

بررسی توزیع دمایی در ماشین کاری تخلیه الکتریکی قطعه کار استیل P20

فرامرز رنجبر^۱، آرمان قهرمانیان^{۲*} و رضا آذرافزا^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>واژگان کلیدی: ماشین کاری تخلیه الکتریکی، جابجایی آزاد، نرخ براده برداری، توزیع گاوسین، سیال دی الکتریک.</p>	<p>در این مقاله توزیع حرارت در سطح قطعه کار در ضمن تخلیه الکتریکی واحد توسط نرم افزار Fluent شبیه سازی شد. برای این منظور از خواص ترمودینامیکی میانگین برای جنس قطعه کار و شعاع شار گرمایی با توزیع گاوسین برای منبع حرارتی و اعمال شرط مرزی جابجایی آزاد در سطح بالایی قطعه کار استفاده شد. در نهایت از روی پروفیل توزیع دما در قطعه کار استیل P20 حجم گودال بدست آمد و با داده های تجربی مقایسه شد. سیال دی الکتریک مورد بررسی کروسن انتخاب شده است. در تمامی شبیه سازی های صورت گرفته، گرمای نهان ذوب ماده در نظر گرفته شده است که باعث کاهش خطای محاسبات نرخ براده برداری شده است. مقایسه نشان داد که بر خلاف نظریات ارائه شده در مدل های پیشین، کسر انرژی منتقل شده به قطعه کار و مایع دی الکتریک با توجه به شرایط ماشین کاری متغیر است و با افزایش شدت جریان ورودی و مدت زمان روشنی پالس، کسر انرژی منتقل شده به قطعه کار افزایش می یابد. همچنین با استفاده از توزیع دمایی در زیر گودال ایجاد شده، به بررسی اثرات تغییرات ساختاری ایجاد شده بر روی صافی سطح پرداخته شد. با افزایش شدت جریان حجم منطقه انتقال افزایش و باعث تغییرات ساختاری و تغییر خواص ترمودینامیکی قطعه کار می شود و باعث کاهش صافی سطح قطعه کار ماشین کاری شده می شود.</p>

۱- مقدمه

ماشین کاری تخلیه الکتریکی یک پروسه پیچیده که شامل چند فرآیند مختلف از جمله فرآیند الکتریکی، الکترومغناطیس، تغییر فاز ترمودینامیک، رفتار هیدرودینامیکی سیال دی الکتریک و انتقال حرارت مرکب می باشد که ارائه یک مدل جامع و واقعی را پیچیده می کند [۱]. مهم ترین فرآیندی که در ماشین کاری تخلیه الکتریکی حائز اهمیت است، پیش بینی و مدل کردن رفتار ترمودینامیکی قطعه کار است، چون عامل اصلی براده برداری در این نوع ماشین کاری رسیدن دمای موضعی قطعه کار به دمای ذوب و گاهی دمای جوش آن است.

ماشین کاری تخلیه الکتریکی یک فرآیند براده برداری غیر سنتی می باشد. این نوع ماشین کاری در شکل دهی فلزات پیچیده جهت تولید سوراخ های قالب هایی که با سایر روش های مرسوم امکان پذیر نیست، کاربرد فراوانی دارد.

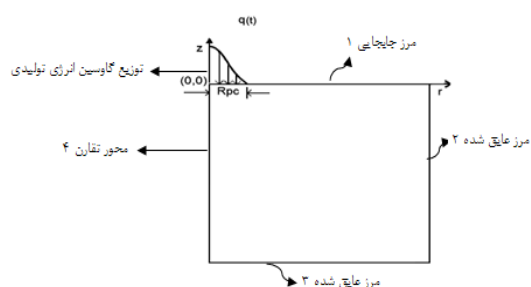
* پست الکترونیک نویسنده مسئول: arman.ghahremanian@gmail.com

۱. استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز

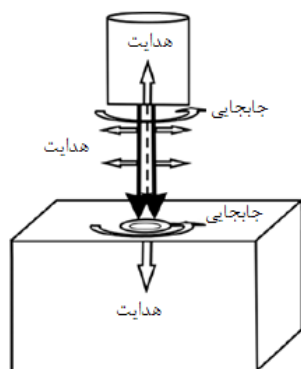
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علوم و تحقیقات کردستان

۳. استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علوم و تحقیقات کردستان

ارائه یک مدل جدید و واقعی تر و پیش‌بینی رفتار ترمودینامیکی ماده، نرخ براده برداری و تغییرات ساختاری بسیار مهم است. با پیش‌بینی موارد فوق می‌توان شرایط ماشین کاری در شرایط آزمایشگاهی را بهینه سازی کرد و با توجه به شرایط ماشین کاری، اعم از ظرفیت کاری یا خشن کاری، بهترین و بهینه‌ترین پارامترها را مشخص کرد. تا کنون تحقیقات جامعی بر روی مطالعات ترمودینامیکی ماشین کاری تخلیه الکتریکی صورت نگرفته است و اکثر مطالعات انجام شده با ساده‌سازی‌هایی که صورت گرفته است در مقایسه با نتایج تجربی از تطابق و دقت مناسبی برخوردار نیستند. در تحقیق حاضر فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی با قطعه کار استیل P20 در ۶ حالت مختلف با ارائه یک مدل جدید شبیه سازی شده و به بررسی رفتار ترمودینامیکی قطعه کار با استفاده از شرایط شبیه سازی پرداخته شده و نتایج با داده‌های تجربی هارمیندر^۱ مقایسه شده است.



شکل ۱- شرایط مرزی مدل ارائه شده برای قطعه کار



شکل ۲- نحوه توزیع انرژی در هنگام تخلیه الکتریکی

انرژی های تولید شده در این فرآیند بصورت زیر تعریف شدند.

E_1 : انرژی صرف شده برای فرسایش و براده برداری از قطعه کار

E_2 : انرژی هدایت شده از طریق قطعه کار

E_3 : انرژی صرف شده برای فرسایش و براده برداری از ابزار

E_4 : انرژی هدایت شده از طریق ابزار

E_5 : انرژی منتقل شده به مایع دی الکتریک

E_6 : انرژی ذخیره شده در مایع دی الکتریک

E_7 : انرژی‌هایی مانند نور، صدا و یونیزاسیون

۲- مدل سازی ماشین کاری تخلیه الکتریکی

اولین و مقدماتی‌ترین مکانیزم براده برداری در ماشین کاری تخلیه الکتریکی وجود گرما و حرارت تولید شده ناشی از تخلیه الکتریکی و ایجاد کانال پلاسما می‌باشد که این حرارت بصورت شار گرمایی موضعی به قطعه کار وارد شده و باعث براده برداری و ذوب ماده می‌شود [۲].

زمانی که تخلیه الکتریکی انجام می‌شود، مقداری انرژی صرف مقاومت سیال دی الکتریک و ایجاد کانال پلاسما می‌شود و مقداری نیز از طریق هدایت وارد قطعه کار می‌شود. مقداری از شار گرمایی وارد شده به قطعه کار باعث ذوب و براده برداری می‌شود و ما بقی انرژی حرارتی، به قطعه کار منتقل می‌شود [۳]. نکته قابل توجه در این فرآیند، تبادل انرژی براده‌های کنده شده و سیال دی الکتریک می‌باشد که یکی از دلایل اصلی گرم شدن

¹ Harminder

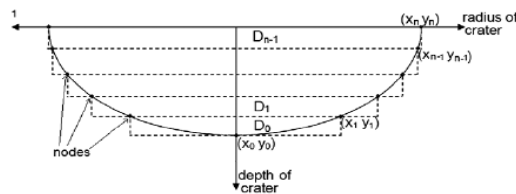
$$Pr = \frac{\mu c p}{K} \quad (9)$$

$$Gr = \frac{g \beta \Delta T L_c^3}{\nu^2} \quad (10)$$

بعد مشخصه در جابجایی آزاد نیز برای یک صفحه دایره‌ای شکل برابر با $0/9$ قطر می‌باشد.

$$C_{vt} = \sum_{i=0}^{n-1} D_i \quad (11)$$

حجم گودال حاصل از تخلیه الکتریکی از رابطه ۱۱ و با استفاده از انتگرال گیری محاسبه شده است.



شکل ۳- تصویر شماتیک محاسبه حجم گودال

$$MRR = \frac{60 \times C_{vt}}{t_{on} + t_{off}} \times 10^{-3} \quad (12)$$

نرخ براده برداری نیز از رابطه ۱۲ محاسبه شده است [۵].

۲-۲- شرایط شبیه سازی

مشخصات ترموفیزیکی قطعه کار و سیال دی‌الکتریک در دمای 20°C در جدول ۱ نشان داده شده است. شکل قطعه کار بصورت استوانه‌ای به شعاع ۴۰ میلی‌متر و ارتفاع ۵۰ میلی‌متر انتخاب شده است.

جدول ۱- مشخصات ترموفیزیکی قطعه کار و سیال

		دی‌الکتریک			
		C_p	T_m	T_b	k
استیل	P20	۴۶۰	۱۳۰۰	۳۰۰۰	۳۶/۵
کرومن		۲۰۰۰	---	۱۵۰	۰/۱۵

در این تحقیق در ۶ حالت مختلف شبیه سازی مورد نظر صورت گرفته است که در جدول ۲ نمایش داده شده است. تمامی شبیه سازی‌های صورت گرفته در ولتاژ ۶۰ و زمان خاموشی ۱۰ میکروثانیه انجام شده است.

۱-۲- معادلات حاکم

برای آنالیز حرارتی انتقال حرارت به قطعه کار، معادله جریان هدایت بر شرط مسئله حکم فرماست [۴].

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

ضریب پخش گرمایی ماده نیز با در نظر گرفتن گرمای نهان ذوب از رابطه زیر بدست می‌آید [۴].

$$\alpha' = \frac{K_t}{\rho(C_p + m/T_m)} \quad (2)$$

معادله شار گرمایی ورودی که توسط جوشی^۱ و همکارانش ارائه شده است از رابطه ۳ محاسبه شده است [۵].

$$q(t) = \frac{3.4878 \times 10^5 F_c V I^{0.14}}{t_{on}^{0.88}} \exp \left\{ -4.5 \left(\frac{t}{t_{on}} \right)^{0.88} \right\} \quad (3)$$

شعاع کانال پلاسما نیز از رابطه ۴ محاسبه شده است [۳].

$$R_{pc} = (2.04e - 3) I^{0.43} t_{on}^{0.44} \quad (4)$$

تمامی انرژی‌های معرفی شده در قسمت قبلی از طریق روابط ترمودینامیکی قابل محاسبه است.

$$E_{1,3} = E_{ss} + E_{sm} + E_{lm} + E_{fg} \quad (5)$$

$$E_{2,4} = E_{ss} \quad (6)$$

بخش قابل توجهی از انرژی منتقل شده به سیال دی‌الکتریک از طریق براده‌های ذوب شده از قطعه کار و انتقال انرژی از طریق جابجایی آزاد بر روی سطح قطعه کار می‌باشد. در این تحقیق از انرژی منتقل شده از دیواره قطعه کار به سیال به دلیل یکسان بودن دمای دیواره با سیال دی‌الکتریک با توجه به توزیع دمایی صرف نظر شده است.

$$E_5 = E_1 + E_{Conv} \quad (7)$$

برای محاسبه انتقال حرارت جابجایی آزاد از روابط ورق‌های گرم شده افقی رو به بالا استفاده شده است [۴].

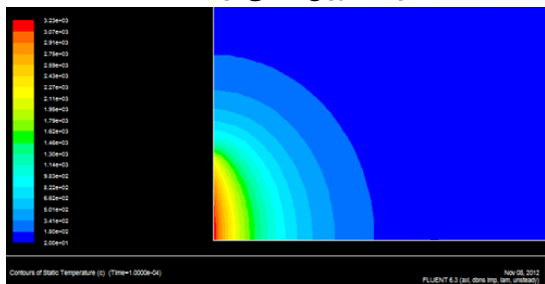
$$\overline{Nu}_L = 0.13(Gr Pr)^{1/3} \rightarrow Gr Pr \leq 2 \times 10^8 \quad (8)$$

اعداد پرانتل و گراشف نیز از روابط زیر قابل محاسبه است:

$$\overline{Nu}_L = 0.16(Gr Pr)^{1/3} \rightarrow 5 \times 10^8 \leq Gr Pr \leq 10^{11}$$

¹ -Joshi

شکل ۵- توزیع دمایی برای حالت B₂



شکل ۶- توزیع دمایی برای حالت B₃

حجم گودال ایجاد شده از شبیه سازی برای تمامی حالات نیز بر اساس شکل ۳ و معادله ۱۲ محاسبه و در جدول ۳ مشخص شده است. همانطور که مشاهده می شود، با افزایش مدت زمان تخلیه و افزایش شدت جریان، حجم گودال افزایش می یابد.

جدول ۳- حجم گودال ایجاد شده بر حسب میکرومتر مکعب

حالت ۱A	$C_v 87720/2 =$	حالت ۱B	$C_v 1279823/6 =$
حالت ۲A	$C_v 135701/4 =$	حالت ۲B	$C_v 215555/6 =$
حالت ۳A	$C_v 232403/5 =$	حالت ۳B	$C_v 374048/2 =$

نرخ براده برداری محاسبه شده از نتایج شبیه سازی شده در جدول ۴ مشخص شده است.

جدول ۴- نرخ براده برداری بر حسب میلیمتر مکعب در دقیقه

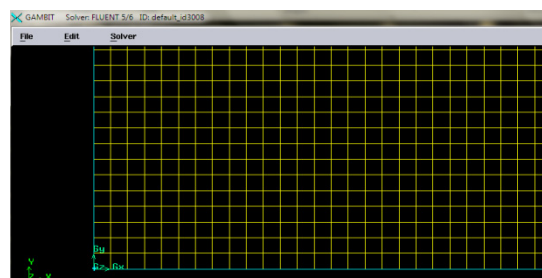
حالت ۱A	$MRR 105/2 =$	حالت ۱B	$MRR 153/5 =$
حالت ۲A	$MRR 116/3 =$	حالت ۲B	$MRR 184/7 =$
حالت ۳A	$MRR 126/7 =$	حالت ۳B	$MRR 204/1 =$

همانطور که از نتایج مشاهده می شود، با افزایش شدت جریان و مدت زمان تخلیه الکتریکی نرخ براده برداری افزایش می یابد ولی با افزایش نرخ براده برداری به دلیل افزایش اثرات شوک حرارتی، حجم بیشتری از قطعه کار دچار تغییرات متالورژیکی شده و صافی سطح کاهش می یابد. انرژی منتقل شده به قطعه کار که فاکتور مهمی در مدل سازی و پیش بینی نرخ براده برداری و صافی سطح می باشد، در جدول ۵ مشخص شده است.

جدول ۲- شرایط شبیه سازی شده

	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳
گروه A	۱۶ A - ۴۰ μs	۱۶ A - ۶۰ μs	۱۶ A - ۱۰۰ μs
گروه B	۲۴ A - ۴۰ μs	۲۴ A - ۶۰ μs	۲۴ A - ۱۰۰ μs

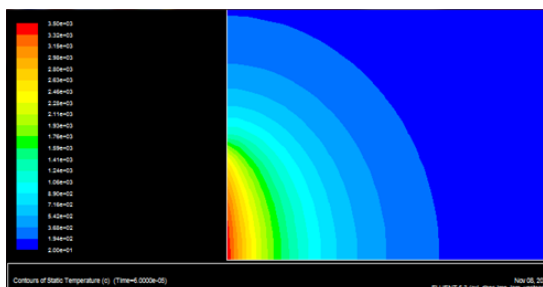
برای شبیه سازی حالات مندرج در جدول ۲ ابتدا قطعه کار را در نرم افزار Gambit 2.3 مدل سازی شد و تمام شرایط مرزی واقعی مسئله در این محیط اعمال شد. برای این منظور، از مش بندی مربعی به تعداد ۱۲۰۶۸۰ مش استفاده شد. در شکل ۴ نمونه ای از مش بندی نشان داده شده است.



شکل ۴- نمونه مش بندی در نرم افزار Gambit

۳- نتایج شبیه سازی

تمامی شبیه سازی های صورت گرفته برای یک جرقه صورت گرفته است و سپس با استفاده از توزیع دمایی حاصل از شبیه سازی به محاسبه نرخ براده برداری و کسر انرژی منتقل شده به قطعه کار پرداخته شده است. در شکل ۵ و ۶ توزیع دمایی قطعه کار برای ماشین کاری تخلیه الکتریکی با شدت جریان ۱۶ آمپر و زمان های تخلیه ۶۰ و ۱۰۰ میکروثانیه نشان داده شده است.



شکل ۷- توزیع دمایی در منطقه تغییر فاز ساختاری

انرژی منتقل شده از براده‌های کنده شده و سطح داغ قطعه کار به سیال دی الکتریک نیز در جدول ۶ نشان داده شده است.

۴- نتیجه گیری

نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که با افزایش مدت زمان تخلیه الکتریکی برای یک شدت جریان مشخص، حجم گودال، نرخ براده برداری و انرژی منتقل شده به قطعه کار افزایش می‌یابد. زمانی که مدت زمان تخلیه افزایش داده می‌شود، شعاع کانال پلاسما بزرگتر شده و در نتیجه ابعاد حفره توسعه می‌یابد. انرژی منتقل شده به قطعه کار نیز به دلیل افزایش مدت زمان تخلیه افزایش پیدا می‌کند. با افزایش شدت جریان در زمان تخلیه معین، به دلیل افزایش انرژی تخلیه، نرخ براده برداری و انرژی منتقل شده به قطعه کار افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از شبیه سازی نرخ براده برداری در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، شیب نرخ براده برداری در شدت جریان ۲۴ آمپر بیشتر از شیب آن در شدت جریان ۱۶ آمپر می‌باشد و دلیل آن غالب بودن سهم افزایش انرژی حاصل از تخلیه الکتریکی به افزایش شار گرمایی حاصل از بالا بردن مدت زمان تخلیه الکتریکی است. نکته قابل تامل این است که با توجه به جدول ۲، نرخ براده برداری با افزایش مدت زمان تخلیه تا حدود ۲۰۰ میکروثانیه در شدت جریان ۱۶ آمپر، برابر با نرخ براده برداری تحت شرایط ۲۴ آمپر با زمان تخلیه ۴۰ میکروثانیه می‌باشد. با توجه به اینکه شدت جریان بالا موجب کاهش صافی سطح می‌شود، بنابراین طبق موارد اشاره شده، توصیه می‌شود که با کاهش شدت جریان و افزایش مدت زمان تخلیه علاوه بر دستیابی به صافی سطح مناسب، با همان نرخ براده برداری از سایش بیشتر ابزار جلوگیری شود.

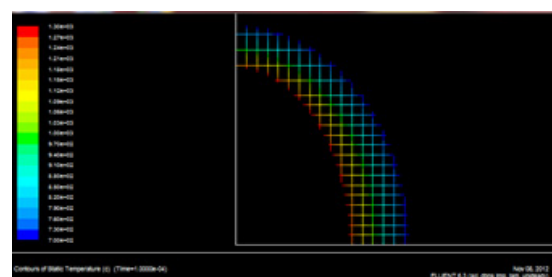
جدول ۵- انرژی منتقل شده به قطعه کار بر حسب میلی ژول

حالت ۱A	$E_{+1}E6/2 = 2$	حالت ۱B	$E_{+1}E8/1 = 2$
حالت ۲A	$E_{+1}E9/8 = 2$	حالت ۲B	$E_{+1}E15/6 = 2$
حالت ۳A	$E_{+1}E19/1 = 2$	حالت ۳B	$E_{+1}E35/9 = 2$

جدول ۶- انرژی منتقل شده به سیال دی الکتریک بر حسب میلی ژول

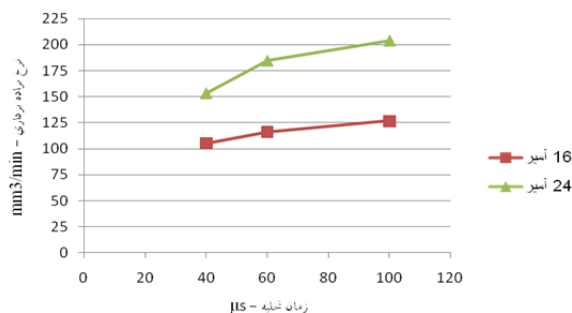
حالت ۱A	$E4/6 = 5$
حالت ۲A	$E6/7 = 5$
حالت ۳A	$E11/6 = 5$

زمانی که تخلیه الکتریکی صورت می‌گیرد مقداری از حجم ماده بصورت مذاب و مقداری بصورت بخار وارد سیال دی الکتریک شده و تمام انرژی گرمایی ذخیره شده در خود را به سیال دی الکتریک پس می‌دهد. ولی نکته‌ای که حائز اهمیت است و کمتر به آن اشاره شده است، ناحیه تغییر فاز و در حقیقت ناحیه ای که دچار تغییرات ساختاری و متالوژیکی شده است. با توجه به این که یکی از مشخصات و مزیت‌های ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی عدم وابستگی نرخ براده برداری به سختی قطعه کار است، نتایج شبیه سازی برای حالت ۴۰ میکروثانیه مشخص کرد که ناحیه‌ی تغییر فاز، حجم قابل ملاحظه‌ای دارد. با توجه به مشخصات ترمودینامیکی ماده مورد بررسی، محدوده ۶۰۰ تا ۱۳۰۰ درجه سانتیگراد به عنوان منطقه تغییر فاز قطعه کار در نظر گرفته شده است. شکل ۷ نتایج حاصل از توزیع دمایی در این محدوده دمایی را برای حالت ۱۶ آمپر و ۱۰۰ میکروثانیه نشان می‌دهد.



شکل ۹- مقایسه کسر انرژی منتقل شده به قطعه کار با نتایج تجربی

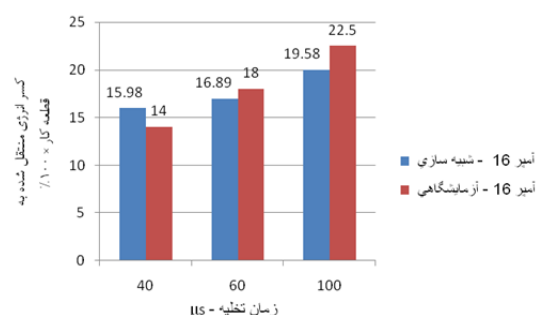
با توجه به شکل ۹، با افزایش مدت زمان تخلیه کسر انرژی منتقل شده به قطعه کار افزایش پیدا می‌کند که تطابق نتایج تجربی و شبیه سازی را نشان می‌دهد. با توجه به روند تغییرات کسر انرژی از شکل بالا، ملاحظه می‌شود که با افزایش زمان تخلیه، نتایج شبیه سازی شده نسبت به نتایج تجربی رشد بیشتری نشان می‌دهد و بالعکس؛ به طوری که با مقایسه حالت ۴۰ میکروثانیه با دو حالت بعدی، کاملاً مشهود است. دلیل این امر بالا بودن شار گرما و کوچک بودن شعاع کانال پلاسما برای زمان های تخلیه کوچکتر است که از روابط نیمه تجربی ۳ و ۴ حاصل می‌شود. نکته قابل توجه دیگر، ناحیه‌ای از قطعه کار است که به علت قرار گرفتن در منطقه ۶۰۰ تا ۱۳۰۰ درجه سانتیگراد دچار تغییر شکل و تغییر ساختار فیزیکی شده‌است؛ با افزایش شدت جریان و مدت زمان روشنی پالس، شار گرمایی گسیل شده به سطح قطعه کار افزایش و در نتیجه حجم منطقه انتقال گرما توسعه می‌یابد و قسمت بیشتری از قطعه کار دچار تغییرات ساختاری شده و صافی سطح قطعه کار کاهش می‌یابد. دلیل اصلی کاهش صافی سطح در انرژی های تخلیه بزرگتر، افزایش وسعت ناحیه انتقال است. به همین دلیل، جهت اجتناب از چنین پدیده نامناسب توصیه می‌شود برای پرداخت کاری، از شدت جریان‌های پایین‌تر جهت ماشین کاری استفاده گردد.



شکل ۸- نرخ براده برداری شبیه سازی شده

کسر انرژی منتقل شده به ابزار، مهمترین فاکتور در مدل سازی و تعیین نرخ براده برداری می‌باشد. با مقایسه کسر انرژی حاصل از شبیه سازی و نتایج آزمایشات هارمیندر در شرایط ماشین کاری یکسان تطابق بهتری نسبت به سایر مدل های ارائه شده برای توزیع انرژی منتقل شده به قطعه کار حاصل شد [۶].

با توجه به شکل ۹، با افزایش مدت زمان تخلیه کسر انرژی منتقل شده به قطعه کار افزایش پیدا می‌کند که تطابق نتایج تجربی و شبیه سازی را نشان می‌دهد. با توجه به روند تغییرات کسر انرژی از شکل بالا، ملاحظه می‌شود که با افزایش زمان تخلیه، نتایج شبیه سازی شده نسبت به نتایج تجربی رشد بیشتری نشان می‌دهد و بالعکس؛ به طوری که با مقایسه حالت ۴۰ میکروثانیه با دو حالت بعدی، کاملاً مشهود است.



۵- مراجع

- [1] Schulz, H.P., Herms, R., Juhr, H., Schactzing, W., Wollenberg, G. (2004). "Comparison of measured crater morphology for EDM". Journal of Material Process Technology, Vol. 149, pp. 316-322
- [2] Panda, D.K., Bhoi, R.J. (2005). "Artificial neural network prediction of material removal rate". Journal of Material Manufacturing Process, Vol. 20, pp. 645-672.

- [3] Eubnak, P.T., Patel, M.R., Barrufet, M.A., Bozkurt, B. (1993). "Theoretical models of the EDM Process". Journal of Applied Physics, Vol. 73, pp. 410-411.
- [4] Ozishik, M. (1989). "Heat Conduction". Manufactured in united of America, Dover Publication, Inc 31 East 2an sreet Minoela,N.Y 11501.
- [5] Joshi, S.N., Pande, S.S. (2010). "Thermo-physical modeling of die-sinking EDM process". Journal of Manufacturing Process, Vol. 12, pp. 45-56.
- [6] Singh, H. (2012), "Experimental study of energy during EDM process for utilization in thermal models". International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 55, pp. 5053-5064.

INVESTIGATION OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN THE DISCHARGE MACHINING STEEL P20

S.F. Ranjbar¹, A. Ghahremanian^{2*} and R.Azarafza³

1. Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz

2 M.Sc. Student, Faculty of Mechanical Engineering, Research and Science Branch Kurdistan, Sanandaj

3. Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Research and Science Branch Kurdistan, Sanandaj

*Corresponding Author: arman.ghahremanian@gmail.com

ARTICLE INFO

Keywords:

Electrical Discharge Machining,
Free Convection,
Metal Removal Rate,
Gaussian
Distribution.

ABSTRACT

In this paper the software fluent is used to simulate the distribution of temperature on work piece during electrical discharge machining. For this purpose, Average thermodynamic properties is for kind of work piece, Gaussian distribution of heat flux for the thermal source and the free movement of the upper part as a boundary condition is used in this simulation. At the end the pit volume obtained from temperature distribution profiles in the work piece P20 steel were compared with experimental data and also dielectric fluid of choice is Kerosene. In all simulations conducted, latent heat of melting is intended; to reduce error calculation in metal removal rate. The comparison showed that contrary to the previous models, Energy transferred to the work piece and dielectric fluid varies according to the machining conditions, and the fraction of energy transferred to the work piece increases with the intensity and duration of the input pulse and the Inlet flow. Also the effects of structural changes on the surface roughness are studied using the temperature distribution in the pit. Increasing the inlet flow will cause increases in transition zone volume, reduction in machined work piece smoothness and Changes the thermodynamic properties of the work piece.
