

تأثیر عوامل زمین شناسی در نرخ نفوذ حفاری دورانی مغزه گیری

مطالعه موردی: معدن نخلک

علیرضا علیجانی*^۱، رسول اجل لوئیان^۲

چکیده

حفاری مغزه گیری یکی از فرایندهای مهم در پروژه های ژئوتکنیکی و معدنی می باشد که بررسی عوامل موثر در آن، در پیشبرد پروژه اهمیت زیادی دارد. در این پژوهش تأثیر فاکتورهای زمین شناسی مانند خصوصیات ذاتی و توده سنگهای معدن نخلک مورد بررسی قرار گرفته و تأثیر آنها بر میزان نرخ نفوذ حفاری، مورد ارزیابی قرار گرفته است. طبق پژوهش های انجام گرفته بر روی چهار نمونه سنگی با تکیه بر حدود ۳۵ هزار متر حفاری مغزه گیری مشخص شده است که با کاهش جورشدهگی ذرات، میزان وزن واحد حجم و ویژگی های مهندسی سنگ افزایش و میزان تخلخل و جذب آب کاهش می یابد. این امر باعث می شود که نرخ نفوذ سرمرته در سنگ کاهش یافته و سنگ قابلیت حفاری کمتری داشته باشد. میزان کوارتز و سیلیس موجود در سنگ نیز شاخص مهمی در کاهش نرخ نفوذ می باشد. تأثیر سیمان دولومیتی سنگ باعث افزایش تخلخل و افزایش نرخ نفوذ می گردد. از مهمترین شاخص های ارزیابی نرخ نفوذ در توده سنگ، میزان تراکم درزه ها است که با کاهش میزان RQD، میزان نرخ نفوذ به شدت کاهش می یابد. نتایج نشان می دهد، میزان نرخ نفوذ در ازای افزایش شاخص RQD (از ۶۰٪ به ۸۰٪) باعث افزایش ۱۶۰٪ نرخ نفوذ می شود.

کلمات کلیدی: حفاری مغزه گیری، نرخ نفوذ، RQD، جورشدهگی.

۱. دانشجوی دکتری زمین شناسی مهندسی، دانشگاه اصفهان، alirezaalijani2014@gmail.com

۲. عضو هیئت علمی گروه زمین شناسی، دانشگاه اصفهان.

۱. مقدمه

۳۵ هزار متر حفاری مغزه گیری از نتایج تعداد ۵ دستگاه حفاری با ویژگی های یکسان تهیه و بررسی شد.

۲. مواد و روش ها

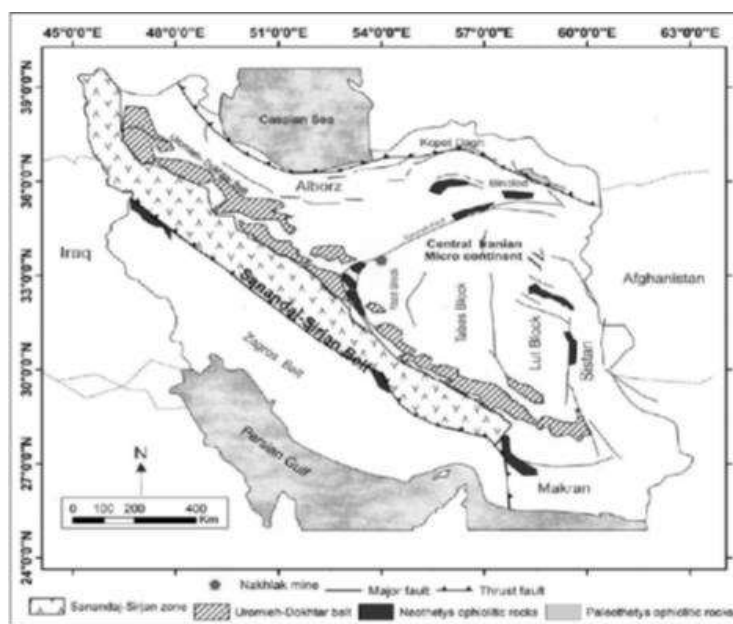
۱-۲. کلیات طرح

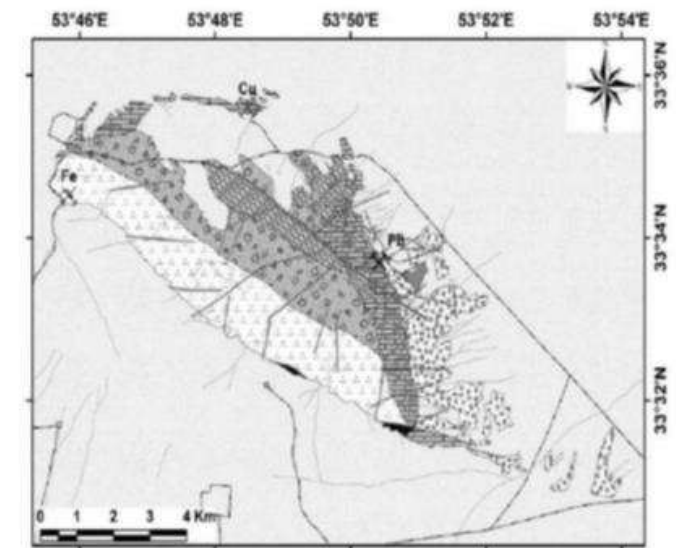
مجتمع معدنی سرب نخلک در ۴۰ کیلومتری شهرستان انارک از توابع استان اصفهان در فاصله ۲۶۰ کیلومتری شهر اصفهان می باشد. این معدن یکی از بزرگترین معادن زیرزمینی ایران و یکی از قدیمی ترین معادن فعال جهان می باشد. این معدن با طول حدود ۴۵ کیلومتر شبکه تونلی در چهار طبقه و ۷ عدد شفت دسترسی، یکی از بزرگترین معادن زیرزمینی فلزی جهان است.

از نظر زمین شناسی این معدن در محدوده ایران مرکزی زون انارک قرار گرفته است (شکل ۱). واحدهای اصلی زمین شناسی منطقه شامل گروه نخلک (تریاس)، گروه صدر (کرتاسه) و گروه خالد (پالئوسن) می باشد (جزی و همکاران، ۱۳۹۴، کیمیا گوهران، ۱۳۹۹). جدول ۱ واحدهای سنگ چینه ای معدن را نشان می دهد. شکل ۲ موقعیت سنگ- های اصلی منطقه که در واحد کرتاسه قرار گرفته اند را نشان می دهد.

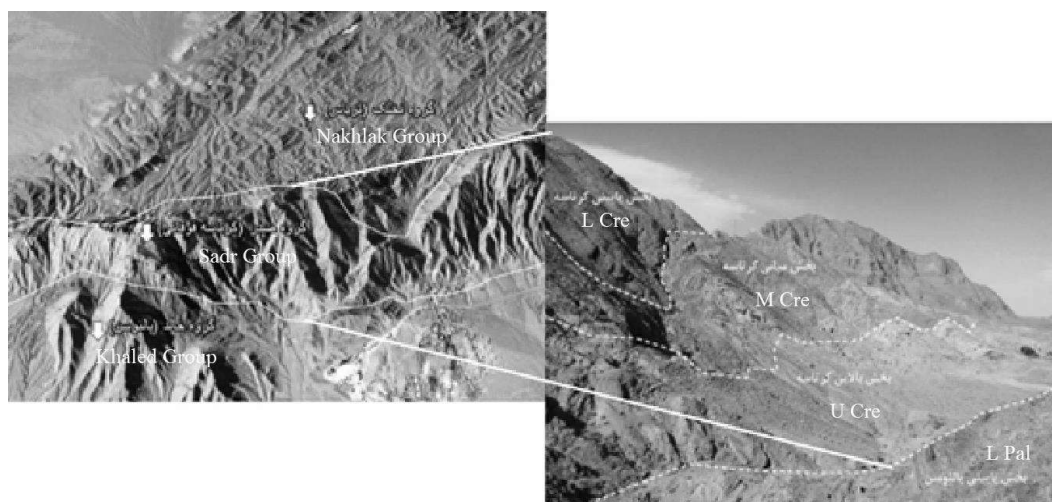
حفاری مغزه گیری در توده سنگ با هدف مطالعات زمین شناسی اکتشافی و ژئوتکنیکی، یکی از مهمترین فعالیت های اکتشافی است که اقتصاد و آینده پروژه ها به طرق زیادی به آن وابسته بوده و از طرفی سهم زیادی از هزینه های بخش اکتشاف پروژه ها را به خود اختصاص می دهد (اصانلو، ۱۳۷۰) ولیکن به دلیل اهمیت موضوع لازم است که زمان و هزینه لازم برای آن گذارده شود.

حفاری در توده سنگ درزه دار یکی از چالش برانگیزترین فعالیتهای اکتشافی می باشد که راندمان حفاری را به شدت کم کرده و هزینه های اکتشاف را بالا می برد. لذا بررسی عوامل زمین شناسی تاثیر گذار در کاهش یا افزایش نرخ نفوذ حفاری می تواند کلید راه حل بسیاری از مشکلات حفاری باشد. برای مشخص شدن اثر شرایط زمین شناسی (بافت، کانی شناسی و ویژگی های توده سنگ) بر روی نرخ نفوذ حفاری، دستگاه های انتخاب شده دارای شرایط یکسان از نظر توان دستگاه حفاری (همه دستگاه ها از نوع HDS 750)، از نظر کیفیت لوازم حفاری (همه قطعات دستگاه ها از تولیدی واحد تهیه شده) می باشد. بدین منظور نتایج حاصل از حفاری





شکل ۱. محدوده معدن از نظر زمین شناسی ایران (جزی و همکاران، ۱۳۹۴)



شکل ۲. تفکیک واحدهای سنگ چینه ای معدن نخلک

جدول ۱. واحدهای سنگ چینه ای معدن نخلک (جزی، ۱۳۹۴، کیمیاگوهران، ۱۳۹۹)

Coring (m)	Description	Lithology	Rock Unite		Stratigraphy Unit
220	Thickness 1150m, No mineralization	Limestone, Shale, Sandstone and Conglomerate	Equivalent with Nayband Formation	Alam Formation	Nakhlak Group (Triassic)
0	Thickness 870m, No mineralization	Sandstone and Conglomerate		Baghorogh Formation	
500	Thickness 380m, No mineralization	Brown Shale	Equivalent with Red Shale	Ashin Formation	

		Formation		
11820	Thickness 50-70m, weak mineralization	Conglomerate and Sandy conglomerate	Equivalent with Orbitolina Limestone in Central Iran	Sadr Group (Cre)
14800	Thickness 120-150m, good mineralization	Interbedding of Lime sandstone and Dolomitic sandstone with Alteration		
7460	Thickness 40-70, weak mineralization	Biochemical Rudist Limestone		
200	Thickness 263m, No mineralization	Conglomerate and Sandy conglomerate		Khaled Group (Paleocene)
		Thick bedding Limestone		

منشا اصلی کانی زایی معدن می باشد (کیمیا گوهران، ۱۳۹۹).

همانطور که جدول ۱ نشان می دهد، بیشترین میزان حفاری در واحد کرتاسه (آهک ماسه ای و دولومیتی) می باشد که

۲-۲. تاثیر عوامل زمین شناسی

(Kolapo, 2021 & Adebayo et al, 2013). جهت بررسی فاکتورهای اصلی نیاز است ویژگی های مکانیک سنگی و فیزیکی سنگها و ویژگی های کانی شناسی آنها مورد بررسی قرار گیرد. جداول ۲ و ۳ مجموعه ویژگی های فیزیکی و مهندسی سنگ های معدن را برای تعداد حدود ۶۰ نمونه که به صورت تصادفی از بخش های بدون ماده معدنی از مغزه ها به دست آمده نشان می دهد.

همانطور که بیان شد پیشروی عملیات حفاری مغزه گیری، تابع فاکتورهای زمین شناسی است. عوامل زمین شناسی زیادی مانند ویژگی های ذاتی سنگ (خصوصیات مکانیکی و فیزیکی سنگ، کانی شناسی، بافت و ساخت و غیره) و ویژگی های توده سنگ (ناپوستگی ها و خصوصیات آنها و کیفیت توده سنگ) بر روی میزان نرخ نفوذ حفاری و پیش بینی عملیات حفاری نقش دارند که در این بخش به آنها اشاره شده است (اصانلو، ۱۳۷۰ و

جدول ۲. ویژگی های اصلی فیزیکی نمونه های سنگی معدن نخلک

Mohs hardness	Water absorption %	%Porosity	Unit weight (g/cm ³)	Mineralogy	Lithology
6-7	0.22-0.55	1.2-1.68	2.65-2.73	Q%=52-65 Dolo%=3-12% Weak rounding and sorting	Lime sandstone
5.6-6.5	0.5-1.1	1.38-4	2.55-2.68	Q%=45-56 Dolo%=30-60% Moderate rounding and sorting	Dolomitic sandstone
4-5.2	2-4	3.7	2.45-2.55	Q%=5-30 Dolo%=20-40% Very weak rounding and sorting	Bioclast pack stone
6.2-7.4	0.7-1	1.31-3.2	2.52-2.7	Q%=65-70 Dolomitic cement Weak sorting good rounding	Polygenetic microconglomerate

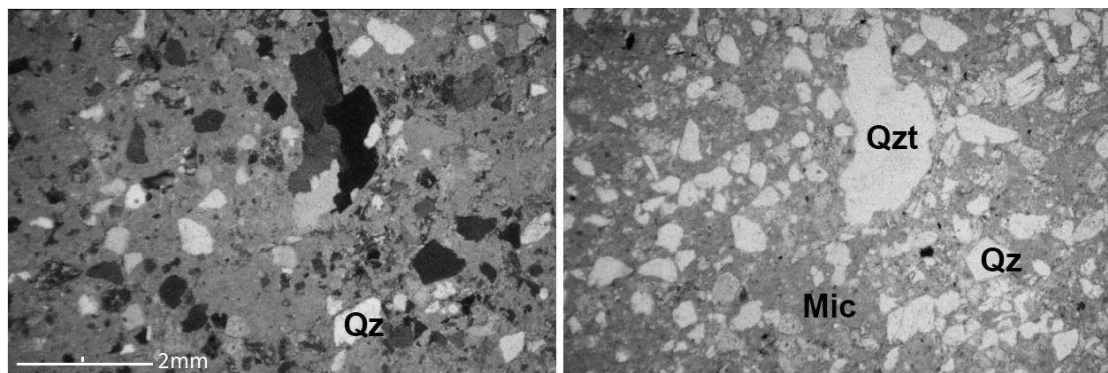
جدول ۳. ویژگی های اصلی مهندسی نمونه های سنگی معدن نخلک

E (GPa)	BTS (MPa)	Point load (MPa)	UCS (MPa)	Wave velocity (m/s)		Lithology
				Vs	Vp	
38-49	11-13	7.8-12	98-140	2500-2700	5100-5500	Lime sandstone
22-38	6-8	6.5-11.5	70-110	2200-2700	4500-5500	Dolomitic sandstone
17-22	6-9	5-8	55-85	2000-2500	3400-4200	Bioclast pack stone
20-35	7-10	7.2-9.8	80-100	2200-2500	4200-5200	Polygenetic microconglomerate

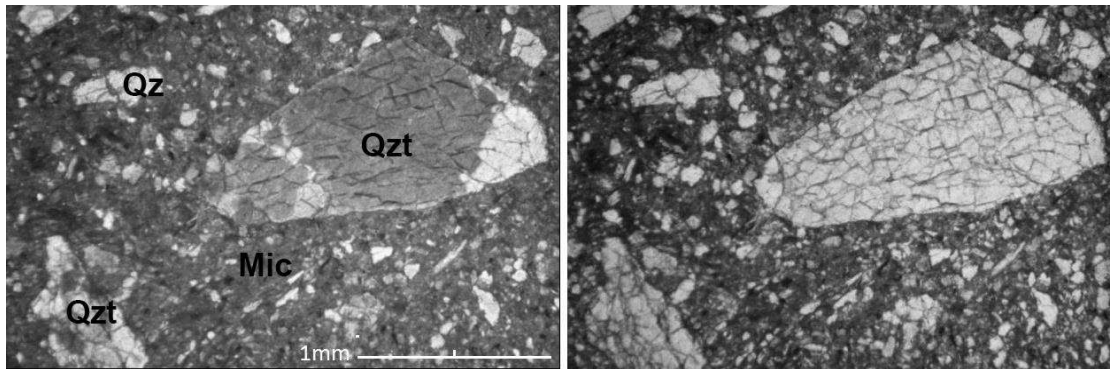
باشد (Ersoyo et al,1995). میزان درصد دولومیت کم این نمونه سنگی نیز از دلایل کاهش میزان تخلخل آن می باشد که این امر باعث افزایش ویژگی های مهندسی (مقاومت تک محوری، بارنقطه ای و برزیلی) شده و در کنار درصد بالای کوارتز باعث کاهش میزان نرخ نفوذ حفاری می گردد که در ادامه بیان شده است (Yarali et al,2013 , Niazi,2011 , Ersoyo et al,1995).

وجود دولومیت بالا، وزن مخصوص کمتر و تخلخل بیشتری داشته که باعث کاهش ویژگی های مهندسی سنگ و افزایش نسبی نرخ نفوذ حفاری در این گونه سنگ شده است.

مطابق جدول ۲ بیشترین میزان وزن واحد حجم، مربوط به واحد ماسه سنگ آهکی است. این نمونه سنگ همانطور که در مقطع نازک (شکل ۳) نشان داده شده است، از نظر کانی شناسی مچور بوده (بلوغ کانی شناسی بالا) و از نظر بافتی ایمچور (بلوغ بافتی پایین) (دانه بندی خوب) می باشد. این امر باعث می شود، ذرات سنگی علاوه بر اینکه به خوبی در یکدیگر قفل می شوند دارای وزن مخصوص بالا بوده و میزان تخلخل و جذب آب آن بسیار پایین همانطور که شکل ۴ نشان می دهد، نمونه ماسه سنگ دولومیتی و دولومیت ماسه ای، دارای بلوغ کانی شناسی و بافتی کمتری بوده و بیشتر قطعات سنگی (لیتیک آرنایت) بخش اصلی سنگ را تشکیل داده اند. همچنین به خاطر



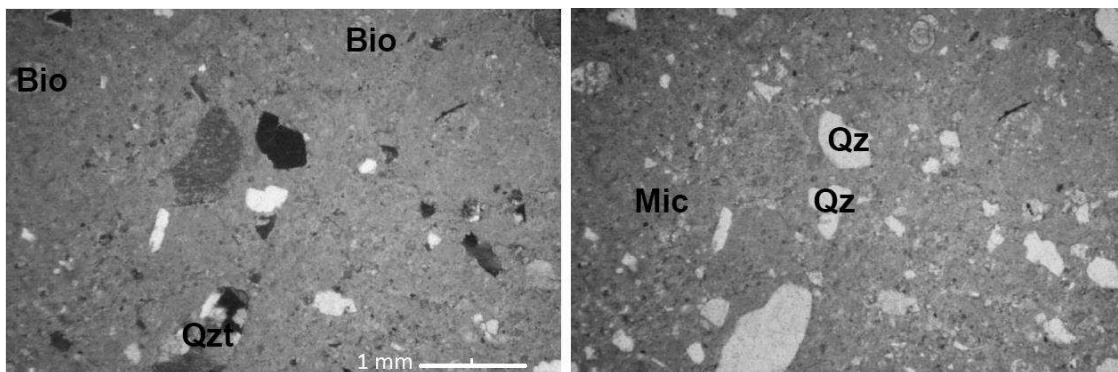
شکل ۳. نمونه مقطع نازک ماسه سنگ آهکی در نور PPL و XPL



شکل ۴. نمونه مقطع نازک ماسه سنگ دولومیتی دولومیت ماسه ای در نور PPL و XPL

این نمونه سنگی باعث کاهش خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ و از طرفی باعث افزایش نرخ نفوذ حفاری شده است. وجود درصد کوارتز کم نیز دلیل دیگری بر افزایش نرخ نفوذ حفاری می باشد. شکل ۵ نمونه مقطع نازک نمونه را نشان می دهد.

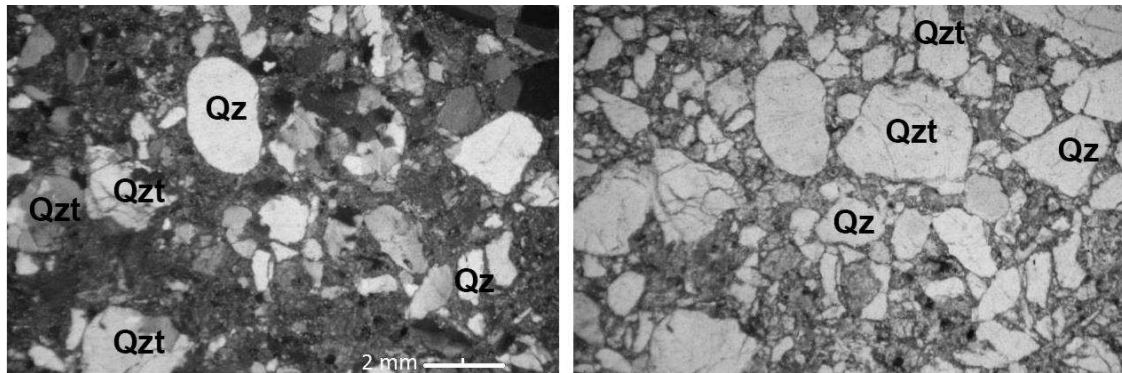
نمونه آهک بیوپکستون دولومیتی و بیوکلاست پکستون، نمونه سنگی است که احتمالاً از نظر محیط تشکیل با نمونه های دیگر محدوده متفاوت بوده و بیشتر در محیط لاگونی (انرژی حمل کم) تشکیل شده است. وجود سیمان میکرایتی و دولومیتی با مقاومت و سختی کم در



شکل ۵. نمونه مقطع نازک بیوکلاست پکستون دولومیتی در نور PPL و XPL

همچنین مچوریتی بافتی متوسط (ساب مچور)، دارای ویژگی های فیزیکی و مهندسی متوسطی است. همچنین وجود قطعات گردگوشه و قطعات سنگی با منشا مختلف باعث کاهش ویژگی های مقاومت نمونه سنگی شده است (Hegde et al, 2017).

میکروکنگلوامرای پلی ژنتیک که احتمالاً منشا برون سازندی دارد از ذرات و قطعات با اندازه و ترکیب مختلفی تشکیل شده است (شکل ۶). این نمونه سنگی هرچند به دلیل میزان کوارتز بالا دارای سایندهای زیادی است، ولیکن به خاطر وجود سیمان تماماً دولومیتی و

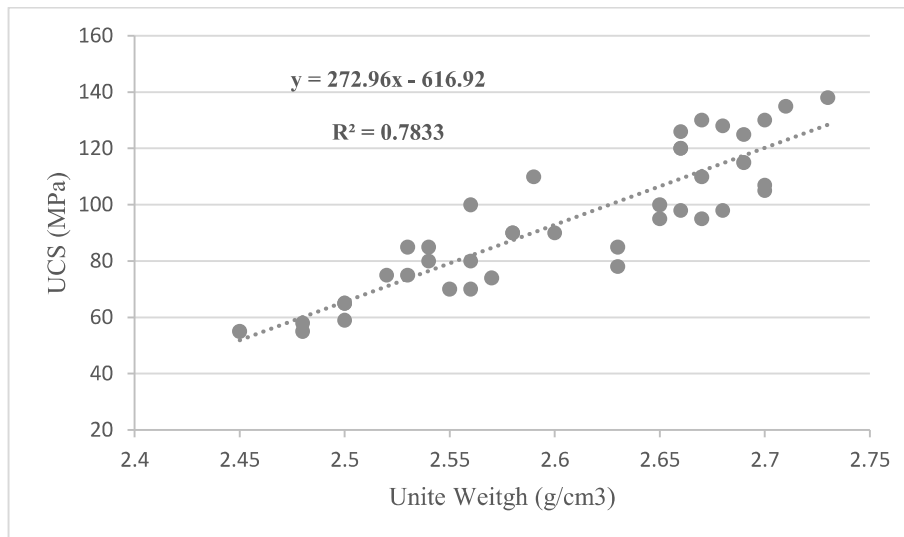


شکل ۶. نمونه مقطع نازک میکروکنگولومرای پلی ژنتیک در نور PPL و XPL

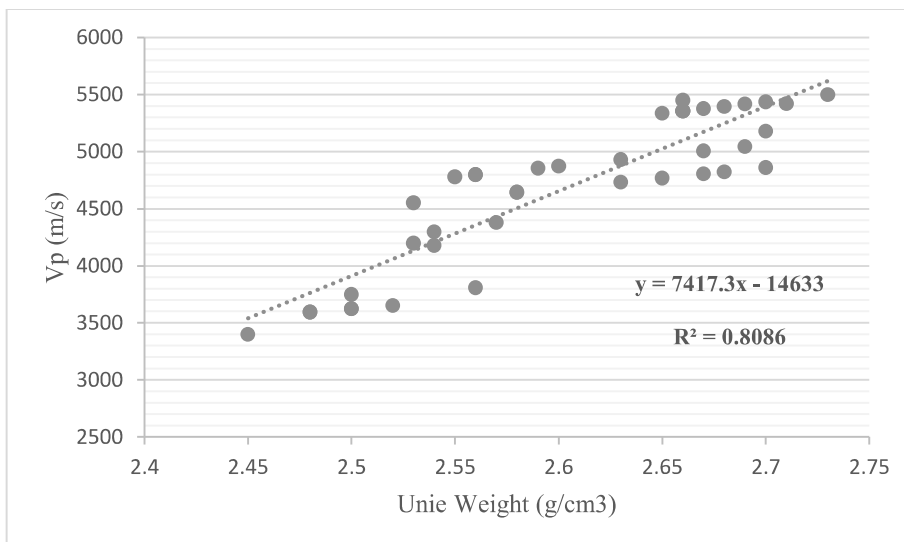
۳-۲. عوامل ذاتی

افزایش می یابد (Inanloo et al,2018 & Hegde et al,2017 & Babatunde,2011). هرچند این عوامل به صورت تک تک ارتباط خیلی خوبی با نرخ نفوذ حفاری ندارند، ولیکن مجموع این عوامل به صورت توأم، نقش بسیار موثری در ویژگی های مهندسی و نرخ نفوذ ایجاد می کنند (Hoseinie et al,2014). شکل ۷ رابطه مستقیم بین وزن واحد حجم (در طوبت طبیعی) و مقاومت تک محوری را نشان می دهد که مطابق آن، افزایش وزن واحد حجم باعث افزایش مقاومت تراکمی تک محوری دارد. شکل ۸ نیز رابطه مستقیم وزن واحد حجم طبیعی با سرعت امواج فشاری را نشان می دهد، این نمودار نشان می دهد که تراکم ذرات سنگی که ناشی از ساخت سنگ است باعث افزایش سرعت امواج فشاری می گردد (Su et al,2016 & Kahraman et al,2018 & Hayati,2019).

همانطور که بیان شد، عوامل ذاتی سنگ در ویژگی های مهندسی و نرخ نفوذ سنگ نقش بسزایی دارند که در این بخش به مهمترین آنها پرداخته می شود. بافت سنگها (ارتباط بین ذرات و کانی های تشکیل دهنده سنگ) یکی از مهمترین فاکتورهای ذاتی سنگ است که در زمان تشکیل سنگ ایجاد شده و تاثیر زیادی در ویژگی های مکانیکی و حفاری پذیری آنها دارد. عواملی مانند اندازه ذرات، میزان جورشدگی (یکنواختی ذرات تشکیل دهنده)، گردشدگی، سیمان شدگی و غیره در این عامل نقش اساسی دارند (Babatunde,2011). نمونه های مورد مطالعه در معدن عموما دارای جورشدگی متوسط می باشند که ناشی از شرایط رسوبگذاری می باشد. با افزایش جورشدگی، میزان درجه قفل شدگی ذرات (Interlocking degree) کاهش یافته و به طبع آن میزان دانسیته و مقاومت آن کاهش یافته و میزان تخلخل آن



شکل ۷. رابطه مستقیم وزن واحد حجم با مقاومت تک محوری



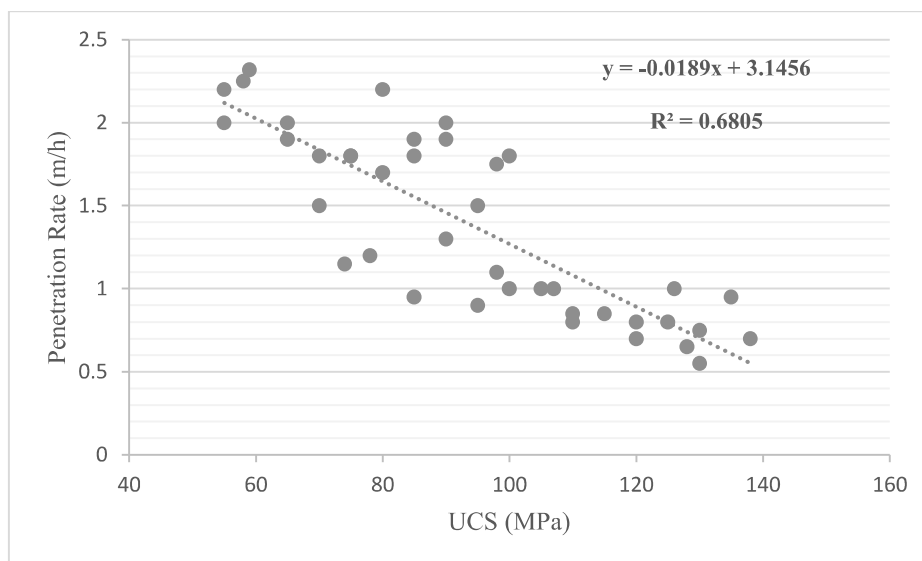
شکل ۸. رابطه مستقیم وزن واحد حجم با سرعت امواج فشاری

نمونه های آهک ماسه ای و میکروکنگولومرا با حدود ۵۵-۷۰٪ کوارتز، قطعات خرد شده سنگی آرنایت و چرت، دارای سختی موس بالا و همچنین دارای نرخ نفوذ کمتری می باشند. از طرفی سنگ آهک بیوپکستن به خاطر وجود میکریت با مقاومت کم و همچنین درصد کوارتز کم، دارای سختی پایین و نرخ نفوذ بالاتری می باشد (رمضان نیا و همکاران، ۱۴۰۰ & Babatunde, 2011).

کانی شناسی: تاثیر کانی شناسی نیز به اندازه ساخت و بافت در میزان ویژگی های مکانیکی و مهندسی و همچنین میزان نرخ نفوذ، تاثیر زیادی دارد. بیشترین عامل کانی شناسی موثر در ساینده گی، درصد کوارتز آزاد و سیلیس موجود و عامل کانی شناسی موثر دیگر وجود سیمان دولومیتی در ساختار سنگ است (Niazi, 2011, Bhalchavdra, 2009). همانطور که جدول ۳ نشان میدهد،

آوردن نرخ نفوذ حفاری نشان می‌دهد، رابطه معکوسی بین این دو پارامتر وجود دارد (شکل ۹). افزایش نسبت مدولی باعث افزایش قوام سنگ و کاهش نرخ نفوذ می‌گردد (Kahraman, 2018). بررسی تمام این موارد جهت ارزیابی میزان قابلیت حفاری سنگ و میزان نرخ نفوذ سنگ می‌باشد. ولیکن از آنجا که نقش ماده سنگ و توده سنگ (مجموعه ماده سنگ و ساختارهای زمین شناسی) بصورت همزمان بر روی نرخ نفوذ نقش دارد، لذا بررسی این امر بسیار ضروری می‌باشد.

همانطور که بیان شد، ویژگی های ساخت و کانی شناسی سنگ، عامل اصلی و تعیین کننده ویژگی های فیزیکی آنها بوده که این عوامل نقش بسیار موثری در تعیین ویژگی های مکانیکی و مهندسی سنگ دارند (رمضان نیا و همکاران، ۱۴۰۰). از آنجا که برآیند ویژگی های ذاتی سنگ باعث به وجود آمدن ویژگی های مهندسی سنگ می‌شود و از مهمترین ویژگی های مهندسی سنگ مدول یانگ و ارتباط آن با مقاومت تک محوری (UCS) است، لذا بررسی رابطه مقاومت تک محوری برای به دست



شکل ۹. رابطه معکوس بین مقاومت تک محوری و میزان نرخ نفوذ

خلاصه فرمول های مهم حاصل از نمودارها در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴. روابط به دست آمده بین ویژگی های فیزیکی و مکانیکی سنگها

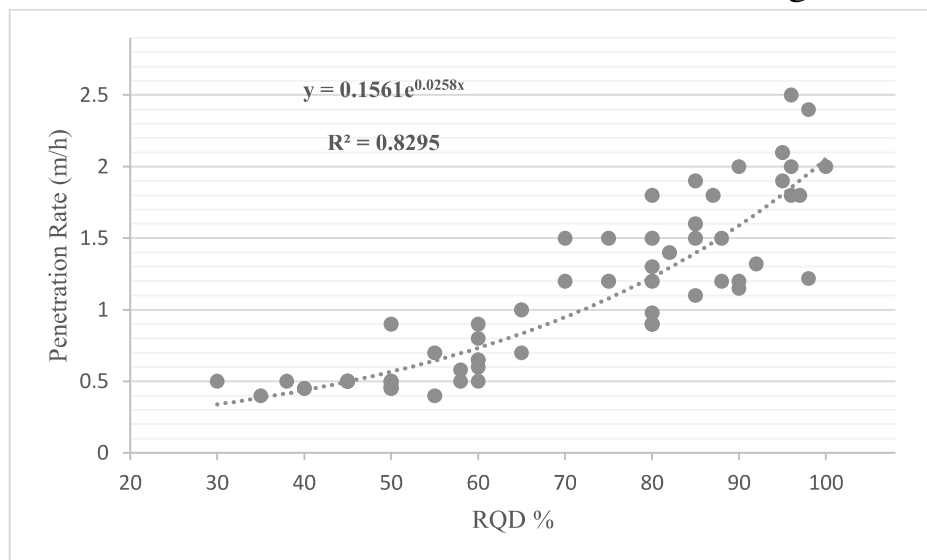
(γ = وزن مخصوص، UCS = مقاومت تراکمی تک محوری، V_p = سرعت موج فشاری و P.R = میزان نرخ نفوذ)

Relation	Formula	R ²	Relation
direct	$UCS = 273 \gamma - 617$	0.78	Unite weight and UCS
direct	$V_p = 74174 \gamma - 14633$	0.80	Unite weight and V_p
reverse	$P.R = -0.019 UCS + 3.1$	0.68	Penetration rate and UCS

۴-۲. عامل توده سنگ

همانطور که بیان شد، توده سنگ مجموعه ای از سنگ بکر و ساختارهای موجود در سنگ می باشد. این عوامل ساختاری که عموماً ناشی از تکتونیک و رهایی تنش در درون زمین هستند، شامل ساختارهای صفحه ای (درزه، رخ، گسل و غیره) و ساختارهای خطی (لینه آسیون، خش لغزش، جهت یابی کانی ها و غیره) می باشند که تاثیر زیادی در نرخ نفوذ سرمته و قابلیت حفاری سنگ دارند (اسعد فاطمی و همکاران، ۱۳۹۶ و Kahraman et al, 2000 & Wilbure, 1959). یکی از مهمترین این شاخص ها درصد RQD می باشد. این شاخص که به فاصله داری درزه ها و تعداد آنها در متر مکعب توده سنگ است، تاثیر بسیاری در میزان حفاری سنگ دارد. بطور تجربی مشخص شده است که با کاهش شاخص RQD، تعداد ناپوستگی های سنگ به ازای طول افزایش می یابد که این امر باعث بروز ناهمگنی در ماده سنگ می گردد که از نظر اجرایی این امر منجر به کاهش سرعت دوران سرمته، هدر رفتن مایع حفاری درون درزه ها شده

که نتیجتاً باعث کاهش نرخ نفوذ سرمته داخل توده سنگ می گردد (اسعد فاطمی، ۱۳۹۶). از طرفی شکاف ها و درزه های سنگی ممکن است توسط مواد با سختی های مختلف پر شده باشند که این امر باعث کاهش نرخ نفوذ می گردد. مجموعه این عوامل باعث فرسایش شدید سرمته شده و نرخ نفوذ حفاری به شدت کاهش می یابد. لذا اگرچه میزان شاخص RQD سنگ افزایش یابد، نشان از سلامت سنگ و نزدیک بودن آن به شرایط سنگ بکر می باشد که باعث یکنواختی و افزایش نرخ نفوذ می باشد (Wang, 1995, Wang et al, 1995، Akun et al, 2005). این امر در واحد سنگ آهکی بیوپیکستون به خوبی دیده می شود. همانطور که جدول ۵ نشان می دهد در این واحد سنگی با میزان RQD=95-100، میزان نرخ نفوذ 1.5-2.7 متر بر ساعت می باشد. شکل ۱۰ رابطه نرخ نفوذ و شاخص RQD را برای میانگین سنگ های منطقه نشان می دهد.



شکل ۱۰. رابطه بین شاخص RQD و نرخ نفوذ برای چهار نمونه سنگی اصلی منطقه

همانطور که شکل ۱۰ نشان می‌دهد، رابطه مستقیمی بین میزان RQD و نرخ نفوذ حفاری وجود دارد بطوری که با کاهش تعداد ترک‌ها به ازای طول مغزه حفاری به دلیل وجود سطوح ضعف کمتر، سرعت نفوذ سرمرته افزایش می‌یابد. جدول ۵ میزان نرخ نفوذ را برای واحدهای سنگی معدن نخلک نشان می‌دهد.

جدول ۵. میزان نرخ نفوذ واحدهای سنگی و علت آن

Description	Penetration rate (m/h)	RQD %	Lithology
Weak sorting and rounding, high Q content and high penetration rate	0.5-1.8	90-100	Lime sandstone
High value of dolomitic cement and low Q content and high porosity and high penetration rate	0.7-2.2	50-75	Dolomitic sandstone
Dolomitic cement and low hardness and high RQD and high penetration rate	1.5-2.7	95-100	Bioclast pack stone
High porosity and high Q content and moderate penetration rate	0.8-1.2	50-80	Polygenetic microconglomerate

دولومیتی به دلیل دانه بندی ناهمسان (وجود نبود دانه بندی و عدم وجود رنج دانه بندی وسیع)، دارای درصد سیمان زیادی بین ذرات بوده و به دلیل عدم همخوانی ذرات از نظر اندازه، بافت سنگ به شکلی است که باعث افزایش میزان تخلخل و کاهش وزن واحد حجم سنگ می‌گردد. این امر بطور مستقیم باعث کاهش ویژگی‌های مکانیکی سنگ و افزایش نرخ نفوذ حفاری می‌شود.

کانی شناسی: عامل کانی شناسی نیز همانطور که بیان شد، از عوامل بسیار موثر در میزان نرخ نفوذ حفاری می‌باشد که با توجه به اثر ساینده‌گی سنگ در حفاری دورانی، میزان درصد کوارتز و دولومیت نقش اساسی دارند بطوری که نمونه ماسه سنگ آهکی به دلیل وجود درصد کوارتز بالا و دولومیت کم، دارای ساینده‌گی بیشتری در برابر سرمرته بوده و نرخ نفوذ کمتری دارد و از طرفی نمونه‌های ماسه سنگ دولومیتی و بیوکلاست پکستون به دلیل وجود کوارتز متوسط و کم و از طرفی درصد دولومیت زیاد که عمدتاً سیمان سنگ را تشکیل داده است، دارای سختی موس پایتتر و نرخ نفوذ بالاتری می‌باشند (Hoseinie et al, 2014).

۳. بحث و بررسی نتایج

بافت سنگ: بافت سنگها همانطور که بیان شد، ناشی از شرایط رسوبگذاری اولیه، محیط رسوبگذاری، نیروهای بین ذره ای در زمان رسوبگذاری، اندازه ذرات، جورشدگی، گردشدگی و غیره می‌باشد. این عوامل چه بصورت اولیه (همزمان با رسوبگذاری) یا ثانویه (پس از رسوبگذاری) باشد، تعیین کننده ویژگی‌های فیزیکی سنگها (وزن واحد حجم، تخلخل و غیره) بوده که نتیجتاً باعث تعیین ویژگی‌های مکانیکی سنگ و به ازای آن میزان نرخ نفوذ حفاری می‌گردد (Babatunde, 2011).

نمونه‌های ماسه سنگ آهکی همانطور که بیان شد، به دلیل دانه بندی خوب (رنج وسیع دانه بندی) و گردشدگی ضعیف دارای درجه درهم قفل شدگی بالایی بین ذرات می‌باشد که این امر باعث کاهش تخلخل و درصد جذب آب و از طرفی افزایش وزن واحد حجم شده است. به ازای این موارد، میزان مقاومت تک محوری و کششی سنگ (برزیلی و بار نقطه ای) افزایش یافته و در نتیجه میزان نرخ نفوذ در سنگ کاهش می‌یابد. در مقابل نمونه‌های بیوپکستون دولومیتی و ماسه سنگ

شاخص مقاومت حفاری (RQD) و مغزه بازیافتی (CR):
 شاخص مغزه بازیافتی (Core Recovery) طول مغزه های
 به دست آمده ناشی از حفاری به طول کل حفاری بوده و
 شاخص RQD، طول مغزه های بیشتر از ۱۰ سانتیمتر (به
 خاطر شکستگی های طبیعی) به طول کل حفاری
 می باشد. همانطور که بیان شد، با افزایش تعداد ترک ها
 در طول مغزه، شاخص RQD کاهش می یابد که این امر
 باعث افزایش سطوح ضعف در حین حفاری و کاهش

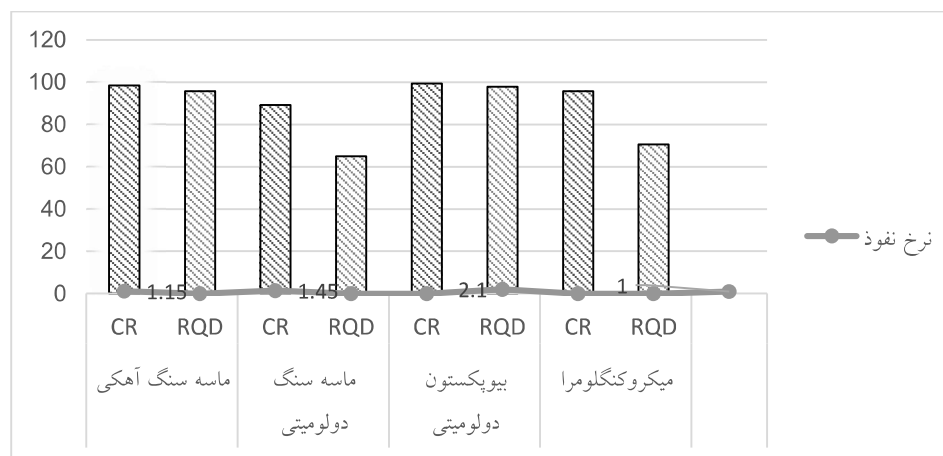
نرخ نفوذ می گردد. داده های حاصل از حفاری نشان
 میدهد (مطابق نمودار شکل ۱۰)، در شرایطی که شاخص
 RQD کمتر از ۶۰٪ باشد، میزان نرخ نفوذ کمتر از یک متر
 در ساعت می باشد. ولیکن با افزایش شاخص RQD،
 میزان نرخ نفوذ بصورت نمایی ($e^{0.025}$) افزایش می یابد.
 جدول ۶ میزان افزایش نرخ نفوذ را به ازای افزایش RQD
 نشان می دهد.

جدول ۶. رابطه بین افزایش نرخ نفوذ با شاخص RQD

Increase	Penetration (m/h) rate	%RQD
---	0.31	30
216%	0.68	60
164%	1.1	80
164%	1.81	100

همانطور که جدول ۶ نشان می دهد، با افزایش میزان RQD
 از ۶۰٪ به ۸۰٪، میزان نرخ نفوذ به صورت نمایی حدود
 ۱۶۴٪ افزایش می یابد که نشان دهنده تاثیر تراکم و تعداد
 درزه ها در میزان نرخ نفوذ می باشد. شاخص مغزه
 بازیافتی (CR) بمقدار بسیار اندکی در نرخ نفوذ تاثیر دارد

بطوری که در حفره ها میزان سرعت حفاری افزایش
 می یابد، ولی از آنجایی که در نمونه های سنگی معدن
 نخلک میزان مغزه بازیافتی نسبتا زیاد است، همانطور که
 شکل ۱۱ نشان می دهد، تغییر در میزان شاخص مغزه
 بازیافتی، تاثیر زیادی در نرخ نفوذ ندارد.



شکل ۱۱. رابطه شاخص های RQD و مغزه بازیافتی با میزان نرخ نفوذ

۴. نتیجه گیری

معدن نخلک با حدود دو هزار سال سابقه استخراج یکی از بزرگترین معادن زیرزمینی کشور است. در این معدن، حفاری اکتشافی به روش دورانی مغزه گیری توسط دستگاه های حفاری سیمی انجام می گیرد که نتایج حاصل از حدود ۳۵ هزار متر حفاری بر روی چهار واحد سنگی (آهک ماسه ای، ماسه سنگ دولومیتی، بیوپکستون دولومیتی و میکروکنگلومر) انجام گرفته است. از آنجا که میزان نرخ نفوذ در حفاری اکتشافی و کارایی آن نقش زیادی دارد، لذا در این پژوهش نقش مهمترین عوامل ذاتی سنگ (کانی شناسی و بافت) و مهمترین عامل توده سنگ (تراکم درزه ها و شاخص RQD) جهت بررسی میزان نرخ نفوذ، مورد بررسی قرار گرفته است.

بدین منظور از تمام نمونه های سنگی ذکر شده بصورت تصادفی و در بخش های بدون ماده معدنی، مقاطع نازک مناسب تهیه شده و پس از مطالعه کانی شناسی و جورشدگی بافتی و کانی شناسی، میزان گردشدگی و غیره مکانیکی سنگ شده و باعث افزایش میزان نرخ نفوذ می گردد که این امر در سنگهای بیوپکستون دولومیتی و آهک دولومیتی به خوبی دیده می شود. طبق پژوهش های انجام گرفته شاخص RQD به عنوان مهمترین فاکتور توده سنگ، نقش زیادی در تعیین میزان نرخ نفوذ دارد. این شاخص که از تراکم و فاصله داری درزه ها در توده سنگ محاسبه می گردد، کاهش آن باعث افزایش نقاط ضعف در حین حفاری و کاهش میزان نرخ نفوذ می گردد. نمودارها

از آنها نمونه های مغزه جهت انجام آزمون های فیزیکی و مهندسی سنگ تهیه گردید. نتایج حاصل از آزمایشات نشان می دهد که مهمترین عوامل موثر در افزایش نرخ نفوذ در بین عوامل ذاتی سنگ، عامل کانی شناسی و بافت سنگ می باشد. بطوری که با افزایش گستردگی دانه بندی ذرات تشکیل دهنده سنگ (کاهش جورشدگی)، میزان فضاهای خالی ذرات کاهش یافته که باعث کاهش تخلخل و افزایش وزن واحد حجم می گردد. این امر سفتی و قوام سنگ را در برابر سایش سرمرته حفاری افزایش داده و باعث کاهش نرخ نفوذ می گردد که در نمونه های آهک ماسه ای به خوبی دیده می شود. عامل کانی شناسی نیز نقش بسیار موثری در میزان نرخ نفوذ داشته به طوری که افزایش درصد کوارتز، باعث افزایش ساینده گی سنگ شده و زمینه را برای کاهش نرخ نفوذ فراهم می کند (نمونه ماسه سنگ آهکی و میکروکنگلومر). در کنار این مسئله افزایش میزان دولومیت موجود در سیمان سنگ نیز باعث افزایش تخلخل، کاهش وزن واحد حجم و کاهش مشخصات و داده ها نشان می دهد، در تمام نمونه های سنگی صرفنظر از نوع سنگ، با افزایش شاخص RQD از ۶۰٪ به ۸۰٪، میزان نرخ نفوذ به اندازه ۱۶۴٪ افزایش می یابد که نشاندهنده تاثیر کاهش سطوح ضعف در افزایش راندمان حفاری می گردد. همچنین داده های ناشی از حفاری نشان می دهد، میزان مغزه بازیافتی (CR) به دلیل بالا بودن آن در نمونه های سنگی، تاثیر چندانی در میزان نرخ نفوذ حفاری ندارد.

منابع

- اصانلو، م.، ۱۳۷۰. مهندسی حفاری، انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی، واحد جنوب تهران، ۵۰۰ ص.
- اسعد فاطمی، ا.، احمدی، م.، رستمی، ج.، ۱۳۹۶. ارائه مدل و سیستم رده بندی برای پیشبینی نرخ نفوذ ماشین حفر تونل، نشریه مهندسی معدن، دوره دوازدهم، شماره ۳۶، ۶۹-۵۹.
- جزی، م.ع.، کریم پور، م.ح.، ملک زاده شفارودی، آ.، رحیمی، ب.، ۱۳۹۴. نقش کنترل کننده های چینه شناسی، سنگ شناسی و ساختاری در جایگیری کانسار سرب نخلک، مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۱۵، ۵۱-۶۶.

شرکت کیمیا گوهرا، ۱۳۹۹. گزارش اکتشاف معدن نخلک، ۲۰۰ ص.

رمضان نیا، ر.، عطایی، م.، خالوکاکایی، ر.، صالحی نسب، ع.، ۱۴۰۰. ارزیابی عوامل موثر بر سایش سرمته های سه مخروطی دورانی دستگاه های حفاری در معادن روباز، مجله انجمن زمین شناسی مهندسی، شماره ۴، ۷۵-۸۸.

- Adebayo, B., Adetula, B. O., 2013. Evaluation of physical and mechanical properties of rock for drilling condition classification, *World Journal of Engineering*, 4: 359-365.
- Akun, M. E, Karpuz, C., 2005. Drill ability studies of surface-set diamond drilling in Zonguldak region sandstones from Turkey, *International Journal of Rock Mechanics and Mining*, 42: 473-479.
- Bhalchandra, V. G., 2009. Rotary drilling and blasting in large surface mines, CRC press: Balkema Book, 777P.
- Babatunde. A., 2011. Effect of Textural Characteristics of Rock on Bit Wear, Federal University of Technology, Technical Report, 14: 299-307.
- Ersoy, A, Waller, M. D., 1995. Textural characteristic of rocks, *Engineering geology*, 39: 123-136.
- Hayati, Y., 2019. Determination of drilling rate index based on rock strength using regression analysis, *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*, 91: 1-10.
- Hegde, C., Daigle, H., Millwater, H., Gray, K., 2017. Analysis of Rate of Penetration (ROP) Prediction in Drilling Using Physics-Based and Data-Driven Models, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 159: 295-306.
- Hoseinie, S. H., Ataei, M., Aghababaie, A., 2014. A laboratory study of rock properties affecting the penetration rate of pneumatic top hammer drills, *Journal of mining and environment*, 1: 25-34.
- Inanloo. H., Sereshki, F., Ataei, M., Karamoozian, M., 2018. Prediction of rotary drilling penetration rate in iron ore oxides using rock engineering system, *International Journal of Mining Science and Technology*, 28: 407-413.
- Kahraman, S., 2018. Performance analysis of drilling machines using rock modulus ratio, *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 23: 515-522.
- Kahraman, S., Balchi, C., Yazichi, S., Bilgin, N., 2000. Prediction of the penetration rate of rotary blast hole drills using a new drill ability index, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 37: 729-43.
- Wilbure H. S., 1959. Laboratory Study of Rock Breakage by Rotary Drilling, Society of Petroleum Engineers Office, 216: 92-97.
- Niazi, B., 2011. Determination of drillability of some natural stones and their association with rock properties, *Academic Journals, Scientific Research and Essays*, 6: 382-387.
- Su, O., Sakız, U., Akçın, N. A., 2016. Effect of elastic and strength properties of rocks during blasthole drilling, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 3: 217-221
- Kolapo, P., 2021. Investigating the Effects of Mechanical Properties of Rocks on Specific Energy and Penetration Rate of Borehole Drilling, *Geotechnical Geology Engineering*, 39: 1715-1726.
- Yarali, O., Soyer, E., 2013. Assessment of relationships between drilling rate index and mechanical properties of rocks, *Tunneling and Underground Space Technology*, 33: 46-53.
- Wang, Z. W., Huang, S. L., 1995. The mechanism of diamond core drilling of rocks, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 34: 134-148.
- Wang, Z. W., 1995. The mechanics of diamond core drilling of rocks, PhD Thesis, University of Alaska, 250 P.