

بررسی و مطالعه اثر سرعت دورانی قطعه کار در ماشین کاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک

فریدون رجبی نسب^۱، وحید عابدینی^{۲*}، محمدجعفر حداد^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۲۹ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۱۲	در این مقاله به مطالعه تجربی اثر جنس ابزار و سرعت دورانی قطعه کار در ماشین کاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک پرداخته شده است. بدین منظور از ۳ سطح سرعت دورانی قطعه کار و جریان تخلیه الکتریکی برای بررسی نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح قطعه کار استفاده شده است. پس از انجام آزمایشات و تعیین سرعت مناسب، برای مشاهده بهتر اثر سرعت انتخابی، مقایسه ای بین ماشین کاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک قطعه کار ثابت با ماشین کاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک قطعه کار دوار صورت گرفت. در نهایت کار، جهت بررسی اثر دی الکتریک، مقایسه ای بین ماشین کاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک قطعه کار ثابت با گاز دی اکسید کربن (CO ₂) و ماشین کاری تخلیه الکتریکی غوطه وری در نفت سفید انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که سرعت دورانی ۶۰۰ دور بر دقیقه باعث افزایش نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار و کاهش زبری سطح قطعه کار شده است. علاوه بر این، مقایسه بین ماشین کاری دوار و ثابت نشان می‌دهد که ماشین کاری در شرایط دوار قطعه کار بازده بالاتری دارد. ابزار مسی به دلیل مقاومت الکتریکی پایین، بیشترین نرخ براده برداری و با افزایش جریان تخلیه الکتریکی، بیشترین نرخ سایش را نسبت به سایر ابزارهای مورد آزمایش دارد. همچنین میزان زبری سطح قطعه کار در حالت ماشین کاری نیمه خشک قطعه کار ثابت با گاز CO ₂ کمتر از غوطه وری در نفت سفید می‌باشد.
واژگان کلیدی: ماشین کاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک، نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار، قطعه کار دوار.	

۱- مقدمه

کاربرد سیالات برشی در فرآیندهای ماشین کاری به علت مسائل اقتصادی و محیط زیست در حال حذف و یا کاهش می‌باشند. یکی از روش‌های ماشین کاری که نیاز به سیال دی الکتریک به میزان زیاد می‌باشد و مشکلات اقتصادی و امنیتی و بخصوص زیست محیط دارد، فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی است، بنابراین فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی خشک و نیمه خشک امروزه مورد توجه قرار گرفته است. اولین ماشین کاری تخلیه الکتریکی خشک در سال ۱۹۸۵ توسط مرکز تحقیقات سازمان هوا فضایی آمریکا انجام گرفت که در آن از گازهای آرگون و هلیوم به عنوان دی الکتریک در فرآیند سوراخ کاری تخلیه الکتریکی

استفاده شد [۱]. پس از این تحقیق، در سال‌های بعد تحقیقات وسیع‌تر پیرامون دی الکتریک گازی در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی صورت پذیرفت که رفته رفته منجر به معرفی فرآیندی به نام ماشین کاری تخلیه الکتریکی خشک شد. پس از سازمان هوا فضایی آمریکا، در سال ۱۹۹۷ کونیدا و همکاران به صورت جدی تحقیقات را روی این فرآیند شروع کردند و بیان کردند که برای انجام فرآیند باید از الکتروود چرخان با جداره ضخیم استفاده شود و همچنین اثرات زیست محیطی و آلودگی‌های فرآیند کاملاً حذف شده و به یکی از پاک‌ترین فرآیندهای ماشین کاری تبدیل شده است [۲]. وگنر و همکاران به بررسی تاثیر قطب مثبت قطعه کار در رفتار براده برداری در ماشین کاری تخلیه

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: v.abedini@semnan.ac.ir

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، گروه ساخت و تولید، دانشگاه سمنان

۲. استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، گروه ساخت و تولید، دانشگاه سمنان

۳. استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، گروه ساخت و تولید، دانشگاه تهران

در وایرکات و رسوبات باقی مانده (لایه ریکست^۴) در مقایسه با ماشین کاری تخلیه الکتریکی غوطه‌وری کمتر است، در ماشین کاری نیمه خشک با انرژی تخلیه کم، نرخ براده برداری بیشتر بوده و فاصله گپ کوچک تر است، با این حال تجمع حرارتی در الکتروود ابزار بالاتر بوده که منجر به شکست سیم در وایرکات و سایش الکتروود ابزار در سوراخ کاری تخلیه الکتریکی می شود [۷]. در سال ۲۰۰۸، تائو و همکاران سوراخ کاری تخلیه الکتریکی خشک و نیمه خشک با مخلوط آب با اکسیژن، نیتروژن و هلیوم را مطالعه کردند. آنها از اکسیژن برای عمل خشن کاری و استفاده از مخلوط آب و نیتروژن برای عمل پرداخت کاری استفاده کردند، آنها بیان کردند که ماشین کاری نیمه خشک مناسب برای پرداخت کاری است [۸]. باصری و همکاران به بررسی ماشین کاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک برای بررسی تاثیر جنس ابزار بر عملکرد ماشین کاری پرداختند. آنها این فرآیند را در سه سطح از انرژی تخلیه و با دو ابزار مسی و برنجی مورد مطالعه قرار دادند. آنها بیان کردند که با توجه به رسانایی الکتریکی^۵ بیشتر مس نسبت به برنج، نرخ براده برداری به دست آمده با ابزار مسی بیشتر از ابزار برنجی است بعلاوه نرخ سایش ابزار بدست آمده با ابزار برنجی، به دلیل دمای ذوب کمتر برنج نسبت به مس، بیشتر از ابزار مسی است و نرخ سایش ابزار با افزایش سرعت دورانی ابزار، نرخ سیال دی الکتریک و انرژی تخلیه بیشتر می شود [۹]. ژانگ و همکاران به مطالعه ماشین کاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک مخلوط پودر سیلیکون پرداختند. آنها نرخ براده برداری در دو قطعه کار w18cr4v و فولاد کربنی ۴۵ و نرخ سایش ابزار در دو ابزار برنج و مس را مطالعه کردند و اعلام کردند که افزایش آمپر باعث افزایش تعداد الکترون-ها و تعداد یون‌ها در کانال دیونیزه دی الکتریک شده که باعث می شود فشار تخلیه افزایش یابد که در همین راستا نرخ براده برداری افزایش می یابد. نرخ براده برداری و نرخ سایش ابزار بستگی به فرسایش حرارتی دارد و اثر دیونیزه دی الکتریک بین الکتروود و قطعه کار بازدهی ماشین کاری را تحت تاثیر قرار می دهد. آنها نتیجه گرفتند که ابزار برنجی در قطعه کار w18cr4v پایین ترین نرخ براده برداری و بالاترین نرخ سایش ابزار و ابزار مسی در قطعه کار فولاد

الکتریکی خشک پرداختند. آنها به اندازه گیری میزان نرخ براده برداری^۱ در عملکرد الکتروودها و قطعه کارهای مختلف در فرآیند سوراخ کاری تخلیه الکتریکی پرداختند. آنها بیان داشتند که فاصله گپ در فرآیند براده برداری که با گاز پر می شود با زمانی که با دی الکتریک مایع پر می شود متفاوت است، همچنین ازدیاد کانال پلاسما در زمانی که دی الکتریک مایع وجود ندارد بالا بوده و در فاصله گپ فضای خالی (خلاء) پلاسمایی وجود ندارد [۳]. همچنین در سال ۲۰۱۳ و گنر و همکاران به تحقیق در مورد اثر اکسیداسیون گازها در ثبات فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی خشک پرداختند و از هوا، اکسیژن، نیتروژن و دی اکسید کربن به عنوان دی الکتریک گازی استفاده کردند. آنها بیان داشتند که اکسیژن به علت داشتن راندمان بالا در اکسیداسیون نرخ براده برداری بالا داشته بعلاوه گاز دی اکسید کربن به خاطر خاصیت حفاظتی خوب، توانایی بهتری در کنترل و حفظ کانال پلاسما را دارد و میزان فشار گاز مختلف باعث به وجود آمدن اکسیداسیون مختلف و در نتیجه تاثیر بر روند نرخ براده برداری دارد [۴]. کوزاک و همکاران به بررسی فرزکاری تخلیه الکتریکی خشک پرداختند، هدف بررسی میزان نرخ براده برداری، زبری سطح^۲ و نرخ سایش ابزار^۳ در گازهای هوا، آرگون، نیتروژن و هگزا فلورید و مخلوط آنها بود. آنها بیان کردند فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی انجام شده در مخلوط هوا و هگزا فلورید روش مناسبی است به ویژه برای میکرو ماشین کاری های پیچیده و حساس زیرا در این حالت نسبت سایش ابزار بسیار ناچیز و در نتیجه ماشین کاری دقیق تری نسبت به فرآیند ماشین کاری غوطه‌وری بدست می آید. همچنین آنها اعلام کردند که گاز آرگون به علت پدیده‌ی اتصال کوتاه و جرقه آرک نرخ براده برداری پایین و زبری سطح بالایی دارد [۵]. ماشین کاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک اولین بار در سال ۱۹۸۷ توسط تانیمورا و همکاران با استفاده از مخلوط آب با هوا، نیتروژن و آرگون مورد بررسی قرار گرفت [۶]. در سال ۲۰۰۷ تائو و همکاران به مطالعه فرآیند برش کاری سیمی (وایرکات) و سوراخ کاری تخلیه الکتریکی خشک، غوطه‌وری و نیمه خشک پرداختند. آنها اظهار داشتند که در ماشین کاری خشک نرخ براده برداری بالا بوده و تیز بودن لبه برش

⁴ Recast Layer

⁵ Electrical conductivity

¹ Material Removal Rate-MRR

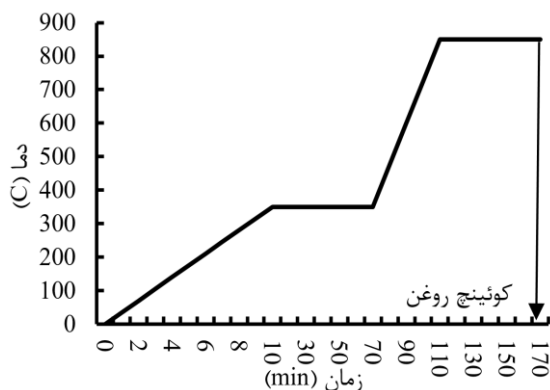
² Surface Roughness-SR

³ Tool Wear Rate-TWR

مطالعه را نشان می‌دهند.

۲-۲- تجهیزات استفاده شده در آزمایش

جهت انجام تست‌ها از دستگاه اسپارک پیش‌رانه مدل ۵۱۱ با ژنراتور ایزوپالس استفاده شده است. در این آزمایش قطعه کار توسط یک موتور AC سه فاز و اینورتر تحت دوران قرار می‌گیرد. در شکل (۲) نمایی از ساختار دستگاه نشان داده شده است. به منظور بهبود عمل شست‌وشو و دور کردن براده‌ها از گپ ماشین کاری دو عدد نازل در دو طرف قطعه کار در حال چرخش قرار داده شده است. یک رگلاتور برای تنظیم فشار گاز و یک شیر کنترل برای تنظیم جریان سیال دی‌الکتريک به کار گرفته شد. از گاز CO_2 به عنوان گاز مخلوط شونده با آب دی‌یونیزه استفاده شد. شکل‌های (۳) و (۴) نمایی از پاشش مخلوط آب و گاز، نازل و محل نصب آنها را نشان می‌دهند.



شکل ۱: نمودار عملیات حرارتی

۳-۲- شرح آزمایش

این مطالعه به بررسی اثر جنس ابزار و سرعت دورانی قطعه کار در گاز CO_2 پرداخته است. بدین منظور نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار، زبری سطح قطعه کار در سه سطح از جریان تخلیه الکتريکی و سرعت دورانی مطالعه شد. همچنین در نهایت کار فرآیند ماشین کاری نیمه‌خشک در حالت دوران قطعه کار با سرعت بهینه، با حالت نیمه‌خشک ثابت (بدون دوران قطعه کار) و حالت نیمه‌خشک ثابت با حالت غوطه‌وری در نفت سفید (حالت نرمال) مقایسه شده است. کلیه آزمایشات انجام شده در حالت ولتاژ پایین دستگاه صورت گرفته است. زمان انجام هر آزمایش ۲۰ دقیقه بوده، برای اندازه‌گیری نرخ براده برداری و نرخ سایش ابزار از ترازوی ساتوریس با دقت 0.0001 گرم استفاده شده است. وزن قطعه کار و ابزار قبل و بعد از انجام تست اندازه

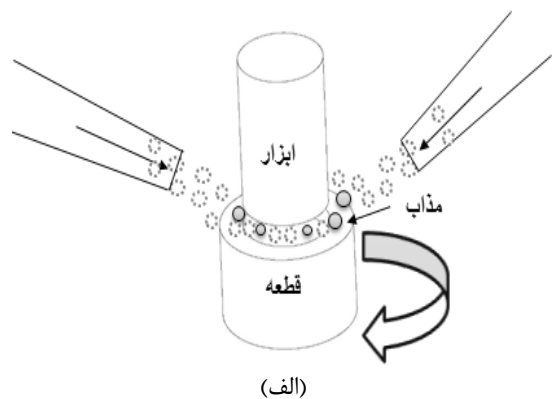
کربنی ۴۵ بالاترین نرخ براده برداری و پایین‌ترین نرخ سایش ابزار را دارد [۱۰]. در سال ۲۰۱۳ ژانگ و همکاران بیان کردند که انرژی تخلیه، زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، نرخ سیال دی‌الکتريک و غلظت پودر مخلوط شونده تاثیر بیشتری نسبت به سرعت چرخش ابزار و فشار هوا در نرخ براده برداری دارند [۱۱]. باصری و همکاران به مقایسه ماشین کاری تخلیه الکتريکی نیمه خشک با ماشین کاری خشک و غوطه‌وری در سه سطح از جریان تخلیه الکتريکی پرداختند. آنها بیان داشتند که در آمپر بالا نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح در ماشین کاری در حالت غوطه‌وری بالا می‌باشد و ماشین کاری خشک کمترین نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح را دارد، در حالی که در آمپر پایین، ماشین کاری نیمه‌خشک بیشترین نرخ براده برداری و کمترین زبری سطح را دارد [۱۲].

با توجه به بررسی تحقیقات انجام شده بر روی ماشین کاری تخلیه الکتريکی نیمه‌خشک مشخص گردید که تحقیقات اندکی بر روی اثر جنس ابزار در این فرآیند انجام گرفته است بنابراین ۲ جنس ابزار (مس-کروم و مس-قلع) علاوه بر جنس ابزار مس مورد مطالعه قرار گرفت و اثر پارامترهای خروجی (نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار، زبری سطح) در سرعت دورانی مختلف قطعه کار بررسی شد.

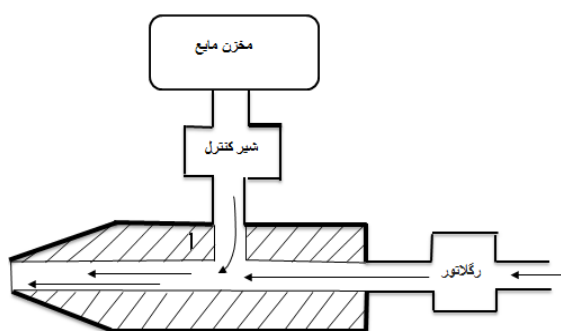
۲- مواد و روش انجام آزمایش

۲-۱- قطعه کار و ابزار

قطعه کار مورد استفاده در این مطالعه فولاد استوانه‌ای از جنس (AISI4140)، (42crn04) است که سطوح پیشانی آن سنگ زنی و پرداخت کاری شده و قطر ۲۵ میلی متر و ارتفاع ۲۰ میلی‌متر دارد که در صنعت به طور وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. قطعه کار جهت سخت کاری، عملیات حرارتی شده و سختی 50 ± 2 را کول دارد، در شکل (۱) نمودار عملیات حرارتی قطعه کار آمده است. آلیاژهای مس به عنوان ابزارهای مورد مطالعه در این پژوهش می‌باشند. قطر ابزار مس، مس-کروم، مس-قلع به کار رفته $15 + 0.5$ میلی‌متر بوده است. به منظور مشخص شدن درصد عناصر موجود در ابزارهای مورد مطالعه، آنالیز XRF روی آنها انجام گرفته است. جداول ۱ تا ۵ به ترتیب ترکیبات قطعه کار مورد مطالعه و خواص فیزیکی عناصر مس، کروم، قلع، AISI4140 و آنالیز XRF ابزارهای مورد

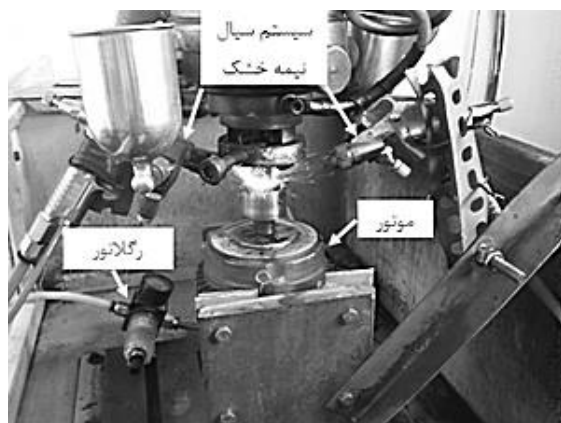


(الف)



(ب)

شکل ۳: (الف) نمای از پاشش مخلوط آب و گاز، (ب) نازل

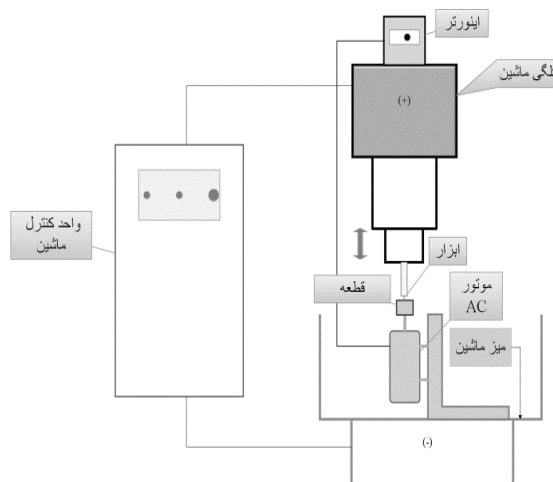


شکل ۴: نمایی از آزمایش

جدول ۳: آنالیز XRF ابزار مس

عنصر	درصد وزنی
Cu	۹۹/۴۴
Sb	۰/۰۰۷
Sn	۰/۰۰۶
Ca	۰/۰۲
S	۰/۰۲۵
Cl	۰/۰۲۶
Mg	۰/۴۷

گیری شده است. نرخ براده برداری (MRR) و نرخ سایش ابزار (TWR) با معادلات (۱) و (۲) بدست می آیند. جداول ۶ و ۷ به ترتیب شرایط آزمایش و خواص الکتریکی، حرارتی و مکانیکی گاز CO₂، آب دیونیزه و نفت سفید در دمای اتاق را نشان می دهند.



شکل ۲: نمای شماتیک از حالت دستگاه

جدول ۱: ترکیبات قطعه کار [۱۳]

عنصر	درصد وزنی
Mo	۰/۰-۱۵/۳۵
Cr	۰/۱-۸/۱
Si	۰/۰۴
P	۰/۰۳۵
Mn	۰/۷۵-۱
C	۰/۰-۳۸/۴۳
Fe	تعادل

جدول ۲: خواص فیزیکی مس، کروم، قلع و AISI4140

AISI4140	قلع	کروم	مس	وزن مخصوص (g/cm ³)
۷/۸۵	۵/۷۶	۷/۱۹	۸/۹۶	۷/۸۵
۱۴۱۶	۲۳۲	۱۹۰۷	۱۰۸۴	نقطه ذوب (°C)
۲۲۲	۱۱۵	۱۱۸	۱۵/۴۳	مقاومت الکتریکی (nΩm)
۰/۴۷	۰/۲۱	۰/۴۶	۰/۳۹	گرمای ویژه (KJ/kg k)
۴۲/۶	۶۷	۹۴	۴۰۱	رسانای حرارتی (W/mk)

جدول ۷: خواص الکتریکی، حرارتی و مکانیکی گاز CO₂، آب دیونیزه و نفت سفید در دمای اتاق [۷ و ۱۴ و ۱۵]

نفت سفید	آب دیونیزه	CO ₂	
۱۴-۲۲	۱۳	۰/۸۸	مقاوت الکتریکی (MV/m)
۰/۱۴۹	۰/۶۰۶	۰/۰۱۴	رسانایی گرمایی (W/m-k)
۴/۱۹	۴/۱۹	۰/۸۴	ظرفیت گرمایی (J/g-k)
۱/۶۴	۰/۹۲	۰/۰۱۴	دینامیک ویسکوزیته (g/m-s)

$$MRR = \frac{W_r}{T_m} \times 1000 \left(\frac{mg}{min} \right) \quad (1)$$

$$TWR = \frac{T_r}{T_m} \times 1000 \left(\frac{mg}{min} \right) \quad (2)$$

در معادلات بالا W_r مقدار ماده برداشته شده از قطعه کار (گرم) و T_r مقدار ماده برداشته شده از ابزار (گرم)، T_m زمان ماشین کاری (دقیقه) می‌باشد. زبری سطح نمونه قطعه کار ماشین کاری شده با زبری سنج مدل ماهر مارسوف PS1 اندازه گرفته شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اثر سرعت دورانی قطعه کار و جنس ابزار بر

نرخ براده برداری

شکل (۵) نشان می‌دهد که با افزایش سرعت دورانی قطعه کار نرخ براده برداری افزایش یافته است. در سرعت دورانی پایین، براده‌ها نمی‌توانند به راحتی از فاصله گپ ماشین کاری به بیرون دفع شوند و این عامل باعث ایجاد جرقه‌های غیر طبیعی (آرک) شده و زمان غیر ماشین کاری افزایش می‌یابد. بنابراین با افزایش سرعت دورانی قطعه کار (۶۰۰ دور بر دقیقه) به دلیل بهبود دفع براده‌ها از گپ ماشین کاری و یکنواخت شدن جرقه‌زنی، نرخ براده برداری افزایش یافته است. سرعت دورانی بالا باعث ایجاد نیروی گریز از مرکز که مطابق معادله (۳) محاسبه می‌شود، می‌گردد [۱۶]، نیروی گریز از مرکز به قطرات مذاب اعمال می‌شود و موجب دفع بهتر ذرات مذاب از گپ ماشین کاری شده که منجر به افزایش نرخ براده برداری گردیده است. در رابطه پایین m_d جرم قطرات مذاب و N سرعت دورانی قطعه کار می‌باشد.

$$F_c = \frac{m_d 4\pi^2 N^2}{36000} \quad (3)$$

جدول ۴: آنالیز XRF ابزار مس-کروم

عنصر	درصد وزنی
Cu	۹۷/۵۲۴
Cr	۰/۷۹۵
S	۰/۲۰۱
K	۰/۰۳۹
Ca	۰/۰۷۱
Fe	۰/۰۸۴
Si	۰/۱۵۳
Cl	۰/۲۲۴
Al	۰/۹۰۹

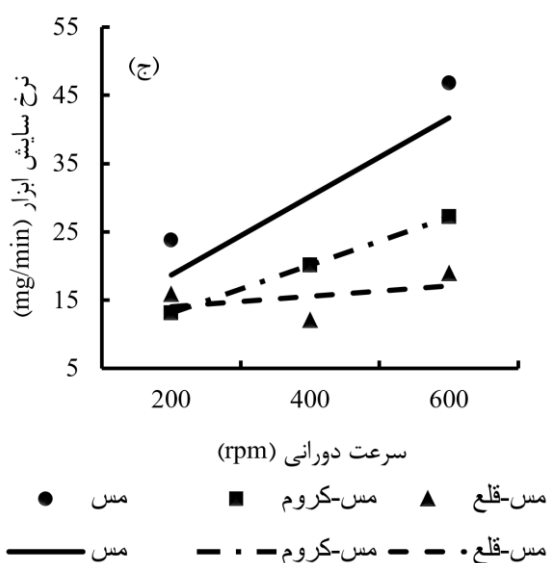
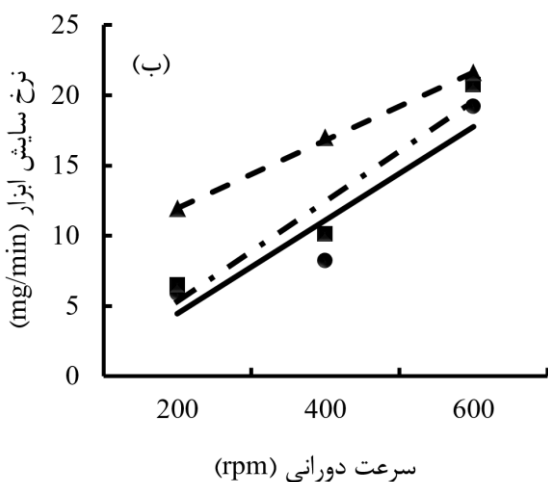
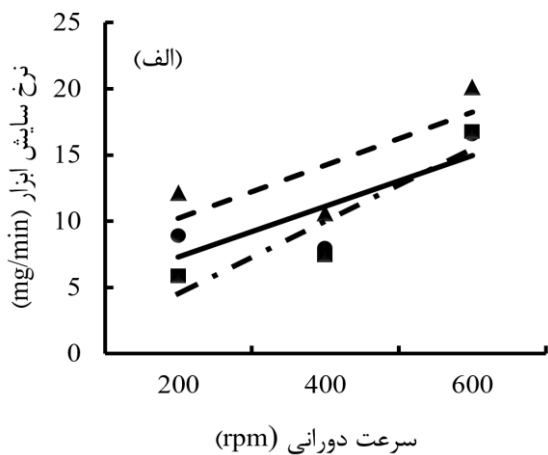
جدول ۵: آنالیز XRF ابزار مس - قلع

عنصر	درصد وزنی
Cu	۸۶/۴۷۲
Sn	۱۲/۲۸۶
S	۰/۱۱۵
Si	۰/۰۴۹
Fe	۰/۰۶۴
Al	۰/۰۶۹
Cl	۰/۱۲۶
Zn	۰/۸۱۹

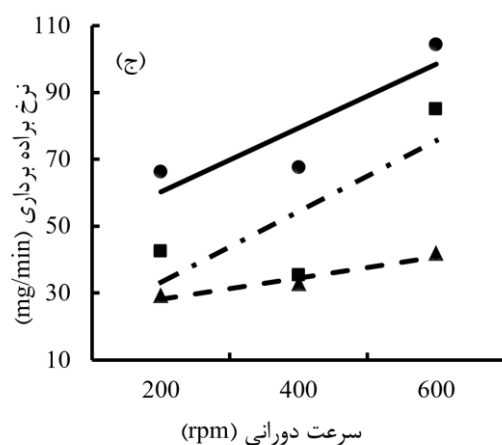
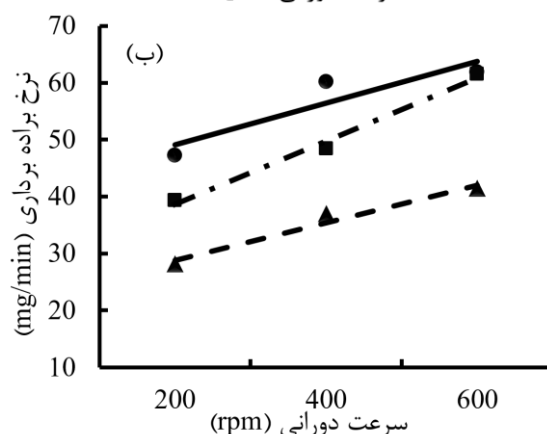
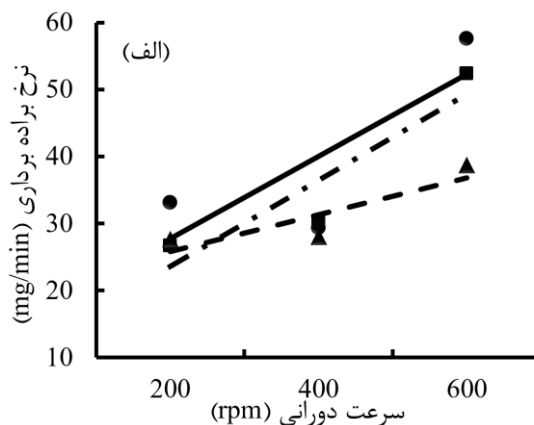
جدول ۶: پارامترهای آزمایش

پارامترها	مقدار		
جریان تخلیه الکتریکی (A)	۵	۱۰	۱۵
زمان روشنی پالس (μs)	۱۲	۲۴	۵۰
زمان خاموشی پالس (μs)	۶	۱۲	۲۴
ولتاژ گپ (V)	۳۰		
سرعت دوران قطعه کار (rpm)	۲۰۰	۴۰۰	۶۰۰
نرخ سیال (ml/hr)	۱۲۰۰		
فشار گاز (bar)	۱		
جنس ابزار	مس	مس-کروم	مس-قلع
نوع گاز	CO ₂		
قطب الکتروود [+]			

آیزوپالس، زمان تاخیر جرقه تأثیری بر زمان روشنایی پالس و مقدار انرژی هر جرقه ندارد، ولی افزایش زمان تاخیر جرقه موجب افزایش زمان غیرماشین کاری شده و نرخ براده برداری را کاهش می دهد.



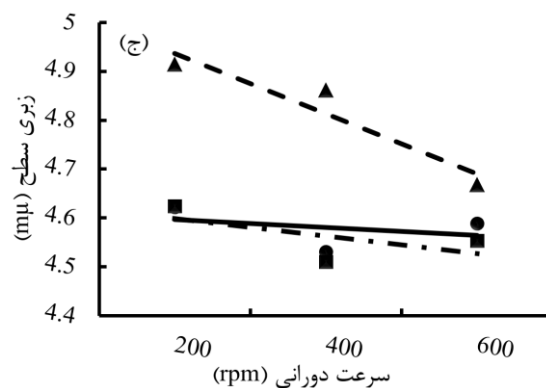
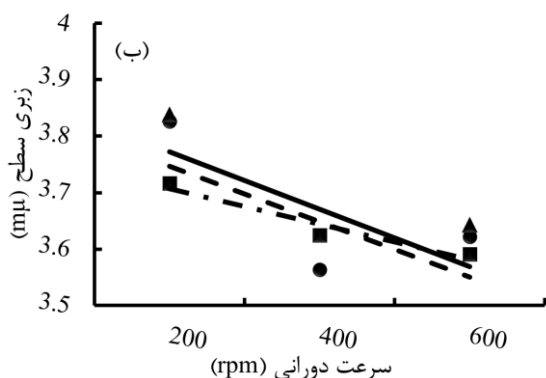
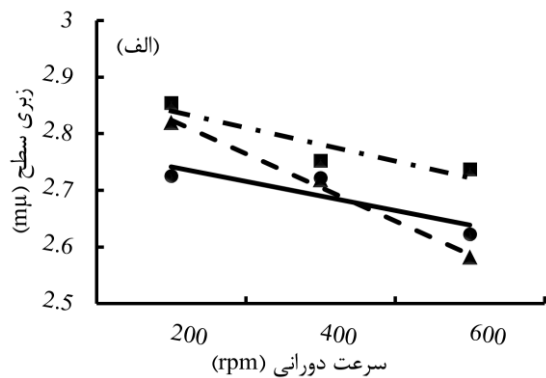
شکل ۶: اثر سرعت دورانی و جنس ابزار در نرخ سایش ابزار در گاز CO₂، (الف) ۵ آمپر، (ب) ۱۰ آمپر، (ج) ۱۵ آمپر



شکل ۵: اثر سرعت دورانی و جنس ابزار در نرخ براده برداری در گاز CO₂، (الف) ۵ آمپر، (ب) ۱۰ آمپر، (ج) ۱۵ آمپر

در هر سه سطح از شدت جریان تخلیه الکتریکی ابزار مس بهتر عمل کرده است، ابزارهای مس-کروم، مس-قلع به دلیل مقاومت الکتریکی بالایی که عنصر کروم و قلع مخلوط در آنها دارد، نرخ براده برداری کمتری داشته اند. به خاطر درصد بالای مس موجود در ابزار مس - کروم این ابزار بهتر از مس - قلع عمل می کند. اگر چه با استفاده از ژنراتور

افزایش جریان تخلیه اول کاهش یافته و با افزایش بیشتر زبری سطح آن افزایش یافته است. ابزار مس - قلع بخاطر آلودگی بیشتر گپ ماشین کاری آن و ایجاد اتصال کوتاه در آمپرهای بالا زبری بیشتری داشته است، همچنین مقاومت الکتریکی بالای ابزار مس - قلع باعث تخلیه شار الکتریکی^۱ نامنظم و غیریکنواخت به سطح قطعه شده که باعث ایجاد حفره‌های غیریکنواخت و نامنظم در آن گردیده که عامل دیگری بر افزایش زبری سطح می‌باشد.



● مس ■ مس-کروم ▲ مس-قلع
 — مس - - - مس-کروم . . . مس-قلع

شکل ۷: اثر سرعت دورانی و جنس ابزار در زبری سطح در گاز CO₂، (الف) ۵ آمپر، (ب) ۱۰ آمپر، (ج) ۱۵ آمپر

۳-۲- اثر سرعت دورانی قطعه کار و جنس ابزار بر نرخ سایش ابزار

نرخ سایش ابزار با افزایش سرعت دورانی قطعه کار بیشتر می‌شود. با افزایش سرعت دورانی قطعه کار پایداری فرآیند افزایش یافته و تعداد پالس‌های طبیعی شرکت‌کننده در عمل ماشین کاری بیشتر می‌شوند در نتیجه نرخ سایش ابزار افزایش می‌یابد. سایش ابزار با نرخ براده‌برداری رابطه مستقیم داشته و در سرعت‌های دورانی که نرخ براده‌برداری بالا بوده سایش ابزار نیز افزایش یافته است که در شکل (۶) نشان داده شده است. یکی از پدیده‌های اصلی و مخرب در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی پدیده‌ی آرک می‌باشد. که روی تمام پارامترهای خروجی فرآیند تاثیر می‌گذارد، آرک باعث افزایش زمان ماشین کاری و زبری سطح می‌شود همچنین روی نرخ براده‌برداری و نرخ سایش ابزار تاثیر می‌گذارد. در جریان تخلیه ۵ و ۱۰ آمپر در ابزار مس - قلع به علت آلودگی گپ پدیده‌ی آرک در آن اتفاق افتاده که نرخ براده‌برداری را کاهش داده و سایش ابزار افزایش یافته است، در آمپرهای پایین به علت کم بودن میزان نرخ براده‌برداری نسبت به آمپرهای بالاتر عامل رسانای حرارتی تاثیر بیشتری داشته و در نتیجه نمودارهای مربوط به مس و مس - کروم (به خاطر درصد بالای مس موجود در ابزار مس - کروم) در ۵ و ۱۰ آمپر پایین تر از مس - قلع می‌باشند، در آمپرهای بالاتر به علت افزایش میزان نرخ براده‌برداری رسانای الکتریکی بر رسانای حرارتی مس ارجحیت داشته و در نتیجه میزان سایش ابزار افزوده شده است.

۳-۳- اثر سرعت دورانی قطعه کار و جنس ابزار بر زبری سطح قطعه

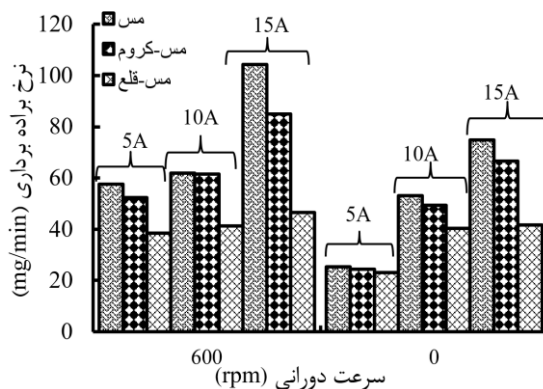
افزایش سرعت دورانی سبب افزایش کیفیت سطح قطعه کار شده است. افزایش سرعت دورانی قطعه کار سبب یکنواختی بیشتر در جرقه‌زنی بین ابزار و قطعه کار شده و در نتیجه فرسایش سطح قطعه کار به صورت یکپارچه‌تر انجام می‌گیرد که باعث شده میزان برجستگی‌ها و فرورفتگی‌ها کمتر گردد و کیفیت سطح قطعه بهتر شود همچنین افزایش سرعت دورانی سبب بهتر شدن شرایط خروج براده‌ها از محل واکنش می‌شود. همان طوری که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، ابزار مس - کروم با افزایش جریان تخلیه زبری سطح آن کاهش یافته است اما در ابزار مس - قلع با

^۱ Electrical flux

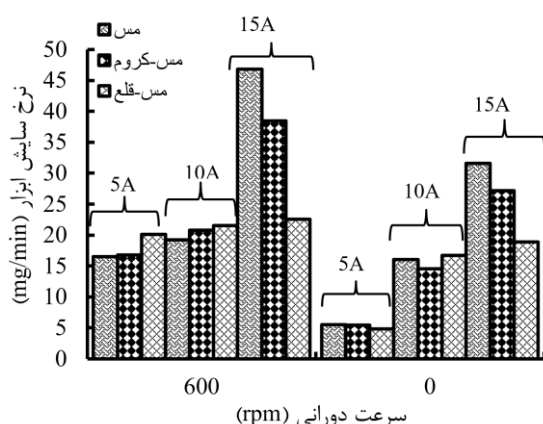
منظور مشاهده کردن بهتر اثر سرعت دورانی انتخابی در ماشین کاری نیمه خشک، مقایسه‌ای بین ماشین کاری نیمه خشک ثابت با قطعه کار دوار صورت گرفته است. شکل‌های (۸) تا (۱۰) نشان می‌دهند که سرعت دورانی باعث افزایش نرخ براده برداری و سایش ابزار و کاهش زبری سطح در ماشین کاری نیمه خشک قطعه کار دوار نسبت به قطعه کار ثابت شده است. یکی از عواملی که باعث سرعت بخشیدن به نرخ براده برداری در ماشین کاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک دوار نسبت به ماشین کاری نیمه خشک ثابت می‌گردد، درگیر شدن سطح مقطع بیشتری از ابزار با قطعه کار برای عمل جرقه زنی در زمان کم است. هر چه سرعت دوران زیاد شود، زمان رسیدن به سطح مقطع بیشتر برای جرقه زنی کاهش می‌یابد که این عامل سرعت براده برداری را بالا می‌برد بعلاوه سرعت دورانی باعث یکنواختی فرسایش در سطح قطعه کار شده که زبری کاهش پیدا کرده است.

۳-۵- پردازش تصویر بر سطح ابزار

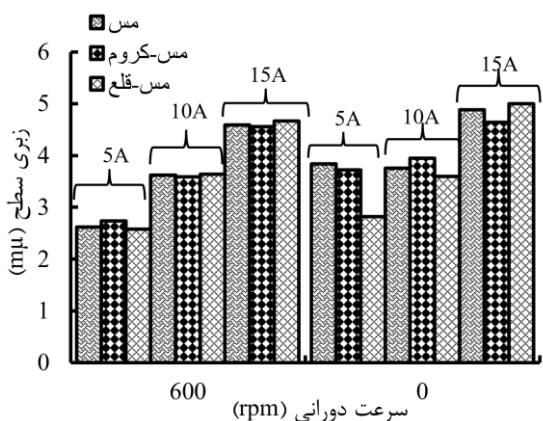
سایش ابزار و سوختگی آن یکی از مشکلاتی است که در فرآیند تخلیه الکتریکی ایجاد می‌شود که برای مراکز تولید همراه با هزینه می‌باشد، بعلاوه باعث کاهش کیفیت قطعه نهایی می‌شود. به همین منظور به بررسی سطح ابزارها پرداخته شده است. شکل (۱۱) عکس از سطح الکتروود ابزار را با میکروسکوپ نوری مدل زایس المپیوس با بزرگ نمایی ۵۰ برابر نشان می‌دهد که با استفاده از نرم افزار متلب پردازش تصویر شده و به صورت باینری (سیاه سفید) در آمده است. درصد رنگ سیاه درون تصاویر از تعداد پیکسل های نمایش داده شده مطابق رابطه (۴) محاسبه می‌گردد. شکل (الف) عکس سطح ابزارها قبل از انجام آزمایش است. درصد زیر هر کدام نشان دهنده‌ی درصد رنگ سیاه می باشد که این رنگ میزان مواد و عناصر موجود در ابزار را نشان می‌دهد که رنگی غیر از رنگ طبیعی جنس ابزار دارند. و شکل (ب) عکس سطح ابزارها بعد از انجام آزمایش در حالت نیمه خشک با سرعت ۶۰۰ دور بر دقیقه است. درصد رنگ سیاه نشان دهنده‌ی سوختگی و تغییر رنگ ابزار در اثر حرارت و چسبیدن مذاب به سطح ابزار می‌باشد. با کم کردن درصدهای بدست آمده از قبل و بعد از فرآیند، میزان درصد رنگ سیاه واقعی به ترتیب ۵۳٪، ۶۱٪ مس - کروم، ۶۳٪ مس - قلع بوده است بعلاوه شکل (ج) ماشین کاری نیمه خشک ثابت را نشان داده که به ترتیب، ۶۰٪، ۶۴٪



شکل ۸: مقایسه نرخ براده برداری در ماشین کاری نیمه خشک ثابت با دوار در گاز CO₂



شکل ۹: مقایسه سایش ابزار در ماشین کاری نیمه خشک ثابت با دوار در گاز CO₂



شکل ۱۰: مقایسه زبری سطح در ماشین کاری نیمه خشک ثابت با دوار در گاز CO₂

۳-۴- مقایسه ماشین کاری نیمه خشک ثابت با قطعه کار دوار

بعد از بررسی سرعت دورانی در ابزارهای مختلف مشاهده شد که سرعت دورانی ۶۰۰ دور بر دقیقه به عنوان مناسب ترین و بهینه ترین سرعت در این مطالعه بوده است لذا به

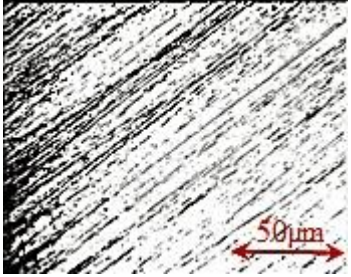
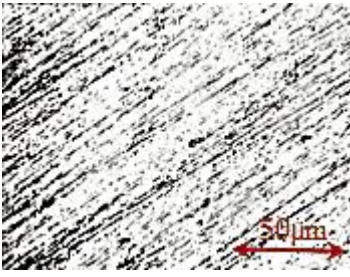
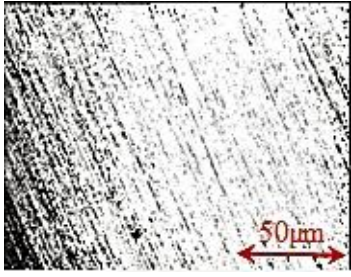
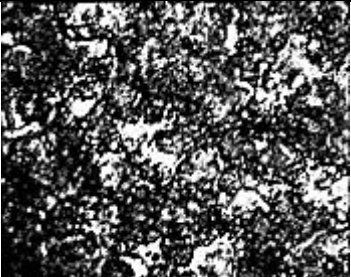
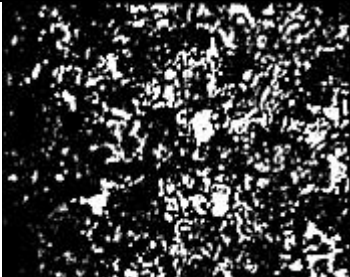

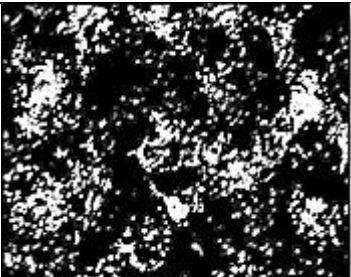
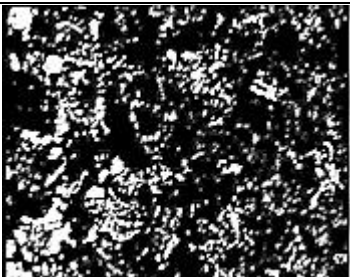
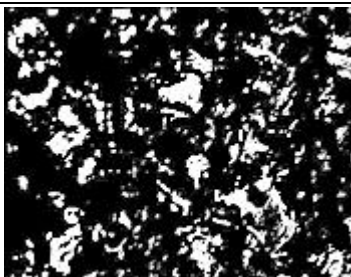
موجب دفع بهتر ذرات مذاب از محل گپ می‌شود. شکل (۱۲) عکس SEM از سطح قطعه کار در ابزار مس و مس - قلع در حالت قطعه کار ثابت و قطعه کار دوار را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در قطعه کار ثابت میزان نشست و دوباره منجمد شدن ذرات برداشته شده از سطح قطعه و ابزار روی سطح زیاد بوده که این حالت عاملی بر افزایش زبری سطح در شرایط آزمایش قطعه کار ثابت نسبت به قطعه کار دوار بوده است. کیفیت سطح ماشین کاری شده توسط ابزار مس به دلیل داشتن پستی و بلندی های با عرض زیاد و عمق کم بهتر از ابزار مس - قلع بوده، همچنین در ابزار مس - قلع سوختگی سطح ایجاد شده است.

مس - کروم، ۶۶٪ مس - قلع است. همان طوری که مشاهده شد، سرعت دورانی باعث بهبود وضعیت ابزار گردیده و مانع از چسبیدن مذاب و آلودگی‌های گپ روی سطح ابزار شده که باعث افزایش سلامتی سطح ابزار می‌شود. در رابطه (۴) تعداد پیکسل‌های سیاه و P_{total} تعداد کل پیکسل‌ها می‌باشد.

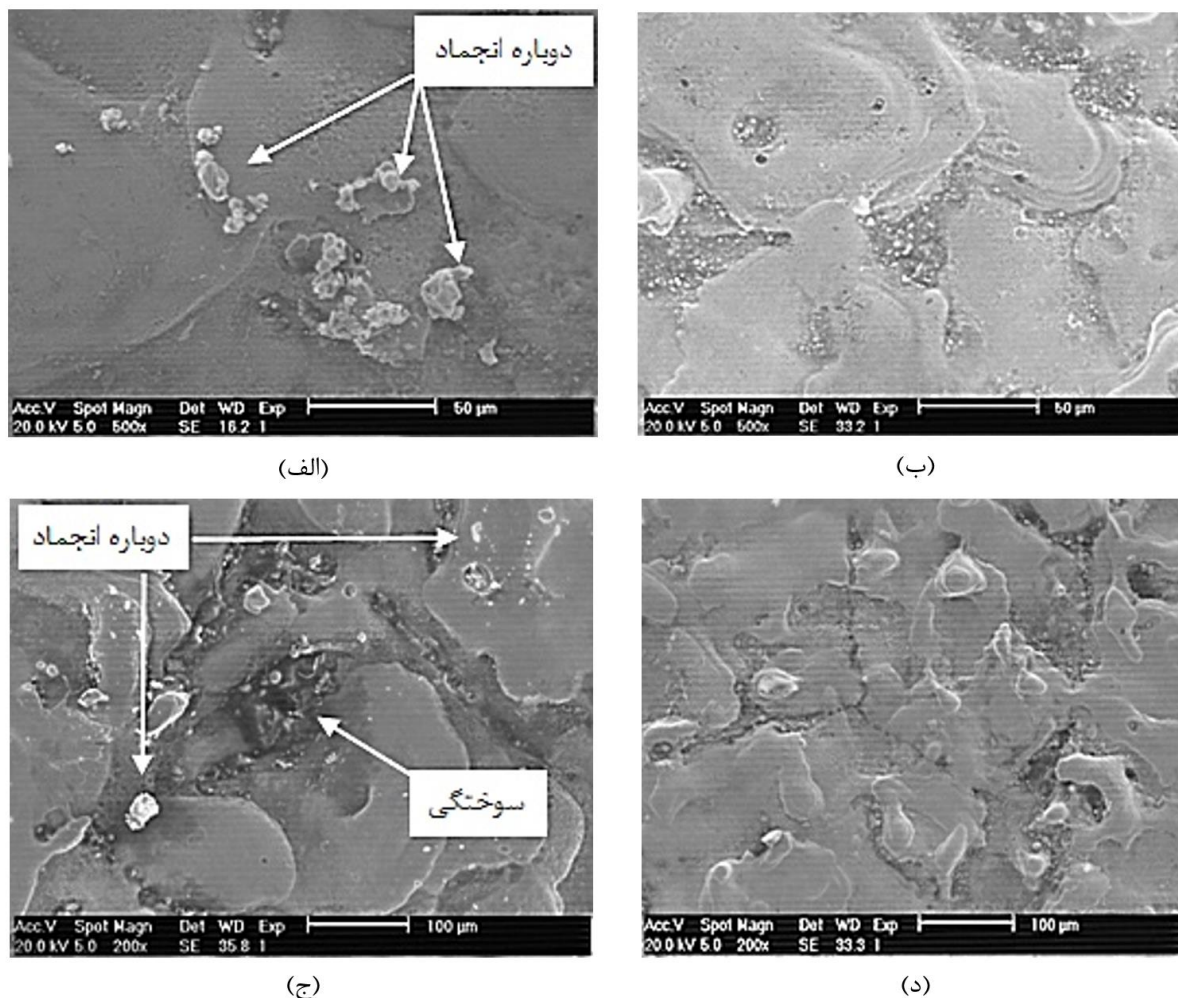
$$\% P_b = \frac{N_{pb}}{P_{total}} \times 100 \quad (4)$$

۳-۶- مورفولوژی سطح قطعه کار

همان طوری که در بخش (۱-۳) توضیح داده شد، سرعت دورانی باعث ایجاد نیروی گریز از مرکز می‌گردد که این نیرو

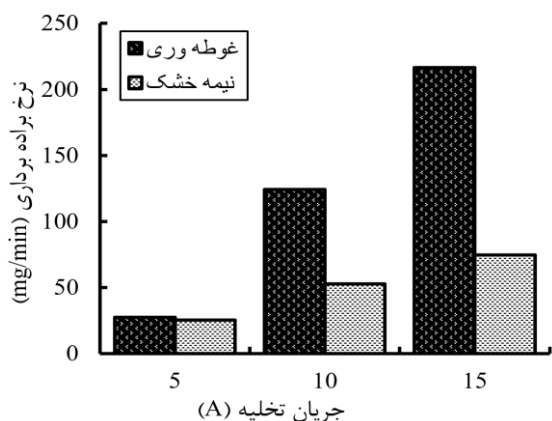
	Cu-tin	Cu-cr	Cu
الف	 23%	 19%	 18%
ب	 76%	 80%	 81%
ج	 83%	 83%	 84%

شکل ۱۱: تصویر میکروسکوپ نوری از بافت سطحی الکترود ابزار با بزرگ‌نمایی ۵۰ برابر (الف) سطح اولیه ابزار، قبل از فرآیند، (ب) سطح ابزار نیمه خشک با سرعت دوران ۶۰۰ دور بر دقیقه در ۱۵ آمپر، (ج) سطح ابزار نیمه خشک ثابت در ۱۵ آمپر



شکل ۱۲: عکس SEM از سطح قطعه کار ماشین کاری نیمه خشک با گاز CO_2 در ۱۵ آمپر، (الف) قطعه کار ثابت در ابزار مس، (ب) قطعه کار دوار با سرعت ۶۰۰ دور بر دقیقه در ابزار مس، (ج) قطعه کار ثابت در ابزار مس - قلع، (د) قطعه کار دوار با سرعت ۶۰۰ دور بر دقیقه در ابزار مس - قلع

همچنین در ابزار مس - قلع سوختگی سطح ایجاد شده است.



شکل ۱۳: مقایسه نرخ براده برداری در ماشین کاری نیمه خشک ثابت با غوطه وری در نفت

۳-۶- مورفولوژی سطح قطعه کار

همان طوری که در بخش (۱-۳) توضیح داده شد، سرعت دورانی باعث ایجاد نیروی گریز از مرکز می‌گردد که این نیرو موجب دفع بهتر ذرات مذاب از محل گپ می‌شود. شکل (۱۲) عکس SEM از سطح قطعه کار در ابزار مس و مس - قلع در حالت قطعه کار ثابت و قطعه کار دوار را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در قطعه کار ثابت میزان نشست و دوباره منجمد شدن ذرات برداشته شده از سطح قطعه و ابزار روی سطح زیاد بوده که این حالت عاملی بر افزایش زبری سطح در شرایط آزمایش قطعه کار ثابت نسبت به قطعه کار دوار بوده است. کیفیت سطح ماشین کاری شده توسط ابزار مس به دلیل داشتن پستی و بلندی‌های با عرض زیاد و عمق کم بهتر از ابزار مس - قلع بوده،

۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از تحقیقات انجام شده در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی نیمه‌خشک نشان داد که:

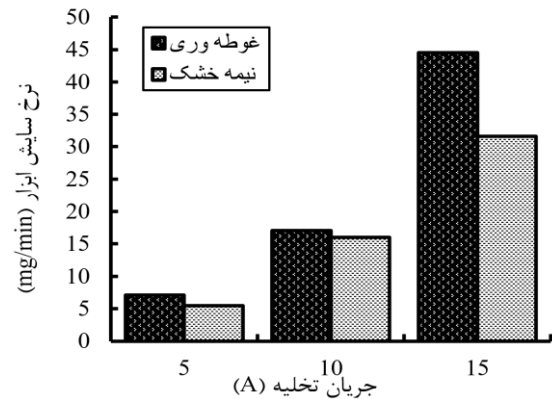
۱- افزایش سرعت دورانی (۶۰۰ دور بر دقیقه) به دلیل دور کردن بهتر آلودگی از گپ و ایجاد حالت جرقه‌زنی یکنواخت‌تر در سطح قطعه کار باعث افزایش نرخ براده برداری در شرایط آزمایش شده است. بررسی اثر جنس ابزار در گاز CO_2 نشان داد که ابزار مس به دلیل مقاومت الکتریکی پایین بیشترین نرخ براده‌برداری را دارد.

۲- سرعت دورانی ۶۰۰ دور بر دقیقه به دلیل افزایش نرخ براده‌برداری، نرخ سایش ابزار را نیز افزایش داده است. ابزارهای مس و مس - کروم در آمپرهای پایین به دلیل خاصیت رسانایی حرارتی خوبی که مس دارد سایش کمتری نسبت به مس - قلع داشته‌اند، اما با افزایش آمپر رسانای حرارتی اثر خود را از دست داده و نرخ سایش ابزار مس به دلیل افزایش نرخ براده‌برداری آن افزایش یافته است.

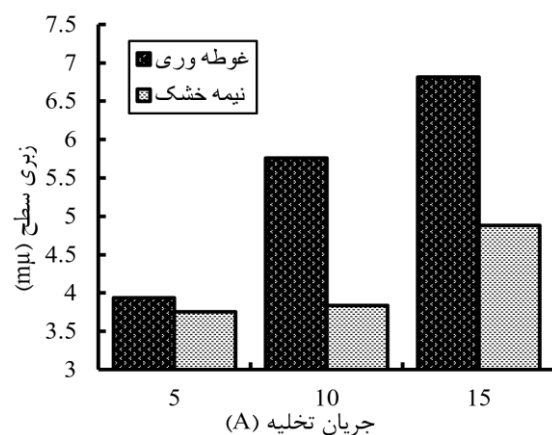
۳- سرعت دورانی ۶۰۰ دور بر دقیقه سبب افزایش کیفیت سطح قطعه کار شده است، این سرعت باعث شده که فرسایش سطح قطعه کار به صورت یکپارچه‌تر انجام گیرد و باعث شده که میزان برجستگی‌ها و فرورفتگی‌های سطح کمتر شود. ابزار مس - قلع در آمپرهای بالا بیشترین زبری سطح را دارد.

۴- مقایسه انجام شده بر روی ماشین‌کاری نیمه‌خشک قطعه کار ثابت و دوار نشان داد که سرعت دورانی نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار را افزایش داده و زبری سطح را کاهش می‌دهد. پردازش تصویر سطح ابزار و عکس SEM سطح قطعه کار نشان داد که سرعت دورانی قطعه کار باعث شده که ذرات کمتری روی سطح قطعه کار و ابزار نشست کند که این حالت باعث بهبود سطح ابزار و سطح قطعه کار شده است.

۵- مقایسه انجام شده بین ماشین‌کاری نیمه‌خشک ثابت در گاز CO_2 با حالت غوطه‌وری در نفت سفید در ابزار مس نشان داد که میزان نرخ براده‌برداری و سایش ابزار در فرآیند غوطه‌وری بالاتر از فرآیند نیمه‌خشک است. به طور عکس، میزان کیفیت سطح قطعه کار در فرآیند نیمه‌خشک بالاتر از فرآیند غوطه‌وردی می‌باشد.



شکل ۱۴: مقایسه نرخ سایش ابزار در ماشین‌کاری نیمه‌خشک ثابت با غوطه‌وری در نفت



شکل ۱۵: مقایسه زبری سطح در ماشین‌کاری نیمه‌خشک ثابت با غوطه‌وری در نفت

۳-۷- مقایسه ماشین‌کاری نیمه‌خشک با غوطه‌وری در نفت سفید

جهت بررسی اثر دی‌الکتریک در فرآیند ماشین‌کاری نیمه‌خشک و غوطه‌وری، آزمایشاتی با شرایط یکسان در حالت نیمه‌خشک ثابت و غوطه‌وری در نفت سفید با استفاده از ابزار مس طراحی گردید. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد نفت سفید به دلیل مقاومت الکتریکی و ویسکوزیته‌ی خوبی که دارد نرخ براده‌برداری و نرخ سایش ابزار در حالت غوطه‌وری بیشتر از حالت نیمه‌خشک است. در حالی‌که زبری سطح بدست آمده در شرایط ماشین‌کاری نیمه‌خشک در گاز CO_2 بهتر از شرایط ماشین‌کاری غوطه‌وری می‌باشد، این اثر می‌تواند به دلیل خواص خوب گاز CO_2 در کنترل کانال پلاسما و نرخ براده‌برداری پایین‌تر فرآیند ماشین‌کاری نیمه‌خشک باشد. شکل‌های (۱۳) تا (۱۵) به ترتیب نرخ براده‌برداری، سایش ابزار و زبری سطح را نشان می‌دهند.

۵- مراجع

- [1] C. P. Patel, K. R. Modi, and M. G. Bhatt, "A Review on optimization of Dry Electro Discharge Machining Process Parameters", *International Journal for Scientific Research & Development*, Vol. 1, NO. 9, 2013, pp. 1901– 1904.
- [2] M. Kunida, M. Yoshida, and N. Taniguchi, "Electrical Discharge Machining in gas", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 46, NO. 1, January 1997, pp. 143 – 146.
- [3] R. Roth, H. Balzer, F. Kuster, and K. Wegener, "Influence of the anode material on the breakdown behavior in dry electrical discharge machining", In *5th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012*, Vol. 1, 2012, pp. 639– 644.
- [4] R. Roth, F. Kuster, and K. Wegener, "Influence of oxidizing gas on the stability of dry electrical discharge machining process", *Procedia CIRP*, Vol. 6, January 2013, pp. 338– 343.
- [5] G. Skrabalak, J. Kozak, and M. Zyburka, "Optimization of dry EDM milling process", *Procedia CIRP*, Vol. 6, January 2013, pp. 332– 337.
- [6] J. Tao, "Investigation of dry and near-dry electrical discharge machining processes", PhD Thesis, University of Michigan, Japan, 2008.
- [7] C. C. Kao, J. Tao, and A. J. Shih, "Near dry electrical discharge machining", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, NO. 15, December 2007, pp. 2273– 2281.
- [8] J. Tao, and A. J. Shih, "Experiment Study of the Dry and Near-Dry Electrical Discharge Milling Processes", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 130, NO. 1, February 2008, pp. 1 – 11.
- [9] A. Gholipoor, H. Baseri, and M. Shakeri, "Experimental investigation of near dry EDM process", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, NO. 1, 2014, pp. 106– 112.
- [10] X. Bai, Q. Zhang, J. Zhang, D. Kong, and T. Yang, "Machining efficiency of powder mixed near dry electrical discharge machining based on different material combinations of tool electrode and workpiece electrode", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 15, NO. 4, October 2014, pp. 474– 482.
- [11] X. Bai, Q. Zhang, J. Zhang, D. Kong, and T. Yang, "Research on material removal rate of powder mixed near dry electrical discharge machining", *The international journal of Advanced manufacturing Technology*, Vol. 68, NO. 5-8, September 2013, pp. 1757– 1766.
- [12] A. Gholipoor, H. Baseri, and M. R. Shabgard, "Investigation of near dry EDM compared with wet and dry EDM processes", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 29, NO. 5, May 2015, pp. 363 – 367.
- [13] M. H. Sadeghi, M. J. Hadad, T. Tawakoli, A. Vesali, and M. Emami, "An investigation on surface grinding of AISI 4140 hardened steel using minimum quantity lubrication-MQL technique", *International Journal of Material Forming*, Vol. 3, NO. 4, December 2010, pp. 241– 251.
- [14] A. Bahadori, "Thermal Insulation Handbook for the Oil, Gas, and Petrochemical Industries", Edition.1, Gulf professional publishing, New York, March 2014, pp. 144.
- [15] C. L. Yaws, "Handbook of Transport Property Data: Viscosity, Thermal Conductivity, and Diffusion Coefficients of Liquids and Gases", Gulf Publishing Company, Houston, 1995.
- [16] S. Joshi, P. Govindan, A. Malshe, and K. Rajurkar, "Experimental characterization of dry EDM performed in a pulsating magnetic field", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 60, NO. 1, January 2011, pp. 239– 242.