



# بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر در نرخ باربرداری در ماشین کاری تخلیه الکتریکی خشک

مجید قریشی<sup>1\*</sup>، وحید طهماسبی<sup>2</sup>

1- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

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

\* تهران، صندوق پستی 19395-1999، ghoreishi@kntu.ac.ir

## چکیده

در این مقاله یکی از جدیدترین فرایندهای ماشین کاری تحت عنوان ماشین کاری تخلیه الکتریکی خشک که از مهمترین تفاوت‌های آن در مقایسه با تخلیه الکتریکی معمولی، استفاده از دی الکتریک گازی و سرعت دوران الکترود ابزار است، مورد بررسی قرار گرفته است. با در نظر گرفتن ولتاژ دهانه ماشین کاری، جریان، زمان روشنی و خاموشی پالس، فشار گاز دی الکتریک و سرعت دوران الکترود به عنوان متغیرهای ورودی مؤثر در فرایند، بهینه‌سازی به روش سطح پاسخ برای بهبود ماشین کاری از نظر نرخ باربرداری صورت پذیرفته است. با توجه به انجام و تحلیل آزمایش‌ها می‌توان نتیجه گرفت هرچه ولتاژ دهانه ماشین کاری، جریان، نسبت زمان روشنی پالس به خاموشی پالس، فشار گاز ورودی و سرعت دوران الکترود بیشتر باشند نرخ باربرداری بیشتر خواهد بود و برای زمان روشنی پالس یک مقدار بهینه وجود دارد که بسته به شرایط آزمایش تعیین می‌شود. همچنین نرخ باربرداری در این فرایند در مقایسه با ماشین کاری تخلیه الکتریکی معمولی در شرایط یکسان بهبود یافته است.

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 16 آذر 1392  
پذیرش: 11 مهر 1393  
ارائه در سایت: 12 مهر 1393  
کلید واژگان:  
ماشین کاری تخلیه الکتریکی خشک  
دی الکتریک گازی  
روش سطح پاسخ  
نرخ باربرداری

## Optimization of material removal rate in dry electro-discharge machining process

Majid Ghoreishi\*, Vahid Tahmasbi

Department of Mechanical Engineering, KNT University of Technology, Tehran, Iran

\* P.O.B. 19395-1999 Tehran, Iran, ghoreishi@kntu.ac.ir

## ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 07 December 2013  
Accepted 03 October 2014  
Available Online 04 October 2014

### Keywords:

Dry electro-Discharge Machining (Dry EDM)  
Gaseous Dielectric  
Response Surface Methodology (RSM)

## ABSTRACT

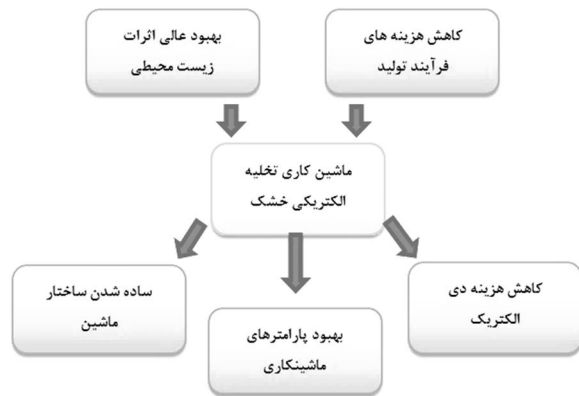
In this paper, dry electro-discharge machining (Dry EDM), one of the newest machining processes which differs mainly from conventional EDM in using gaseous dielectric along with tool electrode rotation, has been studied. Gap voltage, discharge current, pulse-on-time, pulse-off time, dielectric gas pressure, and electrode rotational speed have been considered as effective input parameters. Response surface methodology (RSM) has been used to optimize the machining performance with respect to material removal rate (MRR). Based on the results and analysis of running experiments, it can be concluded that MRR increases by increasing gap voltage, discharge current, the ratio of pulse-on time over pulse-off time, input gas pressure, and electrode rotational speed. There also exists an optimum amount of pulse-on time determined according to the machining circumstances. Also the material removal rate in dry EDM has been improved compared with that in conventional EDM in identical conditions.

## 1- مقدمه

توسط مرکز تحقیقات سازمان فضایی آمریکا<sup>1</sup> است که در آن برای سوراخ کاری از گازهای هلیوم و آرگون استفاده شده بود [4]. پس از این تحقیق، در سال‌های بعد تحقیقات وسیع‌تری پیرامون دی الکتریک گازی در فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی صورت پذیرفت که رفته‌رفته منجر به معرفی فرایندی تحت عنوان ماشین کاری تخلیه الکتریکی خشک شد. پس از سازمان فضایی آمریکا، کانادا و همکارانش در دانشگاه توکیو ژاپن به صورت جدی تحقیق بر روی این فرایند را آغاز کردند و در سال 1997 خصوصیات اصلی ماشین کاری تخلیه الکتریکی خشک را ابراز داشتند که در آن بیان شده بود برای انجام فرایند می‌بایست از الکترود چرخان با جداره ضخیم استفاده شود و همچنین بیان نمودند اثرات زیست محیطی و آلودگی‌های فرایند کاملاً

ماشین کاری تخلیه الکتریکی یکی از پرکاربردترین روش‌های ماشین کاری غیر سنتی است که در سال‌های اخیر مطالعات و پژوهش پیرامون آن در حال گسترش است. اساس ماشین کاری تخلیه الکتریکی بر پایه اثرات حرارتی ناشی از تخلیه الکتریکی است [1]. یکی از مهم‌ترین تحقیقات در این حوزه جایگزین کردن دی الکتریک مایع فرایند با حالت گازی و یا ترکیبی از دو حالت است [2]. ماشین کاری در حالت گازی را خشک و در حالت ترکیب گاز و مایع را نیمه خشک یا نزدیک به خشک می‌نامند [3]. اولین مقاله علمی که در باره ماشین کاری تخلیه الکتریکی خشک به چاپ رسیده، در سال 1985

1- NASA



شکل 1 برخی مزایای ماشین کاری تخلیه الکتریکی خشک

[11]. این روش می تواند نمودارهای خروجی مناسبی را جهت مشخص کردن نقطه بهینه در میان چندین پارامتر به محقق ارائه دهد [12]. همچنین این روش این قابلیت را دارد که رابطه بین ورودی ها و خروجی های یک آزمایش را مدل سازی کرده به صورت یک معادله ریاضی ارائه کند [13].

نرخ باربرداری از جمله خروجی های بسیار مهم در طی فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی خشک بوده و از اهمیت زیادی برخوردار است. لازم به ذکر است در مقاله ای که پیرامون این فرایند انجام شده، مشخص شد در صورت استفاده از گاز اکسیژن و الکترود جدار ضخیم مسی چرخان، نرخ باربرداری از 20 میلی متر مکعب در دقیقه به 60 میلی متر مکعب در دقیقه رسیده است که برای خشن تراشی بسیار مفید خواهد بود و در صورت استفاده از الکترود گرافیتی و بخار نیتروژن در بخش پرداخت نهایی، صافی سطح از 4 میکرون به 0/7 میکرون بهبود یافته است که به نوبه خود بسیار حائز اهمیت است [5]. در این مقاله اثر متغیرهای ورودی ماشین کاری تخلیه الکتریکی خشک از قبیل ولتاژ دهانه ماشین کاری، جریان، زمان روشنی پالس، متغیر درصد نسبت زمان روشنی پالس به خاموشی پالس<sup>3</sup> که تحت عنوان  $D\%$  بیان می شود، فشار گاز دی الکتریک و سرعت دوران الکترود بر روی نرخ باربرداری به روش سطح پاسخ بررسی می شود و در نهایت شرایط لازم برای رسیدن به حالت بهینه مشخص می شود. در پایان در شرایط یکسان، نرخ باربرداری در این فرایند با ماشین کاری تخلیه الکتریکی مقایسه شده است.

### 3- مواد و تجهیزات آزمایش

در این مقاله از الکترود مسی خالص به قطر 8 میلی متر به عنوان ابزار و از گاز اکسیژن به عنوان دی الکتریک در ماشین کاری تخلیه الکتریکی خشک استفاده شده است. قطعه کار نیز از جنس فولاد آلیاژی با قابلیت عملیات حرارتی است. در این تحقیق برای انجام آزمایش ها از دستگاه اسپارک انارک استفاده شده است و همچنین کلگی ماشین کاری گازی برای اولین بار در کشور در دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی ساخته شده و با شماره اختراع 72516 ثبت شده است [14]. تصویر ماشین ابزار و کلگی جدید آن در شکل 2 و شکل 3 آمده است. جریان گاز از داخل الکترود از طریق یک سوراخ 2 میلیمتری به سیستم اعمال می شود.

### 4- مدل سازی ریاضی و شیوه انجام آزمایش

اولین قدم در استفاده از روش سطح پاسخ یافتن رابطه ریاضی موجود بین

حذف شده و به یکی از پاک ترین فرایندهای ماشین کاری تبدیل شده است [2]. در سال 2007 آلبرت شین و همکاران برای اولین بار ماشین کاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک را مطرح نمودند. در این تحقیق دی الکتریک به کار رفته ترکیبی از مایع و گاز (در این تحقیق از ترکیب آب و هوای معمولی) است و در حالت های سوراخ کاری و سیم برش مورد استفاده قرار گرفت که بهبود فرایند سیم برش از لحاظ پارامتری ماشین کاری و افزایش صافی سطح و دقت ابعادی در فرایند سوراخ کاری نسبت به ماشین کاری تخلیه الکتریکی خشک مطرح شده است. اما نرخ براده برداری ماشین کاری تخلیه الکتریکی خشک بالاتر است [3]. در سال 2009 ساها و همکارش در دانشگاه صنعتی کامپور کشور هند به بهینه سازی پارامترهای مؤثر در ماشین کاری تخلیه الکتریکی خشک به روش شبکه عصبی پرداختند و همچنین درباره تعداد و هندسه سوراخ های پیشانی الکترود نکاتی را بیان داشتند که در نوع خود حائز اهمیت است [5]. در سال 2010 جوشی و همراهانش در دانشگاه بمبئی هند به بررسی پارامترهای مؤثر بر سوراخ کاری تخلیه الکتریکی خشک در نرخ براده برداری پرداختند که آزمایش ها به روش تاگوچی<sup>1</sup> طراحی و تحلیل شده است [6]. بار دیگر در سال 2011 جوشی و همکارانش مقاله ای را در باره استفاده از الکترود با حالت ضربه ای و بهره گیری از نیروهای مغناطیسی برای ارتعاش همزمان با دوران الکترود در ماشین کاری تخلیه الکتریکی خشک ارائه دادند که منجر به بهبود نرخ براده برداری شده است [7].

علت استفاده از دی الکتریک در فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی، خنک کاری، ایجاد شرایط لازم برای ماشین کاری در دهانه ماشین کاری و همچنین دور کردن براده ها از دهانه ماشین کاری است [1]. ماشین کاری تخلیه الکتریکی خشک فرایندی است که در آن به جای استفاده از دی الکتریک مایع، از انواع گازها به عنوان مایع دی الکتریک استفاده می شود [6].

ماشین کاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک فرایندی است که از ترکیب همزمان گاز و مایع به عنوان دی الکتریک استفاده می شود [8]. در این مقاله پارامترهای<sup>2</sup> مؤثر در فرایند سوراخ کاری ماشین کاری تخلیه الکتریکی خشک به منظور بهبود نرخ براده برداری به روش سطح پاسخ مورد بررسی قرار گرفته است و به منظور بیان و توجیه استفاده از این فرایند در مواردی که نرخ باربرداری مهم است مانند خشن تراشی، یک مقایسه در شرایط یکسان با ماشین کاری تخلیه الکتریکی معمولی انجام شده است.

مزایای فرایند تخلیه الکتریکی خشک در شکل 1 نشان داده شده است. از جمله می توان به مواردی نظیر سازگاری با محیط زیست، پایین بودن هزینه های فرایند، ساده شدن ابزار و تجهیزات، بهینه شدن پارامترهای ماشین کاری و ارزان بودن دی الکتریک اشاره کرد [9].

### 2- روش آماری سطح پاسخ

روش سطح پاسخ از جمله روش های ریاضی و آماری است که برای مدل سازی و تحلیل مسائلی که پاسخ تحت تأثیر چندین متغیر قرار می گیرد، استفاده می شود و هدف آن مدل سازی و بهینه سازی این پاسخ است [10]. اساس سطح پاسخ بر طراحی آزمایش ها 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 آزمایش ها و رفع عیوب آنها به کار گرفته می شود و استفاده به موقع از آن سبب کاهش زمان تولید و هزینه ها می شود

1- Taguchi Method  
2- Parameters

3- Duty Factor

جدول 1 مقادیر کد شده فاکتورهای ورودی آزمایش

| فاکتورهای ورودی                             | $\alpha$ | -1   | 0   | 1    | $\alpha$ |
|---------------------------------------------|----------|------|-----|------|----------|
| ولتاژ دهانه ماشین کاری (V)                  | 60       | 90   | 120 | 150  | 180      |
| جریان تخلیه (A)                             | 10       | 5/13 | 15  | 17/5 | 20       |
| زمان روشنی پالس ( $\mu$ s)                  | 100      | 250  | 400 | 550  | 700      |
| درصد نسبت زمان روشنی پالس به خاموشی پالس D% | 8        | 24   | 40  | 56   | 72       |
| فشار گاز اکسیژن (kPa)                       | 60       | 120  | 180 | 240  | 300      |
| سرعت دوران الکترود (rpm)                    | 200      | 500  | 800 | 1100 | 1400     |

با توجه به طراحی آزمایش صورت گرفته به روش سطح پاسخ برای تعداد 6 فاکتور<sup>4</sup> ورودی توسط نرم افزار و تعیین فاکتور  $\alpha=2$  با توجه به امکانات و شرایط آزمایش تعداد 53 آزمایش برای رسیدن به هدف به دست آمد که به همراه مقادیر بدست آمده برای نرخ باربرداری در جدول 2 ارائه شده است؛ لازم به ذکر است برای جلوگیری از خطاهای احتمالی آزمایش‌ها به صورت تصادفی انجام شده‌اند و از انجام آزمایش‌ها به ترتیب جدول خودداری شده است.

جدول 2 آزمایش‌های انجام شده و مقادیر نرخ باربرداری

| شماره | V (V) | I (A) | $T_{on}$ ( $\mu$ s) | D% | P (kPa) | N (rpm) | MRR ( $mm^3/min$ ) |
|-------|-------|-------|---------------------|----|---------|---------|--------------------|
| 1     | -1    | -1    | -1                  | -1 | -1      | -1      | 0/63               |
| 2     | 1     | -1    | -1                  | -1 | -1      | 1       | 0/94               |
| 3     | -1    | 1     | -1                  | -1 | -1      | 1       | 2/15               |
| 4     | 1     | 1     | -1                  | -1 | -1      | -1      | 1/52               |
| 5     | -1    | -1    | 1                   | -1 | -1      | 1       | 0/74               |
| 6     | 1     | -1    | 1                   | -1 | -1      | -1      | 0/85               |
| 7     | -1    | 1     | 1                   | -1 | -1      | -1      | 1/85               |
| 8     | 1     | 1     | 1                   | -1 | -1      | 1       | 3/16               |
| 9     | -1    | -1    | -1                  | 1  | -1      | 1       | 1/29               |
| 10    | 1     | -1    | -1                  | 1  | -1      | -1      | 0/85               |
| 11    | -1    | 1     | -1                  | 1  | -1      | -1      | 1/10               |
| 12    | 1     | 1     | -1                  | 1  | -1      | 1       | 4/49               |
| 13    | -1    | -1    | 1                   | 1  | -1      | -1      | 0/88               |
| 14    | 1     | -1    | 1                   | 1  | -1      | 1       | 1/33               |
| 15    | -1    | 1     | 1                   | 1  | -1      | 1       | 3/61               |
| 16    | 1     | 1     | 1                   | 1  | -1      | -1      | 2/61               |
| 17    | -1    | -1    | -1                  | -1 | 1       | 1       | 0/98               |
| 18    | 1     | -1    | -1                  | -1 | 1       | -1      | 0/77               |
| 19    | -1    | 1     | -1                  | -1 | 1       | -1      | 2/11               |
| 20    | 1     | 1     | -1                  | -1 | 1       | 1       | 2/74               |
| 21    | -1    | -1    | 1                   | -1 | 1       | -1      | 0/74               |
| 22    | 1     | -1    | 1                   | -1 | 1       | 1       | 1/18               |
| 23    | -1    | 1     | 1                   | -1 | 1       | 1       | 4/57               |
| 24    | 1     | 1     | 1                   | -1 | 1       | -1      | 2/58               |
| 25    | -1    | -1    | -1                  | 1  | 1       | -1      | 0/77               |
| 26    | 1     | -1    | -1                  | 1  | 1       | 1       | 4                  |
| 27    | -1    | 1     | -1                  | 1  | 1       | 1       | 5/98               |
| 28    | 1     | 1     | -1                  | 1  | 1       | -1      | 2/99               |
| 29    | -1    | -1    | 1                   | 1  | 1       | 1       | 1/09               |

4- Factor



شکل 2 دستگاه اسپارک مورد استفاده در آزمایش‌ها



شکل 3 دستگاه ماشین کاری تخلیه الکتریکی خشک

پاسخ آزمایش و مجموعه متغیرهای ورودی آزمایش به صورت تقریبی است، زیرا در این روش در ابتدا رابطه بین پاسخ و متغیرهای ورودی آزمایش که در این مقاله عبارتند از ولتاژ دهانه ماشین کاری، جریان، زمان روشنی پالس، متغیر درصد نسبت خاموشی پالس به روشنی پالس، فشار گاز دی الکتریک و سرعت دوران الکترود ابزار. در این تحقیق آزمایش‌ها بر پایه طراحی مرکب مرکزی (CCD) بنا شده‌اند. متغیرهای مورد بحث در این آزمایش مطابق جدول 1 در 5 سطح و به همراه مقادیر آنها آورده شده‌اند. نهایتاً مطابق با نتایجی که برای نرخ برداری بدست خواهد آمد، مدل سازی ریاضی برای این آزمایش به شکل یک معادله رگرسیون<sup>1</sup> خطی درجه دو ایجاد خواهد شد که این معادله آماری از نقاط داده‌ای جدول عبور کرده و یا در نزدیک‌ترین حالت نسبت به آنها قرار می‌گیرد.

نرم افزار مینیتب<sup>2</sup> نسخه 16، برای تحلیل و تفسیر نتایج و همچنین بدست آوردن ضرایب معادله ریاضی حاکم بر آزمایش استفاده شده است. برای تحلیل آماری نتایج، از آنالیز واریانس<sup>3</sup> استفاده می‌شود و بنابراین برای پیش‌بینی نرخ باربرداری در هر حالت در فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی خشک، این نتایج قابل استفاده می‌باشد.

1 -Regression  
2 -Minitab  
3- ANOVA

| جدول 3 ضرایب معادله رگرسیون در مدل های اولیه و اصلاح شده |             |           |             |         |
|----------------------------------------------------------|-------------|-----------|-------------|---------|
| مدل سازی اولیه                                           |             | اصلاح شده |             |         |
| ترم ها                                                   | ضریب معادله | مقدار P   | ضریب معادله | مقدار P |
|                                                          | رگرسیون     |           | رگرسیون     |         |
| ثابت                                                     | -1/14634    | 0/000     | 0/1024      | 0/000   |
| Vg                                                       | 0/04821     | 0/085     | 0/019       | 0/070   |
| I                                                        | -0/49396    | 0/000     | -0/47275    | 0/000   |
| T <sub>on</sub>                                          | 0/00785     | 0/058     | 0/00813     | 0/045   |
| D%                                                       | -0/04324    | 0/000     | -0/01602    | 0/000   |
| P                                                        | 0/00464     | 0/000     | 0/00317     | 0/000   |
| N                                                        | -0/00301    | 0/000     | -0/00330    | 0/000   |
| Vg.Vg                                                    | -0/000109   | 0/152     | -           | -       |
| I.I                                                      | 0/00878     | 0/045     | 0/00862     | 0/037   |
| T <sub>on</sub> .T <sub>on</sub>                         | -0/0000061  | 0/046     | -0/0000063  | 0/032   |
| D%.D%                                                    | 0/0000361   | 0/890     | -           | -       |
| P.P                                                      | -0/0000095  | 0/609     | -           | -       |
| N.N                                                      | 0/00000081  | 0/283     | -           | -       |
| Vg.I                                                     | -0/000245   | 0/670     | -           | -       |
| Vg.T <sub>on</sub>                                       | 0/00000514  | 0/737     | -           | -       |
| Vg.D%                                                    | 0/000147    | 0/309     | -           | -       |
| Vg.P                                                     | -0/000833   | 0/037     | -0/0000833  | 0/027   |
| Vg.N                                                     | -0/0000104  | 0/177     | -           | -       |
| I.T <sub>on</sub>                                        | 0/000123    | 0/289     | -           | -       |
| I.D%                                                     | 0/000268    | 0/019     | 0/00268     | 0/013   |
| I.P                                                      | 0/00094     | 0/003     | 0/00094     | 0/001   |
| I.N                                                      | 0/000304    | 0/000     | 0/00030     | 0/000   |
| T <sub>on</sub> .D%                                      | -0/0000568  | 0/056     | -0/00005678 | 0/044   |
| T <sub>on</sub> .P                                       | -0/0000028  | 0/710     | -           | -       |
| T <sub>on</sub> .N                                       | -0/00000175 | 0/258     | -           | -       |
| D%.P                                                     | 0/0000371   | 0/605     | -           | -       |
| D%.N                                                     | 0/000034    | 0/025     | 0/0000334   | 0/017   |
| P.N                                                      | 0/00000205  | 0/592     | -           | -       |

(نقطه مرکزی) 2 در نظر گرفته شده اند.

#### 1-6- اثر ولتاژ دهانه ماشین کاری

با توجه به مقدار  $Pvalue$  جدول آنالیز واریانس برای فاکتور ولتاژ، می‌توان نتیجه گرفت ولتاژ دهانه ماشین کاری نسبت به دیگر پارامترها اثر کمتری روی فرایند دارد. با توجه به اثر فاکتور ولتاژ که در شکل 5 ارائه شده است. می‌توان گفت که هرچه ولتاژ دهانه ماشین کاری بیشتر باشد نرخ باربرداری بیشتر خواهد بود اما اگر اثر بر هم کنش این فاکتور با فاکتور فشار را که در شکل 6 آمده است مورد بررسی قرار گیرد ملاحظه می‌شود علاوه بر مورد فوق در فشارهای خیلی بالا با ولتاژ خیلی کم نیز می‌توان به نرخ باربرداری مطلوب دست یافت. اما در مجموع با در نظر داشتن هر دو نمودار بهتر است برای بدست آوردن مقادیر مطلوب نرخ باربرداری ولتاژ دهانه ماشین کاری در بیشترین مقدار آن تنظیم شود. البته بیان این نکته مهم است که به طور کلی

|    |    |    |    |    |    |    |      |
|----|----|----|----|----|----|----|------|
| 30 | 1  | -1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1/33 |
| 31 | -1 | 1  | 1  | 1  | 1  | -1 | 2/81 |
| 32 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 4/72 |
| 33 | -2 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1/17 |
| 34 | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 2/25 |
| 35 | 0  | -2 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0/81 |
| 36 | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 4/52 |
| 37 | 0  | 0  | -2 | 0  | 0  | 0  | 1/16 |
| 38 | 0  | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 1/93 |
| 39 | 0  | 0  | 0  | -2 | 0  | 0  | 1/31 |
| 40 | 0  | 0  | 0  | 2  | 0  | 0  | 2/97 |
| 41 | 0  | 0  | 0  | 0  | -2 | 0  | 1/49 |
| 42 | 0  | 0  | 0  | 0  | 2  | 0  | 2/44 |
| 43 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | -2 | 1/30 |
| 44 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 2  | 3/49 |
| 45 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 2/12 |
| 46 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 2/29 |
| 47 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 2/15 |
| 48 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 2/19 |
| 49 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 2/22 |
| 50 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1/88 |
| 51 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1/90 |
| 52 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1/89 |
| 53 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 2/09 |

#### 5- تحلیل داده‌ها و نتایج آزمایش

با توجه نتایج به دست آمده برای نرخ باربرداری، تحلیل و اصلاح مدل سازی و حذف عوامل غیر مؤثر، جدول آنالیز واریانس و ضرایب معادله رگرسیون حاکم برمسئله به صورت غیر کد شده برای نرخ باربرداری در جدول 3 آمده است. لازم به ذکر است که متغیرهایی در فرایند مؤثر هستند که مقدار  $p$  بدست آمده با توجه به قابلیت اطمینان 95 درصد برای آنها از 0/05 کمتر باشد.

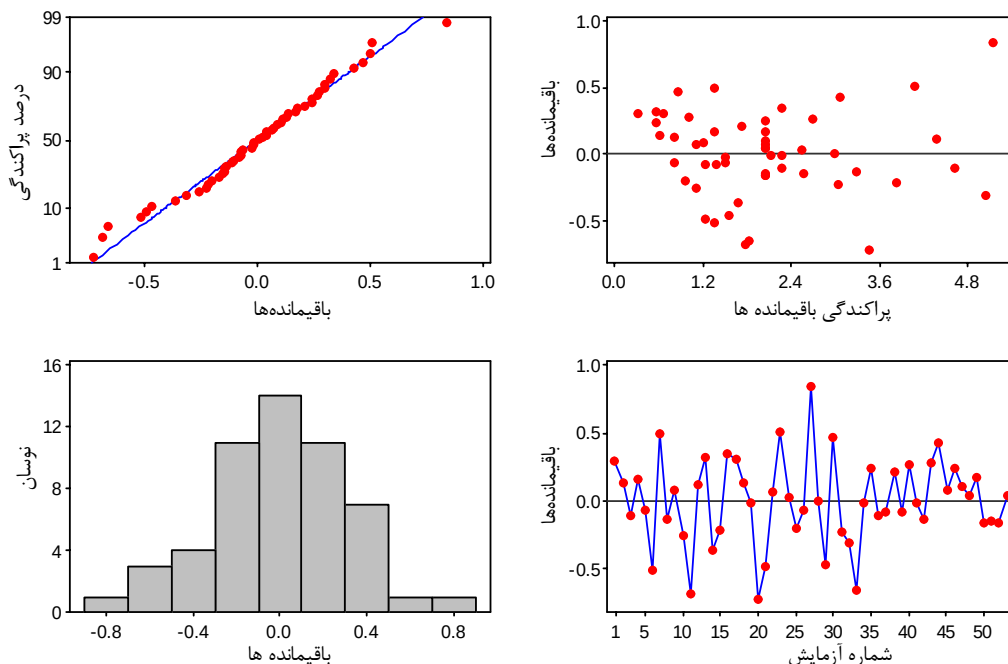
با توجه به نتایج به دست آمده از جدول آنالیز واریانس و اصلاح مدل، معادله رگرسیون منطبق شده با مدل به صورت کد<sup>1</sup> شده برای نرخ باربرداری بر حسب متغیرهای ورودی ماشین کاری به صورت زیر خواهد بود:

$$MRR = 2.0459 + 0.109Vg + 1.0150I_d + 0.1210T_{on} + 0.3275D\% + 0.2675P + 0.5200N + 0.1379I_d^2 + 0.1421T_{on}^2 + 0.15Vg \times P + 0.1712I_d \times D\% + 0.2256I_d \times P + 0.3650I_d \times N - 0.1362T_{on} \times D\% + 0.1625P \times N \quad (1)$$

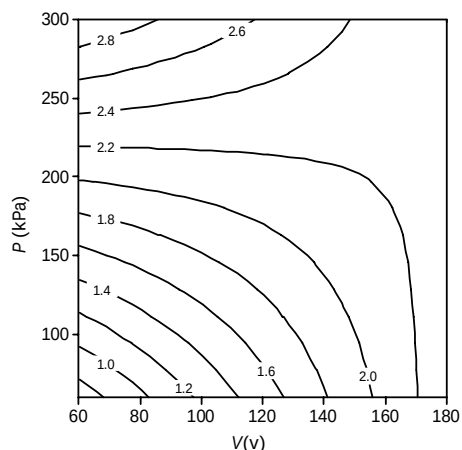
همچنین  $R-Sq = 93.10\%$  مدل و  $R-Sq(adj) = 90.56\%$  است که نشان دهنده دقت بسیار خوب مدل سازی به روش سطح پاسخ به کار رفته می‌باشد و همچنین نمودارهای مربوط به تحلیل و پراکندگی باقی مانده ها در شکل شماره 4 آمده است که بسیار مناسب و منطبق هستند.

#### 6- اثر پارامترهای مؤثر بر نرخ باربرداری

برای تحلیل دقیق اثر پارامترهای مؤثر در فرایند انجام شده می‌بایست به دقت اثر فاکتور اصلی و بر هم کنش‌های مؤثر فاکتورها را مورد تحلیل قرارداد که در این بخش به اثر هریک از فاکتورها پرداخته خواهد شد. در تحلیل نمودار-های اثر برهم کنش فاکتورهای مؤثر، سایر متغیرها در حالت تعادل آزمایش‌ها



شکل 4 نمودارهای مربوط به توزیع باقیمانده ها



شکل 6 اثر برهم کنش فاکتور ولتاژ و فشار

مذاب عمیق تر و بزرگ‌تری تولید می‌کند که منجر به افزایش نرخ باربرداری می‌شود [1]. در تمامی نمودارهای برهم کنش جریان با فاکتورهای زمان خاموشی پالس و فشار گاز ورودی و سرعت دوران ابزار بیشترین نرخ باربرداری در مقدار 20 آمپر قابل ملاحظه است، و هرچه جریان افزایش می‌یابد، نرخ باربرداری بیشتر می‌شود.

همان‌طور که در تمامی نمودار ملاحظه می‌شود، با افزایش جریان میزان نرخ باربرداری افزایش می‌یابد.

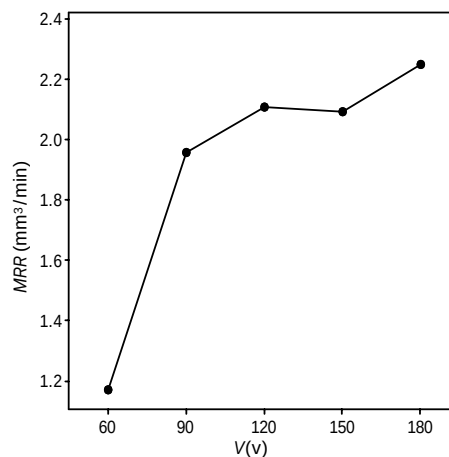
### 3-6- اثر زمان روشنی پالس

با توجه به نتایج به دست آمده از شکل شماره 11 می‌توان نتیجه گرفت که در ابتدا با افزایش زمان روشنی پالس میزان باربرداری بیشتر می‌شود ولی با افزایش بیشتر نرخ باربرداری کم خواهد شد و شکل نمودار دارای یک اکسترمم نسبی است که محدوده مقدار زمان روشنی پالس برای رسیدن به بیشترین مقدار باربرداری را مشخص می‌سازد. نمودار بدست آمده کاملاً با

تغییرات ولتاژ ممکن است در مشخصه های ماشین کاری اثر قابل توجهی نداشته باشد، زیرا ولتاژی که بر روی ماشین تنظیم می‌شود ولتاژ منبع قدرت بوده (ولتاژ مدار باز) و ولتاژ دهانه ماشین کاری که در آن اسپارک رخ می‌دهد معمولاً 0/20 تا 0/25 این ولتاژ است [1]. در این مسأله نیز با توجه به اثر برهم کنش و فشار و ولتاژ و زینی شکل بودن نمودار اثر ولتاژ در این مسأله قابل توجه نیست و نکته علمی گفته شده در باره اثر ولتاژ در ماشین کاری تخلیه الکتریکی در این مورد صدق می‌کند.

### 2-6- اثر جریان تخلیه الکتریکی

با توجه به این که ضریب معادله رگرسیون برای فاکتور جریان بیشترین مقدار است، می‌توان نتیجه گرفت که اثر این متغیر در نرخ باربرداری نسبت به دیگر فاکتورهای فرایند بیشتر است. شکل‌های 7 تا 10 این نکته را نشان می‌دهند که هر چه جریان تخلیه بیشتر باشد نرخ باربرداری بیشتر خواهد بود. با افزایش جریان، انرژی تخلیه شده در دهانه ماشین کاری بیشتر شده و چاله



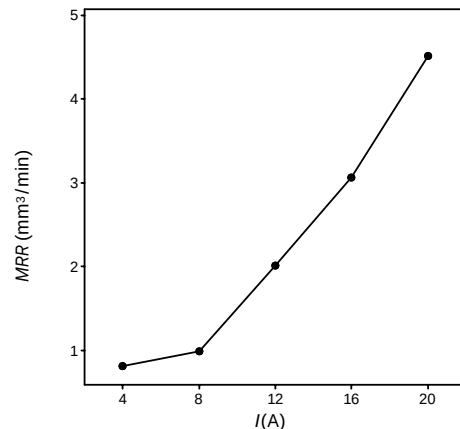
شکل 5 اثر فاکتور اصلی ولتاژ بر نرخ باربرداری

منحنی‌های مشخصه در ماشین کاری اسپارک مطابقت دارد. همان‌طور که در نمودار ملاحظه می‌شود، در ابتدا با افزایش زمان روشنی پالس نرخ باربرداری به دلیل انرژی بیشتر در دهانه افزایش می‌یابد و به یک حداکثری رسیده و پس از آن دیگر افزایش زمان روشنی اثر مناسبی نخواهد داشت. دلیل آن این است که با افزایش بیشتر زمان روشنی، قطر ستون پلاسما افزایش می‌یابد و تمرکز انرژی بر روی سطح کاهش یافته و منجر به چاله‌های مذاب کوچک‌تر و با عمق کمتر می‌شود. در نتیجه افزایش زمان روشنی پالس تا حد معینی مناسب است [1].

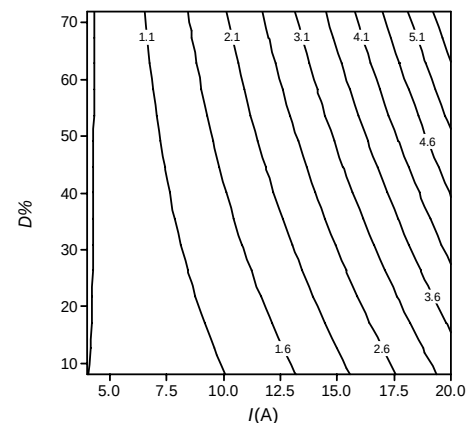
با در نظر گرفتن اثر بر هم کنش فاکتورهای  $T_{on}$  و  $D\%$  که در شکل 12 آمده، نتیجه بدست آمده از شکل 11 تأیید می‌شود و با افزایش  $T_{on}$  و  $D\%$  به سمت یک مقدار بیشینه، بیشترین مقدار نرخ باربرداری حاصل می‌شود که در این تحقیق زمان روشنی پالس برابر با مقدار  $300\mu s$  است.

#### 4-6- اثر زمان خاموشی پالس

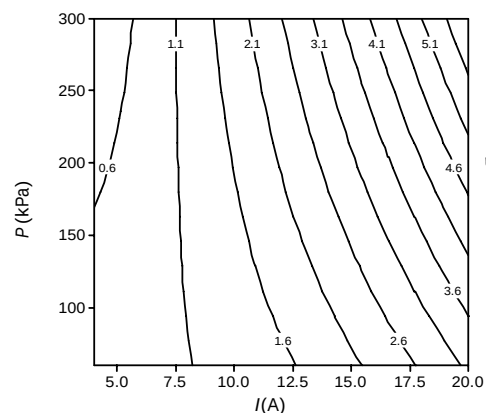
در بسیاری از ماشین های تخلیه الکتریکی از جمله ماشین ابزار مورد استفاده به جای تنظیم زمان خاموشی پالس ( $T_{off}$ ) از نسبت درصد زمان روشنی پالس به خاموشی پالس بهره گرفته می‌شود و تحت عنوان  $D\%$  بیان می‌شود. شکل های 8، 12، 13 و 14 همگی نشان می‌دهند با کاهش زمان خاموشی پالس و



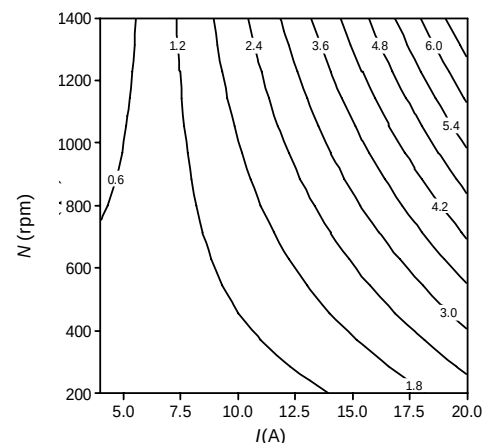
شکل 7 اثر متغیر جریان



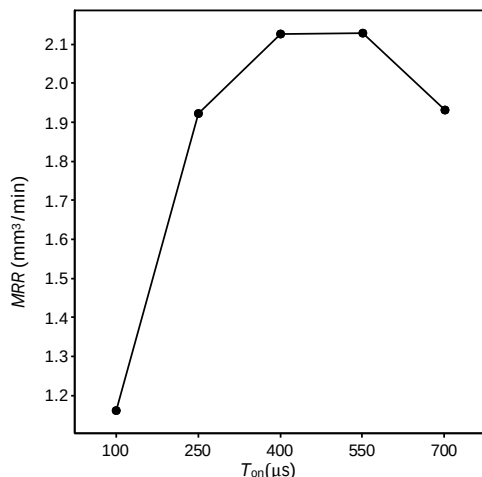
شکل 8 اثر بر هم کنش فاکتور جریان و  $D\%$



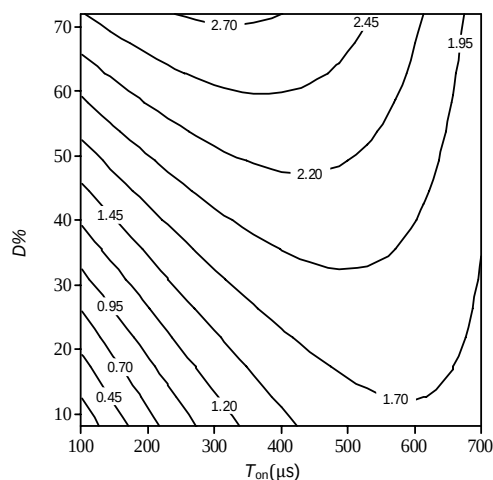
شکل 9 اثر بر هم کنش متغیر جریان و فشار گاز ورودی



شکل 10 اثر بر هم کنش متغیر جریان و سرعت دوران الکترود



شکل 11 اثر فاکتور اصلی زمان روشنی پالس بر نرخ باربرداری



شکل 12 اثر بر هم کنش فاکتورهای زمان روشنی پالس و  $D\%$

شده و نقطه دیگری در ابزار جایگزین می‌شود و پایداری شرایط بهتر می‌شود. لذا اگر دور دستگاه کم باشد به منظور جلوگیری از ناپایدار شدن سیستم می‌بایست زمان خاموشی پالس افزایش یابد و متغیر  $D\%$  کم شود. این نکته به وضوح در شکل 14 قابل ملاحظه است. پس در دوره‌های بالا به راحتی می‌توان زمان خاموشی پالس را کمتر کرد و هرچه دور دستگاه افزایش یابد می‌توان زمان خاموشی پالس را نیز کمتر کرد و به بهترین مقدار نرخ باربرداری دست یافت.

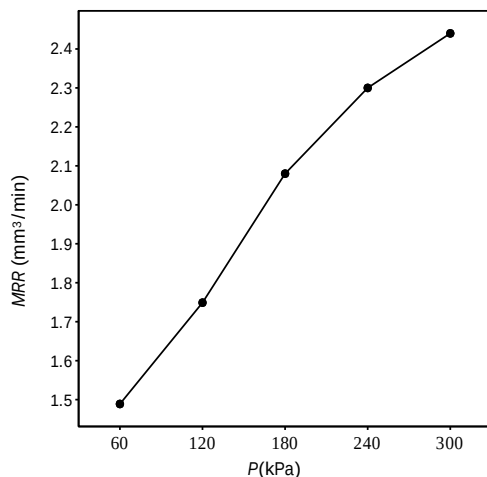
#### 5-6- اثر میزان فشار گاز ورودی

تا به حال فاکتورهای ورودی که مورد بررسی قرار گرفتند فاکتورهای مشترک بین هر دو حالت خشک و معمولی بودند. فشار ورودی و سرعت دوران الکترو فاکتورهای ویژه ماشین کاری تخلیه الکتریکی خشک هستند. شکل 15 اثر فاکتور اصلی فشار گاز ورودی به دی الکتریک را نمایش می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش فشار دی الکتریک گازی، نرخ باربرداری افزایش می‌یابد. افزایش فشار گاز ورودی باعث افزایش پایداری ستون پلاسما در دی الکتریک گازی می‌شود و همچنین با توجه به شستشوی بهتر دهانه و خروج ذرات و اکسید شدن بهتر براده‌ها به افزایش نرخ باربرداری کمک می‌کند.

نمودارهای برهم کنش فاکتور فشار گاز ورودی و ولتاژ (شکل 6) و برهم کنش جریان تخلیه و فشار گاز دی الکتریک (شکل 9) این نکته را تأیید می‌کنند. پایداری بهتر شرایط آزمایش به علت تراکم بیشتر گاز در دهانه و امکان اکسید کردن سطح باربرداری شده و خنک کاری و شستشوی بهتر دهانه در کنار افزایش جریان در ماشین کاری سبب بهبود پایداری و افزایش نرخ براده برداری می‌شود.

#### 6-6- اثر سرعت دوران ابزار

چرخش الکترو یکی از ملزومات ماشین کاری تخلیه الکتریکی خشک است. در فرایند تخلیه الکتریکی خشک با توجه به کاهش شدید دهانه ماشین کاری نسبت به حالت ماشین کاری تخلیه الکتریکی معمولی اگر دوران الکترو نباشد به علت ایجاد جرقه ناخواسته و اتصال کوتاه در فرایند، ماشین کاری متوقف می‌شود. لذا هنگامی که ابزار دوران دارد، پس از ایجاد یک جرقه بین یک نقطه از ابزار و قطعه کار، به علت دوران ابزار نقطه قبلی جای خود را برای جرقه بعد به یک نقطه جدید خواهد داد و لذا با ایجاد جرقه جدید فرایند ادامه می‌یابد و هرچه دوران سریع‌تر باشد این جابه‌جایی نقاط بهتر انجام

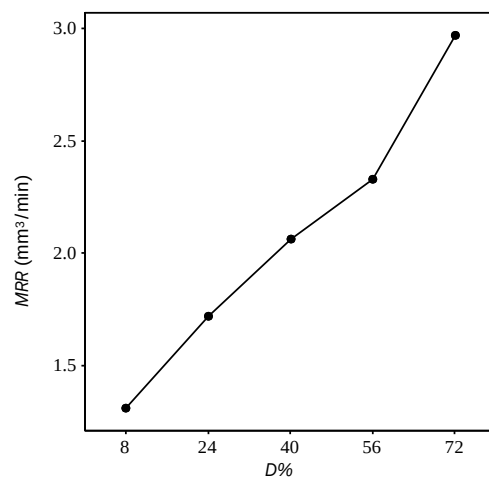


شکل 15 اثر فاکتور اصلی فشار گاز ورودی بر نرخ باربرداری

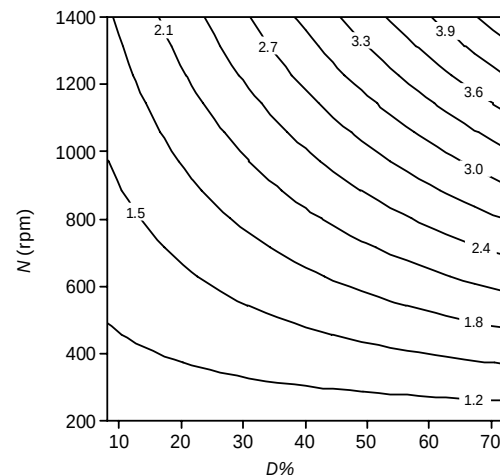
افزایش نسبت  $D\%$  نرخ باربرداری افزایش می‌یابد. شکل 13 اثر فاکتور اصلی  $D\%$  را نمایش می‌دهد.

شکل 14 برهم کنش فاکتور  $D\%$  و سرعت دوران الکترو را نمایش می‌دهد و ملاحظه می‌شود با افزایش مقدار  $D\%$  شبیه شکل‌های 8 و 12 نرخ باربرداری افزایش می‌یابد.

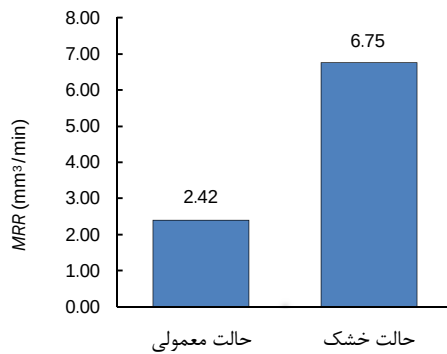
در مورد زمان خاموشی پالس توضیح این نکته ضروری است که در ماشین کاری تخلیه الکتریکی با کاهش زمان خاموشی پالس نرخ باربرداری افزایش می‌یابد ولی از طرف دیگر باید توجه داشت که کم کردن بیش از حد این زمان سبب می‌شود تا زمان کافی به دی‌یونیزه شدن دی الکتریک داده نشود و شرایط پس از اسپارک اول برای اسپارک بعدی آماده نگردد و منجر به جرقه ناخواسته<sup>1</sup> شود که این هم به نوبه خود سبب ناپایداری فرایند ماشین کاری می‌شود [1]. در این مسأله نیز ملاحظه می‌شود که زمان خاموشی پالس به شدت تحت تأثیر میزان دور ابزار قرار دارد (شکل 14). در ماشین کاری تخلیه الکتریکی خشک برای آن که ستون پلاسما و حالت پایدار ماشین کاری شکل گیرد، فاصله دهانه ماشین کاری نسبت به حالت دی الکتریک مایع بسیار کمتر است. لذا اگر بین یک نقطه از ابزار و یک نقطه از قطعه کار مدت زمان بیشتری جریان برقرار شود، به سرعت شرایط ناپایدار می‌شود. لذا با دوران سریع‌تر الکترو ابزار این فرصت از دو نقطه مزبور گرفته



شکل 13 اثر فاکتور اصلی  $D\%$  بر نرخ باربرداری



شکل 14 اثر برهم کنش فاکتورهای سرعت الکترو و  $D\%$



شکل 17 مقایسه نرخ باربرداری در حالت‌های معمولی و خشک

ملاحظه می‌شود که در شرایط یکسان نرخ باربرداری به مراتب در حالت خشک بهتر از حالت معمول شده است که در شکل 17 ملاحظه می‌شود.

### 8- نتیجه و جمع‌بندی

با توجه به موارد بیان شده می‌توان نتیجه گرفت که فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی خشک از جمله فرایندهای ماشین کاری برای دستیابی به نرخ باربرداری بالا در ماشین کاری غیرسنستی و مخصوصاً در حالت خشن‌تراشی است. با انجام تحقیقات وسیع‌تر بر روی این فرایند از جمله نوع گاز و ترکیب آن با مایع دی الکتریک در حیطه های مختلف ماشین کاری تخلیه الکتریکی خشک از جمله فرز و سیم برش، می‌توان به طور قابل ملاحظه‌ای این فرایندها را بهبود بخشید.

در این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت هرچه ولتاژ دهانه ماشین کاری، جریان، نسبت زمان روشنی پالس به خاموشی پالس، فشار گاز ورودی و سرعت دوران الکترود بیشتر باشند نرخ باربرداری بیشتر خواهد بود و برای زمان روشنی پالس یک مقدار بهینه وجود دارد که بسته به شرایط آزمایش تعیین می‌شود.

در آزمایش‌های انجام شده با در نظر گرفتن ولتاژ دهانه ماشین کاری با مقدار 180 ولت و جریان 20 آمپر و زمان روشنی پالس 320 میکروثانیه و درصد نسبت زمان روشنی پالس به خاموشی پالس 72% و مقدار فشار 300 کیلوپاسکال و سرعت دوران 1400 دور بر دقیقه می‌توان به نرخ باربرداری بالای 10 میلی‌متر مکعب بر دقیقه دست یافت که با انجام این آزمایش در عمل این موضوع مورد تأیید قرار گرفت. همچنین باید گفت این در این فرایند به طور کلی نرخ باربرداری نسبت به حالت معمولی به مراتب بهتر شده است.

### 9- تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله برخود لازم می‌دانند از زحمات جناب آقای مهندس حسن محمد علی بیگی که در ساخت دستگاه ماشین ابزار و اطلاعات مربوط به آن از هیچ کوششی فروگذار نکردند، تشکر نموده و مراتب سپاس خود را از آزمایشگاه ماشین کاری مخصوص دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی و پرسنل و دانشجویان آن اعلام دارند.

### 10- مراجع

- [1] M.Ghoreishi, *Electrical discharge machining*, Second Editition, Tehran: KNT University of Technology, pp. 11-40, 2009. (In Persian)
- [2] Kunieda M., Yoshida M., Taniguchi N, *Electrical Discharge machining in gas, CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 46, pp. 143-146, 1997.
- [3] Kao CC., Tao J., Shih AJ, *Near dry electrical discharge machining*,

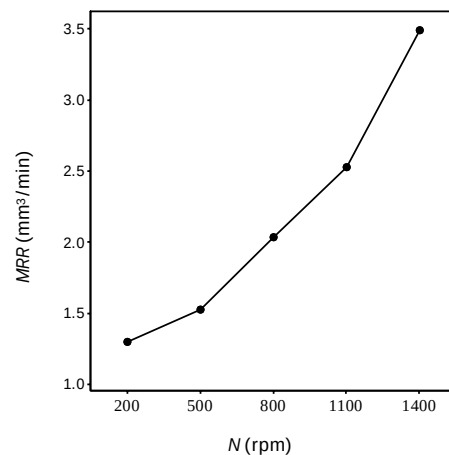
خواهد شد و فرایند پایدارتر می‌شود و با بهتر شدن شرایط ماشین کاری نرخ باربرداری بهبود می‌یابد. شکل 16 این نکته را بیان می‌کند که با افزایش دور ابزار نرخ باربرداری افزایش می‌یابد و با توجه به ضرایب معادله رگرسیون اثر دور ابزار از فشار گاز ورودی بیشتر است همچنین اثر برهم کنش این فاکتور با زمان خاموشی پالس در جای خود مورد بررسی قرار گرفت (شکل 14).

### 7-6- ارائه بهینه ترین حالت انجام آزمایش ها

با توجه نتایج بیان شده از تحلیل نمودارها و مدل‌سازی ریاضی حاکم بر آزمایش، نرم‌افزار نیز یک پیشنهاد بهینه را معرفی و مقدار بیشینه نرخ باربرداری را پیش‌بینی می‌کند که در جدول 4 به آن اشاره شده است. ملاحظه می‌شود همان نتایجی که از تحلیل آزمایش‌ها بیان شده، با دقت بسیار خوبی تأیید شده و می‌توان به نرخ باربرداری بیش از 10 میلی‌متر مکعب بر دقیقه دست یافت.

### 7- مقایسه ماشین کاری تخلیه الکتریکی خشک و معمولی

به طور کلی اگر پارامترهای ورودی ماشین کاری مشترک یعنی ولتاژ، جریان، زمان روشنی و خاموشی پالس در حالت تخلیه الکتریکی خشک و معمولی یکسان باشد، نرخ باربرداری در حالت خشک به مراتب از حالت معمول بیشتر خواهد بود، نرخ سایش ابزار در حالت خشک کمتر خواهد بود، اما زبری سطح در حالت معمول از زبری سطح در حالت خشک بهتر خواهد بود که علت آن استفاده از گاز اکسیژن است که برای خشن‌تراشی توصیه شده است. در جدول 5 دو آزمایش یکی در حالت خشک و دیگری در حالت معمولی در شرایط یکسان ارائه شده‌اند:



شکل 16 اثر فاکتور اصلی سرعت الکترود بر نرخ باربرداری

جدول 4 بهینه سازی انجام شده توسط نرم افزار

| بهینه‌سازی | V (V) | I (A) | T <sub>on</sub> (μs) | D% | P (kPa) | N (rpm) | MRR (mm³/min) |
|------------|-------|-------|----------------------|----|---------|---------|---------------|
| نرم افزار  | 180   | 20    | 318/2                | 72 | 300     | 1400    | 10/9          |
| آزمایش     | 180   | 20    | 320                  | 72 | 300     | 1400    | 10/45         |

جدول 5 آزمایش مقایسه ای حالت خشک و معمولی

| حالت آزمایش | V (V) | I (A) | T <sub>on</sub> (μs) | D% | P (kPa) | N (rpm) | MRR (mm³/min) |
|-------------|-------|-------|----------------------|----|---------|---------|---------------|
| حالت معمولی | 180   | 9/5   | 500                  | 72 | -       | -       | 2/43          |
| حالت خشک    | 180   | 9/5   | 500                  | 72 | 300     | 1400    | 6/75          |



- discharge machining , in *The 3th International Conference on Manufacturing and Production*, Tehran, Iran, 2011. (In Persian)
- [10] Douglas C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*, 7th Edition, pp. 457-460, New York: John Wiley and Son, 2011.
- [11] Hsieh CS, Zhu H, Wei TY, Chung ZJ, Yang WD, Ling YH, Applying the experimental statistical method to deal the preparatory conditions of nanometric-sized TiO<sub>2</sub> powders from a two-emulsion process, *Journal of Eur Ceram Soc*, Vol. 28, pp. 1177-1183, 2008.
- [12] Hou TH, Su CH, Liu WL, Parameters optimization of a nano-particle wet milling process using the taguchi method response surface method and geneticalgorithm, *journal of Powder Technol*, Vol. 173, pp. 153-162, 2007.
- [13] 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.
- [14] M. Ghoreishi, V. Tahmasbi, *Transducer Design and Manufacture of electrical discharge machines Spark of dielectric liquid to gas*, Iran Patent No. 72516, 2011. (In Persian)
- International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, No. 15, pp. 2273-2281, 2007.
- [4] NASA, Inert-Gas electrical-discharge machining, *NASA Technical Brief No. NPO-15660*, Vol. 160, No. 9, pp. 1-9, 1984.
- [5] S. Sourabh K. Saha, S.K. Choudhury, Experimental investigation and empirical modeling of the dry electric discharge machining process, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 49, pp. 297-308, 2009.
- [6] Govindan P., Joshi SS, Experimental characterization of material removal in dry electrical discharge drilling, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 50, No. 5, pp. 431-443, 2010.
- [7] S. Joshi, P. Govindan, A. Malshe., K. Rajurkar, Experimental characterization of dry EDM performed in a pulsating magnetic field, *CIRP Annals Manufacturing Technology*, Vol. 60, pp. 239-242, 2011.
- [8] J. Tao, A.J. Shih, J. Ni, Experimental study of the dry and near-dry electrical discharge milling processes, *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 130, pp. 1-9, 2008.
- [9] M. Ghoreishi, V. Tahmasbi, S. Assarzadeh, Dry and neardry electrical