



## Application of Acidic Electrolyte to the Micro Electro Chemical Discharge Machining

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Torabi Konjin A.H.<sup>1</sup> MSc,  
Elhami Joshaghan S.<sup>1</sup> PhD,  
Razfar M.\*<sup>1</sup> PhD

#### How to cite this article

Torabi Konjin A.H, Elhami Joshaghan S, Razfar M. Application of Acidic Electrolyte to the Micro Electro Chemical Discharge Machining. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(1):251-258.

### ABSTRACT

Glass as a non-conductive material has special properties such as transparency, chemical resistance, and hardness. Traditional machining methods have noticeable limitations in their capability for shaping the glass parts. Electrochemical discharge machining (ECDM), as an advanced machining method, gives a chance to implement special processes on the glass. There are many effective parameters in the ECDM process and each of them has its special effect, but the influence of electrolyte type has been rarely evaluated in the literature. In this research, the effects of two types of NaOH and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> electrolytes on the glass have been studied. Electrolyte temperature, as another effective parameter on the chemical reactions, is also considered in these experiments. Surface quality, machining depth and overcut are considered as the machining outputs. The experimental results obtained in this research indicated that the application of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> acidic electrolyte after machining in NaOH electrolyte rather than machining solely in NaOH electrolyte has a significant effect on the walls of the holes. It is also observed that with a higher electrolyte temperature, the walls of the holes become smoother. It is also shown that, by applying two steps implementation of drilling and application of acidic electrolyte (NaOH/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), holes have a lower overcut, and the machining depth is improved up to 20.5% in the hydrodynamic regime.

**Keywords** Acidic Electrolyte; Drilling Depth; Electrochemical Discharge

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

#### \*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran  
Phone: -  
Fax: -  
razfar.aut.ac.ir

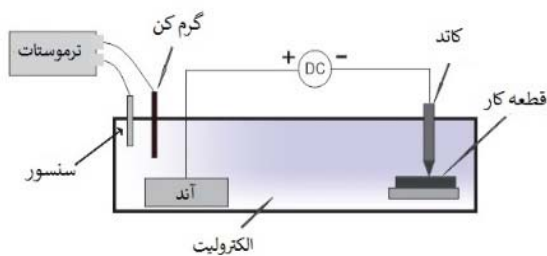
#### Article History

Received: October 1, 2018  
Accepted: May 7, 2019  
ePublished: January 01, 2020

### CITATION LINKS

[1] Experimental investigations on the electrical and 2D-machining characteristics of an electrochemical discharge machining (ECDM) process [2] Electrochemical discharge machining micro-hole in stainless steel with tool electrode high-speed rotating [3] Wire electrochemical discharge machining of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle reinforced aluminum alloy 6061 [4] Drilling of difficult-to-cut steel by electrochemical discharge machining [5] Effect of ultrasonic vibration on the single discharge of electrochemical discharge machining [6] Improving the machining efficiency in electrochemical discharge machining (ECDM) microhole drilling by offset pulse voltage [7] Effect of electrolytes on quality characteristics of glass during ECDM [8] Tool wear and tool thermal expansion during micro-machining by spark assisted chemical engraving [9] Experimental study of the tool wear during the electrochemical discharge machining [10] Conductivity ordering guide [11] Enhancement of electrochemical discharge machining accuracy and surface integrity using side-insulated tool electrode with diamond coating [12] A pressurized feeding approach for effective control on working gap in ECDM of borosilicate glass [13] Study of the current signal and material removal during ultrasonic-assisted electrochemical discharge machining [14] Chemistry of glasses

هیدروژن در اطراف ابزار (کاتد) و حباب‌های اکسیژن در اطراف  
الکتروُد جانبی (آند) تشکیل می‌شوند[5].



شکل ۱) نمای شماتیک سلول الکتروشیمیایی

زمانی که ولتاژ اعمالی به مقداری فراتر از مقدار ولتاژ بحرانی می‌رسد، سرعت تولید حباب‌های هیدروژن افزایش یافته و با هم ادغام شده و باعث تشکیل غشای گاز می‌شوند. این غشای گاز ابزار را از الکتروُد جدا می‌سازد[6]. نتیجه این وقایع در این فرآیند، وقوع تخلیه الکتریکی در نزدیک قطعه کار و سوراخکاری به کمک ذوب حرارتی و حکاکی شیمیایی است.

نرخ باربرداری و دقت هندسی سوراخ ایجادشده در ماشینکاری به کمک تخلیه الکتروشیمیایی، متأثر از الکتروُد بوده و از این بابت، با انتخاب مناسب الکتروُد در این فرآیند، به دلیل وابسته بودن تشکیل حباب و غشای گاز در هنگام الکتروُد به الکتروُد و وقوع حکاکی شیمیایی درون الکتروُد، کارایی این فرآیند افزایش پیدا می‌کند[7].

در مقالات منتشرشده در سال‌های اخیر، الکتروُد مورد استفاده با خاصیت جابجایی یون بالا، الکتروُد های سدیم هیدروکسید (NaOH) و KOH بوده است. این خاصیت جابجایی یون بالا، باعث می‌شود تا نرخ باربرداری نیز افزایش یابد. الکتروُد KOH در مقایسه با الکتروُد NaOH نیز جرقه‌هایی با شدت قوی‌تری تولید کرده و به دنبال آن، ترک‌های میکرونی بیشتری در منطقه سوراخکاری نیز مشاهده می‌شود[8]. کم بودن میزان سایش ابزار در ولتاژهای پایین در الکتروُد NaOH، رسانایی الکتریکی بالا و همچنین رسیدن به نرخ‌های باربرداری بالا نسب به الکتروُد های همچون  $\text{NaNO}_3$  از دلایل دیگر انتخاب الکتروُد های مورد استفاده در این مقاله نیز است[9, 10].

در میان تحقیقات صورت گرفته برای بهبود کیفیت ماشینکاری، محققین برای جلوگیری از اثر مخرب جرقه الکتریکی بر لبه دیواره سوراخ، ابزار را عایق کرده و سوراخ‌هایی نزدیک به قطر ابزار و سلامت سطحی مناسب‌تری به دست آورده‌اند[11]. همچنین در مطالعه آنها تأثیر غلظت الکتروُد نیز، مشاهده شده است که با افزایش غلظت الکتروُد، میزان اضافه‌برش و فشار اعمالی نیز افزایش داشته و پروفیل با صافی بهتری حاصل شده است[12].

## استفاده از الکتروُد اسیدی در فرآیند میکروماشین‌کاری تخلیه الکتروشیمیایی

امیرحسین ترابی کنجین MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

صادق الهامی جوشقان PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

محمد رضا رازفر\* PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

### چکیده

شیشه به عنوان یک ماده غیررسانا دارای خواص قابل توجه همچون شفافیت، مقاومت شیمیایی و سختی است. شیوه‌های سنتی در ماشین‌کاری در شکل‌دهی قطعات شیشه‌ای دارای محدودیت‌هایی هستند. روش ماشین‌کاری به کمک تخلیه الکتروشیمیایی (ECDM)، به عنوان یک روش پیشرفته ماشین‌کاری، امکان اجرای فرآیندهای ویژه‌ای را روی شیشه می‌دهد. پارامترهای متعددی در این فرآیند وجود دارد که هرکدام تأثیر بسزای خود را دارد ولی در این بین تأثیر نوع الکتروُد استفاده شده به ندرت در مقالات مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله تأثیر الکتروُد های NaOH و  $\text{H}_2\text{SO}_4$  روی شیشه مورد مطالعه قرار گرفته است. دمای الکتروُد به عنوان یکی دیگر از پارامترهای موثر در این فرآیند نیز در آزمایشات انجام شده بررسی شده است. کیفیت سطح، عمق ماشین‌کاری و اضافه برش نیز خروجی ماشین‌کاری در این روش در نظر گرفته شده است. نتایج به دست آمده از آزمایشات حاکی از آن است که استفاده از الکتروُد اسیدی  $\text{H}_2\text{SO}_4$  بعد از ماشین‌کاری در الکتروُد NaOH نسبت به ماشین‌کاری صرفاً در الکتروُد NaOH تأثیر بسزایی روی دیواره‌های سوراخ‌ها دارند. همچنین سوراخ‌های ماشین‌کاری شده در دماهای بالاتری از الکتروُد زبری کمتری دارند. در این مقاله نیز نشان داده شده است که با دو مرحله‌ای کردن فرآیند سوراخکاری و استفاده از الکتروُد اسیدی ( $\text{NaOH}/\text{H}_2\text{SO}_4$ )، مقدار اضافه برش کاهش یافته و عمق ماشین‌کاری نیز تا ۲۰٪ در رژیم هیدرودینامیک بهبود یافته است.

کلیدواژه‌ها: الکتروُد اسیدی، عمق سوراخ‌کاری، تخلیه الکتروشیمیایی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۷/۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۲/۱۷

\*نویسنده مسئول: razfar.aut.ac.ir

### ۱- مقدمه

در میان روش‌های هیبریدی، ماشینکاری به کمک تخلیه الکتروشیمیایی در سوراخکاری مواد سخت و ترد همچون سرامیک‌ها و شیشه‌ها کاربرد فراوانی دارد[1]. از این روش، به ترتیب در سوراخکاری فولادهای زنگ‌زن و آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱ استفاده شده است[2, 3]. در این روش، بر اثر تحلیل الکتروشیمیایی و خوردگی ایجادشده توسط تخلیه الکتریکی، جدایش مواد رخ می‌دهد[4]. فرآیند ماشینکاری به کمک تخلیه الکتروشیمیایی متشکل از دو الکتروُد و یک الکتروُد است. مطابق شکل ۱، دو الکتروُد درون الکتروُد قرار گرفته و هر دو آنها به منبع تغذیه متصل می‌شوند. با اعمال ولتاژ الکتریکی، پدیده الکتروُدیز رخ داده و حباب‌های

جدول ۱، نشان داده شده است که شیشه‌هایی که دارای ترکیبات  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  و  $\text{CaSiO}_3$  هستند به دلیل آنکه یون‌های قلیایی در مکان‌های هیدراته شده جذب می‌شوند به  $\text{H}^+$  در مقادیر pH کمتر از ۴ حساسیت بیشتری نشان می‌دهند [14].

جدول ۱) تبادلیون در شبکه شیشه

$\text{Na}_2\text{SiO}_3 + 2\text{H}^+ \leftrightarrow \text{H}_2\text{SiO}_3 + 2\text{Na}^+$	واکنش شیمیایی
$\log a_{\text{Na}^+} = 13.72 - 2\text{pH}$	معادلات حاکم
$K = \frac{(a_{\text{H}_2\text{SiO}_3}) \cdot (a_{\text{Na}^+})^2}{(a_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}) \cdot (a_{\text{H}^+})^2}$	(۶)
$\Delta G^\circ = -288.880 \frac{\text{cal}}{\text{mol}}$	ثوابت
$\log k = 21.44$	
$a_{\text{H}_2\text{SiO}_3} = 10^{-6}$	
$\text{CaSiO}_3 + 2\text{H}^+ \leftrightarrow \text{H}_2\text{SiO}_3 + \text{Ca}^{2+}$	واکنش شیمیایی
$K = \frac{(a_{\text{H}_2\text{SiO}_3}) \cdot (a_{\text{Ca}^{2+}})}{(a_{\text{CaSiO}_3}) \cdot (a_{\text{H}^+})^2}$	معادلات حاکم
$\log a_{\text{Ca}^{2+}} = 18.3 - 2\text{pH}$	(۷)
$\Delta G^\circ = -16780 \frac{\text{cal}}{\text{mol}}$	ثوابت
$\log k = 12.30$	
$a_{\text{H}_2\text{SiO}_3} = 10^{-6}$	

طبق نتایج حاصل در آزمایش تجربی [13]، باربرداری به کمک جرقه الکتریکی به دلیل عدم جابجایی و چرخش مناسب الکترولیت و تشکیل غشای گاز در رژیم هیدرودینامیک باربرداری به‌میزانی کم اتفاق می‌افتد.

در مقاله پیش رو، نشان داده خواهد شد که میزان باربرداری از شیشه، زمانی که الکترولیت انتخابی در سوراخکاری دومرحله‌ای  $\text{H}_2\text{SO}_4$  باشد، به دلیل خاصیت خوردگی بالای این الکترولیت، بیشتر خواهد بود. اما میزان باربرداری در الکترولیت  $\text{NaOH}$  در شرایط سوراخکاری یک‌مرحله‌ای مقدار کمتری دارد.

طبق رابطه آرنیوس، می‌توان ثابت معادله  $K$  را به‌صورت زیر تعریف کرد:

$$K = Ae^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (۸)$$

ثابت واکنش، طبق رابطه  $\lambda$  به دمای مطلق  $T$  (درجه کلوین)، انرژی اکتیواسیون  $E_a$  و ثابت جهانی گاز  $R$  بستگی دارد. با افزایش دما افزایش ثابت واکنش را مطابق رابطه  $\lambda$  شاهد هستیم. همچنین سرعت استخراج یون‌ها  $Q$  نیز به‌صورت لگاریتمی، به‌عنوان تابعی از ثابت واکنش  $K$  به‌صورت زیر تعریف می‌شود [14]:

$$Q = tK^a \quad (۹)$$

در رابطه بالا نیز،  $t$  زمان واکنش و  $a$  نیز ثابت درنظر گرفته می‌شود.

#### ۴-۱- تأثیر پایداری ترمودینامیکی بر واکنش‌های شیمیایی

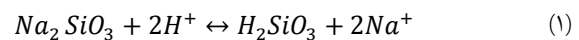
در جدول ۲، گرمای تشکیل استاندارد (آنتالپی) برای گونه‌های موجود در روابط ۶ و ۷ نمایش داده شده است. بر این اساس، مشاهده می‌شود با افزایش دمای الکترولیت، پایداری شیمیایی معادلات ۶ و ۷ نیز افزایش پیدا می‌کند. با استفاده از داده‌های موجود در جدول ۳، به ازای مقادیر استاندارد، آنتالپی واکنش ( $\Delta H$ ) محاسبه شده است. به دلیل اهمیت بالای سرعت استخراج یون‌های قلیایی بر نرخ باربرداری، مقادیر آنتالپی واکنش نیز محاسبه و در جدول ۲ ارائه شده است. برای واکنش‌های اشاره شده در جدول ۱ مشاهده می‌شود،

مقایسه عمق سوراخ، کیفیت سطح و میزان اضافه‌برش در سوراخکاری تک‌مرحله‌ای ( $\text{NaOH}$ ) با سوراخکاری دومرحله‌ای ( $\text{NaOH} \setminus \text{H}_2\text{SO}_4$ ) از مهم‌ترین اهداف تحقیق پیش رو است. در سوراخکاری دومرحله‌ای، تأثیر الکترولیت اسیدی  $\text{H}_2\text{SO}_4$  بر پارامترهای ذکرشده مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

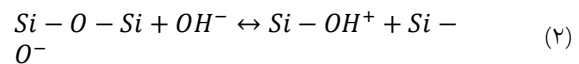
#### ۱-۱- مکانیسم حکاکی شیمیایی در شیشه

مراحل حکاکی شیمیایی در فرآیند تخلیه الکتروشیمیایی به شرح زیر است [13, 14]:

۱- در مرحله نخست، یون‌های مثبت هیدروژن درون الکترولیت به شبکه شیشه نفوذ کرده و حکاکی شیمیایی شیشه سودالایم طبق واکنش شیمیایی زیر صورت می‌گیرد:



۲- در مرحله بعدی نیز، با استخراج یون‌های آلکالین مثل  $\text{Na}^+$  هیدرولیز رخ داده و یون‌های  $\text{OH}^-$  نیز با شکستن پیوند  $\text{Si-O-Si}$  در شبکه شیشه، مکانیسم حکاکی شیمیایی شیشه را مطابق با رابطه زیر تکمیل می‌کنند.



شکستن پیوندهای  $\text{Si-O}$  در شبکه شیشه عمدتاً متأثر از واکنش ۱ است. با استخراج یون‌های آلکالین با استفاده از یون‌های مثبت هیدروژن، شبکه شیشه تضعیف شده و به‌دنبال آن، باربرداری به کمک حکاکی شیمیایی رخ می‌دهد. بنابراین انتظار می‌رود که در الکترولیتی که میزان تولید یون‌های هیدروژن بیشتر باشد، نرخ باربرداری نیز افزایش پیدا کند.

#### ۲-۱- واکنش‌های شیمیایی در محلول‌های آبی

پایداری شیمیایی شیشه تابعی از پایداری کینتکی و ترمودینامیکی است و مولفه‌های آن طبق رابطه ۳ تعریف می‌شود:

$$\text{Durability} = F_{\text{kinetic}} + F_{\text{Thermodynamic}} \quad (۳)$$

تأثیر پارامترهای  $F_{\text{kinetic}}$  و  $F_{\text{Thermodynamic}}$  عمدتاً وابسته به ماهیت فرآیند ماشینکاری به کمک تخلیه الکتروشیمیایی است. در حقیقت در دماهای پایین، نقش انرژی حرارتی به اندازه‌ای نیست که بر انرژی اکتیواسیون غلبه کند. به همین دلیل در دمای بالا پایداری شیشه متأثر از پارامتر  $F_{\text{Thermodynamic}}$  است [14].

واکنش زیر را درنظر بگیرید:



در واکنش ۴، اندیس‌های کوچک نشان‌دهنده مقدار مول عنصر شرکت‌کننده در واکنش بوده و ثابت واکنش  $k$  نیز مطابق رابطه ۵ تعریف می‌شود:

$$\log k_{10} = \frac{-\Delta G^\circ}{1364} \quad (۵)$$

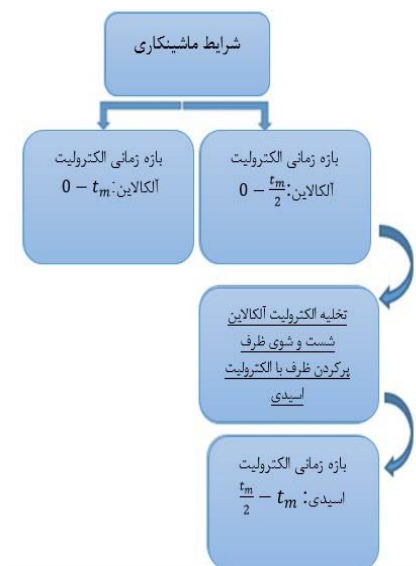
مقادیر کمی  $\log k_{10}$  در بخش بعدی و در جدول ۱ نیز ارائه می‌شود.

#### ۳-۱- تأثیر pH بر تبادلیون بین شیشه و الکترولیت

تبادل یون بین شیشه و الکترولیت طبق روابط ۶ و ۷ صورت می‌گیرد (جدول ۱). تبادل یون‌های  $\text{Na}^+$  و  $\text{Ca}^{2+}$  از pH الکترولیت نیز تأثیر می‌پذیرند و تأثیر سیلیسیک اسید نیز چشمگیر نیست. مطابق

قرار گرفته‌اند. بعد از آماده‌سازی ظرف الکترولیت، ابزار فولاد تندبر به‌صورت مماس با نمونه کار تنظیم می‌شود. نمونه کار نیز به اندازه ۱/۵ میلی‌متر توسط ورنیه دستگاه در الکترولیت غوطه‌ور شده و سپس با استفاده از نیروی ثقیلی و برخورد نمونه با ابزار عملیات سوراخکاری آغاز می‌شود. مرحله نخست از آزمایش، درون الکترولیت NaOH با بازه‌های زمانی مشخصی صورت می‌گیرد. برای مقایسه تأثیر الکترولیت اسیدی H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> با NaOH، حالت دوم سوراخکاری در دو مرحله نیز اجرا می‌شود. در مرحله اول، سوراخکاری در الکترولیت NaOH در بازه زمانی مشخص انجام شده و بعد از آن با تعویض این الکترولیت با الکترولیت H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>، فرآیند سوراخکاری ادامه پیدا می‌کند. در شکل ۲ نیز به‌صورت شماتیک، مراحل سوراخکاری نمایش داده شده است.

آزمایشات بالا، در زمان‌های متفاوت نیز انجام شده است. برای مطالعه تأثیر دما، دو دمای ۲۵ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد انتخاب شده است. در دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد، سنسور و گرمکن دمای الکترولیت را در طول آزمایش ثابت نگه می‌دارند. شکل ۳ نمای واقعی از تجهیزات آزمایشگاهی است.



شکل ۲ خلاصه‌ای از روند آزمایش



شکل ۳ تجهیزات آزمایشگاهی (الف)، تخلیه الکتریکی روی نوک ابزار (ب)

مقدار آنتالپی برای معادلات ۶ و ۷ نیز مثبت بوده و مقدار انرژی آزاد گیبس آن‌ها مقدار منفی دارد. از این رو، مطابق آنچه که در جدول ۱ نشان داده شد، مقدار منفی نیز یک عامل مثبت در انجام پذیر بودن واکنش‌های محسوب می‌شود [14].

جدول ۲) آنتالپی استاندارد تشکیل گونه‌های شیمیایی استفاده‌شده در جدول ۱ در دمای ۲۵°C

گونه‌ها	$\Delta H_{KCal}^\circ$	$\Delta H = \Delta H_f - \Delta H_i$
Na <sup>+</sup>	-۵۷/۲۷۹	۳۳۵/۸۹۱
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	-۳۶۰/۴	
H <sup>+</sup>	۰	
H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	+۳۳/۷۷	
Ca <sup>2+</sup>	-۱۲۹/۷۷	۲۸۱/۶
CaSiO <sub>3</sub>	-۳۷۸/۶	
H <sup>+</sup>	۰	
H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	+۳۲/۷۷	

جدول ۳) مشخصات تجهیزات مورد استفاده در آزمایش

تجهیزات	جزئیات فنی
آند	جنس: فولاد زنگ‌نزن؛ ابعاد: ۰×۰×۰ میلی‌متر
کاتد	جنس: فولاد تندبر؛ قطر: ۰/۳ میلی‌متر
الکترولیت	غلظت NaOH: ۳۰٪؛ غلظت H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> : 1 Mol/litr
منبع تغذیه	حداکثر ولتاژ: ۶۰ ولت؛ حداکثر جریان: ۳ آمپر
گرمکن	ST316؛ حداکثر توان: ۳۰۰ وات
سنسور دما	PT100؛ محدوده دمایی: ۰-۱۰۰ درجه سانتی‌گراد

## ۲- روش‌ها

### ۲-۱- آزمایش‌های تجربی

تمام آزمایشات روی ۶۰ نمونه از شیشه سودالایم انجام شده است. در این آزمایش یک بلوک فولاد زنگ‌نزن مستطیل‌شکل به‌عنوان آند نیز استفاده شده است. جزئیات ترکیب شیمیایی قطعه کار نیز در جدول ۴، ارائه شده است.

جنس ابزار مورد استفاده در طول آزمایش، فولاد تندبر به قطر ۳۰۰ میکرومتر است. همچنین برای اندازه‌گیری دقیق و نگاهداری دمای الکترولیت از سنسور و گرمکن با محدوده کاری دمای ۰-۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و دقت ۰/۱ استفاده شده است. جزئیات کامل از تجهیزات مورد استفاده در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۴) ترکیب شیمیایی شیشه سودالایم

Composition	Wt%
SiO <sub>2</sub>	۷۳
Na <sub>2</sub> O	۱۴
CaO	۹
MgO	۴
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۱۵
K <sub>2</sub> O	۰/۰۳

### ۲-۲- طراحی آزمایش

کیفیت سطح و عمق سوراخ، در زمان‌های ماشینکاری متفاوت در دو سطح از الکترولیت با تغییر دما نیز در ولتاژ ۳۵ ولت مورد بررسی

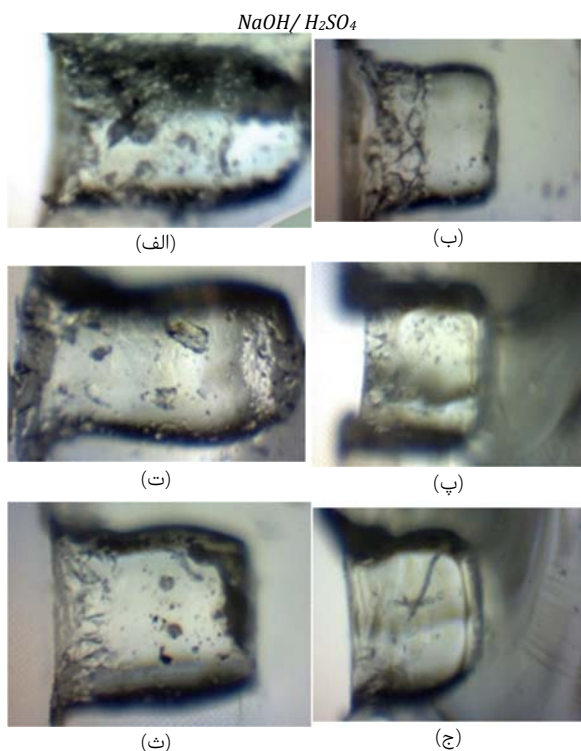
۲-۳- نتایج مربوط به عمق و کیفیت سطح

برای مشاهده تأثیر نوع الکترولیت، دو الکترولیت اسیدی و قلیایی نیز مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین این دو الکترولیت در دمای ۲۵ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد بررسی شده‌اند. افزایش دما از ۲۵ به ۴۵ درجه سانتی‌گراد تأثیر چشمگیری بر خواص الکترولیت در طول آزمایشات نداشته است. از این رو، خواص الکترولیت در هنگام مطالعه تأثیر آن تقریباً ثابت فرض می‌شود. ولتاژ منبع تغذیه مقدار ثابت ۳۵ ولت انتخاب شده است. عمق سوراخ‌های ماشینکاری شده در آزمایشات با استفاده از میکروسکوپ نوری اندازه‌گیری شده و نتایج آن در شکل ۵ در بازه‌های زمانی متفاوت با دو دمای ۲۵ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد ارائه شده است. همچنین، نتایج اشاره شده در نمودار ۱ نیز ترسیم شده‌اند. برای اندازه‌گیری عمق سوراخ به‌عنوان اولین مرحله، خطی مستقیم موازی سطح مرجع از نمونه کار کشیده شده است. سپس، خطی عمود از پایین‌ترین نقطه از تقاطع پروفیل سوراخ رسم می‌شود. با استفاده از فاصله بین تقاطع دو خط کشیده شده و پایین‌ترین نقطه، عمق سوراخ نیز محاسبه می‌شود. همچنین، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در شکل ۶ آورده شده است. در رژیم هیدرودینامیک، تخلیه الکتریکی تأثیر کمتری نسبت به حکاکی شیمیایی در باربرداری از خود نشان می‌دهد. بنابراین، شبکه شیشه در الکترولیت با pH کمتر، مطابق جدول ۱ از خود مقاومت کمتری به باربرداری نشان می‌دهد. به‌طور مشابه، در الکترولیت  $H_2SO_4$  (که دارای pH پایین‌تری است)، به‌دلیل افزایش نرخ استخراج یون‌های قلیایی از شبکه شیشه به نسبت  $NaOH$ ، باربرداری بیشتری را شاهد هستیم.

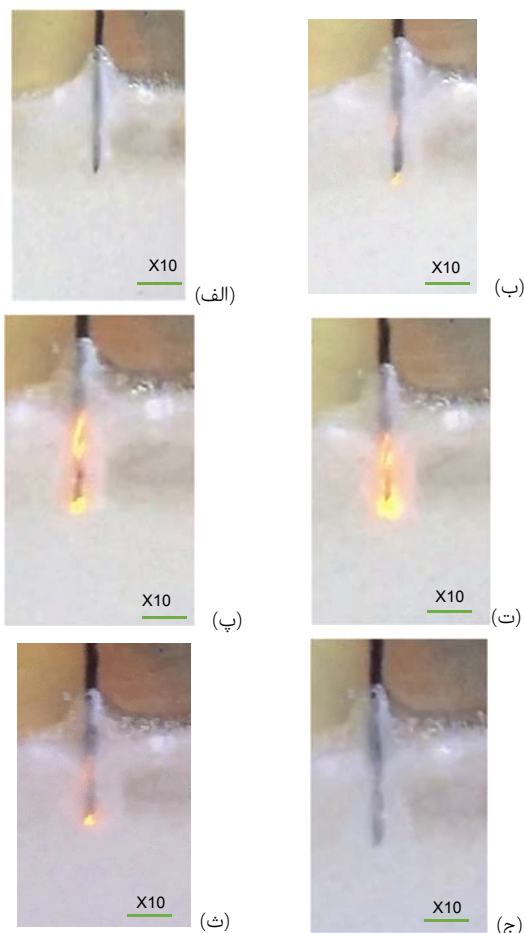
در بخش پیش رو، به ارائه نتایج به‌دست‌آمده و بحث تکمیلی درباره آن‌ها پرداخته می‌شود.

۱-۳- انتشار تخلیه الکتریکی در اطراف ابزار مته

زمانی که غشای گاز به‌طور کامل اطراف ابزار را احاطه می‌کند، پدیده تخلیه الکتریکی شروع می‌شود. در ولتاژهای پایین‌تر از مقدار ولتاژ بحرانی، با وقوع پدیده الکترولیز، حباب‌های هیدروژن روی الکتروود جانبی (آند) تشکیل گشته و با عبور ولتاژ اعمالی از ولتاژ بحرانی، چگالی جریان افزایش می‌یابد و حباب‌های بیشتری در اطراف ابزار تشکیل می‌شود. در نهایت شاهد تکمیل غشای گاز هستیم. با اعمال ولتاژ الکتریکی در این زمان، غشای گاز ابزار را از الکترولیت جدا کرده و آن را عایق می‌کند. نتیجه این وقایع، تخلیه الکتریکی از نقطه‌ای که پتانسیل الکتریکی بیشترین مقدار خود را دارد در غشای گاز است. در شکل ۴، به‌ترتیب تصاویر تولید و انتشار تخلیه الکتریکی مشاهده می‌شود. مطابق شکل ۴- الف تا ۴- ت، زمانی که ولتاژی بالاتر از مقدار بحرانی اعمال می‌شود، نور روشنی در نوک ابزار ایجاد شده و تخلیه الکتریکی اتفاق می‌افتد. همچنین، لبه حداقلی برش مته مکان مستعد دیگر برای تولید جرقه الکتریکی محسوب می‌شود. طبق شکل ۴- ت، تخلیه الکتریکی به بیشترین مقدار خود رسیده و بعد از آن از شدت آن کاهش یافته تا ناپدید شود.

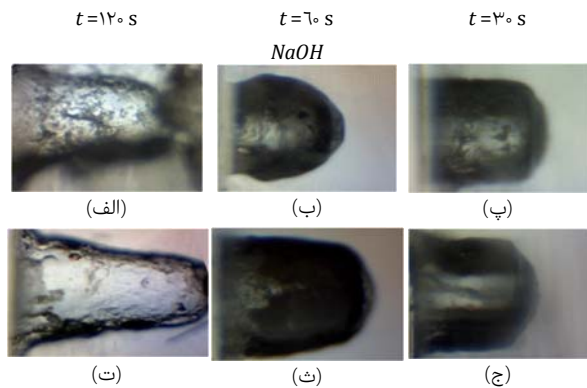


شکل ۵) نتایج مربوط به عمق و کیفیت سطح سوراخ‌ها در دمای ۴۵°C



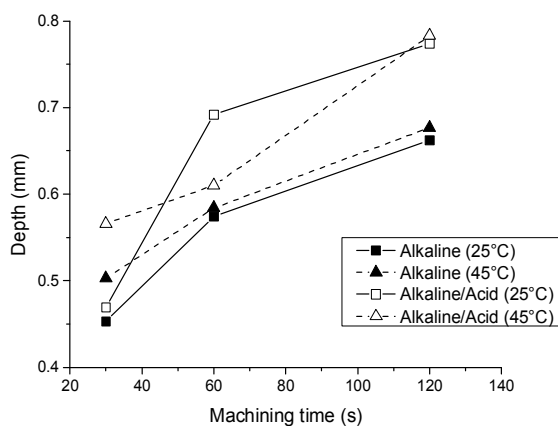
شکل ۴) انتشار تخلیه الکتریکی با استفاده از ابزار مته دولبه به‌عنوان کات

۵۶٪ و ۷/۸۸۸mm در (NaOH \ H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) به ترتیب، افزایش داشته است. بنابراین، می توان مشاهده کرد که با افزایش دما، عمق های بیشتری حاصل می شود. با این حال توجه چینی نتیجه ای، طبق رابطه ۸ نیز امکان پذیر است.



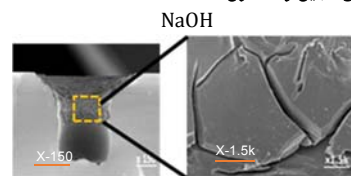
شکل ۷ نتایج مربوط به عمق و کیفیت سطح سوراخ ها در دمای ۲۵°C

با توجه به نمودار ۱، مشاهده می شود که افزایش زمان سوراخکاری، همان طور که انتظار می رفت افزایش عمق سوراخ را به دنبال دارد. همچنین با افزایش دما الکترولیت از ۲۵ به ۴۵ درجه سانتی گراد افزایش عمق سوراخ را منجر می شود. اما در زمان های سوراخکاری بالا، با توجه به نمودار، شیب آن کاهش پیدا می کند. از سوی دیگر، استفاده از H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> در دمای ۴۵ درجه سانتی گراد افزایش قسمت هیدرودینامیک را به دنبال دارد که به وضوح تأثیر نوع الکترولیت و دمای الکترولیت را بر مکانیسم شیمیایی در عمق نهایی سوراخ نشان می دهد.

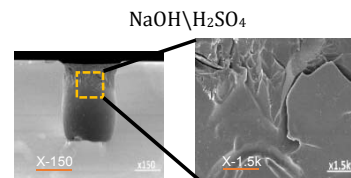


نمودار ۱) عمق سوراخ های ماشینکاری در بازه های زمانی متفاوت

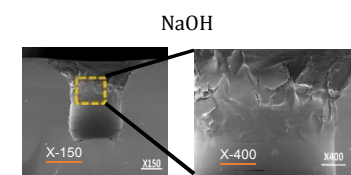
بخش بعدی آزمایشات به بررسی تأثیر الکترولیت بر کیفیت سطح دیواره سوراخ اختصاص پیدا کرده است. با توجه به نتایج به دست آمده در شکل های ۵، ۶ و ۷ در عمق های عمیق، جرقه قوی به دلیل رسانایی الکتریکی بالای NaOH ایجاد ترک در سوراخ را به دنبال دارد. در حالی که در H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> جرقه به صورت متمرکز رخ داده و شدت آن ضعیف تر از NaOH است. بنابراین، زبری دیواره سوراخ



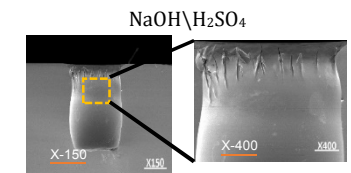
(الف)



(ب)



(پ)

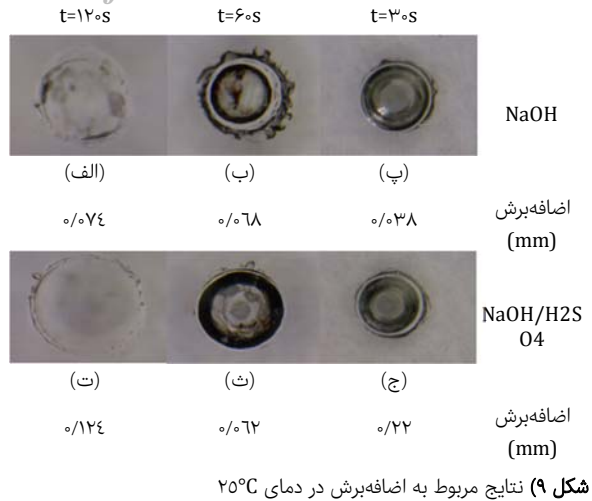


(ت)

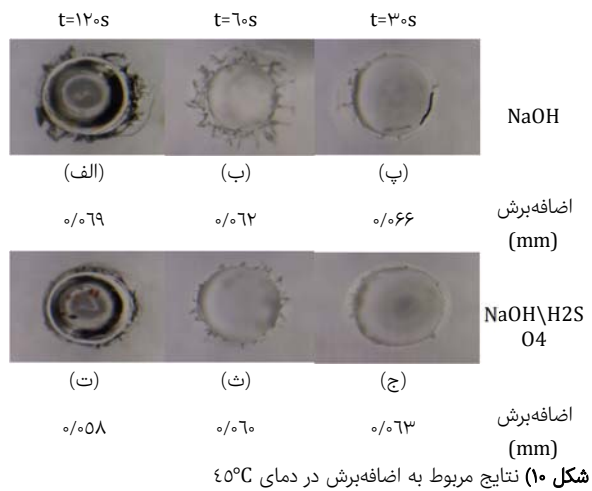
شکل ۶) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطوح سوراخ در دمای ۵۰°C

نتایج عمق سوراخ در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد در شکل ۷ ارائه شده است. در آزمایش دوم ماشینکاری مطابق آنچه در شکل ۲ توضیح داده شد، مرحله نخست، الکترولیت NaOH به کار رفته و در مرحله ثانویه این الکترولیت با الکترولیت H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> جایگزین می شود. جایگزین کردن الکترولیت اسیدی، به ترتیب در زمان ماشینکاری ۶۰ و ۱۲۰ ثانیه (دمای ۲۵ درجه سانتی گراد)، ۲/۵ و ۱۲/۵٪ بهبود در عمق را نسبت به الکترولیت NaOH به همراه داشته است. دلیل بهبود ذکر شده به شرح زیر است.

رسانایی الکتریکی H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> در مقایسه با NaOH کمتر است. رسانایی الکتریکی نیز نقش مثبتی در رژیم تخلیه ایفا می کند. همچنین در رژیم هیدرودینامیک، پایداری شیمیایی شیشه از عمده ترین مسائل در جلوگیری از افزایش عمق سوراخ است. از این رو در pH پایین تر، شیشه پایداری خود را با ازدست دادن یون های کلیدی از دست می دهد. بنابراین، الکترولیت H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> با pH پایین تر، پایداری شیمیایی شیشه را تنزل داده و به دنبال آن عمق بیشتری به نسبت NaOH حاصل می شود. نتایج حاصل در شکل های ۵ و ۷، گواه دلایل ذکر شده هستند. در زمان های ماشینکاری متفاوت، نتایج مشابه ای مطابق شکل ۵ در دمای ۴۵°C نسبت به دمای ۲۵°C مشاهده می شود. به عنوان مثال، عمق سوراخ (شکل ۵-ث) ۶/۲٪ در مقایسه با سوراخ شکل ۵-ب در الکترولیت NaOH افزایش یافته است. همچنین، عمق سوراخ در زمان ۳۰ و ۱۲۰s از مقدار ۵/۰۳ و ۶/۷۷mm (در الکترولیت NaOH) به مقدار



شکل ۹) نتایج مربوط به اضافه‌برش در دمای ۲۵°C



شکل ۱۰) نتایج مربوط به اضافه‌برش در دمای ۴۵°C

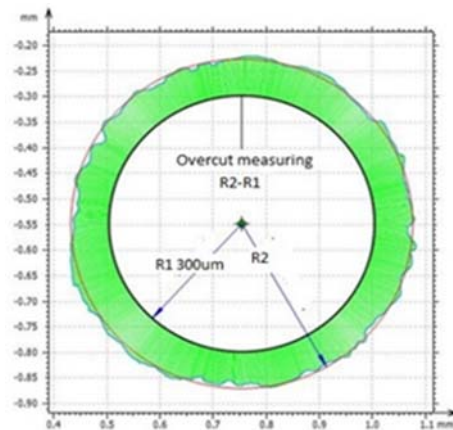
#### ۴- بحث و نتیجه‌گیری

نوع الکترولیت مورد استفاده به‌عنوان محیطی در فرآیند تخلیه الکتروشیمیایی نقش قابل توجهی در دقت هندسی سوراخ‌ها و عمق سوراخکاری دارد؛ بنابراین می‌بایستی به‌درستی انتخاب شوند. در این مقاله، تأثیر الکترولیت  $H_2SO_4$  و  $NaOH$  بر ۶۰ نمونه قطعه شیشه سودالایم مورد ارزیابی قرار گرفته است. طبق نتایج حاصل، عمق سوراخکاری و کیفیت سطح آن‌ها در الکترولیت اسیدی با بهبود همراه بوده است. خلاصه مهم‌ترین نتایج به شرح زیر است: مکانیسم حکاکی شیمیایی قوی در الکترولیت  $H_2SO_4$ ، باعث استخراج بیشتر یون‌های قلیایی از شبکه شیشه می‌شود. عمق سوراخ در سوراخکاری دو مرحله‌ای  $NaOH/H_2SO_4$  در زمان ۳۰s و ۶۰s با دمای ۲۵°C، ۱/۵، ۲۰/۵ و ۱۷/۵٪ نسبت به سوراخکاری تک‌مرحله‌ای  $NaOH$  رشد داشته است. عمق حاصل در دمای ۴۵°C با زمان ۳۰s در سوراخکاری تک‌مرحله‌ای  $NaOH$ ، نسب به دمای ۲۵°C با بهبود ۱۱٪ همراه بوده است. در فرآیند دو مرحله‌ای  $NaOH/H_2SO_4$ ، افزایش دما نتیجه مشابهی داشته و مقدار عمق در زمان ۳۰s در دمای ۲۵°C از ۰/۴۶۰ به ۰/۵۶۶mm در دمای ۴۵°C رسیده است.

در زمان‌های سوراخکاری متفاوت در ماشینکاری حالت دوم مرحله‌ای با استفاده از  $H_2SO_4$  بهبود یافته است. آشکارترین بهبود در کیفیت سطح در دمای ۴۵°C در زمان‌های سوراخکاری ۳۰s و ۶۰s قابل مشاهده است. با بررسی سطح دیواره‌ها وجود ترک نیز مشاهده می‌شود. جرقه‌های پراکنده در  $NaOH$  نسبت به  $H_2SO_4$  منجر به ایجاد جرقه در اطراف بدنه ابزار می‌شود (شکل ۴). درحالی که متمرکز بودن جرقه در  $H_2SO_4$  سطوح با زبری کمتر در مقایسه با  $NaOH$  را تولید می‌کنند.

#### ۳-۳- نتایج مربوط به اضافه‌برش

اضافه‌برش در فرآیند تخلیه الکتروشیمیایی به فاصله بین قطر سوراخ مرجع (۳۰۰ میکرومتر) نسبت به پروفیل قطر سوراخ ورودی می‌گویند. در شکل ۸، نمای شماتیک از اضافه‌برش نمایش داده شده است. برای اندازه‌گیری اضافه‌برش، ابتدا دایره‌ای به اندازه سوراخ مرجع و دایره دیگر که پروفیل سوراخ ورودی را در بر بگیرد کشیده می‌شود. در نهایت تفاوت این دو دایره ( $R_2-R_1$ ) مقدار اضافه‌برش را می‌دهد.



شکل ۸) اضافه‌برش در سوراخ ورودی

بهبود قابل توجه در اضافه‌برش در سوراخکاری دو مرحله‌ای با استفاده از الکترولیت  $H_2SO_4$  مطابق شکل ۹ قابل مشاهده است. در زمان سوراخکاری ۳۰s با دمای ۲۵°C، مقدار اضافه‌برش در سوراخکاری تک‌مرحله‌ای ( $NaOH$ ) ۰/۳۸mm بوده، درحالی که در سوراخکاری دو مرحله‌ای ( $NaOH/H_2SO_4$ ) این میزان به ۰/۲۲mm کاهش پیدا کرده است. نتیجه مشابهی در زمان سوراخکاری ۶۰s نیز به‌دست آمده است. در طول آزمایشات، مشاهده شده است که غشای گاز با ضخامت نازک‌تر در الکترولیت  $H_2SO_4$  بهبود دقت هندسی سوراخ ورودی را به‌دنبال داشته است. افزایش دمای الکترولیت به ۴۵°C مطابق نتایج حاصل در شکل ۹، اضافه‌برش سوراخ (شکل ۹-پ، ۲۵°C) از ۰/۳۸mm به مقدار ۰/۰۶۶mm در سوراخ (پ) در شکل ۱۰ (۴۵°C) افزایش یافته است. در دمای ثابت ۴۵°C، مقدار اضافه‌برش سوراخ (شکل ۱۰-پ) در  $NaOH$ ، ۰/۰۶۶mm است. درحالی که با استفاده از الکترولیت  $H_2SO_4$  این مقدار به ۰/۰۶۳mm کاهش یافته است.

investigations on the electrical and 2D-machining characteristics of an electrochemical discharge machining (ECDM) process. *Microsystem Technologies*. 2017;23(5):1453-1461.

2- Huang SF, Liu Y, Li J, Hu HX, Sun LY. Electrochemical discharge machining micro-hole in stainless steel with tool electrode high-speed rotating. *Materials and Manufacturing Processes*. 2014;29(5):634-637.

3- Liu JW, Yue TM, Guo ZN. Wire electrochemical discharge machining of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle reinforced aluminum alloy 6061. *Materials and Manufacturing Processes*. 2009;24(4):446-453.

4- Coteață M, Schulze HP, Slătineanu L. Drilling of difficult-to-cut steel by electrochemical discharge machining. *Materials and Manufacturing Processes*. 2011;26(12):1466-1472.

5- Elhami S, Razfar MR. Effect of ultrasonic vibration on the single discharge of electrochemical discharge machining. *Materials and Manufacturing Processes*. 2017;33(4):444-451.

6- Zheng ZP, Lin JK, Huang FY, Yan BH. Improving the machining efficiency in electrochemical discharge machining (ECDM) microhole drilling by offset pulse voltage. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2008;18(2):025014.

7- Kumar Gupta P, Dvivedi A, Kumar P. Effect of electrolytes on quality characteristics of glass during ECDM. *Key Engineering Materials*. 2015;658:141-145.

8- Ziki JD, Wüthrich R. Tool wear and tool thermal expansion during micro-machining by spark assisted chemical engraving. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012;61(5-8):481-486.

9- Behroozfar A, Razfar MR. Experimental study of the tool wear during the electrochemical discharge machining. *Materials and Manufacturing Processes*. 2016;31(5):574-580.

10- Foxboro E. Conductivity ordering guide. 3<sup>rd</sup> Volume. Unknown city: Unknown Publisher; 1999.

11- Tang W, Kang X, Zhao W. Enhancement of electrochemical discharge machining accuracy and surface integrity using side-insulated tool electrode with diamond coating. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2017;27(6):065013.

12- Singh T, Dvivedi A. A pressurized feeding approach for effective control on working gap in ECDM of borosilicate glass. *Materials and Manufacturing Processes*. 2017. [In Press]

13- Elhami S, Razfar MR. Study of the current signal and material removal during ultrasonic-assisted electrochemical discharge machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017;92(5-8):1591-1599.

14- Paul A. *Chemistry of glasses*. London: Chapman and Hall; 1982. pp. 109-110.

تأثیر افزایش دما روی نرخ باربرداری در سوراخکاری تکمرحله NaOH حاکی از افزایش ۱۱، ۱/۲ و ۲/۲۶٪، به ترتیب در زمان‌های ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰s است. دلیل اصلی در کاهش این میزان، دسترسی کم الکترولیت در نوک ابزار با افزایش زمان سوراخکاری در این الکترولیت است. همچنین افزایش دما نیز به دلیل بالابردن انرژی جرقه باعث ایجاد ترک در سوراخ‌ها می‌شود. در سوراخکاری دومرحله‌ای به دلیل متمرکزبودن جرقه تولیدشده، ترک‌های کمتری طبق تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی دیده می‌شود. جرقه الکتریکی قوی نیز باعث ناپایداری غشای گاز می‌شود. در دمای ۲۵°C به دلیل ناپایداری غشای گاز، مقدار اضافه‌برش ایجادشده در NaOH، ۰/۰۳۸ و ۰/۰۶۴mm به ترتیب در زمان‌های ۳۰ و ۶۰ s است. غشای گاز پایدارتر و جرقه متمرکز در الکترولیت H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> مقدار اضافه‌برش را به ۰/۰۲۲ و ۰/۰۶۲mm در زمان‌های ۳۰ و ۶۰s کاهش داده است. افزایش دما نیز بر اثر همراه‌بودن با انرژی جرقه قوی‌تر نیز افزایش اضافه‌برش را نسبت به دمای پایین‌تر به دنبال دارد. این مقدار افزایش در سوراخکاری دومرحله نسبت به سوراخکاری تکمرحله‌ای کمتر است.

**تشکر و قدردانی:** موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

**تاییدیه اخلاقی:** موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

**تعارض منافع:** موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

**سهام نویسندگان:** موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

**منابع مالی:** موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

#### فهرست علائم

pH	پی‌اچ حکاکی (mm\liter)
Wt%	درصد وزنی
R	ثابت جهانی گازها
T	دما (K)
A	آمپر
V	ولت
ΔH <sup>0</sup>	آنتالپی استاندارد (kCal)
ΔG <sup>0</sup>	انرژی آزاد گیبس (j/mol)
K	ثابت واکنش
t <sub>m</sub>	زمان سوراخکاری

#### منابع

1- Saranya S, Nair A, Ravi Sankar A. Experimental