بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه آزاد اسلامی
واحد **شاهرود**
دانشکده فنی‌مهندسی
گروه معدن
پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
(M.A)
گرایش استخراج

عنوان:
مطالعه تاثیر تخلخل و دانه‌بندی سنگ بر روی قابلیت‌حفاری

استاد راهنما:
دکتر محمد تاجی

استاد مشاور:
دکتر محمد عطایی

نگارش:
سجاد سرلک

تابستان ۱۳۹۲

تعهد نامه اصالت رساله یا پایان نامه

اینجانب سجاد سرلک دانش‌آموخته مقطع کارشناسی ارشد ناپیوسته در رشته مهندسی معدن که در تاریخ ۱۳۹۲/۷/۹ از پایان نامه خود تحت عنوان " مطالعه تاثیر تخلخل و دانه بندی سنگ بر روی قابلیت حفاری"

با کسب نمره 17.75دفاع نموده‌ام بدینوسیله متعهد می‌شوم:

۱- این پایان‌نامه حاصل تحقیق و پژوهش انجام شده توسط اینجانب بوده و در مواردی که از دستاوردهای علمی وپژوهشی دیگران (اعم از پایان‌نامه ، کتاب، مقاله و.....) استفاده نموده‌ام ، مطابق ضوابط و رویه موجود ، نام منبع مورد استفاده و سایر مشخصات آن را در فهرست مربوطه ذکر و درج کرده‌ام.

۲- این پایان نامه قبلاً برای دریافت هیچ مدرک تحصیلی (هم سطح ، پایین تر یا بالاتر) در سایر دانشگاه‌ها و موسسات آموزش عالی ارائه نشده است.

۳- چنانچه بعد فراغت از تحصیل، قصد استفاده و هرگونه بهره‌برداری اعم از چاپ کتاب، ثبت اختراع و.... از این پایان‌نامه داشته باشم، از حوزه معاونت پژوهشی واحد مجوزهای مربوطه را اخذ نماییم.

٤- چنانچه در هر مقطعی زمانی خلاف موارد فوق ثابت شود، عواقب ناشی از آن را می‌پذیرم و واحد دانشگاهی مجاز است با اینجانب مطابق ضوابط و مقررات رفتار نموده و در صورت ابطال مدرک تحصیلی هیچگونه ادعایی نخواهم داشت.

نام و نام خانوادگی: سجاد سرلک

تاریخ و امضاء:

سپاس بی‌کران پروردگار یکتا را که هستی‌مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونمان شد و به همنشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه‌چینی از علم و معرفت را روزیمان ساخت. با سپاس بیکران بر همدلی و همراهی و همگامی مادر دلسوز و پدر مهربانم که سجده‌ی ایثارشان گل محبت را در وجودم پروراند و دامان گهربارشان لحظه‌های مهربانی را به من آموخت.

و با تقدیر و تشکر شایسته از اساتید ارجمند و بزرگوارم، آقای دکتر محمد تاجی و آقای دکتر محمد عطایی که با نکته‌های دلاویز و گفته‌های بلند، صحیفه‌های سخن را علم‌پرور نمودند و همواره راهنما و راه‌گشای اینجانب در اتمام و اکمال پایان‌نامه بوده‌اند. از استاد گرامی جناب آقاي دکتر مسعود اخیانی که زحمت داوري این پایان‌نامه را تقبل نمودند صمیمانه سپاسگزارم.

عاقلان نقطه پرگار وجودند ولی عشق داند که در این دایره سرگردانند

ازاساتید ارجمند جناب آقایان دکتر سیدهادی حسینی، دکترمهران شاهمنصوری و دکتر حسینعلی بگی که با راهنمایی دلسوزانه کمک شایانی به اینجانب داشتند سپاسگزارم. همچنین لازم می‌دانم از همکاری آزمایشگاه فنی مکانیک سنگ و خاک اداره راه و مسکن و شهرسازی و همچنین معدن سنگ جانبازان شهرستان الیگودرز تقدیر و تشکر نمایم.

دوستان بسیاري در انجام این پژوهش مرا یاري نموده‌اند که به رسم ادب لازم میدانم از همراهی صمیمانه آقایان حسین بارانی، مسعود سرلک، مجید بسحاق، مجتبی تودویی، عبدالله رحمانی و سایر دوستانم که هر کدام به نحوي در این راه مرا همراهي کردند صمیمانه تشکر نمایم.

تقديم به

همه هستيم

دو عشق بي همتاي زندگيم

پدر و مادرم

فهرست

چکیده ۱
فصل اول. قابلیت حفاری ۲
۱-۱ بررسی سیکل حفاری و عمل برش سرمته بر اساس قابلیت حفاری ۳
۱-۲ متغیرهای موثر بر قابلیت حفاری ۷
۱-۲-۱ خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها ۸
۱-۲-۲ تاثیر عوامل زمین‌شناسی و تکتونیکی و فشار و حرارت زمین بر حفاری ۱۱
۱-۳ پیکربندی پایان‌نامه ۱۳
فصل دوم. مروری بر پژوهش‌های انجام شده ۱٤
۲-۱ مروری بر پژوهش‌های انجام شده ۱٤
۲-۲ هدف و مبانی نظری انجام پژوهش ۲۳
۲-۲-۱ هدف از ساخت بلوک‌های بتنی ۲۳
۲-۲-۲ دانه‌بندی بلوک‌های بتنی ۲۳
۲-۲-۳ تخلخل بلوک‌های بتنی ۲٤
۲-۲-۴ مقاومت فشاری تک‌محوری بلوک‌های بتنی ۲٤
۲-۲-۵ عوامل موثر بر مقاومت فشاری تک‌محوری ۲٥
۲-۲-۶ رابطه بین ابعاد و شکل دانه‌ها و مقاومت فشاری تک‌محوری ۲٦
فصل سوم. مواد و روش‌ها ۲۷
۳-۱ تعیین دانه‌بندی ۲۷
۳-۲ ساخت بلوک‌های بتنی ۲۸
۳-۲-۱ قالب‌بندی ۲۸
۳-۲-۲ ساخت بتن ۲۸
۳-۳ شرایط نگهداری و عمل‌آوری بلوک‌های بتنی ۳۰
۳-۴ آزمایش تعیین تخلخل بلوک‌های بتنی ۳۱
۳-۴-۱ روش اشباع و غوطه‌ورسازی ۳۱
۳-۵ آزمایش تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری ۳۲
۳-۶ حفاری بلوک‌های بتنی ۳۳
۳-۶-۱ بارگیری و حمل بلوک‌ها ۳۳

۳-۶-۲ ثابت نگه‌داشتن بلوک‌ها در زیر دستگاه حفاری ۳۳
۳-۶-۳ مشخصات دستگاه حفاری ۳٤
۳-۶-۴ حفاری بلوک‌ها ۳٤
۳-۶-۵ تکنیک ثبت زمان و سرعت حفاری ۳٥
فصل چهارم. نتایج ۳۷
۴-۱ نتایج آزمایش تعیین تخلخل بلوک‌ها ۳۷
۴-۱-۱ مقایسه تخلخل بلوک‌های کوچک ۳۸
۴-۱-۲ مقدار تخلخل بلوک‌های بزرگ ۳۹
۴-۲ نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری ٤۰
۴-۳ نتایج حفاری بلوک‌ها ٤۲
۴-۴ ارزیابی نتایج با نرم افزار spss ٤٥
فصل پنجم. خلاصه نتایج و پیشنهادات ٤۷
۵-۱ خلاصه نتایج ٤۷
۵-۲ پیشنهادات ٤۸
منابع ٤۹

فهرست اشکال

شکل ۱-۱. نیروهای عمل‌کننده بر روی ابزار برش ٤
شکل ۱-۲. منحنی بار - سرعت نفوذ برای چالزنی چرخشی ٦
شکل ۱-۳. تقسیم‌بندی سنگ‌ها بر اساس قابلیت حفاری و ساینده‌گی ۸
شکل ۲-۱. پارامترهای موثر بر قابلیت حفاری ۲٤
شکل ۲-۲. ویژگی‌های مهم و موثر بر قابلیت حفاری ۲۸
شکل ۲-۳. دانه‌بندی در ۳ اندازه مختلف برای ساخت بلوک‌ها ۳۳
شکل ۳-۱. قالب‌بندی برای ساخت بلوک‌های بتنی ۳۹
شکل ۳-۲. ساخت بلوک‌های بتنی ٤۰
شکل ۳-۳. بلوک‌های با اندازه دانه‌های متفاوت با ابعاد۱۵×۱۵×۱۵ ..... ٤۲
شکل ۳-٤. تعیین وزن بلوک‌ها برای آزمایش تخلخل ٤٤

شکل ۳-۵. آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری..... ٤٥
شکل ۳-٦. ثابت نگه‌داشتن بلوک‌ها در زمان حفاری..... ٤٦
شکل ۳-۷. حفاری بلوک‌های بتنی..... ٤٨
شکل ۳-۸. حفاری بلوک‌های بتنی..... ٤٩
شکل ٤-۱. ترک‌های ایجاد شده در بلوک‌ها پس از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری..... ٥٥
شکل ٤-۲. خط رگرسیون دانه‌بندی و سرعت حفاری..... ٦١

فهرست جداول

جدول ۲-۱. محققینی که در مورد قابلیت حفاری با پارامترهای خاص تحقیق انجام داده‌اند..... ۲۲
جدول ۲-۲. پارامترهای قابلیت حفاری..... ۲٥
جدول ۲-۳. طبقه‌بندی مقاومتی سنگ‌ها بر اساس مقلومت فشاری تک‌محوری..... ۳٥
جدول ۳-۱. مشخصات بتن برای ۳ نوع دانه‌بندی..... ٤۱
جدول ۳-۲. مشخصات دستگاه حفاری..... ٤۷
جدول ٤-۱. تخلخل بلوک‌های کوچک ۱٥×۱٥×۱٥ ..... ٥۲
جدول ٤-۲. تخلخل بلوک‌های بزرگ..... ٥۳
جدول ٤-۳. مقاومت فشاری تک‌محوری بلوک‌های کوچک..... ٥٥
جدول ٤-٤. مقایسه بین مقاومت فشاری تک‌محوری با اختلاف اندازه دانه‌ها و تخلخل بلوک‌ها..... ٥۷
جدول ٤-٥. نتایج بدست آمده از حفاری بلوک‌های ۹ گانه..... ٥۸
جدول ٤-٦. همبستگی بین دانه‌بندی و سرعت حفاری..... ٦۲
جدول ٤-۷. همبستگی بین تخلخل و سرعت حفاری..... ٦۲

فهرست نمودارها

نمودار ٤-۱. تخلخل بلوک‌های کوچک..... ٥۲
نمودار ٤-۲. تخلخل بلوک‌های بزرگ..... ٥٤
نمودار ٤-۳. مقاومت فشاری تک‌محوری بلوک‌های با دانه‌بندی a وb وc..... ٥۶
نمودار ۴-۴. سرعت حفاری بلوک‌های ۹ گانه..... ٥۸

نمودار ۴- ۵. تغییرات سرعت حفاری در بلوک‌های ۹ گانه..... ۶۰

چکیده
حفر چال بخشی مهم از عملیات استخراج معادن و پروژه های عمرانی می‌باشد. به منظور جای‌گذاری مواد منفجره و آتشباری باید چال حفر شود. خواص و پارامترهای گوناگونی بر قابلیت حفاری سنگ‌ها تاثیرگذار است. در این پژوهش دو پارامتر تخلخل و اندازه دانه‌ها از خواص ساختاری سنگ به وسیله مدل‌سازی فیزیکی مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور ۹ بلوک بتنی با اندازه دانه‌های مختلف در آزمایشگاه ساخته شد. مقاومت فشاری تک‌محوری وتخلخل این بلوک‌ها تعیین شد. سپس این بلوک‌ها با دستگاه حفاری دورانی حفاری شدند و زمان حفاری ثبت شد. بلوک‌های متوسط‌دانه، ریزدانه و درشت‌دانه به ترتیب دارای مقاومت فشاری تک‌محوری بیشتری بودند. در حالی که در حفاری بلوک‌ها مشاهده شد بلوک‌های درشت‌دانه، متوسط‌دانه و ریزدانه به ترتیب سخت تر حفاری می‌شوند. ضریب همبستگی بین اندازه‌دانه‌ها و سرعت حفاری ۰/۸۹- به دست آمد. بدین معنی که با افزایش اندازه‌دانه‌ها کاهش سرعت حفاری و قابلیت حفاری را داریم. همچنین در این تحقیق، ارتباط معناداری میان تخلخل بلوک‌ها و سرعت‌حفاری دیده نشد.

واژه های کلیدی: قابلیت حفاری، دانه‌بندی، تخلخل، مقاومت فشاری تک‌محوری، مدل‌سازی فیزیکی

فصل اول
قابلیت‌حفاری

مقدمه

حفاری[1] به عنوان مرحله اولیه عملیات بهره‌برداری، نقش مهمی در مراحل دیگر دارد. با توجه به هزینه‌های بالای عملیات و همچنین هزینه‌ی ماشین‌آلات، شناختن کامل پارامترهای درگیر در حفاری، مطلوب خواهد بود. حفاری یک رابطه مستقیم و نزدیک با خواص سنگ دارد. بنابراین، شناخت خصوصیات سنگ کمک بزرگی برای انتخاب نوعی مناسب از سیستم حفاری، پیش‌بینی نرخ حفاری، تعیین تعداد ماشین‌آلات حفاری و میزان تولید معدن خواهد بود[۱۷].

روند حفاری و نتایج آن توسط پارامترهای مختلف از ماده‌سنگ و توده‌سنگ تحت تاثیر قرار می‌گیرند. اثرات مواد سنگ در مطالعات مختلف تاکید شده‌اند با این حال فقدان دانش کاملی از پارامترهای ساختاری توده سنگ ممکن است منجر به نتایج غیر قابل پیش‌بینی شود[۱۶]. پیش‌بینی نرخ نفوذ حفاری سنگ برای برآورد هزینه و برنامه‌ریزی پروژه بسیار مهم است[۲۳]. قابلیت حفاری[2] یک اصطلاح مورد استفاده در ساخت و ساز برای توصیف نفوذ است. تعدادی از پارامترها بر میزان حفاری(سرعت حفاری) و سایش ابزار حفاری تاثیر می‌گذارند[۲۸].

اکثر نظریه‌های مربوط به نفوذ مته عمل حفاری با فرض ضربه گوه به یک سنگ سطح صاف بدین ترتیب است:

۱- نوک گوه تولید تغییر شکل غیرقابل انعطاف می‌کند.
۲- در برخی موارد، تغییر شکل ناشی از بار اولیه به طور ناگهانی به یک شکاف کوچک توسعه داده می‌شود.
۳- افزایش بار علاوه بر این، رشد و توسعه پایدار ترک‌ها[3] را باعث می‌شود.
۴- با برداشتن بار در این مرحله، دریچه متوسط ایجاد شده شروع به بسته‌شدن می‌کند.
۵- در دوره حذف بار، راه سمت گسترش ترک که منافذ جانبی نامیده می‌شوند شروع به توسعه می‌کند.

[1] Drilling
[2] Drillability
[3] Joints

۶- پس از حذف کامل، ادامه گسترش منافذ جانبی، نسبت به سطح نمونه ممکن است که با ضربه فوری منجر به شکست شود. با بارگذاری دوباره و بسته‌شدن منافذ جانبی گوه، منافذ متوسط، دوباره باز می‌شود[۱۸].

۱-۱ بررسی سیکل حفاری و عمل برش سرمته بر اساس قابلیت حفاری

عمل برش یک سرمته حفاری چرخشی بر اساس نظریه فیش[1] به صورت زیر است:

۱. سیکل حفاری بلافاصله پس از شکل‌گرفتن یک شکستگی بزرگ آغاز می‌شود. در ابتدا تغییر شکل‌های الاستیک در اثر تنش‌های ناشی از کج‌شدگی زاویه‌ای سرمته[2] و کرنش‌های پیچشی میله حفاری در سنگ رخ می‌دهد.

۲. انرژی کرنشی در نتیجه ضربات برنده در سطح سنگ آزاد شده و شکستگی‌های ریزی تشکیل می‌شود.

۳. شکستگی‌های مزبور رفته‌رفته زیادتر می‌شوند و در یک لحظه، لبه برنده به سنگ سالم گیر کرده و بر اثر بالارفتن تمرکز تنش تکه نسبتا بزرگی از سنگ کنده شده و بدین ترتیب یک سیکل جدید شروع می‌شود.

آزمایش‌های صحرایی که توسط فیرهارست[3] در سال ۱۹٦٤ انجام شد، نشان داد که بار تغذیه اعمالی و گشتاور چرخشی وارد بر سرمته به دلیل طبیعت ناپیوسته شکل گرفتن تراشه‌های سنگی می‌تواند دارای تغییرات زیادی باشند. شکل ۱-۱ نیروهای عمل‌کننده بر روی ابزار برش را نشان می‌دهد.

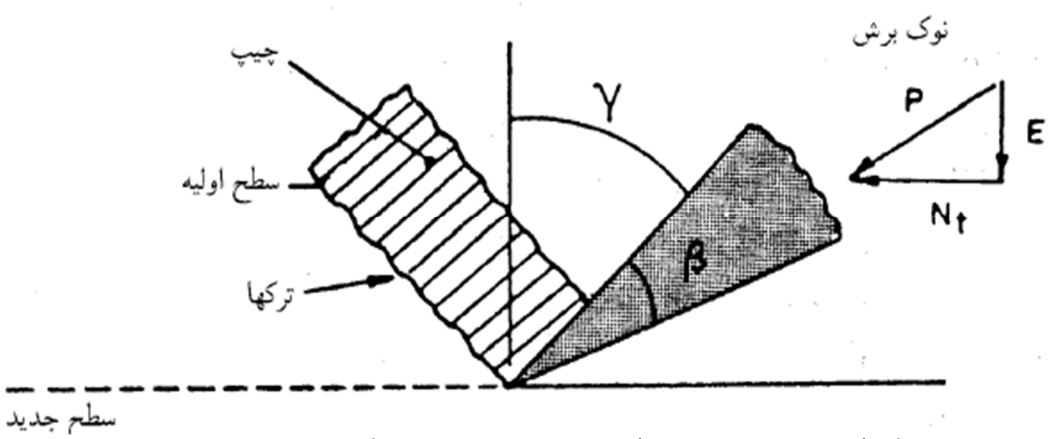
نیروی برش تابعی از شکل هندسی سرمته، مقاومت فشاری سنگ و عمق برش است. این نیرو به دو مولفه مماسی و عمودی تجزیه می‌شود[۱۹].

مولفه مماسی آن بخش از نیروست که در هنگام برخورد سرمته با سنگ بر مقاومت فشاری آن غلبه می‌کند. گشتاور مقاوم که در لوله حفاری ایجاد می‌شود از حاصلضرب نیروی مماسی در شعاع سرمته بدست می‌آید:

(۱-۱)

$$T_r = \frac{2}{3}\mu \cdot E\frac{{r_0}^3 - {r_1}^3}{{r_0}^2 - {r_1}^2}$$

[1] fish
[2] Bit
[3] Fairharst



شکل ۱-۱. نیروهای عمل کننده بر روی ابزار برش[۱۹]

که در آن Tr گشتاور مقاوم، μ ضریب اصطکاک، E نیروی فشاری پشت مته، r0 شعاع خارجی سرمته، r1 شعاع داخلی سرمته است.

گشتاور مقاوم با حداقل گشتاور تولیدی دستگاه حفاری تعیین می‌گردد. re که شعاع موثر سرمته نامیده می‌شود برابر است با:

(۲-۱)

$$r_e = \frac{2}{3} \times \frac{{r_0}^3 - {r_1}^3}{{r_0}^2 - {r_1}^2}$$

که با جای‌گذاری در معادله قبلی داریم:

(۳-۱)

$$T_r = \mu \times E \times r_e$$

همانطور که از رابطه پیداست با ثابت بودن μ، گشتاور متناسب با نیروی فشاری اعمال شده بر ابزار برش خواهد بود. ولی در عمل μ ثابت نیست و با تغییر ضخامت برش و خود نیروی تغذیه تغییر می‌کند.

اندیسی که سرعت نفوذ را تعیین می‌کند از رابطه‌ای ما بین انرژی مصرفی دستگاه حفاری و انرژی ویژه سنگ بدست می‌آید.

انرژی مصرفی کل تجهیزات برابر ۲πNrTr است که در آن Nr سرعت چرخش است. در نتیجه داریم:

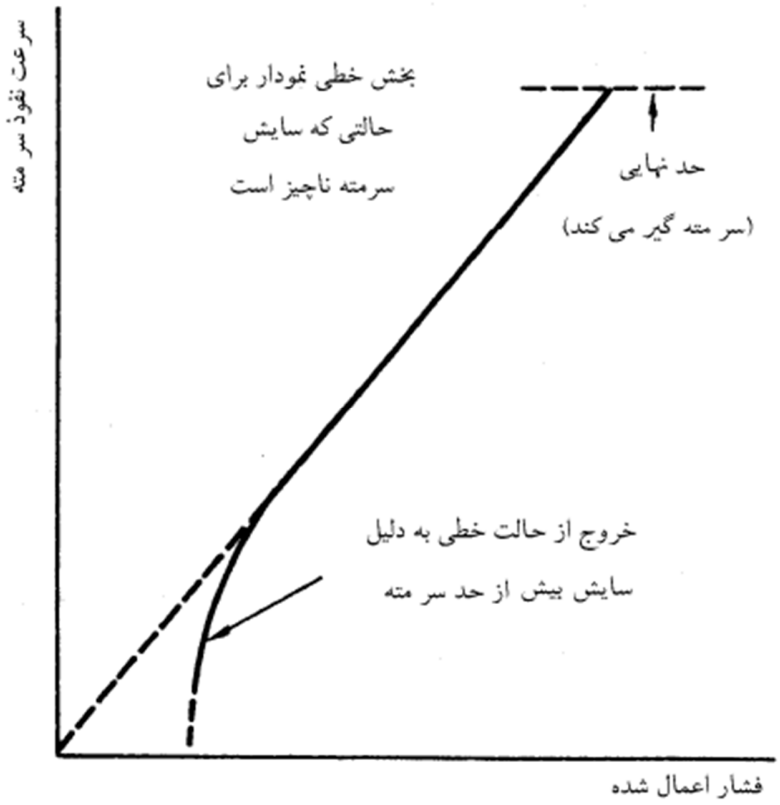
(٤-۱)

$$VP = \frac{2 \times \pi \times Nr \times Tr}{Ev \times Ar} = \frac{\pi \times \mu \times E \times Nr \times re}{Ev \times Ar}$$

که در آن Ev انرژی ویژه سنگ و Ar سطح مقطع عرضی چال است.

از این رابطه چنین برمی‌آید که سرعت نفوذ برای یک سنگ مشخص و قطر حفاری معین رابطه خطی با بار پشت مته و سرعت چرخش دارد. البته در عمل چنین چیزی صحیح نیست. چون همانطور که اشاره شد ضریب اصطکاک سنگ با نیروی پشت مته تغییر می‌کند. مقدار بار پشت مته دارای یک حد پایین است که پایین‌تر از آن سرعت نفوذ تئوریک قابل دستیابی نبوده و تنها باعث سایش سرمته می شود. همچنین دارای یک حد بالاست که بالاتر از آن منجر به گیرکردن سرمته خواهد شد.

سرعت چرخش نیز بدلیل افزایش سایش ناشی از اصطکاک سرمته‌ها، محدود می‌شود. به غیر از ساینده‌گی سنگها باید توجه داشت که با افزایش نیروی تغذیه که منجر به افزایش نیروهای اصطکاکی ما بین سنگ و سرمته می‌شود نیز سایش افزایش خواهد داشت. در شکل ۱-۲ منحنی بار-سرعت نفوذ برای چالزنی چرخشی نشان داده شده است.



شکل۱-۲. منحنی بار- سرعت نفوذ برای چالزنی چرخشی[۱۹]

ایمیوسکوما[1] آزمایشی برای اندازه‌گیری قابلیت حفاری و ساینده‌گی سنگ ارایه داده است. این آزمایش شامل حفاری یک چال در نمونه سنگی با نیروی پشت سرمته و سرعت چرخش ثابت می‌باشد. سرمته از جنس کاربید تنگستن بوده و فلاشینگ[2] توسط آب صورت می‌گیرد. سپس منحنی نفوذ بر حسب زمان ترسیم می‌شود و از روی آن اندیس قابلیت حفاری(اندیس سختی) با دقت یک دهم میلی‌متر تعیین می‌شود. با استفاده از یک ابزار کالیبره شده، سایش بوجود آمده در لبه های سرمته در طول ۳۰ ثانیه با دقت دهم میلی‌متر اندازه‌گیری شده و اندیس ساینده‌گی تعیین می‌شود[۱۹].

سنگها بر اساس دو پارامتر مذکور به چهار گروه تقسیم‌بندی می‌شوند. شکل ۱-۳ روش حفاری مناسب برای هر گروه را نشان می‌دهد.

زون۱:

[1] Emio-secoma
[2] Flushing

زونی با تشکیلات نرم و ساینده‌گی کم: حفاری چرخشی خشک با نیروی پشت مته و فشار هوای پایین پیشنهاد می‌شود.

زون۲:

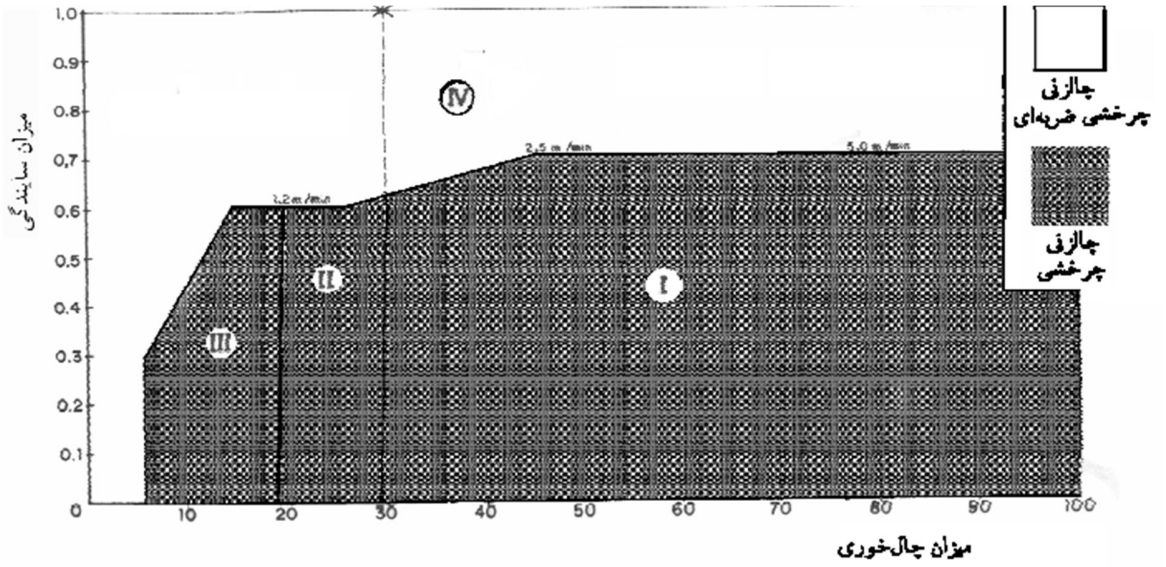
تشکیلات متوسط تا سخت با ساینده‌گی کم: حفاری چرخشی خشک با نیروی پشت مته و تزریق هوا با فشار متوسط پیشنهاد می‌شود.

زون۳:

سنگ کاملا سخت با ساینده‌گی کم: حفاری چرخشی با نیروی پشت مته بالا وفلاشینگ آبی با فشار بالا پیشنهاد می‌شود. نیروی پشت مته می تواند تا ۲۰KN برسد.

زون٤:

تشکیلات بسیار سخت و ساینده‌گی زیاد: حفاری ضربه‌ای چرخشی و فلاشینگ آب یا هوا پیشنهاد می‌شود.



شکل۱-۳. تقسیم‌بندی سنگ‌ها بر اساس قابلیت حفاری و ساینده‌گی آنها(ایمیو سکوما)[۱۹]

سکوما پارامترهای حفاری برای هر زون در قطرهای ۳۰ تا ۵۱ میلی‌متر را به صورت زیر پیشنهاد می‌کند:

زون۱:

حفاری چرخشی با نیروی پشت مته پایین

- نیروی پشت مته: از ۱ تا ۸ کیلو نیوتن
- سرعت چرخش: ۸۰۰ تا ۱۱۰۰ دور در دقیقه
- حفاری خشک
- نوع سنگ: زغال، پتاس، نمک، ژیپس و فسفات نرم
- ابزار: میله مته‌های مارپیچی و سرمته‌های درگی
- سرعت حفاری: ۳/۵ تا ۵ متر در دقیقه
- در هوای مرطوب سرعت حفاری در ۱/۵ یا ۲ ضرب می‌شود.

زون ۲:
حفاری چرخشی با نیروی پشت مته ۸ تا ۱۲ کیلو نیوتن
- سرعت چرخش ۵۵۰ تا ۸۰۰ دور در دقیقه
- حفاری با تزریق هوای مرطوب
- نوع سنگ: سنگ آهک و بوکسیت نرم، سنگ آهن نرم
- سرعت نفوذ۲ تا۳/۵ متر در دقیقه
زون۳:
حفاری چرخشی با نیروی پشت مته ۱۲ تا ۱۸ کیلونیوتن
- سرعت چرخش:۳۰۰ تا ۵۵۰ دور در دقیقه
- حفاری با تزریق آب
- نوع سنگ:بوکسیت‌ها و سنگ آهک با مقاومت متوسط، شیست‌های بدون کوارتز، ژیپس و فسفات سخت
- سرعت حفاری: ۱ تا۱/۸ متر در دقیقه[۱۹].

بعد از همه این مشاهدات، روشن است که نه آزمایشگاه و تست میدانی به تنهایی، زمین‌شناسی به تنهایی و نه تجربه به تنهایی و طراحی تجهیزات و بهره برداری تخصص به تنهایی نمی تواند منجر به نقطه‌ای قابل اتکا برای پیش‌بینی قابلیت حفاری شود و برای هر چیزی شبیه به یک فرمول به وضوح تعریف شده است.

اما علاوه برخواص سنگ، مشکل اصلی تنوع پدیده‌های زمین‌شناسی است که به ارقام و خواص سنگ محدود نمی‌شود[۲۹].

۱-۲ متغیرهای موثر بر قابلیت حفاری

متغیرهایی که به طور مستقیم و غیرمستقیم در پیشرفت عملیات حفاری تاثیر می‌گذارند به سه گروه تقسیم می‌شوند:

- **متغیرهای غیروابسته**

این متغیرها که تقریبا غیر قابل کنترل هستند، عبارتند از:

الف) خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها، چگونگی وضعیت فشارهای هیدرواستاتیکی و تنش سنگ‌های پوششی،

ب) عوامل زمین‌شناسی(لایه‌بندی، چین‌خوردگی، درز و شکاف، گسل، و...)،

ج) ژئومتری چال یا چاهه(قطر، عمق، و...).

- **متغیرهای وابسته**

الف)مته

ب)میله یا لوله‌های حفاری

پ)انرژی

ج)گل حفاری

- **متغیرهای جانبی**

این گروه، متغیرهایی مانند شرایط توپوگرافی و آب و هوایی، دسترسی به منابع انرژی، توان و مهارت کارگر و سرپرست را در بر می‌گیرد[۱].

۱-۲-۱ خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها

خواص فیزیکی سنگ‌ها که شاخص شرایط فیزیکی آنهاست به طور مستقیم و غیرمستقیم روی عملیات حفاری موثرند(مانند میزان به‌هم‌چسبی، تخلخل[1]، چگالی[2]، بافت[3] و ساختمان سنگ‌ها).

خواص مکانیکی سنگ‌ها، شاخص میزان مقاومت سنگ‌ها در مقابل نیرویی است که از خارج به آنها وارد می‌شود. به عبات دیگر، بیشترین مقدار نیروی قابل تحمل برای یک سنگ، بدون آنکه سنگ را متحمل تغییر شکل یا شکستگی کند با توجه به خواص مکانیکی(مقاومت، سفتی، سختی، الاستیسیته، پلاستیسیته، و...)مشخص می‌شود.

به طور کلی، خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها از موارد ذیل روی عملیات حفاری موثرند:

۱. انتخاب روش چالزنی
۲. انتخاب نوع و بویژه اجزای ماشین(مانند مته، لوله و گل حفاری)
۳. انتخاب نوع منبع انرژی و پمپ گل حفاری
۴. انتخاب نوع مواد منفجره
۵. انتخاب و طرح لوله‌های محافظ چاه
۶. میزان سرعت نفوذپذیری
۷. زمان‌بندی طرح و برنامه‌های کوتاه‌مدت یا بلندمدت حفاری

۱-۲-۱-۱ خواص اصلی سنگ‌ها

الف) نیروی به‌هم‌چسبی

مهمترین خصوصیت فیزیکی سنگ‌ها، یعنی نیروی به‌هم‌چسبی حاصل نیروی جاذبه بین مولکول‌های یک جسم یا ماده است. به عبارت دیگر، نیروی به‌هم‌چسبی درون زاست و در مقابل نیروهای خارجی جداکننده مولکول‌ها، جسم را مقاوم می کند. میزان این نیرو به بار الکترواستاتیکی ذرات و نیروی واندروالس بستگی دارد. واندروالس نیرویی است که با توان هفتم فاصله بین ذرات نسبت معکوس دارد. بنابراین هر چه فاصله سطح تماس ذرات کمتر باشد، مقدار آن بیشتر است و در نتیجه، نیروی به‌هم‌چسبی نیز افزایش خواهد یافت.

با توجه به مطالب مذکور، سنگها را بر اساس میزان نیروی به‌هم‌چسبی به ۴ دسته تقسیم می‌کنند:

۱. سنگ سخت
۲. سنگ سیمانه‌ای
۳. سنگ غیر سیمانه‌ای یا شل
۴. سنگ روان

ب) تخلخل

تخلخل عبارت است از نسبت بین حجم کل منافذ یک نمونه سنگ به حجم کل که با درصد مشخص می‌شود. میزان تخلخل سنگ‌های مختلف بین ۰ تا ۵۵ درصد متغیر است(این مقدار برای رس

[1] Porosity
[2] Density
[3] Texture

حدود ۵۵ درصد است). مقدار تخلخل با افزایش عمق کاهش می‌یابد. تخلخل باعث کاهش قدرت و مقاومت سنگ‌ها می‌شود.

ج) نسبت پوکی

نسبت پوکی برابر است با نسبت بین حجم منافذ به حجم بخش جامد نمونه.

د) چگالی

چگالی سنگ با مقاومت سنگ و سرعت نفوذپذیری چالزن یا سیستم حفاری رابطه مستقیم دارد. هر چه سنگ متراکم‌تر باشد، سرعت نفوذپذیری چالزن کمتر خواهد بود و بالعکس.

ه) بافت

خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها به بافت و ساختمان آنها بستگی دارد. بافت گویای ساختمان درونی سنگ است و ممکن است تحت تاثیر اشکال و اندازه‌های مختلف ذرات و کانیها در سنگ‌های مختلف به شکل‌های گوناگون باشد. به طور کلی و بر اساس نوع کانی، انواع بافت به ۱۰ گروه تقسیم می‌شود که عبارتند از:۱) ماسه‌ای، ۲) رسی، ۳) سیلتی، ٤) لوم، ٥) لوم ماسه‌ای، ٦) لوم رسی، ۷) لوم سیلتی، ۸) لوم ماسه‌ای-رسی، ۹) ماسه‌ای-سیلتی،و ۱۰) رسی-سیلتی.

در تقسیم‌بندی رایج‌تری در حفاری بر اساس اندازه و شکل ذرات تشکیل‌دهنده سنگ، بافت سنگها در ٤ گروه تقسیم‌بندی می‌شوند:۱) دانه‌ای مانند گرانیت، ۲) پورفیری، ۳) شیشه‌ای، ٤) تخریبی مانند ماسه‌سنگ.

و) ساختمان سنگ

ساختمان سنگ بیانگر نحوه استقرار کانیها در کنار یکدیگر و ارتباط آنها با آب و هوا است.

۱-۲-۱-۲ بررسی خواص مکانیکی سنگ‌ها

الف) مقاومت

مقاومت عبارت است از میزان پایداری سنگ در مقابل تنش‌های خارجی. این تنش‌ها ممکن است در حالت سکون(استاتیک) و یا متحرک(دینامیک) روی سنگ تاثیر بگذارند. تنش ممکن است از نوع فشاری، کششی-خمشی و یا برشی باشد. به طور طبیعی، سنگ و خاک در مقابل تنش‌های فشاری مقاومت بیشتری نشان می دهند و میزان مقاومت برشی هر سنگ حدودا ۱۰ درصد مقاومت فشاری همان سنگ است. در حفاری مقاومت برشی سنگ‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. عوامل موثر در مقدار مقاومت فشاری سنگ‌ها عبارتند از:

۱. نوع کانیهای تشکیل‌دهنده و نحوه استقرار آنها،
۲. درجه هوازدگی یا آلتراسیون سنگ‌ها،
۳. نیروی بین مولکولی ذرات تشکیل‌دهنده آنها،
۴. وجود عواملی مانند درزه و شکاف در سنگ‌ها،
۵. خواص الاستیکی، پلاستیکی و آنیزوتروپی سنگ‌ها،
۶. جهت و میزان نیروهای وارده به سنگ‌ها.

روش‌های اندازه‌گیری انواع مقاومت سنگ:

۱. اندازه‌گیری شاخص کیفیت سنگ(R.Q.D)
۲. آزمایش بار نقطه‌ای

ب) الاستیسیته

الاستیسیته از خواص سنگ‌های غیرواقعی(ایده‌آل) است. به طور کلی هر جسم جامد وقتی که تحت تاثیر بار یا تنش قرار می‌گیرد مقدار تغییری در آن به وجود می‌آید. به عبارت دیگر به ازای هر مقدار تنش وارد شده به سنگ مقدار متناسبی کرنش وجود خواهد داشت. به عبارت ساده‌تر جسم(سنگ یا خاک) پس از انتقال تنش به حالت اولیه خود برگشت خواهد کرد. این خاصیت برگشت‌پذیری سنگ‌ها پس از انتقال تنش را الاستیسیته می‌نامند.

ج) پلاستیسیته

پلاستیسیته به خواصی از سنگ‌ها اطلاق می‌گردد که موجب تغییر شکل دائمی آنها می‌شود.

د) نسبت پویسون

نسبت پویسون عبارت است از نسبت بین کرنش حاصله از نمونه سنگ در جهت جانبی یا افقی به کرنش حاصله از همان نمونه در جهت طولی یا محوری[۱].

ه) سختی[1]

سختی عبارت است ازمقاومتی که کانی یا سنگ در مقابل ابزار خراش‌دهنده(ساینده) از خود نشان می‌دهد تا خراش(سایش) در آن ایجاد نشود. ابزار خراش‌دهنده در تماس با کانی یا سنگ بوده، طی حرکتی(نیرو) موجب ساینده‌گی کانی یا سنگ می‌شوند. همه کانیها و یا سنگ‌ها در مقابل همه اجسام خراش‌دهنده انعطاف‌پذیری ندارند. به عبارت دیگر از نظر خراش‌دهندگی هم اجسام خراش‌دهنده و هم خراش گیرنده، طبقه‌بندی شده‌اند. هر چه درجه سختی و ساینده‌گی سنگ‌ها زیادتر باشد، عمر مته ها کمتر و سرعت نفوذپذیری نیز کم می‌شود. عوامل موثر در افزایش و کاهش درجه سختی سنگ عبارتند از:

۱. دانه‌های(کانیها) تشکیل‌دهنده سنگ: هر چه کانیهای سنگ سخت‌تر باشند خراش و ساییدگی در سنگها به دشواری ایجاد خواهد شد.
۲. نیروی به‌هم‌چسبی: هر چه نیروی به‌هم‌چسبی کانیهای سنگ زیادتر باشد، ابزار ساینده به دلیل گرفتگی این کانیها به انرژی بیشتری برای ایجاد خراش و سایش نیاز دارند.
۳. شکل دانه‌ها: دانه‌های گوشه‌دار(تیز) خاصیت ساینده‌گی بیشتری دارند و اینگونه دانه‌ها عمر مته را کاهش می‌دهند.
۴. اندازه دانه‌ها: به طور معمول دانه‌های درشت تاثیر فرسایش بیشتری روی ابزار چالزنی خواهند گذاشت.
۵. درجه هموژنی سنگ‌ها: به طور معمول سنگ‌هایی که از یک کانی تشکیل شده‌اند درجه سختی کمتری دارند.
۶. مقدار آب موجود در سنگ: هر چه مقدار آب موجود در سنگ بیشتر باشد، درجه سختی و ساییدگی آن کمتر است.

[1] Hardness

و) سفتی

منظور از واژه سفتی سنگ‌ها، میزان مقاومت آنها در مقابل تنش‌های خارجی(چندین تنش مختلف) است. فرق بین مقاومت و سفتی سنگ‌ها در نوع تنش‌های وارده به سنگ‌ها می‌باشد. وقتی واژه مقاومت به کار می‌رود مقاومت سنگ در مقابل یک تنش مشخص، مانند تنش فشاری تک‌محوری یا تنش برشی، یا کششی مطرح است. اما منظور از کاربرد واژه سفتی، مقاومت سنگ در مقابل چند تنش مانند تنش‌های فشاری، کششی و برشی(ترکیب چند تنش) خواهد بود[۱].

بررسي تأثير ساينديگي بر قابليت حفاري سنگ‌ها

ساینديگی به عنوان يكي از مهم‌ترين پارامترهای مؤثر در قابلیت حفاری سنگ‌ها، سرعت حفاری در معادن را به شدت تحت تأثير خود قرار مي‌دهد. تاکنون چهار روش شناخته شده برای ارزیابی ساینديگی سنگ‌ها ارائه شده است که از جمله آنها می‌توان به روش شاخص ساينديگي سنگ(RAI)، انديس سايش سرشار(CAI)، فاکتور سايش شيمازک واندیس سايش سرمته(BWI)اشاره کرد[٤].

از میان ویژگی‌های ماده‌سنگ، مقاومت فشاری، ساینديگی و سختی از اهمیت بیشتری نسبت به سایر پارامترها برخوردارند. با توجه به کاربرد وسیع مقاومت فشاری در مهندسی سنگ و نیز اهمیت اطلاعات به دست آمده در مورد یک سنگ توسط این شاخص در مهندسی حفاری نیز مطالعات گسترده‌ای در مورد تأثیر مقاومت بر سرعت و قابلیت حفاری انجام یافته است. تحقیقات نشان می‌دهد که با افزایش مقاومت فشاری، قابلیت حفاری سنگها کاهش می‌یابد. چگونگی کاهش و رابطه ریاضی پیشنهادی بین مقاومت فشاری و سرعت حفاری بسته به نوع سیستم حفاری و نیز نوع سرمته به کار برده شده در تحقیقات مختلف، متفاوت بوده است. سختی به عنوان یک ویژگی فیزیکی مهم، نقش بسیار زیادی در سرعت حفاری دارد. تاکنون در بیشتر منابع حفاری، سختی سنگ مورد تأکید بوده است. با این حال متأسفانه تحقیقات جامع و کاملی در مورد ارتباط سختی و سرعت حفاری انجام نشده و رابطه ریاضی مطلوبی بین این دو کمیت ارائه نشده است.

در عملیات حفاری به خاصیتی از سنگ که موجب از بین رفتن انواع سرمته‌ها(ازجنس فولاد، کربور تنگستن و یا الماس) می‌شود، ساینديگی گفته مي‌شود. ساینديگی سنگ‌ها عموما به میزان کوارتز محتوی، اندازه و شکل دانه‌ها و مقاومت کششی سنگ بستگی دارد میزان ساینديگی سنگ یک پارامتر بسیار مهم و تعیین کننده در انتخاب نوع سیستم حفاری، نوع و هندسه سرمته است. لذا شناخت صحیح و واقعی این ویژگي کمک شایان توجهی به طراحان و برنامه ریزان معدن در انتخاب ماشین‌آلات و ارزیابی قابلیت حفاری خواهد کرد[٥].

۱-۲-۲ تاثیر عوامل زمین‌شناسی و تکتونیکی و فشار و حرارت زمین بر حفاری

در بعضی موارد با مطالعه ساختمان ظاهری یک نمونه سنگ می‌توان اطلاعات مفیدی برای حفاری ارائه داد. بسیاری از این ویژگی‌های ساختمان ظاهری سنگ‌ها، ناشی از حرکت زمین است. در ذیل به بخشی از این اطلاعات که در امر حفاری مفید واقع می‌شوند اشاره خواهد شد.

۱-۲-۲-۱ عوامل زمین‌شناسی و تکتونیکی

الف) شیب و امتداد لایه

نشست بیشتر سنگ‌های رسوبی در زیر آب به صورت لایه هایی افقی است که پس از سخت‌شدن تدریجی، لایه‌های سنگ را تشکیل می‌دهند. گاهی در فرآیند تدریجی تشکیل افقی لایه‌های