



# Study on the Effect of Intermediate Part on The Accuracy of Electrochemical Discharge Drilling

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Elhami Joosheghan S.<sup>1\*</sup>,  
Rezvani P.<sup>2</sup>,  
Razfar M.R.<sup>2</sup>

### How to cite this article

Elhami Joosheghan S, Rezvani P, Razfar M R. Study on the Effect of Intermediate Part on The Accuracy of Electrochemical Discharge Drilling. Modares Mechanical Engineering. 2023;23(04):249-256.

## ABSTRACT

Today, the application of materials such as glass has been widely developed in the manufacture of micronutrients, electronics and medical equipment because of its high hardness, chemical resistance and high abrasion. But due to high hardness and low toughness, mechanical machining can not be applied. The Electrochemical discharge method is a new machining method that is capable of machining hard and non-conductive electrical materials such as glass. In the process of electrochemical discharge drilling, the dimensional accuracy of the hole and especially its inlet area is important. but almost, the inlet of the hole has a high slope, which leads to excessive hole overcut and tapering of the hole side wall. In this study, to remove the high slope entrance area, a thin intermediate part was used which will be separated from the main workpiece after the drilling process. The results showed that mentioned method reduced the entrance overcut of the hole by 50 to 76% depending on the diameter of the tool. Also, the hardness measuring of points on the hole inlet showed that using the intermediate part led to the smaller heat-affected zone (HAZ) around the hole entrance.

**Keywords** Electrochemical Discharge Machining, Intermediate Part, Overcut, Tapering, Hardness.

## CITATION LINKS

1- A. Microstructuring Glasses Using Lasers.2- Micromachining using electrochemical discharge phenomenon.3- Absolute pressure sensors by air-tight electrical feedthrough structure 4- Mechanism of material removal in electrochemical discharge machining.5- On the analysis of the electrochemical spark machining process. 6- Measurement of temperature transients in the electrochemical discharge machining process.7- The current signal in spark-assisted chemical engraving (SACE).8- The gas film in spark assisted chemical engraving (SACE).9- Electrical discharge drilling of glass.10- Micromachining using electrochemical discharge phenomenon.11- Removable tubing interconnects for glass-based micro-fluidic systems made using ECDM

<sup>1</sup> Ferdowsi university of Mashhad Iran

<sup>2</sup> Amirkabir university of technology Tehran Iran

### \*Correspondence

Address: Azadi square Mashhad  
Iran  
Sadeghelhami@um.ac.ir

### Article History

Received: February 08, 2023

Accepted: March 13, 2023

ePublished: April 25, 2023

## بررسی تاثیر استفاده از قطعه واسط بر بهبود دقت ماشینکاری تخلیه الکتروشیمیایی

صادق الهامی جوشقان<sup>۱\*</sup>، پرگل رضوانی<sup>۲</sup>، محمدرضا رازفر<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

<sup>۲</sup> دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

### چکیده

امروزه استفاده از موادی مانند شیشه به دلیل خواصی مانند سختی بالا، مقاومت شیمیایی و سایش بالا، به‌طور گسترده در ساخت تجهیزات میکرونی، الکترونیکی و تجهیزات پزشکی توسعه یافته است، اما به دلیل سختی بالا و چقرمگی پایین، باربرداری مکانیکی و ایجاد ساختارهای میکرونی بر روی آن با روش‌های سنتی دشوار است. روش تخلیه الکتروشیمیایی یک روش نوین ماشینکاری است که قابلیت ماشینکاری مواد سخت و نارسانای الکتریکی از جمله شیشه را دارد. در فرآیند سوراخکاری تخلیه الکتروشیمیایی، دقت ابعادی سوراخ و به ویژه ناحیه ورودی آن حائز اهمیت است اما در بیشتر موارد، ورودی سوراخ دارای شیب زیاد بوده که منجر به اضافه برش زیاد و مخروط‌شدگی دیواره سوراخ می‌گردد. در این تحقیق برای حذف ناحیه شیب‌دار ورودی سوراخ (عامل کاهش دقت سوراخکاری) از قطعه واسط با ضخامت کم استفاده شده است که پس از سوراخکاری از سطح قطعه اصلی جدا خواهد شد. نتایج نشان داد که این روش اضافه برش نواحی ورودی سوراخ را با توجه به قطر ابزار مورد استفاده، بین ۵۰ تا ۷۶٪ کاهش داده است. همچنین، نتایج سختی‌سنجی قطعه کار نشان داد با استفاده از قطعه واسط، سوراخ نهایی دارای ناحیه متأثر از حرارت کوچکتر در اطراف سوراخ است.

**کلیدواژه‌ها:** ماشینکاری تخلیه الکتروشیمیایی، قطعه واسط، اضافه برش، مخروطی شدن، سختی سنجی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۲

\*نویسنده مسئول: Sadeghelhami@um.ac.ir

### ۱- مقدمه

رشد تصاعدی محصولات در مقیاس میکرو توجه بسیاری را به دلیل کاربرد های وسیع در زمینه های مختلف همچون سیستم های میکرو الکترومکانیکی، میکرو سیالات، سیستم های آزمایش در زمینه زیست پزشکی به خود جلب کرده است. ساخت این محصولات فشار زیادی را بر صنایع برای داشتن راه حل های اقتصادی و کارآمد تحمیل کرده است. به دلیل تسهیل اهداف حقیقی صنایع، محققین روی به استفاده از روش‌های غیر سنتی یا ماشین کاری میکرونی آورده اند.

امروزه نیاز روزافزون به قطعات شیشه‌ای به دلیل خواص ویژه الکتریکی، حرارتی، شیمیایی و مکانیکی آنها، محققان را بر آن داشته که روش‌های متنوع ساخت قطعات مینیاتوری از این ماده را توسعه دهند. از آنجایی که این مواد معمولاً نارسانای الکتریکی بوده، مقاومت شیمیایی بالایی در محیط‌های خورنده داشته، هدایت و تغییر شکل حرارتی پایینی دارند و از طرفی شفاف و

سخت هستند، در انواع کاربردهای میکروالکترونیک، سیستم‌های میکروالکترومکانیکی، صنایع اپتیک و انواع کاربردهای پزشکی به طور روزافزون مورد استفاده قرار می‌گیرند [1]. با این حال سختی و شکنندگی بالای شیشه، ماشینکاری و شکل‌دهی آنرا بسیار مشکل کرده به نحوی که با روش‌های سنتی و متداول تولید نمی‌توان به هندسه و ساختار مطلوب دست یافت. به همین جهت توسعه روش‌های نوین به منظور تولید قطعات شیشه‌ای از اولویت‌های تحقیق در این زمینه می‌باشد.

ماشین کاری مکانیکی مواد ترد و شکننده مانند شیشه در دو حالت ترد و نرم رخ می‌دهد. در ماشین کاری با شرایط معمول، برش شیشه در حالت ترد اتفاق می‌افتد و همین سبب ایجاد ترک‌های پرشمار در شیشه و شکست آن می‌شود. برای برش شیشه در حالت داکتیل باید عملیات خاصی حین ماشین کاری انجام شود. مثلاً در ناحیه ماشین کاری تنش فشاری برقرار شود و یا ضخامت براده نتراشیده بسیار کم باشد تا از ایجاد و رشد ترک در ساختار شیشه جلوگیری کند. این عملیات خاص نیاز به ماشین کاری با نرخ پیشروی بسیار پایین و سرعت برشی بالا دارد. اعمال نرخ پیشروی پایین به یک سیستم پیشروی بسیار دقیق نیاز دارد و سرعت برشی بالا در صورتی که قطر ابزار کم باشد به اسپیندل‌هایی با سرعت دورانی بسیار بالا نیاز دارد. فراهم آوردن چنین شرایطی بسیار پرهزینه بوده و به تجهیزات خاصی نیاز دارد که با همه این تمهیدات ساختار نهایی کاملاً بدون ترک نخواهد بود.

با این که ماشینکاری شیشه به کمک براده‌برداری مکانیکی توسط روش‌ها و تمهیدات خاصی قابل انجام است با این حال عمده روش‌هایی که برای ایجاد ساختارهای روی شیشه مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل فرآیندهای نوین ماشینکاری بر اساس پدیده‌های حرارتی و شیمیایی هستند. روش‌های متداول در ماشینکاری و ایجاد ساختارهای دوبعدی و سه بعدی در شیشه‌ها، به طور خلاصه عبارتند از ماشینکاری التراسونیک، ماشینکاری با پاشش پودر ساینده به کمک جت هوا، ماشینکاری با جت آب، ماشینکاری به کمک لیزر، استریولیتوگرافی، انحلال شیمیایی به کمک اسید هیدروفلوریک و برش با الماس [1]. روش‌های شیمیایی به ویژه روش انحلال شیمیایی با اسید هیدروفلوریک با وجود ماشینکاری با کیفیت سطح بالا، بسیار زمان‌بر و کند بوده و از طرفی قادر به ایجاد حفره با نسبت عمق به قطر بالا نمی‌باشند. در روش‌های مکانیکی نیز احتمال ایجاد ترک‌های میکرونی و کاهش کیفیت سطح در شیشه وجود داشته و همچنین روش‌های حرارتی نظیر لیزر نیز منجر به تخریب لایه‌ای از سطح قطعه بر اثر حرارت و کاهش کیفیت سطح ماشینکاری می‌شوند.

در کنار روش‌های ذکر شده، یکی از روش‌های نوینی که در سال‌های اخیر جهت ماشینکاری قطعات سخت، شکننده و نارسانای الکتریکی نظیر شیشه و سرامیک معرفی شده است، روش ماشینکاری تخلیه الکتروشیمیایی می‌باشد. این روش نوین،

قطعه کار به بالاتر از دمای ذوب و حتی در برخی مواقع در انرژی بسیار زیاد به بالاتر از دمای تبخیر می رسد. آن ها پیش بینی کردند که ۷۷٪-۹۶٪ انرژی اعمال شده در فرآیند شامل گرم شدن الکترولیت و تبخیر آن و تشکیل حباب ها و فیلم گاز و همچنین افزایش دمای ابزار می شود و فقط در حدود ۲٪-۶٪ برای افزایش دمای قطعه کار مصرف می شود. البته ذکر این نکته ضروری است که آزمایش فوق بر روی فلزات که هدایت حرارتی بسیار متفاوتی نسبت به شیشه دارند انجام شده است.

بررسی های مختلفی نشان دهنده افزایش نرخ باربرداری ECDM با افزایش ولتاژ اعمال شده توسط منبع تغذیه می باشند. در حقیقت با افزایش ولتاژ فرآیند، انرژی جرقه ها افزایش یافته و نرخ باربرداری نیز افزایش می یابد. البته افزایش بیش از اندازه انرژی جرقه ها، احتمال ترک خوردگی شیشه و آسیب های حرارتی (منطقه متاثر از حرارت) آن را افزایش می دهد.

ووتریج [7] در سال ۲۰۰۶ نشان داد که کیفیت فیلم گاز نقش تعیین کننده ای در پایداری فرآیند تخلیه الکتروشیمیایی دارد و هر قدر فیلم گاز تشکیل شده در اطراف ابزار نازک تر باشد، ولتاژ بحرانی کاهش یافته و کیفیت ماشینکاری افزایش می یابد. کیفیت ماشینکاری شامل کیفیت سطح ماشینکاری شده، دقت ابعادی ماشینکاری و تکرارپذیری فرآیند می شود. ضخامت فیلم گاز به میزان زیادی به قطر حباب های تشکیل دهنده آن بستگی دارد و ضخامت متوسط فیلم گاز برابر با قطر متوسط حباب های هیدروژن خواهد بود. شکل و قطر متوسط حبابها نیز متأثر از دو پارامتر قابلیت تر شونده ای ابزار و فاصله متوسط بین نقاط جوانه زنی حبابها است. فعال شدن نقاط جوانه زنی حبابها به ولتاژ اعمالی بستگی دارد و با افزایش ولتاژ، جوانه زنی بیشتر می گردد [8].

در روش پیشروی گرانشی، یک نیروی ثابت بین ابزار و قطعه کار اعمال می شود تا از تماس نزدیک بین منبع گرما (جرقه های الکتروشیمیایی درون فیلم گاز) و سطح قطعه کار اطمینان حاصل شود. اگرچه این روش بسیار ساده بود و نتایج خوبی دارد. در سوراخ کاری با پیشروی گرانشی، چون ابزار به طور مداوم با قطعه کار در تماس است، سوراخ کاری می تواند با یک سیستم اندازه گیری همراه شود تا حرکت ابزار را اندازه گیری کند. در این حالت فرسایش ابزار، اندازه گیری را تحت تأثیر قرار می دهد. با این حال فرسایش ابزار در ماشین کاری تخلیه الکتروشیمیایی عموماً خیلی کم است. کورافوجی و سودا [9] فرسایش ابزار را برای مواد مختلف اندازه گیری کردند. بر این اساس در زمان ماشین کاری سه دقیقه، فرسایش الکترود ابزار حداکثر ۲۲ میکرومتر خواهد بود (در ولتاژهایی در محدوده ۳۵ ولت). اما، برای بیشتر مواد، فرسایش ابزار در محدوده چند میکرون به دست آمده است. روش دیگری نیز برای پیشروی گرانشی در ماشین کاری تخلیه الکتروشیمیایی وجود دارد. در این روش الکترود ابزار دارای موقعیت ثابتی بوده و قطعه کار به طور

قابلیت ماشینکاری با نسبت عمق به قطر بالا و با سرعت باربرداری مناسب را داشته و نسبت به بسیاری از روش های ذکر شده کم هزینه تر و اقتصادی تر می باشد.

#### ۱-۱- اصول ماشینکاری تخلیه الکتروشیمیایی

ماشینکاری تخلیه الکتروشیمیایی از پدیده الکتروشیمیایی و فیزیکی برای ماشین کاری موادی نظیر شیشه و سرامیک بهره می برد. این روش برای ماشین کاری قطعات سخت و مستحکم و نارسانای الکتریکی مناسب است. در این روش، قطعه کار درون محلول الکترولیت مناسب (عمدتاً سدیم هیدروکسید یا پتاسیم هیدروکسید) غوطه ور شده و یک ولتاژ ثابت مستقیم به دو الکترود اعمال می شود. الکترود ابزار به اندازه چند میلی متر درون الکترولیت فرو برده شده و الکترود کمکی نیز که معمولاً خیلی بزرگتر از الکترود ابزار بوده (۱۰۰ برابر یا بیشتر) و غالباً به شکل یک صفحه مسطح است، درون الکترولیت قرار داده می شود. قطب منفی ولتاژ به الکترود ابزار وصل شده و قطب مثبت به الکترود کمکی وصل می شود.

وقتی ولتاژ اعمالی به سلول، پایین است (پایین تر از یک مقدار بحرانی به نام ولتاژ بحرانی که معمولاً بین ۲۰ تا ۳۰ ولت است)، فرآیند الکترولیز اتفاق می افتد. حباب های گاز هیدروژن اطراف الکترود ابزار تشکیل شده و حباب های اکسیژن اطراف الکترود کمکی تشکیل می شوند. وقتی ولتاژ اعمالی افزایش می یابد، جریان الکتریکی نیز افزایش یافته و حباب های بیشتری تشکیل می شود. با افزایش ولتاژ اعمالی، تعداد حباب های تشکیل شده و شعاع آنها نیز افزایش می یابد. وقتی ولتاژ اعمالی از ولتاژ بحرانی بیشتر شود، حباب های هیدروژن به هم پیوسته و یک فیلم گاز در اطراف الکترود ابزار تشکیل می شود. در این صورت تخلیه الکتریکی یا به اصطلاح تخلیه الکتروشیمیایی، بین ابزار و الکترولیت اطراف آن اتفاق می افتد که نور آن قابل مشاهده می باشد. اگر قطعه کار در مجاورت الکترود ابزار باشد، ماشین کاری امکان پذیر می شود. عموماً ابزار باید در فاصله ای کمتر از ۲۵ میکرومتر نسبت به قطعه کار باشد تا ماشین کاری اتفاق بیفتد. تکنولوژی ECDM می تواند برای ساخت ریز سازه های شیشه ای استفاده شود. ریز سازه های کانال شکل و ریز سوراخها می تواند با این روش تولید شود.

#### ۲-۱- مروری بر تحقیقات پیشین

در دهه ۱۹۹۰، اولین کاربرد ماشین کاری تخلیه الکتروشیمیایی در زمینه ریز سیستم های الکترومکانیکی توسط ایساشی و همکاران ارائه شد [3]. به طور همزمان، مطالعه های بنیادی راجع با ماهیت ماشین کاری تخلیه الکتروشیمیایی صورت گرفت. به ویژه گوش و همکاران برای اولین بار ارتباط روشی بین فرآیند ماشین کاری و پدیده تخلیه الکتروشیمیایی برقرار کرد [4,5].

کولکارنی و همکارانش [6] با انجام چند آزمایش ساده و تحلیل نتایج اندازه گیری مختلف نشان دادند که بعد از هر جرقه دمای

شدند. ولتاژ کاری ۳۵ ولت، الکترولیت سدیم هیدروکسید (۲۵٪ وزنی) و زمان ماشینکاری ۱۸۰ ثانیه برای آزمایش‌ها به کار گرفته شدند.

یک نکته حائز اهمیت در سوراخکاری به این روش، مماس کردن سطح ابزار می‌باشد. اهمیت این صفر کردن به این دلیل می‌باشد که بلوک نگه‌دارنده واقع در الکترولیت باعث جابجایی سطح الکترولیت می‌شود به همین دلیل این میزان جابجایی باید محاسبه و برای جبران به طول غوطه‌وری اضافه شود. در آزمایش‌های انجام گرفته طول غوطه‌وری ابزار ۱/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در تمامی آزمایش‌ها ابتدا با اعمال ولتاژ بین دو سر الکتروود، بدون در نظر گرفتن شیشه، ابزار داخل الکترولیت قرار داده می‌شود تا عملیات الکترولیز بین دو الکتروود تا چند دقیقه رخ دهد. این امر باعث تجزیه یون‌های موجود در الکترولیت و برقراری جریان پایدارتری می‌شود که نتایج آن به وسیله اوسیلوسکوپ که به منبع تغذیه متصل می‌شود، قابل مشاهده است. با تنظیم عمق نفوذ ابزار داخل الکترولیت و با اعمال ولتاژ دمای الکترولیت بالا رفته و بلافاصله فیلم گاز بر روی دیواره ابزار تشکیل می‌شود و به خاطر بالا بودن ولتاژ از حد بحرانی، ابزار شروع به جرقه‌زنی می‌کند و این جرقه‌ها باعث ذوب و بار برداری شیشه می‌شود.

## ۲-۲- دقت پروفیل سوراخ در ماشینکاری تخلیه الکتروشیمیایی

در فرآیند سوراخکاری تخلیه الکتروشیمیایی، در ورودی سوراخ اشکال مختلفی قابل مشاهده هستند که در شکل ۱ الف-ج نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱-الف نشان داده شده است، ورودی سوراخ دارای لبه‌های کنگره ای شکل است که در ولتاژهای کاری کمی بالاتر از ولتاژ بحرانی ایجاد می‌شوند. در شکل ۱-ب سوراخ‌هایی با اضافه برش قابل توجه در ورودی سوراخ که همراه با ناحیه متأثر از حرارت است، نشان داده شده است. به‌طور کلی در سوراخ‌های با ولتاژ حدود ۳۰ ولت، سوراخ با ناحیه متأثر از حرارت احاطه می‌شود که با افزایش عمق و ولتاژ این ناحیه بزرگتر می‌گردد. افزایش ولتاژ منجر به افزایش انرژی اعمالی بر قطعه‌کار شیشه‌ای و ترد می‌شود، لذا در ولتاژهای بالاتر از ۳۷ ولت، ورودی سوراخ توسط ناحیه بزرگتری از منطقه متأثر از حرارت احاطه شده و ترک‌هایی در اطراف سوراخ مشاهده می‌شود (شکل ۱-ج). شکل ۱-د مقطع سوراخ و تغییرات اضافه برش در حین سوراخکاری را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، ورودی سوراخ شکلی مخروطی به خود می‌گیرد که منجر به اضافه برش بالا در ورودی می‌شود. با افزایش عمق، اضافه برش با شیب زیاد کاهش یافته و به مقدار تقریباً ثابت و نسبتاً کوچکی می‌رسد. ناحیه با تغییرات زیاد اضافه برش، ضخامت کمی داشته (شکل ۱-ه) و در صورت حذف آن از پروفیل سوراخ (با استفاده از قطعه واسط)، دقت به صورت قابل توجهی بالا خواهد رفت.

مداوم توسط نیروی ثابتی به سمت قطعه‌کار کشیده می‌شود. این نیرو توسط یک وزنه کمکی به نگه‌دارنده ابزار وارد می‌شود.

یکی دیگر از روش‌های پرکاربرد ماشینکاری EDM، پیشروی با سرعت ثابت می‌باشد. در این روش در صورت انتخاب سرعت پیشروی مناسب، می‌توان از تماس مکانیکی بین ابزار و قطعه‌کار جلوگیری کرد. این موضوع به ویژه می‌تواند مشکل خم شدن الکتروود ابزار را برطرف نماید. در روش پیشروی با سرعت ثابت، انتخاب سرعت‌های پیشروی بیشتر از میانگین سرعت برداشتن مواد می‌تواند منجر به شکستن ابزار و یا قطعه‌کار شود. از طرف دیگر، سرعت‌های پیشروی بسیار آهسته زمان سوراخکاری را افزایش داده و ممکن است منطقه متأثر از گرما پیرامون ناحیه ماشینکاری افزایش یابد [10].

برترین مزیت روش پیشروی سرعت ثابت نسبت به پیشروی گرانشی، حرکت کنترل‌شده الکتروود ابزار است. با این ویژگی اشکال پیچیده‌تری از استوانه نیز می‌توان تولید کرد. در این زمینه می‌تواند به کار لی و همکاران [11] اشاره کرد. در این مقاله، لی و همکاران برای ساخت یک کانال ارتباطی سیال، از روش ماشینکاری تخلیه الکتروشیمیایی با پیشروی سرعت ثابت استفاده کرده‌اند. بدین منظور یک کانال درون شیشه ساخته و با استفاده از الکتروود خاصی به شکل پیچ، دو سوراخ با روزه نیز درون شیشه ماشینکاری شده است. علاوه بر دو روش ذکر شده، ماشینکاری اشکال سه‌بعدی با استفاده از ماشین‌های کنترل عددی نیز می‌تواند صورت بگیرد.

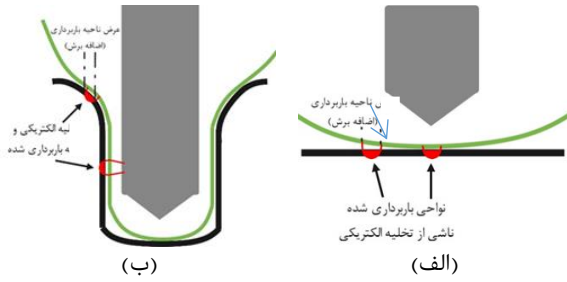
دقت سوراخکاری به وسیله دو پارامتر اضافه برش ورودی سوراخ و مخروطی بودن دیواره سوراخ تعیین می‌شود. اضافه برش در ورودی سوراخ همواره مقادیری بزرگتر نسبت به دیواره (میان) سوراخ از خود نشان داده است. همچنین شیب ورودی سوراخ موجب مخروطی شدن دیواره سوراخ می‌گردد که نامطلوب است. با توجه به این موضوع، نویسندگان استفاده از قطعه واسط در ورودی سوراخ را مطالعه خواهند کرد تا بتوان این ناحیه را که ضخامت کوچکی نیز دارد از پروفیل سوراخ حذف نموده و اضافه برش و مخروطی بودن را به صورت قابل توجهی کاهش داده و سوراخکاری دقیقتری انجام گردد.

## ۲- رویه تجربی انجام آزمایش‌ها

### ۲-۱- تجهیزات

منبع تغذیه جریان مستقیم دارای حداکثر خروجی ۶۰ ولت و ۵ آمپر مورد استفاده قرار گرفت. از میکروسکوپ نوری با حداکثر بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر و از میکروسکوپ الکترونی مدل SERON-AIS2100C استفاده شده است. تغییرات سختی با استفاده از دستگاه میکروسختی سنج ویکرز Bareiss مدل V-Test اندازه‌گیری شده است. ابزار مورد استفاده، مته و از جنس فولاد تندبر با قطرهای ۳۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰ میکرومتر انتخاب شد. قطعه‌کار و قطعه واسط از جنس شیشه سودالایم و با ضخامت‌های ۱ و ۰/۲ میلی‌متر انتخاب

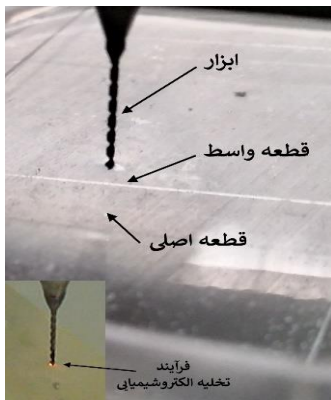
سوراخ، الکترولیت به میزان کافی در دسترس بوده لذا فیلم گاز راحت‌تر تشکیل شده و جرقه‌ها انرژی بالاتری خواهند داشت (رژیم تخلیه الکتریکی). از طرف دیگر، در عمق سوراخ معمولا الکترولیت به میزان کافی در دسترس نیست و تشکیل فیلم گاز سخت‌تر خواهد بود که نتیجه آن تخلیه‌های الکتریکی با تعداد و انرژی کمتر همراه خواهد بود. این موضوع نیز نشان می‌دهد انرژی حرارتی بالایی (ناشی از تخلیه الکتریکی) به ناحیه ورودی سوراخ رسیده و مواد بیشتری را از قطعه‌کار جدا خواهد کرد.



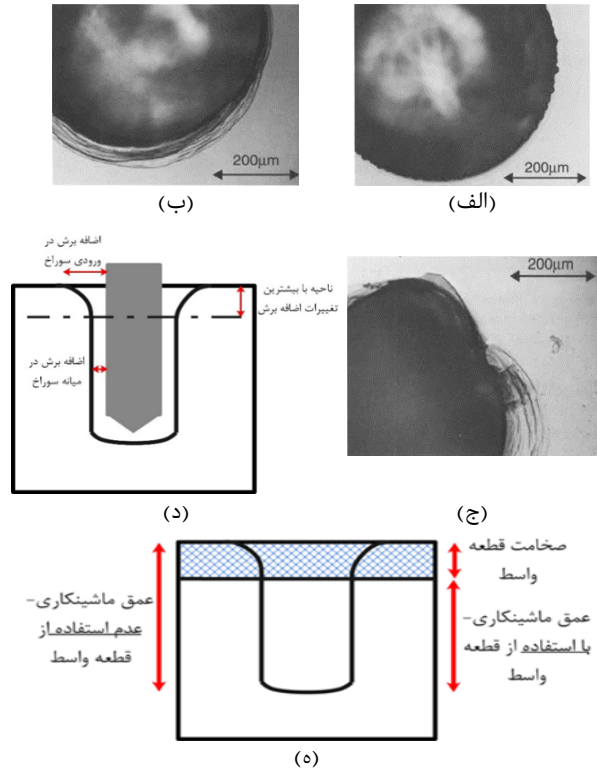
شکل ۲ الف) لحظات اولیه سوراخکاری در محل ورودی سوراخ و ناحیه باربرداری افقی ب) ناحیه اضافه برش در ورودی و میانه سوراخ.

۳- تحلیل نتایج

در این بخش، نتایج استفاده از قطعه واسط بر افزایش کیفیت سوراخ و کاهش اضافه برش در ورودی سوراخ و مخروطی شدن دیواره سوراخ بررسی می‌شود. قطعه پیشنهاد شده در این بخش به عنوان قطعه واسط، شیشه سودا لایم (همجنس قطعه‌کار اصلی) با ضخامت ۰/۲ میلی‌متر می‌باشد. این قطعه بر روی سطح قطعه-کار اصلی قرار داده می‌شود و بعد از انجام آزمایش، قطعه واسط جدا می‌گردد و سوراخ اصلی بر روی قطعه اصلی باقی می‌ماند. در شکل ۱-د می‌توان به صورت شماتیک اثر قطعه واسط را مشاهده کرد. نمایی از نحوه قرارگیری ابزار، قطعه اصلی و قطعه واسط و رخداد پدیده الکتروشیمیایی در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳ نحوه قرارگیری ابزار، قطعه کار اصلی و قطعه واسط و تخلیه‌های الکتریکی ناشی از پدیده تخلیه الکتروشیمیایی



شکل ۱ کیفیت سوراخ‌های ایجاد شده روی شیشه در فرآیند تخلیه الکتروشیمیایی توسط ابزار متنه به قطر ۴۰۰ میکرومتر و الکترولیت سدیم هیدروکسید با غلظت ۲۵٪ وزنی. الف) سوراخ با لبه‌های کنگره‌ای ب) سوراخ‌هایی با اضافه برش و ناحیه متأثر از حرارت ج) سوراخ‌هایی با ترک-های حرارتی<sup>[۱۲]</sup>. د) نمایی شماتیک از پروفیل مقطع سوراخ و اضافه برش‌های نواحی مختلف ه) نمایی شماتیک از اثر قطعه واسط بر دقت سوراخ.

افزایش اضافه برش در ورودی سوراخ از دو منشا سرچشمه می‌گیرد. همانطور که در شکل ۲-الف مشاهده می‌شود، در لحظات اولیه سوراخکاری و در ورودی سوراخ، فیلم گاز شکل گسترده‌تری در راستای افقی دارد و لذا تخلیه‌های الکتریکی ایجاد شده بین ابزار و فیلم گاز در راستای افقی ناحیه بزرگتری را تحت تاثیر قرار می‌دهند که این موضوع خود منجر به افزایش باربرداری در راستای افقی می‌شود. نتیجه نهایی، افزایش اضافه برش خواهد بود. منشا دوم مربوط به مدت زمان و تعداد تخلیه‌های الکتریکی است که به هر ناحیه از سوراخ وارد می‌شود (شکل ۲-ب). ورودی سوراخ اولین ناحیه از پروفیل سوراخ است که تخلیه‌های الکتریکی به آن برخورد می‌کنند. از طرف دیگر هنگامی که ابزار در عمق پیشروی داشته باشد، تخلیه‌های الکتریکی بر دیواره جانبی ابزار ادامه داشته که پیوسته با ناحیه ورودی سوراخ برخورد خواهند کرد و ناحیه باربرداری را افزایش می‌دهد. به طور مثال ناحیه میانی سوراخ، حدودا نصف بازه زمانی ماشینکاری در معرض تخلیه‌های الکتریکی قرار دارد در حالیکه ناحیه ورودی سوراخ تمام زمان ماشینکاری در معرض انرژی حرارتی تخلیه الکتریکی قرار می‌گیرد. نکته دیگری که در این قسمت باید مد نظر باشد، وابستگی انرژی تخلیه الکتریکی با رژیم باربرداری است. در نواحی نزدیک به ورودی

بدون قطعه واسط      با قطعه واسط

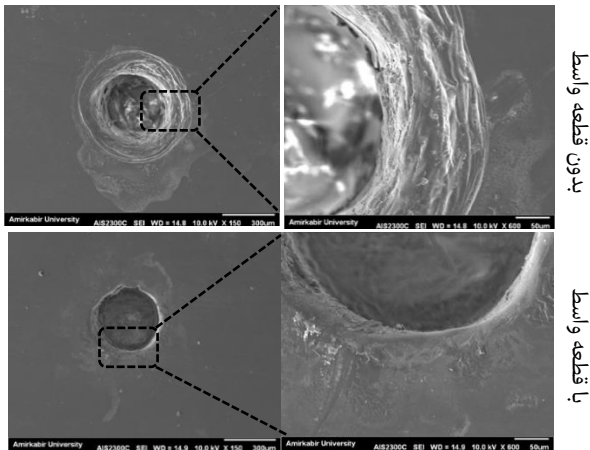


شکل ۴ تصاویر مقاطع سوراخ‌ها در قطرهای مختلف ابزار

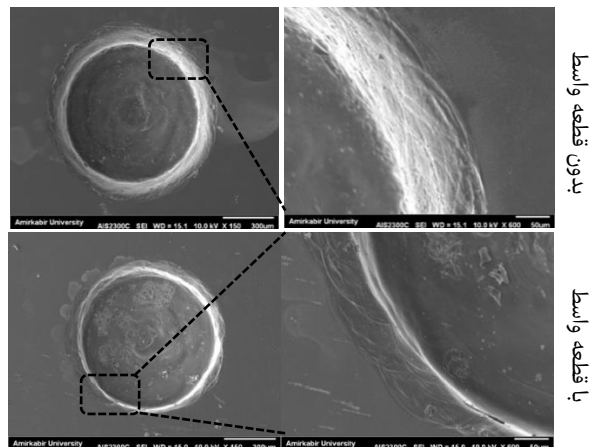
مشهود است که در این روش عمق سوراخ به علت وجود قطعه واسط کمتر از حالت بدون قطعه واسط است. بنابراین این روش زمانی مورد استفاده است که دقت ورودی سوراخ دارای اهمیت بالایی باشد که به واسط حصول آن، کاهش اندک نرخ باربرداری قابل چشم پوشی باشد.

شکل‌های ۴ و ۵ تصاویر مخروطی شدن دیواره سوراخ و اضافه برش را نشان می‌دهند. در شکل ۴ با استفاده از میکروسکوپ نوری، از مقطع سوراخ تصویربرداری شده است. با مقایسه تصاویر، به وضوح مشاهده می‌شود که ناحیه ورودی سوراخ که دارای شیب زیاد است، با استفاده از قطعه واسط حذف شده است و پروفیل سوراخ به شکل استوانه‌ای نزدیک‌تر گردیده است که دستاوردی مطلوب است. در سوراخکاری همیشه هدف ایجاد سوراخ با فرم استوانه‌ای است. همچنین، از اضافه برش در ورودی سوراخ به وسیله میکروسکوپ الکترونی تصویر برداری شده و در شکل ۵ نشان داده شده است. در این تصاویر نیز اثر حذف ناحیه با شیب زیاد در ورودی سوراخ مشهود است.

با توجه به اهمیت اضافه برش بر دقت سوراخ حاصل، از روش پردازش تصویر به منظور مقایسه کمی این پارامتر در قطرهای مختلف ابزار استفاده گردیده است که نمایی شماتیک از این رویه در شکل ۶-الف نشان داده شده است. در شکل ۶-ب، نتایج مربوط به درصد کاهش اضافه برش برای قطرهای مختلف ابزار بیان شده است. درصد کاهش اضافه برش در حالت استفاده از قطعه واسط نسبت به حالت عدم استفاده از قطعه واسط بیان شده است.



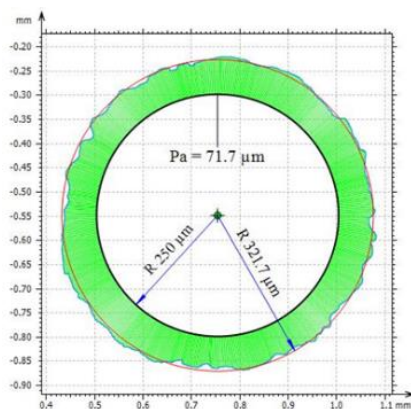
(الف)



(ب)

شکل ۵ عکس‌های SEM از اثر قطعه واسط بر ورودی سوراخ (الف) قطر ۳۰۰ میکرومتر (ب) قطر ۷۰۰ میکرومتر

در همه حالت‌های ممکن، قطعه واسط ناحیه با شیب زیاد را از دیواره سوراخ حذف کرده است و به همین دلیل بیش از ۵۰٪ کاهش اضافه برش حاصل شده است. با در نظر گرفتن ضخامت ثابت قطعه واسط، اندازه کلی ناحیه اضافه برش در قطرهای کوچکتر ابزار، کمتر خواهد بود لذا در این حالتها، ناحیه اضافه برش کاملاً حذف شده و درصد کاهش بالایی (۷۶٪) حاصل شده است.



شکل ۶ نمونه‌ای از محاسبه کمی پارامتر اضافه برش

جدول ۲) نتایج سختی سنجی (ویکرز) با/بدون استفاده از قطعه واسط

نقاط اندازه‌گیری	بدون قطعه واسط	با قطعه واسط
۱	۷۶۵	۷۸۸
۲	۷۲۵	۷۰۳
۳	۶۸۲	۶۲۴

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پروژه، استفاده از تکنیک قطعه واسط در فرآیند سوراخکاری تخلیه الکتروشیمیایی در راستای افزایش دقت و کیفیت سوراخ حاصل مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج بدست آمده به شرح زیر حاصل شدند:

۱. نتایج حاصل از بررسی مقاطع سوراخ نشان داد که استفاده از قطعه واسط ناحیه اصلی ایجاد کننده اضافه برش را از ورودی سوراخ حذف کرده و مقطعی با شکلی بسیار نزدیک به استوانه در دسترس قرار می‌دهد.
۲. به منظور اندازه‌گیری دقیق اضافه برش تکنیک پردازش تصویر به کار گرفته شد. نتایج پردازش تصویر نشان داد که در قطره‌های کوچک سوراخ کاهش اضافه برش تا حدود ۷۶٪ برای قطر ابزار ۳۰۰ میکرومتر رخ می‌دهد. از طرف دیگر به صورت متوسط، قطعه واسط کاهش اضافه برش تا حدود ۵۰٪ را در پی داشته است.
۳. اندازه‌گیری سختی سطحی در فواصل مختلف نسبت به دیواره سوراخ نشان داد که در صورت استفاده از قطعه واسط ناحیه متاثر از حرارت در سطح قطعه مساخت کوچکتری خواهد داشت در حالیکه گرادین دمای شدیدتری بر آن اعمال شده است.

**تاییدیه اخلاقی:** همه جنبه‌های اخلاقی در انجام پژوهش رعایت شده است.

**تعارض منافع:** نویسندگان تایید می‌نمایند که تعارض منافعی وجود ندارد.

**منابع مالی:** منابع مالی برای این پژوهش نبوده است.

**سهم نویسندگان:** سهم نویسندگان صادق الهامی جوشقان، پرگل رضوانی و محمدرضا رازفر به ترتیب ۳۰، ۴۰ و ۳۰ درصد می‌باشد.

#### منابع

- 1- Hülsenberg D, Harnisch A, Bismarck A. Microstructuring Glasses Using Lasers. Springer Berlin Heidelberg; 2008.
- 2- Wuthrich R, Abou Ziki JD. Micromachining using electrochemical discharge phenomenon: fundamentals and application of spark assisted chemical engraving. William Andrew; 2014.
- 3- Esashi M, Matsumoto Y, Shoji S. Absolute pressure sensors by air-tight electrical feedthrough structure.

جدول ۱) درصد کاهش اضافه برش در صورت استفاده از قطعه واسط برای قطرهای مختلف ابزار

قطر ابزار	درصد کاهش اضافه برش
۷۰۰ میکرومتر	۵۱٪
۵۰۰ میکرومتر	۶۶٪
۳۰۰ میکرومتر	۷۶٪

با توجه به تاثیر قطعه واسط بر سطح باربرداری شده، ناحیه متاثر از حرارت در اطراف سوراخ نیز دچار تغییرات خواهد شد که از نقطه نظر ساختار و خواص مواد قابل توجه خواهد بود، لذا در ادامه بررسی ناحیه متاثر از حرارت پرداخته شده است. به منظور تعیین ناحیه متاثر از حرارت، در سه نقطه به فواصل ۲۵، ۴۵ و ۱۰۰ میکرومتر از دیواره سوراخ سختی سطحی اندازه‌گیری شده است (شکل ۷-الف). این اندازه‌گیری در محل ورودی سوراخ و برای دو حالت بدون قطعه واسط و با استفاده از قطعه واسط (بعد از جدا کردن این قطعه) انجام گردیده است و نتایج حاصل (سختی ویکرز) در شکل ۷-ب بیان گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که برای دورترین نقطه اندازه‌گیری (نقطه ۱) سختی در حالت استفاده از قطعه واسط بالاتر است (۷۸۸ نسبت به ۷۶۵ ویکرز) که نشان دهنده عدم تاثیر پذیری این نقطه از حرارت تخلیه‌های الکتریکی است. برای دو نقطه دیگر، سختی در حالت استفاده از قطعه واسط پایین‌تر است که نشان می‌دهد سطح، تاثیر شدیدتری از حرارت پذیرفته است. این روند تغییرات نشان می‌دهد در حالت استفاده از قطعه واسط، تغییرات سختی ناشی از سیکل حرارتی تخلیه‌های الکتریکی در ناحیه کوچکتری متمرکز شده است در حالی که بدون استفاده از قطعه واسط این تغییرات در ناحیه بزرگتری ایجاد می‌شود (برای حالت عدم استفاده از قطعه واسط سختی اولیه شیشه برای نقطه‌ای دورتر از نقطه ۱ حاصل می‌شود که نشان‌دهنده گسترده‌تر بودن ناحیه متاثر از حرارت است).



شکل ۷) الف) نقاط اندازه‌گیری سختی

- Sensors and Actuators A: Physical. 1990;23(1-3):1048-52.
- 4- Basak I, Ghosh A. Mechanism of material removal in electrochemical discharge machining: a theoretical model and experimental verification. *Journal of materials processing technology*. 1997 ;71(3):350-9.
- 5- Jain VK, Dixit PM, Pandey PM. On the analysis of the electrochemical spark machining process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1999 ;39(1):165-86.
- 6- Kulkarni A, Sharan R, Lal GK. Measurement of temperature transients in the electrochemical discharge machining process. In *AIP Conference Proceedings 2003* (Vol. 684, No. 1, pp. 1069-1074). American Institute of Physics.
- 7- Wüthrich R, Spaelter U, Bleuler H. The current signal in spark-assisted chemical engraving (SACE): what does it tell us. *Journal of micromechanics and microengineering*. 2006 ;16(4):779.
- 8- Wüthrich R, Hof LA. The gas film in spark assisted chemical engraving (SACE)—a key element for micro-machining applications. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2006 ;46(7-8):828-35.
- 9- Kurafuji H. Electrical discharge drilling of glass. *Ann. CIRP*. 1968;16:415-9.
- 10- Wuthrich R, Ziki JD. *Micromachining using electrochemical discharge phenomenon*. Oxford: William Andrew; 2009.
- 11- Lee ES, Howard D, Liang E, Collins SD, Smith RL. Removable tubing interconnects for glass-based micro-fluidic systems made using ECDM. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2004; 14(4):535.