مجله مهندسی ساخت و تولید ایران، بهار 1395، دوره 3، شماره 1، ص‌ص 60-65

فصلنامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر نرخ براده برداری در عملیات سوراخ‌کاری برنج با استفاده از روش آنالیز حساسیت آماری

معین طاهری[1*]، وحید طهماسبی[2]

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک

2- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* اراک، صندوق پستی 3815688349، m-taheri@araku.ac.ir

کلیدواژگان

ماشین‌کاری
فرایند سوراخ‌کاری
نرخ براده‌برداری
پارامترهای مؤثر
آنالیز حساسیت آماری

چکیده

فرایند سوراخ‌کاری یکی از ابتدایی‌ترین فرایندهای ماشین‌کاری است که کاربردهای گسترده‌ای در ساخت قطعات و تجهیزات مختلف مکانیکی دارد. یکی از تکنولوژی‌های مورد توجه در فرایند سوراخ‌کاری، فرایند میکروسوراخ‌کاری می‌باشد که امروزه در صنایع حساس برای تولیدات دقیقی همچون نازل سوخت‌رسان خودرو، قطعات مختلف ساعت و دوربین مورد استفاده قرار می‌گیرد. در عملیات سوراخ‌کاری فلزات، برای داشتن سوراخ‌هایی با کیفیت و دقت مطلوب، نیاز است که فاکتورهای مختلفی از قبیل سرعت چرخش اسپیندل، نرخ پیشروی و قطر مته مورد ارزیابی قرار گیرند. در فرایند سوراخ‌کاری، افزایش سرعت چرخش اسپیندل از طرفی موجب بالا رفتن سرعت ماشین‌کاری و نرخ براده‌برداری می‌شود، 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 براده‌برداری، افزایش زمان فرایند سوراخ‌کاری و مقرون‌به‌صرفه نبودن این فرایند از نظر اقتصادی می‌گردد. بنابراین انتخاب دقیق پارامترهای مختلف در عملیات سوراخ‌کاری امری ضروری می‌باشد. در این مقاله ابتدا با انجام آزمایش‌های تجربی، یک مدل ریاضی رگرسیون خطی مرتبه دوم به‌منظور پیش‌بینی میزان نرخ براده‌برداری درحین عملیات سوراخ‌کاری فلز برنج برحسب سرعت چرخش اسپیندل، نرخ پیشروی، قطر ابزار و برهم‌کنش‌های مؤثر آن‌ها ارائه شده است. سپس با استفاده از روش آنالیز حساسیت آماری سوبل، تأثیر پارامترهای مورد بررسی بر نرخ براده‌برداری به دست آمده است. نتایج به دست آمده از آنالیز حساسیت نشان می‌دهند که نرخ پیشروی بیشترین تأثیر را بر نرخ براده‌برداری داشته درحالی‌که قطر ابزار دارای کمترین اثر بر نرخ براده‌برداری می‌باشد.

The effect of various parameters on material removal rate in brass drilling operations using statistical sensitivity analysis

Moein Taheri[*1], **Vahid Tahmasbi**[2]

1- Department of Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran.
2- Department of Mechanical Engineering, KNT University of Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 3815688349, Arak, Iran, m-taheri@araku.ac.ir

Keywords

Machining
Drilling
Material removal rates
Effective parameters
Statistical sensitivity analysis

Abstract

Drilling machining processes is one of the most widespread applications in manufacturing of various mechanical parts and equipment. One of the interesting technologies in drilling, micro-drilling process that is critical in industries such as precision manufacturing nozzle for refueling vehicles, parts and camera clock is used. The drilling operations of metals, for having holes with desired quality and accuracy, it is required that various factors such as spindle rotation speed, feed rate and drill diameter evaluated. In drilling, increase the speed of spindle rotation speed machining and material removal rate is also increasing, and the other side is the erodes faster tool. Therefore, careful selection of various parameters in the drilling operation is necessary. In this paper, by doing experiments, a linear regression model to predict the rate of material removal rate during the second drilling operation based brass spindle rotation speed, feed rate, tool diameter and effective interactions are presented. Then, using statistical sensitivity analysis Sobol, the impact of parameters on material removal rate is obtained. The results of the sensitivity analysis show that the rate of material removal rate has the greatest impact on advancing the tool diameter is the least effect on the rate of material removal.

1- مقدمه

سوراخ‌کاری یکی از بنیادی‌ترین فرایندهای ماشین‌کاری در میان فرایندهای صنعتی است که برای بهبود بهره‌وری و تولیدات به سمت ماشین‌کاری با سرعت بالا و دقت زیاد در حال حرکت

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Taheri, V. Tahmasbi, 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 (in Persian)

Archive of SID

www.SID.ir

است. اگرچه قیمت ابزارهای سوراخ‌کاری به خودی خود نسبتاً پایین است، اما هزینه‌های ناشی از شکسته شدن ابزار زیاد می‌باشد. بنابراین از لحاظ هزینه و بهره‌وری، مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرایندهای سوراخ‌کاری در صنایع تولیدی بسیار مهم می‌باشد [1]. تا به حال مطالعات زیادی از قبیل ارتعاشات سوراخ‌کاری، سایش ابزار، شکل براده‌های ایجاد شده و غیره به منظور مشخص نمودن نمودن شرایط مختلف بر روی فرایند سوراخ‌کاری انجام گرفته است [2-5].

پاندا و پاندی [6] و همچنین شکوری و همکارانش [7،8] کم‌ترین مقدار سرعت دورانی ابزار و کم‌ترین مقدار پیشروی را به منظور دستیابی به کمترین مقدار نیرو در فرایند سوراخ‌کاری استخوان ارائه نمودند. یودیلجاک و همکارانش دریافتند که سرعت دورانی ابزار نقش بسیار کمی در تغییرات نیروی محوری داشته و فاکتوری کم تأثیر است [9].

در فرایند سوراخ‌کاری فلزات دستیابی به نرخ براده‌برداری مناسب امری ضروری می‌باشد که می‌تواند سبب صرفه‌جویی در وقت و اقتصادی شدن فرایند سوراخ‌کاری گردد. با انجام تحقیقات گسترده بر روی این فرایند از جمله بررسی سرعت چرخشی اسپیندل، نرخ پیشروی و قطر ابزار و همچنین بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر روی این فرایند، می‌توان به طور قابل ملاحظه‌ای این فرایند را بهبود بخشید.

یکی از تکنولوژی‌های مورد توجه در فرایند سوراخ‌کاری، فرایند میکروسوراخ‌کاری می‌باشد، که امروزه در صنایع حساس برای تولیدات دقیقی همچون نازل سوخت‌رسان خودرو، قطعات مختلف ساعت و دوربین مورد استفاده قرار می‌گیرد. از میان روش‌های مختلف میکروسوراخ‌کاری، روش مکانیکی آن به این علت که تغییر شکل‌های حرارتی کمتری را در قطعه ایجاد می‌کند، بیشترین کاربرد را دارا می‌باشد. از طرف دیگر این روش نیز مانند تمام روش‌های دیگر با مشکلاتی همچون هزینه بالای تجهیزات و غیره همراه است. برای داشتن سوراخ‌هایی با کیفیت و دقت مطلوب نیاز است که فاکتورهای زیادی از قبیل جنس ماده، سرعت چرخش اسپیندل، نرخ پیشروی و قطر مته مورد ارزیابی قرار گیرند. بنابراین نیاز به روشی است تا بتوان اثر این پارامترهای ورودی را بر فرایند سوراخ‌کاری بررسی نمود، که بدین منظور از روش آنالیز حساسیت آماری سوبل استفاده می‌گردد.

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 می‌گردد [10]. این روش برای شناسایی پارامترهای مؤثر و غیرمؤثر در مدل خروجی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل‌های آنالیز حساسیت در دو نوع محلی و عمومی طبقه‌بندی می‌شوند [11]. روش ای-فست که یکی از روش‌های آماری آنالیز حساسیت می‌باشد و از سرعت بالاتری نسبت به سایر روش‌های آنالیز حساسیت آماری برخوردار است، توسط کوکیر و همکارانش [12] ارائه شده و سالتلی و همکارانش [13] این روش را بهبود داده‌اند.

تاکنون از روش‌های آماری آنالیز حساسیت برای بررسی دقیق و کمّی میزان تأثیرگذاری پارامترهای مختلف بر نرخ براده‌برداری در فرایند سوراخ‌کاری استفاده نشده است.

در این مقاله ابتدا به بررسی کلی فرایند سوراخ‌کاری فلز برنج و طراحی آزمایشات مناسب جهت این فرایند پرداخته شده است و سپس روش‌های مختلف آنالیز حساسیت مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. پس از آن، روش آنالیز حساسیت آماری سوبل مورد بررسی قرار گرفته است و با استفاده از این روش به بررسی تأثیر پارامترهای ورودی مختلف بر روی پارامتر خروجی نرخ براده‌برداری پرداخته شده است.

نتایج به دست آمده از تحلیل حساسیت آماری سوبل نشان می‌دهد که از بین پارامترهای ورودی، پارامتر ورودی قطر مته کم‌ترین تأثیر را بر پارامتر خروجی نرخ براده‌برداری دارد، در حالی که پارامتر ورودی نرخ پیشروی دارای بیشترین اثر بر پارامتر خروجی نرخ براده‌برداری بوده و حتماً باید به دقت اثرات تغییر این پارامتر در فرایند مورد توجه قرار گیرد.

2- مدل‌سازی

در این بخش ابتدا مختصری به تعیین نرخ براده‌برداری در فرایند سوراخ‌کاری پرداخته شده و سپس آنالیز حساسیت و روش‌های مختلف آن شامل روش گرافیکی، ریاضی و آماری به طور مختصر بررسی شده و سپس با توجه به نیاز به بررسی تأثیر متقابل بین ورودی‌های مختلف، روش آنالیز حساسیت آماری سوبل جهت تحلیل و بررسی اثر پارامترهای مختلف انتخاب گشته و به شرح مختصر آن پرداخته شده است.

2-1- تعیین نرخ براده‌برداری در فرایند سوراخ‌کاری

فرایند سوراخ‌کاری یکی از ابتدایی‌ترین فرایندهای ماشین‌کاری می‌باشد که کاربردهای گسترده‌ای در ساخت قطعات و تجهیزات مختلف مکانیکی دارد. نرخ براده‌برداری از جمله خروجی‌های بسیار مهم در طی فرایند سوراخ‌کاری بوده و از اهمیت زیادی برخوردار است.

Archive of SID
www.SID.ir

برای فرایند سوراخ‌کاری نرخ براده‌برداری به سادگی برابر حاصل‌ضرب مساحت سطح مقطع سوراخ مته‌کاری شده در نرخ پیشروی مته است و مطابق رابطه (1) به دست می‌آید:

$$MRR = \pi D^2 N a_f / 4 \quad (1)$$

که در این رابطه N سرعت دورانی مته برحسب دور بر دقیقه، a_f نرخ پیشروی بر حسب میلی‌متر بر دور و D قطر ابزار برحسب میلی‌متر می‌باشند.

در این مقاله از روش پاسخ سطح برای محاسبه‌ی معادلات حاکم بر نرخ براده‌برداری استفاده شده است. اساس سطح پاسخ بر طراحی آزمایش‌ها و بهینه‌سازی آماری استوار است. طرح آزمایش به عنوان ابزاری مناسب برای مهندسان در توسعه و اصلاح و صرفه‌جویی در وقت و هزینه‌های آزمایش‌ها و رفع عیوب آن‌ها به کار گرفته می‌شود و استفاده به موقع از آن سبب کاهش زمان تولید و هزینه‌ها می‌گردد [14]. این روش می‌تواند نمودارهای خروجی مناسبی را جهت مشخص کردن نقطه بهینه در میان چندین پارامتر به محقق ارائه دهد [15]. همچنین این روش این قابلیت را دارد که رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌های یک آزمایش را مدل‌سازی نموده و آن را به صورت یک معادله‌ی ریاضی ارائه نماید [16]. جداول 1 مقادیر سطح‌های مختلف پارامترهای آزمایش را نشان می‌دهد.

در جدول 2 نیز انجام آزمایش‌ها و نتایج نرخ براده‌برداری ذکر شده است. در ابتدا با طراحی آزمایش‌های مناسب، نرخ براده‌برداری برای سرعت‌های مختلف چرخش اسپیندل استخراج شده است. سپس با افزایش نرخ پیشروی، اثر تغییرات نرخ پیشروی بر نرخ براده‌برداری مورد مطالعه قرار گرفته است که تصاویر آن در شکل 1 قابل مشاهده است. در انتها نیز اثر تغییرات قطر ابزار بر میزان نرخ براده‌برداری بررسی شده است که بدین منظور 30 عدد سوراخ با قطرهای مختلف ابزار مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن در شکل 2 آورده شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌های تجربی صورت گرفته، مدل نرخ براده برداری (MRR) به صورت کد[1] شده بر حسب متغیرهای ورودی در فرایند سوراخ‌کاری به صورت رابطه (2) خواهد بود:

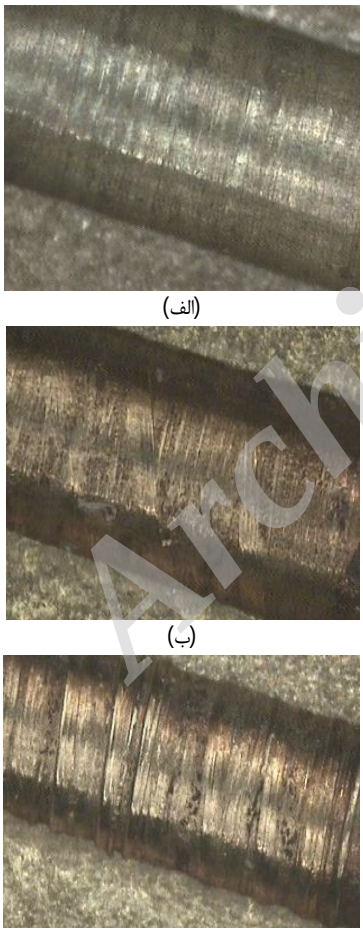
جدول 1 مقادیر سطح های مختلف پارامترهای آزمایش

فاکتورهای ورودی آزمایش	1	0	-1
A : قطر مته (mm)	1	0/8	0/6
B : سرعت چرخش اسپیندل (rpm)	3000	2000	1000
C : نرخ پیشروی (mm/rev)	10	5	1

[1] Coded unit

جدول 2 جدول انجام آزمایشات و نتایج نرخ براده‌برداری

شماره آزمایش	قطر مته (A)	سرعت اسپیندل (B)	نرخ پیشروی (C)	نرخ براده برداری
1	-1	-1	-1	0/28
2	1	-1	-1	0/76
3	-1	1	-1	0/89
4	1	1	-1	2/36
5	-1	-1	1	2/83
6	1	-1	1	7/85
7	-1	1	1	8/48
8	1	1	1	23/56
9	-1	0	0	2/83
10	1	0	0	7/85
11	0	-1	0	2/51
12	0	1	0	7/54
13	0	0	-1	1/01
14	0	0	1	5/03
15	0	0	0	10/05



(الف)

(ب)

(ج)

Fig. 1 Drilling of brass for different feed rate: a) 1 mm/min, b) 5 mm/min, and c) 10 mm/min

شکل 1 سوراخ‌کاری برنج برای نرخ پیشروی‌های متفاوت: (الف) 1 میلی‌متر بر دقیقه، (ب) 5 میلی‌متر بر دقیقه، و (ج) 10 میلی‌متر بر دقیقه

Archive of SID
www.SID.ir

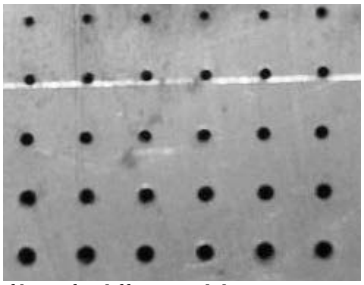


Fig. 2 Drilling of brass for different tool diameter

شکل 2 سوراخ‌کاری برنج برای قطر ابزارهای متفاوت

$$MRR = 5.760 + 2.880V + 4.712f + 2.765D + 2.356V \times f + 1.340V \times D + 2.262f \times D \quad (2)$$

که در این رابطه V سرعت چرخش اسپیندل برحسب دور بر دقیقه، f نرخ پیشروی بر حسب میلی‌متر بر دقیقه و D قطر ابزار برحسب میلی‌متر می‌باشند.

2-2- روش‌های آنالیز حساسیت

آنالیز حساسیت ابزاری جهت بررسی سیستم‌ها و تعیین تأثیر پارامترهای ورودی بر روی متغیرهای خروجی سیستم‌ها می‌باشد. آنالیز حساسیت را به چند طریق طبقه‌بندی می‌کنند. برحسب کاربرد که به نوع قطعی یا احتمالی است یا برحسب فرم مدل، که به روش‌های گرافیکی، ریاضی و آماری طبقه‌بندی می‌شود.

روش گرافیکی: در این روش تحلیل حساسیت، حساسیت را در فرم‌هایی به‌صورت نمودار و جدول یا سطوح نمایش می‌دهند. از روش گرافیکی عموماً برای نشان دادن تغییرات خروجی‌ها تحت تأثیر ورودی‌ها استفاده می‌شود.

روش ریاضی: در روش ریاضی، حساسیت را از روی تغییرات خروجی برحسب تغییرات ورودی به دست می‌آورند. این روش‌ها عموماً درگیر محاسباتی هستند که به بررسی خروجی به ازای مقدار کمی تغییر در ورودی می‌پردازد.

روش آماری: این تحلیل حساسیت به‌صورت توزیع احتمالی به شبیه‌سازی ورودی می‌پردازد، سپس تأثیر این ورودی را بر خروجی ارزیابی می‌کند. در این روش می‌توان اثر متقابل بین چندین ورودی را بر روی خروجی مشخص کرد.

روش سوبل 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 [11].

در این روش برای مدل تعریف شده با تابع $Y=f(X)$، که Y خروجی مدل و $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ بردار پارامترهای ورودی می‌باشد، و واریانس خروجی مدل (V) به صورت مجموع واریانس‌های هر ترم تجزیه شده به صورت رابطه (3) می‌باشد:

$$V(Y) = \sum_{i=1}^{n} V_i + \sum_{i \le j \le n}^{n} V_{ij} + \cdots + V_{1,\dots,n} \quad (3)$$

که در آن، V_i تأثیر مرتبه‌ی اول برای هر فاکتور ورودی $(V_i = V[E(Y|x_i)])$ و $V_{ij} = V[E(Y|x_i, x_j)] - V_i - V_j$ تا $V_{1,\dots,n}$ برهم‌کنش بین n فاکتور را نشان می‌دهند.

شاخص‌های حساسیت به صورت نسبت واریانس هر مرتبه به واریانس کلی به دست می‌آیند $(S_i = \frac{V_i}{V})$ شاخص حساسیت مرتبه‌ی اول، $S_{ij} = \frac{V_{ij}}{V}$ شاخص حساسیت مرتبه‌ی دوم و ...).

شاخص حساسیت کلی یا همان تأثیر کلی هر پارامتر به صورت مجموع همه‌ی مرتبه‌های شاخص حساسیت برای آن پارامتر به صورت رابطه (4) به دست می‌آید:

$$S_{Ti} = S_i + \sum_{i \ne j} S_{ij} + \cdots \quad (4)$$

3- آنالیز حساسیت پارامترها

در این بخش به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف فرایند سوراخ‌کاری بر نرخ براده‌برداری در این نوع فرایند پرداخته شده است.

شکل‌های 3 تا 5 پراکندگی نقاط نرخ براده‌برداری با تغییرات همزمان سه پارامتر ورودی را نشان می‌دهد. نقاط پراکنده موجود در این شکل‌ها با استفاده از نرم‌افزار سیملب[1] و به روش سوبل استخراج شده‌اند. در روش سوبل بر خلاف روش‌های گرافیکی، که در آن‌ها تمامی ورودی‌ها به جز یک ورودی ثابت است، با استفاده از الگوریتمی خاص تمامی پارامترها به طور همزمان تغییر می‌نمایند که برای توضیحات بیشتر می‌توان به مرجع [15] مراجعه نمود.

شکل 3 نشان می‌دهد که با افزایش سرعت چرخش اسپیندل، نرخ‌براده‌برداری به صورت تقریباً خطی افزایش می‌یابد. این افزایش نرخ براده‌برداری، برای سرعت‌های پایین چرخش اسپیندل و در حدود 1000 دور بر دقیقه نسبتاً کم بوده، در حالی که برای سرعت‌های بالای چرخش اسپیندل و در حدود 3000 دور بر دقیقه بسیار بیشتر می‌باشد.

شکل 4 تأثیر نرخ پیشروی بر میزان نرخ براده‌برداری را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌گردد که با افزایش نرخ پیشروی، میزان نرخ براده‌برداری به صورت تقریباً خطی افزایش می‌یابد.

[1] SimLab

Archive of SID
www.SID.ir

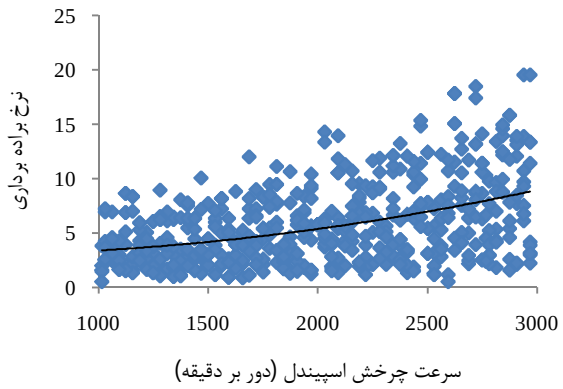


Fig. 3 Effect of spindle velocity on material removal rate

شکل 3 اثر سرعت چرخش اسپیندل بر میزان نرخ براده برداری

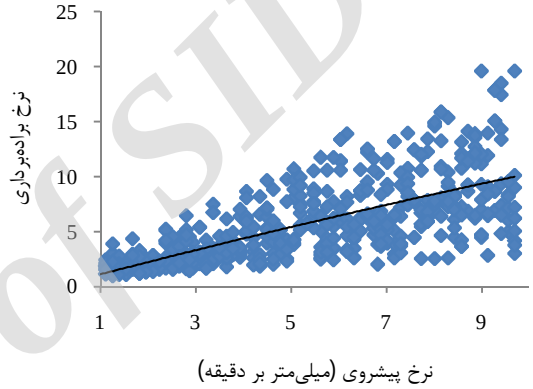


Fig. 4 Effect of feed rate on material removal rate

شکل 4 اثر نرخ پیشروی بر میزان نرخ براده برداری

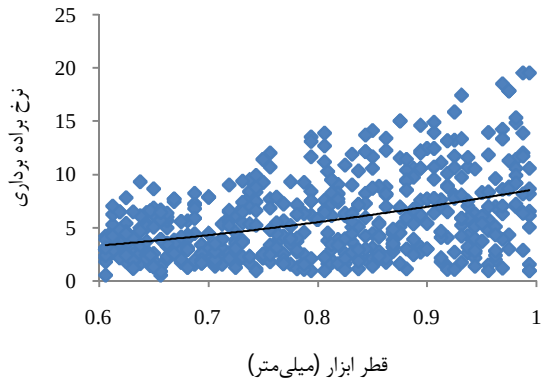


Fig. 5 Effect of tool diameter on material removal rate

شکل 5 اثر قطر ابزار بر میزان نرخ براده برداری

شکل 5 نشان‌دهنده تأثیر قطر ابزار بر نرخ براده‌برداری می‌باشد. این شکل این موضوع را نشان می‌دهد که با افزایش قطر ابزار نیز میزان نرخ براده‌برداری به صورت تقریباً خطی افزایش می‌یابد.

مقایسه شکل‌های 3 تا 5 نشان‌دهنده این امر است که نرخ پیشروی، سرعت چرخش اسپیندل و قطر ابزار هر سه اثر یکسانی بر نرخ براده‌برداری داشته و با افزایش هر یک از آن‌ها میزان نرخ براده‌برداری به صورت تقریباً خطی افزایش خواهد یافت با این تفاوت که افزایش نرخ پیشروی تأثیر بسیار بیشتری نسبت به افزایش قطر ابزار و افزایش سرعت چرخش اسپیندل در میزان افزایش نرخ براده‌برداری دارد که تراکم کمتر داده‌ها در نمودار شکل 4 و شیب بیشتر این نمودار گواه این موضوع می‌باشد.

روش آماری آنالیز حساسیت سوبل، 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 به طور همزمان به دست آورده و پارامترهای مهم با تأثیرگذاری بالا و پارامترهای کم‌اثر را به طور دقیق شناسایی نمود. همچنین در نمودارهای مربوط به این روش می‌توان هم‌زمان نتیجه را به صورت گرافیکی مشاهده نمود.

شکل 6 نتایج کلی روش آنالیز حساسیت سوبل را در برمی‌گیرد. در این شکل مشاهده می‌گردد که از بین سه پارامتر ورودی مورد بررسی، پارامتر نرخ پیشروی با 52 درصد تأثیر بر روی نرخ براده‌برداری به عنوان مهم‌ترین پارامتر اثرگذار شناخته می‌شود.

همچنین در شکل 6 مشاهده می‌شود که سرعت چرخش اسپیندل با 28 درصد اثرگذاری به عنوان دومین پارامتر اثرگذار بر نرخ براده‌برداری فرایند سوراخ‌کاری بوده و پارامتر قطر ابزار نیز با 20 درصد اثرگذاری به عنوان سومین پارامتر اثرگذار بر نرخ براده‌برداری از بین پارامترهای موجود می‌باشد.

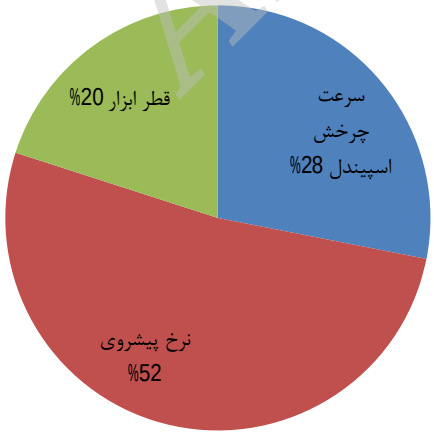


Fig. 6 Effect of various parameters on material removal rate by E-Fast method

شکل 6 تأثیر پارامترهای مختلف بر نرخ براده‌برداری به روش سوبل

Archive of SID

www.SID.ir

4- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله برای بررسی و تحلیل حساسیت نتایج به دست آمده از روش آماری سوبل استفاده شد که روشی دقیق می‌باشد. در روش سوبل بر خلاف روش‌های گرافیکی، که در آن‌ها تمامی ورودی‌ها به جز یک ورودی ثابت است، با استفاده از الگوریتمی خاص تمامی پارامترها به طور همزمان تغییر می‌نمایند و در نتیجه اثرگذاری پارامترهای مؤثر در فرایند به نحو دقیق‌تری به دست می‌آیند.

بررسی‌های صورت گرفته در این مقاله نشان می‌دهد که نرخ پیشروی به عنوان پارامتر مهم و تأثیرگذار در فرایند سوراخ‌کاری شناخته شده که تأثیر فراوانی بر نرخ براده‌برداری خواهد داشت، لذا با توجه به نوع فرایند مورد نظر، انتخاب دقیق نرخ پیشروی بسیار مهم و ضروری می‌باشد.

همچنین نتایج به دست آمده بیانگر این امر است که سرعت چرخش اسپیندل و قطر ابزار تأثیر تقریباً یکسانی بر نرخ براده‌برداری فرایند سوراخ‌کاری دارند.

5- مراجع

[1] S.A. Jalali and 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] A.S. Salama and A.H. E1Sawy, The dynamic geometry of a twist drill point, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 56, pp. 45-53, 1996.

[3] B.Y. Lee, H.S. Liu and Y.S. Tarng, Modeling and optimization of drilling process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 74, pp. 149–157, 1998.

[4] S.Arula,L. Vijayaraghavana, S.K. Malhotrab and R. Krishnamurthya, The effect of vibratory drilling on hole quality in polymeric composites, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, pp. 252–259, 2006.

[5] F.W. Taylor, *On the art of cutting metals*, Transactions of ASME 28 (1907) 31.350

[6] R. K. Pandey, S. Panda, Multi-performance optimization of bone drilling using Taguchi method based on membership function, *Measurement*, Vol. 59, pp. 9-13, 2015.

[7] E. Shakouri, M. H. Sadeghi, M. Maerefat, S. Shajari, Experimental and analytical investigation of the thermal necrosis in high-speed drilling of bone, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, Vol. 10, No. 12, pp. 112-115, 2014.

[8] E. Shakouri, M.H. Sadeghi, M. Maerefat, M.R. Karafi, M. Memarpour, Experimental and analytical investigation of thrust force in ultrasonic assisted drilling of bone, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 194-200, 2014. (in Persian فارسی)

[9] T. Udiljak, D. Ciglar, S. Skoric, Investigation into bone drilling and thermal bone necrosis, *Advance in Production Engineering & Management*, Vol. 3, pp. 103-112, 2007.

[10] A. Saltelli and 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.

[11] A. Saltelli, K. Chan, and E. Scott, sensitivity analysis Wiley series in probability and statistics, *Willey*, New York, 2000.

[12] R. Cukier, H. Levine, and K. Shuler, Nonlinear sensitivity analysis of multiparameter model systems, *Journal of computational physics*, Vol. 26, pp. 1-42, 1978.

[13] A. Saltelli, S. Tarantola, and K. S. Chan, A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output, *Technometrics*, Vol. 41, pp. 39-56, 1999.

[14] 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.

[15] 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.

[16] R. Cukier, H. Levine, K. Shuler, Nonlinear sensitivity analysis of multiparameter model systems, *Journal of computational physics*, Vol. 26, pp. 1-42, 1978.

Archive of SID
www.SID.ir