



## بررسی توزیع دما و عمق حفره ایجاد شده در سوپرآلیاژ اینکونل ۶۱۷ توسط مدل‌سازی المان محدود برای فرآیند میکرو ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی

محمد صادقی<sup>۱</sup>، رضا نصوحی<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناسی ارشد، مکانیک- ساخت و تولید، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، نجف آباد

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، نجف آباد

\*rezanosouhi@pmc.iaun.ac.ir ۸۵۱۴۱۴۳۱۳۱ صندوق‌پستی

### چکیده

در این مقاله، فرآیند میکرو ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی در سوپرآلیاژ اینکونل ۶۱۷ توسط مدل‌سازی المان محدود جهت بررسی نحوه توزیع دما و عمق حفره ایجاد شده در یک جرقه بررسی می‌گردد. در مرحله اول، مدل‌سازی قطعه و اعمال شار حرارتی ناشی از ایجاد جرقه، مرحله دوم، بررسی نحوه توزیع و میزان دمای انتقال یافته به مدل، مرحله سوم، حذف المان‌های سوخته شده و در نهایت بررسی عمق حفره ایجاد شده، صورت می‌پذیرد. شرایط بهینه‌ی کاری نظیر: شعاع کانال پلاسما (شعاع جرقه)، زمان روشن بودن جرقه و میزان انرژی تخلیه شده در سه سطح مختلف انرژی، بررسی و بهینه گردید. همچنین زمان روشن بودن جرقه نسبت به شعاع جرقه و میزان انرژی و اثر آن در عمق حفره بدست آمد که جهت اعتبارسنجی نتایج با کار آزمایشگاهی مقایسه گردید که مطابقت خوبی مشاهده گردید.

کلید واژگان: میکرو ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، روش المان محدود، توزیع دما، روش تاگوچی

## Determining the temperature distribution and the depth of cavities in Inconel 617 super alloy by FE modeling of micro-EDM process

Mohammad Sadeghi, Reza Nosouhi\*

Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

\*P.O.B. 8514143131, Najafabad, Iran, rezanosouhi@pmc.iaun.ac.ir

### ABSTRACT

In this paper, the process of micro-electro discharge machining is investigated in Inconel 617 super alloy by finite element modeling to determine the distribution of temperature and depth of the hole created by spark. First, the workpiece and the heat flux created from spark have been investigated. Then, the second step has investigated the distribution mechanism beside the temperature that has transmitted to the workpiece. Finally, the burnt elements have been removed and the depths of the cavities have been investigated. The optimum condition for plasma channel radius (the radius of the arc), spark on time and the discharged energy at three different levels have been obtained. Also, spark on time, energy and its effect on the depth of cavity were obtained. The results were verified through the experiments which represented a good agreement.

**Keywords:** Distribution of Temperature, Finite Element Method, Micro Electro Discharge Machining, Taguchi Method.

محدود در شبیه‌سازی میکرو ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سابقه چندانی ندارد و به دلیل تفاوت‌های آن با ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، هنوز در بسیاری از زمینه‌ها ناشناخته باقی مانده است. در سال ۲۰۰۴ هان و همکاران [۱]، با استفاده از مدار ایزوپالس و مدار تغذیه سروو، بهبود پارامترهای میکرو ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی را به صورت تجربی بررسی کردند. در سال ۲۰۰۷ آلن و همکاران [۲]، نرخ برداشت فلز در آلیاژ مولیبدنیوم را با استفاده از یک مدل عددی- حرارتی بررسی کردند. آن‌ها تاثیر پارامترهای مؤثر در میکرو ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی را در اندازه حفره ایجاد شده و نرخ سایش ابزار مورد مطالعه قرار دادند و نتایج را با مدل حقیقی مقایسه کردند. در سال ۲۰۰۹ پرادهان و همکاران [۳]، میکرو ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی را برای سوپرآلیاژهای تیتانیوم بررسی کردند که مشخص شد، ماشین‌کاری با قطب مثبت بهتر از ماشین‌کاری با قطب منفی است و در نهایت پارامترهای فرآیند توسط تجزیه تحلیل تاگوچی بهینه‌سازی شد. در سال ۲۰۱۰ جوشی و همکاران [۴]، یک مدل حرارتی- فیزیکی را جهت پیش‌بینی عمق حفره

### ۱- مقدمه

فرآیند میکرو ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی یکی از روش‌های جدید ساخت قطعات می‌باشد که فرآیندهای سنتی قادر به تولید آن‌ها نمی‌باشند و جهت ساخت انواع قطعات پیچیده در مقیاس میکرو، سوراخ‌های ریز، قطعات دستگاه‌های میکرو الکترومکانیکی، میکروکانال‌ها و غیره، در فلزات سخت و حتی نیمه هادی‌ها استفاده می‌شود، اساس کار در این روش شبیه به ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی می‌باشد، که با ایجاد جرقه بین ابزار و قطعه‌کار غوطه‌ور در مایع دی‌الکتریک، باعث برداشت فلز از سطح قطعه‌کار می‌شود. از عمده تفاوت‌های آن با ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی می‌توان، افزایش دقت، کاهش انرژی ورودی و کاهش زمان روشن بودن جرقه را ذکر کرد.

برای اولین بار در سال ۱۹۴۳ آقا و خانم لازرنکو با استفاده از انرژی حاصله از جرقه‌های الکتریکی اقدام به ساخت قطعات کردند، که این روش تاکنون توسط محققان بسیاری گسترش داده شده است. استفاده از روش اجزاء

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Sadeghi, R. Nosouhi, Determining the temperature distribution and the depth of cavities in Inconel 617 super alloy by FE modeling of micro-EDM process, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 376-381, 2015 (in Persian) (فارسی)

### ۵- مدل سازی حرارتی

جهت مدل سازی حرارتی با استفاده از معادله انتقال حرارت در مختصات استوانه ای از معادله (۱) استفاده می شود.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( k_t r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_t \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

### ۵-۱- شرایط مرزی

در شکل ۱ شماتیکی از مدل دو بعدی در نظر گرفته شده با چرخش حول محور تقارن نشان داده شده است.

در ادامه در شکل ۲ شرایط مرزی اعمال شده روی مدل دو بعدی مشاهده می شود. شار حرارتی مناسب در نظر گرفته شده طبق نظر بسیاری از محققین با توزیع گوسی بررسی می شود [۷].

همان طور که در رابطه (۲) مشاهده می شود، مرزهای ۲ و ۳ به دلیل فاصله زیاد از شارحرارتی و مرز ۴ به دلیل تقارن محوری عایق در نظر گرفته می شود.

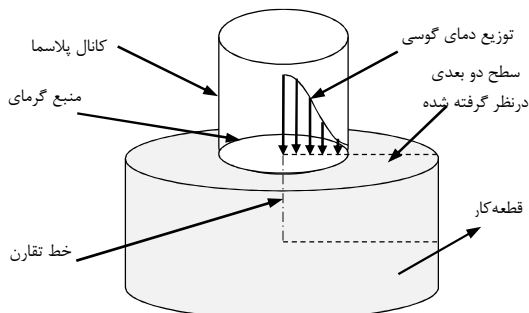
### ۵-۲- شعاع کانال پلاسما

همان طور که اشاره شد، شعاع کانال پلاسما یکی از عوامل بسیار مهم می باشد

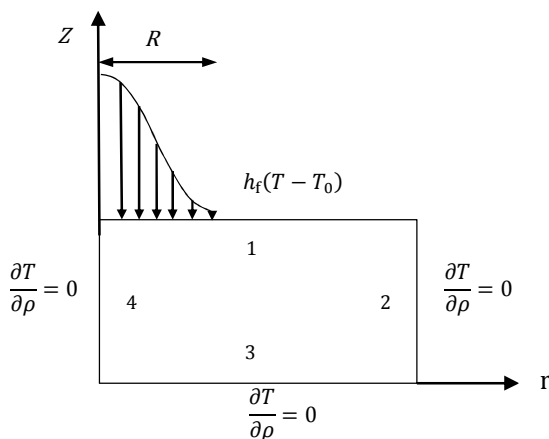
$$\left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) = Q_r \quad \text{اگر } r \leq R \quad (2)$$

$$\left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) = h_f(T - T_0) \quad \text{اگر } r > R$$

$$\left( \frac{\partial T}{\partial \rho} \right) = 0 \quad \text{در مرزهای ۲ و ۳ و ۴}$$



شکل ۱ قطعه مدل شده دو بعدی با تقارن محوری



شکل ۲ شرایط مرزی و شارحرارتی با توزیع گوسی

ایجاد شده در ماشین کاری تخلیه الکتریکی بررسی کردند. قطعه کار مورد استفاده، از فولاد پی ۲۰ و الکتروتود ابزار، مس در نظر گرفته شد. در سال ۲۰۱۳ آویناش [۵]، مدل سازی شکل حفره های ایجاد شده در میکروماشین کاری تخلیه الکتریکی را با نتایج آزمایشگاهی در قطعه کار تیتانیوم درجه ۵ با الکتروتود ابزار، تنگستن بررسی کرد، که طبق گزارش وی با اندازه گیری دمای کانال پلاسما در زمان روشن بودن جرقه توسط طیف نگار، دمایی بین ۴۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ کلوین ثبت شد، همچنین فشار کانال پلاسما در اثر ترکیدن حبابها، ۸-۶ بار مشاهده گردید. در سال ۲۰۱۴ کومار [۶]، با استفاده از توزیع حرارت به صورت یکنواخت با توزیع نرمال، جهت شبیه سازی فرآیند میکرو ماشین کاری تخلیه الکتریکی در فولاد زنگ نزن اقدام کرد که با توجه به کاهش نرخ سایش الکتروتود، میزان نرخ براده برداری بررسی شد و مقایسه نتایج با آزمایشات نشان داد که با افزایش انرژی تخلیه تا ۱۱۰ میکروژول، نرخ برداشت فلز در مدل تئوری افزایش می یابد اما در عمل از این مقدار به بعد نرخ برداشت فلز به صورت خطی، کاهش می یابد.

در این تحقیق به دلیل وجود پارامترهای متغیر گوناگون نظیر شعاع جرقه، زمان روشن بودن جرقه، میزان انرژی تخلیه شده، جنس الکتروتود و قطعه کار، فرکانس، فاصله الکتروتود تا سطح قطعه کار (گپ)، میزان جریان و ولتاژ، با انجام شبیه سازی حرارتی و در نظر گرفتن فرضیات، نحوه توزیع دما و عمق حفره ایجاد شده پیش بینی می شود و نتایج را برای سوپرآلیاژ مذکور در سه حالت انرژی کم، متوسط و زیاد؛ در زمان روشن بودن جرقه کمتر از ۲ میکروثانیه بررسی می گردد و نتایج با کار آزمایشگاهی مقایسه و اعتبارسنجی می گردد.

### ۲- مراحل انجام کار

مراحل انجام کار در این تحقیق شامل: طراحی آزمایشها و بررسی مؤلفه های لازم، ایجاد هندسه مدل دوبعدی با تقارن محوری، انتخاب المان حرارتی، تعریف خصوصیات قطعه کار، اعمال شارحرارتی و شرایط مرزی در مدل حرارتی، بررسی نحوه توزیع دما، حل گام به گام مسئله، حذف المانهای سوخته شده و اندازه گیری عمق حفره ایجاد شده، می باشد و در نهایت نتایج با کار آزمایشگاهی اعتبارسنجی می گردد.

### ۳- فرضیات مسئله

- ۱) مدل سازی و آنالیز برای یک جرقه انجام می شود.
- ۲) دمای اولیه قطعه کار ۲۵ درجه سانتی گراد می باشد.
- ۳) آنالیز وابسته به زمان می باشد.
- ۴) قطعه کار دارای تقارن محوری، همگن و آیزوتروپیک است.
- ۵) از اثر ترکیدن حبابها در کانال پلاسما صرف نظر شده است.

### ۴- خصوصیات ماده

سوپرآلیاژ استفاده شده در این تحقیق به دلیل کاربردهای وسیع نظامی، هوافضا و کاربردهای هسته ای، جهت شبیه سازی در نظر گرفته شده است. همچنین دمای ذوب این سوپرآلیاژ ۱۳۷۷ درجه سانتی گراد می باشد. خصوصیات اینکونل ۶۱۷ در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد در جدول ۱ مشاهده می شود، که در شبیه سازی، خواص مکانیکی، حرارتی و الکتریکی این فلز به صورت غیر خطی تا دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد در نظر گرفته شد.

جدول ۱ خصوصیات اینکونل ۶۱۷ در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد

$k_t$ (w/m·°c)	$c_p$ (j/kg·°c)	$\gamma$	$E_y$ (Gpa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
۱۳/۴	۴۱۹	۰/۳	۲۱۱	۸۳۶۰

جدول ۲ فاکتورها و سطوح آزمایش L36 تاگوچی

ولتاژ (V)	جریان (A)	زمان (μs)	شعاع (μm)	گپ (μm)
۱۰	۱	۰/۰۵	۱	۰/۰۱
		۰/۰۵		
		۰/۱		
۲۰	۱/۵	۰/۵	۳	۱
		۱		
		۱/۵		
۳۰	۳	۲	۵	۵
		۵		

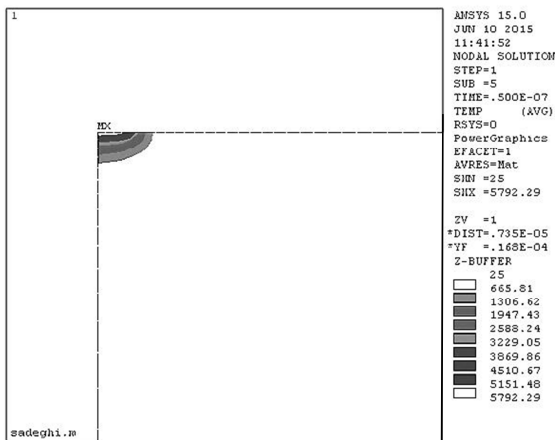
جدول ۳ طراحی و بهینه سازی آزمایش تاگوچی با ۴ فاکتور

ولتاژ (V)	جریان (A)	زمان (μs)	شعاع (μm)
۱۰	۱	۰/۰۵	۱
۱۰	۱/۵	۰/۵	۳
۱۰	۳	۱	۵
۲۰	۱	۰/۵	۵
۲۰	۱/۵	۱	۱
۲۰	۳	۰/۰۵	۳
۳۰	۱	۱	۳
۳۰	۱/۵	۰/۰۵	۵
۳۰	۳	۰/۵	۱

همان طور که قبلاً در شکل ۳ مشاهده گردید، با بهینه سازی مقادیر توسط روش تاگوچی، میزان شارحرارتی ورودی به قطعه کار نسبت به شعاع های مختلف جرقه در ۶ حالت نشان داده شد، که در ادامه جهت شبیه سازی از آن استفاده خواهد شد.

#### ۷- نتایج مدل حرارتی

شارحرارتی در این آنالیز از نوع گذرا می باشد که پس از قطع، بلافاصله در گام پایانی، کانتور توزیع دما نشان داده می شود. برای نمونه در شکل ۴ کانتور توزیع دما در مدل پس از اعمال شارحرارتی در زمان روش بودن جرقه در ۰/۰۵ میکروثانیه نشان داده شده است.



شکل ۴ مقدار توزیع دما در ۰/۰۵ میکروثانیه

که به شدت وابسته به زمان است و با شدت کمتری به جنس الکتروستاتیکی دارد و از رابطه (۳) با توجه به جنس الکتروستاتیکی و از رابطه (۴) با توجه به جریان ورودی به قطعه کار و زمان روشن بودن جرقه به دست می آید.

$$R = K \cdot Q^m \cdot t^n \quad (3)$$

$$R = 0.00204 I^{0.43} \cdot t_{on}^{0.44} \quad (4)$$

#### ۵-۳- شارحرارتی

طبق نظر محققین بهترین حالت، جهت اعمال شارحرارتی برای مدل سازی در این مورد، استفاده از توزیع گرمایی گوسی می باشد. میزان شارحرارتی گوسی از رابطه (۵) به دست می آید [۸].

$$Q(r) = \left( \frac{4.45P \cdot V \cdot I}{\pi R^2} \right) \exp \left\{ -4.5 \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right\} \quad (5)$$

میزان انرژی ورودی به قطعه کار در این مدل، مقدار ۰/۰۸ در نظر گرفته شد [۹]. شارحرارتی گوسی در شکل ۳ با شعاع جرقه ۱ تا ۵ میکرومتر نشان داده شده است.

#### ۵-۴- مدل المان محدود

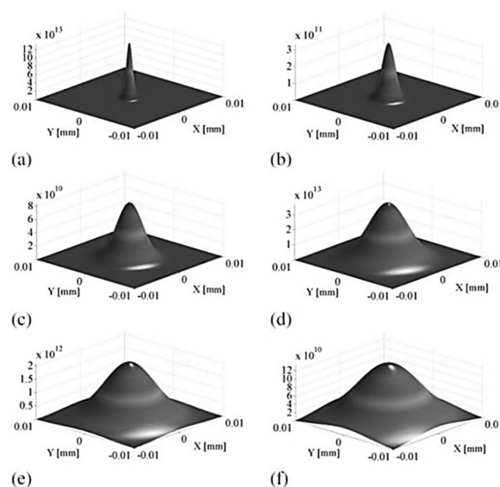
جهت انجام این مدل سازی از نرم افزار انسیس ۱۵ استفاده شده است. همچنین المان حرارتی از نوع درجه دوم با قابلیت تقارن محوری و دارای چهار گره، با یک درجه آزادی دما در هر گره در نظر گرفته شده است.

#### ۶- طراحی آزمایش ها با روش تاگوچی

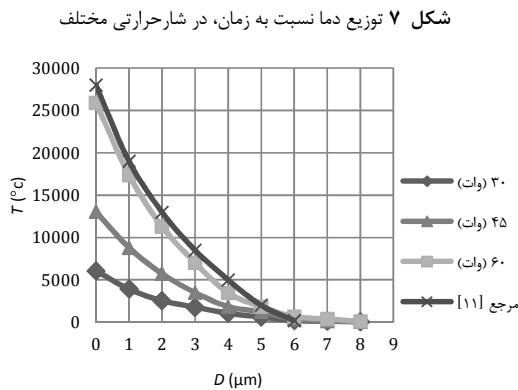
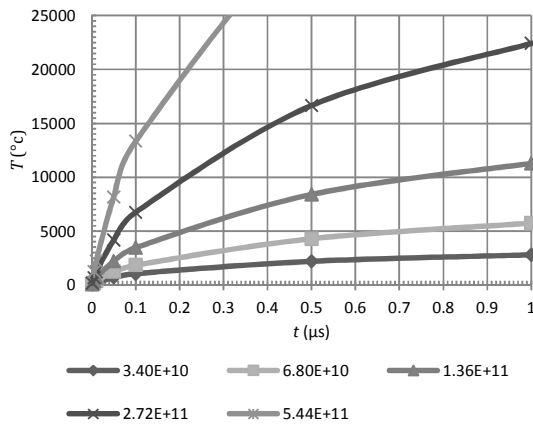
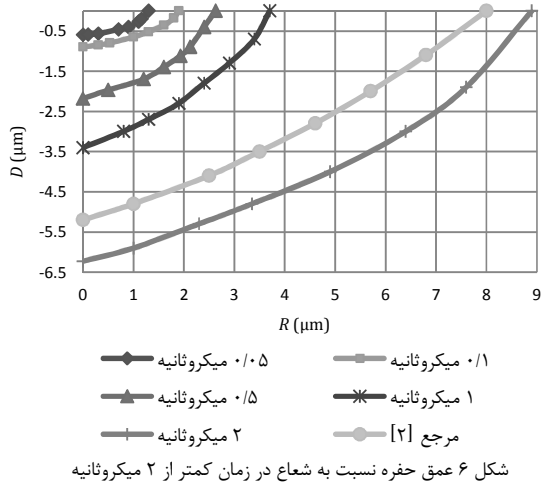
در جدول ۲ ابتدا جهت طراحی آزمایش، ۵ فاکتور و ۳ سطح در نظر گرفته شد، که یکی از سطوح (زمان) دارای ۹ سطح می باشد که طبق طراحی تاگوچی، به ۳۶ آزمایش جهت بررسی نیاز می باشد. با بهینه سازی و بررسی نتایج مشاهده گردید که میزان گپ، بیشترین نویز و بیشترین میزان تأثیرگذاری را در آزمایش ها موجب می شود.

در عمل افزایش گپ، باعث کاهش عمق، ایجاد فرم نامتقارن حفره و در نهایت خاموشی جرقه و اتصال کوتاه می شود.

جهت تصحیح، با تکرار آنالیز تاگوچی در جدول ۳ تعداد فاکتورها ۴ و تعداد سطوح ۳ در نظر گرفته شد، این مقادیر با تکرار آزمایش جهت به دست آوردن عمق حفره ایجاد شده بهینه سازی گردید.



شکل ۳ شارحرارتی ورودی به قطعه کار (w/m<sup>2</sup>) تا شعاع ۵ میکرومتر



در شکل ۹ انرژی کم، بین ۰/۱ تا ۵ میکروژول، در نظر گرفته شده است؛ که به دلیل میزان انرژی کم، جهت انجام کارها، با دقت و حساسیت فراوان با ضخامت کم و حداقل میزان تنش های حرارتی و تنش های پسماند می باشد. در شکل ۱۰ میزان انرژی متوسط بین ۵ تا ۶۰ میکروژول در نظر گرفته شده است، که در این سطح با افزایش انرژی می توان به عمقی تا حدود ۸ میکرومتر دست یافت.

همان طور که ملاحظه می شود در زمان ۰/۰۵ میکروثانیه، روشنی جرقه؛ بیشترین دمای ایجاد شده در سطح قطعه کار تا حدود ۵۷۹۲ درجه سانتی-گراد بالا می رود که حدود چهار برابر دمای ذوب این سوپرآلیاژ می باشد. در ادامه جهت بدست آوردن عمق حفره پس از اعمال شار حرارتی با استفاده از تکنیک تولد و مرگ المان ها، المان هایی که دمای آن ها از دمای ذوب قطعه کار بیشتر است حذف می گردد. شکل ۵ کانتور توزیع دما پس از حذف المان ها را در زمان ۰/۵ میکروثانیه را نشان می دهد. پس از حذف المان های سوخته شده عمق حفره ایجاد شده را می توان به دقت اندازه گیری کرد. شکل ۶ نتایج عمق حفره ایجاد شده را در زمان های مختلف روشن بودن جرقه با انرژی یکسان ورودی به سطح قطعه کار نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود به علت بیشتر بودن توزیع دما در راستای شعاعی نسبت به راستای محوری، میزان شعاع جرقه نسبت به عمق حفره ایجاد شده بیشتر می باشد.

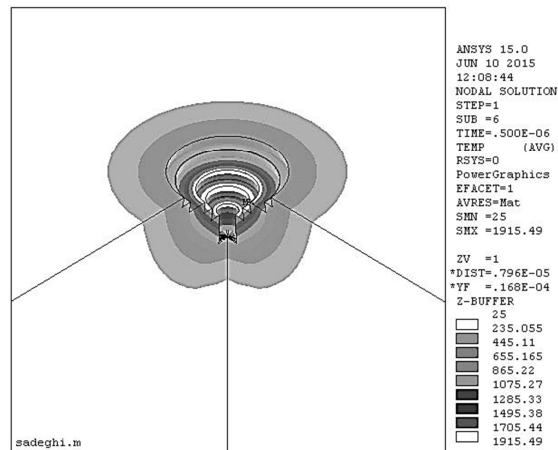
طبق مشاهدات ملاحظه می شود که در زمان حدود ۱ میکروثانیه، نسبت عمق حفره به شعاع جرقه در روی سطح، به یک میزان می باشد. در ادامه همان طور که در شکل ۷ مشاهده می شود با افزایش زمان روشن بودن جرقه، توزیع دما در سطح قطعه کار بیشتر می شود.

#### ۸- مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی

برای بررسی نتایج، از کار انجام گرفته محققین در مراجع [۲، ۵، ۱۱] استفاده می شود. همان طور که در شکل ۶ مشاهده گردید در زمان ۲ میکروثانیه، حداکثر عمق ۶/۲۳ میکرومتر و شعاع ۸/۹ میکرومتر بدست آمد، که با نظر مرجع نشان داده شده در همان شکل تطابق خوبی دارد، دلایل میزان اختلاف بدست آمده را می توان مواردی نظیر اختلاف در خصوصیات ماده و غیرخطی بودن آن، وجود لایه ی جدید تشکیل شده در مدل آزمایشگاهی پس از تخلیه انرژی در زمان روشن بودن جرقه و در نظر نگرفتن اتصال کوتاه در مدل المان محدود دانست.

همان طور که در شکل ۸ مشاهده می گردد، میزان توزیع دما در عمق قطعه کار نشان داده شده است که در مقایسه با مرجع [۱۱] تطبیق خوبی دارد و با افزایش توان و زمان روشن بودن جرقه، دمای سطح قطعه کار در هر دو مدل بالا می رود.

جهت بهینه سازی در برداشت فلز و ایجاد حفره در این سوپرآلیاژ می توان مراحل کار را در سه سطح انرژی نشان داد.



شدید حرارتی ناشی از ایجاد یک جرقه، عمق حفره ایجاد شده پیش‌بینی و جهت بهینه‌سازی، انرژی ورودی بررسی گردید. در ابتدا پارامترهای مؤثر نظیر؛ شعاع جرقه، گپ، جریان، ولتاژ، زمان روشنایی جرقه و انرژی وارد شده به قطعه‌کار با استفاده از روش تاگوچی بررسی گردید و سپس با استفاده از نتایج حاصله، مجدداً آزمایش‌های جدید طراحی گردید.

در توزیع دما با توجه به شارحرارتی ایجاد شده، مشاهده گردید که با افزایش شارحرارتی، دما در سطح قطعه‌کار به شدت افزایش می‌یابد؛ همچنین با افزایش زمان روشن بودن جرقه، این عمل تشدید می‌شود. در ادامه نسبت شعاع جرقه به عمق حفره، در زمان‌های کمتر از ۲ میکروثانیه مورد بررسی قرار گرفت که با مرجع [۲] مطابقت خوبی مشاهده گردید. دلایل میزان اختلاف به‌دست آمده را می‌توان مواردی نظیر اختلاف در خصوصیات ماده و غیرخطی بودن آن، وجود لایه‌ی جدید تشکیل شده در مدل آزمایشگاهی پس از تخلیه انرژی در زمان روشن بودن جرقه و در نظر نگرفتن اتصال کوتاه در مدل المان محدود دانست.

در نهایت جهت بهینه‌سازی عملیات میکرو ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی در سوپرآلیاژ اینکونل ۶۱۷، انرژی وارد شده به قطعه‌کار جهت بدست آوردن بهترین عمق حفره، در سه سطح انرژی بدست آمد، که نتایج در مقایسه با کار مشابه انجام شده در مراجع [۱۱،۵،۴] مطابقت خوبی داشت. استفاده از این سطوح انرژی، سبب بهینه‌سازی و تثبیت خواص مکانیکی در ناحیه‌ی مورد نظر می‌شود. همچنین باعث جلوگیری از تشکیل میکروترک‌های سطحی و کاهش تنش‌های حرارتی و تنش‌های پسماندی می‌شود.

#### ۱۰- فهرست علائم

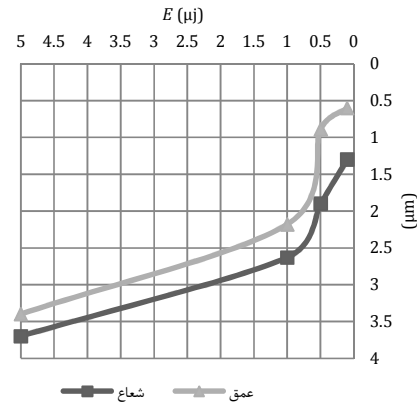
$p$	درصد انرژی ورودی به قطعه‌کار
$c_p$	گرمای ویژه ( $\text{Jkg}^{-1}\text{C}^{-1}$ )
$k_t$	ضریب هدایت گرمایی ( $\text{Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ )
$T$	دما ( $^{\circ}\text{C}$ )
$r$	مختصات طولی
$z$	مختصات عرضی
$t$	زمان ( $\mu\text{s}$ )
$H_f$	ضریب انتقال حرارت همرفت ( $\text{Wm}^{-2}\text{C}^{-1}$ )
$Q_f$	شارحرارتی ( $\text{Wm}^{-2}$ )
$R$	شعاع جرقه ( $\mu\text{m}$ )
$d$	گپ ( $\mu\text{m}$ )
$D$	عمق حفره ( $\mu\text{m}$ )
$I$	شدت جریان (A)
$V$	ولتاژ (V)
$E$	انرژی ( $\mu\text{J}$ )
$E_y$	مدول یانگ (GPa)
$K$	ثابت آزمایشگاهی با توجه به جنس قطعه‌کار (رابطه ۳)
$Q$	توان تخلیه (W)

#### علائم یونانی

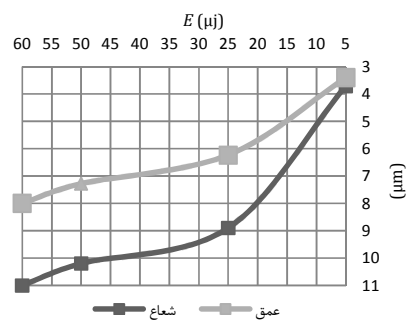
$\rho$	چگالی ( $\text{kgm}^{-3}$ )
$\gamma$	ضریب پواسون

#### بالانویس‌ها

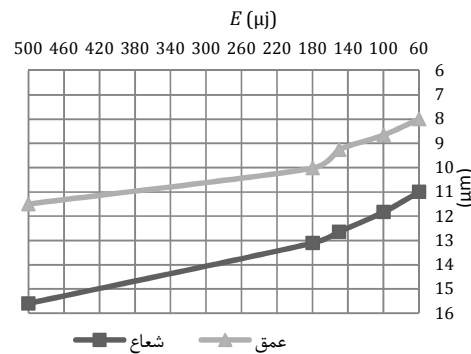
$m$	ثابت نرمال مربوط به جنس قطعه
$n$	ثابت نرمال مربوط به جنس قطعه



شکل ۹ انرژی در سطح یک، بین ۰/۱ تا ۵ میکروژول



شکل ۱۰ انرژی در سطح دو، بین ۵ تا ۶۰ میکروژول



شکل ۱۱ انرژی در سطح سه، بین ۶۰ تا ۵۰۰ میکروژول

در شکل ۱۱ انرژی زیاد ۶۰ تا ۵۰۰ میکروژول نشان داده شده است؛ که برای انجام حداکثر نرخ برداشت فلز از سطح قطعه‌کار انجام می‌گیرد. همواره باید موانع و مشکلات ذیل را در سطح سه مدنظر قرار داد؛ ایجاد لایه جدید ذوب مجدد با ضخامت نسبتاً زیاد نسبت به سطوح قبل، کاهش شدید خواص مکانیکی در آن ناحیه، ایجاد میکروترک‌های سطحی و افزایش تنش‌های حرارتی و تنش‌های پسماند که موجب کاهش مقاومت به خستگی و افزایش تمرکز تنش در قطعه‌کار می‌شود. در این ناحیه کیفیت سطح نسبت به سطوح قبل به‌طور محسوسی پایین می‌آید که وجود این موارد دلایل استفاده از این سطح انرژی، برای خشن‌کاری می‌باشد.

#### ۹- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با بررسی توزیع دما توسط مدل‌سازی المان محدود و گرا دیان

زیر نویس ها

روشن بودن جرقه on

## ۱۱- مراجع

- [1] Han, F, S. Wachi, and M. Kunieda, Improvement of machining characteristics of micro-EDM using transistor type isopulse generator and servo feed control. *Precision Engineering*, (2004). 28(4): p. 378-385.
- [2] Philip Allen, Xiaolin Chen, Process simulation of micro electro-discharge machining on molybdenum, *Journal of Materials Processing Technology* 186 (2007).346-355.
- [3] B. B. Pradhan, M. Masanta, B. R. Sarkar and B. Bhattacharyya, –Investigation of electro discharge micro- machining of titanium super alloy, *International Journal of Advance Manufacturing Technology* (2009) 41:1094-1106.
- [4] Joshi, S. and S. Pande, Thermo-physical modelling of die-sinking EDM process. *Journal of Manufacturing Processes*, 2010. 12(1): p. 45-56.
- [5] Deshmukh, Avinash, modelling of anode crater formation in micro-electrical discharge machining (2013). *Industrial and Management Systems Engineering- Dissertations and Student Research*.
- [6] vinoth kumar, Fabrication electro thermal modeling of micro EDM, *international journal of innovative research in science, engineering and technology*,(2014).
- [7] Murali, M.S. and S.H. Yeo, Process simulation and residual stress estimation of micro-electrodischarge machining using finite element method. *Japanese journal of applied physics*, 2005. 44: p. 5254.
- [8] M.R. Patel, A. Barrufet, P.T. Eubank, D.D. DiBitonto, Theoretical models of the electrical discharge machining process II: The anode erosion model, *Journal of Applied Physics* 66 (9) (1989) 4104-4111.
- [9] V. Yadav, V. Jain, P. Dixit, Thermal stresses due to electrical discharge machining, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 42 (2002) 877-888.
- [10] Umesh kumar vishwakarma, modelling of micro electro discharge machining in aerospace material, (2011). *Department of Mechanical Engineering National Institute of Technology*.
- [11] Ved Prakash Kishor, modelling of micro electro discharge machining in aerospace material, (2013). *Department of Mechanical Engineering National Institute of Technology*.