



Investigation and Sensitivity Analysis of the Effect of Different Parameters on Tool Wear During Dry Turning Process of Aluminum Matrix Composites Using E-Fast Method

Ahmad Homayooni ^{a*}, Hamed Faraji ^b, Ali Farahani ^b, Nima Rahmani ^b

^a Department of Mechanical Engineering, Mechanical Engineering Faculty, Arak University of Technology, Arak, Iran

^b Department of Manufacturing Engineering, Arak University, Arak, Iran

Original Article

Use your device to scan and read the article online



Citation: Homayooni A, Faraji H, Farahani A, Rahmani N. Investigation and Sensitivity Analysis of the Effect of Different Parameters on Tool Wear During Dry Turning Process of Aluminum Matrix Composites Using E-Fast Method. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2024;4(2):308-327.

 <https://10.61186/masm.4.2.308>

KEYWORDS

Sensitivity analysis of aluminum matrix composite, Tool wear, Turning, E-Fast.

ABSTRACT

The use of metal-based composite materials, especially aluminum composites, has found wide applications in various industries such as automotive, aerospace, military, etc., due to their favorable mechanical properties, high strength-to-weight ratio, and high wear resistance and hardness. On the other hand, these mechanical properties and high hardness and wear resistance, which is due to the presence of reinforcing particles such as silicon carbide in these composites, makes them difficult to machine, so that only special tools and blades, such as polycrystalline diamond tools, can machine these composites optimally. The findings from this study can be valuable in optimizing the turning process of aluminum-based metal matrix composites.

In this study, the effects of four input parameters - cutting speed, feed rate, feed force in the X direction, and feed force in the Z direction - on the output parameter of tool wear rate in the dry turning process of A359 aluminum alloy metal matrix composite reinforced with 20 vol.% of silicon carbide particles using polycrystalline diamond tools were investigated.

The numerical investigation of the effect of each of the four input parameters on the output parameter was done using the E-fast statistical sensitivity analysis method, which has high speed in quantitative and qualitative data analysis. The results showed that the parameters of feed force in X direction, feed rate, feed force in Z direction, and cutting speed have 88%, 8%, 3%, and 1% effect on tool wear, respectively.

Extended Abstract

1. Introduction

Metal matrix composites (MMCs) have gained significant attention in various industries, particularly in automotive and aerospace applications, due to their desirable mechanical properties. Among the most popular MMCs are aluminum alloy composites reinforced with ceramic particles, which offer advantages such as lower cost, higher strength, hardness, and fatigue resistance [1, 2]. However, machining these composites is more challenging due to their improved mechanical properties. Consequently, only polycrystalline diamond (PCD) tools are cost-effective for machining these composites [3]. However, due to the high cost of these tools, proper tool condition monitoring is crucial to determine the optimum tool replacement time. For tool

* Corresponding author. Tel.: +989129310395

E-mail address: homayooni@arakut.ac.ir

DOI: <https://10.61186/masm.4.2.308>

Received: June 27, 2024; Received in revised form: July 13, 2024; Accepted: August 04, 2024.

© Author



condition monitoring, two methods, direct and indirect, are commonly employed [4]. Direct methods measure tool wear directly (e.g. by measuring the distance between the tool tip and the workpiece). Due to continuous tool-workpiece contact, wear measurement is challenging and sometimes nearly impossible due to the presence of coolant. In indirect methods, tool wear is estimated by measuring and processing various signals such as force, temperature, tool vibration, etc. [4]. The authors reviewed various studies that investigated tool wear in machining MMCs using different methods, including multiple regression analysis (MRA), generalized radial basis function neural network (GRBF), neuro-fuzzy systems, multi-layer perceptron (MLP) neural network, and fuzzy-neural inference systems. The results of these studies indicate that indirect methods, particularly those based on neural networks, are more effective and accurate in predicting tool wear compared to direct methods. Additionally, the feed force was found to be a more reliable indicator of tool wear compared to the cutting force [5, 6]. The authors also discussed the importance of selecting appropriate activation functions and the number of neurons in the hidden layer of neural networks for achieving optimal performance in tool wear prediction [7]. Other studies demonstrate the potential of various methods, including ANNs, FEA, and regression analysis, for predicting machining process outputs such as residual stress, wear, surface roughness, and cutting force. The findings highlight the importance of identifying the key machining parameters influencing these outputs for different material combinations. Further research could explore more advanced machine learning techniques and investigate the effect of additional machining parameters on process outputs [8-11].

The study presents several examples of successful wear prediction using ML and statistical methods. Warsh Kumar et al. [12] developed an ANN model to predict the wear behavior of aluminum matrix composites reinforced with TiO₂ particles. The model demonstrated good accuracy in capturing the influence of sliding distance, reinforcement weight percentage, and applied load on wear depth. In another study, Taheri and Faraji [13] employed Sobel's global sensitivity analysis to investigate the effect of various parameters on wear and dimensional deviation in wire electrical discharge machining (WEDM). The results revealed that pulse off-time, pulse on-time, servo gap voltage, wire tension, and peak current were the most significant factors influencing wear and dimensional deviation, respectively. Tahmasebi et al. [14] combined statistical and experimental methods to study the effect of spindle speed, feed rate, depth of cut, and reinforcement particle percentage on surface roughness and material removal rate (MRR) in aluminum composite milling. The authors employed response surface methodology, Sobel's global sensitivity analysis, and the Derringer desirability function optimization algorithm to analyze the data. Spindle speed was found to have the most significant impact on surface roughness, followed by feed rate, depth of cut, and reinforcement particle percentage. Feed rate, spindle speed, depth of cut, and reinforcement particle percentage, in that order, had the most pronounced effect on MRR. Das et al. [15] investigated the wear of cutting tools and cutting force components during dry turning of Al7075 composite reinforced with 15 wt% SiC particles. The authors fabricated the composite using vortex stir casting and T6 heat treatment, and employed regression analysis based on the analysis of variance (ANOVA) to model the relationships between tool wear, cutting parameters, and cutting forces. The results showed that tool wear increased with increasing cutting speed, feed rate, and depth of cut, with cutting speed being the most influential factor. Zare Chavoshi [16] studied the effect of cutting parameters on the wear of tungsten carbide and polycrystalline diamond (PCD) tools in CNC turning of Al7075 composite reinforced with 10 wt% SiC particles. The author developed two models, an ANN and a combined ANN and fuzzy inference system (CANFIS), to predict tool wear. The ANN model demonstrated superior performance, with average relative prediction errors of 1.03% and 1.7% for tungsten carbide and PCD tools, respectively. Fuzzy logic systems (FLS) can be used to predict optimal cutting parameters (speed, feed rate, depth of cut) for achieving a desired surface finish while minimizing tool wear. Elsaddig et al. [17] developed an FLS with 90% accuracy for surface roughness and 80% accuracy for tool wear prediction in turning aluminum nanocomposites. Regression analysis can be used to model the relationship between machining parameters and process outputs like tool wear and surface roughness. Prakash et al. [18] used this technique to predict tool wear behavior in machining aluminum composites reinforced with silicon carbide particles. Geometric models can be used to predict tool wear based on tool properties and machining conditions. Lo and Zhang [19] developed a model for predicting tool wear rate in machining aluminum composites with polycrystalline diamond tools. Their model considers factors like tool rake angle and grain size but not the tool nose radius.

This study delves into the impact of cutting parameters on tool wear during dry turning of aluminum matrix composites (AMCs) by employing E-FAST statistical sensitivity analysis. The investigation utilizes an A359 aluminum alloy reinforced with 20% SiC particles and polycrystalline diamond (PCD) cutting tools. The four input parameters considered are cutting speed, feed rate, and feed force in X-direction, and feed force in Z-direction. The output parameter is tool wear.

2. Modeling

Aluminum matrix composites (AMCs) are widely employed in various industries due to their superior properties, including high strength, hardness, fatigue resistance, and wear resistance. Consequently, analyzing the impact of machining process parameters on these composites is crucial. This study delves into the effect of input parameters: cutting speed, feed force in X-direction, feed force in Z-direction, and feed rate on the output parameter, tool wear (TW), using E-Fast statistical sensitivity analysis. The objective is to identify the parameter with the most significant impact on TW. The machining process employed in this study is dry turning without any coolant. The cutting tools are polycrystalline diamond (PCD) of the TPG322 COMPAX 1500 grade. The workpiece composite is A359 aluminum alloy reinforced with 20% SiC particles of average diameter 8/12 micrometers, produced by Ingot Metallurgy. The feed forces in X and Z directions were monitored using a 3D piezoelectric force dynamometer. The ranges of the input parameters are: cutting speed 300-700 m/min, feed rate 0.1-0.4 mm/rev, and feed forces in X and Z directions between 20-100 N.

2.1 Sensitivity Analysis:

Variance-based methods are widely used in sensitivity analysis. These methods calculate the sensitivity index (SI) as the contribution of each parameter to the overall output variance. Sensitivity analysis is typically conducted in four steps:

1. Define input parameters and their distribution types
2. Generate samples for input values
3. Calculate model output for each set of input samples
4. Determine the effect of each input parameter on the output

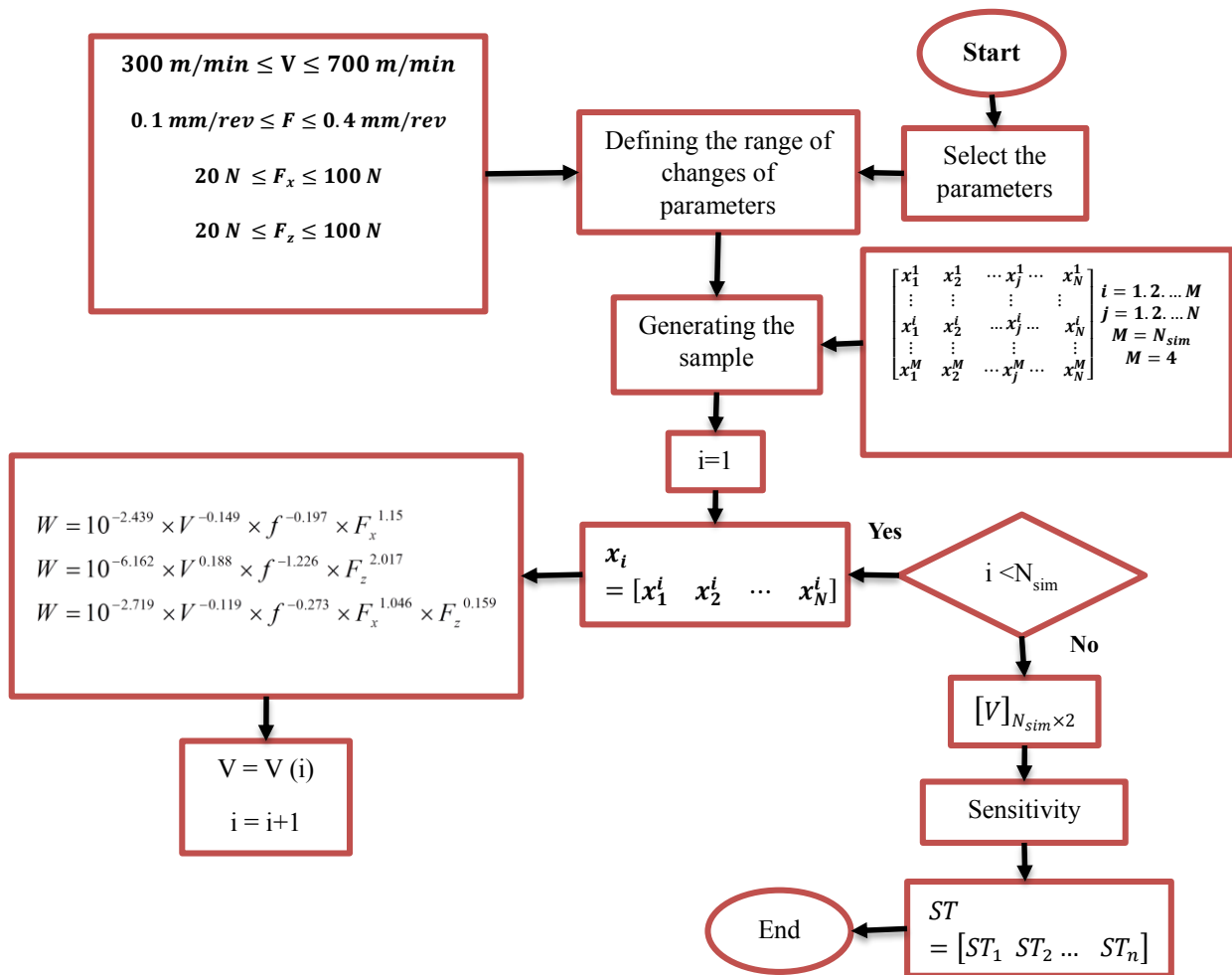


Figure 1. General algorithm of sensitivity analysis

2.2 E-FAST Method

E-FAST is a statistical sensitivity analysis method that is faster than Sobol but less accurate. It is based on variance and independent of any assumptions of linearity or uniformity between input and output parameters. This

method transforms multidimensional integrals into one-dimensional integrals by defining a transfer function, simplifying the calculation of sensitivity indices [21, 22].

To employ E-FAST, the input parameter x_i is defined in Equation 1.

$$x_i = G_i(\sin(\omega_i s + \varphi_i)) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \sin^{-1}(\sin(\omega_i s + \varphi_i)) \quad (1)$$

Where the frequency associated with x_i is defined as ω_i and φ_i as the starting point of the curve. S is also a variable in the interval $-\pi$ to π .

$$F = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f^2(s) ds - \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(s) ds \right]^2 \approx \sum_{j=-\infty}^{\infty} (A_j^2 + B_j^2) - (A_0^2 + B_0^2) \approx 2 \sum_{j=1}^N (A_j^2 + B_j^2) \quad (2)$$

The represent transfer functions, G_1 , G_2 and G_n represent Fourier coefficients. Additionally, is introduced as in Equation 3:

$$f(s) = f(G_1(\sin \omega_1(s)), G_2(\sin \omega_2(s)), \dots, G_n(\sin \omega_n(s))) \quad (3)$$

Finally, the partial variance is obtained from Equation 4:

$$F_i = \sum_{p \in Z^0} (A_{p\omega_i}^2 + B_{p\omega_i}^2) = 2 \sum_{p=1}^{\infty} (A_{p\omega_i}^2 + B_{p\omega_i}^2) \quad (4)$$

3. Results

In this section, we further explore the initial conditions for self-walking by linearizing the system's equations around its equilibrium state. By considering the state variables immediately after contact with the inclined plane and the state variables at the beginning of a new step, we combine these relations to establish an eigenvalue problem. This problem helps determine the stability of the robot's locomotion. We depict the relationship between the generalized coordinates at the end of the old step and the beginning of the new step.

3.1 Effect of Cutting Parameters on Tool Wear

3.1.1 Cutting Speed

The effect of cutting speed on tool wear is analyzed in Figure 2. The results indicate that cutting speed has a minimal impact on tool wear. This suggests that the range of cutting speeds employed in this study does not significantly influence tool wear.

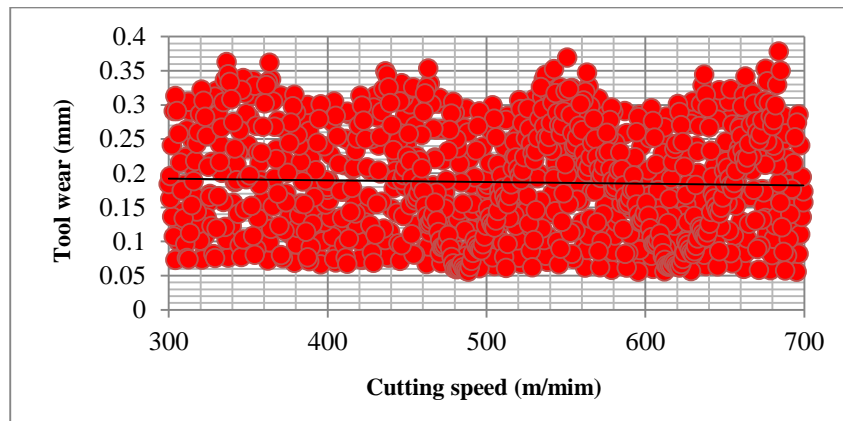


Figure 2. The effect of cutting speed on the amount of tool wear

3.1.2 Feed Rate

Figure 3 presents the effect of feed rate on tool wear. The results show that increasing feed rate generally leads to a slight decrease in tool wear. This reduction in tool wear can be attributed to the increased heat transferred from the cutting zone to the workpiece. The workpiece softens, causing the SiC reinforcement particles to be embedded in the workpiece or pushed forward on the machined surface, thereby reducing tool wear.

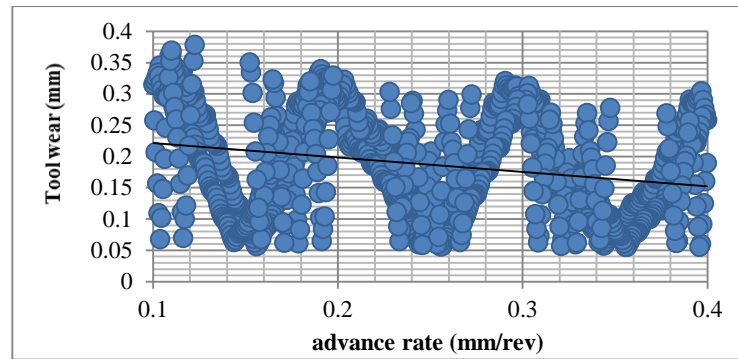


Figure 3. Effect of advance rate on tool wear rate

3.1.3 Feed Force in X-direction:

Figure 4 illustrates the effect of feed force in X-direction on tool wear. The results clearly demonstrate that increasing feed force in X-direction leads to a significant increase in tool wear compared to the other parameters. This can be explained by the increased irregular impacts of high-speed SiC reinforcement particles on the tool surface as feed force in X-direction increases. The substantial increase in tool wear due to changes in feed force in X-direction compared to feed force in Z-direction can be attributed to the larger tool movement range in X-direction (tangential to the workpiece surface) and the resulting higher number of collisions with SiC reinforcement particles compared to the smaller tool movement range in Z-direction (perpendicular to the workpiece) and the resulting lower number of collisions with reinforcement particles.

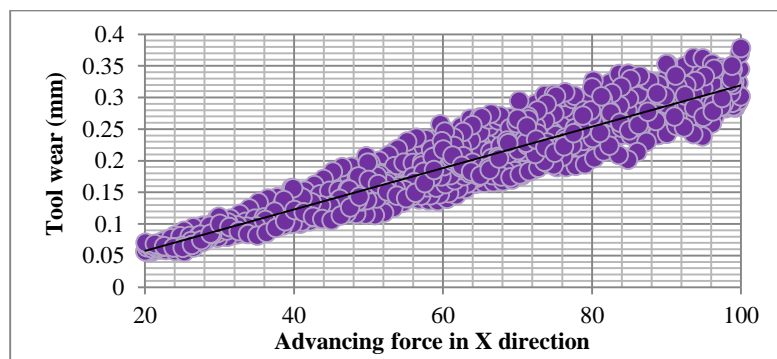


Figure 4. The effect of advancing force in the X direction on the amount of tool wear

3.1.4 Feed Force in Z-direction:

Figure 5 shows the effect of feed force in Z-direction on tool wear. The results indicate that increasing feed force in Z-direction leads to a slight increase in tool wear. This increase in tool wear due to changes in feed force in Z-direction is attributed to the increased irregular impacts of high-speed SiC reinforcement particles on the tool surface. The smaller impact of this parameter (feed force in Z-direction) on tool wear compared to feed force in X-direction is due to the smaller tool movement range in Z-direction (perpendicular to the workpiece) compared to the tool movement range in X-direction (tangential to the workpiece) and the resulting lower number of collisions between the tool surface and SiC reinforcement particles.

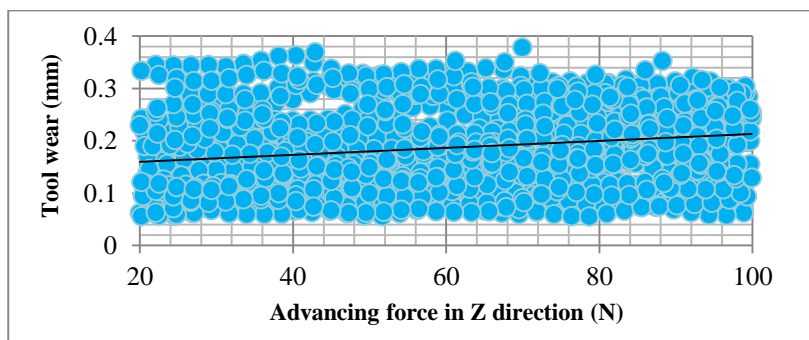


Figure 5. The effect of advancing force in the Z direction on the amount of tool wear

3.1.5 Application to Dry Turning of AMCs:

The E-FAST method was applied to investigate the influence of cutting parameters on tool wear in dry turning of AMCs. The results revealed that feed force in X-direction is the most significant factor affecting tool wear, followed by feed rate, feed force in Z-direction, and cutting speed. This information can be utilized to optimize machining conditions and minimize tool wear, leading to improved machining performance and product quality.

3.2 Quantitative Comparison of Input Parameter Effects:

Figure 6 illustrates the quantitative comparison of the impact of input parameters on tool wear. The results reveal that feed force in X-direction is the most influential parameter, accounting for 88% of the total effect on tool wear. Feed rate, feed force in Z-direction, and cutting speed follow with contributions of 8%, 3%, and 1%, respectively.

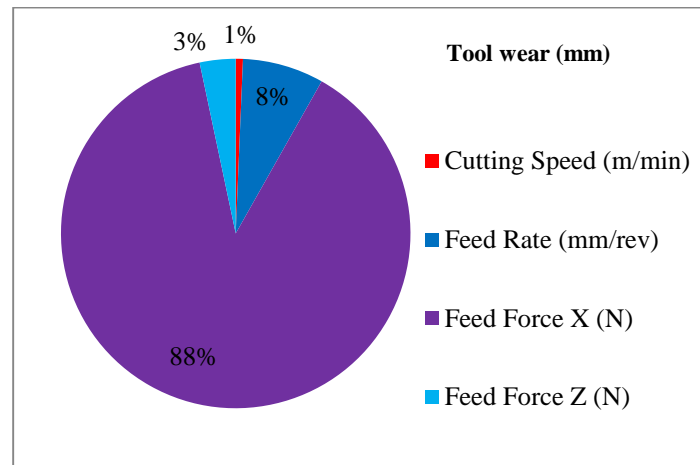


Figure 6. Quantitative comparison of the effect of input parameters on tool wear

4. Conclusion

Sensitivity analysis provides a powerful tool for understanding the relationship between output parameters and their corresponding input parameters. It enables the quantification and qualification of the influence of input parameters, facilitating the identification of critical parameters for optimization and the elimination of insignificant parameters for model simplification.

In this study, E-FAST statistical sensitivity analysis, a computationally efficient method, was employed to investigate the effect of four input parameters: cutting speed, feed rate, feed force in X-direction, and feed force in Z-direction, on the output parameter, tool wear.

The results demonstrate that tool wear can be monitored non-intrusively by measuring machining forces. Additionally, feed force in X-direction emerges as the most influential parameter, contributing 88% to tool wear. Feed rate, feed force in Z-direction, and cutting speed follow with effects of 8%, 3%, and 1%, respectively.



بررسی و تحلیل حساسیت اثر پارامترهای مختلف بر سایش ابزار در فرآیند تراش خشک کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی با استفاده از روش E-Fast

احمد همایونی^{الف*}، حامد فرجی^ب، علی فراهانی^ج، نیما رحمانی^د

^{الف} استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، homayooni@arakut.ac.ir

^ب دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، hamedfarajiau@gmail.com

^ج دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، ali.farahani1392@gmail.com

^د دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، nimarahmani1376@gmail.com

چکیده	واژگان کلیدی
استفاده از مواد کامپوزیت زمینه فلزی به ویژه کامپوزیت‌های آلومینیومی در صنایع مختلفی مانند خودروسازی، هوافضا، نظامی و غیره به واسطه خواص مکانیکی مطلوب، نسبت استحکام به وزن بالا و مقاومت در برابر سایش و سختی بالا، کاربردهای گسترده‌ای پیدا کرده‌اند. در مقابل اما این خواص مکانیکی و سختی و مقاومت در برابر سایش بالا که به دلیل وجود ذرات تقویت‌کننده مانند کاربید سیلیکون در این کامپوزیت‌ها است، ماشین‌کاری این مواد را با مشکل مواجه می‌کند، به گونه‌ای که تنها ابزار و تیغه‌های خاصی همچون ابزارهایی از جنس الماس پلی کریستال، توانایی ماشین‌کاری این کامپوزیت‌ها را به صورت مطلوب دارند؛ اما به دلیل قیمت بالای این ابزارها، نیاز به شناخت پارامترهای تأثیرگذار بر میزان سایش ابزار و در نهایت، تعیین پارامترهای بهینه در فرآیند ماشین‌کاری این مواد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله، اثرات تغییر چهار پارامتر ورودی سرعت برشی، نرخ پیشروی، نیروی پیشروی در راستای X و نیروی پیشروی در راستای Z بر پارامتر خروجی میزان سایش ابزار در فرآیند تراشکاری خشک کامپوزیت زمینه فلزی آلیاژ آلومینیوم A359 تقویت‌شده با ۲۰٪ حجمی ذرات کاربید سیلیکون توسط ابزار الماس پلی کریستال، بررسی شده است. بررسی عددی میزان تأثیر هر یک از چهار پارامتر ورودی بر پارامتر خروجی در فرآیند تراشکاری قطعه کار موردنظر، به وسیله روش تحلیل حساسیت آماری ای-فست که دارای سرعت بالایی در بررسی کمی و کیفی داده‌ها می‌باشد، انجام شده است. مطابق با نتایج به دست آمده، پارامترهای نیروی پیشروی در راستای X، نرخ پیشروی، نیروی پیشروی در راستای Z و سرعت برشی به ترتیب دارای ۸۸٪، ۸٪، ۳٪ و ۱٪ اثر بر میزان سایش ابزار بوده‌اند.	آنالیز حساسیت کامپوزیت زمینه آلومینیومی، سایش ابزار، تراشکاری، ای-فست.
	تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۷
	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۲۳
	تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۱۴

۱- مقدمه

امروزه کامپوزیت‌های ماتریس فلزی (Metal Matrix Composites) یا به اختصار MMC) در صنایع مختلف به ویژه در صنایعی مانند خودروسازی، هوافضا و غیره به واسطه خواص مکانیکی مطلوبی که دارند بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱]. از محبوب‌ترین کامپوزیت‌های ماتریس فلزی، کامپوزیت‌های آلیاژ آلومینیوم تقویت‌شده با ذرات سرامیکی هستند که مزایایی چون قیمت پایین،

استحکام، سختی و مقاومت در برابر خستگی بالاتری دارند [۲]. گرچه این بهبود در خواص مکانیکی، منجر به مشکل‌تر شدن ماشین کاری این کامپوزیت‌ها می‌شود. به همین دلیل، تنها ابزارهایی از جنس الماس پلی کریستال (Polycrystalline Diamond) یا به اختصار (PCD) برای ماشین کاری این کامپوزیت‌ها مقرون به صرفه هستند. اما به دلیل قیمت بالا این ابزارها، سرویس به موقع آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است، بنابراین پایش مداوم وضعیت ابزار در پروسه ماشین کاری برای تشخیص زمان مناسب تعویض ابزار بسیار مهم است [۳] که برای پایش وضعیت ابزار دو روش مستقیم و غیرمستقیم مورد استفاده قرار می‌گیرد. در روش مستقیم، میزان سایش ابزار به صورت مستقیم اندازه‌گیری می‌گردد (برای مثال، اندازه‌گیری فاصله بین نوک ابزار و قطعه کار). به علت تماس مداوم ابزار و قطعه کار، اندازه‌گیری سایش، به دلیل وجود مایع خنک کاری، سخت و حتی گاهی تقریباً غیرممکن است. در روش غیرمستقیم، میزان سایش ابزار با اندازه‌گیری و پردازش سیگنال‌های مختلف مانند نیرو، درجه حرارت، ارتعاش ابزار و غیره تخمین زده می‌شود [۴].

بدین منظور، لین و همکارانش [۵] به بررسی میزان سایش ابزار در ماشین کاری کامپوزیت‌های ماتریس فلزی آلومینیوم به دو روش تجزیه و تحلیل رگرسیون چندگانه (Multiple Regression Analysis یا به اختصار (MRA) و شبکه عصبی تابع پایه شعاعی تعمیم یافته (Generalised Radial Basis Function Neural Network یا به اختصار (GRBF) پرداخته‌اند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد روش GRBF دارای دقت بیشتری نسبت به روش MRA به ویژه در نواحی که سایش ابزار با نیروهای ماشین کاری رابطه غیرخطی دارد، می‌باشد. به طور کلی نتایج به دست آمده از نیروی پیشروی (Feed Force) نسبت به نتایج به دست آمده از نیروی برشی (Cutting Force) دقیق تر است و برای پایش میزان سایش ابزار تنها اندازه‌گیری نیروی پیشروی کافی می‌باشد.

عزمی و همکارانش [۶] در مطالعه خود برای پایش وضعیت سایش ابزار کاربردی در عملیات فرزکاری، از دو روش تجزیه و تحلیل رگرسیون چندگانه و سیستم عصبی - فازی (Neuro-Fuzzy) استفاده کرده‌اند. رابطه تیلور به دست آمده از نتایج، مشخص کرد که عمر مفید ابزار به شدت به سرعت برش (Cutting Speed) و نرخ پیشروی (Feed Rate) وابسته می‌باشد. همچنین ماشین کاری عمود بر رشته‌های فیبر کامپوزیت موجب افزایش سایش ابزار و در نتیجه کاهش عمر مفید ابزار نسبت به ماشین کاری در موازات رشته‌های فیبر می‌شود، اما باید توجه داشت که اثر زاویه برش بر طول عمر ابزار نسبت به سایر نیروهای وارده بر ابزار بسیار ناچیز است. نتایج به دست آمده از نیروی پیشروی نسبت به نتایج به دست آمده از نیروی برشی دقیق تر است. هر چند که داده‌های به دست آمده از روش MRA در عملیات فرزکاری، دارای دقت قابل قبولی نسبت به داده‌های تجربی می‌باشد، ولی داده‌های حاصله از روش ANFIS (Adaptive Neural Network-based Fuzzy Inference Systems) به میزان قابل ملاحظه‌ای دقیق تر هستند، به ویژه در زمانی که روابط غیرخطی می‌باشند.

در مطالعه‌های دیگر، ناصر نیا و همکارانش [۴] از یک شبکه عصبی چندلایه (Multi-Layer Perceptron یا به اختصار (MLP) و یک الگوریتم پس انتشار و سامانه استنتاج تطبیقی فازی - عصبی برای پیش‌بینی میزان سایش ابزار در عملیات فرزکاری استفاده کرده‌اند. همچنین مقدار پیشروی و عمق بار بر جریان مصرفی موتور پیشروی به عنوان متغیرهای ورودی فرایند بررسی شدند. نتایج به دست آمده مشخص کرد که با افزایش میزان سایش ابزار، جریان مصرفی موتور پیشروی افزایش پیدا می‌کند. به طور میانگین ANFIS و MLP به ترتیب با ۹۲ و ۸۴ درصد موفقیت، قادر به تشخیص درست میزان سایش و شکست ابزار بودند.

ویچیک-پیکولا و همکارانش [۷] به بررسی میزان سایش ابزار در عملیات فرزکاری کامپوزیت ماتریس آلومینیوم (Aluminum Matrix Composite یا به اختصار (AMC) به کمک یک مدل شبکه عصبی چندلایه و مقایسه نتایج آن با مقادیر اندازه‌گیری شده از روش تجربی پرداخته‌اند. شتاب ارتعاش (Vibration Acceleration) و نیروهای برشی به عنوان سیگنال‌های ورودی سیستم در نظر گرفته شده‌اند و آزمایش با سه سرعت مختلف انجام شده است. برای اندازه‌گیری میزان خطای تخمین، از روش خطای میانگین مربعات (Mean Square Error یا به اختصار (MSE) که یک روش برای اندازه‌گیری خطا در مدل‌های آماری می‌باشد، استفاده شده است. طبق نتایج به دست آمده، میانگین میزان خطای اندازه‌گیری شده از روش MSE، در هنگام فرزکاری کامپوزیت (Al-SiC) (۱۰٪) با ابزار پوشش داده شده با الماس، برابر با مقدار ۰/۰۲۷ بوده است. بر اساس مدل، مشاهده می‌شود که تابع فعال سازی تانژانت (Tangent Activation Function) و لجستیک در لایه پنهان شبکه عصبی، بهترین نتایج را در فرایند یادگیری

و آزمون دارد. وجود یک یا دو نورون در لایه پنهان، توانایی تخمین مدل را به میزان فراوانی افزایش می‌دهد، هرچند که افزایش تعداد نورون‌ها، تأثیری بر قابلیت تخمین مدل شبکه عصبی ندارد.

فدائی و سوری [۸] در مطالعه خود به بررسی اثر سرعت برشی و پیشروی بر تنش‌های پسماند در شافت‌های تراش کاری شده از جنس فولاد AISI ۱۰۴۵ پرداخته‌اند. از روش‌های پراش اشعه ایکس و فن الکترو پولیش برای تعیین توزیع تنش پسماند استفاده کرده‌اند. با استفاده از تحلیل‌های اجزای محدود، تأثیر تغییرات سرعت برشی و پیشروی را بررسی و با استفاده از داده‌های حاصل، از یک شبکه عصبی مصنوعی برای تخمین تنش‌های پسماند استفاده کرده‌اند. بر اساس نتایج اعلام شده، شبکه عصبی ساخته شده می‌تواند با بیشینه خطا ۱۵٪ برای راستای محوری و ۱۷/۴٪ برای راستای محیطی تنش‌های پسماند در سرعت‌های برشی و پیشروی مختلف مطالعه شده را پیش‌بینی کند. همچنین مشخص شد که در همه سرعت‌های پیشروی، با افزایش سرعت برشی به تنش پسماند افزوده می‌شود که افزایش سرعت پیشروی تا ۰/۲ میلی‌متر/دور باعث افزایش تنش پسماند شده و از این مقدار به بعد، افزایش فراوان نخواهد بود.

در مطالعه‌ای دیگر اوزبورک و همکارانش [۹] کامپوزیت‌های ماتریس آلومینیوم را در دو دمای متفاوت ۵۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس با مقادیر متفاوت SiC و به روش ریخته‌گری تلاطمی ساخته و به دو روش تجربی و شبکه عصبی مصنوعی، اقدام به بررسی ویژگی‌های سایشی آن کرده‌اند. نمونه‌ها در سرعت لغزشی ثابت به میزان ۰/۲ میلی‌ثانیه، تحت نیروهای ۳۰ و ۶۰ نیوتن (N) و با فواصل لغزشی متفاوت ۲۰۰، ۱۵۰، ۱۰۰ و ۵۰ متر بررسی شده‌اند. از بررسی‌ها نتیجه می‌شود که بین اندازه دانه‌های کامپوزیت و سختی، رابطه عکس وجود دارد؛ و بین اندازه دانه‌ها و دمای تولید کامپوزیت‌ها رابطه مستقیم وجود دارد. همچنین میزان وزن اتلافی با دمای تولید نیز رابطه مستقیم دارد. حدود ۸۵٪ از داده‌ها به صورت تصادفی برای آموزش سیستم شبکه عصبی انتخاب شده و ۱۵٪ باقی‌مانده اطلاعات برای آزمایش سیستم، مورد بررسی قرار گرفتند. از مقایسه مقادیر تجربی و مقادیر تخمین زده شده توسط شبکه عصبی، ضریب ۰/۹۸۵۵ به دست آمده که نشان از عملکرد مطلوب مدل ساخته شده دارد.

ژو و همکارانش [۱۰] در مطالعه خود از یک مدل شبکه عصبی چندلایه پیش‌خور (Feed-Forward Multi-Layered Artificial Neural Network)، مبتنی بر الگوریتم یادگیری لونبرگ-مارکوآرت (Levenberg-Marquardt)، برای پیدا کردن رابطه ریاضی بین پارامترهای برشی و میانگین زبری سطح در پروسه فرزکاری کامپوزیت Al/SiC، استفاده کرده‌اند. عملیات فرزکاری توسط یک دستگاه ماشین کنترل عددی (CNC) و با ابزار از جنس الماس پلی کریستال انجام شده است و داده‌ها برای آموزش مدل شبکه عصبی، جمع‌آوری شده است. سرعت برش، عمق برش، نرخ پیشروی و نسبت حجمی SiC پارامترهای ورودی سیستم در نظر گرفته شده‌اند. طبق نتایج به دست آمده نرخ پیشروی، سرعت برش و نسبت حجمی (SiC Volume Fraction) به ترتیب بیشترین تأثیر را بر زبری سطح دارند. زمانی که نرخ پیشروی در یک محدوده مشخص باشد، زبری سطح یک رابطه نمایی تقریبی با نرخ پیشروی دارد. رابطه بین زبری سطح و عمق برش تقریباً خطی است، همانند رابطه بین زبری سطح و نسبت حجمی SiC. مدل شبکه عصبی با ۲/۸ میانگین خطا نسبی در تخمین میانگین زبری سطح، عملکرد قابل قبولی از خود نشان داده است. در آخر یک مدل برای کنترل زبری سطح از طریق تخمین پارامترهای برش، با ۲/۹۱ میانگین خطا نسبی، برای رسیدن به زبری سطح مورد نظر ایجاد شد.

کارابولوت [۱۱] در مطالعه خود اقدام به ساخت کامپوزیت ماتریس آلومینیوم از جنس AA7039/A12 O3 به روش متالورژی پودر کرده و از یک شبکه عصبی، آنالیز رگرسیون و آنالیز واریانس، برای تخمین زبری سطح و نیروی برشی در عملیات فرزکاری، استفاده کرده است. عملیات فرزکاری در شرایط برشی خشک و با ابزار از جنس کاربید بدون پوشش و آزمون‌ها به روش آرایه‌های متعامد تاگوچی (Taguchi Orthogonal Array) انجام شده است. مدل‌های تحلیلی زبری سطح و نیروی برشی، توسط شبکه عصبی و آنالیز رگرسیون ساخته شده‌اند. نتایج تجربی نیز به وسیله روش ANOVA محاسبه گردیده‌اند. نتایج حاکی از آن است که ساختار ماده (با ۸۵/۲۴٪ تأثیر)، نرخ پیشروی (با ۷/۱۲٪ اثر) و سرعت برش (با ۵/۰۵٪ اثر)، به ترتیب مؤثرترین عوامل بر زبری سطح هستند. همچنین نرخ پیشروی (با ۷۳/۶۷٪ اثر)، عمق برش (با ۱۶/۱۶٪ اثر) و سرعت برش (با ۶/۶۲٪ اثر)، به ترتیب عوامل مؤثر بر نیروی برشی می‌باشند. مقادیر زبری سطح به میزان چشمگیری (بین ۱۹۶٪ تا ۳۱۲٪)، در کامپوزیت‌های تقویت شده با Al2O3، نسبت به آلیاژ AA7039 بهبود یافته‌اند که دلیل آن پخش شدن همگن ذرات Al2O3 در AA7039

می‌باشد. شبکه عصبی ایجاد شده نیز، با خطاهای میانگین مربعات به مقادیر $۰.۲/۲۵\%$ و $۰.۶/۶۶\%$ به ترتیب قادر به تخمین زبری سطح و نیروی برشی است.

ورش کومار و همکارانش [۱۲] در پژوهشی اقدام به ساخت یک کامپوزیت ماتریس آلومینیوم، از جنس آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ که با ذرات تیتانیوم دی‌اکسید (TiO₂) تقویت شده است، کرده‌اند. مدل‌سازی شبکه عصبی، طبق الگوریتم یادگیری ماشین پس انتشار (Back Propagation) انجام شده است. آزمایش‌های سایش بر طبق آزمایش‌های استاندارد ASTM G99، به صورت بین روی صفحه (Pin-on-Disc) انجام گردیده است. همچنین آزمون‌ها به روش آرایه‌های متعامد تاگوجی انجام شده است. بر طبق نتایج به دست آمده، فاصله لغزش، درصد وزنی ماده تقویت‌کننده (TiO₂) و بار اعمال شده تأثیر قابل توجه بر میزان عمق آسیب وارد شده بر کامپوزیت بر اثر سایش دارد. با استفاده از شبکه عصبی یک رابطه غیرخطی بین چگالی، بار اعمال شده، درصد وزنی ماده تقویت‌کننده (TiO₂)، فاصله لغزش و میزان ارتفاع شده از کامپوزیت بر اثر سایش به دست آمد؛ و در آخر شبکه عصبی عملکرد قابل قبولی ارائه کرده است.

در مطالعه‌ای دیگر، طاهری و فرجی [۱۳]، اقدام به بررسی اثر پارامترهای ورودی ولتاژ گپ سروو^۱، جریان اوج، کشش سیم، زمان روشن بودن پالس و زمان خاموش بودن پالس بر دو پارامتر سرعت برشی و انحراف ابعادی در فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با سیم، کرده‌اند. برای تحلیل داده‌های به دست آمده از روش تحلیل حساسیت آماری سوپل استفاده شده است. طبق نتایج به دست آمده، پارامترهای زمان خاموش بودن پالس (با ۰.۳۹%)، زمان روشن بودن پالس (با ۰.۳۷%)، ولتاژ گپ سروو (با ۰.۱۴%)، کشش سیم (با ۰.۵%) و جریان اوج (با ۰.۵%) به ترتیب مؤثرترین عوامل بر سرعت برشی بوده‌اند. پارامترهای ولتاژ گپ سروو (با ۰.۵۹%) و زمان روشن بودن پالس (با ۰.۳۱%) اثرگذارترین پارامترها بر انحراف ابعادی می‌باشند.

طهماسبی و همکارانش [۱۴] در مطالعه خود به بررسی اثر پارامترهای ورودی سرعت دوران اسپیندل، سرعت پیشروی، عمق برش و درصد ذرات تقویت‌کننده کامپوزیت بر پارامترهای خروجی زبری سطح و نرخ براده برداری در عملیات فرزکاری کامپوزیت پایه آلومینیومی با استفاده از روش‌های آماری و تجربی پرداخته‌اند. در این پژوهش، تأثیر پارامترهای ورودی بر پارامترهای خروجی به صورت کمی و کیفی با استفاده از مدل‌سازی آماری به روش سطح پاسخ و همچنین روش تحلیل حساسیت آماری سوپل و بهینه‌سازی با بهره‌گیری از الگوریتم دینگر^۲، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته‌اند. مطابق با نتایج به دست آمده میزان تأثیرگذاری پارامترهای ورودی بر پارامتر خروجی زبری سطح بدین ترتیب می‌باشد: سرعت دوران اسپیندل با ۰.۸۴% ، سرعت پیشروی با ۰.۸% ، عمق برش و درصد ذرات تقویت‌کننده هرکدام با ۰.۴% . همچنین پارامترهای سرعت پیشروی، سرعت دوران اسپیندل، عمق برش و درصد ذرات تقویت‌کننده به ترتیب دارای ۰.۳۳% ، ۰.۲۸% ، ۰.۲۶% و ۰.۱۳% اثر بر پارامتر خروجی نرخ براده برداری هستند. در انتها نیز، بهترین ترکیب برای پارامترهای ورودی، از تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده، معرفی شده است.

داس و همکارانش [۱۵] در پژوهشی اقدام به ساخت کامپوزیت آلومینیومی Al7075 با ۱۵% درصد وزنی ذرات SiC با اندازه متوسط ذرات ۸ میلی‌متر، با روش ریخته‌گری گردابی (Vortex Stir Cast) کرده‌اند. همچنین با استفاده از چند ابزار کاربید تنگستن با پوشش نیتريد تیتانیوم و ایجاد یک مدل رگرسیون آنالیز واریانس به بررسی پارامترهای سایش ابزار و اجزای نیروی برش تحت عملیات تراش خشک، پرداخته‌اند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که سایش ابزار با افزایش سرعت برش، پیشروی و عمق برش افزایش می‌یابد و مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر سایش ابزار، سرعت برش می‌باشد و پس از آن، پیشروی و عمق برش، به ترتیب عوامل مؤثر دیگر هستند. قابل ذکر است که تأثیر عمق برش بر سایش ابزار ناچیز بوده است. همچنین، سطح اطمینان مدل آنالیز واریانس ایجاد شده، مقدار ۰.۹۵% گزارش شده است. در انتها نیز ترکیبی بهینه برای پارامترها معرفی شده است.

زارع چاوشی [۱۶] در پژوهش خود به بررسی اثر پارامترهای پیشروی، عمق برش و سرعت برش بر روی سایش دو ابزار از جنس کاربید تنگستن و دیگری از جنس الماس پلی‌کریستالی در عملیات تراشکاری با دستگاه CNC کامپوزیت آلیاژ Al7075 با مقدار ۱۰% درصد وزنی SiC پرداخته است. همچنین دو مدل شبکه عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج فازی عصبی (CANFIS)

¹ servo gap voltage

² Derringer algorithm

برای پیش‌بینی میزان سایش ابزارهای کاربرد تنگستن و الماس پلی کریستال ایجاد شده است. با توجه به تأثیر پارامترهای برش بر میزان سایش ابزار، مشخص شده است که افزایش در پارامترهای پیشروی، عمق برش و سرعت برش باعث افزایش سایش در ابزار می‌گردد. همچنین پارامترهای پیشروی و عمق برش مؤثرترین پارامترها در میزان سایش هستند و سرعت برش کمترین تأثیر را دارد. مطابق با نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌های ایجاد شده، شبکه عصبی مصنوعی با میانگین خطای پیش‌بینی نسبی $1/0.3\%$ برای مقادیر سایش ابزارهای کاربرد تنگستن و $1/0.7\%$ برای مقادیر سایش ابزارهای الماس پلی کریستال، نسبت به سیستم استنتاج فازی عصبی دقیق‌تر است.

در پژوهشی دیگر، السادک و همکارانش [۱۷۷] با هدف پیش‌بینی پارامترهای برش مناسب در عملیات تراشکاری خشک نانو کامپوزیت‌های زمینه فلزی آلومینیومی با ۵ درصد حجمی مختلف از نانو ذرات SiC، با استفاده از ابزارهای کاربرد بدون پوشش، اقدام به توسعه یک سیستم کنترل منطق فازی برای رسیدن به زبری سطح موردنظر با حداقل میزان سایش ابزار، کرده‌اند. پارامترهای ورودی این سیستم پیش‌بینی کننده پارامترهای برش (سرعت برش، پیشروی و عمق برش) و درصد حجمی مختلف نانو ذرات و پارامترهای خروجی این سیستم نیز زبری سطح و میزان سایش ابزار می‌باشند. از مقایسه نتایج سیستم کنترل منطق فازی با نتایج تجربی، مشاهده شد که سیستم کنترل منطق فازی دارای دقت متوسط 90% در پیش‌بینی پارامتر زبری سطح و همچنین دقت 80% درصدی در تخمین پارامتر سایش ابزار می‌باشد؛ بنابراین، سیستم کنترل منطق فازی توسعه داده شده توانایی پیش‌بینی قابل قبول پارامترهای زبری سطح و سایش ابزار در تراشکاری چنین کامپوزیت‌هایی را دارا می‌باشد.

پراکاش و همکارانش [۱۷۸] در مطالعه خود به بررسی سایش ابزار و زبری سطح در عملیات ماشین‌کاری کامپوزیت ماتریس فلزی آلومینیومی تقویت‌شده با ذرات کاربرد سیلیکون (SiC) با استفاده از ابزارهای فولاد پرسرعت (HSS) و کاربرد، پرداخته‌اند. پارامترهای ورودی این پژوهش سرعت برش، نرخ پیشروی و عمق برش بوده و پارامترهای خروجی نیز میزان سایش ابزار و زبری سطح می‌باشند. مطابق با نتایج به‌دست‌آمده، پارامتر زبری سطح به‌طور کلی تحت تأثیر پارامترهای نرخ پیشروی و سرعت برش بوده است. همچنین میزان سایش ابزار در سرعت و شرایط مختلف پیشروی اندازه‌گیری و داده‌های تجربی جمع‌آوری شده است. در آخر پس از اتمام آزمایش تجربی، از تحلیل رگرسیون چندگانه برای پیش‌بینی رفتار سایش سیستم تحت هر شرایطی در محدوده عملیاتی استفاده شده است.

در مطالعه‌ای دیگر لو و زانگ [۱۷۹]، به بررسی اثر پارامترهای زاویه چنگک ابزار (Tool Rake Angle)، زاویه خلاصی ابزار (Tool Clearance Angle) و شعاع دماغه ابزار (Tool Nose Radius) در فرایند ماشین‌کاری کامپوزیت آلیاژ Al2024 حاوی ۴۵ درصد حجمی ذرات کاربرد سیلیکون با ابزارهای الماس پلی کریستال، بر نرخ حجم سایش ابزار توسط یک مدل هندسی پرداخته‌اند. نتایج تجربی به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که میزان پارامتر حجم سایش ابزار ارتباط نزدیکی با اندازه دانه الماس پلی کریستال ابزار و زاویه چنگک ابزار دارد. نتایج آزمون‌های اعتبارسنجی مدل ایجادشده، میانگین خطای پیش‌بینی $6/13\%$ را نشان می‌دهند که دقت پیش‌بینی مدل ارائه‌شده رضایت‌بخش می‌باشد.

طاهری و قانع [۲۰] با استفاده از معادلات رگرسیون خطی به بررسی آنالیز حساسیت پارامترهای مختلف اثرگذار بر استحکام کششی، مقاومت خمشی و مقاومت ضربه‌ای پرداخته‌اند. اثر پارامترهای دمای قالب‌گیری، فشار فشرده‌سازی و زمان فشرده‌سازی با بهره‌گیری از روش آنالیز حساسیت ای-فست بررسی گردیده است. همچنین مشاهده شد که دمای قالب‌گیری با بیشترین میزان تأثیر نسبت به سایر متغیرها به‌عنوان تأثیرگذارترین متغیر بر فرآیند قالب‌گیری فشاری تعیین شده است. پارامتر فشار فشرده‌سازی و زمان فشرده‌سازی پس از پارامتر ذکرشده به ترتیب دومین و سومین پارامتر تأثیرگذار شناخته‌شده است.

کامپوزیت‌های ماتریس آلومینیوم به دلیل دارا بودن خواصی مانند استحکام و سختی بالا و همچنین مقاومت در برابر خستگی و سایش، در صنایع مختلفی مانند خودروسازی، هوافضا، دفاع و غیره، مورد استفاده گسترده قرار گرفته‌اند. به همین دلیل، تجزیه و تحلیل تأثیر پارامترهای مختلف فرایند ماشین‌کاری بر روی این کامپوزیت‌ها، بسیار حائز اهمیت است.

در این مقاله، ابتدا به توضیح تحلیل حساسیت و تشریح روش آماری تحلیل حساسیت ای-فست پرداخته شده است. سپس، برای نخستین بار با استفاده از روش تحلیل حساسیت آماری ای-فست، اثرگذاری چهار پارامتر ورودی شامل سرعت برشی، نرخ

پیشروی، نیروی پیشروی در جهت X و نیروی پیشروی در جهت Z بر پارامتر خروجی میزان سایش ابزار در فرایند تراشکاری خشک کامپوزیت زمینه آلومینیومی با آلیاژ A359 و مقدار ۲۰٪ حجمی کاربید سیلیکون (SiC) با ابزار الماس پلی کریستال، به صورت دقیق و کمی مورد بررسی قرار گرفته است.

در این تحقیق به تجزیه و تحلیل تأثیر پارامترهای مختلف فرایند ماشین کاری بر روی پرداخته شده است. در بیانی مفصل تر به بررسی تأثیر پارامترهای ورودی سرعت برشی، نیروی پیشروی در جهت X، نیروی پیشروی در جهت Z و نرخ پیشروی بر پارامتر خروجی سایش ابزار (Tool Wear) از طریق روش آنالیز حساسیت آماری ای-فست (E-Fast)، پرداخته شده است. هدف از این مطالعه، شناخت تأثیر گذارترین پارامتر بر نرخ سایش ابزار می باشد. بدین منظور در این مطالعه، فرایند ماشین کاری انجام شده، فرایند تراشکاری خشک بوده و بدون استفاده از هرگونه مایع روان کننده انجام شده است. ابزارهای استفاده شده نیز از نوع الماس پلی کریستال از جنس TPG322 COMPAX 1500 می باشند. کامپوزیت قطعه کار، از جنس آلیاژ آلومینیوم A359 تقویت شده با مقدار ۲۰٪ حجمی ذرات کاربید سیلیکون با قطر متوسط ۱۲/۸ میکرومتر که به روش متالورژی شمش (Ingot Metallurgy) تولید شده، انتخاب گردیده است. نیروهای پیشروی در دو جهت X و Z نیز با استفاده از یک دینامومتر نیروی سه بعدی پیزوالکتریک پایش شدند. بازه تغییرات پارامترهای ورودی به صورت ذیل در جدول ۱ انتخاب شده است.

جدول ۱ پارامترهای متغیر ورودی در فرایند

عاملها	سطوح
سرعت برشی	۳۰۰-۷۰۰ متر بر دقیقه
نرخ پیشروی	۰/۴ - ۰/۱ میلی متر در هر دور
نیروی پیشروی در جهت X	۱۰۰ - ۲۰ نیوتن
نیروی پیشروی در جهت Z	۱۰۰ - ۲۰ نیوتن

۲-۱- تحلیل حساسیت

یکی از بخش هایی از تحلیل حساسیت که توجه بیشتری را به خود جلب کرده است، روش های بر پایه واریانس (Variance-Based) هستند. در این روش ها، شاخص حساسیت (Sensitivity Index) به عنوان سهم هر پارامتر در واریانس خروجی کلی مدل، محاسبه می شود. روش های تحلیل حساسیت، به طور کلی در چهار مرحله اجرا می شوند:

۱- تعریف ورودی ها و نوع توزیع هر ورودی

۲- تولید نمونه برای مقادیر ورودی

۳- محاسبه خروجی مدل برای هر مجموعه از نمونه های ورودی

۴- تعیین اثر هر پارامتر ورودی بر خروجی

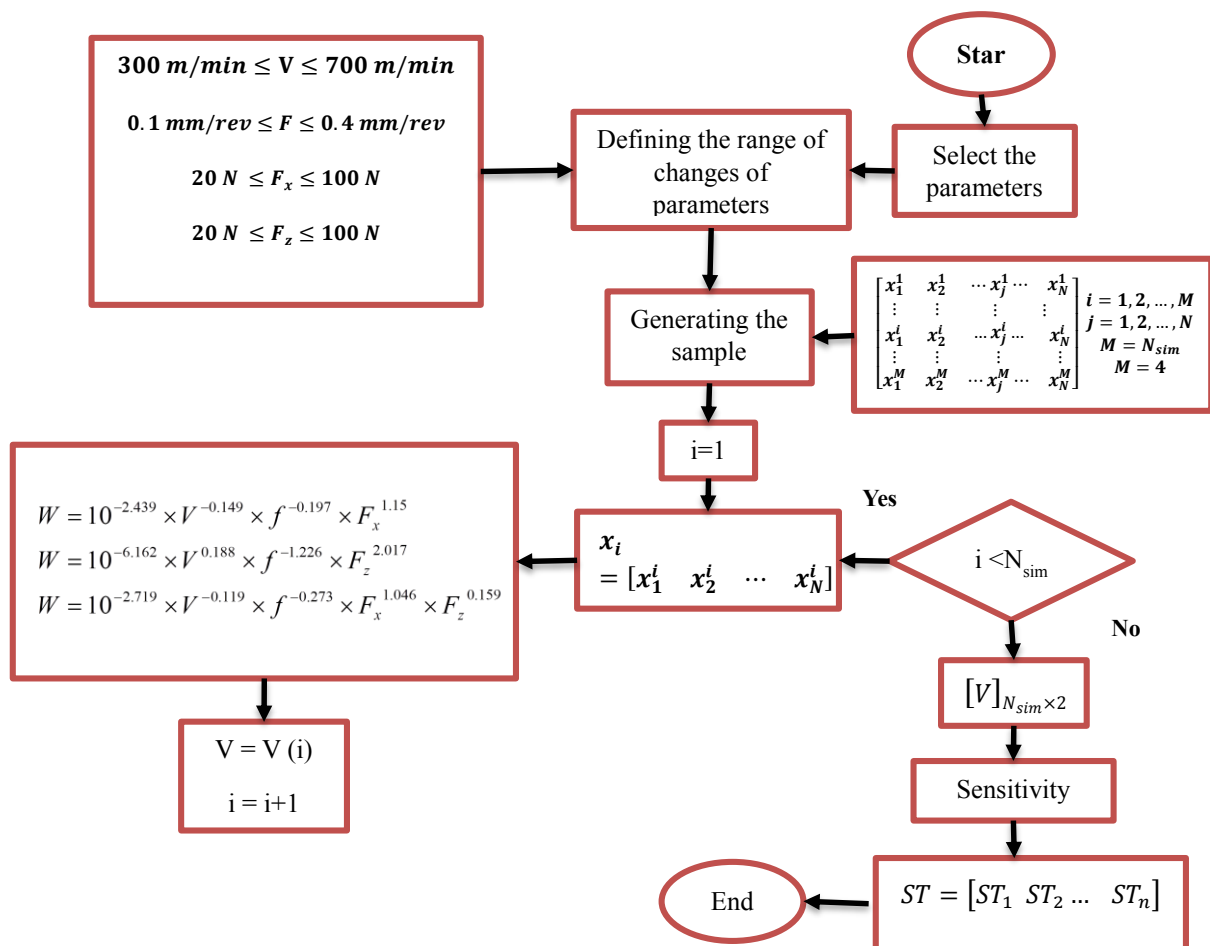
شکل ۱ نشان دهنده فلوچارت کلی تحلیل حساسیت است. همان طور که در شکل مشاهده می شود، ابتدا پارامترهای ورودی که در این مسئله، سرعت برشی، نرخ پیشروی، نیروی پیشروی در جهت X و نیروی پیشروی در جهت Z هستند، انتخاب می شوند. سپس دامنه تغییر پارامترها مطابق با شکل ۱ مشخص می گردد. در مرحله بعد، نمونه ها توسط نرم افزار تولید می شوند. پس از آن، با نمونه های تولید شده و با توجه به کد منیپولیشن^۳، پارامترهای خروجی تولید خواهند شد.

رویکردهای تحلیل حساسیت مبتنی بر واریانس را می توان برای به دست آوردن اثر مرتبه اول و اثر مرتبه دوم (که شامل تعامل بین سایر پارامترها می شود) استفاده کرد.

روش های آماری دارای قابلیت بررسی هم زمان تأثیر پارامترهای ورودی و همچنین مشخص کردن اثرات پارامترها به صورت هم زمان، می باشند. از پرکاربردترین روش های آماری تحلیل حساسیت، می توان روش های سوبل (Sobol) و ای-فست (E-Fast)

³ Manipulation

را نام برد. روش ای - فست دارای سرعت بالاتری نسبت به روش سوپل می‌باشد ولی دقت آن کم‌تر است. روش ای-فست برای اولین بار توسط کوکیر و همکارانش معرفی شده و سپس توسط سالتلی و همکارانش بهبود یافته است. این روش بر پایه واریانس است و مستقل از هرگونه فرض خطی بودن و یکنواختی بین پارامترهای ورودی و خروجی می‌باشد. این روش با تعریف تابع انتقال، انتگرال‌های چندبعدی را به انتگرال‌های تک‌بعدی تبدیل می‌نماید و روش محاسبه شاخص‌های حساسیت را ساده می‌کند [۲۲، ۲۱].



شکل ۱ فلوجارت کلی برای تحلیل حساسیت

به‌منظور استفاده از روش ای-فست، در معادله ۱ پارامتر ورودی x_i تعریف می‌شود:

$$x_i = G_i(\sin(\omega_i s + \varphi_i)) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \sin^{-1}(\sin(\omega_i s + \varphi_i)) \quad (1)$$

که ω_i به‌عنوان فرکانس x_i ، φ_i نقطه شروع منحنی و s نیز متغیری در بازه $-\pi$ تا π تعریف می‌شوند.

$$F = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f^2(s) ds - \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(s) ds \right]^2 \approx \sum_{j=-\infty}^{\infty} (A_j^2 + B_j^2) - (A_0^2 + B_0^2) \approx 2 \sum_{j=1}^N (A_j^2 + B_j^2) \quad (2)$$

G ها به‌عنوان توابع انتقال و A_j و B_j نیز به‌عنوان ضرایب فوریه تعریف می‌گردند. همچنین $f(s)$ به‌صورت معادله ۳ معرفی می‌گردد:

$$f(s) = f(G_1(\sin \omega_1(s)). G_2(\sin \omega_2(s)). \dots G_n(\sin \omega_n(s))) \quad (3)$$

در آخر، واریانس جزئی از رابطه ۴ به دست خواهد آمد:

$$F_i = \sum_{p \in Z^0} (A_{p\omega_i}^2 + B_{p\omega_i}^2) = 2 \sum_{p=1}^{\infty} (A_{p\omega_i}^2 + B_{p\omega_i}^2) \quad (۴)$$

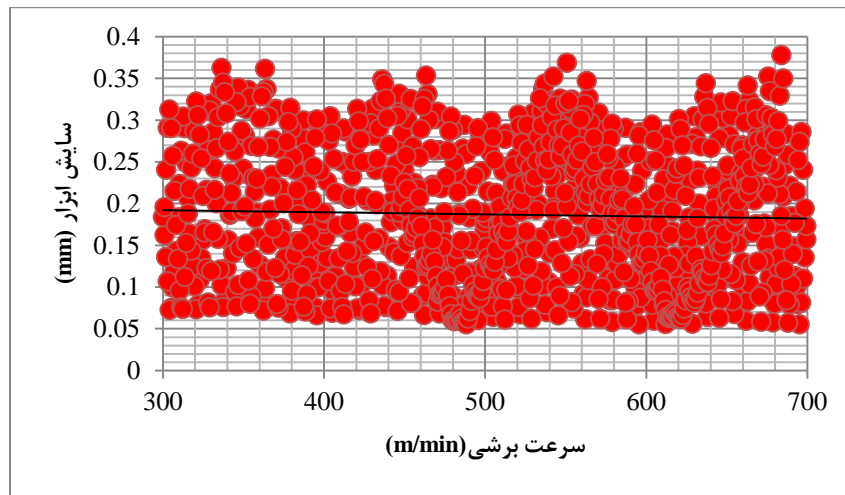
همچنین میزان شاخص حساسیت کلی، از رابطه ۵ به دست خواهد آمد [۲۳، ۲۴].

$$ST_i = 1 - \frac{F_{-1}}{F} \quad (۵)$$

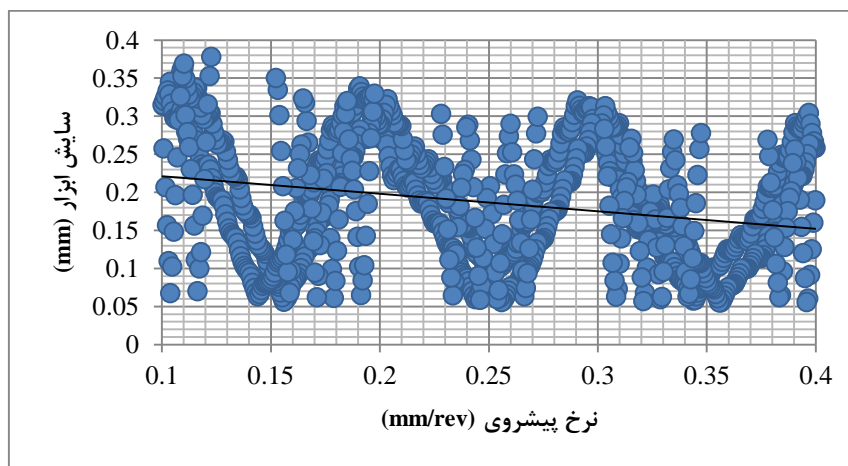
۲- تحلیل حساسیت پارامترها و تحلیل نتایج

در این قسمت اثر پارامترهای سرعت برشی، نرخ پیشروی و نیروی پیشروی در دو جهت X و Z، بر سایش ابزار در فرایند ماشین کاری، بررسی خواهند شد. شکل های ۲ الی ۵، پراکندگی نقاط سایش ابزار را نشان می دهند. این نقاط به کمک نرم افزار سیملب^۴ و با روش ای - فست به دست آمده اند.

اولین پارامتر تأثیرگذار بر میزان سایش ابزار که بررسی شده است، اثر سرعت برشی می باشد. شکل ۲ نشان دهنده نتایج به دست آمده از تأثیر سرعت برشی بر میزان سایش ابزار، می باشد. همان طور که در شکل مشاهده می شود، سرعت برشی اثر فراوانی بر میزان سایش ابزار ندارد.



شکل ۲ تأثیر سرعت برشی بر میزان سایش ابزار

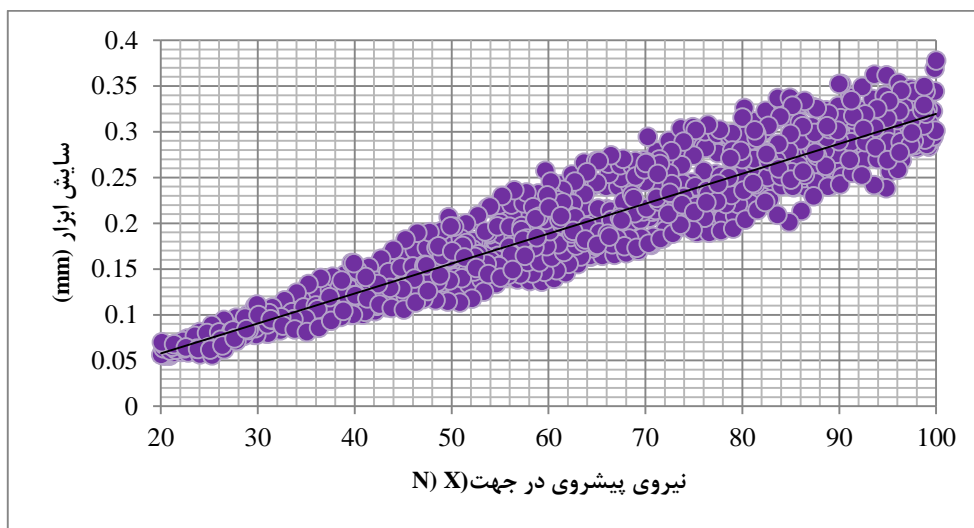


شکل ۳ تأثیر نرخ پیشروی بر میزان سایش ابزار

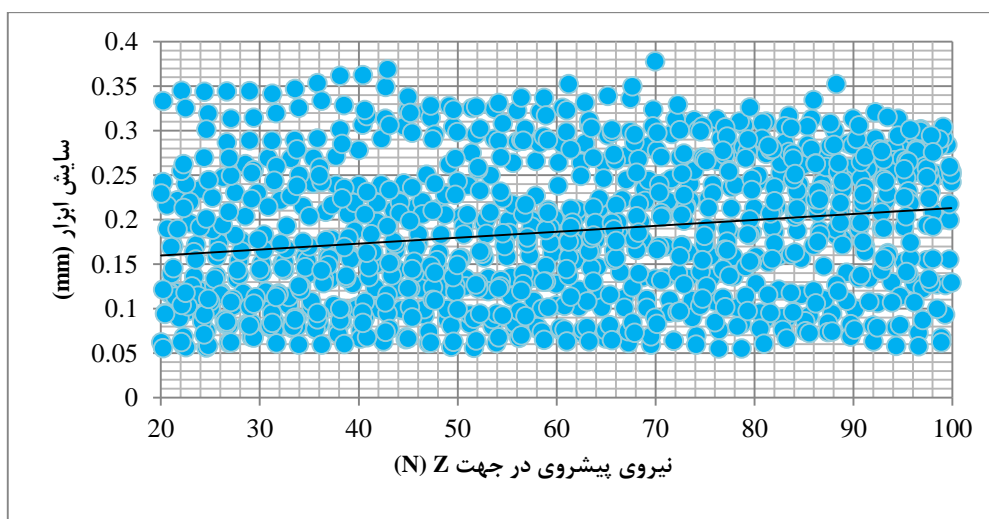
⁴ Simlab

دومین پارامتر تأثیرگذار، نرخ پیشروی است که نتایج حاصل از بررسی آن، در شکل ۳ قابل مشاهده می‌باشد. همان گونه که مشاهده می‌شود، به‌طور کلی افزایش نرخ پیشروی باعث کاهش میزان سایش ابزار با شیب کمی، خواهد شد. این کاهش میزان سایش ابزار می‌تواند به دلیل افزایش گرمای هدایت شده از ناحیه برش به قطعه کار باشد. بدین صورت که قطعه کار نرم‌تر می‌شود و ذرات تقویت کننده کاربید سیلیکون به داخل قطعه کار یا روی سطح ماشین کاری شده به جلو فشرده می‌شوند و به این ترتیب باعث سایش کمتر ابزار برش می‌گردند.

سومین پارامتر تأثیرگذار، نیروی پیشروی در جهت X می‌باشد. نتایج حاصل شده از بررسی این پارامتر بر میزان سایش ابزار، در شکل ۴ قابل مشاهده است. همان طور که در شکل به وضوح فراوان است، با افزایش نیروی پیشروی در جهت X، میزان سایش ابزار نیز افزایش چشمگیری نسبت به سایر پارامترها خواهد داشت. با افزایش نیروی پیشروی در جهت X، به دلیل افزایش ضربات نامنظم با سرعت بالای ذرات تقویت کننده کاربید سیلیکون بر روی سطح ابزار، میزان سایش ابزار افزایش یافته است؛ اما این افزایش چشمگیر میزان سایش ابزار به واسطه تغییر نیروی پیشروی در جهت X نسبت به تغییر نیروی پیشروی در جهت Z را می‌تواند به دلیل بزرگ تر بودن بازه حرکتی ابزار در جهت X (مماس بر سطح قطعه کار) و در نتیجه افزایش تعداد برخوردها با ذرات تقویت کننده کاربید سیلیکون در مقایسه با بازه حرکتی کمتر ابزار در جهت Z (عمود بر قطعه کار) و در نتیجه تعداد برخورد کمتر با ذرات تقویت کننده دانست.



شکل ۴ تأثیر نیروی پیشروی در جهت X بر میزان سایش ابزار

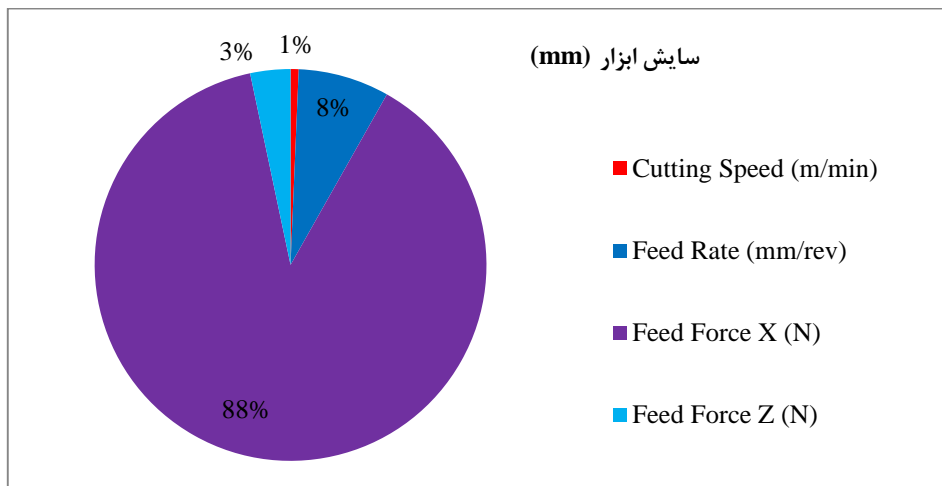


شکل ۵ تأثیر نیروی پیشروی در جهت Z بر میزان سایش ابزار

آخرین پارامتر مورد بررسی، نیروی پیشروی در جهت Z است. شکل ۵ نشان‌دهنده نتایج به‌دست‌آمده از بررسی این پارامتر بر میزان سایش ابزار، می‌باشد. باتوجه به شکل، افزایش نیروی پیشروی در جهت Z، منجر به افزایش میزان سایش ابزار با شیب کمی خواهد شد. افزایش در میزان سایش ابزار به‌واسطه افزایش نیروی پیشروی در جهت Z، به دلیل افزایش ضربات و برخوردهای نامنظم با سرعت بالای ذرات تقویت‌کننده کاربرد سیلیکون بر روی سطح ابزار است. همچنین کمتر بودن اثر این پارامتر (نیروی پیشروی در جهت Z) بر میزان سایش ابزار در مقایسه با پارامتر نیروی پیشروی در جهت X، به دلیل کوچک‌تر بودن بازه حرکتی ابزار در جهت Z (عمود بر قطعه کار) نسبت به بازه حرکتی ابزار در جهت X (مماس با قطعه کار) و در نتیجه، کمتر بودن تعداد برخوردهای سطح ابزار با ذرات تقویت‌کننده کاربرد سیلیکون می‌باشد.

۳- مقایسه کمی اثر پارامترهای ورودی مختلف بر میزان سایش ابزار با استفاده از روش آنالیز حساسیت ای - فست

در این قسمت به مقایسه کمی بین درصد تأثیر پارامترهای مختلف ورودی بر میزان سایش ابزار که از روش آنالیز حساسیت ای-فست به‌دست آمده‌اند، پرداخته خواهد شد. طبق نتایج نشان‌داده‌شده در شکل ۶، نیروی پیشروی در جهت X با ۸۸٪ تأثیر بر میزان سایش ابزار، تأثیرگذارترین پارامتر در بین چهار پارامتر مورد بررسی، می‌باشد. پارامترهای نرخ پیشروی، نیروی پیشروی در جهت Z و سرعت برشی، به ترتیب هرکدام با ۸٪، ۳٪ و ۱٪ پارامترهای تأثیرگذار بعدی بر میزان سایش ابزار می‌باشند.



شکل ۶ مقایسه کمی اثر پارامترهای ورودی بر میزان سایش ابزار

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در آنالیز حساسیت، چگونگی وابستگی پارامتر خروجی یک مدل به پارامترهای ورودی آن، موردبررسی قرار می‌گیرد. روش آنالیز حساسیت یک روش قدرتمند است که توانایی مشخص کردن میزان تأثیرگذاری پارامترهای ورودی به‌صورت کمی و کیفی را دارد که از نتایج به‌دست‌آمده برای یافتن پارامترهای ورودی با تأثیرگذاری بالا بر پارامتر خروجی به‌منظور توجه بیشتر در انتخاب آن‌ها و همچنین شناسایی پارامترهای ورودی با تأثیر اندک بر پارامتر خروجی و به‌منظور ساده‌سازی حذف کردن آن‌ها از معادلات سیستم، می‌توان استفاده کرد.

در این مطالعه از آنالیز حساسیت آماری به روش ای-فست که نسبت به سایر روش‌های آنالیز حساسیت آماری، سرعت بالاتری دارد، برای بررسی تأثیر چهار پارامتر ورودی شامل سرعت برشی، نرخ پیشروی، نیروی پیشروی در جهت X و نیروی پیشروی در جهت Z، بر میزان سایش ابزار به‌عنوان پارامتر خروجی استفاده شده است.

مطابق با نتایج به‌دست‌آمده، با اندازه‌گیری نیروهای ماشین‌کاری می‌توان میزان سایش ابزار را بدون ایجاد وقفه در عملیات ماشین‌کاری، نظارت کرد. همچنین از بین چهار پارامتر مورد بررسی، پارامتر نیروی پیشروی در جهت X با ۸۸٪ تأثیر بر میزان

سایش ابزار، تأثیرگذارترین پارامتر می‌باشد که افزایش نیروی پیشروی در این جهت، منجر به افزایش سایش ابزار می‌شود. پارامترهای نرخ پیشروی، نیروی پیشروی در جهت Z و سرعت برشی، به ترتیب با ۰.۸٪، ۰.۳٪ و ۰.۱٪ اثر، به‌عنوان دومین تا چهارمین پارامتر تأثیرگذار، معرفی شده‌اند. در انتهای بحث نیز پیشنهاد می‌شود، به تأثیر پارامترهای ورودی بر خروجی در این پژوهش با استفاده از روش آنالیز حساسیت سوبل پرداخت. روش آنالیز حساسیت سوبل نسبت به ای-فست دقیق‌تر می‌باشد اما زمان‌بر تر از ای-فست می‌باشد.

۴-۱- فهرست علائم

ضرایب فوریه	A
ضرایب فوریه	B
واریانس جزئی	F
تابع انتقال	G
متغیری در بازه $\pi - \pi$	S
شاخص حساسیت کلی	S
متغیر ورودی	X
نقطه شروع مربوط به X_i	Φ
میلی‌متر	mm
متر/دقیقه	m/min
میلی‌متر/دور	mm/rev
نیوتن	N
فرکانس مربوط به X_i (Rad/s)	ω

Authorship Contribution Statement

Dr. Ahmad Homayooni



Biography: Assistant professor in Mechanical Engineering, Arak University of Technology.

Contribution Statement: Conceptualization, Methodology, Validation, Formal analysis, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing.

Hamed Faraji



Biography: MSc Student in Department of Manufacturing Engineering, Arak University, Arak, Iran

Contribution Statement: Software Revise, Investigation, Formal analysis, Writing – review & editing.

Ali Farahani



Biography: MSc Student in Department of Manufacturing Engineering, Arak University, Arak, Iran

Contribution Statement: Software, Writing – original draft, Writing – Revise, review & editing.

Nima Rahmani



Biography: MSc Student in Department of Manufacturing Engineering, Arak University, Arak, Iran.

Contribution Statement: Writing – original draft, Writing, Formal analysis, Software, Investigation.

۵- مراجع

- [1] Pramod R, Kumar GV, Gouda PS, Mathew AT. A study on the Al₂O₃ reinforced Al7075 metal matrix composites wear behavior using artificial neural networks. *Materials Today: Proceedings*. 2018;5:11376-85.
- [2] Bhattacharyya D, Bowis M, Gregory J. The influence of alumina microsphere reinforcement on the mechanical behavior and weldability of a 6061 aluminum metal matrix composite. *Machining of composite materials(A 95-15178 02-37)*, Materials Park, OH, ASM International, 1992. 1992:49-56.
- [3] Lane C. The effect of different reinforcements on PCD tool life for aluminum composites. *Machining of composite materials(A 95-15178 02-37)*, Materials Park, OH, ASM International, 1992. 1992:17-27.
- [4] Nasernia E, Nouri-Khajavi M, Rezaee M. Milling tool wear prediction by feed motor current signal using MLPs and ANFIS. *Aerospace Mechanics Journal*. 2019;15:51-62.
- [5] Lin J, Bhattacharyya D, Kecman V. Multiple regression and neural networks analyses in composites machining. *Composites Science and Technology*. 2003;63:539-48.

- [6] Azmi A, Lin R, Bhattacharyya D. Tool wear prediction models during end milling of glass fibre-reinforced polymer composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013;67:701-18.
- [7] Wiciak-Pikuła M, Felusiak-Czyryca A, Twardowski P. Tool wear prediction based on artificial neural network during aluminum matrix composite milling. *Sensors*. 2020;20:5798.
- [8] Fadaei A, Sori M. Prediction of cutting speed and feed effects on residual stresses in AISI 1045 steel turning shafts using artificial neural network. *Sharif Journal of Mechanical Engineering*. 2019;35:123-32.
- [9] Özyürek D, Kalyon A, Yıldırım M, Tuncay T, Ciftci I. Experimental investigation and prediction of wear properties of Al/SiC metal matrix composites produced by thixomoulding method using Artificial Neural Networks. *Materials & Design*. 2014;63:270-7.
- [10] Zhou G, Xu C, Ma Y, Wang X-H, Feng P-F, Zhang M. Prediction and control of surface roughness for the milling of Al/SiC metal matrix composites based on neural networks. *Advances in Manufacturing*. 2020;8:486-507.
- [11] Karabulut Ş. Optimization of surface roughness and cutting force during AA7039/Al₂O₃ metal matrix composites milling using neural networks and Taguchi method. *Measurement*. 2015;66:139-49.
- [12] Veeresh Kumar G, Pramod R, Shivakumar Gouda P, Rao C. Artificial Neural Networks for the Prediction of Wear Properties of Al6061-TiO₂ Composites. *Materials Science and Engineering Conference Series 2017*. 012046.
- [13] Faraji H, Taheri M. Sensitivity analysis of parameters affecting cutting speed and dimensional deviation of wire electrical discharge machining. *Mechanic of Advanced and Smart Materials*. 2022;2:310.
- [14] Tahmasbi V, Baghi MH, Aeinehbandy S, Sousanabadi Farahani A. Sensitivity analysis and optimization of material removal rate and surface quality in aluminum matrix composite. *Modares Mechanical Engineering*. 2023;23:395-404.
- [15] Das D, Pradhan SK, Sahoo AK, Panda A, Satpathy MP, Samal C. Tool wear and cutting force investigations during turning 15 wt% SiCp-Al 7075 metal matrix composite. *Materials Today: Proceedings*. 2020;26:854-9.
- [16] Zare Chavoshi S. Tool flank wear prediction in CNC turning of 7075 AL alloy SiC composite. *Production Engineering*. 2011;5:37-47.
- [17] Elsadek A, Gaafer A, Lashin A. Prediction of Roughness and Tool Wear in Turning of Metal Matrix Nanocomposites. *J Eng App Sci*. 2017;64:387-408.
- [18] Prakash U, Yogavardhanaswamy G, Prasad SA, Ravindra H, Rajan T. Tool wear prediction by regression analysis in turning A356 with 10% SiC. *2011 IEEE Recent Advances in Intelligent Computational Systems: IEEE*; 2011. 682-7.
- [19] Liu H, Zong W. Prediction model of tool wear volume in precision turning of ceramic particle reinforced aluminum matrix composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019;100:2689-700.
- [20] Taheri, M., & Ghane, F. Investigating the effective parameters on the mechanical properties of composites reinforced by jute fiber in the compression molding process. *Mechanic of Advanced and Smart Materials*, 3(4), 413-431.
- [21] Cukier R, Levine H, Shuler K. Nonlinear sensitivity analysis of multiparameter model systems. *Journal of computational physics*. 1978;26:1-42.
- [22] Saltelli A. Making best use of model evaluations to compute sensitivity indices. *Computer physics communications*. 2002;145:280-97.

- [23] Fereiduni F, Taheri M, Modabberifar M. Investigation of the effect of different parameters on force in the second phase of two-dimensional Nanomanipulation. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2021;8:23-31.
- [24] Khorshidi K, Taheri M, Ghasemi M. Sensitivity analysis of vibrating laminated composite rec-tangular plates in interaction with inviscid fluid using efast method. *Mechanics of Advanced Composite Structures*. 2020;7:219-31.