





دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفزیک

گروه مهندسی استخراج معدن

طبقه‌بندی قابلیت حفاری توده‌سنگ‌ها و پیش‌بینی سرعت حفاری در معدن سنگ آهن گل‌گهر

دانشجو: مهدی قویدل

اساتید راهنما:

دکتر محمد عطائی

دکتر رضا خالوکاکایی

استاد مشاور:

دکتر سیّد هادی حسینی

بهمن ۱۳۹۰

تقدیم به

عزیزانی که یاوران سختی‌هایم بودند

و با صبوری خود

عاطفه را معنا بخشیدند

و شوق تحصیل را در من زنده نگه داشتند

پدر، مادر

و

همسر مهربانم

بدان امید که سپاسی باشد

بر محبت‌های بی دریغشان

تشکر و قدردانی

به نام پروردگار یکتایی که سایه رحمت خود را بر من گسترد و نعمت‌های بی‌پایانش را بر من ارزانی داشت و توفیق زیباترین شکل کمال یعنی، تحصیل علم را به من عطا فرمود. خدای منان را هزاران بار سپاس می‌گویم که مرا تا این مرحله هدایت نمود و یاری او را در مراحل بعدی نیز خواستارم.

خداوند متعال را شاکر هستم که توفیق انجام این تحقیق را بر من ارزانی داشت. بی‌شک در این مسیر طولانی دست یاری عزیزان فراوانی همراه من بود که شایسته است تا مراتب سپاسگزاری خود را از آنان اعلام دارم. بر خود لازم می‌دانم که از تمامی عزیزانی که در طول انجام پایان‌نامه از راهنمایی‌هایشان استفاده کرده‌ام تشکر کنم. از اساتید راهنمای عزیز جناب آقای دکتر محمد عطائی و آقای دکتر رضا خالوکاکایی و نیز مشاور عزیزم جناب آقای دکتر سید هادی حسینی که در بسیاری از مواقع از راهنمایی‌های ارزنده ایشان استفاده نمودم کمال تشکر و امتنان را دارم.

معلمان مقامت ز عرش برتر باد همیشه توسن اندیشه ات مظفر باد

از کلیه مسئولین و پرسنل محترم مجتمع سنگ آهن گل‌گهر سیرجان، دفتر نظارت و طراحی آقایان مهندس پورزمانی، حمزه‌نژادی و حسینی، کارشناسان شرکت مهندسی مشاور کوشامعدن، مرکز تحقیق و توسعه معدن گل‌گهر که همکاری صمیمانه‌ای با اینجانب داشته‌اند، کمال تشکر را دارم.

در پایان، از همسر مهربانم که آرامش روحی و آسایش فکری فراهم نمودند تا با حمایت‌های همه‌جانبه در محیطی مطلوب، مراتب تحصیلی و نیز پایان‌نامه درسی را به نحو احسن به اتمام برسانم، کمال تشکر و سپاسگزاری را دارم. از پدر و مادر بزرگواری که از کودکی همواره با دعای خیر و تشویقشان در زندگی یاریم نمودند سپاسگزار و متشکرم.

شکر خدا که هر چه طلب کردم از او بر منتهای همت خود کامران شدم

چکیده

با توجه به اهمیت فرآیند حفاری در معادن، لزوم برنامه‌ریزی و پیش‌بینی از شرایط پیش رو بیش از پیش احساس می‌شود. زون‌بندی توده‌سنگ‌های در برگیرنده مواد معدنی و پیش‌بینی سرعت حفاری در آن با توجه به حجم بالای عملیات در معادن می‌تواند به طور جدی شرایط اقتصادی و عملیاتی معدن را تحت تأثیر قرار دهد.

در این تحقیق ابتدا به منظور تعیین قابلیت حفاری توده‌سنگ‌های معدن سنگ آهن گل‌گهر ابتدا سابقه علمی موضوع با استفاده از مقالات و متون علمی موجود از دهه ۱۹۵۰ تا سال ۲۰۱۱ مورد بررسی قرار گرفته و مهمترین پارامترهای فنی مؤثر بر قابلیت حفاری و سرعت حفاری شناسایی گردیده‌اند. با توجه به تأثیر پارامترهای ماده‌سنگ و توده‌سنگ بر فرآیند حفاری، پیش‌بینی سرعت حفاری امری بسیار پیچیده می‌باشد. بنابراین تعیین قابلیت حفاری توده‌سنگ نیازمند روشی جامع با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بر قابلیت حفاری می‌باشد. از این رو طبقه‌بندی قابلیت حفاری RD_i به عنوان روشی مناسب برای زون‌بندی قابلیت حفاری معدن شماره ۱ گل‌گهر انتخاب شد.

در ادامه طی مطالعه در معدن شماره ۱ مجتمع معدنی گل‌گهر سیرجان توده‌سنگ‌های معدن بر اساس قابلیت حفاری RD_i مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. سرعت حفاری الگوهای حفاری ثبت و سرعت حفاری متوسط هر الگو محاسبه شد. از الگوهای مورد مطالعه برای انجام آزمایش‌های مکانیک سنگی نمونه‌برداری انجام شد. در ادامه توده‌سنگ‌های در برگیرنده هر الگو بر اساس قابلیت حفاری RD_i برداشت شد. پارامترهای بافت، سختی موهس، سختی چکش اشمیت، فاصله‌داری درزه‌ها، بازشدگی و پرشدگی و زاویه بین محورچال با سطح درزه در مطالعات میدانی برداشت شد و امتیاز RD_i هر الگو تعیین شد. در نهایت ارتباط پارامترهای مورد مطالعه با سرعت حفاری و RD_i تعیین شد. نتایج آماری نشان داد که

قابلیت حفاری RD_i رابطه خوبی با سرعت حفاری دارد و این رابطه برای پیش‌بینی سرعت حفاری پیشنهاد شده است.

در مرحله بعد، با استفاده از نتایج تحلیل داده‌های آزمایشگاهی و برداشت صحرایی الگوهای حفاری، توده‌سنگ‌های محدوده معدن بر اساس قابلیت حفاری RD_i برداشت شده است. توده‌سنگ‌های معدن به ۶۶ زون مختلف تقسیم و امتیاز RD_i هر زون تعیین شد و زون‌هایی که در همسایگی و کلاس طبقه‌بندی یکسانی می‌باشند بر اساس میانگین وزنی طول پیمایش در یک کلاس واحد طبقه‌بندی گردید. زون‌بندی نهایی توده‌سنگ‌های معدن بر اساس قابلیت حفاری RD_i در دو کلاس آهسته-متوسط و متوسط طبقه‌بندی شد. در پایان، با استفاده از نتایج حاصل از تحلیل آماری سرعت حفاری و قابلیت حفاری RD_i، سرعت حفاری در زون‌های مختلف پیش‌بینی شده است.

کلمات کلید: طبقه‌بندی قابلیت حفاری RD_i، معدن سنگ آهن گل‌گهر، توده‌سنگ، زون‌بندی، پیش‌بینی، سرعت حفاری

فصل اول: مقدمه

- ۱-۱- مقدمه ۲
- ۲-۱- تعریف مساله ۳
- ۳-۱- سابقه و ضرورت انجام تحقیق ۴
- ۴-۱- اهداف تحقیق ۵
- ۵-۱- ساختار پایان نامه ۵

فصل دوم: بررسی تأثیر مشخصات دستگاه و توده سنگ بر سرعت حفاری

- ۱-۲- مقدمه ۸
- ۲-۲- مشخصات تأثیرگذار دستگاه بر سرعت حفاری در معادن روباز ۹
- ۱-۲-۲- بار پشت مته و تأثیر آن بر حفاری ۱۰
- ۲-۲-۲- دور مته و تأثیر آن در سرعت حفاری ۱۳
- ۳-۲-۲- هوای فلاشینگ و تأثیر آن در سرعت حفاری ۱۴
- ۴-۲-۲- مشخصات سرمته و تأثیر آن در سرعت حفاری ۱۶
- ۱-۴-۲-۲- تأثیر قطر سرمته بر سرعت حفاری ۱۶
- ۲-۴-۲-۲- تأثیر نوع و شکل سرمته بر سرعت حفاری ۱۷
- ۳-۲- بررسی تأثیر مشخصات توده سنگ بر سرعت حفاری ۱۷
- ۱-۳-۲- مشخصات فیزیکی و مینرالوژیکی سنگها ۱۹
- ۱-۳-۲-۱- چگالی ۲۰
- ۲-۳-۲-۱- بافت ۲۱
- ۳-۳-۲-۱- تخلخل ۲۸
- ۲-۳-۲- مشخصات مکانیکی سنگها ۳۰
- ۱-۲-۳-۲- مقاومت فشاری تک محوری ۳۰
- ۲-۲-۳-۲- مقاومت کششی ۴۰
- ۳-۲-۳-۲- تردی ۴۲
- ۴-۲-۳-۲- سختی ۴۴

۴۶	..... ۵-۲-۳-۲- ساینده‌گی
۵۶	..... ۶-۲-۳-۲- خواص الاستیسیته و پلاستیسیته
۵۸	..... ۴-۲- مشخصات ساختاری توده‌سنگ‌ها
۵۹	..... ۱-۴-۲- تأثیر گسل خوردگی بر سرعت حفاری
۵۹	..... ۲-۴-۲- تأثیر درزه‌داری و مشخصات درزه‌ها بر سرعت حفاری
۶۰	..... ۱-۲-۴-۲- تأثیر فاصله‌داری درزه‌ها بر سرعت حفاری
۶۲	..... ۲-۲-۴-۲- تأثیر شیب‌داری درزه‌ها بر سرعت حفاری
۶۵	..... ۳-۲-۴-۲- تأثیر دهانه و پرکننده درزه‌ها بر سرعت حفاری
۶۷	..... ۵-۲- نتیجه‌گیری

فصل سوم: معرفی منطقه معدنی سنگ آهن گل‌گهر سیرجان

۶۹	..... ۱-۳- مقدمه
۶۹	..... ۲-۳- تاریخچه مطالعات و سابقه فعالیت معدن
۷۰	..... ۳-۳- سابقه فعالیت کنونی
۷۲	..... ۴-۳- راه‌های ارتباطی معدن
۷۲	..... ۵-۳- مورفولوژی منطقه
۷۳	..... ۶-۳- وضعیت زمین شناسی منطقه
۷۳	..... ۱-۶-۳- جایگاه ناحیه معدنی گل‌گهر در زمین ساخت ایران
۷۳	..... ۲-۶-۳- چینه‌شناسی ناحیه معدنی گل‌گهر
۷۴	..... ۳-۶-۳- ساختار زمین‌شناسی و تکتونیک منطقه
۷۸	..... ۷-۳- شکل و طبیعت ماده معدنی
۷۹	..... ۸-۳- مشخصات کمی و کیفی ذخیره شماره ۱
۷۹	..... ۹-۳- مشخصات هندسی پیت طراحی شده نهایی معدن
۸۰	..... ۱۰-۳- حفاری، آتشیاری، بارگیری و باربری
۸۲	..... ۱۱-۳- تولید معدن

فصل چهارم: مطالعات میدانی و آزمایشگاهی برای زون‌بندی قابلیت حفاری معدن گل‌گهر

۸۶	..... ۱-۴- مقدمه
۸۸	..... ۲-۴- برداشت صحرایی الگوهای حفاری و انجام مطالعات آزمایشگاهی

۸۸	۱-۲-۴- برداشت سرعت متوسط الگوهای حفاری.....
۸۹	۲-۲-۴- مطالعات آزمایشگاهی.....
۸۹	۱-۲-۲-۴- نمونه برداری.....
۹۱	۲-۲-۲-۴- آماده سازی نمونه ها.....
۹۲	۳-۲-۲-۴- آزمایش تعیین مقاومت فشاری تک محوری.....
۹۳	۴-۲-۲-۴- آزمایش مقاومت کششی برزیلی.....
۹۵	۵-۲-۲-۴- آزمایش تعیین چگالی و تخلخل.....
۹۶	۶-۲-۲-۴- آزمایش غیر مخرب سرعت صوت و تعیین ثابت الاستیک دینامیک سنگ.....
۹۷	۳-۲-۴- تعیین امتیاز RD _i توده سنگ های در برگیرنده الگوهای حفاری.....
۹۹	۳-۴- بررسی ارتباط بین پارامترهای مکانیک سنگی و RD _i با سرعت حفاری.....
۱۰۶	۴-۴- زون بندی محدوده معدن بر اساس قابلیت حفاری RD _i
۱۲۲	۵-۴- نتیجه گیری.....

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۱۲۴	۱-۵- نتیجه گیری.....
۱۲۵	۲-۵- پیشنهادات.....
۱۲۷	منابع و مراجع.....

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲- پارامترهای مؤثر بر سرعت حفاری با توجه به نوع روش حفاری (SME, 1987)..... ۹
- جدول ۲-۲- بار پیشنهادی برای قطرهای مختلف در سنگ‌های سخت (اصانلو، ۱۳۸۶)..... ۱۱
- جدول ۳-۲- تحقیقات انجام شده در زمینه تأثیر پارامترهای مینرالوژیکی سنگ‌ها بر قابلیت حفاری..... ۱۹
- جدول ۴-۲- روش وزن‌دهی به تفاوت‌های زاویه‌های دانه‌های کشیده (Ersoy & Waller, 1995a)..... ۲۴
- جدول ۵-۲- امتیازدهی به بافت سنگ در طبقه‌بندی ویلبور (Wibur, 1982)..... ۲۷
- جدول ۶-۲- امتیازدهی به بافت سنگ در طبقه‌بندی RDi (Hoseinie et al. 2008)..... ۲۷
- جدول ۷-۲- تحقیقات انجام شده در زمینه تأثیر خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها بر قابلیت حفاری..... ۳۱
- جدول ۸-۲- امتیازدهی به بافت سنگ در طبقه بندی RDi (Hoseinie et al. 2008)..... ۳۸
- جدول ۹-۲- طبقه بندی توصیفی قابلیت حفاری بر اساس تردی (Altindag, 2010)..... ۴۳
- جدول ۱۰-۲- طبقه‌بندی و امتیازدهی به سختی سنگ‌ها در سیستم طبقه‌بندی RDi (Hoseinie et al. 2008)..... ۴۵
- جدول ۱۱-۲- طبقه‌بندی قابلیت حفاری و سایندگی سنگ‌ها با استفاده از شاخص BWI و DRI (Bruland, 1998)..... ۵۲
- جدول ۱۲-۲- امتیازدهی به فاصله‌داری درزه‌ها در سیستم RDi (Hoseinie et al. 2008)..... ۶۲
- جدول ۱۳-۲- نحوه امتیازدهی به شیب‌داری درزه‌های توده سنگ در سیستم RDi (Hoseinie et al. 2008)..... ۶۵
- جدول ۱۴-۲- نحوه امتیازدهی به بازشدگی و پرکننده درزه‌ها توده سنگ در سیستم RDi (Hoseinie et al. 2008)..... ۶۶
- جدول ۱-۳- مشخصات کمی و کیفی ذخیره شماره ۱ (دفتر نظارت و طراحی، ۱۳۹۰)..... ۷۹
- جدول ۲-۳- ماشین آلات معدن (دفتر نظارت و طراحی، ۱۳۹۰)..... ۸۲
- جدول ۱-۴- فرم ثبت سرعت حفاری در معدن گل‌گهر..... ۸۸
- جدول ۲-۴- سرعت حفاری محاسبه شده در معدن..... ۸۹
- جدول ۳-۴- نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری..... ۹۳
- جدول ۴-۴- نتایج آزمایش مقاومت کششی برزیلی..... ۹۴
- جدول ۵-۴- نتایج آزمایش چگالی و تخلخل..... ۹۵
- جدول ۶-۴- نتایج آزمایش غیر مخرب صوت..... ۹۷
- جدول ۷-۴- طبقه بندی اندیس قابلیت حفاری توده سنگ RDi..... ۹۸
- جدول ۸-۴- پیش‌بینی نرخ نفوذ حفاری در توده‌سنگ با استفاده از RDi..... ۹۸
- جدول ۹-۴- برداشت الگوهای حفاری بر اساس قابلیت حفاری RDi..... ۹۹

- جدول ۴-۱۰- امتیاز RDi الگوهای حفاری مورد مطالعه ۹۹
- جدول ۴-۱۱- نتایج مطالعات آزمایشگاهی الگوهای حفاری ۱۰۰
- جدول ۴-۱۲- فرم برداشت پارامترهای ژئومکانیکی در قابلیت حفاری RDi ۱۰۸
- جدول ۴-۱۳- برداشت پارامترهای ژئومکانیکی در قابلیت حفاری RDi ۱۱۱

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲- پارامترهای مؤثر در قابلیت حفاری توده سنگ‌ها و سایش تجهیزات (Thuro, 1997)..... ۸
- شکل ۲-۲- شکل کلی تغییرات سرعت حفاری نسبت به تغییرات بار پشت مته (Jimeno et al, 1995)..... ۱۲
- شکل ۳-۲- تأثیر بار پشت مته بر سرعت حفاری برای سنگ‌های مختلف (SME, 1987)..... ۱۲
- شکل ۴-۲- تأثیر بار پشت مته بر سرعت حفاری برای سه نوع سنگ مختلف (Rao & Misra, 1998) ۱۳
- شکل ۵-۲- تأثیر بار پشت مته بر سرعت حفاری برای چهار دور مته مختلف (Rao & Misra, 1998)..... ۱۳
- شکل ۶-۲- تأثیر میزان فشار هوای فلاشینگ بر ارتباط بین بار پشت مته و سرعت حفاری (اصانلو، ۱۳۸۶)..... ۱۵
- شکل ۷-۲- ارتباط بین قطر سرمته و سرعت حفاری (استوار، ۱۳۷۹)..... ۱۶
- شکل ۸-۲- ارتباط بین قطر مساحت چال و سرعت حفاری (Jimeno et al, 1995)..... ۱۷
- شکل ۹-۲- پارامترهای ژئومکانیکی مؤثر بر قابلیت حفاری (Hoseinie et al., 2008)..... ۱۸
- شکل ۱۰-۲- ارتباط چگالی سنگ و سرعت حفاری دورانی (Kahraman et al.,2000)..... ۲۱
- شکل ۱۱-۲- ارتباط چگالی طبیعی و نرخ نفوذ (Kahraman et al., 2003)..... ۲۱
- شکل ۱۲-۲- مفهوم فاکتور زاویه ۲۳
- شکل ۱۳-۲- شمای کلی یک مقطع نازک برای محاسبه ضریب بافت (Howarth & Rowlands, 1987)..... ۲۵
- شکل ۱۴-۲- ارتباط ضریب بافت و سرعت حفاری اکتشافی در سه نوع سرمته مختلف (Ersoy & Waller, 1995a) ۲۶
- شکل ۱۵-۲- رابطه سرعت حفاری و ضریب بافت (Rao & Misra, 1998)..... ۲۷
- شکل ۱۶-۲- رابطه سرعت حفاری و ضریب بافت (Howarth & Rowlands, 1987)..... ۲۷
- شکل ۱۷-۲- رابطه سرعت حفاری با تخلخل و چگالی سنگ (Thuro, 1997)..... ۲۸
- شکل ۱۸-۲- رابطه عمر سرمته و تخلخل سنگ (Thuro, 1997)..... ۲۹
- شکل ۱۹-۲- رابطه سرعت حفاری با تخلخل و چگالی خشک سنگ (Thuro, 2002a)..... ۲۹
- شکل ۲۰-۲- تأثیر جهت داری متفاوت نا پیوستگی‌ها بر حفاری (Thuro,1996)..... ۳۴
- شکل ۲۱-۲- رابطه مقاومت فشاری و متوسط نفوذ (Akun & Karpuz, 2005)..... ۳۴
- شکل ۲۲-۲- رابطه سرعت حفاری ضربه‌ای و مقاومت فشاری (Bilgin & Kahraman, 2003)..... ۳۵
- شکل ۲۳-۲- رابطه سرعت حفاری ضربه‌ای و مقاومت فشاری (Kahraman et al. 2003)..... ۳۶
- شکل ۲۴-۲- رابطه بین قابلیت حفاری و مقاومت فشای در دو نوع سرمته (۱) مخروطی (۲) کروی (Kahram et al,2000)..... ۳۶

- شکل ۲-۲۵- رابطه بین سرعت حفاری ضربه‌ای در تونل‌ها و مقاومت فشاری سنگ‌های (Thuro & Spaun, 1996) ... ۳۷
- شکل ۲-۲۶- ارتباط مقاومت فشاری و سرعت حفاری (Rao & Misra, 1998) ۳۷
- شکل ۲-۲۷- ارتباط اندیس بار نقطه‌ای و سرعت حفاری دورانی (Kahraman et al. 2000) ۳۹
- شکل ۲-۲۸- ارتباط اندیس بار نقطه‌ای و سرعت حفاری ضربه‌ای (Kahraman et al. 2003) ۳۹
- شکل ۲-۲۹- ارتباط عدد چکش اشمیت و سرعت حفاری دورانی (Kahraman et al. 2000) ۴۰
- شکل ۲-۳۰- ارتباط عدد چکش اشمیت و سرعت حفاری ضربه‌ای (Kahraman et al. 2003) ۴۰
- شکل ۲-۳۱- ارتباط مقاومت کششی و سرعت حفاری دورانی (Kahraman et al. 2000) ۴۱
- شکل ۲-۳۲- ارتباط مقاومت کششی و سرعت حفاری ضربه‌ای (Kahraman et al. 2003) ۴۱
- شکل ۲-۳۳- ارتباط مقاومت کششی و سرعت حفاری ضربه‌ای در تونل‌سازی (Thuro & Spaun, 1996) ۴۲
- شکل ۲-۳۴- ارتباط تردی با نرخ نفوذ نرمال شده برای داده‌های مختلف (Altindog, 2010) ۴۳
- شکل ۲-۳۵- ارتباط مابین تردی با اندیس قابلیت حفاری (Yarali & Kahraman, 2010) ۴۴
- شکل ۲-۳۶- رابطه میزان ساینندگی رزیوال سنگ با استفاده از سختی موهس (Thuro, 1997) ۴۷
- شکل ۲-۳۷- گراف ساینندگی پیوسته برای کوارتز محتوی ۴۸
- شکل ۲-۳۸- گراف ساینندگی پیوسته برای اندازه دانه‌ها ۴۸
- شکل ۲-۳۹- گراف ساینندگی پیوسته برای مقاومت کششی برزیلی ۴۸
- شکل ۲-۴۰- آزمایش اندازه‌گیری میزان تردی سنگ (S₂₀) (Bruland, 1998) ۴۹
- شکل ۲-۴۱- آزمایش چالزنی کوچک با سرتمه مینیاتوری (Bruland, 1998) ۵۰
- شکل ۲-۴۲- نمودار تعیین شاخص سرعت حفاری (DRI) (Bruland, 1998) ۵۱
- شکل ۲-۴۳- دستگاه آزمایش اندازه‌گیری سایش (AV) (Bruland, 1998) ۵۱
- شکل ۲-۴۴- دیاگرام محاسبه BWI با استفاده از میزان AV و DRI (Bruland, 1998) ۵۲
- شکل ۲-۴۵- نمایی از دستگاه سایش سرشار (Plinninger et al, 2004) ۵۳
- شکل ۲-۴۶- رابطه میزان کوارتز محتوی و عمر سرتمه در انواع سنگ‌ها (Thuro, 1997) ۵۴
- شکل ۲-۴۷- رابطه شاخص ساینندگی سنگ RAI و عمر سرتمه (Plinninger et al, 2002) ۵۵
- شکل ۲-۴۸- رابطه کوارتز محتوی معادل و عمر سرتمه (Thuro & Plinninger, 2003) ۵۵
- شکل ۲-۴۹- ارتباط سرعت حفاری و مدول الاستیسیته سنگ‌ها (Thuro & Spaun, 1996) ۵۷
- شکل ۲-۵۰- ارتباط قابلیت حفاری و مدول الاستیسیته سنگ‌ها در حفاری دورانی (Kahraman et al. 1999) ۵۷
- شکل ۲-۵۱- ارتباط قابلیت حفاری و مدول الاستیسیته سنگ‌ها در حفاری ضربه‌ای (Kahraman et al. 2000e) ۵۷

- شکل ۲-۵۲- خواص ساختمانی سنگ‌ها و تأثیر آن‌ها بر مقاومت مواد سنگی (Jimeno et al., 1995)..... ۵۸
- شکل ۲-۵۳- رابطه سرعت حفاری با فراوانی درزه‌ها (Akun & Karpuz, 2004)..... ۶۰
- شکل ۲-۵۴- ارتباط فاصله‌داری با نرخ حفاری در معدن آهک (Thuro, 1997)..... ۶۱
- شکل ۲-۵۵- رابطه سرعت حفاری با فاصله‌داری درزه‌ها (Hoseinie et al. 2008)..... ۶۱
- شکل ۲-۵۶- محل مناسب حفر چال در توده‌های درزه‌دار (استوار، ۱۳۸۰)..... ۶۲
- شکل ۲-۵۷- توزیع بار پشت مته در سطح درزه‌های شیب دار..... ۶۳
- شکل ۲-۵۸- شرایط هندسی نفوذ مته در سطح درزه با شیب‌های مختلف (حسینی و همکاران، ۱۳۸۶)..... ۶۴
- شکل ۲-۵۹- حجم‌های بحرانی در شیب‌های مختلف برای حفاری با قطر سه اینچ (حسینی و همکاران، ۱۳۸۶)..... ۶۴
- شکل ۲-۶۰- رابطه بین سرعت حفاری و شیب درزه‌ها (Hoseinie et al. 2008)..... ۶۵
- شکل ۲-۶۱- رابطه بین سرعت حفاری و ابعاد پرکننده درزه‌ها درزه‌ها (Hoseinie et al. 2008)..... ۶۶
- شکل ۳-۱- نمایشی از سایت معدنی گل‌گهر سیرجان (Google map)..... ۷۰
- شکل ۳-۲- موقعیت نسبی آنومالی‌های گل‌گهر (کوشامعدن، ۱۳۸۳)..... ۷۱
- شکل ۳-۳- موقعیت معدن گل‌گهر و راه‌های ارتباطی..... ۷۲
- شکل ۳-۴- نمایشی از نقشه زمین‌شناسی پله ۱۰ (کوشامعدن، ۱۳۹۰)..... ۷۷
- شکل ۳-۵- نمایشی از نقشه زمین‌شناسی پله ۱۱ (کوشامعدن، ۱۳۹۰)..... ۷۷
- شکل ۳-۶- نمایشی از نقشه زمین‌شناسی پله ۱۲ (کوشامعدن، ۱۳۹۰)..... ۷۸
- شکل ۳-۷- نمایشی از نقشه زمین‌شناسی پله ۱۳ (کوشامعدن، ۱۳۹۰)..... ۷۸
- شکل ۳-۸- وضعیت ذخیره شماره ۱..... ۷۹
- شکل ۳-۹- محدوده نهایی معدن شماره ۱ گل‌گهر (کوشامعدن، ۱۳۸۳)..... ۸۰
- شکل ۳-۱۰- دستگاه حفاری IR-DMH XL 1800..... ۸۱
- شکل ۳-۱۱- میزان سنگ آهن استخراجی و باقیمانده (دفتر نظارت و طراحی، ۱۳۹۰)..... ۸۳
- شکل ۳-۱۲- تصویر سه بعدی معدن شماره ۱ در انتهای ۸۹ (خروجی از نرم‌افزار GemCom)..... ۸۳
- شکل ۳-۱۳- نمای غربی- شرقی معدن تا پایان سال ۱۳۸۹..... ۸۴
- شکل ۴-۱- مراحل مختلف انجام مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی..... ۸۷
- شکل ۴-۲- موقعیت مکانی الگوهای حفاری..... ۹۰
- شکل ۴-۳- دستگاه مغزه‌گیری سنگ..... ۹۱
- شکل ۴-۴- دستگاه برش اتوماتیک سنگ..... ۹۱

- شکل ۴-۵- نمونه‌های تهیه شده برای انجام آزمایش‌ها..... ۹۲
- شکل ۴-۶- نحوه آماده سازی نمونه برای آزمایش مقاومت فشاری تک محوری و سرعت صوت..... ۹۲
- شکل ۴-۷- دستگاه مورد استفاده در آزمایش مقاومت فشاری تک محوری..... ۹۳
- شکل ۴-۸- نمایی از آزمایش مقاومت کششی برزیلی در لحظه شکست..... ۹۴
- شکل ۴-۹- ترازو و وان آب با سبد سیمی..... ۹۵
- شکل ۴-۱۰- کوره برای خشک کردن نمونه‌ها (آون)..... ۹۵
- شکل ۴-۱۱- نمایی از دستگاه آزمایش سرعت صوت..... ۹۶
- شکل ۴-۱۲- نمودار سرعت موج فشاری و برشی..... ۹۶
- شکل ۴-۱۳- رابطه بین سختی چکش اشمیت و مقاومت فشاری تک محوری..... ۱۰۲
- شکل ۴-۱۴- رابطه بین مقاومت فشاری تک محوری و سرعت حفاری..... ۱۰۲
- شکل ۴-۱۵- رابطه بین سختی چکش اشمیت و سرعت حفاری..... ۱۰۲
- شکل ۴-۱۶- رابطه بین مقاومت کششی برزیلی و سرعت حفاری..... ۱۰۲
- شکل ۴-۱۷- رابطه بین سرعت موج فشاری و سرعت حفاری..... ۱۰۲
- شکل ۴-۱۸- رابطه بین سرعت موج برشی و سرعت حفاری..... ۱۰۳
- شکل ۴-۱۹- رابطه بین تردی (B_1) و سرعت حفاری..... ۱۰۳
- شکل ۴-۲۰- رابطه بین تردی (B_2) و سرعت حفاری..... ۱۰۳
- شکل ۴-۲۱- رابطه بین تردی (B_4) و سرعت حفاری..... ۱۰۳
- شکل ۴-۲۲- رابطه بین تخلخل و سرعت حفاری..... ۱۰۳
- شکل ۴-۲۳- رابطه بین چگالی و سرعت حفاری..... ۱۰۳
- شکل ۴-۲۴- رابطه بین قابلیت حفاری RDi و سرعت حفاری..... ۱۰۵
- شکل ۴-۲۵- نقشه زون‌های برداشت شده در پله‌های ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳..... ۱۰۷
- شکل ۴-۲۶- نمایی از زون شماره ۲۰ واقع در جنوب پله ۱۲..... ۱۱۰
- شکل ۴-۲۷- هیستوگرام امتیاز RDi زون‌های مورد مطالعه معدن گل‌گهر..... ۱۱۲
- شکل ۴-۲۸- نمودار درصد فراوانی امتیاز RDi زون‌های مورد مطالعه معدن گل‌گهر..... ۱۱۲
- شکل ۴-۲۹- فراوانی بافت توده سنگ زون‌های مورد مطالعه معدن گل‌گهر..... ۱۱۳
- شکل ۴-۳۰- هیستوگرام سختی موهس زون‌های مورد مطالعه معدن گل‌گهر..... ۱۱۴
- شکل ۴-۳۱- نمودار درصد فراوانی سختی موهس زون‌های مورد مطالعه معدن گل‌گهر..... ۱۱۴

- شکل ۴-۳۲- هیستوگرام مقاومت فشاری زون‌های مورد مطالعه معدن گل‌گهر..... ۱۱۵
- شکل ۴-۳۳- نمودار درصد فراوانی مقاومت فشاری زون‌های مورد مطالعه معدن گل‌گهر..... ۱۱۵
- شکل ۴-۳۴- هیستوگرام فاصله‌داری درزه‌ها در زون‌های مورد مطالعه معدن گل‌گهر..... ۱۱۶
- شکل ۴-۳۵- نمودار درصد فراوانی فاصله‌داری درزه‌ها در زون‌های مورد مطالعه معدن گل‌گهر..... ۱۱۶
- شکل ۴-۳۶- نمودار درصد فراوانی پرشدگی و بازشدگی زون‌های مورد مطالعه معدن گل‌گهر..... ۱۱۷
- شکل ۴-۳۷- نمودار درصد فراوانی زاویه بین درزه و محورچال زون‌های مورد مطالعه معدن گل‌گهر..... ۱۱۷
- شکل ۴-۳۸- زون‌بندی نهایی قابلیت حفاری زون‌های مورد مطالعه معدن شماره ۱ گل‌گهر..... ۱۱۹
- شکل ۴-۳۹- پیش‌بینی سرعت حفاری در زون‌های مورد مطالعه معدن گل‌گهر..... ۱۲۱

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

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

در معدن‌کاری اعم از روباز یا زیرزمینی، حفاری به عنوان اولین مرحله عملیات استخراج نقش بسیار تعیین کننده‌ای بر سایر مراحل استخراج دارد. با توجه به هزینه بالا و ماشین‌آلات گران‌قیمت، شناخت تمامی پارامترهای دخیل در حفاری و بهینه‌سازی آن، شرایط را برای استخراج بهینه آماده می‌سازد. فرآیند و عملیات حفاری همواره تحت تأثیر شرایط محیط سنگی و نیز مشخصات دستگاه قرار می‌گیرد. به اعتقاد کلیه محققان، تمامی پارامترهای مؤثر بر سرعت حفاری را می‌توان در سه گروه به شرح ذیل ارزیابی و طبقه‌بندی نمود (Thuro, 1997):

- مشخصات فنی و اجرایی دستگاه حفاری
- مشخصات فیزیکی و ژئومکانیکی توده‌سنگ
- 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 نشان‌دهنده 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.

۱-۲- تعریف مساله

حفاری در معادن روباز به عنوان اولین مرحله از عملیات استخراج معادن سطحی از نظر فنی، اقتصادی و اجرایی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. شناخت کامل توده سنگ‌های معدن و ارزیابی توانایی اجرایی دستگاه‌های حفاری در معدن، طراحان و برنامه‌ریزان تولید معدن را به سمت بهبود سرعت استخراج و افزایش تولید سوق می‌دهد. برای دستیابی به یک تولید پیوسته در معادن روباز پیش‌بینی سرعت حفاری و طبقه‌بندی و شناخت کیفیت و کمیت چالخوری سنگ‌ها از اهمیت حیاتی برخوردار است.

در مهندسی سنگ به منظور ارزیابی رفتار توده 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 ارزیابی قابلیت حفاری سنگ‌ها باشد. در این تحقیق توده سنگ‌های موجود در معدن سنگ آهن گل‌گهر با استفاده از اندیس قابلیت حفاری توده سنگ^۱، مورد مطالعه قرار خواهند گرفت.

در مرحله بعدی تحقیق، با ثبت سرعت حفاری ماشین‌های حفاری موجود در معدن و برداشت

^۱ Rock Drilling index (RDi)

مشخصات توده‌سنگ مورد حفاری، امتیاز RDi تعیین شده و رابطه ریاضی بین این شاخص و سرعت حفاری به صورت یک مدل ریاضی ارائه خواهد شد.

۱-۳- سابقه و ضرورت انجام تحقیق

در بحث پیرامون تأثیر خصوصیات ماده‌سنگ و توده‌سنگ بر فرآیند حفاری، متخصصان بسیاری با استفاده از پارامترهای مختلف رفتار سنگ‌ها را تشریح کرده‌اند. ویلبور^۱ پارامترهای سختی، بافت، شکست و جنس سنگ‌ها را مورد تأکید قرار داده است (Wilbur, 1982). اصانلو به پارامترهای نیروی چسبندگی سنگ، تخلخل، چگالی، بافت، مقاومت فشاری تک محوری (UCS)، RQD، الاستیسیته، پلاستیسیته، سختی، سختی و ساختمان توده‌سنگ اشاره کرده است (اصانلو، ۱۳۸۶). جمینیو^۲ و همکارانش پارامترهای دخیل در حفاری را منشاء سنگ‌ها، سختی، مقاومت فشاری تک محوری، الاستیسیته، پلاستیسیته، ساینده‌گی، بافت و ساخت توده‌سنگ معرفی کرده‌اند (Jimeno et al., 1995). استوار بر تأثیر منشاء سنگ‌ها، سختی، ابعاد دانه‌های سنگ، مقاومت فشاری، درزه و شکاف سنگ و چگالی تأکید کرده است (استوار، ۱۳۸۰). قهرمان^۳ و همکارانش در سال ۲۰۰۰، در راستای تعیین اندیس جدیدی برای قابلیت حفاری، پارامترهای مؤثر در حفاری را به طور مفصل تحت مطالعه قرار داده‌اند و بین اندیس قابلیت حفاری سنگ‌ها و پارامترهای مقاومت فشاری، مقاومت کششی و بار نقطه‌ای، سختی چکش اشمیت، سرعت موج طولی، مدول الاستیسیته و چگالی، منحنی‌های مختلف و روابط ریاضی متعددی ارائه کرده‌اند (Kahraman et al., 2000).

سیستم طبقه‌بندی قابلیت حفاری RDi را می‌توان به عنوان تنها سیستم طبقه‌بندی قابلیت حفاری بر اساس توده‌سنگ در نظر گرفت. سیستم طبقه‌بندی RDi با در نظر گرفتن پارامترهای فیزیکی

¹ Wilbur

² Jimeno

³ Kahraman

ماده‌سنگ، پارامترهای مقاومتی ماده‌سنگ و پارامترهای ساختاری توده‌سنگ (مشخصات درزه)، روشی جدید و مبتنی بر خواص ساختاری سنگ را ارائه کرده است. با توجه به پارامترهای تأثیرگذار بر فرآیند حفاری، مجموع امتیازات RD_i، ۱۰۰ در نظر گرفته شده است (Hoseinie et al. 2008).

۱-۴- اهداف تحقیق

با توجه به موقعیت توده‌سنگ‌های مورد مطالعه، ناحیه مورد استخراج در معدن زون‌بندی و کلاس‌بندی خواهند شد تا این نقشه زون‌بندی برای پیش‌بینی قابلیت حفاری توده‌سنگ‌ها در معدن مورد استفاده قرار گیرد.

مهم‌ترین اهداف این تحقیق عبارتند از:

- ۱- بررسی پارامترهای مؤثر در سرعت حفاری در معادن
- ۲- طبقه‌بندی توده‌سنگ‌های معدن سنگ‌آهن گل‌گهر از دیدگاه قابلیت حفاری RD_i
- ۳- زون‌بندی ناحیه استخراجی معدن از دیدگاه قابلیت حفاری توده‌سنگ‌های موجود
- ۴- ارائه رابطه ریاضی برای پیش‌بینی سرعت حفاری در معدن گل‌گهر

۱-۵- ساختار پایان‌نامه

تحقیق حاضر به منظور زون‌بندی قابلیت حفاری توده‌سنگ‌های معدن شماره ۱ گل‌گهر با استفاده از طبقه‌بندی قابلیت حفاری RD_i صورت گرفته و مشتمل بر پنج فصل است:
فصل اول این تحقیق شامل ضرورت و اهداف انجام تحقیق می‌باشد.

فصل دوم این تحقیق شامل مرور اجمالی و بررسی پارامترهای مؤثر بر سرعت حفاری می‌باشد و روابط کیفی و کمی بین پارامترهای دستگاه و سرعت حفاری مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه تأثیر پارامترهای مربوط به مشخصات فیزیکی و ژئومکانیکی توده‌سنگ 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

سایر کشورها، 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، ناحیه معدنی گل‌گهر در استان کرمان معرفی شده است.

در فصل چهارم، مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی برای زون‌بندی قابلیت حفاری معدن گل‌گهر و بررسی ارتباط کمی مشخصات مکانیکی سنگ‌آهن با سرعت حفاری انجام گرفته است. نتایج این مطالعات به صورت ارتباط میان پارامترهای مکانیک سنگی و کانی شناسی سنگ و سرعت حفاری ارائه شده است.

در فصل پنجم، با توجه به تمامی مطالعات و آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، نتایج به‌دست

آمده از مطالعات آزمایشگاهی و صحرایی ارائه شده و پیشنهاداتی برای مطالعات آینده ارائه شده است.

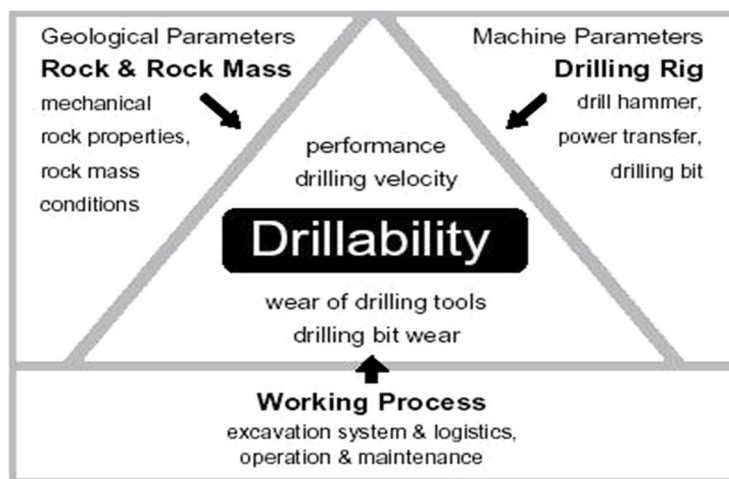
فصل دوم

بررسی تأثیر مشخصات دستگاه و توده سنگ بر سرعت حفاری

۱-۲- مقدمه

این بخش از تحقیق شامل مرور و بررسی پارامترهای مؤثر عملیاتی دستگاه حفاری و پارامترهای فیزیکی و ژئومکانیکی توده سنگ بر سرعت حفاری می‌باشد.

دستگاه حفاری به عنوان منبع تأمین انرژی مکانیکی، از اهمیت بسیار زیادی در فرآیند حفاری برخوردار است. تاکنون در تمامی مطالعات منتشر شده در منابع علمی معتبر پارامترهای عملیاتی دستگاه در کنار مشخصات توده سنگ مورد تأکید بوده است. تورو^۱ در سال ۱۹۹۷ ارتباط پارامترهای مؤثر در حفاری و نیز قابلیت حفاری را مطابق شکل ۱-۲ پیشنهاد داده است.



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

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

^۱.Thuro

مشخصات تأثیر گذار دستگاه بر سرعت حفاری، سپس مشخصات و شرایط توده سنگ مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۲- مشخصات تأثیر گذار دستگاه بر سرعت حفاری در معادن روباز

تعداد زیادی پارامتر در سرعت حفاری دخیل‌اند که هر یک تأثیر مستقیم یا غیر مستقیم بر سرعت حفاری می‌گذارند و در نهایت راندمان و هزینه حفاری را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

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

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

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

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

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

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

الف) پارامترهای عملیاتی مربوط به دستگاه: بار پشت مته، سرعت چرخش مته (دور مته)، هوای فلاشینگ
ب) مشخصات سرمت: نوع و شکل سرمت، قطر سرمت.

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

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

بار روی مته یا تراست^۱ عبارت است از مقدار باری که به مته وارد می‌شود و از این طریق موجب کنترل مسیر (از نظر انحراف مسیر چالزنی توسط مته) و افزایش مقدار حفاری می‌شود. اندازه آن بستگی به قطر مته، نوع سیستم حفاری، مقاومت سنگ و نوع سرمت دارد و مقدار آن از عدد دو رقمی تا ۸۰۰۰

^۱. Trust

پوند به ازای هر اینچ مته (۱۴۳۰ کیلوگرم به ازای هر سانتی متر مته) متغیر است. در جدول ۲-۲ مقدار بار پیشنهادی برای تعدادی از انواع مته‌ها بر حسب قطر برای سنگ‌های سخت ارائه شده است.

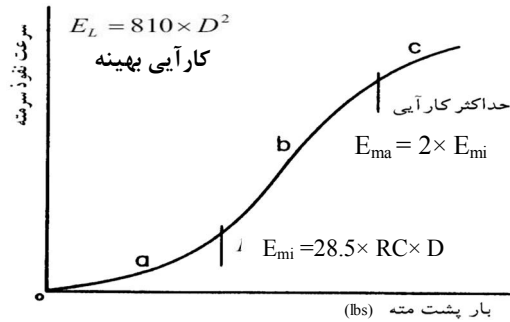
جدول ۲-۲- بار پیشنهادی برای قطرهای مختلف در سنگ‌های سخت (اصانلو، ۱۳۸۶)

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

بدیهی است که مقاومت و سختی سنگ‌ها در میزان سرعت حفاری مؤثر می‌باشند، بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که برای افزایش سرعت حفاری به بار روی مته مناسب نیاز است تا ماشین بتواند بر مقاومت فشاری سنگ غلبه کند.

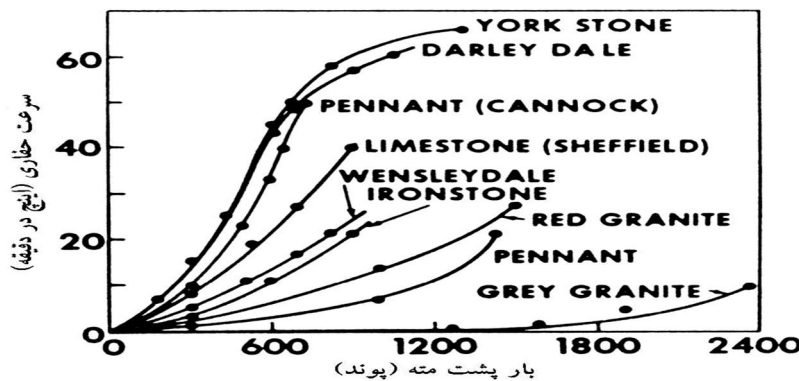
اگر مقدار بار روی مته یا تراست کم باشد علاوه بر کاهش مقدار حفاری، موجب خساراتی به لوله حفاری و بالاخص مته خواهد شد که ناشی از درجه حرارت بیش از حدی است که در اثر عدم انتقال انرژی تولید شده به سنگ و تبدیل آن به گرما و جذب از سوی مته و لوله حاصل می‌شود. همچنین چنانچه بیش از تراست مورد نیاز به مته بار وارد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

کلیه منحنی‌های به‌دست آمده بین سرعت حفاری و بار پشت مته در سنگ‌های مختلف، عموماً شکل ظاهری یکسان و نسبتاً مشابهی دارند. با این وصف می‌توان شکل کلی تغییرات سرعت حفاری نسبت به تغییرات بار پشت مته را به صورت شکل ۲-۲ نشان داد.



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

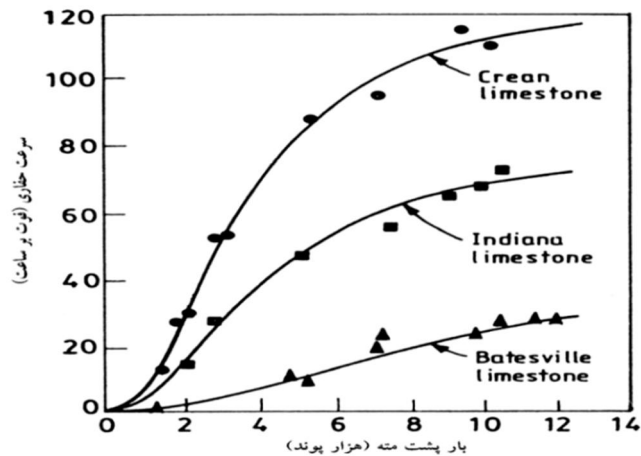
روابط نشان داده شده در این شکل میزان حداقل، حداکثر و بهینه بار پشت مته را با توجه به مقاومت سنگ (RC) برحسب مگاپاسکال و قطر حفاری (D) بر حسب اینچ بیان می‌کنند. در بار پشت مته کمتر از مقدار مینیمم (E_{mi}) سیستم قادر به نفوذ مناسب در سنگ نبوده و در بارهای بیشتر از مقدار ماکزیمم (E_{ma}) سیستم دچار خفگی و کاهش راندمان می‌شود (Jimeno et al, 1995). هارتمن در سال ۱۹۷۸ در کتاب راهنمای معدنکاری روباز، رابطه سرعت حفاری و بار پشت مته در سنگ‌های مختلف را به صورت شکل ۲-۳ نشان داد.



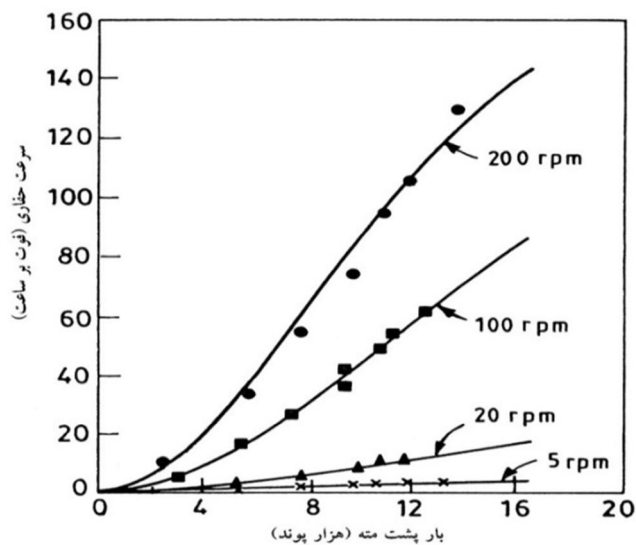
شکل ۲-۳- تأثیر بار پشت مته بر سرعت حفاری برای سنگ‌های مختلف (SME, 1987)

رائو^۱ و میسرا^۲ نیز در سال ۱۹۹۸ با انجام تعدادی آزمایش، نتایج مشابهی را برای تعدادی از سنگ‌های موجود در کشور هند به دست آورده است (شکل‌های ۲-۴ و ۲-۵).

^۱. Rao
^۲. Misra



شکل ۲-۴- تأثیر بار پشت مته بر سرعت حفاری برای سه نوع سنگ مختلف (Rao & Misra, 1998)



شکل ۲-۵- تأثیر بار پشت مته بر سرعت حفاری برای چهار دور مته مختلف (Rao & Misra, 1998)

به طور کلی در تعیین بار روی مته چهار عامل مؤثرند که عبارتند از: (۱) نوع سیستم حفاری (۲) اندازه

مته (۳) میزان تیزی (۴) مقاومت سنگ.

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

همانند بار روی مته (تراست)، تعداد چرخش یا دورمته نیز از اهمیت به‌سزایی در سرعت حفاری

برخوردار است. این بدان علت است که نفوذ در سنگ در اثر تماس مته با سنگ حاصل می‌شود و هر چه

تعداد تماس بیشتر باشد مقدار انرژی منتقل شده به سنگ نیز زیادتر است و لذا به نظر می‌رسد که با افزایش دور مته، سرعت حفاری نیز باید افزایش یابد. از نظر تئوری در اثر تماس پیوسته مته با سنگ و انتقال انرژی مته به سنگ، سرعت حفاری افزایش می‌یابد. این امر منوط به دو عامل بار روی مته و دور مته است. حاصل ضرب این دو عامل برای هر سنگ خاص، عدد ثابتی است که موجب سرعت حفاری مطلوب می‌شود.

در سال ۱۹۶۷ بایر و کالدِر بر اساس مطالعات تجربی در یک معدن آهن در آمریکای شمالی به این نتیجه رسیدند که علاوه بر دو عامل بار روی مته و دور مته عواملی چون قطر مته و مقاومت فشاری تک محوری در سرعت حفاری تأثیر عمده دارند. لذا رابطه ۱-۲ را با احتساب سه عامل مذکور ارائه کردند (حسینی، ۱۳۸۶):

$$R_p = (61 - 28 \log \sigma_u) \frac{w}{d} \cdot \frac{RPM}{300} \quad (1-2)$$

که در رابطه فوق R_p سرعت حفاری بر حسب فوت در ساعت، σ_u مقاومت فشاری تک محوری به ازای هر ۱۰۰۰ پوند بر اینچ مربع، w بار روی مته (هزارپوند)، d قطر مته (اینچ) و RPM دور مته در دقیقه می‌باشد.

در رابطه بایر و کالدِر مقاومت فشاری تک محوری غیر قابل کنترل اما دور مته در دقیقه و بار روی مته قابل کنترل هستند.

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

برای دستیابی به یک حفاری کارآمد و با راندمان مناسب فنی و اقتصادی، تمیزکاری کف چال و تخلیه خرده سنگ‌های حاصل از حفاری امری بسیار حائز اهمیت می‌باشد. خروج سریع و بلافاصله خرده‌های حفاری باعث بهبود شرایط حفاری می‌شود. باقی ماندن خرده‌های حفاری در فضای بین سرمته و سنگ باعث اتلاف انرژی و کاهش قدرت مؤثر سیستم حفاری و در نتیجه کاهش نرخ نفوذ سرمته می‌شود.

در معادن روباز اغلب از هوای فشرده به عنوان عامل فلاشینگ استفاده می‌شود. هوای فشرده در درون چال عموماً وظایف زیر را بر عهده دارد (اصانلو، ۱۳۸۶):

- خنک کردن سرمته و بخش انتهایی تجهیزات حفاری

- پاک‌سازی ته چال از خرده‌های حفاری

- انتقال خرده‌های حفاری به سطح چال

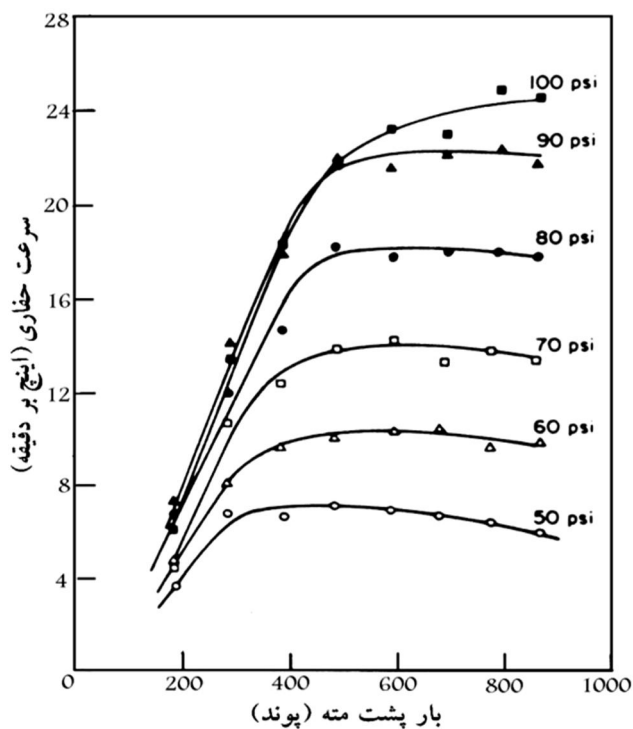
به تجربه ثابت شده که افزایش فشار هوا موجب افزایش سرعت حفاری در سنگ خواهد شد. شکل

۲-۶ تأثیر میزان فشار هوای فلاشینگ را بر ارتباط بین بار پشت مته و سرعت حفاری نشان می‌دهد.

باید توجه داشت که افزایش بازدهی حفاری لزوماً همراه با صرفه‌جویی در هزینه ماشین حفاری

نخواهد بود. گاهی افزایش فشار هوا باعث بالا رفتن هزینه استهلاک مته، لوله، پمپ و غیره می‌شود

(اصانلو، ۱۳۸۶).



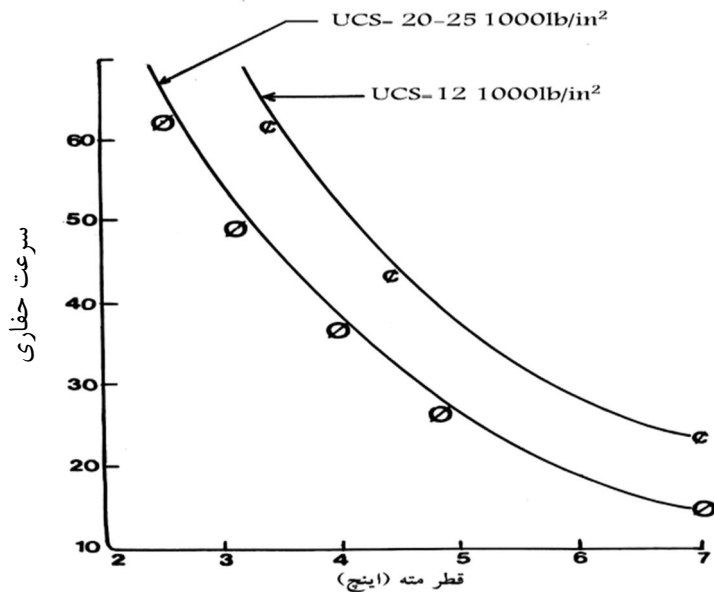
شکل ۲-۶- تأثیر میزان فشار هوای فلاشینگ بر ارتباط بین بار پشت مته و سرعت حفاری (اصانلو، ۱۳۸۶)

۴-۲-۲- مشخصات سرمته و تأثیر آن در سرعت حفاری

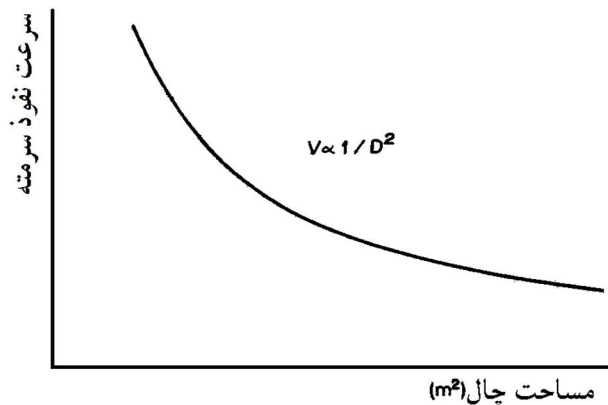
سرمته حفاری به عنوان یک بخش حساس و بسیار مهم، تأثیرات چشمگیری در راندمان، سرعت و هزینه‌های حفاری دارد. تماس مستقیم دستگاه و سنگ توسط سرمته برقرار شده و لذا سرعت حفاری و میزان قابلیت خردشوندگی سنگ به طور مستقیم به شکل، نوع و اندازه سرمته مربوط می‌شود.

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

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. در شکل‌های ۲-۷ و ۲-۸ ارتباط بین قطر سرمته و سرعت حفاری نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۲-۸ نشان داده شده، سرعت حفاری با عکس مجذور قطر متناسب است (استوار، ۱۳۷۹).



شکل ۲-۷- ارتباط بین قطر سرمته و سرعت حفاری با توجه به مقاومت فشاری تک محوری توده‌سنگ (استوار، ۱۳۷۹)



شکل ۲-۸- ارتباط بین قطر چال و سرعت حفاری (Jimeno et al, 1995)

۲-۲-۴- تأثیر نوع و شکل سرمته بر سرعت حفاری

برای انجام عملیات حفاری مناسب و کارآمد، هر نوع سنگ خاص، سیستم حفاری و سرمته مخصوص به خود را نیاز دارد. انتخاب سیستم حفاری مناسب و در نتیجه تعیین سرمته مناسب باعث افزایش راندمان حفاری، افزایش سرعت، کاهش سایش سرمته و کاهش هزینه‌ها می‌شود. در طبقه‌بندی سرمته‌ها عموماً ابتدا روش حفاری و سپس شکل و مشخصات هندسی آن‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد. در حفاری ضربه‌ای- چرخشی دو نوع سرمته دکمه‌ای^۱ و سرمته‌های پره‌ای^۲ استفاده می‌شوند (اصانلو، ۱۳۸۶).

۲-۳- بررسی تأثیر مشخصات توده سنگ بر سرعت حفاری

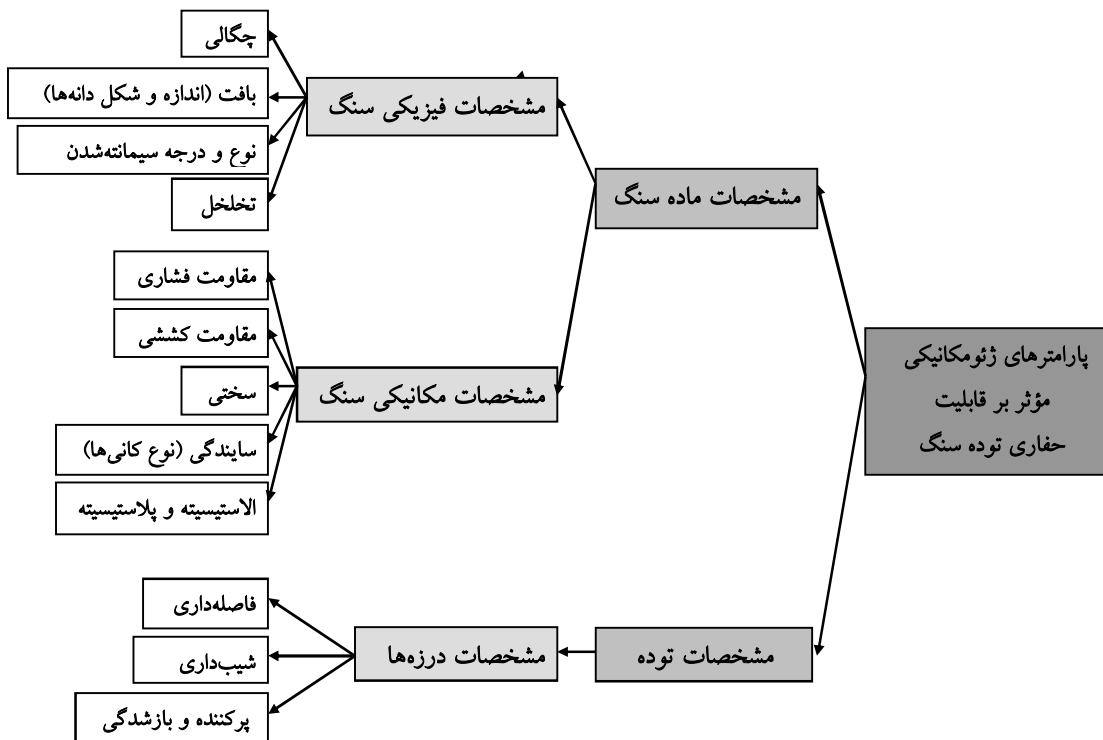
چنانچه در شکل ۲-۱ نشان داده شد، دومین خانواده مهم پارامترهای مؤثر بر سرعت حفاری مشخصات مربوط به ماده سنگ و توده سنگ مورد حفاری است. توده سنگ به عنوان محیط حفاری نقش بسیار اساسی در میزان سرعت حفاری، استهلاک مته و ماشین و هزینه‌های کلی حفاری دارد. بنابراین شناخت محیط حفاری و خصوصیات توده سنگ برجا کمک بسیاری به انتخاب نوع سیستم حفاری، تعیین تعداد ماشین آلات، ارزیابی توان تولید معدن و پیش‌بینی سرعت حفاری خواهد نمود.

^۱. Button Bit

^۲. Drag Bit

تاکنون متخصصان متعددی نقش و تأثیر پارامترهای فیزیکی، مکانیکی و ساختاری توده سنگ را تشریح نموده و رابطه هر یک از این پارامترها را با سرعت حفاری مورد مطالعه قرار داده‌اند. Thuro Singh et al. , Li et al. (2000), Kahraman et al (2000), Ersoy & Waller (1995a,b), (1997) Soyer et al. (2011), Hoseinie et al. (2008), Tanaino (2008), Hoseinie et al. (2007), (2006) Altindag (2010,2011), Bilim et al. (2011).

در این تحقیق سعی گردیده کلیه منابع معتبر، به دقت از نظر رفتارشناسی توده سنگ در حین حفاری و نیز اهمیت و تأثیر هر یک از این پارامترها، مورد بررسی دقیق قرار گیرند. با توجه به مطالعات انجام شده و نیز منابع معتبر، در مجموع می‌توان کلیه پارامترهای ژئومکانیکی مؤثر بر سرعت حفاری را مطابق شکل ۲-۹ طبقه‌بندی نمود.



شکل ۲-۹- پارامترهای ژئومکانیکی مؤثر بر قابلیت حفاری (Hoseinie et al., 2008)

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 آشکاری، در حفاری تعداد پارامترهای مهم مربوطه به ماده سنگ بیشتر بوده و لذا ماده سنگ از اهمیت بیشتری نسبت به توده سنگ برخوردار است.

۲-۳-۱- مشخصات فیزیکی و مینرالوژیکی سنگ‌ها

تاکنون محققان زیادی در زمینه مشخصات مینرالوژیکی سنگ‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند. با توجه به اهمیت این پارامترها می‌توان نتیجه تحقیقات را به صورت خلاصه در جدول ۲-۳ مشاهده نمود.

جدول ۲-۳- تحقیقات انجام شده در زمینه تأثیر پارامترهای مینرالوژیکی سنگ‌ها بر قابلیت حفاری

Parameter Researcher	Gs	Te	Ma	We	D	P	Qc
<i>Wilbur, 1982</i>		✓					
<i>Howarth, 1986</i>		✓			✓	✓	
<i>Howarth and Rowland, 1987</i>		✓					
<i>Bilgin et al, 1993</i>					✓		
<i>Ersoy and Waller, 1995</i>	✓	✓	✓	✓	✓		✓
<i>Osanloo, 1998</i>	✓	✓	✓		✓	✓	
<i>Rao et al, 1998-2002</i>	✓	✓					
<i>Kahraman, 1999</i>					✓		✓
<i>Kahraman et al, 2003</i>					✓		
<i>Altindag, 2003</i>	✓						
<i>Schormair et al, 2006</i>		✓					✓
<i>Hoseinie et al, 2008</i>	✓	✓					
<i>Niyazi Bilim, 2011</i>					✓	✓	

محتوی کوارتز: Qc، تخلخل: P، چگالی: D، هوازدگی: We، ماتریکس: Ma، بافت: Te، اندازه دانه: G_s

۲-۳-۱-۱- چگالی

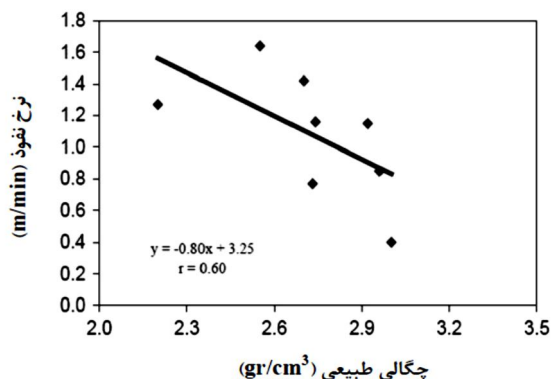
چگالی یک سنگ نسبت جرم مخصوص سنگ (ρ_s) به جرم مخصوص آب (ρ_w) یا نسبت وزن مخصوص سنگ (γ_s) به وزن مخصوص آب (γ_w) است. چگالی یک سنگ را می‌توان بر اساس درصد کانی‌های تشکیل دهنده و وزن مخصوص آن‌ها به دست آورد. از عوامل مؤثر بر چگالی می‌توان تخلخل، نسبت پوکی و نحوه استقرار کانی‌ها را نام برد. هرچه نسبت پوکی و تخلخل سنگ زیادتر باشد، تراکم و چگالی سنگ کمتر خواهد بود.

به طور معمول چگالی سنگ‌ها بین $1/9$ تا $3/5$ متغیر است. تاکنون متخصصان زیادی رابطه چگالی و سرعت حفاری را مطالعه نموده‌اند. از آن جایی که چگالی سنگ با سرعت حفاری رابطه عکس دارد، هرچه سنگ متراکم‌تر و چگال‌تر باشد، سرعت حفاری کمتر خواهد بود (اصانلو، ۱۳۸۶).

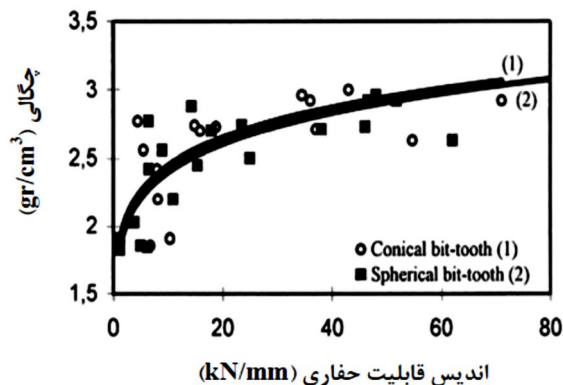
قهرمان و همکاران در سال ۲۰۰۰ با مطالعه گسترده روی تعدادی از سنگ‌های کشور ترکیه نشان داد که با افزایش میزان چگالی سنگ، انرژی لازم برای حفاری توسط سیستم حفاری دورانی افزایش یافته و لذا سرعت حفاری کمتر می‌شود. شکل ۲-۱۰ منحنی حاصل از تحقیقات قهرمان را نشان می‌دهد.

همچنین قهرمان در تحقیق دیگری رابطه چگالی طبیعی سنگ‌ها و سرعت حفاری ضربه‌ای را مورد مطالعه قرار داده است. نتایج این تحقیق نیز مشابه تحقیق قبل این محقق نشان‌دهنده کاهش سرعت حفاری همزمان با افزایش چگالی سنگ‌ها می‌باشد (شکل ۲-۱۱).

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 به ذکر با اهمیت بودن این پارامتر در حفاری اکتفا نموده‌اند. لذا استفاده از این پارامتر به عنوان یک پارامتر منفرد برای پیش‌بینی سرعت حفاری و ارزیابی قابلیت حفاری سنگ‌ها پیشنهاد نمی‌گردد و بایستی تحقیقات جامعی برای بررسی تأثیر چگالی بر قابلیت حفاری انجام شود.



شکل ۲-۱۱- ارتباط چگالی طبیعی و نرخ نفوذ
(Kahraman et al., 2003)



شکل ۲-۱۰- ارتباط چگالی سنگ و سرعت حفاری
دورانی (Kahraman et al., 2000)

۲-۳-۱-۲- بافت

بافت، نقش اساسی در رفتار مهندسی سنگ‌ها به ویژه از نظر قابلیت حفاری دارد. در بحث از بافت سنگ، اندازه، شکل و میزان ماتریکس (نسبت دانه به ماتریکس) مورد توجه قرار می‌گیرد. از نظر دانه‌بندی، هرچه سنگ دانه درشت‌تر باشد قابلیت حفاری سنگ افزایش یافته و راحت‌تر می‌توان در آن حفاری نمود (استوار، ۱۳۸۰). از نظر شکل دانه‌ها، هرچه بافت سنگ دارای کانی‌های مسطح و دانه‌های کروی باشد، در مقایسه با بافت سنگ‌های دارای کانی‌های گوشه‌دار و کشیده زبری کمتری دارد و لذا در حفاری نیز سایش کمتری ایجاد کرده و قابلیت حفاری بهتری نسبت به حالت دیگر دارد. در تقسیم‌بندی رایج در حفاری، بافت سنگ‌ها بر اساس دو عامل اندازه و شکل در چهار گروه تقسیم‌بندی می‌شوند (اصانلو، ۱۳۸۶): ۱- دانه‌ای، ۲- پورفیری، ۳- شیشه‌ای و ۴- تخریبی مانند ماسه سنگ.

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 نمود. 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 نمودن ویژگی‌های بافت یک سنگ آرمان محققان مهندسی حفاری و زمین‌شناسی مهندسی بوده است.

ضریب بافت^۱، جامع‌ترین و معتبرترین روش کمی نمودن بافت یک سنگ است که توسط هوارس^۲ و رولند در سال ۱۹۸۷ ارائه شده است (Ersoy & Waller, 1995a). این روش با رابطه ۲-۲ قابل محاسبه است:

$$TC = AW \left[\left\{ \frac{N_0}{N_0 + N_1} \times \frac{1}{FF_0} \right\} + \left\{ \frac{N_1}{N_0 + N_1} \times AR_1 \times AF_1 \right\} \right] \quad (2-2)$$

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 رابطه ۲-۳ تعریف می‌شود:

$$AW = \frac{\text{مساحت ناحیه مرجع}}{\text{مساحت دانه‌های درون مرز ناحیه مرجع}} \quad (3-2)$$

فاکتور شکل در رابطه ضریب بافت معرف انحراف دانه از حالت گرد بودن است. این انحراف به دو

¹ . Texture Coefficient

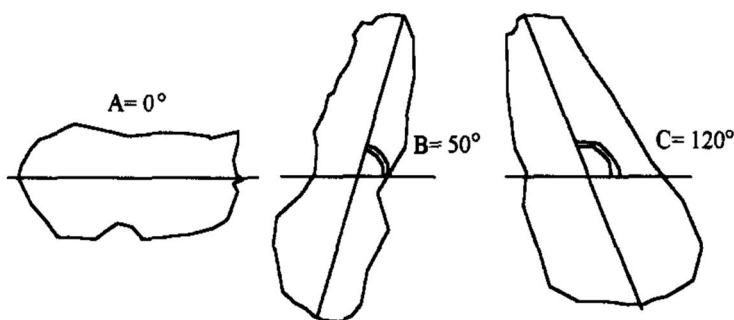
² . Howarth & Rowland

صورت به وجود می‌آید: درازشدگی شکل یا افزایش ناصافی سطح نمونه. فاکتور شکل یا فاکتور کشیدگی دانه از رابطه ۴-۲ قابل محاسبه است:

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

مفهوم فاکتور زاویه مطابق شکل ۱۲-۲ عبارت است از زاویه بین قطر بزرگ دانه و جهت افق. ماکزیمم مقدار این زاویه ۱۸۰ درجه است.

جهت‌یافتگی زاویه دانه‌ها توسط کمی کردن فاکتور زاویه به دست می‌آید. این فاکتور برای دانه‌های کشیده و طویل که در آنها نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک بیش از ۲ می‌باشد محاسبه می‌گردد.



شکل ۱۲-۲- مفهوم فاکتور زاویه

فاکتور زاویه AF_1 توسط سیستم وزن‌دهی موجود در جدول ۴-۲ طبقه‌بندی می‌شود. این سیستم تفاوت زاویه‌ای بین همه دانه‌های کشیده را با دقت و به طور مطلق محاسبه می‌نماید. تفاوت زاویه‌ای در نه کلاس مختلف دسته‌بندی می‌شود، برای هر کلاس یک وزن وجود دارد.

فاکتور زاویه از جمع کلاس‌ها و تقسیم آنها بر کل اعداد زاویه‌ای به شرح رابطه ۵-۲ محاسبه می‌شود:

$$(5-2) \quad AF = \sum_{i=1}^n \left[\frac{X_i}{\frac{N(N-1)}{2}} \right] i$$

که در آن:

N : تعداد کل دانه‌های کشیده و طویل

X_i : شماره تفاوت زاویه‌ای در هر کلاس

i : فاکتور وزن‌دهی و شماره کلاس

شکل دانه‌های سنگ به عنوان بحرانی‌ترین پارامتر مؤثر در قابلیت ساینده‌گی سنگ‌ها مطرح می‌باشد (Ersoy & Waller, 1995a). دانه‌های گوشه‌دار کشیده و ذرات ریز سنگ باعث کاهش سرعت حفاری و افزایش قابلیت ساینده‌گی سنگ‌ها می‌شود.

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

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

ارزوی و والر^۱ در سال ۱۹۹۵ در تحقیقات خود نشان دادند که با افزایش گوشه‌داری دانه‌های سنگ،

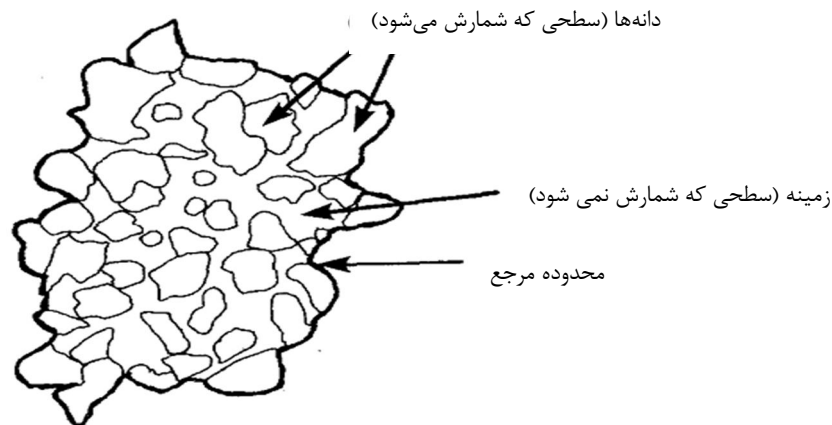
سرعت حفاری اکتشافی کاهش و میزان سایش سرمته افزایش می‌یابد (Ersoy & Waller, 1995a).

^۱. Ersoy & Waller

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 عکس برداری می‌شود. عکس‌های تهیه شده وارد نرم افزار اتوکد^۱ شده و دیجیتایز می‌شوند. پس از دیجیتالی شدن عکس‌ها ابتدا یک محدوده مرجع^۲ یا محدوده دید بر روی مقاطع مشخص می‌شود. این محدوده شامل تمامی دانه‌های کامل قابل مشاهده در عکس بوده و لذا دانه‌های ناقص موجود در حاشیه عکس در نظر گرفته نمی‌شوند (شکل ۲-۱۳).

پس از انجام مراحل فوق در نرم‌افزار اتوکد، دور هر یک از دانه‌های موجود در محدوده دید مقطع

خط بسته کشیده می‌شود (Howarth & Rowlands, 1987).



شکل ۲-۱۳- شمای کلی یک مقطع نازک برای محاسبه ضریب بافت (Howarth & Rowlands, 1987)

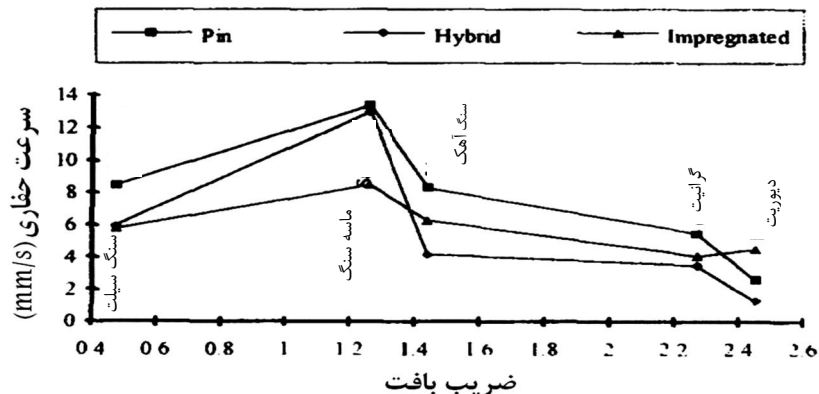
سپس در نرم‌افزار، محیط، مساحت، قطر بزرگ و قطر کوچک هر دانه محاسبه می‌شود. سپس از نتایج حاصل از محاسبات مذکور پارامترهای موجود در رابطه ضریب بافت (رابطه ۲-۲) تعیین شده و میزان ضریب بافت محاسبه می‌شود.

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 اشاره

^۱ . Autocad

^۲ . Reference Boundary

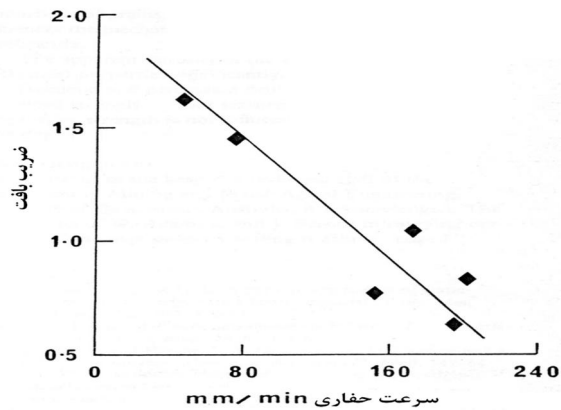
نمود (Ersoy & Waller, 1995a). ایشان با انجام مطالعات آزمایشگاهی دریافته‌اند که در سه نوع مته مختلف با افزایش ضریب بافت سرعت حفاری کاهش می‌یابد (شکل ۲-۱۴).



شکل ۲-۱۴- ارتباط ضریب بافت و سرعت حفاری اکتشافی در سه نوع سرمته مختلف (Ersoy & Waller, 1995a)

در تحقیق جامع دیگری که توسط اوزترک و همکارش^۱ در سال ۲۰۰۴ انجام شده رابطه ضریب بافت و بسیاری از مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها از جمله قابلیت برش سنگ‌ها ارائه شده است (Ozturk et al. 2004). معماریان در تحقیق نسبتاً جامعی رابطه بین ساینده‌گی و ضریب بافت را در تعدادی از سنگ‌های تزئینی ایران مورد بررسی قرار داده است. با این حال به رغم تحقیق مناسب، نتیجه و رابطه ریاضی مطلوبی حاصل نگردیده است. راثو در کتاب "اصول حفاری در سنگ" رابطه سرعت حفاری و ضریب بافت را به صورت شکل ۲-۱۵ نشان داده است (Rao & Misra, 1998). هوارس و رولندز نیز در ارزیابی تاثیر ضریب بافت بر قابلیت حفاری رابطه سرعت حفاری و ضریب بافت را به صورت شکل ۲-۱۶ بیان نموده‌اند. از نظر طبقه‌بندی نیز تاکنون ویلبور (۱۹۸۶) و حسینی (۲۰۰۸) با در نظر گرفتن بافت به عنوان یک پارامتر مهم در قابلیت حفاری سنگ‌ها، بافت و اندازه دانه‌ها را در سیستم طبقه‌بندی خویش برای پیش‌بینی قابلیت حفاری به کار برده‌اند. جدول‌های ۲-۵ و ۲-۶ امتیازدهی و طبقه‌بندی بافت را در طبقه‌بندی ویلبور و حسینی (RDi) نشان می‌دهند.

^۱. Ozturk



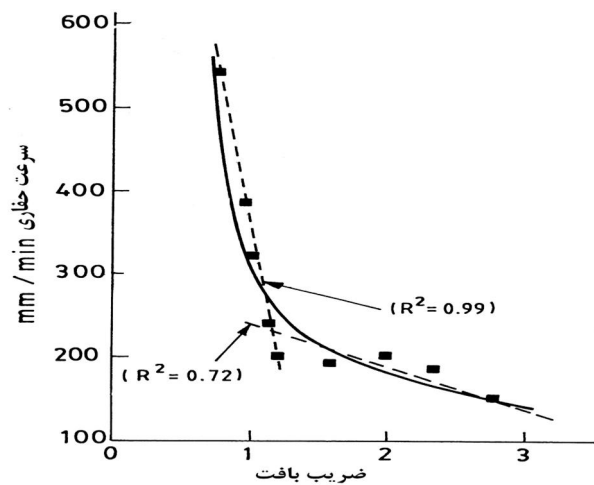
شکل ۲-۱۵- رابطه سرعت حفاری و ضریب بافت (Rao & Misra, 1998)

جدول ۲-۵- امتیازدهی به بافت سنگ در طبقه‌بندی ویلبور (Wibur, 1982)

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

جدول ۲-۶- امتیازدهی به بافت سنگ در طبقه‌بندی RDi (Hoseinie et al. 2008)

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

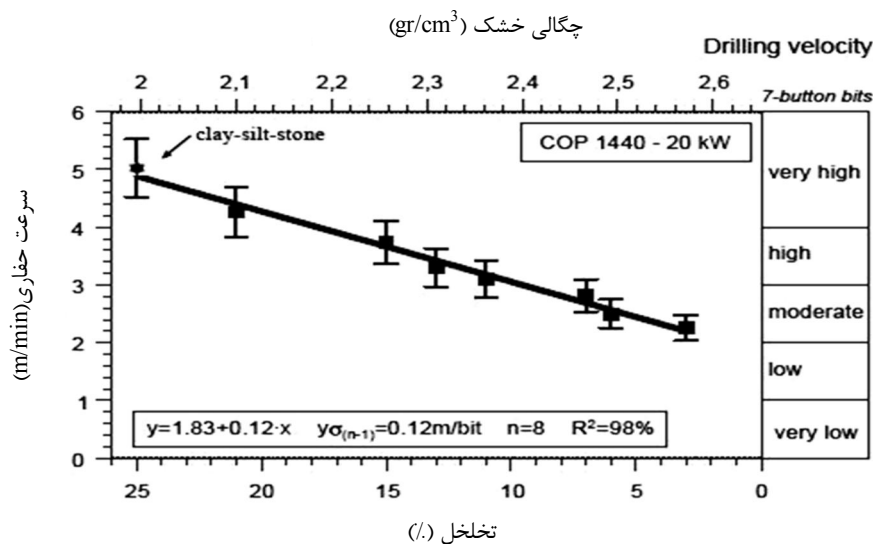


شکل ۲-۱۶- رابطه سرعت حفاری و ضریب بافت (Howarth & Rowlands, 1987)

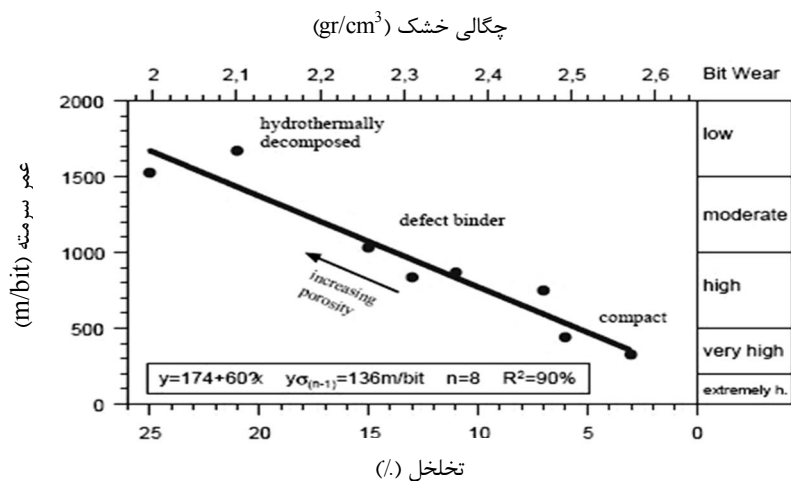
۲-۳-۱-۳- تخلخل

سنگ‌ها اجسام کاملاً توپری نیستند و همیشه حاوی خلل و فرج به صورت حفره‌های کم و بیش مرتبط و یا حفره‌های مجزا هستند. وجود این حفره‌ها اهمیت زیادی در خواص مکانیکی و مهندسی سنگ دارند و به طور کلی هرچه سنگ متخلخل‌تر باشد مقاومت مکانیکی آن کمتر است. به همین دلیل نوع تخلخل و درصد آن از نخستین خواصی است که در مباحث مکانیک سنگی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. تخلخل با چگالی و مقاومت فشاری سنگ‌ها رابطه معکوس دارد. لذا با اندازه‌گیری دو پارامتر چگالی و مقاومت فشاری می‌توان از میزان تخلخل سنگ نیز به صورت غیر مستقیم اطلاع حاصل نمود (وفائیان، ۱۳۷۱).

تورو در مقاله خویش رابطه بین تخلخل و سرعت حفاری و همچنین رابطه تخلخل و عمر سرمته را مورد بررسی قرار داد. وی با انجام آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی چنین نتیجه گرفته است که میزان تخلخل سنگ با سرعت حفاری و میزان سایش و عمر مته رابطه خطی قوی دارد (Thuro, 1997). شکل ۱۷-۲ و ۱۸-۲ نتایج ارائه شده تحقیقات تورو را نشان می‌دهد.

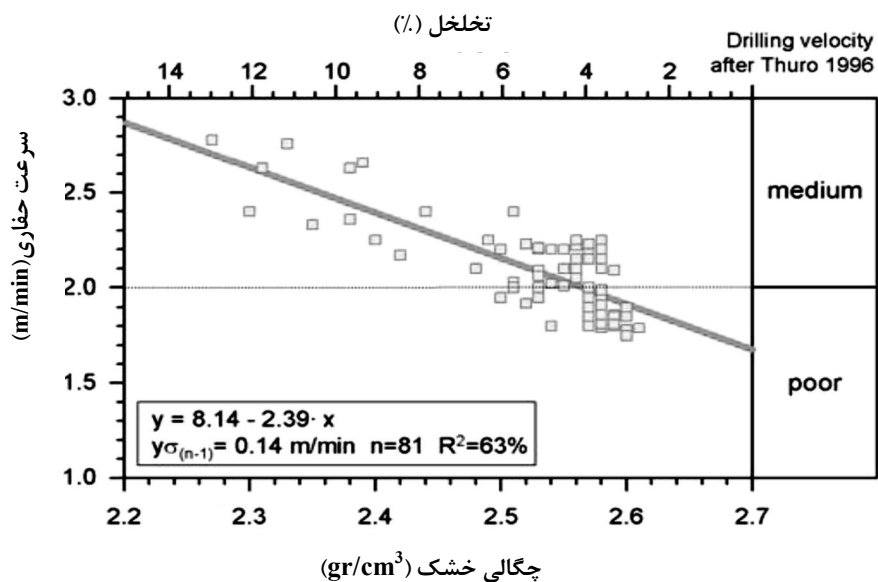


شکل ۱۷-۲- رابطه سرعت حفاری با تخلخل و چگالی سنگ (Thuro, 1997)



شکل ۲-۱۸- رابطه عمر سرمته و تخلخل سنگ (Thuro, 1997)

تورو در سال ۲۰۰۲ در تحقیقی دیگر رابطه تخلخل و چگالی را به صورت توأم بر روی سرعت حفاری مورد بررسی قرار داده و نتیجه تحقیق خود را به صورت شکل ۲-۱۹ ارائه نموده است. نتایج این تحقیق نیز نشان می‌دهد که با افزایش تخلخل و کاهش چگالی، سرعت حفاری به صورت خطی افزایش می‌یابد (Thuro, 2002a).



شکل ۲-۱۹- رابطه سرعت حفاری با تخلخل و چگالی خشک سنگ (Thuro, 2002a)

۲-۳-۲- مشخصات مکانیکی سنگ‌ها

با توجه به اهمیت بسیار زیاد پارامترهای مکانیکی سنگ محققان بسیار زیادی بر روی این پارامترها به تحقیق پرداخته‌اند و هر یک تلاش نموده‌اند تا بهترین رابطه را با مفاهیم نرخ نفوذ، قابلیت حفاری و سرعت حفاری بدست آورند. در جدول ۲-۷ برخی از کارهای صورت گرفته ذکر شده است.

۲-۳-۲-۱- مقاومت فشاری تک محوری

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

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

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 گرفته است (Thuro, 1996).

جدول ۲-۷- تحقیقات انجام شده در زمینه تأثیر خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها بر قابلیت حفاری

Parameter Researcher	UCS	TS	Is	Sc.H	B	T	Ab.	H	Sh.H	IHN	E	SE	WV	DRI	CRS	PI	WF	PR
Simon, 1956	✓					✓		✓										
Rollow, 1962																		✓
Teale, 1965												✓						✓
Hucka, 1965	✓																	
Paone et al., 1969	✓	✓							✓		✓				✓			
S-olsen et al., 1970	✓				✓		✓	✓						✓				✓
Selim & Bruce, 1970												✓						✓
Martini, 1971				✓										✓				
Hustrulid et al., 1971-2												✓						
Mellor, 1972												✓						✓
Tandanand et al., 1975															✓			
Paithankar et al., 1980								✓	✓		✓							✓
Rabia & Brook, 1980-1									✓	✓								
Wilbur, 1982								✓										
Rabia, 1982												✓						✓
Clark, 1982	✓																	✓
Howarth, 1986	✓	✓		✓							✓		✓					
Atkinson et al, 1986																	✓	
Howarth et al., 1987																		✓
West, 1989							✓										✓	
Bilgin et al., 1993	✓	✓												✓				
Ersoy and Waller, 1995	✓	✓					✓	✓	✓		✓							✓
Jimeno et al., 1995								✓										

جدول ۷-۲- تحقیقات انجام شده در زمینه تأثیر خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها بر قابلیت حفاری (ادامه)

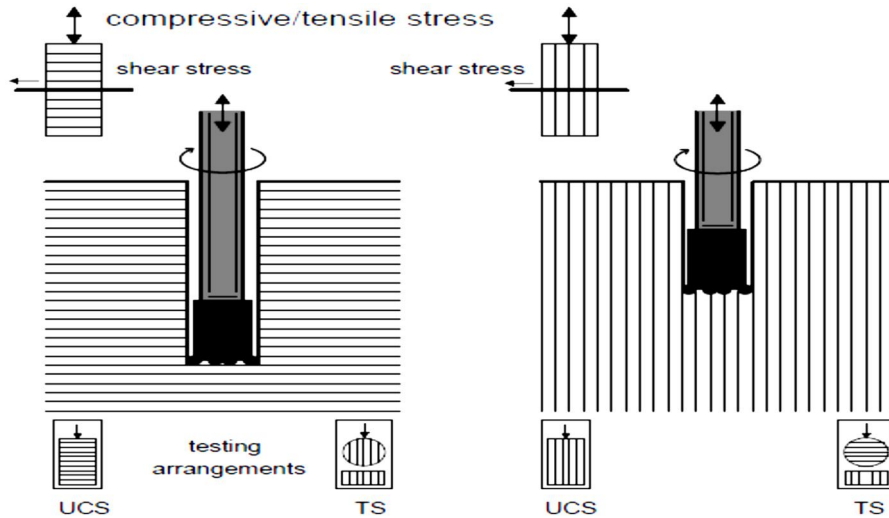
Parameter Researcher	UCS	TS	Is	Sc.H	B	T	Ab.	H	Sh.H	IHN	E	SE	WV	DRI	CRS	PI	WF	PR
Andreev, 1995					✓									✓				
Serradj, 1996	✓															✓		
Thuro and Spaun, 1996	✓	✓				✓					✓							
Thuro, 1997	✓																✓	✓
Shimada & Matsui, 1998	✓	✓							✓									
Osanloo, 1998	✓					✓		✓			✓							
Rao et al., 1998, 2002	✓	✓					✓	✓				✓						
Kahraman, 1999	✓	✓								✓	✓		✓					
Li et al., 2000				✓										✓				
Kahraman et al., 2000	✓	✓		✓						✓	✓		✓					
Altindog, 2000, 2002			✓	✓	✓						✓		✓	✓				✓
Liu et al., 2002														✓				
Kahraman, 2002					✓									✓				
Plinninger et al., 2002							✓											
Ersoy, 2003												✓						
Kahraman et al., 2003	✓	✓	✓	✓						✓	✓	✓	✓					✓
Izquierdo et al., 2004												✓						
Tanaino, 2004, 2005	✓											✓						
Akun & Karpuz, 2005	✓											✓						
Schormair et al., 2006							✓											
Singh et al., 2006				✓					✓	✓								
K.B.Chary et al, 2006	✓			✓	✓	✓							✓	✓				
Yarali, 2007					✓									✓				
Ataei & Hoseinie, 2008							✓											
Yarali et al., 2008																		
Hoseinie et al., 2008	✓							✓										

جدول ۷-۲- تحقیقات انجام شده در زمینه تأثیر خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها بر قابلیت حفاری (ادامه)

Parameter	UCS	TS	Is	Sc.H	B	T	Ab.	H	Sh.H	IHN	E	SE	WV	DRI	CRS	PI	WF	PR
Researcher																		
Altindag, 2010					✓									✓				
Yarali & Kahraman, 2010					✓									✓				
Adebayo et al., 2010	✓		✓					✓						✓				
Niyazi Bilim, 2011	✓	✓	✓	✓									✓					✓
Yarali, Kahraman, 2011	✓	✓			✓									✓				
Yarali, Soyer, 2011	✓	✓	✓		✓				✓					✓				
V.C. Kelessidis, 2011	✓													✓				

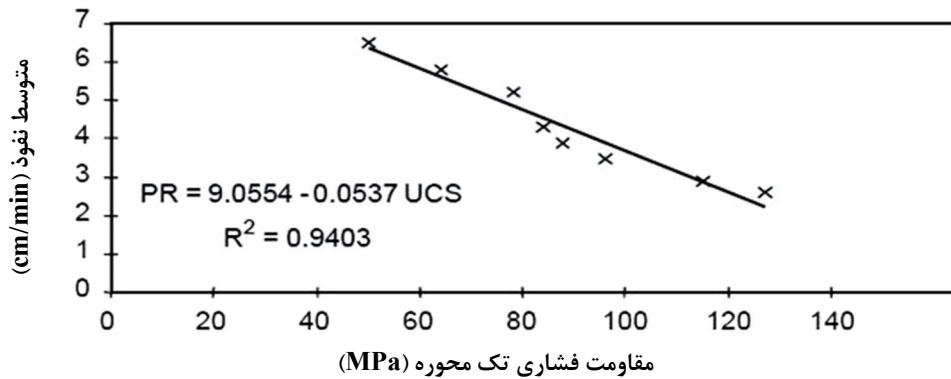
UCS: مقاومت فشاری، TS: مقاومت کششی، Is: اندیس با نقطه‌ای، Sc.H: سختی چکش اشمیت، B: تردی، T: چقرمگی، Ab: ساینده‌گی، H: سختی، Sh.H: سختی شور، IHN: عدد سختی ضربه‌ای، E: مدول الاستیسیته، SE: انرژی ویژه، WV: سرعت موج، DRI: اندیس سرعت حفاری، CRS: ضریب مقاومت سنگ، PI: اندیس پروتودیاکونف، WF: فاکتور سایش، PR: نرخ نفوذ

از سوی دیگر مقاومت سنگ‌های آنیزوتوپ بستگی به جهت نیروی وارد شده دارد. مثلاً مقاومت فشاری سنگ‌ها در جهت عمود بر جهت چینه‌شناسی یا شیبستوزیته بیشتر از جهت موازی با آن است (شکل ۲-۲۰).



شکل ۲-۲۰- تاثیر جهت داری متفاوت نا پیوستگی‌ها بر حفاری (Thuro,1996)

آکون و کارپوز^۱ 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 ۲-۲۱) (Akun & Karpuz, 2005).

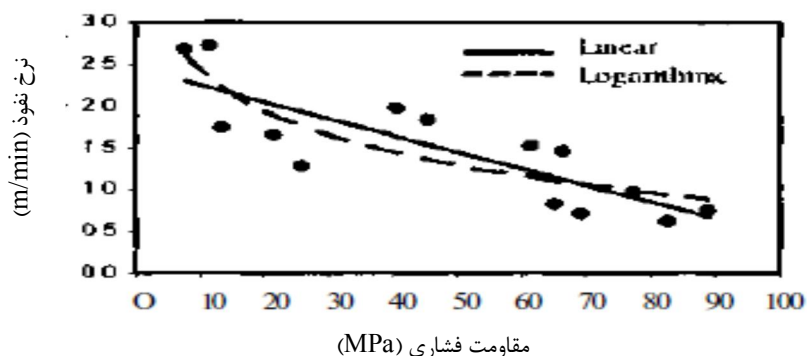


شکل ۲-۲۱- رابطه مقاومت فشاری و متوسط نفوذ (Akun & Karpuz, 2005)

^۱ . Akun & Karpuz

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 DTH و ضربه‌ای-دورانی چکش بالا و دورانی پیشنهاد نمود. 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 نموده است (Kahraman, 1999).

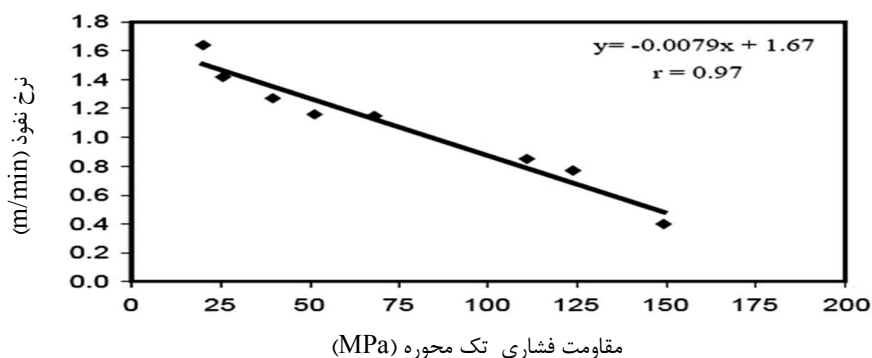
بیلگین^۱ و قهرمان در سال ۲۰۰۳ با بررسی داده‌های ۱۴ معدن در ترکیه رابطه‌ای بین برخی از پارامترهای مکانیکی به دست آوردند. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص گردید که مقاومت فشاری رابطه نزدیکی با نرخ نفوذ دارد که در شکل ۲-۲۲ مشاهده می‌شود.



شکل ۲-۲۲- رابطه سرعت حفاری ضربه‌ای و مقاومت فشاری (Bilgin & Kahraman, 2003)

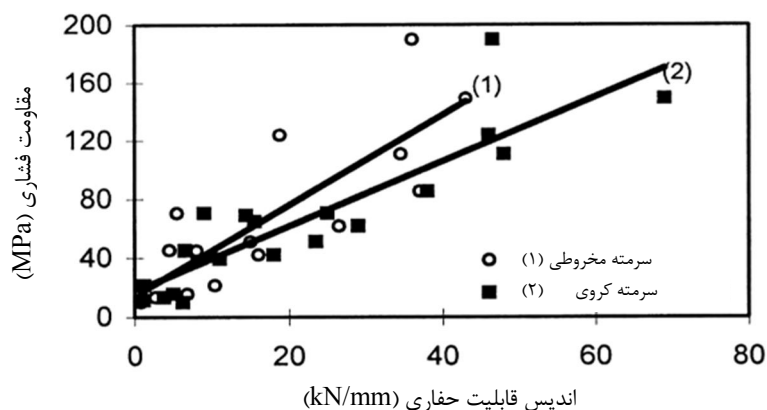
قهرمان در تحقیق جامع دیگری کلیه پارامترهای مکانیکی و فیزیکی سنگ را که بر سرعت حفاری ضربه‌ای تأثیر دارند مورد مطالعه قرار داده و در این میان با استفاده از نمونه‌هایی از سنگ‌های کشور ترکیه رابطه ریاضی مقاومت فشاری و سرعت حفاری را به صورت شکل ۲-۲۳ نشان داده است.

^۱ Bilgin



شکل ۲-۲۳- رابطه سرعت حفاری ضربه‌ای و مقاومت فشاری (Kahraman et al. 2003)

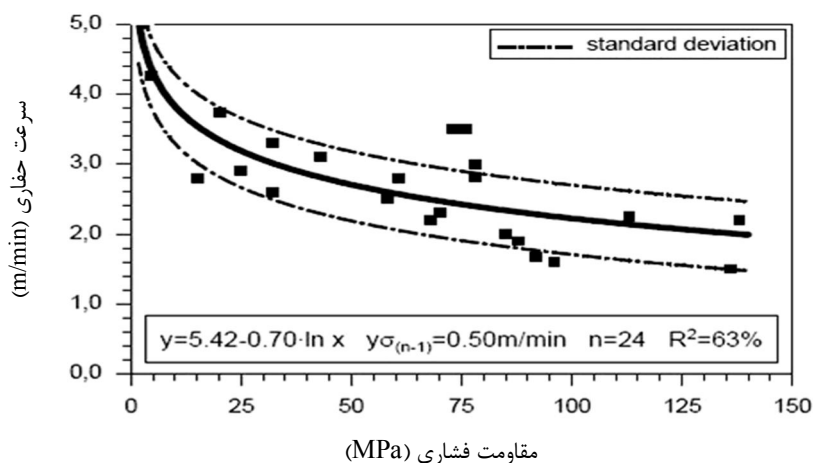
قهرمان در مقاله دیگری در سال ۲۰۰۰ در تحقیقات پیرامون ارائه یک اندیس قابلیت حفاری جدید نشان داد که مقاومت فشاری با قابلیت حفاری سنگ‌ها (روش دورانی) رابطه خطی معکوس دارد. شکل ۲-۲۴ رابطه بین قابلیت حفاری و مقاومت فشاری را طبق تحقیقات قهرمان در دو نوع سرمته نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲۴- رابطه بین قابلیت حفاری و مقاومت فشاری در دو نوع سرمته (۱) مخروطی (۲) کروی (Kahram et al,2000)

ارزوی و والتر در تحقیقات خود برای پیش‌بینی سرعت حفاری اکتشافی مقاومت فشاری را به عنوان یک عامل مؤثر در سرعت حفاری برای ارائه مدل و انجام رگرسیون به کار برده‌اند (Ersoy & Waller, 1995a).

تورو 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 ۲-۲۵ منحنی ارائه شده توسط تورو را نشان می‌دهد (Thuro & Spaun,1996).

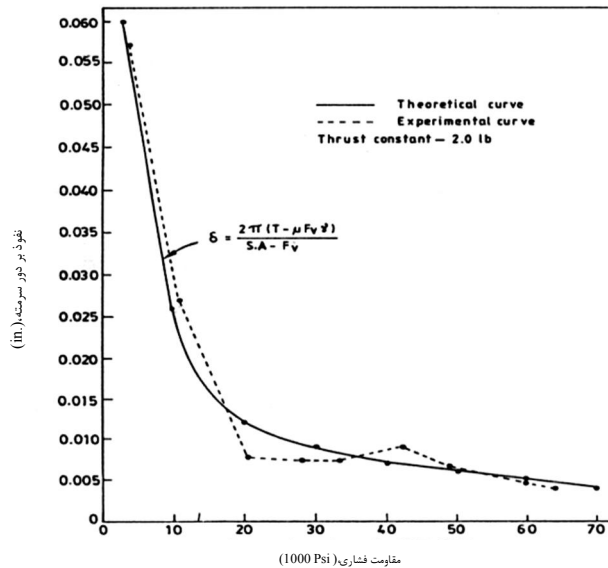


شکل ۲-۲۵- رابطه بین سرعت حفاری ضربه‌ای در تونل‌ها و مقاومت فشاری سنگ‌های اسلیتی و کوارتزیتی در کشور

آلمان (Thuro & Spaun, 1996)

رئو در کتاب اصول حفاری سنگ ارتباط مقاومت فشاری و سرعت حفاری را به صورت شکل ۲-۲۶

نشان داده است.



شکل ۲-۲۶- ارتباط مقاومت فشاری و سرعت حفاری (Rao & Misra, 1998)

چنانچه از نتایج محققان گذشته و حاضر بر می‌آید مقاومت فشاری به عنوان مهم‌ترین پارامتر

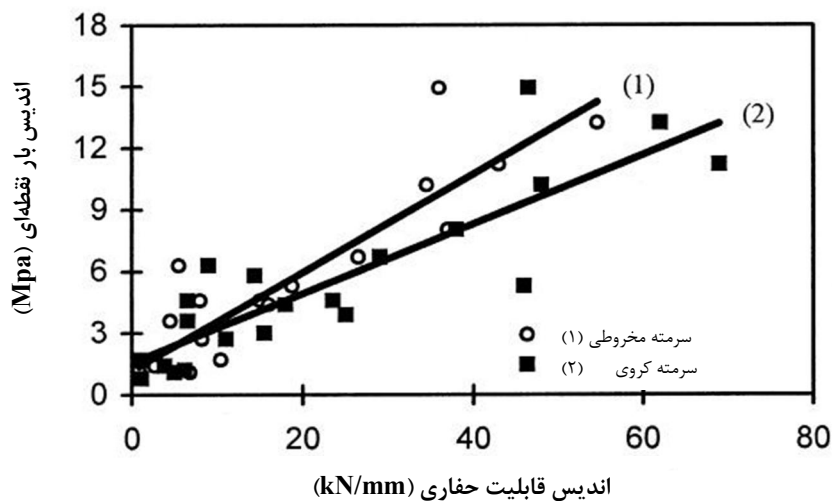
مهندسی سنگ، در مهندسی حفاری نیز همچون سایر شاخه‌های مهندسی معدن از اهمیت بسیار زیادی

برخوردار می‌باشد. مقاومت فشاری سنگ‌ها از جنبه‌های مختلف نیز مورد طبقه‌بندی قرار گرفته است. تنها طبقه‌بندی موجود در زمینه حفاری برای سنگ‌ها توسط حسینی و همکاران در سال ۲۰۰۸ و به نام قابلیت حفاری توده سنگ‌ها RDi ارائه شده است. در این طبقه‌بندی مقاومت فشاری به عنوان مهم‌ترین پارامتر فیزیکی و مکانیکی سنگ، امتیاز ۲۲ را از مجموع ۱۰۰ امتیاز RDi کسب نموده است. نحوه طبقه‌بندی و امتیازدهی به سنگ‌ها از نظر مقاومت فشاری در سیستم RDi در جدول ۲-۸ نشان داده شده است (Hoseinie et al. 2008).

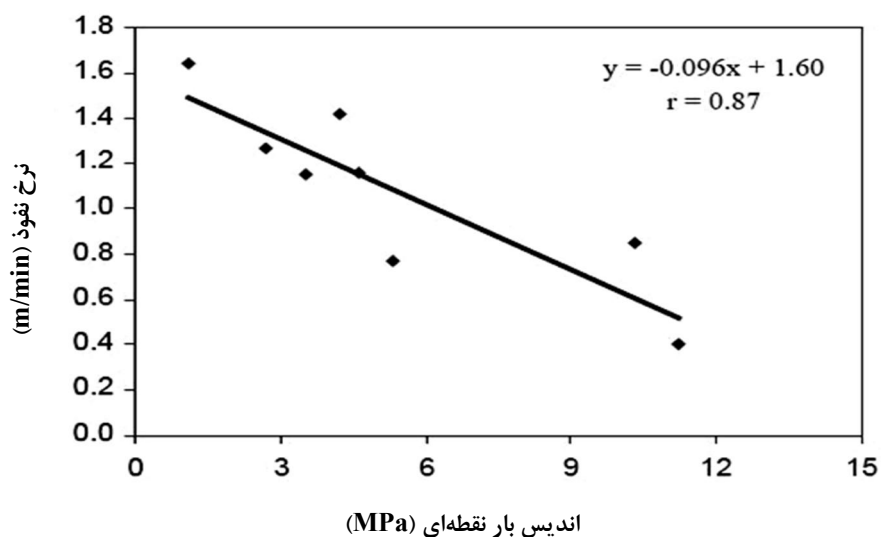
جدول ۲-۸- امتیازدهی به مقاومت فشاری در طبقه بندی RDi (Hoseinie et al. 2008)

مقاومت فشاری تک محوره (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	

کلیه تحقیقات انجام شده عموماً بر روی مقاومت فشاری تک محوری صورت گرفته است که در عمل انجام آزمایش و تعیین این مشخصه سنگ امری زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد. لذا در سال‌های اخیر تحقیقاتی صورت گرفته تا بتوان با روش‌های سریع‌تر و ارزان‌تر مقاومت سنگ را تخمین زده و رابطه آن را با حفاری مشخص نمود. یکی از این روش‌ها استفاده از شاخص مقاومت بار نقطه‌ای می‌باشد. این شاخص به عنوان یک کمیت جانشین در بسیاری از زمینه‌های مکانیک سنگ جایگزین مقاومت فشاری تک‌محوری شده است. معتبرترین تحقیقات موجود در این زمینه توسط قهرمان در کشور ترکیه انجام شده است (Kahraman et al., 1999). ایشان در تحقیقات خود نشان داد که در حفاری دورانی با دو نوع سرمت، با افزایش میزان بار نقطه‌ای قابلیت حفاری سنگ‌ها به صورت خطی کاهش می‌یابد (شکل ۲-۲۷). همچنین قهرمان در سال ۲۰۰۳ طی آزمایش‌های آزمایشگاهی نشان داد که سرعت حفاری ضربه‌ای با افزایش بار نقطه‌ای به صورت خطی کاهش می‌یابد (شکل ۲-۲۸).

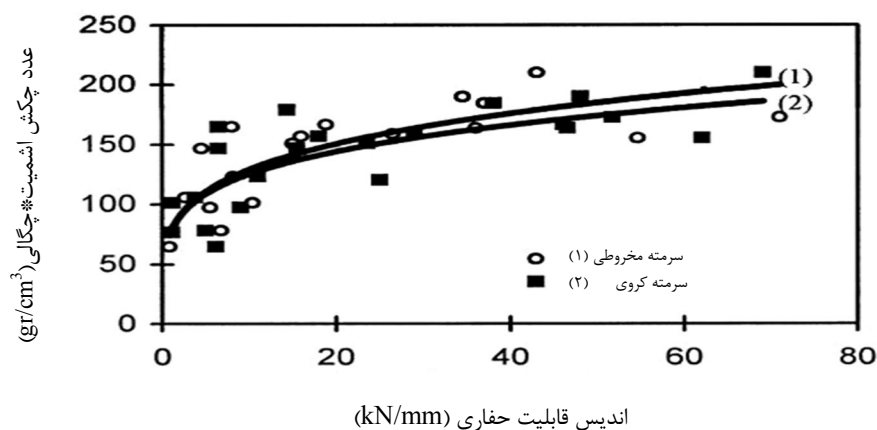


شکل ۲-۲۷- ارتباط اندیس بار نقطه‌ای و سرعت حفاری دورانی (Kahraman et al. 2000)

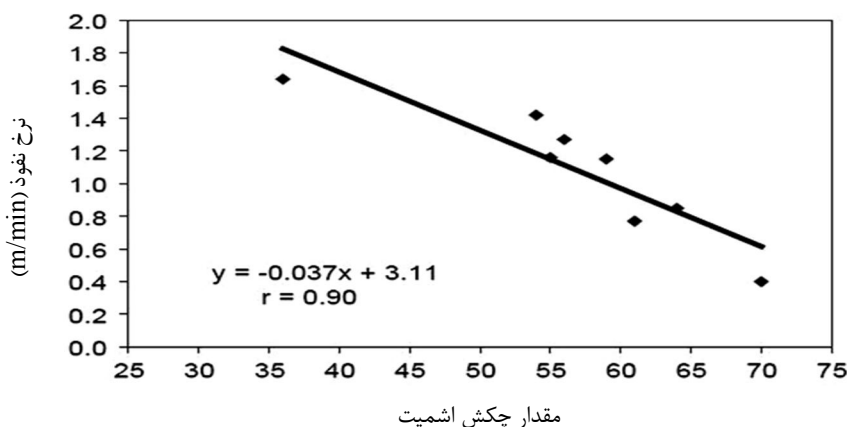


شکل ۲-۲۸- ارتباط اندیس بار نقطه‌ای و سرعت حفاری ضربه‌ای (Kahraman et al. 2003)

یکی دیگر از این روش‌های غیر مستقیم مقاومت سنگ، استفاده از عدد چکش اشمیت است. معتبرترین تحقیقات موجود در این زمینه نیز توسط قهرمان در کشور ترکیه انجام شده است. ایشان در تحقیقات خود نشان داد که در حفاری دورانی و ضربه‌ای، با افزایش میزان عدد چکش اشمیت قابلیت حفاری سنگ‌ها به صورت خطی کاهش می‌یابد (شکل ۲-۲۹ و ۲-۳۰).



شکل ۲-۲۹- ارتباط عدد چکش اشمیت و سرعت حفاری دورانی (Kahraman et al. 2000)



شکل ۲-۳۰- ارتباط عدد چکش اشمیت و سرعت حفاری ضربه‌ای (Kahraman et al. 2003)

۲-۲-۳-۲- 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).

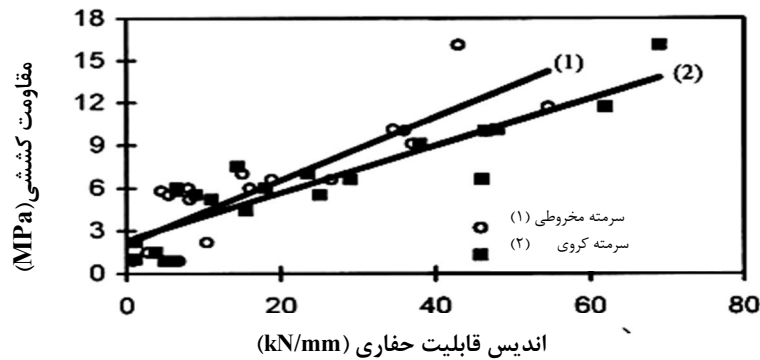
در مهندسی حفاری، مقاومت کششی نشانگر مقاومت مرزی دانه‌ها و ماتریکس می‌باشد (Ersoy &

Waller, 1995a). لذا با افزایش مقاومت و اتصال بین دانه و ماتریکس، مقاومت کششی سنگ افزایش

می‌یابد. اتصال و به هم چسبیدگی شدید ماتریکس و دانه باعث افزایش سایندگی سنگ و در نهایت باعث

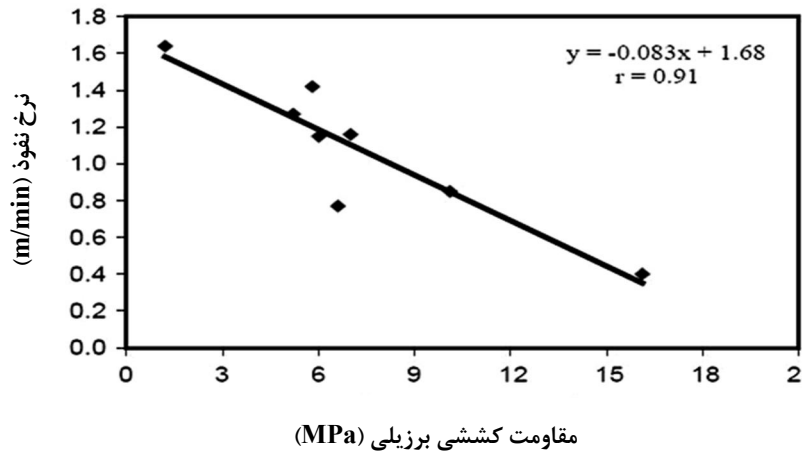
کاهش سرعت حفاری می‌شود.

محققان مختلفی به اهمیت مقاومت کششی سنگ در قابلیت حفاری اشاره و تأکید نموده‌اند. با این حال تحقیقات برجسته و معتبر در این زمینه توسط قهرمان از کشور ترکیه و تورو در کشور آلمان انجام گرفته است. قهرمان طی تحقیق جامعی رابطه سرعت حفاری دورانی و مقاومت کششی را به صورت شکل ۳۱-۲ ارائه نموده است (Kahraman et al., 2000).



شکل ۳۱-۲- 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 ۳۲-۲ ارائه نموده است.

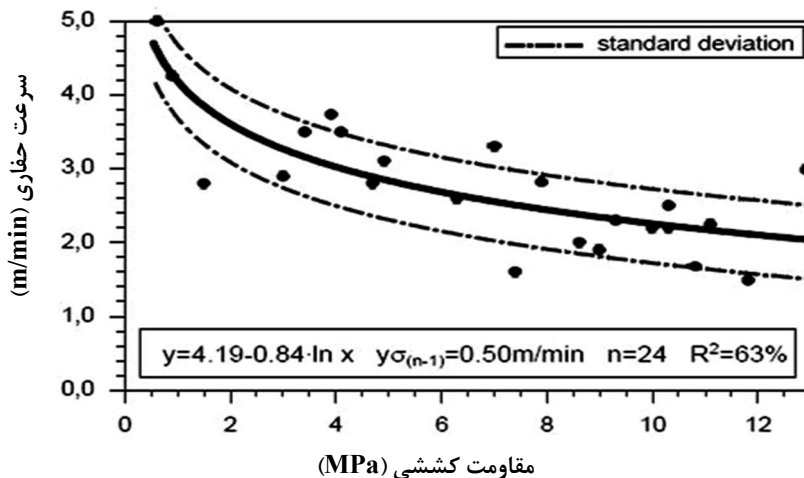


شکل ۳۲-۲- ارتباط مقاومت کششی و سرعت حفاری ضربه‌ای (Kahraman et al. 2003)

نتایج تحقیقات قهرمان نشان می‌دهد که مقاومت کششی با قابلیت حفاری سنگ‌ها و سرعت حفاری دورانی و ضربه‌ای در معادن روباز رابطه خطی معکوس دارد. تورو طی مقاله‌ای نشان داد که مقاومت

کششی با سرعت حفاری ضربه‌ای در تونل‌سازی به روش سنتی رابطه لگاریتمی معکوس دارد (شکل ۲-۲).

(Thuro & Spaun, 1996) (۳۳)



شکل ۲-۳۳- ارتباط مقاومت کششی و سرعت حفاری ضربه‌ای در تونل‌سازی (Thuro & Spaun, 1996)

۲-۳-۲-۳- تردی

تردی به عنوان یکی از خواص مهم سنگ‌ها شناخته می‌شود. محققان مختلف برای بیان اهداف

مورد نظر خود از تعابیر متفاوتی استفاده کرده‌اند. رابطه‌های ۲-۶ تا ۲-۱۵ تعدادی از مفاهیم مختلف

تردی را نشان می‌دهد.

$$B_1 = \frac{\sigma_c}{\sigma_t} \quad (۲-۶); \quad B_2 = \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t} \quad (۲-۷)$$

$$B_3 = \frac{\sigma_c \sigma_t}{2}, (\text{Mpa})^2 \quad (۲-۸); \quad B_4 = \sqrt{B_3} \quad (۲-۹)$$

$$B_5 = \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_t} \quad (۲-۱۰); \quad B_6 = \frac{W_r}{W_t} \quad (۲-۱۱)$$

$$B_7 = \frac{F_{max}}{P} \quad (۲-۱۲); \quad B_8 = q \sigma_c \quad (۲-۱۳)$$

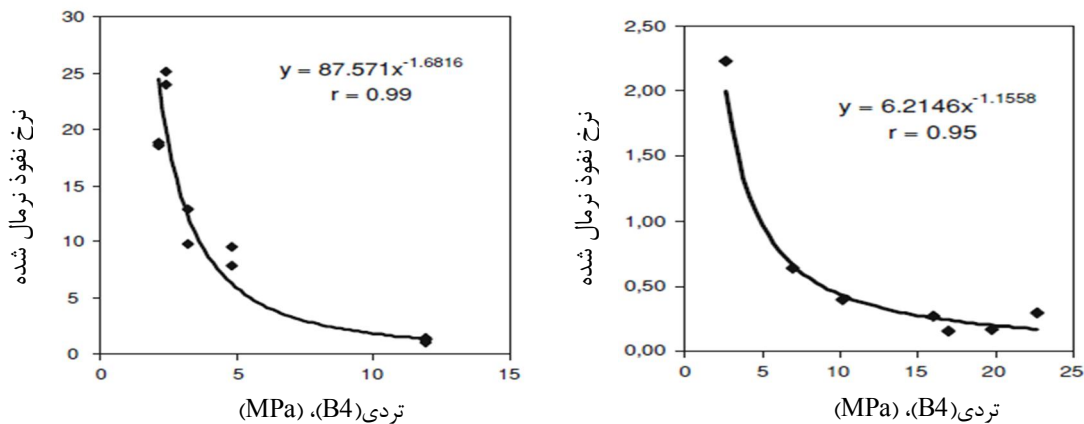
$$B_9 = \frac{W_{rs}}{W_t} \quad (۲-۱۴); \quad B_{10} = \frac{(HE)}{K_{1c}^2} \quad (۲-۱۵)$$

که: σ_c : مقاومت فشاری، σ_t : مقاومت کششی، H: سختی، E: مدول الاستیسیته، K_{1c} : چقرمگی،

ε_r : کرنش برگشت‌پذیر، ε_t : کرنش کلی، q: درصد ذرات زیر ۲۸ مش تشکیل شده از تست ضربه

پروتودیاکونف، W_r : انرژی برگشت پذیر، W_t : انرژی کل، W_{TS} : انرژی کرنش برگشت پذیر قبل از شکست،
 W_t : انرژی کل قبل از شکست، F_{max} : نیروی اعمالی روی نمونه سنگی (KN)، P : متناظر با بیشترین نیروی
 نفوذ (mm) می باشند.

آلتینداگ^۱ با استفاده از داده‌های مقالات محققان ترک و همچنین مفاهیم تردی ذکر شده ارتباط
 بین مفاهیم مختلف تردی با نرخ نفوذ و نرخ نفوذ نرمال را بررسی نمود که می‌توان در شکل ۲-۳۴ مشاهده
 نمود (Altindag, 2010). در نهایت و با استدلال بر نتایج بدست آمده در تحقیق، یک طبقه‌بندی قابلیت
 حفاری بر اساس تردی را مطابق جدول ۲-۹ ارائه نمود.



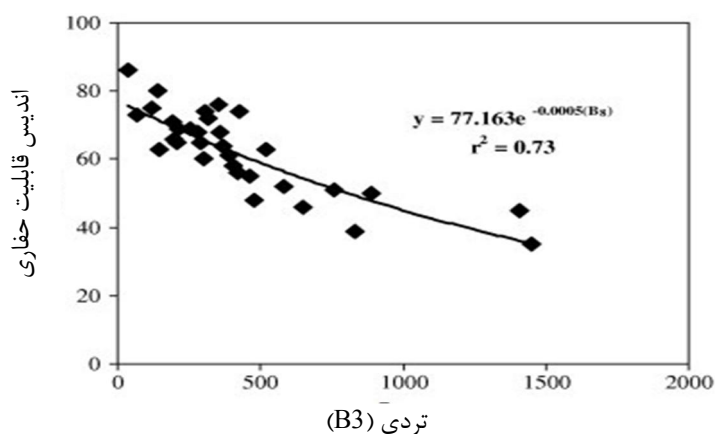
شکل ۲-۳۴- ارتباط تردی با نرخ نفوذ نرمال شده برای داده‌های مختلف (Altindog,2010)

جدول ۲-۹- طبقه بندی توصیفی قابلیت حفاری بر اساس تردی (Altindag,2010)

توصیف قابلیت حفاری	توصیف تردی	تردی آلتینداگ (B4)
خیلی آسان	کم	۰-۱۰
آسان	متوسط	۱۰-۱۵
متوسط	ترد	۱۵-۲۰
سخت	خیلی ترد	۲۰-۲۵
خیلی سخت	بینهایت ترد	>۲۵

^۱ Altindag

یارالی^۱ و قهرمان در سال ۲۰۱۰ با استفاده از ۳۲ داده مختلف و انجام آزمایش تردی بر روی آن بیان داشتند که قابلیت حفاری با تردی (B₃)، ضریب همبستگی بالایی دارد به طوری که با افزایش تردی قابلیت حفاری کاهش می‌یابد. آنها همچنین استفاده از تردی (B₃)، را برای ارزیابی قابلیت حفاری توصیه نمودند (شکل ۲-۳۵). محققان دیگری نیز با استفاده از مفاهیم تردی، برای پیش‌بینی و به‌دست آوردن قابلیت حفاری و نرخ نفوذ تلاش نموده‌اند (Yarali & Kahraman, 2010; Yarali & Soyer, 2011).



شکل ۲-۳۵- ارتباط مابین تردی با اندیس قابلیت حفاری (Yarali & Kahraman, 2010)

۲-۳-۲-۴- 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. 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 (اصانلو، ۱۳۸۶).

^۱Yarali

از آنجا که سختی یک سنگ قاعداً میانگین سختی کانی‌های تشکیل دهنده آن است بنابراین باید ابتدا مقیاس سختی کانی‌ها توضیح داده شود. مقیاس سنجش سختی کانی‌ها معیار استاندارد موهس (Mohs) است که در آن سختی ده کانی به صورت اعداد صحیح ۱ تا ۱۰ در نظر گرفته شده است. در این معیار، هر کانی با عدد سختی بالاتر می‌تواند کانی با عدد سختی پایین‌تر را خراش دهد.

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 و همکاران سختی سنگ‌ها را با استفاده از مقیاس موهس و نیز از نظر قابلیت حفاری به پنج کلاس مختلف تقسیم‌بندی نمود (Jimeno et al., 1995). حسینی و همکاران با تکیه بر پیشنهاد جمینیو سختی موهس را در سیستم طبقه‌بندی RD_i (اندیس قابلیت چالزنی توده‌سنگ) به کار برده و میزان سختی سنگ‌ها را امتیازدهی کردند. در سیستم طبقه‌بندی RD_i سختی بعد از مقاومت فشاری، دومین شاخص مهم سنگ در طبقه‌بندی قابلیت حفاری است. در جدول ۲-۱۰ طبقه‌بندی و امتیازدهی به سختی سنگ‌ها در سیستم طبقه‌بندی RD_i نشان داده شده است (Hoseinie et al. 2008). متأسفانه با اینکه بسیاری از محققان علم حفاری بر اهمیت سختی و نقش آن تأکید نموده‌اند. با این حال تاکنون در منابع معتبر علمی، هیچ رابطه ریاضی و یا منحنی حاصل از کارهای تجربی برای بیان کیفیت ارتباط این دو کمیت ارائه نشده است.

جدول ۲-۱۰- طبقه‌بندی و امتیازدهی به سختی سنگ‌ها در سیستم طبقه‌بندی RD_i (Hoseinie et al. 2008)

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

۲-۳-۲-۵- ساینده‌گی

در حفاری، ساینده‌گی به خاصیتی از سنگ اطلاق می‌شود که قادر است سرمته از جنس فولاد، کربور تنگستن یا الماس را از بین ببرد. ساینده‌گی به سختی کانیها بستگی دارد اما شکل دانه‌ها و کلیواژ نیز در کیفیت این خاصیت تأثیر دارند. 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. برای ارزیابی ساینده‌گی سنگ شاخص‌های کیفی و کمی مختلفی ارائه شده است که در زیر تعدادی از آنها معرفی می‌شوند.

الف) - فاکتور ساینده‌گی اشمیازک (F-abrasivity)

این شاخص در سال ۱۹۷۰ توسط اشمیازک و ناتز^۱ ارائه شده است. رابطه کلی این شاخص به شکل رابطه زیر می‌باشد (Ersoy & Waller, 1995a):

$$F = \frac{(EqQtz \times \phi \times BTS)}{100} \quad (۲-۱۶)$$

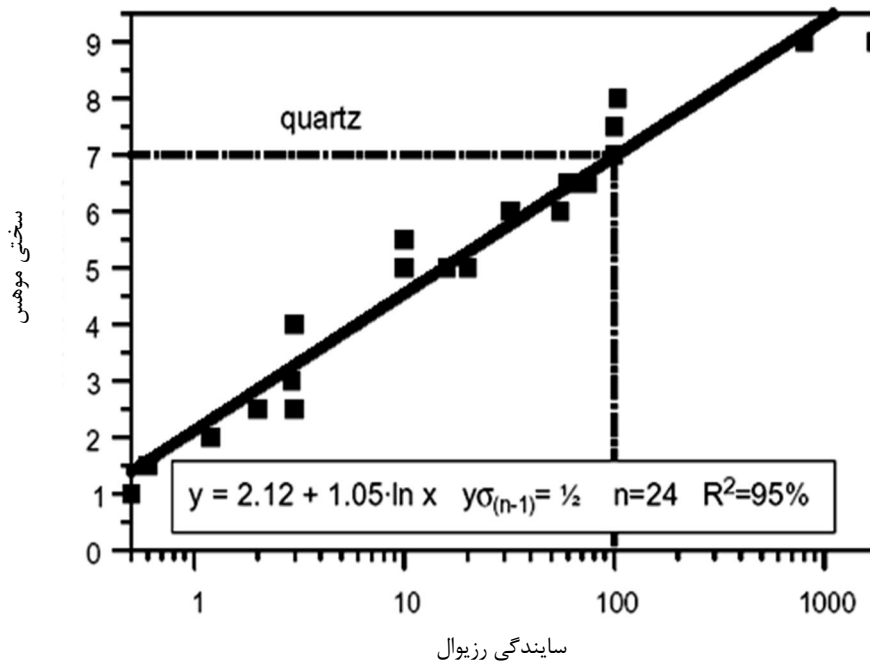
که در آن، EqQtz نشانگر درصد میزان کوارتز محتوی معادل سنگ، ϕ ، اندازه دانه‌ها برحسب میلیمتر و BTS نمایانگر مقاومت کششی غیرمستقیم (آزمون برزیلی) بر حسب مگا پاسکال می‌باشد. اندازه دانه‌ها با استفاده از مقاطع نازک و میانگین‌گیری وزنی اندازه دانه‌ها و مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم از طریق آزمایش تعیین می‌شود. در میان پارامترهای فوق میزان درصد کوارتز محتوی یکی از حساس‌ترین و پرکاربردترین پارامترهای مربوط به ساینده‌گی سنگ‌ها می‌باشد. این شاخص بر این مبنا

^۱ Natz

استوار است که هر کانی با توجه به سختی مقیاس موهس چه درصدی از سایندگی ناشی از کوارتز را ایجاد می کند. رابطه کلی برای تعیین EqQtz به شرح زیر می باشد:

$$EqQtz = \sum_{i=1}^n A_i \cdot R_i \quad (17-2)$$

که در آن، A نشانگر درصد کانی‌ها، R سایندگی رزیوال^۱ و n تعداد کانی‌ها می باشد. میزان سایندگی رزیوال سنگ با استفاده از سختی موس و طبق رابطه نشان داده شده در شکل ۲-۳۶ قابل محاسبه است.



شکل ۲-۳۶- رابطه میزان سایندگی رزیوال سنگ با استفاده از سختی موهس (Thuro, 1997)

چنانچه از این شکل بر می آید، میزان EqQtz برای کانی کوارتز ۱۰۰٪ بوده و با کاهش میزان کوارتز و یا سختی دیگر کانی‌های سنگ میزان سایندگی سنگ به صورت لگاریتمی کاهش می یابد.

^۱. Rosiwal

فاکتور سایش شیمازک توسط عطائی و همکاران بر اساس روش تحلیل سلسله مراتبی فازی^۱ مورد

ارزیابی قرار گرفته و رابطه زیر ارائه شده است (Ataei et al., 2011):

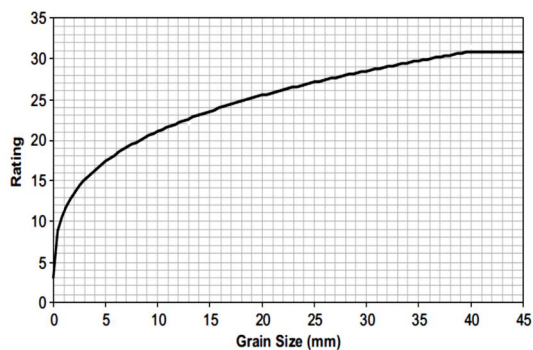
$$F = \frac{EQC \times G_s \times BTS}{100} \quad (18-2)$$

که در آن: F: فاکتور ساینده گی شیمازک (N/mm)، EQC: امتیاز درصد محتوی کوارتز معادل، G_s:

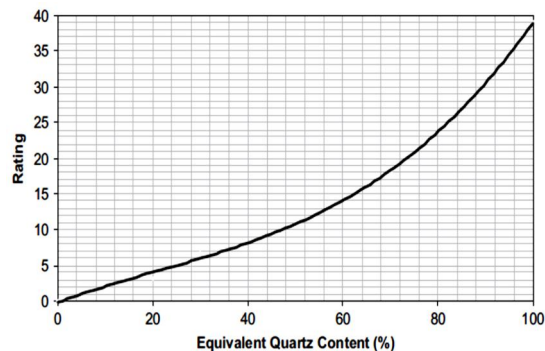
امتیاز متوسط اندازه دانه‌ها، BTS: مقاومت کششی برزیلی می‌باشند.

با توجه به یکسان نبودن ضریب اهمیت هر یک از پارامترها، با استفاده از گراف‌های شکل ۲-۳۷ تا

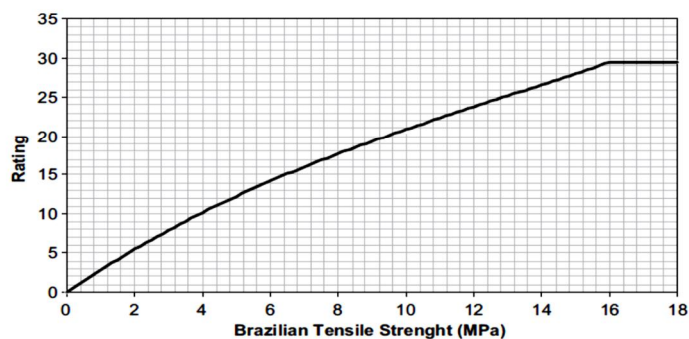
۲-۳۹ امتیاز هر پارامتر به دست آمده و با توجه به رابطه ۲-۱۸ میزان ساینده گی شیمازک محاسبه می‌شود.



شکل ۲-۳۸- گراف ساینده گی پیوسته برای اندازه دانه‌ها (Ataei et al., 2011)



شکل ۲-۳۷- گراف ساینده گی پیوسته برای کوارتز محتوی (Ataei et al., 2011)

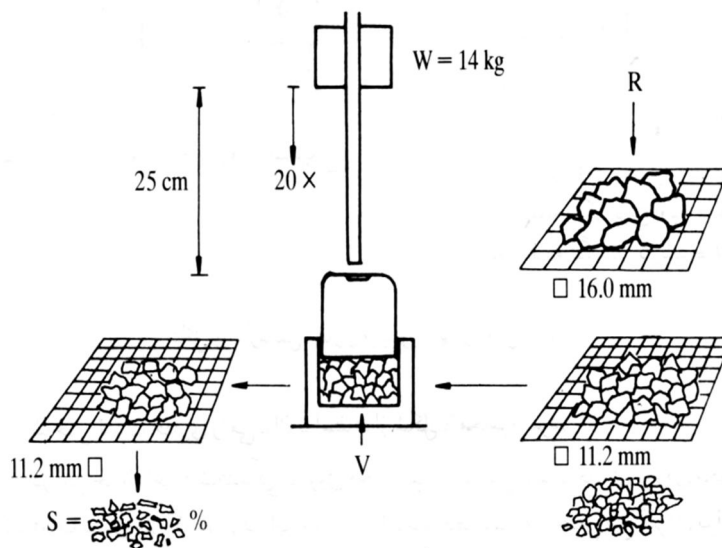


شکل ۲-۳۹- گراف ساینده گی پیوسته برای مقاومت کششی برزیلی (Ataei et al., 2011)

^۱.Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP)

ب) اندیس سایش سرمته BWI^۱

این شاخص بر اساس شاخص سرعت حفاری (DRI^۲) و نیز مقدار سایش (AV^۳) استوار است. شاخص DRI به نوبه خود وابسته به دو کمیت میزان تردی (S₂₀) و نیز مقدار ارزش J سیور^۴ که از آزمایش حفاری کوچک قابل محاسبه می‌باشد. میزان تردی سنگ توسط یک آزمایش ساده اندازه‌گیری می‌شود. برای این منظور، یک نمونه معرف ۵۰۰ گرمی از سنگ به قطعات ۱۱/۲ تا ۱۶ میلیمتر خرد می‌شود و سپس تحت ۲۰ ضربه متوالی ناشی از یک وزنه ۱۴ 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 ۲-۴۰).



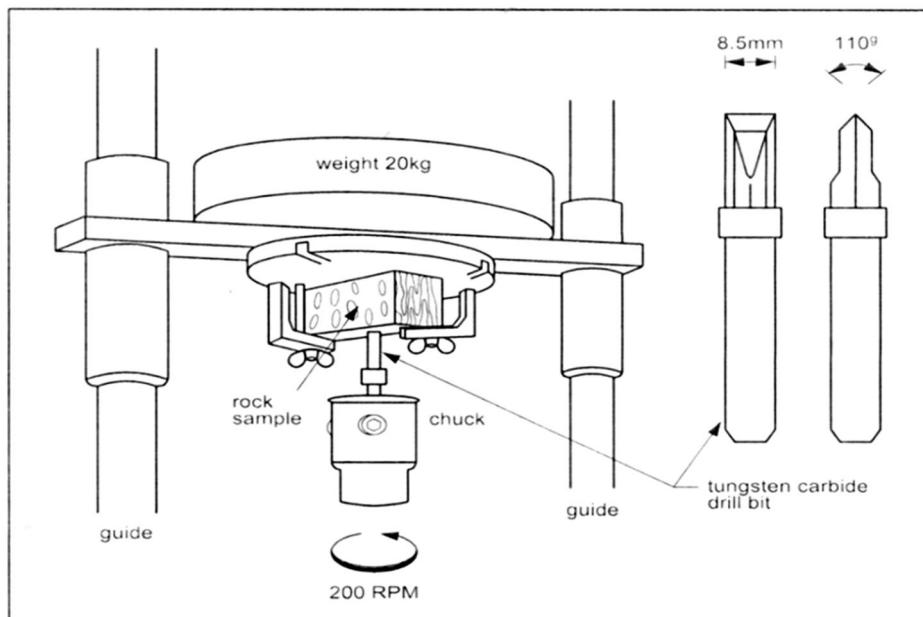
شکل ۲-۴۰- آزمایش اندازه‌گیری میزان تردی سنگ (S₂₀) (Bruland, 1998)

- 1 . Bit Wear Index
- 2 . Drilling Rate Index
- 3 . Abrissivness Value
- 4 . Siever's J value

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 J ثبت می‌شود (شکل ۲-۴۱).

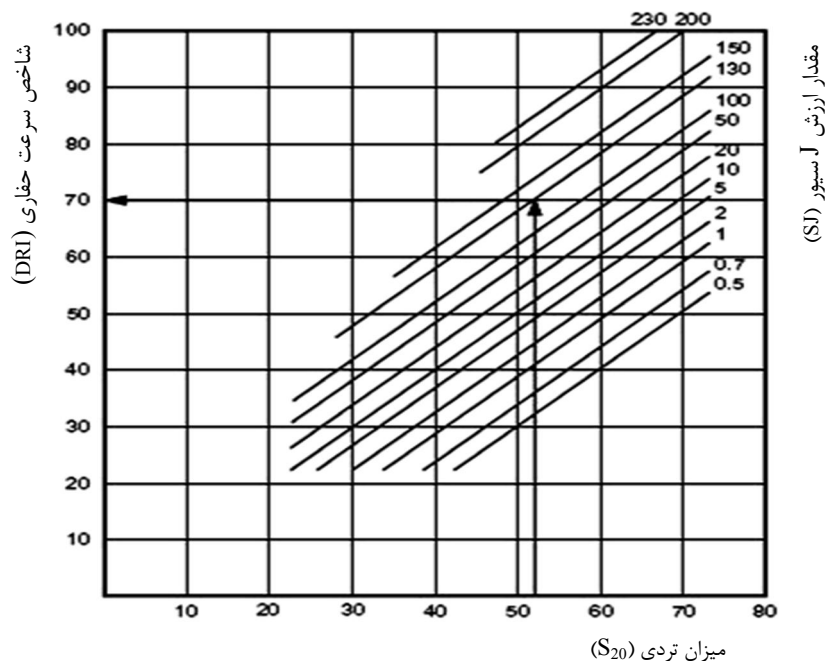
با در دست بودن دو پارامتر بالا، شاخص سرعت حفاری (DRI) طبق نمودار شکل ۲-۴۲ قابل محاسبه است.

پس از تعیین DRI نوبت به AV می‌رسد. این روش در سال‌های بین ۶۱ - ۱۹۵۸ در دانشکده زمین‌شناسی و مهندسی ذخائر معدنی دانشگاه NTNU نروژ ارائه شده است. برای تعیین شاخص AV طبق شکل ۲-۴۳ میزان سایش تابع زمان یک قرص از تنگستن کاربید ناشی از پودر شکسته ماده سنگ مورد آزمایش اندازه‌گیری می‌شود (Bruland, 1998).



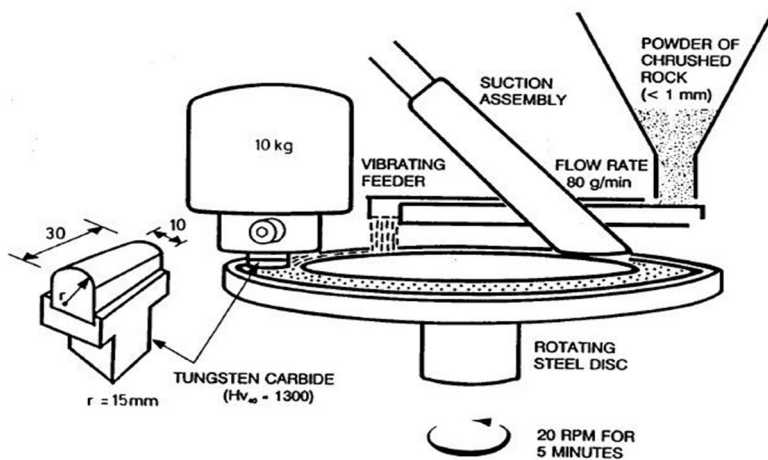
شکل ۲-۴۱- آزمایش چالزنی کوچک با سرمته مینیاتوری (Bruland, 1998)

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



میزان تندی (S₂₀)

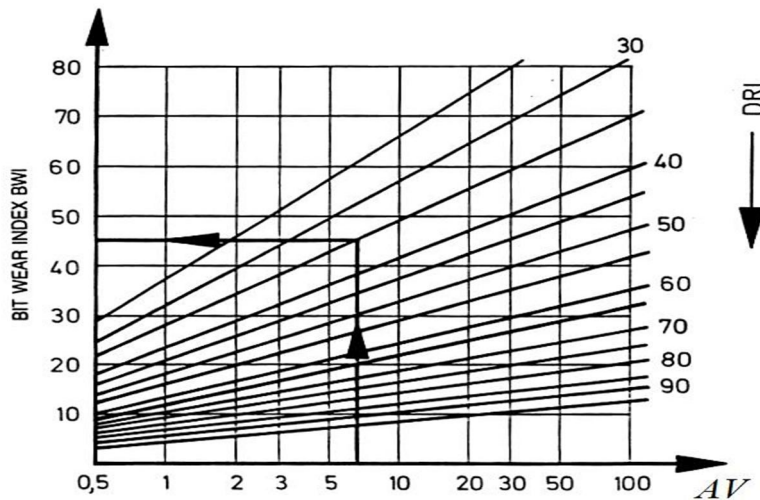
شکل ۲-۴۲- نمودار تعیین شاخص سرعت حفاری (DRI) (Bruland, 1998)



شکل ۲-۴۳- دستگاه آزمایش اندازه‌گیری سایش (AV) (Bruland, 1998)

حال با دانستن میزان DRI و نیز AV، می‌توان میزان شاخص سایش سرمته (BWI) را از روی شکل

۴۴-۲ تخمین زد.



شکل ۴۴-۲- دیاگرام محاسبه BWI با استفاده از میزان AV و DRI (Bruland, 1998)

با توجه به تحقیقات دانشمندان نیروژی قابلیت حفاری و ساینده‌گی سنگ‌ها با استفاده از شاخص

BWI و نیز DRI در هفت کلاس مختلف طبقه‌بندی می‌شوند. این طبقه‌بندی در جدول ۱۱-۲ ارائه شده

است.

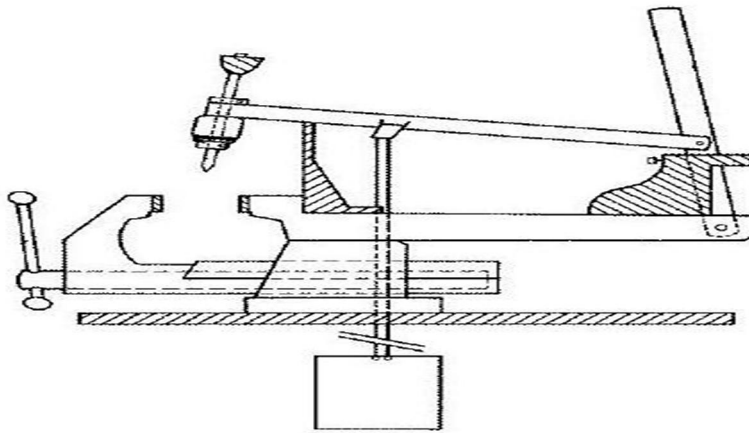
جدول ۱۱-۲- طبقه‌بندی قابلیت حفاری و ساینده‌گی سنگ‌ها با استفاده از شاخص BWI و DRI

(Bruland, 1998)

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

ج) آزمایش تعیین اندیس سایش سرشار^۱ (CAI)

آزمایش اندیس سایش سرشار اولین بار از سوی انستیتوی تحقیقات معدنکاری 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. برای تعیین اندیس سایش سرشار به منظور ایجاد سطحی تازه و بدون هوازدگی، نمونه‌ها شکسته می‌شوند به نحوی که قطعه باقی‌مانده از نمونه قابل نصب در گیره باشد. پس از اتصال میله فولادی به وزنه هفت کیلوگرمی و محکم نمودن پیچ مربوطه، نوک تیز میله فولادی بر روی قطعه سنگ قرار داده شده و دسته دستگاه برای ایجاد یک سانتی‌متر خراش در مدت یک ثانیه کشیده می‌شود. پس از ایجاد خراش قطر ساییده شده بر روی میله فولادی در زیر میکروسکوپ قرائت می‌گردد (شکل ۲-۴۵) (Plinninger et al., 2004).



شکل ۲-۴۵- نمایی از دستگاه سایش سرشار (Plinninger et al., 2004)

د) شاخص سایش سنگ (RAI^۲)

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

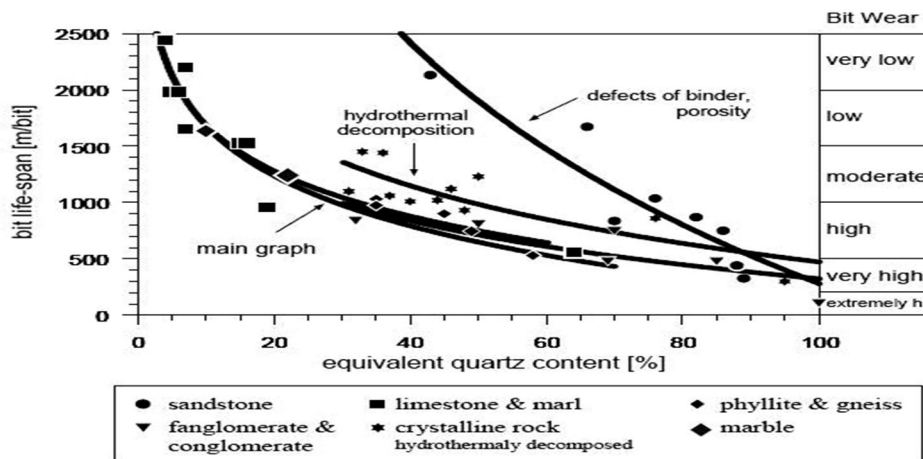
$$RAI = EqQtz \times UCS \quad (۱۹-۲)$$

^۱. Cerchar Abrissivness Index

^۲. Rock Abrissivness Index

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

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 کوارتز محتوی و عمر سرمه را در انواع سنگ‌های طبیعت بررسی نموده و منحنی‌های شکل ۲-۴۶ را ارائه کرده است.



شکل ۲-۴۶- رابطه میزان کوارتز محتوی و عمر سرمه در انواع سنگ‌ها (Thuro, 1997)

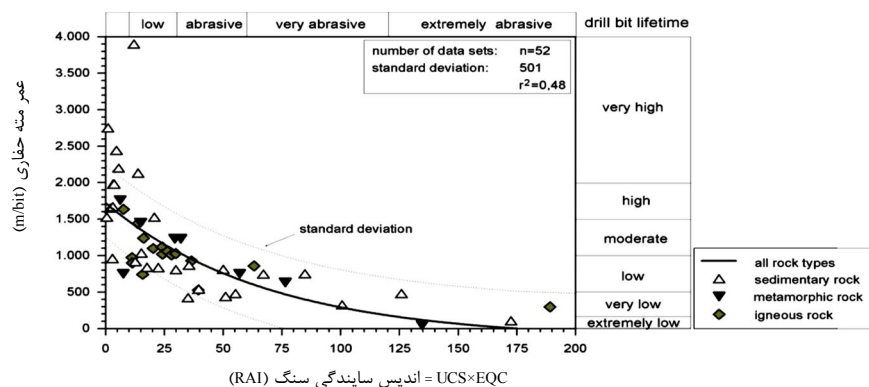
پلانینگر در سال ۲۰۰۲ با استفاده از یک شاخص جدید به نام شاخص ساینده‌گی سنگ (RAI) رابطه ساینده‌گی و عمر سرمه را در یک سری حفاری زیرزمینی به صورت شکل ۲-۴۷ پیشنهاد نمود. تورو در سال ۲۰۰۳ رابطه میزان کوارتز محتوی معادل و عمر سرمه را برای انواع سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی به صورت شکل ۲-۴۸ ارائه کرد. پلانینگر در سال ۲۰۰۴ رابطه شاخص‌های EqQtz و اندیس ساینده‌گی سرشار را ارائه نمود. 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 چکش بالا نسبت به سایر مشخصات سنگ‌ها

دارند. وی رابطه ریاضی زیر را برای پیش‌بینی سرعت حفاری ضربه ای - دورانی چکش بالا پیشنهاد نموده است (Kahraman et al., 1999).

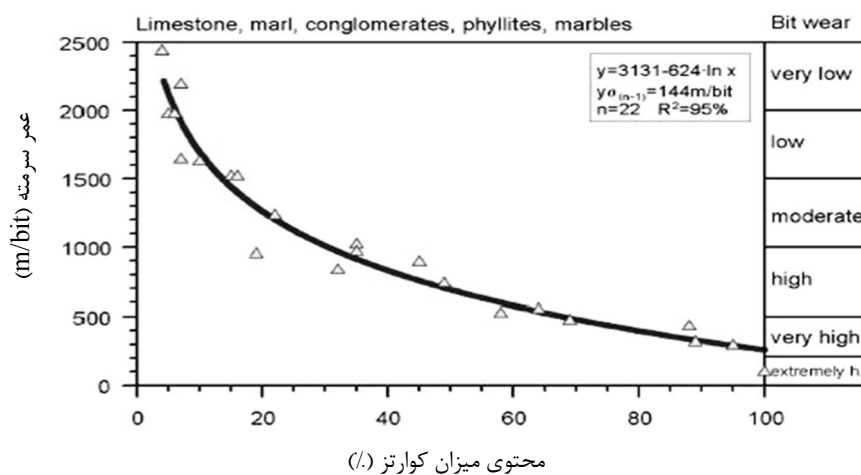
$$PR = 0.47 \frac{b_{pm}^{0.375}}{\sigma_c^{0.534} \times q^{0.093}} \quad (2-20)$$

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

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



شکل ۲-۴۷- رابطه شاخص ساینده‌گی سنگ RAI و عمر سرشته (Plinninger et al, 2002)



شکل ۲-۴۸- رابطه کوارتز محتوای معادل و عمر سرشته (Thuro & Plinninger, 2003)

۲-۳-۲-۶- 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) فوق‌العاده 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 بین $10^4 \times 0.3$ 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 تشکیل‌دهنده سنگ است. بافت سنگ نیز بر این پارامتر تأثیر دارد، به طوری که مقدار آن در جهت لایه‌بندی یا شیستوزیته معمولاً بیشتر از حالت عمودی می‌باشد.

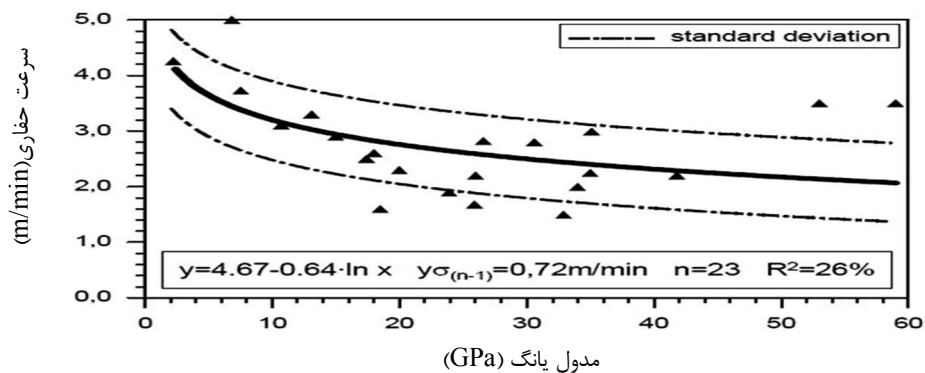
پلاستیسیته بستگی به ترکیب کانی‌شناسی سنگ‌ها داشته و با افزایش مقدار کوارتز، فلدسپات و کانی‌های سخت دیگر کاهش می‌یابد.

در مطالعات گذشته، تأثیر خواص الاستیکی سنگ‌ها بر سرعت حفاری مورد اشاره و تأکید قرار گرفته شده است. تورو در سال ۱۹۹۶ نشان داد که با افزایش مدول یانگ سنگ‌ها، سرعت حفاری به صورت لگاریتمی کاهش می‌یابد (شکل ۲-۴۹). قهرمان با انجام تعداد زیادی آزمایش نشان داد که با افزایش

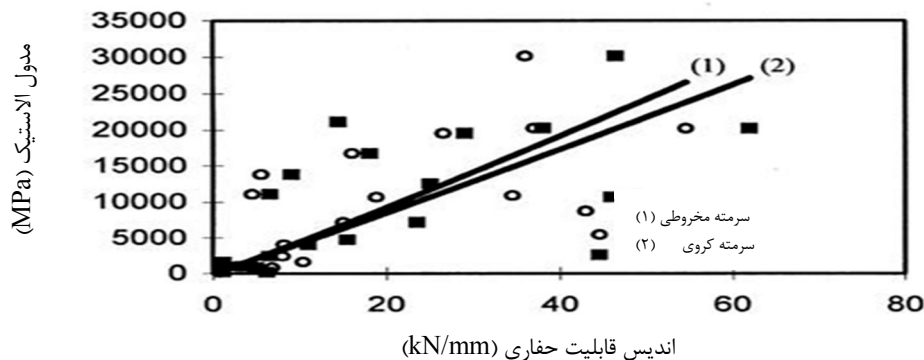
مدول الاستیسیته سنگ‌ها سرعت حفاری دورانی و قابلیت حفاری سنگ‌ها کاهش می‌یابد (شکل ۲-۵۰).

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

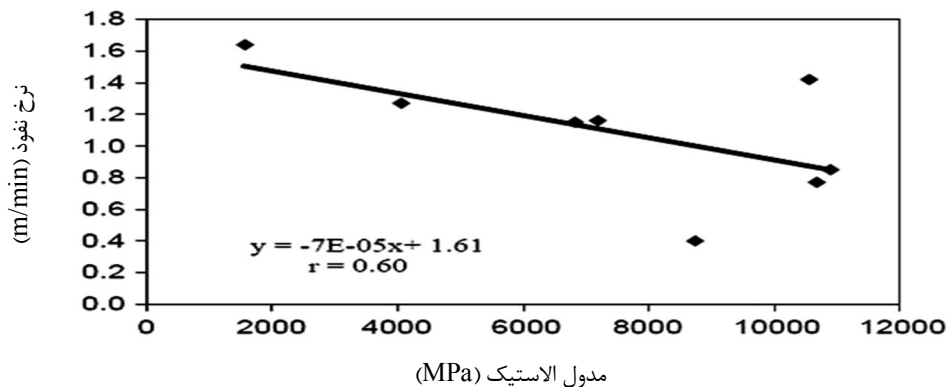
الاستیسیته سنگ‌ها سرعت حفاری به صورت خطی کاهش می‌یابد (شکل ۲-۵۱).



شکل ۲-۴۹- ارتباط سرعت حفاری و مدول الاستیسیته سنگ‌ها (Thuro & Spaun, 1996)



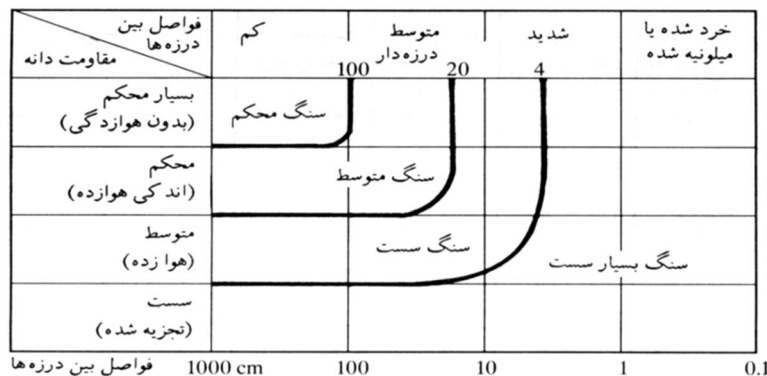
شکل ۲-۵۰- ارتباط قابلیت حفاری و مدول الاستیسیته سنگ‌ها در حفاری دورانی (Kahraman et al. 1999)



شکل ۲-۵۱- ارتباط قابلیت حفاری و مدول الاستیسیته سنگ‌ها در حفاری ضربه‌ای (Kahraman et al. 2000e)

۲-۴- مشخصات ساختاری توده‌سنگ‌ها

مشخصات توده‌سنگ و ساختار کلی آن نقش بسیار تعیین کننده‌ای بر فرآیند حفاری و راندمان آن دارند. میزان نفوذپذیری توده‌سنگ ارتباط مستقیم با ساختار توده‌ای آن دارد. متخصصان متعددی بر تأثیرات ساختار توده سنگ بر قابلیت حفاری و نفوذپذیری آن تأکید کرده‌اند. که از جمله آن‌ها می‌توان به سیستم طبقه‌بندی ویلبور اشاره کرد (Wilbur, 1982). در سیستم طبقه‌بندی ویلبور ساختار توده‌سنگ به نحو خوبی مورد توجه قرار گرفته است. در این سیستم برای توصیف توده‌سنگ از عبارات توده‌ای، لایه‌ای، ورقه‌ای، رگه‌ای و بلوکی استفاده شده است. استفاده از عبارات کیفی گرچه در شناخت توده‌سنگ کاربرد وسیعی دارد با این حال در عمل نظرات شخصی و برداشت‌های مختلف از وضعیت توده‌سنگ، کاربر را دچار مشکل می‌سازد. جیمنو و همکاران درزه‌داری توده‌سنگ و طبقه‌بندی آن از لحاظ ساختار و مقاومت را به صورت شکل ۲-۵۲ ارائه نموده‌اند.



شکل ۲-۵۲- خواص ساختمانی سنگ‌ها و تأثیر آن‌ها بر مقاومت مواد سنگی (Jimeno et al., 1995)

مهمترین عوارض زمین‌شناسی و تکتونیکی که قابلیت حفاری توده‌سنگ‌ها را تحت تأثیر قرار

می‌دهند عبارتند از:

الف) گسل خوردگی

ب) درزه‌داری و مشخصات درزه‌ها:

- فاصله‌داری

- شیب‌داری درزه‌ها

- دهانه و پرکننده درزه‌ها.

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

۲-۴-۱- تأثیر گسل خوردگی بر سرعت حفاری

گسل در معدن‌کاری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. گسل خوردگی ممکن است در حفاری در مقیاس کوچک و در مقیاس بزرگ‌تر موجب تغییر ناگهانی سنگ‌ها شده و لذا فرآیند پیشروی را با مشکل مواجه سازد. قبل از عملیات حفاری تشخیص گسل و نوع آن ضروری است. سطوح گسل خورده بسیار ضعیف می‌باشند و در این محیط‌ها نیاز به بار پشت مته زیادی نیست، بالعکس دور مته در دقیقه را می‌توان افزایش داد. در این شرایط ماشین حفاری دورانی در اولویت قرار می‌گیرد. با دور شدن از زون گسل خورده سنگ‌ها و محیط پیوسته‌تر می‌شود.

در مجموع، قفل‌شدگی سرمته و سیستم حفاری، کاهش سرعت و افزایش استهلاک را می‌توان مهم‌ترین عوارض ناشی از وجود زون‌های خردشده گسلی دانست.

۲-۴-۲- تأثیر درزه‌داری و مشخصات درزه‌ها بر سرعت حفاری

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

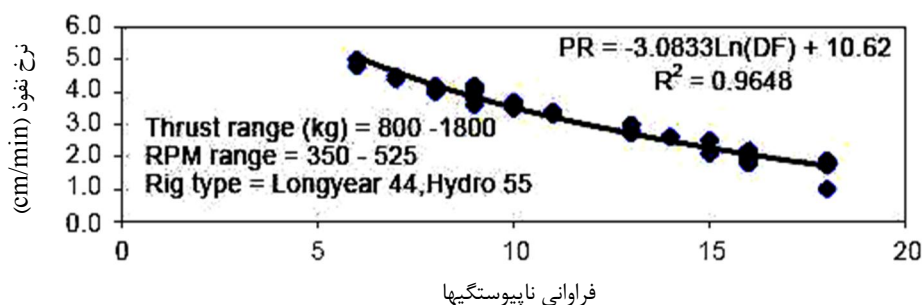
از جمله مهم‌ترین مشخصات ژئومکانیکی درزه‌ها که قابلیت حفاری توده‌سنگ را به شدت تحت تأثیر

قرار می‌دهند می‌توان به فاصله‌داری، شیب‌داری و بازشدگی درزه‌ها اشاره نمود. در ادامه تأثیر هر یک از پارامترهای فوق مورد بررسی قرار می‌گیرند:

۲-۴-۱- تأثیر فاصله‌داری درزه‌ها بر سرعت حفاری

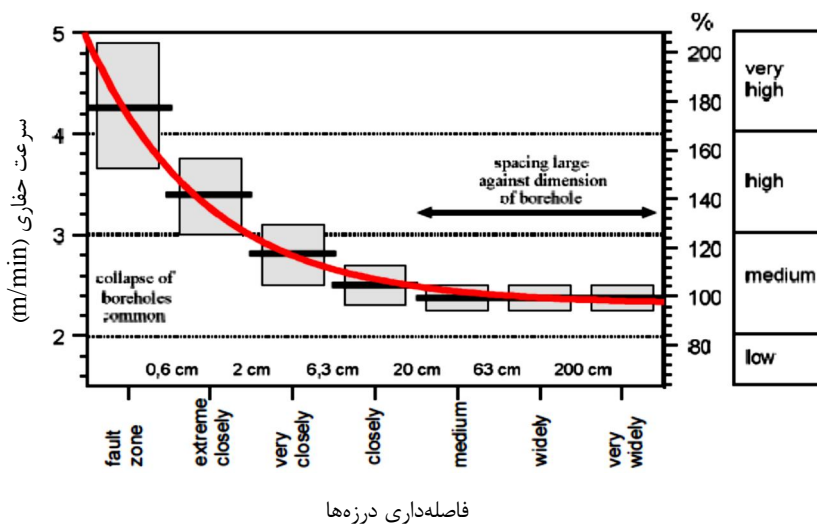
قابلیت حفاری و نفوذپذیری توده‌سنگ به فاصله‌داری درزه‌ها بستگی دارد. کاهش فاصله‌داری باعث کاهش پیوستگی محیط حفاری و نیز کاهش راندمان و نرخ نفوذ حفاری می‌گردد. ناپایداری دیواره چال‌های حفر شده معلول وجود درزه‌های نزدیک و همچنین درزه‌های تصادفی در مسیر چال می‌باشد. وجود بیش از یک دسته درزه و وجود درزه‌های تصادفی باعث بحرانی‌تر شدن محیط حفاری می‌گردد. بدترین حالت توده‌سنگ از نظر چالزنی زمانی رخ می‌دهد که توده‌سنگ حالت بلوکی (با حجم‌های کم) داشته باشد (حسینی، ۱۳۸۶).

مطالعات بسیار کمی بر روی تأثیرهای کمی فاصله‌داری بر روی سرعت حفاری انجام شده است. آکون و کارپوز سال ۲۰۰۵ در تحقیقی در یکی از معادن ترکیه دریافتند که با افزایش فراوانی تعداد درزه در توده‌سنگ، سرعت حفاری کاهش می‌یابد (شکل ۲-۵۳) (Akun & Karpuz, 2005).



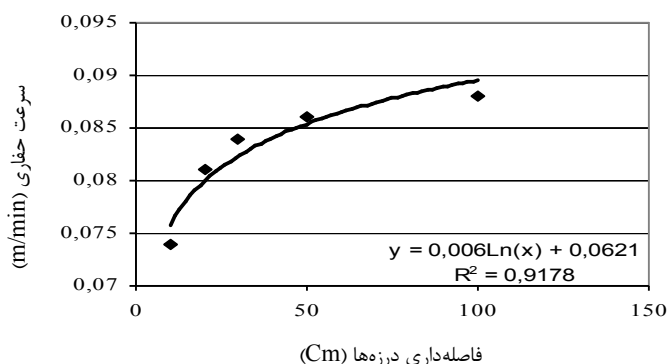
شکل ۲-۵۳- رابطه سرعت حفاری با فراوانی درزه‌ها (Akun & Karpuz, 2005)

تورو نیز در سال ۱۹۹۷ با بررسی معدن سنگ آهک در آلمان رابطه بین فاصله‌داری با نرخ نفوذ را به دست آورد. همانطوری که در شکل ۲-۵۴ مشاهده می‌شود با کاهش فاصله‌داری به خصوص در زون گسلی نرخ نفوذ به صورت مضاعفی افزایش می‌یابد (Thuro, 1997).



شکل ۲-۵۴- ارتباط فاصله‌داری با نرخ حفاری در معدن آهک Muschelkalk (Thuro, 1997)

حسینی و همکاران در سال ۲۰۰۸ طی انجام یک سری مطالعات آزمایشگاهی و مدل‌سازی فیزیکی توده‌سنگ‌ها با بتن، کیفیت و کمیت تغییرات سرعت حفاری ناشی از تغییرات فاصله‌داری درزه‌ها را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این تحقیق به صورت منحنی شکل ۲-۵۵ ارائه شده است (Hoseinie et al., 2008).



شکل ۲-۵۵- رابطه سرعت حفاری با فاصله‌داری درزه‌ها (Hoseinie et al. 2008)

با دقت در منحنی شکل ۲-۵۵ به وضوح آشکار می‌گردد که کمترین نرخ نفوذ و راندمان سیستم حفاری مربوط به فاصله‌داری ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد. لذا با توجه به اطلاعات به‌دست آمده می‌توان پیش‌بینی کرد که با افزایش فاصله‌داری به بیش از یک متر، رفتار توده سنگ به رفتار محیط‌های پیوسته

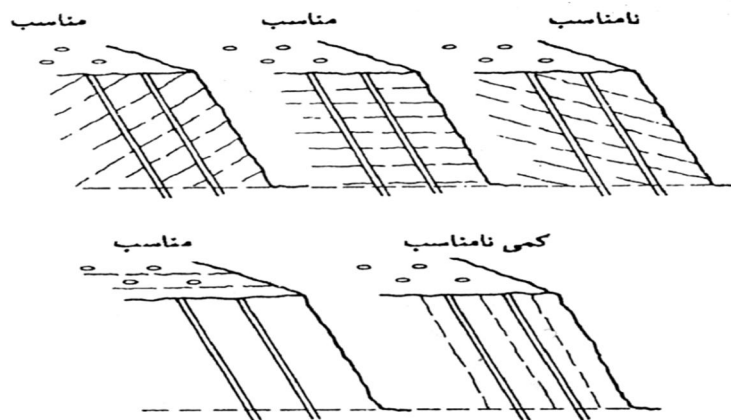
نزدیک‌تر می‌شود. همچنین با توجه به خطوط بریده روی منحنی، معلوم می‌گردد که شدت تغییرات سرعت حفاری در فاصله‌داری‌های کم بیشتر از تغییرات سرعت حفاری در فاصله‌داری‌های زیاد می‌باشد. لذا شرایط حفاری در توده سنگ‌های با درزه‌های نزدیک بحرانی‌تر است. در حال حاضر فقط در سیستم طبقه‌بندی قابلیت حفاری توده سنگ (RDi) به فاصله‌داری درزه‌ها از نظر قابلیت حفاری امتیازدهی شده است. جدول ۲-۱۲ نحوه امتیازدهی به فاصله‌داری درزه‌های توده سنگ را در سیستم RDi نشان می‌دهد.

جدول ۲-۱۲- امتیازدهی به فاصله‌داری درزه‌ها در سیستم RDi (Hoseinie et al. 2008)

۰-۰.۱۵	۰.۱۵-۰.۵	۰.۵-۱	۱-۲	>۲	فاصله داری درزه ها (m)
۱	۵	۹	۱۳	۱۸	امتیاز (از ۱۰۰)

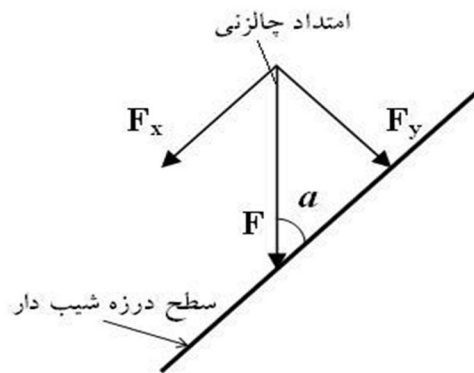
۲-۲-۴-۲- تأثیر شیب‌داری درزه‌ها بر سرعت حفاری

وجود درزه‌های شیب‌دار باعث انحراف چال، کاهش بار پشت مته و در نهایت کاهش نرخ نفوذ سیستم حفاری می‌گردد (شکل ۲-۵۶). از طرفی در درزه‌های باز که دارای پرکننده نیز می‌باشد، تماس چال با درزه‌ها باعث ریزش پرکننده‌ها به چال در حین و بعد از حفاری می‌گردد. این پدیده موجب گیرکردن سرمته در حین حفاری و پرشدگی چال بعد از حفاری می‌شود.



شکل ۲-۵۶- محل مناسب حفر چال در توده‌های درزه‌دار (استوار، ۱۳۸۰)

چنانچه در شکل ۵۷-۲ نشان داده شده، در سطح درزه‌های شیب‌دار بار پشت مته (F) به صورت تابعی از زاویه (a) به دو مؤلفه موازی سطح درزه (F_x) و عمود بر سطح درزه (F_y) تجزیه می‌گردد. مؤلفه F_x به عنوان مهم‌ترین دلیل انحراف چال و کاهش بار پشت مته می‌باشد. با کاهش زاویه (a) مقدار $F_x = F \cos(a)$ افزایش یافته و عامل انحراف چال و کاهش نفوذ مته تقویت می‌گردد.

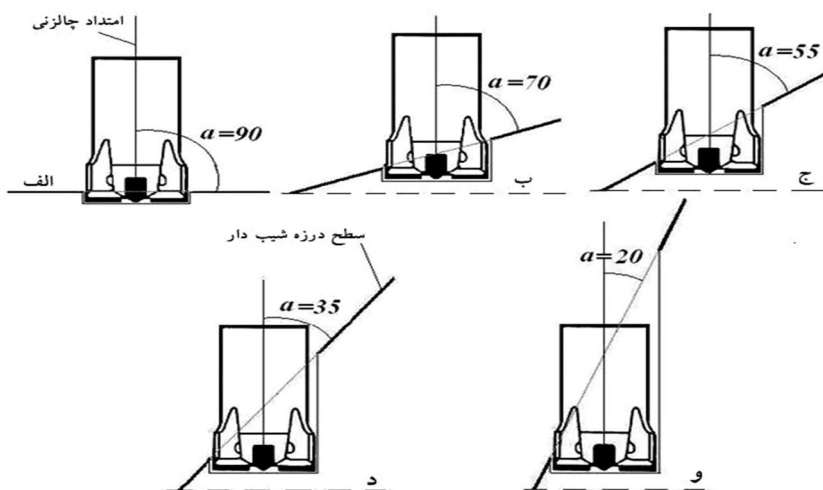


شکل ۵۷-۲- توزیع بار پشت مته در سطح درزه های شیب دار

حسینی و همکاران برای بررسی شرایط نفوذپذیری سطح درزه‌های شیب‌دار پارامتری به نام حجم بحرانی معرفی نمودند. حجم بحرانی به صورت حجم درگیر با نوک مته قبل از نفوذ کامل آن در بلوک زیرین سطح درزه در نظر گرفته شده است. در هنگام رسیدن مته به سطح درزه اعم از تخت یا شیب‌دار، شرایط نفوذ مته در سنگ دقیقاً شبیه حالت شروع اولیه حفاری می‌گردد. در این حالت مدت زمان مکان‌یابی و جانمایی مته در سطح درزه یکی از عوامل تأخیر نفوذ سیستم حفاری در سنگ و سطح درزه می‌باشد. هر چه شیب نسبی سطح درزه (a) کمتر گردد حجم بحرانی افزایش یافته و به نسبت همین حجم، زمان حفاری زیادتر شده و نرخ نفوذ مته در درزه کاهش می‌یابد. در شکل ۵۸-۲ شرایط هندسی نفوذ مته در سطح درزه‌ها با شیب‌های مختلف و در شکل ۵۹-۲ حجم بحرانی تقریبی در شیب‌های مختلف برای قطر چالزنی سه اینچ نشان داده شده است. در این شکل به منظور تعیین احجام بحرانی تقریبی، فضای حفر شده توسط مته به صورت یک منشور با قاعده دوزنقه و ارتفاع سه اینچ در نظر گرفته

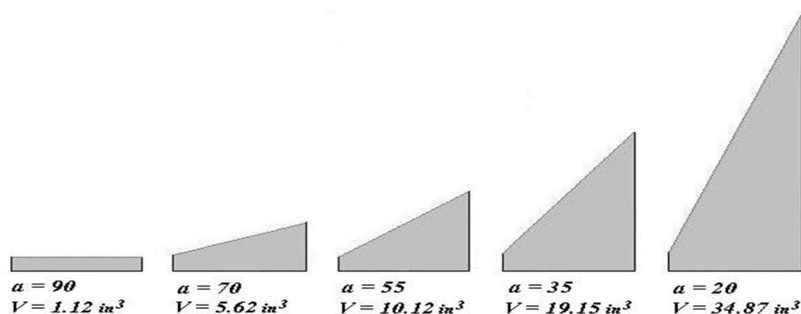
شده و محاسبات انجام پذیرفته است. شایان ذکر است حین کاهش زاویه (a) ، افزایش حجم بحرانی و کاهش بار پشت مته مهم‌ترین عوامل کاهش نرخ نفوذ مته در سطح درزه‌های شیب‌دار است (حسینی و همکاران، ۱۳۸۶).

با توجه به مطالب ارائه شده، حسینی و همکاران رابطه بین سرعت حفاری و شیب درزه‌ها را به صورت شکل ۲-۶۰ ارائه نموده‌اند.

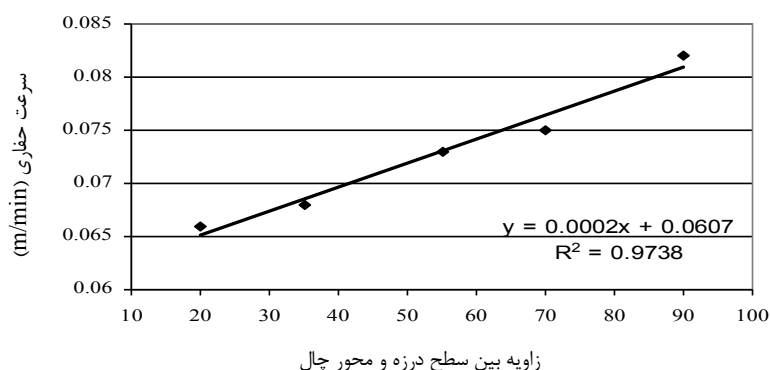


الف) امتداد حفاری عمود بر سطح درزه (بهترین حالت) $F_x = 0$
 درجه $(F_x = 0.34F)$
 ج) زاویه بین سطح درزه و امتداد چال ۵۵ درجه $(F_x = 0.57F)$
 درجه $(F_x = 0.81F)$
 د) زاویه بین سطح درزه و امتداد چال ۳۵
 و) زاویه بین سطح درزه و امتداد چال ۲۰ درجه $(F_x = 0.93F)$

شکل ۲-۵۸- شرایط هندسی نفوذ مته در سطح درزه با شیب‌های مختلف (حسینی و همکاران، ۱۳۸۶)



شکل ۲-۵۹- حجم‌های بحرانی در شیب‌های مختلف برای حفاری با قطر سه اینچ (حسینی و همکاران، ۱۳۸۶)



شکل ۲-۶۰- رابطه بین سرعت حفاری و شیب درزه‌ها (Hoseinie et al. 2008)

در سیستم طبقه‌بندی قابلیت حفاری توده‌سنگ (RDi) شیب‌داری درزه‌ها از نظر قابلیت حفاری امتیازدهی شده است. جدول ۲-۱۳ نحوه امتیازدهی به فاصله‌داری درزه‌های توده‌سنگ را در سیستم RDi نشان می‌دهد.

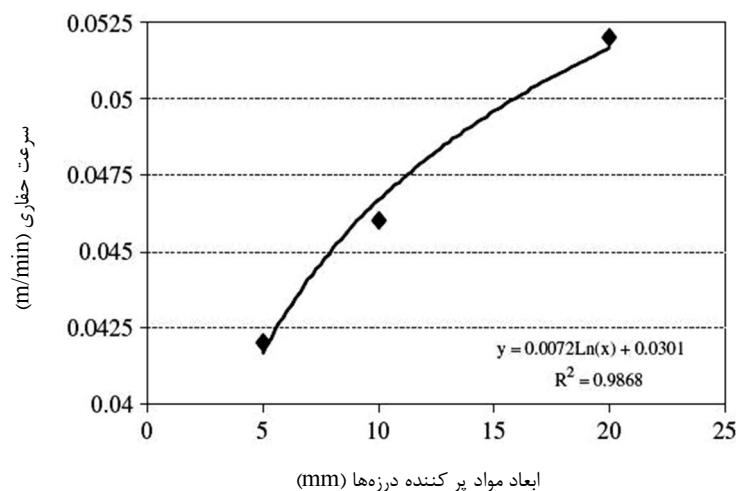
جدول ۲-۱۳- نحوه امتیازدهی به شیب‌داری درزه‌های توده‌سنگ در سیستم RDi (Hoseinie et al. 2008)

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

۲-۴-۲- تأثیر دهانه و پرکننده درزه‌ها بر سرعت حفاری

دهانه درزه، میزان و ابعاد پرکننده‌ها از جمله مشخصات فضای بین سطوح درزه می‌باشند که نرخ نفوذ سیستم حفاری را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند. درزه‌ها و ترک‌های جوش‌خورده تأثیر چندانی بر کاهش نرخ نفوذ سیستم ندارند. وجود درزه‌های باز به علت تسهیل فرار هوای فلاشینگ و کاهش خروج خرده‌های حفاری، باعث کاهش نرخ نفوذ و گاه خفگی و قفل‌شدگی سیستم حفاری می‌گردند. وجود مواد پرکننده در فضای درزه‌های باز باعث کاهش شدید نرخ نفوذ سیستم حفاری می‌گردد. نتایج مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که در توده‌سنگ‌های با پرکننده با ابعاد کوچکتر، مشکلات حفاری به مراتب بیشتر می‌باشد. با کاهش ابعاد پرکننده تا حد ذرات فلاشینگ، ذرات به جای خرد شدن، تحت فشار هوای

فلاشینگ تنها در فضای بین سر مته و سنگ حرکت می‌کنند. باقی ماندن ذرات در فضای بین سر مته و سنگ باعث اتلاف انرژی و کاهش نرخ نفوذ می‌گردد. این اتفاق مشابه پدیده‌ای است که در اثر وجود سنگ‌های خرد شده بین دیسک و ماده سنگ در حفاری مکانیزه تونل با TBM اتفاق می‌افتد. حسینی و همکاران رابطه بین سرعت حفاری و شیب درزه‌ها را به صورت شکل ۲-۶۱ ارائه نموده‌اند.



شکل ۲-۶۱- رابطه بین سرعت حفاری و ابعاد پرکننده درزه‌ها (Hoseinie et al. 2008)

در سیستم طبقه‌بندی قابلیت حفاری توده‌سنگ (RD_i) بازشدگی و پرکننده درزه‌ها از نظر قابلیت حفاری برای اولین بار امتیازدهی شده است. جدول ۲-۱۴ نحوه امتیازدهی به فاصله‌داری درزه‌های توده‌سنگ را در سیستم RD_i نشان می‌دهد.

جدول ۲-۱۴- نحوه امتیازدهی به بازشدگی و پرکننده درزه‌ها توده سنگ در سیستم RD_i (Hoseinie et al. 2008)

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

در سیستم‌های طبقه‌بندی سنگ همواره سعی می‌شود با کمترین تعداد پارامترها بهترین قضاوت در مورد سنگ صورت گیرد. بنابراین در ارائه سیستم طبقه‌بندی برای پیش‌بینی میزان قابلیت حفاری

توده‌سنگ‌ها، استفاده از تمامی پارامترها از لحاظ مهندسی امر پسندیده‌ای نمی‌باشد. بر این اساس پارامترهایی که برای تعیین اندیس قابلیت حفاری توده‌سنگ RD_i مورد استفاده قرار گرفته‌اند عبارتند از:

الف- پارامترهای فیزیکی ماده‌سنگ: بافت و اندازه دانه‌ها

ب- پارامترهای مقاومتی ماده‌سنگ: سختی و مقاومت فشاری تک محوری

ج- پارامترهای ساختاری توده‌سنگ (مشخصات درزه‌ها): فاصله‌داری درزه‌ها، دهانه و پر کننده

درزه‌ها و شیب درزه‌ها.

با توجه به اهمیت نسبی پارامترهای فوق مجموع امتیازات در اندیس RD_i، ۱۰۰ در نظر گرفته شده

است.

۲-۵- نتیجه‌گیری

همان‌طور که عنوان شد پارامترهای بسیار زیادی به‌صورت مستقیم و غیر مستقیم در فرآیند حفاری

تأثیرگذار می‌باشند. ضریب اهمیت پارامترها در فرآیند حفاری یکسان نیست و همچنین نمی‌توان تنها بر

اساس یک پارامتر فرآیند حفاری را پیش‌بینی نمود. بنابراین می‌بایست روشی استفاده شود که علاوه بر

سهولت، در برگیرنده پارامترهای اساسی در فرآیند حفاری باشد. از این‌رو با توجه به تمامی پارامترهای

مؤثر، سیستم طبقه‌بندی اندیس قابلیت حفاری توده‌سنگ‌ها RD_i می‌تواند روش مناسبی جهت ارزیابی و

بررسی قابلیت حفاری می‌باشد.

فصل سوم

معرفی منطقه معدنی سنگ آهن گل کهر سیرجان

۳-۱- مقدمه

در این فصل موقعیت جغرافیایی، وضعیت زمین‌شناسی عمومی، ساختمانی و ژئوتکنیکی معدن گل‌گهر بررسی خواهد شد. در ادامه مشخصات فنی معدن گل‌گهر و به‌خصوص معدن شماره ۱ بیان خواهد شد. شرایط زمین‌شناسی ساختمانی معدن در طبقه‌بندی RDi از اهمیت بالایی برخوردار است.

۳-۲- تاریخچه مطالعات و سابقه فعالیت معدن

معدن سنگ آهن گل‌گهر بر اساس شواهد موجود در امر استخراج سابقه‌ای دیرینه دارد. ابن بلخی جغرافی‌نویس دوره سامانیان در کتاب خود به نام فارسی‌نامه از ناحیه‌ای به نام صاهد (چاهک واقع در ۷۰ کیلومتری شمال غرب معدن گل‌گهر) یاد کرده است و نوشته است که "در آنجا آهن و پولاد خیزد، تیغ‌ها کنند و شمشیر، چاهی معروف است" و تصادفاً در اطراف آبادی چاهک فعلی آثار پراکنده معدن‌کاری قدیمی گسترش فراوانی دارد. مقدسی جغرافی‌نویس قرن چهارم در کتاب جغرافیای خود از اسلحه ساخت چاهک در شمال نیریز که به عنوان محلی که پولاد نیکو دارد یاد کرده است. در ۲۵ کیلومتری شمال غرب معدن و در ۳۵ کیلومتری غرب روستای بشنه آثار قدیمی کوره‌های ذوب آهن دیده می‌شود (مرکز اسناد).

۳-۳- سابقه فعالیت کنونی

در سال ۱۳۴۸ شرکت خصوصی ایران باریت، عملیات اکتشاف و پی جویی سنگ آهن را آغاز کرد. ۲۶ حلقه چاه مشتمل بر ۲۸۰۰ متر حفاری نمونه گیری و تعدادی ترانشه حفر شد. در هنگام مطالعات و اکتشاف مقدماتی، ذخیره بسیار زیاد، با عیار مناسب آهن در ناحیه آنومالی شماره ۱ گل گهر مشخص شد که در شکل ۱-۳ نقشه معدن گل گهر آورده شده است.



شکل ۱-۳- نمایی از سایت معدنی گل گهر سیرجان (Google map)

در نتیجه ادامه عملیات اکتشاف در سال ۱۳۵۳ به شرکت ملی فولاد واگذار شد. شرکت ملی فولاد با مشاورت شرکت سوئدی گرانگز^۱، مراحل مختلف اکتشاف و عملیات مهندسی را پی گیری نمود. در این رابطه توسط شرکت ایروسرویس^۲ در محدوده ای به وسعت ۴۵۰۰۰ کیلومتر مربع در فاصله بین آباده فارس تا جازموریان، برداشت های ژئوفیزیک هوایی (مگنتومتری) انجام و آنومالی های متعددی که دارای

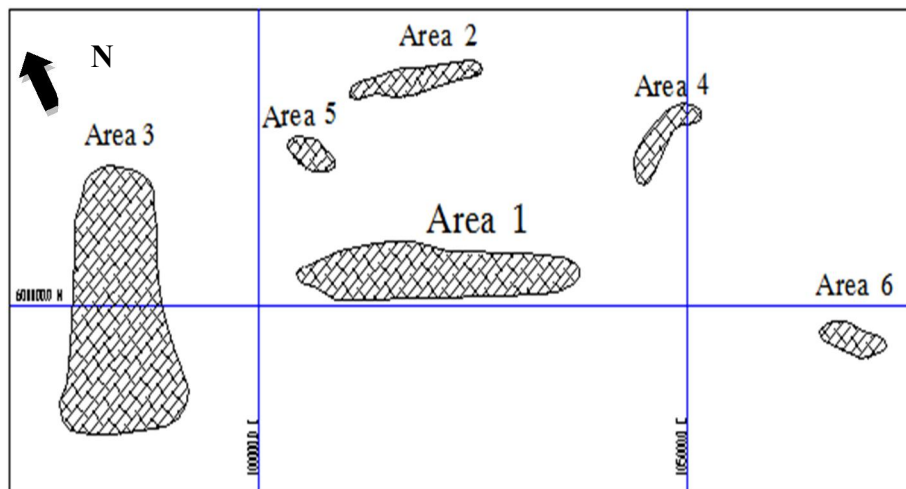
¹ Granges

² Aero Service

پتانسیل‌های بالایی از سنگ آهن بودند مشخص گردید. بزرگترین این آنومالی‌ها در منطقه گل‌گهر واقع شده است.

در پی مطالعات ژئوفیزیک هوایی با استفاده از تجربه و امکانات مؤسسه زمین‌شناسی یوگسلاوی^۱ در محدوده‌ای به وسعت ۷۴ کیلومترمربع برداشت‌های ژئوفیزیک زمینی صورت گرفت که شامل مغناطیس‌سنجی و ثقل‌سنجی بوده است. متعاقب آن حفاری زمین‌شناسی در ۶ منطقه جداگانه شروع گردید و وجود سنگ‌آهن در این ۶ منطقه با عیارهای مناسب تأیید گردید. معادن شش‌گانه سنگ آهن مذکور با شماره‌های یک تا شش نام‌گذاری شده‌اند (شکل ۳-۲).

مطابق برآورد ژئوفیزیکی جمعاً ۱۱۳۵ میلیون تن ذخیره سنگ‌آهن دارند که از این شش توده، معدن ۱ مورد اکتشاف تفصیلی قرار گرفته است و ذخیره آن ۳۱۳ میلیون تن محاسبه شده است. ذخیره احتمالی معدن شماره ۳ که آن بیش از ۷۰۰ میلیون تن برآورد شده است، و در این معدن عملیات خاکبرداری و استخراج به صورت محدود در حال انجام است (مرکز اسناد).



شکل ۳-۲- موقعیت نسبی آنومالی‌های گل‌گهر (کوشا معدن، ۱۳۸۳)

^۱Geo Institute of Yugoslavia

۳-۴- راه‌های ارتباطی معدن

ناحیه معدنی سنگ آهن گل‌گهر در ۵۵ کیلومتری جنوب غرب سیرجان واقع شده است. راه ارتباطی این منطقه جاده آسفالتی سیرجان - شیراز است که بعد از طی ۴۵ کیلومتر جاده آسفالتی یک راه فرعی آسفالتی درجه ۱ به طرف جنوب تا معدن امتداد می‌یابد (شکل ۳-۳). راه آهن دو بانده بافق بندرعباس از ۸ کیلومتری شرق معدن عبور می‌کند که یک انشعاب به طول حدودی ۱۰ کیلومتر معدن را به شبکه راه آهن سراسری متصل می‌سازد. ارتفاع متوسط توپوگرافی معدن از سطح دریا ۱۷۴۰ متر است، بلندترین نقطه ارتفاعی در منطقه مربوط به کوه چاه سفید با ارتفاع ۲۰۰۰ متر می‌باشد و کمترین ارتفاع در محدوده معدن بدون در نظر گرفتن پیت در سمت جنوب غرب آن با ارتفاع ۱۷۰۹ متر از سطح دریا می‌باشد.



شکل ۳-۳- موقعیت معدن گل‌گهر و راه‌های ارتباطی

از نظر موقعیت منطقه‌ای در اطراف محدوده معدن کاری در معدن شماره ۱ گل‌گهر چندین حوضه آبریز وجود دارد که شامل: ۱- حوضه چاه دراز ۲- حوضه عین البقر ۳- حوضه قطار بنه ۴- حوضه خیرآباد می‌باشد. معدن گل‌گهر در بخش شمالی حوضه عین البقر قرار دارد. این حوضه از شمال با حوضه خیرآباد، از شرق با حوضه چاه دراز، از سمت غرب با حوضه قطاربنه و از جنوب با کویر مرگ در ارتباط است (کوشا معدن، ۱۳۸۳).

۳-۵- مورفولوژی منطقه

مورفولوژی ناحیه گل‌گهر شامل یک دشت وسیع هموار تا ناهموار است که تک رشته‌هایی از تشکیلات کربناته از آن سر بر آورده است. ناحیه مورد مطالعه دارای سه واحد ریخت‌شناسی و کوه‌های ستیغ‌دار است که اطراف آن را دشت‌های آبرفتی و نمک‌زارهای مسطح فرا گرفته است و امتداد عمومی ارتفاعات NW-SE می‌باشد. ارتفاع متوسط دشت‌های آبرفتی ناحیه معدنی از سطح دریا حدود ۱۷۳۰ متر و در شمال معدن نمک‌زار کفه خیرآباد (سیرجان) قرار دارد. در غرب معدن دو رشته کوه موازی به نام چاه بره با امتداد NW-SE با ارتفاع ۱۹۸۶ متر قرار گرفته و در جنوب ناحیه رشته کوه عین البقر با ارتفاع ۲۰۳۷ متر و امتداد تقریباً W-E قرار گرفته است (مرکز اسناد).

۳-۶- وضعیت زمین شناسی منطقه

۳-۶-۱- جایگاه ناحیه معدنی گل‌گهر در زمین ساخت ایران

ناحیه معدنی گل‌گهر در تقسیم‌بندی ساختاری ایران، در لبه زون سنندج - سیرجان و لبه فروافتادگی نمک‌زار کفه خیرآباد، که خود در حد فاصل زون سنندج - سیرجان و زون ارومیه دختر به وجود آمده، قرار گرفته است (مرکز اسناد).

۳-۶-۲- چینه‌شناسی ناحیه معدنی گل‌گهر

منطقه مورد مطالعه عموماً از آبرفت‌های عهد حاضر پوشیده شده است و ارتفاعات معدودی که رخنمون دارند شامل سنگ‌های دگرگونی پالئوزوئیک در جنوب و جنوب غربی معدن و سنگ‌های رسوبی مزوزوئیک و سنوزوئیک در شرق معدن می‌باشند. سنگ‌های پالئوزوئیک شامل کمپلکس گل‌گهر بوده که این مجموعه قدیمی‌ترین مجموعه دگرگونی این منطقه را تشکیل می‌دهد و ذخایر شش گانه سنگ آهن گل‌گهر در این کمپلکس قرار گرفته است. بخش تحتانی این کمپلکس شامل تناوبی از گنایس،

میکاشیست، آمفیبولیت و کوارتز شیست می‌باشد. بر روی این بخش مجموعه‌ای تشکیل شده است که در تمامی نواحی اسفندقه، حاجی‌آباد و نیریز ویژگی‌های یکنواختی دارند.

در ناحیه پریا (۳۰ کیلومتری شمال شرق گل‌گهر) مقاطع کاملی از پالئوزوئیک تا تریاس زیرین، توسط سازمان زمین‌شناسی کشور مطالعه شده است. در این مقطع بین کمپلکس گل‌گهر و واحد کرسفید و کمپلکس‌های رویی، دگرشیبی دیده نمی‌شود. کمپلکس کرسفید توسط ماسه سنگ، اسلیت و آهک‌های کربونیفر زیرین پوشیده شده است. با توجه به نبود دگرشیبی و آرامش نسبی زمین ساخت ایران در پالئوزوئیک و وجود کربونیفر زیرین روی دولومیت‌های کرسفید، می‌توان سن دونین را برای کمپلکس کرسفید و سن احتمالی اردویسین را برای کمپلکس گل‌گهر در نظر گرفت. بیرون‌زدگی رسوبات مزوزوئیک عمدتاً در شمال شرق معدن، رسوبات تریاس به صورت آهک‌های ریفی، و تریاس فوقانی به صورت دولومیتی در ناحیه دو کوهی در شمال شرق، و رسوبات ژوراسیک فوقانی به صورت آهک‌های دولومیتی قهوه‌ای رنگ در شرق معدن مشاهده شده است (مرکز اسناد).

۳-۶-۳- ساختار زمین‌شناسی و تکتونیک منطقه

مطالعه تغییرات زمین‌شناسی ساختمانی به دلایل زیر در این منطقه مشکل است (کوشا معدن،

۱۳۸۳):

الف- نبودن رخنمون واحدهای سنگی قدیمی.

ب- جوان بودن سن (پلیوسن-کواترنر) واحدهای سنگی پوشش دهنده محدوده آنومالی و نبودن

چین‌خوردگی و تغییر شکل‌های ناشی از گامه‌های^۱ اصلی و موثر کوه‌زایی آلپ در این سنگ نهشته‌ها.

ج- گچ دار بودن و سست بودن واحدهای کنگلومرا

با وجود این‌که خطواره مربوط به گسل‌ها در روی عکس‌های هوایی دیده می‌شود ولی در صحرا به

^۱ Phase

دلیل سست بودن و گچ‌دار بودن واحدهای سنگی گسل‌های مربوط به این خطواره‌ها به خوبی دیده نمی‌شوند. با همه این کاستی‌ها در محدوده مورد مطالعه گسل‌های شاخص زیر قابل شناسایی است که یک‌دسته از این گسل‌ها موازی زاگرس و بطور تقریبی عمود بر محور تنش بیشینه و دسته دیگر منطبق بر دو دسته از گسل‌های امتداد لغز هم نوع هستند. بنابراین:

- دسته‌ای از گسل‌ها که روند شمال غرب-جنوب شرق را دارند و موازی روند زاگرس هستند به احتمال زیاد علاوه بر مولفه جابجایی امتدادی، مولفه جابجایی قائم از نوع تراستی هم باید داشته باشند. دسته‌بندی مواد معدنی ابتدا توسط شرکت گرانگزر انجام گرفت، که با تغییرات اندکی توسط شرکت ADM¹ و دفتر طراحی و زمین‌شناسی گل‌گهر ارائه شده است. دسته‌بندی مواد معدنی در معدن به صورت مگنتیت بالایی، اکسید و مگنتیت پایینی می‌باشد.

به منظور تفکیک جنس سنگ‌ها از سیستم کدگذاری به شرح زیر استفاده شده است:

کد ۱۰۱ برای مگنتیت پایینی

این نوع کانسنگ با مقدار باطله خیلی کم و درصد بالای مگنتیت (تا حدود ۸۰٪ محصول مغناطیسی) مشخص می‌شود.

در حدود ۹ درصد سنگ مگنتیت پایینی درصد گوگردی در حدود ۳ تا ۶ درصد دارد. گوگرد بیشتر به شکل پیریت دیده می‌شود و در آزمایش‌های جدایش مغناطیسی به راحتی به قسمت باطله منتقل می‌گردد. در بعضی نقاط، مقدار قابل ملاحظه‌ای از گوگرد در داخل کنسانتره باقی می‌ماند. موضوع گوگرد در داخل مگنتیت پایینی و مسائل مطرح شده در این مورد، مسأله‌ای مهم در کانه‌آرایی و طراحی معدن به شمار می‌آید.

کد ۲۰۱ برای مگنتیت اکسید شده که به آن اکسید می‌گویند.

¹ Argyle Diamond Mines

سنگ‌های این زون به صورت لایه‌ای روی مگنتیت پایینی را پوشانده‌اند. این لایه در هنگام بالا آمدگی لایه آهن، در معرض هوازدگی قرار گرفته و اکسید شده است و بعد از آن رسوبات جوان ترشیاری روی آن را پوشانده‌اند. در طی مرحله اکسیداسیون پیریت و گوگرد از این کانسنگ به طور کامل خارج شده و توسط لیمونیت جایگزین گردیده و مگنتیت تبدیل به اکسید آهن قرمز رنگ (هماتیت و گوتیت) شده است. در سنگ‌های زون اکسیده، به طور میانگین ۱۲ درصد هماتیت و گوتیت وجود دارد. در مجموع کنسانتره حاصل از این سنگ، مقدار آهن کمتری نسبت به کنسانتره تولید شده از سنگ مگنتیتی دارد (۶۲ درصد آهن در مقابل ۶۹ درصد در سنگ مگنتیت).

کد ۱۰۳ برای مگنتیت بالایی

این کانسنگ در منطقه‌ای محدود، در بالای توده معدنی قرار دارد و در حدود ۳ درصد تناژ کل توده معدنی را تشکیل می‌دهند. سنگ معدنی این توده تا اندازه‌ای اکسید شده، اما همچنان به شدت مغناطیسی است. میزان اکسیدشدگی این سنگ برای از بین رفتن پیریت کافی بوده و عیار کلی گوگرد در داخل این سنگ معدنی به شدت پایین آمده است. درصد فسفر نیز در داخل این کانسنگ بسیار پایین است.

کانی‌های غیر فلزی از نظر جایگاه قرارگیری به دو گروه قابل تقسیم هستند:

کانی‌هایی که به صورت گانگ در متن سنگ آهن قرار دارند. این گروه عمدتاً از کانی‌های ورقه‌ای (تالک، کلریت، سرپانتین) تشکیل شده است.

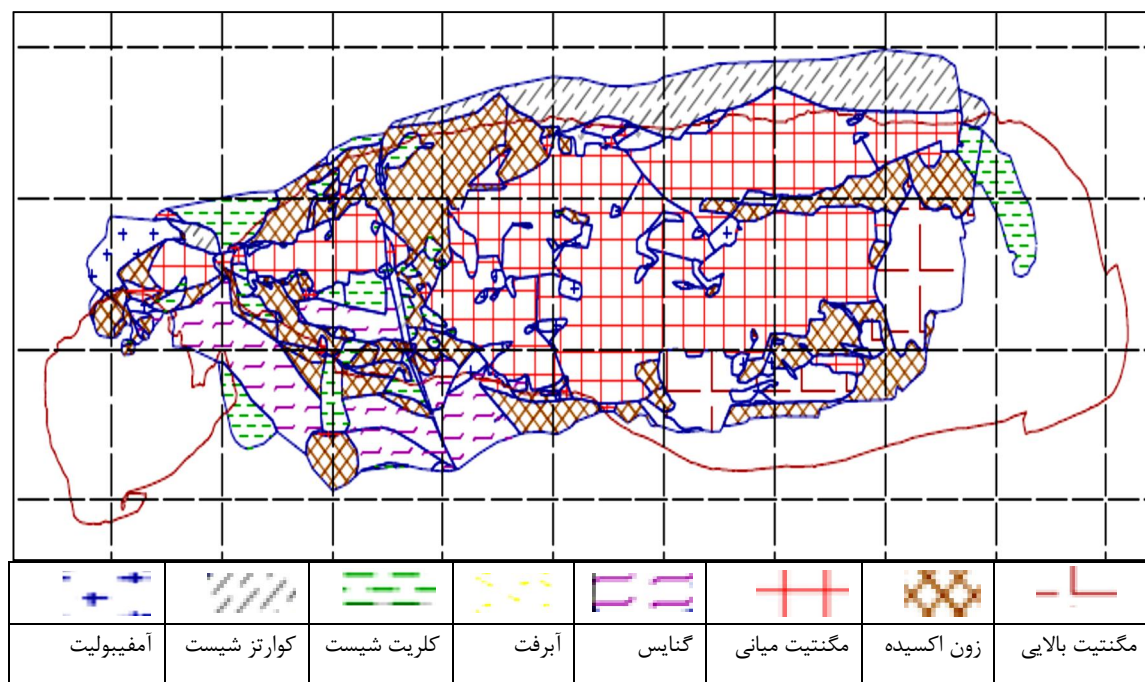
کانی‌هایی که به صورت توده یا رگه (تجمعات دایکی شکل) در داخل توده‌سنگ آهن جای گرفته‌اند.

این گروه کانی‌های غیر فلزی که به صورت متمرکز (رگه‌ای، توده‌ای، عدسی) هستند، عبارتند از:

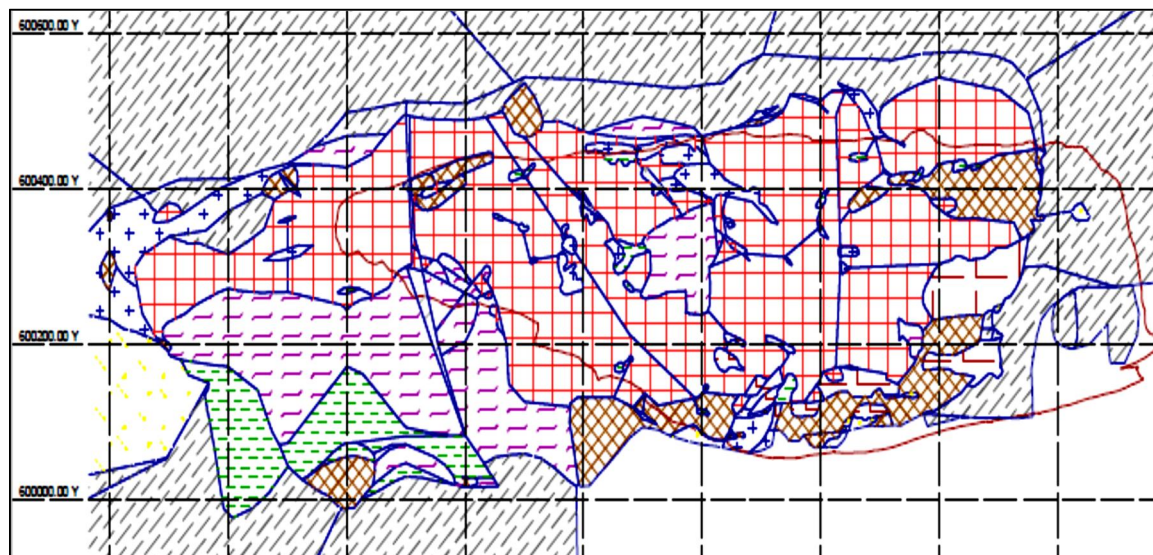
رگه‌های کلریت، فلوگوپیت، کلسیت، سرپانتین، هورنبلند، آمفیبولیت، گنایس آمفیبولیت‌دار و

آمفیبول‌های تورمالین فلوگوپیت‌دار که در مسیر گسل‌ها و یا فضا‌های تکتونیکی تشکیل شده‌اند.

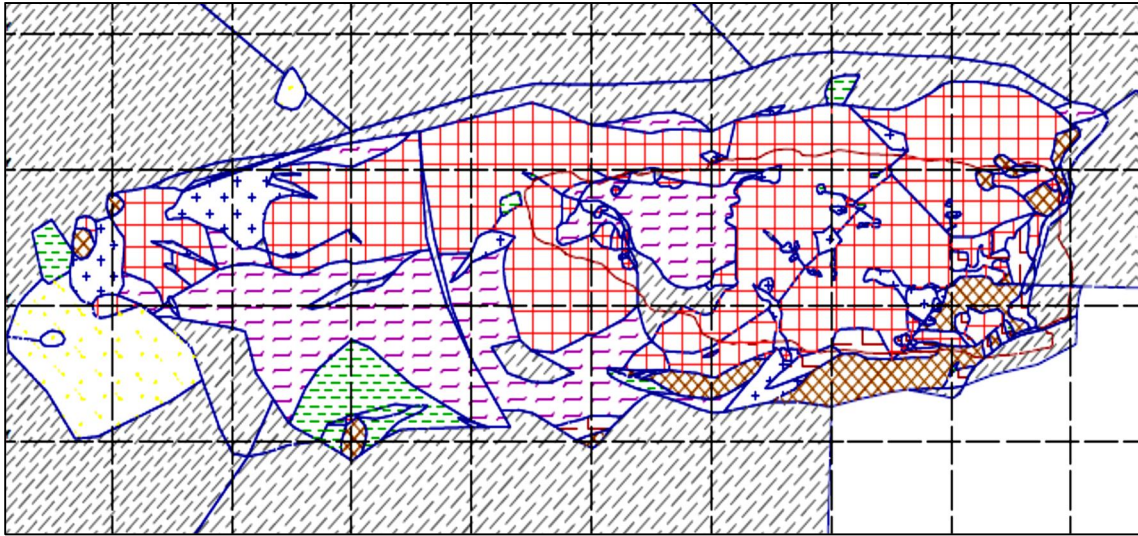
کانی‌های ورقه‌ای شامل تالک، کلریت، سرپانتین که دارای خاصیت آماسی هستند، هم به صورت رگه‌ای و هم به صورت سیمان در برگیرنده دانه‌های مگنتیت دیده می‌شوند. در شکل‌های ۳-۴ تا ۳-۷ نقشه زمین‌شناسی پله‌های مورد مطالعه معدن گل‌گهر آورده شده است.



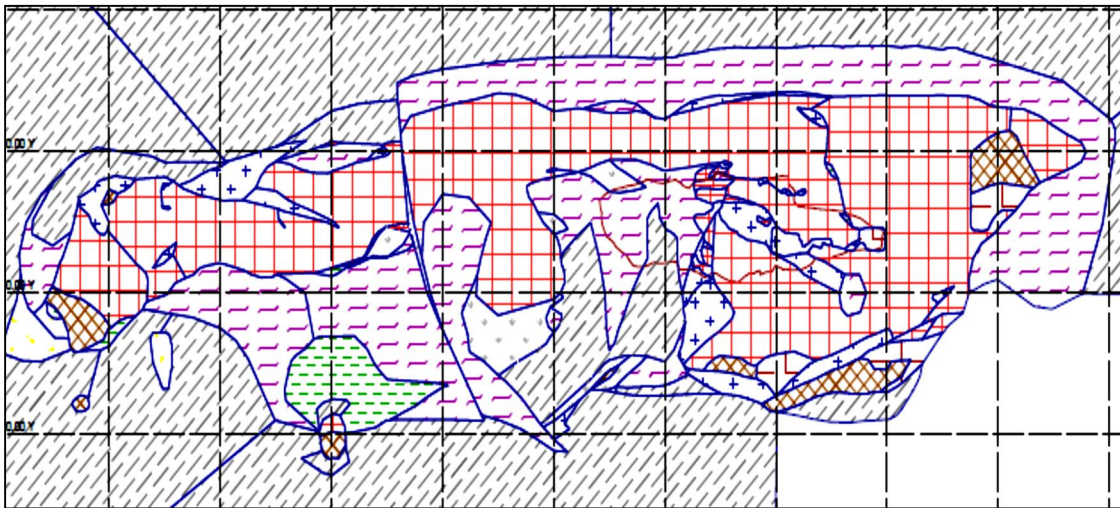
شکل ۳-۴- نمایی از نقشه زمین‌شناسی پله ۱۰ (کوشامعدن، ۱۳۹۰)



شکل ۳-۵- نمایی از نقشه زمین‌شناسی پله ۱۱ (کوشامعدن، ۱۳۹۰)



شکل ۳-۶- نمایی از نقشه زمین شناسی پله ۱۲ (کوشامعدن، ۱۳۹۰)

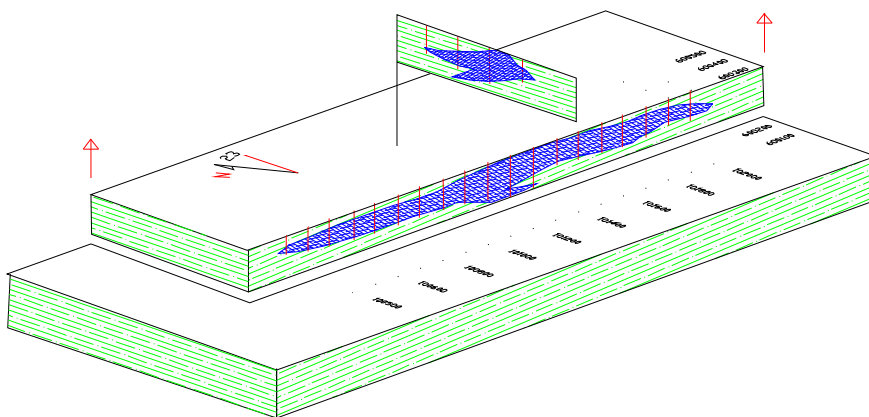


شکل ۳-۷- نمایی از نقشه زمین شناسی پله ۱۳

۳-۷- شکل و طبیعت ماده معدنی

در ذخیره شماره ۱ تا کنون ۲۵۲ چاه اکتشافی به تراژ ۳۲۶۵۴ حفاری گردیده است، که از این مقدار ۱۲۶۸۵ متر حفاری در سنگ آهن و ۱۰۰۸۳ متر در سنگ باطله و ۹۸۸۶ متر در خاک بوده است. ماکزیمم عمق چاه حفاری شده ۴۱۶ متر می‌باشد. بر اساس حفاری‌های اکتشافی انجام شده شکل کلی

ذخیره شماره ۱ تقریباً به صورت یک عدسی کشیده با امتداد NW-SE است (شکل ۳-۸) (کوشا معدن، ۱۳۸۳).



شکل ۳-۸- وضعیت ذخیره شماره ۱ (کوشا معدن، ۱۳۸۳)

۳-۸- مشخصات کمی و کیفی ذخیره شماره ۱

ذخیره شماره ۱ گل گهر دارای ۳۱۳/۰۶ میلیون تن ذخیره زمین‌شناسی است که ۲۳۰ میلیون تن آن با توجه به فاکتورهای اقتصادی قابل استخراج می‌باشد. مشخصات کمی و کیفی آن به تفکیک نوع سنگ در جدول ۳-۱ بیان شده است (دفتر نظارت و طراحی، ۱۳۹۰).

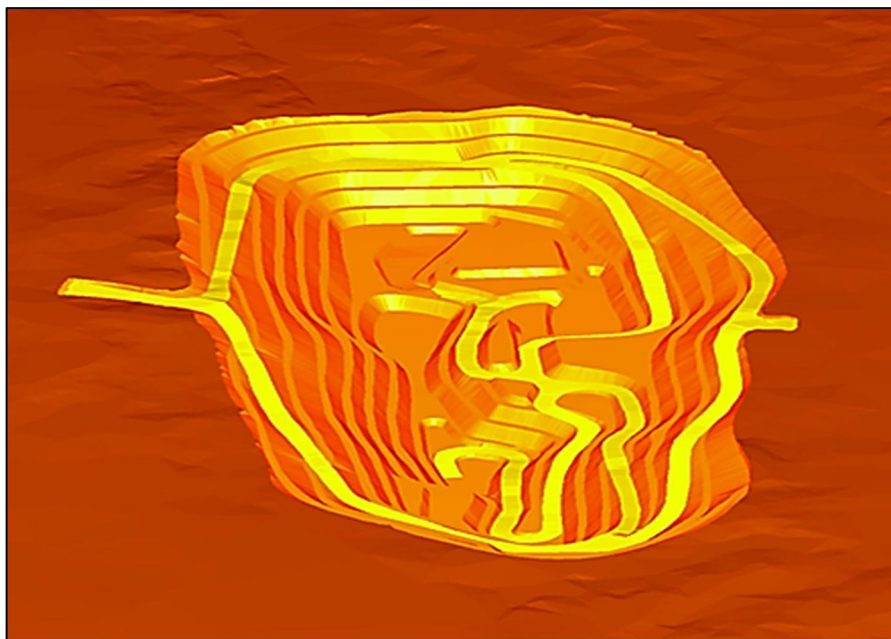
جدول ۳-۱- مشخصات کمی و کیفی ذخیره شماره ۱ (دفتر نظارت و طراحی، ۱۳۹۰)

عیار کنسانتره (%)				عیار سنگ (%)				تناژ (میلیون تن)	نوع سنگ
S	P	Fe	Wt	S	P	FeO	Fe		
۰/۰۱۴	۰/۰۲۴	۷۰/۷	۷۷/۶۸	۰/۰۵۱	۰/۰۶۸	۱۸/۹	۶۰/۸	۱۹/۹۸	مگنتیت بالایی
۰/۰۵۷	۰/۰۳۵	۶۹/۱	۵۹/۰۲۷	۰/۳۵۸	۰/۱۳۱	۹	۶۰/۳	۶۸/۷۱	مگنتیت اکسیده
۰/۴۷۰	۰/۰۲۴	۷۰/۳	۷۳/۵۷	۲/۶۱۲	۰/۱۴۲	۲۲/۴	۵۵/۹	۲۲۴/۳۷	مگنتیت پائینی
۰/۳۵۰	۰/۰۲۷	۷۰	۶۸/۶۶	۱/۹۵۴	۰/۱۳۵	۱۹/۲	۵۷/۲	۳۱۳/۰۶	جمع کل

۳-۹- مشخصات هندسی پیت طراحی شده نهایی معدن

پیت نهایی معدن به صورت یک بیضی با ابعاد تقریبی ۲۲۵۰×۷۵۰ متر می‌باشد که شامل ۲۱ پله با

ارتفاع ۱۵ متر و شیب کلی دیواره‌های معدن بین ۳۸ تا ۴۵ درجه است. رمپ‌های دسترسی به معدن با شیب ۸٪ و عرض ۲۵ متر طراحی شده‌اند. عرض پله‌های ایمنی ۱۰ متر بوده و به ازای هر دو پله (۳۰ متر) یک پله ایمنی در دیواره نهایی باقی خواهد ماند. ارتفاع بالاترین نقطه معدن ۱۷۵۵ متر و پایین‌ترین آن (در طرح نهایی) ۱۴۴۰ متر می‌باشد. محدوده نهایی معدن شماره یک گل‌گهر در شکل ۳-۹ نمایش داده شده است (کوشا معدن، ۱۳۸۳).



شکل ۳-۹- محدوده نهایی معدن شماره ۱ گل‌گهر (کوشا معدن، ۱۳۸۳)

۳-۱۰- حفاری، آتشیاری، بارگیری و باربری

ماشین حفاری که در این معدن مورد بررسی قرار گرفت از نوع IR-DMH XL 1800 می‌باشد. این دستگاه یک دریل الکتریکی از نوع سیستم حفاری با سرمته سه مخروطی می‌باشد و دارای یک سیستم جلوبرنده هیدرواستاتیکی و یک سیستم حرکت چرخشی چرخ زنجیری از نمونه اسکواوتوری در موقع حرکت است (شکل ۳-۱۰).

این دریل برای حفر چال‌های انفجاری به روش دورانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. کمپرسور دستگاه

حفاری فشار هوا را از میان بلبرینگ‌های سرمته عبور داده و باعث خنک شدن سرمته، تمیز کردن ته چال و افزایش عمر سرمته خواهد شد.

چال‌های حفاری در معدن با قطر ۲۵/۱ سانتی‌متر و عمق متوسط ۱۷ متر حفاری می‌گردند. شبکه‌های حفاری با توجه به نوع سنگ‌ها از ۴×۵ متر تا ۶×۷ متر و در پوشش آبرفتی (خاک) ۸×۱۰ متر متغیر می‌باشد. خرج اصلی در چال‌های خشک آنفو و در چال‌های آبدار از مواد ناریه ضد آب امولایت استفاده می‌شود.



شکل ۳-۱۰- دستگاه حفاری IR-DMH XL 1800

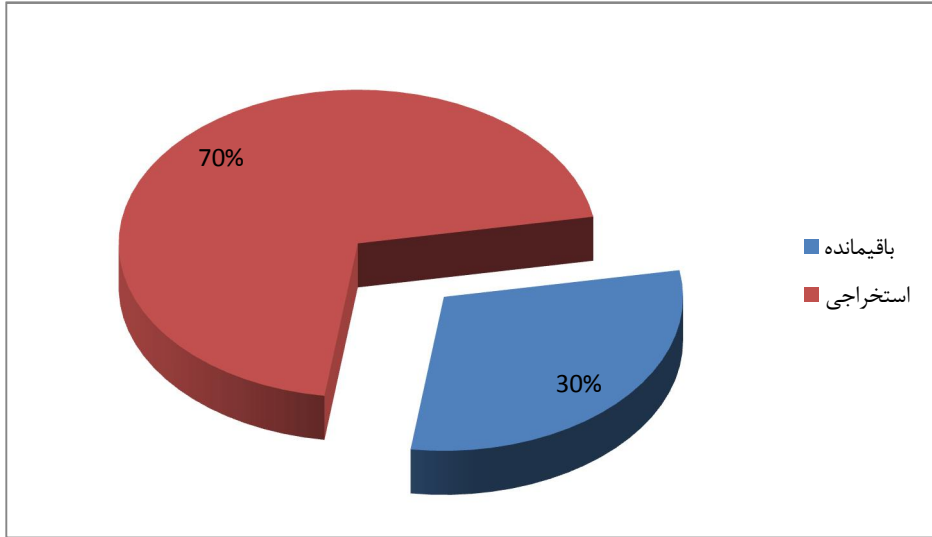
در پایان هر سال و در طرح پنج ساله جدید تعداد ماشین‌آلات مورد نیاز با توجه به پارامترهای مکانیکی آنها و نیز میزان تولید و برنامه استخراجی محاسبه می‌گردند. تعداد و مشخصات ماشین‌آلات فعلی معدن در جدول ۳-۲ آمده است (دفتر نظارت و طراحی، ۱۳۹۰).

جدول ۳-۲- ماشین آلات معدن (دفتر نظارت و طراحی، ۱۳۹۰)

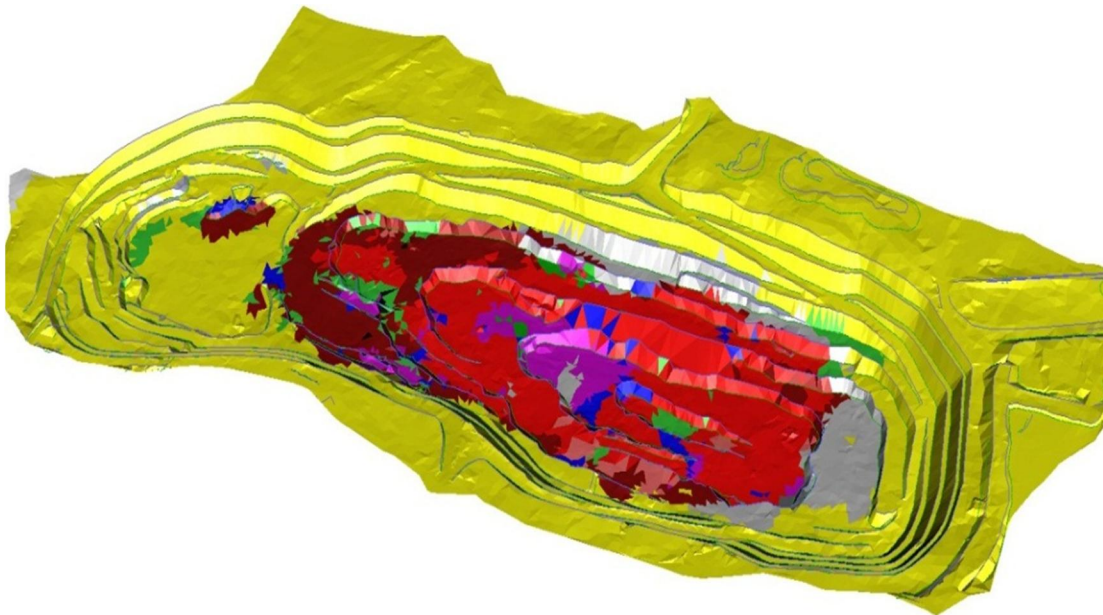
تعداد دستگاه	مشخصات	نوع ماشین آلات
۳	EUCLID 85 (ton)	تراک (کامیون معدنی)
۱۰	KOMATSU 100 (ton)	
۱۰	TEREX 100 (ton)	
۳	INGERSOLL-RAND DMH (9 7/8)	دریل (دستگاه حفاری)
۱	TITON (8 in)	
۲	ATLAS COPCO 402A	دریل واگن
۴	P&H AL1900	شاوول (بیل الکتریکی)
۲	LIBHER	
۵	KOMATSU 375A	بلدوزر
۵	KOMATSU 155A	
۲	MICHIGAN L480	لودر
۲	O&K G350	گریدر
۲	MICHIGAN 260C	ویلدوزر
۲	BAYERISCHER LLOYD	آنفو تراک
۱	O&K RH30C	چکش هیدرولیک

۳-۱۱- تولید معدن

از ابتدای معدن کاری تا پایان سال ۸۹ به میزان ۱۲۱/۲ میلیون تن سنگ آهن و ۱۳۱/۸ میلیون تن خاک و سنگ باطله از معدن استخراج شده است. عملیات معدن کاری انجام شده در سال ۸۹ شامل استخراج ۱۱/۵ میلیون تن سنگ آهن و ۱۰/۴ میلیون تن خاک و باطله برداری بوده است. نمودار مربوط به میزان سنگ آهن استخراجی و باقیمانده در شکل ۳-۱۱ آمده است. تصویر سه بعدی وضعیت فعلی معدن در شکل ۳-۱۲ مشاهده می شود (دفتر نظارت و طراحی، ۱۳۹۰).



شکل ۳-۱۱- میزان سنگ آهن استخراجی و باقیمانده (دفتر نظارت و طراحی، ۱۳۹۰)



شکل ۳-۱۲- تصویر سه بعدی معدن شماره ۱ در انتهای ۸۹ (خروجی از نرم افزار GemCom) (کوشا معدن، ۱۳۹۰)

در شکل ۳-۱۳ نمای غربی- شرقی معدن را مشاهده می کنید.



شکل ۳-۱۳- نمای غربی- شرقی معدن تا پایان سال ۱۳۸۹

فصل چهارم

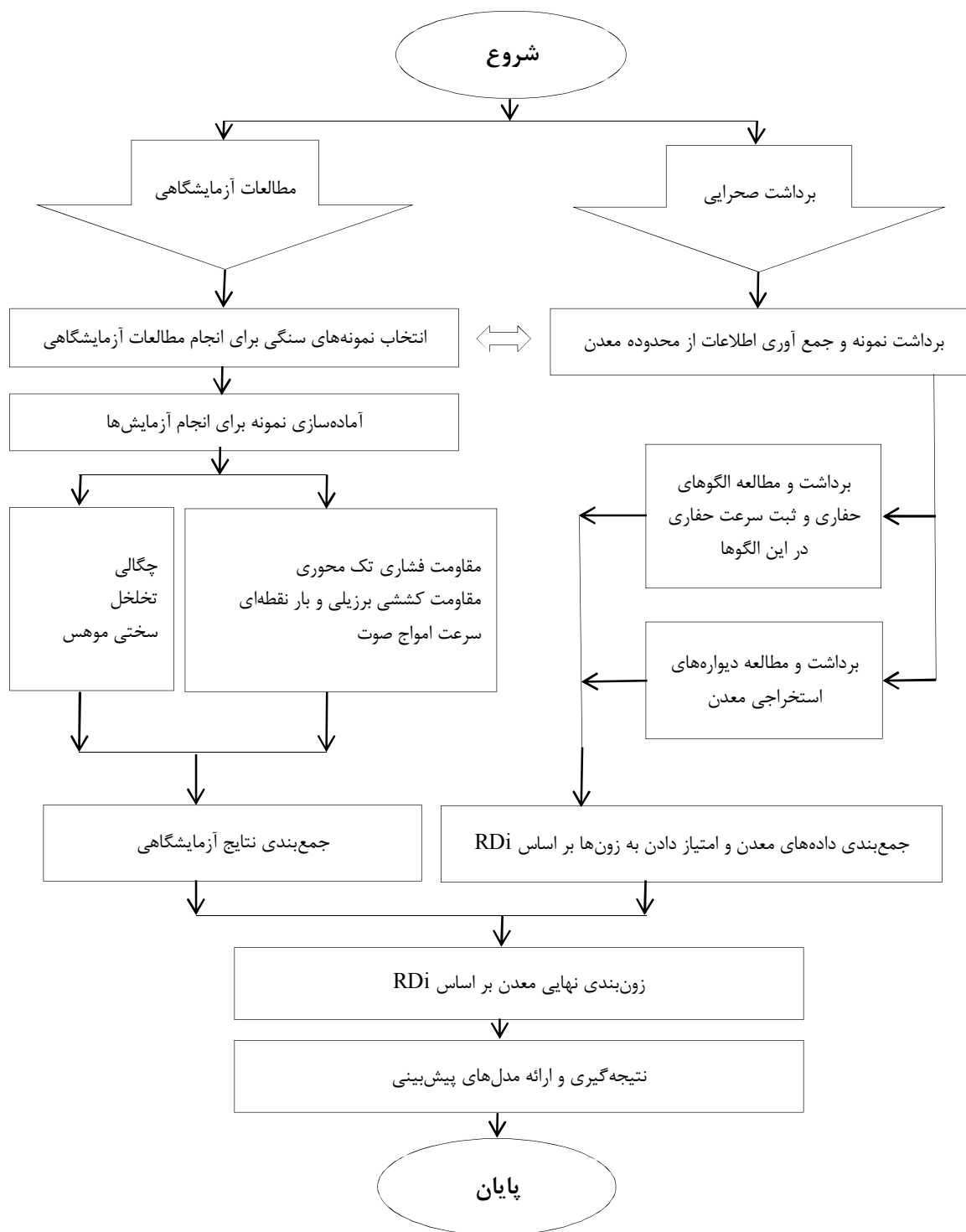
مطالعات میدانی و آزمایشگاهی برای زون بندی

قابلیت حفاری معدن گل گهر

۴-۱- مقدمه

در این فصل از تحقیق مطالعات در محدوده معدن در دو بخش مجزا انجام شده است. در بخش اول مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی بر روی الگوهای حفاری اجرا شده در معدن انجام شده و سرعت متوسط حفاری هر الگو برداشت شده است. بر اساس نتایج آزمایشگاهی و صحرایی امتیاز RD_i هر الگوی حفاری به دست آمده است. سپس ارتباط بین RD_i و پارامترهای مکانیک سنگی مورد مطالعه و روابطی برای پیش‌بینی سرعت حفاری به دست آمده است. از روابط فوق در ارزیابی نتایج برداشت‌های صحرایی توده‌سنگ‌های محدوده معدن استفاده خواهد شد.

در بخش دوم از تحقیق به منظور بررسی و ارزیابی قابلیت حفاری، توده‌سنگ‌های معدن شماره ۱ گل‌گهر بر اساس طبقه‌بندی قابلیت حفاری RD_i مورد مطالعه قرار گرفته است. به اطلاعات جمع‌آوری شده از معدن بر اساس طبقه‌بندی قابلیت حفاری RD_i امتیازدهی و قابلیت حفاری زون‌های برداشت شده محاسبه شده است. سپس بر اساس کلاس‌بندی قابلیت حفاری RD_i و امتیازهای به دست آمده زون‌بندی توده‌سنگ‌های مورد مطالعه انجام شده است. سپس سرعت حفاری برای هر زون بر اساس امتیاز RD_i پیش‌بینی شده است. روندنمای انجام مطالعات انجام شده در معدن سنگ آهن گل‌گهر در شکل ۴-۱ نشان داده شده است



شکل ۴-۱- مراحل مختلف انجام مطالعات صحرائی و آزمایشگاهی

۴-۲- برداشت صحرایی الگوهای حفاری و انجام مطالعات آزمایشگاهی

مطالعه و ارزیابی الگوهای حفاری به سه بخش جدا از هم تقسیم شده است. در بخش اول سرعت حفاری هر الگوی حفاری ثبت شده است. بخش دوم آزمایش‌های مکانیک سنگی بر روی توده‌سنگ‌های در برگیرنده الگوهای حفاری انجام شده است. پس از انجام آزمایش‌های مکانیک سنگی و برداشت الگوهای حفاری، امتیاز RD_i هر الگو به دست آمده است. در نهایت ارتباط بین RD_i و پارامترهای مکانیک سنگی مورد مطالعه با سرعت حفاری مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

۴-۲-۱- برداشت سرعت متوسط الگوهای حفاری

سرعت حفاری هر الگو با توجه به متوسط سرعت حفر چال‌های آن الگو محاسبه شد. برای به دست آوردن سرعت حفاری معدن تعداد ۱۱ الگوی حفاری و بیش از ۲۵۰ چال مورد مطالعه قرار گرفت. جدولی به منظور ثبت ساعت حفاری برای هر چال تهیه شد که نمونه‌ای از آن در جدول ۴-۱ آورده شده است.

جدول ۴-۱- فرم ثبت سرعت حفاری در معدن گل‌گهر

شماره پترن:	تاریخ:		
	شماره چال	ساعت شروع	ساعت خاتمه
۱			زمان
۲			توضیحات
۳			
.			
.			
.			
۴۵			

ساعت شروع و پایان حفر چال و تأخیرها در حین عملیات حفاری ثبت گردید. بر این اساس با ثبت زمان حفر چال و در اختیار داشتن عمق چال، سرعت حفاری برای هر چال بر حسب متر بر دقیقه به دست

آمد و سپس سرعت حفاری در یک الگوی حفاری نیز با متوسط‌گیری از سرعت حفاری چال‌ها محاسبه شد. این عملیات برای هر ۱۱ الگو تکرار شد که نتایج آن در جدول ۴-۲ آورده شده است.

جدول ۴-۲- سرعت حفاری محاسبه شده در معدن

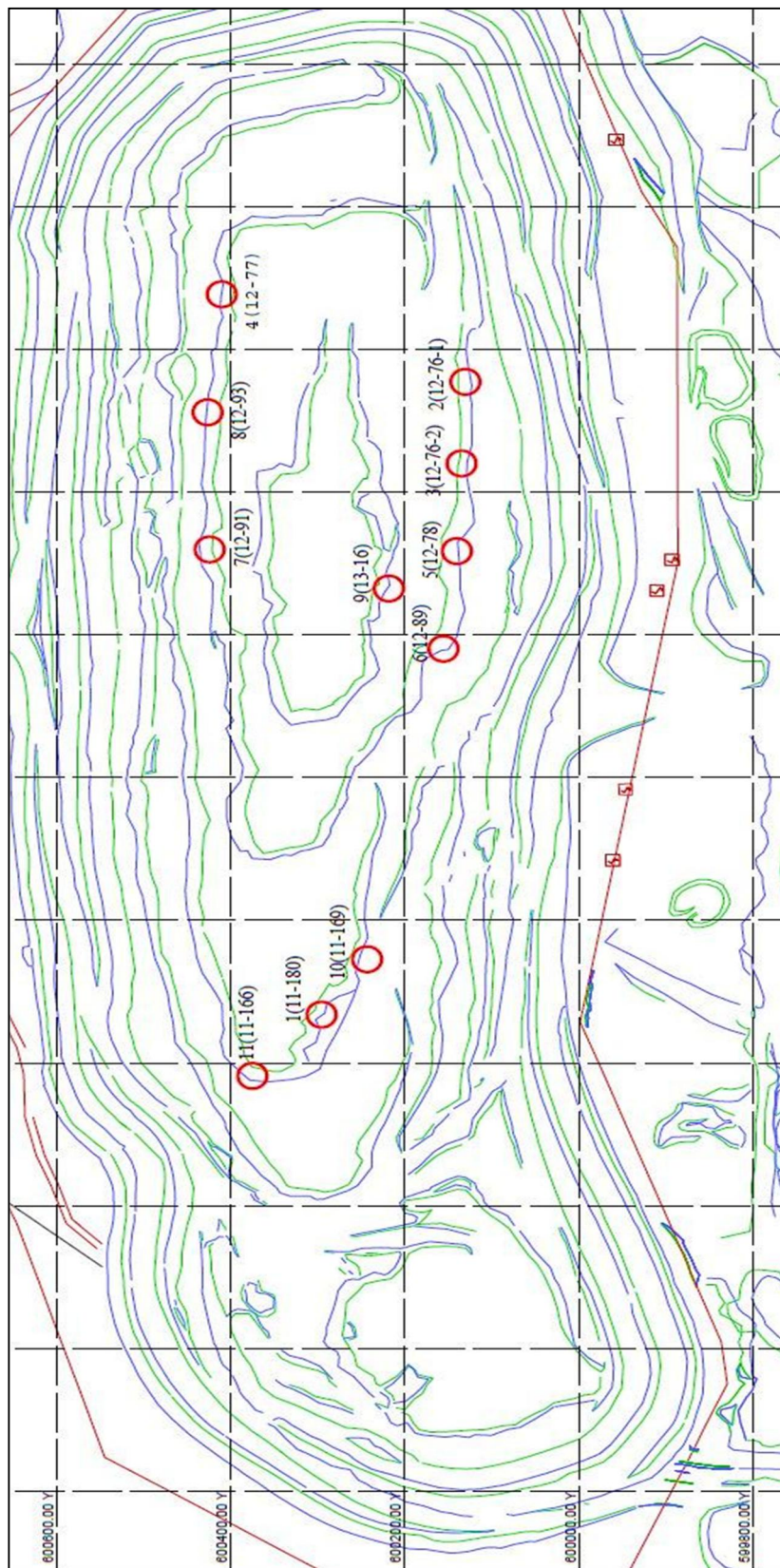
شماره الگو	تعداد چال	سرعت حفاری متوسط (m/min)
۱	۲۲	۰/۵۵۷
۲	۲۷	۰/۶۸۲
۳	۲۵	۰/۶۲۸
۴	۲۶	۰/۷۶
۵	۲۳	۰/۸۷
۶	۲۸	۰/۳۹
۷	۱۸	۰/۵۰۷
۸	۲۲	۰/۶۱
۹	۱۷	۰/۴۹
۱۰	۱۹	۰/۶۵۳
۱۱	۲۷	۰/۴۹۴

۴-۲-۲- مطالعات آزمایشگاهی

نمونه‌گیری از الگوهای حفاری برای انجام آزمایش‌های مکانیک سنگی در حین ثبت زمان سرعت حفاری انجام شد. برای بررسی خصوصیات ژئومکانیکی توده‌سنگ‌های در برگزیده، از هر الگو یک نمونه سنگی بزرگ و یک نمونه دستی برای تعیین مقاومت فشاری تک محوری و چگالی جمع‌آوری شده و به آزمایشگاه ارسال گردید. شکل ۴-۲ موقعیت مکانی الگوهای حفاری را نشان می‌دهد.

۴-۲-۲-۱- نمونه‌برداری

صحت آزمایش‌های مکانیک سنگی وابستگی شدیدی به تهیه نمونه خوب از توده‌سنگ مورد مطالعه دارد. بدین منظور باید شرایطی برای نمونه در نظر گرفته شود تا نمونه معرف شرایط توده سنگ مورد مطالعه باشد. نمونه تا حد امکان باید عاری از درزه، شکاف یا پرشدگی ثانویه باشد. نمونه نباید از سطح



شکل ۴-۲- موقعیت مکانی الگوهای حفاری

- گسل خورده تهیه گردد. هر گونه اشتباه در انتخاب نمونه منجر به خطای زیادی در جواب آزمایشها خواهد شد. با توجه به شرایط فوق، نمونه از توده سنگ‌های مورد مطالعه گرفته شد. از هر سینه کار تعداد دو یا سه نمونه سنگی به ابعاد تقریبی $20 \times 30 \times 20$ سانتی متر برای آزمایش‌های مکانیک سنگی انتخاب و به آزمایشگاه منتقل شد.

۴-۲-۲-۲- آماده سازی نمونه‌ها

پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه، کدگذاری بر اساس توده سنگ و موقعیت مورد مطالعه صورت گرفت. نمونه‌ها باید به درستی در دستگاه مغزه‌گیر ثابت شوند، در غیر این صورت امکان شکستن، گیر کردن و تاب برداشتن نمونه وجود دارد. در شکل‌های ۴-۳ تا ۴-۶ مراحل آماده‌سازی نشان داده شده است.



شکل ۴-۴- دستگاه برش اتوماتیک سنگ



شکل ۴-۳- دستگاه مغزه‌گیری سنگ



شکل ۴-۶- نحوه آماده سازی نمونه برای آزمایش مقاومت فشاری تک محوری و سرعت صوت



شکل ۴-۵- نمونه‌های تهیه شده برای انجام آزمایش‌ها

۴-۲-۳- آزمایش تعیین مقاومت فشاری تک محوری

آزمایش مقاومت فشاری تک محوری یا نامحصور (UCS) مرسوم‌ترین آزمون آزمایشگاهی برای مطالعات مکانیکی سنگ بکر می‌باشد که با وجود ظاهری ساده، انجام دقیق آن بسیار مشکل است. این آزمایش به عنوان آزمایش پایه در اکثر پروژه‌های مهندسی انجام گرفته و به ندرت اتفاق می‌افتد که در پروژه‌ای مقاومت فشاری تک محوری مورد نیاز نباشد. با توجه به اهمیت مقاومت فشاری تک محوری و همچنین اهمیت ویژه آن در طبقه بندی قابلیت حفاری RDi، نمونه‌های استوانه‌ای تهیه و مورد آزمایش قرار گرفت.

آزمایش مقاومت فشاری تک محوری بر اساس استاندارد ISRM سال ۱۹۸۶ بر روی این مغزه‌ها انجام شد (فهیمی فر، ۱۳۸۰). نمونه‌ها باید تحت نرخ بارگذاری ۱-۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه، در زمان ۵ تا ۱۰ دقیقه شکسته شوند (شکل ۴-۷). در لحظه شکست حداکثر نیروی اعمالی ثبت می‌شود. در نهایت محاسبات صورت گرفته و نمودار تنش- کرنش ترسیم می‌شود.



شکل ۴-۷- دستگاه مورد استفاده در آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری در جدول ۴-۳ آورده شده است.

جدول ۴-۳- نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

شماره الگو حفاری	مقاومت فشاری (MPa)
۱	۱۹۱/۷
۲	۱۲۶/۱۱
۳	۱۷۷/۷۱
۴	۹۹/۹۲
۵	۹۷/۳
۶	۲۴۱/۵۴
۷	۲۰۶/۹۳
۸	۱۸۱/۳۲
۹	۱۷۱/۹۷
۱۰	۱۳۶/۲۶
۱۱	۲۲۷/۰۱

۴-۲-۲-۴- آزمایش مقاومت کششی برزیلی

این آزمایش برای تعیین مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای سنگ بکر به طور غیر مستقیم به کار

می‌رود. این آزمایش مبتنی بر واقعیت تجربی است. آزمایش فوق بر اساس استاندارد ISRM انجام شد.

شکل ۴-۸ لحظه شکست نمونه ۵-۱۵-۱۳ را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۸- نمایش از آزمایش مقاومت کششی برزیلی در لحظه شکست

در این آزمایش بطور پیوسته و یکنواخت بار فشاری را اعمال کرده تا نمونه ظرف مدت ۱۵ تا ۳۰ ثانیه شکسته شود. حداکثر نیروی اعمالی ثبت شده و محاسبات انجام می‌شود. نتایج آزمایش‌ها در جدول ۴-۴ آورده شده است

جدول ۴-۴- نتایج آزمایش مقاومت کششی برزیلی

شماره الگو حفاری	مقاومت کششی (MPa)
۱	۱۷/۳
۲	۱۱/۲۰۶
۳	۱۶/۷۶
۴	۱۱/۳۶
۵	۶/۷۳
۶	۲۱/۴۸
۷	۱۷/۶۱
۸	۱۵/۴۴
۹	۱۴/۹
۱۰	۹/۳۲
۱۱	۱۹/۷۸

۴-۲-۵- آزمایش تعیین چگالی و تخلخل

چگالی سنگ تابع منافذ، درزها، شکافها و سایر فضاهای باز موجود در سنگ می‌باشد. تعیین چگالی و تخلخل با استفاده از روش اشباع و غوطه‌ورسازی و طبق استاندارد ISRM انجام می‌گردد (فهیمی‌فر، ۱۳۸۰). در شکل‌های ۴-۹ و ۴-۱۰ ترازو و کوره مربوط به این آزمایش مشاهده می‌شوند. نتایج مربوط به آزمایش در جدول ۴-۵ آورده شده است.



شکل ۴-۱۰- کوره برای خشک کردن نمونه‌ها (آون)



شکل ۴-۹- ترازو و وان آب با سبد سیمی

جدول ۴-۵- نتایج آزمایش چگالی و تخلخل

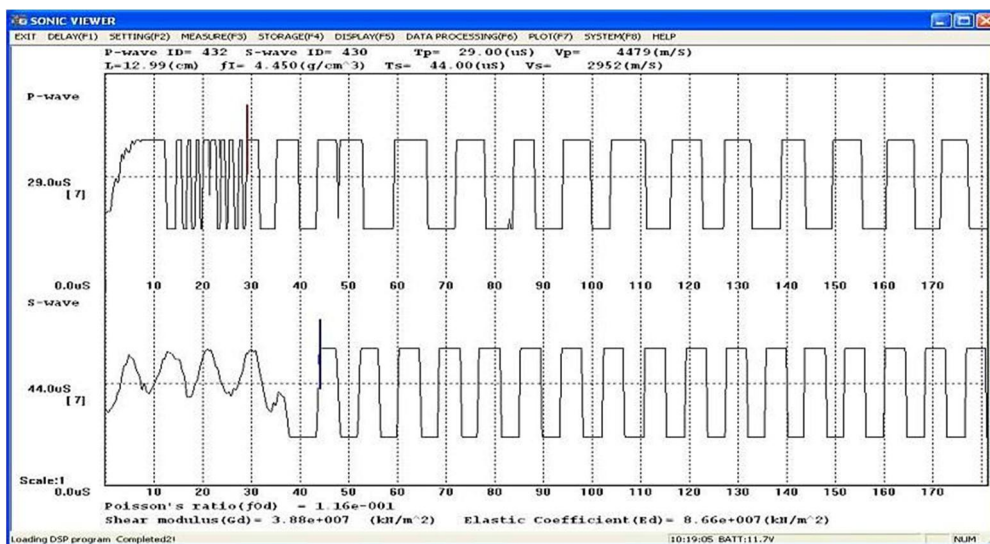
شماره الگو حفاری	چگالی (gr/cm^3)	تخلخل (%)
۱	۴/۴۲	۱/۲
۲	۴/۷۴	۱/۵۹
۳	۴/۷۳	۱/۳
۴	۴/۶۹	۲/۲۹
۵	۴/۸۷	۳/۰۹
۶	۳/۲۷	۰/۵۳
۷	۳/۶۷	۱/۴۴
۸	۴/۱۸	۱/۲۹
۹	۴/۲۵	۱/۶۲
۱۰	۴/۱۵	۲/۲۴
۱۱	۴/۳۹	۱/۶۹

۴-۲-۶- آزمایش غیر مخرب سرعت صوت و تعیین ثابت الاستیک دینامیک سنگ

امروزه استفاده از روش‌های دینامیکی برای برآورد دقیق و سریع ثابت‌های الاستیک در مهندسی سنگ کاملاً پذیرفته شده است و از آنجایی که این آزمایش‌ها غیر مخرب هستند، مورد استقبال زیادی قرار گرفته‌اند. دستگاه مورد استفاده در آزمایش سرعت صوت در شکل ۴-۱۱ نشان داده شده است. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها آزمایش مطابق استاندارد انجام شده و مقادیر ثابت الاستیک قابل اندازه‌گیری نمونه با استفاده از نرم‌افزار دستگاه و روابط موجود محاسبه گردید. شکل ۴-۱۲ نشان‌دهنده سرعت موج فشاری و برشی می‌باشد.



شکل ۴-۱۱- نمایی از دستگاه آزمایش سرعت صوت



شکل ۴-۱۲- نمودار سرعت موج فشاری و برشی

نتایج آزمایش غیر مخرب سرعت صوت در جدول ۴-۶ آورده شده است.

جدول ۴-۶- نتایج آزمایش غیر مخرب صوت

شماره الگوی حفاری	سرعت موج برشی (m/s)	سرعت موج فشاری (m/s)	مدول دینامیکی (GPa)
۱	۲۷۵۵	۵۶۶۵	۹۰/۲۵
۲	۲۷۶۱	۴۹۹۶	۹۰/۴۷
۳	۲۸۲۴	۴۷۶۳	۹۲/۷۲
۴	۲۳۸۱	۴۶۴۳	۷۰/۲۸
۵	۱۹۷۸	۳۸۷۶	۵۰/۴۵
۶	۳۳۱۱	۵۷۸۳	۹۰/۰۶
۷	۲۸۳۱	۵۲۹۱	۷۶/۴۴
۸	۳۰۳۰	۵۵۱۰	۹۸/۴۹
۹	۲۶۳۷	۵۲۳۰	۷۸/۵۹
۱۰	۲۵۷۰	۴۵۸۸	۶۹/۷
۱۱	۳۰۵۰	۵۵۲۶	۱۰۴/۶

۴-۲-۳- تعیین امتیاز RD_i توده‌سنگ‌های در برگیرنده الگوهای حفاری

با توجه به طبقه‌بندی قابلیت حفاری RD_i، پارامترهای مؤثر بر قابلیت حفاری و نحوه امتیازدهی به

هر کدام از پارامترها و طبقه‌بندی قابلیت حفاری به صورت جدول ۴-۷ و جدول ۴-۸ می‌باشند.

در سیستم RD_i به منظور امتیازدهی به مقادیر مختلف هر پارامتر، بیشترین امتیاز به بهترین

وضعیت داده شده است. براین اساس ۷۰٪، ۵۰٪، ۲۵٪ و ۱۰٪ امتیاز ماکزیمم به ترتیب حالت‌های

متوسط-سریع، متوسط، آهسته-متوسط و آهسته اختصاص یافته است (اعداد بسته به شرایط گرد شده‌اند).

در طبقه‌بندی RD_i، برای قضاوت استاندارد در نقاط مرزی و شرایط خاص استثناء در نظر گرفته

شده است. اگر توده‌سنگ مورد مطالعه دارای لایه‌بندی و ورقه‌ای باشد به دلیل سهولت فرآیند حفاری،

امتیاز ۱۲ در نظر گرفته شده است و یا اگر پرشدگی درزه‌ها به صورت خاک یا پودر باشد، امتیاز ۷ برای

پرکننده در نظر گرفته شده است.

جدول ۴-۹- برداشت الگوهای حفاری بر اساس قابلیت حفاری RDi

جدول ۴-۷- طبقه بندی اندیس قابلیت حفاری توده سنگ RDi (Hoseinie et al. 2008)

متخلخل	خرد شده	دانه‌ای	پرفیری	متراکم	بافت
-	۵<	۲-۵	۰/۰۵-۱ و ۲-۵	۰/۰۵-۱	اندازه دانه (mm)
۱۵	۱۰	۷	۴	۱	امتیاز
۱-۳	۳-۴/۵	۴/۵-۶	۶-۷	>۷	سختی موهس
خیلی نرم	نسبتاً نرم	نسبتاً سخت	سخت	خیلی سخت	توصیف
۱۸	۱۳	۹	۴	۱	امتیاز
۱-۲۵	۲۵-۵۰	۵۰-۱۰۰	۱۰۰-۲۰۰	۲۰۰<	مقاومت فشاری تک محوره (MPa)
مقاومت خیلی کم	مقاومت کم	مقاومت متوسط	مقاومت زیاد	مقاومت خیلی زیاد	توصیف
۲۲	۱۶	۱۱	۶	۲	امتیاز
۲<	۱-۲	۰/۵-۱	۰/۱۵-۰/۵	۰-۰/۱۵	فاصله‌داری درزه‌ها (m)
۱۸	۱۳	۹	۵	۱	امتیاز
درزه بسته (۰-۲)	۲۰<	۱۲-۲۰	۹-۱۲	۲-۹	باز شدگی و پرشدگی درزه‌ها (mm)
۱۵	۱۰	۷	۴	۱	امتیاز
۷۰-۹۰	۵۵-۷۰	۳۵-۵۵	۲۰-۳۵	۰-۲۰	زاویه مابین درزه و محور چال
۱۲	۸	۶	۳	۱	امتیاز (Deg)

جدول ۴-۸- پیش‌بینی نرخ نفوذ حفاری در توده‌سنگ با استفاده از RDi (Hoseinie et al. 2008)

۸۰-۱۰۰	۶۰-۸۰	۴۰-۶۰	۲۰-۴۰	۷-۲۰	RDi
تند	متوسط-تند	متوسط	کند-متوسط	کند	پیش‌بینی سرعت حفاری

با توجه به مشخصات توده‌سنگ در برگزیده الگوهای حفاری مورد مطالعه در روش RDi، خصوصیات مقاومتی سنگ، چگالی، سختی موهس و سه مشخصه اصلی سیستم درزه‌ها شامل فاصله‌داری، جهت‌یافتگی و نیز شرایط پرکننده درزه‌ها، مورد بررسی قرار گرفت.

بدین منظور شرح کلی توده‌سنگ، بافت، شیب و امتداد درزه، بازشدگی، پرشدگی و سختی چکش اشمیت ۱۱ الگوی حفاری مورد ارزیابی دقیق قرار گرفت. اطلاعات در فرم مربوط به هر الگو یادداشت شده و امتیاز هر الگو محاسبه شد. فرم برداشت الگوهای حفاری ۱ و ۲ در جدول ۴-۹ آورده شده است.

نوع سنگ: مگنتیت	شماره سایت: ۱	نوع سنگ: مگنتیت	شماره سایت: ۲
پارامترهای مربوط به اندیس قابلیت حفاری		پارامترهای مربوط به اندیس قابلیت حفاری	
شرح توده سنگ	بلوکی تا کمی خرد شده	شرح توده سنگ	خرد شده تا کمی بلوکی
بافت	متراکم	بافت	پرفیری
سختی موهس	۴.۵	سختی موهس	۴.۵
مقاومت فشاری تک محوره (MPa)	۱۹۱	مقاومت فشاری تک محوره (MPa)	۱۲۶
فاصله داری درزه ها (cm)	۵۰-۲۰ و کمی ۱۵۰	فاصله داری درزه ها (cm)	۲۰
بازشدگی درزه ها (mm)	۵-۱۰	بازشدگی درزه ها (mm)	۵
پر شدگی	کلسیت - شیست	پر شدگی	تالک
زاویه بین درزه و محور چال (Deg)	۲۰	زاویه بین درزه و محور چال (Deg)	۵۰
اندیس قابلیت حفاری RDi	۴۵	اندیس قابلیت حفاری RDi	۴۹

امتیاز RDi توده سنگ در برگیرنده الگوهای حفاری در جدول ۴-۱۰ آورده شده است.

جدول ۴-۱۰- امتیاز RDi الگوهای حفاری مورد مطالعه

شماره الگو	Te.	H.	UCS	J.S.	D.o.F	Ang.	RDi	Classification
۱	۱	۱۳	۶	۹	۱۵	۱	۴۵	متوسط
۲	۴	۱۳	۶	۵	۱۵	۸	۴۹	متوسط
۳	۱	۹	۶	۹	۱۵	۶	۴۶	متوسط
۴	۱	۹	۱۱	۹	۱۵	۳	۴۸	متوسط
۵	۱	۱۳	۱۱	۹	۱۵	۱	۵۰	متوسط
۶	۱	۹	۲	۵	۱۵	۶	۳۸	کند- متوسط
۷	۱	۱۳	۲	۵	۱۵	۸	۴۴	متوسط
۸	۱	۱۳	۶	۱۳	۷	۶	۴۶	متوسط
۹	۱	۹	۶	۹	۱۵	۳	۴۳	متوسط
۱۰	۴	۱۳	۶	۵	۱۵	۳	۴۶	متوسط
۱۱	۳	۹	۲	۵	۱۵	۶	۴۱	متوسط

Te: بافت، H: سختی موهس، UCS: مقاومت فشاری، J.S.: فاصله داری، D.o.F: ابعاد پرکننده، Ang: زاویه بین چال و درزه.

۴-۳- بررسی ارتباط بین پارامترهای مکانیک سنگی و RDi با سرعت حفاری

در این مرحله پس از ثبت سرعت حفاری در الگوهای مختلف و اخذ نمونه‌های لازم از هر الگو،

آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی بر روی نمونه‌ها انجام شد و در نهایت با برداشت اطلاعات لازم برای تعیین

امتیاز RDi ، امتیاز قابلیت حفاری هر یک از این الگوها تعیین شده که نتایج این عملیات به‌طور خلاصه در

جدول ۴-۱۱ درج شده است.

جدول ۴-۱ - نتایج مطالعات آزمایشگاهی الگوهای حفاری

DR (m/min)	RDI	Brittleness				E _{Dyn} (GPa)	V _p (m/s)	V _s (m/s)	Density (g/cm ³)	Prosity (%)	σ _t (MPa)	σ _c (MPa)	R _n	جنس سنگ	شماره سایت
		B ₄	B ₃	B ₂	B ₁										
۰/۵۵۷	۴۵	۴۰/۷۲	۱۶۵۸/۲۴	۰/۸۳	۱۱/۰۸	۹۰/۲۵	۲۷۵۵	۴/۴۲	۱/۲	۱۷/۳	۱۹۱/۷	۵۸/۹۷	مگنتیت	۱	
۰/۶۸۲	۴۹	۲۶/۵۸	۷۰۶/۵۷	۰/۸۴	۱۱/۲۵	۹۲/۴۷	۲۷۶۱	۴/۷۴	۱/۵۹	۱۱/۲	۱۲۶/۱۱	۵۰/۲۴	مگنتیت	۲	
۰/۶۲۸	۴۶	۳۸/۵۹	۱۲۸۹/۱۷	۰/۸۳	۱۰/۰۶	۹۲/۷۲	۲۸۲۴	۴/۷۳	۱/۳	۱۶/۷۶	۱۷۷/۷۱	۵۶/۲۱	مگنتیت	۳	
۰/۷۶	۴۸	۳۳/۸۲	۵۶۷/۵۵	۰/۸	۸/۷۹	۷۰/۲۸	۳۳۸۱	۴/۶۹	۲/۲۹	۱۱/۳۶	۹۹/۹۲	۴۶/۷۷	مگنتیت	۴	
۰/۸۷	۵۰	۱۸/۰۹	۳۲۷/۴۲	۰/۸۷	۱۴/۴۵	۵۰/۴۵	۱۹۷۸	۴/۸۷	۳/۰۹	۶/۷۳	۹۷/۳	۴۰/۵۶	مگنتیت	۵	
۰/۳۹	۳۸	۵۰/۹۳	۲۵۹/۴۱	۰/۸۴	۱۱/۲۴	۹۰/۰۶	۳۳۱۱	۳/۲۷	۰/۵۳	۲/۱۴۸	۲۴۱/۵۴	۶۳/۰۲	مگنتیت	۶	
۰/۵۰۷	۴۴	۴۲/۶۸	۱۸۲۱/۹۸	۰/۸۴	۱۱/۷۵	۷۷/۲۶	۲۸۲۶	۳/۶۷	۱/۴۴	۱۷/۶۱	۲۰۶/۹۳	۵۸/۲۴	مگنتیت	۷	
۰/۶۱	۴۶	۳۷/۴۱	۱۴۹۹/۷۷	۰/۸۴	۱۱/۷۴	۹۸/۴۹	۳۰۳۰	۴/۱۸	۱/۲۹	۱۵/۴۴	۱۸۱/۳۲	۵۴/۹۷	مگنتیت	۸	
۰/۴۹	۴۳	۳۵/۷۹	۱۲۸۱/۱۸	۰/۸۴	۱۱/۵۴	۷۸/۵۹	۲۶۳۷	۴/۲۵	۱/۶۲	۱۴/۹	۱۷۱/۹۷	۵۵/۴۷	مگنتیت	۹	
۰/۶۵۳	۴۶	۲۵/۲	۶۳۴/۹۷	۰/۸۷	۱۴/۶۲	۶۹/۷	۲۵۷۰	۴/۱۵	۲/۲۴	۹/۳۲	۱۳۶/۲۶	۴۹/۴۶	باطله	۱۰	
۰/۴۹۴	۴۱	۴۷/۳۸	۲۲۴۵/۱۳	۰/۸۴	۱۱/۴۷	۱۰۴/۶	۳۰۵۰	۴/۳۹	۱/۶۹	۱۹/۷۸	۲۲۷/۰۱	۶۱/۹	مگنتیت	۱۱	

R_n: عدد چکش اشمیت، σ_c: مقاومت فشاری تک محوری، σ_t: مقاومت کششی، Prosity: تخلخل، Density: چگالی، V_s: سرعت موج برشی، V_p: سرعت موج فشاری، E_{Dyn}: مدول الاستیسیته دینامیکی، Brittleness: تردی، * DR: سرعت متوسط حفاری، RDI: اندیس قابلیت حفاری

$$* B_1: \sigma_c/\sigma_t, B_2: (\sigma_c - \sigma_t)/(\sigma_c + \sigma_t), B_3: \sigma_c \sigma_t / 2, B_4: \sqrt{B_3}$$

در این مرحله 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 دورانی و شاخص RD_i انجام شد. علاوه بر بررسی ارتباط سرعت حفاری با RD_i، ارتباط سرعت حفاری با دیگر پارامترهای مکانیکی سنگ انجام شد که در ادامه آورده شده است.

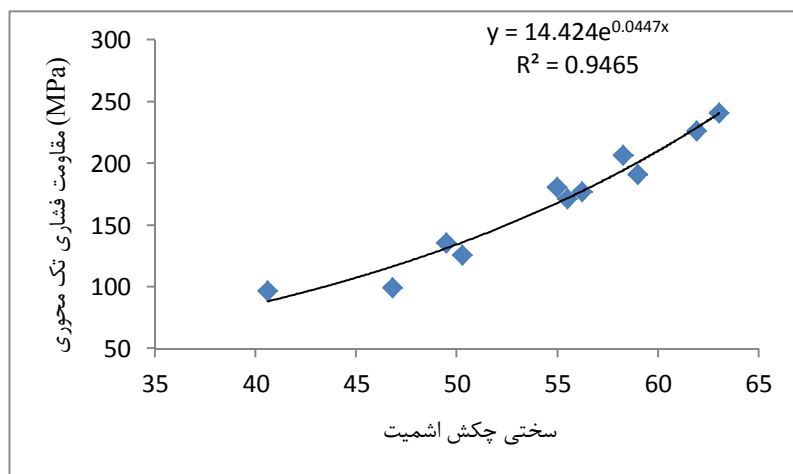
یکی از موارد مهمی را که در بررسی مدل‌های آماری می‌بایست به آن توجه داشت، وجود ضرایب منطقی در مدل می‌باشد. ضرایب منطقی در یک مدل به معنی پیروی مدل از طبیعت ذاتی فرایند می‌باشد. به عبارت دیگر یک مدل آماری زمانی دارای اعتبار علمی می‌باشد که بتواند تحت هر شرایطی، مقادیر درستی از فرایند را پیش‌بینی کند. در تحقیق حاضر، روند طبیعی و منطقی هر یک از مدل‌ها با توجه به طبیعت ذاتی فرایند مورد بررسی قرار گرفت. چگونگی روند این تغییرات نسبت به تغییر هر یک از متغیرهای مدل بررسی شده است.

با استفاده از داده‌های برداشت شده از الگوهای حفاری و نتایج آزمایشگاهی، ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوری با سختی چکش اشमित تعیین گردید. با توجه به این که انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوری برای تمامی نقاط مورد مطالعه ضرورت و توجیه اقتصادی ندارد، بنابراین پس از بررسی نتایج آزمایش‌ها، ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوری و سختی چکش اشमित با ضریب تعیین^۱ ۹۴/۶۵ درصد به صورت نمودار شکل ۴-۱۳ تعیین گردید. با افزایش سختی اشमित مقاومت فشاری به صورت نمایی افزایش می‌یابد و از رابطه زیر برای محاسبه مقاومت فشاری تک محوری با توجه به عدد سختی چکش اشमित نقاط می‌توان استفاده کرد:

$$UCS = 14.424 \times e^{0.0447R_n} \quad (1-4)$$

که در رابطه فوق UCS، مقاومت فشاری تک محوری (MPa) و R_n، سختی چکش اشमित می‌باشد.

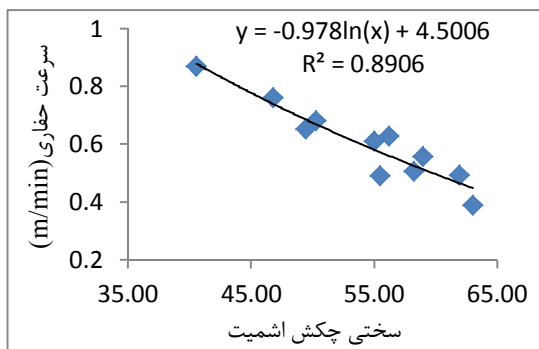
¹ Coefficients of determination (R²)



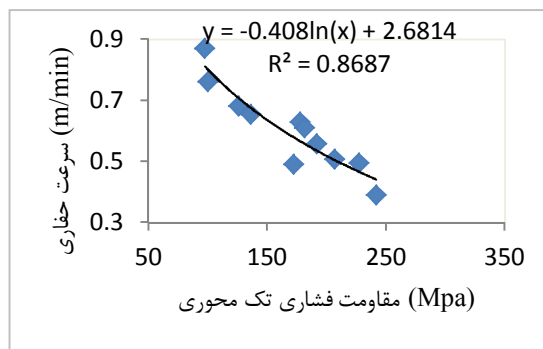
شکل ۴-۱۳- رابطه بین سختی چکش اشمیت و مقاومت فشاری تک محوری

ارتباط پارامترهای مکانیک سنگی مؤثر بر قابلیت حفاری با سرعت حفاری بررسی شده است که

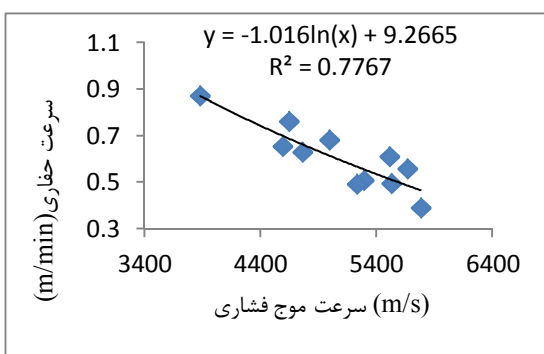
نتایج آن در شکل‌های ۴-۱۴ تا ۴-۲۳ آورده شده است.



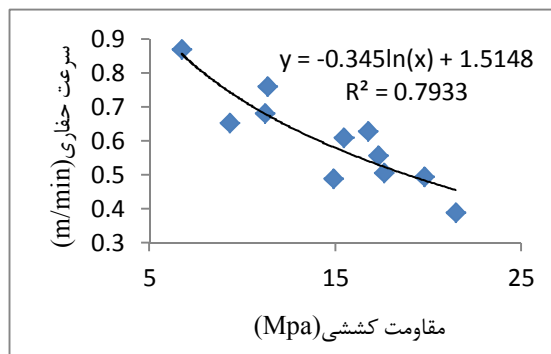
شکل ۴-۱۵- رابطه بین سختی چکش اشمیت و سرعت حفاری



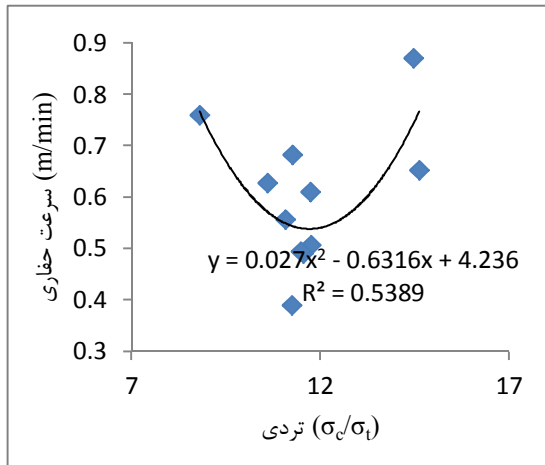
شکل ۴-۱۴- رابطه بین مقاومت فشاری تک محوری و سرعت حفاری



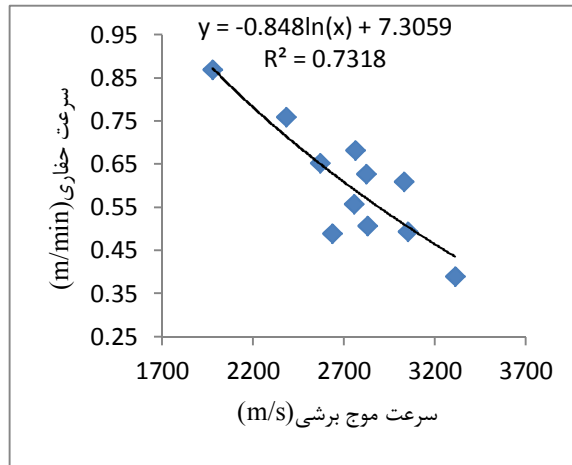
شکل ۴-۱۷- رابطه بین سرعت موج فشاری و سرعت حفاری



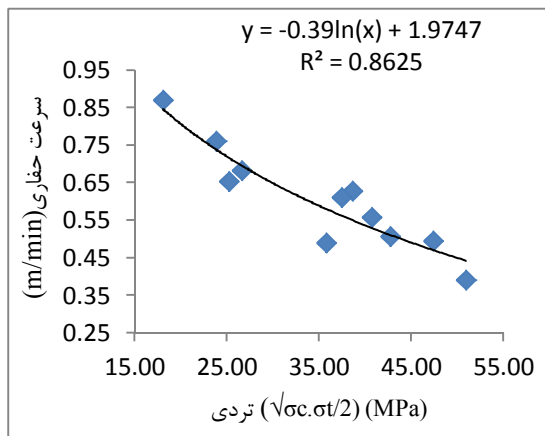
شکل ۴-۱۶- رابطه بین مقاومت کششی برزیلی و سرعت حفاری



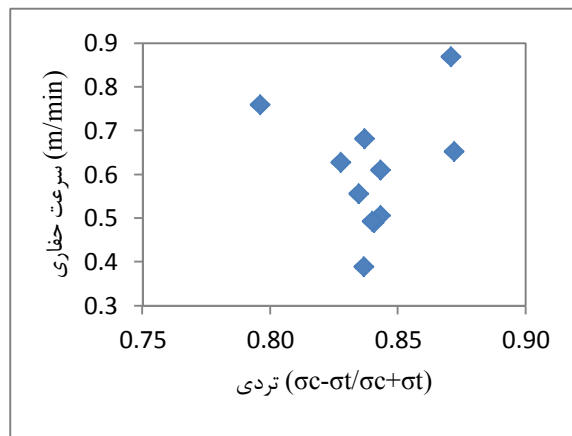
شکل ۴-۱۹- رابطه بین تدری (B₁) و سرعت حفاری



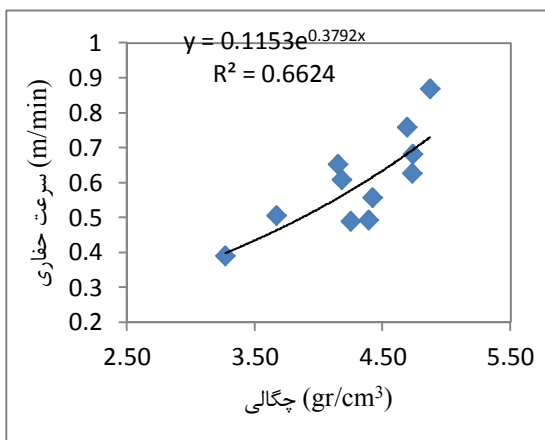
شکل ۴-۱۸- رابطه بین سرعت موج برشی و سرعت حفاری



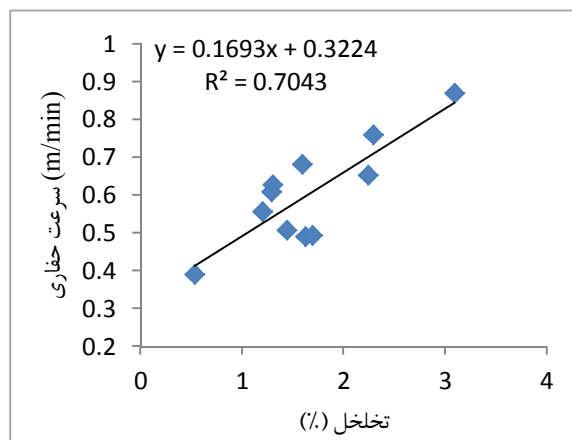
شکل ۴-۲۱- رابطه بین تدری (B₄) و سرعت حفاری



شکل ۴-۲۰- رابطه بین تدری (B₂) و سرعت حفاری



شکل ۴-۲۳- رابطه بین چگالی و سرعت حفاری



شکل ۴-۲۲- رابطه بین تخلخل و سرعت حفاری

همان‌گونه که در شکل ۴-۱۴ مشاهده می‌شود مقاومت فشاری تک محوری همبستگی خوبی با سرعت متوسط حفاری دارد و با افزایش مقاومت فشاری سرعت حفاری کاهش می‌یابد.

سختی چکش اشمیت نیز رفتاری مشابه مقاومت فشاری دارد. همان‌طوری که در شکل ۴-۱۵ مشاهده می‌شود رابطه‌ی نمایی بین سختی اشمیت و سرعت حفاری وجود دارد که با افزایش سختی چکش اشمیت، سرعت حفاری نیز کاهش می‌یابد.

مطابق شکل ۴-۱۶ مقاومت کششی برزیلی با ضریب تعیین ۷۹٪ با سرعت حفاری ارتباط دارد. با افزایش مقاومت کششی سرعت حفاری به صورت نمایی کاهش می‌یابد.

سرعت موج فشاری و سرعت موج برشی رابطه‌ای نمایی با سرعت متوسط حفاری داشته و با افزایش سرعت صوت، سرعت متوسط حفاری کاهش می‌یابد (شکل‌های ۴-۱۷ و ۴-۱۸).

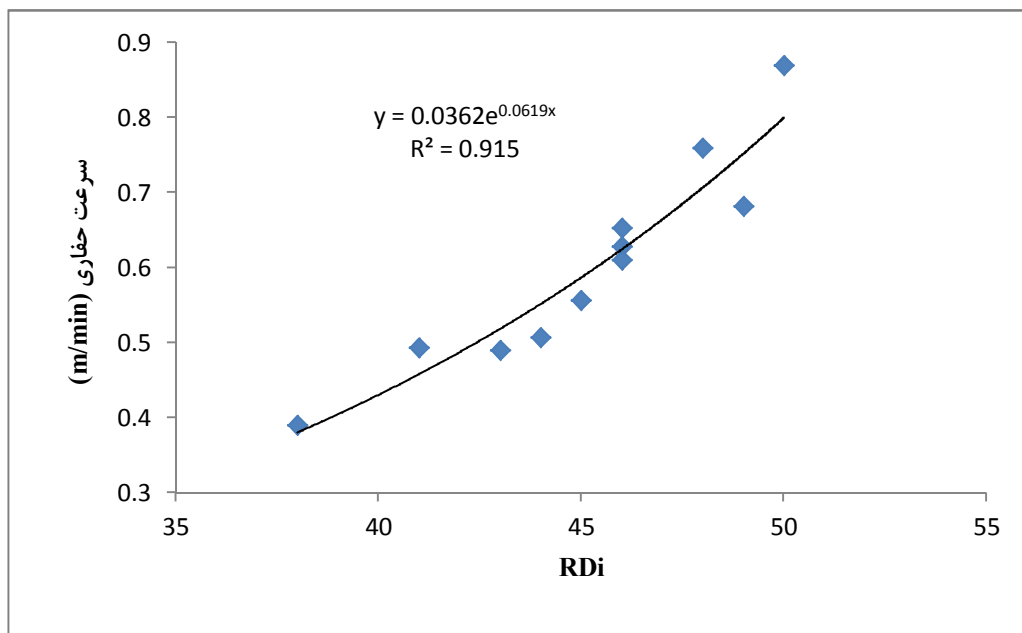
در سال‌های اخیر ارزیابی و بررسی تردی و به دست آوردن روابط آن با پارمترهای حفاری رواج پیدا کرده است. تردی بر اساس مقاومت فشاری و مقاومت کششی محاسبه می‌شود. در شکل‌های ۴-۱۹ تا ۴-۲۱ ارتباط سه مفهوم تردی و سرعت متوسط حفاری مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود که رابطه تردی (B₄) ارائه شده توسط آلتینداگ از ضریب تعیین بیشتری برخوردار است (Altindag, 2008).

تخلخل به صورت خطی با متوسط سرعت حفاری رابطه دارد و با افزایش میزان تخلخل، میزان مقاومت مکانیکی سنگ کاهش یافته و سرعت حفاری افزایش می‌یابد (شکل ۴-۲۲).

چگالی نیز رابطه‌ای نمایی با سرعت حفاری دارد (شکل ۴-۲۳). بر اساس تئوری، این رابطه می‌بایست کاهشی باشد اما با افزایش چگالی میزان سرعت حفاری نیز افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد که شرایط پیچیده زمین‌شناسی و گسل‌خوردگی ناحیه مورد مطالعه و اختلاف ناچیز مقادیر چگالی، باعث چنین رفتاری شده باشد.

همان طوری که مشاهده می‌شود روابط معناداری بین پارامترهای ذکر شده و سرعت متوسط حفاری وجود دارد. اما در واقعیت امر فرآیند حفاری از پارامترهای بسیاری تأثیر می‌پذیرد و نمی‌توان همبستگی آن با یک پارامتر را به عنوان معیار در نظر گرفت.

در شکل ۴-۲۴ رابطه بین شاخص قابلیت حفاری RD_i و سرعت حفاری نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش شاخص RD_i سرعت حفاری دورانی به صورت نمایی افزایش می‌یابد. میزان همگرایی قابل قبول به دست آمده مؤید این واقعیت است که با استفاده از شاخص RD_i و رابطه ریاضی زیر می‌توان سرعت حفاری را به نحو مطلوبی پیش‌بینی نمود:



شکل ۴-۲۴- رابطه بین قابلیت حفاری RD_i و سرعت حفاری

$$Drilling\ Rate = 0.0362 \times e^{0.0619RD_i} \quad (R^2 = 0.915) \quad (۲-۴)$$

که در رابطه فوق:

RD_i : اندیس قابلیت حفاری

Drilling Rate: سرعت حفاری دستگاه بر حسب متر بر دقیقه می‌باشد.

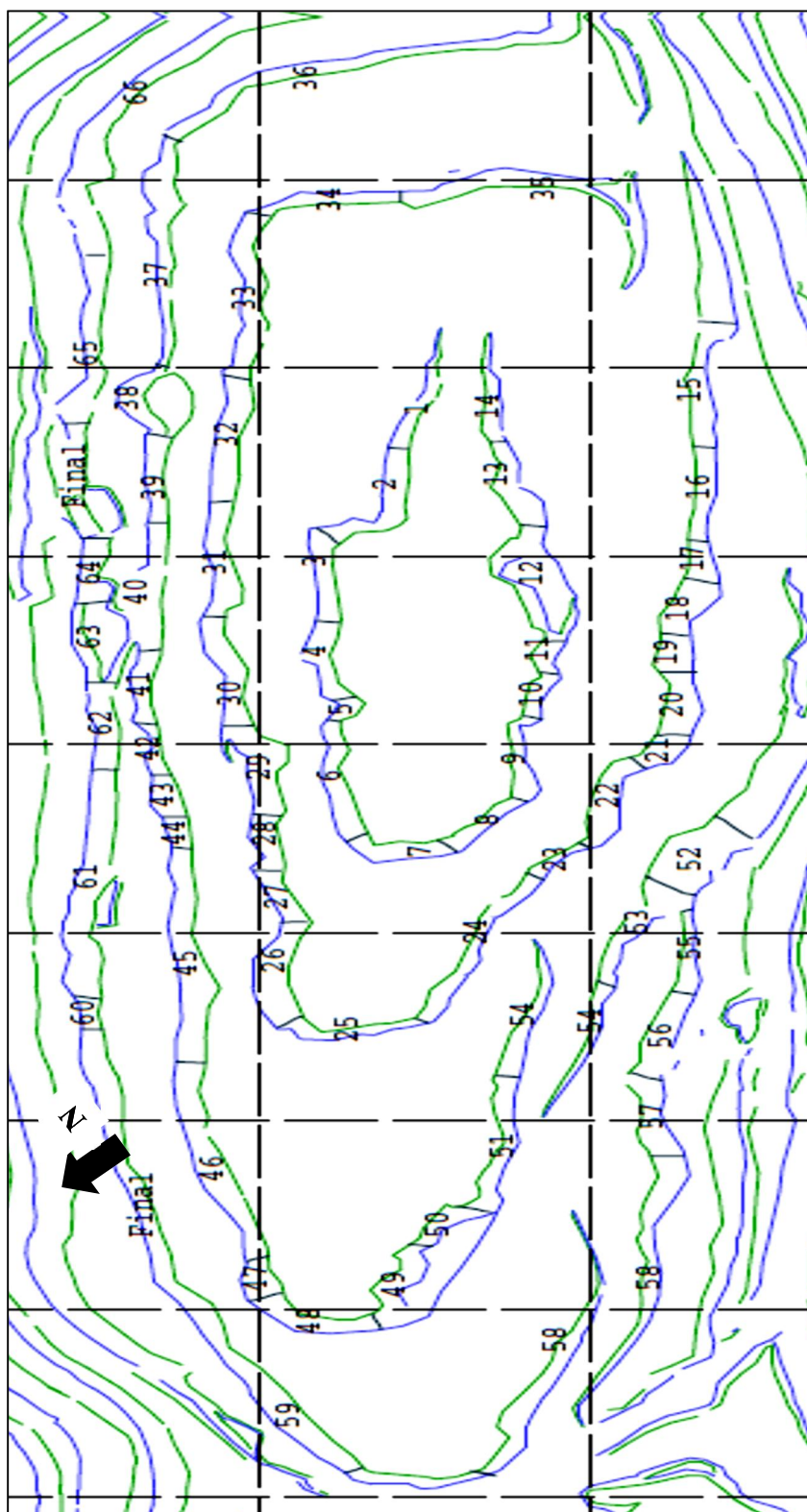
در بخش‌های بعدی از این رابطه برای پیش‌بینی سرعت حفاری در زون‌های مختلف معدن استفاده خواهد شد.

۴-۴- زون‌بندی محدوده معدن بر اساس قابلیت حفاری RD_i

بعد از انجام مطالعات میدانی و آزمایشگاهی، نتایج حاصل از هر کدام از توده‌سنگ‌های برداشت شده مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت زون‌های مورد مطالعه بر اساس خصوصیات برداشت شده و نتایج آزمایشگاهی و بر اساس طبقه‌بندی قابلیت حفاری RD_i امتیازدهی شدند.

در این تحقیق سعی شده است تا تمامی سنگ‌های معدن از نظر ژئومکانیکی مورد مطالعه دقیق قرار گیرد. برای دستیابی به این هدف باید در هر نقطه از معدن که توده‌سنگ‌های تپیک و معرف مناسبی مشاهده شد، به صورت سیستماتیک و منظم برداشت شده و اطلاعات مربوط به قابلیت حفاری ثبت گردد. برای برداشت خصوصیات توده‌سنگ‌های معدن گل‌گهر و تعیین اندیس قابلیت حفاری (RD_i)، هر پله با توجه به وضعیت زمین‌شناسی و رخنمون به زون‌های کوچکتری تقسیم می‌گردد. با این روش جزییات بیشتری از سینه کار بر اساس تغییرات محیطی و تغییرات بافتی لحاظ می‌گردد.

با توجه به ساختار کلی زمین‌شناسی معدن در مجموع ۶۶ زون مناسب و متفاوت، از نظر توده‌سنگ مورد مطالعه قرار گرفت. موقعیت زون‌های مورد مطالعه در محدوده معدن در شکل ۴-۲۵ آورده شده است. در کنار ثبت پارامترهای مربوط به قابلیت حفاری، وضعیت کلی و شرح هر توده‌سنگ نیز ثبت شده است.



شکل ۴-۲۵- نقشه زون‌های برداشت شده در پله‌های ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳

برای ثبت اطلاعات سرزمین به منظور سهولت ارزیابی و ترتیب‌بخشی و طبقه‌بندی اطلاعات، فرم‌های خاصی طراحی و مورد استفاده قرار گرفته شد. فرم برداشت پارامترهای مؤثر بر قابلیت حفاری توده‌سنگ‌های مورد مطالعه در جدول ۴-۱۲ آورده شده است.

از هر کدام از زون‌های ۶۶ گانه مورد مطالعه، یک نمونه دستی برای تعیین چگالی جمع‌آوری شده و به آزمایشگاه ارسال گردید. هدف از تهیه نمونه از هر سایت، تعیین دقیق پارامترهای مهندسی سنگ و پرهیز از کلی‌گویی و قضاوت کلی بوده است. بدین ترتیب برداشت صحرائی پله‌های ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳ انجام شده است.

جدول ۴-۱۲- فرم برداشت پارامترهای ژئومکانیکی در قابلیت حفاری RD_i

شماره سایت:	تراز:	امتیاز
		شرح توده‌سنگ
		بافت
		سختی موهس
		عدد واجهشی چکش اشمیت
		مقاومت فشاری تک محوره (MPa)
		فاصله‌داری درزه‌ها (cm)
		بازشدگی درزه‌ها (mm)
		پرشدگی
		زاویه مابین درزه و محور چال
		اندیس قابلیت حفاری RD _i

بر این اساس در برداشت صحرائی، پارامترهای بافت و اندازه دانه، سختی موهس، سختی چکش اشمیت، فاصله‌داری، بازشدگی و پرشدگی درزه‌ها و زاویه مابین درزه و محور چال مورد مطالعه قرار گرفت. برای برداشت بافت و اندازه دانه‌ها بر اساس مطالعات کانی‌شناسی صورت گرفته در معدن و مشاهدات میدانی از هر زون انجام شد. برداشت بافت توده‌سنگ‌ها بر اساس طبقه‌بندی RD_i صورت گرفته شده و نیازی به برداشت کلاسیک زمین‌شناسی نمی‌باشد.

سختی موهس توده‌سنگ‌های مورد مطالعه با استفاده از کیت سختی موهس^۱ مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های کوچکی از هر زون تهیه و سختی موهس بر اساس مقیاس سختی موهس محاسبه شد. در واقع برداشت درزه‌ها در چهار نوع سنگ عمده در معدن از جمله کوارتز شیست، گنایس، مگنتیت (پائینی) و هماتیت انجام گرفت. برداشت ناپیوستگی‌ها به روش‌های خاصی انجام می‌شود. در این تحقیق برداشت درزه‌ها بر اساس روش برداشت دسته شکستگی‌ها^۲ انجام گردید. برای این منظور دسته شکستگی‌ها توسط مشاهده در خلال برداشت منظم تعیین شده و جهت‌داری، طول و فاصله‌داری ثبت شد. داده‌های حاصل از برداشت‌های درزه بر اساس شماره سایت تفکیک و سپس اطلاعات مربوط به هر نوع سنگ بر اساس طبقه‌بندی RDi امتیاز داده شد.

فاصله‌داری، فاصله عمودی میان دو ناپیوستگی مجاور است، که معمولاً به فاصله‌داری متوسط دو ناپیوستگی از یک دسته درزه اطلاق می‌شود. فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها به مقدار زیادی اندازه بلوک‌های سنگ بکر را تعیین می‌کند. در برداشت میدانی توده‌سنگ‌های مورد مطالعه متوسط فاصله‌داری ناپیوستگی‌های هر زون در نظر گرفته شد.

باز شدگی فاصله عمودی بین دیواره‌های سنگی یک ناپیوستگی است، که این فضا ممکن است با آب یا هوا یا ماده دیگری پر شده باشد. با بررسی بازشدگی زون‌های مورد مطالعه میزان بازشدگی متوسط و نوع پرکننده آن در فرم‌های مخصوص، ثبت گردید.

برای بررسی مقاومت توده‌سنگ‌های مورد مطالعه از سختی چکش اشمیت استفاده شد. استفاده از چکش اشمیت برای تخمین مقاومت فشاری توده‌سنگ توسط دیر و میلر پیشنهاد گردیده است (Deer & Miller, 1966). روش پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ برای آزمایش به این ترتیب می‌باشد که

¹Mohs Hardness kit

² Fracture-set mapping

۲۰ آزمایش انجام می‌شود (به طوری که هر نقطه آزمایش حداقل به اندازه قطر پلانتر^۱ با نقطه قبلی فاصله داشته باشد)، و در نهایت میانگین ۱۰ مقدار بالایی عدد چکش، پس از انجام اصلاحات به عنوان عدد سختی در نظر گرفته می‌شود (Kahraman et al., 2002). در تحقیق حاضر نیز از روش پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ استفاده شد.

در هنگام برداشت اطلاعات زون‌های مختلف سعی شده تا از هر زون عکس گرفته شود تا مقایسه تصویری به عمل آورده شود. به طور مثال عکسی از زون شماره ۲۰ در شکل ۴-۲۶ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۶- نمایی از زون شماره ۲۰ واقع در جنوب پله ۱۲

نمونه‌ای از فرم‌های برداشت تکمیل شده در جدول ۴-۱۳ آورده شده است.

^۱ Plunger

جدول ۴-۱۳- برداشت پارامترهای ژئومکانیکی در قابلیت حفاری RDi

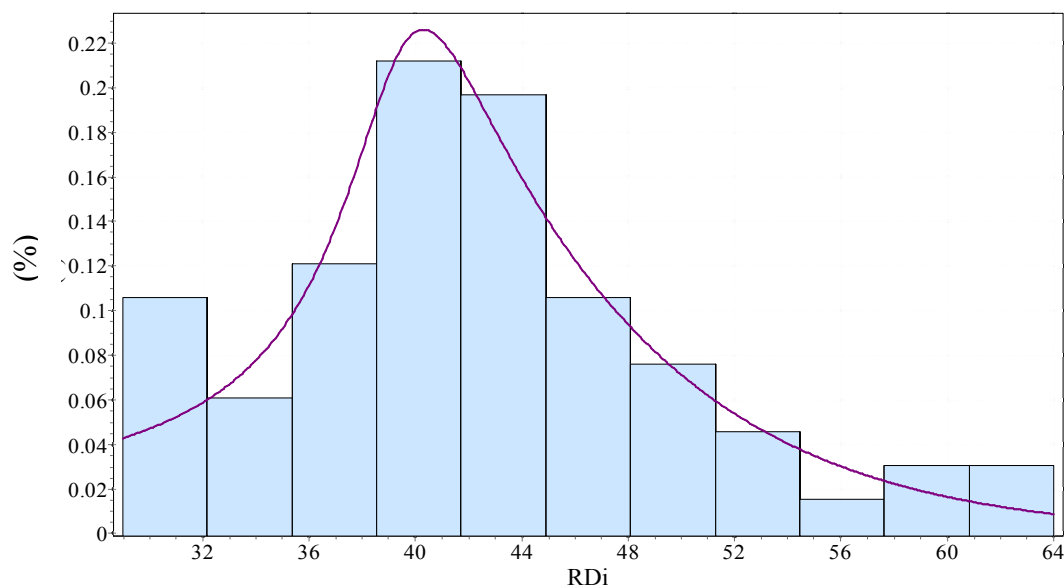
شماره سایت: ۲۵		تراز: 12W		شماره سایت: ۲۶		تراز: 12NW	
پارامترهای مربوط به اندیس قابلیت حفاری				پارامترهای مربوط به اندیس قابلیت حفاری			
	شرح توده سنگ	خرد شده و بلوکی		شرح توده سنگ	بلوکی		
	بافت	متراکم	۱	بافت	متراکم	۱	
	سختی موهس	۵	۹	سختی موهس	۵	۹	
	مقاومت فشاری تک محوره	۱۵۹	۶	مقاومت فشاری تک محوره	۲۱۶	۲	
	فاصله داری درزه ها	۳۰-۴۰	۵	فاصله داری درزه ها	۸۰-۱۵۰	۱۳	
	بازشدگی درزه ها	۲-۵	۱۵	بازشدگی درزه ها	۲-۵	۱۵	
	پرشدگی	کلسیت		پرشدگی	کلسیت		
	زاویه مابین درزه و محور چال	۵۰	۶	زاویه مابین درزه و محور چال	۲۰	۱	
	اندیس قابلیت حفاری RDi		۴۲	اندیس قابلیت حفاری RDi		۴۱	



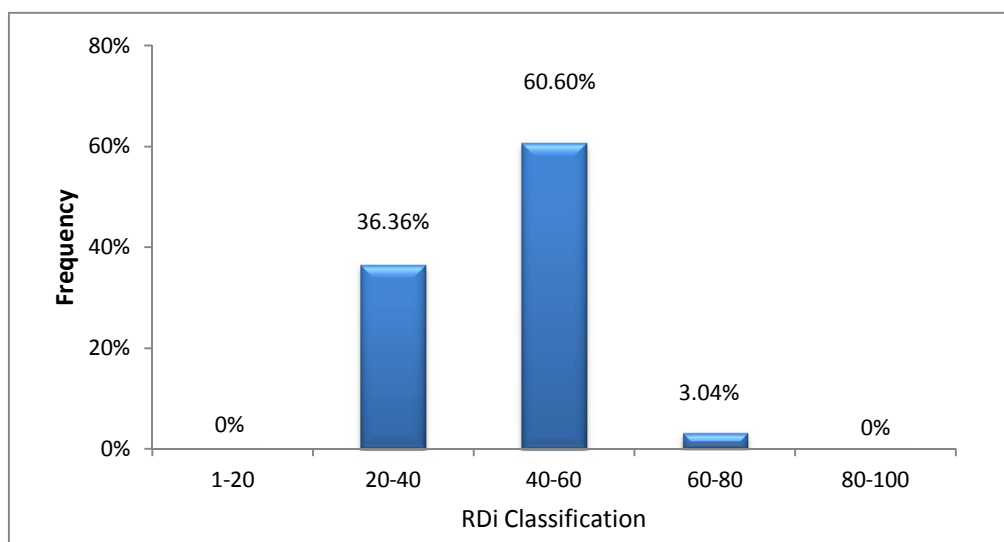
پس از برداشت صحرایی و تعیین امتیاز پارامترهای مورد نظر، مقدار قابلیت حفاری برای هر یک از

زون‌های ۶۶ گانه مورد مطالعه بر اساس اندیس قابلیت حفاری RDi تعیین گردید.

شکل ۴-۲۷ هیستوگرام مربوط به امتیاز RD_i زون‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همان‌طوری که در شکل دیده می‌شود بیش از ۴۰٪ زون‌ها، اندیس قابلیت حفاری بین ۴۰ تا ۴۴ دارند. همان‌طوری که در نمودار شکل ۴-۲۸ نشان داده شده است معدن در سه کلاس RD_i طبقه‌بندی شده است که بیش از ۶۰٪ زون‌های معدن در کلاس متوسط قرار گرفته‌اند.



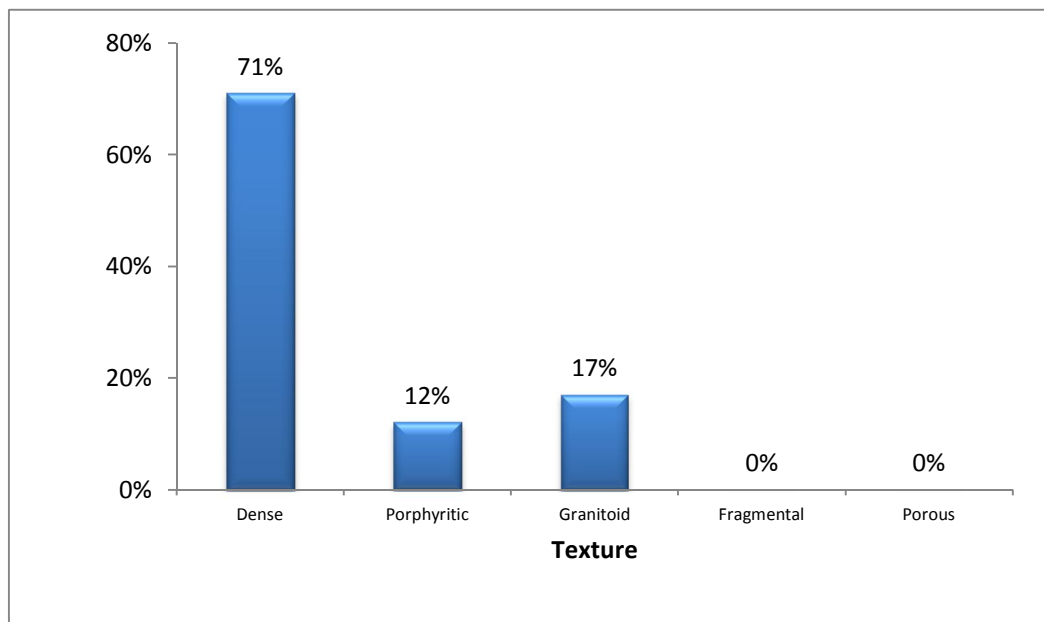
شکل ۴-۲۷- هیستوگرام امتیاز RD_i زون‌های مورد مطالعه معدن گل‌گهر



شکل ۴-۲۸- نمودار درصد فراوانی امتیاز RD_i زون‌های مورد مطالعه معدن گل‌گهر

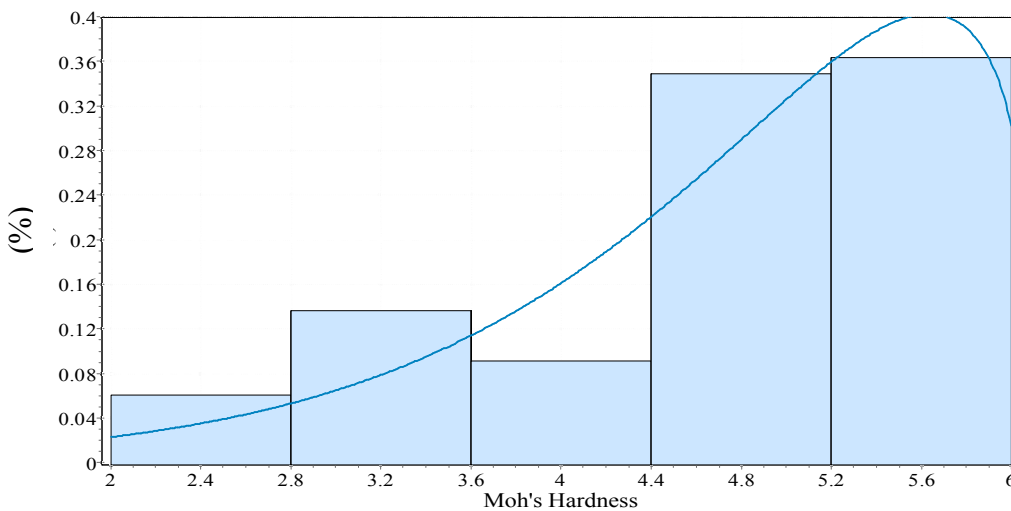
با توجه به مطالعات آزمایشگاهی بر روی مشخصات مکانیک سنگی و نیز برداشت صحرائی محدوده معدن، به راحتی می‌توان تأثیر مشخصات مکانیک سنگی را بر قابلیت حفاری RD_i مورد بررسی قرار داد، و طبقه‌بندی نقاط برداشت شده بر اساس RD_i را به صورت آماری ارزیابی کرد. برای این منظور، فراوانی و هیستوگرام کلیه پارامترهای مکانیک سنگی آورده شده است. در ادامه نتایج این تحلیل‌ها به طور کامل ارائه شده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

با توجه به اطلاعات مندرج در فرم‌های برداشت، می‌توان فراوانی و هیستوگرام امتیازهای کسب شده توسط توده‌سنگ‌ها در نواحی مختلف معدن را به صورت شکل‌های ۴-۲۹ تا ۴-۲۶ رسم نمود. همان‌طوری که در بخش قبل مشاهده شد، بافت سنگ در طبقه‌بندی RD_i به پنج کلاس طبقه‌بندی شده است. با توجه به توده‌سنگ‌های معدن گل‌گهر حدود ۷۰٪ را توده‌های متراکم تشکیل می‌دهند. بنابراین می‌توان این‌گونه بیان نمود که پارامتر بافت سنگ تأثیر زیادی بر طبقه بندی RD_i در معدن مورد مطالعه ندارد. شکل ۴-۲۹ فراوانی بافت توده‌سنگ‌های معدن گل‌گهر را نشان می‌دهد.

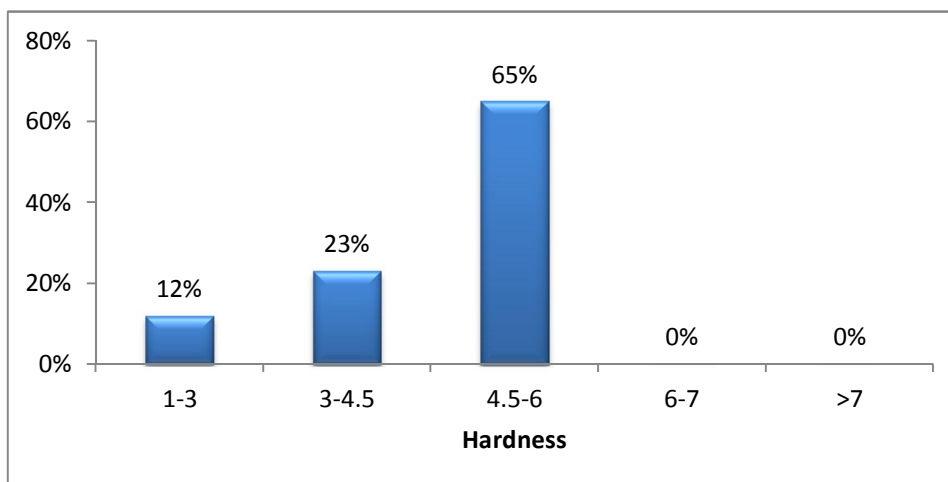


شکل ۴-۲۹- فراوانی بافت توده سنگ زون‌های مورد مطالعه معدن گل‌گهر

سختی موهس نیز یکی دیگر از پارامترهای بسیار تأثیرگذار بر قابلیت حفاری RD_i است که ۱۸٪ از کل امتیازها را شامل می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴-۳۰ دیده می‌شود تقریباً ۶۰٪ از سنگ‌های معدن سختی بیش از ۴/۴ دارند و سنگ‌های نسبتاً سختی محسوب می‌شوند. شکل ۴-۳۱ فراوانی سختی موهس بر اساس طبقه‌بندی موهس را نشان می‌دهد. ۶۵٪ از سنگ‌های معدن در کلاس میانی قرار گرفته و امتیاز ۹ به آنها تعلق می‌گیرد و مابقی سنگ‌ها نرم‌تر بوده و امتیاز بیشتری کسب می‌کنند.

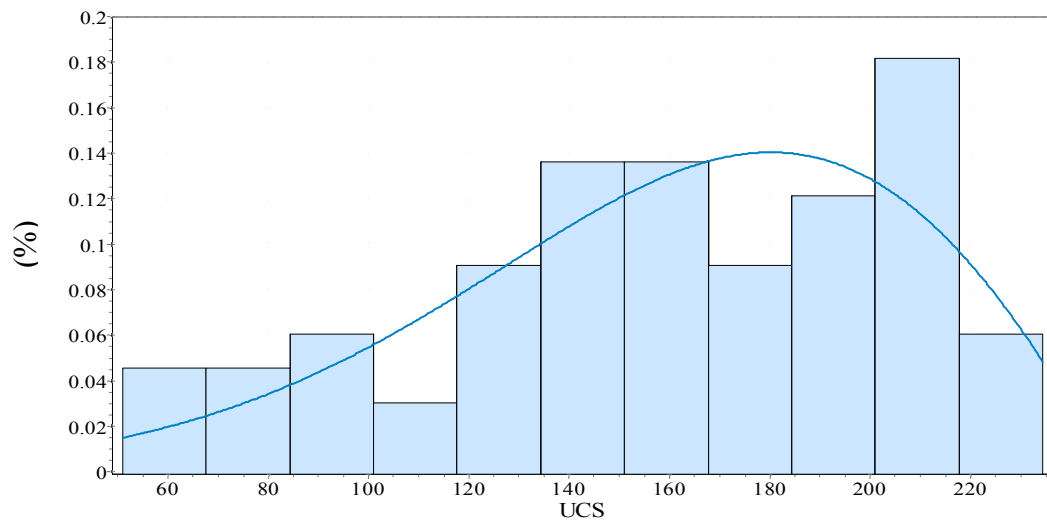


شکل ۴-۳۰- هیستوگرام سختی موهس زون‌های مورد مطالعه معدن گل‌گهر

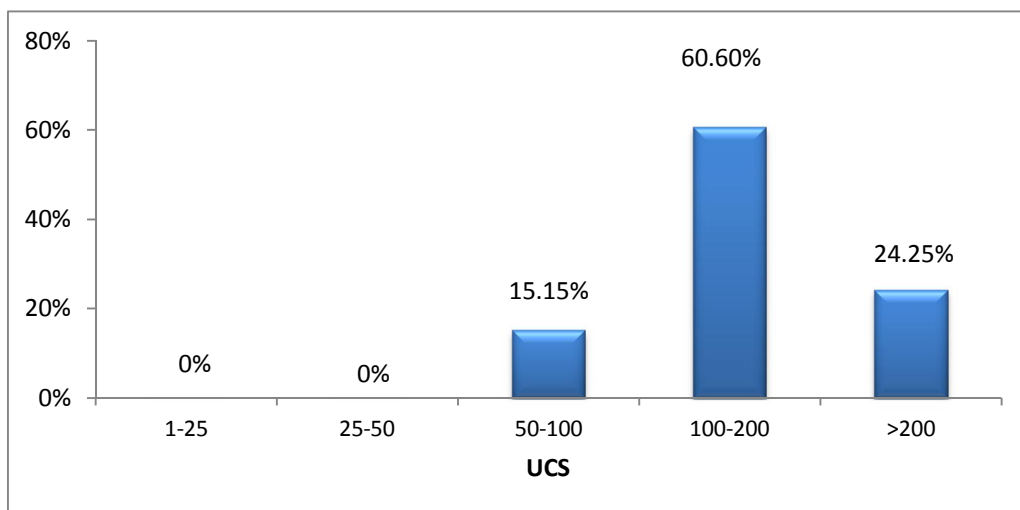


شکل ۴-۳۱- نمودار درصد فراوانی سختی موهس زون‌های مورد مطالعه معدن گل‌گهر

مقاومت فشاری مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر قابلیت حفاری می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۳۲-۴ مشاهده می‌شود مقاومت فشاری تک محوری بازه وسیعی از ۵۵ تا ۲۳۰ مگا پاسکال را در بر گرفته است. بیش از ۸۰٪ از سنگ‌ها مقاومتی بالاتر از ۱۰۰ مگا پاسکال دارند و سنگ‌های سختی می‌باشند. در فرآیند حفاری با افزایش مقاومت فشاری سرعت حفاری کاهش می‌یابد. در شکل ۳۳-۴ فراوانی مقاومت فشاری سنگ بر اساس قابلیت حفاری RD_i آورده شده است. ۶۰٪ از سنگ‌ها در کلاس مقاومت زیاد قرار دارند و در طبقه‌بندی RD_i، امتیازی معادل ۶ را کسب می‌کنند.

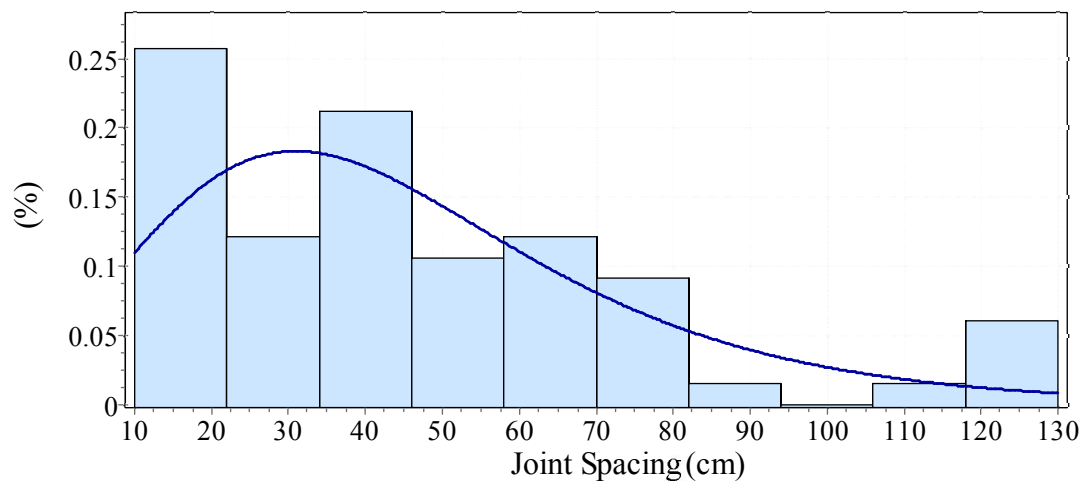


شکل ۳۲-۴- هیستوگرام مقاومت فشاری زون‌های مورد مطالعه معدن گل‌گهر

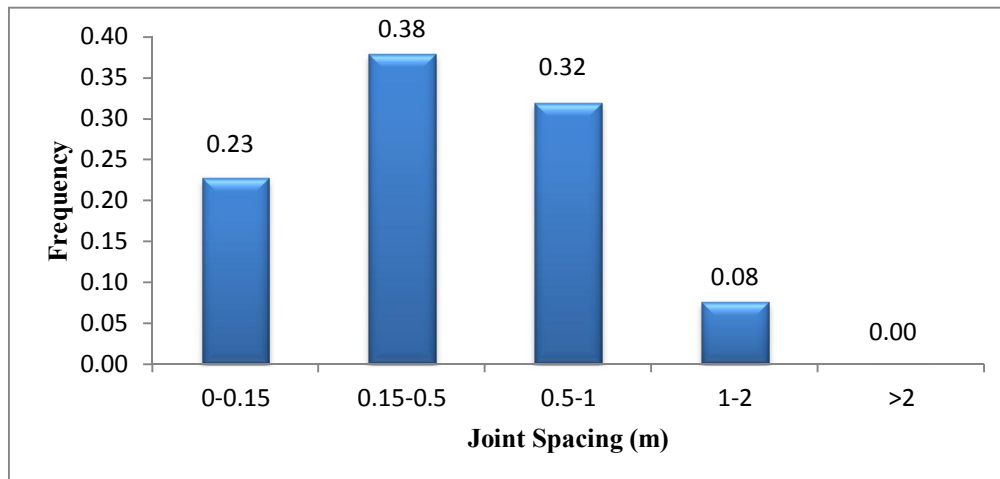


شکل ۳۳-۴- نمودار درصد فراوانی مقاومت فشاری زون‌های مورد مطالعه معدن گل‌گهر

فاصله‌داری درزه‌ها نیز تأثیر به‌سزایی در قابلیت حفاری دارد. هر چه میزان فاصله‌داری کمتر باشد شرایط حفاری بحرانی‌تر خواهد بود. با توجه به شکل ۴-۳۴ و شکل ۴-۳۵ مشاهده می‌شود که ۶۰٪ فاصله‌داری‌ها کمتر از ۵/۰ متر می‌باشد و این حالت کاهش سرعت حفاری را در پی خواهد داشت.



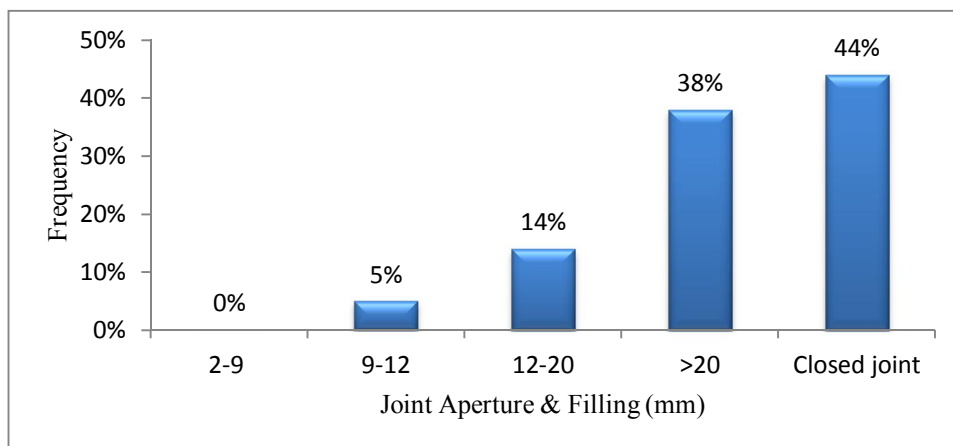
شکل ۴-۳۴- هیستوگرام فاصله‌داری درزه‌ها در زون‌های مورد مطالعه معدن گل‌گهر



شکل ۴-۳۵- نمودار درصد فراوانی فاصله‌داری درزه‌ها در زون‌های مورد مطالعه معدن گل‌گهر

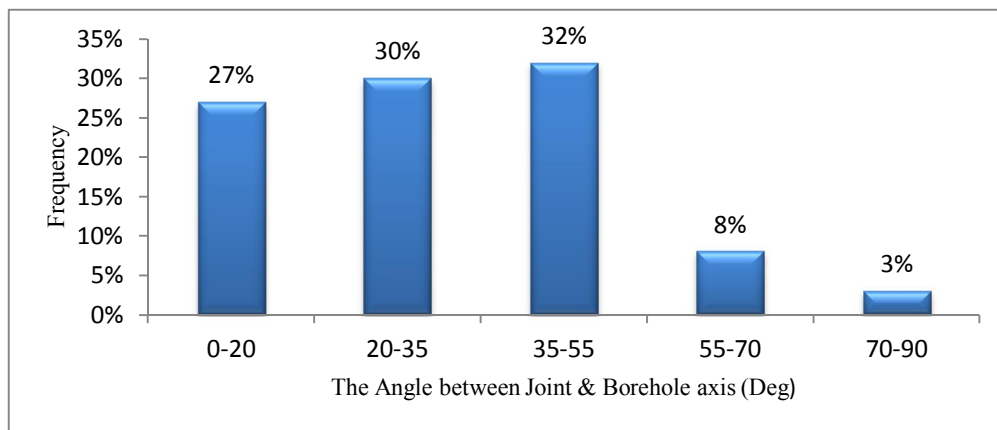
شرایط بازشدگی و پرشدگی دیواره‌های معدن در شرایط حفاری بسیار حائز اهمیت می‌باشد. هرچه بازشدگی بیشتر باشد عملکرد حفاری به علت فرار هوای فلاشینگ و احتمال گیر کردن سرمته کاهش

می‌یابد. همان‌طوری که در شکل ۴-۳۶ مشاهده می‌شود بیش از ۸۰٪ از درزه‌ها بسته بوده و یا دارای پرشدگی خوبی می‌باشند و عملکرد فرآیند حفاری در هنگام تغییر فاز چندان کاهش نمی‌یابد.



شکل ۴-۳۶- نمودار درصد فراوانی پرشدگی و بازشدگی زون‌های مورد مطالعه معدن گل‌گهر

با توجه به شرایطی که در فصل قبل بیان شده است با افزایش شیب درزه‌ها امکان انحراف چال افزایش می‌یابد. درزه‌داری افقی بهترین حالت برای فرآیند حفاری می‌باشد، بنابراین اگر زاویه بین درزه و محور چال به عمود میل کند شرایط حفاری بهبود می‌یابد. همان‌طوری که در شکل ۴-۳۷ آورده شده است فقط ۱۱٪ از درزه‌ها شرایط ایده‌آلی دارند و این مسأله باعث کاهش سرعت حفاری می‌شود. نتایج مطالعات صحرائی بیان‌گر این واقعیت است که با افزایش زاویه بین درزه و امتداد چال نرخ نفوذ سیستم حفاری و قابلیت حفاری توده‌سنگ افزایش می‌یابد.

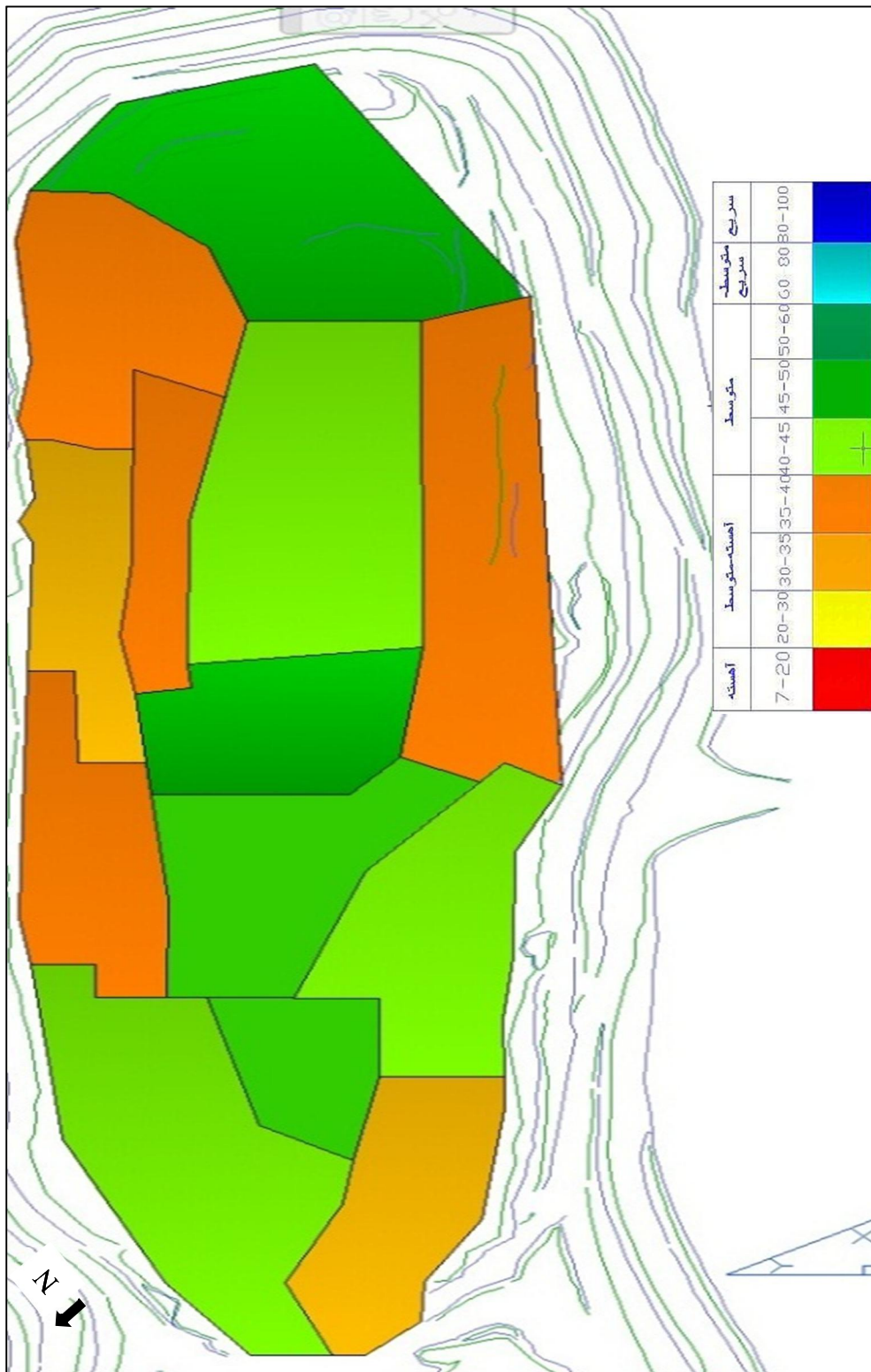


شکل ۴-۳۷- نمودار درصد فراوانی زاویه بین درزه و محور چال زون‌های مورد مطالعه معدن گل‌گهر

هدف تحقیق حاضر تعیین زون‌بندی قابلیت حفاری برای توده‌سنگ‌های معدن گل‌گهر می‌باشد، که تعداد ۶۶ زون برداشت، مطالعه و مورد ارزیابی دقیق قرار گرفت. اما تعداد زیاد زون‌ها، نزدیکی امتیاز بسیاری از زون‌ها به یکدیگر تخمین سرعت حفاری و قابلیت حفاری را برای بخش طراحی میسر نمی‌سازد.

برای دستیابی به هدف فوق باید با توجه به کلاس‌بندی قابلیت حفاری RD_i، زون‌های هم‌کلاس و در همسایگی هم را در یک گروه در نظر گرفت. سپس بر اساس روش میانگین وزنی طول پیمایش، میانگین امتیاز RD_i را محاسبه کرده و به آن گروه اختصاص داد. محدوده شعاع تأثیر زون جدید بر اساس شعاع تأثیر زون‌های کوچکتر تشکیل دهنده آن در نظر گرفته شده است.

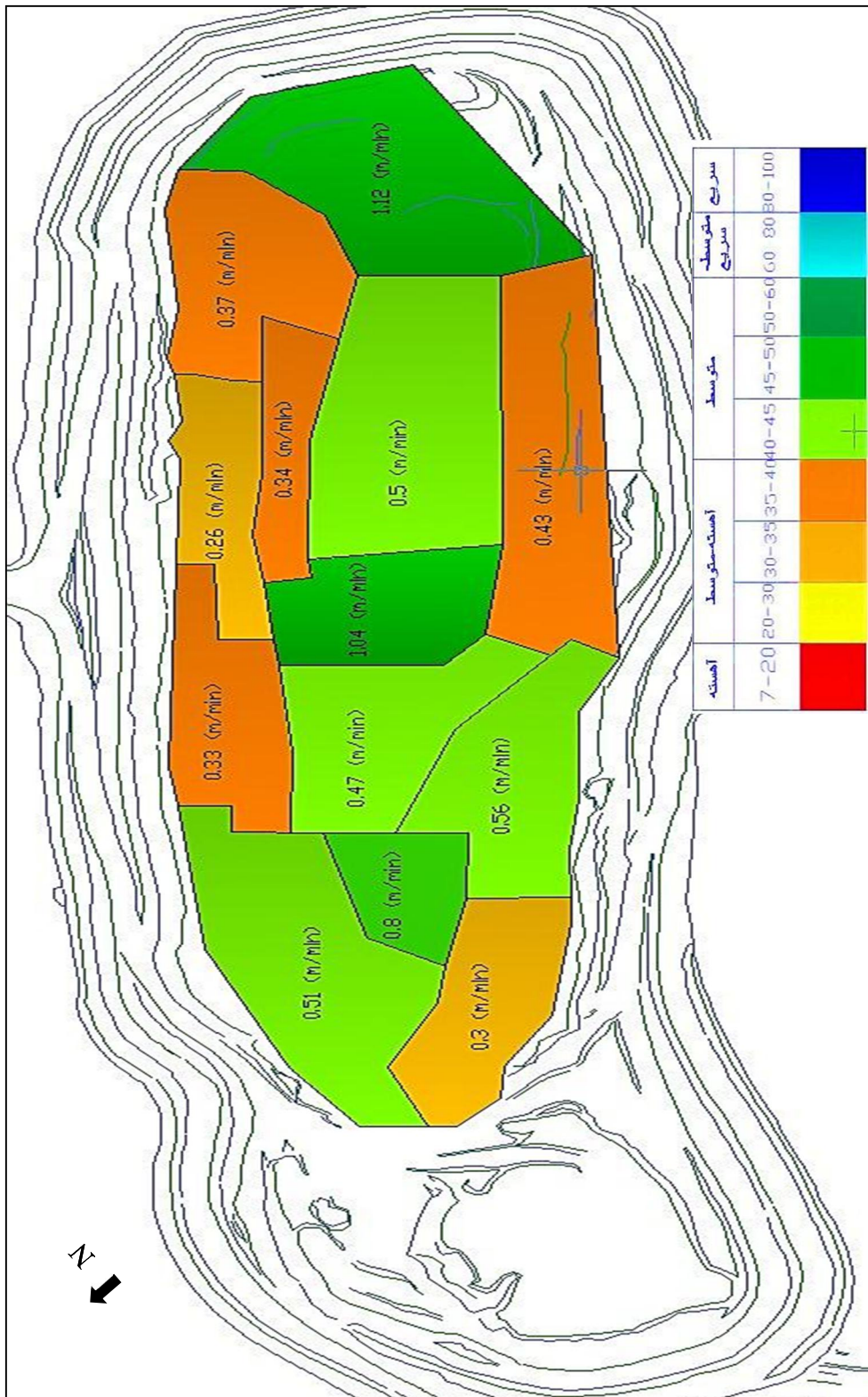
این روش در تمامی محدوده معدن و زون‌های مورد مطالعه به کار گرفته شده و ۶۶ زون اولیه به ۱۳ زون بزرگتر طبقه‌بندی شده‌اند. زون‌های جدید با توجه به طبقه‌بندی RD_i در دو کلاس کند-متوسط و متوسط قرار داده شده‌اند. نتیجه نهایی زون‌بندی توده‌سنگ‌های مورد مطالعه در شکل ۴-۳۸ آورده شده است.



شکل ۴-۳۸. زون بندی نهایی قابلیت حفاری زون های مورد مطالعه معدن شماره ۱ گل گهر

با توجه به رابطه بین سرعت حفاری و قابلیت حفاری RD_i، سرعت حفاری در زون‌های مورد مطالعه محاسبه گردید. نتیجه پیش‌بینی سرعت حفاری در زون‌های مورد مطالعه در شکل ۴-۳۹ آورده شده است.

همان‌طوری که در شکل ۴-۳۹ مشاهده می‌شود سرعت حفاری پیش‌بینی شده در زون‌های مختلف در بازه ۰/۲۵ تا ۰/۸ متر بر دقیقه تغییر می‌کند و فقط در دو زون آن سرعت حفاری بیش از ۱ متر بر دقیقه می‌باشد.



شکل ۴-۳۹- پیش‌بینی سرعت حفاری در زون‌های مورد مطالعه معدن گل‌گهر

۴-۵- نتیجه گیری

برای زون بندی توده سنگ های معدن گل گهر ابتدا الگوهای حفاری مورد مطالعه قرار گرفت. مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه انجام و نتایج آن محاسبه شد. سرعت حفاری هر الگو ثبت شد و پارامترهای موثر بر قابلیت حفاری RD_i مورد مطالعه قرار گرفت و امتیاز هر پارامتر و الگوی حفاری محاسبه شد. در نهایت ارتباط بین پارامترهای مکانیک سنگی و شاخص RD_i با سرعت حفاری مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفت.

سپس ناحیه استخراجی معدن به ۶۶ زون تقسیم شده و پارامترهای بافت، سختی موهس، سختی چکش اشمیت، فاصله داری، بازشدگی و زاویه بین محور چال با درزه برداشت شد. سپس امتیاز هر پارامتر تعیین و قابلیت حفاری هر زون محاسبه شد. توده سنگ های محدوده معدن بر اساس قابلیت حفاری RD_i به دو کلاس متوسط و آهسته-متوسط تقسیم بندی شد. در نهایت با توجه به روابط ریاضی به دست آمده از بخش قبل سرعت حفاری هر زون پیش بینی شد.

فصل پنجم

نتیجہ گیری و پیشہدات

۵-۱- نتیجه‌گیری

حفاری به عنوان اولین مرحله در استخراج معادن روباز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به حجم سرمایه‌گذاری بالا و لزوم برنامه‌ریزی و تعیین هزینه‌های حفاری، اهمیت حفاری آشکارتر می‌شود. تعیین قابلیت حفاری سنگ‌ها در پروژه‌های مهندسی بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

در این تحقیق توده‌سنگ‌های محدوده معدن شماره ۱ گل‌گهر از نظر قابلیت حفاری مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفت و ناحیه استخراجی معدن زون‌بندی شد تا نقشه زون‌بندی برای پیش‌بینی قابلیت حفاری در معدن مورد استفاده قرار گیرد. همچنین کلیه پارامترهای مهم مؤثر در سرعت حفاری و قابلیت حفاری توده‌سنگ RDi مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت و رابطه ریاضی برای پیش‌بینی سرعت حفاری ارائه شد.

با توجه به مطالعات انجام شده نتایج زیر به‌دست آمده است:

۱- وضعیت گسل‌خوردگی و درزه‌داری توده‌سنگ‌های معدن شماره ۱ گل‌گهر از نظر حفاری و قابلیت حفاری بسیار بحرانی است. به طوری که با توجه به نتایج برداشت‌های میدانی در بیش از ۶۰ درصد توده‌سنگ‌ها فاصله‌داری کمتر از ۵۰ سانتی‌متر مشاهده شد. با توجه به شرایط توده‌سنگ‌های محدوده معدن، با کاهش فاصله‌داری و پیوستگی محیط سرعت حفاری و قابلیت حفاری کاهش می‌یابد.

۲- از نظر طبقه‌بندی قابلیت حفاری ۷۰ درصد بافت توده‌سنگ‌های معدن گل‌گهر متراکم است. بدین ترتیب پارامتر بافت سنگ در معدن برای بیشتر نقاط تأثیر مشابه و یکسانی دارد.

۳- بیش از ۶۵ درصد زون‌های مورد مطالعه در معدن سختی موهس بین ۴-۶/۵ دارند. سختی موهس بالا باعث کاهش سرعت حفاری خواهد شد.

۴- مقاومت فشاری تک محوری توده‌سنگ‌های معدن نیز با توجه به طبقه‌بندی‌های مختلف ارائه شده در کلاس سخت تا خیلی سخت قرار گرفته است. به طوری که ۶۰ درصد مقاومت فشاری توده‌سنگ‌های در برگیرنده محدوده معدن بین ۲۰۰-۱۰۰ مگاپاسکال می‌باشد.

۵- وضعیت بازشدگی در معدن متأثر از وضعیت گسل خوردگی و درزه‌داری می‌باشد. در بسیاری از توده‌سنگ‌ها بازشدگی بین ۲۰-۲ میلی‌متر مشاهده شد که پرشدگی تقریباً مناسبی با کلسیت و تالک وجود داشت.

۶- ارتباط خوبی بین پارامترهای مکانیک سنگی مؤثر بر قابلیت حفاری و سرعت حفاری به دست آمده است. بهترین رابطه با ضریب تعیین ۹۱/۵ درصد بین طبقه‌بندی قابلیت حفاری RDi و سرعت حفاری به دست آمده که از آن برای پیش‌بینی سرعت حفاری در معدن استفاده شده است.

۷- توده‌سنگ‌های محدوده معدن گل‌گهر بر اساس طبقه‌بندی قابلیت حفاری RDi زون‌بندی شد. بر اساس امتیاز به دست آمده، زون‌های مورد مطالعه در معدن گل‌گهر در دو کلاس آهسته-متوسط و متوسط قرار گرفتند.

۸- پیش‌بینی سرعت حفاری توده‌سنگ‌های مورد مطالعه بر اساس روابط به دست آمده محاسبه شد. بیشترین سرعت پیش‌بینی شده، ۱/۱۲ متر بر دقیقه و مربوط به دیواره شرقی معدن و کمترین سرعت پیش‌بینی شده، ۰/۲۶ متر بر دقیقه مربوط به دیواره شمالی معدن شماره ۱ گل‌گهر می‌باشد.

۵-۲- پیشنهادات

۱- پیشنهاد می‌شود با توجه به شرایط درزه‌داری و گسل خوردگی معدن شماره ۱ گل‌گهر محدوده استخراجی معدن به صورت پیوسته پایش شود و طراحی الگوهای حفاری بر اساس شرایط

محیطی هر زون صورت پذیرد.

۲- نقشه زمین شناسی معدن خطای زیادی را در واقعیت نشان می دهد. به روز نمودن نقشه زمین

شناسی باعث شناخت بهتر از محیط حفاری می شود و واحد عملیات قادر خواهد بود با توجه به

شرایط زمین شناسی تمهیدات لازم را فراهم نماید.

۳- پیشنهاد می شود از دستگاه های جدید و با قابلیت بالا در حفاری استفاده شود. دستگاه های

جدید و مدرن، امروزه قادرند تا تمامی فرآیند حین عملیات حفاری را ثبت نمایند و بررسی و

مطالعه این اطلاعات می تواند در طراحی و کیفیت حفاری تأثیرگذار باشد.

۴- پیشنهاد می شود در کارهای مطالعاتی بعدی ادامه تحقیق بر روی پارامترهای قابل کنترل

(پارامترهای تأثیرگذار دستگاه حفاری) بر عملکرد حفاری، سرعت حفاری و قابلیت حفاری RDi

انجام شود.

منابع و مراجع

- اصانلو، م، ۱۳۸۶، روشهای حفاری، چاپ سوم، مرکز نشر صدرا، ۴۹۴ صفحه.
- استوار، ر، ۱۳۸۰، آتشفکاری در معادن، جلد اول، جهاد دانشگاهی، دانشگاه صنعتی امیر کبیر.
- 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.
- حسینی، ه، پوررحیمیان، ی، آقابابایی، ح، ۱۳۸۵، مدل‌سازی فیزیکی اثرات فاصله‌داری و پرکننده درزه‌ها بر راندمان چالزنی معادن، فصلنامه مهندسی معدن، انجمن مهندسی معدن ایران، سال اول، شماره اول، زمستان.
- حسینی، ه، آقابابایی، ح، پوررحیمیان، ی، ۱۳۸۶، بررسی و مدلسازی تأثیر شیب داری درزه‌ها بر سرعت چالزنی در معادن روباز، فصلنامه علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران، بهار.
- فهیمی‌فر، ا، سروش، ح، ۱۳۸۰، آزمایش‌های مکانیک سنگ، مبانی نظری و استانداردها (جلد اول: آزمون‌های آزمایشگاهی)، انتشارات سهامی آزمایشگاه‌های فنی و مکانیک خاک.
- کوشا معدن، ۱۳۸۳، گزارش آشنایی با معدن سنگ آهن گل‌گهر.
- کوشا معدن، ۱۳۹۰، گزارش سالیانه تولید معدن شماره ۱.
- مرکز اسناد، گزارش‌های موجود در مرکز اسناد مجتمع معدنی گل‌گهر.
- دفتر نظارت و طراحی معدن، ۱۳۹۰، گزارش‌های روزانه مدیریت امور معدن.
- Adebayo B., Opafunso Z. O., Akande J. M. (2010), "Drillability and Strength Characteristics of Selected Rocks in Nigeria", AU J.T. 14(1): 56-60.
- Akun M. E. & Karpuz C. (2005), "Drillability studies of surface-set diamond drilling in Zonguldak region sandstones from Turkey", International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 42, 473-479.
- Altindag R. (2000), "The Effects of Specimen Volume, Temperature and Water Content on shore hardness", 17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey-İMCET 2000.
- Altindag R. (2002), "The evaluation of rock brittleness concept on rotary blast hole drills", The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy, January/February.
- Altindag R. (2003), "Technical Note Estimation of Penetration Rate in Percussive Drilling by Means of Coarseness Index and Mean Particle Size", Rock Mech. Rock Eng. 36 (4), 323-332.
- Altindag R. (2010), "Assessment of some brittleness indexes in rock-drilling efficiency", Rock Mech Rock Eng, VOL. 43: 361-370.
- Andreev G. E. (1995), "Brittle failure of rock materials: test results and constitutive models", A. A. Balkema, Rotterdam, p 446.
- Ataei M., Mikaeil R., Hoseinie S. H., Hosseini S. M. (2011), "Fuzzy analytical hierarchy process

approach for ranking the sawability of carbonate rock"., International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences.

Atkinson T., Cassapy V. B., Singh I.,(1986), "Assessment of abrasive wear resistance potential in rock excavation machinery"., Int. J. Min. Geol. Eng. 3, 151–163.

Bilgin N., Eskikaya S.,Dincer T., (1993), "The performance analysis of large diameter blast hole rotary drilling in Turkish Coal Enterprises",.In: Almgren G.,KumarU., Vagenas N.,editors.Mine mechanization and automation.Rotterdam, Balkema.

Bilim B., (2011),"Determination of drillability of some natural stones and their association with rock properties"., Scientific Research and Essays Vol. 6(2), pp. 382-387.

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

Chary K.B., Sarma L. P., Prasanna Lakshmi K. J., Vijayakumar N. A., Naga Lakshmi V. and Rao M. V. M. S. (2006) "Evaluation of Engineering Properties of Rock Using Ultrasonic Pulse Velocity and Uniaxial Compressive Strength"., Proc. National Seminar on Non-Destructive Evaluation Dec. 7- 9, Hyderabad.

Clark G. B.,(1979), "Principles of rock drilling"., Colorado School of Mines Quart, Colorado 74:91–93.

Clark G.B., (1982), "Principles of rock drilling part-1"., Col. Sch. Mines, Quarterly, 1(77), 118.

Drake R. (2004),"Bench drilling techniques and equipment selection manual"., Ingersol-Rand Company.

Ersoy A. (2003), "Automatic drilling control base don minimum drilling specific energy using PDC and WC bits"., Trans. Inst. Min. MetallA., December:A86.

Ersoy A. & Waller M. D. (1995a),"Textural characterization of rocks"., J. of Engineering Geology, June, VoL. 39, Issues 3-4, 123-136.

Ersoy A. & Waller M.D. (1995b),"Prediction of drill-bit performance using multi-variable linear regression analysis"., Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Industry, , Vol. 104, May-August, pp. A101-114.

Jimeno C. L., Jimeno E. L. & Carcedo F. J. A. (1995),"Drilling and blasting of rocks"., A.A Balkema, Pub Rotterdam.

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

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

Hoseinie S. H. and Ataei M., (2007),"A review of machine parameters influencing the drilling rate

in mines"., 7th International Scientific Conference on Modern Management of Mine Producing and Environmental Protection (SGEM2007), Albena Complex, Bulgaria.

Hoseinie S.H., Aghababaei H., Pourrahimian Y. (2008),"Development of a new classification system for assessing of Rock mass Drillability index (RD_i)"., International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 45, 1-10.

Hoseinie S. H.,Ataei M., Osanloo M. (2009),"A new classification system for evaluating rock penetrability"., International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 46: 1329–1340.

Howarth D. F., Rowlands J. C. (1987), "Quantitative assessment of rock texture and correlation with Drillability and strength properties"., Rock Mechanics & Rock Engineering, Vol. 20: 57-85.

Hucka V. (1965), "A rapid method for determining the strength of rocks in-situ"., Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 2, 127-134.

Hustrulid W. A., Fairhurst C. (1971), "Atheoretical and experimental study of the Percussive drilling of rock, Part I: theory of percussive drilling"., Int. J. Rock Mech. Min. Sci.;8:11–33.

Izquierdo L. E. ,Chiang L. E. (2004), "A methodology for estimation of the specific rock energy index using corrected down-the-hole drill monitoring data"., Trans. Inst. Min. Metall A113:A225.

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

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

Kahraman S. (2002), "Correlation of TBM and drilling machine performance with rock brittleness"., Eng. Geol., 65:269–283.

Kahraman S.,Bilgin N.,Feridunoglu C. (2003),"Dominant rock properties affecting the penetration rate of percussive drills"., International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 40: 711–723.

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.

Kelessidis V. C. (2011),"Rock drillability prediction from in situ determined unconfined compressive strength of rock"., Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 111.

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.

Liu H. Y., Kou S. Q., Lindqvist P. (2002),"Numerical simulation of the fracture process in cutting heterogeneous brittle material"., International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 26(13): 1,253-78, November.

Martini L. A. (1971), "Percussion drilling tool"., U.S. Patent 36112191.

- Mellor M. (1972), "Normalization of specific energy values"., *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.9:661–3
- Ozturk A., Nasuf & Bilgin N. (2004), "The assessment of rock cutability and physical and mechanical rock properties from a texture coefficient"., *Journal of south African Institut of Mining and Metalurgy*, August.
- Plinninger R., Spaun G. & Thuro K. (2002), "Predicting tool wear in drill and blast"., *Tunnels & Tunnelling International Magazine*, April.
- Pathinkar A. G., Misra G. B. (1980), "Drillability of rocks in percussive drilling from 'energy per unit volume as determined with a microbit"., *Min. Eng.*;32:1407–10.
- Paone J., Madson D., Bruce W. E. (1969), "Drillability studies-laboratory percussive drilling"., *USBM Rep. Invest. 7300*.
- Rabia H. (1982), "Specific energy as a criterion for drilling performance prediction"., *Int J Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 19:39–42.
- Rabia H, Brook N. (1981), "The effects of apparatus size and surface area of charge on the impact strength of rock"., *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci*;Vol. 18:211–19.
- Rao K. U. M., & Misra B. (1998), "Principles of rock drilling"., Balkema, Rotterdam.
- Schormair N., Thuro K. & Plinninger R. (2006), "The influence of anisotropy on hard rock drilling and cutting"., *IAEG Paper number 491*.
- Schmidt R. L. (1972), "Drillability studies- Percussive drilling in the field"., *USBM RI 7684*
- Selim A. A., Bruce W. E. (1970), "Prediction of penetration rate for percussive drilling"., *USBM RI 7396*.
- 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.
- Shimada H., Matsui K. (1998), "Estimation of applicability of a drilling machine in Japanese open pit limestone quarry"., In: *Proceedings of the international symposium on mine planning and equipment selection*. Rotterdam: Balkema.
- Simon R. (1956), "Theory of rock drilling"., *Proceedings of the sixth annual drilling symposium*, Minneapolis.
- Singh S. P., Ladouceur M. & Rouhi F. (1998), "Sources, implication and control of blasthole deviation"., *7th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection*. A.A Balkema, Pub Rotterdam.
- Singh T. N., Gupta A. R. & Sain R. (2006), "A comparative analysis of cognitive system for the prediction of drillability of rocks and wear factor"., *Geotechnical and Geological Engineering*, 24: 299-312.
- Singh S. P. (1990), "Rock drillability comparison by different methods"., In: *Proceedings 2nd Int. Symposium on Mine Planning and Equipment Selection*, Calgary, 3-4 November, A.A Balkema,

Pub Rotterdam.

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

Selmer-Olsen R., Blindheim O. T. (1970),"On the drillability of rock by percussive drilling"., In Proceedings of the Second Congress International Society on Rock Mechanics, p. 65–70.

Tanaino A. S., Lipin A. A. (2004),"State and prospects of the percussive-rotary blasthole drilling in quarries"., J. Min. Sci., 40000–000.

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.

Tanaino A. S., (2008),"Rock Drillability classification part II: Canonical representation of rock properties in the rock classification by fracture resistance"., Journal of Mining Science, Vol. 44, No. 6.

Tandanand S., Unger H. F. (1975), "Drillability determination-a drillability index of percussive drills"., USBM Rep. Invest. 8073.

Teale R. (1965),"The concept of specific energy in rock drilling"., Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 2:57–71.

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

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

Yarali O. (2007),"Investigation of the relations between rock brittleness and drilling rate index"., Proceedings of the 20th international mining congress of turkey, pp 217-224.

Yaralı O., Yaşar E., Bacak G., Ranjith P.G. (2008),"A study of rock abrasivity and tool wear in Coal Measures Rocks"., International Journal of Coal Geology, 74 53–66.

Yarali O., Kahraman S. (2010),"The drillability assessment of rocks using the different brittleness values"., Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 12: 62-65.

Yarali O, Soyer E., Marcel Dekker A. G. (2011),"The effect of mechanical rock properties and brittleness on drillability"., Scientific Research and Essays, vol. 6(5): 1077-1088.

West G. (1989), "Rock abrasiveness testing for tunneling"., Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr 26: 151-160.

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

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

Abstract

Regarding to great importance of drilling operation in mining activity, prediction of what can be happened in the future is essential. Classification of those rocks surrounding orebodies and prediction of rate of penetration in them can considerably effect on economic and operational conditions of mines.

In current research work, to determine the drillability of Gole Goher rocks masses, a comprehensive study has been carried out (i.e. those papers published from 1950 to 2011 were collected) and the most technical parameters affecting on drillability have been identified. Considering the influence of rock mass and intact rocks in drilling operation, predicting the speed of drilling is a complicated task. Hence, a comprehensive and general approach is required to predict the drillability using effective parameters. In this regard, rock mass drillability index was taken into consideration as a suitable method for classification of drillability of rocks located in mine No.1 of Gole Gohar. Afterward, drillability of rocks located in mine No.1 of Gole Gohar was evaluated. Speed of drilling pattern and its average have been determined. The patterns given were sampled to do rock mechanical test. Fabric, Mohess hardness, Schmit hammer hardness, joint spacing, fracture opening, angle of well axis and joint surface were determined and RDi marks have been assigned to each pattern. At the end, possible relationship of study parameters with speed of drilling and RDi has been identified. Obtained results have shown that RDi has a suitable relationship with speed of drilling and hence it was recommended to use in relative works.

In the next stage, utilizing the results obtained from mechanical test and field sampling, rocks mass located around the mine was samples based on their drillability. In this regard, rock masses have been classified into 66 zones with their relative RDi mark. Finally, rock masses located in the mine were classified into two classes: slow-intermediate and intermediate. At the end, obtained results of statistical analysis of drilling speed and RDi were used to predict the speed of drilling in various z ones identified in the area.

Keywords: Rock mass Drillability index (RDi). Gole Gohar Iron mine, Rock mass, Zoning, Prediction, Drilling speed



Shahrood University of Tecnology
Faculty of Mining Eng., Petroleum and Geophysics

M.Sc. Thesis

***Drillability classificatin of rock masses and
prediction of drilling rate in Gol-E-Gohar iron
mine***

Mehdi Ghavidel

Supervisor(s):
Prof. M. Ataie
Prof. R. Khaloakakie

Advisor:
Dr. S.H. Hoseinie

Feb 2012