

برآورد شکنندگی سنگ‌های گرانیتی مناطق تواندشت و گوشه (شهرستان بروجرد) از سختی واجهشی اشمیت و خصوصیات پتروگرافی

رضا خراسانی^۱، رسول اجل لوئیان^۲، امین جمشیدی^{۳*}

پذیرش مقاله: ۹۸/۰۲/۲۴

دریافت مقاله: ۹۷/۱۰/۰۱

چکیده

شکنندگی یکی از مهمترین ویژگی‌های مکانیکی سنگ است که در طرح‌های ژئوتکنیکی مانند عملیات حفاری و سازه‌های زیرزمینی دارای کاربرد گسترده‌ای است. تاکنون روش استاندارد برای برآورد شکنندگی سنگ‌ها معرفی نشده است و بنابراین از روش‌های غیر مستقیم برای برآورد آن استفاده می‌شود. در این تحقیق با استفاده از روابط آماری دو و چند متغیره، شکنندگی سنگ‌های گرانیتی از سختی واجهشی اشمیت و خصوصیات پتروگرافی (میانگین اندازه کانی‌ها و ترکیب کانی شناسی) برآورد شده است. برای رسیدن به این اهداف، ۱۰ نمونه سنگ گرانیتی مختلف از معادن تواندشت و گوشه در اطراف شهر بروجرد تهیه شد. بر اساس آزمون‌های آزمایشگاهی شاخص شکنندگی، سختی واجهشی چکش اشمیت، میانگین اندازه کانی‌ها و نسبت کوارتز به فلدسپات نمونه‌ها تعیین شدند. سپس جهت برآورد شکنندگی مدل‌های مختلفی بر روی داده‌ها برازش داده شد. نتایج روابط آماری دو متغیره نشان می‌دهد که همبستگی‌های متوسط (ضرایب تعیین بین ۰/۷۰ تا ۰/۸۷) بین شاخص شکنندگی با سختی واجهشی چکش اشمیت، میانگین اندازه کانی‌ها و نسبت کوارتز به فلدسپات وجود دارد. در حالی که روابط آماری چند متغیره حکایت از تأثیر قابل توجه میانگین اندازه کانی‌ها و نسبت کوارتز به فلدسپات روی دقت همبستگی بین شاخص شکنندگی و سختی واجهشی اشمیت (به ترتیب با ضرایب تعیین ۰/۹۱ و ۰/۹۳) دارد.

کلید واژه‌ها: شکنندگی، سختی واجهشی اشمیت، میانگین اندازه کانی‌ها، نسبت کوارتز به فلدسپات، گرانیت

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان

۲- عضو هیات علمی گروه زمین شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان

۳- عضو هیات علمی گروه زمین شناسی، دانشگاه لرستان، خرم آباد. jamshidi.am@lu.ac.ir

*مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

شکنندگی سنگ یکی از خواص مکانیکی سنگ و تابعی از مقاومت است که نشان دهنده استحکام سنگ در مقابل تغییر شکل در محدوده الاستیک است (آلتینداگ) (Altindag 2010). ارزیابی این ویژگی در عملیات استخراج سنگ‌های تزئینی و حفاری تونل‌ها از اهمیت بسزایی برخوردار است. با افزایش شکنندگی سنگ‌ها، قابلیت استخراج سنگ‌های تزئینی با سیم برش الماسه و حفاری تونل‌ها به وسیله دستگاه TBM کاهش می‌یابد. بنابراین با تعیین شکنندگی می‌توان یک ارزیابی اولیه از سرعت استخراج سنگ‌های تزئینی و حفاری تونل‌ها به دست آورد. محققین روابط تجربی متفاوتی را برای اندازه‌گیری و تعیین میزان شکنندگی سنگ‌ها ارائه کرده‌اند ولی نتایج حاصل از این روش‌ها تا حدود زیادی با هم اختلاف دارند (یاگیز، تیریکی، قبادی و رسولی فرح، ۱۳۹۱: ایلماز و همکاران، آلتینداگ و گونی، ارالی و سویر، حیدری و همکاران، قبادی و همکاران، ۱۳۹۷) (Yagiz 2006, Tiryaki 2006, Yilmaz et al., 2010, Altindag and Guney 2010, Yarali and Soyer 2011, Heidari et al., 2014). با این حال بیشتر محققین شکنندگی را تابعی از مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلی سنگ می‌دانند (آلتینداگ، قهرمان) (Altindag 2002, Kahraman 2002). از این رو برای ارزیابی شکنندگی سنگ‌ها از مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلی استفاده می‌کنند. از آنجایی که انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلی، زمانبر و نیازمند مغزه‌های با ابعاد استاندارد می‌باشد، تعدادی از محققین جهت ارزیابی اولیه شکنندگی از خصوصیات فیزیکی مانند تخلخل، چگالی و جذب آب (حیدری و همکاران، قبادی و ناصر، قبادی و همکاران، ۱۳۹۷) (Heidari et al., 2014, Ghobadi and Naseri 2016) و خصوصیات مکانیکی مانند سرعت امواج الترسونیک، سختی و اجزش اشमित و شاخص بار نقطه‌ای (یاگیز، تیریکی، قبادی و رسولی فرح، ۱۳۹۱: ایلماز و همکاران، آلتینداگ و گونی، ارالی و سویر، حیدری و همکاران، قبادی و

رسولی فرح، ۱۳۹۱، قبادی و همکاران، ۱۳۹۷) (Yagiz 2006, Tiryaki 2006, Yilmaz et al., 2010, Altindag and Guney 2010, Yarali and Soyer 2011, Heidari et al., 2014) استفاده کرده‌اند. نتایج این محققین نشان داد که با استفاده از خصوصیات فیزیکی و مکانیکی می‌توان ارزیابی اولیه‌ای از شکنندگی سنگ‌ها داشت. هر چند در تحقیقات گذشته از خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مختلفی برای برآورد غیر مستقیم شکنندگی استفاده شده ولی در هیچ یک از این تحقیقات از خصوصیات پتروگرافی استفاده نشده است. علاوه بر این در تحقیقات گذشته برای برآورد شکنندگی سنگ‌ها، از روابط آماری دو متغیره بر اساس تنها یک ویژگی فیزیکی یا مکانیکی استفاده شده است و از روابط آماری چند متغیره استفاده نشده است. با توجه به این، در پژوهش با تهیه ۱۰ نمونه سنگ گرانیتی مختلف از معادن مورد مطالعه چند هدف دنبال می‌شود (۱) ارزیابی قابلیت حفاری نمونه‌ها بر اساس شکنندگی آن‌ها (۲) توسعه روابط آماری دو متغیره بین شکنندگی با سختی و اجزشی اشमित، میانگین اندازه کانی‌ها و نسبت کوارتز به فلدسپات (۳) ارائه روابط آماری چند متغیره به منظور بررسی تأثیر میانگین اندازه کانی‌ها و نسبت کوارتز به فلدسپات روی دقت همبستگی بین شکنندگی با سختی و اجزشی اشमित.

۲. موقعیت جغرافیایی و وضعیت زمین‌شناسی منطقه

مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه توده گرانیتی گوشه و تواندشت در جنوب شهرستان بروجرد است. این توده با سن ژوراسیک میانی به عنوان بخش کوچکی از زون سنندج-سیرجان به صورت کوچک و مجزا و کم و بیش به شکل مدور در بخش جنوبی توده اصلی گرانیتوئیدی بروجرد رخنمون دارد. ترکیب سنگ-های این توده از گرانیت تا گرانودیوریت متغیر بوده و بصورت دانه ریز در حاشیه تا دانه درشت در مرکز دیده می‌شوند. شکل ۱ محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد. شواهد ژئوشیمیایی نشان می‌دهد که منشا توده گرانوتوئیدی پوسته زیرین بوده و احتمالاً ماگمای بازالتی حاصل از کوهزایی که

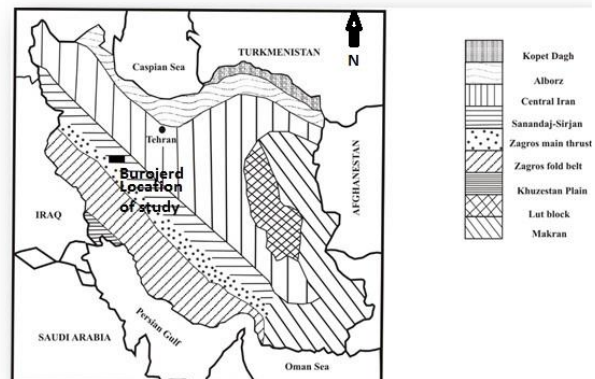
شده از آزمون فیشر، خط قطری، خطای استاندارد برآورد و خطای میانگین مربعات استفاده شد.

۴. مطالعات آزمایشگاهی

۴.۱. خصوصیات پتروگرافی

در این پژوهش از میانگین اندازه کانی‌ها و نسبت کوارتز به فلدسپات به عنوان خصوصیات پتروگرافی استفاده شده است. استفاده از نسبت کوارتز به فلدسپات به این دلیل است که این کانی‌ها، بخش اصلی تشکیل دهنده ترکیب کانی شناسی سنگ‌های گرانیتی هستند. برای تعیین این خواص از هر نمونه سنگ ۲ مقطع نازک میکروسکوپی تهیه و مورد مطالعه قرار گرفت. در جدول ۱ ترکیب کانی شناسی و میانگین اندازه نمونه‌ها ارائه شده است. برای مطالعه درصد کانی‌های تشکیل دهنده سنگ‌ها و اندازه کانی‌ها از روش شمارش نقطه‌ای (Point counting) استفاده شده است. در این روش چند خط روبش (Scan line) برای هر مقطع نازک در نظر گرفته می‌شود. سپس خطوط در نظر گرفته شده در مقطع نازک جاروب می‌شوند و بیش از ۵۰ نقطه از هر خط روبش برداشت می‌شود. این برداشت‌ها در طول مسیر خط روبش شامل نوع کانی‌های تشکیل دهنده سنگ و اندازه کانی‌ها می‌باشند. در نهایت با استفاده از برداشت‌ها، درصد کانی‌های تشکیل دهنده سنگ و اندازه کانی‌ها تعیین می‌شود. جهت نام‌گذاری سنگ‌های مورد مطالعه از طبقه‌بندی اشتراک‌ایزن استفاده شد (اشتراک‌ایزن) (Streckeisen 1967). همانگونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود کانی‌های اصلی تشکیل دهنده نمونه‌ها کوارتز، ارتوکلاز و پلاژیوکلاز (۷۵ تا ۸۹ درصد) و کانی‌های فرعی بیوتیت، مسکوویت، کلریت، میکروکلین، تورمالین و آمفیبول (۱۱ تا ۲۵ درصد) می‌باشند. مطالعه مقاطع نازک میکروسکوپی نشان می‌دهد میانگین اندازه کانی‌ها از $1/36$ میلیمتر برای نمونه G10 و $3/34$ میلیمتر برای نمونه G1 متغیر است.

در پوسته زیرین جایگزین شده محتمل‌ترین منشاء گرمایی ذوب بخشی سنگ‌های دگرگونی مافیک تا حد واسط در پوسته بوده است. امروزه استفاده از سنگ‌های گرانیتی منطقه مورد مطالعه به عنوان مصالح ساختمانی به ویژه سنگ‌های نما به دلیل فراوانی و ویژگی‌های مهندسی مناسب، دارای کاربرد فراوانی است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه نمونه برداری

۳. مواد و روش پژوهش

برای انجام این تحقیق، طی بازدید از معادن مورد مطالعه تعدادی بلوک از ۱۰ نمونه سنگ گرانیتی مختلف تهیه شد و از آن‌ها نمونه‌ها و مغزه‌های لازم برای انجام آزمایش‌های پیش‌بینی شده تهیه گردید. از میان خصوصیات پتروگرافی، میانگین اندازه کانی‌ها و نسبت کوارتز به فلدسپات تعیین شدند. ویژگی‌های مکانیکی شامل مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی برزیلی و سختی واجهشی اشمیت نمونه‌ها بر اساس استانداردهای انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM 1981) در حالت خشک تعیین شدند. بر اساس مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی برزیلی شکنندگی نمونه‌ها تعیین شد. در ادامه با استفاده از آنالیزهای رگرسیون، روابط آماری دو و چند متغیره بین شکنندگی با سختی واجهشی اشمیت، میانگین اندازه کانی‌ها و نسبت کوارتز به فلدسپات توسعه داده شد. در پایان جهت اعتبار سنجی و مقایسه میزان دقت روابط ارائه

جدول ۱. نتایج مطالعات پتروگرافی نمونه‌های مورد مطالعه

Rock code	Mineralogical composition (%)						MGS (mm)	Rock type
	Qz	Pl (Or+Pl+Mi)	Bt	Mu	Tu	Am		
G1	16	59(33+26)	15	5	0	5	3.34	Syenogranite
G2	29	51(25+23+3)	10	6	4	0	2.19	Granodiorite
G3	50	33(18+15)	10	7	0	0	1.50	Granite
G4	38	41(20+19+2)	13	5	0	0	1.65	Monzogranite
G5	26	61(30+28+3)	8	3	0	0	2.90	Syenogranite
G6	30	50(25+23+2)	12	5	0	0	2.15	Granodiorite
G7	40	46(26+20)	10	4	0	0	2.05	Monzogranite
G8	24	58(35+20+3)	9	6	3	0	3.01	Syenogranite
G9	33	54(26+25+3)	7	4	0	0	2.12	Syenogranite
G10	60	29(18+11)	10	2	0	0	1.36	Granite

MGS اندازه میانگین کانی‌ها - Qz/FI نسبت کوارتز به فلدسپات، Qz - کوارتز - FI - فلدسپات - Or - ارتوکلاز - Pl - پلاژوکلاز - Bt - بیوتیت - Mu - مسکویت - Ch - کلریت - Mi - میکروکلین - Tu - تورمالین - Am - آمفیبول

۲.۴. خصوصیات مکانیکی و شکنندگی

مقاومت فشاری تک محوری: برای انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوریاز هر نوع سنگ ۵ نمونه با قطر ۵۴ میلیمتر و نسبت طول به قطر ۲/۵ تهیه و مورد آزمایش قرار گرفت. همانطور که در همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها از ۶۷/۸۹ مگاپاسکال برای نمونه G1 تا ۱۱۲/۳۴ مگاپاسکال برای نمونه G10 متغیر است.

مطابق طبقه بندی پیشنهادی انجمن بین‌المللی سنگ (ISRM 2007) نمونه G10 در رده سنگ‌های با مقاومت بالا (۱۰۰ تا ۲۵۰ مگاپاسکال) و سایر نمونه‌ها در رده سنگ‌های با مقاومت متوسط (۵۰ تا ۱۰۰ مگاپاسکال) قرار دارند.

مقاومت کششی برزیلی: بدین منظور تعداد ۵ نمونه از هر نوع سنگ با قطر ۵۴ میلیمتر و نسبت قطر به ضخامت ۰/۵ مورد آزمایش قرار گرفت. بعد از انجام آزمایش‌ها، از نتایج میانگین گرفته شد و به عنوان مقدار نهایی مقاومت کششی برزیلی نمونه‌ها در نظر گرفته شد (جدول ۲). همانطور که از این جدول مشاهده می‌شود مقاومت کششی برزیلی نمونه‌ها از ۵/۲۴ تا ۱۲/۱۱ مگاپاسکال تغییر می‌کند. کمترین و بیشترین مقاومت کششی برزیلی به ترتیب برای نمونه G2 با ۵/۲۴ مگاپاسکال و G10 با ۱۲/۱۱ مگاپاسکال است.

شکنندگی: در این پژوهش، برای تعیین شکنندگی نمونه‌ها از شاخص شکنندگی پیشنهاد شده توسط آلتینداگ (Altindag 2010) استفاده شده است. این شاخص از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$B = \sqrt{\frac{UCS \times BTS}{2}} \text{ MPa} \quad (1)$$

در این رابطه B شاخص شکنندگی، UCS و BTS به ترتیب مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلی نمونه‌ها هستند.

علاوه بر رابطه ۱، روابط دیگری نیز توسط محققین مختلف برای تعیین شاخص شکنندگی معرفی شده‌اند که از متداول-ترین آنها روابط زیر هستند:

$$B = \frac{UCS}{BTS} \quad (2) \text{ (Altindag 2002)}$$

$$B = \frac{UCS - BTS}{UCS + BTS} \quad (3) \text{ (Kahraman 2002)}$$

نتایج تعیین شاخص شکنندگی نمونه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. همانطور که از این جدول مشاهده می‌شود شاخص شکنندگی نمونه‌ها از ۱۳/۶۳ برای نمونه G8 و ۲۶/۰۸ برای نمونه G10 متغیر است.

به منظور طبقه‌بندی نمونه‌ها بر اساس شاخص شکنندگی و قابلیت حفاری از طبقه‌بندی پیشنهاد شده توسط آلتینداگ (Altindag 2010) استفاده شد. نتایج بیانگر این است که نمونه‌های مورد مطالعه در رده شکنندگی متوسط تا خیلی

شکننده با قابلیت حفاری آسان تا سخت قرار دارند (جدول ۳)

جدول ۲. نتایج خصوصیات مکانیکی و سختی واجهشی اشمیت نمونه‌ها

SH		B (MPa)		BTS (MPa)		UCS (MPa)		Rock code
Ave	SD	Ave	SD	Ave	SD	Ave	SD	
49.23	2.31	14.68	0.98	6.35	0.47	67.89	5.01	۱G
46.44	1.54	13.90	1.15	5.24	0.51	73.70	6.38	۲G
50.29	3.10	19.90	1.04	8.09	0.57	97.86	4.45	۳G
53.17	2.13	19.74	1.06	8.40	0.45	92.80	6.03	۴G
49.18	1.43	14.95	0.97	6.47	0.43	69.10	5.31	۵G
45.59	1.96	14.54	1.00	5.58	0.45	75.81	5.23	۶G
45.24	2.09	17.56	0.91	7.27	0.51	84.85	3.49	۷G
49.00	3.12	13.63	1.06	5.44	0.50	68.30	5.35	۸G
50.00	2.76	18.00	0.95	8.24	0.40	78.68	5.62	۹G
59.00	1.76	26.08	1.48	12.11	0.81	112.34	6.45	۱۰G

UCS مقاومت فشاری تک محوری - BTS مقاومت کششی برزیلین - B شاخص شکنندگی - SH سختی واجهشی اشمیت - SD انحراف معیار - Ave میانگین

جدول ۳. طبقه‌بندی سنگ‌ها بر اساس شکنندگی و قابلیت حفاری (Altindag 2010)

Samples under study	Drillability description	Brittleness description	Brittleness index (B)
-	Very easy	Low brittleness	0-10
G8 ، G6 ، G5 ، G2 ، G1	Easy	Moderately brittle	10-15
G9 ، G7 ، G4 ، G3	Moderate	Brittle	15-20
G10	Difficult	Very brittle	20-25
-	Extremely difficult	Extremely brittle	25<

۳.۴. سختی واجهشی اشمیت

از آنالیزهای رگرسیون دو متغیره استفاده شد. در این آنالیزها سعی شده مدلی بر داده‌ها برازش شود که بیشترین ضریب تعیین (R^2) را داشته باشد. در شکل‌های (۲الف و ب) رابطه بین شاخص شکنندگی با میانگین اندازه کانی‌ها و نسبت کوارتز به فلدسپات نشان داده شده است. مطابق رابطه‌های (۴) و (۵)، به ترتیب روابط توانی و خطی بین شاخص شکنندگی با میانگین اندازه کانی‌ها و نسبت کوارتز به فلدسپات با ضرایب تعیین 0.73 و 0.86 وجود دارد:

$$B = 26.53MGS^{-0.589} \quad R^2 = 0.73$$

برای $1.36 < MGS < 3.34$ (۴)

$$B = 6.4475(Qz/FI) + 11.938 \quad R^2 = 0.86$$

برای $0.27 < Qz/FI < 2.07$ (۵)

که در آنها B شاخص شکنندگی، MGS میانگین اندازه کانی‌ها و Qz/FI نسبت کوارتز به فلدسپات نمونه‌ها می‌باشد.

مقایسه روابط (۴) و (۵) نشان می‌دهد که شاخص شکنندگی دارای همبستگی بالاتری با نسبت کوارتز به فلدسپات (ضریب

برای تعیین سختی واجهشی اشمیت، از چکش نوع N با انرژی موثر $2/207$ نیوتن متر روی بلوک‌های سنگی استفاده شده است. از هر نمونه سنگ تعدادی بلوک تهیه و روی آن‌ها مطابق استاندارد انجمن بین المللی مکانیک سنگ (ISRM (1981) ۲۰ ضربه در نقاط با فواصل ۳ سانتیمتری اعمال شد. نتایج سختی واجهشی اشمیت نمونه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود سختی واجهشی نمونه‌ها از $45/24$ تا $59/00$ متغیر است.

۵. نتایج و بحث

۱.۵. آنالیزهای رگرسیون دو متغیره برای برآورد شکنندگی نمونه‌ها

جهت بررسی رابطه شاخص شکنندگی با میانگین اندازه کانی‌ها، نسبت کوارتز به فلدسپات و سختی واجهشی اشمیت،

همانطور که از شکل (۲ج) مشاهده می‌شود، شاخص شکنندگی نمونه‌ها با افزایش سختی واجهشی اشمیت، افزایش پیدا کرده است. از آنجایی که شاخص شکنندگی یک رابطه مستقیم با قابلیت حفاری سنگ‌ها دارد (جدول ۳)، بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش سختی واجهشی اشمیت، قابلیت حفاری نمونه‌ها سخت‌تر می‌شود.

مقایسه ضرایب تعیین روابط (۲) تا (۴) نشان می‌دهد که دقت خصوصیات پتروگرافی (میانگین اندازه کانی‌ها و نسبت کوارتز به فلدسپات) نسبت به سختی واجهشی اشمیت برای برآورد شاخص شکنندگی نمونه‌ها بیشتر است.

۲.۵. آنالیزهای رگرسیون چند متغیره برای برآورد شکنندگی نمونه‌ها

برای برآورد شکنندگی نمونه‌ها از سختی واجهشی اشمیت، میانگین اندازه کانی‌ها و نسبت کوارتز به فلدسپات با استفاده از نرم‌افزار SPSS® v.19 code مدل‌های زیر بر روی داده‌ها برازش داده شد:

$$B = -5.158 + 0.585 - 2.987MGS \quad R^2 = 0.91 \quad (9)$$

$$B = -3.854 + 0.348 + 4.641(Qz/FI) \quad R^2 = 0.93 \quad (10)$$

که در آن‌ها B شاخص شکنندگی، SH سختی واجهشی اشمیت، MGS میانگین اندازه کانی‌ها و Qz/FI نسبت کوارتز به فلدسپات نمونه‌ها هستند.

از رابطه‌های (۹) و (۱۰) مشاهده می‌شود هنگامی که سختی واجهشی اشمیت و میانگین اندازه کانی‌ها به عنوان پارامتر ورودی رابطه رگرسیون استفاده می‌شوند (رابطه ۹) مقدار ضریب تعیین برای برآورد شاخص شکنندگی برابر با ۰/۹۱ است. در حالی که اگر سختی واجهشی اشمیت و نسبت کوارتز به فلدسپات به عنوان پارامتر ورودی استفاده شوند (رابطه ۱۰) مقادیر ضریب تعیین برای برآورد شاخص شکنندگی برابر با ۰/۹۳ است. این موضوع نشان دهنده بیشتر بودن تأثیر نسبت کوارتز به فلدسپات نسبت به میانگین اندازه کانی‌ها در دقت برای برآورد شاخص شکنندگی است.

تعیین (۰/۸۷) نسبت به میانگین اندازه کانی‌ها (ضریب تعیین ۰/۷۳) است. از این رو می‌توان با احتیاط از رابطه ۳ برای برآورد و ارزیابی اولیه شاخص شکنندگی نمونه‌های گرانیتی مشابه از لحاظ منشاء، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی استفاده کرد.

نکته دیگری که از شکل‌های (۲الف و ب) می‌توان گفت، وجود رابطه معکوس بین شاخص شکنندگی با میانگین اندازه کانی‌ها و یک رابطه مستقیم بین شاخص شکنندگی و نسبت کوارتز به فلدسپات است. در واقع با کاهش میانگین اندازه کانی‌ها و افزایش نسبت کوارتز به فلدسپات، شاخص شکنندگی نمونه‌ها افزایش پیدا کرده است. با افزایش شاخص شکنندگی، قابلیت حفاری سنگ‌ها سخت‌تر می‌شود (جدول ۳).

شکل (۲ج) رابطه بین شاخص شکنندگی و سختی واجهشی اشمیت را نشان می‌دهد. یک رابطه خطی با ضریب تعیین ۰/۷۰ بین این دو خصوصیت مطابق رابطه زیر وجود دارد:

$$B = 0.8006SH - 22.508 \quad R^2 = 0.70 \quad (6)$$

برای $45.24 < SH < 59.00$

در این رابطه، B شاخص شکنندگی و SH سختی واجهشی اشمیت نمونه‌ها می‌باشد.

رابطه (۶) ارائه شده در این تحقیق با روابط حاصل از تحقیقات گذشته مقایسه شده است. قبادی و رسولی فرح (۱۳۹۱) به بررسی رابطه بین شاخص شکنندگی و سختی واجهشی اشمیت سنگ‌های گرانیتی پرداختند. این محققین به رابطه زیر دست پیدا کردند:

$$B = 0.795SH - 16.59 \quad R^2 = 0.72 \quad (7)$$

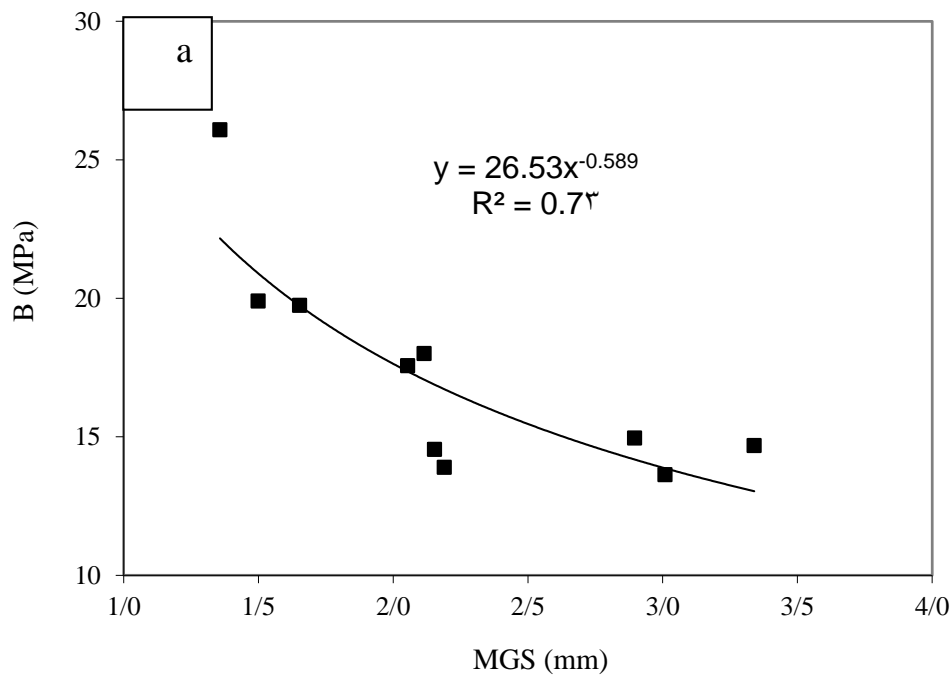
آلتینداگ و گونی (Altindag and Guney 2010) با مطالعه دامنه گسترده‌ای از انواع سنگ‌ها به رابطه زیر بین شاخص شکنندگی و سختی واجهشی اشمیت رسیدند:

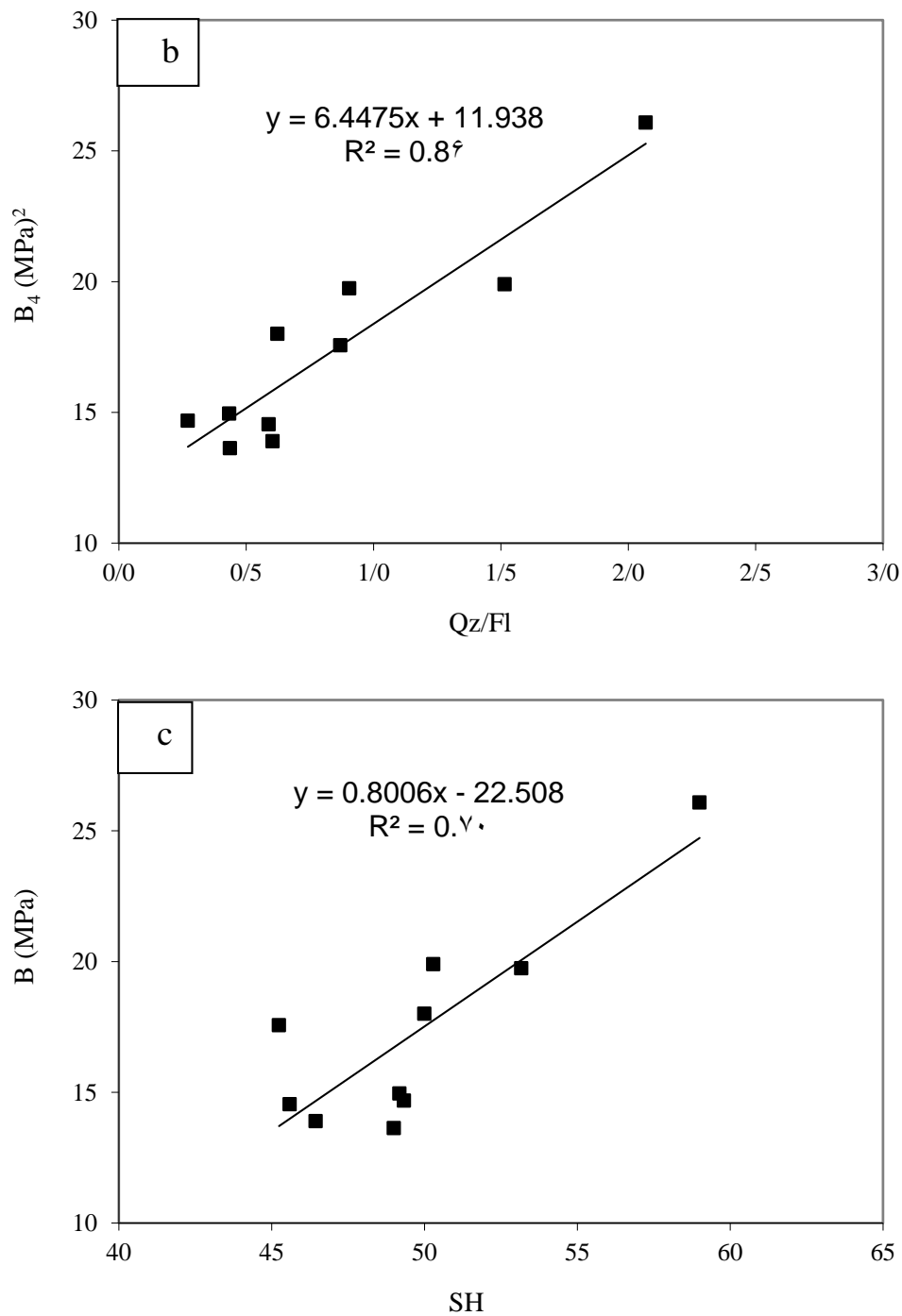
$$B = 0.062SH^{1.4316} \quad R^2 = 0.72 \quad (8)$$

با مقایسه رابطه (۶) با روابط (۷) و (۸)، مشاهده می‌شود که ضرایب تعیین تقریباً مشابه‌ای بین نتایج این تحقیق و سایر تحقیقات وجود دارد.

باشد، می‌توانیم به ارائه یک تفسیر علمی از نتایج مبادرت نمائیم. پس زمانی که مقدار سطح معنی‌داری از ۰/۰۵ بزرگتر باشد، آنگاه باید گفت که نتایج در اثر شانس حاصل شده‌اند و لذا نمی‌توان تفسیر علمی از نتایج ارائه داد (حبیب پور و صفری، ۱۳۸۸). همانطور که از جدول (۴) مشاهده می‌شود تمامی سطوح معنی‌داری محاسبه شده کمتر از ۰/۰۵ می‌باشند که نشان دهنده معنی‌دار بودن رابطه‌های ارائه شده برای برآورد شاخص شکنندگی نمونه‌ها از لحاظ آماری است.

به منظور اعتبار سنجی رابطه‌های (۹) و (۱۰) به دست آمده از آنالیزهای رگرسیون چند متغیره، از مفهوم سطح معنی‌داری (*Sig.*) و آزمون فیشر (*F-ratio*) استفاده شده است. تمامی رابطه‌های آماری به یک مقدار احتمال که در بعضی مواقع تحت عنوان سطح معنی‌داری معرفی می‌شود، ختم می‌شوند. سطح معنی‌داری اساس پذیرش معنی‌داری آماری نتایج می‌باشد، بدین صورت که زمانی به احتمال پائین شانس بودن نتایج پی می‌بریم که مقدار سطح معنی‌داری از مقدار مورد توافق جامع علمی یعنی ۰/۰۵ کوچکتر باشد (در این تحقیق سطح خطای ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است). تنها در صورتی که مقدار سطح معنی‌داری به دست آمده از ۰/۰۵ کوچکتر





شکل ۲. رابطه شاخص شکنندگی با (a) میانگین اندازه کانی‌ها (b) نسبت کوارتز به فلدسپات (c) سختی واجهشی اشمیت

متغیرهای مستقل قادرند به خوبی تغییرات متغیر وابسته را تبیین کنند یا خیر. اگر F به دست آمده از رابطه رگرسیون

یکی از مهمترین آزمون‌های آماری برای ارزیابی میزان برازش یک مدل آزمون فشر است. این آزمون نشان می‌دهد که آیا

۳.۵. مقایسه میزان دقت روابط آماری دو متغیره و چند متغیره در برآورد شاخص شکنندگی

برای مقایسه میزان دقت روابط ارائه شده بر اساس آنالیزهای دو و چند متغیره، مقادیر برآورد شده شاخص شکنندگی از روابط دو متغیره (رابطه ۴، ۵ و ۶) و چند متغیره (۹ و ۱۰) تعیین و با مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده مقایسه و همچنین ضرایب تعیین بین آن‌ها تعیین شده‌اند. در جدول (۵) مقادیر شاخص شکنندگی برآورد شده از این روابط ارائه شده است.

بیشتر از F موجود در جدول‌های آماری باشد نشان دهنده کارایی و مناسب بودن رابطه رگرسیون در تخمین متغیر وابسته است. همانطور که از جدول (۴) مشاهده می‌شود مقدار F به دست آمده از هر ۲ رابطه چند متغیره به مراتب بزرگتر از F موجود در جدول‌های آماری (با درجه آزادی رگرسیون ۲ و درجه آزادی باقیمانده ۷) می‌باشد. این موضوع نشان دهنده همبستگی و اعتبار مناسب روابط آماری چند متغیره بین شکنندگی نمونه‌ها با سختی واجهشی اشمیت، میانگین اندازه کانی‌ها و نسبت کوارتز به فلدسپات است.

جدول ۴. نتایج آزمون‌های آماری برای صحت سنجی روابط چند متغیره

Regression equations	Determination coefficient (R ²)	F-ratio (Calculated value)	F-ratio (Tabulated value)	Sig.	MSE	SEE
$B = -5.158 + 0.585SH - 2.987MGS$	0.91	34.59	5.59	0.000	1.78	1.33
$B = -3.854 + 0.348SH + 4.641(Qz/FI)$	0.93	43.69	5.59	0.000	1.44	1.20

B: شاخص شکنندگی، SH: سختی واجهشی اشمیت، MGS: میانگین اندازه کانی‌ها، Qz/FI: نسبت کوارتز به فلدسپات، R²: ضریب تعیین، Sig: سطح معنی داری، MSE: خطای میانگین مربعات، SEE: خطای استاندارد برآورد

جدول ۵. مقادیر شاخص شکنندگی برآورد شده از روابط آماری دو و چند متغیره

Multivariate statistical relationships		Simple statistical relationships			Observed values	Rock code
Estimated values from Eq.10	Estimated values from Eq.9	Estimated values from Eq. 6	Estimated values from Eq.5	Estimated values from Eq. 4		
14.40	13.72	16.99	13.55	13.04	14.68	G ^۱
15.04	15.47	14.67	15.72	16.72	13.90	G ^۲
20.67	19.78	17.75	21.66	20.90	19.90	G ^۳
19.04	21.01	20.06	18.14	19.73	19.74	G ^۴
15.20	14.96	16.87	14.70	14.18	14.95	G ^۵
14.85	15.08	13.99	15.86	16.88	14.54	G ^۶
15.91	15.17	13.71	17.45	17.36	17.56	G ^۷
15.08	14.52	16.72	14.63	13.87	13.63	G ^۸
16.42	17.77	17.52	16.00	17.07	18.00	G ^۹
26.21	25.30	24.73	15.28	22.16	26.08	G ^{۱۰}

شکنندگی و برآورده شده از روابط چند متغیره نشان داده شده‌اند. در شکل (۴) مشاهده می‌شود که اگر سختی واجهشی اشمیت و میانگین اندازه کانی‌ها به عنوان پارامتر ورودی برای برآورد شاخص شکنندگی استفاده شوند، مقدار ضریب تعیین برابر با ۰/۹۱ و هنگامی که سختی واجهشی اشمیت و نسبت

همانطور که از شکل (۳) مشاهده می‌شود (روابط دو متغیره) هنگامی که تنها از میانگین اندازه کانی‌ها، نسبت کوارتز به فلدسپات و سختی واجهشی اشمیت برای برآورد شاخص شکنندگی استفاده می‌شود، ضریب تعیین بین مقدار واقعی شاخص شکنندگی و برآورد شده شده به ترتیب برابر با ۰/۷۷، ۰/۸۷ و ۰/۷۰ می‌باشد. در شکل (۳) مقادیر واقعی شاخص

که از جدول ۴ مشاهده می شود مقدار خطای استاندارد برآورد برای روابط (۹) و (۱۰) به ترتیب برابر با $1/33$ و $1/20$ و مقدار خطای میانگین مربعات برای این روابط به ترتیب برابر با $1/78$ و $1/44$ می باشد. کمتر بودن خطای استاندارد برآورد و خطای میانگین مربعات در رابطه (۱۰) نسبت به رابطه (۹) نشان دهنده دقت بالاتر آن در برآورد شکنندگی نمونه‌ها است.

بر اساس مقایسه ضرایب تعیین، خط قطری، خطای استاندارد برآورد و خطای میانگین مربعات، در مجموع روابط چند متغیره نسبت به روابط دو متغیره دارای دقت بیشتری در برآورد شاخص شکنندگی هستند و می توان از آن‌ها برای سنگ‌های با دامنه ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مشابه استفاده کرد.

۶. نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، ۱۰ نمونه سنگ گرانیتی از معادن تواندشت و گوشه در اطراف شهر بروجرد تهیه و خصوصیات پتروگرافی (میانگین اندازه کانی‌ها و نسبت کوارتز به فلدسپات)، سختی واجهشی اشمیت و شکنندگی آن‌ها تعیین شد. روابط آماری دو و چند متغیره برای برآورد شکنندگی نمونه‌ها از میانگین اندازه کانی‌ها، نسبت کوارتز به فلدسپات و سختی واجهشی اشمیت توسعه داده شد. بر اساس تجزیه و تحلیل داده‌ها، نتایج زیر حاصل شد:

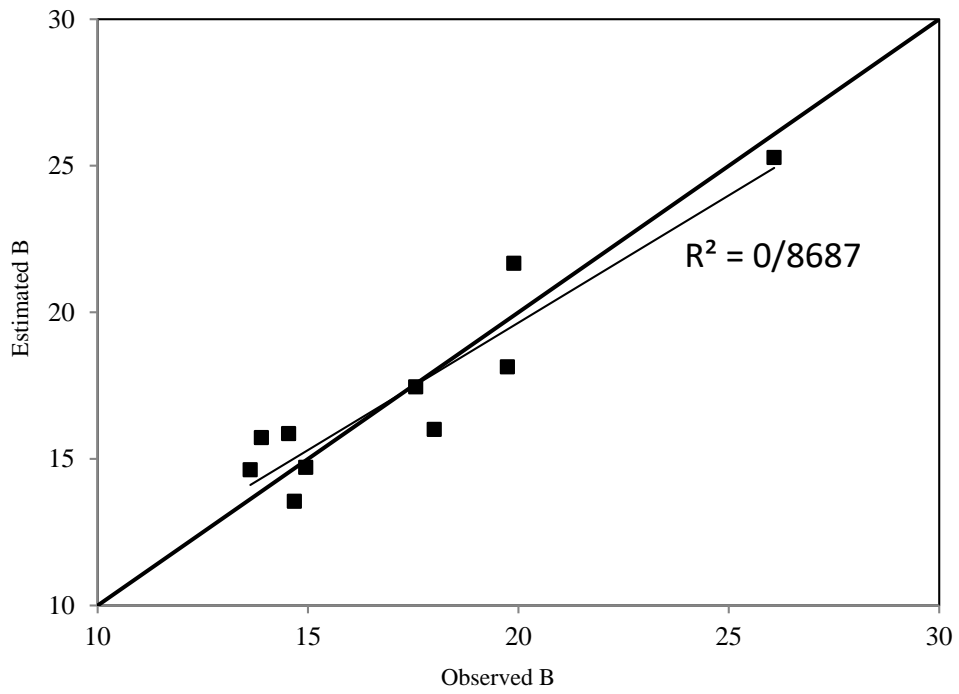
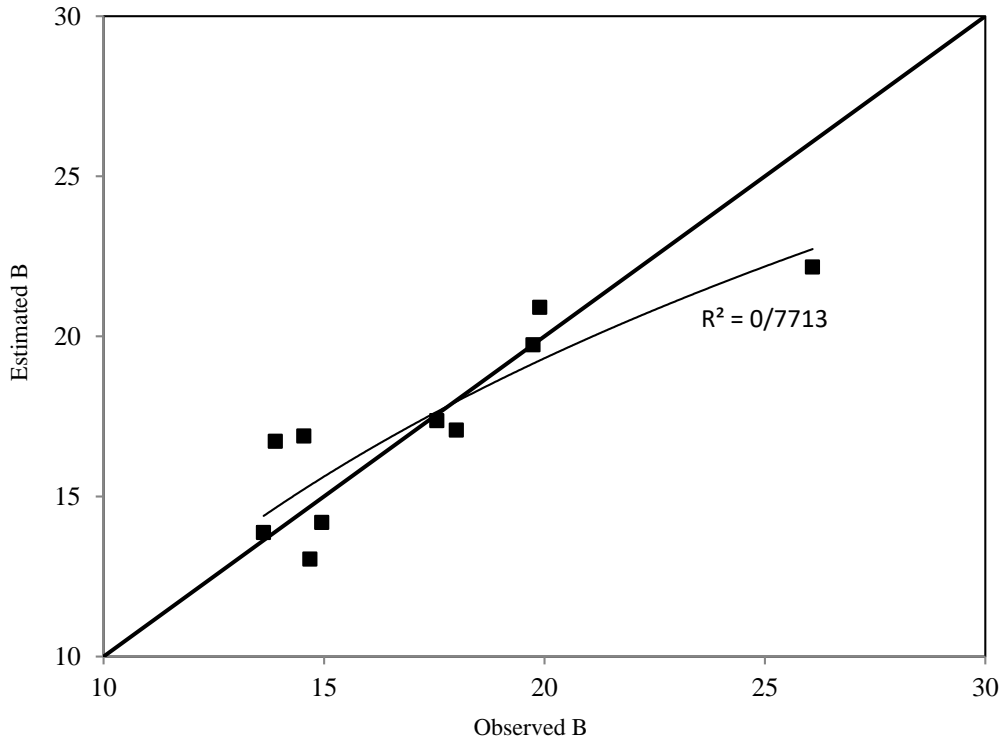
نتایج نشان داد با افزایش نسبت کوارتز به فلدسپات و سختی واجهشی اشمیت و کاهش میانگین اندازه کانی‌ها، مقدار شکنندگی نمونه‌ها افزایش و قابلیت حفاری نمونه‌ها سخت‌تر شده است.

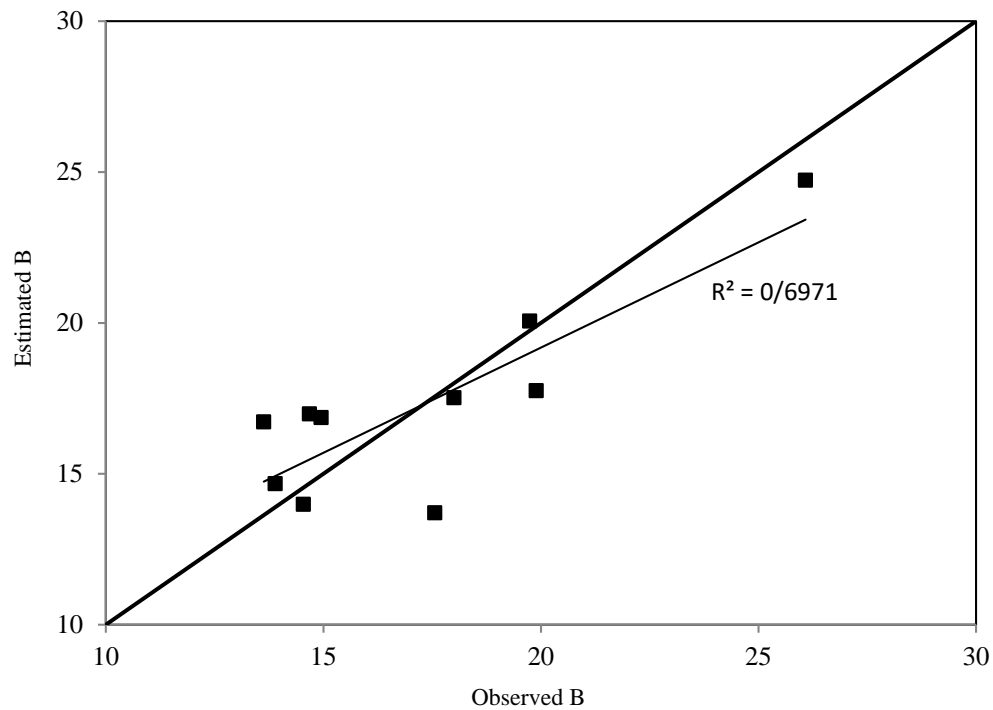
کوارتز به فلدسپات استفاده شوند ضریب تعیین $0/93$ خواهد بود.

بر اساس این نتایج مشاهده می شود آنالیزهای رگرسیون چند متغیره نسبت به آنالیزهای دو متغیره مقادیر ضریب تعیین بالاتری دارند. بنابراین دقت بیشتری در برآورد شاخص شکنندگی نمونه‌ها دارند. افزایش مقدار ضریب تعیین نشان دهنده تأثیر مثبت میانگین اندازه کانی‌ها و نسبت کوارتز به فلدسپات در دقت برآورد شاخص شکنندگی می باشد.

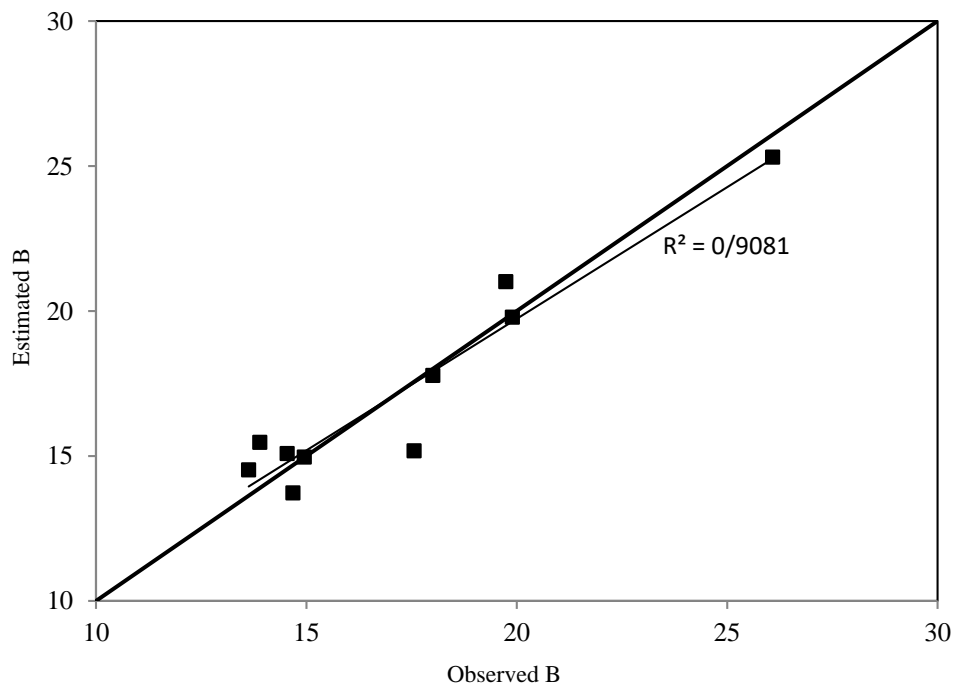
یکی از روش‌های آماری برای مقایسه و دقت روابط در برآورد یک پارامتر استفاده از خط قطری یا ۱:۱ است. به این منظور در شکل‌های (۳) و (۴) مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده شاخص شکنندگی در مقابل مقادیر برآورد شده آن از روابط دو متغیره (رابطه ۴، ۵ و ۶) و چند متغیره (۹ و ۱۰) به صورت شماتیک و با استفاده از خط قطری (۱:۱) نشان داده شده است. هر چه توزیع نقاط به خط قطری نزدیکتر باشند یا روی آن قرار گیرند نشان دهنده برآوردی دقیق‌تر از شاخص شکنندگی با استفاده از روابط ارائه شده است. همانطور که از شکل (۴) مشاهده می شود هنگامی که از روابط رگرسیونی چند متغیره استفاده می شود نقاط خیلی نزدیک به خط قطری هستند که نشان دهنده دقت بالای برآورد شاخص شکنندگی است. در حالی که روابط رگرسیون دو متغیره پراکندگی بیشتری در داده‌ها نشان می دهند (شکل ۳).

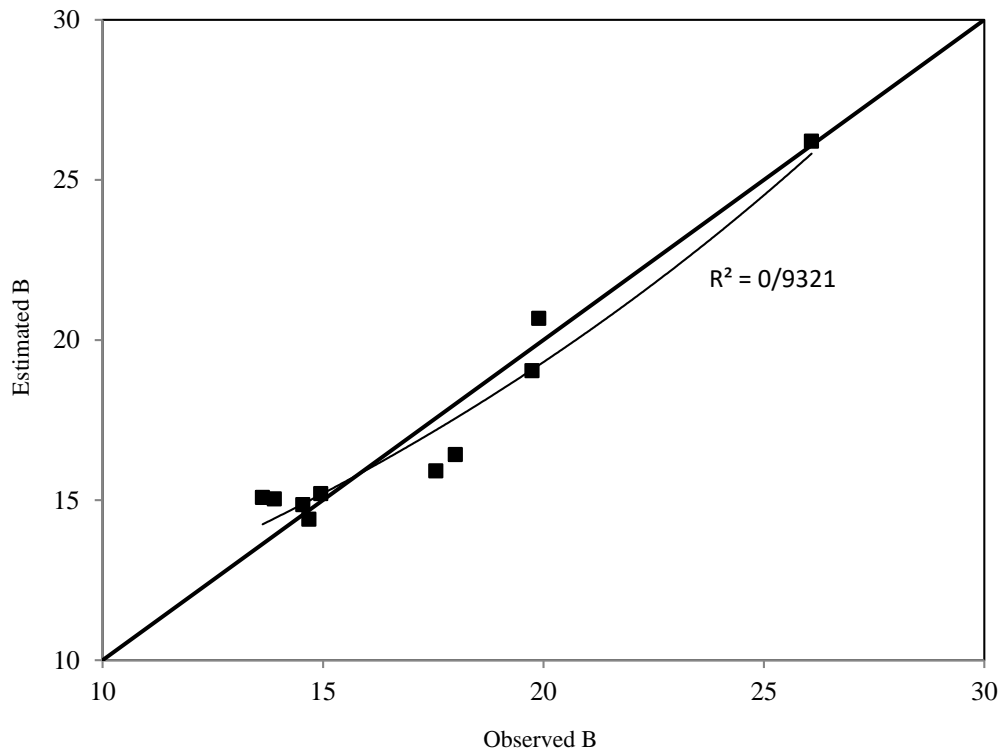
علاوه بر استفاده از خط قطری به منظور مقایسه و دقت روابط چند متغیره در برآورد شکنندگی، از خطای استاندارد برآورد (SEE) و خطای میانگین مربعات (MSE) استفاده شده است. معیارهای خطای استاندارد برآورد و خطای میانگین مربعات روشی برای تعیین میزان خطای برآورد یک مدل آماری هستند. هر چه مقادیر این دو معیار کمتر باشند نشان دهنده دقت بالاتر یک مدل در برآورد پارامتر مجهول است. همانطور





شکل ۳. مقادیر واقعی شاخص شکنندگی در مقابل مقادیر برآورد شده از روابط آماری دو متغیره (a) رابطه ۴ (شاخص شکنندگی - میانگین اندازه کانی ها (b) رابطه ۵ (شاخص شکنندگی - نسبت کوارتز به فلدسپات) (c) رابطه ۶ (شاخص شکنندگی - سختی واجهشی اشمیت)





شکل ۴. مقادیر واقعی شاخص شکنندگی در مقابل مقادیر برآورد شده از روابط آماری چند متغیره (a) رابطه ۹ (شاخص شکنندگی - سختی واجهشی اشمیت و میانگین اندازه کانی‌ها) (b) رابطه ۱۰ (شاخص شکنندگی - سختی واجهشی اشمیت و نسبت کوآرتز به فلدسپات)

کوآرتز به فلدسپات به همراه سختی واجهشی اشمیت باعث افزایش در مقدار ضریب تعیین برآورد شکنندگی در روابط همبستگی چند متغیره می‌شود. روابط همبستگی چند متغیره ارائه شده با استفاده از مقایسه ضرایب تعیین، آزمون‌های آماری و خطوط قطری (۱:۱) اعتبار سنجی شدند و نتایج نشان داد دارای دقت و صحت مناسب برای برآورد شکنندگی می‌باشند. این روابط می‌تواند به کاهش هزینه و زمان برای انجام آزمایش‌های پرهزینه، زمان‌بر و همچنین طاقت فرسای مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلی (که از آنها شکنندگی تعیین می‌شود) منجر شود. البته توصیه می‌شود روابط ارائه شده با احتیاط صرفاً برای سنگ‌های با منشأ، دامنه ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مشابه برای ارزیابی‌های اولیه شکنندگی سنگ‌ها استفاده شوند.

روابط آماری دو متغیره نشان دهنده ضریب تعیین ۰/۷۰ تا ۰/۸۷ برای برآورد شکنندگی از میانگین اندازه کانی‌ها، نسبت کوآرتز به فلدسپات و سختی واجهشی اشمیت است در صورتی که روابط چند متغیره نشان داد هنگامی که سختی واجهشی اشمیت و میانگین اندازه کانی‌ها به عنوان پارامتر ورودی رابطه رگرسیون استفاده می‌شوند مقدار ضریب تعیین برای برآورد شکنندگی برابر با ۰/۹۱ است و هنگامی که سختی واجهشی اشمیت و نسبت کوآرتز به فلدسپات به عنوان پارامتر ورودی استفاده شوند، مقدار ضریب تعیین برای برآورد شکنندگی برابر با ۰/۹۳ است. تجزیه و تحلیل نتایج با استفاده از آنالیزهای رگرسیون دو و چند متغیره نشان داد میانگین اندازه کانی‌ها و نسبت کوآرتز به فلدسپات نقش مهمی در میزان دقت برآورد شکنندگی از سختی واجهشی اشمیت دارند. در واقع استفاده از میانگین اندازه کانی‌ها و نسبت

منابع

- حبیب‌پور، ک. و صفری، ر.، ۱۳۸۸. راهنمای جامع کاربرد SPSS در تحقیقات پیمایشی (تحلیل داده‌های کمی). انتشارات لویه متفکران، ۸۶۱ ص.
- قبادی، م.ح.، امیری، م.، آلیانی، ف.، ۱۳۹۷. تعیین شکنندگی پریدوتیت‌ها با استفاده از خصوصیات فیزیکی و مکانیکی (مطالعه موردی: هرسین، استان کرمانشاه). یافته‌های نوین زمین شناسی کاربردی، جلد ۲۴، ۳۸-۲۶.
- قبادی، م.ح.، و رسولی فرح، م.، ۱۳۹۱. تعیین شکنندگی گرانیت با استفاده از سختی واجهشی سنگ جهت ارزیابی قابلیت حفاری. یافته‌های نوین زمین شناسی کاربردی، جلد ۱۱، ۲۸-۱۶.
- Altindag, R., 2002. The evaluation of rock brittleness concept on rotary blast hole drills. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy* 102 (1): 61- 66.
- Altindag, R., 2010. Assessment of some brittleness indexes in rock-drilling efficiency. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 43: 361– 370.
- Altindag, R., Guney, A., 2010. Predicting the relationships between brittleness and mechanical properties (UCS, TS and SH) of rocks. *Scientific Research and Essays*, 5(16): 2107–2118.
- Ghobadi, M.H., Naseri, F., 2016. Rock Brittleness Prediction Using Geomechanical Properties of Hamekasi Limestone: Regression and Artificial Neural Networks Analysis. *Geopersia*, 6 (1): 19-33.
- Heidari, M, Khanlari, G.R., Torabi-Kaveh, M., Kargarian, S., Saneie, S., 2014. Effect of Porosity on Rock Brittleness. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47:785–790.
- ISRM. 1981. Rock characterization testing and monitoring. ISRM suggested methods. In: Brown ET (ed)
- ISRM. 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring. In: Ulusay R, Hudson JA (eds.), Suggested methods prepared by the commission on testing methods.
- Kahraman, S., 2002. Correlation of TBM and drilling machine performances with rock brittleness. *Engineering Geology* 4:269-283.
- Streckeisen, A.L., 1967. Classification and nomenclature of igneous rocks (Final report of an inquiry.) *Neues Jahrbuch fur Mineralogie Abhandlungen*, 107: 144-240.
- Tiryaki, B., 2006. Evaluation of the indirect measures of rock brittleness and fracture toughness in rock cutting. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 106: 407–424.
- Yagiz, S., 2006. Correlation between uniaxial compressive strength and brittleness of selected rock types. In: 57th Geological Congress of Turkey, MTA General Directory, Ankara, Turkey, Abstract, p 160.
- Yarali, O., Soyer, E., 2011. The effect of mechanical rock properties and brittleness on drillability. *Scientific Research and Essays*, 6(5): 1077-1088.
- Yilmaz, N., Karaca, Z., Goktan, R.M., Akal, C., 2010. Relative brittleness characterization of some selected granitic building stones: Influence of mineral grain size. *Construction and Building Materials*, 23 (2009) 370–375.