

ارزیابی سرعت حفاری چرخشی در سنگ آهک‌ها بر اساس شاخص‌های شکنندگی

امین جمشیدی*

استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۰/۰۸/۱۰

کلیدواژه‌ها:

سنگ آهک

سرعت حفاری چرخشی

شاخص شکنندگی

چکیده

برآورد دقیق سرعت حفاری چرخشی در سنگ می‌تواند منجر به صرفه‌جویی زمان و هزینه عملیات اکتشافی در پروژه‌های ژئوتکنیکی مانند سدها، تونل‌ها، چاه‌های نفت و گاز و معادن سنگ ساختمانی شود. در این پژوهش سرعت حفاری چرخشی در سنگ آهک بر اساس شاخص‌های شکنندگی برآورد شده است. برای رسیدن به این هدف، مقادیر سرعت حفاری، مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلین در سه چاه اکتشافی حفر شده در سنگ آهک تعیین شدند. بر اساس مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلین، شاخص‌های شکنندگی سنگ آهک‌ها تعیین شدند. بر اساس داده‌ها، روابط رگرسیون یک، دو و سه متغیره میان سرعت حفاری به عنوان پارامتر وابسته و شاخص‌های شکنندگی به عنوان پارامتر مستقل توسعه داده شد. نتایج حاکی از آن است که بر اساس روابط رگرسیون یک و دو متغیره، سرعت حفاری چرخشی می‌تواند بر اساس شاخص‌های شکنندگی با دقت تقریباً مناسبی برآورد شود. علاوه بر این نتایج نشان داد که رابطه رگرسیون سه متغیره نسبت به یک و دو متغیره، دارای دقت بیشتری در برآورد سرعت حفاری می‌باشد. نهایتاً، رابطه سه متغیره ارائه شده در این پژوهش می‌تواند در مراحل ابتدایی عملیات اکتشافی پروژه‌های ژئوتکنیکی در سنگ‌های آهکی مناسب باشد که این باعث صرفه‌جویی در زمان و هزینه می‌شود.

۱- پیش‌نوشتار

حفاری چرخشی به طور گسترده‌ای در معادن سنگ ساختمانی، ساختگاه پروژه‌های ژئوتکنیکی (سد و تونل) و چاه‌های نفت و گاز برای به دست آوردن اطلاعات زیرسطحی استفاده می‌شود. برآورد سرعت حفاری قبل از انجام عملیات اکتشافی، برای ارزیابی هزینه و برنامه‌ریزی پروژه‌های حفاری در سنگ بسیار مهم می‌باشد. تعدادی از محققین به بررسی روابط همبستگی سرعت حفاری چرخشی با خصوصیات مختلف سنگ‌ها پرداخته‌اند که از این میان می‌توان به تحقیقات Selmer-Olsen and Blindheim (1970); Selim and Bruce (1970) Schmidt (1972); Rabia and Brook (1980); Thuro and Spaun (1996); Howarth and Rowland (1987); Pathinkar and Misra (2015) اشاره کرد.

Paone et al. (1969) پژوهشی مرتبط با حفاری چرخشی در محل ساختگاه یک پروژه ژئوتکنیکی انجام دادند. این محققین نتیجه گرفتند که سرعت حفاری دارای ارتباط نزدیکی با مقاومت فشاری تک محوری و کششی برزیلین، سختی شور و مدول یانگ استاتیک سنگ‌ها است. همچنین این محققین بیان کردند که استفاده از چند ویژگی سنگ به طور همزمان می‌تواند ارزیابی دقیق‌تری از سرعت حفاری بدهد. Selim and Bruce (1970) یکسری مطالعات آزمایشگاهی حفاری روی سنگ‌های مختلف انجام دادند. این محققین روابط همبستگی بین سرعت حفاری با مقاومت فشاری تک محوری و کششی برزیلین، سختی شور، چگالی، مدول یانگ استاتیک و دینامیک، مدول برشی و درصد کوارتز برقرار کردند. این محققین بیان کردند که روابط همبستگی توسعه یافته در برآورد سرعت حفاری مناسب هستند. Selmer-Olsen and Blindheim (1970) با انجام حفاری چرخشی در صحرا، یک همبستگی خوب بین سرعت حفاری و شاخص سرعت حفاری برقرار کردند و به این

نتیجه رسیدند که سختی، مقاومت، شکنندگی و سایش‌پذیری سنگ دارای اهمیت بسزایی در سرعت حفاری هستند. Schmidt (1972) روابطی بر اساس مقاومت فشاری و کششی، سختی شور، چگالی، مدول یانگ، مدول برشی، سرعت امواج طولی و عرضی و نسبت پواسون برای برآورد سرعت حفاری توسعه داد. این محقق به این نتیجه رسید که فقط مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی و نسبت پواسون همبستگی خوبی با سرعت حفاری دارند. Pathinkar and Misra (1980) پنج نوع سنگ مختلف را در مقیاس آزمایشگاهی را انجام دادند و همبستگی آن را با تعدادی از خصوصیات سنگ بررسی کردند. نتایج نشان داد که خصوصیات از سنگ مانند مقاومت فشاری و کششی، سختی شور و موس به تنهایی نمی‌توانند برآورد مناسبی از سرعت حفاری داشته باشند. حال آنکه وقتی این خصوصیات در یک رابطه چند متغیره وارد می‌شوند، سرعت حفاری با دقت مناسبی می‌تواند برآورد شود. Rabia and Brook (1980) یک رابطه برای برآورد سرعت حفاری از سختی‌های شور و ضربه‌ای توسعه دادند. نتایج نشان داد همبستگی بسیار خوبی بین این پارامترها وجود دارد. Howarth et al. (1986) رابطه میان سرعت حفاری با تعدادی از خصوصیات سنگ را بررسی کردند و نتایج آنها نشان داد که چگالی، مقاومت فشاری اشباع، تخلخل و سرعت موج طولی دارای همبستگی خوبی با سرعت حفاری هستند در صورتی که برای سختی اشمیت، مقاومت فشاری خشک اینگونه نیست. Howarth and Rowland (1987) یک معیار کیفی از بافت سنگ به نام ضریب بافت توسعه دادند و رابطه آن را با سرعت حفاری بررسی کردند. این محققین به این نتیجه رسیدند که ضریب بافت دارای همبستگی نزدیکی با سرعت حفاری است. آنها همچنین بیان کردند که یک سنگ با ضریب بافتی بالا دارای حفاری‌پذیری پایین و مقاومت فشاری بالا است. تحقیقات Thuro and Spaun (1996) نشان داد که سرعت حفاری در ارتباط نزدیکی با مقاومت فشاری و کششی سنگ‌ها است.

همانطور که از تحقیقات گذشته پیداست، تعداد زیادی از خصوصیات سنگ برای برآورد سرعت حفاری مورد استفاده قرار گرفته است. از این خصوصیات می‌توان مقاومت فشاری تک محوری و کششی برزیلین، مدول یانگ، سختی و سرعت

* نویسنده مسئول: امین جمشیدی؛ E-mail: jamshidi.am@lu.ac.ir

حقوق معنوی مقاله برای فصلنامه علوم زمین و نویسندگان مقاله محفوظ است.

doi: GSJ.2021.237778.1813

dor: 20.1001.1.10237429.1400.31.3.7.4



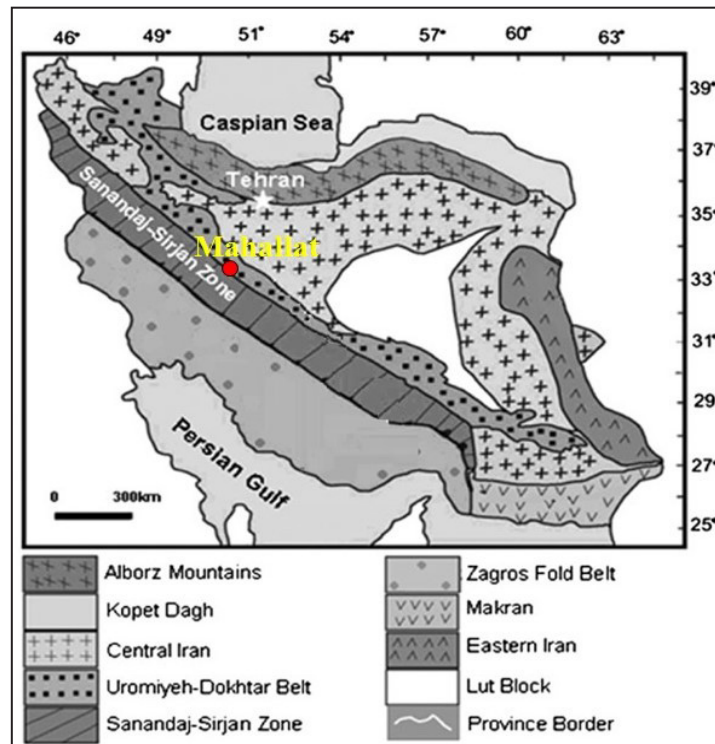
This is an open access article Under the by-nc/4.0/ License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

در سنگ‌آهک برداشت شد (جدول ۱). شکل ۱ موقعیت جغرافیایی چاه‌های اکتشافی را نمایش می‌دهد. از مغزه‌های سنگی بازآفتی، مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلین تعیین شدند. بر اساس این مقاومت‌ها، شاخص‌های شکنندگی سنگ‌ها محاسبه شدند. با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS آنالیزهای رگرسیون روی داده‌ها انجام شد و روابط یک، دو و سه متغیره میان سرعت حفاری و شاخص‌های شکنندگی توسعه داده شد.

امواج اولتراسونیک را نام برد. به هر حال در این تحقیقات توجهی به شاخص‌های شکنندگی سنگ نشده است. در تحقیق حاضر سرعت حفاری چرخشی در سنگ‌آهک بر اساس شاخص‌های شکنندگی (با استفاده از آنالیزهای رگرسیون یک، دو و سه متغیره) مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، اطلاعات مربوط به سرعت حفاری چرخشی ۳ چاه اکتشافی



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه.

جدول ۱- سرعت حفاری چرخشی، مقاومت و شاخص‌های شکنندگی سنگ‌آهک‌های مورد مطالعه.

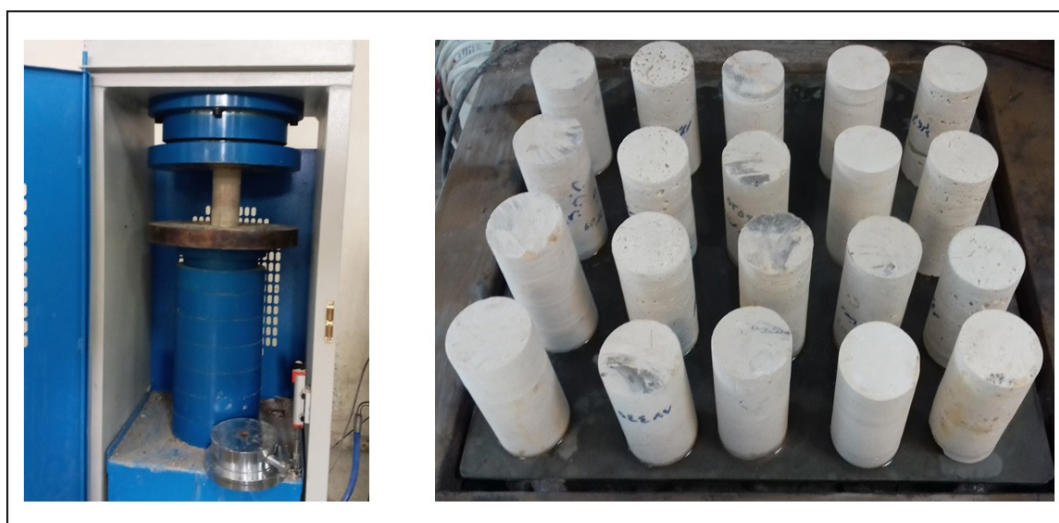
B_3 (MPa)	B_2 (MPa) ²	B_1	BTS (MPa)	UCS (MPa)	PR (mm/min)	Geology name	Depth (m)	Borehole No.
21.1	444	11.7	8.7	102	37	A1 Limestone	28-29	1
20.6	425	11.8	8.5	100	36	A2 Limestone	29-30	1
20.9	436	11.3	8.8	99	36	A3 Limestone	30-31	1
21.7	471	12.2	8.8	107	35	A4 Limestone	31-32	1
21.5	463	11.7	8.9	104	35	A5 Limestone	32-33	1
22.5	505	12.2	9.1	111	34	Limestone A6	33-34	1
18.0	323	11.5	7.5	86	43	B1 Limestone	18-19	2
19.3	373	11.4	8.1	92	42	B2 Limestone	19-20	2
17.3	298	11.8	7.1	84	42	B3 Limestone	20-21	2
18.3	336	10.8	7.9	85	41	B4 Limestone	21-22	2
19.4	375	12.0	7.9	95	41	B5 Limestone	22-23	2
18.2	331	11.2	7.7	86	38	B6 Limestone	23-24	2
14.4	206	13.6	5.5	75	47	C1 Limestone	15-16	3
15.7	246	12.0	6.4	77	46	C2 Limestone	16-17	3
14.8	218	12.5	5.9	74	45	C3 Limestone	17-18	3
16.7	280	11.4	7.0	80	44	C4 Limestone	18-19	3
15.8	250	11.8	6.5	77	41	C5 Limestone	19-20	3

PR سرعت حفاری چرخشی، UCS مقاومت فشاری تک محوری، BTS مقاومت کششی برزیلین، B شاخص‌های شکنندگی.

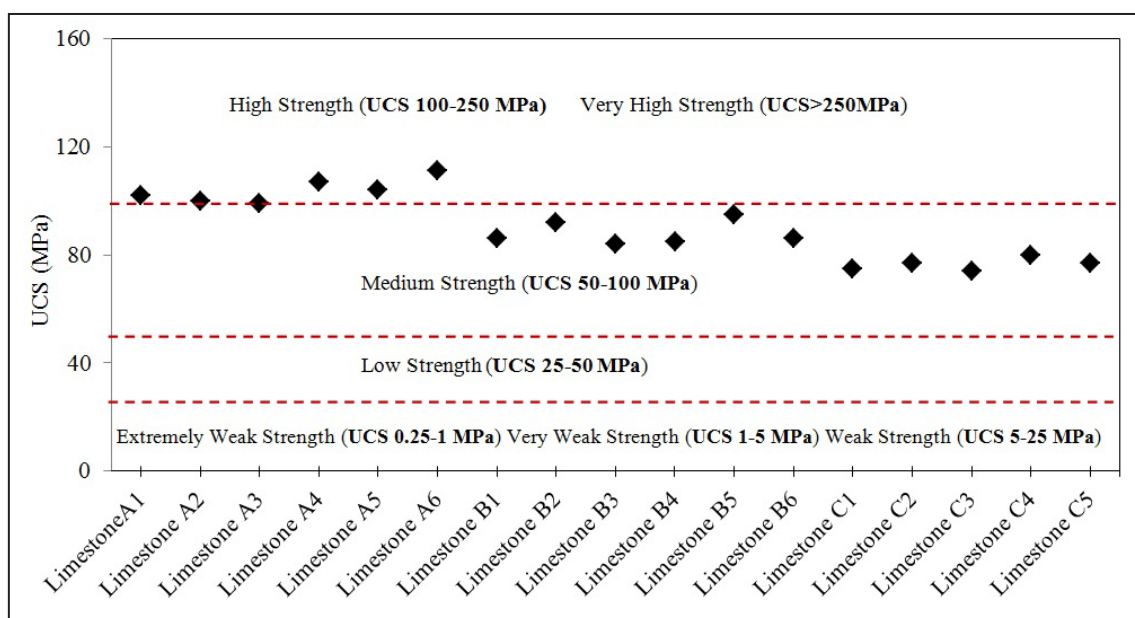
۱-۲. مقاومت فشاری تک محوری و کششی برزیلین

آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری و کششی برزیلین روی ۵ نمونه مطابق با استاندارد انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM, 1981) انجام شدند. برای انجام این آزمایش‌ها، تعدادی از مغزه‌های بازافتی از چاه‌های حفاری به آزمایشگاه انتقال داده شدند. با استفاده از دستگاه برش و ساب، دو انتهای نمونه‌ها برش داده شدند به طوری که وضعیت هندسی آنها مطابق معیار انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ باشند. برای آزمایش مقاومت فشاری تک محوری نسبت طول به قطر ۲/۵ و آزمایش مقاومت کششی برزیلین نسبت ضخامت به قطر ۰/۵ برای نمونه‌ها در نظر گرفته شد. شکل ۲ تعدادی از نمونه‌های تهیه شده برای انجام آزمایش مقاومت فشاری

تک محوری و دستگاه آزمایش را نشان می‌دهد. میانگین نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۱ ارائه شده‌اند. سنگ آهک‌های مورد مطالعه مطابق با طبقه‌بندی پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM, 2007) بر اساس مقاومت فشاری تک محوری طبقه‌بندی شده‌اند (شکل ۳). از این شکل مشخص است که سنگ آهک A1، A2، A5، A4 و A6 در رده سنگ‌های با مقاومت فشاری بالا (۲۵۰-۱۰۰ مگاپاسکال) و دیگر نمونه‌ها در رده سنگ‌های با مقاومت متوسط (۵۰-۱۰۰ مگاپاسکال) قرار می‌گیرند. همچنین از جدول ۱ مشاهده می‌شود که مقاومت کششی برزیلین نمونه‌ها از ۵/۵ مگاپاسکال برای سنگ آهک C1 تا ۹/۱ مگاپاسکال برای سنگ آهک A6 متغیر هستند.



شکل ۲- تعدادی از نمونه‌های تهیه شده برای آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری و دستگاه آزمایش.



شکل ۳- طبقه‌بندی سنگ آهک‌های مورد مطالعه بر اساس مقاومت فشاری تک محوری (ISRM, 2007).

۲-۲. شاخص‌های شکنندگی

شکنندگی سنگ یکی از خواص مکانیکی سنگ می‌باشد که در عملیات حفاری و سازه‌های زیرزمینی از اهمیت بسزایی برخوردار است. شکنندگی تابعی از مقاومت است که نشان دهنده استحکام سنگ در مقابل تغییر شکل در محدوده الاستیک است (Altindag and Guney, 2010). 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. با این حال بیشتر محققین شکنندگی را تابعی از مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلین سنگ می‌دانند. از این رو برای ارزیابی شکنندگی سنگ‌ها از مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلین استفاده می‌کنند. در این پژوهش، برای تعیین شکنندگی نمونه‌ها از شاخص‌های شکنندگی پیشنهاد شده توسط (Altindag and Guney, 2010) استفاده شده است. این شاخص‌ها از روابط زیر به دست می‌آیند:

اساس شاخص شکنندگی B₃ استفاده شده است (جدول ۲). از این جدول مشاهده می‌شود که با افزایش شکنندگی از کمی شکننده تا بسیار شکننده، قابلیت حفاری سنگ‌ها از خیلی آسان تا بسیار سخت تغییر می‌کند. با مشاهده جدول ۲ می‌توان گفت که نمونه‌های سنگ‌آهک C1 و C3 در رده سنگ‌های با شکنندگی متوسط و قابلیت حفاری آسان، سنگ‌آهک C2، C4، B6، B5، B4، B3، B2، B1 و C5 در رده سنگ‌های شکننده و قابلیت حفاری متوسط و نمونه‌های سنگ‌آهک A1، A2، A5، A4، A3 و A6 در رده سنگ‌های با شکنندگی زیاد و قابلیت حفاری سخت قرار گرفته‌اند.

$$B_1 = UCS/BTS \quad (1)$$

$$B_2 = (UCS \times BTS)/2(MPa)^2 \quad (2)$$

$$B_3 = \sqrt{UCS \times BTS/2 MPa} \quad (3)$$

در این روابط B شاخص‌های شکنندگی، UCS و BTS به ترتیب مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی برزیلین نمونه‌ها هستند.

نتایج تعیین شاخص شکنندگی نمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. مطابق نتایج به دست آمده، نمونه‌ها بر اساس شاخص شکنندگی و قابلیت حفاری طبقه‌بندی شده‌اند. برای این از طبقه‌بندی پیشنهاد شده توسط (Altindag and Guney 2010) بر

جدول ۲- طبقه‌بندی سنگ‌های مورد مطالعه بر اساس شکنندگی و قابلیت حفاری (Altindag and Guney, 2010).

Limestones under study	Drilling ability	Description of brittleness	Brittleness index (B ₃)
-	Very easy	Low brittleness	0-10
Limestone C1- Limestone C3	Easy	Moderatly brittleness	10-15
B3- B2- Limestone B1- Limestone Limestone B6- B5- Limestone B4- Limestone Limestone C5 - Limestone C2- Limestone C4 Limestone	Moderate	Brittle	15-20
A3- A2- Limestone Limestone A1- Limestone A6 A5- Limestone A4- Limestone Limestone	Difficult	Very brittleness	20-25
-	Extremely difficult	Extremely brittleness	25<

۳- نتایج و بحث

۳-۱. آنالیز رگرسیون یک متغیره برای برآورد سرعت حفاری در نمونه‌ها

در این بخش به بررسی رابطه سرعت حفاری و شاخص‌های شکنندگی (B₁, B₂, B₃)، با انجام آنالیزهای رگرسیون یک متغیره پرداخته شده است. در این آنالیزها سعی شده که منحنی بر داده‌ها برازش شود که بیشترین ضریب تعیین (R²) را داشته باشد. برای انجام این آنالیزها از داده‌های جدول ۱ استفاده شده است. در شکل ۴ رابطه بین سرعت حفاری و شاخص‌های شکنندگی نشان داده شده است. مطابق روابط ۴ تا ۶، روابط خطی، نمایی و خطی بین سرعت حفاری و شاخص‌های شکنندگی با ضرایب تعیین ۰/۵۰ تا ۰/۸۶ وجود دارد:

$$PR = 2.0636B_1 + 18.684 \quad R^2 = 0.500$$

$$PR = -2.7031B_1 + 67.561 \quad R^2 = 0.62 \quad \text{الف-۴}$$

$$PR = 57.29e^{-0.001B_2} \quad R^2 = 0.86 \quad \text{ب-۴}$$

$$PR = -1.4995B_3 + 68.054 \quad R^2 = 0.85 \quad \text{ج-۴}$$

$$PR = 2.0636B_1 + 18.684 \quad R^2 = 0.50 \quad \text{د-۴}$$

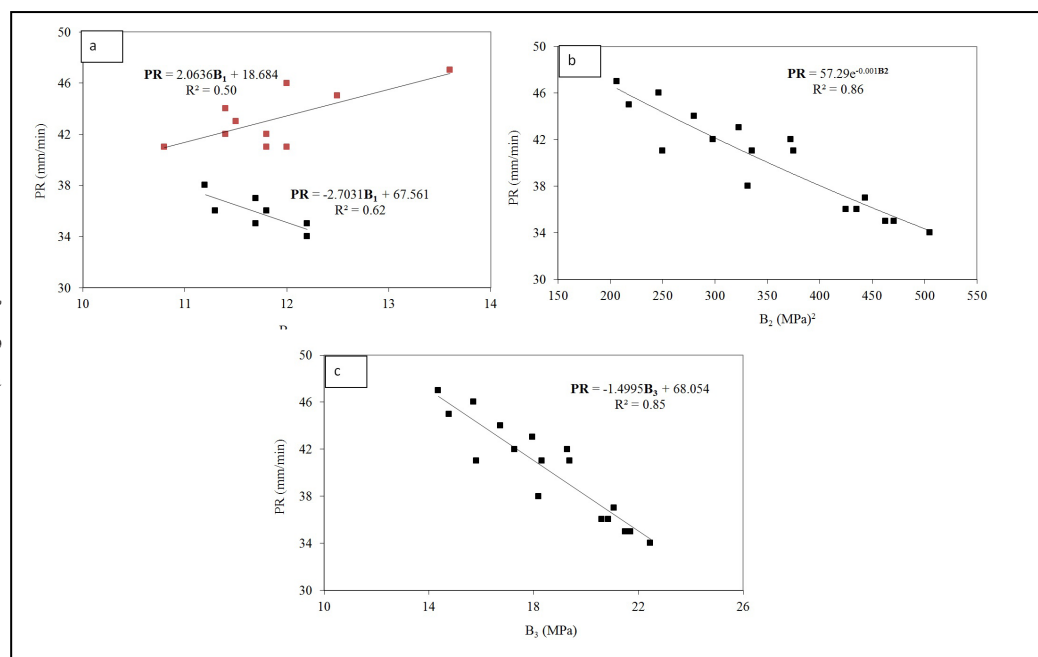
$$PR = -2.7031B_1 + 67.561 \quad R^2 = 0.62 \quad \text{ه-۴}$$

$$PR = 57.29e^{-0.001B_2} \quad R^2 = 0.86 \quad \text{و-۴}$$

$$PR = -1.4995B_3 + 68.054 \quad R^2 = 0.85 \quad \text{ز-۴}$$

در این روابط PR سرعت حفاری چرخشی (میلیمتر بر دقیقه) و B شاخص‌های شکنندگی نمونه‌ها می‌باشد.

شکل ۴- رابطه سرعت حفاری و شاخص‌های شکنندگی B₃ (c)، B₂ (b)، B₁ (a).



شاخص شکنندگی B_1 است (رابطه ۴). بنابراین وقتی این شاخص در روابط دو متغیره ۱۰ و ۱۱ وارد می‌شود تأثیر منفی بر ضریب تعیین می‌گذارد و در نتیجه باعث کاهش آن می‌شود.

۳-۳- آنالیز رگرسیون سه متغیره برای برآورد سرعت حفاری در نمونه‌ها

در این تحقیق از آنالیز رگرسیون سه متغیره برای امکان برآورد دقیق‌تر سرعت حفاری از شاخص‌های شکنندگی نیز استفاده شده است. مطابق رابطه ۱۳، در این آنالیز سرعت حفاری به عنوان پارامتر وابسته و شاخص‌های شکنندگی B_1 ، B_2 و B_3 به عنوان پارامتر مستقل در نظر گرفته شده‌اند:

$$PR = \alpha_0 + \alpha_1 B_1 + \alpha_2 B_2 + \alpha_3 B_3 \quad (13)$$

که در آن PR سرعت حفاری (میلی متر بر دقیقه)، B شاخص‌های شکنندگی، α_0 یک ثابت و α_1 ، α_2 و α_3 ضرایب رگرسیون هستند.

با استفاده از نرم افزار SPSS v.19 code ® داده‌های حاصل از جدول ۱ تجزیه و تحلیل و رابطه رگرسیون سه متغیره زیر برای برآورد سرعت حفاری نمونه‌ها ارائه شده است:

$$PR = -24.129 + 1.580B_1 - 0.213B_2 + 6.489B_3 \quad R^2=0.94$$

$$34 < PR(\text{mm/min}) < 47 \quad 10.8 < B_1 < 13.6 \quad 206 < B_2(\text{MPa}) < 505 \quad \text{و} \quad 14.4 < B_3(\text{MPa}) < 22.5 \quad (14)$$

از این رابطه مشاهده می‌شود که وقتی از سه پارامتر مستقل شاخص‌های شکنندگی استفاده می‌شود، ضریب تعیین برابر با ۰/۹۴ خواهد بود. مقایسه ضریب تعیین به دست آمده از رابطه سه متغیره ۱۴ با روابط یک متغیره ۴ تا ۶ و دو متغیره ۱۰ تا ۱۲ نشان می‌دهد که رابطه سه متغیره دارای دقت بالاتری برای برآورد سرعت حفاری است.

به منظور صحت سنجی رابطه ۱۴ به دست آمده از آنالیزهای رگرسیون سه متغیره، از مفهوم سطح معنی داری (Sig.) و آزمون F فیشر (F-ratio) استفاده شده است. تمامی رابطه‌های آماری به یک مقدار P-value یا مقدار احتمال که در بعضی مواقع تحت عنوان سطح معنی داری یا Sig. معرفی می‌شود، ختم می‌شوند. سطح معنی داری اساس پذیرش معنی داری آماری نتایج می‌باشد، بدین صورت که زمانی به احتمال پایین شانس بودن نتایج پی می‌بریم که مقدار Sig. از مقدار مورد توافق جامع علمی یعنی ۰/۰۵ کوچک‌تر باشد (در این تحقیق سطح خطای ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است، $\alpha=0.05$). تنها در صورتی که مقدار Sig. به دست آمده از ۰/۰۵ کوچک‌تر باشد، می‌توانی به ارائه یک تفسیر علمی از نتایج مبادرت کرد. پس زمانی که مقدار Sig. از ۰/۰۵ بزرگ‌تر باشد، آنگاه باید گفت که نتایج در اثر شانس حاصل شده‌اند و بنابراین نمی‌توان تفسیر علمی از نتایج ارائه داد. بر اساس نتایج تحلیل رابطه ۱۴ بر اساس نرم افزار آماری SPSS، مقدار Sig. محاسبه شده برابر با ۰/۰۰ شده است. این مقدار کمتر از ۰/۰۵ ($\alpha=0.05$) می‌باشد که نشان دهنده معنی دار بودن رابطه ۱۴ برای برآورد سرعت حفاری نمونه‌ها از لحاظ آماری است.

یکی از مهمترین آزمون‌های آماری برای ارزیابی میزان برازش یک مدل آزمون F فیشر است. این آزمون نشان می‌دهد که آیا متغیرهای مستقل قادرند به خوبی تغییرات متغیر وابسته را تبیین کنند یا خیر. اگر F به دست آمده از رابطه رگرسیون بیشتر از F موجود در جدول‌های آماری باشد نشان دهنده کارایی و مناسب بودن رابطه رگرسیون در تخمین متغیر وابسته است. بر اساس تحلیل نرم افزار SPSS مشاهده شد که مقدار F به دست آمده از رابطه ۱۴ به مراتب بزرگتر از F موجود در جدول‌های آماری (با درجه آزادی رگرسیون ۳ و درجه آزادی باقیمانده ۱۳) می‌باشد. این موضوع نشان دهنده همبستگی و برازش مناسب رابطه ۱۴ بین سرعت حفاری با شاخص‌های شکنندگی است.

به منظور ارزیابی دقت برآورد سرعت حفاری با استفاده از رابطه ۱۴، از خط قطری یا ۱:۱ ($y=x$) استفاده شده است. به این منظور در شکل ۳ مقادیر واقعی اندازه گیری شده سرعت حفاری در مقابل مقادیر برآورد شده آن از رابطه ۱۴ به صورت شماتیک و با استفاده از خط قطری نشان داده شده است. هر چه توزیع نقاط به خط

مقایسه روابط ۴ تا ۶، نشان می‌دهد که سرعت حفاری همبستگی ضعیفی با شاخص شکنندگی B_1 دارد (ضریب تعیین ۰/۵۰ و ۰/۶۲)، در صورتی که با شاخص‌های شکنندگی B_2 و B_3 دارای همبستگی مناسبی است (ضرایب تعیین به ترتیب برابر با ۰/۸۶ و ۰/۸۵). از این رو می‌توان با احتیاط از روابط ۵ و ۶ برای برآورد و ارزیابی اولیه سرعت حفاری نمونه‌ها استفاده کرد.

نکته دیگری که از شکل ۴ می‌توان گفت، وجود رابطه معکوس بین سرعت حفاری و شاخص‌های شکنندگی است. در واقع با کاهش شاخص‌های شکنندگی، سرعت حفاری نمونه‌ها افزایش پیدا کرده است. این موضوع به این دلیل است که شاخص‌های شکنندگی یک رابطه مستقیم با مقاومت فشاری تک محوری و کششی برزیلین دارند (روابط ۲ و ۳). بنابراین با کاهش مقاومت، شاخص شکنندگی کاهش می‌یابد که این به نوبه خود باعث افزایش قابلیت حفاری می‌شود. در نتیجه می‌توان گفت مقاومت نمونه‌ها دارای یک رابطه معکوس با سرعت حفاری است. این یافته‌ها در تطابق با نتایج Thuro and Spaun (1996) و Schmidt (2014) است. این محققین نیز به این نتیجه رسیدند که با کاهش مقاومت فشاری تک محوری و کششی برزیلین، سرعت حفاری در سنگ‌ها افزایش می‌یابد.

۳-۲- آنالیز رگرسیون دو متغیره برای برآورد سرعت حفاری در نمونه‌ها

آنالیزهای رگرسیون دو متغیره به دلیل اینکه از دو پارامتر وابسته استفاده می‌کنند، پیچیدگی بیشتری نسبت به آنالیز رگرسیون یک متغیره دارند. با این حال نتایج تحقیقات برخی از محققین نشان می‌دهد که روابط دو متغیره نسبت به روابط یک متغیره ممکن است دارای دقت بالاتری در برآورد یک پارامتر مجهول از سنگ باشند. بنابراین در این بخش از تحقیق، از آنالیز رگرسیون دو متغیره برای برآورد سرعت حفاری از شاخص‌های شکنندگی استفاده شده است. در این آنالیزها، سرعت حفاری به عنوان پارامتر وابسته و شاخص‌های شکنندگی به عنوان پارامتر مستقل در نظر گرفته شده‌اند. فرم کلی معادله‌های رگرسیون دو متغیره به صورت زیر است:

$$PR = \alpha_0 + \alpha_1 B_1 + \alpha_2 B_2 \quad (7)$$

$$PR = \alpha_0 + \alpha_1 B_1 + \alpha_2 B_3 \quad (8)$$

$$PR = \alpha_0 + \alpha_1 B_2 + \alpha_2 B \quad (9)$$

که در آنها PR سرعت حفاری (میلی متر بر دقیقه)، B شاخص‌های شکنندگی، α_0 یک ثابت و α_1 و α_2 ضرایب رگرسیون هستند.

با استفاده از نرم‌افزار SPSS v.19 code ® داده‌های حاصل از جدول ۱ تجزیه و تحلیل و ۳ رابطه رگرسیون برای برآورد سرعت حفاری به صورت زیر ارائه شده است:

$$PR = 50.481 + 0.324B_1 - 0.040B_2 \quad R^2=0.85$$

$$34 < PR(\text{mm/min}) < 47 \quad 10.8 < B_1 < 13.6 \quad 206 < B_2(\text{MPa}) < 505 \quad (10)$$

$$PR = 67.388 + 0.049B_1 - 1.494B_3 \quad R^2=0.84 \quad 34 < PR(\text{mm/min}) < 47 \quad \text{و}$$

$$10.8 < B_1 < 13.6 \quad 14.4 < B_3(\text{MPa}) < 22.5 \quad (11)$$

$$PR = 40.713 - 0.082B_2 + 1.521B_3 \quad R^2=0.86 \quad 34 < PR(\text{mm/min}) < 47 \quad \text{و}$$

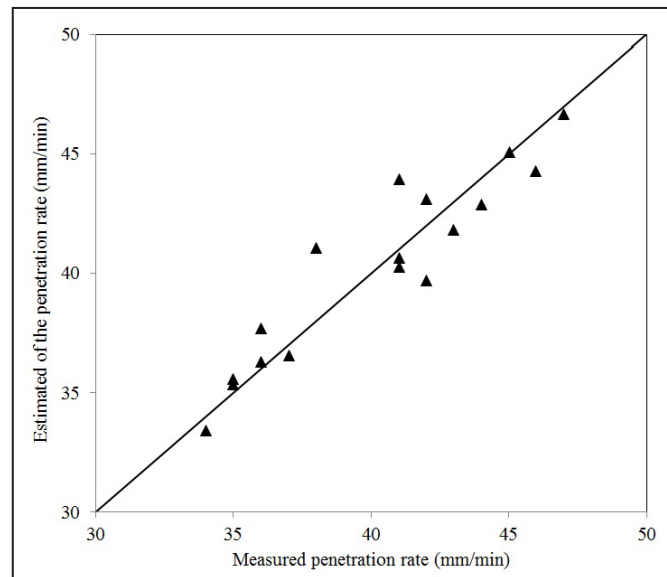
$$206 < B_2(\text{MPa}) < 505 \quad 14.4 < B_3(\text{MPa}) < 22.5 \quad (12)$$

بر اساس روابط ۱۰ تا ۱۲، ضرایب تعیین بین ۰/۸۴ تا ۰/۸۶ بین سرعت حفاری و شاخص‌های شکنندگی وجود دارد. به هر حال ضرایب تعیین این روابط بسیار به هم نزدیک می‌باشد و اختلاف چندانی ندارند.

هنگامی که روابط رگرسیون دو متغیره (روابط ۱۰ تا ۱۲) با روابط یک متغیره (روابط ۴ تا ۶) مقایسه می‌شوند، نکته مهمی قابل نتیجه‌گیری است. این مقایسه نشان می‌دهد که ضریب تعیین رابطه دو متغیره ۱۲ با ضریب تعیین رابطه یک متغیره ۵ برابر است. بنابراین دقت این روابط برای برآورد سرعت حفاری مشابه است. از طرف دیگر مشاهده می‌شود که روابط دو متغیره ۱۰ و ۱۱ دارای ضریب تعیین پایین‌تری نسبت به رابطه یک متغیره ۵ می‌باشند که این در تضاد با برخی یافته‌های محققین گذشته است. دلیل این موضوع همبستگی فوق العاده ضعیف سرعت حفاری با

می‌شود پراکندگی نقاط نزدیک به خط قطری هستند که نشان دهنده دقت مناسب برآورد سرعت حفاری است.

قطری نزدیک‌تر باشند و یا روی آن قرار گیرند نشان دهنده برآوردی دقیق‌تر از سرعت حفاری با استفاده از رابطه ارائه شده است. همان‌طور که از شکل ۵ مشاهده



شکل ۵- مقادیر واقعی سرعت حفاری و برآورد شده آن از رابطه ۱۴.

۵- نتیجه‌گیری

شاخص‌های شکنندگی با ضریب تعیین (۰/۹۴) وجود دارد. این رابطه نسبت به روابط یک و دو متغیره، دارای دقت به مراتب بالاتری در برآورد سرعت حفاری می‌باشد. رابطه سه متغیره با استفاده از آزمون‌های آماری و داده‌های منتشر شده از دو محقق صحت‌سنجی و اعتبار سنجی شده و نتایج تأییدکننده اعتبار این رابطه بود. - رابطه سه متغیره ارائه شده در این پژوهش می‌تواند در مراحل ابتدایی عملیات اکتشافی پروژه‌های ژئوتکنیکی در سنگ‌های آهکی مناسب باشند که این باعث صرفه‌جویی در زمان و هزینه می‌شود. - در پایان خاطر نشان می‌شود که در روابط ارائه شده بین سرعت حفاری و شاخص‌های شکنندگی، اثر عمق (داده‌های حفاری تقریباً از عمق یکسان برداشت شده‌اند) و ساختارهای زمین‌شناسی مانند شکستگی‌ها و لایه‌بندی در نظر گرفته نشده است.

سپاسگزاری

در پایان لازم است از مساعدت پرسنل معادن سنگ ساختمانی که اینجانب را برای انجام پژوهش حاضر یاری رساندند کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم.

در پژوهش حاضر سرعت حفاری چرخشی، مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی برزیلین و شاخص‌های شکنندگی ۱۷ سنگ آهک از سه چاه اکتشافی تعیین شدند. آنالیزهای رگرسیون روی داده‌ها به منظور توسعه روابط یک، دو و چند متغیره برای برآورد سرعت حفاری از شاخص‌های شکنندگی انجام شد. نتایج این آنالیزها به صورت خلاصه در زیر ارائه شده‌اند.

- سنگ آهک‌های مورد مطالعه در گروه سنگ‌های با شکنندگی متوسط، شکننده و شکنندگی زیاد قرار گرفتند که قابلیت حفاری در آنها به ترتیب معادل حفاری آسان، متوسط و سخت می‌باشد.

- با افزایش شاخص‌های شکنندگی، مقاومت فشاری تک محوری و کششی برزیلین، میزان حفاری‌پذیری سنگ‌های مورد مطالعه کاهش یافت.

- مقایسه ضرایب تعیین روابط یک (۰/۸۵ تا ۰/۸۶) و دو متغیره (۰/۸۴ تا ۰/۸۶) نشان داد که این روابط دارای دقت تقریباً مشابه برای برآورد سرعت حفاری از شاخص‌های شکنندگی می‌باشند.

- رابطه سه متغیره توسعه داده شده نشان داد که رابطه نزدیکی بین سرعت حفاری و

References

- Altindag, R. and 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. <https://doi.org/10.5897/SRE.9000753>.
- Howarth, D.F., Adamson, W. R. and Brendt, J.R., 1986- Correlation of model tunnel boring and drilling machine performances with rock properties. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts* 23, 171–175. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(86\)90344-X](https://doi.org/10.1016/0148-9062(86)90344-X).
- Howarth, D.F. and Rowland, J.C., 1987- Quantitative assessment of rock texture and correlation with drill ability and strength properties. *International Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering* 20, 57–85. <https://doi.org/10.1007/BF01019511>.
- 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*.
- Paone, J., Madson, D. and Bruce, W.E., 1969- Drillability studies - laboratory percussive drilling. Report of investigations (United States. Bureau of Mines), 7300.
- Pathinkar, A. G. and Misra, G. B., 1980- Drillability of rocks in percussive drilling from energy per unit volume as determined with a microbit. *Mining Engineering* 32, 1407–1410. <https://doi.org/10.1007/BF01019511>.
- Rabia, H. and Brook, N., 1980- An empirical equation for drill performance prediction. *The State of The Art in Rock Mechanics. Proceeding of the 21st US Symposium on Rock Mechanics, University of Missouri-Rolla*. pp. 103-111.
- Schmidt, R.L., 1972- Drillability studies - percussive drilling in the field. University of Michigan Library.
- Selim, A. A. and Bruce, W.E., 1970- Prediction of penetration rate for percussive drilling. US Bureau of Mines RI 7396.
- Selmer-Olsen, R. and Blindheim, O.T., 1970- On the drillability of rock by percussive drilling. *Proceedings of the 2nd Congress of the Int. Society for Rock Mechanics, Belgrade, Yugoslavia*.
- Thuro, K. and Spaun, G., 1996- Introducing the ‘destruction work’ as a new rock property of toughness referring to drill ability in conventional drill and blast tunnelling. *Proceedings of Eurock’96: Prediction and Performance in Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 2. pp. 707–713.

Original Research Paper

Evaluation of rotary drilling rate in limestones based on brittleness indices

A. Jamshidi^{1*}¹Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, Lorestan University, Khorramabad, Iran**ARTICLE INFO***Article history:*

Received: 2020 July 02

Accepted: 2021 January 04

Available online: 2021 November 01

Keywords:

Limestone

Rotary Drilling Rate

Brittleness Index

ABSTRACT

Accurate estimation of the rotary drilling rate of the rock can save time and cost on exploration operations of the geotechnical projects such as dams, tunnels, oil and gas wells and building stone mines. In this study, the rotary drilling rate in limestone is estimated based on brittleness indices. To achieve this goal, the values of rotary drilling rate, uniaxial compressive strength (UCS) and Brazilian tensile strength (BTS) were determined in three exploratory wells drilled in limestone. Based on the UCS and BTS, the brittleness indices of limestones were determined. Based on the data, the regression relationships of one, two and three variables between rotary drilling rate as a dependent parameter and brittleness indices as an independent parameter were developed. The results suggest that based on one- and two-variable regression relationships, rotary drilling rate can be estimated based on brittleness indices with relatively good accuracy. In addition, the results showed that the three-variable regression relationship was more accurate than the one- and two-variable in estimating the rotary drilling rate. Finally, the three-variable relationship presented in this study could be appropriate in the early stages of exploration operations for geotechnical projects in limestone, which saves time and money.

*Corresponding author: A. Jamshidi; E-mail: jamshidi.am@lu.ac.ir

G.S. Journal. All rights reserved.

doi: GSJ.2021.237778.1813

dor: 20.1001.1.10237429.1400.31.3.7.4

