

# مطالعه تجربی تأثیر عمق اولیه محفظه در فرآیند ماشین کاری EDM

## بر روی مؤلفه‌های سلامتی سطح فولاد ابزار DIN 1/2379

محمد رضا شبگرد<sup>۱</sup>      یوسف جعفری آزاد<sup>۲</sup>  
 دانشکده مهندسی مکانیک      دانشکده فنی و مهندسی  
 دانشگاه صنعتی تبریز      دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۲/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۲/۱۵)

### چکیده

در این مقاله، تأثیر عمق اولیه محفظه ماشین کاری با تنظیم پارامترهای ورودی (شدت جریان و زمان روشنی پالس) در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی (EDM) بر روی مؤلفه‌های سلامتی سطح (ضخامت لایه سفید، چگالی میکروترک‌ها، عمق منطقه متأثر از حرارت و میکروسختی) برای فولاد ابزار سردکار (DIN 1.2379) مورد مطالعه قرار گرفته است. مطابق نتایج به دست آمده، افزایش عمق اولیه محفظه، موجب کاهش ضخامت لایه سفید و لایه متأثر از گرما (HAZ) گردیده و چگالی میکروترک‌ها را در سطح ماشین کاری شده، کاهش می‌دهد. همچنین، نتایج حاصل از میکروسختی سنجی نشان می‌دهد، با افزایش عمق اولیه محفظه ماشین کاری، میزان سختی در لایه‌های نزدیک سطح با پیشروی در امتداد عمق قطعه کار، افزایش یافته و بعد از گذر از یک عمق مشخص از سطح ماشین کاری شده، این روند افزایشی متوقف شده و میزان سختی به تدریج کاهش می‌یابد.

**واژه‌های کلیدی:** عمق اولیه محفظه، فولاد ابزار (DIN 1.2379)، ماشین کاری تخلیه الکتریکی، مؤلفه‌های سلامتی سطح

## An Experimental Study on the Effect of Primary Cavity Depth on Surface Integrity of Tool Steel (DIN 1/2379) in EDM Process

M.R. Shabgard      Y. Jafari Azad  
 Department of Mechanical Engineering      Department of Technical & Engineering  
 Tabriz University      Islamic Azad University of Dezful  
 (Received:30/April/2014; Accepted:6/March/2015)

### ABSTRACT

In this paper, the effect of the primary cavity depth in different input parameters (pulse duration and spark current), in the Electrical Discharge Machining (EDM) on surface integrity (white layer thickness, HAZ, micro hardness and micro crack density) of DIN 1.2379 cold work tool steel has been studied. According to the obtained results, increasing the initial depth of hole, decreased the white layer thickness, micro crack density on the Machined surface and HAZ. The results of the micro hardness also, indicate growth the value of hardness in the layers close to the machined surface along the depth and after passing through a specified depth from machined surface, this process stopped and then, the machined surface micro hardness reduced.

**Keywords:** Primary Cavity Depth, DIN 1.2379 Tool Steel, Electrical Discharge Machining (EDM), Surface Integrity

۱- دانشیار (نویسنده پاسخگو): mrshabgard@tabrizu.ac.ir

۲- کارشناس ارشد: yousef.jafari azad@yahoo.com

## فهرست علائم

D	ضریب نفوذ ( $m^2s^{-1}$ )
$D_o$	ضریب نفوذ مستقل از دما ( $m^2s^{-1}$ )
$Q_d$	انرژی فعال سازی نفوذ ( $Jmol^{-1}$ )
R	ثابت گازها ( $Jmol^{-1}K^{-1}$ )
T	دمای مطلق (K)

## ۱ - مقدمه

ماشین کاری تخلیه الکتریکی (EDM) به عنوان فرآیندی جهت براده برداری از مواد رسانای سخت با استحکام بالا که امکان ماشین کاری آنها از طریق فرآیندهای تولید سنتی امکان پذیر نبوده، یا با مشکلاتی همراه می باشد به کار می رود [۱]. در این فرآیند ولتاژ پالسی منقطع برقرار شده بین ابزار و قطعه کار، که در فاصله نزدیک و کنترل شده ای از هم قرار گرفته اند، عامل جرقه های منقطع در نزدیک ترین نقطه (نقاط) آنها شده و هر جرقه جزء کوچکی از ماده را در اثر تخلیه انرژی جدا می کند، تکرار متناوب این جرقه ها موجب ماشین کاری قطعه کار می شود [۲-۳]. فولاد ابزار سردکار (DIN 1.2379) به دلیل داشتن استحکام بالا، مقاومت سایشی خیلی خوب در دماهای بالا، سختی پذیری و چقرمگی عالی، در ساخت انواع قالبها مانند قالب های کشش عمیق و خم کاری، آهنگری، اکستروژن سرد، ریخته گری تحت فشار و ... به کار می رود. ماشین کاری این نوع فولاد بعد از عملیات حرارتی به علت سختی و استحکام بالای آن توسط روش های ماشین کاری سنتی بسیار مشکل و هزینه بر می باشد، لذا جهت ماشین کاری این ماده اغلب از فرآیند EDM استفاده می شود. از طرفی باتوجه به این که فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به شدت متأثر از عمق محفظه ماشین کاری بوده و با افزایش عمق محفظه، شست و شوی آلودگی ها و براده های تولید شده در اثر جرقه ها از منطقه ماشین کاری مشکل تر می شود، لذا این عامل سبب کاهش میزان نرخ براده برداری گردیده و مولفه های مربوط به سلامتی سطح ماشین کاری شده را تهدید می نماید و به این طریق سبب افزایش قطعات معیوب گردیده، در نتیجه موجب افزایش هزینه ماشین کاری قطعات می شود. باتوجه به عوامل مذکور، یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در فرآیند ماشین کاری قطعات به روش تخلیه الکتریکی، عمق اولیه محفظه می باشد، که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است. تحقیقات متعددی جهت بررسی تأثیر در فرآیند

ماشین کاری تخلیه الکتریکی به عمل آمده است. گو<sup>۱</sup> و همکاران [۴] با استفاده از مدل سازی ریاضی، تأثیر شدت جریان جرقه و زمان روشنی پالس در فرآیند EDM بر روی مشخصه های سلامتی سطح فولاد ابزار DIN 1.2379 را مورد مطالعه قرار داده اند. مطابق نتایج این پژوهش، تمامی مولفه های سلامتی سطح اعم از ضخامت لایه دوباره منجمد شده، زبری سطح و تنش های سطحی که در سطح ماشین کاری شده پدید آمده اند، با مدل سازی ریاضی قابل ارزیابی هستند، چنان که افزایش زمان روشنی پالس و شدت جریان موجب افزایش ضخامت لایه سفید و زبری سطح شده و انتخاب حداقل انرژی پالس، به دلیل تولید کم ترین تنش کششی سطحی، بهترین شرایط برای سطح ماشین کاری شده را فراهم می آورد. خاندان و همکاران [۵] ماشین کاری قطعه کاری از جنس فولاد DIN 1.3505 با الکتروود برنجی را به روش EDM انجام داده اند. در این مطالعه چهار پارامتر (عمق ماشین کاری، شدت جریان، زمان روشنی پالس و قطر الکتروود) به عنوان پارامترهای ورودی مورد بررسی قرار گرفته است. طبق نتایج حاصل از این پژوهش حداکثر اثر روی میزان نرخ براده برداری و زبری سطح به ترتیب مربوط به شدت جریان، عمق ماشین کاری شده، زمان روشنی پالس و قطر الکتروود گزارش شده است. ییلماز<sup>۲</sup> و همکاران [۶] تأثیر عملکرد الکتروودهای تک کاناله و چندکاناله مسی و برنجی در فرآیند EDM، برای انجام سوراخ کاری سریع حفره را مورد مطالعه قرار داده اند و نتایج حاصل از این تحقیق نشان داده، میزان نرخ براده برداری و فرسایش ابزار برای الکتروود ابزارهای تک کاناله بیش تر از الکتروودهای چندکاناله می باشد. ژانگ<sup>۳</sup> و همکاران [۷] طی پژوهشی لایه دوباره منجمد شده توسط ماشین کاری تخلیه الکتریکی را مورد بررسی قرار داده اند. طبق نتایج این تحقیق با بالارفتن زمان روشنی پالس و شدت جریان جرقه، مقدار ضخامت لایه دوباره منجمد شده افزایش یافته است، همچنین، میکروسختی با استفاده از سیال دی الکتریک مخلوط آب و روغن به دلیل بالابودن نرخ تبرید در لایه های سطحی بیش تر است. میکروترک های سطحی ایجاد شده در ماشین کاری با استفاده از آب دی یونیزه، بسیار کم عمق و کوچک تر از میکروترک های حاصله از ماشین کاری فولاد AISI 1035 با سیال دی الکتریک پایه هیدروکربنی و مخلوط آب و روغن مشاهده شده است.

1- Guu  
2 - Oguzhan  
3 - Yanzhen

بررسی‌ها نشان داده، شارهای گرمایی غیرهمگون حوضچه‌های مذاب، تغییرات متالورژیکی و تغییر شکل‌های غیرهمگن پلاستیکی موجب ایجاد تنش‌های پسماند سطحی در فرآیند EDM می‌گردد. شبگرد و همکاران [۱۳] تأثیر پارامترهای شدت جریان جرقه و زمان روشنی پالس را بر روی مشخصه‌های ماشین کاری EDM و مولفه‌های سلامتی سطح قطعه کار فولادی AISI H13 مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج حاصل از پژوهش ایشان نشان داده است، افزایش زمان روشنی پالس موجب بالا رفتن مقادیر نرخ براده‌برداری، زبری سطح، ضخامت لایه سفید و عمق منطقه متأثر از گرما شده است. همچنین، طبق یافته‌های این تحقیق، فرسایش نسبی ابزار با افزایش زمان روشنی پالس کاهش یافته، درحالی‌که با افزایش شدت جریان جرقه میزان این مولفه بیش‌تر شده است. لی و تای<sup>۸</sup> [۱۴] با مطالعه ماشین کاری تخلیه الکتریکی روی دو جنس فولادی AISI H13 و DIN1.2379 تأثیر زمان روشنی پالس و شدت جریان را بر روی ضخامت لایه سفید و شکل‌گیری ترک‌ها و زبری سطح، مورد بررسی قرار داده‌اند و طبق نتایج ایشان، با افزایش زمان روشنی پالس و شدت جریان ضخامت لایه سفید و زبری سطح افزایش یافته و به‌دلیل هدایت حرارتی بالا برای فولاد H13 تمایل به تشکیل ترک در آن پایین‌گزارش شده است. در ادامه، ایشان بالارفتن زمان روشنی پالس را موجب بیش‌تر شدن ضخامت لایه سفید و تنش‌های پسماند در هر دو جنس اعلام کرده‌اند که این اثر، خود موجب گسترش ترک‌ها خواهد بود.

هدف این پژوهش، مطالعه تأثیر عمق اولیه محفظه ماشین کاری بر روی مؤلفه‌های سلامتی سطح (ضخامت لایه سفید، چگالی میکروتکرک‌ها، عمق منطقه متأثر از حرارت و میکروسختی سطح مقطع ماشین کاری شده) فولاد ابزار سردکار DIN1.2379 به‌روش ماشین کاری تخلیه الکتریکی (EDM) می‌باشد.

## ۲- تجهیزات و روش انجام پژوهش

نمونه‌های فولادی مورد استفاده در آزمایش‌ها از جنس فولاد ابزار سردکار (DIN1.2379) انتخاب شدند. جهت آماده‌سازی نمونه‌های آزمایش، ابتدا قطعه‌ی خام تهیه گردید. بعد از برش آن و انجام عملیات ماشین کاری و سوراخ‌کاری در عمق‌های اولیه مختلف، نمونه‌ها عملیات حرارتی شده و سختی آن‌ها به 62HRC رسانده شد. در نهایت توسط عملیات سنترلس و

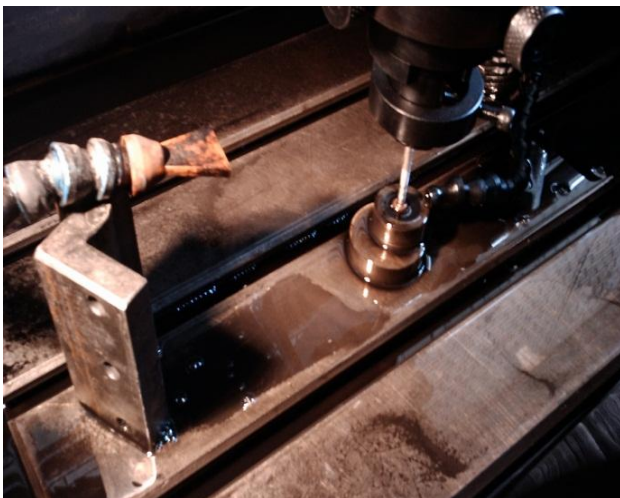
رضا و همکارانش [۸] بهینه‌سازی فرآیند EDM را برای فولاد AISI 304 از لحاظ سایش الکتروود، مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این پژوهش اثر متغیرهای همچون شدت جریان، ولتاژ، پلاریته، قطر الکتروود و ابعاد محفظه، فشار جریان دی‌الکتریک بر روی فرسایش نسبی ابزار مورد بررسی قرار گرفته و از روی میزان سایش ابزار، شرایط بهینه ماشین کاری در چهار سطح از عمق با استفاده از متد تاگوچی بیان شده است. باجلبن<sup>۱</sup> و همکاران [۹] فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی را بر روی دو جنس فولاد ابزار X200Cr15 و 50CrV4 با متغیرهای مستقل شدت جریان جرقه و زمان روشنی پالس، جهت مطالعه مؤلفه‌های سلامتی سطح اعم از ضخامت لایه سفید و میکروسختی سطحی و نیز پارامترهای ماشین کاری شامل نرخ براده‌برداری و فرسایش نسبی ابزار به انجام رسانده‌اند. طبق نتایج به‌دست آمده از این مطالعه، افزایش پارامترهای ورودی موجب بالارفتن ضخامت لایه سفید، نرخ براده‌برداری و کاهش فرسایش نسبی ابزار گردیده است. بمبرگ<sup>۲</sup> و همکاران [۱۰] تأثیر عمق سوراخ با ابزار دوار را در فرآیند EDM، مورد مطالعه قرار داده‌اند. طبق نتایج این پژوهش، زمان ماشین کاری با استفاده از این مکانیزم کاهش یافته، همچنین افزایش شعاع دوران ابزار باعث افزایش نرخ باربرداری<sup>۳</sup> (MRR)، کاهش زمان ماشین کاری و فرسایش نسبی ابزار<sup>۴</sup> (TWR) شده است. هانگ<sup>۵</sup> [۱۱] طی مطالعه‌ای، فرآیند EDM را با متغیرهای عمق محفظه، قطر محفظه و شدت جریان مورد بررسی قرار داده است. در این پژوهش ماشین کاری با استفاده از سیستم بینایی ماشین انجام یافته و مقایسه نتایج واقعی با نتایج ارائه شده توسط الگوریتم<sup>۶</sup> (DLA) نشانگر صحت کارایی الگوریتم مذکور گزارش شده است. اکمچی<sup>۷</sup> [۱۲] تأثیر جنس الکتروود و مایع دی‌الکتریک بر روی لایه سفید، تنش‌های پسماند و آستنیت باقی مانده (با استفاده از شیوه‌های دیفراکتومتری اشعه ایکس) در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی فولاد ابزار DIN 1.2738، را مورد مطالعه قرار داده است. براساس نتایج این تحقیق،

- 1- Boujelbene
- 2- Bemberg
- 3- Material Removal Rate
- 4- Tool Wear Ratio
- 5- Huang
- 6- Detection Line Algorithm
- 7- Ekmekci

شد. در شکل ۲، تصویری از انجام ماشین کاری نشان داده شده است.

**جدول (۲):** ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی فولاد  
DIN 1.2379 [۱۵].

مشخصه‌های فولاد ابزار سردکار DIN 1.2379	
۷/۷	وزن مخصوص ( $\text{gcm}^{-3}$ )
۱۴۲۱	نقطه ذوب ( $^{\circ}\text{C}$ )
۲۰	رسانایی حرارتی ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
۰/۴	ظرفیت گرمایی ویژه ( $\text{Jg}^{-1}\text{C}^{-1}$ )
۱/۷۴	مقاومت الکتریکی ( $\mu\Omega\text{cm}$ )
۶۲	سختی (HRC)
۴۷۵	استحکام کشش (MPa)
۲۲۰۰	استحکام تسلیم فشاری (MPa)
Si: ۰/۳۰ ، Mn: ۰/۴۰	
C: ۱/۵۵ ، V: ۰/۸۰	ترکیب شیمیایی (Wt%)
Cr: ۱۱/۸ ، Mo: ۰/۸۰	



شکل (۲): ماشین کاری فولاد ابزار DIN1.2379  
توسط فرآیند EDM.

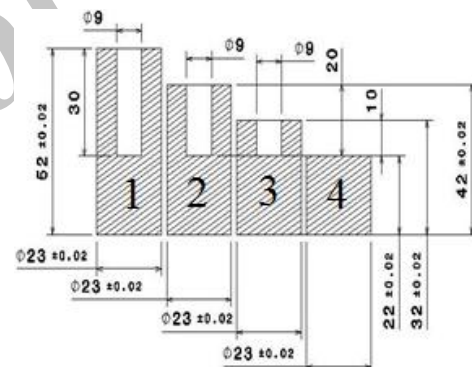
## ۲-۱- طراحی آزمایش‌ها

آزمایش‌ها به روش عاملی کامل<sup>۳</sup> طراحی شدند. جنس ابزار مورد استفاده، مس الکترولیت با چگالی ۸/۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب بوده است. آزمایش‌ها با ملاحظه سطوح هرکدام از پارامترهای ورودی، عمق محفظه ماشین کاری، شدت جریان جرقه و زمان روشنی پالس، انجام پذیرفتند. مقدار هرکدام از

سنگ‌زنی قطعات به ابعاد نهایی آماده گردیدند. در جدول ۱، ابعاد نمونه‌ها و شرایط سخت کاری آن، در شکل ۱، هندسه نمونه‌های فولادی و در جدول ۲، برخی از ویژگی‌های فیزیکی، ترکیب شیمیایی قطعه کار فولاد ابزار سردکار DIN1.2379، ارائه شده است.

**جدول (۱):** ابعاد نمونه‌ها، ابزار و شرایط سخت کاری فولاد  
DIN 1.2379 [۱۵].

ابعاد ابزار (mm)	عمق اولیه محفظه (mm)	ابعاد قطعه (mm)
$\emptyset 8 \times 20$	۰	$\emptyset 23 \times 22$
$\emptyset 8 \times 30$	۱۰	$\emptyset 23 \times 32$
$\emptyset 8 \times 40$	۲۰	$\emptyset 23 \times 42$
$\emptyset 8 \times 50$	۳۰	$\emptyset 23 \times 52$
دمای پیش گرمایش	$650-750^{\circ}\text{C}$	
دمای آستینت	$990-1050^{\circ}\text{C}$	
زمان نگهداری	دقیقه ۳۰-۶۰	



شکل (۱): ابعاد و هندسه قطعات نمونه.

جهت انجام آزمایش‌ها از ماشین اسپارک تهران اکرام (CNC-EDM) مدل (TA-E.D.M.404H) استفاده شد.

بعد از انجام عملیات ماشین کاری توسط دستگاه اسپارک نمونه‌های مورد نظر جهت بررسی ساختار میکروسکوپی آن‌ها توسط دستگاه وایرکات برش داده شدند. بعد از سمباده‌زنی، پولیش کاری و اچینگ<sup>۱</sup> سطح مقطع نمونه‌ها، ضخامت لایه سفید، ضخامت لایه متأثر از گرما (HAZ) و چگالی میکروتورک‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی<sup>۲</sup> (SEM) مورد مطالعه قرار گرفت و در نهایت میکروسختی سطح مقطع ماشین کاری شده توسط دستگاه میکروسختی‌سنج اندازه‌گیری

1- Etching

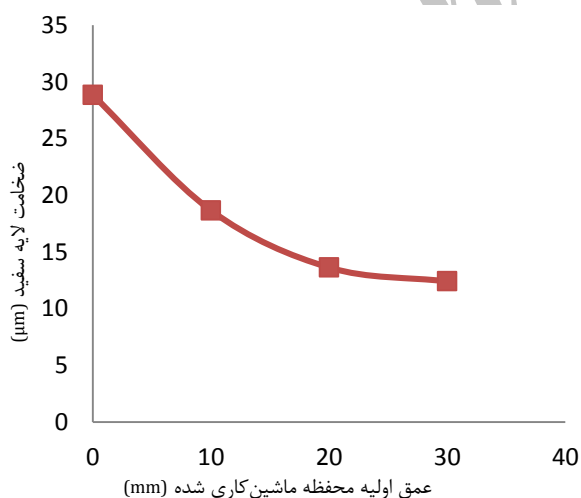
2- Scanning Electron Microscope

3- Full Factoria

کاهش می‌یابد. دلیل این موضوع را می‌توان این‌گونه توجیه نمود که با بیش تر شدن عمق اولیه محفظه ماشین کاری، آلودگی گپ در اثر شست‌وشوی ضعیف ناحیه ماشین کاری افزایش یافته و با به‌وجود آمدن پالس‌های آرک (arc) از میزان انرژی مفیدی که بایستی روی سطح تخلیه می‌شد کاسته می‌شود، در نتیجه حوضچه‌های مذاب تشکیل شده دارای ابعاد کوچک‌تری شده و چون حجم مذاب موجود در آنها کم‌تر است، مقدار کم‌تری از آن مذاب در اثر تماس با سیال دی‌الکتریک به‌عنوان لایه دوباره منجمد شده روی سطح باقی می‌ماند. در نتیجه با افزایش عمق اولیه محفظه از ضخامت لایه سفید کاسته می‌شود.

**جدول (۴):** مقادیر ضخامت لایه سفید، ضخامت لایه متأثر از گرما و چگالی میکروتراک‌ها برای عمق‌های مختلف محفظه ( $I=42A$  &  $Ton=100\mu s$ ).

عمق اولیه محفظه ماشین کاری (mm)	WLT <sup>۲</sup> ( $\mu m$ )	HAZ( $\mu m$ )	CD <sup>۳</sup>
۰	۲۸/۸۵	۳۷/۶۸	۰/۳۴
۱۰	۱۸/۶۶	۳۳/۲۳	۰/۱۶
۲۰	۱۳/۶۳	۲۳/۸۱	۰/۱۳
۳۰	۱۲/۴۱	۲۱/۷۴	۰/۱۲



**شکل (۳):** تغییرات ضخامت لایه سفید بر حسب عمق اولیه محفظه ( $Ton=100\mu s$  &  $I=42A$ ).

پارامترهای ورودی و متغیرهای مهم ماشین کاری در جدول ۳ ارائه شده است.

**جدول (۳):** تنظیمات ثابت و شرایط متغیرها در انجام آزمایش.

متغیر تجربی	تنظیمات
نوع ژنراتور	پالس ISO
عمق اولیه محفظه <sup>۱</sup> (mm)	۳۰، ۲۰، ۱۰، ۰
قطبیت ابزار	مثبت
دی‌الکتریک	نفت سفید
نوع شستشو	جت سیال از بغل
گپ (mm)	۰/۰۱
شدت جریان (A)	۴۲
زمان روشنی پالس (μs)	۱۰۰
ولتاژ (V)	۸۰

### ۳- نتایج، بحث و بررسی

در این بخش نتایج حاصل از تحقیق ارائه و تأثیر عمق اولیه محفظه ماشین کاری بر روی مولفه‌های سلامتی سطح مورد بررسی قرار گرفته است.

#### ۳-۱- بررسی تأثیر عمق اولیه محفظه ماشین کاری بر روی ضخامت لایه سفید

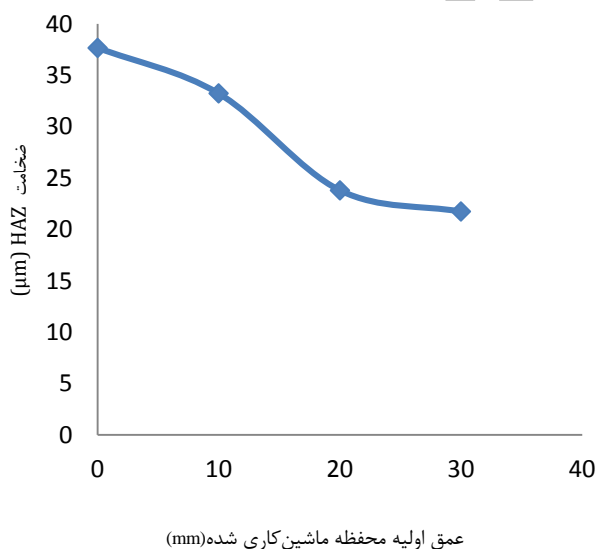
جدول ۴ مقادیر مؤلفه‌های سلامتی سطح، شکل ۳، تأثیر عمق اولیه محفظه ماشین کاری بر روی ضخامت لایه سفید و شکل‌های ۴-۷، تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) و ساختار میکروسکوپی لایه‌های سطحی در نمونه‌های ماشین کاری شده با عمق‌های اولیه مختلف در شدت جریان ۴۲ آمپر و زمان روشنی پالس ۱۰۰ میکروثانیه را نشان می‌دهند. همان‌طوری که مقادیر موجود در جدول ۴، شکل ۳ و تصاویر میکروسکوپ الکترونی در شکل‌های ۴-۷، نمایش می‌دهند، وقتی عمق اولیه محفظه ماشین کاری کم‌تر است، به دلیل بالا بودن انرژی تخلیه شده به سطح فولاد و تشکیل چاله‌های مذاب وسیع‌تر، ناحیه دوباره منجمد شده (لایه سفید) دارای ضخامت بیش‌تری می‌باشد، این در حالی است که با بالا رفتن عمق اولیه محفظه ماشین کاری ضخامت این لایه

2- White Layer Thickness  
3- Crack Density

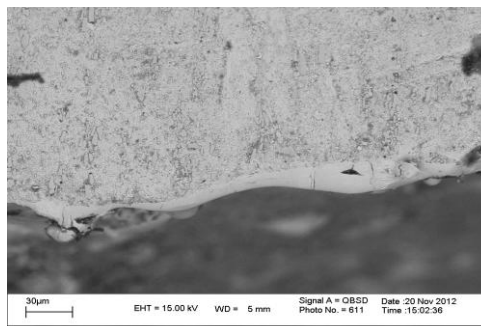
1-Primary Cavity Depth

### ۳-۲- بررسی تأثیر عمق محفظه بر روی ضخامت لایه متأثر از گرما

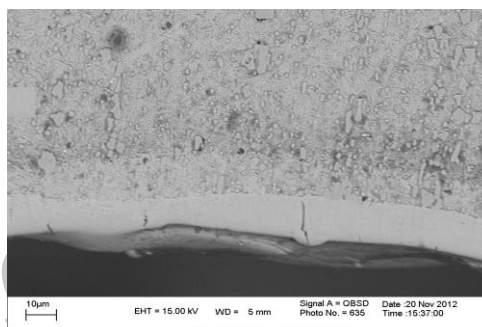
شکل ۸، تأثیر عمق اولیه محفظه ماشین کاری، بر روی ضخامت لایه متأثر از گرما و شکل های ۹-۱۲، تصویرهای میکروسکوپ الکترونی مربوط به نمونه های ماشین کاری شده در عمق های اولیه مختلف برای محفظه ماشین کاری جهت آشکارسازی لایه متأثر از گرما، در شدت جریان ۴۲ آمپر و زمان روشنی پالس ۱۰۰ میکروثانیه را نشان می دهند. همان طوری که شکل های مذکور نشان می دهند، با افزایش عمق اولیه محفظه، از مقدار ضخامت لایه متأثر از حرارت (HAZ) کاسته می شود. افزایش عمق اولیه محفظه ماشین کاری همراه با بیش تر شدن مقدار شدت جریان جرقه و زمان روشنی پالس، موجب ایجاد شرایط ناپایدار برای فرآیند می شود. لذا ناحیه ماشین کاری یا اصطلاحاً ناحیه گپ با بالا رفتن این پارامترها شدیداً آلوده می گردد، باتوجه به این که نوع و مقدار شست و شو ثابت انتخاب شده است، با افزایش پارامترهای ورودی مذکور، این نوع شست و شو توانایی خارج نمودن آلودگی ها از گپ را نداشته، لذا تعداد پالس های نرمال کاهش می یابد. همچنین، به علت آلودگی های منطقه ماشین کاری، مساحت سطح مقطع کانال پلاسما افزایش یافته و دانسیته انرژی حرارتی جرقه ها کم تر می شود و بدین طریق ضخامت لایه متأثر از حرارت کاهش می یابد.



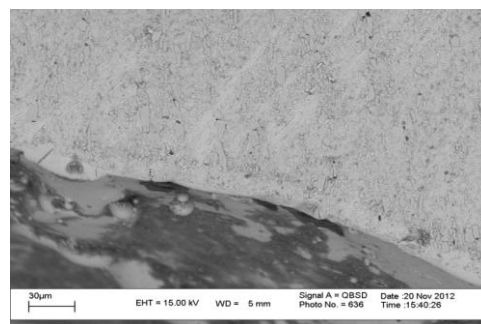
شکل ۸): تغییرات ناحیه متأثر از گرما بر حسب عمق اولیه محفظه (  $I=42A$  و  $Ton=100\mu s$  ).



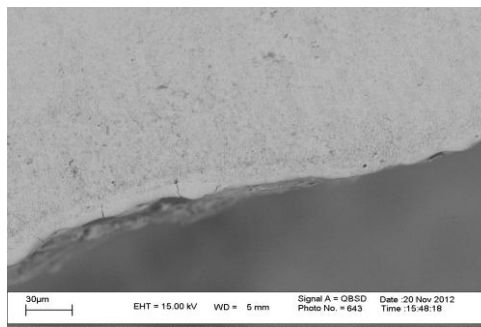
شکل ۴): تصویر SEM سطح مقطع ماشین کاری شده برای محفظه بدون عمق اولیه ( $I=42A$  &  $Ton=100\mu s$ ).



شکل ۵): تصویر SEM سطح مقطع ماشین کاری شده برای محفظه با عمق اولیه ۱۰ mm ( $I=42A$  &  $Ton=100\mu s$ ).

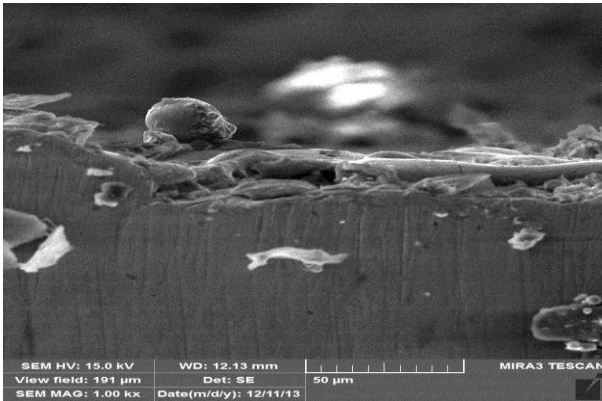


شکل ۶): تصویر SEM سطح مقطع ماشین کاری شده برای محفظه با عمق اولیه ۲۰ mm ( $I=42A$  &  $Ton=100\mu s$ ).

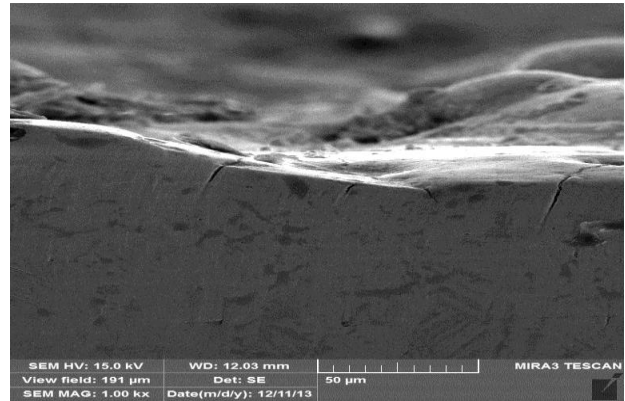


شکل ۷): تصویر SEM سطح مقطع ماشین کاری شده برای محفظه با عمق اولیه ۳۰ mm ( $I=42A$  &  $Ton=100\mu s$ ).





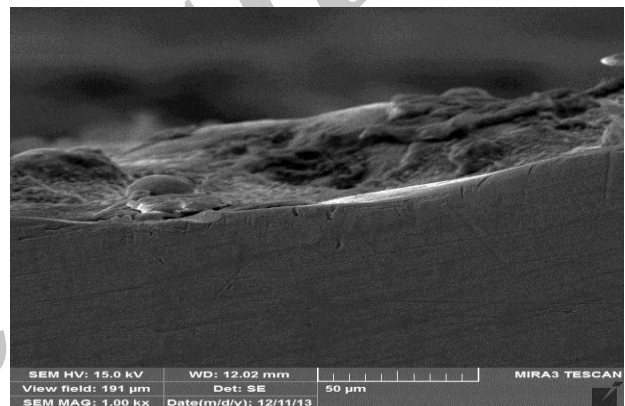
شکل (۱۲): تصویر SEM سطح مقطع ماشین کاری شده، جهت آشکارسازی HAZ برای محفظه با عمق اولیه ۳۰ mm ( $I=42A$  &  $Ton=100\mu s$ ).



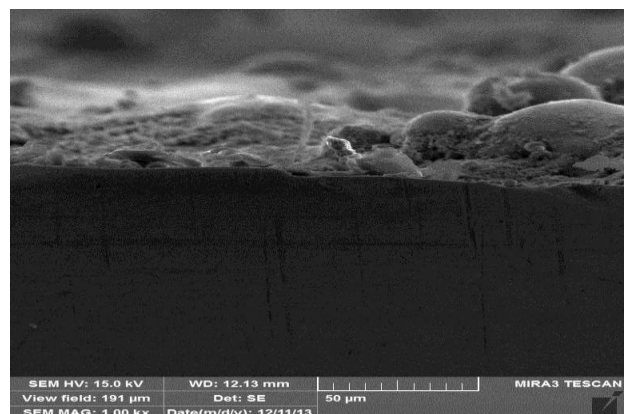
شکل (۹): تصویر SEM سطح مقطع ماشین کاری شده، جهت آشکارسازی HAZ برای محفظه بدون عمق اولیه ( $I=42A$  &  $Ton=100\mu s$ ).

### ۳-۳- بررسی تأثیر عمق اولیه محفظه ماشین کاری بر روی چگالی میکروتُرک‌های سطحی

بدیهی است پس از اتمام زمان روشنی پالس، مواد مذاب خیلی سریع سرد شده و به صورت غیرتعدادی منجمد می‌گردند، در نتیجه تنش‌های حرارتی خیلی بالایی در مواد دوباره منجمد شده سطحی ایجاد می‌شود. در صورتی که مقادیر این تنش‌ها که اکثراً از نوع کششی هستند، از استحکام شکست مواد منجمد شده بالاتر باشد، موجب ایجاد ترک‌های ریز سطحی می‌گردند [۷ و ۹]. جدول ۴، مقادیر مولفه‌های سلامتی سطح و شکل ۱۳، تأثیر عمق اولیه محفظه ماشین کاری بر روی چگالی میکروتُرک‌های سطحی (مجموع طول ترک‌ها تقسیم بر طول لبه نمونه آزمایش در تصویر SEM) در عمق‌های اولیه مختلف برای محفظه ماشین کاری، با شدت جریان ۴۲ آمپر و زمان روشنی پالس ۱۰۰ میکروثانیه را نشان می‌دهند. همان گونه که از شکل‌ها مشاهده می‌شود، با افزایش عمق اولیه محفظه ماشین کاری، دانسیته ترک‌ها کاهش می‌یابد. دلیل این مسئله را این گونه می‌توان بیان کرد که با توجه به این که با افزایش عمق اولیه محفظه ماشین کاری قطر کانال پلاسما افزایش می‌یابد، دانسیته انرژی حرارتی تخلیه شده به سطح کاهش یافته، لذا مقدار مواد مذاب ایجاد شده در ازای هر جرقه کم می‌شود. در نتیجه به دلیل ارتباط مستقیم مقدار مواد مذاب تولید شده در سطح ماشین کاری شده و تنش‌های سطحی به وجود آمده در اثر سریع سرد شدن این مواد، با افزایش عمق اولیه محفظه ماشین کاری از میزان میکروتُرک‌های سطحی کاسته می‌شود.



شکل (۱۰): تصویر SEM سطح مقطع ماشین کاری شده، جهت آشکارسازی HAZ برای محفظه با عمق اولیه ۱۰ mm ( $I=42A$  &  $Ton=100\mu s$ ).



شکل (۱۱): تصویر SEM سطح مقطع ماشین کاری شده، جهت آشکارسازی HAZ برای محفظه با عمق اولیه ۲۰ mm ( $I=42A$  &  $Ton=100\mu s$ ).

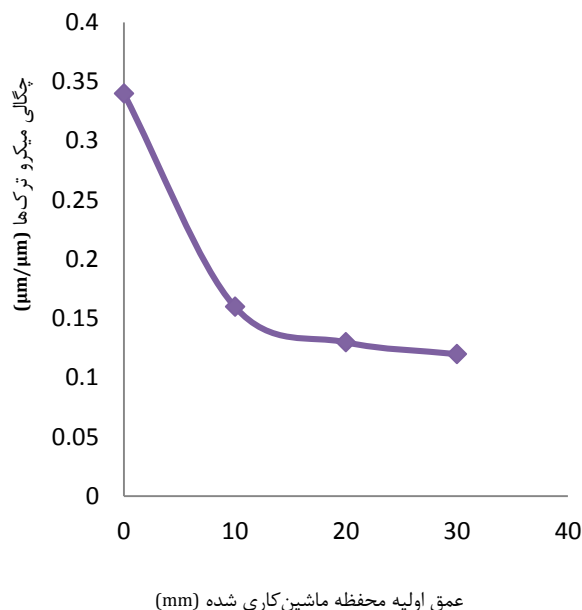
ضریب نفوذ اتمی بیشتر شده، لذا میزان نفوذ اتم‌های کربن در سطح افزایش می‌یابد [۹].

$$L \log D = \log D_0 - \frac{Q_d}{2.3R} \left( \frac{1}{T} \right) \quad (1)$$

**جدول (۵):** مقادیر میکروسختی سنجی در فواصل مختلف از سطح برای عمق‌های اولیه مختلف محفظه ماشین کاری (P.C.D) ( $I=42A$  &  $Ton=100\mu s$ )

P.C.D (mm)	فاصله از سطح ماشین کاری شده ( $\mu m$ )	میکروسختی (HRC)
	۲۰	۵۹/۷
	۷۰	۶۴/۲
	۱۲۰	۶۷/۵
	۱۷۰	۵۶/۵
	۲۲۰	۵۷/۲
۱۰	۲۰	۶۱
	۷۰	۶۲/۴
	۱۲۰	۶۲/۹
	۱۷۰	۶۰/۲
	۲۲۰	۵۹/۷
۲۰	۲۰	۵۶/۵
	۷۰	۵۸
	۱۲۰	۵۹/۲
	۱۷۰	۵۸/۷
	۲۲۰	۶۰/۱
۳۰	۲۰	۵۷/۵
	۷۰	۵۹/۵
	۱۲۰	۵۲/۶
	۱۷۰	۵۳/۷
	۲۲۰	۶۱/۳

افزایش مقدار کربن در اثر نفوذ آن از سیال دی‌الکتريک هیدروکربنی به شبکه کریستالی آهن موجب تولید آستنیت در لایه‌های سطحی می‌شود. مقدار تولید آستنیت در سطح وابسته به میزان نفوذ اتم‌های کربن می‌باشد. همان‌گونه که از این نمودارها می‌توان استنباط نمود در صورتی که شست‌وشوی ناحیه گپ مناسب باشد (عمق‌های کم ماشین کاری) به دلیل سریع سرد شدن لایه سطحی فولاد، فرصت برای تبدیل کامل آستنیت به فاز مارتنزیت محدود بوده و در نتیجه مقدار کم‌تری آستنیت به مارتنزیت تبدیل می‌شود و ساختار میکروسکوپی اغلب به صورت مارتنزیتی با آستنیت باقی‌مانده، خواهد بود. ولی با پیشروی در عمق، چون نرخ تبرید کاهش می‌یابد، فرصت کافی برای تشکیل فاز مارتنزیت در اثر حضور آهن گاما

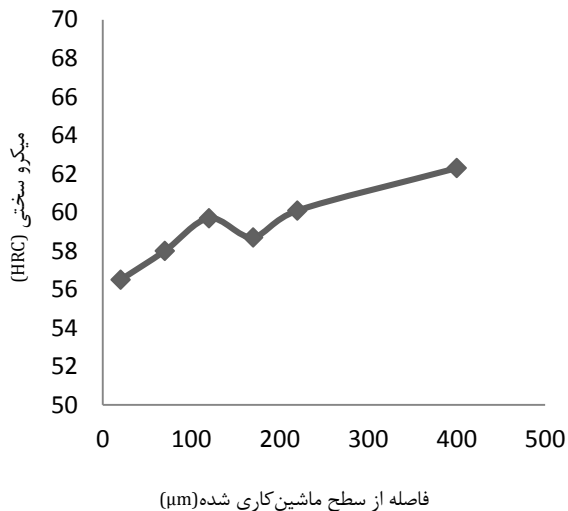


شکل (۱۳): تغییرات چگالی میکروترک‌ها بر حسب عمق اولیه محفظه ( $Ton=100\mu s$  و  $I=42A$ ).

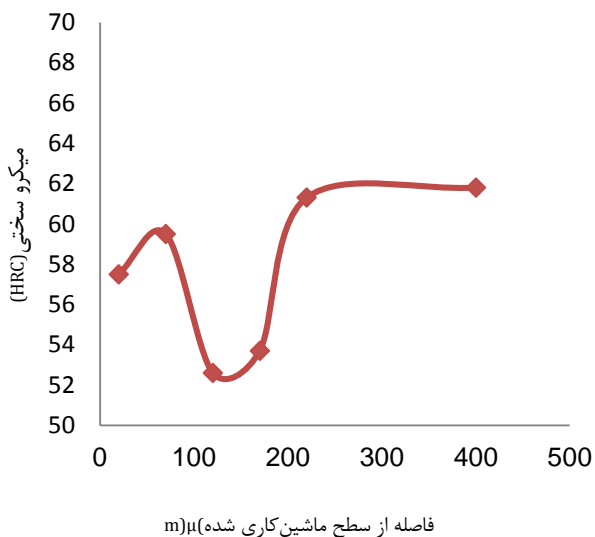
**۳-۴- بررسی تأثیر عمق اولیه محفظه ماشین کاری بر روی مقادیر میکروسختی سطح مقطع ماشین کاری شده**  
جدول ۵ نتایج حاصل از میکروسختی سنجی در فواصل مختلف از سطح ماشین کاری شده و شکل‌های ۱۷-۱۴، مقادیر میکروسختی سطح مقطع ماشین کاری شده در عمق‌های اولیه مختلف، با شدت جریان جرقه ۴۲ آمپر و زمان روشنی پالس ۱۰۰ میکروثانیه را نشان می‌دهند.

همان‌طور که شکل‌های مذکور نشان می‌دهند، در عمق‌های اولیه متفاوت مقدار میکروسختی در سطح قطعه کار کم‌تر است و به تدریج از سطح تا عمق مشخصی افزایش یافته و مجدداً با شیب زیادی کاهش می‌یابد. علت این امر را این‌چنین می‌توان توجیه نمود که، بعد از تشکیل کانال پلاسما پدیده ذوب، تبخیر سیال دی‌الکتريک و جوشش حجمی بستری مناسب از لحاظ دما و فشار برای بیش‌تر شدن مقدار کربن در سطح ماشین کاری شده را فراهم می‌آورد. به طوری که با نفوذ اتم کربن در درجه حرارت‌های بالا در اثر تجزیه و تبخیر دی‌الکتريک هیدروکربنی مقادیر قابل توجهی از کربن به سطح فولاد نفوذ می‌کند. بالا بودن زمان روشنی پالس و شدت جریان جرقه نیز عاملی برای افزایش انرژی جرقه و افزایش درجه حرارت کانال پلاسما است، مطابق رابطه (۱)، با توجه به رابطه مستقیم بین درجه حرارت و ضریب نفوذ اتمی، با افزایش درجه حرارت،





شکل (۱۶): مقادیر میکروسختی سطح ماشین کاری شده با عمق اولیه محفظه ۲۰ mm ( $I=42A$  &  $Ton=100\mu s$ ).



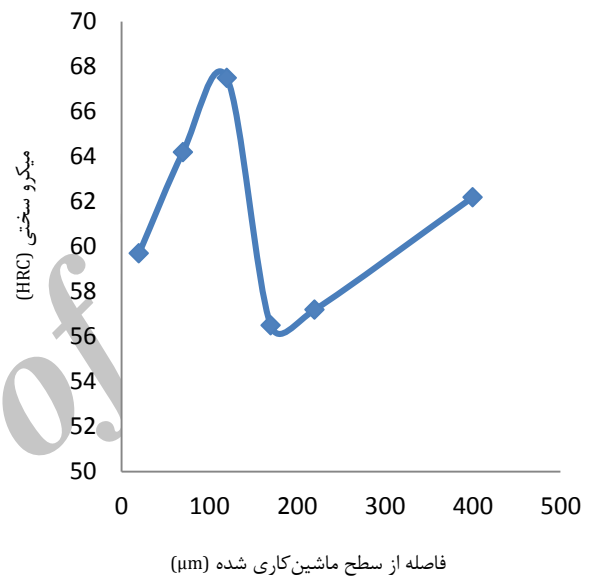
شکل (۱۷): مقادیر میکروسختی سطح ماشین کاری شده با عمق اولیه محفظه ۳۰ mm ( $I=42A$  &  $Ton=100\mu s$ ).

#### ۴- نتیجه گیری

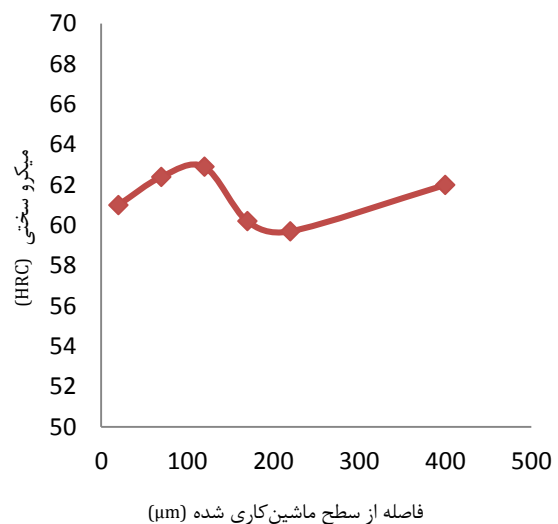
نتایج این پژوهش نشان می‌دهد رفتار فرآیند EDM تأثیرپذیری کاملاً محسوسی از عمق اولیه محفظه ماشین کاری دارد. به طور کلی نتایج این تحقیق را به صورت زیر می‌توان خلاصه نمود:

۱. با افزایش عمق اولیه محفظه ماشین کاری مقدار ضخامت لایه سفید کاهش می‌یابد.

به وجود آمده و در نتیجه بر میزان میکروسختی سطح مقطع ماشین کاری شده افزوده می‌شود [۷]. از طرفی با بیش تر شدن فاصله از سطح ماشین کاری شده، به دلیل کم شدن اثر نفوذ اتم‌های کربن، کاهش دمای منطقه و نرخ تبرید، به نوعی عملیات تمپرینگ (بازپخت) روی ساختار صورت می‌گیرد که در نتیجه آن، از مقدار سختی کاسته می‌شود. بعد از خروج از این ناحیه مقدار سختی در قسمت‌های داخلی سطح مقطع به مقدار سختی مواد پایه (فولاد عملیات حرارتی شده) سوق پیدا می‌کند [۹].



شکل (۱۴): مقادیر میکروسختی سطح ماشین کاری شده برای محفظه بدون عمق اولیه ( $I=42A$  &  $Ton=100\mu s$ ).



شکل (۱۵): مقادیر میکروسختی سطح ماشین کاری شده با عمق اولیه محفظه ۱۰ mm ( $I=42A$  &  $Ton=100\mu s$ ).

9. Boujelbene, M., Bayraktar, E., Tebni, W., and Ben Salem, S. "Influence of Machining Parameters on The Surface Integrity in Electrical Discharge Machining", International Scientific Journal Published Monthly by the World Academy of Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 37, No. 2, pp.110-116, 2009.
  10. Bemberg, R. and Heamawatanachai, S. "Orbital Electrode Actuation to Improve Efficiency of Drilling Micro Hole by Micro EDM", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, pp. 1826-1834, 2009.
  11. Huang, Y.K. "A Fast Inspection of Tool Electrode and Drilling Depth in EDM Drilling by Detection Line Algorithm", Sensors Journal, Vol. 8, No. 8, pp. 4866-4877, 2008.
  12. Ekmekci, B. "Residual Stresses and White Layer in Electric Discharge Machining (EDM)", Applied Science Journal, Vol. 253, pp. 9234-9240, 2007.
  13. Shabgard, M.R., Seyedzavvar, M.S., and Nadimi Babil Oliaei, S. "Influence of Input Parameters on the Characteristics of the EDM Process", Journal of Mechanical Engineering, Vol. 57, pp. 689-696, 2011.
  14. Lee, H.T. and Tai, T.Y. "Relationship between EDM Parameters and Surface Crack Formation, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 142, pp. 676-683, 2003.
  15. <http://www.bucorp.com>
۲. افزایش عمق اولیه محفظه ماشین کاری، باعث کاهش چگالی میکروتَرَک‌های سطحی می‌شود.
  ۳. بیشتر شدن عمق اولیه محفظه ماشین کاری موجب کاهش ضخامت لایه متأثر از گرما (HAZ) می‌گردد.
  ۴. بررسی مقادیر میکروسختی‌سنجی سطح مقطع قطعه‌کار ماشین کاری شده نشان می‌دهد، در عمق‌های اولیه متفاوت مقدار سختی در سطح ماشین کاری شده، کم‌تر از لایه‌های عمقی است.
  ۵. تغییرات میکروسختی در عمق‌های اولیه کم محفظه ماشین کاری، کمی بیش‌تر از عمق‌های زیاد است.

#### ۵- مراجع

1. Marafona, J.D. and Araujo, A. "Influence of Workpiece Hardness on EDM Performance", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 49, pp. 744-748, 2009.
2. Jabbaripour, B., Sadeghi, M.H., Shabgard, M.R., and Faraji, H. "Investigating Output Characteristics in Powder Mixed Electrical Discharge Machining of  $\gamma$ -TiAl Intermetallic", Modares Mechanical Engineering, Vol. 12, No. 5, pp. 74-86, 2012. (In Persian).
3. Kumar, S., Singh, R., Singh, T.p., and Sethi, B.I. "Surface Modification By Electrical Discharge Machining", Journal of Materials Processing Technology. Vol. 209, pp. 3675-3687, 2009.
4. Guu, Y.H., Hocheng, H., Chou, C.Y., and Deng, C.S. "Effect of Electrical Discharge Machining on Surface Characteristics and Machining Damage of AISI D2 tool Steel", Journal of Material Science and Engineering , Vol. 358, pp. 37-43, 2003.
5. Khandare, S.S. and Popat, M. "Experimental Investigations and Development of Empirical Model in Rotary Electro Discharge Machining Using Taguchi Methods", National Conference on Recent Trends in Engineering & Technology, 2011.
6. Oguzhan, Y. and Okka, M.A. "Effect of Single and Multi-Channel Electrodes Application on EDM Fast Hole Drilling Performance", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 51, pp. 185-195, 2010.
7. Yanzhen, Z.H., Yonghong, L., Renjie, J., and Baoping, C. "Study of The Recast Layer of A Surface Machined by Sinking Electrical Discharge Machining Using Water-in-Oil Emulsion as Dielectric", Applied Surface Science Journal, Vol. 257, pp. 5989-5997, 2011.
8. Reza, M.S., Hamdi, M., Tomadi, S.H., and Ismail, A.R. "Optimization of Control Parameters for EWR in Injection Flushing Type of EDM on Stainless Steel 304 Work Piece", World Academy of Science, Engineering and Technology journal, Vol. 72, pp. 386-388, 2010.