



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گزارش نهایی طرح پژوهشی

**”بررسی پارامترهای مؤثر در سرعت حفاری و ارائه سیستم
طبقه‌بندی جدید برای تعیین
اندیس قابلیت نفوذ در سنگ‌ها (RPI)”**

مجری طرح:

دکتر محمد عطائی

(دانشیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک)

همکار اصلی طرح:

سید هادی حسینی

(دانشجوی دکتری مهندسی استخراج معدن)

تابستان ۱۳۸۷

این طرح با استفاده از اعتبارات پژوهشی دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شده‌است و تاریخ‌های

تصویب و خاتمه آن به ترتیب ۸۶/۹/۱۱ و ۸۷/۴/۹ می‌باشد.

چکیده

در این پژوهش به منظور بررسی پارامترهای مؤثر بر سرعت حفاری ابتدا سابقه علمی موضوع با استفاده از مقالات و متون علمی موجود از دهه ۱۹۵۰ الی سال ۲۰۰۸ مورد بررسی قرار گرفته و مهمترین پارامترهای فنی مؤثر شامل مشخصات ماشین حفاری و نیز مشخصات مهندسی سنگ‌ها در حفاری شناسایی گردیده‌اند. در ادامه با توجه به کمبود اطلاعات علمی در مورد حفاری ضربه‌ای-دورانی پنوماتیکی چکش بالا در سطح بین‌المللی، تأثیر پارامترهای مذکور بر روی سرعت حفاری ضربه‌ای در ۱۰ نوع از معادن مختلف شمالغرب کشور بررسی و آزمایش گردیده‌اند. سپس با توجه به تعدد پارامترهای مربوط به سنگ که در سرعت حفاری مؤثرند سعی گردید تا یک سیستم طبقه‌بندی مهندسی سنگ برای ارزیابی قابلیت نفوذ در سنگ ارائه شود. برای این منظور از کارشناسان مربوطه داخل و خارج از کشور در مورد ضریب اهمیت هر یک از پارامترهای دخیل در قابلیت نفوذ سنگ‌ها نظرسنجی به عمل آمده است. سپس جهت ارائه یک سیستم طبقه‌بندی کمی، بر اساس پارامترهای مؤثر در قابلیت نفوذ سنگ‌ها، نظرات کیفی متخصصان مذکور توسط روش تحلیل سلسله مراتبی تجزیه و تحلیل شده و مهمترین پارامترها از نظر کمی انتخاب شده‌اند. با دستیابی به وزن هر پارامتر، سیستم طبقه‌بندی جدیدی به صورت کمی و بر مبنای پارامترهای مهم پیشنهاد گردیده است. این سیستم که اندیس قابلیت نفوذ در سنگ نامیده شده (RPI) در مجموع به سنگ‌ها امتیازی از ۱۰۰-۱۰/۲۵ اختصاص می‌دهد. سپس قابلیت نفوذپذیری سنگ‌ها در پنج کلاس خیلی آسان، آسان، متوسط، سخت و خیلی سخت طبقه‌بندی می‌شوند.

پس از پیشنهاد سیستم طبقه‌بندی، برای ارزیابی توانایی و کارایی روش، نمونه‌های سنگ جمع‌آوری شده از ۱۰ معدن مختلف شمالغرب کشور مورد ارزیابی و مطالعه قرار گرفتند. بعد از اتمام مطالعات نمونه‌ها، سنگ‌ها از نظر پارامترهای موجود در سیستم طبقه‌بندی امتیازدهی شده و کلاس هر کدام از سنگ‌ها در سیستم پیشنهادی RPI تعیین شد. نمونه‌هایی از سنگ‌های مورد آزمایش در ابعاد $30 \times 40 \times 30$ سانتی‌متر به معدن سنگ آهک سیمان صوفیان واقع در ۳۰ کیلومتری تبریز منتقل شده و در آن محل سه عدد چال تحقیقاتی هر یک به عمق ۱۰ سانتی‌متر با سیستم حفاری ضربه‌ای-دورانی پنوماتیکی چکش بالا با قطر ۳ اینچ حفر گردید. در پایان امتیاز کسب شده توسط هر سنگ در سیستم RPI با سرعت خالص به دست آمده در ماده سنگ‌های مورد آزمایش رگرسیون شده و رابطه ریاضی بین این دو پارامتر ارائه شده است.

۲۹	۲-۲-۱- دور مته و تأثیر آن در سرعت حفاری
۳۳	۱-۲-۲-۱- تأثیر ترکیب بار روی مته و دور مته در سرعت حفاری
۳۴	۳-۲-۱- هوای فلاشینگ و تأثیر آن در سرعت حفاری
۳۷	۴-۲-۱- مشخصات سرمته و تأثیر آن در سرعت حفاری
۳۷	۱-۴-۲-۱- تأثیر قطر سرمته بر سرعت حفاری
۳۹	۲-۴-۲-۱- تأثیر نوع و شکل سرمته بر سرعت حفاری
۴۰	۱-۲-۴-۲-۱- سرمته‌های مورد استفاده در روش ضربه‌ای- دورانی
۴۲	۲-۲-۴-۲-۱- سرمته‌های مورد استفاده در روش دورانی
۴۷	۳-۲-۴-۲-۱- سرمته‌های مورد استفاده در حفاری ضربه‌ای

فصل دوم: بررسی تأثیر مشخصات توده سنگ بر سرعت حفاری

۵۴	۱-۲- مشخصات فیزیکی و مینرالوژیکی سنگ‌ها
۵۴	۱-۱-۲- چگالی
۵۶	۲-۱-۲- بافت
۵۷	۱-۲-۱-۲- ضریب بافت
۶۲	۳-۱-۲- درجه سیمان‌شدن و نوع ماتریکس
۶۳	۴-۱-۲- تخلخل
۶۷	۲-۲- مشخصات مکانیکی سنگ‌ها
۶۷	۱-۲-۲- مقاومت فشاری تک‌محوری
۷۳	۲-۲-۲- مقاومت کششی
۷۵	۳-۲-۲- سختی
۷۸	۴-۲-۲- ساینده‌گی
۸۷	۱-۴-۲-۲- تقسیم بندی سنگ‌ها بر اساس شاخص‌های حفاری
۸۷	۱-۱-۴-۲-۲- سنگ‌های آذرین
۸۹	۲-۱-۴-۲-۲- سنگ‌های متامورفیک

۹۰	..... ۳-۱-۴-۲-۲ سنگ‌های رسوبی
۹۱	..... ۵-۲-۲ خواص الاستیسیته و پلاستیسیته
۹۲	..... ۳-۲ مشخصات ساختاری توده سنگ‌ها
۹۵	..... ۱-۳-۲ تأثیر گسل خوردگی بر سرعت حفاری
۹۵	..... ۲-۳-۲ تأثیر درزه‌داری و مشخصات درزه‌ها بر سرعت حفاری
۹۵	..... ۱-۲-۳-۲ تأثیر فاصله‌داری درزه‌ها بر سرعت حفاری
۹۷	..... ۲-۲-۳-۲ تأثیر شیب‌داری درزه‌ها بر سرعت حفاری
۱۰۰	..... ۳-۲-۳-۲ تأثیر دهانه و پرکننده درزه‌ها بر سرعت حفاری

فصل سوم: مطالعات آزمایشگاهی و بررسی ارتباط مشخصات سنگ با سرعت حفاری

۱۰۳	..... ۱-۳ جمع‌آوری نمونه از معادن
۱۰۳	..... ۲-۳ آزمایش‌های مکانیک سنگ
۱۰۵	..... ۳-۳ آزمایش آنالیز شیمیایی (XRF)
۱۰۶	..... ۴-۳ مطالعات کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی
۱۱۰	..... ۵-۳ آزمایش‌های حفاری
۱۱۳	..... ۶-۳ بحث و تحلیل ریاضی نتایج مطالعات آزمایشگاهی

فصل چهارم: ارائه سیستم طبقه‌بندی جدید برای پیش‌بینی قابلیت نفوذ در سنگ

۱۲۴	..... ۱-۴ روش تحلیل سلسله مراتبی
۱۲۵	..... ۱-۱-۴ ساختن سلسله مراتبی
۱۲۵	..... ۲-۱-۴ محاسبه وزن عناصر در AHP
۱۲۷	..... ۳-۱-۴ محاسبه نرخ ناسازگاری
۱۲۸	..... ۲-۴ ارائه سیستم طبقه بندی جدید
۱۲۹	..... ۱-۲-۴ نظرسنجی از متخصصان علم حفاری
۱۳۶	..... ۲-۲-۴ یافتن وزن پارامترها با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی

- ۱۳۷.....۳-۲-۴ انتخاب پارامترهای مورد استفاده در طبقه‌بندی
- ۱۳۹.....۱-۳-۲-۴ مقاومت فشاری تک‌محوری
- ۱۳۹.....۲-۳-۲-۴ فاکتور سایش شیمازک
- ۱۳۹.....۳-۳-۲-۴ سختی
- ۱۴۰.....۴-۳-۲-۴ بافت
- ۱۴۰.....۵-۳-۲-۴ مدول الاستیسیته (مدول یانگ)
- ۱۴۱.....۴-۲-۴ طبقه‌بندی هر یک از پارامترهای مورد استفاده در طبقه‌بندی
- ۱۴۱.....۱-۴-۲-۴ مقاومت فشاری تک‌محوری
- ۱۴۱.....۲-۴-۲-۴ فاکتور سایش شیمازک
- ۱۴۲.....۳-۴-۲-۴ سختی
- ۱۴۲.....۴-۴-۲-۴ بافت و اندازه دانه‌ها
- ۱۴۳.....۵-۴-۲-۴ مدول الاستیسیته (مدول یانگ)
- ۱۴۳.....۵-۲-۴ سیستم طبقه‌بندی کلی و پیش‌بینی قابلیت حفاری نفوذ در سنگ
- ۱۴۴.....۶-۲-۴ مطالعات موردی برای تعیین قابلیت نفوذ در سنگ

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

- ۱۴۷.....۱-۵ نتیجه‌گیری
- ۱۴۸.....۲-۵ پیشنهادات

مراجع

- ۱۴۹.....مراجع

پیوست

- ۱۵۲.....پیوست

تقدیر و تشکر

اتمام تحقیق حاضر و دستیابی به نتایج بسیار خوب و مطلوب، نتیجه همکاری صمیمانه معدنکاران عزیز است که با شوق برادرانه و علاقه‌ای بی نظیر امکان آن را فراهم آوردند تا محقق این اثر بتواند به راحتی در معادن مورد مطالعه در این طرح به فعالیت پژوهشی بپردازد. لذا بر خود وظیفه می‌دانیم از کلیه مدیران و پرسنل معدن مس سونگون، معدن اوچ مازی مراغه، معدن آهک سیمان صوفیان، معدن تراورتن خلخال، معدن تراورتن سردارآباد، معدن سیلیس خواجه مرجان و معدن نفلین سینیت رزگاه سراب به حد کمال تشکر و قدردانی نمائیم.

از مدیریت محترم امور معادن کارخانجات سیمان صوفیان جناب آقای مهندس رضا محرم‌پور به دلیل همکاری صمیمانه و لطف بی پایان‌شان سپاسگزاریم.

مقدمه

حفاری به عنوان یک عملیات مهندسی، در زمینه‌های مختلف فنی و مهندسی از جمله مهندسی معدن، مهندسی نفت، عمران، آب‌های زیرزمینی ... کاربردهای وسیع و تعیین کننده‌ای دارد. بسته به روش حفاری و نوع ماشین‌آلات به کار برده شده، حجم عملیات انجام گرفته در زمینه‌های مختلف متفاوت از همدیگر می‌باشد. حفاری با قطرهای ۰/۵ تا ۲۴ اینچ و عمق‌های یک متر تا چند هزار متر، گستره وسیع عملیات حفاری و تنوع کاربردهای آن را به خوبی آشکار می‌سازد.

در معدن‌کاری اعم از روباز یا زیرزمینی، حفاری به عنوان اولین مرحله عملیات استخراج نقش بسیار تعیین کننده‌ای بر سایر مراحل استخراج دارد. 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. فرآیند و عملیات حفاری همواره تحت تأثیر شرایط محیط سنگی و نیز مشخصات دستگاه قرار می‌گیرد. به اعتقاد کلیه محققان، تمامی پارامترهای مؤثر بر سرعت حفاری را می‌توان در سه گروه به شرح ذیل ارزیابی و طبقه بندی نمود (Thuro, 1997):

الف) مشخصات فنی و اجرایی دستگاه حفاری

ب) مشخصات فیزیکی و ژئومکانیکی توده‌سنگ

ج) عوامل خدماتی و عملیاتی.

از میان سه گروه فوق، دو مورد اول از اهمیت بیشتری برخوردارند. پارامترهای دستگاه عموماً به نام "پارامترهای قابل کنترل" و یا "پارامترهای وابسته" خوانده می‌شوند. گروه دوم که عموماً نشان دهنده کیفیت ماده سنگ و توده سنگ از نظر قابلیت حفاری می‌باشد، پارامترهای "غیر قابل کنترل" و یا "پارامترهای مستقل" خوانده می‌شوند. در مجموع می‌توان با شناخت، ارزیابی و کنترل پارامترهای مذکور، راندمان، سرعت و هزینه حفاری را کنترل نموده و استهلاک ماشین‌آلات را به حداقل رسانید.

فصل اول این تحقیق شامل مرور اجمالی و بررسی پارامترهای عملیاتی دستگاه حفاری مؤثر بر سرعت حفاری می‌باشد. در این فصل روابط کیفی و کمی بین پارامترهای دستگاه و سرعت حفاری مورد بررسی قرار گرفته است.

در فصل دوم، تأثیر پارامترهای مربوط به مشخصات فیزیکی و ژئومکانیکی توده سنگ بر سرعت حفاری مورد بحث قرار گرفته است. برای این منظور با استفاده از بیش از ۵۰ منبع علمی معتبر بین‌المللی و با مرور کارهای تحقیقاتی ارزنده در کشورهای ترکیه، آلمان، هندوستان، انگلستان و سایر کشورها، کلیه این عوامل به طور مناسبی شناسایی، طبقه‌بندی و تشریح شده و روابط کیفی و کمی ارائه شده بین پارامترهای مذکور و سرعت حفاری منعکس گردیده است.

در فصل سوم، مطالعات آزمایشگاهی جهت بررسی ارتباط کمی مشخصات سنگ با سرعت حفاری ضربه‌ای-دورانی پنوماتیکی چکش بالا انجام گرفته است. نتایج این مطالعات به صورت ارتباط میان پارامترهای مکانیکی و کانی‌شناسی سنگ و سرعت حفاری ارائه گردیده است.

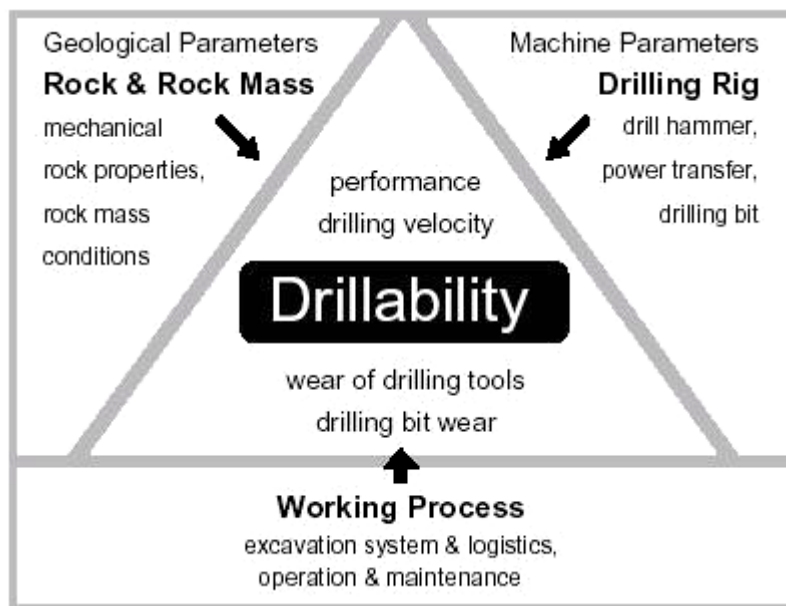
در فصل چهارم، به منظور ارائه یک رهیافت جدید برای ارزیابی قابلیت حفاری سنگ‌ها، یک سیستم طبقه‌بندی جدید با نام اندیس قابلیت نفوذ در سنگ (RPI) ارائه شده است.

در فصل پنجم، با توجه به تمامی مطالعات انجام شده در طی این پژوهش، نتایج بدست آمده از مطالعات آزمایش‌گاهی و صحرایی ارائه گردیده و پیشنهاداتی جهت مطالعات آینده ارائه شده است.

فصل اول

بررسی تأثیر مشخصات دستگاه بر سرعت حفاری

دستگاه حفاری به عنوان منبع تأمین انرژی مکانیکی، از اهمیت بسیار زیادی در فرآیند حفاری برخوردار است. تاکنون در تمامی مطالعات منتشر شده در منابع علمی معتبر پارامترهای عملیاتی دستگاه در کنار مشخصات توده سنگ مورد تأکید بوده است. تورو^۱ در سال ۱۹۹۷ ارتباط پارامترهای مؤثر در حفاری و نیز قابلیت حفاری را مطابق شکل ۱-۱ یک مثلث به صورت پیشنهاد داده است.



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

میزان اهمیت دستگاه و نیز شدت تأثیر پارامترهای مختلف عموماً به روش حفاری مورد استفاده بستگی دارد زیرا مکانیزم خردایش سنگ در روش‌های مختلف با یکدیگر متفاوت می‌باشد. در ادامه ابتدا روش‌های حفاری به صورت اجمالی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۱- روش‌های حفاری در معادن روباز

۱-۱-۱- روش دورانی

حفاری دورانی یکی از پرکاربردترین روش‌های مرسوم در معدن‌کاری روباز می‌باشد. در این روش بر حسب مشخصات مهندسی سنگ‌های موجود از دو خانواده سرمته مختلف استفاده می‌شود. لذا حفاری دورانی نیز بر حسب نوع سرمته به دو نوع مختلف تقسیم‌بندی می‌شود (Jimeno, 1995):

الف) حفاری دورانی با سرمته‌های سه مخروطی

^۱ . Thuro

ب) حفاری دورانی با عمل برش (سرمت‌های تیغه‌ای)

۱-۱-۱-۱ حفاری دورانی با سرمت‌های سه مخروطی

تا سال ۱۹۴۹ تقریباً تمامی چالها با دستگاههای حفاری ضربه‌ای- چرخشی حفر می‌شد و تنها در سنگ‌های بسیار نرم از دستگاه‌های حفاری چرخشی با سرمت‌های تیغه‌ای استفاده می‌شده است. آغاز کار معادن بزرگ روباز زغال در آمریکا با روباره‌های بیش از ۴۰ متر و حضور مواد منفجره ارزان قیمت و با راندمان انرژی بالا همچون آنفو در بازار، اتفاقی بود که سازندگان دستگاه‌های حفاری را برای طراحی تجهیزاتی با ظرفیت بالا که دارای سرعت نفوذ بالایی باشند، برانگیخت. مقارن با این رویدادها، سرمت‌های سه مخروطی که از سال ۱۹۰۷ در عملیات‌های نفتی استفاده می‌شد، و همچنین استفاده از هوای فشرده برای فلاشینگ خرده‌های حفاری نیز توسعه یافت.

قطر چال‌ها از ۲ تا ۱۷/۵ اینچ (۵۰ تا ۴۴۴ میلی‌متر) متغیر بود. هر چند در معدن‌کاری سطحی رایج‌ترین قطر‌ها از ۶ تا ۱۲/۲۵ اینچ (۱۵۲ تا ۳۱۱ میلی‌متر) تغییر می‌کند. استفاده از قطرهای بالاتر به معادن با تولید بالا محدود می‌شود و قطرهای کمتر از ۶ اینچ نیز به دلیل سایش سرمت‌های سه‌مخروطی در اثر کاهش اندازه یاتاقان‌ها تقریباً هرگز به کار نمی‌روند.

این روش حفاری بسیار گسترده می‌باشد و دامنه وسیعی از سنگ‌ها را پوشش می‌دهد که از سنگ‌های بسیار نرم تا سنگ‌های بسیار سخت را شامل می‌شود.

با این که حفاری چرخشی با سرمت‌های سه مخروطی گسترده‌ترین روش حفاری می‌باشد ولی مطالب این بخش به تشریح دستگاه‌های حفاری بزرگ که قادر به اعمال نیروی تغذیه بالایی هستند می‌پردازد. با در نظر گرفتن این نکته که دستگاه‌های حفاری با سرمت‌های تیغه‌ای دارای طرح ساده‌تر و اندازه کوچکتری هستند، یک دستگاه حفاری چرخشی مطابق شکل ۱-۲ از قسمت‌های زیر تشکیل شده است: یک منبع نیرو، یک رشته لوله یک‌پارچه یا تکه‌تکه که وظیفه انتقال بار و چرخش را بر عهده دارند، هوای فشرده برای فلاشینگ، یک سرمت با دندان‌های فولادی یا دکمه‌های کاربید تنگستن. این قسمت‌ها به همان ترتیب فوق روی سنگ قرار می‌گیرند.

حفاری توسط عمل برش به وسیله سرمته‌های کاربرد تنگستنی یا مواد دیگری مثل الماس مصنوعی، پلی کریستالین انجام می‌شود. این سرمته‌ها از نظر شکل و زوایا متنوع بوده و آن‌ها را می‌توان به انواع زیر تقسیم بندی کرد:

الف) سرمته‌های دو پر تیغه‌ای با قطرهای ۳۶ تا ۵۰ میلی‌متر

ب) سرمته‌های سه یا چهار پر تیغه‌ای با قطرهای ۵۰ تا ۱۱۵ میلی‌متر

ج) سرمته‌های سه تیغه‌ای با تیغه‌های قابل تعویض با قطر ۱۶۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر

شکل هندسی و مشخصات فنی این سرمته‌ها در بخش مربوط به تأثیر سرمته بر سرعت حفاری به تفصیل مورد بحث قرار می‌گیرد.

اساس حفاری با عمل برش یک سرمته تیغه‌ای چرخشی براساس نظریه فیش^۲ به صورت زیر است (Jimeno 1995):

۱. سیکل حفاری بلافاصله پس از شکل گرفتن یک شکستگی بزرگ آغاز می‌شود. در ابتدا تغییر شکل‌های الاستیک در اثر تنش‌های ناشی از کج‌شدگی زاویه‌ای سرمته و کرنش‌های پیچشی میله حفاری، در سنگ رخ می‌دهد.

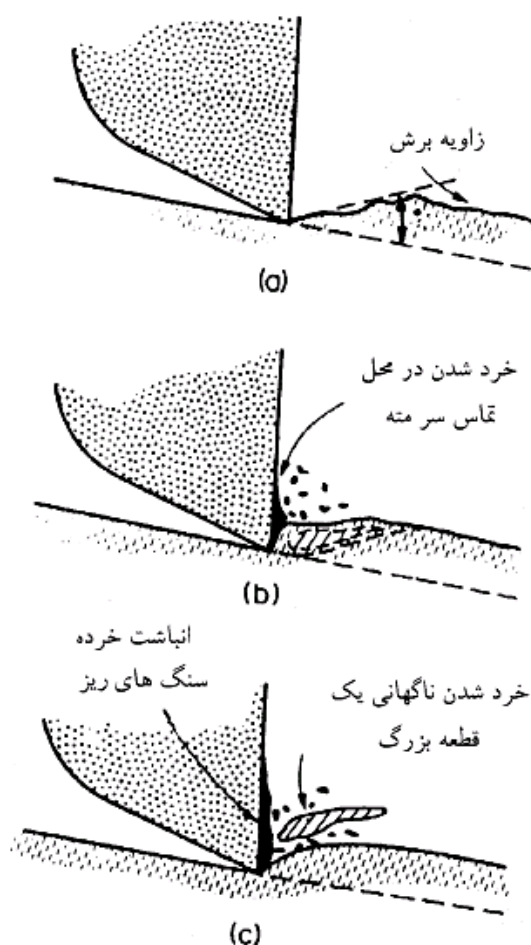
۲. انرژی کرنشی در نتیجه ضربات لبه برنده در سطح آزاد شده و شکستگی زیری تشکیل می‌شود.

۳. شکستگی‌های مزبور رفته رفته زیادتر می‌شوند و در یک لحظه لبه برنده به سنگ سالم گیر کرده و بر اثر بالا رفتن تمرکز تنش تکه نسبتاً بزرگی از سنگ کنده شده و بدین ترتیب یک سیکل جدید شروع می‌شود (شکل ۱-۳).

۱-۱-۳- مکانیزم حفاری دورانی

در ماشین‌های حفاری دورانی اولاً مته و لوله هر دو می‌چرخند ثانیاً انرژی که از طریق لوله و مته به سنگ وارد و موجب حفر چال می‌شود، ترکیبی است از انرژی چرخشی و فشار روی مته. در این ماشین‌ها مته و لوله به طور خودکار نمی‌چرخند بلکه چرخش آن‌ها ناشی از انرژی است که از صفحه دوار به لوله و مته منتقل می‌شود. به عبات دیگر، با چرخش صفحه دوار، لوله و مته نیز می‌چرخند و به همین دلیل به ماشین نام ماشین دورانی اطلاق می‌شود. تنشی که از طریق مته به سنگ وارد می‌آید از نوع مماسی بوده و بدین

جهت نیز مقاومت برشی سنگ‌ها در این روش چالزنی اهمیت دارد و سنگ‌ها از طریق خراش‌برداری و تراشیدگی به صورت قطعات ریز بین ۰/۱۲۵ تا یک اینچ در می‌آیند.



شکل ۱-۳- مراحل برش سنگ در حفاری دورانی توسط سر مته تیغه‌ای (Jimeno et al, 1995)

سرعت حفاری در این نوع سیستم عمدتاً به نوع مته، نوع سنگ، مقدار انرژی چرخشی و بار پشت مته بستگی دارد. در طبقات کم مقاومت از نوع سر مته تیغه‌ای و در سنگ‌های نیمه سخت از نوع مته مخروطی و در سنگ‌های سخت از نوع دکمه‌ای استفاده می‌شود. سیستم حفاری دورانی معمولاً در معادن برای حفر چال‌های با قطر ۶ الی ۱۷ اینچ (۱۵۰ تا ۴۳۱/۸ میلی‌متر) و عمق بین ۹ تا ۱۸ متر به کار برده می‌شود.

۱-۱-۴- موارد استفاده از سیستم‌های حفاری دورانی

۱- ماشین‌های حفاری دورانی برای انواع سنگ‌ها از نظر درجه سختی مناسب بوده و بازدهی قابل ملاحظه‌ای دارند.

۲- این روش حفاری بالاخص در معادن روباز که قطر چال‌ها معمولاً بین ۶ تا ۱۵ اینچ هستند، نسبت به روش ضربه‌ای به دلیل سرعت حفاری بیشتر و هزینه کمتر اولویت دارد.

۳- در معادنی که مقدار تولید بالاست روش دورانی مناسب‌تر از روش ضربه‌ای است.

۴- به دلیل سرعت حفاری زیادتر، سیستم‌های حفاری دورانی توانایی حفر چال‌های انفجاری بیشتری دارند بدین دلیل در معادنی که مقدار تولید زیاد است، این روش اولویت دارد.

۵- سیستم حفاری دورانی برای چال‌های عمیق و یا نیمه عمیق به دلیل کوتاه بودن زمان حفاری و پایین‌تر بودن هزینه آن، از اولویت انتخاب برخوردار است.

۱-۱-۱-۵- مواردی که روش چرخشی توصیه نمی‌شود

۱- هزینه اولیه سیستم‌های دورانی نسبت به سیستم‌های حفاری ضربه‌ای زیادتر است. بنابراین برای معادن کوچک از نظر مقدار ذخیره و تولید این نوع ماشین‌ها توصیه نمی‌شوند.

۲- عمدتاً سیستم‌های حفاری دورانی برای چال‌های با قطر بیش از ۴ اینچ طراحی شده‌اند. لذا برای چال‌های با قطر کم این نوع ماشین‌ها استفاده کمتری دارند.

۱-۱-۲- روش حفاری ضربه‌ای

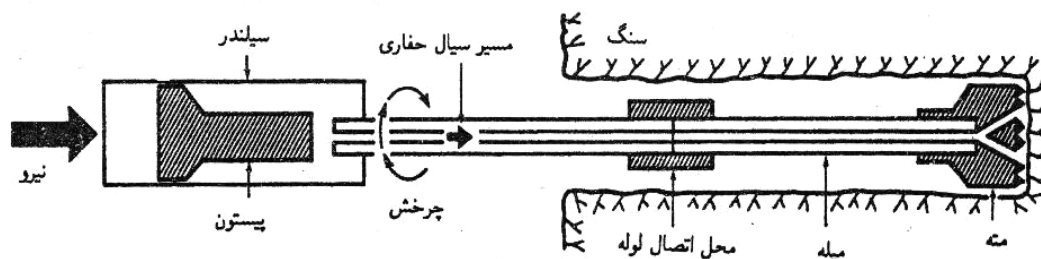
۱-۱-۲-۱- چکش‌های حفاری

ابتدایی‌ترین نوع سیستم‌های ضربه‌ای، چکش‌های حفاری هستند که عمدتاً برای حفاری چال‌های با قطر کم (یک تا دو اینچ) به کار برده می‌شوند. انرژی این نوع ماشین‌ها توسط هوای فشرده تأمین و معمولاً از آن‌ها برای حفر چال‌های با عمق کم استفاده می‌شود. چون جهت چالهایی که با این سیستم حفاری می‌شوند به سمت پایین است، لذا به آنها سینکر^۳ نیز می‌گویند.

طبقه‌بندی چکش‌های حفاری بر حسب وزن آنها است که بین ۱۳ تا ۱۴ کیلوگرم متغیراند. بخش‌های عمده سیستم عبارتند از: چکش یا ضربه زن (به سیلندر و پیستون داخل آن اصطلاحاً در حفاری ضربه‌ای چکش یا ضربه زن گفته می‌شود)، میله حفاری و مته. هنگامی که هوای فشرده در سیلندر توسط پیستون به جریان در می‌آید آن را به سر میله می‌دمد، جلو و عقب رفتن پیستون داخل سیلندر با سرعتی معادل ۲۲۰۰ بار در هر دقیقه امکان پذیر است. به عبارت دیگر در هر دقیقه تا ۲۲۰۰ بار عمل دمیدن هوا یا ضربه به سر میله صورت می‌گیرد. انرژی حاصله از ضربات پیستون به میله و از آنجا به مته و بالاخره به سنگ منتقل می‌شود.

3. Sinker

در صورتی که این انرژی بر مقاومت سنگ فزونی داشته باشد عمل نفوذپذیری یا حفر صورت خواهد گرفت. شکل ۱-۴ نمایی از قسمت‌های عمده یک ماشین حفاری ضربه‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۴- نمایی از قسمت‌های عمده یک ماشین حفاری ضربه‌ای (اصانلو، ۱۳۷۵)

در این سیستم میله حفاری به ازای هر ضربه به طور اتوماتیک قدری می‌چرخد تا مته ضربه‌های خود را هر بار بر روی سطح جدید از سنگ وارد کند. معمولاً از هوا برای انتقال ذرات حفاری از ته چال استفاده می‌شود. در شرایطی خاص ممکن است از آب به جای هوا برای انتقال ذرات حفاری استفاده شود.

اگر چه در موارد نادر چکش‌های حفاری برای حفر چال‌هایی تا عمق حدوداً شش متر به کار گرفته شده‌اند اما عمدتاً از آن‌ها برای حفر چال‌های تا عمق حدوداً سه متر استفاده می‌شود.

نوع سنگین از این سیستم حفاری ممکن است چال‌هایی تا قطر بیش از ۵۰ میلی‌متر را حفر کند. چکش‌های حفاری یا پیکورها بیشتر در معادن زیرزمینی و کارهای ساختمانی و حفر چال برای انفجارهای ثانویه مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۱-۱-۲-۲- واگن دریل

واگن دریل نوع دیگر از سیستم حفاری ضربه‌ای است که حفاری از طریق تسمه‌ها به دکل نصب شده و به صورت خشاب‌وار بر روی دکل بالا و پایین می‌شود و مجموعه حفار و دکل بر روی ارابه دو یا سه چرخ لاستیکی سوار گردیده‌اند که به همین جهت به آن واگن دریل می‌گویند.

واگن دریل می‌تواند با زوایای مختلف حفاری کند. در مجموع حفر چال با واگن دریل در مقایسه با انواع چکش‌های حفاری در شرایط یکسان از نظر سنگ، با سهولت و کیفیت بهتری انجام می‌گیرد. از واگن دریل می‌توان برای حفر چال‌هایی تا عمق ۴۵ متر و قطر ۰/۵ تا ۴ اینچ برای سنگ‌های نیمه سخت و سخت استفاده کرد. اما به طور رایج عمق چال‌هایی که با واگن دریل حفر می‌شوند تا ۹ متر می‌رسد. طول لوله حفاری با توجه به نوع ایجاد کننده بار پشت مته و واگن دریل متفاوت است.

باید توجه داشت که آنچه تاکنون از انواع سیستم‌های حفاری ضربه‌ای ذکر شد آن گروهی بودند که به کمک آن‌ها می‌توان چال‌های با قطر و عمق کم حفاری کرد و ضربه زن آنها در بیرون از دهانه چال قرار دارد.

۱-۲-۳- مزیت‌ها و موارد استفاده سیستم‌های حفاری ضربه‌ای

- ۱- جهت حفر چالهای کم عمق، سیستم حفاری ضربه‌ای در مقایسه سیستم دورانی ارزان‌تر تمام می‌شود.
- ۲- هزینه اولیه این سیستم معمولاً ارزان‌تر از نوع سیستم حفاری دورانی است.
- ۳- هزینه استهلاک ماشین‌های حفاری ضربه‌ای به دلیل ارزان‌تر بودن آن‌ها کمتر است.
- ۴- در سنگ‌های نیمه‌سخت و سخت (بیش از ۶۰۰۰ پوند بر اینچ مربع مقاومت فشاری دارند) که چال‌ها با فواصل کم حفاری می‌شوند، بازدهی سیستم ضربه‌ای قابل مقایسه با نوع چرخشی است، اصولاً ماشین‌های حفاری ضربه‌ای در سنگ‌های نیمه سخت و سخت بازدهی بیشتری دارند.
- ۵- هزینه روزانه عملیات حفاری با ماشین‌های ضربه‌ای کمتر از ماشین‌های دورانی است (از نظر سوخت، هوا، آب و تامین انرژی مقایسه انجام می‌گیرد).
- ۶- هزینه انتقال پایین است.
- ۷- برای حفر چال‌های با قطر و عمق کم که فواصل آن‌ها نیز زیاد نیست (در مواردی که سنگ سخت است) به دلیل ارزان‌تر شدن عملیات حفاری (هزینه اولیه و استهلاک کمتر است) انتخاب ماشین‌های حفاری ضربه‌ای اولویت دارند.

۱-۲-۴- معایب ماشین‌های حفاری ضربه‌ای

- ۱- یکی از اساسی‌ترین معایب ماشین‌های حفاری ضربه‌ای محدودیت آن‌ها در عمق و سرعت حفاری است. اگر چه با بعضی از انواع این روش چاهی به عمق ۳۳۹۷ متر حفاری شده است، اما مدت زمان حفاری و هزینه‌ای که این عملیات در برداشته موجب شده است تا ماشین‌های حفاری ضربه‌ای برای چال‌ها با عمق زیاد استفاده نشود.
- ۲- سرعت حفاری با این سیستم حفاری در مقایسه با ماشین‌های حفاری دورانی کم است. به طور معمول سرعت حفاری با انواع ماشین‌های حفاری ضربه‌ای با توجه به نوع سنگ، قطر، عمق بین ۱/۵ تا ۴۶ متر در شیفیت متغیر است. اما در مورد سیستم حفاری دورانی تا ۶۱۰ متر در شیفیت نیز گزارش شده است. بنابراین برای آن دسته از معادن بالاخص روباز که تولید روزانه و سالانه قابل توجه مورد نظر است و هر هفته بین دو

یا سه انفجار (هر انفجار بیش از ۵۰ چال با عمق ۵ تا ۱۵ متر) باید انجام گیرد، استفاده از این روش (هر نوعی از سیستم ضربه‌ای) قابل توجیه نیست. اما در معادنی که مقدار تولید آن‌ها کم است بالاخص زیرزمینی که قطر و عمق چال‌ها معمولاً کم هستند، استفاده از سیستم حفاری ضربه‌ای اولویت خواهد داشت.

۳- در حفر چاه‌های عمیق به دلیل احتمال وجود فشار طبقات و تأثیر آن‌ها در امر حفاری، استفاده از ماشین‌های حفاری ضربه‌ای (از هر نوع) به دلیل عدم توانایی کنترل فشار هوا و عدم غلبه بر فشار نرمال طبقات به ندرت انجام می‌گیرد. به عبارت دیگر، در چنین شرایطی باید از گل حفاری استفاده کرد که با ایجاد فشار هیدروستاتیکی مناسب، مشکل فشار نرمال طبقات را برطرف کند.

۱-۲-۵- عوامل مؤثر در انتخاب انواع ماشین‌های حفاری ضربه‌ای

عواملی از آن جمله اندازه سنگ‌شکن، اندازه و ظرفیت سیستم بارگیری و حمل، مقدار تولید، قطر چال، اندازه پروژه (مدت زمان استخراج)، جنس سنگ، ابعاد سنگ پس از انفجار، ایمنی و بهداشت در جبهه استخراج (از نظر میزان تولید گرد و غبار)، سرعت چالزنی، عمق چال و بالاخره مسائل اقتصادی باید در انتخاب ماشین حفاری ضربه‌ای مورد توجه قرار گیرند. اندازه سنگ‌هایی که خرد می‌شوند باید به حدی باشد که سیستم‌های بارگیری و حمل به راحتی آن‌ها را حمل کنند و در ضمن برای اندازه سنگ شکن مناسب باشند. سرعت حفاری باید در هر شیفت به اندازه‌ای باشد که تعداد چال‌های مورد نیاز برای هر انفجار، به موقع آماده شوند. بدون شک مسائل اقتصادی، درآمد ناشی از معدن و اندازه پروژه می‌توانند در انتخاب سیستم حفاری ضربه‌ای مؤثر باشند.

۱-۱-۳- روش حفاری ضربه‌ای - دورانی

حفاری توسط ضربه و دوران، کلاسیک‌ترین شیوه برای حفر چال‌های آتشکاری است که ظهور آن از نظر تاریخی با پیشرفت صنعتی در قرن نوزدهم مقارن است. نخستین نمونه این دستگاه در سال ۱۸۳۸ ساخته شد که با بخار کار می‌کرد. با بهره‌گیری از هوای فشرده به عنوان منبع انرژی این سیستم به طور گسترده‌ای رونق یافت. این حادثه به همراه اختراع دینامیت باعث پیشرفت شگرفی در زمینه شکستن سنگ در مهندسی معدن و عمران در پایان قرن گذشته شد. اساس این روش بر مبنای ضربه‌ای است که یک قطعه فولادی به نام پیستون به میله حفاری وارد می‌کند و آن هم هم‌زمان انرژی خود را توسط عضو انتهایی‌اش که سرمته

می‌باشد، به انتهای چال منتقل می‌کند. دستگاه‌های حفاری ضربه‌ای-دورانی بسته به وضعیت قرارگیری چکش حفاری به دو گروه بزرگ تقسیم می‌شوند:

- دستگاه‌های چکش بالا:

در این دستگاه‌ها دو عمل اصلی یعنی ضربه و چرخش در خارج از چال آتشکاری تولید می‌شوند و از طریق ته‌مه و میله حفاری به سرته منتقل می‌شوند. چکش را می‌توان به صورت هیدرولیکی یا توسط هوای فشرده به کار انداخت.

- چکش ته‌چالی (DTH):

این دستگاه‌های حفاری برای اولین بار در سال ۱۹۵۱ ارائه شدند و تا به امروز در حفاری‌های سطحی در سنگ‌های با مقاومت متوسط و با قطر ۱۰۵ تا ۲۰۰ میلی‌متر به طور گسترده‌ای استفاده می‌شوند. در برخی مدل‌های آن قطر حفاری به ۹۱۵ میلی‌متر هم رسیده است.

نحوه کار چکش ته‌چالی DTH بر این اساس است که پیستون ضربه را به طور کامل و مستقیماً به سرته حفاری وارد می‌کند. هوای فشرده از طریق لوله‌ای که نقش نگهدارنده و چرخاننده چکش را نیز ایفا می‌کند، تأمین می‌شود. عمل چرخش توسط یک موتور هوای فشرده یا هیدرولیکی انجام می‌شود و بر روی بخش بیرون چال دستگاه که تأمین کننده هوای فشرده نیز است، سوار می‌شود (شکل ۱-۵). تمیزکاری ته‌چال با تخلیه هوای چکش از میان سوراخ‌های سرته صورت می‌گیرد. فرکانس ضربه در چکش DTH معمولاً بین ۶۰۰ تا ۱۶۰۰ ضربه در دقیقه می‌باشد. بسته به محل کاربرد این دستگاه‌ها دامنه قطرهای متداول حفاری در جدول ۱-۱ نشان داده شده است.

جدول ۱-۱- دامنه قطرهای متداول حفاری در روش حفاری ضربه‌ای- دورانی (Jimeno et al, 1195)

قطر حفاری (میلی‌متر)		روش حفاری
زیرزمینی	روباز	
۳۸-۶۵	۵۰-۱۲۷	ضربه‌ای- دورانی چکش بالا
۱۰۰-۱۶۵	۷۵-۲۰۰	ضربه‌ای- دورانی چکش ته‌چالی

مزایای اصلی حفاری ضربه‌ای- دورانی عبارتند از:

قابلیت استفاده در هر نوع سنگ از نرم تا سخت

حفر چال با قطرهای مختلف

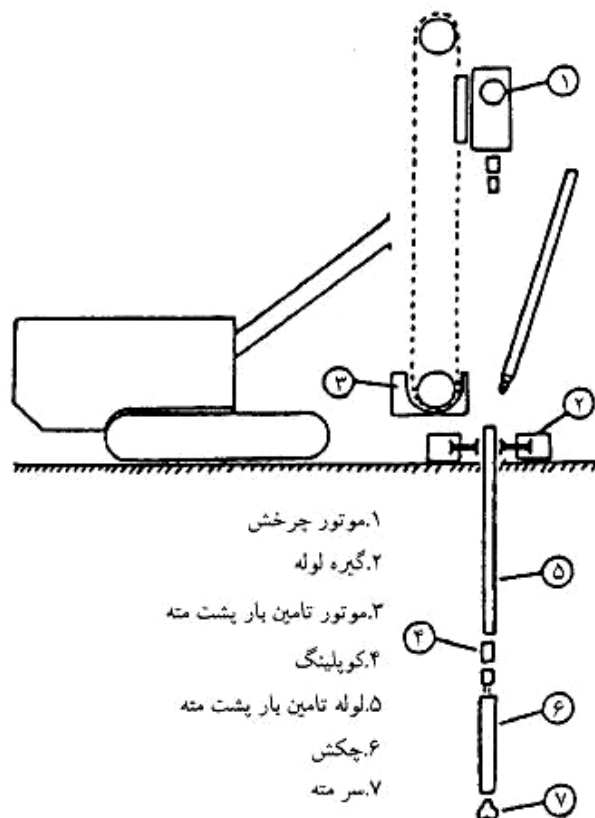
4. Top Hammer
5. Down The Hole

دارای تجهیزات چند منظوره و دارای انعطاف پذیری زیاد برای عملیات مختلف

نیاز به تنها یک اپراتور

تعمیرات و نگهداری سریع و آسان

هزینه اولیه نسبتاً پایین.



شکل ۱-۵- نمایشی از اجزای دستگاه DTH (Jimeno et al, 1995)

۱-۲- مشخصات مربوط به دستگاه که بر سرعت حفاری در معادن روباز

مؤثرند

تعداد زیادی پارامتر در سرعت حفاری دخیل اند که هر یک تأثیر مستقیم یا غیر مستقیم بر سرعت حفاری می گذارند و در نهایت راندمان و هزینه حفاری را به شدت تحت تأثیر قرار می دهند.

تعداد پارامترهای مؤثر بر سرعت حفاری نه تنها به تکنولوژی ساخت دستگاه بلکه به نوع روش حفاری نیز بستگی کامل دارد. جدول ۱-۲ پارامترهای مؤثر بر سرعت حفاری را با توجه به نوع روش حفاری نشان

می دهد.

جدول ۱-۲- پارامترهای مؤثر بر سرعت حفاری با توجه به نوع روش حفاری (SME, 1987)

ضربه‌ای	دورانی	ضربه‌ای- دورانی	
●	●	●	دستگاه (موتور)
●	●	●	قدرت
	●	●	بار موتور
	●	●	گشتاور
	●	●	سرعت چرخش
●		●	انرژی دمش فلاشینگ
●		●	فرکانس دمش فلاشینگ
			میله حفاری (راد)
●	●	●	قطر میله حفاری
●	●	●	هندسه میله حفاری
●	●	●	مشخصات ماده سازنده
			سرمته
●	●	●	قطر سرمته
●	●	●	هندسه سرمته
●	●	●	مشخصات ماده سازنده
			هوای فلاشینگ
●	●	●	سرعت دمش
●	●	●	مشخصات فیزیکی

چنانچه از جدول فوق برمی‌آید حفاری دورانی و ضربه‌ای- دورانی از نظر پارامترهای عملیاتی اشتراک بیشتری نسبت به روش ضربه‌ای دارند. همچنین امروزه با توجه به تکنولوژی بالای ساخت دستگاه‌های حفاری و نیز آلیاژهای پیشرفته مورد استفاده در سرمته‌ها و همچنین نیاز به تولید بالا و حفاری‌های قطور، روش‌های دورانی و ضربه‌ای- دورانی از مقبولیت بیشتری برخوردار بوده و کاربرد روش ضربه‌ای تنها محدود به عملیات زیرزمینی می‌باشد. لذا در این تحقیق عمدتاً پارامترهای دستگاه مؤثر در روش‌های حفاری دورانی و ضربه‌ای- دورانی به صورت خاص مورد مطالعه قرار می‌گیرند.

با توجه به تحقیقات انجام شده توسط حسینی و عطایی در سال ۲۰۰۷، مطابق جدول ۱-۳، در میان مشخصات دستگاه چهار پارامتر سرعت چرخش مته (دور مته)، بار پشت مته، هوای فلاشینگ و قطر مته از اهمیت بیشتر و تعیین‌کننده‌تری برخوردارند (Hoseinie & Ataie, 2007).

در مجموع عوامل مؤثر مربوط به تجهیزات را می‌توان به دو دسته اصلی زیر و زیر مجموعه‌های وابسته آن‌ها تقسیم بندی نمود (Thuro, 1997):

الف) پارامترهای عملیاتی مربوط به دستگاه

- سرعت چرخش مته (دور مته)

- بار پشت مته

- هوای فلاشینگ

ب) مشخصات سرمته

- نوع و شکل سرمته

- قطر سرمته.

در ادامه هر یک از پارامترهای مذکور به طور جداگانه و مفصل مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گیرند.

۱-۲-۱- بار پشت مته و تأثیر آن بر حفاری

بار روی مته یا تراست^۱ عبارت است از مقدار باری که به مته وارد می‌شود و از این طریق موجب کنترل مسیر (از نظر انحراف مسیر چالزنی توسط مته) و افزایش مقدار حفاری می‌شود. اندازه آن بستگی به قطر مته، نوع سیستم حفاری، مقاومت سنگ و نوع سرمته دارد و مقدار آن از عدد دو رقمی تا ۸۰۰۰ پوند به ازای هر اینچ مته (۱۴۳۰ کیلوگرم به ازای هر سانتی‌متر مته) متغیر است. در جدول ۱-۴ مقدار بار پیشنهادی برای تعدادی از انواع مته‌ها بر حسب قطر برای سنگ‌های سخت ارائه شده است.

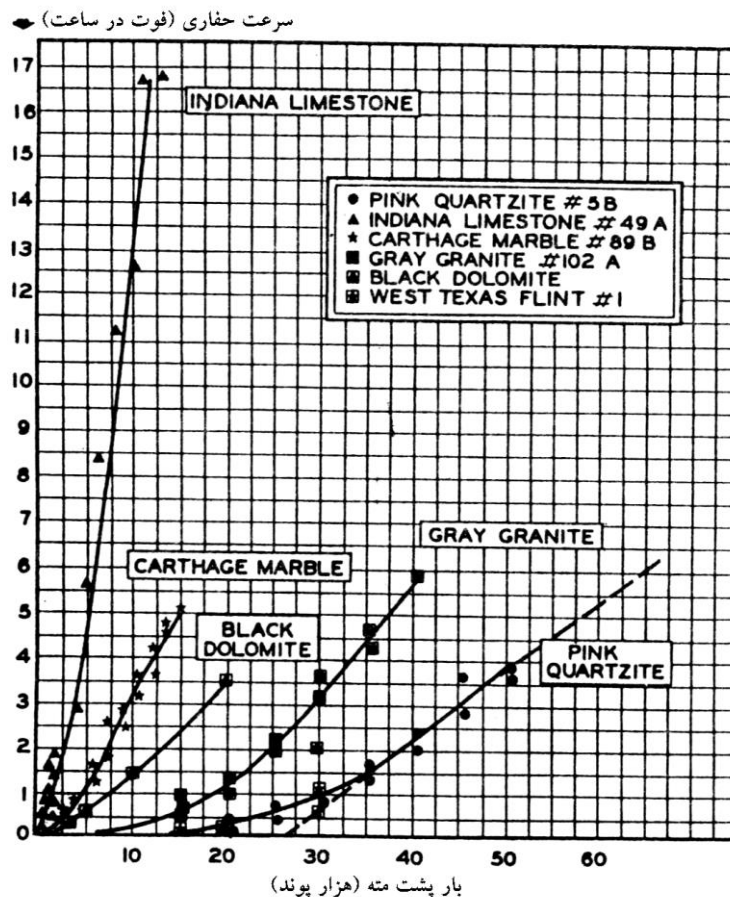
جدول ۱-۴- بار پیشنهادی برای قطرهای مختلف در سنگ‌های سخت (اصانلو، ۱۳۷۵)

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

بدیهی است که مقاومت و سختی سنگ‌ها در میزان سرعت حفاری مؤثراند بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که جهت افزایش سرعت حفاری به بار روی مته مناسب نیاز است تا ماشین بتواند بر مقاومت فشاری سنگ غلبه کند. رابطه مزبور را می‌توان با فرمول ذیل بیان کرد:

$$R_p = a + bW$$

که در فرمول فوق W بار پشت مته بر حسب پوند (کیلوگرم) و R_p میزان حفاری بر حسب فوت در ساعت (متر بر ساعت) و a, b ضرایب معادله خطی هستند که عمدتاً به اندازه مته، خصوصیات فیزیکی و مکانیک سنگ و نیز هوای فلاشینگ بستگی دارند. رابطه سرعت حفاری و بار پشت مته در سنگ‌های مختلف در شکل ۱-۶ نشان داده شده است. نتایج نشان داده شده در این شکل از تحقیقات آزمایشگاهی و تحت فشار اتمسفر حاصل شده است.



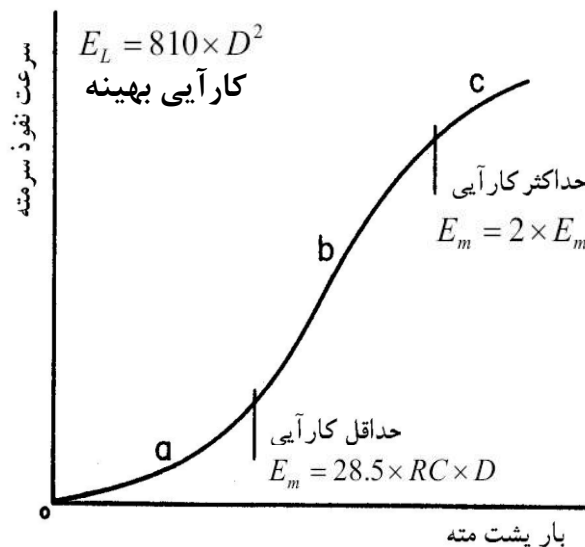
شکل ۱-۶- رابطه سرعت حفاری و بار پشت مته در سنگ‌های مختلف (اصانلو، ۱۳۷۵)

در روی هر منحنی سه بخش قابل تفکیک است: بخشی که بار روی مته کمتر از مقاومت فشاری سنگ است، بخشی که بار روی مته زیادتر از مقاومت فشاری سنگ است و بخشی که بار روی مته مطلوب است. برای مثال، چنانچه به منحنی کوارتزیت توجه شود از نقطه ۳۰۰۰۰ پوند (نقطه بحرانی) بین بار روی مته و میزان حفاری تقریباً رابطه خطی مستقیم برقرار است که برای این بخش فرمول $R_p = a + bW$ صادق است. در غیر این صورت یعنی وقتی که بار روی مته برای کوارتزیت کمتر از ۳۰۰۰۰ پوند و بیشتر از ۵۰۰۰۰ پوند است از

فرمول مزبور نمی‌توان استفاده کرد. در رابطه فوق برای شرایطی که حفاری بر روی سنگ‌های نسبتاً نرم انجام می‌گیرد، $a = 0$ می‌شود.

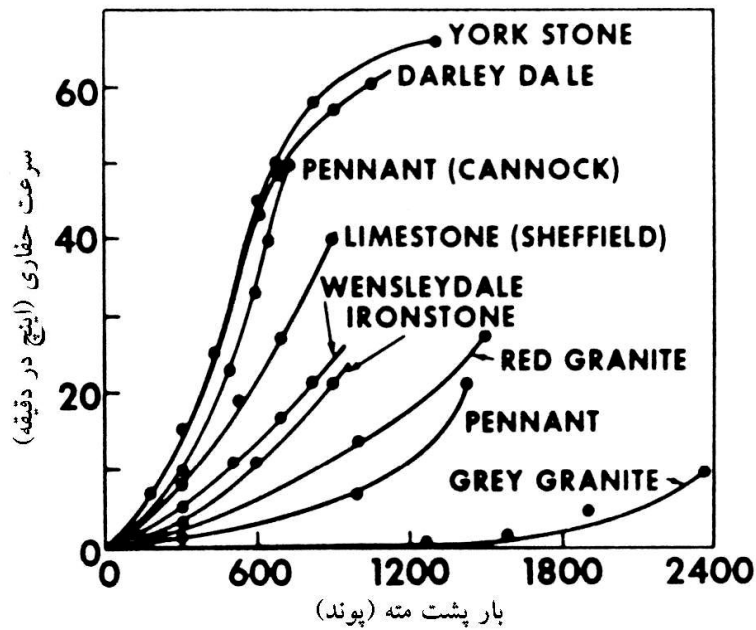
اگر مقدار بار روی مته یا تراست کم باشد علاوه بر کاهش مقدار حفاری، موجب خساراتی به لوله حفاری و بالاخص مته خواهد شد که ناشی از درجه حرارت بیش از حدی است که در اثر عدم انتقال انرژی تولید شده به سنگ و تبدیل آن به گرما و جذب از سوی مته و لوله حاصل می‌شود و عکس حالت فوق نیز موجب کندی (احیاناً توقف) و افزایش هزینه حفاری خواهد شد. به عبارت دیگر چنانچه بیش از تراست مورد نیاز به مته بار وارد شود، مته چه در سیستم ضربه‌ای و چه در حفاری چرخشی قادر نخواهد بود به صورت آزاد تحرک لازم را داشته باشد و باعث کندی و توقف دستگاه خواهد شد.

همان‌گونه که در شکل ۶-۱ نشان داده شده است کلیه منحنی‌های به دست آمده بین سرعت حفاری و بار پشت مته در سنگ‌های مختلف، عموماً شکل ظاهری یکسان و نسبتاً مشابهی دارند. با این وصف می‌توان شکل کلی تغییرات سرعت حفاری نسبت به تغییرات بار پشت مته را به صورت شکل ۷-۱ نشان داد.



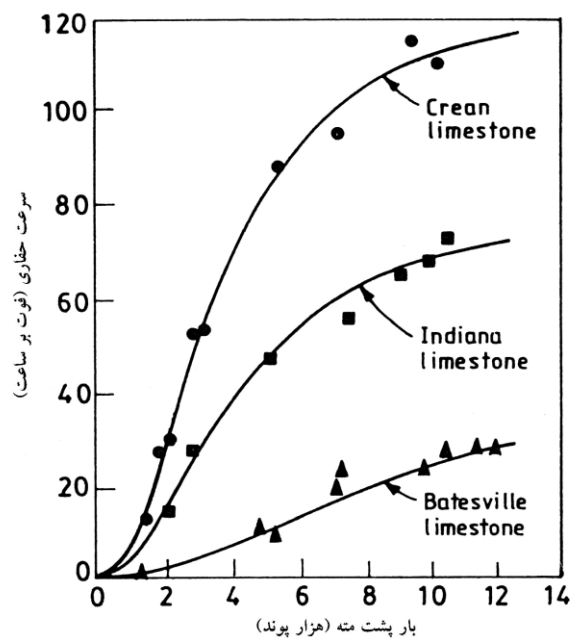
شکل ۷-۱- شکل کلی تغییرات سرعت حفاری نسبت به تغییرات بار پشت مته (Jimeno et al, 1995)

روابط نشان داده شده در این شکل میزان حداقل، حداکثر و بهینه بار پشت مته را با توجه به مقاومت سنگ (RC) بر حسب MPa و قطر حفاری (D) بر حسب اینچ بیان می‌کنند. در بار پشت مته کمتر از مقدار مینیمم (E_{mi}) سیستم قادر به نفوذ مناسب در سنگ نبوده و در بارهای بیشتر از مقدار ماکزیمم (E_{ma}) سیستم دچار خفگی و کاهش راندمان می‌شود. در سال ۱۹۷۸ در کتاب راهنمای معدنکاری روباز، هارتمن رابطه سرعت حفاری و بار پشت مته در سنگ‌های مختلف را به صورت شکل ۸-۱ نشان داد.



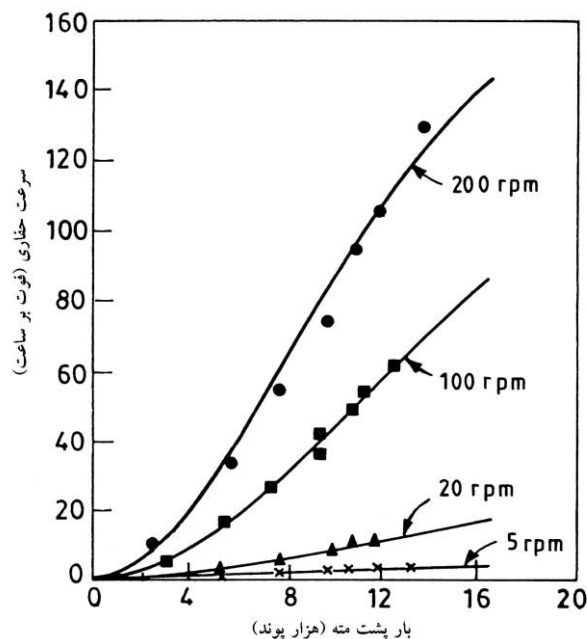
شکل ۸-۱- تأثیر بار پشت مته بر سرعت حفاری برای سنگ‌های مختلف (SME, 1987)

رائو و میسرا^۷ نیز در سال ۱۹۹۸ با انجام تعدادی آزمایش نتایج مشابهی را برای تعدادی از سنگ‌های موجود در کشور هند به دست آورده است (شکل‌های ۹-۱ و ۱۰-۱).



شکل ۹-۱- تأثیر بار پشت مته بر سرعت حفاری برای سه نوع سنگ مختلف (Rao & Misra, 1998)

7. Rao
8. Misra



شکل ۱-۱-۱۰- تأثیر بار پشت مته بر سرعت حفاری برای چهار دور مته مختلف (Rao & Misra, 1998)

۱-۱-۲-۱- عوامل مؤثر در تعیین بار روی مته

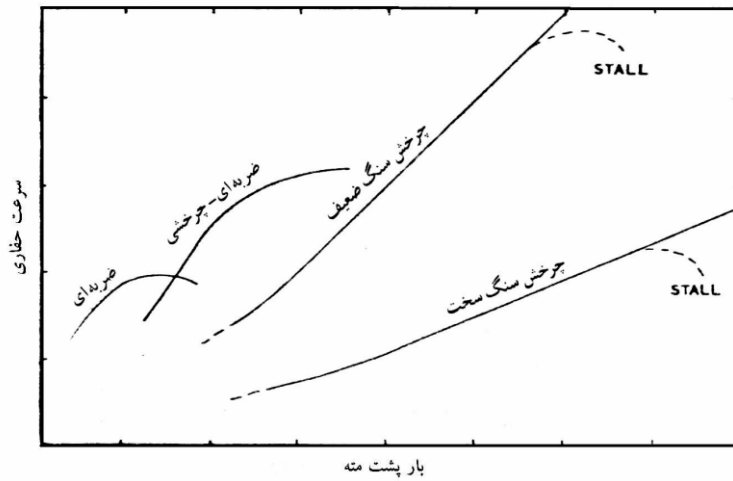
به طور کلی در تعیین بار روی مته چهار عامل مؤثرند که عبارتند از: (۱) نوع سیستم حفاری (۲) اندازه مته (۳) میزان تیزی (۴) مقاومت سنگ.

۱-۱-۱-۲-۱- تأثیر نوع سیستم حفاری در تعیین بار روی مته

هدف از اعمال بار روی مته، اطمینان از انتقال انرژی به سر مته، جلوگیری از انحراف و افزایش سرعت حفاری است. اما میزان بار روی مته در سیستم ضربه ای با سیستم چرخشی یکسان نیست چون در سیستم ضربه ای بار روی مته کار انتقال انرژی و برقراری تماس با سنگ را دارد در حالی که در سیستم چرخشی نه تنها بار روی مته (تراست) باید موجب تماس مته با سنگ شود بلکه کار فرو بردن مته در سنگ و چرخش آن را نیز به عهده دارد. به این دلیل در سیستم چرخشی به بار روی مته بیشتری نیاز است تا در سیستم ضربه ای (شکل ۱-۱۱).

چنانچه در شکل پیداست مقدار بار پشت مته لازم برای سیستم حفاری ضربه ای و ضربه ای- چرخشی کمتر از سیستم حفاری چرخشی است. این نکته نیز ضروری است که بار پشت مته زیاد همچنین ممکن است موجب خم شدن لوله حفاری و انحراف مسیر چال شود. لذا مطلوبترین مقدار بار پشت مته به مقداری اطلاق می گردد که رضایت بخش ترین نتایج را از نظر بازدهی حفاری به وجود آورد. مینیمم بار روی مته که

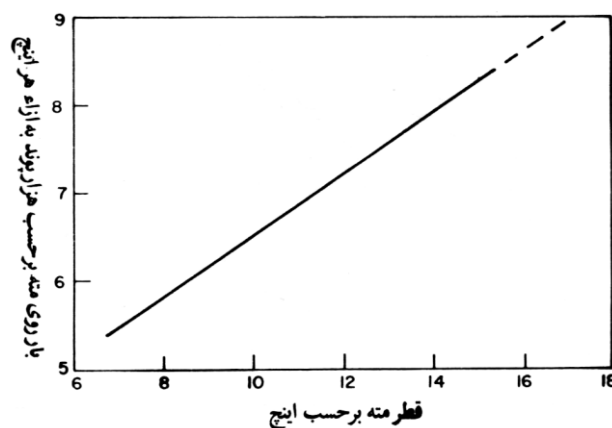
باعث نتایج رضایت بخش خواهد شد را بار پشت مته بحرانی نیز می نامند. مینیمم و ماکزیمم بار روی مته یا تراست به سختی سنگ بستگی دارد.



شکل ۱-۱۱- تأثیر نوع سیستم حفاری بر میزان بار پشت مته (اصانلو، ۱۳۷۵)

۱-۲-۱-۱-۲- تأثیر اندازه مته در تعیین بار روی مته

اندازه مته در تعیین بار پشت مته مؤثر است. از آنجائی که مته‌های با قطر بیشتر دارای ظرفیت تحمل پذیری فشار بیشتری هستند 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. 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 ۱-۱۲ ارتباط بین قطر مته و بار روی مته را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱۲- ارتباط بین قطر مته و بار روی مته (اصانلو، ۱۳۷۵)

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

ضروری است که هزینه مته از عوامل مؤثر در تعیین هزینه حفاری است و تا ۶۰ درصد هزینه‌ها را می‌تواند شامل شود.

۱-۲-۱-۱-۳- تأثیر میزان تیزی مته در تعیین بار روی مته

چنانچه مته‌ها تیزی خود را از دست دهند، مساحت سرمته افزایش می‌یابد که مستلزم بار زیادی است تا سرعت حفاری در حد بهینه ثابت بماند. این امر باعث استهلاک مته و کاهش عمر آن می‌شود؛ لذا افزایش بار روی مته به نقطه‌ای می‌رسد که دیگر موجب ازدیاد سرعت حفاری نمی‌شود و هزینه افزایش می‌یابد. بنابراین، باید همیشه مته را تیز نگه داشت و به موقع نیز آن را تعویض کرد.

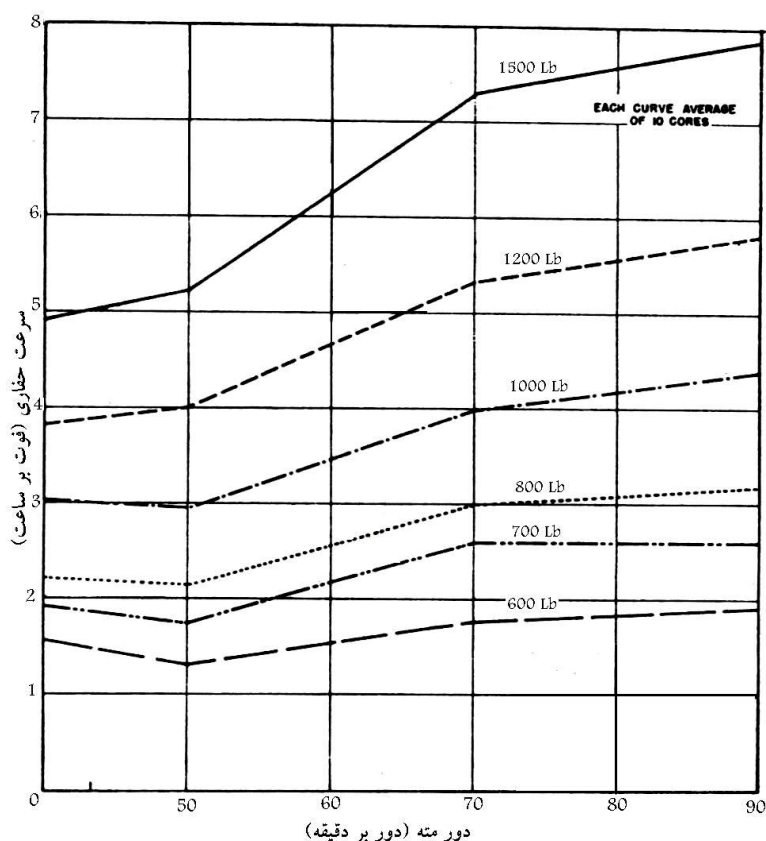
۱-۲-۱-۱-۴- تأثیر مقاومت سنگ در تعیین بار روی مته

مقاومت سنگ از عوامل عمده در انتخاب بار پشت مته می‌باشد. بدون شک سنگ‌هایی که مقاومت بیشتری دارند نسبت به سنگ‌های نیمه سخت و نرم به بار روی مته بیشتری نیاز دارند. فرض بر این است که به هنگام تماس سرمته با سنگ هر لحظه سه نقطه با سنگ تماس دارد (مبنای سیستم حفاری چرخشی با مته‌های سه مخروطی است) که این سه نقطه $0/187$ قطر مته برحسب اینچ مربع $(8/7)$ سانتی‌متر مربع) با سنگ در تماس است. لذا دیگر در مته هشت اینچی (۲۰ سانتی‌متری) $1/5$ اینچ مربع $(8/7)$ سانتی‌متر مربع) با سنگ در تماس است. لذا چنانچه مقاومت فشاری تک محوری سنگی مثل سنگ‌های سخت رسوبی ۲۴۰۰۰ (پوند بر اینچ مربع) باشد مقدار بار روی مته مورد نیاز ۳۶۰۰۰ پوند است که از حاصلضرب مقاومت فشاری تک محوری سنگ در سطح تماس مته با سنگ حاصل می‌شود.

۱-۲-۲- دور مته و تأثیر آن در سرعت حفاری

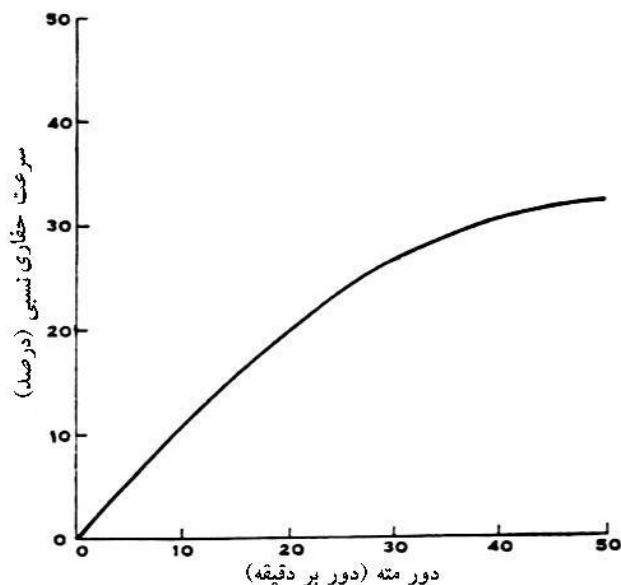
همانند بار روی مته (تراست)، تعداد چرخش یا دورمته نیز از اهمیت به‌سزایی در سرعت حفاری برخوردار است. این بدان علت است که نفوذ در سنگ در اثر تماس مته با سنگ حاصل می‌شود و هر چه تعداد تماس بیشتر باشد مقدار انرژی منتقل شده به سنگ نیز زیادتر است و لذا به نظر می‌رسد که با افزایش دور مته، سرعت حفاری نیز باید افزایش یابد. اما بین افزایش دور مته و سرعت حفاری رابطه کاملاً خطی مستقیم وجود ندارد. کلیه آزمایش‌هایی که در این مورد انجام گرفته است این نظریه را تأیید می‌کنند. کاهش تعداد دور مته به دلیل کاهش تعداد تماس سرمته با سنگ موجب کاهش سرعت حفاری می‌شود (شکل ۱-۱۳) و 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 سرمته 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 ۱۴-۱ و ۱۵-۱).

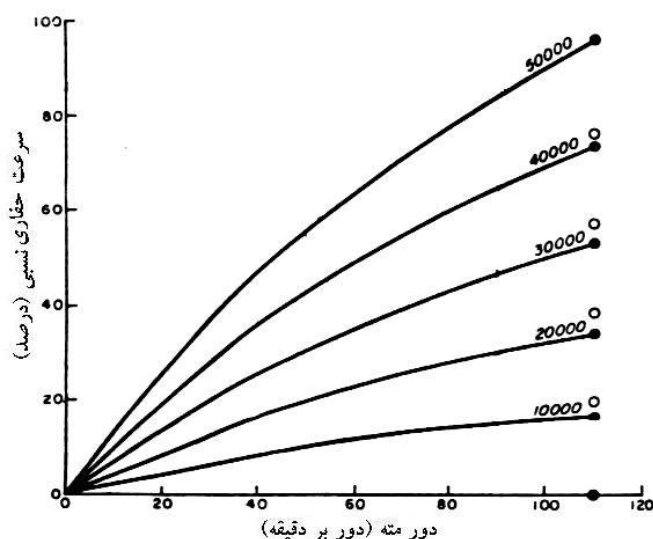


شکل ۱۳-۱- ارتباط بین دور مته و سرعت حفاری در مرمز تحت بارهای پشت مته مختلف (اصانلو، ۱۳۷۵)

افزایش بیش از حد دور مته در دقیقه ضمن آن که در اثر ایجاد ارتعاش یا نوسان بیش از اندازه ممکن است موجب کاهش سرعت حفاری شود، ممکن است باعث از بین رفتن دندانهای مته، یا از بین رفتن لوله اضافی و حتی لوله‌های حفاری شود. بدین جهت در امر حفاری بالاخص از نوع دورانی توصیه می‌شود تعداد دور مته در دقیقه کاهش و سعی شود در حد امکان به بار روی مته اضافه شود. شکل‌های ۱۶-۱، ۱۷-۱ و ۱۸-۱ ترکیب بار روی مته و تعداد دور مته در هر دقیقه را در سیستم حفاری دورانی با اندازه مته‌های مختلف نشان می‌دهند.

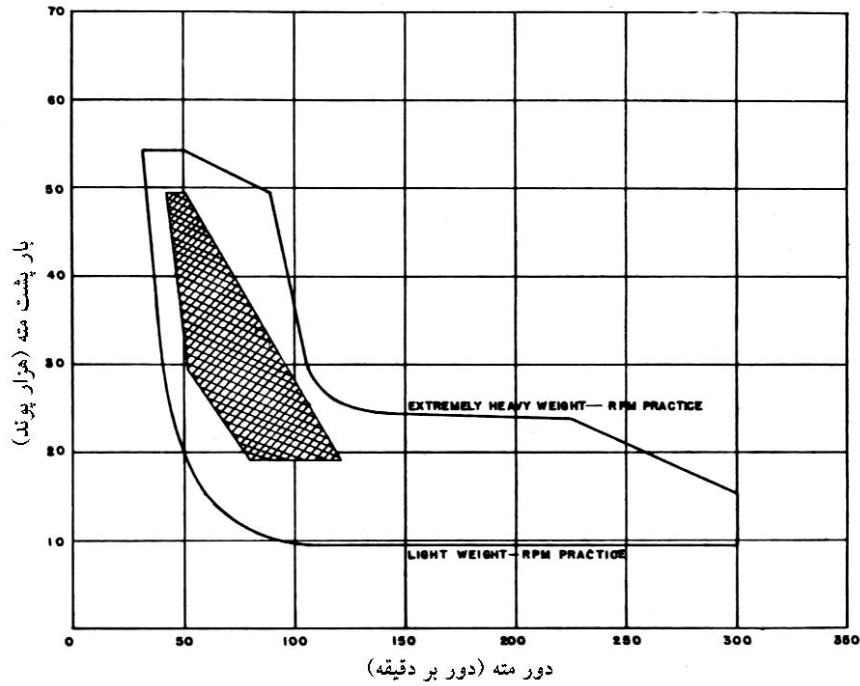


شکل ۱-۱۴- ارتباط بین دور مته و سرعت حفاری در بار ثابت (اصانلو، ۱۳۷۵)

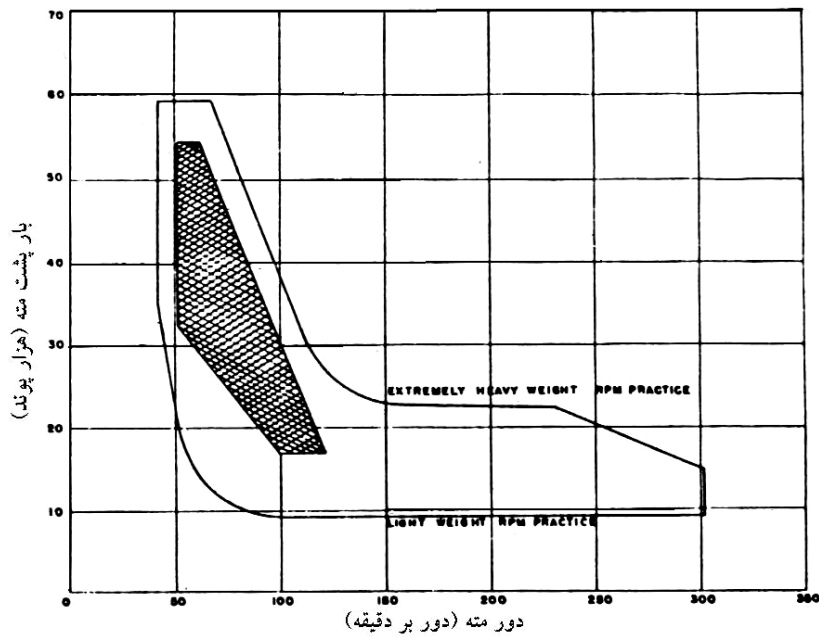


شکل ۱-۱۵- ارتباط بین دور مته و سرعت حفاری در بار پشت مته متغییر (اصانلو، ۱۳۷۵)

شکل ۱-۱۶ ارتباط بین دور مته در دقیقه و بار روی مته را برای مته‌های با قطر $7/625$ تا $7/875$ اینچ نشان می‌دهد. همان طور که از شکل پیداست کاهش دور مته در دقیقه می‌تواند با افزایش بار روی مته جبران شود تا از به هدر رفتن انرژی که در اثر سرعت بیش از مطلوب دور مته در دقیقه به وجود می‌آید، جلوگیری شود. در شکل ۱-۱۷ نیز ارتباط بین دور مته در دقیقه و بار روی مته برای مته‌های با قطر $8/5$ تا 9 اینچ را نشان می‌دهد. در هر دو تصویر سبک‌ترین و سنگین‌ترین (کم‌ترین و زیادترین) بار روی مته با توجه به دور مته نشان داده شده است. در ضمن مناطق هاشور شده شرایط مطلوب حفاری را از نظر روی مته و دور مته نشان می‌دهد.

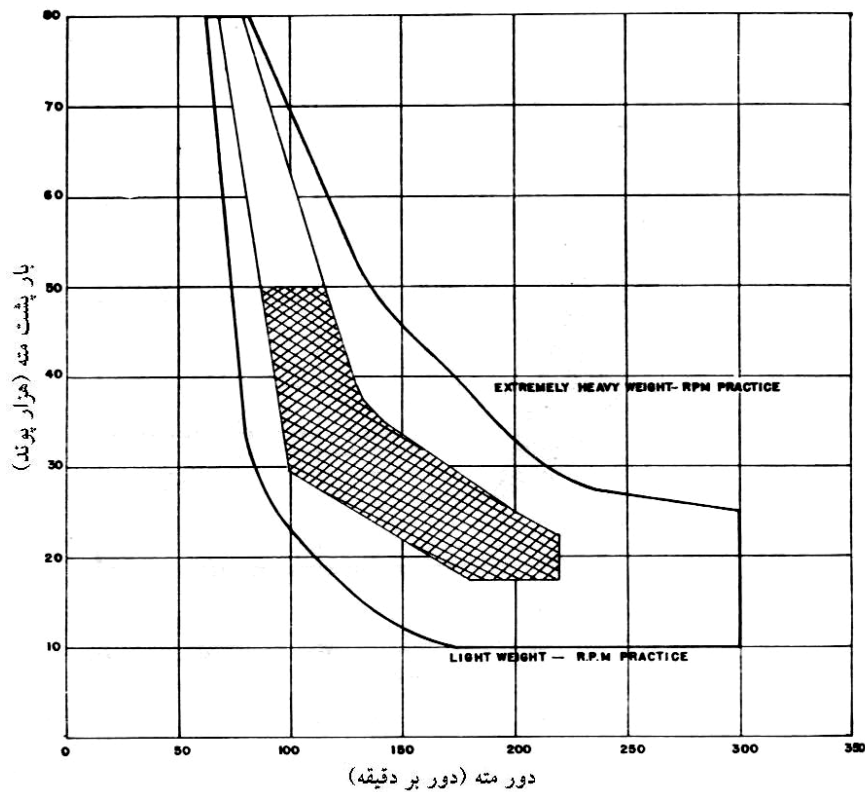


شکل ۱-۱۶- ارتباط بین دور مته و بار روی مته را برای مته‌های با قطر ۷/۶۲۵ تا ۷/۸۷۵ اینچ (اصانلو، ۱۳۷۵)



شکل ۱-۱۷- ارتباط بین دور مته و بار روی مته برای مته‌های با قطر ۸/۵ تا ۹ اینچ (اصانلو، ۱۳۷۵)

در شکل ۱-۱۸ ارتباط بین دور مته در دقیقه و بار روی مته برای مته‌های ۱۰/۶۲۵، ۱۱ و ۱۲/۲۵ اینچ نشان داده شده است. منطقه هاشور شده در اشکال شرایط حفاری را از نظر بار روی مته و دور مته در دقیقه نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱۸- ارتباط بین دور مته در دقیقه و بار روی مته را برای مته‌های ۱۰/۶۲۵، ۱۱ و ۱۲/۲۵ اینچ (اصانلو، ۱۳۷۵)

۱-۲-۲-۱- تأثیر ترکیب بار روی مته و دور مته در سرعت حفاری

از نظر تئوری در اثر تماس ممتد و مستمر مته با سنگ و انتقال انرژی مته به سنگ، سرعت حفاری افزایش می‌یابد. این امر منوط به دو عامل بار روی مته و دور مته است. حاصل ضرب این دو عامل برای هر سنگ خاص، عدد ثابتی است که موجب سرعت حفاری مطلوب می‌شود. به طور تجربی بین سرعت حفاری و دو شاخص یاد شده در سنگ‌های مختلف روابط ریاضی به شرح زیر برقرار است (اصانلو، ۱۳۷۵):

$$R_p = \begin{cases} b.w.N^{0.5} & \text{(۱) برای سنگ‌های نرم } (\sigma_c \leq 6000 \text{ psi}) \\ a + b.w.N^{1/2} & \text{(۲) برای سنگ‌های نیمه سخت } (6000 \text{ psi} \leq \sigma_c \leq 20000 \text{ psi}) \\ a + b.w^{1/2}.N^{1/2} & \text{(۳) برای سنگ‌های سخت } (\sigma_c \leq 20000 \text{ psi}) \end{cases}$$

که در روابط فوق R_p سرعت حفاری، w بار روی مته، N دور مته در دقیقه و b ضریب است.

در سال ۱۹۶۷ بایر و کالدر بر اساس مطالعات تجربی در یک معدن آهن در آمریکای شمالی به این نتیجه رسیدند که علاوه بر دو عامل بار روی مته و دور مته عواملی چون قطر مته و مقاومت فشاری تک محوری در سرعت حفاری تأثیر عمده دارند. لذا رابطه (۴) را با احتساب سه عامل مذکور ارائه کردند.

$$Rp = (61 - 28 \log \sigma_u) \frac{w}{d} \cdot \frac{R.P.M}{300} \quad (4)$$

که در رابطه فوق Rp سرعت حفاری برحسب فوت در ساعت، σ_u مقاومت فشاری تک محوری به ازای هر ۱۰۰۰ پوند بر اینچ مربع، w بار روی مته (هزارپوند)، d قطر مته (اینچ) و RPM دور مته در دقیقه می‌باشد. در رابطه بایر و کالدر مقاومت فشاری تک محوری غیر قابل کنترل اما دور مته در دقیقه و بار روی مته قابل کنترل هستند. از نظر عملی بار روی مته و دور مته حد محدودی دارند. در مورد بار روی مته ماکزیمم باری که می‌شود اعمال کرد ۱۰۰۰۰ پوند به ازای هر اینچ قطر مته بوده و دور در دقیقه نیز بین ۵۰ تا ۳۰۰ متغیر است. در سنگ‌های سخت از دور مته کم و بار روی مته زیاد استفاده می‌شود و در سنگ‌های نرم از دور مته بالا و بار روی مته کم استفاده می‌شود. در موارد استثنایی امکان استفاده دور مته بیش از ۳۰۰ دور بر دقیقه وجود دارد. استفاده از دور مته زیاد باعث لرزش مته و لوله‌های نزدیک به مته می‌شود و احتمال آسیب دیدگی افزایش می‌یابد. صرف نظر از نوع ماشین حفاری هر قدر سنگ سخت تر و یا قطر مته زیادتر باشد دور مته در دقیقه باید کمتر باشد به استثنای سنگ‌های شکاف دار که برای جلوگیری از گیر کردن مته الزاماً دور مته در دقیقه را باید افزایش داد.

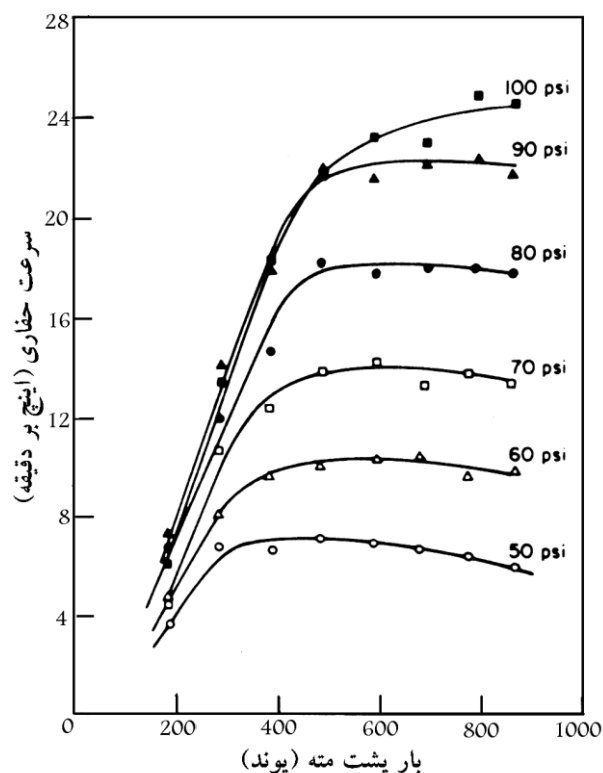
۱-۲-۳- هوای فلاشینگ و تأثیر آن در سرعت حفاری

برای دستیابی به یک حفاری کارآمد و با راندمان مناسب فنی و اقتصادی، تمیزکاری کف چال و تخلیه خرده سنگ‌های حاصل از حفاری امری بسیار حائز اهمیت می‌باشد. خروج سریع و بلافاصله خرده‌های حفاری باعث بهبود شرایط حفاری می‌شود. باقی ماندن خرده‌های حفاری در فضای بین سرمته و سنگ باعث اتلاف انرژی و کاهش قدرت مؤثر سیستم حفاری و در نتیجه کاهش نرخ نفوذ سرمته می‌شود. در معادن روباز اغلب از هوای فشرده به عنوان عامل فلاشینگ استفاده می‌شود. هوای فشرده در درون چال عموماً وظایف زیر را بر عهده دارد:

- خنک کردن سرمته و بخش انتهایی تجهیزات حفاری

- پاک‌سازی ته چال از خرده‌های حفاری

به تجربه ثابت شده که افزایش فشار هوا موجب افزایش سرعت حفاری در سنگ خواهد شد. شکل ۱-۱۹ تأثیر میزان فشار هوای فلاشینگ را بر ارتباط بین بار پشت مته و سرعت حفاری نشان می‌دهد. در شکل ۱-۲۰ تأثیر مستقیم افزایش میزان فشار هوای فلاشینگ بر سرعت حفاری نشان داده شده است. 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 نفوذپذیری ۳۸ درصد افزایش خواهد یافت.



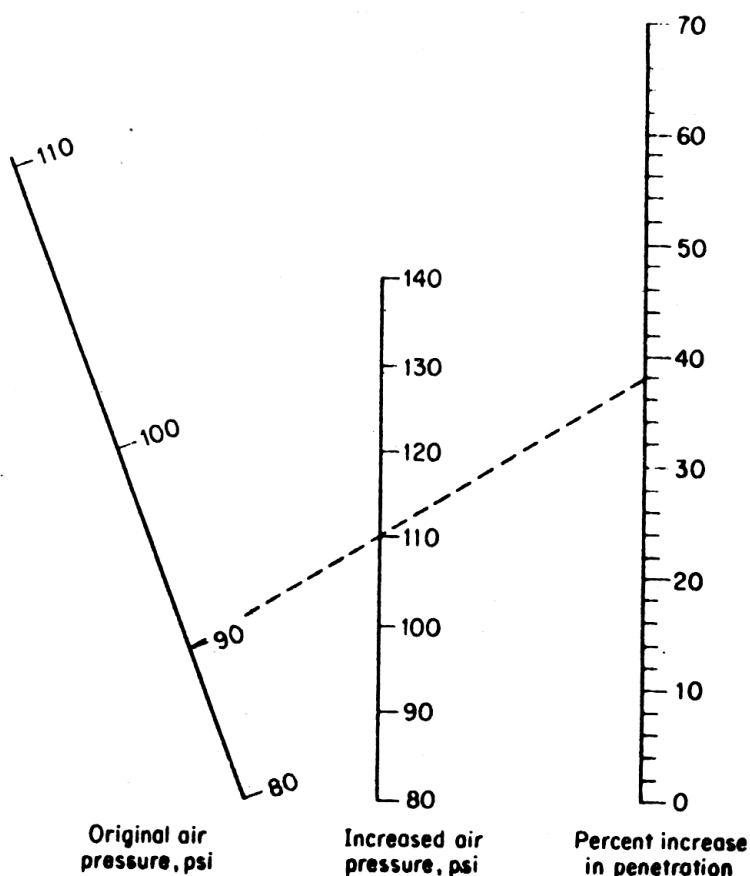
شکل ۱-۱۹- تأثیر میزان فشار هوای فلاشینگ را بر ارتباط بین بار پشت مته و سرعت حفاری (اصانلو، ۱۳۷۵)

باید توجه داشت که افزایش بازدهی حفاری لزوماً همراه با صرفه‌جویی در هزینه ماشین حفاری نخواهد بود. گاهی افزایش فشار هوا باعث بالا رفتن هزینه استهلاک مته، لوله، پمپ و غیره می‌شود. برای مثال در یکی از معادن کانادا به نام انتاریو^۹ این مقایسه انجام گرفت و نتایجی به دست آمده که در جدول ۱-۴ ارائه شده است. لذا در ارتباط با فشار هوا و مقدار حفاری و هزینه باید شرایط مطلوب را فراهم کرد. در شکل ۱-۲۱ ملاحظه می‌شود که وضعیت مطلوب برای حفاری سنگ‌ها در کانادا فشار هوای ۱۰۲ پوند بر اینچ مربع است.

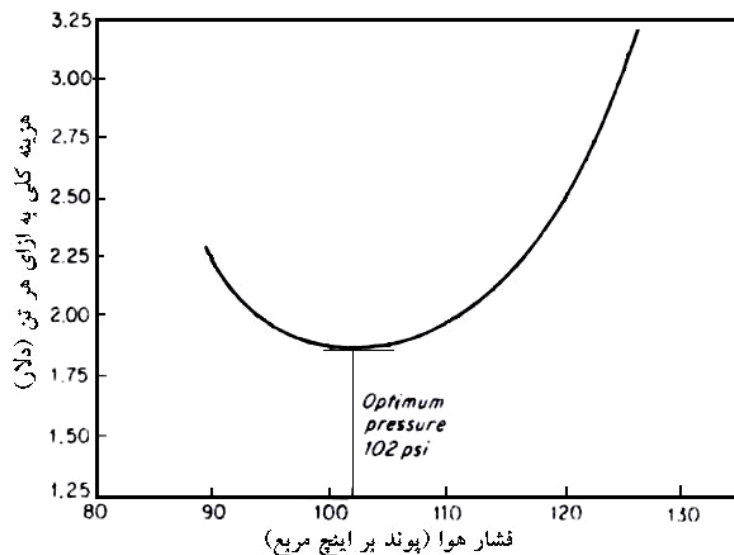
به عبارت دیگر در کمتر از این فشار و زیادتر از ۱۰۲ پوند بر اینچ مربع هزینه حفاری بالاست، در حالی که در فشار ۱۰۲ پوند بر اینچ مربع هزینه حفاری کمترین مقدار را دارد. عوامل متعددی می‌توانند در ایجاد شرایط مطلوب از نظر تهیه فشار هوا مؤثر باشند، لذا منحنی ارائه شده ممکن است برای شرایط عام صادق نبوده و در هر مورد نیاز به برآورد هزینه با توجه به شرایط خاص حفاری وجود داشته باشد.

جدول ۱-۴- افزایش هزینه حفاری در اثر افزایش فشار هوا (تجربی) مبنای معادن آهن کانادا

درصد افزایش هزینه براساس فشار هوا				
۱۲۰	۱۱۰	۱۰۰	۹۰	اقلام
۳۹/۵	۲۶/۰	۱۳/۰	۰	هزینه عملیات و تعمیر کمپرسور
۸۳/۰	۵۵/۰	۲۷/۰	۰	دریل
۶۴/۵	۴۳/۰	۲۱/۵	۰	مته
۶۶/۰	۴۳/۵	۲۱/۵	۰	لوله



شکل ۱-۲۰- تأثیر مستقیم افزایش میزان فشار هوای فلاشینگ بر سرعت حفاری (اصانلو، ۱۳۷۵)



شکل ۱-۲۱- هزینه حفاری در ارتباط با فشار هوا (اصانلو، ۱۳۷۵)

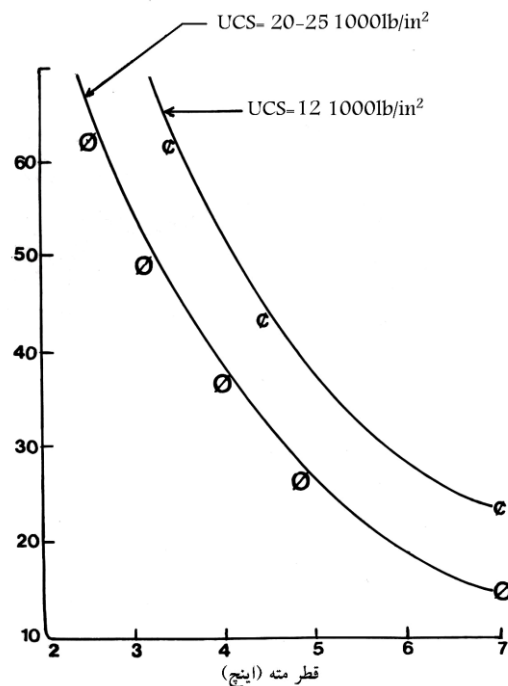
۱-۲-۴- مشخصات سرتمه و تأثیر آن در سرعت حفاری

سرتمه حفاری به عنوان یک بخش حساس و بسیار مهم، تأثیرات چشمگیری در راندمان، سرعت و هزینه‌های حفاری دارد. تماس مستقیم دستگاه و سنگ توسط سرتمه برقرار شده و لذا سرعت حفاری و میزان قابلیت خردشوندگی سنگ به طور مستقیم به شکل، نوع و اندازه سرتمه مربوط می‌شود. برای هر یک از روش‌های حفاری و برای هر نوع سنگ سرتمه ویژه‌ای موجود می‌باشد. بررسی پارامترهای مؤثر در طراحی، ساخت و انتخاب سرتمه مناسب کار بسیار پیچیده‌ای است که خارج از موضوع این تحقیق می‌باشد. در بررسی تأثیر مشخصات سرتمه در سرعت حفاری عموماً دو مشخصه اصلی آن یعنی قطر و شکل سرتمه در نظر گرفته می‌شود. در ادامه دو عامل فوق به طور مفصل مورد بررسی قرار می‌گیرند.

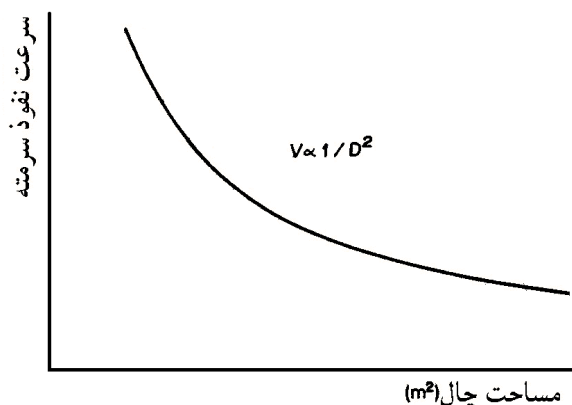
۱-۲-۴-۱- تأثیر قطر سرتمه بر سرعت حفاری

قطر سرتمه و در نهایت قطر چال یک پارامتر مهم در سرعت حفاری است. در کارهای معدنی، هر چه قطر چال کمتر باشد، سرعت چالزنی بیشتر است. تاکنون دو منحنی برای نشان دادن ارتباط بین قطر سرتمه و سرعت حفاری ارائه شده است که این دو مورد در شکل‌های ۱-۲۲ و ۱-۲۳ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱-۲۳ نشان داده شده، سرعت حفاری با عکس مجذور قطر متناسب است.

تاکنون یک جدول تجربی (جدول ۵-۱) نیز برای پیش بینی سرعت نفوذ در یک نمونه سنگ با قطرهای مختلف ارائه شده است. با استفاده از این جدول اگر سرعت نفوذ یک دستگاه برای یک قطر معین معلوم باشد، مقدار سرعت به ازای قطرهای بزرگ‌تر یا کوچک‌تر را می‌توان با استفاده از جدول به دست آورد.



شکل ۱-۲۲- ارتباط بین قطر سرمته و سرعت حفاری (استوار، ۱۳۷۹)



شکل ۱-۲۳- ارتباط بین قطر مساحت چال و سرعت حفاری (Jimeno et al, 1995)

به عنوان مثال اگر در چالزنی با قطر ۷۶ میلی‌متر سرعت نفوذ ۳۶ متر بر ساعت باشد، با توجه به جدول برای چالزنی با قطر ۱۰۲ میلی‌متر سرعت نفوذ حدود ۶۵ درصد سرعت قبل یعنی معادل ۲۳/۴ متر بر ساعت خواهد بود. ضریب دقت این اعداد را می‌توان با استفاده از رابطه (۵) محاسبه کرد.

$$F = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{1.5}$$

شایان ذکر است کلیه فرمول‌های تجربی ارائه شده برای پیش بینی سرعت حفاری از جمله پوان^{۱۰} (۱۹۶۹)، تانداند و اونگر^{۱۱} (۱۹۷۵) و هاسترولید^{۱۲} (۱۹۷۱) قطر و یا سطح سرتمه را به عنوان یک عامل اساسی به کار برده‌اند که این امر به نوبه خود اهمیت قطر را در مطالعه سرعت حفاری نشان می‌دهد.

جدول ۱-۵- جدول تجربی برای پیش‌بینی سرعت نفوذ در یک سنگ با قطرهای مختلف (Jimeno et al, 1995)

قطر (mm)	۳۸	۴۱	۴۴	۴۸	۵۱	۵۷	۶۴	۷۰	۷۶	۸۹	۱۰۲	۱۱۴	۱۲۷
۱۲۷	۶.۱۰	۵.۴۱	۴.۸۲	۴.۳۵	۳.۹۶	۳.۳۱	۲.۸۳	۲.۴۶	۲.۱۵	۱.۷۱	۱.۴۰	۱.۱۷	۱.۰۰
۱۱۴	۵.۱۹	۴.۶۱	۴.۱۱	۳.۷۱	۳.۳۷	۲.۸۲	۲.۴۱	۲.۰۹	۱.۸۳	۱.۴۵	۱.۱۹	۱.۰۰	۰.۸۵
۱۰۲	۴.۳۵	۳.۸۶	۳.۴۵	۳.۱۱	۲.۸۳	۲.۳۶	۲.۰۲	۱.۷۵	۱.۵۴	۱.۲۲	۱.۰۰	۰.۸۴	۰.۷۲
۸۹	۳.۵۶	۳.۱۷	۲.۸۲	۲.۵۵	۲.۳۲	۱.۹۴	۱.۶۵	۱.۴۴	۱.۲۶	۱.۰۰	۰.۸۲	۰.۶۹	۰.۵۹
۷۶	۲.۸۲	۲.۵۱	۲.۲۴	۲.۰۲	۱.۸۴	۱.۵۴	۱.۳۱	۱.۱۴	۱.۰۰	۰.۷۹	۰.۶۵	۰.۵۵	۰.۴۶
۷۰	۲.۴۸	۲.۲۰	۱.۹۷	۱.۷۷	۱.۶۱	۱.۳۵	۱.۱۵	۱.۰۰	۰.۸۸	۰.۷۰	۰.۵۷	۰.۴۸	۰.۴۱
۶۴	۲.۱۵	۱.۹۱	۱.۷۱	۱.۵۴	۱.۴۰	۱.۱۷	۱.۰۰	۰.۸۷	۰.۷۶	۰.۶۱	۰.۵۰	۰.۴۲	۰.۳۵
۵۷	۱.۸۴	۱.۶۳	۱.۴۶	۱.۳۱	۱.۱۹	۱.۰۰	۰.۸۵	۰.۷۴	۰.۶۵	۰.۵۲	۰.۴۲	۰.۳۵	۰.۳۰
۵۱	۱.۵۴	۱.۳۷	۱.۲۲	۱.۱۰	۱.۰۰	۰.۸۴	۰.۷۲	۰.۶۲	۰.۵۴	۰.۴۳	۰.۳۵	۰.۳۰	۰.۲۵
۴۸	۱.۴۰	۱.۲۴	۱.۱۱	۱.۰۰	۰.۹۱	۰.۷۶	۰.۶۵	۰.۵۶	۰.۴۹	۰.۳۹	۰.۳۲	۰.۲۸	۰.۲۳
۴۴	۱.۲۶	۱.۱۲	۱.۰۰	۰.۹۰	۰.۸۲	۰.۶۹	۰.۵۹	۰.۵۱	۰.۴۵	۰.۳۵	۰.۲۹	۰.۲۴	۰.۲۱
۴۱	۰.۰۸	۱.۰۰	۰.۸۹	۰.۸۱	۰.۷۳	۰.۶۱	۰.۵۲	۰.۴۵	۰.۴۰	۰.۳۲	۰.۲۶	۰.۲۲	۰.۱۹
۳۸	۱.۰۰	۰.۸۹	۰.۷۹	۰.۷۲	۰.۶۵	۰.۵۴	۰.۴۶	۰.۴۰	۰.۳۴	۰.۲۸	۰.۲۳	۰.۱۹	۰.۱۶

۱-۲-۴-۲- تأثیر نوع و شکل سرتمه بر سرعت حفاری

برای انجام عملیات حفاری مناسب و کارآمد، هر نوع سنگ خاص، سیستم حفاری و سرتمه مخصوص به خود را نیاز دارد. انتخاب سیستم حفاری مناسب و در نتیجه تعیین سرتمه مناسب باعث افزایش راندمان حفاری، افزایش سرعت، کاهش سایش سرتمه و کاهش هزینه‌ها می‌شود. در طبقه‌بندی سرتمه‌ها عموماً ابتدا روش حفاری و سپس شکل و مشخصات هندسی آن‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد. در ادامه سرتمه‌های رایج و کاربرد در حفاری معادن روباز به طور اجمالی معرفی می‌شوند.

10.Poan

11 . Tanand & Unger

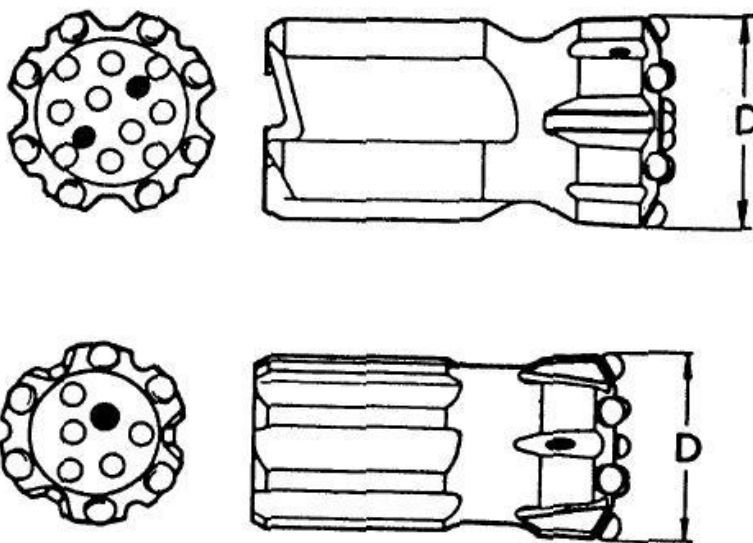
12 .Hustrolid

۱-۲-۴-۲-۱- سرمت‌های مورد استفاده در روش ضربه‌ای - دورانی

دو نوع سرمته که در چالزنی ضربه‌ای - چرخشی استفاده می‌شوند، عبارتند از سرمت‌های دکمه‌ای^{۱۳} و سرمت‌های پره‌ای^{۱۴}.

الف) سرمت‌های دکمه‌ای

این سرمت‌ها دارای دکمه‌هایی از جنس کاربید تنگستن هستند که با الگوهای مختلفی روی سرمته توزیع شده‌اند و با قطرهای ۵۰ تا ۲۵۱ میلی‌متر ساخته می‌شوند (شکل ۱-۲۴). سرمت‌های دکمه‌ای با حفاری دورانی سازگارترند و نسبت به سرمت‌های پره‌ای سرعت پیشروی بالاتری دارند. همچنین سرمت‌های دکمه‌ای در برابر سایش مقاوم‌تر هستند و این مقاومت نه تنها به دلیل شکل دکمه‌هاست بلکه به دلیل اتصال مؤثر دکمه‌ها با فولاد نیز می‌باشد که از طریق پرس سرد حاصل شده است.



شکل ۱-۲۴- سرمت‌های دکمه‌ای

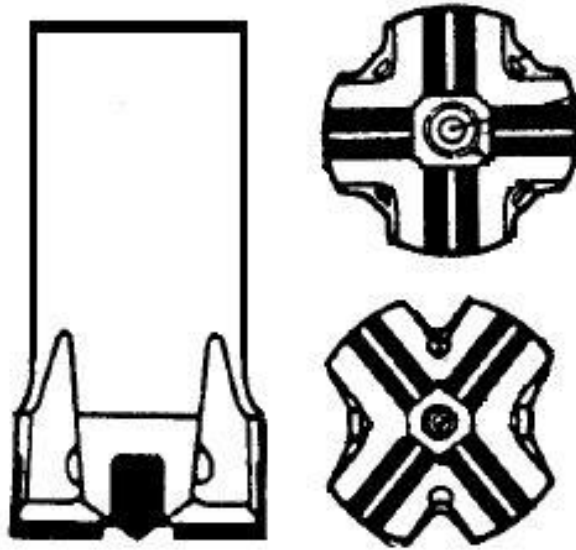
ب) سرمت‌های پره‌ای

این سرمت‌ها در دو شکل صلیبی و ضربدری ساخته می‌شوند. نوع اول شامل چهار پره از جنس کاربید تنگستن است که عمود بر هم هستند در حالی که سرمت‌های ضربدری چهار پره دارند که با هم زوایای ۷۵ درجه و ۱۰۵ درجه می‌سازند (شکل ۱-۲۵). سرمت‌های پره‌ای از قطر ۳۵ تا حداکثر ۵۷ میلی‌متر در نوع

13. Button Bit

14. Drag Bit

صلیبی و ۶۴ میلی‌متر در نوع ضربداری ساخته می‌شوند. سرته‌های ضربداری دارای سرعت بیشتری بوده و بر خلاف انواع دیگر سرته‌ها چال‌های قطورتر از مقدار مورد نظر و یا با مقطع پنج ضلعی حفر نمی‌کنند.



شکل ۱-۲۵- سرته‌های دکمه‌ای

ج) سرته‌های DTH

سرته‌های DTH دارای ته‌ته‌ای هستند که ضربات پیستون مستقیماً به آن وارد می‌شود. متداولترین قطرهای این سرته‌ها ۸۵ تا ۲۵۰ میلی‌متر است. البته سرته‌هایی با قطر بیشتر نیز وجود دارند. انواع سرته‌های اصلی DTH عبارتند از:

ج-۱) سرته‌های دکمه‌ای: این سرته‌ها بیشترین کاربرد را داشته و برای هر نوع سنگی مناسب هستند. سرته‌های دکمه‌ای به زیر گروه‌های زیر تقسیم می‌شوند:

- سرته‌های با یک هسته شکننده

- سرته‌های مقعر

- سرته‌های محدب

- سرته‌های بالستیک

ج-۲) سرته‌های پره‌ای: این سرته‌ها در دو نوع ساخته می‌شوند:

- نوع اول: با سطح تماس که دارای پره‌های صلیبی یا ضربداری مشابه با نوع چکش بالا بوده و در سنگ‌های نرم و خرد شده استفاده می‌شوند.

- نوع دوم: سرمته‌هایی با یک هسته شکننده، دارای چهار پره کوتاه و یک یا دو دکمه در مرکز هستند. این دکمه‌ها هسته سنگ ایجاد شده در هر ضربه را خرد می‌کنند. جدول ۱-۶ انواع سرمته‌های پیشنهادی برای حفاری تشکیلات مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۶- انواع سرمته‌های پیشنهادی برای حفاری تشکیلات مختلف (Jimeno et al, 1995)

سرمته‌های دکمه‌ای		سرمته‌های تیغه‌ای		خصوصیات سنگ
سنگین	معمولی	سنگین	معمولی	
N	R	N	R	نرم
S	R	R	S	متوسط تا سخت
R	S	S	N	سخت
S	N	R	N	سایش کناری بالا
R	S	S	N	سایش پیشانی بالا
S	R	N	N	سایش پیشانی متوسط
N	N	N	N	سنگ‌های درزه‌دار
N پیشنهاد نمی‌شود و S خوب است و R پیشنهاد می‌شود				

۱-۲-۲-۴-۲- سرمته‌های مورد استفاده در روش دورانی

در حفاری دورانی عموماً دو دسته عمده از سرمته‌ها شامل سرمته‌های تیغه‌ای و سرمته‌های مخروطی کاربرد دارند. در زیر انواع پر کاربرد سرمته‌های مورد استفاده در روش دورانی معرفی می‌شوند.

الف) سرمته‌های سه مخروطی

سرمته‌های چرخشی مخروطی یا غلتکی بر حسب نوع ساختمان آنها به چند زیر گروه تقسیم‌بندی می‌شوند. این تقسیم‌بندی اولین بار در سال ۱۹۰۹ ارائه شده است که در واقع تلاشی بوده است برای توسعه بیشتر سیستم حفاری چرخشی در مقابل ماشین‌های ضربه‌ای بالاخص از نوع کابلی که بازدهی قابل ملاحظه‌ای در سنگ‌های سخت دارند. بر روی سرمته‌های مخروطی دو تا چهار ردیف دندانه به شکل V تعبیه شده است بدین جهت در بعضی موارد این نوع مته‌ها را مته‌های چرخشی دندانه‌دار نیز می‌نامند.

در سنگ‌های نرم طول دندانه‌ها و فاصله آنها از یکدیگر زیاد می‌باشند. برای حفاری سنگ‌های سخت‌تر، اندازه دندانه‌ها کوتاه و فاصله آنها از یکدیگر نیز کم می‌شود. در بعضی از سرمته‌های مخروطی شکل و نحوه قرارگیری مخروط‌ها نسبت به یکدیگر شبیه علامت بعلاوه، ضربدر یا صلیبی است که آنها را مته‌های مخروطی شکل تقاطعی^{۱۵} می‌نامند. این نوع مته‌ها در سنگ‌های سخت، بازدهی خوبی دارند. تعداد

مخروط‌های مته می‌تواند یک، دو، سه، چهار، پنج یا حتی به شش عدد برسد اما رایج‌ترین آن‌ها مته‌های سه مخروطی هستند.

باید توجه داشت که به دلیل نیاز به حفر چال یا چاه در سنگ‌های بسیار سخت در سال‌های اخیر تغییراتی در این نوع مته‌ها به وجود آمده است. در این مته‌ها ارتفاع دندان‌ها بسیار کم و جنس آن‌ها از کربور تنگستن (WC) و سر این دندان‌ها کاملاً گرد و صاف است و چون شبیه دکمه‌اند به آن‌ها مته‌های دکمه‌ای می‌گویند. مته‌های مخروطی دندان‌دار (غلتکی دندان‌دار) قادرند در سنگ‌های سختی همچون گرانیت، سنگ معدن بسیار سخت مس‌دار، سنگ معدن بسیار سخت آهن‌دار قابلیت نفوذپذیری قابل توجهی داشته باشند. درجه نفوذپذیری این نوع مته‌ها در این سنگ‌ها بین ۱۷ تا ۳۰ فوت در ساعت (۵ تا ۹ متر در ساعت) متغیر است و در سنگ‌های آهنی و دولومیت کاملاً سخت، سنگ آهن و مس نسبتاً سخت و ماسه سنگ بسیار سخت درجه نفوذپذیری بین ۳۰ تا ۸۰ فوت در ساعت (۹ تا ۲۴ متر در ساعت) می‌تواند تغییر کند. برای سنگ‌های فاقد سختی همچون رس، شیل‌ها، ماسه سنگ نرم یا شل و سنگ‌های معدنی فاقد سختی درجه نفوذپذیری بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ فوت در ساعت (۳۰ تا ۹۰ متر در ساعت) افزایش می‌یابد.

برای این گونه مته‌ها به ازای هر اینچ مته می‌توان تا ۸۰۰۰ پوند بار وارد کرد (به‌ازای هر میلی‌متر قطر مته ۱۴۲/۷ کیلوگرم). مته‌های غلتکی و تیغه‌ای تا قطر ۲۶ اینچ نیز ساخته شده است اما رایج‌ترین آن‌ها در صنعت معدنکاری قطری بین ۴ تا ۱۵ اینچ دارند.

الف-۱) انتخاب نوع سرمته

مقاومت فشاری سنگ و سختی آن مهم‌ترین پارامترهایی هستند که در انتخاب سرمته مخروط غلطکی بایستی مدنظر قرار گیرند. معمولاً استفاده کنندگان نمونه‌هایی از سنگ مورد حفاری برای سازنده سرمته می‌فرستند تا آن‌ها سرمته مناسب را انتخاب کرده و سرعت نفوذ احتمالی و مقدار سایش در هر متر حفاری را نیز برآورد کنند. سرمته‌های دندان‌دار بر اساس نوع سنگ تشکیلات به سه دسته تقسیم می‌شوند: نرم، متوسط و سخت.

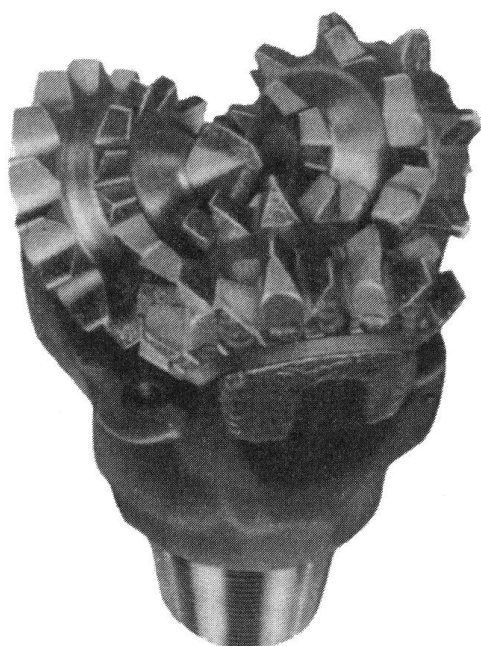
تشکیلات نرم:

سرمته‌های مخروط غلطکی برای تشکیلات نرم یا تاقانهای کوچکی دارند که سازگار با دندان‌های بلند و نیروهای تغذیه پایین می‌باشند. دندان‌ها فاصله زیادی از هم دارند و مخروط‌ها منحرف شدگی زیادی دارند تا

خراشندگی بالائی داشته باشند (شکل ۱-۲۶).

تشکیلات متوسط:

سرمت‌های مورد استفاده در تشکیلات با مقاومت متوسط یا تاقانهای متوسطی مطابق با نیروی اعمالی مورد نیاز و اندازه دندانها دارند. فاصله و طول دندانها و منحرف‌شدگی نسبت به سرمت‌های مورد استفاده در تشکیلات نرم کمتر است (شکل ۱-۲۷).



شکل ۱-۲۶- سرمت سه مخروطی با دندانهای فولادی ویژه تشکیلات نرم (Jimeno et al, 1995)

تشکیلات سخت:

سرمت‌های مورد استفاده در تشکیلات سخت دارای یاتاقانهای بزرگ و دندانهای کوچک و مقاوم نزدیک به هم هستند. میزان منحرف‌شدگی بسیار اندک می‌باشد که چالزنی با بارهای پشت مته زیاد را ممکن می‌سازد (شکل ۱-۲۸).

الف-۲) کدهای IDAC (انجمن بین المللی پیمان کاران حفاری)

IDAC یک سیستم کدگذاری است که توسط آن نوع سرمت (با دندانهای فولادی یا دکمه‌های کاربید تنگستن)، نوع تشکیلات سنگی قابل چالزنی با آن سرمت و برخی از مشخصات طرح سرمت مشخص می‌شود. رقم اول (۱ تا ۸):

سرمت‌های سه مخروطی با دندانهای فولادی

۱-×-× تشکیلات نرم با مقاومت فشاری پایین و قابلیت حفاری بالا

۲-×-× تشکیلات متوسط تا نیمه سخت با مقاومت فشاری بالا

۳-×-× تشکیلات سخت و نسبتاً ساینده

۴-×-× جهت سرمته‌های آتی نگه داشته شده است.

سرمته‌های دکمه‌دار

۵-×-× تشکیلات نرم تا متوسط با مقاومت فشاری پایین

۶-×-× تشکیلات نیمه سخت با مقاومت فشاری بالا

۷-×-× تشکیلات سخت، نسبتاً ساینده و ساینده

۸-×-× تشکیلات بسیار سخت و ساینده



شکل ۱-۲۷- سرمته سه مخروطی با دندانه‌های فولادی ویژه تشکیلات متوسط (Jimeno et al, 1995)

رقم دوم (۱ تا ۴):

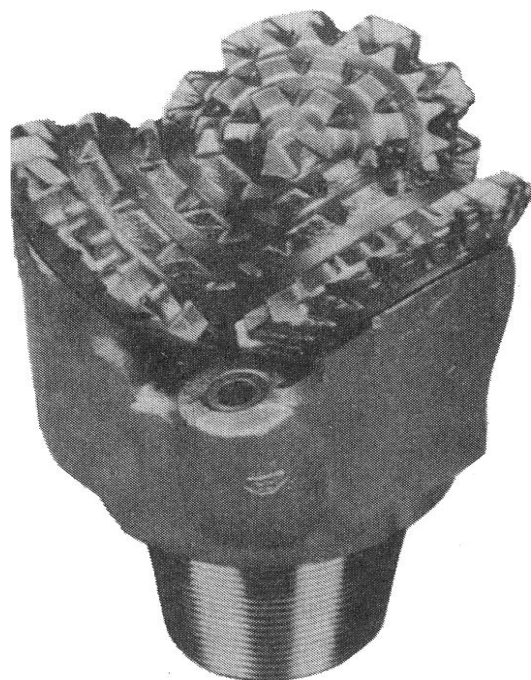
۱-×-× شماره های ۱ تا ۴ سختی تشکیلات را از نرم‌ترین تا سخت‌ترین آن‌ها در هر یک از سیستم‌های

طبقه‌بندی نشان می‌دهد.

رقم سوم (۱ تا ۷):

انواع مختلف یاتاقانها و طرح خاص دکمه‌های ردیف بیرونی را نشان می‌دهد. (متداول برای سرمته‌های

دکمه‌دار و دندانه‌های فولادی)



شکل ۱-۲۸- سرمته سه مخروطی با دندان‌های فولادی ویژه تشکیلات سخت (Jimeno et al, 1995)

۱-۳-۳ سه مخروطی استاندارد با یاتاقان‌های باز

۲-۳-۳ سه مخروطی استاندارد با یاتاقان‌های باز و فلاشینگ تنها با هوا

۳-۳-۳ سه مخروطی استاندارد با یاتاقان‌های باز و دکمه‌های کاربرد تنگستن مخصوص بر ردیف خارجی مخروط

۴-۳-۳ سه مخروطی با یاتاقان‌های پوشیده

۵-۳-۳ سه مخروطی با یاتاقان‌های پوشیده و دکمه‌های کاربرد تنگستن مخصوص در ردیف خارجی مخروط

۶-۳-۳ سه مخروطی با یاتاقان‌های پوشیده اصطکاکی

۷-۳-۳ سه مخروطی با یاتاقان‌های پوشیده اصطکاکی و دکمه‌های کاربرد تنگستن مخصوص در ردیف خارجی مخروط.

ب) سرمته‌های تیغه‌ای

حفاری چرخشی با عمل برش در دهه چهل در معادن زغال آمریکا در نقطه اوج خود بود. در آن زمان از این روش برای حفر چال در روباره و در خود ماده معدنی استفاده می‌شد. با گسترش روز افزون استفاده از دستگاه‌های حفاری چرخشی با سرمته‌های سه مخروطی در کارهای سطحی، استفاده از این روش محدود به

سنگ‌های نرم و قطرهای کم تا متوسط شد که تنها قابل قیاس با روش‌های شکستن مستقیم بودند. در کارهای زیرزمینی حفاری ضربه‌ای- دورانی بخش عظیمی از کارها را به خود اختصاص داده است و تنها سنگ‌های با مقاومت کم تا متوسط و غیر ساینده مانند پتاس، زغال و غیره را برای دستگاه‌های حفاری دوران باقی گذاشته است.

حفاری توسط عمل برش در چال‌های استخراجی (تولیدی) به وسیله سرمته‌هایی که دارای قطعاتی از جنس کاربید تنگستن یا مواد دیگری مثل الماس مصنوعی پلی کریستالین هستند انجام می شود. این سرمته‌ها از نظر شکل و زوایا متنوع بوده و آنها را می توان به انواع زیر تقسیم بندی کرد:

الف: سرمته‌های دوپیر تیغه‌ای با قطرهای ۳۶ تا ۵۰ میلی متر

ب: سرمته‌های سه یا چهار پر تیغه‌ای با قطرهای ۵۰ تا ۱۱۵ میلی متر

ج: سرمته‌های سه تیغه‌ای با تیغه‌های قابل تعویض از قطر ۱۶۰ تا ۴۰۰ میلی متر

شکل ۱-۲۹ نمونه‌هایی از انواع سرمته‌های تیغه‌ای مورد استفاده در روش حفاری دورانی را نشان می دهد.

۱-۲-۴-۲-۳- سرمته‌های مورد استفاده در حفاری ضربه‌ای

به طور کلی از سه نوع مته در سیستم حفاری ضربه‌ای استفاده می شود که عبارتند از:

الف) مته اسکنه‌ای

ب) مته تقاطعی

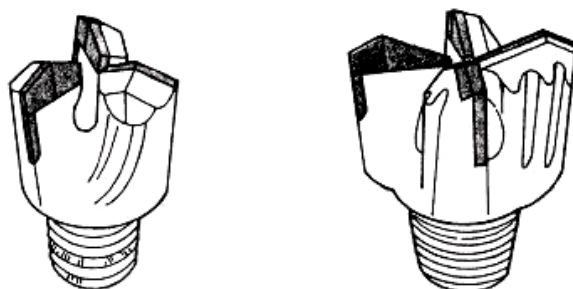
ج) مته دکمه‌ای

مته‌های اسکنه‌ای غالباً در حفاری‌های معادن زیرزمینی به کار برده می شوند و دستگاه‌هایی از نوع سینکر یا چکشهای حفاری دارای این نوع مته هستند. ولی برای چال‌های با قطر و عمق زیاد مناسب نیستند و معمولاً برای چال‌هایی با قطر کمتر از سه اینچ (۷۵ میلی متر) استفاده می شوند (شکل ۳۰-۱).

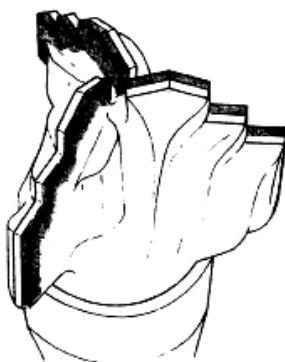
تا چند سال گذشته معمولاً مته‌های چکشهای حفاری و یا دریفر به شکل اسکنه مشابه نوک قلم خوش نویسی در انتهای لوله‌های حفاری به طور یک پارچه ساخته می شد که در واقع غیر قابل جدا شدن و تعویض بودند. اما در سال‌های اخیر به جای این نوع ساختار، مته‌ها غالباً به میله حفاری متصل می شوند. حسن این نوع مته‌ها آن است که به آسانی قابل تعویض اند و در ضمن در اندازه و اشکال مختلف با درجه



(a) سرمته های تیغه ای دو پر

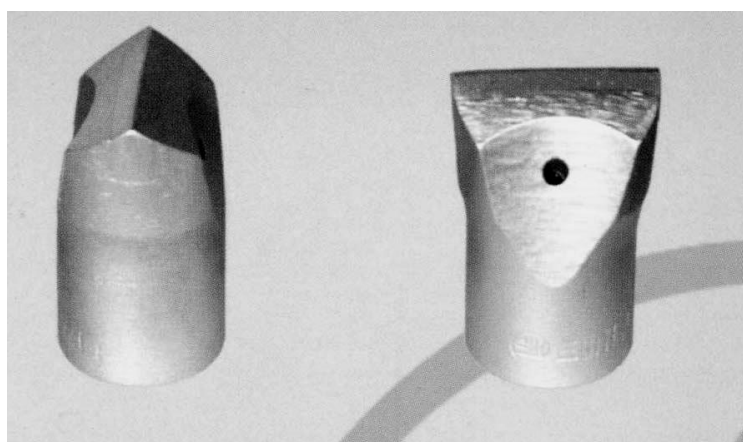


(b) سرمته های تیغه ای سه و چهار پر



(c) سرمته های تیغه ای سه پر با پره های قابل تعویض

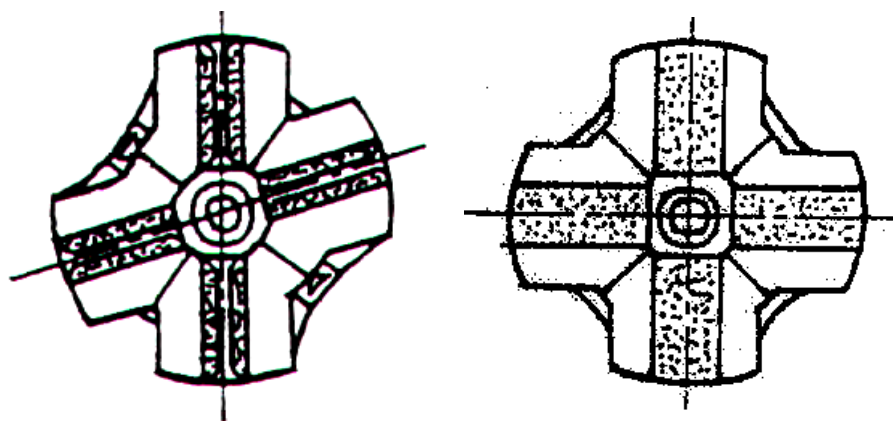
شکل ۱-۲۹- انواع سرمته های تیغه ای مورد استفاده در روش حفاری دورانی (Jimeno et al, 1995)



شکل ۱-۳۰- نمونه ای از سرمته اسکنه ای

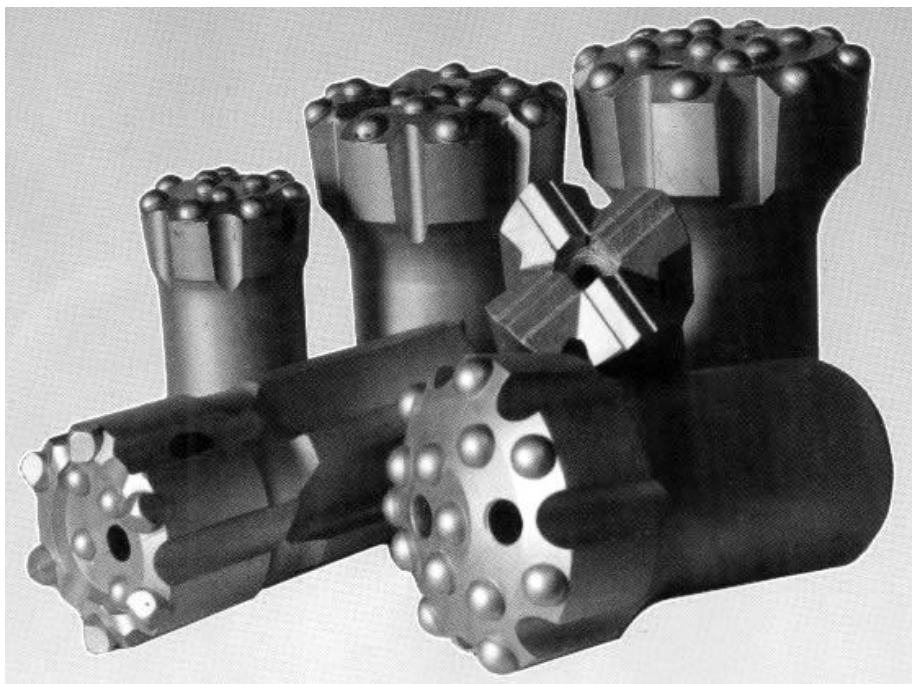
سختی متفاوت طراحی شده‌اند. جنس این مته‌ها غالباً فولادی است اما به دلیل خاصیت خراش‌اندازی بعضی از کانی‌ها و سنگ‌ها، مته‌های فولادی گاهی به ازای هر چند اینچ حفاری باید تعویض شده‌اند و چون از نظر اقتصادی و اتلاف وقت جهت عوض کردن این مته‌ها مشکلاتی در امر حفاری به وجود می‌آید لذا به تدریج برای ساختن این مته به جای فولاد از کربورتنگستن که مقاومت بیشتری دارد، استفاده می‌شود. بدین جهت برای چال‌های بیش از سه اینچ (۷۵ میلی‌متر) مته‌هایی از این نوع (ساخته شده از آلیاژهای سخت یا کربورتنگستن) به شکل دیگری توسعه داده شده که عمدتاً شباهت به حرف لاتین «x» دارد و در بعضی موارد نیز به علامت بعلاوه «+» طراحی و ساخته شده‌اند. شکل ۱-۳۱ چند نمونه از این نوع مته‌ها را نشان می‌دهد.

معمولاً از مته‌های ضربداری برای سنگ‌های متراکم و سخت استفاده می‌شود که در چال شیارهای مارپیچی ایجاد می‌کند. لبه‌های چهار بخش مته به حالت ۹۰ درجه (در حالت +) و یا تقریباً ۹۰ درجه (در حالت x) نسبت به یکدیگر قرار دارند. قطر این نوع مته‌ها بر حسب کارخانه سازنده آنها متفاوت است اما با توجه به آنکه از سیستم چالزنی ضربه‌ای اختصاصاً برای چال‌های کم قطر و سنگ‌های سخت بیشتر استفاده می‌شود، قطر مته‌ها معمولاً بین ۱/۵ تا ۵ اینچ متغیرند (۳۸ تا ۱۲۷ میلی‌متر) و وزن این نوع مته‌ها بر حسب قطر آن بین حدود ۶۰۰ گرم تا حدود ۸ کیلوگرم متغیر است.



شکل ۱-۳۱- نمونه‌ای از سرمته‌های تقاطعی (راست نوع «+»، چپ نوع «x»)

مته‌های دکمه‌ای نوع دیگر از مته‌های سیستم ضربه‌ای است که مشابه مته‌های دکمه‌ای است که در سیستم حفاری دورانی به کار برده می‌شوند (شکل ۱-۳۲).



شکل ۱-۳۲- نمونه‌ای از سرمته‌های دکمه‌ای

سطح مته‌های دکمه‌ای، شکل تقریباً صاف و برجستگی‌های کروی مانند دارند که جنس آن‌ها از کربورتنگستن است. این نوع مته‌ها بدان جهت ساخته شدند تا اشکال ساییدگی که در انواع دیگر مته‌های مورد استفاده در سیستم حفاری ضربه‌ای موجود است برطرف شود. مته‌های دکمه‌ای به نحوی طراحی شده‌اند که قطعات خرد شده سنگ در کوتاه‌ترین مدت از مقابل آن‌ها انتقال داده می‌شوند و لذا اصطکاک دندانه‌ها و مته با سنگ کمتر ولی عمر آنها زیاده‌تر خواهد بود.

چنانچه شرح آن آمد سرمته‌های خاص هر نوع سنگ و هر روش حفاری عموماً عملکرد خاصی داشته و نتایج کاملاً متفاوتی ارائه می‌کنند. همخوانی و تناسب سرمته انتخابی و نوع روش و شرایط سنگ در نهایت باعث بهبود شرایط حفاری و افزایش سرعت می‌شود.

فصل دوم

بررسی تأثیر مشخصات توده سنگ
بر سرعت حفاری

چنانچه در شکل ۱-۱ نشان داده شد، دومین خانواده مهم پارامترهای مؤثر بر سرعت حفاری مشخصات مربوط به ماده سنگ و توده سنگ مورد حفاری است. توده سنگ به عنوان محیط حفاری نقش بسیار اساسی در میزان سرعت حفاری، استهلاک مته و ماشین و هزینه‌های کلی حفاری دارد. بنابراین شناخت محیط حفاری و خصوصیات توده سنگ برجا کمک بسیار زیادی به انتخاب نوع سیستم حفاری، تعیین تعداد ماشین آلات، ارزیابی توان تولید معدن و پیش‌بینی سرعت حفاری خواهد نمود.

تاکنون متخصصان متعددی نقش و تأثیر پارامترهای فیزیکی، مکانیکی و ساختاری توده سنگ را تشریح نموده و رابطه هر یک از این پارامترها را با سرعت حفاری مورد مطالعه قرار داده‌اند. (قاسمی و همکاران Hoseinie, Ersoy & Waller (1995b), Ersoy & Waller (1995a), Akun & Karpuz (2005), (۱۳۸۳)، (2006) et al., Hoseinie et al. (2007), Hoseinie et al. (2008), Jimeno et al. (1995) al., Jung et al. (1994), Li et al. (2000), Kaiser (1994) & McCreath, Kahraman et al (2000), Kahraman (1999), (1994) Serradj (1996), Singh(1990), Singh et al. (1998), Singh et al. (2006), Tanaino (2005), Thuro (1997), (1982) Wilbur & Lyman, (1991) Wijk). در این تحقیق سعی گردیده کلیه منابع معتبر، به دقت از نظر رفتارشناسی توده سنگ در حین حفاری و نیز اهمیت و تأثیر هر یک از پارامترهای مورد بررسی دقیق قرار گیرند.

با توجه به مطالعات انجام شده و نیز منابع معتبر، در مجموع می‌توان کلیه پارامترهای ژئومکانیکی مؤثر بر سرعت حفاری را در سه خانواده اصلی زیر طبقه بندی نمود (شکل ۱-۲):

الف) مشخصات فیزیکی و میزالوژیکی ماده سنگ

- چگالی

- بافت (اندازه و شکل دانه)

- نوع ماتریکس و درجه سیمانته شدن

- تخلخل

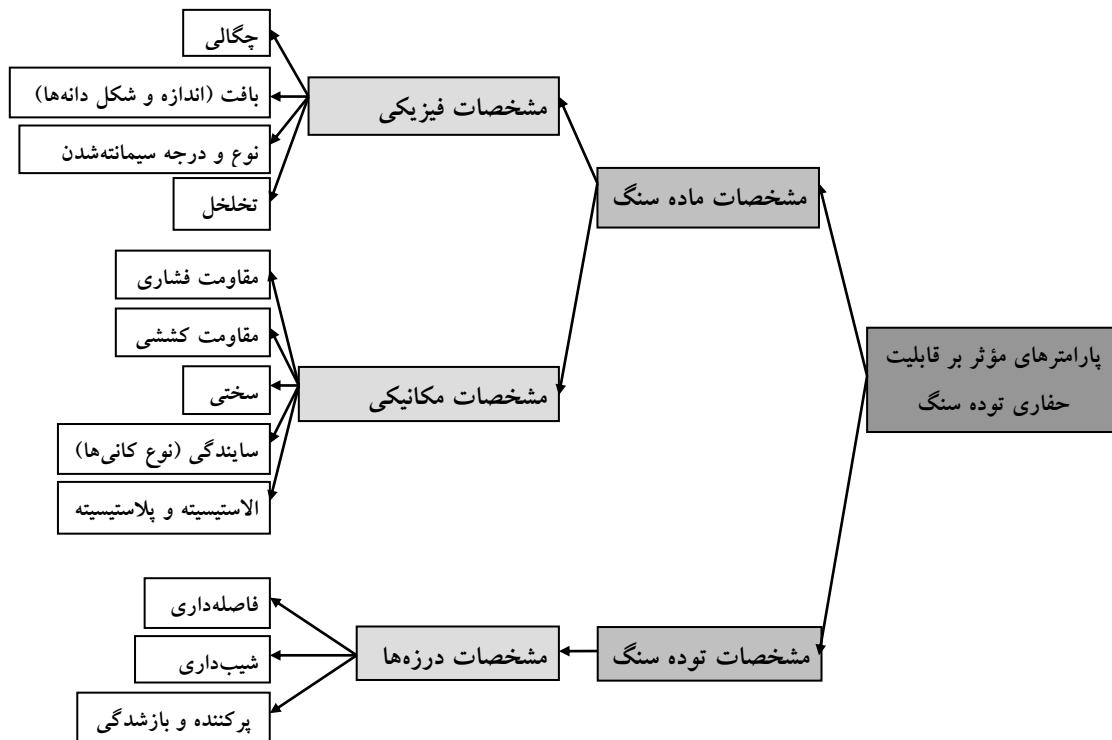
ب) مشخصات مکانیکی

- مقاومت فشاری تک محوری

- مقاومت کششی

- سختی (مقیاس موهس)

- ساینده‌گی (نوع کانی‌های موجود)
- الاستیسیته و پلاستیته
- (ج) مشخصات ساختاری توده سنگ
- درزه‌داری (فاصله‌داری، شیب و بازشدگی درزه‌ها)
- گسل
- لایه‌بندی.



شکل ۱-۲- پارامترهای ژئومکانیکی مؤثر بر سرعت حفاری

تأثیر توأم کلیه پارامترهای فوق و نیز درجه اهمیت مختلف هر یک از آنها در سرعت حفاری، مسئله بررسی و بهینه‌سازی حفاری را بسیار دشوار و پیچیده می‌سازد. چنانچه از طبقه‌بندی فوق نیز پیداست، برخلاف آتشکاری، در حفاری تعداد پارامترهای مهم مربوطه به ماده سنگ بیشتر بوده و لذا ماده سنگ از اهمیت بیشتری نسبت به توده سنگ برخوردار است.

در ادامه این فصل مهمترین پارامترهای مؤثر بر سرعت حفاری به طور تفصیلی مورد بحث قرار می‌گیرند.

۲-۱- مشخصات فیزیکی و مینرالوژیکی سنگ‌ها

۲-۱-۱- 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. وزن مخصوص یک کانی به ترکیب و ساختمان شیمیایی آن بستگی دارد. معمولاً هرچه شمار اتم‌های سنگین یک کانی بیشتر باشد شعاع اتمی آن کوچکتر می‌گردد و تراکم آن‌ها در شبکه تبلور بیشتر شده و در نتیجه چگالی آن کانی بیشتر می‌شود. چگالی یک سنگ را می‌توان بر اساس درصد کانی‌های تشکیل دهنده و وزن مخصوص آن‌ها به‌دست آورد. از عوامل مؤثر بر چگالی می‌توان تخلخل، نسبت پوکی و نحوه استقرار کانی‌ها را نام برد. هرچه نسبت پوکی و تخلخل سنگ زیادتر باشد تراکم و چگالی سنگ کمتر خواهد بود. به طور معمول چگالی سنگ‌ها بین $1/9$ تا $3/5$ متغیر است اما در موارد استثنایی سنگ‌ها به دلیل داشتن کانی‌های سنگین چگالی بیشتری دارند. به طور معمول چگالی سنگ‌های آذرین بیشتر از سنگ‌های آذرین رسوبی است. این مقدار برای سنگ‌های رسوبی بین $1/9$ تا $2/7$ متغیر است. چگالی ظاهری برخی از سنگ‌ها در جدول ۲-۲ نشان داده شده است. همچنین جدول ۲-۳ چگالی برخی از کانی‌های شاخص در حفاری را نشان می‌دهد.

جدول ۲-۲- چگالی ظاهری برخی از سنگ‌ها

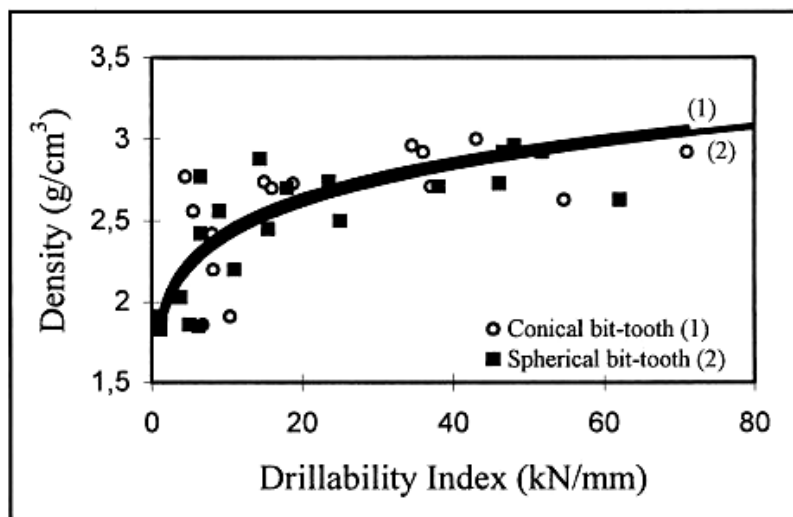
انواع سنگ‌ها	چگالی ظاهری
۱- سنگ‌های آذرین	
بازالت	۲/۲-۲/۷۷
دیاباز	۲/۸-۲/۹۵
گابرو	۲/۷-۳
گرانیت	۲/۵۳-۲/۲۶
۲- سنگ‌های رسوبی	
دولومیت	۲/۶۷-۲/۷۲
سنگ آهک	۲/۶۲-۲/۷۲
ماسه‌سنگ	۱/۹۱-۲/۶
شیل	۲-۲/۴
۳- سنگ‌های متامورفیک	
گنیس	۲/۶۱-۳/۱۲
ماربل	۲/۵۱-۲/۸۶
کارتزیت	۲/۶۱-۲/۶۷
شیست	۲/۶-۲/۸۵
اسلیت	۲/۷۱-۲/۷۸

جدول ۲-۳- چگالی برخی از کانی‌های شاخص در حفاری

چگالی	نوع کانی	چگالی	نوع کانی
۲/۷۱-۳/۷۲	کلسیت	۲-۳/۲	میکای سیاه
۲/۵-۲/۸	فلدسپار	۲/۸-۳	دولومیت
۲/۹-۳/۵	هورنبلند	۲/۲-۲/۴	ژیپس
۲-۲/۴	مونوریلونیت	۲/۵-۲/۶۵	کائولینایت
۲/۶۵	کوارتز	۲/۷۶-۳	میکای سفید
۴/۹-۵/۲	پیریت	۲/۶-۲/۷	تالک
۴/۳-۴/۶	باریت	۲/۶-۳	کلریت واپلیت

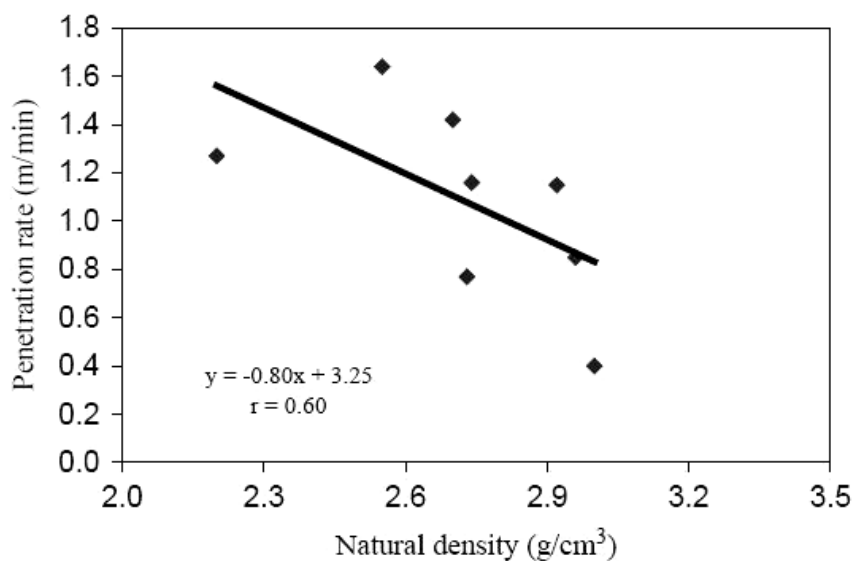
تاکنون متخصصان زیادی رابطه چگالی و سرعت حفاری را مطالعه نموده‌اند. از آنجائی که چگالی سنگ با مقاومت سنگ و سرعت حفاری رابطه عکس دارد، هرچه سنگ متراکم‌تر و چگال‌تر باشد سرعت حفاری کمتر خواهد بود.

قهرمان ۱۶ و همکاران در سال ۲۰۰۰ با مطالعه گسترده روی تعدادی از سنگ‌های کشور ترکیه نشان داد که با افزایش میزان چگالی سنگ انرژی لازم برای حفاری توسط سیستم حفاری دورانی افزایش یافته و لذا سرعت حفاری کمتر می‌شود. شکل ۲-۲ منحنی حاصل از تحقیقات قهرمان را نشان می‌دهد.



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

همچنین قهرمان در تحقیقی دیگر رابطه چگالی طبیعی سنگ‌ها و سرعت حفاری ضربه‌ای را مورد مطالعه قرار داده است. نتایج این تحقیق نیز مشابه تحقیق قبل این متخصص نشان دهنده کاهش سرعت حفاری همزمان با افزایش چگالی سنگ‌ها می‌باشد (شکل ۲-۳).



شکل ۲-۳- ارتباط چگالی سنگ و سرعت حفاری ضربه‌ای (Kahraman et al. 2003)

غیر از تحقیقات جامع ذکر شده که توسط دکتر قهرمان در کشور ترکیه صورت پذیرفته در سایر مقالات و منابع موجود، رابطه ریاضی خاصی بین چگالی سنگ و سرعت حفاری ارائه نشده است و کلیه محققان تنها به ذکر با اهمیت بودن این پارامتر در حفاری اکتفا نموده‌اند. لذا استفاده از این پارامتر به عنوان یک پارامتر منفرد برای پیش‌بینی سرعت حفاری و ارزیابی قابلیت حفاری سنگا با توجه به پیشینه ضعیف تحقیقاتی پیشنهاد نمی‌گردد.

۲-۱-۲- بافت

بافت، نقش اساسی در رفتار مهندسی سنگ‌ها به ویژه از نظر قابلیت حفاری دارد. در بحث از بافت سنگ، اندازه، شکل و میزان ماتریکس (نسبت دانه به ماتریکس) مورد توجه قرار می‌گیرد.

از نظر دانه بندی، هرچه سنگ دانه درشت‌تر باشد قابلیت حفاری سنگ افزایش یافته و راحت‌تر می‌توان در آن حفاری نمود (استوار، ۱۳۸۰). از نظر شکل دانه‌ها، هرچه 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.

در تقسیم‌بندی رایج در حفاری، بافت سنگ‌ها بر اساس دو عامل اندازه و شکل در چهار گروه تقسیم‌بندی می‌شوند: ۱- دانه ای، ۲- پورفیری، ۳- شیشه ای و ۴- 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:

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

برای تشخیص و تشریح بافت یک سنگ روشهای بسیار متنوع و طبقه بندی های بسیار جامعی وجود دارد که می‌توان در متون کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی آنها را جستجو نمود. با این حال در کارهای مهندسی بویژه حفاری روباز و حفاری مکانیزه توسط TBM و رودهدرها تشریح بافت به صورت کیفی نمی‌تواند چندان کارساز باشد. لذا همواره یافتن یک روش برای کمی‌نمودن ویژگیهای بافت یک سنگ آرمان محققان مهندسی حفاری و زمین‌شناسی مهندسی بوده است.

۲-۱-۲-۱- ضریب بافت

ضریب بافت^{۱۷}، جامع‌ترین و معتبرترین روش کمی‌نمودن بافت یک سنگ است که توسط هوارس^{۱۸} و رولند در سال ۱۹۸۷ ارائه شده است (Ersoy & Waller, 1995a). این روش با رابطه عمومی زیر قابل محاسبه

است:

$$TC = AW \left[\left\{ \frac{N_0}{N_0 + N_1} \right\} + \left\{ \frac{N_1}{N_0 + N_1} \times AR_1 \times AF_1 \right\} \right] \quad (۶)$$

که در آن:

TC: ضریب بافت

AW: وزن 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

FF₀: میانگین حسابی فاکتور شکل برای دانه‌های N_0

AR₁: میانگین حسابی نسبت طول بر قطر در دانه‌های N_1

AF₁: فاکتور زاویه که برای ذره‌های N_1 محاسبه می‌شود.

17 . Texture Coefficient

18 . Howarth & Rowland

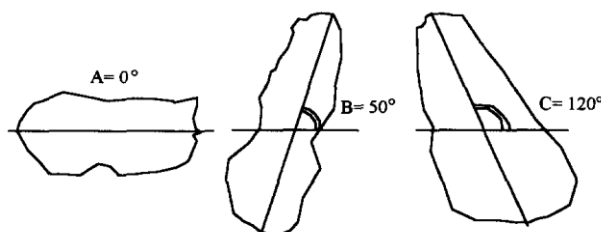
وزن مساحت (AW) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$AW = (\text{مساحت ناحیه مرجع}) / (\text{مساحت دانه‌های درون مرز ناحیه مرجع}) \quad (7)$$

فاکتور شکل در رابطه ضریب بافت معرف انحراف دانه از حالت گرد بودن است. این انحراف به دو صورت به وجود می‌آید: درازشدگی شکل یا افزایش ناصافی سطح نمونه. فاکتور شکل یا فاکتور کشیدگی دانه از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$2(\text{محیط}) / (\text{مساحت}) = 4\pi = \text{فاکتور شکل} \quad (8)$$

مفهوم فاکتور زاویه مطابق شکل ۲-۴ عبارت است از زاویه بین قطر بزرگ دانه و جهت افق. ماکزیمم مقدار این زاویه ۱۸۰ درجه است.



شکل ۲-۴ - مفهوم فاکتور زاویه

جهت‌یافتگی زاویه دانه‌ها توسط کمی کردن فاکتور زاویه به دست می‌آید. این فاکتور برای دانه‌های کشیده و طویل که در آنها نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک بیش از ۲ می‌باشد محاسبه می‌گردد. فاکتور زاویه AF_1 توسط سیستم وزن‌دهی موجود در جدول ۲-۳ طبقه‌بندی می‌شود. این سیستم تفاوت زاویه‌ای بین همه دانه‌های کشیده را با دقت و به طور مطلق محاسبه می‌نماید. تفاوت زاویه‌ای در نه کلاس مختلف دسته‌بندی می‌شود، برای هر کلاس یک وزن وجود دارد.

جدول ۲-۳ - روش وزن‌دهی به تفاوت‌های زاویه‌های دانه‌های کشیده (Ersoy & Waller, 1995a)

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

فاکتور زاویه از جمع کلاس‌ها و تقسیم آنها بر کل اعداد زاویه‌ای به شرح رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

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

که در آن:

N: تعداد کل دانه‌های کشیده و طویل

X_i: شماره تفاوت زاویه‌ای در هر کلاس

i: فاکتور وزن‌دهی و شماره کلاس

شکل دانه‌های سنگ به عنوان بحرانی‌ترین پارامتر مؤثر در قابلیت ساینده‌گی سنگ‌ها مطرح می‌باشد (Ersoy & Waller, 1995a). دانه‌های گوشه‌دار کشیده و ذرات ریز سنگ باعث کاهش سرعت حفاری و افزایش قابلیت ساینده‌گی سنگ‌ها می‌شود. ارزوی و والر^{۱۹} در سال ۱۹۹۵ در تحقیقات خود نشان دادند که با افزایش گوشه‌داری دانه‌های سنگ، سرعت حفاری اکتشافی کاهش و میزان سایش سرتمه افزایش می‌یابد.

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 نرم افزار اتوکد^{۲۰} شده و دیجیتایز می‌شوند. پس از دیجیتالی‌شدن عکس‌ها ابتدا یک محدوده مرجع^{۲۱} 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 ۲-۵).

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 دانه محاسبه می‌شود. سپس از نتایج حاصل از محاسبات مذکور پارامترهای موجود در رابطه ضریب بافت (رابطه (۶)) تعیین شده و میزان ضریب بافت محاسبه می‌شود.

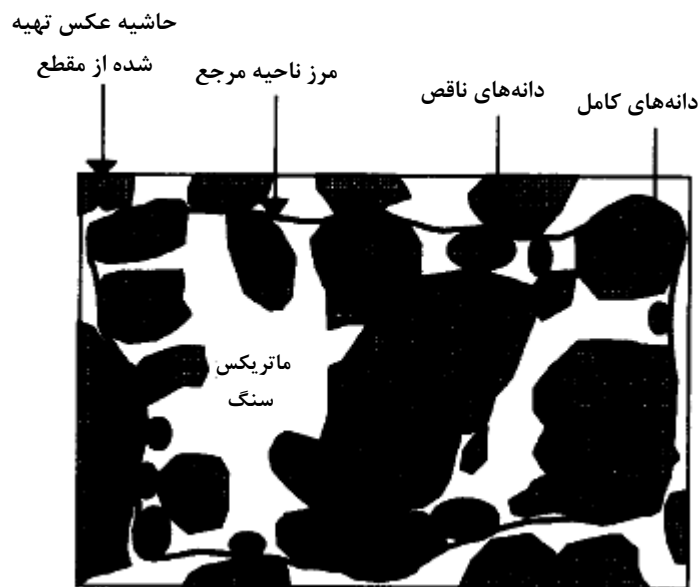
تاکنون محققان زیادی با استفاده از کارهای آزمایشگاهی و صحرایی بر اهمیت و تأثیر بافت بر قابلیت حفاری و ساینده‌گی سنگ‌ها تأکید کرده‌اند. از جمله جامع‌ترین این تحقیقات می‌توان به تحقیق ارزوی و والر (۱۹۹۵)

19 . Ersoy & Waller

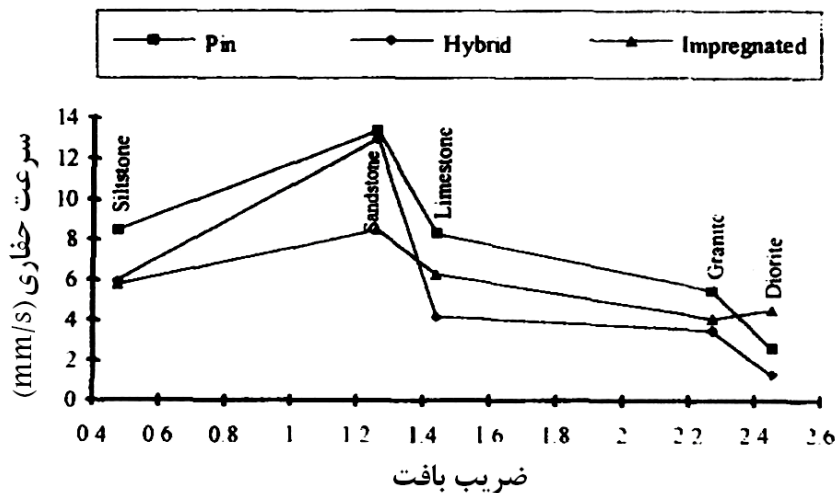
20 . Autocad

21 . Reference Boundry

اشاره نمود. ایشان با انجام مطالعات آزمایشگاهی دریافته‌اند که در سه نوع مته مختلف با افزایش ضریب بافت سرعت حفاری کاهش می‌یابد (شکل ۵-۲).



شکل ۲-۵- شمای کلی یک مقطع نازک برای محاسبه ضریب بافت (Ersoy & Waller, 1995a)

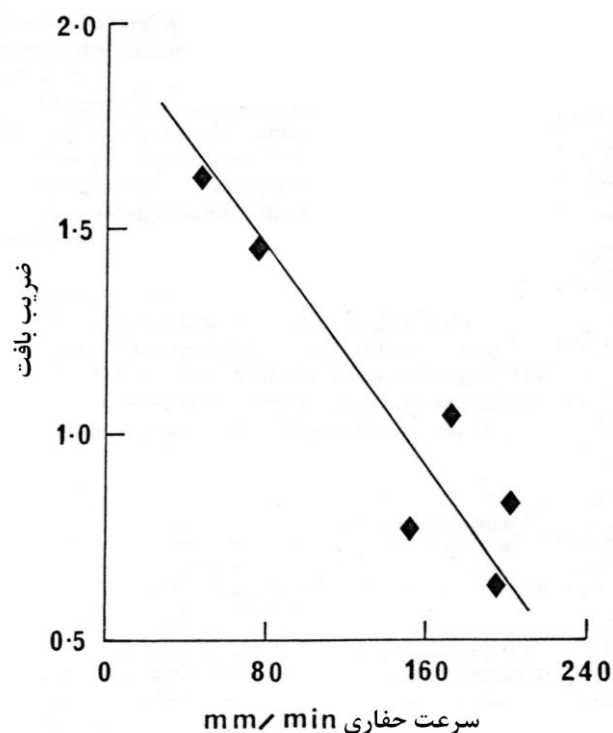


شکل ۲-۶- ارتباط ضریب بافت و سرعت حفاری اکتشافی در سه نوع سرمته مختلف (Ersoy & Waller, 1995a)

در تحقیق جامع دیگری که توسط اوزترک و همکارش^{۲۲} در سال ۲۰۰۴ انجام شده رابطه ضریب بافت و بسیاری از مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها از جمله قابلیت برش سنگ‌ها ارائه شده است (Ozturk et al. 2004). معماریان در تحقیق نسبتاً جامعی رابطه بین ساینده‌گی و ضریب بافت را در تعدادی از سنگ‌های تزئینی ایران مورد بررسی قرار داده است با این حال به رغم تحقیق مناسب، نتیجه و رابطه ریاضی مطلوبی

²² . Ozturk

حاصل نگردیده است. راثو^{۲۳} در کتاب "اصول حفاری در سنگ" رابطه سرعت حفاری و ضریب بافت را به صورت شکل‌های ۷-۲ و ۸-۲ نشان داده‌است (Rao & Misra, 1998). از نظر طبقه‌بندی نیز تاکنون ویلبور^{۲۴} (۱۹۸۶) و حسینی (۲۰۰۸) با در نظر گرفتن بافت به عنوان یک پارامتر مهم در قابلیت حفاری سنگ‌ها، بافت و اندازه دانه‌ها را در سیستم طبقه‌بندی خویش برای پیش‌بینی قابلیت حفاری به کار برده‌اند. جداول ۴-۲ و ۵-۲ امتیازدهی و طبقه‌بندی بافت را در طبقه‌بندی ویلبور و حسینی (RDi) نشان می‌دهند.



شکل ۷-۲- رابطه سرعت حفاری و ضریب بافت (Rao & Misra, 1998)

جدول ۴-۲- امتیازدهی به بافت سنگ در طبقه‌بندی ویلبور (Wibur, 1982)

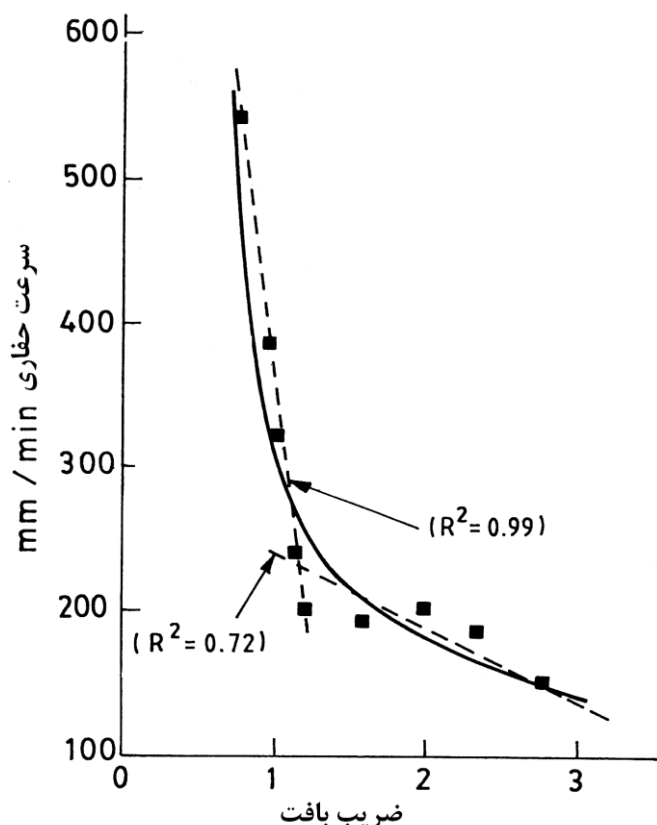
بافت	متخلخل	شکسته (نیمه تحکیم یافته)	گرانوئیدی (دانه متوسط)	پرفیری	متراکم (دانه‌بندی ریز)
امتیاز (از ۳۲)	۸	۴	۳	۲	۱

جدول ۵-۲- امتیازدهی به بافت سنگ در طبقه‌بندی RDi (Hoseinie et al. 2008)

بافت	متخلخل	شکسته (نیمه تحکیم یافته)	گرانوئیدی (دانه متوسط)	پرفیری	متراکم (دانه‌بندی ریز)
اندازه دانه‌ها (mm)	.....	>۵	۲-۵	ماتریکس: ۰/۵-۱ دانه‌ها: ۲-۵	۰/۰۵-۱
امتیاز (از ۱۰۰)	۱۵	۱۰	۷	۴	۱

²³ . Rao

²⁴ .Wilbur



شکل ۲-۸- رابطه سرعت حفاری و ضریب بافت (Rao & Misra, 1998)

۲-۱-۳- درجه سیمان‌شدن و نوع ماتریکس

مهمترین خصوصیت فیزیکی سنگ‌ها، یعنی نیروی به هم چسبی، حاصل نیروی جاذبه بین مولکولهای یک جسم یا ماده است. به عبارت دیگر نیروی به هم چسبی یک نیروی درون زاست و در مقابل نیروهای خارجی جدا کننده مولکولها، جسم را مقاوم می‌کند. میزان این نیرو به بار الکترواستاتیکی ذرات و نیروی واندروالس بستگی دارد. واندروالس نیرویی است که با توان هفتم فاصله بین ذرات نسبت معکوس دارد. بنابراین هرچه فاصله سطح تماس ذرات کمتر باشد، مقدار آن بیشتر است و در نتیجه نیروی به هم چسبی نیز افزایش خواهد یافت. به همین دلیل در خاک مرطوب به دلیل نفوذ بیش از حد آب در بین ذرات و کاهش سطح تماس آنها در مقایسه با خاک خشک یا نیمه‌تر نیروی به هم چسبی کمتری وجود دارد. البته باید توجه داشت که وجود مقدار متناسبی از آب به دلیل افزایش سطح تماس و ایجاد ارتباط محکمتر بین ذرات، موجب افزایش نیروی به هم چسبی خواهد شد. بر همین اساس دو کانی هم‌جنس مانند ماسه را می‌توان به کمک کانی دیگری به هم متصل کرد. کانیهای مانند ماسه یا گراول نیز نیروی به هم چسبی ندارند.

با توجه به مطالب مذکور سنگ‌ها را بر اساس میزان نیروی به هم چسبی به چهار دسته تقسیم می‌کنند:

الف) سنگ سخت: به سنگی گفته می‌شود که تحت تأثیر نیروی به هم‌چسبی 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 سیمان‌ای: به سنگی گفته می‌شود که کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده آنها توسط رس یا سیلیس یا کانی دیگری به یکدیگر مرتبط و سیمان 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 غیرسیمان‌ای 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)

ماتریکس‌های سنگ‌های مختلف عمدتاً با توجه به منشأ ساخت و فرآیندهای درگیر در شکل‌گیری و نیز عمر آنها متفاوت می‌باشند. ماتریکس سنگ می‌تواند هم‌جنس یا غیرهم‌جنس دانه‌های سنگی باشد. در انواع سنگ‌ها عموماً سیمان سنگ‌ها شامل گونه‌های سیلیسی، آهکی، آهنی و رسی می‌باشد.

تاکنون محققان مختلف به اهمیت سیمان‌شدن در قابلیت حفاری و سرعت حفاری سنگ‌ها اشاره نموده‌اند. اما از آنجایی که این پارامتر یک پارامتر کیفی و تشریحی است، ارتباط ریاضی خاص یا کمیت شناخته شده‌ای برای نشان دادن رابطه بین سیمان‌شدن و سرعت حفاری پیشنهاد نشده است. آنچه از کلیه منابع علمی در دست است اینکه با افزایش کیفیت سیمان‌ته شدن و نیز افزایش مقاومت سیمان سنگ، سرعت حفاری و قابلیت حفاری سنگ کاهش پیدا می‌کند.

۲-۱-۴- 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 و مهندسی سنگ دارند و به طور کلی هرچه سنگ متخلخل‌تر باشد مقاومت مکانیکی آن کمتر است. به همین دلیل نوع تخلخل و درصد آن از نخستین خواصی است که در مباحث مکانیک سنگی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

تخلخل سنگ را می‌توان از نظر نوع به دو گروه عمده تقسیم‌بندی نمود:

الف) تخلخل با حفره‌های مرتبط

ب) تخلخل با حفره‌های مجزا

چنانچه فضای خالی یک سنگ به همدیگر راه داشته باشد این نوع تخلخل را تخلخل مرتبط می‌نامند. وجود این نوع تخلخل باعث می‌شود که ساختار فیزیکی و ماکروسکوپی سنگ حالت پفکی به خود گرفته و از استحکام کافی برخوردار نباشد. در این صورت مقاومت سنگ به شدت کاهش یافته و در نتیجه قابلیت حفاری در سنگ افزایش می‌یابد. تخلخل سنگ‌ها در طبیعت از صفر تا ۵۵٪ درصد متغیر می‌باشد.

از آنجائیکه تخلخل با چگالی و مقاومت فشاری سنگ‌ها رابطه معکوس دارد. لذا با اندازه‌گیری این دو پارامتر می‌توان از میزان تخلخل سنگ نیز به صورت غیر مستقیم اطلاع حاصل نمود.

از عوامل مهم دیگری که در میزان تخلخل سنگ‌ها تأثیر اساسی دارد زمان تشکیل آنها است به طوری که سنگ‌های قدیمی‌تر تخلخل بیشتری دارند، مثلاً یک نمونه ماسه‌سنگ کامبرین دارای تخلخل ۱۱٪ و ماسه‌سنگ کرتاسه دارای تخلخل ۳۴٪ است. همچنین عمق قرار گرفتن سنگ‌ها در مقدار تخلخل آنها مؤثر است، مثلاً نمونه شیل مربوط به پنسیلوانین در اکلاهما در اعماق ۱۰۰۰، ۳۰۰۰ و ۵۰۰۰ متر به ترتیب دارای ۱۶، ۷ و ۴ درصد تخلخل است. در میان سنگ‌های رسوبی، چاک با تخلخل ۴۰٪ از سایر سنگ‌ها تخلخل بیشتری دارد و در سنگ‌های آذرین پمیس بیشترین تخلخل را دارد. در سنگ‌های آذرین تخلخل معمولاً بین یک تا دو درصد است مگر اینکه هوازگی یافته باشند که در این صورت بر حسب شدت هوازگی ممکن است تخلخل آنها به ۲۰٪ هم برسد.

حتی درصد کمی از تخلخل‌هایی که به صورت درزه و ترک‌های مویینی هستند به اندازه درصد زیادی از تخلخل‌هایی که به شکل حفره‌های غیر درزه‌ای اند تأثیر دارند، زیرا تخلخل درزه‌ای تأثیر عمده‌ای بر خواص مکانیکی سنگ دارد.

اندازه‌گیری تخلخل سنگ‌ها ممکن است به یکی از روش‌های ساده زیر صورت گیرد:

۱ - با اندازه‌گیری دانسیته

۲ - با اندازه‌گیری درصد آب جذب شده در سنگ بعد از اشباع در آب

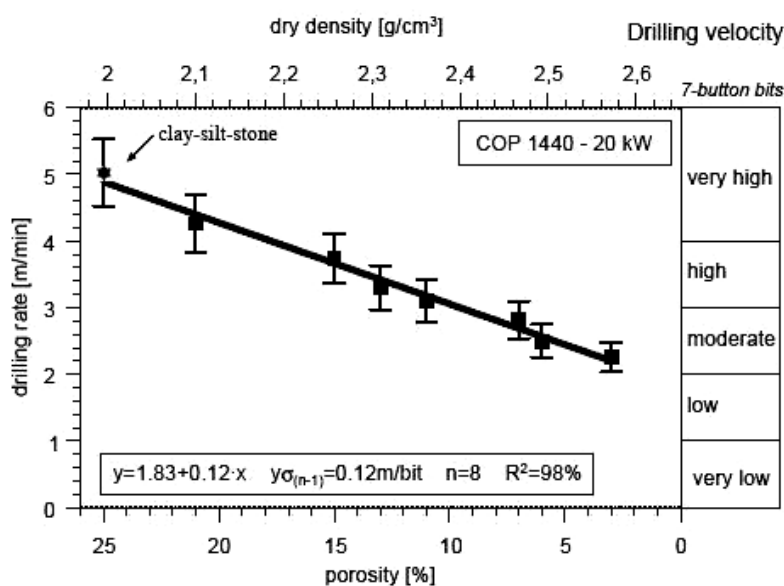
۳ - با اندازه‌گیری درصد جیوه جذب شده در سنگ بعد از اشباع در جیوه

۴ - با اندازه‌گیری حجم بخش جامد و حجم هوای درون سنگ بر اساس قانون Boyle

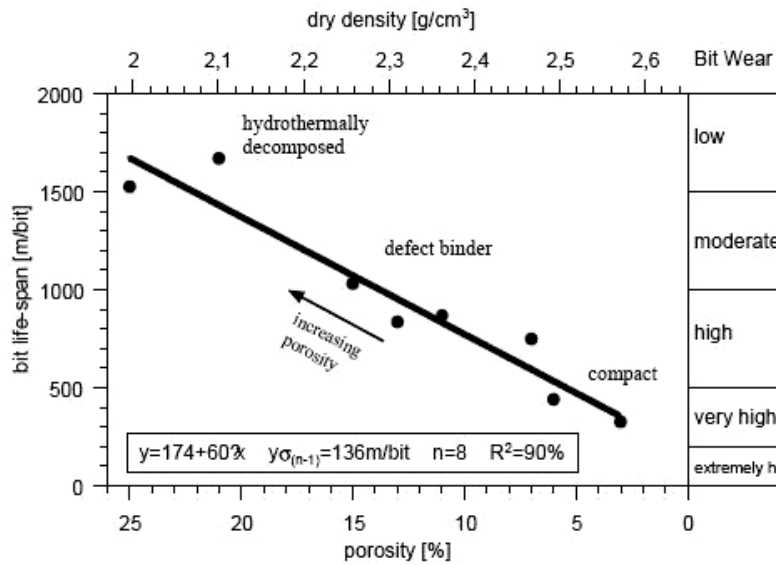
تخلخل یک سنگ بستگی به شکل و اندازه دانه‌هایی دارد که آنرا تشکیل می‌دهند و نیز مربوط به میزان تنوع دانه‌ها، سیمان‌شدن آنها و نوع تجمع کانی‌ها است. اگر سنگ از دانه‌های کروی با اندازه‌های متفاوت تشکیل شده باشد حداقل تخلخل را خواهد داشت، در صورتی که اگر دانه‌ها زاویه‌دار و بی‌شکل باشند تخلخل زیادتر است. نوع ارتباط دانه‌ها با یکدیگر نیز اهمیت دارد به طوری که با شکل و اندازه یکسان دانه‌ها، تخلخل یک سنگ تا حد زیادی بستگی به طرز قرار گرفتن دانه‌ها دارد، مثلاً اگر دانه‌های کروی آنطور قرار گیرند که هر کدام در گوشه یک مکعب باشند تخلخل سنگ ۴۷/۶۷٪ و در صورتی که دانه‌ها در مرکز یک رمبوه‌درن قرار گرفته باشند تخلخل آن به ۲۶/۱۸٪ می‌رسد.

تاکنون مطالعاتی بر روی تأثیر تخلخل بر روی قابلیت حفاری سنگ‌ها انجام شده است و محققان مختلفی به این ویژگی سنگ اشاره نموده‌اند.

تورو (۱۹۹۵) در مقاله خویش رابطه بین تخلخل و سرعت حفاری و همچنین رابطه تخلخل و عمر سرمه را مورد بررسی قرار داده است. وی با انجام کلیه آزمایش‌های صحرائی و آزمایشگاهی چنین نتیجه گرفته است که میزان تخلخل سنگ با سرعت حفاری و میزان سایش و عمر مته رابطه خطی قوی دارد. شکل ۲-۹ و ۲-۱۰ نتایج ارائه شده تحقیقات تورو را نشان می‌دهد.

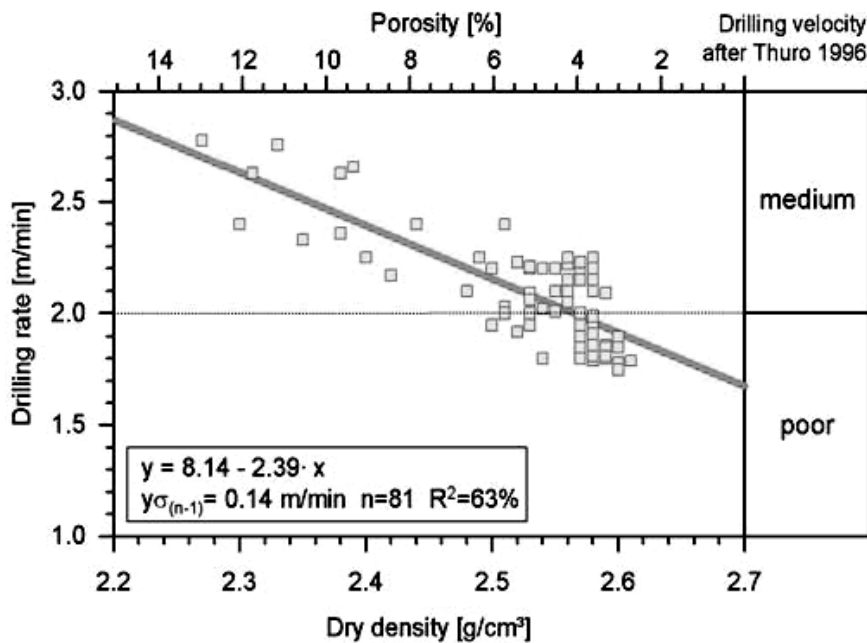


شکل ۲-۹ - رابطه سرعت حفاری با تخلخل و چگالی سنگ (Thuro, 1997)



شکل ۲-۱۰- رابطه عمر سرمته و تخلخل سنگ (Thuro, 1997)

تورو در سال ۲۰۰۲ در تحقیقی دیگر رابطه تخلخل و چگالی را به صورت توام بر روی سرعت حفاری مورد بررسی قرار داده و نتیجه تحقیق خود را به صورت شکل ۲-۱۱ ارائه نموده است. نتایج این تحقیقی نیز نشان می‌دهد که با افزایش تخلخل و کاهش چگالی، سرعت حفاری به صورت خطی افزایش می‌یابد.



شکل ۲-۱۱- رابطه سرعت حفاری با تخلخل و چگالی خشک سنگ (Thuro, 2002a)

۲-۱- مشخصات مکانیکی سنگ‌ها

۲-۱-۱- مقاومت فشاری تک‌محوری

مقاومت عبارت است از میزان پایداری سنگ در مقابل تنش‌های خارجی. این تنش‌ها ممکن است در حالت سکون (استاتیک) و یا در حالت متحرک (دینامیک) باشند. مقاومت فشاری را می‌توان به عنوان مهم‌ترین و پرکاربردترین ویژگی سنگ‌ها دانست. به دلیل اهمیت و نقش مقاومت در رفتارهای مهندسی سنگ، مقاومت فشاری در اکثر طبقه‌بندی‌های مهندسی سنگ و در کاربردهای گسترده مکانیک سنگ وارد شده و جز لاینفک قضاوت‌های مهندسی در مورد یک سنگ و یک توده سنگ می‌باشد.

شاید اهمیت مقاومت فشاری به خاطر تعدد پارامترهایی باشند که در آن مؤثرند. بدین معنی که از آن‌جایی که پارامترهای مختلفی در مقاومت یک سنگ تأثیر دارند، لذا مقاومت فشاری سنگ‌ها می‌تواند نماینده کلیه این پارامترها در سنگ باشد. عوامل مؤثر در مقاومت فشاری سنگ‌ها عبارتند از (اصانلو، ۱۳۷۵):

- نوع کانی‌های تشکیل دهنده و شرایط استقرار آن‌ها

- درجه هوازدگی یا آلتراسیون سنگ‌ها

- نیروی بین مولکولی ذرات تشکیل دهنده آن‌ها

- وجود عواملی مانند درزه و شکاف در سنگ‌ها

- خواص الاستیکی، پلاستیکی و آنیزوتروپی سنگ‌ها

- جهت و میزان نیروهای وارده بر سنگ‌ها

لذا چنانچه ذکر شد مقاومت فشاری می‌تواند یک کمیت مناسب برای ارزیابی کلیه پارامترهای فوق در سنگ‌ها باشد. مقاومت سنگ اساساً بستگی به ترکیب کانی‌شناسی آن دارد. از بین کانیهای تشکیل دهنده سنگ کوارتز بیشترین مقاومت را داراست که تا بیش از ۵۰۰ مگاپاسکال می‌رسد. مقاومت سنگ در مورد سیلیکات‌های آهن و منیزیم و سیلیکات‌های آلومینیوم از ۲۰۰ تا ۵۰۰ مگاپاسکال متغیر است و در مورد کلسیت ۱۰ تا ۲۰ مگاپاسکال است. بنابراین هرچقدر مقدار کوارتز بیشتر باشد مقاومت نیز افزایش می‌یابد.

مقاومت یک کانی بستگی به اندازه بلورهای آن دارد و با افزایش اندازه بلورها مقاومت آن کم می‌شود. چنین تأثیری وقتی قابل توجه است که اندازه بلور زیر ۰/۵ میلیمتر باشد. زمانی که نیروی چسبندگی بین دانه‌ها مطرح باشد، تأثیر اندازه بلورها روی مقاومت کمتر می‌شود. برای مثال مقاومت فشاری ماسه‌سنگ آرکوزی

دانه‌ریز تقریباً دو برابر میزان کوارتز دانه درشت است. در حالی که مقاومت فشاری مرمر تشکیل شده از دانه‌های یک میلیمتری برابر ۱۰۰ مگاپاسکال و برای سنگ آهک دانه‌ریز (۳ تا ۴ میلی‌متر) بالغ بر ۲۰۰ تا ۲۵۰ مگاپاسکال می‌باشد. در بین سنگ‌های رسوبی بالاترین مقاومت مربوط به سنگ‌هایی است که دارای سیمان سیلیسی هستند. با حضور سیمان رسی مقاومت به شدت کاهش می‌یابد. برای سنگ‌های با سنگ‌شناسی مشابه، مقاومت با میزان تخلخل سنگ تناسب داشته و با بالا رفتن تخلخل مقاومت کمتر می‌شود. وجود تخلخل تعداد نقاط تماس ذرات کانی و نیروی عکس العمل میان آن‌ها را کاهش می‌دهد.

عمق تشکیل و درجه دگرگونی نیز بر مقاومت سنگ مؤثر است. برای مثال مقاومت لایه رسی نزدیک سطح زمین حدود ۲ تا ۱۰ مگاپاسکال می‌باشد در حالی که در سنگ‌های رسی که تحت دگرگونی معینی قرار گرفته باشند، مقاومت به ۵۰ تا ۱۰۰ مگاپاسکال می‌تواند برسد.

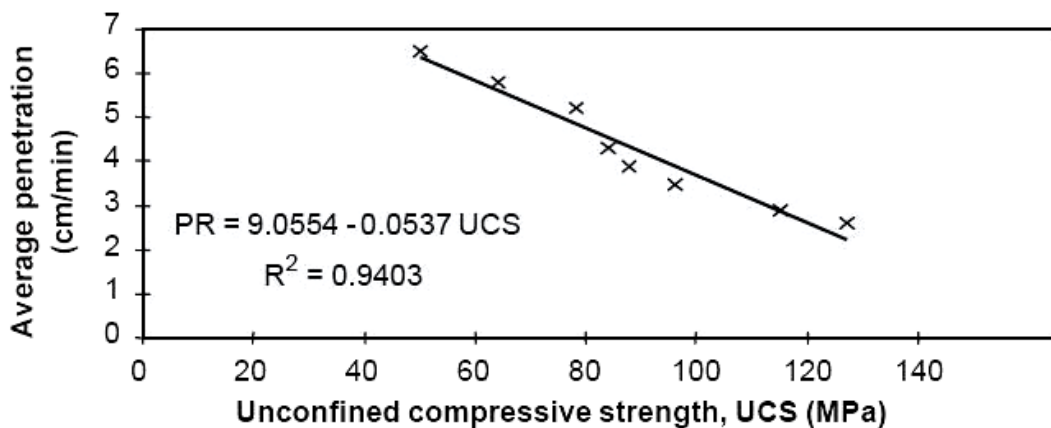
از سوی دیگر مقاومت سنگ‌های غیر آنیزوتوپ بستگی به جهت نیروی وارد شده دارد. مثلاً مقاومت فشاری سنگ‌ها در جهت عمود بر جهت چینه‌شناسی یا شیب‌توزیته بیشتر از جهت موازی با آن است. نسبت دو مقاومت فوق‌الذکر از ۰/۳ تا ۰/۸ متغیر است. این نسبت برای سنگ‌های ایزوتروپ برابر یک است.

با توجه به مطالب گفته شده، مقاومت فشاری یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که سرعت حفاری و قابلیت حفاری سنگ را تحت تأثیر قرار می‌دهد. هرچه سنگ مقاومت فشاری بالاتری داشته باشد از قابلیت حفاری آن کاسته می‌شود. تاکنون در بسیاری از منابع علمی در مورد مهندسی حفاری، تأثیر مقاومت فشاری بر سرعت حفاری مورد تأکید قرار گرفته است.

آکون و کارپوز^{۲۵} (۲۰۰۵) در تحقیقات خویش پیرامون پیش‌بینی سرعت حفاری دریافتند که سرعت حفاری و مقاومت فشاری نمونه‌ای از ماسه سنگ در کشور ترکیه رابطه خطی معکوس با هم دارند (شکل ۱۰-۲). قهرمان در سال ۱۹۹۹، مقاومت فشاری تک محوری سنگ را به همراه تعدادی از پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها، جهت پیش‌بینی سرعت حفاری ضربه‌ای به طور جدی به کار برد. ایشان در نتیجه تحقیقات خویش سه رابطه تجربی برای پیش‌بینی سرعت حفاری DTH و ضربه‌ای-دورانی چکش بالا و دورانی پیشنهاد نمود. قهرمان در مطالعات رگرسیون خویش بر روی داده‌های جمع‌آوری شده از حفاری به این نکته تأکید کرده است که در حفاری دورانی، مقاومت فشاری تک محوری، در حفاری DTH، عدد چکش اشمیت و در حفاری ضربه‌ای-دورانی چکش بالا مقاومت فشاری تک محوری و میزان کوارتز سنگ دارای

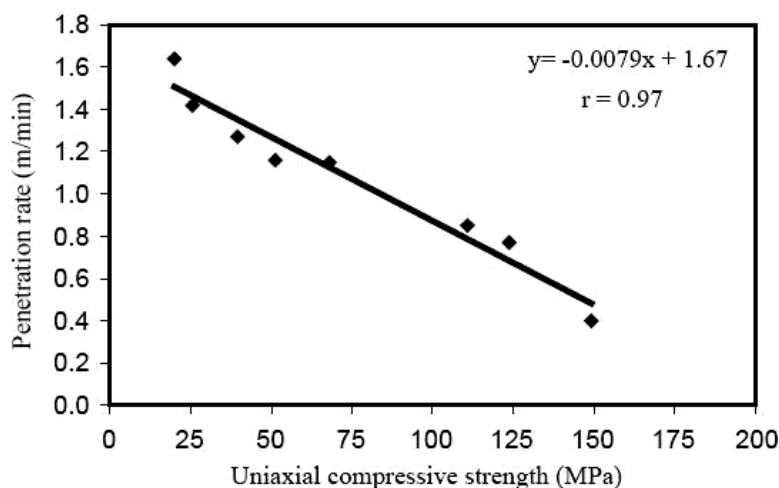
25 . Akun & Karpuz

بالاترین همگرایی با سرعت حفاری بوده و از آنها به عنوان پارامتر شاخص مشخصات سنگ در فرمول‌بندی خویش استفاده نموده است.



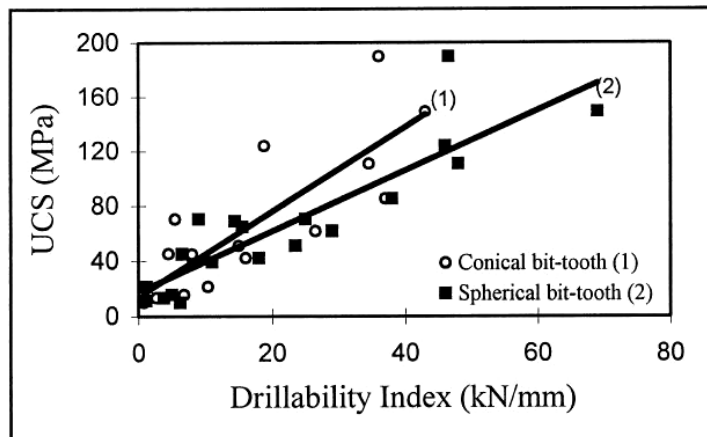
شکل ۲-۱۲- رابطه سرعت حفاری و مقاومت فشاری در نمونه‌های از ماسه سنگ (Akun & Karpuz, 2004)

قهرمان در تحقیق جامع دیگری کلیه پارامترهای مکانیکی و فیزیکی سنگ را که بر سرعت حفاری ضربه‌ای تأثیر دارند مورد مطالعه قرار داده و در این میان با استفاده از نمونه‌هایی از سنگ‌های کشور ترکیه رابطه ریاضی مقاومت فشاری و سرعت حفاری را به صورت شکل ۲-۱۳ نشان داده است.



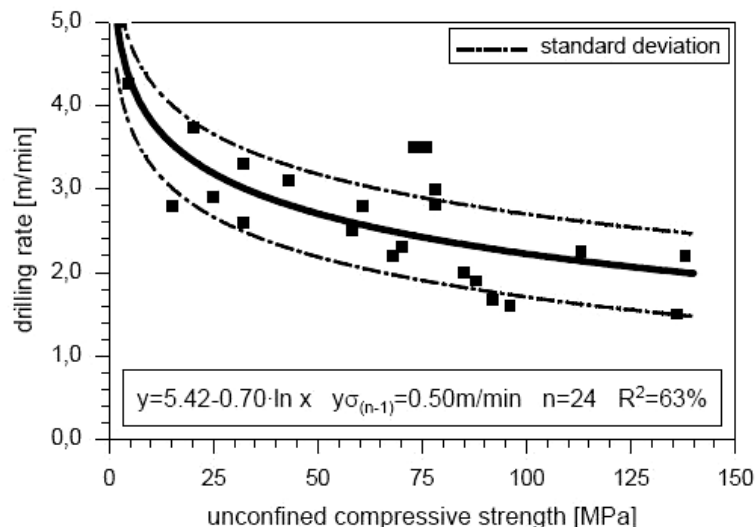
شکل ۲-۱۳- رابطه سرعت حفاری ضربه‌ای و مقاومت فشاری (Kahraman et al. 2003)

قهرمان در مقاله دیگری در سال ۲۰۰۰ در تحقیقات پیرامون ارائه یک اندیس قابلیت حفاری جدید نشان داد که مقاومت فشاری با قابلیت حفاری سنگ‌ها (روش دورانی) رابطه خطی معکوس دارد. شکل ۲-۱۴ رابطه بین قابلیت حفاری و مقاومت فشاری را طبق تحقیقات قهرمان در دو نوع سرمته نشان می‌دهد.



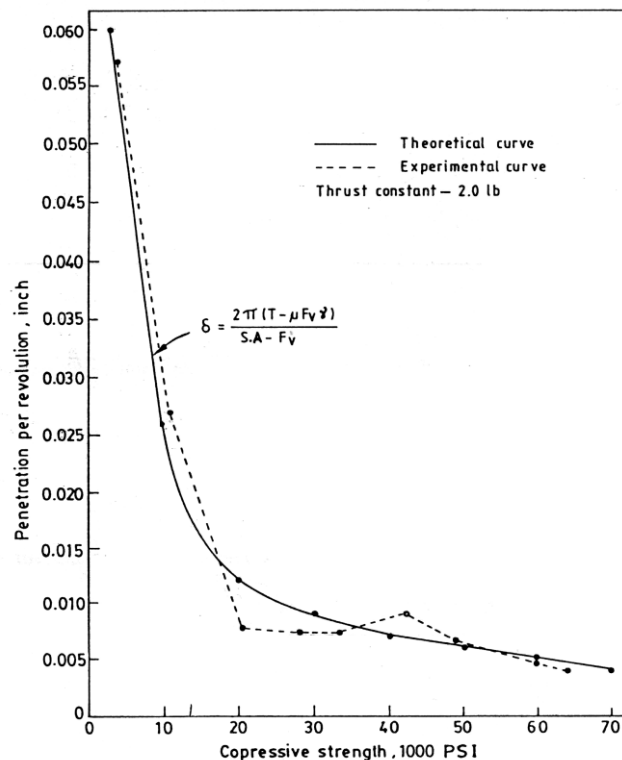
شکل ۲-۱۴ رابطه بین قابلیت حفاری و مقاومت فشای در دو نوع سرمته (Kahraman et al. 2000)

ارزوی و والتر (۱۹۹۵) در تحقیقات خود برای پیش بینی سرعت حفاری اکتشافی مقاومت فشاری را به عنوان یک عامل مؤثر در سرعت حفاری برای ارائه مدل و انجام رگرسیون به کار برده‌اند. تورو در سال ۱۹۹۶ ضمن طبقه‌بندی کلیه پارامترهای مؤثر در حفاری، یک رابطه ریاضی بین سرعت حفاری ضربه‌ای در تونل‌ها و مقاومت فشاری سنگ‌های اسلیتی و کوارتزیتی در کشور آلمان ارائه کرده است. شکل ۲-۱۵ منحنی ارائه شده توسط تورو را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۵- رابطه بین سرعت حفاری ضربه‌ای در تونل‌ها و مقاومت فشاری سنگ‌های اسلیتی و کوارتزیتی در کشور آلمان (Thuro & Spaun, 1996)

اصانلو و کاوه‌آهنگری در سال ۱۹۹۴ مقاومت فشاری تک محوری را به عنوان مهمترین و تنها پارامتر سنگ برای ارائه مدل ریاضی برای پیش‌بینی سرعت حفاری در میدان نفتی سلمان به کار برده‌اند. راثو در کتاب اصول حفاری سنگ ارتباط مقاومت فشاری و سرعت حفاری را به صورت شکل ۲-۱۶ نشان داده است.



۲-۱۶- ارتباط مقاومت فشاری و سرعت حفاری (Rao & Misra, 1998)

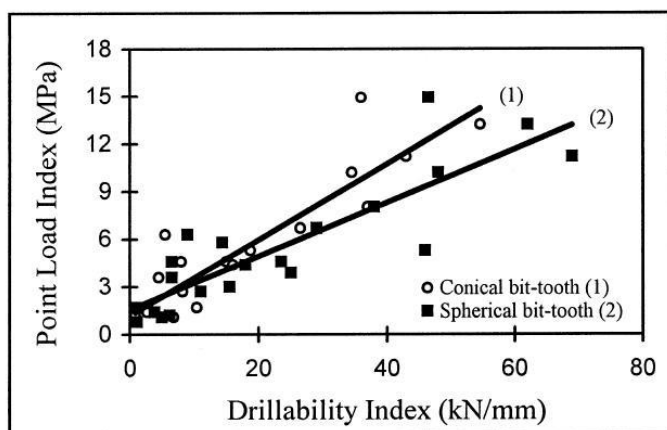
چنانچه از نتایج محققان گذشته و حاضر بر می آید مقاومت فشاری به عنوان مهم ترین پارامتر مهندسی سنگ، در مهندسی حفاری نیز همچون سایر شاخه های مهندسی معدن از اهمیت بسیار زیادی برخوردار می باشد. تاکنون مقاومت فشاری سنگ ها از جنبه های مختلف مورد طبقه بندی قرار گرفته است. تنها طبقه بندی موجود در زمینه حفاری برای سنگ ها توسط حسینی و همکاران ۲۰۰۸ و به نام قابلیت حفاری توده سنگ ها (RD_i) ارائه شده است. در این طبقه بندی مقاومت فشاری به عنوان مهم ترین پارامتر فیزیکی و مکانیکی سنگ، امتیاز ۲۲ را از مجموع ۱۰۰ امتیاز RD_i کسب نموده است. نحوه طبقه بندی و امتیازدهی به سنگ ها از نظر مقاومت فشاری در سیستم RD_i در جدول ۲-۶ نشان داده شده است.

جدول ۲-۶- امتیازدهی به بافت سنگ در طبقه بندی RD_i

مقاومت فشاری تک محوری (MPa)	مقاومت خیلی کم	مقاومت کم	مقاومت متوسط	مقاومت بالا	مقاومت خیلی بالا
۱-۲۵	۲۵-۵۰	۵۰-۱۰۰	۱۰۰-۲۰۰	>۲۰۰	
امتیاز	۲۲	۱۶	۱۱	۶	۲

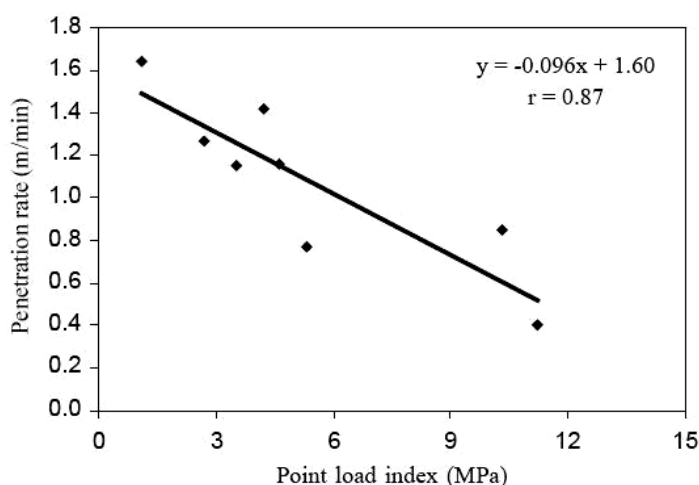
کلیه تحقیقات انجام شده عموماً بر روی مقاومت فشاری تک محوری صورت گرفته است که در عمل انجام آزمایش و تعیین این مشخصه سنگ امری زمان بر و پرهزینه می باشد. لذا در سال های اخیر تحقیقاتی صورت گرفته تا بتوان با روش های سریع تر و ارزان تر مقاومت سنگ را تخمین زده و رابطه آن را با حفاری مشخص

نمود. یکی از این روش‌ها استفاده از شاخص مقاومت بار نقطه‌ای می‌باشد. این شاخص به عنوان یک کمیت جانشین در بسیاری از زمینه‌های مکانیک سنگ جایگزین مقاومت فشاری تک‌محوری گردیده است. معتبرترین تحقیقات موجود در این زمینه توسط قهرمان در کشور ترکیه انجام شده است. ایشان در تحقیقات خود نشان داد که در حفاری دورانی با دو نوع سرمه، با افزایش میزان بار نقطه‌ای قابلیت حفاری سنگ‌ها به صورت خطی کاهش می‌یابد (شکل ۲-۱۷).



۲-۱۷- ارتباط اندیس بار نقطه‌ای و سرعت حفاری دورانی (Kahraman et al. 2000)

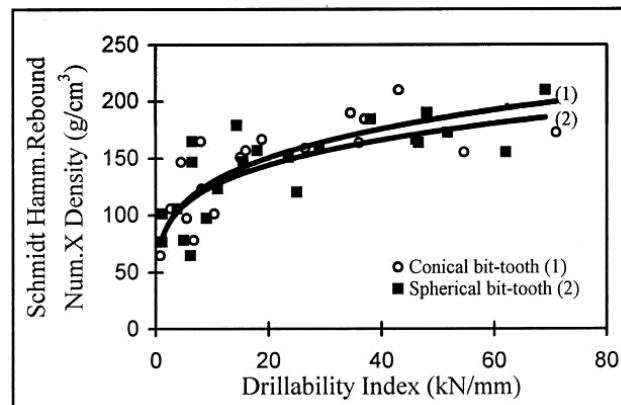
همچنین قهرمان در سال ۲۰۰۳ طی آزمایش‌های آزمایشگاهی نشان داد که سرعت حفاری ضربه‌ای با افزایش بار نقطه‌ای به صورت خطی کاهش می‌یابد (شکل ۲-۱۸).



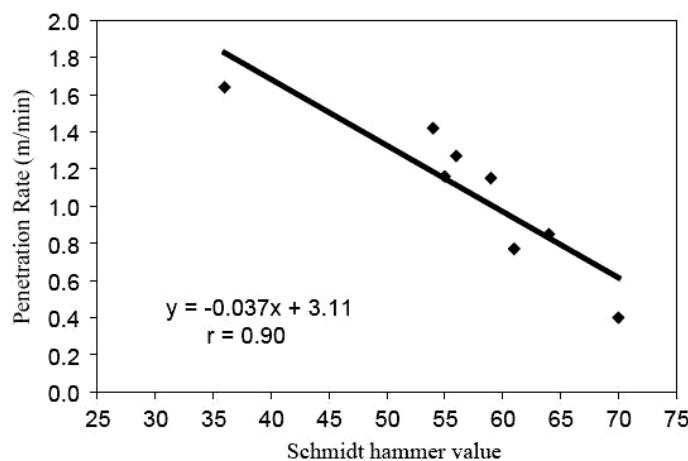
۲-۱۸- ارتباط اندیس بار نقطه‌ای و سرعت حفاری ضربه‌ای (Kahraman et al. 2003)

یکی دیگر از این روش‌های غیر مستقیم مقاومت سنگ، استفاده از عدد چکش اشمیت است. معتبرترین تحقیقات موجود در این زمینه نیز توسط قهرمان در کشور ترکیه انجام شده است. ایشان در تحقیقات خود

نشان داد که در حفاری دورانی و حفاری ضربه‌ای، با افزایش میزان عدد چکش اشمیت قابلیت حفاری سنگ‌ها به صورت خطی کاهش می‌یابد (شکل ۱۹-۲ و ۲۰-۲).



۱۹-۲- ارتباط عدد چکش اشمیت و سرعت حفاری دورانی (Kahraman et al. 2000)



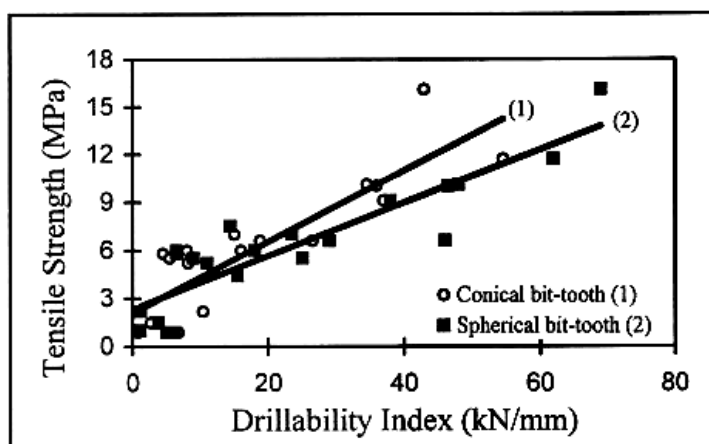
۲۰-۲- ارتباط عدد چکش اشمیت و سرعت حفاری ضربه‌ای (Kahraman et al. 2003)

۲-۱-۲- 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 (اصانلو، ۱۳۷۵). مقاومت کششی تقریباً ۱۰ درصد مقاومت فشاری سنگ است و در مباحث حفاری، انفجار و معادن زیرزمینی (پایداری سقف) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (اصانلو، ۱۳۷۵). مقاومت کششی در واقع ماگزیمم تنش کششی است که یک سنگ می‌تواند داشته باشد و برخلاف 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.

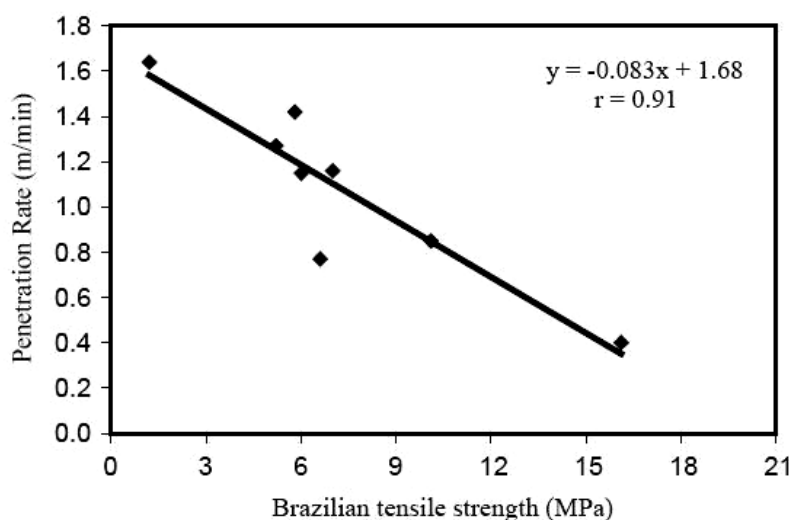
در مهندسی حفاری، مقاومت کششی نشانگر مقاومت مرزی دانه‌ها و ماتریکس می‌باشد (Ersoy & Waller, 1995a). لذا با افزایش مقاومت و اتصال بین دانه و ماتریکس مقاومت کششی سنگ افزایش می‌یابد. اتصال و به هم چسبیدگی شدید ماتریکس و دانه باعث افزایش ساینده‌گی سنگ و در نهایت باعث کاهش سرعت حفاری می‌شود.

تاکنون محققان مختلفی به اهمیت مقاومت کششی سنگ در قابلیت حفاری اشاره و تأکید نموده‌اند. با این حال تحقیقات برجسته و معتبر در این زمینه توسط قهرمان از کشور ترکیه و تورو در کشور آلمان انجام گرفته است. قهرمان (۱۹۹۹) طی تحقیق جامعی رابطه سرعت حفاری دورانی و مقاومت کششی را به صورت شکل ۲-۲۱ ارائه نموده است.



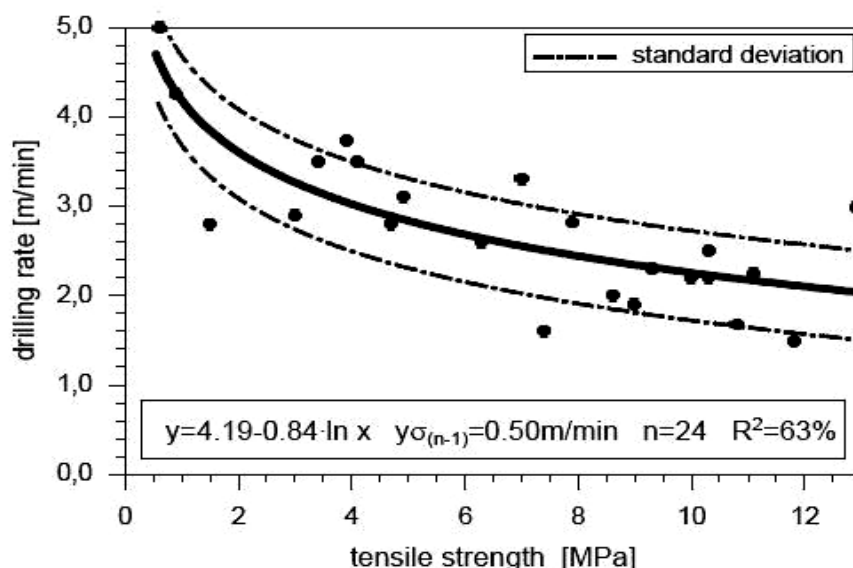
۲-۲۱- ارتباط مقاومت کششی و سرعت حفاری دورانی (Kahraman et al.2000)

همچنین ایشان رابطه سرعت حفاری ضربه‌ای و مقاومت کششی (تست برزیلی) را به صورت رابطه خطی شکل ۲-۲۲ ارائه نموده است.



۲-۲۲- ارتباط مقاومت کششی و سرعت حفاری ضربه‌ای (Kahraman et al. 2003)

نتایج تحقیقات قهرمان نشان می‌دهد که مقاومت کششی با قابلیت حفاری سنگ‌ها و سرعت حفاری دورانی و ضربه‌ای در معادن روباز رابطه خطی معکوس دارد. تورو در سال ۱۹۹۶ طی مقاله‌ای نشان داد که مقاومت کششی با سرعت حفاری ضربه‌ای در تونل‌سازی به روش سنتی رابطه لگاریتمی معکوس دارد (شکل ۲-۲۳).



۲-۲۳- ارتباط مقاومت کششی و سرعت حفاری ضربه‌ای در تونل‌سازی (Thuro & Spaun, 1996)

۲-۱-۳- سختی

به جرأت می‌توان گفت سختی مهمترین و عامیانه‌ترین مشخصه یک کانی به شمار می‌رود. سختی عبارت است از مقاومتی که یک کانی یا سنگ در مقابل ابزار خراش‌دهنده (ساینده) از خود نشان می‌دهد تا خراش (سایش) در آن ایجاد نشود. ابزار خراش‌دهنده در تماس با کانی یا سنگ بوده و طی حرکتی (نیرو) موجب ساینده‌گی کانی یا سنگ می‌شوند. همه کانیها و یا سنگ‌ها در مقابل همه اجسام خراش‌دهنده انعطاف‌پذیری ندارند، به عبارت دیگر از نظر خراش‌دهندگی هم اجسام خراش‌دهنده و هم خراش‌پذیرنده طبقه‌بندی شده‌اند. اگر مقاومت سنگ در برابر خراش حاصل از جسم دیگر مورد نظر باشد سختی استاتیکی نامیده می‌شود و در حالتی که سختی سنگ در برابر ضربه در نظر گرفته شود سختی دینامیکی نامیده می‌شود. این دو سختی با یکدیگر مساوی نیستند. هرچه درجه سختی و ساینده‌گی سنگ‌ها زیادتر باشد، عمر مته‌ها کمتر و سرعت نفوذپذیری نیز کم می‌شود. عوامل مؤثر در افزایش و کاهش درجه سختی سنگ عبارتند از:

۱ - دانه‌های (کانیهای) تشکیل دهنده سنگ: هرچه کانی‌های سنگ سخت‌تر باشند خراش و ساینده‌گی در سنگ‌ها به دشواری ایجاد خواهد شد. برای مثال اگر دانه‌های تشکیل دهنده سنگی کوارتز باشد آن سنگ در

مقابل ابزار خراش دهنده از مقاومت خوبی برخوردار می‌شود.

۲ - نیروی به هم‌چسبی: هرچه نیروی به هم‌چسبی کانی‌های سنگ زیادتر باشد ابزار ساینده به دلیل گرفتگی این کانی‌ها به انرژی بیشتری برای ایجاد خراش و سایش نیاز دارند.

۳ - شکل دانه‌ها: دانه‌های گوشه‌دار (تیز) خاصیت سایندگی بیشتری دارند و اینگونه دانه‌ها عمر مته را کاهش خواهند داد.

۴ - اندازه دانه‌ها: به طور معمول دانه‌های درشت تأثیر فرسایشی بیشتری روی ابزار حفاری خواهند گذاشت.

۵ - درجه هم‌وزنی سنگ‌ها: به طور معمول سنگ‌هایی که از یک کانی تشکیل شده‌اند درجه سختی کمتری دارند.

۶ - مقدار آب موجود در سنگ: هرچه مقدار آب موجود در سنگ بیشتر باشد درجه سختی و ساییدگی آن کمتر است.

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 موهس (Mohs) 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 ۲-۷ و ۲-۸).

جدول ۲-۷- سختی کانی‌ها بر اساس مقیاس موهس

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
کراندم	۹	روی چاقو و شیشه خراش می‌دهد
الماس	۱۰	روی چاقو و شیشه خراش می‌دهد

۲-۸- سختی نسبی متوسط پاره‌ای از سنگ‌ها

نوع سنگ	درصد کوارتز	سختی	نوع سنگ	درصد کوارتز	سختی
هورن فلس	۹۸	۶/۹۵	دیاباز	۵۲	۶/۰۴
کوارتزیت	۹۶	۶/۹۳	بازالت	۵۰	۵/۰۹
گرانیت	۷۴	۶/۵	سنگ آهک	—	۳/۷
اوژیت آندریت	۶۰	۶/۲۵	مرمر	—	۳/۲

کانی‌هایی که جزو این مقیاس نباشند با کانی‌های استاندارد این مقیاس مقایسه شده و سختی نسبی آنها تعیین می‌گردد. سختی استاتیکی سنگ‌هایی که خاصیت پلاستیسیته داشته باشند با روش‌هایی اندازه‌گیری می‌شوند که در تست کردن فلزات مورد استفاده است. این تست‌ها هرکدام معیار ویژه‌ای در سنجش سختی دارند، مثلاً در تست Briennell، بر مبنای نفوذ گلوله سخت فولادی در نمونه مورد آزمایش، سختی بر اساس نسبت نیروی وارده آمده به قطر خراش ایجاد شده سنجیده می‌شود. در تست Rockwell - که نفوذ خراش دهنده تحت اثر دو بار متوالی است - سختی را بر مبنای عمق نفوذ نفوذکننده در نمونه تعیین می‌کنند. از تست Vickers (نفوذ هرم الماسی در نمونه) نیز می‌توان برای تعیین سختی سنگ‌ها سود برد.

سختی دینامیکی سنگ‌ها را می‌توان توسط تست Shore تعیین نمود. در این تست چکشی نوک الماسی از ارتفاع معینی رها می‌شود و بر مبنای میزان برگشت چکش به حالت اولیه سختی سنگ تعیین می‌شود. آنجا که ضریب برگشت که از روی سختی‌نمای Tarkhov تعیین می‌شود نیز غالباً به عنوان معیاری از خاصیت الاستیسیته سنگ است، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که پارامترهای الاستیسیته و سختی دینامیک در ارتباط با یکدیگر است.

تاکنون تحقیقات زیادی پیرامون تأثیر سختی بر قابلیت حفاری سنگ‌ها انجام شده است. چنانچه از کلیه این تحقیقات بر می‌آید با افزایش سختی، سرعت حفاری و قابلیت حفاری سنگ‌ها کاهش می‌یابد. جمینیو^{۲۶} و همکاران در سال ۱۹۹۵ سختی سنگ‌ها را با استفاده از مقیاس موهس و نیز از نظر قابلیت حفاری به پنج کلاس مختلف تقسیم بندی نمود. در سال ۲۰۰۸ حسینی و همکاران با تکیه بر پیشنهاد جمینیو سختی موهس را در سیستم طبقه‌بندی RDi (اندیس قابلیت چالزنی توده‌سنگ) به کار برده و میزان سختی سنگ‌ها را امتیازدهی کردند. در سیستم طبقه‌بندی RDi سختی بعد از مقاومت فشاری، دومین شاخص مهم سنگ

در طبقه‌بندی قابلیت حفاری است. در جدول ۲-۹ طبقه بندی و امتیازدهی به سختی سنگ‌ها در سیستم طبقه بندی RD_i نشان داده شده است.

جدول ۲-۹- طبقه بندی و امتیازدهی به سختی سنگ‌ها در سیستم طبقه بندی RD_i

سختی موهس	۱-۳	۳-۴/۵	۴/۵-۶	۶-۷	>۷
خیلی نرم تا نرم	نسبتاً نرم	نسبتاً سخت	سخت	خیلی سخت	
امتیاز (از ۱۰۰)	۱۸	۱۳	۹	۴	۱

متأسفانه با اینکه بسیاری از محققان علم حفاری بر اهمیت سختی و نقش آن تأکید نموده‌اند با این حال تاکنون در منابع معتبر علمی، هیچ رابطه ریاضی و یا منحنی حاصل از کارهای تجربی برای بیان کیفیت ارتباط این دو کمیت ارائه نشده است.

۲-۱-۴- ساینده‌گی

در حفاری، ساینده‌گی به خاصیتی از سنگ اطلاق می‌شود که قادر است سرشته از جنس فولاد، کربور تنگستن یا الماس از بین ببرد. ساینده‌گی به سختی کانیها بستگی دارد اما شکل دانه‌ها و کلیواژ نیز در کیفیت این خاصیت تأثیر دارند. به همین دلیل در سالهای نه چندان دور در ایامی که تنها مته‌های فولادی مورد استفاده قرار می‌گرفتند عمر این مته‌ها در سنگ‌های حاوی کوارتز مثل ماسه‌سنگ در حد چند سانتی‌متر بود. هر چند کوارتز سختی بیشتری نسبت به فولاد دارد اما شکل ذرات نیز بی‌تأثیر در کاهش عمر مته نبوده است. این مشکل با جانشین کردن مته‌هایی از جنس کربور تنگستن به جای مته‌های فولادی برطرف شده است. خرده‌سنگ‌های گوشه‌دار و تیز در مقایسه با خرده سنگ‌های گرد بر روی مته خراش‌های عمیق ایجاد می‌کنند و مانع از آن می‌شوند تا انرژی منتقل شده به سطح مته موجب خردشدن سنگ شود. از سوی دیگر خرده‌های ریز و گرد سنگ نیز باعث صیقل‌دادن سرشته و کندی حفاری می‌شوند. سنگ‌هایی که خاصیت ساینده‌گی آنها در حفاری باید مورد توجه قرار گیرد عبارتند از:

۱- سنگ‌های حاوی کوارتز مثل کوارتزیت، ماسه سنگ و سنگ‌های آذرین اسیدی

۲- سنگ‌های حاوی سیلیس مثل چرت و سنگ‌های اولیوین‌دار مثل دونایت و بعضی از انواع بازالت

۳- سنگ‌های حاوی گارنت مثل گنیس گانریت‌دار

در قیاس با سیستم ضربه‌ای، سیستم حفاری دورانی نسبت به خاصیت ساینده‌گی حساسیت بیشتری دارد. لذا در ارتباط با سیستم دورانی، خاصیت ساینده‌گی بسیاری از سنگ‌ها ولو در مقیاس کوچک باید مورد توجه قرار

گیرد که البته کمیت ساینده‌گی مطرح خواهد بود تا کیفیت آن. برای مثال مادستون سیلت‌دار سخت، در شرایط نرمال به علت نداشتن کمیت خاصیت ساینده‌گی به عنوان سنگ ساینده محسوب نمی‌شود اما برای سیستم چرخشی حتی در مقیاس کم مضر است. کانی‌هایی همچون توپار، کروندوم و بریل چون به ندرت در سنگ‌ها وجود دارند کمتر مورد توجه قرار می‌گیرند.

ساینده‌گی در سنگ‌ها عموماً به سه عامل میزان کوارتز محتوی، اندازه دانه‌ها و مقاومت برشی سنگ‌ها بستگی دارد (Ersoy & Waller, 1995a). در این میان میزان سیلیس یا در حالت کلی کوارتز بسیار مورد تأکید بوده است. تشخیص خاصیت ساینده‌گی سنگ‌ها بر اساس وجود سیلیس امکان‌پذیر است. سنگ‌هایی که سیلیس کمتری دارند مثل دولومیت یا آهک خاصیت ساینده‌گی کمتری دارند و بالعکس سنگ‌هایی که SiO_2 بیشتری دارند مثل ماسه‌سنگ سیلیسی خاصیت ساینده‌گی بیشتری دارند. در جدول ۲-۱۰ میزان کوارتز موجود در برخی از سنگ‌های مهم نشان داده شده است.

جدول ۲-۱۰- میزان کوارتز موجود برخی از سنگ‌های مهم

نام سنگ	میزان کوارتز	نام سنگ	میزان کوارتز
آمفیبولیت	۰-۵	میکا گنایس	۰-۳۰
دیاباز	۰-۵	میکاشیست	۱۵-۳۵
دیوریت	۱۰-۲۰	پگماتیت	۱۵-۳۵
گنایس	۱۵-۵۰	فیلیت	۱۰-۲۵
گرانیت	۲۰-۳۵	کوارتزیت	۶۰-۱۰۰
گری‌واک	۱۰-۲۵	ماسه‌سنگ	۲۵-۹۰
سنگ آهک	۰-۵	شیل	۰-۲۰
اسلیت	۱۰-۳۵	تاکنیت	۰-۱۰

تاکنون برای ارزیابی ساینده‌گی سنگ شاخص‌های کیفی و کمی مختلفی ارائه شده است که در زیر تعدادی از آنها معرفی می‌شوند.

الف) - فاکتور ساینده‌گی شیمازک (F-abrasivity)

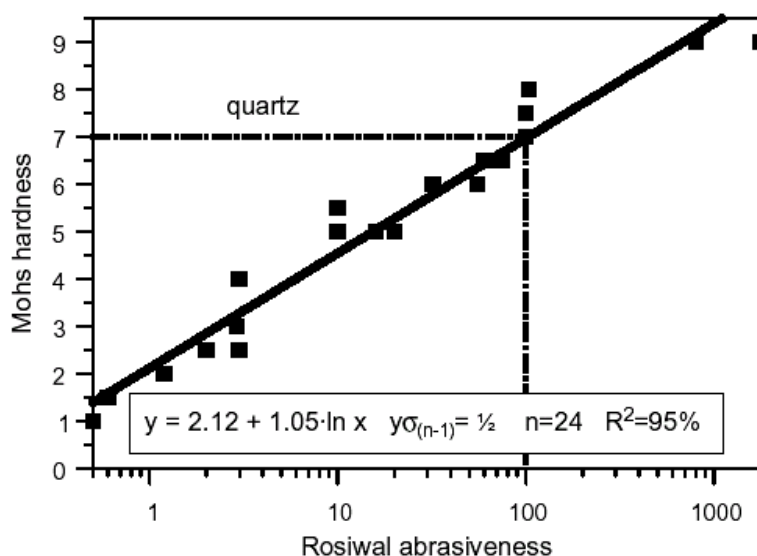
این شاخص در سال ۱۹۷۰ توسط شیمازک و ناتز ارائه شده است. رابطه کلی این شاخص به شکل رابطه زیر می‌باشد.

$$F = \frac{(EqQtz \times \phi \times BTS)}{100} \quad (10)$$

که در آن، EqQtz نشانگر درصد میزان کوارتز محتوی معادل سنگ، ϕ ، اندازه دانه‌ها برحسب میلیمتر و BTS نمایانگر مقاومت کششی غیرمستقیم (آزمون برزیلی) می‌باشد. اندازه دانه‌ها با استفاده از مقاطع نازک و میانگین‌گیری وزنی اندازه دانه‌ها و مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم از طریق آزمایش تعیین می‌شود در میان پارامترهای فوق میزان درصد کوارتز محتوی یکی از حساس‌ترین و پرکاربردترین پارامترهای مربوط به ساینده‌ی سنگ‌ها می‌باشد. این شاخص بر این مبنا استوار است که هر کانی با توجه به سختی مقیاس موهس چه درصدی از ساینده‌ی ناشی از کوارتز را ایجاد می‌کند. رابطه کلی برای تعیین EqQtz به شرح زیر می‌باشد:

$$EqQtz = \sum_{i=1}^n A_i \cdot R_i \quad (11)$$

که در آن، A نشانگر درصد کانی‌ها، R ساینده‌ی رزیوال^{۲۷} و n تعداد کانی‌ها می‌باشد. میزان ساینده‌ی رزیوال سنگ با استفاده از سختی موس و طبق رابطه نشان داده‌شده در شکل ۲-۲۴ قابل محاسبه است.



شکل ۲-۲۴- رابطه میزان ساینده‌ی رزیوال سنگ با استفاده از سختی موهس (Thuro, 1997)

چنانچه از این شکل بر می‌آید، میزان EqQtz برای کانی کوارتز ۱۰۰٪ بوده و با کاهش میزان کوارتز و یا سختی دیگر کانی‌های سنگ میزان ساینده‌ی سنگ به صورت لگاریتمی کاهش می‌یابد.

ب) اندیس سایش سرمته^{۲۸} BWI

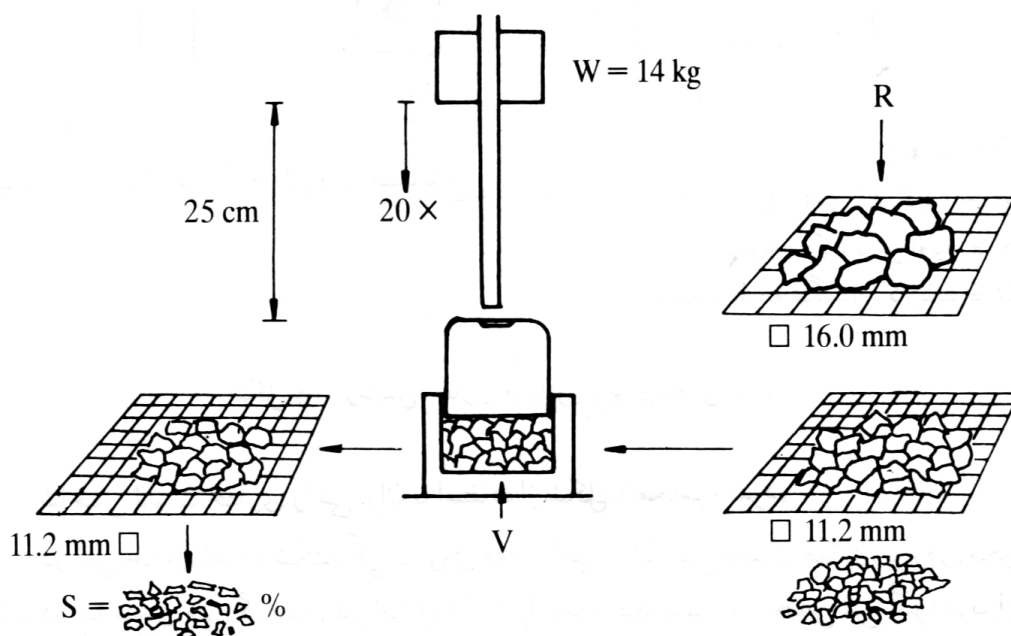
این شاخص بر اساس شاخص سرعت حفاری (DRI^{۲۹}) و نیز مقدار سایش (AV^{۳۰}) استوار است. شاخص

27. Rosiwal

28. Bit Wear Index

DRI به نوبه خود وابسته به دو کمیت میزان تردی (S_{20}) و نیز مقدار ارزش J سیور³¹ که از آزمایش حفاری کوچک قابل محاسبه می‌باشد.

میزان تردی سنگ توسط یک آزمایش ساده اندازه‌گیری می‌شود. برای این منظور، یک نمونه معرف ۵۰۰ گرمی از سنگ به قطعات ۱۱/۲ تا ۱۶ میلی‌متر خرد می‌شود و سپس تحت ۲۰ ضربه متوالی ناشی از یک وزنه ۱۴ کیلوگی که از ارتفاع ۲۵ سانتی‌متری نمونه انداخته می‌شود قرار می‌گیرد. این فرآیند ۳ یا ۴ مرتبه تکرار شده و در هر بار درصد قطعات کوچکتر از ۱۱/۲ میلی‌متر که "مقدار تردی" یا "عدد شکستگی" نامیده می‌شود اندازه‌گیری شده و میانگین آنها محاسبه می‌شود (شکل ۲-۲۵).



شکل ۲-۲۵- آزمایش اندازه‌گیری میزان تردی سنگ (S_{20})

در آزمایش حفاری کوچک، یک دستگاه حفاری کوچک با سرمته مینیاتوری به قطر ۸/۵ میلی‌متر و زاویه میل ۱۱۰ درجه، نیروی ۲۰ کیلوگی در پشت مته و سرعت چرخش ۲۸۰ دور بر دقیقه مورد استفاده قرار می‌گیرد. چهار تا هشت بار حفاری روی نمونه انجام شده و طول چال‌های حفر شده بر حسب دهم میلی‌متر اندازه‌گیری و به عنوان عدد J ثبت می‌شود (شکل ۲-۲۶).

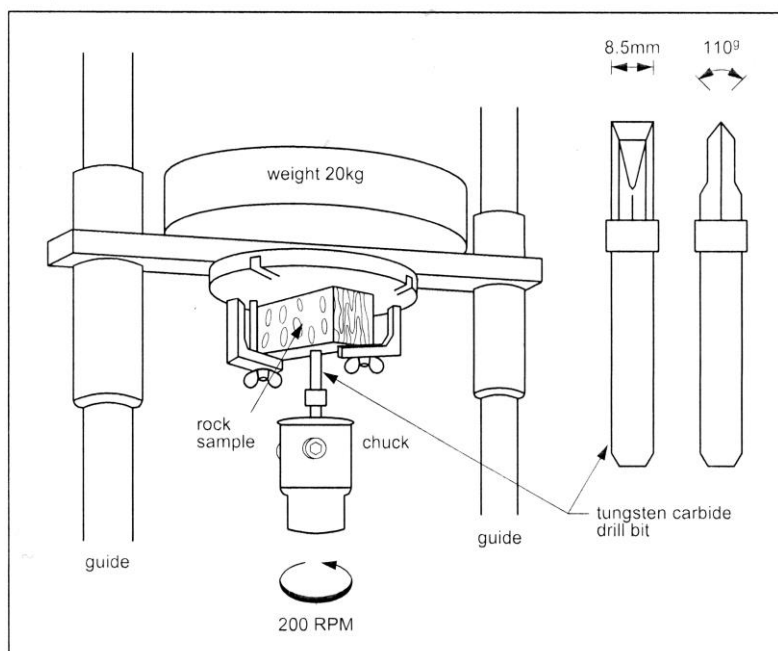
با در دست بودن دو پارامتر بالا، شاخص سرعت حفاری (DRI) طبق نمودار شکل (۲-۲۷) قابل محاسبه است.

²⁹ . Drilling Rate Index

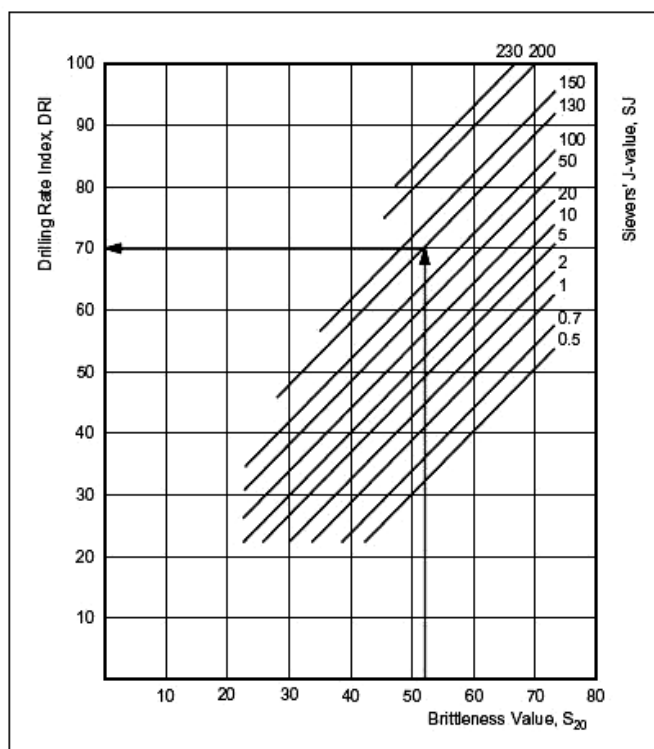
³⁰ . Abrissivness Value

³¹ . Siever's J value

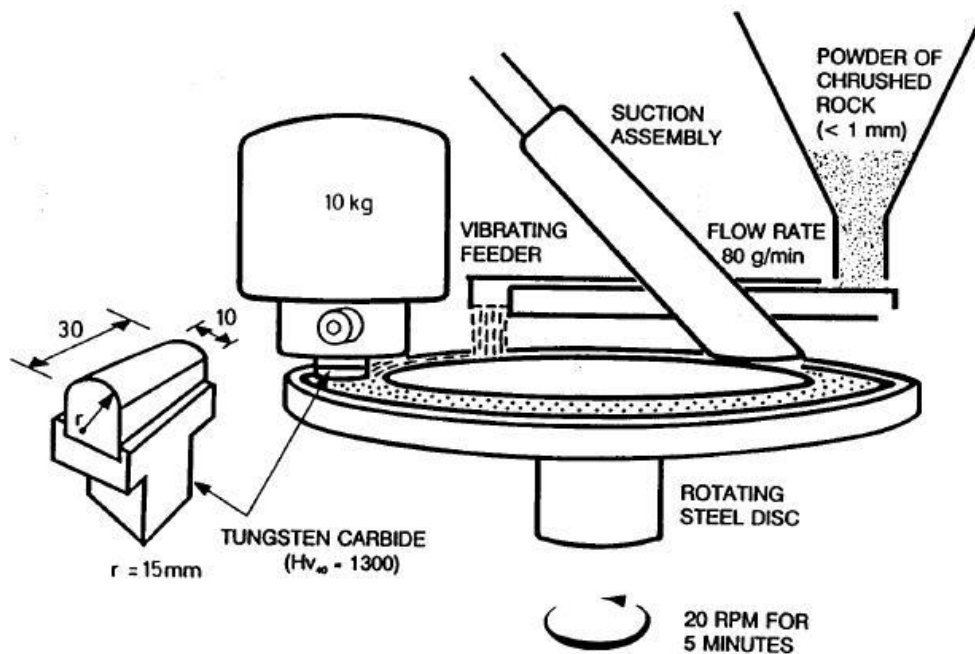
پس از تعیین DRI نوبت به AV می‌رسد. این روش در سالهای بین ۶۱ - ۱۹۵۸ در دانشکده زمین شناسی و مهندسی ذخائر معدنی دانشگاه NTNU نروژ ارائه شده است. برای تعیین شاخص AV طبق شکل ۲-۲۸ میزان سایش تابع زمان یک قرض از تنگستن کاربید ناشی از پودر شکسته ماده سنگ مورد آزمایش اندازه‌گیری می‌شود.



شکل ۲-۲۶- آزمایش چالزنی کوچک با سرته مینیاتوری



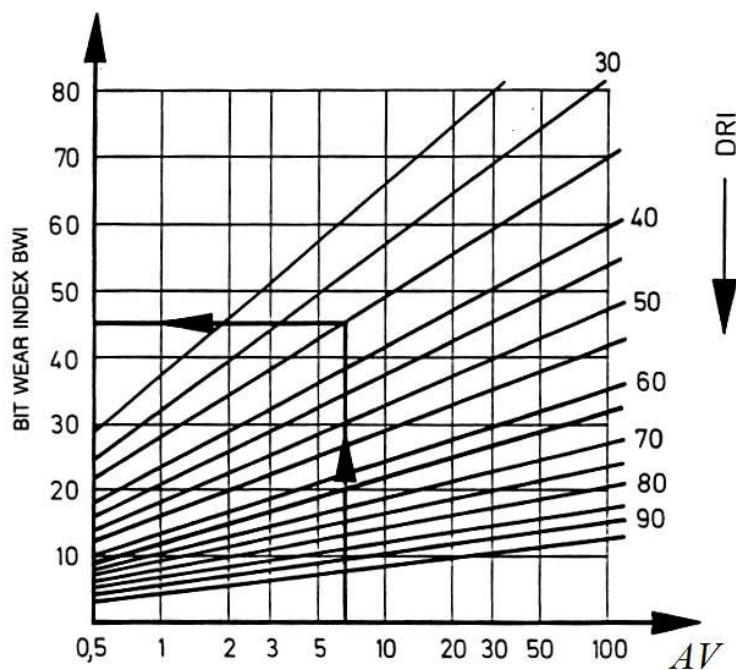
شکل ۲-۲۷- نمودار تعیین شاخص سرعت حفاری (DRI)



شکل ۲-۲۸- دستگاه آزمایش اندازه‌گیری سایش (AV)

در این روش ذرات دارای قطر کمتر از ۱mm در بخش زیر قرص تنگستن از فضای دیسک سوراخ وارد می‌شوند. میزان AV در این آزمایش برابر است با میزان کاهش وزن ناشی از دوران ۱۰۰ دور صفحه گردان دستگاه (معادل ۵ دقیقه دوران).

حال با دانستن میزان DRI و نیز AV، می‌توان میزان شاخص سایش سرمته (BWI) را از روی شکل ۲-۲۹ تخمین زد.



شکل ۲-۲۹- دیاگرام محاسبه BWI با استفاده از میزان AV و DRI

با توجه به تحقیقات دانشمندان نروژی قابلیت حفاری و ساینده‌گی سنگ‌ها با استفاده از شاخص BWI و نیز DRI در هفت کلاس مختلف طبقه‌بندی می‌شوند. این طبقه‌بندی در جدول ۲-۱۱ ارائه شده است.

جدول ۲-۱۱- طبقه‌بندی قابلیت حفاری و ساینده‌گی سنگ‌ها با استفاده از شاخص BWI و DRI

BWI	DRI	کلاس ساینده‌گی سنگ
۱۰ >	۲۵ >	به شدت کم
۱۱-۲۰	۲۶-۳۲	خیلی کم
۲۱-۳۰	۳۳-۴۲	کم
۳۱-۴۴	۴۳-۵۷	متوسط
۴۵-۵۵	۵۸-۶۹	بالا
۵۶-۶۹	۷۰-۸۲	خیلی بالا
>۷۰	>۸۲	به شدت بالا

ج) آزمایش تعیین اندیس سایش سورشار^{۳۲} (CAI)

آزمایش اندیس سایش سورشار اولین بار از سوی انستیتوی تحقیقات معدنکاری زغال فرانسه معرفی شد. این اندیس با ساییده‌شدن و خراش نوک تیز یک مته (پین) فلزی بر روی یک سطح سنگی تازه به دست می‌آید. این پین فولادی از نوع فولاد قابل عملیات حرارتی آلیاژ H ۴۱۴۰ در استاندارد AISI می‌باشد که در طی یک فرآیند عملیات حرارتی به مقاومت ۶۱۰ ویکرز رسیده است. نوک این پین فولادی با زاویه ۹۰ درجه به حداکثر تیزی رسیده است (شکل ۲-۳۰).

برای تعیین اندیس سایش سورشار به منظور ایجاد سطحی تازه و بدون هوازدگی، نمونه‌ها شکسته می‌شوند به نحوی که قطعه باقی‌مانده از نمونه قابل نصب درگیره باشد. پس از اتصال میله فولادی به وزنه هفت کیلوگرمی و محکم نمودن پیچ مربوطه، نوک تیز میله فولادی بر روی قطعه سنگ قرار داده شده و دسته دستگاه برای ایجاد یک سانتی‌متر خراش در مدت یک ثانیه کشیده می‌شود. پس از ایجاد خراش قطر ساییده شده بر روی میله فولادی در زیر میکروسکوپ قرائت می‌گردد.

د) شاخص سایش سنگ (RAI)^{۳۳}

این شاخص در ۲۰۰۲ توسط پلانینگر در کشور آلمان ارائه شده است. رابطه کلی این شاخص به شرح زیر می‌باشد (Plinninger et al, 2002).

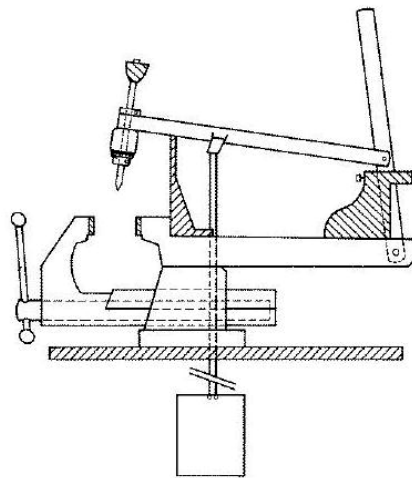
$$RAI = EqQtz \times UCS \quad (11)$$

³² .Cershar Abrissivness Index

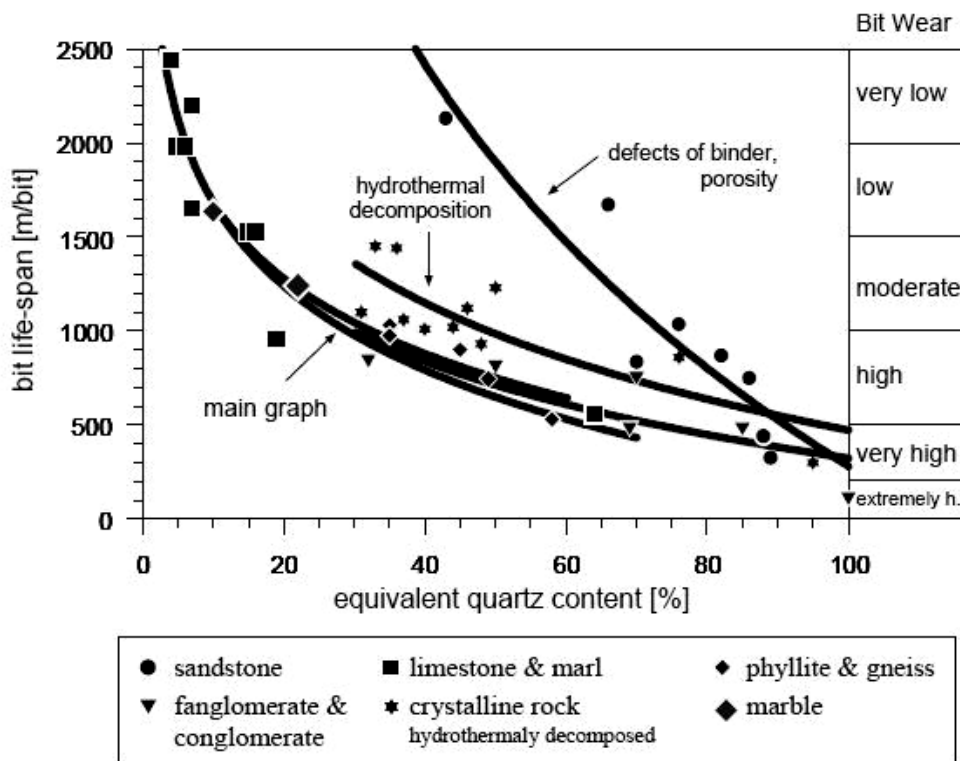
³³ . Rock Abrissivness Index

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

با توجه به شاخص‌های مختلف ارائه شده جهت بررسی ساینده‌گی سنگ، متخصصات مختلفی با استفاده از هر کدام از شاخص‌های فوق رابطه ساینده‌گی و سرعت حفاری سنگ‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند. تورو در سال ۱۹۹۷ رابطه میزان کوارتزی محتوی و عمر سرمته را در انواع سنگ‌های طبیعت بررسی نموده و منحنی‌های شکل ۲-۳۱ را ارائه کرده است.



شکل ۲-۳۰- نمایی از دستگاه سایش سورشار



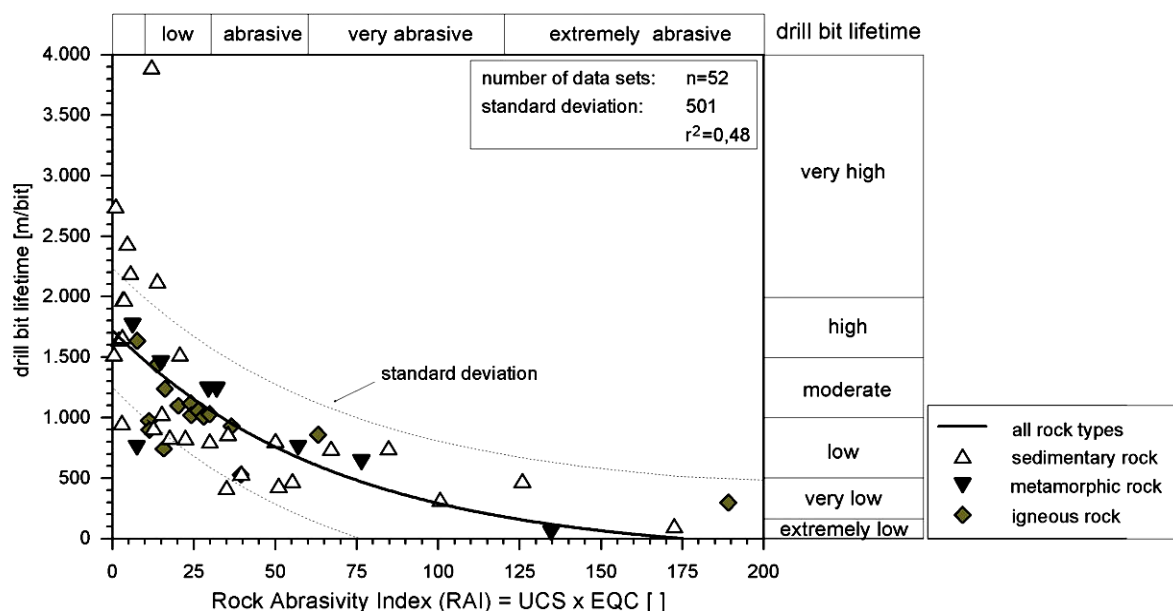
شکل ۲-۳۱- رابطه میزان کوارتزی محتوی و عمر سرمته در انواع سنگ‌های (Thuro, 1997)

پلانینگر در سال ۲۰۰۲ با استفاده از شاخص پیشنهادی جدید به نام شاخص ساینده‌گی سنگ RAI رابطه ساینده‌گی و عمر سرته را در یک سری حفاری زیرزمینی به صورت شکل ۲-۳۲ پیشنهاد نمود. تورو در سال ۲۰۰۳ رابطه میزان کوارتز محتوی معادل و عمر سرته را برای انواع سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی به صورت شکل ۲-۳۳ ارائه نمود. پلانینگر در سال ۲۰۰۴ رابطه شاخص‌های EqQtz و اندیس ساینده‌گی سورشار را ارائه نموده است. همچنین قهرمان در سال ۱۹۹۹ طی تحقیقات خود، برای پیش‌بینی سرعت حفاری، به این نتیجه رسید که میزان کوارتز محتوی و مقاومت فشاری تک‌محوری بهترین کاربرد را برای ارزیابی و پیش‌بینی سرعت حفاری ضربه‌ای- دورانی چکشی بالا نسبت به سایر مشخصات سنگ‌ها دارند. وی رابطه ریاضی زیر را برای پیش‌بینی سرعت حفاری ضربه‌ای - دورانی چکش بالا پیشنهاد نموده است.

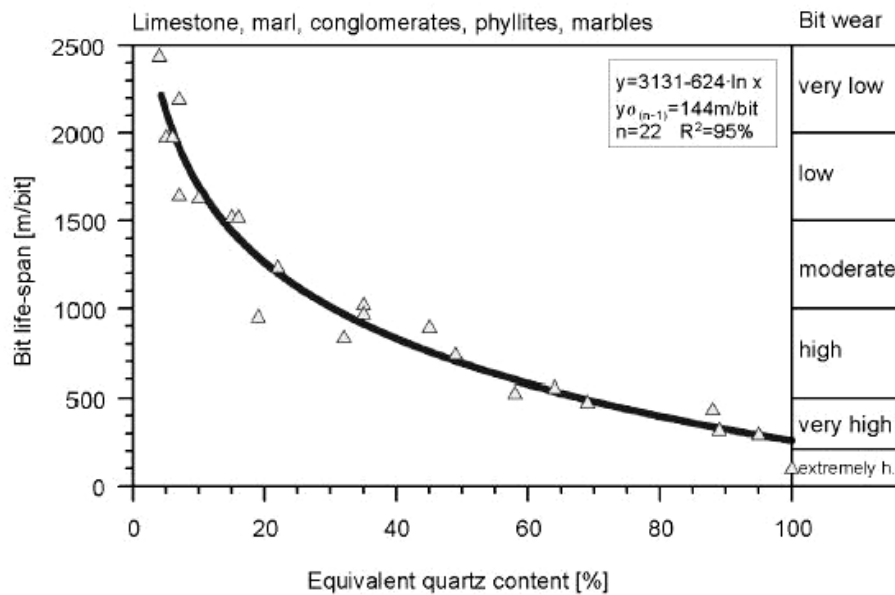
$$PR = 0.47 \frac{b_{pm}^{0.375}}{\sigma_c^{0.534} \times q^{0.093}} \quad (12)$$

PR: سرعت حفاری (m/min) σ_c : مقاومت فشاری تک محوری (Mpa)

q: میزان کوارتز (/.) b: فرکانس دمش هوای فلاشینگ (bpm)



شکل ۲-۳۲- رابطه شاخص ساینده‌گی سنگ RAI و عمر سرته (Plinninger et al, 2002)



شکل ۲-۳۳- رابطه کوارتز محتوای معادل و عمر سرمته (Thuro & Plinnger, 2003)

۲-۱-۴-۱- تقسیم بندی سنگ‌ها بر اساس شاخص‌های حفاری

به طور کلی سنگ‌ها در طبیعت به سه گروه تقسیم می‌شوند:

۲-۱-۴-۱-۱- سنگ‌های آذرین

اولین گروه شامل سنگ‌های آذرین است که از سرد شدن ماگمای مذاب به وجود می‌آیند. بر حسب اینکه ماگما چگونه و در کجا سرد می‌شود سه گروه سنگ قابل تشخیص است که عبارتند از:

۱- سنگ‌های آذرین پلوتونیک که دانه درشتند

۲- سنگ‌های آذرین درونی که از نظر اندازه دانه‌ها متوسط‌اند و نشان می‌دهد که سرد شدن ماگما در درون زمین صورت گرفته است.

۳- سنگ‌های آذرین بیرونی که دانه ریزاند و بافت شیشه‌ای دارند که نشان دهنده آن است که ماگما در سطح سرد شده است.

بسیاری از سنگ‌های آذرین هم سخت‌اند و هم سفت. بیشتر آنها باید با سیستم ضربه‌ای حفاری شوند اگر چه در بعضی از انواع ممکن است به کمک ماشین‌های چرخشی نیز حفاری انجام پذیرد.

در ادامه طبقه‌بندی سنگ‌ها از نظر ساینده‌گی و روش انتخاب ماشین حفاری مناسب با توجه به این خاصیت سنگ‌ها ارائه می‌گردد:

الف) سنگ‌های آذرین ساینده

دانه ریز مثل پرلیت، ابسیدین و رئولیت

دانه متوسط مثل آپلیت، فلسایت، میکروگرانیت و گرانوفیر

دانه درشت مثل گانوریوریت، گرانیات و پگماتیت

برای این گروه از سنگ‌ها در صورتی که قطر چال کمتر از دو اینچ باشد باید از چکش حفاری سنگین یا سینکر استفاده کرد و برای چال‌های با قطر بین دو تا چهار اینچ از دریفر و چال‌هایی با قطر بین چهار تا شش اینچ از D.T.H و چکش‌های حفاری با مته‌های قلمی با جنس کریور تنگستن باید استفاده شود. لازم به توضیح است که در همه این ماشین‌ها باید از قدرت و تراست حداکثر استفاده را به عمل آورد، در غیر این صورت حفاری به کندی صورت می‌گیرد.

ب) سنگ‌های آذرین نیمه ساینده

دانه ریز مثل داسیت و بازالت اولیوین‌دار

دانه درشت مثل دونایت، گابرو اولیوین‌دار، دیوریت کوارتزار و پریودوتیت

ج) سنگ‌های آذرین با ساینده کمی

دانه ریز مثل آندزیت، بازالت و تراشیت

دانه متوسط مثل دولریت، دیاباز و لمپروفیر

دانه درشت مثل دیوریت، گابرو، نوریت، پورفریت و سینیت

در دو کلاس بالا برای چال‌های با قطر کم و عمق کم از سینکر یا چکش حفاری نیمه‌سنگین باید استفاده شود. برای چال‌های با قطر شش اینچ می‌توان از ماشین چرخشی سنگین و برای مورد بینابین این دو از D.T.H استفاده کرد.

د) سنگ‌های آذرین تجزیه شده

دانه ریز مثل بازالت قرمز

دانه متوسط مثل سرپانتین

دانه درشت مثل گرانیات کائولینه شده

بدون استفاده از حفاری و انفجار نیز می‌توان بازالت قرمز را به کمک بولدوزر آماده بهره‌برداری کرد اما گزینه دیگر استفاده از ماشین حفاری دورانی با مته تیغه‌ای است. در مورد سرپانتین روش حفاری به قطر چال بستگی دارد. برای چال‌های با قطر کم می‌توان از ماشین ضربه‌ای و برای چال‌های با قطر زیاد می‌توان از D.T.H، ماشین حفاری دورانی یا ضربه‌ای- چرخشی استفاده کرد. که از این نوع ماشین‌ها برای گرانت کائولینه شده نیز به کار گرفته می‌شوند.

۲-۱-۴-۱-۲- سنگ‌های متامورفیک

این گروه از سنگ‌ها در اثر حرارت یا فشار یا هر دو بر روی سنگ‌های رسوبی و آذرین به وجود آمده‌اند و طیف وسیعی از سنگ‌ها را شامل می‌شوند. بعضی از این سنگ‌ها از نظر حفاری مشابه سنگ‌های آذرین و بعضی دیگر مشابه سنگ‌های رسوبی‌اند.

الف) سنگ‌های متامورفیک سخت و ساینده

دانه ریز مثل گرانولیت، کوارتزیت و شیست کوارتزار

دانه درشت مثل گنیس

کوارتزیت خاصیت ساینده‌ی دارد و حفاری با آن بسیار دشوار است. چه در مورد کوارتزیت و چه در سایر موارد، ماشین‌های حفاری ضربه‌ای سنگین اولویت دارند. انتخاب یکی از انواع روش‌های ضربه‌ای بستگی به قطر چال دارد.

ب) سنگ‌های متامورفیک نیمه‌سخت و نیمه‌ساینده

دانه متوسط مثل شیست، هورنبلند و میکا - شیست

دانه درشت مثل مرمر دولومیت

در موارد یاد شده بالا می‌توان از ماشین حفاری ضربه‌ای نیمه سنگین استفاده کرد.

ج) سنگ‌های متامورفیک نرم

دانه ریز مثل اسلیت

دانه متوسط مثل فلنیت، شیست و کلرایت

دانه درشت مثل مرمر

برای چال‌های با قطر کم از چکش حفاری سبک و یا نیمه‌سنگین و برای چال‌های با قطر زیاد از دريفتر یا D.T.H یا ماشین چرخشی با تراست زیاد باید استفاده کرد.

۲-۱-۴-۱-۳- سنگ‌های رسوبي

این گروه از سنگ‌ها از فرسایش و تخریب سنگ‌های قدیمی به وجود آمده‌اند و از نظر حفاری طیف وسیعی را شامل می‌شوند. در میان سنگ‌های رسوبي سنگ‌هایی را می‌توان یافت که به دلیل سختی به دشواری حفاری می‌شوند. ضمناً مواردی را از این گروه می‌توان نام برد که به مانند خاک عمل می‌کنند مثل ماسه و رس. گروه‌بندی همه سنگ‌های رسوبي در اینجا امکانپذیر نیست، آنچه که در ذیل بدان اشاره خواهد شد تقریبی است و بیشتر عملیات حفاری در آنها انجام می‌گیرد.

الف) سنگ‌های سخت سیلیسی

دانه‌ریز مثل چرت و فلنیت

دانه متوسط مثل کوارتزیت رسوبي مانند سنگ سیلیسی

دانه درشت مثل گری‌واک و کنگلومرا

این گروه از سنگ‌ها به ماشین حفاری ضربه‌ای با قدرت زیاد نیاز دارند، عمر مته نیز کمتر از حفاری‌های معمولی است. کاربرد ماشین حفاری چرخشی در این سنگ‌ها مشکل است.

ب) سنگ‌های رسوبي ساینده با سختی کم

دانه‌ریز مثل سلیتستون، سنگ آهک سیلیسی و خاکستر آتشفشانی

دانه متوسط مثل بسیاری از ماسه سنگ‌ها، توف و آرکوز

دانه درشت مثل گریتستون و آگلومرا

برای حفر چال‌های تا قطر سه اینچ از جنس سنگ‌های مذکور می‌توان از دريفتر متوسط استفاده کرد و برای چال‌های با قطر زیادتر از D.T.H، دريفتر سنگین و ماشین حفاری ضربه‌ای- چرخشی استفاده کرد.

ج) شکننده اما ساینده

دانه‌ریز مثل سلیتستون شکننده

دانه متوسط مثل ماسه‌سنگ آرژیلایوس، ماسه‌سنگ آهکی، ماسه‌سنگ شکننده دانه درشت مثل بعضی

گریتستون‌ها

این سنگ‌ها به طور کلی نرمند و حفاری در آنها آسان است و با ماشین‌های چرخشی به راحتی حفاری می‌شوند.

د) نسبتاً سخت اما فاقد خاصیت ساینده

دانه‌ریز مثل سنگ آهک متراکم، بعضی از مادستون‌ها، شیل سخت و مرمر

دانه متوسط مانند برخی از سنگ‌های آهکی ساختمانی

در این سنگ‌ها برای چال‌های کم قطر می‌توان از ماشین‌های ضربه‌ای نیمه‌سنگین تا سنگین و یا ماشین‌های D.T.H استفاده کرد. برای چال‌های با قطر حدود شش اینچ از ماشین چرخشی سنگین باید استفاده نمود. در این روش سرمته از عمر خوبی برخوردار است مگر آنکه از تراست زیادی استفاده شود.

۲-۱-۳- خواص الاستیسیته و پلاستیسیته

قابلیت تغییر شکل، نحوه شکست و نوع شکست سنگ‌ها به خاصیت الاستیسیته و پلاستیسیته سنگ‌ها بستگی دارد. بر اساس نحوه تغییر شکل سنگ به عنوان تابعی از تنش‌های تولید شده در اثر بارهای استاتیک، سه گروه سنگ قابل تفکیک است:

الف) الاستیک ترد یا آن‌هایی که از قانون هوک تبعیت می‌کنند

ب) پلاستیک ترد که قبل از شکستن تغییر شکل پلاستیک دارند

ج) فوق العاده پلاستیک یا بسیار متخلخل که در آنها تغییر شکل الاستیک مشخص وجود ندارد.

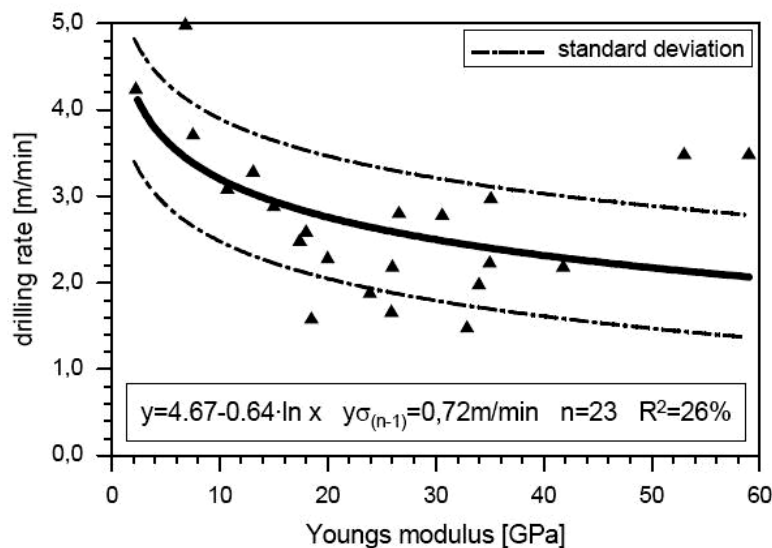
اکثر کانی‌های موجود در سنگ رفتار الاستیک ترد دارند و از قانون هوک تبعیت می‌کنند. خواص الاستیک توسط مدول الاستیسیته مشخص می‌شود. مدول الاستیسیته نسبت تنش قائم به تغییر شکل نسبی ایجاد شده در اثر آن است. مقدار آن در اکثر سنگ‌ها بسته به ترکیب کانی‌شناسی، تخلخل و نوع تغییر شکل و بزرگی نیروی اعمال شده مابین $10^4 \times 0.3$ تا $10^5 \times 1/7$ مگاپاسکال متغیر است.

مقادیر مدول الاستیسیته در اکثر سنگ‌های رسوبی کمتر از مقدار آن برای کانی‌های تشکیل دهنده سنگ است. بافت سنگ نیز بر این پارامتر تأثیر دارد به طوری که مقدار آن در جهت لایه‌بندی یا شیستوزیته معمولاً بیشتر از حالت عمودی می‌باشد.

همانطور که اشاره شده، در برخی سنگ‌ها شکست سنگ پس از تغییر شکل پلاستیک رخ می‌دهد. این حالت زمانی است که تنش‌ها از حد الاستیک بیشتر شوند. در مورد یک جسم پلاستیک ایده آل حتی با ثابت بودن

تنش مقدار تغییر شکل‌ها افزایش می‌یابند. در سنگ‌های واقعی همزمان با تغییر شکل، سنگ محکم‌تر می‌شود و برای افزایش تغییر شکل پلاستیک می‌بایست نیروی اعمالی نیز افزایش یابد. پلاستیسیته بستگی به ترکیب کانی‌شناسی سنگ‌ها داشته و با افزایش مقدار کوارتز، فلدسپات و کانی‌های سخت دیگر کاهش می‌یابد. رس‌های مرطوب و برخی سنگ‌های همگن خواص پلاستیک شدیدی از خود نشان می‌دهند. پلاستیسیته سنگ‌های سخت مثل گرانیت، شیست متبلور و ماسه سنگ به خصوص در دمای بالا قابل توجه می‌باشد.

تاکنون در مطالعات گذشته، تأثیر خواص الاستیکی سنگ‌ها بر سرعت حفاری مورد اشاره و تأکید قرار گرفته شده است. تورو در سال ۱۹۹۶ نشان داد که با افزایش مدول یانگ سنگ‌ها، سرعت حفاری به صورت لگاریتمی کاهش می‌یابد (شکل ۲-۳۴). قهرمان با انجام تعداد زیادی آزمایش نشان داد که با افزایش مدول الاستیسیته سنگ‌ها سرعت حفاری دورانی و قابلیت حفاری سنگ‌ها کاهش می‌یابد (شکل ۲-۳۵). 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 ۲-۳۶).

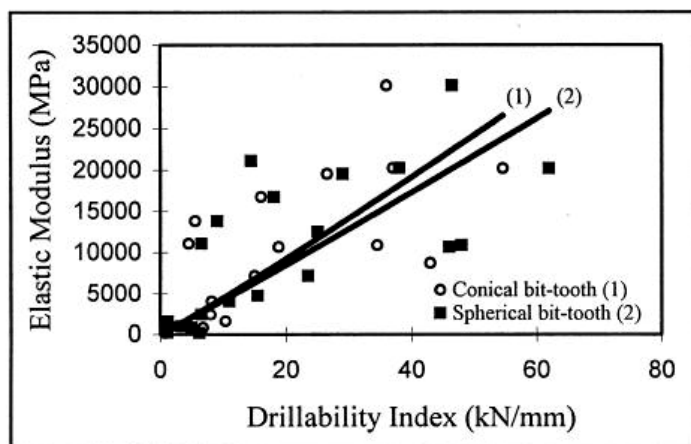


شکل ۲-۳۴- ارتباط سرعت حفاری و مدول الاستیسیته سنگ‌ها (Thuro & Spaun, 1996)

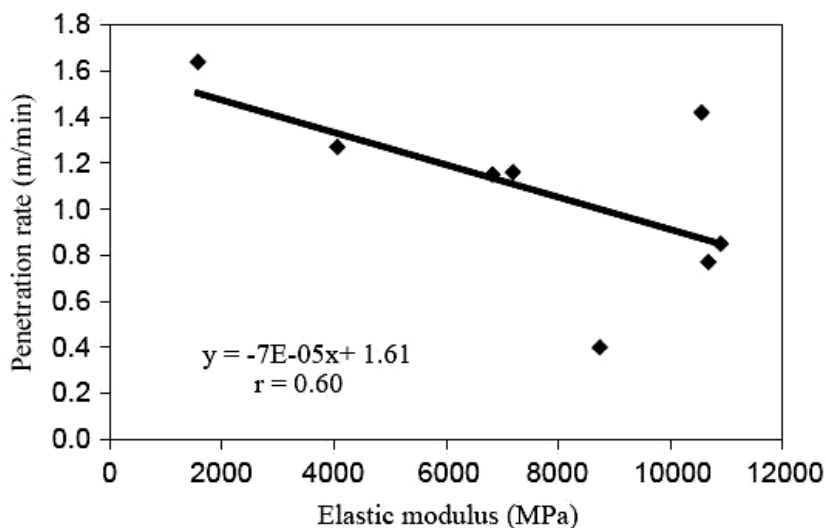
۲-۳- مشخصات ساختاری توده سنگ‌ها

مشخصات توده سنگ و ساختار کلی آن نقش بسیار تعیین کننده‌ای بر فرآیند حفاری و راندمان آن دارند. میزان نفوذپذیری توده سنگ ارتباط مستقیم با ساختار توده‌ای آن دارد. تاکنون متخصصان متعددی بر

تأثیرات ساختار توده سنگ بر قابلیت حفاری و نفوذپذیری آن تأکید کرده‌اند. که از جمله آن‌ها می‌توان به سیستم طبقه‌بندی ویلبور اشاره کرد. در سیستم طبقه‌بندی ویلبور ساختار توده سنگ به نحو خوبی مورد توجه قرار گرفته است. در این سیستم برای توصیف توده سنگ از عبارات توده‌ای، لایه‌ای، ورقه‌ای، رگه‌ای و بلوکی استفاده شده است. استفاده از عبارات کیفی گرچه در شناخت توده سنگ کاربرد وسیعی دارد با این حال در عمل نظرات شخصی و برداشت‌های مختلف از وضعیت توده سنگ، کاربر را دچار مشکل می‌سازد.

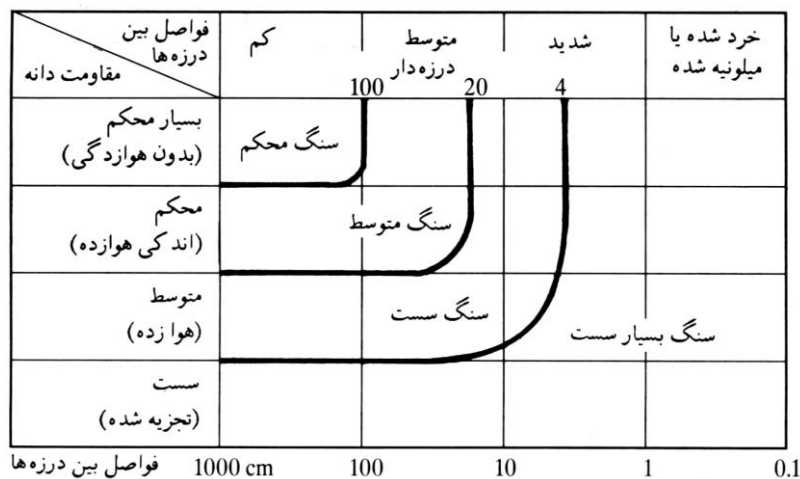


شکل ۲-۳۵- ارتباط قابلیت حفاری و مدول الاستیسیته سنگ‌ها در حفاری دورانی (Kahraman et al. 1999)



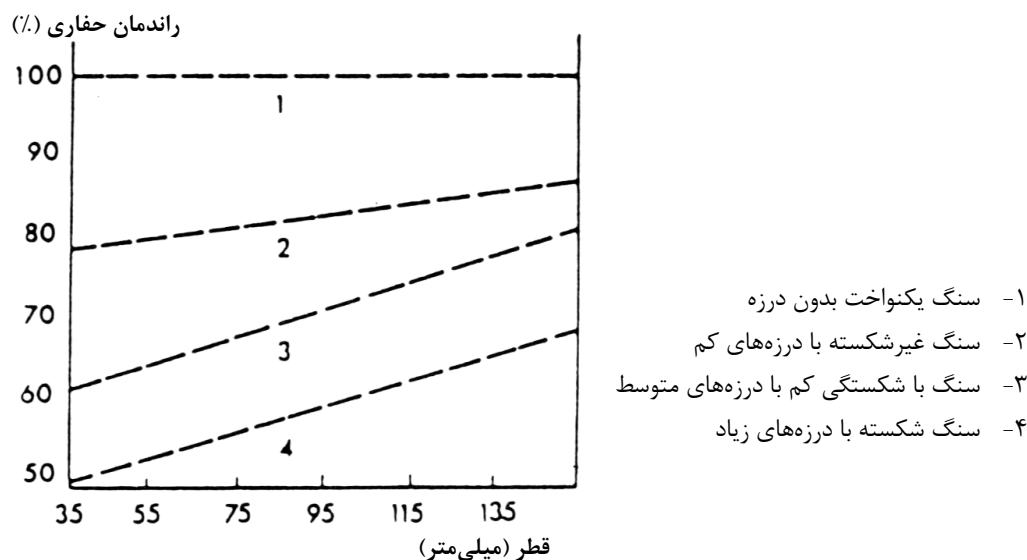
شکل ۲-۳۶- ارتباط قابلیت حفاری و مدول الاستیسیته سنگ‌ها در حفاری ضربه‌ای (Kahraman et al. 200e)

جیمینو و همکاران درزه‌داری توده سنگ و طبقه‌بندی آن از لحاظ ساختار و مقاومت را به صورت شکل ۲-۳۵ ارائه نموده‌اند.



شکل ۲-۳۷- خواص ساختمانی سنگ‌ها و تأثیر آن‌ها بر مقاومت مواد سنگی (Jimeno et al. 1995)

استوار با تأکید بر منحنی‌های شکل (۲-۳۶)، تأثیرات تکتونیک بر چالزنی را مورد اشاره قرار داده است.



شکل ۲-۳۸- اثر قطر چال‌ها بر راندمان حفاری در سنگ با درجات مختلف شکستگی (استوار، ۱۳۸۰)

مهمترین عوارض زمین‌شناسی و تکتونیک که قابلیت حفاری توده سنگ‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند عبارتند از:

الف) گسل خوردگی

ب) درزه‌داری و مشخصات درزه‌ها:

- فاصله‌داری

- شیب‌داری درزه‌ها

- دهانه و پرکننده درزه‌ها.

در ادامه تأثیرات هر یک از پارامترهای فوق مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۲-۳-۱- تأثیر گسل خوردگی بر سرعت حفاری

گسل در معدن کاری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. گسل خوردگی ممکن است در حفاری در مقیاس کوچک و در مقیاس بزرگ‌تر موجب تغییر ناگهانی سنگ‌ها شده و لذا فرآیند پیشروی را با مشکل مواجه سازد. قبل از عملیات حفاری تشخیص گسل و نوع آن ضروری است. سطوح گسل خورده بسیار ضعیف بوده و مثل خاک عمل می‌نمایند. در این محیط‌ها نیاز به بار پشت مته زیادی نیست بالعکس دور مته در دقیقه را می‌توان افزایش داد. در این شرایط ماشین حفاری دورانی در اولویت قرار می‌گیرد. هرچه از زون گسل خورده دورتر شویم سنگ‌ها سخت‌تر و محیط پیوسته‌تر می‌شود. در مجموع، قفل‌شدگی سرمته و سیستم حفاری، کاهش سرعت و افزایش استهلاک را می‌توان مهمترین عوارض ناشی از وجود زون‌های خردشده گسلی دانست.

۲-۳-۱- تأثیر درزه‌داری و مشخصات درزه‌ها بر سرعت حفاری

حفاری در توده سنگ‌های درزه‌دار به مراتب مشکل‌تر از چالزنی در نواحی بدون درزه است (استوار، ۱۳۸۰). حفاری در زون‌های شدیداً درزه‌دار به واسطه بلوک‌های کوچک و درزه‌های باز همواره با مشکل مواجه می‌شود. قفل‌شدگی سرمته و کاهش نفوذ سیستم حفاری و راندمان از بارزترین پدیده‌های حفاری در توده سنگ‌های درزه‌دار می‌باشد.

از جمله مهم‌ترین مشخصات ژئومکانیکی درزه‌ها که قابلیت حفاری توده‌سنگ را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند می‌توان به فاصله‌داری، شیب‌داری و بازشدگی درزه‌ها اشاره نمود. در ادامه تأثیرات هر یک از پارامترهای فوق مورد بررسی قرار می‌گیرند.

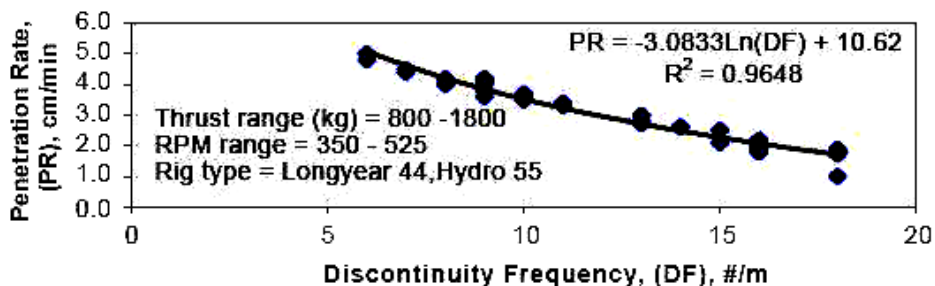
۲-۳-۱-۱- تأثیر فاصله‌داری درزه‌ها بر سرعت حفاری

فاصله‌داری را می‌توان مهمترین ویژگی سیستم درزه‌ها به حساب آورد. قابلیت حفاری و نفوذپذیری توده سنگ به فاصله‌داری درزه‌ها بستگی دارد. کاهش فاصله‌داری باعث کاهش پیوستگی محیط حفاری و نیز کاهش راندمان و نرخ نفوذ حفاری می‌گردد.

ناپایداری دیواره چال‌های حفر شده معلول وجود درزه‌های نزدیک و همچنین درزه‌های تصادفی در مسیر چال می‌باشد. وجود بیش از یک دسته درزه و وجود درزه‌های تصادفی باعث بحرانی‌تر شدن محیط حفاری

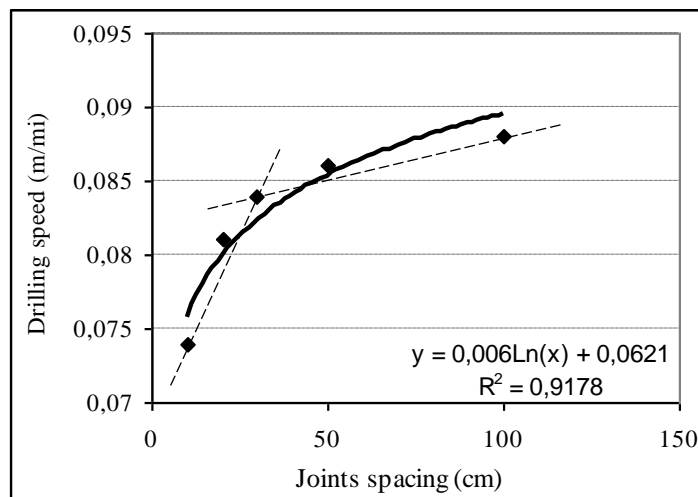
می‌گردد. بدترین حالت توده سنگ از نظر چالزنی زمانی رخ می‌دهد که توده سنگ حالت بلوکی (با حجم‌های کم) داشته باشد.

تاکنون مطالعات بسیار کمی بر روی تأثیرات کمی فاصله‌داری بر روی سرعت حفاری انجام شده است. آکون و کارپوز در سال ۲۰۰۵ در تحقیقی در یکی از معادن شن و ماسه ترکیه دریافتند که با افزایش فراوانی تعداد درزه در توده سنگ سرعت حفاری کاهش می‌یابد (شکل ۲-۳۹).



شکل ۲-۳۹- رابطه سرعت حفاری با فراوانی درزه‌ها (Akun & Karpuz, 2004)

حسینی و همکاران در سال ۲۰۰۸ طی انجام یک سری مطالعات آزمایشگاهی و مدل‌سازی فیزیکی توده سنگ‌ها با بتن، کیفیت و کمیت تغییرات سرعت حفاری ناشی از تغییرات فاصله‌داری درزه‌ها را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این تحقیق به صورت منحنی شکل ۲-۴۰ ارائه شده است.



منحنی شکل ۲-۴۰- رابطه سرعت حفاری با فاصله‌داری درزه‌ها (Hoseinie et al. 2008)

با دقت در منحنی شکل ۲-۴۰ به وضوح آشکار می‌گردد که کمترین نرخ نفوذ و راندمان سیستم حفاری مربوط به فاصله‌داری ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد. در توده سنگ‌های با فاصله‌داری ۱۰-۵۰ سانتی‌متری نرخ نفوذ سیستم حفاری اختلاف کمی با هم دارند. لذا با توجه به اطلاعات به‌دست آمده می‌توان پیش‌بینی کرد که با

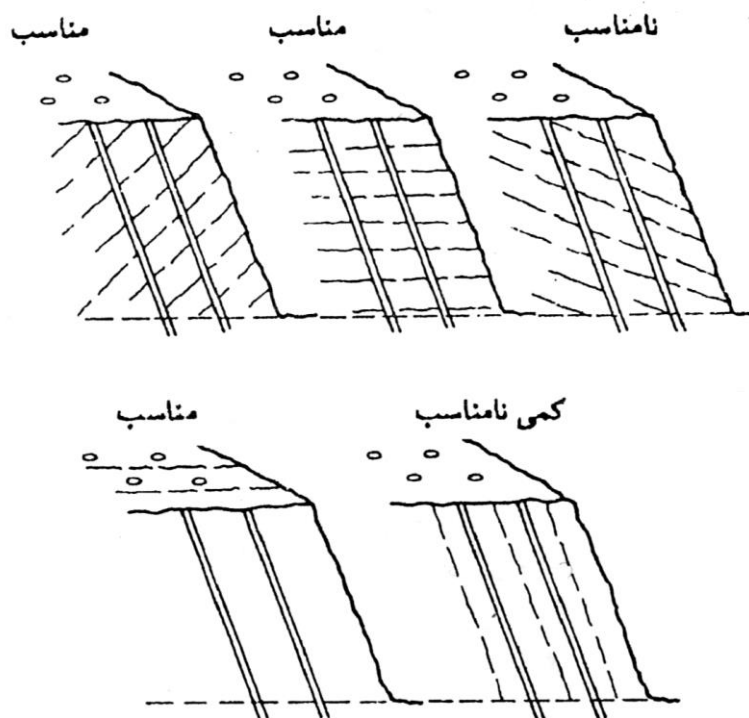
افزایش فاصله‌داری به بیش از یک متر، رفتار توده سنگ به رفتار محیط‌های پیوسته نزدیک‌تر می‌شود. همچنین با توجه به خطوط بریده روی منحنی، معلوم می‌گردد که شدت تغییرات سرعت حفاری در فاصله‌داری‌های کم بیشتر تغییرات سرعت حفاری در فاصله‌داری‌های زیاد می‌باشد. لذا شرایط حفاری در توده سنگ‌های با درزه‌های نزدیک بحرانی‌تر است. تاکنون فقط در سیستم طبقه‌بندی قابلیت حفاری توده سنگ (RDi) به فاصله‌داری درزه‌ها از نظر قابلیت حفاری امتیازدهی شده است. جدول ۲-۱۰ نحوه امتیازدهی به فاصله‌داری درزه‌های توده سنگ را در سیستم RDi نشان می‌دهد.

جدول ۲-۱۰- امتیازدهی به فاصله‌داری درزه‌ها در سیستم RDi (Hoseinie et al. 2008)

فاصله داری درزه ها (m)	>۲	۱-۲	۰/۵-۱	۰/۱۵-۰/۵	۰-۰/۱۵
امتیاز (از ۱۰۰)	۱۸	۱۳	۹	۵	۱

۲-۱-۳-۲- تأثیر شیب‌داری درزه‌ها بر سرعت حفاری

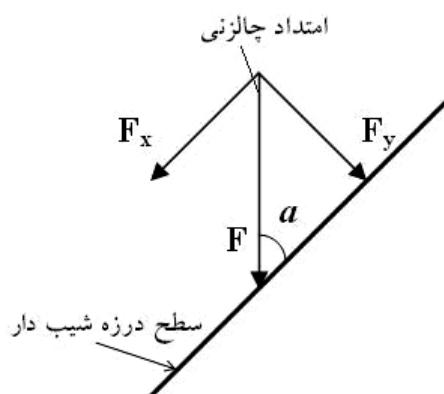
وجود درزه‌های شیب‌دار باعث انحراف چال، کاهش بار پشت مته و در نهایت کاهش نرخ نفوذ سیستم حفاری می‌گردد (شکل ۲-۴۱). از طرفی در درزه‌های باز که دارای پرکننده نیز می‌باشد، تماس چال با درزه‌ها باعث ریزش پرکننده‌ها به چال در حین و بعد از حفاری می‌گردد. این پدیده موجب گیرکردن سر مته در حین حفاری و پرشدگی چال بعد از حفاری می‌شود.



شکل ۲-۴۱- محل مناسب حفر چال در توده‌های درزه‌دار (استوار، ۱۳۸۰)

بار پشت مته به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیر گذار بر سرعت حفاری سیستم‌های دورانی و دورانی-ضربه‌ای می‌باشد. وجود درزه‌های شیب‌دار به عنوان یک عامل ساختاری توده‌سنگ میزان بار پشت مته و نهایتاً سرعت حفاری را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد.

چنانچه در شکل ۲-۴۲ نشان داده شده، در سطح درزه‌های شیب‌دار بار پشت مته (F) بصورت تابعی از زاویه (α) 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.

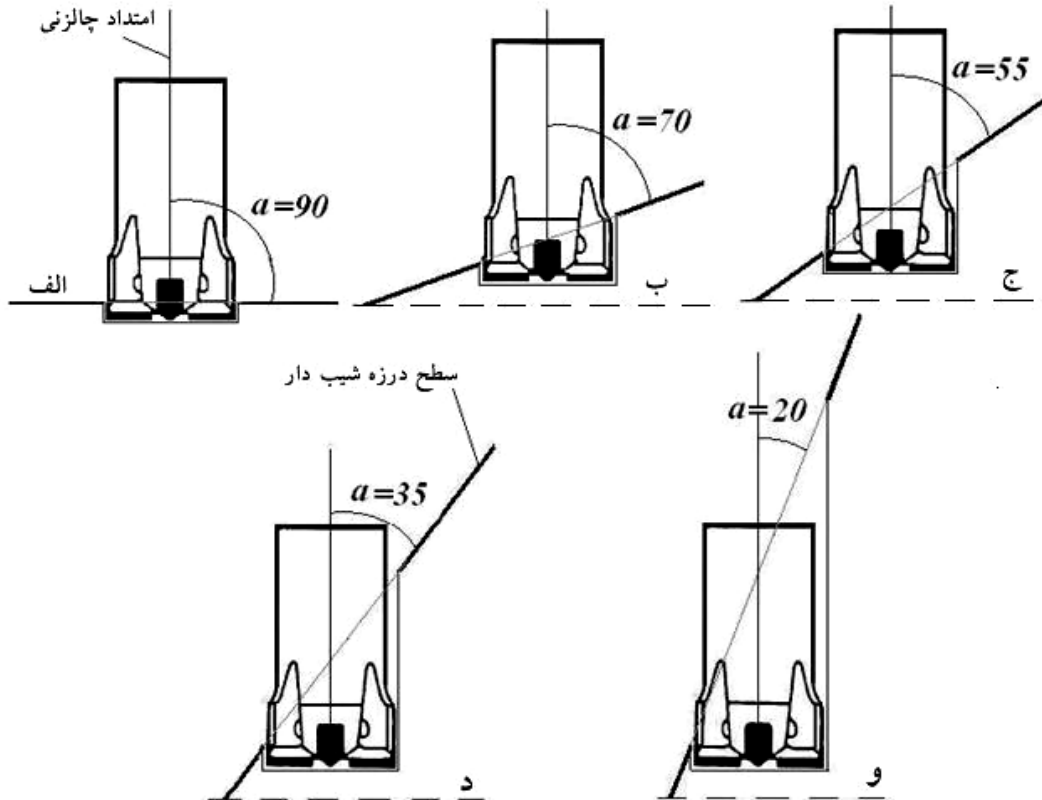


شکل ۲-۴۲- توزیع بار پشت مته در سطح درزه‌های شیب‌دار

حسینی و همکاران (۱۳۸۶) جهت، بررسی شرایط نفوذپذیری سطح درزه‌های شیب‌دار، به منظور انتخاب یک کمیت عملی برای مقایسه شرایط مختلف، حجم درگیر با نوک مته قبل از نفوذ کامل آن در بلوک زیرین سطح درزه به عنوان حجم بحرانی معرفی کرده‌اند. در هنگام رسیدن مته به سطح درزه اعم از تخت یا شیب‌دار، شرایط نفوذ مته در سنگ دقیقاً شبیه حالت شروع اولیه حفاری می‌گردد. در این حالت مدت زمان مکان‌یابی و جانمایی مته در سطح درزه یکی از عوامل تأخیر نفوذ سیستم حفاری در سنگ و سطح درزه می‌باشد. هر چه شیب نسبی سطح درزه (α) کمتر گردد حجم بحرانی افزایش یافته و به نسبت همین حجم، زمان حفاری زیادتر شده و نرخ نفوذ مته در درزه کاهش می‌یابد. در شکل ۲-۴۳ شرایط هندسی نفوذ مته در سطح درزه‌ها با شیب‌های مختلف و در شکل ۲-۴۴ حجم بحرانی تقریبی در شیب‌های مختلف برای قطر چالزنی سه اینچ نشان داده شده است. در این شکل به منظور تعیین احجام بحرانی تقریبی، فضای حفر شده توسط مته به صورت یک منشور با قاعده دوزنقه و ارتفاع سه اینچ در نظر گرفته شده و محاسبات انجام

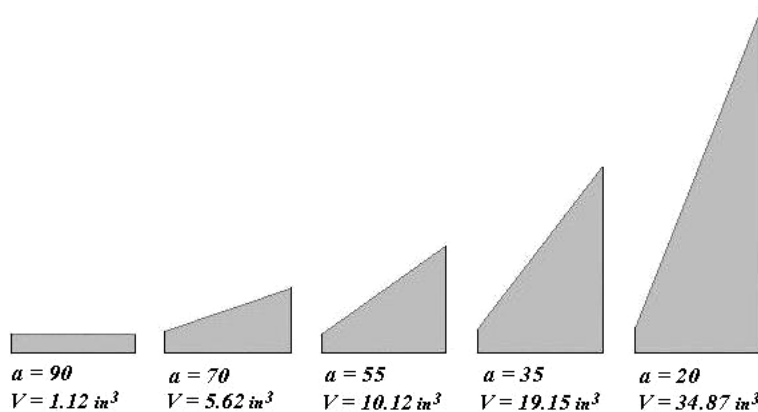
پذیرفته است. شایان ذکر است حین کاهش زاویه (a)، افزایش حجم بحرانی و کاهش بار پشت مته مهمترین عوامل کاهش نرخ نفوذ مته در سطح درزه‌های شیب‌دار است.

با توجه به مطالب ارائه شده، حسینی و همکاران رابطه بین سرعت حفاری و شیب درزه‌ها را به صورت شکل (۲-۴۵) ارائه نموده‌اند.

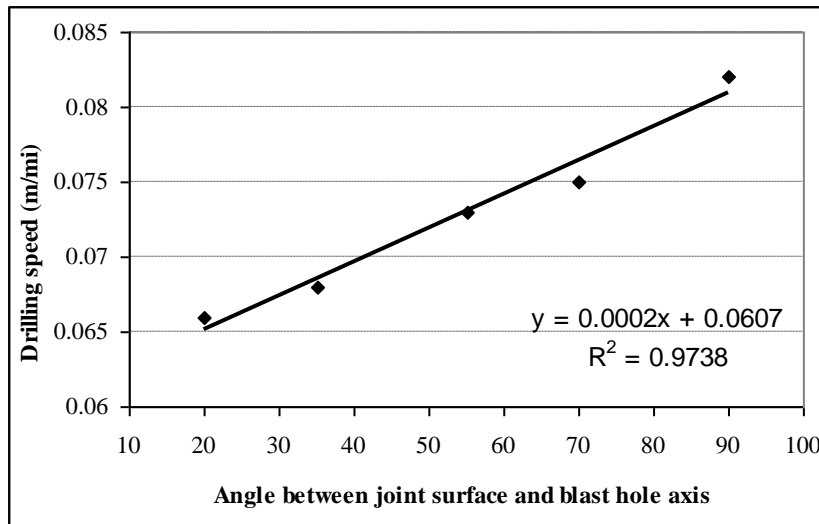


الف) امتداد حفاری عمود بر سطح درزه (بهترین حالت) $F_x = 0$
 ج) زاویه بین سطح درزه و امتداد چال ۵۵ درجه $(F_x = 0.57F)$
 د) زاویه بین سطح درزه و امتداد چال ۳۵ درجه $(F_x = 0.81F)$
 ب) زاویه بین سطح درزه و امتداد چال ۷۰ درجه $(F_x = 0.34F)$
 و) زاویه بین سطح درزه و امتداد چال ۲۰ درجه $(F_x = 0.93F)$

شکل ۲-۴۳- شرایط هندسی نفوذ مته در سطح درزه با شیب‌های مختلف (حسینی و همکاران، ۱۳۸۶)



شکل ۲-۴۴- حجم‌های بحرانی در شیب‌های مختلف برای حفاری با قطر سه اینچ (حسینی و همکاران، ۱۳۸۶)



شکل ۲-۴۵- رابطه بین سرعت حفاری و شیب درزه‌ها (حسینی و همکاران، ۱۳۸۶)

در سیستم طبقه‌بندی قابلیت حفاری توده سنگ (RDi) شیب‌داری درزه‌ها از نظر قابلیت حفاری امتیازدهی شده است. جدول ۲-۱۱ نحوه امتیازدهی به فاصله‌داری درزه‌های توده سنگ را در سیستم RDi نشان می‌دهد.

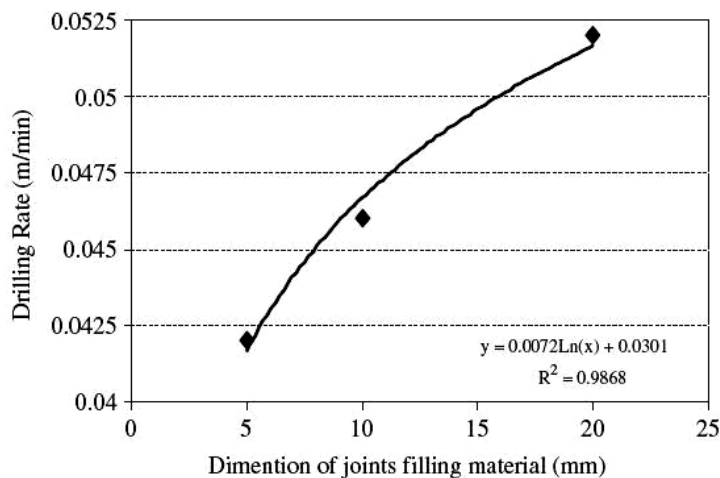
جدول ۲-۱۱- نحوه امتیازدهی به شیب‌داری درزه‌های توده سنگ در سیستم RDi

۰-۲۰	۲۰-۳۵	۳۵-۵۵	۵۵-۷۰	۷۰-۹۰	شیب‌داری درزه‌ها (°)
۱	۳	۶	۸	۱۲	امتیاز (از ۱۰۰)

۲-۳-۱-۳- تأثیر دهانه و پرکننده درزه‌ها بر سرعت حفاری

دهانه درزه، میزان و ابعاد پرکننده‌ها از جمله مشخصات فضای بین سطوح درزه می‌باشند که نرخ نفوذ سیستم حفاری را 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 خفگی و قفل‌شدگی سیستم حفاری می‌گردند. وجود مواد پرکننده در فضای درزه‌های باز باعث کاهش شدید نرخ نفوذ سیستم حفاری می‌گردد. نتایج مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که در توده سنگ‌های با پرکننده با ابعاد کوچکتر، مشکلات حفاری به مراتب بیشتر می‌باشد. با کاهش ابعاد پرکننده تا حد ذرات فلاشینگ، ذرات به جای خرد شدن، تحت فشار هوای فلاشینگ تنها در فضای بین سر مته و سنگ حرکت می‌کنند. باقی ماندن ذرات در فضای بین سر مته و سنگ باعث اتلاف انرژی و کاهش نرخ نفوذ می‌گردد. این اتفاق مشابه پدیده‌ای است در اثر وجود سنگ‌های خرد شده بین دیسک و ماده سنگ در حفاری مکانیزه تونل با TBM اتفاق می‌افتد.

حسینی و همکاران رابطه بین سرعت حفاری و شیب درزه‌ها را به صورت شکل (۲-۴۶) ارائه نموده‌اند.



شکل ۲-۴۶- رابطه بین سرعت حفاری و ابعاد پرکننده درزه‌ها درزه‌ها (Hoseinie et al. 2008)

در سیستم طبقه‌بندی قابلیت حفاری توده سنگ (RDi) بازشدگی و پرکننده درزه‌ها از نظر قابلیت حفاری برای اولین بار امتیازدهی شده است. جدول ۲-۱۲ نحوه امتیازدهی به فاصله‌داری درزه‌های توده سنگ را در سیستم RDi نشان می‌دهد.

جدول ۲-۱۲- نحوه امتیازدهی به بازشدگی و پرکننده درزه‌ها توده سنگ در سیستم RDi

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

فصل سوم

مطالعات آزمایشگاهی و بررسی
ارتباط مشخصات سنگ با سرعت
حفاری

چنانچه در فصل قبل شرح داده شد پارامترهای مؤثر بر سرعت حفاری هر یک روابط ریاضی مختلفی با سرعت حفاری و سایر موارد حفاری مکانیزه دارند. با این حال ارزیابی کلی یک سنگ تنها با در نظر گرفتن کلیه پارامترها و تأثیرات متقابل آنها امکان پذیر است. تاکنون در مطالعات انجام شده بر روی حفاری، هیچ یک از محققان تأثیر همه مشخصات سنگ از جمله مشخصات کانی‌شناسی، مشخصات فیزیکی و مکانیکی را بر روی سرعت حفاری توسط یک روش حفاری مورد مطالعه قرار نداده‌اند بلکه در هر تحقیق تأثیر تعدادی از این پارامترها بر روی سرعت حفاری به صورت محدود مورد مطالعه قرار گرفته است.

با توجه به تعدد معادن کوچک و متوسط در کشورمان (که بیشتر هم مالکیت خصوصی دارند)، روش حفاری ضربه‌ای- دورانی پنوماتیکی با توجه به هزینه‌های سرمایه‌ای و هزینه‌های عملیاتی همچنان در کشور به طور گسترده به کار برده می‌شود. از آن جایی که ارزیابی پارامترهای سنگ و شناسایی کمیت تأثیر آنها بر سرعت حفاری می‌تواند راه‌گشای خوبی برای انتخاب ماشین و سرمته مناسب در این معادن باشد، لذا در این تحقیق سعی شده تا با انجام مطالعات جامع آزمایشگاهی ارتباط ریاضی بین سرعت حفاری ضربه‌ای- دورانی پنوماتیکی چکش بالا و مشخصات مهندسی سنگ به طور مناسبی تعیین شود.

۳-۱- جمع‌آوری نمونه از معادن

با توجه به شناخت مجریان طرح از کیفیت سنگ‌های معادن شمال غرب کشور، به منظور انجام مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های سنگی، در مجموع از سنگ‌های موجود در هشت معدن و نیز یکی از شیروانی‌های سنگی مشرف به اتوبان شمالی تبریز نمونه‌برداری به عمل آمد. در جدول ۳-۱ اسامی و در شکل ۳-۱ موقعیت مکانی معادن نمونه‌برداری شده بر روی نقشه نشان داده شده است. در انتخاب این معادن نوع سنگ از اهمیت بسیار زیادی برخوردار بوده است و هدف این بوده است که از انواع سنگ‌های نرم غیرساینده تا سنگ‌های سخت ساینده در آزمایش‌های انجام شده گنجانده شود. در مجموع از هر معدن یک نمونه با ابعاد متوسط $30 \times 40 \times 30$ سانتی‌متر و به وزن تقریبی ۵۰ کیلوگرم و تعدادی نمونه سنگی به ترتیب برای حفاری و نیز انجام آزمایش‌های مکانیک سنگی انتخاب و به آزمایشگاه منتقل شدند.

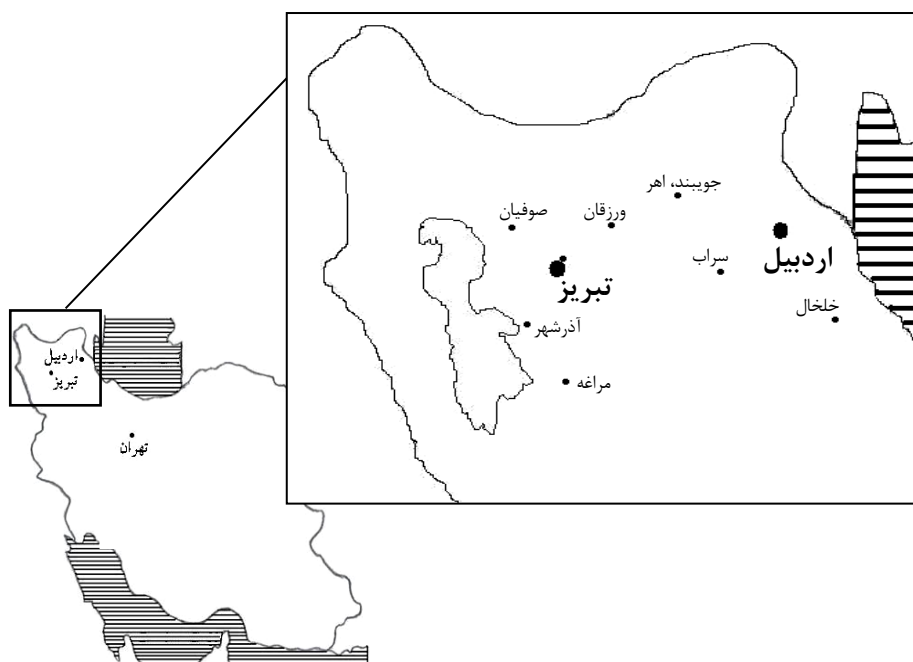
۳-۲- آزمایش‌های مکانیک سنگ

پس از تهیه نمونه‌های مکانیک سنگی، کلیه نمونه‌ها به صورت کاملاً دقیق توسط کیسه‌های پلاستیکی بسته‌بندی شده و در جعبه‌های چوبی به آزمایشگاه منتقل شدند. با توجه حجم آزمایش‌ها و دقت مورد نیاز،

از آزمایشگاه خواسته شد تا کلیه آزمایش‌ها تحت استانداردهای انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ و با دقت بالا انجام گیرند [۲۱].

جدول ۳-۱- اسامی معادن نمونه‌برداری شده و موقعیت مکانی آن‌ها

نام سنگ	نام معدن	موقعیت مکانی
مونزونیت	معدن مس سونگون	۱۲۰ کیلومتری شمال شرق تبریز
گرانیت	معدن اوچ مازی مراغه	۹۳ کیلومتری جنوب شرقی تبریز
سنگ آهک شیری	معدن آهک سیمان صوفیان	۳۱ کیلومتری شمال غرب تبریز
سنگ آهک سیاه	معدن آهک سیمان صوفیان	۳۱ کیلومتری شمال غرب تبریز
تراورتن کرمی	معدن تراورتن خلخال	۹۰ کیلومتری جنوب شرقی اردبیل
تراورتن قرمز	معدن تراورتن سردارآباد	۳۷ کیلومتری جنوب شرقی تبریز
سیلیس	معدن خواجه مرجان	۱۵ کیلومتری شمال غربی تبریز
نفلین سینیت	معدن رزگاه نفلین سینیت سراب	۸۵ کیلومتری شرق تبریز
ماسه سنگ آهکی	بزرگراه پاسداران تبریز	شمال تبریز



شکل ۳-۱- موقعیت مکانی معادن نمونه‌برداری شده

با توجه به مطالعات انجام شده در فصل قبل و شناسایی پارامترهای مؤثر، در مجموع آزمایش‌های زیر برای

انجام بر روی سنگ‌ها به آزمایشگاه سفارش داده شد:

(الف) آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)

(ب) آزمایش کشش غیر مستقیم (تست برزیلی) (BTS)

(ج) تعیین چگالی خشک (DD)

(د) سختی چکش اشمیت (SHN)

پ) مدول یانگ (E)

استانداردها، توضیحات، مراحل و محاسبات مربوط به کلیه آزمایش‌ها در پیوست گزارش ارائه شده است. نتایج آزمایش‌های مکانیک سنگی در صورت جدول ۲-۳ ارائه شده است.

۳-۳- آزمایش آنالیز شیمیایی (XRF)

از آن جایی که مقدار سیلیس نقش تعیین کننده‌ای در رفتار سنگ از نظر قابلیت حفاری و ساینده‌گری دارد، در این تحقیق کلیه سنگ‌ها از نظر دارا بودن میزان سیلیس تحت آزمایش آنالیز شیمیایی قرار گرفتند. برای این منظور نمونه‌های کوچک تپیک از هر سنگ تحویل آزمایشگاه شد تا پس از خردایش و مخلوط‌سازی، مورد آزمایش آنالیز شیمیایی تابش اشعه X (XRF) قرار گیرند. میزان سیلیس موجود در سنگ‌ها حاصل از آنالیز شیمیایی در جدول ۳-۳ آورده شده است.

جدول ۲-۳- نتایج آزمایش‌های مکانیک سنگی

نام سنگ	UCS (MPa)	BTS (MPa)	DD (g/cm ³)	SHN	E (GPa)
مونزونیت	۵۷	۴/۲۱	۲/۵۸	۵۰/۹	۵۱/۲۳
گرانیت	۸۷/۵	۵/۳۶	۲/۶۵	۱/۵۸	۶۰/۸۴
سنگ آهک کرمی	۴۰	۵/۴۵	۲/۷۹	۵۲/۳	۵۸/۸۲
سنگ آهک سیاه	۵۱	۲/۲۳	۲/۵۹	۵۴/۱	۴۴/۱
تراورتن کرمی	۵۰/۵	۲/۴	۲/۴۶	۵۴/۳	۴۸/۸۳
تراورتن قرمز	۵۳	۱/۴۵	۲/۵۵	۵۰/۲	۷۰/۱۹
سیلیس	۱۱۲	۴/۱۸	۲/۵۸	۵۴	۴۳/۲۸
نفلین سینیت	۷۶	۴/۴۶	۲/۴۹	۵۷/۲	۵۱/۵۹
ماسه سنگ آهکی	۱۴	۰/۷۸	۲/۲۴	۴۵/۵	۹/۲۸

جدول ۳-۳- میزان سیلیس موجود در سنگ‌ها حاصل از آنالیز شیمیایی

نام سنگ	SiO ₂ (%)
مونزونیت	۶۸/۶۷
گرانیت	۵۶/۷۶
سنگ آهک شیری	۴/۷
سنگ آهک سیاه	۰/۲۴
تراورتن کرمی	۰/۵۳۷
تراورتن قرمز	۰/۱۸۷
سیلیس	۵۸/۸
نفلین سینیت	۵۴/۲۲
ماسه سنگ آهکی	۵۰/۷۸

۳-۴- مطالعات کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی

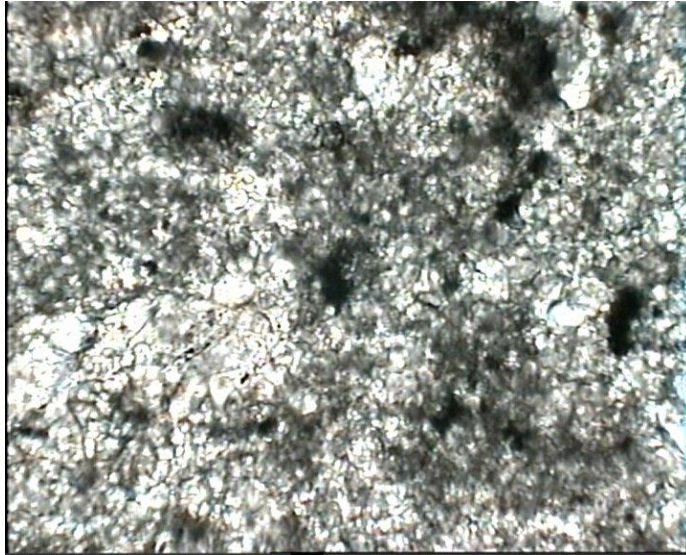
برای بررسی و ارزیابی قابلیت حفاری هر نوع سنگی اطلاع دقیق از مشخصات کانی‌شناسی آن یک امر الزامی و اساسی به شمار می‌رود، زیرا پارامترهای بسیار مهمی همچون سختی و ساینده‌گی به طور مستقیم از ترکیب کانی‌شناسی سنگ تأثیر می‌پذیرند. در این تحقیق یک مقطع نازک از بخش تیپیک سنگ‌های مورد مطالعه تهیه شده و مورد مطالعه قرار گرفته است. با استفاده از این مقطع نوع و درصد کانی‌های تشکیل دهنده، نوع بافت و میانگین اندازه دانه‌های سنگ تعیین شده است. نمونه‌ای از عکس‌های گرفته شده از مقاطع نازک تهیه شده در شکل ۳-۲ تا شکل ۳-۱۰ نشان داده شده است. در جدول ۳-۴ نتایج حاصل از مطالعات کانی‌شناسی آورده شده است.



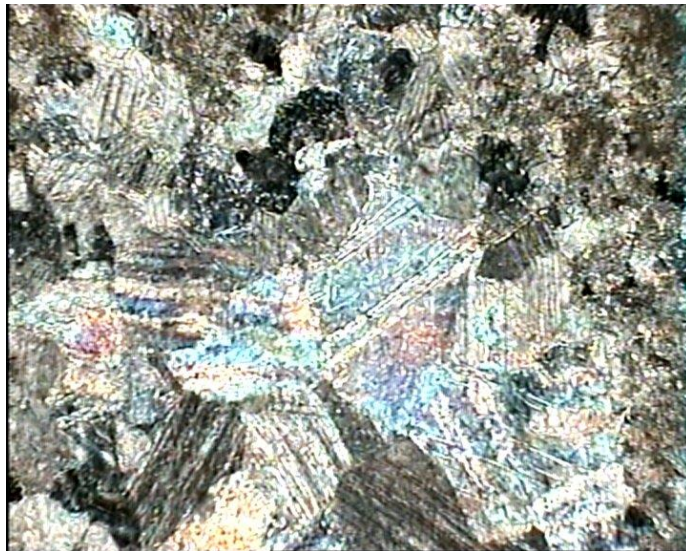
شکل ۳-۲- عکس گرفته شده از مقطع نازک تهیه شده از مونزونیت- معدن مس سونگون



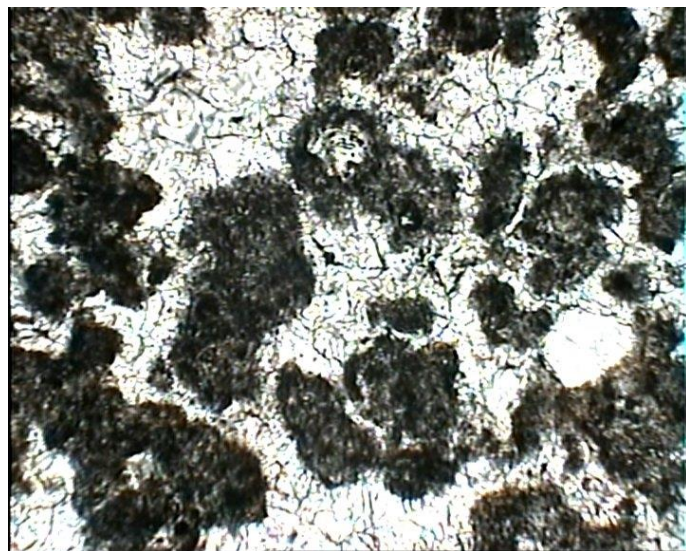
شکل ۳-۳- عکس گرفته شده از مقطع نازک تهیه شده از گرانیت مراغه



شکل ۳-۴ - عکس گرفته شده از مقطع نازک تهیه شده از سنگ آهک کرمی



شکل ۳-۵ - عکس گرفته شده از مقطع نازک تهیه شده از سنگ آهک مشکی



شکل ۳-۶ - عکس گرفته شده از مقطع نازک تهیه شده از تراورتن کرمی



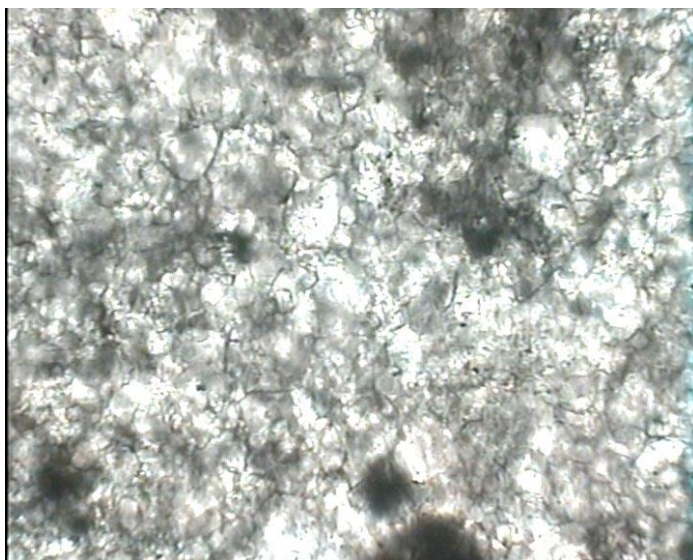
شکل ۳-۷- عکس گرفته شده از مقطع نازک تهیه شده از تراورتن قرمز



شکل ۳-۸- عکس گرفته شده از مقطع نازک تهیه شده از سیلیس



شکل ۳-۹- عکس گرفته شده از مقطع نازک تهیه شده از نفلین سینیت



شکل ۳-۱۰- عکس گرفته شده از مقطع نازک تهیه شده از ماسه سنگ آهکی

جدول ۳-۴- نتایج مطالعات کانی شناسی انجام شده بر روی سنگ‌ها

نام سنگ	کانی‌های موجود	بافت	میانگین ابعاد دانه‌ها (mm)
مونزونیت	کوارتز، سرسیت، زیرکن، موسکوویت، کانی‌های اپک	گرانوبلاستیک	۰/۵۱
گرانیت	فلدسپات، آندزیت، بیوتیت، آمفیبول، پیروکسن، کلریت، کانی‌های اپک	گرانولار (دانه‌ای)	۶/۵۶
سنگ آهک کرمی	کلسیت، مواد آلی، هماتیت، قطعات سنگ خرد شده	اسپریت	۱/۵۲
سنگ آهک سیاه	کلسیت، هماتیت، کانی‌های اپک.	اسپریت	۱/۳۵
تراورتن کرمی	کلسیت، مواد آلی، فضاهای خالی	اسپریت	۱/۲۷
تراورتن قرمز	کلسیت، هماتیت، کانی‌های اپک. فضاهای خالی	اسپریت	۱/۱۲
سیلیس	کوارتز، آندزین، میکروکلین، موسکوویت، آپاتیت، زیرکن، قطعات سنگ شکسته، کانی‌های اپک	گرانولار (دانه‌ای)	۲/۴۵
نفلین سینیت	آلکالی فلدسپات، پلاژیوکلاز، نفلین، اوژیت، الیوپن، آپاتیت، کانی‌های اپک	گرانولار (دانه‌ای)	۳/۷۷
ماسه سنگ آهکی	کلسیت، کوارتز، قطعات سنگ شکسته	گرانولار (دانه‌ای)	۱/۳

در تفاسیر مقاطع نازک درصد کانی‌های تشکیل دهنده سنگ و نیز محدوده ابعادی (اندازه) دانه‌ها به دقت مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. پس از تعیین درصد کانی‌های موجود و نیز ابعاد دانه‌ی هر یک از کانی‌ها در هر سنگ، با استفاده از راهنمای کانی‌شناسی، سختی هر یک از کانی‌ها استخراج شد. سپس با استفاده از رابطه (۱۱) فصل دوم میزان کوارتز محتوی معادل (EqQtz) هر سنگ تعیین شد.

با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش‌های ذکر شده، میزان شاخص سایش شیمازک سنگ طبق رابطه (۱۰) برای هر سنگ محاسبه و معلوم شد. جدول ۳-۵ سختی میانگین، میزان کوارتز محتوی و مقادیر شاخص سایش شیمازک محاسبه شده برای هر کدام از سنگ‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۵- سختی میانگین، میزان کوارتز محتوی و مقادیر شاخص سایش شیمازک محاسبه شده برای هر کدام از سنگ‌های مورد مطالعه

نام سنگ	سختی میانگین	میزان کوارتز محتوی (%)	شاخص سایش شیمازک (N/mm)
مونزونیت	۴/۷۵	۵۲/۸۱	۱/۱۳
گرانیت	۵/۴۲	۳۲/۵	۱۱/۴۴
سنگ آهک کرمی	۳/۰۵	۳/۴	۰/۲۵
سنگ آهک سیاه	۳/۱۵	۴/۲	۰/۱۴
تراورتن کرمی	۲/۶	۱/۹۳	۰/۰۵
تراورتن قرمز	۲/۷	۳/۸۵	۰/۰۶
سیلیس	۶/۳۵	۷۲/۴۵	۷/۴۲
نفلین سینیت	۵/۸۵	۳۷/۵۹	۶/۳۲
ماسه سنگ	۲/۱	۱/۶۲	۰/۰۱۶

۳-۵- آزمایش‌های حفاری

در کنار انجام آزمون‌های آزمایشگاهی، تعدادی نمونه حجیم از سنگ‌های مورد مطالعه برای انجام حفاری به معدن سنگ آهک سیمان صوفیان منتقل شدند. در معدن، تمامی نمونه‌ها در یک کانال به عمق متوسط ۰/۵ متر و عرض ۰/۸ متر توسط بتن دفن شده و تنها سطح بالایی نمونه‌ها برای انجام حفاری به صورت آزاد باقی گذاشته شد. پس از آماده‌سازی و مراحل تحکیم نمونه‌ها در بتن که تقریباً یک هفته به طول انجامید، کلیه سنگ‌ها توسط دستگاه حفاری ضربه‌ای- دورانی با سرمته تیغه‌ای از نوع ضربدری و با قطر سه اینچ مورد حفاری قرار گرفتند.

در هر نوع از سنگ‌های مورد مطالعه به طور میانگین تعداد پنج چال به عمق متوسط ۱۰ سانتی‌متر حفر شد و میانگین زمان حفر این چال‌ها و سرعت حفاری در آن سنگ محاسبه شد. نتایج مطالعات حفاری در جدول ۳-۶ آورده شده است. شکل‌های ۳-۱۱ تا ۳-۱۴ مراحل اجرایی آزمایش‌های حفاری را نشان می‌دهند.

جدول ۳-۶- نتایج آزمایش‌های حفاری بر روی سنگ‌های مورد مطالعه

نام نمونه	سرعت حفاری (m/min)
-----------	--------------------

۰/۵۲	مونزونیت
۰/۳۲	گرانیت
۰/۳۴	سنگ آهک کرمی
۰/۴۴	سنگ آهک سیاه
۰/۵۸	تراورتن کرمی
۰/۸۱	تراورتن قرمز
۰/۱	سیلیس
۰/۲۲	نفلین سینیت
۱/۲۸	ماسه سنگ



شکل ۳-۱۱- مراحل اولیه حفر کانال



شکل ۳-۱۲- نمونه‌های سنگی قرار گرفته در کانال حفر شده



شکل ۳-۱۳- نمونه‌ای از چال‌های حفر شده در سنگ‌ها



شکل ۳-۱۴ - دستگاه حفاری ضربه‌ای-دورانی مورد استفاده در مطالعات در حین حفر چال در نمونه‌ها

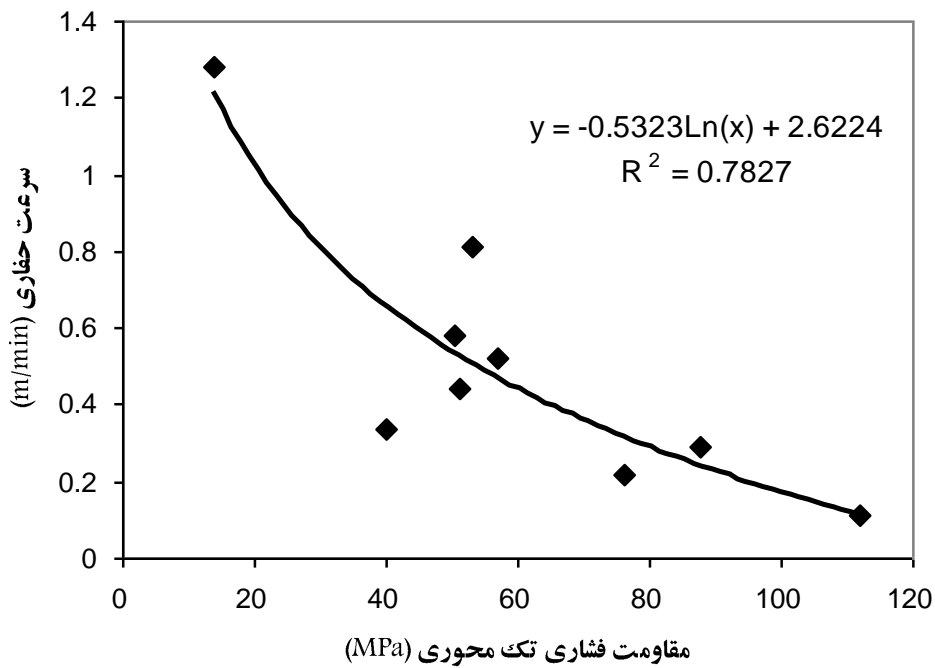
۳-۳- بحث و تحلیل ریاضی نتایج مطالعات آزمایشگاهی

پس از انجام مطالعات آزمایشگاهی، حفاری سنگ‌ها و جمع‌آوری نتایج حاصل، با توجه به اعداد ارائه شده در جداول ۳-۲، ۳-۳، ۳-۵ و ۳-۶ به منظور بررسی ارتباط سرعت حفاری ضربه‌ای- دورانی چکش بالای پنوماتیکی و مشخصات سنگ‌ها، بهترین منحنی‌ها بر روی داده‌های به دست آمده از آزمایش‌ها برآزش شد. شکل‌های ۳-۱۵ تا ۳-۲۷ منحنی‌های برآزش شده و نیز رابطه‌های ریاضی متناظر نشان می‌دهند.

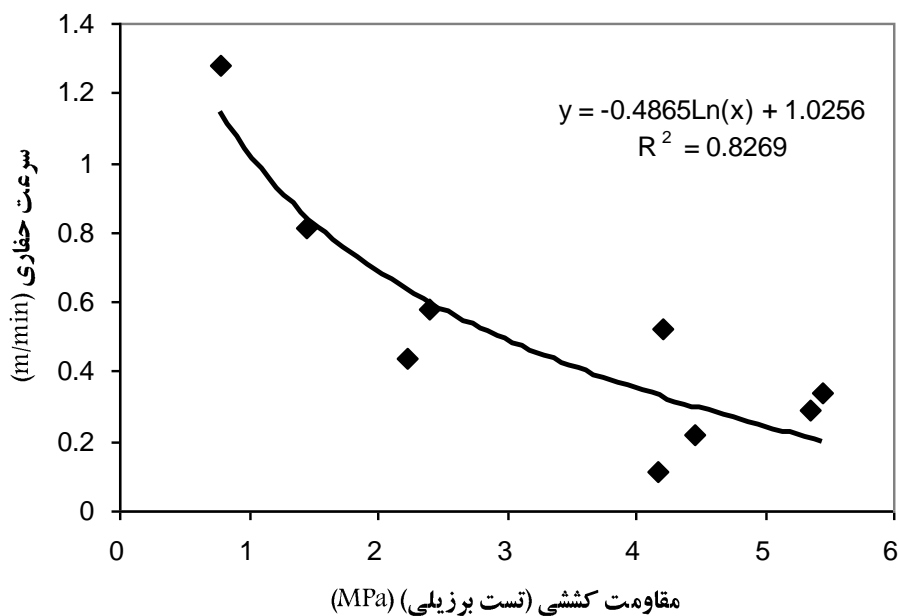
چنانچه از شکل ۳-۱۵ پیداست، با افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ سرعت حفاری ضربه‌ای- دورانی به صورت نمایی ($R^2=0.7828$) کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش مقاومت کششی (تست برزیلی) سنگ، سرعت حفاری ضربه‌ای- دورانی به صورت نمایی ($R^2=0.8269$) طبق شکل ۳-۱۶ کاهش می‌یابد. از منحنی‌های مذکور چنین برداشت می‌شود که مقاومت کششی از توانایی بالاتری برای پیش‌بینی سرعت حفاری در معادن بر خوردار است.

با دقت در شکل ۳-۱۷ مشخص می‌شود که گرچه با افزایش چگالی سنگ‌ها سرعت حفاری به صورت خطی کاهش می‌یابد با این حال با توجه به همگرایی پایین داده‌های منحنی ($R^2=0.5128$) نمی‌توان به رابطه ارائه

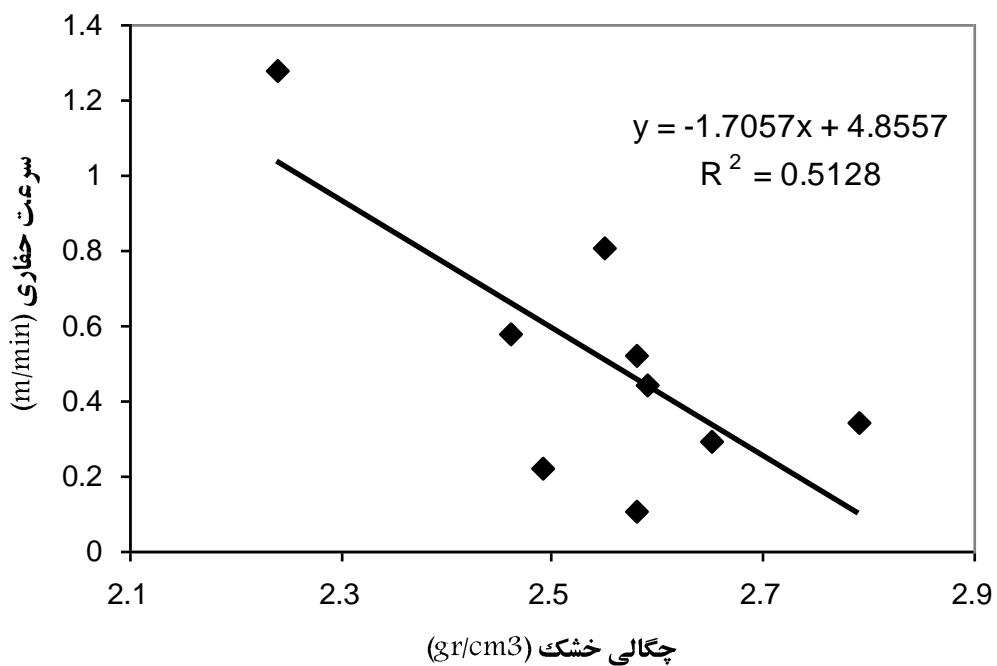
شده اعتماد کرد. لذا گرچه پارامتر چگالی یک شاخص سریع و آسان است با این حال کاربرد آن برای ارزیابی قابلیت حفاری سنگ‌ها پیشنهاد نمی‌شود.



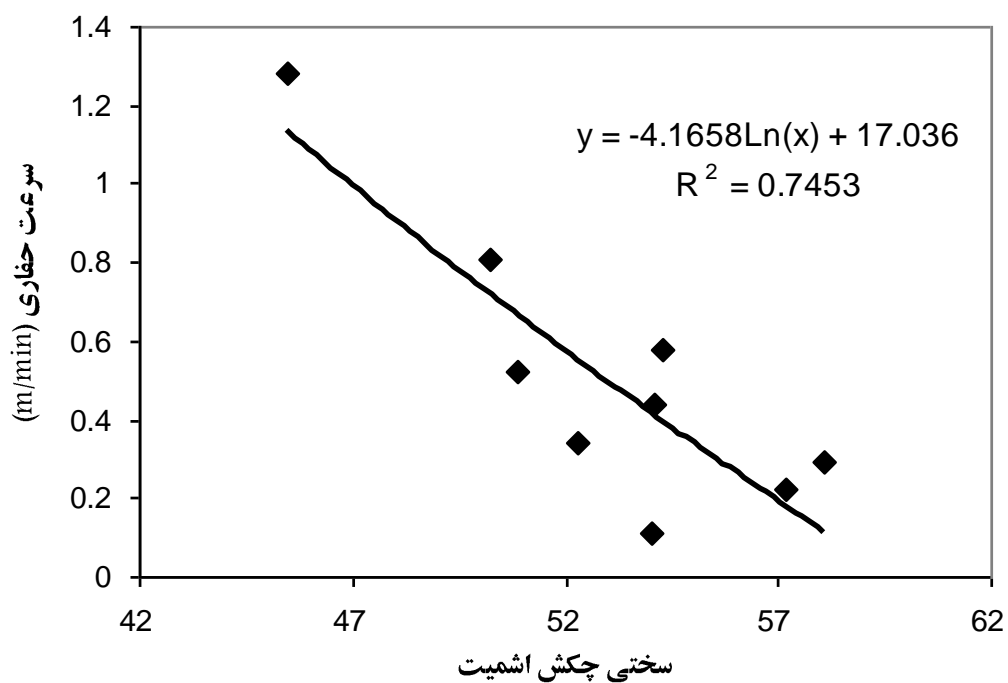
شکل ۳-۱۵- رابطه ریاضی بین مقاومت فشاری و سرعت حفاری



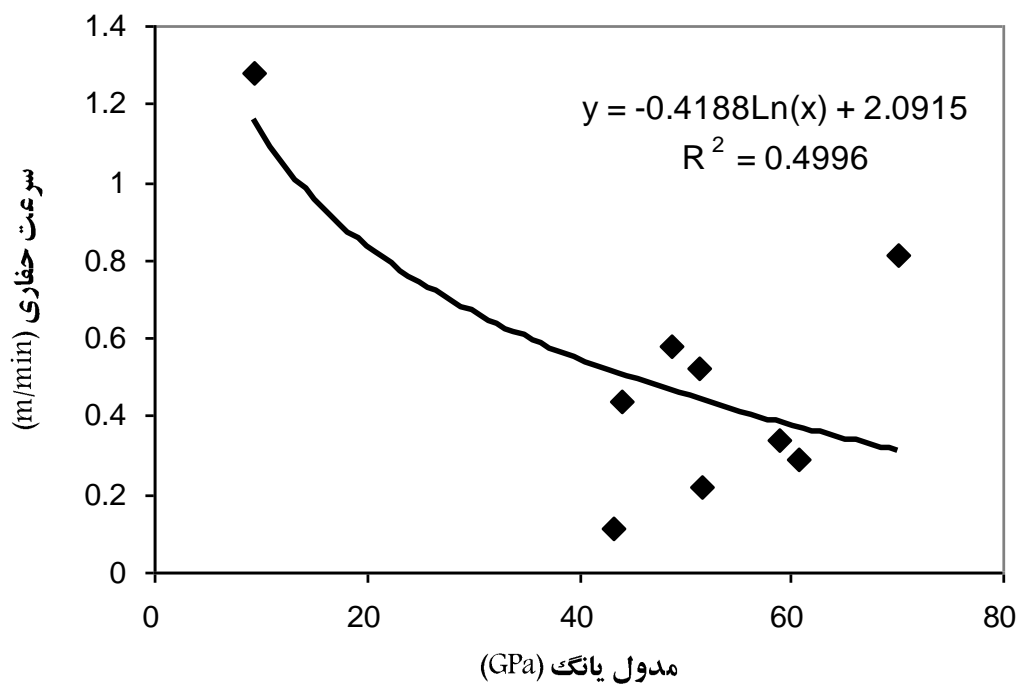
شکل ۳-۱۶- رابطه ریاضی بین مقاومت کششی و سرعت حفاری



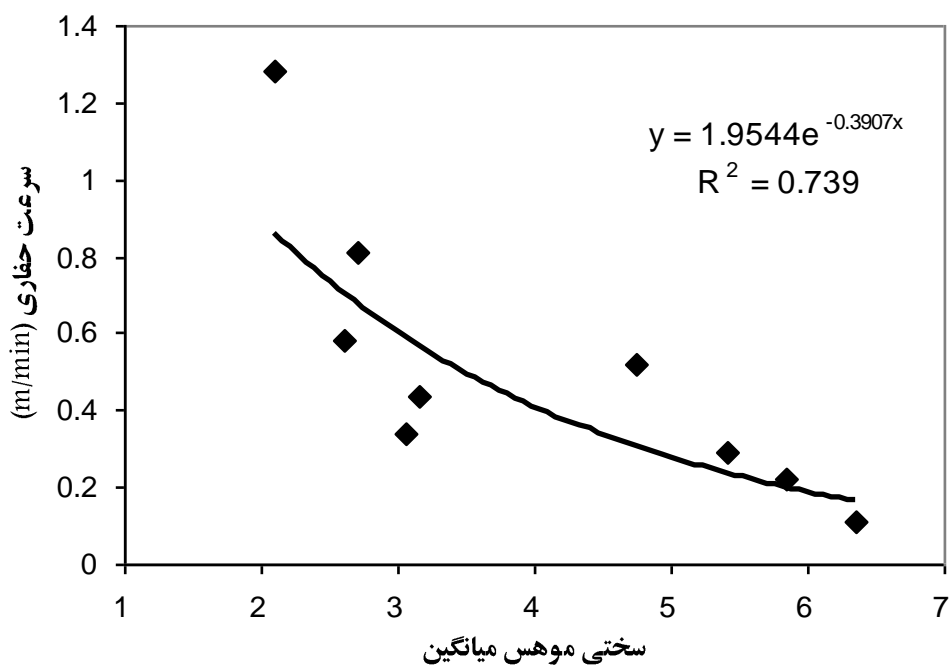
شکل ۳-۱۷- رابطه ریاضی بین چگالی خشک و سرعت حفاری



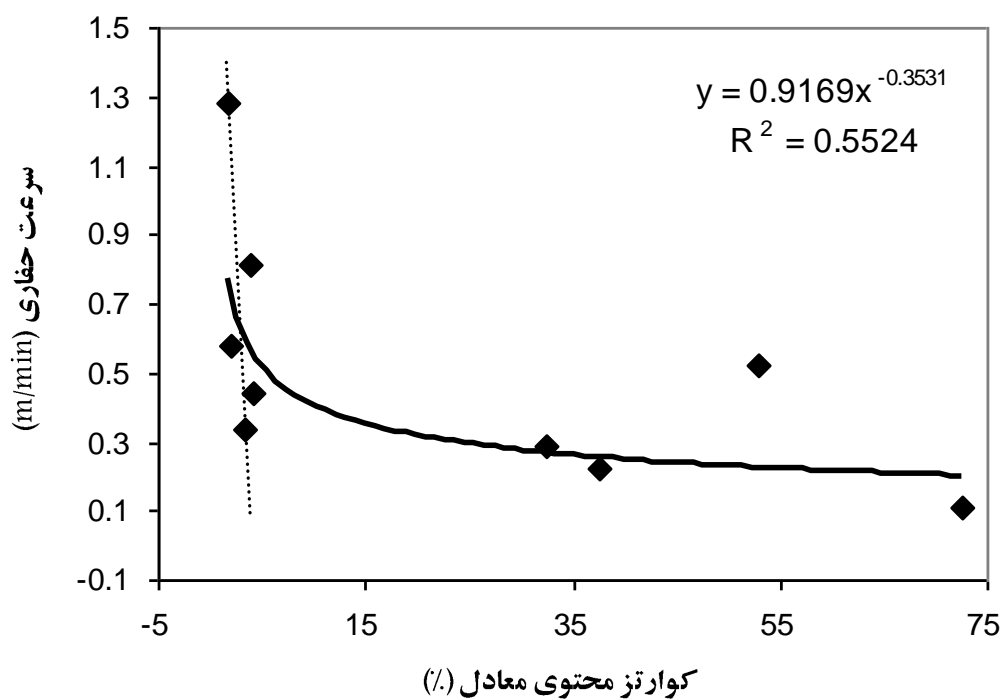
شکل ۳-۱۸- رابطه ریاضی بین سختی چکش اشمیت و سرعت حفاری



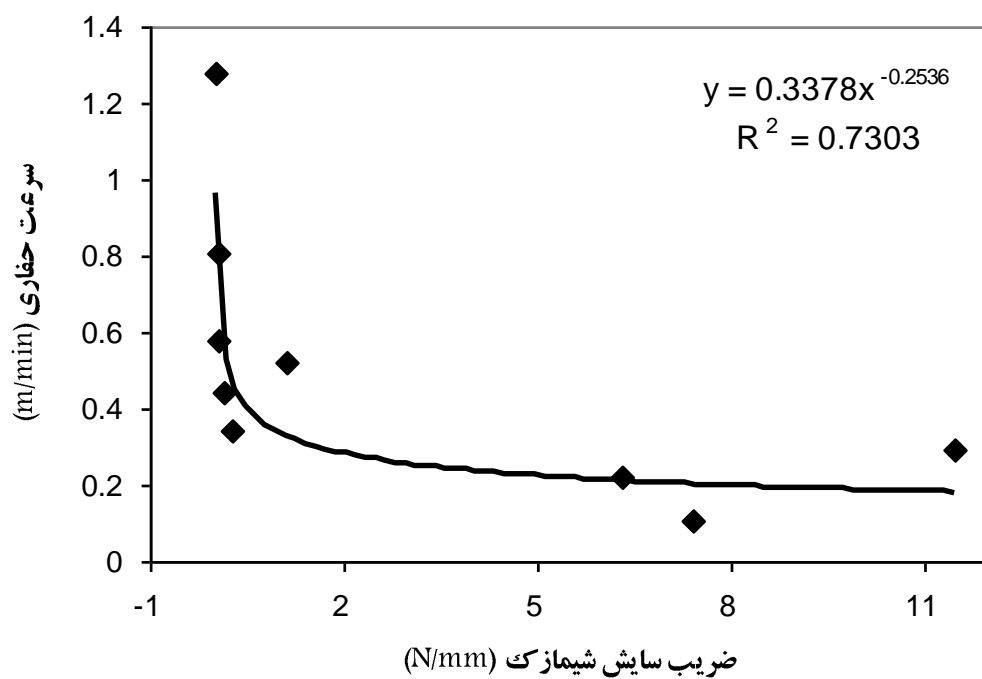
شکل ۳-۱۹- رابطه ریاضی بین مدول یانگ و سرعت حفاری



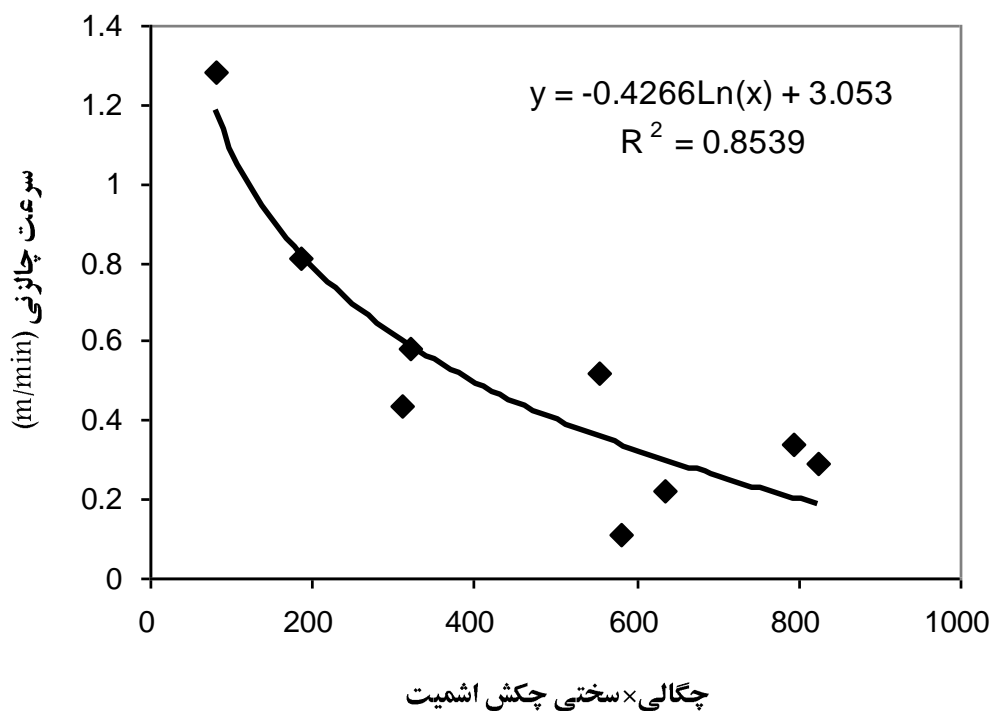
شکل ۳-۲۰- رابطه ریاضی بین سختی موهس و سرعت حفاری



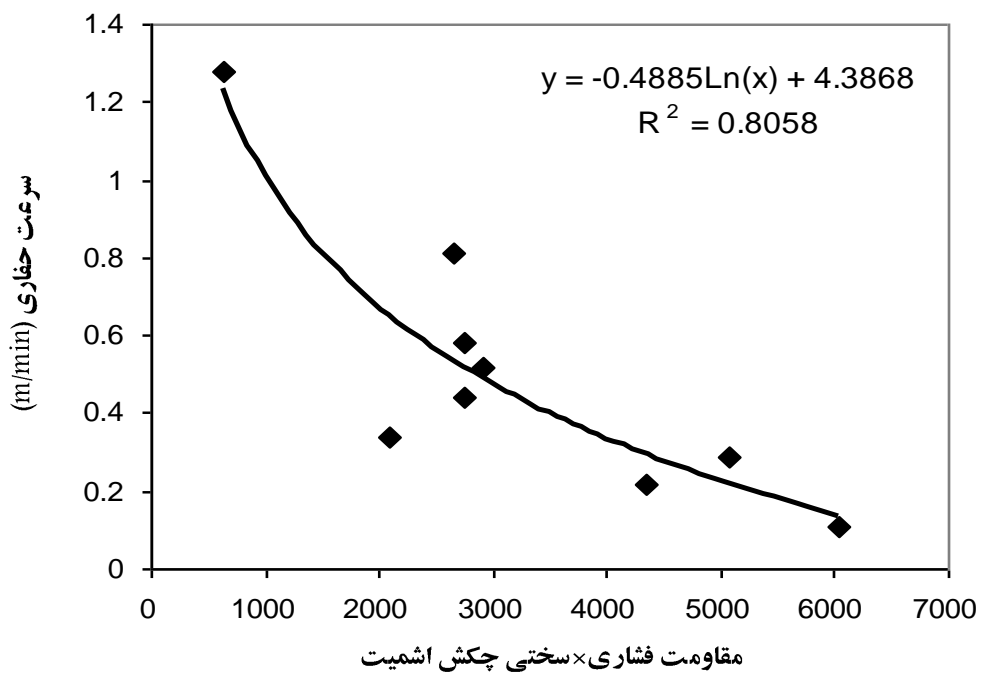
شکل ۳-۲۱- رابطه ریاضی بین کوارتز محتوی معادل و سرعت حفاری



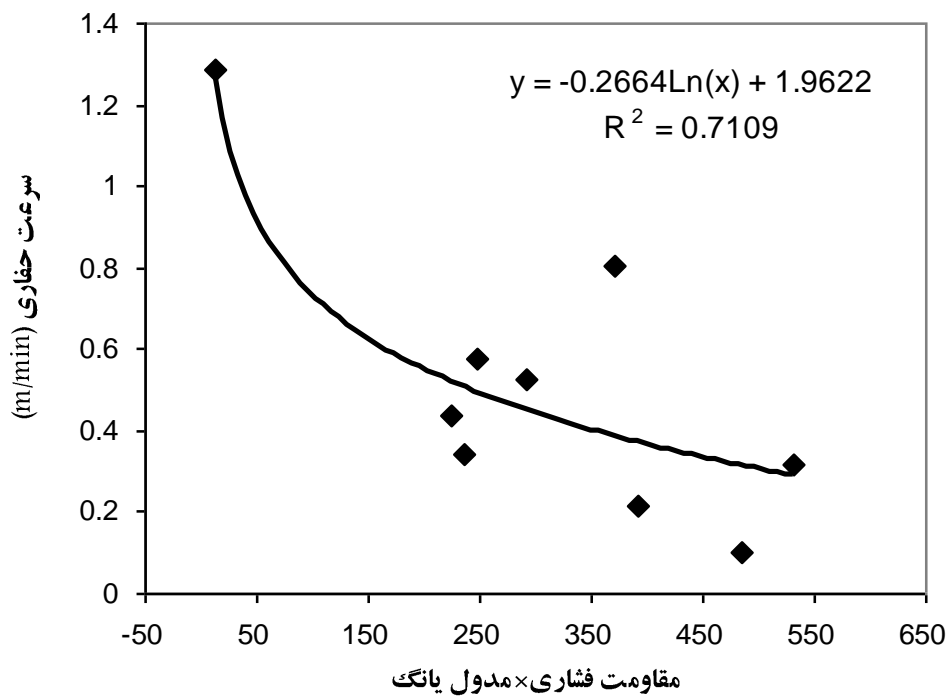
شکل ۳-۲۲- رابطه ریاضی بین ضریب سایش شیمازک و سرعت حفاری



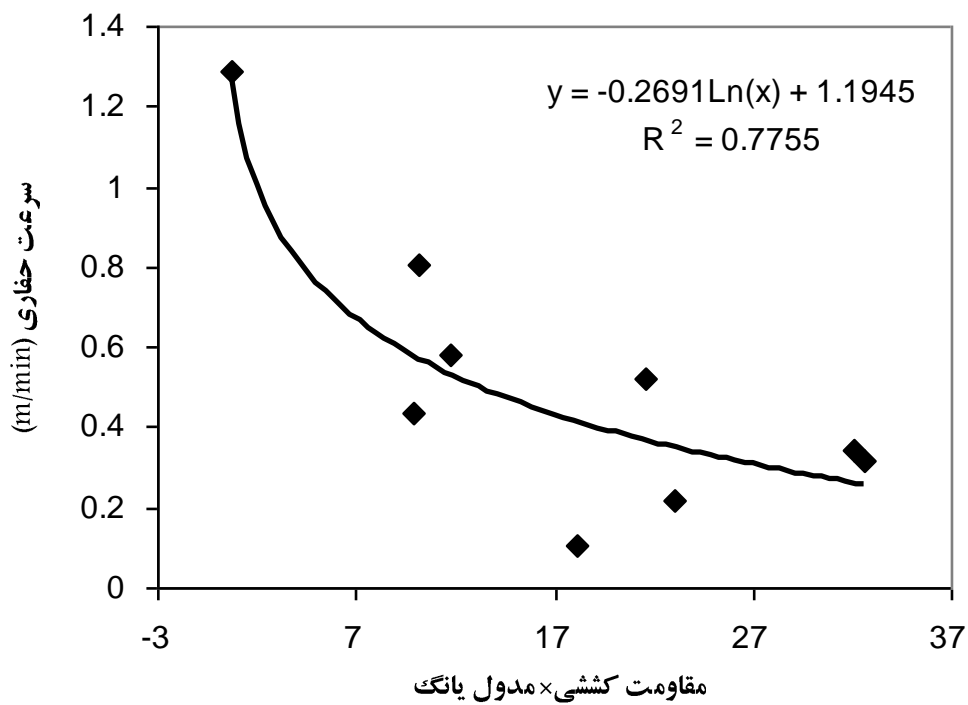
شکل ۳-۲۳- رابطه ریاضی بین حاصل ضرب چگالی × چکش اشمیت و سرعت حفاری



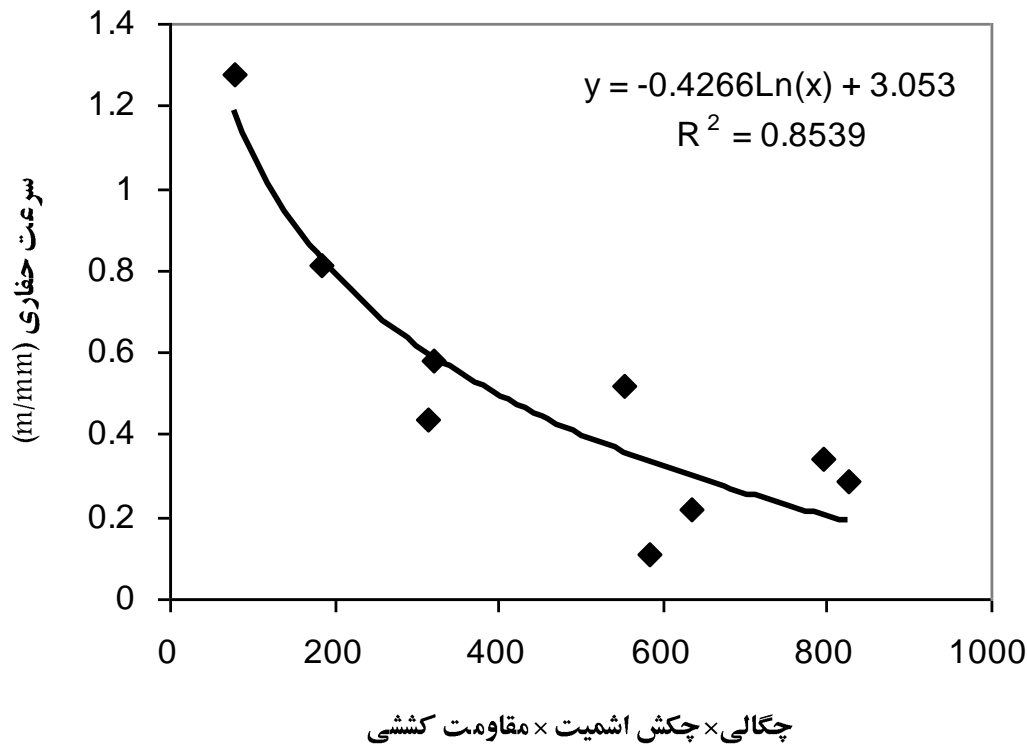
شکل ۳-۲۴- رابطه ریاضی بین حاصل ضرب مقاومت فشاری × چکش اشمیت و سرعت حفاری



شکل ۳-۲۵- رابطه ریاضی بین حاصل ضرب مقاومت فشاری × مدول یانگ و سرعت حفاری



شکل ۳-۲۶- رابطه ریاضی بین حاصل ضرب مقاومت کششی × مدول یانگ و سرعت حفاری



شکل ۳-۲۷- رابطه بین حاصل ضرب چگالی × چکش اشمیت × مقاومت کششی و سرعت حفاری

چنانچه از شکل ۳-۱۸ پیداست، با افزایش سختی چکش اشمیت سنگ، سرعت حفاری ضربه‌ای- دورانی به صورت نمایی ($R^2=0.7453$) کاهش می‌یابد. طبق شکل ۳-۱۹ با افزایش مدول یانگ سنگ‌ها، سرعت حفاری کاهش می‌یابد. با این حال به استناد میزان ضریب همگرایی به دست آمده ($R^2=0.4996$) نمی‌توان از این رابطه به صورت عملی استفاده کرد.

با دقت در شکل ۳-۲۰، مشخص می‌شود که با افزایش میزان سختی موهس، سرعت حفاری کاهش می‌یابد. از نظر پراکندگی اطلاعات، این رابطه در حد متوسط بوده ($R^2=0.739$) ولی در سنگ‌های سخت (سختی بیشتر از ۵/۵) می‌توان از این رابطه تا حد خوبی بهره جست. چنانچه در شکل ۳-۲۱ مشاهده می‌شود با افزایش میزان کوارتز محتوی، سرعت حفاری کاهش می‌یابد. میزان ضریب همگرایی این رابطه پائین‌تر از حد معمول بوده ($R^2=0.5524$) لذا چنین نتیجه می‌شود که سرعت حفاری با میزان کوارتز محتوی سنگ رابطه ریاضی مناسبی ندارد. با این حال طبق نتایج به دست آمده برای سنگ‌های با کوارتز کم (کمتر از ۵٪) سرعت حفاری با میزان کوارتز محتوی رابطه خطی کاهنده دارد.

با توجه شکل ۳-۲۲، با افزایش میزان شاخص شیمازک سرعت حفاری به صورت توانی ($R^2=0.7303$) کاهش می‌یابد. از آنجائی که شاخص شیمازک به تنهایی شامل سه پارامتر کوارتز محتوی، مقاومت کششی و اندازه دانه‌ها است لذا نسبت به رابطه شکل ۳-۲۲ از همگرایی بالاتری برخوردار است.

در شکل‌های ۳-۲۳ تا ۳-۲۷ ارتباط ترکیبی از پارامترها به صورت حاصل ضرب ساده با سرعت حفاری نشان داده شده است. چنانچه مشخص است با استفاده از تعداد بیشتری از پارامتر می‌توان سرعت حفاری را با دقت بالاتری پیش‌بینی کرد. لذا چنانچه به وضوح آشکار است، در صورت وجود یک رابطه منطقی مثل یک سیستم طبقه‌بندی یا یک شاخص مهندسی بین پارامترهای مختلف می‌توان به نحو بسیار شایسته‌ای قابلیت حفاری سنگ‌ها را مورد ارزیابی قرار داد.

فصل چهارم

ارائه سیستم طبقه‌بندی جدید برای
پیش‌بینی قابلیت نفوذ در سنگ
(RPI)

تاکنون مطالعات بسیار زیادی در مورد پارامترهای مؤثر بر سرعت حفاری انجام شده است. بسیاری از پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ به صورت آزمایشگاهی یا صحرایی مورد مطالعه قرار گرفته است. در کلیه مطالعات پیشین چنانچه در فصل دوم مورد بحث قرار گرفت، اندرکنش بین پارامترهای مختلف به طور کلی بر فرآیند حفاری و نتیجه مطالعات تأثیرگذار است. تاکنون روش کامل و جامعی شامل کلیه پارامترهای مؤثر در قابلیت حفاری برای مطالعه و بررسی قابلیت حفاری و نفوذ در سنگ ارائه نشده است. در دنیای امروز که کلیه صنایع به سوی مکانیزاسیون و استفاده از تکنولوژی‌های برتر پیش می‌رود، صنایع معدنی از جمله مهندسی حفاری، تونل‌سازی و برش سنگ‌های ساختمانی از این امر مستثنی نیستند. با ظهور دستگاه‌های گران قیمت و بسیار پیشرفته حفاری در معادن روباز و ماشین‌آلات تونل‌سازی، پیش‌بینی قابلیت حفاری و انتخاب ماشین مناسب برای یک سنگ امری بسیار حیاتی است که در کانون مطالعات مهندسی سنگ و مهندسی حفاری قرار گرفته است.

در این تحقیق با توجه به مرور کلیه منابع معتبر و شناخته شده جهان و نیز شناسایی بسیاری از پارامترهای مهم مؤثر، تلاش شده است تا با جمع‌آوری کلیه این پارامترها در یک سیستم طبقه‌بندی جامع، تلاش کلیه محققین این علم و نیز تلاش‌های پیشین به صورت یک روش هوشمند برای ارزیابی قابلیت حفاری سنگ پیشنهاد شود.

مهم‌ترین مرحله در ارائه سیستم طبقه‌بندی و ارزیابی جامع یک پدیده با تعداد مشخصی پارامتر، تعیین وزن هر پارامتر و سهم اثرگذاری آن عامل بر پدیده اصلی است. از آنجائی که کلیه سیستم‌های طبقه‌بندی مهندسی سنگ، همواره بر اساس تعدادی پارامتر مرکب و در ارتباط با هم ارائه می‌شوند، تأثیر توأم هر یک از پارامترها، ارزیابی پدیده نهایی را دشوار می‌سازد. لذا تعیین وزن هر پارامتر، همواره دغدغه اصلی در ارائه سیستم‌های طبقه‌بندی در مهندسی سنگ بوده است.

تاکنون روش‌های مختلفی برای وزن‌دهی پارامترهای مختلف مؤثر در پدیده‌های مکانیک سنگ ارائه شده است. از جمله مشهورترین آن‌ها می‌توان به روش تجربی-مقایسه‌ای و نیز روش سیستم مهندسی سنگ (RES) اشاره کرد. در روش تجربی-مقایسه‌ای، ارائه دهنده‌گان سیستم طبقه‌بندی، با توجه به تجربیات و مشاهدات صحرایی وزن هر پارامتر را به صورت اولیه تعیین می‌کنند. سپس وضعیت اصلی و برجای توده سنگ با وضعیت پیش‌بینی شده توسط سیستم طبقه‌بندی مقایسه می‌شود. در صورت اختلاف بین واقعیت و

پیش بینی، وزن پارامترها کم و زیاد می‌شود تا جایی که واقعیت با پیش‌بینی مطابقت نماید. در این صورت امتیازدهی نهایی بدست می‌آید.

در سیستم مهندسی سنگ کلیه پارامترهای مؤثر در یک پدیده، در یک ماتریس اندرکنش به صورت کلی آورده می‌شوند. سپس هر یک از سلول‌های ماتریس فوق با توجه به تجربیات افراد محقق به ازای اهمیت نسبی یک پارامتر نسبت به کل پدیده با یک امتیاز مخصوص پر می‌شوند. با انجام محاسبات ریاضی مربوطه، یک نمودار اثر- تأثیر بین پارامترها رسم می‌شود. با استفاده از این نمودار، مؤثرترین، کم‌ترین، غالب‌ترین، و با اهمیت‌ترین پارامتر یک پدیده مشخص می‌شود. پس از این مرحله و پس از تعیین اهمیت نسبی پارامترها، وزن پیشنهادی به هر پارامتر اختصاص می‌یابد.

از جمله جدیدترین روش‌های موجود برای وزن‌دهی به پارامترهای مؤثر در یک پدیده در مهندسی سنگ می‌توان به روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره از جمله روش وزن‌دهی ساده، روش شباهت به گزینه ایده‌آل، روش تحلیل سلسله مراتبی و روش تسلط تقریبی اشاره کرد.

روش‌های تجربی-مقایسه‌ای و سیستم مهندسی سنگ، تا حد بسیار زیادی به تجربه و مشاهدات افراد بسیار معدودی وابسته بوده و لذا دایره تجربیات استفاده شده در ورای این روش‌ها محدودتر می‌باشد. در این صورت، امکان اشتباه و عدم کارایی سیستم‌های طبقه‌بندی پیشنهاد شده با این روش‌ها زیاد است. در روش تحلیل سلسله مراتبی، از نظرات و تجربیات تعداد کثیری از متخصصان یک رشته استفاده می‌شود و لذا دایره تجربیات پشتوانه روش بسیار بیشتر از سایر روش‌ها بوده و این سیستم‌ها از کارآرایی بالایی برخوردارند. همچنین وجود پارامتری به نام نرخ ناسازگاری که در ادامه توضیح داده می‌شود یک تدبیر بسیار خوب برای کنترل نسبت ارزش پارامترها نسبت به هم به شمار می‌ورد که این تدبیر در سایر روش‌ها وجود ندارد. در این تحقیق با توجه به قابلیت و شهرت بیشتر، روش تحلیل سلسله مراتبی برای وزن‌دهی پارامترهای موجود در سیستم طبقه‌بندی مورد استفاده قرار گرفته است.

۴-۱- روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

روش تحلیل سلسله مراتبی در سال ۱۹۸۰ توسط محققى به نام توماس- ال- ساعتى ۳۴ ارائه شد. در این روش مسأله تصمیم‌گیری به سطوح مختلف هدف، معیارها و زیر معیارها و گزینه‌ها تقسیم می‌شود تا تصمیم

³⁴ : Thomas L. Saaty

گیرنده بتواند به راحتی در کوچک‌ترین تصمیم‌گیری دقت نماید. مهم‌ترین قابلیت روش تحلیل سلسله مراتبی در توانایی تبدیل ساختار سلسله مراتبی یک مسئله پیچیده چند شاخصه به ساختار بسط داده شده برای درک بهتر تصمیم گیرنده از مسئله تصمیم‌گیری می‌باشد. مهم‌ترین مزیت به کارگیری روش تحلیل سلسله مراتبی استفاده از مقایسه زوجی برای مشخص کردن اهمیت نسبی گزینه‌ها در ارتباط با هر معیار می‌باشد.

فرآیند تحلیل سلسله مراتبی با ساختن سلسله مراتبی شروع و پس از محاسبه ضریب اهمیت معیارها و محاسبه نرخ ناسازگاری سیستم مناسب‌ترین گزینه انتخاب می‌شود.

۴-۱-۱- ساختن سلسله مراتبی

اولین قدم در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی ساختن سلسله مراتب مسأله است که معمولاً به ترتیب در آن هدف، معیارها (در صورت وجود زیرمعیارها) و گزینه‌ها نشان داده می‌شود. روش ساختن سلسله مراتبی بستگی به نوع تصمیم اتخاذ شده دارد و به صورت مختلفی ساخته می‌شود. در یک سلسله مراتبی محدودیتی برای تعداد سطوح وجود ندارد. زیر معیارهای هر معیار ممکن است به صورت فاصله‌های عددی و یا پارامترهای کیفی مانند زیاد، متوسط، کم باشد. در شکل ۴-۱ سلسله مراتبی انتخاب مناسب‌ترین روش استخراج یک کانسار مس به عنوان نمونه نشان داده شده است.

۴-۱-۲- محاسبه وزن عناصر در AHP

محاسبه وزن در AHP به دو صورت می‌باشد:

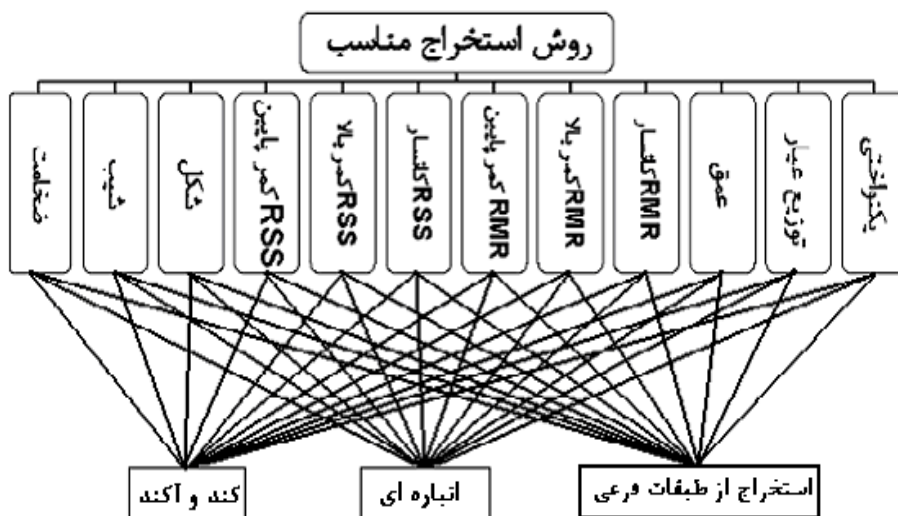
الف) وزن نسبی^{۳۵}

برای محاسبه وزن در تحلیل سلسله مراتبی، عناصر هر سطح نسبت به عنصر مربوط خود در سطح بالاتر به صورت زوجی مقایسه شده و ماتریس مقایسه زوجی تشکیل می‌شود. تخصیص امتیازات عددی مربوط به مقایسه زوجی اهمیت دو گزینه یا دو شاخص بر اساس جدول ۴-۱ صورت می‌گیرد.

یک ماتریس مقایسه زوجی به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nm} \end{bmatrix}$$

³⁵ : Local Priority



شکل ۴-۱- سلسله مراتب انتخاب مناسب ترین روش استخراج برای کانسار مس

که در آن a_{ij} ترجیح عنصر i ام نسبت به عنصر j ام می باشد. در مقایسه زوجی معیارها نسبت به یکدیگر رابطه زیر برقرار است:

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \quad (1)$$

جدول ۴-۱- طبقه بندی کمی و کیفی برای مقایسه زوجی معیارها

مقیاسه نسبی شاخصها (قضاوت شفاهی)	امتیاز عددی
اهمیت مطلق	۹
اهمیت خیلی قوی	۷
اهمیت قوی	۵
اهمیت ضعیف	۳
اهمیت یکسان	۱
ترجیحات بین فواصل فوق	۸، ۶، ۴، ۲ و

سپس با استفاده از ماتریس مقایسه زوجی، وزن نسبی عناصر محاسبه می شود. روش های مختلفی برای محاسبه وزن نسبی بر اساس ماتریس مقایسه زوجی وجود دارد که مهم ترین آن ها روش حداقل مربعات، روش حداقل مربعات لگاریتمی، روش بردار ویژه و روش های تقریبی می باشند. از بین این روش ها روش بردار ویژه دقیق تر می باشد. در این روش W_i به گونه ای تعیین می شود که رابطه زیر برقرار باشد:

$$A.W = \lambda.W \quad (2)$$

که در آن λ و W به ترتیب مقدار ویژه و بردار ویژه ماتریس مقایسه زوجی A می‌باشد. در حالتی که ابعاد ماتریس بزرگ‌تر باشد، محاسبه این مقادیر بسیار وقت‌گیر است. لذا برای محاسبه λ مقدار دترمینان ماتریس $A - \lambda.I$ مساوی با صفر قرار داده می‌شود و با قراردادن بزرگترین مقدار λ حاصله در رابطه زیر مقادیر W_i محاسبه می‌شود.

$$A - \lambda_{\max}.I = 0 \quad (3)$$

(ب) وزن نهایی^{۳۶}

وزن نهایی هر گزینه در یک فرآیند سلسله مراتبی، از مجموع حاصل ضرب وزن هر معیار در امتیاز گزینه مورد نظر بدست می‌آید. مجموع امتیازات به دست آمده برای هر گزینه از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$i = 1, 2, \dots, m \quad A_{AHPscore} = \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot W_j \quad (4)$$

که در آن a_{ij} بیانگر میزان اهمیت نسبی گزینه i ام به ازای شاخص C_j و W_j نشانگر اهمیت شاخص C_j می‌باشد. همچنین لازم است که مقادیر گزینه‌ها و وزن شاخص‌ها نرمالیزه شود.

$$\sum_{i=1}^m a_{ij} = 1 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^n W_j = 1 \quad (6)$$

۴-۱-۳- محاسبه نرخ ناسازگاری

محاسبه نرخ ناسازگاری نیز از اهمیت بالایی در روش AHP برخوردار است. در حالت کلی می‌توان گفت که میزان قابل قبول ناسازگاری یک سیستم بستگی به تصمیم گیرنده دارد، اما ساعتی عدد ۰/۱ را به عنوان حد قابل قبول ارائه می‌کند و معتقد است چنان چه میزان ناسازگاری بیشتر از ۰/۱ باشد، بهتر است در قضاوت‌ها تجدید نظر شود.

شاخص ناسازگاری^{۳۷}، شاخص ناسازگاری تصادفی^{۳۸} و نرخ ناسازگاری^{۳۹} سلسله مراتبی با توجه به روابط زیر محاسبه می‌شود:

³⁶ : Overall Priority

³⁷ - Inconsistency Index

³⁸ - Random Inconsistency Index

³⁹ - Inconsistency Ratio

$$I.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (7)$$

$$R.I.I = 1.98 \frac{n - 2}{n} \quad (8)$$

$$I.R. = \frac{I.I.}{R.I.I} \quad (9)$$

که در این روابط $I.I.$ شاخص ناسازگاری، $R.I.I$ شاخص ناسازگاری تصادفی، $I.R.$ نرخ ناسازگاری، λ_{\max} بزرگ‌ترین مقدار ویژه ماتریس و n اندازه ماتریس می‌باشد.

از آنجایی که در این تحقیق هدف تنها یافتن وزن پارامترهای مختلف می‌باشد لذا تنها وزن نسبی پارامترها محاسبه شده است. لازمه محاسبه وزن نسبی پارامترها، تشکیل ماتریس مقایسه زوجی است. یکی از بهترین روش‌های تشکیل این ماتریس نظرسنجی از متخصصان آن رشته می‌باشد. جزئیات این روش به تفصیل ارائه خواهد شد.

۴-۲- ارائه سیستم طبقه بندی جدید

چنانچه در فصل دوم ذکر شد تعداد زیادی از پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ بر قابلیت حفاری و نفوذپذیری سنگ‌ها تأثیر دارند. تاکنون بسیاری از محققان رابطه بین مشخصات سنگ و سرعت حفاری را مورد مطالعه قرار داده‌اند. با توجه به منابع مورد مطالعه در فصل دوم، در طی این تحقیق، کلیه پارامترهای مهم مربوط به ماده سنگ که در حفاری مؤثرند به تعداد دوازده پارامتر به شرح ذیل تشخیص داده شدند:

- بافت سنگ

- اندازه و شکل دانه‌های سنگ

- میزان کوارتز محتوی

- نوع ماتریکس و کیفیت سیمان‌شدن

- سختی

- سایندگی

- هوازدگی

- چگالی

- سختی چکش اشمیت

- مقاومت فشاری تک محوری

- مقاومت کششی

- مدول الاستیسیته (مدول یانگ)

چنانچه مشاهده می شود پارامترهای فوق، تمامی مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ را به خوبی پوشش می دهند و لذا می توان با استفاده از این پارامترها، به دیدی روشن از قابلیت حفاری سنگ دست یافت.

۴-۲-۱- نظرسنجی از متخصصان علم حفاری

پس از تعیین پارامترهای مؤثر بر سرعت حفاری و قابلیت نفوذ در سنگها، به منظور استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی برای تعیین وزن پارامترهای مختلف، فرمهای نظرسنجی شامل کلیه پارامترهای فوق تهیه شده و برای تکمیل شدن برای ۲۶ تن از اساتید برجسته علم حفاری در داخل و خارج از کشور ارسال شد. از میان فرمهای ارسال شده بیش از ۱۵ فرم نظرسنجی تکمیل شده دریافت شد که برای ورودی روش تحلیل سلسله مراتبی مورد استفاده قرار گرفتند. جدول ۴-۲ نمونه ای از فرمهای نظرسنجی و جدول ۴-۳ و ۴-۴ لیست متخصصان مورد نظرسنجی و محل خدمت آنها را نشان می دهد. در این فرم از متخصصان خواسته شده بود بسته به نظر شخصی خویش و به میزان اهمیت هر یک از پارامترها امتیاز بسیار با اهمیت (۹)، با اهمیت (۷)، اهمیت متوسط (۵)، کم اهمیت (۳) و یا بدون اهمیت (۱) اختصاص دهند.

جدول ۴-۲- نمونه ای از فرم نظرسنجی

← اهمیت هر یک از پارامترها				
بسیار با اهمیت	با اهمیت	اهمیت متوسط	کم اهمیت	بدون اهمیت
↓ مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ				
				بافت سنگ
				اندازه و شکل دانه های سنگ
				میزان کوارتز محتوی
				نوع ماتریکس و کیفیت سیمانه شدن
				سختی
				سایندگی
				هوازدگی
				چکالی
				سختی چکش اشمیت
				مقاومت فشاری تک محوره
				مقاومت کششی
				مدول یانگ (الاستیسیته)

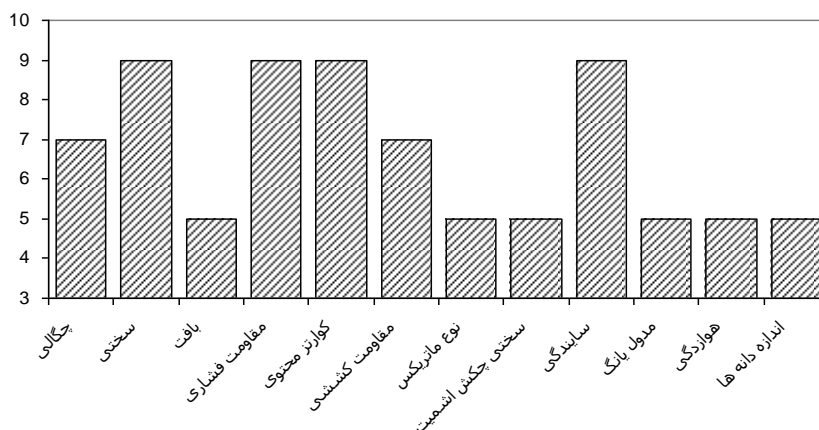
جدول ۴-۳- لیست متخصصان داخلی مورد نظر سنجی و محل خدمت آن‌ها

نام متخصصان	مرتبۀ علمی، محل خدمت
دکتر مرتضی اصانلو	استاد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
دکتر حمید منصوری	استادیار، دانشگاه شهید باهنر کرمان
دکتر فرهنگ سرشکی	استادیار، دانشگاه صنعتی شاهرود
دکتر حسن مومیوند	استادیار، دانشگاه ارومیه
دکتر مسعود چراغی	استادیار، دانشگاه صنعتی اصفهان
دکتر حمید آقابابایی	دانشیار، دانشگاه صنعتی سهند
دکتر کاظمی	استادیار، دانشگاه صنعتی شاهرود
دکتر حسن خوشرو	استادیار، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
مهندس یاشار پوررحیمیان	مربی، دانشگاه صنعتی سهند
مهندس حافظی	مدیرعامل مجتمع معدنی فسفات اسفوردی
مجریان طرح	دانشگاه صنعتی شاهرود

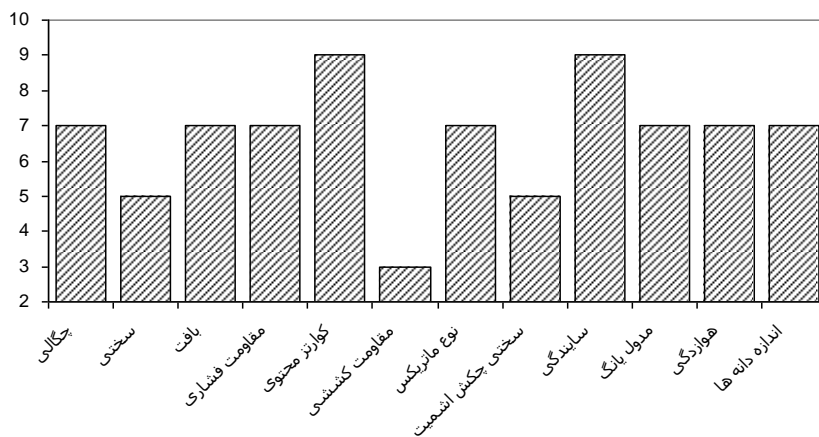
جدول ۴-۴- لیست متخصصان خارجی مورد نظر سنجی و محل خدمت آن‌ها

نام متخصصان	دانشگاه محل خدمت، کشور
Prof. Summers	University of Missouri-Rolla, America
Prof. Krapuz	Middle East Technical University (METU), Turkey
Prof. Singh	Indian Institute of Technology, Momby, India
Prof. Boruland	Norwegian Technical National University (NTNU), Norway

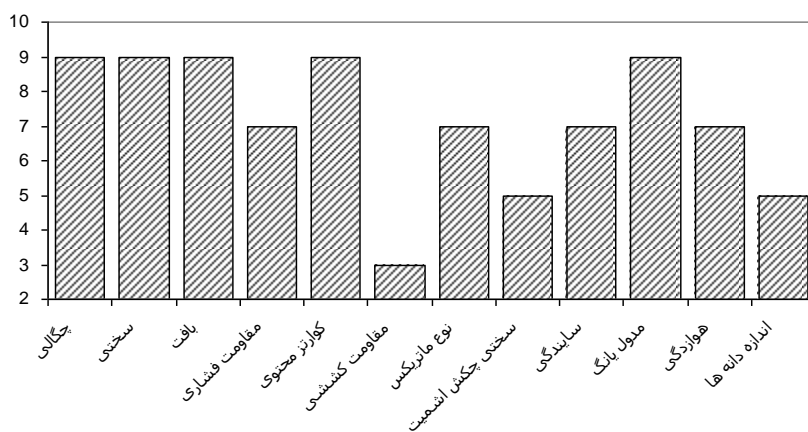
با توجه به فرم‌های موجود، نمودار ستونی امتیازات متناظر با هر یک از پارامترها از نظر متخصصان مختلف به صورت جداگانه برای هر متخصص به صورت شکل‌های ۴-۲ تا شکل ۴-۱۶ رسم شده است. همچنین میانگین امتیاز هر یک از پارامترها با توجه به نظرات متخصصان محاسبه شده و به صورت نمودار ستونی در شکل ۴-۱۷ نشان داده شده است.



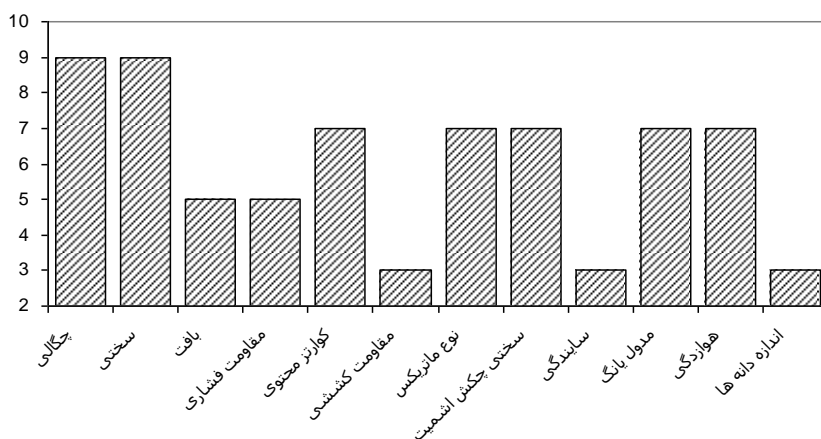
شکل ۴-۲- نمودار ستونی امتیاز پارامترها با توجه به نظر آقای دکتر اصانلو



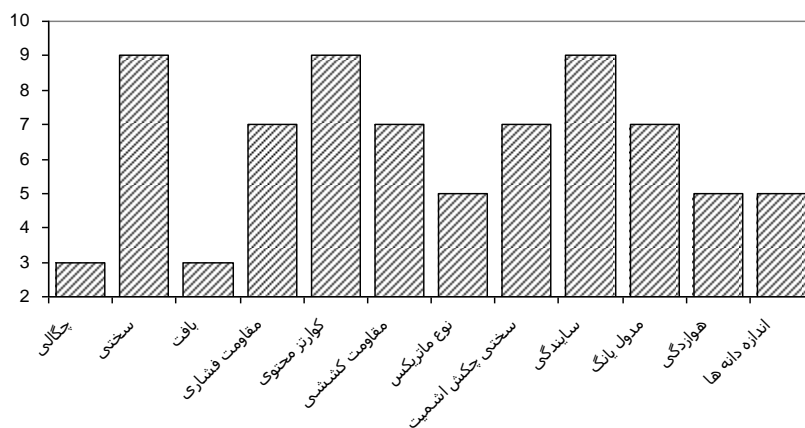
شکل ۴-۳- نمودار ستونی امتیاز پارامترهای مؤثر با توجه به نظر آقای دکتر منصورى



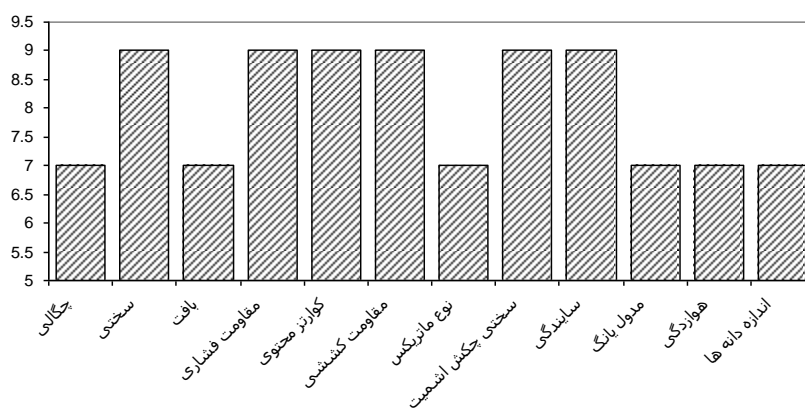
شکل ۴-۴- نمودار ستونی امتیاز پارامترهای مؤثر با توجه به نظر آقای دکتر سرشکى



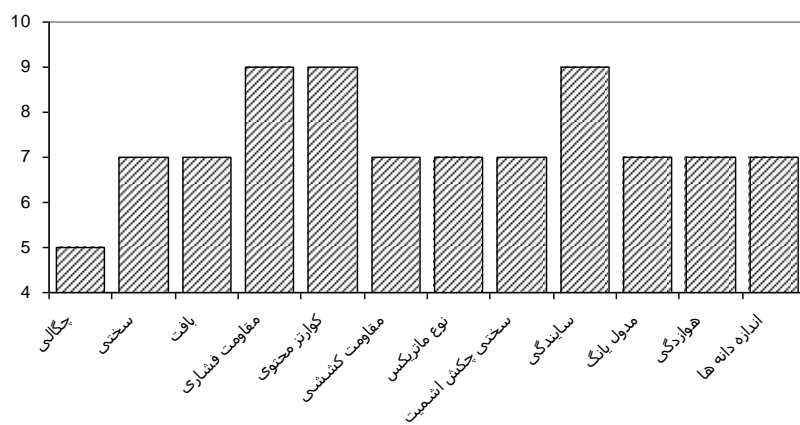
شکل ۴-۵- نمودار ستونی امتیاز پارامترهای مؤثر با توجه به نظر آقای دکتر خوشرو



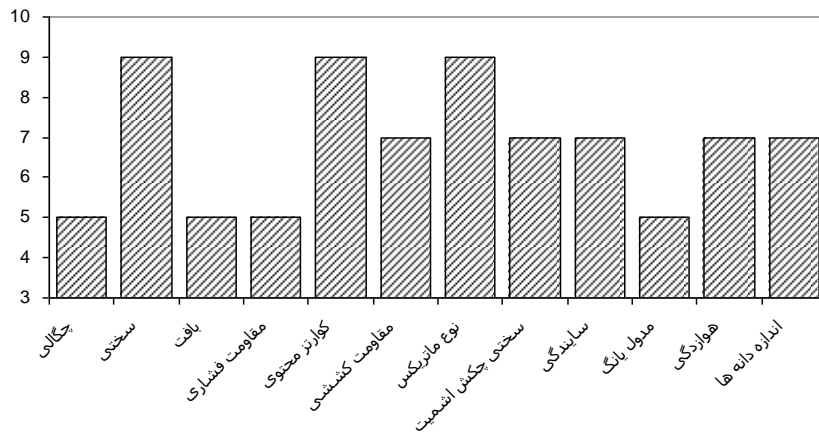
شکل ۴-۶- نمودار ستونی امتیاز پارامترهای مؤثر با توجه به نظر آقای دکتر مومیوند



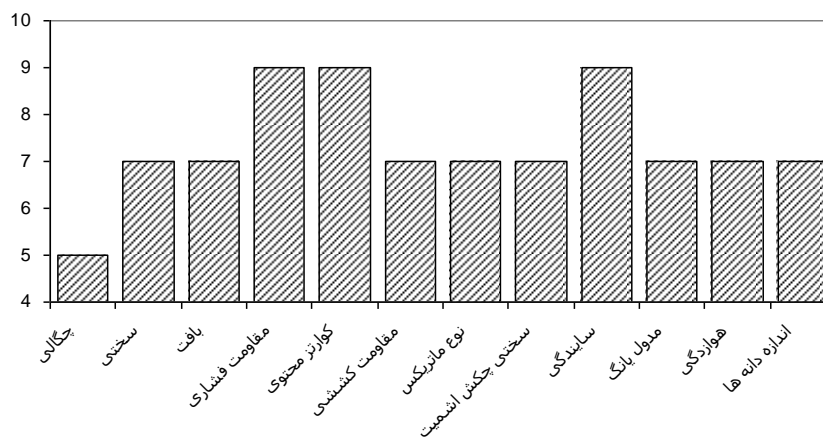
شکل ۴-۷- نمودار ستونی امتیاز پارامترهای مؤثر با توجه به نظر آقای دکتر چراغی



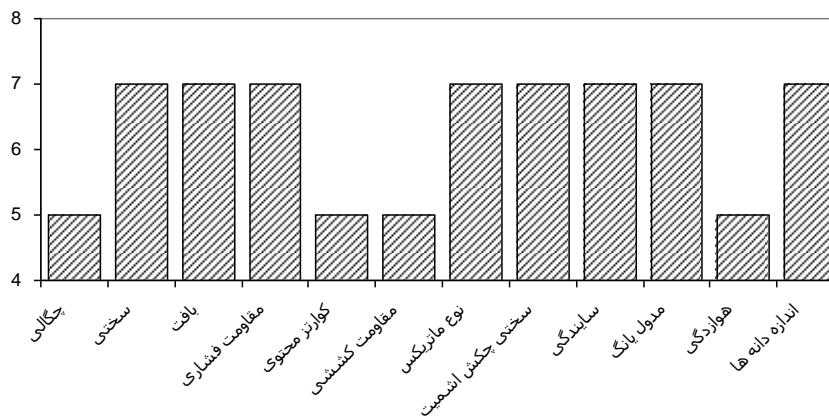
شکل ۴-۸- نمودار ستونی امتیاز پارامترهای مؤثر با توجه به نظر آقای دکتر آقابابایی



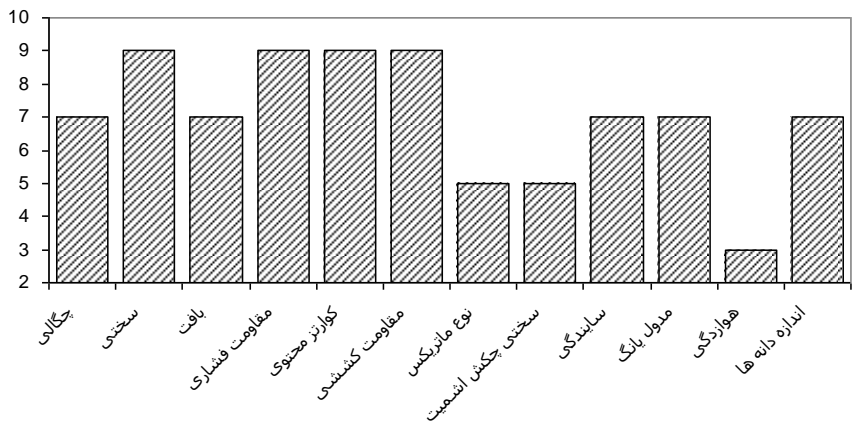
شکل ۴-۹- نمودار ستونی امتیاز پارامترهای مؤثر با توجه به نظر آقای دکتر کاظمی



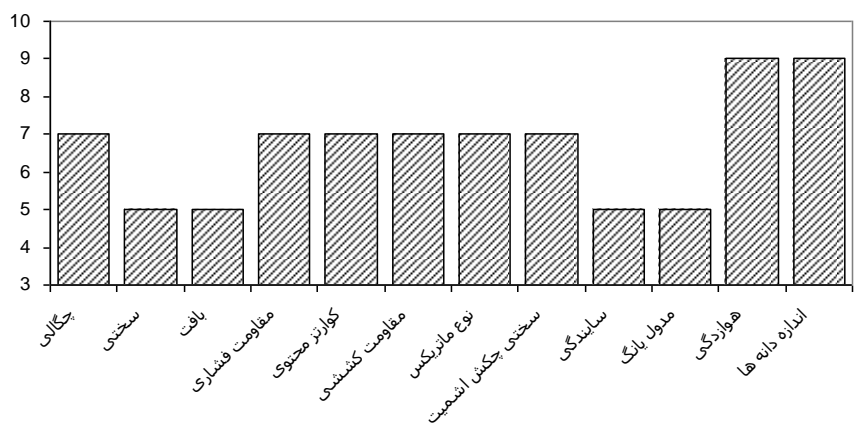
شکل ۴-۱۰- نمودار ستونی امتیاز پارامترهای مؤثر با توجه به نظر آقای مهندس پوررحیمیان



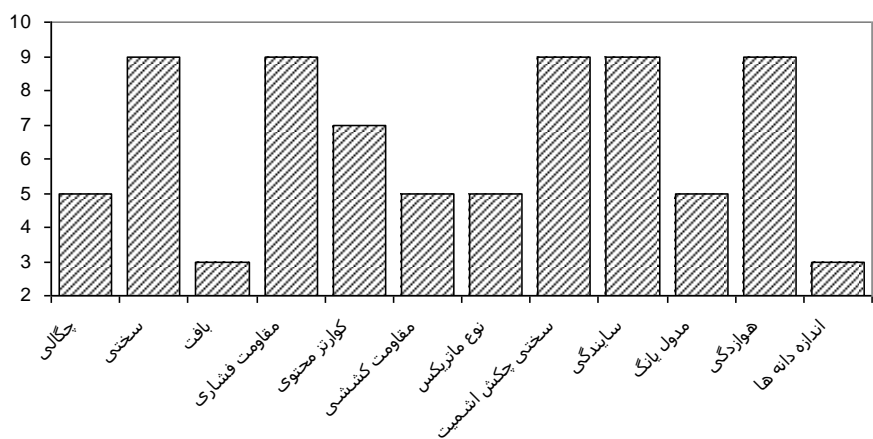
شکل ۴-۱۱- نمودار ستونی امتیاز پارامترهای مؤثر با توجه به نظر آقای مهندس حافظی



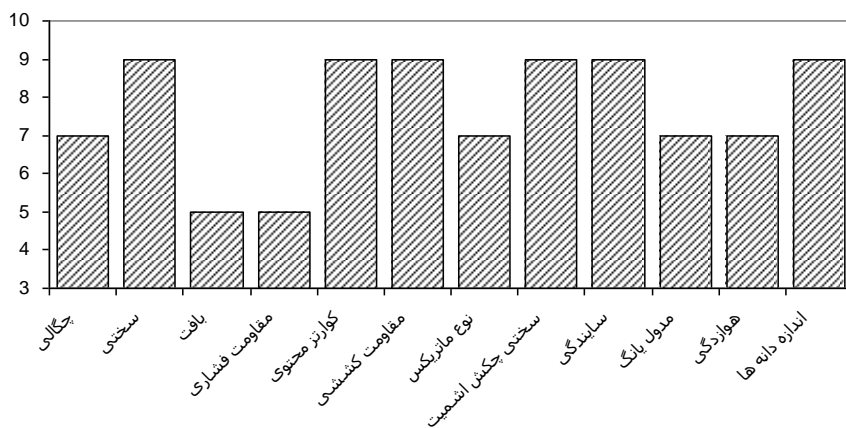
شکل ۴-۱۲ - نمودار ستونی امتیاز پارامترهای مؤثر با توجه به نظر مجریان طرح



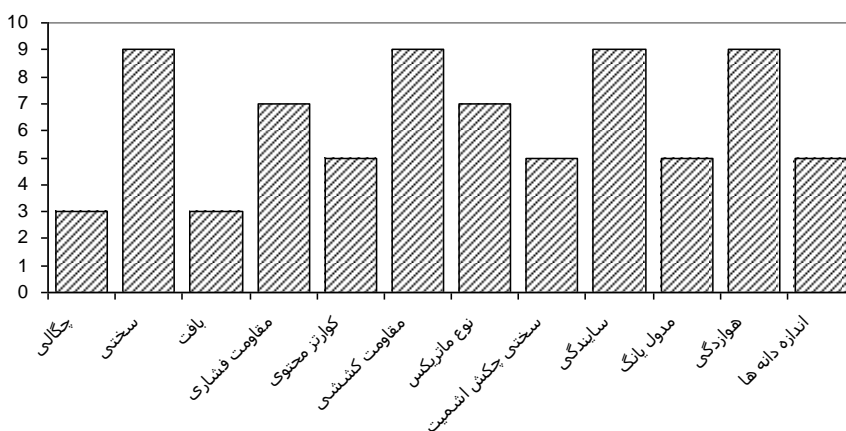
شکل ۴-۱۳ - نمودار ستونی امتیاز پارامترهای مؤثر با توجه به نظر آقای Prof. Summers



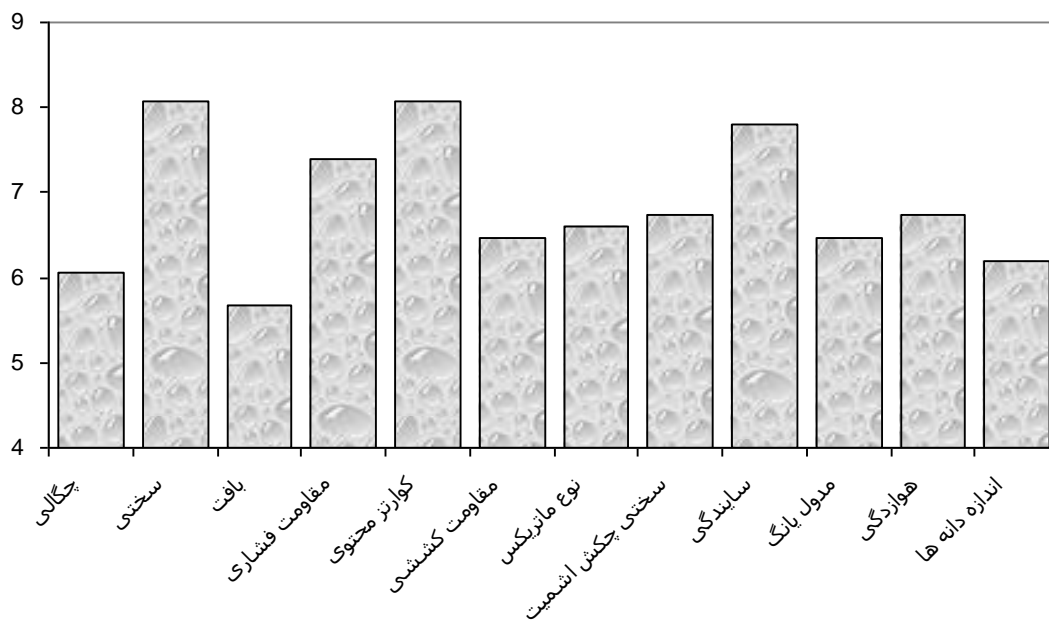
شکل ۴-۱۴ - نمودار ستونی امتیاز پارامترهای مؤثر با توجه به نظر آقای Prof. Karpuz



شکل ۴-۱۵- نمودار ستونی امتیاز پارامترهای مؤثر با توجه به نظر آقای Prof. Singh



شکل ۴-۱۶- نمودار ستونی امتیاز پارامترهای مؤثر با توجه به نظر آقای Prof. Bruland



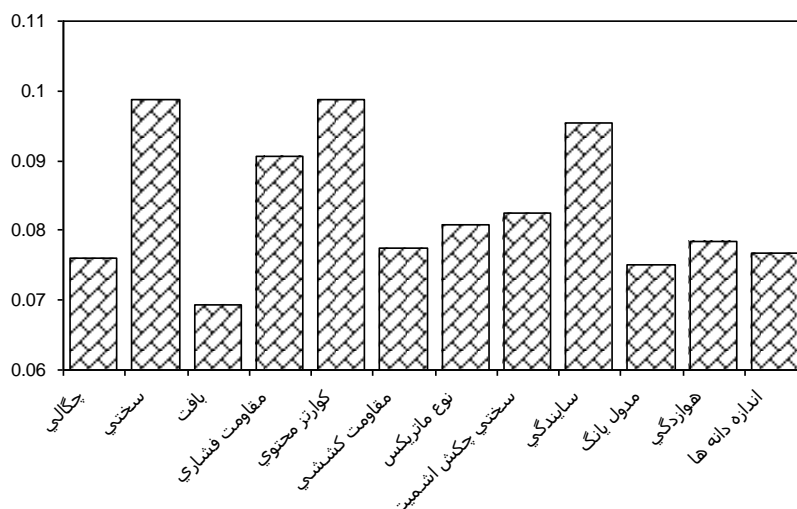
شکل ۴-۱۷- نمودار ستونی میانگین امتیاز هر یک از پارامترها با توجه به نظرات متخصصان

۴-۲-۲- یافتن وزن پارامترها با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی

پس از انجام نظرسنجی و کارهای آماری بر روی نتایج حاصل از نظرسنجی، کلیه نتایج حاصله برای تشکیل ماتریس مقایسه زوجی پارامترها مورد استفاده قرار گرفتند. در این تحقیق برای اولین بار در جهان، در روش AHP نظرات متخصصان مختلف به طور مستقیم در تشکیل ماتریس مقایسه زوجی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای این منظور در درایه‌های ماتریس از نسبت میانگین امتیازهای داده شده در نظرسنجی برای اختصاص امتیاز استفاده شده است. شکل ۴-۱۸ ماتریس مقایسه زوجی بین ۱۲ پارامتر نظرسنجی را نشان می‌دهد. با انجام محاسبات ریاضی مربوطه ذکر شده، وزن کلیه پارامترهای دوازده‌گانه به شرح جدول ۴-۵ محاسبه شدند. شکل ۴-۱۹ نمودار ستونی برای مقایسه وزن پارامترهای مذکور را نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌شود میزان کوارتز محتوی، سختی، ساینده‌گی و مقاومت فشاری تک محوری از اهمیت بیشتری نسبت به سایر پارامترها برخوردار هستند.

جدول ۴-۵- وزن نهایی محاسبه شده توسط روش تحلیل سلسله مراتبی برای کلیه پارامترها

پارامتر	وزن نهایی
چگالی	۰/۰۷۵۹۲
سختی	۰/۰۹۸۷۸
بافت	۰/۰۶۹۳۹
مقاومت فشاری	۰/۰۹۰۶۱
کوارتز محتوی	۰/۰۹۸۷۸
مقاومت کششی	۰/۰۷۷۵۵
نوع ماتریکس	۰/۰۸۰۸۲
سختی چکش اشمیت	۰/۰۸۲۴۵
ساینده‌گی	۰/۰۹۵۵۱
مدول یانگ	۰/۰۷۵۱
هوازده‌گی	۰/۰۷۸۳۷
اندازه دانه‌ها	۰/۰۷۶۷۳



شکل ۴-۱۹- نمودار ستونی وزن نهایی کلیه پارامترها

۴-۲-۳- انتخاب پارامترهای مورد استفاده در طبقه‌بندی

در مهندسی سنگ، همواره برای ارائه سیستم طبقه‌بندی، انتخاب پارامترهای مهم و ترکیب این پارامترها در کنار هم یکی از مهم‌ترین مراحل به شمار می‌رود. در سیستم‌های طبقه‌بندی سنگ همواره سعی می‌شود با کمترین تعداد پارامترها بهترین قضاوت در مورد سنگ صورت گیرد. لذا در تلاش برای ارائه سیستم طبقه‌بندی جدید برای پیش‌بینی قابلیت نفوذ در سنگ، استفاده از تمامی ۱۲ پارامتر فوق از لحاظ مهندسی امر پسندیده‌ای نیست. از طرفی همگی پارامترهای فوق مثل هوازدگی و نوع ماتریکس سنگ دارای شاخص کمی و آزمایشگاهی نیستند. همچنین تعدادی از پارامترهای مورد اشاره با همدیگر همپوشانی داشته و طبیعت بعضی از پارامترها تعداد دیگری از پارامترها را در بر می‌گیرند.

با در نظر گرفتن کلیه موارد فوق، در توسعه سیستم طبقه‌بندی جدید دو اصل اساسی زیر مورد توجه قرار گرفته است:

از کمترین تعداد پارامترها برای طبقه‌بندی استفاده شود.

از به کارگیری پارامترهای هم‌ارز ارزش، هم‌ارز و دارای همپوشانی پرهیز شود.

با در نظر گرفتن دو اصل فوق و نیز مطالب فوق‌الذکر تعداد پنج پارامتر از ۱۲ پارامتر اولیه برای استفاده در سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در ادامه پنج پارامتر مذکور معرفی می‌گردند.

پارامتر	میانگین امتیاز
چگالی	۶/۲
سختی	۸/۰۶۶۶
بافت	۵/۶۶۶۶
مقاومت فشاری	۷/۴
کوارتز محتوی	۸/۰۶۶۶
مقاومت کششی	۶/۳۳۳۳
نوع ماتریکس	۶/۶
سختی چکش اشمیت	۶/۷۳۳۳
سایندگی	۷/۸
مدول یانگ	۶/۱۳۳۳
هوازدهی	۶/۴
اندازه دانه‌ها	۶/۲۶۶۶



ماتریس مقایسه زوجی اولیه

	QC	Ha	Ab	UCS	E	Ma	Sch	Tex	De	Wea	Gra	TS
کوارتز محتوی (QC)	1	1	1.034	1.09	1.32	1.22	1.198	1.42	1.3	1.26	1.29	1.27
سختی (Ha)	1	1	1.034	1.09	1.32	1.22	1.198	1.42	1.3	1.26	1.29	1.27
سایندگی (Ab)	0.967	0.967	1	1.054	1.27	1.18	1.158	1.38	1.26	1.22	1.24	1.23
مقاومت فشاری (UCS)	0.917	0.917	0.949	1	1.21	1.12	1.099	1.31	1.19	1.16	1.18	1.17
مدول الاستیسیته (E)	0.76	0.76	0.786	0.829	1	0.93	0.91	1.08	0.99	0.96	0.98	0.97
نوع ماتریکس (Ma)	0.818	0.818	0.846	0.892	1.08	1	0.98	1.16	1.06	1.03	1.05	1.04
چکش اشمیت (Sch)	0.835	0.835	0.863	0.91	1.1	1.02	1	1.19	1.09	1.05	1.07	1.06
بافت (Tex)	0.702	0.702	0.726	0.766	0.92	0.86	0.841	1	0.91	0.89	0.9	0.89
چگالی (De)	0.769	0.769	0.795	0.838	1.01	0.94	0.92	1.09	1	0.97	0.99	0.98
هوازدهی (We)	0.793	0.793	0.821	0.865	1.04	0.97	0.950	1.13	1.03	1	1.02	1.01
اندازه دانه‌ها (Gra)	0.777	0.777	0.803	0.847	1.02	0.95	0.93	1.11	1.01	0.98	1	0.99
مقاومت کششی (TS)	0.785	0.785	0.812	0.856	1.03	0.96	0.94	1.12	1.02	0.99	1.01	1



ماتریس مقایسه زوجی نرمالایز شده

	QC	Ha	Ab	UCS	E	Ma	Sch	Tex	De	Wea	Gra	TS
کوارتز محتوی (QC)	0.099	0.099	0.099	0.099	0.1	0.1	0.098	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
سختی (Ha)	0.099	0.099	0.099	0.099	0.1	0.1	0.098	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
سایندگی (Ab)	0.096	0.096	0.096	0.096	0.1	0.1	0.095	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
مقاومت فشاری (UCS)	0.091	0.091	0.091	0.091	0.09	0.09	0.090	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
مدول الاستیسیته (E)	0.075	0.075	0.075	0.075	0.08	0.08	0.075	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
نوع ماتریکس (Ma)	0.081	0.081	0.081	0.081	0.08	0.08	0.080	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
چکش اشمیت (Sch)	0.082	0.082	0.082	0.082	0.08	0.08	0.082	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
بافت (Tex)	0.069	0.069	0.069	0.069	0.07	0.07	0.069	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
چگالی (De)	0.076	0.076	0.076	0.076	0.08	0.08	0.075	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
هوازدهی (We)	0.078	0.078	0.078	0.078	0.08	0.08	0.078	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
اندازه دانه‌ها (Gra)	0.077	0.077	0.077	0.077	0.08	0.08	0.076	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
مقاومت کششی (TS)	0.078	0.078	0.078	0.078	0.08	0.08	0.077	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
مجموع ستون‌ها	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

شکل ۴-۱۸ - ماتریس مقایسه زوجی بین ۱۲ پارامتر نظرسنجی

۴-۲-۳-۱- مقاومت فشاری تک محوری

این پارامتر به عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای مهندسی سنگ در اکثر سیستم‌های طبقه‌بندی مورد استفاده قرار گرفته است. چنانچه در فصل دوم اشاره شده است این پارامتر می‌تواند نماینده بسیاری از مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ باشد. در این تحقیق نیز با توجه به پارامترهای نظرسنجی شده، آزمایش مقاومت فشاری تک محوری می‌تواند نماینده مقاومت، چگالی، میزان هوازدگی و نیز کیفیت و نوع ماتریکس سنگ باشد. از طرفی این آزمایش، یک آزمایش بسیار شناخته شده و قابل دسترس می‌باشد که از این نظر می‌توان پارامترهای بدون کمیت مثل هوازدگی را با آن به راحتی مورد مطالعه قرار داد. لذا با توجه به همه تفاسیر، مجموع وزن چهار پارامتر فوق به عنوان وزن آزمایش مقاومت فشاری تک محوری در سیستم طبقه‌بندی جدید در نظر گرفته شده است.

۴-۲-۳-۲- فاکتور سایش شیمازک

چنانچه در فصل قبل شرح آن آمد، ساینده‌گی یکی از مهم‌ترین پارامترهای سنگ از نظر قابلیت حفاری می‌باشد. این پارامتر سرعت حفاری و نیز استهلاک تجهیزات حفاری را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. تاکنون روش‌های مختلفی برای ارزیابی قابلیت ساینده‌گی سنگ‌ها پیشنهاد شده است. از آنجایی که قابلیت ساینده‌گی سنگ‌ها بیشتر به ترکیب کانی‌شناسی و کیفیت ساینده‌گی کانی‌های سنگ بستگی دارد لذا روش‌ها و آزمایش‌های غیر مستقیم مثل اندیس سایش سرمته و شاخص سایش سورشار با توجه به اینکه هیچ‌گونه توجهی به بافت و ترکیب کانی‌شناسی سنگ ندارند. از دقت و قابلیت اطمینان کمتری برخوردارند. در این میان شاخص سایش شیمازک به دلیل در نظر گرفتن مقاومت کششی، اندازه دانه‌ها و نیز میزان کوارتز محتوی نسبت به سایر روش‌ها برتری دارد و به علت در نظر گرفتن ترکیب میکروسکوپی سنگ از قابلیت بالایی در ارزیابی ساینده‌گی سنگ‌ها برخوردار است. با توجه به مطالب ذکر شده، فاکتور سایش شیمازک به عنوان شاخص کمی ارزیابی ساینده‌گی سنگ مورد استفاده قرار گرفته است. وزن این پارامتر، طبق نتایج حاصل از نظرسنجی به صورت مجموع وزن مقاومت کششی، ساینده‌گی و میزان کوارتز محتوی حاصل می‌شود.

۴-۲-۳-۳- سختی

سختی یکی از مهم‌ترین پارامترهای هر کانی به شمار می‌رود که تأثیر بسیار زیادی بر سختی کل سنگ و در

نهایت قابلیت حفاری آن دارد. در این تحقیق دو شاخص سختی در نظرسنجی انجام شده گنجانده شده بود که این عامل سختی و عدد چکش اشمیت بوده‌اند. در مجموع از آنجائی که سختی واقعی و علمی یک سنگ از مطالعه مقطع نازک و بررسی ترکیب کانی‌شناسی سنگ حاصل می‌شود و چکش اشمیت با وجود سهولت کاربرد ممکن است بسیار خطا داشته باشد، لذا در سیستم طبقه‌بندی حاضر امتیاز کسب شده توسط چکش اشمیت نیز به امتیاز سختی اضافه شده و در مجموع مقیاس سختی موس برای ارزیابی سختی مورد استفاده قرار گرفته است. از عمده دلایل استفاده از سختی موس می‌توان به شهرت و آشنایی خوب کاربران و دقت بالا به دلیل استفاده از مقطع نازک می‌باشد.

۴-۲-۳-۴- بافت

چنانچه در فصول قبل ذکر شد بافت سنگ یکی از عوامل مهم تأثیرگذار بر قابلیت حفاری سنگ است. ترکیب دانه‌بندی، نوع بافت و آرایش فضایی دانه‌ها در سنگ از جمله مهم‌ترین مشخصات مورد توجه در بافت سنگ است. تاکنون تنها روش ضریب بافت به عنوان یک شاخص کمی برای ارزیابی بافت سنگ‌ها ارائه شده است. این شاخص از نظر ریاضی با محاسبات طولانی همراه بوده و تعیین این شاخص، فرآیند وقت‌گیری است. لذا چنین به نظر تعیین این شاخص و استفاده از آن در طبقه‌بندی حاضر، ارزیابی قابلیت حفاری سنگ و در کل استفاده از سیستم پیشنهادی را دشوار، پیچیده و وقت‌گیر می‌سازد. از آنجائی که وزن عامل بافت در کل سیستم در جایگاه چهارم قرار می‌گیرد لذا با توجه به اهمیت نسبی کمتر نسبت به سایر پارامترها، استفاده از شاخص وقت‌گیر مثل ضریب بافت امر مطلوبی به نظر نمی‌رسد. بنابراین برای طبقه‌بندی بافت سنگ از روش پیشنهادی حسینی و همکاران (۲۰۰۸) استفاده شده است. برای وزن این پارامتر مجموع وزن بافت و اندازه دانه‌های حاصل از نظرسنجی در نظر گرفته شده است.

۴-۲-۳-۵- مدول الاستیسیته (مدول یانگ)

با توجه به رفتار سنگ‌ها در فرآیند شکست و به ویژه حفاری، نحوه رسیدن یک سنگ به مقاومت فشاری حداکثر آن بر قابلیت حفاری سنگ تأثیرگذار است. الاستیسیته را می‌توان یک پارامتر مستقل دانست که رفتار خاصی در سنگ ایجاد می‌کند و گرچه از سایر مشخصات سنگ اثر می‌پذیرد با این حال اثرگذاری آن بر سایر رفتار بیشتر از تأثیرپذیری آن از سایر پارامتر مورد توجه قرار می‌گیرد. لذا در این تحقیق مدول به

عنوان معرف رفتار الاستیسیته سنگ مورد استفاده قرار گرفته و امتیاز حاصل از نظرسنجی به صورت مستقیم برای آن لحاظ شده است.

۴-۲-۴- طبقه‌بندی هر یک از پارامترهای مورد استفاده در طبقه‌بندی

هدف از ارائه سیستم طبقه‌بندی حاضر، تقسیم‌بندی سنگ در پنج کلاس از نظر قابلیت نفوذپذیری در سنگ است. برای این منظور کلیه پنج پارامتر موجود در سیستم طبقه‌بندی نیز باید به نحو مناسبی در پنج کلاس طبقه‌بندی شده و امتیازدهی شوند.

هوک و براون دریافتند که یک سیستم طبقه‌بندی باید غیر خطی باشد تا به طور واقعی‌تر به توان به طبقه‌بندی توده‌سنگ‌های ضعیف پرداخت. بنابراین در سیستم طبقه‌بندی جدید به منظور امتیازدهی به مقادیر مختلف هر پارامتر، بیشترین امتیاز به بهترین وضعیت (بالا) داده شده است. برای امتیاز حالت‌های متوسط-زیاد، متوسط، کم-متوسط و کم به ترتیب ۷۰٪، ۵۰٪، ۲۵٪ و ۱۰٪ امتیاز ماکزیمم، اختصاص یافته است (اعداد بسته به شرایط گرد شده‌اند). با ترتیب امتیازدهی فوق، سعی شده سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی غیر خطی باشد. در ادامه جزئیات طبقه‌بندی هر یک از پارامترها ارائه می‌شود.

۴-۲-۴-۱- مقاومت فشاری تک‌محوری

چنانچه ذکر شد، به منظور طبقه‌بندی سنگ‌ها از نظر مقاومت فشاری تک‌محوری لازم است که پنج کلاس مختلف برای سنگ ارائه شود لذا از آن جایی که در طبقه‌بندی ماده سنگ به روش بنیادسنگی سنگ‌ها در پنج کلاس مختلف تقسیم می‌شوند، لذا در سیستم RPi هم از این روش استفاده شده است. با توجه به این که حداکثر امتیاز مقاومت فشاری ۳۲ می‌باشد نحوه امتیازدهی به مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ‌ها طبق جدول ۴-۶ پیشنهاد می‌شود.

جدول ۴-۶- امتیازدهی به مقاومت فشاری در طبقه بندی RPi

مقاومت فشاری تک محوری (MPa)	مقاومت خیلی کم	مقاومت کم	مقاومت متوسط	مقاومت بالا	مقاومت خیلی بالا
۱-۲۵	۲۵-۵۰	۵۰-۱۰۰	۱۰۰-۲۰۰	>۲۰۰	
امتیاز	۳۲	۲۲/۵	۱۶	۸	۳

۴-۲-۴-۲- فاکتور سایش شیمازک

تاکنون هیچ گونه طبقه‌بندی کمی برای ساینده‌گی سنگ‌ها ارائه شده است. در این تحقیق با توجه به مطالب

مشروح، فاکتور سایش شیمازک که به عنوان کمیت سایندهی سنگ در نظر گرفته شده است، در پنج کلاس اصلی تقسیم می‌شود. روش امتیازدهی و طبقه‌بندی این کمیت به شرح جدول ۷-۳ پیشنهاد می‌شود.

جدول ۷-۴ - امتیازدهی به فاکتور سایش شیمازک در طبقه بندی RPi

>۴	۳-۴	۲-۳	۱-۲	۰-۱	فاکتور سایش شیمازک (N/mm)
سایندهی خیلی بالا	سایندهی بالا	سایندهی متوسط	سایندهی کم	سایندهی خیلی کم	امتیاز
۲/۵	۶/۵	۱۳/۵	۱۹/۵	۲۷	

۴-۲-۳-۳-۳ سختی

چنانچه در بخش قبلی توضیح داده شد در این تحقیق برای امتیازدهی به سختی سنگ از روش پیشنهادی حسینی و همکاران در سیستم RD_i (Hoseinie et al. 2008) استفاده شده است. با توجه به اینکه سختی سنگ در مجموع امتیاز ۱۸ از ۱۰۰ امتیاز را کسب کرده است، نحوه امتیازدهی به بافت سنگ در سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی طبق جدول ۸-۴ می‌باشد.

جدول ۸-۴ - طبقه بندی و امتیازدهی به سختی سنگ‌ها در سیستم طبقه بندی RPi

>۷	۶-۷	۴/۵-۶	۳-۴/۵	۱-۳	سختی موهس
خیلی سخت	سخت	نسبتاً سخت	نسبتاً نرم	خیلی نرم تا نرم	امتیاز (از ۱۰۰)
۲	۴/۵	۹	۱۲/۵	۱۸	

۴-۲-۳-۴-۲-۴ بافت و اندازه دانه‌ها

چنانچه در بخش قبلی توضیح داده شد در این تحقیق برای امتیازدهی به بافت سنگ از روش پیشنهادی حسینی و همکاران در سیستم RD_i (Hoseinie et al. 2008) استفاده شده است. با توجه به اینکه بافت و اندازه دانه‌های سنگ در مجموع امتیاز ۱۵ از ۱۰۰ امتیاز را کسب کرده است، نحوه امتیازدهی به بافت سنگ در سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی طبق جدول ۹-۴ می‌باشد.

جدول ۹-۴ - امتیازدهی به بافت سنگ در طبقه بندی RPi

متراکم (دانه‌بندی ریز)	پرفیری	گرانوئیدی (دانه متوسط)	شکسته (نیمه تحکیم یافته)	متخلخل	بافت
۰/۰۵-۱	ماتریکس: ۰/۵-۱ دانه‌ها: ۲-۵	۲-۵	>۵	.....	اندازه دانه‌ها (mm)
۱/۵	۴	۷/۵	۱۰/۵	۱۵	امتیاز (از ۱۰۰)

۴-۲-۵- مدول الاستیسیته

تاکنون تنها یک روش شناخته شده برای طبقه‌بندی رفتار الاستیک سنگ‌ها پیشنهاد شده است. این روش که توسط انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ ارائه شده است، مدول یانگ سنگ‌ها را به عنوان مرجع انتخاب کرده است. در این طبقه‌بندی سنگ‌ها از نظر مدول به پنج کلاس عمده تقسیم می‌شوند. از آنجائی که حداکثر امتیاز اختصاص داده شده به این پارامتر هشت امتیاز از ۱۰۰ می‌باشد، نحوه امتیازدهی به مدول الاستیسیته سنگ در سیستم RPi طبق جدول ۴-۱۰ است.

جدول ۴-۱۰- طبقه بندی و امتیازدهی به الاستیسیته سنگ‌ها در سیستم طبقه بندی RPi

مدول یانگ (GPa)	<10	10-30	30-70	70-100	>100
خاصیت الاستیسیته	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
امتیاز (از ۱۰۰)	۸	۵/۵	۴	۲	۱

۴-۲-۵- سیستم طبقه‌بندی کلی و پیش‌بینی قابلیت حفاری نفوذ در سنگ

پس از شرح کامل نحوه امتیازدهی به تک‌تک پارامترها، جدول نهایی امتیازدهی و بدنه کلی سیستم طبقه‌بندی شاخص قابلیت نفوذ در سنگ به شرح جدول ۴-۱۱ قابل ارائه است.

جدول ۴-۱۱- جدول امتیازدهی به پارامترها و تعیین اندیس قابلیت نفوذ در سنگ‌ها (RPI)

ردیف‌های ارزش					پارامترها	
>200	100-200	50-100	25-50	1-25	مقاومت فشاری تک‌محوری (MPa)	۱
خیلی بالا	بالا	متوسط	کم	خیلی کم	امتیاز	
۳	۸	۱۶/۵	۲۳	۳۲/۵	فاکتور سایش شیمازک (N/mm)	۲
>4	3-4	2-3	1-2	0-1	امتیاز	
سایندگی خیلی بالا	سایندگی بالا	سایندگی متوسط	سایندگی کم	سایندگی خیلی کم	سختی موهس	۳
۲/۵	۶/۵	۱۳/۵	۱۹	۲۷	امتیاز	
>7	6-7	4/5-6	3-4/5	1-3	خیلی نرم تا نرم	۴
خیلی سخت	سخت	نسبتاً سخت	نسبتاً نرم	خیلی نرم تا نرم	امتیاز	
۲	۴/۵	۹	۱۲/۵	۱۸	بافت	۵
متراکم	پرفیری	گرانوئیدی	شکسته	متخلخل	اندازه دانه‌ها (mm)	
0/05-1	ماتریکس: 0/5-1 دانه‌ها: 2-5	2-5	>5	.....	امتیاز
۱/۵	۴	۷/۵	۱۰	۱۴/۵	مدول یانگ (GPa)	
>100	70-100	30-70	10-30	<10	خیلی کم	
خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم	خیلی کم	امتیاز	
۱	۲	۴	۵/۵	۸		

پس از تعیین شاخص RPi، براساس مقدار به دست آمده برای هر سنگ می‌توان قابلیت نفوذ در سنگ را و نیز قابلیت ماشین‌کاری و کارپذیری سنگ پیش‌بینی کرد. برای این منظور می‌توان از جدول ۴-۱۲ بهره جست.

جدول ۴-۱۲- پیش‌بینی قابلیت نفوذ در سنگ و نیز قابلیت ماشین‌کاری بر اساس RPi

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

۴-۲-۶- مطالعات موردی برای تعیین قابلیت نفوذ در سنگ

پس از ارائه سیستم طبقه‌بندی RPi، به منظور ارزیابی قابلیت نفوذ در سنگ و نیز قابلیت حفاری آن، سنگ‌های مورد مطالعه در فصل سوم، از دیدگاه سیستم طبقه‌بندی RPi امتیازدهی و طبقه‌بندی شدند. نحوه امتیازدهی به سنگ‌های مذکور در جدول ۴-۱۳ آورده شده است. در جدول ۴-۱۴ امتیاز RPi و کلاس هر سنگ را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۱۳- نحوه امتیازدهی به سنگ‌های مورد مطالعه بر اساس RPi

امتیاز پارامترهای سنگ در سیستم RPi					نام سنگ
مدول یانگ (GPa)	بافت	سختی موهس	فاکتور ساییش شیمارک (N/mm)	مقاومت فشاری تک‌محوری (MPa)	
۴	۴	۹	۱۹	۱۶/۵	مونزونیت
۷/۵	۴	۹	۲/۵	۱۶/۵	گرانیت
۱/۵	۴	۱۲/۵	۲۷	۲۳	سنگ آهک کرمی
۴	۴	۱۲/۵	۲۷	۱۶/۵	سنگ آهک سیاه
۴	۴	۱۸	۲۷	۱۶/۵	تراورتن کرمی
۴	۲	۱۸	۲۷	۱۶/۵	تراورتن قرمز
۷/۵	۴	۴/۵	۲/۵	۸	سیلیس
۷/۵	۴	۹	۲/۵	۱۶/۵	نفلین سینیت
۱۰	۸	۱۸	۲۷	۳۲/۵	ماسه سنگ

چنانچه از جدول ۴-۱۴ بر می‌آید سنگ‌های آهکی و تراورتنی با توجه به مشخصات از قبل تعیین شده (طبق جدول ۳-۳ و ۴-۳) دارای قابلیت نفوذ در سنگ نسبتاً بالا و نیز قابلیت حفاری قابل قبولی هستند. سنگ مونزونیت با توجه به مشخصات مهندسی و نیز بافت موجود در کلاس سنگ‌های با قابلیت نفوذ متوسط می‌باشد. سنگ‌های سیلیس و نفلین سینیت همچنان که قابل پیش‌بینی بود در زمره سنگ‌های سخت از نظر

جدول ۴-۱۴- امتیاز RPi و کلاس هر سنگ بر اساس RPi

نام سنگ	امتیاز RPi	قابلیت نفوذ در سنگ
مونزونیت	۵۲/۵	متوسط
گرانیت	۳۹/۵	سخت
سنگ آهک کرمی	۶۸	آسان
سنگ آهک سیاه	۶۴	آسان
تراورتن کرمی	۶۹/۵	آسان
تراورتن قرمز	۶۷/۵	آسان
سیلیس	۲۶/۵	سخت
نفلین سینیت	۳۲	سخت
ماسه سنگ	۹۵/۵	خیلی آسان

قابلیت نفوذ قرار می‌گیرند. ماسه سنگ مورد آزمایش با توجه به سرعت به دست آمده در مطالعات حفاری نیز پیش‌بینی می‌شد که از قابلیت حفاری و نفوذ (RPi) بالایی برخوردار باشد. خوشبختانه با توجه نتایج به دست آمده از مطالعات موردی معلوم می‌شود که کلاس‌بندی حاصل از طبقه‌بندی RPi با واقعیت موجود در سنگ‌ها بسیار سازگاری و همخوانی دارد.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱- بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق کلیه پارامترهای مهم مؤثر در سرعت حفاری و قابلیت نفوذپذیری سنگ‌ها در مقابل دستگاه حفاری مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. با مرور منابع معتبر جهانی و کارهای انجام شده گذشته مشخص گردید که کلیه محققان بر تأثیر بیشتر پارامترهای ماده سنگ نسبت به مشخصات توده سنگ توافق جمعی دارند. در این میان چگالی، بافت (اندازه و شکل دانه)، نوع ماتریکس و درجه سیمانته شدن، تخلخل، مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی، سختی (مقیاس موهس)، ساینده‌گی (نوع کانی‌های موجود) والاستیسیته و پلاستیسیته سنگ‌ها از اهمیت فوق العاده‌ای در حفاری برخوردارند.

از آنجایی که مقاومت یک سنگ در برابر حفاری به اندرکنش میان سنگ و سرتمه مربوط می‌باشد لذا چیرگی مشخصات مهندسی سرتمه و عوامل عملیاتی دستگاه نظیر بار پشت مته و دور مته بر مشخصات سنگ ضامن بهبود شرایط حفاری و افزایش سرعت می‌باشد.

نتایج حاصل از نظرسنجی‌های انجام شده در طی این تحقیق نشان می‌دهد که به اعتقاد متخصصان حفاری پنج پارامتر سختی، ساینده‌گی، مقاومت فشاری و میزان کوارتز محتوی مهمترین پارامترهای مؤثر در قابلیت حفاری سنگ هستند. به رغم تأکید متخصصان مختلف و مطالعات گسترده گذشتگان، تاکنون یک روش جامع و کاملی جهت پیش‌بینی قابلیت حفاری سنگ‌ها ارائه نشده‌بود و در این تحقیق سعی شد تا یک رهیافت جدید برای ارزیابی قابلیت حفاری سنگ‌ها ارائه و تشریح شود.

جهت ارائه یک سیستم طبقه‌بندی کمی، بر اساس پارامترهای مؤثر در قابلیت نفوذ سنگ‌ها، نظرات کیفی ۱۵ نفر از متخصصان داخل و خارج کشور توسط روش تحلیل سلسله مراتبی تجزیه و تحلیل شدند. با دستیابی به وزن هر پارامتر سیستم طبقه‌بندی جدیدی به صورت کمی و بر مبنای پنج پارامتر مهم مقاومت فشاری، شاخص سایش شیمازک، سختی، بافت و مدول یانگ سنگ‌ها پیشنهاد شد. این سیستم که اندیس قابلیت نفوذ در سنگ نامیده شده در مجموع به سنگ‌ها امتیازی از ۱۰۰-۱۰ اختصاص می‌دهد. سپس قابلیت حفاری سنگ‌ها در پنج کلاس خیلی خوب، خوب، متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف طبقه‌بندی می‌شود.

شایان ذکر است که سیستم طبقه‌بندی ارائه شده در این روش یک تلاش اولیه و یک پیشنهاد جدید می‌باشد که بایستی با استفاده از مطالعات صحرایی گسترده مورد استفاده و ارزیابی بیشتر قرار گیرد تا به نحو احسن

و با اطمینان بیشتری به توان از آن بهره جست.

۲-۵- پیشنهادات

الف) با توجه به اینکه کلیه پارامترهای مورد استفاده در شاخص قابلیت نفوذپذیری سنگ (RPI) کمابیش در سایر روش‌های حفاری و به ویژه حفاری‌های زیرزمینی مثل حفاری با دستگاه تونل‌زنی (TBM)، رودهدر، دستگاه شیرر و رنده زغال‌بری و نیز برش و فرآوری سنگ‌های ساختمانی تأثیرگذارند لذا می‌توان از شاخص برای ارزیابی و پیش‌بینی عملکرد این دستگاه‌ها نیز سود جست. البته این امر مستلزم کارهای صحرایی و آزمایشگاهی بسیار زیادی است که از حجم و توان یک تحقیق خارج می‌باشد.

ب) از آنجایی که حفاری به روش‌های مختلف و با قطرهای مختلف قابل انجام است لذا پیشنهاد می‌شود به منظور مطالعه دقیق و کنترل شده تأثیر کلیه پارامترهای سنگ بر سرعت حفاری، با روش‌های مختلف و با قطرهای مختلف از روش آزمایش به کاربرده شده در این تحقیق استفاده شود.

منابع و مراجع

- اصانلو، مرتضی، ۱۳۷۵، روشهای حفاری، مرکز نشر صدرا.
- استوار، رحمت الله، ۱۳۸۰، آتشفکری در معادن، جلد اول.
- حسینی، سید هادی، پوررحیمیان، یاشار، آقابابایی، حمید، ۸۵، مدل سازی فیزیکی اثرات فاصله داری و پرکننده درزه ها بر راندمان چالزنی معادن، فصلنامه مهندسی معدن، انجمن مهندسی معدن ایران، سال اول، شماره اول، زمستان.
- حسینی، سید هادی، آقابابایی، حمید، پوررحیمیان، یاشار، ۸۶، بررسی و مدلسازی تأثیر شیب داری درزه ها بر سرعت چالزنی در معادن روباز، فصلنامه علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی ایران، بهار.
- علمی اسدزاده، گلپیرا، معماریان، حسین، ۱۳۸۵، بررسی ارتباط بین سایش و بافت سنگ در نمونه هایی از سنگ های ساختمانی ایران، نشریه دانشکده فنی، جلد ۴۰، شماره ۱، اردیبهشت.
- معماریان، حسین، ۱۳۸۱، زمین شناسی مهندسی و ژئوتکنیک، انتشارات دانشگاه تهران.
- فهیمی فر، احمد، سروش، حامد، ۱۳۸۰، آزمایش های مکانیک سنگ، مبانی نظری و استانداردها (جلد اول: آزمون های آزمایشگاهی)، انتشارات شرکت سهامی آزمایشگاه های فنی و مکانیک خاک.
- 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.*
- Bruiland. A. 1998, Hard rock tunnel boring-drillability test methods. Department of building and construction engineering, NTUN university, Norway..*
- Drake. R. 2004, Bench drilling techniques and equipment selection manual, Ingersol-Rand Company.*
- Ersoy, A. & Waller, M. D. 1995a, Textural characterization of rocks. J. of Engineering Geology, June, Vol. 39, Issues 3-4, 123-136.*
- Ersoy, A. & Waller, M.D. 1995b, Prediction of drill-bit performance using multi-variable linear regression analysis. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Industry, , Vol. 104, May-August, pp. A101-114.*
- Jimeno, C. L, Jimeno. E. L. & Carcedo, F. J. A. 1995, Drilling and blasting of rocks. A.A*

Balkema, Pub Rotterdam,

Jung. S. J, Prisbrey. K & Wu. G. 1994, **Prediction of rock hardness and drillability using acoustic emission signatures during indentation**. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, Vol. 31, Issue 5, 561-567.

Hoseinie, S. H, Pourrahimian, Y. & Aghababaei, H. 2006, **Analyzing and physical modeling of joints dipping effects on penetration rate of rotary drilling in open pit mines**, 15th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection (MPES2006)., Torino, Italy. 1007-1013.

Hoseinie S. H. and Ataei M., 2007, **A review of machine parameters influencing the drilling rate in mines**, 7th International Scientific Conference on Modern Management of Mine Producing and Environmental Protection (SGEM2007), Albena Complex, Bulgaria.

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.

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.

Kaiser. P. K & McCreath. D. R. 1994, **Rock mechanics considerations for drilled or bored excavations in hard rock**. *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 9, Issue 4, October, 425-437.

Li, X., Rupert, G., Summers, D. A., Santi, P. & Liu, D. 2000, **Analysis of impact hammer rebound to estimate rock drillability**, *Journal of Rock Mechanics & Rock Engineering*, 33(1), 1-13.

Ozturk. A.C.A, Nasuf. & Bilgin. N. 2004, **The assessment of rock cutability and physical and mechanical rock properties from a texture coefficient**, *Journal of south African Institut of Mining and Metalurgy*, August.

Plinninger.R., Spaun.G & Thuro.K, 2002, **Predicting tool wear in drill and blast**, *Tunnels & Tunnelling International Magazine*, April.

Rao, K.U.M, & Misra, B. 1998, **Principles of rock drilling**, Balkema, Rotterdam..

Serradj, T. 1996, **Method of assessment of rock drillability incorporating the Protodyakonov index**. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Industry*, Vol. 105, Septemser-December, A175-A179.

Singh S. P, 1998. Ladouceur. M & Rouhi. F. **Sources, implication and control of blasthole deviation.** 7th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection. A.A Balkema, Pub Rotterdam.

Singh, T. N, Gupta, A. R. & Sain, R. 2006, *A comparative analysis of cognitive system for the prediction of drillability of rocks and wear factor.* *Geotechnical and Geological Engineering*, 24: 299-312.

Singh, S. P. 1990. **Rock drillability comparison by different methods.** In: *Proceedings 2nd Int. Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, Calgary, 3-4 November*, A.A Balkema, Pub Rotterdam,

SME1987, Handbook of Surface Mining. Editor: Hugh W. Evans.

Tanaino, A. S., 2005, **Rock classification by drillability. Part 1: Analysis of the available classification.** *Journal of Mining Science*, Vol. 41, No. 6, pp. 541-549.

Thuro, K, Spaun, G, 1996, **Introducing the destruction work as a new rock property of toughness referring to drillability in conventional drill and blast tunneling,** *Eurock 96, Turin, Italy,*.

Thuro, K, 1997. **Drillability prediction- geological influences in hard rock drill and blast tunneling.** *Geol Rundsch*, 86: 426-438.

Wijk.G. 1991, **Rotary drilling prediction.** *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, Vol. 28, Issue 1, Jan, 35-42.

Wilbur, L. 1982. **Rock Tunnel Engineering Handbook.** Edited by Bickel and Kuesel, Publication of Van Nostrand Reinhold Company,

پیوست

استانداردها، مراحل و محاسبات مربوط به کلیه آزمایش‌های انجام شده

۱- تعیین چگالی

- تئوری آزمایش

جرم واحد حجم سنگ را چگالی حجمی می‌گویند. این مقدار تابعی از ترکیب کانی شناسی، تخلخل و مقدار آب موجود در سنگ می‌باشد. چگالی سنگ تابع منافذ، درزها، شکاف‌ها و سایر فضاهای باز موجود در سنگ می‌باشد. چگالی یک نمونه مشخص سنگ، با افزایش عمق بیشتر می‌شود، چرا که با افزایش عمق و در نتیجه فشار سنگ‌های فوقانی و ترک‌های موجود در سنگ به تدریج بسته می‌شوند. بنابراین عمر سنگ نیز رابطه مستقیم با چگالی آن دارد. از طرف دیگر هوازدهی سنگ‌ها باعث کاهش چگالی آن‌ها می‌شود. این موضوع به خاطر افزایش درز و ترک در سنگ، تجزیه شیمیایی و تورم برخی از کانی‌ها در اثر هوازدهی می‌باشد. اختلاف در چگالی سنگ‌ها بیشتر مربوط به تخلخل آن‌هاست، زیرا چگالی دانه‌ای اکثر کانی‌ها نزدیک به هم می‌باشد و بدین ترتیب همبستگی زیادی بین چگالی و تخلخل وجود دارد. آگاهی از چگالی سنگ‌ها نقش مهمی در طراحی مهندسی پروژه‌های عمرانی و معدنی ایفا می‌کند. مقادیر چگالی و تخلخل در ارزیابی ذخایر معدنی، انتخاب نوع وسایل حفاری، طراحی سیستم حمل و نقل، محاسبه میزان مواد منفجره مصرفی و همچنین برای تعیین تنش قائم ناشی از وزن سنگ‌های روباره در اعماق مختلف توده سنگ به کار می‌رود.

در جدول پ-۱- چگالی نسبی دانه‌ای برخی کانی‌های آورده شده است. در جدول پ-۲ نیز چگالی انواع مختلف سنگ‌ها ذکر شده است. جدول پ-۳ خلاصه این آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول پ-۱- چگالی نسبی برخی از کانی‌های متداول

کانی	چگالی (g/cm^3)	کانی	چگالی (g/cm^3)
هالیت	۲/۱ - ۲/۶	بیوتیت	۲/۸ - ۳/۱
ژیپس	۲/۳ - ۲/۴	دولومیت	۲/۸ - ۳/۱
سریانتین	۲/۳ - ۲/۶	انیدریت	۲/۹ - ۳
اورتوکلاز	۲/۵ - ۲/۶	پیروکسن	۳/۲ - ۳/۶
کالسدون	۲/۶ - ۲/۶۴	اولیوین	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

جدول پ-۲- چگالی سنگ‌ها

نام سنگ	دامنه چگالی (g/cm ^۳)
سنگ‌های آذرین تمام بلورین	
گرانیت	۲/۵۱۶-۲/۸۰۹
گرانودیوریت	۲/۶۶۸-۲/۷۸۵
سینیت	۲/۶۳۰-۲/۸۹۹
کوارتز دیوریت	۲/۶۸۰-۲/۹۶۰
دیوریت	۲۰/۷۲۱-۲/۹۶۰
نوریت	۲/۷۲۰-۳/۰۲۰
گابرو	۲/۸۵۰-۳/۱۲۰
دیاباز	۲/۸۰۴-۳/۱۱۰
پریدوتیت	۳/۱۵۲-۳/۲۷۶
دونیت	۳/۲۰۴-۳/۳۱۴
پیروکسنیت	۳/۱۰۰-۳/۳۱۸
آنورتوزیت	۲/۶۴۰-۲/۹۲۰
سنگ‌های شیشه‌های طبیعی	
ریولیت ابسیدیان	۲/۳۳۰-۲/۴۱۳
تراکیت ابسیدیان	۲/۴۳۵-۲/۴۶۷
پیچ استون	۲/۳۲۱-۲/۳۷۰
شیشه آندزیتی	۲/۴۰۰-۲/۵۷۳
شیشه لویسیت تفریقی	۲/۵۲۰-۲/۵۸۰
شیشه بازالتی	۲/۷۰۴-۲/۸۵۱
سنگ‌های رسوبی	
ماسه سنگ	۲/۱۷۰-۲/۷۰۰
سنگ آهک	۲/۳۷۰-۲/۷۵۰
دولومیت	۲/۷۵۰-۲/۸۰۰
چاک	۲/۲۳۰
مرمریت	۲/۷۵۰
شیل	۲/۰۶۰-۲/۶۶۰
سنگ‌های دگرگونی	
گنایس	۲/۵۹۰-۳/۰۶۰
شیست	۲/۷۰۰-۳/۰۳۰
اسلیت	۲/۷۲۰-۲/۸۴۰
آمفیبولیت	۲/۷۹۰-۳/۱۴۰
گرانولیت	۲/۶۳۰-۳/۱۰۰
سنگ‌های تک کانی	
پیروکسنیت	۳/۲۵۰-۳/۳۱۰
هورن بلندیت	۳/۱۲۰-۳/۲۲۰
سرپانتین	۲/۴۴۰-۲/۶۵۰
انیدریت	۲/۸۲۰-۲/۹۳۰
سنگ نمک	۲/۱۰۰-۲/۱۸۰

جدول پ-۳- خلاصه آزمایش تعیین چگالی

استاندارد	ISRM
وسایل	گرمخانه، دسیکاتور، ترازو، دستگاه اشباع نمونه در خلاء
نمونه	سه قطعه سنگ ۵۰ گرمی یا با ابعادی ۱۰ برابر بزرگترین دانه سنگ با شکل هندسی منظم (استوانه یا منشور)
مراحل	۱- اندازه‌گیری ابعاد نمونه و محاسبه حجم (V) ۲- توزین نمونه نمونه خشک شده (Ms)
محاسبات	$\rho_d = \frac{Ms}{V}$

۲- سختی چکش اشمیت

- تئوری آزمایش

سختی یکی از مفاهیم رایجی است که برای توصیف رفتاری سنگ‌ها به کار می‌رود. با این حال هیچ‌گونه کمیت فیزیکی اساسی برای برآورد کمی آن وجود ندارد. سختی تابعی از عوامل ذاتی متفاوتی چون نوع کانی‌ها، ابعاد دانه‌ها چسبندگی مرزی کانی‌ها، مقاومت و رفتار الاستیک و پلاستیک سنگ می‌باشد. ترکیب و اندرکنش این عوامل، تعیین کننده سختی یک سنگ است. با وجود این که سختی یکی از مشخصه‌های رفتاری سنگ می‌باشد، زمانی می‌توان آن را کمی کرد که طبق روش‌های آزمایشی خاص و تحت شرایطی یکسان عمل شود. بنابراین مهم است که بدانیم با توجه به اهداف مورد نظر از چه روشی برای تعیین سختی استفاده کنیم که هم با طبیعت سنگ و هم با نیاز مهندسی ما تناسب داشته باشد. روش‌های متعدد برای تعیین سختی سنگ پیشنهاد شده است که بسیاری از این روش‌ها فقط برای اهداف ویژه‌ای بوده و استفاده عمومی ندارد. برخی دیگر ممکن است فقط توسط سازمان مهندسی خاصی استفاده شده باشند. به هر حال می‌توان این روش‌ها را کلاً به سه گروه زیر تقسیم کرد:

الف) آزمایش‌های خراشی: در این روش‌ها سختی سنگ یا کانی بر اساس قابلیت خراش برداری در اثر کشیده شدن یک جسم ثانوی روی آن‌ها مشخص می‌شود. مقیاس سختی موهس و اسکرومترهای خراشی از این قبیل آزمایش‌ها هستند. این روش‌ها به طور وسیعی برای سنجش سختی کانی‌ها در اهداف زمین شناسی به کار برده می‌شوند.

ب) آزمایش‌های واجهشی یا دینامیکی: در آزمایش‌های این گروه از یک چکش یا وزنه برای ضربه‌زدن به سطح سنگ استفاده می‌شود و ارتفاع واجهش (انعکاس) وزنه، مقیاسی برای سنجش سختی است. هر گونه رفتار پلاستیک یا تغییر شکل بر اثر ضربه، انرژی الاستیک واجهش چکش را کاهش می‌دهد. چکش اشمیت، اسکروسکوپ شور و اسکروگراف از این دسته آزمایش‌ها می‌باشند.

ج) آزمایش‌های اثرگذاری: در این روش‌ها یک نوک الماسی تیز با شکلی خاص در حالت ایستا و تحت نیرویی مشخص اثری بر روی نمونه می‌گذارد. مقدار سختی سنگ بر اساس عمق یا مساحت نقطه اثر دائمی ایجاد شده روی سنگ، حجم پودر ایجاد شده و یا منحنی نیرو- اثر برآورد می‌شود. این روش‌ها تماماً آزمایشگاهی هستند.

به طور کلی آزمایش‌های تعیین سختی به منظور بررسی ویژگی‌های مهندسی سنگ، روش‌های ساده، سریع و ارزانی هستند. در بیشتر مواقع لازم است که ابتدا رابطه‌ای عملی بین سختی و ویژگی مورد نظر یا پارامتر اجرایی مورد نظر به دست آورد. در بین روش‌های موجود برای تعیین سختی سنگ، روش چکش اشمیت به دلیل سادگی، در دسترس بودن وسایل آزمایش و ارتباط بسیار خوب نتایج آن‌ها با سایر ویژگی‌های سنگ، متداول‌ترین روش‌ها هستند. جدول پ-۴ خلاصه این آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول پ-۴- خلاصه آزمایش تعیین سختی چکش اشمیت

استاندارد	ISRM
وسایل	چکش اشمیت، آنویل کالیبراسیون، قاعده فولادی
نمونه	مغزه‌های بزرگتر از NX (۵۴ میلی‌متر)، بلوکهای با ابعاد حداقل ۶×۶ سانتیمتر، سنگ برج (قسمت بکر)
مراحل	۱- کالیبره کردن چکش با آنویل استاندارد ۲- پرداخت کردن سطح نمونه ۳- استقرار نمونه در دستگاه و محکم کردن آن ۴- فشردن چکش روی سنگ و قرائت مقدار واجهش ۵- تکرار آزمایش در حداقل ۲۰ نقطه مجزا
محاسبات	(میانگین ۱۰ قرائت روی آنویل) / (مقدار ویژه استاندارد آنویل) = ضریب تصحیح میانگین قرائتها × ضریب تصحیح = سختی اشمیت

۳- تعیین سرعت موج در سنگ

- تئوری آزمایش

امروزه استفاده از روش‌های دینامیکی برای برآورد دقیق و سریع ثابت‌های الاستیک در مهندسی سنگ کاملاً پذیرفته شده است و از آنجایی که این آزمایش‌ها غیر مخرب هستند، مورد استقبال زیادی قرار گرفته‌اند.

روش کار عبارت است از ارسال امواج الاستیک به داخل نمونه و اندازه‌گیری سرعت امواج فشاری (اتساعی یا طولی) و برشی (پیچشی یا عرضی) در آن. سرعت این امواج بستگی به مقاومت فشاری و کششی سنگ یا به طور کلی کیفیت سنگ دارد. بنابراین رابطه مستقیمی بین ثابت‌های الاستیک سنگ و سرعت امواج الاستیک وجود دارد. البته ثابت‌هایی که با این روش تعیین می‌شوند مربوط به کرنش‌های بسیار کم هستند، چرا که المان‌های پیزوالکتریک مورد استفاده در این روش‌ها قادر نیستند سطح تنش بالایی در نمونه به وجود آورند. سرعت امواج فشاری و برشی با توجه به زمان گذر از فرستنده به گیرنده در طول نمونه محاسبه می‌شود و معمولاً سرعت امواج برشی (V_s) دو سوم سرعت امواج فشاری (V_p) می‌باشد.

روش دیگر تعیین ثابت‌های الاستیک دینامیکی، اندازه‌گیری فرکانس تشدید ناشی از ارسال امواج الاستیک به داخل نمونه است. در این روش نیز می‌توان از هر دو ارتعاش فشاری و برشی استفاده کرد و فرکانس تشدید نمونه را به دست آورد. سرعت گذر موج با کمک این فرکانس‌ها تعیین می‌شود. از آنجایی که فرکانس تشدید را می‌توان با دقت بالایی تعیین کرد، این روش نیز از دقت بالایی برخوردار است.

در روش‌های فوق ممکن است نمونه در ابتدای آزمایش تحت تاثیر یک بار فشاری معادل شرایط برجا قرار گیرد. سرعت امواج الاستیک با افزایش تنش فشاری محوری افزایش می‌یابد. در برخی حالات مشاهده شده است که وقتی تنش از حد معینی بیشتر می‌شود، این سرعت شروع به کاهش می‌کند که دلیل آن گسترش ترک‌ها در نمونه است.

از عوامل مؤثر بر سرعت انتشار امواج صوتی و ثابت‌های الاستیک دینامیکی سنگ می‌توان به نوع سنگ، بافت، چگالی، تخلخل، ناهمسانگردی، سطح تنش، درصد رطوبت و درجه حرارت اشاره کرد. سرعت امواج صوتی در سنگ متناسب با سرعت صوت در کانی‌های تشکیل دهنده آن می‌باشد، البته در صورتی که تأثیر عواملی مثل اندازه یا جهت‌گیری دانه‌ها در نظر گرفته نشود.

سرعت امواج الاستیک در سنگ به اندازه دانه‌ها نیز بستگی دارد و با ریزدانه شدن بافت سنگ افزایش می‌یابد. عمده‌تاً افزایش چگالی باعث افزایش سرعت می‌شود و رابطه بین این دو پارامتر ممکن است خطی یا غیر خطی باشد. در جدول پ-۵ چگالی نسبی دانه‌ای برخی کانی‌ها آورده شده است. در جدول پ-۶ نیز چگالی انواع مختلف سنگ‌ها ذکر شده است. جدول پ-۷ خلاصه این آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول پ-۵- سرعت امواج طولی در برخی کانی‌ها

کانی	سرعت موج (m/s)
کوارتز	۶۰۵۰
اولیوین	۸۴۰۰
اورژیت	۷۲۰۰
آمفیبولیت	۷۲۰۰
مسکویت	۵۸۰۰
اورتوکلاز	۵۸۰۰
پلاژیوکلاز	۶۲۵۰
کلسیت	۶۶۰۰
دولومیت	۷۵۰۰
مگنتیت	۷۴۰۰
گچ	۵۲۰۰
اپیدوت	۷۴۵۰
پیریت	۸۰۰۰

جدول پ-۶- سرعت امواج طولی در برخی سنگ‌ها

سنگ	سرعت موج (m/s)
گابرو	۷۰۰۰
بازالت	۶۵۰۰-۷۰۰۰
سنگ آهک	۶۵۰۰-۶۵۰۰
دولومیت	۶۵۰۰-۷۰۰۰
ماسه سنگ	۶۰۰۰
کوارتزیت	۶۰۰۰
گرانیت	۵۵۰۰-۶۰۰۰

جدول پ-۷- خلاصه آزمایش تعیین سرعت موج در سنگ

استاندارد	ASTMD2845 و ISRM
وسایل	ژنراتور مولد پالس فرکانس بالا، ترانس دیوسرهای فرستنده و گیرنده، صافی، پیش تقویت کننده، اسیلوسکوپ اشعه کاتدی، شمارش گرالکترونیکی، زمان سنج
نمونه	بلوک‌های راست گوشه، مغزه‌های استوانه‌ای و نمونه‌های کروی، مسافت گذر موج باید حداقل ۱۰ برابر میانگین ابعاد دانه‌ها و عرض نمونه حداقل ۱۰ برابر طول موج باشد.
مراحل	۱- اندازه‌گیری دقیق مسافت گذر موج ۲- قرار دادن مناسب ترانس دیوسرها روی نمونه ۳- ارسال موج و اندازه‌گیری زمان گذر آن از نمونه ۴- تعیین زمان صفر مدار و تصحیح نتایج
محاسبات	$V_p = \frac{d}{t_p}$ $V_s = \frac{d}{t_s}$

۴- مقاومت فشاری تک محوری و مدول تغییر شکل پذیری

- تئوری آزمایش

آزمایش مقاومت فشاری تک محوری یا نامحصور (UCS) مرسوم‌ترین آزمون آزمایشگاهی برای مطالعه مکانیکی سنگ بکر می‌باشد که با وجود ظاهری ساده، انجام دقیق آن بسیار مشکل است. این آزمایش به عنوان آزمایش پایه در اکثر پروژه‌های مهندسی انجام گرفته است و به ندرت اتفاق می‌افتد که در پروژه‌ای مقاومت فشاری تک محوری مورد نیاز نباشد. اگرچه این آزمایش عمدتاً به عنوان شاخصی برای مقایسه سنگ‌ها شناخته می‌شود، لیکن کاربردهای وسیع دیگری نیز در حل مسائل عملی مکانیک سنگ پیدا کرده است که برخی از این کاربردها به شرح زیر می‌باشد:

- برآورد یا پیش بینی زمان وقوع خرابی در اثر فشار یا برش در اطراف فضاهای زیرزمینی

- ارزیابی مقاومت پایه‌های سنگی در معادن زیرزمینی

- تخمین مقاومت فشاری سه محوری با استفاده از معیارهای خرابی مثل هوک و براون

- تعیین مدول‌های اساسی سنگ برای پیش بینی میزان تغییر شکل یا نشست در نقاط مختلف آن

- تعیین ظرفیت مجاز باربری و مقاومت برشی جانبی پی‌های عمیق (شمع‌ها)

- تعیین نوع و مشخصات دستگاه حفاری

- تعیین مشخصات عملیات آتش کاری

مقاومت ماده سنگی یا سنگ بکر به عنوان یک پارامتر اصلی در اکثر سیستم‌های طبقه بندی توده سنگ مورد توجه قرار گرفته است. مقاومت ماده‌ی سنگ حد بالای مقاومت توده سنگ می‌باشد.

در ادامه این بخش علاوه بر مطرح کردن برخی مباحث نظری، روش‌های استاندارد که در آزمایشگاه‌های مکانیکی سنگ در ایران متداول هستند مثل ASTM، ISRM و BS به طور کامل تشریح شده است. برخی دیگر از روش‌های استاندارد که کمتر مورد توجه هستند در جدول پ-۷ با روش‌های مرسوم مقایسه شده‌اند. قابل ذکر است چنانچه نوع استاندارد توسط کارفرما مشخص نشده باشد، پیشنهاد می‌شود از یکی از روش‌های ASTM یا ISRM که در کشور ما شناخته شده هستند استفاده شود. جدول پ-۸ خلاصه این آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول پ-۷- مقایسه استانداردهای مختلف مقاومت فشاری تک محوری

ISRM	ASTM D2938	ASTMC710	
استوانه ای	استوانه ای	منشوری، استوانه ای	شکل نمونه
۵۴	۴۷	۵۰/۸	حداقل قطر نمونه (mm)
۲/۵-۳	۲-۲/۵	<۱	نسبت ارتفاع به قطر
۰/۰۰۱rad	۰/۲۵°	-	انحراف از قائم سطوح انتهایی نمونه
۰/۰۲	۰/۰۲۵	۰/۰۲۵	حداکثر ناصافی سطوح انتهایی نمونه (mm)
۰/۳	۰/۵	-	حداکثر ناهمواری مجاز جانبی (mm)
۱	-	۰/۵	دقت اندازه‌گیری ارتفاع (mm)
۰/۱	-	۰/۵	دقت اندازه‌گیری قطر
$D \leq DP \leq D+2$	$D \leq DP \leq 2D$	-	قطر صفحات بارگذاری
D/۳ یا ۱۵	-	-	حداقل ضخامت بارگذاری (mm)
۵۸	۵۸	-	سختی صفحات بارگذاری
۰/۵-۱MPa/s	-	۶۹۰KPa/s	نرخ بارگذاری
۵-۱۰ دقیقه	۵-۱۵ دقیقه	-	زمان شکستن نمونه
۵	۱۰	۱۰	حداقل تعداد نمونه

جدول پ-۸- خلاصه آزمایش تعیین مقاومت فشاری

استاندارد	ASTM D2938 و ISRM
وسایل	دستگاه بارگذاری، صفحات بارگذاری، پوشش محافظ
نمونه	مغزه استوانه ای با نسبت طول به قطر ۲/۵ تا ۳ و حداقل قطر ۵۴ میلیمتر (حداقل ۵ نمونه)
مراحل	۱- استقرار نمونه و صفحات بارگذاری در دستگاه ۲- افزایش پیوسته بار با سرعت ثابت ۳- شکستن نمونه در مدت ۵ تا ۱۰ دقیقه ۴- ثبت حداکثر نیروی اعمالی (F)
محاسبات	$\sigma_c = \frac{F}{A}$

۵- مدول‌های تغییر شکل پذیری استاتیکی

- تئوری آزمایش

منحنی‌های تنش-کرنش به دست آمده از آزمایش فشاری تک محوری را می‌توان برای محاسبه مدول‌های تغییر شکل‌پذیری سنگ مورد استفاده قرار داد. مدول‌های تغییر شکل‌پذیری سنگ شامل مدول یانگ، ضریب پواسون، مدول برشی و مدول حجمی می‌باشند. مهم‌ترین و مفیدترین آن‌ها مدول یانگ و ضریب پواسون می‌باشند که رفتار الاستیک سنگ را به خوبی توصیف می‌کنند. مدول الاستیسیته (یانگ) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

که در آن σ تنش فشاری محوری در آزمایش تک محوری است و معمولاً برحسب مگاپاسکال بیان می‌شود و ε کرنش محوری است که به صورت mm/mm یا in/in یا برحسب درصد ارائه می‌شود. مقدار E را می‌توان با توجه به منحنی تنش - کرنش نیز تعیین کرد. جدول پ-۹ خلاصه این آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول پ-۹- خلاصه آزمایش تغییر شکل پذیری استاتیکی

استاندارد	ASTM D 3148 و ISRM
وسایل	دستگاه بارگذاری، صفحات بارگذاری، وسایل اندازه گیری تغییر شکل‌ها، وسیله ثبت قرائت‌ها، محفظه حرارتی و دماسنج
نمونه	مغزه استوانه ای با نسبت طول به قطر ۲/۵ تا ۳ و حداقل قطر ۵۴ میلیمتر (حداقل ۵ نمونه)
مراحل	۱- کنترل نشیمنگاه کروی ۲- استقرار نمونه و صفحات بارگذاری در دستگاه ۳- نصب وسایل اندازه گیری ۴- افزایش پیوسته بار با سرعتی ثابت و ثبت حداقل ۱۰ قرائت ۵- شکستن نمونه در مدت ۵ تا ۱۰ دقیقه
محاسبات	$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$

۶- مقاومت کششی

- تئوری آزمایش

مقاومت کششی عبارت است از حداکثر تنش کششی که یک ماده قادر است تحمل نماید تا به مرحله گسیختگی برسد. اطلاع از رفتار سنگ‌ها در کشش و میزان مقاومت کششی آن‌ها، در تحلیل پایداری سقف و کف فضاهای زیرزمینی، بررسی پایداری سنگ‌ها در زون‌های کششی سنگ‌ها یکی از پیش شرط‌های مهم موفقیت در طراحی معادن، تونل‌ها، شیروانی‌ها و کنترل مؤثر لایه‌ها و طبقات زمین می‌باشد و ما را در درک مکانیزم‌های خرابی در چنین حالاتی یاری می‌کند.

سنگ‌ها و به طور کلی تمامی مواد شکننده، ذاتاً در کشش بسیار ضعیف‌تر از فشار عمل می‌کنند. بدین ترتیب علت وقوع اکثر گسیختگی‌ها و ریزش‌ها در معادن، تونل‌ها، مغارها و سایر سازه‌های مهندسی، ایجاد تنش‌های کششی در آن‌ها می‌باشد. این پدیده‌ها اهمیت شناخت مکانیزم‌های گسیختگی کششی و نحوه تحلیل و مقابله با آن‌ها را به خوبی آشکار می‌سازند.

روش‌های متنوعی برای اندازه‌گیری مقاومت کششی سنگ‌ها ابداع شده‌اند که به طور کلی می‌توان آن‌ها را به دو نوع آزمایش کشش مستقیم و آزمایش‌های کششی غیرمستقیم تقسیم کرد. بهترین روش اندازه‌گیری مقاومت کششی سنگ، کشیدن مستقیم آن می‌باشد که به آزمایش کشش مستقیم یا کشش تک محوری موسوم است. دقت نتایج این آزمایش که اصولاً برای فلزات طراحی شده است به شرایط زیر بستگی دارد:

- نمونه آزمایشی باید فقط در معرض تنش کششی خالص قرار گیرد.
 - به تمامی سطح مقطع نمونه باید تنش کششی یکنواختی اعمال شود.
 - انجام دقیق آزمایش کشش مستقیم با مشکلاتی همراه است که استفاده از آن را به عنوان یک روش آزمایشگاهی متداول محدود کرده است. از مشکلات عمده این روش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:
 - الف) روش آماده سازی مطلوب نمونه ساده نیست.
 - ب) نحوه اتصال نمونه به دستگاه بسیار مشکل است.
 - ج) اعمال بار کششی خالص کاملاً محوری مشکل است.
 - د) امکان ایجاد تنش‌های خمشی و پیچشی وجود دارد.
- برای فائق آمدن بر مشکلات فوق تلاش‌های زیادی توسط محققین مختلف صورت گرفته و روش‌های گوناگونی نیز ارائه شده است. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش کششی غیر مستقیم اشاره کرد.

۶-۱- تعیین مقاومت کششی غیر مستقیم (روش برزیلی)

این آزمایش برای تعیین مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای سنگ بکر به طور غیر مستقیم به کار می‌رود. توجیه این آزمایش مبتنی بر این واقعیت تجربی است که با اعمال فشار قطری به نمونه‌های استوانه‌ای سنگ، تنش کششی در امتداد عمود بر محور بارگذاری گسترش یافته و زمانی که این تنش کششی از مقاومت کششی سنگ بیشتر شود، نمونه دچار گسیختگی می‌شود. قابل ذکر است که این آزمایش روی نمونه‌های شدیداً متخلخل، دانه درشت و دارای درز و ترک از دقت کافی برخوردار نیست.

تذکر : این آزمایش دارای استانداردهای مختلفی از جمله می‌باشد. این استانداردها در برخی موارد دارای تفاوت‌هایی هستند. اما با توجه به اینکه در روش پیشنهادی ISRM (آزمایش برزیلی) توزیع تنش در نمونه یکنواخت‌تر است، نتایج به دست آمده از آن نیز قابل اطمینان‌تر می‌باشد. به علاوه امروزه این روش عمومیت

بیشتری دارد. از این رو در ادامه این قسمت (جدول پ-۱۰) روش انجام آزمایش مقاومت کششی مستقیم و غیر مستقیم سنگ، براساس روش پیشنهادی ISRM آورده شده است.

جدول پ-۱۰- خلاصه آزمایش کشش مستقیم و کشش غیرمستقیم

روش	کشش مستقیم	کشش غیر مستقیم (برزلی)
استاندارد	ASTMD2936، ISRM	GOST21153.3، ASTM D3967، ISRM
وسایل	وسایل اعمال مستقیم بار کششی محوری، کلاهک‌های استوانه‌ای فلزی، زنجیر	فک‌های قوسی فولادی، وسیله بارگذاری، نوار چسب کاغذی، گوی و نشیمن‌گاه کروی
نمونه	مغزه استوانه‌ای با نسبت ارتفاع به قطر ۲/۵ تا ۳ و حداقل قطر ۵۴ میلی‌متر (حداقل ۵ نمونه)	مغزه استوانه‌ای با نسبت ارتفاع حداقل یک و قطر حداقل ۵۴ میلی‌متر (حداقل ۱۰ نمونه)
مراحل	۱- چسباندن کلاهک به نمونه ۲- استقرار نمونه و کلاهک در دستگاه بارگذاری ۳- اعمال بار کششی به صورت پیوسته و یکنواخت تا گسیختگی نمونه ۴- یادداشت حداکثر بار اعمالی	۱- چسباندن نوار چسب به دور نمونه ۲- قرار دادن نمونه در داخل فک‌های قوسی ۳- اعمال پیوسته و یکنواخت بار فشاری و شکستن نمونه ۴- ظرف مدت ۱۵ تا ۳۰ ثانیه ۵- یادداشت حداکثر بار اعمالی
محاسبات	$\sigma_t = -\frac{P}{A}$	$\sigma_t = 0 / 636 \frac{P}{D_t}$