



# Modeling of Erosion Parameters in Spark Machining of Ti-6Al-4V Alloy using Fuzzy Method



## ARTICLE INFO

### Authors

Ranjbari G

Mechanical faculty, Aras branch, Islamic Azad university, Hadishahr, Iran

### \* Correspondence

Address: Mechanical faculty, Aras branch, Islamic Azad university, Hadishahr, Iran  
Ranjbar.gohar@gmail.com

G. ranjbari, Modeling of erosion parameters in spark machining and equal channel angular pressing (ECAP) using fuzzy method. Proceedings of 3rd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT). 2023;23(10):37-42

## ABSTRACT

In this paper, tool and workpiece wear ratio and surface roughness in the removal process of Ti-6Al-4V by spark are modeled using fuzzy algorithm. In the machining process using a spark, a copper electrode is used as a tool and equal channel angular pressing (ECAP) process is applied to the tool. In this combined modelling the number of ECAP passes, current, spark presence time and spark absence time are used as input parameters. The evaluation and validation results of fuzzy modeling, using experimental data, show that the fuzzy algorithm is capable of modeling and establishing relationships between response variables based on input parameters with high accuracy. Therefore, by using this method, one can easily predict the response variables and avoid the need of conducting experiments that require spending a lot of time and cost.

**Keywords** Fuzzy Modelling, Spark Machining, ECAP, Tool Wear Ratio, Work Piece Wear Rate, Surface Roughness

ماهانامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه نامه مجموعه مقالات سومین کنفرانس ملی ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته  
مهر ۱۴۰۲، دوره ۲۳، شماره ۱۰، صفحه ۳۷-۴۲



## مدلسازی پارامترهای سایش مکانیکی در فرایند براده برداری تخلیه الکتریکی آلیاژ Ti-6Al-4V با استفاده از الگوریتم فازی



### چکیده

در این مقاله، با استفاده از الگوریتم فازی، متغیرهای پاسخ نرخ سایش ابزار، نرخ براده برداری از قطعه کار و زبری سطح در فرایند ماشین‌کاری ماده Ti-6Al-4V توسط تخلیه الکتریکی مدلسازی شده است. در فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، الکتروود مسی به عنوان ابزار استفاده شده است و فرایند فشار در کانالهای هم مقطع زاویه دار (ایکپ) بر روی ابزار اعمال شده است. در این مدلسازی ترکیبی تعداد پاسهای فرایند ایکپ، شدت جریان، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس به عنوان پارامترهای ورودی انتخاب شده اند. نتایج ارزیابی و صحت سنجی مدلسازی فازی، با استفاده از داده های تجربی نشان میدهد الگوریتم فازی با دقت بالای ۹۵٪ قادر به مدلسازی و ایجاد ارتباط بین متغیرهای پاسخ بر اساس پارامترهای ورودی میباشد. بنابراین با استفاده از این روش میتوان به سادگی به پیش بینی متغیرهای پاسخ پرداخت و از انجام آزمایشهایی که مستلزم صرف زمان و هزینه زیادی هستند، بی نیاز شد.

### مشخصات مقاله

#### نویسنده

گوهر رنجبری

گروه مکانیک، واحد ارس، دانشگاه آزاد اسلامی، هادیشهر، ایران

#### \* نویسنده مسئول

آدرس: گروه مکانیک، واحد ارس، دانشگاه آزاد اسلامی، هادیشهر، ایران  
Ranjbar.gohar@gmail.com

**کلیدواژه‌ها** مدلسازی فازی، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، ایکپ، نرخ سایش ابزار، نرخ براده برداری از قطعه کار، زبری سطح

## ۱- مقدمه

پاسخهای خروجی در کمترین زمان ممکن شده و از هدررفت ماده و انرژی و زمان و شکست ابزار جلوگیری خواهد کرد. بر اساس نتایج تحقیقات گذشته، زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس و شدت جریان، تاثیرگذارترین پارامترها در ماشینکاری تخلیه الکتریکی هستند. اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید بر روی الکترود منجر به افزایش کیفیت سطح و بهبود فرایند ماشینکاری میشود اما اعمال فرایند ایکپ بر روی الکترود مسی به ندرت گزارش شده است. بنابراین در این مقاله تاثیر تعداد پاسهای فرایند ایکپ نیز در فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی بررسی شده است. بنابراین قطعه کار استوانه ای از جنس Ti-6Al-4V به قطر ۲۵ میلیمتر و ضخامت ۱۰ میلیمتر و الکترود ابزار از جنس مس انتخاب شده است [۸].

## ۲- روش تحقیق

## ۲-۱- تغییر شکل پلاستیک شدید الکترود مسی

یک میله استوانه ای مسی با قطر ۱۱/۸ میلیمتر و طول ۴۵ میلیمتر و قالب ایکپ دوتکه با قید و بست مناسب مورد استفاده قرار گرفته است و نمونه اولیه مسی با پرس هیدرولیکی ۱۰۰ تنی در قالب ایکپ فشرده شده و تا ۵ بار این فرایند تکرار میشود. نتایج اندازه گیری سختی و هدایت الکتریکی نشان میدهد این پارامترها با افزایش تعداد پاس فرایند ایکپ، افزایش می یابد [۸]. با این حال هدایت الکتریکی و سختی در تکرار پنجم به بیشترین مقدار خود میرسد. ابزار مسی تا سه بار تحت فرایند ایکپ قرار گرفته، به عنوان ابزار ماشینکاری تخلیه الکتریکی برای براده برداری از قطعه کار از جنس آلیاژ Ti-6Al-4V قرار گرفته است. مطابق جدول ۱ [۸] طراحی آزمایشات با استفاده از یک آرایه متعامد L27 با ۴ فاکتور سه سطحی تنظیم شده است. همانگونه که ملاحظه میشود تعداد پاس ایکپ، شدت جریان، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس به عنوان متغیرهای ورودی و نرخ براده برداری از قطعه کار، نرخ سایش ابزار و زبری سطح به عنوان متغیرهای خروجی هستند.

## ۲-۲- منطق فازی

منطق فازی سابقه طولانی در ریاضیات و فلسفه دارد. اصطلاح فازی به معنای گنگ و نامشخص است. این منطق برای هر موقعیتی، میزانی از عدم قطعیت را نشان میدهد. این منطق بیان میکند تمام گزاره ها تا حدی درست یا نادرست هستند [۹]. تعریف ترجیح، با عباراتی مانند "هر چه بیشتر بهتر"، "هر چه کمتر بهتر"، مقدار اسمی بهتر"، نیز بیانگر عدم قطعیت و ابهام است. منطق فازی ابزار متداول برای بررسی این اطلاعات است و از عبارات کلامی برای توصیف ارتباط منطقی بین متغیرهای ورودی و خروجی استفاده میکند. در این مقاله از منطق فازی برای مدل سازی متغیرهای ورودی و خروجی در فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی قطعه کاری از آلیاژ Ti-6Al-4V توسط ابزار مسی که قبلا تا ۳ بار تحت عملیات تغییر شکل پلاستیک شدید به روش ایکپ (فشار در کانالهای هم مقطع زاویه دار) قرار گرفته است، استفاده شده است. همانگونه که در جدول ۱ نیز مشاهده میشود تعداد پاس های ایکپ، شدت جریان، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس، متغیرهای ورودی و نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح متغیرهای خروجی هستند. برای ایجاد یک مدل فازی سه

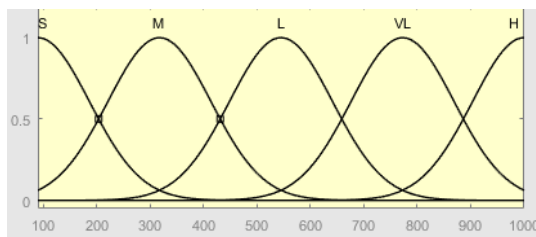
در فرایند ماشینکاری به روش تخلیه الکتریکی، براده برداری توسط پدیده ذوب و تبخیر سطح ماده به وسیله حرارت تولید شده در کانال پلاسما اتفاق می افتد. جرقه ایجاد شده بین ابزار و قطعه کار در مایع دی الکتریک باعث براده برداری از قطعه کار و ایجاد اشکال پیچیده دو و سه بعدی میشود. سطح بالای قطعه کار دوباره منجمد شده و در ادامه به شدت سرد میشود و یک لایه سخت بر روی قطعه کار ایجاد میشود. این لایه منجر به افزایش زبری سطح قطعه کار شده و سطح قطعه کار را سخت و شکننده میکند [۱]. در این فرایند انتخاب پارامترهای ماشینکاری جهت دستیابی به کارکرد بهینه سیستم بسیار ضروری است. غالبا پارامترهای ماشینکاری مطلوب بر اساس مقادیر تجربی یا هندبوک ها، تعیین میشوند اما نمیتوان به این مقادیر به عنوان پارامترهای بهینه در شرایط و محیط خاص اعتماد نمود [۲]. یکی از اهداف فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی کاهش زبری سطح، خوردگی و سایش ابزار و قطعه کار میباشد که دستیابی به این مهم، از بین پارامترهای فراوان موثر در فرایند، کار دشواری میباشد. تکنیک های هوش مصنوعی مانند فازی از سالهای گذشته به طور وسیعی برای این امر مورد استفاده قرار گرفته است. ییلماز و همکاران [۳] یک سیستم هوشمند فازی برای انتخاب پارامترهای فرایند EDM معرفی نموده اند. سیستم و مدل فازی توسط آزمایشات تجربی ارزیابی شده و قوانین فازی، توابع عضویت و روشهای فازی زدایی برای از بین بردن پیچیدگیهای شرایط مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج کار ایشان دقت بالای مدل فازی را در انتخاب پارامترهای EDM که به سختی قابل اندازه گیری است نشان میدهد. یکپارچگی سطح و دقت ابعادی به عنوان پارامترهای بحرانی در فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی توسط دوانگان و همکاران [۴] مورد بررسی قرار گرفته است. شبگرد و همکاران [۵] نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح را در فرایند EDM و US/EDM با استفاده از الگوریتم فازی و پارامترهای ورودی (شدت جریان، زمان روشنی پالس و ارتعاش ابزار) مدل سازی نموده اند. دقت مدل پیشنهادی ایشان بالای ۹۰٪ میباشد.

با توجه به نیاز صنایع مختلف از قبیل هوافضا، کشتیرانی، دریانوردی و ... به موادی با استحکام بالا، وزن پایین، قابلیت ماشینکاری خوب و موثر در قطعاتی با اشکال پیچیده و نامنظم، آلیاژ Ti-6Al-4V در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. [۶] و [۷] برخی از خواص این آلیاژ مانند سختی بالا در نواحی دمایی نامساعد و پایین، واکنش با مواد ابزار، هدایت حرارتی پایین، ماشینکاری آنرا با روشهای سنتی با مشکل مواجه نموده است. از میان تمام روشهای ماشینکاری مدرن، ماشینکاری براده برداری تخلیه الکتریکی، انتخاب شده است. با توجه به وجود پارامترهای متنوع ورودی در فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی میتوان گفت انتخاب ناصحیح پارامترهای ماشینکاری منجر به نرخ پایین ماشینکاری، شکست ابزار، دقت پایین، سایش ابزار و در اغلب اوقات تغییر شکل ابزار با مرور زمان، هدررفت نیروی انسانی و افزایش هزینه خواهد شد. ترکیب آزمایشات تجربی و محاسبات نرم از قبیل منطق فازی، روش سطح پاسخ و ... منجر به کاهش تعداد آزمایشات و درک صحیح اثر فاکتورهای کنترل بر روی

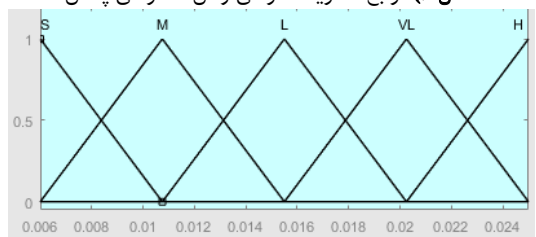


جدول ۱) طراحی آزمایش بر اساس آرایه متعامد L27 تاگوچی [۸]

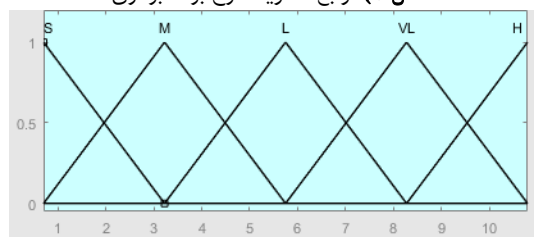
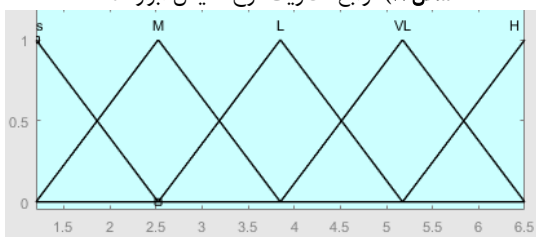
شماره	پاس ایکپ	شدت جریان (A)	زمان روشن پالس (μs)	زمان خاموشی پالس (μs)	نرخ براده برداری (g/s)	نرخ سایش ابزار (g/s)	زبری سطح (μm)
۱	۰	۱۰	۱۰۰	۱۰۰	۰/۰۰۸۱	۰/۰۰۷۶	۵/۱۲۸
۲	۰	۱۰	۴۷۵	۴۷۵	۰/۰۰۷۱	۰/۰۰۶۸	۴/۹۲۱
۳	۰	۱۰	۹۵۰	۹۵۰	۰/۰۰۶۹	۰/۰۰۹۵	۵/۲۸۴
۴	۰	۳۰	۱۰۰	۴۷۵	۰/۰۰۸۳	۰/۰۰۶۴	۴/۹۱۷
۵	۰	۳۰	۴۷۵	۹۵۰	۰/۰۰۶۸	۰/۰۰۸۳	۵/۱۹۲
۶	۰	۳۰	۹۵۰	۱۰۰	۰/۰۱۰۲	۰/۰۱۰۸	۶/۴۲۹
۷	۰	۴۵	۱۰۰	۹۵۰	۰/۰۰۶۱	۰/۰۰۵۵	۴/۳۰۱
۸	۰	۴۵	۴۷۵	۱۰۰	۰/۰۰۹۶	۰/۰۱۰۴	۶/۱۷۲
۹	۰	۴۵	۹۵۰	۴۷۵	۰/۰۰۸۳	۰/۰۱۰۶	۶/۳۱۸
۱۰	۱	۱۰	۱۰۰	۱۰۰	۰/۰۱۲۵	۰/۰۰۴۴	۳/۴۹۱
۱۱	۱	۱۰	۴۷۵	۴۷۵	۰/۰۱۰۶	۰/۰۰۳۵	۳/۲۴۵
۱۲	۱	۱۰	۹۵۰	۹۵۰	۰/۰۰۹۵	۰/۰۰۲۹	۳/۰۹۱
۱۳	۱	۳۰	۱۰۰	۴۷۵	۰/۰۱۱۷	۰/۰۰۲۴	۲/۸۹۵
۱۴	۱	۳۰	۴۷۵	۹۵۰	۰/۰۱۰۵	۰/۰۰۴۹	۳/۸۵۹
۱۵	۱	۳۰	۹۵۰	۱۰۰	۰/۰۱۳۷	۰/۰۰۶۸	۵/۰۸۱
۱۶	۱	۴۵	۱۰۰	۹۵۰	۰/۰۱۰۸	۰/۰۰۲۶	۲/۹۸۳
۱۷	۱	۴۵	۴۷۵	۱۰۰	۰/۰۱۳۱	۰/۰۰۵۰	۴/۰۲۹
۱۸	۱	۴۵	۹۵۰	۴۷۵	۰/۰۱۵۰	۰/۰۰۶۱	۴/۴۲۶
۱۹	۳	۱۰	۱۰۰	۱۰۰	۰/۰۱۸۹	۰/۰۰۱۳	۱/۳۹۲
۲۰	۳	۱۰	۴۷۵	۴۷۵	۰/۰۱۷۶	۰/۰۰۱۴	۱/۳۹۴
۲۱	۳	۱۰	۹۵۰	۹۵۰	۰/۰۱۹۵	۰/۰۰۱۹	۱/۶۴۶
۲۲	۳	۳۰	۱۰۰	۴۷۵	۰/۰۱۷۳	۰/۰۰۰۹	۱/۲۹۱
۲۳	۳	۳۰	۴۷۵	۹۵۰	۰/۰۱۸۸	۰/۰۰۱۶	۱/۴۱۵
۲۴	۳	۳۰	۹۵۰	۱۰۰	۰/۰۲۰۷	۰/۰۰۳۱	۳/۱۲۴
۲۵	۳	۴۵	۱۰۰	۹۵۰	۰/۰۱۸۰	۰/۰۰۱۷	۱/۵۲۹
۲۶	۳	۴۵	۴۷۵	۱۰۰	۰/۰۲۱۸	۰/۰۰۲۳	۲/۷۹۶
۲۷	۳	۴۵	۹۵۰	۴۷۵	۰/۰۲۲۰	۰/۰۰۴۳	۳/۳۱۹



شکل ۶) توابع عضویت گاوسی زمان خاموشی پالس

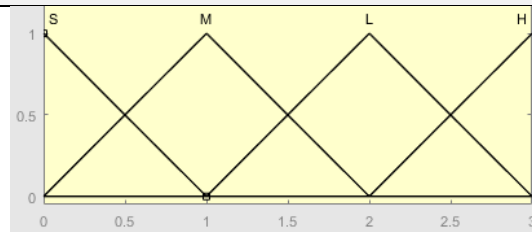


شکل ۷) توابع عضویت نرخ براده برداری

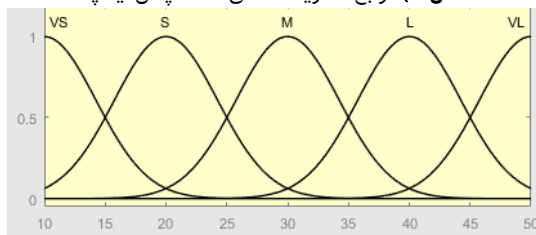
شکل ۸) توابع عضویت نرخ سایش ابزار  $\times 10^{-3}$ 

شکل ۹) توابع عضویت زبری سطح

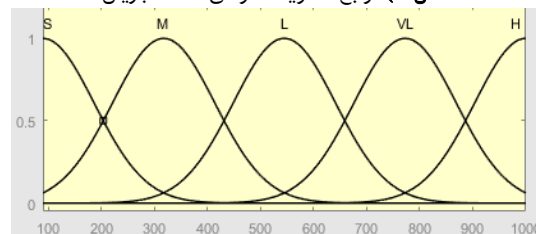
برای سایر آزمایشات نیز به این ترتیب مقادیر متغیرهای مربوط به هر آزمایش در باکس وارد شده و پاسخ حاصل از پیش بینی مدل، دقت بالای ۹۵٪ آنرا تایید میکند. در مرحله آخر برای بررسی تاثیر متغیرهای ورودی بر خروجی میتوان از سطوح فازی مطابق شکل ۱۱ استفاده کرد. مطابق این شکل، سطوح فازی نشان میدهد با افزایش تعداد پاس های ایکپ، زبری سطح کاهش می یابد. در طول فرایند ایکپ الکتروود ابزار تحت بارهای فشاری قرار گرفته و تغییر شکل پلاستیکی اتفاق می افتد. نایجابیها در مرز دانه ها گیر افتاده بنابراین سختی ابزار افزایش می یابد. این امر منجر به افزایش قابلیت ماشینکاری و کاهش زبری سطح میشود [۸]. با انتخاب هر کدام از پارمترهای ورودی به صورت دوتایی میتوان تاثیر آن دو متغیر ورودی را بر زبری سطح، نرخ براده برداری و نرخ سایش ابزار مشاهده نمود. سایر سطوح فازی به علت محدودیت صفحات در این مقاله نشان داده نشده است افزایش شدت جریان زبری سطح را افزایش داده و کاهش زمان روشن پالس منجر به کاهش زبری سطح میشود زیرا کاهش زمان روشن پالس، به طور موثری باعث زدودن آلودگیها و ضایعات شده و در نهایت منجر به پرداخت سطح میشود.



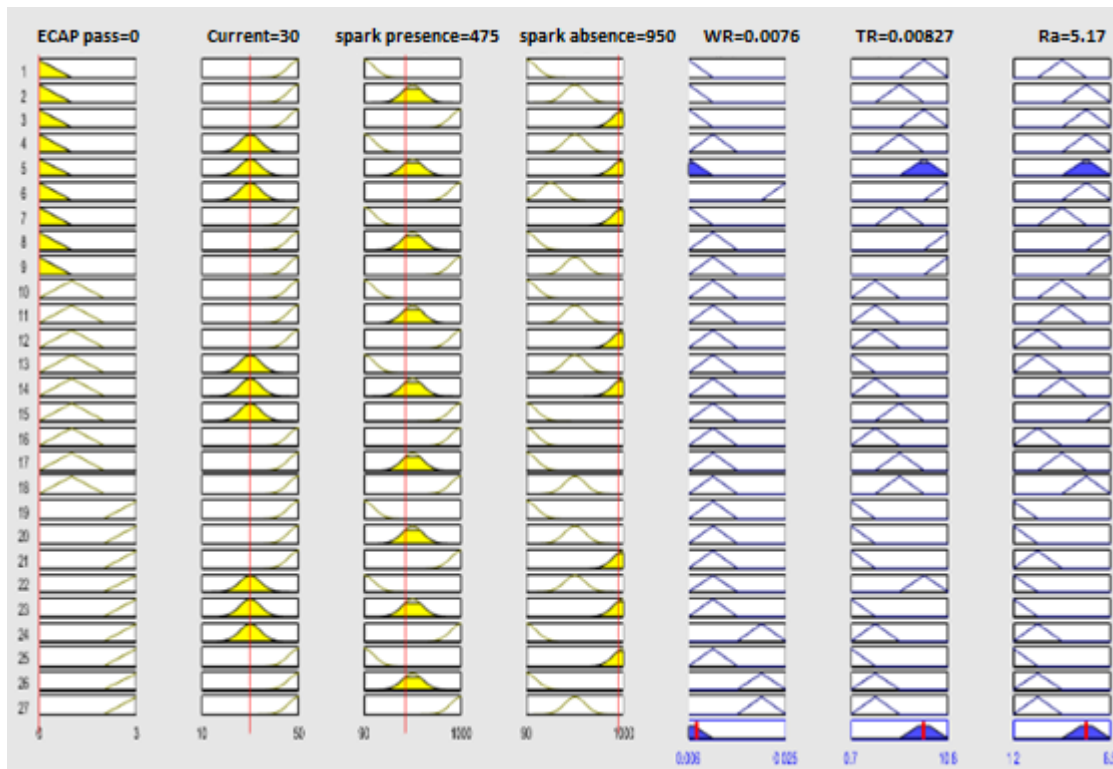
شکل ۱۰) توابع عضویت مثلثی تعداد پاس ایکپ



شکل ۱۱) توابع عضویت گاوسی شدت جریان



شکل ۱۲) توابع عضویت گاوسی زمان روشن پالس



شکل ۱۰) نتایج پیش بینی مدل فازی در آزمایش شماره ۵

است. ابزار مسی در فرآیند تخلیه الکتریکی قبل از فرایند تحت عملیات تغییر شکل پلاستیک شدید به روش ایکپ قرار گرفته است. تعداد پاس های ایکپ، شدت جریان، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس به عنوان متغیرهای ورودی و نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح به عنوان متغیرهای پاسخ در نظر گرفته شده است. بر اساس نتایج به دست آمده از پیش بینی توسط مدل فازی میتوان ادعا نمود مدل فازی با دقت بالای ۹۵٪ قادر به پیش بینی مقادیر تجربی میباشد. با بررسی سطوح فازی برای زبری سطح میتوان پی برد جهت دستیابی به کمترین مقدار زبری سطح باید تعداد پاس های ایکپ و زمان روشنی پالس کمترین مقدار و شدت جریان و زمان خاموشی پالس بیشترین مقدار باشند. این نتایج به خوبی با نتایج تجربی در توافق است. بنابراین جهت صرفه جویی در زمان، انرژی و هزینه انجام آزمایشات تجربی میتوان با استفاده از روش فازی به مدلسازی فرایند ماشینکاری به روش تخلیه الکتریکی پرداخت.

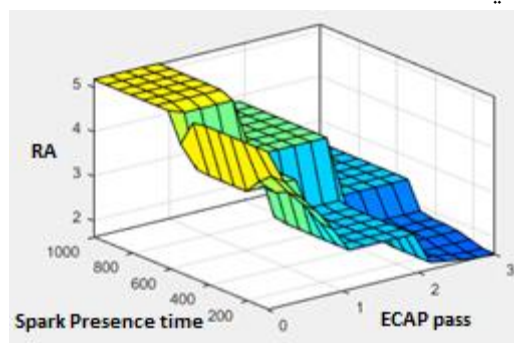
مراجع

[1] Çaydaş U, Hasçalık A, Ekici S. An adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) model for wire-EDM. Expert Systems with Applications. 2009 Apr 1;36(3):6135-9.

[2] Lin CL, Lin JL, Ko TC. Optimisation of the EDM process based on the orthogonal array with fuzzy logic and grey relational analysis method. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2002 Feb;19:271-7.

[3] Yilmaz O, Eyerçioğlu O, Gindy NN. A user-friendly fuzzy-based system for the selection of electro discharge machining process parameters. Journal of

همانگونه که از نتایج تجربی مرجه [۸] برمی آید افزایش زمان خاموشی پالس منجر به کاهش زبری سطح میشود زیرا افزایش زمان خاموشی پالس باعث میشود مایع دی الکتریک براحتی بتواند مواد زاید ناشی از سایش های اولیه قطعه کار را شسته و منجر به افزایش کیفیت سطح شود. بنابراین برای به دست آوردن زبری سطح بهینه (کمترین مقدار) باید تعداد پاسهای ایکپ و زمان خاموشی پالس بیشترین مقدار و شدت جریان و زمان روشنی پالس کمترین مقدار باشد. شکل ۱۱ که سطوح فازی را برای زبری سطح بر اساس تعداد پاس های ایکپ و زمان روشنی پالس نشان میدهد، موارد فوق را برای روند نزولی زبری سطح با کاهش تعداد پاسهای ایکپ و زمان روشنی پالس تایید میکند.



شکل ۱۱) سطوح فازی برای زبری سطح بر اساس تعداد پاس های ایکپ و زمان روشنی پالس

#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله به مدلسازی فرآیند ماشینکاری به روش تخلیه الکتریکی قطعه کاری از جنس آلیاژ Ti-6Al-4V پرداخته شده

Materials Processing Technology. 2006 Mar 10;172(3):363-71.

[4] Dewangan S, Gangopadhyay S, Biswas CK. Study of surface integrity and dimensional accuracy in EDM using Fuzzy TOPSIS and sensitivity analysis. Measurement. 2015 Mar 1;63:364-76.

[5] Shabgard MR, Badamchizadeh MA, Ranjbary G, Amini K. Fuzzy approach to select machining parameters in electrical discharge machining (EDM) and ultrasonic-assisted EDM processes. Journal of Manufacturing Systems. 2013 Jan 1;32(1):32-9.

[6] Ezilarasan, C., Senthil Kumar, V. S., & Velayudham, A. (2013). Effect of machining parameters on surface integrity in machining Nimonic C-263 super alloy using whisker-reinforced ceramic insert. Journal of materials engineering and performance, 22, 1619-1628.

[7] Ezilarasan C, Senthil Kumar VS, Velayudham A. Effect of machining parameters on surface integrity in machining Nimonic C-263 super alloy using whisker-reinforced ceramic insert. Journal of materials engineering and performance. 2013 Jun;22:1619-28.

[8] Gopal R, Thirunavukkarasu K, Kavimani V, Gopal PM. Measurement and multi-response optimization of spark erosion machining parameters for titanium alloy using hybrid taguchi-grey relational analysis-principal component analysis approach. Journal of Materials Engineering and Performance. 2021 Apr;30:3129-43.

[9] Kosko B. Global stability of generalized additive fuzzy systems. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews). 1998 Aug;28(3):441-52.

[10] Jang JS, Sun CT, Mizutani E. Neuro-fuzzy and soft computing Upper Saddle River.

[11] Yilmaz O, Eyercioglu O, Gindy NN. A user-friendly fuzzy-based system for the selection of electro discharge machining process parameters. Journal of Materials Processing Technology. 2006 Mar 10;172(3):363-71.

[12] Tzeng YF, Chen FC. Multi-objective optimisation of high-speed electrical discharge machining process using a Taguchi fuzzy-based approach. Materials & design. 2007 Jan 1;28(4):1159-68.