



بررسی تجربی پارامترهای ولتاژ پالس در ایجاد شیار بر روی شیشه با فرآیند تخلیه الکتروشیمیایی

منصور حاجیان^۱، اردشیر همسایان اتفاق^۲، محمد رضا رازفر^{۳*}، سasan جهانگیرزاده^۴

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۳- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

* تهران، صندوق پستی ۴۴۱۳-۵۸۷۵، razfar@aut.ac.ir

چکیده

ماشین‌کاری تخلیه الکتروشیمیایی از جمله فرآیندهای نوین تولید می‌باشد که از ترکیب دو فرآیند الکتروشیمیایی و فرآیند تخلیه الکتریکی تشکیل شده است. مکانیزم‌های براده‌برداری در این روش شامل براده‌برداری به کمک واکنش شیمیایی و همچنین براده‌برداری به کمک حرارت ناشی از جرقه می‌باشد. در این فرآیند قطعه کار در محلول الکتروولیت غوطه‌ور می‌شود و ابزار به قطبه کار نزدیک می‌شود. با اعمال ولتاژ در ابزار و الکتروولیت فرعی فیلم گازی در اطراف ابزار تشکیل می‌شود که با افزایش ولتاژ، جرقه در اطراف ابزار زده می‌شود. حرارت ناشی از این جرقه منجر به بار برداری از قطبه کار می‌شود. لذا یکی از پارامترهای مهم در این فرآیند انرژی جرقه می‌باشد. دستیابی به حد بهینه از انرژی جرقه همواره مورد نظر محققان بوده است. در این مقاله با فرآیند تخلیه الکتروشیمیایی و به کمک منع تغذیه پالسی بر روی شیشه شیارهای مینیاتوری ایجاد می‌شود و کنترل انرژی جرقه به کمک کنترل و ضعیفیت پالس‌ها انجام می‌گیرد. پارامترهایی موردنظر بررسی در این مقاله زمان روشنی و خاموشی و همچنین فرکанс پالس می‌باشد. اثر این پارامترها بر روی عمق شیار و کیفیت سطح مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زمان روشنی پالس عمق شیار افزایش می‌یابد و کیفیت سطح اندکی بهبود می‌یابد. زمان روشنی پالس و نسبت زمان روشنی به خاموشی پالس در شکل گیری ریز جرقه‌ها یا حذف آن‌ها اثر بسزایی داشته و نرخ براده‌برداری را تعیین می‌نماید.

کلیدوازگان: ماشین‌کاری تخلیه الکتروشیمیایی، شیارهای مینیاتوری، ولتاژ پالسی، عمق شیار

Experimental investigation of continuous voltage and pulsed voltage into electrochemical discharge machining

Mansour Hajian, Ardesir Hemasian Etefagh, Mohammadreza Razfar*, Sasan Jahangirzadeh

Department of Mechanical Engineering, Amir Kabir University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 15875-4413 Tehran, Iran, razfar@aut.ac.ir

ABSTRACT

Electrochemical discharge machining (ECDM) is a new method that has been developed for machining of materials such as glass or ceramic. This process also has a high capacity for machining brittle and non-conductive materials. Electrochemical discharge machining is the process of combining electrical discharge machining (EDM) and electrochemical machining (ECM). ECDM has the ability to engrave non-conductive materials such as glass. In this process, the gap between the tool and the workpiece is filled by electrolyte solution. Gas film is generated by applying a voltage to the tool and auxiliary electrode. Increasing the voltage leads to spark occurring in the gas film. Moreover, the thermal removal mechanism is the dominant material removal mechanism. The most effective parameters in ECDM are the voltage and the shape of the voltage. In this article, the effects of pulsed and continuous voltage on the machining parameters are discussed. Experimental results showed that the depth of machining was increased by increasing the voltage. Moreover, pulsed voltage was capable of controlling the process and the depth of machining.

Keywords: Continuous Voltage, Depth of Machining, Electrochemical Discharge Machining, Pulsed Voltage.

در ابعاد کوچک و کاربردهای ظرفی خیلی مناسب نمی‌باشند [۲]. روش ماشین‌کاری تخلیه الکتروشیمیایی^۱، روشی است که با بهره‌گیری از خواص خودنگی الکتروولیت و حرارتی جرقه‌های ایجاد شده، از مواد نارسانایی نظری شیشه برادری انجام می‌دهد، در ضمن این که مشکلات دیگر فرآیندهای ماشین‌کاری شیشه را به حداقل رسانده است [۳]. یک سلول ماشین‌کاری تخلیه الکتروشیمیایی از واحدهای زیر تشکیل شده است: ۱- منبع تغذیه که می‌تواند منبع DC پیوسته یا پالسی باشد - ۲- الکتروولیت، عمدتاً از الکتروولیت-

۱- مقدمه

مواد نارسانایی نظری شیشه و سرامیک، به دلیل خواص منحصر به فردی چون مقاومت به خوردگی، نارسانایی در برابر جریان الکتریسته و حرارت و همچنین شفافیت مناسب برای شیشه، امروزه مورد توجه قرار گرفته‌اند و در زمینه‌هایی چون مهندسی پردازشی، و ساخت وسایل بسیار کوچک نظری میکرو پمپ‌ها و میکرو اکتوها به کار گرفته می‌شوند [۱]. در ماشین‌کاری شیشه از روش‌هایی چون ماشین‌کاری با لیزر و ماشین‌کاری آلتراسونیک استفاده می‌شود که به دلیل کیفیت سطح پایین و ترک‌های ریز در ناحیه ماشین‌کاری، برای ساخت

1. Electrochemical Discharge Machining (ECDM)

Please cite this article using:

M. Hajian, A. Hemasian Etefagh, M. Razfar, S. Jahangirzadeh, Experimental investigation of continuous voltage and pulsed voltage into electrochemical discharge machining, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 393-396, 2015 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

سبب شکست ابزار گردد. از طرفی به کارگیری ولتاژ پالسی برای کنترل بهتر فیلم گاز و حرارت وصله به قطعه کار مفید خواهد بود [۵].

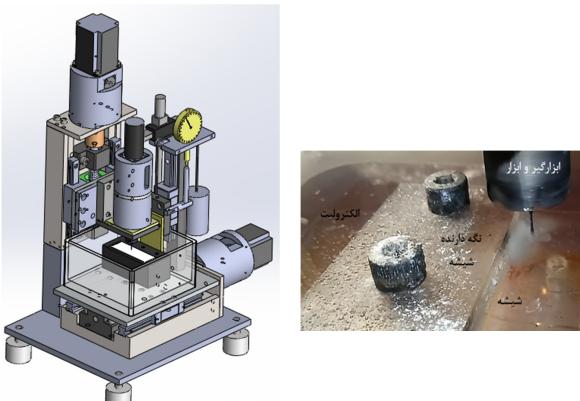
در این مقاله، به بررسی تاثیر تغییر زمان روشی پالس برای دو زمان خاموشی پالس متفاوت، 1 ± 0.5 میلی ثانیه ($T_{off}=0.5$ and 1 ms) بر روی وضعیت شیار ایجاد شده با فرآیند تخلیه الکتروشیمیابی پرداخته شده است و عمق، کیفیت شیار و وضعیت جرقه‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. در واقع عدم تفاوت تحقیق حاضر با سایر تحقیقات ارائه شده در این زمینه عبارت است از: (الف) به کارگیری محلول NaOH با غلظت $25\text{wt}\%$ برای انجام ماشین کاری شیشه ب) تغییر زمان روشی پالس. در بخش دوم مقاله، تجهیزات و برنامه آزمایش‌های تجربی ارائه گردیده است. در بخش سوم نتایج آزمایش‌ها آورده شده است و بر روی آن‌ها بحث شده است و در بخش پایانی مقاله، نتایج جمع‌بندی شده است.

۲- آزمایشات تجربی

۲-۱- تجهیزات و مواد آزمایش

به دلیل سرعت پایین فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتروشیمیابی، لازم است تا ابزار (یا قطعه کار) بر روی سطح قطعه کار (در نزدیکی سطح پیشانی ابزار) با سرعت کم حرکت داده شود. ابزار مته از جنس فولاد تندر بر و به قطر 0.5mm پس از آن که با عملیات سبب‌دهنده‌ی انتهای آن تخت شد، بر روی کولت ابزار-گیر فرز میکروماسین کاری نصب گردید. محورهای حرکتی این دستگاه قادر است سرعت خطی از محدوده 1 الی 120 mm/s میکرومتر بر ثانیه ($\mu\text{m/s}$) را تأمین نماید و ابزار ماشین کاری را با لنگی دورانی کمتر از 5ms در محدوده سرعت دورانی $10\text{--}1500\text{ rpm}$ به چرخش درآورد. در شکل ۱، شماتیک تجهیز فرزکاری ماشین کاری تخلیه الکتروشیمیابی نمایش داده شده است.

قطعه کار از جنس شیشه لام و به ابعاد $140\times 40\times 40\text{ mm}^3$ میلی‌متر مکعب می‌باشد که توسط نگهدارنده از جنس پلکسی گلاس در نزدیکی ابزار و در فاصله 10 mm از آن قرار می‌گیرد. با توجه به کارهای محققان قبلی، در این تحقیق از محلول سود سوزآور یا غلظت وزنی $25\text{wt}\%$ استفاده می‌شود. این محلول در حدود 400 CC در ظرف محتوی نگه دارنده قطعه کار ریخته می‌شود به نحوی که در حدود 2 mm از سطح فوقانی قطعه کار درون محلول قرار گیرد. از طریق یک مدار الکترونیکی پالس‌ساز، ولتاژ پیوسته مدار با افتی قابل اغماس



شکل ۱ تجهیز فرزکاری تخلیه الکتروشیمیابی:

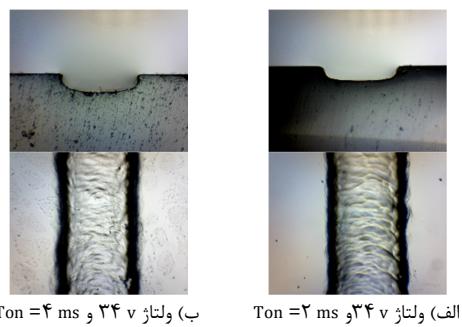
سمت چپ: نمای شماتیک، سمت راست: ابزار در حال ماشین کاری

های قلیایی نظریه هیدروکسید سدیم یا هیدروکسید پتاسیم با درصدهای مختلف حدود با درصدهای مختلف حدود $20\text{--}30\%$ در صد وزنی استفاده می‌شود. ۳- الکترود کاتد یا قطب منفی، که به نام ابزار شناخته می‌شود و عموماً قطری کمتر از یک میلی‌متر داشته و در حدود یک تا دو میلی‌متر در الکتروولیت فرو می‌رود. ۴- الکترود آند یا قطب مثبت که در محلول الکتروولیت شناور بوده و سطح مقطعی به اندازه حدود چند صد برابر سطح مقطع فروبزی ابزار در الکتروولیت دارد و عموماً از جنس فولاد زنگ نزن یا گرفت می‌باشد. با اتصال جریان الکتریسیته بین ابزار و الکترود آند، فرآیند الکتروولیز آغاز می‌شود و حباب‌های گاز در اطراف الکتروودها ایجاد می‌شوند. با افزایش سطح ولتاژ و رسیدن آن به ولتاژ بحرانی، سطح ابزار از حباب‌ها پوشیده می‌شود و زمینه برای ایجاد جرقه بین ابزار و الکتروولیت فراهم می‌آید. در صورتی که قطعه-کاری نظریه شیشه در فاصله‌ای نزدیک، کمتر از 5 mm ، از ابزار قرار گیرد، حرارت ناشی از ایجاد تخلیه الکتریکی به سطح آن برخورد کرده و زمینه را برای انجام واکنش ناحیه‌ای از قطعه کار با الکتروولیت فراهم می‌آورد و به این ترتیب بازبرداری از قطعه کار انجام می‌شود [۴]. یکی از راههای مرسوم در روش فرزکاری با فرآیند تخلیه الکتروشیمیابی، حرکت‌دهی ابزار بر روی سطح قطعه کار و در فاصله‌ای معین می‌باشد که سبب ایجاد شیارهای مینیاتوری می‌شود [۵].

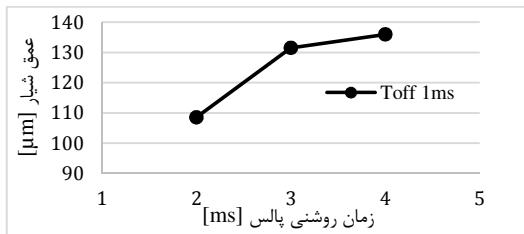
تخلیه الکتروشیمیابی از مهم‌ترین ارکان این فرآیند محسوب می‌شود [۶]. در واقع کنترل مقدار انرژی رسیده به قطعه کار که از تخلیه الکتروشیمیابی حاصل می‌شود می‌تواند فرآیند ماشین کاری را کنترل نماید و به این ترتیب می‌توان میزان نرخ برآورده‌برداری و کیفیت سطح را تحت کنترل در آورد. در صورتی که سهم حرارت دریافتی قطعه کار زیاد باشد، ممکن است ترک‌های سطحی در ناحیه ماشین کاری پیدی آید. از طرفی تکرار پذیری در عملیات ماشین کاری سهم مهمی دارد که در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتروشیمیابی تحت کنترل در آوردن حرارت رسیده به قطعه در تکرار پذیری عملیات اهمیت زیاد دارد. در واقع نوع منع تغذیه، پیوسته و پالسی و سطح ولتاژ به عنوان عوامل ورودی برای کنترل حرارت در فرآیند ECDM در نظر گرفته می‌شوند و در دسته پارامترهای فعل کنترل حرارت جای داده می‌شوند. از طرفی منابع انتقال حرارت در تخلیه الکتروشیمیابی شامل الکتروولیت و ابزار می‌باشند که انتخاب مشخصات هدایت حرارتی موردنظر می‌توان ناحدی سهم حرارت دریافتی قطعه کار را کنترل نمود [۵].

در مورد فرزکاری با فرآیند ماشین کاری الکتروشیمیابی، بر روی انتخاب پارامترهای فرآیندی و تاثیر آن‌ها بر روی کیفیت شیار، عمق و ناحیه متاثر حرارتی به صورت محدودی تحقیقات انجام گرفته است [۷، ۸]. عمدۀ تحقیقات صورت گرفته بر به کارگیری ولتاژ پیوسته بر نامه‌بریزی شده است و کمتر به ولتاژ پالسی پرداخته شده است. اولین بررسی‌ها برای به کارگیری ولتاژ پالسی در روش فرزکاری با فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتروشیمیابی توسط زنگ^۱ و همکارانش انجام شده است [۹]. فرآیند ماشین کاری آن‌ها در حضور محلول هیدروکسید پتاسیم با غلظت وزنی $2\text{--}20\%$ بوده است که با ثابت نگهداشتن زمان روشی پالس (T_{on}) در حدود 2 ms و تغییر دادن زمان خاموشی پالس (T_{off})، کیفیت و عرض شیارهای حاصله را بررسی نمودند. مشاهدات حاکی از آن است که با افزایش زمان خاموشی پالس، عمق شیار و عرض شیار کاهش پیدا می‌نماید. افزایش زمان خاموشی پالس علاوه بر طولانی نمودن فرآیند ماشین کاری، می‌تواند در اثر تماس مکانیکی ابزار با قطعه کار

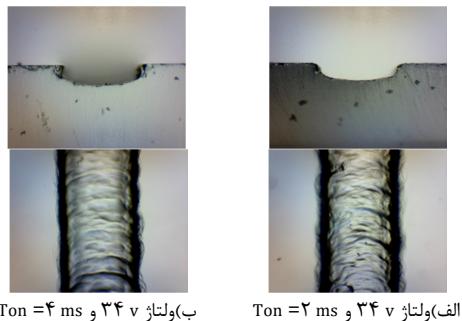
1. Zheng



شکل ۳ عکس از سطح و مقطع عرضی شیار ماشین کاری شده با ولتاژ پالسی و زمان خاموشی $Ton = 4$ ms، $Toff = 1$ ms (الف)، $Ton = 2$ ms، $Toff = 0.5$ ms (ب).

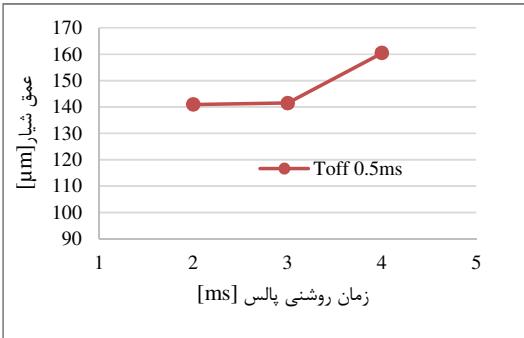


شکل ۴ نمودار تغییرات عمق متوسط شیار بر حسب زمان روشنی پالس



شکل ۵ عکس از سطح و مقطع عرضی شیار ماشین کاری شده با ولتاژ پالسی و زمان خاموشی $Ton = 4$ ms، $Toff = 0.5$ ms (الف)، $Ton = 2$ ms، $Toff = 1$ ms (ب).

در این حالت نمودار تغییرات عمق بر حسب زمان روشنی پالس در شکل ۶ آورده شده است.



شکل ۶ نمودار تغییرات عمق متوسط شیار بر حسب زمان روشنی پالس

به مجموعه هدایت می‌شود به نحوی که ابزار به قطب منفی متصل می‌شود. همچنین آند از جنس فولاد زنگنزن و به ابعاد $5 \times 40 \times 50$ میلی متر مکعب بوده که درون محلول الکتروولیت قرار می‌گیرد و به قطب مشتب متصل می‌شود. به کمک اوسیلوسکوپ و مدار پالس ساز، زمان روشنی و خاموشی پالس تنظیم می‌شود. همچنین تغییرات ولتاژ مدار از طریق اوسیلوسکوپ ثبت می‌شود. پس از انجام آزمایش، توسط میکروسکوپ نوری از سطح شیار، با بزرگنمایی $\times 16$ ، عکس برداری می‌شود پس از آن با برش نمونه‌های شیار خورده از وسط، عمق شیار با میکروسکوپ نوری مشاهده شده و ثبت می‌شود.

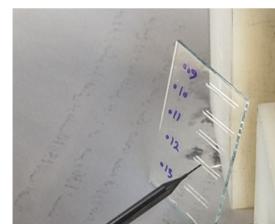
۲-۲- برنامه آزمایش‌ها

شیارها در ولتاژ ۳۴۷ و با ابزار از جنس فولاد تندیر و به قطر $5/0$ mm بر روی سطح شیشه با روش فرزکاری با فرآیند تخلیه الکتروشیمیایی ایجاد می‌شوند. ابزار دارای سرعت دورانی 800 rpm بوده که در فاصله $10 \mu\text{m}$ از قطعه کار قرار می‌گیرد و قطعه کار (میز محور X) با سرعت $10 \mu\text{m}/\text{s}$ نسبت به ابزار در راستای افقی حرکت می‌نماید. در تمامی آزمایش‌ها، شیار به طول 10 mm بر روی سطح شیشه ایجاد می‌شود. زمان روشنی پالس ۲ و ۳ و ۴ میلی ثانیه (ms) و زمان خاموشی پالس ۱ و $5/0$ میلی ثانیه انتخاب می‌شود. تمامی آزمایش‌ها به صورت فول فاکتوریل انجام می‌گیرد و برای هر سری آزمایش، دو مرتبه تکرار انجام می‌گیرد و برای عمق شیار، متوسط مقدار حاصله از دو آزمایش گزارش می‌شود. در شکل ۲ چند نمونه از شیارهای ایجاد شده بر روی سطح شیشه و ابزار ماشین کاری نمایش داده شده است.

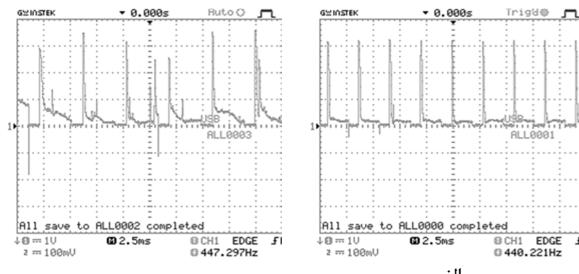
۳- بحث و نتیجه‌گیری

۱- بررسی تاثیر ولتاژ پالسی با زمان خاموشی ۱ میلی ثانیه در مجموعه آزمایش‌های اول، با در نظر گیری زمان خاموشی پالس 1 ms ، زمان روشنی پالس از ۲ و ۳ و ۴ میلی ثانیه (ms) تغییر می‌نماید. در واقع نسبت زمان روشنی پالس به خاموشی پالس به ترتیب $= 2/3$ و $= 4/3$ برابر می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود، با افزایش زمان روشنی پالس عمق شیار افزایش می‌یابد. همچنین کیفیت سطح شیار افزایش می‌یابد و ناهمواری‌های کمتری در کف شیار به چشم می‌خورد. همچنین نمودار تغییرات عمق بر حسب زمان روشنی پالس در شکل ۴ آورده شده است.

۲- بررسی تاثیر ولتاژ پالسی با زمان خاموشی $5/0$ میلی ثانیه در مجموعه آزمایش‌های دوم، با در نظر گیری زمان خاموشی پالس $0/5 \text{ ms}$ ، زمان روشنی پالس از ۲ و ۳ و ۴ میلی ثانیه (ms) تغییر می‌نماید. در واقع نسبت زمان روشنی پالس به خاموشی پالس به ترتیب $= 8/6$ و $= 8/4$ برابر می‌باشد. در شکل ۵، تصویر سطح شیارها و مقطع عرضی آن‌ها آورده شده است.



شکل ۲ نمونه‌ای از شیارهای ایجاد شده بر روی سطح شیشه



شکل ۸ نمودار وضعیت جرقه‌ها در فرآیند ماشین کاری:

- (الف) $Ton/Toff=2$ ($Toff=1ms$, $Ton=2ms$)
- (ب) $Ton/Toff=8$ ($Toff=0.5ms$, $Ton=4ms$)

کمتری ایجاد شده و عمق شیار کمتر خواهد بود. در حالی که زیاد بودن زمان روشنی پالس و کوچکتر بودن زمان خاموشی پالس منجر به شکل گیری ریز جرقه‌ها شده که خود نقش مهمی در انجام ماشین کاری و افزایش عمق شیار دارند.

۴- جمع‌بندی

برخلاف نتایج گزارش شده در دیگر کارهای تحقیقاتی، عرض شیارهای حاصله در حالت مختلف ولتاژ پالسی تغییر خاصی ننموده است و اما افزایش کیفیت سطح، عمق شیار و کاهش مقدار ناهمواری‌ها با افزایش نسبت زمان روشنی پالس به خاموشی آن، مشاهده می‌شود. انتخاب مقدار زمان روشنی و خاموشی پالس و نسبت بین آن‌ها تأثیر مهمی در کنترل فیلم گاز، وضعیت جرقه‌ها و حرارت واصله به قطعه کار داشته و نزخ براده‌باری را تعیین می‌نماید. در این میان شکل گیری ریز جرقه‌ها نقش مهمی در افزایش نزخ براده‌باری دارد.

۵- مراجع

- [1] N. M. Dhawale, *Investigation of machining forces during constant velocity drilling in SACE:(spark assisted chemical engraving) technology*, M.Sc Thesis, Concordia University, 2009.
- [2] S. K. Jui, A. B. Kamara, M. M. Sundaram, High aspect ratio micromachining of glass by electrochemical discharge machining (ECDM), *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 15, No. 4, pp. 460-466, 2013.
- [3] C. Yang, S. Ho, B. H. Yan, Micro hole machining of borosilicate glass through electrochemical discharge machining (ECDM), in *Proceeding of Trans Tech Publ*, pp. 149-166, 2004.
- [4] R. Wüthrich, V. Fascio, Machining of non-conducting materials using electrochemical discharge phenomenon—an overview, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45, No. 9, pp. 1095-1108, 2005.
- [5] R. Wüthrich, Micromachining using electrochemical discharge phenomenon: fundamentals and applications of spark assisted chemical engraving: *William Andrew Publication*, 2009.
- [6] R. Wüthrich, L. Hof, The gas film in spark assisted chemical engraving (SACE)—a key element for micro-machining applications, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, No. 7, pp. 828-835, 2006.
- [7] T. F. Didar, A. Dolatabadi, R. Wüthrich, Characterization and modeling of 2D-glass micro-machining by spark-assisted chemical engraving (SACE) with constant velocity, *Journal of micromechanics and microengineering*, Vol. 18, No. 6, pp. 065016, 2008.
- [8] J. D. A. Ziki, T. F. Didar, R. Wüthrich, Micro-texturing channel surfaces on glass with spark assisted chemical engraving, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 57, pp. 66-72, 2012.
- [9] Z.-P. Zheng, W.-H. Cheng, F.-Y. Huang, B.-H. Yan, 3D microstructuring of Pyrex glass using the electrochemical discharge machining process, *Journal of micromechanics and microengineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 960, 2007.
- [10] R. Wüthrich, U. Spaelter, H. Bleuler, The current signal in spark-assisted chemical engraving (SACE): what does it tell us, *Journal of micromechanics and microengineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 779, 2006.

۳-۳- مقایسه عمق شیار در حالت ولتاژ پالسی با زمان خاموشی متفاوت

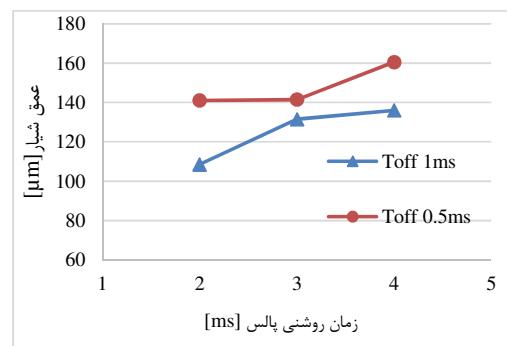
عمق شیار برای دو حالت ماشین کاری با زمان خاموشی‌های ۱ و 5 ms میلی ثانیه (ms) در شکل ۷-الف با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود با افزایش نسبت زمان روشنی پالس به زمان خاموشی پالس، عمق شیار افزایش می‌یابد. در حالتی که نسبت زمان روشنی پالس به زمان خاموشی پالس ۸ برابر باشد، زمان خاموشی پالس 0.5 ms و زمان روشنی 4 ms میلی ثانیه، عمق شیار $160\text{ }\mu\text{m}$ می‌باشد. در شرایطی که این نسبت دو باشد، یعنی زمان خاموشی پالس ۱ و زمان روشنی ۲ میلی ثانیه، عمق شیار $107\text{ }\mu\text{m}$ می‌باشد. همچنان روند افزایش عمق شیار با افزایش نسبت زمان روشنی پالس به زمان خاموشی آن منتظر است (شکل ۷-ب).

جهت قضاوت بهتر در مورد اثرات ولتاژ پالسی، مطالعه وضعیت جرقه‌ها از روی نمودارهای خروجی اوسیلوسکوپ مفید می‌باشد [۱۰]. مطابق شکل ۸، تخلیه‌های الکتریکی برای دو حالت زیر ثبت شده است.

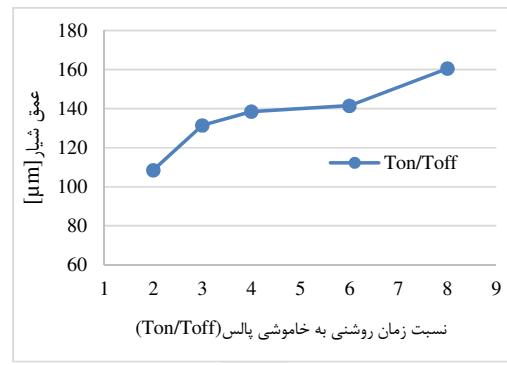
(الف) زمان روشنی پالس ۲ میلی ثانیه و خاموشی ۱ میلی ثانیه:

- $Ton/Toff=2$ ($Toff=1ms$, $Ton=2ms$)
- $Ton/Toff=8$ ($Toff=0.5ms$, $Ton=4ms$)

در حالت الف، جرقه‌ها با مقدار ماسکیمیم یکسان و بدون هیچ ریز جرقه‌ای انجام شده‌اند در حالی که مقدار ماسکیمیم جرقه‌ها در حالت ب متفاوت بوده و در طول زمان روشنی پالس، ریز جرقه‌هایی نیز شکل می‌گیرند. این مطلب نشان می‌دهد که در حالتی که زمان روشنی پالس و نسبت آن به زمان خاموشی پالس کوچک باشد، جرقه‌ها بیشتر تحت کنترل بوده، حرارت



الف



شکل ۷ نمودار تغییرات عمق متوسط شیار بر حسب: (الف). زمان روشنی پالس، (ب) نسبت زمان روشنی به خاموشی پالس