
توده سنگ	شرایط توده سنگ و ناپیوستگی‌ها	درزه‌ها، شکستگی‌ها، تورق ^۱ ، برگ وارگی ^۲ ، گسل‌ها، چین خوردگی لایه‌ها، جهت‌داری ^۳ ، فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها، وضعیت هوازدگی، تجزیه هیدروترمالی و دگرسانی، آب محتوی و...

¹ Cleavage

² Foliation

³ Anisotropy

با توجه به اهمیت مسئله، در طول سالیان گذشته، محققان مختلفی، مطالعات تئوری و تجربی زیادی را انجام داده و ارتباط نرخ نفوذ را با عوامل مختلف مؤثر بر آن بررسی کرده‌اند. در ادامه، به اهم این مطالعات و نتایج حاصل پرداخته می‌شود.

پروتودیاکانوف^۱ در سال ۱۹۶۲، از آزمایش ضریب مقاومت سنگ^۲، که نشانگر مقدار مقاومت سنگ در مقابل ضربه می‌باشد، برای اندازه‌گیری استحکام آن استفاده کرد (Yarali & Kahraman, 2011).

ماتورر^۳ در سال ۱۹۶۶، کارهای انجام شده پیشین در مورد چالزنی را به تفصیل مورد بررسی قرار داد. او به این نتیجه رسید که، زمانی که سرمته‌های چالزنی بارگذاری می‌شوند، مقاومت‌های کششی و برشی در سنگ، کنار سرمته به وجود آمده و بسته به اینکه بارگذاری، اول به کدام یک از این مقاومت‌ها برسد، گسیختگی‌هایی کششی و یا برشی در سنگ رخ می‌دهد. به علت پیچیدگی دینامیکی عملیات چالزنی، مدل‌های ارائه شده، بیش از حد ساده در نظر گرفته شده‌اند (Kahraman et al, 2003).

سینگ^۴ در سال ۱۹۶۹، بیان کرد که، نرخ نفوذ با مقاومت فشاری تک‌محوره رابطه عکس دارد (Kahraman, 1999).

پائون^۵ و همکارانش در سال ۱۹۶۹، تحقیقات میدانی را در زمینه حفاری ضربه‌ای انجام دادند. آن‌ها پس از انجام تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که، مقاومت فشاری تک‌محوره^۶، سختی شور^۷،

^۱ Protodyakonov

^۲ Coefficient of rock strength

^۳ Maurer

^۴ Singh

^۵ Paone

^۶ Uniaxial compressive strength

^۷ Shore hardness

^۸ در این روش، یک چکش از جنس کربید تنگستن (۲/۳ گرم وزن و ۵/۷۳ میلی‌متر قطر) به همراه یک الماس کوچک، از یک ارتفاع مشخص بر روی جسم فرود می‌آید. سختی شور از اندازه‌گیری ارتفاع واجهش به دست می‌آید. این ارتفاع به طور تصادفی بر روی عددی بین ۱۴۰-۰ که توسط دستگاهی که در بالای چکش الماسه قرار دارد، قرار می‌گیرد. طبق پیشنهاد ISRM، ساین آزمایش باید ۲۰ بار تکرار شود و از نتایج میانگین‌گیری شود.

مدول یانگ^۱ و مقاومت کششی^۲، رابطه قابل قبولی را با نرخ نفوذ در حفاری ضربه‌ای در نه نوع سنگ سخت و ساینده که شامل کانی‌هایی مانند کوارتز و فلدسپارند، نشان می‌دهند. همچنین آن‌ها بیان کردند که، هر کدام از این پارامترها به تنهایی نمی‌توانند نتایج رضایت‌بخشی را با نرخ نفوذ در حفاری ضربه‌ای نشان دهند (Kahraman et al, 2003).

فیش^۳ در سال ۱۹۶۸، مدلی را برای روش حفاری چرخشی ارائه داد. ایشان در این رابطه بیان کرد که، نرخ نفوذ در حفاری چرخشی با بار پشت مته^۴ رابطه مستقیم و با مقاومت فشاری تک‌محوره رابطه عکس دارد (Kahraman, 1999).

سلیم و بروک^۵ در سال ۱۹۷۰، آزمایشاتی را بر روی نه نمونه سنگ با استفاده از سیستم حفاری ضربه‌ای در آزمایشگاه انجام دادند. آن‌ها روابط خطی را میان نرخ نفوذ در حفاری ضربه‌ای و پارامترهایی از قبیل: مقاومت فشاری، مقاومت کششی، سختی شور، چگالی ظاهری، ضریب مقاومت سنگ و مدول یانگ به دست آوردند که، این روابط می‌توانست جهت به دست آوردن نرخ نفوذ در سیستم حفاری ضربه‌ای استفاده شود (Yarali & Kahraman, 2011).

سلمرولسن و بلندهایم^۶ در سال ۱۹۷۰، سختی، مقاومت، تردی و سایندگی را به عنوان مشخصاتی از سنگ که در عملیات چالزنی مهم هستند، معرفی کردند. همچنین آن‌ها با انجام آزمایشاتی بر روی سیستم‌های حفاری ضربه‌ای، رابطه خوبی بین نرخ نفوذ و شاخص نرخ چالزنی^۷ به دست آوردند (Yarali & Kahraman, 2011).

¹ Young's modulus

² Tensile strength

³ Fish

⁴ Trust

⁵ Selim & Bruce

⁶ Selmerolsen and Blindheim

⁷ Drilling Rate Index

هوسترولید و فره‌رست^۱ در سال ۱۹۷۱، مطالعه‌ای کامل در مورد چالزنی ضربه‌ای انجام داده و سپس مدلی برای چالزنی ضربه‌ای واقعی به کار بردند. آن‌ها به طور مفصل انرژی منتقل شده در چالزنی ضربه‌ای، محل برخورد پیستون فولادی، نیروی پیش‌برنده و سایر موارد را برای طراحی سیستم‌های حفاری ضربه‌ای مورد بررسی قرار داده و رابطه زیر را برای نرخ نفوذ ارائه دادند (Hustrulid & Fairhurst, 1971):

$$PR = \frac{E_i \times bpm \times T_R}{A_H \times E_V} \quad \text{رابطه (۱-۲)}$$

که در این رابطه:

E_i : انرژی هر بار دمیدن (in-lb) bpm : فرکانس دمیدن (blows/min)

T_R : نرخ انتقال انرژی A_H : مساحت چال (in^2)

E_V : انرژی به ازای واحد حجم (in-lb/in^3)

همانطور که در رابطه فوق مشاهده می‌شود، نرخ نفوذ با انرژی دمیدن و فرکانس دمیدن، رابطه مستقیم و با مساحت چال و انرژی ویژه رابطه معکوس دارد.

اشمیت^۲ در سال ۱۹۷۲، رابطه‌ای را بین نرخ نفوذ با پارامترهایی از قبیل: مقاومت فشاری، مقاومت کششی، سختی شور، چگالی، مدول یانگ، سرعت موج طولی، عرضی و نسبت پواسون بیان کرد. او به این نتیجه رسید که، در میان پارامترهای بیان شده، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول یانگ رابطه خوبی را با نرخ نفوذ نشان می‌دهند (Yarali & Kahraman, 2011).

تانداناند^۳ و آنگر^۴ در سال ۱۹۷۵، با انجام مطالعات میدانی در رابطه با نه سنگ سخت و ساییده، به این نتیجه رسیدند که، مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت کششی، سختی شور و مدول یانگ با نرخ نفوذ در حفاری ضربه‌ای رابطه نسبتاً خوبی دارند (Kahraman et al, 2000).

¹ Hustrulid & Fairhurst

² Schmidt

³ Tandanand

⁴ Unger

پایتانکار و میسرا^۱ در سال ۱۹۸۰، از خصوصیات سنگ مانند مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت کششی، انرژی مخصوص^۲، سختی شور و سختی موس دریافتند که این پارامترها هر کدام به تنهایی نمی‌توانند ارتباط خوبی با نرخ نفوذ در حفاری ضربه‌ای داشته باشند (Kahraman, 1999).

ویلبور^۳ در سال ۱۹۸۲، مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر قابلیت حفاری را سختی موس، بافت، شکستگی و ساختار توده سنگ ذکر کرده است (Hoseinie et al, 2009).

استوار^۴ اهمیت منشأ سنگ، سختی، اندازه دانه‌ها، مقاومت فشاری تک‌محوره، چگالی، سیستم درزه‌ها، و ساختار توده‌سنگ را در قابلیت حفاری بیشتر دانسته است (Hoseinie et al, 2009).

هوارس^۵ و همکارانش در سال ۱۹۸۶، رابطه‌ای قوی میان نرخ نفوذ و مشخصاتی از سنگ از قبیل: چگالی حجمی، مقاومت فشاری سنگ در حالت اشباع و تخلخل ظاهری بیان کردند. همچنین آن‌ها به این نتیجه رسیدند که رابطه میان نرخ نفوذ با سختی اشمیت و مقاومت فشاری سنگ در حالت خشک، رابطه‌ای قوی نمی‌باشد (Yarali & Kahraman, 2011).

هوارس و رولند^۶ در سال ۱۹۸۷، پس از بررسی رابطه میان ضریب بافت و نرخ نفوذ در سیستم حفاری ضربه‌ای، به این نتیجه رسیدند که، با افزایش ضریب بافت، قابلیت حفاری کاهش یافته و مقاومت فشاری سنگ افزایش می‌یابد (Howarth & Rowland, 1987).

تورو و اسپان^۷ در سال ۱۹۹۶، نرخ نفوذ را در جبهه کار تونل بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که، بین نرخ نفوذ در سیستم حفاری ضربه‌ای با مقاومت فشاری و کششی، یک رابطه لگاریتمی قوی وجود دارد (Thuro & Spaun, 1996).

¹ Paithankar and Misra

² Specific energy

³ Wilbur

⁴ Ostovar

⁵ Howarth

⁶ Rowland

⁷ Thuro & Spaun

اصانلو^۱، پارامترهایی مانند نیروی به هم چسبی سنگ، تخلخل، چگالی، بافت، مقاومت فشاری تک محوره، RQD، الاستیسیته، پلاستیسیته، چقرمگی، سختی و ساخت توده سنگ را به عنوان پارامترهای تأثیرگذار بر قابلیت حفاری معرفی کرده است (Hoseinie et al, 2009).

قهرمان^۲ در سال ۱۹۹۹، با استفاده از مدل رگرسیون چندگانه به منظور پیش‌بینی نرخ نفوذ در سیستم‌های حفاری چرخشی، DTH^۳ و سیستم‌های حفاری هیدرولیکی چکش بالا، به این نتیجه رسید که، پارامترهایی که در هر کدام از این سیستم‌های حفاری، نرخ نفوذ را تحت تأثیر قرار می‌دهند، متفاوت می‌باشند. به طوری که پارامترهای مؤثر بر نرخ نفوذ در سیستم حفاری چرخشی، وزن مته حفاری، سرعت چرخش مته حفاری، قطر مته و مقاومت فشاری سنگ می‌باشند. در سیستم حفاری DTH، این پارامترهای مؤثر، فشار عملیاتی، قطر پیستون و عدد چکش اشمیت بوده و در سیستم حفاری هیدرولیکی چکش بالا، فشار هوا، مقاومت فشاری سنگ و کوارتز محتوی، پارامترهای مؤثر بر نرخ نفوذ می‌باشند (Kahraman, 1999).

قهرمان و همکارانش در سال ۲۰۰۰، اندیس قابلیت حفاری جدیدی را ارائه دادند. آن‌ها با استفاده از این اندیس، مدلی ریاضی جهت نرخ نفوذ در سیستم‌های حفاری چرخشی به دست آوردند. همچنین آن‌ها روابط مهمی را بین این اندیس با مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت بار نقطه-ای، عدد چکش اشمیت، سرعت موج، مدول الاستیک و چگالی به دست آوردند (Kahraman et al, 2000).

قهرمان در سال ۲۰۰۲، روابطی میان نرخ نفوذ در سیستم‌های حفاری ضربه‌ای و چرخشی با تردی بیان کرد. ایشان به این نتیجه رسیدند که رابطه بین نرخ نفوذ و تردی، به روش اندازه‌گیری این پارامتر بستگی دارد (Kahraman, 2002).

¹ Osanloo

² Kahraman

³ Down the hole

ایشان در سال ۲۰۰۳، قابلیت چالزنی را در سیستم‌های حفاری ضربه‌ای، در هشت نوع سنگ بررسی کرد. در طول مطالعات نوع دستگاه چالزن، نوع سرمته، قطر و طول سوراخ، فشار هوا، فشار تغذیه نیرو، زمان چالزنی و ... ثبت شدند. نرخ نفوذ از این اندازه‌گیری‌ها محاسبه شده و برای تمامی مشاهدات به دست آمدند. پس از آن، ارتباط این اعداد با مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت کششی برزیلی، مدول الاستیک، مقاومت بار نقطه‌ای، سختی اشمیت، سرعت صوت و چگالی بررسی شد. از میان این پارامترها، انرژی ویژه، مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت کششی برزیلی، مقاومت بار نقطه‌ای و سختی اشمیت به عنوان مهم‌ترین پارامترهایی که بر نرخ نفوذ تأثیر می‌گذارند، انتخاب شدند. مقاومت بار نقطه‌ای و سختی اشمیت در مقایسه با مقاومت فشاری تک‌محوره و مقاومت کششی برزیلی به راحتی تعیین می‌شوند، زیرا ابزار این آزمایش‌ها قابل حمل بوده و می‌توانند در محل مورد نظر مورد استفاده قرار گیرند (Kahraman & Bilgin, 2003).

بیلگین^۱ و قهرمان در سال ۲۰۰۳، با استفاده از سیستم حفاری چرخشی و آزمایش بر روی چهارده نمونه سنگ که از هشت معدن روباز مختلف جمع‌آوری کردند، روابطی را بین مشخصات مختلف سنگ و نرخ نفوذ به دست آوردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که، پارامترهایی از قبیل: مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت بار نقطه‌ای، عدد چکش اشمیت و سختی سورشار، روابط خیلی قوی را با نرخ نفوذ نشان می‌دهند. همچنین بین پارامترهایی مانند، مقاومت کششی برزیلی و سختی نفوذگر مخروطی با نرخ نفوذ نیز، روابط خوبی برقرار می‌باشد (Kahraman & Bilgin, 2003).

حسینی و عطائی در سال ۱۳۸۸، با انجام آزمایشاتی بر روی نه نوع سنگ مختلف با استفاده از سیستم حفاری ضربه‌ای چکش بالا، رابطه بین نرخ نفوذ را با سه پارامتر مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت کششی برزیلی و مدول یانگ، به دست آورده و نتیجه‌گیری کردند که، با افزایش این سه پارامتر، سرعت حفاری در این سیستم با سرمته تیغه‌ای ضربدری، به صورت لگاریتمی کاهش می‌یابد.

¹ Bilgin

همچنین آن‌ها پیشنهاد کردند که، از میان سه پارامتر مقاومتی فوق، مقاومت فشاری تک‌محوره به عنوان، مشخصه مهندسی سنگ قرار گیرد (حسینی و عطائی، ۱۳۸۸).

حسینی و همکارانش در سال ۲۰۰۸، با ارائه سیستم رده‌بندی جدیدی با عنوان اندیس قابلیت حفاری توده‌سنگ^۱، به منظور پیش‌بینی کیفی قابلیت حفاری، با استفاده از مدلسازی فیزیکی در آزمایشگاه، به این نتیجه رسیدند که، پارامترهای مؤثر ماده‌سنگ بر نرخ نفوذ، بافت، سختی موس و مقاومت فشاری تک‌محوره می‌باشند (Hoseinie et al, 2008).

یارعلی^۲ و قهرمان در سال ۲۰۱۱، بیان کردند که، تحقیقاتی در زمینه تردی^۳ که یکی از پارامترهای مؤثر بر قابلیت حفاری می‌باشد، انجام شده است. اما هیچ تعریف واحد یا روش اندازه‌گیری مشخصی در بین محققان مختلف وجود ندارد. آن‌ها با انجام آزمایشاتی بر روی ۳۲ نوع سنگ مختلف، ارتباط بین اندیس قابلیت حفاری^۴ و انواع مختلف تردی به دست آوردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که، اندیس قابلیت حفاری با برخی از انواع تردی رابطه‌ای قوی دارد، به طوری که با افزایش تردی، اندیس قابلیت حفاری کاهش می‌یابد (Yarali & Kahraman, 2011).

چنیانی^۵ و همکارانش در سال ۲۰۱۲، به منظور ارائه مدلی عملی و ساده، جهت پیش‌بینی قابلیت حفاری در سیستم حفاری دورانی، مطالعاتی را در معدن مس سرچشمه انجام دادند. آن‌ها با در نظر گرفتن پارامترهای مختلفی از ماده‌سنگ، توده‌سنگ و ماشین حفار شامل: مقاومت فشاری تک-محوره، سختی اشمیت، کوارتز محتوی، اندازه خردایش، شیب درزه، آلتراسیون، سرعت چرخش مته و بار پشت مته و استفاده از آنالیزهای آماری، معادلات تجربی را به منظور پیش‌بینی سرعت حفاری و به طور خاص، اندیس ویژه قابلیت حفاری توده‌سنگ^۶ توسعه دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که،

¹ Rock mass Drillability Index

² Yarali

³ brittleness

⁴ Drilling Rate Index

⁵ Cheniany

⁶ Specific Rock Mass Drillability Index

مهمترین پارامترهای مؤثر، پارامترهای مقاومتی شامل: مقاومت فشاری تک محوره و عدد سختی اشمیت می باشد و شیب ناپیوستگی ها کمترین ارتباط را با اندیس ویژه قابلیت حفاری توده سنگ دارد (Cheniany et al, 2012).

همچنین حسینی و همکارانش در سال ۲۰۰۹ و قویدل در سال ۱۳۹۰، تحقیقات انجام شده در زمینه پارامترهای مؤثر فیزیکی و مکانیکی بر قابلیت حفاری را جمع آوری نمودند که در جدول (۲-۳)، ذکر شده است.

جدول ۲-۳- تحقیقات انجام شده در زمینه تأثیر پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ بر قابلیت حفاری (برگرفته از Hoseinie et al, 2009; قویدل، ۱۳۹۰)

Researcher	Year	PI	n	WV	SE	DRI	CRS	S.H	To	YM	TS	CS	Sc.H	D	We	Ab	Ha	QC	Ma	GS	B	Te
Simon	1956								✓			✓					✓					
Teale	1965				✓																	
Hucka	1965											✓										
Protodyakonov	1962	✓																				
Maurer	1966											✓										
Fish	1968											✓										
Paone et al	1969						✓	✓		✓	✓	✓										
Singh	1969											✓										
S-Olsen and Blendheim	1970					✓															✓	
Selim & Bruce	1970				✓																	
Martini	1971					✓							✓									
Hustrulid and Fairhurst	1971, 1972				✓																	
Mellor	1972				✓																	
Schmidt	1972			✓				✓		✓	✓	✓		✓								
Tandanand and Unger	1975						✓															
Paithankar & Mirsha	1980												✓				✓					
Rabia and Brook	1980, 1981							✓														
Wilbur	1982																✓					✓
Rabia	1982				✓																	
Clark	1982											✓										

Researcher	Year	PI	n	WV	S.E	DRI	CRS	S.H	To	YM	TS	CS	Sc.H	D	We	Ab	Ha	QC	Ma	GS	B	Te
Howarth	1986		✓	✓						✓	✓	✓	✓									✓
Howarth & Rowland	1987																					✓
West	1989															✓						
Bilgin et al	1993					✓					✓	✓		✓								
Ersoy and Waller	1995									✓	✓	✓		✓	✓			✓	✓	✓		✓
Jimeo et al	1995																✓					
Andreev	1995																				✓	
Serradj	1996	✓										✓										
Thuro and Spaun	1996								✓	✓	✓	✓										
Thuro	1997											✓										
Rao et al.	1998				✓						✓	✓				✓	✓			✓		✓
Shimada and Matsui	1998							✓			✓	✓										
Osanloo	1998											✓					✓					✓
Kahraman	1999			✓					✓	✓		✓		✓								
Kahraman et al.	2000			✓					✓	✓		✓	✓	✓								
Li et al	2000												✓									
Kahraman et al	2000										✓	✓										✓
Altindog	2000-2					✓															✓	
Liu et al.	2002					✓															✓	
Kahraman	2002					✓															✓	
Plinninger et al.	2002															✓						
Ersoy	2003				✓							✓										
Kahraman et al	2003			✓	✓							✓										
Bilgin & Kahraman	2003							✓				✓	✓									
Izquierdo and Chiang	2004				✓							✓										
Tanaino	2005				✓							✓										
Akun and Karpuz	2005				✓							✓										
Schormair et al.	2006																	✓				✓
Singh et al.	2006							✓					✓									

Researcher	Year	PI	n	WV	S.E	DRI	CRS	S.H	To	YM	TS	CS	Sc.H	D	We	Ab	Ha	QC	Ma	GS	B	Te
K.B.Chary et al	2006			✓		✓														✓	✓	
Yarali	2007					✓														✓		
Ataei and Hoseinie	2008															✓						
Hoseinie etal.	2008											✓					✓		✓		✓	
Hoseinie etal.	2009									✓		✓					✓				✓	
Adebayo et al.	2010					✓																
Altindag	2010					✓																
Yarali & Kahraman	2010					✓																
Yarali & Kahraman	2011					✓					✓	✓										
Niyazi Bilim	2011		✓											✓								
Yarali & Kahraman	2011					✓						✓	✓							✓	✓	
Yarali & Soyer	2011					✓						✓	✓							✓	✓	
V.C. Kelessidis	2011					✓						✓										
Cheniany et al.	2012												✓						✓			

که در این جدول، Te: بافت، GS: اندازه دانه^۱، Ma: ماتریکس^۲، QC: کوارتز محتوی^۳، Ha: سختی^۴، Ab: ساینده^۵، We: هوازدگی^۶، D: چگالی^۷، Sc.H: سختی اشمیت، CS: مقاومت فشاری، TS: مقاومت کششی، YM: مدول یانگ، To: چقرمگی^۸، S.H: سختی شور، CRS: ضریب مقاومت سنگ، DRI: اندیس نرخ نفوذ^۹، S.E: انرژی ویژه^۱، WV: سرعت موج^۲، n: تخلخل^۳، PI: اندیس پروتودیاکانوف^۴.

¹ Grain size
² Matrix
³ Quartz constant
⁴ Hardness
⁵ Abrasivity
⁶ Weathering
⁷ Density
⁸ Toughness
⁹ Drilling rate index

۱.۳.۲ خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ماده سنگ

تا به حال بیشترین تحقیقات در مورد نرخ نفوذ در زمینه شرایط سنگ بکر انجام گرفته است. همانطور که اشاره شد، محققان متعددی مطالعات تئوریک و تجربی فراوانی انجام داده و نرخ نفوذ را با خواص گوناگونی از سنگ ارتباط داده‌اند (معماریان و همکاران، ۱۳۸۵). در ادامه این بخش از تحقیق، به برخی از مهم‌ترین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی ماده سنگ و خصوصیات توده سنگ که بر قابلیت حفاری تأثیر می‌گذارند، اشاره می‌شود.

۱.۱.۳.۲ اندازه و شکل دانه‌ها

از نظر شکل دانه‌ها هر چه بافت سنگ دارای کانی‌های مسطح و دانه‌های کروی باشد، در مقایسه با بافت سنگ‌های دارای کانی‌های گوشه‌دار و کشیده، زبری کمتری دارد و لذا در حفاری نیز سایش کمتری ایجاد کرده و قابلیت حفاری بهتری نسبت به حالت دیگر دارد (عطائی و همکاران، ۱۳۸۷).

راکسبروک و ریسپین^۵ در سال ۱۹۷۲، اندیسی به نام اندیس زبری^۶ معرفی کردند. این اندیس بدون بعد می‌باشد. اندیس زبری از جمع وزن تجمعی اندازه ذرات به دست می‌آید (Altindag, 2003). آلتینداگ در سال ۲۰۰۳، با بررسی ۱۹ چال انفجاری در سنگ آهک که با سیستم‌های حفاری ضربه‌ای حفر شده بودند، اندیس زبری و متوسط اندازه خرده‌های حفاری را در هر یک از چال‌ها به دست آورده و ارتباط هر یک از این پارامترها را با نرخ نفوذ به صورت شکل‌های (۲-۱۳) و (۲-۱۴)، ارائه داد (Altindag, 2003).

¹ Specific energy

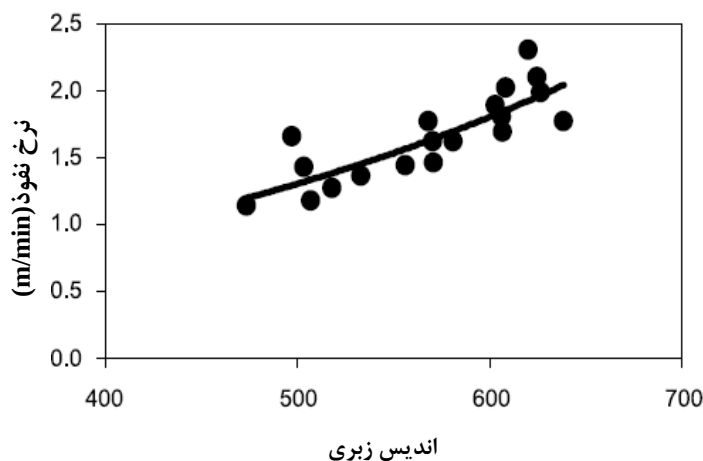
² P-wave velocity

³ porosity

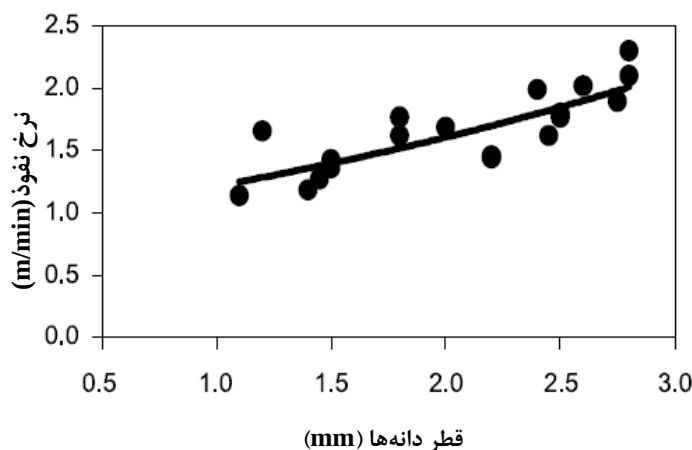
⁴ Protodyakonov index

⁵ Roxborough & Rispin

⁶ Coarseness Index



شکل ۲-۱۳- ارتباط بین اندیس زبری و نرخ نفوذ در سنگ آهک (Altindag, 2003)



شکل ۲-۱۴- ارتباط بین متوسط اندازه خرده‌های حفاری و نرخ نفوذ در سنگ آهک (Altindag, 2003)

همانطور که در اشکال بالا مشاهده می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که، با افزایش اندازه دانه‌ها و اندیس زبری نرخ نفوذ افزایش می‌یابد، بالعکس هر چه دانه‌های سنگ کوچکتر و ریزتر باشد، بافت سنگ چگال‌تر شده و نرخ نفوذ کاهش می‌یابد. همچنین با استفاده از اندیس زبری و متوسط اندازه دانه‌های حاصل از چال‌های انفجار، می‌توان نرخ نفوذ را تخمین زد.

در تقسیم‌بندی رایج در حفاری، بافت سنگ‌ها بر اساس دو عامل اندازه و شکل در چهار گروه تقسیم‌بندی می‌شوند: دانه‌ای (مانند گرانیت)، پورفیری، شیشه‌ای، تخریبی (مانند ماسه سنگ). مشخص‌ترین بافت در این تقسیم‌بندی بافت دانه‌ای است، که در سنگ‌های آذرین با توجه به اندازه دانه‌ها، انواع آن در چند زیرگروه تقسیم‌بندی می‌شود (اصانلو، ۱۳۸۲):

- ۱- خیلی درشت با دانه‌های بزرگتر از ۱۰ میلی‌متر
- ۲- درشت با دانه‌های ۵ تا ۱۰ میلی‌متر
- ۳- متوسط با دانه‌های ۵-۲ میلی‌متر
- ۴- ریزدانه با دانه‌های ۰/۲۵ تا ۲ میلی‌متر
- ۵- بسیار ریزدانه با دانه‌های کوچکتر از ۰/۲۵ میلی‌متر

۲.۱.۳.۲ ارزیابی کمی بافت سنگ

روش ارزیابی کمی بافت سنگ شامل ۴ مرحله است (Howarth & Rowland, 1987):

- ۱- اندازه‌گیری و تحلیل گردی ذرات
- ۲- اندازه‌گیری و تحلیل کشیدگی ذرات
- ۳- اندازه‌گیری و کمی سازی جهت‌گیری ذرات
- ۴- وزن‌دهی نتایج بر اساس درجه تراکم ذرات

روند تحلیل بصورت فرمول زیر خلاصه می‌شود:

$$TC = AW \left[\left(\frac{N_0}{N_0 + N_1} \times \frac{1}{FF_0} \right) + \left(\frac{N_0}{N_0 + N_1} \times AR_1 \times AF_1 \right) \right] \quad (۴-۲)$$

که در آن:

TC: ضریب بافت

AW: وزن دادن به مساحت (دانسیته تراکم دانه‌ها)

N_0 : تعداد دانه‌های با نسبت طول به قطر کمتر از ۲

N_1 : تعداد دانه‌های با نسبت طول به قطر بیشتر از ۲

FF_0 : میانگین حسابی فاکتور شکل برای دانه‌های N_0

AR_1 : میانگین حسابی نسبت طول بر قطر در دانه‌های N_1

AF_1 : فاکتور زاویه که برای ذره‌های N_1 محاسبه می‌شود.

وزن مساحت (AW) به صورت زیر تعریف می‌شود:

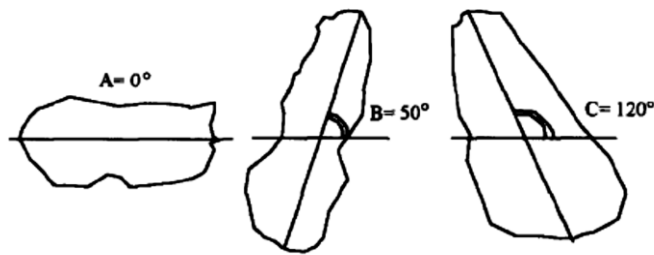
$$(5-2) \quad AW = (\text{مساحت ناحیه مرجع}) / (\text{مساحت دانه‌های درون مرز ناحیه مرجع})$$

وزن مساحت بر اساس چگالی تراکمی دانه‌ها در داخل مرز ناحیه مرجع، محاسبه می‌شود. تأثیر فاکتور وزن مساحت در سنگ‌های رسوبی مانند ماسه سنگ، سیلت‌استون و سنگ آهک مشخص می‌باشد، اما این فاکتور در سنگ‌های کریستالین، مانند گرانیت و دیوریت تأثیری ندارد. فاکتور شکل در رابطه ضریب بافت، معرف انحراف دانه از حالت گرد بودن است. این انحراف به دو صورت به وجود می‌آید. به صورت درازشدگی شکل یا افزایش ناصافی سطح نمونه. فاکتور شکل یا فاکتور کشیدگی دانه از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$(6-2) \quad F_s = \frac{4\pi(\text{مساحت})}{(\text{محیط})^2} = \text{فاکتور شکل}$$

مقدار این فاکتور از صفر برای دانه‌های خیلی ناصاف تا یک برای دانه‌های کاملاً کروی شکل متغیر است. زمانی که یک دانه از حالت کروی بودن خارج می‌شود، مقدار این فاکتور نیز کاهش پیدا می‌کند. در واقع زمانی که گوشه‌داری، درازشدگی و زبری دانه‌ها افزایش می‌یابد، سایش مته افزایش و نرخ نفوذ کاهش خواهد یافت. نتایج حاصل از شکل دانه‌های سنگ نشان می‌دهد که، گرانیت در مقایسه با دیوریت، سنگ آهک، ماسه‌سنگ و سیلت‌استون دارای فاکتور شکل کمتر و در نتیجه گوشه‌دارتر می‌باشد (Ersoy & Waller, 1995).

زاویه بین قطر بزرگ دانه و جهت افق را فاکتور زاویه می‌نامند. ماکزیمم مقدار این زاویه ۱۸۰ درجه می‌باشد (شکل ۲-۱۵).



شکل ۲-۱۵ - مفهوم فاکتور زاویه (Ersoy & Waller, 1995)

فاکتور زاویه برای دانه‌های کشیده و طویل که نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک آن‌ها بیش از ۲ باشد محاسبه می‌گردد. تفاوت زاویه‌ای در ۹ کلاس دسته‌بندی شده، که وزن هر کلاس در جدول (۲-۴)، نشان داده شده است.

جدول ۲-۴ - روش وزن‌دهی به تفاوت‌های زاویه‌های دانه‌های کشیده (Ersoy & Waller, 1995)

ردیف	دامنه	وزن (i)
۱	$0 < \theta_{DMAX} \leq 10$	۱
۲	$10 < \theta_{DMAX} \leq 20$	۲
۳	$20 < \theta_{DMAX} \leq 30$	۳
۴	$30 < \theta_{DMAX} \leq 40$	۴
۵	$40 < \theta_{DMAX} \leq 50$	۵
۶	$50 < \theta_{DMAX} \leq 60$	۶
۷	$60 < \theta_{DMAX} \leq 70$	۷
۸	$70 < \theta_{DMAX} \leq 80$	۸
۹	$80 < \theta_{DMAX} \leq 90$	۹

این فاکتور از جمع کردن وزن هر کلاس و تقسیم آن بر کل اعداد زاویه‌ای در هر کلاس به شرح رابطه (۲-۷) محاسبه می‌شود:

$$AF_1 = \sum_{i=1}^9 \left[\frac{X_i}{\frac{N(N-1)}{2}} \right] i \quad (2-7)$$

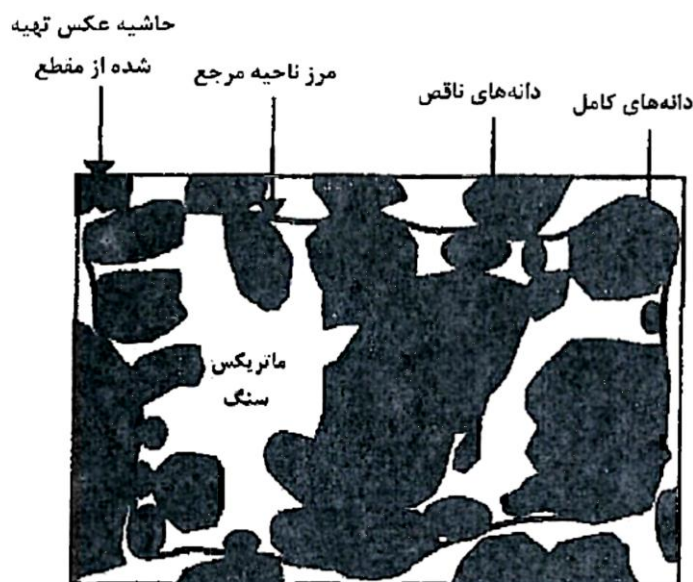
که در آن:

N: تعداد کل دانه‌های کشیده و طویل

X_i : شماره تفاوت زاویه‌ای در هر کلاس

i : فاکتور وزن دهی و شماره کلاس

برای محاسبه ضریب بافت سنگ، ابتدا از سنگ مورد نظر دو عدد مقطع نازک در جهات عمود بر هم تهیه می‌شود. سپس از مقاطع تهیه شده در زیر میکروسکوپ عکسبرداری می‌شود. عکس‌های تهیه شده وارد نرم‌افزار اتوکد^۱ شده و دیجیتایز می‌شوند. پس از دیجیتالی شدن عکس‌ها ابتدا یک محدوده مرجع^۲ یا محدوده دید بر روی مقاطع مشخص می‌شود. این محدوده شامل تمامی دانه‌های کامل قابل مشاهده در عکس بوده و لذا دانه‌های ناقص موجود در حاشیه عکس در نظر گرفته نمی‌شوند (شکل ۲-۱۶) (عطائی و همکاران، ۱۳۸۷).



شکل ۲-۱۶- شمای کلی یک مقطع نازک برای محاسبه ضریب بافت (Ersoy & Waller, 1995)

پس از انجام مراحل فوق در نرم‌افزار اتوکد، دور هر یک از دانه‌های موجود در محدوده دید مقطع خط بسته کشیده می‌شود. سپس در نرم‌افزار، محیط، مساحت، قطر بزرگ و قطر کوچک هر

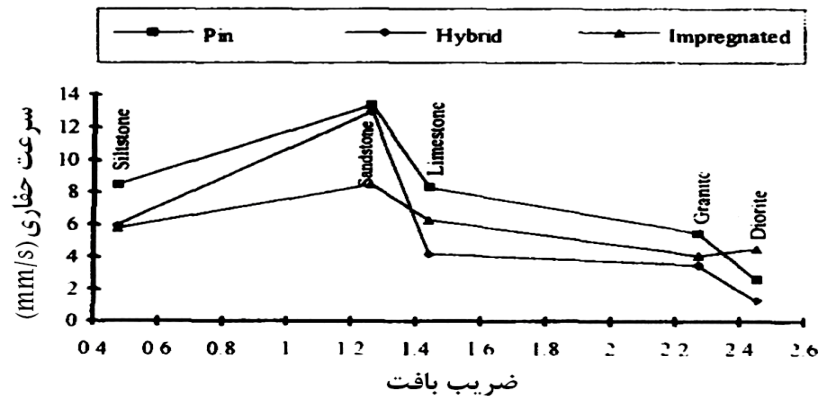
^۱. Autocad

^۲. Reference Boundry

دانه محاسبه می‌شود. سپس از نتایج حاصل از محاسبات مذکور پارامترهای موجود در رابطه ضریب بافت تعیین شده و میزان ضریب بافت محاسبه می‌شود (عطائی و همکاران، ۱۳۸۷).

ارزوی و والر در سال ۱۹۹۵، با بررسی ارتباط بین ضریب بافت و پارامترهای مختلف به نتایج زیر رسیدند (Ersoy & Waller, 1995):

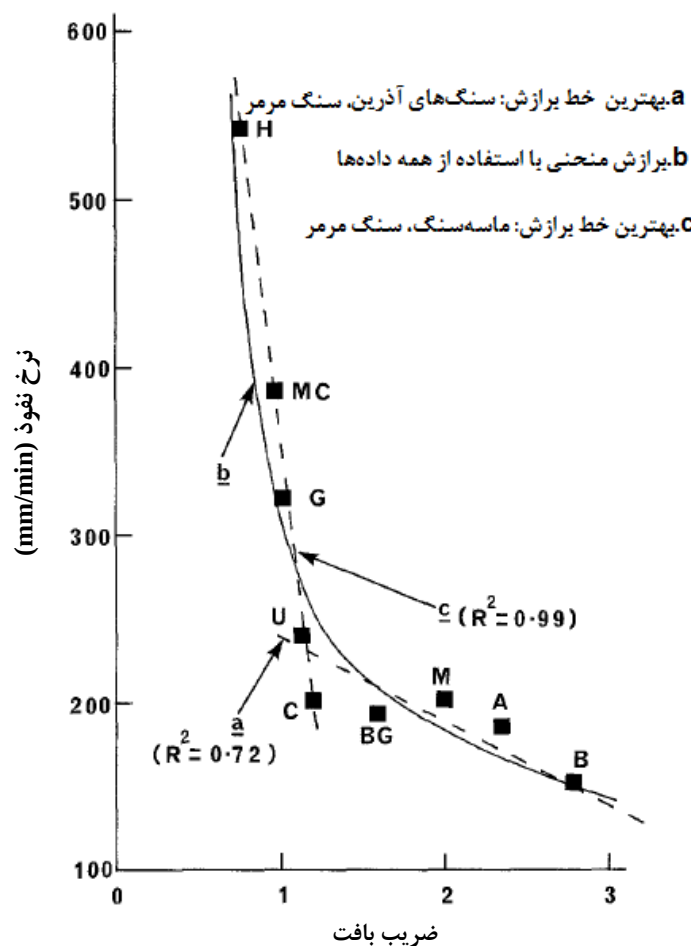
- ضریب بافت و فاکتور شکل، دارای رابطه قوی با ضریب همبستگی $0/94$ می‌باشد.
- بین فاکتور ساینده‌گی شیمازک و ضریب بافت نیز ارتباط خوبی با ضریب همبستگی $0/83$ وجود دارد. به طوری که با افزایش این فاکتور، ضریب بافت افزایش می‌یابد.
- همچنین ضریب همبستگی بین چگالی و سختی شور با ضریب بافت نیز، به ترتیب $0/73$ و $0/69$ می‌باشد و با افزایش چگالی و سختی شور، این ضریب نیز افزایش می‌یابد.
- سنگ‌های کریستالین نسبت به سنگ‌های رسوبی دارای ضریب بافت بیشتری می‌باشند.
- همچنین آن‌ها، مثالی از ارتباط بین ضریب بافت سنگ و رفتار سرمته‌های الماسه و PDC در حین حفاری با سرعت چرخش ۱۱۵۰ دور بر دقیقه را مطابق (شکل ۲-۱۷)، بیان کردند. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، ماسه‌سنگ از سایر سنگ‌ها متفاوت عمل می‌کند. مته‌های PDC، بیشترین نرخ نفوذ را در ماسه‌سنگ‌ها دارند. علت این تفاوت در ماسه‌سنگ به مقدار خمیره سیلیکاته، تخلخل و ضعف در اتصال دانه‌ها مربوط می‌شود، که موجب افزایش نرخ نفوذ در سرمته می‌شود (Ersoy & Waller, 1995).



شکل ۲-۱۷- ارتباط ضریب بافت و سرعت حفاری اکتشافی در سه نوع سرشته مختلف (Ersoy & Waller, 1995)

هوارس و رولند در سال ۱۹۸۷، رابطه بین ضریب بافت و نرخ نفوذ را در سنگ‌های مختلف

بررسی کرده و نتایج کار خود را در شکل (۲-۱۸)، ارائه دادند.



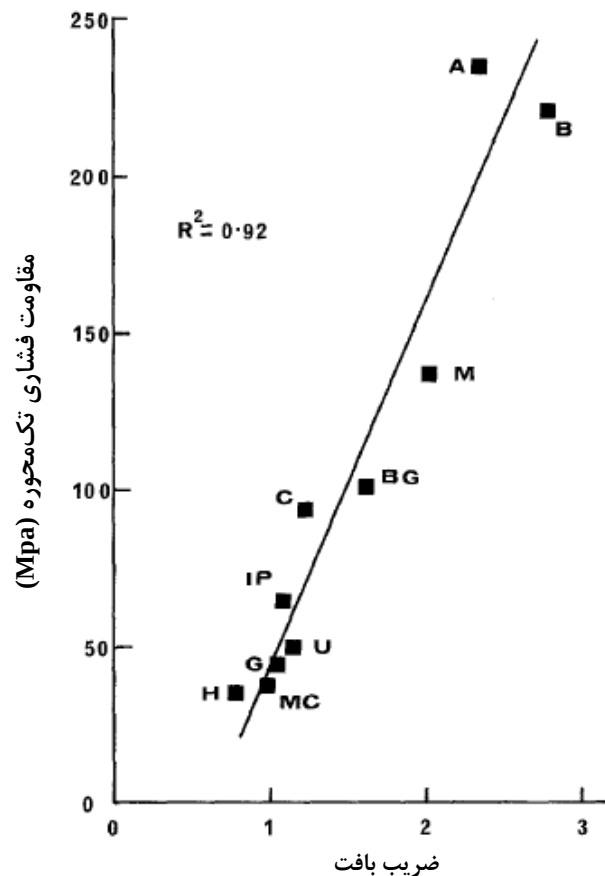
شکل ۲-۱۸- رابطه بین سرعت حفاری و ضریب بافت (Howarth & Rowlands, 1987)

همانطور که در شکل (۲-۱۸)، مشاهده می‌شود، دو خط با بهترین برازش می‌توانند از میان داده‌ها بگذرند، که منحنی b را به طور تقریبی پیوشاند. خط a، بهترین تناسب را با داده‌های سنگ-های آذرین و مرمر ($R^2=0/72$)، نشان می‌دهد و خط c، با داده‌های ماسه‌سنگ و مرمر تناسب دارد ($R^2=0/99$).

نرخ نفوذ، با افزایش مقدار ضریب بافت کاهش می‌یابد، اما سنگ‌های آذرین و ماسه‌سنگ‌ها متفاوت عمل می‌کنند. مشاهده می‌شود که هر تغییر کوچک (که این تغییر به علت تغییر مقدار خمیره پلی سیلیکاته ایجاد می‌شود)، در مقدار ضریب بافت ماسه‌سنگ‌ها، تغییر بسیار بزرگی را در نرخ نفوذ ایجاد می‌کند، در حالی که در سنگ‌های آذرین، اگر تغییرات بزرگی در مقدار ضریب بافت ایجاد شود (که این تغییر به علت شکل و درجه به هم قفل‌شدگی دانه‌ها ایجاد می‌شود)، تنها تغییر کوچکی در نرخ نفوذ ایجاد خواهد شد (Howarth & Rowlands, 1987).

با توجه به شکل فوق می‌توان گفت، فرآیند حفاری و مکانیزم شکست در سه گروه سنگ‌های بالا، مرتبط با یکدیگر و وابسته به ضریب بافت می‌باشند. مرمرها حد فاصل بین سنگ‌های آذرین و ماسه‌سنگ‌ها می‌باشند، بنابراین ویژگی‌های هر دو گروه را به نمایش می‌گذارند. دانه‌های کلسیت متبلور هستند، اگر چه دارای ارتباط سستی می‌باشند، بنابراین به ماسه‌سنگ‌ها شباهت دارند. درجه ارتباط بین نرخ نفوذ و ضریب بافت به قدری بالا می‌باشد که می‌توان گفت، این ضریب تأثیر مهم و قابل توجهی بر نرخ نفوذ سیستم‌های حفاری و سرمت‌های الماسه‌ای دارد.

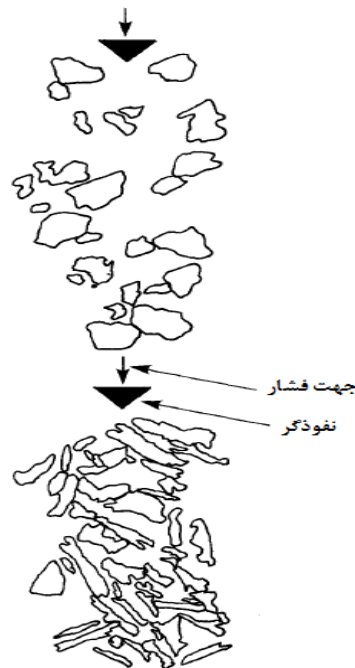
همچنین آن‌ها در این تحقیق رابطه بین مقاومت فشاری تک‌محوره و ضریب بافت را مطابق شکل (۲-۱۹)، به دست آورده و مشاهده کردند که، این دو پارامتر دارای ارتباطی قوی می‌باشند، به طوری که با افزایش ضریب بافت، مقاومت فشاری سنگ افزایش و در نتیجه نرخ نفوذ در سنگ کاهش می‌یابد (Howarth & Rowlands, 1987).



شکل ۲-۱۹- رابطه بین ضریب بافت و مقاومت فشاری تک محوره (Howarth & Rowlands, 1987)

لیندکوئیست^۱ در سال ۱۹۸۴، نشان داد که، شکست برای کاهش فشار، به طور گسترده‌ای در طبیعت وجود دارد و شکست در راستای بیشترین فشار اتفاق می‌افتد. از آنجایی که در حفاری، نفوذ معمولاً توسط یک گوه انجام می‌شود، از طرفی، ضریب بافت نیز، شکل دانه‌ها، جهت‌یافتگی و درجه به هم قفل‌شدگی دانه‌ها را مدل می‌کند. بنابراین می‌توان گفت که یک بافت قفل‌شده، یک سد فیزیکی در مقابل نفوذ محسوب می‌شود (شکل ۲-۲۰) (Howarth & Rowlands, 1987).

¹ Lindqvist



شکل ۲-۲۰- نمایش مقاومت بافت در برابر شکست در حال بارگذاری با یک نفوذگر گوه‌ای (Howarth & Rowlands, 1987)

۳.۱.۳.۲ درجه سیمانی شدن و نوع ماتریکس

مهم‌ترین خصوصیت فیزیکی سنگ‌ها، یعنی نیروی به هم چسبی، حاصل نیروی جاذبه بین مولکول‌های یک جسم یا ماده است. سنگ‌ها را بر اساس میزان نیروی به هم چسبی به چهار دسته تقسیم می‌کنند (اصانلو، ۱۳۸۲):

الف) سنگ سخت: به سنگی گفته می‌شود که تحت تأثیر نیروی به هم چسبی ذرات آنها با یکدیگر کاملاً مرتبطند و برای خرد کردن آنها نیروی زیادی لازم است (مانند کوارتز و سنگ‌های حاوی کوارتز)، به همین علت حفاری این سنگ‌ها دشوار است. اما از طرفی چون به طور معمول درزه و شکاف ندارند، دیواره چال یا چاه‌های حفر شده در این نوع سنگ‌ها به لوله محافظ و یا سایر سیستم‌های نگه‌دارنده نیاز ندارد.

ب) سنگ سیمان‌های: به سنگی گفته می‌شود که کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده آنها توسط رس یا سیلیس یا کانی دیگری به یکدیگر مرتبط و سیمان‌ه شده‌اند. در بعضی موارد تورم حاصل در سیمان بعضی از این سنگ‌ها به هنگام حفاری ممکن است به انسداد ته چال یا چاه منجر شود.

ج) سنگ غیر سیمان‌های یا شل: به سنگی گفته می‌شود که سیمان ندارد (مانند ماسه یا گراول). دیواره چال یا چاه اکتشافی یا استخراجی حفر شده در میان این سنگ‌ها، باید بلافاصله با لوله‌های ویژه‌ای محافظت شوند.

د) سنگ روان: به سنگی گفته می‌شود که به آسانی مورد هجوم و در دسترس آب قرار می‌گیرد و به سرعت خاصیت نیمه جامد خواهد یافت. مانند: ماسه ریز، رس حاوی مقدار کمی ماسه و لوم ماسه‌ای.

با افزایش کیفیت سیمانی شدن و نیز افزایش مقاومت سیمان سنگ، قابلیت حفاری سنگ کاهش پیدا می‌کند.

۴.۱.۳.۲ چگالی

چگالی یک سنگ نسبت جرم مخصوص سنگ (ρ_s) به جرم مخصوص آب (ρ_w) یا نسبت وزن مخصوص سنگ (γ_s) به وزن مخصوص آب (γ_w) است (وفائیان، ۱۳۷۶).

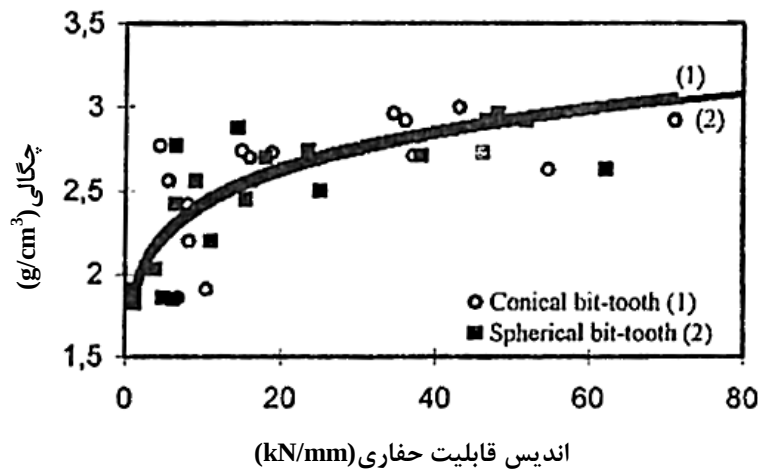
از آن جایی که چگالی سنگ با سرعت حفاری رابطه عکس دارد، هر چه سنگ متراکم‌تر و چگال‌تر باشد، سرعت حفاری کمتر خواهد بود.

جدول (۲-۵)، چگالی برخی از کانی‌های شاخص در حفاری را نشان می‌دهد.

جدول ۲-۵- چگالی برخی از کانی‌های شاخص در حفاری (فهیمی فر و سروش، ۱۳۸۰)

نوع کانی	چگالی	نوع کانی	چگالی
هالیت	۲/۱-۲/۶	بیوتیت	۲/۸-۳/۱
ژیپس	۲/۳-۲/۴	دولومیت	۲/۸-۳/۱
سرپانتین	۲/۳-۲/۶	انیدریت	۲/۹-۳
اورتوکلاز	۲/۵-۲/۶	پیروکسن	۳/۲-۳/۶
کالسدون	۲/۶-۲/۶۴	الیوین	۳/۲-۳/۶
کوارتز	۲/۶۵	باریت	۴/۳-۴/۶
پلاژیوکلاز	۲/۶-۲/۸	مگنتیت	۴/۴-۵/۲
کلریت	۲/۶-۳	پیریت	۴/۹-۵/۲
کلسیت	۲/۷	گالن	۷/۴-۷/۶
مسکویت	۲/۷-۳	ایلیت	۲/۶-۳

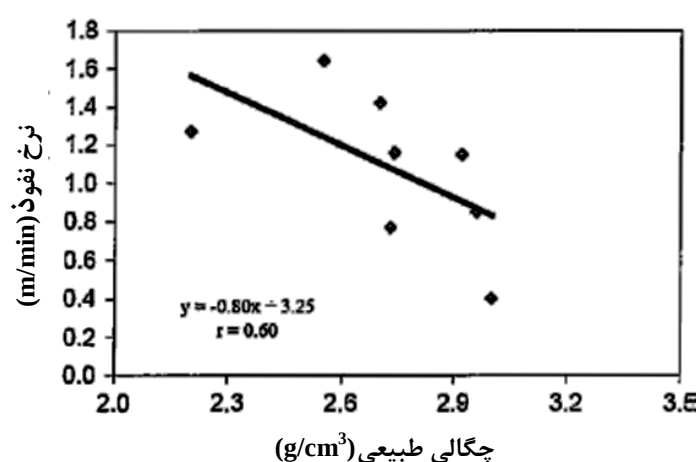
قهرمان^۱ و همکارانش در سال ۲۰۰۰، با جمع‌آوری ۲۲ نمونه سنگ از معادن مختلف روباز و کواری، با استفاده از سیستم حفاری دورانی، رابطه بین نرخ نفوذ و چگالی را مطابق شکل (۲-۲۱)، به دست آوردند. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، شیب خط سرمته‌های مخروطی بیشتر از شیب خط سرمته‌های کروی می‌باشد. این بدان معنی است، زمانی که ویژگی‌های سنگ ثابت فرض شوند، اندیس قابلیت حفاری سرمته‌های کروی بیشتر از سرمته‌های مخروطی می‌باشد و برای رسیدن به عمق نفوذ مشخص در یک جنس سنگ، نیرویی که برای سرمته‌های کروی لازم است، بیشتر از نیروی لازم برای سرمته‌های مخروطی می‌باشد (Kahraman et al, 2000).



شکل ۲-۲۱- ارتباط چگالی سنگ و سرعت حفاری دورانی (Kahraman et al, 2000)

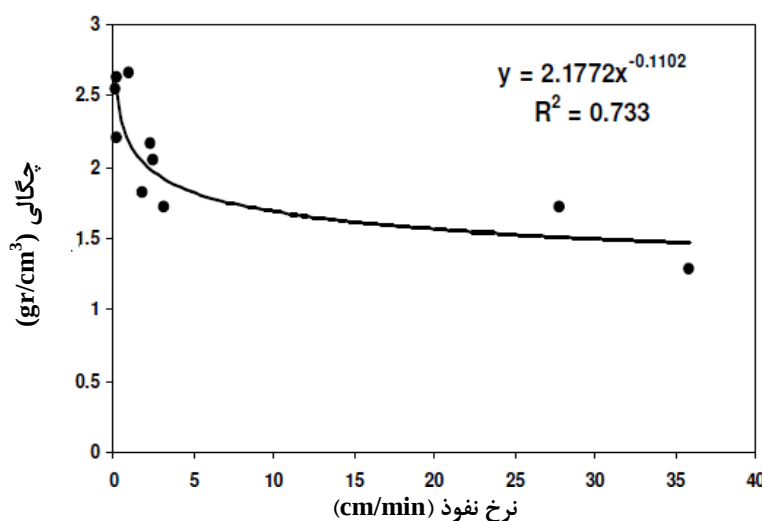
در شکل فوق، ضریب همبستگی برای نمودار شماره ۱، ۰/۷۶ و برای نمودار شماره ۲، ۰/۸ می- باشد.

همچنین این محققین در سال ۲۰۰۳، با استفاده از سیستم حفاری ضربه‌ای و تعیین ارتباط بین چگالی و نرخ نفوذ در هشت نمونه سنگ جمع‌آوری شده از معادن روباز و بزرگراه‌ها، به این نتیجه رسیدند که بین این دو، ارتباط ضعیفی وجود دارد. ولی در نهایت می‌توان گفت که، با افزایش چگالی در سنگ، نرخ نفوذ کاهش و اندیس قابلیت حفاری افزایش می‌یابد (شکل ۲-۲۲) (Kahraman et al, 2003).



شکل ۲-۲۲- ارتباط چگالی سنگ و سرعت حفاری ضربه‌ای (Kahraman et al, 2003)

بیلیم^۱ در سال ۲۰۱۱، ده نوع سنگ مختلف از جمله: آندزیت، مرمر، توف، تراورتن، سنگ آهک و ... را از معادن روباز ترکیه جمع‌آوری نمود. ایشان از هر نوع سنگ ده نمونه انتخاب و نرخ نفوذ را در هر نوع سنگ با استفاده از سیستم حفاری دورانی با سرعت چرخش ۱۴۷۹ rpm، به دست آورد. همچنین ایشان با تعیین چگالی این ده نوع سنگ، ارتباط خوبی را بین نرخ نفوذ و چگالی مطابق شکل (۲-۲۳)، به دست آورد (Bilim, 2011).



شکل ۲-۲۳- ارتباط بین چگالی و نرخ نفوذ (Bilim, 2011)

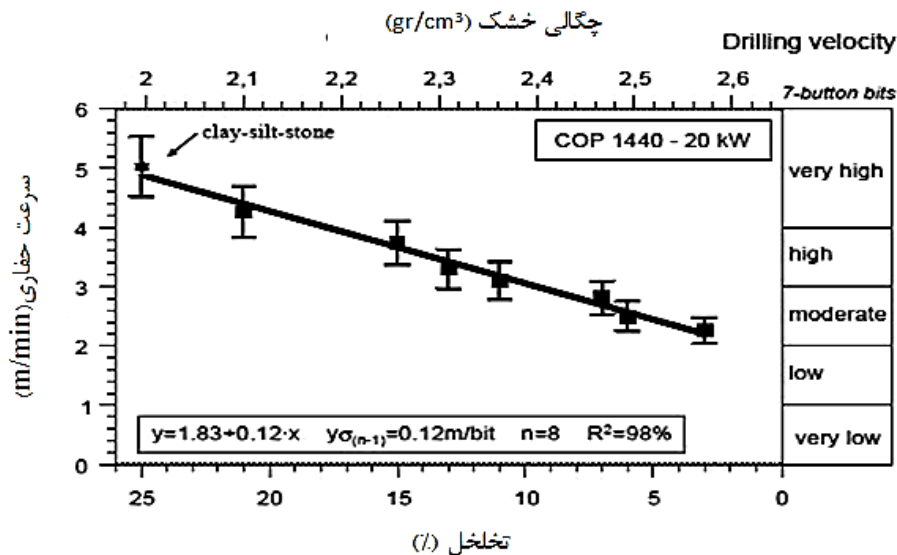
۵.۱.۳.۲ تخلخل

سنگ‌ها اجسام کاملاً توپری نیستند و همیشه حاوی خلل و فرج به صورت حفره‌های کم و بیش مرتبط و یا حفره‌های مجزا هستند. وجود این حفره‌ها اهمیت زیادی در خواص مکانیکی سنگ دارند و به طور کلی هر چه تخلخل سنگ بیشتر باشد مقاومت مکانیکی آن کمتر است (وفائیان، ۱۳۷۶).

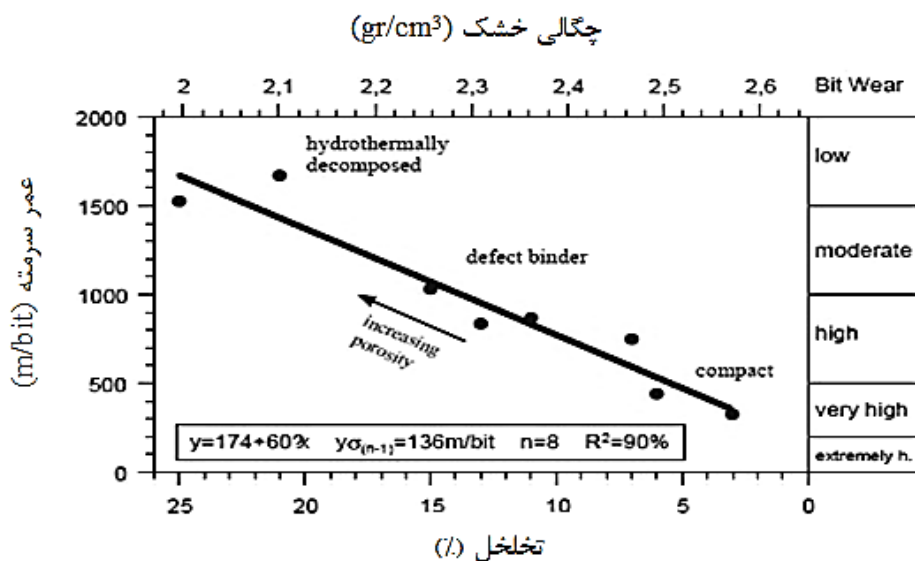
تورو در سال ۱۹۹۷، به منظور بهبودی در پیش‌بینی نرخ نفوذ و سایش مته، پس از بررسی پارامترهای مختلف زمین‌شناسی، مکانیکی و ماده‌سنگ مؤثر بر نرخ نفوذ و سایش مته، ارتباط بین پارامترهای مختلفی را با یکدیگر مورد بحث و بررسی قرار داد. در اشکال (۲-۲۴) و (۲-۲۵)، به ترتیب

¹ Bilim

روابط تخلخل و چگالی خشک با سرعت حفاری و عمر سرمته در ماسه سنگ مشاهده می شود (Thuro, 1997).



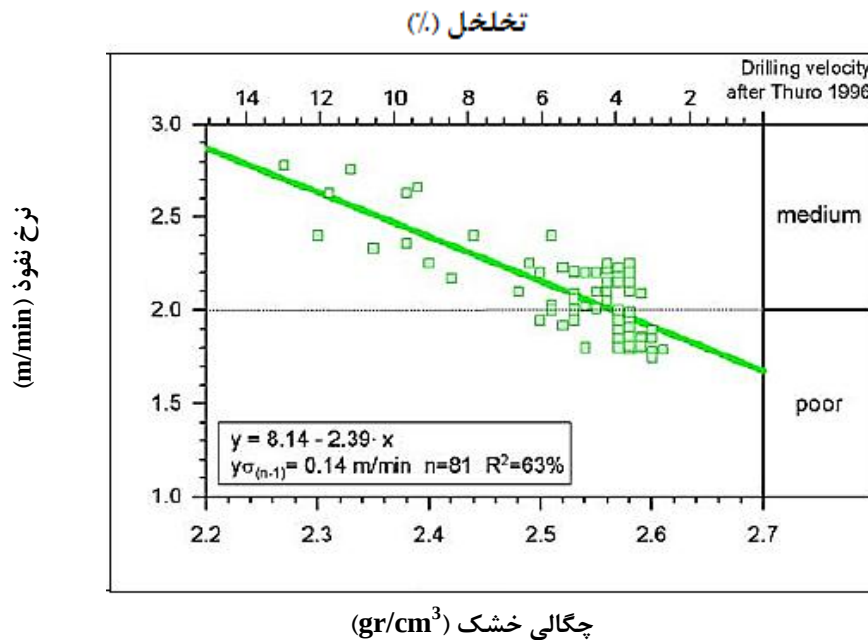
شکل ۲-۲۴- رابطه سرعت حفاری با تخلخل و چگالی در ماسه سنگ (Thuro, 1997)



شکل ۲-۲۵- رابطه عمر سرمته و تخلخل در ماسه سنگ (Thuro, 1997)

تورو و همکارانش در سال ۲۰۰۲، به کمی کردن پارامتر هوازدگی و ارتباط آن با چگالی و تخلخل پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که، چون درجه هوازدگی در سنگ، ارتباط محرزی با چگالی خشک و مقاومت سنگ بکر دارد، بنابراین نرخ نفوذ به طور مستقیم با تخلخل در ارتباط می-

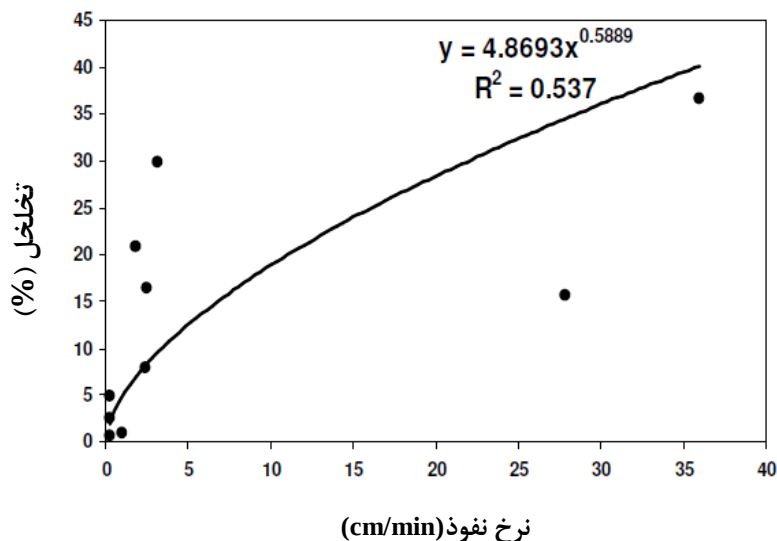
باشد. در شکل (۲-۲۶)، ارتباط چگالی خشک و تخلخل با نرخ نفوذ مشاهده می شود (Thuro et al, 2002).



شکل ۲-۲۶- رابطه سرعت حفاری با تخلخل و چگالی خشک سنگ (Thuro et al, 2002)

بیلیم در سال ۲۰۱۱، ارتباط بین تخلخل و نرخ نفوذ را مطابق شکل (۲-۲۷)، بیان نمود

(Bilim, 2011).



شکل ۲-۲۷- ارتباط میان نرخ نفوذ و تخلخل (Bilim, 2011)

همانطور که در این اشکال مشاهده می‌شود، با افزایش تخلخل سنگ، به علت کاهش مقاومت مکانیکی سنگ، نرخ نفوذ و عمر سرمته افزایش می‌یابد.

۶.۱.۳.۲ مقاومت فشاری تک‌محوره

مقاومت مکانیکی سنگ، مقدار ایستادگی آن در برابر تخریب به وسیله یک نیروی خارجی استاتیک یا دینامیک می‌باشد. سنگ‌ها بیشترین مقاومت را در برابر فشار از خود نشان می‌دهند و معمولاً مقاومت کششی آن‌ها از ۱۰ تا ۱۵ درصد مقاومت فشاریشان تجاوز نمی‌کند. این مسئله به دلیل تردی سنگ‌ها، وجود مقادیر بالای نواقص و بی‌نظمی‌های موضعی و نهایتاً چسبندگی پایین میان ذرات تشکیل‌دهنده سنگ می‌باشد (Jimeno et al, 1995).

عوامل مؤثر در مقاومت فشاری سنگ‌ها عبارتند از:

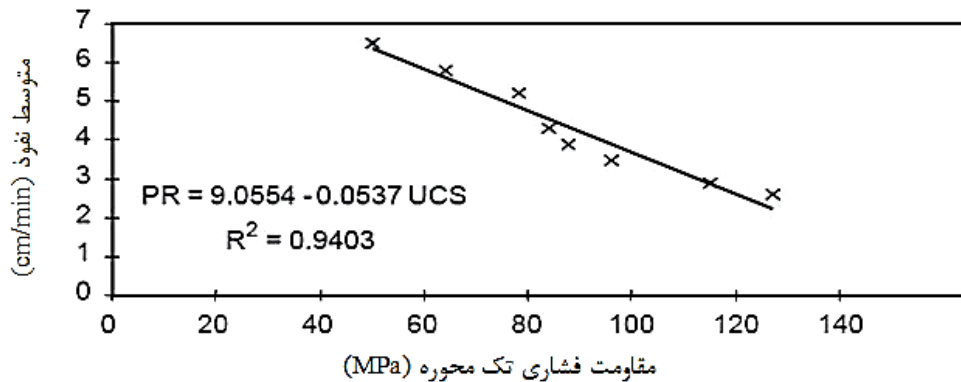
- نوع کانی‌های تشکیل‌دهنده و شرایط استقرار آنها
- درجه هوازدگی یا آلتراسیون سنگ‌ها
- نیروی بین مولکولی ذرات تشکیل‌دهنده آنها
- وجود عواملی چون درزه و شکاف در سنگ‌ها
- خواص الاستیکی، پلاستیکی و آنیزوتروپی سنگ‌ها
- جهت و میزان نیروهای وارده بر سنگ‌ها

بنابراین مقاومت فشاری تک‌محوره می‌تواند نماینده تمام پارامترهای فوق به ویژه چگالی، تخلخل، الاستیسیته و پلاستیسیته سنگ‌ها باشد (حسینی و همکاران، ۱۳۸۶).

آکون و کارپوز^۱ در سال ۲۰۰۵، مقاومت فشاری تک‌محوره را در نمونه‌های مختلفی از ماسه-سنگ بررسی کرده و برای هر یک از آن‌ها نرخ نفوذی به دست آوردند. نتایج این آزمایش در شکل (۲۸-۲)، مشاهده می‌شود. با توجه به این شکل می‌توان نتیجه گرفت که، این مقاومت با نرخ نفوذ

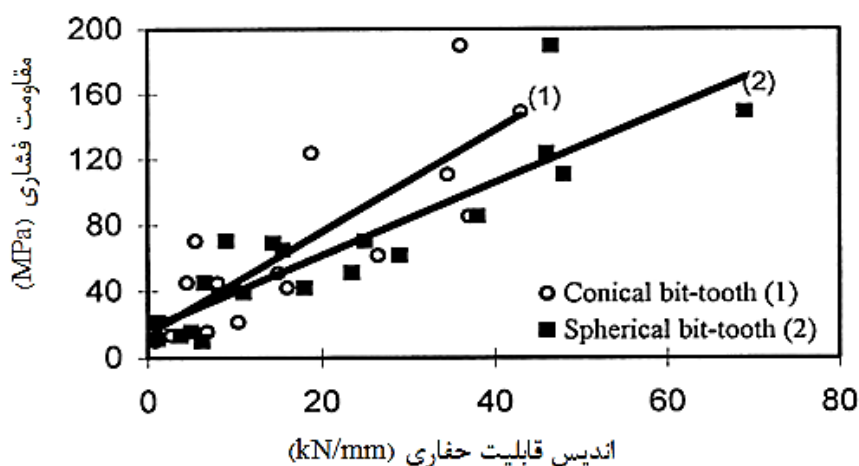
¹ Akun & Karpuz

دارای ضریب همبستگی بالایی بوده و یک پارامتر مؤثر در نرخ نفوذ می‌باشد (Akun & Karpuz, 2005).



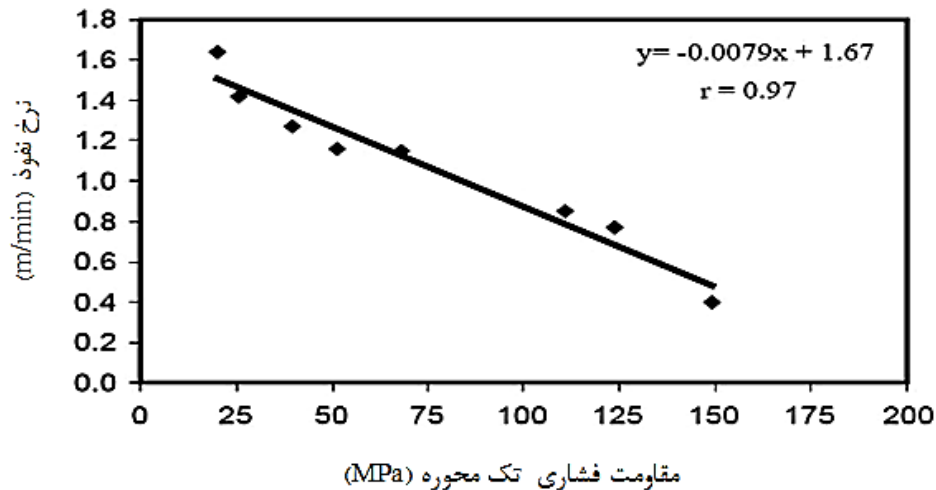
شکل ۲-۲۸- رابطه سرعت حفاری و مقاومت فشاری در نمونه‌ای از ماسه‌سنگ (Akun & Karpuz, 2005)

قهرمان و همکارانش در سال ۲۰۰۰، رابطه بین اندیس قابلیت حفاری و مقاومت فشاری را در دو نوع سرمته مطابق شکل (۲-۲۹)، به دست آوردند. البته ذکر این نکته ضروری است که این نمودار برای سنگ‌های دارای مقاومت فشاری بیش از ۴۰ مگاپاسکال قابل استفاده می‌باشد. ضریب همبستگی نیز برای خط مربوط به سرمته‌های کروی ۰/۸۳ و برای سرمته‌های مخروطی ۰/۸۸ می‌باشد (Kahraman et al, 2000).



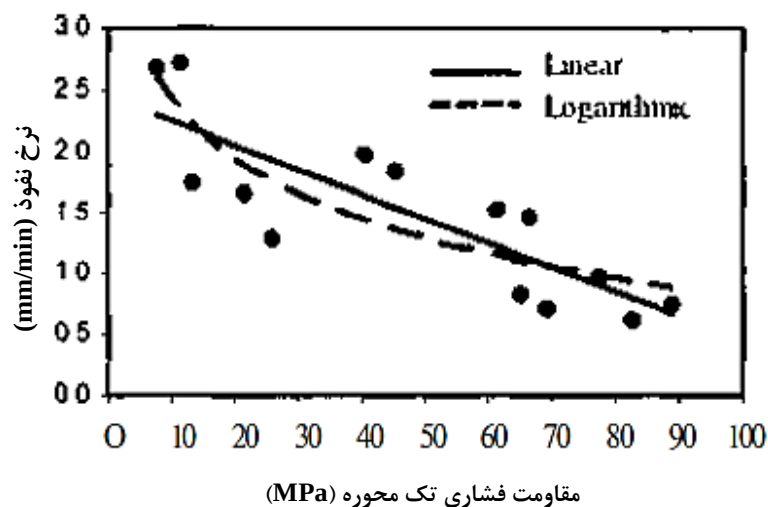
شکل ۲-۲۹- رابطه بین اندیس قابلیت حفاری و مقاومت فشاری در دو نوع سرمته (Kahraman et al, 2000)

همچنین قهرمان و همکارانش در سال ۲۰۰۳، در شکل (۲-۳۰)، رابطه بین مقاومت فشاری تک‌محوره و نرخ نفوذ را در سیستم حفاری ضربه‌ای به دست آوردند (Kahraman et al, 2003).



شکل ۳۰-۲- رابطه سرعت حفاری ضربه‌ای و مقاومت فشاری (Kahraman et al, 2003)

بیلگین و قهرمان در سال ۲۰۰۳، مقاومت فشاری تک‌محوره را بر روی نمونه‌هایی با قطر ۳۳ میلی‌متر و نسبت طول به قطر ۲ انجام دادند. آن‌ها ارتباط بین این مقاومت و نرخ نفوذ را در سیستم‌های حفاری چرخشی به صورت شکل (۲-۳۱)، به دست آوردند (Bilgin & Kahraman, 2003).

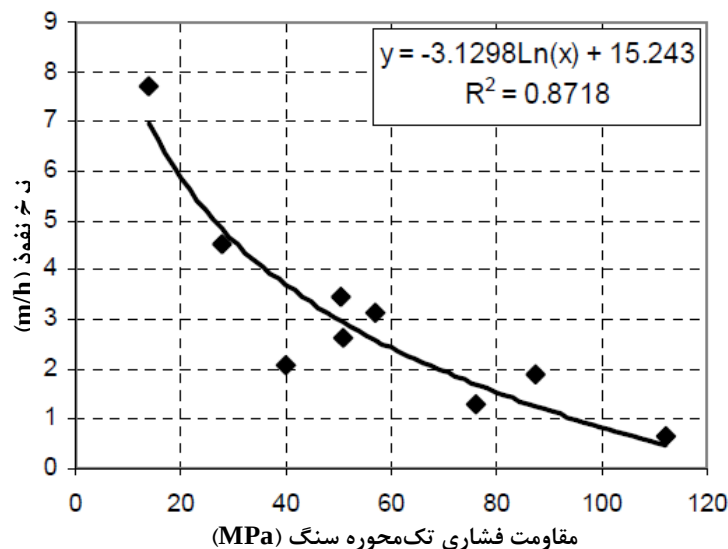


شکل ۳۱-۲- ارتباط بین مقاومت فشاری تک‌محوره و نرخ نفوذ در سیستم‌های حفاری چرخشی

(Bilgin & Kahraman, 2003)

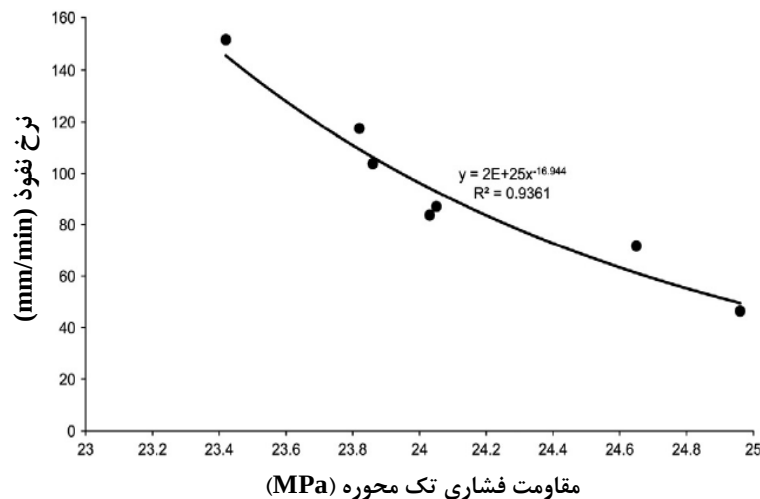
حسینی و عطائی در سال ۱۳۸۸، آزمایشاتی را بر روی ۹ نوع سنگ مختلف که از ۸ معدن مختلف و یک شیروانی سنگی مشرف به یک بزرگراه، جمع‌آوری شده بود، با استفاده از سیستم حفاری ضربه‌ای هیدرولیکی انجام دادند. آن‌ها رابطه‌ای لگاریتمی بین مقاومت فشاری تک‌محوره و سرعت

حفاری ضربه‌ای مطابق شکل (۲-۳۲)، به دست آورده و به این نتیجه رسیدند که، چون ضریب همگرایی بین این دو پارامتر بالا می‌باشد، می‌توان از مقاومت فشاری تک‌محوره برای پیش‌بینی سرعت حفاری ضربه‌ای استفاده کرد (حسینی و عطائی، ۱۳۸۸).



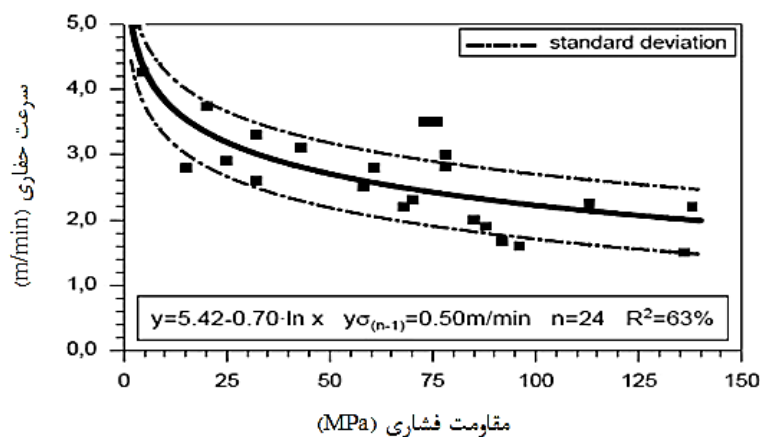
شکل ۲-۳۲- رابطه بین سرعت حفاری ضربه‌ای و مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ (حسینی و عطائی، ۱۳۸۸)

یاشار و همکارانش در سال ۲۰۱۱، آزمایشاتی را بر روی نمونه‌های سیمانی در آزمایشگاه انجام دادند. آن‌ها رابطه بین مقاومت فشاری تک‌محوره و نرخ نفوذ را به صورت شکل (۲-۳۳)، به دست آوردند. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش این مقاومت، نرخ نفوذ کاهش می‌یابد (Yasar et al, 2011).



شکل ۲-۳۳- رابطه بین مقاومت فشاری تک محوره و نرخ نفوذ (Yasar et al, 2011)

تورو و اسپان در سال ۱۹۹۶، ارتباط بین مدول یانگ، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و تردی با سرعت حفاری را بر روی سنگ‌هایی مانند ماسه سنگ رسی، سنگ آهک، شیست و مرمر بررسی کردند. در شکل (۲-۳۴)، ارتباط میان مقاومت فشاری تک محوره و سرعت حفاری مشاهده می‌شود (Thuro & Spaun, 1996).

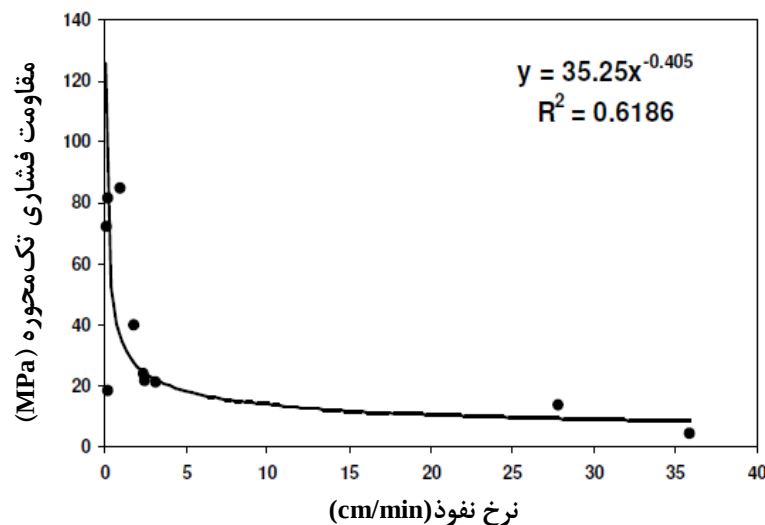


شکل ۲-۳۴- رابطه بین سرعت حفاری ضربه‌ای در تونل‌ها و مقاومت فشاری سنگ‌های اسلیتی و کوارتزیتی در کشور

آلمان (Thuro & Spaun, 1996)

بیلیم نیز در سال ۲۰۱۱، با بررسی ارتباط بین نرخ نفوذ و مقاومت فشاری تک محوره در ۱۰

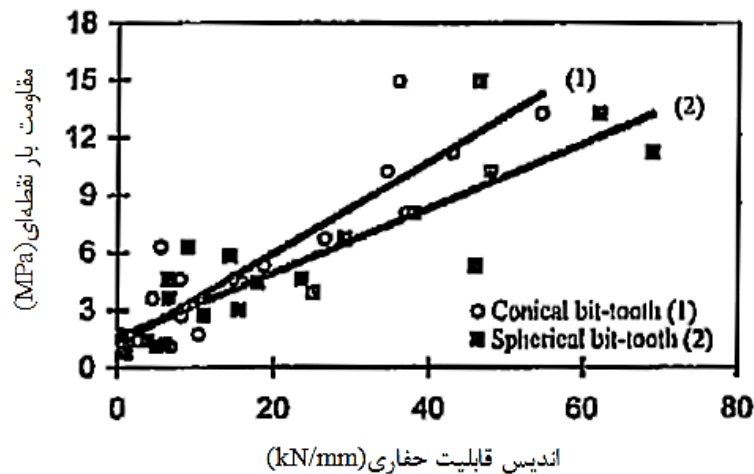
نوع سنگ، این ارتباط را به صورت شکل (۲-۳۵)، بیان کرد (Bilim, 2011).



شکل ۲-۳۵- ارتباط بین نرخ نفوذ و مقاومت فشاری تک محوره (Bilim, 2011)

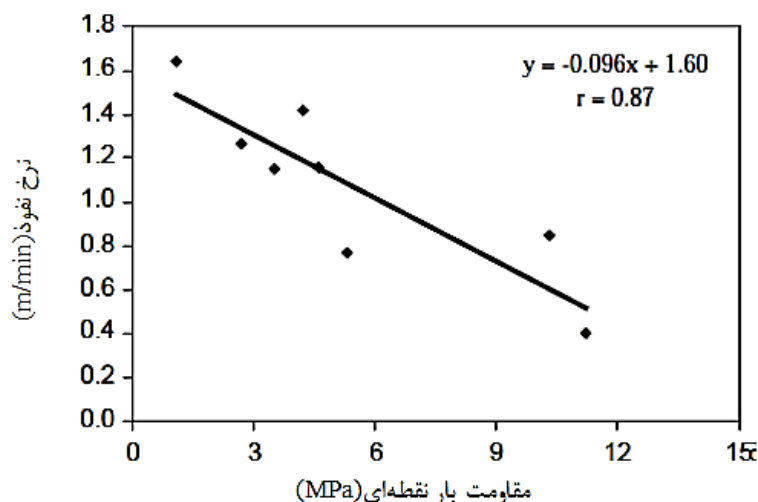
کلیه تحقیقات انجام شده عموماً بر روی مقاومت فشاری تک محوره صورت گرفته است که در عمل انجام آزمایش و تعیین این مشخصه سنگ، امری زمان بر و پرهزینه می باشد. لذا در سال های اخیر تحقیقاتی صورت گرفته تا بتوان با روش های سریع تر و ارزان تر مقاومت سنگ را تخمین زده و رابطه آن را با حفاری مشخص نمود. یکی از این روش ها استفاده از شاخص مقاومت بار نقطه ای می باشد. این شاخص به عنوان یک کمیت جانشین در بسیاری از زمینه های مکانیک سنگ جایگزین مقاومت فشاری تک محوره گردیده است (عطائی و همکاران، ۱۳۸۷).

قهرمان در سال ۲۰۰۰، در تحقیقات خود نشان داد که، در حفاری دورانی با دو نوع سرمه، با افزایش میزان بار نقطه ای، اندیس قابلیت حفاری افزایش و قابلیت حفاری سنگ ها به صورت خطی کاهش می یابد (شکل ۲-۳۶). در این شکل نیز، با توجه به شیب خط مربوط به سرمه های کروی، نتیجه گیری می شود که، برای حفاری عمق معینی از یک سنگ، نیروی لازم برای سرمه های کروی بیشتر از سرمه های مخروطی می باشد. ضریب همبستگی برای خط مربوط به سرمه های کروی ۰/۹ و برای سرمه های مخروطی ۰/۸۶ می باشد (Kahraman et al, 2000).



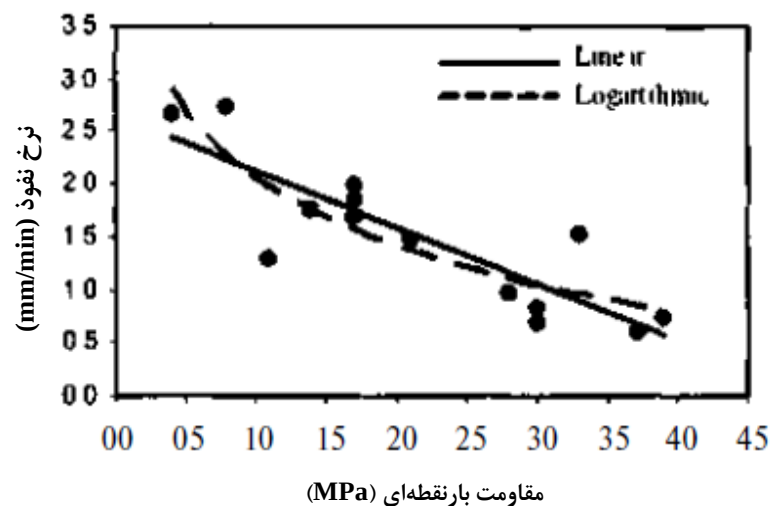
شکل ۲-۳۶- ارتباط اندیس قابلیت حفاری و مقاومت بار نقطه‌ای (Kahraman et al, 2000)

همچنین قهرمان در سال ۲۰۰۳ طی آزمایش‌های آزمایشگاهی نشان داد که سرعت حفاری ضربه‌ای با افزایش بار نقطه‌ای به صورت خطی کاهش می‌یابد (شکل ۲-۳۷).



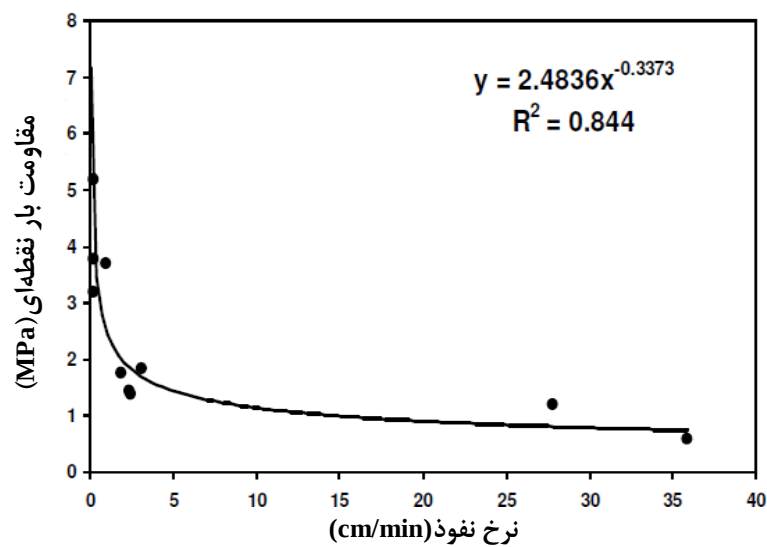
شکل ۲-۳۷- ارتباط مقاومت بار نقطه‌ای و سرعت حفاری ضربه‌ای (Kahraman et al, 2003)

بیلگین و قهرمان در سال ۲۰۰۳، ارتباط بین مقاومت بار نقطه‌ای با نرخ نفوذ در سیستم‌های حفاری چرخشی را به صورت شکل (۲-۳۸)، بیان کردند. همانطور که مشاهده می‌شود، در هر دو حالت خطی و لگاریتمی، با افزایش مقاومت بار نقطه‌ای، نرخ نفوذ کاهش می‌یابد (Bilgin & Kahraman, 2003).



شکل ۲-۳۸- ارتباط بین مقاومت بار نقطه‌ای و نرخ نفوذ در سیستم‌های حفاری چرخشی
(Bilgin & Kahraman, 2003)

بیلیم در سال ۲۰۱۱، رابطه بین مقاومت بار نقطه‌ای و نرخ نفوذ را مطابق شکل (۲-۳۹)، به دست آورد. ایشان بیان کردند که، در میان پارامترهای مختلف، مقاومت بار نقطه‌ای، بهترین ارتباط را با نرخ نفوذ دارد (Bilim, 2011).



شکل ۲-۳۹- رابطه بین مقاومت بار نقطه‌ای و نرخ نفوذ (Bilim, 2011)

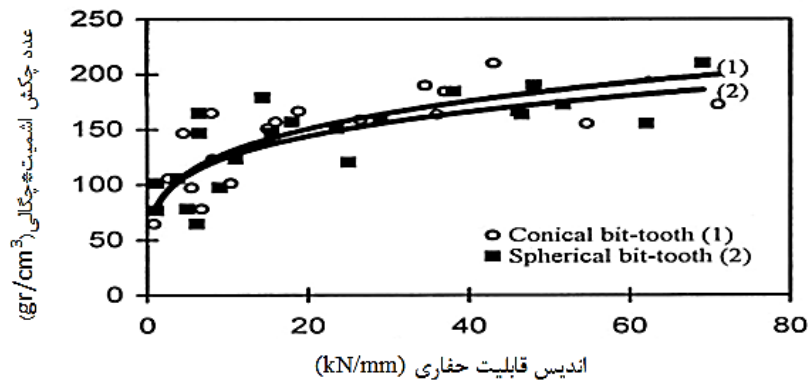
۷.۱.۳.۲ سختی اشمیت

سختی اشمیت، کاربردهای مختلفی در طبقه‌بندی سنگ‌ها، و تعیین خواص مهندسی آن‌ها دارد. دیر و میلر^۱ در سال ۱۹۶۵، در مطالعاتی که به منظور طبقه‌بندی سنگ‌ها بر روی دامنه وسیعی از آن‌ها از ۲۸ محل مختلف انجام دادند، از سختی اشمیت استفاده کرده و به این نتیجه رسیدند که، سختی اشمیت با مقاومت فشاری تک‌محوره، ضریب همبستگی معادل ۰/۸۸ دارد. همچنین آن‌ها با ضرب کردن سختی اشمیت در چگالی خشک سنگ، رابطه‌ای بین مقاومت فشاری تک‌محوره و سختی اشمیت به دست آوردند که، دارای ضریب ۰/۹۴۳ بود. با توجه به مطالب بیان شده، چکش اشمیت می‌تواند به منظور تخمین سریع و ارزان مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ در صحرا استفاده شود. یکی دیگر از کاربردهای سختی اشمیت، برآورد مقاومت زغال‌سنگ در حالت برجا می‌باشد، چرا که انجام آزمایش تعیین مقاومت زغال‌سنگ بسیار مشکل است (فهیمی‌فر و سروش، ۱۳۸۰).

در ادامه به تعدادی از روابطی که توسط محققان مختلف در زمینه سختی اشمیت ارائه شده، اشاره می‌شود.

همانطور که قبلاً اشاره شد، قهرمان و همکارانش در سال ۲۰۰۰، با استفاده از سیستم حفاری دورانی بر روی ۲۲ نمونه سنگ مختلف، شامل: مارل، سنگ‌آهک رسی، سنگ‌آهک، ماسه‌سنگ، توف و ...، روابط بین پارامترهای مختلفی را با اندیس قابلیت حفاری به دست آوردند، که یکی از این روابط، رابطه بین سختی اشمیت و این اندیس می‌باشد. در شکل (۲-۴۰)، رابطه بین سختی اشمیت ضربدر چگالی با اندیس قابلیت حفاری مشاهده می‌شود. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش سختی اشمیت ضربدر چگالی، اندیس قابلیت حفاری ابتدا با سرعت و سپس به تدریج افزایش می‌یابد. همچنین اندیس قابلیت حفاری سرمته‌های کروی بیشتر از سرمته‌های مخروطی می‌باشد (Kahraman et al, 2000).

¹ Deer & Miller



شکل ۲-۴۰- ارتباط عدد چکش اشمیت و اندیس قابلیت حفاری (Kahraman et al, 2000)

قابل ذکر است که در این شکل، ضریب همبستگی برای نمودار مربوط به سرمت‌های کروی

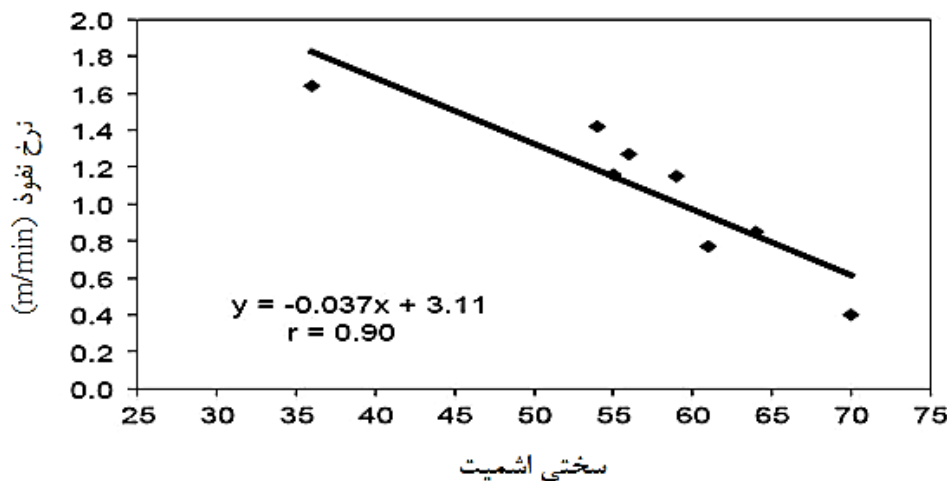
۰/۸۴ و برای سرمت‌های مخروطی ۰/۷۶ می‌باشد.

قهرمان و همکارانش در سال ۲۰۰۳ نیز، رابطه بین نرخ نفوذ در سیستم حفاری ضربه‌ای و

سختی اشمیت را در هشت نوع سنگ شامل: سنگ‌آهک، ماسه‌سنگ هوازده، ماسه‌سنگ، دولومیت،

سنگ‌آهک، دیاباز، مارل و ماسه‌سنگ فلزدار به دست آورده و نتایج کار خود را به صورت شکل (۲-۴۱)،

بیان کردند (Kahraman et al, 2003).

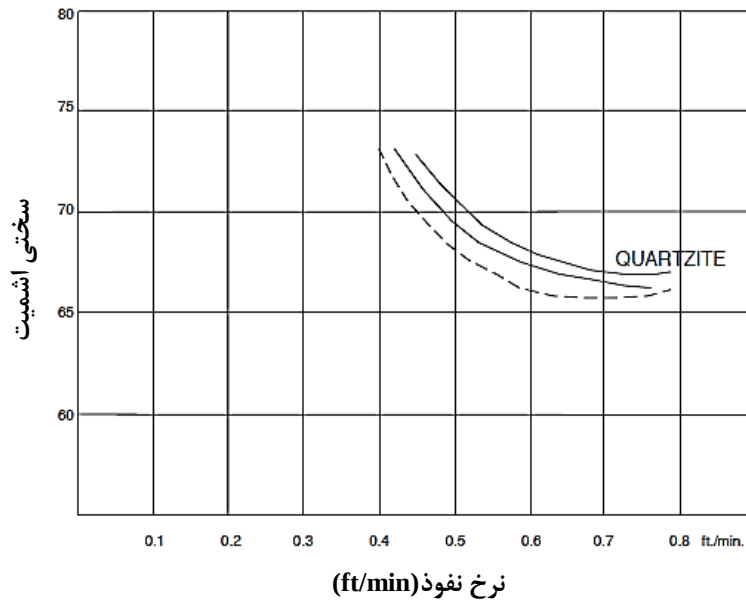


شکل ۲-۴۱- ارتباط عدد چکش اشمیت و سرعت حفاری ضربه‌ای (Kahraman et al, 2003)

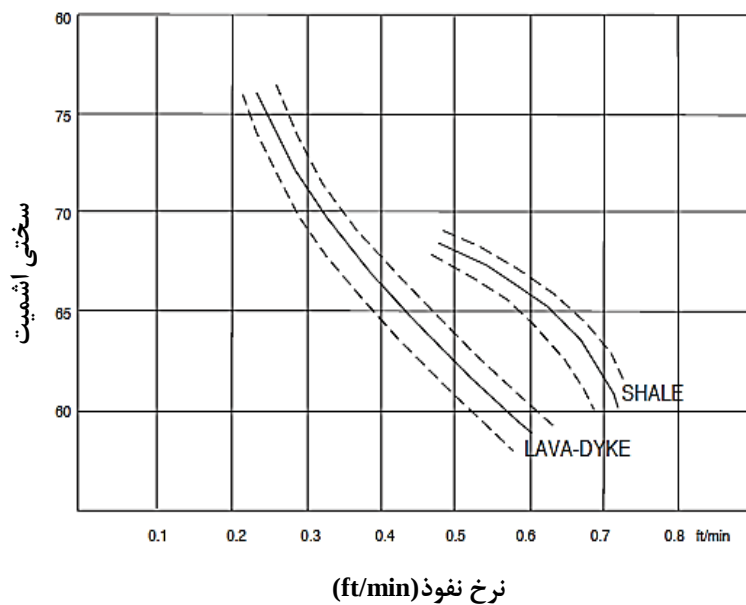
همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش عدد سختی اشمیت، نرخ نفوذ در سیستم حفاری

ضربه‌ای کاهش یافته است.

دنخوس^۱ در سال ۲۰۰۲، رابطه بین چکش اشمیت و نرخ نفوذ را در معادن زغال آلمان بر روی کوارتزیت و شیل بررسی کرد. همانطور که در اشکال (۲-۴۲) و (۲-۴۳)، مشاهده می‌شود، با افزایش عدد چکش اشمیت، نرخ نفوذ کاهش یافته است (Denkhaus, 2003).



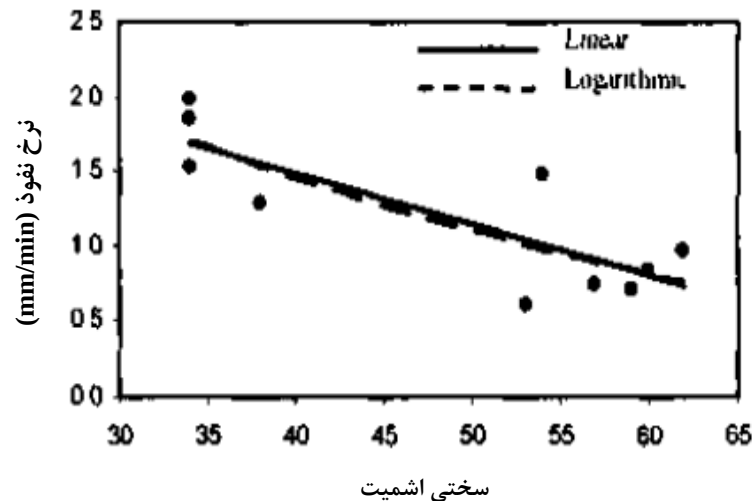
شکل ۲-۴۲- ارتباط بین سختی اشمیت و نرخ نفوذ در کوارتزیت (Denkhaus, 2003)



شکل ۲-۴۳- ارتباط بین سختی اشمیت و نرخ نفوذ در شیل (Denkhaus, 2003)

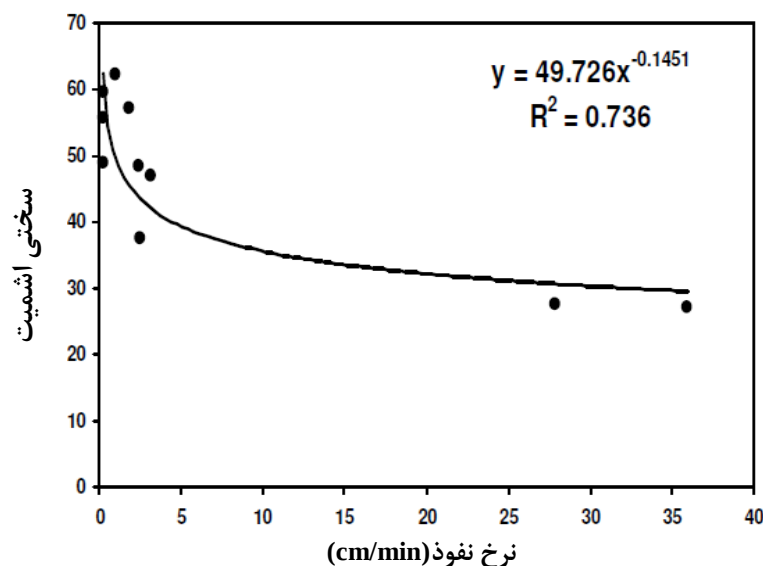
¹ Denkhaus

همچنین بیلگین و قهرمان در سال ۲۰۰۳، ارتباط بین سختی اشمیت را با نرخ نفوذ در سیستم‌های حفاری چرخشی به صورت شکل (۲-۴۴)، بیان کردند. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش سختی اشمیت، نرخ نفوذ کاهش می‌یابد (Bilgin & Kahraman, 2003).



شکل ۲-۴۴- ارتباط بین سختی اشمیت و نرخ نفوذ در سیستم‌های حفاری چرخشی (Bilgin & Kahraman, 2003)

بیلیم نیز در سال ۲۰۱۱، ارتباط بین سختی اشمیت و نرخ نفوذ را به صورت شکل (۲-۴۵)، به دست آورد (Bilim, 2011).



شکل ۲-۴۵- ارتباط بین سختی اشمیت و نرخ نفوذ (Bilim, 2011)

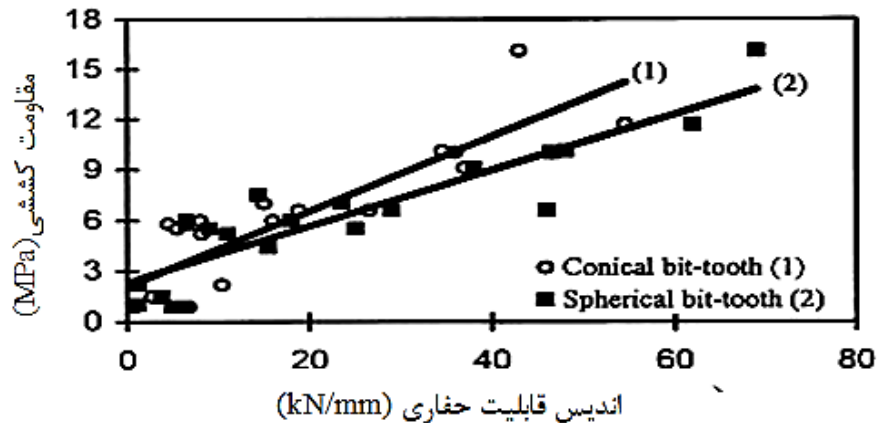
۸.۱.۳.۲ مقاومت کششی

مقاومت کششی به عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای مقاومتی سنگ مطرح می‌باشد. مقاومت کششی سنگ در عملیات حفاری و انتخاب نوع سیستم حفاری مفید است. این مقاومت تقریباً ۱۰ درصد مقاومت فشاری سنگ است و در مباحث حفاری، انفجار و معادن زیرزمینی (پایداری سقف)، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. مقاومت کششی در واقع ماکزیمم تنش کششی است که یک سنگ می‌تواند داشته باشد و بر خلاف مقاومت فشاری که بررسی و مطالعات در مورد آن به حد وسیع و گسترده‌ای انجام گرفته است، در مورد مقاومت کششی شاید به دلیل دشواری در تهیه نمونه و انجام آزمایش، مطالعه کافی انجام نگرفته است (اصانلو، ۱۳۸۲).

در ادامه بحث به تحقیقاتی که در زمینه ارتباط بین مقاومت کششی و نرخ نفوذ انجام شده است، پرداخته می‌شود.

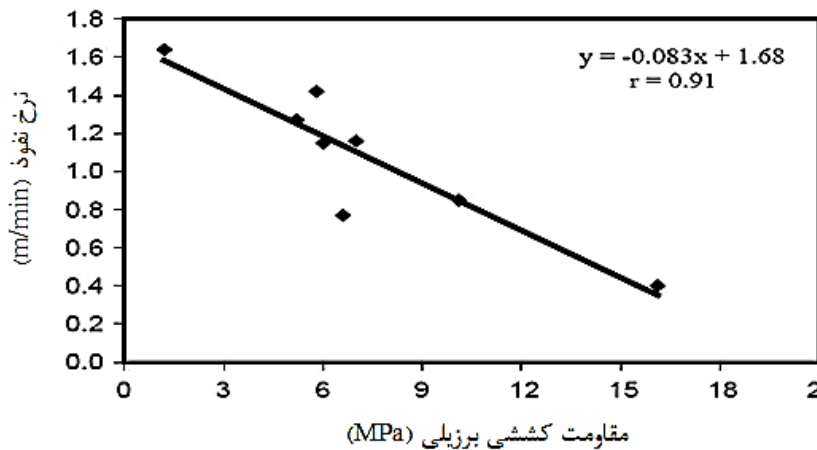
قهرمان و همکارانش در سال ۲۰۰۰، با استفاده از سیستم حفاری دورانی بر روی ۲۲ نمونه سنگ، رابطه بین اندیس قابلیت حفاری و مقاومت کششی را به صورت شکل (۲-۴۶)، به دست آوردند. در این شکل، ضریب همبستگی برای خط مربوط به سرمت‌های کروی ۰/۸۷ و برای سرمت - های مخروطی ۰/۸۸ می‌باشد (Kahraman et al, 2000).

همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش مقاومت کششی، اندیس قابلیت حفاری افزایش یافته، در نتیجه قابلیت حفاری سنگ کاهش می‌یابد.



شکل ۲-۴۶- ارتباط مقاومت کششی و سرعت حفاری دورانی (Kahraman et al, 2000)

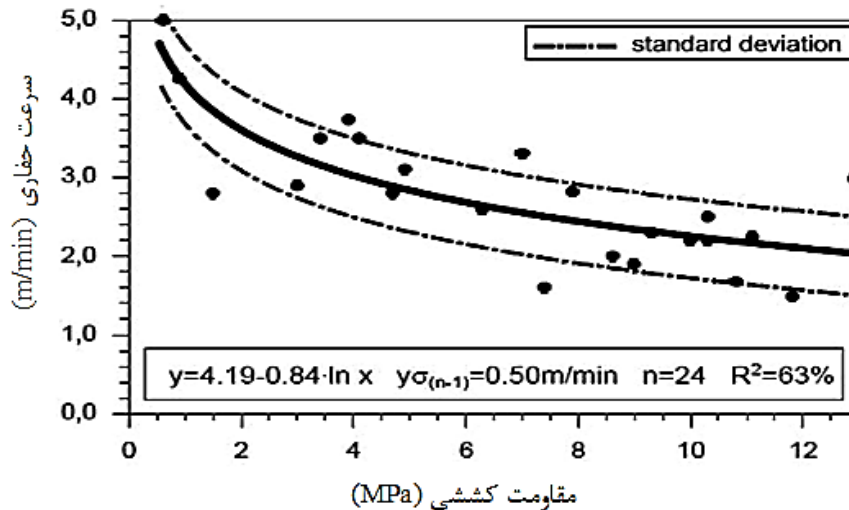
همچنین قهرمان و همکارانش در سال ۲۰۰۳، رابطه‌ای قوی بین نرخ نفوذ و مقاومت کششی برزیلی در سیستم حفاری ضربه‌ای، مطابق شکل (۲-۴۷)، به دست آوردند. ایشان بیان کردند که، علاوه بر مقاومت فشاری تک‌محوره، انرژی مخصوص، مقاومت کششی و سختی اشمیت، مقاومت بار نقطه‌ای نیز از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر نرخ نفوذ در سیستم‌های حفاری ضربه‌ای می‌باشند (Kahraman et al, 2003).



شکل ۲-۴۷- ارتباط مقاومت کششی و سرعت حفاری ضربه‌ای (Kahraman et al, 2003)

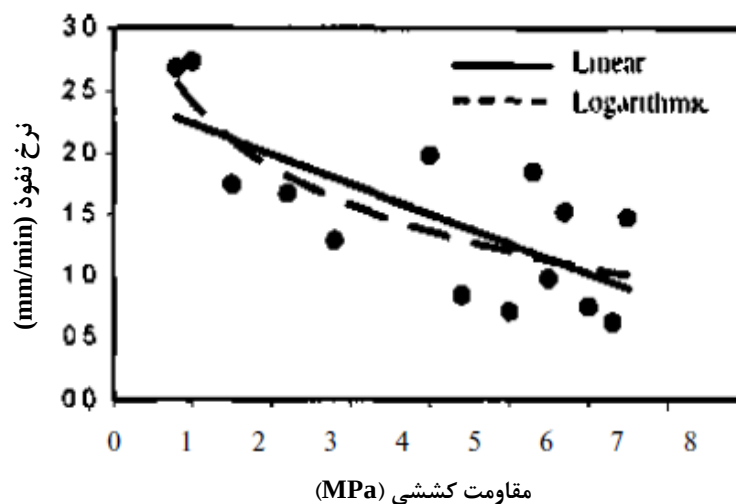
تورو و اسپان در سال ۱۹۹۶، رابطه بین نرخ نفوذ در سیستم حفاری ضربه‌ای و مقاومت کششی را در سنگ‌های مختلفی مانند: سیلت‌استون رسی، سنگ‌آهک، مرمر، شیست و سنگ‌های کریستالین،

مطابق شکل (۲-۴۸)، به دست آوردند. همانطور که از منحنی رگرسیون لگاریتمی این ارتباط مشاهده می‌شود، با افزایش مقاومت کششی، نرخ نفوذ کاهش یافته است (Thuro & Spaun, 1996).



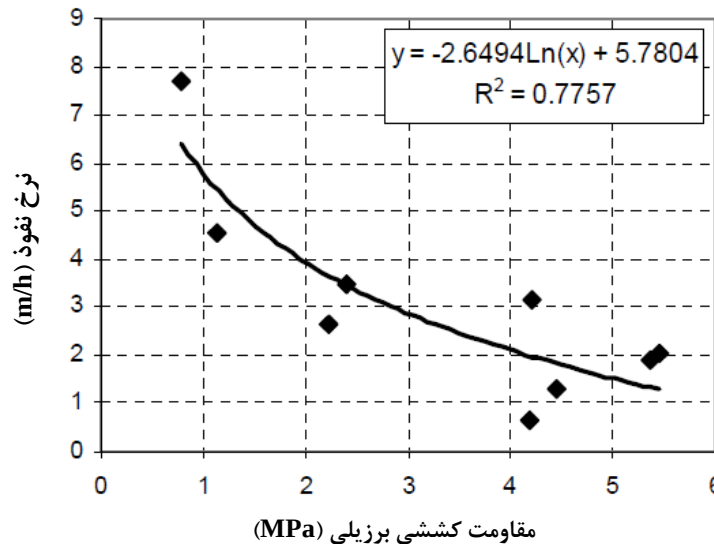
شکل ۲-۴۸- ارتباط مقاومت کششی و سرعت حفاری ضربه‌ای در تونل‌سازی (Thuro & Spaun, 1996)

بیلگین و قهرمان در سال ۲۰۰۳، با انجام آزمایش مقاومت کششی برزیلی، ارتباط بین این مقاومت با نرخ نفوذ را در سیستم‌های حفاری چرخشی، به صورت شکل (۲-۴۹)، بیان کردند (Bilgin & Kahraman, 2003).



شکل ۲-۴۹- ارتباط بین مقاومت کششی برزیلی و نرخ نفوذ در سیستم‌های حفاری چرخشی (Bilgin & Kahraman, 2003)

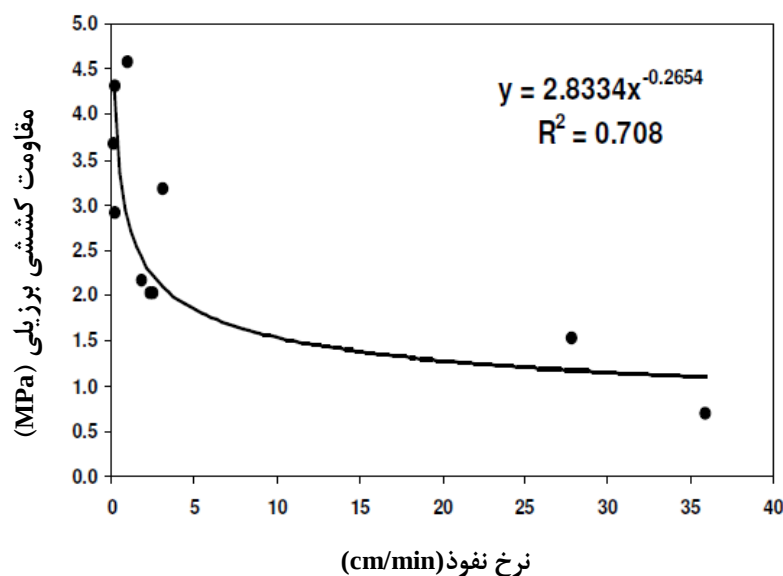
حسینی و عطائی در سال ۱۳۸۸، ارتباط بین مقاومت کششی و نرخ نفوذ را در سیستم حفاری ضربه‌ای، مطابق شکل (۲-۵۰)، به دست آوردند.



شکل ۲-۵۰- رابطه بین سرعت حفاری ضربه‌ای و مقاومت کششی برزیلی سنگ (حسینی و عطائی، ۱۳۸۸)

همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش مقاومت کششی، نرخ نفوذ به صورت لگاریتمی کاهش یافته است (حسینی و عطائی، ۱۳۸۸).

بیلیم نیز در سال ۲۰۱۱ در ترکیه، ارتباط بین مقاومت کششی برزیلی و نرخ نفوذ را در ۱۰ نوع سنگ مختلف بررسی کرد. نتیجه این بررسی در شکل (۲-۵۱)، مشاهده می‌شود (Bilim, 2011).



شکل ۲-۵۱- ارتباط بین مقاومت کششی برزیلی و نرخ نفوذ (Bilim, 2011)

۹.۱.۳.۲ سختی

سختی به صورت مقاومت لایه سطحی سنگ در برابر نفوذ جسم دیگری که دارای سختی بیشتری است، تعریف می‌شود. سختی سنگ‌ها اولین و اصلی‌ترین مقاومتی است که باید در حفاری بر آن غلبه کرد (Jimeno et al, 1995). بیش از ۲۰۰ آزمایش سختی برای توصیف ویژگی‌های سنگ وجود دارد، که بیشتر آن‌ها به منظور اهداف خاصی طراحی شده و بیشتر از آن توسعه پیدا نکرده‌اند (Thuro & Plinninger, 2003).

در زیر به یکی از روش‌های اندازه‌گیری سختی، یعنی سختی موس، که در این تحقیق مورد استفاده قرار خواهد گرفت، پرداخته می‌شود. از آنجا که سختی یک سنگ قاعداً میانگین سختی کانی‌های تشکیل دهنده آن است، بنابراین باید ابتدا مقیاس سختی کانی‌ها توضیح داده شود. مقیاس سنجش سختی کانی‌ها معیار استاندارد موس^۱ است، که در آن سختی ده کانی به صورت اعداد صحیح ۱ تا ۱۰ در نظر گرفته شده است. در این معیار، هر کانی با عدد سختی بالاتر می‌تواند کانی با عدد سختی پایین‌تر را خراش دهد (جدول ۲-۶) (وفائیان، ۱۳۷۶).

جدول ۲-۶- سختی کانی‌ها بر اساس مقیاس موس (وفائیان، ۱۳۷۶)

کانی	سختی	مشخصه سختی
تالک	۱	کانی روی کاغذ بدون خراش می‌نویسد.
گچ	۲	کاغذ را خراش می‌دهد.
کلسیت	۳	نوک چاقو به آسانی کانی را خراش می‌دهد.
فلوریت	۴	با فشار کمی به وسیله چاقو روی آن خراش می‌افتد.
آپاتیت	۵	با فشار زیاد به وسیله چاقو روی آن خراش می‌افتد.
فلدسپار	۶	روی چاقو و شیشه خراش می‌دهد.
کوارتز	۷	روی چاقو و شیشه خراش می‌دهد.
توپاز	۸	روی چاقو و شیشه خراش می‌دهد.
کرنوم	۹	روی چاقو و شیشه خراش می‌دهد.
الماس	۱۰	روی چاقو و شیشه خراش می‌دهد.

^۱ Mohs

بدیهی است که، با افزایش سختی سنگ، سرعت حفاری و قابلیت حفاری سنگ‌ها کاهش خواهد یافت. جمینو^۱ و همکارانش در سال ۱۹۹۵، رابطه بین سختی سنگ‌ها و مقاومت فشاری تک-محوره را به صورت جدول (۷-۲)، ارائه داده‌اند.

جدول ۷-۲- رابطه بین سختی موس و مقاومت فشاری تک‌محوره (Jimeno et al, 1995)

درجه سختی	مقدار سختی موس	مقاومت فشاری تک‌محوره (MPa)
بسیار سخت	۷-۱۰	>۲۰۰
سخت	۶-۷	۱۲۰-۲۰۰
نیمه سخت	۴/۵-۶	۶۰-۱۲۰
نیمه نرم	۳-۴/۵	۳۰-۶۰
نرم	۲-۳	۱۰-۳۰
بسیار نرم	۱-۲	<۱۰

۱۰.۱.۳.۲ ساینده‌گی

سایش به پاسخ سنگ‌ها نسبت به عوامل مخرب فیزیکی گفته می‌شود، که در واقع مقدار فرسایش سنگ در برابر عوامل فرساینده را نشان می‌دهد. قدرت ساینده‌گی سنگ عبارت است از: مقدار تأثیر فرسایشی سنگ روی سایر موادی که با آن در تماس هستند. این پارامتر در تعیین میزان استهلاک ماشین‌های حفاری و تونل‌زنی و تعیین عمر مفید قطعات، حائز اهمیت است. قابلیت سایش و قدرت ساینده‌گی سنگ بستگی به نوع و مقدار کانی‌ها، تعداد ریزترک‌ها، درجه هوازدگی سنگ و نیز چسبندگی بین دانه‌ها دارد (فهیمی فر و سروش، ۱۳۸۰).

فاکتورهای مختلفی، ساینده‌گی در سنگ را تحت تأثیر قرار می‌دهند. مهمترین فاکتورهایی که می‌توان به آن‌ها اشاره کرد، عبارتند از: ترکیب کانی‌شناسی، سختی کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ، مشخصات دانه‌ها شامل: اندازه، شکل و گوشه‌داری، نوع ماتریکس و درجه سیمانه شدن، مقاومت، سختی و انرژی ویژه. از آزمایش‌هایی که برای تعیین ساینده‌گی استفاده می‌شوند، می‌توان به اندیس

¹ Jimeno

سایش سورشار^۱، اندیس سایش ضربه دینامیکی^۲ و فاکتور ساینده شیمازک^۳ اشاره کرد (Ersoy & Waller, 1995).

الف - اندیس سایش سورشار

آزمایش اندیس سایش سورشار در فرانسه و در اواسط دهه ۱۹۸۰ ابداع شد. این اندیس یک روش سریع و ساده جهت تعیین ساینده گی سنگ می باشد.

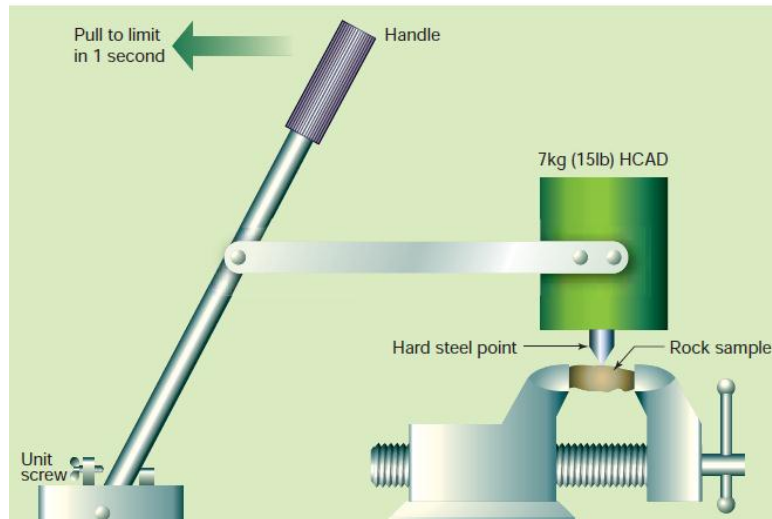
برای انجام این آزمایش، در مدت زمان یک ثانیه و تحت بار استاتیکی ۷۰ نیوتن، نوک تیز پین فولادی، خراشی با سرعت ۱۰ میلی متر بر ثانیه بر روی سطحی ناهموار و تازه شکسته ایجاد می کند. این پین فولادی از نوع فولاد قابل عملیات حرارتی آلیاژ ۴۱۴۰H در استاندارد AISI می باشد، که در طی یک فرآیند عملیات حرارتی به مقاومت ۶۱۰ ویکرز^۴ رسیده است. نوک این پین فولادی با زاویه ۹۰ درجه به حداکثر تیزی رسیده است. اندیس سایش سورشار از اندازه گیری ضخامت قطر ساییده شده روی نوک تیز فولادی با کمک میکروسکوپ بر حسب میلی متر خوانده می شود. استفاده وسیع از این آزمایش توسط تولیدکنندگان تجهیزات تونل سازی، مانند مؤسسه های تحقیقاتی و مشاوران در زمینه حفاری سنگ منجر به این شده است که اندیس سایش سورشار تبدیل به یکی از پارامترهای استاندارد در طبقه بندی سنگ سخت شود (شکل ۲-۵۲) (Plinninger & Thuro, 2004).

^۱ Cershar Abrissivness Index

^۲ Dynamic impact abrasive index

^۳ Schimazek's F-abrasivity factor

^۴ واحد سختی ویکرز کیلوگرم نیرو بر میلی متر مربع است. (توضیح آن به طور کامل در قسمت پیوست آمده است).



شکل ۲-۵۲- نمایی از دستگاه سایش سورشار (Tunnels & Tunnelling International, 2006)

ب- اندیس سایش ضربه دینامیکی

این اندیس روشی برای ارزیابی سایندهی بالقوه سنگ‌ها می‌باشد، که در دانشگاه ناتینگهام^۱ توسعه داده شده است. اندیس سایش ضربه دینامیکی این مزیت را دارد که، می‌تواند برای انواع سنگ‌های مقاوم تا ترد مورد استفاده قرار گیرد. این اندیس تابعی از سختی و میزان کانی‌های ساینده در سنگ بوده و زمانی که به علت شکل نمونه یا شرایط یا پایین بودن مقیاس مقاومتی سنگ، نتوان از روش‌های دیگر استفاده کرد، این روش مورد استفاده قرار می‌گیرد (Ersoy & Waller, 1995).

پ- فاکتور سایندهی شیمازک

این فاکتور سایندهی در سال ۱۹۷۰، توسط شیمازک و ناتز به صورت رابطه (۸-۲)، ارائه شده است:

$$F = \frac{(EqQtz \times \phi \times BTS)}{100} \quad (8-2)$$

که در آن:

F: فاکتور سایندهی شیمازک (N/mm)، EqQtz: درصد محتوی کوارتز معادل، ϕ : اندازه دانه

(mm)، BTS: مقاومت کششی برزیلی می‌باشند. اگر اندازه دانه کمتر از ۰/۰۲۵ میلی‌متر باشد، دانه‌ها

¹ Nottingham

تأثیر ناچیزی بر روی ساینده‌گی خواهند داشت. مقاومت کششی نیز، مقاومت مرز بین دانه‌ها را نشان می‌دهد. سختی کانی‌های موجود در سنگ، نسبت به کوارتز سنجیده می‌شود. در اروپا این اندیس به منظور ارزیابی ساینده‌گی سنگ‌های رسوبی، به خصوص معدن‌کاری زغال و تونل مورد استفاده قرار گرفته است. فاکتور سایش شیمازک یک رابطه خطی با سایش نشان داده است (Ersoy & Waller, 1995).

اندازه دانه‌ها با استفاده از مقاطع نازک و میانگین‌گیری وزنی اندازه دانه‌ها و مقدار مقاومت کششی غیر مستقیم از طریق آزمایش تعیین می‌شود.

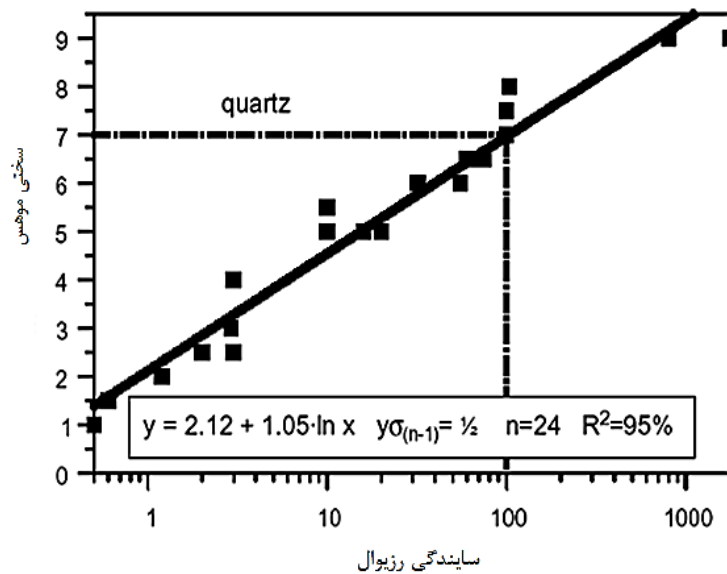
پ-۱ کوارتز محتوی

با توجه به اینکه، سایش ابزار، به طور عمده، به علت وجود کانی‌های سخت‌تر از فولاد با سختی ۵/۵ و به خصوص کوارتز با سختی ۷ می‌باشد، برای اینکه تمام کانی‌های موجود در یک نمونه سنگ در نظر گرفته شوند، باید مقدار کوارتز محتوی معادل در مقاطع نازک توسط آنالیز کیفی مشخص شود، که این به معنای کل کانی‌های محتوی با توجه به ساینده‌گی یا سختی کوارتز می‌باشد. بنابراین مقدار کوارتز محتوی معادل از ضرب کردن مقدار هر کانی در سختی نسبی رزیوال آن نسبت به کوارتز به دست می‌آید (Thuro, 1997).

رابطه (۲-۹)، مقدار کوارتز محتوی معادل را نشان می‌دهد.

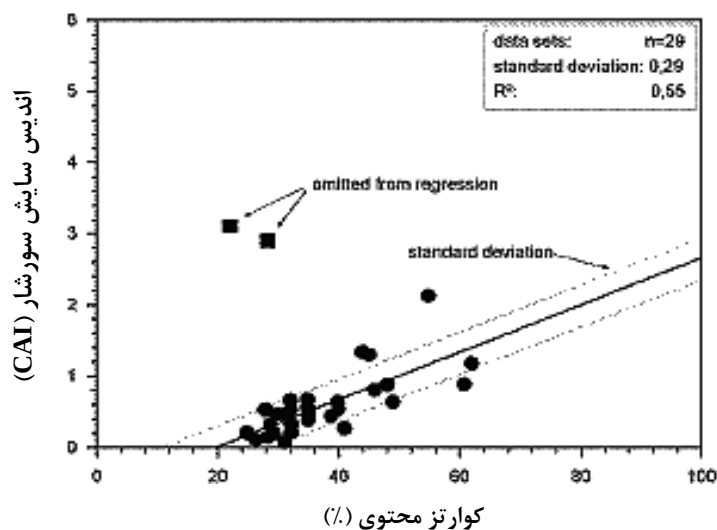
$$EqQtz = \sum_{i=1}^n A_i R_i \quad (۲-۹)$$

که در آن، A نشانگر درصد کانی‌ها، R ساینده‌گی رزیوال و n تعداد کانی‌ها می‌باشد. ارتباط بین سختی موس و ساینده‌گی رزیوال در شکل (۲-۵۳)، مشاهده می‌شود. با استفاده از این نمودار می‌توان با داشتن سختی موس، ساینده‌گی رزیوال کانی مورد نظر را با دقت قابل قبولی به دست آورد (Thuro, 1997).



شکل ۲-۵۳- رابطه میزان ساینده گی رزیوال سنگ با استفاده از سختی موس (Thuro, 1997)

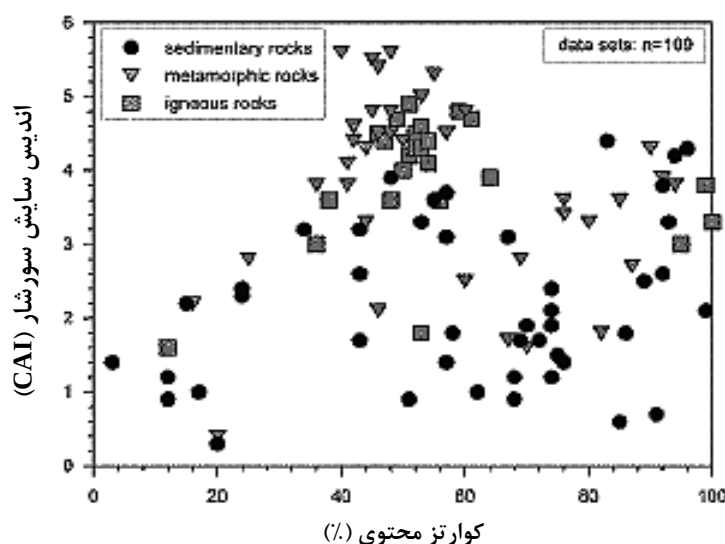
وست^۱ در سال ۱۹۸۹، بیان کرد که کوارتز محتوی پارامتر اصلی ژئومکانیکی مؤثر بر مقدار اندیس سایش سورشار است و یک رابطه منطقی برای ۲۹ سری داده با سایش کم ارائه کرد (شکل ۲-۵۴).



شکل ۲-۵۴- ارتباط بین اندیس سایش سورشار و کوارتز محتوی (Plinninger & Thuro, 2004)

¹ West

یک برنامه تحقیقاتی نیز در مؤسسه TU مونیخ توسط کسلینگ^۱ در سال ۲۰۰۰ انجام گرفت. در این آزمایش، ۱۰۹ نمونه سنگی مختلف، با محدوده وسیع سایش (اندیس از ۰/۳ تا ۵/۶) با استفاده از تست سورشار و همچنین پارامترهای استاندارد دیگری از سنگ سخت، نظیر مقاومت فشاری تک-محوره، مدول یانگ و مقاومت کششی برزیلی مانند تحلیل سنگ‌شناسی مقاطع نازک، مورد بررسی قرار گرفت. بر خلاف نظر وست، نتیجه کار ارائه شده در شکل (۲-۵۵)، نشان می‌دهد که کوارتز محتوی معادل، به تنهایی برای تفسیر مقادیر سایش حاصل از تست سورشار مناسب نمی‌باشد (Plinninger & Thuro, 2004).



شکل ۲-۵۵- ارتباط بین اندیس سایش سورشار و کوارتز محتوی (Plinninger & Thuro, 2004)

پ-۲ شاخص سایش سنگ^۲

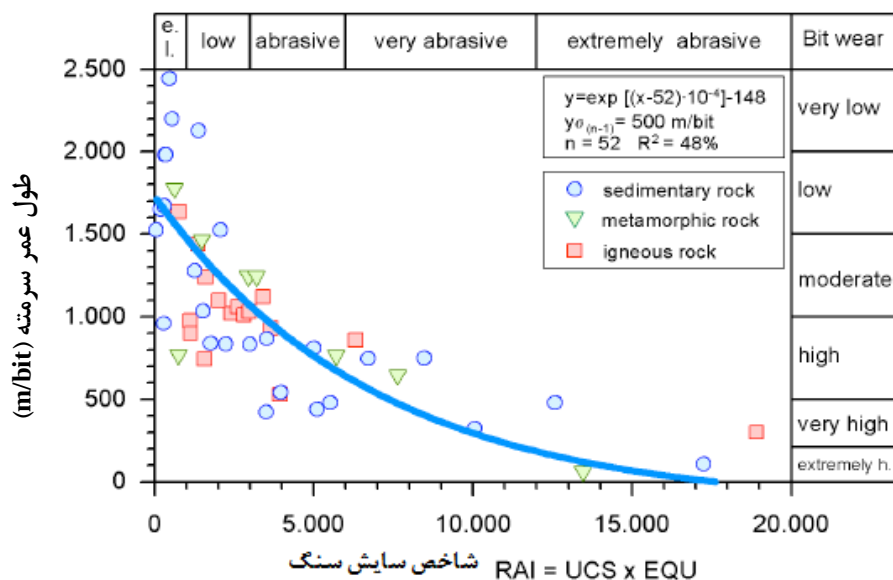
شاخص سایش سنگ یک شاخص فرسایشی ژئوتکنیکی جدیدی می‌باشد که بخشی از فرآیند نرخ فرسایش سرمته را شامل می‌شود. این روش یک برنامه تحقیقی را که شامل تمامی محدوده مقیاس توده سنگ تا مقیاس کانی‌شناسی می‌شود، ارائه می‌دهد. زمانی که تحقیقات در مقیاس کانی-

¹ Kasling

² Rock Abrissvness Index

شناسی و سنگ انجام می‌گیرد، شاخص سایش انواع سنگ‌ها، از ضرب کردن مقاومت فشاری تک-محوره که معیاری از به هم چسبیدگی و قفل‌شدگی کانی‌هاست، در مقدار کوارتز محتوی به دست می‌آید. اما در مقیاس توده‌سنگ با آگاهی از پارامترهای مثبت و منفی تأثیرگذار، که سایش مته را کاهش یا افزایش می‌دهند، می‌توان نمودار این شاخص را نتیجه گرفت (Thuro & Plinninger, 2003).

در شکل (۲-۵۶)، رابطه بین عمر سرمته در مقابل شاخص سایش سنگ مشاهده می‌شود.



شکل ۲-۵۶- رابطه شاخص سایش سنگ RAI و عمر سرمته (Thuro & Plinninger, 2003)

با توجه به شکل بالا، رابطه سایش سنگ به صورت زیر می‌باشد:

$$RAI = EqQtz \times UCS \quad (۲-۱۰)$$

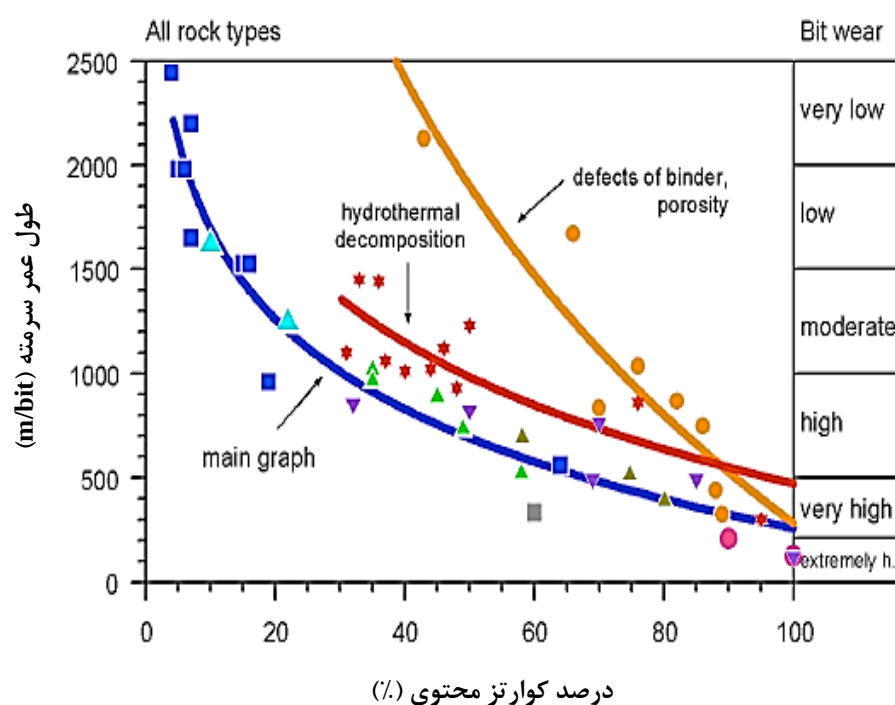
که در آن، $EqQtz$ نشانگر درصد میزان کوارتز محتوی معادل سنگ و UCS نمایانگر مقاومت فشاری سنگ بر حسب مگاپاسکال می‌باشد.

روش تعیین مقدار کوارتز محتوی معادل در بین سازندگان ابزارها، مهندسان و زمین‌شناسان به منظور تحقیقات اولیه کارگاهی و پیش از اینکه سایش ابزار اتفاق بیفتد، گسترده است. در شکل (۲-۵۷)، عمر سرمته در سنگ‌های مختلفی با مقدار کوارتز محتوی معادل ارتباط داده شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار کوارتز محتوی، میزان سایش سرمته‌ها افزایش می‌یابد. اما برخی از انواع سنگ‌ها به طور واضحی، منحنی‌های خاص خود را دارند (Thuro & Plinninger, 2003):

- ماسه‌سنگ‌ها، به ویژه آن‌هایی که دارای تخلخل بالاتری هستند، که اغلب به علت نقصان در سیمان سیلیسی آن‌ها می‌باشد.

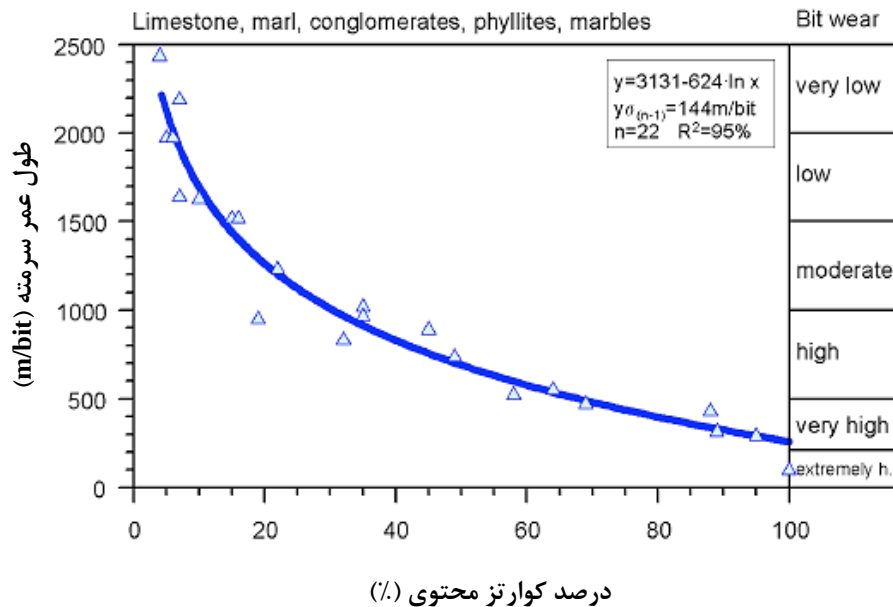
- سنگ‌های تجزیه‌شده هیدروترمالی بلورین.



شکل ۲-۵۷- رابطه میزان کوارتز محتوی و عمر سرمته در انواع سنگ‌های طبیعت (Thuro & Plinninger, 2003)

در هر کدام از انواع سنگ‌های مختلف، قفل‌شدگی دانه‌ها در ریزبافت‌های سنگ، یک مانع محسوب می‌شود. بنابراین برای پیش‌بینی عمر مته در هر نوع سنگ، باید به طور خاص مورد بحث واقع شود. همانطور که در شکل (۲-۵۸)، مشاهده می‌شود، گروهی از سنگ‌های دانه-دانه شامل: سنگ‌آهک، مارل، کنگلومرا، فیلیت و مرمر، توسط منحنی رگرسیون لگاریتمی توصیف شده‌اند. برای این گروه از سنگ‌های انتخاب شده، رابطه بدست آمده بسیار نزدیک است و ممکن است زمانی که

مقدار کوارتز محتوای معادل آن‌ها به وسیله آنالیزهای کیفی در مقاطع نازک مشخص شود، به منظور پیش‌بینی فرسایش سرمته مورد استفاده قرار گیرند (Thuro & Plinninger, 2003).

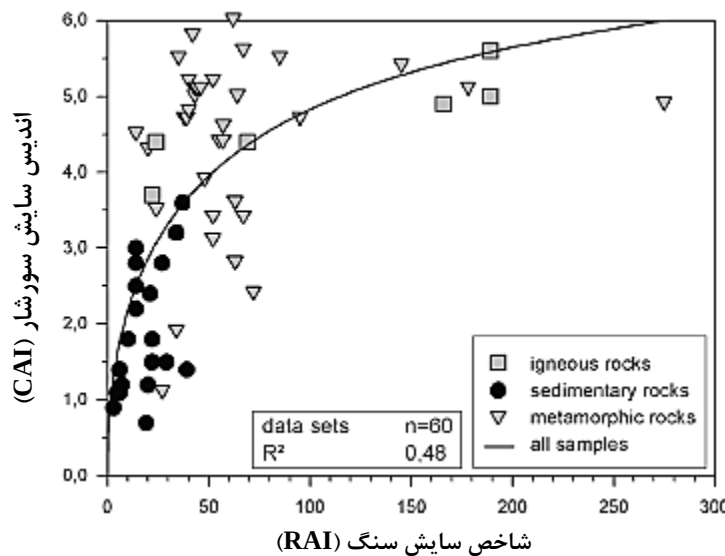


شکل ۲-۵۸- رابطه عمر سرمته با درصد کوارتز محتوی در سنگ‌های مختلف دانه-دانه با کوارتز محتوی معادل

(Thuro & Plinninger, 2003)

همچنین پلانیگر و همکارانش در سال ۲۰۰۴، بیان کردند که، شاخص سایش سنگ رابطه

لگاریتمی نسبتاً خوبی را با اندیس سایش سورشار نشان می‌دهد (شکل ۲-۵۹) (Plinninger & Thuro, 2004).



۵۹-۲- ارتباط بین شاخص سایش سنگ و اندیس سایش سورشار (Plinninger & Thuro, 2004)

قهرمان در سال ۱۹۹۹، به منظور پیش‌بینی سرعت حفاری در سه نوع سیستم حفاری چرخشی، DTH و سیستم حفاری ضربه‌ای - دورانی چکش بالا، تحقیقاتی را بر روی چندین نوع سنگ شامل: سنگ آهک، دولومیت، ماسه سنگ آلتزه شده، سرپانتیت، هماتیت، توف و دولومیت انجام داد. ایشان با استفاده از صدها مدل، بهترین مدل را برای پیش‌بینی نرخ نفوذ در هر یک از سیستم‌های حفاری اشاره شده ارائه کرد. ایشان به این نتیجه رسیدند که، پارامترهای غالب سنگ در روش چرخشی، مقاومت فشاری تک‌محوره، در روش DTH عدد سختی اشمیت و در سیستم حفاری ضربه‌ای - دورانی چکش بالا مقاومت فشاری و کوارتز محتوی می‌باشند. در رابطه (۲-۱۱)، سرعت حفاری در سیستم حفاری ضربه‌ای - دورانی چکش بالا، آمده است (Kahraman, 1999).

$$PR = 0.47 \frac{b_{pm}^{0.375}}{\sigma_c^{0.534} \times q^{0.093}} \quad (2-11)$$

σ_c : مقاومت فشاری تک‌محوری (Mpa)

PR: سرعت حفاری (m/min)

b: فرکانس دمش هوای فلاشینگ (bpm)

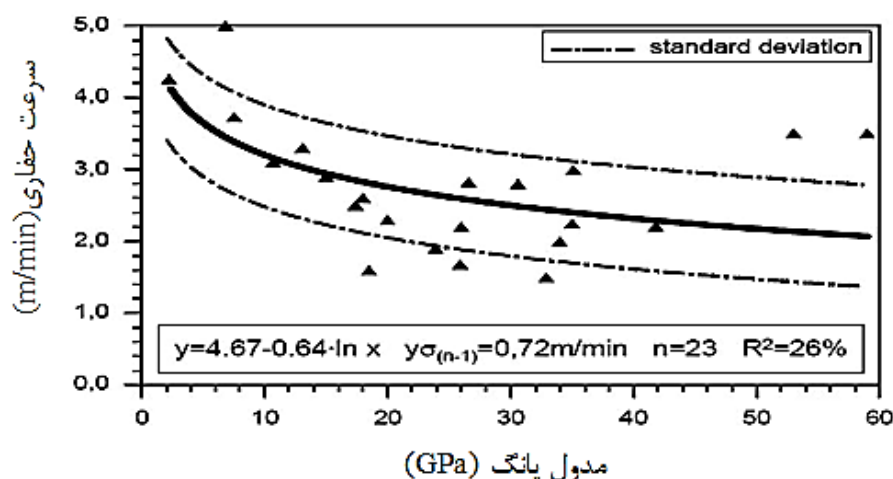
q: میزان کوارتز (%)

۱۱.۱.۳.۲ خواص الاستیسیته و پلاستیسیته

قابلیت تغییر شکل، نحوه شکست و نوع شکست سنگ به خاصیت الاستیسیته و پلاستیسیته سنگ‌ها بستگی دارد. خواص الاستیک سنگ‌ها توسط مدول الاستیسیته (E) و نسبت پواسون (ν) مشخص می‌شود.

اکثر کانی‌های موجود در سنگ رفتار الاستیک ترد دارند و از قانون هوک تبعیت می‌کنند. خواص الاستیک توسط مدول الاستیسیته مشخص می‌شود. مدول الاستیسیته نسبت تنش قائم به تغییر شکل نسبی ایجاد شده در اثر آن است (Jimeno et al, 1995).

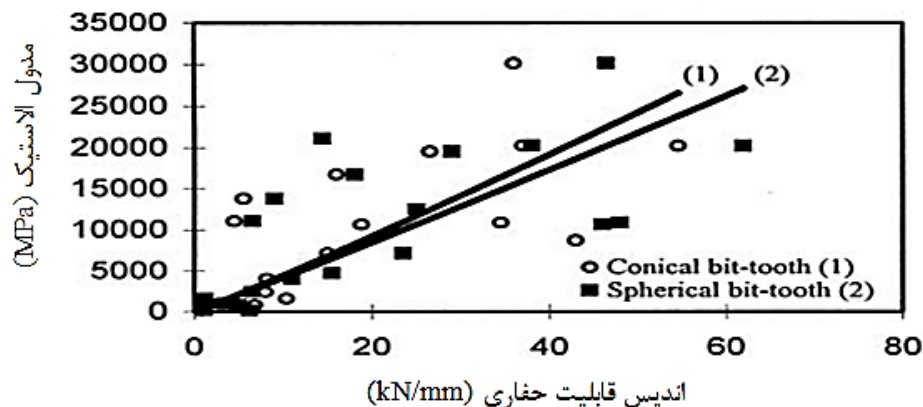
همانطور که قبلاً اشاره شد، تورو در سال ۱۹۹۶، پس از انجام آزمایشاتی بر روی تعدادی نمونه سنگ، نشان داد که با افزایش مدول یانگ سنگ‌ها، سرعت حفاری به صورت لگاریتمی کاهش می‌یابد. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که ضریب همبستگی بین مدول یانگ و سرعت حفاری، بالا نبوده و این دو پارامتر ارتباط خوبی را با یکدیگر نشان نمی‌دهند (Thuro & Spaun, ۱۹۹۶).



شکل ۲-۶۰- ارتباط سرعت حفاری و مدول الاستیسیته سنگ‌ها (Thuro & Spaun, 1996)

قهرمان در سال ۲۰۰۰، با انجام تعداد زیادی آزمایش با استفاده از سیستم حفاری دورانی و دو نوع سرته کروی و مخروطی، نشان داد که با افزایش مدول الاستیسیته سنگ‌ها، سرعت حفاری

دورانی در سنگ کاهش و اندیس قابلیت حفاری افزایش می‌یابد (شکل ۲-۶۱) (Kahraman et al, 2000).

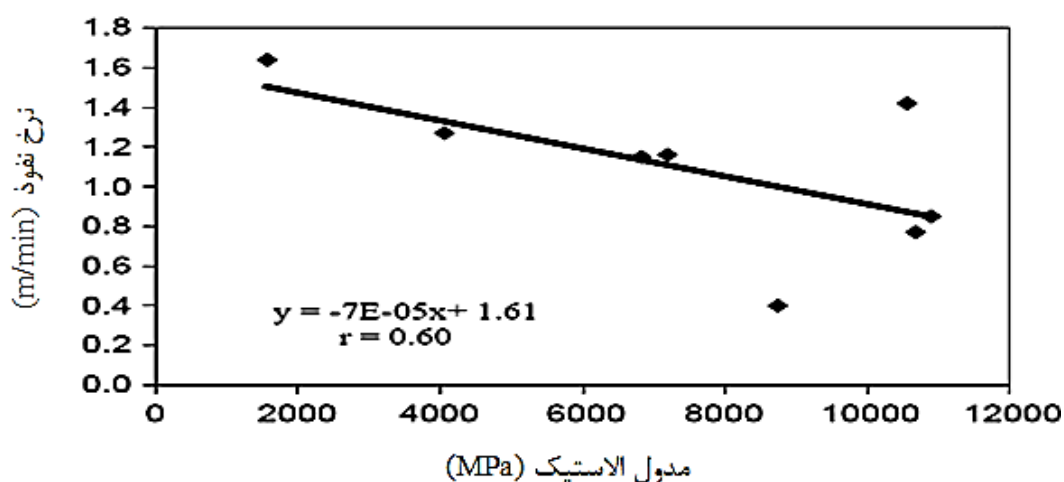


شکل ۲-۶۱- ارتباط قابلیت حفاری و مدول الاستیسیته سنگ‌ها در حفاری دورانی (Kahraman et al, 2000)

در شکل بالا، ضریب همبستگی برای سرمته‌های کروی ۰/۸۴ و برای سرمته‌های مخروطی ۰/۷۸ می‌باشد.

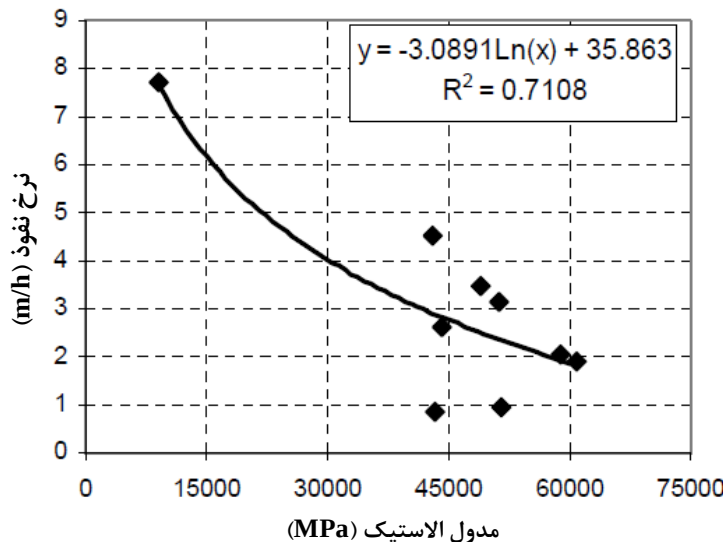
همچنین قهرمان در سال ۲۰۰۳ طی تحقیقی پیرامون حفاری ضربه‌ای نشان داد که با افزایش

مدول الاستیسیته سنگ‌ها سرعت حفاری به صورت خطی کاهش می‌یابد (شکل ۲-۶۲) (Kahraman et al, 2003).



شکل ۲-۶۲- ارتباط قابلیت حفاری و مدول الاستیسیته سنگ‌ها در حفاری ضربه‌ای (Kahraman et al, 2003)

حسینی و عطائی نیز در سال ۱۳۸۸، با بررسی رابطه بین نرخ نفوذ و مدول الاستیسیته در سیستم حفاری ضربه‌ای پنوماتیکی با سرمته تیغه‌ای ضربدری، به این نتیجه رسیدند که، با افزایش مدول الاستیسیته، نرخ نفوذ به صورت لگاریتمی کاهش می‌یابد. اما این ارتباط، یک ارتباط قابل قبولی نمی‌باشد (شکل ۲-۶۳) (حسینی و عطائی، ۱۳۸۸).



شکل ۲-۶۳- رابطه بین سرعت حفاری ضربه‌ای و مدول الاستیسیته سنگ (حسینی و عطائی، ۱۳۸۸)

۱۲.۱.۳.۲ تردی

تردی یکی از پارامترهای مهم و مؤثر در قابلیت حفاری سنگ می‌باشد. تعیین ارتباط بین قابلیت حفاری و تردی به مهندسی سنگ کمک خواهد کرد. همانطور که قبلاً اشاره شد، بین محققان مختلف، تعریف، مفهوم و روش اندازه‌گیری واحدی برای این پارامتر وجود ندارد (Gunaydin et al, 2004).

قهرمان در سال ۲۰۰۲، به طور آماری رابطه بین قابلیت حفاری با سه تعریف مختلف از تردی را با به کارگیری داده‌های خامی که از کارهای آزمایشگاهی محققان مختلفی به دست آمده بود، بررسی کرد. او در این تحقیق از روابط زیر برای تحقیق استفاده نمود (Kahraman, 2002):

$$B_1 = \frac{\sigma_c}{\sigma_t} \quad \text{رابطه (۲-۱۲)}$$

σ_c : مقاومت فشاری تک محوره

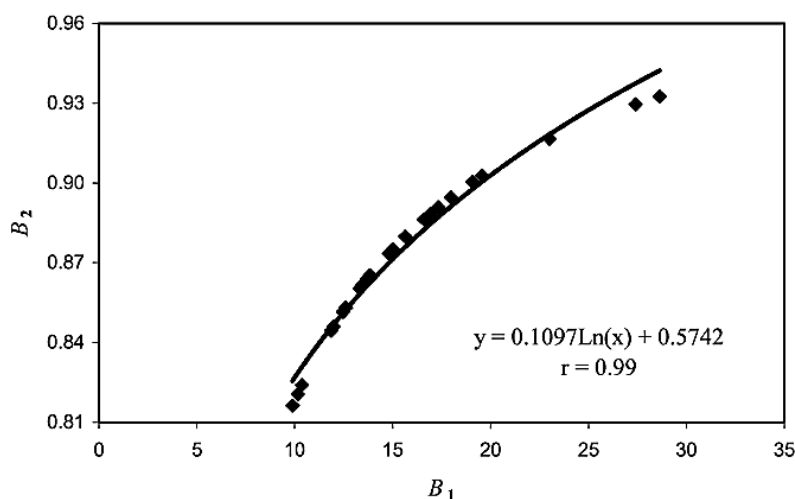
σ_t : مقاومت کششی

$$B_2 = \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t} \quad \text{رابطه (۲-۱۳)}$$

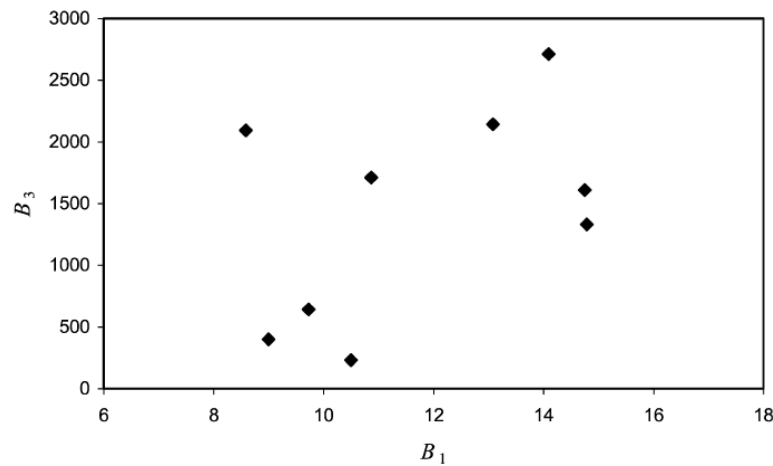
$$B_3 = q\sigma_c \quad \text{رابطه (۲-۱۴)}$$

q : درصد خاکه به دست آمده در آزمایش پروتودیاکانوف

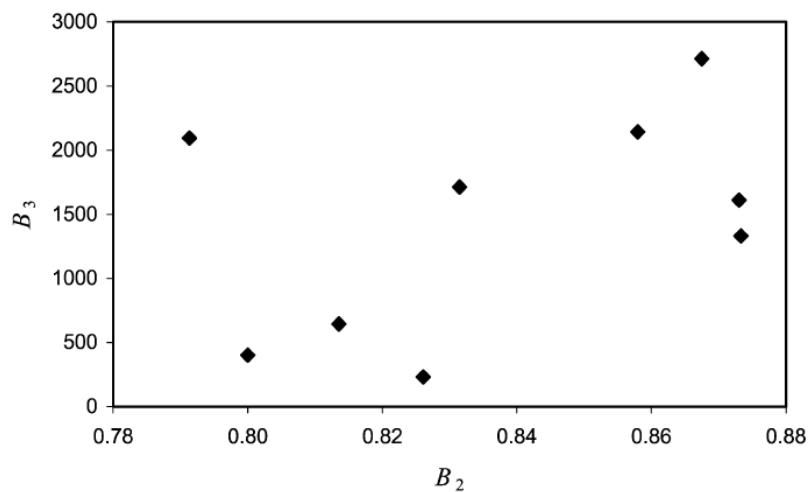
بین تردی B_1 و B_2 ، رابطه لگاریتمی خوبی وجود دارد، در حالی که ارتباطی بین تردی B_3 و تردی های B_1 و B_2 دیده نمی شود. از این مقایسه می توان نتیجه گرفت که تردی B_3 با تردی های B_1 و B_2 تفاوت دارد، که این تفاوت به روش اندازه گیری تردی B_3 برمی گردد (Kahraman, 2002). در شکل (۲-۶۴)، یک ارتباط بسیار خوب بین تردی B_1 و B_2 مشاهده می شود، اما در اشکال (۲-۶۵) و (۲-۶۶) هیچ گونه ارتباطی میان تردی B_3 با تردی های B_1 و B_2 مشاهده نمی شود.



شکل ۲-۶۴- ارتباط بین تردی B_1 و B_2 (Kahraman, 2002)

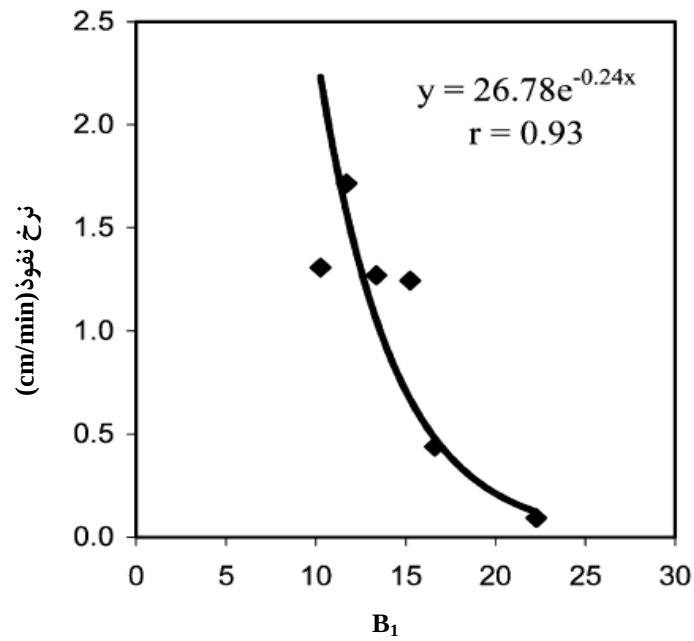


شکل ۲-۶۵- ارتباط بین تردی B_1 و B_3 (Kahraman, 2002)

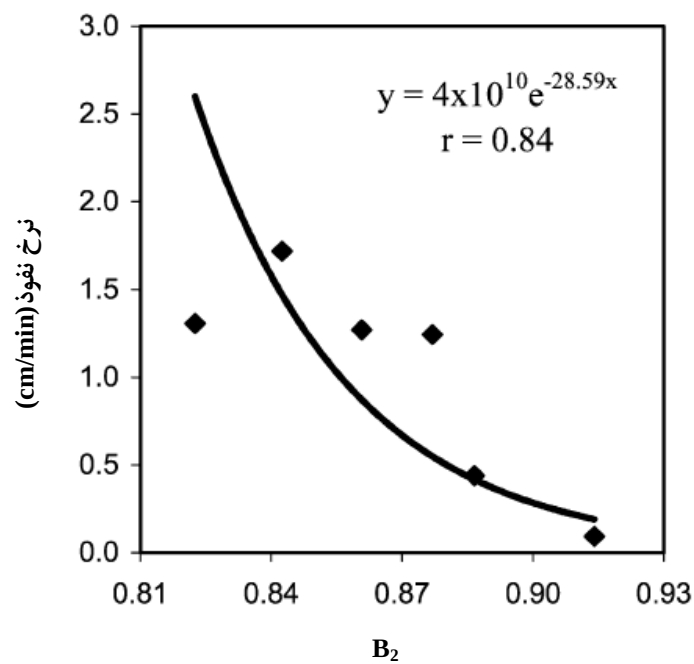


شکل ۲-۶۶- ارتباط بین تردی B_2 و B_3 (Kahraman, 2002)

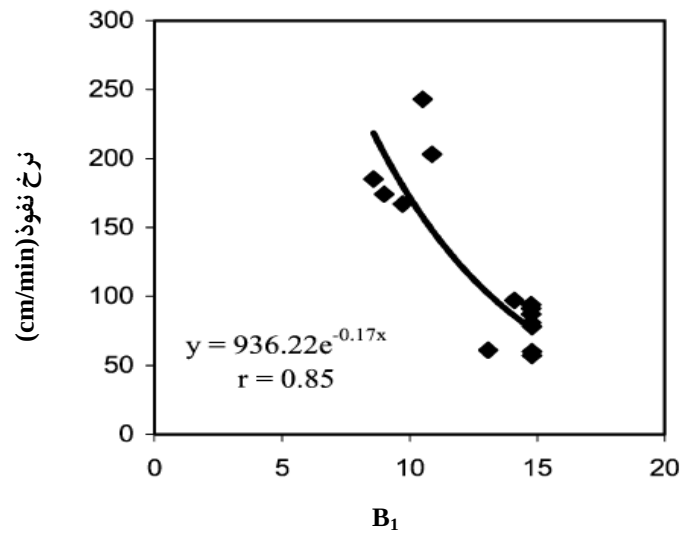
در اشکال (۲-۶۷) تا (۲-۷۱) نیز، ارتباط بین تردی‌های مختلف با نرخ نفوذ مشاهده می‌شود. به طوری که با افزایش تردی نرخ نفوذ کاهش می‌یابد. همانطور که مشاهده می‌شود، بین تردی‌های B_1 و B_2 در TBM، ارتباط بسیار خوبی وجود دارد. همچنین در سیستم حفاری چرخشی تردی‌های B_1 و B_2 و در سیستم حفاری ضربه‌ای تردی B_3 ارتباط خوبی را با نرخ نفوذ نشان می‌دهد.



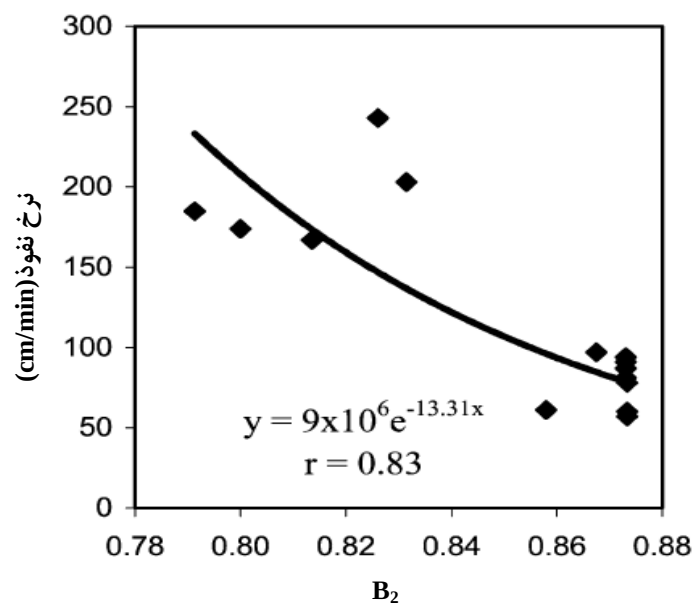
شکل ۲-۶۷- ارتباط بین نرخ نفوذ و تردی B_1 در TBM (Kahraman, 2002)



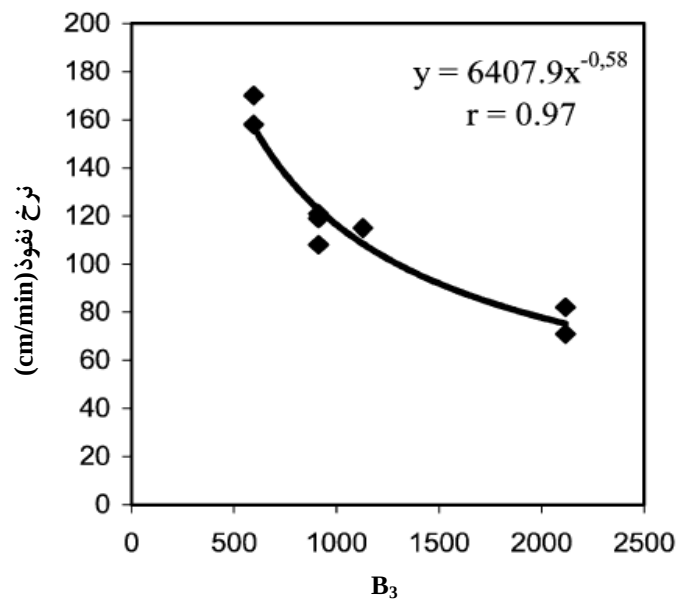
شکل ۲-۶۸- ارتباط بین نرخ نفوذ و تردی B_2 در TBM (Kahraman, 2002)



شکل ۲-۶۹- ارتباط بین نرخ نفوذ و تردی B_1 در سیستم حفاری چرخشی (Kahraman, 2002)

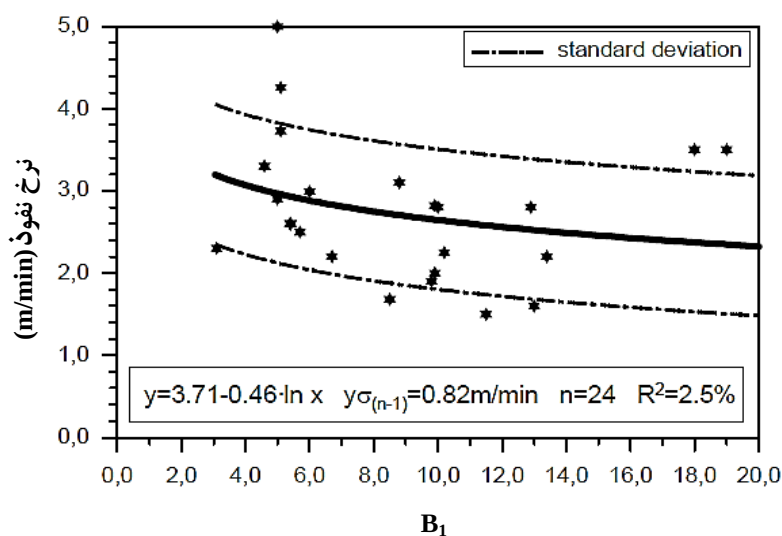


شکل ۲-۷۰- ارتباط بین نرخ نفوذ و تردی B_2 در سیستم حفاری چرخشی (Kahraman, 2002)



شکل ۲-۷۱- ارتباط بین نرخ نفوذ و تدری B_3 در سیستم حفاری ضربه‌ای (Kahraman, 2002)

تورو و اسپان نیز در سال ۱۹۹۶، ارتباط بین تدری B_1 و نرخ نفوذ را در سیستم حفاری ضربه‌ای به صورت شکل (۲-۷۲)، بیان کردند (Thuro & Spaun, 1996).

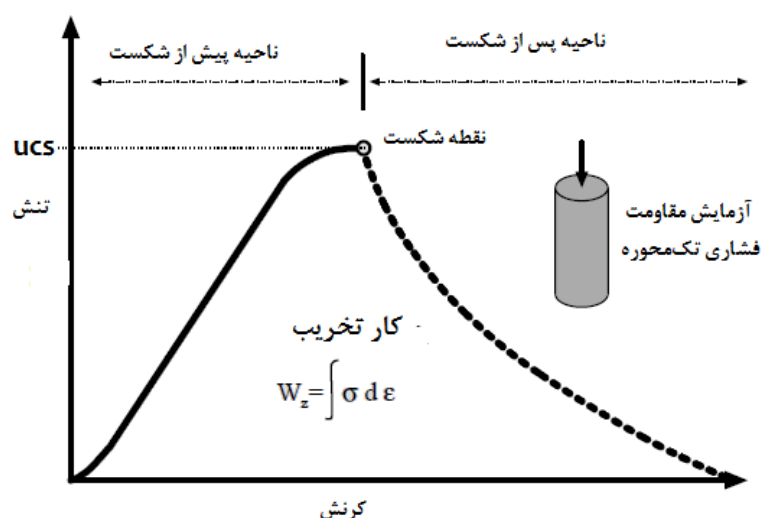


شکل ۲-۷۲- ارتباط بین اندیس قابلیت حفاری و B_1 (Thuro & Spaun, 1996)

همانطور که مشاهده می‌شود، ارتباط بین تدری B_1 و نرخ نفوذ در سیستم حفاری ضربه‌ای، رابطه خوبی را نشان نمی‌دهد.

۱۳.۱.۳.۲ کار تخریب

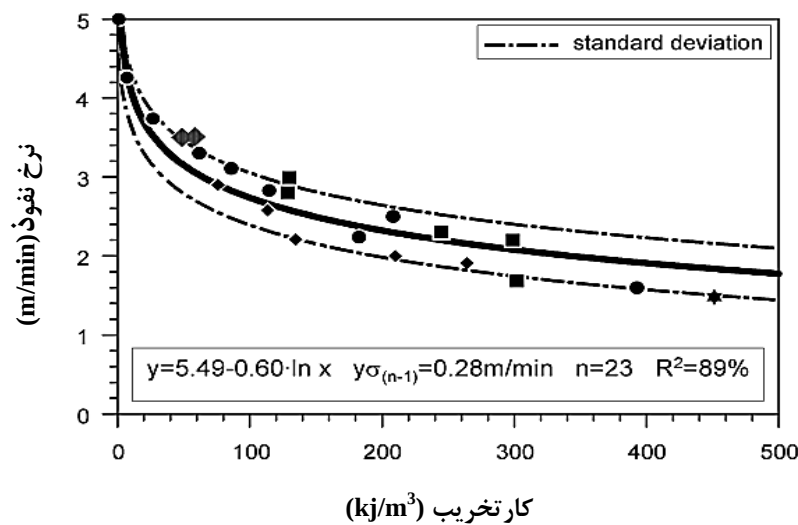
تورو و اسپان در سال ۱۹۹۶، مشخصه جدیدی از سنگ با نام کار تخریب^۱ را معرفی کرده و بیان کردند که، این مفهوم در مقایسه با سایر خصوصیات سنگ، بهترین رابطه را با قابلیت چالزنی داراست. اصطلاح کار ویژه تخریب (W_z)، مقدار کار لازم برای تغییر شکل یک نمونه سنگ تا انتهای ناحیه پس از شکست است (Thuro & Spaun, 1996) (شکل ۷۳-۲).



شکل ۷۳-۲- برآورد کار تخریب ویژه از منحنی تنش کرنش یک نمونه سنگ تحت فشار تک محوره (Thuro, 1997)

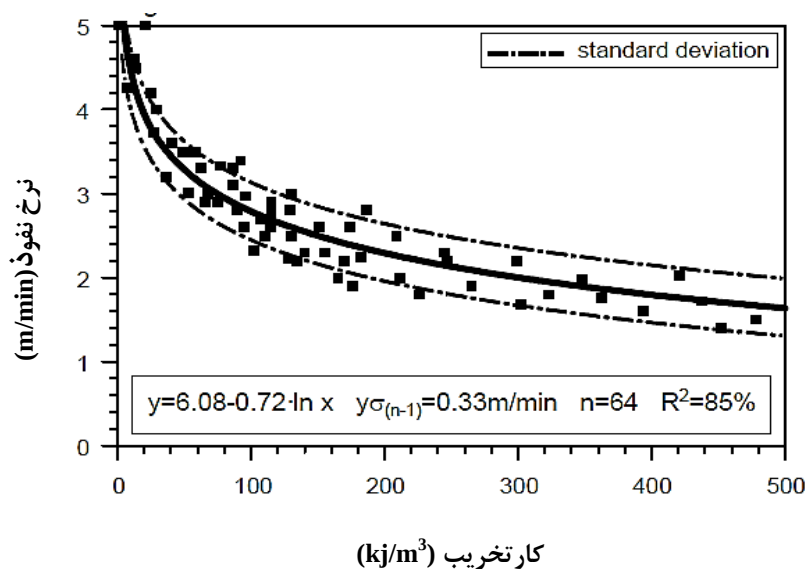
به طور کلی در هر گونه فرآیند خردایش سنگ (به عنوان نمونه، عملیات مربوط به چالزنی)، باید انرژی کافی به سنگ انتقال یابد، تا علاوه بر شکستن سنگ باعث خردایش و جدا شدن سنگ از محل اولیه شود. این کار به معنای آن است که، فرآیند خردایش، هم ناحیه پیش از شکست و هم ناحیه پس از شکست را شامل می شود. به همین دلیل مفهومی مانند کار تخریب، که هر دوی این نواحی را در بر می گیرد، رابطه ای مناسب و نزدیک با قابلیت حفاری دارد. این محققین پس از بررسی ۲۳ نمونه سنگ با استفاده از سیستم حفاری ضربه ای در جبهه کار تونل، رابطه بین کار تخریب و نرخ نفوذ را به صورت شکل (۷۴-۲)، بیان کردند (Thuro and Spaun, 1996).

¹ Destruction Work



شکل ۲-۷۴- رابطه بین نرخ نفوذ و کار تخریب در ۲۳ نمونه سنگ در جبهه کار تونل (Thuro and Spaun, 1996)

همچنین این محققین با انجام ۶۴ آزمایش، ارتباط بین نرخ نفوذ و کار تخریب را به صورت شکل (۲-۷۵)، بیان کردند. همانطور که در این اشکال مشاهده می‌شود، بین کار تخریب و نرخ نفوذ رابطه خوبی وجود دارد و با افزایش مقدار کار تخریب، نرخ نفوذ کاهش می‌یابد. از این بررسی‌ها می‌توان این نتیجه‌گیری را کرد که، یکی از پارامترهای مؤثر بر نرخ نفوذ کار تخریب می‌باشد (Thuro and Spaun, 1996).



شکل ۲-۷۵- ارتباط بین کار تخریب و نرخ نفوذ (Thuro and Spaun, 1996)

در نهایت نتیجه گرفته می‌شود که، با استفاده از نمودارهای مختلف و پارامترهایی مانند: قطر مته حفاری، سرعت چرخش مته، بار پشت مته، مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت کششی، ضریب بافت و ... می‌توان نرخ نفوذ را پیش‌بینی کرده و یا بالعکس، با داشتن نرخ نفوذ، ویژگی‌های مختلف سنگ را پیش‌بینی کرد. البته جهت توسعه در این زمینه باید، آزمایشات و کار وسیع‌تری انجام شود (Kahraman, 2000).

۲.۳.۲ توده سنگ

مشخصات مختلف توده سنگ و ساختار آن نقش بسیار مهمی در فرآیند حفاری دارند. اگر چه پارامترهای مکانیکی سنگ نقش مهمی را ایفا می‌کنند، اما تأثیر پارامترهای زمین‌شناسی در بیشتر پروژه‌ها، به طور کامل در نظر گرفته نمی‌شوند. در برخی موارد، تأثیر پارامترهای زمین‌شناسی بر شکستگی سنگ، می‌تواند مهم‌تر از ویژگی‌های دیگر سنگ باشد (Thuro et al, 2002).

از این رو بهتر است، مشخصات زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی توده سنگ، به اندازه سایر پارامترهای ژئوتکنیکی مورد بررسی قرار گیرند.

تحقیقات انجام گرفته در زمینه تأثیر پارامترهای توده سنگ بر نرخ نفوذ، نسبت به پارامترهای مؤثر ماده سنگ، محدود می‌باشد. در ادامه به تعدادی از تحقیقاتی که در این زمینه انجام شده، اشاره می‌شود.

اودسون در سال ۱۹۷۹، رابطه بین نرخ نفوذ، شاخص کیفی توده سنگ، درجه آلتراسیون و جنس سنگ در سنگ‌های آذرین را مورد بررسی قرار داد. او به این نتیجه رسید که مقایسه RQD، با نرخ نفوذ مناسب نیست. چرا که مقادیر پایین RQD، در سنگ‌های بسیار شکاف‌پذیر و گسسته موجب نرخ‌های نفوذ بالایی می‌شود (Oddsson, 1979).

ویلبر و لیمن^۱ در سال ۱۹۸۲، در روش طبقه‌بندی‌شان، به ساختار توده‌سنگ اشاره کیفی کرده‌اند. در این روش از عبارات توده‌ای، ورقه‌ای، رگه‌ای و بلوکی برای توصیف توده‌سنگ‌ها استفاده شده است. با توجه به اینکه ممکن است افراد مختلف با توجه به شرایط پیچیده توده‌سنگ، تعریف‌های متفاوتی از آن داشته باشند، لذا طبقه‌بندی کیفی در برخی موارد کاربر را دچار سردرگمی می‌کند (حسینی و همکاران، ۱۳۸۵).

جیمینو^۲ و همکارانش در سال ۱۹۹۵، بیان کردند که، ویژگی‌های ساختاری توده‌سنگ، مانند: شیب‌توزیته، ضخامت لایه‌بندی، شیب و امتداد درزه‌ها و گسل‌ها، بر روی جهت‌داری و پایداری دیواره‌های چال و عملکرد حفاری، تأثیرگذارند (Jimeno et al, 1995).

تورو در سال ۱۹۹۷، علاوه بر بررسی پارامترهای مکانیکی سنگ، به تعیین ارتباط میان پارامترهای زمین‌شناسی مانند: فاصله‌داری و جهت‌داری ناپیوستگی‌ها با نرخ نفوذ پرداخت. او بیان کرد که، اگر فاصله‌داری درزه‌ها بیش از ابعاد چال باشد، تأثیر آن نامشخص خواهد بود. در مورد جهت‌داری ناپیوستگی‌ها نیز به این نتیجه رسید که، اگر جهت نفوذ عمود بر جهت برگ‌وارگی باشد، نرخ نفوذ افزایش و بالعکس، اگر موازی با جهت برگ‌وارگی باشد، نرخ نفوذ حداقل مقدار خود را خواهد داشت (Thuro, 1997).

سینگ^۳ و همکارانش در سال ۱۹۹۸، در بررسی عوامل دخیل در میزان انحراف چال‌های آشکاری، عملکرد پارامترهای مختلفی از توده‌سنگ از جمله مقاومت سنگ، ناهمسانگردی، لایه‌بندی و مشخصات درزه‌ها به ویژه شیب‌داری درزه‌ها را مورد تأکید قرار داده‌اند (حسینی و همکاران، ۱۳۸۵).
تورو و همکارانش در سال ۲۰۰۲، به منظور کمی کردن پارامتر هوازدگی و بررسی ارتباط آن با نرخ نفوذ، تحقیقاتی را در دو تونل طویل ۳/۳ کیلومتری بزرگراه، در آلمان شرقی در سنگ گرانیت به

¹ Wilbur & Lyman

² Jimeno

³ Singh

شدت هوازده انجام دادند. آن‌ها مراحل مختلف هوازده‌گی را در ۶ مرحله، طبقه‌بندی کرده و به این نتیجه رسیدند که، با افزایش درجه هوازده‌گی نرخ نفوذ کاهش و میزان مصرف مواد منفجره افزایش می‌یابد (Thuro et al, 2002).

آکون و کارپوز در سال ۲۰۰۵، با بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر نرخ نفوذ، یکی از پارامترهای مؤثر بر نرخ نفوذ را، شاخص کیفیت سنگ معرفی نمودند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که، درصد شاخص کیفیت سنگ و نرخ نفوذ رابطه خطی مستقیم دارند (Akun & Karpuz, 2005).

حسینی و همکارانش در سال ۲۰۰۸، در راستای ارائه یک سیستم رده‌بندی به منظور تعیین قابلیت حفاری، به بررسی کمی تأثیرات درزه‌ها بر راندمان چالزنی در سیستم حفاری دورانی، بر روی مدل‌های فیزیکی پرداختند. آن‌ها با شبیه‌سازی فاصله‌داری، شیب و پرشدگی درزه‌ها با استفاده از بلوک‌های بتونی در آزمایشگاه، به نتایج زیر رسیدند (Hoseinie et al, 2008):

- با افزایش فاصله‌داری درزه‌ها، نرخ نفوذ به صورت لگاریتمی افزایش یافته و به همین نسبت، موجب افزایش بازدهی عملیات حفاری می‌شود.

- با افزایش ابعاد مواد پرکننده درزه‌ها، نرخ نفوذ به صورت لگاریتمی افزایش می‌یابد. شرایط بحرانی، زمانی اتفاق می‌افتد که، اندازه ذرات پرکننده به اندازه ذرات فلاشینگ شود.

- با افزایش زاویه بین امتداد چال و سطح درزه، نرخ نفوذ به صورت خطی افزایش می‌یابد.

با توجه به جدول (۲-۲) و تحقیقات صورت گرفته که در بالا به آن‌ها اشاره شد، می‌توان عوامل

مختلفی از توده‌سنگ را که بر نرخ نفوذ تأثیر می‌گذارند، به دو دسته زیر تقسیم کرد:

- پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها، شامل: فاصله‌داری، شیب، بازشدگی و پرکننده‌ها.

- ساختارهای زمین‌شناسی، شامل: گسل‌خوردگی، چین‌خوردگی، آنیزوتروپی و هوازده‌گی.

در ادامه به توضیح هر یک از موارد فوق و تأثیر آن‌ها بر نرخ نفوذ پرداخته می‌شود.

۱.۲.۳.۲ پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها

الف - تأثیر فاصله‌داری درزه‌ها بر نرخ نفوذ

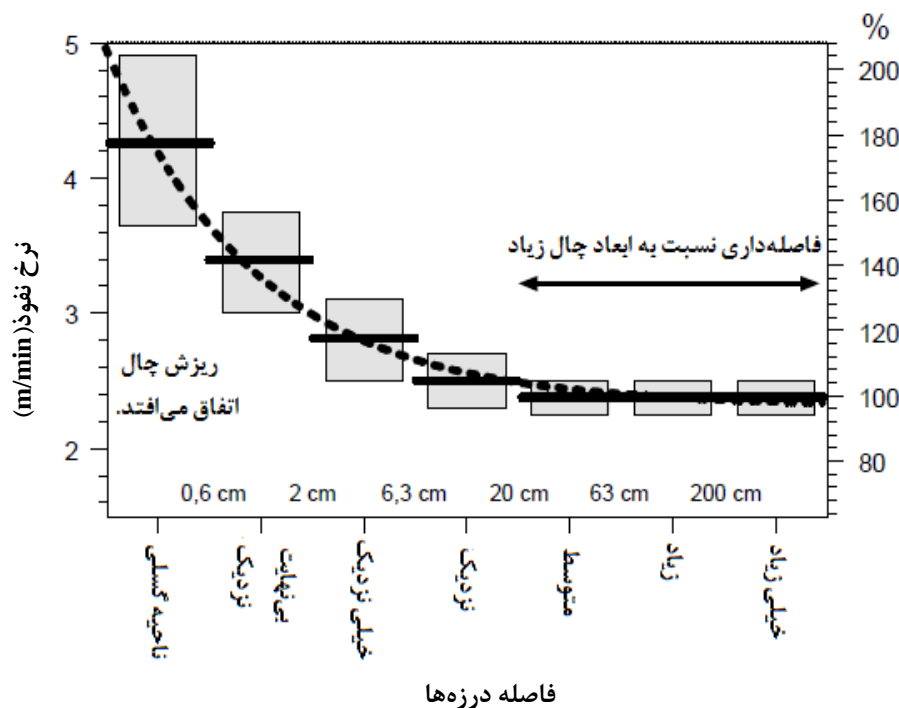
فاصله‌داری را می‌توان مهم‌ترین ویژگی سیستم درزه‌ها به حساب آورد. قابلیت حفاری و نفوذپذیری توده‌سنگ به فاصله‌داری درزه‌ها بستگی دارد. کاهش فاصله‌داری باعث کاهش پیوستگی محیط حفاری و نیز کاهش راندمان و نرخ نفوذ حفاری می‌گردد. وجود بیش از یک دسته درزه موجب بحرانی شدن وضعیت حفاری می‌شود. بحرانی‌ترین حالت در حفاری زمانی اتفاق می‌افتد که سنگ حالت بلوکی با بلوک‌های دارای حجم کوچک داشته باشد (Hoseinie et al, 2008).

فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها عامل مؤثری بر نرخ نفوذ در توده‌سنگ‌ها می‌باشد. ناپیوستگی‌ها صفحات ضعف توده‌سنگ‌ها را تشکیل می‌دهند. فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها می‌تواند به صورت تعداد ناپیوستگی در هر متر معرفی شده و پارامتری برای پیش‌شکستگی^۱ سنگ باشد (Thuro, 1997).

در شکل (۷۶-۲)، که ارتباط بین فاصله‌داری درزه‌ها با نرخ نفوذ در سنگ آهک را نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که، اگر فاصله‌داری نسبت به ابعاد چال زیاد باشد، تأثیر ناپیوستگی‌ها مشخص نخواهد بود. زمانی که درزه‌ها نزدیکتر می‌شوند، سرعت نفوذ تا دو برابر افزایش می‌یابد، اما مشکلی که در این حالت به وجود می‌آید، عدم تعادل چال است که، باعث فروریختن^۲ دیواره چال و گیر کردن وقت‌گیر چال انفجاری می‌شود. به همین جهت کوشش برای نفوذ سریع، به خصوص در مناطق گسلی بی‌نتیجه می‌باشد (Thuro, 1997).

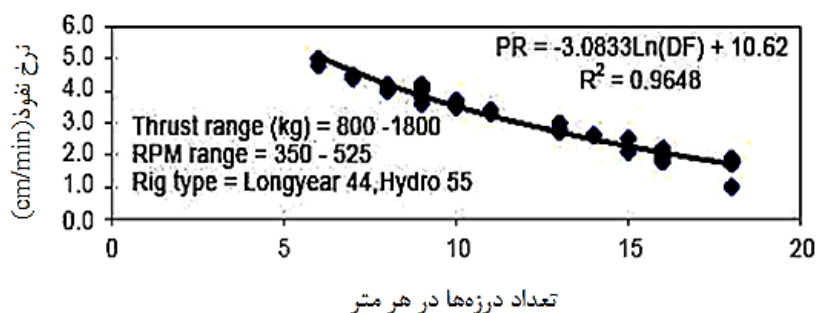
^۱ Precracking

^۲ Collapse



شکل ۲-۷۶- ارتباط بین فاصله داری درزه ها با نرخ نفوذ در سنگ آهک (Thuro, 1997)

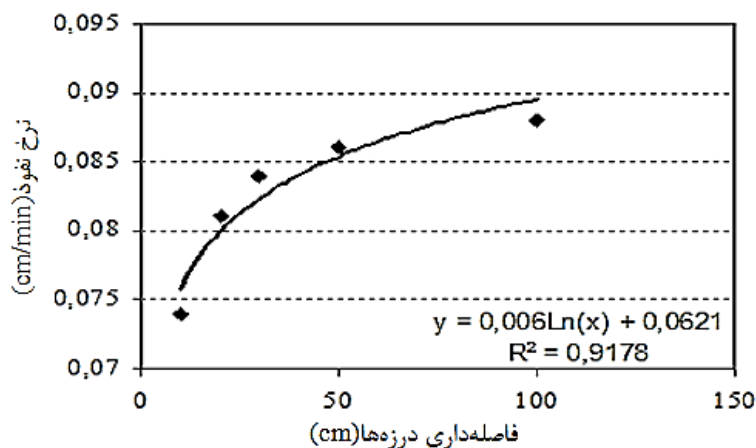
آکون و کارپوز در سال ۲۰۰۵، یکی از پارامترهای مؤثر بر نرخ نفوذ را فراوانی درزه ها دانستند. آن ها رابطه بین تعداد درزه ها در هر متر و نرخ نفوذ را در ماسه سنگ به دست آوردند. با توجه به نتیجه کار آن ها در شکل (۲-۷۷)، مشاهده می شود که، که با افزایش تعداد درزه ها در هر متر، نرخ نفوذ کاهش یافته است (Akun & Karpuz, 2005).



شکل ۲-۷۷- رابطه سرعت حفاری با فراوانی درزه ها (Akun & Karpuz, 2005)

نتایج حفاری با سیستم حفاری DTH، در مدل های فیزیکی حسینی و همکارانش در سال ۲۰۰۸، نشان می دهد که، کمترین نرخ نفوذ و راندمان سیستم حفاری، مربوط به فاصله داری ۱۰

سانتی متر می باشد. در توده سنگ های با فاصله داری ۵۰-۱۰ سانتی متری نرخ نفوذ سیستم حفاری اختلاف کمی با هم دارند. لذا با توجه به اطلاعات به دست آمده می توان پیش بینی کرد که با افزایش فاصله داری به بیش از یک متر، رفتار توده سنگ به رفتار محیط های پیوسته نزدیک تر می شود (شکل ۷۸-۲) (Hoseinie et al, 2008).



شکل ۷۸-۲- رابطه سرعت حفاری با فاصله داری درزه ها (Hoseinie et al, 2008)

نتایج مدلسازی فیزیکی، به منظور امتیازدهی به فاصله داری درزه ها جهت تعیین شاخص قابلیت حفاری^۱، در جدول (۸-۲)، ذکر شده است.

جدول ۸-۲- امتیازدهی به توده سنگ در رابطه با فاصله داری درزه ها (Hoseinie et al, 2008)

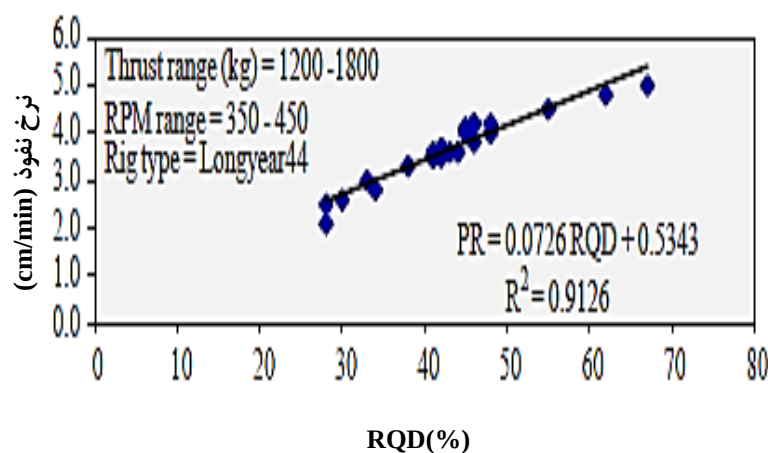
فاصله داری درزه ها (m)	>۲	۱-۲	۰/۵-۱	۰/۱۵-۰/۵	۰-۰/۱۵
امتیاز	۱۸	۱۳	۹	۵	۱

البته سنگ هایی که دارای تورق و شیستوزیته قانونمند باشند، به علت سهولت حفاری در آنها، امتیاز ۱۲ برای آنها در نظر گرفته می شود.

¹ Rock mass Drillability Index

همچنین با افزایش شاخص کیفیت سنگ^۱، که به عنوان درصد قطعات مغزه سالم بلندتر از صد میلیمتر، نسبت به طول کل مغزه می‌باشد، انتظار می‌رود، هر چه درصد این شاخص افزایش یابد، نرخ نفوذ نیز افزایش پیدا کند.

همانطور که اشاره شد، آکون و کارپوز در سال ۲۰۰۵، یکی از پارامترهای مؤثر بر نرخ نفوذ را، شاخص کیفیت سنگ معرفی نمودند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که، درصد شاخص کیفیت سنگ و نرخ نفوذ رابطه خطی مستقیم دارند. شاخص کیفیت سنگ و نرخ نفوذ در سنگ‌های توده‌ای و همگن بالا بوده و در حین حفاری در این سنگ‌ها نیاز به تغییرات کمی در پارامترهای عملیاتی خواهیم داشت، بالعکس در سنگ‌های ضعیف که شاخص کیفیت سنگ و نرخ نفوذ در آن‌ها پایین است، کنترل بار پشت مته یک امر ضروری می‌باشد. همانطور که در شکل (۷۹-۲)، مشاهده می‌شود، با افزایش درصد این شاخص در ماسه‌سنگ، نرخ نفوذ نیز افزایش یافته است (Akun & Karpuz, 2005).



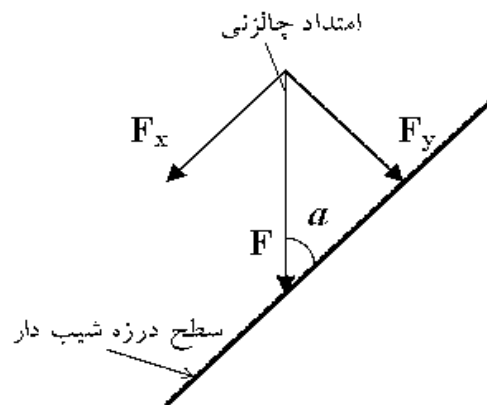
شکل ۷۹-۲- ارتباط بین RQD و نرخ نفوذ در ماسه‌سنگ (Akun & Karpuz, 2005)

ب- تأثیر شیب درزه‌ها بر سرعت حفاری

وجود درزه‌های شیب‌دار باعث انحراف چال، کاهش بار پشت مته و در نهایت کاهش نرخ نفوذ سیستم حفاری می‌گردد.

¹ Rock Quality Designation

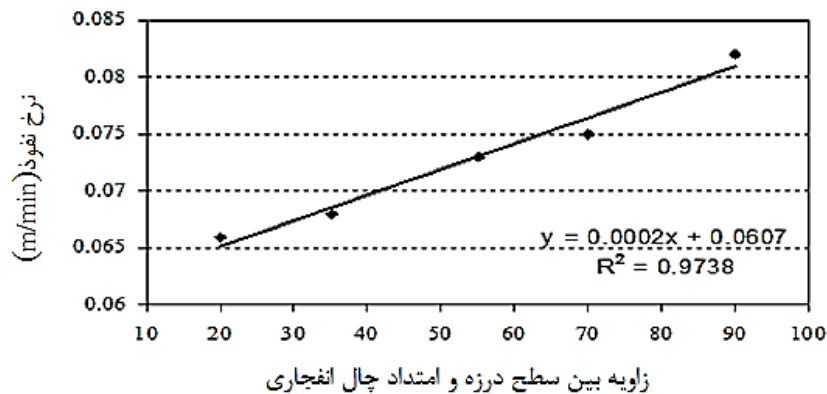
چنانچه در شکل (۸۰-۲) نشان داده شده، در سطح درزه‌های شیب‌دار بار پشت مته (F) به صورت تابعی از زاویه (α)^۱ به دو مؤلفه موازی سطح درزه (F_x) و عمود بر سطح درزه (F_y) تجزیه می‌گردد. مؤلفه F_x به عنوان مهم‌ترین دلیل انحراف چال و کاهش بار پشت مته می‌باشد. با کاهش زاویه (α) مقدار $F_x = F \cos(\alpha)$ افزایش یافته و عامل انحراف چال و کاهش نفوذ مته تقویت می‌گردد (حسینی و همکاران، ۱۳۸۵).



شکل ۸۰-۲-توزیع بار پشت مته در سطح درزه‌های شیب‌دار (حسینی و همکاران، ۱۳۸۵)

از طرفی در درزه‌های باز که دارای پرکننده نیز می‌باشد، تماس چال با درزه‌ها باعث ریزش پرکننده‌ها به چال در حین و بعد از حفاری می‌گردد. این پدیده موجب گیرکردن سرمته در حین حفاری و پرشدگی چال بعد از حفاری می‌شود. نتایج مدلسازی فیزیکی، این نتیجه را بیان می‌کند که، با افزایش زاویه بین سطح درزه و امتداد چال، نرخ نفوذ سیستم حفاری و در نتیجه قابلیت حفاری توده سنگ افزایش می‌یابد (شکل ۸۱-۲) (Hoseinie et al, 2008).

^۱ زاویه بین امتداد چالزنی و سطح درزه شیب‌دار



شکل ۲-۸۱- رابطه بین سرعت حفاری و شیب درزه‌ها (Hoseinie et al, 2008)

امتیازدهی به زاویه بین سطح درزه و امتداد چال، توسط حسینی و همکارانش، به منظور تعیین شاخص قابلیت حفاری، در جدول (۲-۹)، ذکر شده است.

جدول ۲-۹- امتیازدهی به توده‌سنگ در رابطه با شیب درزه‌ها (زاویه بین امتداد چال و سطح درزه) (Hoseinie et al, 2008)

شیب‌داری درزه‌ها (درجه)	۷۰-۹۰	۵۵-۷۰	۳۵-۵۵	۲۰-۳۵	۰-۲۰
امتیاز	۱۲	۸	۶	۳	۱

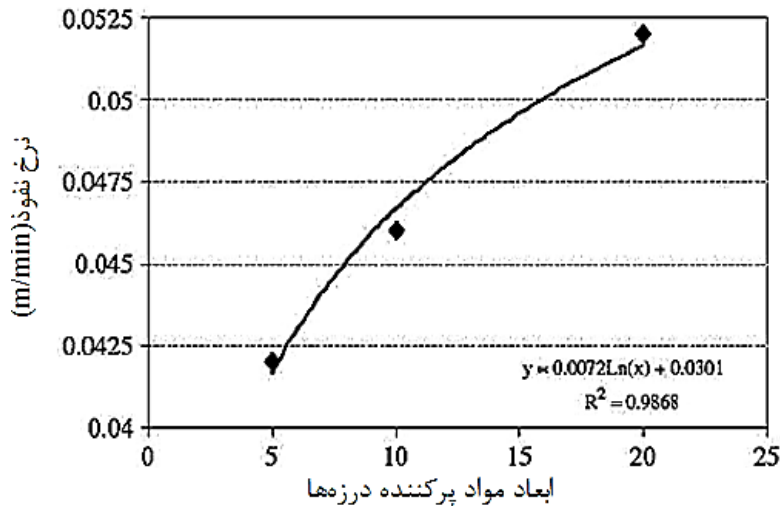
پ- تأثیر دهانه و پرکننده درزه‌ها بر سرعت حفاری

دهانه بازشدگی و اندازه ذرات پرکننده در فضای درزه‌های باز، از پارامترهایی هستند که، نرخ نفوذ را در سیستم حفاری به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند.

درزه‌ها و ترک جوش خورده تأثیر چندانی بر کاهش نرخ نفوذ سیستم ندارند. وجود درزه‌های باز به علت تسهیل فرار هوای فلاشینگ و کاهش خروج خرده‌های حفاری، باعث کاهش نرخ نفوذ و گاه قفل‌شدگی سیستم حفاری می‌گردند. وجود مواد پرکننده در فضای درزه‌های باز باعث کاهش شدید نرخ نفوذ سیستم حفاری می‌گردد. نتایج مطالعات تجربی نشان می‌دهد که در توده‌سنگ‌های با پرکننده با ابعاد کوچکتر، مشکلات حفاری افزایش پیدا می‌کند. با کاهش ابعاد پرکننده تا حد ذرات فلاشینگ، ذرات به جای خرد شدن، تحت فشار هوای فلاشینگ تنها در فضای بین سرمته و سنگ

حرکت می‌کنند. باقی ماندن ذرات در فضای بین سرمته و سنگ باعث اتلاف انرژی و کاهش نرخ نفوذ می‌گردد (Hoseinie et al, 2008).

در شکل (۲-۸۰)، رابطه بین نرخ نفوذ و ابعاد مواد پرکننده درزه‌ها با استفاده از مدلسازی فیزیکی، که توسط حسینی و همکارانش ارائه شده است، مشاهده می‌شود.



شکل ۲-۸۰- رابطه بین سرعت حفاری و ابعاد پرکننده درزه‌ها (Hoseinie et al, 2008)

در جدول (۲-۱۰)، نتایج امتیازدهی به این پارامتر به منظور ارائه شاخص قابلیت حفاری، ذکر شده است.

جدول ۲-۱۰- امتیازدهی به توده سنگ در رابطه با پرکننده درزه‌ها (زاویه بین امتداد چال و سطح درزه) (Hoseinie et al, 2008)

۲-۹	۹-۱۲	۱۲-۲۰	>۲۰	درزه بسته	پرکننده درزه‌ها (mm)
۱	۴	۷	۱۰	۱۵	امتیاز

قابل ذکر است که، برای درزه‌های پر شده با مواد خاکی و پودرهای بسیار ریز سنگی استثنائاً امتیاز ۷ برای پرکننده‌ها منظور می‌شود.

۲.۲.۳.۲ پارامترهای زمین شناسی

الف - تأثیر گسل خوردگی بر سرعت حفاری

گسل در امر حفاری ممکن است در مقیاس کوچک (چالزنی) و یا در مقیاس بزرگ (ایجاد تونل)، موجب تغییر ناگهانی سنگها شود و پیشروی عملیات با مشکل مواجه گردد. به همین دلیل قبل از عملیات حفاری، تشخیص گسل و نوع آن ضروری است. سطوح گسل زده بسیار ضعیف و مثل خاک عمل می نمایند و برای حفاری در آنها نیاز به بار پشت مته زیاد نیست. بالعکس دور مته در دقیقه را می توان افزایش داد، در این شرایط ماشین حفاری چرخشی برای حفاری در اولویت قرار دارد. هر چه از این زون فاصله گرفته شود، مواد سخت تر می شوند (اصانلو، ۱۳۸۲).

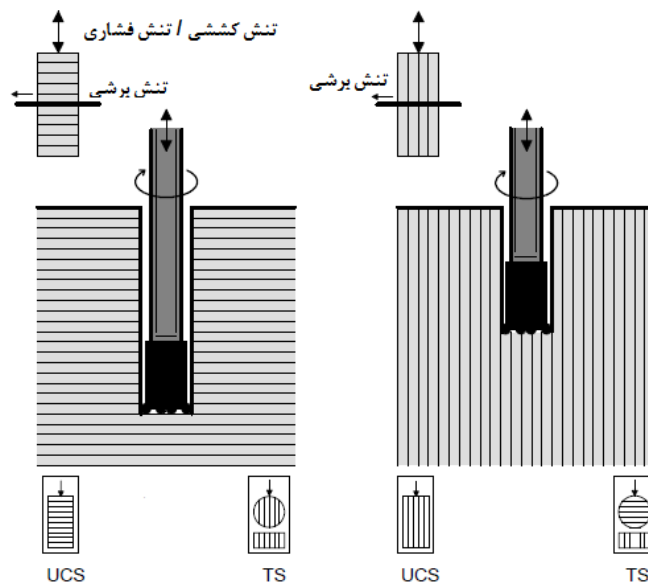
ب - چین خوردگی

تأثیر چین خوردگی برای مهندسین چه در مقیاس کوچک و چه در مقیاس بزرگ مانند حفاری معدنی و ایجاد تونل بالاخص در دو حالت تاقدیس و ناودیس از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد. به طور کلی محدوده تاقدیس جزء نواحی کم مقاومت یا ضعیف محسوب می گردند، این امر به دلیل کشیدگی لایه های بالائی است که تا حدی ناشی از فشاری است که لایه های پایینی بدان وارد می آورند و لذا در قسمت های بالا دارای شکاف های باز و فروریختگی می باشند، که جهت حفاری نامناسب می باشند. در نواحی ناودیس، لایه ها تمایل به لغزش و سرخوردن به روی یکدیگر دارند و اغلب در این نواحی قطعات خرد شده لایه های بالائی مشاهده می شوند که در مجموع عملیات حفاری به آسانی انجام نمی گیرد (اصانلو، ۱۳۸۲).

پ - جهت داری

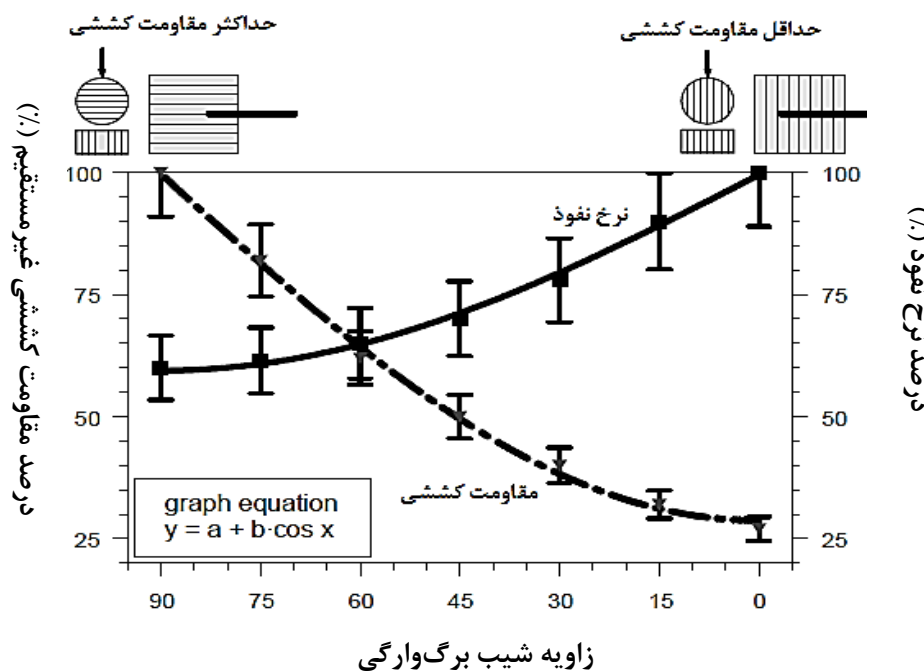
مشخصات سنگ و در نتیجه نرخ نفوذ وابستگی زیادی به جهت یافتگی سطوح ضعف دارند. به عنوان مثال، هنگامی که جهت نفوذ عمود بر جهت یافتگی برگ وارگی باشد، سنگ مورد نظر در زوایای عمود تحت فشار قرار گرفته و در جهت موازی با برگ وارگی، تحت برش قرار دارد و قابلیت حفاری در

این حالت افزایش می‌یابد. در مقابل، اگر جهت نفوذ موازی با برگ‌وارگی باشد، فشار نیز موازی با برگ‌وارگی است، اما تنش برشی در جهت عمود بر آن قرار دارد. واضح است که به دلیل بالاتر بودن مقاومت در حالت عمود بودن تنش برشی بر برگ‌وارگی، ترک‌های کمتری می‌توانند توسعه یابند و در این حالت حداقل پیشروی چالزنی را موجب خواهد شد (Thuro, 1997) (شکل ۲-۸۳).



شکل ۲-۸۳- عملیات چالزنی با توجه به جهت‌داری متفاوت برگ‌وارگی (Thuro, 1997)

همانطور که در شکل (۲-۸۴)، مشاهده می‌شود، هر چه مقدار شیب برگ‌وارگی بیشتر باشد، قابلیت حفاری کمتر خواهد بود، زیرا در این حالت مقاومت کششی حداکثر می‌باشد. در مقابل هر چه زاویه شیب برگ‌وارگی به سمت صفر میل کند، قابلیت حفاری نیز افزایش خواهد یافت، زیرا مقاومت کششی کاهش می‌یابد.



شکل ۲-۸۴- ارتباط بین نرخ نفوذ، مقاومت کششی و زاویه شیب برگ‌وارگی (Thuro, 1997)

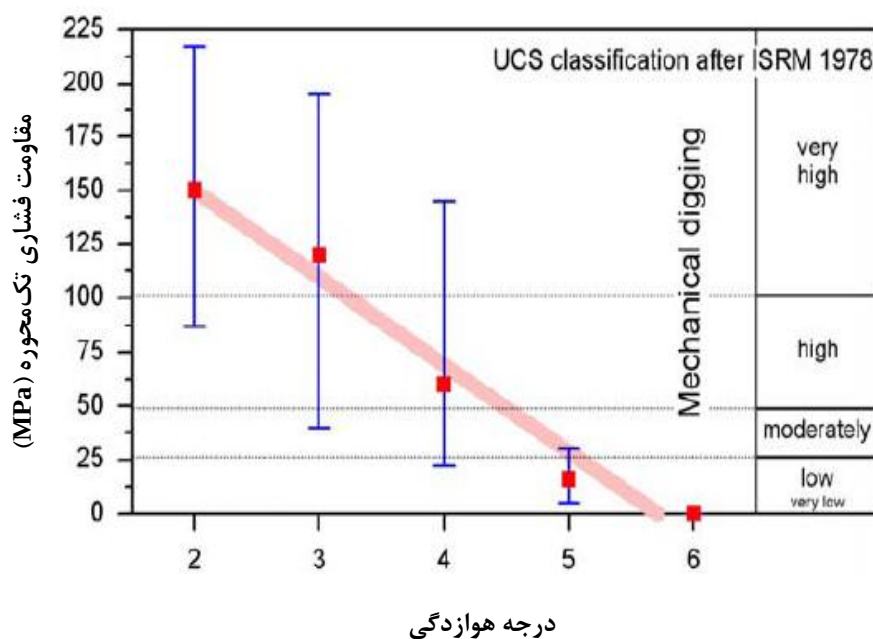
ت- هواز دگی

درجه هواز دگی سنگ، مفهومی کیفی می‌باشد، که بهتر است برای نشان دادن مقدار آن از سایر خواص سنگ استفاده کرد. با افزایش درجه هواز دگی، غیر از تغییراتی که در کانی‌شناسی سنگ رخ می‌دهد، به دلیل سست شدن بافت، مقدار تخلخل به طور قابل توجهی افزایش یافته و همزمان با آن چگالی خشک ماده سنگ کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر تأثیر هواز دگی و دگرسانی به این صورت است که موجب کاهش چگالی و افزایش تخلخل می‌شود. همچنین با افزایش درجه هواز دگی، مقدار مقاومت فشاری تک‌محوره کاهش و نرخ نفوذ افزایش می‌یابد. در ادامه، به کمی‌سازی پارامتر هواز دگی که توسط تورو و همکارانش در سال ۲۰۰۲، در دو تونل طویل ۳/۳ کیلومتری بزرگراه در آلمان شرقی در سنگ گرانیت به شدت هواز ده صورت گرفته است، اشاره خواهد شد. آن‌ها مراحل مختلف هواز دگی را در ۶ مرحله بر اساس روش‌های پیشنهادی ISRM و IAEG، طبقه‌بندی کردند که به شرح زیر می‌باشد (Thuro et al, 2002):

گرانیت تازه (بدون هوازدگی)، گرانیت کمی هوازده، گرانیت هوازده، ناحیه شسته شده، ناحیه از هم پاشیده شده، ماسه و یا سیلت/رس.

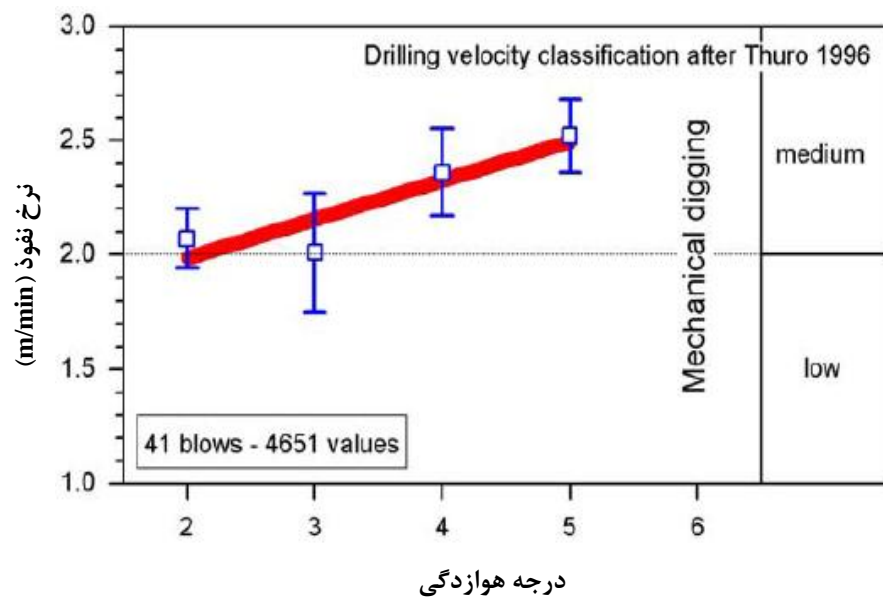
با روی دادن هوازدگی، ویژگی‌های فیزیکی سنگ نیز بطور مشابه تغییر می‌کند. در اشکال زیر، با افزایش درجه کلاس‌ها، درجه هوازدگی نیز افزایش یافته است.

شکل (۸۵-۲)، ارتباط بین مقاومت فشاری تک‌محوره را به ازای درجات مختلف هوازدگی نشان می‌دهد. منحنی‌های حاصل برای کمی سازی مراحل هوازدگی رضایت بخش نیستند.

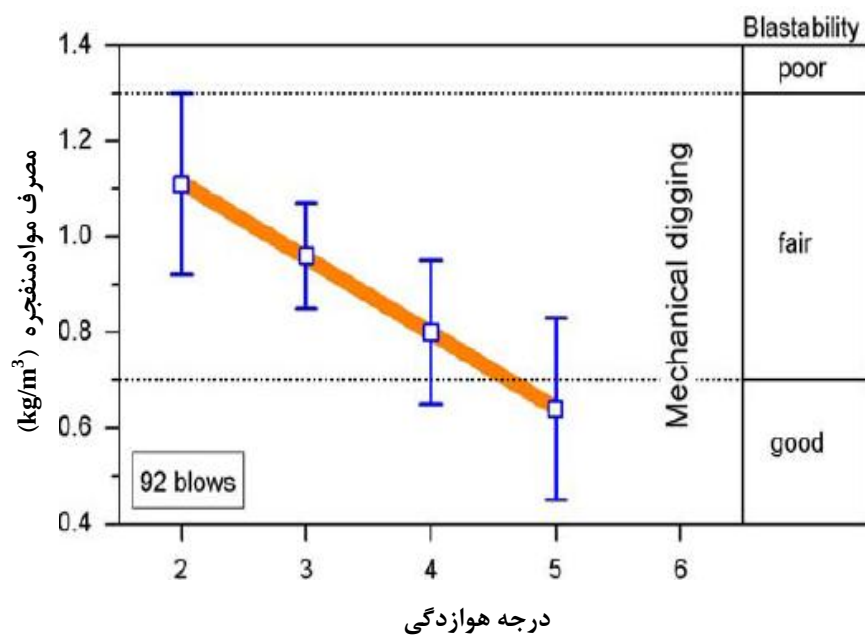


شکل ۸۵-۲- ارتباط بین مقاومت فشاری تک‌محوره و درجه هوازدگی گرانیت (زیاد، متوسط، کم) (Thuro et al, 2002)

با وجود طبقه‌بندی هوازدگی توده سنگ، ارتباط ضعیفی بین این دو پارامتر وجود داشته و نشان می‌دهد که انحراف معیار بین مقادیر زیاد بوده است. این محدوده وسیع انحراف مقادیر، در پارامترهای فنی نیز دیده می‌شود (اشکال ۸۶-۲ و ۸۷-۲).



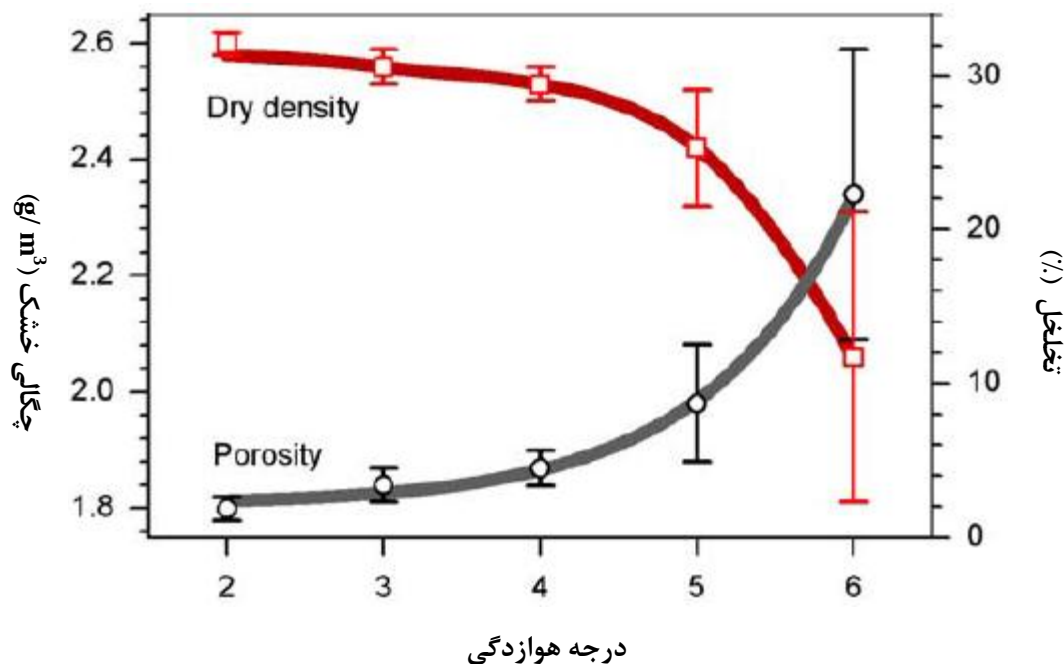
شکل ۲-۸۶- رابطه بین نرخ نفوذ و درجه هوازدگی گرانیت در چال‌های انفجاری (Thuro et al, 2002)



شکل ۲-۸۷- رابطه بین مقدار مصرف مواد منفجره و درجه هوازدگی در گرانیت (Thuro et al, 2002)

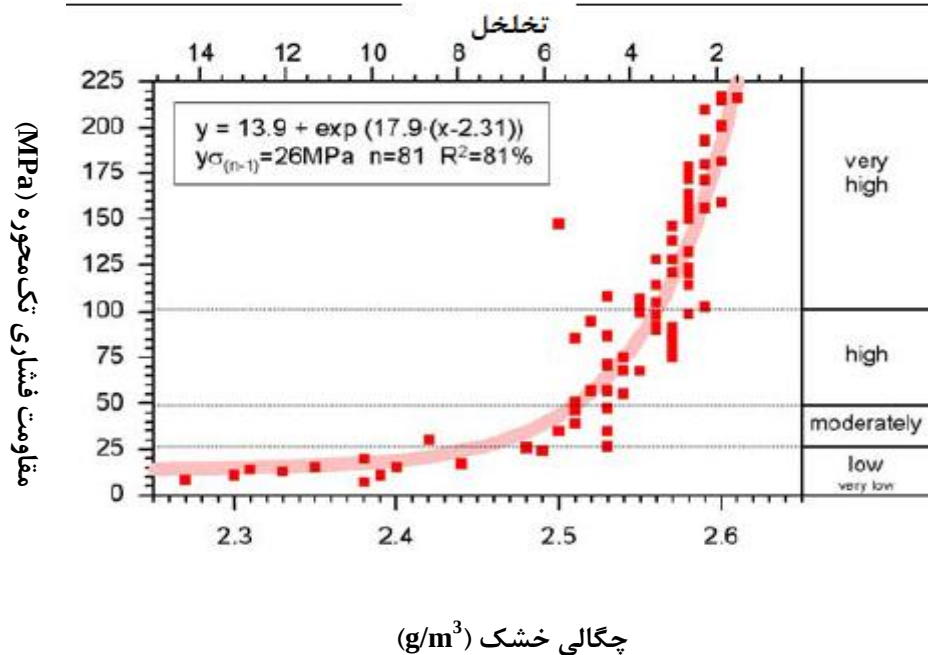
در اثر هوازدگی گرانیت و تجزیه آن به خاک رسی/سیلتی، بواسطه لق شدگی ذرات ریز، تخلخل

بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته و چگالی خشک سنگ کاهش می یابد (شکل ۲-۸۸).



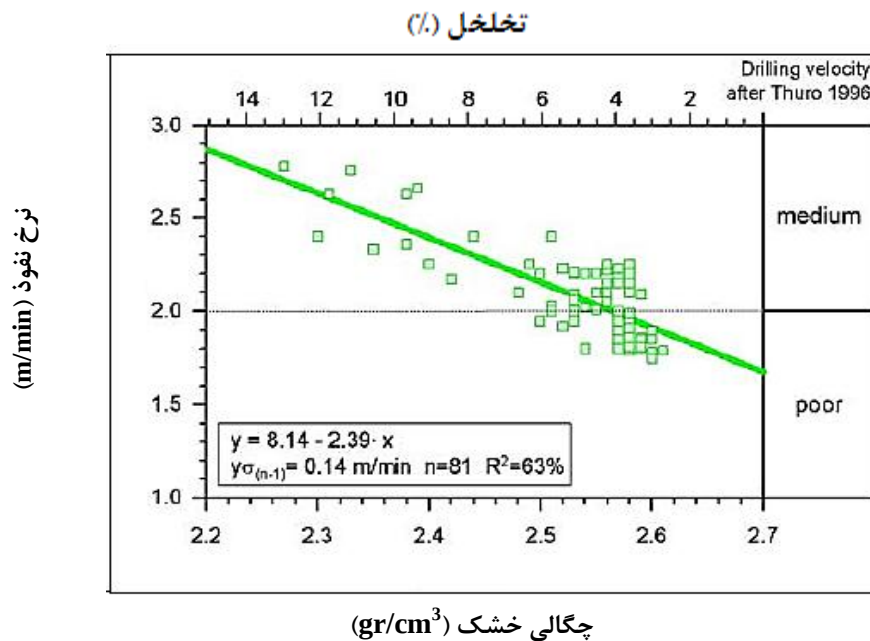
شکل ۲-۸۸- ارتباط بین درجه هوازدگی با چگالی خشک و تخلخل (Thuro et al, 2002)

به زبان ساده، هوازدگی و آلتراسیون گرانیته، با افزایش تخلخل و کاهش چگالی خشک همراه است. چگالی خشک یا تخلخل می‌توانند پارامترهای کلیدی ارتباط بین ویژگی‌های سنگ و اجرای حفاری باشند. با استفاده از چگالی خشک یا تخلخل، بجای فاکتور کلی‌تر درجه هوازدگی، به منظور ارتباط دادن درجه هوازدگی با مقاومت فشاری تک‌محوره، رابطه خوبی در شکل (۲-۸۹)، مشاهده می‌شود. برای این منحنی نتایج تست‌های نمونه استوانه‌ای و بار نقطه‌ای در نظر گرفته شده است. مقیاس تخلخل در بالای منحنی به ازای چگالی خشک متوسط گرانیته تازه، ۲/۶۵ گرم بر سانتیمتر مکعب (هوازدگی = ۰٪)، نشان داده شده است (Thuro et al, 2002).



شکل ۲-۸۹- رابطه مقاومت فشاری تک محوره در مقابل چگالی خشک و تخلخل (Thuro et al, 2002)

با ایجاد ارتباط بین درجه هوازدگی، چگالی خشک و مقاومت ماده، نرخ حفاری بطور مستقیم با تخلخل ارتباط پیدا می کند (شکل ۲-۹۰). منحنی فیت خوبی بر داده ها داشته و لذا یک کمی سازی صحیح از درجه هوازدگی با استفاده از تخلخل به عنوان یک پارامتر کلیدی با توجه به سرعت حفاری ایجاد شده است (Thuro et al, 2002).



شکل ۲-۹۰- نرخ حفاری در مقابل چگالی خشک و تخلخل (Thuro et al, 2002)

۴.۲ عوامل خدماتی و عملیاتی

همانطور که قبلاً اشاره شد، عوامل خدماتی و پشتیبانی، می‌تواند شامل: مدیریت مناسب عملیات، استفاده صحیح و نگهداری مستمر تجهیزات و ابزارها، نیروی کارگری و نظارت، تأمین انرژی، محل کار، آب و هوا و مواردی از این قبیل باشد.

این عوامل مستقل، به میزان زیادی خارجی بوده و تا حدودی بر عملکرد حفاری تأثیر می‌گذارند. بیشتر فعالیت‌های خدماتی و پشتیبانی، باید به نحوی برنامه‌ریزی شوند که، قبل یا بعد از چرخه تولید، ارائه شده و با فعالیت‌های تولیدی تداخلی نداشته باشند. البته برخی از این فعالیت‌ها که انجام آن‌ها، از جنبه ایمنی و بهداشت یا بازدهی عملیات ضرورت داشته باشند، باید به نحوی انجام گیرند که، جزء بخشی از چرخه تولید باشند. به هر حال، هر عملیاتی که انجام آن در معدن ضروری باشد، باید به طور منظم برنامه‌ریزی شود. به عنوان مثال برای انتخاب دستگاه حفاری، تعیین و مشخص کردن شرایطی که دستگاه در آن، مورد استفاده قرار می‌گیرد، مانند: نیروی کار، محل مورد نظر، آب و هوا و ... همراه با ملاحظات ایمنی، ضروری به نظر می‌رسد (یاوری، ۱۳۸۱).

همچنین از آنجایی که پارامترهای وابسته به ماشین حفار تأثیر بسزائی در تعیین قابلیت حفاری دارند، بهتر است که دستگاه‌های حفاری، در زمان‌های مقرر سرویس‌های دوره‌ای شوند و چنانچه لازم باشد، تعمیرات پیشگیرانه برای آن‌ها انجام شود. این امر موجب افزایش کارایی دستگاه حفاری شده و باعث افزایش قابلیت حفاری خواهد شد.

به منظور کنترل مؤثر عملیات و مدیریت موفق در تمام زمینه‌ها، مدیر معدن نیز، باید از آموزش‌های کافی در حد بالا، تجربه، دید وسیع و توانایی‌های رهبری لازم برخوردار باشد (ترابی، ۱۳۷۲).

شرکت اینگرسول-رند نیز، از عوامل غیر وابسته به چالزنی که سرعت کل چالزنی را تحت تأثیر قرار می‌دهند، به موارد زیر اشاره کرده است (یاوری، ۱۳۸۳):

- زمان تنظیم و استقرار بازوی حفار: زمان مورد نیاز برای قرارگیری محور بازوی دستگاه حفاری در بالای چال بعدی می‌باشد. البته در حفاری مایل، این زمان، زمان تنظیم زاویه انحراف مورد نیاز بازو را نیز شامل می‌شود.

- زمان تغییر میله مته: زمانی است که، به منظور اضافه کردن میله مته‌ها، پس از توقف نفوذ دستگاه حفاری یا برای جدا کردن میله مته‌ها پس از رسیدن به عمق مورد نیاز چال صرف می‌شود.

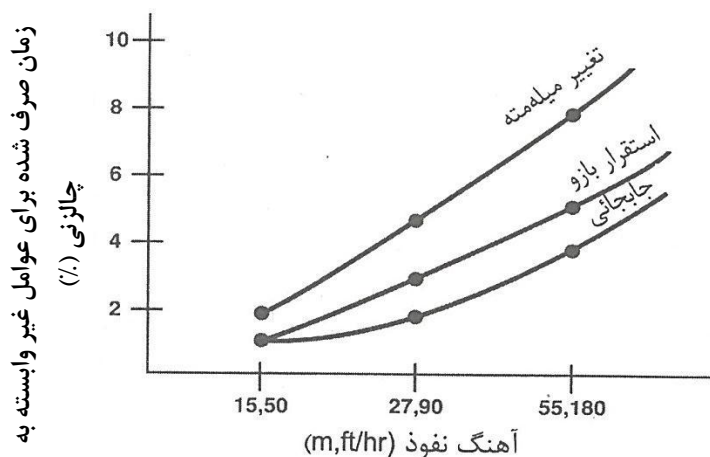
- زمان جابه‌جایی: فاصله زمانی بین وقتی است که، پس از بیرون آوردن میله مته‌ها، آخرین میله مته بر روی هادی دستگاه قرار گرفته تا زمانی که دستگاه حفار بر روی موقعیت بعدی خود مستقر می‌شود.

- زمان بیکاری: شامل زمان‌هایی است که، دستگاه حفار در طول یک دوره چالزنی، به دلایلی مانند سوخت‌گیری یا مشکلات مکانیکی کار نمی‌کند.

کلیه موارد اشاره شده، اثرات مختلفی بر سرعت نهایی چالزنی دارند. هرچه آهنگ نفوذ افزایش یابد، عوامل غیر وابسته به چالزنی نظیر زمان‌های اشاره شده، از اهمیت بیشتری برخوردار می‌شوند.

به عنوان مثال در حفاری سنگ گرانیت، با عمق چال ۱۴/۶ متر و قطر ۷۶ میلی متر، مقدار تأثیر این عوامل بر نرخ نفوذ در سرعت ۲۷ متر بر ساعت، ۲۰ درصد و در سرعت ۵۵ متر بر ساعت، ۲۸ درصد بوده است.

در شکل (۲-۹۱)، تأثیر عوامل غیر وابسته به چالزنی، بر سرعت کل چالزنی مشاهده می شود.



شکل ۲-۹۱- تأثیر عوامل غیر وابسته به چالزنی بر سرعت کل چالزنی (یاوری، ۱۳۸۳)

همانطور که در این شکل مشاهده می شود، با افزایش آهنگ نفوذ، درصد تأثیر این عوامل نیز افزایش یافته است.

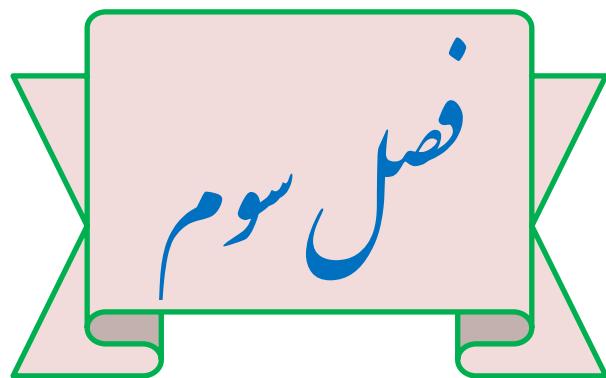
با توجه به مطالب فوق، به نظر می رسد یکی از مواردی که باید در حفاری مد نظر قرار گیرد، آموزش متصدی دستگاه حفار به منظور کمینه سازی این زمان ها و در نهایت بیشینه سازی توان تولید می باشد.

۵.۲ نتیجه گیری

با این که هیچ کدام از عوامل زمین شناسی، تجربه، طراحی دستگاه، مهارت عملیاتی و آزمایش های آزمایشگاهی، به تنهایی روشی برای تعیین قابلیت حفاری، توسط یک فرمول واضح، قابل ارائه نمی باشند و در مراحل اولیه می توان توسط جداول و روابط به دست آمده برای خواص پتروگرافی و

مکانیکی سنگ، نرخ نفوذ و فرسایش سرمته را برای سنگ‌های آزمایش شده با روندی موفقیت‌آمیزی پیش‌بینی کرد. اما علاوه بر خواص سنگ، مشکل عمده، تنوع پدیده‌های زمین‌شناسی است که نمی‌توان آن‌ها را درون اشکال و خواص سنگ قرار داد (Thuro & Plinninger, 2003).

همچنین با توجه به مطالب بیان شده می‌توان گفت، مشخصات مختلفی از دستگاه حفار، ماده-سنگ و توده‌سنگ بر قابلیت حفاری مؤثرند. برخی از این عوامل قابل کنترل و برخی نیز غیر قابل کنترل می‌باشند. هر کدام از این مشخصات به نسبت متفاوتی در قابلیت حفاری مؤثرند. بنابراین باید به دنبال سیستم رده‌بندی بود که، به طور مناسبی به اهمیت هر یک از پارامترهای فوق پرداخته باشد. یکی از سیستم‌های رده‌بندی که در زمینه قابلیت حفاری ارائه شده و در این فصل به امتیازبندی پارامترهای مربوط به توده‌سنگ آن اشاره شد، سیستم رده‌بندی RDi، می‌باشد. در فصل آینده تعدادی از این سیستم‌های رده‌بندی از جمله، سیستم رده‌بندی RDi به طور مفصل توضیح داده خواهد شد. در نهایت سیستم مناسب انتخاب شده و جهت تعیین قابلیت حفاری دو معدن باغک و دردوی سنگان مورد استفاده قرار می‌گیرد.



سیستم‌های رده‌بندی ارائه شده در

زمینه قابلیت‌های

۱.۳ مقدمه

جهت ارزیابی قابلیت حفاری، سیستم‌های رده‌بندی مختلفی ارائه شده است. در یکی از این سیستم‌های رده‌بندی فقط به ویژگی‌هایی از ماده‌سنگ اشاره شده است، اما در بقیه سیستم‌های رده‌بندی، هم به پارامترهایی از ماده‌سنگ و هم به ویژگی‌هایی از توده‌سنگ اشاره شده است.

در هر کدام از این سیستم‌های رده‌بندی به هر کدام از این مشخصات در شرایط مختلف امتیازاتی داده می‌شود. در نهایت با بررسی این مشخصات از ماده‌سنگ و توده‌سنگ و جمع امتیازات، وضعیت حفاری در محدوده مورد نظر مشخص می‌شود. در ادامه به معرفی هر یک از این سیستم‌های رده‌بندی که در زمینه قابلیت حفاری ارائه شده، اشاره می‌شود.

۲.۳ طبقه‌بندی ویلبور

در این سیستم رده‌بندی، ویلبور با توجه به ویژگی‌های زیر، قابلیت حفاری در سنگ‌ها را به صورت کیفی مورد بررسی قرار داده و قابلیت حفاری در سنگ را به پنج کلاس سریع، متوسط سریع، متوسط، آهسته-متوسط و آهسته تقسیم کرده است (Wilbur, 1982).

۱- سختی سنگ

۲- بافت و چگالی سنگ

۳- شکستگی‌های موجود در سنگ

۴- ساختار و شکل سنگ

۱.۲.۳ سختی

سختی یک کانی می‌تواند به وسیله مقیاس سختی موس که در جدول (۱-۳)، نشان داده شده است تعیین شود. عدد نشان داده شده در مقابل هر کانی نشان دهنده میزان سختی آن است.

عدد بالاتر نشانگر سختی بالاتر آن کانی می‌باشد. کانی‌های با عدد بالاتر می‌توانند کانی‌های با عدد پایین‌تر یا برابر را خراش دهند. سنگ‌ها ممکن است شامل چندین کانی مختلف باشند، باید در

چندین قسمت از این سنگ سختی را به دست آورد و آنگاه سختی متوسطی را بدست آورد (Wilbur, 1982).

جدول ۱-۳- مقیاس سختی موس (Wilbur, 1982)

۱	تالک	۶	فلدسپار
۲	ژیپس	۷	کوارتز
۳	کلسیت	۸	توپاز
۴	فلوریت	۹	کرنوم
۵	آپاتیت	۱۰	الماس

در جدول (۲-۳)، وضعیت حفاری با توجه به میزان سختی سنگ مشاهده می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش سختی قابلیت حفاری از حالت سریع به آهسته تغییر پیدا کرده است.

جدول ۲-۳- سختی (Wilbur, 1982)

وضعیت حفاری	میزان سختی
سریع	۱-۲
متوسط سریع	۳-۴
متوسط	۵-۶
آهسته-متوسط	۷
آهسته	۸-۹

۲.۲.۳ بافت

بافت می‌تواند به طور چشمی تعیین شود و سپس با توجه به جدول (۳-۳)، شرایط حفاری آن تعیین شود.

جدول ۳-۳- بافت (Wilbur, 1982)

وضعیت حفاری	نوع سنگ و بافت
سریع	متخلخل (روزنه‌دار یا پر از حفره)
متوسط سریع	شکسته (نیمه‌تحکیم یافته)
متوسط	گرانوئیدی (با دانه‌های به اندازه کافی بزرگ و قابل شناسایی، گرانیت دانه متوسط)
آهسته-متوسط	پورفیری (بلورهای درشت با زمینه دانه‌ریز-گرانیت دانه)
آهسته	متراکم (دانه‌بندی خیلی ریز غیر قابل شناسایی با چشم غیر مسلح)

۳.۲.۳ شکستگی

مفهوم شکستگی در ارتباط با قابلیت حفاری به این مسئله اشاره دارد که، چطور یک سنگ توسط ضربه چکش از هم جدا می‌شود. در جدول (۳-۴)، پنج حالت مختلف حفاری با توجه به نوع سنگ و الگوی شکستگی آن طبقه‌بندی شده است.

جدول ۳-۴- شکستگی (Wilbur, 1982)

وضعیت حفاری	نوع سنگ و الگوی شکستگی
سریع	خرد شده به قطعات کوچک زمانی که چکش به آرامی برخورد می‌کند.
متوسط سریع	شکننده (سنگ می‌شکند زمانی که چکش به آرامی برخورد می‌کند).
متوسط	حالت بریده شدن (وقتی تکه‌های سنگ بریده شوند یا ترک برداشته و خرد شوند، زمانی که چکش برخورد می‌کند).
آهسته-متوسط	سخت (سنگ در مقابل شکستن مقاومت می‌کند، زمانی که ضربه سنگینی به سنگ وارد می‌شود).
آهسته	چکش‌خوار

۴.۲.۳ ساخت

ساخت، شرایط ساختاری توده سنگ را بیان می‌کند. ساخت‌های مختلفی که شرایط حفاری را تسهیل می‌کنند، در جدول (۳-۵)، آمده است.

همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، بالاترین نرخ حفاری مربوط به سنگ‌های توده‌ای و در مقابل، کمترین نرخ حفاری مربوط به سنگ‌های بلوکی و درزه‌دار می‌باشد (Wilbur, 1982).

جدول ۳-۵- شکل (Wilbur, 1982)

وضعیت حفاری	نوع سنگ همراه با ساختار آن
سریع	توده‌ای (محکم و متراکم تقریباً بدون درزه)
متوسط - سریع	ورقه‌ای (لایه‌ای با ۴ تا ۸ فوت (۱/۲ تا ۲/۴ متر) ضخامت با درزه‌های افقی نازک)
متوسط	لایه لایه (با لایه‌هایی ۱ تا ۳ فوت (۰/۳ تا ۰/۹ متر) ضخامت با درزه‌های افقی با مقداری خاک)
آهسته - متوسط	رگه‌ای (تعداد زیادی درزه‌های باز در حالت‌های افقی و عمودی)
آهسته	بلوکی (درزه‌های باز پهن در همه جهات پر شده با خاک یا سنگ‌های شکسته)

همانطور که در این رده‌بندی مشاهده می‌شود، ویلبر قابلیت حفاری در سنگ را با توجه به چهار ویژگی: سختی، بافت، شکستگی و ساختشان، به پنج کلاس سریع، متوسط - سریع، متوسط، آهسته - متوسط و آهسته تقسیم کرده است. با توجه به این سیستم رده‌بندی می‌توان نتایج زیر را بیان کرد:

- از نظر سختی، هر چه میزان سختی سنگ افزایش می‌یابد، قابلیت حفاری سنگ کاهش پیدا می‌کند.

- از نظر بافت سنگ‌ها، مشاهده می‌شود، هر چه سنگ تخلخل بالاتری داشته باشد، قابلیت حفاری آن بیشتر بوده، از طرفی هر چه دانه‌های تشکیل دهنده سنگ ریزتر باشند، قابلیت حفاری در آن کاهش می‌یابد.

- از نظر پارامتر شکستگی، هر چه سنگ شکننده‌تر و مقاومت آن در برابر ضربه جهت شکستن کمتر باشد، قابلیت حفاری در آن، بیشتر می‌باشد.

- با توجه به ویژگی ساخت، می‌توان نتیجه گرفت که، هر چه سنگ توده‌ای (بدون درزه) باشد، قابلیت حفاری در آن افزایش می‌یابد. از طرفی هر چه سنگ بلوکی و میزان درزه و شکاف در آن زیاد بوده و باز شدگی درزه‌ها نیز زیاد باشند، قابلیت حفاری در آن‌ها به شدت کاهش می‌یابد، چون امکان گیر افتادن مته در این شرایط خیلی زیاد است.

با توجه به مطالب بیان شده در رابطه با سیستم رده‌بندی ویلبور می‌توان گفت، این سیستم رده‌بندی، به ساخت توده‌سنگ اشاره کیفی کرده است. در این روش از عبارات توده‌ای، ورقه‌ای، رگه‌ای و بلوکی برای توصیف توده‌سنگ‌ها استفاده شده است. با توجه به اینکه ممکن است افراد مختلف با توجه به شرایط پیچیده توده‌سنگ تعریف‌های متفاوت از آن داشته باشند، لذا طبقه‌بندی کیفی در برخی موارد کاربر را دچار سردرگمی می‌نماید.

همچنین مشاهده می‌شود که در این رده‌بندی اشاره‌ای به فاصله‌داری و بازشدگی درزه‌ها نشده است. در ضمن در مورد پارامتری مانند مقاومت فشاری تک‌محوره که یکی از عوامل بسیار تأثیرگذار بر قابلیت حفاری می‌باشد صحبتی به میان نیامده است.

۳.۳ رده‌بندی توده‌های سنگی بر اساس قابلیت تراشه‌شدن^۱

یکی از سیستم‌های رده‌بندی که، هم پارامترهایی از توده‌سنگ و هم پارامترهایی از ماده‌سنگ را در نظر گرفته است، روش امتیازتوده‌سنگ براساس قابلیت تراشه‌شدن است. این رده‌بندی در سال ۱۹۷۵ توسط Weaver ارائه شده است. همانطور که در جدول (۳-۶)، مشاهده می‌شود، در این رده‌بندی فاکتورهای سرعت امواج انکساری در سنگ، مقاومت فشاری تک‌محوره، میزان هوازدگی، فاصله درزه‌ها، تداوم درزه‌ها، بازشدگی درزه‌ها و وضعیت شیب و امتداد درزه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد و به هرکدام از این پارامترها، امتیازی اختصاص داده می‌شود. سپس با جمع امتیازات مربوط به هرکدام از پارامترهای فوق، قابلیت تراشه‌شدن توده سنگ و مقدار انرژی لازم جهت حفاری ارزیابی می‌گردد. قابلیت تراشه‌شدن به اختصار با TRR^2 نشان داده شده است (محمدی و همکاران، ۱۳۸۳).

¹ Rippability

² Total Rippability Rating

جدول ۳-۶- جدول رده بندی توده های سنگی بر اساس قابلیت تراشه شدن (محمدي و همکاران، ۱۳۸۳)

رده سنگ	۱	۲	۳	۴	۵
توصیف	سنگ خیلی خوب	سنگ خوب	سنگ نسبتاً خوب	سنگ ضعیف	سنگ خیلی ضعیف
سرعت لرزه ای ($\frac{m}{s}$)	>2150	۱۸۵۰-۲۱۵۰	۱۵۰۰-۱۸۵۰	۱۲۰۰-۱۵۰۰	۴۵۰-۱۲۰۰
امتیاز	۲۶	۲۴	۲۰	۱۲	۵
مقاومت سنگ (MPa)	سنگ بی نهایت مقاوم >70	سنگ خیلی مقاوم ۲۰-۷۰	سنگ مقاوم ۱۰-۲۰	سنگ نرم ۳-۱۰	سنگ خیلی نرم ۱/۷-۳
امتیاز	۱۰	۵	۲	۱	۰
هوازدهی سنگ	غیرهوازده	کمی هوازده	هوازده	خیلی هوازده	کاملاً "هوازده"
امتیاز	۹	۷	۵	۳	۱
فاصله درزه ها (mm)	>3000	۱۰۰۰-۳۰۰۰	۳۰۰-۱۰۰۰	۵۰-۳۰۰	<50
امتیاز	۳۰	۲۵	۲۰	۱۰	۵
تداوم درزه ها	غیرممتد	کمی ممتد	ممتد- بدون پرکننده	ممتد- با مقداری پرکننده	ممتد- پرکننده
امتیاز	۵	۶	۳	۰	۰
پرکننده درزه ها	بدون بازشدگی	کمی باز شده	باز شدگی $>1mm$	پرکننده $<5mm$	پرکننده $<5mm$
امتیاز	۵	۵	۴	۳	۱
امتداد و جهت شیب	خیلی مساعد	نامساعد	کمی نامساعد	مساعد	خیلی مساعد
امتیاز	۱۵	۱۳	۱۰	۵	۳
مجموع امتیازات	۹۰-۱۰۰	۷۰-۹۰	۵۰-۷۰	۲۰-۵۰	<25
ارزیابی قابلیت تراشه شدن	آتشکاری	حفاری و آتشکاری بی نهایت سخت	حفاری خیلی سخت	حفاری سخت	حفاری آسان
انتخاب ماشین حفاری	-	D9G/DD9G	D8/D9	D7/D8	D7
اسب بخار	-	۳۸۵/۷۷۰	۲۷۰/۳۸۵	۱۸۰/۲۷۰	۱۸۰
کیلو وات	-	۲۹۰-۵۷۵	۲۰۰-۲۹۰	۱۳۵-۲۰۰	۱۳۵

با توجه به این سیستم رده بندی، می توان مزایا و معایب زیر را برای آن بر شمرد.

مزایا:

- در این رده‌بندی، پارامترهایی هم از ماده‌سنگ و هم از توده‌سنگ، مورد بررسی قرار گرفته است. مثلاً پارامتری مانند مقاومت فشاری تک‌محوره که در رده‌بندی ویلبور در نظر گرفته نشده بود، در این رده‌بندی مورد استفاده واقع شده است.
 - به هر کدام از پارامترهای در نظر گرفته شده، امتیاز داده شده و برخی از پارامترها مانند: سرعت لرزه‌ای، مقاومت سنگ، فاصله درزه‌ها و پرکننده درزه‌ها به صورت کمی آورده شده است.
 - در مورد درزه‌ها، به مشخصاتی مانند: فاصله‌داری، تداوم درزه‌ها، پرکننده درزه‌ها، امتداد و جهت شیب، امتیاز داده شده است.
 - این سیستم رده‌بندی می‌تواند جهت تعیین مقدار انرژی بولدوزر مورد استفاده در معادن روباز و ماشین TBM در تونل‌ها باشد.
- معایب:
- در این رده‌بندی، پارامتری مانند سرعت انکساری امواج در توده‌سنگ استفاده شده است که جهت تعیین این پارامتر به آزمایش‌های پرهزینه‌ای نیاز می‌باشد.
 - این رده‌بندی حداقل میزان انرژی ماشین انتخابی را مشخص می‌کند.
 - در مورد امتداد و جهت شیب به صورت کیفی و مبهم، اشاره شده است.
 - این سیستم رده‌بندی بیشتر جهت حفاری سطحی به کار می‌رود و در جایی که با حفاری عمقی، مانند حفر چال‌های انفجار سروکار داریم، این رده‌بندی جوابگو نخواهد بود.
- همچنین جهت آسان نمودن کار و کاهش هزینه‌های عملیات ژئوفیزیکی به منظور تعیین سرعت موج لرزه‌ای در توده‌سنگ و نیز با توجه به اینکه در هر سه رده‌بندی TRR، RMR و Q پارامترهای مشترکی جهت رده‌بندی توده‌های سنگی وجود دارد، می‌توان با برقراری ارتباط بین رده‌بندی TRR با رده‌بندی‌های RMR و Q، در همان مراحل مقدماتی، مقدار انرژی مورد نیاز حفاری را با دقت مناسبی تخمین زد.

۴.۳ اندیس قابلیت نفوذ در سنگ ها^۳ (RPI)

این سیستم رده بندی در سال ۲۰۰۹، توسط حسینی و همکارانش ارائه شده است.

در تلاش برای ارائه این سیستم رده بندی، ابتدا تعداد ۱۲ پارامتر مختلف به شرح زیر که بر قابلیت نفوذ سنگ تأثیرگذارند، مشخص شده است.

اندازه دانه ها، هوازدگی، مدول یانگ، ساینده گی، سختی چکش اشمیت، نوع ماتریکس، مقاومت کششی، مقاومت فشاری تک محوره، کوارتز محتوی، بافت، سختی و چگالی.

جهت ارائه این سیستم رده بندی کمی، بر اساس پارامترهای مؤثر در قابلیت نفوذ سنگ ها که در بالا به آن ها اشاره شد، نظرات کیفی ۱۵ نفر از متخصصان داخل و خارج کشور توسط روش تحلیل سلسله مراتبی تجزیه و تحلیل شده اند. با دستیابی به وزن هر پارامتر سیستم رده بندی جدیدی به صورت کمی و بر مبنای پنج پارامتر مهم مقاومت فشاری تک محوره، شاخص سایش شیمازک، سختی، بافت و مدول یانگ سنگ ها پیشنهاد شد. این سیستم که اندیس قابلیت نفوذ در سنگ نامیده شده در مجموع به سنگ ها امتیازی از ۱۰-۱۰۰ اختصاص می دهد. سپس قابلیت حفاری سنگ ها در پنج کلاس خیلی خوب، خوب، متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف طبقه بندی می شود (حسینی، ۱۳۸۷).

پنج پارامتر فوق به همراه امتیازات مربوط به آن ها در جدول (۳-۷)، آورده شده است.

پس از تعیین شاخص RPI، بر اساس مقدار به دست آمده برای هر سنگ می توان قابلیت نفوذ در سنگ و نیز قابلیت ماشین کاری و کارپذیری آن را پیش بینی کرد. برای این منظور می توان از جدول (۳-۸)، بهره جست (حسینی، ۱۳۸۷).

³ Rock Penetrability index

جدول ۳-۷- جدول امتیازدهی به پارامترها و تعیین اندیس قابلیت نفوذ در سنگها (حسینی، ۱۳۸۷)

ردیف های ارزش					پارامترها
۱-۲۵	۲۵-۵۰	۵۰-۱۰۰	۱۰۰-۲۰۰	>۲۰۰	۱ مقاومت فشاری تک-محوره (MPa)
مقاومت خیلی کم	مقاومت کم	مقاومت متوسط	مقاومت بالا	مقاومت خیلی بالا	
۳۲/۵	۲۳	۱۶/۵	۸	۳	امتیاز
۰-۱	۱-۲	۲-۳	۳-۴	>۴	۲ فاکتور سایش شیمزک (N/mm)
سایندگی خیلی کم	سایندگی کم	سایندگی متوسط	سایندگی بالا	سایندگی خیلی بالا	
۲۷	۱۹	۱۳/۵	۶/۵	۲/۵	امتیاز
۱-۳	۳-۴/۵	۴/۵-۶	۶-۷	>۷	۳ سختی موس
خیلی نرم تا نرم	نسبتاً نرم	نسبتاً سخت	سخت	خیلی سخت	
۱۸	۱۲/۵	۹	۴/۵	۲	امتیاز
متخلخل	شکسته (نیمه تحکیم یافته)	گرانوئیدی (دانه متوسط)	پرفیری	متراکم (دانه-بندی ریز)	۴ بافت
.....	>۵	۲-۵	ماتریکس: ۰/۵-۱ دانه ها: ۲-۵	۰/۰۵-۱	
۱۴/۵	۱۰	۷/۵	۴	۱/۵	امتیاز
۱۰<	۱۰-۳۰	۳۰-۷۰	۷۰-۱۰۰	>۱۰۰	۵ مدول ینگ (GPa)
خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد	
۸	۵/۵	۴	۲	۱	امتیاز

جدول ۳-۸- پیش بینی قابلیت نفوذ در سنگ و نیز قابلیت ماشین کاری بر اساس RPi (حسینی، ۱۳۸۷)

امتیاز RPi					قابلیت ماشین کاری و کارپذیری سنگ
۸۰-۱۰۰	۶۰-۸۰	۴۰-۶۰	۲۰-۴۰	۱۰-۲۰	
بالا	متوسط- بالا	متوسط	متوسط- کم	کم	نفوذ در سنگ
خیلی آسان	آسان	متوسط	سخت	خیلی سخت	قابلیت ماشین کاری و کارپذیری سنگ
خوب	متوسط- خوب	متوسط	متوسط- ضعیف	ضعیف	

برای این سیستم رده‌بندی نیز می‌توان مزایا و معایب زیر را بر شمرد.

مزایا:

- با توجه به اینکه، کلیه پارامترهای مورد استفاده در این رده‌بندی کمابیش در سایر روش‌های حفاری و به ویژه حفاری‌های زیرزمینی مانند حفاری با دستگاه تونل‌زنی (TBM)، رودهدر، دستگاه شیرر و رنده زغال‌بری و نیز برش و فرآوری سنگ‌های ساختمانی تأثیرگذارند، لذا می‌توان از این رده‌بندی برای ارزیابی و پیش‌بینی عملکرد این دستگاه‌ها نیز استفاده کرد.
- از آنجا که این سیستم رده‌بندی هم به منظور نفوذ در سنگ و هم قابلیت ماشین‌کاری و کارپذیری سنگ ارائه شده است، پارامترهای مورد استفاده در آن نیز مربوط به ماده‌سنگ می‌باشند.
- پارامترهای مورد استفاده در این رده‌بندی، ابتدا به صورت کمی بیان شده، آنگاه به آن‌ها امتیاز داده شده است.

معایب:

- اگر بخواهد از این سیستم رده‌بندی جهت تعیین قابلیت حفاری در معادن روباز استفاده شود، یکی از ضعف‌های عمده‌ای که به این رده‌بندی وارد می‌باشد، در نظر نگرفتن ویژگی‌های درزه‌ها از قبیل: فاصله‌داری، دهانه بازشدگی، پرشدگی و شیب آن‌ها می‌باشد که از عوامل تأثیرگذار در حفاریند.
- با توجه به اینکه این سیستم رده‌بندی یک سیستم جدید در زمینه حفاری می‌باشد، بایستی با استفاده از مطالعات صحرایی گسترده، مورد استفاده و ارزیابی بیشتری قرار گیرد، تا بتوان با اطمینان بیشتری از آن استفاده کرد.

۵.۳ اندیس قابلیت حفاری توده‌سنگ^۴ (RDi)

این سیستم رده‌بندی نیز در سال ۲۰۰۸ توسط حسینی و همکارانش ارائه شده است.

^۴ Rock mass Drillability Index

با مرور مطالعات انجام گرفته تاکنون، پارامترهای مهمی که حفاری را تحت تأثیر قرار می‌دهند، به شرح زیر می‌باشند:

ژنز و منشأ تشکیل سنگ‌ها، سختی سنگ، بافت سنگ، تخلخل، چگالی، ساینده‌گی، الاستیسیته و پلاستیسیته، مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ، قابلیت تراشه‌دهی، سفتی سنگ، RQD و مشخصات توده‌سنگ (درزه و شکاف، لایه‌بندی).

این سیستم رده‌بندی، با توجه به مطالعات گذشته به ویژه سیستم رده‌بندی ویلیور پیرامون پارامترهای دخیل در حفاری ارائه شده است. همچنین در این سیستم سعی شده است تا با وارد کردن خصوصیات درزه‌ها، یک دید کمی از توده‌سنگ و مشخصات مهندسی به دست آید.

در توسعه اندیس قابلیت حفاری توده‌سنگ سه اصل اساسی زیر مورد توجه قرار گرفته است:

- ۱- از کمترین تعداد پارامترها برای طبقه‌بندی استفاده شود.
- ۲- از به کار بردن پارامترهای هم ارزش و هم ارز پرهیز شود.
- ۳- طبقه‌بندی توده‌سنگ به راحتی در محل قابل انجام باشد. (به مطالعات آزمایشگاهی نیاز نباشد).

با در نظر گرفتن سه اصل فوق، پارامترهایی که جهت تعیین اندیس قابلیت حفاری توده‌سنگ (RDi) مورد استفاده قرار گرفته‌اند، عبارتند از:

- الف) پارامترهای فیزیکی ماده سنگ: بافت و اندازه دانه‌ها.
- ب) پارامترهای مقاومتی ماده‌سنگ: سختی و مقاومت فشاری تک‌محوره.
- ج) پارامترهای ساختاری توده‌سنگ (مشخصات درزه‌ها): فاصله‌داری درزه‌ها، دهانه و پرکنندگی درزه‌ها، شیب درزه‌ها.

در سیستم RDi، به منظور امتیازدهی به مقادیر مختلف هر پارامتر، بیشترین امتیاز به بهترین وضعیت (سریع) داده شده است. برای امتیاز حالت‌های متوسط - سریع، متوسط، آهسته - متوسط و

آهسته به ترتیب ۷۰٪، ۵۰٪، ۲۵٪ و ۱۰٪ امتیاز ماکزیمم، اختصاص یافته است (حسینی و همکاران، ۱۳۸۶). در جدول (۳-۹)، این رده بندی به همراه پارامترهای مورد استفاده در آن مشاهده می شود.

جدول ۳-۹- جدول امتیازدهی به پارامترها و تعیین اندیس قابلیت حفاری توده سنگ ها (RDi) (Hoseini et al, 2008)

ردیف های ارزش					پارامترها
متراکم (دانه-بندی ریز)	پرفیری	گرانوئیدی (دانه متوسط)	شکسته (نیمه تحکیم یافته)	متخلخل	بافت
۰/۰۵-۱	ماتریکس: ۰/۵-۱ دانه ها: ۲-۵	۲-۵	>۵		اندازه دانه ها (mm)
۱	۴	۷	۱۰	۱۵	امتیاز
>۲۰۰	۱۰۰-۲۰۰	۵۰-۱۰۰	۲۵-۵۰	۱-۲۵	مقاومت فشاری تک محوره (MPa)
مقاومت خیلی بالا	مقاومت بالا	مقاومت متوسط	مقاومت کم	مقاومت خیلی کم	
۲	۶	۱۱	۱۶	۲۲	امتیاز
>۷	۶-۷	۴/۵-۶	۳-۴/۵	۱-۳	سختی موس
خیلی سخت	سخت	نسبتاً سخت	نسبتاً نرم	خیلی نرم تا نرم	
۱	۴	۹	۱۳	۱۸	امتیاز
۰-۰/۱۵	۰/۱۵-۰/۵	۰/۵-۱	۱-۲	>۲	فاصله داری درزه ها* (m)
۱	۵	۹	۱۳	۱۸	امتیاز
۲-۹	۹-۱۲	۱۲-۲۰	>۲۰	درزه بسته	پرکننده درزه ها** (mm)
۱	۴	۷	۱۰	۱۵	امتیاز
۰-۲۰	۲۰-۳۵	۳۵-۵۵	۵۵-۷۰	۷۰-۹۰	شیب داری درزه ها*** (درجه)
۱	۳	۶	۸	۱۲	امتیاز

* سنگ هایی که دارای تورق و شیب سوزینه قانونمند باشند، به علت سهولت حفاری در آنها، امتیاز ۱۲ برای فاصله داری منظور می گردد.

** برای درزه های پر شده با مواد خاکی و پودرهای بسیار ریز سنگی استثنائاً امتیاز ۷ برای پرکننده ها منظور می شود.

*** زاویه بین امتداد چال و سطح درزه مد نظر می باشد.

در نهایت با توجه به مقدار RD_i بدست آمده از جدول نهایی طبقه‌بندی، سرعت حفاری در توده‌سنگ را به صورت کیفی می‌توان بر طبق جدول (۳-۱۰)، پیش‌بینی نمود. شایان ذکر است، برای بررسی پارامترهای مربوط به سیستم درزه‌ها در توده‌سنگ‌های با بیش از یک دسته درزه، ویژگی‌های دسته‌درزه غالب مورد نظر طبقه‌بندی قرار می‌گیرد. برای مقادیر مرزی، امتیاز مربوط به طبقه پایین‌تر اختصاص داده می‌شود.

جدول ۳-۱۰ - پیش‌بینی سرعت حفاری بر اساس RD_i (Hoseini et al, 2008)

اندیس قابلیت حفاری (RD _i)	۸۰-۱۰۰	۶۰-۸۰	۴۰-۶۰	۲۰-۴۰	۷-۲۰
سرعت حفاری	سریع	متوسط - سریع	متوسط	آهسته - متوسط	آهسته

با دقت در این سیستم رده‌بندی می‌توان مزایا و معایب زیر را برای آن بر شمرد:

مزایا:

- همانطور که اشاره شد، در این سیستم رده‌بندی، سعی شده است علاوه بر وارد کردن پارامترهایی از ماده‌سنگ، با در نظر گرفتن خصوصیات درزه‌ها، یک دید کمی از توده‌سنگ و مشخصات مهندسی به دست آید.

- همچنین در ارائه این رده‌بندی، سه اصل اساسی زیر مورد توجه قرار گرفته است:

- ۱- از کمترین تعداد پارامترها برای طبقه‌بندی استفاده شده است.
- ۲- از به کار بردن پارامترهای هم ارزش و هم ارز پرهیز شده است.
- ۳- طبقه‌بندی توده‌سنگ به راحتی در محل قابل انجام می‌باشد. به بیانی دیگر مانند سیستم رده‌بندی RPi، به مطالعات آزمایشگاهی زیادی نیاز نیست.

معایب:

- زمانی که بیش از یک دسته درزه غالب داشته باشیم، این سیستم رده‌بندی پاسخی در این زمینه نخواهد داشت.

- ارائه دهنده این سیستم رده‌بندی، به منظور ارزیابی تأثیرات سیستم درزه‌ها بر سرعت حفاری در معادن روباز، به مدت سه سال، تمامی مطالعات صحرایی خود را در معدن مس سونگون و معدن سنگ‌آهک سیمان صوفیان بر روی سیستم حفاری DTH، انجام داده است، در حالی که در معادن مختلف از سیستم‌های حفاری مختلفی استفاده می‌شود.

۶.۳ نتیجه‌گیری

با دقت در مطالبی که در زمینه سیستم‌های رده‌بندی مختلف بیان شد و همچنین با توجه به مزایا و معایبی که برای هر کدام از آن‌ها ذکر شد، می‌توان به این نتیجه رسید که، مناسب‌ترین سیستم رده‌بندی که می‌توان در معادن روباز جهت تعیین قابلیت حفاری چال‌های انفجار از آن استفاده کرد، سیستم رده‌بندی RDi می‌باشد. زیرا هم به ویژگی‌هایی بسیار تأثیرگذار از توده‌سنگ و هم ماده‌سنگ اشاره کرده است و از طرفی هر کدام از این ویژگی‌ها را به صورت کمی بیان کرده و امتیاز لازم را به آن‌ها داده است. همچنین به مطالعات آزمایشگاهی زیادی نیاز نیست و این امر هزینه‌ها را کاهش می‌دهد. ولی سیستم رده‌بندی TRR، جهت حفاری سطحی به کار می‌رود و در نهایت در معادن روباز و یا در تونل‌ها مقدار انرژی ماشین مورد استفاده را تعیین می‌کند. از آنجایی که در این معادن باید قابلیت حفاری چال‌های انفجاری تعیین شود و این حفاری‌ها، حفاری‌های عمقی می‌باشند، بنابراین از این سیستم رده‌بندی که جهت حفاری سطحی استفاده می‌شود، نمی‌توان استفاده کرد. در سیستم رده‌بندی ویلبور نیز، مشخصات مختلف سنگ را کاملاً به صورت کیفی بررسی کرده و امتیازی به آن‌ها داده نشده است.

در سیستم رده‌بندی RPi نیز، فقط ویژگی‌هایی از ماده‌سنگ در نظر گرفته شده است و به مشخصات درزه‌ها که در حفاری در معادن روباز تأثیر زیادی دارند، اشاره‌ای نشده است. همچنین مطالعات آزمایشگاهی آن زیاد بوده، که موجب افزایش هزینه‌ها خواهد شد.



معرفی معادن سنگ آهن سنگان

۱.۴ مقدمه

نیاز صنایع فولاد کشور به سنگ آهن، موضوع و مشکل واردات ارزی سنگ آهن از خارج کشور با توجه به اهداف مشخص شده دولت جمهوری اسلامی ایران، مبنی بر توسعه صنایع فولاد و کاهش وابستگی به سنگ آهن وارداتی، لزوم بهره‌برداری و استخراج منابع داخلی کشور را در رأس برنامه-ریزی‌های اقتصادی قرار داده است.

بر اساس برداشت‌های مغناطیس‌سنجی- هواپردی و بررسی‌های زمین‌شناختی، مناطق آهن‌خیز ایران را می‌توان به شرح زیر تقسیم کرد:

الف- کمربند زنجان- سمنان- مشهد

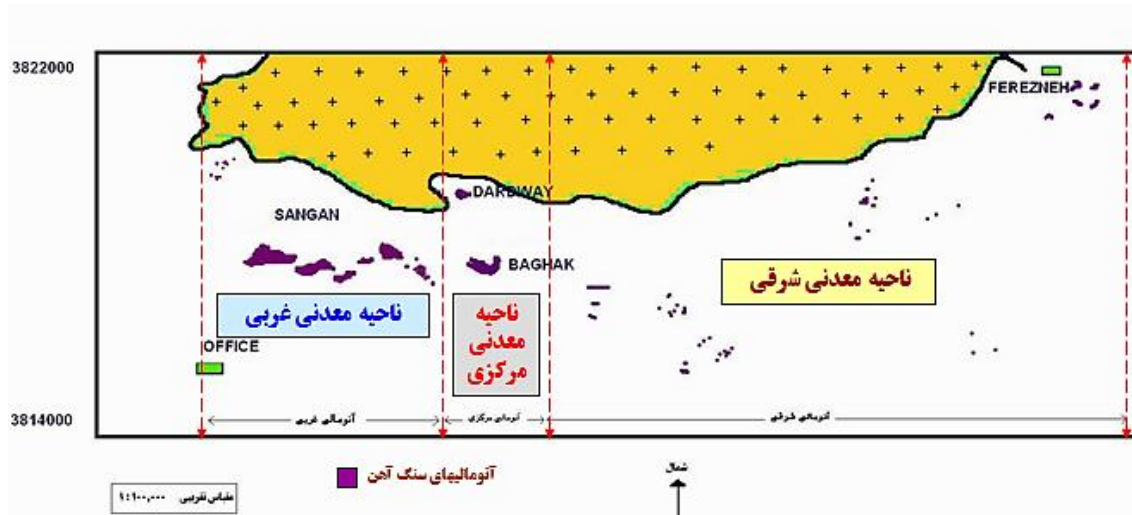
ب- کمربند همدان- اصفهان- سیرجان

ج- کمربند انارک- بافق- کرمان

د- حوزه بندرعباس

معادن سنگ آهن سنگان در جنوب شرقی استان خراسان رضوی واقع شده است. این معادن بر روی کمربند آهن‌خیز زنجان- سمنان- مشهد قرار گرفته است.

نتایج مطالعات انجام شده حاکی از آن است، که ابعاد تقریبی این کانسار، در حدود 26×8 کیلومتر مربع بوده و از سه ناحیه معدنی شرقی، مرکزی و غربی تشکیل شده است و ذخیره زمین‌شناسی آن در حدود $1/2$ میلیارد تن تخمین زده می‌شود. همانطور که در شکل (۴-۱)، مشاهده می‌شود، آنومالی‌های غربی با ابعاد تقریبی 3×2 کیلومتر مربع از پنج آنومالی 'A، B، C شمالی و جنوبی تشکیل شده است و به طور گسترده‌ای مورد اکتشاف قرار گرفته است.



شکل ۴-۱- جانمایی آنومالی‌های مختلف معدن سنگ آهن سنگان (www.simp.ir)

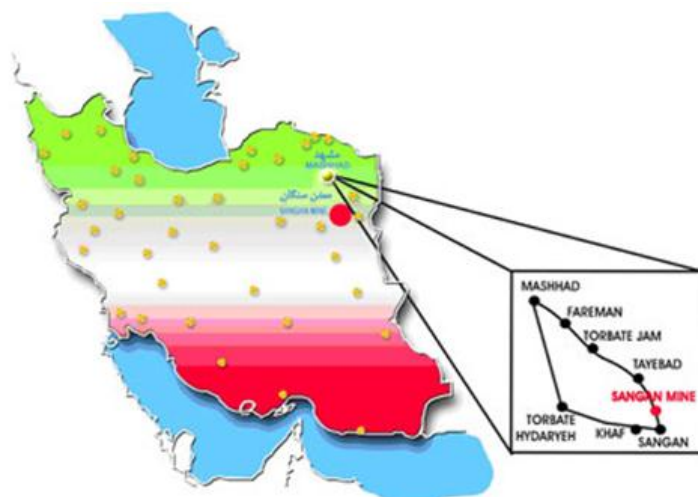
آنومالی مرکزی دارای ابعاد 2×5 کیلومتر مربع می‌باشد، که از دو قسمت باغک و دردوی تشکیل شده است.

آنومالی‌های شرقی با ابعاد تقریبی 5×21 کیلومتر مربع در شرقی‌ترین محدوده معادن سنگ آهن سنگان قرار دارد و شامل آهن‌های سنج‌دک، فرزنه، سم‌آهنی و سایر آنومالی‌های ناحیه شرقی تا مرز افغانستان است.

۲.۴ موقعیت جغرافیایی و شرایط آب و هوایی منطقه سنگان

کانسار سنگ آهن سنگان در استان خراسان (شمال شرقی ایران) در فاصله ۳۰۰ کیلومتری جنوب شرقی مشهد و ۱۶ کیلومتری شمال شهر سنگان از توابع شهرستان خواف، در منطقه‌ای به عرض جغرافیائی 24° و 34° و طول جغرافیائی 16° و 60° واقع شده است.

این ناحیه از تپه ماهورهایی به ارتفاع تقریبی ۱۲۰۰ متر شروع شده و ارتفاع آن از سطح دریا در حدود ۱۶۵۰ متر می‌باشد. سنگان در ناحیه آب و هوایی گرم و خشک بیابانی و نیمه‌بیابانی واقع شده است، که میزان بارش سالیانه تقریباً بین ۱۴۰ تا ۲۰۰ میلیمتر در سال متغیر بوده و میزان متوسط بارندگی آن ۱۵۰ میلیمتر در سال است (شکل ۴-۲).



شکل ۴-۲- موقعیت جغرافیایی سنگان (www.simp.ir)

متوسط میزان رطوبت نسبی سالیانه در این منطقه در حدود ۴۰ درصد بوده که از ۱۲ درصد تا ۷۶ درصد، به ترتیب در ماه‌های خرداد و دی متغیر است. از طرف دیگر کم‌ترین مقدار میانگین ماهیانه رطوبت از خرداد تا شهریور (۲۵ تا ۳۵ درصد) اندازه‌گیری شده است. در این منطقه بادهای شدیدی در تابستان می‌وزد. باد اصلی این ناحیه هرات نامیده می‌شود که از رشته کوه هندوکش افغانستان در شمال و شمال‌غربی شروع شده و جهت آن در سرتاسر تابستان ثابت است. میانگین سرعت باد روزانه در حدود ۵۰ کیلومتر در ساعت است (www.simp.ir).

۳.۴ تاریخچه معدن

معادن سنگ آهن سنگان برای اولین بار و در حدود ۶۰۰ سال پیش با عنوان معادن سنگ‌آهن خواف در کتاب نزهت‌القلوب حمدالله مستوفی معرفی گردید. عملیات اکتشافی اولیه آن حد فاصل سالهای ۱۳۵۰ تا ۱۳۵۸ شمسی توسط بخش خصوصی انجام شد و در ادامه از نیمه دوم سال ۱۳۶۲ شناخت پارامترهای کیفی و کمی این کانسار توسط کارشناسان و نیروهای متخصص شرکت ملی فولاد ایران شروع شد. بر اساس نتایج حاصله تصمیم گرفته شد که، مطالعات تکمیلی اکتشاف و انجام آزمایش‌های معدنی و فرآوری، مطالعات امکان‌سنجی، بررسی چرخه تولید، تعیین ظرفیت بهینه، فاز

بندی تولید، تعیین محصول نهایی، آزمایش‌های فنی و اقتصادی با بهره‌گیری از آخرین تکنولوژی روز دنیا و استفاده از توانمندی‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری، به معروف‌ترین شرکت تحقیقاتی سنگ‌آهن در جهان (شرکت BHP استرالیا) سپرده شود. در ادامه شرکت‌های ایریتک^{۹۵} ایران، سایمونز^{۹۶} کانادا و بیتمن^{۹۷} آفریقای جنوبی نیز در غالب کنسرسیوم SBI^{۹۸} و با درنظر گرفتن جنبه-های زمین‌شناسی، ذخایر معدنی و استخراج و فرآوری کانسنگ برای تولید کنسانتره آهن با عیار بالا، در مطالعات و تحقیقات مربوط به معادن سنگ‌آهن سنگان فعالیت نمودند (www.simp.ir).

۴.۴ زمین شناسی

کانسار سنگان با توجه به کانی‌سازی آن، از نوع سنگ‌آهن اسکارنی می‌باشد که قسمتی از روند شرق به غرب رشته‌کوه طالب را تشکیل می‌دهد. ساختار زمین‌شناسی نشان‌دهنده تماس ماده معدنی و باطله از شمال به جنوب به صورت زیر می‌باشد (www.simp.ir):

الف- گرانیت های سرنوسر

ب- کمپلکس کوارتزیت، ماسه سنگ و سیلت استون

ج- واحد اسکارنی شمالی (آنومالی C شمالی)

د- شیل و سیلت استون

ه- واحد اسکارنی جنوبی (آنومالی های A و B و C جنوبی)

و- مجموعه ولکانیکی

انواع زون‌های سنگ‌آهن که در سنگان تعریف شده‌اند بصورت زیر می‌باشند:

۱- زون آهن توده‌ای پرعیار

⁹⁵ IRITEC

⁹⁶ Symons

⁹⁷ Bitman

⁹⁸ Symons & Bitman & IRITEC

۲- زون آهن پراکنده کم‌عیار

۳- زون اکسیده

۴- زون سولفور

از آنجائی که در این پروژه، معادن مرکزی (باغک و دردوی) مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، بنابراین در ادامه این معادن با جزئیات بیشتر توضیح داده می‌شوند.

۵.۴ معدن باغک

۱.۵.۴ موقعیت جغرافیایی

کانسار سنگ‌آهن باغک بخشی از محدوده کانسارهای سنگ‌آهن سنگان در استان خراسان رضوی (شمال‌شرقی ایران) در فاصله ۳۰۰ کیلومتری جنوب‌شرقی مشهد، ۶۸ کیلومتری جنوب‌غرب تایباد، ۴۰ کیلومتری شمال‌شرق خواف و ۱۸ کیلومتری شمال‌شرق شهر سنگان واقع شده است. این منطقه در حدود ۴۰ کیلومتری مرز افغانستان نیز قرار دارد.

طول جغرافیایی کانسار سنگ‌آهن باغک بر اساس سیستم جغرافیایی UTM ۲۶۸۳۰۰-۲۶۶۴۰۰ شرقی و عرض جغرافیایی آن ۳۸۱۸۷۰۰-۳۸۱۷۲۰۰ شمالی می‌باشد. ارتباط سایت معدن به کانسار باغک از طریق جاده خاکی از جنوب آنومالی‌های A، B و C جنوبی عبور می‌نماید. این مسیر ابتدا از کانسار باغک و سپس به کانسار دردوی می‌رسد. طول این مسیر حدود ۶ کیلومتر است. در شکل (۴-۳)، دورنمایی از معدن باغک مشاهده می‌شود (معدنکاو، ۱۳۸۸).



شکل ۴-۳- دورنمایی از معدن باغک

۲.۵.۴ ژئومورفولوژی

کانسار باغک مانند بقیه آنومالی‌های سنگان در ناحیه‌ای کوهستانی واقع شده است. بلندترین نقطه باغک با ارتفاع ۱۷۸۰ متر از سطح دریا در حاشیه شرقی گردنه باغک و پست‌ترین نقطه آن با ارتفاع ۱۴۸۰ متر در محدوده جنوب آن قرار دارد. روند زهکشی از شمال به طرف جنوب و امتداد آبراهه‌ها بیشتر شمال‌غرب-جنوب‌شرق است که با امتداد تعدادی از گسل‌ها، هماهنگی دارد. لیتولوژی بخش مرتفع و خشن آن شامل توده‌های سنگ‌آهن، آهک، دولومیت و دایک‌های داسیتی می‌باشد، ولی توپوگرافی آرام به سنگ‌های نظیر شیل، سیلتستون و توف تعلق دارد (معدن‌کاو، ۱۳۸۸).

۳.۵.۴ آب و هوا

محدوده مورد بررسی از دیدگاه اقلیمی در ناحیه خشک تا نیمه کویر و تا حدودی کوهستانی قرار دارد. تغییرات درجه حرارت بین ۴۵ درجه سانتی‌گراد در فصل تابستان تا ۱۵- درجه سانتی‌گراد در فصل زمستان در نوسان می‌باشد. مقدار بارندگی سالیانه آن حدود ۱۲۰ میلی‌متر به صورت باران و برف می‌باشد. متوسط میزان رطوبت نسبی سالیانه در این منطقه در حدود ۴۰ درصد بوده که از ۱۲

درصد تا ۷۶ درصد در ماه‌های خرداد و دی متغیر است. از طرف دیگر کمترین میانگین رطوبت ماهیانه از خرداد تا شهریور (۲۵ تا ۳۵ درصد) اندازه‌گیری شده است. آنچه از نظر آب و هوایی قابل ذکر می‌باشد، وجود باد و طوفان‌های شدید در فصل تابستان و اوایل پاییز می‌باشد به طوری که انجام کارهای زمین‌شناسی را با مشکل روبرو می‌نماید و باعث حرکت شن می‌شود. باد اصلی این منطقه هرات نامیده می‌شود که از رشته کوه هندوکش افغانستان در شمال و شمال غربی شروع شده و جهت آن در سرتاسر تابستان ثابت است. میانگین سرعت باد روزانه در حدود ۵۰ کیلومتر در ساعت است (معدنکاو، ۱۳۸۸).

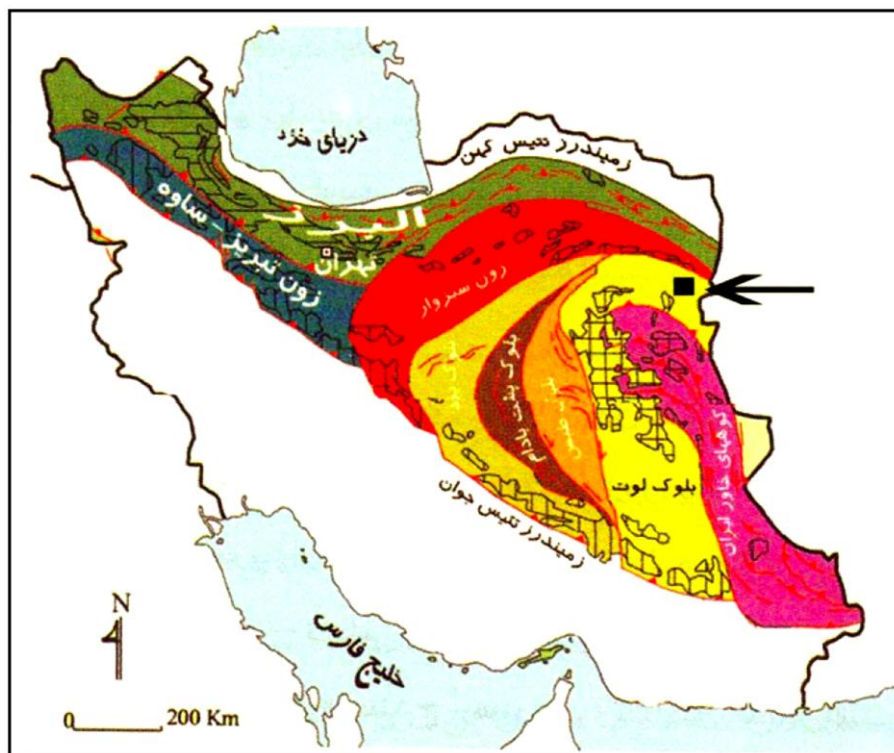
۴.۵.۴ زمین‌شناسی

از نظر زمین‌شناسی در زون قاره لوت قرار دارد. از نظر تکتونیکی فازهای مختلف کوهزایی را پشت سر گذاشته که در آن تعدادی قابل تشخیص می‌باشد. کانه‌زایی آن به عقیده اکثر محققین از نوع اسکارن می‌باشد. کانه اصلی سنگ‌آهن آن مگنتیت می‌باشد. قدیمی‌ترین سازندهای زمین‌شناسی موجود در محدوده معدن، شامل شیل و ماسه‌سنگ به همراه لایه‌هایی از آهک به سن ژوراسیک تا کرتاسه زیرین است، که پدیده اسکارنی شدن در آنها اتفاق افتاده است. عامل اصلی پدیده اسکارن را به گرانیات سرنوسر واقع در شمال معدن با سن آئوسن نسبت می‌دهند. علاوه بر واحدهای فوق سنگ-های ولکانیکی- پیروکلاستیکی در جنوب این منطقه دارای گسترش است. تعدادی دایک با ترکیب داسیت، میکرودیوریت، میکرومونزونیت در داخل واحد اسکارنی دیده می‌شود. روند عمومی لایه‌ها، گرانیات سرنوسر و دایک‌های نفوذی تقریباً شرقی- غربی و به موازات گسل درونه واقع در شمال منطقه می‌باشد. ارتباط بخش اسکارنی با واحدهای اطراف، بیشتر گسله است. گسل‌های این منطقه در چهار روند شمال‌غربی- جنوب‌شرقی، تقریباً شرقی- غربی، شمال‌شرقی- جنوب‌غربی و شمالی- جنوبی گسترش پیدا کرده است. کانه‌زایی به دلیل شکستگی زیاد، عدم وجود چین‌خوردگی، گسترش زیاد اسکارن از نوع اسکارن کم‌عمق می‌باشد و سیستم شکستگی‌ها با توجه به نوع لیتولوژی با تاثیر

توده‌های نفوذی، چین‌ها و گسل‌ها در بخش‌های مختلف متفاوت است. ارتباط روشنی بین شکستگی‌ها و کانه‌زایی مگنتیت وجود ندارد، اما کانه‌زایی‌های دیگر بیشتر از شکستگی‌های غیر تکتونیکی تبعیت کرده‌اند که شامل پیریت، هماتیت، فلوگوپیت و کلسیت است.

در این آنومالی واحدهای سنگی شامل شیل، سیلتستون، آهک کریستالین و آهک دولومیتی متعلق به مزوزوئیک، گرانیت سرنوسر، ریوداسیت، اسکارن، سنگ آهن، مربوط به ترشیری و بالاخره نهشته‌های واریزه‌ای و آبرفتی مربوط به کواترنر می‌باشد (معدنکاو، ۱۳۸۸).

همچنین در شکل (۴-۴)، پهنه‌های ساختاری- رسوبی ایران و موقعیت محدوده مورد مطالعه دردوی- باغک را می‌توان مشاهده نمود.



شکل ۴-۴- پهنه‌های ساختاری- رسوبی ایران و موقعیت محدوده مورد مطالعه دردوی- باغک (معدنکاو، ۱۳۸۸)

۵.۵.۴ استخراج معدن

بر مبنای اطلاعات مدل بلوکی تهیه شده حاصل اجرای شبکه اکتشاف ۵۰ متری، مشخصات این معدن در جدول (۱-۴) آمده است.

جدول ۱-۴- مشخصات ذخیره و عیار معدن باغک (کاوشگران، ۱۳۸۹)

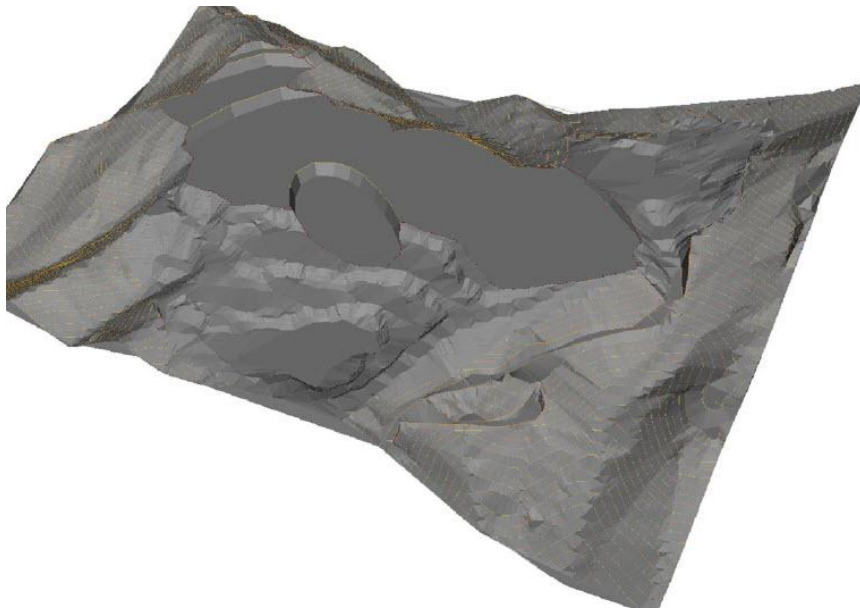
۶۰	میزان ذخیره (میلیون تن)	
۴۴/۴۱	Fe	عیار (%)
۱۵/۰۴	FeO	
۳/۰۷۴	S	
۲/۹۵	Fe/FeO	

ظرفیت استخراج سالانه معدن باغک مطابق با برنامه ریزی سال ۱۳۹۱ برابر با ۱۹۰ هزار تن سنگ آهن پرعیار و ۳۱۰ هزار تن سنگ آهن با عیار متوسط در نظر گرفته شده است. همچنین مطابق برنامه ریزی انجام شده بایستی ۱/۳ میلیون تن سنگ باطله از این منطقه حمل گردد (کاوشگران، ۱۳۹۱). پارامترهای طراحی برای محدوده کانسار باغک در جدول (۲-۴) آمده است (کاوشگران، ۱۳۹۱):

جدول ۲-۴- پارامترهای طراحی برای محدوده کانسار باغک (کاوشگران، ۱۳۸۹)

۱۰ متر	ارتفاع پله‌های استخراجی
۵ متر	عرض پله‌های نهایی شده
۸ متر	عرض پله‌های ایمنی
۷۵ درجه	شیب سینه کار
متوسط ۵۰ درجه	شیب دیواره نهایی

در شکل (۵-۴) نمایی از پیت نهایی معدن باغک مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۵- نمایی از پیت نهایی معدن باغک (کاوشگران، ۱۳۹۱)

۶.۴ معدن دردوی

۱.۶.۴ موقعیت جغرافیایی و ژئومورفولوژی

این معدن در حدفاصل طول جغرافیایی ۲۶۷۳۵۰-۲۶۸۱۰۰ شرقی و عرض جغرافیایی آن ۳۸۱۹۵۵۰-۳۸۱۹۰۵۰ شمالی (بر اساس سیستم جغرافیایی UTM) قرار گرفته است.

آنومالی سنگ آهن دردوی بخشی از معدن سنگ آهن سنگان خواف می باشد که در فاصله ۳۰۰ کیلومتری جنوب مشهد قرار دارد. راه دسترسی به آن از طریق مشهد- سهراب امام تقی- تربت حیدریه- خواف- سنگان می باشد. ارتباط بین سایت اصلی و معادن از طریق جاده خاکی که از جنوب آنومالی های A، B و C برقرار می باشد. این مسیر ابتدا به معدن باغک و سپس به معدن دردوی می رسد. طول این مسیر حدود ۸ کیلومتر است به لحاظ کوهستانی بودن این ناحیه، پستی و بلندی هایی با شیب تند در منطقه مشاهده می شود. بالاترین ارتفاع در این منطقه برابر با ۱۷۰۰ متر و پایین ترین نقطه دارای ارتفاعی معادل ۱۵۴۰ متر می باشد (کاوشگران، ۱۳۸۵).

در شکل (۴-۶) نمایی از معدن دردوی مشاهده می شود.



شکل ۴-۶- دورنمایی از معدن دردوی

۲.۶.۴ زمین‌شناسی

از نظر زمین‌شناسی در زون قاره لوت قرار دارد. از نظر تکتونیکی فازهای مختلف کوهزایی را پشت سر گذاشته که در آن تعدادی قابل تشخیص می‌باشد. کانه‌زایی آن از نوع اسکارن می‌باشد. کانه اصلی سنگ‌آهن آن مگنتیت است.

قدیمی‌ترین سازندهای زمین‌شناسی موجود در محدوده معدن شامل شیل و ماسه‌سنگ به همراه لایه‌هایی از آهک به سن ژوراسیک تا کرتاسه زیرین است که پدیده اسکارنی شدن در آن‌ها اتفاق افتاده است. عامل اصلی پدیده اسکارن را به گرانیات سرنوسر واقع در شمال معدن با سن ائوسن، نسبت می‌دهند. علاوه بر واحدهای فوق، سنگ‌های ولکانیکی - پیروکلاستیکی در جنوب منطقه مورد بررسی دارای گسترش است. تعدادی دایک با ترکیب داسیت، میکرودیوریت، میکرومونزونیت در داخل واحد اسکارنی دیده می‌شود.

روند عمومی لایه‌ها، گرانیات سرنوسر و دایک‌های نفوذی تقریباً شرقی - غربی و به موازات گسل درونه (واقع در شمال منطقه) می‌باشد.

گسل‌های اصلی محدوده آنومالی دردوی در دو راستای شرق جنوب‌شرقی - غرب شمال‌غربی و شمال‌غربی - جنوب‌شرقی گسترش پیدا کرده است.

کانه‌زایی به دلیل شکستگی زیاد، عدم وجود چین‌خوردگی، گسترش زیاد اسکارن، از نوع اسکارن کم‌عمق می‌باشد و سیستم شکستگی‌ها با توجه به نوع لیتولوژی با تأثیر توده‌های نفوذی، چین‌ها و گسل‌ها در بخش‌های مختلف متفاوت است، ولی دسته‌دزره‌های شرقی - غربی و شمالی - جنوبی را بیشتر می‌توان مشاهده نمود.

ارتباط روشنی بین شکستگی‌ها و کانه‌زایی مگنتیت وجود ندارد، اما کانه‌زایی‌های دیگر بیشتر از شکستگی‌های غیرتکتونیکی تبعیت کرده‌اند که شامل پیریت، هماتیت، فلوگوپیت و کلسیت است (معدنکاو، ۱۳۸۸).

۳.۶.۴ استخراج معدن

بر مبنای اطلاعات مدل بلوکی تهیه شده حاصل اجرای شبکه اکتشاف ۵۰ متری، مشخصات این معدن در جدول (۳-۴)، آمده است.

جدول ۳-۴- مشخصات ذخیره و عیار معدن دردوی (کاوشگران، ۱۳۸۹)

۱۲۰	میزان ذخیره (میلیون تن)	
۴۳/۹۷	Fe	عیار (%)
۱۸/۳۶	FeO	
۱/۰۳۱	S	
۲/۴۸	Fe/FeO	

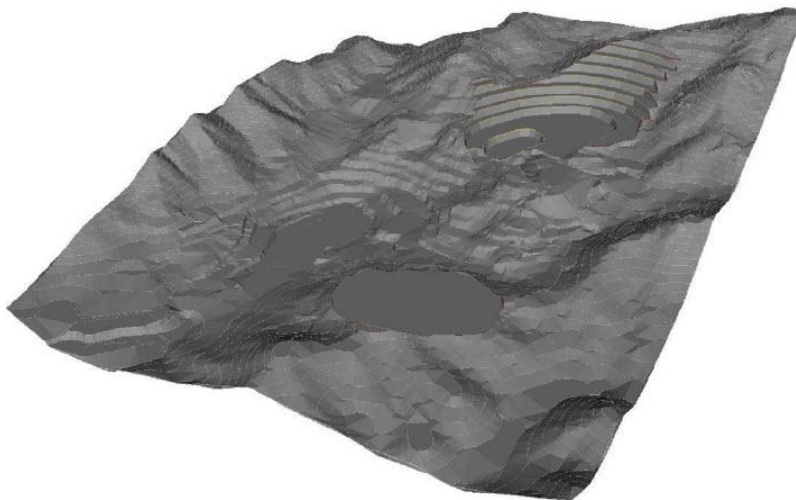
ظرفیت استخراج سالانه ۶۵۰ هزار تن سنگ‌آهن پرعیار و متوسط عیار در نظر گرفته شده است که پس از سنگ‌شکنی، در حدود ۴۰۰ هزارتن در سال سنگ‌آهن دانه‌بندی شده قابل عرضه خواهد بود. بر این اساس بهره‌برداری از این معدن در یک دوره ۱۳ ساله پیش‌بینی شده است (کاوشگران، ۱۳۸۹).

پارامترهای طراحی برای محدوده این کانسار به شرح ذیل می‌باشند:

جدول ۴-۴- پارامترهای طراحی برای محدوده کانسار دردوی (کاوشگران، ۱۳۸۹)

ارتفاع پله‌های استخراجی	۱۰ متر
عرض پله‌های نهایی شده	۵ متر
عرض پله‌های ایمنی	۸ متر
شیب سینه‌کار	۷۵ درجه
شیب دیواره نهایی	متوسط ۴۵ درجه

در شکل (۷-۴) نمایی از پیت نهایی معدن دردوی مشاهده می‌شود.



شکل ۷-۴- نمایی از پیت نهایی معدن دردوی (کاوشگران، ۱۳۹۱)

۷.۴ جمع‌بندی

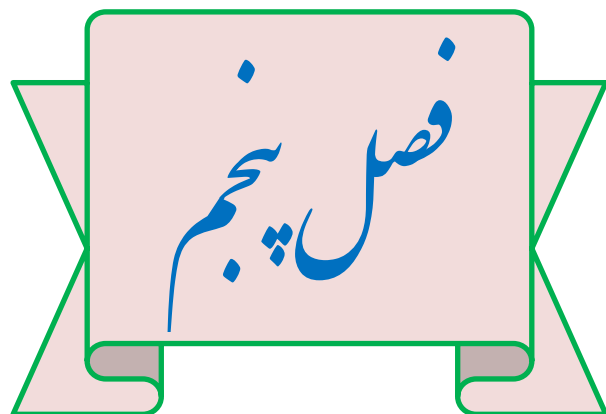
با توجه به نیاز صنایع فولاد کشور به سنگ آهن و مشکلاتی که در واردات وجود دارد، اهمیت استخراج منابع سنگ آهن داخل کشور روشن می‌شود.

مجموعه معادن سنگ آهن سنگان با ذخیره ۱/۲ میلیارد تن، یکی از ذخایر عظیم سنگ آهن کشور محسوب می‌شود که به سه ناحیه شرقی، مرکزی و غربی تقسیم شده است. آنومالی‌های ناحیه شرقی در حال اکتشاف می‌باشند. همچنین آنومالی‌های ناحیه غربی نیز جهت استخراج آماده شده و

در حال حاضر فقط از آنومالی B، استخراج می‌شود. اما آنومالی‌های ناحیه مرکزی با نام‌های باغک و دردوی در حال استخراج بوده و معادن فعال کل مجموعه به شمار می‌روند.

میزان ذخیره معدن باغک ۶۰ میلیون تن و میزان ذخیره معدن دردوی ۱۲۰ میلیون تن می‌باشد. ظرفیت استخراج سالانه معدن باغک مطابق با برنامه‌ریزی‌های سال ۱۳۹۱ برابر با ۱۹۰ هزار تن سنگ آهن پرعیار و ۳۱۰ هزار تن سنگ آهن با عیار متوسط و ظرفیت استخراج سالانه معدن دردوی ۶۵۰ هزار تن سنگ آهن پرعیار و متوسط عیار در نظر گرفته شده است که پس از سنگ‌شکنی، در حدود ۴۰۰ هزارتن در سال سنگ آهن دانه‌بندی شده قابل عرضه خواهد بود.

با توجه به اینکه در سال، باید این میزان از سنگ آهن از این دو معدن استخراج شود، و جهت تولید این حجم از سنگ آهن به انفجار و حفر چال‌های انفجاری نیاز می‌باشد، می‌توان به اهمیت تعیین قابلیت حفاری در این دو معدن پی برد.



تعیین قابلیت‌های معادن

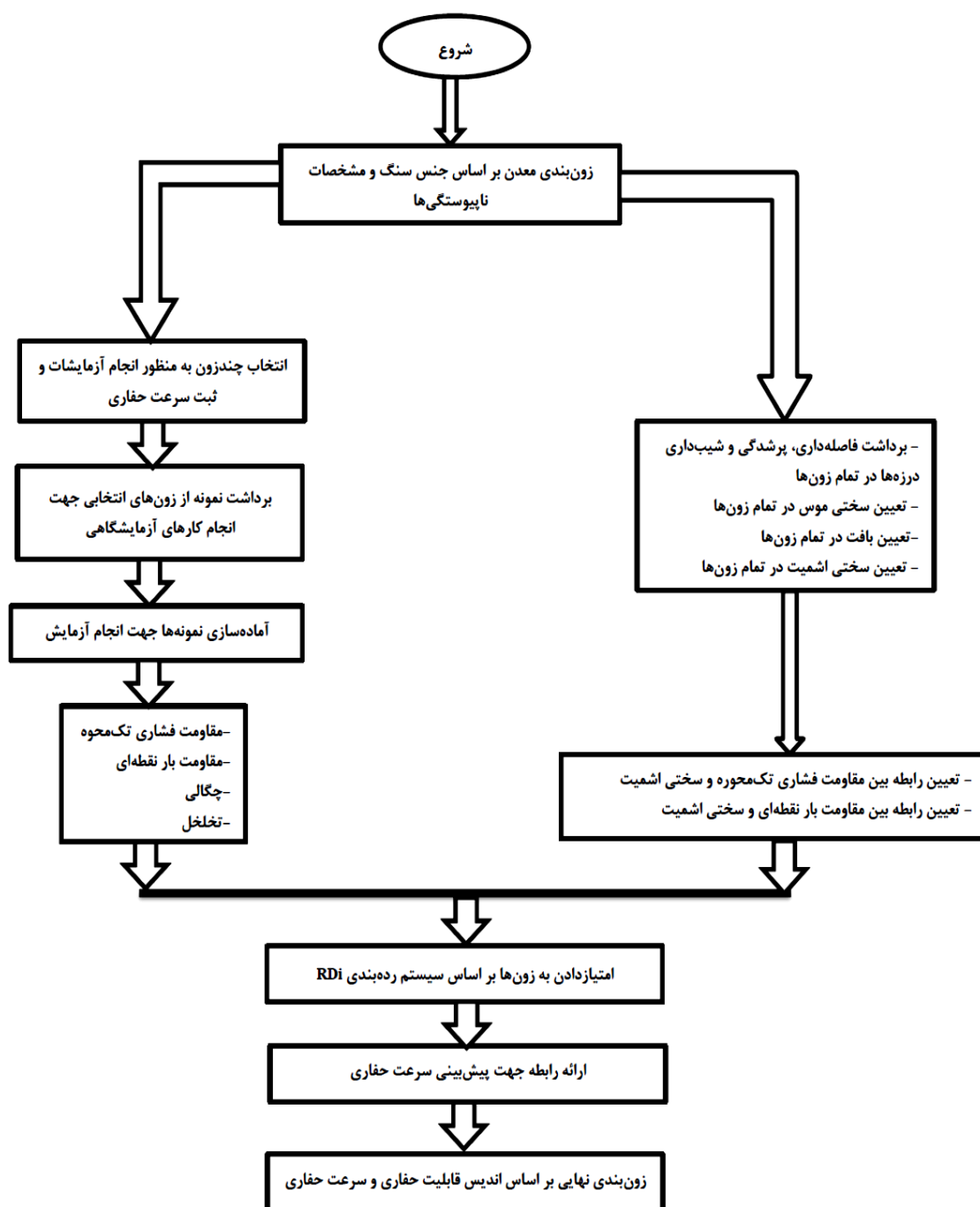
بانک و دردی

۱.۵ مقدمه

همانطور که قبلاً اشاره شد، قابلیت حفاری عبارتست از: میزان چال حفر شده بر حسب طول (متر) در واحد زمان (معمولاً دقیقه یا ساعت). با مشخص شدن مترژ چالزنی مورد نیاز برای انفجار، بر طبق برنامه‌ریزی تولید، مدت زمان مورد نیاز برای حفر چال مشخص خواهد شد. با در اختیار داشتن نرخ نفوذ چالزنی در سنگ‌ها، می‌توان تعداد ماشین‌آلات حفاری مورد نیاز برای حفر مترژ مشخصی از چال‌ها در طی زمان مشخصی را تعیین نمود. البته حالت معکوس مطالب فوق را می‌توان در نظر گرفت، یعنی بر اساس نرخ نفوذ سنگ‌ها و به تبع آن بر اساس زمان مورد نیاز برای حفر چال‌ها و تعداد ماشین‌آلات حفاری موجود، برنامه‌ریزی تولید صورت گیرد.

سیستم رده‌بندی که برای تعیین قابلیت حفاری معادن باغک و دردوی مورد استفاده قرار گرفته است، سیستم رده‌بندی RDi (اندیس قابلیت حفاری) می‌باشد. همانطور که قبلاً اشاره شد، این سیستم رده‌بندی در سال ۲۰۰۸ توسط حسینی و همکارانش ارائه شده است. در این طبقه‌بندی پارامترهای فیزیکی ماده‌سنگ (بافت و اندازه دانه‌ها)، پارامترهای مقاومتی ماده‌سنگ (سختی و مقاومت فشاری تک‌محوره) و پارامترهای ساختاری توده‌سنگ (مشخصات درزه‌ها: فاصله‌داری، بازشدگی، پرشدگی و شیب) به منظور تخمین قابلیت حفاری سنگ مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده توأم از خصوصیات ژئومکانیکی توده‌سنگ و ماده‌سنگ، پرهیز از به‌کارگیری پارامترهای هم‌ارزش و هم‌ارز، امتیازدهی منطقی و سهولت استفاده از آن، این سیستم را به صورت سیستمی جامع نسبت به سایر سیستم‌هایی که تاکنون ارائه شده، تبدیل کرده است.

در شکل (۵-۱)، مراحل انجام کار جهت تعیین قابلیت حفاری هر یک از معادن باغک و دردوی، آورده شده است.



شکل ۵-۱- مراحل مختلف انجام مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی

همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، پس از زون‌بندی معادن مورد نظر بر اساس جنس سنگ و مشخصات ناپیوستگی‌ها، چند زون از هر معدن به منظور برداشت نمونه جهت تعیین مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت بار نقطه‌ای، چگالی و تخلخل و ثبت سرعت حفاری انتخاب خواهند شد. از طرفی در تمام زون‌ها از جمله در زون‌های انتخابی، سختی موس، بافت، سختی اشمیت و مشخصات ناپیوستگی‌ها مانند فاصله‌داری، پرشدگی و زاویه بین امتداد چال و سطح درزه برداشت خواهند شد. پس از مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های برداشت شده از زون‌های انتخابی، با انجام تحلیل‌های رگرسیونی رابطه بین مقاومت فشاری و مقاومت بار نقطه‌ای با سختی اشمیت مشخص خواهد شد. پس از تعیین ارتباط بین پارامترهای ذکر شده، ضریب همبستگی هر کدام از این پارامترها که بیشتر باشد، جهت تعیین مقاومت فشاری سایر زون‌ها مورد استفاده قرار خواهد گرفت. همچنین اندیس قابلیت حفاری برای هر کدام از معادن در زون‌های انتخابی محاسبه شده و ارتباط بین این اندیس و سرعت حفاری در این زون‌ها مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در نهایت با داشتن اندیس قابلیت حفاری در تمامی زون‌ها، با استفاده از رابطه تعیین شده بین سرعت حفاری و اندیس قابلیت حفاری در زون‌های انتخابی، تخمین قابلیت نفوذ در توده‌سنگ‌های سایر ترازها امکان‌پذیر خواهد بود.

در ادامه، ابتدا به بررسی تعیین قابلیت حفاری در معدن باغک و سپس معدن دردوی پرداخته خواهد شد.

۲.۵ تعیین قابلیت حفاری توده‌سنگ در معدن باغک

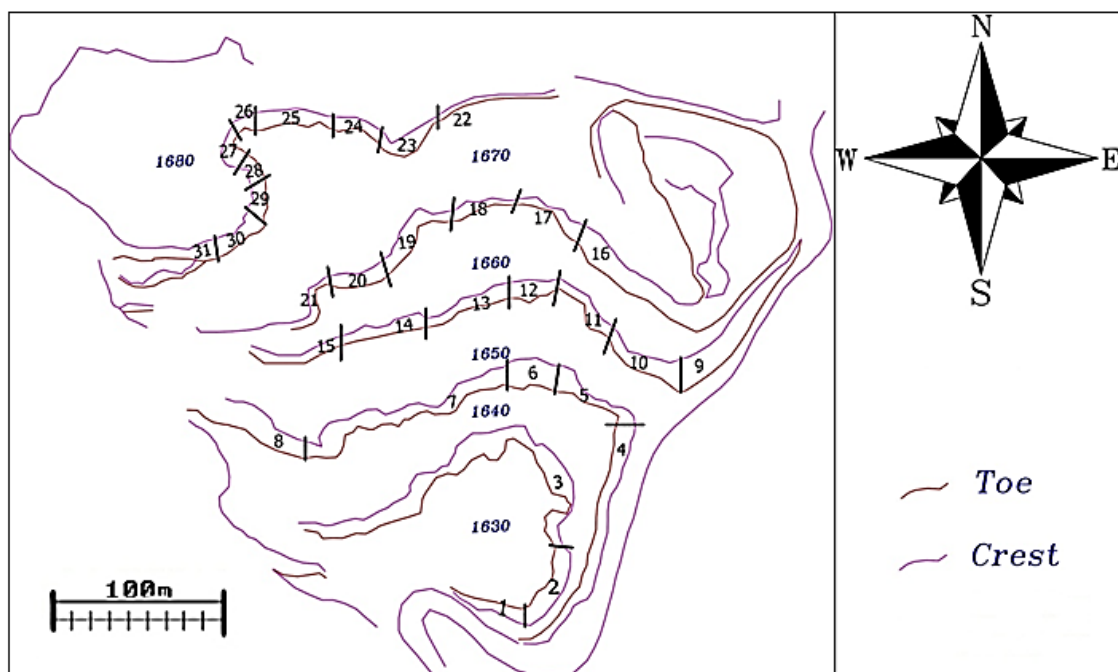
۱.۲.۵ زون‌بندی

با توجه به پارامترهای مختلف توده‌سنگ و ماده‌سنگ که در سیستم رده‌بندی RDi ذکر شده است و با در نظر گرفتن این نکته که، در این معدن چالزنی جهت آتشیاری، با توجه به جنس سنگ و نیز کم‌عیار یا پرعیار بودن مگنتیت موجود انجام می‌گیرد، ترازهای مختلف معدن با توجه به جنس

سنگ و مشخصات درزه‌ها مانند: فاصله‌داری، پرشدگی و شیب، به زون‌های مختلفی تقسیم شده، آنگاه قابلیت حفاری هر زون به طور جداگانه بررسی و تعیین می‌شود.

بنابراین در این مرحله از کار، تمام ترازهای معدن باغک زون‌بندی شده است. در نهایت با توجه به تغییرات جنس سنگ و شرایط ناپیوستگی‌ها، این معدن به ۳۱ زون تقسیم شده است که در شکل (۲-۵)، ترازهای مختلف معدن باغک همراه با شماره زون و در جدول (۵-۱) نیز، جنس سنگ هر کدام از زون‌ها به تفکیک آورده شده است.

همانطور که اشاره شد، با توجه به اینکه در این معدن، جهت تولید آهن و یا برداشت باطله، آتشیاری بر اساس جنس سنگ انجام می‌شود، بنابراین در این تحقیق ابتدا زون‌بندی بر اساس جنس سنگ و مشخصات ناپیوستگی‌ها انجام شده، آنگاه پس از امتیاز دادن بر اساس سیستم رده‌بندی RD_i، سرعت حفاری در هر یک از این زون‌ها پیش‌بینی شده است.



شکل ۲-۵- زون‌بندی معدن باغک

جدول ۵-۱- زون بندی معدن باغک همراه با جنس سنگها

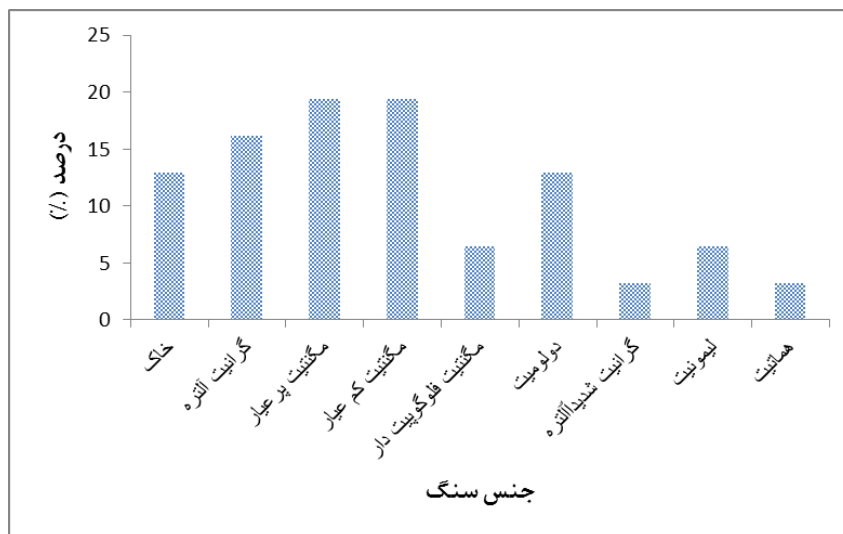
شماره زون	تراز	جنس سنگ	شماره زون	تراز	جنس سنگ
۱	۱۶۳۰	خاک	۱۷	۱۶۶۰	مگنتیت کم عیار
۲	۱۶۳۰	گرانیت آلتیه شده	۱۸	۱۶۶۰	مگنتیت پر عیار
۳	۱۶۳۰	مگنتیت پر عیار	۱۹	۱۶۶۰	مگنتیت کم عیار
۴	۱۶۴۰	خاک	۲۰	۱۶۶۰	دولومیت
۵	۱۶۴۰	مگنتیت کم عیار	۲۱	۱۶۶۰	مگنتیت پر عیار
۶	۱۶۴۰	مگنتیت فلوگوپیت دار	۲۲	۱۶۷۰	خاک
۷	۱۶۴۰	مگنتیت کم عیار	۲۳	۱۶۷۰	گرانیت شدیداً آلتیه
۸	۱۶۴۰	خاک	۲۴	۱۶۷۰	لیمونیت
۹	۱۶۵۰	گرانیت آلتیه شده	۲۵	۱۶۷۰	هماتیت
۱۰	۱۶۵۰	مگنتیت فلوگوپیت دار	۲۶	۱۶۷۰	لیمونیت
۱۱	۱۶۵۰	مگنتیت کم عیار	۲۷	۱۶۷۰	مگنتیت پر عیار
۱۲	۱۶۵۰	دولومیت	۲۸	۱۶۷۰	گرانیت آلتیه شده
۱۳	۱۶۵۰	مگنتیت پر عیار	۲۹	۱۶۷۰	مگنتیت کم عیار
۱۴	۱۶۵۰	دولومیت	۳۰	۱۶۷۰	دولومیت
۱۵	۱۶۵۰	مگنتیت پر عیار	۳۱	۱۶۷۰	گرانیت آلتیه شده
۱۶	۱۶۶۰	گرانیت آلتیه شده			

در شکل (۵-۳)، درصد انواع سنگهای معدن باغک مشاهده می شود. با توجه به این شکل می-

توان ترتیب فراوانی سنگهای این معدن را به صورت زیر بیان کرد: مگنتیت پر عیار و کم عیار (۳۸٪)،

گرانیت آلتیه (۱۶٪)، دولومیت (۱۳٪)، مگنتیت فلوگوپیت دار (۷٪)، لیمونیت (۷٪)، هماتیت (۳٪) و

گرانیت شدیداً آلتیه (۳٪).



شکل ۳-۵- نمودار ستونی درصد خاک و سنگ‌های مختلف

۲.۲.۵ اندازه‌گیری پارامترهای مربوط به ماده سنگ

با توجه به اینکه، برای استفاده از سیستم رده‌بندی RD_i، باید پارامترهایی از ماده سنگ مانند بافت، مقاومت فشاری تک‌محوره و سختی موس تعیین شوند، در ادامه به تعیین این پارامترها پرداخته می‌شود. همچنین مقاومت بار نقطه‌ای، چگالی، تخلخل و سختی اشمیت نیز در این بخش تعیین گردیده است.

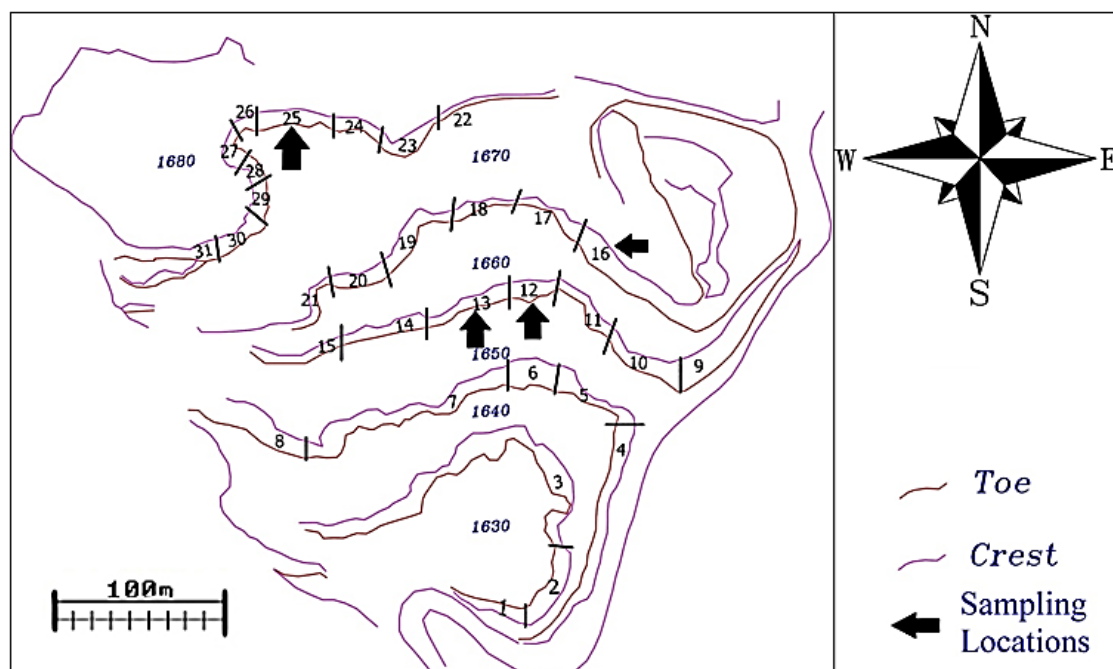
۱.۲.۲.۵ برداشت نمونه

با توجه به شکل (۳-۵) و فراوانی انواع سنگ‌ها در معدن باغک، نمونه‌ها از سنگ‌های غالب در این معدن، انتخاب شده است. اما به دلیل کمبود امکانات آزمایشگاهی و با توجه به این که تفاوت مگنتیت پرعیار و کم‌عیار فقط در عیار و شرایط ناپیوستگی‌های آن‌ها می‌باشد و از نظر مقاومتی تفاوتی با یکدیگر ندارند، تصمیم گرفته شد که از این معدن، جهت انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت بار نقطه‌ای، چگالی و تخلخل، از زون‌های ۱۲ (دولومیت)، ۱۳ (مگنتیت پرعیار)، ۱۶ (گرانیت آتزه‌شده) و ۲۵ (هماتیت) و جهت تعیین بافت و سختی موس از تمامی زون‌ها، نمونه-

هایی جمع‌آوری شده و به آزمایشگاه منتقل شوند. در شکل (۴-۵) و (۵-۵)، نمونه‌های جمع‌آوری شده و محل انتخاب این نمونه‌ها مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۵- نمونه‌های جمع‌آوری شده جهت انجام آزمایش و انتقال آن‌ها به آزمایشگاه صنعتی شاهرود



شکل ۵-۵- زون‌های انتخاب شده جهت جمع‌آوری نمونه از معدن باغک

۲.۲.۲.۵ مقاومت فشاری تک محوره

جهت تعیین مقاومت فشاری تک محوره، از استاندارد ISRM استفاده شده است. طبق پیشنهاد ISRM، نسبت ارتفاع به قطر نمونه بین $2/5$ تا 3 و حداقل قطر نمونه 54 میلیمتر (مغزه NX) می باشد. همانطور که در شکل (۵-۶)، مشاهده می شود، ابتدا با استفاده از دستگاه کرگیر، نمونه های استوانه ای مورد نظر تهیه شده، سپس بعد از برش و آماده سازی نمونه ها (شکل ۵-۷)، عملیات بارگذاری انجام شده است.



ب- نمونه های استوانه ای تهیه شده قبل از برش

الف - دستگاه تهیه نمونه های استوانه ای

شکل ۵-۶- تهیه نمونه های استوانه ای



الف- دستگاه برش جهت برش و آماده سازی نمونه ها ب- نمونه های برش داده شده جهت عملیات بارگذاری
شکل ۵-۷- آماده سازی نمونه ها جهت عملیات بارگذاری

برای نمونه در شکل (۵-۸)، نمونه دولومیت در زیر دستگاه بارگذاری مشاهده می شود.



الف- نمونه دولومیت قبل از عملیات بارگذاری ب- نمونه دولومیت بعد از عملیات بارگذاری
شکل ۵-۸- بارگذاری فشاری نمونه دولومیت

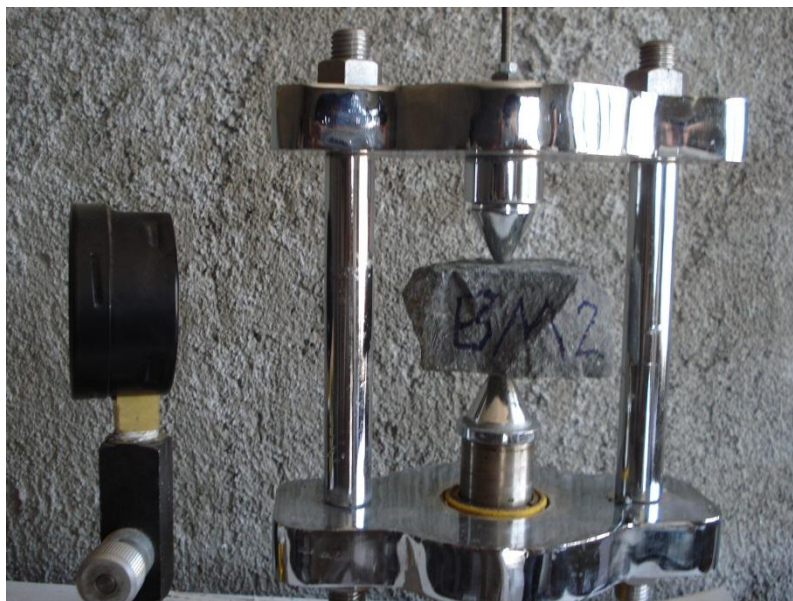
نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوره در جدول (۵-۲) ذکر شده است. در قسمت پیوست، اطلاعات مربوط به این آزمایش به طور کامل در جدول (۷-۴۸)، قابل مشاهده است.

جدول ۵-۲- نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوره در معدن باغک

نوع سنگ	گرانیت آلتزه شده	مگنتیت پرعیار	هماتیت	دولومیت
مقاومت فشاری تک محوره (MPa)	۹۵/۲	۱۱۹/۵۷	۶۰	۱۰۲/۱۶

۳.۲.۲.۵ مقاومت بار نقطه‌ای

انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوره، مستلزم آماده سازی دقیق نمونه و در اختیار داشتن دستگاه های گران و حساس می باشد و در عین حال، نتایج حاصل وابستگی شدیدی به شیوه بارگذاری دارد. بنابراین انجام دقیق و صحیح آزمایش مقاومت فشاری تک محوره پرهزینه و وقت گیر است. به منظور رفع مشکلات فوق از مقاومت بار نقطه‌ای نیز، در این تحقیق استفاده شده است. به منظور انجام این آزمایش، نمونه هایی از محل زون های تعیین شده، جهت انجام آزمایش مقاومت بار نقطه‌ای انتخاب و در آزمایشگاه مهندسی مشاور کاوشگران مقدار مقاومت هر کدام از این نمونه ها تعیین شده است. برای انجام این آزمایش به علت نبود امکانات لازم جهت تهیه مغزه و یا نمونه بلوکی، از نمونه های کلوخه ای استفاده شده است. در شکل (۵-۹)، نمونه ای از مگنتیت معدن باغک، در حال بارگذاری در زیر دستگاه مقاومت بار نقطه‌ای مشاهده می شود. همچنین شکل (۵-۱۰)، قبل و بعد از بارگذاری این نمونه را نشان می دهد.



شکل ۵-۹- آزمایش مقاومت بار نقطه‌ای نمونه شماره ۲ سنگ مگنتیت معدن باغک



الف- نمونه مگنتیت قبل از عملیات بارگذاری ب- نمونه مگنتیت بعد از عملیات بارگذاری

شکل ۵-۱۰- نمونه شماره ۲ سنگ مگنتیت معدن باغک قبل و بعد از بارگذاری

نتایج آزمایش مقاومت بار نقطه‌ای نمونه‌های معدن باغک در جدول (۵-۳) ذکر شده است.

همچنین در قسمت پیوست، نتایج مربوط به این آزمایش به طور کامل در جدول (۷-۵۰)،

بیان شده است.

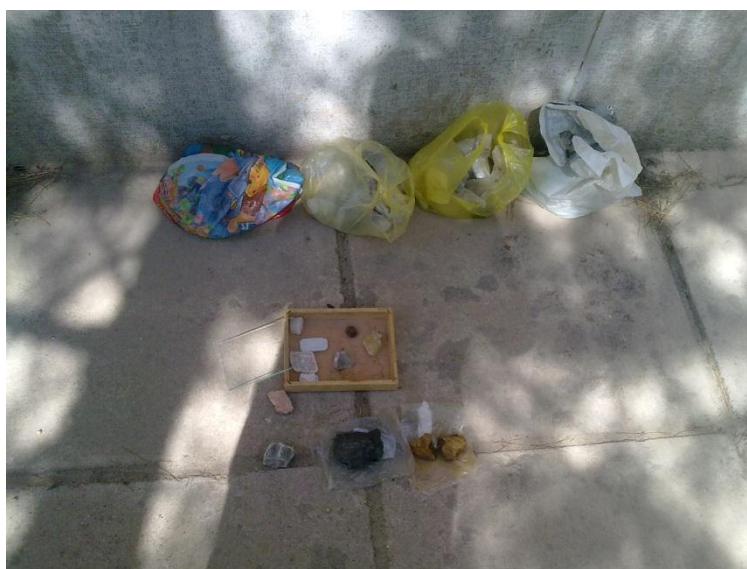
جدول ۵-۳- نتایج آزمایش مقاومت بار نقطه‌ای در معدن باغک

نوع سنگ	گرانیت آلتیه شده	مگنتیت پرعیار	هماتیت	دولومیت
شاخص مقاومت بار نقطه‌ای تصحیح شده (MPa)	۴/۳۶	۶/۹۷	۱/۷۴	۴/۵۸
مقاومت بار نقطه‌ای (MPa)	۱۰۰/۱۷	۱۶۰/۲۴	۴۰	۱۰۵/۳۷

از جداول (۲-۵) و (۳-۵) نتیجه‌گیری می‌شود که، نمونه‌های معدن باغک از نظر مقاومتی، نمونه‌های نسبتاً مقاومی می‌باشند و این بالا بودن مقاومت قابلیت حفاری را کاهش خواهد داد.

۴.۲.۲.۵ تعیین سختی و بافت

دو پارامتر دیگر از ماده‌سنگ، سختی و بافت نمونه‌ها می‌باشد که باید تعیین شوند. جهت تعیین سختی، از مقیاس سختی موس استفاده شده است. در این آزمایش سختی سنگ یا کانی بر اساس قابلیت خراش‌برداری در اثر کشیده شدن یک جسم ثانوی روی آن مشخص می‌گردد. بافت نمونه‌های تمام زون‌ها، با توجه به سیستم رده‌بندی اشاره شده، به صورت چشمی و با نظر افراد متخصص تعیین شده است. در شکل (۵-۱۱)، نمونه سنگ‌ها به همراه جعبه سختی موس نشان داده شده است.



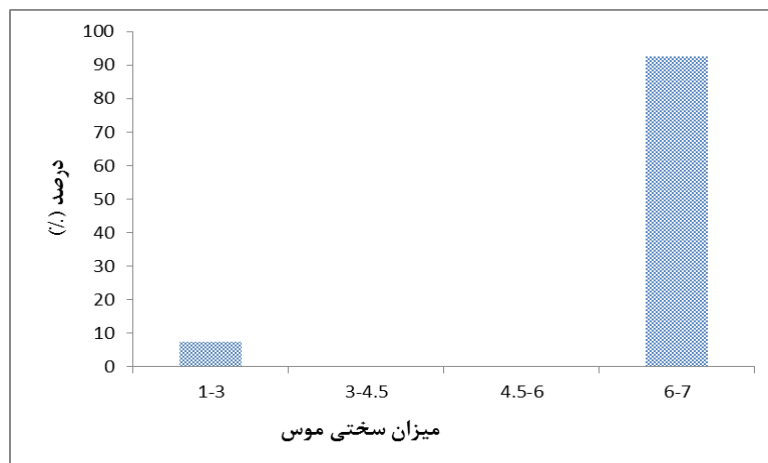
شکل ۵-۱۱- نمونه سنگ‌ها به همراه جعبه سختی موس

در جدول (۴-۵)، سختی موس تمام نمونه‌های سنگی درج شده است.

جدول ۴-۵- مقدار سختی موس نمونه‌های سنگی معدن باغک

شماره زون	جنس سنگ	میزان سختی	شماره زون	جنس سنگ	میزان سختی
۱	خاک	-	۱۷	مگنتیت کم عیار	۶-۷
۲	گرانیت آلتیره شده	۶-۷	۱۸	مگنتیت پر عیار	۶-۷
۳	مگنتیت پر عیار	۶-۷	۱۹	مگنتیت کم عیار	۶-۷
۴	خاک	-	۲۰	دولومیت	۶-۷
۵	مگنتیت کم عیار	۶-۷	۲۱	مگنتیت پر عیار	۶-۷
۶	مگنتیت فلوگوبیت دار	۶-۷	۲۲	خاک	-
۷	مگنتیت کم عیار	۶-۷	۲۳	گرانیت شدیداً آلتیره	۶-۷
۸	خاک	-	۲۴	لیمونیت	۱-۲
۹	گرانیت آلتیره شده	۶-۷	۲۵	هماتیت	۶-۷
۱۰	مگنتیت فلوگوبیت دار	۶-۷	۲۶	لیمونیت	۱-۲
۱۱	مگنتیت کم عیار	۶-۷	۲۷	مگنتیت پر عیار	۶-۷
۱۲	دولومیت	۶-۷	۲۸	گرانیت آلتیره شده	۶-۷
۱۳	مگنتیت پر عیار	۶-۷	۲۹	مگنتیت کم عیار	۶-۷
۱۴	دولومیت	۶-۷	۳۰	دولومیت	۶-۷
۱۵	مگنتیت پر عیار	۶-۷	۳۱	گرانیت آلتیره شده	۶-۷
۱۶	گرانیت آلتیره شده	۶-۷			

با توجه به نمودار ستونی رسم شده برای سختی موس در معدن باغک مطابق شکل (۵-۱۲)، مشاهده می‌شود که ۹۳٪ سنگ‌های این معدن، دارای سختی ۶-۷ بوده، که در سیستم رده‌بندی RDi، جزء سنگ‌های سخت محسوب شده و انتظار می‌رود که این پارامتر، قابلیت حفاری در این معدن را تحت تأثیر قرار داده و نرخ نفوذ را کاهش دهد.



شکل ۵-۱۲- نمودار ستونی درصد سختی موس در معدن باغک

در جدول (۵-۵) نیز، بافت نمونه‌های مختلف سنگی قابل مشاهده است.

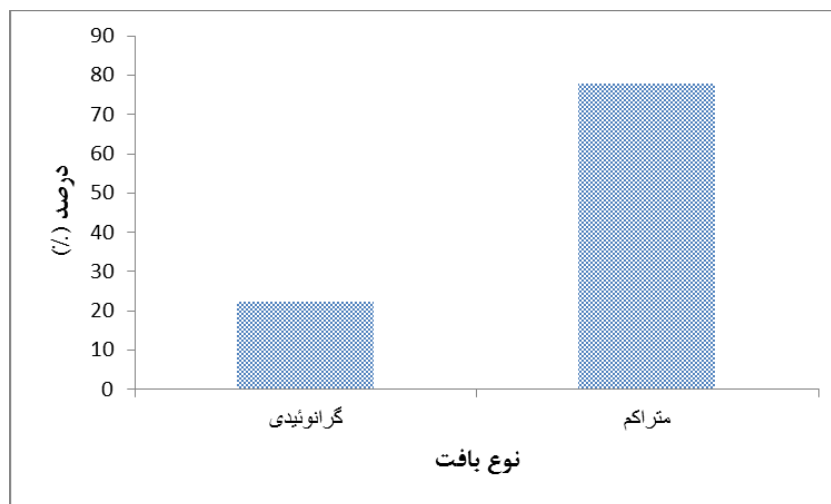
جدول ۵-۵- بافت نمونه‌های سنگی معدن باغک

شماره زون	جنس سنگ	بافت	شماره زون	جنس سنگ	بافت
۱	خاک	-	۱۷	مگنتیت کم عیار	متراکم
۲	گرانیت آتره شده	گرانوئیدی	۱۸	مگنتیت پر عیار	متراکم
۳	مگنتیت پر عیار	متراکم	۱۹	مگنتیت کم عیار	متراکم
۴	خاک	-	۲۰	دولومیت	متراکم
۵	مگنتیت کم عیار	متراکم	۲۱	مگنتیت پر عیار	متراکم
۶	مگنتیت فلوگوئیددار	لایه‌ای و متراکم	۲۲	خاک	-
۷	مگنتیت کم عیار	متراکم	۲۳	گرانیت شدیداً آتره	گرانوئیدی
۸	خاک	-	۲۴	لیمونیت	متراکم
۹	گرانیت آتره شده	گرانوئیدی	۲۵	هماتیت	متراکم
۱۰	مگنتیت فلوگوئیددار	لایه‌ای و متراکم	۲۶	لیمونیت	متراکم
۱۱	مگنتیت کم عیار	متراکم	۲۷	مگنتیت پر عیار	متراکم
۱۲	دولومیت	متراکم	۲۸	گرانیت آتره شده	گرانوئیدی
۱۳	مگنتیت پر عیار	متراکم	۲۹	مگنتیت کم عیار	متراکم
۱۴	دولومیت	متراکم	۳۰	دولومیت	متراکم
۱۵	مگنتیت پر عیار	متراکم	۳۱	گرانیت آتره شده	گرانوئیدی
۱۶	گرانیت آتره شده	گرانوئیدی			

همانطور که در شکل (۵-۱۳)، مشاهده می‌شود، ۷۸٪ بافت سنگ‌های موجود در این معدن،

بافت متراکم می‌باشد، که در سیستم رده‌بندی RD_i، به لحاظ تأثیر منفی بر قابلیت حفاری، بدترین

بافت بوده و دارای کمترین امتیاز است. بنابراین انتظار می‌رود که این ویژگی نیز قابلیت حفاری در این معدن را تحت تأثیر قرار داده و آن را کاهش دهد.



شکل ۵-۱۳- نمودار ستونی درصد انواع بافت در معدن باغک

۵.۲.۲.۵ تعیین سختی اشمیت

همانطور که قبلاً اشاره شد، سختی اشمیت، کاربردهای مختلفی در طبقه‌بندی سنگ‌ها، و تعیین خواص مهندسی آن‌ها دارد. دیر و میلر^۱ در سال ۱۹۶۵، در مطالعاتی که به منظور طبقه‌بندی سنگ‌ها بر روی دامنه وسیعی از آن‌ها از ۲۸ محل مختلف انجام دادند، از سختی اشمیت استفاده کرده و به این نتیجه رسیدند که، سختی اشمیت با مقاومت فشاری تک‌محوره، ضریب همبستگی معادل ۰/۸۸ دارد. همچنین آن‌ها با ضرب کردن سختی اشمیت در چگالی خشک سنگ، رابطه‌ای بین مقاومت فشاری تک‌محوره و سختی اشمیت به دست آوردند که، دارای ضریب ۰/۹۴۳ بود. با توجه به مطالب بیان شده، چکش اشمیت می‌تواند به منظور تخمین سریع و ارزان مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ در صحرای استفاده شود (فهیمی‌فر و سروش، ۱۳۸۰).

¹ Deer & Miller

با نظر به این نکته که، در سیستم رده‌بندی مورد استفاده در این تحقیق، تعیین مقاومت فشاری سنگ یک پارامتر کاملاً ضروری می‌باشد و تعیین مقاومت فشاری تک‌محوره چه در آزمایشگاه و چه به صورت مقاومت بار نقطه‌ای هزینه و وقت زیادی را می‌طلبد، بنابراین به نظر می‌رسد، اگر بتوان در چند زون مشخص، رابطه‌ای بین سختی اشمیت و مقاومت فشاری تک‌محوره و یا مقاومت بار نقطه‌ای پیدا کرد، آنگاه با تعمیم این رابطه برای بقیه زون‌ها، می‌توان با صرف هزینه کمتر و با دقت نسبتاً خوب، مقاومت فشاری یا بار نقطه‌ای تمام نمونه‌های سنگی سایر زون‌ها را با استفاده از سختی اشمیت ماده‌سنگ، به دست آورد (جدول ۵-۶).

جهت اندازه‌گیری سختی اشمیت در هر یک از زون‌ها، ۲۰ آزمایش انجام شده است، سپس با حذف نیمی از داده‌هایی که مقدار کمتری دارند، میانگین ۱۰ داده باقی‌مانده محاسبه شده و در نهایت با ضرب کردن این مقدار در ضریب تصحیح، سختی اشمیت در هر زون به دست آمده است.

جدول ۵-۶- سختی اشمیت نمونه‌های سنگی معدن باغک

شماره زون	جنس سنگ	سختی اشمیت	شماره زون	جنس سنگ	سختی اشمیت
۱	خاک	-	۱۷	مگنتیت کم‌عیار	۵۶/۷۸
۲	گرانیت آلت‌ره شده	۳۷/۲۶	۱۸	مگنتیت پرعیار	۵۴/۰۸
۳	مگنتیت پرعیار	۵۳/۸۲	۱۹	مگنتیت کم‌عیار	۵۴/۶۵
۴	خاک	-	۲۰	دولومیت	۴۹/۸۶
۵	مگنتیت کم‌عیار	۵۴/۲۳	۲۱	مگنتیت پرعیار	۵۵/۸۲
۶	مگنتیت فلوگوپیت‌دار	۴۳/۲۴	۲۲	خاک	-
۷	مگنتیت کم‌عیار	۵۴/۸	۲۳	گرانیت شدیداً آلت‌ره	۵۵/۹۴
۸	خاک	-	۲۴	لیمونیت	-
۹	گرانیت آلت‌ره شده	۵۴/۶	۲۵	هماتیت	۴۴/۳۴
۱۰	مگنتیت فلوگوپیت‌دار	۴۱/۷۸	۲۶	لیمونیت	-
۱۱	مگنتیت کم‌عیار	۵۴/۱۴	۲۷	مگنتیت پرعیار	۵۶/۵۸
۱۲	دولومیت	۵۱/۰۶	۲۸	گرانیت آلت‌ره شده	۵۴/۷۴
۱۳	مگنتیت پرعیار	۵۶/۹۵	۲۹	مگنتیت کم‌عیار	۵۶/۹۵
۱۴	دولومیت	۴۸/۷۵	۳۰	دولومیت	۵۱/۰۶
۱۵	مگنتیت پرعیار	۵۷/۸	۳۱	گرانیت آلت‌ره شده	۵۵/۵
۱۶	گرانیت آلت‌ره شده	۵۵/۹۴			

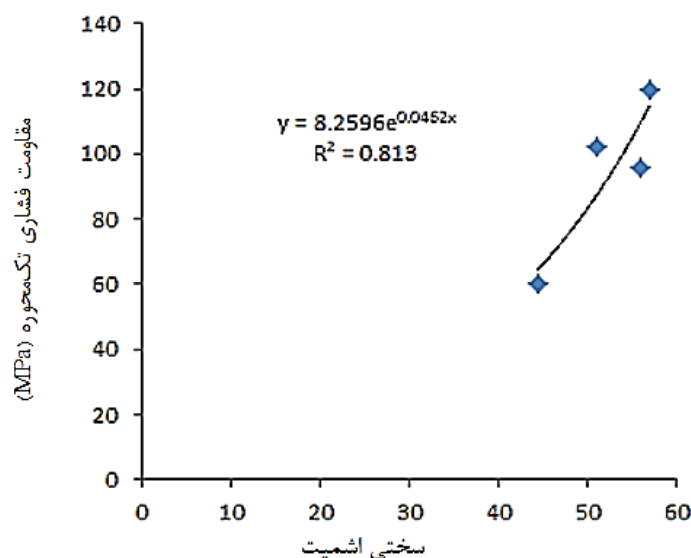
۶.۲.۲.۵ تعیین ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوره و مقاومت بار نقطه‌ای با سختی

اشمیت در زون‌های انتخابی

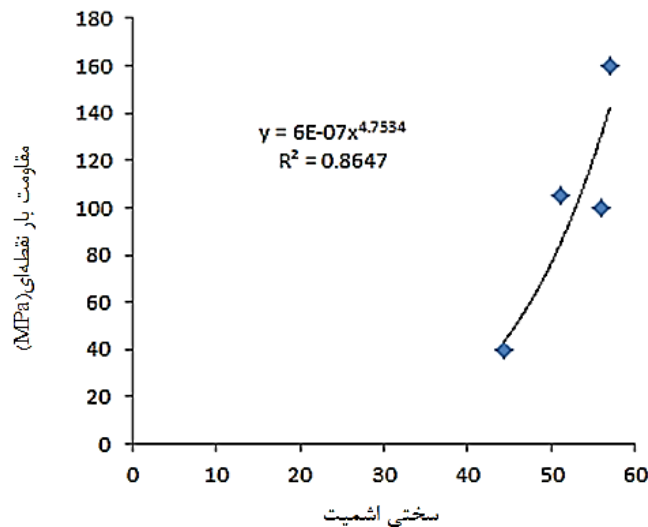
همانطور که اشاره شد، در سیستم رده‌بندی مورد استفاده در این تحقیق، تعیین مقاومت فشاری سنگ، یک پارامتر کاملاً ضروری می‌باشد و تعیین مقاومت فشاری تک‌محوره به روش آزمایشگاهی و یا با استفاده از روش غیر مستقیم به صورت مقاومت بار نقطه‌ای هزینه و وقت زیادی را می‌طلبد، بنابراین به نظر می‌رسد، اگر بتوان در زون‌های مشخص شده در شکل (۵-۵)، رابطه‌ای بین سختی اشمیت و مقاومت فشاری تک‌محوره و یا مقاومت بار نقطه‌ای پیدا کرد، آنگاه می‌توان با تعیین سختی اشمیت زون‌های دیگر و جایگذاری آن در این رابطه، با صرف هزینه کمتر و با دقت نسبتاً خوب، مقاومت فشاری یا بار نقطه‌ای نمونه‌های سنگی سایر زون‌ها را تخمین زد.

در اشکال (۵-۱۴) و (۵-۱۵)، به ترتیب نمودار ارتباط بین مقاومت فشاری تک‌محوره با سختی

اشمیت و مقاومت بار نقطه‌ای و سختی اشمیت مشاهده می‌شود.



شکل ۵-۱۴-نمودار ارتباط بین مقاومت فشاری تک‌محوره و چکش اشمیت در معدن باغک



شکل ۵-۱۵- نمودار ارتباط بین مقاومت بار نقطه‌ای و چکش اشمیت در معدن باغک

هر چه تعداد نمونه‌ها بیشتر باشد، اعتبار رابطه پیشنهادی نیز بیشتر خواهد بود، ولی همانطور که قبلاً اشاره شد، به دلیل کمبود امکانات آزمایشگاهی، فاصله زیاد معدن تا آزمایشگاه و هزینه بالای حمل نمونه‌ها و با توجه به نمودار ستونی رسم شده برای درصد سنگ‌های مختلف این معدن، چهار نمونه از سنگ‌های غالب آن، جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره و هشت نمونه به منظور آزمایش مقاومت بار نقطه‌ای انتخاب شده است. با توجه به اشکال بالا، ضریب همبستگی بین مقاومت فشاری تک‌محوره و سختی اشمیت ۰/۸۱ و بین مقاومت بار نقطه‌ای و سختی اشمیت ۰/۸۶ می‌باشد. مشاهده می‌شود که، این همبستگی بین مقاومت بار نقطه‌ای و سختی اشمیت بیشتر از همبستگی بین مقاومت فشاری تک‌محوره و سختی اشمیت می‌باشد. بنابراین رابطه‌ای که برای بدست آوردن مقاومت فشاری زون‌های دیگر استفاده شده است، رابطه بین مقاومت بار نقطه‌ای و سختی اشمیت می‌باشد (رابطه ۵-۱).

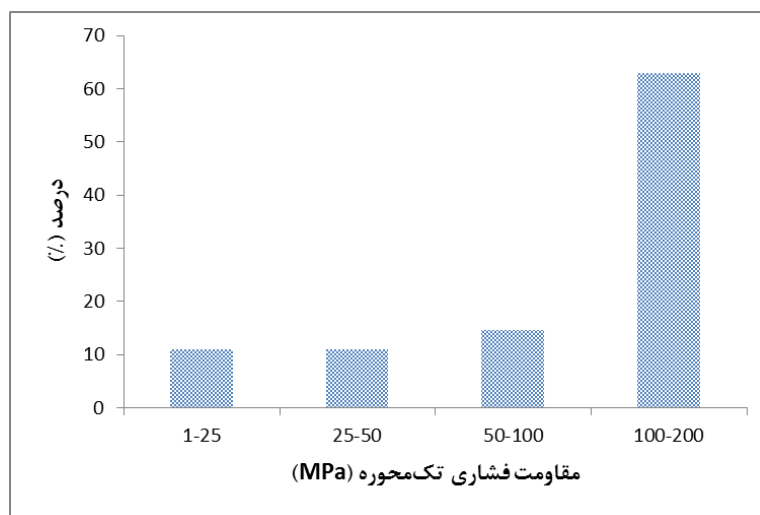
$$ucs = 6 \times 10^{-7} \times SH^{4.7534} \quad (۵-۱)$$

که در آن:

ucs: مقاومت بار نقطه‌ای (MPa)

SH: سختی اشمیت

پس از به دست آوردن مقاومت فشاری تک محوره برای تمامی سنگ‌های زون‌های مختلف، با استفاده از نمودار ستونی در شکل (۵-۱۶)، بازه‌های مختلف مقاومتی برای سنگ‌های این معدن، نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۶- نمودار ستونی درصد مقاومت فشاری تک محوره در معدن باغک

همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، بیش از ۶۳٪ سنگ‌های این معدن در بازه مقاومتی ۱۰۰-۲۰۰ مگاپاسکال قرار دارند که مربوط به مگنتیت، گرانیت و دولومیت می‌شوند، که در سیستم رده‌بندی RDi جزء سنگ‌های با مقاومت بالا محسوب شده و از این نظر سرعت حفاری را تحت تأثیر قرار داده و آن را کاهش می‌دهند.

۷.۲.۲.۵ چگالی و تخلخل

در این بخش از تحقیق، برای اینکه بتوان با توجه به تخلخل و چگالی به دست آمده یک قضاوت نسبی در مورد قابلیت حفاری انجام داد، این دو پارامتر در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه صنعتی شاهرود، اندازه‌گیری شده و نتایج آن در جدول (۵-۷)، آمده است.

جدول ۵-۷- نتایج آزمایش چگالی و تخلخل معدن باغک

نوع سنگ	گرانیت آلتیه شده	مگنتیت پرعیار	هماتیت	دولومیت
چگالی (g/cm^3)	۲/۶۱	۴/۶۱	۴	۳/۰۳
تخلخل (%)	۰/۹۳	۰/۳۸	۱۳/۱۸	۱/۱۳

برای انجام آزمایش‌ها، نمونه‌های سنگی از قسمت بکر سنگ انتخاب شده است. اطلاعات مربوط به مقادیر چگالی و تخلخل، به طور کامل در قسمت پیوست در جدول (۷-۴۶)، توضیح داده شده است. در شکل (۵-۱۷)، ابزار مورد استفاده جهت اندازه‌گیری چگالی و تخلخل نشان داده شده است.



الف- دستگاه خشک‌کن جهت خشک کردن نمونه‌ها ب- دستگاه توزین نمونه‌ها

شکل ۵-۱۷- ابزار مورد استفاده برای تعیین چگالی و تخلخل

۳.۲.۵ پارامترهای مربوط به توده‌سنگ

با توجه به سیستم رده‌بندی RDی، مشاهده می‌شود که، به منظور استفاده از این سیستم رده-بندی، باید مشخصات مربوط به توده‌سنگ شامل: فاصله‌داری درزه‌ها، پرکننده درزه‌ها و شیب‌داری

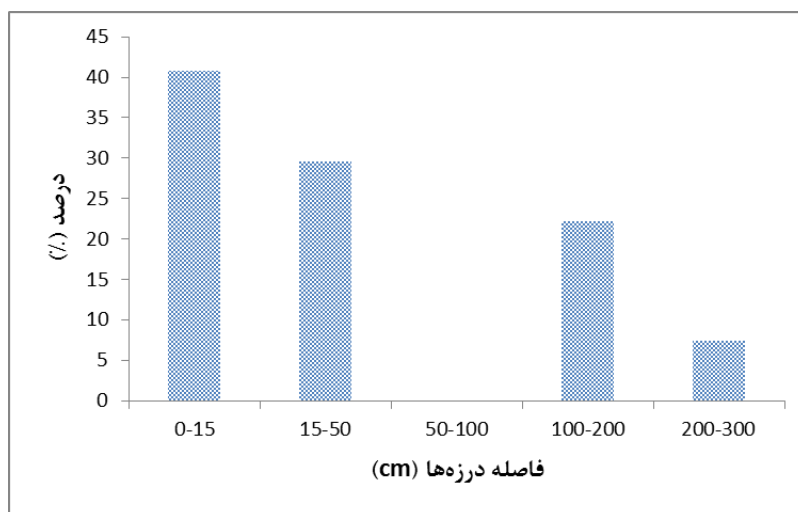
درزه‌ها که زاویه بین امتداد چال و سطح درزه می‌باشد، مشخص شود. بنابراین در این بخش از تحقیق، این پارامترها اندازه‌گیری و ثبت شده است.

وضعیت ناپیوستگی‌ها یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر قابلیت حفاری می‌باشد. همانطور که اشاره شد، یکی از مزیت‌هایی که سیستم رده‌بندی RDi نسبت به سایر رده‌بندی‌ها دارد، در نظر گرفتن وضعیت ناپیوستگی‌ها و در واقع تأثیر دادن ویژگی‌هایی از توده‌سنگ بر قابلیت حفاری است. در بعضی از زون‌ها که بیش از یک دسته‌درزه وجود دارد، وضعیت دسته‌درزه‌ای در نظر گرفته شده که بدترین وضعیت را دارد و نسبت به دسته‌درزه‌های دیگر قابلیت حفاری را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این مرحله از تحقیق، زاویه بین امتداد چال و سطح درزه، فاصله‌داری و پرشدگی درزه‌ها برداشت شده است. در شکل (۵-۱۸)، نمونه‌ای از پرشدگی درزه‌ها توسط میکا نشان داده شده است.



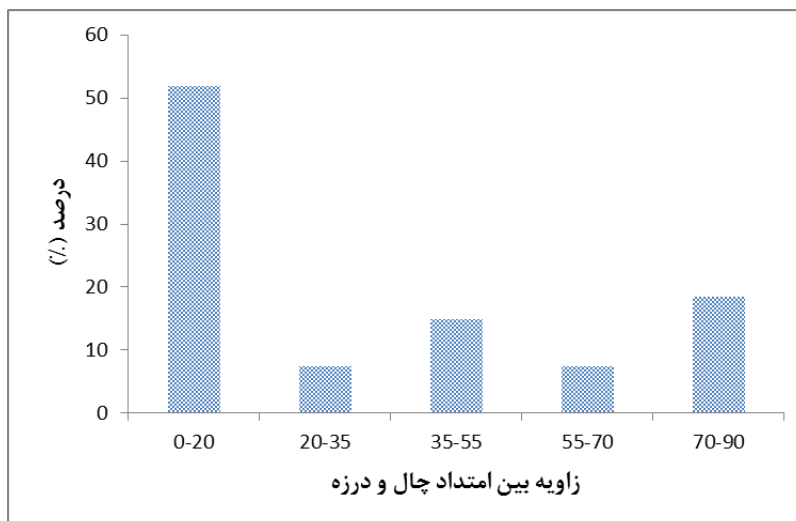
شکل ۵-۱۸- پرشدگی درزه‌ها توسط میکا

با توجه به شکل (۵-۱۹)، که نمودار ستونی فاصله‌داری درزه‌ها در بازه‌های مختلف را در معدن باغک نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که، فاصله‌داری در این معدن متفاوت می‌باشد. به طوری که ۴۱٪ فاصله‌داری در بازه ۰-۱۵ سانتی‌متر، ۳۰٪ در بازه ۱۵-۵۰ سانتی‌متر، ۲۲٪ در بازه ۱-۲ متر و بیش از ۷٪ در بازه بیش از ۲ متر می‌باشد. بنابراین نتیجه‌گیری می‌شود که بیش از ۷۱٪ از فاصله‌داری درزه‌ها کمتر از ۵/۰ متر بوده که این امر پیوستگی محیط حفاری را کاهش داده و موجب کاهش نرخ نفوذ خواهد شد.



شکل ۵-۱۹- نمودار ستونی درصد فاصله‌داری درزه‌ها در معدن باغک

یکی دیگر از پارامترهایی که در عملیات برداشت ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها، ثبت شده است، زاویه بین امتداد چال و سطح درزه می‌باشد. این کار نیز در تمام زون‌ها برای درزه‌ها انجام شده است، که نمودار ستونی بازه‌های مختلف این زاویه در شکل (۵-۲۰)، نشان داده شده است.



شکل ۵-۲۰- نمودار ستونی درصد زاویه‌داری بین امتداد چال و سطح درزه در معدن باغک

با توجه به نمودار ستونی مربوط به فراوانی زاویه بین امتداد چال و سطح درزه، مشاهده می‌شود که، بیش از ۵۲٪ زوایای اندازه‌گیری شده در معدن بین ۰-۲۰ درجه، ۷٪ زوایا بین ۳۵-۲۰، ۱۵٪ بین ۵۵-۳۵، ۷٪ بین ۷۰-۵۵ و ۱۹٪ آن‌ها زاویه‌ای بین ۷۰-۹۰ درجه دارند. با توجه به این نکته که، با افزایش این زاویه، نرخ نفوذ نیز افزایش پیدا می‌کند، مشاهده می‌شود که بیش از نیمی از زوایای اندازه‌گیری شده، اندازه‌ای زیر ۲۰ درجه دارند که این امر، تأثیر منفی بر روی نرخ نفوذ خواهد داشت.

۴.۲.۵ ثبت سرعت حفاری در زون‌های انتخابی

با توجه به اینکه یکی از اهداف این تحقیق تعیین سرعت حفاری در بخش‌های مختلف معدن می‌باشد، اگر بتوان رابطه‌ای بین اندیس قابلیت حفاری (RDi) و سرعت حفاری در چند زون انتخابی، در شکل (۵-۵) به دست آورد، می‌توان با به دست آوردن اندیس قابلیت حفاری در سایر زون‌ها و با استفاده از رابطه موجود، سرعت حفاری در سایر زون‌ها را نیز تعیین نمود. با توجه به مطالب بیان شده، در این قسمت از تحقیق سرعت حفاری در زون‌های اشاره شده در بخش‌های قبل اندازه‌گیری شده است. در جداول (۵-۸) و (۵-۹)، به ترتیب سرعت حفاری و مشخصات دستگاه‌های حفار به همراه کمپرسورهای مورد استفاده بیان شده است.

جدول ۵-۸- سرعت حفاری در زون‌های مورد نظر معدن باغک

شماره زون	جنس سنگ	سرعت (m/min)	قطر چال (mm)
۱۲	دولومیت	۰/۲۷	۱۱۵
۱۳	مگنتیت پرعیار	۰/۲۸	۱۱۵
۱۶	گرانیت آلتیه شده	۰/۴۵	۱۱۵
۲۵	هماتیت	۰/۴۱	۱۱۵

جدول ۵-۹- مشخصات دستگاه‌های حفار و کمپرسورهای هوای فشرده معدن باغک

نام دستگاه	فشار پشت مته (bar)	دور متی	نوع کمپرسور	دور موتور کمپرسور (RPM)	فشار هوا (bar)	قطر حفاری (mm)
TYI368A	-	-	Atlascopco	۲۱۵۰-۲۱۷۰	۱۲	۱۱۵
TYI368A	-	-	Ingersoll Rand	۲۱۵۰-۲۱۷۰	۱۲	۱۱۵

همچنین در شکل (۵-۲۱)، تصویر ماشین حفار و کمپرسورهای مورد استفاده این دستگاه‌ها

مشاهده می‌شود.



شکل ۵-۲۱- دستگاه حفاری TYI368A در حال حفاری و کمپرسورهای هوای فشرده در معدن باغک

۵.۲.۵ محاسبه اندیس قابلیت حفاری در زون‌های انتخابی

در این قسمت، اندیس قابلیت حفاری برای زون‌های مشخص شده در شکل (۵-۵)، محاسبه شده است، تا در بخش‌های بعدی بتوان یک رابطه مناسب بین اندیس قابلیت حفاری و سرعت حفاری ثبت شده در این زون‌ها به دست آورد. بعد از محاسبه اندیس قابلیت حفاری برای سایر زون‌ها و جایگذاری آن در این رابطه، سرعت حفاری را می‌توان تخمین زد.

در جدول (۵-۱۰)، بر اساس سیستم رده‌بندی RDi، بعد از امتیازدهی به پارامترهای این سیستم، اندیس قابلیت حفاری در زون‌های مورد نظر محاسبه شده است.

جدول ۵-۱۰- اندیس قابلیت حفاری برای زون‌های مشخص شده معدن باغک

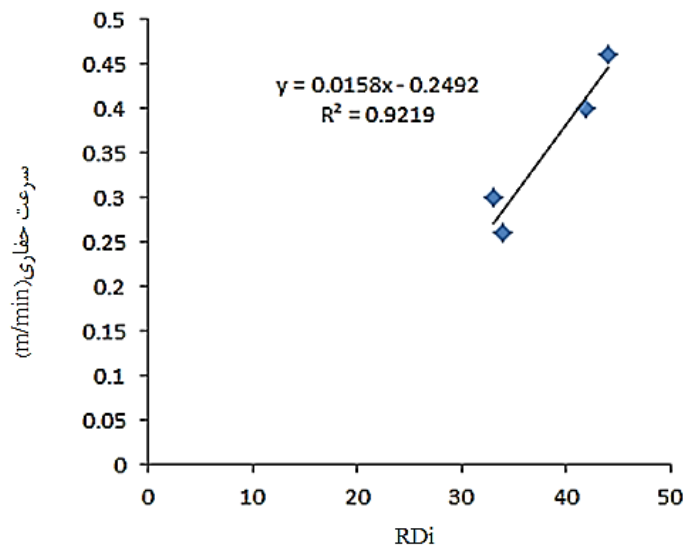
تراز	۱۶۵۰	۱۶۵۰	۱۶۶۰	۱۶۷۰
شماره زون	۱۲	۱۳	۱۶	۲۵
جنس سنگ	دولومیت	مگنتیت پرعیار	گرانیت آلتره	هماتیت
امتیاز مقاومت فشاری تک‌محوره	۱۱	۶	۶	۱۶
امتیاز بافت	۱	۱	۷	۱
امتیاز سختی	۴	۴	۴	۴
امتیاز فاصله‌داری درزه‌ها	۱	۵	۵	۵
امتیاز پرکننده درزه‌ها	۱۵	۱۰	۱۰	۱۵
امتیاز شیب‌داری درزه‌ها	۱	۸	۱۲	۱
سرعت ثبت شده	۰/۲۷	۰/۲۸	۰/۴۵	۰/۴۱
RDi	۳۳	۳۴	۴۴	۴۲

در این جدول ، با مشخص شدن اندیس قابلیت حفاری در چهار زون تعیین شده در معدن باغک، مشاهده می‌شود که سرعت حفاری در دولومیت و مگنتیت، آهسته-متوسط و در گرانیت آلتره و هماتیت متوسط می‌باشد. البته سرعتی که در این زون‌ها ثبت شده این مطلب را به خوبی نشان می‌دهد.

۶.۲.۵ ارتباط بین RDi و سرعت حفاری

اگر بتوان یک رابطه مناسب بین اندیس قابلیت حفاری و سرعت حفاری ثبت شده در زون‌های انتخاب شده به دست آورد، می‌توان پس از محاسبه این اندیس برای سایر زون‌ها و جایگذاری آن در این رابطه، سرعت حفاری را به راحتی تخمین زد.

در شکل (۵-۲۲) ارتباط بین اندیس قابلیت حفاری و سرعت حفاری، نشان داده شده است.



شکل ۵-۲۲- نمودار ارتباط بین RD_i و سرعت حفاری در معدن باغک

رابطه (۵-۲)، این ارتباط را بیان می‌کند:

$$v = 0.0158RD_i - 0.2492 \quad (۵-۲)$$

V: سرعت حفاری (m/min)

RD_i: اندیس قابلیت حفاری

۷.۲.۵ امتیازدهی به هر کدام از زون‌ها بر اساس سیستم رده‌بندی RD_i

پس از تعیین روابط بین اندیس قابلیت حفاری و سرعت حفاری، ابتدا مقاومت فشاری تمام زون‌ها را با استفاده از رابطه (۵-۱) تعیین کرده، آنگاه بعد از امتیازدهی به تمامی پارامترهای موجود در سیستم رده‌بندی RD_i، این اندیس را محاسبه کرده و نهایتاً می‌توان با استفاده از رابطه (۵-۲)، سرعت حفاری را در هر یک از زون‌ها، محاسبه کرد.

به طور نمونه در جداول (۵-۱۱) و (۵-۱۲)، تمام مشخصات دو زون از معدن باغک و امتیازات مربوط به آن‌ها در سیستم رده‌بندی RD_i درج شده است. در اشکال (۵-۲۳) و (۵-۲۴)، نمای کلی این زون‌ها مشاهده می‌شود.

جدول ۵-۱۱- مشخصات زون شماره ۲۵ معدن باغک

معدن: باغک	تراز: ۱۶۷۰	زون: ۲۵	جنس سنگ: هماتیت
پارامترها		پرشدگی: هماتیت و لیمونیت	
sh.H	۴۴/۳۴	امتیاز	
Te	متراکم	۱	
UCS	۴۰/۳۷	۱۶	
Mohs.H	۶-۷	۴	
j.s	۰/۴	۵	
j.p	۳	۱۵	
j.d	۱۰	۱	
RD _i	۴۲	متوسط	
V	۰/۴۱		

مشخصات کامل هر زون، همراه با امتیازات و سرعت مربوطه، هم به صورت کیفی و هم به

صورت کمی در بخش پیوست در جداول (۷-۱) تا (۷-۲۷) ذکر شده است.



شکل ۵-۲۳- تصویری از زون شماره ۲۵ (هماتیت) معدن باغک

جدول ۵-۱۲- مشخصات زون شماره ۱۱ معدن باغک

معدن: باغک	تراز: ۱۶۵۰	زون: ۱۱	جنس سنگ: مگنتیت کم عیار
پارامترها			
sh.H	۵۶/۱۴	امتیاز	
Te	متراکم	۱	
UCS	۱۲۳/۹۲	۶	
Mohs.H	۶-۷	۴	
j.s	۱-۲	۱۳	
j.p	بسته	۱۵	
j.d	۴۵	۶	
RD _i	۴۵	متوسط	
V	۰/۴۶		



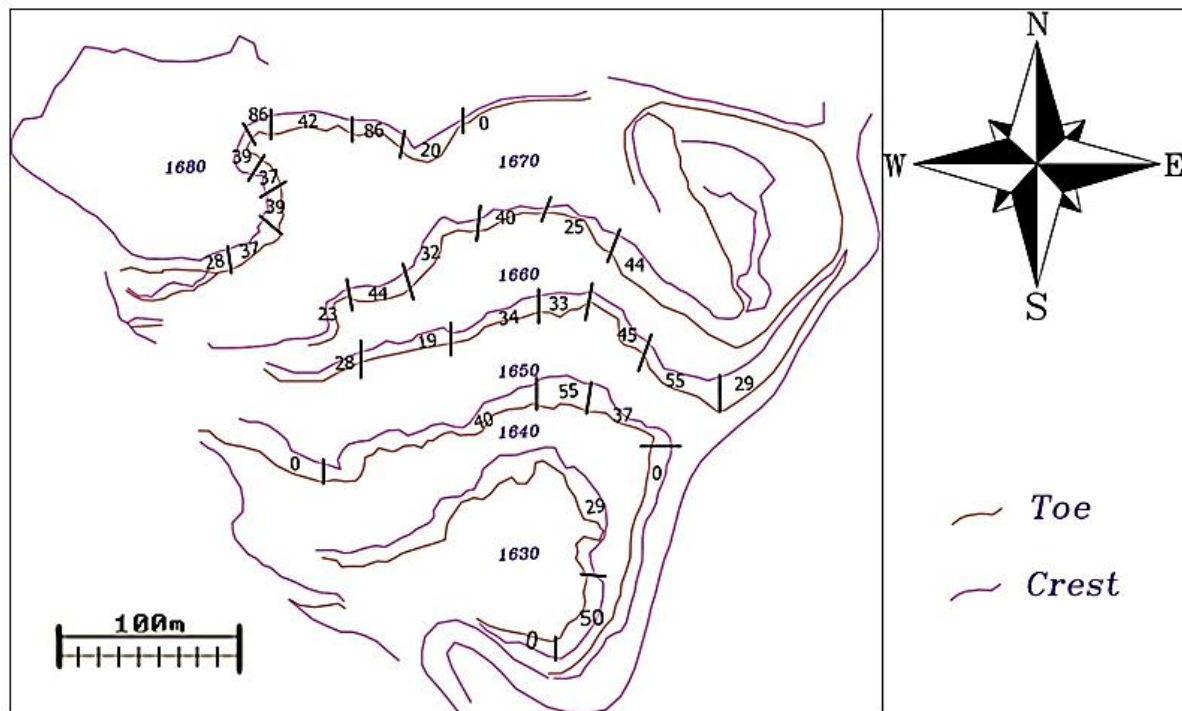
شکل ۵-۲۴- تصویری از زون شماره ۱۱ (مگنتیت کم عیار) معدن باغک

در جدول (۵-۱۳)، امتیاز مربوط به پارامترهای مختلف ماده سنگ و توده سنگ در زونهای معدن باغک محاسبه شده، سپس اندیس قابلیت حفاری و سرعت حفاری تخمین زده شده، درج شده است.

جدول ۵-۱۳- جدول امتیازات نهایی بر اساس سیستم طبقه‌بندی RDi در معدن باغک

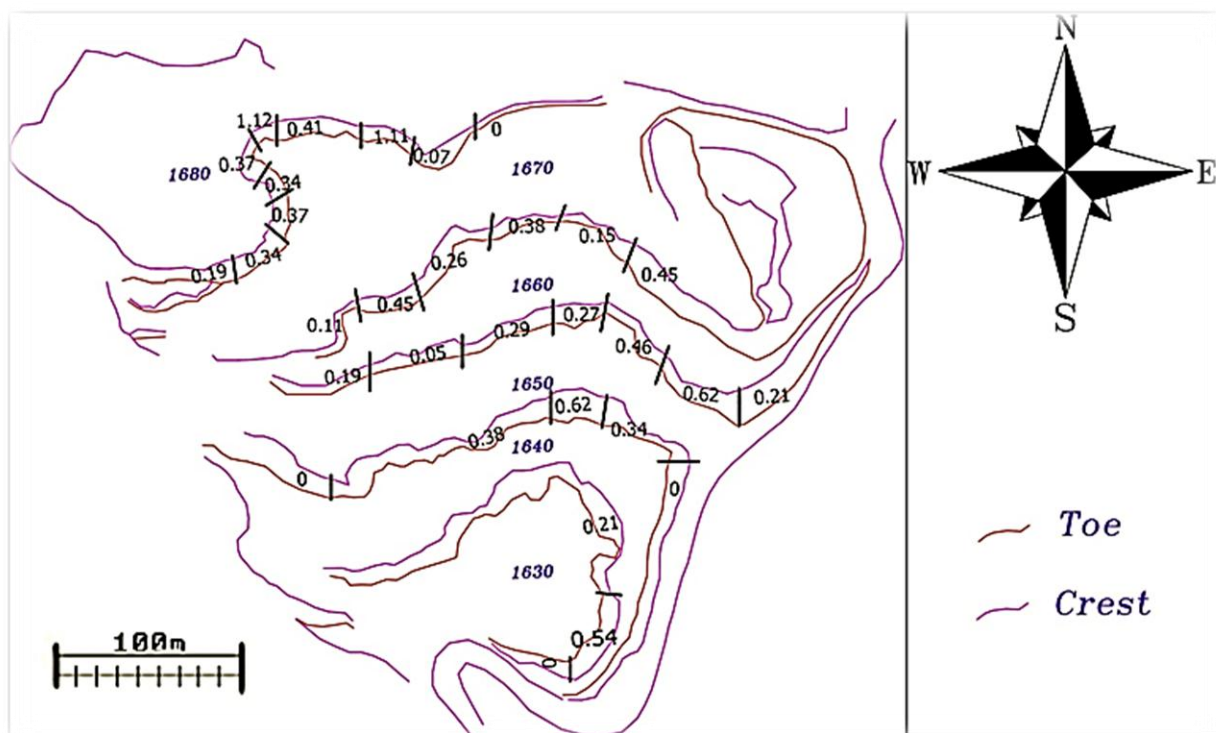
زون	ucs	بافت	سختی موس	فاصله- داری درزه‌ها	پرکننده درزه‌ها	شیب- داری درزه‌ها	RDi	سرعت حفاری (کیفی)	سرعت حفاری (کمی)
۱	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۲	۲۲	۷	۴	۱	۱۵	۱	۵۰	متوسط	۰/۵۴
۳	۶	۱	۴	۵	۱۰	۳	۲۹	آهسته-متوسط	۰/۲۱
۴	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۵	۶	۱	۴	۵	۱۵	۶	۳۷	آهسته-متوسط	۰/۳۴
۶	۱۶	۱	۴	۱۳	۱۵	۶	۵۵	متوسط	۰/۶۲
۷	۶	۱	۴	۱۳	۱۵	۱	۴۰	آهسته-متوسط	۰/۳۸
۸	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۹	۶	۷	۴	۱	۱۰	۱	۲۹	آهسته-متوسط	۰/۲۱
۱۰	۱۶	۱	۴	۱۳	۱۵	۶	۵۵	متوسط	۰/۶۲
۱۱	۶	۱	۴	۱۳	۱۵	۶	۴۵	متوسط	۰/۴۶
۱۲	۱۱	۱	۴	۱	۱۵	۱	۳۳	آهسته-متوسط	۰/۲۷
۱۳	۶	۱	۴	۵	۱۰	۸	۳۴	آهسته-متوسط	۰/۲۹
۱۴	۱۱	۱	۴	۱	۱	۱	۱۹	آهسته	۰/۰۵
۱۵	۶	۱	۴	۱	۱۵	۱	۲۸	آهسته-متوسط	۰/۱۹
۱۶	۶	۷	۴	۵	۱۰	۱۲	۴۴	متوسط	۰/۴۵
۱۷	۶	۱	۴	۱	۱۰	۳	۲۵	آهسته-متوسط	۰/۱۵
۱۸	۶	۱	۴	۱۳	۱۵	۱	۴۰	آهسته-متوسط	۰/۳۸
۱۹	۶	۱	۴	۵	۱۵	۱	۳۲	آهسته-متوسط	۰/۲۶
۲۰	۱۱	۱	۴	۵	۱۵	۸	۴۴	متوسط	۰/۴۵
۲۱	۶	۱	۴	۱	۱۰	۱	۲۳	آهسته-متوسط	۰/۱۱
۲۲	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۲۳	۶	۷	۴	۱	۱	۱	۲۰	آهسته	۰/۰۷
۲۴	۲۲	۱	۱۸	۱۸	۱۵	۱۲	۸۶	سریع	۱/۱۱
۲۵	۱۶	۱	۴	۵	۱۵	۱	۴۲	متوسط	۰/۴۱
۲۶	۲۲	۱	۱۸	۱۸	۱۵	۱۲	۸۶	سریع	۱/۱۱
۲۷	۶	۱	۴	۱	۱۵	۱۲	۳۹	آهسته-متوسط	۰/۳۶
۲۸	۶	۷	۴	۱۳	۱۰	۱	۴۱	آهسته-متوسط	۰/۴
۲۹	۶	۱	۴	۱	۱۵	۱۲	۳۹	آهسته-متوسط	۰/۳۷
۳۰	۱۱	۱	۴	۵	۱۵	۱	۳۷	آهسته-متوسط	۰/۳۴
۳۱	۶	۱	۴	۱	۱۵	۱	۳۴	آهسته-متوسط	۰/۲۹

در شکل (۵-۲۵)، امتیاز مربوط به اندیس قابلیت حفاری نشان داده شده است.

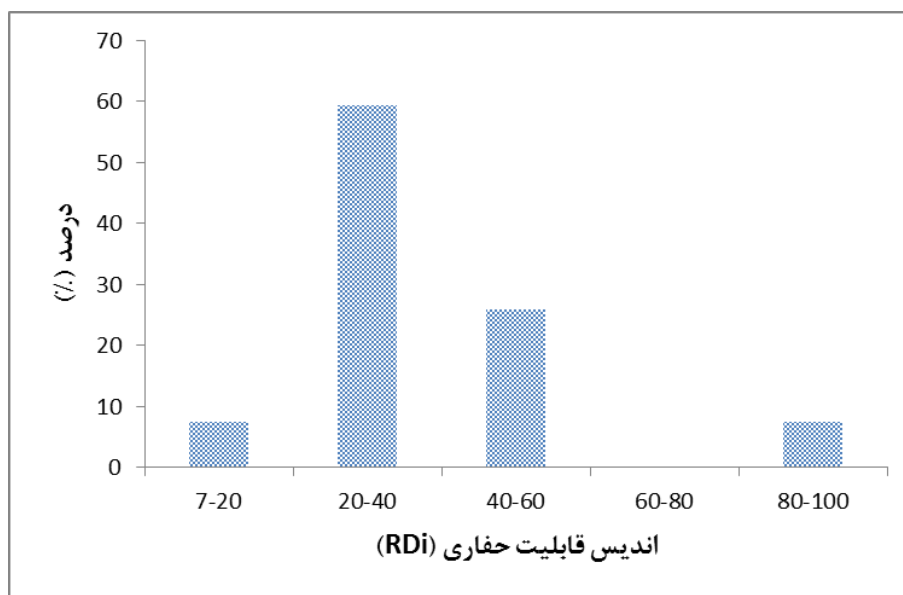


شکل ۵-۲۵- امتیاز RDi زون‌های مختلف معدن باغک

همچنین در شکل (۵-۲۶)، سرعت حفاری به صورت کمی و در شکل (۵-۲۷)، نمودار ستونی درصد اندیس قابلیت حفاری در معدن باغک رسم شده است. در این شکل با توجه به سیستم مورد استفاده در این تحقیق، سرعت به طور کیفی در بازه ۰-۲۰ آهسته، ۲۰-۴۰ آهسته-متوسط، ۴۰-۶۰ متوسط، ۶۰-۸۰ متوسط-سریع و ۸۰-۱۰۰ سریع بیان شده است. با توجه به مطالب بیان شده و شکل (۵-۲۷)، سرعت کیفی بیش از ۵۹٪ سنگ‌های این معدن، آهسته-متوسط، ۲۶٪ دارای سرعت متوسط، ۸٪ دارای سرعت آهسته و سرعت بیش از ۷٪ سنگ‌ها سریع می‌باشد. البته سرعتی که در هر زون تعیین می‌شود، با در نظر گرفتن تمامی پارامترهای موجود در سیستم رده‌بندی مورد استفاده در تحقیق می‌باشد و با توجه به یک پارامتر مشخص نمی‌توان قضاوت درستی در پیش‌بینی سرعت حفاری کرد.



شکل ۵-۲۶- تخمین سرعت حفاری زون‌های مختلف معدن باغک با استفاده از اندیس حفاری RDi

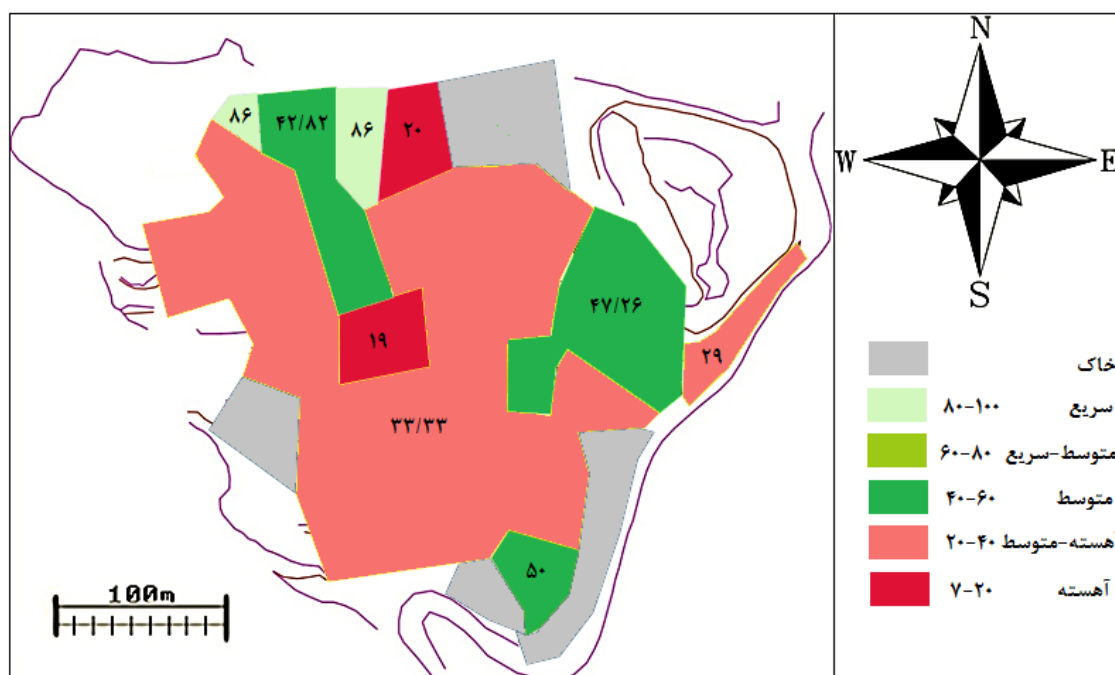


شکل ۵-۲۷- نمودار ستونی درصد اندیس قابلیت حفاری در معدن باغک

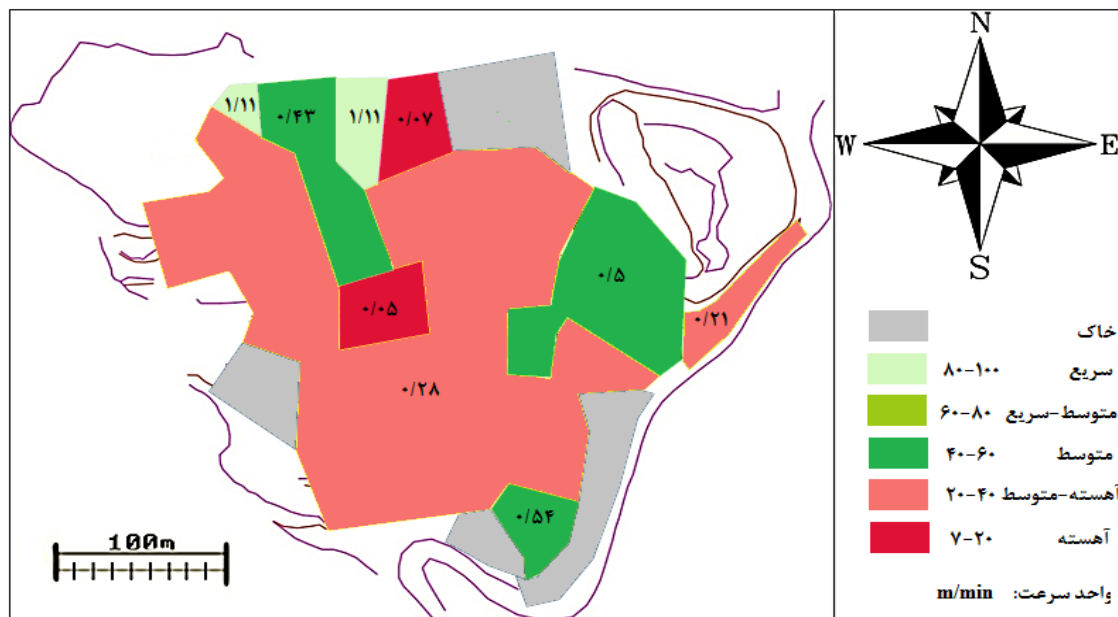
۸.۲.۵ زون بندی نهایی توده سنگ های معدن باغک

همانطور که قبلاً اشاره شد، ترازهای مختلف معدن باغک، به ۳۱ زون مختلف تقسیم شده است. با توجه به اینکه امتیاز بسیاری از زون ها، نزدیک به یکدیگر می باشد، زون های هم کلاس و در همسایگی هم یک زون جدید در نظر گرفته شده است. سپس با استفاده از روش میانگین وزنی طول پیمایش، امتیاز RD_i برای هر زون جدید محاسبه شده و در نهایت، این معدن به ۱۲ زون نهایی تقسیم شده است.

اشکال (۵-۲۸) و (۵-۲۹)، به ترتیب زون بندی نهایی توده سنگ های معدن باغک را بر اساس شاخص قابلیت حفاری و سرعت حفاری نشان می دهد.



شکل ۵-۲۸- زون بندی نهایی توده سنگ های معدن باغک بر اساس شاخص قابلیت حفاری (RD_i)



شکل ۵-۲۹- زون بندی نهایی توده سنگ های معدن باغک بر اساس سرعت حفاری

همانطور که در اشکال فوق مشاهده می شود، بیشتر نواحی حفاری در این معدن، دارای سرعت آهسته-متوسط می باشند.

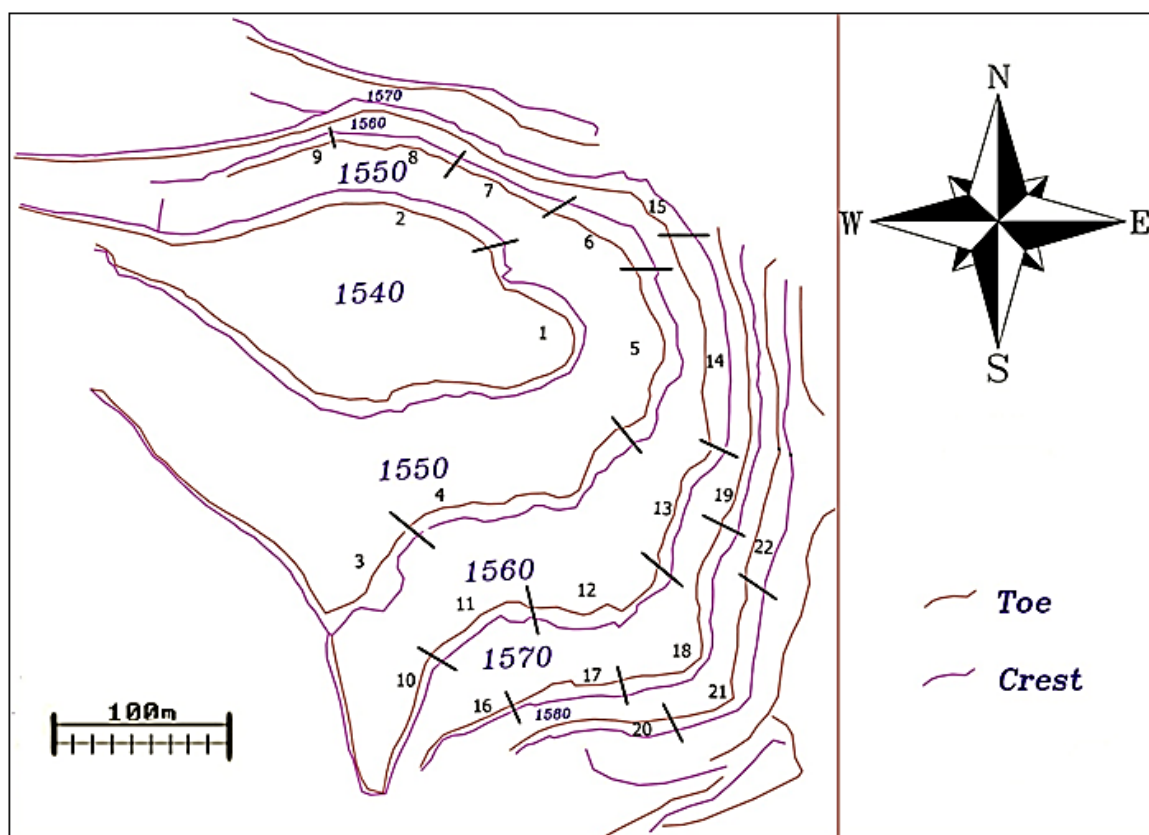
در معدن باغک در دو زون لیمنیتی سرعت بالای ۱ متر بر دقیقه بوده و در بقیه زون ها سرعت از ۰/۵ تا ۰/۵۴ متر بر دقیقه تغییر می کند. این سرعت پایین در این معدن می تواند به دلایل زیر باشد:

- سختی بیشتر سنگ های این معدن ۶-۷ بوده که، سختی بالایی می باشد.
 - بافت غالب در معدن باغک، بافت متراکم است که، این بافت قابلیت حفاری را کاهش داده و در سیستم رده بندی RDi، دارای امتیاز کمی می باشد.
 - به لحاظ مقاومتی، سنگ های این معدن دارای مقاومت بالایی می باشند.
- پس از بررسی معدن باغک، به تعیین قابلیت حفاری معدن دردوی پرداخته می شود. از آنجایی که برخی توضیحات برای هر دو معدن یکسان می باشد، بنابراین از آوردن دوباره این توضیحات صرف نظر می شود.

۳.۵ تعیین قابلیت حفاری توده سنگ‌های معدن دردوی

۱.۳.۵ زون بندی

ترازهای مختلف معدن دردوی نیز مانند معدن باغک، با توجه به تغییرات جنس سنگ و شرایط ناپیوستگی‌ها، به ۲۲ زون تقسیم شده است که در شکل (۵-۳۰)، ترازهای مختلف این معدن همراه با شماره زون و در جدول (۵-۱۴)، جنس سنگ هر کدام از زون‌ها به تفکیک آورده شده است.



شکل ۵-۳۰- زون‌بندی معدن دردوی

جدول ۵-۱۴- جنس سنگ‌های زون‌های مختلف معدن دردوی

شماره زون	تراز	جنس سنگ	شماره زون	تراز	جنس سنگ
۱	۱۵۴۰	مگنتیت پرعیار	۱۲	۱۵۶۰	مگنتیت کم‌عیار
۲	۱۵۴۰	گرانیت آلتره شده	۱۳	۱۵۶۰	گرانیت آلتره شده
۳	۱۵۵۰	خاک آبرفتی	۱۴	۱۵۶۰	خاک آبرفتی
۴	۱۵۵۰	مگنتیت کم‌عیار	۱۵	۱۵۶۰	گرانیت آلتره شده
۵	۱۵۵۰	توف کربنات‌دار آذرآواری	۱۶	۱۵۷۰	خاک آبرفتی
۶	۱۵۵۰	مگنتیت پرعیار	۱۷	۱۵۷۰	گرانیت آلتره شده
۷	۱۵۵۰	مگنتیت کم‌عیار	۱۸	۱۵۷۰	مگنتیت کم‌عیار
۸	۱۵۵۰	گرانیت آلتره شده	۱۹	۱۵۷۰	گرانیت آلتره شده
۹	۱۵۵۰	هماتیت	۲۰	۱۵۸۰	خاک آبرفتی
۱۰	۱۵۶۰	مگنتیت کم‌عیار	۲۱	۱۵۸۰	توف کربنات‌دار آذرآواری
۱۱	۱۵۶۰	توف کربنات‌دار آذرآواری	۲۲	۱۵۸۰	گرانیت آلتره شده

همانند معدن باغک، در شکل (۵-۳۱)، درصد انواع سنگ‌های معدن دردوی نشان داده شده است. با توجه به این شکل می‌توان ترتیب فراوانی سنگ‌های این معدن را به صورت زیر بیان کرد: گرانیت آلتره (۳۲٪)، مگنتیت کم‌عیار (۲۳٪)، مگنتیت پرعیار (۹٪)، توف کربنات‌دار آذرآواری (۱۴٪) و هماتیت (۴٪)، بیان کرد.



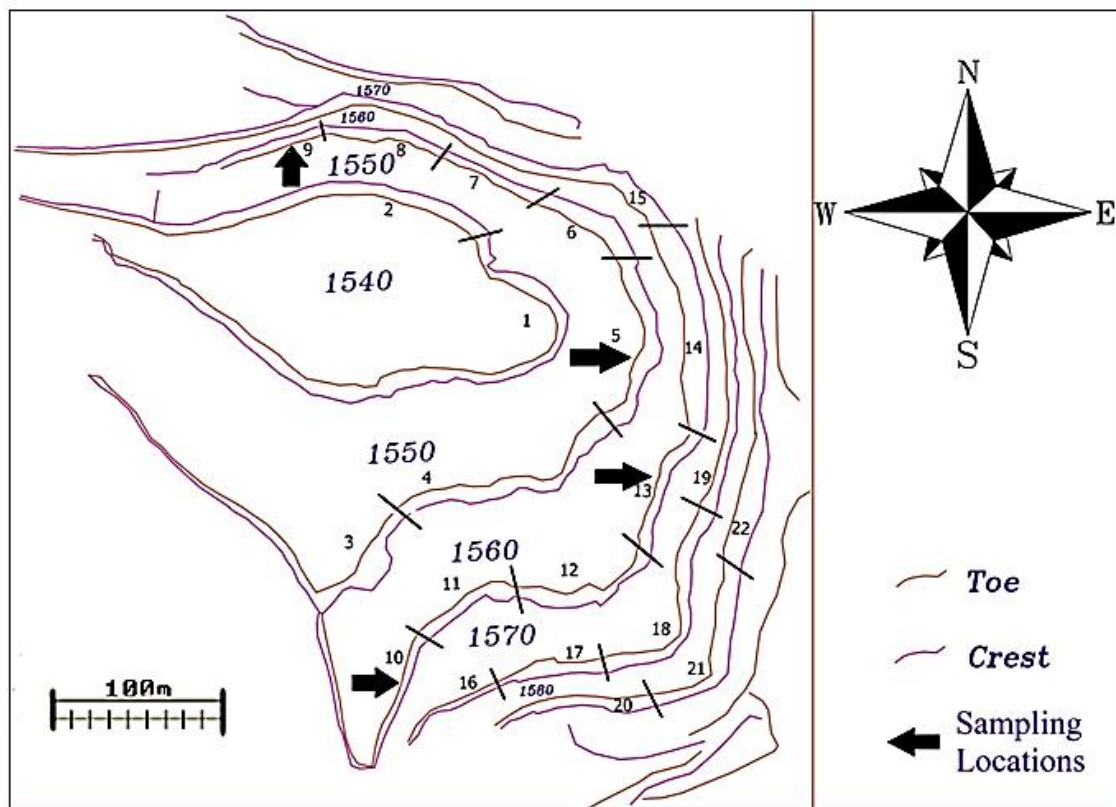
شکل ۵-۳۱- درصد انواع سنگ‌های معدن دردوی

۲.۳.۵ اندازه‌گیری پارامترهای مربوط به ماده سنگ

همانطور که قبلاً اشاره شد، با توجه به اینکه، برای استفاده از سیستم رده‌بندی RD_i، باید پارامترهایی از ماده سنگ مانند بافت، مقاومت فشاری تک‌محوره و سختی موس تعیین شوند، در ادامه به تعیین این پارامترها پرداخته می‌شود. همچنین مقاومت بار نقطه‌ای، چگالی، تخلخل و سختی اشمیت نیز در این بخش تعیین شده است.

۱.۲.۳.۵ برداشت نمونه

با توجه به جدول (۵-۱۴) و شکل (۵-۳۱)، مشاهده می‌شود که، در معدن دردوی پنج نوع سنگ مختلف وجود دارد، با توجه به این که سنگ‌های از جنس مگنتیت، به لحاظ مقاومتی تفاوتی با یکدیگر نداشته و تفاوت آن‌ها در عیار آهن موجود در آن‌ها می‌باشد، از این نوع سنگ یک نمونه انتخاب شده است. بنابراین به منظور انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت بار نقطه-ای، چگالی و تخلخل از زون‌های ۵ (توف کربنات‌دار آذرآواری)، ۹ (هماتیت)، ۱۰ (مگنتیت کم‌عیار) و ۱۳ (گرانیت آلتره‌شده) و جهت تعیین بافت و سختی موس از تمامی زون‌ها نمونه‌هایی جمع‌آوری شده و به آزمایشگاه منتقل شده‌اند. در شکل (۵-۳۲) محل نمونه‌های انتخاب شده نشان داده شده است.



شکل ۵-۳۲- زون‌های تعیین شده جهت جمع‌آوری نمونه از معدن دردوی

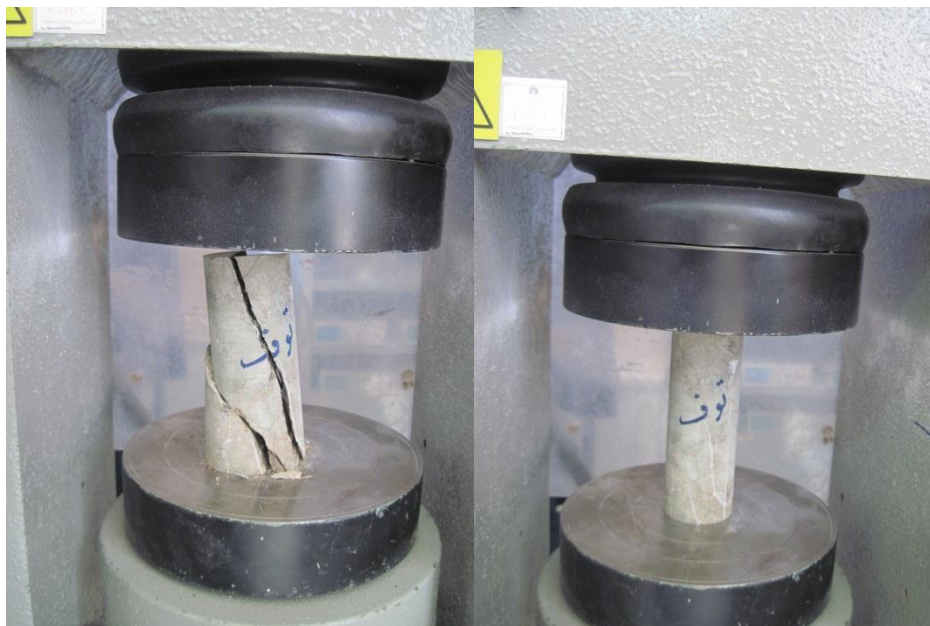
۲.۲.۳.۵ مقاومت فشاری تک‌محوره

جهت تعیین مقاومت فشاری تک‌محوره در نمونه‌های معدن دردوی نیز همانند معدن باغک، از

استاندارد ISRM استفاده شده است.

به عنوان مثال، در شکل (۵-۳۳)، بارگذاری فشاری نمونه توف کربنات‌دار آذرآواری، نشان داده

شده است.



الف- نمونه توف قبل از عملیات بارگذاری ب- نمونه توف بعد از عملیات بارگذاری

شکل ۵-۳۳- بارگذاری فشاری نمونه توف کربنات دار آذرآواری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوره در جدول (۵-۱۵)، درج شده است.

جدول ۵-۱۵- نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوره در معدن دردوی

نوع سنگ	توف کربنات دار آذرآواری	مگنتیت کم عیار	هماتیت	گرانیت آلتیه شده
مقاومت فشاری تک- محوره (MPa)	۴۲/۱۷	۳۲/۶۱	۲۰	۴۵/۲۱

در قسمت پیوست، اطلاعات مربوط به نمونه های آزمایش مقاومت فشاری تک محوره این معدن،

در جدول (۷-۴۹)، به طور کامل ذکر شده است.

۳.۲.۳.۵ مقاومت بار نقطه ای

به منظور انجام آزمایش مقاومت بار نقطه ای، نمونه هایی از محل زون های تعیین شده، انتخاب و

در آزمایشگاه مهندسی مشاور کاوشگران بارگذاری شده اند. برای انجام این آزمایش از نمونه های

کلوخی استفاده شده است. در شکل (۵-۳۴)، نمونه ای از هماتیت معدن دردوی در حال بارگذاری در

زیر دستگاه مقاومت بار نقطه ای مشاهده می شود.



شکل ۵-۳۴- آزمایش مقاومت بار نقطه‌ای نمونه شماره ۱ سنگ هماتیت معدن دردوی

همچنین شکل (۵-۳۵)، قبل و بعد از بارگذاری این نمونه را، نشان می‌دهد.



ب- نمونه هماتیته بعد از عملیات بارگذاری

الف- نمونه هماتیته قبل از عملیات بارگذاری

شکل ۵-۳۵- نمونه شماره ۱ سنگ هماتیت معدن دردوی، قبل و بعد از بارگذاری

نتایج آزمایش مقاومت بار نقطه‌ای نمونه‌های معدن دردوی در جدول (۵-۱۶)، قابل مشاهده است. همچنین در بخش پیوست، اطلاعات مربوط به این آزمایش و روابطی که به منظور تعیین مقاومت فشاری تک‌محوره مورد استفاده قرار گرفته، در جدول (۷-۵۱)، به طور کامل بیان شده است.

جدول ۵-۱۶- نتایج آزمایش مقاومت بار نقطه‌ای در معدن دردوی

نوع سنگ	توف کربنات‌دار آذرآواری	مگنتیت کم‌عیار	هماتیت	گرانیت آلتره شده
شاخص مقاومت بار نقطه‌ای تصحیح شده (MPa)	۲/۳۱	۱/۹۵	۱/۰۱	۲/۵
مقاومت بار نقطه‌ای (MPa)	۵۳/۰۶	۴۴/۷۱	۲۴/۳	۵۷/۴۵

از مقایسه جداول (۵-۱۵) و (۵-۱۶) نتیجه‌گیری می‌شود که، نمونه‌های معدن دردوی نسبت به نمونه‌های معدن باغک از مقاومت کمتری برخوردار بوده و سرعت حفاری در مورد این پارامتر، بیشتر از معدن باغک می‌باشد.

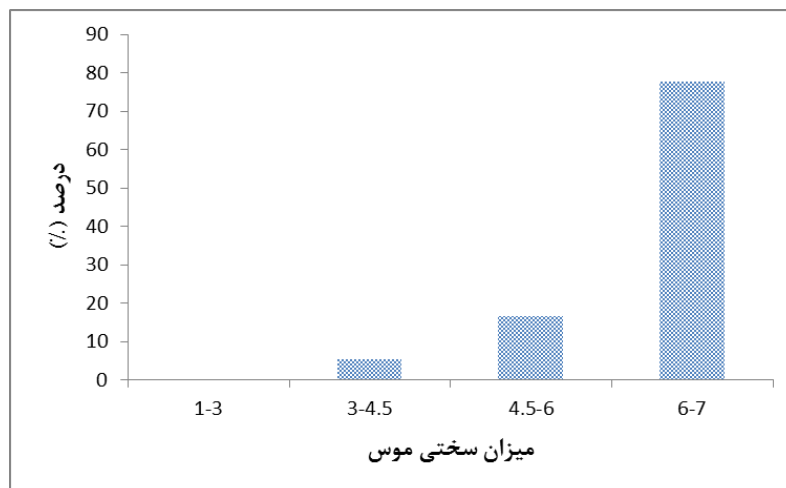
۴.۲.۳.۵ تعیین سختی و بافت

جهت تعیین سختی نمونه‌های معدن دردوی نیز، از مقیاس سختی موس استفاده شده است. همچنین بافت نمونه‌های تمامی زون‌ها، با توجه به سیستم رده‌بندی اشاره شده، به صورت چشمی و با نظر افراد متخصص تعیین شده است. در جدول (۵-۱۷)، سختی موس تمام نمونه‌های سنگی در این معدن مشاهده می‌شود.

جدول ۵-۱۷- مقدار سختی موس نمونه‌های سنگی معدن دردوی

شماره زون	جنس سنگ	میزان سختی	شماره زون	جنس سنگ	میزان سختی
۱	مگنتیت پرعیار	۶-۷	۱۲	مگنتیت کم‌عیار	۶-۷
۲	گرانیت آلتره شده	۶-۷	۱۳	گرانیت آلتره شده	۶-۷
۳	خاک آبرفتی	-	۱۴	خاک آبرفتی	-
۴	مگنتیت کم‌عیار	۶-۷	۱۵	گرانیت آلتره شده	۶-۷
۵	توف کربنات‌دار آذرآواری	۴/۵-۶	۱۶	خاک آبرفتی	-
۶	مگنتیت پرعیار	۶-۷	۱۷	گرانیت آلتره شده	۶-۷
۷	مگنتیت کم‌عیار	۳-۴/۵	۱۸	مگنتیت کم‌عیار	۶-۷
۸	گرانیت آلتره شده	۶-۷	۱۹	گرانیت آلتره شده	۶-۷
۹	هماتیت	۶-۷	۲۰	خاک آبرفتی	-
۱۰	مگنتیت کم‌عیار	۶-۷	۲۱	توف کربنات‌دار آذرآواری	۴/۵-۶
۱۱	توف کربنات‌دار آذرآواری	۴/۵-۶	۲۲	گرانیت آلتره شده	۶-۷

با توجه به جدول فوق و نمودار ستونی رسم شده برای سختی موس در معدن دردوی (شکل ۵-۳۶)، مشاهده می‌شود که ۷۸٪ سنگ‌های این معدن، دارای سختی ۶-۷ و بیش از ۱۷٪ دارای سختی ۴/۵-۶ بوده، که نشان‌دهنده سختی بالا در سنگ‌های این معدن می‌باشد.



شکل ۵-۳۶- نمودار ستونی درصد سختی موس در معدن دردوی

در جدول (۵-۱۸) نیز، نوع بافت نمونه‌های مختلف، نشان داده شده است.

جدول ۵-۱۸- بافت نمونه‌های سنگی معدن دردوی

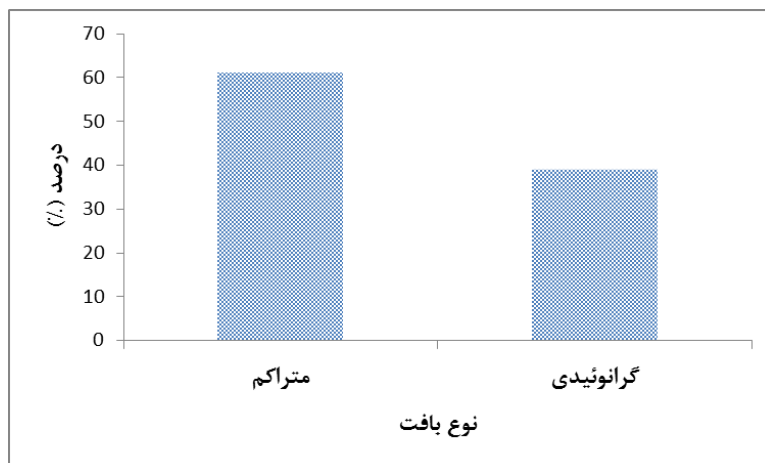
شماره زون	جنس سنگ	بافت	شماره زون	جنس سنگ	بافت
۱	مگنتیت پرعیار	متراکم	۱۲	مگنتیت کم‌عیار	متراکم
۲	گرانیت آلتره شده	گرانوئیدی	۱۳	گرانیت آلتره شده	گرانوئیدی
۳	خاک آبرفتی	-	۱۴	خاک آبرفتی	-
۴	مگنتیت کم‌عیار	متراکم	۱۵	گرانیت آلتره شده	گرانوئیدی
۵	توف کربنات‌دار آذرآواری	متراکم	۱۶	خاک آبرفتی	-
۶	مگنتیت پرعیار	متراکم	۱۷	گرانیت آلتره شده	گرانوئیدی
۷	مگنتیت کم‌عیار	متراکم	۱۸	مگنتیت کم‌عیار	متراکم
۸	گرانیت آلتره شده	گرانوئیدی	۱۹	گرانیت آلتره شده	گرانوئیدی
۹	هماتیت	متراکم	۲۰	خاک آبرفتی	-
۱۰	مگنتیت کم‌عیار	متراکم	۲۱	توف کربنات‌دار آذرآواری	متراکم
۱۱	توف کربنات‌دار آذرآواری	متراکم	۲۲	گرانیت آلتره شده	گرانوئیدی

همانطور که در شکل (۵-۳۷)، مشاهده می‌شود، ۶۱٪ بافت سنگ‌های موجود در این معدن،

بافت متراکم می‌باشد، که در سیستم رده‌بندی RDi، به لحاظ تأثیر منفی بر قابلیت حفاری، بدترین

بافت بوده و دارای کمترین امتیاز است. بنابراین انتظار می‌رود که این ویژگی نیز قابلیت حفاری در این

معدن را تحت تأثیر قرار داده و آن را کاهش دهد.



شکل ۵-۳۷- نمودار ستونی مربوط به میزان بافت‌های مختلف در معدن دردوی

۵.۲.۳.۵ تعیین سختی اشمیت

در این معدن، جهت تعیین رابطه بین مقاومت فشاری تک‌محوره و سختی اشمیت و همچنین تعیین رابطه میان مقاومت بار نقطه‌ای و سختی اشمیت، این پارامتر در تمامی زون‌ها تعیین شده است. جهت اندازه‌گیری سختی اشمیت نمونه‌های معدن دردوی، همانند معدن باغک در هر یک از زون‌ها، ۲۰ آزمایش انجام شده، سپس با حذف نیمی از داده‌هایی که مقدار کمتری دارند، میانگین ۱۰ داده باقی‌مانده محاسبه شده و در نهایت با ضرب کردن این مقدار در ضریب تصحیح، سختی اشمیت در هر زون به دست آمده است. در جدول (۵-۱۹)، سختی اشمیت تمام نمونه‌های سنگی زون‌های مختلف معدن دردوی آورده شده است.

جدول ۵-۱۹- سختی اشمیت نمونه‌های معدن دردوی

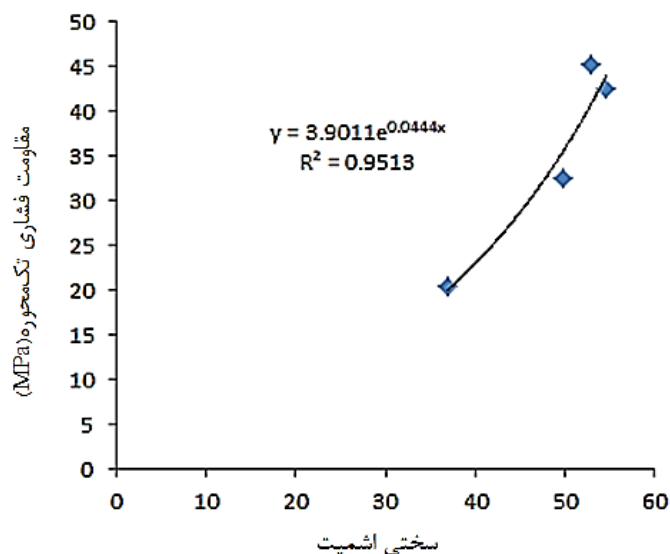
شماره زون	جنس سنگ	سختی اشمیت	شماره زون	جنس سنگ	سختی اشمیت
۱	مگنتیت پرعیار	۵۹/۸	۱۲	مگنتیت کمعیار	۵۴/۷
۲	گرانیت آلتیه شده	۴۴/۵۳	۱۳	گرانیت آلتیه شده	۵۲/۹
۳	خاک آبرفتی	-	۱۴	خاک آبرفتی	-
۴	مگنتیت کمعیار	۴۷/۶۶	۱۵	گرانیت آلتیه شده	۴۷/۶
۵	توف کربنات‌دار آذرآواری	۵۴/۶۴	۱۶	خاک آبرفتی	-
۶	مگنتیت پرعیار	۴۸/۵۸	۱۷	گرانیت آلتیه شده	۵۰/۳۱
۷	مگنتیت کمعیار	۴۸	۱۸	مگنتیت کمعیار	۵۳/۴۵
۸	گرانیت آلتیه شده	۴۶/۴۶	۱۹	گرانیت آلتیه شده	۴۸/۰۲
۹	هماتیت	۳۶/۹۸	۲۰	خاک آبرفتی	-
۱۰	مگنتیت کمعیار	۴۹/۷۷	۲۱	توف کربنات-دار آذرآواری	۴۲/۵
۱۱	توف کربنات‌دار آذرآواری	۵۳/۵۴	۲۲	گرانیت آلتیه شده	۴۴/۶۵

۵.۳.۲.۶ تعیین ارتباط بین مقاومت فشاری تک‌محوره و مقاومت بار نقطه‌ای با سختی

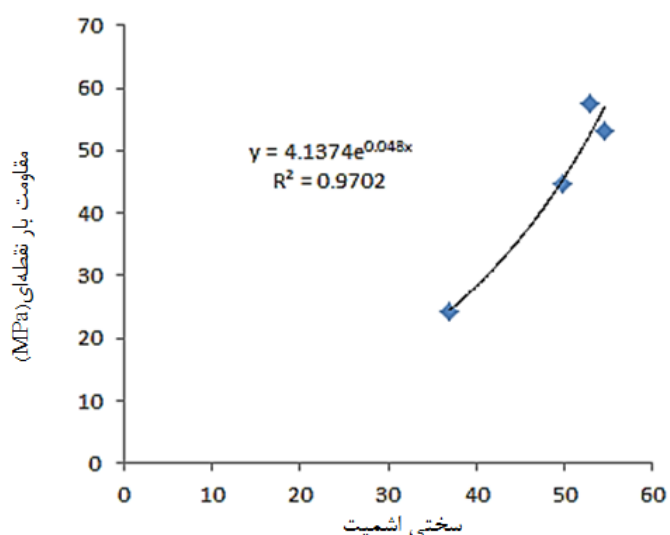
اشمیت در زون‌های انتخاب شده

در این بخش رابطه‌ای بین سختی اشمیت و مقاومت فشاری تک‌محوره و نیز سختی اشمیت و مقاومت بار نقطه‌ای ارائه شده است، که می‌توان با جایگذاری سختی اشمیت در هر یک از این روابط، با صرف هزینه کمتر و با دقت نسبتاً خوب، مقاومت فشاری تک‌محوره تمام نمونه‌های سنگی از زون‌های مختلف را مشخص کرد.

در اشکال (۵-۳۸) و (۵-۳۹)، به ترتیب نمودار ارتباط بین مقاومت فشاری تک‌محوره با سختی اشمیت و مقاومت بار نقطه‌ای و سختی اشمیت مشاهده می‌شود. همانطور که در این نمودارها مشاهده می‌شود، ضریب همبستگی در هر دو نمودار، یک ارتباط قابل قبولی را بین مقاومت فشاری تک‌محوره و مقاومت بار نقطه‌ای با سختی اشمیت می‌دهد.



شکل ۵-۳۸- نمودار ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوری و چکش اشمیت در معدن دردوی



شکل ۵-۳۹- نمودار ارتباط بین مقاومت بار نقطه ای و چکش اشمیت در معدن دردوی

با توجه به اشکال بالا، ضریب همبستگی بین مقاومت فشاری تک محوره و سختی اشمیت در زون های انتخابی، ۰/۹۵ و این ضریب برای مقاومت بار نقطه ای و سختی اشمیت، ۰/۹۷ می باشد. مشاهده می شود که، این همبستگی بین مقاومت بار نقطه ای و سختی اشمیت بیشتر از همبستگی بین مقاومت فشاری تک محوره و سختی اشمیت می باشد. بنابراین رابطه ای که برای بدست آوردن

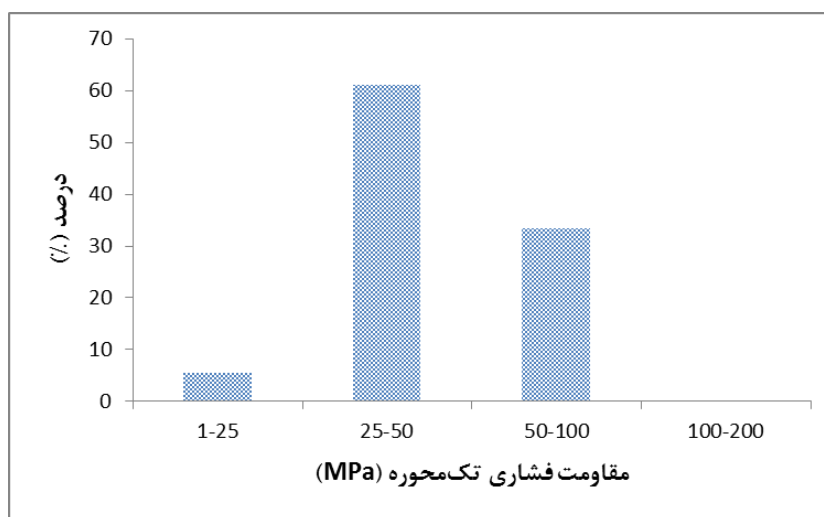
مقاومت فشاری زون‌های دیگر استفاده شده است، رابطه میان مقاومت بارنقطه‌ای و سختی اشمیت می‌باشد (رابطه ۳-۵).

$$ucs = 4.137 \times e^{0.048SH} \quad (۳-۵)$$

ucs: مقاومت بار نقطه‌ای (MPa)

SH: سختی اشمیت

پس از به دست آوردن مقاومت فشاری تک‌محوره در دیگر زون‌های معدن دردوی، نمودار ستونی برای مقاومت فشاری سنگ‌های این معدن رسم شده و در شکل (۵-۴۰)، قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۵-۴۰- نمودار ستونی درصد مقاومت فشاری تک‌محوره در معدن دردوی

همانطور که در این نمودار مشاهده می‌شود، بیش از ۶۱٪ سنگ‌های این معدن در بازه مقاومتی ۲۵-۵۰ مگاپاسکال، ۳۳٪ در بازه مقاومتی ۵۰-۱۰۰ مگاپاسکال و ۶٪ سنگ‌های این معدن دارای مقاومتی بین ۱-۲۵ قرار دارند، که در مجموع تمام سنگ‌های این معدن دارای مقاومتی زیر ۱۰۰ مگاپاسکال بوده که در مقایسه با مقاومت فشاری سنگ‌های معدن باغک، بسیار پایین می‌باشند.

۷.۲.۳.۵ چگالی و تخلخل

جهت تعیین چگالی و تخلخل نمونه‌های این معدن نیز، مانند معدن باغک، پس از انتقال دادن این نمونه‌ها به آزمایشگاه دانشگاه صنعتی شاهرود عملیات لازم انجام شده و نتایج حاصل در جدول (۵-۲۰)، درج شده است.

جدول ۵-۲۰- نتایج آزمایش چگالی و تخلخل در معدن دردوی

نوع سنگ	توف کربنات‌دار آذرآواری	مگنتیت کم‌عیار	هماتیت	گرانیت آلتیره شده
چگالی (g/cm^3)	۳/۳۲	۴/۹۹	۳/۸۲	۲/۶
تخلخل (%)	۶	۱/۹۶	۱۲/۶۲	۳/۱۸

اطلاعات مربوط به مقادیر چگالی و تخلخل در جدول (۷-۴۷)، و روابط مورد استفاده جهت تعیین این دو پارامتر در این معدن، به طور کامل در قسمت پیوست توضیح داده شده است.

۳.۳.۵ پارامترهای مربوط به توده‌سنگ

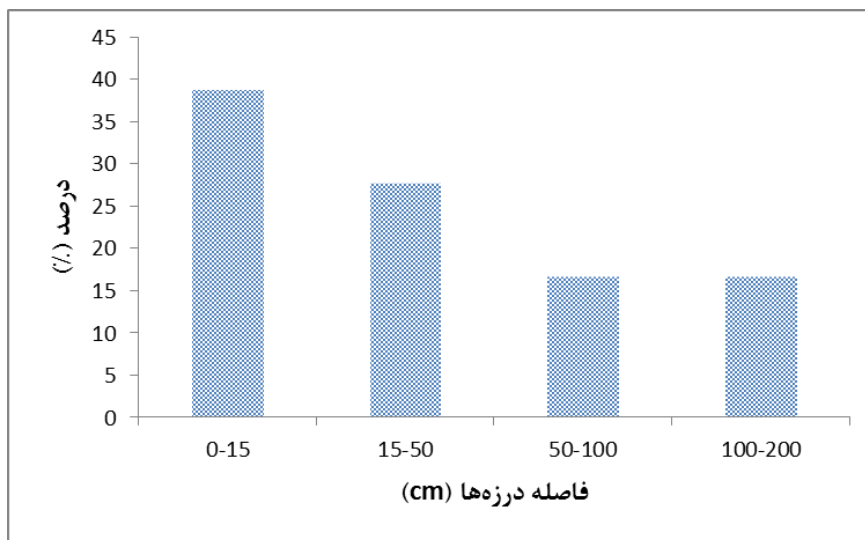
همانطور که اشاره شد، وضعیت ناپیوستگی‌ها یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر قابلیت حفاری می‌باشد. در معدن دردوی نیز، بعضی از زون‌ها که دارای بیش از یک دسته‌درزه هستند، وضعیت دسته‌درزه‌ای که بدترین وضعیت را دارد و نسبت به دسته‌درزه دیگر قابلیت حفاری را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد، مد نظر قرار گرفته است.

به منظور برداشت دسته‌درزه‌ها، اطلاعات مربوط به زاویه بین امتداد چال و سطح درزه، فاصله-داری و پرشدگی درزه‌ها جهت امتیازدهی ثبت شده است. در شکل (۵-۴۱)، نمونه‌ای از پر شدگی گرانیت توسط کلسیت در این معدن نشان داده شده است.



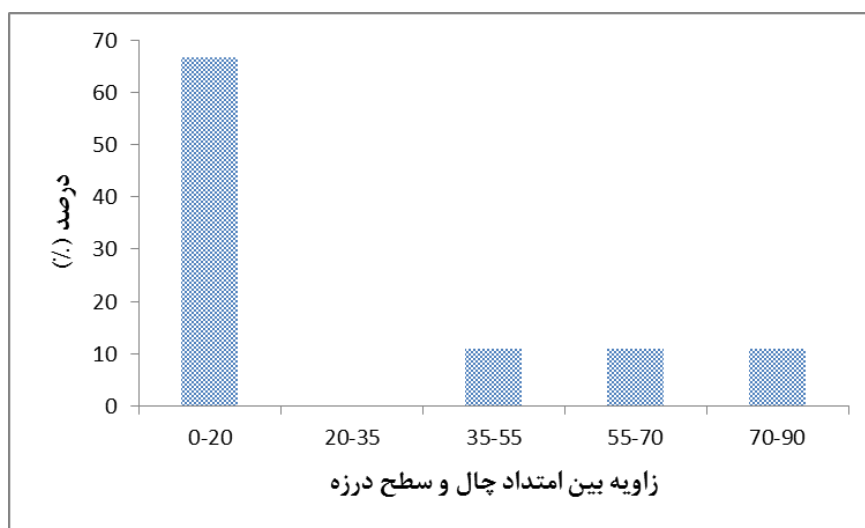
شکل ۴۱-۵- پرشدگی گرانیت توسط کلسیت در معدن دردوی

نمودار ستونی فاصله‌داری درزه‌ها در بازه‌های مختلف در معدن دردوی در شکل (۵-۴۲)، نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که، فاصله‌داری درزه‌ها در این معدن متفاوت می‌باشد، به طوری که ۳۹٪ فاصله‌داری در بازه ۰-۱۵ سانتی‌متر، ۲۸٪ در بازه ۱۵-۵۰ سانتی‌متر، ۱۶٪ در بازه ۵۰-۱۰۰ سانتی‌متر و بیش از ۱۷٪ در بازه بیش از ۱-۲ متر می‌باشد. در این معدن نیز مانند معدن باغک، بیش از ۶۷٪ فاصله‌داری درزه‌ها، زیر ۰/۵ متر می‌باشند که این امر موجب کاهش پیوستگی محیط حفاری شده و نرخ نفوذ را کاهش می‌دهد.



شکل ۵-۴۲- نمودار ستونی درصد فاصله‌داری درزه‌ها در معدن دردوی

همچنین در این مرحله از کار، زاویه بین امتداد چال و سطح درزه برداشت شده است که، در شکل (۵-۴۳)، نتایج کار به صورت نمودار ستونی نشان داده شده است.



شکل ۵-۴۳- نمودار ستونی درصد زاویه‌داری بین امتداد چال و سطح درزه در معدن باغک

با توجه به نمودار ستونی فوق، مشاهده می‌شود که، بیش از ۶۷٪ درزه‌ها، دارای زاویه بین امتداد چال و سطح درزه ۰-۲۰ درجه، ۱۱٪ درزه‌ها دارای زاویه‌ای بین ۳۵-۵۵ درجه، زاویه ۱۱٪ درزه‌ها بین ۵۵-۷۰ درجه و ۱۱٪ دیگر درزه‌ها، دارای زاویه‌ای بین ۷۰-۹۰ درجه می‌باشند. از این

نمودار نتیجه‌گیری می‌شود که بیش از نیمی از درزه‌ها، دارای زاویه کمتر از ۲۰ درجه بوده که نرخ نفوذ را تحت تأثیر قرار داده و آن را کاهش خواهد داد.

۴.۳.۵ ثبت سرعت حفاری در زون‌های انتخابی

به منظور ارزیابی سرعت حفاری و شرایط توده‌سنگ، این سرعت در زون‌های مختلف معدن دردوی اندازه‌گیری شده است. در جداول (۵-۲۱) و (۵-۲۲)، به ترتیب سرعت حفاری و مشخصات دستگاه حفار بیان شده است. همچنین در شکل (۵-۴۴)، تصویری از ماشین حفار آورده شده است.

جدول ۵-۲۱- سرعت حفاری در زون‌های مورد نظر معدن دردوی

شماره زون	جنس سنگ	سرعت (m/min)	قطر چال (mm)
۵	توف کربنات‌دار آذرآواری	۰/۴۷	۱۵۲
۹	هماتیت	۰/۸۲	۱۵۲
۱۰	مگنتیت کم‌عیار	۰/۶۹	۱۵۲
۱۳	گرانیت آلتیره شده	۰/۴۴	۱۵۲

جدول ۵-۲۲- مشخصات دستگاه حفار در معدن دردوی

نام دستگاه	فشار پشت مته (bar)	دوره (دور در دقیقه)	نوع کمپرسور	دور موتور کمپرسور (RPM)	فشار هوا (bar)	قطر حفاری (mm)
Roc L8	۵۰	۴۵-۵۰	جزئی از دستگاه حفار	۲۰۰۰	۲۰	۱۵۲

با توجه به جدول (۵-۲۲) و مقایسه آن با مشخصات دستگاه‌های حفار معدن باغک، مشاهده می‌شود، دستگاه‌های حفار مستقر در معدن باغک، دارای کارایی پایین بوده و اطلاعاتی از قبیل، سرعت چرخش، بار پشت مته، سرعت حفاری، و ... در آن ثبت نمی‌شود، که یک ضعف عمده در این دستگاه‌های حفار به شمار می‌رود.

همچنین، قطر حفاری با ماشین حفار Roc L8، ۱۵۲ میلی‌متر بوده و زمان تعویض میله مته و جابه‌جایی دستگاه حفار Roc L8، نسبت به دستگاه حفار TYL386 بسیار کم است، در نتیجه می‌توان گفت، اگر از دستگاه حفار Roc L8 به منظور حفاری استفاده شود، تعداد چال کمتری لازم بوده و در زمان حفاری نیز صرفه‌جویی خواهد شد.

ماشین حفار Roc L8، به راحتی می‌تواند، چال مورد نظر را با شیب‌های مختلف حفر نماید. این بدان معنی است که، می‌توان با توجه به شرایط هر معدن، الگوهای مختلف آتشیاری را اجرا کرده و بهترین الگو را هم به لحاظ هزینه و هم تولید بار بیشتر انتخاب کرد.



شکل ۵-۴- دستگاه حفاری Roc L8 در حال حفاری در معدن دردوی

۵.۳.۵ محاسبه اندیس قابلیت حفاری در زون‌های مختلف معدن دردوی

اندیس قابلیت حفاری برای زون‌های مختلف معدن دردوی، محاسبه شده است، تا در بخش‌های بعدی بتوان یک رابطه مناسب بین اندیس قابلیت حفاری و سرعت حفاری ثبت شده در این زون‌ها در

معدن دردوی به دست آورد. آنگاه بعد از محاسبه اندیس قابلیت حفاری برای سایر زون‌ها و جایگذاری آن در این رابطه، بتوان سرعت حفاری را به راحتی تخمین زد.

در جدول (۵-۲۳)، بر اساس سیستم رده‌بندی RD_i، بعد از امتیازدهی به پارامترهای این سیستم، اندیس قابلیت حفاری در زون‌های مورد نظر محاسبه شده است.

با مشخص شدن اندیس قابلیت حفاری در چهار زون تعیین شده در معدن دردوی، مشاهده می‌شود که سرعت حفاری در توف کربنات‌دار آذرآواری و گرانیت آلتره آهسته-متوسط و در مگنتیت و هماتیت متوسط می‌باشد.

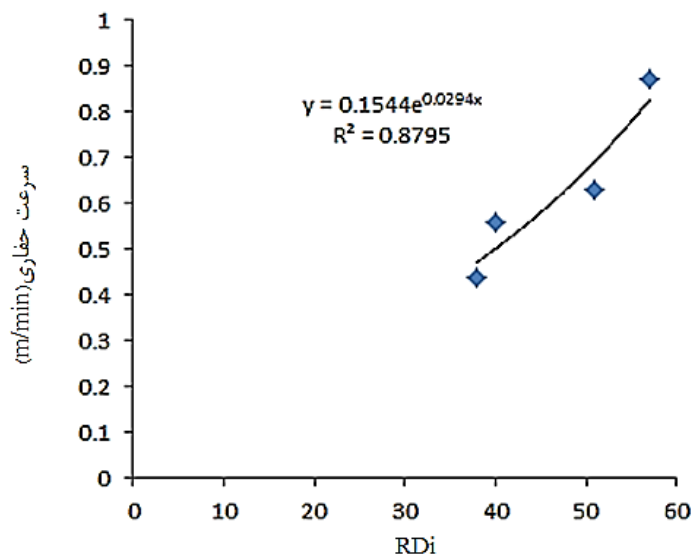
جدول ۵-۲۳- اندیس قابلیت حفاری برای زون‌های مشخص شده معدن دردوی

تراز	۱۵۵۰	۱۵۵۰	۱۵۶۰	۱۵۶۰
شماره زون	۵	۹	۱۰	۱۳
جنس سنگ	توف کربنات‌دار آذرآواری	هماتیت	مگنتیت کم‌عیار	گرانیت آلتره
امتیاز مقاومت فشاری تک‌محوره	۱۱	۲۲	۱۶	۱۶
امتیاز بافت	۱	۱	۱	۷
امتیاز سختی	۹	۴	۴	۴
امتیاز فاصله‌داری درزه‌ها	۱	۹	۹	۱
امتیاز پرکننده درزه‌ها	۱۵	۱۵	۱۵	۷
امتیاز شیب‌داری درزه‌ها	۱	۶	۶	۱
سرعت ثبت شده	۰/۴۷	۰/۸۲	۰/۶۹	۰/۴۴
RD _i	۳۸	۵۷	۵۱	۳۶

۶.۳.۵ ارتباط بین RD_i و سرعت حفاری

همانطور که اشاره شد، اگر بتوان یک رابطه مناسبی بین اندیس قابلیت حفاری و سرعت حفاری ثبت شده در زون‌های انتخاب شده به دست آورد، می‌توان پس از محاسبه این اندیس برای سایر زون‌ها و جایگذاری آن در این رابطه، سرعت حفاری را به راحتی تعیین کرد.

در شکل (۵-۴۵)، ارتباط بین اندیس قابلیت حفاری و سرعت حفاری برای معدن دردوی مشاهده می‌شود. رابطه (۵-۴) نیز این ارتباط را بیان می‌کند. با توجه به این نمودار می‌توان گفت، ارتباط بین اندیس قابلیت حفاری و سرعت حفاری در این معدن نیز، یک ارتباط قابل قبولی می‌باشد.



شکل ۵-۴۵- نمودار ارتباط بین RD_i و سرعت حفاری در معدن دردوی

$$v = 0.1544e^{0.0294RD_i} \quad (۵-۴)$$

V: سرعت حفاری (m/min)

RD_i: اندیس قابلیت حفاری

۷.۳.۵ امتیازدهی به هر کدام از زون‌ها بر اساس سیستم RD_i

پس از تعیین روابط فوق، ابتدا مقاومت فشاری تمام زون‌ها را با استفاده از رابطه (۵-۳) تعیین کرده، آنگاه بعد از امتیازدهی به تمامی پارامترهای موجود در سیستم رده‌بندی RD_i، این اندیس محاسبه شده و نهایتاً می‌توان با استفاده از رابطه (۵-۴)، سرعت حفاری هر یک از زون‌ها را تخمین زد.

به طور نمونه در جداول (۵-۲۴) و (۵-۲۵)، تمام مشخصات دو زون از معدن دردوی و امتیازات آن‌ها در سیستم رده‌بندی RD_i ذکر شده است. در اشکال (۵-۴۶) و (۵-۴۷)، نمای کلی این زون‌ها

مشاهده می‌شود. مشخصات کامل هر زون، همراه با امتیازات و سرعت مربوطه، هم به صورت کیفی و هم به صورت کمی در بخش پیوست آمده است.

جدول ۵-۲۴- مشخصات زون شماره ۱ معدن دردوی

معدن: دردوی	تراز: ۱۵۴۰	زون: ۱	جنس سنگ: مگنتیت پرعیار
پارامترها			
sh.H	۵۹/۸	امتیاز	
Te	متراکم	۱	
UCS	۷۳	۱۱	
Mohs.H	۶-۷	۴	
j.s	۰-۰/۱۵	۱	
j.p	بسته	۱۵	
j.d	۵۵-۷۰	۸	
RD _i	۴۰	متوسط	
V	۰/۵		



شکل ۵-۴۶- تصویری از زون شماره ۱ (مگنتیت پرعیار) معدن دردوی

جدول ۵-۲۵- مشخصات زون شماره ۱۹ معدن دردوی

معدن: دروی	تراز: ۱۵۷۰	زون: ۱۹	جنس سنگ: گرانیت آلتزه
پارامترها		پرشدگی: کلسیت	
sh.H	۴۸/۰۲	امتیاز	
Te	گرانوئیدی	۷	
UCS	۴۱/۴۷	۱۶	
Mohs.H	۶-۷	۴	
j.s	۰/۱۵-۰/۵	۵	
j.p		۱۵	
j.d	۰-۲۰	۱	
RD _i	۴۸	متوسط	
V	۰/۶۳		



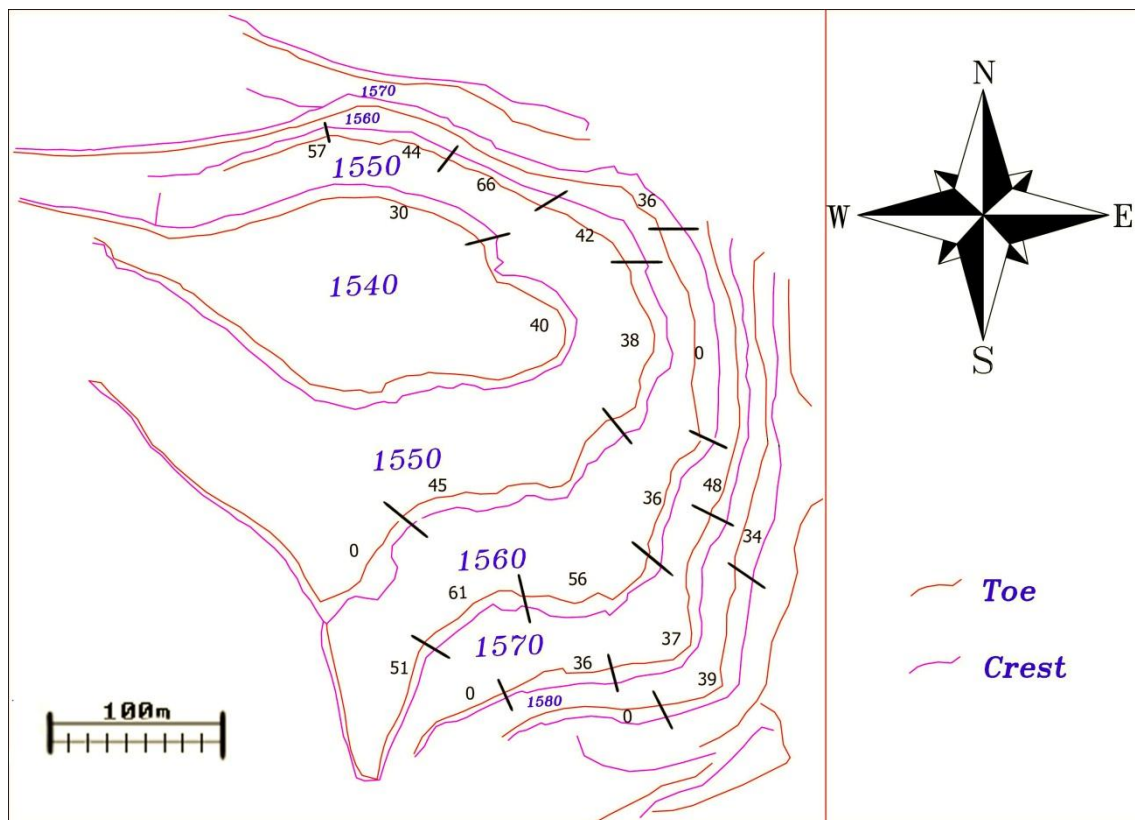
شکل ۵-۴۷- تصویری از زون شماره ۱۹ (گرانیت آلتزه) معدن دردوی

در جدول (۵-۲۶)، امتیازدهی نهایی زون‌های مختلف معدن دردوی درج شده و وضعیت سرعت مربوط به هر زون به صورت کیفی و کمی ذکر شده است. در این جدول مشخصات زون‌های خاکی با خط تیره نشان داده شده است.

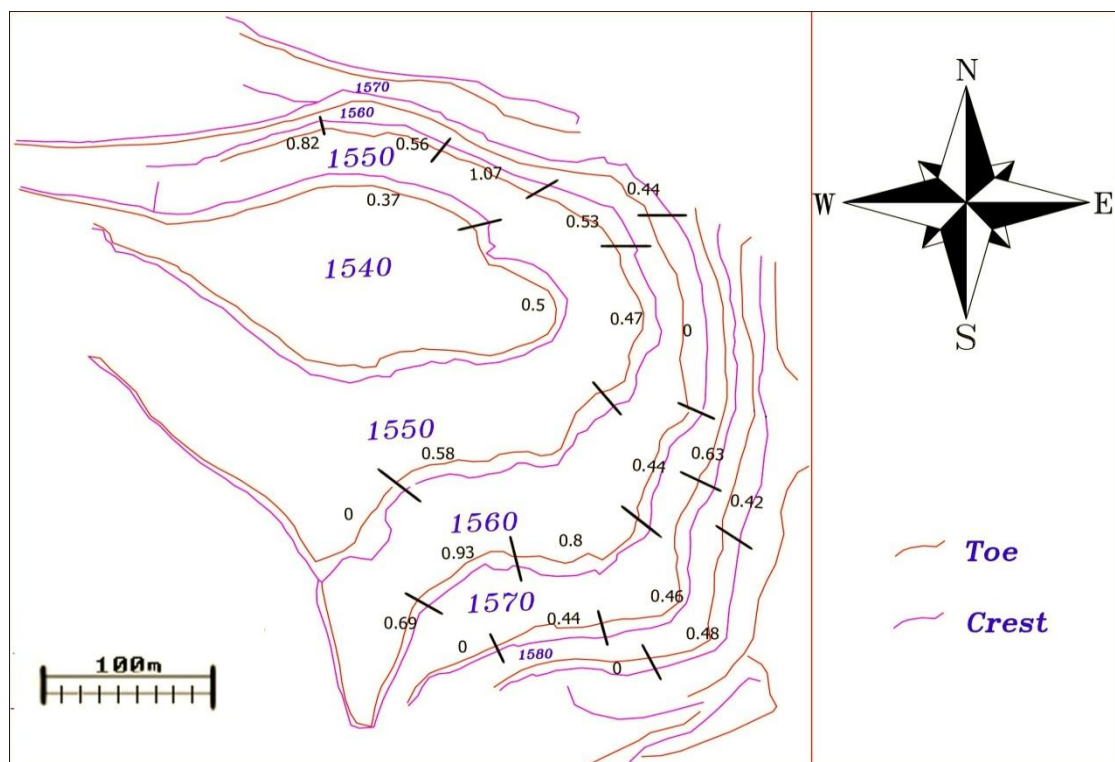
جدول ۵-۲۶- جدول امتیازات نهایی بر اساس سیستم طبقه‌بندی RDi در معدن دردوی

زون	ucs	بافت	سختی موس	فاصله‌داری درزه‌ها	پرکننده درزه‌ها	شیب- داری درزه‌ها	RDi	سرعت حفاری (کیفی)	سرعت حفاری (کمی)
۱	۱۱	۱	۴	۱	۱۵	۸	۴۰	متوسط	۰/۵
۲	۱۶	۷	۴	۱	۱	۱	۳۰	آهسته- متوسط	۰/۳۷
۳	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۴	۱۶	۱	۴	۱۳	۱۰	۱	۴۵	متوسط	۰/۵۸
۵	۱۱	۱	۹	۱	۱۵	۱	۳۸	آهسته- متوسط	۰/۴۷
۶	۱۶	۱	۴	۵	۱۵	۱	۴۲	متوسط	۰/۵۳
۷	۱۶	۱	۱۳	۹	۱۵	۱۲	۶۶	متوسط-سریع	۱/۰۷
۸	۱۶	۷	۴	۱	۱۵	۱	۴۴	متوسط	۰/۵۶
۹	۲۲	۱	۴	۹	۱۵	۶	۵۷	متوسط	۰/۸۲
۱۰	۱۶	۱	۴	۹	۱۵	۶	۵۱	متوسط	۰/۶۹
۱۱	۱۱	۱	۹	۱۳	۱۵	۱۲	۶۱	متوسط- سریع	۰/۹۳
۱۲	۱۱	۱	۴	۱۳	۱۵	۱۲	۵۶	متوسط	۰/۸
۱۳	۱۶	۷	۴	۱	۷	۱	۳۶	آهسته-متوسط	۰/۴۴
۱۴	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۱۵	۱۶	۷	۴	۱	۷	۱	۳۶	آهسته- متوسط	۰/۴۴
۱۶	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۱۷	۱۶	۷	۴	۱	۷	۱	۳۶	آهسته- متوسط	۰/۴۴
۱۸	۱۱	۱	۴	۵	۱۵	۱	۳۷	آهسته- متوسط	۰/۴۶
۱۹	۱۶	۷	۴	۵	۱۵	۱	۴۸	متوسط	۰/۶۳
۲۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۲۱	۱۶	۱	۹	۵	۷	۱	۳۹	آهسته- متوسط	۰/۴۸
۲۲	۱۶	۷	۴	۵	۱	۱	۳۴	آهسته- متوسط	۰/۴۲

در اشکال (۵-۴۸) و (۵-۴۹)، به ترتیب امتیاز مربوط به اندیس قابلیت حفاری و سرعت حفاری به صورت کمی به تفکیک هر زون، نشان داده شده است.

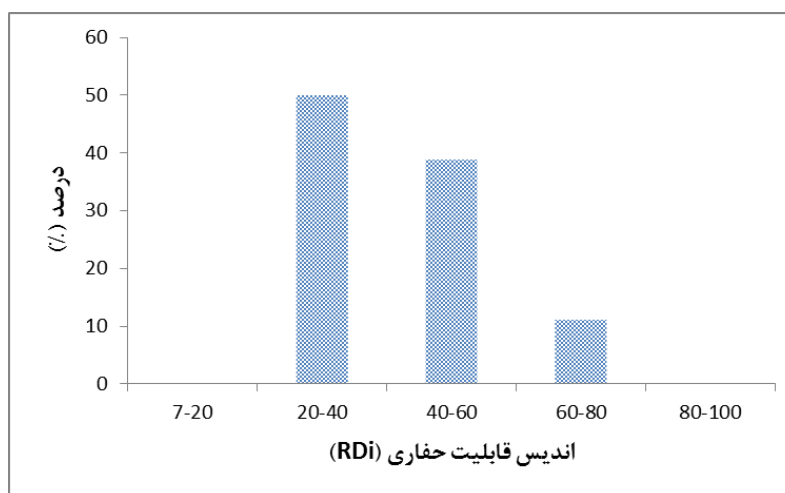


شکل ۴۸-۵- مقدار شاخص RDi در زون‌های مختلف معدن دردوی



شکل ۴۹-۵- تخمین سرعت حفاری در زون‌های مختلف معدن دردوی

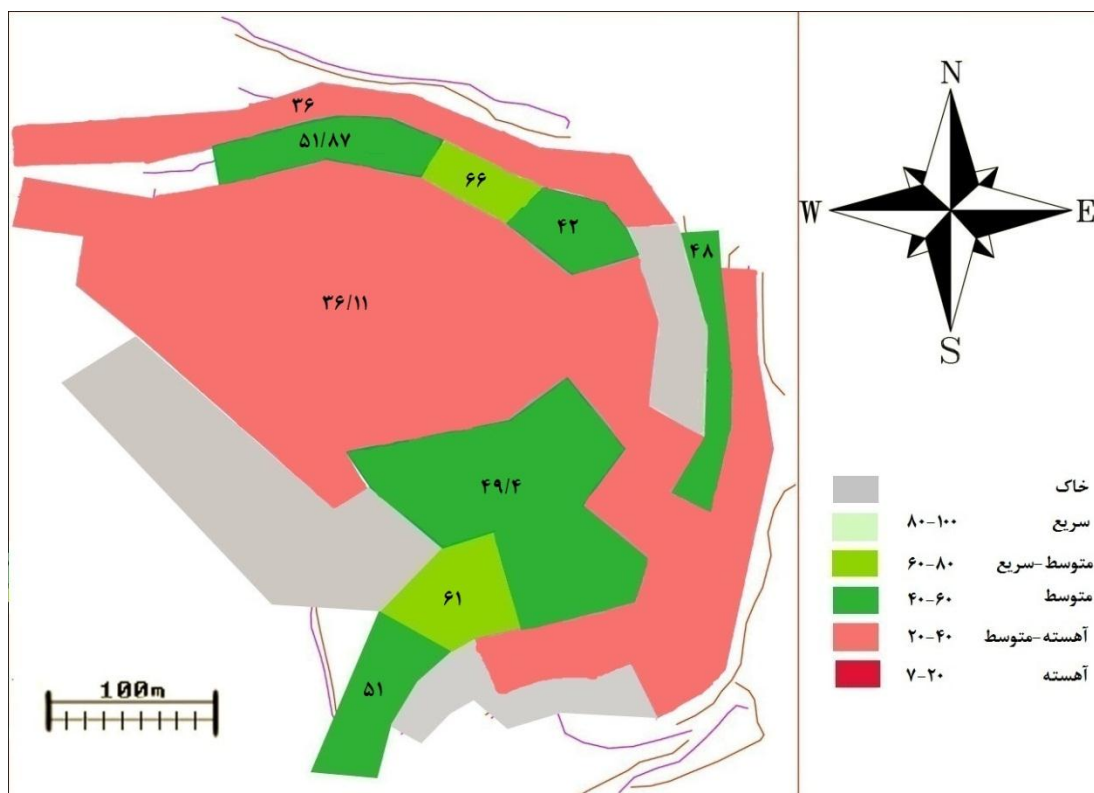
در شکل (۵-۵۰)، نمودار ستونی درصد اندیس قابلیت حفاری در معدن دردوی رسم شده است. همانطور که قبلاً اشاره شد، با توجه به سیستم مورد استفاده در این تحقیق، سرعت به طور کیفی در بازه ۰-۲۰ آهسته، ۲۰-۴۰ آهسته-متوسط، ۴۰-۶۰ متوسط، ۶۰-۸۰ متوسط-سریع و ۸۰-۱۰۰ سریع بیان شده است. با توجه به این مطالب و نمودار ستونی رسم شده، سرعت کیفی بیش از ۵۰٪ سنگ-های این معدن، آهسته-متوسط، ۳۹٪ دارای سرعت متوسط، ۱۱٪ دارای سرعت متوسط-سریع می-باشد. مشاهده می-شود که، نزدیک به ۹۰ درصد زون‌های موجود در این معدن دارای سرعتی متوسط و متوسط به پایین می-باشد. این سرعت کیفی با توجه به فاصله‌داری درزه‌ها، بافت و سختی غالبی که در این معدن وجود دارد، امری بدیهی به نظر می‌رسد.



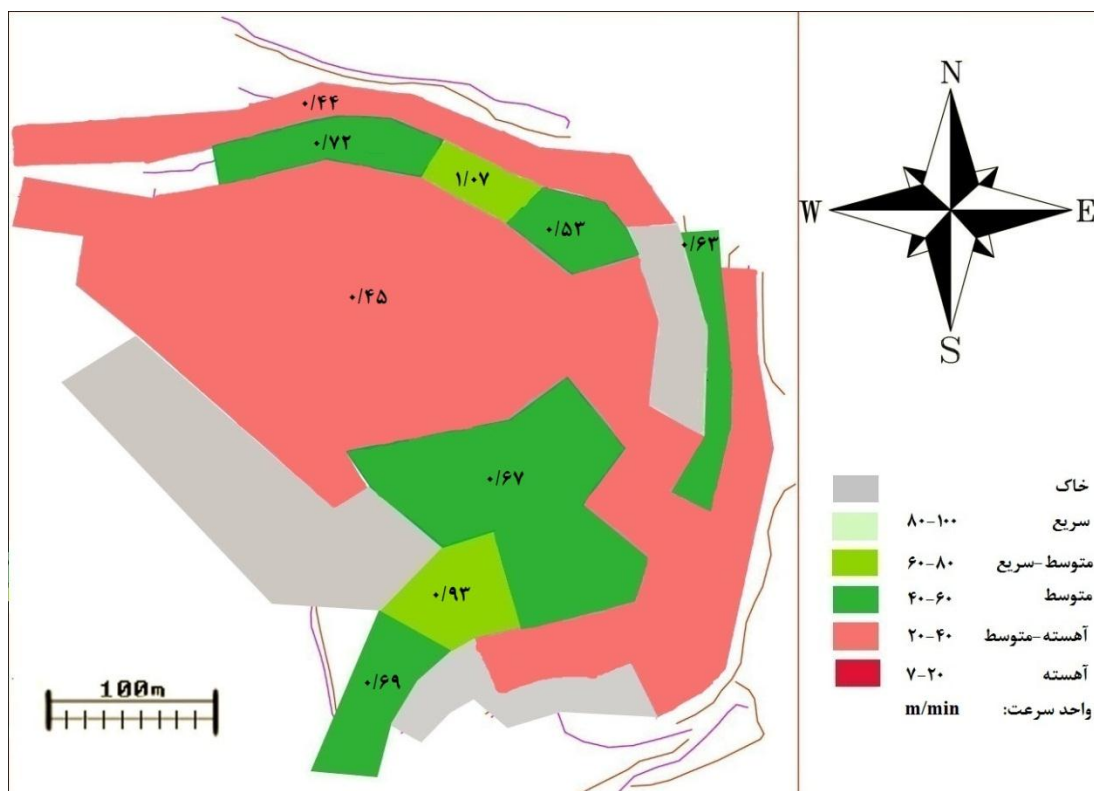
شکل ۵-۵۰- نمودار ستونی درصد اندیس قابلیت حفاری در معدن دردوی

۸.۳.۵ زون‌بندی نهایی توده‌سنگ‌های معدن دردوی

در این معدن نیز همانند معدن باغک، زون‌های هم‌کلاس و در همسایگی هم یک زون جدید در نظر گرفته شده و ۲۲ زون این معدن به ۱۲ زون بزرگتر تبدیل شده است. سپس با استفاده از روش میانگین وزنی طول پیمایش، امتیاز RDi برای هر زون جدید به دست آمده است. زون‌بندی نهایی در معدن دردوی، بر اساس شاخص قابلیت حفاری و سرعت حفاری به ترتیب در اشکال (۵-۵۱) و (۵-۵۲)، مشاهده می‌شود.



شکل ۵-۵۱- زون بندی نهایی توده سنگ های معدن دردوی بر اساس شاخص قابلیت حفاری (RDi)



شکل ۵-۵۲- زون بندی نهایی توده سنگ های معدن دردوی بر اساس سرعت حفاری

همانطور که در اشکال بالا مشاهده می‌شود، بیشتر نواحی حفاری در این معدن نیز، دارای سرعت آهسته-متوسط می‌باشند.

در معدن دردوی سرعت از ۰/۴۴ تا ۱/۰۷ متغیر می‌باشد. اما مقدار سرعت در زون‌های مشابه (آهسته-متوسط)، این دو معدن متفاوت است. این تفاوت سرعت، به دلایل زیر می‌باشد:

- ماشین حفاری مستقر در معدن دردوی، قدرت و کارایی بیشتری نسبت به ماشین حفاری معدن دردوی دارد.

- سنگ‌های معدن باغک به لحاظ مقاومتی، بسیار مقاومتر از سنگ‌های معدن دردوی می‌باشند.

۴.۵ مقایسه بین پارامترهای مختلف در معادن باغک و دردوی

در جداول (۲۷-۵) تا (۳۲-۵)، مقایسه‌ای بین پارامترهای مختلف اندازه‌گیری شده و سرعت حفاری در معادن باغک و دردوی، آورده شده است.

جدول ۲۷-۵- مقایسه درصد انواع بافت در دو معدن باغک و دردوی

نوع بافت	متخلخل	شکسته	گرانوئیدی	پرفیری	متراکم
معدن باغک	۰	۰	٪۲۲	۰	٪۷۸
معدن دردوی	۰	۰	٪۳۹	۰	٪۶۱

با توجه به جدول (۲۷-۵)، مشخص می‌شود که، یکی از بافت‌های غالب در هر دو معدن باغک و دردوی بافت متراکم می‌باشد. از آنجا که این بافت در سیستم رده‌بندی RDi، دارای کمترین امتیاز بوده و بیشترین تأثیر را در میان بافت‌ها در کاهش نرخ نفوذ دارد، به نظر می‌رسد، یکی از عواملی که موجب کاهش نرخ نفوذ در هر دو معدن شده است، این پارامتر می‌باشد.

در جدول (۲۸-۵)، مشاهده می‌شود که، بیش از ۶۳٪ سنگ‌های معدن باغک دارای مقاومتی بیش از ۱۰۰ مگاپاسکال بوده، اما در معدن دردوی مقاومت تمامی سنگ‌ها کمتر از ۱۰۰ مگاپاسکال

می باشد. بنابراین از نظر مقاومتی، سنگ های معدن باغک دارای مقاومت بیشتری بوده و انتظار می رود که، این پارامتر، سرعت را در بخش های مختلف معدن، تحت تأثیر قرار دهد.

جدول ۵-۲۸- مقایسه درصد مقاومت فشاری تک محوره در دو معدن باغک و دردوی

مقاومت فشاری تک-محوره (MPa)	۱-۲۵	۲۵-۵۰	۵۰-۱۰۰	۱۰۰-۲۰۰	بیشتر از ۲۰۰
	مقاومت خیلی کم	مقاومت کم	مقاومت متوسط	مقاومت بالا	مقاومت خیلی بالا
معدن باغک	٪۱۱	٪۱۱	٪۱۵	٪۶۳	۰
معدن دردوی	٪۶	٪۶۱	٪۳۳	۰	۰

با توجه به داده های جدول (۵-۲۹)، نتیجه گرفته می شود که، سختی غالب در هر دو معدن در مقیاس موس، ۶-۷ بوده، که سختی بالایی می باشد. این پارامتر نیز نرخ نفوذ را در هر دو معدن تحت تأثیر قرار داده و آن را کاهش خواهد داد.

جدول ۵-۲۹- مقایسه درصد سختی موس در دو معدن باغک و دردوی

سختی موس	۱-۳	۳-۴/۵	۴/۵-۶	۶-۷	بیشتر از ۷
	خیلی نرم تا نرم	نسبتاً نرم	نسبتاً سخت	سخت	خیلی سخت
معدن باغک	٪۷	۰	۰	٪۹۳	۰
معدن دردوی	۰	٪۵	٪۱۷	٪۷۸	۰

با توجه به جدول (۵-۳۰)، که مقایسه ای بین فاصله داری در دو معدن باغک و دردوی را نشان می دهد، این نتیجه گرفته می شود که، فاصله داری در هر دو معدن باغک و دردوی، متفاوت بوده، اما درزه های بیشتری در بازه ۰-۱۵ سانتی متر نسبت به دیگر بازه ها، قرار دارد.

جدول ۵-۳۰- مقایسه درصد فاصله داری درزه ها در دو معدن باغک و دردوی

فاصله داری درزه ها (m)	بیشتر از ۲ متر	۱-۲	۰/۵-۱	۰/۱۵-۰/۵	۰-۰/۱۵
معدن باغک	٪۷	٪۲۲	۰	٪۳۰	٪۴۱
معدن دردوی	۰	٪۱۷	٪۱۶	٪۲۸	٪۳۹

زاویه بین امتداد چال و سطح درزه نیز یکی از عوامل تأثیرگذار بر نرخ نفوذ می‌باشد. هر چه مقدار این زاویه بیشتر باشد، نرخ نفوذ نیز بیشتر خواهد بود. در جدول (۵-۳۱)، مشاهده می‌شود که، در هر دو معدن بیش از نیمی از زاویه‌های اندازه‌گیری شده، در بازه ۲۰-۰ قرار دارند که تأثیر منفی بر روی نرخ نفوذ دارد.

جدول ۵-۳۱- مقایسه درصد زاویه بین امتداد چال و سطح درزه در دو معدن باغک و دردوی

زاویه بین امتداد چال و سطح درزه	۷۰-۹۰	۵۵-۷۰	۳۵-۵۵	۲۰-۳۵	۰-۲۰
معدن باغک	٪۱۹	٪۷	٪۱۵	٪۷	٪۵۲
معدن دردوی	٪۱۱	٪۱۱	٪۱۱	٪۰	٪۶۷

در جدول (۵-۳۲)، پس از در نظر گرفتن تأثیر تمام پارامترهای ذکر شده در سیستم رده‌بندی RD_i، سرعت به صورت کیفی در هر دو معدن مشخص شده است. مشاهده می‌شود که، در هر دو معدن، سرعت‌های غالب به ترتیب، آهسته-متوسط و متوسط می‌باشند.

جدول ۵-۳۲- مقایسه درصد شاخص کیفیت حفاری (RD_i) در دو معدن باغک و دردوی

RD _i	۸۰-۱۰۰	۶۰-۸۰	۴۰-۶۰	۲۰-۴۰	۷-۲۰
	سریع	متوسط-سریع	متوسط	آهسته-متوسط	آهسته
معدن باغک	٪۷	۰	٪۲۶	٪۵۹	٪۸
معدن دردوی	۰	٪۱۱	٪۳۹	٪۵۰	۰

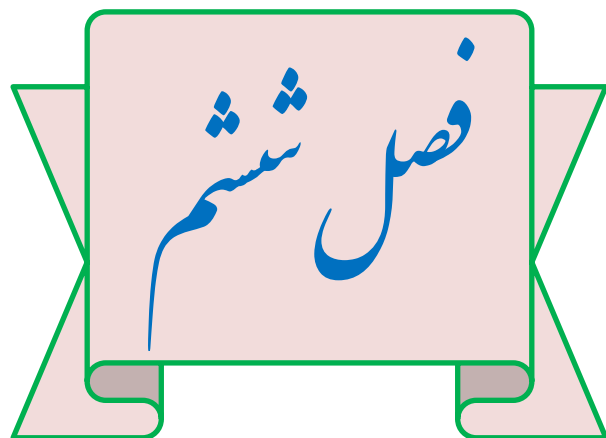
پس از تعیین سرعت حفاری در تمام زون‌های سنگی، با استفاده از رابطه بین اندیس قابلیت حفاری و سرعت حفاری، بیشترین و کمترین سرعت در معدن باغک ۱/۱۱ و ۰/۰۵ متر بر دقیقه بوده و در معدن دردوی، بیشترین و کمترین سرعت ۱/۰۷ و ۰/۳۷ متر بر دقیقه می‌باشد.

۵.۵ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این فصل، پس از انتخاب سیستم رده‌بندی مناسب جهت تعیین قابلیت حفاری معادن باغک و دردوی، به بررسی ارتباط بین این شاخص و سرعت حفاری پرداخته شد. برای این منظور پس از

مطالعات آزمایشگاهی بر روی چهار نمونه از معدن باغک و چهار نمونه از معدن دردوی از توابع معادن سنگ آهن سنگان، شاخص قابلیت حفاری برای هر کدام از این معادن محاسبه شد. سپس با انجام تحلیل‌های آماری و رگرسیونی بر نتایج آزمایشات، علاوه بر تعیین ارتباط بین شاخص قابلیت حفاری و سرعت حفاری، جهت تعیین مقاومت فشاری تک‌محوره نیز ارتباط بین عدد سختی اشمیت، مقاومت فشاری تک‌محوره و مقاومت بار نقطه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به روابط ارائه شده بین عدد سختی اشمیت و مقاومت فشاری تک‌محوره و همچنین عدد سختی اشمیت و مقاومت بار نقطه‌ای، چون ضریب همبستگی در هر دو معدن میان سختی اشمیت و مقاومت بار نقطه‌ای بیشتر بود، بنابراین از این روابط جهت تعیین مقاومت فشاری استفاده شد. علاوه بر این شاخص حفاری توده‌سنگ با سرعت حفاری نیز دارای رابطه‌ای قوی در هر دو معدن باغک و دردوی بود. با تعیین شاخص قابلیت حفاری برای تمام زون‌ها، با استفاده از رابطه بین این شاخص و سرعت حفاری در زون‌های انتخابی، سرعت حفاری در تمام ترازهای دیگر هر دو معدن تعیین شد. در نهایت، زون‌بندی نهایی بر اساس شاخص قابلیت حفاری و سرعت حفاری در هر دو معدن انجام شد که، بر این اساس هر دو معدن به ۱۲ زون بزرگتر تقسیم شدند.

بنابراین با تعیین زون‌بندی نهایی در این معادن و داشتن شاخص قابلیت حفاری و سرعت در این زون‌ها، می‌توان با دید بهتری به حفاری در این معادن پرداخت.



نتیجہ گیری و پیشہادات

۱.۶ نتیجه‌گیری

حفاری به صورت گسترده‌ای در مهندسی معدن، عمران و نفت استفاده می‌شود. با توجه به هزینه بالا و ماشین‌آلات گران قیمت، شناخت محیط حفاری و خصوصیات توده‌سنگ برجا، کمک بسیار زیادی به انتخاب نوع سیستم حفاری، تعیین تعداد ماشین‌آلات حفاری، ارزیابی توان تولید معدن و پیش‌بینی سرعت حفاری خواهد نمود. عوامل متعددی در امر حفاری دخیل‌اند. برخی از این عوامل با قابلیت حفاری رابطه مستقیم و برخی دیگر رابطه عکس دارند.

به منظور انجام این تحقیق، پس از بررسی سیستم‌های رده‌بندی مختلف همراه با مزایا و معایب آن‌ها در بخش سوم، نهایتاً سیستم رده‌بندی RDi جهت تعیین قابلیت حفاری معادن باغک و دردوی انتخاب شد. به منظور تعیین قابلیت حفاری در معادن ذکر شده با استفاده از این سیستم رده‌بندی، ابتدا ترازهای مختلف هر کدام از معادن باغک و دردوی بر اساس پارامترهای مطرح شده در سیستم رده‌بندی RDi، زون‌بندی شدند، که بر این اساس، معدن باغک به ۳۱ زون و معدن دردوی به ۲۲ زون تقسیم شدند. در هر یک از این معادن، چهار زون جهت جمع‌آوری نمونه و ثبت سرعت حفاری انتخاب شده و پارامترهایی از قبیل مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت بار نقطه‌ای، چگالی و تخلخل در هر یک از نمونه‌های این هشت زون مشخص شدند. همچنین بافت، سختی موس، سختی اشمیت، فاصله‌داری، شیب‌داری و پرشدگی درزه‌ها در تمامی ۵۳ زون تعیین گردیدند. از آنجایی که تعیین مقاومت فشاری تک‌محوره برای تمامی ۵۳ زون امری هزینه‌بر بود، با تعیین رابطه بین مقاومت فشاری تک‌محوره و چکش اشمیت و همچنین رابطه بین مقاومت بار نقطه‌ای و چکش اشمیت در زون‌های تعیین شده، مشخص شد که، رابطه بین مقاومت بار نقطه‌ای و چکش اشمیت در هر دو معدن یک رابطه قوی با ضریب همبستگی بالا می‌باشد. (ضریب همبستگی بین مقاومت فشاری تک‌محوره در معادن باغک و دردوی به ترتیب: $R^2=0.813$ و $R^2=0.9513$ ، ضریب همبستگی بین مقاومت بار نقطه‌ای و سختی اشمیت در هر کدام از معادن باغک و دردوی به ترتیب: $R^2=0.8647$ و $R^2=0.9702$).

بنابراین با استفاده از این روابط مقاومت فشاری تمام زون‌ها که یکی از پارامترهای ورودی سیستم رده‌بندی RD_i می‌باشد، محاسبه شد.

در مرحله بعد، رابطه بین اندیس قابلیت حفاری و سرعت حفاری که یک رابطه ضروری به منظور تعیین سرعت حفاری در سایر زون‌ها می‌باشد، تعیین گردید. بدین منظور پس از محاسبه اندیس قابلیت حفاری (RD_i) و ثبت سرعت حفاری در زون‌های تعیین شده، رابطه بین این دو پارامتر در هر یک از معادن به طور جداگانه به دست آمد. پس از تحلیل رگرسیونی مشخص شد که رابطه بین اندیس قابلیت حفاری و سرعت حفاری در هر دو معدن، یک رابطه بسیار خوب و قوی می‌باشد (ضریب همبستگی در هر یک از معادن باغک و دردوی به ترتیب: $R^2=0.9219$ و $R^2=0.8795$).

پس از در نظر گرفتن تأثیر تمام پارامترهای ذکر شده در سیستم رده‌بندی RD_i، سرعت به صورت کیفی در هر دو معدن مشخص شد، به طوری که در هر دو معدن، سرعت‌های غالب به ترتیب، آهسته-متوسط و متوسط می‌باشند. پس از محاسبه اندیس قابلیت حفاری در تمامی زون‌های دیگر و با استفاده از رابطه بین اندیس قابلیت حفاری و سرعت حفاری در هر کدام از معادن، سرعت در تمام زون‌ها به دست آمد. در نهایت، زون‌بندی نهایی بر اساس شاخص قابلیت حفاری و سرعت حفاری در هر دو معدن انجام شد که، بر این اساس هر دو معدن به ۱۲ زون بزرگتر تقسیم شدند. پس از این زون‌بندی جدید مشخص شد که، در معدن باغک سرعت از ۰/۰۵ تا ۰/۵۴ متر بر دقیقه تغییر می‌کند و فقط در دو زون لیمونیتی سرعت بالای ۱ متر بر دقیقه می‌باشد. در معدن دردوی نیز سرعت از ۰/۴۴ تا ۱/۰۷ متر بر دقیقه می‌باشد.

با توجه به مطالب گفته شده نتیجه‌گیری می‌شود، می‌توان قبل از حفاری، با تعیین اندیس قابلیت حفاری در زون‌های دیگر و با استفاده از رابطه بین این اندیس و سرعت حفاری در زون‌های انتخاب شده، سرعت حفاری را به صورت کمی تعیین کرده و با اطلاع از وضعیت حفاری در هر زون، با دید باز به حفاری در هر زون پرداخت.

۲.۶ پیشنهادات

- ۱- از آنجایی که پارامترهای وابسته به ماشین حفار تأثیر بسزایی در تعیین قابلیت حفاری دارند، بهتر است که دستگاه‌های حفاری، در زمان‌های مقرر سرویس‌های دوره‌ای شوند و چنانچه لازم باشد، تعمیرات پیشگیرانه برای آن‌ها انجام شود. این امر موجب افزایش کارایی تک تک اجزای دستگاه حفاری شده و در موجب افزایش قابلیت حفاری خواهد شد.
- ۲- پیشنهاد می‌شود به دلایل زیر و به منظور افزایش بازدهی و کاهش هزینه‌ها، در معدن باغک نیز از ماشین حفار Roc L8 و یا دستگاه حفاری با کارایی بالاتر استفاده شود.
- ماشین حفار مستقر در معدن باغک، یک دستگاه قدیمی بوده و اطلاعاتی از قبیل، سرعت چرخش، بار پشت مته، سرعت حفاری، و ... در آن ثبت نمی‌شود.
- قطر حفاری با ماشین حفار Roc L8، ۱۵۲ میلی‌متر است، بنابراین می‌توان به منظور عملیات آتشیاری، در مجموع تعداد چال کمتری حفر کرد.
- از آنجایی که مقاومت سنگ‌های معدن باغک بالا می‌باشد، دستگاه‌های حفار فعلی مستقر در این معدن، دارای کارایی پایینی می‌باشند.
- زمان تعویض میله مته و جابه‌جایی دستگاه حفار Roc L8، نسبت به دستگاه حفار TYL386، بسیار کم بوده، که در مجموع تعداد چال بیشتری را در زمان کمتر حفر می‌نماید.
- ماشین حفار Roc L8، به راحتی می‌تواند، چال مورد نظر را با شیب‌های مختلف حفر نماید. این بدان معنی است که، می‌توان با توجه به شرایط هر معدن، الگوهای مختلف آتشیاری را اجرا کرده و بهترین الگو را هم به لحاظ هزینه و هم تولید بار بیشتر انتخاب کرد.
- ۳- پیشنهاد می‌شود برای مطالعات بیشتر در زمینه تعیین قابلیت حفاری، از روش RPi نیز استفاده شود و نتایج این دو روش در این معادن با یکدیگر مقایسه شود.

۴- ضعف فعلی که در سیستم رده‌بندی RDi وجود دارد این است که، در جایی که با بیش از یک دسته درزه غالب مواجه شود، پاسخی برای این مسئله نخواهد داشت. پیشنهاد می‌شود، به منظور برطرف کردن این مشکل و توسعه این سیستم رده‌بندی، تحقیقات بیشتری در این زمینه انجام شود.

- استوار، رحمت‌ا...، ۱۳۸۳، "آتش‌کاری در معادن"، چاپ ششم، چاپ قلم، ص ۲۱۴.
- اصلولو، مرتضی، ۱۳۸۲، "روشهای حفاری"، چاپ دوم، مرکز نشر صدرا، ص ۴۱-۲۱.
- ترابی، سید رحمان، ۱۳۷۲، "الفبای معدنکاری"، چاپ اول، مرکز نشر دانشگاهی، تهران، ص ۱۰۷.
- حسینی سیده‌ادی، پوررحیمیان یاشار، آقابابایی حمید، ۱۳۸۵، "بررسی و مدل‌سازی تاثیر شیب‌داری درزه‌ها بر سرعت چالزنی در معدن روباز"، فصلنامه علوم زمین، شماره ۶۳، سال شانزدهم.
- حسینی سیده‌ادی، پوررحیمیان یاشار، آقابابایی حمید، ۱۳۸۶، "پیشنهاد سیستم طبقه‌بندی جدید جهت پیش‌بینی سرعت حفاری در معادن روباز"، سومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران.
- حسینی سیده‌ادی، عطائی محمد، ۱۳۸۸، "تأثیر مشخصات مقاومتی سنگ بر سرعت حفاری ضربه‌ای در معادن"، ششمین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران.
- حسینی س، (۱۳۸۷)، پایان‌نامه ارشد: "RPI روشی جدید برای ارزیابی و پیش‌بینی قابلیت حفاری سنگ‌ها"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- شرکت مهندسی معدن‌کاو، فروردین ۱۳۸۸، "گزارش زمین‌شناسی ساختمانی آنومالی سنگ‌آهن باغک(سنگان)".
- شرکت مهندسی معدن‌کاو، خرداد ۱۳۸۸، "گزارش زمین‌شناسی ساختمانی آنومالی سنگ‌آهن دردوی(سنگان)".
- عطائی م، حسینی س، (۱۳۸۷)، طرح پژوهشی، "بررسی پارامترهای مؤثر در سرعت حفاری و ارائه سیستم طبقه‌بندی جدید برای تعیین اندیس قابلیت نفوذ در سنگ‌ها (RPI)"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- فهیمی‌فر، ا.، سروش، ح.، ۱۳۸۰، "آزمایش‌های مکانیک سنگ، مبانی نظری و استانداردها (جلد اول آزمون‌های آزمایشگاهی)"، انتشارات شرکت سهامی آزمایشگاه‌های فنی و مکانیک خاک.

قویدل م، (۱۳۹۰)، پایان‌نامه ارشد، "طبقه‌بندی قابلیت حفاری توده‌سنگ‌ها و پیش‌بینی سرعت حفاری در معدن سنگ‌آهن گلگهر"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

کمالی جواد، مهترپور شاکر، ۱۳۸۰، "عوامل مؤثر در سرعت حفاری"، اولین کنفرانس حفاری ایران. محمدی سید داوود، خانلری غلامرضا، ۱۳۸۳، "تخمین قابلیت تراشه شدن توده‌های سنگی با استفاده از رده‌بندی‌های Q و RMR "، کنفرانس مهندسی معدن ایران.

معماریان حسین، قاسمی امیررضا، مهین‌راد ابوالفضل، ۱۳۸۵، "بررسی عوامل مؤثر بر نرخ نفوذ در چالزن‌های ضربه‌ای چکش بالا"، نشریه علمی- پژوهشی مهندسی معدن.

مهندسین مشاور کاوشگران، مرداد ۱۳۸۹، "گزارش طراحی، برنامه‌ریزی و آماده‌سازی استخراج معدن سنگ‌آهن باغک سنگان".

مهندسین مشاور کاوشگران، فروردین ۱۳۹۱، "گزارش طراحی، برنامه‌ریزی و آماده‌سازی استخراج معدن سنگ‌آهن باغک سنگان".

مهندسین مشاور کاوشگران، شهریور ۱۳۸۵، "گزارش نهایی بررسی امکان تأمین سالانه یک میلیون تن آهن دانه‌بندی شده از معادن فرعی باغک، دردوی و تپه‌قرمز".

مهندسین مشاور کاوشگران، خرداد ۱۳۸۹، "گزارش طراحی و برنامه‌ریزی استخراج معدن سنگ‌آهن دردوی سنگان".

مهندسین مشاور کاوشگران، فروردین ۱۳۹۱، "گزارش طراحی و برنامه‌ریزی استخراج معدن سنگ-آهن دردوی سنگان".

وفائیان، محمود، ۱۳۷۶، "خواص مهندسی سنگ‌ها"، نشر اردکان، ص ۹-۶.

یاوری شهرضا، مهدی، ۱۳۸۱، "اصول مهندسی معدن"، چاپ اول، چاپ و نشر علامه طباطبایی، ص ۱۲۸-۱۲۴ و ص ۱۵۳.

یاوری شهرضا، مهدی، ۱۳۸۳، "فنون چالزنی پله‌ای و راهنمای انتخاب تجهیزات"، چاپ اول،

لیتوگرافی و خدمات چاپ امید، ص ۲۱-۲۳.

Akun M.E. & Karpuz C. (2005) "*Drillability studies of surface-set diamond drilling in Zonguldak region sandstones from Turkey*" International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 42, 473-479.

Altindag R. (2003) "*Technical Note Estimation of Penetration Rate in Percussive Drilling by Means of Coarseness Index and Mean Particle Size*". Rock Mech. Rock Engng. 36 (4), 323-332.

Bilim, N. (2011) "*Determination of drillability of some natural stones and their association with rock properties*". Scientific Research and Essays Vol. 6(2), pp. 382-387, 18 January.

Bilgesu H. I., tetrack L.T., Altmis U., Mohaghegh S. and Ameri S. (1997) "*A new approach for the prediction of rate of penetration (ROP) values*" Proc. of SPE Reginal Meeting, Lexington, USA, 175-179.

Bilgin, N. and Kahraman, S. (2003). "*Drillability prediction in rotary blast hole drilling*". In: Proc. 18th Int. Mining Cong. and Exhibition of Turkey, Antalya, Turkey, pp. 177-182.

Cheniany A, Hasan Khoshrou, Shahriar K and Khademi Hamidi J. (2012) "*An estimation of the penetration rate of rotary drills using the Specific Rock Mass Drillability index*" International Journal of Mining Science and Technology 22 187-193.

Denkhaus H.G. (2003) "*Brittleness and drillability*". The South African Institute of Mining and Metallurgy.

Ersoy A. & Waller, M.D. (1995) "*Textural characterization of rocks*" J. of Engineering Geology, June, Vol. 39, Issues 3-4, 123-136.

Gunaydin O., Kahraman S and Fener M. (2004) "*Sawability prediction of carbonate rocks from brittleness indexes*". The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy.

Hoseinie S. H., Aghababaei H., Pourrahimian Y. (2008) "*Development of a new classification system for assessing of Rock mass Drillability index (RDi)*" International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 45, 1-10.

- Hoseinie S.H & Ataei, M and Osanloo, M. (2009) “A new classification system for evaluating rock penetrability”. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 46, 1329–1340.
- Howarth D.F. and Rowland J.C. (1987) “Quantitative assessment of rock texture and correlation with drillability and strength properties” Rock Mech. Rock Eng., 20, 57–85.
- <http://projeh.blogfa.com>
- Hustrulid WA, Fairhurst C. (1971) “A theoretical and experimental study of the percussive drilling of rock” Part VI: application of the model to actual percussive drilling. Int J Rock Mech Min Sci ; 9:431–449.
- Jimeno CL, Jimeno E. L. & Carsedo F. J. A. (1995) “Drilling and blasting of rocks” A.A Balkema, Pub Rotterdam.
- Kahraman S. (1999) “Rotary and percussive drilling prediction using regression analysis” International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 36: 981-989.
- Kahraman S., Balci C., Yazici S. & Bilgin N. (2000) “Prediction of the penetration rate of rotary blast hole drilling using a new drillability index” International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 37, 729-743.
- Kahraman, S. (2002). “Correlation of TBM and drilling machine performances with rock brittleness”. Eng. Geol. 65, 269–283.
- Kahraman, S. (2003). “Performance analysis of drilling machines using rock modulus Ratio”. J. S. Afr. Inst. Min. Metall. 103, 515–522.
- Kahraman S., Bilgin N. and Feridunoglu C. (2003) ” Dominant rock properties affecting the penetration rate of percussive drills” Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 40, 711–723.
- Oddsson, J. (1979). “Rock quality designation and drilling rate correlated with lithology and degree of alteration in volcanic rocks from the 1979 Surtsey drill hole”. Surtsey Research Progress Report IX, 94-97.
- Plinninger R.J & Thuro K. (2004) “Wear Prediction in Hardrock Excavation Using the CERCHAR Abrasiveness Index (CAI)”. 53rd Geomechanics Colloquium.
- Rustan A. (1998) “Rock Blasting terms and Symbols” A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp. 60.

Tunnels & Tunnelling International. (2006) "*Abrasivity testing for rock and soils*". , pp. 47-49.

Thuro K. and Spaun G. (1996) "*Introducing the destruction work as a new rock property of toughness referring to drillability in convetional drill and blast tunneling*" Eurock 96, Turin, Italy.

Thuro K. (1997) "*Prediction of drillability in hard rock tunneling by drilling and blasting*" In Glosser, J., Hinkel, J.W. and Schubert, W. (Eds.): Tunnels for People, Balkema, Rotterdam, 103 – 108.

Thuro K., Plinninger R.J. and Spaun G. (2002) "*Drilling, Blasting and Cutting – Is it possible to quantify geological parameters relating to excavability?*" Environment.

Durban, South Africa, 16 - 20 September - J. L. van Rooy and C. A. Jermy, editors.

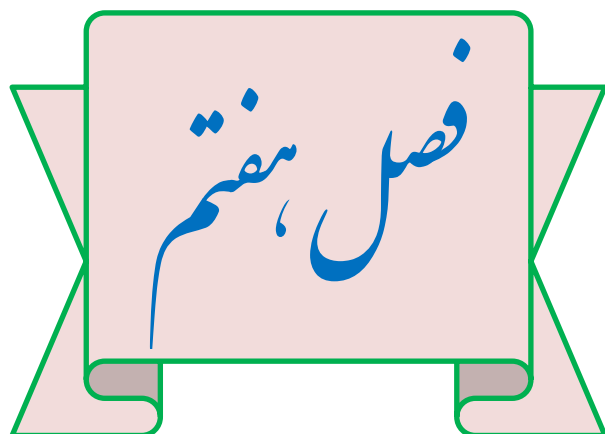
Thuro K. and Plinninger R.J. (2003) "*Hard rock tunnel boring, cutting, drilling and blasting: rock parameters for excavability*" Technology roadmap for rock mechanics, South African Institiue of Mining and Metallurgy.

Wilbur L. (1982) "*Rock Tunnel Engineering Handbook*". Edited by Bickel and kuesel, Publication of Van Norstrand Reinhold Company.

www.simp.ir.

Yarali O. and Kahraman S. (2011) "*The drillability assessment of rocks using the different brittleness values*". Tunnelling and Underground Space Technology 26, 406–414.

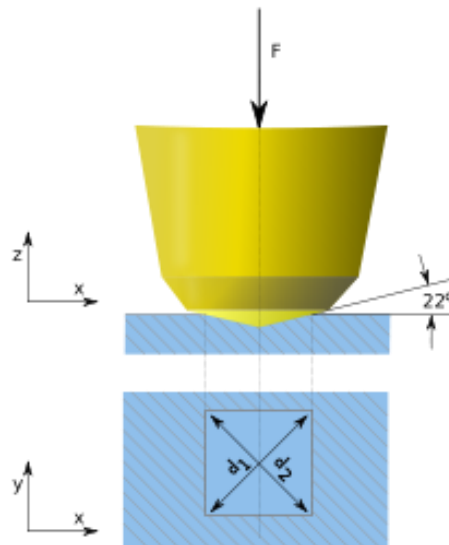
Yasar E., Ranjith P.G. and Viete D.R. (2011) "*An experimental investigation into the drilling and physico-mechanical properties of a rock-like brittle material*". Journal of Petroleum Science and Engineering 76, 185–193.



پوست

۱.۷ آزمایش سختی ویکرز

این آزمایش در سال ۱۹۲۴ معرفی گردیده و مورد استفاده قرار گرفته است. در این آزمایش از نفوذ یک هرم مربع القاعده و قائم استفاده می‌گردد که، جنس آن از الماس مصنوعی بوده و زاویه رأس آن ۱۳۶ درجه است (شکل ۱-۷).



شکل ۱-۷ - آزمایش سختی ویکرز

این آزمایش اثر کوچکتري روی فلزات باقی گذاشته و ضمناً برای فلزات نرم مناسب‌تر می‌باشد. در آزمایش برنیل چون اثر نیروی وارده شکل گلوله نیز بطور الاستیک تغییر می‌نمود لذا شکل ایجاد شده به نیروی وارده بستگی داشته و از این رو نسبت P/D^2 حائز اهمیت بود. اما چون در این آزمایش هرم کوچک الماس تغییر شکل نمی‌دهد و شکل ایجاد شده در نمونه آزمایشی بستگی به نیروی وارده نداشته و از این رو جوابهای بدست آمده دقیق‌تر و قابل تشخیص‌تر است. مثلاً سختی ویکرز ۶۰۰ دو برابر سختی ویکرز ۳۰۰ است، ولی در آزمایش برنیل این مقیاس و تناسب برقرار نیست و ورقهای نازک به روش برنیل حق تقدم دارند (<http://projeh.blogfa.com>).

۱.۱.۷ عدد سختی ویکرز

این عدد بر اساس رابطه (۷-۱)، محاسبه می‌شود.

$$VH = \frac{2F \sin(136^\circ/2)}{d^2} \approx \frac{1.854F}{d^2} \quad \text{رابطه (۷-۱)}$$

واحد سختی ویکرز، کیلوگرم نیرو بر میلی‌متر مربع است و مقادیر حاصل بصورت

xxxVHyy گزارش می‌شوند که xxx میزان سختی و yy نیروی اعمال شده بر فرورونده است.

۲.۱.۷ مقدار نیرو در آزمایش ویکرز

مقدار نیرو در آزمایش ویکرز کمتر از نیروی مورد استفاده در آزمایش برنیل بوده و با سخت بودن نمونه مورد آزمایش افزایش می‌یابد، این نیرو معمولاً بین ۳۰ تا ۵ کیلوگرم بوده و نیروهای زیاد مثلاً بالای ۱۲۵ کیلوگرم باید دقت شود تا به الماس دستگاه لطمه نزنند (<http://projeh.blogfa.com>).

۲.۷ جداول مربوط به زون‌های معدن باغک

در جداول (۷-۱) تا (۷-۲۷)، تمام پارامترهای مربوط به سیستم رده‌بندی RDi آورده شده است. همچنین سختی اشمیت، امتیاز RDi و مقدار سرعت مربوط به هر زون نیز آمده است. در این جداول، مقاومت فشاری تک‌محوره بر حسب مگاپاسکال، فاصله‌داری درزه‌ها بر حسب متر و سرعت حفاری بر حسب متر بر دقیقه بیان شده است.

جدول ۱-۷- معدن باغک، زون شماره ۲

معدن: باغک	تراز: ۱۶۳۰	زون: ۲	جنس سنگ: گرانیت آلتزه خرد شده
پارامترها			
sh.H	۳۷/۲۶		امتیاز
Te	گرانوئیدی		۷
ucs	۱۷/۶۶		۲۲
Mohs.H	۶-۷		۴
j.s	۰-۰/۱۵		۱
j.p	درزه بسته		۱۵
j.d	۵		۱
RD _i	۵۰		متوسط
V	۰/۵۴		

جدول ۲-۷- معدن باغک، زون شماره ۳

معدن: باغک	تراز: ۱۶۳۰	زون: ۳	جنس سنگ: مگنتیت پرعیار
پارامترها			پرشدگی: کلسیت و فلوگوپیت
sh.H	۵۳/۸۲		امتیاز
Te	متراکم		۱
ucs	۱۰۱/۴		۶
Mohs.H	۶-۷		۴
j.s	۰/۴۳		۵
j.p	۲۵		۱۰
j.d	۳۰		۳
RD _i	۲۹		آهسته- متوسط
V	۰/۲۱		

جدول ۷-۳- معدن باغک، زون شماره ۵

معدن: باغک	تراز: ۱۶۴۰	زون: ۵	جنس سنگ: مگنتیت کم عیار
پارامترها			پرشدگی: کلسیت
sh.H	۵۴/۲۳		امتیاز
Te	متراکم		۱
ucs	۱۰۵/۱۲		۶
Mohs.H	۶-۷		۴
j.s	۰/۲۵		۵
j.p	تقریباً بسته		۱۵
j.d	۳۷		۶
RDi	۳۷		آهسته - متوسط
V	۰/۳۴		

جدول ۷-۴- معدن باغک، زون شماره ۶

معدن: باغک	تراز: ۱۶۴۰	زون: ۶	جنس سنگ: مگنتیت فلوگوپیت دار
پارامترها			پرشدگی: کلسیت و فلوگوپیت
sh.H	۴۳/۲۴		امتیاز
Te	لایه‌ای و متراکم		۱
ucs	۳۵/۸۲		۱۶
Mohs.H	۶-۷		۴
j.s	۱-۲		۱۳
j.p	تقریباً بسته		۱۵
j.d	۵۰		۶
RDi	۵۵		متوسط
V	۰/۶۲		

جدول ۷-۵- معدن باغک، زون شماره ۷

معدن: باغک	تراز: ۱۶۴۰	زون: ۷	جنس سنگ: مگنتیت کم عیار
پارامترها			پرشدگی: کلسیت
sh.H	۵۴/۸		امتیاز
Te	متراکم		۱
ucs	۱۱۰/۴۸		۶
Mohs.H	۶-۷		۴
j.s	۱/۵		۱۳
j.p	۶		۱۵
j.d	۷		۱
RD _i	۴۰		آهسته- متوسط
V	۰/۳۸		

جدول ۷-۶- معدن باغک، زون شماره ۹

معدن: باغک	تراز: ۱۶۵۰	زون: ۹	جنس سنگ: گرانیت آلتیره
پارامترها			پرشدگی: کلسیت
sh.H	۵۴/۶		امتیاز
Te	گرانوئیدی		۷
ucs	۱۰۸/۵۷		۶
Mohs.H	۶-۷		۴
j.s	۰-۰/۱۵		۱
j.p	۲۰		۱۰
j.d	۱۰		۱
RD _i	۲۹		آهسته- متوسط
V	۰/۲۱		

جدول ۷-۷- معدن باغک، زون شماره ۱۰

معدن: باغک	تراز: ۱۶۵۰	زون: ۱۰	جنس سنگ: مگنتیت فلوگوپیت دار
پارامترها			
sh.H	۴۱/۷۸		امتیاز
Te	لایه‌ای و متراکم		۱
ucs	۳۰/۴۲		۱۶
Mohs.H	۶-۷		۴
j.s	۱-۲		۱۳
j.p	بسته		۱۵
j.d	۴۵		۶
RD _i	۵۵		متوسط
V	۰/۶۲		

جدول ۷-۸- معدن باغک، زون شماره ۱۱

معدن: باغک	تراز: ۱۶۵۰	زون: ۱۱	جنس سنگ: مگنتیت کم عیار
پارامترها			
sh.H	۵۶/۱۴		امتیاز
Te	متراکم		۱
ucs	۱۲۳/۹۲		۶
Mohs.H	۶-۷		۴
j.s	۱-۲		۱۳
j.p	بسته		۱۵
j.d	۴۵		۶
RD _i	۴۵		متوسط
V	۰/۴۶		

جدول ۷-۹- معدن باغک، زون شماره ۱۲

معدن: باغک	تراز: ۱۶۵۰	زون: ۱۲	جنس سنگ: دولومیت
پارامترها			پرشدگی: کلسیت
sh.H	۵۱/۰۶		امتیاز
Te	متراکم		۱
ucs	۷۸/۹۴		۱۱
Mohs.H	۶-۷		۴
j.s	۰-۰/۱۵		۱
j.p	۶		۱۵
j.d	۰-۲۰		۱
RD _i	۳۳		آهسته- متوسط
V	۰/۲۷		

جدول ۷-۱۰- معدن باغک، زون شماره ۱۳

معدن: باغک	تراز: ۱۶۵۰	زون: ۱۳	جنس سنگ: مگنتیت پرعیار
پارامترها			پرشدگی: کلسیت
sh.H	۵۶/۹۵		امتیاز
Te	متراکم		۱
ucs	۱۳۲/۶۵		۶
Mohs.H	۶-۷		۴
j.s	۰/۲۸		۵
j.p			۱۰
j.d	۷۰		۸
RD _i	۳۴		آهسته- متوسط
V	۰/۲۹		

جدول ۷-۱۱- معدن باغک، زون شماره ۱۴

معدن: باغک	تراز: ۱۶۵۰	زون: ۱۴	جنس سنگ: دولومیت خرد شده
پارامترها			
sh.H	۴۸/۷۵		امتیاز
Te	متراکم		۱
ucs	۶۳/۳۵		۱۱
Mohs.H	۶-۷		۴
j.s	۰-۰/۱۵		۱
j.p			۱
j.d	۰-۲۰		۱
RD _i	۱۹		آهسته
V	۰/۰۵۱		

جدول ۷-۱۲- معدن باغک، زون شماره ۱۵

معدن: باغک	تراز: ۱۶۵۰	زون: ۱۵	جنس سنگ: مگنتیت پرعیار
پارامترها			پرشدگی: کلسیت
sh.H	۵۷/۸		امتیاز
Te	متراکم		۱
ucs	۱۴۲/۳۳		۶
Mohs.H	۶-۷		۴
j.s	۱۳/۲۵		۱
j.p	تقریباً بسته		۱۵
j.d	۰-۲۰		۱
RD _i	۲۸		آهسته- متوسط
V	۰/۱۹		

جدول ۷-۱۳- معدن باغک، زون شماره ۱۶

معدن: باغک	تراز: ۱۶۶۰	زون: ۱۶	جنس سنگ: گرانیات آلتیره
پارامترها			پرشدگی: کلسیت
sh.H	۵۵/۹۴		امتیاز
Te	گرانوئیدی		۷
ucs	۱۲۱/۸۴		۶
Mohs.H	۶-۷		۴
j.s	۰/۴۳		۵
j.p	۱۳		۱۰
j.d	۷۱		۱۲
RD _i	۴۴		متوسط
V	۰/۴۵		

جدول ۷-۱۴- معدن باغک، زون شماره ۱۷

معدن: باغک	تراز: ۱۶۶۰	زون: ۱۷	جنس سنگ: مگنتیت کم عیار
پارامترها			پرشدگی: کلسیت
sh.H	۵۶/۷۸		امتیاز
Te	متراکم		۱
ucs	۱۳۰/۷۸		۶
Mohs.H	۶-۷		۴
j.s	۰/۰۴		۱
j.p	۱۱		۱۰
j.d	۲۲		۳
RD _i	۲۵		آهسته- متوسط
V	۰/۱۵		

جدول ۷-۱۵- معدن باغک، زون شماره ۱۸

معدن: باغک	تراز: ۱۶۶۰	زون: ۱۸	جنس سنگ: مگنتیت پرعیار
پارامترها			پرشدگی: کلسیت
sh.H	۵۴/۰۸		امتیاز
Te	متراکم		۱
ucs	۱۰۳/۷۴		۶
Mohs.H	۶-۷		۴
j.s	۱/۶۸		۱۳
j.p	تقریباً بسته		۱۵
j.d	۳		۱
RD _i	۴۰		آهسته- متوسط
V	۰/۳۸		

جدول ۷-۱۶- معدن باغک، زون شماره ۱۹

معدن: باغک	تراز: ۱۶۶۰	زون: ۱۹	جنس سنگ: مگنتیت کم‌عیار
پارامترها			
sh.H	۵۴/۶۵		امتیاز
Te	متراکم		۱
ucs	۱۰۹/۰۵		۶
Mohs.H	۶-۷		۴
j.s	۰/۳۲		۵
j.p	۵		۱۵
j.d	۱۵		۱
RD _i	۳۲		آهسته- متوسط
V	۰/۲۶		

جدول ۷-۱۷- معدن باغک، زون شماره ۲۰

معدن: باغک	تراز: ۱۶۶۰	زون: ۲۰	جنس سنگ: دولومیت
پارامترها			پرشدگی: کلسیت
sh.H	۴۹/۸۶		امتیاز
Te	متراکم		۱
Ucs	۷۰/۵۱		۱۱
Mohs.H	۶-۷		۴
j.s	۰/۱۶		۵
j.p	تقریباً بسته		۱۵
j.d	۵۶		۸
RD _i	۴۴		متوسط
V	۰/۴۵		

جدول ۷-۱۸ معدن باغک، زون شماره ۲۱

معدن: باغک	تراز: ۱۶۶۰	زون: ۲۱	جنس سنگ: مگنتیت پرعیار
پارامترها			پرشدگی: کلسیت
sh.H	۵۵/۸۲		امتیاز
Te	متراکم		۱
Ucs	۱۲۰/۶		۶
Mohs.H	۶-۷		۴
j.s	۰/۰۴		۱
j.p	۱۰		۱۰
j.d	۰		۱
RD _i	۲۳		آهسته-متوسط
V	۰/۱۱		

جدول ۷-۱۹- معدن باغک، زون شماره ۲۳

معدن: باغک	تراز: ۱۶۷۰	زون: ۲۳	جنس سنگ: گرانیت آلتیره خردشده
پارامترها			
sh.H	۵۵/۹۴		امتیاز
Te	گرانوئیدی		۷
ucs	۱۲۱/۸۳		۶
Mohs.H	۶-۷		۴
j.s	۰-۰/۱۵		۱
j.p			۱
j.d	۰-۲۰		۱
RD _i	۲۰		آهسته
V	۰/۰۷		

جدول ۷-۲۰- معدن باغک، زون شماره ۲۴

معدن: باغک	تراز: ۱۶۷۰	زون: ۲۴	جنس سنگ: لیمونیت
پارامترها			
sh.H	-		امتیاز
Te	متراکم		۱
ucs	-		۲۲
Mohs.H	۱-۲		۱۸
j.s			۱۸
j.p			۱۵
j.d			۱۲
RD _i	۸۶		سریع
V	۱/۱۱		

جدول ۷-۲۱- معدن باغک، زون شماره ۲۵

معدن: باغک	تراز: ۱۶۷۰	زون: ۲۵	جنس سنگ: هماتیت
پارامترها			پرشدگی: هماتیت و لیمونیت
sh.H	۴۴/۳۴	امتیاز	
Te	متراکم	۱	
ucs	۴۰/۳۷	۱۶	
Mohs.H	۶-۷	۴	
j.s	۰/۴	۵	
j.p	۳	۱۵	
j.d	۱۰	۱	
RD _i	۴۲	متوسط	
V	۰/۴۱		

جدول ۷-۲۲- معدن باغک، زون شماره ۲۶

معدن: باغک	تراز: ۱۶۷۰	زون: ۲۶	جنس سنگ: لیمونیت
پارامترها			
sh.H	-	امتیاز	
Te	متراکم	۱	
ucs	-	۲۲	
Mohs.H	۱-۲	۱۸	
j.s		۱۸	
j.p		۱۵	
j.d		۱۲	
RD _i	۸۶	سریع	
V	۱/۱۱		

جدول ۷-۲۳- معدن باغک، زون شماره ۲۷

معدن: باغک	تراز: ۱۶۷۰	زون: ۲۷	جنس سنگ: مگنتیت پرعیار
پارامترها			
sh.H	۵۶/۵۸		امتیاز
Te	متراکم		۱
ucs	۱۲۸/۶۱		۶
Mohs.H	۶-۷		۴
j.s	۰-۰/۱۵		۱
j.p			۱
j.d	۷۰-۹۰		۱۲
RD _i	۳۹		آهسته-متوسط
V	۰/۳۶		

جدول ۷-۲۴- معدن باغک، زون شماره ۲۸

معدن: باغک	تراز: ۱۶۷۰	زون: ۲۸	جنس سنگ: گرانیت آلتیره
پارامترها			
sh.H	۵۴/۷۴		امتیاز
Te	گرانوئیدی		۷
ucs	۱۰۹/۹		۶
Mohs.H	۶-۷		۴
j.s	۱-۲		۱۳
j.p			۱
j.d	۱۰		۱
RD _i	۴۱		متوسط
V	۰/۴		

جدول ۷-۲۵- معدن باغک، زون شماره ۲۹

معدن: باغک	تراز: ۱۶۷۰	زون: ۲۹	جنس سنگ: مگنتیت کم عیار
پارامترها			
sh.H	۵۶/۹۵	امتیاز	
Te	متراکم	۱	
ucs	۱۳۲/۶۵	۶	
Mohs.H	۶-۷	۴	
j.s	۰-۰/۱۵	۱	
j.p		۱	
j.d	۷۰-۹۰	۱۲	
RD _i	۳۹	آهسته- متوسط	
V	۰/۳۷		

جدول ۷-۲۶- معدن باغک، زون شماره ۳۰

معدن: باغک	تراز: ۱۶۷۰	زون: ۳۰	جنس سنگ: دولومیت
پارامترها			
sh.H	۵۱/۰۶	امتیاز	
Te	متراکم	۱	
ucs	۷۸/۹۴	۱۱	
Mohs.H	۶-۷	۴	
j.s	۰/۱۵-۰/۵	۵	
j.p		۱	
j.d	۰-۲۰	۱	
RD _i	۳۷	آهسته- متوسط	
V	۰/۳۴		

جدول ۷-۲۷- معدن باغک، زون شماره ۳۱

معدن: باغک	تراز: ۱۶۷۰	زون: ۳۱	جنس سنگ: گرانیات آلتیره
پارامترها			
sh.H	۵۵/۵	امتیاز	
Te	گرانوئیدی	۷	
ucs	۱۱۷/۳۵	۶	
Mohs.H	۶-۷	۴	
j.s	۰-۰/۱۵	۱	
j.p		۱	
j.d	۰-۲۰	۱	
RD _i	۳۴	آهسته-متوسط	
V	۰/۲۹		

۳.۷ جداول مربوط به زون‌های معدن دردوی

در جداول (۷-۲۸) تا (۷-۴۵) نیز، تمام پارامترهای مربوط به سیستم رده‌بندی RD_i آورده شده است. همچنین سختی اشمیت، امتیاز RD_i و مقدار سرعت مربوط به هر زون نیز آمده است.

جدول ۷-۲۸- معدن دروی، زون شماره ۱

معدن: دردوی	تراز: ۱۵۴۰	زون: ۱	جنس سنگ: مگنتیت پرعیار
پارامترها			
sh.H	۵۹/۸	امتیاز	
Te	متراکم	۱	
ucs	۷۳	۱۱	
Mohs.H	۶-۷	۴	
j.s	۰-۰/۱۵	۱	
j.p	بسته	۱۵	
j.d	۵۵-۷۰	۸	
RD _i	۴۰	متوسط	
V	۰/۵		

جدول ۷-۲۹- معدن دروی، زون شماره ۲

معدن: دردوی	تراز: ۱۵۴۰	زون: ۲	جنس سنگ: گرانیات آلتیره
پارامترها			خردشده
sh.H	۴۴/۵۳		امتیاز
Te	گرانوئیدی		۷
ucs	۳۵/۰۸		۱۶
Mohs.H	۶-۷		۴
j.s			۱
j.p			۱
j.d	۰-۲۰		۱
RD _i	۳۰		آهسته-متوسط
V	۰/۳۷		

جدول ۷-۳۰- معدن دروی، زون شماره ۴

معدن: دردوی	تراز: ۱۵۵۰	زون: ۴	جنس سنگ: مگنتیت کم عیار
پارامترها			پرشدگی: کلسیت و هماتیت
sh.H	۴۷/۶۶		امتیاز
Te	متراکم		۱
ucs	۴۰/۷۶		۱۶
Mohs.H	۶-۷		۴
j.s	۱-۲		۱۳
j.p	۲۰		۱۰
j.d	۰-۲۰		۱
RD _i	۴۵		متوسط
V	۰/۵۸		

جدول ۷-۳۱- معدن دروی، زون شماره ۵

معدن: دردوی	تراز: ۱۵۵۰	زون: ۵	جنس سنگ: توف کربنات دار آذرآواری
پارامترها			
sh.H	۵۴/۶۴	امتیاز	
Te	متراکم	۱	
ucs	۵۶/۹۸	۱۱	
Mohs.H	۴/۵-۶	۹	
j.s	۰-۰/۱۵	۱	
j.p	بسته	۱۵	
j.d	۰-۲۰	۱	
RDi	۳۸	آهسته- متوسط	
V	۰/۴۷		

جدول ۷-۳۲- معدن دروی، زون شماره ۶

معدن: دردوی	تراز: ۱۵۵۰	زون: ۶	جنس سنگ: مگنتیت پرعیار
پارامترها			پرشدگی: کلسیت و هماتیت
sh.H	۴۸/۵۸	امتیاز	
Te	متراکم	۱	
ucs	۴۲/۶۰	۱۶	
Mohs.H	۶-۷	۴	
j.s	۰/۱۵-۰/۵	۵	
j.p	۲/۵	۱۵	
j.d	۹	۱	
RDi	۴۲	متوسط	
V	۰/۵۳		

جدول ۷-۳۳- معدن دروی، زون شماره ۷

معدن: دردوی	تراز: ۱۵۵۰	زون: ۷	جنس سنگ: مگنتیت کم عیار (مقداری نرم)
پارامترها			
sh.H	۴۸		امتیاز
Te	متراکم		۱
ucs	۴۱/۴۳		۱۶
Mohs.H	۳-۴/۵		۱۳
j.s	۰/۵-۱		۹
j.p	بسته		۱۵
j.d	۷۰-۹۰		۱۲
RD _i	۶۶		متوسط - سریع
V	۱/۰۷		

جدول ۷-۳۴- معدن دروی، زون شماره ۸

معدن: دردوی	تراز: ۱۵۵۰	زون: ۸	جنس سنگ: گرانیت آلتیره
پارامترها			
sh.H	۴۶/۴۶		امتیاز
Te	گرانوئیدی		۷
ucs	۳۸/۴۸		۱۶
Mohs.H	۶-۷		۴
j.s	۰-۰/۱۵		۱
j.p	بسته		۱۵
j.d	۰-۲۰		۱
RD _i	۴۴		متوسط
V	۰/۵۶		

جدول ۷-۳۵- معدن دروی، زون شماره ۹

معدن: دردوی	تراز: ۱۵۵۰	زون: ۹	جنس سنگ: هماتیت
پارامترها			
sh.H	۳۶/۹۸	امتیاز	
Te	متراکم	۱	
ucs	۲۴/۴۱	۲۲	
Mohs.H	۶-۷	۴	
j.s	۰/۵-۱	۹	
j.p	بسته	۱۵	
j.d	۳۵-۵۵	۶	
RD _i	۵۷	متوسط	
V	۰/۸۲		

جدول ۷-۳۶- معدن دروی، زون شماره ۱۰

معدن: دردوی	تراز: ۱۵۶۰	زون: ۱۰	جنس سنگ: مگنتیت کم عیار
پارامترها			پرشدگی: کلسیت
sh.H	۴۹/۷۷	امتیاز	
Te	متراکم	۱	
ucs	۴۵/۱۱	۱۶	
Mohs.H	۶-۷	۴	
j.s	۰/۵-۱	۹	
j.p	۲	۱۵	
j.d	۳۵-۵۵	۶	
RD _i	۵۱	متوسط	
V	۰/۶۹		

جدول ۷-۳۷- معدن دروی، زون شماره ۱۱

معدن: دروی	تراز: ۱۵۶۰	زون: ۱۱	جنس سنگ: توف کربنات دار آذرآواری
پارامترها			
sh.H	۵۳/۵۴	امتیاز	
Te	متراکم	۱	
ucs	۵۴/۰۵	۱۱	
Mohs.H	۴/۵-۶	۹	
j.s	۱-۲	۱۳	
j.p	بسته	۱۵	
j.d	۸۰	۱۲	
RD _i	۶۱	متوسط - سریع	
V	۰/۹۳		

جدول ۷-۳۸- معدن دروی، زون شماره ۱۲

معدن: دروی	تراز: ۱۵۶۰	زون: ۱۲	جنس سنگ: مگنتیت کم عیار
پارامترها			
sh.H	۵۴/۷	امتیاز	
Te	متراکم	۱	
ucs	۵۷/۱۴	۱۱	
Mohs.H	۶-۷	۴	
j.s	۱/۱۵	۱۳	
j.p	تقریباً بسته	۱۵	
j.d	۷۰	۱۲	
RD _i	۵۶	متوسط	
V	۰/۸		

جدول ۷-۳۹- معدن دروی، زون شماره ۱۳

معدن: دروی	تراز: ۱۵۶۰	زون: ۱۳	جنس سنگ: گرانیت آلتیره
پارامترها			خردشده، پرشدگی: خاک
sh.H	۵۲/۹		امتیاز
Te	گرانوئیدی	۷	
ucs	۵۲/۴۱	۱۶	
Mohs.H	۶-۷	۴	
j.s	۰/۱۵-۱	۱	
j.p		۷	
j.d	۰-۲۰	۱	
RD _i	۳۶		آهسته-متوسط
V	۰/۴۴		

جدول ۷-۴۰- معدن دروی، زون شماره ۱۵

معدن: دروی	تراز: ۱۵۶۰	زون: ۱۵	جنس سنگ: گرانیت آلتیره
پارامترها			خردشده، پرشدگی: خاک
sh.H	۴۷/۶		امتیاز
Te	گرانوئیدی	۷	
ucs	۴۰/۶۴	۱۶	
Mohs.H	۶-۷	۴	
j.s	۰-۰/۱۵	۱	
j.p		۷	
j.d	۰-۲۰	۱	
RD _i	۳۶		آهسته-متوسط
V	۰/۴۴		

جدول ۷-۴۱- معدن دروی، زون شماره ۱۷

معدن: دروی	تراز: ۱۵۷۰	زون: ۱۷	جنس سنگ: گرانیت آلتیره
پارامترها		خردشده، پرشدگی: خاک	
sh.H	۵۰/۳۱	امتیاز	
Te	گرانوئیدی		۷
ucs	۴۶/۲۹	۱۶	
Mohs.H	۶-۷	۴	
j.s	۰-۰/۱۵	۱	
j.p		۷	
j.d	۰-۲۰	۱	
RD _i	۳۶	آهسته- متوسط	
V	۰/۴۴		

جدول ۷-۴۲- معدن دروی، زون شماره ۱۸

معدن: دروی	تراز: ۱۵۷۰	زون: ۱۸	جنس سنگ: مگنتیت کم عیار
پارامترها		پرشدگی: کلسیت	
sh.H	۵۳/۴۵	امتیاز	
Te	متراکم		۱
ucs	۵۳/۸۲	۱۱	
Mohs.H	۶-۷	۴	
j.s	۰/۱۵-۰/۰۵	۵	
j.p	۲/۵	۱۵	
j.d	۹	۱	
RD _i	۳۷	آهسته- متوسط	
V	۰/۴۶		

جدول ۷-۴۳- معدن دروی، زون شماره ۱۹

معدن: دروی	تراز: ۱۵۷۰	زون: ۱۹	جنس سنگ: گرانیت آلتیره
پارامترها		پرشدگی: کلسیت	
sh.H	۴۸/۰۲	امتیاز	
Te	گرانوئیدی	۷	
ucs	۴۱/۴۷	۱۶	
Mohs.H	۶-۷	۴	
j.s	۰/۱۵-۰/۵	۵	
j.p		۱۵	
j.d	۰-۲۰	۱	
RD _i	۴۸	متوسط	
V	۰/۶۳		

جدول ۷-۴۴- معدن دروی، زون شماره ۲۱

معدن: دروی	تراز: ۱۵۸۰	زون: ۲۱	جنس سنگ: توف کربنات دار آذرآواری
پارامترها		خردشده، پرشدگی: خاک	
sh.H	۴۲/۵	امتیاز	
Te	متراکم	۱	
ucs	۳۱/۸۱	۱۶	
Mohs.H	۴/۵-۶	۹	
j.s		۵	
j.p	۲	۷	
j.d	۰-۲۰	۱	
RD _i	۳۹	آهسته- متوسط	
V	۰/۴۸		

جدول ۷-۴۵- معدن دروی، زون شماره ۲۲

معدن: دروی	تراز: ۱۵۸۰	زون: ۲۲	جنس سنگ: گرانیت آلتزه
پارامترها		خردشده	
sh.H	۴۴/۶۵	امتیاز	
Te	گرانوئیدی	۷	
ucs	۳۵/۲۷	۱۶	
Mohs.H	۶-۷	۴	
j.s		۵	
j.p		۱	
j.d	۰-۲۰	۱	
RD _i	۳۴	آهسته-متوسط	
V	۰/۴۲		

۴.۷ جداول مربوط به پارامترهای اندازه‌گیری شده جهت به دست آوردن چگالی

و تخلخل

در جداول (۷-۴۶) و (۷-۴۷)، پارامترهای مختلف مربوط به چگالی و تخلخل هر یک از معادن

باغک و دردوی آورده شده است.

جدول ۷-۴۶- پارامترهای مربوط به چگالی نمونه‌های معدن باغک

نوع سنگ	$M_{sub}(gr)$	$M_{sat}(gr)$	$M_s(gr)$	$V(cm^3)$	$V_v(cm^3)$	$\rho_d(gr/cm^3)$	$n(\%)$
گرانیت آلتزه	۶۸/۹۴۱۰	۱۱۱/۶۱۲۳	۱۱۱/۲۱۴۹	۴۲/۶۷۱۳	۰/۳۹۷۴	۲/۶۰۶۳	۰/۹۳۱۳
مگنتیت پرعیار	۴۶/۷۱۳۷	۵۹/۱۸۱۵	۵۹/۱۰۴۹	۱۲/۴۶۷۸	۰/۰۷۶۶	۴/۷۴۰۶	۰/۶۱۴۴
مگنتیت کم‌عیار	۱۱۱/۱۲۶۲	۱۴۱/۶۱۴۱	۱۴۱/۰۶۱۳	۳۰/۴۸۷۹	۰/۵۵۲۸	۴/۶۲۶۸	۱/۸۱۳۲
دولومیت	۳۰/۶۱۳۱	۴۵/۳۴۰۹	۴۵/۲۵۳۳	۱۴/۷۲۷۸	۰/۰۸۷۶	۳/۰۷۲۶	۰/۵۹۴۸
لیمونیت	۴۲/۵۱۹۵	۶۱/۷۲۸۲	۶۱/۸۸۴۷	۲۶/۲۰۸۷	۶/۸۴۳۵	۲/۳۶۱۲	۲۶/۱۱۱۵

جدول ۷-۴۷- پارامترهای مربوط به چگالی نمونه‌های معدن دزدوی

نوع سنگ	$M_{sub}(gr)$	$M_{sat}(gr)$	$M_s(gr)$	$V(cm^3)$	$V_v(cm^3)$	$\rho_d(gr/cm^3)$	$n(\%)$
گرانیت آلتزه	۷۱/۶۳۳۵	۱۱۵/۶۲۱۲	۱۱۴/۲۲۳۱	۴۳/۹۸۷۷	۱/۳۹۸۱	۲/۵۹۶۷	۳/۱۷۸۴
مگنتیت کم-عیار	۹۸/۹۲۵۷	۱۲۷/۴۴۲۰	۱۲۶/۴۳۰۵	۲۸/۵۱۶۳	۱/۰۱۱۵	۴/۴۳۳۶	۳/۵۴۷۱
هماتیت	۹۴/۰۴۲۵	۱۲۶/۲۵۲۴	۱۲۲/۵۹۳۰	۳۲/۲۰۹۹	۳/۶۵۹۴	۳/۸۰۶۱	۱۱/۳۶۱۱
توف کربنات-دار آذرآواری	۸۸/۶۱۸۵	۱۲۵/۸۶۰۱	۱۲۴/۷۵۰۶	۳۷/۲۴۱۶	۱/۱۰۹۵	۳/۳۴۹۸	۲/۹۷۹۲

که در این جداول:

$$V = \frac{M_{sat} - M_{sub}}{\rho_w} \quad \text{رابطه (۷-۲)}$$

M_{sub} : جرم اشباع غوطه‌ور نمونه (gr)

M_{sat} : جرم نمونه اشباع با سطح خشک (gr)

ρ_w : چگالی آب ($1 gr/cm^3$)

V : حجم کل (cm^3)

$$V_v = \frac{M_{sat} - M_s}{\rho_w} \quad \text{رابطه (۷-۳)}$$

M_s : جرم نمونه خشک (gr)

V_v : حجم منافذ (cm^3)

$$\rho_d = \frac{M_s}{V} \quad \text{رابطه (۷-۴)}$$

ρ_d : چگالی خشک (gr/cm^3)

$$n = \frac{100V_v}{V} \quad \text{رابطه (۷-۵)}$$

n : تخلخل (%)

۵.۷ جداول مربوط به مشخصات نمونه‌های تهیه شده جهت انجام مقاومت

فشاری تک‌محوره و مقاومت بار نقطه‌ای

در جداول (۷-۴۸) تا (۷-۵۱)، تمام مشخصات نمونه‌های آماده‌شده جهت آزمایشات مقاومت

فشاری تک‌محوره و مقاومت بار نقطه‌ای آورده شده است.

جدول ۷-۴۸- مشخصات نمونه‌های معدن باغک جهت اندازه‌گیری مقاومت فشاری تک‌محوره

مشخصات نمونه	گرانیت آلتزه شده	مگنتیت پرعیار	هماتیت	دولومیت
ارتفاع (mm)	۱۴۹/۹۷	۱۲۰/۷۴	۱۲۵/۱۲	۱۴۹/۵
قطر (mm)	۵۴/۱۲	۵۴/۱۲	۵۴/۱۲	۵۴/۱۲
نسبت ارتفاع به قطر	۲/۷۷	۲/۲۳	۲/۳	۲/۷۶
سطح مقطع (mm^2)	۲۳۰۰/۴۱	۲۳۰۰/۴۱	۲۳۰۰/۴۱	۲۳۰۰/۴۱
حداکثر نیروی وارده (N)	۲۱۹۰۰۰	۲۷۵۰۰۰	۱۳۸۰۰۰	۲۳۵۰۰۰
مقاومت فشاری تک‌محوره (MPa)	۹۵/۲	۱۱۹/۵۷	۶۰	۱۰۲/۱۶

جدول ۷-۴۹- مشخصات نمونه‌های معدن دردوی جهت اندازه‌گیری مقاومت فشاری تک‌محوره

مشخصات نمونه	توف کربنات‌دار آذرآواری	مگنتیت کم‌عیار	هماتیت	گرانیت آلتزه
ارتفاع (mm)	۱۴۶/۷۷	۱۲۶/۸۷	۱۴۵/۲	۱۴۸/۷
قطر (mm)	۵۴/۱۲	۵۴/۱۲	۵۴/۱۲	۵۴/۱۲
نسبت ارتفاع به قطر	۲/۷۱	۲/۳۴	۲/۶۸	۲/۷۵
سطح مقطع (mm^2)	۲۳۰۰/۴۱	۲۳۰۰/۴۱	۲۳۰۰/۴۱	۲۳۰۰/۴۱
حداکثر نیروی وارده (N)	۹۷۰۰۰	۷۵۰۰۰	۴۶۰۰۰	۱۰۴۰۰۰
مقاومت فشاری تک‌محوره (MPa)	۴۲/۱۷	۳۲/۶۱	۲۰	۴۵/۲۱

جدول ۷-۵۰- مشخصات نمونه‌های معدن باغک جهت اندازه‌گیری مقاومت بار نقطه‌ای

معدن باغک	گرانیت آلتزه شده		مگنتیت پرعیار		هماتیت		دولومیت	
	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۱	نمونه ۲
$W_1(mm)$	۹۸	۱۲۷	۱۱۳	۱۰۱	۷۵	۱۰۰	۱۲۶	۹۷
$W_2(mm)$	۱۲۳	۱۰۹	۱۱۷	۹۰	۱۰۵	۱۲۵	۱۰۹	۹۸
$W(mm)$	۱۱۰/۵	۱۱۸	۱۱۵	۹۵/۵	۹۰	۱۱۲/۵	۱۱۷/۵	۹۷/۵
$D(mm)$	۷۳	۶۹	۵۶	۵۳	۶۵	۷۵	۷۴	۵۹
$D_e^2(mm^2)$	۱۰۲۷۵/۸	۱۰۳۷۱/۹۷	۸۲۰۳/۸۲	۶۴۴۷/۷۷	۷۴۵۲/۲۳	۱۰۷۴۸/۴۱	۱۱۰۷۶/۴۳	۷۳۲۸/۰۳
D_e	۱۰۱/۳۷	۱۰۱/۸۴	۹۰/۵۷	۸۰/۳	۸۶/۳۳	۱۰۳/۶۷	۱۰۵/۲۴	۸۵/۶
$P(bar)$	۳۱۰	۲۱۰	۳۳۵	۳۰۰	۹۰	۹۵	۲۷۵	۲۲۰
$P(N)$	۳۸۹۳۶	۲۶۳۷۶	۴۲۰۷۶	۳۷۶۸۰	۱۱۳۰۴	۱۱۹۳۲	۳۴۵۴۰	۲۷۶۳۲
$I_s(MPa)$	۳/۷۹	۲/۵۴	۵/۱۳	۵/۸۴	۱/۵۲	۱/۱۱	۳/۱۲	۳/۷۷
F	۱/۳۷	۱/۳۸	۱/۳۱	۱/۲۴	۱/۲۸	۱/۳۹	۱/۴	۱/۲۷
I_{s50}	۵/۲۱	۳/۵	۶/۷	۷/۲۳	۱/۹۴	۱/۵۴	۴/۳۶	۴/۸
$\delta_c(MPa)$	۱۱۹/۷۸	۸۰/۵۶	۱۵۴/۱۲	۱۶۶/۳۵	۴۴/۶۱	۳۵/۴۵	۱۰۰/۲۵	۱۱۰/۴۷
$\delta_c(MPa)$	۱۰۰/۱۷		۱۶۰/۲۳		۴۰/۰۳		۱۰۵/۳۶	

جدول ۷-۵۱- مشخصات نمونه‌های معدن دردوی جهت اندازه‌گیری مقاومت بار نقطه‌ای

معدن دردوی	توف کربنات- دار آذرآواری		مگنتیت کم‌عیار		هماتیت		گرانیت آلتزه شده	
	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۱	نمونه ۲
$W_1(mm)$	۱۰۹	۱۲۶	۶۱	۱۲۰	۶۵	۹۵	۹۵	۱۲۸
$W_2(mm)$	۷۸	۱۰۵	۹۵	۱۳۵	۹۶	۱۱۴	۱۱۷	۱۰۲
$W(mm)$	۹۳/۵	۱۱۵/۵	۷۸	۱۲۷/۵	۸۰/۵	۱۰۴/۵	۱۰۶	۱۱۵
$D(mm)$	۸۵	۶۸	۴۷	۴۶	۷۳	۹۵	۶۸	۷۵
$D_e^2(mm^2)$	۱۰۱۲۴/۲	۱۰۰۰۵/۱	۴۶۷۰/۰۶	۷۴۷۱/۳۴	۷۴۸۵/۹۹	۱۲۶۴۶/۵	۹۱۸۲/۱۶۶	۱۰۹۸۷/۲۶
$D_e(mm)$	۱۰۰/۶۲	۱۰۰/۰۳	۶۸/۳۴	۸۶/۴۴	۸۶/۵۲	۱۱۲/۴۶	۹۵/۸۲	۱۰۴/۸۲
$P(bar)$	۱۱۰	۱۶۰	۷۰	۸۰	۴۵	۸۰	۱۵۵	۱۳۵
$P(N)$	۱۳۸۱۶	۲۰۰۹۶	۸۷۹۲	۱۰۰۴۸	۵۶۵۲	۱۰۰۴۸	۱۹۴۶۸	۱۶۹۵۶
$I_s(MPa)$	۱/۳۶	۲/۰۱	۱/۸۸	۱/۳۴	۰/۷۶	۰/۷۹	۲/۱۲	۱/۵۴
F	۱/۳۷	۱/۳۷	۱/۱۵	۱/۲۸	۱/۲۸	۱/۴۴	۱/۳۴	۱/۴
I_{s50}	۱/۸۷	۲/۷۴	۲/۱۷	۱/۷۲	۰/۹۷	۱/۱۴	۲/۸۴	۲/۱۵
$\delta_c(MPa)$	۴۳	۶۳/۱۱	۴۹/۸۴	۳۹/۵۷	۲۲/۲۳	۲۶/۳۲	۶۵/۳۵	۴۹/۵۳
$\delta_c(MPa)$	۵۳/۰۶		۴۴/۷		۲۴/۳		۵۷/۴۴	

همچنین روابط (۶-۷) تا (۱۱-۷)، که جهت به دست آوردن بعضی از پارامترها استفاده شده است، آورده شده است.

در جداول مربوط به مقاومت بار نقطه‌ای از روابط زیر استفاده شده است:

$$W = \frac{w_1 + w_2}{2} \quad \text{رابطه (۶-۷)}$$

$W(mm)$: کوچکترین بعد بلوک یا کلوخه در جهت عمود بر محور بارگذاری (میانگین عرض نمونه)

$$D_e^2 = \frac{4 \times w \times D}{\pi} \quad \text{رابطه (۷-۷)}$$

$D_e(mm)$: قطر معادل مغزه

$D(mm)$: فاصله بین نقاط تماس فکها

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad \text{رابطه (۸-۷)}$$

$I_s(MPa)$: شاخص مقاومت بار نقطه‌ای تصحیح نشده

$P(N)$: بار در لحظه گسیختگی

$D_e(mm)$: قطر معادل مغزه

$$I_{s50} = F \times I_s \quad \text{رابطه (۹-۷)}$$

$I_{s50}(MPa)$: شاخص مقاومت بار نقطه‌ای تصحیح نشده

F : ضریب تصحیح اندازه

$$F = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0.45} \quad \text{رابطه (۱۰-۷)}$$

$$\delta_c(MPa) = 23 \times I_{s50} \quad \text{رابطه (۱۱-۷)}$$

$\delta_c(MPa)$: مقاومت فشاری تک‌محوره

Abstract

According to high costs and expensive machines, understanding all of the parameters effective in drilling and optimizing them, make the condition suitable for optimized exploitation. Realization the drilling environment and rock mass properties contribute to selection of drilling type, determination of drilling machines, assessment of mine production rate and prediction of drilling speed. Many factors have hand in drilling. Some of them have direct relationship with drillability and some have inverse. Sangan iron ore mines locate in southeastern of Khorasan-e-razavi province. To determine the drillability in these mines, two of active mines of this complex named Baghak and Dardway have been selected. To do the research in these mines, at first level contours of each mine have been classified according to parameters of RDi classification system, so that Baghak mine divides into 31 zones and Dardway mine divides into 22 zones. Thus, in each mine, 4 zones have been selected for sampling and recording of drilling speed. Uniaxial compressive strength, point load strength, density and porosity of each sample have been determined. Moreover, texture, Mohs Hardness, Schmidt hardness, spacing, slope and filling of the joints have been determined in all zones. Since one of an important parameters in RDi classification system is uniaxial compressive strength and determination of this parameter for all 53 zones is so expensive, so in this study Schmidt hardness at first has been determined for all zones and then after making relationship between uniaxial compressive strength and Schmidt hammer and between point load strength and Schmidt hammer in 4 selective zones in each mines, it was obtained that correlation coefficient between point load strength and Schmidt hammer in both mines are higher than correlation coefficient between uniaxial compressive strength and Schmidt hammer in determined zones. By relationship between point load strength and Schmidt hammer, compressive strength of all zones that is one of the input parameters of RDi classification system, has been calculated. Moreover, after calculation of the Rock Drillability Index (RDi) and recoding the drilling speed in selective zones, relation between RDi and drilling speed in each mine has been obtained separately. Finally, after calculation of the RDi for all zones and by relation between RDi and drilling speed, speed in all zones of both mines has been obtained. According to the results, drilling speed can be determined before drilling by RDi classification

system in terms of quality and quantity and by information of each zone condition, drilling should be started.

Keywords: Rock mass engineering classification, Drillability, Sangan iron mines.



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics

Evaluation of Sangan iron mines drillability by rock mass classification

Reza Farkhari

Supervisors:

Dr. Hossein Mirzaii Nasirabad

Dr. Farhang Sereshki

Advisors:

Abdorraoof Mashhoor

**Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirements for the Degree of Master of Science (M.Sc.)**

In

Mining engineering

September 2012