



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

معین طاهری^{1*}، وحید طهماسبی²

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

چکیده

کلیدواژگان

ماشین کاری
فرایند سوراخ کاری
نرخ براده برداری
پارامترهای مؤثر
آنالیز حساسیت آماری

فرایند سوراخ کاری یکی از ابتدایی ترین فرایندهای ماشین کاری است که کاربردهای گسترده ای در ساخت قطعات و تجهیزات مختلف مکانیکی دارد. یکی از تکنولوژی های مورد توجه در فرایند سوراخ کاری، فرایند میکروسوراخ کاری می باشد که امروزه در صنایع حساس برای تولیدات دقیقی همچون نازل سوخت رسان خودرو، قطعات مختلف ساعت و دوربین مورد استفاده قرار می گیرد. در عملیات سوراخ کاری فلزات، برای داشتن سوراخ هایی 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 سوراخ کاری، افزایش سرعت چرخش اسپیندل از طرفی موجب بالا رفتن سرعت ماشین کاری و نرخ براده برداری می شود، و از طرف دیگر موجب فرسایش سریع تر ابزار می گردد. همچنین کاهش نرخ پیشروی از طرفی سبب افزایش کیفیت سطح می شود، و از طرف دیگر موجب کاهش نرخ براده برداری، افزایش زمان فرایند سوراخ کاری و مقرون به صرفه نبودن این فرایند از نظر اقتصادی می گردد. بنابراین انتخاب دقیق پارامترهای مختلف در عملیات سوراخ کاری امری ضروری می باشد. در این مقاله ابتدا با انجام آزمایش های تجربی، یک مدل ریاضی رگرسیون خطی مرتبه دوم به منظور پیش بینی میزان نرخ براده برداری در حین عملیات سوراخ کاری فلز برنج برحسب سرعت چرخش اسپیندل، نرخ پیشروی، قطر ابزار و برهم کنش های مؤثر آن ها ارائه شده است. سپس با استفاده از روش آنالیز حساسیت آماری سوپل، تأثیر پارامترهای مورد بررسی بر نرخ براده برداری به دست آمده است. نتایج به دست آمده از آنالیز حساسیت نشان می دهند که نرخ پیشروی بیشترین تأثیر را بر نرخ براده برداری داشته در حالی که قطر ابزار دارای کمترین اثر بر نرخ براده برداری می باشد.

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

Moein Taheri^{*1}, Vahid Tahmasbi²

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

فرایندهای صنعتی است که برای بهبود بهره وری و تولیدات به

سمت ماشین کاری با سرعت بالا و دقت زیاد در حال حرکت

سوراخ کاری یکی از بنیادی ترین فرایندهای ماشین کاری در میان

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)

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 کمی 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 سوپل 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 سوپل 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 سوپل 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.

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 شرایط مختلف بر روی فرایند سوراخ‌کاری انجام گرفته است [2-5].

پاندا و پانندی [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 سوپل 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

جدول 2 جدول انجام آزمایشات و نتایج نرخ براده برداری

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 سوراخ کاری برنج برای نرخ پیشرویهای متفاوت: (الف) 1 میلی متر بر دقیقه، (ب) 5 میلی متر بر دقیقه، و (ج) 10 میلی متر بر دقیقه

برای فرایند سوراخ کاری نرخ براده برداری به سادگی برابر حاصل ضرب مساحت سطح مقطع سوراخ مته کاری شده در نرخ پیشروی مته است و مطابق رابطه (1) به دست می آید:

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

که در این رابطه N سرعت دورانی مته بر حسب دور بر دقیقه، a_f نرخ پیشروی بر حسب میلی متر بر دور و D قطر ابزار بر حسب میلی متر می باشند.

در این مقاله از روش پاسخ سطح برای محاسبه ی معادلات حاکم بر نرخ براده برداری استفاده شده است. اساس سطح پاسخ بر طراحی آزمایشها و بهینه سازی آماری استوار است. طرح آزمایش به عنوان ابزاری مناسب برای مهندسان در توسعه و اصلاح و صرفه جویی در وقت و هزینه های آزمایشها و رفع عیوب آنها به کار گرفته می شود و استفاده به موقع از آن سبب کاهش زمان تولید و هزینه ها می گردد [14]. این روش می تواند 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 مدل سازی نموده و آن را به صورت یک معادله ی ریاضی ارائه نماید [16]. جداول 1 مقادیر سطحهای مختلف پارامترهای آزمایش را نشان می دهد.

در جدول 2 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 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 1 قابل مشاهده است. در انتها نیز اثر تغییرات قطر ابزار بر میزان نرخ براده برداری 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 کد¹ شده بر حسب متغیرهای ورودی در فرایند سوراخ کاری به صورت رابطه (2) خواهد بود:

جدول 1 مقادیر سطح های مختلف پارامترهای آزمایش

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

¹ Coded unit

می‌باشد، و واریانس خروجی مدل (V) به صورت مجموع واریانس‌های هر ترم تجزیه شده به صورت رابطه (3) می‌باشد:

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

که در آن، V_i تأثیر مرتبه‌ی اول برای هر فاکتور ورودی $V_{ij} = V[E(Y|x_i, x_j)] - V_i - V_{ij}$ و $x_i (V_i = V[E(Y|x_i)])$ 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:

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

3- آنالیز حساسیت پارامترها

در این بخش به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف فرایند سوراخ کاری بر نرخ براده برداری در این نوع فرایند پرداخته شده است.

شکل‌های 3 تا 5 پراکندگی نقاط نرخ براده برداری با تغییرات همزمان سه پارامتر ورودی را نشان می‌دهد. نقاط پراکنده موجود در این شکل‌ها با استفاده از نرم‌افزار سیملب¹ و به روش سوپل استخراج شده‌اند. در روش سوپل 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، نرخ براده برداری به صورت تقریباً خطی افزایش می‌یابد. این افزایش نرخ براده برداری، 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 براده برداری را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌گردد که با افزایش نرخ پیشروی، میزان نرخ براده برداری به صورت تقریباً خطی افزایش می‌یابد.

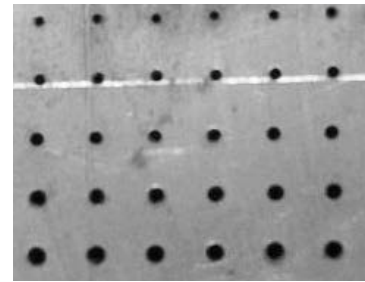


Fig. 2 Drilling of brass for different tool diameter

شکل 2 سوراخ کاری 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 به صورت 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 به صورت 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 سوپل 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

¹ SimLab

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 بیشتری نسبت به افزایش قطر ابزار و افزایش سرعت چرخش اسپیندل در میزان افزایش نرخ براده‌برداری دارد که تراکم 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 مشاهده 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 سوراخ کاری بوده و پارامتر قطر ابزار نیز با 20 درصد اثرگذاری به عنوان سومین پارامتر اثرگذار بر نرخ براده‌برداری از بین پارامترهای موجود می‌باشد.

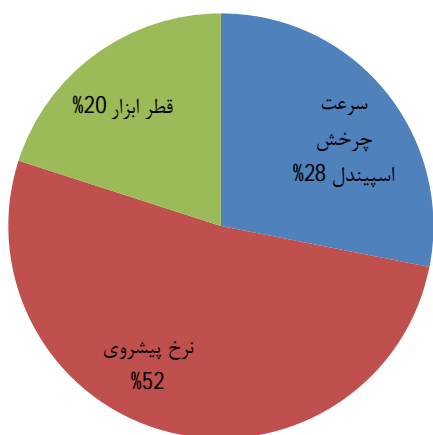


Fig. 6 Effect of various parameters on material removal rate by E-Fast method

شکل 6 تأثیر پارامترهای مختلف بر نرخ براده‌برداری به روش سوبل

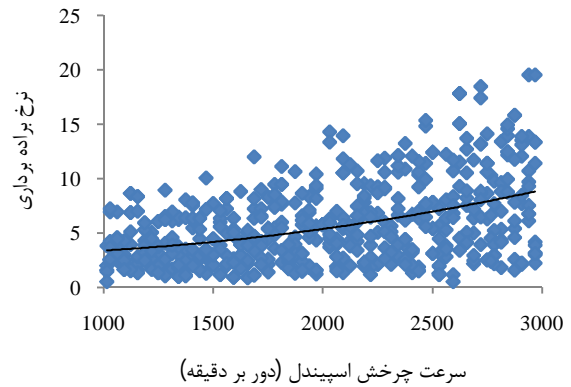


Fig. 3 Effect of spindle velocity on material removal rate

شکل 3 اثر سرعت چرخش اسپیندل بر میزان نرخ براده برداری

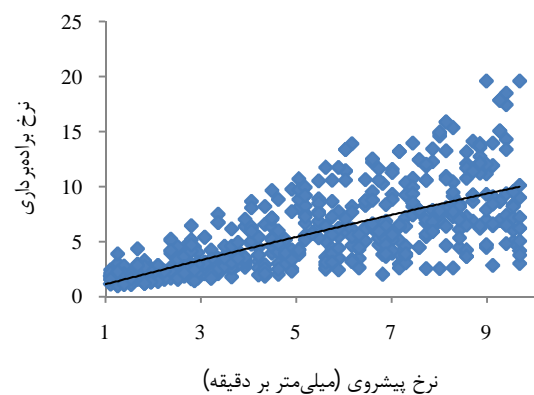


Fig. 4 Effect of feed rate on material removal rate

شکل 4 اثر نرخ پیشروی بر میزان نرخ براده برداری

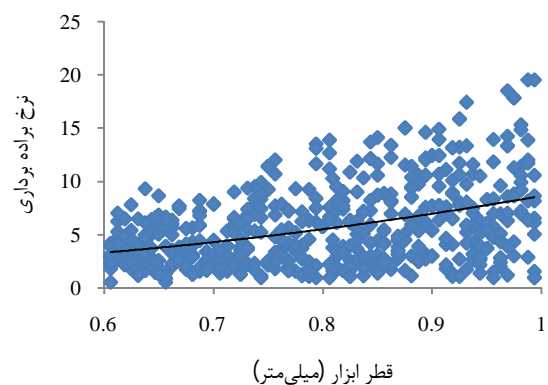


Fig. 5 Effect of tool diameter on material removal rate

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.

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, *Wiley*, 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.

4- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله برای بررسی و تحلیل حساسیت نتایج به دست آمده از روش آماری سوپل استفاده شد که روشی دقیق می‌باشد. در روش سوپل 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. ElSawy, 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. Tarn, Modeling and optimization of drilling process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 74, pp. 149-157, 1998.
- [4] S.Arula, L. Vijayaraghavana, S.K. Malhotra 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