

بررسی تأثیر ساینده‌گی بر قابلیت حفاری سنگ‌ها

محمد عطایی^{۱*} و سید هادی حسینی^۱

^۱دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، شاهرود، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۳۸۷/۰۷/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۳۸۶/۱۲/۱۳

چکیده

ساینده‌گی به عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در قابلیت حفاری سنگ‌ها، سرعت حفاری در معادن را به شدت تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. تا کنون چهار روش شناخته شده برای ارزیابی ساینده‌گی سنگ‌ها ارائه شده است که از جمله آنها می‌توان به روش شاخص ساینده‌گی سنگ (RAI)، اندیس سایش سورشار (CAI)، فاکتور سایش شیمازک (F-abrasivity) و اندیس سایش سرمت (BWI) اشاره کرد. در این مقاله، ساینده‌گی شش نوع سنگ معدن با استفاده از فاکتور سایش شیمازک و شاخص ساینده‌گی سنگ مطالعه شده است. برای این منظور با استفاده از مقاطع نازک، میزان کوارتز محتوی و میانگین اندازه دانه‌ها محاسبه شده است. همچنین میزان مقاومت فشاری و کششی (آزمون برزیلی) سنگ‌ها در آزمایشگاه تعیین شده است. برای تعیین قابلیت حفاری سنگ‌ها، کلیه نمونه‌های سنگی با استفاده از دستگاه حفاری ضربه‌ای- دورانی چکش بالا مورد حفاری قرار گرفته و سرعت حفاری در آنها ثبت شده است. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده، نشان می‌دهد با افزایش میزان فاکتور سایش شیمازک سرعت حفاری به صورت لگاریتمی و با افزایش میزان شاخص ساینده‌گی سنگ سرعت حفاری به صورت نمایی کاهش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: حفاری، ساینده‌گی، فاکتور سایش شیمازک.

*نویسنده مسئول: محمد عطایی

۱- مقدمه

در عملیات حفاری، به خاصیتی از سنگ که موجب از بین رفتن انواع سرمت‌ها (از جنس فولاد، کربور تنگستن و یا الماس) می‌شود، ساینده‌گی گفته می‌شود (اصانلو، ۱۳۷۵). ساینده‌گی سنگ‌ها عموماً "به میزان کوارتز محتوی، اندازه و شکل دانه‌ها و مقاومت کششی سنگ بستگی دارد (Ersoy & Waller, 1995a). میزان ساینده‌گی سنگ یک پارامتر بسیار مهم و تعیین‌کننده در انتخاب نوع سیستم حفاری، نوع و هندسه سرمت است. لذا شناخت صحیح و واقعی این ویژگی کمک شایان توجهی به طراحان و برنامه‌ریزان معدن در انتخاب ماشین‌آلات و ارزیابی قابلیت حفاری خواهد کرد. تاکنون روش‌های مختلفی از جمله شاخص ساینده‌گی سنگ (RAI)، فاکتور سایش شیمازک، شاخص سایش سورشار (CAI) و شاخص سایش سرمت (BWI) برای ارزیابی ساینده‌گی سنگ‌ها پیشنهاد شده است. در این نوشتار سعی شده ابتدا با مرور اجمالی روش‌های فوق، کاربرد روش عامل سایش شیمازک و شاخص ساینده‌گی سنگ در ارزیابی سرعت حفاری ضربه‌ای- دورانی با سرمت تیغه‌ای مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد.

۲- روش‌های ارزیابی ساینده‌گی سنگ‌ها

۲-۱. اندیس سایش سرشار (CAI)

آزمایش اندیس سایش سرشار اولین بار از سوی انستیتو معدن کاری زغال‌سنگ فرانسه معرفی شد. این اندیس با ساییده شدن و خراش نوک تیز یک میله (پین) فلزی بر روی یک سطح سنگی تازه، به دست می‌آید (شکل ۱). در این آزمایش پس از محکم کردن نمونه در گیره دستگاه، نوک تیز میله فولادی بر روی سنگ قرار داده شده و دسته دستگاه برای ایجاد یک سانتی‌متر خراش در مدت یک ثانیه کشیده می‌شود. پس از ایجاد خراش قطر سطح ساییده شده بر روی میله فولادی در زیر میکروسکوپ خوانده می‌شود. این میکروسکوپ دارای خط‌کشی مدرج به اندازه هر درجه معادل ۰/۰۵۸ میلی‌متر است. پس از ضرب عدد خوانده شده در ۱۰ اندیس سایش سرشار محاسبه می‌شود (علمی اسدزاده و معماریان، ۱۳۸۵).

۲-۲. اندیس سایش سرمت (BWI)

این روش در سال‌های بین ۱۹۶۱-۱۹۵۸ در دانشکده زمین‌شناسی و مهندسی ذخائر

در بحث پیرامون تأثیر ویژگی‌های ماده و توده سنگ بر قابلیت حفاری، متخصصان بسیاری با استفاده از پارامترهای مختلف رفتار سنگ‌ها را تشریح کرده‌اند. تاکنون متخصصان متعددی نقش و تأثیر پارامترهای فیزیکی، مکانیکی و ساختاری توده سنگ را تشریح کرده و رابطه هر یک از این پارامترها را با سرعت حفاری مورد مطالعه قرار داده‌اند (Akun & Karpuz, 2005; Ersoy & Waller, 1995a; Ersoy & Waller, 1995b; Hoseinie et al., 2006; Hoseinie et al., 2007; Hoseinie et al., 2008; Jimeno et al., 1995; Jung et al., 1994; Kahraman, 1999; Li et al., 2000; Serradj, 1996; Singh, 1990; Thuro, 1997; Singh et al., 1998; Kaiser & McCreath 1994; Kahraman et al., 2000; Wilbur & Lyman, 1982; Tanaino, 2005; Singh et al., 2006; Wijk, 1991). از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر سرعت حفاری می‌توان به زایش و منشأ تشکیل سنگ‌ها، سختی سنگ، بافت سنگ (شکل و اندازه دانه‌های سنگ)، تخلخل، چگالی، ساینده‌گی، الاستیسیته و پلاستیسیته، مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ (UCS) (اندیس بار نقطه‌ای و چکش اشمیت)، مقاومت کششی، سفتی سنگ، RQD و ویژگی‌های توده سنگ (درزه، شکاف و لایه‌بندی) اشاره کرد (Hoseinie et al., 2008).

از میان ویژگی‌های ماده سنگ، مقاومت فشاری، ساینده‌گی و سختی از اهمیت بیشتری نسبت به سایر پارامترها برخوردارند. با توجه به کاربرد وسیع مقاومت فشاری در مهندسی سنگ و نیز اهمیت اطلاعات به دست آمده در مورد یک سنگ توسط این شاخص، در مهندسی حفاری نیز مطالعات گسترده‌ای در مورد تأثیر مقاومت بر سرعت و قابلیت حفاری انجام یافته است. تحقیقات نشان می‌دهد که با افزایش مقاومت فشاری، قابلیت حفاری سنگ‌ها کاهش می‌یابد. چگونگی کاهش و رابطه ریاضی پیشنهادی بین مقاومت فشاری و سرعت حفاری بسته به نوع سیستم حفاری و نیز نوع سرمت به کار برده شده در تحقیقات مختلف، متفاوت بوده است.

سختی به عنوان یک ویژگی فیزیکی مهم، نقش بسیار زیادی در سرعت حفاری دارد. تا کنون در بیشتر منابع حفاری، سختی سنگ مورد تأکید بوده است. با این حال متأسفانه تحقیقات جامع و کاملی در مورد ارتباط سختی و سرعت حفاری انجام نشده و رابطه ریاضی مطلوبی بین این دو کمیت ارائه نشده است.

شده و مورد تفسیر قرار گرفتند. در شکل ۵ تصویر نمونه‌هایی از مقاطع نازک تهیه شده، نشان داده شده است.

در تفسیر مقاطع نازک درصد کانی‌های تشکیل دهنده سنگ و نیز محدوده ابعادی دانه‌ها به دقت بررسی شد. پس از تعیین درصد کانی‌های موجود و نیز ابعاد دانه هر یک از کانی‌ها در هر سنگ، با استفاده از راهنمای کانی‌شناسی، سختی هر یک از کانی‌ها استخراج شد. برای محاسبه شاخص سایش شیمزک ابتدا با توجه به ترکیب کانی‌شناسی سنگ‌های مورد مطالعه جدول ۱ و با استفاده از شکل ۳ و فرمول ۲ میزان کوارتز محتوی معادل سنگ محاسبه شد. سپس با استفاده از فرمول ۱ شاخص سایش شیمزک هر سنگ تعیین شد. همچنین مقاومت فشاری و کششی (آزمون برزیلی) نمونه‌ها طبق استاندارد در آزمایشگاه تعیین شدند. همچنین با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش‌های یاد شده، میزان شاخص سایش سنگ برای هر سنگ محاسبه و معلوم شد. جدول ۲ نتایج آزمایش‌های مکانیک سنگی و مقادیر شاخص سایش شیمزک و شاخص سایش محاسبه شده برای هر کدام از سنگ‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

۲-۳. آزمایش‌های حفاری

در کنار انجام آزمون‌های آزمایشگاهی، تعدادی نمونه حجیم از سنگ‌های مورد مطالعه برای انجام حفاری به معدن سنگ‌آهک سیمان صوفیان منتقل شدند. در معدن، تمامی نمونه‌ها در یک کانال به ژرفای میانگین ۰/۵ متر و عرض ۰/۸ متر توسط بتن دفن شده و تنها سطح بالایی نمونه‌ها برای انجام حفاری به صورت آزاد باقی گذاشته شد. پس از آماده‌سازی و مراحل تحکیم نمونه‌ها در بتن، کلیه سنگ‌ها توسط دستگاه حفاری ضربه‌ای- دورانی با سرته تیغه‌ای نو از نوع ضربدری و با قطر سه اینچ حفاری شدند. جنس تیغه‌های سرته مورد استفاده از نوع کاربید تنگستن بوده و دارای زاویه رأس ۱۱۰ درجه بود. ویژگی‌های عملیاتی دستگاه حفاری مورد استفاده عبارت بودند از: فشار هوای فلاشینگ ۴/۵ بار (bar)، بار پشت مته ۳۸ بار (bar)، دور مته ۶۰ دور بر دقیقه، قدرت دستگاه ۷/۵ اسب بخار و بسامد ضربه وارد به سر میله ۲۰۰۰ دفعه بر دقیقه. کلیه مراحل آزمایش اعم از دفن نمونه‌ها در کانال بتنی و مراحل حفاری، در هوای آفتابی و بدون هیچ گونه رطوبت جوی انجام شده است.

در هر نوع از سنگ‌های مورد مطالعه به طور میانگین تعداد پنج چال به ژرفای متوسط ۱۰ سانتی‌متر حفر شد و میانگین زمان حفر این چال‌ها و سرعت حفاری در آن سنگ محاسبه شد. نتایج مطالعات حفاری در جدول ۳ آورده شده است.

۳-۳. بحث و تحلیل ریاضی نتایج مطالعات آزمایشگاهی

پس از انجام مطالعات آزمایشگاهی، حفاری سنگ‌ها و جمع‌آوری نتایج حاصل، با توجه به اعداد ارائه شده در جدول‌های ۲ و ۳، بهترین منحنی بر روی داده‌های به دست آمده از آزمایش‌ها برازش شد. شکل‌های ۶ و ۷ منحنی‌های برازش شده و نیز رابطه ریاضی بین عامل سایش شیمزک و شاخص سایش سنگ را با سرعت حفاری نشان می‌دهند. چنانچه از منحنی‌ها بر می‌آید، با افزایش میزان ساینده‌گی سنگ سرعت حفاری و قابلیت حفاری سنگ‌ها کاهش می‌یابد. با توجه به شیب منحنی شکل ۶، به‌طور آشکار دیده می‌شود که شدت تغییرات سرعت حفاری در سنگ‌های با خاصیت ساینده‌گی پایین، نسبت به شدت تغییرات در سنگ‌های ساینده بیشتر است. لذا در سنگ‌های با ساینده‌گی پایین، تعیین دقیق میزان ساینده‌گی از اهمیت بیشتری برخوردار است، زیرا طبق نتایج به دست آمده در این نوشتار، نبود دقت در این امر پیش‌بینی میزان ساینده‌گی و نیز قابلیت حفاری سنگ‌ها را با خطا مواجه می‌کند. همچنین با توجه به منحنی‌های حاصل معلوم می‌شود که رابطه بین میزان ساینده‌گی و سرعت حفاری در سنگ‌های با خاصیت ساینده‌گی پایین، به حالت خطی نزدیک‌تر بوده (خطوط بریده) و رفتار منحنی در بخش‌های مربوط به سنگ‌های ساینده به حالت لگاریتمی و نمایی میل می‌کند. با توجه به منحنی شکل ۷ مشخص می‌شود که شاخص سایش سنگ نسبت

معدنی دانشگاه NTNU نروژ ارائه شده است. (Jimeno et al., 1995) این شاخص بر مبنای شاخص سرعت حفاری (DRI) و نیز شاخص مقدار سایش (AV) استوار است. شاخص سرعت حفاری (DRI) وابسته به دو کمیت میزان تردی (S_{20}) و نیز به مقدار ارزش J-Siever's است. با در دست بودن دو پارامتر بالا، شاخص سرعت حفاری (DRI) طبق نمودار شکل ۲ قابل محاسبه است. هر یک از شاخص‌های یاد شده با استفاده از آزمایش‌های استاندارد قابل اندازه‌گیری و محاسبه است. در پایان، با معلوم بودن شاخص سرعت حفاری (DRI) و نیز شاخص مقدار سایش (AV) با استفاده از نمودار شکل ۲ می‌توان اندیس سایش سرته را محاسبه کرد.

۲-۳. فاکتور سایش شیمزک (F-abrasivity)

این شاخص در سال ۱۹۷۰ توسط شیمزک و ناتز (Knatz) ارائه شده است. رابطه کلی این شاخص به صورت رابطه ۱ است (Ersoy & Waller, 1995a).

$$F = \frac{(EqQtz \times \phi \times BTS)}{100} \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن، EqQtz نشانگر درصد میزان کوارتز محتوی معادل سنگ، ϕ اندازه دانه‌ها بر حسب میلی‌متر و BTS مقاومت کششی غیرمستقیم (آزمون برزیلی) است. اندازه دانه‌ها با استفاده از مقاطع نازک و میانگین‌گیری وزنی اندازه دانه‌ها و مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم از طریق آزمایش تعیین می‌شود. در میان پارامترهای بالا میزان درصد کوارتز محتوی یکی از حساس‌ترین و پرکاربردترین پارامترهای مربوط به ساینده‌گی سنگ‌ها است. این شاخص بر این مبنای استوار است که هر کانی با توجه به سختی مقیاس موهس چه درصدی از ساینده‌گی ناشی از کوارتز را ایجاد می‌کند. رابطه کلی برای تعیین EqQtz به صورت رابطه ۲ است:

$$EqQtz = \sum_{i=1}^n A_i R_i \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن، A نشانگر درصد کانی‌ها، R ساینده‌گی رزیوال (Rosin) و n تعداد کانی‌ها است. میزان ساینده‌گی رزیوال سنگ با استفاده از سختی موهس و طبق رابطه نشان داده شده در شکل ۳ قابل محاسبه است.

چنانچه از این شکل بر می‌آید، میزان EqQtz برای کانی کوارتز ۱۰۰٪ بوده و با کاهش میزان کوارتز و یا سختی دیگر کانی‌های سنگ، میزان ساینده‌گی سنگ به صورت لگاریتمی کاهش می‌یابد.

۲-۴. شاخص سایش سنگ (RAI)

این شاخص توسط Plinninger et al. (2002) در کشور آلمان ارائه شده است. رابطه کلی این شاخص به صورت $RAI = EqQtz \times UCS$ است. که در آن، EqQtz نشانگر درصد میزان کوارتز محتوی معادل سنگ و UCS مقاومت فشاری سنگ بر حسب مگاپاسکال است. با توجه به این که شاخص شیمزک و شاخص سایش سنگ بر مبنای پارامترهای مهم مؤثر در ساینده‌گی سنگ‌ها استوار هستند و همچنین در این شاخص‌ها به شرایط ماکروسکوپی و میکروسکوپی سنگ به صورت همزمان توجه می‌شود، لذا در این نوشتار از شاخص سایش شیمزک و شاخص سایش سنگ برای ارزیابی ساینده‌گی سنگ‌ها استفاده شده است.

۳- روش تحقیق

۳-۱. مطالعات آزمایشگاهی

در این نوشتار با توجه به شناخت نویسندگان از کیفیت سنگ‌های معدن شمال‌باختر کشور، به منظور انجام مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های سنگی، در مجموع از سنگ‌های موجود در شش معدن نمونه برداری به عمل آمد. در شکل ۴ موقعیت مکانی معدن نمونه‌برداری شده بر روی نقشه نشان داده شده است.

دو آزمایشگاه ابتدا از هر سنگ دو مقطع نازک در دو جهت عمود بر هم تهیه

حفاری و قابلیت حفاری سنگ به صورت لگاریتمی و با افزایش میزان شاخص سایش سنگ سرعت حفاری به صورت نمایی کاهش می‌یابد. همچنین مشخص شد که شدت تغییرات سرعت حفاری در سنگ‌های با خاصیت ساینده‌گی پایین، نسبت به شدت تغییرات سرعت حفاری در سنگ‌های ساینده بیشتر است. لذا پیشنهاد می‌شود در سنگ‌های با ساینده‌گی کم، میزان فاکتور سایش شیمازک به دقت تعیین شده و مطالعات میکروسکوپی به دقت بر روی مقاطع نازک انجام گیرد.

همچنین با توجه به این که این مطالعه بر روی ماده سنگ‌های معادن مختلف انجام یافته است، نتایج کسب شده از این نوشتار می‌تواند در معادن با کیفیت توده سنگ خوب (دارای فراوانی درزه کم) به طور مناسبی استفاده نمود. ولی در معادن با درزه‌داری بالا با توجه به کاهش سرعت ناشی از درزه‌داری، منحنی به دست آمده بین ساینده‌گی و سرعت حفاری به سمت پایین انتقال می‌یابد.

۵- سپاسگزاری

ریاست محترم امور معادن کارخانجات سیمان صوفیان جناب آقای مهندس محرم‌پور و جناب آقای دکتر حمید آقابابایی که در طی این نوشتار ما را صمیمانه یاری کردند سپاسگزاریم.

جدول ۱- ترکیب کانی‌شناسی سنگ‌های مورد مطالعه

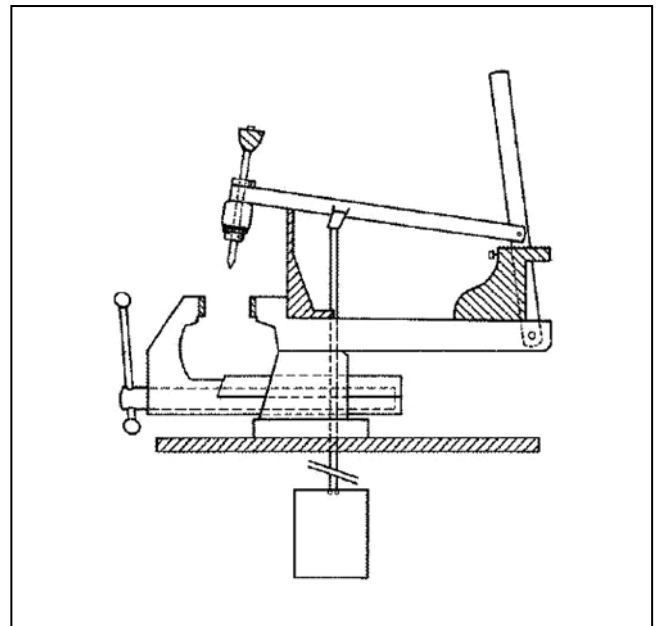
نام سنگ	نام معدن	کانی‌های موجود	فراوانی (%)
هورنفلس	مس سونگون	کوارتز	۵۰
		سرسیت و مسکوویت	۴۰
		اسفن لوکوسن	۳
		زیرکن	۲
مونزونیت	گرانیت مراغه	کانی‌های کدر	۵
		فلدسپار قلیایی	۴۰
		پلاژیو کلاز	۳۵
		بیوتیت	۱۰
		آمفیبول	۶
		پیروکسن	۲
تراورتن	تراورتن قرمز آذرشهر	کلریت	۴
		کانی‌های کدر	۳
		کلسیت	۸۰
		اکسید آهن	۵
ماسه سنگ	سیلیس خواجه مرجان	کانی‌های اپک	۵
		فضای خالی	۱۰
		کوارتز	۶۰
		اورتوکلاز	۱۲
		میکروکلین	۱۳
		مسکوویت	۱
		زیرکن	۱
تراورتن	تراورتن کرمی خلخال	آپاتیت	۲
		قطعات سنگی	۱۰
		کانی‌های کدر	۱
نفلین سینیت	نفلین سینیت سراب	کلسیت	۸۰
		مواد آلی	۱۰
		فضای خالی	۱۰
		ارتوز	۵۵
		پلاژیو کلاز	۱۰
		نفلین	۲۰
تراورتن کرمی	تراورتن کرمی	اولیوین	۵
		آپاتیت	۳
		کانی‌های کدر	۴
		کانی‌های کدر	۳

به شاخص سایش شیمازک از توانایی بیشتری در پیش‌بینی قابلیت حفاری سنگ‌ها برخوردار بوده و با توجه به شیب کمتر و یکنواخت‌تر منحنی، تأثیر ساینده‌گی را بر قابلیت حفاری سنگ‌ها بهتر نشان می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

ساینده‌گی به عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در قابلیت حفاری سنگ‌ها، سرعت حفاری در معادن را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. تاکنون چهار روش شناخته شده برای ارزیابی ساینده‌گی سنگ‌ها ارائه شده است که از جمله آنها می‌توان به روش شاخص ساینده‌گی سنگ، فاکتور سایش شیمازک، اندیس سایش سورشار و اندیس سایش سرمه اشاره کرد. هر یک از این روش‌ها با توجه به مشخصات پارامترهای مورد استفاده، به نحوی میزان ساینده‌گی سنگ‌ها را مورد ارزیابی قرار می‌دهند. در میان پارامترهای یاد شده فاکتور سایش شیمازک و شاخص سایش سنگ به علت وابستگی مستقیم به پارامترهای اساسی مؤثر در ساینده‌گی سنگ‌ها و نیز مبنای میکروسکوپی و ماکروسکوپی آن از مقبولیت بیشتری نسبت به دو روش دیگر برخوردار است.

نتایج این نوشتار نشان می‌دهد که با افزایش میزان فاکتور سایش شیمازک سرعت



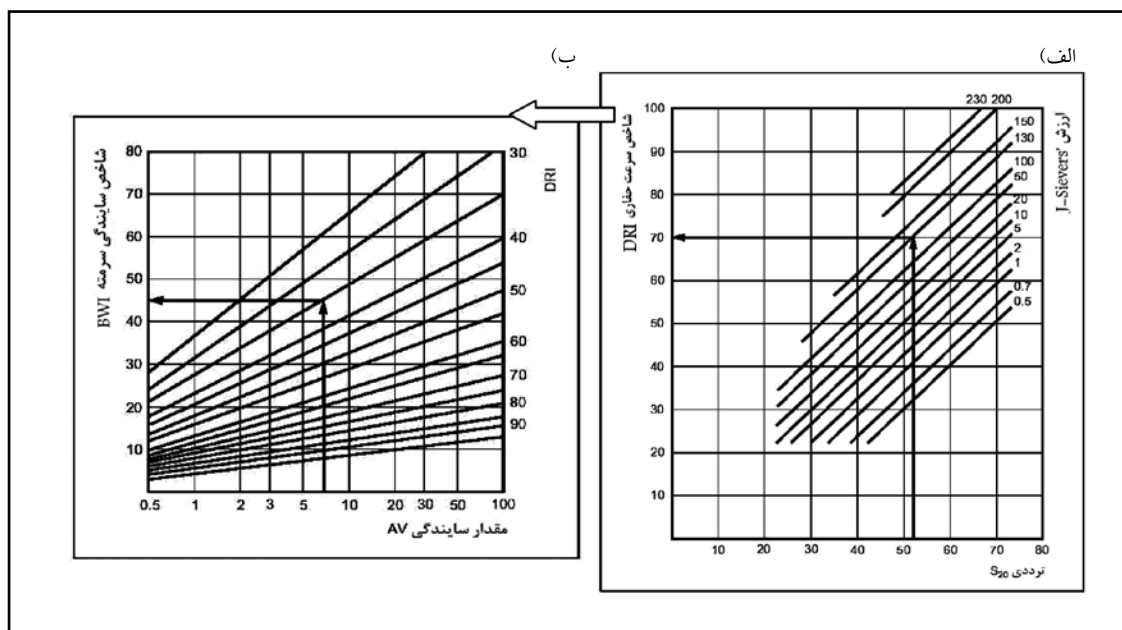
شکل ۱- نمایی از دستگاه سایش سرشار

جدول ۲- نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی سنگ‌های مورد مطالعه

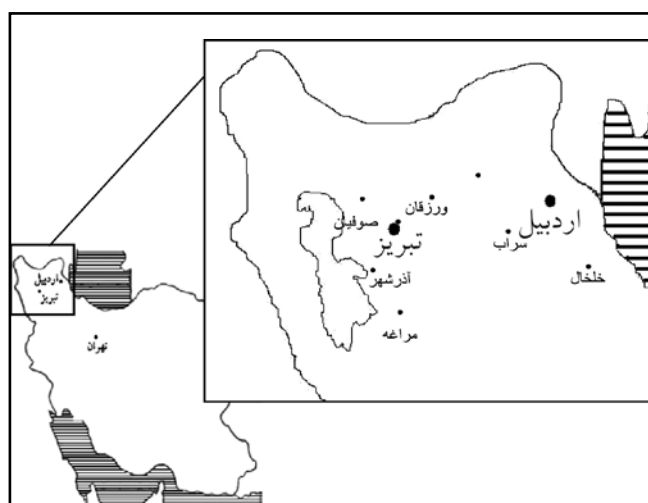
نام سنگ	کوارتز محوی معادل (%)	متوسط اندازه دانه‌ها (mm)	مقاومت کششی (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)	شاخص سایش سنگ	شاخص سایش شیمازک
هورنفلس	۵۲/۸۱۲۴	۱/۱۲	۴/۲۱	۵۷	۳۰۱۰/۳۰۷	۱۱/۱۳۳۹
مونزونیت	۳۲/۵	۲/۴۵	۵/۳۶	۸۷/۵	۲۸۴۳/۷۵	۱۱/۴۴۱۵
تراورتن قرمز	۳/۸۵۸	۳/۷۷	۱/۴۵	۵۳	۲۰۴/۴۴۴	۰/۰۶۳
ماسه سنگ	۷۲/۴۵۹۳	۰/۵۱	۴/۱۸	۱۱۲	۸۱۱۵/۴۴۲	۷/۴۲۰۵
تراورتن کرمی	۱/۹۷۷	۶/۵۷	۲/۴	۵۰/۵	۹۷/۸۱۱۵	۰/۰۵۹۳
تراورتن کرمی	۳۷/۵۹	۱/۵	۴/۴۶	۷۶	۲۸۵۶/۸۴	۶/۳۲۸۸

جدول ۳- نتایج آزمایش های حفاری بر روی سنگ های مورد مطالعه

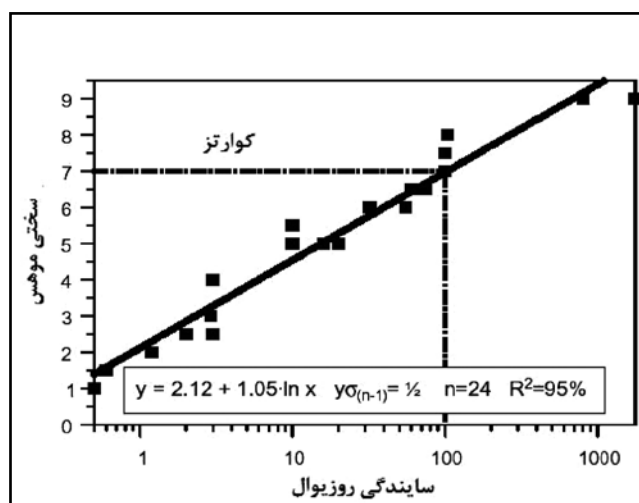
نام نمونه	سرعت حفاری (m/h)
هورنفلس	۳/۱۴۲۸
مونزونیت	۱/۹۱
تراورتن	۴/۸۴۳۵
ماسه سنگ	۰/۶۲۷
تراورتن	۳/۴۷۴
نقلین سینیت	۱/۳۰۰۲



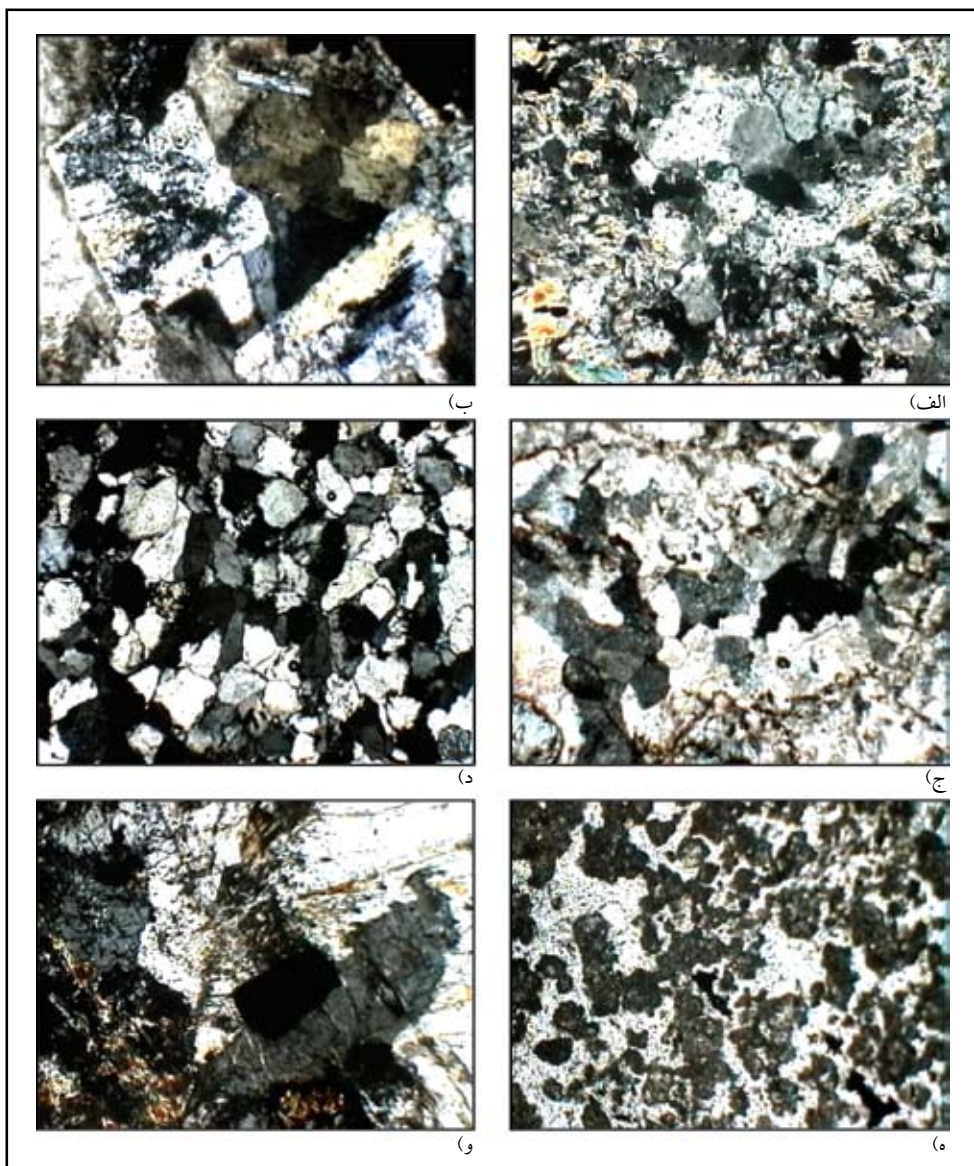
شکل ۲- نمودارهای محاسبه الف) شاخص سرعت حفاری (IRD) ب) شاخص سایش سرمته (BWI)



شکل ۴- موقعیت مکانی معادن نمونه برداری شده

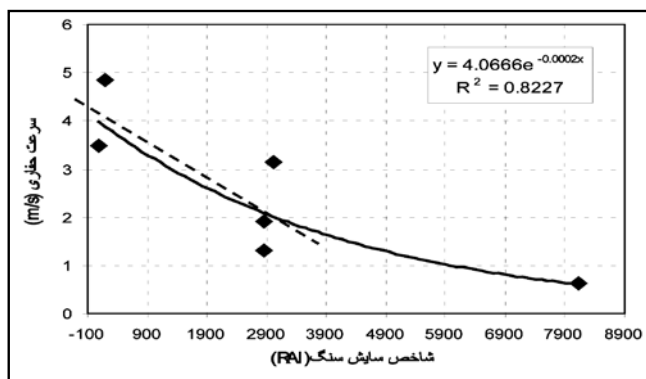


شکل ۳- رابطه تعیین میزان سایندگی رزویال سنگ با استفاده از سختی موهس (Thuro, 1997)

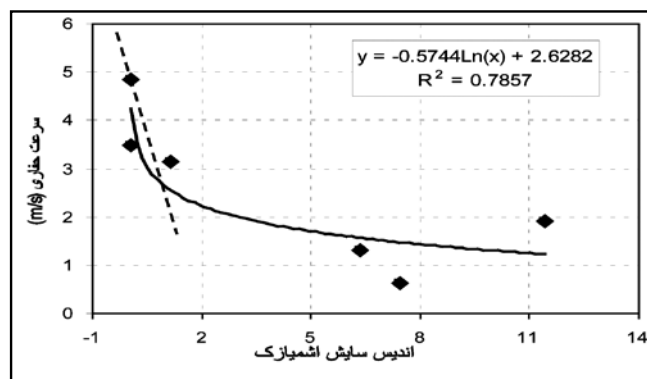


شکل ۵- نمونه‌ای از مقاطع نازک تهیه شده از سنگ‌های مورد مطالعه

الف) هورنفلس، معدن مس سونگون (د) ماسه‌سنگ، معدن سیلیس خواجه مرجان (ب) مونزونیت، معدن گرانیت اوچ مازی
مراغه (و) تراورتن، معدن خلخال (ج) تراورتن، معدن تراورتن سرخ آذرشهر (ه) نفلین سینیت، معدن نفلین سینیت سراب



شکل ۷- رابطه ریاضی بین شاخص سایش سنگ و سرعت حفاری
--- رابطه خطی در سنگ‌های با ساینده‌گی کم



شکل ۶- رابطه ریاضی بین ضریب سایش شیمازک و سرعت حفاری
--- رابطه خطی در سنگ‌های با ساینده‌گی کم

کتابخانه

اصانلو، م.، ۱۳۷۵- روش های حفاری، مرکز نشر صدرا.

علمی اسدزاده، گ.، و معماریان، ح.، ۱۳۸۵- بررسی ارتباط بین سایش و بافت سنگ در نمونه هایی از سنگ های ساختمانی ایران، نشریه دانشکده فنی، جلد ۴۰، شماره ۱، اردیبهشت.

References

- Akun, M. E. & Karpuz, C., 2005- Drillability studies of surface-set diamond drilling in Zonguldak region sandstones from Turkey, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 42, 473-479.
- Bruland, A., 1998- Hard rock tunnel boring-drillability test methods. Department of building and construction engineering, NTUN university, Norway..
- Drake, R., 2004-Bench drilling techniques and equipment selection manual, Ingersol-Rand Company.
- Ersoy, A. & Waller, M. D., 1995a- Textural characterization of rocks. *J. of Engineering Geology*, June, Vol. 39, Issues 3-4, 123-136.
- Ersoy, A. & Waller, M. D., 1995b- Prediction of drill-bit performance using multi-variable linear regression analysis. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Industry*, , Vol. 104, May-August, pp. A101-114.
- Hoseinie, S. H. & Ataei, M., 2007- A review of machine parameters influencing the drilling rate in mines, 7th International Scientific Conference on Modern Management of Mine Producing and Environmental Protection (SGEM2007), Albena Complex, Bulgaria.
- Hoseinie, S. H., Pourrahimian, Y. & Aghababaei, H., 2006- Analyzing and physical modeling of joints dipping effects on penetration rate of rotarydrillinginopenpitmines, 15thInternationalSymposiumonMinePlanningandEquipmentSelection(MPES2006), Torino, Italy. 1007-1013.
- Hoseinie, S. H., Aghababaei, H. & Pourrahimian, Y., 2008- Development of a new classification system for assessing of Rock mass Drillability index (RDi), *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 45, 1-10.
- Hugh, W. E., 1987- Handbook of Surface Mining, Society of Mining Engineering.
- Jimeno, C. L., Jimeno, E. L. & Carcedo, F. J. A., 1995- Drilling and blasting of rocks. A.A Balkema, Pub Rotterdam,
- Jung, S. J., Prisbrey, K. & Wu, G., 1994- Prediction of rock hardness and drillability using acoustic emission signatures during indentation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, Vol. 31, Issue 5, 561-567.
- Kahraman, S., 1999- Rotary and percussive drilling prediction using regression analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, , 36: 981-989
- Kahraman, S., Balci, C., Yazici, S. & Bilgin, N., 2000- Prediction of the penetration rate of rotary blast hole drilling using a new drillability index. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 37: 729-743.
- Kaiser, P. K. & McCreath, D. R., 1994- Rock mechanics considerations for drilled or bored excavations in hard rock. *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 9, Issue 4, October, 425-437.
- Li, X., Rupert, G., Summers, D. A., Santi, P. & Liu, D., 2000- Analysis of impact hammer rebound to estimate rock drillability, *Journal of Rock Mechanics & Rock Engineering*, 33(1), 1-13.
- Ozturk, A. C., Nasuf, A. & Bilgin, N., 2004- The assessment of rock cutability and physical and mechanical rock properties from a texture coefficient, *Journal of south African Institut of Mining and Metalorgy*, August.
- Plinninger, R., Spaun, G. & Thuro, K., 2002- Predicting tool wear in drill and blast, *Tunnels & Tunnelling International Magazine*, April.
- Rao, K. U. M. & Misra, B., 1998- Principles of rock drilling, Balkema, Rotterdam..
- Serradj, T., 1996- Method of assessment of rock drillability incorporating the Protodyakonov index. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Industry*, Vol. 105, Septemser-December, A175-A179.
- Singh, S. P., 1990- Rock drillability comparison by different methods. In: *Proceedings 2nd Int. Symposium on Mine Planning and Equipment Selection*, Calgary, 3-4 November, A.A Balkema, Pub Rotterdam,
- Singh, S. P., 1998- Ladouceur. M & Rouhi. F. Sources, implication and control of blasthole deviation. 7th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection. A.A Balkema, Pub Rotterdam.
- Singh, T. N., Gupta, A. R. & Sain, R., 2006- A comparative analysis of cognitive system for the prediction of drillability of rocks and wear factor. *Geotechnical and Geological Engineering*, 24: 299-312.
- Tanaino, A. S., 2005- Rock classification by drillability. Part 1: Analysis of the available classification. *Journal of Mining Science*, Vol. 41, No. 6, pp. 541-549.
- Thuro, K., 1997- Drillability prediction- geological influences in hard rack drill and blast tunneling. *Geol Runsch*, 86: 426-438.
- Thuro, K., Spaun, G., 1996- Introducing the destruction work as a new rock property of toughness referring to drillability in convetional drill and blast tunneling, *Eurock 96*, Turin, Italy,.
- Wijk, G., 1991- Rotary drilling prediction. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, Vol. 28, Issue 1, Jan, 35-42.
- Wilbur, L., 1982- Rock Tunnel Engineering Handbook. Edited by BickeL and kuesel, Publication of Van Norstrand Reinhold Compan