

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد استخراج مواد معدنی

زون بندی معادن روباز بر اساس قابلیت حفاری و سرعت حفاری

مطالعه موردی: معدن مارن ۱ شرکت سیمان مشهد

نگارنده: فرشاد کوهستانی

اساتید راهنما

دکتر فرهنگ سرشکی

دکتر محمد عطایی

استاد مشاور

دکتر رضا خالوکاکائی

دی ۱۳۹۵

با احترام تقدیم به

پدرم، اولین استادم، که همواره پتر مجتبی بر سرم است

بزرگواری که انضامی زندگی را از او آموختم.

مادرم، بلندتکیه گاهم، که دلمان پر مهرش یکنانه پناهیم است

مهربانی که عشق و رزیدن را از او آموختم.

و تقدیم به

برادر و خواهر عزیزم، که در تکمیل تحصیل همواره مشوقم بودند.

تقدیر و تشکر

سپاس خدای عزوجل را که همواره بندگان را مورد لطف و عنایتش قرار داده است، خدایی که بار دیگر مرا تحت الطاف بیکرانش قرار داد تا بتوانم قدمی دیگر در مسیر اعتلا و پیشرفت تحصیل پیش بردارم. بی‌شک در ابتدایستی قدردان پدر و مادر مهربانم باشم که یک بار دیگر با فراهم نمودن اسباب رفاه آسایش، گذر از این مرحله زندگانی نیز یاریم نمودند و البته امیدوار به روزی که تنها بتوانم گوشه‌ای بسیار کوچک از زحماتشان را جبران نمایم. در ادامه مراتب سپاس و قدردانی خویش را انشاء الله به اساتید راهنمای عزیزم دکتر فرزندگ سرشکی و دکتر محمد عطایی و استاد مشاور عزیزم دکتر رضا خالوکا کائنی نموده و از خداوند متعال سلامتی، موفقیت و بهروزی را برای ایشان خواستارم. از جناب آقای دکتر امین رفیعی و جناب آقای دکتر مهر داد سلیمانی متفرد که زحمت داورسی این پایان نامه به عهده ایشان بود، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

همچنین از دکتر کیومرث سیف‌پناهی و دکتر سید نادری حسینی که در بهبود پایان نامه اینجانب، کمک بزرگی کردند، کمال تشکر را دارم. در خاتمه از مهندس نادر زیاری، مهندس شهاب زنگنه، مهندس بیژن روشنروان، مهندس مصطفی آموزش، مهندس مصطفی علنیزاده و کلیه دوستان و عزیزانی که مراد به پایان رسانیدن این پایان نامه یاری نمودند سپاس گذاری می‌نمایم، مطمئناً موفقیت و سلامتی ایشان آرزوی قلبی اینجانب خواهد بود.

تعهد نامه

اینجانب **فرشاد کوهستانی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن (استخراج) دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **زون بندی معادن روباز بر اساس قابلیت حفاری و سرعت حفاری – مطالعه موردی: معدن مارن ۱ شرکت سیمان مشهد** تحت راهنمایی **دکتر فرهنگ سرشکی** و **دکتر محمد عطایی** متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

امضای دانشجو

تاریخ: / /

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد

چکیده

حفاری به عنوان اولین مرحله در استخراج معادن روباز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به حجم سرمایه‌گذاری بالا، پیش‌بینی سرعت حفاری در پیشروی حفاری، برنامه‌ریزی معدن و پیش‌بینی خصوصیات سنگ، تعیین زمان تعویض سرمته و کاهش هزینه‌های معدن‌کاری بسیار ضروری است. با توجه به اهمیت این موضوع هدف اصلی این پایان‌نامه ناحیه‌بندی ناحیه استخراجی معدن از دیدگاه قابلیت حفاری و سرعت حفاری توده‌سنگ‌های موجود با استفاده از روش عکس فاصله است.

در این پایان‌نامه ابتدا پارامترهای تأثیرگذار بر قابلیت حفاری بر اساس تحقیقات و مطالعات پیشین از مقالات و متون علمی موجود مورد بررسی قرار گرفت و مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر قابلیت حفاری و سرعت حفاری شناسایی شد. با توجه به این که سرعت حفاری به پارامترهای مختلفی متکی است، بر این اساس از اندیس قابلیت حفاری توده‌سنگ (RDi)، که متشکل از پارامترهای مؤثر بر سرعت حفاری است؛ به عنوان روشی مناسب برای ناحیه‌بندی استفاده شده است.

در ادامه برای بررسی و ارزیابی توده‌سنگ‌های معدن مارن ۱ شرکت سیمان شرق، پارامترهای اندیس قابلیت حفاری توده‌سنگ منطقه مورد مطالعه به صورت صحرائی و آزمایشگاهی برداشت و در آزمایشگاه مورد آزمایش قرار گرفت و امتیاز RDi برای هر الگو تعیین شد. همچنین سرعت حفاری هر الگو ثبت و سرعت متوسط حفاری برای هر الگو محاسبه شد.

سپس ارتباط بین پارامترهای مؤثر بر قابلیت حفاری و سرعت حفاری و همچنین ارتباط بین اندیس قابلیت حفاری توده‌سنگ با سرعت حفاری مورد بررسی قرار گرفت و نتیجه گرفته شد که بین اندیس قابلیت حفاری توده‌سنگ و سرعت حفاری رابطه خوبی برقرار است و از این رابطه برای پیش‌بینی سرعت حفاری استفاده شده است.

در مرحله بعد، توده‌سنگ‌های منطقه مورد مطالعه به ۵۲ ناحیه تقسیم و پارامترهای کمی طبقه‌بندی RDi به روش عکس فاصله تخمین زده شدند. همزمان با تخمین پارامترهای کمی، پارامترهای کیفی طبقه‌بندی RDi نیز برداشت شدند. سپس امتیاز RDi برای هر ناحیه تعیین شد که بر این اساس توده‌سنگ‌های در برگیرنده منطقه مورد مطالعه به دو کلاس متوسط و متوسط - تند بر اساس سرعت حفاری طبقه‌بندی شدند.

در انتها با استفاده از نرم‌افزار GIS منطقه مورد مطالعه بر اساس اندیس قابلیت حفاری توده‌سنگ و سرعت حفاری ناحیه‌بندی شده است.

کلمات کلیدی: معادن روباز، پیش‌بینی سرعت حفاری، اندیس قابلیت حفاری توده‌سنگ

(RDi)، ناحیه‌بندی، توده‌سنگ‌های معدن مارن ۱ شرکت سیمان شرق، نرم‌افزار GIS

فهرست مطالب

۱	..... فصل اول
۲	..... ۱-۱- مقدمه
۳	..... ۲-۱- تعریف مسأله
۳	..... ۳-۱- اهمیت انجام تحقیق
۴	..... ۴-۱- ضرورت انجام تحقیق
۴	..... ۵-۱- اهداف تحقیق
۴	..... ۶-۱- معرفی منطقه مورد مطالعه
۵	..... ۷-۱- پیشینه و سابقه تحقیق
۷	..... ۸-۱- ساختار پایان نامه
۹	..... فصل دوم
۱۰	..... ۱-۲- مقدمه
۱۰	..... ۲-۲- مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه پارامترهای مؤثر بر سرعت حفاری
۱۳	..... ۱-۲-۲- مشخصات تأثیرگذار دستگاه بر سرعت حفاری در معادن روباز
۱۴	..... ۱-۱-۲-۲- بار پشت مته و تأثیر آن بر حفاری
۱۵	..... ۱-۱-۲-۲- بار پشت مته و تأثیر آن بر حفاری
۱۶	..... ۳-۱-۲-۲- هوای فلاشینگ و تأثیر آن در سرعت حفاری
۱۶	..... ۴-۱-۲-۲- مشخصات سرمته و تأثیر آن در سرعت حفاری
۱۸	..... ۲-۲-۲- بررسی تأثیر مشخصات توده سنگ بر سرعت حفاری
۱۹	..... ۱-۲-۲-۲- مشخصات فیزیکی سنگها
۲۳	..... ۲-۲-۲-۲- مشخصات مکانیکی سنگها

۶۱	..... ۴-۴-۲-۴- آزمایش بافت
۶۲	..... ۴-۴-۲-۵- آزمایش سختی چکش اشمیت
۶۷	..... ۴-۳- تعیین امتیاز <i>RDi</i> توده‌سنگهای دربرگیرنده الگوهای حفاری
۷۰	..... ۴-۴- بررسی ارتباط بین پارامترهای مکانیک‌سنجی و <i>RDi</i> با سرعت حفاری
۷۳	..... ۴-۵- ناحیه‌بندی محدوده معدن مارن ۱ با استفاده از روش عکس فاصله
۷۶	..... ۴-۵-۱- تعیین بهترین مدل تخمین پارامتر مقاومت فشاری
۸۰	..... ۴-۵-۲- تعیین بهترین مدل تخمین پارامتر سختی موهس
۸۳	..... ۴-۵-۳- امتیازدهی <i>RDi</i> و کلاس بندی ۵۲ ناحیه معدن مارن ۱
۸۵	..... ۴-۵-۳-۱- بررسی آماری طبقه‌بندی <i>RDi</i>
۸۶	..... ۴-۵-۳-۲- بررسی آماری پارامترهای <i>RDi</i>
۹۰	..... ۴-۵-۴- ناحیه‌بندی نهایی بر اساس شاخص قابلیت حفاری و سرعت حفاری
۹۲	..... ۴-۶- جمع‌بندی
۹۳	..... فصل پنجم
۹۴	..... مقدمه
۹۴	..... نتیجه‌گیری
۹۶	..... پیشنهادها
۹۷	..... منابع و مراجع
۱۰۱	..... پیوست‌ها
۱۰۲	..... پیوست ۱
۱۰۶	..... پیوست ۲

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲- پارامترهای مؤثر در قابلیت حفاری توده‌سنگ‌ها و سایش تجهیزات ۱۲
- شکل ۲-۲- شکل کلی تغییرات سرعت حفاری نسبت به تغییرات بار پشت مته ۱۵
- شکل ۳-۲- ارتباط بین نرخ نفوذ و بار روی سرمته ۱۷
- شکل ۴-۲- ارتباط بین نرخ نفوذ و سرعت دوران ۱۷
- شکل ۵-۲- پارامترهای ژئومکانیکی مؤثر بر قابلیت حفاری ۱۹
- شکل ۶-۲- ارتباط چگالی سنگ و سرعت حفاری ۲۰
- شکل ۷-۲- رابطه سرعت حفاری با تخلخل و چگالی سنگ ۲۲
- شکل ۸-۲- رابطه عمر سرمته و تخلخل سنگ ۲۳
- شکل ۹-۲- ارتباط بین مقاومت فشاری تک‌محوری و نرخ نفوذ متوسط ۲۴
- شکل ۱۰-۲- رابطه بین قابلیت حفاری و مقاومت فشاری ۲۵
- شکل ۱۱-۲- رابطه سرعت حفاری ضربه‌ای و مقاومت فشاری ۲۵
- شکل ۱۲-۲- ارتباط بین سرعت حفاری ضربه‌ای در تونل‌ها و مقاومت فشاری سنگ‌های اسلیتی و کوارتزیتی ۲۶
- شکل ۱۳-۲- ارتباط اندیس بار نقطه‌ای و سرعت حفاری دورانی ۲۷
- شکل ۱۴-۲- ارتباط اندیس بار نقطه‌ای و سرعت حفاری ضربه‌ای ۲۷
- شکل ۱۵-۲- ارتباط عدد چکش اشمیت و سرعت حفاری دورانی ۲۸
- شکل ۱۶-۲- ارتباط عدد چکش اشمیت و سرعت حفاری ضربه‌ای ۲۸
- شکل ۱۷-۲- ارتباط مقاومت کششی و سرعت حفاری دورانی ۲۹
- شکل ۱۸-۲- ارتباط مقاومت کششی و سرعت حفاری ضربه‌ای ۲۹
- شکل ۱۹-۲- ارتباط بین مقاومت کششی و سرعت حفاری ضربه‌ای در تونل‌سازی ۲۹
- شکل ۲۰-۲- ارتباط تردی با نرخ نفوذ نرمال شده برای داده‌های مختلف ۳۱

- شکل ۲-۲۱- ارتباط بین تردی با اندیس قابلیت حفاری ۳۲
- شکل ۲-۲۲- ارتباط بین اندیس سایش رزیوال و سختی موهس ۳۴
- شکل ۲-۲۳- ارتباط سرعت حفاری و مدول الاستیسیته سنگ‌ها ۳۴
- شکل ۲-۲۴- ارتباط قابلیت حفاری و مدول الاستیسیته سنگ‌ها در حفاری دورانی ۳۵
- شکل ۲-۲۵- ارتباط قابلیت حفاری و مدول الاستیسیته سنگ‌ها در حفاری ضربه‌ای ۳۵
- شکل ۲-۲۶- ارتباط فاصله‌داری با نرخ حفاری در معدن آهک *Muschelkalk* ۳۷
- شکل ۲-۲۷- رابطه سرعت حفاری با فراوانی درزه‌ها ۳۷
- شکل ۲-۲۸- رابطه سرعت حفاری با فاصله‌داری درزه‌ها ۳۸
- شکل ۲-۲۹- رابطه بین سرعت حفاری و شیب درزه‌ها ۳۹
- شکل ۲-۳۰- رابطه بین سرعت حفاری و ابعاد پرکننده درزه‌ها ۴۰
- شکل ۳-۱- موقعیت محدوده مورد مطالعه از نمای بالا (بدون مقیاس) ۴۷
- شکل ۴-۱- موقعیت مکانی ۱۳ سینه‌کار برداشت شده ۵۳
- شکل ۴-۲- کدگذاری مغزه‌های گرفته شده ۵۷
- شکل ۴-۳- آماده‌سازی نمونه‌ها و مغزه‌گیری ۵۸
- شکل ۴-۴- اعمال نیرو و شکسته شدن مغزه ۵۹
- شکل ۴-۵- کوره مربوط به آزمایش چگالی و تخلخل ۶۰
- شکل ۴-۶- بافت دو نمونه از مقاطع نازک گرفته شده در زیر میکروسکوپ ۶۲
- شکل ۴-۷- تعیین سختی چکش اشمیت نمونه‌ها ۶۲
- شکل ۴-۸- موقعیت مکانی ۹ سینه‌کار جدید ۶۴
- شکل ۴-۹- موقعیت مکانی مجموع ۲۲ سینه‌کار برداشت شده ۶۴
- شکل ۴-۱۰- ارتباط بین مقاومت فشاری تک‌محوری با سختی چکش اشمیت ۶۶

- شکل ۴-۱۱- ارتباط بین سختی چکش اشمیت با سرعت حفاری ۷۰
- شکل ۴-۱۲- ارتباط بین مقاومت فشاری تک‌محوری با سرعت حفاری ۷۱
- شکل ۴-۱۳- ارتباط بین چگالی با سرعت حفاری ۷۱
- شکل ۴-۱۴- ارتباط بین تخلخل با سرعت حفاری ۷۱
- شکل ۴-۱۵- ارتباط بین شاخص قابلیت حفاری و سرعت حفاری ۷۳
- شکل ۴-۱۶- موقعیت مکانی ۵۲ ناحیه منطقه مورد مطالعه ۷۶
- شکل ۴-۱۷- مقاومت فشاری آزمایشگاهی - تخمینی به روش عکس توان ۳ فاصله ۷۹
- شکل ۴-۱۸- سختی موهس آزمایشگاهی - سختی موهس تخمینی عکس توان ۱۴ فاصله ۸۲
- شکل ۴-۱۹- هیستوگرام امتیاز RDi ناحیه‌های مورد مطالعه ۸۵
- شکل ۴-۲۰- نمودار درصد فراوانی امتیاز RDi ناحیه‌های مورد مطالعه ۸۵
- شکل ۴-۲۱- هیستوگرام فراوانی بازشدگی و پرشدگی درزه‌های ناحیه‌های مورد مطالعه ۸۷
- شکل ۴-۲۲- نمودار درصد فراوانی زاویه بین محور چال با درزه‌های ناحیه‌های مورد مطالعه ... ۸۷
- شکل ۴-۲۳- هیستوگرام سختی موهس ناحیه‌های مورد مطالعه ۸۸
- شکل ۴-۲۴- نمودار درصد فراوانی سختی موهس ناحیه‌های مورد مطالعه ۸۸
- شکل ۴-۲۵- هیستوگرام فراوانی مقاومت فشاری ناحیه‌های مورد مطالعه ۸۹
- شکل ۴-۲۶- نمودار درصد فراوانی مقاومت فشاری ناحیه‌های مورد مطالعه ۸۹
- شکل ۴-۲۷- ناحیه‌بندی نهایی معدن مارن ۱ براساس شاخص قابلیت حفاری RDi ۹۰
- شکل ۴-۲۸- ناحیه‌بندی نهایی معدن مارن ۱ براساس سرعت حفاری ۹۱

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۱- خلاصه‌ای از مطالعات محققین در رابطه با قابلیت حفاری و نرخ نفوذ در سنگ ... ۵
- جدول ۱-۲- پارامترهای مؤثر بر سرعت حفاری با توجه به نوع روش حفاری ۱۳
- جدول ۲-۲- بار پیشنهادی برای قطرهای مختلف در سنگ‌های سخت ۱۴
- جدول ۳-۲- امتیازدهی به بافت سنگ در طبقه‌بندی ویلبور ۲۱
- جدول ۴-۲- امتیازدهی به بافت سنگ در طبقه‌بندی *RDi* ۲۲
- جدول ۵-۲- امتیازدهی به مقاومت فشاری در طبقه‌بندی *RDi* ۲۶
- جدول ۶-۲- طبقه‌بندی توصیفی قابلیت حفاری بر اساس تردی ۳۱
- جدول ۷-۲- طبقه‌بندی و امتیازدهی به سختی سنگ‌ها در سیستم طبقه‌بندی *RDi* ۳۳
- جدول ۸-۲- نحوه امتیازدهی به شیب‌داری درزه‌های توده‌سنگ در سیستم *RDi* ۳۹
- جدول ۹-۲- طبقه‌بندی اندیس قابلیت حفاری توده‌سنگ *RDi* ۴۱
- جدول ۱۰-۲- پیش‌بینی سرعت حفاری در توده‌سنگ با استفاده از *RDi* ۴۲
- جدول ۱-۳- مختصات نقاط رأس ده ضلعی محدوده اکتشافی مورد مطالعه ۴۷
- جدول ۱-۴- فرم ثبت سرعت حفاری در معدن مارن ۵۴
- جدول ۲-۴- سرعت متوسط حفاری محاسبه شده ۵۴
- جدول ۳-۴- نتایج فاصله‌داری، بازشدگی و شیب متوسط ناپیوستگی‌ها ۵۵
- جدول ۴-۴- سختی موهس سینه‌کارهای حفاری شده ۵۶
- جدول ۵-۴- نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری ۵۹
- جدول ۶-۴- نتایج آزمایش چگالی و تخلخل ۶۱
- جدول ۷-۴- نتایج میانگین سختی چکش اشمیت ۶۳
- جدول ۸-۴- محاسبه پارامترهای *RDi* برای سینه‌کارهای جدید ۶۵

- جدول ۹-۴- سختی اشمیت و مقاومت فشاری تک‌محوری برای سینه‌کارهای جدید ۶۷
- جدول ۱۰-۴- نتایج کلی مقادیر برداشت شده پارامترهای *RDi* برای ۲۲ سینه‌کار ۶۸
- جدول ۱۱-۴- امتیاز *RDi* الگوهای حفاری مورد مطالعه ۶۹
- جدول ۱۲-۴- نتایج اندازه‌گیری شده پارامترها در هر ناحیه ۷۴
- جدول ۱۳-۴- مقادیر شاخص‌های ارزیابی برای روابط ارائه شده ۷۸
- جدول ۱۴-۴- مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری برای ۵۲ ناحیه ۸۰
- جدول ۱۵-۴- مقادیر درصد صحیح بودن مقدار سختی موهس تخمینی ۸۱
- جدول ۱۶-۴- نتایج تخمین سختی موهس به روش عکس توان ۱۴ فاصله ۸۲
- جدول ۱۷-۴- امتیاز دهی به پارامترهای *RDi* ۸۳

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

حفاری به معنی نفوذ در سنگ است. نفوذ در سنگ‌ها گاهی به منظور خرد کردن آن‌ها انجام می‌گیرد. حفاری به عنوان یک عملیات مهندسی، در زمینه‌های مختلف فنی و مهندسی از جمله مهندسی معدن، مهندسی نفت، عمران و آب‌های زیرزمینی، کاربردهای وسیع و تعیین‌کننده‌ای دارد.

بسته به روش حفاری و نوع ماشین‌آلات به کار برده شده، حجم عملیات انجام گرفته در زمینه‌های مختلف، متفاوت از همدیگر است. حفاری با قطرهای ۰/۵ تا ۲۴ اینچ و عمق‌های یک متر تا چند هزار متر، گستره‌ی وسیع عملیات حفاری و تنوع کاربردهای آن را به خوبی آشکار می‌سازد.

در استخراج کلیه معادن به استثنای موارد نادر، مانند استخراج سنگ‌های ساختمانی یا برداشت بعضی از سنگ‌های سست، حفاری جزء عملیات اجتناب‌ناپذیر محسوب می‌شود، بنابراین هرگونه حفاری در یک منطقه بایستی با شناخت کامل از زمین‌شناسی و بررسی عوامل مؤثر در عملیات حفاری آغاز شود.

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 مشخصات فنی و اجرایی دستگاه حفاری، مشخصات فیزیکی و ژئومکانیکی توده‌سنگ و عوامل خدماتی و عملیاتی ارزیابی و طبقه‌بندی کرد. از میان این سه گروه، دو مورد اول از اهمیت بیشتری برخوردارند. پارامترهای دستگاه عموماً با نام "پارامترهای قابل کنترل" و یا "پارامترهای وابسته" خوانده می‌شوند. گروه دوم که عموماً نشان‌دهنده کیفیت ماده‌سنگ و توده‌سنگ از نظر قابلیت حفاری می‌باشند، 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 کرده و استهلاک ماشین‌آلات را به حداقل رسانید [۱].

۱-۲- تعریف مسأله

حفاری به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مراحل فرآیند استخراج معدن، بهره‌برداری از منابع نفت و گاز و تحقق کارهای عمرانی تأثیر بسزایی بر روی هزینه‌ها و زمان انجام پروژه دارد. حفاری به‌عنوان یک فرآیند معدن‌کاری از خصوصیات ژئومکانیکی ماده‌سنگ و توده‌سنگ اثر می‌پذیرد. بنابراین شناخت خصوصیات سنگ برجا کمک بسیار زیادی به انتخاب نوع سیستم چال‌زنی، تعیین تعداد ماشین‌آلات چال‌زنی، ارزیابی توان تولید معدن و پیش‌بینی سرعت حفاری خواهد نمود. پیش‌بینی صحیح نرخ حفاری می‌تواند یک دید کلی در اختیار متخصصان قرار بدهد [۲].

از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر سرعت حفاری می‌توان به ژنز و منشأ تشکیل سنگ‌ها (آذرین، رسوبی و دگرگونی)، سختی سنگ، بافت سنگ (شکل و اندازه دانه‌های سنگ)، تخلخل، چگالی، ساینده‌گی، الاستیسیته و پلاستیسیته، مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ^۱ (اندیس بار نقطه‌ای و چکش اشمیت)، مقاومت کششی، مشخصات توده‌سنگ (درزه و شکاف، لایه‌بندی) اشاره نمود. چنانچه مشاهده می‌شود تمامی ۱۱ پارامتر فوق به نحو بسیار مطلوبی مشخصات فیزیکی، مکانیکی و مهندسی ماده‌سنگ و توده‌سنگ را تشریح می‌کنند. با توجه به هزینه بالا و ماشین‌آلات گران‌قیمت، شناخت تمامی پارامترهای دخیل در حفاری و بهینه‌سازی آن، شرایط را برای استخراج بهینه فراهم می‌سازد. حفاری اصولی در نهایت منجر به انفجار مناسب، خردشدگی مطلوب و کاهش مؤثر هزینه‌ها می‌شود [۳].

۱-۳- اهمیت انجام تحقیق

حفاری یک رابطه مستقیم و نزدیک با خواص سنگ دارد، بنابراین شناخت خصوصیات سنگ کمک بزرگی برای انتخاب نوع مناسب از سیستم حفاری، پیش‌بینی نرخ حفاری، تعیین تعداد ماشین‌آلات حفاری و میزان تولید معدن خواهد بود.

^۱ UCS

با توجه به حجم سرمایه‌گذاری بالا، لزوم برنامه‌ریزی و تعیین هزینه‌های حفاری، اهمیت حفاری آشکارتر و تعیین قابلیت حفاری سنگ‌ها در پروژه‌های مهندسی اهمیت بیش‌تری پیدا می‌کند؛ بنابراین شناخت کامل پارامترهای درگیر در حفاری، مطلوب خواهد بود. به دلیل تعداد پارامترهای زیاد، هزینه بالا و وقت‌گیر بودن اندازه‌گیری این پارامترها، باید روشی استفاده شود که علاوه بر سهولت، دربرگیرنده پارامترهای اساسی در فرآیند حفاری باشد؛ از این رو استفاده از روش‌های تخمین همچون عکس فاصله می‌تواند روش مناسبی برای ارزیابی و بررسی قابلیت حفاری سنگ‌ها باشد.

۱-۴- ضرورت انجام تحقیق

ناحیه‌بندی توده‌سنگ‌های دربرگیرنده مواد معدنی و پیش‌بینی سرعت حفاری در آن به دلیل حجم بالای عملیات می‌تواند به طور جدی شرایط اقتصادی و عملیاتی معدن را تحت تأثیر قرار دهد، بنابراین، با توجه به این‌که در منطقه مورد مطالعه این کار انجام نشده است، انجام این پروژه دارای فوریت زمانی است و هر چه زودتر نتیجه حاصل شود برای معدن مناسب‌تر است.

۱-۵- اهداف تحقیق

در این پروژه هدف اصلی ناحیه‌بندی ناحیه استخراجی معدن از دیدگاه قابلیت حفاری و سرعت حفاری توده‌سنگ‌های موجود با استفاده از روش عکس فاصله^۱ است. برای این کار دو هدف جزئی زیر را می‌توان در نظر گرفت:

✓ تعیین عوامل مؤثر بر سرعت حفاری در معادن روباز

✓ طبقه‌بندی توده‌سنگ‌های ترازهای مختلف معدن

۱-۶- معرفی منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در شمال - شمال شرق مشهد واقع شده است. این منطقه به شکل یک ۱۰ ضلعی با مساحت ۱۸۱/۴ هکتار است.

^۱ inverse distance to a power

راه اصلی دسترسی به محدوده، جاده مشهد به کارخانه سیمان است که به جاده سیمان مشهور است. طول مسیر از مشهد تا کارخانه ۲۸ کیلومتر می‌باشد و از روستاهای قرقی سفلی و فارمد می‌گذرد.

۷-۱- پیشینه و سابقه تحقیق

تا به حال به خصوص در ۱۵ سال گذشته، بسیاری از محققان بر روی حفاری سنگ مطالعه کرده‌اند و روابط بسیاری بین سرعت حفاری و خواص فیزیکی و مکانیکی مختلف سنگ ارائه کرده‌اند. در هر یک از این تحقیقات، یک یا چند پارامتر مورد بررسی قرار گرفته و نتایج عمده‌ای به دست آمده است. به طور خلاصه این تحقیقات در جدول (۱-۱) مشاهده می‌شود و در فصل دوم به صورت جامع‌تری این تحقیقات پرداخته شده است.

جدول ۱-۱- خلاصه‌ای از مطالعات محققین در رابطه با قابلیت حفاری و نرخ نفوذ در سنگ

نام محقق	موضوع تحقیق	توضیحات
<i>Protodyakonov (1962)</i> [۴]	ارائه ضریب مقاومت سنگ	مطالعات ایشان در پیش‌بینی نرخ نفوذ سیستم‌های ضربه‌ای کاربرد بیشتری دارد.
<i>Rabia and Brook (1980)</i> [۴]	تعیین ارتباط بین نرخ نفوذ و ضریب مقاومت سنگ	مدل آن‌ها برای پیش‌بینی نرخ نفوذ دستگاه‌های ضربه‌ای کاربرد داشت و داده‌ها در مورد حفاری دورانی رابطه‌ای نشان ندادند.
<i>Jimeno et al (1995)</i> [۵]	طبقه‌بندی قابلیت حفاری سنگ‌ها بر اساس منشأ، سختی، الاستیسیته و پلاستیسیته، درزه‌ها و ساختار سنگ	در این تحقیق به ارتباط مقادیر کمی طبقه‌بندی با نرخ نفوذ حفاری اشاره‌ای نشده و همچنین تأثیر پارامترهای دستگاه در عملیات حفاری دیده نشده است.
<i>Kahraman (1999)</i> [۶]	مدل نرخ نفوذ برای دستگاه‌های دورانی و ضربه‌ای	در این تحقیق تأثیر خصوصیات هندسی درزه‌ها در نظر گرفته نشده است. ایشان به درزه‌داری محدوده-های برداشت‌شده اشاره می‌کند، اما به تأثیر درزه-داری یا RQD^1 در نرخ نفوذ اشاره‌ای نکرده است.

¹ Rock Quality Designation

ادامه جدول ۱-۱- خلاصه‌ای از مطالعات محققین در رابطه با قابلیت حفاری و نرخ نفوذ در سنگ

Altindag (2000 , 2003)	تأثیر تردی سنگ و انرژی ویژه بر قابلیت حفاری و نرخ نفوذ	این اندیس‌ها با نرخ نفوذ حفاری دورانی رابطه‌ای نداشتند. اندیس‌های تردی سنگ بیشتر در ارتباط با نرخ نفوذ دستگاه‌های حفاری ضربه‌ای می‌باشند.	[۴]
Hoseinie et al (2008 , 2009)	تأثیر بافت و اندازه دانه‌ها، مقاومت فشاری، سختی موس، فاصله‌داری درزه‌ها، شیب درزه‌ها، بازشدگی و پرکننده درزه‌ها بر شاخص قابلیت حفاری و نرخ نفوذ	در تحقیق اول ایشان پارامترهای دستگاه حفاری که در نرخ نفوذ بسیار مؤثرند، در روابط تأثیر داده نشده‌اند و در تحقیق دوم درزه‌های توده‌سنگ در نظر گرفته نشده است.	[۷]، [۸]
Adebayo et al (2010)	قابلیت حفاری و خصوصیات مقاومتی سنگ‌های انتخاب‌شده در نیجریه	خصوصیات مقاومتی را در آزمایشگاه مورد مطالعه قرار دادند و شاخص نرخ حفاری را به دست آوردند. نشان داده شد که خواص سنگ از یک مکان به مکان دیگر متفاوت است.	[۹]
Khalokakaie et al (2011)	سیستم طبقه‌بندی فازی برای ارزیابی قابلیت حفاری توده‌سنگ‌ها	طبقه‌بندی فازی نسبت به سیستم کلاسیک به خصوص در توده‌سنگ‌های با شرایط مرزی، نتایج واضح‌تری تولید می‌کند.	[۱۰]
Hoseinie et al (2012)	تأثیر سختی مواد سنگی بر روی نرخ حفاری	آزمون سختی ابزاری (I_{HI})، بهتر از سختی موس و چکش اشمیت برای مطالعات سختی در سنگ‌هاست.	[۱۱]
Saeidi et al (2014)	مدل نرخ نفوذ تصادفی برای حفاری چرخشی در معادن روباز	آنالیز مؤلفه‌های اصلی و مونت کارلو تکنیک مناسبی برای ارزیابی و مدل‌سازی تغییرپذیری پارامترهای نفوذپذیری توده‌سنگ می‌باشند.	[۱۲]
Ataei et al (2015)	پیش‌بینی نرخ حفاری معادن روباز با استفاده از شاخص قابلیت حفاری توده‌سنگ	علاوه بر خواص سنگ بکر، پارامترهای ساختاری توده‌سنگ نیز تأثیر زیادی بر روی نرخ حفاری دارد، که قابلیت حفاری توده‌سنگ به پارامترهایی از جمله خواص توده‌سنگ/سنگ بکر، مشخصات ماشین و پارامترهای عملیاتی وابسته است.	[۱۳]

^۱ Indentation Hardness Index

۱-۸- ساختار پایان نامه

تحقیق حاضر به منظور ناحیه‌بندی معدن شماره ۱ مارن کارخانه سیمان شرق بر اساس قابلیت حفاری صورت گرفته و شامل پنج فصل، به شرح زیر است:

فصل اول این تحقیق به کلیات موضوع مورد مطالعه پرداخته شده است.

فصل دوم این تحقیق شامل مرور اجمالی و بررسی پارامترهای مؤثر بر سرعت حفاری است. روابط کیفی و کمی بین پارامترهای دستگاه و سرعت حفاری مورد بررسی قرار گرفته و 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 بین پارامترهای مذکور و سرعت حفاری ارائه شده است. در انتها، معرفی شاخص قابلیت حفاری توده‌سنگ‌ها در دستور کار قرار گرفته است.

فصل سوم این تحقیق به معرفی منطقه مورد مطالعه پرداخته شده است.

در فصل چهارم، مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی برای ناحیه‌بندی قابلیت حفاری معدن مارن ۱ کارخانه سیمان شرق و بررسی ارتباط کمی مشخصات مکانیکی سنگ با سرعت حفاری انجام شده است. نتایج این مطالعات به صورت ارتباط میان پارامترهای مکانیک‌سنجی، کانی‌شناسی و سرعت حفاری ارائه شده است.

در فصل پنجم، با توجه به تمامی مطالعات و آزمایش‌های انجام‌شده در این تحقیق، نتایج به دست آمده از مطالعات آزمایشگاهی و صحرایی و همچنین پیشنهادهایی برای مطالعات آینده بیان شده است.

فصل دوم

بررسی پارامترهای مؤثر بر قابلیت حفاری و معرفی شاخص قابلیت حفاری

۲-۱- مقدمه

در این فصل از پایان نامه، برای شناسایی پارامترهای مؤثر بر سرعت حفاری؛ ابتدا مطالعات پیشین انجام شده در مورد پارامترهای مؤثر بر سرعت حفاری شرح و تأثیر هر کدام از پارامترها بر سرعت حفاری بیان شده است. سپس با توجه به این که تأثیر تمامی این پارامترها را نمی توان به صورت همزمان بر سرعت حفاری در نظر گرفت، باید روشی به کار برد که به طور همزمان شامل پارامترهای مؤثر بر سرعت حفاری باشد. از این رو در این پایان نامه از شاخص قابلیت حفاری^۱ توده سنگ ها، که شش پارامتر مؤثر بر سرعت حفاری را به صورت همزمان در نظر می گیرد؛ استفاده شده است.

۲-۲- مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه پارامترهای مؤثر بر سرعت حفاری

عوامل متعددی ممکن است در پیشرفت یا عدم پیشرفت فرآیند حفاری مؤثر باشند، که این عوامل مؤثر را می توان به صورت زیر نام برد:

- خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ ها

- عوامل زمین شناسی، لایه بندی، گسل، درزه، شکاف و ...

- عوامل مربوط به سرمته، دستگاه های حفاری و روش حفاری

البته عوامل دیگری هم اعم از شرایط آب و هوایی، پرسنل ماهر، مدیریت و ... در امر حفاری بی

تأثیر نیستند [۱۴].

تحقیقات انجام شده توسط محققین پیشین در مورد قابلیت حفاری سنگ ها و سرعت حفاری از

سال ۱۹۵۰ میلادی آغاز شد و به مرور در اثر گذر زمان، امروزه در زمینه حفاری مکانیزه و معدن کاری

ابعاد گسترده ای پیدا کرده است. بعضی محققین تأثیر پارامترهای مؤثر بر سرعت حفاری را به صورت

مجزا و بعضی دیگر به صورت همزمان در نظر گرفته اند.

^۱ Rock Drilling index (RDi)

مطالعه پرتودیاکونف^۱ جزء اولین مطالعات انجام شده در زمینه قابلیت حفاری سنگ‌ها و نرخ نفوذ سرمته‌ها بود. در این تحقیق ضریب مقاومت سنگ (CRS^2) تحت عنوان مقاومت سنگ در برابر ضربه تعریف شده است و ایشان توسط آزمایش ضربه، این ضریب را تعیین کرد و یک طبقه‌بندی برای نرخ نفوذ مته در سنگ‌ها ارائه داد. این ضریب که در معادله (۱-۲) ارائه شده است بیشتر در مورد حفاری ضربه‌ای کاربرد داشت [۴].

$$CRS = 1.887 \left(\frac{\sigma_c^2}{2E} \right) \quad (1-2)$$

که در آن σ_c مقاومت فشاری و E مدول یانگ بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشند. انرژی ویژه اولین بار توسط تیل^۳ بیان شد. ایشان ارتباط بین انرژی ویژه را با مقاومت فشاری و نرخ نفوذ در دستگاه‌های حفاری دورانی مطرح کرد. انرژی ویژه (SE) کار لازم برای حفاری واحد حجم سنگ هست که در معادله (۲-۲) ارائه شده است.

$$SE = \frac{W}{A} + \frac{2\pi NT}{A \cdot PR} \quad (2-2)$$

که در آن A سطح مقطع چال حفاری به مترمربع، PR نرخ نفوذ سرمته در سنگ به متر در دقیقه، T گشتاور به نیوتن-متر، N سرعت دوران و W بار روی سرمته به نیوتن است. کسر اول این معادله مرتبط با فشار وارد بر سرمته و کسر دوم مرتبط با چرخش سرمته است. مشاهده می‌شود که انرژی ویژه رابطه معکوسی با نرخ نفوذ دارد [۴].

هوگوس^۴ برای انرژی ویژه محاسباتی (SE_c)، رابطه (۳-۲) زیر را ارائه داد [۴]:

$$SE_c = \frac{\sigma_c^2}{2E} \quad (3-2)$$

^۱ Protodyakonov

^۲ Coefficient of rock strength

^۳ Teale

^۴ Hughes

قهرمان و همکاران^۱ در سال ۲۰۰۳ طی مطالعات خود بر روی انرژی ویژه به دست آمده از رابطه (۳-۲) و نرخ نفوذ، به این نتیجه رسیدند که با افزایش انرژی ویژه، نرخ نفوذ به صورت خطی کاهش می‌یابد [۱۵].

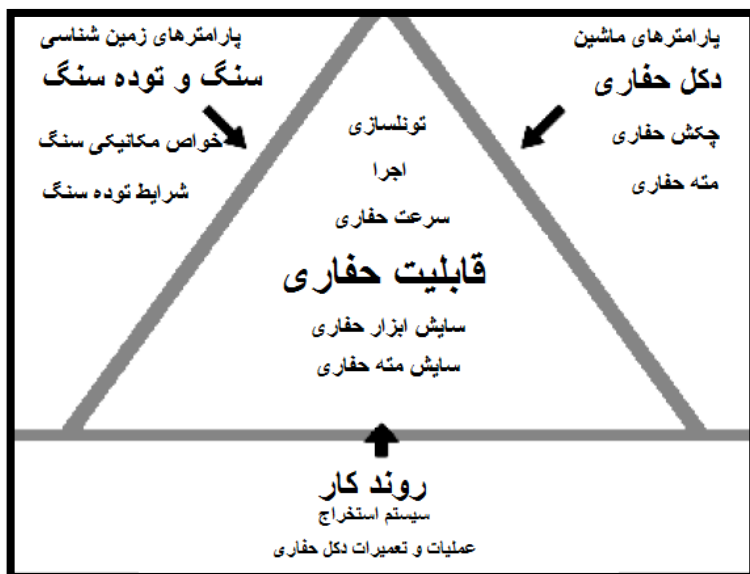
یاشار و همکاران^۲ طی مطالعات خود با استفاده از دستگاه حفاری آزمایشگاهی، تأثیر پارامترهای قابل کنترل دستگاه از جمله: بار پشت مته، گشتاور اعمال شده و انرژی ویژه را بر نرخ نفوذ حفاری بررسی کردند. نتایج به دست آمده اهمیت بار و گشتاور به کار گرفته شده در نرخ نفوذ و انرژی ویژه را نشان داد. در نهایت روابط تجربی را برای تعیین نرخ نفوذ حفاری ارائه دادند که بر اساس این روابط، نرخ نفوذ با افزایش بار روی مته و میزان انرژی ویژه به صورت نمایی کاهش می‌یابد. آن‌ها همچنین نشان دادند که افزایش مقاومت سنگ در معادله (۳-۲) میزان انرژی ویژه را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد [۱۶].

در اکثر مطالعات انجام شده، پارامترهای عملیاتی دستگاه همراه با مشخصات توده سنگ مورد توجه قرار گرفته است. در سال ۱۹۹۷، تورو^۳ ارتباط پارامترهای مؤثر در حفاری و نیز قابلیت حفاری را مطابق شکل (۱-۲) پیشنهاد داده است.

^۱ Kahraman et al

^۲ Yasar et al

^۳ Thuro



شکل ۲-۱- پارامترهای مؤثر در قابلیت حفاری توده سنگها و سایش تجهیزات [۱۷]

۲-۱-۲- مشخصات تأثیرگذار دستگاه بر سرعت حفاری در معادن روباز

میزان تأثیر پارامترهای مختلف و همچنین میزان اهمیت دستگاه به دلیل اینکه مکانیزم خردایش سنگ در روشهای مختلف حفاری با یکدیگر متفاوت است، عموماً به روش حفاری مورد استفاده بستگی دارد. در جدول (۲-۱) پارامترهای مؤثر بر سرعت حفاری با توجه به نوع روش حفاری نشان داده شده است.

جدول ۲-۱- پارامترهای مؤثر بر سرعت حفاری با توجه به نوع روش حفاری [۱۸]

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 جنس میله حفاری
			سرمته
●	●	●	قطر سرمته
●	●	●	هندسه سرمته
●	●	●	مشخصات جنس سرمته
			هوای فلاشینگ
●	●	●	سرعت دمش
●	●	●	مشخصات فیزیکی

در سال ۲۰۰۷ حسینی و عطایی بیان کردند که چهار پارامتر بار پشت مته، سرعت چرخش مته (دور مته)، هوای فلاشینگ و قطر مته از اهمیت بیشتری نسبت به پارامترهای دیگر مشخصات دستگاه برخوردارند. در ادامه هر یک از پارامترها را به طور جداگانه مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است [۱۸].

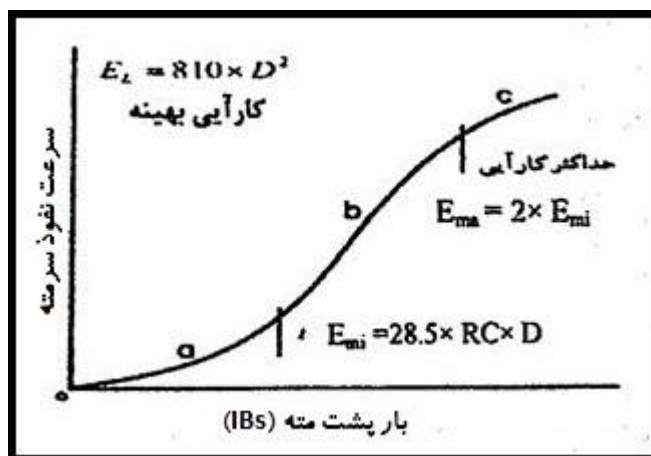
۲-۲-۱-۱- بار پشت مته و تأثیر آن بر حفاری

بار پشت 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. با توجه به روش حفاری، وظیفه نیروی فشاری پشت سرمته متفاوت است. در روش ضربه‌ای، تنها وظیفه‌ای که نیروی فشاری پشت سرمته دارد؛ عبارتست از برقرار نمودن ارتباط بین سرمته و سنگ قبل از آن که انرژی ضربه‌ای پیستون به سرمته منتقل شود ولی در روش دورانی نیروی فشاری پشت سرمته موظف است که سرمته را در سنگ ته چال فرو برد تا در نتیجه چرخش سرمته بتوان سنگ ته چال را تراشید. بدیهی است با وظیفه جدیدی که نیروی فشاری پشت سرمته در چالزنی دورانی به‌عهده دارد، مقدار

^۱ Thrust

آن بایستی چندین برابر مقدار نیروی فشاری پشت سرمرته در روش ضربه‌ای باشد [۲۰]. علاوه بر نوع روش حفاری، اندازه نیروی فشاری پشت سرمرته بستگی به قطر مته، مقاومت سنگ و نوع سرمرته دارد و مقدار آن از عدد دو رقمی تا هشت هزار پوند به ازای هر اینچ مته (۱۴۳۰ کیلوگرم به ازای هر سانتی‌متر مته) متغییر است [۱].

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



شکل ۲-۲- شکل کلی تغییرات سرعت حفاری نسبت به تغییرات بار پشت مته [۴]

روابط نشان داده شده در این شکل میزان حداقل، حداکثر و بهینه بار پشت مته را با توجه به مقاومت سنگ (RC) بر حسب مگا پاسکال و قطر حفاری (D) بر حسب اینچ بیان می‌کنند. در بار پشت مته کمتر از 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 [۱].

فیش^۱ مدلی را برای دستگاه حفاری دورانی ارائه داد که در آن نرخ نفوذ رابطه مستقیم با بار روی

^۱ Fish

مته^۱ و نسبت معکوس با مقاومت فشاری داشت [۴].

میلر و بال^۲ بیان کردند که بار پشت مته کمتر منجر به سایش مته می‌شود، در حالی که اعمال بار زیاد باعث فرسایش سریع دندانه‌های الماسی می‌شود (هردوی شرایط تأثیر منفی روی نرخ نفوذ دارند) [۱۹].

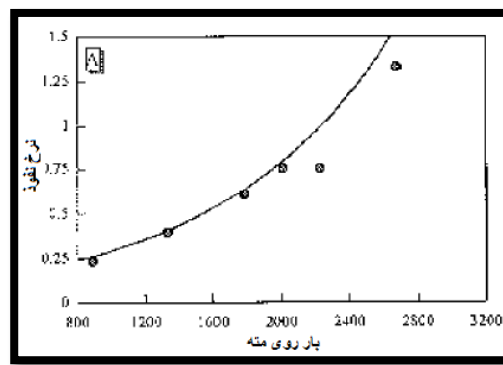
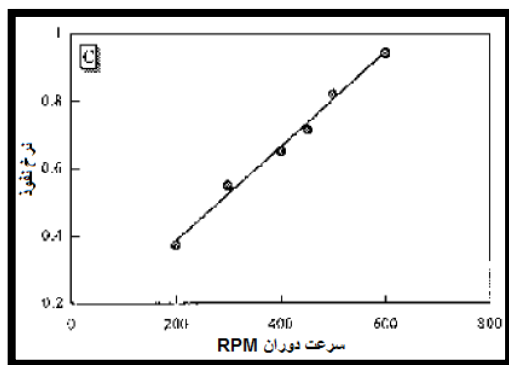
۲-۱-۲-۲- دور مته و تأثیر آن در سرعت حفاری

سرعت دوران بر حسب دور در دقیقه (*RPM*) بعد از بار روی سر مته پارامتر مؤثری در حفاری سنگ هست. همچنان که محققان نشان داده‌اند، سرعت دوران ارتباط مستقیمی با قابلیت حفاری داشته به طوری که با افزایش سرعت دوران نرخ نفوذ سرمته افزایش می‌یابد [۲۰].

هوانگ و وانگ با انجام آزمایش‌های مکانیکی، تأثیر پارامترهای سرعت دوران، بار روی مته و قطر سرمته را روی نفوذ سرمته الماسی در سنگ‌های مختلف مطالعه کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که نرخ نفوذ با سرعت دورانی رابطه خطی قوی دارد، به طوری که با افزایش سرعت دورانی، نرخ نفوذ افزایش می‌یابد. آن‌ها همچنین برای ارتباط نرخ نفوذ مته الماسی و بار روی مته رابطه‌نمایی را مطابق شکل‌های زیر پیشنهاد کردند (شکل ۲-۳ و شکل ۲-۴). از دیدگاه آن‌ها از میان سه عامل تأثیرگذار دستگاه حفاری؛ یعنی بار روی مته، سرعت دوران و نوع مته، بار روی مته بیشترین تأثیر را در عملکرد حفاری دورانی و نرخ نفوذ مته در سنگ دارد [۲۰].

^۱ Thrust

^۲ Miller and Ball



شکل ۲-۳- ارتباط بین نرخ نفوذ و بار روی سرمته [۲۰] شکل ۲-۴- ارتباط بین نرخ نفوذ و سرعت دوران [۲۰]

سینکالا^۱ تأثیر بار پشت مته و گشتاور را بر نرخ نفوذ سر مته مطالعه کرد. او تأکید کرد که برای کاهش هزینه‌های عملیاتی، کاهش انحراف چال ضروری هست و در میان پارامترهای قابل کنترل، تأثیرگذارترین پارامترها بر روی انحراف مسیر چال از جانب بار پشت مته، گشتاور و مهارت اپراتور هست [۲۱].

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

برای دستیابی به یک حفاری کارآمد و با راندمان مناسب فنی و اقتصادی، تمیزکاری کف چال و تخلیه خرده‌سنگ‌های حاصل از حفاری امری مهم هست. 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 [۱]:

- ✓ 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. باید توجه داشت که افزایش بازدهی حفاری لزوماً همراه با صرفه‌جویی در هزینه ماشین حفاری نخواهد

^۱ Sinkala

بود، بلکه گاهی افزایش فشار هوا باعث بالا رفتن هزینه استهلاک مته، لوله، پمپ و غیره می‌شود [۱].

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

رشته لوله در دستگاه‌های حفاری از قسمت‌های متعددی تشکیل شده، اما مهم‌ترین قسمت آن سرمته حفاری است. سرمته، سنگ را زیر دندان‌ها یا تیغه‌های متلاشی می‌کند و باعث پیشروی چال حفاری در جهت مدنظر می‌شود، لذا سرعت حفاری و میزان قابلیت خردشوندگی سنگ به طور مستقیم به شکل، نوع و اندازه سرمته مربوط است که در ادامه به این موارد اشاره شده است.

الف- تأثیر قطر سرمته بر سرعت حفاری

هوانگ و وانگ^۱ با انجام مطالعات آزمایشگاهی دریافتند که در سنگ‌های با مقاومت فشاری بیش‌تر از ۱۰۰ مگاپاسکال، استفاده از سرمته‌های با قطر بزرگ‌تر بسیار با صرفه‌تر از مته‌های با قطر کوچک‌تر است، زیرا در این نوع سنگ‌ها قطر بزرگ‌تر سرمته گسیختگی و برش سنگ را به راحتی فراهم می‌کند [۲۰].

قهرمان در مدلی که برای پیش‌بینی نرخ نفوذ حفاری بیان کرد نشان داد که با افزایش قطر سرمته نرخ نفوذ در سنگ کاهش می‌یابد [۶].

ب- 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. بسته به روش حفاری انواع سرمته‌ها توسعه یافته‌اند. در روش‌های چکش پایین (DTH^۲) و چکش بالا (TOP^۳) مته‌های رایج شامل، مته دکمه‌ای و مته ضربدری است. در حفاری دورانی انرژی لازم برای تراشیدن سنگ از ممان چرخشی سرمته نتیجه می‌شود، که ممان چرخشی برابر است با [۲۲]:

$$M = F * r \quad (۴-۲)$$

^۱ Huang & Wang

^۲ Down the hole

^۳ Top the hole

که در آن M : ممان به کیلوگرم‌متر، F : نیروی ممان بر مسیر حرکت چرخشی به کیلوگرم و r : فاصله نقطه اثر نیرو تا محور خنثی به متر است. بدین ترتیب انرژی منتقل شده به ته چال در محل محور سرمرته برابر صفر و در محیط سرمرته به میزان حداکثر خواهد بود.

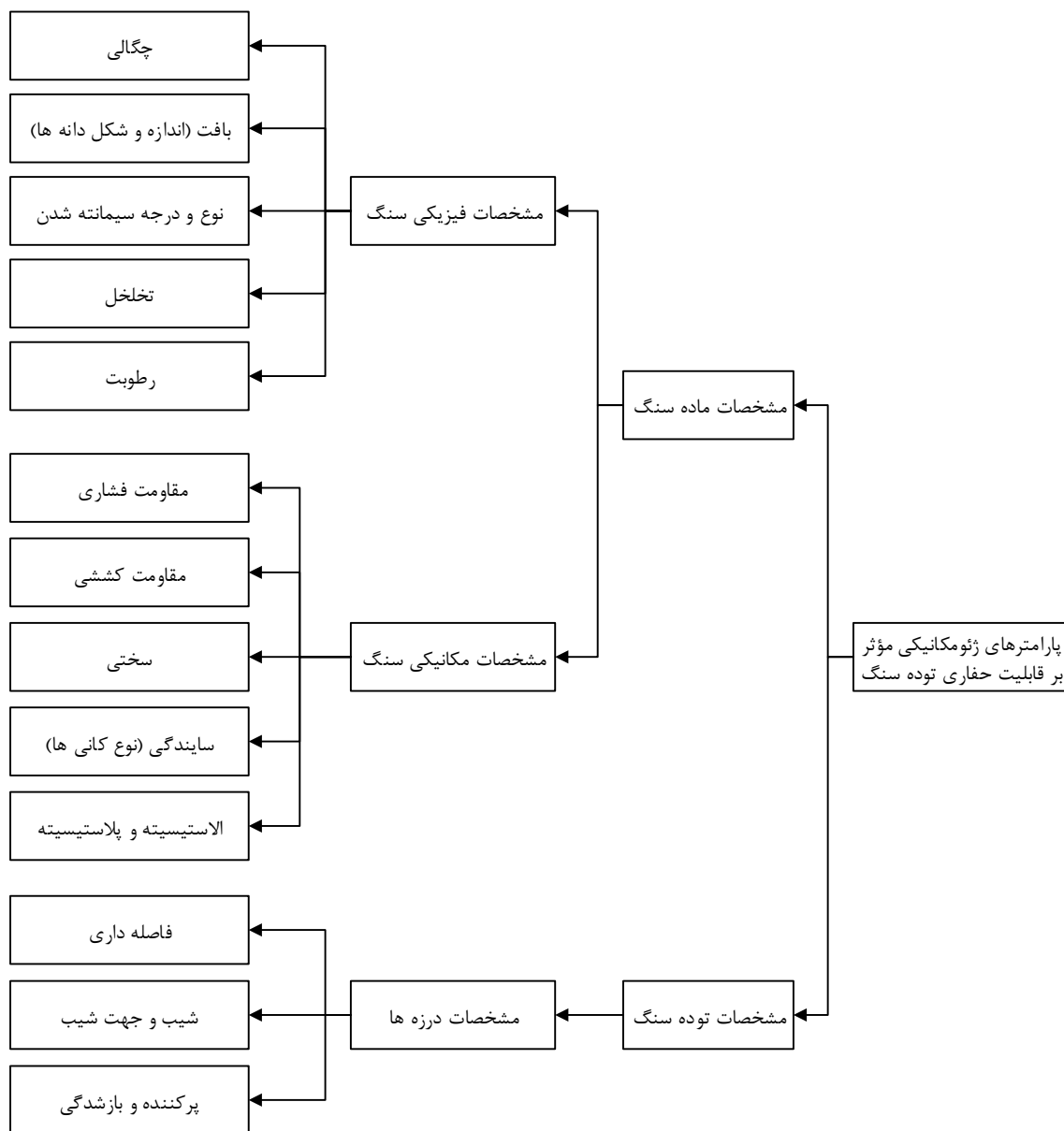
در روش دورانی سرمرته‌های رایج انواع تیغه‌ای و سه مخروطی است. حفاری دورانی با سرمرته‌های سه مخروطی می‌تواند در توده‌سنگ خیلی سخت تا نرم مورد استفاده قرار گیرد [۱۹].

در حفاری ضربه‌ای - چرخشی دو نوع سرمرته دکمه‌ای و پره‌ای استفاده می‌شوند. در طبقه‌بندی سرمرته‌ها عموماً ابتدا روش حفاری و سپس شکل و مشخصات هندسی آن‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد [۱].

۲-۲-۲- بررسی تأثیر مشخصات توده‌سنگ بر سرعت حفاری

تاکنون متخصصان متعددی نقش و تأثیر پارامترهای فیزیکی، مکانیکی و ساختاری توده‌سنگ را تشریح نموده و رابطه هر یک از این پارامترها را با سرعت حفاری مورد مطالعه قرار داده‌اند [۷].

به طور کلی می‌توان کلیه پارامترهای ژئومکانیکی مؤثر بر سرعت حفاری را مطابق شکل (۲-۵) طبقه‌بندی کرد.



شکل ۲-۵- پارامترهای ژئومکانیکی مؤثر بر قابلیت حفاری [اقتباس از ۷]

۲-۲-۱- مشخصات فیزیکی سنگ‌ها

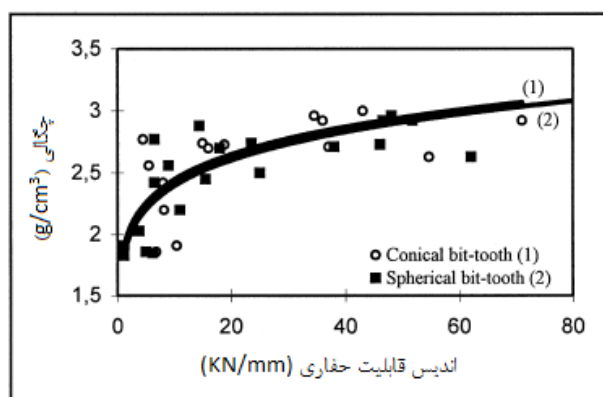
تاکنون محققان زیادی مشخصات فیزیکی سنگ‌ها را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در ادامه به بررسی هر یک از پارامترها می‌پردازیم.

الف- چگالی

متخصصان زیادی رابطه چگالی و سرعت حفاری را مطالعه نموده‌اند. از آن جایی که چگالی سنگ با

سرعت حفاری رابطه عکس دارد، هر چه سنگ متراکم‌تر و چگال‌تر باشد، سرعت حفاری کم‌تر خواهد بود [۱].

قهرمان و همکاران در سال ۲۰۰۰ با مطالعه گسترده به این نتیجه رسیدند که با افزایش میزان چگالی سنگ، انرژی لازم برای حفاری توسط سیستم حفاری دورانی افزایش یافته و لذا سرعت حفاری کم‌تر می‌شود. در شکل (۶-۲) رابطه چگالی با اندیس قابلیت حفاری نشان داده شده است.



شکل ۲-۶- ارتباط چگالی سنگ و اندیس قابلیت حفاری [۲۳]

لازم به ذکر است که در شکل فوق اندیس قابلیت حفاری از منحنی نیرو-نفوذ تعریف شده است و رابطه نزدیکی با مقاومت فشاری، مقاومت کششی، عدد چکش اشمیت نوع N ، مدول الاستیسیته و چگالی سنگ دارد.

ب- بافت

بافت سنگ و دانه‌بندی آن تأثیر بزرگی روی رفتار مهندسی سنگ‌ها به ویژه قابلیت نفوذ در آن‌ها را دارد. از نظر دانه‌بندی، هر چه سنگ دانه‌درشت‌تر باشد، قابلیت حفاری سنگ افزایش یافته و راحت‌تر می‌توان در آن حفاری نمود [۲۰]. از نظر شکل دانه‌ها، هر چه 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. ضریب بافت، جامع‌ترین و معتبرترین روش کمی نمودن بافت یک سنگ است که توسط هوارس و

رولند^۱ در سال ۱۹۸۷ ارائه و در رابطه (۵-۲) نشان داده شده است [۲۴].

$$TC = AW \left[\left\{ \frac{N_0}{N_0 + N_1} \times \frac{1}{FF_0} \right\} + \left\{ \frac{N_1}{N_0 + N_1} \times AR_1 \times AF_1 \right\} \right] \quad (5-2)$$

که در آن:

TC : ضریب بافت

AW : وزن مساحت (دانسیتته 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 (۶-۲) تعریف می‌شود:

$$AW = \frac{\text{مساحت ناحیه مرجع}}{\text{مساحت دانه‌های درون مرز ناحیه مرجع}} \quad (6-2)$$

فاکتور شکل در رابطه ضریب بافت، معرف انحراف دانه از حالت گرد بودن است و از رابطه (۷-۲)

محاسبه می‌شود.

$$\text{فاکتور شکل} = \frac{4\pi(\text{مساحت})}{(\text{محیط})^2} \quad (7-2)$$

اوزترک و همکارانش^۲ در سال ۲۰۰۴ رابطه بین ضریب بافت و بسیاری از مشخصات فیزیکی و

مکانیکی سنگ‌ها از جمله قابلیت برش سنگ‌ها را ارائه دادند [۲۴].

علمی اسدزاه، رابطه بین ساینده‌گی و ضریب بافت را در تعدادی از سنگ‌های تزئینی ایران مورد

بررسی قرار داده است [۲۵]. از نظر طبقه‌بندی نیز ویلبور و حسینی با در نظر گرفتن بافت به عنوان

^۱ Howarth & Rowland

^۲ Ozturk et al

یک پارامتر مهم در قابلیت حفاری سنگ‌ها، بافت و اندازه دانه‌ها را در سیستم طبقه‌بندی خویش برای پیش‌بینی قابلیت حفاری به کار برده‌اند. جدول‌های (۲-۳ و ۲-۴) امتیازدهی و طبقه‌بندی بافت را در طبقه‌بندی ویلبور و حسینی (RDi^1) نشان می‌دهند.

جدول ۲-۳- امتیازدهی به بافت سنگ در طبقه‌بندی ویلبور [۲۶]

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

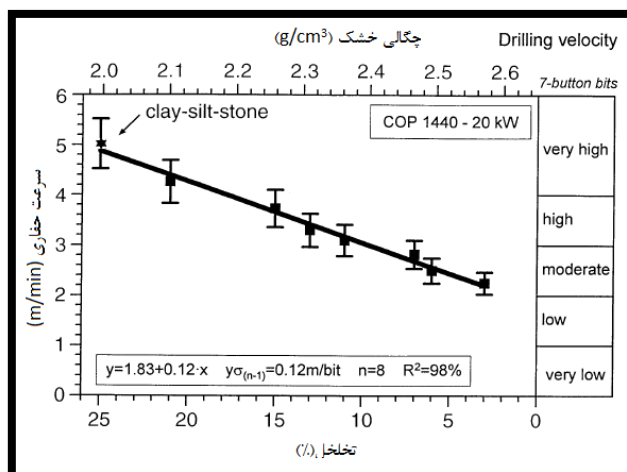
جدول ۲-۴- امتیازدهی به بافت سنگ در طبقه‌بندی RDi [۷]

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

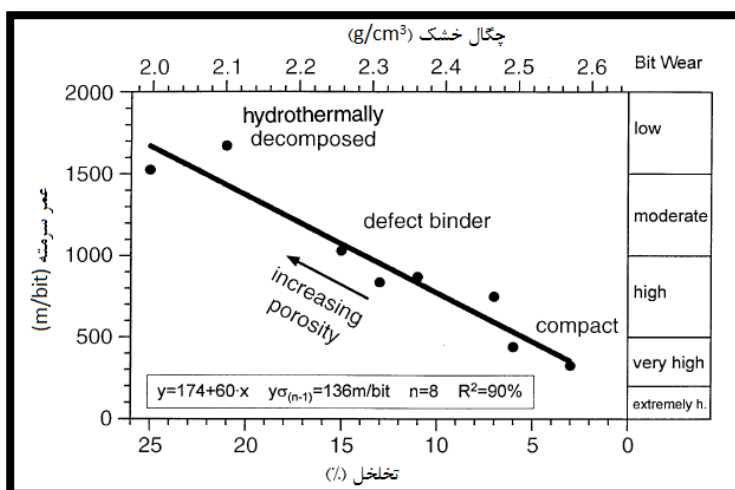
ج- تخلخل

تورو در سال ۱۹۹۷ با انجام آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی نتیجه گرفت که میزان تخلخل سنگ با میزان سایش سرمرته رابطه خطی معکوس و با سرعت حفاری و عمر سرمرته رابطه مستقیم دارد [۱۷]. شکل‌های (۲-۷ و ۲-۸) نتایج ارائه شده تحقیقات تورو را نشان می‌دهد.

^۱ Rock Drilling index



شکل ۲-۷- رابطه سرعت حفاری با تخلخل و چگالی سنگ [۱۷]



شکل ۲-۸- رابطه عمر سرشته و تخلخل سنگ [۱۷]

۲-۲-۲-۲- مشخصات مکانیکی سنگ‌ها

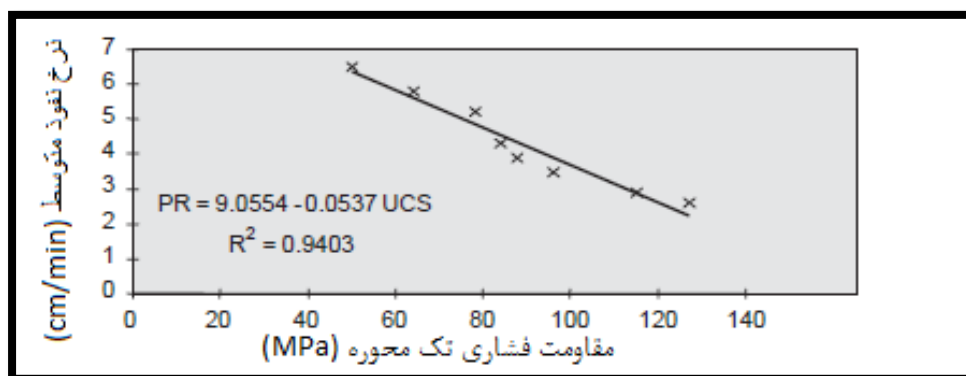
تاکنون محققان زیادی مشخصات مکانیکی سنگ‌ها را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در ادامه به بررسی هر یک از پارامترها می‌پردازیم.

الف- مقاومت فشاری تک‌محوری

مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS) یکی از مهم‌ترین خصوصیات مهندسی سنگ هست. استفاده از این پارامتر در طبقه‌بندی بسیار ضروری هست، زیرا مقاومت ماده‌سنگ اساس مقاومت توده‌سنگ را تشکیل می‌دهد. هر چه سنگ مقاومت فشاری بالاتری داشته باشد از قابلیت حفاری آن کاسته می‌شود. تاکنون در بسیاری از منابع علمی، تأثیر مقاومت فشاری بر سرعت حفاری مورد تأکید قرار گرفته است

[۱۷].

در سال ۲۰۰۵ آکون و کارپوز^۱، بر روی پیش‌بینی سرعت حفاری مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که سرعت حفاری و مقاومت فشاری نمونه‌ای از ماسه‌سنگ در کشور ترکیه رابطه خطی معکوس با هم دارند (شکل ۲-۹) [۲۷].



شکل ۲-۹- ارتباط بین مقاومت فشاری تک‌محوری و نرخ نفوذ متوسط [۲۷]

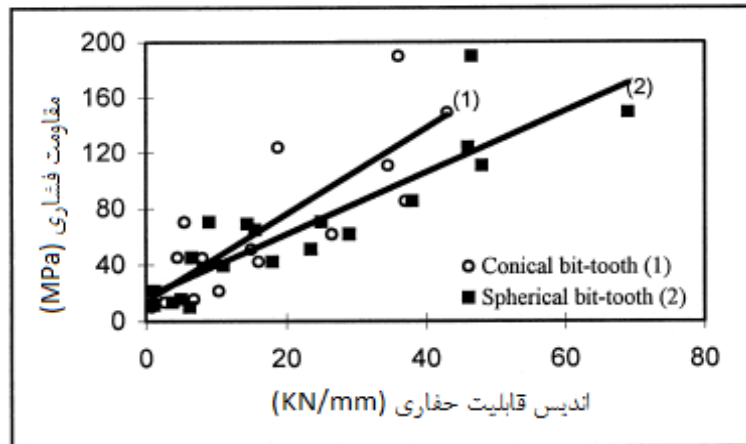
در سال ۱۹۹۹، قهرمان پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها را به همراه مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ برای پیش‌بینی سرعت حفاری ضربه‌ای به کار برد و سه رابطه تجربی برای پیش‌بینی سرعت حفاری DTH^2 ، ضربه‌ای - دورانی چکش بالا و دورانی پیشنهاد کرد. همچنین در مطالعات رگرسیونی خود بر روی داده‌های جمع‌آوری شده از حفاری به این نکته اشاره کرد که در حفاری دورانی، پارامتر مقاومت فشاری تک‌محوری، در حفاری DTH ، پارامتر عدد چکش اشمیت و در حفاری ضربه‌ای - دورانی چکش بالا پارامترهای مقاومت فشاری تک‌محوری و میزان کوارتز سنگ دارای بالاترین همگرایی با سرعت حفاری بوده و از آن‌ها به عنوان پارامتر شاخص مشخصات سنگ در فرمول‌بندی خویش استفاده کرده است [۶].

قهرمان در سال ۲۰۰۰ بر روی ارائه یک اندیس قابلیت حفاری جدید مطالعه کرد و به این نتیجه رسید که مقاومت فشاری با اندیس قابلیت حفاری سنگ‌ها (روش دورانی) رابطه خطی معکوس دارد

^۱ Akun and Karpuz

^۲ Down The Hole

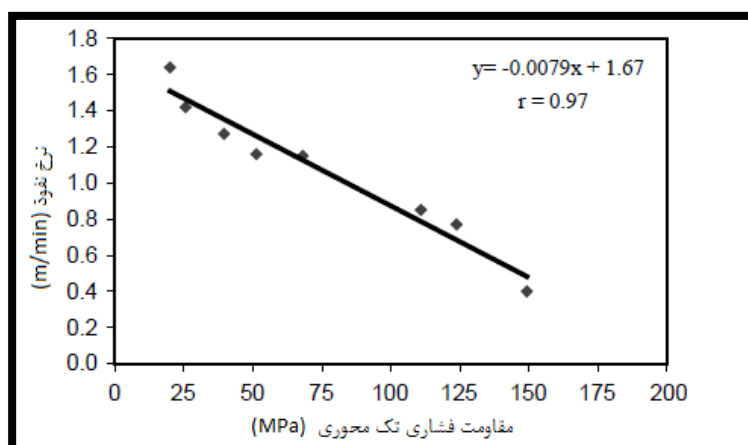
که در شکل (۲-۱۰) این رابطه در دو نوع سرمته نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۰- رابطه بین اندیس قابلیت حفاری و مقاومت فشاری [۲۳]

لازم به ذکر است که در شکل فوق اندیس قابلیت حفاری از منحنی نیرو-نفوذ تعریف شده است و رابطه نزدیکی با مقاومت فشاری، مقاومت کششی، عدد چکش اشمیت نوع N ، مدول الاستیسیته و چگالی سنگ دارد.

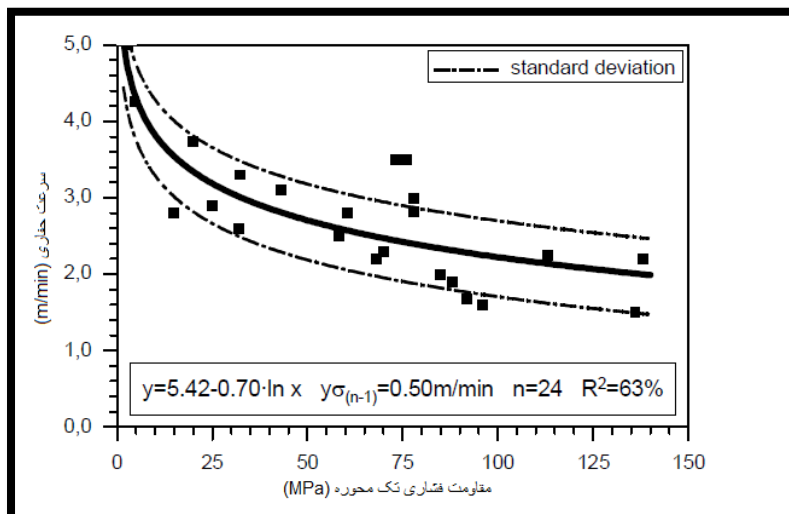
همچنین قهرمان در تحقیق دیگری کلیه پارامترهای مکانیکی و فیزیکی سنگ را که بر سرعت حفاری ضربه‌ای تأثیر دارند مورد مطالعه قرار داد و رابطه ریاضی مقاومت فشاری و سرعت حفاری را به صورت شکل (۲-۱۱) نشان داده است.



شکل ۲-۱۱- رابطه سرعت حفاری ضربه‌ای و مقاومت فشاری [۱۵]

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 (۲-۱۲) منحنی ارائه شده توسط تورو را نشان می‌دهد [۲۸].



شکل ۲-۱۲- ارتباط بین سرعت حفاری ضربه‌ای در تونل‌ها و مقاومت فشاری سنگ‌های اسلیتی و کوارتزیتی [۲۸]

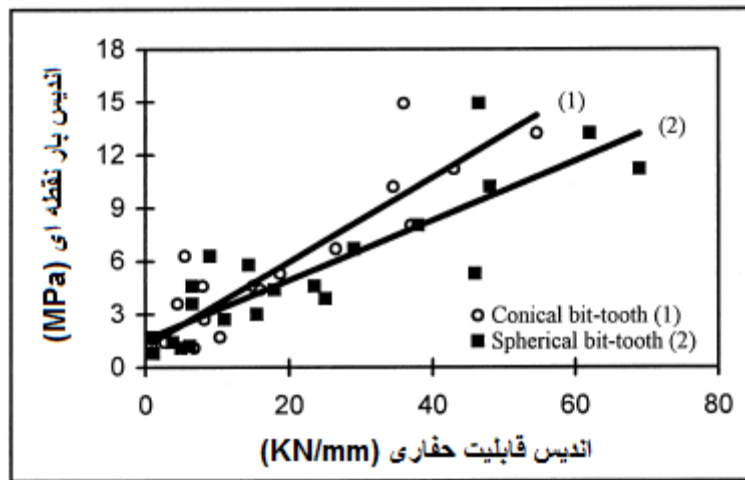
مقاومت فشاری سنگ‌ها از جنبه‌های مختلف نیز مورد طبقه‌بندی قرار گرفته است. حسینی و همکاران در سال ۲۰۰۸ یک طبقه‌بندی در زمینه حفاری سنگ‌ها به نام قابلیت حفاری توده‌سنگ‌ها *RDi* ارائه دادند. نحوه طبقه‌بندی و امتیازدهی به سنگ‌ها از نظر مقاومت فشاری در سیستم *RDi* در جدول (۲-۵) نشان داده شده است [۷].

جدول ۲-۵- امتیازدهی به مقاومت فشاری در طبقه‌بندی *RDi* [۷]

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

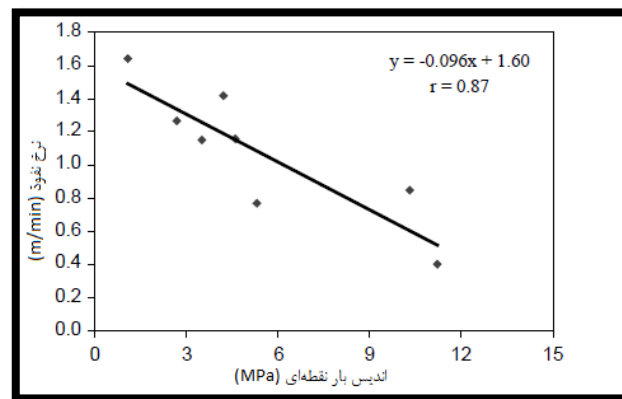
به علت این که انجام آزمایش و تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ زمان‌بر و پرهزینه است، محققان در سال‌های اخیر مطالعات زیادی انجام دادند تا با روش‌های سریع‌تر و ارزان‌تر مقاومت سنگ را تخمین زده و رابطه آن را با حفاری مشخص کنند. یکی از این روش‌ها استفاده از شاخص مقاومت بار نقطه‌ای است. این شاخص به عنوان یک کمیّت جانشین در بسیاری از زمینه‌های مکانیک سنگ

جایگزین مقاومت فشاری تک محوری شده است. معتبرترین تحقیقات موجود در این زمینه توسط قهرمان انجام شده است [۶]. ایشان در تحقیقات خود نشان داد که در حفاری دورانی با دو نوع سرمته، با افزایش میزان بار نقطه‌ای؛ اندیس قابلیت حفاری به صورت خطی افزایش می‌یابد (شکل ۲-۱۳). قهرمان در تحقیق دیگر خود در سال ۲۰۰۳ نشان داد که سرعت حفاری ضربه‌ای با افزایش بار نقطه‌ای به صورت خطی کاهش می‌یابد (شکل ۲-۱۴).



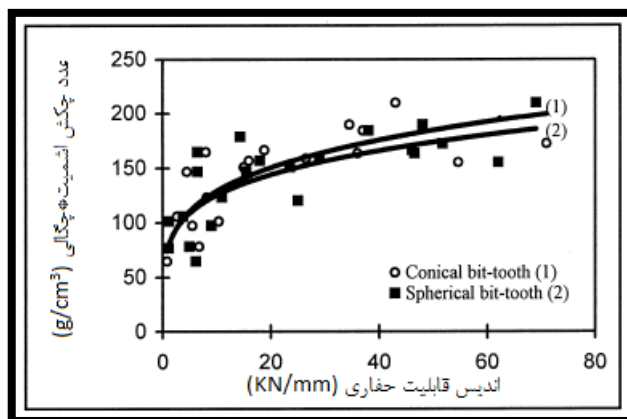
شکل ۲-۱۳- ارتباط اندیس بار نقطه‌ای و اندیس قابلیت حفاری [۲۳]

لازم به ذکر است که در شکل فوق اندیس قابلیت حفاری از منحنی نیرو-نفوذ تعریف شده است و رابطه نزدیکی با مقاومت فشاری، مقاومت کششی، عدد چکش اشمیت نوع N ، مدول الاستیسیته و چگالی سنگ دارد.

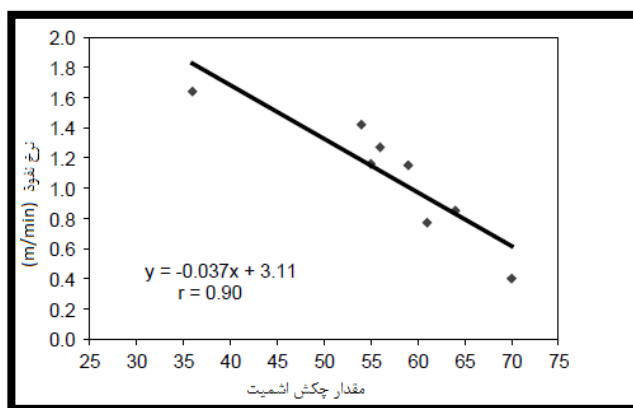


شکل ۲-۱۴- ارتباط اندیس بار نقطه‌ای و سرعت حفاری ضربه‌ای [۱۵]

استفاده از چکش اشمیت یکی دیگر از روش‌های غیرمستقیم مقاومت سنگ است که در این زمینه نیز قهرمان تحقیقاتی را انجام داده است. وی در تحقیقات خود نشان داد که در حفاری ضربه‌ای و دورانی، با افزایش میزان عدد چکش اشمیت اندیس قابلیت حفاری سنگ‌ها افزایش می‌یابد (شکل ۱۵-۲ و شکل ۱۶-۲).



شکل ۱۵-۲- ارتباط عدد چکش اشمیت و اندیس قابلیت حفاری [۲۳]

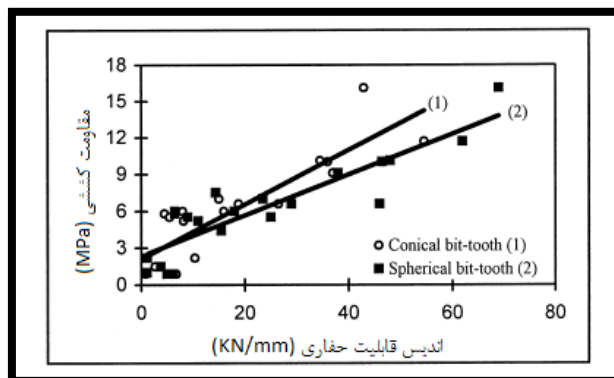


شکل ۱۶-۲- ارتباط عدد چکش اشمیت و سرعت حفاری ضربه‌ای [۱۵]

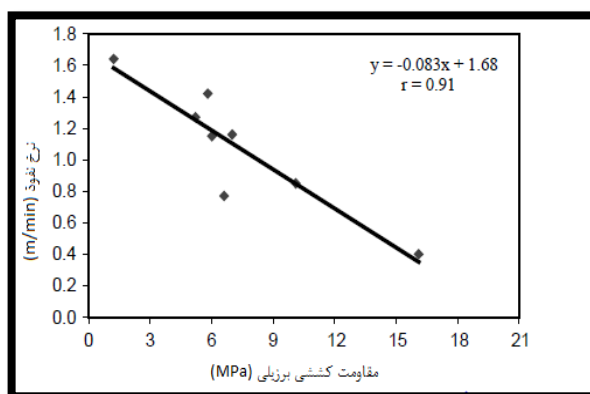
ب- مقاومت کششی

در سال ۲۰۰۰ قهرمان و همکارانش در مورد سرعت حفاری دورانی و مقاومت کششی و همچنین در سال ۲۰۰۳ در مورد سرعت حفاری ضربه‌ای و مقاومت کششی (تست برزیلی) مطالعاتی را انجام دادند که این ارتباط در شکل‌های (۱۷-۲ و ۱۸-۲) نشان داده شده است. نتیجه این تحقیقات نشان می‌دهد که مقاومت کششی با اندیس قابلیت حفاری سنگ‌ها رابطه خطی مستقیم و با سرعت حفاری دورانی و

ضربه‌ای در معادن روباز رابطه خطی معکوس دارد.



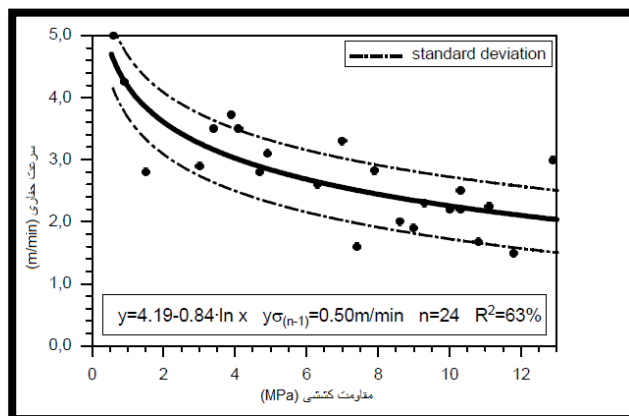
شکل ۲-۱۷- ارتباط مقاومت کششی و اندیس قابلیت حفاری [۲۳]



شکل ۲-۱۸- ارتباط مقاومت کششی و سرعت حفاری ضربه‌ای [۱۵]

تورو در سال ۱۹۹۶ طی مطالعه‌ای نشان داد که مقاومت کششی با سرعت حفاری ضربه‌ای در

تونل‌سازی به روش سنتی رابطه لگاریتمی معکوس دارد (شکل ۲-۱۹) [۲۸].



شکل ۲-۱۹- ارتباط بین مقاومت کششی و سرعت حفاری ضربه‌ای در تونل‌سازی [۲۸]

ج- تردی

به طور کلی شکنندگی را می‌توان به حالتی از سنگ اطلاق کرد که تحت شرایطی، قابلیت تاب‌آوری آن در زیر بار با افزایش دگرشکلی کاهش یابد. شکنندگی را می‌توان با توجه به شیب قسمت افتان منحنی تنش-کرنش تعیین کرد. هر چه این بخش پرشیب‌تر، جسم شکننده‌تر خواهد بود. محققان مختلف برای بیان اهداف مورد نظر خود از تعابیر متفاوتی برای تردی استفاده کرده‌اند. رابطه‌های (۲-۸) تا (۲-۱۷) تعدادی از مفاهیم مختلف تردی را نشان می‌دهد [۲۹] و [۳۰].

$$B_1 = \frac{\sigma_c}{\sigma_t} \quad (۸-۲)$$

$$B_2 = \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t} \quad (۹-۲)$$

$$B_3 = \frac{\sigma_c \sigma_t}{2}, (MPa)^2 \quad (۱۰-۲)$$

$$B_4 = \sqrt{B_3} \quad (۱۱-۲)$$

$$B_5 = \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_t} \quad (۱۲-۲)$$

$$B_6 = \frac{W_r}{W_t} \quad (۱۳-۲)$$

$$B_7 = \frac{F_{max}}{P} \quad (۱۴-۲)$$

$$B_8 = q \sigma_c \quad (۱۵-۲)$$

$$B_9 = \frac{W_{rs}}{W_t} \quad (۱۶-۲)$$

$$B_{10} = \frac{(HE)}{K_{1c}^2} \quad (۱۷-۲)$$

که در فرمول‌های بالا:

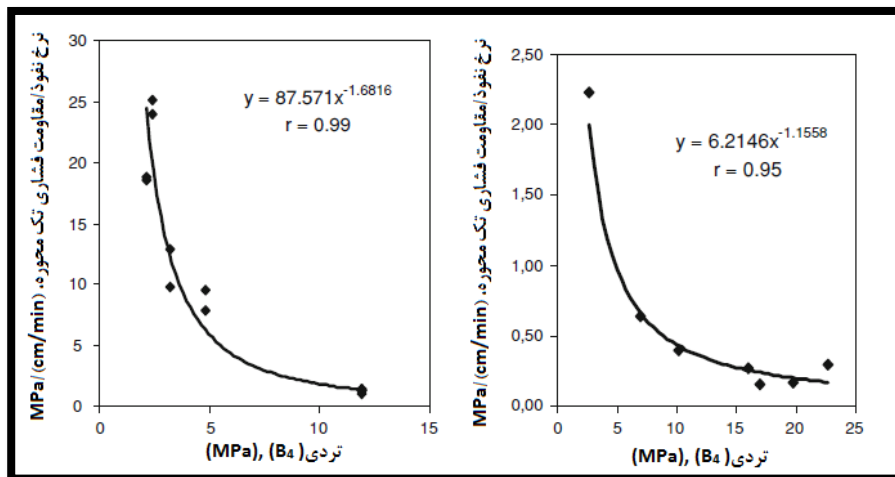
σ_c : مقاومت فشاری، σ_t : مقاومت کششی، H : سختی، E : مدول الاستیسیته، K_{1c} : چقرمگی،

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

پرتودیاکونوف، W_r : انرژی برگشت‌پذیر، W_t : انرژی کل، W_{rs} : انرژی کرنش برگشت‌پذیر 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) هستند.

آلتینداگ^۱ اندیس‌های تردی سنگ که بیانگر تجزیه سنگ تحت فشار ابزار است را بر اساس مقاومت فشاری و کششی سنگ، هم برای دستگاه‌های ضربه‌ای و هم برای دورانی ارائه داد و نتیجه گرفت که این اندیس به خوبی می‌تواند به عنوان یک پارامتر پیش‌بینی کننده نرخ نفوذ دستگاه‌های حفاری ضربه‌ای به کار رود [۲۹]. آلتینداگ با استفاده از داده‌های مقالات محققان ترک ارتباط بین مفاهیم مختلف تردی با نرخ نفوذ و نرخ نفوذ نرمال را بررسی نموده است که در شکل (۲-۲۰) نشان داده شده است [۳۰]؛ نتیجه آن یک طبقه‌بندی قابلیت حفاری بر اساس تردی است که در جدول (۲-۶) ارائه شده است.



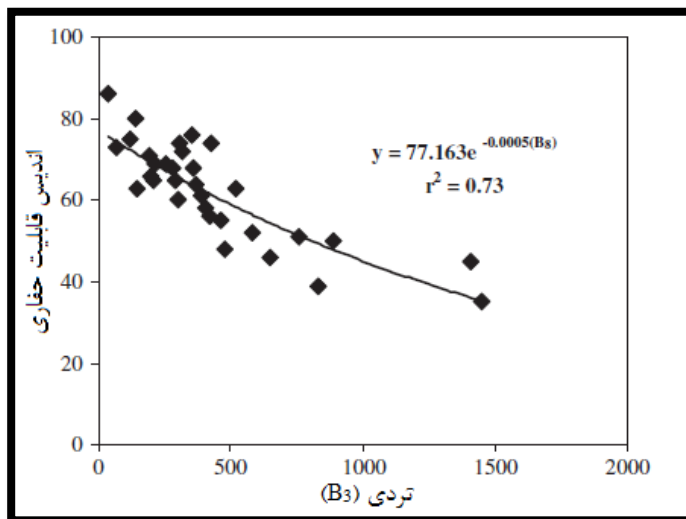
شکل ۲-۲۰-۲- ارتباط تردی با نرخ نفوذ نرمال شده برای داده‌های مختلف [۳۰]

جدول ۲-۶- طبقه‌بندی توصیفی قابلیت حفاری بر اساس تردی [۳۰]

توصیف قابلیت حفاری	توصیف تردی	تردی آلتینداگ (B ₄)
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 بیان کردند که قابلیت حفاری با تردی (B_3)، ضریب همبستگی بالایی دارد که در شکل (۲-۲۱) نشان داده شده است.



شکل ۲-۲۱- ارتباط بین تردی با اندیس قابلیت حفاری [۳۱]

محققان دیگری نیز با استفاده از مفاهیم تردی، برای پیش‌بینی و به دست آوردن قابلیت حفاری و نرخ نفوذ تلاش نموده‌اند [۳۱]، [۳۲].

د- سختی

سختی در واقع مقاومت سنگ در برابر خراش و نفوذ هست. سختی اولین پارامتر مقاومتی است که باید در حین حفاری بر آن غلبه شود. تحقیقات زیادی پیرامون تأثیر سختی بر قابلیت حفاری سنگ‌ها انجام شده است. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که با افزایش سختی، سرعت حفاری و قابلیت حفاری سنگ‌ها کاهش می‌یابد. جمینو و همکاران سختی سنگ‌ها را با استفاده از مقیاس موهس و نیز از نظر قابلیت حفاری به پنج کلاس مختلف تقسیم‌بندی کردند [۵]. حسینی و همکاران با تکیه بر پیشنهاد جمینو^۲ سختی موهس را در سیستم طبقه‌بندی RDi به کار برده و میزان سختی سنگ‌ها را امتیازدهی کردند. در جدول (۲-۷) طبقه‌بندی و امتیازدهی به سختی سنگ‌ها در سیستم طبقه‌بندی

^۱ Yarali

^۲ Jimeno

RDi نشان داده شده است [۷].

جدول ۷-۲- طبقه‌بندی و امتیازدهی به سختی سنگ‌ها در سیستم طبقه‌بندی RDi [۷]

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

۵- سایندگی

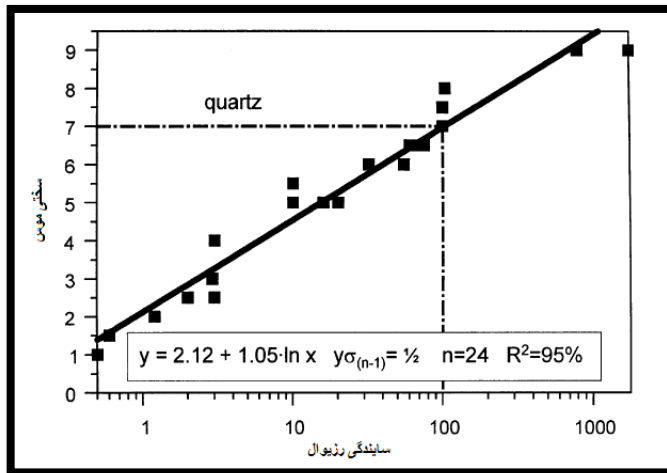
خاصیت سایندگی سنگ عبارت است از ویژگی‌ای که باعث فرسایش فلز در اثر تماس (اصطکاک) با سنگ می‌شود. پلینینگر و همکاران^۱ اندیس قابلیت سایندگی سنگ را بر اساس درصد کوارتز سنگ و مقاومت فشاری آن برای حفاری در مناطق اسکاندیناوی پیشنهاد کردند و ارتباط آن را با نرخ نفوذ حفاری به دست آوردند. آن‌ها نشان دادند که دلیل سایش سرمته‌ها در نتیجه وجود کانی‌های سخت‌تر از فولاد (سختی موس تقریباً ۵/۵) به خصوص کوارتز (سختی موهس ۷) است. برای درگیر کردن کل کانی‌های نمونه سنگ، محتوی کوارتز معادل در مقطع نازک به وسیله تحلیل کیفی تخمین زده می‌شود، یعنی محتوی کل کانی‌ها نسبت به سختی کوارتز، با ضرب درصد هر کانی در سایندگی نسبی رزیوال^۲ هر کانی به دست می‌آید. مقدار کوارتز معادل (EQC) از رابطه (۱۸-۲) به دست می‌آید [۳۳]:

$$EQC = \sum_{i=1}^n A_i \times RH_i \quad (18-2)$$

که A_i درصد هر کانی ($/$)، RH_i درصد سایندگی رزیوال ($/$) و n تعداد کانی‌های تشکیل دهنده نمونه سنگ هست [۱۷]. همچنین ارتباط بین سختی موهس و سایندگی رزیوال کانی‌ها در شکل (۲-۲) نشان داده شده است.

^۱ Plinninger et al

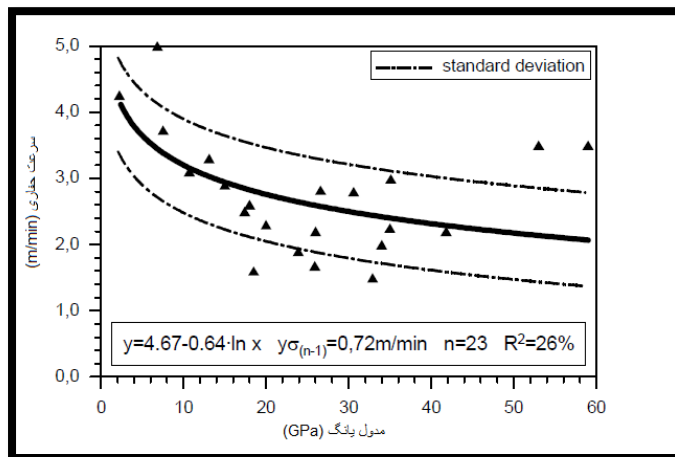
^۲ Rosiwal



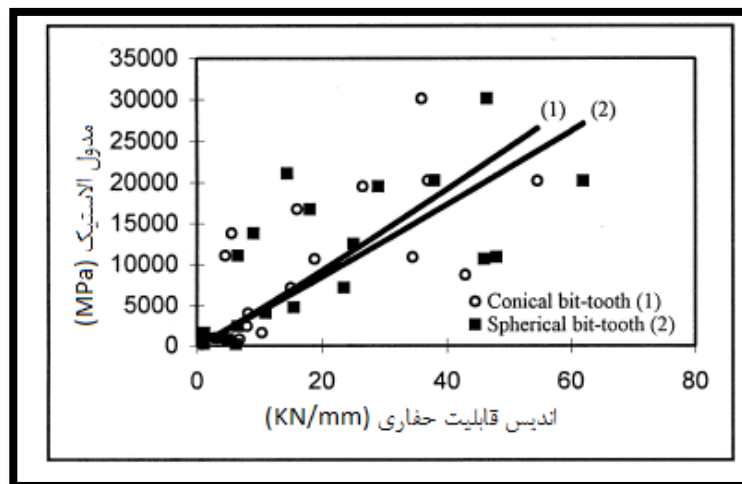
شکل ۲-۲۲- ارتباط بین اندیس سایش رزیوال و سختی موهس [۱۷]

و- خواص الاستیسیته و پلاستیسیته

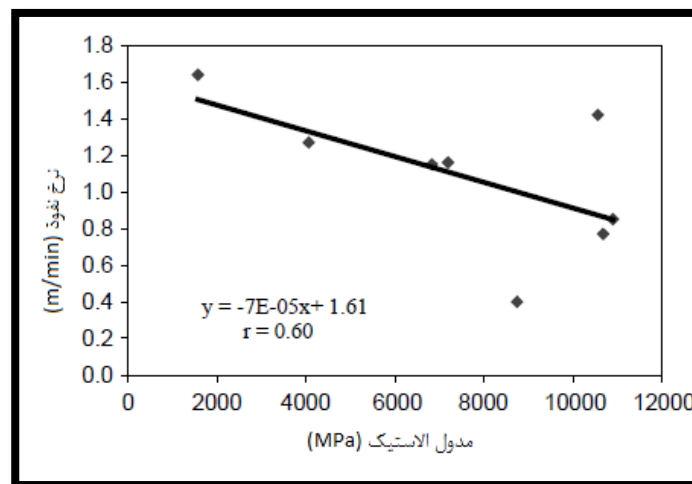
تورو در سال ۱۹۹۶ بیان کرد که با افزایش مدول یانگ سنگ‌ها، سرعت حفاری به صورت لگاریتمی کاهش می‌یابد (شکل ۲-۲۳). قهرمان و همکاران در سال ۲۰۰۰ نشان دادند که با افزایش مدول الاستیسیته سنگ‌ها سرعت حفاری دورانی کاهش می‌یابد (شکل ۲-۲۴). قهرمان در سال ۲۰۰۳ همچنین نشان داد که با افزایش مدول الاستیسیته سنگ‌ها سرعت حفاری به صورت خطی کاهش می‌یابد (شکل ۲-۲۵).



شکل ۲-۲۳- ارتباط سرعت حفاری و مدول الاستیسیته سنگ‌ها [۲۸]



شکل ۲-۲۴- ارتباط اندیس قابلیت حفاری و مدول الاستیسیته سنگ‌ها در حفاری دورانی [۲۳]



شکل ۲-۲۵- ارتباط قابلیت حفاری و مدول الاستیسیته سنگ‌ها در حفاری ضربه‌ای [۱۵]

۲-۲-۲-۳- مشخصات ساختاری توده‌سنگ‌ها

متخصصان متعددی بر تأثیرات ساختار توده‌سنگ بر قابلیت حفاری و نفوذپذیری آن تأکید کرده‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به سیستم طبقه‌بندی ویلبور اشاره کرد [۲۵]. 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.

در ادامه تأثیر هر یک از پارامترهای مهم عوارض زمین‌شناسی و تکتونیکی مؤثر بر قابلیت حفاری توده‌سنگ‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

الف- تأثیر گسل خوردگی بر سرعت حفاری

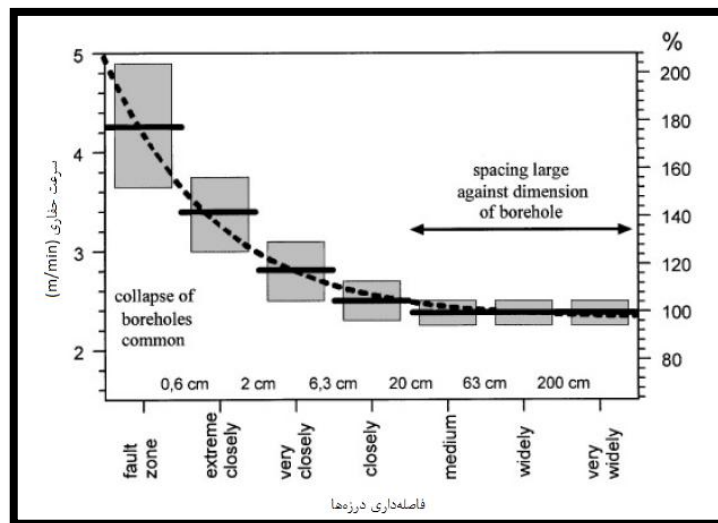
سطوح گسل خورده بسیار ضعیف است و در این محیط‌ها نیاز به بار پشت مته زیادی نیست، بالعکس دور مته در دقیقه را می‌توان افزایش داد. در این شرایط ماشین حفاری دورانی در اولویت قرار می‌گیرد. قفل‌شدگی سرمته و سیستم حفاری، کاهش سرعت و افزایش استهلاک را می‌توان مهم‌ترین عوارض ناشی از وجود ناحیه‌های خردشده گسلی دانست.

ب- تأثیر درزه‌داری و مشخصات درزه‌ها بر سرعت حفاری

حفاری در توده‌سنگ‌های درزه‌دار به مراتب مشکل‌تر از حفاری در نواحی بدون درزه است. از مشکلات حفاری در توده‌سنگ‌های درزه‌دار می‌توان به قفل‌شدگی سرمته، کاهش نفوذ سیستم حفاری، انحراف سرمته و کاهش راندمان اشاره کرد. در ادامه تأثیر هر یک از پارامترهای مهم مشخصات ژئومکانیکی درزه‌های مؤثر بر قابلیت حفاری توده‌سنگ‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

✓ تأثیر فاصله‌داری درزه‌ها بر سرعت حفاری

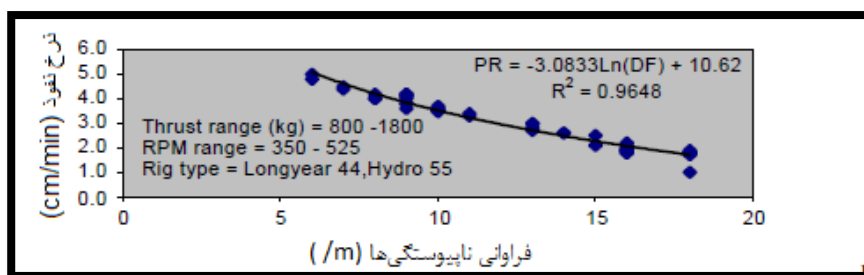
بسته به جنس سنگ فاصله‌داری با نرخ نفوذ رابطه کاهشی یا افزایشی دارد. مطالعات بسیار کمی بر روی تأثیرهای کمی فاصله‌داری بر روی سرعت حفاری انجام شده است. تورو در سال ۱۹۹۷ فاصله‌داری درزه‌ها را با نرخ نفوذ حفاری مته دستگاه جامبو دریل در یک معدن در آلمان به دست آورد و نتیجه گرفت که با کاهش فاصله‌داری سیستم درزه و به خصوص در ناحیه گسله نرخ نفوذ به صورت مضاعفی افزایش می‌یابد [۱۷]. در شکل (۲-۲۶) این رابطه نشان داده شده است.



شکل ۲-۲۶- ارتباط فاصله‌داری با نرخ حفاری در معدن آهک *Muschelkalk* [۱۷]

آکون و کارپوز در سال ۲۰۰۵ دریافتند که با افزایش فراوانی تعداد درزه در توده‌سنگ، سرعت

حفاری می‌یابد (شکل ۲-۲۷) [۲۷].

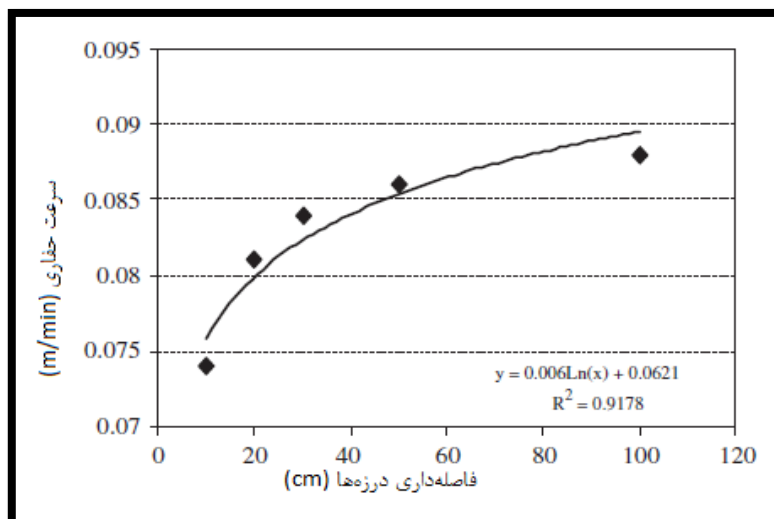


شکل ۲-۲۷- رابطه سرعت حفاری با فراوانی درزه‌ها [۲۷]

حسینی و همکاران در سال ۲۰۰۸ با انجام مطالعات آزمایشگاهی و مدل‌سازی فیزیکی

توده‌سنگ‌ها با بتن، کیفیت و کمیت تغییرات سرعت حفاری ناشی از تغییرات فاصله‌داری درزه‌ها را

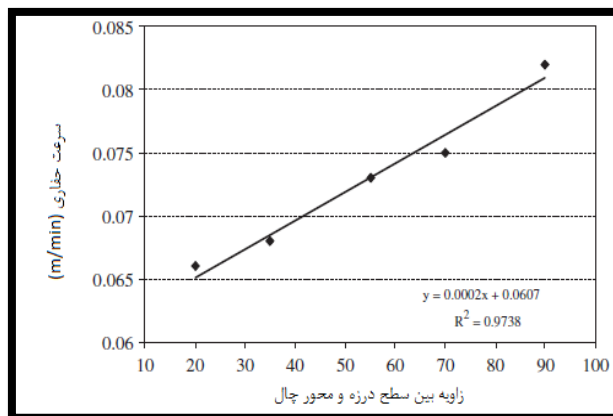
مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این تحقیق به صورت منحنی شکل (۲-۲۸) ارائه شده است [۷].



شکل ۲-۲۸- رابطه سرعت حفاری با فاصله‌داری درزه‌ها [۷]

✓ تأثیر شیب و جهت شیب درزه‌ها بر سرعت حفاری

حسینی و همکاران طی مطالعات خود در مورد شیب‌داری درزه‌ها ابتدا با تحلیل هندسی شرایط نفوذ و عبور مته از سطح درزه و شرایط مختلف، شیب‌داری را به صورت ریاضی مورد بررسی قرار دادند و همچنین با انجام مدل‌سازی فیزیکی هر یک از شرایط هندسی، آهنگ نفوذ مته چهار صلیبی را با استفاده از روش دورانی اندازه‌گیری کردند. در پایان با توجه به نتایج عددی حاصل از آزمایش‌ها، رابطه ریاضی بین زاویه شیب درزه نسبت به امتداد چال‌زنی و آهنگ نفوذ ارائه دادند و نتیجه گرفتند که با کاهش زاویه بین سطح درزه و امتداد چال‌زنی، آهنگ نفوذ مته در توده‌سنگ‌های درزه‌دار به صورت خطی کاهش می‌یابد [۳]. حسینی و همکاران رابطه بین سرعت حفاری و شیب‌داری درزه‌ها را به صورت شکل (۲-۲۹) نشان دادند.



شکل ۲-۲۹- رابطه بین سرعت حفاری و شیب درزه‌ها [۷]

نحوه امتیازدهی به شیب‌داری درزه‌های توده‌سنگ در سیستم طبقه‌بندی RDi به صورت جدول (۲-۸) است.

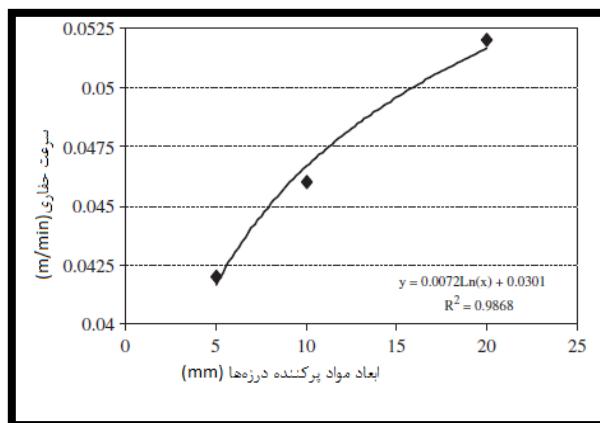
جدول ۲-۸- نحوه امتیازدهی به شیب‌داری درزه‌های توده‌سنگ در سیستم RDi [۷]

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

✓ تأثیر بازشدگی، پرکننده و نوع پرکننده درزه‌ها بر سرعت حفاری

درزه‌ها و ترک جوش خورده تأثیر چندانی بر کاهش نرخ نفوذ سیستم حفاری 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 می‌شوند. حسینی و همکاران در سال ۲۰۰۸ به این نتیجه رسیدند که وجود مواد پرکننده در فضای درزه‌های باز باعث کاهش شدید نرخ نفوذ سیستم حفاری می‌شود. همچنین نتایج مطالعات نشان می‌دهد که در توده‌سنگ‌های حاوی مواد پرکننده با ابعاد کوچکتر (ناحیه‌های خرد شده، گسلی و برشی)، مشکلات حفاری به مراتب بیشتر است. با کاهش ابعاد پرکننده تا حد ذرات فلاشینگ، ذرات به جای خرد شدن، تحت فشار هوای فلاشینگ تنها در فضای بین سرمته و سنگ حرکت می‌کنند. باقی ماندن ذرات در فضای بین سرمته و سنگ باعث اتلاف انرژی و کاهش نرخ نفوذ می‌شود. حسینی و همکاران رابطه بین سرعت حفاری و ابعاد پرکننده درزه‌ها را به صورت

شکل (۲-۳۰) ارائه کردند [۷].



شکل ۲-۳۰- رابطه بین سرعت حفاری و ابعاد پرکننده درزهها [۷]

همچنین نوع مواد پرکننده بر روی حفاری تأثیر می‌گذارد. گاهی اوقات مواد پرکننده از نوع رسی است که در مجموع در روش حفاری چرخشی تأثیر کمی دارد اما به روی سیستم حفاری ضربه‌ای می‌تواند تأثیر بگذارد و باعث فرورفتگی سیستم و گیر افتادن مته شود [۱].

۲-۳- سیستم طبقه‌بندی *RD_i*

فرآیند حفاری و نتایج آن تحت تأثیر پارامترهای مختلف ماده‌سنگ و توده‌سنگ قرار می‌گیرند. تأثیر هر کدام از این پارامترها در مطالعات مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است که در این فصل به آن‌ها اشاره شد. عدم اطلاع کامل از پارامترهای ساختاری توده‌سنگ ممکن است باعث تولید نتایج غیر قابل پیش‌بینی شود.

در سال ۲۰۰۸، حسینی و همکاران روش طبقه‌بندی جدیدی برای مشخص کردن شاخص قابلیت حفاری (*RD_i*) توده‌سنگ، ارائه کردند. برای انجام این کار ۶ پارامتر از توده‌سنگ شامل بافت (اندازه دانه‌ها)، سختی موهس، مقاومت فشاری تک‌محوری، فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها، بازشدگی و پرشدگی ناپیوستگی‌ها و زاویه بین محور چال با ناپیوستگی، به وسیله مدل‌سازی فیزیکی مورد بررسی قرار گرفته و درجه‌بندی شده است. در سیستم طبقه‌بندی *RD_i*، به منظور امتیازدهی به مقادیر مختلف هر پارامتر، بیشترین امتیاز به بهترین وضعیت (سریع) داده شده است. برای امتیاز حالت‌های متوسط-

سریع، متوسط، آهسته-متوسط و آهسته به ترتیب ۰.۷٪، ۰.۵٪، ۰.۲۵٪ و ۰.۱٪ امتیاز ماکزیمم، اختصاص یافته است (اعداد بسته به شرایط گرد شده‌اند) [۷].

در جدول (۲-۹) نحوه امتیازدهی در سیستم *RDi* و در جدول (۲-۱۰) کلاس بندی پیش بینی سرعت حفاری آورده شده است.

جدول ۲-۹- طبقه بندی اندیس قابلیت حفاری توده سنگ *RDi* [۷]

ردیف‌های ارزش					پارامترها
متراکم	پرفیری	گرانوئیدی	شکسته	متخلخل	بافت
۰/۰۵-۱	ماتریکس: ۰/۰۵-۱ دانه‌ها: ۲-۵	۲-۵	۵<	.....	اندازه دانه (mm)
۱	۴	۷	۱۰	۱۵	امتیاز
					مقاومت فشاری تک محوری (MPa)
>۲۰۰	۱۰۰-۲۰۰	۵۰-۱۰۰	۲۵-۵۰	۱-۲۵	
مقاومت خیلی بالا	مقاومت بالا	مقاومت متوسط	مقاومت کم	مقاومت خیلی کم	توصیف
۲	۶	۱۱	۱۶	۲۲	امتیاز
					سختی موهس
>۷	۶-۷	۴/۵-۶	۳-۴/۵	۱-۳	
خیلی سخت	سخت	نسبتاً سخت	نسبتاً نرم	خیلی نرم تا نرم	>توصیف
۱	۴	۹	۱۳	۱۸	امتیاز
					فاصله داری درزه‌ها (m)
۰-۰/۱۵	۰/۱۵-۰/۵	۰/۵-۱	۱-۲	۲<	
۱	۵	۹	۱۳	۱۸	امتیاز
					بازشدگی و پرشدگی درزه‌ها (mm)
۲-۹	۹-۱۲	۱۲-۲۰	۲۰<	درزه بسته (۰-۲)	
۱	۴	۷	۱۰	۱۵	امتیاز
					زاویه مابین درزه و محور چال (Deg)
۰-۲۰	۲۰-۳۵	۳۵-۵۵	۵۵-۷۰	۷۰-۹۰	
۱	۳	۶	۸	۱۲	امتیاز

جدول ۲-۱۰- پیش‌بینی سرعت حفاری در توده‌سنگ با استفاده از RDi [۷]

RDi	۷-۲۰	۲۰-۴۰	۴۰-۶۰	۶۰-۸۰	۸۰-۱۰۰
پیش‌بینی سرعت حفاری	آهسته	آهسته-متوسط	متوسط	متوسط-سریع	سریع

در سیستم طبقه‌بندی RDi ، برای قضاوت استاندارد در نقاط مرزی و شرایط خاص استثناء در نظر گرفته شده‌است به این صورت که اگر توده‌سنگ مورد مطالعه دارای تورق و شیستوزیته قانون‌مند باشد به دلیل سهولت فرآیند حفاری، امتیاز ۱۲ برای فاصله‌داری در نظر گرفته شده‌است و همچنین اگر پرشدگی درزه‌ها به صورت خاک یا پودر باشد، امتیاز ۷ برای پرکننده در نظر گرفته شده است [۷].

۲-۴- جمع‌بندی

با توجه به مطالب ارائه شده در این فصل، مشاهده می‌شود که پارامترهای زیادی به طور مستقیم و غیرمستقیم در فرآیند حفاری تأثیرگذارند. ضریب اهمیت این پارامترها در فرآیند حفاری یکسان نیست و همچنین نمی‌توان تنها بر اساس یک پارامتر فرآیند حفاری را پیش‌بینی نمود، بنابراین باید روشی استفاده شود که علاوه بر سهولت، دربرگیرنده پارامترهای اساسی در فرآیند حفاری باشد. از این رو با توجه به تعداد پارامترهای زیاد، هزینه بالا و وقت‌گیر بودن اندازه‌گیری پارامترها، سیستم طبقه‌بندی RDi ، با توجه به در نظر گرفتن ۶ پارامتر به طور همزمان؛ می‌تواند روش مناسبی جهت ارزیابی و بررسی قابلیت حفاری سنگ‌ها باشد.

فصل سوم

معرفی منطق مورد مطالعه

۳-۱- مقدمه

در این فصل از پایان نامه، برای شناسایی کلی منطقه مورد مطالعه؛ به تاریخچه شرکت سیمان شرق، موقعیت مکانی و جایگاه استان، وضعیت کلی آب و هوای منطقه، موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی محدوده به مطالعاتی و زمین‌شناسی منطقه‌ای اشاره شده است.

۳-۲- تاریخچه شرکت سیمان شرق

در سال ۱۳۳۶ بهره برداری از کوره های عمودی با استفاده از انرژی حرارتی کک که تکنولوژی روز آن زمان بود آغاز شد. به دلیل تغییر تولید از تناوبی به مداوم و در راستای کاهش قیمت تمام شده محصول در سال‌های بعد، احداث اولین کوره دوار با ظرفیت ۳۰۰ تن در روز در دستور کار قرار داده شد که کوره مزبور با بهره گرفتن از دستاوردهای فنی شرکت کروپ آلمان رسماً در مهر ماه ۱۳۴۶ در مدار تولید قرار گرفت. اما این پایان کار نبود چرا که گسترش روز افزون شهرها، کثرت تقاضاهای عمومی، ایجاد طرح های زیر بنایی در استان و ... حجم سیمان وسیعی را می طلبید که در توانایی تولید جاری کارخانه نبود لذا راه اندازی واحد دوار ۲ در مرداد ماه ۱۳۵۴ با ظرفیت اسمی ۱۲۵۰ تن در روز آغاز شد.

در سال ۱۳۶۲ کوره های قائم به دلیل محصول نامناسب و مقرون بصرفه نبودن تولیدات از چرخه بهره برداری خارج و به کلی متوقف شد. تدابیر مسئولین شرکت در رابطه با تحصیل منابعی که بتواند خلاء مادی ناشی از متوقف کردن واحدهای قائم را جبران نماید به تفکر تهیه و تولید آهک صنعتی منجر و این فکر در سال ۱۳۶۹ از قوه به فعل در آمد که حاصل آن راه اندازی واحد آهک صنعتی در تیر ماه ۱۳۷۴ با دو کوره و ظرفیت تولید روزانه ۵۵۰ تن بود.

سرانجام در سال ۱۳۷۲ طرح توسعه کارخانه سیمان مشهد به اجرا درآمد و منجر به بهره برداری واحد ۳۰۰۰ تنی در بهمن ماه ۱۳۷۷ شد. با توجه به نیاز کشور به سیمان جهت ایجاد زیر ساخت های توسعه‌ای اش، شرکت سیمان شرق تصمیم گرفت واحد ۴ با ظرفیت ۳۵۰۰ تن را در برنامه توسعه اش

قرار دهد. این طرح از سال ۱۳۸۳ شروع، ماشین آلات این خط از دانمارک و آلمان خریداری شد و در اردیبهشت ماه سال ۱۳۸۹ به بهره‌برداری رسید. همچنین بر اساس قرارداد شماره ۸۶/۱۲/۸۰۶۳ مورخ ۸۶/۰۷/۱۶ انجام خدمات مهندسی اکتشاف تفصیلی معدن مارن کارخانه سیمان مشهد از سوی شرکت سیمان شرق (سهامی عام) به شرکت مهندسی مشاور کاوشگران واگذار شد. متعاقب عقد قرارداد بلافاصله فعالیت‌های لازم آغاز و مطابق شرح خدمات و با دقت مناسب این مرحله مطالعاتی به انجام رسید. مسأله اصلی ذخیره مارن مذکور وجود تغییرات بسیار زیاد در کیفیت و یا ترکیبات مختلف آن می‌باشد که علی‌رغم چال‌زنی و نمونه‌گیری‌های اکتشافی قابل توجه که قبلاً انجام شده بود، باز هم پیش‌بینی تغییرات عیار جهت انتخاب سینه کار مناسب که بتواند مواد مطلوب برای مخلوط مواد خام را تولید کند بسیار سخت و بعضاً نشدنی بود. با بررسی‌های انجام شده در حجم بسیار قابل توجه مشخص شد که علت این تغییرات وجود بخش‌های مختلف و متفاوت زمین‌شناسی در محدوده مورد مطالعه است که این بخش‌ها تفکیک و براساس مطالعات آماری و زمین‌آمار شبکه اکتشاف آن‌ها طراحی و اجرا شده و نهایتاً مشخصات اکتشافی یا کمیت و کیفیت ذخیره هر قسمت تعیین شد. همچنین مطالعات نشان داد که تغییرات در جهت عمق کمتر است و می‌توان فواصل نمونه‌گیری‌های عمقی را بیشتر نمود و در تعداد، هزینه و زمان آزمایش نمونه‌های اکتشافی صرفه جویی نمود

هم‌اکنون مجتمع صنعتی کارخانجات سیمان مشهد قادر است تا سالانه بیش از ۲ میلیون تن

سیمان و ۲۰۰,۰۰۰ تن آهک صنعتی را تولید و به خریداران عرضه نماید [۳۴].

۳-۳- موقعیت مکانی و جایگاه استان در کشور

استان خراسان رضوی با مساحتی حدود ۱۱۶۳۴۹ کیلومتر مربع بخشی از گستره‌ی بزرگی از شمال شرق ایران زمین در استان پهناور خراسان بزرگ می‌باشد که در بین عرض‌های ۳۳ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۴۲ دقیقه عرض شمالی و ۵۶ درجه و ۱۹ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۶ دقیقه طول شرقی قرار دارد. این استان از شمال و شمال غرب به جمهوری ترکمنستان و استان خراسان شمالی، از شرق به

کشور افغانستان، از جنوب به استان خراسان جنوبی و از غرب به استان‌های یزد و سمنان محدود است. خراسان شمالی جمعاً دارای ۸۴۱ کیلومتر مرز مشترک با کشورهای همسایه است که از این میان ۳۰۲ کیلومتر آن مرز با افغانستان و ۵۳۹ کیلومتر همجواری با ترکمنستان است.

۳-۴- وضعیت کلی آب و هوا

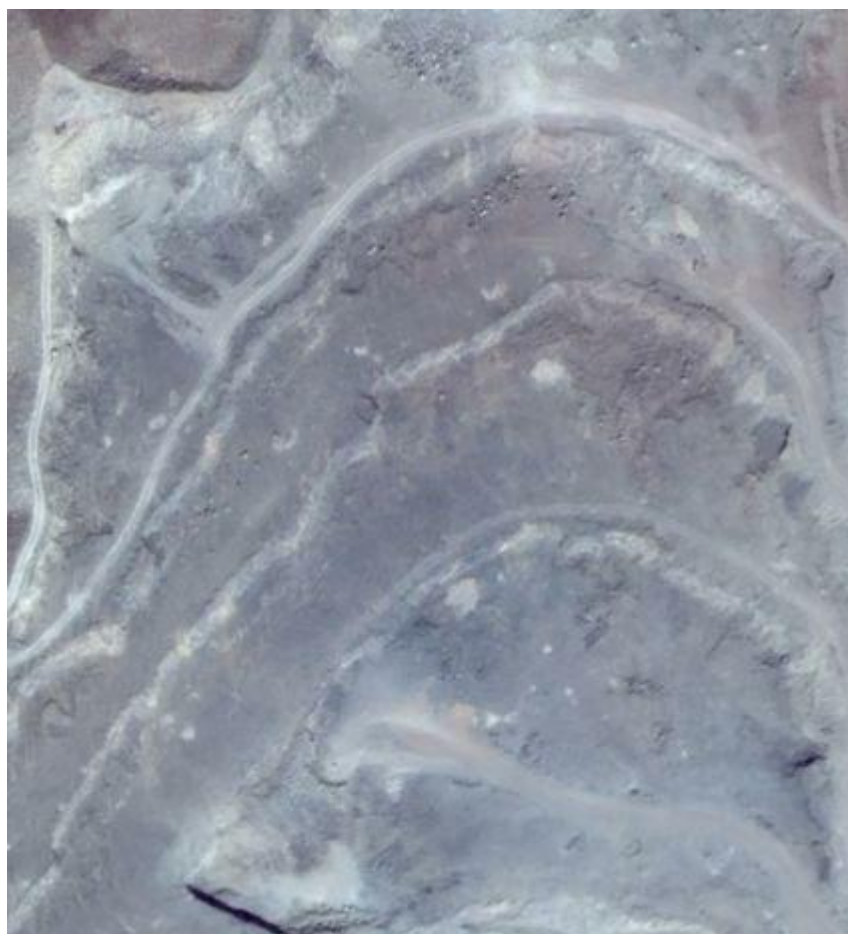
گسترده‌گی استان و عواملی مانند وجود رشته کوه‌های مرتفع و دشت‌ها و مناطق کویری دور از دریا و وزش بادهای مختلف موجب تفاوت آب و هوایی در قسمت‌های گوناگون آن شده‌است. در بیشتر بررسی‌های انجام گرفته از جمله مطالعات آمایش گستره خراسان (شامل استان‌های خراسان رضوی، شمالی و جنوبی)، این سرزمین به سه منطقه آب و هوایی شمال، مرکز و جنوب تقسیم می‌شود. خراسان رضوی شامل شهرستان‌های سبزوار، تربت حیدریه، کاشمر، گناباد و ... است و مساحتی در حدود ۸۵ هزار کیلومتر مربع دارد. این منطقه دارای آب و هوای نیمه صحرایی ملایم بوده و فعالیت اصلی اقتصادی در آن کشاورزی است که در دشت‌های وسیع دامنه‌های جنوبی بینالود تا کویر نمک و مناطق کویری مرز افغانستان انجام می‌شود. این دشت‌ها از نظر آب و هوایی جزو مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شوند و میزان بارندگی در آن‌ها بین ۲۰۰ تا ۲۵۰ میلیمتر در سال است [۳۴].

۳-۵- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی محدوده مطالعاتی

محدوده مورد مطالعه در شمال - شمال شرق شرق مشهد واقع شده است. این منطقه به شکل یک ۱۰ ضلعی با مساحت ۱۸۱/۴ هکتار می‌باشد. مختصات رأس‌های این ۱۰ ضلعی در سیستم *UTM* در جدول (۱-۳) ارائه شده است. در شکل (۱-۳) موقعیت منطقه مورد از نمای بالا نشان داده شده است. راه اصلی دسترسی به محدوده، جاده مشهد به کارخانه سیمان است. طول مسیر از مشهد تا کارخانه ۲۸ کیلومتر می‌باشد و از روستاهای قرقی سفلی و فارمد می‌گذرد. به دلیل نزدیکی این محدوده به شهر مشهد، شرایط و مشخصات اقلیمی و آب و هوایی آن را می‌توان مشابه این شهر در نظر گرفت [۳۴].

جدول ۳-۱- مختصات نقاط رأس ده ضلعی محدوده اکتشافی مورد مطالعه [۳۴]

نقطه رأس	$X(m)$	$Y(m)$
A	۷۴۴۵۸۴	۴۰۴۱۳۵۰
B	۷۴۷۰۳۵	۴۰۴۲۳۱۲
C	۷۴۷۱۳۷	۴۰۴۲۰۸۳
D	۷۴۶۶۹۹	۴۰۴۱۴۷۳
E	۷۴۶۴۶۱	۴۰۴۱۳۴۱
F	۷۴۶۰۷۷	۴۰۴۱۲۱۶
G	۷۴۵۲۹۹	۴۰۴۰۶۸۰
H	۷۴۵۱۱۰	۴۰۴۰۶۶۷
I	۷۴۵۱۰۰	۴۰۴۰۶۳۴
J	۷۴۴۹۱۵	۴۰۴۰۵۶۱



شکل ۳-۲- موقعیت محدوده مورد مطالعه از نمای بالا (بدون مقیاس)

۳-۶- زمین‌شناسی منطقه‌ای

محدوده‌ی معادن کارخانه سیمان شرق در پهنه‌بندی زمین‌شناسی ایران جز پهنه‌ی ساختاری کپه‌داغ و حاشیه شمال - شمال‌شرق دشت مشهد می‌باشد. این محدوده در شمال ورقه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ مشهد (چاپ سازمان زمین‌شناسی کشور) قرار می‌گیرد.

حوضه رسوبی کپه‌داغ علاوه بر شمال شرق ایران، بخش وسیعی از ترکمنستان و شمال افغانستان را هم شامل می‌شود. بخش ایرانی حوضه کپه‌داغ بین طول‌های شرقی ۵۴ درجه تا ۶۱ درجه و ۱۳ دقیقه قرار دارد و وسعتی معادل ۵۵۰۰۰ کیلومتر مربع یعنی تقریباً ۳/۳ درصد مساحت کشور را شمال می‌شود. ردیف سنگ‌های رخنمون‌یافته در محدوده اکتشافی معدن مارن عمدتاً مربوط به بخش فوقانی سازند مزدوران^۱ با زمانی معادل ژوراسیک فوقانی (آکسفوردین - کمپرین) و بنابر نتایج برخی تحقیقات تا تئوکومین (کرتاسه زیرین) می‌باشند.

با بررسی‌های انجام شده مشخص شد بخشی که تحت عنوان ذخایر مارن کارخانه مورد استفاده قرار می‌گیرند و در حال اکتشاف هستند در اصل تناوب یا تکراری از طبقات آهک مارنی، مارن، آهک‌های رسی و آهک‌های شیلی با میان لایه‌هایی از آهک آلئیتی و ماسه‌ای هستند که معمولاً با ساختاری تک شیب و با ساختمانی غالباً سالم و بدون خردشدگی‌های ناشی از پیامد عملکرد گسل‌های بزرگ، به طور تناوبی بر روی هم قرار گرفته‌اند. این ساختار تک شیب ممکن است مربوط به یال چین‌خوردگی بزرگی باشد که گستره‌ای فراتر از محدوده طراح را دربر می‌گیرد نواحی شرقی محدوده اکتشافی نیز، دشت به وجود آمده احتمالاً در اثر عملکرد گسله‌ای بوده که طبقات کربناته سازند مزدوران را بریده است و هم‌اکنون توسط نهشته‌های کواترنر نسبتاً ریزدانه پوشیده شده‌است.

در حاشیه شمال شرقی محدوده، رخنمون‌های کوچکی از واحد ماسه‌سنگی دیده شد که با توجه به تشابهاتی که با ماسه‌سنگ‌های سازند شورجه دارند احتمالاً مربوط به این سازند هستند [۳۴].

^۱ Mozduran Formation

۳-۷- جمع بندی

با توجه به مطالب ارائه شده در این فصل، مشاهده می شود که در محدوده مورد مطالعه کارهای اکتشافی به طور کامل انجام نگرفته و همچنین با توجه به این که ناحیه بندی توده سنگ های دربرگیرنده مواد معدنی و پیش بینی سرعت حفاری در آن به دلیل حجم بالای عملیات می تواند به طور جدی شرایط اقتصادی و عملیاتی معدن را تحت تأثیر قرار دهد، در ادامه به مطالعات صحرائی و آزمایشگاهی برای ناحیه بندی قابلیت حفاری معدن مارن ۱ سیمان شرق مشهد پرداخته شده است.

فصل چهارم

مطالعات صحرائی و آزمایشگاهی برای ناحیه بندی قابلیت حفاری

معدن مارن آسمان شرق مشهد

۴-۱- مقدمه

در این فصل از پایان نامه مطالعات انجام شده در معدن مارن ۱ شرح داده شده است. در ابتدا مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی بر روی الگوهای حفاری اجرا شده در معدن انجام شده و سرعت متوسط حفاری هر الگو ثبت شده است. سپس ارتباط بین هر یک از پارامترهای مکانیک سنگی - سرعت حفاری، مقاومت فشاری - سختی چکش اشمیت و همچنین ارتباط بین RDi - سرعت حفاری مورد مطالعه قرار گرفت. در مرحله بعد، با استفاده از طبقه بندی RDi رابطه ای بین سرعت حفاری و امتیاز RDi به دست آمد که از آن برای پیش بینی سرعت حفاری استفاده شد.

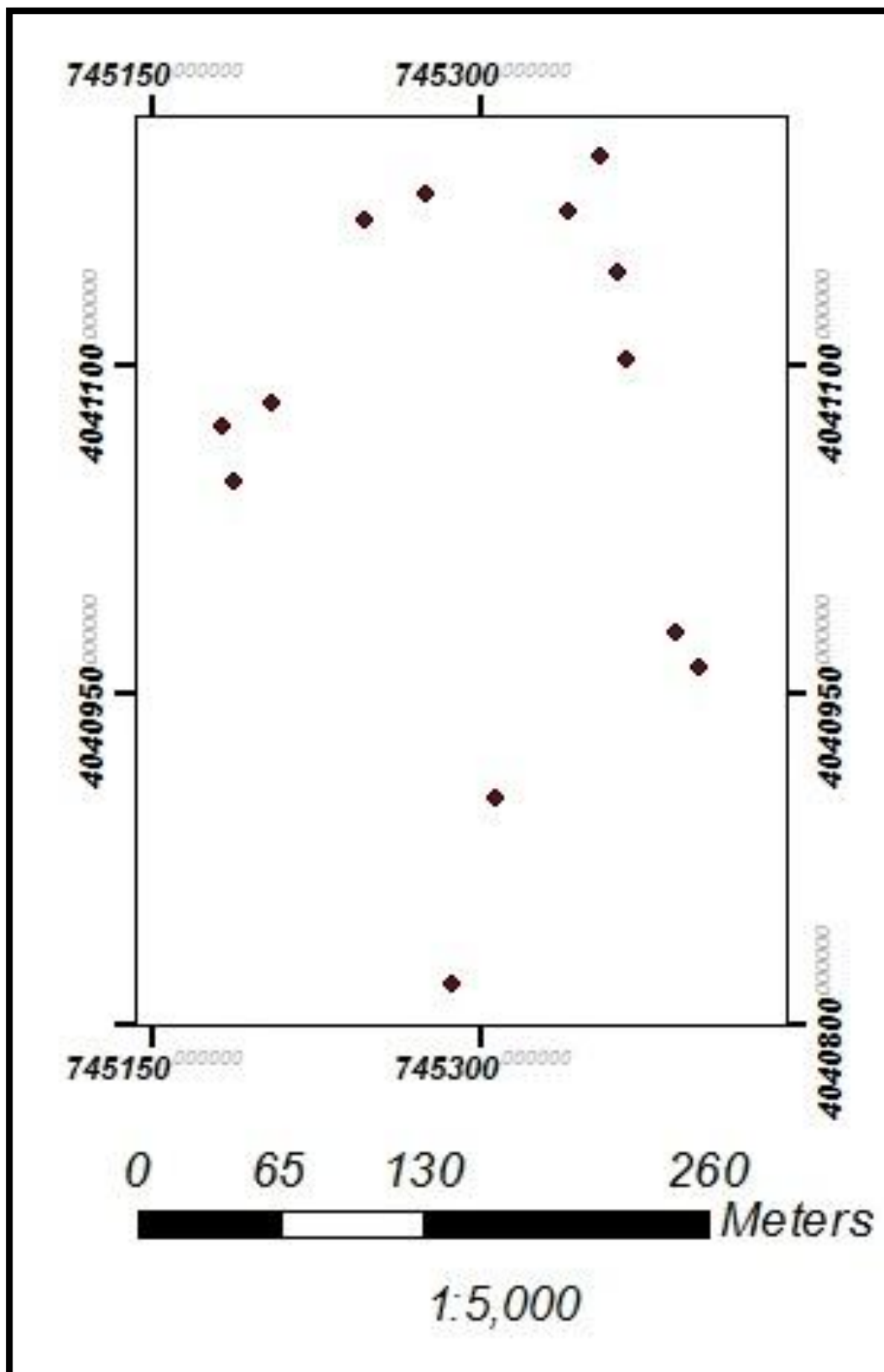
به منظور بررسی و ارزیابی قابلیت حفاری با استفاده از روش های عکس فاصله با استفاده از نرم افزار GIS^1 یک طبقه بندی بر اساس RDi به دست آمده است. سپس با استفاده از رابطه به دست آمده برای پیش بینی سرعت حفاری منطقه مورد مطالعه بر اساس سرعت حفاری ناحیه بندی شده است.

۴-۲- برداشت صحرایی و انجام مطالعات آزمایشگاهی

در ابتدا سرعت حفاری هر الگو ثبت و نمونه هایی برای انجام آزمایش های مکانیک سنگی برداشته شده است، که در ادامه به توضیح این موارد اشاره شده است. در شکل (۴-۱) موقعیت مکانی ۱۳ سینه کار برداشت شده، نشان داده شده است.

۴-۲-۱- برداشت سرعت حفاری الگوهای حفاری

سرعت متوسط حفاری با توجه به سرعت حفاری برداشت شده برای هر الگو بر اساس جدول (۴-۱) محاسبه شد. بر این اساس با استفاده از زمان سنج زمان حفر هر چال محاسبه (در هنگام تأخیرها کرنومتر متوقف بوده است) و با در اختیار داشتن عمق چال مورد نظر، سرعت حفاری برای هر چال بر حسب متر بر دقیقه به دست آمده و سپس سرعت متوسط حفاری با میانگین گیری از سرعت حفاری های به دست آمده محاسبه شد. نتایج به دست آمده در جدول (۴-۲) آورده شده است.



شکل ۴-۱- موقعیت مکانی ۱۳ سینه کار برداشت شده

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

شماره الگو:				
توضیحات	سرعت حفاری (m/min)	زمان حفاری (min)	عمق چال (m)	شماره چال
				۱
				۲
				.
				.
				N

جدول ۴-۲- سرعت متوسط حفاری محاسبه شده

شماره الگو	$X(m)$	$Y(m)$	سرعت متوسط حفاری (m/min)
۱	۷۴۵۳۶۲	۴۰۴۱۱۴۳	۰/۶۴۷
۲	۷۴۵۲۰۴	۴۰۴۱۰۸۳	۰/۵۲۱
۳	۷۴۵۳۰۶	۴۰۴۰۹۰۳	۰/۶۲
۴	۷۴۵۱۸۲	۴۰۴۱۰۷۳	۰/۵۰۲
۵	۷۴۵۳۳۹	۴۰۴۱۱۷۱	۰/۶۶۸
۶	۷۴۵۲۷۵	۴۰۴۱۱۷۹	۰/۵۷۸
۷	۷۴۵۳۶۶	۴۰۴۱۱۰۳	۰/۶۳۶
۸	۷۴۵۱۸۷	۴۰۴۱۰۴۸	۰/۵۱۱
۹	۷۴۵۳۸۹	۴۰۴۰۹۷۸	۰/۸۶۲
۱۰	۷۴۵۳۵۴	۴۰۴۱۱۹۵	۰/۶۰۳
۱۱	۷۴۵۳۹۹	۴۰۴۰۹۶۳	۰/۷۶۷
۱۲	۷۴۵۲۴۷	۴۰۴۱۱۶۶	۰/۵۷۹
۱۳	۷۴۵۲۸۷	۴۰۴۰۸۱۹	۰/۷۴۹

۴-۲-۲- اندازه گیری فاصله داری، بازشدگی و شیب درزه ها

فاصله داری، فاصله عمودی میان دو ناپیوستگی مجاور است، که معمولا به فاصله داری متوسط دو ناپیوستگی از یک دسته درزه اطلاق می شود. در برداشت صحرایی توده سنگ های مورد مطالعه فاصله داری، بازشدگی و شیب ناپیوستگی ها به روش خط اثر^۱ انجام شده است و سپس فاصله داری، بازشدگی و شیب متوسط ناپیوستگی ها برای هر سینه کار محاسبه شد که نتایج آن در جدول (۴-۳) درج شده است.

جدول ۴-۳- نتایج محاسبه فاصله داری، بازشدگی و شیب متوسط ناپیوستگی ها

شماره سینه کار	$X(m)$	$Y(m)$	تعداد درزه غالب	فاصله داری متوسط (cm)	بازشدگی متوسط (mm)	شیب متوسط (درجه)
۱	۷۴۵۳۶۲	۴۰۴۱۱۴۳	۲	۲۵۵	۱۳	۴۹
۲	۷۴۵۲۰۴	۴۰۴۱۰۸۳	۲	۳۹۵	۷/۵	۴۳/۵
۳	۷۴۵۳۰۶	۴۰۴۰۹۰۳	۶	۲۹۱	۱۵/۲	۴۰
۴	۷۴۵۱۸۲	۴۰۴۱۰۷۳	۲	۳۵۱	۱۰/۵	۴۵/۵
۵	۷۴۵۳۳۹	۴۰۴۱۱۷۱	۲	۲۵۳	۱۳/۵	۴۳
۶	۷۴۵۲۷۵	۴۰۴۱۱۷۹	۲	۳۰۸	۱۰/۵	۴۴
۷	۷۴۵۳۶۶	۴۰۴۱۱۰۳	۳	۲۴۷	۱۵/۳	۴۴
۸	۷۴۵۱۸۷	۴۰۴۱۰۴۸	۳	۳۲۴	۱۰/۷	۴۸
۹	۷۴۵۳۸۹	۴۰۴۰۹۷۸	۲	۲۹۱	۱	۴۳
۱۰	۷۴۵۳۵۴	۴۰۴۱۱۹۵	۲	۲۳۴	۱۵	۴۶
۱۱	۷۴۵۳۹۹	۴۰۴۰۹۶۳	۲	۳۱۱	۱	۴۳
۱۲	۷۴۵۲۴۷	۴۰۴۱۱۶۶	۴	۳۴۷	۶/۷	۵۱/۷۵
۱۳	۷۴۵۲۸۷	۴۰۴۰۸۱۹	۵	۲۶۷	۲۲	۴۶/۶

^۱ Scan line

۴-۲-۳- تعیین سختی موهس

برای تعیین سختی موهس کانی‌ها با استفاده از جدول سختی موهس برخی از اشیا همچون ناخن، سنجاق، شیشه و ... سختی موهس منطقه مورد مطالعه برداشت شد که در جدول (۴-۴) نشان داده شده است.

جدول ۴-۴- سختی موهس سینه کارهای حفاری شده

شماره سینه کار	$X(m)$	$Y(m)$	سختی موهس
۱	۷۴۵۳۶۲	۴۰۴۱۱۴۳	۲
۲	۷۴۵۲۰۴	۴۰۴۱۰۸۳	۳
۳	۷۴۵۳۰۶	۴۰۴۰۹۰۳	۲
۴	۷۴۵۱۸۲	۴۰۴۱۰۷۳	۳
۵	۷۴۵۳۳۹	۴۰۴۱۱۷۱	۲
۶	۷۴۵۲۷۵	۴۰۴۱۱۷۹	۲
۷	۷۴۵۳۶۶	۴۰۴۱۱۰۳	۲
۸	۷۴۵۱۸۷	۴۰۴۱۰۴۸	۳
۹	۷۴۵۳۸۹	۴۰۴۰۹۷۸	۲
۱۰	۷۴۵۳۵۴	۴۰۴۱۱۹۵	۲
۱۱	۷۴۵۳۹۹	۴۰۴۰۹۶۳	۲
۱۲	۷۴۵۲۴۷	۴۰۴۱۱۶۶	۲
۱۳	۷۴۵۲۸۷	۴۰۴۰۸۱۹	۲

۴-۲-۴- مطالعات آزمایشگاهی

در زمان ثبت سرعت حفاری از هر الگو نمونه‌هایی جمع‌آوری و برای انجام آزمایش‌های مکانیک‌سنجی به آزمایشگاه منتقل شد. بر این اساس با توجه به این که نمونه‌برداری غلط می‌تواند نتایج کار را با خطای زیادی روبرو کند، بدین منظور نمونه‌های انتخابی باید عاری از درزه، شکاف و پرشدگی ثانویه

باشند. همچنین نمونه نباید از سطح گسل خورده تهیه شود.

۴-۲-۴-۱- مغزه گیری

برای مغزه گیری باید نمونه‌ها مطابق شکل (۴-۲) در دستگاه مغزه گیر طوری ثابت شوند که در حین مغزه گیری دچار لرزش و شکستگی نشوند. بعد از عملیات مغزه گیری، مغزه‌های گرفته شده از نمونه‌ها بر اساس موقعیت مکانی برداشت شده، کدگذاری شدند (شکل ۴-۳).



شکل ۴-۲- آماده سازی نمونه‌ها و مغزه گیری

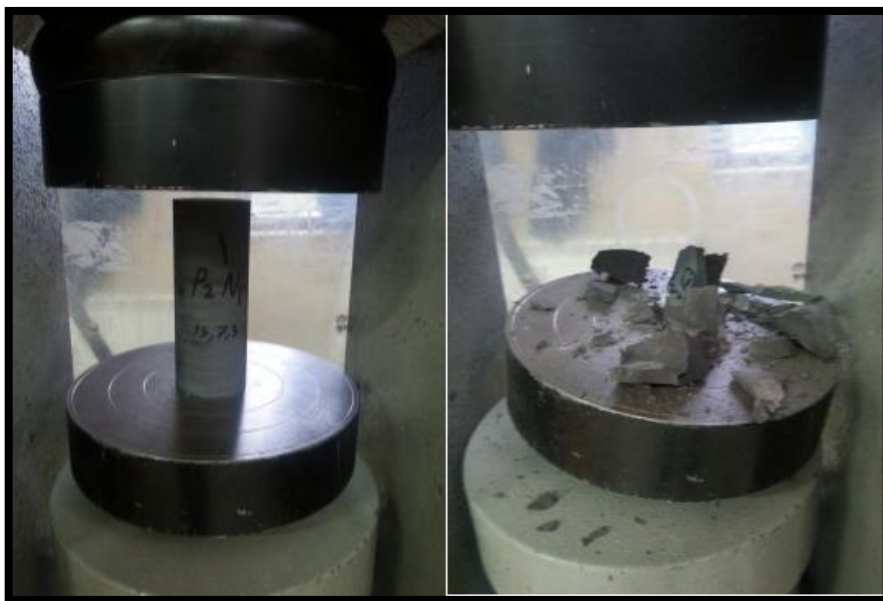


شکل ۴-۳- کدگذاری مغزه‌های گرفته شده

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

آزمایش مقاومت فشاری تک محوری (*UCS*) مرسوم‌ترین آزمون آزمایشگاهی برای مطالعات مکانیکی سنگ بکر می‌باشد که با وجود ظاهری ساده، انجام دقیق آن بسیار مشکل است. با توجه به این که یکی از پارامترها در طبقه‌بندی *RDi* مقاومت فشاری تک محوری است، آزمایش مقاومت فشاری تک محوری بر اساس استاندارد *ISRM* سال ۱۹۸۶ بر روی مغزه‌های استوانه‌ای تهیه شده، انجام شد. بر این اساس بار به طور پیوسته و بدون وارد آمدن ضربه با نرخ تقریباً ثابت به نمونه اعمال می‌شود. گسیختگی نمونه باید در مدت ۵ الی ۱۰ دقیقه پس از شروع بارگذاری اتفاق بیفتد (شکل ۴-۴). همچنین می‌توان سرعت بارگذاری را بین ۰/۵ تا ۱ مگاپاسکال بر ثانیه اختیار نمود. در لحظه شکست حداکثر بار وارد بر مغزه ثبت می‌شود و در نهایت مقاومت فشاری تک محوری از تقسیم حداکثر بار وارد بر مغزه به سطح مقطع اولیه آن محاسبه می‌شود که نتایج آن در جدول (۴-۵) آورده شده است

[۳۵].



شکل ۴-۴- اعمال نیرو و شکسته شدن مغزه

جدول ۴-۵- نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

مقاومت فشاری متوسط (MPa)	$Y(m)$	$X(m)$	شماره سینه کار
۱۰۰/۹۴۵	۴۰۴۱۱۴۳	۷۴۵۳۶۲	۱
۱۵۴/۵۶۴	۴۰۴۱۰۸۳	۷۴۵۲۰۴	۲
۱۱۱/۳۴۹	۴۰۴۰۹۰۳	۷۴۵۳۰۶	۳
۱۲۴/۰۵۱	۴۰۴۱۰۷۳	۷۴۵۱۸۲	۴
۹۸/۹۳۶	۴۰۴۱۱۷۱	۷۴۵۳۳۹	۵
۱۲۹/۵۸۹	۴۰۴۱۱۷۹	۷۴۵۲۷۵	۶
۱۱۵/۶۱۲	۴۰۴۱۱۰۳	۷۴۵۳۶۶	۷
۱۳۴/۵۷۵	۴۰۴۱۰۴۸	۷۴۵۱۸۷	۸
۵۶/۴۹۹	۴۰۴۰۹۷۸	۷۴۵۳۸۹	۹
۱۰۲/۴۹۲	۴۰۴۱۱۹۵	۷۴۵۳۵۴	۱۰
۶۱/۱۵۲	۴۰۴۰۹۶۳	۷۴۵۳۹۹	۱۱
۱۴۵/۱۷۹	۴۰۴۱۱۶۶	۷۴۵۲۴۷	۱۲
۹۶/۲۱۱	۴۰۴۰۸۱۹	۷۴۵۲۸۷	۱۳

۴-۲-۴-۳- آزمایش تعیین چگالی و تخلخل

آگاهی از چگالی سنگ‌ها نقش مهمی در مهندسی پروژه‌های معدنی ایفا می‌کند. چگالی سنگ تابع منافذ، درزه‌ها، شکاف‌ها و سایر فضاهای موجود در سنگ است. اختلاف در چگالی سنگ‌ها بیشتر مربوط به تخلخل آن‌ها است. تخلخل سنگ، بستگی به شکل و توزیع ابعاد دانه‌ها، استحکام دانه‌ها، سمت و سوی دانه‌ها، درجه تراکم و سیمان‌شدگی دانه‌ها دارد [۳۵].

تعیین چگالی و تخلخل با استفاده از روش اشباع و غوطه‌ورسازی و طبق استاندارد *ISRM* انجام می‌شود. در شکل (۴-۵) کوره مربوط به این آزمایش مشاهده می‌شود و همچنین نتایج آزمایش‌های چگالی و تخلخل در جدول (۴-۶) آورده شده است.



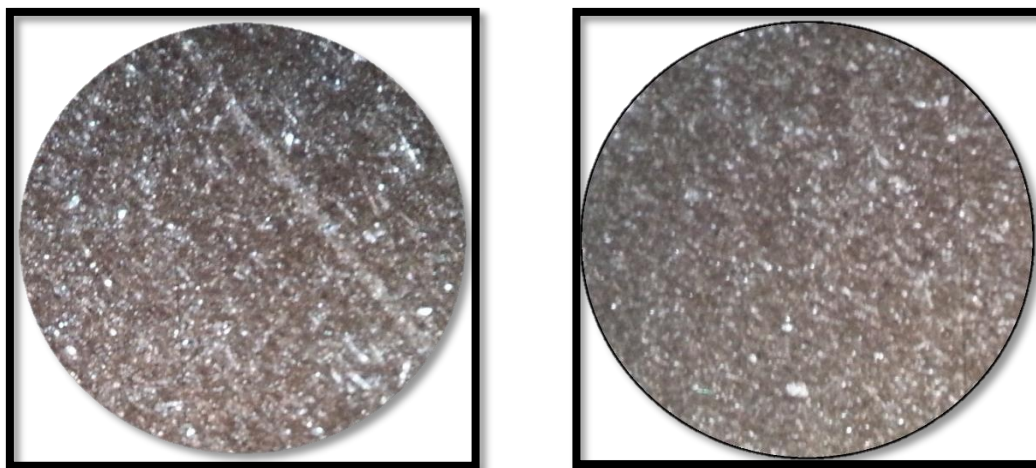
شکل ۴-۵- کوره مربوط به آزمایش چگالی و تخلخل

جدول ۴-۶- نتایج آزمایش چگالی و تخلخل

شماره سینه کار	$X(m)$	$Y(m)$	چگالی متوسط (g/cm^3)	تخلخل متوسط (%)
۱	۷۴۵۳۶۲	۴۰۴۱۱۴۳	۲/۶۲	۲/۰۴
۲	۷۴۵۲۰۴	۴۰۴۱۰۸۳	۲/۵۲	۴/۲۹
۳	۷۴۵۳۰۶	۴۰۴۰۹۰۳	۲/۵۱	۴/۲۱
۴	۷۴۵۱۸۲	۴۰۴۱۰۷۳	۲/۵۸	۳/۱۴
۵	۷۴۵۳۳۹	۴۰۴۱۱۷۱	۲/۶۰	۳/۰۵
۶	۷۴۵۲۷۵	۴۰۴۱۱۷۹	۲/۵۷	۳/۹۱
۷	۷۴۵۳۶۶	۴۰۴۱۱۰۳	۲/۶۱	۲/۵۹
۸	۷۴۵۱۸۷	۴۰۴۱۰۴۸	۲/۵۵	۲/۸۵
۹	۷۴۵۳۸۹	۴۰۴۰۹۷۸	۲/۳۲	۱/۷۲
۱۰	۷۴۵۳۵۴	۴۰۴۱۱۹۵	۲/۵۹	۲/۳۱
۱۱	۷۴۵۳۹۹	۴۰۴۰۹۶۳	۲/۴۲	۱/۷۵
۱۲	۷۴۵۲۴۷	۴۰۴۱۱۶۶	۲/۴۶	۲/۱۱
۱۳	۷۴۵۲۸۷	۴۰۴۰۸۱۹	۲/۳۷	۲/۰۸

۴-۲-۴- آزمایش بافت

برای تعیین بافت سنگ‌ها، بر اساس اندازه دانه‌ها مطابق طبقه‌بندی RDi ؛ از نمونه‌های منتقل شده به آزمایشگاه مقطع نازک گرفته شد و بعد از ساب داده شدن، اندازه دانه‌ها در زیر میکروسکوپ تعیین شد (شکل ۴-۶)، که بر این اساس برای تمامی منطقه مورد مطالعه بافت ریزدانه با اندازه دانه‌های بین ۰/۰۵ تا ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شد.



شکل ۴-۶- بافت دو نمونه از مقاطع نازک گرفته شده در زیر میکروسکوپ

۴-۲-۴-۵- آزمایش سختی چکش اشمیت

سختی یکی از مفاهیم رایجی است که برای توصیف رفتاری سنگ‌ها به کار می‌رود. با این حال هیچگونه کمیت فیزیکی اساسی برای برآورد کمی آن وجود ندارد. سختی تابعی از عوامل ذاتی متفاوتی چون نوع کانی‌ها، ابعاد دانه‌ها، چسبندگی مرزی کانی‌ها، مقاومت و رفتار الاستیک و پلاستیک سنگ است. در بین روش‌های موجود برای تعیین سختی سنگ، روش چکش اشمیت و اسکروپسکوپ شور به دلیل سادگی، در دسترس بودن وسایل آزمایش و ارتباط بسیار خوب نتایج آن‌ها با سایر ویژگی‌های سنگ، متداول‌ترین روش‌ها هستند [۳۵].

بر روی نمونه‌های برداشته شده از هر الگوی حفاری آزمایش سختی چکش اشمیت مطابق شکل

(۴-۷) انجام شد که نتایج آن مطابق جدول (۴-۷) آورده شده است.

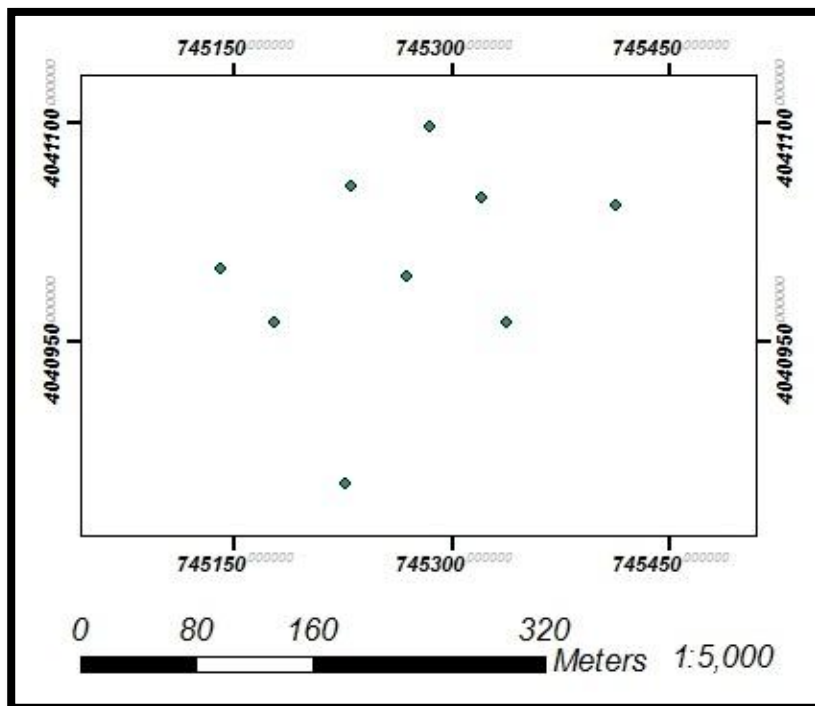


شکل ۴-۷- تعیین سختی چکش اشمیت نمونه‌ها

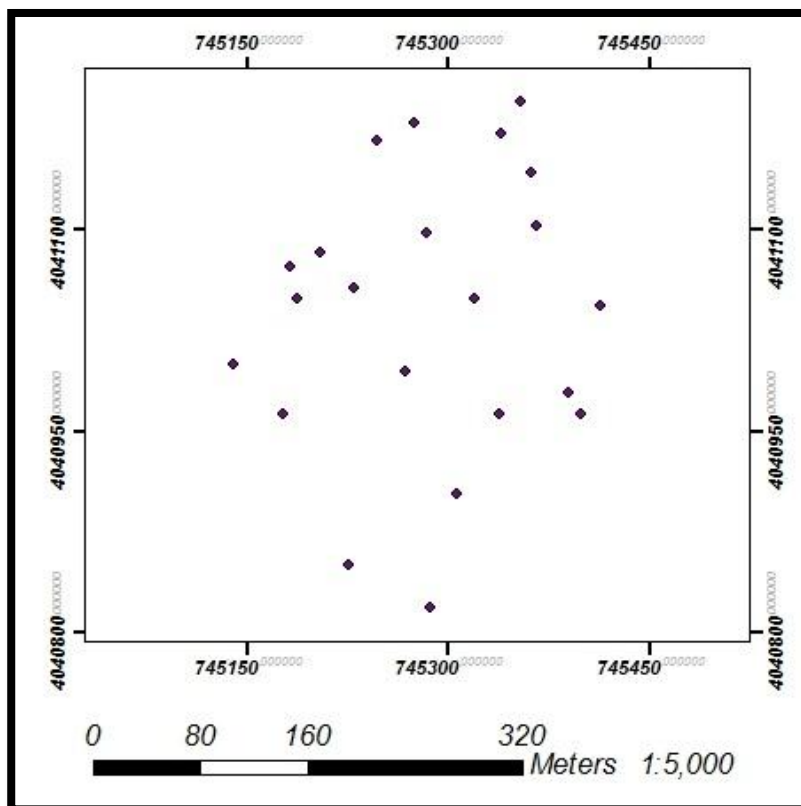
جدول ۴-۷- نتایج میانگین سختی چکش اشمیت

شماره الگو	$X(m)$	$Y(m)$	میانگین سختی چکش اشمیت
۱	۷۴۵۳۶۲	۴۰۴۱۱۴۳	۵۹/۴۸
۲	۷۴۵۲۰۴	۴۰۴۱۰۸۳	۶۱/۲۳
۳	۷۴۵۳۰۶	۴۰۴۰۹۰۳	۵۸/۲۵
۴	۷۴۵۱۸۲	۴۰۴۱۰۷۳	۶۱/۳۷
۵	۷۴۵۳۳۹	۴۰۴۱۱۷۱	۵۷/۹۳
۶	۷۴۵۲۷۵	۴۰۴۱۱۷۹	۶۱/۰۳
۷	۷۴۵۳۶۶	۴۰۴۱۱۰۳	۵۸/۲۵
۸	۷۴۵۱۸۷	۴۰۴۱۰۴۸	۶۲/۴۳
۹	۷۴۵۳۸۹	۴۰۴۰۹۷۸	۴۹/۳۷
۱۰	۷۴۵۳۵۴	۴۰۴۱۱۹۵	۵۸/۴۷
۱۱	۷۴۵۳۹۹	۴۰۴۰۹۶۳	۵۰/۲
۱۲	۷۴۵۲۴۷	۴۰۴۱۱۶۶	۶۲/۵۷
۱۳	۷۴۵۲۸۷	۴۰۴۰۸۱۹	۵۵/۵۳

برای بالا بردن دقت کار و کاهش خطا هنگام درون‌یابی به روش عکس فاصله نیاز به تعداد سینه‌کارهای بیشتری است. بر این اساس برای ۹ سینه‌کار جدید که موقعیت مکانی آن‌ها در شکل (۸-۴) نشان داده شده است، پارامترهای مورد نیاز RDi برداشت شد که نتایج آن در جدول (۸-۴) آورده شده است. در شکل (۹-۴) موقعیت مکانی مجموع ۲۲ سینه‌کار نشان داده شده است.



شکل ۴-۸- موقعیت مکانی ۹ سینه کار جدید

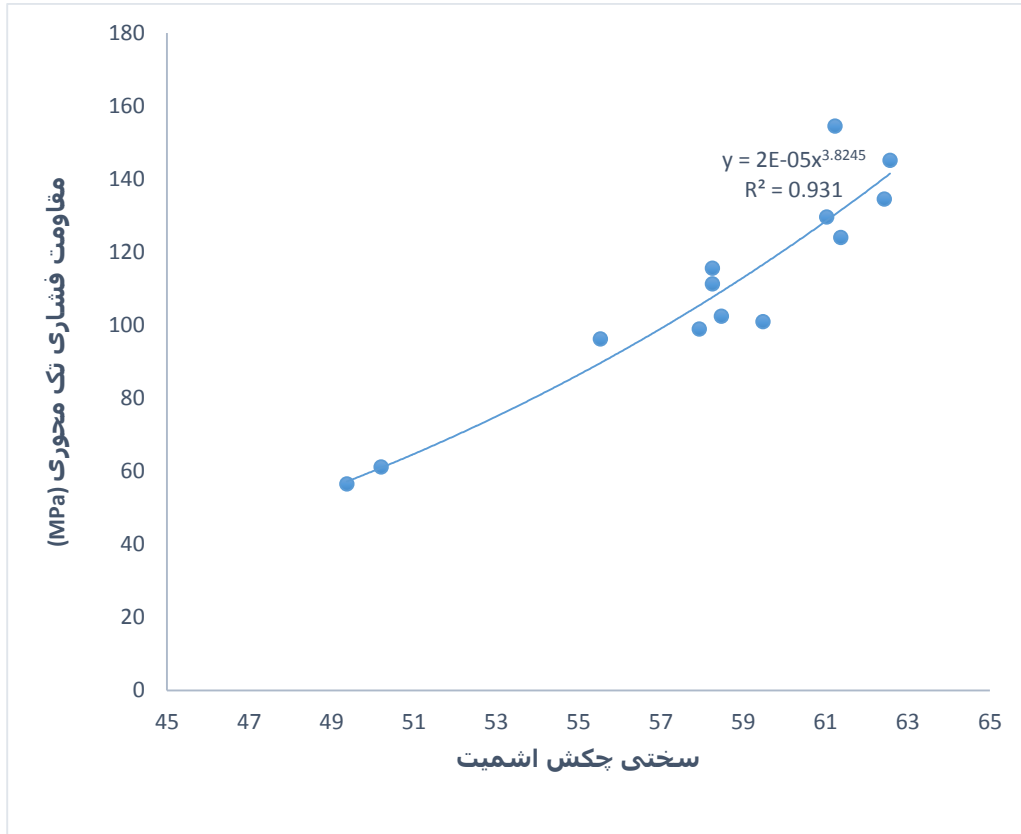


شکل ۴-۹- موقعیت مکانی مجموع ۲۲ سینه کار برداشت شده

جدول ۴-۸- محاسبه پارامترهای RDi برای سینه کارهای جدید

شماره سینه کار	$X(m)$	$Y(m)$	بافت (mm)	سختی موهس	تعداد درزه غالب	فاصله داری متوسط (cm)	بازشدگی متوسط (mm)	میانگین زاویه مابین درزه و محور چال (Deg)
۱	۷۴۵۳۳۸	۴۰۴۰۹۶۳	۰۵/۰ -۱	۲	۴	۲۸۸/۷۵	۱۲/۲۵	۳۸/۵
۲	۷۴۵۴۱۳	۴۰۴۱۰۴۳	۰۵/۰ -۱	۲	۲	۲۲۳/۵	۲۱/۵	۴۲
۳	۷۴۵۳۲۰	۴۰۴۱۰۴۹	۰۵/۰ -۱	۲	۴	۳۱۲/۷۵	۱۰/۵	۴۸/۷۵
۴	۷۴۵۲۶۸	۴۰۴۰۹۹۴	۰۵/۰ -۱	۳	۵	۲۸۷/۲	۶/۸	۴۲/۶
۵	۷۴۵۲۲۶	۴۰۴۰۸۵۱	۰۵/۰ -۱	۲	۵	۲۶۷/۶	۱۵/۸	۴۴/۴
۶	۷۴۵۲۸۴	۴۰۴۱۰۹۸	۰۵/۰ -۱	۲	۵	۲۹۷	۱۰/۸	۴۴/۴
۷	۷۴۵۲۳۰	۴۰۴۱۰۵۷	۰۵/۰ -۱	۳	۶	۳۲۵/۸۳	۵/۷	۵۰/۵
۸	۷۴۵۱۷۷	۴۰۴۰۹۶۳	۰۵/۰ -۱	۲	۵	۲۷۴/۴	۹/۲	۴۰/۲
۹	۷۴۵۱۴۰	۴۰۴۱۰۰۰	۰۵/۰ -۱	۲	۴	۲۴۰/۵	۱۳	۴۰/۵

به علت اینکه تعیین مقاومت فشاری سنگ‌ها کاری زمان‌بر و پرهزینه است، بدین منظور مطابق شکل (۴-۱۰) با توجه به این که رابطه خوبی بین سختی چکش اشمیت و مقاومت فشاری ۱۳ الگوی برداشت شده قبلی با ضریب تعیین بالا نشان داده شده است، از رابطه (۴-۱) می‌توان برای محاسبه مقاومت فشاری تک‌محوری سینه کارهای جدید استفاده کرد. بر این اساس ابتدا سختی چکش اشمیت سینه کارهای جدید اندازه‌گیری و سپس با استفاده از رابطه (۴-۱) مقاومت فشاری سینه کارهای جدید محاسبه شد که نتایج آن در جدول (۴-۹) آورده شده است. همچنین در جدول (۴-۱۰)، نتایج اندازه‌گیری کلیه پارامترهای RDi برای ۲۲ سینه کار آورده شده است.



شکل ۴-۱۰- ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوری با سختی چکش اشمیت

همانطور که مشاهده می شود با افزایش سختی چکش اشمیت، مقاومت فشاری هم افزایش می یابد و از رابطه به دست آمده زیر می توان برای محاسبه مقاومت فشاری تک محوری با استفاده از عدد سختی چکش اشمیت نقاط استفاده کرد:

$$UCS = 2E - 05R_n^{3.8245} \quad (۴-۱)$$

که در رابطه فوق UCS ، مقاومت فشاری تک محوری بر حسب MPa و R_n ، عدد سختی چکش اشمیت است.

جدول ۴-۹- سختی اشمیت و مقاومت فشاری تک محوری برای سینه کارهای جدید

شماره سینه کار جدید	$X(m)$	$Y(m)$	سختی چکش اشمیت	مقاومت فشاری تک محوری (MPa)
۱	۷۴۵۳۳۸	۴۰۴۰۹۶۳	۵۷/۴	۱۰۶/۷
۲	۷۴۵۴۱۳	۴۰۴۱۰۴۳	۵۵/۵	۹۳/۸
۳	۷۴۵۳۲۰	۴۰۴۱۰۴۹	۶۰/۷	۱۳۲/۱
۴	۷۴۵۲۶۸	۴۰۴۰۹۹۴	۶۲/۸	۱۵۰/۴
۵	۷۴۵۲۲۶	۴۰۴۰۸۵۱	۵۹/۴	۱۲۱/۶
۶	۷۴۵۲۸۴	۴۰۴۱۰۹۸	۶۱/۵	۱۳۸/۹
۷	۷۴۵۲۳۰	۴۰۴۱۰۵۷	۶۴/۸	۱۶۹/۶
۸	۷۴۵۱۷۷	۴۰۴۰۹۶۳	۶۰/۹	۱۳۳/۸
۹	۷۴۵۱۴۰	۴۰۴۱۰۰۰	۵۹/۸	۱۲۴/۷

در جدول (۴-۱۰) نتایج کلی مقادیر برداشت شده پارامترهای RDi ، برای ۲۲ سینه کار؛ آورده شده است.

۴-۳- تعیین امتیاز RDi توده سنگ های دربرگیرنده الگوهای حفاری

پس از برداشت های صحرایی و انجام آزمایش های مکانیک سنگی بر روی نمونه ها، امتیاز RDi توده سنگ ها با توجه به جدول (۲-۹) برای هر الگو تعیین شد، که نتایج آن در جدول (۴-۱۱) آورده شده است.

جدول ۴-۱۰- نتایج کلی مقادیر برداشت شده پارامترهای RDi برای ۲۲ سینه کار

شماره	$X(m)$	$Y(m)$	Te	UCS	H	$J.S$	$D.O.F$	Ang
۱	۷۴۵۳۶۲	۴۰۴۱۱۴۳	۰/۰۵-۱	۱۰۰/۹۴۵	۲	۲۵۵	۱۳	۴۱
۲	۷۴۵۲۰۴	۴۰۴۱۰۸۳	۰/۰۵-۱	۱۵۴/۵۶۴	۳	۳۹۵	۷/۵	۴۶/۵
۳	۷۴۵۳۰۶	۴۰۴۰۹۰۳	۰/۰۵-۱	۱۱۱/۳۴۹	۲	۲۹۱	۱۵/۲	۵۰
۴	۷۴۵۱۸۲	۴۰۴۱۰۷۳	۰/۰۵-۱	۱۲۴/۰۵۱	۳	۳۵۱	۱۰/۵	۴۴/۵
۵	۷۴۵۳۳۹	۴۰۴۱۱۷۱	۰/۰۵-۱	۹۸/۹۳۶	۲	۲۵۳	۱۳/۵	۴۷
۶	۷۴۵۲۷۵	۴۰۴۱۱۷۹	۰/۰۵-۱	۱۲۹/۵۸۹	۲	۳۰۸	۱۰/۵	۴۶
۷	۷۴۵۳۶۶	۴۰۴۱۱۰۳	۰/۰۵-۱	۱۱۵/۶۱۲	۲	۲۴۷	۱۵/۳	۴۶
۸	۷۴۵۱۸۷	۴۰۴۱۰۴۸	۰/۰۵-۱	۱۳۴/۵۷۵	۳	۳۲۴	۱۰/۷	۴۲
۹	۷۴۵۳۸۹	۴۰۴۰۹۷۸	۰/۰۵-۱	۵۶/۴۹۹	۲	۲۹۱	۱	۴۷
۱۰	۷۴۵۳۵۴	۴۰۴۱۱۹۵	۰/۰۵-۱	۱۰۲/۴۹۲	۲	۲۳۴	۱۵	۴۴
۱۱	۷۴۵۳۹۹	۴۰۴۰۹۶۳	۰/۰۵-۱	۶۱/۱۵۲	۲	۳۱۱	۱	۴۷
۱۲	۷۴۵۲۴۷	۴۰۴۱۱۶۶	۰/۰۵-۱	۱۴۵/۱۷۹	۲	۳۴۷	۶/۷	۳۸/۳
۱۳	۷۴۵۲۸۷	۴۰۴۰۸۱۹	۰/۰۵-۱	۹۶/۲۱۱	۲	۲۶۷	۲۲	۴۳/۴
۱۴	۷۴۵۳۳۸	۴۰۴۰۹۶۳	۰/۰۵-۱	۱۰۶/۷	۲	۲۸۸/۷۵	۱۲/۲۵	۳۸/۵
۱۵	۷۴۵۴۱۳	۴۰۴۱۰۴۳	۰/۰۵-۱	۹۳/۸	۲	۲۲۳/۵	۲۱/۵	۴۲
۱۶	۷۴۵۳۲۰	۴۰۴۱۰۴۹	۰/۰۵-۱	۱۳۲/۱	۲	۳۱۲/۷۵	۱۰/۵	۴۸/۷۵
۱۷	۷۴۵۲۶۸	۴۰۴۰۹۹۴	۰/۰۵-۱	۱۵۰/۴	۳	۲۸۷/۲	۶/۸	۴۲/۶
۱۸	۷۴۵۲۲۶	۴۰۴۰۸۵۱	۰/۰۵-۱	۱۲۱/۶	۲	۲۶۷/۶	۱۵/۸	۴۴/۴
۱۹	۷۴۵۲۸۴	۴۰۴۱۰۹۸	۰/۰۵-۱	۱۳۸/۹	۲	۲۹۷	۱۰/۸	۴۴/۴
۲۰	۷۴۵۲۳۰	۴۰۴۱۰۵۷	۰/۰۵-۱	۱۶۹/۶	۳	۳۲۵/۸۳	۵/۷	۵۰/۵
۲۱	۷۴۵۱۷۷	۴۰۴۰۹۶۳	۰/۰۵-۱	۱۳۳/۸	۲	۲۷۴/۴	۹/۲	۴۰/۲
۲۲	۷۴۵۱۴۰	۴۰۴۱۰۰۰	۰/۰۵-۱	۱۲۴/۷	۲	۲۴۰/۵	۱۳	۴۰/۵

Te : بافت، UCS : مقاومت فشاری تک محوری، H : سختی موهس، $J.S$: فاصله داری، $D.O.F$: بازشدگی درزه ها،

Ang : زاویه بین محور چال با درزه

جدول ۴-۱۱- امتیاز RDi الگوهای حفاری مورد مطالعه

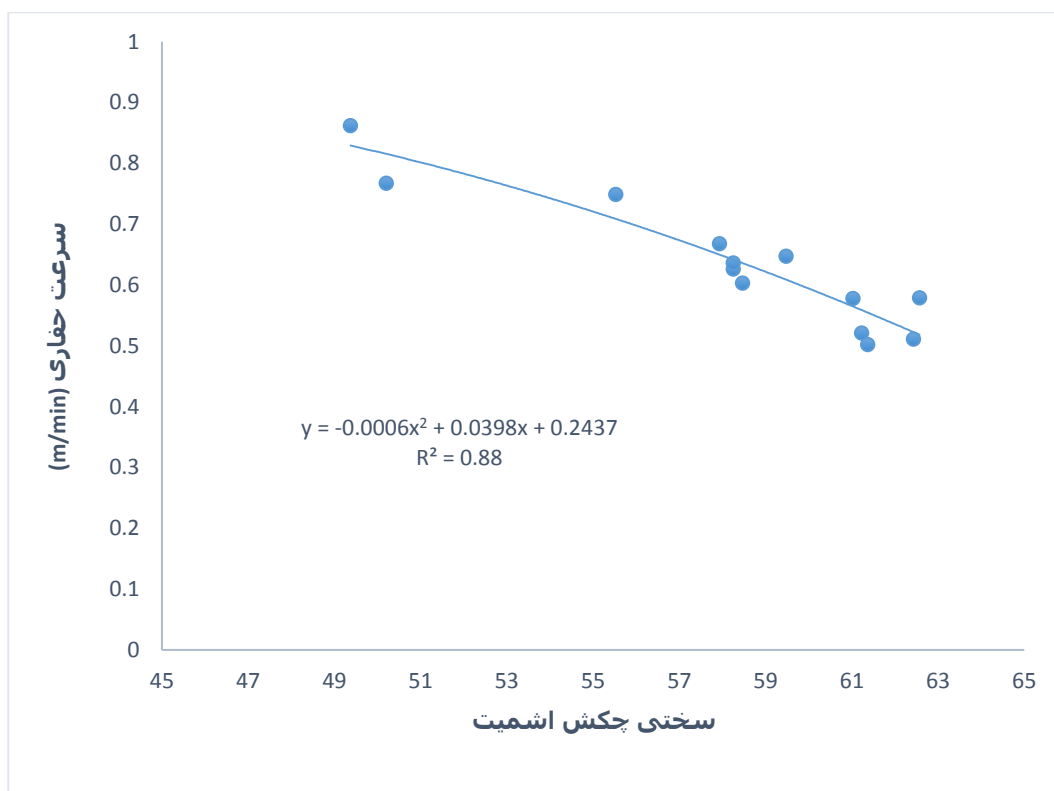
شماره	$X(m)$	$Y(m)$	Te	UCS	H	$J.S$	$D.O.F$	Ang	RDi	طبقه بندی
۱	۷۴۵۳۶۲	۴۰۴۱۱۴۳	۱	۶	۱۸	۱۸	۷	۶	۵۶	متوسط
۲	۷۴۵۲۰۴	۴۰۴۱۰۸۳	۱	۶	۱۳	۱۸	۱	۶	۴۵	متوسط
۳	۷۴۵۳۰۶	۴۰۴۰۹۰۳	۱	۶	۱۸	۱۸	۷	۶	۵۶	متوسط
۴	۷۴۵۱۸۲	۴۰۴۱۰۷۳	۱	۶	۱۳	۱۸	۴	۶	۴۸	متوسط
۵	۷۴۵۳۳۹	۴۰۴۱۱۷۱	۱	۱۱	۱۸	۱۸	۷	۶	۶۱	متوسط-تند
۶	۷۴۵۲۷۵	۴۰۴۱۱۷۹	۱	۶	۱۸	۱۸	۴	۶	۵۳	متوسط
۷	۷۴۵۳۶۶	۴۰۴۱۱۰۳	۱	۶	۱۸	۱۸	۷	۶	۵۶	متوسط
۸	۷۴۵۱۸۷	۴۰۴۱۰۴۸	۱	۶	۱۳	۱۸	۴	۶	۴۸	متوسط
۹	۷۴۵۳۸۹	۴۰۴۰۹۷۸	۱	۱۱	۱۸	۱۸	۱۵	۶	۶۹	متوسط-تند
۱۰	۷۴۵۳۵۴	۴۰۴۱۱۹۵	۱	۶	۱۸	۱۸	۷	۶	۵۶	متوسط
۱۱	۷۴۵۳۹۹	۴۰۴۰۹۶۳	۱	۱۱	۱۸	۱۸	۱۵	۶	۶۹	متوسط-تند
۱۲	۷۴۵۲۴۷	۴۰۴۱۱۶۶	۱	۶	۱۸	۱۸	۱	۶	۵۰	متوسط
۱۳	۷۴۵۲۸۷	۴۰۴۰۸۱۹	۱	۱۱	۱۸	۱۸	۱۰	۶	۶۴	متوسط-تند
۱۴	۷۴۵۳۳۸	۴۰۴۰۹۶۳	۱	۶	۱۸	۱۸	۷	۶	۵۶	متوسط
۱۵	۷۴۵۴۱۳	۴۰۴۱۰۴۳	۱	۱۱	۱۸	۱۸	۱۰	۶	۶۴	متوسط-تند
۱۶	۷۴۵۳۲۰	۴۰۴۱۰۴۹	۱	۶	۱۸	۱۸	۴	۶	۵۳	متوسط
۱۷	۷۴۵۲۶۸	۴۰۴۰۹۹۴	۱	۶	۱۳	۱۸	۱	۶	۴۵	متوسط
۱۸	۷۴۵۲۲۶	۴۰۴۰۸۵۱	۱	۶	۱۸	۱۸	۷	۶	۵۶	متوسط
۱۹	۷۴۵۲۸۴	۴۰۴۱۰۹۸	۱	۶	۱۸	۱۸	۴	۶	۵۳	متوسط
۲۰	۷۴۵۲۳۰	۴۰۴۱۰۵۷	۱	۶	۱۳	۱۸	۱	۶	۴۵	متوسط
۲۱	۷۴۵۱۷۷	۴۰۴۰۹۶۳	۱	۶	۱۸	۱۸	۴	۶	۵۳	متوسط
۲۲	۷۴۵۱۴۰	۴۰۴۱۰۰۰	۱	۶	۱۸	۱۸	۷	۶	۵۶	متوسط

Te : بافت، UCS : مقاومت فشاری تک محوری، H : سختی موهس، $J.S$: فاصله داری، $D.O.F$: باز شدگی درزه ها،

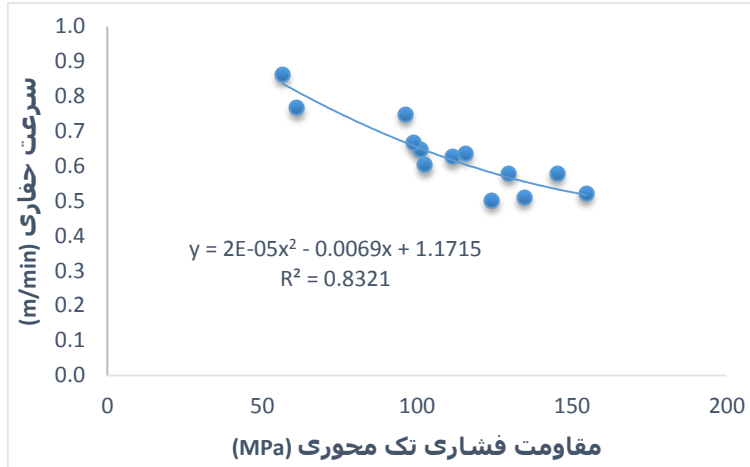
Ang : زاویه بین محور چال با درزه

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

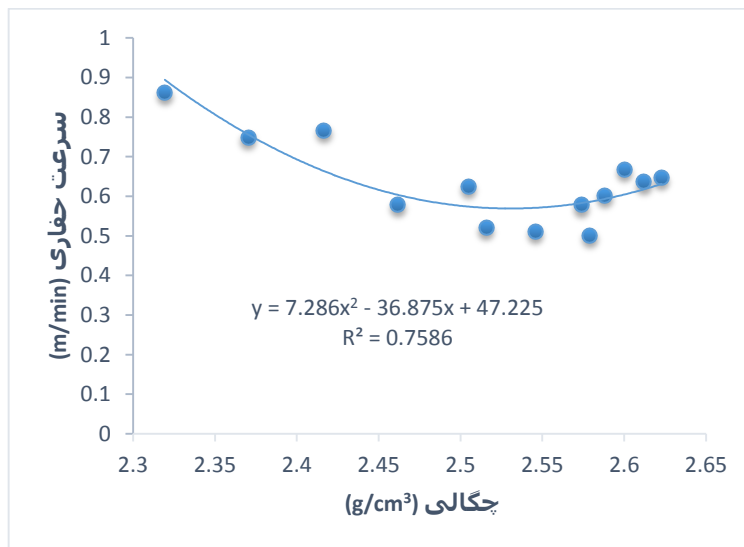
در بررسی مدل های آماری بایستی به وجود ضرایب منطقی در مدل توجه داشت. ضرایب منطقی در یک مدل به معنی پیروی مدل از طبیعت ذاتی فرآیند است. به عبارت دیگر یک مدل آماری زمانی دارای اعتبار علمی است که بتواند تحت هر شرایطی، مقادیر درستی از فرآیند را پیش بینی کند. بدین منظور روند طبیعی و منطقی هر یک از مدل ها با توجه به طبیعت ذاتی فرآیند مورد بررسی قرار گرفت که در ادامه ارتباط پارامترهای مکانیک سنگی مؤثر بر قابلیت حفاری با سرعت حفاری بررسی شده است که نتایج آن در شکل های (۴-۱۱) تا (۴-۱۴) آورده شده است.



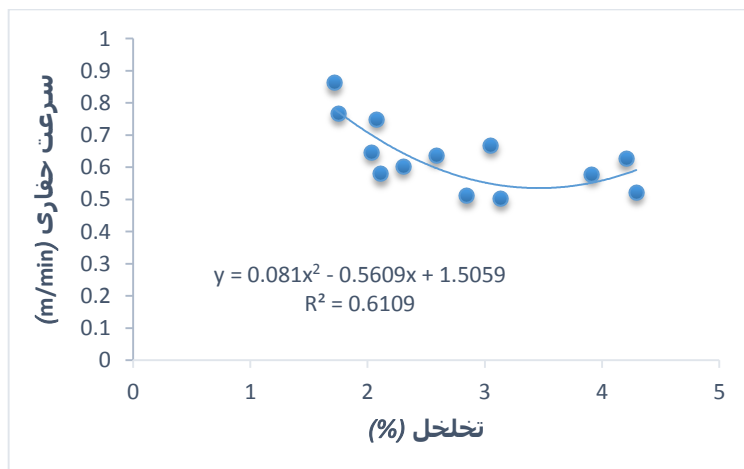
شکل ۴-۱۱- ارتباط بین سختی چکش اشمیت با سرعت حفاری



شکل ۴-۱۲- ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوری با سرعت حفاری



شکل ۴-۱۳- ارتباط بین چگالی با سرعت حفاری



شکل ۴-۱۴- ارتباط بین تخلخل با سرعت حفاری

همانطور که در شکل (۴-۱۱) مشاهده می شود، ارتباط معناداری بین سختی چکش اشمیت و سرعت حفاری دیده می شود که با افزایش سختی چکش اشمیت سرعت حفاری کاهش می یابد.

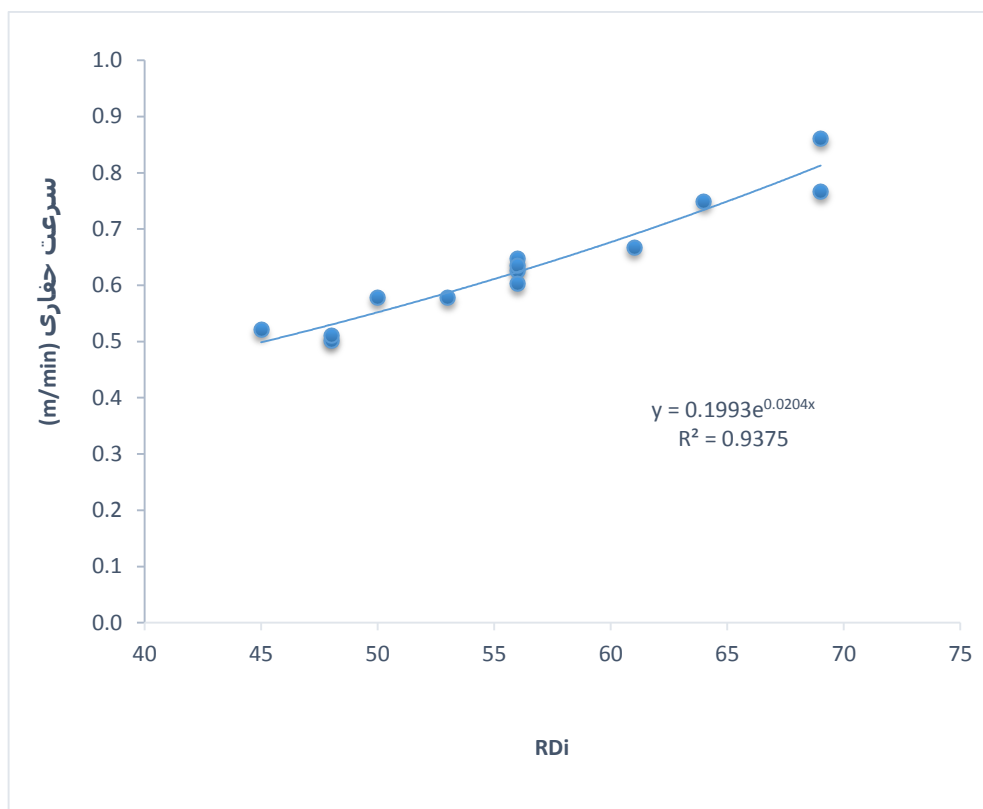
همچنین این ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوری و سرعت حفاری در شکل (۴-۱۲) مشاهده می شود که با افزایش مقاومت فشاری تک محوری سرعت حفاری کاهش پیدا می کند.

در شکل (۴-۱۳) مشاهده می شود که با افزایش چگالی، سرعت حفاری کاهش پیدا می کند که البته به علت تغییرات اندک در مقادیر چگالی این ارتباط با ضریب تعیین پایین تر، قابل درک است.

همچنین با توجه به شکل (۴-۱۴)، تخلخل با سرعت حفاری رابطه کاهشی دارد که بر اساس تئوری؛ این رابطه میبایست افزایشی باشد. به نظر می رسد که شرایط عملیاتی و گسل خوردگی ناحیه مورد مطالعه با توجه به افزایش تعداد درزه ها و حرکت آزادانه سرمته بین درزه ها و سنگ، باعث چنین رفتاری شده باشد.

بر این اساس با توجه به این که ارتباط معناداری بین پارامترهای ذکر شده و سرعت حفاری مشاهده می شود، نمی توان وابستگی سرعت حفاری را تنها با تکیه به یک پارامتر بیان کرد. از این رو این ارتباط را می توان با استفاده از یک شاخص، که به طور کلی در برگیرنده پارامترهای مربوط به حفاری باشد بیان کرد.

همان طور که در شکل (۴-۱۵) مشاهده می شود، ارتباط معناداری بین شاخص قابلیت حفاری و سرعت حفاری می توان مشاهده کرد. با توجه به این که این ارتباط از ضریب تعیین بالایی برخوردار است می توان برای پیش بینی سرعت حفاری با در اختیار داشتن مقادیر RDi از رابطه ریاضی به دست آمده از این ارتباط که در رابطه (۴-۲) بیان شده است، استفاده کرد.



شکل ۴-۱۵- ارتباط بین شاخص قابلیت حفاری و سرعت حفاری

$$\text{Drilling Rate} = 0.1993e^{0.0204RDi} \quad (۲-۴)$$

که در این رابطه:

Drilling Rate، سرعت حفاری بر حسب متر بر دقیقه و *RDi*، شاخص قابلیت حفاری می‌باشد.

۴-۵- ناحیه بندی محدوده معدن مارن ۱ با استفاده از روش عکس فاصله

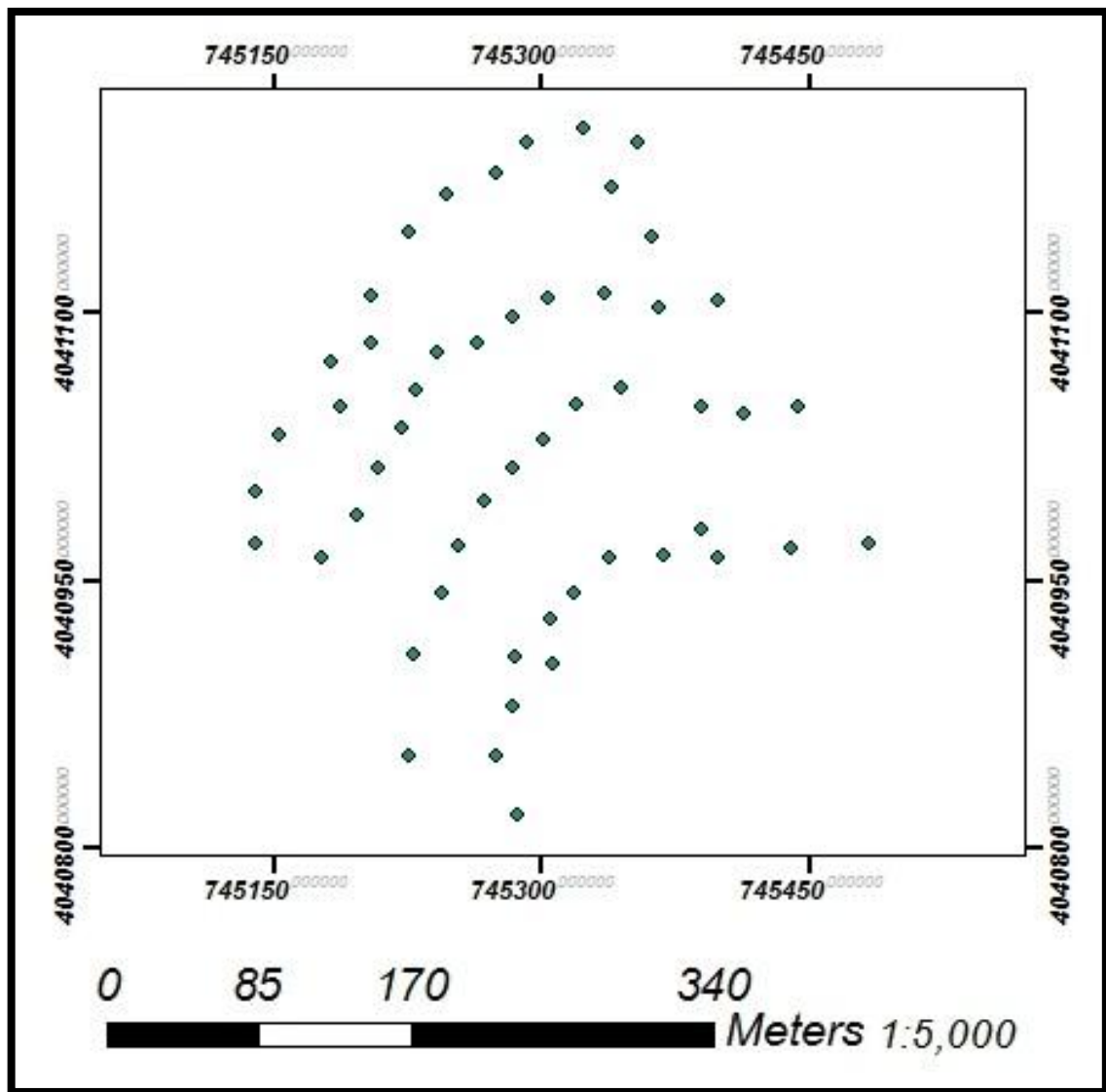
برای ناحیه بندی به روش عکس فاصله، باید پارامترهای سیستم طبقه بندی *RDi* تخمین زده شوند. با توجه به ماهیت سه پارامتر فاصله داری درزه‌ها، بازشدگی درزه‌ها و زاویه بین محور چال با درزه‌ها که قابل تخمین نیستند، ابتدا معدن را به ۵۲ ناحیه تقسیم (شکل ۴-۱۶) و سپس این سه پارامتر را برای هر ناحیه در معدن اندازه گیری کرده که نتایج آن در جدول (۴-۱۲) مشاهده می‌شود. سپس برای به دست آوردن دو پارامتر مقاومت فشاری تک محوری و سختی موهس برای هر ناحیه، با استفاده از روش عکس فاصله (از توان ۱ تا ۲۰)، مقدار آن‌ها به کمک نرم افزار *GIS* تخمین زده شد (مطابق پیوست ۱).

جدول ۴-۱۲- نتایج اندازه گیری شده پارامترها در هر ناحیه

شماره ناحیه	$X(m)$	$Y(m)$	تعداد درزه غالب	فاصله داری متوسط (cm)	بازشدگی متوسط (mm)	میانگین زاویه مابین درزه و محور چال (Deg)
۱	۷۴۵۳۶۲	۴۰۴۱۱۴۳	۲	۲۵۵	۱۳	۴۱
۲	۷۴۵۲۰۴	۴۰۴۱۰۸۳	۲	۳۹۵	۷/۵	۴۶
۳	۷۴۵۳۰۶	۴۰۴۰۹۰۳	۶	۲۹۱	۱۵/۲	۵۰
۴	۷۴۵۱۸۲	۴۰۴۱۰۷۳	۲	۳۵۱	۱۰/۵	۴۴
۵	۷۴۵۳۳۹	۴۰۴۱۱۷۱	۲	۲۵۳	۱۳/۵	۴۷
۶	۷۴۵۲۷۵	۴۰۴۱۱۷۹	۲	۳۰۸	۱۰/۵	۴۶
۷	۷۴۵۳۶۶	۴۰۴۱۱۰۳	۳	۲۴۷	۱۵/۳	۴۶
۸	۷۴۵۱۸۷	۴۰۴۱۰۴۸	۳	۳۲۴	۱۰/۷	۴۲
۹	۷۴۵۳۸۹	۴۰۴۰۹۷۸	۲	۲۹۱	۱	۴۷
۱۰	۷۴۵۳۵۴	۴۰۴۱۱۹۵	۲	۲۳۴	۱۵	۴۴
۱۱	۷۴۵۳۹۹	۴۰۴۰۹۶۳	۲	۳۱۱	۱	۴۷
۱۲	۷۴۵۲۴۷	۴۰۴۱۱۶۶	۴	۳۴۷	۶/۷	۳۸
۱۳	۷۴۵۲۸۷	۴۰۴۰۸۱۹	۵	۲۶۷	۲۲	۴۳
۱۴	۷۴۵۳۳۸	۴۰۴۰۹۶۳	۴	۲۸۸	۱۲/۲۵	۳۸
۱۵	۷۴۵۴۱۳	۴۰۴۱۰۴۳	۲	۲۲۳	۲۱/۵	۴۲
۱۶	۷۴۵۳۲۰	۴۰۴۱۰۴۹	۴	۳۱۲	۱۰/۵	۴۸
۱۷	۷۴۵۲۶۸	۴۰۴۰۹۹۴	۵	۲۸۷	۶/۸	۴۲
۱۸	۷۴۵۲۲۶	۴۰۴۰۸۵۱	۵	۲۶۷	۱۵/۸	۴۴
۱۹	۷۴۵۲۸۴	۴۰۴۱۰۹۸	۵	۲۹۷	۱۰/۸	۴۴
۲۰	۷۴۵۲۳۰	۴۰۴۱۰۵۷	۶	۳۲۵	۵/۷	۵۰

ادامه جدول ۴-۱۲- نتایج اندازه گیری شده پارامترها در هر ناحیه

۴۰	۹/۲	۲۷۴	۵	۴۰۴۰۹۶۳	۷۴۵۱۷۷	۲۱
۴۰	۱۳	۲۴۰	۴	۴۰۴۱۰۰۰	۷۴۵۱۴۰	۲۲
۴۳	۱۶/۵	۲۵۲	۲	۴۰۴۰۹۷۱	۷۴۵۴۸۳	۲۳
۴۷	۸/۳	۲۴۲	۳	۴۰۴۰۹۶۸	۷۴۵۴۴۰	۲۴
۳۸	۱/۵	۳۰۴	۲	۴۰۴۰۹۶۴	۷۴۵۳۶۸	۲۵
۴۱	۱۲/۷	۲۹۵	۳	۴۰۴۰۹۴۳	۷۴۵۳۱۸	۲۶
۴۸	۱۴	۲۸۵	۳	۴۰۴۰۹۲۸	۷۴۵۳۰۵	۲۷
۴۹	۱۳/۸	۲۲۹	۶	۴۰۴۰۹۰۷	۷۴۵۲۸۵	۲۸
۴۴	۲۰/۸	۲۲۴	۴	۴۰۴۰۸۸۰	۷۴۵۲۸۴	۲۹
۳۱	۲۰/۵	۲۴۰	۴	۴۰۴۰۸۵۲	۷۴۵۲۷۴	۳۰
۴۳	۲۲/۵	۲۵۴	۲	۴۰۴۱۰۴۸	۷۴۵۴۴۴	۳۱
۴۴	۲۰/۵	۲۲۲	۲	۴۰۴۱۰۴۸	۷۴۵۳۹۰	۳۲
۴۰	۱۰/۲۵	۲۹۳	۴	۴۰۴۱۰۵۸	۷۴۵۳۴۴	۳۳
۴۶	۱۰/۵	۲۹۳	۴	۴۰۴۱۰۲۹	۷۴۵۳۰۱	۳۴
۴۸	۱۰/۸	۲۸۶	۴	۴۰۴۱۰۱۳	۷۴۵۲۸۴	۳۵
۴۸	۱۴/۷	۲۹۰	۶	۴۰۴۰۹۶۹	۷۴۵۲۵۳	۳۶
۴۵	۱۴/۳	۲۲۲	۶	۴۰۴۰۹۴۳	۷۴۵۲۴۴	۳۷
۳۳	۲۱/۶	۲۳۱	۵	۴۰۴۰۹۰۸	۷۴۵۲۲۸	۳۸
۴۲	۱۵/۵	۲۲۱	۲	۴۰۴۰۹۰۷	۷۴۵۳۹۹	۳۹
۴۳	۱۷/۷	۲۸۶	۳	۴۰۴۱۱۱۱	۷۴۵۳۳۵	۴۰
۴۲	۱۱/۵	۲۹۸	۴	۴۰۴۱۱۰۸	۷۴۵۳۰۴	۴۱
۵۰	۱۱	۲۹۱	۴	۴۰۴۱۰۸۳	۷۴۵۲۶۴	۴۲
۴۶	۸/۳	۲۸۷	۶	۴۰۴۱۰۷۳	۷۴۵۲۴۲	۱۳
۴۲	۹	۲۹۲	۲	۴۰۴۱۰۳۵	۷۴۵۲۲۱	۴۴
۴۵	۱۲/۵	۲۴۱	۲	۴۰۴۱۰۱۳	۷۴۵۲۰۸	۴۵
۳۹	۲۲	۲۰۲	۵	۴۰۴۰۹۸۶	۷۴۵۱۹۶	۴۶
۴۸	۱۵/۸	۲۲۰	۴	۴۰۴۰۹۷۱	۷۴۵۱۴۰	۴۷
۴۵	۱۵/۳	۲۰۵	۴	۴۰۴۱۰۳۱	۷۴۵۱۵۳	۴۸
۴۸	۹	۲۹۸	۲	۴۰۴۱۱۰۹	۷۴۵۲۰۵	۴۹
۴۶	۱۳/۳	۲۸۶	۴	۴۰۴۱۱۴۵	۷۴۵۲۲۵	۵۰
۴۲	۱۶	۲۸۸	۳	۴۰۴۱۱۹۵	۷۴۵۲۹۲	۵۱
۴۶	۱۷	۲۳۱	۲	۴۰۴۱۲۰۳	۷۴۵۳۲۴	۵۲



شکل ۴-۱۶- موقعیت مکانی ۵۲ ناحیه منطقه مورد مطالعه

در ادامه برای تعیین بهترین مدل تخمینی به بررسی و مقایسه مدل‌های تخمینی اشاره شده است.

۴-۵-۱- تعیین بهترین مدل تخمین پارامتر مقاومت فشاری

با توجه به این که برای تخمین مقاومت فشاری و سختی موهس از روش عکس فاصله از توان ۱ تا توان ۲۰ استفاده شده است، ۲۰ گروه داده برای هر کدام از این دو پارامتر به دست آمده است. حال برای تعیین مناسب‌ترین مدل پارامتر مقاومت فشاری از ۴ رابطه ریاضی ضریب تعیین R^2 ، جذر میانگین

مربعات خطا^۱ $RMSE$ ، شاخص عملکرد^۲ VAF و میانگین درصد خطای مطلق^۳ $MAPE$ استفاده شده است.

$RMSE$ متوسط خطای نتایج به دست آمده از خروجی مدل را نشان می‌دهد. کاهش این شاخص موجب افزایش ضریب تعیین رابطه شده و کارایی بهتر مدل را نشان می‌دهد. علاوه بر این، هر چه شاخص عملکرد VAF ، بزرگتر و میانگین درصد خطای مطلق $MAPE$ کوچکتر و نزدیک به صفر باشد، مدل مناسب تر است. نحوه محاسبه این شاخص‌ها در روابط (۳-۴) تا (۶-۴) ارائه شده است [۳۶].

$$R^2 = 100 \left[\frac{(\sum_{i=1}^N (y_{mean} - \bar{y}_{mean})(y_{pred} - \bar{y}_{pred}))^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (y_{mean} - \bar{y}_{mean})^2 \sum_{i=1}^N (y_{pred} - \bar{y}_{pred})^2}} \right] \quad (3-4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_{mean} - y_{pred})^2} \quad (4-4)$$

$$VAF = 100 \left[1 - \frac{Var(y_{mean} - y_{pred})}{Var(y_{mean})} \right] \quad (5-4)$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{(y_{mean} - y_{pred})}{(y_{mean})} \right| * 100 \quad (6-4)$$

در این روابط y_{pred} و y_{mean} به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمینی و \bar{y}_{pred} و \bar{y}_{mean} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمینی هستند. Var نیز در این روابط به معنی واریانس مقادیر است.

در جدول (۴-۱۳) مقدار مقادیر این چهار معیار برای پارامتر مقاومت فشاری آورده شده است. با توجه به جدول (۴-۱۳) مشاهده می‌شود که روش عکس توان ۳ فاصله بهترین تخمین را به دلیل

^۱ Root Mean Square Error

^۲ Variance Account For

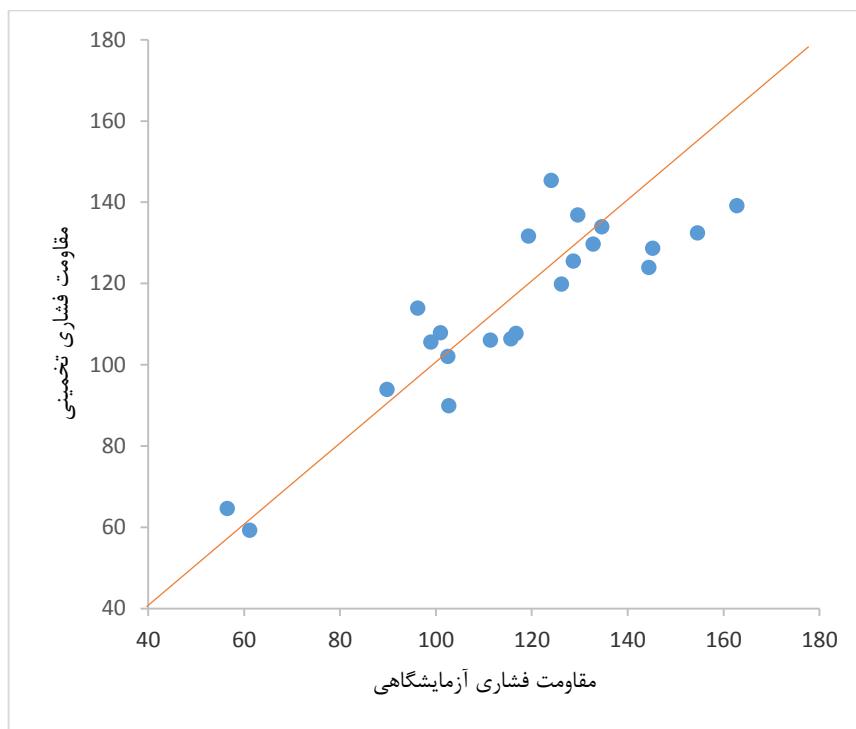
^۳ Mean Absolute Percentage Error

بهینه بودن هر ۴ معیار ارزیابی داراست. در این تخمین، R^2 و VAF بالاترین مقادیر و $RMSE$ و $MAPE$ پایین ترین مقادیر را در بین ۲۰ گروه داده‌ها دارند که نشان دهنده مدل مناسب تر است.

جدول ۴-۱۳- مقادیر شاخص‌های ارزیابی برای روابط ارائه شده

توان تخمینی	R^2	$RMSE$	VAF	$MAPE$
۱	۰/۷۰	۲۰/۲	۴۰/۱	۱۶/۳
۲	۰/۷۷	۱۳/۶	۷۳	۱۰
۳	۰/۷۹	۱۲/۳	۷۸/۷	۸/۴
۴	۰/۷۸	۱۲/۷	۷۷/۸	۸/۸
۵	۰/۷۶	۱۳/۴	۷۵/۶	۹/۵
۶	۰/۷۵	۱۴/۱	۷۳/۴	۱۰
۷	۰/۷۴	۱۴/۷	۷۱/۴	۱۰/۴
۸	۰/۷۳	۱۵/۱	۶۹/۷	۱۰/۷
۹	۰/۷۲	۱۵/۵	۶۸/۴	۱۰/۹
۱۰	۰/۷۱	۱۵/۸	۶۷/۲	۱۱
۱۱	۰/۷۱	۱۶	۶۶/۲	۱۱/۱
۱۲	۰/۷۱	۱۶/۲	۶۵/۴	۱۱/۲
۱۳	۰/۷۰	۱۶/۴	۶۴/۸	۱۱/۳
۱۴	۰/۷۰	۱۶/۵	۶۴/۲	۱۱/۳
۱۵	۰/۷۰	۱۶/۶	۶۳/۶	۱۱/۴
۱۶	۰/۷۰	۱۶/۷	۶۳/۲	۱۱/۵
۱۷	۰/۷۰	۱۶/۸	۶۲/۸	۱۱/۵
۱۸	۰/۷۰	۱۶/۹	۶۲/۴	۱۱/۶
۱۹	۰/۶۹	۱۷	۶۲	۱۱/۶
۲۰	۰/۶۹	۱۷/۱	۶۱/۷	۱۱/۷

در شکل (۴-۱۷) نمودار مقادیر مقاومت فشاری تک محوری آزمایشگاهی در مقابل مقاومت فشاری تک محوری تخمینی به روش عکس توان ۳ فاصله نشان داده شده است (سایر نمودارها در پیوست ۲ ارائه شده است).



شکل ۴-۱۷- مقاومت فشاری آزمایشگاهی - مقاومت فشاری تخمینی به روش عکس توان ۳ فاصله

با توجه به شکل (۴-۱۷)، همانطور که مشاهده می شود این نمودار در بین ۲۰ نمودار، بهترین تراکم نقاط را حول محور $y=x$ نشان می دهد و به همین دلیل برای امتیاز دادن به پارامتر مقاومت فشاری تک محوری در سیستم RDi ، برای ۳۰ ناحیه باقی مانده؛ از مقادیر به دست آمده تخمینی به روش عکس توان ۳ فاصله استفاده شده است، که این مقادیر به همراه مقادیر به دست آورده شده ۲۲ ناحیه قبلی، در جدول (۴-۱۴) آورده شده است.

جدول ۴-۱۴- مقادیر مقاومت فشاری تک محوری برای ۵۲ ناحیه

ردیف	<i>Estimate</i>	ردیف	<i>Estimate</i>	ردیف	<i>Estimate</i>	ردیف	<i>Estimate</i>
۱	۱۰۰/۹۴۵	۱۴	۱۰۶/۷	۲۷	۱۱۰/۶۹۰	۴۰	۱۱۲/۰۴۰
۲	۱۵۴/۵۶۴	۱۵	۹۳/۸	۲۸	۱۱۱/۲۸۷	۴۱	۱۳۰/۶۶۷
۳	۱۱۱/۳۴۹	۱۶	۱۳۲/۱	۲۹	۱۱۰/۱۸۳	۴۲	۱۳۷/۴۹۴
۴	۱۲۴/۰۵۱	۱۷	۱۵۰/۴	۳۰	۱۰۲/۲۳۸	۴۳	۱۵۵/۵۵۰
۵	۹۸/۹۳۶	۱۸	۱۲۱/۶	۳۱	۹۱/۰۲۰	۴۴	۱۴۵/۹۳۷
۶	۱۲۹/۵۸۹	۱۹	۱۳۸/۹	۳۲	۹۰/۳۵۳	۴۵	۱۴۱/۴۵۹
۷	۱۱۵/۶۱۲	۲۰	۱۶۹/۶	۳۳	۱۱۸/۳۷۲	۴۶	۱۳۰/۶۱۴
۸	۱۳۴/۵۷۵	۲۱	۱۳۳/۸	۳۴	۱۲۶/۵۲۲	۴۷	۱۲۳/۶۵۴
۹	۵۶/۴۹۹	۲۲	۱۲۴/۷	۳۵	۱۳۶/۸۱۵	۴۸	۱۲۸/۰۰۹
۱۰	۱۰۲/۴۹۲	۲۳	۵۸/۳۱	۳۶	۱۴۰/۵۸۳	۴۹	۱۴۸/۵۰۷
۱۱	۶۱/۱۵۲	۲۴	۶۰/۰۱	۳۷	۱۲۶/۰۱۹	۵۰	۱۴۲/۸۷۱
۱۲	۱۴۵/۱۷۹	۲۵	۷۶/۰۶۹	۳۸	۱۱۹/۴۱۴	۵۱	۱۲۷/۹۳۲
۱۳	۹۶/۲۱۱	۲۶	۱۰۴/۷۴۳	۳۹	۱۱۱/۱۱۴	۵۲	۱۰۵/۹۴۴

Estimate: مقاومت فشاری تخمین زده شده

۴-۵-۲- تعیین بهترین مدل تخمین پارامتر سختی موهس

حال برای تعیین مناسبترین مدل پارامتر سختی موهس از بین ۲۰ گروه داده تخمینی، با توجه به ماهیت پارامتر سختی موهس که نمی توان تراکم نقاط را حول محور $y=x$ بررسی کرد؛ استفاده از ۴ معیار ارزیابی ذکر شده برای این پارامتر کاربردی ندارد. به این منظور، مقایسه مقادیر ۲۰ گروه داده های تخمینی در دستور کار قرار گرفته است.

با مقایسه انجام شده بین مقادیر و نمودارهای تخمینی (پیوست ۱ و ۲)، درصد تخمین صحیح برای هر روش تخمینی در جدول (۴-۱۵) ارائه شده است.

جدول ۴-۱۵- مقادیر درصد صحیح بودن مقدار سختی موهس تخمینی

توان تخمین	درصد تخمین صحیح	توان	درصد	توان تخمین صحیح	درصد تخمین صحیح	توان تخمین	درصد تخمین صحیح
۱	۰	۶	۶۸/۲	۱۱	۸۱/۸	۱۶	۹۰/۹
۲	۹/۱	۷	۷۲/۷	۱۲	۸۱/۸	۱۷	۹۰/۹
۳	۳۶/۴	۸	۸۱/۸	۱۳	۸۶/۴	۱۸	۹۰/۹
۴	۵۹/۱	۹	۸۱/۸	۱۴	۹۰/۹	۱۹	۹۰/۹
۵	۶۸/۲	۱۰	۸۱/۸	۱۵	۹۰/۹	۲۰	۹۰/۹

با توجه به جدول (۴-۱۵)، درصد تخمین صحیح از توان ۱۴ تا ۲۰ ثابت شده است و این درصد تخمین بالای ۹۰ درصد، نشان دهنده تخمین مناسب از توان ۱۴ به بالا را نشان می‌دهد. به این منظور به علت ثابت شدن درصد تخمین صحیح از توان ۱۴ به بالا، به استفاده از مقادیر تخمین عکس توان ۱۴ فاصله اکتفا شده است.

حال برای امتیاز دادن به پارامتر سختی موهس در سیستم RDi ، برای ۳۰ ناحیه باقی مانده؛ از مقادیر به دست آمده تخمینی به روش عکس توان ۱۴ فاصله استفاده شده است، که این مقادیر به همراه مقادیر به دست آورده شده ۲۲ ناحیه قبلی، در جدول (۴-۱۶) آورده شده است.

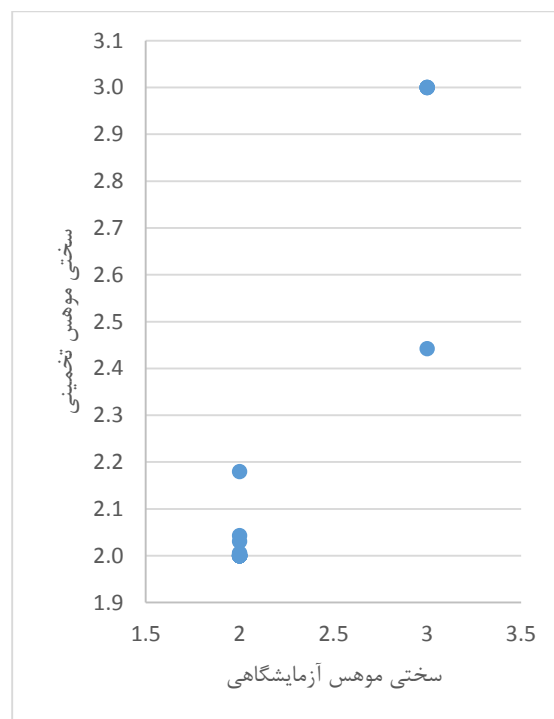
همچنین در شکل (۴-۱۸) نمودار مقادیر سختی موهس آزمایشگاهی در مقابل سختی موهس

تخمینی به روش عکس توان ۱۴ فاصله آورده شده است.

جدول ۴-۱۶- نتایج تخمین سختی موهس به روش عکس توان ۱۴ فاصله

ردیف	Estimate	ردیف	Estimate	ردیف	Estimate	ردیف	Estimate
۱	۲	۲	۲۷	۲	۱۴	۲	۴۰
۲	۳	۲	۲۸	۲	۱۵	۲	۴۱
۳	۲	۲	۲۹	۲	۱۶	۲/۲	۴۲
۴	۳	۲	۳۰	۳	۱۷	۲/۹	۴۳
۵	۲	۲	۳۱	۲	۱۸	۲/۹	۴۴
۶	۲	۲	۳۲	۲	۱۹	۲/۸	۴۵
۷	۲	۳	۳۳	۲	۲۰	۲/۲	۴۶
۸	۳	۲	۳۴	۲	۲۱	۲/۱	۴۷
۹	۲	۲	۳۵	۲	۲۲	۲/۵	۴۸
۱۰	۲	۲	۳۶	۲	۲۳	۲/۹	۴۹
۱۱	۲	۲	۳۷	۲	۲۴	۲/۱	۵۰
۱۲	۲	۲	۳۸	۲	۲۵	۲	۵۱
۱۳	۲	۲	۳۹	۲	۲۶	۲	۵۲

Estimate: سختی موهس تخمین زده شده



شکل ۴-۱۸- سختی موهس آزمایشگاهی - سختی موهس تخمینی عکس توان ۱۴ فاصله

۴-۵-۳- امتیازدهی RDi و کلاس بندی ۵۲ ناحیه معدن مارن ۱

پس از برداشت‌های صحرائی و انجام آزمایش‌های مکانیک سنگی در ۵۲ ناحیه، داده‌های به دست آمده را آنالیز کرده و امتیاز RDi هر ناحیه به دست آمد که نتایج آن همراه با کلاس بندی منطقه مورد مطالعه در جدول (۴-۱۷) آورده شده است.

جدول ۴-۱۷- امتیاز دهی به پارامترهای RDi

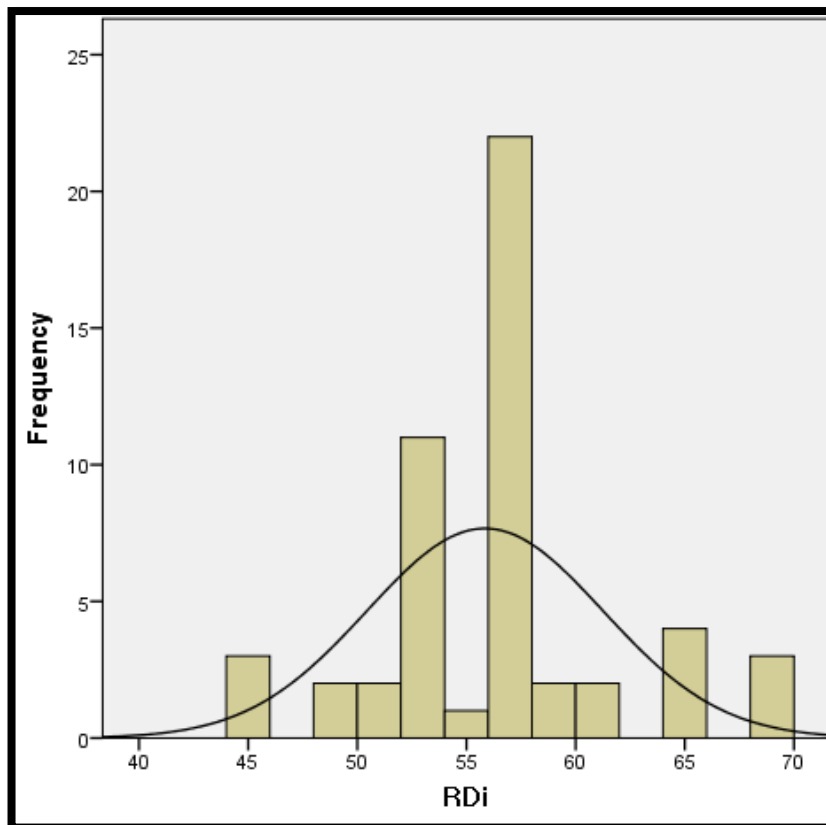
ردیف	بافت	مقاومت فشاری	سختی موهس	فاصله داری	بازشدگی درزه‌ها	زاویه بین محور چال و درزه	RDi	طبقه بندی
۱	۱	۶	۱۸	۱۸	۷	۶	۵۶	متوسط
۲	۱	۶	۱۳	۱۸	۱	۶	۴۵	متوسط
۳	۱	۶	۱۸	۱۸	۷	۶	۵۶	متوسط
۴	۱	۶	۱۳	۱۸	۴	۶	۴۸	متوسط
۵	۱	۱۱	۱۸	۱۸	۷	۶	۶۱	متوسط-تند
۶	۱	۶	۱۸	۱۸	۴	۶	۵۳	متوسط
۷	۱	۶	۱۸	۱۸	۷	۶	۵۶	متوسط
۸	۱	۶	۱۳	۱۸	۴	۶	۴۸	متوسط
۹	۱	۱۱	۱۸	۱۸	۱۵	۶	۶۹	متوسط-تند
۱۰	۱	۶	۱۸	۱۸	۷	۶	۵۶	متوسط
۱۱	۱	۱۱	۱۸	۱۸	۱۵	۶	۶۹	متوسط-تند
۱۲	۱	۶	۱۸	۱۸	۱	۶	۵۰	متوسط
۱۳	۱	۱۱	۱۸	۱۸	۱۰	۶	۶۴	متوسط-تند
۱۴	۱	۶	۱۸	۱۸	۷	۶	۵۶	متوسط
۱۵	۱	۱۱	۱۸	۱۸	۱۰	۶	۶۴	متوسط-تند
۱۶	۱	۶	۱۸	۱۸	۴	۶	۵۳	متوسط
۱۷	۱	۶	۱۳	۱۸	۱	۶	۴۵	متوسط
۱۸	۱	۶	۱۸	۱۸	۷	۶	۵۶	متوسط
۱۹	۱	۶	۱۸	۱۸	۴	۶	۵۳	متوسط
۲۰	۱	۶	۱۳	۱۸	۱	۶	۴۵	متوسط
۲۱	۱	۶	۱۸	۱۸	۴	۶	۵۳	متوسط
۲۲	۱	۶	۱۸	۱۸	۷	۶	۵۶	متوسط

ادامه جدول ۴-۱۷- امتیازدهی به پارامترهای RDi

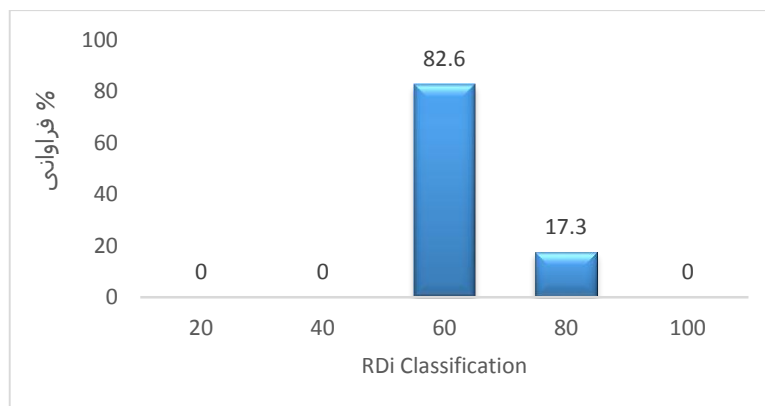
متوسط-تند	۶۱	۶	۷	۱۸	۱۸	۱۱	۱	۲۳
متوسط	۵۵	۶	۱	۱۸	۱۸	۱۱	۱	۲۴
متوسط-تند	۶۹	۶	۱۵	۱۸	۱۸	۱۱	۱	۲۵
متوسط	۵۶	۶	۷	۱۸	۱۸	۶	۱	۲۶
متوسط	۵۶	۶	۷	۱۸	۱۸	۶	۱	۲۷
متوسط	۵۶	۶	۷	۱۸	۱۸	۶	۱	۲۸
متوسط	۵۹	۶	۱۰	۱۸	۱۸	۶	۱	۲۹
متوسط	۵۶	۳	۱۰	۱۸	۱۸	۶	۱	۳۰
متوسط-تند	۶۴	۶	۱۰	۱۸	۱۸	۱۱	۱	۳۱
متوسط-تند	۶۴	۶	۱۰	۱۸	۱۸	۱۱	۱	۳۲
متوسط	۵۳	۶	۴	۱۸	۱۸	۶	۱	۳۳
متوسط	۵۳	۶	۴	۱۸	۱۸	۶	۱	۳۴
متوسط	۵۳	۶	۴	۱۸	۱۸	۶	۱	۳۵
متوسط	۵۶	۶	۷	۱۸	۱۸	۶	۱	۳۶
متوسط	۵۶	۶	۷	۱۸	۱۸	۶	۱	۳۷
متوسط	۵۶	۳	۱۰	۱۸	۱۸	۶	۱	۳۸
متوسط	۵۶	۶	۷	۱۸	۱۸	۶	۱	۳۹
متوسط	۵۶	۶	۷	۱۸	۱۸	۶	۱	۴۰
متوسط	۵۳	۶	۴	۱۸	۱۸	۶	۱	۴۱
متوسط	۵۳	۶	۴	۱۸	۱۸	۶	۱	۴۲
متوسط	۵۰	۶	۱	۱۸	۱۸	۶	۱	۴۳
متوسط	۵۳	۶	۴	۱۸	۱۸	۶	۱	۴۴
متوسط	۵۶	۶	۷	۱۸	۱۸	۶	۱	۴۵
متوسط	۵۹	۶	۱۰	۱۸	۱۸	۶	۱	۴۶
متوسط	۵۶	۶	۷	۱۸	۱۸	۶	۱	۴۷
متوسط	۵۶	۶	۷	۱۸	۱۸	۶	۱	۴۸
متوسط	۴۸	۶	۴	۱۸	۱۸	۶	۱	۴۹
متوسط	۵۶	۶	۷	۱۸	۱۸	۶	۱	۵۰
متوسط	۵۶	۶	۷	۱۸	۱۸	۶	۱	۵۱
متوسط	۵۶	۶	۷	۱۸	۱۸	۶	۱	۵۲

۴-۵-۳-۱- بررسی آماری طبقه بندی RDi

با توجه به جدول (۴-۱۷) مشاهده می شود که معدن در دو کلاس سرعت حفاری متوسط و متوسط-تند کلاس بندی شده است. شکل (۴-۱۹) هیستوگرام مربوط به امتیاز RDi ناحیه های مورد مطالعه را نشان می دهد. همان طوری که در شکل دیده می شود، بیشترین فراوانی بین امتیاز ۵۲ تا ۵۸ است.



شکل ۴-۱۹- هیستوگرام امتیاز RDi ناحیه های مورد مطالعه



شکل ۴-۲۰- نمودار درصد فراوانی امتیاز RDi ناحیه های مورد مطالعه

نمودار شکل (۴-۲۰) کلاس بندی معدن مارن ۱ را بر اساس شاخص قابلیت حفاری نشان می دهد. همان طور که دیده می شود، معدن در دو کلاس بر اساس RDi طبقه بندی شده است که بیش از ۸۰ درصد ناحیه های معدن در کلاس متوسط قرار گرفته اند.

۴-۵-۳-۲- بررسی آماری پارامترهای RDi

✓ بافت

با توجه به این که بافت سنگ بر اساس طبقه بندی RDi در تمامی ناحیه ها امتیاز ۱ یعنی بافت ریزدانه را گرفته است، در نتیجه می توان این گونه بیان کرد که پارامتر بافت سنگ تأثیر زیادی بر طبقه بندی RDi در معدن مورد مطالعه ندارد.

✓ فاصله داری

با توجه به این که فاصله داری ناپیوستگی ها بر اساس طبقه بندی RDi در تمامی ناحیه ها امتیاز ۱۸ یعنی فاصله داری بیش از ۲ متر را گرفته است، در نتیجه می توان این گونه بیان کرد که پارامتر فاصله داری تأثیر زیادی بر طبقه بندی RDi در معدن مورد مطالعه ندارد.

✓ زاویه بین محور چال با درزه

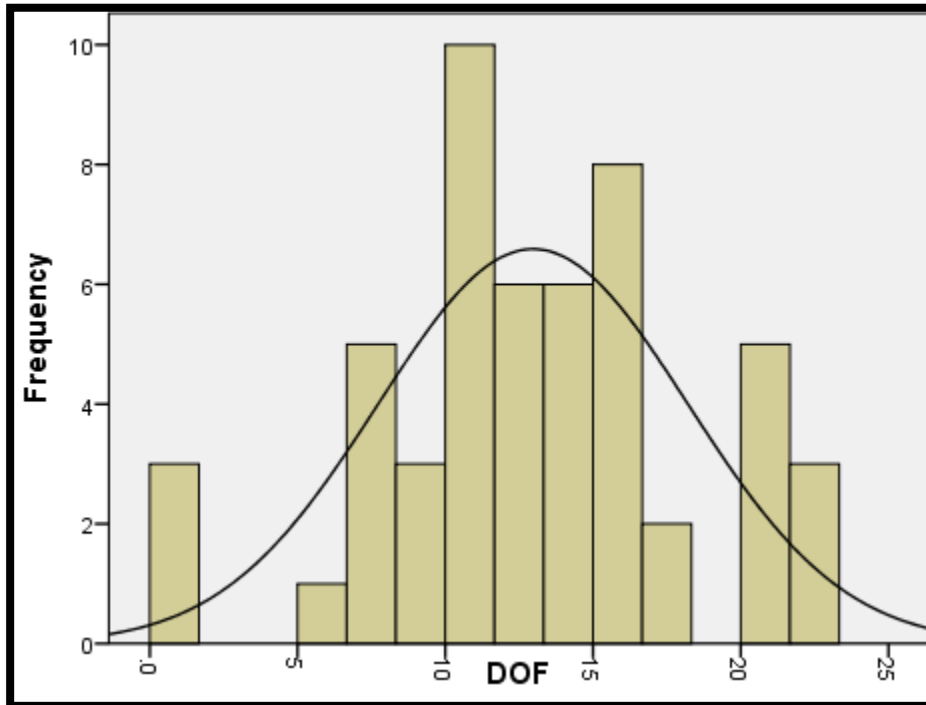
با توجه به این که زاویه بین محور چال با درزه بر اساس طبقه بندی RDi در اکثر ناحیه ها امتیاز ۶ یعنی زاویه بین ۳۵ تا ۵۵ را گرفته است، در نتیجه می توان این گونه بیان کرد که پارامتر زاویه بین محور چال با درزه تأثیر زیادی بر طبقه بندی RDi در معدن مورد مطالعه ندارد.

✓ بازشدگی و پرشدگی درزه ها

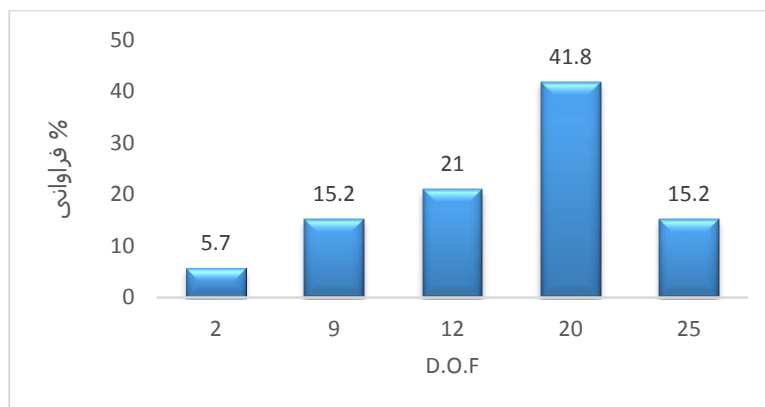
شرایط بازشدگی و پرشدگی ناپیوستگی ها دیواره های معدن در شرایط حفاری بسیار حائز اهمیت می باشد. هر چه بازشدگی بیش تر باشد، عملکرد حفاری به علت فرار هوای فلاشینگ و احتمال گیر کردن سرمته کاهش می یابد.

همانطور که در شکل (۴-۲۱) مشاهده می شود بیش ترین فراوانی بین فاصله ۱۰ تا ۱۷ میلیمتر می باشد. همچنین با توجه به شکل (۴-۲۲)، بیش از ۴۰ درصد ناپیوستگی ها در کلاس طبقه بندی

شاخص قابلیت حفاری، بازشدگی ۱۲ تا ۲۰ میلیمتر را دارند.



شکل ۴-۲۱- هیستوگرام فراوانی بازشدگی و پرشدگی درزه‌های ناحیه‌های مورد مطالعه



شکل ۴-۲۲- نمودار درصد فراوانی زاویه بین محور چال با درزه‌های ناحیه‌های مورد مطالعه

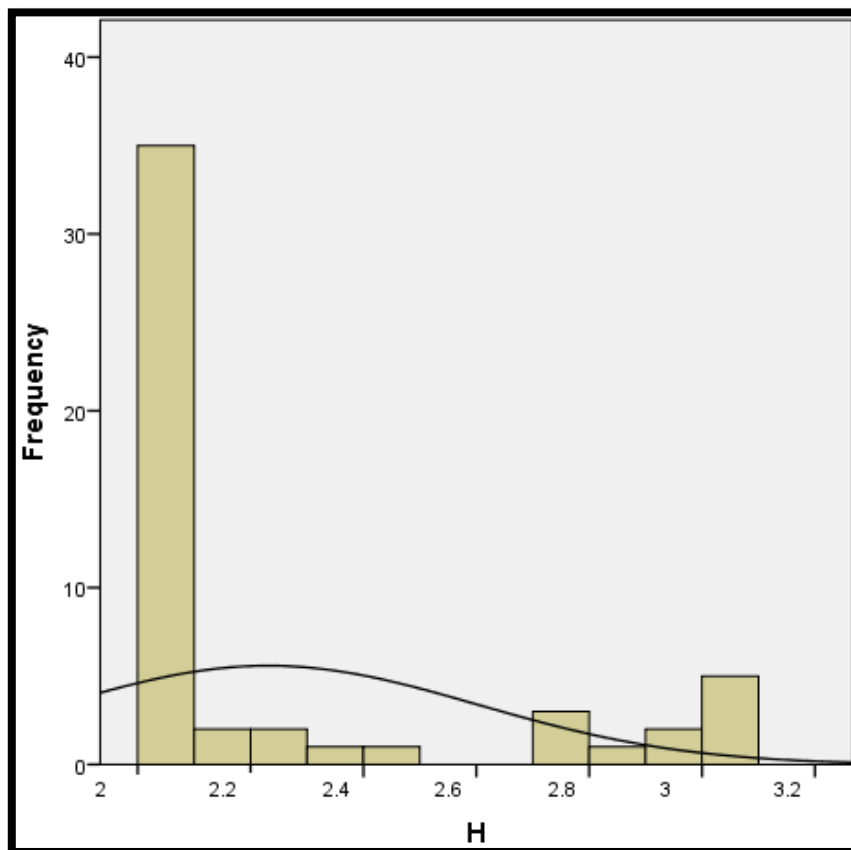
✓ سختی موهس

سختی موهس نیز یکی دیگر از پارامترهای تأثیرگذار بر قابلیت حفاری است. همانطور که در شکل

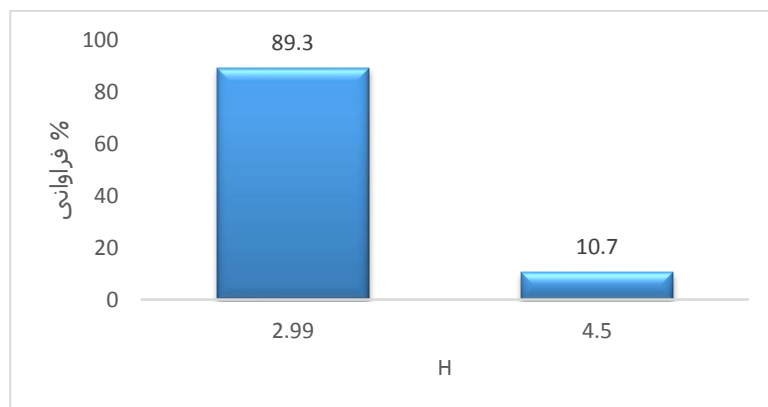
(۴-۲۳) مشاهده می‌شود بیش‌ترین فراوانی سختی موهس ۲ است. همچنین با توجه به شکل (۴-۴)

۲۴) مشاهده می شود که ۸۹ درصد داده ها بر اساس کلاس بندی شاخص قابلیت حفاری سختی

زیر ۳ دارند.



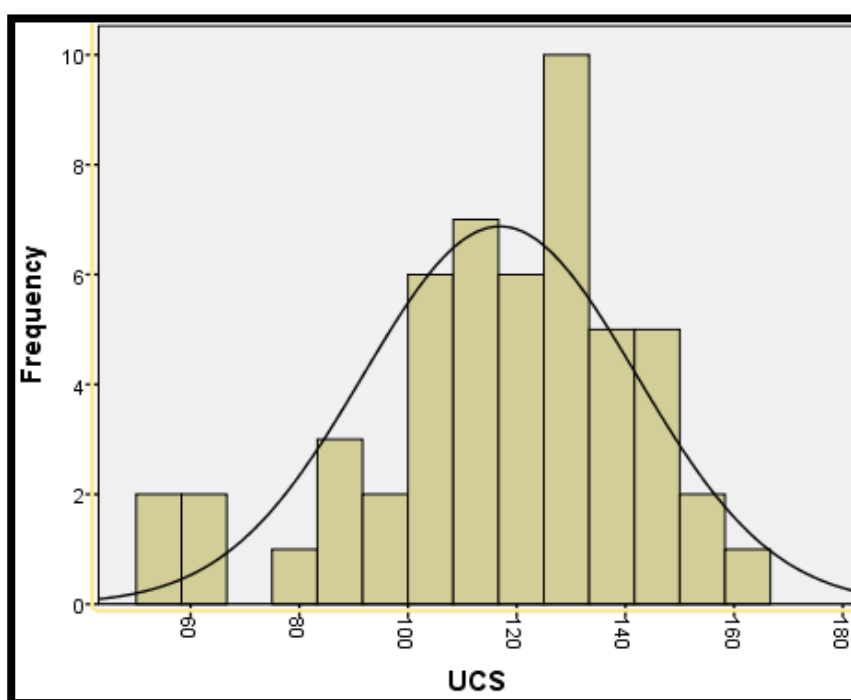
شکل ۴-۲۳- هیستوگرام سختی موهس ناحیه های مورد مطالعه



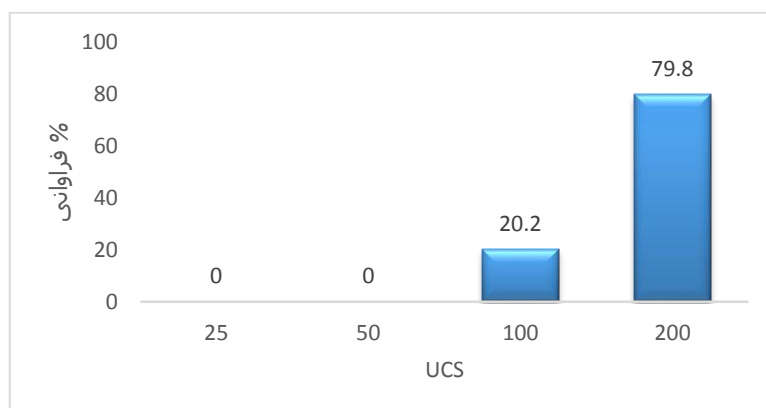
شکل ۴-۲۴- نمودار درصد فراوانی سختی موهس ناحیه های مورد مطالعه

✓ مقاومت فشاری

مقاومت فشاری مهم ترین پارامتر تأثیرگذار بر قابلیت حفاری است. همان طور که در شکل (۴-۲۵) مشاهده می شود مقاومت فشاری بازه وسیعی را شامل می شود که بیش ترین مقادیر آن در بازه بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ مگاپاسکال است. همچنین با توجه به شکل (۴-۲۶) بیش از ۷۹ درصد داده ها، بر اساس کلاس بندی شاخص قابلیت حفاری؛ مقاومتی بیش از ۱۰۰ مگاپاسکال دارند.



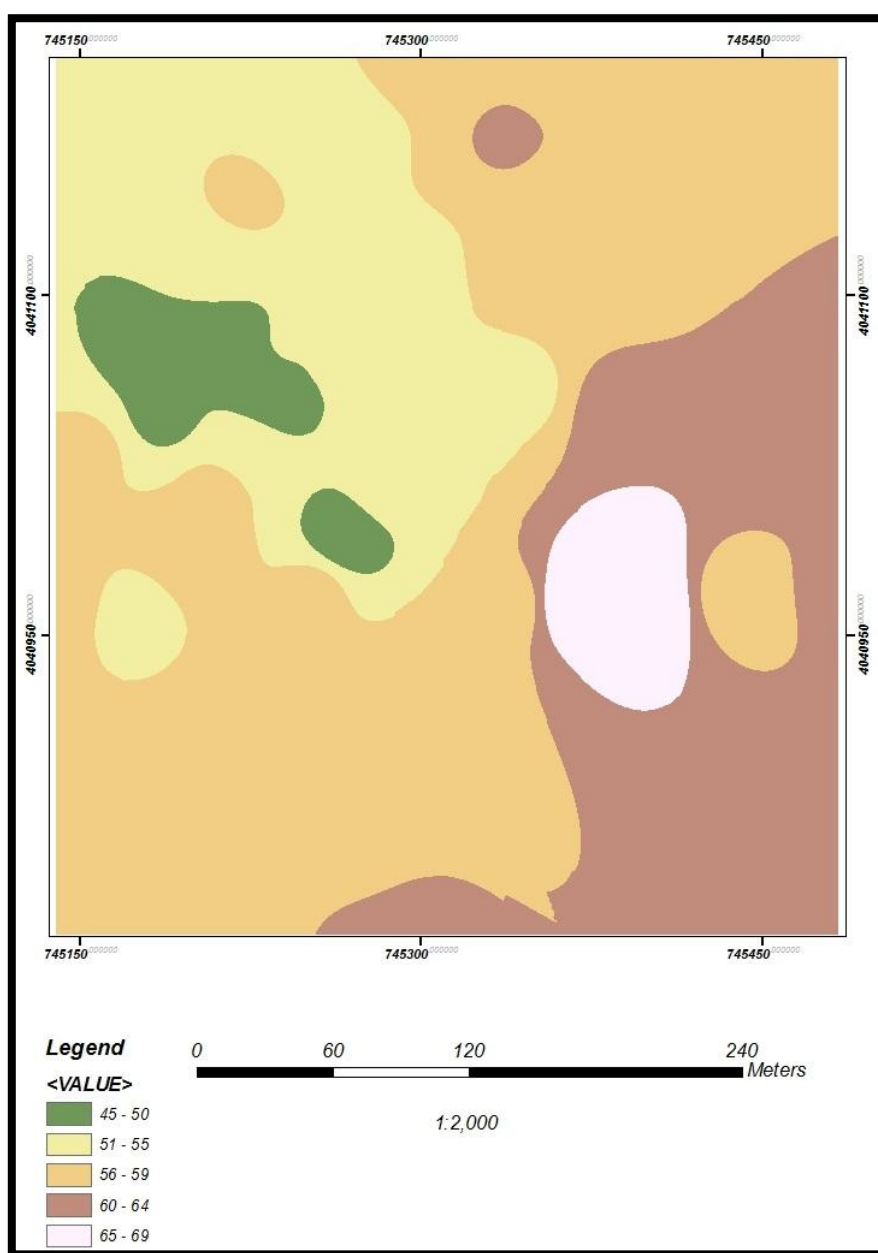
شکل ۴-۲۵- هیستوگرام فراوانی مقاومت فشاری ناحیه های مورد مطالعه



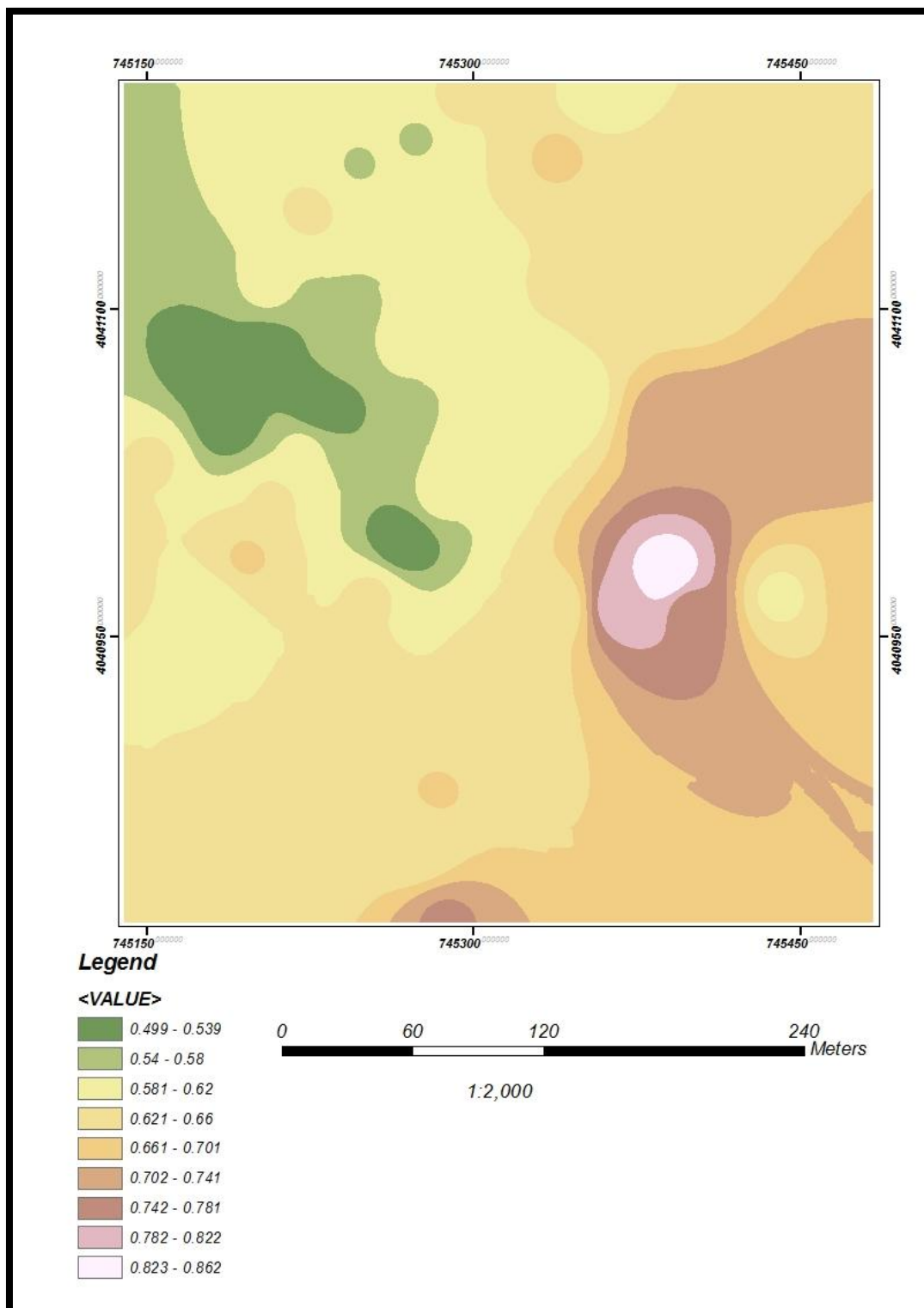
شکل ۴-۲۶- نمودار درصد فراوانی مقاومت فشاری ناحیه های مورد مطالعه

۴-۵-۴- ناحیه بندی نهایی بر اساس شاخص قابلیت حفاری و سرعت حفاری

مطابق جدول (۴-۱۷)، با توجه به امتیاز RDi به دست آمده؛ ابتدا به کمک نرم افزار GIS یک ناحیه بندی بر اساس شاخص قابلیت حفاری مطابق شکل (۴-۲۷) انجام شد. سپس با استفاده از رابطه (۴-۲) به دست آمده شده بین سرعت حفاری و قابلیت حفاری، سرعت حفاری برای تمامی ناحیه ها حساب شده است و مطابق شکل (۴-۲۸) ناحیه بندی نهایی معدن بر اساس سرعت حفاری انجام شد.



شکل ۴-۲۷- ناحیه بندی نهایی معدن مارن ۱ بر اساس شاخص قابلیت حفاری RDi



شکل ۴-۲۸- ناحیه بندی نهایی معدن مارن ۱ براساس سرعت حفاری

همانطور که در شکل (۴-۲۷) مشاهده می شود، معدن مارن ۱ از امتیاز ۴۵ تا ۶۹ بر اساس شاخص قابلیت حفاری کلاس بندی شده است، که با توجه به نحوه کلاس بندی شاخص قابلیت حفاری می توان معدن را در دو کلاس سرعت حفاری متوسط و متوسط-تند، طبقه بندی کرد.

همچنین با توجه به شکل (۴-۲۸)، معدن از سرعت ۰/۴۹ تا ۰/۸۶ متر در دقیقه بر اساس سرعت حفاری ناحیه بندی شده است. شکل (۴-۲۸) در مبحث برنامه ریزی تولید که هر بلوک استخراجی چقد زمان حفر آن طول میکشد، کمک زیادی می تواند بکند.

همان طور که در شکل مشاهده می شود، اگر معدن رو به دو قسمت غربی و شرقی تقسیم کنیم؛ در قسمت غربی با توجه به این که سختی چکش اشمیت و همچنین مقاومت فشاری سنگ ها بیشتر است، سرعت حفاری به صورت آهسته تری نسبت به قسمت شرقی انجام می گیرد.

همچنین در قسمت جنوب شرقی و شمال غربی معدن به ترتیب بیشترین و کمترین سرعت حفاری با توجه به خصوصیات زمین شناسی و مکانیک سنگی مشاهده می شود.

۴-۶- جمع بندی

برای ناحیه بندی معدن مارن ۱ شرکت سیمان مشهد، برای الگوهای حفاری سرعت حفاری ثبت، برداشت های صحرایی و آزمایش های مکانیک سنگی انجام و امتیاز RDi آن ها محاسبه شد. سپس محدوده مطالعاتی را به ۵۲ ناحیه تقسیم و امتیاز RDi پارامترها، برای هر ناحیه؛ به دست آورده شد. در نهایت با استفاده از روابط ریاضی به دست آمده، برای هر ناحیه سرعت حفاری تعیین و به کمک نرم افزار GIS ناحیه بندی نهایی بر اساس شاخص قابلیت حفاری و سرعت حفاری انجام شد.

فصل پنجم

نتیجہ گیری و پیشہاوا

مقدمه

حفاری به عنوان اولین مرحله در استخراج معادن روباز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به حجم سرمایه‌گذاری بالا، پیش‌بینی سرعت حفاری در پیشروی حفاری، برنامه‌ریزی معدن، پیش‌بینی خصوصیات سنگ، تعیین زمان تعویض سرمته و کاهش هزینه‌های معدن‌کاری بسیار ضروری می‌باشد. در این پایان‌نامه توده‌سنگ‌های محدوده معدن مارن شماره ۱ شرکت سیمان شرق از نظر قابلیت حفاری مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفت و رابطه ریاضی برای پیش‌بینی سرعت حفاری ارائه شد که طی آن، ناحیه استخراجی معدن بر اساس سرعت حفاری ناحیه‌بندی شد.

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. بر این اساس تعیین قابلیت حفاری و در پی آن سرعت حفاری سنگ‌ها در پروژه‌های مهندسی بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

در این پایان‌نامه پارامترهای تاثیرگذار بر قابلیت حفاری و سرعت حفاری توده‌سنگ‌های معدن مارن ۱ شرکت سیمان مشهد مورد مطالعه قرار گرفت و یک رابطه ریاضی برای پیش‌بینی سرعت حفاری ارائه شد.

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

❖ با استفاده از شاخص قابلیت حفاری، توده سنگ را می‌توان در پنج رده: ۷-۲۰ آهسته، ۲۰-۴۰-

۴۰ آهسته-متوسط، ۴۰-۶۰ متوسط، ۶۰-۸۰ متوسط-تند و ۸۰-۱۰۰ تند از دیدگاه سرعت

حفاری طبقه‌بندی کرد. همچنین این شاخص ارتباط خوبی با سرعت حفاری نشان داد به

طوری که با افزایش RDi سرعت حفاری نیز افزایش می‌یابد. بنابراین با استفاده از شاخص

RDi می‌توان سرعت حفاری را در مناطق مختلف معدن پیش‌بینی کرد.

❖ توده‌سنگ‌های محدوده معدن مارن ۱ شرکت سیمان شرق بر اساس طبقه‌بندی RDi در دو

کلاس متوسط و متوسط-تند قرار گرفتند.

- ❖ پیش‌بینی سرعت حفاری توده‌سنگ‌های منطقه مورد مطالعه بر اساس روابط به‌دست آمده محاسبه و با کمک نرم‌افزار *GIS* ناحیه‌بندی شد. بیش‌ترین سرعت حفاری $0/86$ متر بر دقیقه و کم‌ترین سرعت حفاری $0/49$ متر بر دقیقه می‌باشد.
- ❖ از نظر قابلیت حفاری بافت توده‌سنگ‌های معدن مارن ۱ شرکت سیمان شرق متراکم است.
- ❖ ۸۹ درصد ناحیه‌های مورد مطالعه در معدن سختی موهس زیر ۳ دارند. با توجه به این‌که سختی موهس بالا باعث کاهش سرعت حفاری می‌شود، از این جهت مشکلی برای حفاری ایجاد نمی‌کند.
- ❖ مقاومت فشاری تک‌محوری توده‌سنگ‌های مورد مطالعه با توجه به طبقه‌بندی *RDi* در دو کلاس مقاومت متوسط و مقاومت زیاد قرار گرفته‌است که بیش از ۷۹ درصد مقاومت فشاری توده‌سنگ‌های دربرگیرنده محدوده معدن بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ مگاپاسکال می‌باشند.
- ❖ فاصله‌داری ناپیوستگی‌های منطقه مورد مطالعه از نظر طبقه‌بندی *RDi* همگی امتیاز ۱۸ که بیانگر فاصله‌داری بیش‌تر از ۲ متر می‌باشد را گرفته‌اند. بر این اساس که در مواد معدنی با سختی موهس پایین، با کاهش فاصله‌داری و پیوستگی محیط؛ سرعت حفاری و قابلیت حفاری کاهش می‌یابد و با توجه به نوع ماده معدنی مورد مطالعه که دارای سختی موهس پایینی می‌باشد، از این جهت شرایط فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها بر اساس طبقه‌بندی *RDi* تأثیر زیادی در سرعت حفاری نمی‌گذارد.
- ❖ وضعیت بازشدگی در معادن متأثر از وضعیت ناپیوستگی‌هاست. در محدوده مورد مطالعه بیش از ۴۰ درصد ناپیوستگی‌ها بازشدگی بی ۱۲ تا ۲۰ میلیمتر دارند.
- ❖ ناحیه‌بندی انجام شده بر اساس سرعت حفاری می‌تواند در مبحث برنامه‌ریزی تولید معدن و زمان حفر هر بلوک کمک زیادی بکند.

پیشنهادها

- ❖ پیشنهاد می‌شود با توجه به تغییرات مقاومت فشاری و در نتیجه آن، تغییرات سرعت حفاری در دو قسمت جنوب شرقی و شمال غربی محدوده، الگوی حفاری بر همین اساس طراحی شود.
- ❖ پیشنهاد می‌شود شرایط درزه‌داری توده‌سنگ با توجه به برداشت‌های انجام شده در طراحی الگوی حفاری و همچنین به کار بردن نوع و مقدار مواد منفجره لحاظ شود.
- ❖ پیشنهاد می‌شود از دستگاه‌های حفاری جدید استفاده شود. دستگاه‌های جدید و مدرن، امروزه قادرند تمامی فرآیند حین عملیات حفاری را ثبت نمایند و با بررسی و مطالعه این اطلاعات می‌تواند در طراحی و کیفیت حفاری تأثیرگذار باشد.
- ❖ پیشنهاد می‌شود در کارهای مطالعاتی بعدی ادامه تحقیق بر روی پارامترهای قابل کنترل (پارامترهای تأثیرگذار دستگاه حفاری) بر عملکرد حفاری، سرعت حفاری و قابلیت حفاری انجام شود.

منابع و مراجع

- [۱] م، اصائلو، روش‌های حفاری، مرکز نشر صدرا، ۱۳۷۵.
- [۲] ج. گلاوژ، ص. قادرنژاد و ر. میکائیل "ارائه یک سیستم طبقه‌بندی فازی برای ارزیابی قابلیت حفاری سنگ‌ها" پنجمین کنفرانس مهندسی معدن، تهران، ۱۳۹۳.
- [۳] س. ه. حسینی، ی. پوررحیمیان و ح. آقابابایی "پیشنهاد سیستم طبقه‌بندی جدید جهت پیش‌بینی سرعت حفاری در معادن روباز" سومین کنفرانس مکانیک سنگ /یران، تهران، ۱۳۸۶.
- [۴] ا. سعیدی، "پیش‌بینی نرخ نفوذ حفاری و ارزیابی سایش سرمته‌های سه مخروطی دورانی در معادن روباز" رساله دکتری، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۹۳.
- [5] C. Jimeno, E. Jimeno and F. Carcedo, *Drilling and blasting of rocks*, Rotterdam, CRC Press, 1995.
- [6] S. Kahraman, "Rotary and percussive drilling prediction using regression analysis," *Rock Mech & Min Sci*, vol. 36, pp. 981-989, 1999.
- [7] S. Hoseinie, H. Aghababaei and Y. Pourrahimian, "Development of a new classification system for assessing of rock mass drillability index," *Rock Mech & Min Sci*, vol. 45, no. 1, pp. 1-10, 2008.
- [8] Hoseinie, S.H; Ataei, M; Osanloo, M, "a new classification ssystem for evaluating rock penetrability," *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, vol. 46, pp. 1329-1340, 2009.
- [9] Adebayo, B; Opafunso, Z; Akande, J, "Drillability and Strength Characteristics of Selected Rocks in Nigeria," pp. 56-60, 2010.
- [10] Khalokakaie, R; Ataei, M; Mikaiel, R, "A fuzzy logic based classification for assessing of rock mass drillability," *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, vol. 3, no. 4, 2011.
- [11] Hoseinie, S.H; Ataei, M; Mikaiel, R, "Comparison of Some Rock Hardness Scales Applied," *Arab J Sci Eng*, vol. 37, pp. 1451-1458, 2012.
- [12] Saeidi, O; Torabi, S.R; Ataei, M; Rostami, J, "A stochastic penetration rate model for rotary drilling in surface mines," *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, vol. 68, pp. 55-65, 2014.
- [13] Ataei, M; KaKaie, R; Ghavidel, M; Saeidi, O, "Drilling rate prediction of an open pit mine using the rock," *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, vol. 73, pp. 130-138, 2015.
- [۱۴] ج. کمالی و ش. مهتریور، "عوامل مؤثر بر سرعت حفاری" نخستین همایش علمی تخصصی حفاری در معادن، بافق، ۱۳۸۲.
- [15] S. Kahraman, N. Bilgin and C. Fridunoglu, "Dominant rock properties affecting the penetration rate of percussive drills," *Rock Mech & Min Sci*, vol. 40, pp. 711-723, 2003.

- [16] E. Yasar, P. Ranjith and D. Viète, "An experimental investigation in to the drilling and physico-mechanical properties of a rock-like brittle material," *Petr Sci & Eng*, vol. 76, no. 3-4, pp. 185-193, 2011.
- [17] K. Thuro, "Drillability prediction—geological influences in hard rock drill and blast tunneling," *Geol Rundsch*, vol. 86, pp. 426-438, 1997.
- [18] S. Hoseinie and M. Ataei, "A review of machine parameters influencing the drilling rate in mines," in *7th International Scientific Conference, citeulike*, 2007.
- [19] B. Gokhale, *Rotary drilling and blasting in large surface mines*, London: Taylor and Francis Group, 2010.
- [20] S. Huang and Z. Wang, "The mechanics of diamond core drilling of rock," *Rock Mech & Min Sci*, vol. 34, no. 3-4, p. 134.e1–134.e14, 1997.
- [21] T. Sinkala, "improving hole quality by automatic control of the drilling process: theoretical and field studies," *Min Sci & Technol*, vol. 12, pp. 79-88, 1991.
- [۲۲] ر. استوار، "آتش کاری در معادن، جهاد دانشگاهی"، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، ۱۳۸۰.
- [23] S. Kahraman, C. Balci, S. Yazici and N. Bilgin, "Prediction of the penetration rate of rotary blast hole drills using a new drillability index," *Rock Mech & Min Sci*, vol. 37, pp. 729-743, 2000.
- [24] C. Ozturk, E. Nasuf and N. Bilgin, "The assessment of rock cutability and physical and mechanical rock properties from a texture coefficient," *Journal of the South African Institute of Mining and Metalurgy*, 2004.
- [۲۵] گ. علمی اسدزاده و ح. معماریان، "بررسی ارتباط بین میزان سایش و بافت سنگ در نمونه‌هایی از سنگ‌های ساختمانی ایران"، نشریه دانشکده فنی، جلد ۴، شماره ۱، ص. ۱۰۳-۹۳، ۱۳۸۵.
- [26] L. Wilbur, *Rock Tunnel Engineering Handbook*, Publication of Van Norstrand Reinhold Company, 1982.
- [27] M. Akun and C. Karpuz, "drillability studies of surface-set diamond drilling in zonguldak region sandstones from Turkey," *Rock Mech & Min Sci*, vol. 42, pp. 473-479, 2005.
- [28] K. Thuro and G. Spaun, "Introducing the destruction work as a new rock property of toughness reffering to drillability in conventional drill and blast tunnelling," vol. 2, pp. 707-713, 1996.
- [29] R. Altindag, "The evaluation of rock brittleness concept on rotary blast hole drills," in *5th Turkish National Rock Mech Symp*, 2000.
- [30] R. Altindag, "assessment of some brittleness indexes in rock-drilling efficiency," *Rock Mech Eng*, vol. 43, pp. 361-370, 2010.

- [31] O. Yarali and S. Kahraman, "The drillability assessment of rocks using the different brittleness values," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 12, pp. 62-65, 2010.
- [32] O. Yarali, E. Soyer and A. Marcel Dekker, "The effect of mechanical rock properties and brittleness on drillability," *Scientific Research and Essays*, pp. 1077-1088, 2011.
- [33] R. Plinninger, G. Spaun and K. Thuro, "Predicting tool wear in drill and blast," *Tunnels & Tunnelling International Magazine*, 2002.
- [۳۴] "گزارش نهایی اکتشافات تفضیلی معدن مارن کارخانه سیمان مشهد"، ۱۳۸۷.
- [۳۵] ن. زیاری، "دستورکار آزمایشگاه مکانیک سنگ"، ۱۳۹۳.
- [36] Gokceoglu, C, "A fuzzy triangular chart to predict the uniaxial compressive strength of the Ankara agglomerates from their petrographic composition," *Engineering Geology*, vol. 66, pp. 39-51, 2002.

پوستها

پیوست ۱: جدول مقادیر مقاومت فشاری تک محوری تخمینی به روش عکس فاصله از توان ۱ تا ۲۰ برای ۲۲ سینه کار برداشت شده

پله	توان ۱	توان ۲	توان ۳	توان ۴	توان ۵	توان ۶	توان ۷	توان ۸	توان ۹	توان ۱۰
۱	۱۱۴/۸	۱۱۱	۱۰۷/۹	۱۰۶/۲	۱۰۵/۳	۱۰۴/۸	۱۰۴/۳	۱۰۴	۱۰۳/۶	۱۰۳/۳
۲	۱۲۵/۸	۱۳۲/۴	۱۳۲/۵	۱۳۰/۶	۱۲۸/۸	۱۲۷/۳	۱۲۶/۳	۱۲۵/۵	۱۲۵	۱۲۴/۷
۳	۱۱۲/۷	۱۰۸/۹	۱۰۶/۱	۱۰۴/۵	۱۰۳/۸	۱۰۳/۴	۱۰۳/۳	۱۰۳/۱	۱۰۳	۱۰۲/۹
۴	۱۳۱/۱	۱۴۲/۳	۱۴۵/۴	۱۴۵/۹	۱۴۶/۱	۱۴۶/۳	۱۴۶/۵	۱۴۶/۷	۱۴۶/۹	۱۴۷/۲
۵	۱۱۵/۶	۱۱۰	۱۰۵/۶	۱۰۳/۶	۱۰۲/۸	۱۰۲/۵	۱۰۲/۴	۱۰۲/۳	۱۰۲/۴	۱۰۲/۴
۶	۱۲۱/۷	۱۲۹/۶	۱۳۶/۹	۱۴۱/۳	۱۴۳/۴	۱۴۴/۴	۱۴۴/۸	۱۴۵	۱۴۵/۱	۱۴۵/۱
۷	۱۱۳/۳	۱۰۹/۶	۱۰۶/۴	۱۰۴/۱	۱۰۲/۷	۱۰۱/۹	۱۰۱/۵	۱۰۱/۲	۱۰۱/۱	۱۰۱
۸	۱۲۷/۳	۱۳۴/۲	۱۳۴	۱۳۱/۵	۱۲۹/۲	۱۲۷/۵	۱۲۶/۳	۱۲۵/۵	۱۲۵	۱۲۴/۷
۹	۱۰۱/۵	۷۵/۶	۶۴/۷	۶۲	۶۱/۴	۶۱/۲	۶۱/۲	۶۱/۲	۶۱/۲	۶۱/۲
۱۰	۱۱۴/۳	۱۰۷/۲	۱۰۲/۱	۱۰۰	۹۹/۳	۹۹/۱	۹۹	۹۹	۹۸/۹	۹۸/۹
۱۱	۹۹/۱	۷۰/۱	۵۹/۳	۵۷/۱	۵۶/۶	۵۶/۵	۵۶/۵	۵۶/۵	۵۶/۵	۵۶/۵
۱۲	۱۲۱/۱	۱۲۶/۲	۱۲۸/۷	۱۲۹/۴	۱۲۹/۵	۱۲۹/۶	۱۲۹/۶	۱۲۹/۶	۱۲۹/۶	۱۲۹/۶
۱۳	۱۱۵/۳	۱۱۴/۱	۱۱۴	۱۱۴/۵	۱۱۵	۱۱۵/۴	۱۱۵/۷	۱۱۵/۹	۱۱۶	۱۱۶/۲
۱۴	۱۰۹/۵	۹۹/۶	۸۹/۹	۸۲/۳	۷۶/۶	۷۲/۳	۶۹	۶۶/۵	۶۴/۴	۶۲/۸
۱۵	۱۱۰/۱	۱۰۱/۶	۹۴	۸۸/۲	۸۴	۸۰/۹	۷۸/۶	۷۶/۶	۷۵	۷۳/۵
۱۶	۱۱۶/۵	۱۱۷/۹	۱۱۹/۹	۱۲۲	۱۲۴/۱	۱۲۵/۹	۱۲۷/۳	۱۲۸/۴	۱۲۹/۳	۱۲۹/۹
۱۷	۱۱۷/۸	۱۲۱	۱۲۴	۱۲۶/۵	۱۲۸/۶	۱۳۰/۲	۱۳۱/۴	۱۳۲/۴	۱۳۳/۲	۱۳۳/۹
۱۸	۱۱۴/۹	۱۱۱/۸	۱۰۷/۷	۱۰۴	۱۰۱/۳	۹۹/۵	۹۸/۴	۹۷/۷	۹۷/۲	۹۹/۹
۱۹	۱۲۱/۱	۱۲۶	۱۲۹/۷	۱۳۲/۲	۱۳۳/۸	۱۳۴/۸	۱۳۵/۳	۱۳۵/۴	۱۳۵/۲	۱۳۴/۹
۲۰	۱۲۴	۱۳۳/۲	۱۳۹/۱	۱۴۲/۶	۱۴۴/۹	۱۴۶/۵	۱۴۷/۹	۱۴۹	۱۴۹/۹	۱۵۰/۷
۲۱	۱۲۱	۱۲۴/۸	۱۲۵/۵	۱۲۴/۲	۱۲۲/۶	۱۲۱/۳	۱۲۰/۴	۱۱۹/۹	۱۱۹/۷	۱۱۹/۵
۲۲	۱۲۴	۱۲۹/۷	۱۳۱/۶	۱۳۱/۴	۱۳۰/۷	۱۳۰/۱	۱۲۹/۷	۱۲۹/۴	۱۲۹/۲	۱۲۹/۱

ادامه جدول مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری تخمینی به روش عکس فاصله از توان ۱ تا ۲۰ برای ۲۲ سینه کار برداشت شده

پله	توان ۱۱	توان ۱۲	توان ۱۳	توان ۱۴	توان ۱۵	توان ۱۶	توان ۱۷	توان ۱۸	توان ۱۹	توان ۲۰
۱	۱۰۳	۱۰۲/۷	۱۰۲/۴	۱۰۲/۱	۱۰۱/۸	۱۰۱/۶	۱۰۱/۴	۱۰۱/۲	۱۰۱	۱۰۰/۸
۲	۱۲۴/۵	۱۲۴/۳	۱۲۴/۲	۱۲۴/۲	۱۲۴/۱	۱۲۴/۱	۱۲۴/۱	۱۲۴/۱	۱۲۴/۱	۱۲۴/۱
۳	۱۰۲/۹	۱۰۲/۸	۱۰۲/۸	۱۰۲/۷	۱۰۲/۷	۱۰۲/۷	۱۰۲/۷	۱۰۲/۷	۱۰۲/۷	۱۰۲/۷
۴	۱۴۷/۴	۱۴۷/۷	۱۴۷/۹	۱۴۸/۱	۱۴۸/۴	۱۴۸/۶	۱۴۸/۸	۱۴۹	۱۴۹/۳	۱۴۹/۵
۵	۱۰۲/۴	۱۰۲/۴	۱۰۲/۴	۱۰۲/۴	۱۰۲/۵	۱۰۲/۵	۱۰۲/۵	۱۰۲/۵	۱۰۲/۵	۱۰۲/۵
۶	۱۴۵/۲	۱۴۵/۲	۱۴۵/۲	۱۴۵/۲	۱۴۵/۲	۱۴۵/۲	۱۴۵/۲	۱۴۵/۲	۱۴۵/۲	۱۴۵/۲
۷	۱۰۱	۱۰۱	۱۰۱	۱۰۱	۱۰۰/۹	۱۰۰/۹	۱۰۰/۹	۱۰۰/۹	۱۰۰/۹	۱۰۰/۹
۸	۱۲۴/۴	۱۲۴/۳	۱۲۴/۲	۱۲۴/۲	۱۲۴/۱	۱۲۴/۱	۱۲۴/۱	۱۲۴/۱	۱۲۴/۱	۱۲۴/۱
۹	۶۱/۲	۶۱/۲	۶۱/۲	۶۱/۲	۶۱/۲	۶۱/۲	۶۱/۲	۶۱/۲	۶۱/۲	۶۱/۲
۱۰	۹۸/۹	۹۸/۹	۹۸/۹	۹۸/۹	۹۸/۹	۹۸/۹	۹۸/۹	۹۸/۹	۹۸/۹	۹۸/۹
۱۱	۵۶/۵	۵۶/۵	۵۶/۵	۵۶/۵	۵۶/۵	۵۶/۵	۵۶/۵	۵۶/۵	۵۶/۵	۵۶/۵
۱۲	۱۲۹/۶	۱۲۹/۶	۱۲۹/۶	۱۲۹/۶	۱۲۹/۶	۱۲۹/۶	۱۲۹/۶	۱۲۹/۶	۱۲۹/۶	۱۲۹/۶
۱۳	۱۱۶/۳	۱۱۶/۳	۱۱۶/۴	۱۱۶/۵	۱۱۶/۵	۱۱۶/۵	۱۱۶/۶	۱۱۶/۶	۱۱۶/۶	۱۱۶/۶
۱۴	۶۱/۵	۶۰/۵	۵۹/۷	۵۹	۵۸/۵	۵۸/۱	۵۷/۸	۵۷/۶	۵۷/۴	۵۷/۲
۱۵	۷۲/۲	۷۱	۷۰	۶۸/۹	۶۸	۶۷/۱	۶۶/۳	۶۵/۶	۶۴/۹	۶۴/۲
۱۶	۱۳۰/۴	۱۳۰/۸	۱۳۱/۱	۱۳۱/۳	۱۳۱/۵	۱۳۱/۷	۱۳۱/۸	۱۳۲	۱۳۲/۱	۱۳۲/۲
۱۷	۱۳۴/۵	۱۳۵/۱	۱۳۵/۷	۱۳۶/۲	۱۳۶/۷	۱۳۷/۲	۱۳۷/۶	۱۳۸/۱	۱۳۸/۵	۱۳۹
۱۸	۹۶/۷	۵۶/۵	۹۶/۴	۹۶/۴	۹۶/۳	۹۶/۳	۹۶/۳	۹۶/۳	۹۶/۲	۹۶/۲
۱۹	۱۳۴/۵	۱۳۴	۱۳۳/۵	۱۳۲/۹	۱۳۲/۴	۱۳۱/۸	۱۳۱/۳	۱۳۰/۹	۱۳۰/۴	۱۳۰
۲۰	۱۵۱/۴	۱۵۱/۹	۱۵۲/۴	۱۵۲/۷	۱۵۳	۱۵۳/۳	۱۵۳/۵	۱۵۳/۷	۱۵۳/۸	۱۵۴
۲۱	۱۱۹/۴	۱۱۹/۴	۱۱۹/۳	۱۱۹/۳	۱۱۹/۳	۱۱۹/۳	۱۱۹/۳	۱۱۹/۳	۱۱۹/۳	۱۱۹/۳
۲۲	۱۲۹	۱۲۸/۹	۱۲۸/۸	۱۲۸/۸	۱۲۸/۸	۱۲۸/۷	۱۲۸/۷	۱۲۸/۷	۱۲۸/۷	۱۲۸/۷

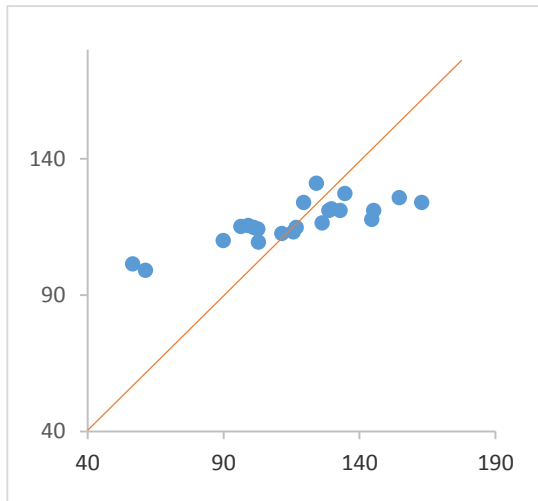
پیوست ۱: جدول مقادیر سختی موهس تخمینی به روش عکس فاصله از توان ۱ تا ۲۰ برای
۲۲ سینه کار برداشت شده

پله	توان ۱	توان ۲	توان ۳	توان ۴	توان ۵	توان ۶	توان ۷	توان ۸	توان ۹	توان ۱۰
۱	۲/۲	۲/۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۲	۲/۵	۲/۸	۲/۹	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۳	۲/۲	۲/۲	۲/۲	۲/۱	۲/۱	۲/۱	۲/۱	۲	۲	۲
۴	۲/۵	۲/۸	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۵	۲/۲	۲/۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۶	۲/۲	۲/۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۷	۲/۲	۲/۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۸	۲/۵	۲/۸	۲/۹	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۹	۲/۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۱۰	۲/۲	۲/۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۱۱	۲/۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۱۲	۲/۳	۲/۲	۲/۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۱۳	۲/۲	۲/۱	۲/۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۱۴	۲/۲	۲/۲	۲/۱	۲/۱	۲/۱	۲/۱	۲/۱	۲	۲	۲
۱۵	۲/۲	۲/۱	۲/۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۱۶	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۲	۲/۲	۲/۲	۲/۲	۲/۱	۲/۱	۲/۱
۱۷	۲/۲	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۴	۲/۴	۲/۴	۲/۴	۲/۴	۲/۴
۱۸	۲/۲	۲/۲	۲/۱	۲/۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۱۹	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۲
۲۰	۲/۴	۲/۶	۲/۸	۲/۹	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۲۱	۲/۳	۲/۴	۲/۳	۲/۲	۲/۲	۲/۱	۲/۱	۲	۲	۲
۲۲	۲/۴	۲/۵	۲/۵	۲/۴	۲/۳	۲/۲	۲/۲	۲/۱	۲/۱	۲/۱

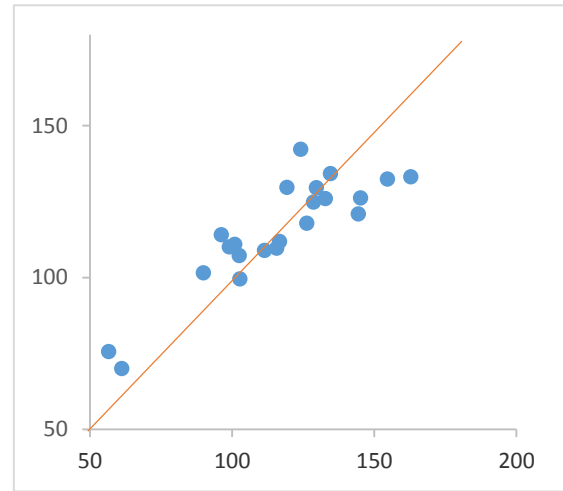
ادامه جدول مقادیر سختی موهس تخمینی به روش عکس فاصله از توان ۱ تا ۲۰ برای ۲۲
سینه کار برداشت شده

پله	توان ۱۱	توان ۱۲	توان ۱۳	توان ۱۴	توان ۱۵	توان ۱۶	توان ۱۷	توان ۱۸	توان ۱۹	توان ۲۰
۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۲	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۳	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۴	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۵	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۶	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۷	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۸	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۹	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۱۰	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۱۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۱۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۱۳	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۱۴	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۱۵	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۱۶	۲/۱	۲/۱	۲/۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۱۷	۲/۴	۲/۴	۲/۴	۲/۴	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵
۱۸	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۱۹	۲/۲	۲/۲	۲/۲	۲/۲	۲/۲	۲/۲	۲/۱	۲/۱	۲/۱	۲/۱
۲۰	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۲۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۲۲	۲/۱	۲/۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲

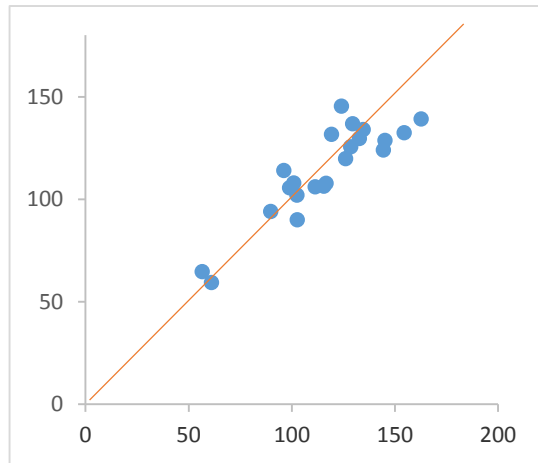
پیوست ۲: نمودارهای مقاومت فشاری تخمینی - مقاومت فشاری آزمایشگاهی



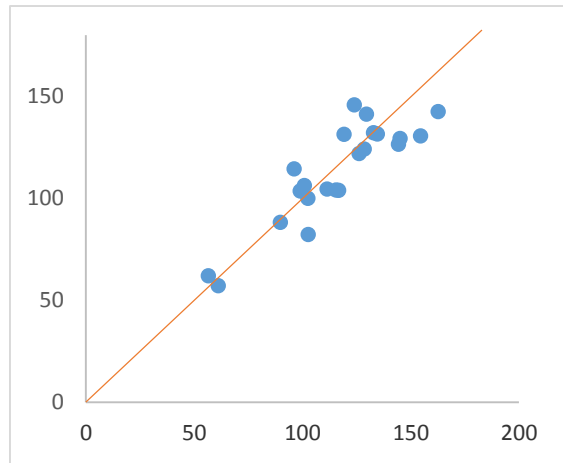
تخمین به روش عکس توان ۱ فاصله



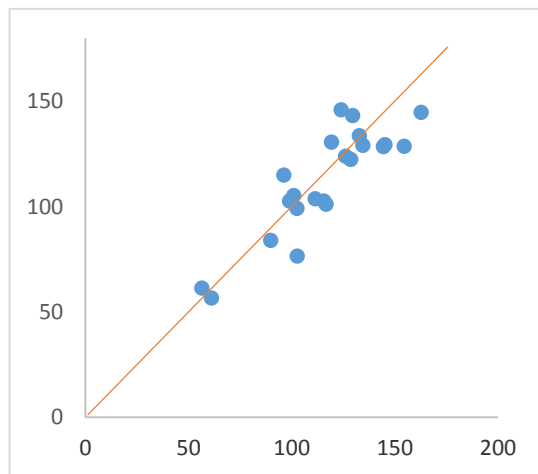
تخمین به روش عکس توان ۲ فاصله



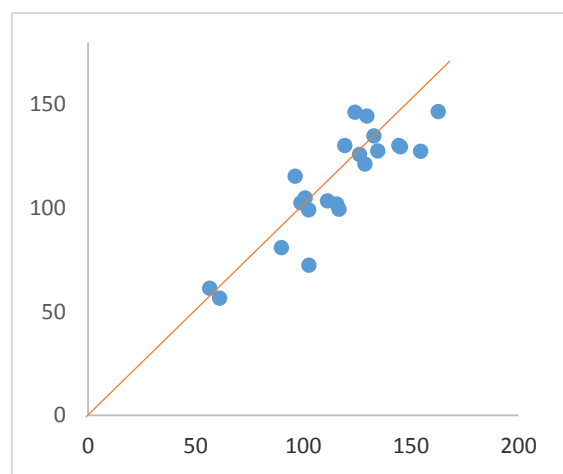
تخمین به روش عکس توان ۳ فاصله



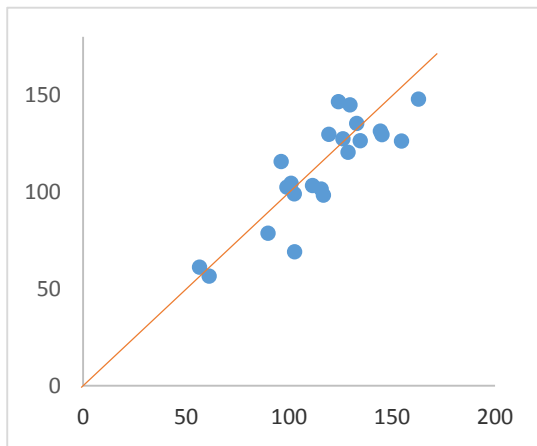
تخمین به روش عکس توان ۴ فاصله



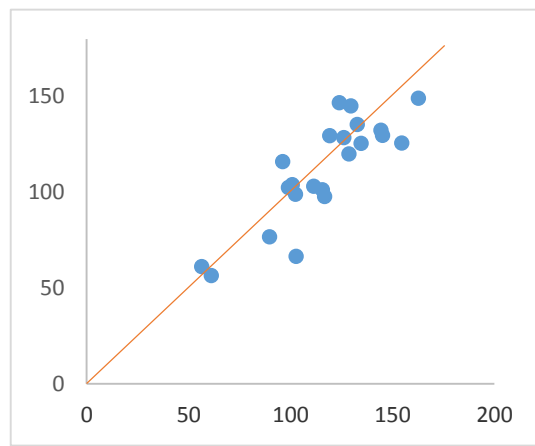
تخمین به روش عکس توان ۵ فاصله



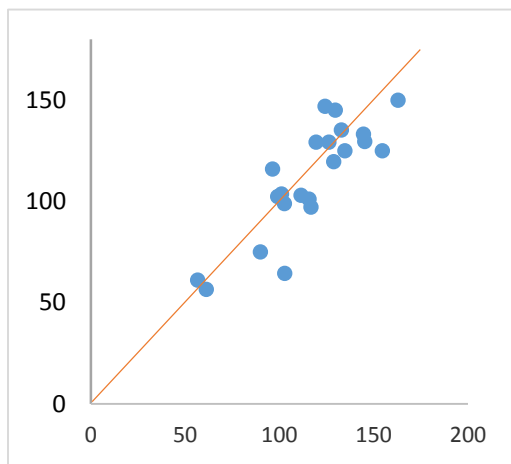
تخمین به روش عکس توان ۶ فاصله



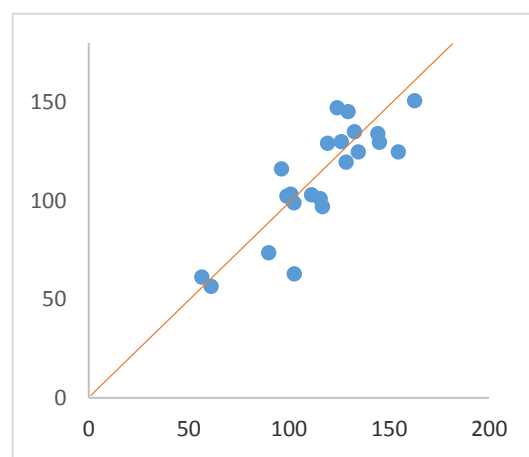
تخمین به روش عکس توان ۷ فاصله



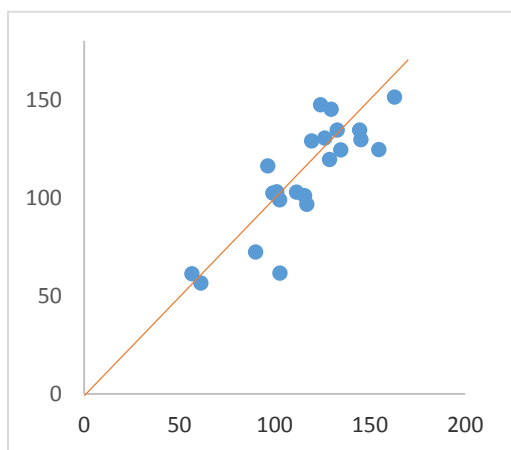
تخمین به روش عکس توان ۸ فاصله



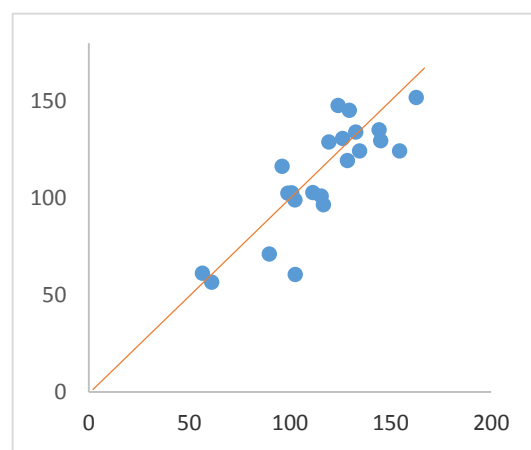
تخمین به روش عکس توان ۹ فاصله



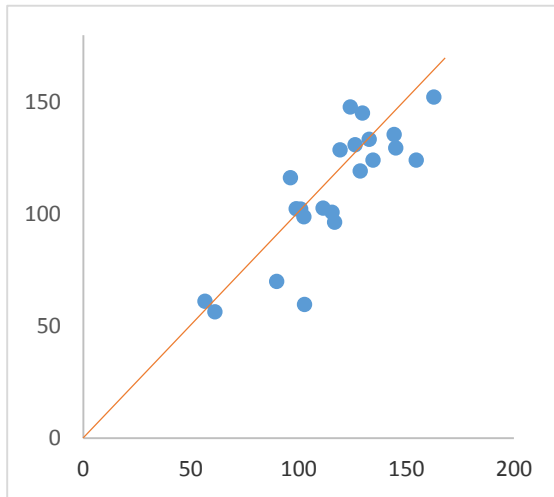
تخمین به روش عکس توان ۱۰ فاصله



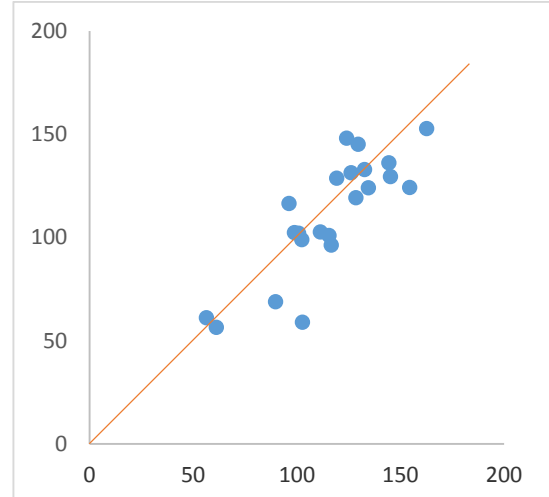
تخمین به روش عکس توان ۱۱ فاصله



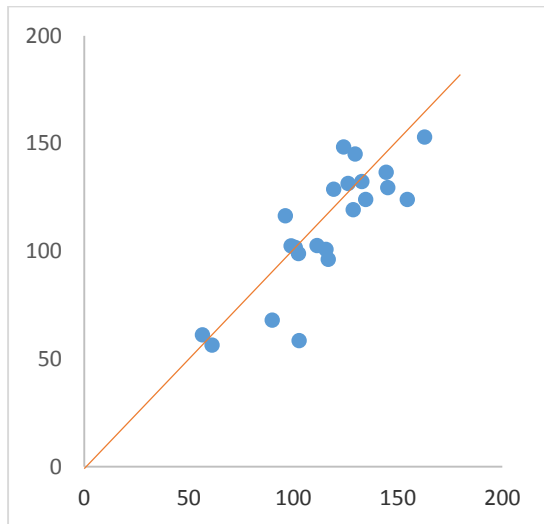
تخمین به روش عکس توان ۱۲ فاصله



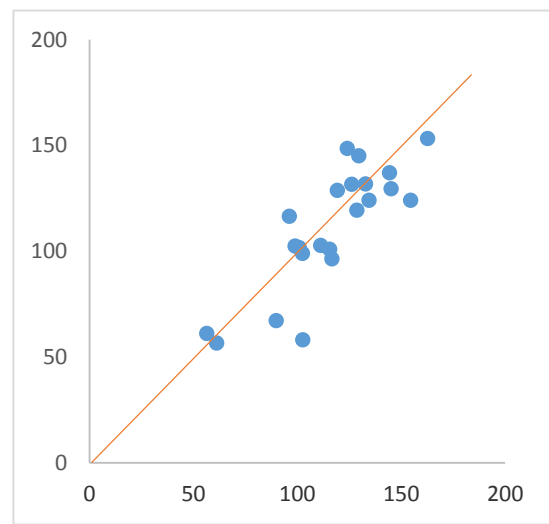
تخمین به روش عکس توان ۱۳ فاصله



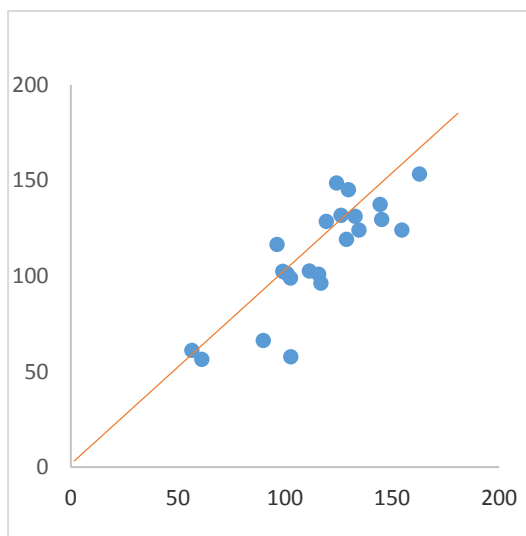
تخمین به روش عکس توان ۱۴ فاصله



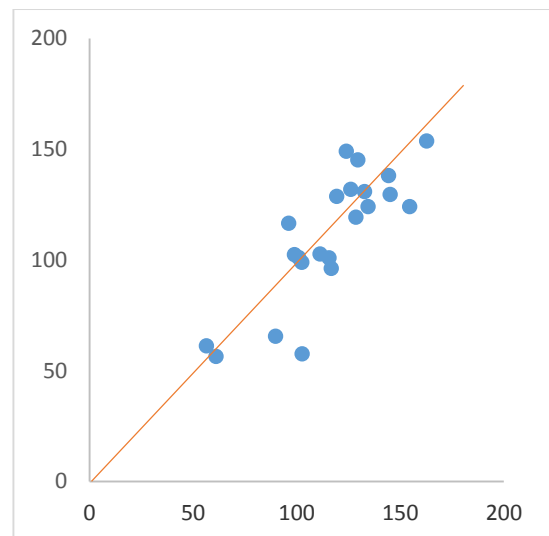
تخمین به روش عکس توان ۱۵ فاصله



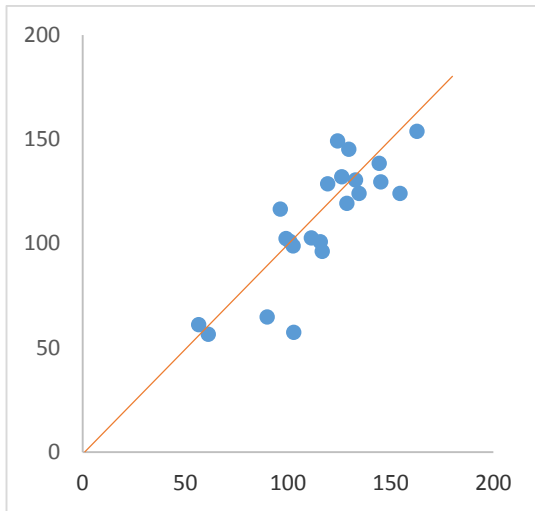
تخمین به روش عکس توان ۱۶ فاصله



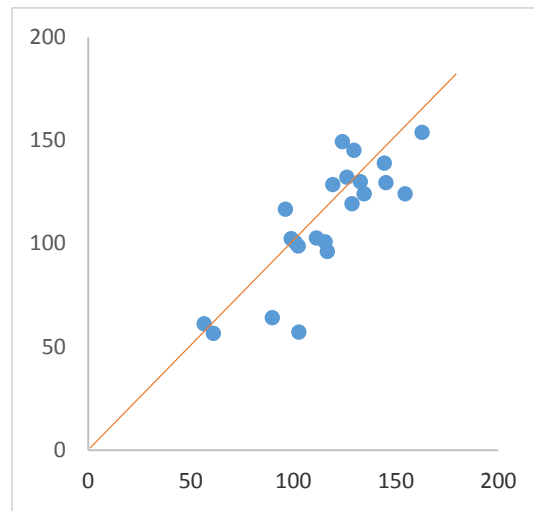
تخمین به روش عکس توان ۱۷ فاصله



تخمین به روش عکس توان ۱۸ فاصله



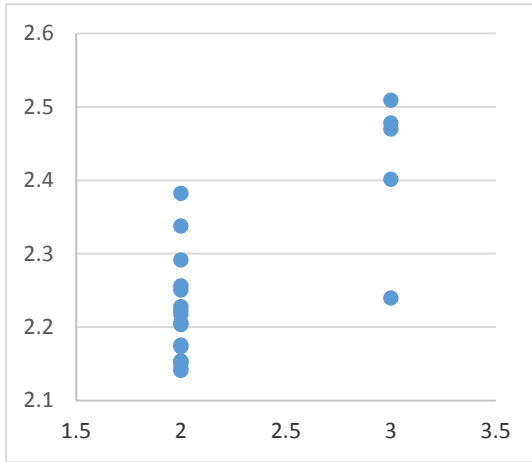
تخمین به روش عکس توان ۱۹ فاصله



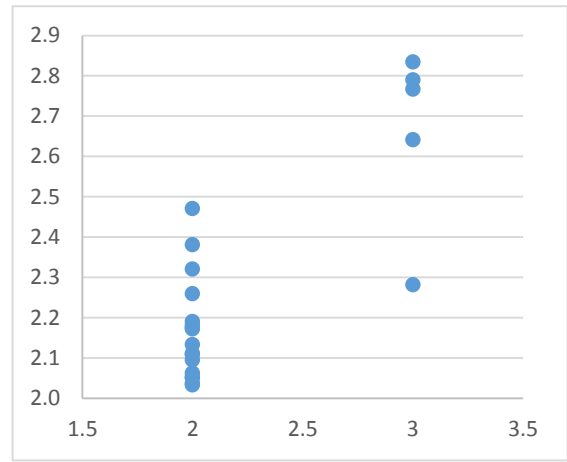
تخمین به روش عکس توان ۲۰ فاصله

در این نمودارها محور عمودی مقدار مقاومت فشاری تخمینی و محور افقی مقدار مقاومت فشاری آزمایشگاهی می‌باشد.

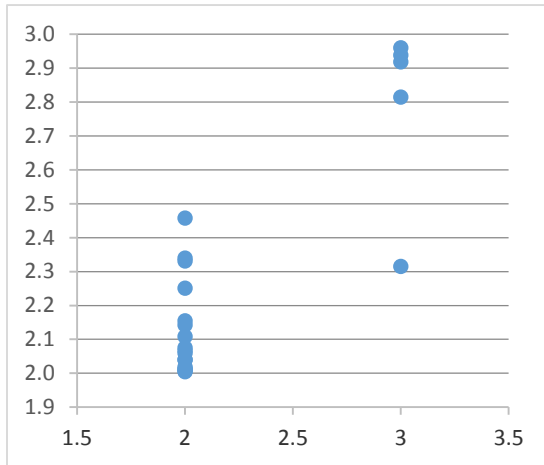
پیوست ۲: نمودارهای سختی موهس تخمینی - سختی موهس آزمایشگاهی



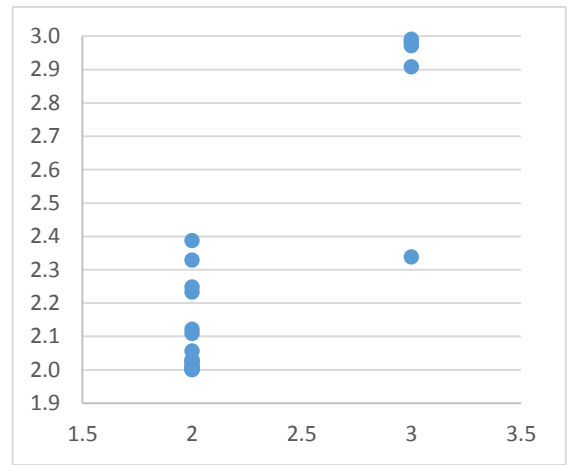
تخمین به روش عکس توان ۱ فاصله



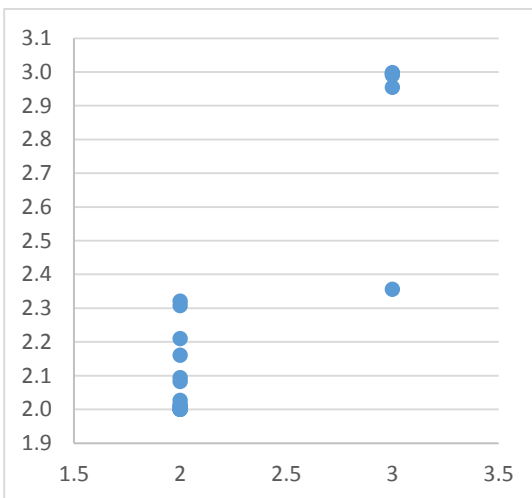
تخمین به روش عکس توان ۲ فاصله



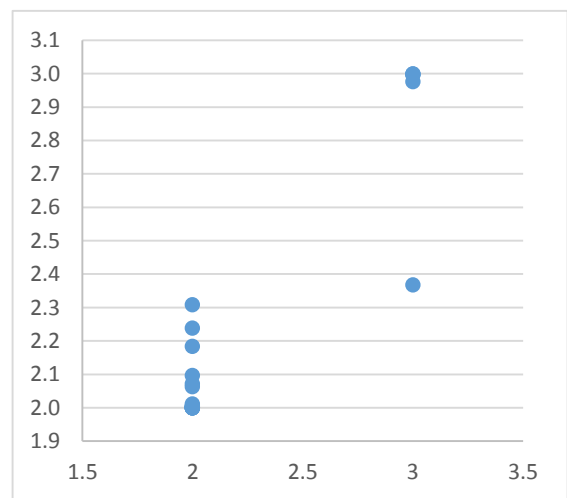
تخمین به روش عکس توان ۳ فاصله



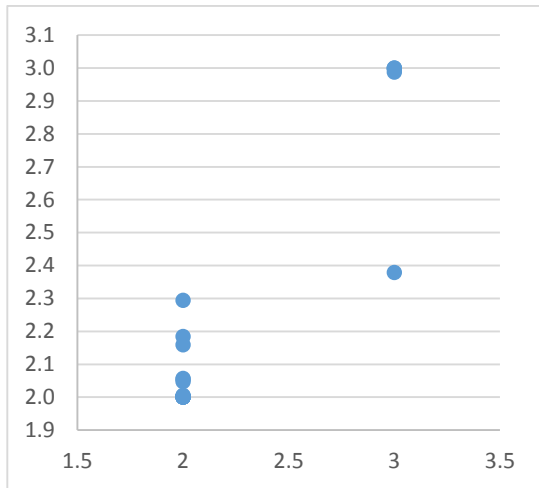
تخمین به روش عکس توان ۴ فاصله



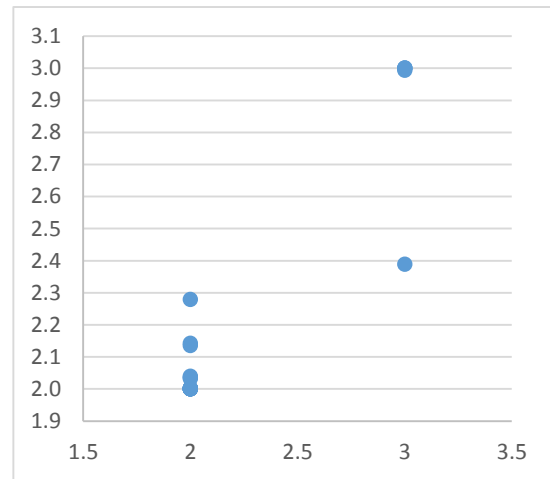
تخمین به روش عکس توان ۵ فاصله



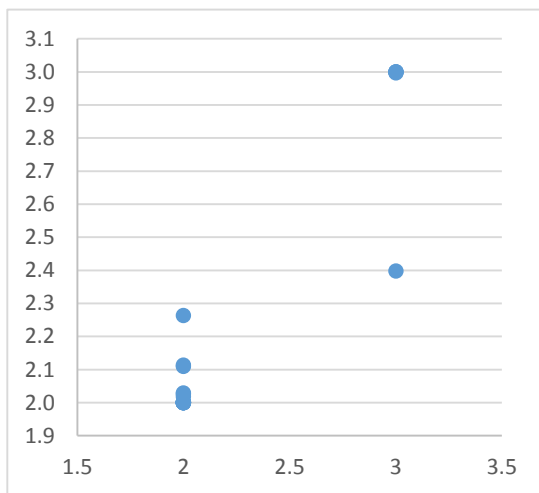
تخمین به روش عکس توان ۶ فاصله



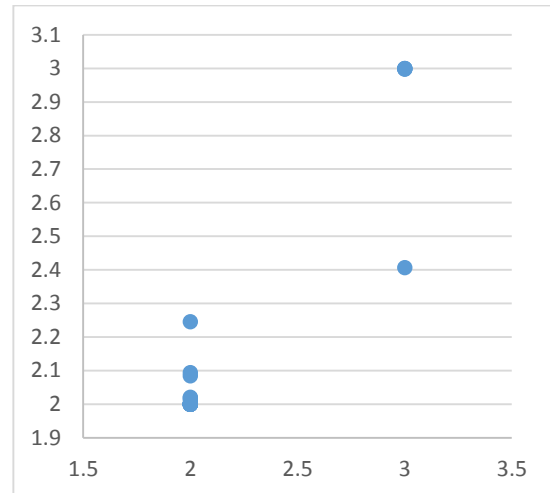
تخمین به روش عکس توان ۷ فاصله



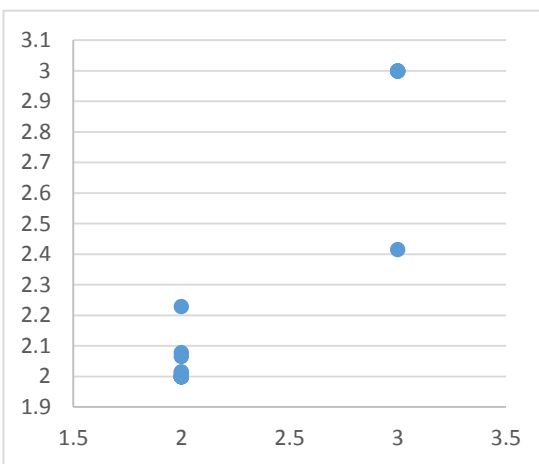
تخمین به روش عکس توان ۸ فاصله



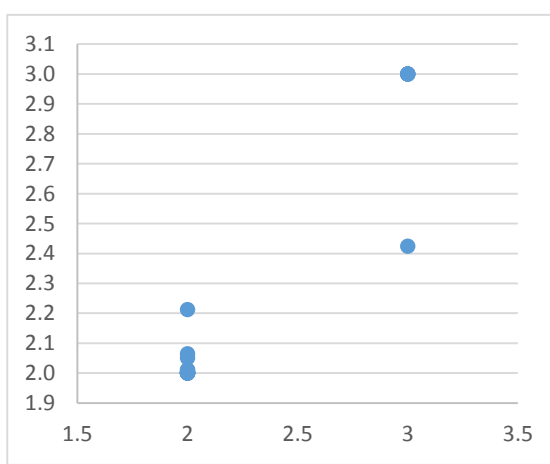
تخمین به روش عکس توان ۹ فاصله



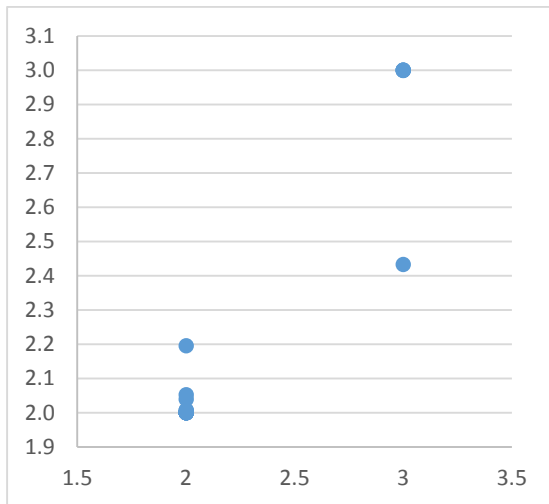
تخمین به روش عکس توان ۱۰ فاصله



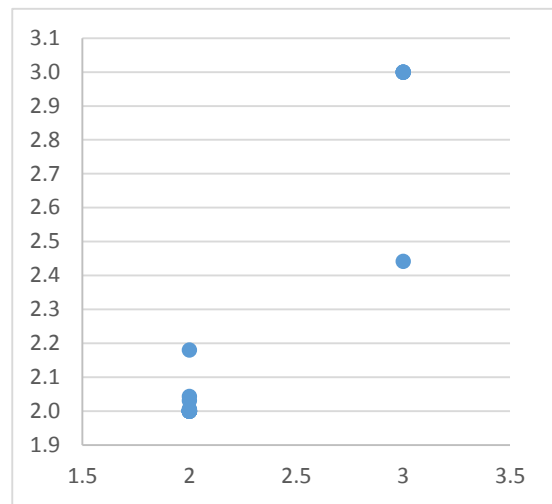
تخمین به روش عکس توان ۱۱ فاصله



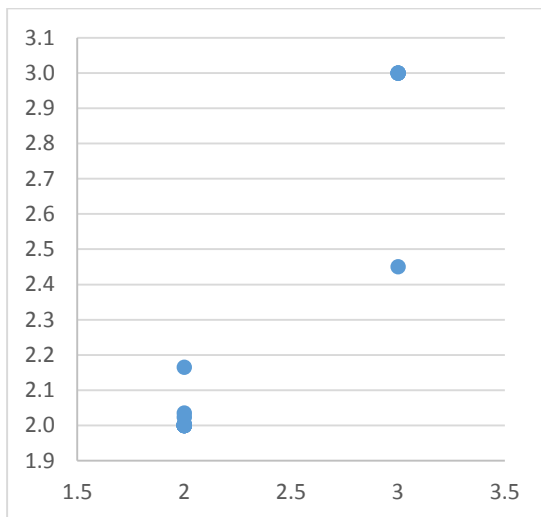
تخمین به روش عکس توان ۱۲ فاصله



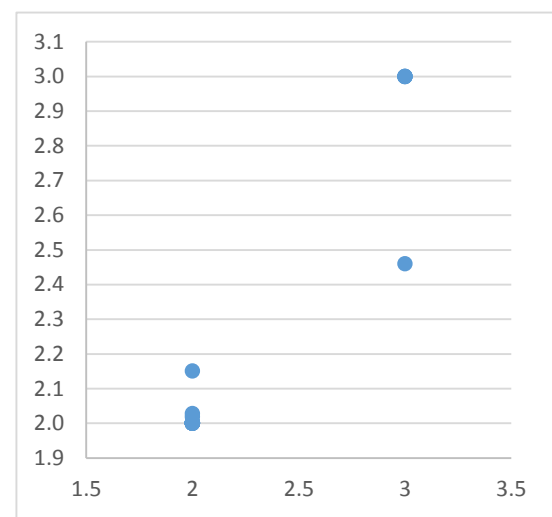
تخمین به روش عکس توان ۱۳ فاصله



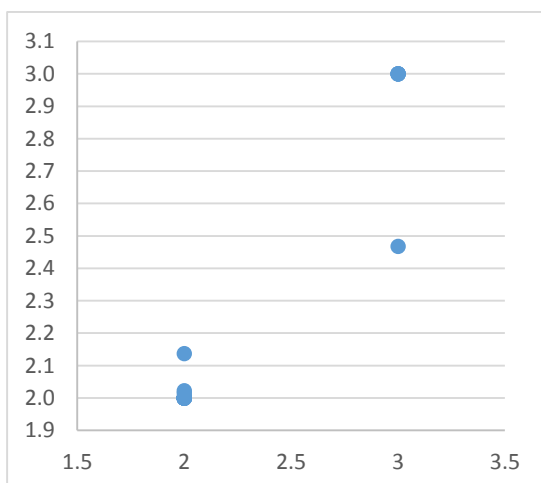
تخمین به روش عکس توان ۱۴ فاصله



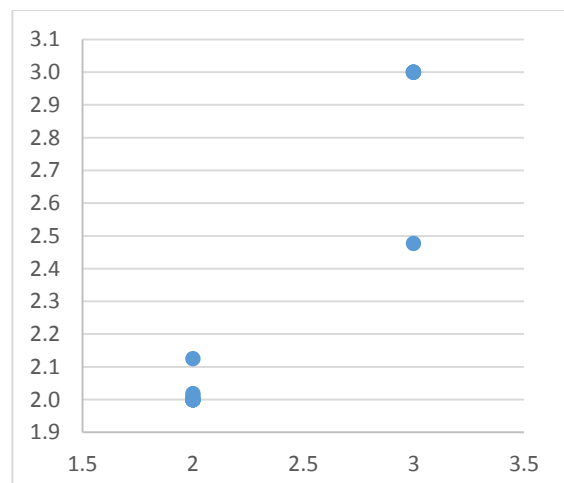
تخمین به روش عکس توان ۱۵ فاصله



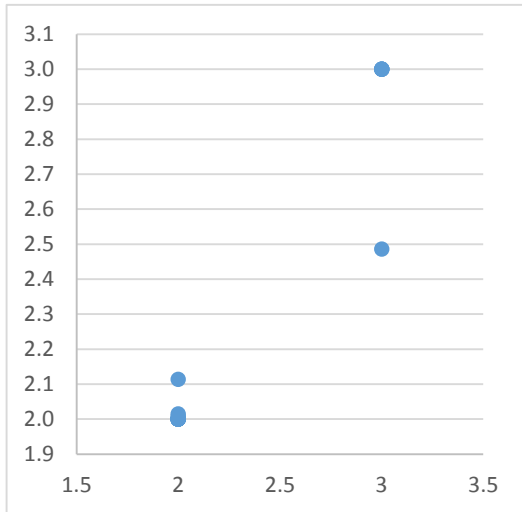
تخمین به روش عکس توان ۱۶ فاصله



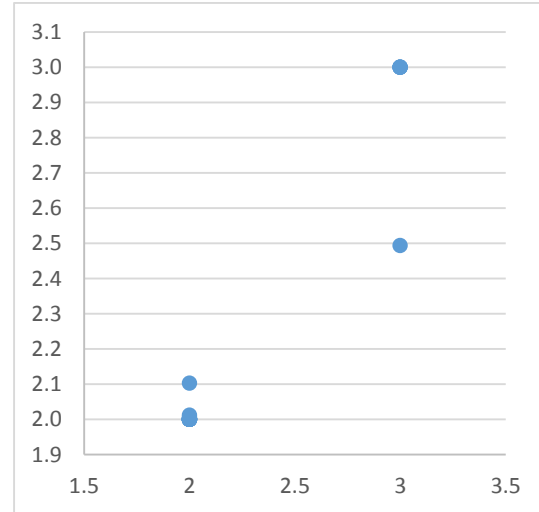
تخمین به روش عکس توان ۱۷ فاصله



تخمین به روش عکس توان ۱۸ فاصله



تخمین به روش عکس توان ۱۹ فاصله



تخمین به روش عکس توان ۲۰ فاصله

در این نمودارها محور عمودی مقدار سختی موهس تخمینی و محور افقی مقدار سختی موهس آزمایشگاهی می باشد.

Abstract

Drilling has special importance as the first step in opening mining. Due to the high investment volume, penetration rate prediction in drilling advance, mine planning and rock characteristics prediction, determining of switching time of bit and costs reduction in mining is necessary. With regard to importance of this subject, the main purpose of this study is mining area zoning from the viewpoint of rock mass drill ability and drilling speed using Inverse distance method.

In this study first, effective parameters on drill ability was considered in according to previous researches and studies from available academic texts and essays and the most important effective parameters on drill ability and penetration rate was identified. As regards that drill ability has depend on different parameters, according to RDi that consist of effective parameters on penetration rate, has been used for suitable methods. In the following, for study and investigation of rack mass of marl mine 1 of the east cement corporation, the parameters of RDi of area has been caught for field and laboratory and was tested in laboratory and RDi scores was determined for each pattern. Also, penetration rate of each pattern was registered and the average rate of penetration for each pattern was calculated.

Then the relationship between effective parameters on drill ability and penetration rate and also the relationship between rocks drilling index with penetration rate was checked out and it was concluded that there is a good relationship between RDi and penetration rate and it has been used for predicting of penetration rate.

In the next step, the rocks of area was divided in 52 zones and the quantitative parameters of RDi as well as qualitative parameters was estimated with inverse distance to a power method. Then the rocks of the area were classified based on penetration rate in two parts: middle and middle-fast.

At the end, by using GIS software, the area of study has been zoned based on RDi and penetration rate.

Key words: *open pit mines, anticipating rate of penetration, rock drill index (RDi), zoning, rock mass of marl mine 1 of east cement corporation, GIS software*



Faculty of mining, Petroleum and Geophysics Engineering

MSc Thesis in Mineral Exploitation

***Open pit mine zoning according to Rock mass Drillability
Index and rate of drilling - case study: East cement
company(mashhad)***

By:

Farshad Kouhestani

Supervisor:

Dr. Farhang Sereshki

Prof. Mohamad Ataie

Advisor:

Prof. Reza Khaloukakaie

January 2017