

## مطالعه‌ی تأثیر پارامترهای ورودی بر روی نرخ براده‌برداری، زبری سطح و نرخ خوردگی ابزار در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتریکی فولاد ابزار AISI H13\*

(یادداشت پژوهشی)

محمد رضا شبگرد<sup>(۱)</sup> هادی عیوضی باقری<sup>(۲)</sup> روح اله رحمانی<sup>(۳)</sup>

**چکیده** در این پژوهش تأثیر پارامترهای ورودی فرآیند EDM (زمان روشن‌ی پالس، سیکل وظیفه و قطبیت ابزار)، بر روی نرخ براده‌برداری (MRR)، درصد فرسایش نسبی ابزار (TWR) و ماکزیمم زبری سطح ( $R_{max}$ ) در ماشین‌کاری فولاد ابزار AISI H13 مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش سیکل وظیفه در هر دو حالت قطبیت ابزار، نرخ براده‌برداری و زبری سطح افزایش و فرسایش نسبی ابزار کاهش می‌یابد. در قطبیت مثبت، با افزایش زمان روشن‌ی پالس، نرخ براده‌برداری و زبری سطح افزایش و فرسایش نسبی ابزار روندی نزولی دارد، ولی در قطبیت منفی با افزایش زمان روشن‌ی پالس، نرخ براده‌برداری و زبری سطح ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. هم‌چنین بر اساس نتایج به دست آمده در حالت قطبیت منفی در زمان‌های روشن‌ی پالس کم‌تر، مقدار نرخ براده‌برداری بیش‌تر و مقدار فرسایش نسبی ابزار کم‌تر از قطبیت مثبت است.

**واژه‌های کلیدی** زمان روشن‌ی پالس، قطبیت ابزار، سیکل وظیفه.

### The Study of the Effect of Input Parameters on Material Removal Rate, %Tool Water Ratio and Surface Roughness of AISI H13 Tool Steel in the Electrical Discharge Machining (EDM)

M.R. Shabgard

H. Eivazi-Bagheri

R. Rahmany

**Abstract** In this study the effect of input parameters of the EDM process (pulse on-time, duty cycle and tool polarity), on the material removal rate (MRR), tool wear ratio (TWR) and maximum surface roughness ( $R_{max}$ ) in the machining AISI H13 tool steel has been studied. This study shows that increasing the duty cycle in the two conditions of tool polarity, material removal rate and the maximum surface roughness are increased and the tool wear ratio is reduced. Also in the positive polarity, by increasing pulse on-time, material removal rate and surface roughness are increased and tool wear ratio declines; but in the negative polarity by increasing pulse on time, material removal rate and surface roughness are first increased and then decreased. Furthermore, based on results obtained in the negative polarity mode, on the low pulse on-time, material removal rate is high, and tool wear ratio is lower than positive polarity.

**Key Words** Pulse on-time, Duty cycle, Tool polarity.

\* تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۰/۲/۱۳ و تاریخ پذیرش آن ۱۳۹۱/۸/۲۰ می باشد.

(۱) نویسنده‌ی مسؤول: دانشیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه تبریز.

(۲) کارشناس ارشد ساخت و تولید، عضو باشگاه پژوهشگران جوان دانشگاه آزاد اسلامی تبریز.

(۳) کارشناس ارشد ساخت و تولید، عضو باشگاه پژوهشگران جوان دانشگاه آزاد اسلامی تبریز.

## مقدمه

ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی (EDM) یکی از روش‌های نوین براده‌برداری است که در آن، ولتاژ پالسی منقطع برقرار شده بین دو الکترود، به نام‌های ابزار و قطعه‌کار، که در فاصله‌ی نزدیک و کنترل‌شده‌ای از یکدیگر (Gap) قرار گرفته اند و غوطه‌ور در سیالی به نام دی الکتریک می‌باشند، عامل جرقه‌های منقطع در نزدیک‌ترین نقطه (نقاط) آن‌ها شده و هر جرقه جزء کوچکی از ماده را جدا می‌کند. فولاد AISI H13 به دلیل داشتن مقاومت مناسب در برابر کاهش سختی در دماهای بالا، سختی‌پذیری و چقرمگی بالا، در ساخت انواع قالب‌های گرم‌کار مانند قالب‌های آهنگری، اکستروژن، ریخته‌گری تحت فشار و غیره به کار می‌رود [1,2].

تحقیقات متعددی در ارتباط با تأثیر پارامترهای ورودی بر روی مشخصه‌های خروجی فرآیند ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتریکی فولادها به عمل آمده است. تنگ لی و همکاران [3]، تأثیر پارامترهای ورودی بر روی نرخ براده‌برداری، صافی سطح، فراخی کناری و متوسط ضخامت لایه‌ی سفید را در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتریکی فولاد AISI 1045 مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمایش‌های صورت‌گرفته نشان می‌دهد که با افزایش زمان روشن‌ی پالس مقدار زبری سطح و نرخ براده‌برداری افزایش می‌یابد. تبنی و همکاران [4]، تغییرات نرخ براده‌برداری، زبری سطح و ضخامت لایه‌ی سفید ایجادشده در عملیات ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتریکی قطعه‌کارهای فولادی با ابزارهای مسی و گرافیتی را با در نظر گرفتن تأثیر شدت جریان ورودی، زمان روشن‌ی پالس و زمان خاموشی پالس مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش انرژی تخلیه، زبری سطح افزایش می‌یابد و کیفیت سطح پایین‌تر می‌آید. هم‌چنین در این تحقیق شدت جریان و زمان روشن‌ی پالس پایین برای ماشین‌کاری مواد با استحکام و سختی کم‌تر

پیشنهاد شده است. کوکوبو و همکاران [5]، تأثیر دو نوع دی الکتریک (نفت سفید و آب دی‌یونیزه)، قطبیت ابزار و زمان‌های روشن‌ی پالس متفاوت را بر روی حجم ماده‌ی برداشته‌شده و عمق حفره‌های ایجادشده در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتریکی فولاد AISI 1049 بررسی کرده و گزارش داده‌اند که با افزایش زمان روشن‌ی پالس در هر دو حالت قطبیت ابزار، عمق ذوب و حجم ماده‌ی برداشته‌شده افزایش می‌یابد. ایوبانک و همکاران [6]، با مدل‌سازی کاتد و آند در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتریکی به این نتیجه رسیدند که هنگام تخلیه‌ی الکتریکی شکل‌گیری کانال پلاسما ابتدا بر روی آند آغاز می‌شود و در نتیجه ابتدا آند ذوب می‌شود و سپس امتداد کانال پلاسما به کاتد می‌رسد. این پدیده باعث بزرگ‌تر شدن شعاع کانال پلاسما بر روی قطب مثبت نسبت به قطب منفی می‌شود، این امر سبب می‌شود میزان خوردگی قطب مثبت و منفی در شرایط مختلف متفاوت باشد. بوژلبنه و همکاران [7]، به بررسی تأثیر انرژی جرقه‌ها بر روی پارامترهای خروجی فرآیند EDM (نرخ براده‌برداری، فرسایش نسبی ابزار و ضخامت لایه‌ی سفید) در ماشین‌کاری فولادهای 50CrV5، X200Cr15 پرداخته‌اند. بر اساس گزارش آن‌ها، با افزایش انرژی جرقه‌ها، ضخامت لایه‌ی سفید و نرخ براده‌برداری افزایش یافته و فرسایش نسبی ابزار کاهش می‌یابد. پاندى و سینک [8] در یک مقاله‌ی مروری، زمان روشن‌ی پالس، زمان خاموشی پالس، فاصله‌ی بین ابزار و قطعه‌کار، سیکل وظیفه و قطبیت را به عنوان پارامترهای مهم الکتریکی ورودی و چرخش الکترود، نوع شستشو، شکل و جنس ابزار را به عنوان پارامترهای غیر الکتریکی ورودی معرفی کردند. بر اساس این پژوهش، با کاهش زمان خاموشی پالس، تا حدی که پایداری فرآیند از بین نرود و افزایش زمان روشن‌ی پالس به طور هم‌زمان، می‌توان نرخ برداشت ماده را افزایش داد.

منفی به عمل آمده است. تمامی نمونه‌ها توسط دستگاه اسپارک (تهران-اکرام-CNC) در حالت آیزوپالس ( Iso Pulse) به مدت ۲۰ دقیقه تحت عملیات ماشین‌کاری قرار گرفتند. برای اندازه‌گیری زبری سطح قطعات ماشین‌کاری شده از پارامتر زبری ماکزیمم سطح  $R_{max}$  استفاده شده و مقادیر آن توسط دستگاه Maher-perthometer M2 اندازه‌گیری شده است. جدول (۲) پارامترهای ورودی برای انجام آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

برای محاسبه‌ی نرخ براده‌برداری و فرسایش نسبی ابزار به ترتیب از روابط (۱) و (۲) استفاده شده است.

$$MRR = \frac{(M_{w1} - M_{w2})}{(\rho_w \times t)} \times 10^3 \quad (1)$$

$$TWR \% = \frac{(M_{T1} - M_{T2}) \times \rho_w}{(M_{w1} - M_{w2}) \times \rho_T} \times 100 \quad (2)$$

که در این روابط (MRR) نرخ براده‌برداری از قطعه‌کار  $(mm^3/min)$ ،  $M_{w1}$  و  $M_{w2}$  به ترتیب وزن قطعه‌کار قبل و بعد از ماشین‌کاری بر حسب گرم،  $\rho_w$  چگالی قطعه‌کار  $(gr/cm^3)$  و  $t$  زمان ماشین‌کاری (min)، TWR درصد سایش نسبی ابزار بر حسب نسبت حجم برداشته‌شده از مواد ابزار به حجم برداشته‌شده از مواد قطعه‌کار،  $M_{T1}$  و  $M_{T2}$  به ترتیب وزن ابزار قبل و بعد از ماشین‌کاری بر حسب گرم و  $\rho_T$  چگالی ابزار ماسی می‌باشند.

هدف این پژوهش، بررسی تأثیر پارامترهای ورودی (زمان روشنی پالس  $(T_{on})$ ، سیکل وظیفه و قطبیت ابزار) بر روی مهم‌ترین پارامترهای خروجی فرآیند EDM (نرخ براده‌برداری، درصد فرسایش نسبی ابزار و زبری ماکزیمم سطح) در ماشین‌کاری فولاد ابزار AISI H13 به وسیله‌ی ابزار ماسی و ارائه‌ی اطلاعات مهم تکنولوژیکی برای استفاده در صنعت می‌باشد.

### مواد و روش تحقیق

برای آماده‌سازی نمونه‌های فولادی، عملیات برش اولیه، ماشین‌کاری و سنگ‌زنی انجام پذیرفت. تعداد ۴۸ عدد نمونه‌ی استوانه‌ای فولادی تهیه شد. سپس برای دستیابی به سختی مورد نظر (۵۲-۴۵ HRC) عملیات سخت‌گردانی فولاد H13 با دقت انجام گردید. هم‌چنین برای آماده‌سازی ۴۸ عدد ابزار ماسی استوانه‌ای شکل نیز عملیات برش‌کاری، ماشین‌کاری و پرداخت‌کاری صورت گرفت. جدول (۱) جنس و ابعاد ابزار و قطعه‌کارهای تهیه‌شده را نشان می‌دهد.

برای مطالعه‌ی تأثیر سطوح مختلف پارامترهای ورودی روی مشخصه‌های خروجی فرآیند، طراحی آزمایش‌ها به صورت طرح عاملی کامل (Full factorial) (زمان روشن پالس در شش سطح، سیکل وظیفه در چهار سطح و قطبیت ابزار در دو سطح) انجام گرفته است. به این ترتیب ۲۴ آزمایش در حالت قطبیت مثبت و ۲۴ آزمایش نیز با حالت قطبیت

جدول ۱ جنس و ابعاد ابزار و قطعه‌کار

مواد	جنس	چگالی $(gr/cm^3)$	طول (mm)	قطر (mm)
ابزار(الکتروند)	مس (۹۹٪)	۸۹۳	۲۰	۱۸
قطعه‌کار	AISI H13 Tool Steel	۷۷۲۵	۲۰	۲۰

جدول ۲. پارامترهای ورودی و شرایط انجام آزمایش‌ها

دیتا الکتریک	نفت سفید
زمان روشنی پالس (μs)	۲،۶،۱۰،۱۵،۲۵،۵۰
ولتاژ ورودی (V)	۲۰۰
شدت جریان (A)	۱۶
سیکل وظیفه (%)	۲۰،۳۰،۴۰،۵۰
قطبیت	+ / -
فاصله ابزار و قطعه کار (mm)	۰/۱

### نتایج و بحث

#### تأثیر زمان روشنی پالس بر روی نرخ براده‌برداری.

شکل (۱) تأثیر زمان روشنی پالس را بر روی نرخ براده‌برداری در حالت قطبیت مثبت نشان می‌دهد. مطابق این شکل در قطبیت مثبت با افزایش زمان روشنی پالس، نرخ براده‌برداری به صورت یکنواخت افزایش می‌یابد.

دلیل این مسأله را این طور می‌توان توضیح داد که بعد از تشکیل کانال پلاسما، پدیده‌ی ذوب و تبخیر در محل اتصال کانال پلاسما به الکترودها حادث می‌شود، البته تا زمانی که جریان الکتریکی در اثر قطع ولتاژ قطع گردد. در این هنگام، در اثر افت شدید فشار در داخل کانال بخار، جوشش حجمی (Bulk Boiling) در چاله‌ی مذاب فوق داغ اتفاق می‌افتد و در نتیجه بخشی از مواد مذاب به خاطر انفجار ناشی از این پدیده، به خارج چاله‌ی مذاب پرتاب می‌شود. تکرار وصل ولتاژ و پدیده‌های فوق، باعث براده‌برداری در مقیاس ریز به ازای هر جرقه از سطح الکترود و قطعه‌کار می‌شود. هر چه انرژی جرقه‌ها بیش تر باشد، نرخ ذوب، تبخیر و پرتاب مواد به خارج از حوضچه‌ی مذاب در اثر پدیده‌ی جوشش حجمی و در نتیجه سرعت براده‌برداری افزایش می‌یابد. انرژی هر جرقه با توجه به مفهوم الکتریکی آن تابعی از شدت جریان جرقه، زمان روشنی پالس و ولتاژ جرقه است. بنابراین هر چه مقادیر این پارامترها افزایش یابد، نرخ براده‌برداری نیز

افزایش می‌یابد.

شکل (۲) تأثیر زمان روشنی پالس را در حالت قطبیت منفی بر روی نرخ براده‌برداری نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌گردد در حالت قطبیت منفی همزمان با افزایش زمان روشنی پالس، نرخ براده‌برداری در زمان‌های روشنی پالس کم‌تر (تا ۱۵ میکروثانیه) افزایش یافته ولی بعد از آن کاهش می‌یابد. دلیل این مسأله را می‌توان به اختلاف اندازه شعاع کانال پلاسما بر روی آند و کاتد مرتبط دانست و این گونه بیان کرد که در هنگام شروع تشکیل کانال پلاسما، الکترون‌ها به دلیل خاصیت تحرک پذیری بالا شروع به حرکت می‌کنند، در نتیجه شکل‌گیری کانال پلاسما ابتدا در روی قطب مثبت آغاز می‌شود و در مدت زمان روشنی پالس شعاع کانال پلاسما بر روی آند همواره بزرگ‌تر از کاتد می‌باشد [6]. هم‌چنین در هنگام براده‌برداری هم‌زمان با افزایش زمان روشنی پالس شعاع کانال پلاسما نیز بزرگ‌تر می‌شود، به طوری که افزایش شعاع کانال پلاسما تا حد بهینه باعث بزرگ‌تر شدن چاله‌های ایجادشده بر سطح و در نتیجه افزایش نرخ براده‌برداری می‌گردد، ولی بعد از یک حد بهینه به دلیل کاهش چگالی جریان و کاهش شار گرمایی ورودی به سطح، میزان عمق ذوب سطحی کاهش یابد. به همین دلیل در قطبیت منفی با افزایش زمان روشنی پالس (بیش از ۱۵ میکروثانیه) به دلیل گسترش زیاد شعاع کانال پلاسما در روی قطعه‌کار، بازده فرآیند کاهش یافته و نرخ براده‌برداری روندی نزولی پیدا می‌کند.

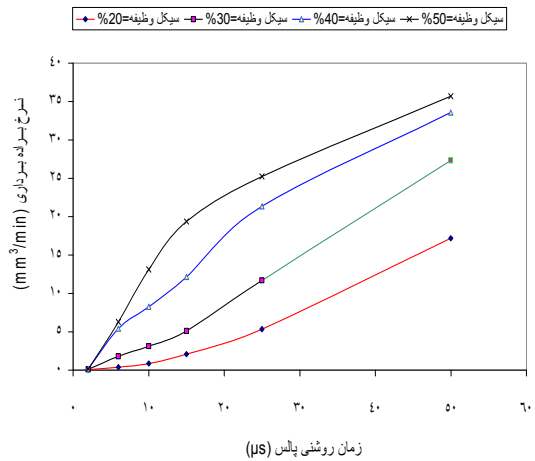
تأثیر سیکل وظیفه بر روی نرخ براده‌برداری. همان طوری که در شکل‌های (۱ و ۲) مشاهده می‌شود، هم‌زمان با افزایش سیکل وظیفه در هر دو حالت قطبیت ابزار، نرخ براده‌برداری افزایش می‌یابد. دلیل این مسأله را این طور می‌توان بیان کرد که با افزایش سیکل وظیفه، زمان مفید ماشین‌کاری و تعداد جرقه‌ها بیش‌تر می‌شود، در نتیجه حجم ماده‌ی برداشته‌شده از سطح

مثبت بیش تر از حالتی است که قطبیت ابزار منفی انتخاب شده است، دلیل این مسأله را این گونه می توان بیان کرد که چون دمای سطح کاتد گرم تر از دمای سطح آند می باشد، در حالت قطبیت منفی نقطه ی گرم تر بر روی ابزار مسی قرار می گیرد و مس به دلیل رسانایی گرمایی بالاتر باعث اتلاف حرارت تولید شده و در نتیجه افت فشار داخل کانال پلاسما می گردد. کاهش فشار داخل کانال از سویی باعث کاهش درصد پرتاب فلز ذوب شده به داخل مایع دی الکتریک در اثر پدیده ی جوشش حجمی می شود و از سویی دیگر پایین بودن درجه حرارت سطح قطعه کار در قطبیت منفی باعث می شود درصد بیش تری از فلز ذوب شده قبل از پرتاب به داخل مایع دی الکتریک بر روی سطح قطعه کار منجمد شود و در نتیجه باعث کاهش میزان ضخامت لایه ی دوباره منجمد شده (White layer) در قطبیت منفی گردد [5]. در زمان های روشنی پالس پایین (کم تر از ۵ میکروثانیه)، چون حرکت غالب در کانال پلاسما توسط الکترون ها صورت می گیرد و محل برخورد الکترون ها (آند) منطقه اصلی براده برداری می باشد، لذا نرخ براده برداری در حالت قطبیت منفی در زمان های روشنی پالس پایین، بیش تر می باشد و میزان لایه ی دوباره منجمد شده در روی سطح کم تر از حالتی است که قطبیت ابزار مثبت انتخاب شده است.

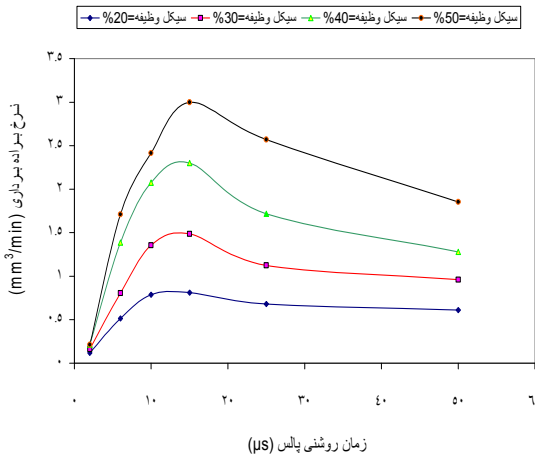
**تأثیر زمان روشنی پالس بر روی فرسایش نسبی ابزار.** شکل (۳) تأثیر زمان روشنی پالس را بر روی فرسایش نسبی ابزار در قطبیت مثبت نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود با افزایش زمان روشنی پالس در قطبیت مثبت، فرسایش نسبی ابزار به طور یک نواخت کاهش می یابد.

دلیل این مسأله را این طور می توان بیان نمود که در فرآیند EDM با قطبیت مثبت، هنگامی که مدت زمان روشنی پالس کم باشد، مکانیزم غالب برای

قطعه کار افزایش یافته و باعث افزایش نرخ براده برداری در هر دو حالت قطبیت می گردد.



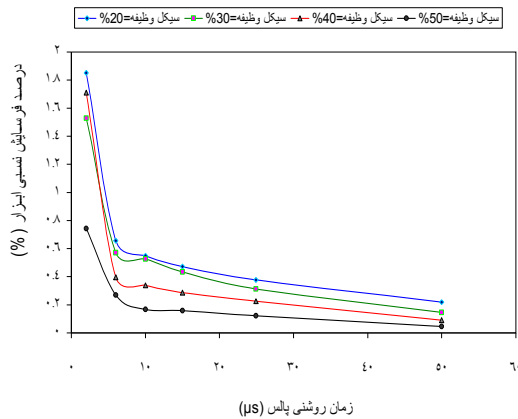
شکل ۱ تأثیر زمان روشنی پالس و سیکل وظیفه بر روی نرخ براده برداری در قطبیت مثبت



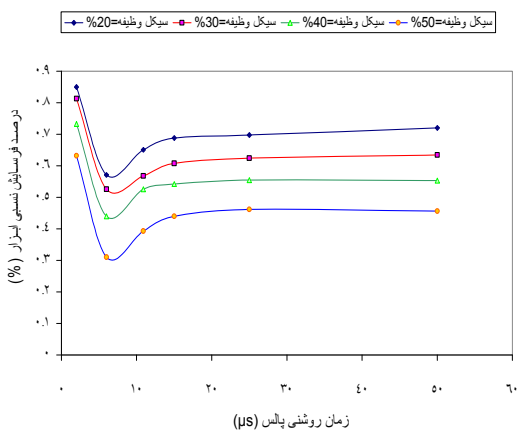
شکل ۲ تأثیر زمان روشنی پالس و سیکل وظیفه بر روی نرخ براده برداری در قطبیت منفی

**تأثیر قطبیت ابزار بر روی نرخ براده برداری.** مقایسه ی شکل های (۱ و ۲) تأثیر قطبیت ابزار را بر روی نرخ براده برداری نشان می دهد. همان طور که مشاهده می گردد در زمان های روشنی پالس بالاتر (بیش تر از ۵ میکروثانیه) نرخ براده برداری در قطبیت

می‌گردد. با افزایش بازده فرآیند، نرخ براده‌برداری از قطعه‌کار بسیار بیش‌تر از میزان خوردگی ابزار می‌شود و درصد فرسایش نسبی ابزار کاهش می‌یابد.



شکل ۳ تأثیر زمان روشنی پالس و سیکل وظیفه بر روی فرسایش نسبی ابزار در قطبیت مثبت



شکل ۴ تأثیر زمان روشنی پالس و سیکل وظیفه بر روی فرسایش نسبی ابزار در قطبیت منفی

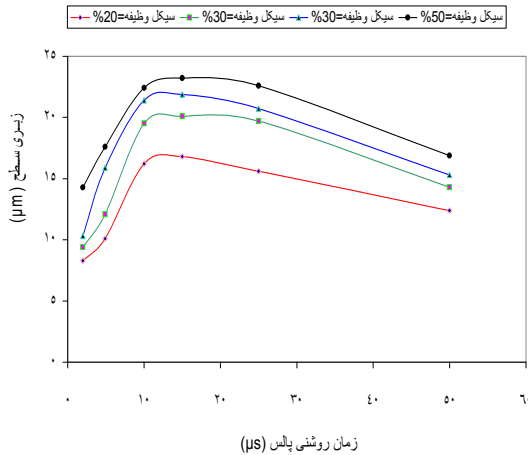
**تأثیر نوع قطبیت بر روی فرسایش نسبی ابزار.** مقایسه‌ی شکل‌های (۳ و ۴) تأثیر قطبیت ابزار را بر روی میزان فرسایش نسبی ابزار نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد در زمان‌های روش پالس پایین میزان فرسایش ابزار در حالت قطبیت مثبت بیش‌تر است ولی با افزایش زمان روش پالس میزان

براده‌برداری حرکت الکترون‌ها از سوی قطب منفی (قطعه‌کار) به طرف قطب مثبت (ابزار) می‌باشد که موجب خوردگی بیش‌تر ابزار در این شرایط می‌شود، ولی با افزایش زمان روشنی پالس، به دلیل گسترش شعاع کانال پلاسما، حرکت یون‌های مثبت از طرف ابزار (قطب مثبت) به طرف قطعه‌کار (قطب منفی)، آسان‌تر می‌شود و برخورد یون‌های مثبت مکانیزم غالب براده‌برداری می‌باشد و این عامل باعث کاهش درصد فرسایش نسبی ابزار هم‌زمان با افزایش زمان روشنی پالس می‌گردد.

شکل (۴) تأثیر زمان روشنی پالس بر روی فرسایش نسبی ابزار در حالت قطبیت منفی را نشان می‌دهد. مطابق این شکل هم‌زمان با افزایش زمان روشنی پالس، فرسایش نسبی ابزار در زمان‌های روشنی پالس پایین (تا ۱۵ میکروتانیه) کاهش می‌یابد و سپس روندی صعودی دارد. دلیل این مسأله را این‌گونه می‌توان توضیح داد که در زمان‌های روشنی پالس پایین، در کانال پلاسما، حرکت غالب توسط الکترون‌ها صورت می‌گیرد، در این حالت قطعه‌کار (قطب مثبت) محل برخورد الکترون‌ها بوده و محل اصلی براده‌برداری می‌باشد، اما با افزایش زمان روشنی پالس و گسترش شعاع کانال پلاسما، یون‌های مثبت آسان‌تر حرکت می‌کنند و حرکت غالب در کانال پلاسما توسط یون‌های مثبت صورت می‌گیرد که این پدیده باعث فرسایش بیش‌تر ابزار (قطب منفی) می‌گردد.

**تأثیر سیکل وظیفه بر روی فرسایش نسبی ابزار.** شکل‌های (۳ و ۴) تأثیر سیکل وظیفه بر روی فرسایش نسبی ابزار را نشان می‌دهند. مطابق این شکل‌ها با افزایش سیکل وظیفه در هر دو حالت قطبیت ابزار، میزان فرسایش نسبی ابزار روندی نزولی دارد. این پدیده بدین صورت توجیه می‌شود که با افزایش سیکل وظیفه به دلیل افزایش زمان مفید ماشین‌کاری و افزایش نرخ براده‌برداری، بازده فرآیند ماشین‌کاری بیش‌تر

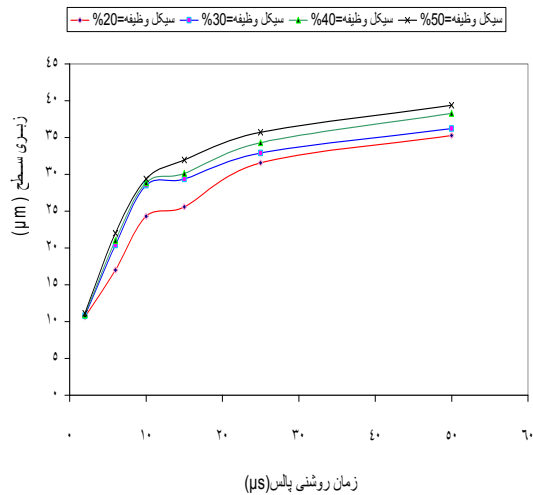
طول زمان ماشین کاری و انرژی جرقه‌ها بیش تر می شود و شعاع کانال پلاسما افزایش می یابد. با افزایش انرژی جرقه‌ها و شعاع کانال پلاسما، عمق و قطر چاله‌های به وجود آمده در روی قطعه کار افزایش می یابد و باعث افزایش مقدار زبری سطح می شود.



شکل ۶ تغییرات زبری سطح قطعه کار نسبت به مقدار مدت زمان روشنی پالس و سیکل وظیفه در قطبیت منفی

شکل (۶) تأثیر زمان روشنی پالس بر روی زبری سطح ماشین کاری شده را در حالت قطبیت منفی نشان می دهد. همان طوری که مشاهده می گردد، در قطبیت منفی نمودار را می توان به دو بخش تقسیم کرد. در بخش اول با افزایش زمان روشنی پالس، مقدار زبری سطح افزایش می یابد. این مسأله را این گونه می توان توجیه کرد که در زمان های روشنی پالس پایین (کم تر از ۱۵ میکروثانیه)، با افزایش زمان روشنی پالس به دلیل افزایش انرژی جرقه‌ها و در نتیجه افزایش عمق و قطر حفره های ایجاد شده روی سطح، مقدار زبری سطح قطعه کار به طور یک نواخت افزایش می یابد. در بخش دوم هم زمان با افزایش زمان روشنی پالس مقدار زبری سطح روندی نزولی دارد. دلیل این مسأله را این طور می توان بیان کرد که شعاع کانال پلاسما بر روی قطعه کار در قطبیت منفی همواره بزرگ تر از حالتی

خوردگی ابزار در حالت قطب منفی بیش تر می گردد. دلیل این مسأله را این طور می توان توجیه کرد که در حالت قطبیت منفی در زمان های روش پالس پایین به دلیل تحرک زیاد الکترون ها در کانال پلاسما، قطعه کار همواره محل برخورد الکترون ها می باشد و در معرض فرسایش قرار دارد. اما در حالت قطبیت مثبت در زمان های روش پالس پایین، ابزار در معرض برخورد الکترون ها می باشد و میزان فرسایش ابزار در این حالت بیش تر است ولی با افزایش زمان روشنی پالس و گسترش شعاع کانال پلاسما، یون های مثبت به سهولت حرکت می کنند و محل برخورد یون های مثبت (قطب منفی) منطقه ی اصلی فرسایش می باشد.



شکل ۵ تغییرات زبری سطح قطعه کار نسبت به مقدار مدت زمان روشنی پالس و سیکل وظیفه در قطبیت مثبت

**تأثیر زمان روشنی پالس بر روی ماکزیمم زبری سطح.** شکل (۵) تغییرات ماکزیمم زبری سطح قطعات ماشین کاری شده را بعد از عملیات ماشین کاری در قطبیت مثبت نشان می دهد. همان طور که ملاحظه می گردد با افزایش زمان روشن پالس، مقدار ماکزیمم زبری سطح افزایش می یابد. دلیل این مسأله را این طور می توان توضیح داد که با افزایش زمان روشنی پالس

قطب مثبت (قطعه کار)، چاله‌های مذاب با عمق کم تر و سطح بزرگ تر بر سطح قطعه کار ایجاد می‌شوند، در حالی که در قطبیت مثبت چاله‌های ایجاد شده بر سطح قطعه کار دارای قطر کم تر و عمق بیش تری می‌باشند و زبری سطح کم تر است.

### نتیجه گیری

(۱) نرخ براده برداری هم‌زمان با افزایش سیکل وظیفه در هر دو حالت قطبیت ابزار (مثبت و منفی) افزایش می‌یابد.

(۲) در قطبیت مثبت نرخ براده برداری هم‌زمان با افزایش زمان روشنی پالس افزایش می‌یابد در صورتی که در قطبیت منفی، با افزایش زمان‌های روشنی پالس، نرخ براده برداری ابتدا افزایش یافته ولی بعد از  $T_{on}=15\mu s$  کاهش می‌یابد.

(۳) با افزایش سیکل وظیفه در هر دو حالت قطبیت (مثبت و منفی)، فرسایش نسبی ابزار کاهش و زبری سطح افزایش می‌یابد.

(۴) در قطبیت مثبت با افزایش زمان روشنی پالس مقدار فرسایش نسبی ابزار کاهش یافته در صورتی که در قطبیت منفی، مقدار فرسایش نسبی ابزار ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد.

(۵) با افزایش زمان روشنی پالس در قطبیت مثبت، مقدار زبری ماکزیمم سطح افزایش می‌یابد و مقدار زبری ماکزیمم سطح در قطبیت مثبت، بیش تر از قطبیت منفی می‌باشد.

(۶) حالت بهینه برای حصول نرخ براده برداری بیشینه و فرسایش نسبی ابزار کمینه (در محدوده‌ی پارامترهای مورد آزمایش) زمان روشنی پالس ۵۰ میکروثانیه، قطبیت مثبت و سیکل وظیفه‌ی ۵۰٪ می‌باشد.

است که قطبیت ابزار مثبت انتخاب شده است. هم‌چنین به دلیل افزایش شعاع کانال پلاسما هم‌زمان با افزایش زمان روشنی پالس، در حالت قطبیت منفی در زمان‌های روشنی پالس بالاتر (بیش تر از ۱۵ میکروثانیه)، به دلیل گسترش زیاد شعاع کانال پلاسما بر سطح قطعه کار، چگالی جریان و شار گرمایی ورودی به سطح کاهش می‌یابد، در نتیجه میزان عمق ذوب سطحی کاهش می‌یابد و عمق چاله‌های به وجود آمده کم تر می‌شود و مقدار زبری سطح قطعه کار کاهش می‌یابد.

### تأثیر سیکل وظیفه بر روی ماکزیمم زبری سطح.

هم‌چنین شکل‌های (۶ و ۵) تأثیر سیکل وظیفه را بر روی زبری سطح قطعه کار  $R_{Max}$  در قطبیت مثبت و منفی نشان می‌دهند. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش سیکل وظیفه هر دو حالت قطبیت مقدار زبری سطح افزایش می‌یابد. دلیل این مسأله را چنین می‌توان بیان نمود که با افزایش سیکل وظیفه، زمان مفید ماشین کاری بیش تر شده و تعداد جرقه‌ها افزایش می‌یابد. افزایش تعداد جرقه‌ها باعث افزایش میزان ذوب سطحی و افزایش اندازه‌ی چاله‌های به وجود آمده بر سطح می‌گردد، در نتیجه مقدار زبری سطح  $R_{Max}$  به طور یک‌نواخت افزایش می‌یابد.

### تأثیر نوع قطبیت ابزار بر روی ماکزیمم زبری سطح.

هم‌چنین مقایسه‌ی شکل‌های (۶ و ۵) تأثیر قطبیت ابزار را بر زبری سطح قطعات ماشین کاری شده نشان می‌دهند. مطابق این شکل‌ها مقدار زبری سطح در حالت قطبیت مثبت بیش تر از قطبیت منفی است. دلیل این مسأله را چنین می‌توان بیان نمود که در حالت قطبیت منفی به دلیل گسترش شعاع کانال پلاسما بر



## مراجع

1. Mageough, J.A., "Advanced methods of machining", Chapman and Hall, Michigan, pp.1-2, (1987).
2. Yan H., Hua J., Shivpuri R., "Numerical simulation of finish hard turning for AISI H13 die steel", *Science and Technology of Advanced Materials*, Vol. 6, pp. 540-547, (2005).
3. Lee H. T., Hsu F. Ch., Tai T. Y., "Study of surface integrity using the small area EDM process with a copper-tungsten electrode", *Materials Science and Engineering*, Vol. A364, pp. 346-356, (2004).
4. Tebni W., Boujelbene M., Bayraktar E., "Parametric approach model for determining electrical discharge machining (EDM) conditions: Effect of cutting parameters on the surface integrity", *The Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 34, pp. 101-114, (2009).
5. Kokubo H., Takezawa H., Horio K., Mohri N., Yamazaki T., "A Study on the Material Removal Mechanism in EDM-Single Discharge Experiments with Low Melting Temperature Alloy-", *American Society for precision Engineering publications*", (2004).
6. Eubank Ph. T., Patel M. R., M. Barrufet A., "Theoretical Models of the Electrical Discharge Machining process: I. A Simple Cathode Erosion Model", *Journal of Applied Physics*, Vol. 66, pp. 4095-4103, (1989).
7. Boujelbene M., Bayraktar E., Tebni W., Ben Salem S., "Influence of machining parameters on the surface integrity in electrical discharge machining", *Archives of Materials Science and Engineering*, Vol. 37 (2), pp. 110-116, (2009).
8. Pandey A., Singh Sh., "Current research trends in variants of Electrical Discharge Machining: A review", *International Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 2(6), pp. 2172-2191, (2010).

