

Research article

DOI: 10.22034/IJME.2025.2061130.2048

OPEN ACCESS

Evaluation of Diamond Wire Saw Production Rate Response to Rock Geomechanical Factors

Mojtaba Mokhtarian Asl ^{1,*}, Aref Alipour ¹, Reza Milaeil ¹

¹ Associate Professor, Faculty of Industrial and Mining Technologies, Urmia University of Technology, Urmia, Iran

Article info	Abstract
<p>Received: 19 May 2025 Revised: 19 August 2025 Accepted: 21 September 2025</p> <p>Keywords Sawability Diamond wire saw Production rate Response surface method</p> <p>*Corresponding author Mojtaba Mokhtarian Asl m.mokhtarian@uut.ac.ir</p>	<p>Sawability of diamond wire saws is essential in the planning of the stone quarries. Researchers have been offered linear and non-linear models for production rate as a measure of sawability, based on geomechanical and machine parameters. In this paper, the performance of diamond wire saws in cutting carbonate rocks was studied based on production rates across 14 different carbonate rocks in various Iranian stone quarries. Previously, parameters such as uniaxial compressive strength, Brazilian tensile strength, Schmidt hammer value, Los Angeles abrasion, and diamond wire saw were considered to model production rate. In this study, response surface methodology (RSM) has been employed to investigate the effect of independent variables on the production rate of diamond wire saws. Based on the statistical error between the calculated and measured production rates, the RSM-based quadratic model has the lowest values of MAPE, VARE, MEDAE, and RMSE, while it has the highest VAF, compared to the other models. In addition, based on the Analysis of Variance (ANOVA) results, the Los Angeles abrasion test value has the most significant impact on production rate. The statistical analysis concluded that the production rate of carbonate rocks using diamond wire saws can be reliably predicted by the developed RSM-based quadratic model.</p>

How to cite this article Mokhtarian, M., Alipour, A., Milaeil, R., 2025, Evaluation of Diamond Wire Saw Production Rate Response to Rock Geomechanical Factors. *Journal of Mining Engineering*, 20(2): 90-103. (in Persian with English Abstract) <https://doi.org/10.22034/ijme.2025.2061130.2048>



©2025 The author(s). Published by [Iranian Society of Mining Engineering](#).

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

EXTENDED ABSTRACT

1. Introduction

The production and processing of stone quarries play a significant role in the construction industry. The demand for increased production and high quality necessitates advanced technology and tools. To compete effectively in today's market, it is essential to leverage new technologies for cutting, shaping, and polishing stone products. Diamond cutting tools are an example of this advanced technology, used in all stages of ornamental stone preparation. The proper application of these tools significantly enhances process efficiency and the quality of processed stones (Jain & Rathore, 2009, 2011).

Determining and measuring the sawability of rock is considered a branch of rock engineering. In the limited classifications provided, the physico-mechanical properties of the rock —such as density, porosity, degree and type of cementation, textural characteristics, rock strength parameters, hardness, and abrasiveness —and machine/operational conditions have been considered (Yılmaz, Goktan, and Kibici 2011).

To evaluate rock sawability, the use of various devices on laboratory and industrial scales has been of interest. Typically, sawability involves the interaction between the rock's mechanical properties and the cutting machine's performance. Various indices, such as power consumption, required cutting force, and production rate per unit time, are used to assess the power and performance of the cutting machine, and, in other words, its sawability (Ataei et al., 2012).

The diamond wire saw has been extensively used in a stone processing plant. The diamond wire saw is one of the most important tools used in the stone quarries. The diamond wire is simply a steel cable on which small beads bonded with diamond abrasive are mounted at regular intervals, with spacing material placed between the beads (Ozcelik, 1999).

Providing a model for estimating the sawability of stone quarries is important for production planning. Various researchers have developed linear and nonlinear estimation relationships by correlating geomechanical and machine parameters with the production rate, a quantitative index of sawability. A crucial point in these models is how the factors affecting the cutting process are selected and their degree of influence is considered.

2. Methodology

The sawability of stone quarries by a diamond wire saw machine was studied by Ataei et al. for cutting 14 types of soft carbonate rock from different quarries in Iran. (Ataei et al. 2012). In the aforementioned research, the geomechanical parameters of these rocks, including uniaxial compressive strength (UCS), Brazilian tensile strength (BTS), Schmidt hammer rebound number, and Los Angeles abrasion test (LA) results, were used to model production rate. These parameters are summarized in Table 1. Based on the data in Table 1, Ataei et al. proposed the nonlinear regression equation of relation (1) to estimate the production rate.

$$PR = \sqrt{\frac{10^{17.431} \times LA^{0.418}}{USC^{0.503} \times BTS^{0.642} \times SHv^{8.596}}} \quad (1)$$

Where PR is the production rate (m²/h), LA is Los Angeles abrasion (%), UCS is uniaxial compressive strength (MPa), BTS is Brazilian tensile strength (MPa), and SH is Schmidt hammer value (n).

Table 1. Geomechanical parameters of the tested rock and the corresponding production rate values

UCS (MPa)	BTS (MPa)	LA (%)	SH (n)	PR (m ² /h)
98.9	6.6	20.5	56.2	6
124	8.7	21.5	57.1	5.5
139.5	12.4	24.6	58.3	3.5
132.6	11.6	21.4	57.2	3.7
188.5	13	25.4	58.6	2.2
116	7.61	20.47	56.1	5
84.6	4.5	29.23	50.6	10
84.6	5	33	53.6	10
95	6.7	34.31	57.8	6.2
63	4.5	32.11	56.3	6.7
59	4.6	45	55.8	6.5
67	5.5	30.28	53.7	10.6
75	6	25.06	55.6	9.2
80	7	36.9	54.5	9

In this research, the response surface methodology (RSM) was employed to model the production rate as a function of the geomechanical factors of the studied rock. RSM is a collection of statistical and mathematical techniques used to determine the relationship between a response and independent variables. The term "response surface" for this methodology is derived from its Graphic scheme [7]. In the present study, four independent variables were considered as follows:

X₁: Uniaxial Compressive Strength (UCS)

X₂: Brazilian Tensile Strength (BTS)

X₃: Los Angeles Abrasion (LA)

X₄: Schmidt Hammer Rebound (SH)

The dependent variable, or in other words, the model response (Y), is the wire saw production rate (PR). To predict the response, linear and quadratic models were examined. The analyses related to the response surface methodology were performed using Design-Expert software version 10.0.4. The response model is expressed in terms of coded and actual parameters, as in equations (2) and (3), respectively, in which the wire-cutting production rate is a function of the independent variables. To evaluate model adequacy, several statistical metrics are used; some are summarized for the presented model in Table 2. These statistical indicators demonstrate the model's reasonable accuracy.

$$Y = 1.2621 + 11.0166X_1 - 22.7820X_2 + 3.3646X_3 + 5.3948X_4 - 83.4200X_1X_2 + 14.7338X_1X_3 + 7.5443X_1X_4 - 11.9455X_2X_3 + 3.0570X_2X_4 - 6.6378X_3X_4 + 55.6141X_1^2 + 24.2271X_2^2 \quad (2)$$

$$PR = -27.5032 - 2.6582UCS + 6.3636BTS + 7.3710LA + 0.5996SH - 0.3031UCS \cdot BTS + 0.0185UCS \cdot LA + 0.0291UCS \cdot SH - 0.2292BTS \cdot LA + 0.1798BTS \cdot SH - 0.1353LA \cdot SH + 0.0133USC^2 + 1.3413BTS^2 \quad (3)$$

Table 2. Statistical indicators of the response model

Indicator	Value
Standard deviation	0.058
Mean (m ² /h)	6.72
Coefficient of variation (%)	0.87
Predicted Residual Sum of Squares	150.04
R-squared	1
Adj R-squared	0.9995
Adequate precision	149.261

3. Findings and argument

In this section of the study, the performance of the proposed models is evaluated utilizing both graphical and quantitative comparative approaches. Graphically, the calculated-versus-measured value plot is used to assess prediction accuracy. In this method, the production rates calculated by each model are plotted against their corresponding measured values. The outcomes of this analysis for each investigated model are presented in Figs. 1 and 2.

A coefficient of determination (R^2) value closer to unity indicates greater accuracy in the model's production rate estimates. As illustrated in Figs. Among the analyzed models, the Response Surface Method (RSM)- based model, with an R^2 of 1, demonstrates superior performance. In the technical literature, several indices and statistical tests are used to compare the goodness-of-fit of estimates. Based on these indices, presented in Table 3, the Response Surface Method-based model (Equation 3) consistently yields the most favorable values across all evaluations. This conclusively confirms its superior performance compared to the model proposed by Ataei et al.

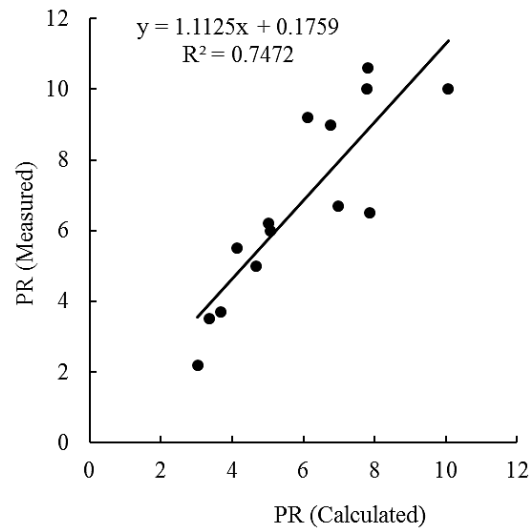


Figure 1. Correlation of calculated and measured values from Ataie et al. model

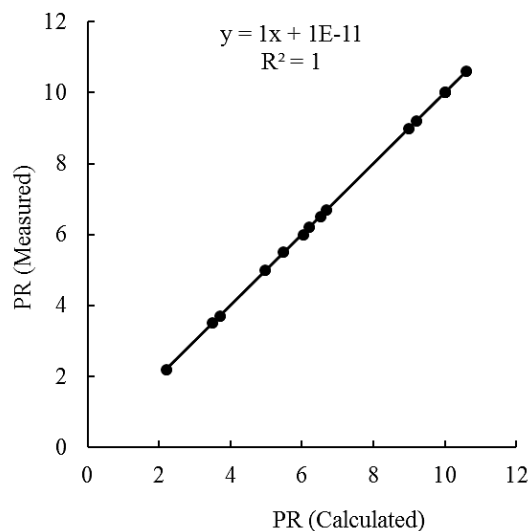


Figure 2. Correlation of calculated and measured values from the response surface model

Table 3. The value of statistical criteria for the predictive models

Statistical criteria	Model.Ataei et al	Response Surface Method model
Correlation Coefficient	0.878	1
Mean absolute percentage error.	17.209	0.196
Route Mean Squared Error	1.560	0.016
Variance Absolute Relative Error	1.378	0.000
Median absolute error	0.2	0.002
Variance accounts for	73.955	99.996

4. Conclusions

This study developed a nonlinear predictive model to estimate the production rate of a diamond wire saw across 14 varieties of soft carbonate rocks, using their key geomechanical properties. Statistical evaluation of the model revealed exceptional predictive accuracy, evidenced by a correlation coefficient of unity ($R^2 = 1$), a mean absolute percentage error (MAPE) of 0.196%, and a variance of relative absolute error of zero. Sensitivity analysis further identified the Los Angeles abrasion value as the most influential parameter on the production rate. The confirmed efficacy of the Response Surface Methodology (RSM) in this context underscores the robustness of the developed modelling framework and recommends its application for similar cutting efficiency studies in the future.

5. References

- [1] Ataei, Mohammad, Reza Mikaiel, Farhang Sereshki, and Narges Ghaysari. 2012. "Predicting the production rate of diamond wire saw using statistical analysis." *Arabian Journal of Geosciences* 5 (6):1289-1295. doi: 10.1007/s12517-010-0278-z.
- [2] Jain, SC, and SS Rathore. 2009. "Role of cut size area on the performance of diamond wire saw machine in quarrying of marble." *International Journal of Mining, Reclamation and Environment* 23 (2):79-91.
- [3] Jain, SC, and SS Rathore. 2011. "Prediction of cutting performance of diamond wire saw machine in quarrying of marble: a neural network approach." *Rock Mechanics and Rock Engineering* 44 (3):367-371.
- [4] Ozcelik, Y. 1999. "Investigation of the working conditions of diamond wire cutting machines in marble industry." PhD Thesis, Hacettepe University, Ankara (in Turkish).
- [5] Yılmaz, N Gunes, RM Goktan, and Y Kibici. 2011. "An investigation of the petrographic and physico-mechanical properties of true granites influencing diamond tool wear performance, and development of a new wear index." *Wear* 271 (5):960-969.



OPEN ACCESS

DOI: 10.22034/ijme.2025.2061130.2048

مقاله پژوهشی

تاثیر عوامل ژئومکانیکی سنگ بر نرخ تولید سیم‌برش الماسه

مجتبی مختاریان اصل^{۱*}، عارف علیپور^۱، رضا میکائیل^۱^۱ دانشیار، دانشکده صنایع و فناوری های معدنی، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۷</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۲۸</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۳۰</p> <p>واژه‌های کلیدی</p> <p>سیم برش قابلیت برش سنگ تزئینی پیش‌بینی نرخ تولید روش سطح پاسخ</p> <p>*نویسنده مسئول مجتبی مختاریان اصل m.mokhtarian@uut.ac.ir</p>	<p>وجود یک مدل پیش‌بینی برای برآورد قابلیت برش سنگ‌های تزئینی با در نظرگیری الزامات برنامه‌ریزی تولید، از اهمیت بالایی برخوردار است. پژوهشگران مختلف با ایجاد ارتباط بین پارامترهای ژئومکانیکی سنگ و مشخصات ماشین‌آلات برش با نرخ تولید - که شاخص کمی قابلیت برش محسوب می‌شود - روابط خطی و غیرخطی متعددی را ارائه کرده‌اند. در این پژوهش، برای پیش‌بینی قابلیت برش، از داده‌های ثبت‌شده نرخ تولید دستگاه سیم‌برش الماسه در فرآیند برش ۱۴ نمونه سنگ کربناته نرم از معادن مختلف ایران استفاده شده است. پارامترهای ژئومکانیکی مورد بررسی شامل مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت کششی برزیلی، عدد چکش اشمیت و نتایج آزمایش سایش لس آنجلس بوده که برای مدل‌سازی نرخ تولید به کار گرفته شدند. در این مطالعه، با استفاده از داده‌های موجود، یک مدل غیرخطی با بهره‌گیری از روش سطح پاسخ برای پیش‌بینی نرخ تولید سیم‌برش الماسه ارائه شده و نتایج با پژوهش‌های پیشین مقایسه شد. همچنین با تکیه بر قابلیت‌های روش سطح پاسخ، میزان تأثیر هر یک از پارامترهای مورد نظر بر نرخ تولید بررسی شد. بر اساس یافته‌ها، ضریب تعیین (R^2) در آزمون تخمین - مقدار واقعی برای روش سطح پاسخ برابر با ۱ محاسبه شد، در حالی که این مقدار در مطالعات قبلی ۰/۷۴ بوده است. میانگین درصد قدرمطلق خطا در روش پیشنهادی حاضر ۰/۱۹۶ درصد به دست آمد که در مقایسه با مقدار ۱۷/۲۰۹ درصد در پژوهش‌های گذشته، بهبود چشمگیری را نشان می‌دهد. در سایر آزمون‌های آماری نیز، مدل پیش‌بینی نرخ تولید مبتنی بر روش سطح پاسخ در مقایسه با رویکردهای قبلی، بهترین عملکرد را دارا بوده است.</p>

استناد به این مقاله:

مختاریان اصل، مجتبی؛ علیپور، عارف؛ میکائیل، رضا؛ ۱۴۰۴. تاثیر عوامل ژئومکانیکی سنگ بر نرخ تولید سیم‌برش الماسه. نشریه مهندسی معدن.

<https://doi.org/10.22034/ijme.2025.2061130.2048> .۱۰۳-۹۰ .(۲)۲۰

۱- مقدمه

تولید و فرآوری سنگ تزئینی نقش مهمی را در صنعت ساختمان ایفا می‌کند. نیاز به تولید بیشتر و کیفیت عالی، تکنولوژی و ابزار پیشرفته‌ای را طلب می‌کند، برای رقابت موثر در بازار امروزی باید از تکنولوژی‌های جدید در برش، فرم‌دهی و پرداخت محصولات سنگی استفاده نمود. وسایل برش الماسه، نمونه‌ای از این تکنولوژی پیشرفته‌اند که در تمام مراحل تهیه سنگ تزئینی به کار می‌روند. سیستم برش الماسه در استخراج سنگ، تیغه‌های برش در تهیه پلاک از قواره‌ها، اره‌های مدور دیسکی در آراستن محصولات و تیغه‌های صیقل‌دهی در پرداخت نهایی این محصولات به کار می‌روند. به کارگیری صحیح این وسایل به نحو چشم‌گیری در بالا بردن بازدهی فرآیند و کیفیت سنگ‌های فرآوری شده مؤثر است [۱] و [۲]. تاکنون تحقیقات مختلفی در مورد سیم‌برش شامل: بررسی پوشش مهره‌های الماسه، قدرت موتور و سرعت سیم‌برش، ساختار سیم و هندسه‌ی برش، ابعاد بلوک سنگ، ساختار مهره‌ها و سیم الماسه، شبیه‌سازی کامپیوتری برش با سیم‌برش، و بررسی نرخ تولید یا نرخ برش توسط محققین مختلف صورت گرفته است [۳].

تعیین و اندازه‌گیری قابلیت برش سنگ^۱ یکی از شاخه‌های مهندسی سنگ محسوب می‌شود. در طبقه‌بندی‌های محدود ارائه شده، مشخصات فیزیکی-مکانیکی سنگ نظیر: چگالی، تخلخل، درجه و نوع سیمان‌شدگی، مشخصات بافتی، پارامترهای مقاومتی سنگ، سختی و ساینده‌گی در کنار مشخصات بافت-ساخت و شرایط دستگاهی و اپراتوری مورد توجه قرار گرفته است [۴]. این طبقه‌بندی‌ها بصورت متفاوت از هم بوده و از پارامترهای مؤثر مختلفی استفاده کرده‌اند، گاهی در این طبقه‌بندی‌ها پارامترها هم‌اثر و هم‌پوشان نیز وجود دارد [۵].

به منظور ارزیابی قابلیت برش سنگ استفاده از دستگاه‌های مختلف در مقیاس آزمایشگاهی و صنعتی مورد توجه بوده است. بطور معمول در قابلیت برش اندرکنش بین خصوصیات مکانیکی سنگ و کارکرد دستگاه برش مورد توجه قرار می‌گیرد. شاخصه‌های مختلفی نظیر: اندازه‌گیری شدت جریان مصرفی دستگاه، مقدار نیروی برش لازم، مقدار تولید دستگاه در واحد زمان و ... به منظور ارزیابی توان و کارکرد دستگاه برش و به عبارتی قابلیت برش مطرح هستند [۳].

یکی از مهمترین ابزارهای برش مرسوم در این حوزه به کارگیری سیم‌برش الماسه می‌باشد. فرایند برش با این ابزار یک فرایند سایشی است که با استفاده از مهره‌های الماس و در اثر عبور دانه‌های الماس روی مهره از روی قطعه سنگ صورت می‌گیرد. در مرحله‌ی نخست در اثر نفوذ دانه‌های الماس در سنگ تراشه‌های سنگ ایجاد می‌شود. دانه‌ی الماس با خراش سنگ و شکافتن سطح برش موجب ایجاد تراشه و سطح جدید و جدیدتر می‌شود. هنگامی که سنگ توسط ابزار الماسه تحت برش قرار می‌گیرد، اندرکنش مکانیکی میان ابزار و سنگ نیروی فرآیندی ایجاد می‌کند که به‌طور عمده ناشی از تغییر شکل الاستیک و پلاستیک سنگ، اصطکاک میان مهره‌ی الماس و ماتریکس با تراشه‌های ناشی از برش سنگ است. در واقع تغییرات نیرو به همراه پستی و بلندی‌های موجود در سطح قطعه‌سنگ کاری، بی‌نظمی ضخامت تراشه‌ها، لایه لایه شدن تراشه‌ها و اصطکاک سطوح باعث تغییر در شرایط برشی سنگ می‌شود [۶].

پارامترهای مؤثر در استخراج و فرآوری با سیم‌برش الماسه به دو دسته پارامترهای غیرقابل کنترل که مربوط به خصوصیات سنگ می‌شود و پارامترهای نسبتاً قابل کنترل تقسیم می‌گردد [۶]. پارامترهای غیرقابل کنترل شامل خصوصیات فیزیکی نظیر ترکیب کانی‌شناسی و بافتی سنگ، چگالی و ابعاد ذرات و خصوصیات مکانیکی همچون میزان سایش‌پذیری، تردی و خصوصیات مقاومتی سنگ می‌شود. پارامترهای بطور نسبی قابل کنترل شامل مشخصه‌های عملیاتی برش شامل ویژگی‌های کلی ابزار برش نظیر قدرت ماشین و مشخصات مهره‌های مربوط به سیم برش، ویژگی‌های عملیاتی مانند سرعت برش و سایز ابعاد بلوک و خصوصیات مدیریت عملیات شامل کیفیت عملکرد پرسنل و شرایط محیطی می‌شوند.

ارائه‌ی مدل به‌منظور تخمین واکنش قابلیت برش سنگ‌های تزئینی با توجه به ملاحظات برنامه‌ریزی تولید حائز اهمیت است. محققین مختلف با مرتبط کردن پارامترهای ژئومکانیکی و ماشین برش با نرخ تولید که شاخصی کمی از قابلیت برش است، اقدام به ارائه‌ی روابط تخمین خطی و غیرخطی نموده‌اند. نکته مهم در این مدل‌ها نحوه انتخاب عامل‌های مؤثر بر فرآیند برش و در نظر گرفتن میزان اثرگذاری آن‌ها می‌باشد. در سالیان اخیر استفاده از روش‌های طراحی آزمایش مورد توجه قرار گرفته است. طرح آزمایش به سلسله آزمون‌هایی اطلاق می‌شود که بتواند

سنگ مورد مطالعه شده است. جزئیات مربوط به کارایی روش به کارگرفته شده نسبت به مدل پیشنهادی عطایی و همکاران در بخش‌های بعدی با استفاده از شاخص‌های آماری بررسی خواهد شد.

جدول ۱- پارامترهای عملیاتی ماشین سیم برش

Table 1- Operating parameters of wire saw machine

واحد	توصیف	پارامتر
kW	۴۵	قدرت موتور
m	۸۰-۶۵	سرعت خطی
m/s	۳۵-۳۰	طول سیم برش
cm	۶۰	قطر روتور
	۳۶-۳۳	تعداد مهره در هر متر
	مخصوص سنگ‌های نرم	جنس مهره الماسه

جدول ۲- پارامترهای ژئومکانیکی سنگ مورد آزمایش و مقدار نرخ تولید متناظر با آن

Table 2- Geomechanical parameters of the tested rock and the corresponding production rate values

PR (m ² /h)	SH (n)	LA (%)	BTS (MPa)	UCS (MPa)
۶	۵۶/۲	۲۰/۵	۶/۶	۹۸/۹
۵/۵	۵۷/۱	۲۱/۵	۸/۷	۱۲۴
۳/۵	۵۸/۳	۲۴/۶	۱۲/۴	۱۳۹/۵
۳/۷	۵۷/۲	۲۱/۴	۱۱/۶	۱۳۲/۶
۲/۲	۵۸/۶	۲۵/۴	۱۳	۱۸۸/۵
۵	۵۶/۱	۲۰/۴۷	۷/۶۱	۱۱۶
۱۰	۵۰/۶	۲۹/۲۳	۴/۵	۸۴/۶
۱۰	۵۳/۶	۳۳	۵	۸۴/۶
۶/۲	۵۷/۸	۳۴/۳۱	۶/۷	۹۵
۶/۷	۵۶/۳	۳۲/۱۱	۴/۵	۶۳
۶/۵	۵۵/۸	۴۵	۴/۶	۵۹
۱۰/۶	۵۳/۷	۳۰/۲۸	۵/۵	۶۷
۹/۲	۵۵/۶	۲۵/۰۶	۶	۷۵
۹	۵۴/۵	۳۶/۹	۷	۸۰

فاکتور یا متغیرهای موثر بر یک فرآیند نظیر برش سنگ را مشخص و میزان تاثیر آن‌ها را مشخص نماید. کاربرد این روش‌ها را می‌توان در تعیین پارامترهای موثر بر فرآیند، تعیین شرایط بهینه، اصلاح فرآیند با توجه به نتایج حاصل از شرایط امکان‌پذیر، تعیین شرایط مقاوم و کاهش تغییرپذیری واکنش فرآیند بیان کرد.

۲- مورد مطالعاتی و سابقه تحقیق

قابلیت برش سنگ تزئینی در قالب نرخ تولید دستگاه سیم برش الماسه در عملیات برش ۱۴ نوع سنگ کربناته نرم از معادن مختلف ایران توسط عطایی و همکاران مورد مطالعه قرار گرفته است [۳]. بر مبنای نتایج آزمایشگاهی این ۱۴ نمونه و مقادیر اندازه‌گیری شده نرخ تولید این ۱۴ نمونه در معادن مختلف اقدام به ارائه مدل غیرخطی تخمین نرخ تولید صورت گرفته است. در جدول ۱ پارامترهای عملیاتی دستگاه‌های سیم‌برش مورد استفاده در معادن مختلف ارائه شده است. لازم به ذکر است که به دلیل تشابه ساختاری و عملکردی، پارامترهای مربوط به این دستگاه‌ها به صورت ثابت در نظر گرفته شده و در مدل‌سازی لحاظ نشده است.

در تحقیق مذکور پارامترهای ژئومکانیکی این سنگ‌ها شامل: مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ، مقاومت کشش برزیلی، عدد اشمیت و نتیجه آزمایش سایش لس‌آنجلس به‌منظور مدل‌سازی نرخ تولید مورد توجه قرار گرفته است. این پارامترها در جدول ۲ جمع‌بندی شده‌اند.

بر مبنای مستندات جدول ۲، عطایی و همکاران معادله رگرسیون غیر خطی رابطه‌ی (۱) را به‌منظور تخمین نرخ تولید ارائه نموده‌اند.

$$PR = \sqrt{\frac{10^{17.431} \times LA^{0.418}}{USC^{0.503} \times BTS^{0.642} \times SHv^{8.596}}} \quad (1)$$

در جدول ۲ و رابطه‌ی (۱):

LA: آزمون سایش لس‌آنجلس (بر حسب درصد)

UCS: مقاومت فشاری تک‌محوره (مگاپاسکال)

BTS: مقاومت کششی برزیلی (مگاپاسکال)

SH: عدد اشمیت

PR: نرخ برش سیم‌برش الماسه (متر مربع بر ساعت)

در ادامه تحقیق با به‌کارگیری روش سطح پاسخ اقدام به مدل‌سازی واکنش نرخ برش نسبت به عامل‌های ژئومکانیکی

۳- تخمین نرخ تولید سیم‌برش الماسه با استفاده از روش سطح پاسخ

روش سطح پاسخ^۱ (RSM) مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری و ریاضی است که برای تعیین رابطه‌ی بین پاسخ و متغیرهای مستقل استفاده می‌شود. واژه‌ی سطح پاسخ برای این متدولوژی برگرفته از شمای گرافیکی آن است [۷]. RSM در مسائلی کاربرد دارد که پاسخ مد نظر توسط چندین متغیر تحت تأثیر قرار می‌گیرد یا مکانیسم‌های دخیل در پاسخ به خوبی مشخص نشده‌اند و اطلاعات موجود در مورد سیستم بسیار کم می‌باشد یا میان متغیرها بر هم کنش وجود داشته و پاسخ غیر خطی است [۸]. رابطه‌ی کلی بین پاسخ و متغیرهای مستقل طبق رابطه (۲) قابل بیان است [۹].

$$\eta = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \varepsilon \quad (2)$$

که در رابطه‌ی بالا η پاسخ مدنظر، f تابع ناشناخته پاسخ، x_1, x_2, \dots, x_n متغیرهای مستقل، n تعداد متغیرهای مستقل و ε خطای آماری می‌باشند.

به‌طور کلی فرآیند بهینه‌سازی توسط RSM به سه مرحله قابل تقسیم است، این مراحل شامل موارد زیر است [۱۰]:

- ۱- تعیین متغیرهای مستقل و بازه‌ی تغییرات آنها.
 - ۲- توسعه و اعتبارسنجی مدل ریاضی.
 - ۳- رسم نمودارهای دو یا سه بعدی سطح پاسخ به‌صورت تابعی از پارامترهای مستقل و تعیین نقاط بهینه.
- روش سطح پاسخ علاوه بر اینکه در طراحی آزمایشات کاربرد وسیعی دارد، می‌توان از آن برای تعیین مدل ریاضی برای داده‌های تاریخی ثبت شده از چندین متغیر مستقل و وابسته استفاده کرد که از کاربردهای این روش در مطالعات اخیر می‌توان به مدل‌سازی نرخ نفوذ دستگاه تمام مقطع مکانیزه حفر تونل [۱۱] و تولید نمونه های تصادفی بدون نیاز به پارامترهای توزیع اشاره کرد [۱۲]. در این تحقیق از کاربرد اخیر روش سطح پاسخ برای مدل‌سازی و پیش‌بینی نرخ تولید سیم‌برش استفاده شده است.

با توجه به اینکه پارامترهای دخیل در مدل‌سازی ریاضی از لحاظ ابعادی و دامنه‌ی تغییرات متفاوت هستند، آنالیز رگرسیونی روی داده‌های اولیه بصورت خام قابل انجام نیست. بنابراین پیش از انجام آنالیز باید پارامترهای دخیل کدبندی

شوند. با انجام کدبندی هر پارامتر در بازه‌ی ۱ تا ۱- نگاشته شده و بدون بعد می‌گردد. به‌طور معمول برای کدبندی پارامترها از رابطه‌ی (۳) استفاده می‌شود.

$$x_{coded} = \frac{x_i - (x_{max} + x_{min})/2}{(x_{max} - x_{min})/2} \quad (3)$$

در رابطه‌ی بالا x_{coded} مقدار کدبندی شده، x_i مقدار اولیه، x_{min} حداقل مقدار و x_{max} حداکثر مقدار پارامتر مد نظر هستند. بعد از کدبندی پارامترها، تحلیل رگرسیونی انجام می‌شود. برای تعیین ضرایب مدل رگرسیون از روش حداقل مربعات خطا استفاده می‌شود، که از تکنیک‌های رگرسیون چندگانه است. با توجه به اینکه رفتار پاسخ مدل ناشناخته است؛ بایستی دقت برازش مدل مورد بررسی قرار گیرد. برای ارزیابی کفایت مدل، تکنیک‌های مختلفی وجود دارند. تعدادی از این تکنیک‌ها شامل مجموع مربع‌های خطای پیش‌بینی، آزمون ضعف برازش^۲ و ضریب تعیین^۳ (R^2) می‌باشند [۹].

در تحقیق حاضر چهار متغیر مستقل به شرح زیر در نظر گرفته شده است:

X_1 : مقاومت فشاری تک محوره (UCS)

X_2 : مقاومت کششی برزیلی (BTS)

X_3 : سایش لس آنجلس (LA)

X_4 : واجهش چکش اشمیت (SH)

متغیر وابسته یا عبارتی پاسخ مدل (Y) نیز نرخ تولید سیم‌برش (PR) لحاظ شده است. برای پیش‌بینی پاسخ مدل‌های خطی، $2f$ و درجه دوم مورد بررسی قرار گرفت که نتیجه آزمون‌های آماری برای هر مدل در جدول ۳ جمع‌بندی شده است. آنالیز و تحلیل‌های مربوط به روش سطح پاسخ توسط نرم افزار Design-Expert 10.0.4 انجام گردیده است.

جدول ۳- آنالیز دقت مدل‌های مختلف در تعیین پاسخ مورد بررسی

Table 3- Analyzing the accuracy of different models in determining of the response

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات
میانگین	۶۳۲/۴۹	۱	۶۳۲/۴۹
خطی	۸۰/۱۶	۴	۲۰/۰۴
2f	۱۱/۷۱	۶	۱/۹۵
درجه دوم	۱/۲۵	۳	۰/۴۲
باقیمانده	صفر	صفر	
کل	۷۲۵/۶۱	۱۴	۵۱/۸۳

^۲ Coefficient of determination

^۱ Response Surface Method

^۲ Lack of fit

جدول ۴- آنالیز واریانس مدل درجه دوم مبتنی بر سطح پاسخ

Table 4 -ANOVA for RSM-based second-order quadratic model

p-value	F Value	Mean Square	df	Sum of Squares	Source
۰/۰۱۶۴	۲۲۸۲/۹۴	۷/۷۶	۱۲	۹۳/۱۲	Model
۰/۰۶۰۴	۱۱۰/۲۵	۰/۳۷	۱	۰/۳۷	X_1
۰/۰۴۱۷	۲۳۲/۵۹	۰/۷۹	۱	۰/۷۹	X_2
۰/۰۲۹۹	۴۵۴/۰۲	۱/۵۴	۱	۱/۵۴	X_3
۰/۰۵۸۸	۱۱۶/۴۵	۰/۴۰	۱	۰/۴۰	X_4
۰/۰۵۶۱	۱۲۸/۳۳	۰/۴۴	۱	۰/۴۴	$X_1 X_2$
۰/۰۲۰۹	۹۲۴/۵۸	۳/۱۴	۱	۳/۱۴	$X_1 X_3$
۰/۰۶۱۴	۱۰۶/۹۷	۰/۳۶	۱	۰/۳۶	$X_1 X_4$
۰/۰۲۹۱	۴۷۸/۴۹	۱/۶۳	۱	۱/۶۳	$X_2 X_3$
۰/۰۹۱۶	۴۷/۵۹	۰/۱۶	۱	۰/۱۶	$X_2 X_4$
۰/۰۲۷۳	۵۴۲/۸۷	۱/۸۵	۱	۱/۸۵	$X_3 X_4$
۰/۰۵۳۹	۱۳۹/۰۹	۰/۴۷	۱	۰/۴۷	X_1^2
۰/۰۶۸۵	۸۵/۷۹	۰/۲۹	۱	۰/۲۹	X_2^2
		$۳/۳۹ \times 10^{-1}$	۱	$۳/۳۹ \times 10^{-1}$	Residual
			۱۳	۹۳/۱۲	Cor Total

برای بررسی کفایت مدل پاسخ از تعدادی مشخصه آماری استفاده می‌شود که برخی از آنها برای مدل نهایی پاسخ در جدول ۵ ارائه شده است. با توجه به جدول ۵، مقدار انحراف استاندارد خطای بسیار کوچک (۰/۰۵۸) بیانگر دقت بسیار بالای مدل تخمین است. هرچه مقدار ضریب تعیین یا ضریب رگرسیون (R^2) به ۱ نزدیکتر باشد، ارتباط بهتری بین داده‌های ثبت شده و محاسبه شده از مدل وجود دارد، که این مقدار برای مدل پاسخ بسط یافته دقیقاً برابر ۱ است. ضریب تعیین تعدیل شده (R_{Adj}^2) حاصل از تأثیر واقعی متغیرهای مستقل بر مدل پاسخ است و هرچه تفاوت میان R^2 و R_{Adj}^2 کمتر باشد، مؤید انتخاب صحیح متغیرهای مستقل است. در مدل پاسخ بسط یافته اختلاف این دو کمیت آماری بسیار ناچیز می‌باشد. در نهایت کفایت دقت نسبت سیگنال به نویز را اندازه‌گیری می‌کند که نسبت بزرگتر از ۴ قابل قبول است. برای مدل بسط یافته، نسبت سیگنال به نویز

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۳ مدل درجه دوم برای پیش‌بینی پاسخ در نظر گرفته شد که حالت کلی آن به صورت رابطه (۴) قابل بیان است.

$$y = (b_0 + \varepsilon) + \sum_{i=1}^4 b_i x_i + \sum_{i=1}^4 b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=i+1}^4 b_{ij} x_i x_j \quad (4)$$

که در رابطه بالا b_0 عرض از مبدا مدل، ε خطای استاندارد، b_i ضرایب مدل پاسخ، x_i عبارات خطی برای هر متغیر، x_i^2 عبارات مرتبه دوم هر متغیر و $x_i x_j$ عبارات مرتبه اول اندرکنش هر جفت از متغیرها می‌باشند.

در تعیین مدل نهایی پاسخ (معادله (۴)) عبارات کم اهمیت با توجه به معیار $p\text{-value} > 0.1$ از رابطه درجه دوم حذف شده‌اند. نتایج آنالیز واریانس^۱ (ANOVA) برای پاسخ مدنظر (نرخ تولید) در جدول ۴ خلاصه شده است.

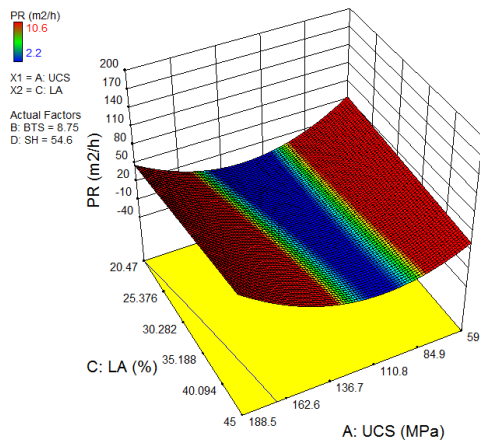
با توجه نتایج ANOVA مقدار F-value مدل برابر با ۲۲۸۲/۹۴ است که این مؤید معنی‌داری مدل می‌باشد و تنها ۱/۶۴ درصد شانس وجود دارد که مقدار F ناشی از نویز^۲ باشد. در مدل ارائه شده عباراتی که $p\text{-value}$ کوچکتر از ۰/۰۵ دارند، در تعیین پاسخ با اهمیت هستند، بنابراین عبارات X_2 (BTS)، $X_3 X_4$ (LA×SH)، $X_1 X_3$ (LA×UCS)، $X_2 X_3$ (UCS×LA) و $X_3 X_4$ (LA×SH) میان متغیرهای مستقل، متغیر X_3 یا عبارتی سایش لس آنجلس حائز اهمیت است.

مدل پاسخ حاصل رگرسیون براساس پارامترهای کدبندی شده و حقیقی (خام) به ترتیب طبق معادله‌های (۵) و (۶) بیان می‌شوند که در آنها نرخ تولید سیم‌برش به عنوان تابعی از متغیرهای مستقل است.

$$Y = 1.2621 + 11.0166X_1 - 22.7820X_2 + 3.3646X_3 + 5.3948X_4 - 83.4200X_1X_2 + 14.7338X_1X_3 + 7.5443X_1X_4 - 11.9455X_2X_3 + 3.0570X_2X_4 - 6.6378X_3X_4 + 55.6141X_1^2 + 24.2271X_2^2 \quad (5)$$

$$PR = -27.5032 - 2.6582UCS + 6.3636BTS + 7.3710LA + 0.5996SH - 0.3031UCS \cdot BTS + 0.0185UCS \cdot LA + 0.0291UCS \cdot SH - 0.2292BTS \cdot LA + 0.1798BTS \cdot SH - 0.1353LA \cdot SH + 0.0133USC^2 + 1.3413BTS^2 \quad (6)$$

^۲ noise^۱ Analysis of variance



شکل ۲- اثر UCS و LA بر نرخ تولید سیمبرش

Fig 1- Effect of UCS and LA on wire saw machine production rate

۴- تخمین نرخ تولید سیمبرش الماسه با استفاده از روش سطح پاسخ

مقادیر اندازه‌گیری شده نرخ تولید سیمبرش الماسه (پاسخ) و مقادیر پیش‌بینی شده پاسخ توسط مدل عطایی و همکاران و مقادیر پاسخ پیش‌بینی شده با مدل ارائه شده در این تحقیق در جدول ۶ ارائه شده است. در ادامه این بخش از تحقیق، کارایی مدل‌های پیشنهادی با استفاده از روش‌های مقایسه‌ای گرافیکی و کمی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در روش گرافیکی از نمودار تخمین - مقدار واقعی به منظور بررسی دقت تخمین‌ها استفاده می‌شود. در این روش مقادیر تخمین زده شده‌ی نرخ تولید توسط هر یک از مدل‌ها در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی آن ترسیم می‌شود. نتایج حاصل از این آزمون برای هر یک از مدل‌های مورد مطالعه در شکل‌های ۳ و ۴ نمایش داده شده است.

به هر مقدار که ضریب تعیین (R^2) به عدد یک نزدیکتر باشد، دقت تخمین نرخ تولید توسط مدل بهتر خواهد بود. همان‌گونه که از شکل‌های ۳ و ۴ مشخص است، از میان مدل‌های بررسی شده، مدل ارائه شده به روش سطح پاسخ با ضریب تعیین ۱ بهترین عمل کرد را در رابطه با تخمین دارد. در ادامه تحقیق جزئیات این برتری با مبنای قرار دادن برخی از مهمترین شاخص‌های آماری تخمین در قالب کمی بیان خواهد شد.

در متون فنی برای مقایسه میزان برازندگی تخمین‌های صورت گرفته تعدادی شاخص و آزمون آماری پیشنهاد شده است،

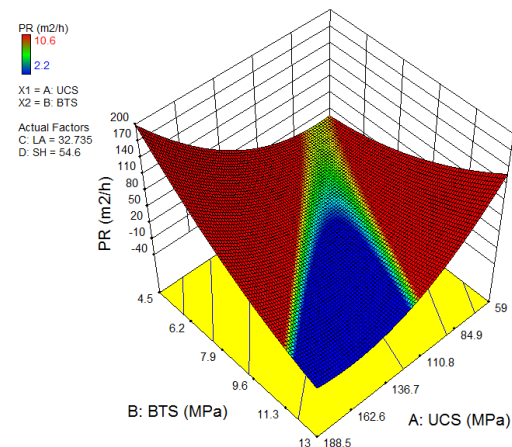
برابر با ۱۴۹/۲۶۱ است که نشان دهنده بالا بودن مقدار سیگنال نسبت به نویز می‌باشد.

جدول ۵- مشخصات آماری مدل پاسخ

Table 5- Statistical indicators of the response model

مقدار	مشخصه آماری
۰/۰۵۸	انحراف استاندارد خطا
۶/۷۲	میانگین (m^2/h)
۰/۸۷	ضریب تغییرات (%)
۱۵۰/۰۴	مجموع مربع‌های باقیمانده پیش‌بینی شده ^۱
۱	ضریب تعیین (R^2)
۰/۹۹۹۵	ضریب تعیین تعدیل شده (R_{Adj}^2)
۱۴۹/۲۶۱	کفایت دقت ^۲

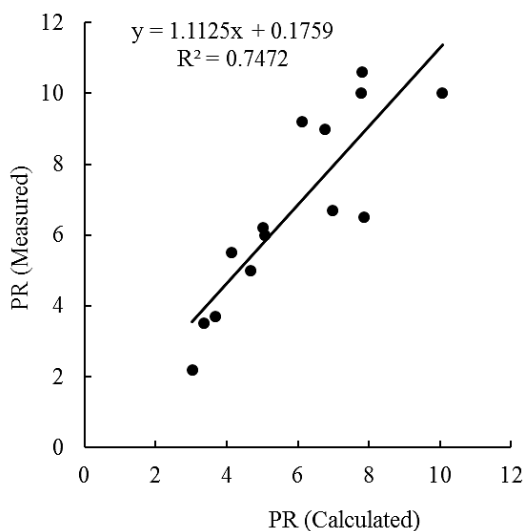
در ادامه تحقیق اثرهای چهار متغیر مستقل در نظر گرفته شده بر نرخ تولید سیمبرش در قالب طرح‌های گرافیکی سطح پاسخ و نمودار کانتور بررسی شد که نتایج آن برای دو اندرکنشی که بیشترین ضریب را در معادله (۵) دارند (X_1X_2 و X_1X_3) یا عبارتی تغییرات آنها بیشترین تاثیر را در پاسخ در پی خواهد داشت، در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده‌اند. در هر کدام از این تصاویر، نمودار سطح پاسخ به عنوان تابعی از دو پارامتر رسم شده و پارامترهای دیگر ثابت در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۱- اثر UCS و BTS بر نرخ تولید سیمبرش

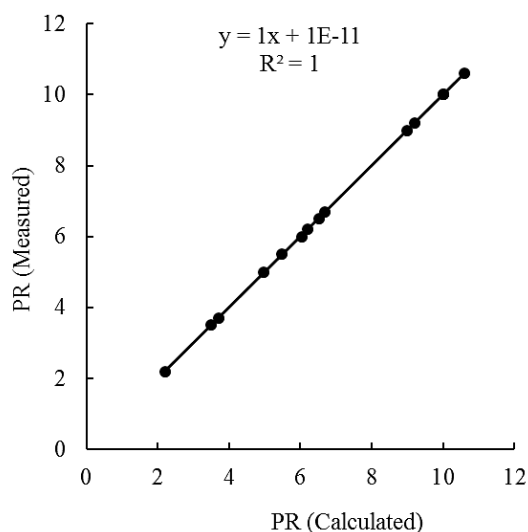
Fig 1- Effect of UCS and BTS on wire saw machine production rate

^۲ Adequate precision^۱ Predicted Residual Sum of Squares



شکل ۳- نمودار تخمین - اندازه گیری شده حاصل از مدل عطایی و همکاران

Fig 3-Correlation of predicted and actual value from Ataie et al. model



شکل ۴- نمودار تخمین - اندازه گیری شده حاصل از مدل سطح پاسخ

Fig 4- Correlation of predicted and actual value from response surface model.

که آزمون‌های مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۷ جمع‌بندی شده‌اند. معادلات ریاضی مربوط به هر یک از این شاخص‌ها بصورت جداگانه معرفی و توضیحات لازم به منظور تفسیر راحتتر ذکر شده است. در معادلات ارائه شده برای آزمون‌های آماری، PR_{Meas} و PR_{Esti} به ترتیب برابر با مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده‌ی نرخ تولید می‌باشند.

بر مبنای شاخص‌های قید شده در جدول ۷ تمامی مدل‌های تخمین نیروی برش مورد ارزیابی قرار گرفتند، که نتیجه آن در جدول ۸ ارائه شده است. با توجه به مقادیر حاصله از آزمون‌های آماری (جدول ۸) مدل مبتنی بر روش سطح پاسخ (رابطه‌ی ۶) در تمامی ارزیابی‌ها بهترین مقدار را دارا بوده و لذا عمل کرد مناسب‌تر آن در مقایسه با مدل پیشنهادی عطایی و همکاران تأیید می‌شود.

جدول ۶- مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمینی توسط مدل‌های مختلف

Table 6-Predicted and actual values by different models

PR اندازه گیری شده	PR تخمینی توسط عطایی و همکاران	PR تخمینی در پژوهش حاضر
۶	۵/۰۶۳	۶/۰۴۱
۵/۵	۴/۱۲۹	۵/۴۸۵
۳/۵	۳/۳۶۵	۳/۴۹۴
۳/۷	۳/۶۷۱	۳/۷۰۸
۲/۲	۳/۰۲۶	۲/۲۰۴
۵	۴/۶۸۱	۴/۹۷۷
۱۰	۱۰/۰۶۹	۱۰/۰۰۰
۱۰	۷/۷۹۵	۱۰/۰۰۱
۶/۲	۵/۰۲۴	۶/۲۰۱
۶/۷	۶/۹۹۰	۶/۶۷۷
۶/۵	۷/۸۶۸	۶/۵۱۲
۱۰/۶	۷/۸۱۱	۱۰/۵۹۰
۹/۲	۶/۱۱۲	۹/۲۱۰
۹	۶/۷۶۲	۹/۰۰۰

جدول ۷- آزمون‌های آماری مورد استفاده برای مقایسه میزان برازندگی تخمین

Table 7- Statistical criteria for controlling the performance of the estimator models

توضیحات	معادله	پارامتر آماری
مقدار بزرگتر بهتر است.	$CC = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \left[(PR_{Meas}^i - \overline{PR}_{Meas}^i) (PR_{Esti}^i - \overline{PR}_{Esti}^i) \right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (PR_{Meas}^i - \overline{PR}_{Meas}^i)^2 \times \sum_{i=1}^{i=n} (PR_{Esti}^i - \overline{PR}_{Esti}^i)^2}}$	ضریب همبستگی ^۱ (CC)
مقدار کوچکتر بهتر است.	$MAPE = \frac{1}{n} \times \left[\sum_{i=1}^{i=n} \left \frac{PR_{Meas}^i - PR_{Esti}^i}{PR_{Meas}^i} \right \right] \times 100$	میانگین درصد قدرمطلق خطا ^۲ (MAPE)
مقدار کوچکتر بهتر است.	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^{i=n} (PR_{Meas}^i - PR_{Esti}^i)^2}$	مجدور میانگین مربعات خطا ^۳ (RMSE)
مقدار کوچکتر بهتر است.	$VARE = \text{var} \left(\left \frac{PR_{Meas} - PR_{Esti}}{PR_{Meas}} \right \right) \times 100$	واریانس قدرمطلق خطای نسبی ^۴ (VARE)
مقدار کوچکتر بهتر است.	$MEDAE = \text{median} \left(\left \frac{PR_{Meas} - PR_{Esti}}{PR_{Meas}} \right \right)$	میانه قدرمطلق خطای نسبی ^۵ (MEDAE)
مقدار بزرگتر بهتر است.	$VAF = \left[1 - \frac{\text{var}(PR_{Meas} - PR_{Esti})}{\text{var}(PR_{Meas})} \right] \times 100$	به حساب واریانس ^۶ (VAF)

جدول ۸- مقادیر آزمون‌های آماری برای مدل‌های مختلف تخمین

Table 8- The value of statistical criteria for the predictive models

نام مدل تخمین	CC	MAPE (%)	RMSE	MEDAE	VARE	VAF (%)
مدل پیشنهادی عطایی و همکاران	۰/۸۷۸	۱۷/۲۰۹	۱/۵۶۰	۰/۲	۱/۳۷۸	۷۳/۹۵۵
مدل پیشنهادی بر مبنای سطح پاسخ	۱	۰/۱۹۶	۰/۰۱۶	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰	۹۹/۹۹۶

۵- نتیجه‌گیری

همچنین مطابق بررسی‌ها شاخص سایش‌پذیری مبتنی بر آزمایش سایش لس‌آنجلس بیشترین اثرگذاری را بر میزان نرخ تولید داشته است. با توجه به تایید کارکرد روش سطح پاسخ در مطالعه صورت گرفته، فرآیند مدل‌سازی طی شده به‌منظور کاربرد در مطالعات مرتبط آتی توصیه می‌شود. بر این مبنا توسعه‌ی بانک داده و اعمال سایر پارامترهای دخیل در برش انواع سنگ‌های تزئینی نظیر خصوصیات ساختی و بافتی مربوط به معادن مختلف توصیه می‌شود.

در مطالعه‌ی حاضر برای ۱۴ نوع سنگ نرم کربناته، رابطه‌ی غیرخطی پیش‌بینی نرخ تولید سیم‌الماسه بر مبنای پارامترهای ژئومکانیکی سنگ، ارائه شده و میزان اثرگذاری هر کدام از پارامترها بر میزان نرخ برش با استفاده از روش طراحی آزمایش سطح پاسخ تعیین شده است. با استناد به شاخص‌های آماری، مدل غیرخطی پیشنهادی درجه دوم با ضریب همبستگی یک، میانگین درصد قدرمطلق خطا ۰/۱۹۶ درصد و واریانس قدرمطلق خطای نسبی صفر بهترین دقت را دارا می‌باشد؛

^۱ Correlation Coefficient

^۲ Mean absolute percentage error

^۳ Route Mean Square Error

^۴ Variance Absolute Relative Error

^۵ Median absolute error

^۶ Variance account for

۶- تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان بیان نشد.

۷- قدردانی

از داوران محترم برای نظرهای دقیق و بازخوردهای سازنده‌ای که به بهبود و ارتقاء کیفی این مقاله کمک شایانی کردند، صمیمانه تشکر میکنیم. همچنین از سردبیر محترم به خاطر حمایت‌ها و راهنمایی‌های مفیدی که در طول فرایند بازبینی انجام دادند، سپاسگزاریم.

۸- منابع

- analysis, *Geosystem Engineering*. 16(4): p. 275-285.
- [6] Ozcelik, Y.; 1999; Investigation of the working conditions of diamond wire cutting machines in marble industry. PhD Thesis, Hacettepe University, Ankara (in Turkish).
- [7] Farooq Anjum, M., I. Tasadduq, and K. Al-Sultan (1997). Response surface methodology: A neural network approach, *European Journal of Operational Research*. 101(1): p. 65-73.
- [8] Kwak, J.-S. (2005). Application of Taguchi and response surface methodologies for geometric error in surface grinding process, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 45(3): p. 327-334.
- [9] Baş, D. and İ.H. Boyacı (2007). Modeling and optimization I: Usability of response surface methodology, *Journal of Food Engineering*. 78(3): p. 836-845.
- [۱۰] مردعلی زاده، م.، سلیمانی یزدی و م. صفرخانیان (۲۰۱۴). مدلسازی تجربی و بررسی تاثیر پارامترهای فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی آلیاژ آلومینیوم ۵۴۵۶ با استفاده از روش سطح پاسخ، مدل سازی در مهندسی. ۱۲(۳۸): ۱۰۳-۱۱۶
- [۱۱] مختاریان اصل، م. و ع. علی پور (۲۰۱۸). مدل سازی نرخ نفوذ دستگاه تمام مقطع مکانیزه حفر تونل به روش سطح پاسخ، مدل سازی در مهندسی. ۱۶(۵۵): ۲۴-۳۰
- [۱۲] نیکوئی ماهانی، م.، ا. محمودزاد، و م. امامقلی بابادی (۲۰۱۸). تولید نمونه های تصادفی بدون نیاز به پارامترهای توزیع با استفاده از روش سطح پاسخ، مدل سازی در مهندسی. ۱۶(۵۴): ۱۰-۲۰
- [1] Jain, S. and S. Rathore (2009). *Role of cut size area on the performance of diamond wire saw machine in quarrying of marble*, *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 23(2): p. 79-91.
- [2] Jain, S. and S. Rathore (2011). *Prediction of cutting performance of diamond wire saw machine in quarrying of marble: a neural network approach*, *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 44(3): p. 367-371.
- [3] Ataei, M., et al. (2012). *Predicting the production rate of diamond wire saw using statistical analysis*, *Arabian Journal of Geosciences*. 5(6): p. 1289-1295.
- [4] Yılmaz, N.G., R. Goktan, and Y. Kibici (2011). An investigation of the petrographic and physico-mechanical properties of true granites influencing diamond tool wear performance, and development of a new wear index, *Wear*. 271(5): p. 960-969.
- [5] Sadegheslam, G., et al. (2013). Predicting the production rate of diamond wire saws using multiple nonlinear regression