



بررسی عددی و بهبود عملکرد شستشوی دهانه ماشین کاری در فرایند میکروماشین کاری تخلیه الکتریکی با در نظر گرفتن اثر عمق سوراخ و سیال دی‌الکتریک

احسان طبیبی^۱، مجید قریشی^{۲*} و سجاد بیگمردی^۳

^۱ کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

^۲ استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

^۳ دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

یادداشت تحقیقاتی، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۰۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۲/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۰۴

چکیده

شستشوی دهانه ماشین کاری یکی از عوامل مهم در میکروماشین کاری تخلیه الکتریکی است که نه تنها دهانه ماشین کاری را از براده‌ها پاک‌سازی می‌کند، بلکه سبب افزایش بازده ماشین کاری نیز می‌شود. درک صحیح از جریان دی‌الکتریک کمک شایانی به بهبود عملکرد شستشوی دهانه ماشین کاری می‌کند. در این پژوهش، اثر پارامترهای عمق سوراخ و سیال دی‌الکتریک بر جریان شستشوی دهانه در میکروماشین کاری تخلیه الکتریکی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور پارامتر طراحی عمق در سه سطح ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر در کنار سه دی‌الکتریک آب دیونیزه، نفت سفید و روغن EDM-30 مورد مطالعه قرار گرفته است. جریان دی‌الکتریک درون دهانه ماشین کاری به کمک دینامیک سیالات محاسباتی تجزیه و تحلیل شده و معادلات حاکم نیز با استفاده از روش حجم محدود گسسته‌سازی شده است. برای اعتبارسنجی، مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی و عددی تحقیقات پیشین صورت گرفته است. حداکثر اختلاف بین نتایج این شبیه‌سازی با نتایج تجربی ۱۰/۸۱ درصد است که از تطابق خوب این نتایج با نتایج تحقیقات پیشین حکایت دارد. با بررسی نتایج عددی مشاهده می‌شود که با کاهش عمق سوراخ و استفاده از آب دیونیزه به عنوان سیال دی‌الکتریک، سرعت جریان درون دهانه ماشین کاری افزایش یافته و ناحیه رکود تشکیل شده درون سوراخ کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: میکروماشین کاری تخلیه الکتریکی؛ دی‌الکتریک؛ شستشوی دهانه ماشین کاری؛ دینامیک سیالات محاسباتی.

Numerical Investigation and Enhancement of Flushing Performance in the Micro-Electro Discharge Machining by Considering the Hole Depth and Dielectric Fluid

E. Tabibi¹, M. Ghoreishi^{2,*}, S. Beigmoradi³

¹ M.Sc., Mech. Eng., K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

² Prof., Mech. Eng., K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

³ Ph.D. Student, Mech. Eng., K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

Abstract

flushing of machining gap is one of the most crucial issues in the micro-EDM that not only removes debris from the machining gap, but it also increases the machining efficiency. Identification of dielectric flow pattern provides a good perspective for its user to enhance the flushing performance. In this paper, the effects of the hole depth and dielectric fluid parameters on the flushing in micro-EDM are studied on the flushing in micro-EDM. Three different levels of 5, 10 and 15 mm for depth are considered, while deionized water, kerosene, and EDM-30 oil are chosen as dielectrics. To find out the effect of these parameters on flushing, computational fluid dynamics (CFD) based on boundary volume method is applied to solve the fluid flow in the flushing gap. To verify the numerical simulation model, a comparison was conducted between the results obtained in this work and the experimental and numerical results of the available literatures. The maximum difference between the results of this work and the experimental results is about 10.81%, which indicates that these results are in good agreement with the results of the previous research. The simulation was in a close agreement with them. By investigating the numerical results, it is observed that decreasing the depth of the hole and using deionized water as dielectric fluid increase the velocity of the flow in the flushing gap and reduce the size of the stagnation region in the hole.

Keywords: Micro-EDM; Dielectric; Flushing; Computational Fluid Dynamics.

۱- مقدمه

میکروماشین کاری تخلیه الکتریکی^۱ برای تولید میکروسوراخ‌ها در صنایع مختلفی از جمله خودروسازی، هوافضا، نساجی و پزشکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. میکروماشین کاری تخلیه الکتریکی زیرمجموعه و مقیاس کوچکی از ماشین کاری تخلیه الکتریکی است که برای تولید میکروقطعه‌ها استفاده می‌شود. در این روش همانند ماشین کاری تخلیه الکتریکی معمولی، براده برداری با ایجاد جرقه^۲ بین الکترود و قطعه کار صورت می‌گیرد. تفاوت اصلی میکروماشین کاری تخلیه الکتریکی و ماشین کاری تخلیه الکتریکی معمولی در نوع منبع تغذیه، دقت محورهای X، Y و Z و ابعاد الکترود است [۱]. شستشوی^۳ نامناسب و باقی ماندن براده‌ها^۴ در دهانه^۵ ماشین کاری اثرات نامطلوبی از جمله اتصال کوتاه، وقوع جرقه‌های ناخواسته و افزایش زبری سطح قطعه کار و الکترود دارد [۲].

کبیریا و همکارانش [۳] پژوهشی در زمینه استفاده از دی‌الکتریک‌های مختلف در میکروماشین کاری تخلیه الکتریکی انجام دادند. آن‌ها در بررسی‌های تجربی به این نتیجه رسیدند که نرخ براده برداری از قطعه کار در حضور دی‌الکتریک آب دیونیزه نسبت به نفت سفید بیشتر است. در ضمن لایه کربنی که به سبب استفاده از نفت سفید روی ابزار تشکیل می‌شود، نرخ سایش ابزار را به طور قابل توجهی نسبت به آب دیونیزه کاهش می‌دهد. کونیدا و کیتامورا [۴] نیز دهانه ماشین کاری را در حضور دو دی‌الکتریک آب و روغن مشاهده کردند. آن‌ها دریافتند که هنگام استفاده از آب به عنوان دی‌الکتریک می‌توان به ماشین کاری پایدارتر و نرخ براده برداری بیشتر از روغن دست یافت. بلوتی و همکاران [۵]، با میکروماشین کاری تخلیه الکتریکی میکرو سوراخ‌هایی را در آلایژ Ti-6Al-4V ایجاد کردند. در این روش، شستشوی دهانه ماشین کاری از طریق الکترود لوله‌ای برنجی و با دی‌الکتریک روغن هیدروکربنی صورت گرفته است؛ همچنین پارامترهای بهینه برای دستیابی به صافی سطح و راندمان

مناسب توسط طرح تاگوچی تعیین شده است. اثر دی‌الکتریک‌های مختلف روی سطح سوراخ کاری شده در آلایژ نیکل توسط لی و همکارانش [۶]، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بیانگر آن است که دی‌الکتریک نفت سفید، لایه ذوب مجدد نازک‌تری (۴/۸ میکرومتر) نسبت به سایر دی‌الکتریک‌ها ایجاد می‌کند؛ اما به سبب تجزیه گرمایی نفت سفید، سرعت ماشین کاری آرام است. رجبی نسب و همکارانش [۷]، اثر جنس الکترود و مقدار جریان سیال دی‌الکتریک را بر عملکرد ماشین کاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاکی از آن است که افزایش نرخ جریان سیال دی‌الکتریک بدلیل شستشوی بهتر براده‌ها از دهانه ماشین کاری و کاهش احتمال پدیده آرک، نرخ براده برداری را افزایش می‌دهد، اما در عین حال سبب افزایش سایش الکترود و زبری سطح قطعه کار می‌شود. آن‌ها در پژوهشی دیگر به بررسی اثر نوع و فشار گاز بر نرخ براده برداری، سایش ابزار و زبری سطح فولاد AISI4140 در ماشین کاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک پرداختند [۸].

دانگ و همکاران [۹] به سوراخ کاری آلایژ مس بریلیم به روش تخلیه الکتریکی پرداختند. آن‌ها اذعان داشتند که دی‌الکتریک آب دیونیزه نسبت به نفت سفید برای تولید سوراخ‌هایی با نسبت ابعادی بالا مناسب است؛ همچنین دریافتند که با افزایش عمق سوراخ، زمان ماشین کاری و سایش الکترود افزایش می‌یابد. باصری و صادقیان [۱۰] با افزودن نانو پودر TiO₂ به سیال دی‌الکتریک و اعمال میدان مغناطیسی به این نتیجه رسیدند که افزودن پودر دهانه ماشین کاری را بزرگ‌تر می‌کند و موجب می‌شود، شرایط شستشوی براده‌ها بهبود یابد. بدین ترتیب جرقه‌های مطلوب بیشتر شده و به دنبال آن نرخ براده برداری نیز افزایش می‌یابد. اعمال میدان مغناطیسی نیز خروج براده‌ها از دهانه ماشین کاری را تسهیل کرده و سبب پایداری فرایند می‌شود. سطوح سوراخ‌های ایجاد شده درون مواد مرکب زمینه فلزی توسط نارایانان و همکارانش [۱۱]، مورد بررسی قرار گرفته است. آن‌ها آزمایش‌هایی با چهار پارامتر ورودی جریان، ولتاژ دهانه ماشین کاری، عمق سوراخ و مدت زمان پالس طراحی نمودند و زبری سطوح را با روش تداخل سنجی برای تمام سوراخ‌ها اندازه‌گیری کردند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش عمق سوراخ زبری سطح نیز افزایش

¹ Micro Electro Discharge Machining (Micro-EDM)

² Spark

³ Flushing

⁴ Debris

⁵ Gap

می‌یابد. جباری‌پور و همکارانش [۱۲]، اثرات جنس الکتروود روی خواص ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی ترکیب بین فلزی γ -TiAl و تأثیر سیال دی‌الکتریک (نفت سفید) را در تشکیل انواع فازها و ترکیبات شیمیایی مختلف روی سطح قطعه کار مورد بررسی قرار دادند. عبدالله و همکارانش [۱۳]، با اعمال ارتعاش فراصوتی به الکتروود در فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی دریافتند که این ارتعاش باعث ایجاد کاویتاسیون می‌شود. آن‌ها نتیجه گرفتند که کاویتاسیون ایجاد شده توسط ارتعاش فراصوتی به عنوان یک پمپ عمل کرده و سیال دی‌الکتریک تازه را به دهانه ماشین‌کاری هدایت می‌کند. بدین ترتیب شرایط شستشو و خروج براده‌ها از دهانه بهتر شده و جرقه‌های ناخواسته نیز کاهش می‌یابد. پژوهشگران متعددی تاکنون اذعان داشته‌اند که استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی برای بررسی انواع پدیده‌ها در مقایسه با روش‌های تجربی و آزمایشگاهی بسیار کم هزینه است و در عین حال محدودیت‌ها و پیچیدگی‌های روش‌های تجربی را نیز تا حد زیادی برطرف می‌سازد؛ همچنین در این روش بدست آوردن اطلاعات و بحث و تحلیل پیرامون آن‌ها سریع‌تر صورت می‌گیرد [۱۴ و ۱۵]. صادقی و نوحی [۱۶] با شبیه‌سازی حرارتی فرایند میکروماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سوپر آلیاژ اینکونل ۶۱۷ نحوه توزیع دما و عمق حفره ایجاد شده را پیش‌بینی کردند و در نهایت برای بهینه‌سازی عملیات میکروماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، انرژی وارد شده به قطعه کار جهت دست یافتن به بهترین عمق حفره را در سه سطح انرژی بدست آوردند. ژانگ و همکاران [۱۷]، فرایند خروج براده‌ها در سوراخ‌کاری قطعه‌کار TC4 را شبیه‌سازی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که در سوراخ‌های با عمق زیاد، براده‌های زیادی در دهانه باقی می‌مانند که جرقه‌های ثانویه ایجاد کرده و شرایط ماشین‌کاری را نامطلوب می‌سازند. عدم خروج به موقع براده‌ها از سوراخ‌ها موجب شیب‌دار شدن و سایش سر الکتروود می‌شود. تانجیلول و همکارانش [۱۸]، از یک سیستم شستشوی مکشی برای خروج براده‌ها از دهانه ماشین‌کاری استفاده کردند و یک روش جدید شبیه‌سازی برای این فرایند ارائه دادند. بهینه‌سازی هندسه و جنس الکتروود مرتعش در میکروماشین‌کاری تخلیه الکتریکی توسط بیگمردی و همکاران [۱۹] انجام گرفت. آن‌ها شبیه‌سازی را با

الکتروودهای دایره‌ای، مربعی و مثلثی و جنس‌های مس، گرافیت و مس - تنگستن انجام دادند. مناسب‌ترین الکتروود برای ماشین‌کاری، الکتروود مثلثی با جنس مس - تنگستن گزارش شده است. فنگ و همکاران [۲۰]، اثر سرعت چرخش الکتروود را روی نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار و مخروطی شدن سوراخ بررسی کردند. در این پژوهش سرعت چرخش الکتروود از ۱۰۰۰ تا ۶۰۰۰ دور بر دقیقه متغیر است. آن‌ها در شبیه‌سازی فرایند از مدل آشفتگی K- ϵ بهره بردند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سرعت چرخشی الکتروود، نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار و مخروطی شدن سطح بهبود می‌یابد. ضمناً اثر افزایش سرعت چرخشی الکتروود در سوراخ‌های عمیق بیشتر است. کلیوف و همکارانش [۲۱]، مسیر حرکت سیال دی‌الکتریک را با روش تصویربرداری سریع مشاهده کردند و بردارهای سرعت جریان و جابجایی حباب‌ها را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. تأثیر قطر الکتروود، دهانه ماشین‌کاری، شکل کانال شستشو، طول الکتروود و عمق سوراخ روی جریان دی‌الکتریک در پژوهش و گنر و همکاران [۲۲] مورد مطالعه قرار گرفته است. آن‌ها در شبیه‌سازی فرایند از مدل آشفتگی K- ϵ استفاده کردند و دبی دی‌الکتریک را به صورت تجربی و عددی محاسبه نمودند. با توجه به نتایج می‌توان دریافت که بازده شستشوی دهانه ماشین‌کاری نقش قابل توجهی روی ضخامت لایه ذوب مجدد دارد و این مسئله روی کیفیت قطعه‌کار مؤثر است.

با توجه به عیوب ذکر شده ناشی از عدم شستشوی مناسب دهانه ماشین‌کاری بهبود این فرایند تأثیر مستقیمی بر زمان، هزینه و کیفیت ماشین‌کاری دارد. در اکثر فعالیت‌های انجام گرفته از روش‌های تجربی جهت بررسی اثر پارامترهای ماشین‌کاری بر بهبود فرایند شستشوی دهانه ماشین‌کاری استفاده شده است که این روش‌ها هزینه‌های سنگینی را در بر خواهند داشت. در این پژوهش از روش عددی حجم محدود جهت شبیه‌سازی سه بعدی فرایند شستشوی دهانه ماشین‌کاری بهره گرفته شده است که مطالعات کمی پیرامون استفاده از آن جهت این فرایند انجام گرفته است. در این پژوهش اثر همزمان دو پارامتر عمق سوراخ‌کاری و نوع دی‌الکتریک بر بهبود فرایند شستشوی دهانه ماشین‌کاری بررسی شده که تاکنون مورد توجه سایر محققان قرار نگرفته است. مزیت روش عددی در این فرایند

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (۴)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (۵)$$

۳- شبیه‌سازی عددی

در این مقاله فرضیاتی برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است که عبارت‌اند از:

۱- هندسه مسئله به صورت سه بعدی شبیه‌سازی شده است.

۲- فاز سیال دی‌الکتریک، مایع و تراکم ناپذیر است.

۳- از اثر حرارت ناشی از جرقه بین الکترود و قطعه کار صرف نظر شده است.

۳-۱- مشخصات هندسی

در این پژوهش از یک الکترود استوانه‌ای تک کانال برای ایجاد میکروسوراخ در قطعه کار استفاده شده است. قطر خارجی و داخلی الکترود مورد استفاده به ترتیب ۵۰۰ و ۲۰۰ میکرومتر بوده و طول آن ۱۰۰ میلی‌متر است. شایان ذکر است، به منظور مقایسه بین نتایج پژوهش حاضر و نتایج تجربی و عددی مرجع [۲۲]، ابعاد الکترود همانند ابعاد الکترود مورد استفاده در مقاله مرجع یاد شده انتخاب گردیده است. در ضمن سه سوراخ به قطر ۶۰۰ میکرومتر و عمق‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر در قطعه کار ایجاد شده است. هندسه مسئله در شکل ۱ نمایش داده شده است.

۳-۲- شبکه‌بندی هندسه و آزمون استقلال از شبکه

دامنه محاسباتی مسئله شامل کانال ورودی الکترود و سوراخ است. روی دیواره کانال الکترود و سوراخ از شبکه‌بندی ساختار یافته^۱ با شبکه‌های چهار ضلعی^۱ و در سایر نواحی

کاهش قابل توجه هزینه‌های ماشین کاری در کنار فراهم آوردن دیدگاه دقیقی از اثر هر کدام از این پارامترها در بهبود فرایند ماشین کاری است.

۲- تئوری زمینه

۲-۱- معادلات جریان

معادلات حاکم بر حرکت سیال شامل معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی هستند. با حل این معادلات می‌توان سرعت، فشار و دیگر متغیرها را به دست آورد. معادله پیوستگی برای جریان تراکم ناپذیر و آشفته به صورت معادله (۱) است [۲۳].

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = 0 \quad (۱)$$

معادله مومنتوم برای جریان آشفته به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود [۲۳].

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = \bar{B}_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} - \overline{\rho u'_i u'_j} \right) \quad (۲)$$

معادله انرژی نیز برای جریان آشفته به صورت رابطه (۳) بیان می‌شود [۲۳].

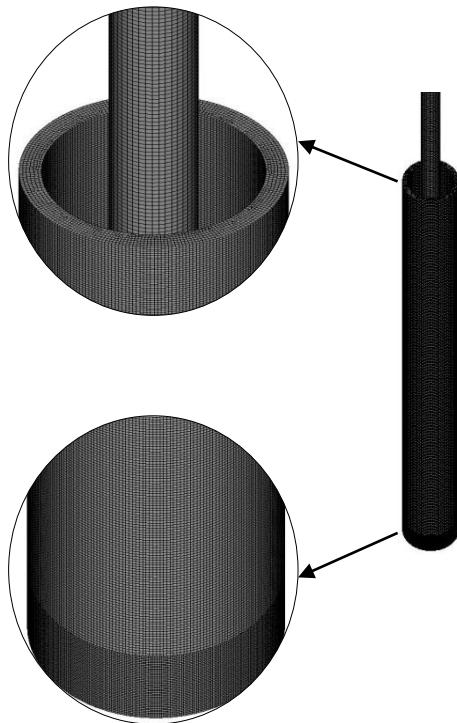
$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{u'_i u'_j}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\bar{u}_i \frac{u'_i u'_j}{2} \right) = - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[u'_i \left(\frac{p'}{\rho} + \frac{u'_i u'_j}{2} \right) \right] + u'_i u'_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_i} \left[u'_j \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) \right] - \nu \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u'_i}{\partial x_i} \quad (۳)$$

در روابط فوق، u بیانگر مؤلفه سرعت، ρ چگالی، B نیروی حجمی، P فشار، μ ویسکوزیته دینامیکی و ν ویسکوزیته سینماتیکی است.

^۱ Structured Mesh

جدول ۱- استقلال از شبکه

شماره	تعداد سلول	دبی حجمی خروجی از دهانه ماشین کاری (ml/sec)	درصد اختلاف نتایج شبکه‌ها
۱	۵۶۷۹۲۱	۰/۳۲۸۶	۱/۰۴
۲	۱۰۲۴۶۱۲	۰/۳۲۵۲	۰/۵۲
۳	۱۵۱۷۸۰۸	۰/۳۲۳۵	۰/۲۱
۴	۱۹۱۷۲۰۰	۰/۳۲۲۸	-

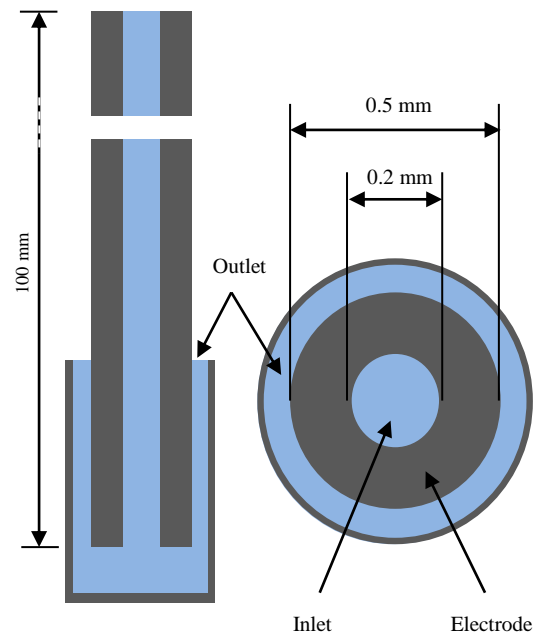


شکل ۲- شبکه‌بندی دامنه حل

۳-۳- شرایط مرزی

شرایط مرزی، متغیرهای حرارتی و جریان سیال را روی مرزهای دامنه محاسباتی مشخص می‌کند؛ بنابراین تعریف مناسب آن از اهمیت زیادی برخوردار است. در این پژوهش از شرط مرزی فشار ورودی و فشار خروجی استفاده شده است. فشار ورودی برابر با فشار شستشوی دهانه ماشین کاری است که ۲ مگاپاسکال در نظر گرفته شده و فشار خروجی نیز صفر

دامنه حل از ترکیبی از شبکه‌های شش وجهی^۲ و منشوری^۳ استفاده شده و سلول‌های درون دهانه کناری و پایینی ریزتر ایجاد شده است. برای بررسی استقلال نتایج حل عددی از اندازه شبکه لازم است که اثر اندازه سلول‌ها بر یکی از پارامترهای مسئله ارزیابی گردد. بدین منظور چهار شبکه با اندازه‌های متفاوت برای هندسه مورد نظر تولید شده و دبی خروجی از دهانه ماشین کاری برای هر یک از شبکه‌ها محاسبه شده است. در جدول ۱ دبی حاصل از هر یک از شبکه‌ها و درصد اختلاف نتایج شبکه‌ها گزارش شده است. همان‌طور که پیداست، با تغییر تعداد سلول‌های شبکه محاسباتی از ۱۵۱۷۸۰۸ به ۱۹۱۷۲۰۰ تفاوت قابل ملاحظه‌ای در دبی خروجی از دهانه ماشین کاری مشاهده نمی‌شود. بدین ترتیب شبکه شماره ۳ به عنوان شبکه مناسب انتخاب می‌شود. در شکل ۲ نمایی از شبکه‌بندی هندسه مورد نظر نشان داده شده است.



شکل ۱- هندسه مسئله

¹ Quadrilateral

² Hexahedral

³ Prism

کانال و دو کانال از جنس مس و دی الکتریک آب دیونیزه به ماشین کاری تخلیه الکتریکی قطعه کار اینکونل ۷۱۸ پرداختند و دبی خروجی از دهانه ماشین کاری را توسط روش های تجربی و عددی به دست آوردند. سپس نرخ براده برداری، سایش ابزار و ضخامت لایه ذوب مجدد را محاسبه کردند. آن ها برای بررسی جریان سیال دی الکتریک درون دهانه ماشین کاری از دوربین پر سرعت^۴ فانتوم ۷۱۲.۱ با نرخ فریم^۵ ۳۰۰۰۰ فریم بر ثانیه استفاده کردند. به منظور ارزیابی نتایج، دبی های حجمی خروجی حاصل از مقاله مرجع [۲۲] و تحقیق حاضر در جدول ۳ ارائه شده است.

شکل ۳ نمودار اعتبارسنجی را نشان می دهد. همان طور که از جدول ۳ و شکل ۳ پیداست، دبی خروجی به دست آمده از تحقیق حاضر با نتایج وگنر و همکارانش [۲۲] مطابقت قابل قبولی دارد. حداکثر اختلاف بین نتایج شبیه سازی عددی با آزمایش های تجربی برابر با ۱۰/۸۱ درصد برای عمق ۳۰۰ میلی متر است که از نقطه نظر مهندسی قابل قبول بوده و در مجموع میانگین اختلاف روش عددی و تجربی در حدود ۶ درصد برآورد شده است.

۴- نتایج

پس از آنکه از صحت روش شبیه سازی اطمینان حاصل شد، در این بخش اثر پارامترهای عمق سوراخ و سیال دی الکتریک روی سرعت جریان دی الکتریک درون دهانه ماشین کاری و ناحیه رکود ایجاد شده درون سوراخ مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

جدول ۳- دبی های خروجی از دهانه ماشین کاری

طول الکتروود (mm)	۳۰۰	۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰	
دبی حجمی	۰/۳۷	-	-	۰/۷۸	نتایج تجربی
خروجی از دهانه ماشین کاری (ml/sec)	۰/۳۵	۰/۴۹	۰/۶۰	۰/۸۱	نتایج شبیه سازی وگنر و همکاران
نتایج شبیه سازی تحقیق حاضر	۰/۴۱	۰/۵۴	۰/۶۲	۰/۷۹	

است. شرط عدم لغزش^۱ نیز روی دیواره های سوراخ و دیواره های الکتروود اعمال گردیده است. دی الکتریک های مورد استفاده در این تحلیل، آب دیونیزه، نفت سفید و روغن EDM-30 است که اطلاعات مربوط به آن در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- مشخصات سیال دی الکتریک [۲۲، ۲۵ و ۲۶]

سیال دی الکتریک	چگالی (kg/m ³)	ویسکوزیته دینامیکی (kg/m-s)
آب دیونیزه	۹۹۷	۰/۰۰۰۸۹
نفت سفید	۸۰۰	۰/۰۰۲۱
روغن EDM-30	۸۲۶	۰/۰۰۲۹

۳-۴- روش حل جریان

در این پژوهش، برای اصلاح فشار و سرعت از الگوریتم سیمپل^۲ استفاده می شود. ضرایب زیر تخفیف^۳ به کار برده شده برای فشار، مومنتوم و اتلاف آشفتگی به ترتیب ۰/۳، ۰/۷ و ۰/۸ است. معیار همگرایی برای حل معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی^۶ ۱۰^{-۶} در نظر گرفته شده است.

۳-۵- اعتبارسنجی

برای اطمینان از صحت نتایج شبیه سازی عددی لازم است که نتایج عددی با نتایج تجربی و یا عددی صحیح مقایسه شوند تا اعتبار روش عددی و مدل آشفتگی استفاده شده تأیید گردد. لازم به ذکر است که تاکنون پژوهشی صورت نگرفته است که در آن به طور همزمان به بررسی عمق سوراخ و نوع دی الکتریک پرداخته شده باشد؛ بنابراین برای اعتبارسنجی از تحقیقاتی استفاده شده که نزدیک به این پژوهش هستند تا صحت روش شبیه سازی عددی برای هندسه مشابه تأیید شود و بتوان با اطمینان نسبت به نتایج این تحقیق برای مسئله اصلی قضاوت نمود. در این مرحله، پژوهش وگنر و همکارانش [۲۲] مورد توجه قرار گرفته است. آن ها با الکتروودهای تک

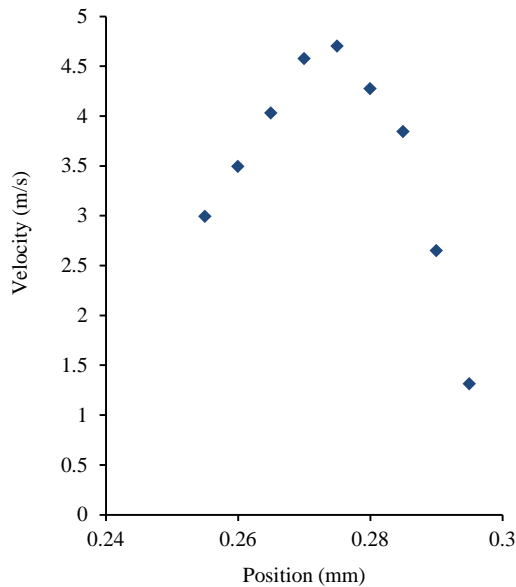
¹ No Slip

² SIMPLE

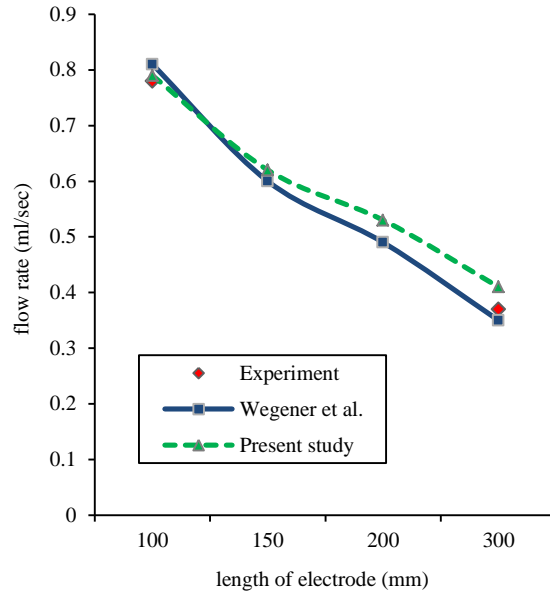
³ Under Relaxation Factor

⁴ High Speed Camera

⁵ Frame



شکل ۴- سرعت خروجی آب دیونیزه از سوراخ به عمق ۵ میلی‌متر



شکل ۳- نمودار اعتبارسنجی

۴-۱- سرعت جریان درون دهانه ماشین کاری

به منظور بررسی اثر عمق سوراخ و سیال دی‌الکتریک روی سرعت خروجی از دهانه ماشین کاری سرعت نقاط مختلف روی دهانه خروجی مورد ارزیابی قرار گرفته و در شکل ۴ آورده شده است. همان‌طور که از شکل پیداست، سرعت در مرکز دهانه خروجی از سایر نقاط بیشتر است و با نزدیک شدن به دیواره‌ها مقدار سرعت کاهش می‌یابد که این امر نتیجه اصطکاک سطح دیواره‌ها و نیروی ویسکوز لایه مرزی است. بدین ترتیب سرعت نقطه مرکزی دهانه خروجی در حالت‌های مختلف ماشین کاری استخراج شده و در جدول ۴ ارائه گردیده است.

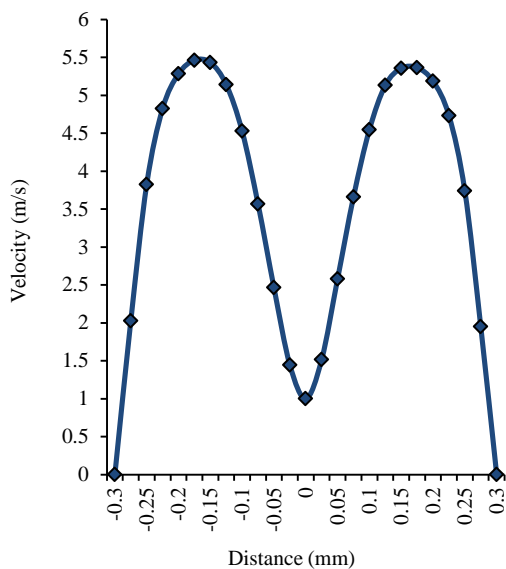
نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عمق سوراخ، سرعت خروجی از دهانه ماشین کاری کاهش می‌یابد. در واقع با کاهش سرعت دی‌الکتریک، سرعت خروج براده‌ها از دهانه ماشین کاری نیز کاهش می‌یابد. عدم خروج به موقع براده‌ها و تجمع آن‌ها درون دهانه سبب اتصال کوتاه گشته و فرایند ماشین کاری را ناپایدار می‌کند؛ همچنین در سوراخ‌های با عمق زیاد، سیال دی‌الکتریک تازه نمی‌تواند وارد دهانه ماشین کاری شود؛ بنابراین فرایند شستشوی دهانه ماشین کاری با مشکل مواجه می‌شود. در آزمایش‌های تجربی یو و همکارانش [۲] نیز مشاهده شده که با عمیق‌تر شدن

جدول ۴- سرعت خروجی دی‌الکتریک از دهانه ماشین کاری

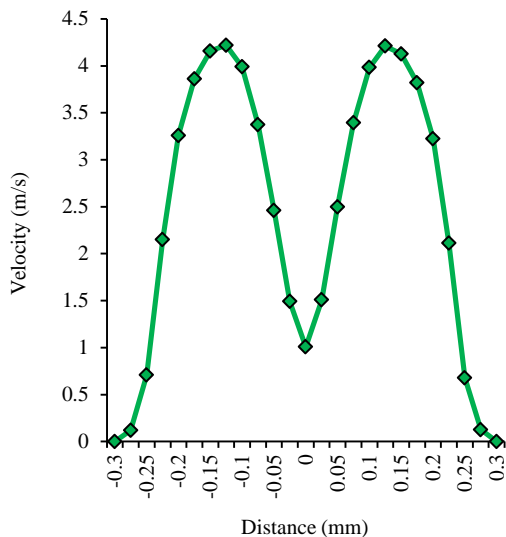
سرعت خروجی از دهانه ماشین کاری (m/s)	عمق سوراخ (mm)	دی‌الکتریک
۴/۸۸۸۰	۵	آب دیونیزه
۴/۷۰۲۵	۱۰	آب دیونیزه
۴/۵۸۸۸	۱۵	آب دیونیزه
۳/۷۱۷۹	۵	نفت سفید
۳/۵۹۵۶	۱۰	نفت سفید
۳/۴۳۸۲	۱۵	نفت سفید
۳/۱۳۳۸	۵	روغن EDM-30
۲/۹۸۹۴	۱۰	روغن EDM-30
۲/۸۲۲۲	۱۵	روغن EDM-30

سوراخ‌ها، خروج براده‌ها از دهانه ماشین کاری سخت‌تر شده و در نتیجه نرخ براده برداری کاهش و نرخ سایش ابزار افزایش می‌یابد.

شکل ۷ بردارهای سرعت جریان دی الکتریک آب دیونیزه درون دهانه زیرین سوراخ به عمق ۵ میلی متر را نشان می دهد. تشکیل جریان های گردابی^۱ هنگام ماشین کاری تخلیه الکتریکی در این شکل کاملاً مشخص است. وجود جریان های گردابی درون دهانه، توانایی سیال دی الکتریک را برای جدا کردن و خروج براده های حاصل از فرایند سوراخ کاری افزایش می دهد.



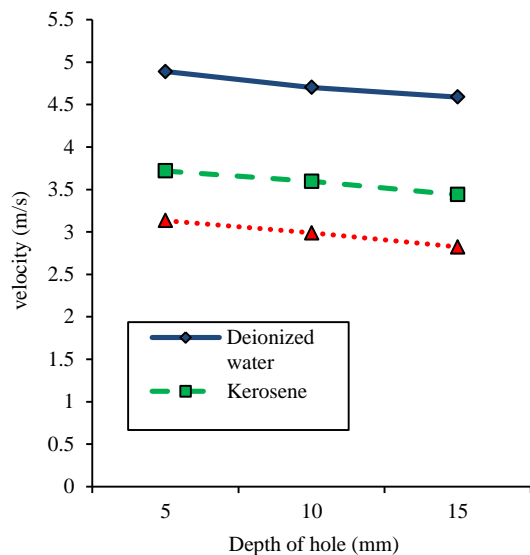
(الف)



(ب)

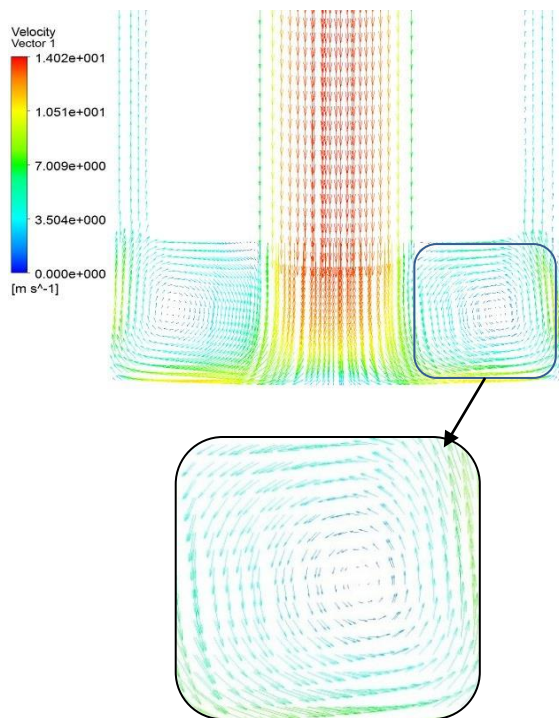
شکل ۵ سرعت خروجی از دهانه ماشین کاری را بر اساس عمق سوراخ و دی الکتریک های مختلف نشان می دهد. با مشاهده شکل ۵ به وضوح پیداست که سرعت خروجی دی الکتریک آب دیونیزه نسبت به دی الکتریک های نفت سفید و روغن EDM-30 بیشتر است. دلیل این موضوع ویسکوزیته کمتر آب دیونیزه نسبت به دو دی الکتریک دیگر است؛ بنابراین آب دیونیزه شرایط بهتری را برای خروج براده ها از دهانه ماشین کاری فراهم می کند. همانند آنچه یان و همکارانش [۲۷] در نتایج آزمایش های خود گزارش کردند، می توان عنوان داشت که با استفاده از آب دیونیزه به عنوان دی الکتریک، احتمال وقوع پدیده آرک کاهش یافته و نرخ براده برداری از قطعه کار بیشتر می شود.

در شکل ۶ توزیع سرعت جریان دی الکتریک هنگام ماشین کاری سوراخ با عمق ۵ میلی متر در نزدیکی سطح قطعه کار آورده شده است. سرعت دی الکتریک در فواصلی از سطح قطعه کار که مقابل دیواره های الکتروود قرار دارد، بیشترین مقدار خود را داراست. با توجه به اینکه در ماشین کاری تخلیه الکتریکی، جرقه بین الکتروود و قطعه کار برقرار می شود، این موضوع می تواند تأثیر مثبتی در فرایند شستشوی دهانه ماشین کاری داشته باشد.



شکل ۵- سرعت خروجی از دهانه ماشین کاری بر اساس عمق سوراخ و دی الکتریک های مختلف

¹ Vortex

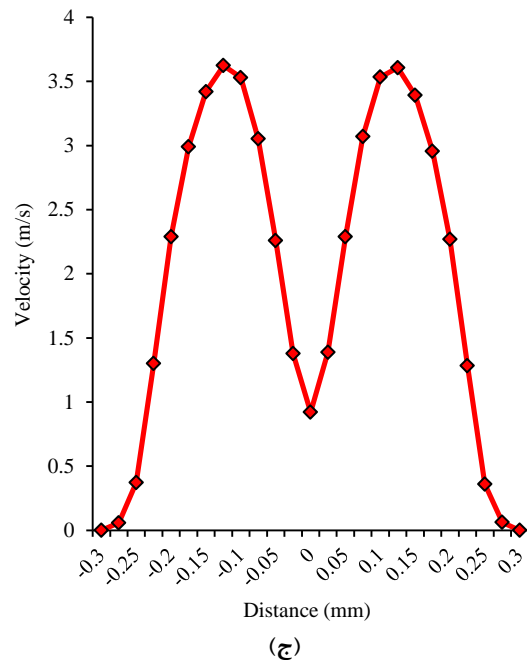


شکل ۷- بردارهای سرعت آب دیونیزه درون سوراخ به عمق ۵ میلی‌متر

خطوط نقطه چین نشان داده شده است، همان نواحی رکود هستند. به دلیل سرعت پایین جریان دی‌الکتريک در این نواحی تعدادی از براده‌ها همچنان در این محل‌ها باقی می‌مانند و فرایند ماشین‌کاری را ناپایدار می‌سازند. مشاهدات حاکی از آن است که ناحیه رکود در تمام حالت‌های ماشین‌کاری ایجاد می‌شود. با این حال با مقایسه کانتورهای شکل ۸ می‌توان دریافت که در سوراخ با عمق ۵ میلی‌متر و در حضور دی‌الکتريک آب دیونیزه ناحیه رکود کوچک‌تری نسبت به سایر حالت‌های ماشین‌کاری تشکیل می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی شستشوی دهانه ماشین‌کاری در فرایند میکروماشین‌کاری تخلیه الکتریکی پرداخته شده است. جریان دی‌الکتريک درون سوراخ ایجاد شده روی قطعه‌کار با نرم‌افزار انسیس فلونت شبیه‌سازی شده و اثر پارامترهای عمق سوراخ و سیال دی‌الکتريک روی جریان شستشوی



شکل ۶- توزیع سرعت جریان دی‌الکتريک در نزدیکی سطح قطعه کار؛ الف) آب دیونیزه، ب) نفت سفید و ج) روغن EDM-30

۴-۲- ناحیه رکود

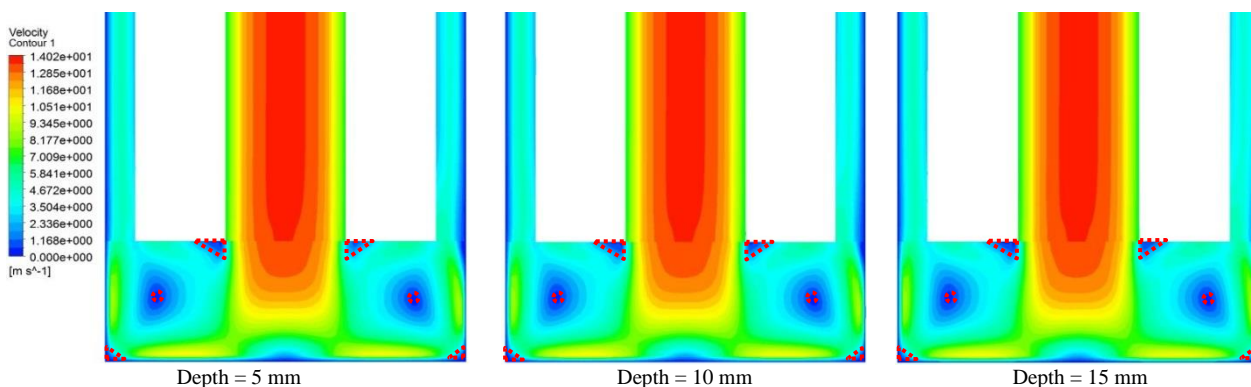
ناحیه رکود^۱ به ناحیه‌ای از دهانه ماشین‌کاری اطلاق می‌شود که سرعت جریان در آن نزدیک به صفر است [۲۸]. کانتورهای سرعت^۲ حالت‌های مختلف ماشین‌کاری برای بررسی اثر عمق سوراخ و سیال دی‌الکتريک روی ناحیه رکود در شکل ۸ ارائه شده است. وجود ناحیه رکود اثر نامطلوبی در فرایند شستشوی دهانه ماشین‌کاری دارد؛ زیرا جریان سیال دی‌الکتريک نمی‌تواند در این نواحی براده‌های حاصل از ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی را از دهانه خارج کند. ناحیه رکود اغلب در گوشه‌های دهانه ماشین‌کاری و اطراف الکترود ایجاد می‌شود و سبب تجمع براده‌ها در این نواحی می‌گردد. باقی ماندن براده‌ها و وقوع جرقه‌های ناخواسته، مخروطی شدن سوراخ‌ها و سایش الکترود را به دنبال دارد.

شکل ۸ نواحی رکود ایجاد شده درون دهانه ماشین‌کاری را به وضوح نشان می‌دهد. مناطق به رنگ آبی تیره که با

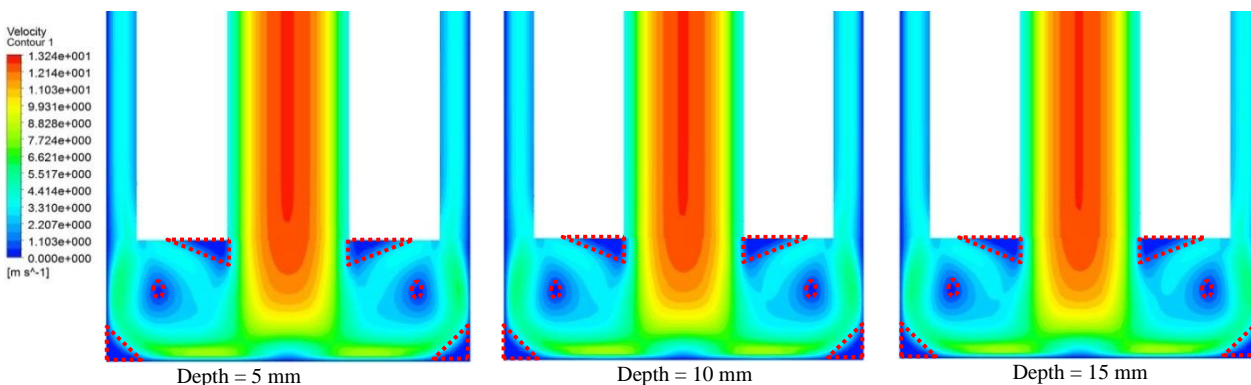
^۱ Stagnation Area

^۲ Velocity Contour

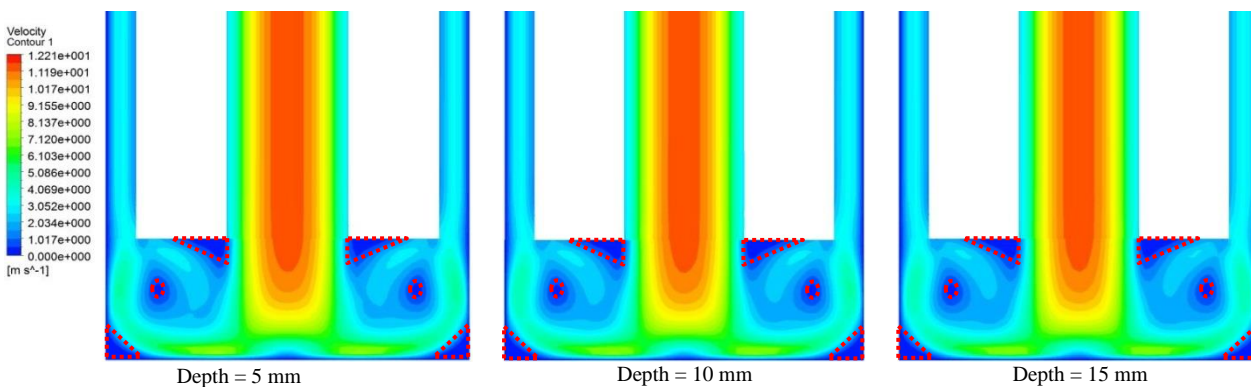
(الف)



(ب)



(ج)



شکل ۸- کانتورهای سرعت

(الف) آب دیونیزه (ب) نفت سفید (ج) روغن EDM-30

نتایج بین ۱/۲۸ تا ۱۰/۸۱ درصد بوده که بیانگر صحت شبیه‌سازی است.

نتایج نشان می‌دهد که با کاهش عمق سوراخ سرعت جریان دی‌الکتریک درون دهانه ماشین کاری افزایش می‌یابد.

دهانه ماشین کاری توسط دینامیک سیالات محاسباتی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. روش شبیه‌سازی جریان با مطالعات پیشین مورد اعتبارسنجی قرار گرفته و نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی مقایسه شده است. بازه اختلاف

- Advanced Machining and Machine Tools Conference 15(13): 360-364. (In Persian)
- [9] Dong S, Wang Z, Wang Y, zhang J (2017) Micro-EDM drilling of high aspect ratio micro-holes and in situ surface improvement in C17200 beryllium copper alloy. *J Alloys Compd* 727: 1157-1164.
- [10] Baseri H, Sadeghian S (2016) Effects of nanopowder TiO₂-mixed dielectric and rotary tool on EDM. *Int J Adv Manuf Technol* 83(1-4): 519-528.
- [11] Narayanan NS, Vignesh JH, Navin RI, Kumar SR, Babu PD, Pradeesh N (2019) Surface characteristics of drilled holes in Al-TiB₂ metal matrix composites using electric discharge machine. *Adv Manuf Process*: 91-100.
- [12] Jabbaripour B, Sadeghi MH, Shabgard MR, Faridvand Sh (2011) Investigating the effects of tool materials on the properties of electrical discharge machining of γ -TiAl intermetallic. *Modares Mechanical Engineering* 11(2): 135-146. (In Persian)
- [13] Abdullah A, Shabgard MR, Ivanov A, Shervanyi-Tabar MT (2009) Effect of ultrasonic-assisted EDM on the surface integrity of cemented tungsten carbide (WC-Co). *Int J Adv Manuf Technol* 41(3-4): 268-280.
- [14] shahi A, Hajilary N, Rezakazemi M (2019) CFD simulation of anode solid oxide fuel cell. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 9(1): 217-235. (In Persian)
- [15] Hejazi M, Taghizadeh M, Afshari E (2015) Numerical simulation of wind interference effects around a group of tall buildings. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 5(2): 285-301. (In Persian)
- [16] Sadeghi M, Nosouhi R (2015) 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* 15(13): 376-381. (In Persian)
- [17] Zhang W, Liu Y, Zhang S, Ma F, Wang P, Yan C (2015) Research on the gap flow simulation of debris removal process for small hole EDM machining with Ti alloy. *Advances in Computer Science Research* 39: 2121-2126.
- [18] Tanjilul M, Ahmed A, Kumar AS, Rahman M (2018) A study on EDM debris particle size and flushing mechanism for efficient debris removal in EDM-drilling of Inconel 718. *J Mater Process Technol* 255: 263-274.
- [19] Beigmoradi S, Ghoreishi M, Vahdati M (2018) Optimum design of vibratory electrode in micro-EDM process. *Int J Adv Manuf Tech* 95(9-12): 3731-3744.
- این امر می‌تواند توانایی دی‌الکتریک را در شستشوی دهانه ماشین‌کاری ارتقا بخشد؛ همچنین ناحیه رکود تشکیل شده درون سوراخ با عمق ۵ میلی‌متر از بقیه کوچک‌تر است.
- مقایسه دی‌الکتریک‌های مختلف نشان می‌دهد که جریان آب دیونیزه درون سوراخ از سرعت بیشتری برخوردار است؛ همچنین آب دیونیزه ناحیه رکود کوچک‌تری نسبت به نفت سفید و روغن EDM-30 ایجاد می‌کند. به همین دلیل فرایند خروج براده‌ها از دهانه ماشین‌کاری بهبود می‌یابد و در نتیجه از مخروطی شدن سوراخ‌ها جلوگیری می‌شود.

۶- مراجع

- [1] Meena VK, Azad MS, Mitra S (2012) Effect of flushing condition on deep hole micro-EDM drilling. *Int J Mach Mach Mater* 12(4): 308-320.
- [2] Yu Z, Rajurkar KP, Narasimhan J (2003) Effect of machining parameters on machining performance of micro EDM and surface integrity. In *Proceedings of Annual ASPE Meeting, Portland*.
- [3] Kibria G, Sarkar B, Pradhan B, and Bhattacharyya B (2010) Comparative study of different dielectrics for micro-EDM performance during micro hole machining of Ti-6Al-4V alloy. *Int J Adv Manuf Tech* 48(5-8): 557-570.
- [4] Kunieda M, Kitamura T (2018) Observation of difference of EDM gap phenomena in water and oil using transparent electrode. *Procedia CIRP* 68: 342-346.
- [5] Bellotti M, Qian J, Reynaerts D (2018) Enhancement of the micro-EDM process for drilling through-holes. *Procedia CIRP* 68(1): 610-615.
- [6] Li C, Xu, Xi, Li Y, Tong H, Ding S, Kong Q, Zhao L, Ding J (2019) Effects of dielectric fluids on surface integrity for the recast layer in high speed EDM drilling of nickel alloy. *J Alloys Compd* 783: 95-102.
- [7] Rajabinasab F, Hadad MJ, Abedini V, Hajighorbani RA (2015) Investigation and study of the tool material and the dielectric fluid rate effect on the performance of near dry electrical discharge machining. *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference* 15(13): 365-370. (In Persian)
- [8] Rajabinasab F, Hadad MJ, Abedini V (2015) Investigation and study of the kind and the gas pressure effect on the performance of near dry electrical discharge machining. *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the*

- development and validation. *Comput Fluids* 24(3): 227-238.
- [25] Kumar AH, Krishnaiah G (2016) Optimization of process parameters and dielectric fluids on machining En 31 by using topsis. *Int J Eng Res Appl* 6(9): 13-18.
- [26] https://www.graphitesupplies.com/Rustlick-EDM-30-Dielectric-Fluid-Oil-55-Gallon-Electrical-Discharge-Machining-EDM-72552_p_8074.html.
- [27] Yan C, Zou R, Yu Z, Li J, Tsai Y (2018) Improving machining efficiency methods of micro EDM in cold plasma jet. *Procedia CIRP* 68: 547-552.
- [28] Okada A, Uno Y, Onoda S, Habib S (2009) Computational fluid dynamics analysis of working fluid flow and debris movement in wire EDMed kerf. *Ann CIRP* 58(1): 209-212.
- [20] Feng G, Yang X, Chi G (2018) Experimental and simulation study on micro hole machining in EDM with high-speed tool electrode rotation. *Int J Adv Manuf Tech*: 1-9.
- [21] Kliuev M, Baumgart C, Büttner H, Wegener K (2018) Flushing velocity observations and analysis during EDM drilling. *Procedia CIRP* 77: 590-593.
- [22] Wegener K, Kliuev M, Baumgart C (2018) Fluid dynamics in electrode flushing channel and electrode-workpiece gap during EDM drilling. *Procedia CIRP* 68: 254-259.
- [23] Stull RB (2012) An introduction to boundary layer meteorology. Vol 13. Springer Science & Business Media, Dordrecht.
- [24] Shih TH, Liou WW, Shabbir A, Yang Z, Zhu J (1995) A new k-epsilon eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows. *Model*