كاربرد روش رويه پاسخ در بهينه­سازي نرخ برداشت­ براده و سایش ابزار در فرآیند ماشينكاري تخلیه الکتریکی کامپوزیت Al-4Cu-6Si -10wt%SiCP

سامان خليل پورآذري1\*

1- استاديار، گروه مهندسي ساخت و توليد، دانشكده انرژي­هاي تجديدپذير، دانشگاه صنعتي اروميه، اروميه

\* اروميه، صندوق پستی 419-57155، s.khalilpour@mee.uut.ac.ir

چکیده

در این مقاله تأثیر پارامترهای ورودی قابل کنترل شامل زمان روشنی پالس، جریان پالس و ولتاژ گپ در فرآیند تخليه الكتريكي برای حصول به حداکثر میزان نرخ برداشت براده و حداقل سایش ابزار در ماشينكاري قطعه کامپوزیتیAl-4Cu-6Si-10wt%SiCP مورد بررسی قرار گرفته است. برای هر پارامتر ورودی، سه سطح در نظر گرفته شده و سپس با استفاده از روش رویه پاسخ طبق طراحي باکس- بنکن که امکان انجام آزمایشات کمتری را با صرف هزینه پایین در مقایسه با طراحي مرکب مرکزی در اختیار قرار می­دهد، پارامترهای خروجی بهینه­سازی گردید. نتایج تحقیق ضمن تأیید صحت و کفایت مدل رگرسیونی ارائه شده با طراحي باکس- بنکن که بر مبنای سیزده آزمایش انجام گرفت، نشان می­دهد که پارامترهای ولتاژ گپ، جریان پالس و زمان روشنی پالس به ترتیب دارای بیشترین تأثیر در تعیین مقادیر بهینه خروجی می­باشند. همچنین مشخص گردید که افزایش زمان روشنی پالس و کاهش همزمان ولتاژ گپ و جریان پالس عواملی مهم در حصول به حداکثر میزان نرخ برداشت براده و حداقل سایش ابزار مي­باشند. مقایسه آزمایش تجربی با مقادير بهینه به دست آمده برای پارامترهای خروجی بیانگر خطای هشت درصدی در محاسبات است که با توجه به دستگاه­های مورد استفاده میزان مناسب و قابل قبولی می­باشد.

**کلی**د‌واژگ**ان**

ماشينكاري، نرخ برداشت براده، تخلیه الکتریکی، بهینه­سازی، روش رویه پاسخ

**Application of response surface method in optimizing chip removal rate and tool wear in electric discharge machining of Al-4Cu-6Si -10wt% SiCP composite**

Saman Khalilpourazary1\*

1- Renewable Department, Urmia University of Technology, Urmia, Iran.

\* P.O.B. 57155-419 Urmia, Iran, [s.khalilpour@mee.uut..ac.ir](mailto:s.khalilpour@mee.uut..ac.ir)

Abstract

In this paper, the effect of controllable process input parameters including pulse time, pulse current and gap voltage to achieve maximum chip removal rate and minimum tool wear in the electrical discharge machining process of Al-4Cu-6Si-10 wt% SiCP composite is investigated. For each input parameter, three levels are considered, and then using the response surface method according to the Box-Behnken design, which allows fewer experiments to be performed at a lower cost compared to the central composite method, the optimal output parameters were selected. The results of the research, while confirming the accuracy and adequacy of the regression model presented by the Box-Behnken method, which was performed based on thirteen experiments, show that the parameters of gap voltage, pulse current, and pulse time have the greatest effect in determining the optimal output values, respectively. It was also found that increasing the pulse time and simultaneously decreasing the gap voltage and pulse current is an important factor in achieving the maximum chip removal rate and minimum tool wear. Comparison of the final experimental tests to validate the optimal results obtained for the output parameters indicates an 8% error in the calculations, which is an appropriate and acceptable amount according to the devices used.

Keywords

Machining, Material removal rate, Electro discharge, Optimization, Surface response method

1. مقدمه

ترکیب ماکروسکوپی دو جزء زمینه فلزی و تقویت­کننده با نسبت معين که سطح مشترک مشخصی بین آنها در ميكروساختار ماده وجود دارد، کامپوزیت زمینه فلزی نام دارد که در مقایسه با فلز زمینه، می­تواند خواصي نظير مقاومت در برابر خوردگی، خزش، خستگی و نیز نسبت استحکام به وزن را افزايش دهد]1[. یکی از روش­های مورد استفاده در توليد قطعات كامپوزيتي با زمينه فلزي که تنوع و پیچیدگی پارامترهای موجود در آن مستقیماً بر روی راندمان فرآیند ماشینکاری و کیفیت محصول تولید شده تأثیرگذار بوده و انتخاب صحيح پارامترهاي ورودي در آن به منظور کنترل بهتر فرآیند از اهمیت بالایی برخوردار است، روش تخلیه الکتریکی می­باشد. با توجه به اهميت پارامترهاي ورودي در اين فرآيند و لزوم دستيابي به بهترين نتايج ممكن، امروزه از روش­هاي گوناگون بهينه­سازي براي كمك به توليدكنندگان در راستاي گزينش صحيح پارامترهاي ورودي به منظور كاهش هزينه، افزايش كيفيت سطح و تأمين نظرات مشتري در توليد محصول استفاده مي­گردد. به عبارت ديگر روش­های مختلف بهینه­سازی یکی از ابزارهای مهم در راستای کاهش پروسه آزمون و خطا در انتخاب مناسب پارامترهای ورودی، انجام بهینه­سازی واقعی محصول با در نظر گرفتن برهمکنش بین این پارامترها و رسیدن به نتایج با قابلیت اطمینان بالا در حصول به پارامترهاي خروجي مناسب می­باشد. در سال 2002، لین و همکاران از ترکیب تکنیک بهینه­سازی با روش گرِی و منطق فازی برای بهینه­سازی فرآیند ماشینکاری به روش تخلیه الکتریکی استفاده نمودند]2[. کانسال و همکاران نیز روش رویه پاسخ را جهت بهینه­سازی کیفیت سطح و نرخ برداشت براده در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی کامپوزيت فلزی Al–10%SiCP به کار بردند که نتایج تحلیل و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی بیانگر صحت قابل قبول از مدل رگرسیونی ارائه شده است ]3[. یانگ و همکاران نیز به منظور کاهش زبری سطح و افزایش نرخ برداشت براده در فرآیند تخلیه الکتریکی، روش بهینه­سازی جديدي به نام شبیه­سازی تبریدی را به كار بردند]4[. مقايسه نتايج بهينه شده با آزمايشات تجربي در اين تحقيق، بيانگر انطباق بالاي اين نتايج و موفقيت روش شبيه­سازي تبريدي در پيش­بيني مناسب از پارامترهاي خروجي در فرآیند تخلیه الکتریکی است. در تحقيق حاضر براي انجام آزمايش­ها از روش رويه پاسخ[[1]](#footnote-1) برای بهینه­سازی میزان فرسایش ابزار و نرخ برداشت براده با استفاده از طراحي باکس- بنکن در فرآیند ماشينكاري تخلیه الکتریکی قطعه Al-4Cu-6Si استفاده گرديد. پارامترهای ورودی براي حصول به مقادير مناسب و بهينه میزان فرسایش ابزار و نرخ برداشت براده در فرآيند ماشينكاري تخلیه الکتریکی قطعه Al-4Cu-6Si، زمان روشنی پالس، جریان پالس و ولتاژ گپ در نظر گرفته شده است.

1. روش تحقيق

هدف فرآیند طراحی آزمایشات، تعیین حداقل آزمایشات موردنیاز برای بررسی ارتباط بین نتیجه موردنظر که پاسخ نام دارد با پارامترهاي قابل کنترل ورودي می­باشد تا بتوان در زمان و هزینه تولید صرفه­جویی لازم را به عمل آورده و در عین حال از آزمون و خطا در تعیین پارامترهای ورودی نیز بر حذر بود. روش رويه پاسخ براي طراحي آزمايش­هاي موردنظر در فرآيندهاي توليدي از مجموعه­اي متنوع شامل تكنيك­هاي رياضي و آماري براي مدل­سازي و تحليل مسائلي كه در آنها نتايج پارامترهاي خروجي متأثر از چندين متغير ورودي است، به كار مي­رود. به عبارت ديگر مهمترين هدف روش رويه پاسخ كه براساس بهينه­سازي آماري بنا نهاده شده است، تعيين شرايط بهينه براي پارامترهاي ورودي جهت حصول به بيشترين يا كمترين مقادير در پارامترهاي خروجي است. در روش رویه پاسخ براي در نظر گرفتن پارامترهای ورودی و اثر برهم­کنش آنها از دو روش طراحي مرکب مرکزي[[2]](#footnote-2) و باکس- بنکن[[3]](#footnote-3) جهت تعیین تعداد آزمایشات اولیه برای حصول به مقادیر بهینه پاسخ استفاده می­گردد]5[.

در طراحی باکس- بنکن به عنوان يكي از تكنيك­هاي مورد استفاده در روش رويه پاسخ، به منظور تعيين تعداد كمتري از آزمایشات و صرفه­جويي در هزينه­هاي انجام آنها در مقايسه با روش طراحي مركب مركزي، فقط تعداد حداكثر چهار فاکتور ورودي براي انجام بهينه­سازي پارامترهاي خروجي قابل بررسي است. این تکنیک یک طراحی عاملی سه سطحی ناکامل است كه در آن یک بلوک آزمایشات[دو سطحی](https://analium.com/blog/experimental-design-principles/) در بین مجموعه مختلفی از متغیرها تکرار می­شود و از آن برای حل مشکل تعداد زیاد آزمایشات در طراحی با تعداد فاکتور بالا استفاده مي­شود. تعداد آزمایشات به تعداد پارامترها، تعداد بلوک و به طور خاص به دوران­پذیری طراحی اوليه بستگی دارد. لازم به ذكر است كه یک طراحی آزمایش در صورتی دوران­پذیر است که واریانس پاسخ پیش­بینی شده در هر نقطه فقط تابعی از فاصله آن از نقطه مرکزی باشد. از آنجا که در روش باکس- بنکن برای هر پارامتر ورودی، سه سطح تعریف می­شود که این مقدار در روش مرکب مرکزي به پنج سطح افزایش می­یابد، در روش باکس- بنکن ضمن حفظ حالت چرخش­پذیری، تعداد آزمایشات اولیه کمتر بوده و در میزان هزینه اولیه برای انجام آنها به شدت صرفه­جویی می­گردد.

از این رو در تحقیق حاضر از روش باکس- بنکن برای دست­یابی به مدل رگرسیونی برای ایجاد ارتباط بین پاسخ و پارامترهای ورودی در فرآیند ماشينكاري تخليه الكتريكي قطعه Al-4Cu-6Si طبق رابطه (1) استفاده شده است.

|  |  |
| --- | --- |
| (1) |  |

که در آن، F، تابع پاسخ از پارامترهاي ورودي به صورت مدل رگرسیونی مرتبه دوم می­باشد که جواب پاسخ،Y يا همان پارامترهاي خروجي را محاسبه می­نماید. به این ترتیب تابع پاسخ برای k فاکتور ورودی در روش رویه پاسخ با طراحي باکس- بنکن که برای این تحقیق در سطح اطمینان 95 درصد تنظیم گردیده است، به صورت رابطه (2) تعريف مي­گردد.

|  |  |
| --- | --- |
| (2) |  |

در جدول 1، مقادیر پارامترهای اوليه و تعداد سطوح آزمایش برای سه پارامتر ورودی زمان روشنی پالس، جریان پالس و ولتاژ گپ در فرآيند ماشينكاري تخليه الكتريكي ارائه گردیده است.

**جدول1** تعداد سطوح و پارامترهای مورد استفاده در آزمایش­ها

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| سطوح آزمایش | | | پارامتر |
| 3 | 2 | 1 |
| بالا (1+) | میانی (0) | پایین (1-) |
| 400 | 300 | 200 | زمان روشنی پالس (µs) |
| 40 | 30 | 20 | جریان پالس (A) |
| 60 | 50 | 40 | ولتاژ گپ (V) |

براي انجام آزمایشات، از دستگاه اسپارك مدل ZNCساخت شرکت تهران اکرام به همراه سیال دی­الکتریک نفت سفید برای ماشينكاري تخلیه الکتریکی قطعه مستطیلی شکل به ابعاد 35 در 10 میلیمتر و ارتفاع 15 میلیمتر از جنس Al-4Cu-6Si استفاده گردید.

در جدول 2، آزمايش­هاي طراحي شده توسط نرم­افزار مینی­تب[[4]](#footnote-4) با استفاده از روش رویه پاسخ با طراحي باکس- بنکن و نتايج ارائه شده برای پارامترهای خروجی نرخ برداشت براده و میزان سایش ابزار بر طبق آزمایشات تجربي انجام گرفته، ارائه شده است.

**جدول 2** آزمایشات طراحی شده و نتایج آنها

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| شماره آزمايش | ولتاژ گپ (V) | جریان پالس  (A) | زمان روشنی پالس (µs) | نرخ برداشت براده | میزان سایش ابزار |
| 1 | 0 | 1- | 1- | 25/446 | 99/12 |
| 2 | 1- | 0 | 1- | 50/829 | 89/20 |
| 3 | 1- | 1- | 0 | 85/426 | 53/15 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 25/701 | 16/23 |
| 5 | 1 | 1 | 0 | 50/892 | 55/33 |
| 6 | 1 | 0 | 1 | 25/701 | 01/20 |
| 7 | 0 | 1 | 1 | 18/1197 | 74/32 |
| 8 | 1 | 1- | 0 | 06/409 | 38/14 |
| 9 | 1 | 0 | 1- | 25/701 | 41/20 |
| 10 | 0 | 1 | 1- | 75/981 | 62/22 |
| 11 | 1- | 0 | 1 | 50/892 | 65/21 |
| 12 | 1- | 1 | 0 | 83/1090 | 21/34 |
| 13 | 0 | 1- | 1 | 87/490 | 10/13 |

با توجه به جدول 2، مشخص است که توسط كاربرد روش باکس- بنکن تعداد آزمایشات طراحی شده قابل کاهش می­باشد، تا از این طریق بتوان آزمایشات تجربی را در زمانی اندک و با صرف كمترين هزینه به اتمام رسانید. لازم به ذكر است كه در اين جدول هر آزمایش فقط یک بار تکرار شده است. همچنين در این تحقیق برای محاسبه مقادیر نرخ برداشت براده و میزان سایش ابزار در فرآيند ماشينكاري تخليه الكتريكي از روابط (3) و (4) استفاده شده است]6[.

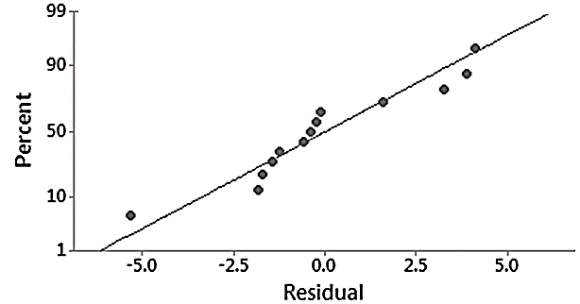
|  |  |
| --- | --- |
| (3) |  |
| (4) |  |

1. نتايج

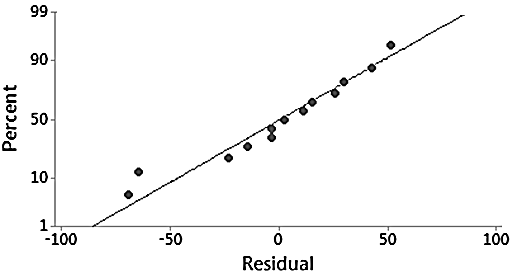
با توجه به رابطه (1)، نتایج مدل رگرسيون درجه دوم به دست آمده براي میزان نرخ برداشت براده و سایش ابزار در فرآیند ماشينكاري تخلیه الکتریکی پس از حذف متغيرهاي غير موثر بر فرآیند در روش رویه پاسخ با طراحي باکس- بنکن و با توجه به سطح اطمينان ٩٥ درصد به ترتیب طبق رابطه (5) و (6) تعیین می­شود.

|  |  |
| --- | --- |
| (5) |  |
| (6) |  |

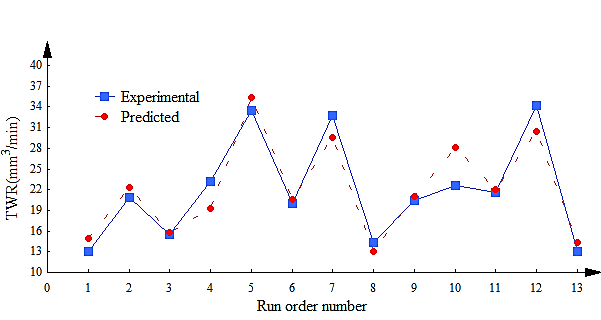
همچنین در شکل­ 1 نمودار توزیع نرمال باقیمانده­ها برای پارامتر خروجي میزان سایش ابزار و در شکل 2، همین نمودار برای پارامتر خروجي میزان نرخ برداشت براده ارائه شده است. در هر دو نمودار توزیع داده­ها در نزدیک خط مستقیم رسم شده توسط نرم­افزار ميني­تب بوده و این به معنای نرمال بودن توزیع خطاها می­باشد. در شکل­های 3 و 4 نیز نتایج محاسبه شده از مدل ریاضی با نتایج تجربی به دست آمده از سیزده آزمایش برای میزان سایش و نرخ برداشت براده مقایسه شده است، که نقاط به دست آمده نشانگر مطابقت بالای بین این نتایج با هم می­باشد. همچنين در روش رویه پاسخ از جدول آناليز واريانس نهایی به دست آمده در نرم­­افزار مینی­تب به منظور بررسي کفايت و مؤثر بودن مد­ل­هاي برازش شده و متغيرهاي مربوط به آن استفاده می­گردد كه به همين دلیل در جدول 3، مقادیر پراهمیت پارامترP، به همراه درجات آزادی مربوط به مدل هر یک از پارامترهای خروجي نرخ برداشت براده و سایش ابزار ارائه شده است.



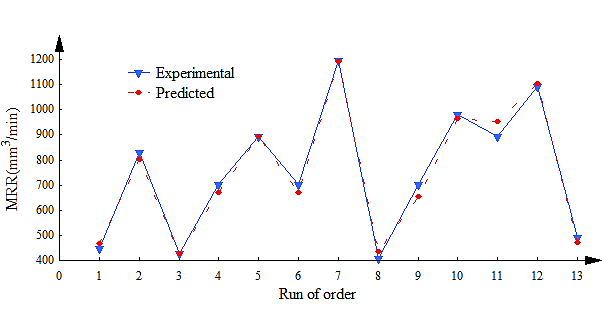
**شکل 1** نمودار توزيع احتمال نرمال باقيمانده­ها براي سایش ابزار در فرآیند تخلیه الکتریکی



**شکل 2** نمودار توزيع احتمال نرمال باقيمانده­ها براي میزان نرخ برداشت براده در فرآیند تخلیه الکتریکی

****

**شکل 3** مقايسه نتايج تجربي میزان سایش و مقادير پيش­بيني شده با استفاده از مدل درجه دوم



**شکل 4** مقايسه نتايج تجربي میزان نرخ برداشت براده و مقادير پيش­بيني شده با استفاده از مدل درجه دوم

از آنجا كه سطح اطمينان ٩٥ درصد در نظر گرفته شده است، مقدار پارامتر P برای هر یک از پارامترهای ورودی باید کمتر از 05/0 باشد تا مدل رگرسیونی تعریف شده معنادار گردد. مقادير ارائه شده در جدول 3 نشان مي­دهد که برای تمام مقادیر، مقدار پارامتر P کمتر از 05/0 به دست آمده که به معنای مطابقت مدل ارائه شده با نتایج تجربی است.

**جدول 3** مقادیر درجه آزادی و پارامتر P مربوط به آناليز واريانس پارامترهای نرخ برداشت براده و سایش ابزار پس از حذف ترم­هاي غيرمؤثر

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| نرخ برداشت براده | | | سایش ابزار | | |
| ترم | درجه آزادی | مقدار P | ترم | درجه آزادی | مقدار P |
| مدل | 6 | 000/0 | مدل | 6 | 016/0 |
| زمان | 1 | 002/0 | زمان | 1 | 026/0 |
| جریان | 1 | 001/0 | جریان | 1 | 045/0 |
| ولتاژ | 1 | 000/0 | ولتاژ | 1 | 036/0 |
| توان دوم جریان | 1 | 001/0 | توان دوم جریان | 1 | 009/0 |
| توان دوم ولتاژ | 1 | 000/0 | توان دوم زمان | 1 | 038/0 |
| تعامل اثر زمان و جریان | 1 | 000/0 | تعامل اثر ولتاژ و جریان | 1 | 012/0 |

­­­­

همچنین با استفاده از جدول ضرایب به دست آمده در نرم­افزار مینی­تب مشخص گردید که به ترتیب پارامترهای ولتاژ، جریان و زمان ماشینکاری مؤثرترین پارامترها بر روی میزان سایش ابزار و نرخ برداشت براده می­باشد.

با توجه به تحلیل صحت مدل­های رگرسیونی ارائه شده در این بخش و تأیید آنها با توجه به توضیحات ارائه شده، مقادیر بهینه پارامترهای ورودی جریان، ولتاژ و زمان به منظور دستیابی به حداکثر میزان نرخ برداشت براده و حداقل میزان سایش ابزار به صورت جدول 4 به دست آمد. با انتخاب مقادیر جدول 4 به عنوان ورودی فرآیند ماشينكاري تخلیه الکتریکی، مقدار حداکثر میزان نرخ برداشت براده و حداقل میزان سایش ابزار به ترتیب در جدول 5 تعیین شد.

**جدول 4** مقادیر بهینه پارامترهای ورودی برای حداکثر نرخ برداشت براده و حداقل سایش ابزار

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| پارامترهای ورودی | زمان روشنی پالس (µs) | جریان پالس (A) | ولتاژ گپ (V) |
| مقادیر | 400 | 20 | 40 |

**جدول 5** مقادیر خروجی حداکثر نرخ برداشت براده و حداقل سایش ابزار

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| پارامترهای خروجی | حداکثر نرخ برداشت براده (mm3/min) | حداقل سایش ابزار (mm3/min) |
| مقادیر | 5989/1210 | 6843/9 |

با توجه به مقادیر پیش­بینی شده در نرم­افزار که در جدول 5 ارائه گردید، به منظور صحه­گذاری مدل، آزمایشات تجربی با استفاده از پارامترهای ورودی پیشنهادی در جدول 4 به انجام رسید. در جدول 6 مقادیر پیش­بینی شده توسط مدل با نتایج حاصل از آزمایش تجربی صحه­گذاري بیان گردیده است که در آن با توجه به مقادیر، حداکثر خطا کمتر از 8 درصد می­باشد که با توجه به تجهیزات مورد استفاده در حد قابل قبولی است.

**جدول 6** نتایج آزمایش صحه­گذاری نهایی برای پارامترهای نرخ برداشت براده و سایش ابزار

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| پارامتر خروجی | مقدار پیش­بینی شده در نرم­افزار | مقدار حاصل از آزمایش | خطا (%) |
| نرخ برداشت براده | 5989/1210 | 87/1298 | 8 |
| سایش ابزار | 6843/9 | 9095/8 | 8 |

1. نتیجه­گیری

در این تحقیق میزان تأثیر پارامترهای ورودی زمان روشنی پالس، جریان پالس و ولتاژ گپ جهت رسیدن به حداکثر میزان نرخ برداشت براده و حداقل سایش ابزار در فرآیند ماشينكاري تخلیه الکتریکی قطعه کامپوزیتی Al-4Cu-6Si-10wt%SiCP مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان داد که مدل رگرسیونی مورد استفاده در این تحقیق با دقت بالایی قادر به بهینه­سازی فرآیند تخلیه الکتریکی بوده و علاوه بر آن بر طبق جدول مقادیر P مربوط به آنالیز واریانس از کفایت و صحت موردنظر برخوردار می­باشد. همچنین پارامترهای ولتاژ، جریان و زمان روشنی پالس به ترتیب دارای بیشترین تأثیر در تعیین مقادیر بهینه است. آزمایشات تجربی نشان داد که افزایش زمان روشنی پالس و کاهش همزمان ولتاژ گپ و جریان عاملی مهم در حصول به حداکثر میزان نرخ برداشت براده و حداقل سایش ابزار می­باشد.

1. فهرست علایم

|  |  |
| --- | --- |
| MMR | خروجی نرخ برداشت براده |
| TWR | میزان سایش ابزار |
|  | وزن قطعه کار قبل از ماشینکاری |
|  | وزن قطعه کار بعد از ماشینکاری |
|  | وزن ابزار قبل از ماشینکاری |
|  | وزن ابزار بعد از ماشینکاری |
| t | زمان ماشینکاری |
|  | ضریب ثابت |
|  | ترم­های درجه­دوم |
|  | ترم­های برهمکنش |
|  | پارامترهای ورودی |
| **علایم یونانی** | |
|  | مقدار خطا به توجه به دقت موردنظر |

1. مراجع

[1] ASM Handbook, *Properties and Selection Irons Steels and High Performance Alloys*, pp. 17-19, New York: USA, 2005.

[2] C. L. Lin, J. L. Lin, T. C. Ko, Optimizations of the EDM Process Based on the Orthogonal Array with Fuzzy Logic and Grey Relational Analysis Method, [*International Journal of Advanced Manufacturing Technology*](http://www.springerlink.com/content/0268-3768/), Vol. [19, No. 4](http://www.springerlink.com/content/0268-3768/19/4/), pp. 271-277, 2002.

[3] H. K. Kansal, S. Singh, P. Kumar, An experimental study of the machining parameters in powder mixed electric discharge machining of Al–10% SiCP metal matrix composites, *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, Vol. 1, No. 4, pp.396-411, 2006.

[4] S. H. Yang, J. Srinivas, S. Mohan, D. M. Lee, S. Balaji, Optimization of electric discharge machining using simulated annealing, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No.9, pp.4471-4475, 2009.

[5] C. M. Douglas, *Design and analysis of experiments*, Seventh Edition, pp. 80-93, London: John Wiley & Sons Ltd, 2001.

[6] V. K. Jain, *Advance Machining Processes*, pp. 43-55, New Dehli: Allied Publishers, 2004.

1. Response Surface Method (RSM) [↑](#footnote-ref-1)
2. Central Composite Designs (CCD) [↑](#footnote-ref-2)
3. Box–Behnken Design (BBD) [↑](#footnote-ref-3)
4. Minitab Software [↑](#footnote-ref-4)