



## مدل سازی ریاضی و تجربی شعاع کانال پلاسما در فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به کمک میدان مغناطیسی خارجی متناوب

محمود شیرزادی<sup>۱</sup>، حمید سلیمانی مهر<sup>۲\*</sup>، شهرام اعتمادی حقیقی<sup>۲</sup>

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، برق و کامپیوتر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشکده مکانیک، برق و کامپیوتر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

\* تهران، صندوق پستی ۱۴۵۱۵/۷۷۵، پست الکترونیکی سازمانی soleimanimehr@srbiau.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۸ دی ۱۴۰۱

داوری اولیه: ۲۱ خرداد ۱۴۰۲

پذیرش: ۲۵ تیر ۱۴۰۲

کلیدواژه‌گان:

میدان مغناطیسی متناوب

کانال پلاسما

ماشین کاری تخلیه الکتریکی

مدل سازی ریاضی

### چکیده

امروزه استفاده از سرامیک‌ها و آلیاژهای سخت در صنایع پیشرفته باعث شده تا روش‌های نوینی مانند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به منظور کاهش معایب روش‌های سنتی براده برداری این مواد ایجاد شود. این روش‌ها نیز به نوبه خود دارای ایرادهایی از جمله کیفیت سطح ماشین کاری هستند که در این مقاله با استفاده از یک میدان مغناطیسی متناوب خارجی و انجام آزمایش‌های عملی بر روی آلیاژ سخت اینکونل ۷۱۸ در رفع تعدادی از آن‌ها تلاش شده است. در این نوشته برای ایجاد یک میدان مغناطیسی خارجی با استفاده از جریان متناوب حول منطقه انجام فرایند تخلیه الکتریکی یک پیچ هلمهولتز پیشنهاد شده است. در روش سنتی و پیشنهادی، شعاع کانال پلاسما مدل سازی ریاضی- عددی می‌شود و برای صحت‌سنجی نتایج تئوری، آزمایش‌های تجربی تعریف می‌گردد. مقایسه یکنواختی سطح (مورفولوژی) و زبری سطح (Ra) به عنوان پارامترهای اثربخشی بین روش سنتی و روش پیشنهادی در نظر گرفته شده‌اند. کانال پلاسما استوانه‌ای فرض شده است. جهت کنترل زبری سطح از یک زبری سنج استفاده شد. نتایج مدل سازی ریاضی- عددی کاهش ۱۰٪ قطر کانال پلاسما را نشان می‌دهد. طبق نتایج به دست آمده میزان زبری سطح در زمان‌های ثابت، کاهش یافته است. مبنای صحت‌سنجی روش پیشنهادی، مقایسه پارامترهای خروجی کیفیت سطح ماشین کاری در آزمایش‌های تجربی می‌باشد.

## Mathematical and experimental modeling of plasma channel radius in alternating magnetic field assisted electric discharge machining process

Mahmood Shirzadi, Hamid Soleimanimehr\*, Shahram Etemadi Haghghi

Department of Mechanics, Electrical Power and Computer, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 14515/775 Tehran, Iran, email address, soleimanimehr@srbiau.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received: 29 December 2022  
First Decision: 11 June 2023  
Accepted: 16 July 2023

### Keywords:

Alternating magnetic field  
Plasma channel  
Electric discharge machining  
Mathematical modeling

### Abstract

Today, the use of ceramics and hard alloys in advanced industries has led to the creation of new methods such as electric discharge machining in order to reduce the disadvantages of traditional methods of chipping these materials. In turn, these methods also have defects, such as the quality of the machining surface, which in this paper has been tried to solve some of them by using an external alternating magnetic field and conducting practical tests on Inconel 718 hard alloy. In this paper, a Helmholtz coil is proposed to create an external magnetic field using an alternating current around the area of the electric discharge process. In the traditional and proposed method, the radius of the plasma channel is modeled mathematically and numerically, and experimental tests are defined to validate the theoretical results. Comparison of surface uniformity (morphology) and surface roughness (Ra) are considered as effective parameters between the traditional method and the proposed method. The plasma channel is assumed to be cylindrical. A roughness meter is used to control surface roughness. The results of mathematical-numerical modeling show a 10% reduction in the diameter of the plasma channel. According to the obtained results, the amount of surface roughness (Ra) has decreased in fixed times. The basis of validation of the proposed method is to compare the output parameters of machining surface quality in practical tests.

### ۱- مقدمه

به این نتیجه رسیدند که وجود یک میدان مغناطیسی خارجی متناوب باعث افزایش ۵۲ درصدی مقدار براده برداری نسبت به روش سنتی فرایند تخلیه الکتریکی می‌گردد و از نظر پارامترهای زبری و یکنواختی سطح نیز سطح بهتری حاصل می‌شود.

ذبیحی و همکاران [۱] در سال ۲۰۲۳ تأثیر میدان مغناطیسی خارجی بر نرخ حذف مواد فرو مغناطیسی در فرایند تخلیه الکتریکی به کمک میدان مغناطیسی متناوب را بررسی کردند و

Please cite this article using:

M. Shirzadi, H. Soleimanimehr, Sh. Etemadi Haghghi, Mathematical and experimental modeling of plasma channel radius in alternating magnetic field assisted electric discharge machining process, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 11, pp. 54- 65, 2023 (in Persian).  
<https://doi.org/10.22034/IJME.2023.378362.1731>

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

ووی مینگ [۲] و همکاران در سال ۲۰۱۹ تحقیقی بر روی مواد مغناطیسی و غیر مغناطیسی با ادغام میدان مغناطیسی در فرایند ماشین‌کاری با روش تخلیه الکتریکی بر روی پارامترهای نرخ براده‌برداری و کیفیت سطح (Ra) و بهره‌وری انرژی انجام دادند و دریافتند که استفاده از میدان مغناطیسی باعث بهره‌وری مصرف انرژی شده و سرعت بخشیدن به نرخ براده برداری (MRR) در هر دو جنس شده و در کل استفاده از میدان مغناطیسی باعث بهبود پارامترهای فرایند گردیده است.

سوشیل کومار و همکاران [۳] در سال ۲۰۲۰ در یک تحقیق عملی بر روی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۰۶ با یک دستگاه تخلیه الکتریکی بر پایه مخلوط مایع دی‌الکتریک با سیلیکون<sup>۱</sup> و بور<sup>۲</sup> و قرار دادن فرایند در یک میدان مغناطیسی و طراحی این آزمایش به روش تاگوچی<sup>۳</sup> بروی پارامترهای زمان روشنی پالس<sup>۴</sup>، زمان خاموشی پالس، شدت جریان، نرخ براده برداری و همچنین میزان صافی سطح (Ra) را به روش واریانس<sup>۵</sup> (ANOVA) بررسی نمودند و مشخص گردید که شدت جریان جاری Ip حدود ۸۲٪ در نرخ براده برداری سهم داشته است؛ همچنین بر روی صافی سطح شدت جریان ۴۸/۴۰٪ و ابزار مسی ۲۰٪ و زمان روشن بودن پالس مقدار ۱۶/۹۷٪ مؤثر بودند.

سیواپراکازام و همکاران [۴] در سال ۲۰۲۰ در تحقیق عملی از یک دستگاه میکرو تخلیه الکتریکی برای تحقیق بر روی تأثیر میدان مغناطیسی بر سوپر آلیاژ اینکونل با حضور میدان مغناطیسی و بدون حضور میدان مغناطیسی جهت تغییر در دو پارامتر ولتاژ و نرخ براده‌برداری استفاده کردند پارامترهای مذکور در ۳ سطح طراحی و انتخاب شدند که مشخص گردید نرخ براده‌برداری در همراهی میدان مغناطیسی ۲۲٪ بهبود داشته و سایش ابزار و همچنین کیفیت سطح ماشین‌کاری بهبود یافته است؛ علاوه بر این حضور میدان مغناطیسی بر روی سرعت ماشین‌کاری تأثیری نداشته است.

رنجیت لیجو پاول و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۹ در یک تحقیق عملی از ماشین تخلیه الکتریکی به همراهی یک میدان میکرو مغناطیسی استفاده نمودند و آزمایش‌ها را بر اساس روش تاگوچی طراحی کردند که در آن فاصله ابزار تا قطعه‌کار در ۳ مرحله تغییر ولتاژ، فرکانس و راندمان مورد آزمایش قرار گرفته و با نتایج به‌دست‌آمده با عدم حضور میکرو میدان مغناطیسی مقایسه شده‌اند که مشخص شد براده‌های جدا شده از قطعه‌کار

در روش بدون میدان مغناطیسی در منطقه ابزار تجمع کرده و با نزدیک شدن الکتروود، عمل تخلیه اتفاق می‌افتد و باعث کاهش راندمان و عدم کیفیت سطح ماشین‌کاری شده است؛ در صورت مجاورت میدان میکرو مغناطیسی این موضوع کاهش داشته و سبب افزایش نرخ براده‌برداری و تولید سطح ماشین‌کاری با کیفیت بهتری خواهد شد.

نونو آنتوان و همکاران [۶] در سال ۲۰۲۰ تحقیقی عملی بر روی یک دستگاه تخلیه الکتریکی و ترکیب یک میدان مغناطیسی و استفاده از الکتروود مسی و فولادی جهت سوراخ‌کاری یک قطعه‌کار از جنس تیتانیوم انجام دادند و با پارامترهای شدت جریان، ولتاژ، زمان روشنی و خاموشی پالس را بررسی نمودند. آن‌ها معتقد بودند عدم خروج ذرات جدا شده از قطعه‌کار و حضور مقداری از آن‌ها در محل انجام فرایند در روش معمول باعث عدم کارایی می‌شود؛ بنابراین با انجام آزمایش و مقایسه نتایج با حضور میدان مغناطیسی و بدون میدان مغناطیسی مشاهده کردند که در روش ترکیبی، نرخ براده برداری افزایش یافته است؛ همچنین این روش ترکیبی از به وجود آمدن پدیده قوس الکتریکی جلوگیری می‌کند ضمن این‌که نرخ سایش ابزار (TWR) کاهش یافته و زبری یا کیفیت سطح (Ra) بهبود یافته است.

سیواپراکاسام و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۹ تحقیقی عملی بر روی قطعه‌کار کامپوزیتی از جنس آلومینیوم و یک الکتروود از جنس تنگستن طراحی نمودند. این تحقیق بر روی افزایش نرخ براده برداری معطوف بوده و از تغییر در ولتاژ و مقدار پیشروی به‌عنوان پارامترهای تغییر در فرایند استفاده شده است. نتایج در حالت استفاده از میدان مغناطیسی و تغییر در پارامترهای ولتاژ و مقدار پیشروی نرخ براده برداری ۲۰٪ نسبت به حالت بدون میدان مغناطیسی بهبود یافته است.

پولاک پندی و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۸ تحقیقی عملی بر روی تأثیر میدان مغناطیسی بر فرایند ماشین‌کاری با تخلیه الکتریکی با همراهی و مخلوط کردن هوا و گاز آرگون با مایع دی‌الکتریک بروی یک قطعه‌کار کامپوزیتی انجام دادند و اثر آن‌ها بر روی فرایند را با تغییر در پارامترهای شدت جریان و دوره تناوب پالس و همچنین مقدار فشار هوا و گاز آرگون و تمرکز تأثیر متغیرها بر روی نرخ براده‌برداری و نرخ سایش ابزار بررسی کردند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که همراهی میدان مغناطیسی در نرخ براده‌برداری ۴۱٪ و در نرخ سایش ۷-۱۴٪ افزایش داشته است؛ از جنبه دیگر واکنش گرمایی بین هوا و

<sup>1</sup> Silicon

<sup>2</sup> Bore

<sup>3</sup> Taguchi

<sup>4</sup> Pulse

<sup>5</sup> Analysis of Variance

<sup>6</sup> Tool wear rate

بهینه آزمایش به وجود آمده است. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با استفاده از میدان مغناطیسی، ساختار پارامترهای فرورفتگی و برجستگی‌های سطحی کامپوزیت مورد آزمایش نسبت به روش معمول ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بهبود یافته است.

نتین چیتال [۱۳] و همکاران در سال ۲۰۱۹ در تحقیقی عملی را بر روی تأثیر میدان مغناطیسی بر فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی از یک حلقه از جنس نیویوم حول الکتروود مسی و بر روی یک قطعه‌کار از جنس فولاد انجام دادند که مشخص گردید حلقه مذکور مانند یک سپر، الکتروود را از سرایت گرمای ایجاد شده از فرایند ماشین‌کاری محافظت نموده و همچنین آن را از براده‌های موجود در مایع دی‌الکتریک نیز محافظت می‌کند؛ همچنین استفاده از این سپر محافظ باعث افزایش نرخ براده‌برداری و کاهش نرخ سایش ابزار می‌گردد.

ذبیحی و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۲۳ به بررسی تأثیر توان میدان مغناطیسی بر روی فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی پرداختند. مشخص شد که برای رسیدن به حداکثر نرخ براده‌برداری به یک توان میدان مغناطیسی بهینه نیاز است.

در این مقاله مدل‌سازی ریاضی-عددی بر اساس تأثیر میدان مغناطیسی بر روی کانال پلاسما با توجه به شعاع گرمای انتقال یافته انجام گرفت. جهت شبیه‌سازی شعاع گرمای انتقال یافته به قطعه‌کار، از تابع گوسین استفاده و از یک پیچه هلمهولتز برای قرار گرفتن مرکز محل ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سنتی در مرکز میدان مغناطیسی استفاده شده است. مدل‌سازی ریاضی-عددی شعاع کانال پلاسما در روش سنتی و روش پیشنهادی انجام گردید و جهت صحت‌سنجی نتایج تئوری مدل‌سازی ریاضی-عددی آزمایش‌های تجربی انجام شد.

## ۲- آزمایش

آزمایش‌های تجربی در دو روش سنتی و روش پیشنهادی شده با تغییر متغیرهای زمان روشنی پالس و شدت میدان مغناطیسی خارجی در سه نقطه تغییر یافته ثابت، برای هر روش بر روی کیفیت سطح ماشین‌کاری شده از نظر زبری و یکنواختی سطح (مورفولوژی) بین دو حالت سنتی با روش پیشنهادی مقایسه گردید. در آزمایش‌های تجربی از یک ماشین اسپارک مدل TEHRAN EKRAM 304H/60A با ژنراتور ایزوپالس، استفاده شده است. جدول ۱ مشخصات دستگاه EDM TEHRAN EKRAM مورد استفاده در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

قطعه‌کار در روش مخلوط هوا با دی‌الکتریک ۱۰-۱۸٪ افزایش داشته و در روش مخلوط گاز آرگون با مایع دی‌الکتریک نرخ سایش ابزار ۷-۱۶٪ کاهش داشته است.

آنیش کومار و همکار [۹] در سال ۲۰۱۹ با انجام تحقیقی عملی بر روی تأثیر میدان مغناطیسی در فرایند سوراخ‌کاری با یک ابزار مسی به روش تخلیه الکتریکی که نتایج به روش واکنش سطح تحلیل می‌شود، دریافتند نرخ براده‌برداری در زمانی که جریان در حداکثر مقدار بوده به حداکثر مقدار  $16/14 \text{ mm}^3/\text{min}$  رسیده است و نرخ سایش ابزار در زمانی که میدان مغناطیسی فعال بوده کاهش یافته است ضمن این‌که سوراخ ایجاد شده خوردگی لبه بسیار کمی دارد.

هاردیک براوالا و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۹ با استفاده از روش مدل‌سازی ریاضی، نرخ براده‌برداری را با فرض وجود مخلوط هوا با مایع دی‌الکتریک و وجود میدان مغناطیسی حین فرایند ماشین‌کاری با تخلیه الکتریکی و در زمانی که ستون پلاسما تشکیل و تخلیه می‌گردد را با در نظر گرفتن تغییر پارامترهای شدت جریان، دوره پالس و فشار هوا مدل تخمین زدند. در این تحقیق نتایج آزمایش‌های عملی مبنای ارزیابی نتایج قرار گرفته است. در شرایط مخلوط شدن هوا با مایع دی‌الکتریک، مقادیر تخمین زده شده نرخ براده‌برداری با نتایج عملی یکسان بودند و در سایر شرایط مدل‌سازی، نتایج تخمینی اختلاف ۱۰٪ را نشان می‌دهند.

ژن ژانگ و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۸ در تحقیقی عملی تأثیر میدان مغناطیسی بر فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی و مصرف بهینه انرژی و تأثیر بهینه آن بر روی جنبه زیست‌محیطی را با روش معمول ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی مورد مقایسه قرار دادند. در این تحقیق نتایج آزمایش‌های عملی مبنای ارزیابی نتایج بوده است. آن‌ها از یک مدل حرارتی فیزیکی جدید برای محاسبه انرژی استفاده نمودند و مشخص گردید که مصرف بهینه انرژی ۲٪/۱۵ و نرخ فرسایش ابزار ۴٪/۲۲ کاهش و نرخ براده‌برداری ۹٪/۲۱ افزایش داشته است.

لی و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۹ تحقیقی عملی را بر روی پارامترهای سطح ماشین‌کاری شده به همراه میدان مغناطیسی بر روی یک کامپوزیت نیکل-تیتانیوم انجام دادند. در این تحقیق سطح ماشین‌کاری شده توسط یک میکروسکوپ الکترونی (SEM) مورد بررسی قرار گرفته و برای بررسی میزان زبری سطح از یک ابزار اندازه‌گیری زاویه نوری کمک گرفته شده است که در شرایط میزان شدت جریان ۴/۵ آمپر و ولتاژ ۵۰ ولت حالت



Fig. 1 Applying the magnetic field along with installing the fixture  
شکل ۱ اعمال میدان مغناطیسی به همراه نصب فیکسچر

جدول ۳ خواص الکتروود مسی

Table 3 Properties of copper electrode

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

در این تحقیق قطعه‌کاری از جنس اینکونل ۷۱۸ به جهت اهمیت استفاده در صنایع پیشرفته مانند هوافضا با قطر ۷ میلی‌متر و طول ۳ میلی‌متر به جهت پوشش کامل سطح تماس با ابزار و سهولت استخراج بهتر نتایج زبری‌سنجی استفاده شده است. اینکونل یک گروه از سوپر آلیاژهای بر پایه نیکل هستند که در برابر خوردگی و اکسیداسیون در دما و فشار مقاومت بالایی دارند. در حرارت بالا، بر روی سطح آلیاژهای اینکونل لایه‌ای مقاوم، پایدار و غیرفعال از اکسید ایجاد می‌شود که از خوردگی بیشتر جلوگیری می‌نماید.

خواصی از جمله چگالی، ضریب هدایت گرمایی، ظرفیت گرمایی ویژه و نقطه ذوب تأثیر زیادی در شعاع منطقه گرم شده در قطعه‌کار و تابع گرمایی ایجاد می‌نماید. بنابراین هرچه قطعه‌کار از نظر خواص فیزیکی ضعیف‌تر یا نرم‌تر باشد، گرمای بیشتری جذب نموده و کیفیت سطح پایین‌تر و حجم براده‌برداری افزایشی خواهد بود و هرچه سخت‌تر باشد، پارامترهای خروجی سطح ماشین‌کاری شده بهتر و حجم براده‌برداری کمتر خواهد بود. ترکیب شیمیایی اینکونل ۷۱۸ در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۱ مشخصات دستگاه اسپارک ایران اکرام

Table 1 Specifications of TEHRAN EKRAM EDM machine

| پارامتر                      | مقدار    |
|------------------------------|----------|
| ماکزیمم جریان خروجی (A)      | ۰/۵ - ۶۰ |
| ولتاژ کاری (V)               | ۸۰ و ۲۵۰ |
| ولتاژ ورودی ماشین (V)        | ۳۸۰      |
| محدوده زمان روشنی پالس (μs)  | ۰ - ۱۵۰۰ |
| محدوده زمان خاموشی پالس (μs) | ۱۰ - ۷۶۰ |

در راستای انجام آزمایش‌های تجربی، پارامترهای تنظیم شده آزمایش جهت دستگاه اسپارک در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲ پارامترهای تنظیمی دستگاه مورد استفاده در آزمایش تجربی

Table 2 Adjustment parameters of the device used in the experimental test

| مقدار                                  | متغیر              |
|--|--------------------|
| منفی                                   | قطبیت الکتروود     |
| ایزو پالس                              | مدار سیستم         |
| ۲۵۰ V                                  | ولتاژ              |
| ۳ μs                                   | زمان خاموشی پالس   |
| ۱۵۰ و ۱۰۰ و ۵۰ μs                      | زمان روشنی پالس    |
| T <sub>0</sub> ، ۰/۱۱۸ ، ۰/۲۳۶ ، ۰/۳۴۵ | شار میدان مغناطیسی |
| ۶۰ Hz                                  | فرکانس جریان میدان |

برای ایجاد میدان مغناطیسی متناوب خطی از یک پیچ هلمهولتز دایره‌ای با قطر سیم ۰/۸ میلی‌متر، تعداد دور ۱۰۵۰ با قطر ۱۳/۵ سانتی‌متر و با امپدانس داخلی ۱۶ اهم استفاده گردید. در راستای تثبیت قطعه‌کار و قرار دادن آن در مرکز پیچ، یک فیکسچر طراحی و ساخته شد. برای اعمال میدان مغناطیسی متناوب خطی سیم‌پیچ هلمهولتز به فاصله گپ اعمال می‌شود. برای این منظور فیکسچر طراحی شده برای قطعه‌کار بر روی پیچ هلمهولتز نصب گردید به نحوی که قطعه‌کار دقیقاً در مرکز دو سیم‌پیچ قرار بگیرد. در مرکز سیم‌پیچ‌ها میزان خطی شدن میدان مغناطیسی در بیشینه حالت خود قرار دارد. شکل ۱ اعمال میدان در مرکز دو سیم‌پیچ هلمهولتز را نشان می‌دهد.

از یک الکتروود مسی با خلوص ۹۹٪ با قطر خارجی ۲۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر جهت پوشش کامل سطح قطعه‌کار در فرایند به‌عنوان ابزار استفاده گردید. خواص ابزار مسی در جدول ۳ آورده شده است.

## ۲-۱- ایجاد میدان مغناطیسی متناوب

جهت ایجاد میدان مغناطیسی متناوب از یک سیم‌پیچ هلمهولتز دایره‌ای با تعداد دور ۱۰۵۰، قطر ۱۳۳/۵ میلی‌متر و سیم مسی به ضخامت ۰/۸ میلی‌متر استفاده شده است. یک پیچه هلمهولتز دایره‌ای از دو سیم‌پیچ دایره‌ای شکل با شعاع و تعداد دور سیم‌پیچ یکسان تشکیل می‌شود.

این دو سیم‌پیچ در صورتی که هم محور در فاصله‌های برابر با شعاع خود  $a=R$  نسبت به یکدیگر قرار گیرند و جریان یکسان  $I$  از هر دو سیم‌پیچ عبور داده شود، برآیند میدان مغناطیسی این دو سیم‌پیچ در حوالی نقطه میانی آن‌ها به صورت یک میدان مغناطیسی تقریباً یکنواخت و موازی با محور این سیم‌پیچ‌ها خواهد بود (شکل ۲)

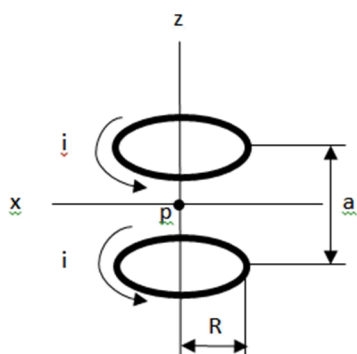


Fig. 2 Simple schematic of a circular Helmholtz coil

شکل ۲ شماتیک ساده یک پیچه هلمهولتز دایره‌ای

## ۲-۲- محاسبه مقدار میدان مغناطیسی

میدان مغناطیسی محوری یک سیم‌پیچ دایره‌ای به شعاع  $R$  حامل جریان  $I$  با  $N$  دور سیم و شعاع  $a$  با ثابت تراوایی مغناطیسی در خلأ  $\mu_0=4\pi\times 10^{-7}$  در نقطه‌ای روی محور آن و به فاصله  $Z$  از مرکز سیم‌پیچ از رابطه ۱ به دست می‌آید [۱۵]:

$$B_{(E)} = \frac{\mu_0 NI}{2} \frac{R^2}{(R^2+Z^2)^{3/2}} \quad (1)$$

در این رابطه، فاصله بین دو صفحه پیچه‌ها طوری انتخاب می‌شود که مشتق دوم  $B$  در نقطه‌ای واقع بر محور پیچه‌ها به فاصله مساوی از هر یک از آن‌ها صفر شود. حال اگر دو سیم‌پیچ مشابه در فاصله معینی از یکدیگر قرار گیرند به گونه‌ای که صفحات آن‌ها موازی باشند و مبدأ دستگاه مختصات بین دو سیم‌پیچ انتخاب شود و فاصله دو سیم‌پیچ  $a$  نامیده شود، میدان مغناطیسی از رابطه ۲ به دست می‌آید [۱۵]:

جدول ۴ درصد عناصر تشکیل دهنده سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸

| Table 4 Percentage of constituent elements of Inconel 718 super alloy |        |           |         |          |      |
|---|--------|-----------|---------|----------|------|
| Ni  | Cr     | Fe        | Mo      | Nb       | Co   |
| ۵۵-۵۰   | ۲۱-۱۷  | توازن     | ۳/۳-۲/۸ | ۵/۵-۳/۷۵ | ۱    |
| Mn  | Cu     | Al        | Ti      | Siz      | C    |
| ۰/۳۵  | ۱-۰/۶۵ | ۱/۱۵-۰/۶۵ | ۰/۳     | ۰/۳۵     | ۰/۰۸ |
| S   | P      | B         |         |          |      |
| ۰/۰۱۵   | ۰/۰۱۵  | ۰/۰۰۶     |         |          |      |

آلیاژ اینکونل در بازه وسیعی از دما، استحکام خود را حفظ می‌کند. این آلیاژ کاربردی ویژه در شرایطی که آلومینیوم و فولادهای ضدزنگ به علت احتمال وقوع خزش در دماهای بالا قابل استفاده نیستند را دارد. در جدول ۵ خواص فیزیکی و مکانیکی قطعه‌کار آورده شده است.

جدول ۵ خواص فیزیکی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸

| Table 5 Physical properties of Inconel 718 super alloy |                 |
|--|-----------------|
| مقدار  | خواص مکانیکی    |
| ۱۱/۴ W/m-K   | هدایت حرارتی    |
| ۱۱۰۰ MPa   | مدول الاستیک    |
| ۱۳۳۶-۱۲۶۰ °C   | نقطه ذوب        |
| ۰/۰۰۰۱۲۵ ohm-cm  | مقاومت الکتریکی |
| ۸/۱۹ g/cc  | چگالی           |

جهت تعیین زبری سطح بعد از عملیات ماشین‌کاری، زبری سطح ماشین‌کاری شده توسط دستگاه زبری‌سنج Mahr perthometer M2 با استاندارد CUT off و طول ۰/۸ میلی‌متر و حرکت پراب به طول ۶ میلی‌متر روی نمونه‌ها، اندازه‌گیری می‌شود.

در این مقاله،  $R_a$  به عنوان معیار زبری سطح در نظر گرفته شده است و برای افزایش دقت، زبری هر سطح در پنج امتداد مختلف اندازه‌گیری شده و میانگین این زبری‌ها به عنوان زبری سطح نهایی در نظر گرفته شد.

آب دی یونیزه به عنوان مایع دی‌الکتریک در هر دو روش سنتی و تخلیه الکتریکی با میدان مغناطیسی متناوب استفاده گردید. گپ بین ابزار و قطعه‌کار در تمام آزمایش‌ها ثابت و جریان فرایند ۲۵ آمپر می‌باشد. کانال پلازما استوانه‌ای فرض شده است.

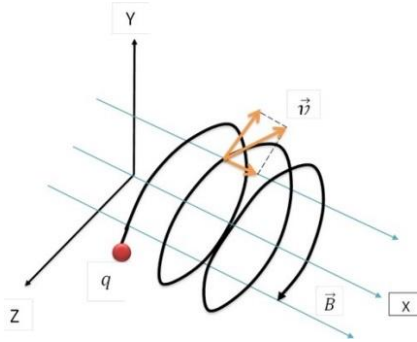


Fig. 3 The effect of the external magnetic field on the moving path of charged particles

شکل ۳ تأثیر میدان مغناطیسی خارجی روی مسیر حرکت ذرات باردار

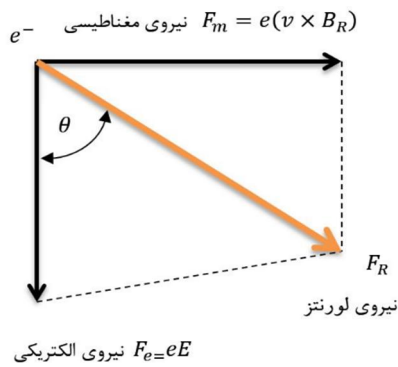


Fig. 4 Particle motion vector after the impact of external magnetic field

شکل ۴ بردار حرکت ذرات بعد از تأثیر میدان مغناطیسی خارجی

تأثیر میدان مغناطیسی بروی کانال پلاسما در نهایت منجر به فشار به دیواره آن و کاهش قطر و شعاع کانال پلاسما خواهد شد. (شکل ۵)

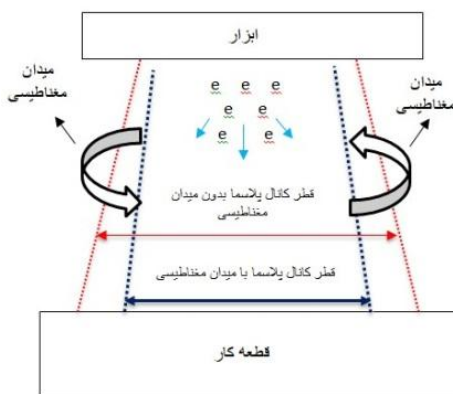


Fig. 5 The effect of the magnetic field on the radius of the plasma channel

شکل ۵ تأثیر میدان مغناطیسی بروی شعاع کانال پلاسما

$$B_{(E)} = \frac{\mu_0 NI}{2R} \left( \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{z-a/2}{R}\right)^2\right)^{3/2}} + \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{z+a/2}{R}\right)^2\right)^{3/2}} \right) \quad (2)$$

هنگامی که  $z=0$  باشد برای  $a < R$  شار مغناطیسی حداکثر و برای  $a > R$  شار مغناطیسی حداقل است. برای حالتی که  $a=R$  باشد میدان یکنواخت است. با این توضیح در ناحیه  $-\frac{R}{2} < z < \frac{R}{2}$  میدان مغناطیسی یکنواختی وجود خواهد داشت که در نقطه میانی  $z=0$  روی محورها بین سیم‌پیچ‌ها در  $a=R$  مقدار  $B_{(E)}$  از رابطه ۳ به دست می‌آید [۱۵]:

$$B_{(E)} = \frac{\mu_0 NI}{a} \left(\frac{5}{4}\right)^{3/2} \quad (3)$$

ذره باردار یا الکترون‌ها در درون کانال پلاسما در مسیر حرکت خود از طرف ابزار به طرف قطعه کار حرکت می‌کنند و در طی مسیر نیروی الکتریکی به ذره وارد می‌گردد و چون توده الکترون‌ها در حال حرکت می‌باشند، در واقع به مانند یک سیم حامل جریان الکتریکی در خواهند آمد. با توجه به این موضوع حرکت ذرات باردار در اثر حرکت در سیم حامل جریان یک نیروی مغناطیسی تولید می‌نمایند که الکترون‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند. طبق قانون اورستد<sup>۱</sup> و فارادی<sup>۲</sup> در جایی که توده‌ای از الکترون‌ها جریان یابند و جریان الکتریکی به وجود آورند، در کنار آن میدان مغناطیسی هم به وجود خواهد آمد که به آن نیروی الکترومغناطیس گفته می‌شود.

با توجه به توضیحات مذکور، در واقع ذرات درون کانال پلاسما تحت تأثیر دو میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند؛ یکی درون کانال پلاسما و دیگری میدانی که توسط پیچ هلمهولتز ایجاد شده است. بنابراین مقدار نهایی میدان مغناطیسی مجموع این دو نیرو خواهد بود.

ذره باردار در طی مسیر خود درون کانال پلاسما بعد از اینکه تحت میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد دچار انحراف مسیر می‌شود؛ با این توضیح که جهت حرکت ذره در راستای عمود با تأثیر میدان مغناطیسی منحرف شده و مسیر حرکت آن به صورت زاویه‌دار تغییر می‌نماید و در ادامه چون جریان الکترون‌ها ادامه دارد، در نهایت مسیر حرکت ذرات درون کانال پلاسما به شکل مارپیچ تغییر می‌نماید (شکل ۳).

بردار برآیند، حاصل از بردار مسیر الکترون‌ها و میدان مغناطیسی عمود بر آن مسیر جدید حرکت ذرات بوده که به آن نیروی لورنتز می‌گویند (شکل ۴)

<sup>1</sup> Hans Christian Orsted  
<sup>2</sup> Michael Faraday

انتقال گرما به قطعه کار، گرمای کمتری از دو ناحیه قبلی دریافت نموده و دچار تغییر خواص مولکولی می‌شود (شکل ۸).

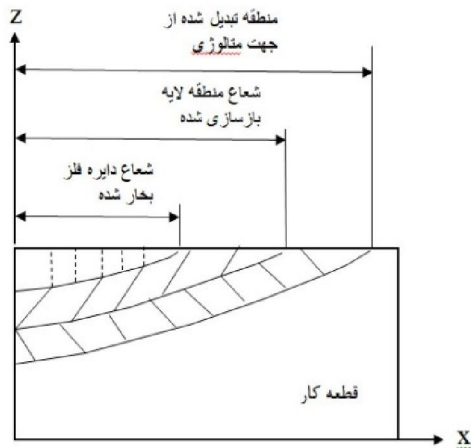


Fig. 8 The layers created by the heat transfer process

شکل ۸ لایه‌های ایجاد شده در اثر فرایند انتقال گرما

با اعمال میدان مغناطیسی B در محل انجام فرایند تخلیه الکتریکی و انتقال انرژی به قطعه کار و تخلیه ستون پلاسما، گرمای حاصل بر اساس تابع گاوسی به قطعه کار وارد می‌شود (شکل ۶).

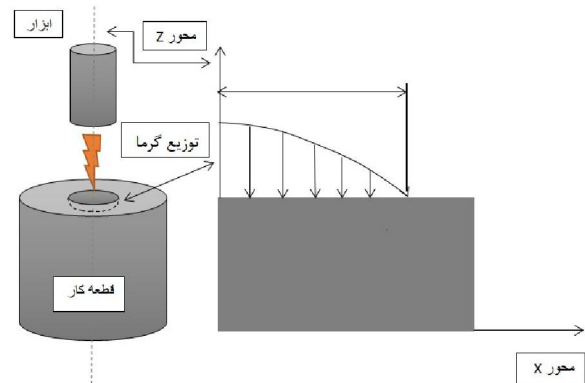


Fig. 6 Schematic of heat distribution to the work piece

شکل ۶ شماتیک توزیع گرما به قطعه کار

### ۳- مدل‌سازی ریاضی و عددی

اساس تخلیه بار الکتریکی بین دو قطب کاتد و آند به دو نوع تخلیه الکترون و تخلیه تابان صورت می‌پذیرد. تخلیه الکتریکی قوسی از لحاظ مکانیسم تابش الکترون از سطح الکتروود کاتد با تخلیه تابان تفاوت اساسی دارد. در تخلیه تابان یا همان فرایند اسپارک، الکترون‌ها از سطح الکتروود در اثر برخورد یون‌های مثبت کننده می‌شوند؛ درحالی‌که در تخلیه قوسی در اثر جریان بالا، گرمایش و ذوب الکتروود اتفاق می‌افتد. بنابراین در این مقاله تمرکز بر روی تخلیه الکتریکی غیر قوسی یا اسپارک می‌باشد.

در ابتدا جهت بررسی مدل‌سازی ریاضی-عددی شعاع کانال پلاسما، فرض تخلیه یک تک جرقه مورد بررسی قرار گرفت. در انتها از روی مقایسه نتایج زبری و کیفیت سطح، تأثیر گرما و روش پیشنهادی صحت سنجی شد و از رابطه ۴ به دست می‌آید [۱۶]:

$$R = 5.7546 \times t^{0.43} \quad (4)$$

مقدار تقریبی شعاع کانال پلاسما در فرایند اسپارک و در حالت سنتی به شدت جریان و زمان روشنی پالس بستگی دارد و از رابطه ۵ به دست می‌آید [۱۵]:

$$R_p = 2.04 \times I^{0.43} \times T_{on}^{0.44} \quad (5)$$

در این رابطه I شدت جریان برحسب آمپر و  $T_{on}$  زمان روشنی پالس برحسب میکروثانیه و  $R_p$  شعاع کانال پلاسما بر حسب میکرومتر می‌باشد. بنابراین افزایش آمپر در روش سنتی تخلیه الکتریکی باعث افزایش شعاع کانال پلاسما می‌گردد.

این بدان معنی خواهد بود که گرما در مرکز تخلیه ستون پلاسما حداکثر و به تدریج توزیع، به حداقل خواهد رسید (شکل ۷).

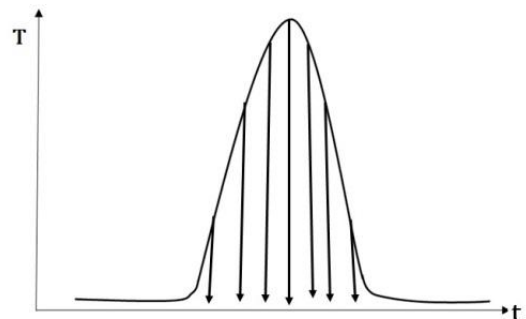


Fig. 7 Gaussian function of temperature time distribution

شکل ۷ تابع گاوسی توزیع دما زمان

نفوذ گرما در قطعه کار پس از تخلیه الکتریکی، سه ناحیه را ایجاد می‌کند. ناحیه اول که ناحیه اصلی می‌باشد، فلز ذوب شده و در ادامه فرایند تبخیر از روی قطعه کار جدا می‌شود. این ناحیه در واقع مقدار براده برداری در فرایند می‌باشد. ناحیه دوم فلز در اثر گرمای انتقال یافته ذوب شده و در مجاورت مایع دی‌الکتریک دوباره منجمد خواهد شد. این لایه به عنوان لایه دوباره منجمد شده یا بازسازی شده شناخته می‌شود. معمولاً سختی این لایه بعد از سرد شدن دچار تغییر می‌گردد. لایه بعدی در فرایند

$$F_c = 5.5998 \times I^{-0.3401} \times T_{on}^{0.2989} \quad (10)$$

در رابطه ۱۰،  $I$  شدت جریان جاری،  $T_{on}$  زمان روشنی پالس و  $F_c$  مقدار انرژی انتقال یافته به قطعه‌کار که کاملاً وابسته به میزان شدت جریان و زمان روشنی پالس می‌باشد. افزایش آمپر در زمان‌های ثابت باعث افزایش درصد انتقال انرژی به قطعه‌کار و در نتیجه کاهش شعاع کانال پلاسما خواهد شد (روابط ۱۰ و ۹). معادله تعادل نیروهای وارده بر کانال پلاسما از رابطه ۱۱ به دست می‌آید [۱۸]:

$$\frac{d^2r}{dt^2} = \frac{eq}{2\pi d\epsilon_0 m} - \frac{e\theta B_S}{m} - \frac{e\theta B_E}{m} + \frac{p_{in}(2rd)}{m} - \frac{p_{out}(2rd)}{m} - \frac{\gamma(2r+2d)}{m} \quad (11)$$

که  $d^2r/dt^2$  معادله شتاب شعاعی در حال گسترش کانال پلاسما،  $eq/2\pi d\epsilon_0 m$  میدان الکتریکی ناشی از ذرات باردار داخل کانال پلاسما،  $e\theta B_S/m$  معادله تأثیر میدان مغناطیسی خارجی بروی حرکت ذرات باردار داخل کانال پلاسما،  $e\theta B_E/m$  معادله تأثیر میدان مغناطیسی خارجی بروی گپ بین ابزار و قطعه‌کار،  $p_{in}(2rd)/m$  معادله نیروی ناشی از فشار داخلی کانال پلاسما،  $p_{out}(2rd)/m$  معادله نیروی خارجی ناشی از فشار مایع دی‌الکتریک به کانال پلاسما و  $\gamma(2r+2d)/m$  معادله نیروی کشش کانال پلاسما با مایع دی‌الکتریک (خط تماس) می‌باشند.

در این معادله  $r$  شعاع کانال پلاسما،  $\theta$  سرعت رانش ذرات درون کانال پلاسما  $t$  زمان روشنی پالس،  $e$  بار الکتریکی الکترون،  $q$  ذرات باردار در کانال پلاسما،  $p_{in}$  فشار داخلی کانال پلاسما،  $p_{out}$  فشار خارجی مایع دی‌الکتریک به کانال پلاسما،  $d$  گپ میان ابزار و قطعه‌کار،  $\epsilon_0$  مقدار ضریب نفوذ در خلأ کششی،  $m$  جرم کانال پلاسما ( $2 \times 10^{-12} \text{kg}$ )،  $\gamma$  کشش سطحی بین مایع دی‌الکتریک و کانال پلاسما ( $32 \times 10^{-3}$ ) بر حسب  $N/M$  می‌باشند.

نیروهای وارده به کانال پلاسما در صورت وجود یک میدان مغناطیسی خارجی به صورت شکل ۹ خواهد بود.

بر طبق قوانین فیزیک الکتریسیته  $q$  مقدار بار الکتریکی بر حسب کولن از رابطه ۱۲ به دست می‌آید. در این رابطه  $n$  تعداد ذرات باردار آزاد در حال حرکت درون کانال پلاسما و بار الکتریکی الکترون برابر  $e = 1.6 \times 10^{-19}$  می‌باشد.

$$q = ne \quad (12)$$

$\theta$  سرعت رانش ذرات درون کانال پلاسما می‌باشد و  $V_m$  ولتاژ تخلیه در تخلیه الکتریکی بدون میدان مغناطیسی و  $V$  ولتاژ تخلیه با میدان مغناطیسی می‌باشد و از رابطه ۱۳ به دست می‌آید [۲۰]:

معادله حاکم استفاده شده برای انتقال حرارت رسانشی متقارن به قطعه‌کار، ناشی از تک جرعه فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بدون تولید گرمای داخلی در سیستم مختصات استوانه‌ای جهت نمایش نحوه تأثیر گرما و عوامل تعیین کننده آن با استفاده از معادله دیفرانسیل انتقال گرما در هر بار تخلیه کانال پلاسما بدون تولید گرمای داخلی در سیستم مختصات استوانه‌ای از رابطه (۶) بیان می‌گردد [۱۸]:

در برخی از کارهای انجام شده در مورد مدل‌سازی ریاضی تک جرعه فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، محققان توزیع شار حرارت یکنواختی را در کانال پلاسما در نظر گرفته‌اند که به دور از واقعیت می‌باشد. برای شبیه‌سازی دقیق فرایند برداشت ماده در مدل‌سازی فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، به جای منبع حرارتی نقطه‌ای، منبع حرارتی دایره‌ای شکل (شکل ۶) در نظر گرفته شده است [۱۹]:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] \quad (6)$$

$\rho$  چگالی جنس قطعه‌کار،  $T$  گرما،  $t$  زمان،  $k$  ضریب هدایت گرمایی قطعه‌کار،  $r, z$  محورهای مختصات،  $q(r)$  مقدار شار حرارتی وارد شده به قطعه‌کار و  $C_p$  ظرفیت گرمایی ویژه قطعه‌کار می‌باشد. معادلات ۷ و ۸ شرایط مرزی حاکم بر معادله گرما می‌باشد و با فرض عدم نفوذ گرما در عمق قطعه‌کار در نظر گرفته شده است.

$$k \frac{\partial T}{\partial z} \begin{cases} h_f(T - T_0) & r > R \\ q(r) & r < R \end{cases} \quad (7)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

با توجه به توضیح مذکور، حسب فرض بیان شده مبنی بر استوانه‌ای بودن کانال پلاسما توزیع شار حرارتی گوسین در فاصله شعاعی از محور جرعه با تابع نمایی گاوسی که در آن  $q(r)$  مقدار انتشار گرما به روی قطعه‌کار در اثر تخلیه کانال پلاسما،  $r$  شعاع دایره گرمای انتقال یافته به قطعه‌کار،  $V$  ولتاژ تخلیه،  $I$  میزان شدت جریان هنگام تخلیه ستون پلاسما و  $R$  شعاع کانال پلاسما می‌باشد، از رابطه ۹ که در این تحقیق نیز استفاده شده است به دست می‌آید [۱۹]:

$$q(r) = \frac{4.55 F_c V I}{\pi R p^2} \exp \left[ -4.5 \times \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (9)$$

درصد انتقال یافته از کل نیروی انرژی تخلیه الکتریکی به قطعه‌کار  $F_c$  می‌باشد. رابطه ۱۰ بر حسب مقادیر مختلف از ۱۴٪، ۱۸٪، ۳۴٪ و ۵۰٪ نیز بیان شده است. در این تحقیق درصد انتقال انرژی به قطعه‌کار ۵۰٪ در نظر گرفته شده و مقدار شعاع منطقه گرم شده برابر با شعاع قطعه‌کار و  $R$  شعاع کانال پلاسما می‌باشد.



$\Delta P$  شاخصی است برای نشان دادن غیر ایده‌آل بودن کانال پلاسما و از معادله ۱۸ به دست می‌آید [۱۸]:

$$\Delta P = \frac{e^2}{24\pi\epsilon_0\lambda_D} (n_e + n_i) \quad (18)$$

در معادله ۱۸  $\lambda_D$  طول deby می‌باشد (واحدی بر حسب متر کولون که برای بیان لحظه‌های دوقطبی الکتریکی مولکول استفاده می‌شود  $1\text{deby} = 3.336 \times 10^{-30}$ ) و از رابطه ۱۹ به دست می‌آید [۲۴]:

$$\lambda_D = \left( \frac{\epsilon_0 k_B T}{n_e e^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

#### ۴- نتایج و بحث

با انجام مدل‌سازی ریاضی-عددی و آزمایش‌های تجربی، مقادیر به دست آمده برای شعاع کانال پلاسما در سطوح مختلف تغییر و سطوح ثابت پارامترهای آزمایش در دو حالت اعمال میدان مغناطیسی متناوب و بدون اعمال میدان مغناطیسی به‌طور خلاصه در جدول ۶ نشان داده شده‌اند. ملاحظه می‌شود که در روش اعمال میدان مغناطیسی متناوب خارجی با افزایش چگالی میدان مغناطیسی، شعاع کانال پلاسما کاهش می‌یابد. در نتیجه چاله‌های مذاب به یکدیگر نزدیک‌تر شده و از اختلاف اندازه بین آن‌ها نسبت به یکدیگر کاسته و موجب کاهش زبری سطح خواهد شد. از طرف دیگر تمرکز تخلیه کانال پلاسما به کمک میدان مغناطیسی و کاهش شعاع شوک گرمایی منتقل شده به منطقه تخلیه کانال پلاسما باعث خواهد شد. توزیع گرما بر روی سطح قطعه‌کار در منطقه کوچک‌تری ایجاد شده و تأثیر تغییرات متالوگرافی در سطح قطعه‌کار از نظر ترک‌های ریز و تنش‌های سطحی کاهش یابد و در مجموع سطح یکنواخت‌تری به دست آید. البته در این روش نیز با افزایش زمان روشنی پالس، شعاع کانال پلاسما افزایش نسبی خواهد داشت؛ بنابراین حسب نیاز به حجم براده برداری بالا، با افزایش آمپر، شار مغناطیسی میدان و زمان روشنی پالس این شاخص را می‌توان افزایش داد و در صورت نیاز به شاخص‌های مطلوب کیفیت سطح می‌توان پارامترهای شار مغناطیسی را افزایش، آمپر و زمان روشنی پالس را کاهش داد تا هدف مورد نظر تأمین گردد. در هر صورت روش اعمال میدان مغناطیسی نسبت به روش سنتی تخلیه الکتریکی باعث کاهش قطر کانال پلاسما و تمرکز بیشتر در منطقه تخلیه آن می‌گردد که باعث بهبود در همه پارامترهای ماشین‌کاری خواهد شد.

$$\vartheta = \frac{V}{V_m} \times 10^4 \quad (13)$$

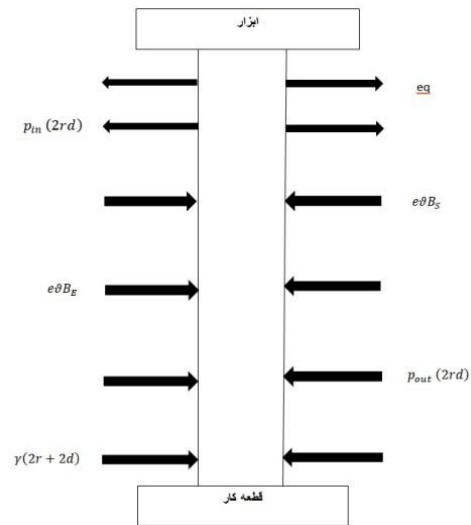


Fig. 9 Forces on the plasma channel

شکل ۹ نیروهای وارد بر کانال پلاسما

میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط حرکت الکترون‌ها درون کانال پلاسما از رابطه ۱۴ به دست می‌آید که  $\mu_0$  مقدار نفوذ شار مغناطیسی به ماده قطعه‌کار می‌باشد [۲۱]:

$$B_s = \frac{\mu_0 i}{2\pi R} \quad (14)$$

$p_{in}$  فشار داخلی کانال پلاسما و از رابطه ۱۵ به دست می‌آید [۱۹]:

$$P_{in} = (n_e + n_i)k_B T - \Delta P \quad (15)$$

$n_i$  تعداد یون‌ها در کانال پلاسما،  $k_B$  مقدار ثابت بولتزمن<sup>۱</sup> و  $T$  مقدار گرمای کانال پلاسما ( $T = 1000^\circ\text{C}$ ) می‌باشند.

$p_{out}$  فشار خارجی مایع دی‌الکتریک به کانال پلاسما به‌علاوه فشار هوا از مفاهیم فیزیک پایه و از رابطه ۱۶ به دست می‌آید.

$$P_{out} = P_0 + \rho gh \quad (16)$$

در این رابطه  $P_0$  فشار هوا،  $\rho$  چگالی مایع دی‌الکتریک،  $g$  جاذبه زمین و  $h$  ارتفاع مایع دی‌الکتریک از نقطه جرقه به بالا می‌باشد.

$n_e$  تعداد الکترون‌ها در کانال پلاسما و از رابطه ۱۷ به دست می‌آید [۲۳]:

$$n_e = \frac{j}{e \left( \frac{k_B T_e}{m_e} \right)^{0.5}} \quad (17)$$

در این معادله  $j$  چگالی جریان،  $T_e$  دمای الکترون،  $m_e$  جرم الکترون می‌باشد.

<sup>1</sup> Boltzman Constant

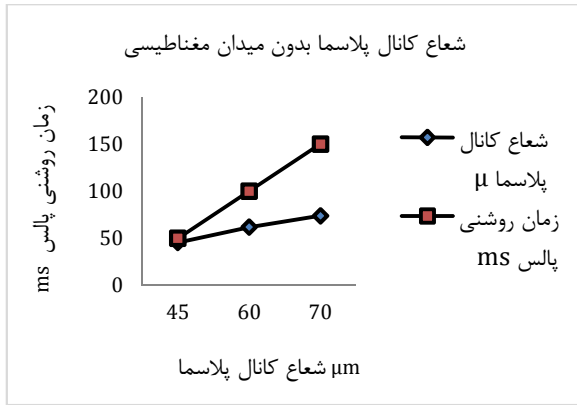


Fig. 11 Plasma channel radius in EDM

شکل ۱۱ شعاع کانال پلاسما در EDM

مقایسه مقادیر شعاع کانال پلاسما در دو روش سنتی تخلیه الکتریکی EDM و روش ترکیب میدان مغناطیسی خارجی با روش سنتی MFEDM در سه زمان روشنی پالس و سه مقدار میدان مغناطیسی مورد آزمایش، در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مقدار شعاع کانال پلاسما بعد از اعمال میدان مغناطیسی متناوب خارجی نسبت به روش سنتی تخلیه الکتریکی در هر سه زمان روشنی پالس کاهش یافته است و با افزایش مقدار میدان مغناطیسی این مقدار بیشتر می‌شود.

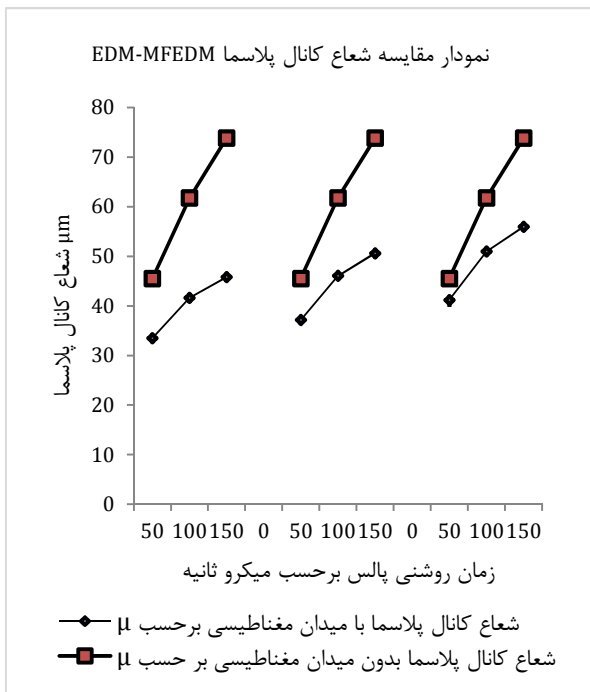


Fig. 12 Comparison of EDM-MFEDM plasma channel radius

شکل ۱۲ مقایسه شعاع کانال پلاسما EDM-MFEDM

جدول ۶ نتایج مدل‌سازی ریاضی-عددی

Table 6 Mathematical-numerical modeling results

| میدان مغناطیسی<br>تسلا<br>T | زمان<br>روشنی<br>پالس<br>ms | جریان<br>دستگاه در<br>آزمایش<br>(A) | شعاع کانال<br>پلاسما با<br>میدان<br>مغناطیسی<br>$\mu\text{m}$ | شعاع کانال<br>پلاسما<br>بدون میدان<br>مغناطیسی<br>$\mu\text{m}$ |
|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|---|---|
| 0                           | 50                          | 25                                  | 0   | 45/527  |
| 0/1118                      | 50                          | 25                                  | 33/524  | 0   |
| 0/236                       | 50                          | 25                                  | 41/632  | 0   |
| 0/356                       | 50                          | 25                                  | 45/795  | 0   |
| 0                           | 100                         | 25                                  | 0   | 61/762  |
| 0/1118                      | 100                         | 25                                  | 37/159  | 0   |
| 0/236                       | 100                         | 25                                  | 46/064  | 0   |
| 0/356                       | 100                         | 25                                  | 50/619  | 0   |
| 0                           | 150                         | 25                                  | 0   | 73/826  |
| 0/1118                      | 150                         | 25                                  | 41/188  | 0   |
| 0/236                       | 150                         | 25                                  | 50/968  | 0   |
| 0/356                       | 150                         | 25                                  | 55/952  | 0   |

میزان تغییر مقدار  $R_a$  نسبت به زمان روشنی پالس و مقدار میدان مغناطیسی در فرایند تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی متناوب خارجی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مشخص می‌شود در زمان روشنی پالس کمتر و اعمال میدان مغناطیسی بیشتر، سطح مطلوب‌تری به دست می‌آید.

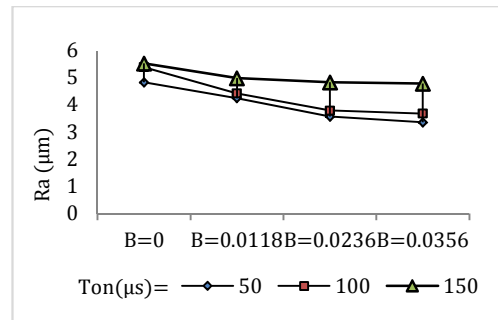


Fig. 10 Comparison of the surface roughness of the EDM process with the MFEDM process

شکل ۱۰ مقایسه‌ای از زبری سطح فرایند EDM با فرایند MFEDM

با توجه به این‌که یکی از عوامل تعیین کننده شعاع کانال پلاسما زمان روشنی پالس می‌باشد، شکل ۱۱ نشان دهنده تغییر شعاع کانال پلاسما در روش سنتی تخلیه الکتریکی در سه زمان مختلف است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، شعاع کانال پلاسما با روند افزایش زمان روشنی پالس، افزایش یافته است و نسبت مستقیم دارد.

## ۵- نتیجه‌گیری

مدل‌سازی شعاع کانال پلاسما در فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، قبلاً مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله با استفاده از آن روش‌ها و قوانین فیزیک، مدل‌سازی شعاع کانال پلاسما برای فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی خارجی انجام یافت. نتایج مدل‌سازی با آزمایش مقایسه شد و نتایج زیر به دست آمد.

۱- نشان داده شد که با روش افزودن میدان مغناطیسی متناوب خارجی MFEDM سطح بهتری از نظر زبری و یکنواختی سطح (مورفولوژی) نسبت به روش سنتی EDM به دست می‌آید و این روش تأثیر مثبتی روی کیفیت سطح ماشین‌کاری شده دارد.

۲- نتایج نشان داد که میزان زبری سطح در زمان‌های کوتاه‌تر روشنی پالس و میزان میدان مغناطیسی بیشتر، سطح بهتری از نظر Ra به دست می‌دهد. در نتیجه این شرایط در زمانی مطلوب خواهد بود که صافی سطح با کیفیت بالا و یا در اصطلاح سطح پرداخت‌کاری مدنظر باشد.

۳- نتایج نشان داد که بالا بردن زمان روشنی پالس و کاهش شدت میدان مغناطیسی متناوب خارجی، موجب افزایش Ra می‌شود که این نکته نشان دهنده سطح خشن‌تر یا افزایش مقدار براده برداری می‌باشد. این شرایط در زمانی که نیاز به حجم براده برداری بالا باشد، مناسب خواهد بود.

۴- اعمال میدان مغناطیسی متناوب خارجی موجب کاهش ۱۰٪ قطر کانال پلاسما گردیده که نشان دهنده تأثیر مثبت میدان مغناطیسی متناوب خارجی بر روی تمرکز ستون پلاسما و تخلیه آن و در نتیجه راندمان بالاتر پارامترهای خروجی ماشین‌کاری می‌باشد.

## ۶- مراجع

- <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05653-8>
- [3] S. Kumar, M. Goud, N.M. Suri, An investigation of magnetic-field-assisted EDM by silicon and boron based dielectric of Inconel 706, *Silicon*, Vol. 13, pp. 4747-4755, 2021.  
<https://doi.org/10.1007/s12633-020-00776-9>
- [4] P. Sivaprakasam, P. Hariharan, G. Elias, Experimental investigations on magnetic field-assisted micro-electric discharge machining of inconel alloy, *International Journal of Ambient Energy*, Vol. 43, No. 1, pp. 2619-2626, 2022.  
<https://doi.org/10.1080/01430750.2020.1758782>
- [5] R. Renjith, L. Paul, Machining characteristics of micro-magnetic field assisted EDM ( $\mu$ -MFAEDM), *Materials Today: Proceedings*, Vol. 27, pp. 2000-2004, 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.047>
- [6] R.N. Anthuvan, V. Krishnaraj, M. Parthiban, Magnetic field-assisted electrical discharge machining of micro-holes on Ti-6Al-4V, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 39, pp. 1688-1694, 2021.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.153>
- [7] P. Sivaprakasam, J. Udaya Prakash, P. Hariharan, Enhancement of material removal rate in magnetic field-assisted micro electric discharge machining of Aluminium Matrix Composites, *International Journal of Ambient Energy*, Vol. 43, No. 1, pp. 584-589, 2022.  
<https://doi.org/10.1080/01430750.2019.1653979>
- [8] H. Beravala, P.M. Pandey, Experimental investigations to evaluate the effect of magnetic field on the performance of air and argon gas assisted EDM processes, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 34, pp. 356-373, 2018.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.06.026>
- [9] A. Kumar, R. Sharma, Multi-response optimization of magnetic field assisted EDM through desirability function using response surface methodology, *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, Vol. 29, No. 1, pp. 19-35, 2020.  
<https://doi.org/10.1515/jmbm-2020-0003>
- [10] H. Beravala, P.M. Pandey, Modelling of material removal rate in the magnetic field and air-assisted electrical discharge machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 234, No. 7, pp. 1286-1297, 2020.  
<https://doi.org/10.1177/0954406219892297>
- [11] W. Ming, Z. Zhang, S. Wang, Y. Zhang, F. Shen, G. Zhang, Comparative study of energy efficiency and environmental impact in magnetic field assisted and conventional electrical discharge machining, *Journal of cleaner production*, Vol. 214, pp. 12-28, 2019.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.231>
- [12] C.C. Feng, L. Li, C.S. Zhang, G.M. Zheng, X. Bai, Z.W. Niu, Surface characteristics and hydrophobicity of Ni-Ti alloy through magnetic mixed electrical discharge machining. *Materials*, Vol. 12, No. 3, pp. 388, 2019.  
<https://doi.org/10.3390/ma12030388>
- [1] S.S. Zabihi, H. Soleimanimehr, S. Etemadi Haghghi, A. Maghsoudpour, Effects of variable magnetic field assisted EDM on MRR and surface integrity of AZ80 magnesium, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 38, No. 7, pp. 836-847, 2023.  
<https://doi.org/10.1080/10426914.2022.2157434>
- [2] W. Ming, F. Shen, Z. Zhang, H. Huang, J. Du, J. Wu, A comparative investigation on magnetic field-assisted EDM of magnetic and non-magnetic materials, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 109, pp. 1103-1116, 2020.

- Mohammadpourfard, A novel approach to plasma channel radius determination and numerical modeling of electrical discharge machining process. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 42, pp. 1-10, 2020.  
<https://doi.org/10.1007/s40430-020-2244-3>
- [19] V. Yadav, V.K. Jain, P.M. Dixit, Thermal stresses due to electrical discharge machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, No. 8, pp. 877-888, 2002.  
[https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00029-9](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00029-9)
- [20] J.A. Rees, Electron drift velocities in air. *Australian Journal of Physics*, Vol. 26, No. 3, pp. 427-432, 1973.  
<https://doi.org/10.1088/0370-1328/85/6/327>
- [21] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fundamentals of physics*, 3th. Edition, John Wiley & Sons, 2013.
- [22] A. Descoedres, *Characterization of electrical discharge machining plasmas*, (No. THESIS). EPFL, 2006.  
<https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-3542>
- [23] K.H. Loo, G.J. Moss, R.C. Tozer, D.A. Stone, M. Jinno, R. Devonshire, A dynamic collisional-radiative model of a low-pressure approach to modeling fluorescent lamps for circuit simulations, *IEEE Trans Power Electron*, Vol. 19, No. 4, pp. 1117-1129, 2004.  
<https://doi.org/10.1109/TPEL.2004.830071>
- [24] F.F.Chen, Introduction to plasma physics, *Springer Science & Business Media*, chapter. 1, pp. 1-14, 2012.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-22309-4>
- [13] N.S. Chityal, A. Bhandare, U.A. Dabade, Experimental investigation on a shield and magnetic assisted EDM of EN24 steel. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 19, pp. 594-598, 2019.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.075>
- [14] S.S. Zabihi, S.E. Haghighi, H. Soleimanimehr, A. Maghsoudpour, Effects of auxiliary magnetic field strength and direction on material removal rate and surface roughness in magnetic field-assisted electrical discharge machining, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 41, pp. 446-452, 2023.  
<https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2023.01.008>
- [15] *Helmholtz coil*, Wikipedia, The Free Encyclopedia, accessed July 13, 2023.
- [16] Q. Liu, Q. Zhang, M. Zhang, F. Yang, Study on the discharge characteristics of single-pulse discharge in micro-EDM, *Micromachines*, Vol. 11, No. 1, pp. 55, 2020.  
<https://doi.org/10.3390/mi11010055>
- [17] S. Gudipudi, V.K. Patel, N. Selvaraj, S. Kanmani Subbu, C.S.P Rao, FEA-Based Electrothermal Modeling of a Die-Sinker Electro Discharge Machining (EDM) of an Aluminum Alloy AA6061, In *Numerical Optimization in Engineering and Sciences, Proceedings of NOIEAS Springer Singapore*. pp. 489-500, 2020.  
[https://doi.org/10.1007/978-981-15-3215-3\\_48](https://doi.org/10.1007/978-981-15-3215-3_48)
- [18] A. Gholipoor, M.R. Shabgard, M.