

## مطالعه تأثیر پارامترهای ورودی بر روی مشخصه‌های خروجی در فرآیند ماشین کاری به روش تخلیه الکتریکی

هادی عیوضی باقری<sup>۱</sup>  
حامد حسینقلی پور اصل<sup>۲</sup>  
علی رضا نظام آبادی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۹۱/۴/۱۳

تاریخ تصویب: ۹۱/۱۱/۹

### چکیده

در این مقاله تأثیر پارامترهای ورودی فرآیند برداشت ماده از سطوح (ماشین کاری) به روش تخلیه الکتریکی شامل زمان روشنی پالس، شدت جریان و ولتاژ ورودی بر روی مشخصه‌های خروجی این فرآیند (نرخ براده برداری، فرسایش نسبی الکتروود و زبری سطح) در ماشین کاری فولاد ابزار *AISI D6* مورد بررسی قرار گرفته است.

<sup>۱</sup> دانشجوی دکترای مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل (نویسنده مکاتبه کننده)،

hadibageri@yahoo.com

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات اراک.

<sup>۳</sup> استاد یار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات اراک.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد با افزایش زمان روشنی پالس، نرخ بُراده برداری و زبری سطح افزایش یافته فرسایش نسبی الکتروود کاهش می‌یابد. همچنین بر اساس نتایج به دست آمده در این تحقیق مشخص گردید با افزایش شدت جریان ورودی، نرخ بُراده برداری، فرسایش نسبی الکتروود (ابزار) و زبری سطح قطعه کار افزایش می‌یابند.

**واژه‌های کلیدی:** ماشین کاری تخلیه الکتریکی، زمان روشنی پالس، شدت جریان.

## ۱. مقدمه

امروزه بر اساس نیاز فن آوری پیشرفته به ساخت و ماشین کاری موادی با استحکام و سختی بالا و برداشت ماده از سطح قطعات و مواد مختلف، فرآیندهای جدید ماشین کاری جایگزین فرآیندهای سنتی شده است. یکی از مهم ترین این فرآیندها از جنبه کاربردی، ماشین کاری تخلیه الکتریکی (EDM<sup>۱</sup>) می باشد. ماشین کاری تخلیه الکتریکی فرآیندی است که در آن با اعمال ولتاژ پالسی و منقطع بین ابزار و قطعه کار که در سیال دی الکتریک غوطه ور است و ایجاد جرقه بین آن‌ها به ازای هر پالس، عمل بُراده برداری و برداشت ماده از سطح انجام می‌شود [۱].

فولادهای ابزار پرکربن با کروم (گروه D) که در این تحقیق به عنوان قطعه کار استفاده شده است، حاوی حداکثر ۲۵٪ کربن و ۱۲٪ کروم می‌باشند. کربن بالا همراه با کروم زیاد، باعث مقاومت سایش عالی در این نوع فولاد می‌شود. این نوع فولاد به اکسایش در دمای بالا مقاوم بوده و دارای چقرمگی بالایی می‌باشند. از این فولاد به طور گسترده برای ساخت قالب‌های بُرش ورق، شکل دادن، پلیسه‌گیری و نورد پیچ استفاده می‌شود.

<sup>۱</sup>. Electrical Discharge Machining

در رابطه با ماشین کاری تخلیه الکتریکی فولادها مطالعات مختلفی انجام شده است. بوژلبنه<sup>۱</sup> و همکاران [۳]، به بررسی تأثیر انرژی جرقه ها بر روی پارامترهای خروجی فرآیند EDM (نرخ براده برداری، فرسایش نسبی ابزار و ضخامت لایه دوباره منجمد شده) در ماشین کاری فولادهای 50CrV5 , X200Cr15 پرداخته اند. بر اساس گزارش آن ها، با افزایش انرژی جرقه ها، ضخامت لایه دوباره منجمد شده در سطح و نرخ براده برداری افزایش یافته فرسایش نسبی ابزار کاهش می یابد. دهاناناجی پرادهان<sup>۲</sup> و همکاران [۴] با در نظر گرفتن پارامترهای ورودی شدت جریان، زمان روشنی پالس و سیکل وظیفه بر روی زبری سطح قطعه کار رفتار الکترودهای (ابزار) مسی و آلومینیومی را بر روی ماشین کاری EDM فولاد EN-8 مورد بررسی قرار داده اند. در این بررسی مشخص شد که زبری سطح قطعات ماشین کاری شده به وسیله الکتروده مسی کمتر بوده سطح قطعه کار در این حالت دارای کیفیت بهتری می باشد. آموریم<sup>۳</sup> و همکاران [۵]، تأثیر جنس الکتروده (گرافیت و مس) و قطبش الکتروده مثبت و منفی را بر روی پارامترهای خروجی فرآیند ماشین کاری EDM فولاد AISI P20 مورد مطالعه قرار داده گزارش نموده اند که در وضعیت قطبش منفی، نرخ براده برداری الکتروده گرافیتی نسبت به الکتروده مسی بالاتر است و زبری سطح قطعه کار با استفاده از الکتروده مسی کمتر. تبنى<sup>۴</sup> و همکاران [۶]، تغییرات نرخ براده برداری، زبری سطح و ضخامت لایه دوباره منجمد شده در عملیات ماشین کاری تخلیه الکتریکی قطعه کارهای 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 داده اند. آن ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش انرژی تخلیه، زبری سطح افزایش یافته کیفیت سطح پایین تر می آید. در تحقیق شبگرد و همکاران [۷]، تأثیر پارامترهای ورودی (زمان روشنی پالس، قطبش ابزار و سیکل وظیفه) بر روی پارامترهای نرخ براده برداری، فرسایش نسبی ابزار و زبری سطح فولاد ابزار AISI H13 در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی مورد مطالعه قرار گرفته است. بر اساس نتایج تحقیق آن ها، با افزایش زمان روشنی پالس، نرخ

1. M. Boujelbene

2. Pradhan

3. Amorim

4. W. Tebni

براده برداری افزایش می‌یابد و فرسایش نسبی ابزار کاهش می‌یابد، همچنین با افزایش سیکل وظیفه، زبری سطح در هر دو حالت قطبش افزایش می‌یابد. تنگ لی<sup>۱</sup> و همکاران [۸]، تأثیر پارامترهای ورودی بر روی نرخ براده برداری، صافی سطح، گشادی کناری و متوسط ضخامت لایه دوباره منجمد شده در سطح را در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمایش‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که با افزایش زمان روشنی پالس مقدار زبری سطح و نرخ براده برداری افزایش می‌یابد. هدف این پژوهش مطالعه تأثیر پارامترهای ورودی (زمان روشنی پالس، شدت جریان و ولتاژ ورودی) بر روی نرخ براده برداری، زبری سطح و فرسایش نسبی ابزار (الکتروود) در ماشین کاری فولاد ابزار AISI D6 می‌باشد.

## ۲. مواد و روش تحقیق

ابتدا توسط عملیات برش اولیه، ماشین کاری و سنگ زنی تعداد ۳۲ عدد نمونه فولادی آماده شد. سپس جهت دستیابی به سختی مورد نظر (HRC ۶۰) عملیات سخت گردانی نمونه‌های فولادی با دقت انجام پذیرفت. همچنین برای آماده‌سازی ابزارهای مسی نیز عملیات برش کاری، ماشین کاری و پرداخت کاری انجام گردید. جدول ۱ جنس و ابعاد ابزار و قطعه کار آماده شده را نشان می‌دهد.

جدول ۱. جنس و ابعاد ابزار و قطعه کار

مواد	جنس	طول (mm)	قطر (mm)
ابزار	مس	۲۰	۱۸
قطعه کار	AISI D6	۲۰	۲۰

در این آزمایش‌ها زمان روشنی پالس، شدت جریان و ولتاژ ورودی به عنوان متغیرهای ورودی مستقل در نظر گرفته شدند، بدین ترتیب زمان روشنی پالس و شدت جریان در چهار سطح و ولتاژ ورودی در دو سطح تغییر کرده است. تمامی نمونه‌ها توسط دستگاه

<sup>۱</sup>. Hwa-Teng LEE

اسپارک (تهران-اکرام CNC-Azarakhsh) در حالت ایزوپالس<sup>۱</sup> به مدت ۲۰ دقیقه تحت عملیات ماشین کاری الکتریکی قرار گرفتند. همچنین جهت ایجاد شرایط یکسان شستشو در تمام آزمایش ها، از روش شستشوی غوطه وری استفاده گردید. قطعات فولادی و الکترودهای مسی قبل و بعد از عملیات ماشین کاری توسط ترازوی دیجیتالی AB265- Mettler Toledo با دقت 0.00001 gr توزین گردیدند. جدول ۲ متغیرهای ورودی آزمایش ها و سطوح تغییرات آن ها را نمایش می دهد.

جدول ۲. متغیرهای ورودی و سطوح تغییرات آن ها

دی الکتریک	نفت سفید
زمان روشنی پالس (میکرو ثانیه)	۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰
ولتاژ ورودی (ولت)	۲۵۰، ۱۵۰
شدت جریان (آمپر)	۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴
گپ ماشین کاری (میلیمتر)	۰/۲
سیکل وظیفه (درصد)	۵۰

برای محاسبه نرخ براده برداری (برداشت ماده از سطح) 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 ( $MRR^2$ ) نرخ براده برداری از قطعه کار ( $mm^3/min$ )،  $M_{W1}$  و  $M_{W2}$  به ترتیب وزن قطعه کار قبل و بعد از ماشین کاری برحسب گرم،  $\rho_w$  چگالی قطعه

1. Iso Pulse

2. Material Removal Rate

کار  $\gamma/\gamma\gamma$  ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ) و  $t$  زمان ماشین کاری (min)، ( $\text{TWR}^1$ ) درصد سایش نسبی ابزار (الکتروُد) بر حسب نسبت حجم ماده برداشته شده از مواد ابزار به حجم برداشته شده از مواد قطعه کار،  $M_{T1}$  و  $M_{T2}$  به ترتیب وزن ابزار قبل و بعد از ماشین کاری بر حسب گرم و  $\rho_T$  چگالی ابزار می باشد که مقدار آن برای ابزار مسی  $8/93$  ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ) در نظر گرفته شده است.

### ۳. بحث و نتایج

#### ۳.۱ تأثیر زمان روشنی پالس و شدت جریان بر روی نرخ براده برداری

شکل های ۱ و ۲ تأثیر زمان روشنی پالس و شدت جریان ورودی بر روی نرخ براده برداری را نشان می دهند. همان طور که مشاهده می گردد با افزایش زمان روشنی پالس و شدت جریان، نرخ براده برداری به صورت یکنواخت افزایش می یابد.

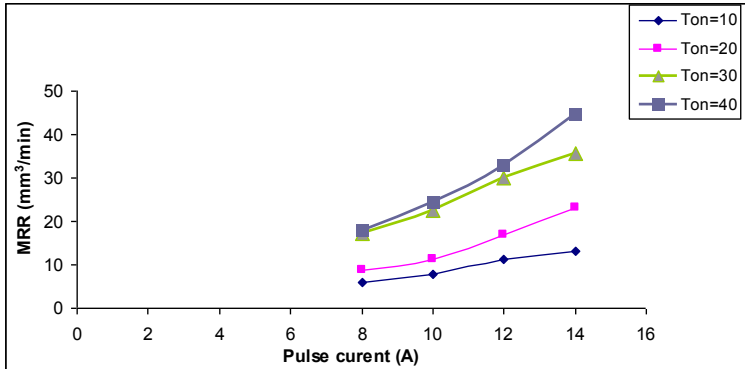
با توجه به رابطه ۳ پارامترهای اصلی تأثیر گذار بر روی انرژی جرقه‌ها در فرآیند

EDM زمان روشنی پالس ( $T_i$ )، شدت جریان ورودی ( $I$ ) و ولتاژ ( $U$ ) می باشند [۳].

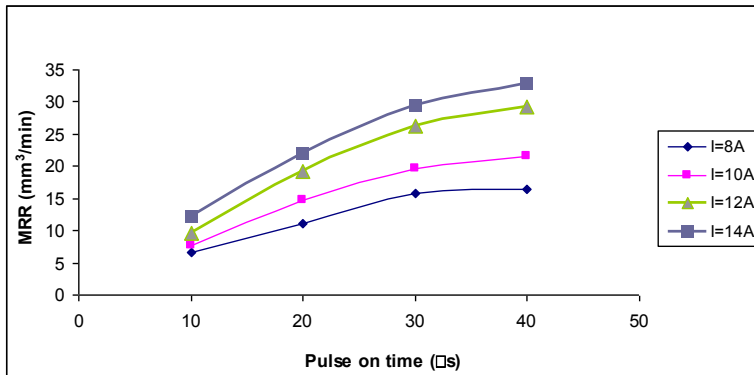
$$W = \int_0^{ton} U(I_i)I(T_i).dT_i \quad (3)$$

با افزایش زمان روشنی پالس و شدت جریان تا یک حد بهینه، به دلیل افزایش انرژی جرقه‌ها، نرخ ذوب افزایش می یابد و میزان ذوب قطعه کار بیشتر می شود و در نتیجه سرعت براده برداری افزایش می یابد. در واقع افزایش زمان روشنی پالس باعث افزایش طول زمان ماشین کاری شده و به دلیل افزایش دمای سطح قطعه کار، حجم چاله های مذاب افزایش می یابد و در نتیجه نرخ براده برداری بیشتر می شود. اما با افزایش شدت جریان، به دلیل افزایش چگالی جریان، مایع دی الکتریک سریع تر و راحت تر یونیزه می شود که این مسأله باعث افزایش نرخ براده برداری می گردد.

<sup>1</sup>. Tool Wear Ratio



شکل ۱. تغییرات نرخ بُراده برداری همزمان با افزایش شدت جریان ( $v=150V$ )

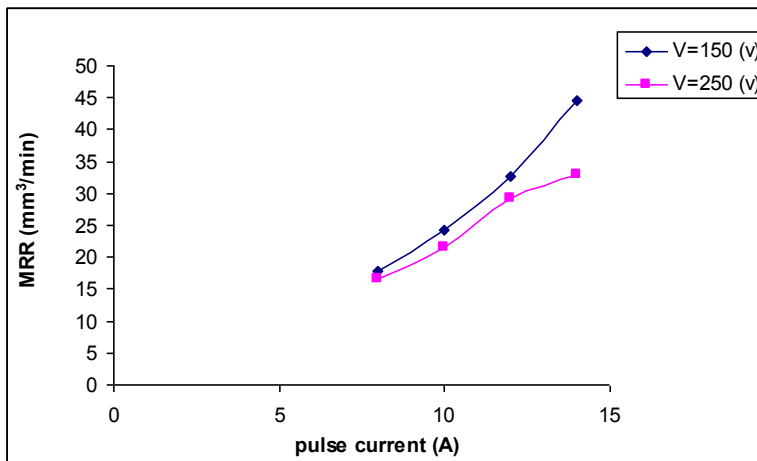


شکل ۲. تغییرات نرخ بُراده برداری همزمان با افزایش زمان روشنی پالس ( $v=250V$ )

### ۲.۳ تأثیر ولتاژ ورودی بر روی نرخ بُراده برداری

شکل ۳ تأثیر ولتاژ ورودی بر روی نرخ بُراده برداری همزمان با افزایش شدت جریان را نشان می‌دهد. با توجه به رابطه (۳) به نظر می‌رسد با افزایش ولتاژ ورودی، بایستی نرخ بُراده برداری به دلیل افزایش انرژی جرقه‌ها همواره افزایش یابد، اما همان‌طور که ملاحظه می‌شود مقدار نرخ بُراده برداری در ولتاژ ۲۵۰ ولت کمتر از مقدار نرخ بُراده برداری در ولتاژ ۱۵۰ ولت است. دلیل این امر را می‌توان بدین صورت توجیه کرد که افزایش ولتاژ ورودی تا یک حد مناسب باعث افزایش نرخ بُراده برداری شود ولی در ولتاژ ورودی پایین، کانال پلاسمای ایجاد شده در روی سطح قطعه کار فشرده‌تر می‌باشد که این مسأله

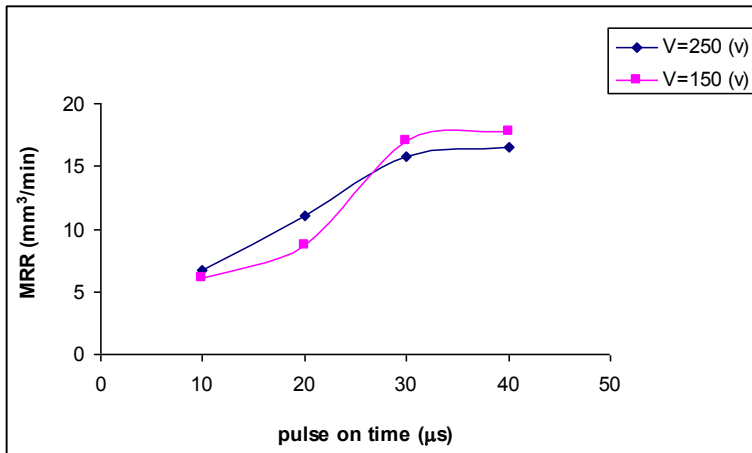
سبب به وجود آمدن پدیده مولتی اسپارک<sup>۱</sup> می‌شود [۹]. این پدیده باعث افزایش سرعت ماشین کاری و در نتیجه افزایش نرخ براده برداری بیشتر در ولتاژهای پایین تر می‌گردد. همچنین شکل ۴ تأثیر ولتاژ ورودی بر روی نرخ براده برداری را همزمان با افزایش زمان روشن پالس نشان می‌دهد. مطابق این شکل، در زمان‌های روشن پالس پایین، نرخ براده برداری در ولتاژ ۲۵۰ ولت بیشتر است، اما با افزایش زمان روشن پالس، نرخ براده برداری کاهش می‌یابد. دلیل این مسأله را این‌طور می‌توان تفسیر نمود که با توجه به وابستگی شدید شعاع کانال پلاسمای ایجاد شده در روی قطعه کار به زمان روشن پالس، کانال پلاسمای ایجاد شده در زمان‌های روشن پالس پایین فشرده‌تر بوده که این امر باعث افزایش نرخ براده برداری در ولتاژ ورودی بالاتر شده است. اما با افزایش بیشتر زمان روشن پالس به دلیل افزایش شعاع کانال پلاسما و با در نظر گرفتن گسترش شعاع کانال پلاسمای به وجود آمده در ولتاژ بالاتر، با بیشتر شدن زمان روشن پالس در ولتاژ ورودی ۲۵۰ ولت نرخ براده برداری کاهش می‌یابد [۱۰].



شکل ۳. تغییرات نرخ براده برداری همزمان با افزایش شدت جریان ( $T_{on}=40\mu s$ )

<sup>۱</sup>. multi sparking

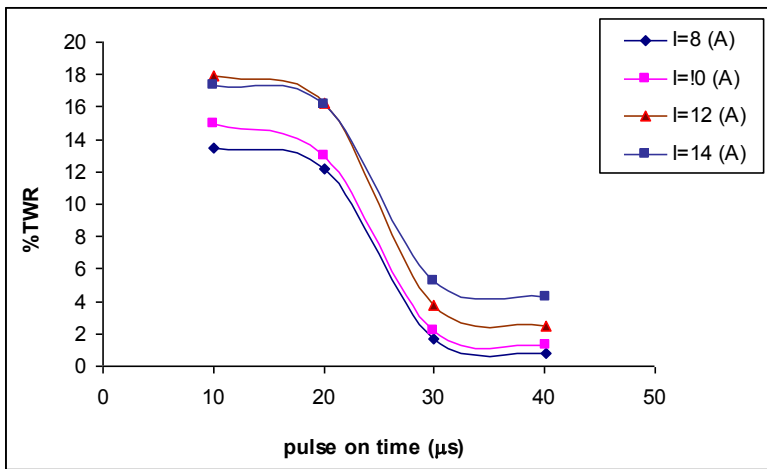




شکل ۴. تغییرات نرخ براده برداری همزمان با افزایش زمان روشنایی پالس ( $I=8A$ )

### ۳.۳ تأثیر زمان روشنایی پالس بر روی فرسایش نسبی ابزار

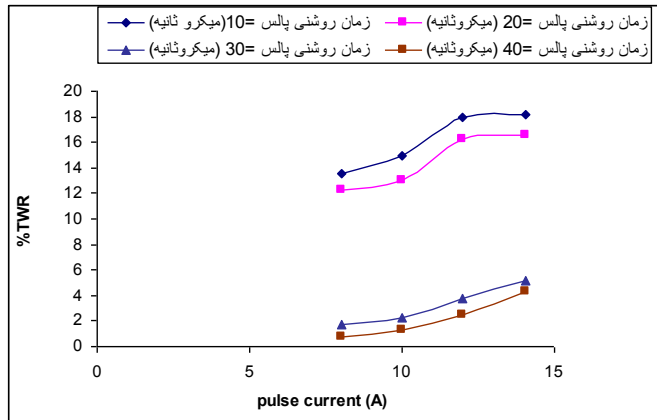
شکل ۵ تأثیر زمان روشنایی پالس بر روی فرسایش نسبی ابزار را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش زمان روشنایی پالس، فرسایش نسبی ابزار روندی نزولی دارد. دلیل این مسأله را این‌طور می‌توان بیان نمود که، در فرآیند (EDM) با قطبش مثبت، هنگامی که مدت زمان روشنایی پالس کم باشد، مکانیزم غالب جهت براده برداری حرکت الکترون‌ها از سوی قطب منفی (قطعه کار) به طرف قطب مثبت (ابزار) می‌باشد که موجب خوردگی بیشتر ابزار در این شرایط می‌شود، ولی با افزایش زمان روشنایی پالس، به دلیل گسترش شعاع کانال پلاسما، حرکت یون‌های مثبت از طرف ابزار (قطب مثبت) به طرف قطعه کار (قطب منفی)، راحت‌تر شده مکانیزم غالب برخورد یون‌های مثبت براده برداری می‌باشد و این عامل باعث کاهش درصد فرسایش نسبی ابزار همزمان با افزایش زمان روشنایی پالس می‌گردد [۷].



شکل ۵. تغییرات فرسایش نسبی ابزار همزمان با افزایش زمان روشنی پالس ( $v=150V$ )

### ۳.۴ تأثیر شدت جریان بر روی فرسایش نسبی ابزار

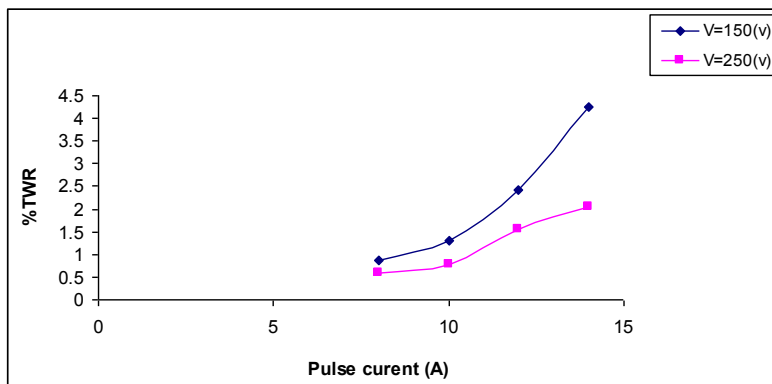
شکل ۶ تأثیر شدت جریان ورودی بر روی فرسایش نسبی ابزار را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود همزمان با افزایش شدت جریان، فرسایش نسبی ابزار افزایش می‌یابد. دلیل این امر را این‌طور می‌توان توجیه نمود که با توجه به پایین‌تر بودن دمای ذوب ابزار مسی ( $1084^{\circ}C$ ) نسبت به دمای ذوب قطعه کار فولادی، با افزایش شدت جریان به دلیل افزایش چگالی جریان و ایجاد جرقه‌های پر انرژی‌تر، مقدار بیشتری از سطح ابزار نسبت به قطعه کار ذوب می‌شود و به همین جهت با افزایش شدت جریان، فرسایش نسبی ابزار بیشتر می‌گردد.



شکل ۶. تغییرات فرسایش نسبی ابزار همزمان با افزایش شدت جریان ( $v=150V$ )

### ۳. ۵ تأثیر ولتاژ ورودی بر روی فرسایش نسبی ابزار

شکل ۷ تأثیر ولتاژ ورودی را بر روی فرسایش نسبی ابزار نشان می دهد. مطابق این شکل، مقدار فرسایش نسبی ابزار در ولتاژ پایین بیشتر است. دلیل این امر نیز به فشردگی کانال پلاسما در ولتاژ پایین تر مربوط می شود که در این حالت پدیده مولتی اسپارک باعث افزایش سرعت ماشین کاری می شود و به دلیل ایجاد جرقه های بیشتر بین ابزار و قطعه کار، فرسایش نسبی ابزار بیشتر می گردد.

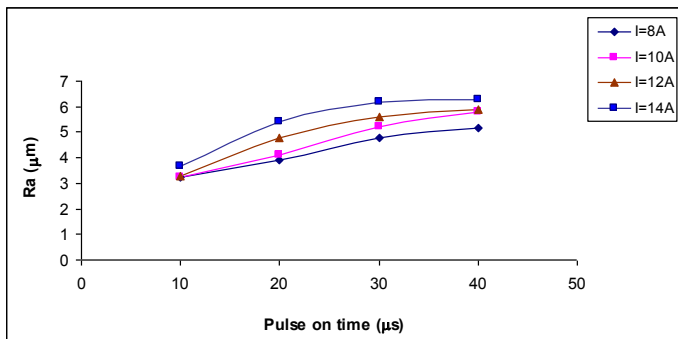


شکل ۷. تأثیر ولتاژ ورودی بر روی فرسایش نسبی ابزار همزمان با افزایش شدت جریان ( $T_{on}=40\mu s$ )

### ۶.۳ تأثیر زمانِ روشنی پالس و شدتِ جریان بر روی زبری سطح

شکل ۸ تغییراتِ زبری سطحِ قطعاتِ ماشین‌کاری شده را نسبت به تغییراتِ زمانِ روشنی پالس و شدتِ جریان نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد با افزایشِ زمانِ روشنی پالس، مقدارِ زبری میانگینِ سطح ( $R_a$ ) به‌طورِ یکنواخت افزایش می‌یابد. دلیلِ این مسأله را این‌طور می‌توان توضیح داد که با افزایشِ زمانِ روشنی پالس طولِ زمانِ ماشین‌کاری و انرژیِ جرّقه‌ها بیشتر شده شعاعِ کانالِ پلاسما افزایش می‌یابد، با افزایشِ انرژیِ جرّقه‌ها و شعاعِ کانالِ پلاسما تا حدِّ بهینه، عمق و قطرِ چاله‌های به وجود آمده در روی قطعه کار افزایش می‌یابد که باعثِ افزایشِ مقدارِ زبری سطح می‌شود.

همچنین مطابقِ شکل ۸ همزمان با افزایشِ شدتِ جریان، مقادیرِ زبری سطحِ قطعه کار افزایش می‌یابد. علتِ آن است که با افزایشِ شدتِ جریان به دلیلِ افزایشِ حجمِ چاله‌های مذابِ ایجاد شده در سطحِ قطعه کار، حجمِ فلزِ بیشتری از چاله مذاب برداشته می‌شود و چاله بزرگتری در روی سطح به وجود می‌آید که باعثِ افزایشِ زبری سطحِ قطعه کار می‌گردد [۷].

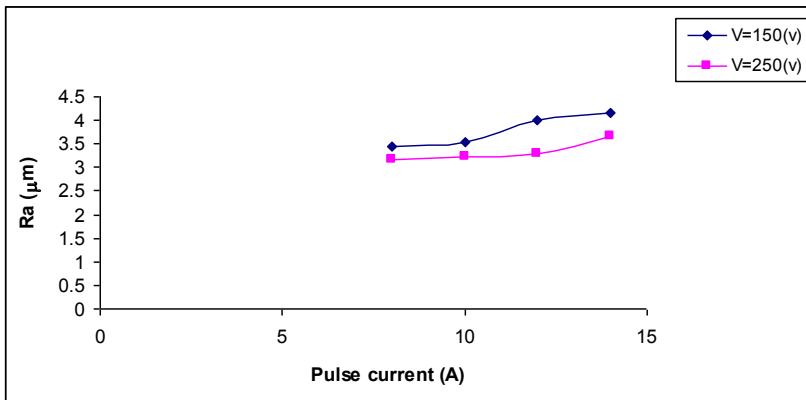


شکل ۸. تغییراتِ زبری سطح همزمان با افزایشِ زمانِ روشنی پالس و شدتِ جریان ( $v=250V$ )

### ۷.۳ تأثیر ولتاژ بر روی زبری سطح

شکل ۹ تأثیرِ ولتاژِ ورودی بر روی مقدارِ زبری سطحِ قطعه کار را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدارِ زبری سطح در ولتاژِ ورودی پایین‌تر بیشتر می‌باشد. دلیلِ این امر را

می توان با توجه به ایجاد کانال پلاسمای فشرده تر در ولتاژ پایین و در نتیجه به وجود آمدن چاله های مذاب عمیق تر بر روی سطح قطعه کار توجیه نمود که به دلیل افزایش حجم برداشت ماده از سطح قطعه کار در این حالت، چاله های عمیق تری بر روی سطح قطعه کار باقی می ماند که باعث افزایش زبری سطح قطعه کار می گردد.



شکل ۹. تأثیر ولتاژ ورودی بر روی زبری سطح همزمان با افزایش شدت جریان ( $T_{on}=10 \mu s$ )

#### ۴. نتیجه گیری

در این تحقیق تأثیر پارامترهای ورودی (زمان روشن پالس، شدت جریان و ولتاژ) بر روی پارامترهای خروجی فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی فولاد ابزار AISI D6 مورد بررسی قرار گرفت و نتایج مهم زیر به دست آمد:

۱. نرخ براده برداری همزمان با افزایش زمان روشن پالس زیاد می شود و مقدار فرسایش نسبی ابزار کاهش می یابد.
۲. با افزایش زمان روشن پالس و شدت جریان، زبری سطح قطعه کار روندی صعودی دارد.
۳. همزمان با افزایش شدت جریان، نرخ براده برداری بالاتر به ازای مقدار ولتاژ ورودی پایین حاصل می شود.
۴. فرسایش نسبی ابزار همزمان با افزایش شدت جریان بیشتر می شود.

۵. نرخ براده برداری بیشتر در زمان روشنی پالس پایین، به ازای ولتاژ ورودی بیشتر حاصل می‌شود.

## منابع

[۱] شبگرد، محمد رضا؛ افسری، احمد؛ عیوضی باقری، هادی؛ رحمانی، روح الله؛ «بررسی تأثیر پارامترهای ورودی بر روی عمق منطقه متأثر از حرارت (HAZ) فولاد AISI H13 در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی (EDM)» نشریه مواد نوین، جلد ۲، ۱۳۹۰، صفحه ۲۳ تا ۳۴.

[2] M. Boujelbene, E. Bayraktar, W. Tebni, S. Ben Salem; "Influence of machining parameters on the surface integrity in electrical discharge machining" *Archives of Materials Science and Engineering* **37**, No. 2 (2009) 110-116.

[3] D. Pradhan and S. C. Jayswal; "Behavior of Copper and Aluminum Electrodes on EDM Of EN-8 Alloy Steel"; *International Journal of Engineering Science and Technology*, **3**, No. 7 (2011) 5492-5499.

[4] F. L. Amorim and W. L. Weingaertner; "The Behavior of Graphite and Copper Electrodes on the Finish Die-Sinking Electrical Discharge Machining (EDM) of AISI P20 Tool Steel"; *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science & Engineering* **4** (2007) 366-371.

[5] W. Tebni, M. Boujelbene, and E. Bayraktar; "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* **34** (2009) 101-114.

[۶] شبگرد، محمد رضا؛ افسری، احمد؛ عیوضی باقری، هادی؛ رحمانی، روح الله «مطالعه تأثیر پارامترهای ورودی بر روی نرخ براده برداری، زبری سطح و نرخ خوردگی ابزار در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی فولاد ابزار AISI H13» نشریه علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک، جلد ۲۴، شماره ۱، ۱۳۹۱، صفحه ۱۲۳-۱۳۲.

[7] H. T. Lee, F. Ch. Hsu, and T. Y. Tai; "Study of surface integrity using the small area EDM process with a copper-tungsten electrode"; *Material Science and Engineering* **364** (2004) 346-356.

[8] A. Ali Khan; "Role of Heat Transfer on Process Characteristics during Electrical Discharge Machining"; *Developments in Heat Transfer* **21** (2011) 417-435.