



## Improvement of Surface Integrity of PDMS Micro-channel in the Micro Electrochemical Discharge Milling Process

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Torabi A.<sup>1</sup> MSc,

Razfar M.\*<sup>1</sup> PhD

#### How to cite this article

Torabi A, Razfar M. Improvement of Surface Integrity of PDMS Micro-channel in the Micro Electrochemical Discharge Milling Process. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(11):2605-2615.

### ABSTRACT

In recent years, forming a 3D microfluidic channels on the electrical non-conductive material such as Polydimethylsiloxane (PDMS) in the micro-electromechanical system (MEMS) and medical applications is of great interest. Lithography is the most know process to create patterns on the PDMS however there are a few drawbacks to this process such as high operational cost and time, and sidewall angle. In all applications, the quality of the micro-channel surface determines the performance of it. In this research as innovatively the electrochemical discharge milling (ECDM) which is known for lower operational cost and proper material removal rate (MRR; i.e. process time), and is capable of creating patterns on electrical non-conductive material, was used to form a micro-channel on the PDMS. To that end, the effect of process parameters such as electrolyte concentration, feed rate and cutting speed and voltage on the surface roughness and surface integrity deeply investigated. It was observed that ECDM is capable of creating patterns on the PDMS with surface integrity which is comparable with the lithography micro-channel. It is also observed that decreasing the rotational speed from 10000 to 0rpm results in increasing the surface roughness 2 to 4 times. This happens due to the increasing the thickness of the gas film around the tool, and subsequently increasing the flying sparks which results in higher surface roughness. Increasing the Voltage from 38 to 42V results in 36% enhancement of surface roughness. The 25% electrolyte concentration results in lower surface roughness.

**Keywords** Polydimethylsiloxane (PDMS); Electrochemical Discharge Milling; Micro-Channel; Surface Integrity

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Department, Mechanical Engineering Faculty, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

#### \*Correspondence

Address: Amirkabir University of Technology, No. 424, Hafez Street, Tehran, Iran.

Phone: +98 (21) 64543458

Fax: +98 (21) 66413969

razfar@aut.ac.ir

#### Article History

Received: March 29, 2020

Accepted: September 20, 2020

ePublished: November 14, 2020

### CITATION LINKS

[1] Commercialization of microfluidic ... [2] Investigating the effect of the electrolyte ... [3] The origins and the future of ... [4] Optimization of grinding partially stabilized ... [5] Hole-Surface integrity and flexural strength ... [6] Monolayers on disordered substrates: Self ... [7] Magnetophoretic manipulation in microsystem using ... [8] Fabrication and testing of polydimethylsiloxane ... [9] Wettability modification of cyclic olefin ... [10] Recent progress in soft ... [11] A low-cost fabrication system for ... [12] Near-IR nanosecond laser direct writing ... [13] Heat transfer and fluid flow in minichannels ... [14] Experimental investigation of the ... [15] Experimental investigation of metal ... [16] Experimental investigation of continuous ... [17] A study on the effect of tool travel speed and tool ... [18] Numerical and experimental study of discharge ... [19] The tool geometrical shape and pulse-off ... [20] Machining a glass rod with a lathe-type ... [21] In situ measurement and micromachining ... [22] 3D microstructuring of glass using electrochemical ... [23] 3D microstructuring of Pyrex glass using ... [24] Micro-texturing channel surfaces on glass with ... [25] The gas film in spark assisted chemical ... [26] Experimental investigation for improvement of ... [27] Application of electrolyte injection to the ... [28] Investigating the effect of mixed alkaline ... [29] Effect of tool electrode roughness on the ... [30] The drilling of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> using a pulsed DC supply ... [31] Optimization of surface roughness in ... [32] Handbook of surface and ... [33] Micromachining using electrochemical discharge ... [34] Characterization and modeling of 2D-glass ... [35] Experimental and numerical investigations of ...

## بهبود یکپارچگی سطح در میکروکانال ایجادشده در پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان توسط میکروفرزکاری تخلیه الکتروشیمیایی

ارسلان ترابی MSc

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

محمدرضا رازفر\* PhD

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

### چکیده

در سال‌های اخیر ایجاد ساختارهای سه‌بعدی و کانال‌های کوچک هدایت‌کننده جریان سیال، بر روی مواد نارسا‌ای جریان الکتریکی نظیر پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان، جهت کاربرد در سیستم‌های الکترومکانیکی و پزشکی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. عموماً جهت ایجاد میکروکانال در پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان از فرآیند لیتوگرافی استفاده می‌شود که از جمله محدودیت‌های آن می‌توان به زمان و هزینه بالای فرآیند و دیواره‌های زاویه‌دار اشاره نمود. در تمامی مصارف، عملکرد کانال وابسته به کیفیت سطح آن است. در این پژوهش برای اولین بار فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتروشیمیایی که با هزینه کم و نرخ براده‌برداری مناسب قادر به ایجاد کانال بر روی مواد نارسا‌ای جهت ایجاد میکروکانال در پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان استفاده شده است. از سایر مزایای این روش می‌توان به امکان دستیابی به عمق‌های بالا اشاره کرد. بدین منظور تأثیر پارامترهایی فرآیند نظیر غلظت الکترولیت، سرعت دورانی و پیش‌روی، اختلاف پتانسیل اعمالی بر کیفیت و زبری سطح بررسی شد. ملاحظه شد که ماشین‌کاری تخلیه الکتروشیمیایی قادر است کانال‌های با کیفیت سطح مشابه روش لیتوگرافی ایجاد کند. همچنین ملاحظه شد که با کاهش سرعت دورانی از ۱۰۰۰۰ دور بر دقیقه تا صفر، زبری سطح ۲ تا ۴ برابر افزایش می‌یابد. این امر به دلیل افزایش ضخامت فیلم گاز و افزایش جرقه‌های سرگردان از سطح ابزار و قطعه‌کار با کاهش سرعت دورانی رخ می‌دهد. همچنین مقدار زبری سطح کانال ایجادشده با افزایش ولتاژ از ۳۸ به ۴۲ ولت، به اندازه ۳۶٪ افزایش می‌یابد. غلظت الکترولیت ۲۵٪ منجر به بهترین زبری سطح در تمام نمونه‌ها شد.

**کلیدواژه‌ها:** پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان، فرزکاری تخلیه الکتروشیمیایی، میکروکانال، یکپارچگی سطح

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۳۰

\*نویسنده مسئول: razfar@aut.ac.ir

### مقدمه

شیشه‌ها، سرامیک‌ها و پلیمرها از جمله موادی هستند که در دهه اخیر به صورت گسترده در صنعت مایعات میکرونی استفاده شده است. در این صنعت نیاز به ایجاد هندسه‌های پیچیده با ابعاد کوچک و کیفیت سطح بالا در حال افزایش است [1-3]. ایجاد الگو در شیشه‌ها و سرامیک‌ها به دلیل تردی با مشکلاتی همراه است [4, 5]. این امر موجب شد در در بسیاری از کاربردها، شیشه و سرامیک‌ها به زودی جای خود را به پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان (PDMS) دادند. هنگامی که پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان به عمل آید، مانند یک جامد الاستیک رفتار کرده که ساختار قالب‌ریزی شده خود را حفظ می‌کند.

استفاده از پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان در کاربردهای میکروسیالات برای اولین بار توسط فرگوسن و همکاران ارایه شد [6]. تا به امروز، چندین مواد پلیمری دیگر نیز، مانند پلی‌اورتان‌متیل‌اکریلیت (PUMA) و پلی‌متیل‌متاکریلیت (PUMMA) در ساخت میکروکانال‌ها به کار گرفته شده است؛ اما پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان همچنان پلیمر غالب مورد استفاده در میکروساخت‌های میکروسیالات باقی می‌ماند. میکروکانال پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان ساخته‌شده با استفاده از قالب‌سازی میکرو با شیوه قالب‌گیری مجدد، به صورت گسترده به کار گرفته می‌شوند.

پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان قادر است آشکارسازی فلورانس با طول موج کوتاه را محدود کند (نزدیک به ۴۰۰ نانومتر). از این رو برای آشکارسازی القایی و ناشی از لیزر حساسیت در پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان نسبت به دستگاه‌های شیشه‌ای کمتر است. انتخاب پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان به عنوان مواد کانال‌های کوتاه به علت سازگاری زیستی و ساخت ساده آن با استفاده از شیوه قالب‌گیری مجدد است [3]. فابریک و همکاران به کارگیری مگنتوفورز در سیستم‌های میکرو با استفاده از ساختارهای پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان را گزارش کردند که از ذرات میکرونی آهن کربونیل ترکیب‌شده در زمینه پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان ساخته شده است [7]. /بدین و همکاران ساخت و آزمایش کانال میکروسیالات پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان را جهت تفکیک سلول‌های زیستی عامل‌دار شده مغناطیسی ارایه کردند. آنها میکروکانال را در PDMS با روش قالب‌گیری عینی با لاک نوری (Photoresist) SU-8 تولید کردند. ملاحظه شد که با اعمال شدت جریان ۲ آمپر، میکروکانال قادر به تفکیک سلول‌های زیستی عامل‌دار شده مغناطیسی است [8].

لیتوگرافی یک از مرسوم‌ترین روش‌ها جهت ایجاد کانال در پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان است [9]. با این حال این فرآیند دارای معایبی همچون زمان و هزینه بالا، دیواره‌های زاویه‌دار یا عدم امکان دستیابی به دیواره عمود است. همچنین بیشترین مقدار عمق کانال ایجادشده توسط این روش عموماً کمتر از ۲۰۰ میکرون است [10-12]. کانال‌های کوچک میکرونی و مینیاتوری به کانال‌هایی با ابعاد مقطع کوچک‌تر از یک میلی‌متر و بزرگ‌تر از یک میکرومتر اطلاق می‌شود. در ابعاد مقطع بزرگ‌تر از یک میلی‌متر، جریان حرکت سیال در کانال، رفتاری شبیه حرکت سیال در مقیاس‌های ماکروسکوپی خواهد داشت [13]. میکروکانال‌ها به واسطه نسبت بالای سطح به حجم و همچنین مقدار حجم کوچک خود، کاربردها و مزیت‌های زیادی دارند که به برخی از آنها اشاره شد.

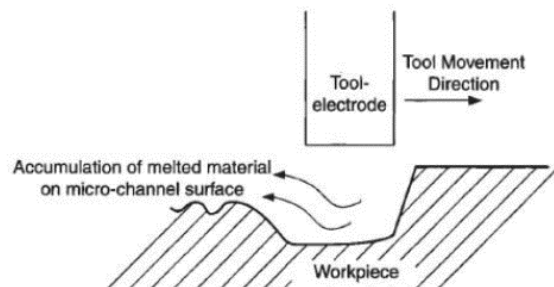
ماشین‌کاری الکتروشیمیایی (Electro Chemical Machining; ECM) فرآیندی است که در آن براده‌برداری براساس اصول انحلال آندی کنترل‌شده در سطح قطعه‌کار صورت می‌پذیرد. در این فرآیند قطعه‌کار (آند) و ابزار (کاتد)، دارای رسانایی الکتریکی هستند و هر دو داخل یک پیل الکتریکی قرار می‌گیرند. الکترولیت نقش پل ارتباطی میان ابزار و قطعه‌کار را ایفا کرده و محصولات واکنش و

مختلف به‌عنوان قطعه‌کار استفاده نمودند و اثر پارامترهایی چون فاصله ابزار تا قطعه‌کار، ولتاژ اعمالی و جنس قطعه‌کار را بر عمق ماشین‌کاری و کیفیت سطح کانال بررسی کردند. تعداد آزمایش‌ها انجام‌شده محدود بوده و بیشتر بر امکان‌سنجی فرآیند فرزکاری تمرکز شده است [21, 22]. ژنگ و همکاران جزء شی‌های سه‌بعدی را توسط فرآیند فرزکاری تخلیه الکتروشیمیایی بر روی شیشه نسوز ایجاد نمودند. آنها در تحقیقات خود اثرات پارامترهایی چون مقدار ولتاژ، سرعت دورانی و سرعت پیش‌روی را بررسی کردند. هدف آنها تغییر پارامترهای موثر به‌منظور دستیابی به دقت بالاتر ماشین‌کاری و کیفیت سطح بهتر بود [23]. مشاهدات این محققین حاکی از آن است که به‌کارگیری ولتاژ پالسی به‌جای ولتاژ پیوسته سبب بهبود کیفیت سطح کانال می‌شود. اهمیت عمده به‌کارگیری ولتاژ پالسی در انتخاب بهینه زمان روشنی و خاموشی پالس است به‌نحوی که با ترکیب مناسب آنها بتوان مقدار انرژی که به قطعه‌کار منتقل می‌شود را کنترل کرد. لازم است در این حالت زمان روشنی پالس را از زمان متوسط مورد نیاز برای تشکیل فیلم گاز اندکی بیشتر انتخاب کرد اما به‌گونه‌ای باشد که مانع رسیدن حرارت بیش از حد از طریق انرژی جرقه به قطعه‌کار شود. ماهیت براده برداری در فرآیند ECDM با تشکیل فیلم گاز در اطراف ابزار و جرقه زنی صورت می‌گیرد [16]. در برخی پژوهش‌ها توسط تصویربرداری حجم گاز تشکیل‌شده در اطراف ابزار اندازه‌گیری شده است [24, 25]. زمان خاموشی پالس در سرد شدن ناحیه ماشین‌کاری و کاهش منطقه متأثر از حرارت نقش مهمی دارد. چرخش ابزار سبب جریان یافتن بهتر الکتروولیت به ناحیه ماشین‌کاری و خروج براده از آن ناحیه می‌شود. این مطلب در عملیات سوراخ‌کاری اهمیت زیادی داشته و محققان زیادی بر روی آن بررسی انجام دادند [19, 23].

در صورتی که ابزار به‌صورت منبع انرژی حرارتی در نظر گرفته شود، حرکت پیش‌روی آن بر روی قطعه‌کار، مدت‌زمان قرارگیری قطعه‌کار در معرض انرژی حرارتی را مشخص می‌نماید. بنابراین انتخاب صحیح پارامتر پیش‌روی ابزار در ترکیب با سطح و شکل ولتاژ (به‌عنوان نماینده منبع حرارتی)، نقش مهمی بر کیفیت سطح ماشین‌کاری‌شده، دقت ابعادی و منطقه متأثر از حرارت دارد [26]. در شکل ۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی کانال ماشین‌کاری‌شده با فرآیند تخلیه الکتروشیمیایی نمایش داده شده است. در دو پژوهش انجام‌شده عمق کانال در فرآیند فرزکاری تخلیه الکتروشیمیایی شیشه بررسی شد. بر این اساس بهترین دما به‌عنوان دمای براده‌برداری، ۷۰۰ درجه سلسیوس به‌دست آمده است [27, 28]. در پژوهشی که توسط عرب و همکاران انجام گرفته است، به بررسی تأثیر صافی سطح کانال ایجادشده، روی سطح شیشه پرداخته شده است. در این بررسی، ابتدا ابزار تک‌لبه با صافی‌های مختلف توسط فرآیند تخلیه الکتریکی ایجاد شده است. صافی سطح‌های ایجادشده روی ابزار بین ۵/۷۹ تا ۱۰/۱۰ میکرومتر، اندازه‌گیری شده است. در هنگام افزایش زبری ابعاد سوراخ‌های ایجادشده روی سطح شیشه با افزایش همراه بوده است. در زمان استفاده از ابزارهایی که باعث

حرارت را از ناحیه ماشین‌کاری تخلیه می‌کند. از اصلی‌ترین محدودیت‌های این روش لزوم رسانایی الکتریکی قطعه‌کار است [14]. ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی (Electrical Discharge Machining; EDM) نیز یک روش ماشین‌کاری مدرن است که در آن، براده‌برداری توسط اعمال ولتاژ پالسی بین دو الکترود (ابزار و قطعه‌کار) که داخل سیال (دی‌الکتریک) غوطه‌ور هستند، صورت می‌پذیرد. شکل‌گیری جرقه‌های کوچک بین ابزار و قطعه‌کار باعث براده‌برداری و در نهایت دستیابی به هندسه نهایی می‌شود. از مشکلات اصلی این روش لزوم رسانایی الکتریکی ابزار و آسیب‌های سطحی و زیر سطحی است [15]. فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتروشیمیایی (ECDM) با بهره‌گیری از خواص خوردگی الکتروولیت و حرارتی جرقه‌های ایجادشده، قادر به براده‌برداری و ماشین‌کاری مواد نارسانایی نظیر شیشه‌ها، سرامیک‌ها و پلیمرها است. همچنین در این روش آسیب‌های سطحی و زیر سطحی ایجادشده در روش EDM نیز بسیار کاهش می‌یابد. یک سلول ECDM از واحدهای منبع تغذیه، الکتروولیت، ابزار (کاتد، قطب منفی)، آند (قطعه واسطه با قطب مثبت و مقطع بسیار بزرگ‌تر نسبت به ابزار)، دستگاه ماشین‌کاری (حرکت پیش‌روی و دورانی ابزار) و قطعه‌کار تشکیل شده است. اعمال اختلاف پتانسیل بحرانی بین ابزار و کاتد باعث تشکیل حباب در سطح ابزار شده و جرقه بین ابزار و الکتروولیت شکل می‌گیرد، در صورتی که قطعه‌کار در فاصله کم نسبت به ابزار قرار گیرد، حرارت ناشی از تخلیه الکتریکی باعث براده‌برداری می‌شود [16].

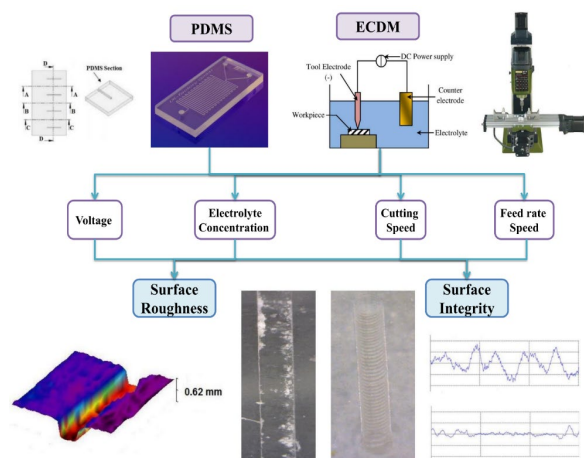
فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتروشیمیایی که شماتیک آن در شکل ۱ نمایش داده شده است، اولین بار برای سوراخ‌کاری مواد نارسانا استفاده شده است [16-18]. محدوده قطری سوراخ‌های ایجادشده از چندین میکرون شروع شده و تا چند میلی‌متر می‌رسد. با حرکت ابزار بر روی سطح قطعه‌کار، می‌توان ساختارهای دوبعدی و سه‌بعدی ایجاد کرد. اولین هندسه‌های سه‌بعدی را ژنگ و همکاران ایجاد کردند [19]. سپس فروتانی و مائد/ ساختارهای دوبعدی و سه‌بعدی را توسعه دادند [20]. تحقیقات زیادی در این زمینه توسط محققان صورت پذیرفته است [21, 22].



شکل ۱) شماتیک عملیات فرزکاری با فرآیند تخلیه الکتروشیمیایی [21]

در یک کار گروهی اولین ساختارهای سه‌بعدی با فرآیند تخلیه الکتروشیمیایی ایجاد شد. محققان از سه نوع شیشه با ترکیبات

جهت ایجاد میکروکانال در پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان است. بدین منظور توانایی فرآیند میکروفزکاری تخلیه الکتروشیمیایی در ایجاد میکروکانال در پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان با یکپارچگی سطحی مناسب به‌منظور استفاده در ساخت تجهیزات آزمایشگاهی زیستی بررسی شد. میکروکانال‌ها توسط فرآیند میکروفزکاری تخلیه الکتروشیمیایی روی ماده پلیمری پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان ایجاد شده و تأثیر پارامترهای مختلف از جمله ولتاژ بین دو سر الکترودها، غلظت الکترولیت و سرعت پیش‌روی ابزار بر زبری سطح کانال ایجاد شده مورد بررسی قرار گرفت. همچنین میکروکانال‌های ایجاد شده توسط دو روش لیتوگرافی و ماشین‌کاری تخلیه الکتروشیمیایی بر روی پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان مقایسه شد. بلوک دیاگرام پژوهش انجام شده در شکل ۳ نمایش داده شده است.



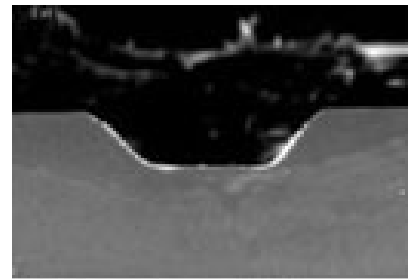
شکل ۳) بلوک دیاگرام پژوهش

### فعالیت‌های تجربی

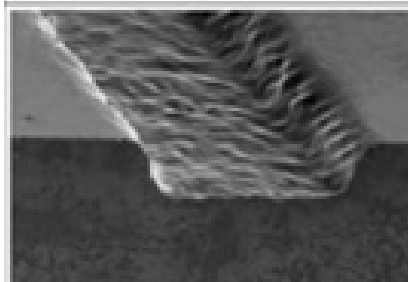
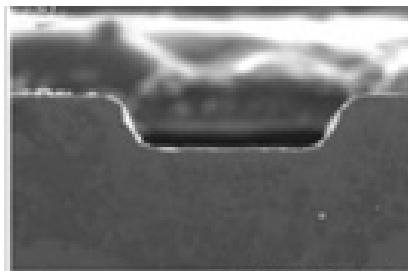
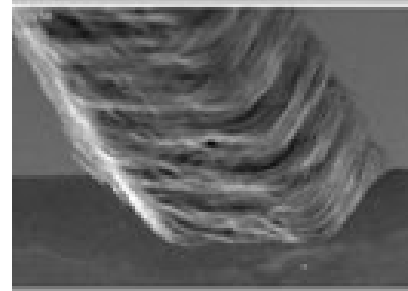
روش تخلیه الکتروشیمیایی به‌وسیله اصول خوردگی شیمیایی و الکتروشیمی، شرایط لازم برای ماشین‌کاری مواد نارسا را ایجاد می‌کند. با توجه به فرآیند، برای انجام آزمایش‌ها باید دستگاهی مورد استفاده قرار گیرد، که بتواند در مقیاس کوچک، حرکات دقیق خطی در کورس‌های حرکتی مختلف را فراهم کند. برای انجام آزمایش‌های تجربی از دستگاه میکروفزکاری MF70 که مجهز به میز KT70 استفاده می‌شود، که در شکل ۴ قابل مشاهده است. مکانیزم حرکتی میز در دو راستای X و Y به‌وسیله حرکت خطی بال اسکرو و موتور پله‌ای انجام می‌شود. محور عمودی Z به‌منظور تنظیم فاصله ابزار و قطعه‌کار مورد استفاده قرار می‌گیرد.

ابزار مورد استفاده در این فرآیند ابزار استوانه‌ای ساده به قطر ۰/۵ میلی‌متر است. قطعه‌کار استفاده شده، برای فرآیند تخلیه الکتروشیمیایی، قطعه مکعب مستطیل‌شکل، از جنس پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان با ابعاد ۷۵×۷۵ میلی‌متر است که در شکل ۵ نشان داده شده است. از محلول آبی هیدروکسید سدیم (NaOH) با غلظت‌های وزنی ۲۰، ۲۵ و ۳۰٪ به‌عنوان الکترولیت استفاده شد. پس از ایجاد کانال، کل قطعه به مدت ۱۵ دقیقه در ظرف التراسونیک

افزایش زبری سطح شده است، سطحی که در تماس با الکترولیت بوده و پتانسیل ایجاد جرقه را دارد، بیشتر بوده و زبری سطح باعث افزایش تعداد جرقه‌ها می‌شود و بنابراین ابعاد سوراخ‌ها بزرگ‌تر خواهد شد [29].



(الف)



(ب)

شکل ۲) تصویر میکروسکوپ الکترونی کانال ماشین‌کاری شده با فرآیند تخلیه الکتروشیمیایی، سرعت پیش‌روی ابزار ۱۰۰ میکرومتر بر ثانیه، سرعت دورانی ابزار ۲۰۰ دور بر دقیقه؛ (الف) ولتاژ مستقیم یکنواخت با مقدار ۴۰ ولت، (ب) ولتاژ مستقیم پالسی با مقدار ۴۰ ولت و زمان روشنی و خاموشی پالس ۲ میلی‌ثانیه [30]

ملاحظه می‌شود که دستیابی به کیفیت سطح در میکروکانال‌های ایجاد شده در پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان ضروری است. همچنین میکروفزکاری تخلیه الکتروشیمیایی قادر به ایجاد هندسه‌های مورد نظر در مایعات میکرونی در مواد نارسا است. از طرفی یکپارچگی سطح در میکروفزکاری تخلیه الکتروشیمیایی پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان بررسی نشده است. لذا هدف این پژوهش رایج ماشین‌کاری تخلیه الکتروشیمیایی به‌عنوان فرآیند جایگزین



مطابق شکل ۵ ابتدا قطعه توسط چاقوی جراحی، روی خط D بریده شده و پس از ایجاد مقطع D قطعه در راستاهای A و B و C بریده خواهد شد. سطح مقطع قطعات برش‌زده شده، توسط دوربین دیجیتال Dino-lite مدل ZT4113AM مشاهده شده و اندازه‌گیری ابعاد مقطع پس از کالیبراسیون دوربین توسط خط‌کش کالیبراسیون، انجام شده است. همچنین برای اندازه‌گیری زبری سطح کانال‌های ایجادشده توسط فرآیند بر روی نمونه‌ها از دستگاه زبری‌سنج دیجیتال مدل MarSurf PS10-Elcometer7062 ساخت کشور آلمان استفاده شد. طول کورس حرکت پراب با توجه به حدود بازه زبری که از این فرآیند انتظار می‌رود، مطابق استاندارد انتخاب شد [31, 32]. مطابق استاندارد اشاره‌شده برای اندازه‌گیری زبری، آزمون‌های زبری پنج‌بار تکرار شده و اعداد گزارش‌شده میانگین اعداد اندازه‌گیری شده است. برای پرهیز از خطای آزمایش‌ها و بررسی تکرارپذیری فرآیند، آزمایش‌ها دو مرتبه تکرار شده است. درنهایت سطح کانال‌های ایجادشده توسط رویه‌نگار لیزری سطوح (پروفیلومتر) مدل LPM-D1 بررسی شد. آزمایش‌ها به‌صورت فاکتوریل کامل (مجموعاً ۵۴ آزمایش) انجام شده و سطوح پارامترهای ثابت و متغیر در جدول ۱ ارایه شده است. ابعاد شیار متاثر از قطر ابزار و شرایط ماشین‌کاری است. عرض شیار در تمامی موارد بین ۵۰۰ تا ۱۸۰۰ و عمق شیار بین ۴۵ تا ۸۰۰ میکرون بود.

جدول ۱) سطوح پارامترهای ورودی آزمون‌های تجربی

پارامتر	مقادیر		
	سطح یک	سطح ۲	سطح ۳
اختلاف پتانسیل مستقیم (V)	۳۸	۴۰	۴۲
غلظت الکترولیت (%)	۲۰	۲۵	۳۰
سرعت دوران ابزار (RPM)	صفر	۵۰۰۰	۱۰۰۰۰
سرعت پیش‌روی محور X (mm/min)	۰/۶	۱/۲	-
الکترولیت	هیدروکسید سدیم		
جنس و قطر ابزار کاند (mm)	ابزار استوانه‌ای سرتخت از جنس فولاد تندبر، ۰/۵		
میزان الکترولیت (cc)	۸۰۰		
عمق فروبری ابزار در الکترولیت (mm)	۱/۵ تا ۲		
دمای الکترولیت (°C)	۲۵		

## نتایج و بحث

### تأثیر اختلاف پتانسیل اعمالی

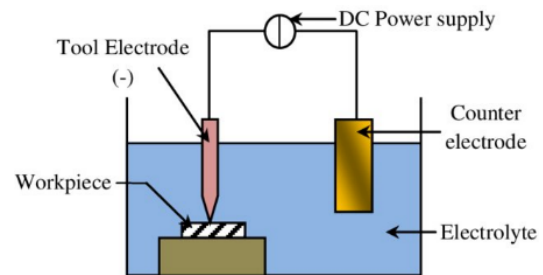
پس از انجام آزمایش‌های اولیه، اولین ولتاژی که منجر به ایجاد کانال کامل بر روی نمونه شده است، ولتاژ ۳۸ ولت بوده است. تأثیر اختلاف پتانسیل بر زبری سطح در نمودار ۱ نمایش داده شده است. ملاحظه شد که استفاده از اختلاف پتانسیل ۳۸ ولت، منجر به بیشترین زبری سطح می‌شود. دلیل این افزایش زبری، غالب‌بودن مکانیزم باربرداری مکانیکی، نسبت به مکانیزم باربرداری توسط تخلیه الکتروشیمیایی است.

در پژوهش/بوزیکی و همکاران [24] اشاره شده است که ماشین‌کاری در این ناحیه سبب ایجاد اثر تماس ابزار، روی کف کانال‌های

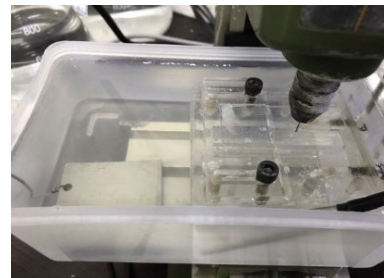
به کمک محلول آب مقطر تمیز شده، مقطع توسط چاقوی جراحی بریده شده و سپس توسط میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار می‌گیرد. باید دقت شود سطح مقطع به‌گونه‌ای بریده شود که در محل کانال هیچ گونه لهدگی و تغییر شکلی ایجاد نشود تا منجر به ایجاد خطا در نتایج آزمایش نشود. روش برش قطعات و نحوه بررسی سطح مقطع در شکل ۵ قابل مشاهده است.



(الف)

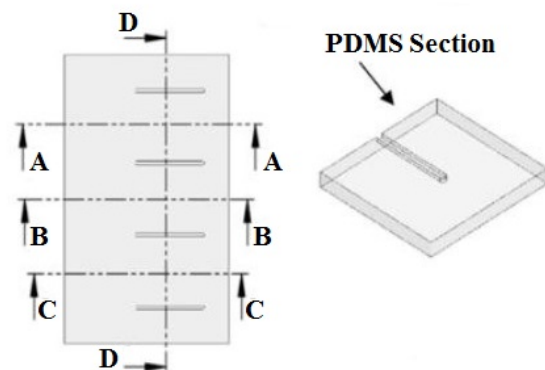


(ب)

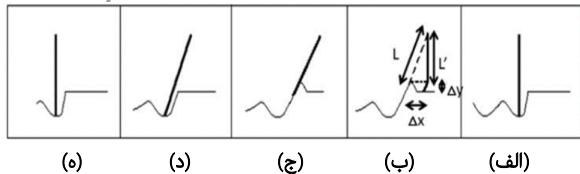


(ج)

شکل ۴) (الف) دستگاه میکروفزکاری تخلیه الکتروشیمیایی، (ب) شماتیک فرآیند EDM، (ج) چیدمان ابزار و قطعه‌کار

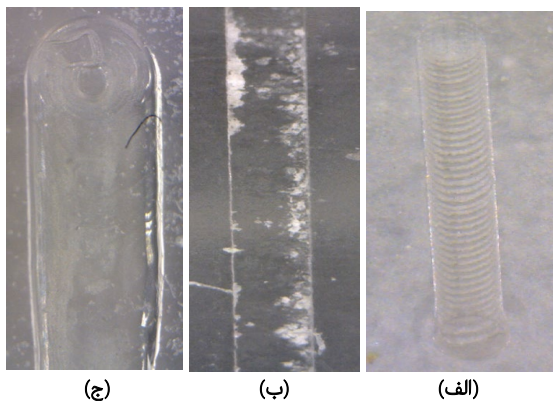


شکل ۵) نحوه مقطع‌زنی قطعه پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان



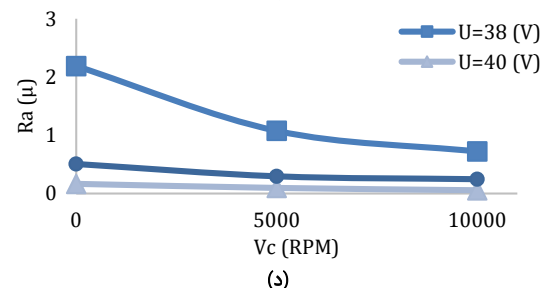
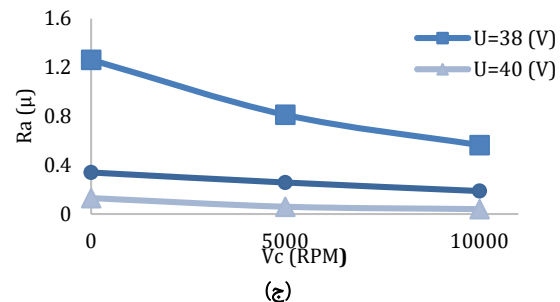
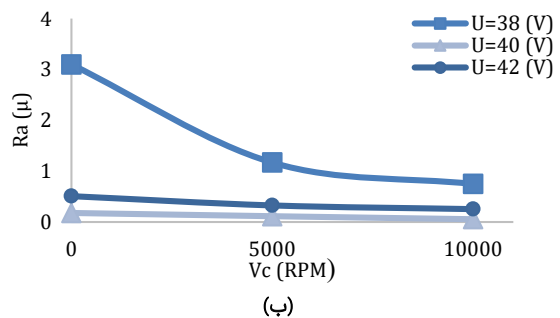
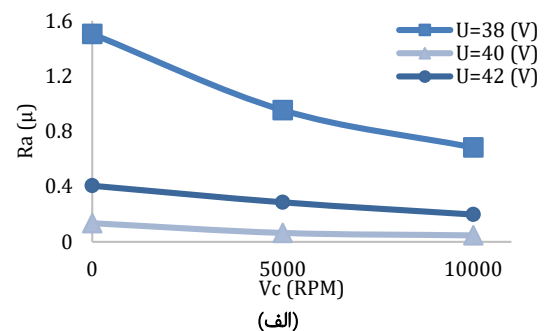
**شکل ۶** مکانیزم چسبیدن و جداشدن ابزار از کار در ایجاد کانال با فرآیند تخلیه الکتروشیمیایی: (الف) انبساط و نفوذ ابزار به داخل قطعه کار، (ب) چسبیدن ابزار به قطعه، (ج) چسبیدن و جداشدن ابزار از سطح قطعه کار، (د) خمش قطعه و جهش آن به مکانی دیگر، (ه) شکل‌گیری یک حفره دیگر<sup>[24]</sup>

مکانیزم چسبیدن و جداشدن ابزار از قطعه کار، مشابه به مشاهدات *ابوزیکی* و همکاران<sup>[24]</sup> است. با این تفاوت که در حالتی که ابزار دوران می‌کند، گام حرکتی مشخصی برای ابزار قابل مشاهده است. کمبودن ولتاژ عملی و همچنین رقیق بودن محلول الکترولیت، می‌تواند منجر به ایجاد چنین اثراتی شود. به‌عبارت دیگر، غالب بودن باربرداری مکانیکی نسبت به تخلیه الکتروشیمیایی، منجر به ایجاد این اثرات و کاهش کیفیت سطح و نیز افزایش زبری می‌شود. در شکل ۷، تأثیر ولتاژ بر شکل ظاهری و زبری سطح قابل مشاهده است. همان‌طور که مشخص است، در ولتاژ ۳۸ ولت، مکانیزم غالب باربرداری، تماس مکانیکی ابزار و قطعه کار است و اثرات تماس مکانیکی ابزار و قطعه کار مشهود است. اما در ولتاژ ۴۰ ولت، دو مکانیزم باربرداری مکانیکی و تخلیه الکتروشیمیایی به تعادل رسیده است. با توجه به اینکه، ابعاد کانال نسبت به ابعاد ابزار در ولتاژ ۴۲ ولت بیشتر است، می‌توان نتیجه گرفت که مکانیزم غالب باربرداری در این ولتاژ مکانیزم تخلیه الکتروشیمیایی است. با توجه به انرژی جرقه بالاتر در ولتاژ ۴۲ ولت نسبت به ولتاژ ۴۰ و ۳۸ ولت، به‌ازای هر جرقه، محل اثر جرقه بزرگ‌تر و نیز حجم ماده باربرداری شده افزایش می‌یابد. بنابراین دلیل، مقدار زبری سطح در حالت ۴۲ ولت مقداری بیشتر نسبت به ۴۰ ولت دارد و استفاده از آن به‌دلیل زبری سطح بیشتر و همچنین ابعاد کانال بزرگ‌تر که در ادامه توضیح داده خواهد شد، توصیه نمی‌شود.



**شکل ۷** تأثیر تغییرات ولتاژ در کانال‌های ایجاد شده در شرایط سرعت دورانی صفر، غلظت ۲۵٪ و سرعت پیش‌روی ۰/۶ میلی‌متر بر دقیقه در ولتاژهای: (الف) ۳۸، (ب) ۴۰، (ج) ۴۲ ولت

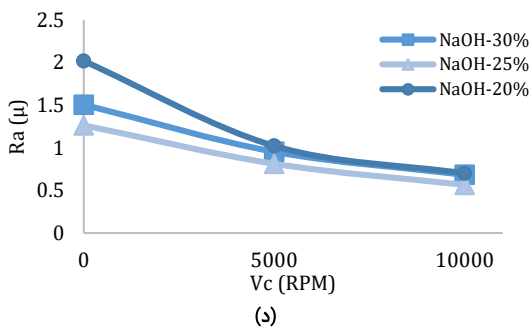
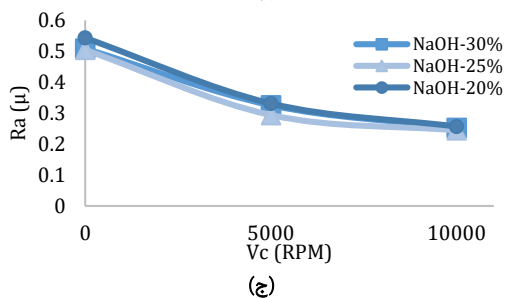
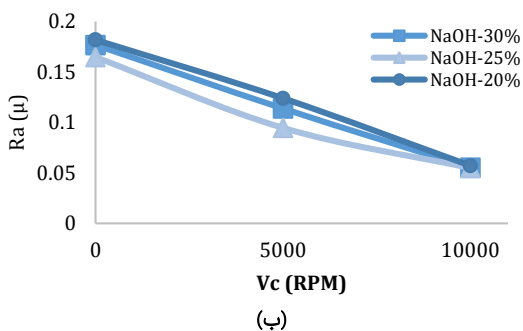
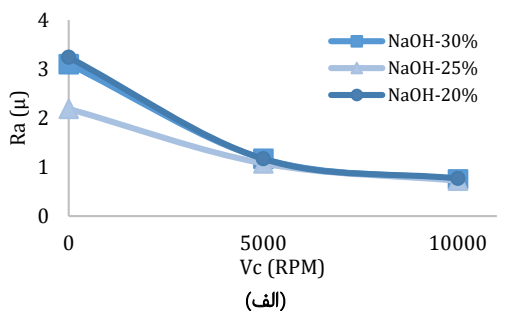
ماشین‌کاری شده است، این اثر که به مکانیزم چسبیدن و جداشدن معروف است، نشان می‌دهد که طول ابزار به‌دلیل ماهیت فرآیند و افزایش دمای ابزار، بیشتر می‌شود. پدیده چسبیدن و جداشدن ابزار از روی سطح کانال در شکل ۶ نشان داده شده است. ابزار در اثر انبساط به داخل قطعه کار نفوذ می‌کند. پس از حرکت افقی ابزار، به‌دلیل چسبیدن ابزار به پلیمر نرم، ابزار زاویه پیدا کرده (شکل ۶-الف) و با ادامه حرکت افقی ابزار از قطعه کار جدا می‌شود (شکل ۶-ج). پس از رسیدن زاویه ابزار به مقداری معین و به‌علت نرم‌بودن پلیمر، ابزار جهش کرده و به مکان دیگر و به حالت افقی درمی‌آید و یک حفره جدید ایجاد می‌شود (شکل‌های ۶-د و ۶-ه)<sup>[24]</sup>.



**نمودار ۱** تأثیر اختلاف پتانسیل و سرعت دورانی بر زبری سطح در شرایط مختلف: (الف) سرعت پیش‌روی: ۱/۲ متر بر دقیقه و ۳۰٪ NaOH، (ب) سرعت پیش‌روی: ۰/۶ متر بر دقیقه و ۳۰٪ NaOH، (ج) سرعت پیش‌روی: ۱/۲ متر بر دقیقه و ۲۵٪ NaOH، (د) سرعت پیش‌روی: ۰/۶ متر بر دقیقه و ۲۵٪ NaOH

### تأثیر غلظت الکترولیت

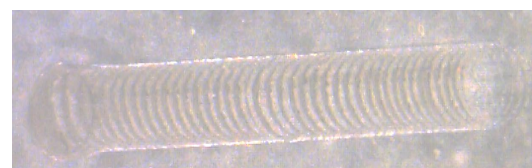
از محلول‌های الکترولیت هیدروکسید سدیم با غلظت‌های وزنی ۲۰، ۲۵ و ۳۰% استفاده شده است. تأثیر غلظت الکترولیت بر زبری سطح در نمودار ۳ نمایش داده شده است. در الکترولیت با غلظت کمتر (۲۰%)، به دلیل توان پایین این محلول در انجام آزمایشات شیمیایی، بافت سطح به خوبی خورده نشد که همین امر موجب شد که اثر حرکت ابزار روی سطح کانال‌ها ایجاد شود. در الکترولیت با غلظت بیشتر (۳۰%) بالا بودن انرژی جرقه‌ها به همراه توان بالای خوردگی الکترولیت، سبب آسیب دیدن سطح کانال شده و زبری سطح را افزایش داده است.



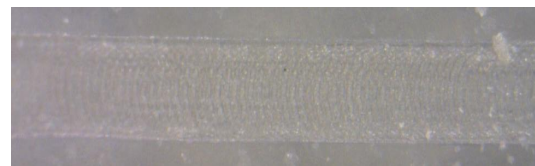
**نمودار ۳** تأثیر غلظت الکترولیت بر زبری سطح در اختلاف پتانسیل و سرعت پیش‌روی (مختلف: الف) ۳۸ و ۱/۲، ب) ۴۰ و ۱/۲، ج) ۴۲ و ۱/۲، د) ۳۸ ولت و ۰/۶ میلی‌متر بر دقیقه

### تأثیر سرعت دورانی ابزار

تأثیر سرعت دورانی بر زبری سطح و گام حرکتی ابزار در نمودار ۱ و شکل ۸ قابل مشاهده است. چرخش ابزار با سرعت بالاتر از ۲۵ دور بر دقیقه منجر به ایجاد اغتشاش در فیلم گاز اطراف ابزار می‌شود [24]. چرخش با سرعت بیشتر از این مقدار موجب کاهش ضخامت فیلم گاز اطراف ابزار خواهد شد. با کاهش ضخامت فیلم گاز در اطراف ابزار، مقدار جرقه‌های سرگردان که از جداره ابزار و سطح قطعه کار زده می‌شود، کاهش می‌یابد. این جرقه‌ها در کنار ایجاد یک ستون جرقه با نظم بیشتر، نسبت به حالت بدون چرخش منجر به کانالی با زبری سطح کمتر خواهد شد. نمودار ۲ نشان‌دهنده تأثیر تغییرات سرعت دورانی در پروفیل سطح کانال‌های ایجادشده در شرایط ولتاژ ۳۸ ولت و محلول ۲۵% وزنی الکترولیت هیدروکسید سدیم و سرعت پیش‌روی ۰/۶ میلی‌متر بر دقیقه است.

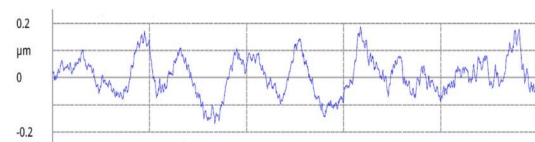


الف)

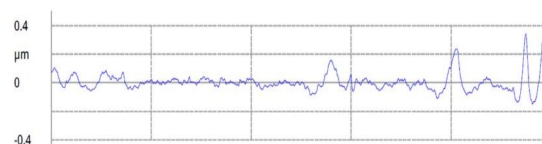


ب)

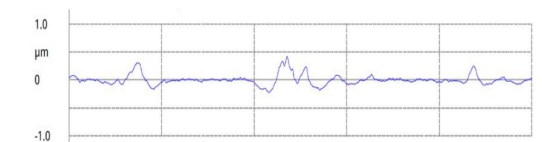
**شکل ۸** تأثیر سرعت دورانی بر گام حرکتی ابزار در ولتاژ ۳۸ ولت و پیش‌روی ۰/۶ میلی‌متر بر دقیقه و غلظت ۲۵% و سرعت‌های دورانی: الف) صفر، ب) ۵۰۰ دور بر دقیقه



الف)



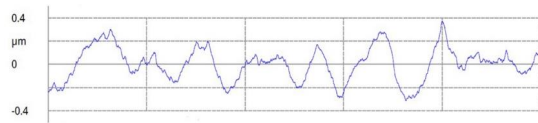
ب)



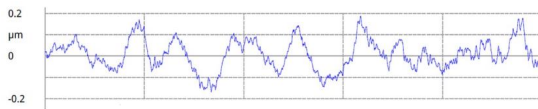
ج)

**نمودار ۲** پروفیل زبری سطح کانال‌های ایجادشده در شرایط اختلاف پتانسیل ۳۸ ولت، محلول الکترولیت هیدروکسید سدیم با غلظت ۲۵% و سرعت پیش‌روی ۰/۶ میلی‌متر بر دقیقه و سرعت‌های دورانی: الف) صفر، ب) ۵۰۰، ج) ۱۰۰۰ دور بر دقیقه

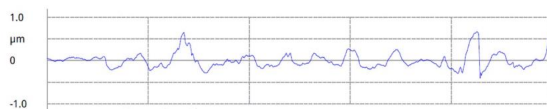
پیش‌روی ۰/۶ میلی‌متر بر ثانیه و سرعت دورانی صفر را نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)



(ج)

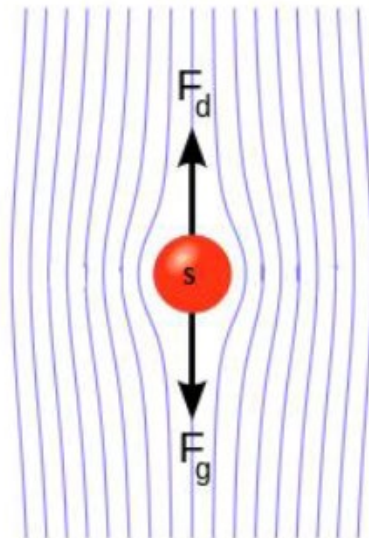
**نمودار ۴** پروفیل زبری سطح کانال‌های ایجاد شده در شرایط اختلاف پتانسیل ۳۸ ولت، سرعت پیش‌روی: ۰/۶ متر بر دقیقه، سرعت دورانی صفر و غلظت‌های مختلف هیدروکسید سدیم؛ الف) ۲۰، ب) ۲۵، ج) ۳۰٪

### تأثیر سرعت پیش‌روی

دو سرعت پیش‌روی برای ابزار در نظر گرفته شده است (۰/۶ و ۱/۲ متر بر دقیقه) که تأثیر آن بر زبری سطح در شرایط مختلف در نمودار ۵ نمایش داده شده است. با توجه به پژوهش‌های قبلی، برای ایجاد کانال با فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتروشیمیایی بر روی قطعه‌کار، دو روش متداول وجود دارد [33]. در روش اول، ابزار در فاصله معین و نزدیکی از سطح قطعه‌کار قرار می‌گیرد و سپس بدون آنکه تماسی بین ابزار و قطعه انجام شود، ابزار با سرعت پیش‌روی افقی، مسیری را روی سطح قطعه‌کار طی می‌نماید و در اثر فرآیند تخلیه الکتروشیمیایی، کانال ایجاد می‌شود. دیدار و همکاران فاصله اولیه بین ابزار و قطعه‌کار را برابر یا بیشتر از ۱۵ میکرومتر در نظر گرفتند و از همین روش برای ایجاد کانال استفاده نمودند [34]. به علاوه در بعضی از مراجع به این نکته اشاره شده است که در صورتی فاصله بین ابزار و قطعه‌کار کمتر از ۲۰ تا ۲۵ میکرومتر باشد، فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتروشیمیایی قادر به ایجاد سوراخ یا کانال بر روی قطعه‌کار است [33]. در برخی از منابع این موضوع مورد بحث قرار گرفته است که با شروع فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتروشیمیایی، ابتدا یک سوراخ در قطعه ایجاد می‌شود و ابزار نیز اندکی در داخل قطعه نفوذ می‌کند (انجام یک پیش‌روی عمودی)، سپس حرکت پیش‌روی افقی ابزار انجام می‌شود. در بعضی از آزمایش‌های صورت‌گرفته توسط فاسیو و همکاران، گزارش شده است که ابزار در ابتدا به مقدار ۶۰ میکرومتر به داخل قطعه نفوذ کرده و سپس برای ایجاد کانال، پیش‌روی افقی انجام شده است [22].

در شرایطی که فاصله اولیه ابزار از سطح قطعه‌کار بسیار کم باشد (ابزار روی سطح قطعه‌کار با فاصله اندک تنظیم شده باشد)، در ابتدا فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتروشیمیایی، متناسب با پارامترهای

دلیل افزایش انرژی جرقه‌ها را می‌توان به پایداری فیلم گاز مرتبط دانست. پایداری فیلم گاز نیز در الکترولیت به سرعت حرکت حباب‌ها در محلول بستگی دارد، به نحوی که هر چه سرعت حرکت حباب‌های رو به بالا بیشتر باشد، فیلم گاز ناپایدارتر خواهد بود. مطابق شکل ۹ نیروهای وارده به حباب، دو نیروی گرانشی و شناوری (بویانسی) است.



**شکل ۹** شماتیک نیروهای وارد بر یک حباب گازی غوطه‌ور در محلول الکترولیت،  $F_d$  نیروی اصطکاکی وارده،  $F_g$  نیروی گرانش

مقدار نیروی جاذبه وارده به این حباب مقداری ثابت است، اما مقدار نیروی شناوری ( $F_B$ ) مطابق رابطه ۱ قابل محاسبه است [33].

$$F_B = \frac{4}{3} \pi R_b^3 \rho \quad (1)$$

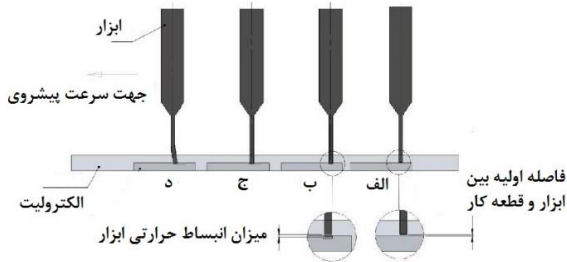
در این رابطه،  $\rho$  چگالی الکترولیت و  $R_b$  شعاع حباب است. از طرفی هنگامی که یک حباب به شعاع  $R_b$  در داخل یک سیال ویسکوز، با سرعت  $v$  و گرانشی دینامیکی  $\mu$  حرکت نماید، مطابق قانون استوک نیروی اصطکاکی ( $F_d$ ) به آن وارد می‌شود در صورتی که گرانشی دینامیکی با گرانشی سینماتیکی جایگزین شود، رابطه ۲ به دست می‌آید:

$$F_b = 6\pi R_b \mu = 6\pi R_b \gamma \quad (2)$$

در این رابطه،  $\gamma$  گرانشی سینماتیکی و  $\mu$  گرانشی دینامیکی هستند. با افزایش غلظت الکترولیت، چگالی و گرانشی الکترولیت افزایش می‌یابد. مطابق رابطه ۲ مقدار نیروی  $F_b$  افزایش یافته و حرکت حباب درون محلول الکترولیت دشوارتر می‌شود [33].

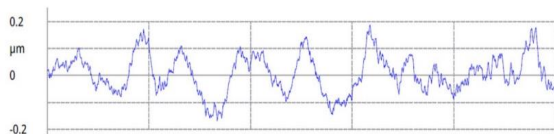
هر چقدر فیلم گاز پایدارتر باشد، زمان کمتری از کل فرآیند ماشین‌کاری به تشکیل فیلم گاز اختصاص می‌یابد و زمان بیشتری برای تخلیه الکتریکی فراهم می‌شود و نتیجتاً انرژی جرقه بیشتر خواهد شد [25]. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، افزایش انرژی جرقه منجر به ایجاد باربرداری بیشتر به ازای هر جرقه شده و نتیجتاً کیفیت سطح کاهش می‌یابد. در نمودار ۴ تأثیر تغییرات غلظت در زبری سطح کانال‌های ایجاد شده در شرایط ولتاژ ۳۸ ولت و سرعت



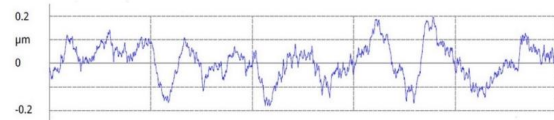


**شکل ۱۰** شماتیک تماس ابزار با قطعه کار؛ الف) قبل از شروع فرآیند ماشین‌کاری، ب) هنگامی که فرآیند شروع می‌شود، ج) انجام سرعت پیشروی افقی، د) در حالت سرعت پیشروی بیش از نرخ باربرداری [35]

مقدار زبری اندازه‌گیری شده توسط دستگاه زبری‌سنج، در سرعت ۶ متر بر دقیقه، میزان کمتری نسبت به زبری سطح اندازه‌گیری شده، در سرعت ۱/۲ متر بر دقیقه حاصل شده است. دلیل این امر براساس فیلم‌گاز اطراف ابزار قابل توجیه است. در سرعت پیشروی کمتر، به دلیل اینکه ابزار در هاله‌ای از گاز ایجاد شده حرکت می‌کند. فیلم‌گاز ایجاد شده در اطراف ابزار، باعث ایجاد جرقه‌هایی با انرژی کمتر نسبت به حالت پیشروی با سرعت بیشتر است و این جرقه‌های با انرژی کمتر منجر به ایجاد کانالی با زبری سطح بهتر خواهد شد. نمودار ۶ نشان‌دهنده تأثیر تغییرات سرعت پیشروی در پروفیل سطح کانال‌های ایجاد شده است. ملاحظه می‌شود که استفاده از سرعت پیشروی بیشتر منجر به ایجاد سطوح با پروفیل زبرتر می‌شود، این امر به دلیل ایجاد جرقه‌های با انرژی بیشتر رخ می‌دهد.



(الف)

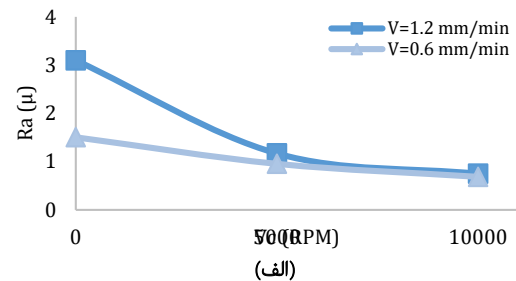


(ب)

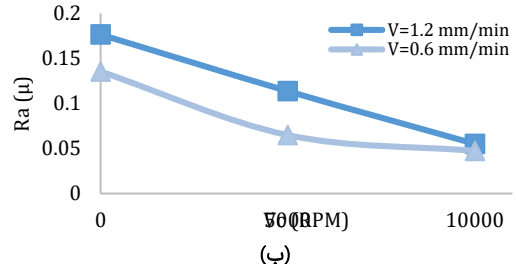
**نمودار ۶** پروفیل زبری سطح کانال‌های ایجاد شده در شرایط اختلاف پتانسیل ۳۸ ولت، غلظت سدیم‌هیدروکسید ۲۵٪، سرعت دورانی صفر و سرعت‌های پیشروی؛ الف) ۰/۶، ب) ۱/۲ متر بر دقیقه

**مقایسه روش‌های لیتوگرافی و ماشین‌کاری تخلیه الکتروشیمیایی**  
همان‌طور که عنوان شد لیتوگرافی یک از مرسوم‌ترین روش‌ها جهت ایجاد کانال در پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان است. با مقایسه نمونه ایجاد شده توسط دو روش در حالت بهینه ملاحظه شد که زبری سطح کانال ایجاد شده توسط ECDM کمتر از ۱۲٪ بیشتر از نمونه روش لیتوگرافی است که با توجه به سایر مزایای روش ماشین‌کاری تخلیه الکتروشیمیایی نظیر زمان، هزینه تولید بسیار کمتر و دیواره‌های عمود بیانگر این امر است که روش ماشین‌کاری تخلیه الکتروشیمیایی می‌تواند جایگزین بسیار مناسبی برای ایجاد الگو

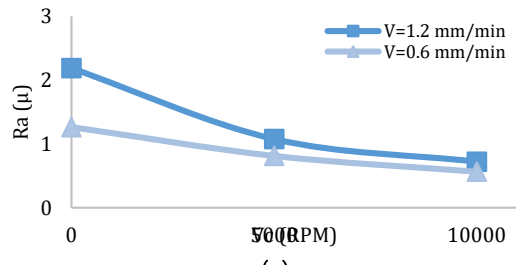
فرآیند، به واسطه انبساط حرارتی ابزار، ابزار می‌تواند به داخل قطعه کار نفوذ کند [22]. به واسطه تماس مکانیکی که بین ابزار و قطعه کار حاصل می‌شود، لازم است تا در فرزکاری با فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتروشیمیایی، با انتخاب مناسب سایر پارامترهای تأثیرگذار در فرآیند، سرعت پیشروی افقی ابزار به گونه‌ای مناسب تنظیم شود. در صورتی که سرعت پیشروی ابزار از نرخ باربرداری بیشتر باشد، ابزار و قطعه کار با یکدیگر تماس پیدا می‌کنند و در اثر این تماس یک نیروی خمش به ابزار وارد می‌شود که می‌تواند موجب کاهش کیفیت سطح و حتی شکست ابزار شود. شکل ۱۰ به صورت شماتیک نحوه تماس ابزار و قطعه کار را در فرآیند تخلیه الکتروشیمیایی نشان می‌دهد. از طرفی، اگر میزان سرعت پیشروی ابزار بسیار کم باشد، زمان ماشین‌کاری افزایش می‌یابد و می‌تواند منطقه متأثر از حرارت را توسعه دهد.



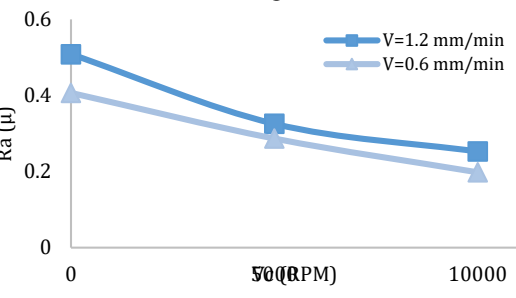
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

**نمودار ۵** تأثیر سرعت پیشروی بر زبری سطح در اختلاف پتانسیل و غلظت‌های مختلف هیدروکسید سدیم؛ الف) ۳۸ و ۳۰، ب) ۴۰ و ۳۰، ج) ۴۲ و ۳۰، د) ۳۸ ولت و ۲۵٪

۲- به‌طور میانگین، اختلاف پتانسیل ۴۰ نسبت به ۳۸ ولت منجر به ۸۵٪ زبری سطح کمتر در نمونه‌ها شد. غلظت الکترولیت ۲۵ نسبت به ۳۰٪ به‌طور میانگین منجر به ۶٪ زبری سطح کمتر شد. استفاده از ابزار با سرعت دورانی ۱۰۰۰۰ دور بر دقیقه نسبت به ابزار ثابت، به‌طور میانگین منجر به کاهش ۴۵٪ زبری سطح در نمونه‌ها شد.

۳- هر چقدر فیلم گاز پایدارتر باشد، زمان کمتری از کل فرآیند ماشین‌کاری به تشکیل فیلم گاز اختصاص می‌یابد و زمان بیشتری صرف تخلیه الکتریکی می‌شود که در نهایت منجر به انرژی جرقه بیشتر خواهد شد. افزایش انرژی جرقه منجر به ایجاد باربرداری بیشتر به‌ازای هر جرقه شده و در نتیجه کیفیت سطح نامناسب می‌شود.

۴- اثر افزایش ولتاژ ماشین‌کاری بر زبری سطح بیش از اثر افزایش غلظت الکترولیت است. در ولتاژ ۳۸ ولت، مکانیزم غالب باربرداری، تماس مکانیکی ابزار و قطعه‌کار است. اما در ولتاژ ۴۰ ولت، دو مکانیزم باربرداری مکانیکی و تخلیه الکتروشیمیایی به تعادل رسیده است. با توجه به اینکه ابعاد کانال نسبت به ابعاد ابزار در ولتاژ ۴۲ ولت بیشتر است، می‌توان نتیجه گرفت که مکانیزم غالب باربرداری در ولتاژ ۴۲ ولت، مکانیزم تخلیه الکتروشیمیایی است. با افزایش ولتاژ ماشین‌کاری و افزایش غلظت الکترولیت، نرخ براده‌برداری افزایش می‌یابد و احتمال ایجاد تماس مکانیکی بین ابزار و قطعه‌کار کاهش پیدا می‌کند.

**تشکر و قدردانی:** از مسئولین مرکز فضایی دانشگاه علم و صنعت بابت هم‌فکری در روند آزمون‌ها و نتایج، قدردانی می‌شود.  
**تاییدیه اخلاقی:** به‌منظور انتشار تصاویر آزمایشات تجربی از پژوهشکده رانشگرهای فضایی مجوزهای لازم اخذ شده است.  
**تعارض منافع:** موردی بیان نشده است.

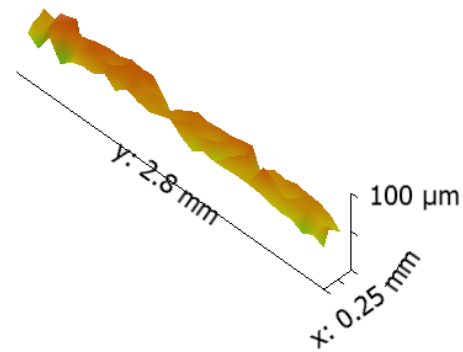
**سهم نویسندگان:** ارسلان ترابی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ محمدرضا رازفر (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪).

**منابع مالی:** توسط پژوهشکده رانشگرهای فضایی تامین شده است.

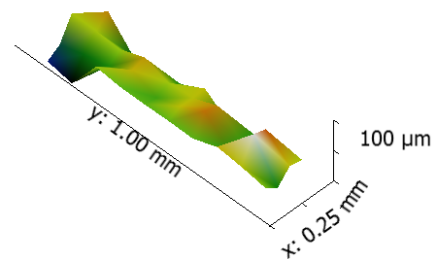
## منابع

- 1- Volpatti LR, Yetisen AK. Commercialization of microfluidic devices. Trends in Biotechnology. 2014;32(7):347-350.
- 2- Sabahi N, Razfar MR, Hajian M, Mohammadi P. Investigating the effect of the electrolyte concentration and type of electrolyte on the surface quality and depth of micro-channels produced by electrochemical discharge machining (ECDM). Modares Mechanical Engineering. 2016;15(13):401-405. [Persian]
- 3- Whitesides GM. The origins and the future of microfluidics. Nature. 2006;442(7101):368-373.
- 4- Aaraj Khodaii SJ, Barazandeh F, Adibi H, Sarhan A. Optimization of grinding partially stabilized zirconia (PSZ) for dental Implant application. Modares Mechanical Engineering. 2018;18(7):187-194. [Persian]

در پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان باشد. همچنین پروفیل کانال‌های ایجادشده توسط دو روش نیز در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. ملاحظه می‌شود که پروفیل کانال‌های ایجادشده توسط دو روش مشابه است. از اصلی‌ترین منابع خطا می‌توان به کیفیت سطح ابزار، عدم دقت در کنترل اختلاف پتانسیل، عدم دقت در کنترل غلظت الکترولیت، ناخالصی مواد اولیه الکترولیت، عدم دقت در کنترل سرعت پیش‌روی و سرعت دورانی ابزار اشاره نمود.



(الف)



(ب)

**شکل ۱۱** مقایسه پروفیل سطح کانال ایجادشده با لیتوگرافی با ماشین‌کاری تخلیه الکتروشیمیایی در بهترین حالت: (الف) لیتوگرافی، (ب) ماشین‌کاری تخلیه الکتروشیمیایی بهینه

## نتیجه‌گیری

تأثیر پارامترهای فرآیند فرزکاری و تخلیه الکتروشیمیایی از جمله تأثیر غلظت الکترولیت، سرعت دورانی و پیش‌روی و اختلاف پتانسیل اعمالی بر کیفیت سطح، زبری سطح و دقت ابعادی بررسی شد. نتایج به‌دست‌آمده را می‌توان به‌صورت زیر جمع‌بندی نمود:

۱- روش ماشین‌کاری تخلیه الکتروشیمیایی قادر است کانال‌هایی ایجاد کند که زبری سطح کانال ایجادشده با کانال ایجادشده توسط لیتوگرافی کمتر از ۱۲٪ اختلاف دارد. لذا با توجه به سایر مزایای روش ماشین‌کاری تخلیه الکتروشیمیایی نظیر زمان و هزینه تولید بسیار کمتر و امکان دستیابی به عمق میکروکانال بالا می‌توان نتیجه گرفت که روش ماشین‌کاری تخلیه الکتروشیمیایی می‌تواند جایگزین بسیار مناسبی برای ایجاد الگو در پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان باشد.

- Micromechanics and Microengineering. 2008;18(6):065006.
- 21- Wuthrich R, Fascio V, Viquerat D, Langen H. In situ measurement and micromachining of glass. Proceedings of 1999 International Symposium on Micromechatronics and Human Science, 23-26 November 1999, Nagoya, Japan. Piscataway: IEEE; 1999.
- 22- Fascio V, Wuthrich R, Viquerat D, Langen H. 3D microstructuring of glass using electrochemical discharge machining (ECDM). Proceedings of 1999 International Symposium on Micromechatronics and Human Science. 23-26 November 1999, Nagoya, Japan. Piscataway: IEEE; 1999.
- 23- Zheng ZP, Cheng WH, Huang FY, Yan BH. 3D microstructuring of Pyrex glass using the electrochemical discharge machining process. Journal of Micromechanics and Microengineering. 2007;17(5):960-966.
- 24- Abou Ziki JD, Didar TF, Wuthrich R. Micro-texturing channel surfaces on glass with spark assisted chemical engraving. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2012;57:66-72.
- 25- Wuthrich 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):828-835.
- 26- Mallick B, Hameed AS, Sarkar BR, Doloi B, Bhattacharyya B. Experimental investigation for improvement of micro-machining performances of  $\mu$ -ECDM process. Materials Today: Proceedings. 2020;27:620-626.
- 27- Mehrabi F, Farahnakian M, Elhami S, Razfar MR. Application of electrolyte injection to the electro-chemical discharge machining (ECDM) on the optical glass. Journal of Materials Processing Technology. 2018;255:665-672.
- 28- Sabahi N, Razfar MR. Investigating the effect of mixed alkaline electrolyte (NaOH+KOH) on the improvement of machining efficiency in 2D electrochemical discharge machining (ECDM). The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018;95:643-657.
- 29- Arab J, Kannoia HK, Dixit P. Effect of tool electrode roughness on the geometric characteristics of through-holes formed by ECDM. Precision Engineering. 2019;60:437-447.
- 30- Chak SK, Rao PV. The drilling of  $Al_2O_3$  using a pulsed DC supply with a rotary abrasive electrode by the electrochemical discharge process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2008;39:633-641.
- 31- Aaraj Khodaii SJ, Rahimi A. Optimization of surface roughness in stereolithography. Modares Mechanical Engineering. 2015;15(1):245-256. [Persian]
- 32- Whitehouse DJ. Handbook of surface and nanometrology. Boca Raton: CRC Press; 2010.
- 33- Wuthrich R, Abou Ziki JD. Micromachining using electrochemical discharge phenomenon. Norwich: William Andrew; 2009.
- 34- Didar T, Dolatabadi A, Wuthrich R. Characterization and modeling of 2D-glass micro-machining by spark-assisted chemical engraving (SACE) with constant velocity. Journal of Micromechanics and Microengineering. 2008;18(6):065016.
- 35- Hajian M, Razfar MR, Movahed S, Hemasian Etefagh A. Experimental and numerical investigations of machining depth for glass material in electrochemical discharge milling. Precision Engineering. 2018;51:521-528.
- 5- Khodaii J, Barazandeh F, Rezaei SM, Adibi H, Sarhan AAD. Surface integrity and flexural strength improvement in grinding partially stabilized zirconia. Journal of Central South University. 2019;26:3261-3278.
- 6- Ferguson GS, Chaudhury MK, Biebuyck HA, Whitesides GM. Monolayers on disordered substrates: Self-assembly of alkyltrichlorosilanes on surface-modified polyethylene and poly (dimethylsiloxane). Macromolecules. 1993;26(22):5870-5875.
- 7- Faivre M, Gelszinnis R, Degouttes J, Terrier N, Riviere C, Ferrigno R, et al. Magnetophoretic manipulation in microsystem using carbonyl iron-polydimethylsiloxane microstructures. Biomicrofluidics. 2014;8(5):054103.
- 8- Abidin U, Yunas J, Majlis BY. Fabrication and testing of polydimethylsiloxane (PDMS) microchannel for lab-on-chip (LOC) magnetically-labelled biological cells separation. Jurnal Teknologi. 2016;78(8-4):73-80.
- 9- Gang MG, Chae KW, Kim WB, Jung YH, Jun MBG, Min BK. Wettability modification of cyclic olefin copolymer surface and microchannel using micromilling process. Journal of Manufacturing Processes. 2019;37:168-176.
- 10- Rogers JA, Nuzzo RG. Recent progress in soft lithography. Materials Today. 2005;8(2):50-56.
- 11- Zhang Z, Zhou R, Brames D, Wang C. A low-cost fabrication system for manufacturing soft-lithography microfluidic master molds. Micro and Nanosystems. 2015;7(1):4-12.
- 12- Kam DH, Kim J, Mazumder J. Near-IR nanosecond laser direct writing of multi-depth microchannel branching networks on silicon. Journal of Manufacturing Processes. 2018;35:99-106.
- 13- Kandlikar S, Garimella S, Li D, Colin S, King MR. Heat transfer and fluid flow in minichannels and microchannels. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2013.
- 14- Shabgard MR, Rostami Heshmatabad R. Experimental investigation of the electrolyte type effect on the specifications of electrochemical machining (ECM) of the 304 stainless steel. Modares Mechanical Engineering. 2016;16(3):43-54. [Persian]
- 15- Jabbaripour B, Motallebpouralishahi M. Experimental investigation of metal removal efficiency and machined surface texture in EDM of titanium aluminide compound. Modares Mechanical Engineering. 2018;17(12):47-55. [Persian]
- 16- Hajian M, Hemasian Etefagh A, Razfar MR, Jahangirzadeh S. Experimental investigation of continuous voltage and pulsed voltage into electrochemical discharge machining. Modares Mechanical Engineering. 2016;15(13):393-396. [Persian]
- 17- Mohammadi P, Razfar MR, Hajian M, Sabahi N. A study on the effect of tool travel speed and tool rotational speed on the surface quality and depth of micro-channels in electrochemical discharge machining. Modares Mechanical Engineering. 2016;15(13):406-409. [Persian]
- 18- Elhami S, Razfar MR. Numerical and experimental study of discharge mechanism in the electrochemical discharge machining process. Journal of Manufacturing Processes. 2020;50:192-203.
- 19- Zheng ZP, Su HC, Huang FY, Hwa YB. The tool geometrical shape and pulse-off time of pulse voltage effects in a Pyrex glass electrochemical discharge microdrilling process. Journal of Micromechanics and Microengineering. 2007;17(2):265-272.
- 20- Furutani K, Maeda H. Machining a glass rod with a lathe-type electro-chemical discharge machine. Journal of