



## بررسی تجربی فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک

احد قلی پور<sup>۱</sup>، حمید باصری<sup>۲\*</sup>، محسن شاکری<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

۳- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

\*بابل، کد پستی ۷۱۱۶۷-۴۷۱۴۸، h.baseri@nit.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۰۱ شهریور ۱۳۹۲

پذیرش: ۰۷ مهر ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۰۱ بهمن ۱۳۹۲

کلید واژگان:

فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک

جنس ابزار

نرخ براده برداری

نرخ سایش ابزار

زبری سطح

### چکیده

در این پژوهش، فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک مطالعه شده است. برای بررسی تأثیر جنس ابزار بر عملکرد ماشینکاری، این فرآیند در سه سطح از انرژی تخلیه و با دو ابزار مسی و برنجی مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین، از روش طراحی آزمایش تاگوشی برای بررسی تأثیر پارامترهای ورودی فرآیند از قبیل سرعت دورانی ابزار، نرخ جریان مایع، فشار گاز و انرژی تخلیه بر نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح استفاده شده است. آنالیز واریانس نیز برای یافتن پارامترهای مهم مؤثر بر نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح به کار گرفته شده است. همچنین مقدار بهینه نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح نیز با استفاده از روش تاگوشی به دست آمده است. نتایج به دست آمده از این مطالعه نشان داد که ابزار مسی نرخ براده برداری بیشتر و نرخ سایش ابزار کمتری در مقایسه با ابزار برنجی دارد. آنالیز اثر اصلی به دست آمده از روش تاگوشی نشان داد که نرخ براده برداری و زبری سطح ماشینکاری شده با افزایش نرخ جریان آب و انرژی تخلیه بیشتر می شود و افزایش فشار گاز موجب کاهش نرخ سایش ابزار می شود. همچنین نتایج به دست آمده از آنالیز واریانس نشان داد که انرژی تخلیه مهم ترین عامل مؤثر بر نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح می باشد.

## Experimental investigation of near dry EDM process

Ahad Gholipoor<sup>1</sup>, Hamid Baseri<sup>2\*</sup>, Mohsen Shakeri<sup>3</sup>

1- M.Sc. Student of Department of Mechanical Engineering, Babol University of Technology, Babol, Iran

2- Associate Professor of Department of Mechanical Engineering, Babol University of Technology, Babol, Iran

3- Professor of Department of Mechanical Engineering, Babol University of Technology, Babol, Iran

\*P.O.B. 47148-71167 Babol, h.baseri@nit.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received in Revised Form 23 August 2013  
Accepted 29 September 2013  
Available Online 21 January 2014

#### Keywords:

Near Dry EDM  
Tool Material  
Material Removal Rate  
Tool Wear Ratio  
Surface Roughness

### ABSTRACT

In this investigation, near dry EDM process was investigated. This process was studied at three levels of discharge energy and with two brass and copper electrode to investigate the effects of tool material on machining performance. Also, the Taguchi method of design of experiments technique was employed to study the effects of process parameters such as tool rotational speed, liquid flow rate, gas pressure and discharge energy on material removal rate (MRR), electrode wear ratio (TWR) and surface roughness (SR) and also the analysis of variance (ANOVA) was employed to find the most important factors effecting MRR, TWR and SR. In addition, the optimum of MRR, TWR and SR was found by Taguchi method. The results showed that copper electrode has higher MRR and lower TWR as compared to brass electrode. Also the analysis of main effect plots obtained by Taguchi method indicated that MRR and SR is enhanced by increasing water flow rate and discharge energy and also increasing gas pressure leads to lower TWR. The ANOVA results showed that discharge energy is the most important factor influencing MRR, TWR and SR.

### ۱- مقدمه

فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی<sup>۱</sup>، که یکی از روش های پیشرفته و پرکاربرد در ماشینکاری می باشد، از انرژی گرمایی، برای ماشینکاری قطعات خیلی سختی که هادی جریان الکتریسیته هستند و روش های ماشینکاری معمولی قادر به براده برداری از آنها نمی باشند، استفاده می کند [۲، ۱]. با توجه به عدم برخورد ابزار و قطعه کار در این فرآیند، ماشینکاری های در ابعاد کوچک با این روش ماشینکاری امکان پذیر است و مشکلاتی از قبیل ارتعاش و تنش های

مکانیکی در این روش وجود ندارد [۳].

علی رغم کاربردهای منحصر به فرد این فرآیند، نرخ براده برداری پایین، زبری سطح و نرخ سایش ابزار بالا و تشکیل لایه ریکاست<sup>۲</sup> (لایه سفید) بر روی سطح قطعه کار (که محل عیوب و ترک بوده و استحکام قطعه کار را کاهش می دهد) از مهم ترین مشکلات و محدودیت های این فرآیند محسوب می شوند [۴، ۵]. برای غلبه بر این محدودیت ها، فرآیندهای دیگری بر پایه این فرآیند توسعه داده شده اند و هر کدام به نوعی از محدودیت های این فرآیند

2- Recast Layer

1- Electrical Discharge Machining (EDM)



جدول ۴ مشخصات اصلی ابزار مسی

مشخصه	واحد	مقدار
وزن مخصوص	(g/cm <sup>3</sup> )	۸/۹۴
دمای ذوب	(°C)	۱۰۸۳-۱۰۶۵
رسانایی حرارتی	(W/m °K)	۳۸۸
گرمای ویژه	(J/kg °K)	۳۸۵
ضریب انبساط حرارتی	(1/°C)	۱۶/۷×۱۰ <sup>-۶</sup>
مقاومت الکتریکی	(nΩcm)	۱۷/۱

جدول ۵ مشخصات اصلی ابزار برنجی

مشخصه	واحد	مقدار
وزن مخصوص	(g/cm <sup>3</sup> )	۸/۷ - ۸/۴
دمای ذوب	(°C)	۹۴۰-۹۰۰
رسانایی حرارتی	(W/m °K)	۱۱۵
گرمای ویژه	(J/kg °K)	۳۸۰
ضریب انبساط حرارتی	(1/°C)	۱۸/۷×۱۰ <sup>-۶</sup>
مقاومت الکتریکی	(nΩcm)	۶۴

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- نتایج مرحله اول آزمایش‌ها

در این بخش، نرخ براده‌برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح به دست آمده با دو ابزار مسی و برنجی در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک و در سه سطح انرژی مختلف مقایسه می‌شود.

#### ۳-۱-۱- تأثیر جنس ابزار بر نرخ براده‌برداری

شکل ۳ نشان می‌دهد که در سطوح انرژی مختلف فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک، ابزار مسی نرخ براده‌برداری بیشتری نسبت به ابزار برنجی دارد. مقاومت الکتریکی بیشتر ابزار برنجی، در مقایسه با ابزار مسی، موجب افت بیشتر ولتاژ شده و زمان تأخیر جرقه را افزایش می‌دهد و منجر به نرخ براده‌برداری کمتر می‌شود. اگرچه با استفاده از ژنراتور ایزوپالس، زمان تأخیر جرقه تأثیری بر زمان روشنایی پالس و مقدار انرژی هر جرقه ندارد، ولی افزایش زمان تأخیر جرقه موجب افزایش زمان غیرماشینکاری شده و نرخ براده‌برداری را کاهش می‌دهد.

#### ۳-۱-۲- تأثیر جنس ابزار بر نرخ سایش ابزار

شکل ۴ نشان می‌دهد که با استفاده از ابزار برنجی در همه سطوح انرژی تخلیه فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک، نرخ سایش ابزار بیشتری در مقایسه با ابزار مسی به دست می‌آید. مقاومت الکتریکی بیشتر ابزار برنجی موجب برخورد بیشتر الکترون‌ها با اتم‌های سازنده ابزار می‌شود که دمای ابزار را افزایش می‌دهد و همچنین، رسانایی حرارتی کمتر ابزار برنجی، در مقایسه با ابزار مسی، موجب تمرکز بیشتر حرارت در ابزار برنجی می‌شود که این عامل نیز موجب افزایش دمای ابزار می‌شود. با توجه به بیشتر بودن دمای ابزار برنجی در طول فرآیند و کمتر بودن محدوده دمایی ذوب ابزار برنجی نسبت به ابزار مسی، مقدار برنج ذوب و تبخیر شده از ابزار برنجی بیشتر از ابزار مسی می‌باشد. در ضمن، مس چقرمگی کافی را برای نگه‌داشتن ماده ابزار در کنار هم دارد. بنابراین، مطابق شکل ۴، نرخ سایش ابزار در ابزار برنجی بیشتر از ابزار مسی است. ابزار مسی، که رسانایی حرارتی بیشتری دارد، می‌تواند شوک‌های حرارتی را نیز، از روی ابزار رها کند که این عامل

برای اندازه‌گیری نرخ براده‌برداری و نرخ سایش ابزار، از ترازویی با دقت ۱ میلی‌گرم استفاده شده است. وزن ابزار و قطعه کار قبل و بعد از آزمایش اندازه‌گیری می‌شود. نرخ براده‌برداری (MRR) و نرخ سایش ابزار (TWR) با معادلات (۱) و (۲) تعریف می‌شوند:

$$(1) \text{ (میلی گرم بر دقیقه)} \quad \text{مقدار ماده برداشته شده از قطعه کار} / \text{زمان ماشینکاری} = \text{نرخ براده‌برداری}$$

$$(2) \text{ (میلی گرم بر دقیقه)} \quad \text{مقدار ماده برداشته شده از ابزار} / \text{زمان ماشینکاری} = \text{نرخ سایش ابزار}$$

زبری سطح (SR) قطعه کار ماشینکاری شده با زبری سنج مدل ماهر مارسورف PS1 سنجیده شده است. زبری سطح ماشینکاری شده از پنج مسیر مختلف اندازه‌گیری شده و با میانگین‌گیری از این اعداد، زبری سطح ماشینکاری شده به دست آمده است.

#### ۳-۲- مواد مورد استفاده در آزمایش‌ها

قطعه کار مورد استفاده در این مطالعه فولاد استوانه‌ای کارسرد شده از جنس X210Cr12 (1.2080) است که سطوح پیشانی آن سنگزنی و پرداختکاری شده و ۱۶ میلی‌متر قطر و ۲۵ میلی‌متر ارتفاع دارد و در صنعت قالبسازی به طور وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. ابزار مورد استفاده در این فرآیند، قطر خارجی ۱۰ میلی‌متر و ارتفاع ۵۰ میلی‌متر داشته و دارای سوراخی خارج از محور به قطر ۴ میلی‌متر است. عیب سوراخ مرکزی در ابزار، ایجاد زائده در مرکز سوراخ ماشینکاری شده در سطح قطعه کار می‌باشد. جنس ابزار مورد استفاده در مرحله اول آزمایش‌ها، مس و برنج با خلوص ۹۹ درصد و در مرحله دوم آزمایش‌ها مس با خلوص ۹۹ درصد است. در جدول ۳، ترکیب شیمیایی قطعه کار و در جدول‌های ۴ و ۵، به ترتیب، مشخصات ابزار مسی و برنجی آمده است.

جدول ۱ شرایط مرحله اول آزمایش‌ها

سطح انرژی	واحد	کم	متوسط	زیاد
شدت جریان الکتریکی	(A)	۱/۵	۶	۲۱
زمان روشنایی پالس	(μS)	۴	۳۵	۱۰۰
زمان خاموشی پالس	(μS)	۱	۳	۵
ولتاژ گپ	(V)	۸۰	۸۰	۸۰

جدول ۲ ماتریس طراحی آزمایش تاگوجی (شرایط مرحله دوم آزمایش‌ها)

شماره آزمایش	فشار گاز (bar)	نرخ جریان مایع (ml/min)	سرعت دورانی ابزار (rpm)	انرژی تخلیه (mJ)
۱	۱	۱۵	۱۱۰	۶۰
۲	۱/۵	۴۰	۱۱۰	۱۷۰
۳	۲	۶۰	۱۱۰	۳۶۰
۴	۱/۵	۱۵	۲۰۰	۳۶۰
۵	۲	۴۰	۲۰۰	۶۰
۶	۱	۶۰	۲۰۰	۱۷۰
۷	۲	۱۵	۲۷۰	۱۷۰
۸	۱	۴۰	۲۷۰	۳۶۰
۹	۱/۵	۶۰	۲۷۰	۶۰

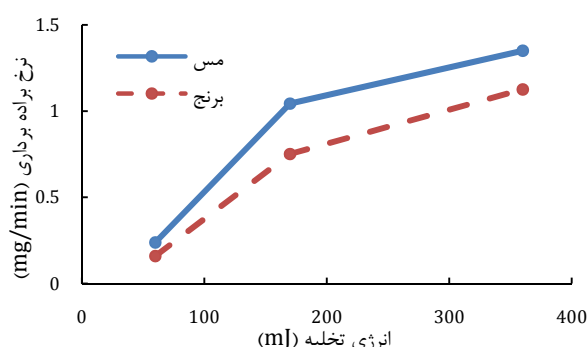
جدول ۳ ترکیب شیمیایی قطعه کار

عنصر	کروم	گوگرد	منگنز	سیلیسیم	کربن	نیکل
درصد وزنی %	۱۱/۲	۰/۰۳	۰/۲۵	۰/۳۹	۲/۱	۰/۱۵

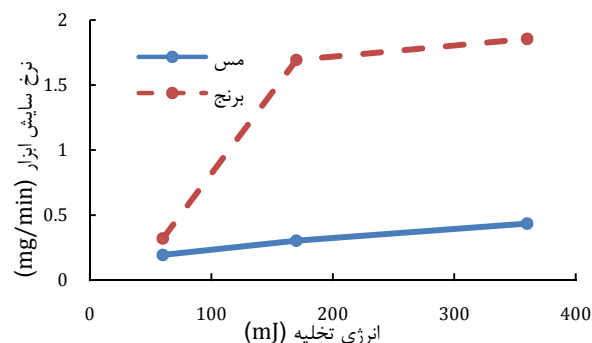
تأثیر مثبتی بر روی عمر و سلامتی ابزار می‌گذارد.

### ۳-۱-۳- تأثیر جنس ابزار بر زبری سطح

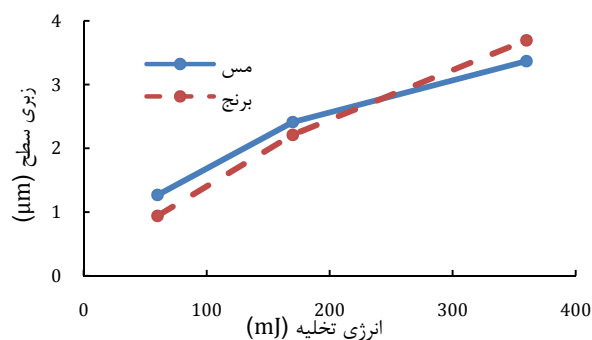
شکل ۵ زبری سطح حاصل از دو ابزار مسی و برنجی را در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک، در سه سطح از انرژی تخلیه نشان می‌دهد. در سطوح انرژی تخلیه پایین، استفاده از ابزار مسی موجب انتقال بهتر انرژی الکتریکی به قطعه کار شده و ابعاد حفرات ایجاد شده در سطح قطعه کار افزایش می‌یابد و در نتیجه در سطوح انرژی تخلیه پایین، زبری سطح به دست آمده با ابزار مسی بیشتر از ابزار برنجی است. در سطوح انرژی تخلیه بالا، با توجه به سایش بیشتر ابزار برنجی در مقایسه با ابزار مسی، آلودگی گپ ماشینکاری افزایش یافته و احتمال تولید پالس آرک<sup>۱</sup> بیشتر می‌شود و بنابراین در سطوح انرژی تخلیه بالا، زبری سطح به دست آمده با ابزار برنجی بیشتر از ابزار مسی است.



شکل ۳ مقایسه نرخ براده برداری به دست آمده با دو ابزار مسی و برنجی در سطوح انرژی تخلیه مختلف



شکل ۴ مقایسه نرخ سایش ابزار به دست آمده با دو ابزار مسی و برنجی در سطوح انرژی تخلیه مختلف



شکل ۵ مقایسه زبری سطح به دست آمده با دو ابزار مسی و برنجی در سطوح انرژی تخلیه مختلف

### ۲-۲- نتایج مرحله دوم آزمایش‌ها

در این مرحله، به کمک روش طراحی آزمایش تاگوچی، به بررسی تأثیر پارامترهای ورودی فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک بر مشخصات خروجی فرآیند (نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح به دست آمده) پرداخته شده است.

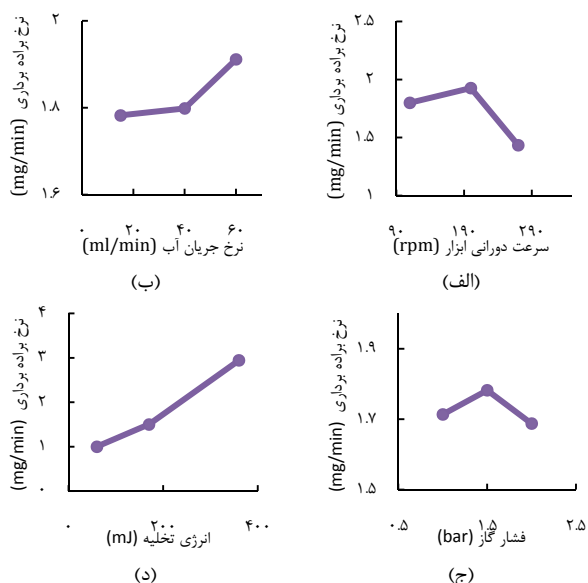
#### ۲-۲-۱- بررسی تأثیر پارامترهای ورودی بر نرخ براده برداری

شکل ۶-الف، نرخ براده برداری را براساس سرعت دورانی ابزار در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، نرخ براده برداری با افزایش سرعت دورانی ابزار تا ۲۰۰ دور بر دقیقه، افزایش می‌یابد، ولی با افزایش بیشتر سرعت دورانی ابزار، نرخ براده برداری کاهش می‌یابد. در سرعت‌های دورانی پایین ابزار، براده‌ها نمی‌توانند به راحتی از فاصله گپ ماشینکاری به بیرون دفع شوند. بنابراین، با افزایش سرعت دورانی ابزار تا ۲۰۰ دور بر دقیقه، به دلیل بهبود دفع براده‌ها از گپ ماشینکاری و یکنواخت شدن جرقه زنی، نرخ براده برداری افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش سرعت دورانی ابزار تا ۲۰۰ دور بر دقیقه، نیروی گریز از مرکزی<sup>۲</sup> که مطابق معادله (۳) محاسبه می‌شود [۱۲]، بر قطرات مذاب اعمال می‌شود که این نیرو موجب دفع بهتر قطرات مذاب از گپ ماشینکاری شده و منجر به افزایش نرخ براده برداری می‌شود. ولی افزایش بیشتر سرعت دورانی ابزار، نرخ براده برداری را کاهش می‌دهد، چون در سرعت‌های دورانی ابزار خیلی بالا (بیشتر از ۲۰۰ دور بر دقیقه) اغتشاش در گپ ماشینکاری افزایش یافته و موجب گسترش کانال پلاسما<sup>۳</sup> می‌شود و بنابراین نرخ براده برداری کاهش می‌یابد.

$$F_c = \frac{m_d 4\pi^2 N^2}{3600} \quad (3)$$

در رابطه بالا،  $m_d$  جرم قطرات مذاب و  $N$  سرعت دورانی ابزار می‌باشد.

تأثیر نرخ جریان آب بر روی نرخ براده برداری در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک، در شکل ۶-ب، نشان داده شده است. بازده این فرآیند با افزایش نرخ جریان آب بهبود می‌یابد، چون با افزایش نرخ جریان آب، دفع براده‌ها از گپ ماشینکاری بهبود یافته و در نتیجه نرخ براده برداری افزایش می‌یابد.



شکل ۶ نمودارهای اثر اصلی مربوط به نرخ براده برداری در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک

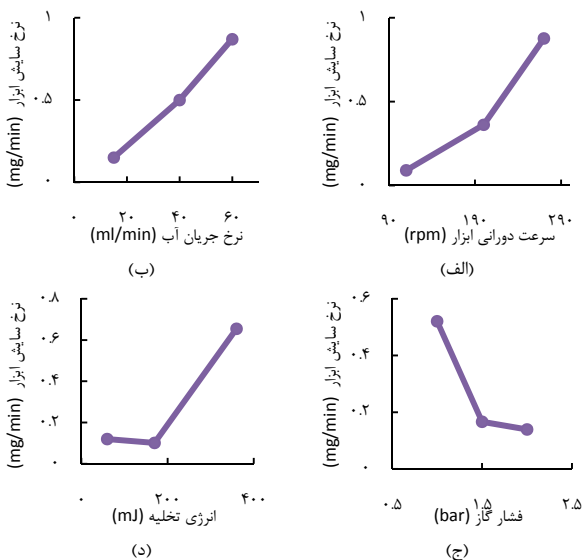
2- Centrifugal Force  
 3- Plasma Channel

1- Arc

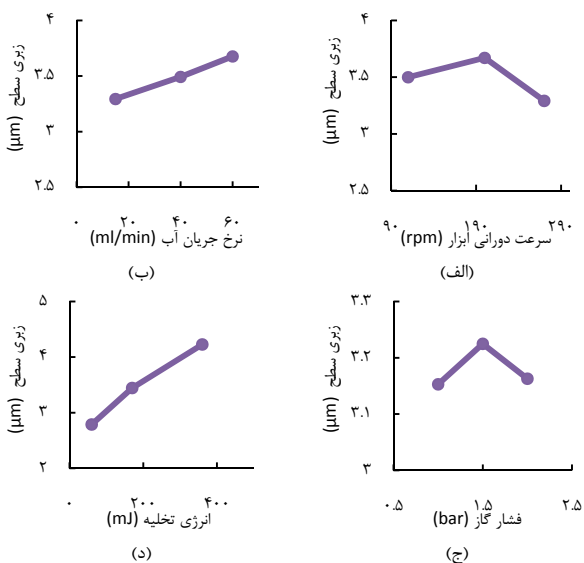
۲-۲-۳- بررسی تأثیر پارامترهای ورودی بر زبری سطح

شکل ۸-الف نشان می‌دهد که زبری سطح با افزایش سرعت دورانی ابزار تا ۲۰۰ دور بر دقیقه افزایش و سپس کاهش می‌یابد، چون، با افزایش سرعت دورانی ابزار تا ۲۰۰ دور بر دقیقه، نرخ براده‌برداری و مقدار براده‌های معلق در گپ ماشینکاری افزایش یافته و احتمال وقوع جرقه آرک بیشتر می‌شود؛ ولی با افزایش بیشتر سرعت دورانی ابزار، نرخ براده‌برداری و آلودگی گپ کمتر شده و تعداد پالس‌های آرک کاهش می‌یابد و در نتیجه زبری سطح ماشینکاری شده کمتر می‌شود.

شکل ۸-ب، ارتباط میان نرخ جریان آب و زبری سطح را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، زبری سطح ماشینکاری شده با افزایش نرخ جریان آب بیشتر می‌شود، چون نرخ براده‌برداری و مقدار ماده برداشته شده از قطعه‌کار با افزایش نرخ جریان آب بیشتر شده و مقدار براده‌های تجمع یافته در گپ ماشینکاری بیشتر می‌شود و احتمال تولید پالس‌های غیرطبیعی مانند آرک بیشتر شده و در نتیجه زبری سطح افزایش می‌یابد.



شکل ۷ نمودارهای اثر اصلی مربوط به نرخ سایش ابزار در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک



شکل ۸ نمودارهای اثر اصلی مربوط به زبری سطح به دست آمده در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک

تأثیر فشار گاز بر نرخ براده‌برداری در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک، در شکل ۶-ج، نشان داده شده است. مطابق این شکل، نرخ براده‌برداری، با افزایش فشار گاز تا ۱/۵ بار، افزایش می‌یابد، ولی با افزایش بیشتر فشار گاز ورودی، نرخ براده‌برداری کاهش می‌یابد. افزایش فشار گاز تا ۱/۵ بار دفع براده‌ها از گپ ماشینکاری را بهبود می‌دهد که به نرخ براده‌برداری بیشتر منجر می‌شود. افزایش بیشتر فشار گاز منجر به افزایش سرعت دی الکتریک در گپ ماشینکاری می‌شود و انتقال جرقه بین ابزار و قطعه کار را محدود می‌کند، به طوری که تعداد جرقه‌های کمتری در عمل ماشینکاری شرکت می‌کنند، همچنین، در این شرایط، اغتشاش ایجاد شده در گپ ماشینکاری افزایش یافته و موجب گسترش کانال پلاسما شده و نرخ براده‌برداری کاهش می‌یابد.

مطابق شکل ۶-د، نرخ براده‌برداری با افزایش انرژی تخلیه افزایش می‌یابد. در سطوح انرژی تخلیه پایین، مکانیزم‌های برداشت ماده از قطعه کار مانند ذوب و تبخیر ضعیف هستند. همچنین، در سطوح انرژی تخلیه پایین، با توجه به کوچک بودن نیروی ضربه‌ای حاصل از انفجار دی الکتریک، دفع براده‌های تولید شده از گپ ماشینکاری به طور مؤثر انجام نمی‌گیرد. در این شرایط، حالت تخلیه در گپ ماشینکاری ناپایدار می‌شود و بازده ماشینکاری کاهش می‌یابد. در سطوح انرژی تخلیه بالا، مکانیزم‌های براده‌برداری بهبود می‌یابد و همچنین نیروی ضربه‌ای بزرگ‌تری از انفجار دی الکتریک به دست می‌آید که دفع براده‌ها از گپ ماشینکاری را بهبود داده و نرخ براده‌برداری را بیشتر می‌کند.

۲-۲-۳- بررسی تأثیر پارامترهای ورودی بر نرخ سایش ابزار

شکل ۷-الف نشان می‌دهد که در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک، نرخ سایش ابزار با افزایش سرعت دورانی ابزار بیشتر می‌شود. با افزایش سرعت دورانی ابزار، دفع براده‌ها از گپ ماشینکاری به صورت بهتری انجام می‌شود و پایداری فرآیند افزایش یافته و تعداد پالس‌های طبیعی شرکت کننده در عمل ماشینکاری بیشتر می‌شود و در نتیجه نرخ سایش ابزار افزایش می‌یابد.

شکل ۷-ب نشان می‌دهد که در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک، با افزایش نرخ جریان آب، نرخ سایش ابزار بیشتر می‌شود. افزایش نرخ جریان آب دفع براده‌ها از گپ ماشینکاری را بهبود می‌دهد و با توجه به کاهش آلودگی گپ ماشینکاری، تعداد پالس‌های غیرطبیعی مانند آرک کمتر شده و در نتیجه نرخ سایش ابزار بیشتر می‌شود.

شکل ۷-ج، نشان می‌دهد که در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک، نرخ سایش ابزار با افزایش فشار گاز کمتر می‌شود. با افزایش فشار گاز، سرعت دی الکتریک در گپ ماشینکاری افزایش یافته و در نتیجه انتقال جرقه بین ابزار و قطعه کار محدود می‌شود و نرخ سایش ابزار کمتر می‌شود. همچنین، گسترش کانال پلاسما، به دلیل افزایش اغتشاش در گپ ماشینکاری با افزایش فشار گاز ورودی، دلیل دیگری بر کاهش نرخ سایش ابزار می‌باشد. به علاوه، با افزایش فشار گاز ورودی، مقدار هوای عبوری از درون ابزار و محتوای اکسیژن آن بیشتر می‌شود و با تشکیل لایه اکسیدی در اطراف ابزار، از خوردگی ابزار محافظت می‌شود. اگرچه با توجه به خنک کاری بیشتر ابزار و قطرات مذاب روی آن با افزایش فشار گاز، رسوب براده‌های برداشته شده از قطعه کار بر سطح ابزار کمی افزایش می‌یابد.

انرژی تخلیه منتقل شده به گپ ماشینکاری بین ابزار، قطعه کار و سیال دی الکتریک تقسیم می‌شود. مطابق شکل ۷-د، با افزایش انرژی تخلیه، مقدار ماده ذوب و تبخیر شده از ابزار افزایش یافته و نرخ سایش ابزار بیشتر می‌شود.

شکل ۸-ج ارتباط میان فشار گاز ورودی و زبری سطح را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، با افزایش فشار گاز تا ۱/۵ بار، زبری سطح افزایش می‌یابد، ولی، با افزایش بیشتر فشار گاز، زبری سطح کاهش می‌یابد. در محدوده‌ای از فشار گاز ورودی که نرخ براده‌برداری افزایش می‌یابد (تا ۱/۵ بار)، با توجه به مقدار براده‌های زیادی که از قطعه‌کار برداشته می‌شود و در گپ ماشینکاری معلق می‌شوند، حالت جرقه‌زنی ناپایدار می‌شود و تعداد پالس‌های غیرطبیعی افزایش می‌یابد و زبری سطح بیشتر می‌شود. با افزایش بیشتر فشار گاز، نرخ براده‌برداری کاهش می‌یابد و مقادیر کمتری از براده‌ها در گپ ماشینکاری معلق می‌شوند و در نتیجه تعداد پالس‌های آرک کاهش می‌یابد و همچنین انجماد دوباره و چسبیدن براده‌های ماشینکاری به سطح ماشینکاری شده کاهش یافته و زبری سطح کمتر می‌شود.

افزایش انرژی تخلیه منجر به افزایش مقدار مواد برداشته شده از قطعه‌کار و مقدار براده‌های تجمع‌یافته در گپ ماشینکاری می‌شود و با توجه به افزایش احتمال رسوب این براده‌ها به سطح ماشینکاری شده و نیز افزایش احتمال تولید پالس‌های آرک، زبری سطح، مطابق شکل ۸-د، افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش انرژی تخلیه اعمالی به گپ ماشینکاری، ابعاد حفره‌های ایجاد شده در سطح قطعه‌کار افزایش یافته و زبری سطح بیشتری به دست می‌آید.

### ۳-۲-۵- مقادیر بهینه

آنالیز تاگوچی، با استفاده از نرم‌افزار کوالیتک، این توانایی را دارد که مقادیر بهینه پارامترهای مورد بررسی و شرایطی که این مقادیر بهینه در آن به دست می‌آیند را حتی اگر جزء آزمایش‌های انجام شده نباشند، معرفی کند.

مقدار بهینه به دست آمده از آنالیز تاگوچی برای نرخ براده‌برداری ۳/۸۷۳ میلی‌گرم بر دقیقه می‌باشد که در شرایط جدول ۹ به دست می‌آید؛ دامنه اطمینان برای مقدار بهینه به دست آمده، با سطح اطمینان ۹۰٪،  $\pm 0/417$  است.

مقدار بهینه به دست آمده از آنالیز تاگوچی برای نرخ سایش ابزار ۰/۰۱۵ میلی‌گرم بر دقیقه می‌باشد که در شرایط جدول ۱۰ به دست می‌آید؛ دامنه اطمینان برای مقدار بهینه به دست آمده، با سطح اطمینان ۹۰٪،  $\pm 0/016$  است.

مقدار بهینه به دست آمده از آنالیز تاگوچی برای زبری سطح ۱/۸۹۵ میکرومتر می‌باشد که در شرایط جدول ۱۱ به دست می‌آید؛ دامنه اطمینان برای مقدار بهینه به دست آمده، با سطح اطمینان ۹۰٪،  $\pm 0/361$  است.

با توجه به آزمایش‌های انجام شده در این شرایط، تطابق خوبی بین نتیجه به دست آمده از آنالیز تاگوچی و روش تجربی وجود دارد.

### ۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی نمود:

- در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک، با توجه به رسانایی الکتریکی بیشتر مس نسبت به برنج، نرخ براده‌برداری به دست آمده با ابزار مسی بیشتر از ابزار برنجی است.

- در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک، نرخ سایش ابزار به دست آمده با ابزار برنجی، به دلیل دمای ذوب کمتر برنج نسبت به مس، بیشتر از ابزار مسی است.

### ۳-۲-۴- آنالیز واریانس

آنالیز واریانس مربوط به نرخ براده‌برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح در جداول ۶، ۷ و ۸ آورده شده است.

آنالیز واریانس نشان می‌دهد که انرژی تخلیه، مهم‌ترین عامل مؤثر بر نرخ براده‌برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح می‌باشد. همچنین فشار گاز ورودی کم‌اهمیت‌ترین عامل مؤثر بر نرخ براده‌برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح می‌باشد و در آنالیز واریانس کنار گذاشته می‌شود.

جدول ۶ آنالیز واریانس برای نرخ براده‌برداری

فاکتور	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	نسبت واریانس	مجموع مربعات خالص	درصد مشارکت
سرعت دورانی ابزار	۲	۰/۵۵۹	۰/۲۷۹	۴/۳	۰/۴۳۲	۷/۵۶۶
نرخ جریان آب	۲	۰/۸۸۲	۰/۴۴۱	۶/۹	۰/۷۵۵	۱۳/۲۲
فشار گاز	۲	۰/۱۲۷				
انرژی تخلیه	۲	۴/۱۴۲	۲/۰۷۱	۳۲/۴	۴/۰۱۴	۷۰/۲۷۴
خطا	۲	۰/۱۲۷	۰/۰۶۳			۸/۹۴

جدول ۷ آنالیز واریانس برای نرخ سایش ابزار

فاکتور	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	نسبت واریانس	مجموع مربعات خالص	درصد مشارکت
سرعت دورانی ابزار	۲	۰/۱۳۳	۰/۰۶۶	۷۲۳/۶۷	۰/۱۳۳	۲۳/۱۶۵
نرخ جریان آب	۲	۰/۰۸۴	۰/۰۴۲	۴۵۵/۸۴	۰/۰۸۴	۲۱/۴۸۹
فشار گاز	۲	۰				
انرژی تخلیه	۲	۰/۶۵۴	۰/۳۲۷	۳۵۳/۳۵	۰/۶۵۴	۴۴/۸۹۵
خطا	۲	-۰/۰۱	-۰/۰۱			۱۰/۴۵۱

جدول ۸ آنالیز واریانس برای زبری سطح

فاکتور	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	نسبت واریانس	مجموع مربعات خالص	درصد مشارکت
سرعت دورانی ابزار	۲	۰/۲۰۶	۰/۱۰۳	۴/۵۹	۰/۱۶۱	۳/۴۸۱
نرخ جریان آب	۲	۰/۰۸۴	۰/۰۴۲	۱/۸۸۴	۰/۰۳۹	۰/۸۵۷
فشار گاز	۲	۰/۰۴۴		۴/۳۸۴		
انرژی تخلیه	۲	۴/۳۰۵	۲/۱۵۲	۹۵/۶۷۹	۴/۲۶	۹۱/۷۹۸
خطا	۲	۰/۰۴۴	۰/۰۲۲			۳/۸۶۴

سطح به ترتیب ۳/۸۷۳ میلی گرم بر دقیقه، ۰/۰۱۵ میلی گرم بر دقیقه و ۱/۸۹۵ میکرومتر می باشد.

### ۵- مراجع

- [1] S. N. Joshi, S. S. Pandeb, Intelligent process modeling and optimization of die-sinking electric discharge machining, *Applied Soft Computing*, Vol. 11, pp. 2743-2755, 2011.
- [2] J. Marafona, J. A. G. Chousal, A finite element model of EDM based on the Joule effect, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, pp. 595-602, 2006.
- [3] K. H. Ho, S. T. Newman, State of the art electrical discharge machining (EDM), *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43, pp. 1287-1300, 2003.
- [4] J. Simao, H. G. Lee, D. K. Aspinwall, R. C. Dewes, E. M. Aspinwall, Workpiece surface modification using electrical discharge machining, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43, pp. 121-128, 2003.
- [5] B. Jabbaripour, M. H. Sadeghi, M. R. Shabgard, Sh. Faridvand, Investigating the effects of tool materials on the properties of electrical discharge machining of  $\gamma$ -TiAl intermetallic, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 11, No. 2, pp. 135-146, 2011. (In Persian)
- [6] N. M. Abbas, D. G. Solomon, M. F. Bahari, A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM), *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, pp. 1214-1228, 2007.
- [7] C. C. Kao, J. Tao, A. J. Shih, Near dry electrical discharge machining, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, pp. 2273-2281, 2007.
- [8] J. Tao, A. J. Shih, J. Ni, Near-dry EDM milling of mirror-like surface finish, *International Journal of Electrical Machining*, Vol. 13, pp. 29-33, 2008.
- [9] M. Fujiki, J. Ni, A. J. Shih, Investigation of the effects of electrode orientation and fluid flow rate in near-dry EDM milling, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 49, pp. 749-758, 2009.
- [10] S. Boopathi, Experimental comparative study of near-dry wire-cut electrical discharge machining (WEDM), *European Journal of Scientific Research*, Vol. 75, No.4, pp. 472-481h, 2012.
- [11] M. Fujiki, G. Y. Kim, J. Ni, A. J. Shih, Gap control for near-dry EDM milling with lead angle, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 51, pp. 77-83, 2011.
- [12] 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.

**جدول ۹** مقدار فاکتورهای ورودی برای رسیدن به مقدار بهینه نرخ براده برداری

فاکتور	سرعت دورانی ابزار (rpm)	نرخ جریان مایع (ml/min)	فشار گاز (bar)	انرژی تخلیه (mJ)
مقدار	۲۰۰	۶۰	۱/۵	۳۶۰

**جدول ۱۰** مقدار فاکتورهای ورودی برای رسیدن به مقدار بهینه نرخ سایش ابزار

فاکتور	سرعت دورانی ابزار (rpm)	نرخ جریان مایع (ml/min)	فشار گاز (bar)	انرژی تخلیه (mJ)
مقدار	۲۰۰	۴۰	۲	۱۷۰

**جدول ۱۱** مقدار فاکتورهای ورودی برای رسیدن به مقدار بهینه زبری سطح

فاکتور	سرعت دورانی ابزار (rpm)	نرخ جریان مایع (ml/min)	فشار گاز (bar)	انرژی تخلیه (mJ)
مقدار	۲۷۰	۱۵	۲	۶۰

- در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک و در سطوح انرژی تخلیه پایین، زبری سطح به دست آمده با ابزار مسی بیشتر از ابزار برنجی است، ولی در سطوح انرژی تخلیه بالا، زبری سطح به دست آمده با ابزار مسی کمتر از ابزار برنجی است.
- نرخ براده برداری و زبری سطح ماشینکاری شده با افزایش نرخ جریان مایع و انرژی تخلیه بیشتر می شوند، در حالی که با افزایش سرعت دورانی ابزار و فشار گاز تا یک حد مشخص بیشتر شده و با افزایش بیشتر این پارامترها کاهش می یابند.
- نرخ سایش ابزار با افزایش سرعت دورانی ابزار، نرخ جریان مایع و انرژی تخلیه بیشتر شده و با افزایش فشار گاز کاهش می یابد.
- آنالیز واریانس انجام شده در مرحله دوم آزمایش ها نشان داد که انرژی تخلیه مهم ترین عامل موثر بر نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح است و با افزایش آن نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح افزایش می یابد.
- مقدار بهینه به دست آمده برای نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار و زبری