

بررسی ارتباط میان نرخ حفاری با شاخص های تردی

صالح قادرنژاد^۱، رضا میکائیل^۱، هادی حسینی^۲، محمد عطایی^۳ و گلسا صادق اسلام^{۱*}

۱- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی ارومیه

۲- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی همدان

۳- دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود

Sadegheslam.uut@gmail.com

چکیده

پیش بینی نرخ حفاری در فرایندهای مهندسی سنگ می تواند یکی از راه کارهای دست یابی به شرایط بهینه در زمینه حفاری باشد. حفاری و نرخ آن به عوامل مختلفی از جمله مشخصات فنی و عملیاتی دستگاه حفار و همچنین مشخصات ژئومکانیکی سنگ و غیره بستگی دارد. در این مقاله سعی شده که با استفاده از مطالعات آماری مدلی مناسب برای پیش بینی نرخ حفاری با توجه به شاخص های تردی ارائه شود. بدین منظور از ۸ معدن، نمونه های سنگی شامل ۴ نمونه سنگ سخت و ۴ نمونه سنگ نرم تهیه شد. سپس نمونه سنگ ها برای تعیین پارامترهای مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی غیر مستقیم مطابق با استانداردهای ISRM به آزمایشگاه مکانیک سنگ انتقال داده شدند. سپس نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی و صحرایی توسط نرم افزار SPSS مورد تحلیل و برازش قرار گرفتند. در این تحقیق سعی شده که بهترین رابطه ممکن از میان روابط ارائه شده به عنوان مدلی مناسب برای پیش بینی نرخ حفاری ارائه شود.

کلمات کلیدی: نرخ حفاری، شاخص تردی، مطالعات آماری

۱- مقدمه

به جرأت می توان گفت مهم ترین پارامترهای مؤثر بر سرعت حفاری مشخصات مربوط به ماده سنگ و توده سنگ مورد حفاری است. توده سنگ به عنوان محیط حفاری نقش بسیار اساسی در میزان سرعت حفاری، استهلاک مته و ماشین و هزینه های کلی حفاری دارد. بنابراین شناخت محیط حفاری و خصوصیات توده سنگ برجا کمک بسیار زیادی به انتخاب نوع سیستم حفاری، تعیین تعداد ماشین آلات، ارزیابی توان تولید معدن و پیش بینی سرعت حفاری خواهد نمود. تاکنون متخصصان متعددی نقش و تأثیر پارامترهای فیزیکی، مکانیکی و ساختاری توده سنگ را تشریح نموده و رابطه هر یک از این پارامترها را با سرعت حفاری مورد مطالعه قرار داده اند (Hoseinie et al, 2008, Ersoy & Waller, 1995a, Akun & Karpuz, 2005, Ersoy & Waller, 1995b, Hoseinie et al, 2007, Serradj, 1996, Kahraman, 1999, Kaiser & McCreath, 1994, Jung et al, 1994, Jimeno et al, 1995, Hoseinie et al, 2008, Singh, 1990, Singh et al, 1998, Singh et al, 2006, Thuro, 1997, Tanaino, 2005).

با توجه به تعدد معادن کوچک و متوسط در کشورمان، روش حفاری ضربه ای- دورانی پنوماتیکی با توجه به هزینه های سرمایه ای و هزینه های عملیاتی پائین همچنان در کشور به طور گسترده به کار برده می شود. از آن جایی که ارزیابی پارامترهای سنگ و شناسایی کمیت تأثیر آنها بر سرعت حفاری می تواند راه گشای خوبی برای انتخاب ماشین و سرمته مناسب در این معادن باشد، لذا در این تحقیق سعی شده تا با انجام مطالعات جامع آزمایشگاهی ارتباط ریاضی بین سرعت حفاری ضربه ای- دورانی پنوماتیکی چکش بالا و شاخص های تردی با استفاده از مطالعات آماری مورد بررسی قرار گرفته شود.

۲- شاخص های تردی

به طور کلی شکنندگی را می توان به حالتی از سنگ اطلاق کرد که تحت شرایطی، قابلیت تاب آوری آن زیر بار با افزایش دگرشکلی کاهش یابد. شکنندگی را می توان با توجه به شیب قسمت افتان منحنی تنش کرنش تعیین کرد. هر چه این بخش پرشیب تر، جسم شکننده تر خواهد بود. از دیدگاه محققین مختلف تعاریف متعددی از شکنندگی ارائه شده است. (Yarali and soyer ۲۰۱۱, Hetenyi, ۱۹۶۶, Ramsey, ۱۹۶۷, Obert and Duvall, ۱۹۶۷, Coates and Parsons, ۱۹۶۶, Aubertin et al, ۱۹۹۴, Goktan, ۱۹۹۱, Kahraman, ۲۰۰۲, Kahraman and Altindag, ۲۰۰۴, Kahraman et al, ۲۰۰۳a, b, Gunaydin et al, ۲۰۰۴, Yilmaz et al, ۲۰۰۸, Mikaeil et al, ۲۰۱۱). برای تعیین شکنندگی سنگ ها شاخص های مختلفی توسط محققین ارائه شده است.

$$B_1 = \frac{\sigma_c}{\sigma_t} \quad (1)$$

$$B_2 = \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_t + \sigma_c} \quad (2)$$

$$B_3 = \frac{\sigma_c \times \sigma_t}{2} \quad (3)$$

$$B_4 = (\sigma_c \times \sigma_t)^{0.72} \quad (4)$$

در روابط ارائه شده B_1, B_2, B_3, B_4 شاخص های تردی، σ_c و σ_t به ترتیب معرف مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی غیر مستقیم بر حسب MPa می باشند.

۳- جمع آوری نمونه از معادن

به منظور انجام مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه های سنگی، در مجموع از سنگ های موجود در هفت معدن و نیز یکی از شیروانی های سنگی مشرف به اتوبان شمالی تبریز نمونه برداری به عمل آمد. در جدول ۱ اسامی معادن نمونه برداری شده نشان داده شده است. در انتخاب این معادن نوع سنگ از اهمیت بسیار زیادی برخوردار بوده است و هدف این بوده است که از انواع سنگ های نرم غیرساینده تا سنگ های سخت ساینده در آزمایش های انجام شده گنجانده شود. در مجموع از هر معدن یک نمونه با ابعاد متوسط $30 \times 40 \times 30$ سانتی متر و به وزن تقریبی ۵۰ کیلوگرم و تعدادی نمونه سنگی به ترتیب برای حفاری و نیز انجام آزمایش های مکانیک سنگی انتخاب و به آزمایشگاه منتقل شدند.

جدول ۱- اسامی معادن نمونه برداری شده و موقعیت مکانی آن ها

نام سنگ	نام معدن	موقعیت مکانی
مونزونیت	معدن مس سونگون	شرق تبریز ۱۲۰ کیلومتری شمال
گرانیت	معدن اوچ مازی مراغه	۹۳ کیلومتری جنوب شرقی تبریز
سنگ آهک سیاه	معدن آهک سیمان صوفیان	غرب تبریز ۳۱ کیلومتری شمال
تراورتن کرمی	معدن تراورتن خلخال	۹۰ کیلومتری جنوب شرقی اردبیل
تراورتن قرمز	معدن تراورتن سردار آباد	۳۷ کیلومتری جنوب شرقی تبریز
سیلیس	معدن خواجه مرجان	غربی تبریز ۱۵ کیلومتری شمال
نفلین سینیت	معدن رزگانه سراب	۸۵ کیلومتری شرق تبریز
ماسه سنگ آهکی	بزرگراه پاسداران تبریز	شمال تبریز

۴- آزمایش های انجام شده

۴-۱- آزمایش های مکانیک سنگ

پس از تهیه نمونه های مکانیک سنگی، کلیه نمونه ها به صورت کاملاً دقیق توسط کیسه های پلاستیکی بسته بندی شده و پس از قرار گرفتن در جعبه های چوبی به آزمایشگاه منتقل شدند. با توجه به حجم آزمایش ها و دقت مورد نیاز، کلیه آزمایش ها تحت استانداردهای انجمن بین المللی مکانیک سنگ و با دقت بالا انجام گرفت (معماریان، ۱۳۸۱، فهیمی فر، ۱۳۸۰). با توجه به پارامترهای مورد استفاده در این تحقیق، در مجموع آزمایش های مقاومت فشاری تک محوری (UCS)، آزمایش کشش غیر مستقیم (BTS) بر روی نمونه ها انجام شد. نتایج آزمایش های مکانیک سنگی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- نتایج آزمایش های مکانیک سنگی

نام سنگ	UCS(MPa)	BTS(MPa)
مونزونیت	۵۷	۴/۲۱
گرانیت	۸۷/۵	۵/۳۶
سنگ آهک سیاه	۵۱	۲/۲۳
تراورتن کرمی	۵۰/۵	۲/۴
تراورتن قرمز	۵۳	۱/۴۵
سیلیس	۱۱۲	۴/۱۸
نفلین سینیت	۷۶	۴/۴۶
ماسه سنگ آهکی	۱۴	۰/۷۸

۴-۲- آزمایش های حفاری

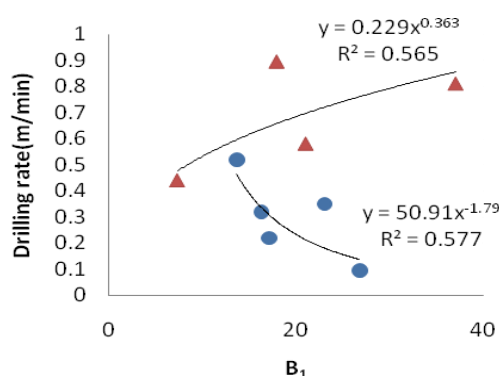
در کنار انجام آزمون های آزمایشگاهی، ۱۳ نمونه حجیم از سنگ های مورد مطالعه برای انجام حفاری به معدن سنگ آهک سیمان صوفیان منتقل شدند. در معدن، تمامی نمونه ها در یک کانال به عمق متوسط ۰/۵ متر و عرض ۰/۸ متر توسط بتن دهن شده و تنها سطح بالایی نمونه ها برای انجام حفاری به صورت آزاد باقی گذاشته شد. پس از آماده سازی و مراحل تحکیم نمونه ها در بتن که تقریباً یک هفته به طول انجامید، کلیه سنگ ها توسط دستگاه حفاری ضربه ای- دورانی با سرته تیغه ای از نوع ضربدری و با قطر سه اینچ مورد حفاری قرار گرفتند. در هر نوع از سنگ های مورد مطالعه به طور میانگین تعداد پنج چال به عمق متوسط ۱۰ سانتی متر حفر شد و میانگین زمان حفر این چال ها و سرعت حفاری در آن سنگ محاسبه شد. نتایج مطالعات حفاری در جدول ۳ آورده شده است.

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

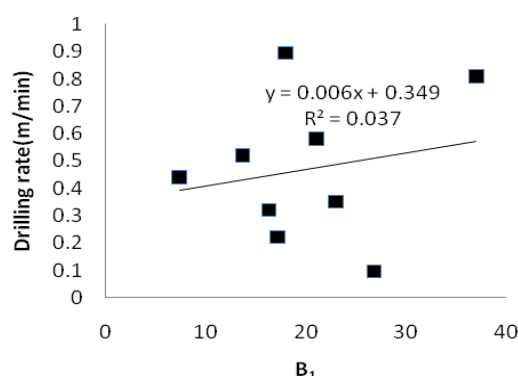
نام نمونه	سرعت حفاری (m/min)
مونزونیت	۰/۵۲
گرانیت	۰/۳۲
سنگ آهک سیاه	۰/۴۴
تراورتن کرمی	۰/۵۸
تراورتن قرمز	۰/۸۱
سیلیس	۰/۰۹۵
نفلین سینیت	۰/۲۲
ماسه سنگ	۱/۲۸

۵- بررسی ارتباط میان نرخ حفاری شاخص های تردی

در این بخش از تحقیق مطالعات آماری بر روی نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی و صحرایی جهت ارائه رابطه بین نرخ حفاری و شاخص های تردی توسط نرم افزار SPSS انجام پذیرفت. تحلیل های انجام شده در نرم افزار SPSS بصورت برازش های تک متغیره صورت گرفت. در بخش نخست، رابطه ی نرخ حفاری برای کلیه نمونه های سنگی با شاخص های تردی مورد بررسی قرار گرفت. در این بخش بهترین تابع (انواع توابع ریاضی شامل توابع توانی، نمایی، لگاریتمی و خطی) با بالاترین ضریب همبستگی تعیین شد. شکل های ۱ و ۲ ارتباط میان شاخص تردی B_1 را با نرخ حفاری در نمونه سنگ های مورد بررسی در دو بخش کلی و دو بخش مجزای نمونه سنگ های سخت و نرم نشان می دهند. نتایج بررسی ها نشان می دهد که ارتباط ضعیفی میان این شاخص تردی و کل نمونه سنگ ها در نمودار شکل ۱ برقرار می باشد. در حالیکه در نمودار شکل ۲، این ارتباط از دقت و همبستگی بهتری در دو گروه مجزا برخوردار می باشد.

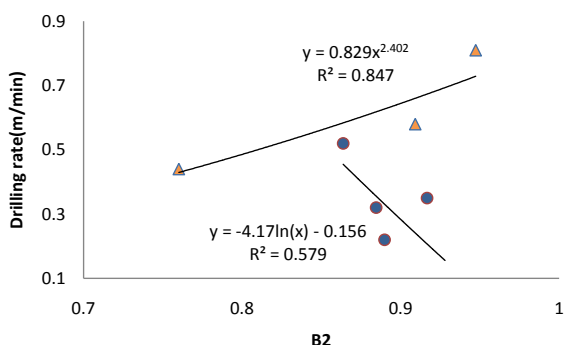


شکل ۲- ارتباط بین شاخص تردی B_1 و نرخ حفاری برای دو دسته سنگ سخت و نرم

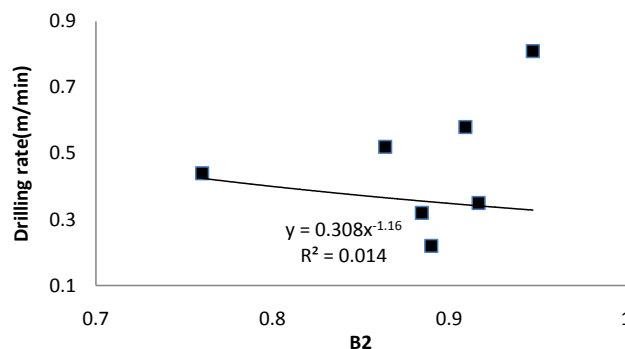


شکل ۱- ارتباط بین شاخص تردی B_1 و نرخ حفاری برای کل نمونه سنگ ها

در ادامه ارتباط میان شاخص تردی B_2 و نرخ حفاری برای کل نمونه سنگ ها مورد بررسی قرار گرفت و بهترین رابطه ممکن که می توان بر داده ها برازش کرد تعیین شد. نتایج حاصل از بررسی ها نشان داد که رابطه ی خوبی میان این شاخص تردی و نرخ حفاری در تمامی داده ها برقرار نیست. مشابه مرحله قبل نمونه های سنگی در دو دسته سخت و نرم مورد بررسی قرار گرفتند. روابط بدست آمده برای نمونه های سنگی نرم و سخت، دارای همبستگی خوبی بودند. روند تغییرات و روابط ارائه شده برای شاخص تردی B_2 و نرخ حفاری در شکل های ۳ و ۴ نشان داده شده است.

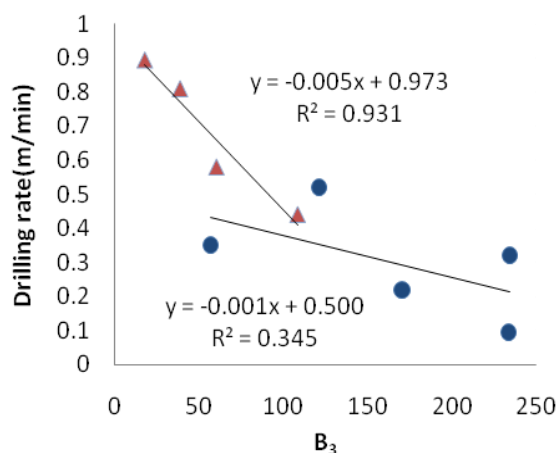


شکل ۲ - ارتباط بین شاخص تردی B_2 و نرخ حفاری برای دو دسته سنگ سخت و نرم

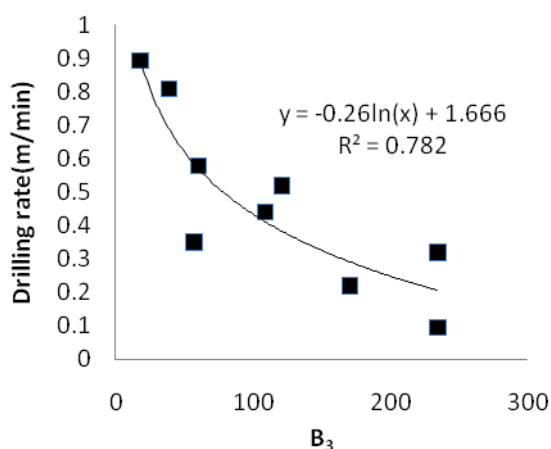


شکل ۳ - ارتباط بین شاخص تردی B_2 و نرخ حفاری برای کل نمونه سنگ ها

بطور مشابه رابطه‌ی بین نرخ حفاری و شاخص تردی B_2 برای کل نمونه‌های سنگی نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده از این بخش برخلاف نتایج قبلی از دقت مناسبی برخوردار بودند. همچنین روابط بدست آمده برای نمونه سنگ‌های نرم و سخت نیز از دقت بیشتری برخوردار بودند به طوری که برای کل داده‌ها با افزایش شاخص تردی B_2 نرخ حفاری کاهش پیدا کرده که این نتیجه به واقعیت نیز نزدیک تر می‌باشد. روابط ارائه شده برای شاخص تردی B_2 و نرخ حفاری در شکل‌های ۵ و ۶ نمایش داده شده‌اند.

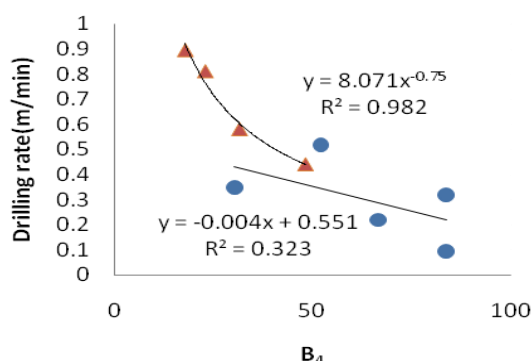


شکل ۴ - ارتباط بین شاخص تردی B_3 و نرخ حفاری برای گروه سنگ نرم و سخت

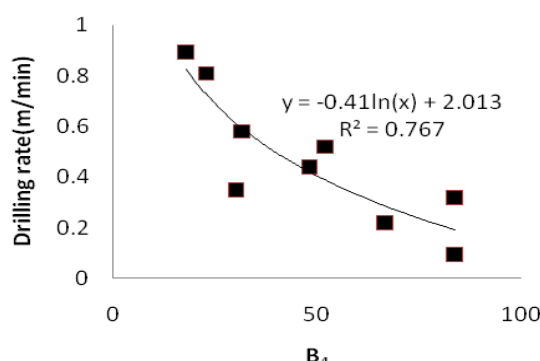


شکل ۵ - ارتباط بین شاخص تردی B_3 و نرخ حفاری برای کل نمونه سنگ ها

در نهایت ارتباط بین شاخص تردی B_3 و نرخ حفاری مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی ابتدا ارتباط شاخص تردی B_3 و نرخ حفاری برای کل نمونه سنگ‌ها مورد بررسی قرار گرفت (که همانند مرحله قبل نتایج از دقت قابل قبولی برخوردار بودند) و در ادامه بررسی‌ها در دو گروه مجزا، مشابه مراحل قبل انجام شد. نتایج حاصل از این بررسی‌ها و روابط بدست آمده از تحلیل‌های آماری در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸ - ارتباط بین شاخص تردی B_4 و نرخ حفاری برای دو دسته سنگ نرم و سخت



شکل ۷ - ارتباط بین شاخص تردی B_4 و نرخ حفاری برای کل نمونه سنگ‌ها

بررسی‌های انجام شده در این تحقیق نشان داد که ارتباط خوبی میان شاخص‌های تردی B_3 و B_4 با نرخ حفاری برقرار بوده و منطق علمی مسئله نیز در روند تغییرات رعایت شده است. بدین ترتیب روابط ۵ تا ۸ را می‌توان به عنوان مناسب‌ترین روابط (از دیدگاه آماری و رعایت منطق علمی موضوع)، برای پیش بینی نرخ حفاری معرفی کرد.

$$D_T = -0.261 \times \ln(B_3) + 1.666 \quad R^2 = 0.782 \quad (5)$$

$$D_S = 0.005 \times B_3 + 0.973 \quad R^2 = 0.931 \quad (6)$$

$$D_T = -0.41 \times \ln(B_4) + 2.013 \quad R^2 = 0.767 \quad (7)$$

$$D_S = 8.071 \times B_4^{-0.75} \quad R^2 = 0.982 \quad (8)$$

روابط ارائه شده، D_T معرف نرخ حفاری (نرخ حفاری برای دو گروه نمونه سنگ‌های مورد مطالعه)، D_S معرف نرخ حفاری برای نمونه سنگ‌های نرم بر حسب متر بر دقیقه، B_3 و B_4 به ترتیب معرف شاخص‌های تردی می‌باشند.

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق سعی شد که با انجام آزمایش‌های دقیق و مطالعات آماری ارتباط بین نرخ حفاری و شاخص‌های تردی مورد بررسی قرا گیرد بدین منظور از ۸ نمونه سنگ در داخل کشور نمونه برداری صورت گرفت. شاخص‌های تردی هر نمونه سنگ در آزمایشگاه مکانیک سنگ با بالاترین دقت ممکن محاسبه شدند. در ادامه ارتباط میان شاخص‌های تردی و نرخ حفاری را با استفاده از برازش‌های تک متغیره مورد بررسی قرار گرفت و بهترین مدل از میان مدل‌های توانی، نمایی، لگاریتمی و خطی برای پیش بینی و بررسی این ارتباط انتخاب شد. از بین روابط ارائه شده شاخص‌های تردی B_1 , B_2 دارای پائین‌ترین میزان همبستگی و در نقطه مقابل شاخص‌های تردی B_3 , B_4 دارای ضریب همبستگی مناسبی بودند. در انتها از میان روابط بدست آمده بهترین روابط برای پیش بینی قابلیت حفاری ارائه شدند. با استفاده از این روابط می‌توان با دقت بالایی میزان نرخ حفاری نمونه سنگ‌های مختلف را مورد بررسی و پیش بینی قرار داد.

منابع و مراجع

فهیمی‌فر، ا، سروش، ح، ۱۳۸۰، آزمایش‌های مکانیک سنگ، مبانی نظری و استانداردها (جلد اول: آزمون‌های آزمایشگاهی)، انتشارات شرکت سهامی آزمایشگاه‌های فنی و مکانیک خاک.

معماریان، حسین، ۱۳۸۱، زمین شناسی مهندسی و ژئوتکنیک، انتشارات دانشگاه تهران.

- Akun, M. E. & Karpuz, C. ۲۰۰۵, Drillability studies of surface-set diamond drilling in Zonguldak region sandstones from Turkey, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, ۴۲, ۴۷۳-۴۷۹.
- Aubertin M, Gill DE, Simon R, ۱۹۹۴. On the use of the brittleness index modified (BIM) to estimate the post-peak behaviour of rocks, *rock mechanics*. In: Nelson and Laubach (eds) Balkema, pp. ۹۴۵-۹۵۲.
- Coates, D.F. ۱۹۶۶. Experimental criteria for classification of rock substances, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, ۳, ۱۸۱-۱۸۹.
- Ersoy, A. & Waller, M. D. ۱۹۹۵a, Textural characterization of rocks. *J. of Engineering Geology*, June, Vol. ۳۹, Issues ۳-۴, ۱۲۳-۱۳۶.
- Ersoy, A. & Waller, M.D. ۱۹۹۵b, Prediction of drill-bit performance using multi-variable linear regression analysis. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Industry*, , Vol. ۱۰۴, May-August, pp. A۱۰۱-۱۱۴.
- Goktan R.M. ۱۹۹۱. Brittleness and micro-scale rock cutting efficiency, *Mining Science and Technology*, ۱۳, pp. ۲۳۷-۲۴۱.
- Gunaydin O., Kahraman S., Fener M., ۲۰۰۴. Sawability prediction of carbonate rocks from brittleness indexes. *J. South Afr. Inst. Min. Metall.* ۱۰۴, ۲۳۹-۲۴۴.
- Hetenyi M. ۱۹۶۶. *Handbook of Experimental Stress Analysis*, p. ۱۵, John Wiley, NewYork.
- Hoseinie S. H. and Ataei M., ۲۰۰۷, A review of machine parameters influencing the drilling rate in mines, ۷th International Scientific Conference on Modern Management of Mine Producing and Environmental Protection (SGEM), Albena Complex, Bulgaria.
- Hoseinie, S.H, Aghababaei. H, Pourrahimian, Y. ۲۰۰۸, Development of a new classification system for assessing of Rock mass Drillability index (RDi), *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, ۴۵, ۱-۱۰.
- Jimeno, C. L, Jimeno. E. L. & Carcedo, F. J. A. ۱۹۹۵, *Drilling and blasting of rocks*. A.A Balkema, Pub Rotterdam.
- Jung. S. J, Prisdrey. K & Wu. G. ۱۹۹۴, Prediction of rock hardness and drillability using acoustic emission signatures during indentation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, Vol. ۳۱, Issue ۵, ۵۶۱-۵۶۷.
- Kahraman. S. ۱۹۹۹, Rotary and percussive drilling prediction using regression analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, , ۳۶: ۹۸۱-۹۸۹.
- Kahraman, S. ۲۰۰۲. Correlation of TBM and drilling machine performances with rock brittleness, *Engineering Geology*, ۶۵(h), ۲۶۹-۲۸۳.
- Kahraman S, Bilgin N, Feridunoglu C, ۲۰۰۳a. Dominant rock properties affecting the penetration rate of percussive drills. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, ۴۰: ۷۱۱-۷۲۳.
- Kahraman S, Gunaydin O, Fener M, Bilgin N, ۲۰۰۳b. Correlation between Los Angeles abrasion loss and uniaxial compressive strength. In: *Proceedings of International Symposium on Industrial Minerals and Building Stones*, Istanbul, Turkey, pp. ۵۷۷-۵۸۱.
- Mikaeil R., M. Ataei, R. Yousefi, ۲۰۱۱b. Correlation of production rate of ornamental stone with rock brittleness indexes. *Arabian Journal of Geosciences*.
- Mikaeil R., Ozcelik Y., Ataei M., Yousefi R., ۲۰۱۱d. Correlation of Specific Ampere Draw with Rock Brittleness Indexes in Rock Sawing Process. *Arch. Min. Sci.*, Vol. ۵۶, No ۴, p. ۷۴۱-۷۵۲.
- Obert, L. and DUVALL, W.I. ۱۹۶۷. *Rock mechanics and the design of structures in rock*, John Wiley, NewYork. p. ۲۷۸.
- Serradj, T. ۱۹۹۶, Method of assessment of rock drillability incorporating the Protodyakonov index. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Industry*, Vol. ۱۰۵, Septemser-December, A۱۷۵-A۱۷۹.
- Singh, S. P. ۱۹۹۰. Rock drillability comparison by different methods. In: *Proceedings 2nd Int. Symposium on Mine Planning and Equipment Selection*, Calgary, ۳-۴ November, A.A Balkema, Pub Rotterdam,
- Singh S. P, ۱۹۹۸. Ladouceur. M & Rouhi. F. Sources, implication and control of blasthole deviation. ۷th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection. A.A Balkema, Pub Rotterdam.



- Singh, T. N, Gupta, A. R. & Sain, R. ۲۰۰۶, A comparative analysis of cognitive system for the prediction of drillability of rocks and wear factor. *Geotechnical and Geological Engineering*, ۲۴: ۲۹۹-۳۱۲.
- Tanaino, A. S., ۲۰۰۵, Rock classification by drillability. Part ۱: Analysis of the available classification. *Journal of Mining Science*, Vol. ۴۱, No. ۶, pp. ۵۴۱-۵۴۹.
- Thuro, K, ۱۹۹۷. Drillability prediction- geological influences in hard rock drill and blast tunneling. *Geol Rundsch*, ۸۶: ۴۲۶-۴۳۸.
- Yarali O., ۲۰۰۷. Investigation of the relations between rock brittleness and drilling rate index. In: *Proceedings of the ۲۰th International Mining Congress of Turkey*, (in Turkish), Ankara, Turkey, pp. ۲۱۷-۲۲۴.
- Yarali O. and Soyer E. ۲۰۱۱. The effect of mechanical rock properties and brittleness on drillability. *Scientific Research and Essays*.
- Yilmaz NG, Karaca Z, Goktan RM, Akal C., ۲۰۰۸. Relative brittleness characterization of some selected granitic building stones: influence of mineral grain size. *Constr. Build. Mater.*, ۲۳(۱): ۳۷۰-۳۷۵.