



دانشکده مهندسی معدن نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن

RPI- روشی جدید برای ارزیابی و پیش بینی قابلیت حفاری سنگ ها

نگارش:

سید هادی حسینی

اساتید راهنما:

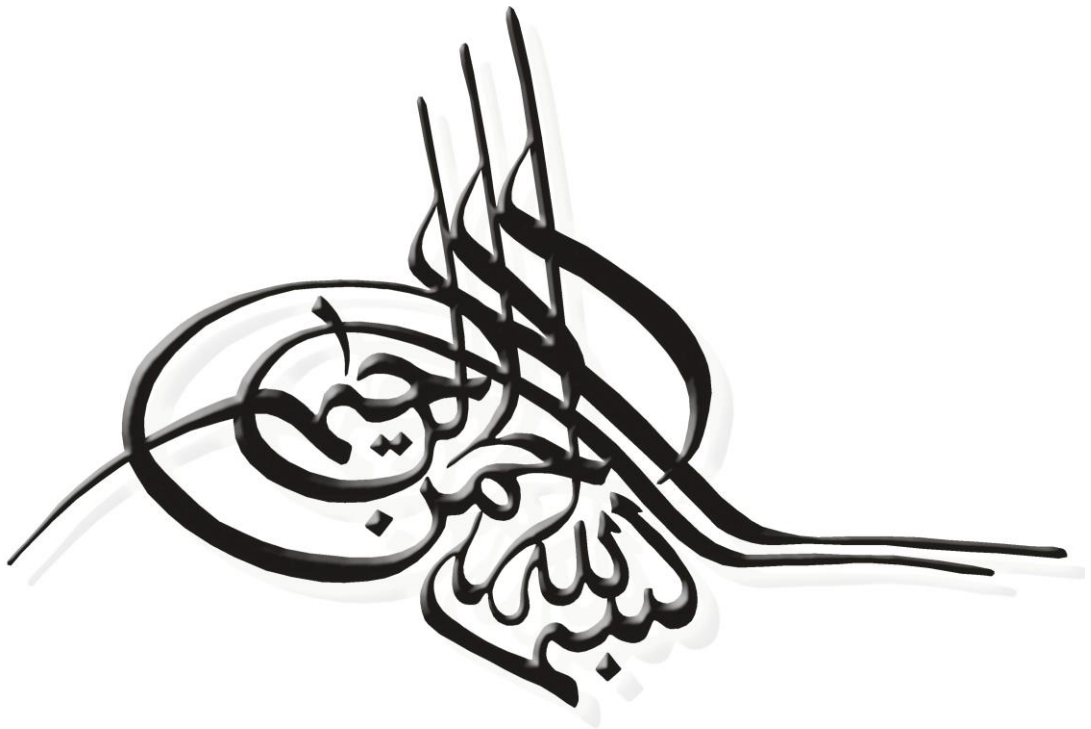
دکتر محمد عطائی

دکتر مرتضی اصانلو

استاد مشاور:

دکتر حمید آقابابایی

تیر ۱۳۸۷



تقدیم به عزیزانم که نفسهایم به وجود آنان بسته است؛

همسر پای و بی آلايشم

و

پدر و مادر مهربان و دلسوزم

تقدیر و تشکر

سپاس یزدان پاک را که بندگان را به علم‌آموزی و درک حقیقت سفارش نمود تا شاید هر یک دری به روی عظمت پنهانش بگشایند. اینک که به یاری خدا پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد خویش را به پایان رسانده‌ام بر خویش وظیفه می‌دانم تا از کلیه عزیزانی که بنده را در این راه یاری نمودند و نظراتشان چراغ راه من بود کمال سپاس و قدردانی را به جای آورم.

این تحقیق فرصتی ارزنده بود تا در طی آن احساس خوب شاگردی و آموختن توأم با عشق به استاد را از صمیم جان تجربه کنم و بیاموزم که:

سعی نابرده در این راه به جایی نرسی مزد اگر می‌طلبی طاعت استاد ببر

حافظ

از زحمات استاد مهربان و عزیزم جناب آقای دکتر عطایی که عاشقانه راهنما و مشوق بنده در این پروژه بودند صمیمانه سپاسگزارم و برای ایشان سلامتی و طول عمر آرزو مندم. از استاد فرزانه و بزرگوارم جناب آقای دکتر اصائلو که در طی پروژه پیوسته راهنما و مشوقم بودند کمال امتنان و تشکر را دارم. از استاد عزیزم جناب آقای دکتر آقابابایی که در امور آزمایشگاهی و مطالعات صحرایی این پروژه صمیمانه یاری و راهنمایی ام نمودند سپاسگزار و متشکرم.

از جناب آقای مهندس محرم پور (مدیریت محترم معادن سیمان صوفیان) که در زمینه فراهم نمودن امکانات صحرایی برای انجام مطالعات حفاری یاری نمودند صمیمانه سپاسگزارم و برای ایشان سلامتی آرزو مندم. همچنین از استاد گرانقدر و عزیزم جناب آقای دکتر سرشکی که در طی پروژه همواره بنده را مورد محبت و راهنمایی های ارزنده خویش قرار دادند سپاس گذارم.

بر خود وظیفه می دانم از کلیه اعضای هیأت علمی گروه استخراج معدن دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود به ویژه ریاست محترم دانشکده، استاد ارجمند جناب آقای دکتر کاکایی که با مدیریت خویش جو آرام و با نشاطی برای پیشرفت و تحصیل مان فراهم نمودند سپاسگزارم.

در پایان از همسر عزیزم که مرا در طی زندگی و انجام پروژه یاری و تشویق کرد و سختی های زندگی دانشجویی را با کمال آرامش و عاشقانه تحمل نمود کمال سپاسگزاری، تشکر و امتنان را دارم. از پدر و مادر مهربانم که همواره با دعای خیر و تشویقشان در زندگی و در طی پروژه یاری ام نمودند کمال تشکر را دارم. از پدر و مادر همسرم به خاطر درک بالا و تشویق های گرمشان بسیار متشکرم.

چکیده

در این تحقیق ابتدا سابقه علمی موضوع مورد بررسی قرار گرفته و مهمترین پارامترهای فنی مؤثر در حفاری شناسایی گردیده اند. در ادامه از کارشناسان مربوطه داخل و خارج از کشور در مورد ضریب اهمیت هر یک از پارامترهای دخیل در قابلیت نفوذ سنگ ها نظرسنجی به عمل آمده است. سپس جهت ارائه یک سیستم طبقه بندی کمی، بر اساس پارامترهای مؤثر در قابلیت نفوذ سنگ ها، نظرات کیفی متخصصان مذکور توسط روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی (FDAHP) تجزیه و تحلیل شده و مهمترین پارامترها از نظر کمی انتخاب شده اند. با دستیابی به وزن هر پارامتر، سیستم طبقه بندی 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، نمونه‌هایی از معادن مختلف شمال غرب کشور جمع‌آوری شدند. پس از این مرحله نمونه‌ها به آزمایشگاه مکانیک سنگ و مقطع نازک منتقل گردیده و تحت آزمایش قرار گرفتند. در مجموع آزمایش‌های تهیه مقطع نازک برای هر نوع سنگ (۱ عدد)، تعیین مقاومت فشاری، تعیین شاخص سایش شیمازک، سختی و مدول الاستیسیته بر روی نمونه‌ها انجام شد. 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 ۳۰×۴۰×۳۰ 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.

نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی و صحرایی نشان داد که با افزایش شاخص نفوذ در سنگ سرعت حفاری ضربه‌ای-دورانی پنوماتیکی چکش بالا به صورت توانی افزایش می‌یابد.

فهرست مطالب

چکیده..... ۵

فهرست مطالب ۱۰

فصل اول: مقدمه

- ۱-۱- مقدمه ۲
- ۲-۱- ضرورت تحقیق ۲
- ۳-۱- اهداف تحقیق ۴
- ۴-۱- ساختار پایان نامه ۴

فصل دوم: بررسی تأثیر مشخصات سنگ بر سرعت حفاری

- ۱-۲- مقدمه ۷
- ۲-۲- مشخصات فیزیکی و کانی‌شناسی سنگ‌ها ۹
 - ۱-۲-۲- چگالی ۹
 - ۲-۲-۲- بافت ۱۲
 - ۱-۲-۲-۲- ضریب بافت ۱۳
 - ۳-۲-۲- درجه سیمان‌شدن و نوع ماتریکس ۱۸
 - ۴-۲-۲- تخلخل ۲۰
 - ۳-۲-۲- مشخصات مکانیکی سنگ‌ها ۲۲
 - ۱-۳-۲- مقاومت فشاری تک محوری ۲۲
 - ۲-۳-۲- مقاومت کششی ۳۰
 - ۳-۳-۲- سختی ۳۳
 - ۴-۳-۲- ساینده‌گی ۳۶
 - ۱-۴-۳-۲- فاکتور سایش شیمازک ۳۸
 - ۲-۴-۳-۲- اندیس سایش سرمته ۳۹
 - ۳-۴-۳-۲- اندیس سایش سرشار ۴۳
 - ۴-۴-۳-۲- شاخص سایش سنگ ۴۳
 - ۵-۳-۲- خواص الاستیسیته و پلاستیسیته ۴۶
- ۴-۲- تقسیم بندی سنگ‌ها بر اساس شاخص‌های حفاری ۴۸

۴۸.....	۱-۴-۲- سنگ‌های آذرین.....
۴۸.....	۱-۱-۴-۲- سنگ‌های آذرین ساینده.....
۴۹.....	۲-۱-۴-۲- سنگ‌های آذرین نیمه ساینده.....
۴۹.....	۳-۱-۴-۲- سنگ‌های آذرین با ساینده کمی.....
۴۷.....	۲-۱-۴-۲- سنگ‌های آذرین تجزیه شده.....
۴۹.....	۲-۴-۲- سنگ‌های متامورفیک.....
۴۹.....	۱-۲-۴-۲- سنگ‌های متامورفیک سخت و ساینده.....
۴۹.....	۲-۲-۴-۲- سنگ‌های متامورفیک نیمه سخت و نیمه ساینده.....
۴۹.....	۳-۲-۴-۲- سنگ‌های متامورفیک نرم.....
۴۹.....	۳-۴-۲- سنگ‌های رسوبی.....
۴۹.....	۱-۳-۴-۲- سنگ‌های سخت سیلیسی.....
۵۰.....	۲-۳-۴-۲- سنگ‌های رسوبی ساینده با سختی کم.....
۵۰.....	۳-۳-۴-۲- سنگ‌های رسوبی شکننده اما ساینده.....
۵۰.....	۴-۳-۴-۲- سنگ‌های رسوبی نسبتاً سخت اما فاقد ساینده گی.....

فصل سوم: روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

۵۲.....	۱-۳- مقدمه.....
۵۲.....	۲-۳- فرآیند تحلیل سلسله مراتبی.....
۵۳.....	۳-۳- گام‌های اصلی در روش AHP.....
۵۳.....	۱-۳-۳- مدل کردن مسئله تصمیم‌گیری.....
۵۴.....	۲-۳-۳- محاسبه وزن عناصر در AHP.....
۵۶.....	۳-۳-۳- محاسبه نرخ ناسازگاری.....
۵۷.....	۴-۳- تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی (FDAHP).....

فصل چهارم: ارزیابی و پیش‌بینی قابلیت حفاری سنگ

- ۴-۱- مقدمه ۶۱
- ۴-۲- نظرسنجی از متخصصان حفاری ۶۴
- ۴-۳- یافتن وزن پارامترها با استفاده از روش FDAHP ۷۱
- ۴-۴- انتخاب و رده‌بندی پارامترهای مورد استفاده در طبقه‌بندی ۷۴
- ۴-۴-۱- مقاومت فشاری تک‌محوری ۷۶
- ۴-۴-۲- فاکتور سایش شیمازک ۷۷
- ۴-۴-۳- سختی ۷۸
- ۴-۴-۴- بافت ۷۹
- ۴-۴-۵- مدول الاستیسیته (مدول یانگ) ۸۰
- ۴-۵- سیستم طبقه‌بندی کلی و پیش‌بینی قابلیت حفاری در سنگ ۸۱
- ۴-۶- انتخاب روش حفاری مناسب در معادن روباز با استفاده از شاخص RPi ۸۲

فصل پنجم: مطالعات موردی در معادن

- ۵-۱- مقدمه ۸۵
- ۵-۲- جمع‌آوری نمونه از معادن ۸۵
- ۵-۳- آزمایش‌های انجام شده ۸۶
- ۵-۳-۱- آزمایش‌های مکانیک سنگ ۸۶
- ۵-۳-۲- مطالعات کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی ۸۶
- ۵-۳-۳- آزمایش‌های حفاری ۸۸
- ۵-۴- طبقه‌بندی قابلیت حفاری سنگ‌های مورد مطالعه ۸۹
- ۵-۵- پیش‌بینی سرعت حفاری سنگ‌ها با استفاده از شاخص جدید ۹۰
- ۵-۶- پیش‌بینی سرعت حفاری با قطرهای مختلف با استفاده از شاخص جدید ۹۱

فصل ششم: بحث و نتیجه‌گیری

۵-۱- بحث و نتیجه‌گیری ۹۵

۵-۲- پیشنهادات ۹۶

مراجع

مراجع ۹۸

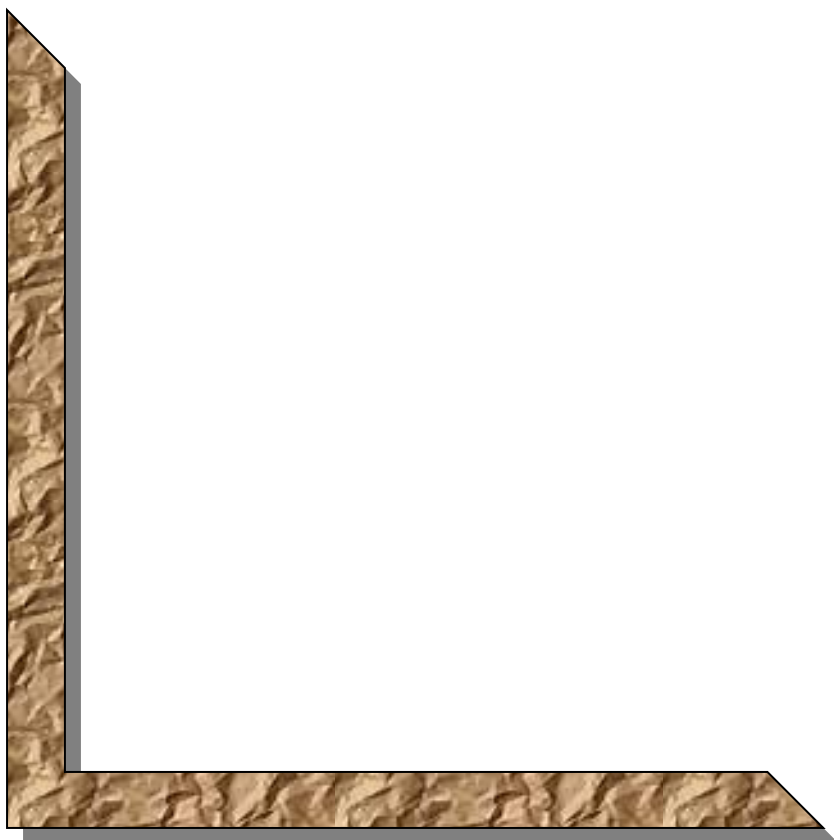
پیوست

پیوست ۱۰۱



فصل اول

مقدمه



۱-۱- مقدمه

حفاری به عنوان یک عملیات مهندسی، در زمینه‌های مختلف فنی و مهندسی از جمله مهندسی معدن، مهندسی نفت، عمران و آب‌های زیرزمینی کاربردهای وسیع و تعیین کننده‌ای دارد. بسته به روش حفاری و نوع ماشین‌آلات به کاربرده شده، حجم عملیات انجام گرفته در زمینه‌های مختلف متفاوت از همدیگر می‌باشد. حفاری با قطرهای ۵/۰ 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 معدن کاری 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 بهینه سازی آن، شرایط را برای استخراج بهینه فراهم می‌سازد.

۱-۲- ضرورت تحقیق

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 توده سنگ

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.

در بحث پیرامون تأثیر خصوصیات ماده و توده سنگ بر فرآیند حفاری، متخصصان بسیاری با استفاده از پارامترهای مختلف رفتار سنگ‌ها را تشریح کرده‌اند. در سری تحقیقات انجام یافته گذشته، آزمایش‌ها و روش‌های استاندارد هم‌چون "اندیس سرعت حفاری ¹DRI" و "اندیس سایش سرمته ²BWI" برای ارزیابی قابلیت حفاری ماده سنگ‌ها ارائه شده که تحقیقات و مطالعات در معادن نشان می‌دهند که هیچ‌کدام از این اندیس‌ها تمامی پارامترهای بحرانی و کلیدی ماده سنگ را مورد توجه قرار نمی‌دهند و جامعیت لازم برای کاربردهای صحرایی را ندارند. همچنین با دقت در مطالعات مطالعات انجام شده قبلی به وضوح آشکار می‌گردد که نتایج این تحقیقات در مجموع به یک نتیجه واحد و یک رهیافت اساسی برای ارزیابی قابلیت حفاری سنگ‌ها نمی‌انجامد و یافته‌های ایت مطالعات عموماً واگرا بوده و توانایی و ابزار خاصی برای کاربران صنعتی و علمی این تحقیقات ارائه نمی‌نمایند.

مشکل عمده تحقیقات پیشین، مطالعه جداگانه پارامترهای مؤثر بر قابلیت حفاری سنگ‌ها است. این در حالی است که قابلیت حفاری هر سنگی به پارامترهای بسیار زیادی وابسته است که این پارامترها در ارتباط تنگاتنگ با هم می‌باشند. لذا دستیابی به یک روش جامع که بتوان با استفاده از آن قابلیت حفاری سنگ‌ها را مورد بررسی و ارزیابی قرار داد یکی از اهداف کلیدی محققان علم حفاری به شمار می‌رود.

در مهندسی سنگ به منظور ارزیابی رفتار توده و ماده سنگ، سیستم‌های طبقه‌بندی به عنوان ابزار کارآمد مطرح می‌باشند. لذا با توجه به طبیعت پیچیده و پارامترهای مؤثر متعدد در فرآیند حفاری، به نظر می‌رسد استفاده از یک طبقه‌بندی می‌تواند راه‌گشای مناسبی برای برطرف نمودن دشواری‌های موجود در

¹.Drilling Rate Index

².Bit Wear Index

ارزیابی قابلیت حفاری سنگ‌ها باشد. لذا با توجه به تمامی مطالب مذکور، ضرورت ارائه یک روش جدید برای ارزیابی قابلیت حفاری سنگ‌ها به خوبی مشخص می‌شود.

۳-۱- اهداف تحقیق

در طی این پروژه سعی شده است تا با بررسی منابع مختلف و تحقیقات گذشته، نقاط ضعف شاخص‌های مختلف و روش‌های ارائه شده پیشین به دقت مشخص شود و سپس با استفاده از آزمایش‌های دقیق و استفاده از نکات پیشنهادی تحقیقات موجود، یک روش جدید در قالب سیستم طبقه‌بندی جدید و جامعی جهت طبقه‌بندی سنگ‌ها از نظر قابلیت حفاری ارائه شود. هدف دیگر این تحقیق توسعه و پیشنهاد یک روش جدید برای انتخاب روش حفاری مناسب بر اساس مشخصات سنگ می‌باشد. ارزیابی و پیش‌بینی سرعت حفاری با استفاده از سیستم طبقه‌بندی جدید نیز یکی از اهداف این طرح می‌باشد.

۴-۱- ساختار پایان‌نامه

پس از مقدمه، در فصل دوم این تحقیق، تأثیر پارامترهای مربوط به مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ بر سرعت حفاری مورد بحث قرار گرفته است. برای این منظور با استفاده از منابع 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.

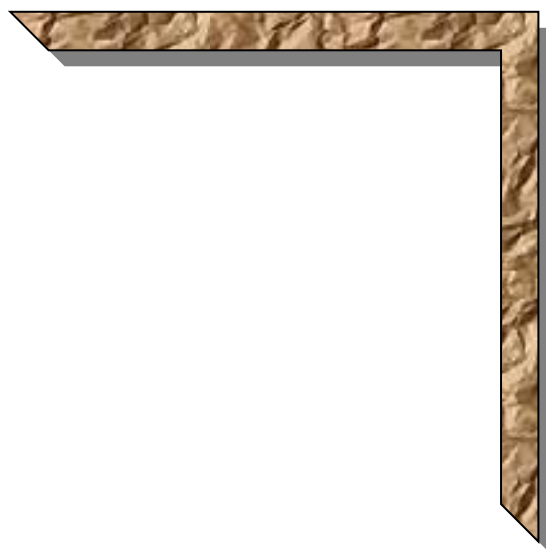
در فصل سوم، کلیات روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و نیز روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی (FDAHP) به طور اجمالی مورد بررسی قرار گرفته است.

در فصل چهارم، با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی و نظرسنجی‌های انجام شده سیستم طبقه‌بندی جدیدی برای پیش‌بینی قابلیت نفوذپذیری و ماشین‌کاری سنگ‌ها ارائه شده است. برای این منظور، نتایج نظرات متخصصان مختلف در مورد اهمیت هر یک از پارامترهای مؤثر بر سرعت حفاری منعکس شده و کلیه محاسبات ریاضی مربوطه بر روی نتایج نظرسنجی، صورت گرفته است. در پایان این

فصل وزن هر یک از پارامترهای مورد استفاده در طبقه‌بندی آورده شده و ساختار کلی طبقه‌بندی و کلاس‌بندی سنگ‌ها بر اساس شاخص پیشنهادی ارائه شده است.

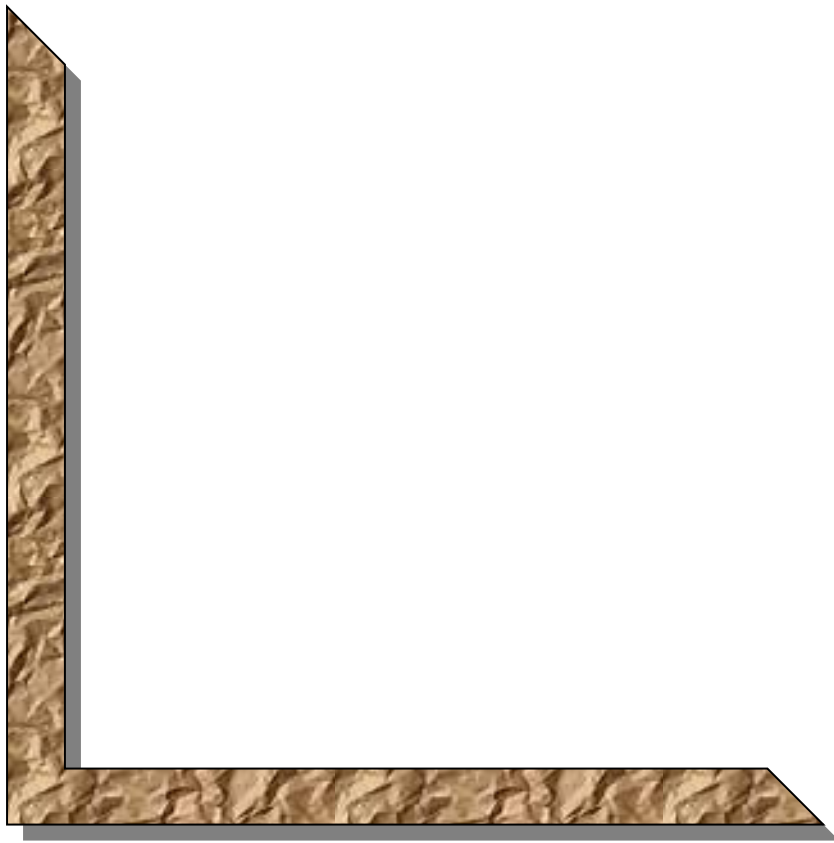
در فصل پنجم، به منظور اعتبارسنجی روش ارائه شده، تعدادی مطالعه موردی بر روی سنگ‌های مختلف انجام شده است. برای این منظور کلیه سنگ‌های مورد مطالعه با استفاده از سیستم طبقه‌بندی جدید، امتیازدهی و طبقه‌بندی شده‌اند. در پایان رابطه ریاضی بین شاخص قابلیت نفوذپذیری سنگ (RPI) و سرعت حفاری ضربه‌ای-دورانی پنوماتیکی چکش بالا ارائه شده است.

در فصل ششم، نتایج حاصل از این تحقیق و پیشنهاداتی برای مطالعات آینده ارائه شده است.



فصل دوم

بررسی تأثیر مشخصات سنگ بر سرعت حفاری



به جرأت می‌توان گفت مهم‌ترین 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 ماشین‌آلات، ارزیابی توان تولید معدن و پیش‌بینی سرعت حفاری خواهد کرد. در این تحقیق سعی شده کلیه منابع معتبر، به دقت از نظر رفتارشناسی توده سنگ در حین حفاری و نیز اهمیت و تأثیر هر یک از پارامترها مورد بررسی دقیق قرار گیرند.

تاکنون متخصصان متعددی نقش و تأثیر پارامترهای فیزیکی، مکانیکی و ساختاری توده سنگ را تشریح کرده و رابطه هر یک از این پارامترها را با سرعت حفاری مورد مطالعه قرار داده‌اند. مطالعات انجام شده پیشین و منابع معتبر در دسترس ((Akun & Karpuz (2005), (1995a), Ersoy & Waller (1995b), Hoseinie et al. (2007), Hoseinie et al. (2008), Jimeno et al. (1995), Jung et al. (1994), Kahraman (1999), Kahraman et al. (2000), Kaiser (1994) & McCreath, Li et al. (2000), Serradj (1996), Singh (1990), Singh et al. (1998), et al. (2006), Tanaino (2005), Thuro (1997), Wilbur & Lyman (1982), Wijk (1991) به طور مناسبی تأثیر پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ را بر سرعت حفاری مورد بررسی و مطالعه قرار داده‌اند. نتایج اکثر این تحقیقات به صورت رابطه ریاضی بین پارامترهای مختلف و سرعت حفاری ارائه شده است. از مهمترین ایرادات مطالعات مذکور می‌توان به این نکته اشاره نمود که تمامی این مطالعات ترکیب تأثیرات پارامترهای مختلف در سرعت حفاری سنگ‌ها مطالعه نکرده و هیچ‌گونه بحثی بر روی درجه اهمیت هر یک از پارامترها صورت نشده است.

با استناد به منابع مذکور، مجموعاً می‌توان مهم‌ترین و کلی‌ترین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی مؤثر بر سرعت حفاری را در سه خانواده اصلی زیر طبقه بندی کرد (شکل ۲-۱):

الف) مشخصات فیزیکی و کانی‌شناسی ماده سنگ

- چگالی

- بافت (اندازه و شکل دانه)

- نوع ماتریکس و درجه سیمانتی شدن

- تخلخل

ب) مشخصات مکانیکی

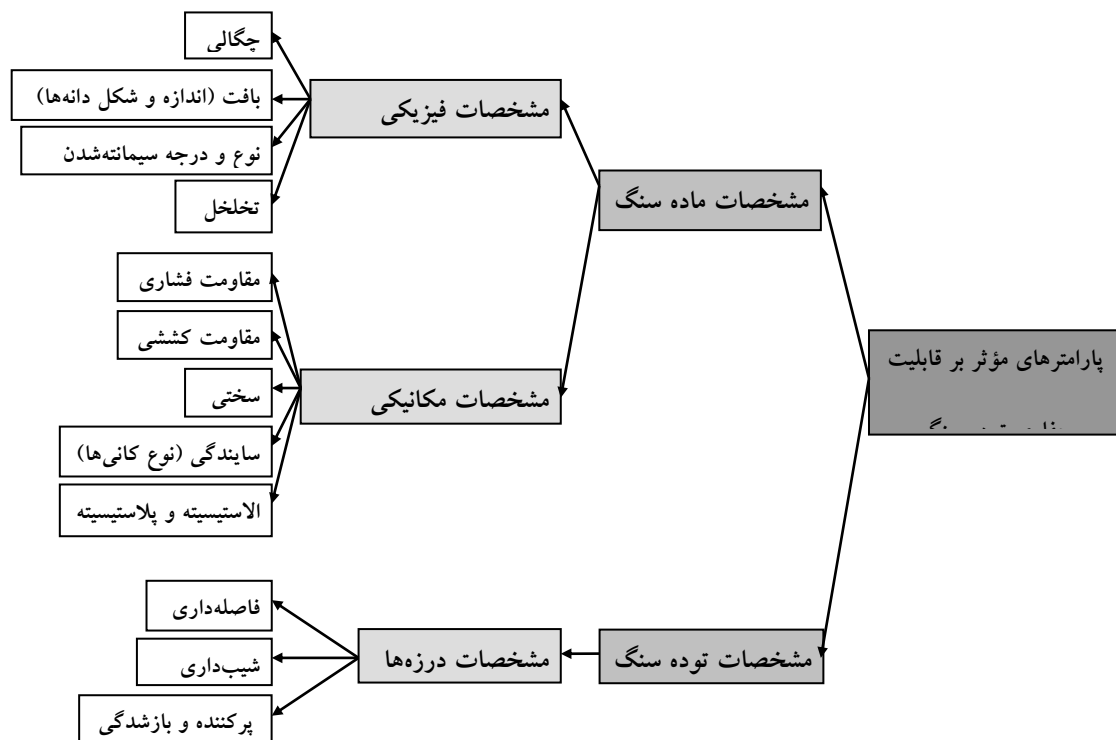
- مقاومت فشاری تک محوری

- مقاومت کششی

- سختی (مقیاس موهس)

- ساینده‌گی (نوع کانی‌های موجود)

- الاستیسیته و پلاستیسیته



شکل ۱-۲- پارامترهای ژئومکانیکی مؤثر بر سرعت حفاری

ج) مشخصات ساختاری توده سنگ

- درزه‌داری (فاصله‌داری، شیب و بازشدگی درزه‌ها)

- گسل

- لایه‌بندی.

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 این تحقیق، از آنجائی که هدف بررسی قابلیت حفاری و نفوذپذیری ماده سنگ و ارائه سیستم طبقه‌بندی مربوطه در این زمینه است لذا از بررسی پارامترهای مربوط به مشخصات ساختاری توده سنگ اجتناب شده و تنها به بررسی پارامترهای مربوط به مشخصات فیزیکی و مکانیکی ماده سنگ‌ها پرداخته شده است.

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

۲-۲- مشخصات فیزیکی و کانی‌شناسی سنگ‌ها

۲-۲-۱- 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 می‌شود 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 (اصانلو، ۱۳۸۶).

به طور معمول چگالی سنگ‌ها بین ۱/۹ تا ۳/۵ متغیر است (اصانلو، ۱۳۸۶). 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 ۱/۹ تا ۲/۷ متغیر است (اصانلو، ۱۳۸۶).

چگالی برخی از کانی‌های شاخص در حفاری در جدول ۱-۲ آورده شده است. همچنین جدول ۲-۲ چگالی ظاهری برخی از سنگ‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۲- چگالی برخی از کانی‌های شاخص در حفاری (اصانلو، ۱۳۸۶)

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

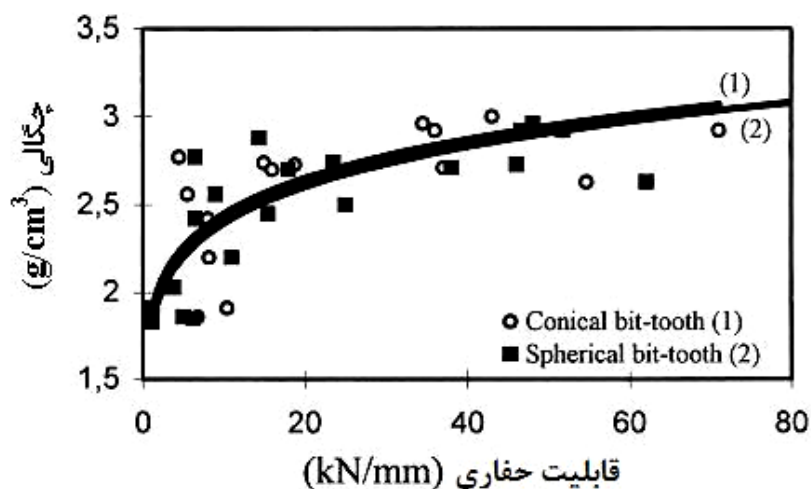
جدول ۲-۲- چگالی ظاهری برخی از سنگ‌ها (اصانلو، ۱۳۸۶)

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 دگرگونی	
گنیس	۲/۶۱-۳/۱۲
مرمر	۲/۵۱-۲/۸۶
کارتزیت	۲/۶۱-۲/۶۷
شیست	۲/۶-۲/۸۵

تاکنون متخصصان زیادی رابطه چگالی و سرعت حفاری را مطالعه کرده‌اند. از آن جایی که چگالی با مقاومت سنگ رابطه مستقیم داشته و با سرعت حفاری رابطه عکس دارد، هرچه سنگ متراکم‌تر و چگال‌تر باشد، سرعت حفاری کمتر خواهد بود.

قهرمان^۳ و همکاران در سال ۲۰۰۰ با مطالعه گسترده روی تعدادی از سنگ‌های کشور ترکیه نشان دادند 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.

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).

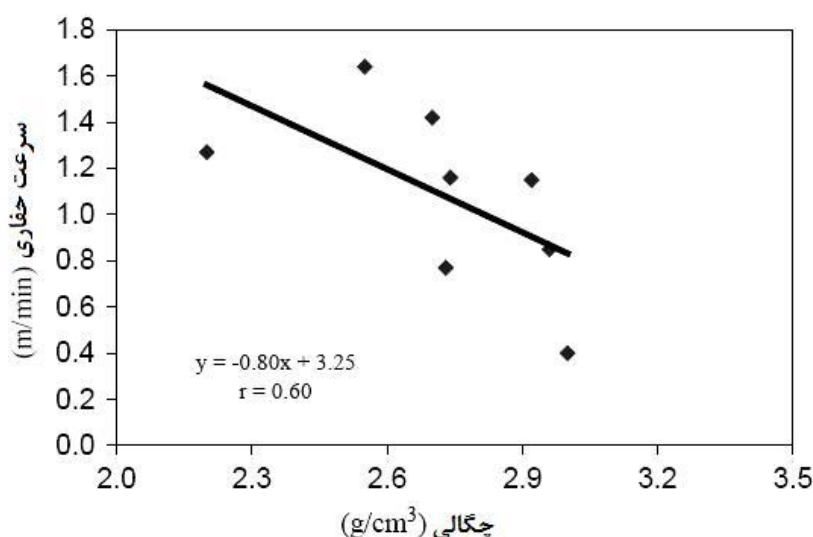


شکل ۲-۲- ارتباط چگالی سنگ و سرعت حفاری دورانی (Kahraman et al. 2000)

غیر از تحقیقات جامع ذکر شده که توسط 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

^۳ . Kahraman

به ذکر با اهمیت بودن این پارامتر در حفاری اکتفا کرده‌اند. لذا استفاده از این پارامتر به عنوان یک پارامتر منفرد برای پیش‌بینی سرعت حفاری و ارزیابی قابلیت حفاری سنگ با توجه به پیشینه ضعیف تحقیقاتی پیشنهاد نمی‌شود.



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

۲-۲-۲- بافت

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

از نظر دانه‌بندی، هرچه سنگ دانه درشت‌تر باشد قابلیت حفاری سنگ افزایش یافته و راحت‌تر می‌توان در آن حفاری کرد (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 (Ersoy & Waller, 1995a).

در تقسیم‌بندی رایج در حفاری، بافت سنگ‌ها بر اساس دو عامل اندازه و شکل دانه‌ها در چهار گروه تقسیم‌بندی می‌شوند (اصانلو، ۱۳۸۶):

۱- دانه‌های

۲- پورفیری

۳- شیشه‌ای

۴- تخریبی مانند ماسه سنگ.

مشخص‌ترین بافت در این تقسیم‌بندی بافت دانه‌های است که در سنگ‌های آذرین با توجه به اندازه دانه‌ها انواع آن در چند زیرگروه تقسیم‌بندی می‌شود (اصانلو، ۱۳۸۶):

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 طبقه‌بندی‌های بسیار جامعی وجود دارد که می‌توان در متون کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی آن‌ها را جستجو کرد. با این حال در کارهای مهندسی به ویژه حفاری روباز و حفاری مکانیزه توسط TBM و رودهدرها تشریح بافت به صورت کیفی نمی‌تواند چندان کارساز باشد. لذا همواره یافتن یک روش برای کمی کردن ویژگی‌های بافت یک سنگ آرمان محققان مهندسی حفاری و زمین‌شناسی مهندسی بوده است.

۲-۲-۱- ضریب بافت

ضریب بافت^۴، جامع‌ترین و معتبرترین روش کمی کردن بافت یک سنگ است که توسط هوارس و رولند^۵ در سال ۱۹۸۷ ارائه شده است (Ersoy & Waller, 1995a). این شاخص با رابطه عمومی زیر قابل محاسبه است:

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

^۴ . Texture Coefficient

^۵ . Howarth & Rowland

(۱-۲)

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

FF_0 : میانگین حسابی فاکتور شکل برای دانه‌های N_0

AR_1 : میانگین حسابی نسبت طول بر قطر در دانه‌های N_1

AF_1 : فاکتور زاویه که برای ذره‌های N_1 محاسبه می‌شود.

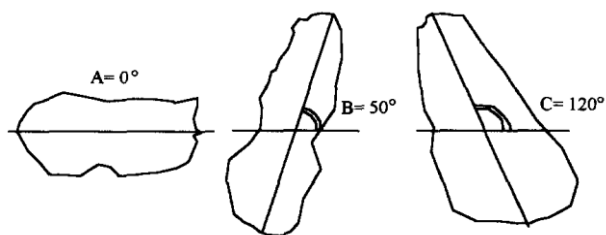
وزن مساحت (AW) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$(۲-۲) \quad AW = \frac{\text{(مساحت ناحیه مرجع)}}{\text{(مساحت دانه‌های درون مرز ناحیه مرجع)}}$$

فاکتور شکل در رابطه ضریب بافت معرف انحراف دانه از حالت گردبودن 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:

$$(۳-۲) \quad \text{فاکتور شکل} = \frac{4\pi (\text{محیط})^2}{\text{مساحت}}$$

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



شکل ۲-۴ - مفهوم فاکتور زاویه

جهت یافتگی 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 می‌شود. 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 می‌کند. تفاوت زاویه‌ای در نه کلاس مختلف دسته‌بندی می‌شود، برای هر کلاس یک وزن وجود دارد.

فاکتور زاویه از جمع کلاس‌ها و تقسیم آن‌ها بر کل اعداد زاویه‌ای به شرح رابطه (۲-۴) محاسبه

میشود:

$$AF = \sum_{i=1}^n \left[\frac{X_i}{\frac{N(N-1)}{2}} \right] i \quad (2-4)$$

که در آن:

N : تعداد کل دانه‌های کشیده و طویل

X_i : شماره تفاوت زاویه‌ای در هر کلاس

i : فاکتور وزن‌دهی و شماره کلاس

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	$30 < \theta_{DMAX} \leq 40$	۴
۵	$40 < \theta_{DMAX} \leq 50$	۵
۶	$50 < \theta_{DMAX} \leq 60$	۶
۷	$60 < \theta_{DMAX} \leq 70$	۷
۸	$70 < \theta_{DMAX} \leq 80$	۸
۹	$80 < \theta_{DMAX} \leq 90$	۹

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^۶ شده و رقومی می‌شوند. پس از رقومی‌شدن عکس‌ها ابتدا یک محدوده مرجع^۷ یا 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 شده 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 ۲-۱) تعیین شده و میزان ضریب بافت محاسبه می‌شود.

شکل دانه‌های سنگ به عنوان بحرانی‌ترین پارامتر مؤثر در قابلیت ساینده‌گی سنگ‌ها مطرح می‌باشد. دانه‌های گوشه‌دار کشیده و ذرات ریز سنگ باعث کاهش سرعت حفاری و افزایش قابلیت ساینده‌گی سنگ‌ها می‌شود. ارزوی و والر^۸ (۱۹۹۵) در تحقیقات خود نشان دادند که با افزایش گوشه‌داری دانه‌های سنگ، سرعت حفاری اکتشافی کاهش و میزان سایش سرمته افزایش می‌یابد (Ersoy & Waller, 1995a).

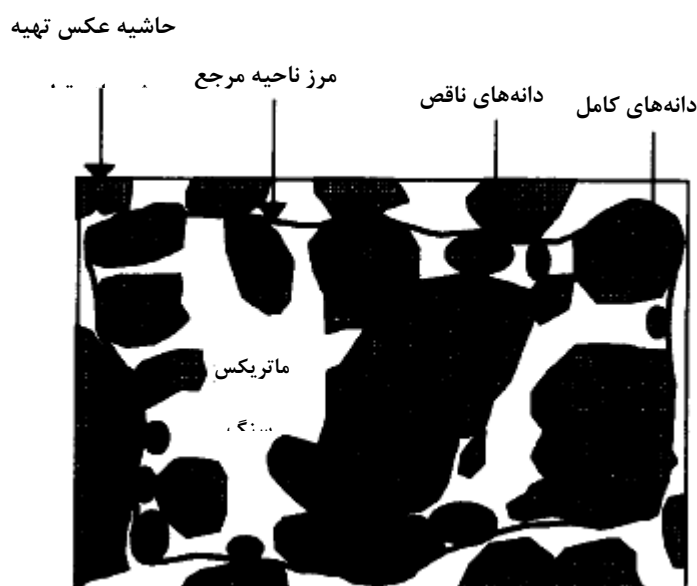
تاکنون محققان زیادی با استفاده از کارهای آزمایشگاهی و صحرایی بر اهمیت و تأثیر بافت بر قابلیت حفاری و ساینده‌گی سنگ‌ها تأکید کرده‌اند. از جمله جامع‌ترین این تحقیقات می‌توان به تحقیق ارزوی و والر (۱۹۹۵) اشاره کرد. ایشان با انجام مطالعات آزمایشگاهی دریافتند که در سه نوع مته مختلف (مته‌های

^۶ . Autocad

^۷ . Reference Boundry

^۸ . Ersoy & Waller

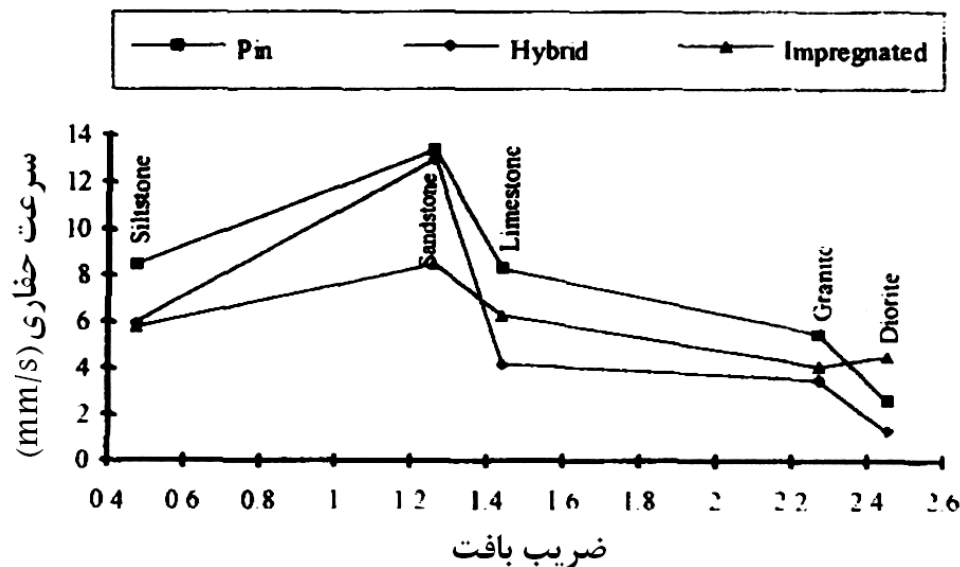
سوزنی، هیبریدی و اشباع شده) با افزایش ضریب بافت سرعت حفاری با لحاظ فراز و نشیب کاهش می‌یابد (شکل ۲-۶).



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

در تحقیق جامع دیگری که توسط اوزترک و همکارش^۹ 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). علمی اسدزاده و معماریان، در تحقیق نسبتاً جامعی رابطه بین ساینده‌گی و ضریب بافت را در تعدادی از سنگ‌های تزئینی ایران مورد بررسی قرار داده‌اند (علمی اسدزاده و معماریان، ۱۳۸۵). با این حال به رغم تحقیق مناسب، با توجه به منحنی‌ها و روابط ریاضی بسیار ضعیف، نتیجه مطلوبی از این تحقیق حاصل نشده است.

^۹ . Ozturk



شکل ۲-۶- ارتباط ضرب بافت و سرعت حفاری اکتشافی (Ersoy & Waller, 1995a)

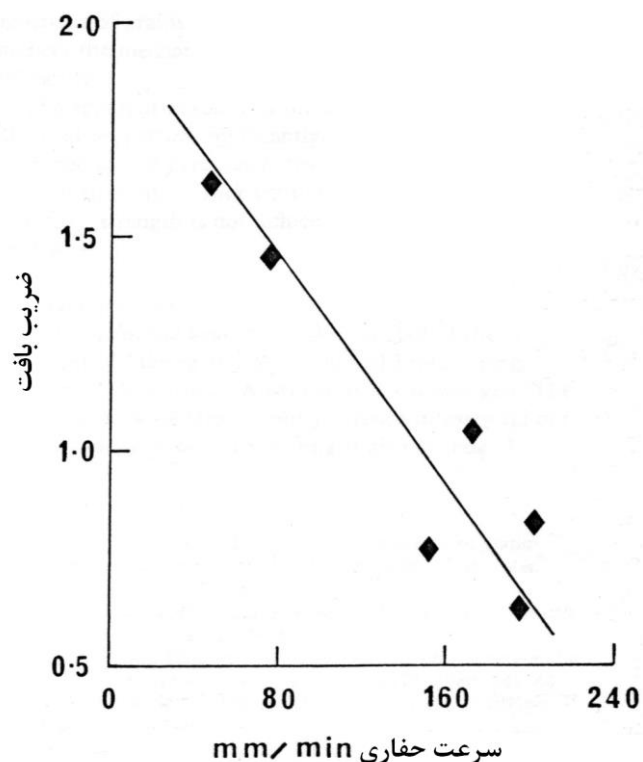
رائو و میسرا^{۱۰} در کتاب "اصول حفاری در سنگ" رابطه سرعت حفاری و ضرب بافت را به صورت شکل‌های ۲-۷ و ۲-۸ نشان داده اند (Rao & Misra, 1998). از نظر طبقه‌بندی نیز تاکنون ویلبر^{۱۱} (۱۹۸۶) و حسینی و همکاران (۲۰۰۸) با در نظر گرفتن بافت به عنوان یک پارامتر مهم در قابلیت حفاری سنگ‌ها، بافت و اندازه دانه‌ها را در سیستم طبقه‌بندی خویش برای پیش‌بینی قابلیت حفاری به کار برده‌اند. جدول ۲-۴ و ۲-۵ امتیازدهی و طبقه‌بندی بافت را در طبقه‌بندی ویلبر و حسینی و همکاران (RDi) نشان می‌دهند.

جدول ۲-۴- امتیازدهی به بافت سنگ در طبقه بندی ویلبر (Wilbur, 1982)

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

¹⁰ . Rao & Misra

¹¹ .Wilbur



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

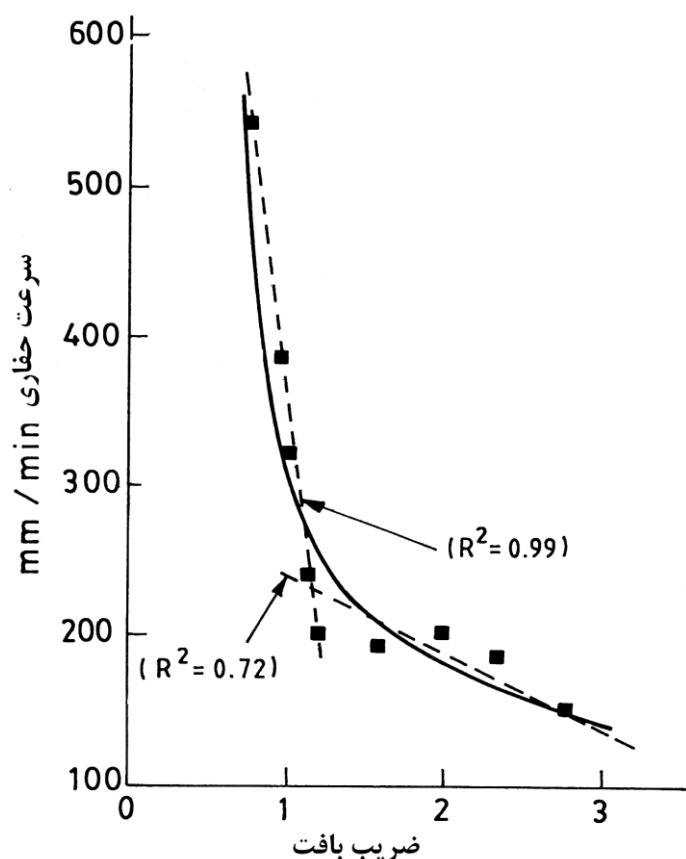
جدول ۲-۵- امتیازدهی به بافت سنگ در طبقه بندی RDi (Hoseinie et al. 2008)

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

۲-۲-۳- درجه سیمانده شدن و نوع خمیزه

مهم ترین خصوصیت فیزیکی سنگ ها، یعنی نیروی به هم چسبی، حاصل نیروی جاذبه بین مولکول های یک جسم یا ماده است. به عبارت دیگر نیروی به هم چسبی یک نیروی درون زاست و در مقابل نیروهای خارجی جدا کننده مولکول ها، جسم را مقاوم می کند. 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 (اصانلو، ۱۳۸۶). بنابراین هرچه فاصله سطح تماس ذرات کمتر باشد، مقدار آن بیشتر است و در نتیجه نیروی

به هم‌چسبی 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 هم‌چسبی کمتری وجود دارد.



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

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 هم‌چسبی 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 هم‌چسبی ندارند (اصانلو، ۱۳۸۶).

با توجه به مطالب مذکور سنگ‌ها را بر اساس میزان نیروی به هم‌چسبی به چهار دسته تقسیم می‌کنند (اصانلو، ۱۳۸۶):

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

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

ج) سنگ غیرسیمان‌های 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 و رسی می‌باشد.

تاکنون محققان مختلف به اهمیت سیمانه‌شدن در قابلیت حفاری و سرعت حفاری سنگ‌ها اشاره کرده‌اند. اما از آنجایی که این پارامتر یک پارامتر کیفی و تشریحی است، ارتباط ریاضی خاص یا کمیت شناخته شده‌ای برای نشان دادن رابطه بین سیمانه‌شدن و سرعت حفاری پیشنهاد نشده است. بدیهی است که با افزایش کیفیت سیمانه‌شدن و نیز افزایش مقاومت سیمان سنگ، سرعت حفاری و قابلیت حفاری سنگ کاهش پیدا می‌کند.

۲-۲-۴- 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 متخلخل تر 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 می گیرد.

تخلخل سنگ را می توان از نظر نوع به دو گروه عمده تقسیم بندی کرد (وفائیان، ۱۳۷۱):

الف) تخلخل با حفره های مرتبط

ب) تخلخل با حفره های مجزا

چنانچه فضای خالی یک سنگ به همدیگر راه داشته باشد، این نوع تخلخل را تخلخل مرتبط می نامند. وجود این نوع تخلخل باعث می شود که ساختار فیزیکی و ماکروسکوپی سنگ حالت پفکی به خود شده و از استحکام کافی برخوردار نباشد. در این صورت مقاومت سنگ به شدت کاهش یافته و در نتیجه قابلیت حفاری در سنگ افزایش می یابد. تخلخل سنگ ها در طبیعت از صفر تا ۵۵ درصد متغیر می باشد (وفائیان، ۱۳۷۱).

از آنجائی که تخلخل با چگالی و مقاومت فشاری سنگ ها رابطه معکوس دارد، لذا با اندازه گیری این دو پارامتر می توان از میزان تخلخل سنگ نیز به صورت غیر مستقیم اطلاع حاصل کرد.

از عوامل مهم دیگری که در میزان تخلخل سنگ ها تأثیر اساسی دارد، زمان تشکیل آن ها است. به طوری که سنگ های قدیمی تر تخلخل بیشتری دارند، مثلاً یک نمونه ماسه سنگ کامبرین دارای تخلخل ۱۱٪ و ماسه سنگ کرتاسه دارای تخلخل ۳۴٪ است. همچنین عمق قرار گرفتن سنگ ها در مقدار تخلخل آن ها 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 سنگ های رسوبی، گچ با تخلخل ۴۰٪ از سایر سنگ ها تخلخل بیشتری دارد و در سنگ های آذرین پومیس بیشترین تخلخل را دارد. در سنگ های آذرین تخلخل معمولاً بین یک تا دو درصد است مگر اینکه هوازدگی یافته باشند که در این صورت بر حسب شدت هوازدگی ممکن است تخلخل آن ها به ۲۰٪ هم برسد (وفائیان، ۱۳۷۱)..

حتی درصد کمی از تخلخل هایی که به صورت درزه و ترک های مویینی هستند به اندازه درصد زیادی از تخلخل هایی که به شکل حفره های غیر درزه ای اند تأثیر دارند، زیرا تخلخل درزه ای تأثیر عمده ای بر خواص مکانیکی سنگ دارد (وفائیان، ۱۳۷۱).

اندازه گیری 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

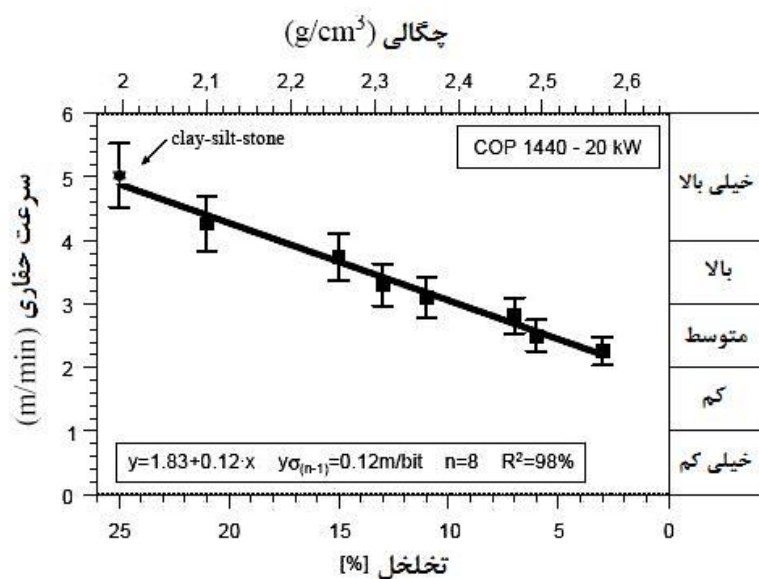
تخلخل یک سنگ بستگی به شکل و اندازه دانه‌هایی دارد که آن را تشکیل می‌دهند و نیز مربوط به میزان تنوع دانه‌ها، سیمان‌شدن آن‌ها و نوع تجمع کانی‌ها است. اگر سنگ از دانه‌های کروی با اندازه‌های متفاوت تشکیل شده باشد حداقل تخلخل را خواهد داشت، در صورتی که اگر دانه‌ها زاویه‌دار و بی‌شکل باشند، تخلخل زیادتر است. 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 هر کدام در گوشه یک مکعب باشند تخلخل سنگ $47/67\%$ و در صورتی که دانه‌ها در مرکز یک رمبوه‌درن قرار شده باشند تخلخل آن به $26/18\%$ می‌رسد (وفائیان، ۱۳۷۱).

تاکنون مطالعاتی بر روی تأثیر تخلخل بر روی قابلیت حفاری سنگ‌ها انجام شده است و محققان مختلفی به این ویژگی سنگ اشاره کرده‌اند. تورو (۱۹۹۷) در مقاله خویش رابطه بین تخلخل و سرعت حفاری و همچنین رابطه تخلخل و عمر سرشته را مورد بررسی قرار داده است. وی با انجام کلیه آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی چنین نتیجه شده 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. تورو و همکارانش 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 کرده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تخلخل و کاهش چگالی، سرعت حفاری به صورت خطی افزایش می‌یابد.

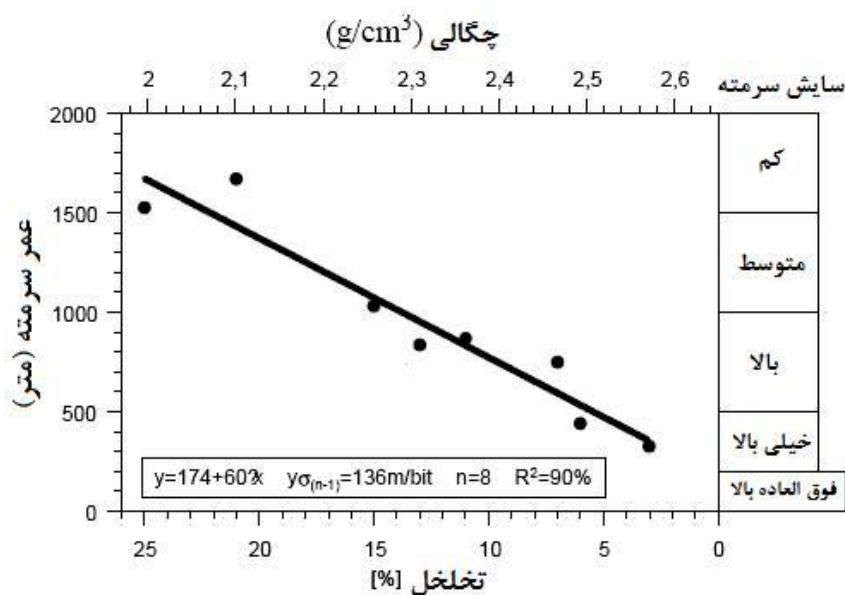
۲-۳- مشخصات مکانیکی سنگ‌ها

۲-۳-۱- مقاومت فشاری تک‌محوری

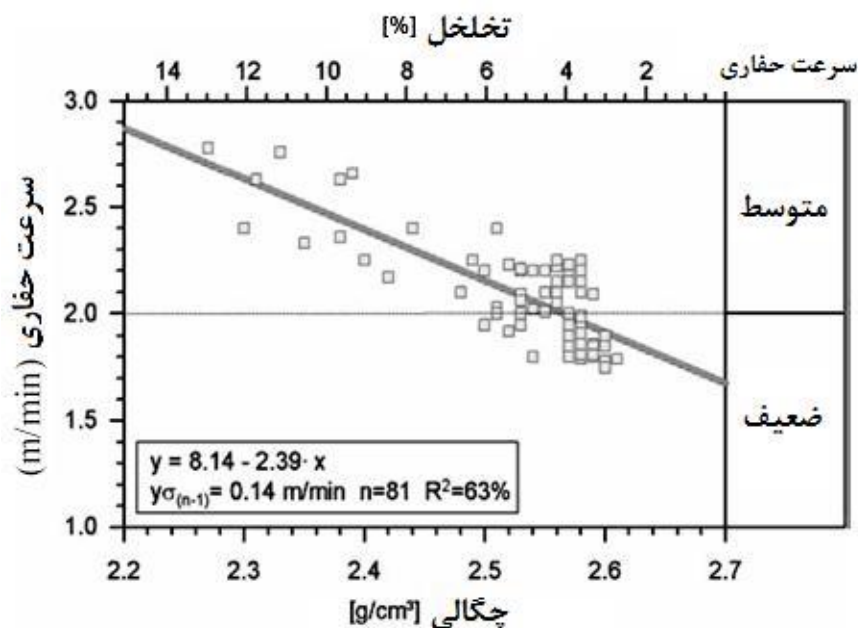
مقاومت میزان پایداری سنگ در مقابل تنش‌های خارجی است. این تنش‌ها ممکن است در حالت سکون (استاتیک) و یا در حالت متحرک (دینامیک) باشند (اصانلو، ۱۳۸۶). مقاومت فشاری را می‌توان به عنوان مهم‌ترین و پرکاربردترین ویژگی سنگ‌ها دانست. به دلیل اهمیت و نقش مقاومت در رفتارهای مهندسی سنگ، مقاومت فشاری در اکثر طبقه‌بندی‌های مهندسی سنگ و در کاربردهای گسترده مکانیک سنگ وارد شده و جز لاینفک قضاوت‌های مهندسی در مورد یک سنگ و یک توده سنگ می‌باشد.



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



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



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

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، ۱۳۸۶):

- 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 (Jimeno et al., 1995).

مقاومت یک کانی به اندازه بلورهای آن بستگی 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 آركوزی 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 (Jimeno et al., 1995). 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 عکس‌العمل میان آن‌ها را کاهش می‌دهد.

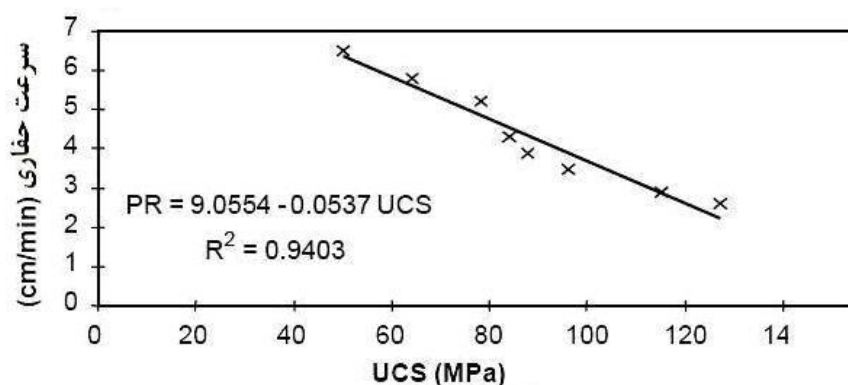
عمق تشکیل و درجه دگرگونی نیز بر مقاومت سنگ مؤثر است. برای مثال مقاومت لایه رسی نزدیک سطح زمین حدود ۲ تا ۱۰ مگاپاسکال می‌باشد در حالی که در سنگ‌های رسی که تحت دگرگونی معینی قرار شده باشند، مقاومت به ۵۰ تا ۱۰۰ مگاپاسکال می‌تواند برسد.

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 شیبستزیده 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 (Jimeno et al., 1995).

با توجه به مطالب گفته شده، مقاومت فشاری یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است 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 شده است.

آکون و کارپوز^{۱۲} (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 ۲-۱۲). قهرمان در سال ۱۹۹۹، مقاومت فشاری تک محوری سنگ را به همراه تعدادی از پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها، برای پیش‌بینی سرعت حفاری ضربه‌ای به طور جدی به کار برد. ایشان در نتیجه تحقیقات خویش سه رابطه تجربی برای پیش‌بینی سرعت حفاری^{۱۳} DTH و ضربه‌ای-دورانی چکش بالا و دورانی پیشنهاد کرد. قهرمان در مطالعات رگرسیونی 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 بالاترین همگرایی با سرعت حفاری بوده و از آن‌ها به عنوان پارامتر شاخص مشخصات سنگ در فرمول‌بندی خویش استفاده کرده است. 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.

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 سرشته نشان می‌دهد.



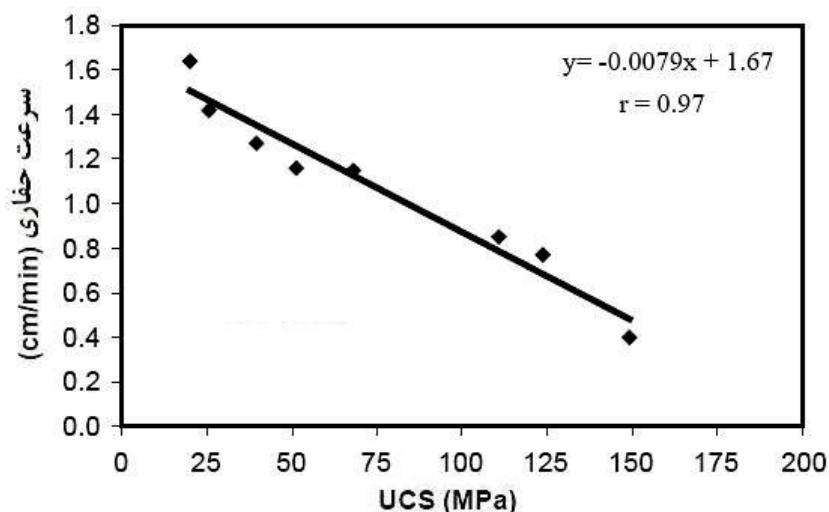
شکل ۲-۱۲- رابطه سرعت حفاری و مقاومت فشاری در ماسه سنگ (Akun & Karpuz, 2005)

¹² . Akun & Karpuz

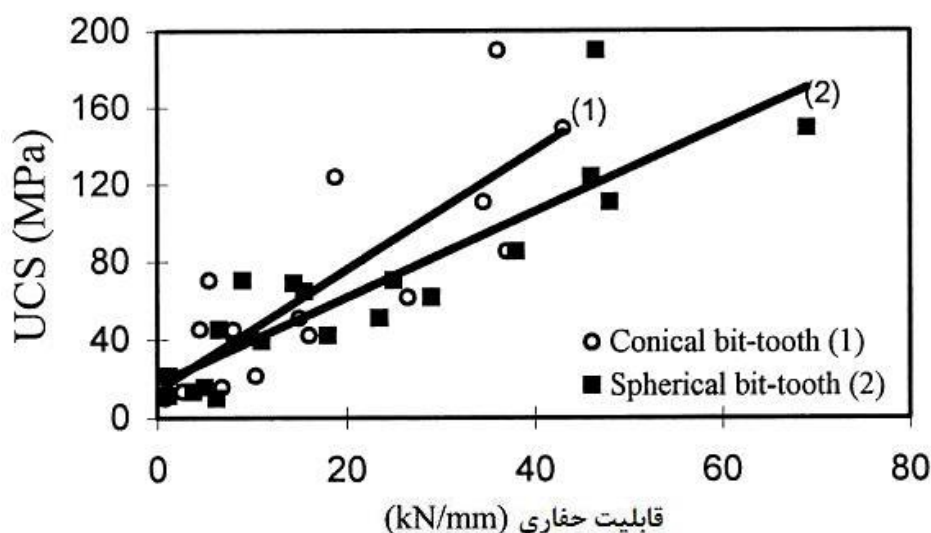
¹³ . Down The Hole

ارزوی و والتر (۱۹۹۵a) 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.

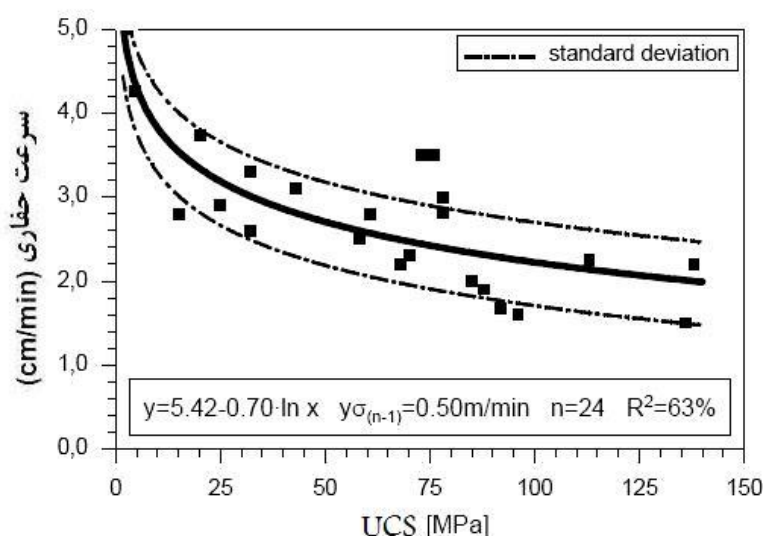
تورو و اسپان در سال ۱۹۹۶ ضمن طبقه‌بندی کلیه پارامترهای مؤثر در حفاری، یک رابطه ریاضی بین سرعت حفاری ضربه‌ای در تونل‌ها و مقاومت فشاری سنگ‌های اسلیتی و کوارتزیتی در کشور آلمان ارائه کرده است. شکل ۲-۱۵ منحنی ارائه شده توسط تورو را نشان می‌دهد



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



شکل ۲-۱۴- رابطه بین قابلیت حفاری و مقاومت فشاری در دو نوع سر مرته (Kahraman et al., 2000)



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

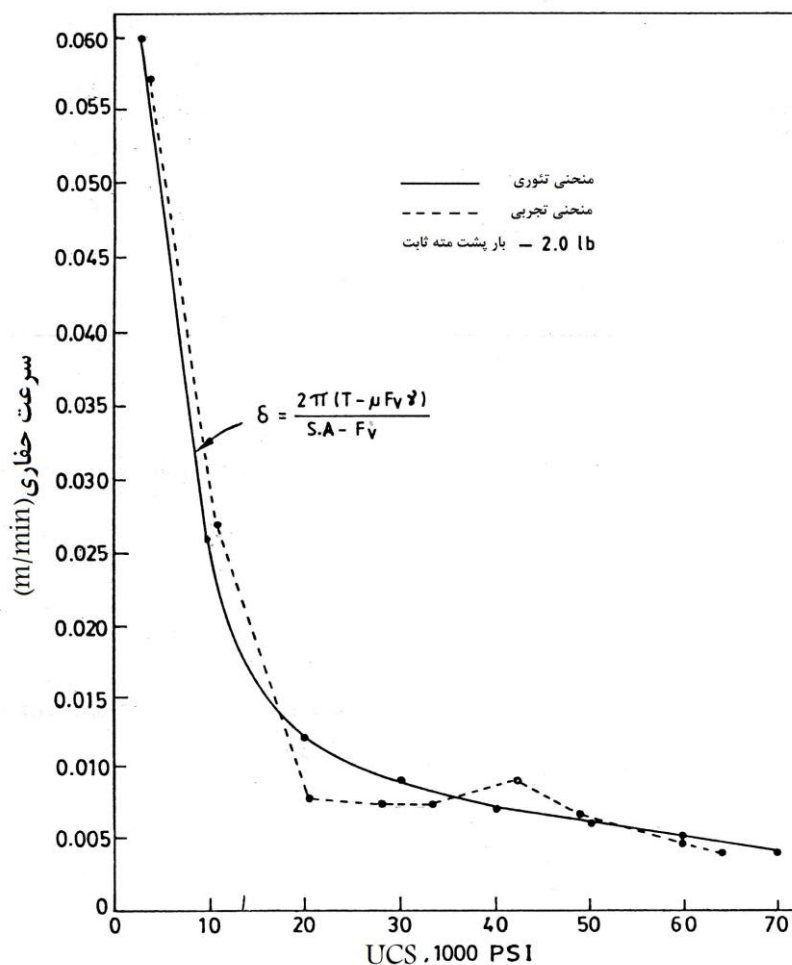
رائو و میسرا (۱۹۹۸) در کتاب اصول حفاری سنگ ارتباط مقاومت فشاری و سرعت حفاری را به صورت شکل ۲-۱۶ نشان داده است.

چنان‌چه از نتایج محققان گذشته و حاضر بر می‌آید مقاومت فشاری به عنوان مهم‌ترین پارامتر مهندسی سنگ، در مهندسی حفاری نیز همچون سایر شاخه‌های مهندسی معدن از اهمیت بسیار زیادی برخوردار می‌باشد. تنها طبقه‌بندی موجود در زمینه حفاری برای سنگ‌ها توسط حسینی و همکاران (۲۰۰۸) و به نام قابلیت حفاری توده سنگ‌ها RD_i^{14} ارائه شده است. در این طبقه‌بندی مقاومت فشاری به عنوان مهم‌ترین پارامتر فیزیکی و مکانیکی سنگ، امتیاز ۲۲ حداکثری را از مجموع ۱۰۰ امتیاز RD_i کسب می‌کند. نحوه طبقه‌بندی و امتیازدهی به سنگ‌ها از نظر مقاومت فشاری در سیستم RD_i در جدول ۲-۶ نشان داده شده است.

جدول ۲-۶- امتیازدهی به مقاومت فشاری در طبقه بندی RD_i (Hoseinie et al. 2008)

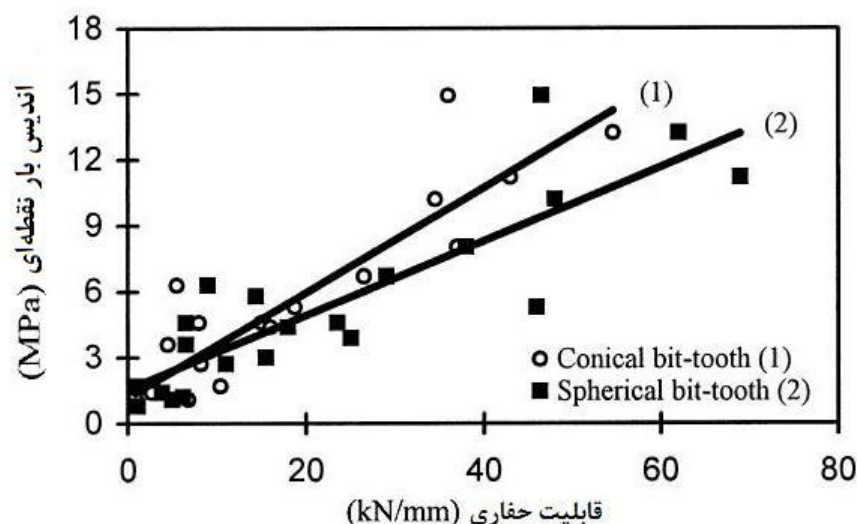
مقاومت فشاری تک محوری (MPa)	۱-۲۵	۲۵-۵۰	۵۰-۱۰۰	۱۰۰-۲۰۰	>۲۰۰
مقاومت خیلی کم	مقاومت کم	مقاومت متوسط	مقاومت بالا	مقاومت خیلی بالا	
۲۲	۱۶	۱۱	۶	۲	

¹⁴ . Rock mass Drillability index



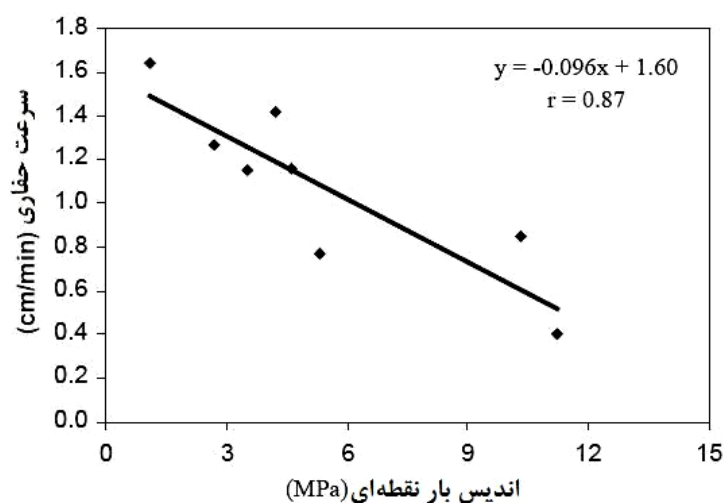
شکل ۲-۱۶- ارتباط مقاومت فشاری و سرعت حفاری (Rao & Misra, 1998)

کلیه تحقیقات انجام شده عموماً بر روی مقاومت فشاری تک‌محوری صورت شده است که در عمل انجام آزمایش و تعیین این مشخصه سنگ امری زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد. لذا در سال‌های اخیر تحقیقاتی صورت شده تا بتوان با روش‌های سریع‌تر و ارزان‌تر مقاومت سنگ را تخمین زده و رابطه آن را با حفاری مشخص کرد. 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 شده است. معتبرترین تحقیقات موجود در این زمینه توسط قهرمان در کشور ترکیه انجام شده است (Kahrama et al. 1999). ایشان در تحقیقات خود نشان داد که در حفاری دورانی با دو نوع سرمته، با افزایش میزان بار نقطه‌ای قابلیت حفاری سنگ‌ها به صورت خطی کاهش می‌یابد (شکل ۲-۱۷). شایان ذکر است شاخص قابلیت حفاری ارائه شده توسط قهرمان با سرعت حفاری رابطه معکوس دارد.



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

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



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

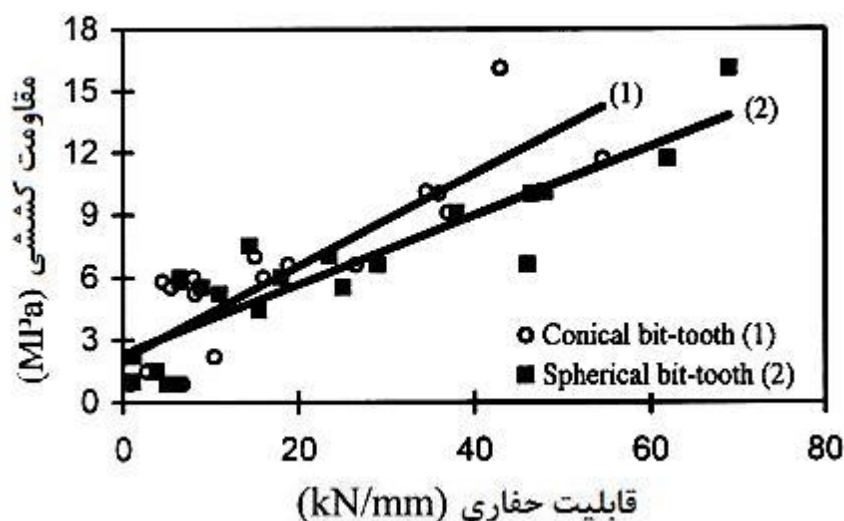
۲-۳-۲- مقاومت کششی

مقاومت کششی به عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای مقاومتی سنگ مطرح می‌باشد. مقاومت کششی سنگ در عملیات حفاری و انتخاب نوع سیستم حفاری مفید است (اصانلو، ۱۳۸۶) و تقریباً ۱۰ درصد مقاومت فشاری سنگ است و در مباحث حفاری، انفجار و معادن زیرزمینی (پایداری سقف) از اهمیت ویژه

ای برخورداری است (اصالو، ۱۳۸۶). مقاومت کششی در واقع ماکزیمم تنش کششی است که یک سنگ می‌تواند تحمل کند و برخلاف مقاومت فشاری که بررسی و مطالعات در مورد آن به حد وسیع و گسترده‌ای انجام شده است. در مورد مقاومت کششی شاید به دلیل دشواری در تهیه نمونه و انجام آزمایش، مطالعه کافی انجام نشده است.

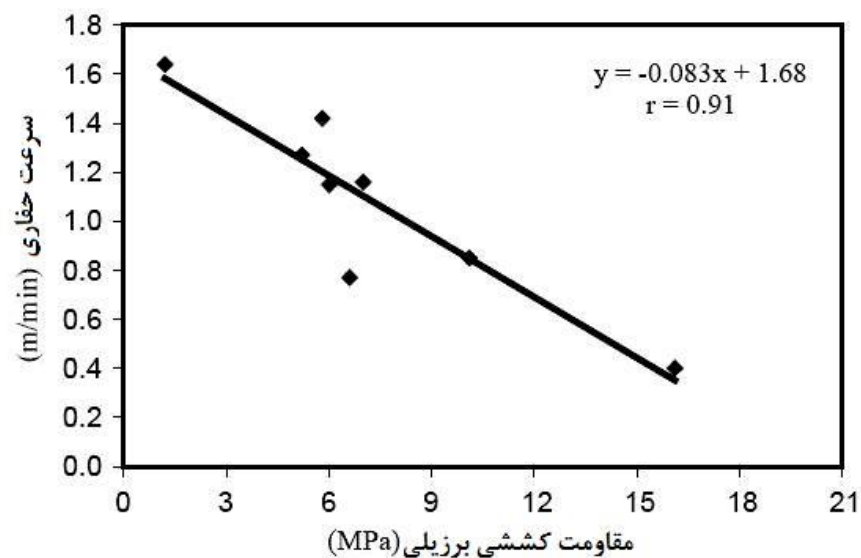
در مهندسی حفاری، مقاومت کششی نشانگر مقاومت مرزی دانه‌ها و ماتریکس می‌باشد (Ersoy & Waller, 1995a). لذا با افزایش مقاومت و اتصال بین دانه و خمیره مقاومت کششی سنگ افزایش می‌یابد. اتصال و به هم چسبیدگی شدید خمیره و دانه باعث افزایش ساینده‌گی سنگ و در نهایت باعث کاهش سرعت حفاری می‌شود.

تاکنون محققان مختلفی به اهمیت مقاومت کششی سنگ در قابلیت حفاری اشاره و تأکید کرده‌اند. با این حال تحقیقات برجسته و معتبر در این زمینه توسط قهرمان از کشور ترکیه و تورو در کشور آلمان انجام شده است. قهرمان (۲۰۰۰) طی تحقیق جامعی رابطه سرعت حفاری دورانی و مقاومت کششی را به صورت شکل ۲-۱۹ ارائه کرده است.



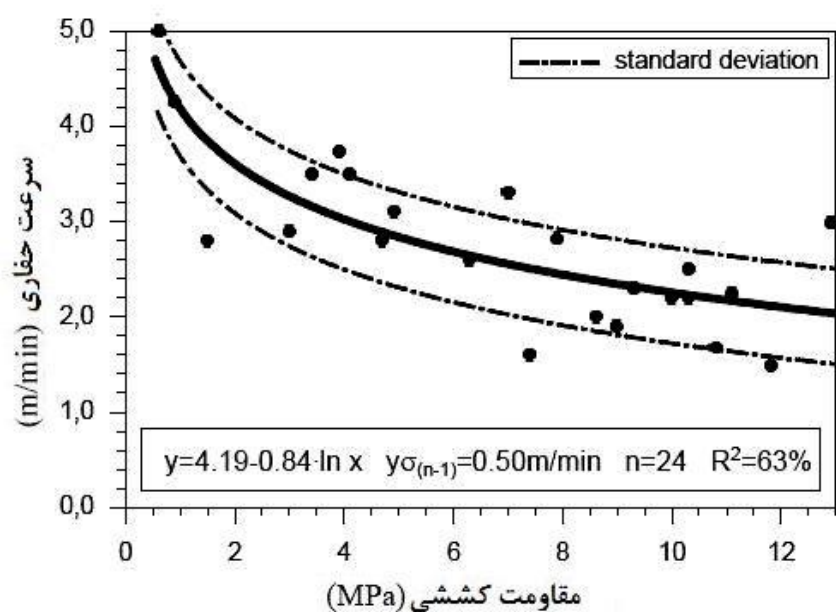
شکل ۲-۱۹- ارتباط مقاومت کششی و سرعت حفاری دورانی (Kahraman et al., 2000)

همچنین ایشان رابطه سرعت حفاری ضربه‌ای و مقاومت کششی (تست برزیلی) را به صورت رابطه خطی شکل ۲-۲۰ ارائه کرده است.



شکل ۲-۲۰- ارتباط مقاومت کششی و سرعت حفاری ضربه‌ای (Kahraman et al. 2003)

نتایج تحقیقات قهرمان و همکارانش نشان می‌دهد که مقاومت کششی با قابلیت حفاری سنگ‌ها و سرعت حفاری دورانی و ضربه‌ای در معادن روباز رابطه خطی معکوس دارد. تورو و اسپان در سال ۱۹۹۶ نشان دادند که مقاومت کششی با سرعت حفاری ضربه‌ای در تونل‌سازی به روش سنتی رابطه لگاریتمی معکوس دارد (شکل ۲-۲۱).



شکل ۲-۲۱- ارتباط مقاومت کششی و سرعت حفاری ضربه‌ای (Thuro & Spaun, 1996)

۲-۳-۳- 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 (اصانلو، ۱۳۸۶). 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 (اصانلو، ۱۳۸۶):

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 خراش‌دهنده 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 ساینده‌گی 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 همگنی سنگ‌ها: به طور معمول سنگ‌هایی که از یک کانی تشکیل شده‌اند، درجه سختی کمتری دارند.

از آن جا 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 شده شده است. در این معیار، هر کانی با عدد سختی بالاتر می‌تواند کانی با عدد سختی پایین‌تر را خراش دهد (جدول ۷-۲ و ۸-۲).

جدول ۷-۲- سختی کانی‌ها بر اساس مقیاس موهس (اصانلو، ۱۳۸۶)

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	با شیشه خراش برمی‌دارد
کوارتز	۷	روی فولاد و شیشه خراش می‌اندازد
توپاز	۸	روی کوارتز خراش می‌اندازد
کراندم	۹	به غیر از کوارتز بر روی بقیه کانی‌ها خراش می‌اندازد
الماس	۱۰	بر روی همه کانی‌ها خراش می‌اندازد

جدول ۸-۲- سختی نسبی متوسط پاره‌ای از سنگ‌ها (اصانلو، ۱۳۸۶)

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
اوزیت آندريت	۶۰	۶/۲۵	مرمر	—	۳/۲

کانی‌هایی که جزو این مقیاس نباشند با کانی‌های استاندارد این مقیاس مقایسه شده و سختی نسبی آن‌ها تعیین می‌شود. 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 برینل^{۱۵}، 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 راک ول^{۱۶} که نفوذ خراش دهنده تحت اثر دو بار متوالی است — سختی را بر مبنای عمق نفوذ نفوذکننده در نمونه

¹⁵ . Brienell

¹⁶ . Rockwell

تعیین می‌کنند. از تست ویکرز^{۱۷} (نفوذ هرم الماسی در نمونه) نیز می‌توان برای تعیین سختی سنگ‌ها سود برد (وفائیان، ۱۳۷۱).

سختی دینامیکی سنگ‌ها را می‌توان توسط تست شر^{۱۸} تعیین کرد. در این تست چکشی نوک الماسی از ارتفاع معینی رها می‌شود و بر مبنای میزان برگشت چکش به حالت اولیه سختی سنگ تعیین می‌شود. از آنجا که ضریب برگشت که از روی سختی‌نمای تارخوو^{۱۹} تعیین می‌شود نیز غالباً به خاصیت الاستیسیته سنگ وابسته است، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که پارامترهای الاستیسیته و سختی دینامیک در ارتباط با یکدیگر است (وفائیان، ۱۳۷۱).

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^{۲۰} 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 کرد. در سال ۲۰۰۸ حسینی و همکاران با تکیه بر پیشنهاد جمینو سختی موهس را در سیستم طبقه‌بندی RDi به کار برده و میزان سختی سنگ‌ها را امتیازدهی کرده‌اند. 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 طبقه‌بندی RDi نشان داده شده است.

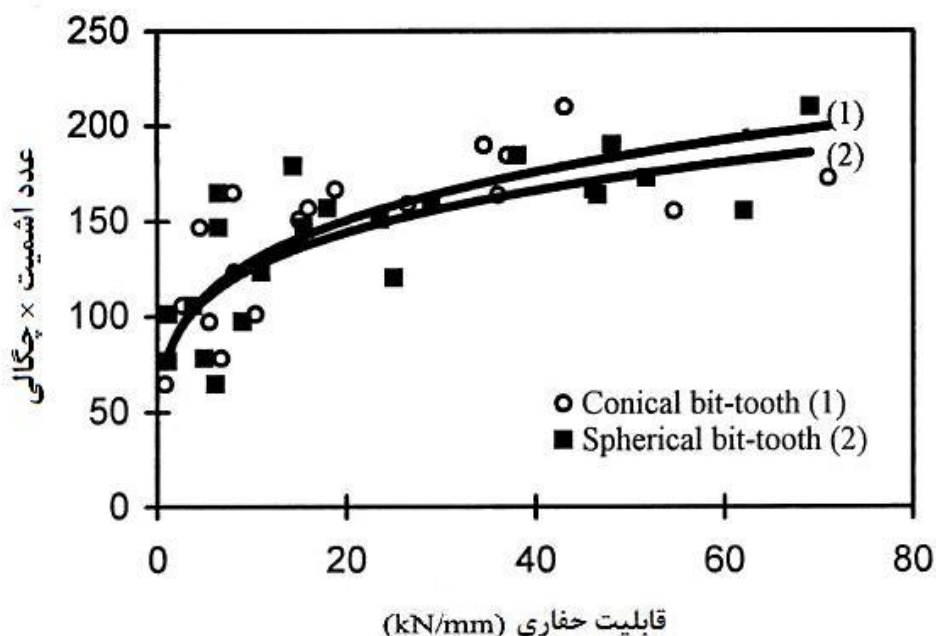
جدول ۲-۹- طبقه بندی سختی سنگ‌ها در سیستم طبقه بندی RDi (Hoseinie et al. 2008)

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

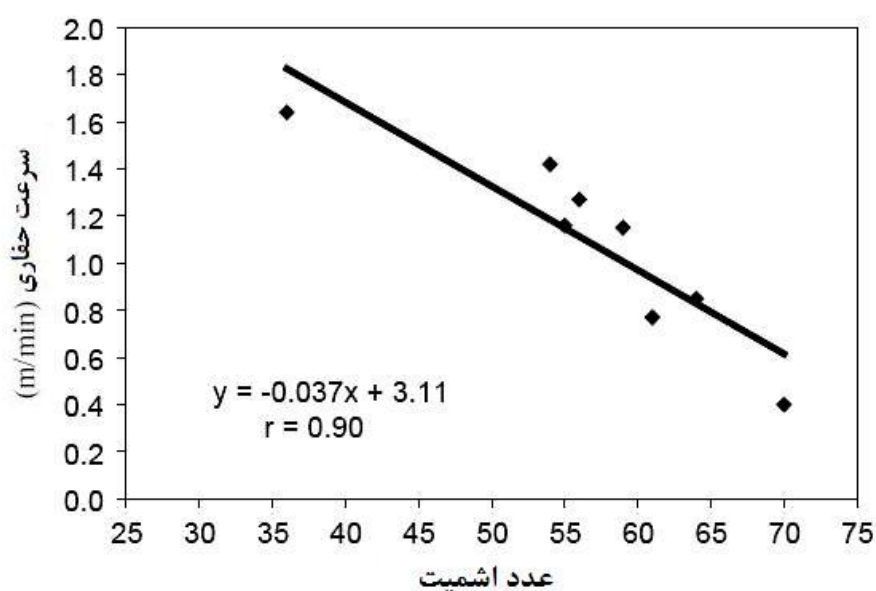
متأسفانه با اینکه بسیاری از محققان علم حفاری بر اهمیت سختی و نقش آن تأکید کرده‌اند با این حال تاکنون در منابع معتبر علمی، هیچ رابطه ریاضی و یا منحنی حاصل از کارهای تجربی برای بیان کیفیت ارتباط این دو کمیت ارائه نشده است.

¹⁷ . Vickers
¹⁸ . Shore
¹⁹ . Tarkhov
²⁰ . Jimeno

تنها روش غیر مستقیم تعیین سختی سنگ، استفاده از عدد چکش اشمیت است. معتبرترین تحقیقات موجود در این زمینه نیز توسط قهرمان و همکارانش در کشور ترکیه انجام شده است (Kahraman et al. 2000 & 2003). 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 ۲-۲۲ و ۲-۲۳).



۲-۲۱- ارتباط عدد چکش اشمیت و سرعت حفاری دورانی (Kahraman et al., 2000)



۲-۲۲- ارتباط عدد چکش اشمیت و سرعت حفاری ضربه‌ای (Kahraman et al. 2003)

۲-۳-۴- ساینده‌گری

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 خرده‌سنگ‌های گرد بر روی مته خراش‌های عمیق ایجاد می‌کنند و مانع از آن می‌شوند تا انرژی منتقل شده به سطح مته موجب خرد شدن سنگ شود (اصانلو، ۱۳۸۶). از سوی دیگر خرده‌های ریز و گرد سنگ نیز باعث صیقل دادن سرشته و کندی حفاری می‌شوند. سنگ‌هایی که خاصیت ساینده‌گی آن‌ها در حفاری باید مورد توجه قرار گیرد عبارتند از (اصانلو، ۱۳۸۶):

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

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

۳- سنگ‌های حاوی گارنت مثل گنیس گارنیت‌دار

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 توپاز، کروندوم و بریل چون به ندرت در سنگ‌ها وجود دارند، کمتر مورد توجه قرار می‌گیرند (اصانلو، ۱۳۸۶).

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

سیلیس بیشتری دارند مثل ماسه سنگ سیلیسی خاصیت ساینده‌گی بیشتری دارند. در جدول ۱۰-۲ میزان کوارتز موجود در برخی از سنگ‌های مهم نشان داده شده است.

۱۰-۲- میزان کوارتز موجود برخی از سنگ‌های مهم (Jimeno et al., 1995)

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

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

۲-۳-۴-۱- فاکتور ساینده‌گی شمیازک (F-abrasivity)

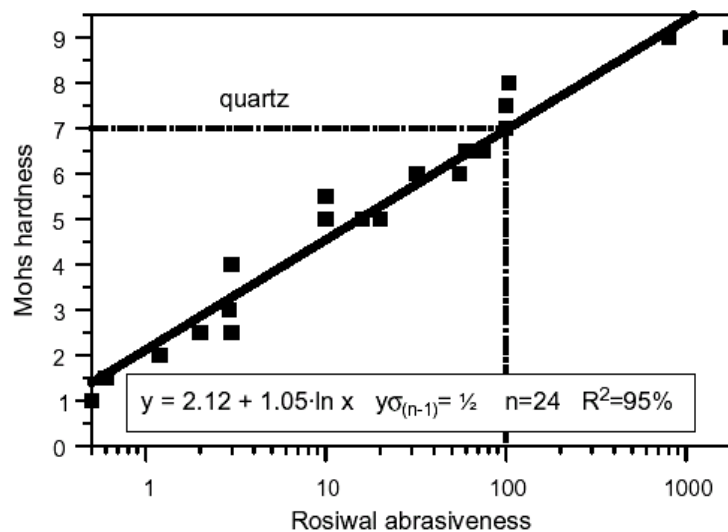
این شاخص در سال ۱۹۷۰ توسط شیمازک و ناتز^{۲۱} ارائه شده است. رابطه کلی این شاخص به شکل رابطه زیر می‌باشد (Ersoy & Waller, 1995a).

$$F = \frac{(EqQtz \times \phi \times BTS)}{100} \quad (۵-۲)$$

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 ساینده‌گی سنگ‌ها می‌باشد. این شاخص بر این مبنا استوار است که هر کانی با توجه به سختی مقیاس موهس چه درصدی از ساینده‌گی ناشی از کوارتز را ایجاد می‌کند. رابطه کلی برای تعیین EqQtz به شرح زیر می‌باشد:

$$EqQtz = \sum_{i=1}^n A_i \cdot R_i \quad (۶-۲)$$

که در آن، A نشانگر درصد کانی‌ها، R ساینده‌گی رزیوال^{۲۲} و n تعداد کانی‌ها می‌باشد. میزان ساینده‌گی رزیوال سنگ با استفاده از سختی موس و طبق رابطه نشان داده‌شده در شکل ۲۳-۲ قابل محاسبه است. 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 ساینده‌گی سنگ به صورت لگاریتمی کاهش می‌یابد.



شکل ۲-۲۳- رابطه میزان ساینده‌گی رزیوال سنگ با استفاده از سختی موهس (Thuro, 1997)

۲-۳-۴-۲- اندیس سایش سرمته (BWI)

این شاخص بر اساس شاخص سرعت حفاری (DRI) و نیز مقدار سایش (AV^{۲۳}) استوار است. شاخص DRI به نوبه خود به دو کمیت میزان تردی (S₂₀) و نیز مقدار ارزش ل سیور^{۲۴} که از آزمایش حفاری کوچک قابل محاسبه می‌باشد، وابسته است.

22. Rosiwal

23. Abrissivness Value

24. Siever's J value

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 کیلوپی 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 ۲-۲۴) (Jimeno et al., 1995).

در آزمایش حفاری کوچک، یک دستگاه حفاری کوچک با سرمته مینیاتوری به قطر ۸/۵ میلی‌متر و زاویه میل ۱۱۰ درجه، نیروی ۲۰ کیلوپی 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 L ثبت می‌شود (شکل ۲-۲۵).

با در دست بودن دو پارامتر بالا، شاخص سرعت حفاری (DRI) طبق نمودار شکل (۲-۲۶) قابل محاسبه است.

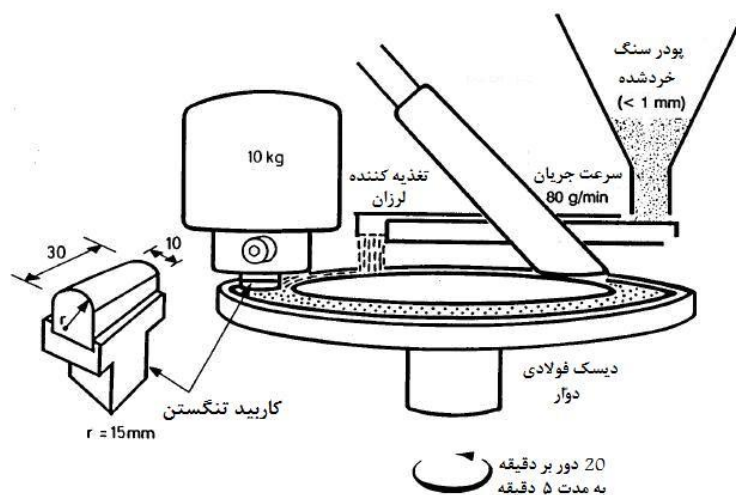
پس از تعیین DRI نوبت به AV می‌رسد. این روش در سال‌های بین ۶۱ — ۱۹۵۸ در دانشکده زمین شناسی و مهندسی ذخائر معدنی دانشگاه NTNU نروژ ارائه شده است. برای تعیین شاخص AV طبق شکل ۲-۲۷ میزان سایش تابع زمان یک قرص از تنگستن کاربید ناشی از پودر شکسته ماده سنگ مورد آزمایش اندازه‌گیری می‌شود.

در این روش ذرات دارای قطر کمتر از ۱ mm 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 ۲-۲۸ تخمین زد.

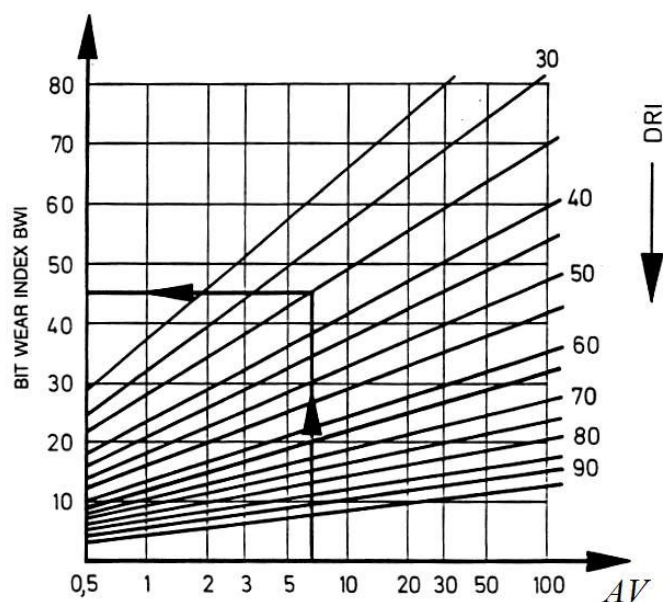
شکل ۲-۲۶- نمودار تعیین شاخص سرعت حفاری (DRI) (Bruland, 1998)

جدول ۲-۱۱- طبقه‌بندی قابلیت حفاری و ساینده‌گی سنگ‌ها با استفاده از شاخص BWI و DRI (Bruland, 1998)

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



شکل ۲-۲۷- دستگاه آزمایش اندازه‌گیری سایش (AV) (Bruland, 1998)



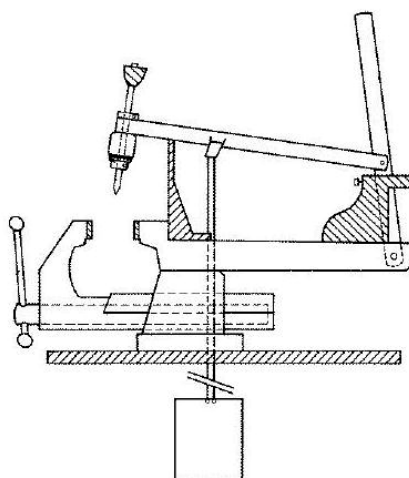
شکل ۲-۲۸- دیاگرام محاسبه BWI با استفاده از میزان AV و DRI (Bruland, 1998)

۲-۳-۴-۳- اندیس سایش سرشار^{۲۵} (CAI)

آزمایش اندیس سایش سرشار اولین بار از سوی انستیتوی تحقیقات معدن کاری زغال فرانسه معرفی شد. این اندیس با ساییده شدن و خراش نوک تیز یک مته (پین) فلزی بر روی یک سطح سنگی تازه به دست می‌آید (شکل ۲-۲۹). این پین فولادی از نوع فولاد قابل عملیات حرارتی آلیاژ H ۴۱۴۰ در استاندارد AISI

²⁵ Cerchar Abrissivness Index

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 ۲-۲۸- نمایشی از دستگاه سایش سرشار (Plinninger et al, 2004)

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 کردن 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 می‌شود.

۲-۳-۴- شاخص سایش سنگ (RAI^{۲۶})

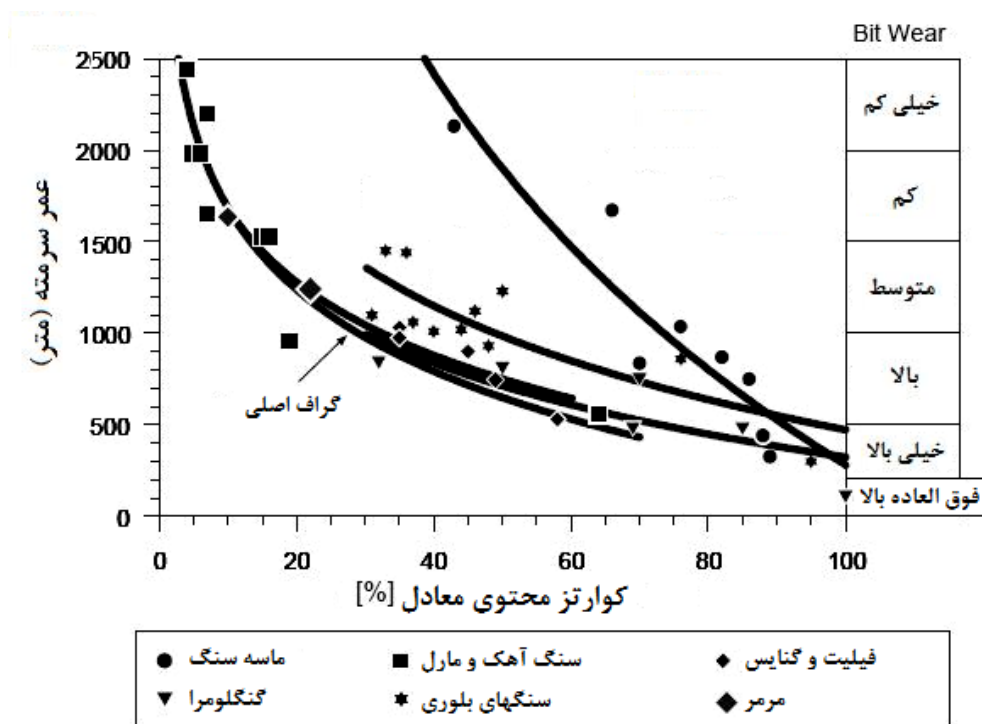
این شاخص در ۲۰۰۲ توسط پلانیگر و همکارانش در کشور آلمان ارائه شده است. رابطه کلی این شاخص به شرح زیر می‌باشد (Plinninger et al, 2002).

$$RAI = EqQtz \times UCS \quad (۷-۲)$$

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

²⁶ . Rock Abrissivness Index

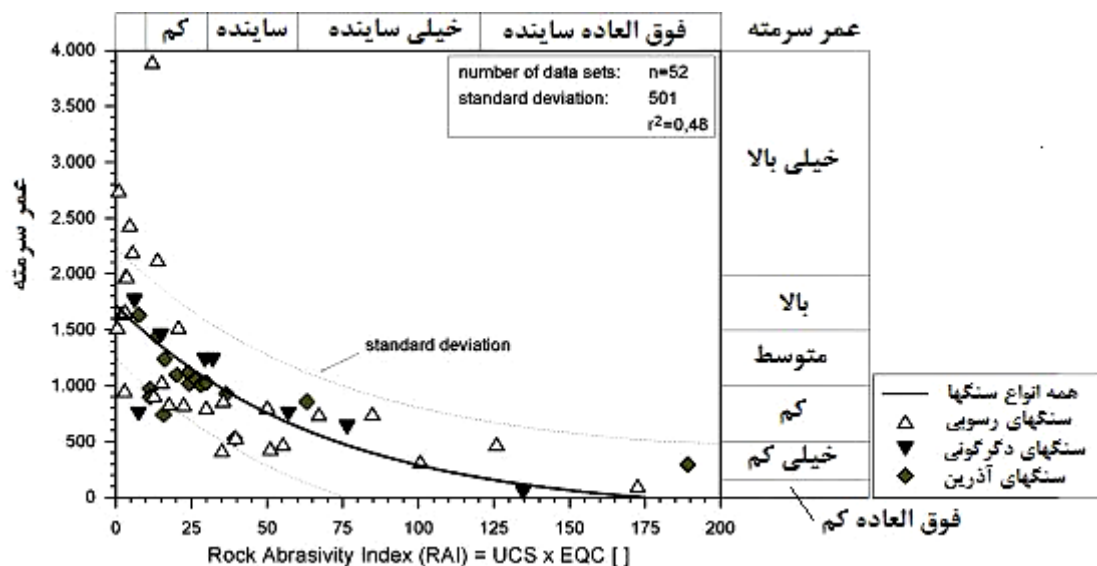
با توجه به شاخص‌های مختلف ارائه شده برای بررسی ساینده‌گی سنگ، متخصصان مختلفی با استفاده از هر کدام از شاخص‌های فوق رابطه ساینده‌گی و سرعت حفاری سنگ‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند. تورو در سال ۱۹۹۷ رابطه میزان کوارتزی محتوی و عمر سرمته را در انواع سنگ‌های طبیعت بررسی کرده و منحنی‌های شکل ۲-۳۰ را ارائه کرده است.



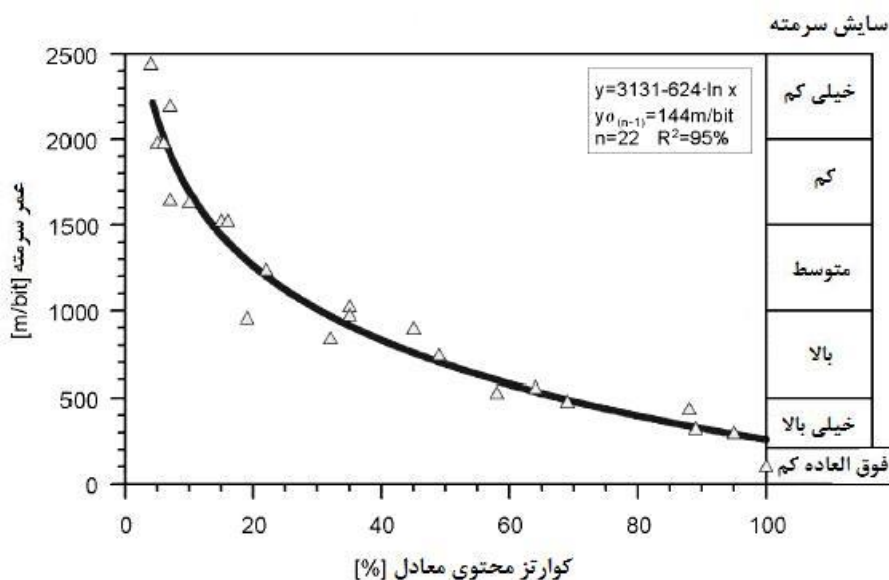
شکل ۲-۳۰- رابطه میزان کوارتزی محتوی و عمر سرمته در انواع سنگ‌ها (Thuro, 1997)

پلانیگر و همکارانش در سال ۲۰۰۲ با استفاده از شاخص پیشنهادی جدید به نام شاخص ساینده‌گی سنگ RAI، رابطه ساینده‌گی و عمر سرمته را در یک سری حفاری زیرزمینی به صورت شکل ۲-۲۹ پیشنهاد کرد.

تورو در سال ۲۰۰۳ رابطه میزان کوارتزی محتوی معادل و عمر سرمته را برای انواع سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی به صورت رابطه شکل ۲-۳۱ ارائه کرد. وی همچنین در سال ۲۰۰۴ رابطه شاخص‌های $EqQtz$ و اندیس ساینده‌گی سرشار را ارائه کرده است.



شکل ۲-۳۱- رابطه شاخص ساینده سنگ RAI و عمر سرمته (Plinninger et al, 2002)



شکل ۲-۳۲- رابطه کوارتز محتوای معادل و عمر سرمته (Thuro & Plinninger, 2003)

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 کرده است.

$$PR = 0.47 \frac{b_{pm}^{0.375}}{\sigma_c^{0.534} \times q^{0.093}} \quad (۸-۲)$$

PR: سرعت حفاری (m/min)

σ_c : مقاومت فشاری تک محوری (Mpa)

q: میزان کوارتز (%)

b: فرکانس دمش هوای فلاشینگ (bpm)

۲-۳-۵- 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 (Jimeno et al. 1995):

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.

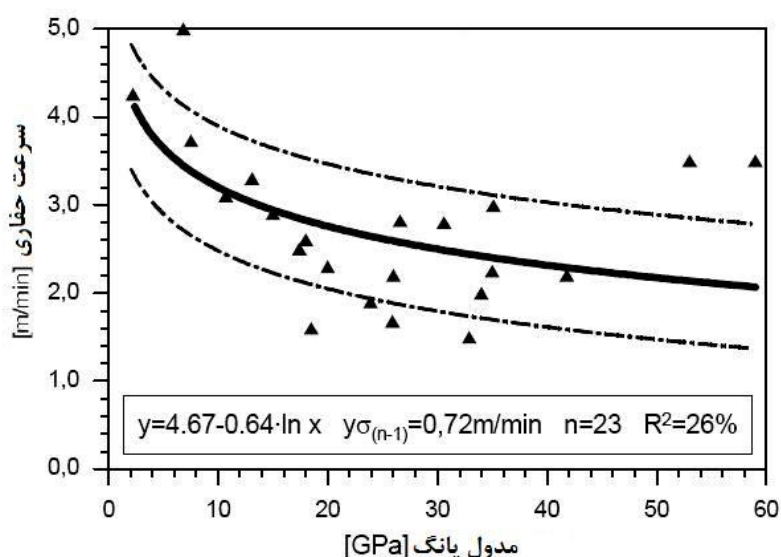
اکثر کانی‌های موجود در سنگ رفتار الاستیک ترد دارند و از قانون هوک تبعیت می‌کنند. خواص الاستیک توسط مدول الاستیسیته مشخص می‌شود. مدول الاستیسیته نسبت تنش قائم به تغییر شکل نسبی ایجاد شده در اثر آن است. مقدار آن در اکثر سنگ‌ها بسته به ترکیب کانی‌شناسی، تخلخل و نوع تغییر شکل و بزرگی نیروی اعمال شده مابین $10^4 \times 0.3$ تا $10^5 \times 1/7$ مگاپاسکال متغیر است (Jimeno et al. 1995).

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 شistosozite 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

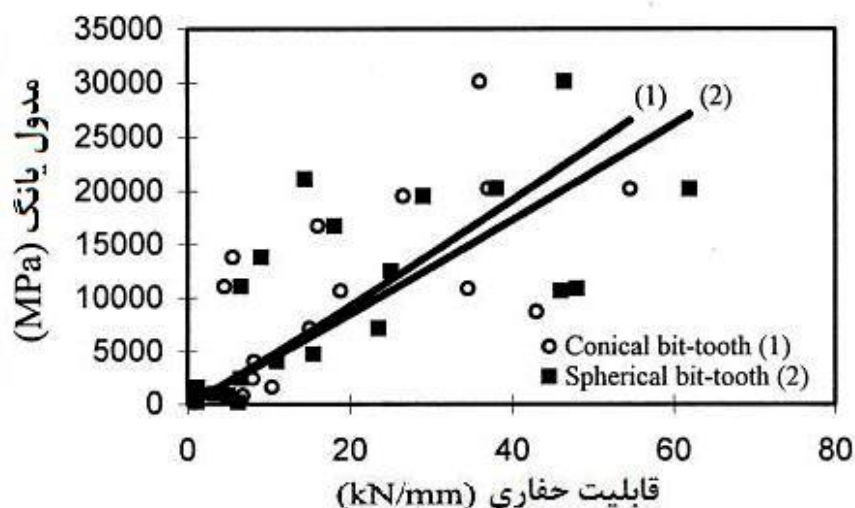
یک جسم پلاستیک ایده آل حتی با ثابت بودن تنش مقدار تغییر شکل‌ها افزایش می‌یابند. در سنگ‌های واقعی همزمان با تغییر شکل، سنگ محکم‌تر می‌شود و برای افزایش تغییر شکل پلاستیک می‌بایست نیروی اعمالی نیز افزایش یابد.

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.

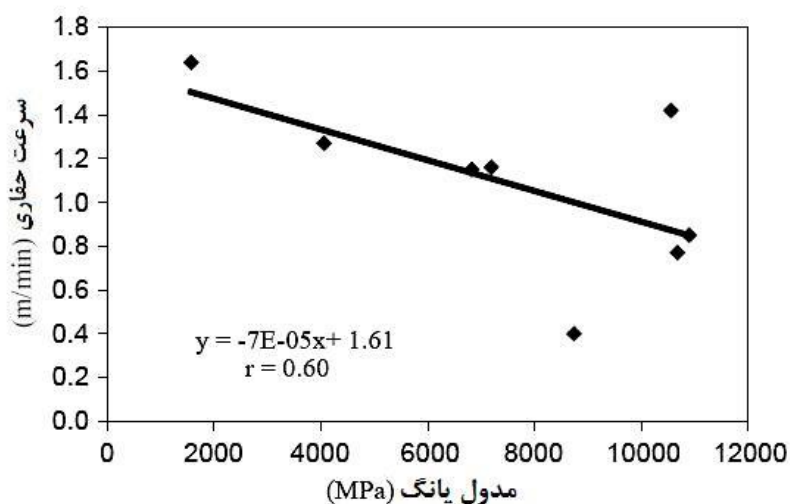
تاکنون در مطالعات گذشته، تأثیر خواص الاستیکی سنگ‌ها بر سرعت حفاری مورد اشاره و تأکید قرار شده است. تورو و اسپان در سال ۱۹۹۶ نشان داد که با افزایش مدول یانگ سنگ‌ها، سرعت حفاری به صورت لگاریتمی کاهش می‌یابد (شکل ۲-۳۳). قهرمان و همکارانش با انجام تعداد زیادی آزمایش نشان داد که با افزایش مدول الاستیسیته سنگ‌ها سرعت حفاری دورانی کاهش و قابلیت حفاری سنگ‌ها افزایش می‌یابد (شکل ۲-۳۴). همچنین قهرمان و همکارانش در سال ۲۰۰۳ طی تحقیقی پیرامون حفاری ضربه‌ای نشان داد که با افزایش مدول الاستیسیته سنگ‌ها، سرعت حفاری به صورت خطی کاهش می‌یابد (شکل ۲-۳۴).



شکل ۲-۳۳- ارتباط سرعت حفاری و مدول الاستیسیته سنگ‌ها (Thuro & Spaun, 1996)



شکل ۲-۳۴- ارتباط قابلیت حفاری و مدول یانگ سنگ‌ها (Kahraman et al. 1999)



شکل ۲-۳۵- ارتباط قابلیت حفاری و مدول الاستیسیته سنگ‌ها در حفاری ضربه‌ای

(Kahraman et al. 2000)

۲-۴- تقسیم بندی سنگ‌ها بر اساس شاخص‌های حفاری

به طور کلی سنگ‌ها در طبیعت به سه گروه تقسیم می‌شوند (اصانلو، ۱۳۸۶):

۲-۴-۱- سنگ‌های آذرین

طبقه‌بندی سنگ‌ها از نظر ساینده‌گری و روش انتخاب ماشین حفاری مناسب با توجه به این خاصیت

سنگ‌ها ارائه می‌گردد (اصانلو، ۱۳۸۶):

۲-۴-۱-۱- سنگ‌های آذرین ساینده

- دانه ریز مثل پرلیت، ابسیدین و رئولیت
- دانه متوسط مثل آپلیت، فلسایت، میکروگرانیت و گرانوفیر
- دانه درشت مثل گانوریوریت، گرانیت و پگماتیت

۲-۴-۱-۲- سنگ‌های آذرین نیمه ساینده

- دانه ریز مثل داسیت و بازالت اولیوین‌دار
- دانه درشت مثل دونایت، گابرو اولیوین‌دار، دیوریت کوارتزدار و پریودوتیت

۲-۴-۱-۳- 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 و سینیت

۲-۴-۱-۴- سنگ‌های آذرین تجزیه شده

- دانه ریز مثل بازالت قرمز
- دانه متوسط مثل سرپانتین
- دانه درشت مثل گرانیت کائولینه شده .

۲-۴-۲- سنگ‌های متامورفیک

۲-۴-۲-۱- سنگ‌های متامورفیک سخت و ساینده

- دانه ریز مثل گرانولیت، کوارتزیت و شیسیت کوارتزدار
- دانه درشت مثل گنیس

۲-۴-۲-۲- سنگ‌های متامورفیک نیمه سخت و نیمه ساینده

- دانه متوسط مثل شیست، هورنبلند و میکا - شیست

- دانه درشت مثل مرمر دولومیت

۲-۴-۲-۳ - سنگ‌های متامورفیک نرم

- دانه ریز مثل اسلیت

- دانه متوسط مثل فلنیت، شیست و کلرایت

- دانه درشت مثل مرمر

۲-۴-۳ - سنگ‌های رسوبی

۲-۴-۳-۱ - سنگ‌های سخت سیلیسی

- دانه‌ریز مثل چرت و فلنیت

- دانه متوسط مثل کوارتزیت رسوبی مانند سنگ سیلیسی

- دانه درشت مثل گری‌واک و کنگلومرا

۲-۴-۳-۲ - سنگ‌های رسوبی ساییده 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

۲-۴-۳-۳ - سنگ‌های رسوبی شکننده اما ساییده

- دانه‌ریز مثل سیلتستون شکننده

- دانه متوسط مثل ماسه‌سنگ آرژیل‌اسیوس، ماسه‌سنگ آهکی، ماسه‌سنگ شکننده دانه درشت مثل بعضی

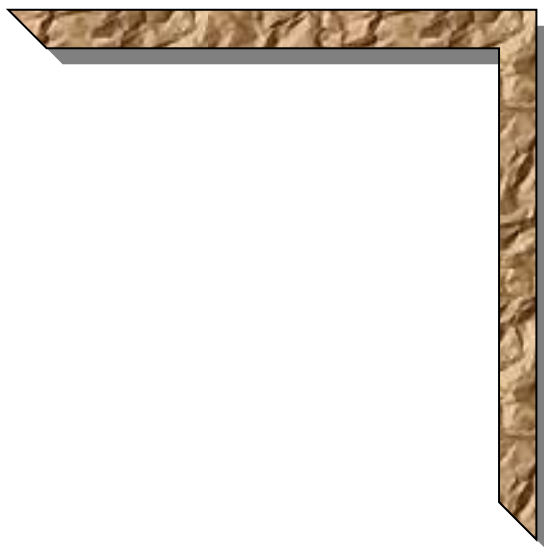
گریتستون‌ها

۲-۴-۳-۴ - سنگ‌های رسوبی نسبتاً سخت اما فاقد خاصیت ساینده

- دانه ریز مثل سنگ آهک متراکم، بعضی از مادستون‌ها، شیل سخت و مرمر

- دانه متوسط مانند برخی از سنگ‌های آهکی ساختمانی

چنانچه از مطالب این فصل و مروری بر منابع مختلف موجود بر می‌آید تاکنون مطالعات بسیار خوب و جامعی بر روی تأثیر پارامترهای مهندسی سنگ بر سرعت حفاری انجام شده است. با این حال به وضوح مشخص است که کلیه نتایج حاصل از این تحقیقات هر یک به طور جداگانه قابلیت حفاری و سرعت حفاری را مورد ارزیابی قرار داده‌اند و لذا ایجاد یک روش مبتنی بر کلیه پارامترهای مذکور به منظور ایجاد همگرایی بیشتر این تحقیقات لازم به نظر می‌رسد. در فصل آینده بیشتر در این باره بحث خواهد شد.



فصل سوم

روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)



۳-۱- مقدمه

تصمیم‌سازی یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های انسانی است زیرا هر فرد در طول شبانه روز تصمیم‌های فراوانی را اتخاذ می‌کند. برخی از این تصمیم‌ها اهمیت چندانی نداشته و برخی دیگر از اهمیت بالایی

برخوردار هستند. هرچه مسئولیت و اختیارات انسان بیشتر باشد تصمیم‌گیری اهمیت بیشتری خواهد داشت. از آنجا که اتخاذ تصمیم صحیح و به موقع می‌تواند تأثیر بسزایی در زندگی شخصی و اجتماعی انسان‌ها داشته باشد، ضرورت وجود یک تکنیک قوی که بتواند انسان را در این زمینه یاری کند، کاملاً محسوس می‌باشد. یکی از کارآمدترین این تکنیک‌ها، فرآیند سلسله مراتبی (AHP)²⁷ است.

۳-۲- فرآیند تحلیل سلسله مراتبی

فرآیند تحلیل سلسله مراتبی یکی از جامع‌ترین سیستم‌های طراحی شده برای تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه است. زیرا این تکنیک امکان فرموله کردن مسئله را به صورت سلسله مراتبی فراهم می‌کند و همچنین امکان در نظر گرفتن معیارهای مختلف کمی و کیفی را در مساله دارد. این فرآیند گزینه‌های مختلف را در تصمیم‌گیری دخالت داده و امکان تحلیل حساسیت روی معیارها را دارد. علاوه بر این بر مبنای مقایسه زوجی بنا نهاده شده، که قضاوت و محاسبات را تسهیل می‌نماید. همچنین میزان سازگاری و ناسازگاری تصمیم را قابل محاسبه است که این امر از مزایای ممتاز این تکنیک در تصمیم‌گیری چند معیاره به حساب می‌آید. بعلاوه این روش از یک مبنای تئوریک قوی برخوردار بوده و بر اساس اصول محکمی بنا نهاده شده است.

توماس ساعتی²⁸ (بنیان‌گذار این روش) چهار اصل زیر را به عنوان اصول فرآیند تحلیل سلسله مراتبی بیان نموده و کلیه محاسبات، قوانین و مقررات را بر این اصول بنا نهاده است. این اصول عبارتند از (قدسی‌پور، ۱۳۷۹):

اصل (۱) - شرط معکوس²⁹: اگر ترجیح عنصر A بر عنصر B برابر n باشد، ترجیح عنصر B بر عنصر A برابر $1/n$ خواهد بود.

اصل (۲) - اصل همگنی³⁰: عنصر A با عنصر B باید همگن و قابل مقایسه باشند. به بیان دیگر برتری عنصر A بر عنصر B نمی‌تواند بی‌نهایت یا صفر باشد.

²⁷ .Analytical Hierarchy Process

²⁸ . T. Saati

²⁹ . Reciprocal Condition

³⁰ . Homogeneity

اصل ۳)- وابستگی^{۳۱}: هر عنصر سلسله مراتبی به عنصر سطح بالاتر خود می‌تواند وابسته باشد و به صورت خطی این وابستگی تا بالاترین سطح می‌تواند ادامه داشته باشد.

اصل ۴)- انتظارات^{۳۲}: هر گاه تغییری در ساختمان سلسله مراتبی رخ دهد، پروسه ارزیابی باید مجدداً انجام گیرد.

۳-۳- گام‌های اصلی در روش AHP

چهار گام اصلی در روش AHP عبارتند از:

۱- مدل کردن مسئله تصمیم‌گیری و یا ساختن سلسله مراتب

۲- محاسبه وزن عناصر

۳- محاسبه تقدم‌های نسبی یا اهمیت عناصر

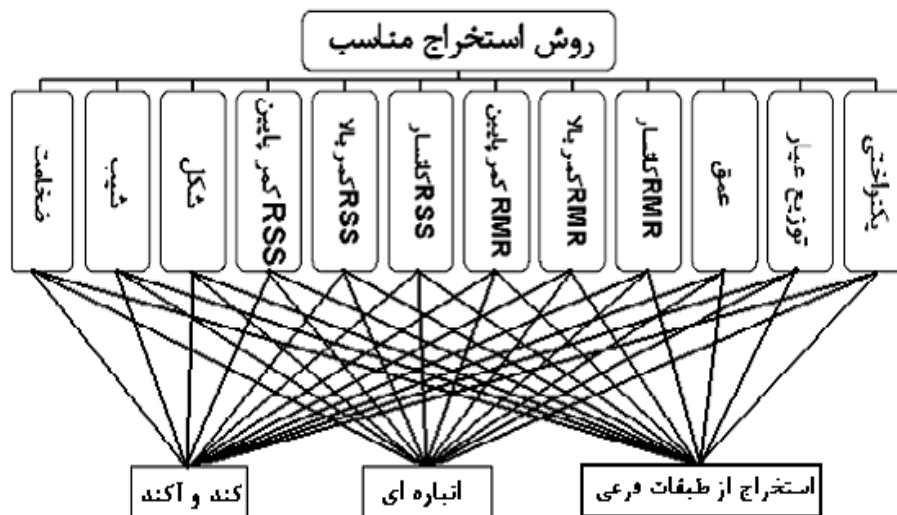
۴- تعیین رتبه بندی تقدم عناصر تصمیم‌گیری.

۳-۳-۱- مدل کردن مسئله تصمیم‌گیری

اولین قدم در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی مدل کردن مسئله تصمیم‌گیری یا ساختن سلسله مراتب مسأله است که معمولاً به ترتیب در آن هدف، معیارها (در صورت وجود زیرمعیارها) و گزینه‌ها نشان داده می‌شود است. برای این منظور ایجاد یک نمایش گرافیکی از مسئله که در آن هدف، معیارها و گزینه‌ها نشان داده می‌شوند ضروری است. در شکل ۳-۱ سلسله مراتبی انتخاب مناسب‌ترین روش استخراج یک کانسار مس به عنوان نمونه نشان داده شده است. سطح یک در سلسله مراتب همواره هدف را نشان می‌دهد و پایین‌ترین سطح، گزینه‌های تصمیم‌گیری را بیان می‌کند.

³¹ . Dependency

³² . Expectations



شکل ۱-۳- سلسله مراتب انتخاب مناسب ترین روش استخراج برای کانسار مس

۳-۲- محاسبه وزن عناصر در AHP

محاسبه وزن در AHP به دو صورت می باشد:

الف) وزن نسبی^{۳۳}

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 می شود. تخصیص امتیازات عددی مربوط به مقایسه زوجی اهمیت دو گزینه یا دو شاخص بر اساس جدول ۱-۳ صورت می گیرد.

یک ماتریس مقایسه زوجی به صورت زیر نشان داده می شود:

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

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:

³³ : Local Priority

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \quad (۱)$$

جدول ۱-۳- طبقه‌بندی کمی و کیفی برای مقایسه زوجی معیارها (قدسی‌پور، ۱۳۷۹)

مقایسه 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 می‌شود. برای محاسبه وزن هر گزینه از ماتریس مقایسه زوجی (وزن نسبی) چندین روش پیشنهاد شده است که اهم آن‌ها عبارتند از:

- روش حداقل مربعات معمولی

- روش حداقل مربعات لگاریتمی

- روش بردار ویژه

- روش‌های تقریبی

روش حداقل مربعات معمولی، یکی از روش‌های معمولی، ساده و پرکاربرد برای محاسبه وزن پارامترها است. این روش شامل سه مرحله زیر است:

مرحله اول: مقادیر هر یک از ستون‌ها را با هم جمع می‌کنیم.

مرحله دوم: هر عنصر در ماتریس مقایسه زوجی را به جمع ستون خودش تقسیم کرده تا ماتریس مقایسه زوجی نرمالیز شود.

مرحله سوم: مقدار متوسط (میانگین) عناصر در هر سطر از ماتریس نرمالیز را محاسبه می‌کنیم تا مقادیر متوسط یک تخمین از وزن‌های مورد نظر به دست آید. از بین این روش‌ها روش بردار ویژه دقیق‌تر می‌باشد. در این روش W_i به گونه‌ای تعیین می‌شود 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 می باشد. در حالتی که ابعاد ماتریس بزرگتر باشد، محاسبه این مقادیر بسیار وقت گیر است. لذا برای محاسبه λ مقدار دترمینان ماتریس $A - \lambda.I$ مساوی با صفر قرار داده می شود و با قراردادن بزرگترین مقدار λ حاصله در رابطه زیر مقادیر W_i محاسبه می شود.

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

ب) وزن نهایی^{۳۴}

وزن نهایی هر گزینه در یک فرآیند سلسله مراتبی، از مجموع حاصل ضرب وزن هر معیار در امتیاز گزینه مورد نظر بدست می آید. مجموع امتیازات بدست آمده برای هر گزینه از رابطه زیر حاصل می شود:

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

که در آن a_{ij} بیانگر میزان اهمیت نسبی گزینه i ام بازای شاخص C_j و W_j نشانگر اهمیت شاخص C_j می باشد. همچنین لازم است که مقادیر گزینه ها و وزن شاخص ها نرمالیزه شود.

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

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

۳-۳-۳ محاسبه نرخ ناسازگاری

محاسبه نرخ ناسازگاری نیز از اهمیت بالایی در روش AHP برخوردار است. در حالت کلی می توان 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 می نماید و معتقد است چنانچه میزان ناسازگاری بیشتر از ۰/۱ باشد، بهتر است در قضاوت ها تجدید نظر شود.

³⁴ : Overall Priority

شاخص ناسازگاری^{۳۵}، شاخص ناسازگاری تصادفی^{۳۶} و نرخ ناسازگاری^{۳۷} سلسله مراتبی با توجه به روابط زیر محاسبه می شود.

$$I.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (۷)$$

$$R.I.I = 1.98 \frac{n - 2}{n} \quad (۸)$$

$$I.R. = \frac{I.I.}{R.I.I} \quad (۹)$$

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

از آنجایی که در این تحقیق هدف تنها یافتن وزن پارامترهای مختلف می باشد لذا تنها وزن نسبی پارامترها محاسبه گردیده است. لازمه محاسبه وزن نسبی پارامترها تشکیل ماتریس مقایسه زوجی است. یکی از بهترین روش های تشکیل این ماتریس نظرسنجی از متخصصان آن رشته می باشد. جزئیات این روش در ادامه به تفصیل ارائه می شود.

۳-۴- تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی (FDAHP)^{۳۸}

در روش دلفی، پیش بینی های ارائه شده توسط افراد خبره در قالب اعداد قطعی بیان می گردند، در حالی که استفاده از اعداد قطعی برای پیش بینی های بلند مدت، آن را از دنیای واقعی دور می سازد. از طرفی افراد خبره از شایستگی های و توانایی های ذهنی خود برای پیش بینی استفاده می نمایند و این نشان می دهد که عدم قاطعیت حاکم بر این شرایط از نوع امکانی است نه احتمالی. امکانی بودن عدم قاطعیت، با مجموعه های فازی سازگاری دارد و بنابراین بهتر آن است که با استفاده از مجموعه های فازی (با بکارگیری اعداد فازی) به پیش بینی بلند مدت و تصمیم گیری در دنیای واقعی بپردازیم. بدین ترتیب اطلاعات لازم را در قالب زبان طبیعی از خبرگان اخذ نموده و مورد تحلیل قرار می دهیم. این روش تحلیل، روش دلفی فازی نامیده می شود.

³⁵ - Inconsistency Index

³⁶ - Random Inconsistency Index

³⁷ - Inconsistency Ratio

³⁸ . Fuzzy Delphi Analytic Hierarchy Process

گونه‌های مختلف از اعداد فازی را می‌توان برای اخذ نظرات خبرگان مورد استفاده قرار داد، اما در این تحقیق برای سهولت انجام محاسبات از اعداد فازی مثلثی استفاده خواهد شد. مراحل اجرای روش دلفی به شرح زیر است:

الف) نظر سنجی از متخصصان

در این مرحله ابتدا از متخصصان مختلف در مورد پارامترهای مؤثر بر یک پدیده یا تصمیم به صورت کیفی یا در صورت امکان کمی نظرسنجی به عمل می‌آید.

ب) محاسبه اعداد فازی

برای محاسبه اعداد فازی ($\tilde{a}_{ij}$) نظرات حاصل از نظرسنجی از متخصصان به طور مستقیم مد نظر قرار می‌گیرد. اعداد فازی در این مرحله را می‌توان بر اساس توابع عضویت مختلف همچون روش مثلثی و یا حالت ذوزنقه‌ای محاسبه نمود. با توجه به کاربرد زیاد و سهولت محاسبه روش مثلثی محاسبه اعداد فازی در شکل ۳-۲ نشان داده شده است.

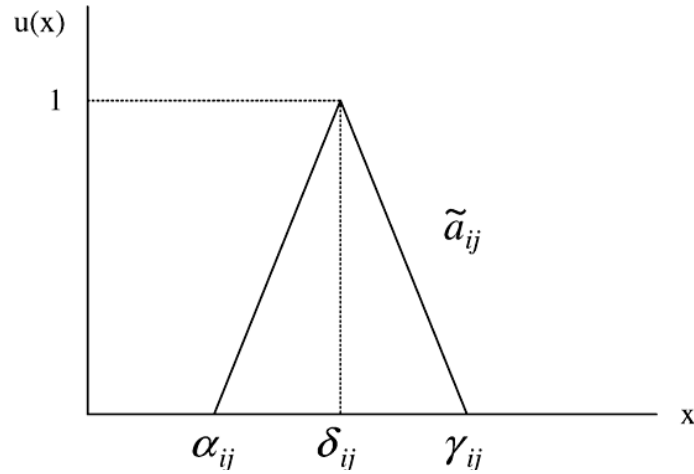
با توجه به شکل ۳-۲، در حالت کلی در روش فازی دلفی یک عدد فازی به صورت رابطه ۳-۴ تا ۳-۷ تعریف می‌شود (Liu & Chen, 2007).

$$a_{ij} = (\alpha_{ij}, \delta_{ij}, \gamma_{ij}) \quad (4-3)$$

$$\alpha_{ij} = \min(\beta_{ijk}), k = 1, \dots, n \quad (5-3)$$

$$\delta_{ij} = \left(\prod_{k=1}^n \beta_{ijk} \right)^{1/n}, k = 1, \dots, n \quad (6-3)$$

$$\gamma_{ij} = \max(\beta_{ijk}), k = 1, \dots, n \quad (7-3)$$



شکل ۳-۲- تابع عضویت مثلثی در روش فازی دلفی (Liu & Chen, 2007)

در روابط فوق $\alpha_{ij}, \delta_{ij}, \gamma_{ij} \in [1/9, 1] \cup [1, 9]$ می باشد. با توجه به شکل ۳-۲، γ_{ij} حد بالای نظرات داوران، α_{ij} حد پائین نظرات داوران و β_{ijk} نشان دهنده اهمیت نسبی پارامتر i بر پارامتر j از دیدگاه متخصص k ام است.

(ج) تشکیل ماتریس معکوس فازی

در این مرحله با توجه به اعداد فازی به دست آمده در مرحله قبل ماتریس مقایسه زوجی فازی بین پارامترها مختلف به شرح رابطه ۳-۸ تشکیل می شود (Liu & Chen, 2007).

$$\tilde{A} = [\tilde{a}_{ij}] \quad \tilde{a}_{ij} \times \tilde{a}_{ji} \approx 1, \forall i, j = 1, 2, \dots, n \quad (۳-۸)$$

یا به صورت:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} (1, 1, 1) & (\alpha_{12}, \delta_{12}, \gamma_{12}) & (\alpha_{13}, \delta_{13}, \gamma_{13}) \\ (1/\gamma_{12}, 1/\delta_{12}, 1/\alpha_{12}) & (1, 1, 1) & (\alpha_{23}, \delta_{23}, \gamma_{23}) \\ (1/\gamma_{13}, 1/\delta_{13}, 1/\alpha_{13}) & (1/\gamma_{23}, 1/\delta_{23}, 1/\alpha_{23}) & (1, 1, 1) \end{bmatrix}$$

(د) محاسبه وزن فازی نسبی پارامترها (Liu & Chen, 2007)

$$\tilde{Z}_i = [\tilde{a}_{ij} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{in}]^{1/n}, \tilde{W}_i = \tilde{Z}_i \otimes (\tilde{Z}_i \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_n) \quad (۳-۹)$$

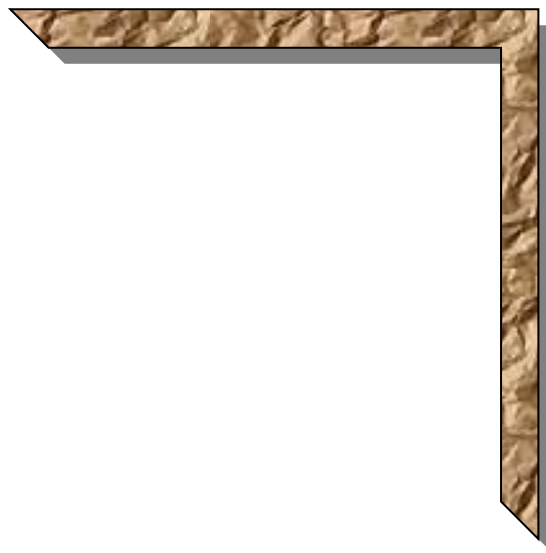
که در آن $\tilde{a}_1 \otimes \tilde{a}_2 = (\alpha_1 \times \alpha_2, \delta_1 \times \delta_2, \gamma_1 \times \gamma_2)$ بوده و $\otimes$ نماد ضرب اعداد فازی و $\oplus$ نماد جمع اعداد فازی است. $\tilde{W}_i$ یک بردار سطری است که نشان دهنده وزن فازی پارامتر آم می‌باشد.

(ه) غیر فازی کردن وزن پارامترها

پس از یافتن وزن فازی نهایی هر یک از پارامترها، کلیه اعداد به دست آمده با استفاده از رابطه ۳-۱۰ به حالت غیر فازی تبدیل شده و تنها به صورت یک عدد بیان می‌شوند (Liu & Chen, 2007).

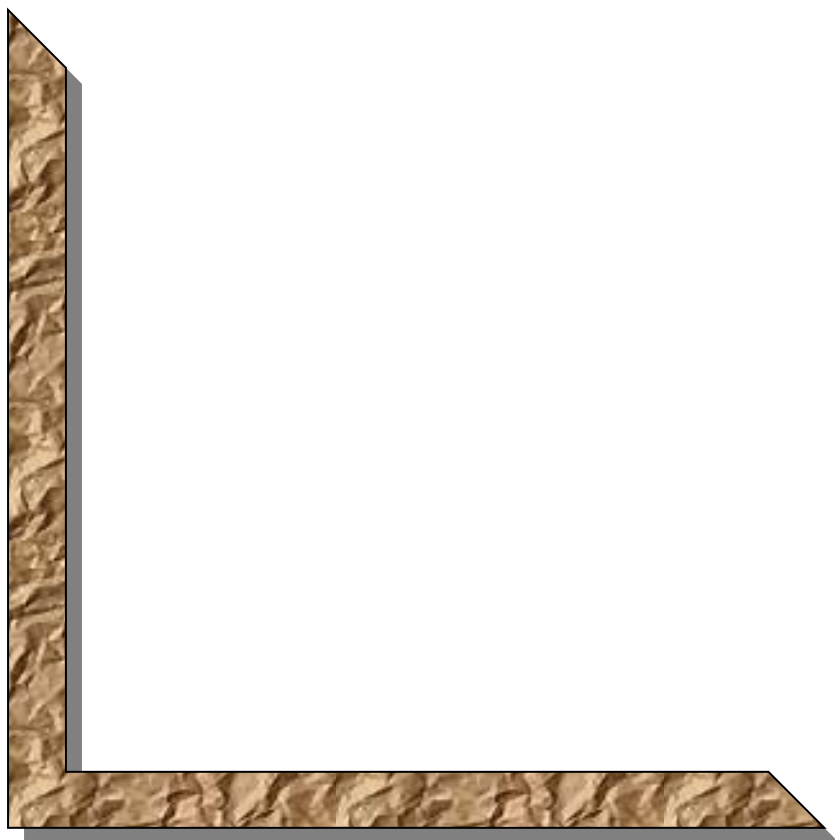
$$\tilde{W}_i = (\prod_{j=1}^3 \omega_j)^{1/3} \quad (۱۰-۳)$$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، از آن جایی که تکنیک فازی دلفی بر مبنای تجربیات و نظرات تعدادی از متخصصان یک علم استوار است، لذا به نظر می‌رسد نتایج به دست آمده از این روش می‌تواند رهیافت مناسبی برای ارزیابی اهمیت پارامترهای مؤثر بر یک پدیده و یک مفهوم باشد. به استناد تمامی منطق‌های ریاضی و به ویژه خاصیت فوق، در ادامه این تحقیق از این تکنیک برای ارزیابی پارامترهای مؤثر بر سرعت حفاری استفاده خواهد شد.



فصل چهارم

ارزیابی و پیش‌بینی قابلیت حفاری سنگ



۴-۱- مقدمه

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 جهت 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.

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 جمع آوری کلیه این پارامترها در یک سیستم طبقه بندی 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 بر پدیده اصلی است. از آنجای که کلیه سیستم‌های طبقه‌بندی مهندسی سنگ، همواره بر اساس تعدادی پارامتر مرکب و در ارتباط با هم ارائه می‌گردند، 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)³⁹ اشاره نمود. 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 می‌گردد. در صورت اختلاف بین واقعیت و پیش‌بینی، وزن پارامترها کم و زیاد می‌شود تا جایی که واقعیت با پیش‌بینی مطابقت نماید. در این صورت امتیازدهی نهایی بدست می‌آید (تقی پور و رخشنده، ۱۳۸۲).

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 (تقی پور و رخشنده، ۱۳۸۲).

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 نمود.

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 کارآرایی 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 می‌رود 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.

³⁹. Rock Engineering System

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:

- (۱) بافت سنگ
- (۲) اندازه و شکل دانه‌های سنگ
- (۳) میزان کوارتز محتوی
- (۴) نوع ماتریکس و کیفیت سیمانته شدن
- (۵) سختی
- (۶) ساینده‌گی
- (۷) هوازدگی
- (۸) چگالی
- (۹) سختی چکش اشمیت
- (۱۰) مقاومت فشاری تک‌محوری
- (۱۱) مقاومت کششی
- (۱۲) مدول الاستیسیته (مدول ینگ)

چنانچه مشاهده می‌شود پارامترهای فوق، تمامی مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ را به خوبی پوشش می‌دهند و لذا می‌توان با استفاده از این پارامترها، به دیدی روشن از قابلیت حفاری سنگ دست یافت. در ادامه، مراحل مختلف ارائه سیستم طبقه‌بندی جدید با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی (FDAHP) آورده شده است.

۴-۲- نظرسنجی از متخصصان حفاری

پس از تعیین پارامترهای مؤثر بر سرعت حفاری و قابلیت نفوذ در سنگ‌ها، به منظور استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی جهت تعیین وزن پارامترهای مختلف، فرم‌های نظر سنجی شامل کلیه پارامترهای فوق تهیه شده و جهت تکمیل شدن برای ۲۳ تن از اساتید برجسته علم حفاری در داخل و خارج از کشور ارسال گردید. از میان فرم‌های ارسال شده ۱۵ فرم نظرسنجی تکمیل شده دریافت شد (۱۱ فرم از متخصصان داخلی و ۴ فرم از متخصصان خارجی) که برای ورودی روش تحلیل سلسله مراتبی مورد استفاده قرار گرفتند. جدول ۴-۱ و ۴-۲ نمونه‌هایی از فرم‌های نظرسنجی ارسال را نشان می‌دهد. 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 ۴-۱- نمونه‌ای از فرم نظرسنجی ارسال شده برای متخصصان داخلی

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

با توجه به فرم‌های موجود، ماتریس مقایسه زوجی متناظر با هر یک از پارامترها از نظر متخصصان مختلف به صورت جداگانه برای هر متخصص تشکیل شده است. ماتریس‌های مذکور در جدول‌های پ-۱ تا پ-۱۵ پیوست آورده شده است. همچنین نتایج کلی نظر سنجی‌ها در جدول ۴-۳ آورده شده است.

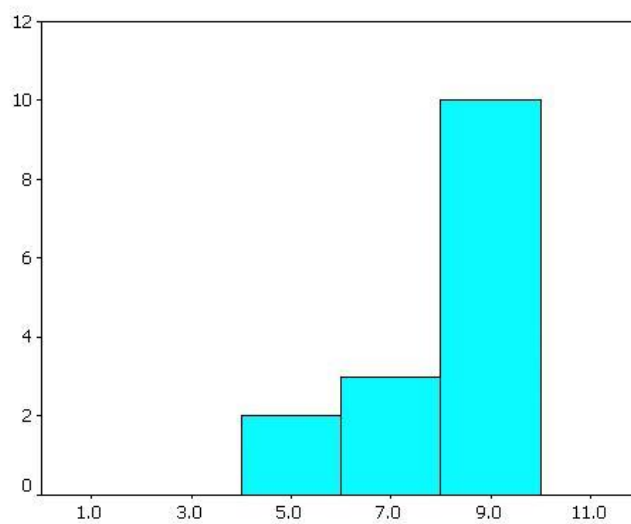
جدول ۴-۲- نمونه‌ای از فرم نظرسنجی ارسال شده برای متخصصان خارجی

		Importance of each parameter				
		Very Weak Importance	Weak Importance	Moderate Importance	Strong Importance	Very Strong Importance
Rock material properties	Texture					
	Grain Size & Shape					
	Matrix Type & Cementation					
	Quartz Content (%)					
	Hardness					
	Abrasiveness					
	Weathering					
	Density					
	Schmit Hammer Rebound					
	Uniaxial Compressive Strength (UCS)					
	Tensile Strength					
	Young's Modules					

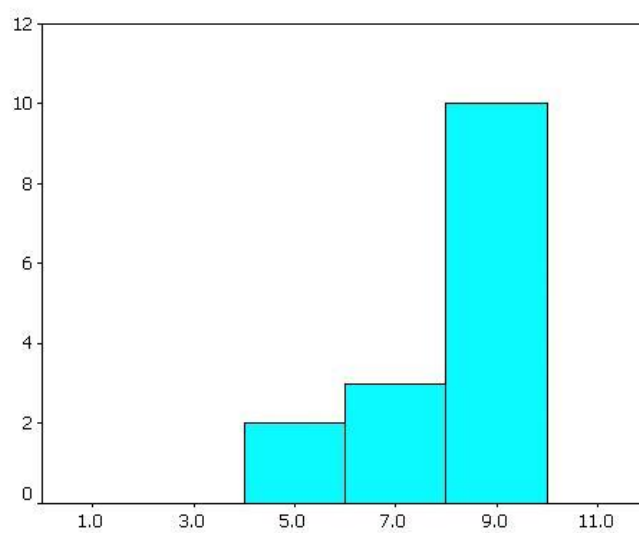
جدول ۴-۳- نتایج کلی نظر سنجی ها

متخصصان →	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
	امتیازات اختصاص یافته به پارامترها توسط متخصصان														
کوارتز محتوی	۹	۹	۹	۷	۹	۹	۹	۹	۹	۷	۵	۷	۹	۵	۹
سختی	۹	۵	۹	۹	۹	۹	۷	۹	۹	۹	۹	۵	۷	۷	۹
سایندگی	۹	۹	۷	۳	۹	۹	۹	۷	۹	۹	۹	۹	۹	۷	۷
مقاومت فشاری	۹	۷	۷	۵	۷	۹	۹	۵	۵	۹	۷	۷	۹	۷	۹
مدول یانگ	۵	۷	۹	۷	۷	۷	۷	۵	۷	۵	۵	۹	۷	۷	۷
نوع ماتریکس	۵	۷	۷	۷	۵	۹	۷	۹	۷	۵	۷	۷	۷	۷	۵
سختی اشمیت	۵	۵	۵	۷	۷	۹	۷	۷	۹	۹	۵	۷	۷	۷	۵
بافت	۵	۷	۹	۵	۳	۷	۷	۵	۵	۳	۳	۵	۷	۷	۷
چگالی	۷	۷	۹	۹	۳	۷	۵	۵	۷	۵	۳	۷	۵	۵	۷
هوازدگی	۵	۷	۷	۷	۵	۷	۷	۷	۷	۹	۹	۵	۷	۵	۳
اندازه دانه ها	۵	۷	۵	۳	۵	۷	۷	۷	۹	۳	۵	۵	۷	۷	۷
مقاومت کششی	۷	۳	۳	۳	۷	۷	۷	۷	۹	۵	۹	۷	۷	۵	۹

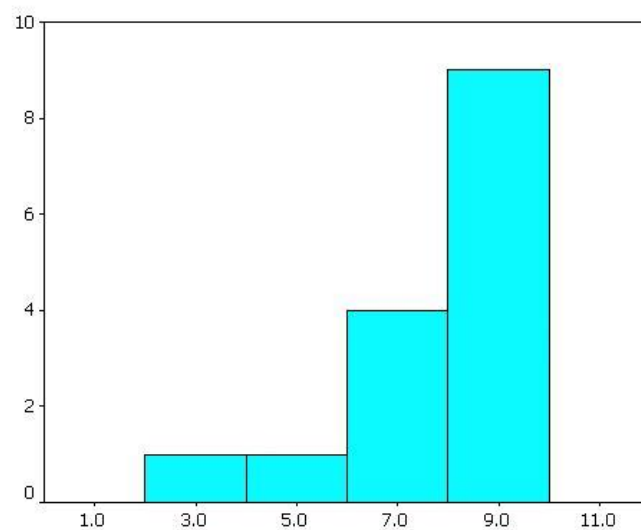
به منظور بررسی فراوانی امتیازات اختصاص یافته به پارامترهای مؤثر توسط متخصصان، هیستوگرام مربوط به هر پارامتر طبق شکل های ۴-۱ تا ۴-۱۲ رسم شده است.



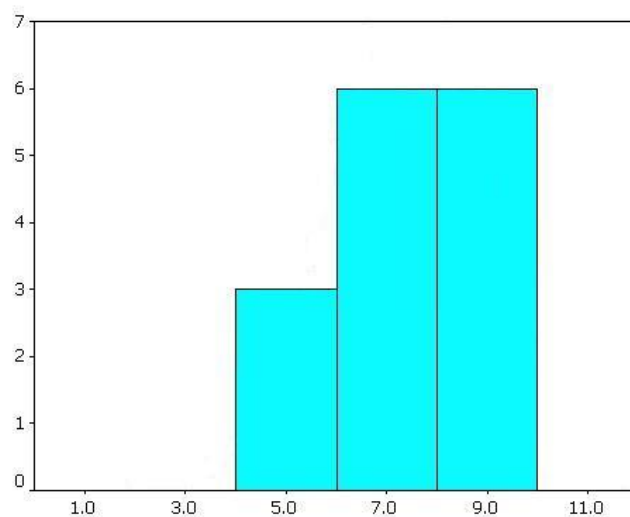
شکل ۴-۱- هیستوگرام فراوانی امتیاز میزان کوارتز محتوی با توجه به نظرات متخصصان



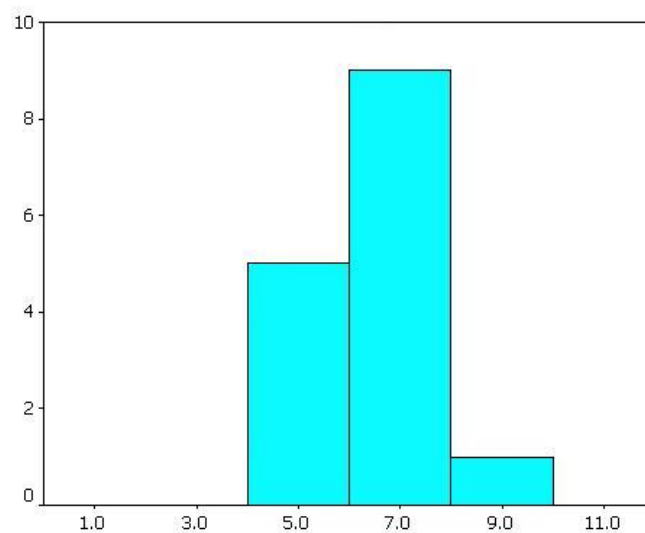
شکل ۴-۲- هیستوگرام فراوانی امتیاز سختی با توجه به نظرات متخصصان



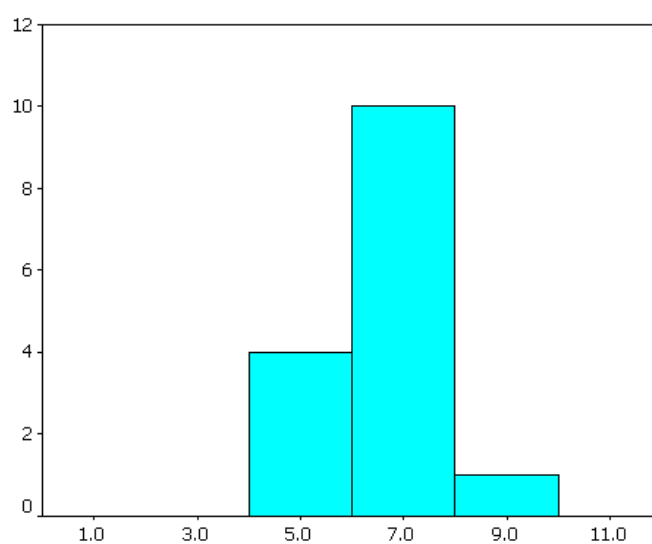
شکل ۴-۳- هیستوگرام فراوانی امتیاز ساینده با توجه به نظرات متخصصان



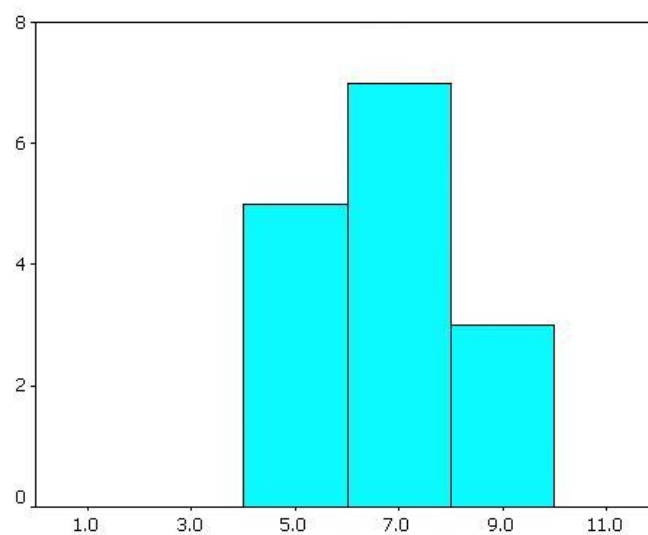
شکل ۴-۴- هیستوگرام فراوانی امتیاز مقاومت فشاری با توجه به نظرات متخصصان



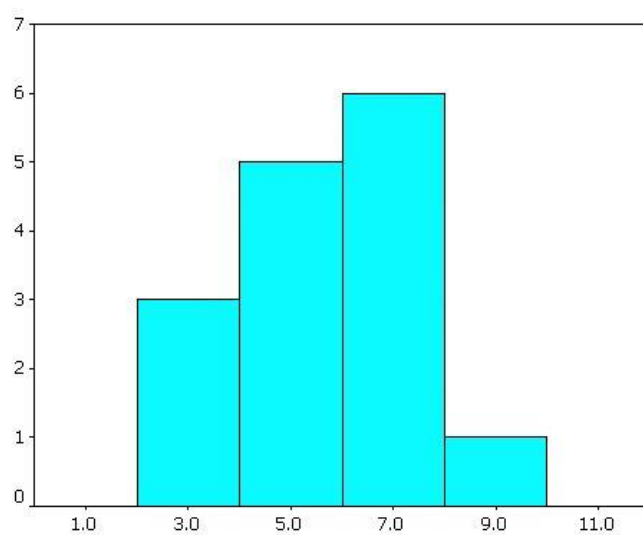
شکل ۴-۵- هیستوگرام فراوانی امتیاز مدول الاستیسیته با توجه به نظرات متخصصان



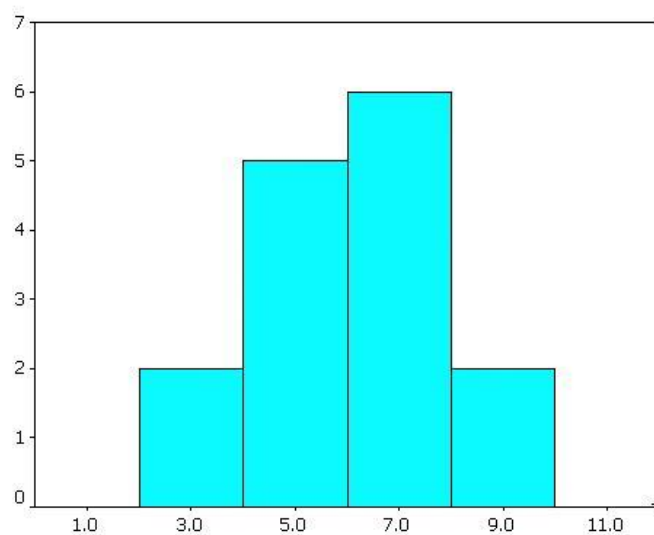
شکل ۴-۶- هیستوگرام فراوانی امتیاز نوع ماتریکس با توجه به نظرات متخصصان



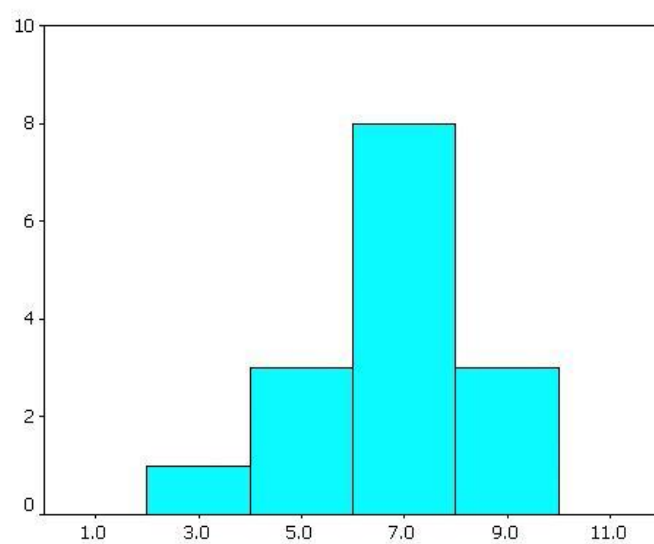
شکل ۴-۷- هیستوگرام فراوانی امتیاز سختی چکش اشمیت با توجه به نظرات متخصصان



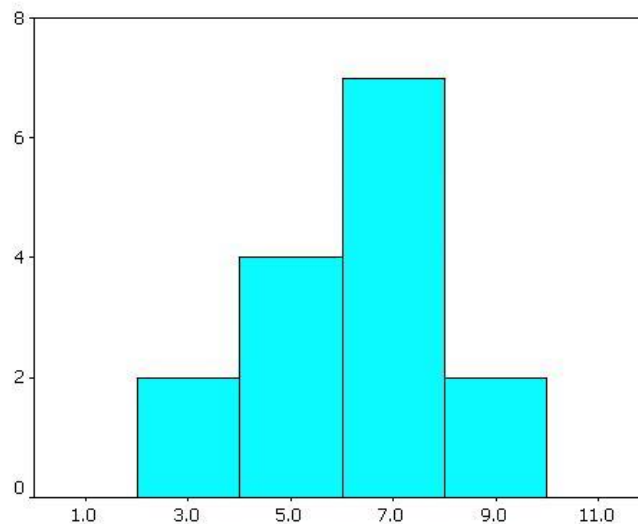
شکل ۴-۸- هیستوگرام فراوانی امتیاز بافت با توجه به نظرات متخصصان



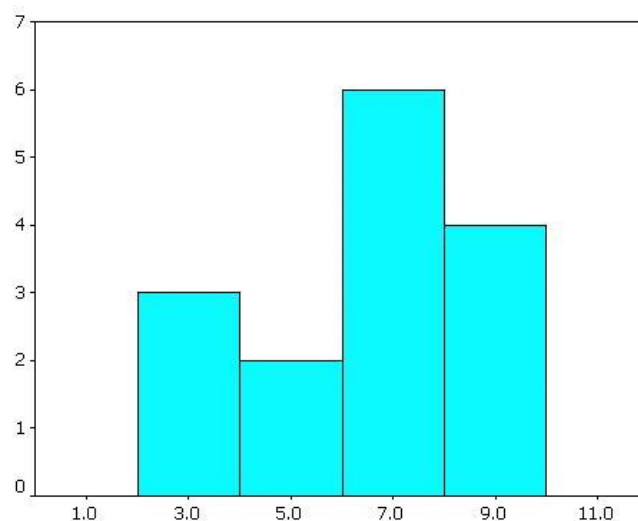
شکل ۴-۹- هیستوگرام فراوانی امتیاز چگالی با توجه به نظرات متخصصان



شکل ۴-۱۰- هیستوگرام فراوانی امتیاز هوازدگی با توجه به نظرات متخصصان



شکل ۴-۱۱ - هیستوگرام فراوانی امتیاز اندازه دانه‌ها با توجه به نظرات متخصصان

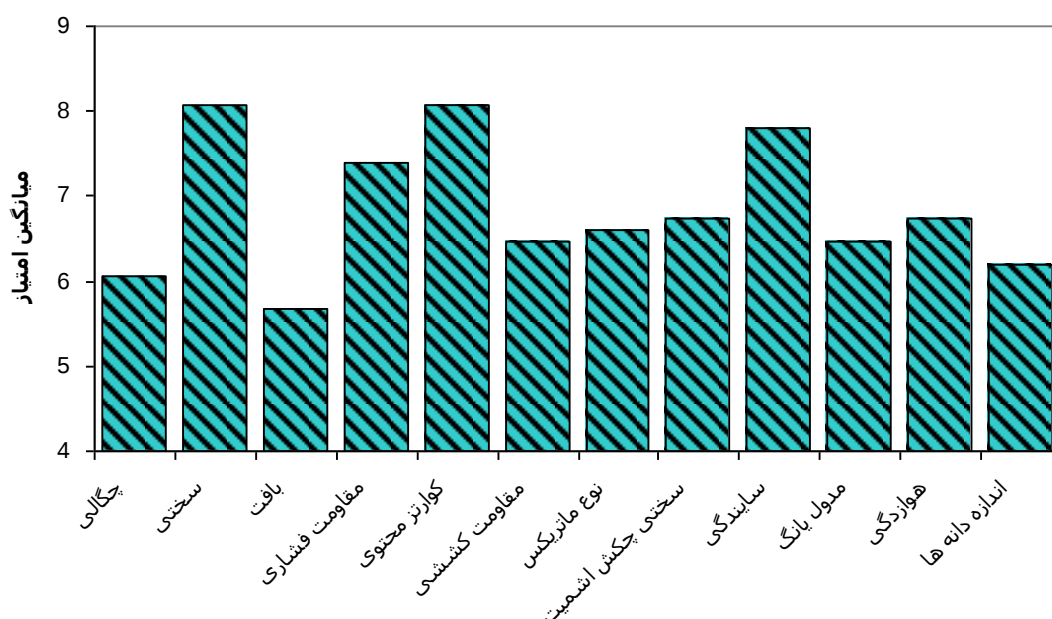


شکل ۴-۱۲ - هیستوگرام فراوانی امتیاز مقاومت کششی با توجه به نظرات متخصصان

در شکل ۴-۱، شکل ۴-۲ و نیز شکل ۴-۳ فراوانی امتیاز ۹ و چلوگی منفی موجود در هیستوگرام‌ها نشان دهنده اهمیت بسیار زیاد پارامتر کوارتز محتوی، سختی و ساینده‌گی می‌باشد. با این حال وجود امتیازات پایین در پارامتر ساینده‌گی نشان دهنده تأکید کمتر بر این پارامتر نسبت به دو پارامتر سختی و میزان کوارتز محتوی است. پارامتر مقاومت فشاری که یکی از بحث انگیزترین پارامترها می‌باشد از نظر امتیازات کسب شده نیز حالت خاصی دارد. با توجه به هیستوگرام فراوانی امتیازات اختصاص یافته (شکل ۴-۴) مشخص است که میزان امتیازات ۷ و ۹ کسب شده توسط این پارامتر برابر بوده و تا حدودی به حالت نرمال نزدیک‌تر است. با این وجود تعداد امتیازات ۵ کسب شده از قطعیت وجودی امتیازات ۷ و ۹ می‌کاهد.

در شکل ۴-۵ و ۴-۶ هیستوگرام فراوانی امتیازات نشان می‌دهد که مدول الاستیسیته و نوع ماتریکس از نظر متخصصان با اهمیت تشخیص داده شده‌اند و فشردگی هیستوگرام‌های مذکور وحدت نظر متخصصان را نشان می‌دهد. سختی چکش اشمیت که هیستوگرام فراوانی امتیازات آن در شکل ۴-۷ نشان داده شده است از دیدگاه متخصصان بسیار با اهمیت تا با اهمیت تشخیص داده شده است و با توجه به شکل فراوانی امتیاز ۷ بیش از همه بوده و توزیع امتیازات این پارامتر به صورت تقریباً نرمال می‌باشد. چنانچه در شکل ۴-۸ نشان داده شده است نظر داوران روی این پارامتر بیشتر به سمت اهمیت کمتر متمایل بوده و با توجه به فراوانی امتیازات ۳ و ۵، پهنای هیستوگرام نشان دهنده پراکندگی نظرات متخصصان در مورد این پارامتر بوده است. طبق شکل ۴-۹، توزیع امتیازات اختصاص یافته به چگالی کاملاً نرمال بوده و هیستوگرام رسم شده از تقارن مناسبی با محوریت امتیازات ۵ و ۷ برخوردار است. با توجه به شکل ۴-۱۰ و ۴-۱۱ مشخص می‌شود که هیستوگرام فراوانی امتیازات هوازده‌گی و اندازه دانه‌ها نسبت به امتیاز ۷ تقریباً متقارن است و امتیاز ۷ بیشترین فراوانی را به خود اختصاص داده و لذا تقریباً نیمی از متخصصان، هوازده‌گی و اندازه دانه‌ها را فاکتور با اهمیتی تشخیص داده‌اند. پراکندگی نظرات باعث بازشدگی هیستوگرام‌های مذکور شده است. هیستوگرام متناظر با امتیازات مقاومت کششی (شکل ۴-۱۲) نشان می‌دهد نظرات متخصصان در مورد این پارامتر از پراکندگی بالایی برخوردار است.

پس از ارزیابی نظرات داوران، میانگین امتیاز اختصاص یافته به هر پارامتر براساس اطلاعات ارائه شده در جدول ۴-۳ محاسبه شده و نمودار ستونی مربوطه در شکل ۴-۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۳- نمودار ستونی میانگین امتیاز هر یک از پارامترها با توجه به نظرات متخصصان

چنانچه از شکل فوق نتیجه می‌شود سختی، مقاومت فشاری، کوارتز محتوی و ساینده‌گی بیشترین امتیازها را کسب نموده و بافت و چگالی کمترین امتیاز را کسب نموده‌اند.

۴-۳- یافتن وزن پارامترها با استفاده از روش FDAHP

پس از انجام نظرسنجی و ارزیابی نتایج حاصل از آن، کلیه نتایج حاصله برای تشکیل ماتریس مقایسه زوجی اصلی پارامترها مورد استفاده قرار گرفتند. در تشکیل ماتریس مذکور با توجه به سابقه کاربرد روش FDAHP در طبقه‌بندی توده سنگ‌های شیروانی‌ها (Liu & Chen, 2007)، از تابع عضویت مثلثی و در نتیجه اعداد فازی مثلثی طبق شکل ۳-۲ و روابط ریاضی ۳-۴ تا ۳-۷ استفاده شده است. توابع عضویت مثلثی با وجود سادگی، مفهوم فازی بودن کمیت‌ها را به صورت مطلوبی مدل می‌کند. شکل ۴-۱۴ ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین ۱۲ پارامتر نظرسنجی را نشان می‌دهد. کلیه محاسبات ریاضی مربوطه ذکر شده در فصل سوم، در شکل ۴-۱۵ آورده شده است. وزن غیر فازی کلیه پارامترهای دوازده‌گانه طبق رابطه ۳-۱۰ به شرح جدول ۴-۳ محاسبه شدند. شکل ۴-۱۶ نمودار ستونی برای مقایسه وزن نهایی فازی دلفی 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.

	Z		
کوارتز محتوی	۰/۰۰۹۸۴	۹/۲۱۳۷۶	۸۳۳۳
سختی	۰/۰۰۹۰۴	۷/۵۳۵۶۶	۱۳۷۷۵
ساینده‌گی	۰/۰۰۰۲۳	۳/۹۸۷۰۱	۳۸۵۷
مقاومت فشاری	۰/۰۰۳۶	۲/۴۰۴۲۹	۱۳۰۶/۹
مدول ینگ	۰/۰۰۴۶۳	۰/۷۰۷۲۸	۱۴۳۴/۸
نوع ماتریکس	۰/۰۰۷۶۵	۰/۹۸۱۶۹	۱۰۲۴/۹
سختی چکش اشمیت	۰/۰۰۲۵۷	۰/۷۱۱۹۲	۷۹۷/۱۱
بافت	۰/۰۰۴۳۵	۰/۱۳۰۷۵	۱۸۶/۷
چگالی	۰/۰۰۰۵۹	۰/۲۲۴۸۶	۱۲۹۶/۲
هوازده‌گی	۰/۰۰۰۶۴	۰/۵۹۴۵۹	۲۱۶۰/۴
اندازه دانه ها	۰/۰۰۰۱۵	۰/۴۴۶۶۸	۴۷۰/۴۹
مقاومت کششی	۰/۰۰۰۰۲	۰/۳۸۹۲۷	۱۷۹۹/۹



	Z _i		
کوارتز محتوی	۰/۶۸۰۳۸	۱/۲۰۳۲۹	۲/۱۲۱۹۴
سختی	۰/۶۷۵۵۷	۱/۱۸۳۳	۲/۲۱۲۷۱
ساینده‌گی	۰/۴۹۷۴۳	۱/۱۲۲۱۶	۱/۹۹
مقاومت فشاری	۰/۶۲۵۷	۱/۰۷۵۸۴	۱/۸۱۸۳۹
مدول ینگ	۰/۶۳۸۹۵	۰/۹۷۱۵۵	۱/۸۳۲۵۹
نوع ماتریکس	۰/۶۶۶۲۸	۰/۹۹۸۴۶	۱/۷۸۱۹۲
سختی چکش اشمیت	۰/۶۰۸۴	۰/۹۷۲۰۸	۱/۷۴۴۹۹
بافت	۰/۴۳۲۵۱	۰/۸۴۴۰۵	۱/۵۴۶۱۹
چگالی	۰/۴۴۴۵	۰/۸۸۳۰۶	۱/۸۱۷۱۵
هوازده‌گی	۰/۴۴۷۳۶	۰/۹۵۷۶	۱/۸۹۶۱۷
اندازه دانه ها	۰/۴۸۰۹۱	۰/۹۳۵۰۵	۱/۶۶۹۹۸

مقاومت کششی	۰/۴۰۵۶۲	۰/۹۲۴۳۹	۱/۸۶۷۵۵
-------------	---------	---------	---------



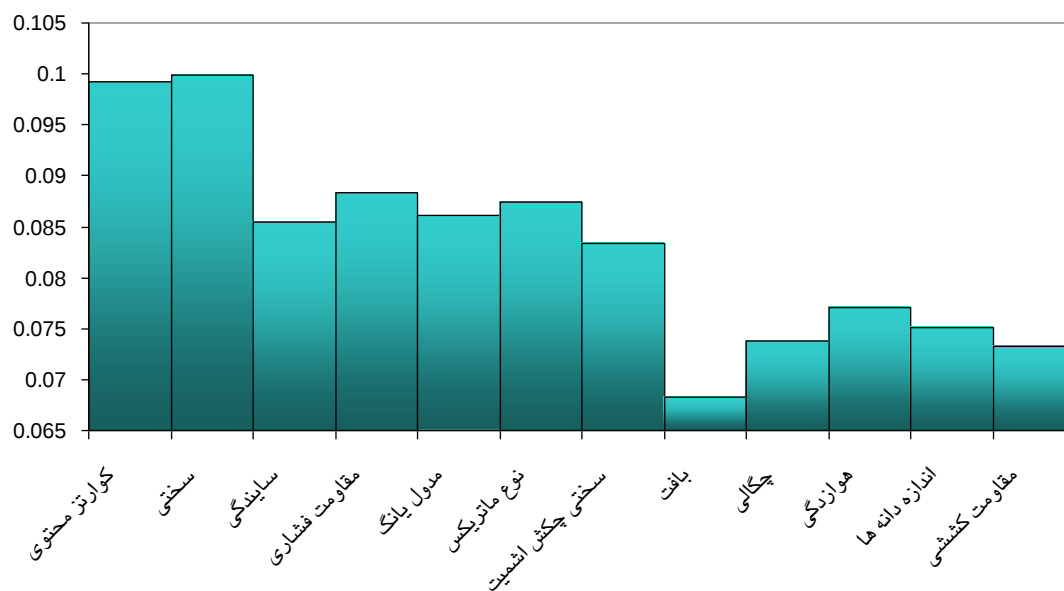
	W _i (وزن فازی پارامترها)		
کوارتز محتوی	۰/۰۳۰۵	۰/۰۹۹۷	۰/۳۲۱۳
سختی	۰/۰۳۰۳	۰/۰۹۸	۰/۳۳۵۱
سایندگی	۰/۰۲۲۳	۰/۰۹۳	۰/۳۰۱۴
مقاومت فشاری	۰/۰۲۸۱	۰/۰۸۹۱	۰/۲۷۵۴
مدول ینگ	۰/۰۲۸۷	۰/۰۸۰۵	۰/۲۷۷۵
نوع ماتریکس	۰/۰۲۹۹	۰/۰۸۲۷	۰/۲۶۹۸
سختی چکش اشمیت	۰/۰۲۷۳	۰/۰۸۰۵	۰/۲۶۴۲
بافت	۰/۰۱۹۴	۰/۰۶۹۹	۰/۲۳۴۱
چگالی	۰/۰۱۹۹	۰/۰۷۳۲	۰/۲۷۵۲
هوازدهی	۰/۰۲۰۱	۰/۰۷۹۳	۰/۲۸۷۱
اندازه دانه ها	۰/۰۲۱۶	۰/۰۷۷۵	۰/۲۵۲۹
مقاومت کششی	۰/۰۱۸۲	۰/۰۷۶۶	۰/۲۸۲۸

شکل ۴-۱۵- کلیه محاسبات انجام شده برای محاسبه وزن‌های

فازی پارامترها

جدول ۴-۴- وزن نهایی غیر فازی پارامترها

پارامتر	وزن غیر فازی پارامترها
کوارتز محتوی	۰/۰۹۹۲
سختی	۰/۰۹۹۸
سایندگی	۰/۰۸۵۵
مقاومت فشاری	۰/۰۸۸۳
مدول یانگ	۰/۰۸۶۲
نوع ماتریکس	۰/۰۸۷۴
سختی چکش اشمیت	۰/۰۸۳۴
بافت	۰/۰۶۸۲
چگالی	۰/۰۷۳۸
هوازدهی	۰/۰۷۷
اندازه دانه ها	۰/۰۷۵
مقاومت کششی	۰/۰۷۳۳



شکل ۴-۱۶- نمودار ستونی وزن نهایی فازی دلفی پارامترهای مؤثر در قابلیت حفاری سنگ‌ها

چنانچه از شکل ۴-۱۶ نتیجه می‌شود سختی، کوارتز محتوی، مقاومت فشاری و نوع ماتریکس بیشترین امتیازها و بافت کمترین امتیاز را کسب نموده‌اند. همانطور که دیده می‌شود با وجود این که ساینده‌گی با توجه به نظرات داوران (شکل ۴-۱۳) جزو چهار پارامتر پر اهمیت بود پس از اعمال عملیات ریاضی مربوط به روش FDAHP در رده ششم اهمیت قرار می‌گیرد.

۴-۴- انتخاب و رده‌بندی 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 (RPI)^{۴۰}، استفاده از تمامی ۱۲ پارامتر فوق از لحاظ مهندسی امر پسندیده‌ای نیست. از طرفی همگی پارامترهای فوق مثل هوازده‌گی 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:

الف) از کمترین تعداد پارامترها برای طبقه‌بندی استفاده شود.

الف) از به کارگیری پارامترهای هم ارزش، هم ارز و دارای همپوشانی پرهیز شود.

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

⁴⁰. Rock Penetrability index

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 بتوان به طبقه‌بندی توده‌سنگ‌های ضعیف پرداخت (Hoek & Brown, 1994). 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.

۴-۴-۱- مقاومت فشاری تک‌محوری

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 تک‌محوری 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 مورد مطالعه قرار داد. لذا با توجه به همه تفاسیر، مجموع وزن چهار پارامتر فوق به عنوان وزن آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری در سیستم طبقه‌بندی جدید در نظر گرفته شده است.

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 بنیواسکی 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. همچنین با در نظر گرفتن یک عدد در هر یک از بازه‌های ذکر شده در جدول ۴-۶، رابطه

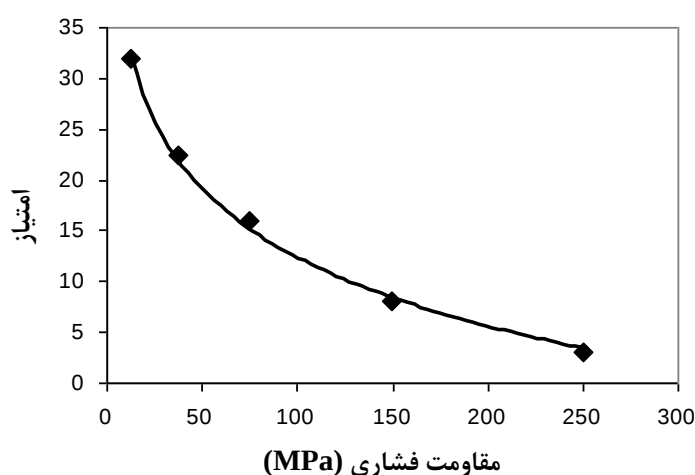
بین امتیاز مقاومت فشاری در سیستم طبقه‌بندی جدید و مقاومت سنگ به صورت شکل ۴-۱۷ قابل ارائه است.

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	۳۲/۵	۲۲/۷۵	۱۶/۲۵	۸	۳/۲۵

۴-۴-۲- فاکتور سایش شیمازک

چنانچه در فصل دوم 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



شکل ۴-۱۷- رابطه بین مقاومت فشاری و امتیاز مربوطه در سیستم طبقه‌بندی

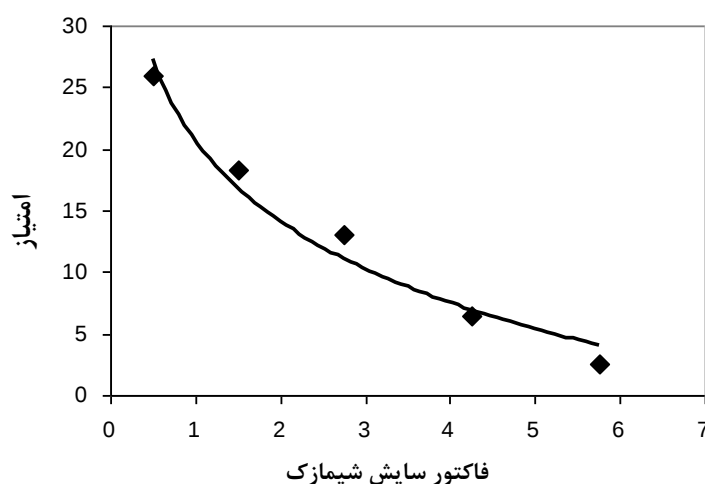
سنگ بستگی دارد لذا روش‌ها و آزمایش‌های غیر مستقیم مثل اندیس سایش سرمته و شاخص سایش سورشار با توجه به اینکه هیچ‌گونه توجهی به بافت و ترکیب کانی‌شناسی سنگ ندارند. از دقت و قابلیت اطمینان کمتری برخوردارند. در این میان شاخص سایش شیمازک به دلیل در نظر گرفتن مقاومت کششی، اندازه دانه‌ها و نیز میزان کوارتز محتوی 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.

تاکنون هیچ‌گونه طبقه‌بندی کمی برای ساینده‌گی سنگ‌ها ارائه نشده است. در این تحقیق با توجه به مطالب مشروح، فاکتور سایش شیمازک که به عنوان کمیت ساینده‌گی سنگ در نظر گرفته شده است، در پنج کلاس اصلی تقسیم می‌شود. روش امتیازدهی و طبقه‌بندی این کمیت به شرح جدول ۴-۷ پیشنهاد می‌شود. رابطه بین سایش شیمازک و امتیاز آن در سیستم طبقه‌بندی جدید به صورت شکل ۴-۱۸ ارائه شده است.

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

فاکتور سایش شیمازک (N/mm)	۰-۱	۱-۲	۲-۳/۵	۳/۵-۵	>۵
ساینده‌گی خیلی کم	ساینده‌گی کم	ساینده‌گی متوسط	ساینده‌گی بالا	ساینده‌گی خیلی بالا	
۲۶	۱۸/۲۵	۱۳	۶/۵	۲/۵	



شکل ۴-۱۸- رابطه بین فاکتور سایش شیمازک و امتیاز مربوطه در سیستم طبقه‌بندی

۴-۴-۳- سختی

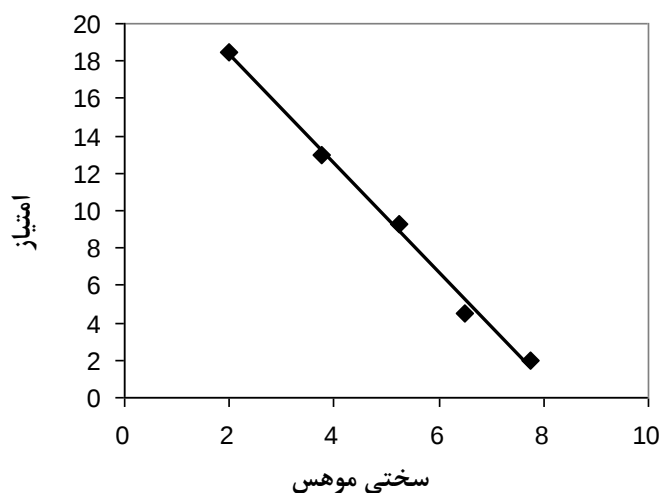
سختی یکی از مهم‌ترین پارامترهای هر کانی به شمار می‌رود که تأثیر بسیار زیادی بر سختی کل سنگ و در نهایت قابلیت حفاری آن دارد. در این تحقیق دو شاخص سختی در نظرسنجی انجام شده

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.

در این تحقیق برای امتیازدهی به سختی سنگ از روش پیشنهادی در سیستم RDi استفاده شده است. با توجه به اینکه سختی سنگ در مجموع امتیاز ۱۸/۵ از ۱۰۰ امتیاز را کسب کرده است، نحوه امتیازدهی به بافت سنگ در سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی طبق جدول ۴-۸ می‌باشد. رابطه بین سختی موس و امتیاز آن در سیستم طبقه‌بندی جدید به صورت شکل ۴-۱۹ ارائه شده است.

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

سختی موس	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)	۱۸/۵	۱۳	۹/۲۵	۴/۵	۲



شکل ۴-۱۹- رابطه بین سختی موس و امتیاز مربوطه در سیستم طبقه‌بندی

۴-۴-۴- 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 می‌رسد 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 طبقه‌بندی RPi 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 در سیستم RDi استفاده شده است. برای وزن این پارامتر مجموع وزن بافت و اندازه دانه‌های حاصل از نظرسنجی در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه بافت و اندازه دانه‌های سنگ در مجموع امتیاز ۱۴/۵ از ۱۰۰ امتیاز را کسب کرده است، نحوه امتیازدهی به بافت سنگ در سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی طبق جدول ۴-۹ می‌باشد.

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

بافت	متخلخل	شکسته	گرانوئیدی	پرفیری	متراکم
اندازه دانه‌ها (mm)		>۵	۲-۵	ماتریکس: ۰/۵-۱ دانه‌ها: ۲-۵	۰/۰۵-۱
امتیاز	۱۴/۵	۱۰	۷/۲۵	۳/۵	۱/۵

۴-۴-۵- مدول الاستیسیته (مدول یانگ)

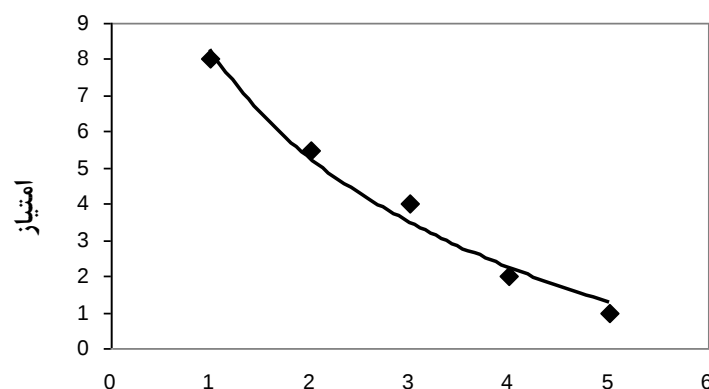
با توجه به رفتار سنگ‌ها در فرآیند شکست و به ویژه حفاری، نحوه رسیدن یک سنگ به مقاومت فشاری حداکثر آن بر قابلیت حفاری سنگ تأثیرگذار است. الاستیسیته را می‌توان یک پارامتر مستقل دانست که رفتار خاصی در سنگ ایجاد می‌کند و گرچه از سایر مشخصات سنگ اثر می‌پذیرد با این حال اثرگذاری آن بیشتر از تأثیرپذیری آن مورد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

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. رابطه بین مدول یانگ و امتیاز آن در سیستم طبقه‌بندی جدید به صورت شکل ۴-۲۰ ارائه شده است.

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

مدول یانگ (GPa)	< ۱۰	۱۰-۳۰	۳۰-۷۰	۷۰-۱۰۰	> ۱۰۰
خاصیت الاستیسیته	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
امتیاز (از ۱۰۰)	۸	۵/۵	۴	۲	۱



مدول یانگ (GPa)

شکل ۴-۲۰- رابطه بین مدول یانگ و امتیاز مربوطه در سیستم طبقه‌بندی

۴-۵- سیستم طبقه‌بندی کلی و پیش‌بینی قابلیت حفاری 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	
> ۲۰۰	۱۰۰-۲۰۰	۵۰-۱۰۰	۲۵-۵۰	۱-۲۵	مقاومت فشاری تک‌محوری (MPa)	۱
خیلی بالا	بالا	متوسط	کم	خیلی کم		
۳/۲۵	۸	۱۶/۲۵	۲۲/۷۵	۳۲/۵	امتیاز	
> ۵	۳/۵-۵	۲-۳/۵	۱-۲	۰-۱	فاکتور سایش شیمازک (N/mm)	۲
سایندگی خیلی بالا	سایندگی بالا	سایندگی متوسط	سایندگی کم	سایندگی خیلی کم		
۲/۵	۶/۵	۱۳	۱۸/۲۵	۲۶	امتیاز	
> ۷	۶-۷	۴/۵-۶	۳-۴/۵	۱-۳	سختی موهس	۳
خیلی سخت	سخت	نسبتاً سخت	نسبتاً نرم	خیلی نرم تا نرم		

۲	۴/۵	۹/۲۵	۱۳	۱۸/۵	امتیاز	
مترکم	پرفیری	گرانوئیدی	شکسته	متخلخل	بافت	
۰/۰۵-۱	ماتریکس: ۰/۵-۱ دانه‌ها: ۲-۵	۲-۵	>۵		اندازه دانه‌ها (mm)	۴
۱/۵	۳/۵	۷/۲۵	۱۰	۱۴/۵	امتیاز	
>۱۰۰	۷۰-۱۰۰	۳۰-۷۰	۱۰-۳۰	<۱۰	مدول یانگ (GPa)	۵
خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم	خیلی کم		
۱	۲	۴/۲۵	۶	۸	امتیاز	

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

جدول ۴-۱۲- پیش‌بینی قابلیت حفاری بر اساس RPi

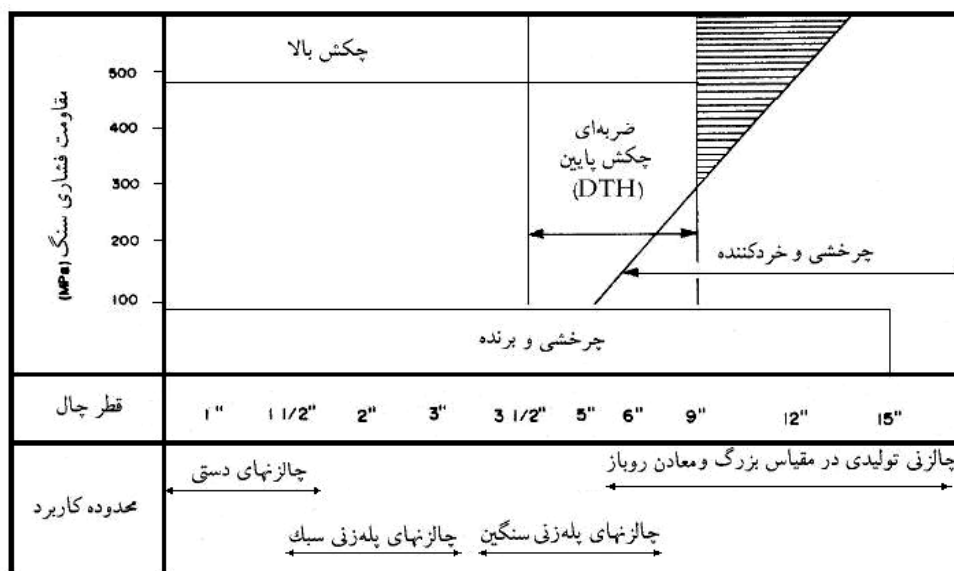
۱۰/۲۵-۲۰	۲۰-۴۰	۴۰-۶۰	۶۰-۸۰	۸۰-۱۰۰	امتیاز RPi
کم	متوسط-کم	متوسط	متوسط-بالا	بالا	
خیلی ضعیف	ضعیف	متوسط	خوب	خیلی خوب	قابلیت حفاری سنگ

چنانچه دیده می‌شود با انجام آزمایش‌های پنج‌گانه فوق می‌توان قابلیت حفاری و نفوذپذیری سنگ را ارزیابی و پیش‌بینی نمود. گرچه ممکن است تعیین دقیق کلیه پارامترهای فوق زمان‌گیر باشد ولی اطلاعات با ارزش به دست آمده در مورد سنگ و قابلیت حفاری آن صرف زمان مذکور را منطقی می‌نماید. این ارزش با توجه به هزینه‌های عملیاتی بالا و مشکلات اجرایی بسیار زیاد ناشی از عدم شناخت صحیح سنگ در حین حفاری بسیار بارزتر می‌شود.

۴-۶- انتخاب روش حفاری مناسب در معادن روباز با استفاده از شاخص RPi

تاکنون مطالعات زیادی بر روی انتخاب سیستم حفاری مناسب برای انواع سنگ‌ها انجام گرفته و روش‌های مختلفی برای تعیین روش حفاری مناسب پیشنهاد گردیده است. با این حال در منابع مختلف حفاری معدنی، هیچ روش جامع و کاملی که اکثر مشخصات سنگ‌ها را برای انتخاب روش حفاری مناسب در معادن را در برگیرد ارائه نشده است. در معدود روش‌های موجود برای انتخاب سیستم حفاری مناسب، از میان مشخصات مهندسی سنگ تنها مقاومت فشاری و میزان ساینده‌گی سنگ‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از رایج‌ترین روش‌های انتخاب روش حفاری که منحصراً بر مبنای مقاومت فشاری و قطر حفاری

استوار است، در کتاب حفاری و آتش‌کاری در سنگ توسط جیمینو و همکاران (۱۹۹۵) مطابق شکل ۴-۲۱ ارائه شده است. یکی از بزرگ‌ترین معایب این روش عدم توجه به سختی و ساینده‌گی سنگ‌ها است که نقش بسیار مهمی در قابلیت حفاری و انتخاب روش حفاری و سرمته دارند.

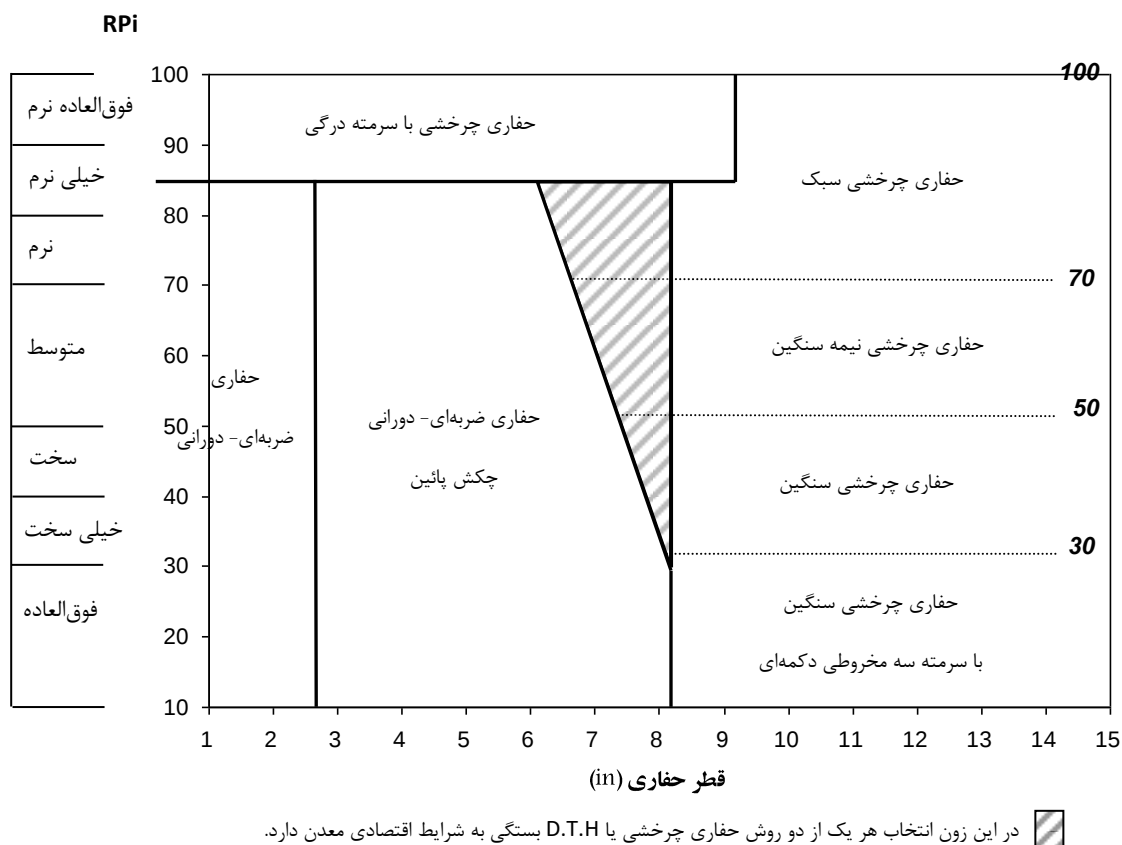


شکل ۴-۲۱- محدوده کاربرد روش‌های مختلف حفاری به صورت تابعی از مقاومت فشاری سنگ‌ها و قطر حفاری (Jimeno et al. 1995)

دومین روش شناخته شده برای انتخاب روش حفاری مناسب بر مبنای ساینده‌گی و اندازه دانه‌های سنگ‌ها استوار است. در این روش، سنگ‌ها از نظر منشأ ساخت و ساینده‌گی به صورت کیفی در سه خانواده اصلی و ۱۱ گروه فرعی به صورت مناسبی طبقه‌بندی شده و برای هر گروه از سنگ‌ها با توجه به قطر حفاری، روش حفاری مناسب پیشنهاد شده است (اصانلو، ۱۳۸۶). این روش به طور کامل در فصل دوم (بخش ۲-۴) آورده شده است. یکی از بزرگ‌ترین معایب این روش کیفی بودن پارامترهای مورد استفاده در آن است که کاربران را در تشخیص مشخصات سنگ و کلاس مربوطه دچار مشکل می‌سازد. با توجه به دو روش مذکور مشخص می‌شود که هر کدام از این روش‌ها باید به عنوان مکمل همدیگر به کار برده شوند. زیرا ترکیبی از سه پارامتر مقاومت فشاری، ساینده‌گی و اندازه دانه به صورت مناسب‌تری می‌توانند در انتخاب روش حفاری مناسب به کار برده شوند. لذا در این میان فقدان یک روش جامع برای انتخاب روش حفاری که تمامی پارامترهای سنگ را در نظر بگیرد به وضوح آشکار است.

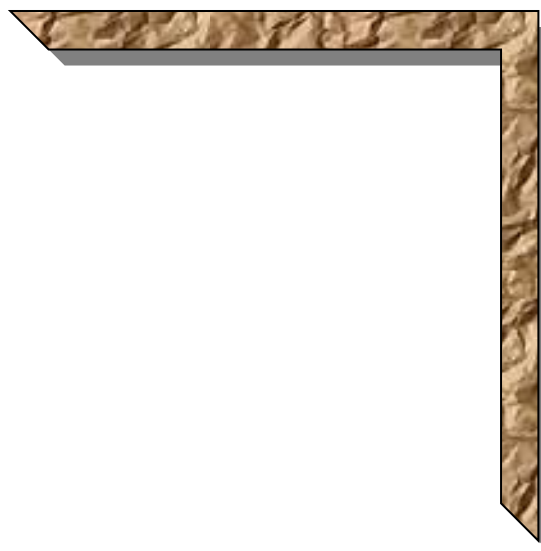
با توجه به پارامترهای مورد استفاده در شاخص قابلیت نفوذ در سنگ، از این روش می‌توان به طور مطلوبی برای انتخاب روش حفاری مناسب سود جست. لذا در این تحقیق سعی شده است با در نظر گرفتن

محدودیت کاربرد هر یک از روش‌های حفاری و نیز میزان شاخص RPi روش حفاری مناسب برای هر سنگ را پیشنهاد شود. نمای کلی روش پیشنهادی برای انتخاب روش حفاری مناسب با استفاده از شاخص قابلیت نفوذ در سنگ، در شکل ۴-۲۲ نشان داده شده است.



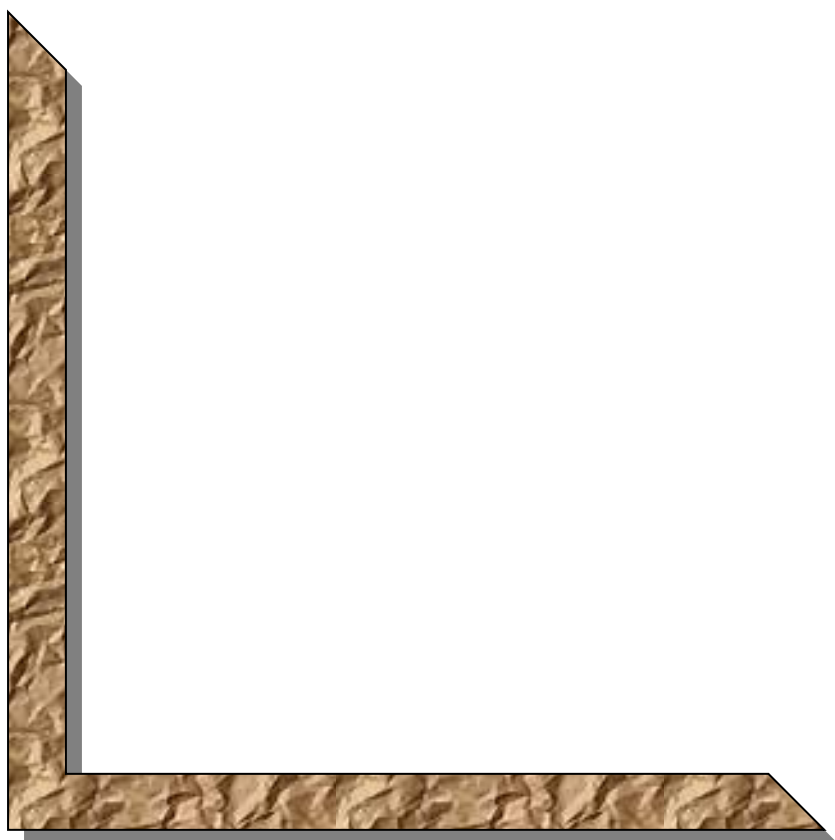
شکل ۴-۲۲ - روش پیشنهادی برای انتخاب روش حفاری مناسب با استفاده از شاخص قابلیت نفوذ

در سنگ



فصل پنجم

مطالعات موردی در معادن



۵-۱- مقدمه

پس از ارائه سیستم طبقه بندی RPi، به منظور ارزیابی توانایی شاخص قابلیت حفاری، نمونه‌ای از سنگ‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته و از دیدگاه سیستم طبقه بندی RPi امتیازدهی و طبقه‌بندی شدند. چنانچه در فصل دوم 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 امکان‌پذیر 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 پائین 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 سرمت 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 با استفاده از سیستم طبقه‌بندی ارائه شده (RPi) به طور مناسبی تعیین شود.

۵-۲- جمع‌آوری نمونه از معادن

به منظور انجام مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های سنگی، در مجموع از سنگ‌های موجود در هفت معدن و نیز یکی از شیروانی‌های سنگی مشرف به اتوبان شمالی تبریز نمونه‌برداری به عمل آمد. در جدول ۵-۱ اسامی معادن نمونه‌برداری شده 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.

جدول ۵-۱- 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 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 سراب	۸۵ کیلومتری شرق تبریز
ماسه سنگ آهکی	بزرگراه پاسداران تبریز	شمال تبریز

۵-۳- آزمایش‌های انجام شده

۵-۳-۱- 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 به حجم آزمایش‌ها و دقت مورد نیاز، کلیه آزمایش‌ها تحت استانداردهای انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ و با دقت بالا انجام گرفت (معماریان، ۱۳۸۱، فهیمی‌فر، ۱۳۸۰). با توجه به پارامترهای مورد استفاده در سیستم طبقه‌بندی RPi، در مجموع آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)، آزمایش کشش غیر مستقیم (تست برزیلی) (BTS) و مدول یانگ (E) بر روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج آزمایش‌های مکانیک سنگی در جدول ۵-۲ ارائه شده است.

۵-۳-۲- 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. جدول ۳-۴ نتایج حاصل از مطالعات کانی‌شناسی آورده شده است.

جدول ۵-۲- نتایج آزمایش‌های مکانیک سنگی

نام سنگ	UCS (MPa)	BTS (MPa)	E (GPa)
مونزونیت	۵۷	۴/۲۱	۵۱/۲۳
گرانیت	۸۷/۵	۵/۳۶	۶۰/۸۴
سنگ آهک سیاه	۵۱	۲/۲۳	۴۴/۱
تراورتن کرمی	۵۰/۵	۲/۴	۴۸/۸۳
تراورتن قرمز	۵۳	۱/۴۵	۷۰/۱۹
سیلیس	۱۱۲	۴/۱۸	۴۳/۲۸
نفلین سینیت	۷۶	۴/۴۶	۵۱/۵۹
ماسه سنگ آهکی	۱۴	۰/۷۸	۹/۲۸

جدول ۵-۳- نتایج مطالعات کانی‌شناسی 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 سیاه	کلسیت، همتیت، کانی‌های اپک.	اسپرایت	۱/۳۵
تراورتن کرمی	کلسیت، مواد آلی، فضاهای خالی	اسپرایت	۱/۲۷
تراورتن قرمز	کلسیت، همتیت، کانی‌های اپک. فضاهای خالی	اسپرایت	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، الیوین، 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 ۲-۶ 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 ۲-۵ برای هر سنگ محاسبه و معلوم شد. جدول ۴-۵ سختی میانگین، میزان کوارتز محتوی و مقادیر شاخص سایش شیمازک محاسبه شده برای هر کدام از سنگ‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

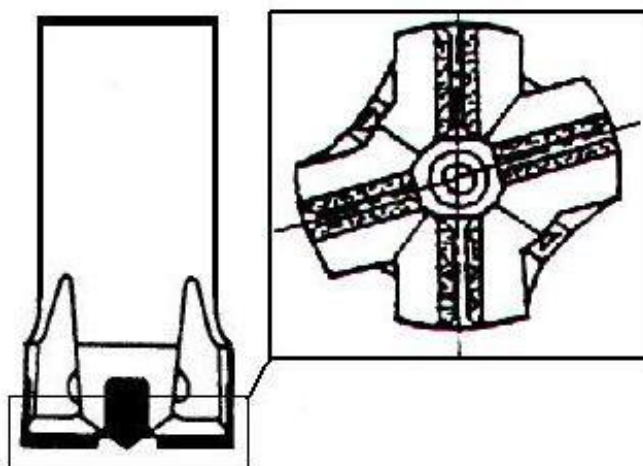
جدول ۴-۵ - سختی میانگین، میزان کوارتز محتوی و مقادیر شاخص سایش شیمازک محاسبه شده برای هر کدام از سنگ‌های مورد مطالعه

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 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

۵-۳-۳- آزمایش‌های حفاری

در کنار انجام آزمون‌های آزمایشگاهی، ۱۳ 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 سرمه تیغه‌ای از نوع ضربدری و با قطر سه اینچ (شکل ۵-۱) مورد حفاری قرار گرفتند.



شکل ۵-۱- سرمه تیغه‌ای از نوع ضربدری مورد استفاده در حفاری‌های آزمایشی (Jimeneo et al. 1995)

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 ۵-۵ آورده شده است. شکل‌های ۵-۲ دستگاه حفاری را در حال حفاری نمونه‌ها نشان می‌دهد

جدول ۵-۵ - نتایج آزمایش‌های حفاری بر روی سنگ‌های مورد مطالعه

نام نمونه	سرعت حفاری (m/min)
مونزونیت	۰/۵۲
گرانیت	۰/۳۲
سنگ آهک سیاه	۰/۴۴
تراورتن کرمی	۰/۵۸
تراورتن قرمز	۰/۸۱
سیلیس	۰/۰۹۵
نفلین سینیت	۰/۲۲
ماسه سنگ	۱/۲۸



شکل ۵-۲- دستگاه حفاری در حال حفاری های آزمایشی

۵-۴- طبقه بندی قابلیت حفاری سنگ های مورد مطالعه

پس از انجام آزمون های آزمایشگاهی بر روی سنگ های مورد مطالعه، کلیه سنگ ها از دیدگاه پارامترهای موجود در سیستم RPi مورد امتیازدهی قرار گرفتند. نحوه امتیازدهی به سنگ های مذکور در جدول ۵-۶ آورده شده است. جدول ۵-۷ امتیاز RPi و کلاس هر سنگ را نشان می دهد.

جدول ۵-۶- نحوه امتیازدهی به سنگ های مورد مطالعه بر اساس RPi

امتیاز پارامترهای سنگ در سیستم RPi					نام سنگ
مدول یانگ (GPa)	بافت	سختی موهس	فاکتور سایش شیمازک (N/mm)	مقاومت فشاری تک محوری (MPa)	
۴/۲۵	۳/۵	۹/۲۵	۱۸/۲۵	۱۶/۲۵	مونزونیت
۴/۲۵	۷/۲۵	۹/۲۵	۲/۵	۱۶/۲۵	گرانیت
۴/۲۵	۳/۵	۱۳	۲۶	۱۶/۲۵	سنگ آهک سیاه
۴/۲۵	۱۴/۵	۱۸/۵	۲۶	۱۶/۲۵	تراورتن کرمی
۴/۲۵	۳/۵	۱۸/۵	۲۶	۱۶/۲۵	تراورتن قرمز
۴/۲۵	۱/۵	۴/۵	۲/۵	۸	سیلیس

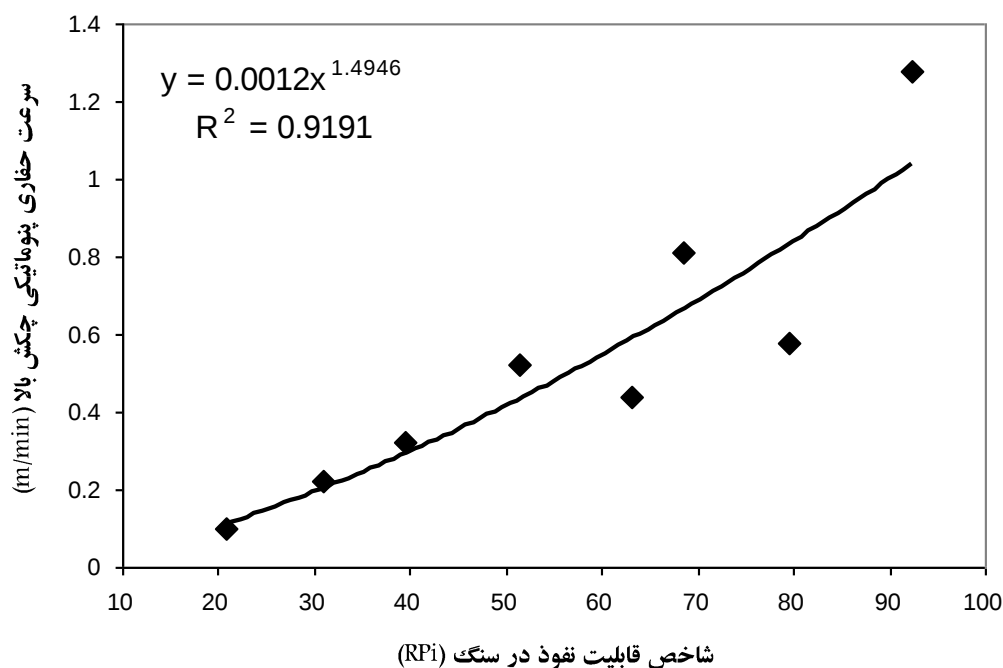
نقلین سینیت	۱۶/۲۵	۲/۵	۴/۵	۳/۵	۴/۲۵
ماسه سنگ	۳۲/۵	۲۶	۱۸/۵	۷/۲۵	۸

جدول ۵-۷- امتیاز و کلاس هر سنگ بر اساس RPi

نام سنگ	امتیاز RPi	قابلیت حفاری در سنگ
مونزونیت	۵۱/۵	متوسط
گرانیت	۳۹/۵	سخت
سنگ آهک سیاه	۶۳	آسان
تراورتن کرمی	۷۹/۵	آسان
تراورتن قرمز	۶۸/۵	آسان
سیلیس	۲۰/۷۵	سخت
نقلین سینیت	۳۱	سخت
ماسه سنگ	۹۲/۲۵	خیلی آسان

۵-۵- پیش‌بینی سرعت حفاری سنگ‌ها با استفاده از شاخص جدید

پس از طبقه‌بندی و ارزیابی قابلیت حفاری سنگ‌های مورد مطالعه، یا توجه به نتایج آزمایش‌های حفاری انجام شده یک سری عملیات ریاضی بر روی داده‌های موجود انجام شد. به منظور ارزیابی توانایی سیستم طبقه‌بندی ارائه شده در پیش‌بینی سرعت حفاری در معادن رگرسیونی بین سرعت حفاری پنوماتیکی چکش بالا و شاخص RPi انجام شد. شکل ۵-۳ رابطه ریاضی بین سرعت حفاری و قابلیت نفوذ در سنگ را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۳- رابطه ریاضی بین سرعت حفاری و شاخص قابلیت نفوذ در سنگ

چنانچه از شکل بر می آید با افزایش شاخص RPi سرعت حفاری پنوماتیکی چکش بالا به صورت توانی افزایش می یابد. میزان همگرایی قابل قبول به دست آمده مؤید این واقعیت است که با استفاده از شاخص RPi و رابطه ریاضی پیشنهادی می توان سرعت حفاری را به نحو مطلوبی پیش بینی نمود.

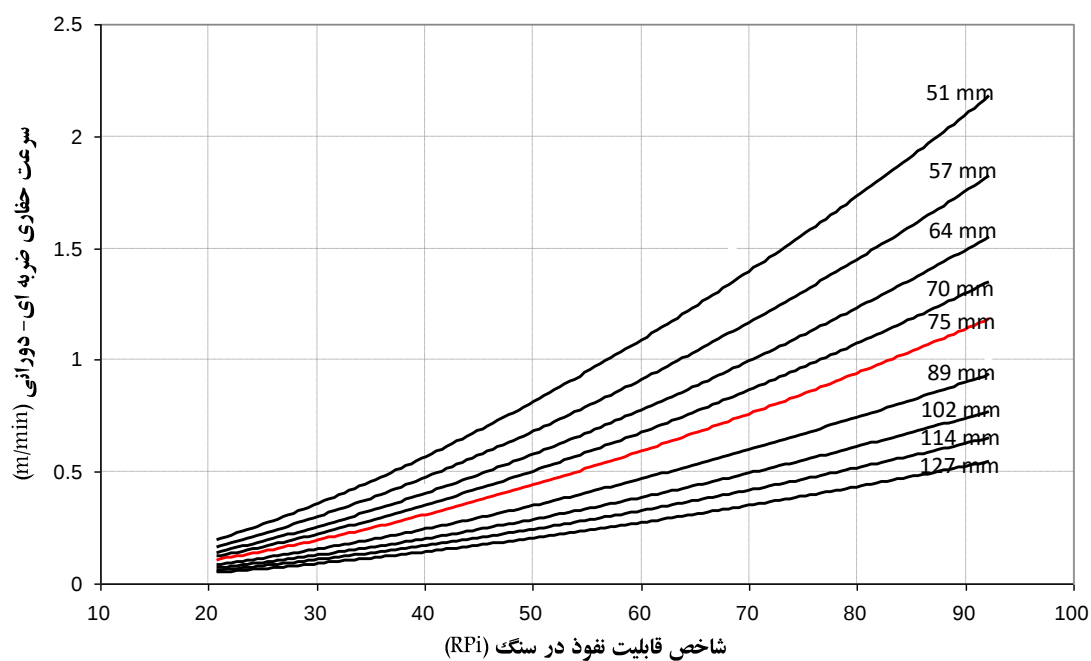
۵-۶- پیش بینی سرعت حفاری با قطرهای مختلف با استفاده از شاخص جدید

قطر سرمته 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 یک جدول تجربی (جدول ۵-۸) 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 بزرگ تر یا کوچک تر را می توان با استفاده از جدول به دست آورد.

با در نظر گرفتن جدول ۵-۸ و با توجه به منحنی به دست آمده در شکل ۵-۳ و رابطه ریاضی متناظر بین سرعت حفاری پنوماتیکی چکش بالا و شاخص RPi که برای حفاری با قطر ۳ اینچ ارائه شده، می توان رابطه شاخص RPi با سرعت حفاری در قطرهای دیگر را نیز ارائه نمود (شکل ۵-۴).

جدول ۵-۸- جدول تجربی برای پیش‌بینی سرعت نفوذ در یک سنگ با قطرهای مختلف (Jimeno et al, 1995)

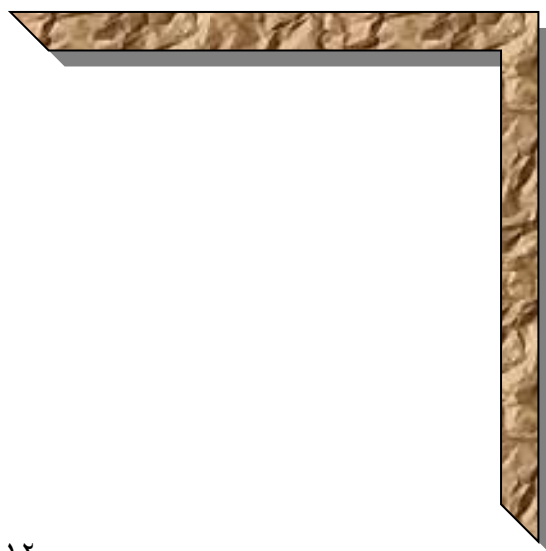
قطر mm	۱۲۷	۱۱۴	۱۰۲	۸۹	۷۶	۷۰	۶۴	۵۷	۵۱	۴۸	۴۴	۴۱	۳۸
۱۲۷	۱.۰۰	۱.۱۷	۱.۴۰	۱.۷۱	۲.۱۵	۲.۴۶	۲.۸۳	۳.۳۱	۳.۹۶	۴.۳۵	۴.۸۲	۵.۴۱	۶.۱۰
۱۱۴	۰.۸۵	۱.۰۰	۱.۱۹	۱.۴۵	۱.۸۳	۲.۰۹	۲.۴۱	۲.۸۲	۳.۳۷	۳.۷۱	۴.۱۱	۴.۶۱	۵.۱۹
۱۰۲	۰.۷۲	۰.۸۴	۱.۰۰	۱.۲۲	۱.۵۴	۱.۷۵	۲.۰۲	۲.۳۶	۲.۸۳	۳.۱۱	۳.۴۵	۳.۸۶	۴.۳۵
۸۹	۰.۵۹	۰.۶۹	۰.۸۲	۱.۰۰	۱.۲۶	۱.۴۴	۱.۶۵	۱.۹۴	۲.۳۲	۲.۵۵	۲.۸۲	۳.۱۷	۳.۵۶
۷۶	۰.۴۶	۰.۵۵	۰.۶۵	۰.۷۹	۱.۰۰	۱.۱۴	۱.۳۱	۱.۵۴	۱.۸۴	۲.۰۲	۲.۲۴	۲.۵۱	۲.۸۲
۷۰	۰.۴۱	۰.۴۸	۰.۵۷	۰.۷۰	۰.۸۸	۱.۰۰	۱.۱۵	۱.۳۵	۱.۶۱	۱.۷۷	۱.۹۷	۲.۲۰	۲.۴۸
۶۴	۰.۳۵	۰.۴۲	۰.۵۰	۰.۶۱	۰.۷۶	۰.۸۷	۱.۰۰	۱.۱۷	۱.۴۰	۱.۵۴	۱.۷۱	۱.۹۱	۲.۱۵
۵۷	۰.۳۰	۰.۳۵	۰.۴۲	۰.۵۲	۰.۶۵	۰.۷۴	۰.۸۵	۱.۰۰	۱.۱۹	۱.۳۱	۱.۴۶	۱.۶۳	۱.۸۴
۵۱	۰.۲۵	۰.۳۰	۰.۳۵	۰.۴۳	۰.۵۴	۰.۶۲	۰.۷۲	۰.۸۴	۱.۰۰	۱.۱۰	۱.۲۲	۱.۳۷	۱.۵۴
۴۸	۰.۲۳	۰.۲۸	۰.۳۲	۰.۳۹	۰.۴۹	۰.۵۶	۰.۶۵	۰.۷۶	۰.۹۱	۱.۰۰	۱.۱۱	۱.۲۴	۱.۴۰
۴۴	۰.۲۱	۰.۲۴	۰.۲۹	۰.۳۵	۰.۴۵	۰.۵۱	۰.۵۹	۰.۶۹	۰.۸۲	۰.۹۰	۱.۰۰	۱.۱۲	۱.۲۶
۴۱	۰.۱۹	۰.۲۲	۰.۲۶	۰.۳۲	۰.۴۰	۰.۴۵	۰.۵۲	۰.۶۱	۰.۷۳	۰.۸۱	۰.۸۹	۱.۰۰	۰.۰۰۸
۳۸	۰.۱۶	۰.۱۹	۰.۲۳	۰.۲۸	۰.۳۴	۰.۴۰	۰.۴۶	۰.۵۴	۰.۶۵	۰.۷۲	۰.۷۹	۰.۸۹	۱.۰۰



شکل ۵-۴- رابطه ریاضی بین سرعت حفاری و قابلیت نفوذ در سنگ در قطرهای مختلف

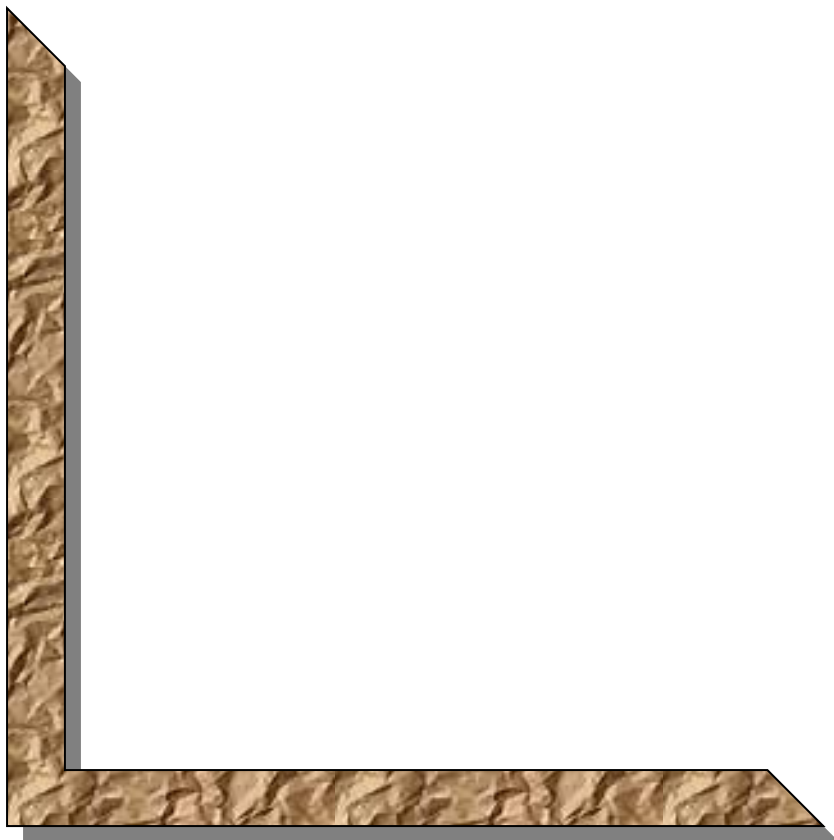
چنانچه از شکل بالا بر می آید با انجام آزمایش‌های پنج‌گانه و تعیین شاخص قابلیت نفوذ در سنگ و با استفاده از گراف‌های ارائه شده می‌توان سرعت حفاری ضربه‌ای-دورانی پنوماتیکی چکش بالا را در قطرهای مختلف پیش‌بینی نمود. با توجه در منحنی‌های مذکور مشخص می‌شود که در سنگ‌های با شاخص قابلیت نفوذ پائین ($RPI < 30$) سرعت حفاری در همه قطرهای مقدار کمی می‌باشد. این امر نشان می‌دهد که در سنگ‌های مقاوم و فوق‌العاده سخت تغییر قطر حفاری راه حل مناسبی برای افزایش سرعت حفاری نبوده و باید بیشتر با تغییر مشخصات عملیاتی دستگاه مثل تعداد ضربه، توان ضربه، دور مته و فشار فلاشینگ سرعت حفاری را بهبود بخشید.

در این مطالعه کاربرد سیستم RPI در پیش‌بینی سرعت حفاری ضربه‌ای-دورانی مورد بحث و بررسی قرار گرفته ولی پر واضح است که با انجام مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی جامع می‌توان شاخص قابلیت نفوذ در سنگ را برای پیش‌بینی سرعت حفاری DTH و سرعت دورانی به کار برد. که این موضوع برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود.



فصل ششم

بحث و نتیجه‌گیری



۵-۱- بحث و نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه 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 فوق‌العاده‌ای در حفاری برخوردارند.

از آنجایی که مقاومت یک سنگ در برابر حفاری به اندرکنش میان سنگ و سرمه مربوط می‌باشد لذا چیرگی مشخصات مهندسی سرمه 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 فازی دلفی (FDAHP) 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 ۱۰۰-۱۰/۲۵ اختصاص می‌دهد. سپس قابلیت حفاری سنگ‌ها در پنج کلاس خیلی خوب، خوب، متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف طبقه‌بندی می‌شود.

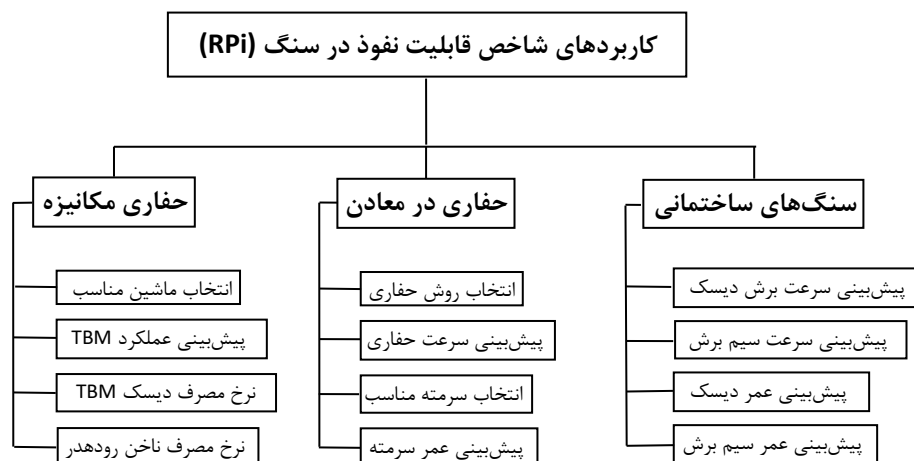
پس از انجام مطالعات آزمایشگاهی به منظور ارزیابی قابلیت و توانایی سیستم طبقه‌بندی پیشنهاد شده، تعداد هشت نمونه از سنگ‌های معادن مختلف شمال غرب کشور برای انجام مطالعات موردی انتخاب شدند. از آنجایی که در اکثر معادن کوچک تا متوسط ایران از روش حفاری چکش بالای پنوماتیکی استفاده می‌شود لذا مطالعات آزمایشگاهی طرح بر روی این روش انجام شد. با توجه به مطالعات آزمایشگاهی انجام شده و طبقه‌بندی سنگ‌های مذکور با استفاده از سیستم طبقه‌بندی جدید، مشخص گردید که با افزایش میزان شاخص قابلیت نفوذ در سنگ (RPI) سرعت حفاری چکش بالای پنوماتیکی به صورت توانی و با ضریب همگرایی ۰/۹۱۹۱ افزایش می‌یابد. با تبدیل سرعت حفاری‌های به دست آمده با قطر ۳ اینچ به سرعت حفاری‌های با قطرهای بالاتر و پائین‌تر، یک نمودار تجربی برای پیش‌بینی سرعت حفاری ضربه‌ای- دورانی چکش بالا ارائه شده است. با معلوم بودن مقدار شاخص RPI و قطر حفاری با استفاده از این نمودار می‌توان سرعت حفاری را پیش‌بینی نمود.

البته 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.

۵-۲- 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. شکل ۶-۱ برخی از زمینه‌های کاربردی پیشنهاد شده برای شاخص قابلیت نفوذ در سنگ را نشان می‌دهد.

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.



شکل ۶-۱- برخی از زمینه‌های کاربردی پیشنهاد شده برای شاخص قابلیت نفوذ در سنگ

منابع و مراجع

- اصانلو، م، ۱۳۸۶، روشهای حفاری، چاپ سوم، مرکز نشر صدا، ۴۹۴ صفحه.
- استوار، ر، ۱۳۸۰، آتشکاری در معادن، جلد اول، جهاد دانشگاهی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- تقی پور، س، رخشنده، م، ۱۳۸۲؛ طبقه بندی مهندسی توده سنگها، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- علمی اسدزاده، گ، معماریان، ح، ۱۳۸۵، بررسی ارتباط بین سایش و بافت سنگ در نمونه‌هایی از سنگ‌های ساختمانی ایران، نشریه دانشکده فنی، جلد ۴۰، شماره ۱، اردیبهشت.
- فهیمی‌فر، ا، سروش، ح، ۱۳۸۰، آزمایش‌های مکانیک سنگ، مبانی نظری و استانداردها (جلد اول: آزمون‌های آزمایشگاهی)، انتشارات شرکت سهامی آزمایشگاه‌های فنی و مکانیک خاک.
- قدسی‌پور، س. ح، ۱۳۷۹، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی AHP، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- معماریان، حسین، ۱۳۸۱، زمین شناسی مهندسی و ژئوتکنیک، انتشارات دانشگاه تهران.
- وفائیان، محمود، ۱۳۷۱، مکانیک سنگ، انتشارات دانشگاه یزد.

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.

Bruland. A. 1998, **Hard rock tunnel boring-drillability test methods**. Department of building and construction engineering, NTUN university, Norway..

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.

Hoek E, Brown ET. 1994, **Practical estimation of rock mass strength**. *Int. J. Rock Mech Min Sci*;34(8):1165–86

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 (SGEM), 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.

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.

Kahraman S., Bilgin N. & Feridunoglu C. 2003, **Dominant rock properties affecting the penetration rate of percussive drills** *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science* 40. 711–723.

Kahraman, S. Balci, C. Yazici, S. & Bilgin, N. 2000, **Prediction of the penetration rate of rotary blast hole drilling using a new drillability index**. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 37: 729-743.

Kahraman. S. 1999, **Rotary and percussive drilling prediction using regression analysis**. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, , 36: 981-989

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 Metalorgy*, August.

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

Plinninger.R., Kasling.H & Thuro.K, 2004, **"Wear prediction in hard rock excavation using Cerchar Abrasivness Index"**, *Eurock2004*, Schubert.

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, 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,

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.

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.

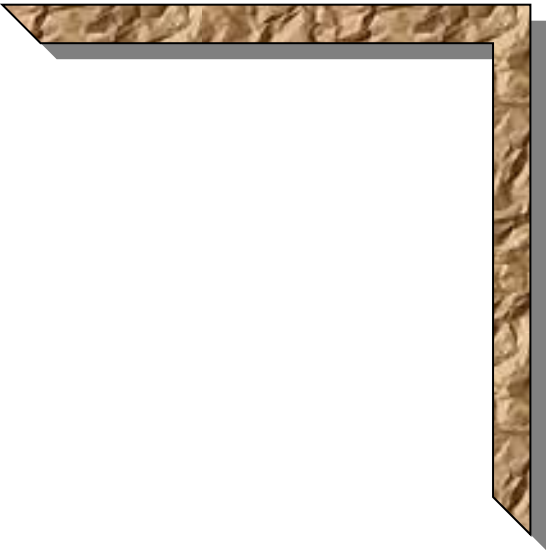
Thuro K., Plinninger R.J. & Spaun G. 2002, **Drilling, Blasting and Cutting- is it possible to qualify geological parameters relating to excavability?**. *Engineering Geology for Developing Countries - Proceedings of 9th Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment*. Durban, South Africa, 16 - 20 September 2002.

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

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,.

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

Ya-Ching Liu. & Chao-Shi Chen, 2007, **A new approach for application of rock mass classification on rock slope stability assessment**, *Engineering Geology* 89 (2007) 129–143



پیوست

جداول مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصصان
مختلف

شکل ۴-۱۴- ماتریس مقایسه زوجی فازی دلفی بین ۱۲ پارامتر نظرسنجی شده

	کوارتز محتوی			سختی			سایندگی			مقاومت فشاری			مدول یانگ		
کوارتز محتوی	۱	۱	۱	۰/۵۶	۱/۰۱۷	۱/۸	۰/۵۵۶	۱/۰۷۲	۲/۳۳	۰/۷۱۴	۱/۱۱۸	۱/۸	۰/۷۱۴	۱/۲۳۹	۱/۸
سختی	۰/۵۶	۰/۹۸۳	۱/۸	۱	۱	۱	۰/۵۵۶	۱/۰۵۴	۳	۰/۷۱۴	۱/۱	۱/۸	۰/۷۱۴	۱/۲۱۸	۱/۸
سایندگی	۰/۴۳	۰/۹۳۳	۱/۸	۰/۳۳	۰/۹۴۸	۱/۸	۱	۱	۱	۰/۶	۱/۰۴۳	۱/۸	۰/۴۲۹	۱/۱۵۵	۱/۸
مقاومت فشاری	۰/۵۶	۰/۸۹۴	۱/۴	۰/۵۶	۰/۹۰۹	۱/۴	۰/۵۵۶	۰/۹۵۹	۱/۶۷	۱	۱	۱	۰/۷۱۴	۱/۱۰۷	۱/۸
مدول یانگ	۰/۵۶	۰/۸۰۷	۱/۴	۰/۵۶	۰/۸۲۱	۱/۴	۰/۵۵۶	۰/۸۶۶	۲/۳۳	۰/۵۵۶	۰/۹۰۳	۱/۴	۱	۱	۱
نوع ماتریکس	۰/۵۶	۰/۸۳	۱/۴	۰/۵۶	۰/۸۴۴	۱/۴	۰/۵۵۶	۰/۸۹	۲/۳۳	۰/۵۵۶	۰/۹۲۸	۱/۸	۰/۷۱۴	۱/۰۲۸	۱/۸
سختی اشمیت	۰/۵۶	۰/۸۰۸	۱/۴	۰/۵۶	۰/۸۲۲	۱/۴	۰/۵۵۶	۰/۸۶۶	۲/۳۳	۰/۵۵۶	۰/۹۰۴	۱/۸	۰/۵۵۶	۱/۰۰۱	۱/۴
بافت	۰/۳۳	۰/۷۰۱	۱/۴	۰/۳۳	۰/۷۱۳	۱/۴	۰/۳۳۳	۰/۷۵۲	۱/۶۷	۰/۴۲۹	۰/۷۸۵	۱/۲۹	۰/۴۲۹	۰/۸۶۹	۱
چگالی	۰/۳۳	۰/۷۳۴	۱/۳	۰/۳۳	۰/۷۴۶	۱/۴	۰/۳۳۳	۰/۷۸۷	۳	۰/۴۲۹	۰/۸۲۱	۱/۸	۰/۴۲۹	۰/۹۰۹	۱/۴
هوازدگی	۰/۳۳	۰/۷۹۶	۱/۸	۰/۳۳	۰/۸۰۹	۱/۸	۰/۴۲۹	۰/۸۵۳	۲/۳۳	۰/۳۳۳	۰/۸۹	۱/۴	۰/۴۲۹	۰/۹۸۶	۱/۸
اندازه دانه‌ها	۰/۴۳	۰/۷۷۷	۱/۴	۰/۳۳	۰/۷۹	۱/۸	۰/۵۵۶	۰/۸۳۳	۱/۸	۰/۵۵۶	۰/۸۶۹	۱/۸	۰/۴۲۹	۰/۹۶۲	۱/۸
مقاومت کششی	۰/۳۳	۰/۷۶۸	۱/۸	۰/۳۳	۰/۷۸۱	۱/۴	۰/۳۳۳	۰/۸۲۴	۱/۴	۰/۴۲۹	۰/۸۵۹	۱/۸	۰/۳۳۳	۰/۹۵۱	۱/۸

جدول پ-۱- ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص اول

	QC	Ha	Ab	UCS	E	Ma	Sch	Tex	De	Wea	Gra	BTS
کوارتز محتوی (QC)	1	1	1	1	1.8	1.8	1.8	1.8	1.286	1.8	1.8	1.286
سختی (Ha)	1	1	1	1	1.8	1.8	1.8	1.8	1.286	1.8	1.8	1.286
سایندگی (Ab)	1	1	1	1	1.8	1.8	1.8	1.8	1.286	1.8	1.8	1.286
مقاومت فشاری (UCS)	1	1	1	1	1.8	1.8	1.8	1.8	1.286	1.8	1.8	1.286
مدول یانگ (E)	0.556	0.556	0.556	0.556	1	1	1	1	0.714	1	1	0.714
نوع ماتریکس (Ma)	0.556	0.556	0.556	0.556	1	1	1	1	0.714	1	1	0.714
سختی چکش اشمیت (Sch)	0.556	0.556	0.556	0.556	1	1	1	1	0.714	1	1	0.714
بافت (Tex)	0.556	0.556	0.556	0.556	1	1	1	1	0.714	1	1	0.714
چگالی (De)	0.778	0.778	0.778	0.778	1.4	1.4	1.4	1.4	1	1.4	1.4	1
هوازدهگی (Wea)	0.556	0.556	0.556	0.556	1	1	1	1	0.714	1	1	0.714

اندازه دانه ها (Gra)	0.556	0.556	0.556	0.556	1	1	1	1	0.714	1	1	0.714
مقاومت کششی (BTS)	0.778	0.778	0.778	0.778	1.4	1.4	1.4	1.4	1	1.4	1.4	1

جدول پ-۲- ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص دوم

	QC	Ha	Ab	UCS	E	Ma	Sch	Tex	De	Wea	Gra	BTS
کوارتز محتوی (QC)	1	1.8	1	1.29	1.29	1.29	1.8	1.29	1.29	1.29	1.286	3
سختی (Ha)	0.556	1	0.556	0.71	0.71	0.71	1	0.71	0.71	0.71	0.714	1.667
سایندگی (Ab)	1	1.8	1	1.29	1.29	1.29	1.8	1.29	1.29	1.29	1.286	3
مقاومت فشاری (UCS)	0.778	1.4	0.778	1	1	1	1.4	1	1	1	1	2.333
مدول یانگ (E)	0.778	1.4	0.778	1	1	1	1.4	1	1	1	1	2.333
نوع ماتریکس (Ma)	0.778	1.4	0.778	1	1	1	1.4	1	1	1	1	2.333
سختی چکش اشمیت (Sch)	0.556	1	0.556	0.71	0.71	0.71	1	0.71	0.71	0.71	0.714	1.667
بافت (Tex)	0.778	1.4	0.778	1	1	1	1.4	1	1	1	1	2.333
چگالی (De)	0.778	1.4	0.778	1	1	1	1.4	1	1	1	1	2.333
هوازدهی (Wea)	0.778	1.4	0.778	1	1	1	1.4	1	1	1	1	2.333
اندازه دانه ها (Gra)	0.778	1.4	0.778	1	1	1	1.4	1	1	1	1	2.333
مقاومت کششی (BTS)	0.333	0.6	0.333	0.43	0.43	0.43	0.6	0.43	0.43	0.43	0.429	1

جدول پ-۳- ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص سوم

	QC	Ha	Ab	UCS	E	Ma	Sch	Tex	De	Wea	Gra	BTS
کوارتز محتوی (QC)	1	1	1.285	1.285	1	1.285	1.8	1	1	1.285	1.8	3
سختی (Ha)	1	1	1.285	1.285	1	1.285	1.8	1	1	1.285	1.8	3
سایندگی (Ab)	0.777	0.777	1	1	0.777	1	1.4	0.778	0.778	1	1.4	2.333
مقاومت فشاری (UCS)	0.777	0.777	1	1	0.777	1	1.4	0.778	0.778	1	1.4	2.333
مدول یانگ (E)	1	1	1.285	1.285	1	1.285	1.8	1	1	1.285	1.8	3
نوع ماتریکس (Ma)	0.777	0.777	1	1	0.777	1	1.4	0.778	0.778	1	1.4	2.333
سختی چکش اشمیت (Sch)	0.555	0.555	0.714	0.714	0.555	0.714	1	0.556	0.556	0.714	1	1.667
بافت (Tex)	1	1	1.285	1.285	1	1.285	1.8	1	1	1.285	1.8	3
چگالی (De)	1	1	1.285	1.285	1	1.285	1.8	1	1	1.285	1.8	3
هوازدهی (Wea)	0.777	0.777	1	1	0.777	1	1.4	0.778	0.778	1	1.4	2.333
اندازه دانه ها (Gra)	0.555	0.555	0.714	0.714	0.555	0.714	1	0.556	0.556	0.714	1	1.667

مقاومت کششی (BTS)	0.333	0.333	0.428	0.428	0.333	0.428	0.6	0.333	0.333	0.428	0.6	1
-------------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-----	-------	-------	-------	-----	---

جدول پ-۴- ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص چهارم

	QC	Ha	Ab	UCS	E	Ma	Sch	Tex	De	Wea	Gra	BTS
کوارتز محتوی (QC)	1	1	1	1.285	1.285	1.8	1.285	3	3	1.8	1.8	1.28
سختی (Ha)	1	1	1	1.285	1.285	1.8	1.285	3	3	1.8	1.8	1.28
سایندگی (Ab)	1	1	1	1.285	1.285	1.8	1.285	3	3	1.8	1.8	1.28
مقاومت فشاری (UCS)	0.777	0.777	0.777	1	1	1.4	1	2.333	2.333	1.4	1.4	1
مدول یانگ (E)	0.777	0.777	0.777	1	1	1.4	1	2.333	2.333	1.4	1.4	1
نوع ماتریکس (Ma)	0.555	0.555	0.555	0.714	0.714	1	0.714	1.666	1.666	1	1	0.71
سختی چکش اشمیت (Sch)	0.777	0.777	0.777	1	1	1.4	1	2.333	2.333	1.4	1.4	1
بافت (Tex)	0.333	0.333	0.333	0.428	0.428	0.6	0.428	1	1	0.6	0.6	0.42
چگالی (De)	0.333	0.333	0.333	0.428	0.428	0.6	0.428	1	1	0.6	0.6	0.42
هوازدهی (Wea)	0.555	0.555	0.555	0.714	0.714	1	0.714	1.666	1.666	1	1	0.71
اندازه دانه ها (Gra)	0.555	0.555	0.555	0.714	0.714	1	0.714	1.666	1.666	1	1	0.71
مقاومت کششی (BTS)	0.777	0.777	0.777	1	1	1.4	1	2.333	2.333	1.4	1.4	1

جدول پ-۵- ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص پنجم

	QC	Ha	Ab	UCS	E	Ma	Sch	Tex	De	Wea	Gra	BTS
کوارتز محتوی (QC)	1	1	1	1	1.286	1.286	1	1.286	1.286	1.286	1.286	1
سختی (Ha)	1	1	1	1	1.286	1.286	1	1.286	1.286	1.286	1.286	1
سایندگی (Ab)	1	1	1	1	1.286	1.286	1	1.286	1.286	1.286	1.286	1
مقاومت فشاری (UCS)	1	1	1	1	1.286	1.286	1	1.286	1.286	1.286	1.286	1
مدول یانگ (E)	0.778	0.778	0.778	0.778	1	1	0.778	1	1	1	1	0.778
نوع ماتریکس (Ma)	0.778	0.778	0.778	0.778	1	1	0.778	1	1	1	1	0.778
سختی چکش اشمیت (Sch)	1	1	1	1	1.286	1.286	1	1.286	1.286	1.286	1.286	1
بافت (Tex)	0.778	0.778	0.778	0.778	1	1	0.778	1	1	1	1	0.778
چگالی (De)	0.778	0.778	0.778	0.778	1	1	0.778	1	1	1	1	0.778
هوازدهی (Wea)	0.778	0.778	0.778	0.778	1	1	0.778	1	1	1	1	0.778
اندازه دانه ها (Gra)	0.778	0.778	0.778	0.778	1	1	0.778	1	1	1	1	0.778
مقاومت کششی (BTS)	1	1	1	1	1.286	1.286	1	1.286	1.286	1.286	1.286	1

جدول پ-۶- ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص ششم

	QC	Ha	Ab	UCS	E	Ma	Sch	Tex	De	Wea	Gra	BTS
کوارتز محتوی (QC)	1	1.286	1	1	1.286	1.286	1.286	1.286	1.8	1.286	1.286	1.286
سختی (Ha)	0.778	1	0.778	0.778	1	1	1	1	1.4	1	1	1
سایندگی (Ab)	1	1.286	1	1	1.286	1.286	1.286	1.286	1.8	1.286	1.286	1.286
مقاومت فشاری (UCS)	1	1.286	1	1	1.286	1.286	1.286	1.286	1.8	1.286	1.286	1.286
مدول یانگ (E)	0.778	1	0.778	0.778	1	1	1	1	1.4	1	1	1
نوع ماتریکس (Ma)	0.778	1	0.778	0.778	1	1	1	1	1.4	1	1	1
سختی چکش اشمیت (Sch)	0.778	1	0.778	0.778	1	1	1	1	1.4	1	1	1
یافت (Tex)	0.778	1	0.778	0.778	1	1	1	1	1.4	1	1	1
چگالی (De)	0.556	0.714	0.556	0.556	0.714	0.714	0.714	0.714	1	0.714	0.714	0.714
هوازدهگی (Wea)	0.778	1	0.778	0.778	1	1	1	1	1.4	1	1	1
اندازه دانه ها (Gra)	0.778	1	0.778	0.778	1	1	1	1	1.4	1	1	1
مقاومت کششی (BTS)	0.778	1	0.778	0.778	1	1	1	1	1.4	1	1	1

جدول پ-۷- ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص هفتم

	QC	Ha	Ab	UCS	E	Ma	Sch	Tex	De	Wea	Gra	
کوارتز محتوی (QC)	1	1	1.286	1.8	1.8	1	1.286	1.8	1.8	1.286	1.286	
سختی (Ha)	1	1	1.286	1.8	1.8	1	1.286	1.8	1.8	1.286	1.286	
سایندگی (Ab)	0.778	0.778	1	1.4	1.4	0.778	1	1.4	1.4	1	1	
مقاومت فشاری (UCS)	0.556	0.556	0.714	1	1	0.556	0.714	1	1	0.714	0.714	
مدول یانگ (E)	0.556	0.556	0.714	1	1	0.556	0.714	1	1	0.714	0.714	
نوع ماتریکس (Ma)	1	1	1.286	1.8	1.8	1	1.286	1.8	1.8	1.286	1.286	
سختی چکش اشمیت (Sch)	0.778	0.778	1	1.4	1.4	0.778	1	1.4	1.4	1	1	
یافت (Tex)	0.556	0.556	0.714	1	1	0.556	0.714	1	1	0.714	0.714	
چگالی (De)	0.556	0.556	0.714	1	1	0.556	0.714	1	1	0.714	0.714	
هوازدهگی (Wea)	0.778	0.778	1	1.4	1.4	0.778	1	1.4	1.4	1	1	
اندازه دانه ها (Gra)	0.778	0.778	1	1.4	1.4	0.778	1	1.4	1.4	1	1	
مقاومت کششی (BTS)	0.778	0.778	1	1.4	1.4	0.778	1	1.4	1.4	1	1	

جدول پ-۸- ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص هشتم

	QC	Ha	Ab	UCS	E	Ma	Sch	Tex	De	Wea	Gra	B
کوارتز محتوی (QC)	1	1	1	1.8	1.285	1.285	1	1.8	1.285	1.285	1	1
سختی (Ha)	1	1	1	1.8	1.285	1.285	1	1.8	1.285	1.285	1	1
سایندگی (Ab)	1	1	1	1.8	1.285	1.285	1	1.8	1.285	1.285	1	1
مقاومت فشاری (UCS)	0.555	0.555	0.555	1	0.714	0.714	0.555	1	0.714	0.714	0.555	0.5
مدول یانگ (E)	0.777	0.777	0.777	1.4	1	1	0.777	1.4	1	1	0.777	0.7
نوع ماتریکس (Ma)	0.777	0.777	0.777	1.4	1	1	0.777	1.4	1	1	0.777	0.7
سختی چکش اشمیت (Sch)	1	1	1	1.8	1.285	1.285	1	1.8	1.285	1.285	1	1
بافت (Tex)	0.555	0.555	0.555	1	0.714	0.714	0.555	1	0.714	0.714	0.555	0.5
چگالی (De)	0.777	0.777	0.777	1.4	1	1	0.777	1.4	1	1	0.777	0.7
هوازدهی (Wea)	0.777	0.777	0.777	1.4	1	1	0.777	1.4	1	1	0.777	0.7
اندازه دانه ها (Gra)	1	1	1	1.8	1.285	1.285	1	1.8	1.285	1.285	1	1
مقاومت کششی (BTS)	1	1	1	1.8	1.285	1.285	1	1.8	1.285	1.285	1	1

جدول پ-۹- ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص نهم

	QC	Ha	Ab	UCS	E	Ma	Sch	Tex	De	Wea	Gra	BTS
کوارتز محتوی (QC)	1	1	1.034	1.09	1.315	1.222	1.198	1.424	1.301	1.26	1.287	1.274
سختی (Ha)	1	1	1.034	1.09	1.315	1.222	1.198	1.424	1.301	1.26	1.287	1.274
سایندگی (Ab)	0.967	0.967	1	1.054	1.272	1.182	1.1584	1.376	1.258	1.219	1.245	1.231
مقاومت فشاری (UCS)	0.917	0.917	0.949	1	1.207	1.121	1.099	1.306	1.194	1.156	1.181	1.161
مدول یانگ (E)	0.76	0.76	0.786	0.829	1	0.929	0.9109	1.082	0.989	0.958	0.979	0.961
نوع ماتریکس (Ma)	0.818	0.818	0.846	0.892	1.076	1	0.9802	1.165	1.065	1.031	1.053	1.041
سختی چکش اشمیت (Sch)	0.835	0.835	0.863	0.91	1.098	1.02	1	1.188	1.086	1.052	1.074	1.061
بافت (Tex)	0.702	0.702	0.726	0.766	0.924	0.859	0.8416	1	0.914	0.885	0.904	0.891
چگالی (De)	0.769	0.769	0.795	0.838	1.011	0.939	0.9208	1.094	1	0.969	0.989	0.971
هوازدهی (Wea)	0.793	0.793	0.821	0.865	1.043	0.97	0.9505	1.129	1.032	1	1.021	1.011
اندازه دانه ها (Gra)	0.777	0.777	0.803	0.847	1.022	0.949	0.9307	1.106	1.011	0.979	1	0.981
مقاومت کششی (BTS)	0.785	0.785	0.812	0.856	1.033	0.96	0.9406	1.118	1.022	0.99	1.011	1

جدول پ-۱۰- ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص دهم

	QC	Ha	Ab	UCS	E	Ma	Sch	Tex	De	Wea	Gra	BTS
کوارتز محتوی (QC)	1	1.4	1.4	1	1.4	1	1	1.4	1	0.778	0.778	1
سختی (Ha)	0.714	1	1	0.714	1	0.714	0.714	1	0.714	0.556	0.556	0.714
سایندگی (Ab)	0.714	1	1	0.714	1	0.714	0.714	1	0.714	0.556	0.556	0.714
مقاومت فشاری (UCS)	1	1.4	1.4	1	1.4	1	1	1.4	1	0.778	0.778	1
مدول یانگ (E)	0.714	1	1	0.714	1	0.714	0.714	1	0.714	0.556	0.556	0.714
نوع ماتریکس (Ma)	1	1.4	1.4	1	1.4	1	1	1.4	1	0.778	0.778	1
سختی چکش اشمیت (Sch)	1	1.4	1.4	1	1.4	1	1	1.4	1	0.778	0.778	1
بافت (Tex)	0.714	1	1	0.714	1	0.714	0.714	1	0.714	0.556	0.556	0.714
چگالی (De)	1	1.4	1.4	1	1.4	1	1	1.4	1	0.778	0.778	1
هوازدهی (Wea)	1.286	1.8	1.8	1.286	1.8	1.286	1.286	1.8	1.286	1	1	1.286
اندازه دانه ها (Gra)	1.286	1.8	1.8	1.286	1.8	1.286	1.286	1.8	1.286	1	1	1.286
مقاومت کششی (BTS)	1	1.4	1.4	1	1.4	1	1	1.4	1	0.778	0.778	1

جدول پ-۱۱- ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص یازدهم

	QC	Ha	Ab	UCS	E	Ma	Sch	Tex	De	Wea	Gra	BTS
کوارتز محتوی (QC)	1	0.556	0.556	0.714	1	0.714	1	1.667	1.667	0.556	1	0.556
سختی (Ha)	1.8	1	1	1.286	1.8	1.286	1.8	3	3	1	1.8	1
سایندگی (Ab)	1.8	1	1	1.286	1.8	1.286	1.8	3	3	1	1.8	1
مقاومت فشاری (UCS)	1.4	0.778	0.778	1	1.4	1	1.4	2.333	2.333	0.778	1.4	0.778
مدول یانگ (E)	1	0.556	0.556	0.714	1	0.714	1	1.667	1.667	0.556	1	0.556
نوع ماتریکس (Ma)	1.4	0.778	0.778	1	1.4	1	1.4	2.333	2.333	0.778	1.4	0.778
سختی چکش اشمیت (Sch)	1	0.556	0.556	0.714	1	0.714	1	1.667	1.667	0.556	1	0.556
بافت (Tex)	0.6	0.333	0.333	0.429	0.6	0.429	0.6	1	1	0.333	0.6	0.333
چگالی (De)	0.6	0.333	0.333	0.429	0.6	0.429	0.6	1	1	0.333	0.6	0.333
هوازدهی (Wea)	1.8	1	1	1.286	1.8	1.286	1.8	3	3	1	1.8	1
اندازه دانه ها (Gra)	1	0.556	0.556	0.714	1	0.714	1	1.667	1.667	0.556	1	0.556
مقاومت کششی (BTS)	1.8	1	1	1.286	1.8	1.286	1.8	3	3	1	1.8	1

جدول پ-۱۲- ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص دوازدهم

	QC	Ha	Ab	UCS	E	Ma	Sch	Tex	De	Wea	Gra	BTS
--	----	----	----	-----	---	----	-----	-----	----	-----	-----	-----

کوارتز محتوی (QC)	1	0.778	2.333	1.4	1	1	1	1.4	0.778	1	2.333	2.333
سختی (Ha)	1.286	1	3	1.8	1.286	1.286	1.286	1.8	1	1.286	3	3
سایندگی (Ab)	0.429	0.333	1	0.6	0.429	0.429	0.429	0.6	0.333	0.429	1	1
مقاومت فشاری (UCS)	0.714	0.556	1.667	1	0.714	0.714	0.714	1	0.556	0.714	1.667	1.667
مدول یانگ (E)	1	0.778	2.333	1.4	1	1	1	1.4	0.778	1	2.333	2.333
نوع ماتریکس (Ma)	1	0.778	2.333	1.4	1	1	1	1.4	0.778	1	2.333	2.333
سختی چکش اشمیت (Sch)	1	0.778	2.333	1.4	1	1	1	1.4	0.778	1	2.333	2.333
بافت (Tex)	0.714	0.556	1.667	1	0.714	0.714	0.714	1	0.556	0.714	1.667	1.667
چگالی (De)	1.286	1	3	1.8	1.286	1.286	1.286	1.8	1	1.286	3	3
هوازدهی (Wea)	1	0.778	2.333	1.4	1	1	1	1.4	0.778	1	2.333	2.333
اندازه دانه ها (Gra)	0.429	0.333	1	0.6	0.429	0.429	0.429	0.6	0.333	0.429	1	1
مقاومت کششی (BTS)	0.429	0.333	1	0.6	0.429	0.429	0.429	0.6	0.333	0.429	1	1

جدول پ-۱۳- ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص سیزدهم

	QC	Ha	Ab	UCS	E	Ma	Sch	Tex	De	Wea	Gra	BTS
کوارتز محتوی (QC)	1	1.286	1	1	1.286	1.286	1.286	1.286	1.8	1.286	1.286	1.286
سختی (Ha)	0.778	1	0.778	0.778	1	1	1	1	1.4	1	1	1
سایندگی (Ab)	1	1.286	1	1	1.286	1.286	1.286	1.286	1.8	1.286	1.286	1.286
مقاومت فشاری (UCS)	1	1.286	1	1	1.286	1.286	1.286	1.286	1.8	1.286	1.286	1.286
مدول یانگ (E)	0.778	1	0.778	0.778	1	1	1	1	1.4	1	1	1
نوع ماتریکس (Ma)	0.778	1	0.778	0.778	1	1	1	1	1.4	1	1	1
سختی چکش اشمیت (Sch)	0.778	1	0.778	0.778	1	1	1	1	1.4	1	1	1
بافت (Tex)	0.778	1	0.778	0.778	1	1	1	1	1.4	1	1	1
چگالی (De)	0.556	0.714	0.556	0.556	0.714	0.714	0.714	0.714	1	0.714	0.714	0.714
هوازدهی (Wea)	0.778	1	0.778	0.778	1	1	1	1	1.4	1	1	1
اندازه دانه ها (Gra)	0.778	1	0.778	0.778	1	1	1	1	1.4	1	1	1
مقاومت کششی (BTS)	0.778	1	0.778	0.778	1	1	1	1	1.4	1	1	1

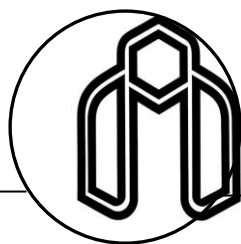
جدول پ-۱۴- ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص چهاردهم

	QC	Ha	Ab	UCS	E	Ma	Sch	Tex	De	Wea	Gra	BTS
کوارتز محتوی (QC)	1	0.714	0.714	0.714	0.714	0.714	0.714	0.714	1	1	0.714	1

سختی (Ha)	1.4	1	1	1	1	1	1	1	1.4	1.4	1	1.4
سایندگی (Ab)	1.4	1	1	1	1	1	1	1	1.4	1.4	1	1.4
مقاومت فشاری (UCS)	1.4	1	1	1	1	1	1	1	1.4	1.4	1	1.4
مدول یانگ (E)	1.4	1	1	1	1	1	1	1	1.4	1.4	1	1.4
نوع ماتریکس (Ma)	1.4	1	1	1	1	1	1	1	1.4	1.4	1	1.4
سختی چکش اشمیت (Sch)	1.4	1	1	1	1	1	1	1	1.4	1.4	1	1.4
بافت (Tex)	1.4	1	1	1	1	1	1	1	1.4	1.4	1	1.4
چگالی (De)	1	0.714	0.714	0.714	0.714	0.714	0.714	0.714	1	1	0.714	1
هوازدهگی (Wea)	1	0.714	0.714	0.714	0.714	0.714	0.714	0.714	1	1	0.714	1
اندازه دانه ها (Gra)	1.4	1	1	1	1	1	1	1	1.4	1.4	1	1.4
مقاومت کششی (BTS)	1	0.714	0.714	0.714	0.714	0.714	0.714	0.714	1	1	0.714	1

جدول پ-۱۵- ماتریس مقایسه زوجی با توجه به نظرات متخصص پانزدهم

	QC	Ha	Ab	UCS	E	Ma	Sch	Tex	De	Wea	Gra	BTS
کوارتز محتوی (QC)	1	1	1.286	1	1.286	1.8	1.8	1.286	1.286	3	1.286	1
سختی (Ha)	1	1	1.286	1	1.286	1.8	1.8	1.286	1.286	3	1.286	1
سایندگی (Ab)	0.778	0.778	1	0.778	1	1.4	1.4	1	1	2.333	1	0.778
مقاومت فشاری (UCS)	1	1	1.286	1	1.286	1.8	1.8	1.286	1.286	3	1.286	1
مدول یانگ (E)	0.778	0.778	1	0.778	1	1.4	1.4	1	1	2.333	1	0.778
نوع ماتریکس (Ma)	0.556	0.556	0.714	0.556	0.714	1	1	0.714	0.714	1.667	0.714	0.556
سختی چکش اشمیت (Sch)	0.556	0.556	0.714	0.556	0.714	1	1	0.714	0.714	1.667	0.714	0.556
بافت (Tex)	0.778	0.778	1	0.778	1	1.4	1.4	1	1	2.333	1	0.778
چگالی (De)	0.778	0.778	1	0.778	1	1.4	1.4	1	1	2.333	1	0.778
هوازدهگی (Wea)	0.333	0.333	0.429	0.333	0.429	0.6	0.6	0.429	0.429	1	0.429	0.333
اندازه دانه ها (Gra)	0.778	0.778	1	0.778	1	1.4	1.4	1	1	2.333	1	0.778
مقاومت کششی (BTS)	1	1	1.286	1	1.286	1.8	1.8	1.286	1.286	3	1.286	1



Shahrood University of Technology

Evaluating and Prediction of Rock Drillability Using Fuzzy Delphi Analytic Hierarchy Process (FDAHP)

A thesis submitted in partial fulfillment of the
requirement for the award of the degree

MASTER OF SCIENCES

By

Seyed Hadi Hoseinie

Faculty of Mining Engineering, Petroleum & Geophysics

July 2008