



تخمین مقدار شکنندگی S20 با استفاده از خصوصیات مکانیکی نمونه‌های سنگهای آذرین (استان همدان)

حسن بحرانی^۱، مجتبی حیدری (نویسنده مسئول)^۲، اشرف ترکیان^۳

^۱ گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان hassanbahrany@gmail.com

^۲ گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان heidarim-enggeol@yahoo.com

^۳ گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان a-torkian@basu.ac.ir

چکیده

یکی از مهمترین خواص مکانیکی سنگ‌ها که در عملیات حفاری و سازه‌های زیرزمینی مانند تونل از اهمیت بسزایی برخوردار است، شکنندگی سنگ می‌باشد. در حال حاضر روش استاندارد برای اندازه‌گیری مستقیم شکنندگی سنگ در دسترس نمی‌باشد. به همین دلیل محققین، روابط تجربی متفاوتی را برای اندازه‌گیری و تعیین میزان شکنندگی سنگ‌ها ارائه کرده‌اند. نتایج حاصل از این روش‌ها تا حدود زیادی با هم اختلاف دارند. با این حال اکثر محققین، شکنندگی را تابعی از مقاومت فشاری تک محوری (UCS) و مقاومت کششی سنگ (BTS) می‌دانند. در این پژوهش برای تخمین مقدار شکنندگی S20 از خصوصیات مکانیکی (مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی برزیلی و مقاومت بار نقطه‌ای) و دینامیکی (سرعت موج فشاری) ۴ نمونه از سنگ‌های آذرین شامل سنگ‌های گرانیتوئیدی و مافیک- حدواسط استان همدان استفاده شده است. در نهایت با استفاده از آنالیز رگرسیونی ساده و چندگانه روابطی بین شاخص شکنندگی S20 با ضرایب شکنندگی (B_1, B_2, B_3, B_4 و B_5) استخراج گردید. نتایج حاصل نشان داد که مقاومت کششی برزیلی، بار نقطه‌ای و ضرایب شکنندگی B_3 و B_4 برای پیش بینی مقدار شکنندگی S20 مفیدتر هستند. آنالیز رگرسیونی ساده خطی، بیشترین ضریب تعیین ($R^2=0.967$) را بین مقدار شکنندگی S20 و B_3 نشان داد. همچنین آنالیز رگرسیونی ساده غیر خطی نشان داد که بیشترین همبستگی میان مقاومت بار نقطه‌ای با مقدار شکنندگی S20 با ضریب تعیین ($R^2=0.998$) می‌باشد. نتایج حاصل از رگرسیون چندگانه خطی نشان داد که پارامترهای مقاومت بار نقطه‌ای و B_3 با ضریب تعیین ($R^2=0.999$) و مقدار آزمون F ($F=498.919$) برای تخمین مقدار شکنندگی S20 مفیدتر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی

آزمون شکنندگی S20، مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت کششی غیر مستقیم، رگرسیون چندگانه، سنگ‌های آذرین



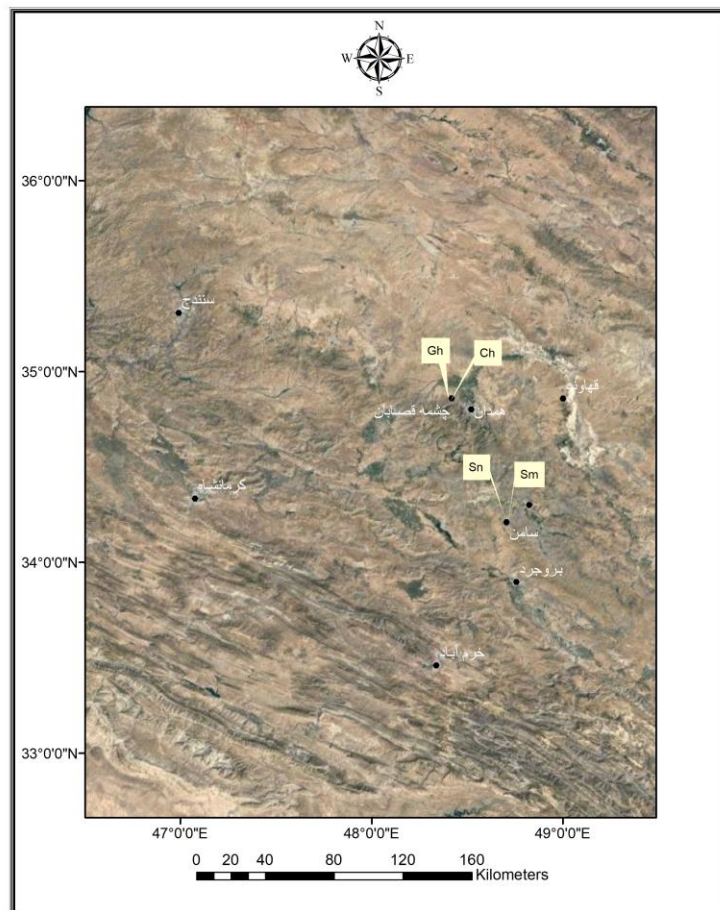
۱. مقدمه

شکندگی یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های ذاتی سنگ است که در پروژه‌های کاربردی مکانیک سنگ و سازه‌های زیرزمینی مانند حفر تونل به کمک ماشین حفاری تونل تمام مقطع (TBM) دارای اهمیت بسزایی است [1]. با این حال به دلیل وجود مشکلات در ارائه مفهوم شکندگی سنگ و روش دقیق اندازه‌گیری آن بین محققین مختلف، استفاده کاربردی آن در حفاری سنگ‌ها محقق نشده است [2]. از دهه ۱۹۷۰ تاکنون مفهوم شکندگی سنگ توسط محققین بسیاری توصیف شده است. Hetenyi (1996) شکندگی را به عنوان شکل پذیری نبودن تعریف نمود [3]. Hucka and Das (1974) برای توصیف شکندگی پیشنهاد کردند سنگ‌هایی که مقادیر کشیدگی کم، زاویه اصطکاک داخلی بالا، شکست، تشکیل ترک در بلورها و نسبت‌های مقاومت فشاری تک محوری به مقاومت کششی بالایی دارند شکندگی بالاتری را نشان می‌دهد [4]. Goktan (1991) اظهار داشت که سنگ شکنده باید انرژی ویژه کمتری از سنگی که شکندگی پایین‌تری دارد، داشته باشد [5]. عموماً اندازه دانه نیز در سنگ‌های گرانیتی بر روی شکندگی موثر است و دانه‌هایی با اندازه‌های بزرگتر در مقایسه با دانه‌های با اندازه کوچکتر نسبت به شکندگی از حساسیت بیشتری برخوردار هستند و با انرژی کمتری می‌شکنند [6]. Howell (1960) شکندگی را به عنوان خاصیتی از ماده سنگی که شکست یا گسیختگی در آن بدون تغییر شکل پلاستیک یا مقادیر کم آن رخ می‌دهد تعریف کرده است. اخیراً با توسعه ماشین‌های مکانیزه حفاری تونل (TBM)، تحقیقاتی توسط محققین زیادی در مورد مکانیزم خردشدگی و برش سنگ توسط این ماشین‌ها انجام داده‌اند اما تأثیر شکندگی سنگ در این تحقیقات به طور دقیق مشخص نشده است و فقط فرضیات آنها بر پایه شکنده بودن سنگ استوار بوده است [7]. مطالعات آزمایشگاهی و عملکرد TBM نشان دهنده آن است که در سنگ‌های شکنده‌تر، مکانیزم ایجاد ترک و خردشدگی سریعتر صورت می‌گیرد [8]. برای تعیین شکندگی سنگ‌ها روش استاندارد ارائه نشده است، ولی با روش‌های غیر مستقیم می‌توان برای تعیین مفاهیم شکندگی سنگ اقدام نمود. Altindag (2002) پیشنهاد کرد مفاهیم شکندگی به عنوان تابعی از مقاومت فشاری تک محوری (UCS) و مقاومت کششی غیر مستقیم (برزلی) سنگ بدست آید [9]. این دو آزمایش به صورت مستقیم و غیر مستقیم بر اساس استانداردهای ASTM (1986b) و ISRM (1978b) تعیین می‌شوند [10 و 11].

روش آزمایش شکندگی (S20) مورد استفاده توسط NTNU/SINTEF، در ابتدا در سوئد توسط مترن و هلمر (۱۹۴۳) ارائه شده است. این آزمایش ابتدا جهت تعیین خواص مقاومتی دانه‌ها طراحی و انجام شد، اما با ایجاد اصلاحاتی جهت مقاصد مختلف از قبیل تعیین حفرپذیری سنگ توسعه داده شد. برای اندازه‌گیری شکندگی، عوامل موثر دیگری از جمله ترکیب کانی‌شناسی، تنش برجا و پارامترهای مقاومتی باید مورد توجه قرار گیرد [12]. عقلی و همکاران با بررسی شکندگی تعدادی از سنگ‌های آذرین پیشنهاد کردند یک روند منظم بین چگالی خشک، سرعت موج p ، سختی چکش اشمیت با مقدار شکندگی سنگ‌های مورد مطالعه وجود دارد و سنگ‌هایی که دارای سختی متوسط هستند از میزان شکندگی بالاتری برخوردار هستند [13]. در این مقاله به کمک پارامترهای مکانیکی (مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی غیر مستقیم، بار نقطه‌ای و سختی اشمیت) و دینامیکی (سرعت موج فشاری) روابطی برای تخمین شاخص شکندگی S20 ارائه گردیده است.

۲. مواد و روش‌ها

در این آزمایش تعداد ۴ نمونه بلوک سنگی آذرین از شهرستان همدان و ملایر برداشت شده است که موقعیت برداشت آن‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. نمونه‌ها بدون هوازدگی و فاقد شکستگی بوده‌اند. نمونه‌ها پس از جمع‌آوری برای مغزه‌گیری به آزمایشگاه منتقل شده‌اند. از نمونه‌ها مغزه‌هایی با قطر NX (۵۴ میلی‌متر) تهیه شد. پس از آن مغزه‌ها برای انجام آزمایشات مکانیکی و دینامیکی برش داده شدند. آزمایش‌های خصوصیات مکانیکی شامل: مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی غیر مستقیم (برزلی)، سختی اشمیت، بار نقطه‌ای و آزمایش دینامیکی شامل: سرعت موج فشاری انجام شد. برای تجزیه و تحلیل نتایج از نرم افزار SPSS ورژن ۲۶ استفاده گردید.



شکل ۱. موقعیت برداشت نمونه‌های مورد مطالعه (اقتباس از گوگل ارث)

۱.۲. آزمایش‌های تعیین خصوصیات مهندسی

۱.۱.۲. تعیین خواص دینامیکی

از عوامل تاثیرگذار بر سرعت موج در سنگ‌ها می‌توان به درصد رطوبت، نوع کانی‌ها، بافت، ساخت، درجه حرارت، چگالی، تخلخل، اندازه و شکل بلورها، ناهمسانگردی، درجه اشباع، خواص درزه‌ها (شیب، امتداد، زبری، مواد پرکننده و آب) و تنش‌های وارده بر سنگ اشاره کرد [14]. برای انجام آزمایش سرعت موج نمونه‌های سنگ مورد مطالعه، ابتدا دستگاه کالیبره شد و سپس سرعت موج فشاری مغزه‌های تهیه شده در حالت خشک و اشباع و براساس استاندارد (ISRM, 1987) تعیین گردید. (شکل ۲)



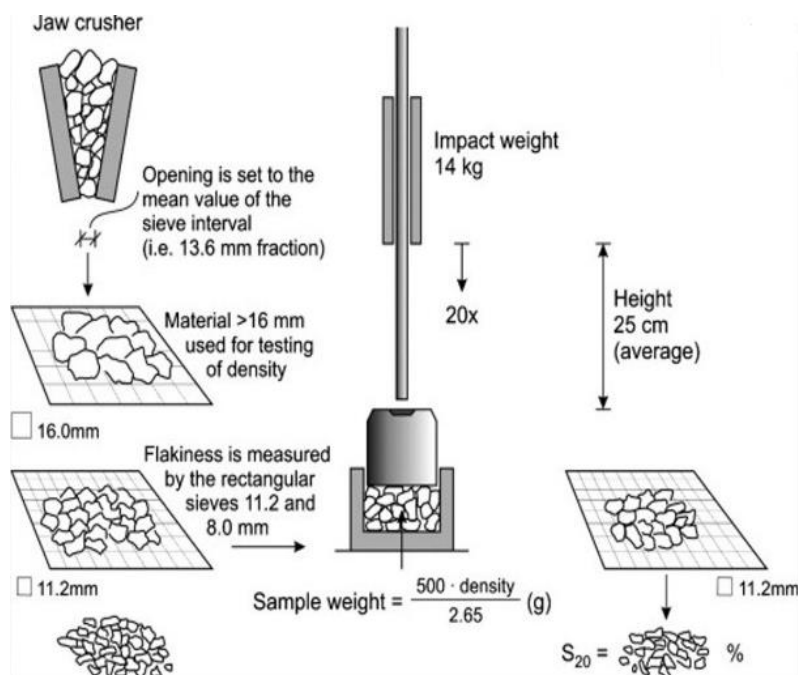
شکل ۲. تصویر دستگاه آزمایش تعیین سرعت امواج فراصوتی نمونه‌ها

۲.۱.۲. تعیین خواص مکانیکی

مهم‌ترین بخش در پروژه‌های زمین‌شناسی مهندسی، بررسی و تعیین خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها می‌باشد [15]. از مهم‌ترین عواملی که بر خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها اثر می‌گذارد می‌توان به ترکیب کانی‌شناسی و بافت، اندازه و شکل کانی‌ها، میزان خلل و فرج، شکستگی‌های میکروسکوپی، درجه آلتراسیون کانی‌ها، درجه قفل شدگی و نوع تماس بین دانه‌ها اشاره کرد [16]. در این مقاله آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوره (UCS)، مقاومت کششی غیر مستقیم و بار نقطه‌ای بر اساس استاندارد (ISRM, 2007) انجام شد.

۲.۲. آزمایش شکنندگی S20

آزمایش شکنندگی اندازه‌گیری خوبی از مقاومت سنگ در برابر خرد شدن در اثر ضربات مکرر نشان می‌دهد. این آزمایش توسط مترن و هلمر در سوئد در سال ۱۹۴۳ ساخته شد [17]. وزن مورد نیاز برای انجام آزمایش شکنندگی ۵۰۰ گرم می‌باشد. روش آزمایش بدین صورت می‌باشد که ابتدا خرده سنگ‌های عبوری از الک ۱۶ میلی‌متر و باقیمانده بر روی الک ۱۱/۲ میلی‌متر تفکیک می‌شوند. سپس با اعمال ۲۰ ضربه توسط وزنه ۱۴ کیلوگرمی از فاصله ۱۵ سانتی‌متری آزمایش انجام شد. در آخر درصد ذرات عبوری از الک مربعی ۱۱/۲ میلی‌متری به عنوان مقدار شکنندگی S20 در نظر گرفته شد [18]. یک طرح کلی از آزمایش در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. طرح کلی آزمایش تعیین شکنندگی S20

علاوه بر این محققین مختلفی تاکنون روابط تجربی متفاوتی را برای تعیین میزان شکنندگی سنگ‌ها ارائه کرده‌اند. در جدول ۱ برخی از روابط ارائه شده توسط محققین مختلف ارائه شده است.

جدول ۱. روابط ارائه شده توسط محققین مختلف برای تعیین میزان شکنندگی سنگ‌ها

شماره رابطه	محققین	رابطه
۱	هوکا و داس (۱۹۷۴)	$B_1 = \frac{\sigma_c}{\sigma_r}$
۲	هوکا و داس (۱۹۷۴)	$B_1 = \frac{\sigma_c - \sigma_r}{\sigma_c + \sigma_r}$
۳	التینداگ (۲۰۰۲)	$B_1 = \frac{\sigma_c \times \sigma_r}{2}$
۴	یارالی و سویر (۲۰۱۱)	$B_1 = (\sigma_c \times \sigma_r)^{0.72}$
۵	قادرى نژاد و همکاران (۱۳۹۷)	$B_1 = \frac{\sigma_c^{0.807}}{\sigma_r^{0.485}}$



۳. نتایج و بحث

نتایج حاصل از انجام آزمایشات مکانیکی، دینامیکی و شاخص‌های شکنندگی در جداول ۲ تا ۷ نشان داده شده است. ویژگی‌های دینامیکی شامل سرعت موج P در حالت خشک از ۴۱۴۲ تا ۵۸۵۹ متر بر ثانیه و سرعت موج P در حالت اشباع از ۵۷۰۷ تا ۶۹۷۸ متر بر ثانیه متغیر است. همچنین ویژگی‌های مکانیکی شامل مقاومت فشاری تک محوری از ۴۴/۳۵ تا ۹۳/۴۸ مگاپاسکال، مقاومت کششی برزلی از ۸/۳۵ تا ۱۳/۸۲ مگاپاسکال، بار نقطه‌ای از ۲/۸ تا ۱۰/۷ مگاپاسکال و مقدار سختی چکش اشمیت از ۴۳/۰ تا ۵۶/۳ متغیر است. مقدار شکنندگی S20 از ۲۳/۵۹ تا ۵۱/۷۵ متغیر می‌باشد.

جدول ۲. برخی از خصوصیات دینامیکی سنگ‌ها

شماره ایستگاه	Saturated P- wave velocity	Dry P- wave velocity
Sm	۶۵۴۹	۵۲۲۰
Sn	۶۳۱۳	۴۱۴۲
Ch	۶۹۷۸	۵۸۵۹
Gh	۵۷۰۷	۴۲۸۷

Dry P- wave velocity: سرعت موج P در حالت خشک،
 Saturated P- wave velocity: سرعت موج P در حالت اشباع

جدول ۳. آنالیز آماری داده‌های حاصل از آزمایش‌های دینامیکی

آمار	Dry P- wave velocity	Saturated P- wave velocity
حداقل	۴۱۴۲	۵۷۰۷
حداکثر	۵۸۵۹	۶۹۷۸
میانگین	۵۹۱۰	۱۰۹۵۷



جدول ۴. خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها

شماره ایستگاه	SHV	BTS (MPa)	Is ₅₀ (MPa)	UCS (MPa)
Sm	۴۳/۰	۸/۳۵	۲/۸	۴۴/۳۵
Sn	۴۷/۱	۹/۵۵	۲/۹	۴۶/۶۷
Ch	۵۶/۳	۱۳/۸۲	۱۰/۷	۹۳/۴۸
Gh	۵۲/۳	۹/۹۵	۳/۵	۸۰/۷۲

UCS: مقاومت فشاری تک محوری، BTS: مقاومت کششی برزیلی،
Is₅₀: بار نقطه‌ای، SHV: مقدار سختی اشمیت

جدول ۵. آنالیز آماری داده‌های حاصل از آزمایشهای مکانیکی

SHV	BTS (MPa)	Is ₅₀ (MPa)	UCS (MPa)	آمار
۴۳/۰	۸/۳۵	۲/۷	۴۴/۳۵	حداقل
۵۶/۳	۱۳/۸۲	۱۰/۷	۱۲۹/۶۲	حداکثر
۴۹/۷	۱۰/۲۶	۴/۳۳	۸۱/۵۱	میانگین

جدول ۶. مقادیر شاخص شکنندگی سنگ‌ها

شماره ایستگاه	S20 (%)	B ₅	B ₄	B ₃	B ₂	B ₁
Sm	۵۱/۷۵	۷/۶۲	۷۰/۶۹	۱۸۵/۱۶	۰/۶۸	۵/۳۱
Sn	۵۱/۳۲	۷/۴۴	۸۰/۷۸	۲۲۲/۸۵	۰/۶۶	۴/۸۹
Ch	۲۳/۵۹	۱۰/۸۹	۱۷۳/۸۱	۶۴۵/۹۵	۰/۷۴	۶/۷۶
Gh	۴۳/۶۴	۱۱/۳۵	۱۲۳/۴۴	۴۰۱/۵۸	۰/۷۸	۸/۱۱

S20: مقدار شکنندگی S20 حاصل از آزمایش، B₁، B₂، B₃، B₄ و B₅: شاخص‌های شکنندگی ارائه شده توسط محققین مختلف

جدول ۷. آنالیز آماری داده‌های شاخص شکنندگی سنگ‌ها

S20 (%)	B ₅	B ₄	B ₃	B ₂	B ₁	آمار
۲۳/۵۹	۷/۴۴	۷۰/۶۹	۱۸۵/۱۶	۰/۶۶	۴/۸۹	حداقل
۵۱/۷۵	۹/۳۳	۱۱۲/۱۸	۳۶۸/۸۸	۰/۷۲	۶/۲۷	حداکثر
۴۲/۵۸	۱۱/۳۵	۱۷۳/۸۱	۶۴۵/۹۵	۰/۷۸	۸/۱۱	میانگین



۱.۳. تجزیه و تحلیل آماری

در این مقاله از خصوصیات مکانیکی و دینامیکی برای تجزیه و تحلیل آماری استفاده شده است. به کمک رگرسیون گیری می توان روابطی میان شاخص شکنندگی S20 با خصوصیات مهندسی یاد شده بدست آورد. واژه رگرسیون (ضریب تعیین) به معنای بازگشت است و نشان می دهد که مقدار یک متغیر به منغیر دیگری بر می گردد. در واقع تابعی که ارتباط بین متغیرهای مستقل و وابسته را بیان می کند، به تابع رگرسیون موسوم است [17]. در این پژوهش از رگرسیون ساده و چندگانه استفاده شده است. رگرسیون ساده شامل رگرسیون های خطی و غیر خطی است. ۶ مدل رگرسیون به شرح زیر است.

۱- رگرسیون خطی $(CAI = a_1.X + c)$ ، ۲- رگرسیون لگاریتمی $(CAI = a_1.\ln X + c)$ ، ۳- رگرسیون معکوس $(CAI = a_1/X + c)$ ، ۴- رگرسیون توانی $(CAI = a_1.X^c)$ ، ۵- رگرسیون نمایی $(CAI = a_1.exp^{c.X})$ ، ۶- رگرسیون درجه دوم $(CAI = (a_1.X) + (a_2.X^2) + c)$ در این روابط X متغیر مستقل، CAI متغیر وابسته، a_1 و a_2 ضرایب رگرسیونی و c مقدار ثابت است.

عملکرد پارامترهای آماری به کمک روش های آماری سنجیده می شود. این پارامترها شامل: ضریب تعیین (R^2)، ضریب تعیین تعدیل شده ($Adj. R^2$)، تخمین خطای استاندارد (Std. Er) و آنالیز واریانس (ANOVA)، آزمون F و آزمون معنی داری Sig است. زمانی که R^2 و $Adj. R^2$ برابر یک باشد، بهترین مدل را نشان می دهد. زمانی که مقدار Sig کمتر از ۰/۰۵ باشد، مدل معنادار خواهد بود. همچنین هرچه مقدار F آزمون بزرگتر باشد، معتبر بودن مدل را تایید می کند.

بهترین روابط رگرسیونی ساده خطی بین مقدار شکنندگی S20 و خصوصیات مکانیکی، دینامیکی و شاخص های شکنندگی B_1 ، B_2 ، B_3 ، B_4 و B_5 بدست آمده از تجزیه و تحلیل داده ها در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۸. بهترین روابط رگرسیونی ساده خطی برای تخمین مقدار شکنندگی S20

شماره	رابطه	R2	Adjusted R2	F	Sig	Standard error
۶	$S20 = -3.373 Is50 + 59.355$	۰/۹۵۸	۰/۹۳۷	۴۵/۸۵۵	۰/۰۲	۳/۳۰۳
۷	$S20 = -5.448 BTS + 99.330$	۰/۹۵۶	۰/۹۳۴	۴۳/۵۸۷	۰/۰۲	۳/۳۸۴
۸	$S20 = -0.062 B3 + 65.008$	۰/۹۶۷	۰/۹۵۰	۵۷/۹۱۷	۰/۰۱	۲/۹۵۲
۹	$S20 = -0.273 B4 + 73.245$	۰/۹۴۹	۰/۹۲۴	۳۷/۴۷۹	۰/۰۲	۳/۶۳۷

در جدول ۹ بهترین روابط رگرسیونی ساده غیر خطی بین مقدار شکنندگی S20 و خصوصیات مکانیکی، دینامیکی و شاخص های شکنندگی B_1 ، B_2 ، B_3 ، B_4 و B_5 ارائه شده است.

جدول ۹. بهترین روابط رگرسیونی ساده غیر خطی برای تخمین مقدار شکنندگی S20

شماره	رابطه	R2	Adjusted R2	F	Sig	Standard error
۱۰	$S20 = -20.598 \ln(Is50) + 72.016$	۰/۹۸۲	۰/۹۷۴	۱۱۱/۷۴۰	۰/۰۰	۲/۱۴۳
۱۱	$S20 = 108.107/Is50 + 13.355$	۰/۹۹۸	۰/۹۹۷	۱۱۶۰/۷۷۷	۰/۰۰	۰/۶۷۰
۱۲	$S20 = -0.584 Is5093.681$	۰/۹۹۶	۰/۹۹۴	۵۳۸/۷۱۲	۰/۰۰	۰/۰۲۸
۱۳	$S20 = -0.096 e65.602 Is50$	۰/۹۸۳	۰/۹۷۴	۱۱۲/۴۸۷	۰/۰۰	۰/۰۶۰
۱۴	$S20 = -59.796 \ln(BTS) + 181.683$	۰/۹۳۹	۰/۹۰۹	۳۱/۰۴۱	۰/۰۳	۳/۹۷۶
۱۵	$S20 = 636.334/BTS - 20.634$	۰/۹۱۱	۰/۸۶۷	۲۰/۵۲۸	۰/۰۴	۴/۸۱۵
۱۶	$S20 = -1.681 BTS2029.782$	۰/۹۳۸	۰/۹۰۶	۳۰/۰۰۷	۰/۰۳	۰/۱۱۴
۱۷	$S20 = -0.154 e201.697 BTS$	۰/۹۶۱	۰/۹۴۱	۴۸/۹۹۳	۰/۰۲	۰/۰۹۰
۱۸	$S20 = -0.002 e75.703 B3$	۰/۹۳۶	۰/۹۰۴	۲۹/۴۰۳	۰/۰۳	۰/۱۱۵
۱۹	$S20 = 0.008 e94.847 B4$	۰/۹۱۴	۰/۸۷۰	۲۱/۱۶۳	۰/۰۴	۰/۱۳۴



در جدول ۱۰ بهترین روابط رگرسیونی چندگانه خطی بین مقدار شکنندگی S20 و خصوصیات مکانیکی، دینامیکی و شاخص‌های شکنندگی B₁, B₂, B₃, B₄ و B₅ ارائه شده است.

جدول ۱۰. بهترین روابط رگرسیونی چندگانه خطی برای تخمین مقدار شکنندگی S20

Standard error	Sig	F	Adjusted R ²	R ²	رابطه	شماره
۱/۱۹۹	۰/۰۵	۱۸۰/۸۵۴	۰/۹۹۲	۰/۹۹۷	$S20 = -3.999 I_{S50} + 0.007 VP_{sat} + 19.541$	۲۰
۰/۸۳۲	۰/۰۳	۳۷۶/۶۶۷	۰/۹۹۶	۰/۹۹۹	$S20 = -3.092 I_{S50} - 51.992 B_2 + 95.133$	۲۱
۰/۷۲۳	۰/۰۳	۴۹۸/۹۱۹	۰/۹۹۷	۰/۹۹۹	$S20 = -1.653 I_{S50} - 0.034 B_3 + 63.085$	۲۲
۰/۸۱۴	۰/۰۳	۳۹۳/۳۷۰	۰/۹۹۶	۰/۹۹۹	$S20 = -1.849 I_{S50} - 0.136 B_4 + 67.070$	۲۳

۴. نتیجه گیری

در این مقاله به کمک خصوصیات ژئومکانیکی سنگ‌های گرانیتوئیدی و مافیک-حدواسط، مقدار شکنندگی S20 پیش بینی شده است. در این پژوهش ۴ نمونه سنگ آذرین شامل سنگ‌های دیوریت و گابرو از شهرستان همدان و سنگ‌های گرانیت و گرانودیوریت از شهرستان ملایر برداشت شده و مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای ارزیابی مقدار شکنندگی S20 این سنگ‌ها از روش‌های آماری رگرسیون ساده و چندگانه استفاده شده است. تجزیه و تحلیل داده‌های آماری رگرسیون ساده خطی نشان می‌دهد، مقاومت کششی غیر مستقیم، مقاومت بار نقطه‌ای و شاخص‌های شکنندگی B₃ و B₄ نسبت به پارامترهای دیگر برای پیش بینی مقدار شکنندگی S20 مفیدتر هستند. همچنین آنالیز رگرسیون ساده غیر خطی نیز نشان می‌دهد که مقاومت کششی غیر مستقیم، مقاومت بار نقطه‌ای و شاخص‌های شکنندگی B₃ و B₄ برای تخمین مقدار شکنندگی S20 مفید تر از دیگر پارامترها هستند. در رگرسیون ساده خطی بیشترین همبستگی مربوط به رابطه شماره ۸ با ضریب تعیین ($R^2=0.967$) می‌باشد. همچنین در رگرسیون ساده غیر خطی بیشترین همبستگی با ضریب تعیین ($R^2=0.998$) مربوط به رابطه شماره ۱۱ که یک رابطه معکوس است می‌باشد. نتایج مربوط به رگرسیون چندگانه خطی نشان می‌دهد که رابطه شماره ۲۳ با ضریب همبستگی ($R^2=0.999$) و مقدار F بزرگتر نسبت به دیگر رابطه‌ها برای تخمین مقدار شکنندگی S20 مفیدتر می‌باشد.

منابع

- [1] Thuro, K. (1997). Drillability prediction: geological influences in hard rock drill and blast tunnelling. Geologische Rundschau, 86, 426-438.
- [2] Altindag, R. (2003). Correlation of specific energy with rock brittleness concepts on rock cutting. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 103(3), 163-171.
- [3] Hetenyi, M. I. (1950). Handbook of Experimental Stress Analysis. Wiley. New York 115pp.
- [4] Hucka, V., & Das, B. (1974, October). Brittleness determination of rocks by different methods. In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts (Vol. 11, No. 10, pp. 389-392). Pergamon.
- [5] Göktan, R. M. (1991). Brittleness and micro-scale rock cutting efficiency. Mining Science and Technology, 13(3), 237-241.
- [6] Yilmaz, N. G., Karaca, Z., Goktan, R. M., & Akal, C. Ü. N. E. Y. T. (2009). Relative brittleness characterization of some selected granitic building stones: influence of mineral grain size. Construction and Building Materials, 23(1), 370-375.
- [7] Howell, J. V (1960) Glossary of geology and related sciences. American Geological Institute, Washington, DC.
- [8] Gong, Q. M., & Zhao, J. (2007). Influence of rock brittleness on TBM penetration rate in Singapore granite. Tunnelling and underground space technology, 22(3), 317-324.
- [9] Altindag, R. (2002). The evaluation of rock brittleness concept on rotary blast hold drills. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 102(1), 61-66.
- [10] ASTM (1986b). Standard test method of unconfined compressive strength of intact rock core specimens. D2938
- [11] ISRM (1978b). Suggested methods for determining tensile strength of rock materials. Suggested method for determining indirect tensile strength by Brazilian test. Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests.



- [12] Yang, Sh. Q., Yin, P. F., Ranjith, P. G (2020) Experimental Study on Mechanical Behavior and Brittleness Characteristics of Longmaxi Formation Shale in Changning, Sichuan Basin, China, Rock Mechanics and Rock Engineering . <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02057-8>.
- [13] Aligholi, S., Lashkaripour, G. R., & Ghafoori, M. (2017). Strength/brittleness classification of igneous intact rocks based on basic physical and dynamic properties. Rock Mechanics and Rock Engineering, 50, 45-65.
- [14] Engelder, T., Plumb, R (1984) Changes in situ ultrasonic properties of rock on strain relaxation, International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences Geomechanics Abstracts, 21(2): 75– 82.
- [15] Diamantis, K., Gartzos, E., & Migiros, G. (2009). Study on uniaxial compressive strength, point load strength index, dynamic and physical properties of serpentinites from Central Greece: test results and empirical relations. Engineering Geology, 108(3-4), 199-207.
- [16] Hemmati, A., Ghafoori, M., Moomivand, H., Lashkaripour, Gh. R (2020) The effect of mineralogy and textural characteristics on the strength of crystalline igneous rocks using image-based textural quantification. Engineering Geology, 266: 10-16.
- [17] Matern, N. V., Hjelmer, A (1943) Forsok medpagrus (Tests with Chippings), Medelande nr.65, Statens väginstitut, Stockholm, p 65. English summary, 56-60.
- [18] Su, O., Sakız, U., & Köken, E. (2014, October). Drillability Assessment of Rocks Based on Strength and Brittleness. In 31st Ann. Int. Pittsburgh Coal Conf.(PCC 2014) (Vol. 697, No. 703, pp. 57-69).
- [19] Yarali, O., Soyer, E (2011) The effect of mechanical rock properties and brittleness on drillability. Scientific Research and Essays, 6: 1077-1088.
- [20] ISRM (International Society for Rock Mechanics), 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006. In: Ulusay, Hudson (eds) Suggested methods prepared by the commission on testing methods.
- [۲۱] قادری نژاد، ص.، الله گانی دزکائی، س.، نجانی، ح.، ر.، علی پنهانی، ب. (۱۳۹۷). ارائه شاخصی جدید برای ارزیابی تردی سنگ. نشریه مهندسی منابع معدنی، شماره ۳، ص ۴۳-۵۵.