دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

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 محبت های بی دریغشان

تشکر و قدردانی

به نام پروردگار یکتایی که سایهٔ رحمت خود را بر من گسترد و نعمت‌های بی پایانش 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 سیّد هادی حسینی که در بسیاری از مواقع از راهنمایی‌های ارزنده ایشان استفاده نمودم کمال تشکر و امتنان را دارم.

معلما 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 مهندسین 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 حمایت های همه جانبه 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 بزرگوارم 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 فنّی 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. ازاین‌رو طبقه‌بندی قابلیت حفاری RDi به عنوان روشی مناسب برای زون‌بندی قابلیت حفاری معدن‌شماره ۱ گل‌گهر انتخاب شد.

در ادامه طی مطالعه در معدن شماره ۱ مجتمع معدنی گل‌گهر سیرجان توده‌سنگ‌های معدن بر اساس قابلیت حفاری RDi 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 RDi 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 RDi هر الگو تعیین شد. در نهایت ارتباط پارامترهای مورد مطالعه با سرعت حفاری و RDi تعیین شد. نتایج آماری نشان داد که

قابلیت حفاری RDi 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 RDi برداشت شده است. توده‌سنگ‌های معدن به ۶۶ زون مختلف تقسیم و امتیاز RDi هر زون تعیین شد و زون‌هایی که درهمسایگی 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 RDi در دو کلاس آهسته- متوسط و متوسط طبقه‌بندی شد. در پایان، با استفاده از نتایج حاصل از تحلیل آماری سرعت حفاری و قابلیت حفاری RDi، سرعت حفاری در زون‌های مختلف پیش‌بینی شده است.

کلمات کلید: طبقه‌بندی قابلیت حفاری RDi، معدن سنگ‌آهن گل‌گهر، توده‌سنگ، زون‌بندی، پیش‌بینی، سرعت حفاری

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- تعریف مساله ۳

۱-۳- سابقه و ضرورت انجام تحقیق ۴

۱-۴- اهداف تحقیق ۵

۱-۵- ساختار پایان‌نامه ۵

فصل دوم: بررسی تأثیر مشخصات دستگاه و توده‌سنگ بر سرعت حفاری

۲-۱- مقدمه ۸

۲-۲- مشخصات تأثیرگذار دستگاه بر سرعت حفاری در معادن روباز ۹

۲-۲-۱- بار پشت مته و تأثیر آن بر حفاری ۱۰

۲-۲-۲- دور مته و تأثیرآن در سرعت حفاری ۱۳

۲-۲-۳– هوای فلاشینگ و تأثیرآن در سرعت حفاری ۱۴

۲-۲-۴- مشخصات سرمته و تأثیرآن در سرعت حفاری ۱۶

۲-۲-۴-۱- تأثیر قطر سرمته بر سرعت حفاری ۱۶

۲-۲-۴-۲- تأثیر نوع و شکل سرمته بر سرعت حفاری ۱۷

۲-۳- بررسی تأثیر مشخصات توده سنگ بر سرعت حفاری ۱۷

۲-۳-۱- مشخصات فیزیکی و مینرالوژیکی سنگ‌ها ۱۹

۲-۳-۱-۱- چگالی ۲۰

۲-۳-۱-۲- بافت ۲۱

۲-۳-۱-۳- تخلخل ۲۸

۲-۳-۲- مشخصات مکانیکی سنگ‌ها ۳۰

۲-۳-۲-۱- مقاومت فشاری تک محوری ۳۰

۲-۳-۲-۲- مقاومت کششی ۴۰

۲-۳-۲-۳- تردی ۴۲

۲-۳-۲-۴- سختی ۴۴

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

فصل سوم: معرفی منطقه معدنی سنگ آهن گل‌گهر سیرجان

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

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

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

۴-۲-۱- برداشت سرعت متوسط الگوهای حفاری ۸۸
۴-۲-۲- مطالعات آزمایشگاهی ۸۹
۴-۲-۲-۱- نمونه‌برداری ۸۹
۴-۲-۲-۲- آماده سازی نمونه‌ها ۹۱
۴-۲-۲-۳- آزمایش تعیین مقاومت فشاری تک محوری ۹۲
۴-۲-۲-۴- آزمایش مقاومت کششی برزیلی ۹۳
۴-۲-۲-۵- آزمایش تعیین چگالی و تخلخل ۹۵
۴-۲-۲-۶- آزمایش غیر مخرب سرعت صوت و تعیین ثابت الاستیک دینامیک سنگ ۹۶
۴-۲-۳- تعیین امتیاز RDi توده‌سنگ‌های در برگیرنده الگوهای حفاری ۹۷
۴-۳- بررسی ارتباط بین پارامترهای مکانیک سنگی و RDi با سرعت حفاری ۹۹
۴-۴- زون‌بندی محدوده معدن بر اساس قابلیت حفاری RDi ۱۰۶
۴-۵- نتیجه‌گیری ۱۲۲

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱- نتیجه‌گیری ۱۲۴
۵-۲- پیشنهادات ۱۲۵

منابع و مراجع ۱۲۷

فهرست جدول‌ها

جدول ۲-۱- 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 ۲-۳- تحقیقات انجام شده در زمینه تأثیر پارامترهای مینرالوژیکی سنگ‌ها بر قابلیت حفاری ۱۹

جدول ۲-۴- روش وزن‌دهی به تفاوت‌های زاویه‌های دانه‌های کشیده (Ersoy & Waller, 1995a) ۲۴

جدول ۲-۵- امتیازدهی به بافت سنگ در طبقه‌بندی ویلبور(Wibur, 1982) ۲۷

جدول ۲-۶- امتیازدهی به بافت سنگ در طبقه‌بندی RDi (Hoseinie et al. 2008) ۲۷

جدول ۲-۷- تحقیقات انجام شده در زمینه تأثیر خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها بر قابلیت حفاری ۳۱

جدول ۲-۸- امتیازدهی به بافت سنگ در طبقه بندی RDi (Hoseinie et al. 2008) ۳۸

جدول ۲-۹- طبقه بندی توصیفی قابلیت حفاری بر اساس تردی(Altindag,2010) ۴۳

جدول ۲-۱۰- طبقه‌بندی و امتیازدهی به سختی سنگ‌ها در سیستم طبقه‌بندی RDi (Hoseinie et al. 2008) ۴۵

جدول ۲-۱۱- طبقه‌بندی قابلیت حفاری و ساینده‌گی سنگ‌ها با استفاده از شاخص BWI و DRI (Bruland, 1998) ۵۲

جدول ۲-۱۲- امتیازدهی به فاصله‌داری درزه‌ها در سیستم RDi (Hoseinie et al. 2008) ۶۲

جدول ۲-۱۳- نحوه امتیازدهی به شیب‌داری درزه‌های توده سنگ در سیستم RDi (Hoseinie et al. 2008) ۶۵

جدول ۲-۱۴- نحوه امتیازدهی به بازشدگی و پرکننده درزه‌ها توده سنگ در سیستم RDi (Hoseinie et al. 2008) ۶۶

جدول ۳-۱- مشخصات کمی و کیفی ذخیره شماره ۱(دفتر نظارت و طراحی،۱۳۹۰) ۷۹

جدول ۳-۲- ماشین آلات معدن (دفتر نظارت و طراحی، ۱۳۹۰) ۸۲

جدول ۴-۱- فرم ثبت سرعت حفاری در معدن گل‌گهر ۸۸

جدول ۴-۲- سرعت حفاری محاسبه شده در معدن ۸۹

جدول ۴-۳- نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری ۹۳

جدول ۴-۴- نتایج آزمایش مقاومت کششی برزیلی ۹۴

جدول ۴-۵- نتایج آزمایش چگالی و تخلخل ۹۵

جدول ۴-۶- نتایج آزمایش غیر مخرب صوت ۹۷

جدول ۴-۷- طبقه بندی اندیس قابلیت حفاری توده سنگ RDi ۹۸

جدول ۴-۸- پیش‌بینی نرخ نفوذ حفاری در توده‌سنگ با استفاده از RDi ۹۸

جدول ۴-۹- 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 ۲-۱- پارامترهای مؤثر در قابلیت حفاری توده سنگ‌ها و سایش تجهیزات (Thuro, 1997)..... ۸

شکل۲-۲- شکل کلی تغییرات سرعت حفاری نسبت به تغییرات بار پشت مته (Jimeno et al, 1995)..... ۱۲

شکل ۲-۳- تأثیر بار پشت مته بر سرعت حفاری برای سنگ‌های مختلف (SME, 1987)..... ۱۲

شکل ۲-۴- تأثیر بار پشت مته بر سرعت حفاری برای سه نوع سنگ مختلف (Rao & Misra, 1998) ۱۳

شکل ۲-۵- تأثیر بار پشت مته بر سرعت حفاری برای چهار دور مته مختلف (Rao & Misra, 1998)..... ۱۳

شکل ۲-۶- تأثیر میزان فشار هوای فلاشینگ بر ارتباط بین بار پشت مته و سرعت حفاری (اصانلو، ۱۳۸۶)..... ۱۵

شکل ۲-۷- ارتباط بین قطر سرمته و سرعت حفاری (استوار، ۱۳۷۹)..... ۱۶

شکل ۲-۸- ارتباط بین قطر مساحت چال و سرعت حفاری (Jimeno et al, 1995)..... ۱۷

شکل ۲-۹- پارامترهای ژئومکانیکی مؤثر بر قابلیت حفاری (Hoseinie et al., 2008)..... ۱۸

شکل ۲-۱۰- ارتباط چگالی سنگ و سرعت حفاری دورانی (Kahraman et al.,2000)..... ۲۱

شکل ۲-۱۱- ارتباط چگالی طبیعی و نرخ نفوذ (Kahraman et al., 2003)..... ۲۱

شکل ۲-۱۲- مفهوم فاکتور زاویه ۲۳

شکل ۲-۱۳- شمای کلی یک مقطع نازک برای محاسبه ضریب بافت (Howarth & Rowlands, 1987)..... ۲۵

شکل ۲-۱۴- ارتباط ضریب بافت و سرعت حفاری اکتشافی در سه نوع سرمته مختلف (Ersoy & Waller, 1995a) . ۲۶

شکل ۲-۱۵- رابطه سرعت حفاری و ضریب بافت (Rao & Misra, 1998)..... ۲۷

شکل ۲-۱۶- رابطه سرعت حفاری و ضریب بافت (Howarth & Rowlands, 1987)..... ۲۷

شکل ۲-۱۷- رابطه سرعت حفاری با تخلخل و چگالی سنگ(Thuro, 1997)..... ۲۸

شکل ۲-۱۸- رابطه عمر سرمته و تخلخل سنگ (Thuro, 1997)..... ۲۹

شکل ۲-۱۹- رابطه سرعت حفاری با تخلخل و چگالی خشک سنگ (Thuro, 2002a)..... ۲۹

شکل ۲-۲۰- تاثیر جهت داری متفاوت نا پیوستگی‌ها بر حفاری (Thuro,1996)..... ۳۴

شکل ۲-۲۱- رابطه مقاومت فشاری و متوسط نفوذ (Akun & Karpuz, 2005) ۳۴

شکل ۲-۲۲- رابطه سرعت حفاری ضربه‌ای و مقاومت فشاری (Bilgin & Kahraman, 2003)..... ۳۵

شکل ۲-۲۳- رابطه سرعت حفاری ضربه‌ای و مقاومت فشاری (Kahraman et al. 2003)..... ۳۶

شکل ۲-۲۴- 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 ساییدگی رزیوال سنگ با استفاده از سختی موهس (Thuro, 1997) ۴۷
شکل ۲-۳۷- گراف ساییدگی پیوسته برای کوارتز محتوی ۴۸
شکل ۲-۳۸- گراف ساییدگی پیوسته برای اندازه دانه‌ها ۴۸
شکل ۲-۳۹- گراف ساییدگی پیوسته برای مقاومت کششی برزیلی ۴۸
شکل ۲-۴۰- آزمایش اندازه‌گیری میزان تردی سنگ (S_{20}) (Bruland, 1998) ۴۹
شکل ۲-۴۱- آزمایش چالزنی کوچک با سرمته مینیاتوری (Bruland, 1998) ۵۰
شکل ۲-۴۲- نموگراف 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 DRI و AV (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 سرمته در انواع سنگ‌ها (Thuro, 1997) ۵۴
شکل ۲-۴۷- رابطه شاخص ساییدگی سنگ RAI و عمر سرمته(Plinninger et al, 2002) ۵۵
شکل ۲-۴۸- رابطه کوارتز محتوای معادل و عمر سرمته (Thuro & Plinnger, 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 Muschelkalk (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 درزه های شیب دار..... ۶۳
شکل ۲-۵۸- شرایط هندسی نفوذ مته در سطح درزه با شیب های مختلف (حسینی و همکاران، ۱۳۸۶)..... ۶۴
شکل ۲-۵۹- حجم های بحرانی در شیب های 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- نمایی از سایت معدنی گل گهر 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- نمایی از نقشه زمین شناسی پله ۱۰ (کوشامعدن، ۱۳۹۰)..... ۷۷
شکل ۳-۵- نمایی از نقشه زمین شناسی پله ۱۱ (کوشامعدن، ۱۳۹۰)..... ۷۷
شکل ۳-۶- نمایی از نقشه زمین شناسی پله ۱۲ (کوشامعدن، ۱۳۹۰)..... ۷۸
شکل ۳-۷- نمایی از نقشه زمین شناسی 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- نمودار‌درصد 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- پیش بینی 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 ماده‌سنگ و توده‌سنگ 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 توده‌سنگ‌های 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 کمّیت چالخوری سنگ‌ها از اهمیت حیاتی برخوردار است.

در مهندسی سنگ به منظور ارزیابی رفتار توده‌سنگ، 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 توده‌سنگ‌های موجود در معدن سنگ‌آهن گل‌گهر با استفاده از اندیس قابلیت حفاری توده‌سنگ[1]، مورد مطالعه قرار خواهند گرفت.

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

[1] 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[1] 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، سفتی، سختی و ساختمان توده‌سنگ اشاره کرده است (اصانلو، ۱۳۸۶). جمینیو[2] 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[3] و همکارانش در سال۲۰۰۰، 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