تخمین شاخص شکنندگی سنگ‌های گرانیتوئیدی با استفاده از خصوصیات فیزیکی و شاخص بار نقطه‌ای

علی احمدی طایفه [۱*]، ناصر حافظی مقدّس[۲]، غلامرضا لشکری‌پور[۳]

۱ - دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، aliahmaditayefe@gmail.com

۲ - استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، nhafezi@um.ac.ir

۳ - استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، lashkaripour@um.ac.ir

چکیده

شکنندگی، شکست سنگ با حداقل تغییر شکل پلاستیک است که عامل مهمی در حفاری مکانیکی و تونل زنی است. نبود یک تعریف و روش اندازه‌گیری استاندارد باعث شده که محققان از روش‌های غیرمستقیم جهت تخمین شکنندگی استفاده کنند. در این مقاله نیز ارزیابی شکنندگی با استفاده از خصوصیات فیزیکی و شاخص بار نقطه‌ای ۱۰ نمونه از سنگ‌های گرانیتوئیدی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور از ۴ شاخص شکنندگی که براساس مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی است، استفاده شده است. در نهایت با استفاده از رگرسیون‌گیری ساده و چند متغیره روابطی جهت ارزیابی شکنندگی ارائه شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که میان شاخص شکنندگی B_1 و B_2 با این آزمون‌های ساده رابطه معناداری وجود ندارد، در حالیکه رابطه میان شاخص شکنندگی B_3 و B_4 با این آزمون‌ها از ضریب همبستگی بالایی برخوردار است. بیشترین ضریب همبستگی نیز مربوط به شاخص B_3 و براساس شاخص بار نقطه‌ای و دانسیته در حالت خشک و شاخص بار نقطه‌ای و تخلخل در حالت اشباع است.

واژه‌های کلیدی: شکنندگی، شاخص بار نقطه‌ای، خصوصیات فیزیکی، گرانیتوئید

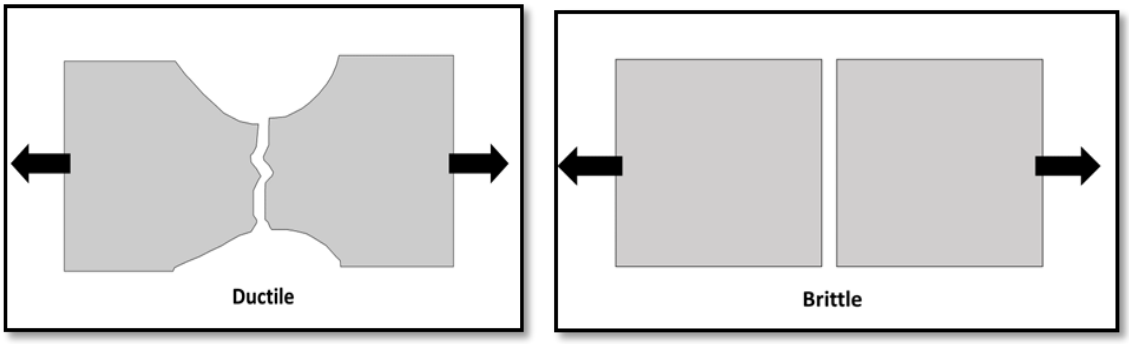
۱- مقدمه

شکنندگی سنگ عامل مهمی در حفاری مکانیکی و تونل زیرزمینی است [1]. شکنندگی تابع لیتولوژی، ترکیب، درجه حرارت، تخلخل و غیره است [2]. سنگ‌های شکننده بویژه سنگ‌های بلورین، استرین کمی قبل از شکست دارند، در حالیکه سنگ‌های نرم می‌توانند استرین بیشتری قبل از شکست داشته باشند [3].

شکنندگی را می‌توان به عنوان مقادیر اندک طویل‌شدگی ذرات، جدایش شکستگی[1]، نسبت بالاترین مقاومت فشاری به کششی در نظر گرفت [4]. در تعریفی دیگر شکنندگی، شکست سنگ با حداقل تغییر شکل پلاستیک است در حالی که شکل‌پذیری با مقدار قابل توجهی تغییر شکل پلاستیک همراه است. در شکل ۱ تفاوت این دو حالت نشان داده شده است [5].

به طور کلی، تعریف استاندارد و عمومی پذیرفته شده برای شکنندگی یا روش دقیق اندازه گیری برای تعیین آن وجود ندارد [6] و محققین معیارهای مختلفی را برای این منظور ارایه نموده اند که برخی از آنها در جدول ۱ ارایه شده است.

[1] Fracture Failure



شکل۱: تفاوت شکنندگی و شکل‌پذیری [5]

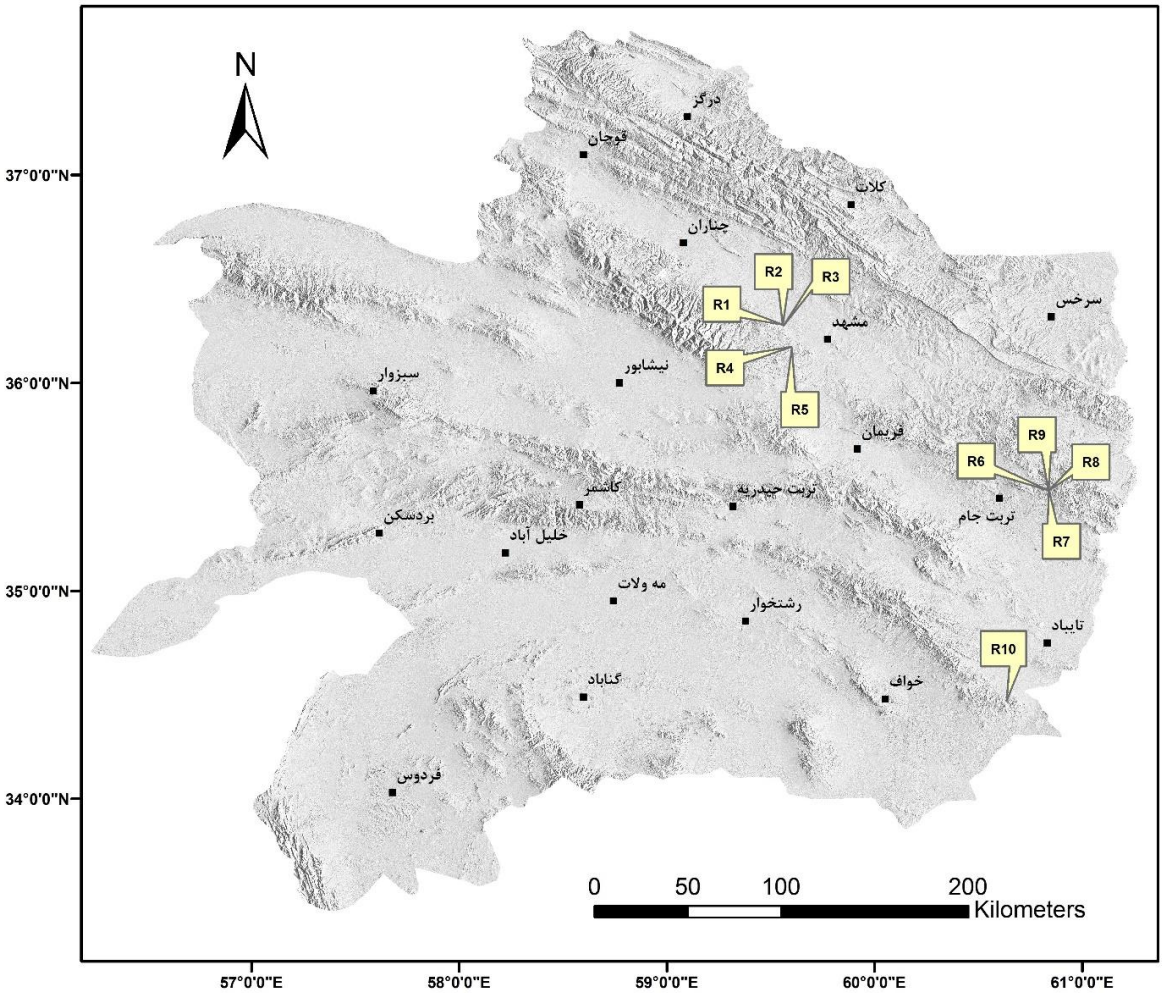
جدول ۱: روابط تعیین شکنندگی

شماره	منبع	رابطه
۱	Baron [7]	$B = \frac{w_r}{w_t}$
۲	Protodyakonov [8]	$B = q \times \sigma_c$
۳	Coates [9]	$B = \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_t}$
۴	Hucka and Das [10]	$B = \frac{\sigma_c}{\sigma_t}$
۵	Hucka and Das [10]	$B = \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t}$
۶	Altindag [11]	$B = \frac{\sigma_c \times \sigma_t}{۲}$
۷	Yagiz [12]	$B = ۰/۱۹۸\,\sigma_c - ۲/۱۷۴\,\sigma_t + ۰/۹۱۳\,\gamma - ۳/۸۰۷$
۸	Yarali and Soyer [13]	$B = (\sigma_c \times \sigma_t)^{۰/۷۲}$
۹	Ozfirat et al [14]	$B = \frac{\sigma_c + \sigma_t}{۲}$

B: شکنندگی، w_r: انرژی برگشت‌پذیر، w_t: انرژی کل، q: درصد ذرات ریزتر از ۲۸ مش، σ_c: مقاومت فشاری تک‌محوری، ε_r: کرنش برگشت‌پذیر، ε_t: کرنش کل، σ_t: مقاومت کششی، Y: دانسیته.

همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود عمده روابط برساس مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی است که آماده‌سازی نمونه برای این آزمایشات مشکل و زمان‌بر است، لذا استفاده از آزمایشات ساده و غیرمخرب می‌تواند روشی موثر جهت ارزیابی شکنندگی واقع شود. در این مورد می‌توان به مطالعات Kaunda and Asbury [15]، Altindag and Guney [16]، Mikaeil et al [6]، قبادی و رسولی‌فرح [۱۷] و حسینی و حاتمی جربت [۱۸] اشاره کرد.

در این مقاله نیز به ارزیابی شاخص شکنندگی با استفاده از خصوصیات فیزیکی و شاخص بار نقطه‌ای ۱۰ نمونه از سنگ‌های گرانیتوئیدی از مناطق مختلف استان خراسان رضوی پرداخته شده است. در شکل ۲ موقعیت برداشت نمونه‌ها مشخص شده است.



شکل ۲: موقعیت برداشت نمونه‌ها

۲- روش کار

در این پژوهش پس از برداشت بلوک‌های گرانیتوئیدی، خصوصیات فیزیکی، شاخص بار نقطه‌ای، مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی برزیلین در حالت خشک و اشباع و براساس استاندارد انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ [19] محاسبه شد که در ادامه درباره هر یک توضیح داده خواهد شد.

۲-۱- آزمون تعیین خصوصیات فیزیکی

این آزمون براساس استاندارد [19] ISRM انجام شد. مقادیر تخلخل و چگالی خشک و اشباع تعیین و در جدول ۲ ارائه شده است.

۲-۲- آزمون تعیین مقاومت بار نقطه‌ای

این آزمون بر روی نمونه‌هایی با قطر ۵۴ میلیمتر و نسبت ضخامت به قطر ۰/۳ تا ۱ به صورت محوری در دو حالت خشک و اشباع انجام شده است. این شاخص برای قطر ۵۰ میلیمتر تصحیح شده و نتایج آن در جدول ۲ به صورت Is_{50} نشان داده شده است.

۲-۳- آزمون مقاومت برزیلی

آزمون مقاومت کششی برزیلی (σt) بر روی نمونه مغزه‌هایی با قطر ۵۴ میلیمتر و نسبت ضخامت به قطر ۰/۵ تا ۰/۷۵ در دو حالت خشک و اشباع انجام شده است. نتایج این آزمایش در جدول ۲ ارائه شده است.

۲-۴- آزمون تراکم تک‌محوره

این آزمایش بر روی نمونه مغزه‌هایی با قطر ۵۴ میلیمتر و نسبت طول به قطر ۲ تا ۲/۵ و در دو حالت خشک و اشباع انجام گردید. نتایج این آزمون در جدول ۲ و به صورت σ_c گزارش شده است.

۲-۵- شاخص شکنندگی

برای محاسبه شاخص شکنندگی نیز از چهار رابطه ۴، ۵، ۶ و ۹ موجود در جدول ۱ استفاده شد که به ترتیب با نام‌های B_1، B_2، B_3 و B_4 مشخص شده‌اند. در جدول ۳ نتایج آزمایشات انجام شده بر روی ده نمونه مورد بررسی ارایه شده است.

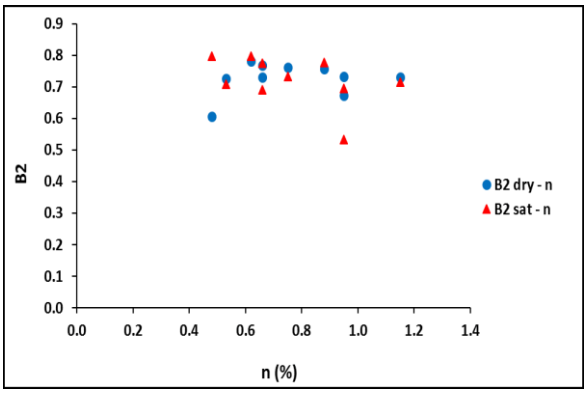
جدول ۲: نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی ویژه، مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی برزیلی

شماره نمونه	تخلخل (٪)	دانسیته (gr/cm^3)		Is_{50} (MPa)		σt (MPa)		σ_c (MPa)	
		خشک	اشباع	خشک	اشباع	خشک	اشباع	خشک	اشباع
۱	۰/۴۸	۲/۷۹	۲/۷۹	۴/۸۶	۴/۰۵	۱۰/۶۰	۷/۶۵	۴۳/۳۲	۶۷/۴۳
۲	۰/۵۳	۲/۶۴	۲/۶۴	۳/۹۹	۳/۰۸	۷/۵۲	۶/۰۸	۴۷/۵۱	۳۵/۶۴
۳	۰/۷۵	۲/۶۴	۲/۶۴	۳/۳۴	۱/۸۴	۶/۹۲	۵/۴۳	۵۱/۱۶	۳۵/۳۲
۴	۰/۹۵	۲/۶۳	۲/۶۴	۳/۱۷	۱/۹۲	۵/۱۱	۵/۰۲	۲۶/۱۵	۲۷/۸۲
۵	۰/۸۸	۲/۶۵	۲/۶۶	۲/۶۸	۱/۹۶	۴/۰۷	۳/۴۷	۲۹/۳۶	۲۷/۵۸
۶	۰/۶۶	۲/۸۳	۲/۸۴	۵/۵۳	۴/۹۲	۱۰/۶۴	۱۱/۷۲	۸۰/۹۷	۶۴/۰۶
۷	۰/۹۵	۲/۷۲	۲/۷۳	۲/۸۷	۱/۷۴	۷/۳۸	۴/۸۹	۴۸/۰۵	۱۶/۰۲
۸	۰/۶۶	۲/۷۴	۲/۷۵	۵/۷۲	۴/۷۶	۱۰/۰۸	۹/۰۱	۶۴/۵۱	۷۰/۹۱
۹	۰/۶۲	۲/۶۶	۲/۶۷	۳/۱۰	۱/۴۵	۴/۶۵	۴/۳۹	۳۷/۹۷	۳۸/۸۶
۱۰	۱/۱۵	۲/۶۳	۲/۶۴	۳/۵۹	۲/۸۴	۶/۰۱	۶/۳۷	۳۸/۵۴	۳۸/۲۵

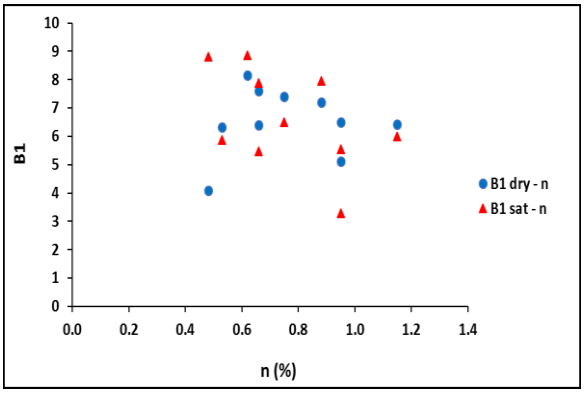
جدول ۳: مقادیر شکنندگی سنگ‌های گرانیتوئیدی

شماره نمونه	B_1		B_2		$B_3\ (MPa)^2$		$B_4\ (MPa)$	
	خشک	اشباع	خشک	اشباع	خشک	اشباع	خشک	اشباع
۱	۴/۰۹	۸/۸۲	۰/۶۱	۰/۸۰	۲۲۹/۵۸	۲۵۷/۸۷	۲۶/۹۶	۳۷/۵۴
۲	۶/۳۲	۵/۸۶	۰/۷۳	۰/۷۱	۱۷۸/۶۶	۱۰۸/۳۳	۲۷/۵۲	۲۰/۸۶
۳	۷/۳۹	۶/۵۱	۰/۷۶	۰/۷۳	۱۷۷/۰۲	۹۵/۸۲	۲۹/۰۴	۲۰/۳۷
۴	۵/۱۲	۵/۵۵	۰/۶۷	۰/۶۹	۶۶/۸۱	۶۹/۷۶	۱۵/۶۳	۱۶/۴۲
۵	۷/۲۱	۷/۹۵	۰/۷۶	۰/۷۸	۵۹/۷۵	۴۷/۸۳	۱۶/۷۲	۱۵/۵۳
۶	۷/۶۱	۵/۴۷	۰/۷۷	۰/۶۹	۴۳۰/۷۶	۳۵۷/۳۳	۴۵/۸۰	۳۷/۸۹
۷	۶/۵۱	۳/۲۸	۰/۷۳	۰/۵۳	۱۷۷/۳۰	۳۹/۱۲	۲۷/۷۱	۱۰/۴۵
۸	۶/۴۰	۷/۸۷	۰/۷۳	۰/۷۷	۳۲۵/۱۲	۳۱۹/۴۳	۳۷/۲۹	۳۹/۹۶
۹	۸/۱۷	۸/۸۵	۰/۷۸	۰/۸۰	۸۸/۳۰	۸۵/۲۷	۲۱/۳۱	۲۱/۶۲
۱۰	۶/۴۱	۶/۰۰	۰/۷۳	۰/۷۱	۱۱۵/۸۱	۱۲۱/۸۳	۲۲/۲۷	۲۲/۳۱

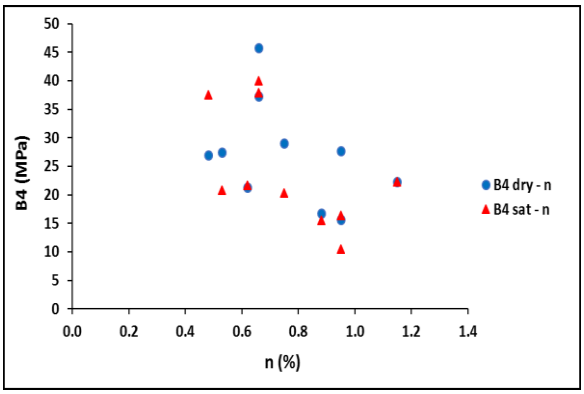
در نهایت به منظور رگرسیون‌گیری، نتایج حاصل از خصوصیات فیزیکی و شاخص بار نقطه‌ای در مقابل شاخص‌های شکنندگی ترسیم شد که در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ قابل مشاهده است. همانطور که مشاهده می‌شود رگرسیون‌گیری بین خصوصیات فیزیکی و شاخص بار نقطه‌ای با شاخص شکنندگی B_1 و B_2 از ضریب همبستگی بالایی برخوردار نیستند و داده‌ها پراکنده‌اند در حالیکه بین شاخص شکنندگی B_3 و B_4 با خصوصیات فیزیکی و شاخص بار نقطه‌ای ضریب همبستگی بالاتری وجود دارد که در این میان نیز ضریب همبستگی B_3 بیش از B_4 است. لذا به منظور بررسی بیشتر رگرسیون‌گیری ساده و چند متغیره بین خصوصیات فیزیکی و شاخص بار نقطه‌ای با شاخص شکنندگی B_3 صورت گرفت (جدول ۴ و ۵). برای این منظور از نرم‌افزار SPSS استفاده شد. برای بررسی صحت نتایج نیز از پارامترهای مجذور میانگین مربعات خطا (*RMSE*)، R^2، نسبت میانگین مربعات رگرسیون به میانگین مربعات باقیمانده‌ها (F) و *P-value* استفاده شده است، به این صورت که هر چه *RMSE* به صفر و R^2 به یک و F بیشتر باشد مدل پیش‌بینی کننده بهتر خواهد بود. همچنین با سطح اطمینان ۹۵٪، مقدار *P-value* باید کمتر از ۵٪ باشد.



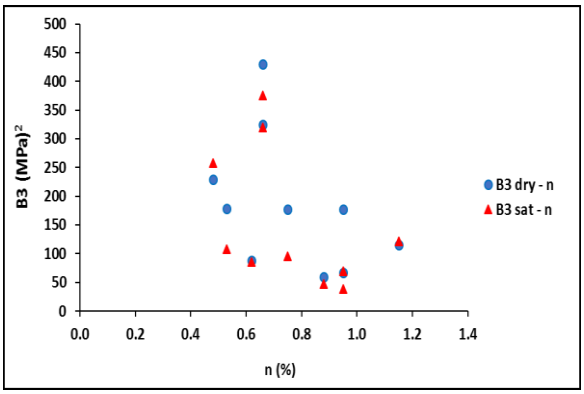
ب



الف

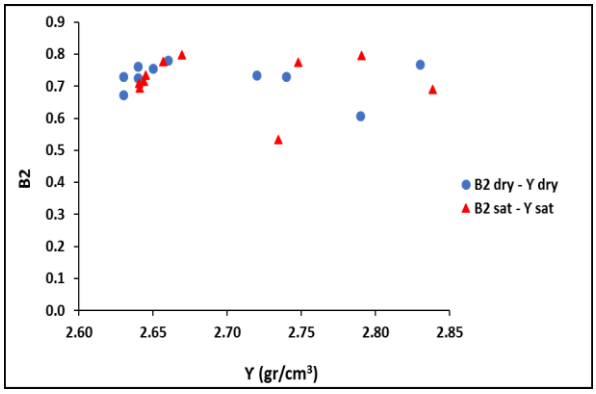


د

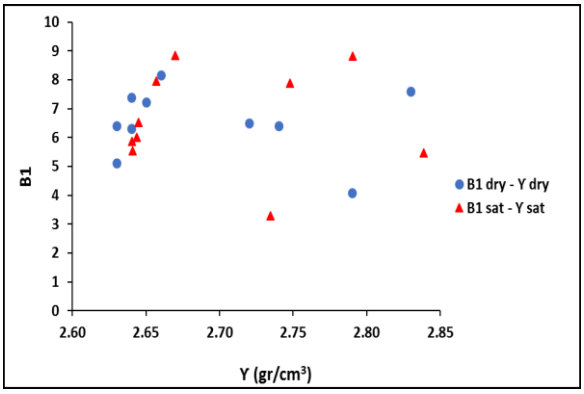


ج

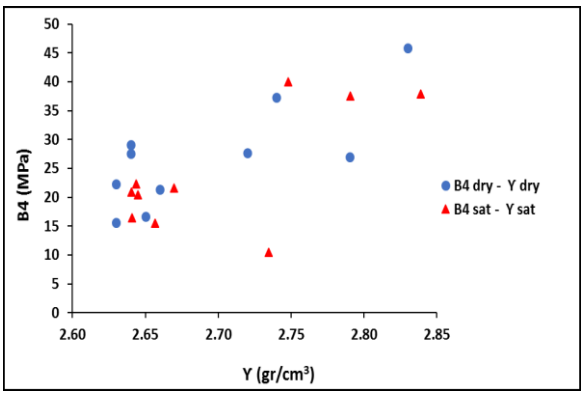
شکل ۳: ارتباط بین تخلخل با B_1 (الف)، B_2 (ب)، B_3 (ج) و B_4 (د)



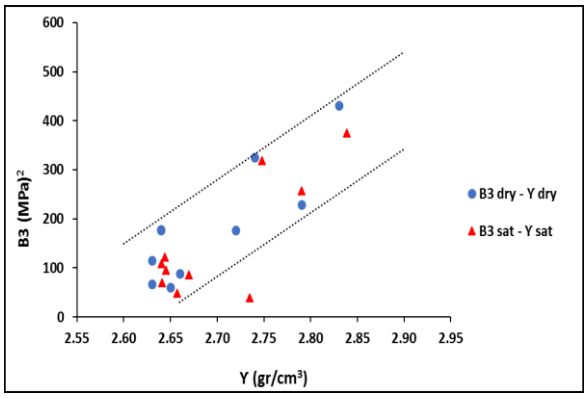
ب



الف

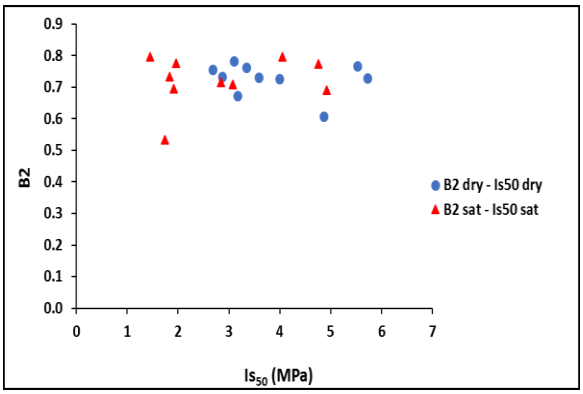


د

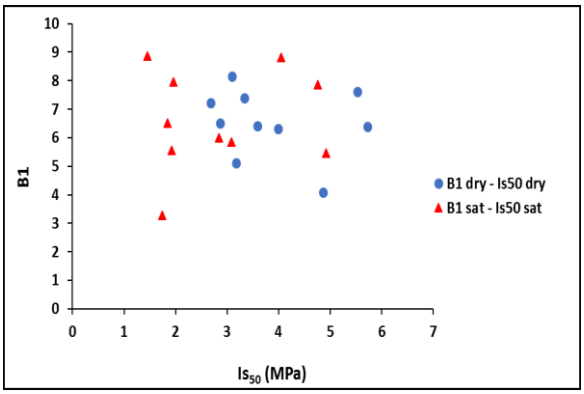


ج

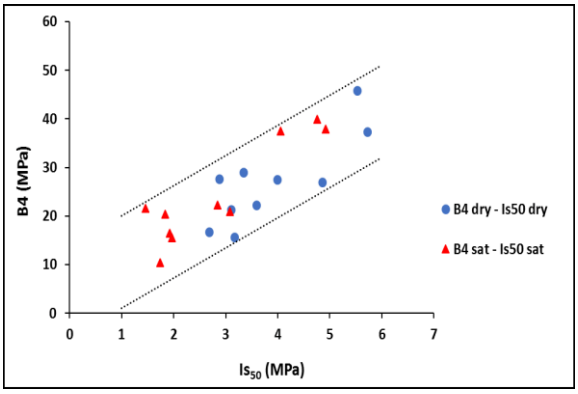
شکل ۴: ارتباط بین دانسیته با B_1 (الف)، B_2 (ب)،B_3 (ج) و B_4 (د)



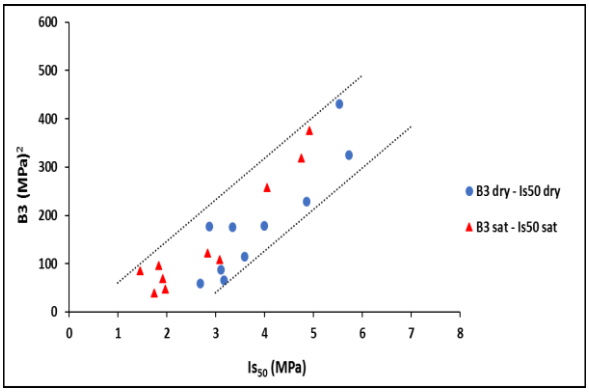
ب



الف



د



ج

شکل ۵: ارتباط بین شاخص بار نقطه‌ای با B_1 (الف)، B_2 (ب)،B_3 (ج) و B_4 (د)

جدول ۴: نتایج رگرسیون ساده و چندمتغیره بین شاخص شکنندگی B_3 در حالت خشک با خصوصیات فیزیکی و شاخص بار نقطه‌ای

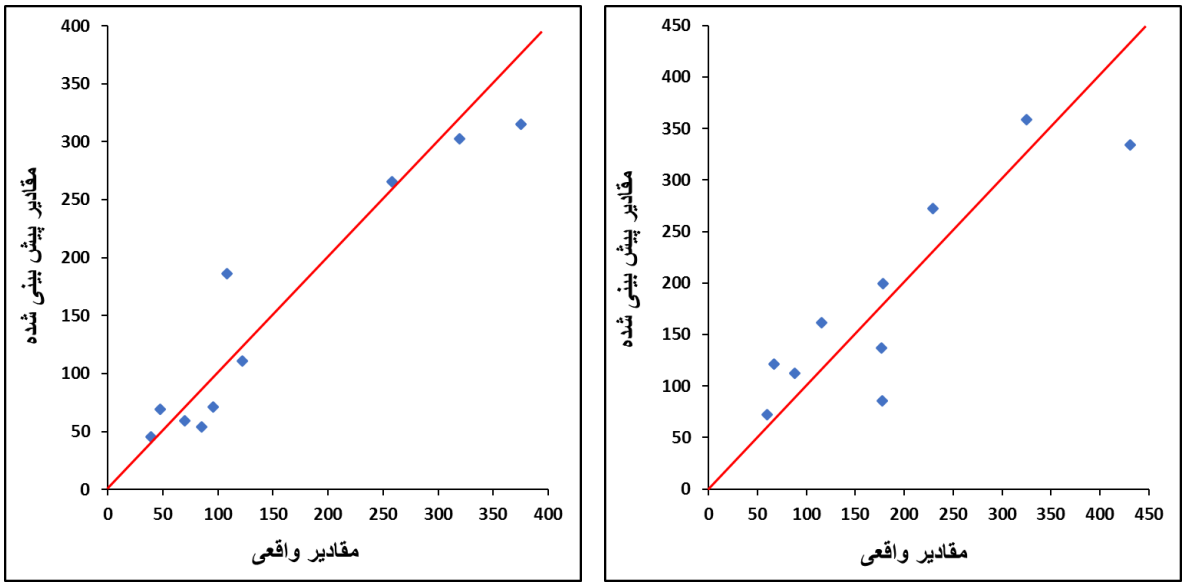
شماره مدل	متغیر وابسته	متغیر مستقل	مدل پیش‌بینی کننده	RMSE	R^2	F	P-value
۱	$B_{3(dry)}$	n	$B_3 = 210.059\ n$	۰/۴۲۷	۰/۵۸۸	۱۲/۸۲۶	۰/۰۰۶
۲		$Y_{(dry)}$	$B_3 = 69.521\ Y$	۰/۳۳۳	۰/۷۵	۲۶/۹۴۹	۰/۰۰۱
۳		$Is_{50(dry)}$	$B_3 = 50.826\ Is_{50}$	۰/۲۱۶	۰/۸۹۴	۷۶/۰۷۷	۰/۰۰۰
۴		n , $Y_{(dry)}$	$B_3 = -255.617\ n + 141.669\ Y$	۰/۲۸۸	۰/۸۱۲	۱۷/۳۳	۰/۰۰۱
۵		n , $Is_{50(dry)}$	$B_3 = -116.634\ n + 71.368\ Is_{50}$	۰/۱۷۷	۰/۹۲۹	۵۲/۵۹۶	۰/۰۰۰
۶		$Y_{(dry)}$, $Is_{50(dry)}$	$B_3 = -70.078\ Y + 96.33\ Is_{50}$	۰/۱۶۴	۰/۹۳۹	۶۱/۷۴۴	۰/۰۰۰
۷		n , $Y_{(dry)}$, $Is_{50(dry)}$	$B_3 = -11.069\ n - 65.009\ Y + 94.988\ Is_{50}$	۰/۱۶۴	۰/۹۳۹	۳۶/۰۶۸	۰/۰۰۰

جدول ۵: نتایج رگرسیون ساده و چندمتغیره بین شاخص شکنندگی B_3 در حالت اشباع با خصوصیات فیزیکی و شاخص بار نقطه‌ای

شماره مدل	متغیر وابسته	متغیر مستقل	مدل پیش‌بینی کننده	RMSE	R2	F	P-value
۱	B3(sat)	n	$B3 = 168.519\ n$	۰/۳۶۲	۰/۴۹	۸/۶۴۸	۰/۰۱۶
۲		Y(sat)	$B3 = 57.134\ Y$	۰/۲۹۵	۰/۶۶	۱۷/۴۵۵	۰/۰۰۲
۳		Is50(sat)	$B3 = 58.721\ Is50$	۰/۱۳۹	۰/۹۲۵	۱۱۰/۳۲۵	۰/۰۰۰
۴		n , Y(sat)	$B3 = -278.251\ n + 135.472\ Y$	۰/۲۵۰	۰/۷۵۵	۱۲/۳۵۰	۰/۰۰۴
۵		n , Is50(sat)	$B3 = -92.135\ n + 76.426\ Is50$	۰/۰۹۲	۰/۹۶۷	۱۱۶/۹۶۲	۰/۰۰۰
۶		Y(sat) , Is50(sat)	$B3 = -37.512\ Y + 88.845\ Is50$	۰/۰۹۴	۰/۹۶۶	۱۱۲/۵۵۵	۰/۰۰۰
۷		n , Y(sat) , Is50(sat)	B3 = -54.937 n – 17.103 Y + 84.204 Is50	۰/۰۹۰	۰/۹۶۹	۷۱/۹۱	۰/۰۰۰

نتایج حاصل نشان می‌دهد که در حالت خشک، چگالی و شاخص بار نقطه‌ای (مدل ۶) بهترین ترکیب برای پیش‌بینی شاخص شکنندگی B_3 است و در حالت اشباع، تخلخل و شاخص بار نقطه‌ای (مدل ۵) بهترین ترکیب برای پیش‌بینی شاخص شکنندگی B_3 است. توجه شود که در حالت خشک اگر چه $RMSE$ و R^2 مدل ۶ و ۷ برابر است ولی از آنجاکه F در مدل ۶ بیشتر است، بنابراین مدل ۶ بهتر است. در حالت اشباع نیز اگرچه R^2 مدل ۷ اندکی بیشتر از مدل ۵ است، ولی میزان F در مدل ۵ خیلی بیشتر از مدل ۷ است، بنابراین مدل ۵ قابل قبول‌تر است.

برای بررسی این دو مدل نیز مقادیر B_3 اندازه‌گیری شده (جدول ۳) در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده حاصل از این دو مدل در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نقاط دارای توزیع یکنواختی در اطراف خط قطری هستند به خصوص در حالت اشباع، که نشان‌دهنده اعتبار این دو مدل است.



ب الف

شکل ۶: مقادیر B_3 واقعی در مقابل الف) مقادیر پیش‌بینی شده براساس مدل ۶ در حالت خشک و ب) مقادیر پیش‌بینی شده براساس مدل ۵ در حالت اشباع

۳- بحث

به منظور بررسی نتایج، نتایج با پژوهش‌های مشابه مقایسه شد. در پژوهشی که توسط حیدری و همکاران [2] بر روی سنگ‌های مختلف صورت گرفت روابطی جهت تخمین شاخص شکنندگی B_1، B_2 و B_3 با استفاده از شاخص بار نقطه‌ای در حالت خشک و اشباع پیشنهاد شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که ضریب همبستگی شاخص بار نقطه‌ای با B_3 از همه بالاتر و با B_2 از همه کمتر است، که در زیر روابط بین شاخص بار نقطه‌ای و B_3 ارائه شده است (رابطه ۱ و ۲).

$$B_{۳_{dry}} = ۱۳۸/۸۲\, Is_{۵۰} - ۲۰۴/۴۸ \qquad R^۲ = ۰/۹۸ \qquad (۱)$$

$$B_{۳_{sat}} = ۹۵/۶۷ Is_{۵۰} - ۱۱۸/۴۴ \qquad R^۲ = ۰/۹۷ \qquad (۲)$$

در پژوهش دیگری که توسط حسینی و حاتمی‌جربت [۱۸] بر روی سنگ توف کرج صورت گرفت، نتایج نشان داد که رابطه درجه ۲ بین شاخص شکنندگی B_3 و شاخص بار نقطه‌ای از بیشترین ضریب همبستگی (رابطه ۳) و رابطه درجه ۲ بین شاخص شکنندگی B_2 و شاخص بار نقطه‌ای از کمترین ضریب همبستگی برخوردار است.

$$B_۳ = ۳۲/۳۹۷Is_{۵۰}^{۲} - ۴۰۷/۷۸Is_{۵۰} + ۲۶۲۰/۹ \qquad R^۲ = ۰/۸۳۱۶ \qquad (۳)$$

در این پژوهش نیز مشابه پژوهش‌های ذکر شده، رابطه میان خصوصیات فیزیکی و شاخص بار نقطه‌ای با شاخص شکنندگی B_3 بیش از سایر شاخص‌هاست. بنابراین بهترین شاخص برای تخمین شکنندگی، شاخص شکنندگی B_3 است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله ارتباط بین شاخص شکنندگی و آزمون‌های ساده ۱۰ نمونه از سنگ‌های گرانیتوئیدی استان خراسان رضوی بررسی شد. برای این منظور از رگرسیون‌گیری بین شاخص شکنندگی B_1 و B_2 و B_3 و B_4 با خصوصیات فیزیکی و شاخص بار نقطه‌ای استفاده شد. نتایج حاصل از رگرسیون نشان داد که بین شاخص شکنندگی B_1 و B_2 با آزمون‌های ساده ضریب همبستگی بالایی وجود ندارد ولی بین شاخص شکنندگی B_3 و B_4 با این آزمون‌ها ضریب همبستگی بالایی وجود دارد. بیشترین ضریب همبستگی نیز مربوط به شاخص B_3 است. لذا برای بررسی بیشتر به ایجاد روابط چند متغیره با B_3 پرداخته شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که:

B_3 با تخلخل رابطه عکس و با دانسیته و شاخص بار نقطه‌ای رابطه مستقیم دارد.

بیشترین ضریب همبستگی B_3 با آزمون‌های ساده در حالت خشک مربوط به دانسیته و شاخص بار نقطه‌ای با مقدار ۰/۹۳۹ و در حالت اشباع مربوط به تخلخل و شاخص‌بار نقطه‌ای با مقدار ۰/۹۶۷ است.

بنابراین استفاده از خصوصیات فیزیکی و شاخص بار نقطه‌ای به عنوان روش‌های غیرمخرب، ساده و ارزان جهت ارزیابی B_3 پیشنهاد می‌شود، که این امر با توجه به تاثیر عوامل مختلف بر شکنندگی نیاز به تحقیق بیشتر و نمونه‌های با جنس‌های متفاوت می‌باشد.

۵- قدردانی

مقاله حاضر، استخراج شده از پایان‌نامه با کد تصویب‌نامه طرح پژوهشی درون دانشگاهی دانشگاه فردوسی مشهد با شماره ۴۶۳۲۷ می‌باشد.

مراجع

[1] Kaunda RB, Asbury B. Prediction of rock brittleness using nondestructive methods for hard rock tunneling. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 8: 533-540, 2016.

[2] Heidari M, Khanlari G R, Torabi-Kaveh M, Kargarian S, Saneie S. Effect of Porosity on Rock Brittleness. Rock Mech Rock Eng, 2014.

[3] Altindag R. Reply to the discussion by Yagiz on ‘‘Assessment of some brittleness indexes in rock-drilling efficiency’’ by Altindag. Rock Mech Rock Eng 43:375–376, 2010.

[4] Kahraman S, Altindag R. A brittleness index to estimate fracture toughness. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 41: 343-348, 2004.

[5] Nejati HR, Moosavi SA. A new brittleness index for estimation of rock fracture toughness. Journal of Mining & Environment, Vol.8, No.1: 83-91, 2017.

[6] Mikaeil R, Ghadernejad S, Ataei M, Esmailvandi M, Daneshvar A. Investigating the Relationship between Various Brittleness Indexes with Specific Ampere Draw in Rock Sawing Process. International Journal of mining and Geo-Engineering: 125-132, 2017.

[7] Baron LI. Determimation of Properties of rocks (in Russian). Gozgotekhizat, Moscow, 1962.

[8] Protodyakonov MM. Mechanical properties and drillability of rocks. 5th Symp. On Rock Mech.,Univ. Minnesota, 1962.

[9] Coates DF. Experimental criteria for classification of rock substances. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. 3: 181-189, 1966.

[10] Hucka V, Das B. Brittleness determination of rocks by different methods. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. . Geomech. Abstr.,11: 389- 392, 1974.

[11] Altindag R. The evaluation of rock brittleness concept on rotary blast hole drills. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2002.

[12] Yagiz S. Assessment of brittleness using rock strength and density with punch penetration test, Tunnelling and Underground Space Technology 24: 66–74, 2009.

[13] Yarali O, Soyer E. The effect of mechanical rock properties and brittleness on drillability. Scientific Research and Essays. 6 (5): 1077-1088, 2011.

[14] Özfırat K, Yenice H, Şimşir F, Yaralı O. A new approach to rock brittleness and its usability at prediction of drillability. Journal of African Earth Sciences: 94-101, 2016.

[15] Kaunda R B, Asbury B. Prediction of rock brittleness using nondestructive methods for hard rock tunneling. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 8: 533-540, 2016.

[16] Altindag R, Guney A. Predicting the relationships between brittleness and mechanical properties (UCS, TS and SH) of rocks. Scientific Research and Essays Vol. 5(16): 2107 – 2118, 2010.

[۱۷] قبادی، م. ح.، رسولی‌فرح، م.ر. تعیین شکنندگی گرانیت با استفاده از سختی واجهشی سنگ جهت ارزیابی قابلیت حفاری. یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، جلد ۱۱: ۱۶-۲۸، ۱۳۹۱.

[۱۸] حسینی، م.، حاتمی جربت، م. تعیین شاخص شکنندگی سنگ با استفاده از آزمایش بار نقطه‌ای (مطالعه موردی: سنگ توف کرج). مجله انجمن زمین‌شناسی ایران، جلد نهم، شماره ۱ و۲: ۱۵-۲۶، ۱۳۹۵.

[19] ISRM. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006. Suggested methods prepared by the commission on testing methods., Ankara, International Soc. for Rock Mechanics, Commission on Testing Methods, 2007.