



Imam Khomeini International University

Vol. 7, No. 2, Summer 2022



نشریه مهندسی منابع معدنی

Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

Research Paper

Prediction of the Tricone Rotary Bits Wear by Combining Principal Component Analysis and Regression Methods in Blast Holes of Sarcheshmeh Copper Mine

Ramezannia R.¹, Ataei M.^{2*}, Kakaie R.², Hoseinie S.H.³, Salehi Nasab A.M.⁴

1- Ph.D Student, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2- Professor, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

3- Assistant Professor, Faculty of Mining, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

4- M.Sc, Head of Drilling and Blasting Unit, Sarcheshmeh Copper Mine

Received: 24 Dec. 2020

Accepted: 08 Jun. 2021

Abstract: The first production cycle in open-pit mines is the drilling of blast holes, which is a major part of the exploitation costs. Bits are considered as one of the most important parts of drilling in operational processes due to the type of application and high costs. Examining the parameters affecting the bits wear can reduce the effect of wear, prevent wasting time and additional costs of the drilling process. Therefore, in this study, first, by determining the effective parameters based on the results of univariate regression and Principal Component Analysis (PCA), the relationship between these factors and the tricone rotary bits wear has been determined through statistical methods. Then, 100 linear and nonlinear models were examined to predict the rate of the tricone rotary bits wears during drilling, of which only 21 models, including 6 linear models and 15 nonlinear models, were approved. The performance of these models is evaluated based on the root mean square error (RMSE), coefficient of determination (R²), Variance accounted for (VAF), and mean absolute percentage error (MAPE). then the priority of each method is determined based on performance evaluation and prioritization strategies. In this research, three strategies of prioritization, the Rank average method, the Borda method, the Copeland method, and finally the Aggregate of these methods have been used. The ranking results show that the best model for predicting the tricone rotary bits wear is the regression model with independent variables of Weight on Bits (WOB), Uniaxial Compressive Strength (UCS), and Geological Strength Index (GSI). According to the results of sensitivity analysis, the Rij value of the Weight on Bits (WOB) is 0.982, which is more than the other two parameters of the final model. Therefore, this parameter has the greatest effect on the tricone rotary bits wear and it is the most important parameter of the final model.

Keywords: Drilling, Tricone rotary bits, Wear, Statistical methods, Sensitivity analysis.

How to cite this article

Ramezannia, R., Ataei, M., Kakaie, R., Hoseinie, S. H., and Salehi Nasab, A. M. (2022). "Prediction of the tricone rotary bits wear by combining principal component analysis and regression methods in blast holes of Sarcheshmeh copper mine". Journal of Mineral Resources Engineering, 7(2): 103-122.

DOI: 10.30479/JMRE.2021.14778.1478

*Corresponding Author Email: ataei@shahroodut.ac.ir

COPYRIGHTS



©2022 by the authors. Published by Imam Khomeini International University.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

INTRODUCTION

The bits as one of the basic tools in drilling operations, responsible for breaking and crushing the rocks. The drill bits are worn during drilling due to the various parameters that are associated with it and the drilling penetration rate is significantly reduced, which leads to a loss of time and a lot of costs. Therefore, due to the high cost and importance of the drill bits in the drilling process, it is necessary to determine the correct time to replace them in order to speed up the drilling operation. Analysis of drilling bits in terms of wear can be a good step to reduce mining costs in the priority of companies and other factors related to the project. Therefore, predicting the wear of drilling bits is a fundamental step in drilling open-pit mines [1,2].

METHODS

In general, the effective parameters in the wear of drilling bits can be analyzed in three sections: rock properties, operation parameters, and management parameters. Among these parameters, operation parameters are controllable parameters or dependent parameters. Parameters related to rock properties are considered as uncontrollable parameters or independent parameters in the process of drilling bits.

In this study, among the physical properties affecting the wear of tricone rotary bits, 7 parameters are density, porosity, Equivalent Quartz Content (EQC), silica content (SiO₂), alumina content (Al₂O₃), the average grain size (GS), and rock texture (TC) and, among the mechanical properties, there are three categories of strength parameters (Uniaxial Compressive Strength (UCS) and Brazilian Tensile Strength (BTS)), hardness indices of rock (Schmidt hammer (SH) and Mohs hardness) and abrasion indices of rock (Schmiazek F-abrasivity factor (SF-a) and Rock Abrasivity Index (RAI)) and among the operational parameters of Weight On Bit (WOB) and bit rotation speed or bit Revolutions Per Minute (RPM) has been investigated. Apart from these parameters, due to the importance of weathering and alteration of rocks and structural joints and discontinuities on the drilling process and bits wear, chemical alteration intensity index (CIA) and rock mass classification systems such as Rock Mass Rating (RMR) And Geological Strength Index (GSI) has also been studied in this study.

In this research, in order to predict of tricone rotary bits wear in Sarcheshmeh copper mine, through the weight loss of wear, 29 bits have been calculated. Then a database using laboratory studies (chemical analysis, the study of thin sections and laboratory tests), field studies and database in Sarcheshmeh Copper mine research and development center and the development of Sarcheshmeh copper mine have been created.

The purpose of investigating the physical, mechanical, structural, and measurement properties of operational parameters is to provide a model that can predict the wear rate of rotary drill bits. For this reason, first, the effect of each of the studied variables on the wear rate of the drill bits has been determined separately using the fit of univariate (univariate regression). Then the parameters affecting the wear rate are extracted based on the principal component analysis (PCA) method. In order to analyze the parameters affecting the wear of tricone rotary bits, the data are divided into two parts: training and test. Then the equations for predicting the wear rate of rotary drill bits using linear and nonlinear multivariate regression are presented. Finally, after controlling and validating the proposed models, the best model is selected based on performance evaluation and prioritization strategies, and sensitivity analysis is performed to determine the effect of input parameters on the target [3-6].

FINDINGS AND ARGUMENT

In order to develop predictive and estimating models and validate them, it is necessary to divide the database into training and test data. For this reason, based on the results of univariate regression and PCA, 10 variables affecting the wear of rotary drill bits were identified and 75% of the total data were used as training data and the remaining 25% for test data.

In this research, Rock Texture Coefficient (TC), Uniaxial Compressive Strength (UCS), Brazilian Tensile Strength (BTS), Schmidt Hardness (SH), (Schmiazek F-abrasivity factor (SF-a), Rock Abrasivity Index (RAI), Rock Mass Rating (RMR), Geological Strength Index (GSI), Weight On Bit (WOB) and bit rotation speed or bit Revolutions Per Minute (RPM) as input parameters (model independent variables) And the wear rate of the drill bits are considered as the model output.

In this study, the final model is a combination of operational, structural, and inherent variables of rock. Based on this, all the models that can be studied have been investigated and tested. Based on tests related to regression models, out of 100 created models, only 21 linear and nonlinear regression models have been approved.

In order to evaluate the performance of each of the selected models, test data sets are used. Based on this, using four performance indices, Root Mean Square Error (RMSE), Coefficient of Determination (R^2), Variance Accounted For (VAF), and Mean Absolute Percentage Error (MAPE) have been used.

Then, using three prioritization strategies including the rank average method, Borda and Copeland's method, aggregate methods have been introduced to prioritization of models [7].

The results of the rankings show that three linear models and two nonlinear models presented below are the final five models with higher priority than the other models.

$$BW = -4.009 + 0.108 WOB + 0.035 RAI + 0.103 GSI \quad (1)$$

$$BW = -3.121 + 0.122 WOB + 2.706 TC + 0.058 GSI \quad (2)$$

$$BW = -2.495 + 0.11 WOB + 0.124 SF-a + 0.071 GSI \quad (3)$$

$$BW = 10^{-2.911} \times WOB^{0.417} \times UCS^{0.153} \times GSI^{1.591} \quad (4)$$

$$BW = 10^{-2.156} \times WOB^{0.406} \times SF - a^{0.15} \times GSI^{1.236} \quad (5)$$

Among these models, the best model for predicting the wear rate of the drill bits is the nonlinear regression model in which the independent variables include Weight On Bit (WOB), Uniaxial Compressive Strength (UCS), and Geological Strength Index (GSI) because they have a better ranking in the evaluation indices and are available in most databases. Figure 1 shows the sensitivity analysis of the input parameters on the wear rate of tricone rotary bits.

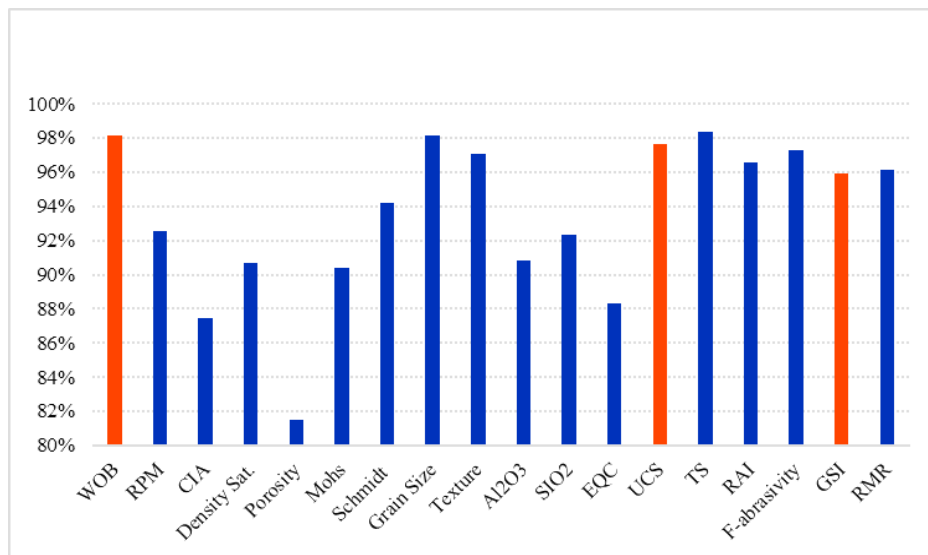


Figure 1. Sensitivity analysis of input parameters on the wear rate of drilling bits

It is worth mentioning, according to the results of sensitivity analysis, the Weight On Bits (WOB) has the greatest effect on the tricone rotary bits wear and it is the most important parameter of the model.

CONCLUSIONS

Drilling of blast holes is the first stage of the production cycle in open-pit mines, which accounts for a

large part of the exploitation costs, and it is necessary for every miner and a relevant specialist to know the drilling parameters. Bit wear is an important parameter for estimating the efficiency of drilling equipment in mining projects. For this reason, using the study of various scientific sources, essential and influential parameters on the wear of rotational taper heads have been determined and Eventually, the final effective parameters based on the results of univariate regression and Principal Component Analysis (PCA) has been determined.

In this study, the final model is a combination of operational, structural, and inherent variables of rock. Therefore, in order to develop predictive and estimating models and validate them, it is necessary are divided the database into training and test data. Based on tests related to regression models, out of 100 created models, only 21 linear and nonlinear regression models have been approved. In order to evaluate the performance of each of the selected models, four performance indices, Root Mean Square Error (RMSE), Coefficient of Determination (R^2), Variance Accounted For (VAF), and Mean Absolute Percentage Error (MAPE) have been used. Then, using three prioritization strategies including the rank average method, Borda and Copeland's method, aggregate methods have been introduced to prioritization of models.

The ranking results show that the best model for predicting the tricone rotary bits wear is the regression model with independent variables of Weight On Bits (WOB), Uniaxial Compressive Strength (UCS), and Geological Strength Index (GSI). According to the results of sensitivity analysis, the Weight On Bits (WOB) has the greatest effect on the tricone rotary bits wear and it is the most important parameter of the model.

REFERENCES

- [1] Abbaspour, H., Drebenstedt, C., Badroddin, M., and Maghaminik, A. (2018). "Optimized design of drilling and blasting operations in open pit mines under technical and economic uncertainties by system dynamic modelling". International Journal of Mining Science and Technology, 28(6): 839-848.
- [2] Park, J., and Kim, K. (2020). "Use of drilling performance to improve rock-breakage efficiencies: A part of mine-to-mill optimization studies in a hard-rock mine". International Journal of Mining Science and Technology, 30(2): 179-188.
- [3] Schneider, A., Hommel, G., and Blettner, M. (2010). "Linear regression analysis: part 14 of a series on evaluation of scientific publications". Deutsches Ärzteblatt International, 107(44): 776.
- [4] Seber, G. A., and Lee, A. J. (2012). "Linear regression analysis". John Wiley & Sons, Vol. 329.
- [5] Suzuki T., Ohtaguchi K., and Koide K. (1994). "Correlation between flash points and chemical structures of organic compounds, using principal component analysis". International Journal of Chemical Engineering, 34(3): 393-402.
- [6] Engelbrecht, A. P. (2007). "Computational intelligence: an introduction". John Wiley & Sons.
- [7] Gokceoglu, C. (2002). "A fuzzy triangular chart to predict the uniaxial compressive strength of the Ankara agglomerates from their petrographic composition". Engineering Geology, 66(1): 39-51.



پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی با ترکیب روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی و رگرسیون در چال‌های انفجاری معدن مس سرچشمه

رسول رمضان نیا^۱، محمد عطایی^{۲*}، رضا خالوکاکی^۳، سید هادی حسینی^۴، عبدالمجید صالحی^۴

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

۲- استاد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

۳- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

۴- کارشناسی ارشد، رئیس واحد حفاری و انفجار امور معدن مس سرچشمه، سرچشمه

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۸

دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۰۴

چکیده

حفر چال‌های انفجاری اولین مرحله از چرخه تولید در معادن روباز است که قسمت عمده‌ای از هزینه‌های استخراج را به خود اختصاص می‌دهد. سرمته‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین قسمت‌های حفاری در فرآیندهای عملیاتی، با توجه به نوع کاربرد و هزینه‌های بالای تمام شده اهمیت بسیار بالایی دارند. با بررسی پارامترهای موثر بر سایش سرمته‌ها می‌توان با کاهش اثرات سایش، از هدر رفتن زمان و هزینه‌های اضافی وارد بر فرآیند حفاری جلوگیری کرد. به همین دلیل در این تحقیق ابتدا با تعیین پارامترهای موثر بر اساس نتایج برازش تک متغیره و تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA)، ارتباط بین این عوامل و سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی از طریق روش‌های آماری تعیین شده است، سپس برای پیش‌بینی مقدار سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی حین حفاری ۱۰۰ مدل خطی و غیرخطی بررسی شده است که تنها ۲۱ مدل که شامل ۶ مدل خطی و ۱۵ مدل غیرخطی است مورد تایید واقع شده است. عملکرد این مدل‌ها بر اساس معیارهای ارزیابی جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تعیین (R^2)، شاخص عملکرد (VAF) و میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) بررسی و اولویت هر یک از روش‌ها بر اساس معیارهای ارزیابی و سه استراتژی اولویت‌بندی میانگین رتبه‌ها، روش بردا و روش کیپلند و در نهایت ادغام این روش‌ها مشخص شده است. نتایج رتبه‌بندی نشان می‌دهد که بهترین مدل پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی مدل رگرسیونی است که متغیرهای مستقل آن بار روی سرمته (WOB)، مقاومت فشاری تک محوری (UCS) و شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) است. طبق نتایج تحلیل حساسیت، R_{ij} بار روی سرمته (WOB)، با مقدار ۰.۹۸۲ از دو پارامتر دیگر مدل نهایی بیشتر است به همین دلیل این پارامتر بیشترین تاثیر را بر سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی دارد و مهم‌ترین پارامتر مدل نهایی محسوب می‌شود.

کلمات کلیدی

حفاری، سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی، سایش، روش‌های آماری، تحلیل حساسیت.

استناد به این مقاله

رمضان نیا، ر.، عطایی، م.، خالوکاکی، ر.، حسینی، س.، صالحی، ع.، م.؛ ۱۴۰۱؛ "پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی با ترکیب روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی و رگرسیون در چال‌های انفجاری معدن مس سرچشمه". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره هفتم، شماره ۲، ص ۱۲۲-۱۰۳.

DOI: 10.30479/JMRE.2021.14778.1478



۱- مقدمه

با استفاده از خواص غالب سنگ (محتوای سیلیس، مقاومت بار نقطه‌ای، مقاومت فشاری تک‌محوره، تخلخل، محتوای کوارتز معادل، مقدار سختی ویکرز، میانگین اندازه‌ی دانه‌ها، شاخص ساینده‌گی سرشار و فاکتور زاویه‌داری) برای نمونه‌های سنگ پرداخت [۶].

سعیدی و همکاران سایش سرمته‌های دورانی را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها ابتدا عمر مفید سرمته‌های حفاری قبل و بعد از حفاری با استفاده از میکرومتر و باسکول اندازه‌گیری کرده تا درصد کاهش وزن کمی سرمته‌ها را به دست آورند، سپس خصوصیات انواع سنگ‌های حفر شده را به طور همزمان اندازه‌گیری کردند [۷].

ساهو و چادوری^۷ اثر مقاومت فشاری تک محوره سنگ و سختی واجهش چکش اشمیت را در میزان نرخ نفوذ و سرعت سایش سرمته‌های حفاری را مورد بررسی قرار دادند. آنها برای تعیین سایش سرمته‌های حفاری قبل و بعد از استهلاک سرمته با استفاده از تصویربرداری میزان افت قطری سرمته را اندازه‌گیری کردند [۸].

در مقاله دودک و ولادیلچیک^۸ نتایج آزمایش سایش دکمه‌های سرمته در چال‌های حفاری آرایه شده است. هدف از این آزمایش تعیین نوع سایش دکمه‌ها در شرایط عملیاتی سرمته‌ها و تاثیر پارامترهای انتخاب شده در فرآیند حفاری و بررسی دوام دکمه‌ها بوده است. به همین منظور از شاخص‌های ساینده‌گی سنگ‌ها استفاده شده است [۹].

مازن^۹ و همکاران میزان کند شدن و سایش دندان‌های سرمته‌های حفاری را با استفاده از پارامترهای حفاری و ساینده‌گی سنگ‌ها مورد بررسی قرار دادند. آنها تاثیر سرعت دوران سرمته و وزن روی سرمته را بر نرخ نفوذ و میزان سایش دندان‌های سرمته اندازه‌گیری کردند [۱۰].

جاپیک و باتمانخ^{۱۰} به اندازه‌گیری، پیش‌بینی و مدلسازی سایش سرمته‌ها در عملیات حفاری پرداختند. آنها روابطی را بین سرعت سایش سرمته و خصوصیات فیزیکی، مکانیکی، عملیات حفاری، خواص سایشی و شکنندگی سنگ‌ها انجام دادند و از تجزیه و تحلیل آماری برای به دست آوردن معادلاتی برای تخمین میزان سایش سرمته‌ها بر اساس خصوصیات سنگ استفاده کردند [۱۱].

پیری و همکاران مقاومت سایشی سرمته‌های حفاری با پوشش‌های مختلف در سه نوع سنگ گرانیات را با توجه به خواص مکانیکی بررسی کردند. آنها بیان داشتند که با افزایش

با توجه به اینکه زمین از سازندهای بسیار نرم تا بسیار سخت تشکیل شده، لازمه نفوذ به این سازندها، به کارگیری ابزار و عملیات ویژه‌ای است. سرمته‌ها به عنوان یکی از ابزارهای اساسی در عملیات حفاری، وظیفه شکستن و خرد کردن سنگ‌ها را بر عهده دارند [۱]. سرمته‌ها حین حفاری با توجه به پارامترهای متعددی که با آن در ارتباط هستند سایش یافته و نرخ نفوذ حفاری به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد که به از دست دادن زمان و هزینه‌های بسیار زیادی منجر می‌شود. لازم به ذکر است با توجه به گران و حیاتی بودن سرمته‌ها در استخراج روباز و فرآیند حفاری، تعیین زمان درست تعویض آن برای سرعت دادن به عملیات حفاری الزامی است. تحلیل و بررسی سرمته‌های حفاری از نظر سایش گامی مناسب برای کاهش هزینه‌های معدنکاری در اولویت شرکت‌ها و عوامل مرتبط با پروژه است و به همین دلیل مورد توجه محققان مختلف قرار گرفته‌اند [۲].

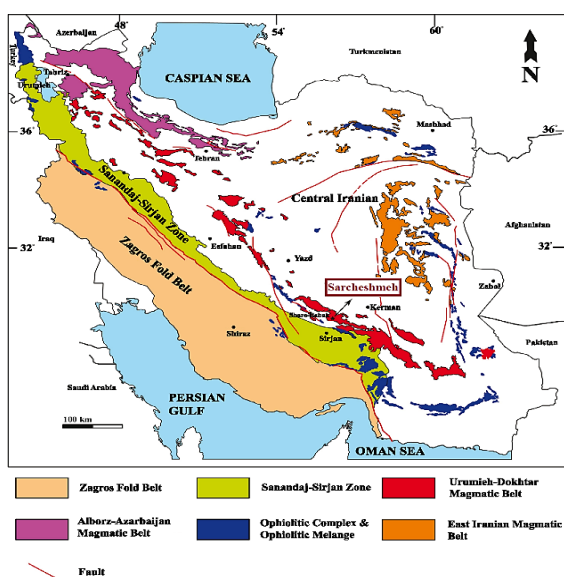
آدابیو^۱ در مقاله خود به بررسی روابط بین نرخ سایش سرمته و خصوصیات بافتی سنگ پرداخت. او نمونه سنگ‌ها را در آزمایشگاه از لحاظ ترکیب کانی‌شناسی، محتوای کوارتز، محتوای سیلیس و تخلخل مورد ارزیابی قرار داد و میانگین اندازه‌ی دانه‌ها و چگالی انباشتی^۲ آنها را از طریق روابط تجربی محاسبه کرد [۳].

آدابیو در تحقیق دیگری به همراه آکجو^۳ تاثیر خصوصیات موثر سنگ بر عملکرد سرمته‌های سه‌مخروطی مختلف در سنگ آهک را ارزیابی و برای تعیین مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی، شاخص ساینده‌گی سنگ و نرخ نفوذ، سنگ‌های مختلف را آزمایش کردند. همچنین ترکیب شیمیایی نمونه‌ها را با استفاده از طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس^۴ تعیین کرده و از نتایج آن برای تعیین مقدار کوارتز معادل بهره بردند [۴].

همچنین آدابیو و آکنده^۵ به بررسی خصوصیات سنگ و توسعه مدل رگرسیونی برای پیش‌بینی نرخ سایش سرمته‌های حفاری دکمه‌ای پرداختند. نمونه‌های سنگ برای تعیین ترکیب شیمیایی، محتوای کوارتز معادل، میزان سیلیس و مقاومت فشاری مورد آزمایش قرار گرفتند. آنها برای تعیین مقدار سختی سنگ از چکش اشمیت و برای اندازه‌گیری طول دکمه‌ها از کولیس دیجیتال استفاده کردند [۵].

باباتونده^۶ به توسعه و شبیه‌سازی مدل‌های سایش سرمته

توف‌های آندزیتی (AN)، توده گرانودیوریتی (GR)، استوک گرانودیوریتی سرچشمه پورفیری (SP)، کوارتز آی چشمی (QI)، استوک لیت‌فاین پورفیری (LF) و دایک‌های گرانودیوریتی (BD,HD)، عمده تشکیل‌دهنده‌اند که در محدوده معدن مس سرچشمه تشکیل شده‌اند و تحت هوازدگی و دگرسانی قرار گرفته‌اند (شکل ۱) [۱۴].



شکل ۱: نقشه زمین‌شناسی معدن مس سرچشمه [۱۴]

۳- جمع‌آوری اطلاعات و ایجاد پایگاه داده

در این تحقیق ۲۹ سرمته مستهلک با توجه به شرایط فیزیکی آنها انتخاب و بررسی شده است. برای اندازه‌گیری سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی از روش افت وزنی سرمته مستهلک نسبت به حالت نو استفاده شده است. به همین منظور سرمته‌های سه‌مخروطی قبل و بعد از حفاری در حالت نو و مستهلک از طریق باسکولی با دقت ۰/۰۱ کیلوگرم توزین شدند و میزان افت وزنی سرمته نسبت به هر متر حفاری اندازه‌گیری شده است. برای ایجاد پایگاه داده ۱۰ نمونه سنگ، برای تعیین مشخصات فیزیکی، مکانیکی، ساختاری موثر 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، استفاده شده است.

در این تحقیق بر اساس مطالعات محققان مختلف ابتدا ۱۸

خواص مکانیکی سنگ، مقاومت فشاری تک محوری، سختی موهس و فاکتور ساینده‌گی شیمازک، سرمته‌های آزمایش شده اختلافات گسترده‌ای را از نظر مقاومت در برابر سایش نشان دادند [۱۲].

ماجد^{۱۱} و همکاران با استفاده از خواص ژئوتکنیکی سنگ‌ها، عمر دکمه‌های سرمته و نرخ نفوذ ماشین‌های حفاری را ارزیابی کردند. آنها نمونه‌های واحدهای سنگی را تحت آزمایش‌های مختلف قرار دادند. این آزمایش‌ها شامل شاخص‌های ساینده‌گی سنگ و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها (مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی برزیلی، تخلخل، چگالی، سختی اشمیت و نظایر آن) بوده است. علاوه بر این، برای محاسبه محتوای کوارتز معادل از آزمایش پراش اشعه ایکس استفاده کردند [۱۳].

لازم به ذکر است که اکثر تحقیقات در شرایط خاص آزمایشگاهی و تنها برای نمونه سنگ‌های مورد مطالعه قابل ارزیابی‌اند، بنابراین ارایه مدل‌های کمی با توجه به مشخصات سنگ و پارامترهای اجرایی برای ارزیابی و پیش‌بینی سایش سرمته‌های حفاری که در همه شرایط قابل استفاده باشد مورد نیاز است. عدم وجود ضرایب منطقی، وجود همپوشانی میان برخی از پارامترها، ساده‌سازی و تحلیل سایش به صورت توصیفی و عدم وجود مدل کمی مناسب با در نظر گرفتن تمامی پارامترهای موثر از مهم‌ترین نقدهای وارد بر تحقیقات پیشین است، بنابراین در این تحقیق برای پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی از ترکیب روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی و روش‌های آماری استفاده شده است.

لازم به ذکر است با توجه به اهمیت هوازدگی و دگرسانی سنگ‌ها و درزه و ناپیوستگی‌های ساختاری بر روند حفاری و سایش سرمته‌ها، شاخص شدت دگرسانی شیمیایی^{۱۲} و سیستم‌های طبقه‌بندی توده سنگ مانند سیستم رده‌بندی توده سنگ (RMR) و شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) نیز در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۲- منطقه مورد مطالعه (معدن مس سرچشمه)

کانسار مس سرچشمه در استان کرمان به عنوان یکی از بزرگترین معادن مس-مولیبدن پورفیری در جهان، بر روی کمر بند آتشفشانی ارومیه - دختر و در ۶۵ کیلومتری جنوب غرب رفسنجان واقع شده است. کانسار مس پورفیری سرچشمه از کانسارهای مس پورفیری نوع مونوزونیتی است.

در ادامه نحوه تعیین پارامترهای نهایی برای پیش‌بینی سایش سرمته‌های حفاری و توسعه مدل‌ها با استفاده از روش‌های آماری بیان خواهد شد.

۴- روش تحقیق

در این تحقیق، هدف از بررسی خصوصیات فیزیکی، مکانیکی، ساختاری و اندازه‌گیری پارامترهای عملیاتی آرایه مدلی است که قادر به پیش‌بینی نرخ سایش سرمته‌های سهمخروطی دورانی باشد. به همین دلیل، ابتدا تاثیر هر یک از متغیرهای مورد بررسی بر نرخ سایش سرمته‌های سهمخروطی دورانی با استفاده از برازش تک متغیره به طور جداگانه مشخص شده است، سپس پارامترهای موثر بر نرخ سایش، بر اساس روش تحلیل مولفه‌های اصلی استخراج و سپس معادلات پیش‌بینی نرخ سایش سرمته‌های سهمخروطی دورانی توسط رگرسیون چند متغیره خطی و غیرخطی آرایه شده است. در

پارامتر تاثیرگذار بر سایش سرمته‌های حفاری شامل تخلخل (Porosity)، محتوای کوارتز معادل (EQC)، سختی موهس (Mohs)، محتوای آلومینا (Al_2O_3)، چگالی (Density)، شاخص دگرسانی شیمیایی (CIA)، محتوای سیلیس (SiO_2)، میانگین اندازه دانه‌ها (GS)، ضریب بافت (TC)، مقاومت فشاری (UCS)، مقاومت کششی (BTS)، سختی واجهش اشمیت (SH)، فاکتور ساینده‌گی شیمازک (SF-a)، شاخص ساینده‌گی سنگ (RAI)، سیستم رده‌بندی توده سنگ (RMR)، شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI)، بار روی سرمته (WOB) و سرعت دوران سرمته (RPM) شناسایی شده و بر اساس نتایج برازش تک متغیره و تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA) ۱۰ متغیر نهایی موثر بر سایش سرمته‌های سهمخروطی دورانی به عنوان پارامترهای نهایی در این تحقیق معرفی شده است. از این رو اطلاعات آماری پارامترهای مختلف در این تحقیق در جدول ۱ به تفصیل آرایه شده است.

جدول ۱: اطلاعات آماری داده‌های تحقیق

انحراف معیار	میانگین	بیشینه	کمینه	پارامتر	
۷,۴۵۱	۱۹,۸۸۷	۲۹,۷۵	۴,۳۳۲	WOB (kg)	ورودی
۵,۱۷۱	۸۸,۹۰۳	۹۸,۲۵	۸۰,۰۵۹	RPM (rev/min)	
۶,۴۵۳	۶۱,۰۴۱	۷۰,۳۶۷	۵۱,۶۵۲	CIA (moles of oxide)	
۰,۰۲۷	۲,۶۵۷	۲,۶۹۲	۲,۵۹۱	Density (g/cm ³)	
۰,۰۷۵	۲,۷۸۱	۴,۱۹۴	۱,۷۰۱	Porosity (%)	
۰,۲۱۷	۴,۹۲۳	۵,۸۳۰	۴,۵۹۱	Mohs	
۲,۵۰۳	۲۲,۰۱۸	۲۶,۱۹۳	۱۸,۷۸۴	SH	
۰,۶۲۹	۱,۲۹۱	۲,۳۸۱	۰,۵۶۳	GS (mm)	
۰,۱۶۳	۰,۵۸۳	۰,۸۶۸	۰,۳۷۱	TC	
۱,۰۴۲	۱۴,۷۲۲	۱۷,۲۹۵	۱۳,۱۷۹	Al ₂ O ₃ (%)	
۳,۵۰۵	۵۵,۴۹۵	۶۰,۵۵۸	۴۹,۱۴۷	SiO ₂ (%)	
۳,۵۴	۴۹,۱۲۲	۵۶,۹۵۸	۴۴,۲۲۲	EQC (%)	
۹,۸۰۳	۳۴,۰۹۵	۵۰,۹۹۸	۲۱,۲۵۷	UCS (MPa)	
۲,۰۸۲	۵,۷۵۵	۹,۲۶۱	۲,۸۷	BTS (MPa)	
۳,۷۱۱	۱۶,۱۰۳	۲۲,۳۲۳	۱۰,۱۱۹	RAI	
۳,۰۹۱	۴,۷۸۶	۱۰,۱۰۵	۱,۲۳۵	SF-a	
۸,۴۳۳	۴۸,۶۵۲	۶۲,۷۷۵	۳۸,۷۹۳	GSI	
۹,۱۵۷	۴۷,۴۸۱	۶۳,۳۶۴	۳۵,۳۶۵	RMR	
۱,۷۹۶	۳,۷۳۱	۷,۲۴۱	۱,۰۷۹	BW (g/m)	

WOB: بار روی سرمته، RPM: سرعت دوران سرمته، CIA: شاخص شدت دگرسانی شیمیایی، Density: چگالی، Porosity: تخلخل، Mohs: سختی موهس، SH: سختی واجهش اشمیت، GS: میانگین اندازه دانه‌ها، TC: ضریب بافت، Al₂O₃: محتوای آلومینا، SiO₂: محتوای سیلیس، EQC: کوارتز معادل سنگ، UCS: مقاومت فشاری تک‌محوری، BTS: مقاومت کششی، RAI: شاخص ساینده‌گی سنگ، SF-a: فاکتور ساینده‌گی شیمازک، GSI: شاخص مقاومت زمین‌شناسی، RMR: سیستم رده‌بندی توده سنگ، BW: نرخ سایش سرمته

جدول ۲: واریانس داده‌ها با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی

مؤلفه	مقادیر ویژه	واریانس (%)	تجمعی (%)
۱	۱۲,۸۶۱	۷۱,۴۴۹	۷۱,۴۴۹
۲	۳,۰۲۰	۱۶,۷۷۶	۸۸,۲۲۵
۳	۰,۹۷۰	۵,۳۹۰	۹۳,۶۱۵
۴	۰,۵۳۹	۲,۹۹۶	۹۶,۶۱۱
۵	۰,۳۸۹	۲,۱۵۹	۹۸,۷۶۹
۶	۰,۱۱۹	۰,۶۵۹	۹۹,۴۲۸
۷	۰,۰۷۲	۰,۴۰۱	۹۹,۸۲۹
۸	۰,۰۱۶	۰,۰۹۱	۹۹,۹۲۰
۹	۰,۰۰۷	۰,۰۳۸	۹۹,۹۵۸
۱۰	۰,۰۰۶	۰,۰۳۴	۹۹,۹۹۲
۱۱	۰,۰۰۱	۰,۰۰۷	۱۰۰,۰۰۰
۱۲	۱,۹۲۶E-۰۰۵	۰,۰۰۰	۱۰۰,۰۰۰
۱۳	۹,۸۸۹E-۰۰۶	۵,۴۹۴E-۰۰۵	۱۰۰,۰۰۰
۱۴	۱,۴۶۴E-۰۰۶	۸,۱۳۱E-۰۰۶	۱۰۰,۰۰۰
۱۵	۲,۲۱۵E-۰۰۷	۱,۲۳۰E-۰۰۶	۱۰۰,۰۰۰
۱۶	۸,۷۸۳E-۰۰۸	۴,۸۸۰E-۰۰۷	۱۰۰,۰۰۰
۱۷	۳,۹۶۶E-۰۰۸	۲,۲۰۴E-۰۰۷	۱۰۰,۰۰۰
۱۸	۱,۰۴۵E-۰۰۸	۵,۸۰۷E-۰۰۸	۱۰۰,۰۰۰

مؤلفه را نشان می‌دهد. نمودار اسکری پلات ایجاد شده نشان می‌دهد که از مؤلفه سوم به بعد با مقادیر ویژه کوچکتر از یک، نمودار میل به خطی شدن پیدا می‌کند.

بنابراین دو مؤلفه‌ی اول به عنوان مؤلفه‌های اصلی انتخاب می‌شوند. علاوه بر این نمودار، نمای دو بعدی از ارتباط مؤلفه‌های اصلی و متغیرهای موثر نیز در شکل ۴ نشان داده شده است.

شکل ۴ نشان می‌دهد که تخلخل، کوارتز محتوای معادل (EQC)، شاخص دگرسانی شیمیایی (CIA)، محتوای سیلیس (SiO₂)، میانگین اندازه دانه‌ها (GS)، ضریب بافت (TC)، مقاومت فشاری (UCS)، مقاومت کششی (BTS)، سختی واجهش اشmitt (SH)، فاکتور ساینده‌ی شیمزاک (SF-a)، شاخص ساینده‌ی سنگ (RAI)، سیستم رده‌بندی توده سنگ (RMR)، شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI)، بار روی سرمته (WOB) و سرعت دوران سرمته (RPM) با همبستگی بالا در مؤلفه اول و سه متغیر سختی موهس، محتوای آلومینا (Al₂O₃) و چگالی با همبستگی بالا در مؤلفه دوم مشاهده می‌شوند، بنابراین پارامترهای با همبستگی بالا (نسبت واریانس بالا) در مؤلفه اول به عنوان متغیرهای موثر بر نرخ سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی انتخاب شده و پارامترهای باقیمانده که

نهایت بعد از کنترل و اعتبارسنجی مدل‌های آرایه شده، بهترین مدل بر اساس معیارهای ارزیابی و استراتژی‌های اولویت‌بندی انتخاب و آنالیز حساسیت برای تعیین مقدار تاثیر پارامترهای ورودی بر روی هدف، انجام شده است.

۴-۱- رگرسیون تک متغیره

برای تعیین رابطه پارامترهای مورد بررسی با نرخ سایش سرمته‌های حفاری، باید تاثیر هر کدام از این پارامترها بر نرخ سایش، به طور جداگانه تعیین شود. از این طریق می‌توان علاوه بر تعیین نوع رابطه، وجود این پارامترهای مستقل در روابط رگرسیونی را نیز بررسی کرد [۱۵-۱۸].

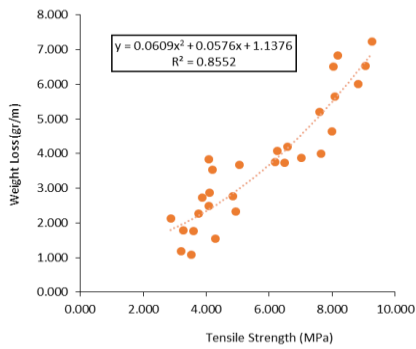
به همین منظور در این بخش، برازش‌های تک متغیره برای تعیین ارتباط تک‌تک متغیرها با نرخ سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی انجام شده است. لازم به ذکر است که در این تحلیل آماری از نتایج افت وزنی به عنوان مقادیر سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی استفاده شده است زیرا در سایر روش‌های اندازه‌گیری شده مانند افت حجمی و افت ابعادی روند مناسبی بین متغیر وابسته و مستقل در برازش‌های تک متغیره دیده نشده است. شکل ۲ نتایج این برازش‌ها را برای ۱۰ پارامتر نهایی نسبت به سایش سرمته‌های حفاری (افت وزنی) نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است در مابقی متغیرها یا روند مشخصی مشاهده نشده است و یا دامنه تغییرات مقادیر پارامترها بسیار کوچک بوده است که آنها را به یک مشخصه تبدیل خواهد کرد و نمی‌توان از آنها به عنوان متغیر یاد کرد.

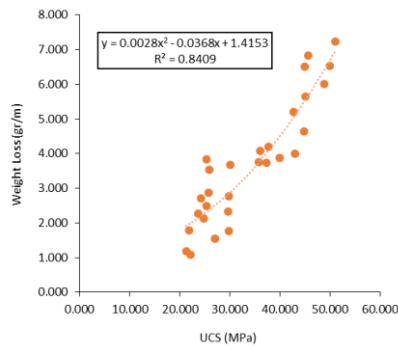
۴-۲- تحلیل مؤلفه‌های اصلی

برای کاهش تعداد متغیرهای تحقیق با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) مهم‌ترین و تاثیرگذارترین پارامترها در این تحقیق معرفی شده است. PCA تعداد مؤلفه‌های سیستم را با استفاده از تعیین ماتریس مقادیر ویژه و روابط آرایه شده، از ۱۸ مؤلفه به دو مؤلفه کاهش داده است. این دو مؤلفه ۸۸,۲۳٪ از کل واریانس متغیرها را نشان می‌دهند (جدول ۲).

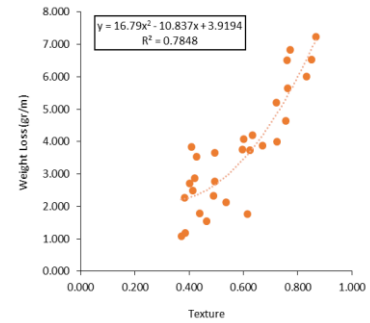
نمودار اسکری پلات روشی دیگر برای تعیین تعداد مؤلفه‌های اصلی مورد نیاز با بیشترین تغییرات داده‌ها است که مقدار ویژه هر مؤلفه را نشان می‌دهد [۲۰، ۱۹]. این نمودار برای ۱۸ مؤلفه ایجاد شده در شکل ۳ نشان داده شده است. هر نقطه در این نمودار شماره مؤلفه و مقدار ویژه مربوط به آن



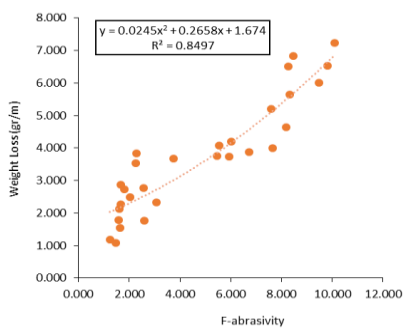
پ) برازش تک متغیره بین مقاومت کششی و سایش سرمته



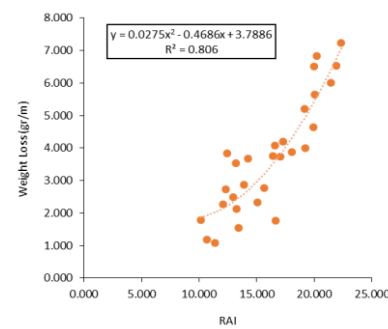
ب) برازش تک متغیره بین مقاومت فشاری و سایش سرمته



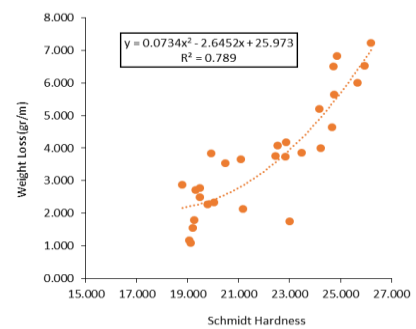
الف) برازش تک متغیره بین ضریب بافت سنگ و سایش سرمته



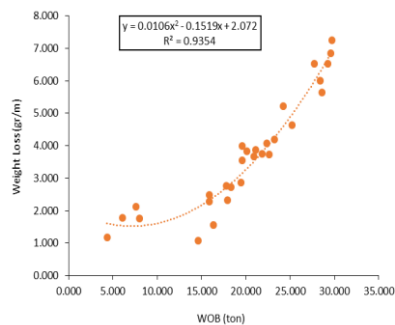
ج) برازش تک متغیره بین فاکتور ساینده‌گی شیمازک و سایش سرمته



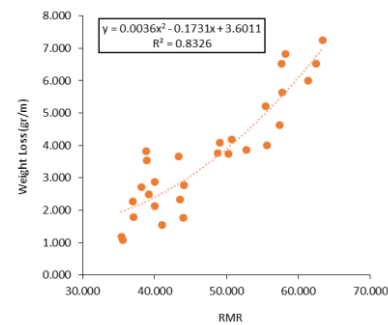
ث) برازش تک متغیره بین شاخص ساینده‌گی سنگ و سایش سرمته



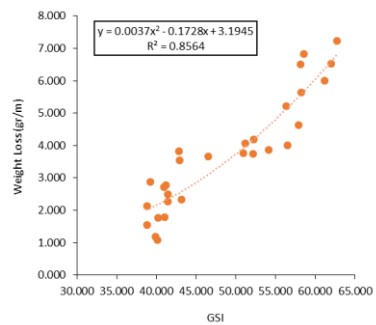
ت) برازش تک متغیره بین سختی واجهش اشمیت و سایش سرمته



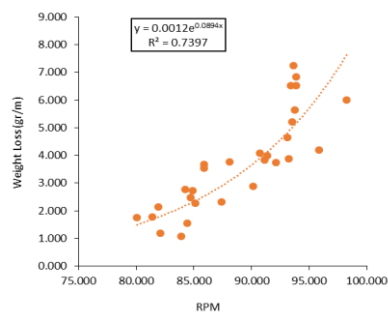
خ) برازش تک متغیره بین بار روی سرمته و نرخ سایش سرمته



ح) برازش تک متغیره بین رده‌بندی توده سنگ و سایش سرمته



چ) برازش تک متغیره بین شاخص مقاومت زمین‌شناسی و سایش سرمته



د) برازش تک متغیره بین سرعت دوران سرمته و نرخ سایش سرمته

شکل ۲: رابطه بین پارامترهای موثر و سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی

از این رو، مقادیر پارامترهای نهایی برای ۲۲ سرمته، تحت عنوان داده‌های آموزش و اطلاعات پارامترهای مربوط به ۷ سرمته دیگر تحت عنوان داده‌های آزمون، برای ارزیابی مدل نهایی مورد استفاده قرار گرفته است. اطلاعات آماری ۱۰ پارامتر نهایی برای تفکیک به داده‌های آموزش و آزمون در جداول ۳ و ۴ نشان داده شده است.

جدول ۳: اطلاعات آماری داده‌های آموزش

پارامتر	کمینه	بیشینه	میانگین	واریانس
WOB (kg)	۴,۳۳۲	۱۹,۸۷۸	۲۹,۷۵۰	۴۹,۸۳۰
RPM (rev/min)	۸۱,۴۰۹	۸۹,۰۹۲	۹۸,۲۵۰	۲۱,۷۲۲
SH	۱۸,۷۸۴	۲۱,۹۳۳	۲۶,۱۹۳	۶,۱۶۹
TC	۰,۳۷۱	۰,۵۷۷	۰,۸۶۸	۰,۰۲۷
UCS (MPa)	۲۱,۲۵۷	۳۳,۷۹۰	۵۰,۹۹۸	۹۷,۹۲۹
BTS (MPa)	۲,۸۷۰	۵,۷۳۱	۹,۲۶۱	۴,۲۶۴
RAI	۱۰,۱۱۹	۱۵,۸۶۷	۲۲,۳۲۳	۱۳,۸۶۷
SF-a	۱,۲۳۵	۴,۷۴۷	۱۰,۱۰۵	۹,۶۳۵
GSI	۳۸,۷۹۳	۴۸,۶۸۰	۶۲,۷۷۵	۶۹,۷۲۴
RMR	۳۵,۳۶۵	۴۷,۱۶۷	۶۳,۳۶۴	۸۵,۴۹۰
BW (g/m)	۱,۰۷۹	۷,۲۴۱	۳,۷۰۹	۳,۱۸۹

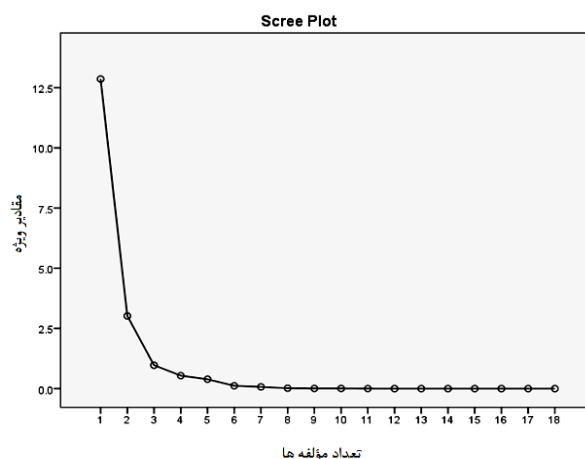
جدول ۴: اطلاعات آماری داده‌های آزمون

پارامتر	کمینه	بیشینه	میانگین	واریانس
WOB (kg)	۸,۰۳۷	۲۹,۲۵۰	۱۹,۹۱۲	۳۹,۹۶۳
RPM (rev/min)	۸۰,۰۵۹	۹۵,۸۷۵	۸۸,۳۱۰	۳۱,۲۲۶
SH	۱۹,۴۶۹	۲۵,۹۵۰	۲۲,۲۸۸	۵,۰۱۸
TC	۰,۴۱۳	۰,۸۵۰	۰,۶۰۳	۰,۰۱۹
UCS (MPa)	۲۵,۳۷۶	۵۰,۰۰۴	۳۵,۰۵۵	۶۶,۳۴۷
BTS (MPa)	۳,۵۹۱	۹,۰۶۱	۵,۸۳۱	۳,۳۹۵
RAI	۱۲,۹۵۱	۲۱,۹۴۰	۱۶,۸۴۲	۷,۸۱۳
SF-a	۲,۰۳۵	۹,۸۰۲	۴,۹۰۸	۷,۵۴۹
GSI	۴۰,۲۴۰	۶۲,۰۰۴	۴۸,۵۶۲	۶۲,۰۷۱
RMR	۳۹,۱۷۵	۶۲,۴۱۴	۴۸,۴۶۷	۵۷,۱۷۷
BW (g/m)	۱,۷۶۰	۶,۵۲۶	۳,۸۰۱	۲,۳۶۱

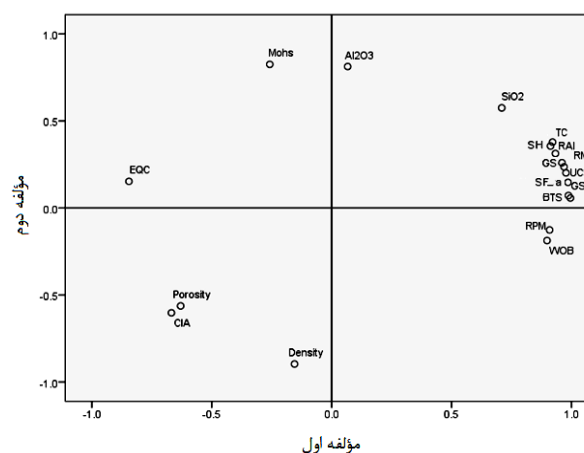
تاثیر ناچیزی بر نرخ سایش دارند (سختی موهس، محتوای آلومینا و چگالی)، از محاسبات حذف شده است.

۴-۳- تفکیک پایگاه داده

برای توسعه مدل‌های پیش‌بینی‌کننده و تخمین‌گر و اعتبارسنجی آن‌ها نیاز است تا پایگاه داده به داده‌های آموزش و آزمون تقسیم شود. به همین دلیل بر اساس نتایج برازش تک متغیره و PCA، ۱۰ متغیر تاثیرگذار بر سایش سرمته‌های سهمخروطی دورانی شناسایی شده و به صورت تصادفی ۷۵٪ کل داده‌ها به عنوان داده‌های آموزش و ۲۵٪ باقیمانده برای داده‌های آزمون مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۳: نمودار اسکری پلات برای کلیه مولفه‌ها



شکل ۴: نمای دو بعدی دو مؤلفه اصلی و متغیرهای نشان داده شده در هر مؤلفه

۴-۴- تعیین متغیرهای ورودی

اساس تمامی مدل‌های قابل بررسی مورد مطالعه و آزمون قرار گرفته است. بر اساس آزمون‌های مربوط به مدل‌های رگرسیونی مانند ضرایب منطقی (پیروی معادله از طبیعت ذاتی و علمی موضوع)، عدم هم‌خطی متغیرهای مستقل، نرمال بودن خطاها، فرض استقلال خطاها، معنی‌داری ضرایب متغیرهای مستقل و معنی‌داری کل مدل رگرسیون، از ۵۰ مدل ایجاد شده تنها ۶ مدل رگرسیونی خطی مورد تایید قرار گرفته است. مدل‌های رگرسیونی چند متغیره خطی تایید شده در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵: مدل‌های رگرسیونی چند متغیره خطی

ردیف	روابط ارایه شده
۱	$BW = -3.850 + 0.109 WOB + 0.013 UCS + 0.103 GSI$
۲	$BW = -4.009 + 0.108 WOB + 0.035 RAI + 0.103 GSI$
۳	$BW = -3.121 + 0.122 WOB + 2.706 TC + 0.058 GSI$
۴	$BW = -2.495 + 0.11 WOB + 0.124 SF-a + 0.071 GSI$
۵	$BW = -8.126 + 0.073 RPM + 0.17 SF-a + 0.093 GSI$
۶	$BW = -9.955 + 0.072 RPM + 0.089 RAI + 0.12 GSI$

همان‌طور که نتایج رگرسیون چند متغیره خطی نشان می‌دهد، در تمامی مدل‌های تایید شده، پارامترهای مستقل رابطه مستقیمی با نرخ سایش دارند که نشان‌دهنده ضرایب منطقی روابط ارایه شده است.

۴-۶- رگرسیون چند متغیره غیر خطی

با این که مدل خطی تقریب خوبی برای نشان دادن ارتباط چند متغیره است، اما روابط بین متغیرها به ندرت به صورت کاملاً خطی بوده و ممکن است از یک الگوی غیرخطی تبعیت کند. به همین دلیل در این تحقیق علاوه بر مدل‌های خطی، مدل‌های مختلف غیرخطی نیز با روش لگاریتم دوگانه مورد استفاده قرار گرفته است. مشابه روابط حاصل از رگرسیون خطی، برای روابط غیرخطی نیز پس از بررسی معنی‌داری کل مدل و معنی‌داری ضرایب متغیرهای مستقل، آزمون دوربین و اتسون برای بررسی استقلال خطاها و نمودار توزیع خطاها برای بررسی نرمال بودن خطاها مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین مساله هم‌خطی بین متغیرها نیز با کنترل مقادیر ضریب تورم واریانس و تولرانس بررسی شده است. بر اساس توضیحات بیان شده، از ۵۰ مدل ایجاد شده تنها ۱۵ مدل

در این تحقیق ضریب بافت سنگ، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، سختی و اجزای اشمیت، فاکتور ساینده شیمازک، اندیس ساینده سنگ، سیستم رده‌بندی توده سنگ، شاخص مقاومت زمین‌شناسی، بار روی سرمته و سرعت دوران سرمته به عنوان پارامترهای ورودی (متغیرهای مستقل مدل‌ها) و نرخ سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی به عنوان خروجی مدل در نظر گرفته شده است. در ارایه مدل‌ها همواره سعی بر این است که تا حد ممکن مدل ساده (دارای پارامتر ورودی کمتر) و دارای جامعیت باشد. برای این منظور در این تحقیق دو پارامتر عملیاتی به دلیل اینکه قابل کنترل‌اند در تمامی مدل‌ها به عنوان متغیر مستقل وجود خواهند داشت اما از میان پارامترهای فیزیکی، مکانیکی باید تعداد متغیرهای مستقل را به گونه‌ای انتخاب کرد که سادگی و عدم همپوشانی داشته باشند. ذکر این نکته حایز اهمیت است که با توجه به اهمیت شرایط توده سنگ مشخصات ساختاری نیز در اکثر مدل‌ها به مانند پارامترهای عملیاتی مورد استفاده قرار گرفته است، پس مدل نهایی ترکیبی از پارامترهای عملیاتی، ساختاری و متغیرهای ذاتی سنگ است. لازم به ذکر است برای ارایه مدل‌های آماری برای پیش‌بینی نرخ سایش از نرم‌افزار SPSS، استفاده شده است.

بر اساس توضیحات بیان شده برخی از پارامترها با یکدیگر همبستگی دارند و نمی‌توان از آنها در کنار یکدیگر در ارایه مدل استفاده کرد. به عنوان مثال در تعیین مقدار سیستم رده‌بندی RMR از مقاومت فشاری استفاده شده است و یا یکی از پارامترهای تعیین‌کننده فاکتور شیمازک مقاومت کششی است، پس این دو متغیر نمی‌توانند در یک مدل حضور داشته باشند. همچنین شاخص مقاومت زمین‌شناسی و سیستم رده‌بندی توده سنگ برای توضیح شرایط ساختاری سنگ ارایه شده‌اند و رفتاری مشابه را در مدل ارایه می‌دهند و یا شاخص ساینده سنگ و فاکتور شیمازک هر دو شاخصی برای تعیین ساینده سنگ‌ها و در مدل فقط یکی از این دو پارامتر قابل استفاده‌اند. از این رو در این تحقیق ۵۰ مدل مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۵- رگرسیون چند متغیره خطی

برای تعیین مدل تخمین‌گر با استفاده از روش رگرسیون خطی از نرم‌افزار آماری SPSS استفاده شده است. بر این

غیرخطی برای پیش‌بینی مقدار سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی حین حفاری مورد تایید واقع شده که در جدول ۶ قابل مشاهده است.

مقادیر رتبه هر معیار برای هر مدل تعیین شده و در جداول ۷ و ۸ ارایه شده است.

۶- تعیین بهترین مدل‌ها

برای تعیین بهترین مدل‌ها به ازای هر خروجی باید به چند جنبه به طور همزمان توجه کرد. در ابتدا باید عملکرد مدل‌ها بر اساس معیارهای ارزیابی چهارگانه معرفی شده مورد بررسی قرار گیرد. علاوه بر این، سهولت و زمان محاسبه مدل‌ها جنبه دیگری است که باید در تعیین بهترین مدل مد نظر قرار گیرد. به این دو جنبه باید قابلیت اطمینان مدل‌ها را که وابسته به روش توسعه آن‌هاست اضافه کرد. بر این اساس در این قسمت برای هر یک از پارامترهای پیش‌بینی شده اولویت هر یک از روش‌ها بر اساس معیارهای ارزیابی چهارگانه مشخص شده است. پس از آن با استفاده از سه استراتژی اولویت‌بندی شامل میانگین رتبه‌ها، روش بردا^{۱۷} و روش کپلند^{۱۸} و در نهایت ادغام^{۱۹} این روش‌ها، اولویت‌بندی مدل‌ها انجام شده است. در مرحله آخر با در نظر گرفتن دو جنبه‌ی دیگر، بهترین مدل‌ها معرفی شده است.

۷- استراتژی‌های اولویت‌بندی

از آنجایی که بر اساس هر یک از معیارهای ارزیابی چهارگانه برای هر مدل یک رتبه‌بندی متفاوت به دست می‌آید باید برای اجماع در تصمیم‌گیری از روش ادغام برای رتبه‌بندی این مدل‌ها استفاده کرد. لازم به ذکر است، مقادیر روش ادغام با استفاده از میانگین حسابی روش‌های میانگین رتبه‌ها، روش بردا و روش کپلند به دست خواهد آمد.

در روش میانگین رتبه‌ها، میانگین حسابی رتبه‌های به دست آمده با استفاده از روش‌های مختلف (که در اینجا معیارهای ارزیابی چهارگانه است) تعیین می‌شود و بر این اساس گزینه‌ها (مدل‌های ارایه شده) اولویت‌بندی می‌شوند. گزینه‌هایی با میانگین حسابی پایین‌تر در اولویت خواهند بود [۲۲].

در روش بردا برای تصمیم‌گیری، ماتریس مقایسه زوجی بین گزینه‌ها ایجاد می‌شود. در صورتی که بر اساس روش‌های مختلف، تعداد ارجحیت مدلی بر مدل دیگر بیش از تعداد مغلوب شدن آن مدل بر مدل دیگر باشد، در ماتریس مقایسه زوجی عدد ۱ و در غیر اینصورت (مساوی یا کمتر بودن تعداد ارجحیت با مغلوب شدن) عدد صفر گذاشته می‌شود، بنابراین وجود عدد ۱ به منزله آن است که سطر بر ستون ارجحیت دارد

جدول ۶: مدل‌های رگرسیونی چند متغیره غیرخطی

ردیف	روابط ارایه شده
۱	$BW = 10^{-2.911} \times WOB^{0.417} \times UCS^{0.153} \times GSI^{1.591}$
۲	$BW = 10^{-2.932} \times WOB^{0.409} \times RAI^{0.211} \times GSI^{1.597}$
۳	$BW = 10^{-2.102} \times WOB^{0.457} \times TC^{0.328} \times GSI^{1.266}$
۴	$BW = 10^{-2.156} \times WOB^{0.406} \times SF - a^{0.15} \times GSI^{1.236}$
۵	$BW = 10^{-6.653} \times RPM^{3.452} \times SF - a^{0.374} \times GSI^{0.14}$
۶	$BW = 10^{-8.706} \times RPM^{3.526} \times RAI^{0.527} \times GSI^{1.029}$
۷	$BW = 10^{-0.754} \times WOB^{0.399} \times SF - a^{0.352} \times RMR^{0.339}$
۸	$BW = 10^{-9.892} \times RPM^{4.351} \times RAI^{0.275} \times RMR^{0.965}$
۹	$BW = 10^{-6.562} \times RPM^{3.498} \times SF - a^{0.396} \times RMR^{0.025}$
۱۰	$BW = 10^{-3.408} \times WOB^{0.322} \times RPM^{1.445} \times SF - a^{0.298} \times RMR^{0.321}$
۱۱	$BW = 10^{-3.599} \times WOB^{0.406} \times RPM^{1.014} \times TC^{0.362} \times GSI^{1.025}$
۱۲	$BW = 10^{-5.669} \times WOB^{0.405} \times RPM^{1.458} \times SH^{1.376} \times GSI^{0.593}$
۱۳	$BW = 10^{-4.112} \times WOB^{0.375} \times RPM^{0.777} \times UCS^{0.175} \times GSI^{1.416}$
۱۴	$BW = 10^{-4.292} \times WOB^{0.361} \times RPM^{0.875} \times RAI^{0.241} \times GSI^{1.407}$
۱۵	$BW = 10^{-3.411} \times WOB^{0.357} \times RPM^{0.867} \times SF - a^{0.169} \times GSI^{1.008}$

بررسی ضرایب متغیرها در روابط غیرخطی ارایه شده نشان می‌دهد که در کلیه‌ی روابط، نرخ سایش با افزایش پارامترهای فیزیکی، مکانیکی، ساختاری و عملیاتی افزایش می‌یابد.

۵- ارزیابی عملکرد مدل‌ها

برای ارزیابی عملکرد هر یک از مدل‌های انتخاب شده، از دسته داده‌های آزمون استفاده می‌شود. بر این اساس با استفاده از چهار معیار ارزیابی، جذر میانگین مربعات خطا^{۱۳} (RMSE)، ضریب تعیین^{۱۴} (R^2)، شاخص عملکرد^{۱۵} (VAF) و میانگین درصد خطای مطلق^{۱۶} (MAPE) استفاده شده است. RMSE متوسط خطای نتایج به دست آمده از خروجی مدل را نشان می‌دهد. کاهش این شاخص موجب افزایش ضریب تعیین رابطه شده و این کارآیی بهتر مدل را نشان می‌دهد. علاوه بر این، هرچه شاخص عملکرد (VAF)، بزرگ‌تر و میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) کوچک‌تر و نزدیک به صفر باشد، مدل مناسب‌تر است [۲۱]. مقادیر این چهار معیار ارزیابی برای ۶ رابطه خطی و ۱۵ رابطه غیرخطی به دست آمده و بر اساس این

۷-۱- اولویت‌بندی مدل‌ها

با توجه به مطالب عنوان شده بر اساس رتبه‌بندی معیارهای چهارگانه به طور مجزا برای هر یک از مدل‌ها، از سه روش میانگین رتبه‌ها، روش بردا و روش کپلند استفاده شده است، سپس با استفاده از روش ادغام، رتبه‌بندی نهایی مدل‌ها تعیین شده است. در جدول ۹ نتایج رتبه‌بندی مدل‌های تخمین سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی ارائه شده است. ادغام رتبه‌بندی‌ها نشان می‌دهد که سه مدل خطی و دو مدل غیرخطی پنج مدل نهایی با اولیوی بالاتر از دیگر مدل‌ها هستند. از این رو مقایسه از لحاظ سهولت و سرعت تعیین‌کننده بهترین مدل است. به طور واضح یک مدل خطی از یک مدل غیرخطی ساده‌تر و دارای سرعت محاسباتی بیشتر است ولی با توجه به اینکه

و عدد صفر به منزله ارجحیت ستون بر سطر است. مجموع عناصر هر سطر، تعداد مسلط شدن هر مدل را نشان می‌دهد و بر این اساس مدل‌ها اولویت‌بندی می‌شوند. روش کپلند در حقیقت اصلاح شده روش بردا است. برای این منظور در اولویت‌بندی علاوه بر تعداد مسلط شدن (جمع عناصر هر سطر)، تعداد مغلوب شدن (مجموع عناصر هر ستون) نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد، سپس گزینه‌ها بر اساس تفاضل مقادیر مسلط شدن و تعداد مغلوب شدن اولویت‌بندی می‌شوند [۲۳]. پس از آنکه اولویت‌بندی مدل‌ها به وسیله سه روش تشریح شده به دست آمد، باید نتایج با یکدیگر ادغام شوند تا یک رتبه و اولویت واحد برای مدل به دست آید که به این تکنیک روش ادغام گفته می‌شود. برای این منظور از رتبه‌های به دست آمده میانگین حسابی گرفته می‌شود [۲۲].

جدول ۷: مقادیر شاخص‌های ارزیابی برای روابط ارائه شده

R ²	VAF	MAPE	RMSE	روابط ارائه شده	ردیف
۰٫۹۸۸	۹۸٫۷۸۰	۳٫۹۱۹	۰٫۱۷۱	$BW = -3.850 + 0.109 WOB + 0.013 UCS + 0.103 GSI$	۱
۰٫۹۹۰	۹۸٫۹۵۴	۴٫۴۴۲	۰٫۱۷۱	$BW = -4.009 + 0.108 WOB + 0.035 RAI + 0.103 GSI$	۲
۰٫۹۸۹	۹۸٫۸۸۲	۴٫۱۵۱	۰٫۱۶۸	$BW = -3.121 + 0.122 WOB + 2.706 TC + 0.058 GSI$	۳
۰٫۹۸۹	۹۸٫۸۷۸	۴٫۲۹۵	۰٫۱۷۰	$BW = -2.495 + 0.11 WOB + 0.124 SF-a + 0.071 GSI$	۴
۰٫۹۴۵	۹۴٫۲۲۷	۹٫۹۴۴	۰٫۳۹۱	$BW = -8.126 + 0.073 RPM + 0.17 SF-a + 0.093 GSI$	۵
۰٫۹۳۹	۹۳٫۸۵۳	۱۰٫۹۱۳	۰٫۳۸۸	$BW = -9.955 + 0.072 RPM + 0.089 RAI + 0.12 GSI$	۶
۰٫۹۹۱	۹۹٫۱۱۶	۴٫۱۵۱	۰٫۱۸۵	$BW = 10^{-2.911} \times WOB^{0.417} \times UCS^{0.153} \times GSI^{1.591}$	۷
۰٫۹۹۰	۹۸٫۹۸۵	۴٫۴۹۰	۰٫۱۸۹	$BW = 10^{-2.932} \times WOB^{0.409} \times RAI^{0.211} \times GSI^{1.597}$	۸
۰٫۹۸۸	۹۸٫۷۳۷	۵٫۲۴۸	۰٫۲۰۱	$BW = 10^{-2.102} \times WOB^{0.457} \times TC^{0.328} \times GSI^{1.266}$	۹
۰٫۹۹۱	۹۹٫۰۷۶	۴٫۶۳۰	۰٫۱۸۱	$BW = 10^{-2.156} \times WOB^{0.406} \times SF - a^{0.15} \times GSI^{1.236}$	۱۰
۰٫۸۷۹	۸۶٫۹۰۶	۱۳٫۳۱۰	۰٫۵۶۱	$BW = 10^{-6.653} \times RPM^{3.452} \times SF - a^{0.374} \times GSI^{0.14}$	۱۱
۰٫۹۰۳	۸۸٫۹۰۶	۱۲٫۷۲۱	۰٫۵۲۲	$BW = 10^{-8.706} \times RPM^{3.526} \times RAI^{0.527} \times GSI^{1.029}$	۱۲
۰٫۹۸۴	۹۷٫۷۳۱	۶٫۳۱۵	۰٫۲۴۱	$BW = 10^{-0.754} \times WOB^{0.399} \times SF - a^{0.352} \times RMR^{0.339}$	۱۳
۰٫۸۷۰	۸۵٫۴۷۴	۱۳٫۶۷۴	۰٫۵۹۲	$BW = 10^{-9.892} \times RPM^{4.351} \times RAI^{0.275} \times RMR^{0.965}$	۱۴
۰٫۸۷۴	۸۶٫۴۸۷	۱۳٫۴۸۰	۰٫۵۷۰	$BW = 10^{-6.562} \times RPM^{3.498} \times SF - a^{0.396} \times RMR^{0.025}$	۱۵
۰٫۹۵۸	۹۵٫۷۳۹	۷٫۵۴۵	۰٫۳۲۵	$BW = 10^{-3.408} \times WOB^{0.322} \times RPM^{1.445} \times SF - a^{0.298} \times RMR^{0.321}$	۱۶
۰٫۹۷۵	۹۷٫۴۷۰	۶٫۷۰۳	۰٫۲۶۸	$BW = 10^{-3.599} \times WOB^{0.406} \times RPM^{1.014} \times TC^{0.362} \times GSI^{1.025}$	۱۷
۰٫۹۶۳	۹۶٫۰۹۰	۸٫۸۸۴	۰٫۳۱۸	$BW = 10^{-5.669} \times WOB^{0.405} \times RPM^{1.458} \times SH^{1.376} \times GSI^{0.593}$	۱۸
۰٫۹۸۳	۹۸٫۲۲۶	۵٫۸۸۵	۰٫۲۴۴	$BW = 10^{-4.112} \times WOB^{0.375} \times RPM^{0.777} \times UCS^{0.175} \times GSI^{1.416}$	۱۹
۰٫۹۸۰	۹۷٫۹۶۴	۵٫۶۸۷	۰٫۲۴۶	$BW = 10^{-4.292} \times WOB^{0.361} \times RPM^{0.875} \times RAI^{0.241} \times GSI^{1.407}$	۲۰
۰٫۹۷۸	۹۷٫۷۹۴	۵٫۹۱۰	۰٫۲۵۴	$BW = 10^{-3.411} \times WOB^{0.357} \times RPM^{0.867} \times SF - a^{0.169} \times GSI^{1.008}$	۲۱

جدول ۸: رتبه‌بندی هر یک از شاخص‌های ارزیابی برای روابط ارایه شده

ردیف	روابط ارایه شده	RMSE	MAPE	VAF	R ²
۱	$BW = -3.850 + 0.109 WOB + 0.013 UCS + 0.103 GSI$	۳	۱	۷	۷
۲	$BW = -4.009 + 0.108 WOB + 0.035 RAI + 0.103 GSI$	۴	۵	۴	۴
۳	$BW = -3.121 + 0.122 WOB + 2.706 TC + 0.058 GSI$	۱	۳	۵	۵
۴	$BW = -2.495 + 0.11 WOB + 0.124 SF-a + 0.071 GSI$	۲	۴	۶	۶
۵	$BW = -8.126 + 0.073 RPM + 0.17 SF-a + 0.093 GSI$	۱۷	۱۶	۱۶	۱۶
۶	$BW = -9.955 + 0.072 RPM + 0.089 RAI + 0.12 GSI$	۱۶	۱۷	۱۷	۱۷
۷	$BW = 10^{-2.911} \times WOB^{0.417} \times UCS^{0.153} \times GSI^{1.591}$	۶	۲	۱	۱
۸	$BW = 10^{-2.932} \times WOB^{0.409} \times RAI^{0.211} \times GSI^{1.597}$	۷	۶	۳	۳
۹	$BW = 10^{-2.102} \times WOB^{0.457} \times TC^{0.328} \times GSI^{1.266}$	۸	۸	۸	۸
۱۰	$BW = 10^{-2.156} \times WOB^{0.406} \times SF-a^{0.15} \times GSI^{1.236}$	۵	۷	۲	۲
۱۱	$BW = 10^{-6.653} \times RPM^{3.452} \times SF-a^{0.374} \times GSI^{0.14}$	۱۹	۱۹	۱۹	۱۹
۱۲	$BW = 10^{-8.706} \times RPM^{3.526} \times RAI^{0.527} \times GSI^{1.029}$	۱۸	۱۸	۱۸	۱۸
۱۳	$BW = 10^{-0.754} \times WOB^{0.399} \times SF-a^{0.352} \times RMR^{0.339}$	۹	۱۲	۱۲	۹
۱۴	$BW = 10^{-9.892} \times RPM^{4.351} \times RAI^{0.275} \times RMR^{0.965}$	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱
۱۵	$BW = 10^{-6.562} \times RPM^{3.498} \times SF-a^{0.396} \times RMR^{0.025}$	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
۱۶	$BW = 10^{-3.408} \times WOB^{0.322} \times RPM^{1.445} \times SF-a^{0.298} \times RMR^{0.321}$	۱۵	۱۴	۱۵	۱۵
۱۷	$BW = 10^{-3.599} \times WOB^{0.406} \times RPM^{1.014} \times TC^{0.362} \times GSI^{1.025}$	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳
۱۸	$BW = 10^{-5.669} \times WOB^{0.405} \times RPM^{1.458} \times SH^{1.376} \times GSI^{0.593}$	۱۴	۱۵	۱۴	۱۴
۱۹	$BW = 10^{-4.112} \times WOB^{0.375} \times RPM^{0.777} \times UCS^{0.175} \times GSI^{1.416}$	۱۰	۱۰	۹	۱۰
۲۰	$BW = 10^{-4.292} \times WOB^{0.361} \times RPM^{0.875} \times RAI^{0.241} \times GSI^{1.407}$	۱۱	۹	۱۰	۱۱
۲۱	$BW = 10^{-3.411} \times WOB^{0.357} \times RPM^{0.867} \times SF-a^{0.169} \times GSI^{1.008}$	۱۲	۱۱	۱۱	۱۲

۸- تحلیل حساسیت

آخرین مرحله در مدل‌سازی، تعیین میزان حساسیت هدف مدل‌سازی شده (خروجی) نسبت به پارامترهای ورودی است. با استفاده از آنالیز حساسیت می‌توان روند کلی تاثیر نسبی پارامترهای ورودی مدل را بر خروجی آن تعیین کرد. یکی از روش‌های جدید برای تعیین حساسیت جواب نسبت به پارامترهای ورودی، روش دامنه کسینوسی^{۲۰} (CAM) است. در این روش یک فضای m بعدی به تعداد پارامترهای ورودی در نظر گرفته می‌شود [۲۴].

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

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

در چهار شاخصه ارزیابی مدل‌ها و رتبه‌بندی آنها مدل ۷ با پارامترهای بار روی سرمته، مقاومت فشاری تک محوری و شاخص مقاومت زمین‌شناسی در دو شاخصه رتبه اول را به دست آورده و همچنین مقاومت فشاری تک محوری (رابطه ۷) نسبت به ضریب بافت (رابطه ۳) بیشتر در پروژه‌ها و فعالیت‌های مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد و در اکثر بانک‌های اطلاعاتی داده‌ها در دسترس است، از این رو بهترین مدل پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی مدل رگرسیون غیرخطی است که در آن متغیرهای مستقل شامل بار روی سرمته، مقاومت فشاری تک محوری و شاخص مقاومت زمین‌شناسی است. مدل نهایی به صورت رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$BW = 10^{-2.911} \times WOB^{0.417} \times UCS^{0.153} \times GSI^{1.591} \quad (1)$$

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

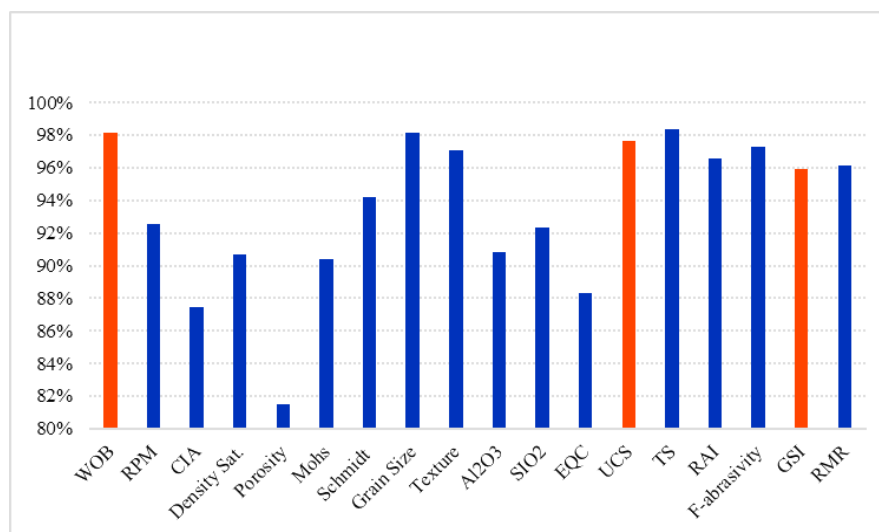
$$X_i = \{X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}, \dots, X_{im}\}$$

در شکل ۵ تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی بر روی خروجی مورد نظر نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که اکثر پارامترها به غیر از شاخص شدت دگرسانی شیمیایی (CIA)، تخلخل و کوارتز محتوای معادل سنگ (EQC) مقادیر بیش از ۰٫۹ دارند که بیانگر قرار گرفتن مهم‌ترین پارامترها به

در نهایت میزان تاثیر هر کدام از پارامترهای ورودی X بر تابع هدف از رابطه ۲ تعیین می‌شود. هرچه میزان تاثیر پارامتر ورودی بر خروجی مورد نظر بیشتر باشد، R_{ij} به یک نزدیک‌تر خواهد بود. در صورت عدم تاثیر پارامتر ورودی بر خروجی نیز، مقدار R_{ij} صفر است. به طور معمول می‌توان گفت که در بررسی R_{ij} ، مقادیر بالای ۰٫۹ نشان‌دهنده تاثیر قابل توجه پارامتر مورد نظر بر خروجی و مقادیر کمتر از ۰٫۸ بیانگر تاثیر ضعیف آن بر خروجی است [۲۴].

جدول ۹: رتبه‌بندی مدل‌های تخمین سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی بر اساس معیارهای ارزیابی

ردیف	روابط ارایه شده	میانگین رتبه‌ها	بردا	کپلند	ادغام
۱	$BW = -3.850 + 0.109 WOB + 0.013 UCS + 0.103 GSI$	۴٫۵	۵	۷	۵٫۵
۲	$BW = -4.009 + 0.108 WOB + 0.035 RAI + 0.103 GSI$	۴٫۲۵	۵	۴	۴٫۴۲
۳	$BW = -3.121 + 0.122 WOB + 2.706 TC + 0.058 GSI$	۳٫۵	۲	۲	۲٫۵
۴	$BW = -2.495 + 0.11 WOB + 0.124 SF-a + 0.071 GSI$	۴٫۵	۳	۳	۳٫۸۳
۵	$BW = -8.126 + 0.073 RPM + 0.17 SF-a + 0.093 GSI$	۱۶٫۲۵	۱۶	۱۶	۱۶٫۰۸
۶	$BW = -9.955 + 0.072 RPM + 0.089 RAI + 0.12 GSI$	۱۶٫۷۵	۱۷	۱۷	۱۶٫۹۲
۷	$BW = 10^{-2.911} \times WOB^{0.417} \times UCS^{0.153} \times GSI^{1.591}$	۲٫۵	۱	۱	۱٫۵
۸	$BW = 10^{-2.932} \times WOB^{0.409} \times RAI^{0.211} \times GSI^{1.597}$	۴٫۷۵	۵	۶	۵٫۲۵
۹	$BW = 10^{-2.102} \times WOB^{0.457} \times TC^{0.328} \times GSI^{1.266}$	۸	۸	۸	۸
۱۰	$BW = 10^{-2.156} \times WOB^{0.406} \times SF-a^{0.15} \times GSI^{1.236}$	۴	۳	۳	۳٫۳۳
۱۱	$BW = 10^{-6.653} \times RPM^{3.452} \times SF-a^{0.374} \times GSI^{0.14}$	۱۹	۱۹	۱۹	۱۹
۱۲	$BW = 10^{-8.706} \times RPM^{3.526} \times RAI^{0.527} \times GSI^{1.029}$	۱۸	۱۸	۱۸	۱۸
۱۳	$BW = 10^{-0.754} \times WOB^{0.399} \times SF-a^{0.352} \times RMR^{0.339}$	۱۰٫۵	۱۱	۱۰	۱۰٫۵
۱۴	$BW = 10^{-9.892} \times RPM^{4.351} \times RAI^{0.275} \times RMR^{0.965}$	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱
۱۵	$BW = 10^{-6.562} \times RPM^{3.498} \times SF-a^{0.396} \times RMR^{0.025}$	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
۱۶	$BW = 10^{-3.408} \times WOB^{0.322} \times RPM^{1.445} \times SF-a^{0.298} \times RMR^{0.321}$	۱۴٫۷۵	۱۵	۱۵	۱۴٫۹۲
۱۷	$BW = 10^{-3.599} \times WOB^{0.406} \times RPM^{1.014} \times TC^{0.362} \times GSI^{1.025}$	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳
۱۸	$BW = 10^{-5.669} \times WOB^{0.405} \times RPM^{1.458} \times SH^{1.376} \times GSI^{0.593}$	۱۴٫۲۵	۱۴	۱۴	۱۴٫۰۸
۱۹	$BW = 10^{-4.112} \times WOB^{0.375} \times RPM^{0.777} \times UCS^{0.175} \times GSI^{1.416}$	۹٫۷۵	۹	۹	۹٫۲۵
۲۰	$BW = 10^{-4.292} \times WOB^{0.361} \times RPM^{0.875} \times RAI^{0.241} \times GSI^{1.407}$	۱۰٫۲۵	۱۰	۱۰	۱۰٫۰۸
۲۱	$BW = 10^{-3.411} \times WOB^{0.357} \times RPM^{0.867} \times SF-a^{0.169} \times GSI^{1.008}$	۱۱٫۵	۱۱	۱۲	۱۱٫۵



شکل ۵: تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی بر روی سایش سرمته‌های حفاری سه‌مخروطی

آزمایشگاهی (آنالیز شیمیایی، بررسی مقاطع نازک و تست‌های آزمایشگاهی بر روی ۱۰ نمونه سنگ)، مطالعات میدانی و بانک اطلاعاتی مرکز تحقیق و توسعه‌ی معدن مس سرچشمه، پایگاه داده تشکیل شده است.

به طور کلی نتایج حاصل از انجام این تحقیق را می‌توان به صورت زیر عنوان کرد:

- برای توسعه مدل‌های پیش‌بینی‌کننده و تخمین‌گر و اعتبارسنجی آن‌ها به صورت تصادفی ۷۵٪ کل داده‌ها به عنوان داده‌های آموزش و ۲۵٪ دیگر برای داده‌های آزمون مورد استفاده قرار گرفته است.
- برای کاهش تعداد متغیرهای تحقیق با استفاده از تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA) مهم‌ترین و تاثیرگذارترین پارامترها در این تحقیق معرفی شده است. PCA تعداد مولفه‌های سیستم را با استفاده از تعیین ماتریس مقادیر ویژه و روابط ارایه شده، از ۱۸ مولفه به دو مولفه کاهش داده است. این دو مولفه ۸۸٫۲۳٪ از کل واریانس متغیرها را نشان می‌دهند.
- بر همین اساس ضریب بافت سنگ (TC)، مقاومت فشاری (UCS)، مقاومت کششی (BTS)، سختی واجهش اشमित (SH)، فاکتور ساینده‌ی شیمازک (SF-a)، اندیس ساینده‌ی سنگ (RAI)، سیستم رده‌بندی توده سنگ (RMR)، شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI)، بار روی سرمته (WOB) و سرعت دوران سرمته (RPM) به عنوان پارامترهای

عنوان متغیر مستقل یا ورودی مدل‌ها است. همچنین با توجه به اینکه متغیرهای مستقل بهترین مدل پیش‌بینی بار روی سرمته، مقاومت فشاری و شاخص مقاومت زمین‌شناسی بوده، به همین دلیل اهمیت این پارامترها بر سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی نیز بررسی شده است. با توجه به توضیحات یاد شده، طبق نتایج تحلیل حساسیت بار روی سرمته (WOB) همواره دارای بیشترین تاثیر در خروجی بهترین مدل بوده است و از این رو مهم‌ترین پارامتر مدل محسوب می‌شود. به همین دلیل باید این پارامتر با دقت بیشتری اندازه‌گیری شود چرا که تغییرات کوچک در مقدار آن به تغییرات اساسی در سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی منجر می‌شود. مقادیر R_{ij} برای پارامترهای ورودی مدل نهایی در جدول ۱۰ ارایه شده است.

جدول ۱۰: میزان تاثیر پارامترهای ورودی رابطه نهایی

پارامتر	WOB	UCS	GSI
R_{ij}	۰٫۹۸۲	۰٫۹۷۷	۰٫۹۵۹

۹- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ۲۹ سرمته به توجه به شرایط فیزیکی سرمته‌ها انتخاب و بررسی و برای اندازه‌گیری سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی در معدن مس سرچشمه از روش افت وزنی استفاده شده است. با استفاده از مطالعات

- با توجه به اینکه متغیرهای مستقل بهترین مدل پیش‌بینی شامل بار روی سرمته، مقاومت فشاری تک محوری و شاخص مقاومت زمین‌شناسی بوده، به همین دلیل اهمیت این پارامترها بر روی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی نیز بررسی شده است.
- طبق نتایج تحلیل حساسیت، بار روی سرمته با R_{ij} ۰.۹۸۲ همواره دارای بیشترین تاثیر در خروجی بهترین مدل بوده است و از این رو مهم‌ترین پارامتر مدل محسوب می‌شود. به همین دلیل باید این پارامتر با دقت بیشتری اندازه‌گیری شود چرا که تغییرات کوچک در مقدار آن به تغییرات اساسی در سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی منجر می‌شود.

۱۰- سپاس‌گزاری

نویسندگان این تحقیق صمیمانه از شرکت ملی صنایع مس ایران (NICICO) برای تامین اعتبار پروژه تحقیقاتی و ارائه داده‌های مورد استفاده کمال تشکر و سپاس را به عمل می‌آورند.

۱۱- مراجع

- [1] Abbaspour, H., Drebenstedt, C., Badroddin, M., and Maghaminik, A. (2018). "Optimized design of drilling and blasting operations in open pit mines under technical and economic uncertainties by system dynamic modelling". International Journal of Mining Science and Technology, 28(6): 839-848.
- [2] Park, J., and Kim, K. (2020). "Use of drilling performance to improve rock-breakage efficiencies: A part of mine-to-mill optimization studies in a hard-rock mine". International Journal of Mining Science and Technology, 30(2): 179-188.
- [3] Adebayo, B. (2011). "Effect of textural characteristics of rock on bit wear". AU Journal of Technology, 14(4).
- [4] Adebayo, B., and Akeju, V. O. (2012). "Evaluation of Tri-cone Bit Performance on Limestone Formation". In Advanced Materials Research, Trans Tech Publications, 367: 555-560.
- [5] Adebayo, B., and Akande, J. M. (2015). "Analysis of Button Bit Wear and Performance of Down-The-Hole Hammer Drill". Ghana Mining Journal, 15(2): 36-41.
- [6] 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.

- نهایی در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته‌اند.
- مدل نهایی ترکیبی از پارامترهای عملیاتی، ساختاری و متغیرهای ذاتی سنگ بوده است. لازم به ذکر است برخی از پارامترها با یکدیگر همبستگی دارند و نمی‌توان از آنها در کنار یکدیگر در ارایه مدل استفاده کرد. از این رو در این تحقیق برای پیش‌بینی مقدار سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی حین حفاری از ۱۰۰ مدل خطی و غیرخطی ارایه شده تنها ۲۱ مدل که شامل ۶ مدل خطی و ۱۵ مدل غیرخطی است مورد تایید واقع شده است.
- برای ارزیابی عملکرد هریک از مدل‌های انتخاب شده، از دسته داده‌های آزمون استفاده شده است. بر این اساس عملکرد مدل‌ها بر اساس معیارهای ارزیابی چهارگانه، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تعیین (R^2)، شاخص عملکرد (VAF) و میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) مورد بررسی قرار گرفته و اولویت هریک از روش‌ها بر اساس معیارهای ارزیابی چهارگانه مشخص شده است. پس از آن با استفاده از سه استراتژی اولویت‌بندی شامل میانگین رتبه‌ها، روش بردا و روش کپلند و در نهایت ادغام این روش‌ها، اولویت‌بندی مدل‌ها انجام شده است.
- ادغام رتبه‌بندی‌ها نشان می‌دهد که سه مدل خطی و دو مدل غیرخطی زیر پنج مدل نهایی با اولویتی بالاتر از دیگر مدل‌ها هستند.

$$BW = -4.009 + 0.108 WOB + 0.035 RAI + 0.103 GSI \quad (۳)$$

$$BW = -3.121 + 0.122 WOB + 2.706 TC + 0.058 GSI \quad (۴)$$

$$BW = -2.495 + 0.11 WOB + 0.124 SF-a + 0.071 GSI \quad (۵)$$

$$BW = 10^{-2.911} \times WOB^{0.417} \times UCS^{0.153} \times GSI^{1.591} \quad (۶)$$

$$BW = 10^{-2.156} \times WOB^{0.406} \times SF - a^{0.15} \times GSI^{1.236} \quad (۷)$$

- بر اساس نتایج رتبه‌بندی و با توجه به اینکه پارامتر مقاومت فشاری (رابطه ۷) نسبت به ضریب بافت (رابطه ۳) در اکثر بانک اطلاعاتی داده‌ها در دسترس است، از این رو بهترین مدل پیش‌بینی به صورت زیر انتخاب شده است.

$$BW = 10^{-2.911} \times WOB^{0.417} \times UCS^{0.153} \times GSI^{1.591} \quad (۸)$$

- [19] Suzuki, T., Ohtaguchi, K., and Koide, K. (1994). "Correlation between flash points and chemical structures of organic compounds, using principal component analysis". *International Journal of Chemical Engineering*, 34(3): 393-402.
- [20] Engelbrecht, A. P. (2007). "Computational intelligence: an introduction". John Wiley & Sons.
- [21] Gokceoglu, C. (2002). "A fuzzy triangular chart to predict the uniaxial compressive strength of the Ankara agglomerates from their petrographic composition". *Engineering Geology*, 66(1): 39-51.
- [22] رمضان‌نیا، ط.؛ ۱۳۹۲؛ "ارزیابی ریسک زمین‌شناسی با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره در تونل‌سازی مکانیزه (مطالعه موردی تونل انتقال آب نوسود)". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [23] عطایی، م.؛ ۱۳۹۵؛ "تصمیم‌گیری چند معیاره". انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود، چاپ چهارم.
- [24] Jong, Y. H., and 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.
- [7] Saeidi, O., Elyasi, A., and Torabi, S. R. (2015). "Wear Assessment of the WC/CO cemented carbide drillbits in an open pit mine". *Geomechanics and Engineering*, 8(4): 477-493. DOI: <https://doi.org/10.12989/gac.2015.8.4.477>.
- [8] Sahoo, S. K., and 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.
- [9] Dudek, R., and Władzielczyk, K. (2018). "Wear Testing of Buttons in Bits for Blasthole Drilling". *Tribologia*.
- [10] Mazen, A. Z., Rahmanian, N., Mujtaba, I. M., and Hassanpour, A. (2019). "Estimation of dulling rate and bit tooth wear using drilling parameters and rock abrasiveness". *Journal of Petroleum Engineering and Technology*, 9(3): 1-12.
- [11] Capik, M., and Batmunkh, B. (2020). "Measurement, prediction and modeling of bit wear in during drilling operations". *Journal of Mining and Environment*.
- [12] Piri, M., Hashemolhosseini, H., Mikaeil, R., Ataei, M., and 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.
- [13] Majeed, Y., Bakar, M. A., and Butt, I. A. (2020). "Abrasive evaluation for wear prediction of button drill bits using geotechnical rock properties". *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79(2): 767-787.
- [14] Einali, M., Alirezaei, S., and Zaccarini, F. (2014). "Chemistry of magmatic and alteration minerals in the Chahfiruzeh porphyry copper deposit, south Iran: implications for the evolution of the magmas and physicochemical conditions of the ore fluids". *Turkish Journal of Earth Sciences*, 23(2): 147-165.
- [15] Schneider, A., Hommel, G., and Blettner, M. (2010). "Linear regression analysis: part 14 of a series on evaluation of scientific publications". *Deutsches Ärzteblatt International*, 107(44): 776.
- [16] Seber, G. A., and Lee, A. J. (2012). "Linear regression analysis". John Wiley & Sons, 329.
- [17] والپول، ر.؛ ۱۳۵۷؛ "مقدمه‌ای بر احتمالات و آمار کاربردی". ترجمه میربهادر قلی آریانزاد و محمد ذهبیون، چاپ نهم، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.
- [18] وایزبرگ، س.؛ ۱۳۷۴؛ "رگرسیون خطی کاربردی". ترجمه حسینعلی نیرومند، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.

¹⁹ Aggregate method

²⁰ Cosine Amplitude Method