Mechanics of Advanced and Smart Materials Journal
http://masm.araku.ac.ir

Experimental study of surface roughness of brass drilling to optimize parameters using E-Fast statistical method

V.Tahmasbi [a*], Z.Eghdami [b]

[a] Assistant Professor of Mechanical Engineering, Arak University Of Technology, Arak, Iran
[b] Department of Mechanical Engineering , Arak University, Arak , Iran

Original Article

Use your device to scan and read the article online

Citation: Tahmasbi V, Eghdami Z. Experimental study of surface roughness of brass drilling to optimize parameters using E-Fast statistical method. Mechanics of Advanced and Smart Materials. 2022;1(2):216-230.

https://10.52547/masm.1.2.216

KEYWORDS

Sensitivity analysis,
statistical E-Fast methods,
drilling process,
Surface roughness.

ABSTRACT

Today, the drilling process is one of the most fundamental machining processes among industrial processes, which is moving towards machining with high speed and accuracy to improve productivity and production. The tools used in this process play a key and important role and can increase the surface quality of the holes in question. In the drilling process, increasing the spindle rotation speed, on the one hand, increases the machining speed and, on the other hand, causes the tool to erode faster. Also, reducing the advancement rate on the one hand increases the surface quality and on the other hand reduces the chipping rate. Therefore, accurate selection of different parameters in drilling operations is necessary to achieve the desired surface smoothness. In this paper, first, by performing experimental experiments, a second-order linear regression mathematical model is presented to predict the surface roughness during brass metal drilling operations in terms of spindle rotation speed, advance rate, tool diameter and their effective interactions. Then, using the e-Fast statistical sensitivity analysis method, the effect of the studied parameters on the surface roughness of the product is investigated. The results obtained from the e-Fast statistical sensitivity analysis method show that among the three input parameters, the progress rate parameter with 62% effect on surface roughness as the most effective parameter, spindle rotation speed with 34% effect as the second parameter affecting surface roughness Finally, tool diameter with only 4% effect is known as the least effective parameter on surface roughness in drilling process.

Extended Abstract

1. Introduction

The drilling process is one of the most basic machining processes that has wide applications in the manufacture of various mechanical parts and equipment. The tools used in this process play a key and important role and can increase the surface quality of the holes. About 25 to 30% of the machining time of various parts is related to drilling.

In the milling process, based on the shear parameters, geometry and tool path, pleats are produced along the edges of the workpiece, but in the drilling process, pleats are created at the inlet and outlet surfaces of the workpiece. Inlet folds form when the workpiece is subjected to severe plastic deformation near the cutting tool and on the inlet surface. Also, when folds are spread on the output surface of the workpiece, output folds are formed. Because output folders are much larger than input folders, most industrial problems focus on output folders.

In this paper, first, a general study of the drilling process of brass metal has been performed and according to the results of experimental experiments, the surface roughness model has been obtained coded according to the input variables of the drilling process using the surface response method. Then different methods of sensitivity analysis have been studied. Then,

* Corresponding author. Tel.: 08633400677; Fax: 08633670020
E-mail address: Tahmasbi@arakut.ac.ir
DOI: https://10.52547/masm.1.2.216
Received: October 16, 2021; Received in revised form: November 26, 2021; Accepted: February 08, 2022
2022 Published by Arak University Press. All rights reserved.

the method of statistical sensitivity analysis of E-Fast has been investigated and using this method, the effect of different input parameters on the output parameter of surface roughness has been investigated.

2. **Modeling and formulation**

The response level method is one of the mathematical and statistical methods that is used to model and analyze the problems that the response is affected by several variables, and its purpose is to model and optimize this response. The drilling process is one of the most basic machining processes that has wide applications in the manufacture of various mechanical parts and equipment. Chipping rate is one of the most important outputs during the drilling process and is very important. The response level is based on experimental design and statistical optimization.

Table 1 shows the values of the different levels of the test parameters. Table 2 also lists the tests and the results of the sampling rate.

According to the results obtained from experimental experiments, the cut-off rate (MRR) model will be coded in terms of input variables in the drilling process as relation (2)

Table 1. values Level Different Parameters the experiment

1	**0**	**-1**	Factors entrance the experiment
1	0.8	0.6	(mm) diameter Drill A
3000	2000	1000	(rpm) speed Rotation Spindle B
10	5	1	(mm / rev) rate Progress C

Table 2. Table Do experiments And Results rate Shavings Vector

Rate Progress (C)	Speed Rotation (B)	Drill diameter (A)	Test number
-1	-1	-1	1
-1	-1	1	2
-1	1	-1	3
-1	1	1	4
1	-1	-1	5
1	-1	1	6
1	1	-1	7
1	1	1	8
0	0	-1	9
0	0	1	10
0	-1	0	11
0	1	0	12
-1	0	0	13
1	0	0	14
0	0	0	15

2-1 E-Fast analysis method

The e-offset method was proposed by Cocker et al. and Saltley et al. improved this method. E-Fast method is one of the methods of statistical sensitivity analysis and model-independent, which is based on analysis of variance. This method can be used for nonlinear and non-uniform functions and models. The application of the e-fast method is presented in several stages. This method, like the Sobel method, is based on variance and is independent of any assumptions (linear and uniform) between inputs and outputs (s). This method, unlike the Sobel method, which uses multidimensional integrals to obtain total variance and partial variances, defines the transfer function, converts multidimensional integrals to one-dimensional integrals, and simplifies the process of calculating sensitivity indices. Explores input factors (K ^ n) using a search curve defined by a set of parametric equations

$$x_i = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} arcsin(sin(\omega_i s + \phi_i)) \quad (2)$$

ω_i (i = 1,2, ⋯, n) The frequency of the factor x_i and s is a variable that changes in the range π- to π and ϕ_i specifies the starting point of the curve. The output variance of the model is approximated using Fourier analysis:

$$V(Y) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f^2(s)ds - \left[\frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(s)ds\right]^2 \approx \sum_{j=-\infty}^{\infty}(A_j^2 + B_j^2) - (A_0^2 + B_0^2) \approx 2\sum_{j=1}^{N}(A_j^2 + B_j^2) \quad (3)$$

$f(s) = f(G_1(sin(\omega_1 s)), G_2(sin(\omega_2 s)), \ldots, G_n(sin(\omega_n s)))$ G Transfer functions, A_j and B_j are Fourier coefficients As shown in Equations 4 and 5.

$$A_j = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(s)\cos(js)ds \quad (4)$$

$$B_j = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(s)\sin(js)ds \quad (5)$$

By calculating the Fourier coefficients for the base frequency ω_i and its higher harmonics pω_i, the partial variance of the first-order input x_i can be obtained.

$$V_i = \sum_{p\in Z^0}(A_{p\omega_i}^2 + B_{p\omega_i}^2) = 2\sum_{p=1}^{\infty}(A_{p\omega_i}^2 + B_{p\omega_i}^2) \quad (6)$$

We also use the ratio of first-order partial variance to total variance to calculate the main sensitivity index, such as the Sobel method. The overall sensitivity index is also obtained from Equation 7

$$ST_i = 1 - \frac{V_{-i}}{V} \quad (7)$$

The variance V _ (- i) is obtained by changing all the parameters except the parameter x_i.

The Sobel method uses the Mint Carlo integral to obtain any partial variance. The Sobel method does not use the transfer function compared to the E-fest method, therefore it has a low computational efficiency. The e-Fast method is a cheap method for calculating the Sobel indicators. Because in the e-fast method, a sample is made, but the subel method requires the construction of several different samples

2-2- Sensitivity analysis of parameters

In this section, the effect of different parameters of the drilling process on the surface roughness in this type of process is investigated. Figures 1 to 3 show the scatter of points of surface roughness with simultaneous changes of three input parameters. The scatter points in these shapes were extracted using Simlab software by e-Fast method.

The statistical method of E-Fast sensitivity analysis has the advantage over analysis of variance that in addition to observing the qualitative effect of input parameters on the output parameter, the quantitative and accurate effect of these parameters can be obtained simultaneously and important parameters with high impact and low parameters Accurately identified the effect. Also in the diagrams related to this method, the result can be seen graphically at the same time.

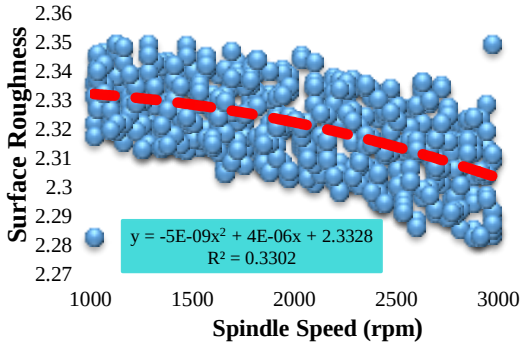


Figure 1. speed effects Rotation Spindle on the surface roughness

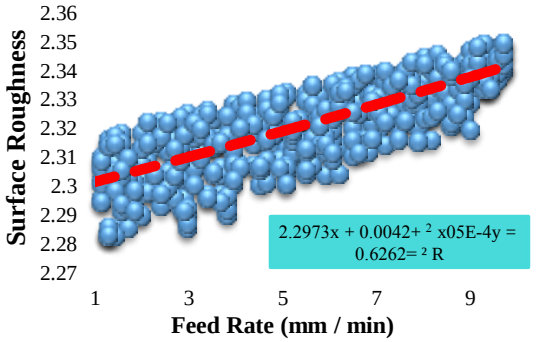


Figure 2. Effect of advancement rate on surface roughness

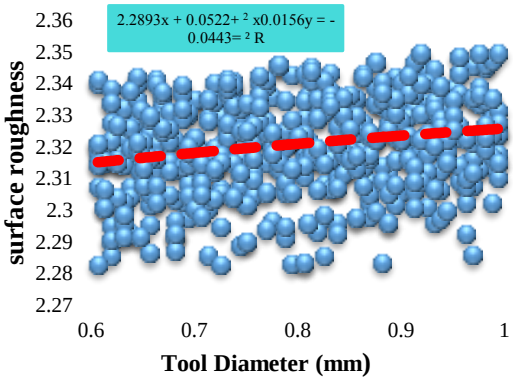


Figure 3. Effect of tool diameter on surface roughness

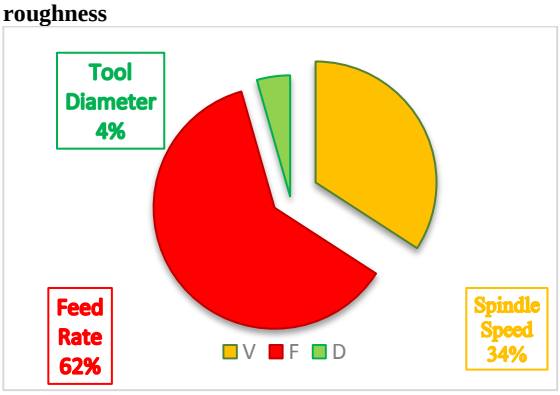


Figure 4. The effect of different parameters on surface roughness by E- fast method

3. Summarizing and concluding

In this paper, the e-Fast statistical method was used to analyze the sensitivity of the obtained results, which is a fast method. In the e-Fast method, unlike graphical methods, in which all inputs except one are fixed inputs, all parameters are changed simultaneously using a special algorithm, and as a result, the effective parameters in the process are obtained more accurately. Figure 8 shows the general results of the E-Fast sensitivity analysis method. In this figure, it is observed that among the three input parameters studied, the progress rate parameter with 62% effect on surface roughness is known as the most important effective parameter. Figure 8 also shows that the spindle rotation speed with 34% effect as the second parameter affecting the final surface roughness of the drilling process and the tool diameter parameter with only 4% effect as the least effective parameter on the surface roughness is among the existing parameters.

In the process of drilling metals, achieving a suitable surface roughness is essential. Extensive research on this process, including the study of spindle rotation speed, advance rate and tool diameter, as well as the effect of various parameters on this process, can be significantly improved. The studies done in this paper show that the progress rate is known as an important and effective parameter in the drilling process that will have a great impact on the surface roughness, so according to the type of process, accurate selection of the progress rate is very important and necessary. The obtained results also indicate that the diameter of the tool has a very small and minor effect on the surface roughness of the drilling process and can be ignored.

مکانیک مواد پیشرفته و هوشمند

مجله علمی مکانیک مواد پیشرفته و هوشمند

بررسی تجربی زبری سطح در سوراخ‌کاری برنج به جهت بهینه‌سازی پارامترها با استفاده از روش آماری ای-فست

وحید طهماسبی[الف*]، زهرا سادات اقدامی[ب]

[الف] استادیار، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، salamattalab@arakut.ac.ir

[ب] دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، zahra.eghdamiiii@gmail.com

واژگان کلیدی

برداشت انرژی، تابعی مدرج، تئوری‌های اصلاح‌شده، پیزوالکتریک.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۹/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۹

چکیده

امروزه فرآیند سوراخ‌کاری یکی از بنیادی‌ترین فرآیندهای ماشین‌کاری در میان فرآیندهای صنعتی است که جهت بهبود بهره‌وری و تولیدات به سمت ماشین‌کاری با سرعت‌بالا و دقت زیاد در حال حرکت است. ابزارهای مورد استفاده در این فرآیند نقش مهمی داشته و می‌توانند باعث افزایش کیفیت سطح سوراخ‌های مورد نظر شوند. اگرچه قیمت ابزارهای سوراخ‌کاری نسبتاً پایین است، اما هزینه‌های ناشی از شکسته شدن ابزار زیاد می‌باشد. در فرآیند سوراخ‌کاری افزایش سرعت چرخش اسپیندل از طرفی موجب بالا رفتن سرعت ماشین‌کاری و از طرف دیگر موجب فرسایش سریع‌تر ابزار می‌گردد. همچنین کاهش نرخ پیشروی از طرفی سبب افزایش کیفیت سطح می‌شود و از طرف دیگر موجب کاهش نرخ براده برداری می‌شود. بنابراین انتخاب دقیق پارامترهای مختلف در عملیات سوراخ‌کاری جهت دستیابی به صافی سطح مطلوب، امری ضروری می‌باشد. در این مقاله ابتدا با انجام آزمایش‌های تجربی، یک مدل ریاضی رگرسیون خطی مرتبه دوم به‌منظور پیش‌بینی میزان زبری سطح در حین عملیات سوراخ‌کاری فلز برنج برحسب سرعت چرخش اسپیندل، نرخ پیشروی، قطر ابزار و برهم‌کنش‌های مؤثر آن‌ها ارائه شده است. سپس با استفاده از روش ای-فست، تأثیر پارامترهای مورد بررسی بر زبری سطح به دست آمده است. نتایج به‌دست‌آمده از روش آنالیز حساسیت آماری ای-فست نشان می‌دهند که بین سه پارامتر ورودی مورد بررسی، پارامتر نرخ پیشروی با ۶۲ درصد تأثیر بر روی زبری سطح به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر اثرگذار، سرعت چرخش اسپیندل با ۳۴ درصد اثرگذاری به‌عنوان دومین پارامتر اثرگذار بر زبری سطح نهایی، قطر ابزار با تنها ۴ درصد اثرگذاری به‌عنوان کم اثرترین پارامتر بر زبری سطح در فرآیند سوراخ‌کاری می‌باشد.

۱- مقدمه

فرآیند سوراخ‌کاری یکی از ابتدایی‌ترین فرآیندهای ماشین‌کاری می‌باشد که کاربردهای گسترده‌ای در ساخت قطعات و تجهیزات مختلف مکانیکی دارد. ابزارهای مورد استفاده در این فرآیند نقش کلیدی و مهمی داشته و می‌توانند باعث افزایش کیفیت سطح سوراخ‌های مورد نظر شوند [۱]. حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد زمان ماشین‌کاری قطعات گوناگون مربوط به سوراخ‌کاری است [۲]. امروزه تولید قطعات صنعتی با خطای ابعادی کم و کیفیت سطح بالا جهت افزایش کیفیت محصولات تولیدی مدنظر تولیدکنندگان قرار دارد. به دلیل آنکه سوراخ‌ها می‌تواند برای عبور سیال و یا قطعات راهنمای قالب‌ها مورد استفاده قرار گیرند،

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۸۶۳۳۴۰۰۶۷۷؛ فکس: ۰۸۶۳۳۶۷۰۰۲۰

آدرس پست الکترونیک: Tahmasbi@arakut.ac.ir

کیفیت سوراخ تولیدشده با استفاده فرآیند دریل کاری، به‌عنوان سریع‌ترین فرآیند تولید سوراخ، حائز اهمیت است. محدودیت‌های تلرانس‌های هندسی و ابعادی[1] سبب شده‌اند که تحقیقات گسترده‌ای برای ایجاد سوراخ با دقت بالا انجام شود [۳]. باوجوداینکه مته‌ها می‌توانند سوراخ‌های دقیق ایجاد کنند، ولی در بعضی از صنایع که دقت و کیفیت سوراخ حائز اهمیت است از مته به‌عنوان یک ابزار خشن‌تراش و قبل از فرآیند برقوکاری، داخل‌تراشی و سنگ‌زنی استفاده می‌شود [۴]. بهبود کیفیت سطح به‌دست‌آمده در فرآیند دریل کاری می‌تواند سبب کاهش هزینه‌ها در فرآیندهای بعد از دریل کاری شود [۵]. در میان روش‌های ماشین‌کاری سنتی، فرآیند سوراخ‌کاری سهم مهمی در حذف تراشه‌ها دارد. مهم‌ترین هدف این فرآیند، سوراخ‌کاری کم‌هزینه و باکیفیت بالا است. ایجاد سوراخ یک مشکل جدی در مهندسی دقیق و تولید انبوه است، بنابراین در تولید نیاز به توجه زیادی دارد. تشکیل سوراخ بین ورودی و خروجی، زبری سطح و حداکثر میزان مواد مربوطه نقش مهمی در کیفیت در حین کار دارد [۶].

پارامترهای زیادی در فرآیند سوراخ‌کاری مطرح می‌شوند که از آن جمله می‌توان به نیروهای کریلیوس[2]، ژیروسکوپیک[3] [۷-۸] دمپینگ فرآیندی[4][۹-۱۰] . شرایط مرزی مته در محل اتصال به ابزار گیر [۱۱] ارتعاشات عرضی، محوری و پیچشی[5] اشاره کرد. برای مدل‌سازی شرایط مختلف دریل کاری تحقیقات گسترده‌ای انجام شده است اما به دلیل وجود شرایط متفاوت در تماس مته با دیوار، هندسه ابزار، کوپل شدن ارتعاشات عرضی، محوری و پیچشی، تأثیر براده در حال خروج بر کیفیت سطح و همچنین گرمای تولیدشده در فرآیند و سایر عوامل، شبیه‌سازی این فرآیند همچنان به‌عنوان یک چالش شبیه‌سازی دقیق مطرح است.

گوپاکویا درنتیجه تحقیقاتش نشان داد که کوپل ارتعاشی طولی و پیچشی نقش مهمی در پایداری فرآیند دریل کاری و کیفیت سوراخ تولیدی بازی می‌کنند [۱۲]. امیر و همکاران از بررسی وضعیت ابزار پس از ماشین‌کاری و کیفیت سوراخ دریافتند که نیروی رانش به‌شدت تحت تأثیر نرخ تغذیه و اندازه مته است. سرعت‌بالای دوک باعث زبری سطح بیشتر می‌شود، درحالی‌که افزایش نرخ تغذیه باعث ایجاد سوراخ‌های بیشتری در لبه سوراخ‌ها می‌شود [۱۳]. در کنار موضوعات فوق، پالانیکومار و همکارانش در فرآیند سوراخ‌کاری آلیاژ آلومینیوم سیلیسیوم نیروی پیشروی و زبری سطح را کنترل کرده‌اند. آن‌ها دریافتند که نرخ پیشروی بر نیروی طولی مته و از طرف دیگر سرعت دوران مته بر زبری سطح تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای دارد[۵]. آماران و همکارانش در یک پژوهش نشان داده‌اند که افزایش سرعت دورانی، پیشروی و قطر مته می‌تواند سبب افزایش کیفیت سطح سوراخ گردد[۱۴].

در فرآیند فرزکاری، بر اساس پارامترهای برشی، هندسه و مسیر ابزار، پلیسه‌ها در امتداد لبه‌های قطعه کار تولید می‌شوند، ولی در فرآیند سوراخ‌کاری، پلیسه‌ها در سطح ورودی و خروجی قطعه کار به وجود می‌آیند. هنگامی‌که قطعه کار در نزدیکی ابزار برشی و بر روی سطح ورودی تحت جریان تغییر شکل پلاستیک شدید قرار بگیرد، پلیسه‌های ورودی شکل می‌گیرند. همین‌طور هنگامی‌که در سطح خروجی قطعه کار مواد گسترش یابند، پلیسه‌های خروجی شکل می‌گیرند. ازآنجایی‌که پلیسه‌های خروجی بسیار بزرگ‌تر از پلیسه‌های ورودی هستند، بیشترین مشکلات صنعتی معطوف به پلیسه‌های خروجی است[۱۵-۱۶].

آنالیز حساسیت روشی است که به‌وسیله‌ی آن آثار تغییرات ضرایب موجود در مدل‌ها را بر نتایج حاصل از آن‌ها می‌توان بررسی نمود. نتایج این بررسی را می‌توان در مرحله‌ی بررسی و مقایسه‌ی نتایج مورد استفاده قرارداد به‌گونه‌ای که موجب افزایش دقت نتایج و صرفه‌جویی در وقت و هزینه شود. ورودی‌هایی که در حل مدل لازم هستند را به نام پارامترهای ورودی شناخته و برای خروجی‌های مدل، عنوان متغیرهای وابسته به‌کاررفته می‌شود همچنین آنالیز حساسیت، عدم قطعیت در خروجی یک مدل را بررسی نموده و بیان می‌نماید که این عدم قطعیت در خروجی چگونه به عدم قطعیت در ورودی مرتبط

[1] Geometric and dimensional tolerances
[2] Coriolis effect
[3] gyroscopic effect
[4] Process dumping
[5] Transverse, axial, torsional vibrations

می‌گردد [۱۷]. این روش برای شناسایی پارامترهای مؤثر و غیر مؤثر در مدل خروجی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل‌های آنالیز حساسیت در دو نوع محلی و عمومی طبقه‌بندی می‌شوند [۱۸]. روش ای-فست توسط کوکیر و همکارانش [۱۹] ارائه‌شده و سالتلی و همکارانش [۲۰] این روش را بهبود داده‌اند. تاکنون از روش‌های آماری آنالیز حساسیت جهت بررسی دقیق و کمی میزان تأثیرگذاری پارامترهای مختلف بر زبری سطح نهایی سوراخ در فرآیند سوراخ‌کاری استفاده نشده است. در طول فرآیند سوراخ‌کاری، کیفیت داده‌ها بر قابلیت اطمینان نتایج نظارت بر شرایط تأثیر می‌گذارد. بااین‌حال، داده‌های واقعی حفاری ممکن است با انواع مختلف داده‌های غیرطبیعی روبرو شوند و انواع مختلف آن‌ها باید متفاوت مورد استفاده قرار گیرد. داده‌های غیرطبیعی ناشی از عوامل خارجی مانند خرابی سنسور، خطاهای ذخیره‌سازی و غیره باید اصلاح شوند، درحالی‌که داده‌های غیرطبیعی ناشی از حوادث حفاری باید محافظت شوند.

در این مقاله، ابتدا به بررسی کلی فرآیند سوراخ‌کاری فلز برنج پرداخته شده است و با توجه به نتایج آزمایش‌های تجربی انجام‌گرفته، مدل زبری سطح به‌صورت کد شده برحسب متغیرهای ورودی فرآیند سوراخ‌کاری با استفاده از روش پاسخ سطح، به دست آمده است. سپس روش‌های مختلف آنالیز حساسیت مورد مطالعه قرارگرفته‌اند. پس‌ازآن، روش آنالیز حساسیت آماری ای-فست[۶] مورد بررسی قرارگرفته است و با استفاده از این روش به بررسی تأثیر پارامترهای ورودی مختلف بر روی پارامتر خروجی زبری سطح پرداخته شده است.

۲- مدل‌سازی و فرمول‌بندی

در این بخش ابتدا مختصری به فرآیند سوراخ‌کاری و استفاده از روش پاسخ سطح جهت محاسبه‌ی فرمول کدشده‌ی زبری سطح حاصل از فرآیند سوراخ‌کاری پرداخته‌شده است. پس‌ازآن، آنالیز حساسیت و روش‌های مختلف آن شامل روش غربال کردن، روش آنالیز حساسیت محلی و روش آنالیز حساسیت عمومی به‌طور مختصر بررسی‌شده و سپس با توجه به نیاز به بررسی تأثیر متقابل بین ورودی‌های مختلف، روش آنالیز حساسیت آماری ای-فست جهت تحلیل و بررسی اثر پارامترهای مختلف انتخاب گشته و به شرح مختصر آن پرداخته شده است

۲-۱- تعیین زبری سطح در فرآیند سوراخ‌کاری به روش پاسخ سطح

امروزه فرآیند سوراخ‌کاری یکی از بنیادی‌ترین فرآیندهای ماشین‌کاری در میان فرآیندهای صنعتی است که جهت بهبود بهره‌وری و تولیدات به سمت ماشین‌کاری با سرعت بالا و دقت زیاد در حال حرکت است. زبری سطح نهایی حاصل از فرآیند سوراخ‌کاری ازجمله خروجی‌های مهم و تأثیرگذار در طی این فرآیند بوده و از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد.

روش سطح پاسخ ازجمله روش‌های ریاضی و آماری می‌باشد که برای مدل‌سازی و تحلیل مسائلی که پاسخ تحت تأثیر چندین متغیر قرار می‌گیرد، استفاده می‌گردد و هدف آن مدل‌سازی و بهینه‌سازی این پاسخ است [۲۱]. فرآیند سوراخ‌کاری یکی از ابتدایی‌ترین فرآیندهای ماشین‌کاری می‌باشد که کاربردهای گسترده‌ای در ساخت قطعات و تجهیزات مختلف مکانیکی دارد. نرخ براده برداری ازجمله خروجی‌های بسیار مهم در طی فرآیند سوراخ‌کاری بوده و از اهمیت زیادی برخوردار است. اساس سطح پاسخ بر طراحی آزمایش‌ها و بهینه‌سازی آماری استوار است. طرح آزمایش به‌عنوان ابزاری مناسب برای مهندسان در توسعه و اصلاح و صرفه‌جویی در وقت و هزینه‌های آزمایش‌ها و رفع عیوب آن‌ها به کار گرفته می‌شود استفاده به‌موقع از آن سبب کاهش زمان تولید و هزینه‌ها می‌گردد. جدول ۱ مقادیر سطح‌های مختلف پارامترهای آزمایش را نشان می‌دهد. در جدول ۲ نیز انجام آزمایش‌ها و نتایج نرخ براده برداری ذکر شده است. در ابتدا با طراحی آزمایش‌های مناسب، نرخ براده برداری برای سرعت‌های مختلف چرخش اسپیندل[۷] استخراج شده است. سپس با افزایش نرخ پیشروی، اثر تغییرات نرخ پیشروی بر نرخ براده برداری مورد مطالعه قرار گرفته است که تصاویر آن در شکل ۱ قابل مشاهده است. در انتها نیز اثر تغییرات قطر ابزار بر میزان نرخ براده برداری بررسی شده است که بدین منظور ۳۰ عدد سوراخ با قطرهای مختلف ابزار موردبررسی قرارگرفته و

[6] E-fast method
[7] spindle

نتایج آن در شکل ۲ آورده شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های تجربی صورت گرفته، مدل نرخ براده برداری (MRR) به‌صورت کدشده برحسب متغیرهای ورودی در فرآیند سوراخ‌کاری به‌صورت رابطه (۲) خواهد بود [۲۲]:

جدول ۱ مقادیر سطح‌های مختلف پارامترهای آزمایش

فاکتورهای ورودی آزمایش	**-۱**	**۰**	**۱**
A :قطر مته (mm)	۰/۶	۰/۸	۱
B :سرعت چرخش اسپیندل (rpm)	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۳۰۰۰
C :نرخ پیشروی (mm/rev)	۱	۵	۱۰

جدول ۲ جدول انجام آزمایشات و نتایج نرخ براده برداری

شماره آزمایش	قطر مته (A)	سرعت اسپیندل (B)	نرخ پیشروی (C)
۱	-۱	-۱	-۱
۲	۱	-۱	-۱
۳	-۱	۱	-۱
۴	۱	۱	-۱
۵	-۱	-۱	۱
۶	۱	-۱	۱
۷	-۱	۱	۱
۸	۱	۱	۱
۹	-۱	۰	۰
۱۰	۱	۰	۰
۱۱	۰	-۱	۰
۱۲	۰	۱	۰
۱۳	۰	۰	-۱
۱۴	۰	۰	۱
۱۵	۰	۰	۰

طاهری [۲۳] با استفاده از روش تحلیل حساسیت آماری سوبل[8] اثر پارامترهای ابعادی مختلف شامل نه پارامتر طول تیرک، عرض تیرک، ضخامت تیرک، ارتفاع سوزن، سرعت در راستای محورهای x و y، شعاع ذره، شعاع نوک سوزن و طول ذره بر هشت پارامتر خروجی شامل نیروی بحرانی لغزش در راستای محور x، غلتش حول محور x، لغزش در راستای محور y، غلتش حول محور y و زمان بحرانی لغزش در راستای محور x، غلتش حول محور x، لغزش در راستای محور y، غلتش حول محور y، در منیپولیشن سه‌بعدی[9] را مورد بررسی قرار داده است.

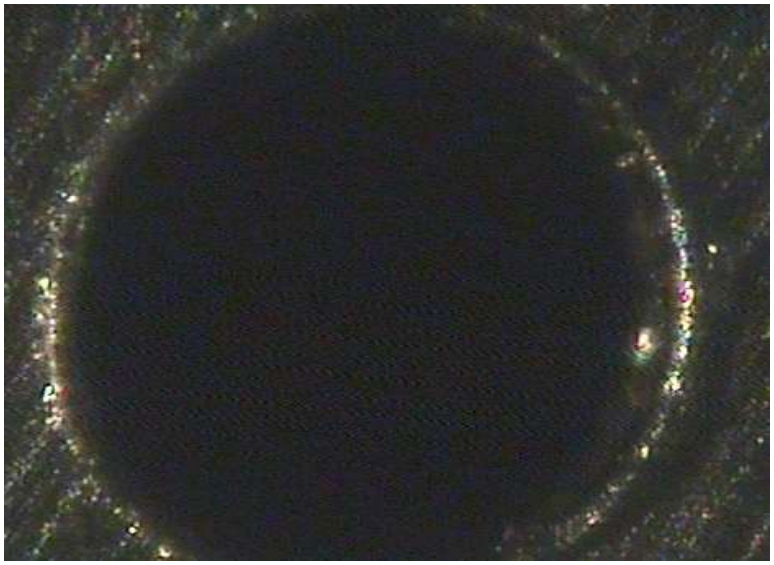
در این مقاله، ابتدا با طراحی آزمایش‌های مناسب، زبری سطح سوراخ برای سرعت‌های مختلف چرخش اسپیندل استخراج شده است. شکل ۱ نمایی از مته و میکرو سوراخکاری[10] انجام شده در برنز از بالا به همراه پلیسه‌های ناشی از آن را نشان می‌دهد.

سپس با افزایش نرخ پیشروی، اثر تغییرات نرخ پیشروی بر زبری سطح مورد مطالعه قرارگرفته است که تصاویر آن به‌صورت صفحه‌ای از جنس برنز که سوراخ‌کاری در ابعاد و با ابزارهای مختلف در آن ایجاد شده، در شکل ۲ قابل‌مشاهده است.این شکل در انتها نیز اثر تغییرات قطر ابزار بر میزان زبری سطح بررسی‌شده است که نتایج آن در شکل ۳ آورده شده است.

[8] Sobol Statistical Method
[9] Three-dimensional manipulation
[10] micro-drilling

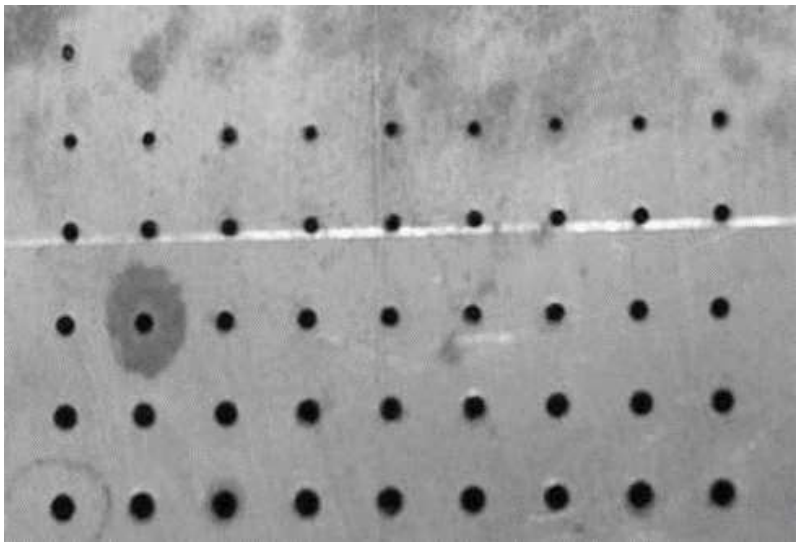
شکل شماره ۳ نمای برش خورده‌ای از محل سوراخ‌کاری می‌باشد که در شرایط مختلف با پیشروی‌های مختلف، زبری سطح نشان داده‌شده مشخص است.

(الف)

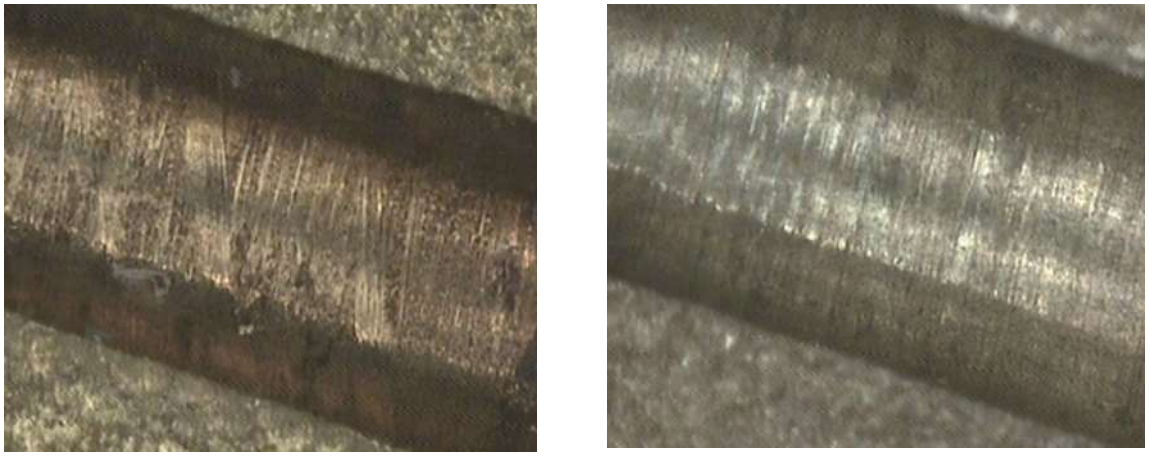


(ب)

شکل ۱ نمایی از الف) مته و ب) سوراخ ایجادشده در برنج



شکل ۲ زبری سطح برنج برای قطر ابزارهای متفاوت



(الف) (ب)

(ج)

شکل ۳ زبری سطح برنج برای نرخ پیشروی‌های متفاوت:الف) ۱ میلی‌متر بر دقیقه، ب) ۵میلی‌متر بر دقیقه، ج) ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های انجام‌گرفته، مدل زبری سطح به‌صورت کد شده برحسب متغیرهای ورودی فرآیند سوراخ‌کاری با استفاده از روش پاسخ سطح، به‌صورت رابطه (۱) خواهد بود:

$$SR = 2.32308 - 0.01406V + 0.02017f + 0.00539D - 0.00644V^2 + 0.00434V \times f \quad (۱)$$

۳- روش‌های کلی آنالیز حساسیت

آنالیز حساسیت برای ساده کردن مدل و افزایش اعتمادپذیری به مدل و ارائه ارتباط بین اطلاعات ورودی و خروجی مدل استفاده می‌شود. همچنین پیش‌بینی می‌کند مدل چگونه پاسخی به متغیرهای ورودی و تغییرات آن‌ها می‌دهد و کالیبراسیونی[11] برای داده‌ها می‌باشد.حوزه‌ای از روش‌های آنالیز حساسیت عمومی که بیش‌تر موردتوجه قرارگرفته است، روش‌های بر پایه‌ی واریانس می‌باشد. در این روش‌ها شاخص حساسیت به‌صورت سهم هر یک از پارامترهای ورودی در واریانس کلی خروجی مدل محاسبه می‌گردد. روش‌های آنالیز حساسیت عمومی در چهار مرحله انجام می‌گیرد:

- تعریف ورودی و نوع توزیع هریک از ورودی‌ها
- تولید نمونه برای مقادیر ورودی

[11] Calibration

- محاسبه‌ی خروجی مدل برای هر یک از مجموعه نمونه‌های ورودی
- محاسبه‌ی تأثیر هر فاکتور ورودی در خروجی

در این قسمت مروری بر روش‌های آنالیز حساسیت بر پایه‌ی تجزیه‌ی واریانس[۱۲] صورت گرفته است. روش‌های آنالیز حساسیت عمومی بر پایه‌ی واریانس می‌توانند برای محاسبه‌ی تأثیر مرتبه‌ی اول و تأثیر مرتبه‌ی دوم (که شامل برهم‌کنش بین پارامترهای دیگر می‌باشد) مورد استفاده قرار گیرند. روش سوبل [۲۴]، یک روش آنالیز حساسیت عمومی و مستقل از مدل است که بر پایه‌ی تجزیه‌ی واریانس می‌باشد. از این روش برای توابع و مدل‌های غیرخطی و غیریکنواخت می‌توان استفاده کرد. برای مدل تعریف‌شده با تابع $Y=f(X)$ که Y خروجی مدل و X (X_1,X_2) بردار پارامترهای ورودی می‌باشند، سوبل تجزیه تابع Y را به‌صورت مجموعی از ترم‌هایی با افزایش بعد پیشنهاد داد که انتگرال هر ترم بر روی متغیرهای ورودی خودش صفر می‌باشد. وی نشان داد که هرگاه همه‌ی ورودی‌ها بر همدیگر عمود باشند این تجزیه یکتاست و واریانس خروجی مدل (V) به‌صورت مجموع واریانس‌های هر ترم تجزیه‌شده می‌باشد. در این پژوهش به بررسی ای-فست بر روی عملیات میکرو سوراخ‌کاری پرداخته شده است.

روش غربال کردن: غربال کردن، برای مدل‌هایی که محاسبات گران و تعداد زیادی پارامتر ورودی دارند، مفید است و از این روش جهت شناسایی پارامترهای ورودی که بیش‌ترین تأثیر را روی خروجی‌ها دارند، استفاده می‌شود.

روش آنالیز حساسیت محلی: این روش، بیشتر با محوریت فاکتورهای مدل می‌باشد. این روش محاسباتی مشتق شده از توابع خروجی با در نظر گرفتن متغیرهای ورودی می‌باشد که به‌وسیله روش‌های محاسبات عددی انجام می‌گیرد. روش‌های محلی آنالیز حساسیت کمتر در زمینه‌هایی که می‌خواهیم سهم ورودی‌ها را روی خروجی‌ها به دست آوریم، کمک می‌کند.

روش آنالیز حساسیت عمومی: آنالیز حساسیت عمومی خروجی غیرمشخصی را با عامل‌های ورودی آن سهم‌بندی می‌کند و انواع توابع توزیع که پوشش می‌دهد، رنج قابل‌قبول فاکتورهای را بیان می‌کند. اهداف کلی و ویژگی‌های آنالیز حساسیت به‌طور خلاصه در شکل ۴ نشان داده شده است.

شکل ۴ اهداف آنالیز حساسیت

[12] analysis of variance (anova)

۳-۱- روش آنالیز ای-فست

روش ای-فست توسط کوکیر و همکارانش [۲۰] ارائه شد و سالتلی و همکارانش [۲۱] این روش را بهبود دادند. روش ای-فست یکی از روش‌های آنالیز حساسیت آماری و مستقل از مدل است که بر پایه‌ی تجزیه واریانس می‌باشد. از این روش می‌توان برای توابع و مدل‌های غیرخطی و غیریکنواخت استفاده کرد[۲۵]. کاربرد روش ای-فست در چند مرحله ارائه می‌شود. این روش همانند روش سوبل بر پایه‌ی واریانس است و مستقل از هرگونه فرض (خطی و یکنواخت) بین ورودی‌ها و خروجی-(ها) می‌باشد. این روش برخلاف روش سوبل که برای به دست آوردن واریانس کلی و واریانس‌های جزئی از انتگرال‌های چندبعدی استفاده می‌کرد، با تعریف تابع انتقال، انتگرال‌های چندبعدی را به انتگرال‌های تک‌بعدی تبدیل کرده و موجب ساده‌سازی روند محاسبه شاخص‌های حساسیت می‌گردد.روش ای-فست فضای n بعدی فاکتورهای ورودی (K^n) را با استفاده از منحنی جست‌وجو تعریف‌شده با مجموعه‌ای از معادلات پارامتریک، کاوش می‌کند [۲۱]:

$$x_i = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} arcsin\left(sin\left(\omega_i s + \phi_i\right)\right) \quad (۲)$$

ω_i $(i = 1,2,\cdots,n)$ فرکانس مربوط به فاکتور x_i و s متغیری است که در بازه‌ی π- تا π تغییر می‌کند و ϕ_i نقطه شروع منحنی را مشخص می‌کند. واریانس خروجی مدل با استفاده از آنالیز فوریه تقریب زده می‌شود:

$$V(Y) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f^2(s)ds - \left[\frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(s)ds\right]^2 \approx \sum_{j=-\infty}^{\infty}(A_j^2 + B_j^2) - (A_0^2 + B_0^2) \approx 2\sum_{j=1}^{N}(A_j^2 + B_j^2) \quad (۳)$$

G $f(s) = f(G_1(sin(\omega_1 s)), G_2(sin(\omega_2 s)), \ldots, G_n(sin(\omega_n s)))fv$ توابع انتقال، A_j و B_j ضرایب فوریه می‌باشند که در روابط ۴ و ۵ نشان داده شده است.

$$\mathrm{A_j} = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} \mathrm{f(s)\,cos(js)ds} \quad (۴)$$

$$\mathrm{B_j} = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} \mathrm{f(s)\,sin(js)ds} \quad (۵)$$

با محاسبه ضرایب فوریه برای فرکانس پایه ω_i و هارمونیک‌های بالاتر آن $p\omega_i$ می‌توان واریانس جزئی مرتبه اول ورودی x_i را به دست آورد.

$$V_i = \sum_{p\in Z^0}(A_{p\omega_i}^2 + B_{p\omega_i}^2) = 2\sum_{p=1}^{\infty}(A_{p\omega_i}^2 + B_{p\omega_i}^2) \quad (۶)$$

همچنین برای محاسبه شاخص حساسیت اصلی مانند روش سوبل از نسبت واریانس جزئی مرتبه اول به واریانس کلی استفاده می‌کنیم. شاخص حساسیت کلی نیز از معادله‌ی ۷ به دست می‌آید [۲۶]:

$$ST_i = 1 - \frac{V_{-i}}{V} \quad (۷)$$

واریانس V_{-i} از تغییر همه پارامترها به‌جز تغییر پارامتر x_i به دست می‌آید.

روش سوبل برای به دست آوردن هر واریانس جزئی از روش منت کارلو[۱۳] استفاده می‌کند. روش سوبل در مقایسه با روش ای-فست از تابع انتقال استفاده نمی‌کند، به این دلیل بازده محاسباتی پائینی دارد. روش ای-فست یک روش ارزان برای

[13] Monte Carlo Method

محاسبه نسبت به شاخص‌های سوبل می‌باشد. چون درروش ای-فست یک نمونه درست می‌شود اما روش سوبل نیازمند ساخت چندین نمونه‌ی متفاوت است. در جدول ۳ جمع‌بندی مختصری از روش‌های آنالیز حساسیت، مزایا و معایب آن‌ها ارائه‌شده است[۲۷].

جدول ۳- مزایا و معایب روش‌های آنالیز حساسیت

نام روش	پایه تحلیل	مزایا	معایب
سوبل	واریانس	قادر به محاسبه‌ی برهم‌کنش بین ورودی‌ها و برای مدل‌های خطی و غیرخطی کاربرد دارد.	تعداد نمونه‌ها برای تحلیل حساسیت زیاد است و وقت‌گیر است.
EFAST	واریانس	برای مدل‌های خطی و غیرخطی کاربرد دارد. تعداد نمونه‌ها برای انجام تحلیل کم است.	دقت کمتری نسبت به مدل‌های دیگر بر پایه‌ی واریانس دارد.

مراحل آنالیز حساسیت به کار گرفته‌شده در این پژوهش به شرح زیر می‌باشد:

۱) انتخاب مجموعه‌ای از n فرکانس $\{\omega_1,\omega_2,...,\omega_n\}$، که n تعداد پارامترهای ورودی مدل می‌باشد.

۲) نسبت دادن به‌دلخواه یک فرکانس از مجموعه فرکانس‌ها برای هر پارامتر ورودی.

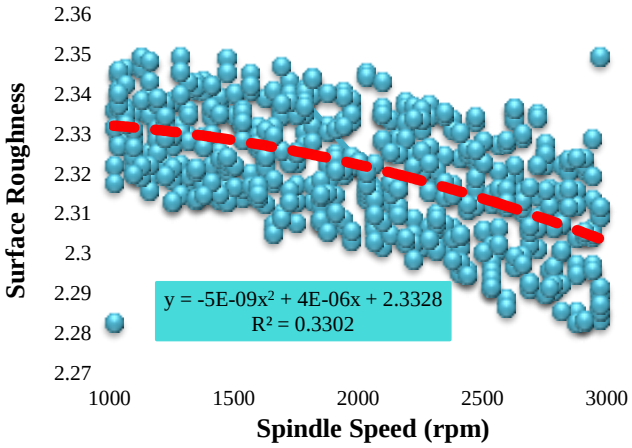
۳) معرفی منحنی جست‌وجو، که فضای همه پارامترهای ورودی را کاوش می‌کند.

۴) محاسبه اندیس‌های حساسیت مرتبه اول و مرتبه کلی به‌وسیله تحلیل فوریه برای خروجی

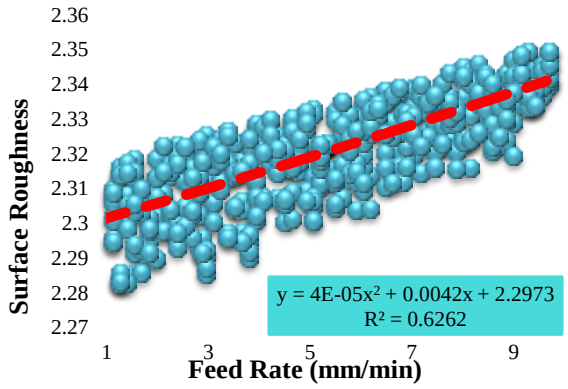
۳-۲- آنالیز حساسیت پارامترها

در این بخش، به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف فرآیند سوراخ‌کاری بر زبری سطح در این نوع فرآیند پرداخته‌شده است. شکل‌های ۵ تا ۷ پراکندگی نقاط میزان زبری سطح با تغییرات هم‌زمان سه پارامتر ورودی را نشان می‌دهد. نقاط پراکنده موجود در این شکل‌ها با استفاده از نرم‌افزار سیملب[۱۴] و به روش ای-فست استخراج شده‌اند. در روش ای-فست برخلاف روش‌های گرافیکی، که در آن‌ها تمامی ورودی‌ها به‌جز یک ورودی ثابت است، با استفاده از الگوریتمی خاص تمامی پارامترها به‌طور هم‌زمان تغییر می‌نمایند. شکل ۵ نشان می‌دهد که با افزایش سرعت چرخش اسپیندل، زبری سطح به‌صورت غیرخطی کاهش می‌یابد. این کاهش زبری سطح، برای سرعت‌های پایین چرخش اسپیندل و در حدود ۱۰۰۰ دور بر دقیقه نسبتاً کم بوده، درحالی‌که برای سرعت‌های بالای چرخش اسپیندل و در حدود ۳۰۰۰ دور بر دقیقه بسیار بیشتر می‌باشد. شکل ۶ تأثیر نرخ پیشروی بر میزان زبری سطح را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌گردد که با افزایش نرخ پیشروی، میزان زبری سطح به‌صورت نسبتاً خطی افزایش می‌یابد. شکل ۷ نشان‌دهنده‌ی تأثیر قطر ابزار بر زبری سطح می‌باشد. این شکل این موضوع را نشان می‌دهد که با افزایش قطر ابزار، میزان زبری سطح به‌صورت تقریباً خطی افزایش می‌یابد. مقایسه‌ی شکل‌های ۶ و ۷ نشان‌دهنده‌ی این امر است که نرخ پیشروی و قطر ابزار هر دو اثر یکسانی بر زبری سطح داشته و با افزایش هر یک از آن‌ها میزان زبری سطح به‌صورت تقریباً خطی افزایش خواهد یافت با این تفاوت که افزایش نرخ پیشروی تأثیر بسیار بیشتری نسبت به افزایش قطر ابزار در میزان زبری سطح دارد. برازش منحنی‌های به‌دست‌آمده از نوع چند جمله‌ای درجه ۲ می‌باشد، همچنین میزان واریانس هریک از پارامترها نمایش داده شده است که با میزان اثرگذاری پارامتر رابطه‌ی مستقیم دارد و در تعیین کردن میزان کمی پارامترها فاکتور اصلی به شمار می‌رود. روش آماری آنالیز حساسیت ای-فست، نسبت به آنالیز واریانس این برتری را دارد که علاوه بر مشاهده‌ی تأثیر کیفی پارامترهای ورودی بر پارامتر خروجی، می‌توان تأثیر کمی و دقیق این پارامترها را به‌طور هم‌زمان به دست آورده و پارامترهای مهم با تأثیرگذاری بالا و پارامترهای کم اثر را به‌طور دقیق شناسایی نمود. همچنین در نمودارهای مربوط به این روش می‌توان هم‌زمان نتیجه را به صورت گرافیکی مشاهده نمود.

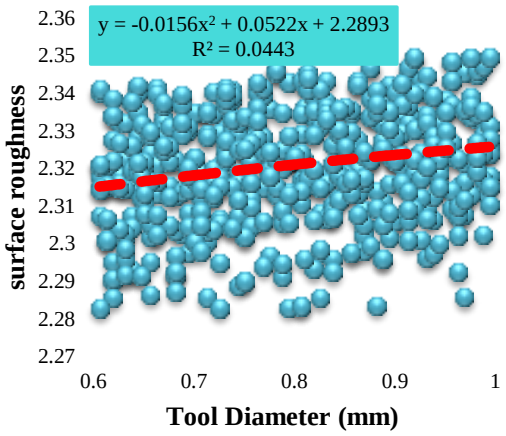
[14] SimLab



شکل ۵ اثر سرعت چرخش اسپیندل بر میزان زبری سطح



شکل ۶ اثر نرخ پیشروی بر میزان زبری سطح



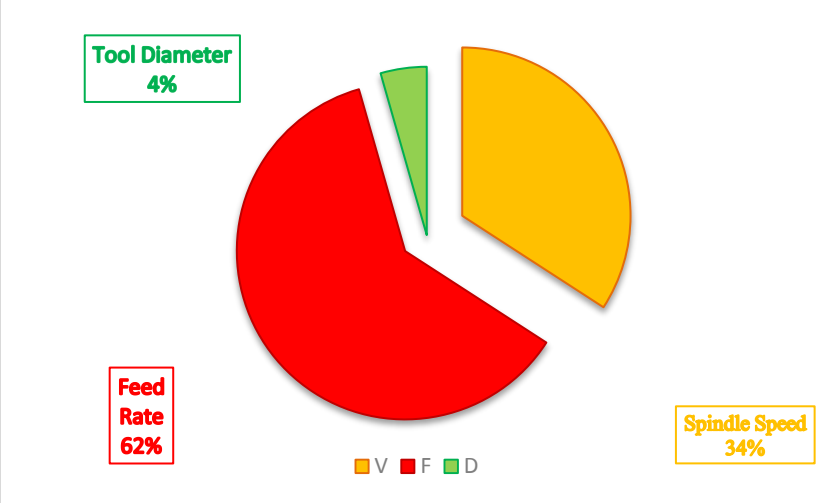
شکل ۷ اثر قطر ابزار بر میزان زبری سطح

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، برای بررسی و تحلیل حساسیت نتایج به‌دست‌آمده از روش آماری ای-فست استفاده شد که روشی سریع می‌باشد. در روش ای-فست برخلاف روش‌های گرافیکی، که در آن‌ها تمامی ورودی‌ها به‌جز یک ورودی ثابت است، با استفاده از الگوریتمی خاص تمامی پارامترها به‌طور هم‌زمان تغییر می‌نمایند و درنتیجه اثرگذاری پارامترهای مؤثر در فرآیند به نحو دقیق‌تری به دست می‌آیند. شکل ۸ نتایج کلی روش آنالیز حساسیت ای-فست را در برمی‌گیرد. در این شکل مشاهده می‌گردد که از بین سه پارامتر ورودی مورد بررسی، پارامتر نرخ پیشروی با ۶۲ درصد تأثیر بر روی زبری سطح به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر

اثرگذار شناخته می‌شود. همچنین در شکل ۸ مشاهده می‌شود که سرعت چرخش اسپیندل با ۳۴ درصد اثرگذاری به‌عنوان دومین پارامتر اثرگذار بر زبری سطح نهایی فرآیند سوراخ‌کاری بوده و پارامتر قطر ابزار نیز با تنها ۴ درصد اثرگذاری به‌عنوان کم اثرترین پارامتر بر زبری سطح از بین پارامترهای موجود می‌باشد.

در فرآیند سوراخ‌کاری فلزات دستیابی به زبری سطح مناسب امری ضروری می‌باشد. با انجام تحقیقات گسترده بر روی این فرآیند ازجمله بررسی سرعت چرخشی اسپیندل، نرخ پیشروی و قطر ابزار و همچنین بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر روی این فرآیند، می‌توان به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای این فرآیند را بهبود بخشید. بررسی‌های صورت گرفته در این مقاله نشان می‌دهد که نرخ پیشروی به‌عنوان پارامتر مهم و تأثیرگذار در فرآیند سوراخ‌کاری شناخته‌شده که تأثیر فراوانی بر زبری سطح خواهد داشت، لذا با توجه به نوع فرآیند مورد نظر، انتخاب دقیق نرخ پیشروی بسیار مهم و ضروری می‌باشد. همچنین نتایج به‌دست‌آمده بیانگر این امر است که قطر ابزار تأثیر بسیار کم و جزئی بر زبری سطح فرآیند سوراخ‌کاری داشته و می‌توان از آن صرف‌نظر نمود.



شکل ۸ تأثیر پارامترهای مختلف بر زبری سطح به روش ای-فست

۵- مراجع

[1] S. A. Jalali, W.J. Kolarik, Tool life and machinability models for drilling steels, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 31, No. 3, pp. 273 282.1991.
[2] M. Pirtini, I. Lazoglu, Forces and hole quality in drilling, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 45, pp. 1271-1281, 2005.
[3] K. Ahmadi, Y. Altintas, Stability of lateral, torsional and axial vibrations in drilling. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 68, pp. 63-74, 2013.
[4] J. Wang, Q. Zhang, a study of high-performance plane rake faced twist drills. Part I:Geometrical analysis and experimental investigation, International journal of machine tools & manufacture,Vol. 48, pp. 1276-1285, 2008.
[5] T. Kivak, G. Samtas, A. Cicek, Taguchi based optimization of drilling parameters in drilling of AISI 316 steel with PVD monolayer and multilayer coated HSS drill. Measurement, Vol. 45, pp. 1547-1557, 2012.
[6] S. Kalyanakumar, C. Munikumar, S.G. Nair, and S. Shaju, Application of multi response optimization of drilling setting main process parameter using VIKOR approach. Materials Today: Proceedings, Vol. 45, pp. 6099-6102, 2021.
[7] T. Arvajeh, F. Ismail, Machining stability in highspeed drilling-part 1: modeling vibration stability in bending, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 46, No. 12-13, pp. 1563–1572, 2006.
[8] D.M. Rincon, A.G. Ulsoy, Complex geometry, rotary inertia and gyroscopic moment effects on drill vibrations, Journal of Sound and Vibration, Vol. 188, No. 5, pp. 701 715, 1995.
[9] P.V. Bayly, S.A. Metzler, A.J. Schaut, S.G. Young, Theory of torsional chatter in twist drills: model, stability analysis and composition to test, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 123, pp. 552–561, 2001.

[10] T. Arvajeh, F. Ismail, Machining stability in high-speed drilling-part 1: modeling vibration stability in bending, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 46, No.12–13, pp. 1563–1572, 2006.
[11] K. Ahmadi, H. Ahmadian, Modelling machine tool dynamics using adistributed parameter tool–holder joint interface, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 47, pp. 1916–1928, 2007.
[12] N. Gopal Koya, Investigation of warping effect on coupled torsional axial vibrations of drilling tool, Acharya Nagarjuna University, PhD Thesis, 2015.
[13] M. Aamir, K. Giasin,, M. Tolouei-Rad, I. Ud Din, M.I. Hanif, U. Kuklu, D.Y. Pimenov, and M. Ikhlaq, Effect of cutting parameters and tool geometry on the performance analysis of one-shot drilling process of AA2024-T3. Metals, Vol. 11, No. 6, pp. 854, 2021
[14] M.A. Amran, S. Salmah, N.I.S. Hussein, R. Izamshah, M. Hadzley, sivaraos, M.S. Kasim, M.A. Sulaiman, Effects of machine parameters on surface roughness using response surface method in drilling process, procediaengineering, Vol. 68, pp. 24-29, 2013.
[15] M.A. Amran, S. Salmah, N.I.S. Hussein, R. Izamshah, M. Hadzley, sivaraos, M.S. Kasim, M.A. Sulaiman, Effects of machine parameters on surface roughness using response surface method in drilling process, procediaengineering, Vol. 68, pp. 24-29, 2013.
[16] S.A. Niknam, Burrs understanding, modeling and optimization during slot milling of aluminium alloys,Ph.D. Thesis, École de technologie supérieure, 2013.
[17] V. Tahmasbi, M. Ghoreishi, M. Taheri, Sensitivity analysis of material removal rate in dry electro-discharge machining process, Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference, Vol. 15, No. 13, pp. 382-386, 2015.
[18] A. Saltelli, I. M. sobol, about the use of rank transformation in sensitivity analysis of model output, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 50, pp. 225-239, 1995.
[19] R. Cukier, H. Levine, K. Shuler, Nonlinear sensitivity analysis of multiparameter model systems, Journal of computational physics, Vol. 26, pp. 1-42, 1978.
[20] A. Saltelli, K. Chan, E. Scott, sensitivity analysis Wiley series in probability and statistics, Willey, New York, 2000.
[21] A. Saltelli, S. Tarantola, K. S. Chan, A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output, Technometrics, Vol. 41, pp. 39-56, 1999.
[22] M. Taheri and V. Tahmasebi. The effect of various parameters on material removal rate in brass drilling operations using statistical sensitivity analysis, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 3, No. 1, pp. 60-65, 2016.
[23] M. Taheri. Investigation and Sensitivity Analysis of Dimensional Parameters and Velocity in the 3D Nanomanipulation Dynamics of Carbon Nanotubes Using Statistical Sobol Method. Modares Mechanical Engineering, Vol. 19, No. 1, pp. 125-135, 2019.
[24] A. Nekahi, K. Dehghani, Modeling the thermo mechanical effects on baking behavior of low carbon steels using response surface methodology, journal of Materials and Design, Vol. 31, pp. 3845–3851, 2010.
[25] M. H. Korayem, M. Zakeri, Sensitivity analysis of nanoparticles pushing critical conditions in 2-D controlled nanomanipulation based on AFM, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 41, pp. 714-726, 2009.
[26] H. Toshimitsu and A.Saltelli, Importance measures in global sensitivity analysis of nonlinear models, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 52, No. 1, pp.1-17, 1996
[27] M. Taheri, S.H Bathaee, Sensitivity Analysis of Peripheral Parameters in Three Dimensional Nano-Manipulation by using HK Model. Journal of Solid and Fluid Mechanics, Vol. 9, No. 2, pp. 123-139, 2019.