

ارزیابی عوامل موثر بر سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی دستگاه‌های حفاری در معادن روباز- مطالعه موردی

سید رسول رمضان نیا*^۱، محمد عطایی^۲، رضا خالوکاکایی^۲، سید هادی حسینی^۳، عبدالمجید صالحی نسب^۴

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۲۶

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۲۰

چکیده

استخراج و بهره‌برداری یکی از بخش‌های مهم در حوزه‌ی معادن و صنایع معدنی است. حفر چال‌های انفجاری اولین مرحله از چرخه‌ی تولید در معادن روباز می‌باشد که قسمت عمده‌ای از هزینه‌های استخراج را به خود اختصاص می‌دهند. سرمته‌ها به عنوان یکی از حساس‌ترین و مهم‌ترین قسمت‌های حفاری در فرآیندهای عملیاتی، با توجه به نوع کاربرد و هزینه‌های بالای تمام شده از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. سایش و فرسودگی این ابزار پارامتر مهمی برای برآورد کارایی تجهیزات حفاری در پروژه‌های معدنی است. سایش سرمته‌های حفاری تابع عوامل مختلفی است که برخی وابسته به ماشین‌آلات، پارامترهای عملیاتی و پارامترهای مدیریتی و برخی تابع شرایط و خصوصیات ماده سنگ و توده سنگ و محیط اطراف است. بررسی پارامترهای مؤثر بر سایش سرمته‌ها می‌تواند با کاهش اثرات سایش، از هدر رفتن زمان و هزینه‌های اضافی وارد بر فرآیند حفاری جلوگیری نماید. لذا در این تحقیق ارزیابی عوامل مؤثر بر سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی در معدن مس سرچشمه مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور ابتدا سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی از طریق آفت وزنی محاسبه شده و با تعیین پارامترهای مؤثر، ارتباط بین این عوامل و سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی از طریق روش آماری تعیین شده است. سپس با استفاده از تحلیل حساسیت مقدار تاثیر پارامترهای ورودی بر روی هدف تعیین شده است. نتایج این تحلیل‌ها نشان می‌دهد که تمامی پارامترهای تحقیق به غیر از شاخص شدت دگرسانی شیمیایی، تخلخل و کوارتز محتوی معادل سنگ بر روی خروجی مورد نظر (سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی) تاثیرگذارند و تغییرات کوچک در مقدار آنها به تغییرات اساسی در سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی منجر می‌شود.

کلید واژه‌ها: حفاری، سایش، سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی، روش آماری، تحلیل حساسیت.

۱. دانشجوی دکتری مهندسی استخراج معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود R.Ramezannia@Shahroodut.ac.ir

۲. عضو هیات علمی گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

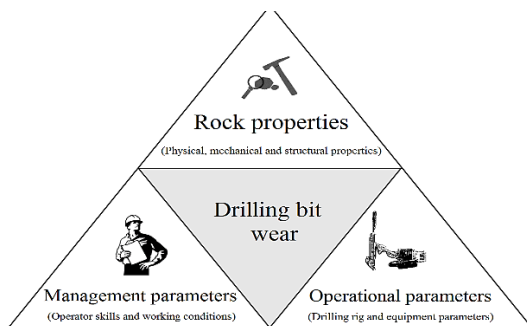
۳. عضو هیات علمی گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

۴. کارشناس ارشد مهندسی استخراج معدن، رئیس واحد حفاری و انفجار امور معدن مس سرچشمه، سرچشمه

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

مؤثر در سایش سرمت‌های حفاری را می‌توان در سه بخش مشخصات سنگ، پارامترهای اجرایی و پارامترهای مدیریتی مورد بررسی قرار داد. از میان این پارامترها، پارامترهای اجرایی به عنوان پارامترهای قابل کنترل و پارامترهای مربوط به مشخصات سنگ، به عنوان پارامترهای غیر قابل کنترل در فرایند سایش سرمت‌های حفاری مطرح می‌باشند. هر کدام از این دسته پارامترها به نحو خاصی در سایش سرمت‌های حفاری تأثیرگذار می‌باشند. شکل ۱ پارامترهای مؤثر بر سایش سرمت‌های حفاری را نشان می‌دهد.



شکل ۱. پارامترهای مؤثر بر سایش سرمت‌های حفاری.

جدول ۱ برخی از مشخصات فیزیکی سنگ‌ها که توسط محققین در زمینه سایش سرمت‌های حفاری مطالعه شده‌اند را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در اکثر این تحقیقات رابطه ریاضی خاصی بین مشخصات فیزیکی و سایش سرمت‌های حفاری ارائه نشده است و تنها به ذکر بااهمیت بودن این پارامتر در فرایند حفاری اکتفا شده است. مطابق نتایج ارائه شده می‌توان به این نکته اشاره کرد که از میان پارامترهای مطالعه شده، چهار پارامتر کوارتز محتوی معادل، محتوای سیلیس، اندازه و شکل دانه‌ها و بافت سنگ در اکثر مطالعات مورد بررسی قرار گرفته و یا اهمیت آن‌ها مورد تأکید بوده است.

از مهم‌ترین خواص مکانیکی سنگ‌ها می‌توان به مقاومت، سختی و ساینده‌گی سنگ‌ها اشاره کرد. جدول ۲ مطالعات محققین در ارتباط با پارامترهای مقاومتی سنگ به منظور بررسی و ارزیابی سایش سرمت‌های حفاری را نشان می‌دهد. مطابق نتایج ارائه شده در این جدول می‌توان به این نکته اشاره کرد که از میان پارامترهای مطالعه شده، دو پارامتر مقاومت فشاری و مقاومت کششی در اکثر

سرمت‌های حفاری با درجه‌ی بالایی از حساسیت و آسیب‌پذیری، یکی از اساسی‌ترین اجزا در راندمان حفاری است که بیشترین هزینه‌های حفاری در معادن را به خود اختصاص می‌دهند. استفاده از سرمت‌های سه‌مخروطی دورانی به‌طور گسترده در معادن روباز برای روباره‌برداری و استخراج مواد معدنی متداول است. سرمت‌های مورد استفاده در معادن روباز معمولاً از جنس فولاد مخصوص یا کاربید تنگستن (WC) می‌باشند. این آلیاژها به عنوان ترکیبی از ذرات ریز کاربید تنگستن در یک محیط در برگیرنده‌ی (Fe, Co, Ni) پراکنده شده‌اند. در معدن‌کاری و صنایع نفت و متالورژی، سرمت‌های حفاری کاربید تنگستن معمولاً در اثر عوامل گوناگون همچون سایش ناشی از ساییدگی، خوردگی، فرسایشی، سایش فرساینده، خراب شدن در اثر لب‌پر شدن، تغییر شکل ناشی از حرارت و ترک خوردن ناشی از حرارت از کار افتاده می‌شوند. در هنگام معدن‌کاری، قسمت‌های کاربید تنگستنی در شرایط شدیدی از لحاظ مکانیکی، شیمیایی و حرارتی قرار می‌گیرند و طبیعت ساینده‌ی اکثر کانی‌ها می‌تواند باعث سایش قابل‌ملاحظه‌ای در سرمت‌های حفاری مورد استفاده در معادن شود. سایش باعث از بین رفتن سطح سرمت‌ها شده و کارایی دستگاه را کاهش داده و رسیدن به نرخ نفوذ بهینه را سخت خواهد کرد. سایش‌های شدیدتر منجر به شکستن سرمت‌ها خواهد شد و تعویض سریع سرمت‌ها را الزامی خواهد کرد. این امر باعث از دست دادن زمان زیادی در فرآیند حفاری خواهد شد که هزینه‌های بسیار زیادی در پی خواهد داشت. بررسی پارامترهای مؤثر بر سایش سرمت‌ها می‌تواند با کاهش اثرات سایش، از هدر رفتن زمان و هزینه‌های اضافی بر فرآیند حفاری جلوگیری نماید. سایش سرمت‌های سه‌مخروطی از آن جهت اهمیت دارد که در بسیاری از موارد منجر به کاهش تولید می‌شود که جریمه‌ها و ضررهای اقتصادی فراوانی را به همراه دارد. بنابراین پیش‌بینی سایش سرمت‌های سه‌مخروطی دورانی مرحله‌ای اساسی و بنیادی در حفاری معادن روباز است. به‌طور کلی پارامترهای

مطالعات مورد بررسی قرار گرفته و یا اهمیت آنها مورد تاکید بوده است.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی مطالعه شده توسط محققین.

Reference	Physical Properties of Rocks						
	Texture	Grain size	Alumina content	Silica content	Equivalent quartz content	Porosity	Density
Larsen-Basse and Koyanagi 1979					•		
Howarth and Rowlands 1987	•						
Miller and Ball 1990		•					
Xuefeng and Shifeng 1994	•				•		
Ersoy and Waller 1995	•	•		•	•		
Plinninger et al. 2002 a					•		
Plinninger et al. 2002 b			•	•			
Adebayo and Okewale 2007					•		
Plinninger 2008			•	•	•		
Adebayo 2011	•	•		•	•	•	•
Adebayo and Akeju 2012 a				•	•		
Adebayo and Akeju 2012 b				•	•		
Angseryd et al. 2013			•	•			
Adebayo and Adetula 2013	•	•			•		
Yahiaoui et al. 2015			•				
Adebayo and Akande 2015	•			•	•		
Babatunde 2015		•		•	•	•	
Saeidi et al. 2015		•			•		
Dogruoz et al. 2016							•
Adebayo 2019					•		
Capik and Batmunkh 2020							•
Piri et al. 2020		•			•		
Majeed et al. 2020					•	•	•

جدول ۲. پارامترهای مقاومتی مطالعه شده توسط محققین.

Reference	Rock strength parameters	
	Compressive strength	Tensile strength
Miller and Ball 1990	•	
Miller and Ball 1991	•	
Ersoy and Waller 1995	•	•
Plinninger et al. 2002	•	
Adebayo and Okewale 2007	•	•
Adebayo et al. 2010	•	•
Rashidi et al. 2010	•	
Adebayo and Akeju 2012 a	•	•
Adebayo and Akeju 2012 b	•	•
Adebayo and Bello 2012	•	•
Adebayo and Adetula 2013	•	•
Adebayo and Akande 2015	•	
Babatunde 2015	•	
Saeidi et al. 2015	•	
Dogruoz et al. 2016	•	•
Karasawa et al. 2016	•	•
Sahoo and Choudhary 2017	•	
Capik and Batmunkh 2020	•	•
Piri et al. 2020	•	•
Kolapo 2020	•	•
Majeed et al. 2020	•	•

استفاده قرار گرفته‌اند که در جدول ۵ به نمایش در آمده است.

جدول ۴. شاخص‌های سایندهی مطالعه‌شده توسط محققین.

Reference	Abrasivity of rocks	
	RAI	F-abrasivity
Ersoy and Waller 1995		•
Plinninger et al. 2002 a	•	•
Plinninger et al. 2002 b	•	
Plinninger 2008	•	•
Adebayo and Akeju 2012 a	•	
Adebayo and Akeju 2012 b	•	
Prieto 2012	•	
Adebayo and Adetula 2013	•	
Dudek and Władzielczyk 2018	•	
Piri et al. 2020		•
Majeed et al. 2020	•	

جدول ۵. شاخص‌های سختی مطالعه‌شده توسط محققین.

Reference	Operational parameters	
	RPM	WOB
Miller and Ball 1990	•	•
Miller and Ball 1991	•	
Ersoy and Waller 1995	•	•
Ersoy and Waller 1997	•	•
Rashidi et al. 2008	•	•
Rashidi et al. 2010 a	•	•
Rashidi et al. 2010 b	•	•
Wu et al. 2010	•	•
Adebayo and Akeju 2012 a	•	•
Adebayo and Akeju 2012 b	•	•
Adebayo and Bello 2012	•	•
Naganawa 2012	•	•
Adebayo and Akande 2015	•	•
Ghosh et al. 2016	•	•
Karasawa et al. 2016		•
Al-Sudani et al. 2017		•
Mazen et al. 2019	•	•
Shankar et al. 2020	•	•
Song et al. 2020		•
Šporin et al. 2020	•	•

با توجه به اهمیت هوازدگی و دگرسانی سنگ‌ها و درزه و ناپیوستگی‌های ساختاری بر روند حفاری و سایش سرتمه‌ها، شاخص شدت دگرسانی شیمیایی (Chemical Index of Alteration (CIA)) و سیستم‌های طبقه‌بندی توده سنگ نظیر سیستم رده‌بندی توده سنگ (RMR) و شاخص مقاومت زمین شناسی (GSI) نیز در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است.

در جدول ۳ برخی از شاخص‌های سختی (سختی موهس و سختی واجهش چکش اشمیت) که توسط تعدادی از محققین در زمینه‌ی سایش سرتمه‌های حفاری مورد بررسی قرار گرفته‌اند، نشان داده شده است.

جدول ۳. شاخص‌های سختی مطالعه‌شده توسط محققین.

Reference	Rock Hardness Scales	
	Mohs	Schmidt hammer
Ersoy and Waller 1995	•	
Ersoy and Waller 1997	•	
Adebayo and Okewale 2007		•
Adebayo et al. 2010		•
Adebayo and Akande 2015		•
Saeidi et al. 2015	•	
Dogruoz et al. 2016		•
Sahoo and Choudhary 2017		•
Capik and Batmunkh 2020		•
Piri et al. 2020	•	
Majeed et al. 2020		•

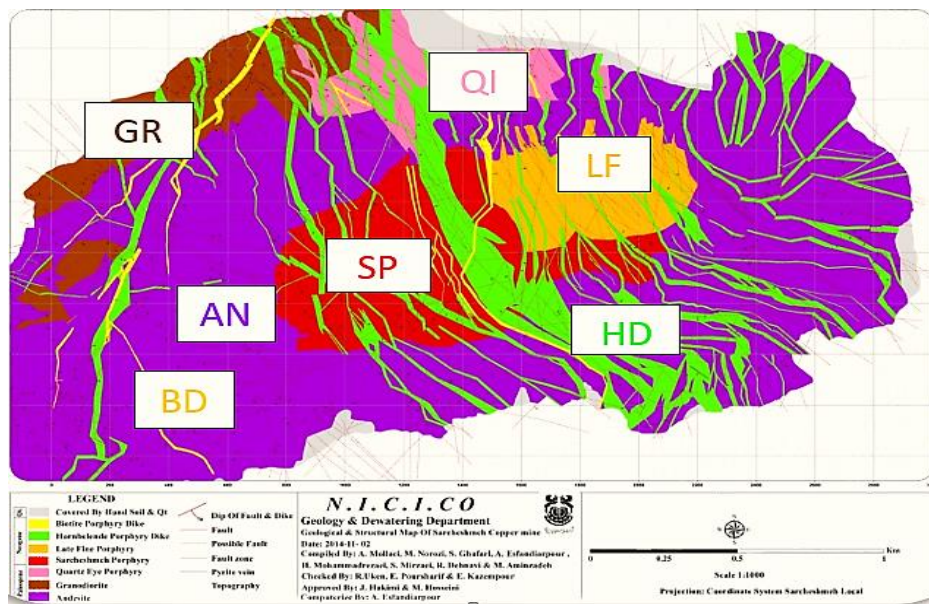
جدول ۴ برخی از شاخص‌های سایندهی سنگ‌ها (فاکتور سایندهی شیمازک (Schmiazek F-abrasivity factor) و شاخص سایندهی سنگ (Rock Abrasivity Index (RAI)) را که توسط محققین مختلف در زمینه‌ی سایش سرتمه‌های حفاری مورد بررسی قرار گرفته شده‌اند را نشان می‌دهد. مطالعات انجام شده پیرامون تأثیر سایندهی سنگ‌ها بر سایش سرتمه‌های حفاری در بیشتر موارد بر بیان بااهمیت بودن سایندهی بر سایش سرتمه‌ها متمرکز بوده است. به طور کلی نتیجه‌ی این تحقیقات نشان می‌دهد که با افزایش سایندهی، سرعت حفاری کاهش یافته و سایش سرتمه‌ها افزایش می‌یابد. با توجه به سایش به وجود آمده در سرتمه‌ها، حفاری در زمان مورد نظر به پایان نخواهد رسید. به همین دلیل بررسی سایش سرتمه‌ها در طول برخورد با سنگ‌ها نیز دارای اهمیت بسیار زیادی است.

همچنین پارامترهایی دیگری نیز بر سایش سرتمه‌های حفاری تأثیرگذارند که بیشتر به شرایط سیستم حفاری و خود سرتمه مربوط می‌باشند و تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر نرخ سایش خواهند داشت. این پارامترهای اجرایی که شامل بار روی سرتمه (WOB) و سرعت دوران سرتمه (RPM) است توسط تعدادی از محققین در زمینه‌ی سایش سرتمه‌های حفاری مورد

پورفیری (SP)، کوارتز چشمی (QI)، استوک لیت‌فاین پورفیری (LF) و دایک‌های گرانودیوریتی (BD,HD)، عمدتاً تشکیل‌دهنده‌ی معدن مس سرچشمه تشکیل شده‌اند و تحت هوازدگی، دگرسانی شدید، کانی‌سازی مس-مولیبدن و پیریتی شدن قرار گرفته‌اند (شکل ۲).

۲. منطقه‌ی مورد مطالعه (معدن مس سرچشمه)

کانسار مس سرچشمه به‌عنوان یکی از بزرگترین معادن مس-مولیبدن پورفیری در جهان، بر روی کمربند آتشفشانی ارومیه - دختر و در ۶۵ کیلومتری جنوب غرب رفسنجان واقع است. توف‌های آندزیتی (AN)، توده گرانودیوریتی (GR)، استوک گرانودیوریتی سرچشمه



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی معدن مس سرچشمه.

۳. جمع‌آوری اطلاعات و ایجاد پایگاه داده

بر اساس توضیحات بیان شده در بخش‌های قبلی پارامترهای مؤثر در سایش سرمته‌های حفاری را می‌توان در سه بخش مشخصات سنگ، پارامترهای اجرایی و پارامترهای مدیریتی مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. در این تحقیق پس از انتخاب پارامترهای مؤثر، بازه‌ی تغییرات هر یک از پارامترها برای پوشش تمام شرایط تعیین شده است. دسته بندی این پارامترها در جدول ۶ ارائه شده است.

در این تحقیق ۲۹ سرمته با توجه به شرایط فیزیکی سرمته‌ها (از کارافتادگی به علت سایش نه به علت شکستگی یا خرابی) انتخاب و مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور اندازه‌گیری سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی از روش افت وزنی سرمته مستهلک نسبت به حالت نو استفاده شده است.

جدول ۶. پارامترهای مؤثر بر سایش سرمته‌های حفاری

Rock properties		Rock mass properties	Operational parameters
Physical properties	Mechanical properties		
Density	UCS	GSI	WOB
Porosity	BTS	RMR	RPM
EQC	Mohs		
Al ₂ O ₃	SH		
SiO ₂	RAI		
GS	SF-a		
TC			
CIA			

WOB: Weight On Bit, RPM: Rotations Per Minute, GSI: Geological Strength Index, RMR: Rock Mass Rating; UCS: Uniaxial Compressive Strength; BTS: Brazilian Tensile Strength, Mohs: Mohs hardness, SH: Schmidt Hammer, RAI: Rock Abrasivity Index, SF-a: Schmiatzek F-abrasivity factor, EQC: Equivalent Quartz Content, Al₂O₃: Alumina content, SiO₂: Silica content, GS: Grain Size, TC: Texture, CIA: Chemical Index of Alteration

همین دلیل در این تحقیق مقادیر مختلفی از این پارامترها اندازه‌گیری شده است که به منظور استفاده از یک مقدار واحد برای تحلیل هر سرمتی حفاری، با توجه به مترای حفاری از میانگین وزنی مقادیر اندازه‌گیری شده نسبت به سنگی که در آن حفاری شده استفاده شده است.

جدول ۷. اطلاعات آماری داده‌های تحقیق

Parameters	Min	Max	Average	STDEV
WOB	4.332	29.75	19.887	7.451
RPM	80.059	98.25	88.903	5.171
CIA	51.652	70.367	61.041	6.453
Density	2.591	2.692	2.657	0.027
Porosity	1.701	4.194	2.781	0.75
Mohs	4.591	5.830	4.923	0.217
SH	18.784	26.193	22.018	2.503
GS	0.563	2.381	1.291	0.629
TC	0.371	0.868	0.583	0.163
Al ₂ O ₃	13.179	17.295	14.722	1.042
SiO ₂	49.147	60.558	55.495	3.505
EQC	44.222	56.958	49.122	3.54
UCS	21.257	50.998	34.095	9.803
BTS	2.87	9.261	5.755	2.082
RAI	10.119	22.323	16.103	3.711
SF-a	1.235	10.105	4.786	3.091
GSI	38.793	62.775	48.652	8.433
RMR	35.365	63.364	47.481	9.157
Bit Wear	1.079	7.241	3.731	1.796

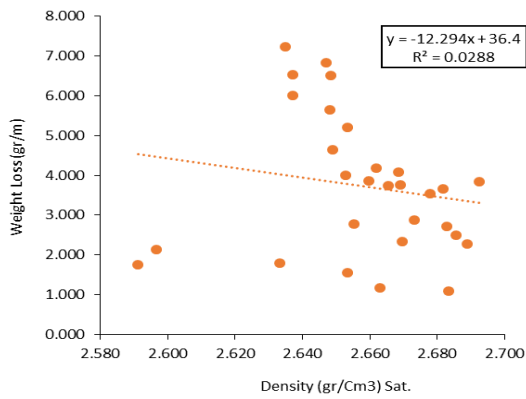
شکل‌های ۳ تا ۱۰ نتایج این برآزش‌ها را برای متغیرهای فیزیکی سنگ‌ها نسبت به سایش سرمت‌های حفاری (افت وزنی) نشان می‌دهد.

برای انجام این فرایند سرمت‌های مستهلک پس از جمع‌آوری، شستشو و تمیزکاری به آزمایشگاه تحقیق و توسعه معدن مس سرچشمه انتقال یافتند (شکل ۳). به منظور تعیین میزان افت وزنی، سرمت‌های سه‌مخروطی قبل و بعد از حفاری در حالت نو و مستهلک از طریق باسکولی با دقت ۰/۰۱ کیلوگرم توزین شدند. با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی (آنالیز شیمیایی، بررسی مقاطع نازک و تست‌های آزمایشگاهی بر روی ۱۰ نمونه سنگ)، مطالعات میدانی و بانک اطلاعاتی موجود در مرکز تحقیق و توسعه معدن مس سرچشمه، پایگاه داده برای تعیین مشخصات فیزیکی، مکانیکی، ساختاری مؤثر سنگ‌ها و پارامترهای عملیاتی تشکیل شده است. لازم به ذکر است به منظور دقت در انجام محاسبات، سنگ‌های مختلف معدن بر اساس پدیده‌ی دگرسانی که بیشترین تاثیر را در تغییر خواص ژئومکانیکی سنگ‌ها داراست، تقسیم‌بندی شده است.

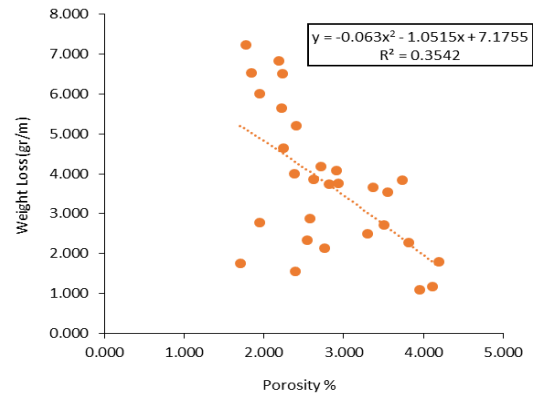
از این رو اطلاعات آماری پارامترهای تحقیق برای ۲۹ سرمت در جدول ۷ به تفصیل ارائه شده است.

۴. نتایج روش تحقیق

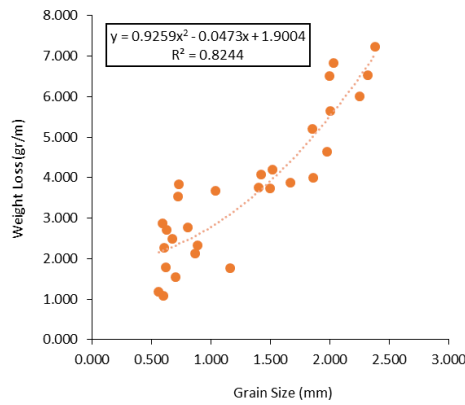
برای تعیین رابطه‌ی پارامترهای مورد بررسی با نرخ سایش سرمت‌های سه‌مخروطی دورانی، می‌بایست تأثیر هرکدام از این پارامترها بر نرخ سایش، به‌طور جداگانه تعیین شود. به همین منظور در این بخش، ارتباط تک‌تک متغیرها با نرخ سایش سرمت‌های سه‌مخروطی دورانی مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور تعیین این پارامترها هر سرمت به توجه به سنگی که در آن حفاری شده است مورد پایش قرار گرفته است. به



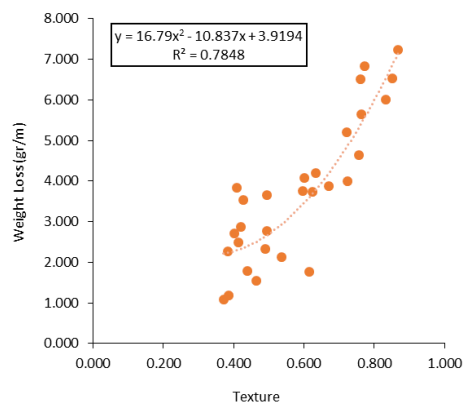
شکل ۴. رابطه‌ی بین چگالی اشباع و سایش سرمته.



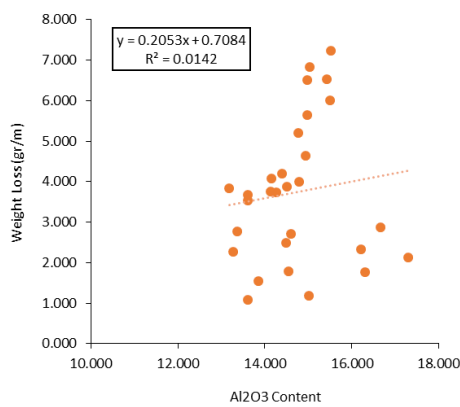
شکل ۳. رابطه‌ی بین تخلخل و سایش سرمته.



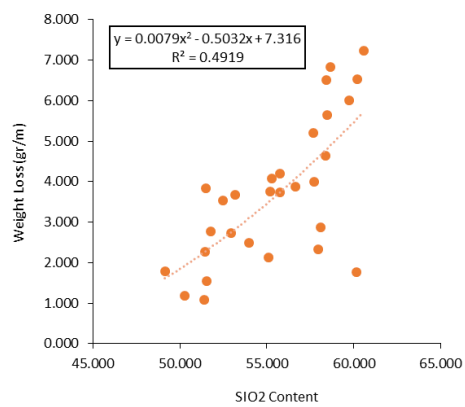
شکل ۶. رابطه‌ی بین میانگین اندازه دانه‌ها و سایش سرمته.



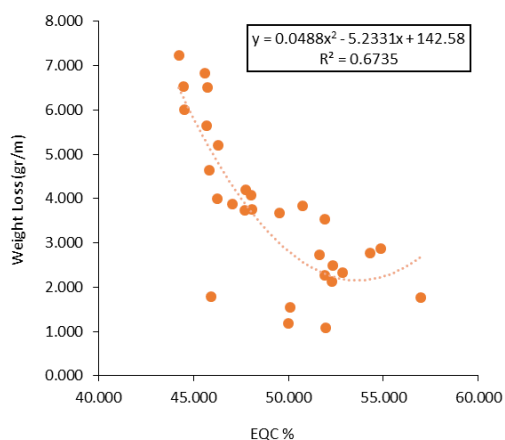
شکل ۵. رابطه‌ی بین ضریب بافت سنگ و سایش سرمته.



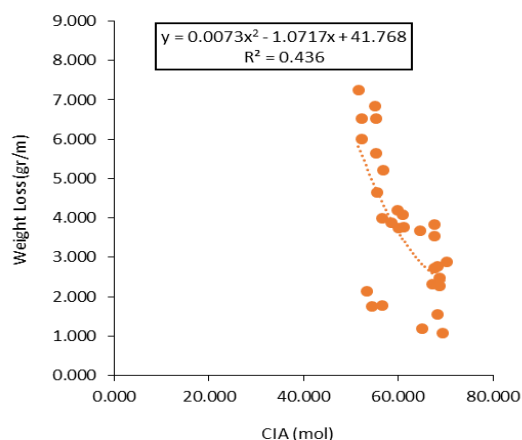
شکل ۸. رابطه‌ی بین محتوای آلومینا و سایش سرمته.



شکل ۷. رابطه‌ی بین محتوای سیلس و سایش سرمته.



شکل ۱۰. رابطه‌ی بین کوارتز محتوی
معادل و نرخ سایش سرمته.



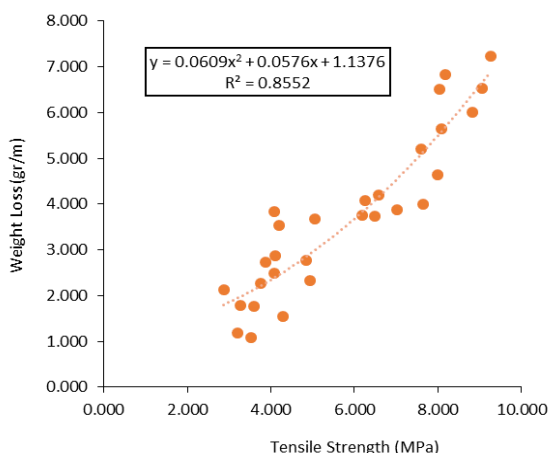
شکل ۹. رابطه‌ی بین شاخص دگرسانی
شیمیایی و نرخ سایش سرمته.

مثال پارامتر چگالی فاکتور تعیین کننده‌ای برای سایش به حساب نمی‌آید و چون مقدار آن به نسبت پوکی و تخلخل وابسته است؛ بنابراین عامل فرعی در افزایش یا کاهش سایش به شمار می‌رود.

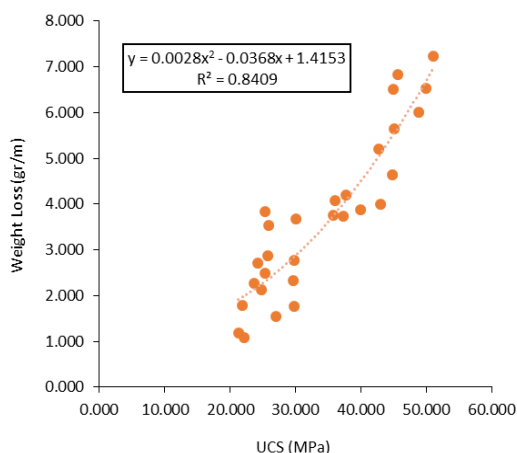
همچنین بین نرخ سایش و پارامتری مانند کوارتز محتوی معادل رابطه‌ی معکوسی دیده می‌شود در حالی که با افزایش میزان کوارتز محتوی معادل میزان نرخ سایش نیز افزایش می‌یابد.

نتایج برازش برای متغیرهای مکانیکی سنگ‌ها نیز در شکل‌های ۱۱ تا ۱۶ نشان داده شده است.

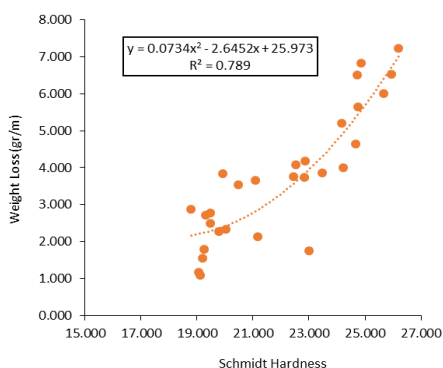
همانطور که در شکل‌های ارائه شده قابل مشاهده است تمامی متغیرها ارتباط خوبی با نرخ سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی ندارند. از بین مشخصات فیزیکی سنگ‌ها، تنها میانگین اندازه دانه‌ها و ضریب بافت با پارامتر وابسته (سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی) رابطه‌ی معناداری را ایجاد کرده است. در مابقی متغیرها یا روند مشخصی مشاهده نشده است که نشان‌دهنده‌ی همبستگی پایین این پارامترها با نرخ سایش بوده است و یا دامنه‌ی تغییرات مقادیر پارامترها بسیار کوچک بوده است که این پارامترها را به یک مشخصه تبدیل خواهد کرد و نمی‌توان از آن به عنوان متغیر یاد کرد. به عنوان



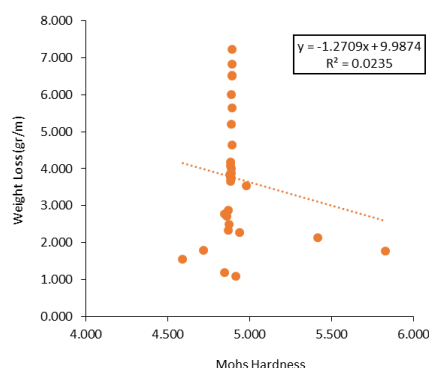
شکل ۱۲. رابطه‌ی بین مقاومت کششی
و نرخ سایش سرمته.



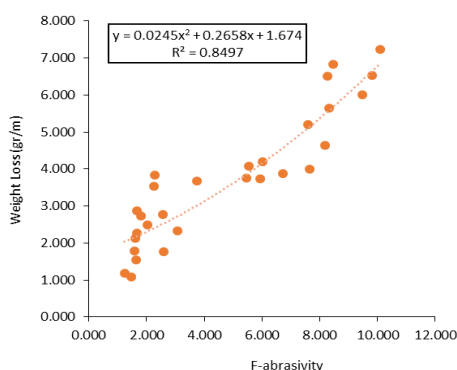
شکل ۱۱. رابطه‌ی بین مقاومت فشاری
و نرخ سایش سرمته.



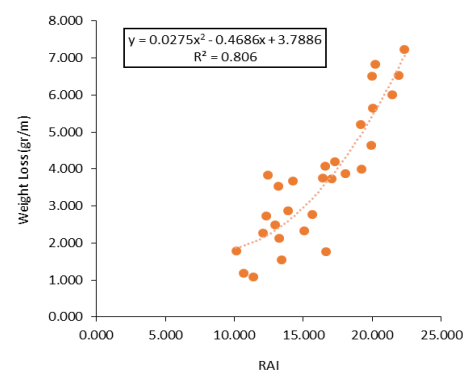
شکل ۱۴. رابطه‌ی بین سختی واجهش اشمیت و نرخ سایش سرمته.



شکل ۱۳. رابطه‌ی بین سختی موهس و نرخ سایش سرمته.



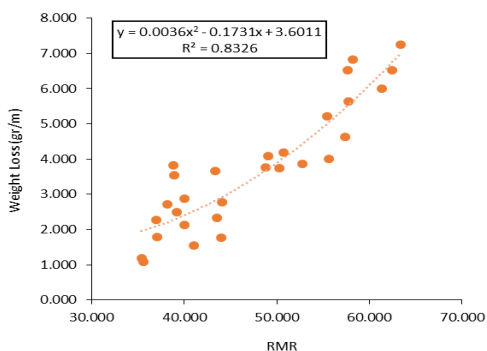
شکل ۱۶. رابطه‌ی بین فاکتور سایندگی شیمزاک و نرخ سایش سرمته.



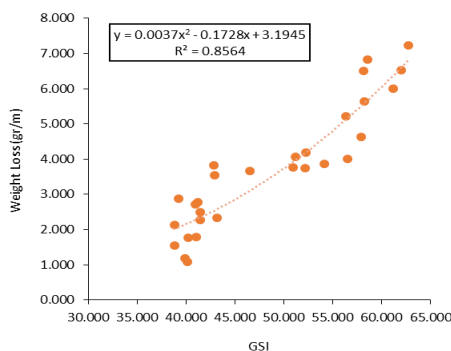
شکل ۱۵. رابطه‌ی بین شاخص سایندگی سنگ و نرخ سایش سرمته.

توجه است. به غیر از مشخصات فیزیکی و مکانیکی، رابطه‌ی بین نرخ سایش سرمته و دو مشخصه‌ی ساختاری مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج آن در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نشان داده شده است. بر اساس این نتایج، پارامتر وابسته با شاخص مقاومت زمین‌شناسی و سیستم رده‌بندی توده سنگ رابطه‌ی مستقیم و معناداری دارد.

طبق نتایج بدست آمده از میان مشخصات مکانیکی سنگ‌ها تمامی پارامترها به غیر از سختی موهس رابطه‌ی معناداری را با متغیر وابسته نشان می‌دهند که نشان‌دهنده‌ی همبستگی بالای این پارامترها با نرخ سایش است. با توجه به اینکه منطقه‌ی مطالعاتی تنها معدن مس سرچشمه بوده و دامنه تغییرات سختی سنگ‌ها ناچیز بوده است، عدم وجود ارتباط معنادار بین سختی موهس با سایش سرمته‌های حفاری قابل

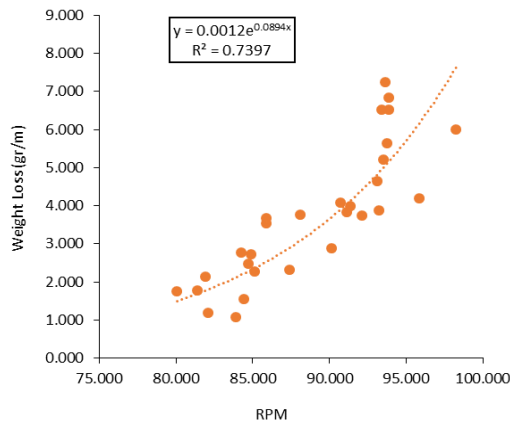


شکل ۱۸. رابطه‌ی بین رده‌بندی توده سنگ و سایش سرمته



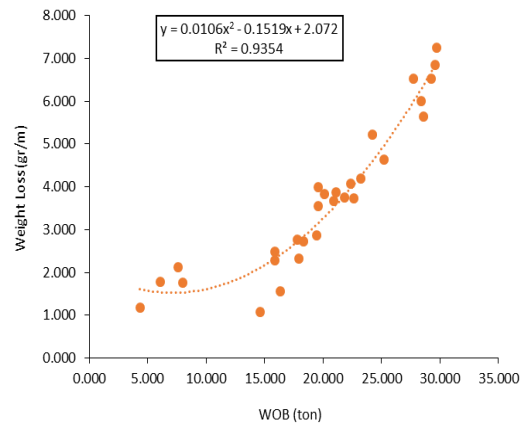
شکل ۱۷. رابطه‌ی بین شاخص مقاومت زمین‌شناسی و سایش سرمته

که از شکل‌های ۱۹ و ۲۰ نمایان است، روند خوب و رابط‌های معناداری بین متغیر وابسته و بار روی سرتمه و سرعت دوران سرتمه‌های حفاری برقرار است.



شکل ۲۰. رابط‌های بین سرعت دوران سرتمه و نرخ سایش سرتمه.

همچنین ارتباط پارامترهای اجرایی و عملیاتی با سایش سرتمه‌های سه‌مخروطی دورانی نیز تعیین شده است که نتایج آن در جداول ۱۹ و ۲۰ به نمایش در آمده است. همان‌طور



شکل ۱۹. رابط‌های بین بار روی سرتمه و نرخ سایش سرتمه.

ورودی بر خروجی بیشتر باشد، R_{ij} به یک نزدیک‌تر خواهد بود. در صورت عدم تأثیر پارامتر ورودی بر خروجی، مقدار R_{ij} صفر است. به طور معمول می‌توان گفت که در بررسی R_{ij} مقادیر بالای ۰/۹ نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه پارامتر مورد نظر بر خروجی و مقادیر کمتر از ۰/۸ بیانگر تأثیر ضعیف آن بر خروجی است (Jong and Lee, 2004).

$$R_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m X_{ik} X_{jk}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m X_{ik}^2 \sum_{k=1}^m X_{jk}^2}} \quad (1)$$

در شکل ۲۱ تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی بر خروجی مورد نظر به نمایش در آمده است. ملاحظه می‌شود که اکثر پارامترها به غیر از شاخص شدت دگرسانی شیمیایی (CIA)، تخلخل و کوارتز محتوی معادل سنگ (EQC) دارای مقادیر R_{ij} بیش از ۰/۹ هستند که بیانگر قرار گرفتن مهم‌ترین پارامترها به عنوان متغیر مستقل یا ورودی مدل‌ها است.

۵. تحلیل حساسیت

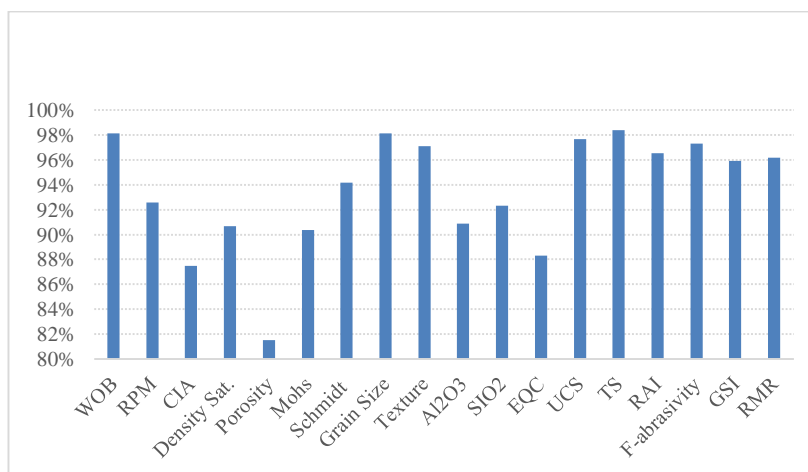
تحلیل حساسیت، تعیین میزان حساسیت هدف مدل‌سازی شده (خروجی) نسبت به پارامترهای ورودی است. با استفاده از آنالیز حساسیت می‌توان روند کلی تأثیر نسبی پارامترهای ورودی مدل را بر خروجی آن تعیین نمود. یکی از روش‌های جدید برای تعیین حساسیت جواب نسبت به پارامترهای ورودی، روش دامنه کسینوسی (Cosine Amplitude (CAM) Method) است. در این روش یک فضای m بعدی به تعداد پارامترهای ورودی در نظر گرفته می‌شود (Jong and Lee, 2004).

$$X = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_m\}$$

پس از آن هر عضو از هر پارامتر ورودی X به وسیله یک بردار طول به تابع هدف متصل می‌شود.

$$X_i = \{X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}, \dots, X_{im}\}$$

در نهایت میزان تأثیر هر کدام از پارامترهای ورودی X بر تابع هدف از رابط‌های زیر تعیین می‌شود. هرچه میزان تأثیر پارامتر



شکل ۲۱. تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی بر روی سایش سرمته‌های حفاری سه‌مخروطی دورانی

وابسته است؛ بنابراین عامل فرعی در افزایش یا کاهش سایش به شمار می‌رود.

همچنین از میان مشخصات مکانیکی سنگ‌ها تمامی پارامترها به غیر از سختی موهس رابطه‌ی معناداری را با متغیر وابسته نشان می‌دهند که نشان‌دهنده‌ی همبستگی بالای این پارامترها با نرخ سایش است. با توجه به اینکه منطقه‌ی مطالعاتی تنها معدن مس سرچشمه بوده و دامنه تغییرات سختی سنگ‌ها ناچیز بوده است، عدم وجود ارتباط معنادار بین سختی موهس با سایش سرمته‌های حفاری قابل توجیه است.

به غیر از مشخصات فیزیکی و مکانیکی، رابطه‌ی بین نرخ سایش سرمته و دو مشخصه‌ی ساختاری و پارامترهای اجرایی مورد بررسی قرار گرفته است. به همین منظور، ارتباط تک‌تک متغیرها با نرخ سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی مورد بررسی قرار گرفته است. از بین مشخصات فیزیکی سنگ‌ها، تنها میانگین اندازه دانه‌ها و ضریب بافت با پارامتر وابسته (سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی) رابطه‌ی معناداری را ایجاد کرده است. در مابقی متغیرها یا روند مشخصی مشاهده نشده است که نشان‌دهنده‌ی همبستگی پایین این پارامترها با نرخ سایش بوده است و یا دامنه‌ی تغییرات مقادیر پارامترها بسیار کوچک بوده است که این پارامترها را به یک مشخصه تبدیل خواهد کرد و نمی‌توان از آن به عنوان متغیر یاد کرد. به عنوان مثال پارامتر چگالی فاکتور تعیین‌کننده‌ای برای سایش به حساب نمی‌آید و چون مقدار آن به نسبت پوکی و تخلخل

همانطور که در برازش تک متغیره نشان داده شده است پارامترهای تخلخل، کوارتز محتوی معادل و شاخص شدت دگرسانی شیمیایی با سایش سرمته‌های حفاری دارای عدم ارتباط معناداری بوده است که تحلیل حساسیت نیز عدم تاثیر این پارامترها بر خروجی مورد نظر را تایید کرده است.

۶. بحث

از میان پارامترهای موثر (مشخصات سنگ، پارامترهای اجرایی و پارامترهای مدیریتی)، تنها مشخصات سنگ که خود شامل مشخصات فیزیکی، مکانیکی و ساختاری سنگ است و پارامترهای اجرایی به علت کمی بودن مقادیر در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است. به همین منظور، ارتباط تک‌تک متغیرها با نرخ سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی مورد بررسی قرار گرفته است. از بین مشخصات فیزیکی سنگ‌ها، تنها میانگین اندازه دانه‌ها و ضریب بافت با پارامتر وابسته (سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی) رابطه‌ی معناداری را ایجاد کرده است. در مابقی متغیرها یا روند مشخصی مشاهده نشده است که نشان‌دهنده‌ی همبستگی پایین این پارامترها با نرخ سایش بوده است و یا دامنه‌ی تغییرات مقادیر پارامترها بسیار کوچک بوده است که این پارامترها را به یک مشخصه تبدیل خواهد کرد و نمی‌توان از آن به عنوان متغیر یاد کرد. به عنوان مثال پارامتر چگالی فاکتور تعیین‌کننده‌ای برای سایش به حساب نمی‌آید و چون مقدار آن به نسبت پوکی و تخلخل

نتیجه‌گیری

سرمته‌ها در حین حفاری با توجه به پارامترهای متعددی که با آن در ارتباط هستند سایش یافته و نیاز به تعویض سرمته الزامی می‌گردد که این فرآیند به زمان و هزینه‌ی زیادی منجر می‌-

سیلیس و آلومینا رابطه‌ی مستقیمی با سایش سرمته‌های حفاری دارند.

- از میان پارامترهای مکانیکی سنگ تنها سختی موهس رابطه‌ی معکوسی با سایش سرمته‌های حفاری دارد و مابقی پارامترها رابطه‌ی مستقیمی و معناداری با سایش سرمته‌های حفاری دارند.
- شاخص مقاومت زمین‌شناسی و سیستم رده‌بندی توده سنگ به عنوان پارامترهای ساختاری مورد بررسی در این تحقیق هم رابطه‌ی مستقیمی با سایش سرمته‌های حفاری را نشان داده‌اند و هم روند خوب و معناداری را به نمایش در آورده‌اند.
- بین پارامترهای اجرایی بار روی سرمته و سرعت دوران روند خوب و رابطه‌ی معناداری با سرمته‌های حفاری برقرار است.
- نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که اکثر پارامترها به غیر از شاخص شدت دگرسانی شیمیایی، تخلخل و کوارتز محتوی معادل سنگ دارای مقادیر Rij بیش از ۰/۹ هستند که بیانگر قرار گرفتن مهم‌ترین پارامترها به عنوان متغیر مستقل یا ورودی مدل‌ها است.

۸. تشکر و قدردانی

نویسندگان این تحقیق صمیمانه از شرکت ملی صنایع مس ایران (NICICO) بابت تأمین اعتبار و ارائه‌ی داده‌های مورد استفاده جهت انجام این پروژه تحقیقاتی کمال تشکر و سپاس را به عمل می‌آورند.

شود. تحلیل و بررسی سرمته‌های حفاری از نظر سایش می‌تواند گامی مناسب برای کاهش هزینه‌های معدن‌کاری در اولویت شرکت‌ها و سایر عوامل مرتبط با پروژه باشد. سایش سرمته‌های حفاری تابع عوامل مختلفی است که برخی وابسته به ماشین‌آلات، پارامترهای عملیاتی و پارامترهای مدیریتی و برخی تابع شرایط و خصوصیات ماده سنگ و توده سنگ و محیط اطراف است. بررسی پارامترهای مؤثر بر سایش سرمته‌ها می‌تواند با کاهش اثرات سایش، از هدر رفتن زمان و هزینه‌های اضافی وارد بر فرآیند حفاری جلوگیری نماید. در این تحقیق به منظور ارزیابی عوامل مؤثر بر سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی در معدن مس سرچشمه ابتدا از طریق آفت وزنی سایش ۲۹ سرمته سه‌مخروطی دورانی محاسبه شده است. در ادامه پایگاه داده برای تعیین مشخصات فیزیکی، مکانیکی، ساختاری مؤثر سنگ‌ها و پارامترهای عملیاتی با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی (آنالیز شیمیایی، بررسی مقاطع نازک و تست‌های آزمایشگاهی)، مطالعات میدانی و بانک اطلاعاتی موجود در مرکز تحقیقات مس سرچشمه، بر اساس ۱۰ نمونه سنگ مختلف ایجاد شده است. با توجه به مقادیر پارامترهای مختلف یک جدول اطلاعات آماری با مقادیر بیشینه، کمینه، میانگین و انحراف از معیار ارائه شده است. سپس نوع رابطه‌ی پارامترهای ورودی با خروجی تعیین گردیده است. در نهایت با استفاده از تحلیل حساسیت مقدار تاثیر پارامترهای ورودی بر روی هدف تعیین شده است. مهمترین نتایج این تحقیق به شرح زیر است:

- از میان پارامترهای فیزیکی سنگ، چگالی، تخلخل، شاخص دگرسانی سنگ و کوارتز محتوی معادل رابطه‌ی معکوس و میانگین اندازه دانه‌ها، ضریب بافت، محتوای

منابع

- Adebayo, B. (2011). Effect of textural characteristics of rock on bit wear. *AU Journal of Technology*, 14(4).
- Adebayo, B. (2019). Evaluation of the Performance of Atlas Copco SDR4 Rotary Drill In Sagamu Limestone Formation, Nigeria. *FUTA Journal of Engineering and Engineering Technology*, 13(1), 12-19.
- Adebayo, B., & Adetula, B. (2013). Evaluation of physical and mechanical properties of rock for drilling condition classification. *World Journal of Engineering*, 10(4), 359-366.

- Adebayo, B., & Akande, J. M. (2015). Analysis of Button Bit Wear and Performance of Down-The-Hole Hammer Drill. *Ghana Mining Journal*, 15(2), 36-41.
- Adebayo, B., & Akeju, V. O. (2012). Evaluation of Tri-cone Bit Performance on Limestone Formation. In *Advanced Materials Research* (Vol. 367, pp. 555-560). Trans Tech Publications.
- Adebayo, B., & Akeju, V. O. (2012). Correlation of Limestone Properties with Bit Performance Variables for LIMROCKWARE2010 Development. *Journal of Mining World Express*, 1(2), 34-38.
- Adebayo, B., & Bello, W. A. (2012). Property Analysis for Correlation of Specific Energy with Penetration Rate and Bit Wear Rate. In *Advanced Materials Research* (Vol. 367, pp. 547-553). Trans Tech Publications.
- Adebayo, B., & Okewale, I. A. (2007). Analysis of the potential of some Nigerian rocks to wear drill bit. *Aust J Technol*, 11, 1-5.
- Adebayo, B., Opafunso, Z. O., & Akande, J. M. (2010). Drillability and strength characteristics of selected rocks in Nigeria. *AU JT*, 14(1), 56-60.
- Al-Sudani, J. A. (2017). Real-time monitoring of mechanical specific energy and bit wear using control engineering systems. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 149, 171-182.
- Angseryd, J., From, A., Wallin, J., Jacobson, S., & Norgren, S. (2013). On a wear test for rock drill inserts. *Wear*, 301(1), 109-115.
- Babatunde, A. (2015). Development of rock bitwear models for selected rocks in Nigeria using dominant rock properties. *World Journal of Engineering*, 12(4), 331-340.
- Capik, M., & Batmunkh, B. (2020). Measurement, Prediction and Modeling of Bit Wear in During Drilling Operations. *Journal of Mining and Environment*.
- Dogruoz, C., Bolukbasi, N., Rostami, J., & Acar, C. (2016). An Experimental Study of Cutting Performances of Worn Picks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(1), 213-224.
- Dudek, R., & Władzielczyk, K. (2018). Wear Testing of Buttons in Bits for Blasthole Drilling. *Tribologia*.
- Ersoy, A., & Waller, M. D. (1995). Textural characterisation of rocks. *Engineering Geology*, 39(3-4), 123-136.
- Ersoy, A., & Waller, M. D. (1995). Wear characteristics of PDC pin and hybrid core bits in rock drilling. *Wear*, 188(1), 150-165.
- Ersoy, A., & Waller, M. D. (1997). Drilling detritus and the operating parameters of thermally stable PDC core bits. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(7), 1109-1123.
- Ghosh, R., Schunnesson, H., & Kumar, U. (2016). Evaluation of operating life length of rotary tricone bits using Measurement While Drilling data. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 83, 41-48.
- Howarth, D. F., & Rowlands, J. C. (1987). Quantitative assessment of rock texture and correlation with drillability and strength properties. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 20(1), 57-85.
- Jong, Y. H., & Lee, C. I. (2004). Influence of geological conditions on the powder factor for tunnel blasting. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41, 533-538.
- Karasawa, H., Ohno, T., Miyazaki, K., & Eko, A. (2016). Experimental results on the effect of Bit wear on torque response. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 84, 1-9.
- Kolapo, P. (2020). Investigating the Effects of Mechanical Properties of Rocks on Specific Energy and Penetration Rate of Borehole Drilling. *Geotechnical and Geological Engineering*, 1-12.
- Larsen-Basse, J. (1973). Wear of hard-metals in rock drilling: a survey of the literature. *Powder Metallurgy*.
- Majeed, Y., Bakar, M. A., & Butt, I. A. (2020). Abrasivity evaluation for wear prediction of button drill bits using geotechnical rock properties. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79(2), 767-787.
- Miller, D., & Ball, A. (1990). An instrumented laboratory machine for the evolution of drill bit performance. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 90(10), 283-288.
- Miller, D., & Ball, A. (1991). The wear of diamonds in impregnated diamond bit drilling. *Wear*, 141(2), 311-320.
- Mazen, A. Z., Rahmanian, N., Mujtaba, I. M., & Hassanpour, A. (2019). Estimation of Dulling Rate and Bit Tooth Wear Using Drilling Parameters and Rock Abrasiveness.

- Naganawa, S. (2012). Feasibility study on roller-cone bit wear detection from axial bit vibration. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 82, 140-150.
- Piri, M., Hashemolhosseini, H., Mikaeil, R., Ataei, M., & Baghbanan, A. (2020). Investigation of wear resistance of drill bits with WC, Diamond-DLC, and TiAlSi coatings with respect to mechanical properties of rock. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 87, 105113.
- Plinninger, R. J., Spaun, G., & Thuro, K. (2002). Predicting tool wear in drill and blast. *Tunnels & Tunneling International Magazine*, 1-5.
- Plinninger, R. J., Spaun, G., & Thuro, K. (2002, September). Prediction and Classification of tool wear in drill and blast tunnelling. In *Engineering Geology for Developing Countries—Proceedings of the 9th Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment*, Durban (pp. 16-20).
- Plinninger, R. J. (2008). Abrasiveness assessment for hard rock drilling. *Geomechanics and Tunneling*, 1(1), 38-46.
- Prieto, L. A. (2012). The Cerchar abrasivity index's applicability to dredging rock. In *Proc Western Dredging Association (WEDA XXXII) Technical Conference and Texas A& M University (TAMU 43) Dredging Seminar*. WEDA.
- Rashidi, B., Hareland, G., & Nygaard, R. (2008, January). Real-time drill bit wear prediction by combining rock energy and drilling strength concepts. In *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*. Society of Petroleum Engineers.
- Rashidi, B., Hareland, G., Tahmeen, M., Anisimov, M., & Abdorazakov, S. (2010, January). Real-Time Bit Wear Optimization Using the Intelligent Drilling Advisory System (Russian). In *SPE Russian Oil and Gas Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- Rashidi, B., Hareland, G., & Wu, A. (2010, January). New approach in real-time bit wear prediction. In *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*. Society of Petroleum Engineers.
- Saeidi, O., Elyasi, A., & Torabi, S. R. (2015). Wear Assessment of the WC/CO cemented carbide drillbits in an open pit mine.
- Sahoo, S. K., & Choudhary, B. (2017). Effect of uniaxial compressive strength of rock on penetration rate and bit wear rate of drill. *Ereen gold ore deposit, MONGOLIA*, 454.
- Shankar, V. K., Kunar, B. M., Murthy, C. S., & Ramesh, M. R. (2020). Measurement of bit-rock interface temperature and wear rate of the tungsten carbide drill bit during rotary drilling. *Friction*, 8(6), 1073-1082.
- Song, X., Aamo, O. M., Kane, P. A., & Detournay, E. (2020). Influence of Weight-on-Bit on Percussive Drilling Performance. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1-15.
- Šporin, J., Balaško, T., Mrvar, P., Janc, B., & Vukelić, Ž. (2020). Change of the Properties of Steel Material of the Roller Cone Bit Due to the Influence of the Drilling Operational Parameters and Rock Properties. *Energies*, 13(22), 5949.
- Wu, A., Hareland, G., & Rashidi, B. (2010, January). The effect of different rock types and roller cone insert types and wear on ROP (rate of penetration). In *44th US Rock Mechanics Symposium and 5th US-Canada Rock Mechanics Symposium*. American Rock Mechanics Association.
- Xuefeng, T., & Shifeng, T. (1994). The wear mechanisms of impregnated diamond bits. *Wear*, 177(1), 81-91.
- Yahiaoui, M., Paris, J. Y., Denape, J., & Dourfaye, A. (2015). Wear mechanisms of WC-Co drill bit inserts against alumina counterface under dry friction: Part 1—WC-Co inserts with homogenous binder phase content. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 48, 245-256.
- Yetkin, M. E., Özfırat, M. K., Yenice, H., Şimşir, F., & Kahraman, B. (2016). Examining the relation between rock mass cuttability index and rock drilling properties. *Journal of African Earth Sciences*, 124, 151-158.