



## مطالعه تحلیلی و تجربی مکانیزم باربرداری در فرایند تراش کاری توسط تخلیه الکتریکی برش با سیم به کمک ارتعاشات آلتراسونیک

امین اله محمدی<sup>1\*</sup>، علیرضا فدایی تهرانی<sup>2</sup>، امیر عبدالله<sup>3</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

\* amin1@cc.iut.ac.ir, 84156-83111، اصفهان

### کلیدواژگان

تراش کاری تخلیه الکتریکی برش با سیم  
ارتعاشات آلتراسونیک  
تک جرقه  
چاله مذاب  
نرخ باربرداری

### چکیده

در فرایند تراش کاری تخلیه الکتریکی برش با سیم به کمک ارتعاشات آلتراسونیک افزایش نرخ باربرداری تا دو برابر را می‌توان به اثرهای جنبه‌های موج فشاری و مکشی در مایع دی‌الکتریک و لغزش کانال پلاسما ناشی از ارتعاش آلتراسونیک بر روی کانال پلاسما و چاله مذاب مربوط دانست. با مطالعه تحلیلی و تجربی یک تک جرقه، نیروها و عوامل مؤثر بر کانال پلاسما شامل نیروی لورنتس، افزایش فشار و یونیزاسیون بخار محیطی کانال پلاسما، کشیدگی کانال پلاسما در اثر حرکت جانبی سیم برش و ایجاد جنبه‌های موج فشار و مکش بر روی چاله مذاب در اثر ارتعاش آلتراسونیک بررسی شده است. آزمایش‌های لازم در پارامترهای متفاوت ماشین کاری ولتاژ و توان در حالت با و بدون استفاده از ارتعاشات آلتراسونیک انجام شده است. در اثر ارتعاش آلتراسونیک رشد حباب بخار کاهش یافته و دانسیته کانال پلاسما افزایش می‌یابد. دانسیته جریان الکتریکی نیز افزایش یافته و همچنین نرخ افت فشار در انتهای جرقه بیشتر می‌شود. در نتیجه هنگام قطع جرقه مقدار مواد بیشتری از چاله مذاب در اثر پدیده جوشش حجمی به بیرون پرتاب می‌شود. لغزش کانال پلاسما نیز موجب کشیدگی چاله مذاب بر روی سطح قطعه‌کار می‌شود. در نهایت، این عوامل باعث افزایش نرخ باربرداری شده است.

## Analytical and experimental study of material removal mechanism in turning process by ultrasonic-assisted wire electrical discharge

Aminollah Mohammadi<sup>1\*</sup>, Alireza Fadaei Tehrani<sup>1</sup>, Amir Abdullah<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

\* P.O.B. 84156-83111 Isfahan, Iran, amin1@cc.iut.ac.ir

### Keywords

Wire Electrical Discharge Turning  
Ultrasonic Vibration  
Single Discharge  
Molten Crater  
Material Removal Rate

### Abstract

The increased material removal rate in ultrasonic-assisted wire electrical discharge turning (by ~2 times) was attributed to compressive and rarefying wave front in dielectric and discharge column sliding into plasma channel and molten crater due to applying lateral ultrasonic vibration on the wire. A single discharge was analytically and experimentally studied and the effective forces and factors on plasma channel including Lorentz force, increase of pressure and surrounding vapor ionization of plasma channel, elongation of molten crater due to lateral displacement of wire and creation of positive and negative pressures of the ultrasonic wave on molten crater were investigated. Experiments were performed in different machining parameters of voltage and power with and without ultrasonic vibrations. By using ultrasonic vibration, the plasma density was increased due to decrease of bubble growth. The current density was increased and pressure drop in the end of discharge was increased. As a result, a great amount of the material was exploded out of the crater due to bulk boiling. The plasma channel sliding was elongated the molten crater on workpiece surface, which leads to material removal increase.

### 1- مقدمه

تخلیه الکتریکی برش با سیم و امواج آلتراسونیک، شکل‌های استوانه‌ای دقیق در مواد سخت و دشوار از لحاظ ماشین کاری با نرخ باربرداری بیشتر و ساختار سطح بهتر امکان‌پذیر می‌باشد [1].

در این تحقیق، مکانیزم باربرداری در فرایند تراش کاری تخلیه الکتریکی برش با سیم به کمک امواج آلتراسونیک توسط تحلیل یک تک جرقه بررسی شده است. با ترکیب فرایند تراش کاری

Please cite this article using:

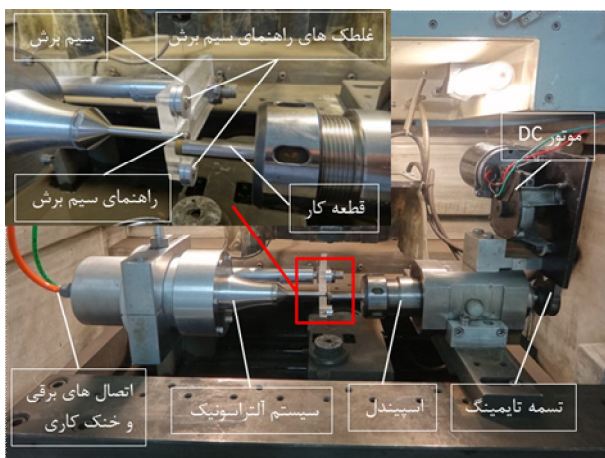
A. Mohammadi, A. Fadaei Tehrani, A. Abdullah, Analytical and experimental study of material removal mechanism in turning process by ultrasonic-assisted wire electrical discharge, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 3, No. 1, pp. 1-9, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

افزایش می‌یابد. شبگرد [6] با مطالعه عددی حباب گاز در فرایند تخلیه الکتریکی دریافت که با افزایش فشارهای محیطی میزان رشد حباب بخار کمتر و نرخ افت فشار در داخل آن نسبت به زمان بیشتر می‌شود. همچنین نرخ رشد پایین حباب بخار سبب افزایش دانسیته کانال پلاسما می‌گردد و در نهایت نرخ باربرداری افزایش می‌یابد. توسط چانگ<sup>3</sup> و همکارانش [7] رفتار حباب گاز به صورت سه بعدی در فرایند تخلیه الکتریکی شبیه سازی شده و اثر فاصله الکترودها مورد مطالعه قرار گرفته است. با بررسی‌های آن‌ها مشخص شد که فاصله کمتر الکترودها موجب افزایش فشار شده و فشار بالاتر بر روی مکان‌های تشکیل جرقه موجب بالاتر رفتن درجه فوق داغ مواد می‌شود و می‌تواند نرخ باربرداری را افزایش دهد. با افزایش فشار ناشی از ارتعاش آلتراسونیک مقدار دانسیته جریان الکتریکی بیشتر شده و نسبت توان آند به کاتد افزایش می‌یابد در نتیجه با پلاریته منفی (ابزار کاتد) نسبت سایش ابزار به قطعه کار کاهش می‌یابد [8].

## 2- وسایل و شرایط انجام آزمایش

در این مطالعه، آزمایش‌ها با نصب اسپیندل و سیستم آلتراسونیک بر روی یک ماشین وایرکات<sup>4</sup> انجام شده است. یک اسپیندل چرخشی دقیق، انعطاف پذیر و مقاوم در برابر خوردگی زیر آب طراحی و ساخته شده و بر روی یک ماشین وایرکات معمولی حداقل دو محوره به منظور تولید قطعات مدور نصب گردیده است. سیستم آلتراسونیک مناسب به منظور اعمال ارتعاش آلتراسونیک به سیم برش طراحی و ساخته شده است (شکل 1).



شکل 1 اسپیندل و سیستم آلتراسونیک بر روی دستگاه وایرکات

در فرایند تخلیه الکتریکی برش با سیم<sup>1</sup>، پالس‌های جرقه با مدت زمان تخلیه کوتاه و شدت جریان بالا استفاده می‌شود و جرقه حاصل در فضای بین سیم برش و قطعه کار (دو الکتروود) عامل باربرداری از هر دو می‌شود. این جرقه‌ها در نزدیکترین نقاط بین دو الکتروود به وقوع می‌پیوندند و در هر لحظه (کمتر از 50 میکرو ثانیه) غالباً یک جرقه بین دو الکتروود به وجود می‌آید. در این شرایط چاله جرقه با اندازه کوچک بر روی سطح قطعه کار ایجاد شده و زبری خاصی روی سطح ایجاد می‌شود. گرچه نرخ افزایش دما خیلی بالاست ولی به دلیل کوتاه بودن طول زمان جرقه (در جرقه‌های کوتاه تر از 0/1 میکرو ثانیه) ممکن است سطح اصابت جرقه به دمای ذوب هم نرسد [2]. برای ایجاد پالس‌های جرقه با چنین ویژگی از ژنراتور مقاومت-خازن<sup>2</sup> استفاده می‌شود [3]. در پالس‌های جرقه با مدت زمان روشنی بسیار کوتاه، بارهای منفی بیشتر از بارهای مثبت در پلاسما در حرکت هستند و در مرحله اولیه روشنی جرقه، جریان الکترون‌ها غالب می‌باشد. زیرا یون‌های مثبت که در حدود  $10^3-10^5$  مرتبه سنگین تر از الکترون‌ها هستند کمتر از الکترون‌ها قابلیت حرکت دارند. در ابتدای جرقه یون‌های مثبت کمتری سطح الکتروود منفی را بمباران می‌کند و بنابراین جریان الکترون‌ها عامل اصلی انرژی برای باربرداری در زمان‌های اولیه و کوتاه روشنی جرقه می‌باشد [4].

در فرایند تراش کاری توسط تخلیه الکتریکی برش با سیم با توجه به زمان کوتاه روشنی جرقه در حدود 2 میکروثانیه مکانیزم اصلی باربرداری به احتمال قوی انتشار الکترون‌ها از سمت کاتد (سیم برش) به سوی آند (قطعه کار) می‌باشد.

با تغییر فشار ناشی از ارتعاش آلتراسونیک بر روی کانال پلاسما در فرایند تخلیه الکتریکی نرخ باربرداری افزایش می‌یابد. بر اساس مطالعه‌های انجام شده [5-7] افزایش فشارهای محیطی بر سیال دی الکتریک و کانال پلاسما موجب افزایش نرخ باربرداری می‌شود. آقای ون دیچک [5] شعاع حباب بخار ایجاد شده در هر جرقه را برای مدت زمان‌ها و فشارهای محیطی مختلف محاسبه نمود. ایشان نشان داد که در فشارهای محیطی بیشتر، شعاع حباب بخار و نرخ رشد آن نسبت به زمان کمتر است و زمان فروپاشی حباب کمتر می‌شود. همچنین طبق بررسی‌های ایشان با افزایش فشارهای محیطی، فشار کانال پلاسما بیشتر می‌شود و در نتیجه در زمان قطع جرقه میزان نرخ افت فشار در داخل حباب بخار بیشتر شده و نرخ باربرداری

<sup>3</sup> Zhang  
<sup>4</sup> ONA R250

<sup>1</sup> Wire electrical discharge turning  
<sup>2</sup> RC

### 3- مدل تحلیلی برای ارزیابی فرایند

طرح کلی مدل تحلیلی برای تعیین عوامل مؤثر بر ابعاد چاله مذاب و نرخ باربرداری بر روی سطح قطعه کار تحت شرایط به کارگیری ارتعاشات آلتراسونیک شامل سه قسمت می باشد:

الف- مکانیزم باربرداری: با توجه به اینکه مدت زمان روشنی پالس در سیستم جرقه زنی مدار مقاومت-خازن دستگاه کوتاه می باشد، عامل اصلی باربرداری بر روی سطح قطعه کار انتشار الکترون ها از سیم برش (کاتد)، برخورد آن ها با سطح قطعه کار (آند) و گرمایش سطح آند در نظر گرفته شده است و در صورت اندک طولانی بودن مدت زمان جرقه احتمال وقوع ذوب و تبخیر وجود دارد.

ب- عوامل مؤثر بر باربرداری: در این مدل، نیروها و عوامل مؤثر بر حرکت الکترون ها شامل نیروی لورنتس<sup>3</sup> ناشی از جریان الکتریکی و تعامل با میدان مغناطیسی می باشد. افزایش دمای پلاسما (افزایش فشار و یونیزاسیون بخار محیطی کانال پلاسما)، کشیدگی کانال پلاسما در اثر حرکت جانبی سیم برش و ایجاد جبهه های موج فشار و مکش بر روی چاله مذاب در اثر ارتعاش آلتراسونیک بر مکانیزم باربرداری اثرگذار می باشند.

ج- معادلات حاکم بر فرایند: روابط میان افزایش شعاع کانال پلاسما در اثر فشار درونی و یونیزاسیون جداره بخار محیطی کانال پلاسما و نیروی دافعه بین الکترون ها و اثر متقابل کاهش قطر کانال یونیزه در اثر نیروی مغناطیسی بررسی شده است. مقدار کشیدگی کانال پلاسما و تغییر حجم چاله مذاب در اثر ارتعاش آلتراسونیک نیز تعیین گردیده است.

مدل حاصل می تواند برای پیش بینی نرخ باربرداری بر اساس مکانیزم باربرداری در فرایند تخلیه الکتریکی برش با سیم در سیستم جرقه زنی مقاومت-خازن به کمک امواج آلتراسونیک استفاده شود.

### 4- ارزیابی شعاع، کشیدگی و حجم چاله مذاب در اثر

#### ارتعاشات آلتراسونیک

بر اساس مطالعه ها و یافته ها، در فرایند تراش کاری توسط تخلیه الکتریکی برش با سیم عامل اصلی باربرداری انتشار الکترون ها از سمت کاتد (سیم برش) به سوی آند (قطعه کار) می باشد [2-4]. در این فرایند، هنگامی که الکترون ها از کاتد به سمت آند گسیل می شوند، عوامل اثرگذار بر روی شعاع کانال پلاسما نیروی لورنتس ناشی از میدان های الکتریکی و مغناطیسی، افزایش دما و نیز کشیدگی کانال پلاسما و جبهه موج فشاری و مکشی بر

سیستم انتقال امواج فراصوتی به سیم برش شامل یک راهنمای سیم برش استوانه ای شکل از جنس کاربید تنگستن سماتته طراحی و ساخته شده است. بر روی این راهنما، شیاری ایجاد گردیده که سیم برش از روی آن عبور کرده و ارتعاشات فراصوتی از طریق آن به سیم برش منتقل می شود. در این سیستم همانگونه که در شکل 1 نشان داده شده است، راهنمای سیم برش از ارتعاش ناخواسته سیم برش جلوگیری کرده و سیم برش توسط راهنمای خود مقید شده و در راستای محور قطعه- کار ارتعاش طولی خواهد داشت [9,10].

قطعه کار از جنس فولاد تندبر با قطر 24 میلی متر می باشد. به منظور مشاهده و اندازه گیری دقیق اثرهای جرقه، سطح قطعه کار قبل از انجام آزمایش ها با یک چرخ سنگ گرد دانه ریز پرداخت شده است. نمودار پالس های ولتاژ جرقه و مدت زمان تخلیه با استفاده از اسلیسکوپ 100 مگا هرتز<sup>1</sup> اندازه گیری شده است. شکل و ابعاد چاله مذاب با استفاده از دستگاه میکروسکوپ سه بعدی نوری<sup>2</sup> اندازه گیری شده است. شرایط و مقادیر پارامترهای ماشین کاری مطابق جدول 1 می باشند. در توان ها و ولتاژهای متفاوت مدت زمان تخلیه 2 میکروثانیه می باشد. سرعت نسبی میان قطعه کار و سیم برش به اندازه 117 متر بر دقیقه و مقدار زمان خاموشی پالس 12 میکروثانیه انتخاب شده است تا جرقه های متوالی بر روی سطح قطعه کار به اندازه کافی از هم جدا بوده و اندازه گیری و ارزیابی دقیق آن ها امکان پذیر باشد. شرایط و اندازه گیری ابعاد تک جرقه مطابق تحقیق قبلی می باشد [11].

جدول 1 پارامترهای تنظیمی برای بررسی تک جرقه

پارامتر	مشخصه	مقدار
زمان روشنی جرقه	$t_e$	2 ( $\mu s$ )
سطح توان (برآوردی از مقدار ماکزیمم جریان)	P	2, 3, 6
زمان خاموشی پالس	$t_o$	12 ( $\mu s$ )
ولتاژ مدار باز	V	100, 120, 130 (Volt)
جنس سیم برش	Brass BERCOCUT	Cu 63% Zn37%
قطر سیم برش	$d_w$	0/25 (mm)
سرعت دوران نسبی قطعه کار	$V_r$	117 (m/min)
پلاریته قطعه کار	آند	-
فرکانس ارتعاش آلتراسونیک	$f_{us}$	20000 (Hz)
دامنه نوسان آلتراسونیک	a	12/5 ( $\mu m$ )
سرعت انتشار صوت در دی الکتریک	$c_a$	1500 (m/s)
چگالی دی الکتریک	$\rho_0$	1000 ( $kg/m^3$ )

<sup>1</sup> CombiScope-HM1008

<sup>2</sup> CSM D3

<sup>3</sup> Lorentz force

روی چاله مذاب در اثر ارتعاش آلتراسونیک می‌باشند.

#### 1-4- گسترش شعاعی کانال پلاسما ناشی از نیروهای الکتریکی و مغناطیسی

موقعی که الکترون‌ها از سیم برش (کاتد) به سمت قطعه کار (آند) گسیل می‌شوند، مطابق شکل 2 میدان الکتریکی موجب ایجاد یک نیروی دافعه و افزایش قطر کانال پلاسما می‌شود. همچنین نیروی مغناطیسی، الکترون‌ها را به سمت مرکز کانال پلاسما متمرکز کرده و موجب کاهش قطر کانال پلاسما می‌شود. نیروی الکترومغناطیسی کل وارد بر بار متحرک در کانال پلاسما ناشی از میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی توسط معادله نیروی لورنتس بصورت رابطه (1) بیان می‌شود [12].

$$F = eE + e(v \times B) \quad (1)$$

با توجه به شکل 2، قسمت اول این معادله ناشی از نیروی دافعه الکتریکی موجب انبساط کانال پلاسما می‌شود و قسمت دوم آن ناشی از نیروی مغناطیسی در جهت شعاعی به سمت داخل کانال پلاسما موجب کاهش شعاع آن می‌شود. میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در کانال پلاسما از رابطه (2) بدست می‌آیند [12].

$$E = \frac{\mu_0 c_l^2 I}{2\pi r v}, B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (2)$$

شتاب شعاعی مرز الکترون‌ها ناشی از نیروهای الکتریکی و مغناطیسی به صورت رابطه (3) می‌باشد [13].

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{eE}{m_e} - \frac{e(v \times B)}{m_e} \quad (3)$$

در نهایت شتاب شعاعی مرز الکترون‌ها موقع انتشار از سیم برش (کاتد) به سوی قطعه کار (آند) به صورت رابطه (4) می‌باشد.

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{\mu_0 e I}{2\pi m_e} \left( \frac{c_l^2 - v^2}{v} \right) \frac{1}{r} \quad (4)$$

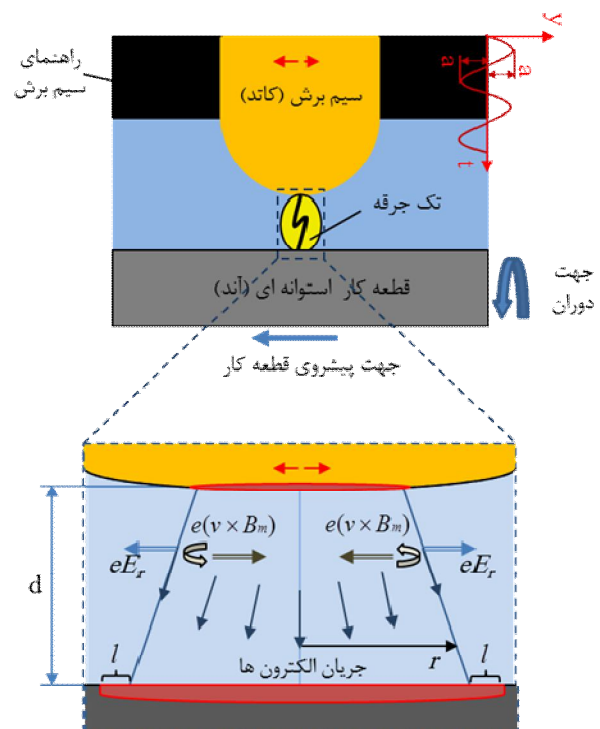
#### 2-4- اثر ارتعاشات آلتراسونیک بر کشیدگی کانال پلاسما

طبق تحقیقات انجام شده [14-16] در فرایند تخلیه الکتریکی، لغزش کانال پلاسما در اثر سرعت نسبی میان دو الکتروود موجب کشیدگی چاله مذاب و افزایش نرخ باربرداری می‌شود. در زمان‌های کم جرقه، با افزایش سرعت نسبی میان قطعه کار و ابزار، حجم ماده برداشته شده از آند بیشتر از کاتد می‌باشد و در نتیجه نسبت سایش کاتد کاهش می‌یابد [14]. در شرایط متفاوت جرقه با جریان و زمان‌های مختلف روشنی جرقه در فرایند تخلیه الکتریکی برش با سیم افزایش سرعت نسبی میان قطعه کار و سیم برش موجب افزایش کشیدگی چاله مذاب و نرخ باربرداری می‌شود [15,16].

ارتعاش آلتراسونیک راهنمای سیم برش موجب جابجایی سیم برش (کاتد) در راستای طولی قطعه کار شده و کانال پلاسما بر روی سطح قطعه کار (آند) کشیده می‌شود. بنابراین چاله مذاب در جهت ارتعاش آلتراسونیک بر روی سطح قطعه کار کشیده خواهد شد. سرعت جابجایی سیم برش در راستای طولی قطعه کار به صورت رابطه (5) می‌باشد.

$$\frac{dl}{dt} = \omega a \cos(\omega t) \quad (5)$$

در فرایند تخلیه الکتریکی برش با سیم، سرعت جابجایی کانال پلاسما بر روی سطح قطعه کار (آند) با سرعت نسبی میان سیم برش و قطعه کار برابر می‌باشد [15]. در نتیجه در اثر اعمال ارتعاش آلتراسونیک به سیم برش، سرعت کشیدگی کانال پلاسما با سرعت سیم برش (کاتد) برابر می‌باشد. اثر نیروی لورنتس در دو حالت با و بدون ارتعاش آلتراسونیک وجود دارد، بنابراین کشیدگی چاله مذاب بر روی سطح قطعه کار (آند) در اثر سرعت جانبی سیم برش حاصل از ارتعاش آلتراسونیک در جهت اعمال ارتعاش به وجود می‌آید. سرعت کشیدگی کانال پلاسما در جهت ارتعاش آلتراسونیک از رابطه (5) بدست می‌آید. با در نظر گرفتن مقادیر جدول 1، مقدار ماکزیمم جابجایی جانبی کانال پلاسما و در نتیجه ماکزیمم کشیدگی چاله مذاب در راستای ارتعاش



شکل 2 شماتیک منطقه گپ و عوامل مؤثر بر گسترش شعاع کانال پلاسما در تراش کاری تخلیه الکتریکی برش با سیم به کمک ارتعاش آلتراسونیک

آلتراسونیک از رابطه (6) بدست می‌آید.

$$\begin{aligned} l_{max} &= 2\pi f_{us} a t_e \\ l_{max} &= 3.14 (\mu\text{m}) \end{aligned} \quad (6)$$

آلتراسونیک به دفع مواد از چاله مذاب و گپ ماشینکاری کمک می‌کند. در نتیجه می‌توان یکی از عوامل افزایش حجم ماده برداشته شده از سطح قطعه کار به ازای هر پالس را به تغییر فشار در اثر ارتعاش آلتراسونیک مربوط دانست.

### 3-4- اثر ارتعاشات آلتراسونیک بر حجم چاله مذاب

طبق تحقیق‌های انجام شده [18,17,5,3] افت چشمگیر فشار در انتهای جرقه و در نتیجه جوشش حجمی از عوامل اصلی باربرداری در فرایند تخلیه الکتریکی می‌باشد. فشار بالای حباب گاز در ناحیه گپ می‌تواند عامل باربرداری در فرایند تخلیه الکتریکی باشد [3]. در انتهای جرقه با قطع جریان و افت ناگهانی فشار، مواد فوق داغ از داخل چاله مذاب به صورت مایع و یا بخار در اثر جوشش حجمی به بیرون رانده می‌شوند [17,5]. مدل ارائه شده برای نرخ باربرداری توسط آقای یو<sup>1</sup> و همکارانش [18] بر اساس برداشت مواد مذاب در اثر شوک‌های ایجاد شده در انتهای جرقه می‌باشد.

در اثر ارتعاشات آلتراسونیک جبهه‌های موج فشاری و مکشی در ناحیه گپ ماشینکاری ایجاد شده و در اثر آن‌ها بر روی چاله مذاب فشار و مکش ایجاد می‌شود. ذرات در سیال دی‌الکتریک در راستای انتشار امواج آلتراسونیک نوسان می‌کنند. فشار ایجاد شده در اثر انتشار امواج آلتراسونیک در دی‌الکتریک از رابطه (7) بدست می‌آید [19].

$$\begin{aligned} p_{us} &= a c_a \rho_0 \omega \cos \omega \left( t - \frac{x}{c_a} \right) \\ p_{us} &= 2\pi f_{us} a c_a \rho_0 \cos \left( 2\pi f_{us} \left( t - \frac{x}{c_a} \right) \right) \end{aligned} \quad (7)$$

با توجه به مقادیر جدول 1 و رابطه (7) مقدار فشار ماکزیمم در اثر اعمال ارتعاش آلتراسونیک از رابطه (8) محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} p_{us/\max} &= 2\pi f_{us} a c_a \rho_0 \\ p_{us/\max} &= 2.356 \text{ (MPa)} \end{aligned} \quad (8)$$

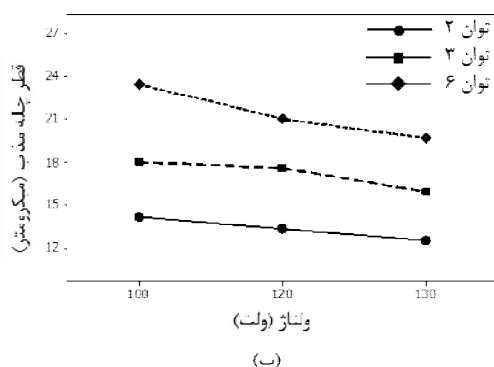
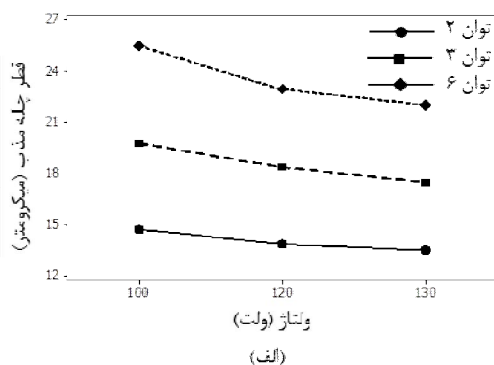
موقع تشکیل جرقه در اثر اعمال ارتعاش آلتراسونیک نسبت به موقعیت مرکز ستون پلاسما در جهت حرکت سیم برش و جلوی آن جبهه موج فشاری و در عقب سیم برش جبهه موج مکشی ایجاد می‌شود. در نتیجه بر روی یک قسمت از چاله مذاب فشار و بر قسمت دیگر مکش ایجاد می‌شود.

بنابراین انتظار می‌رود موقع افزایش فشار ناشی از ارتعاش آلتراسونیک نرخ افت فشار نیز افزایش یافته و جوشش حجمی بیشتر شود و نرخ باربرداری افزایش یابد [6,5]. با اعمال ارتعاش آلتراسونیک و تغییر فشار ناشی از آن بر روی کانال پلاسما، مقادیر دمای نقطه جوش و حجم ذوب و تبخیر ماده تغییر می‌کند [7]. همچنین جبهه موج مکشی ناشی از ارتعاش

## 5- بحث

### 1-5- اثرهای ارتعاش آلتراسونیک بر روی شعاع و کشیدگی چاله مذاب

در این تحقیق، در اثر اعمال ارتعاش آلتراسونیک در شرایط متفاوت پارامترهای ماشینکاری ولتاژ و توان، مقدار کشیدگی چاله مذاب در جهت ارتعاش آلتراسونیک اندازه‌گیری شده است. در شکل 3 نشان داده شده است که در حالت بدون ارتعاش آلتراسونیک با افزایش ولتاژ از 100 تا 130 ولت قطر چاله مذاب بطور متوسط حدود 16 درصد کاهش یافته است. شکل 3 نشان می‌دهد در حالت اعمال ارتعاش آلتراسونیک و با افزایش ولتاژ از 100 تا 130 ولت، کاهش قطر چاله مذاب در جهت ماکزیمم کشیدگی حدود 14 درصد می‌باشد.



شکل 3 قطر متوسط چاله مذاب نسبت به ولتاژ، (الف) - با و (ب) - بدون بکارگیری ارتعاش آلتراسونیک

در حالت با و بدون ارتعاش آلتراسونیک، با افزایش ولتاژ سرعت رانش الکترون‌ها ( $v$ ) افزایش یافته و طبق رابطه (4) شتاب

<sup>1</sup> Ye0

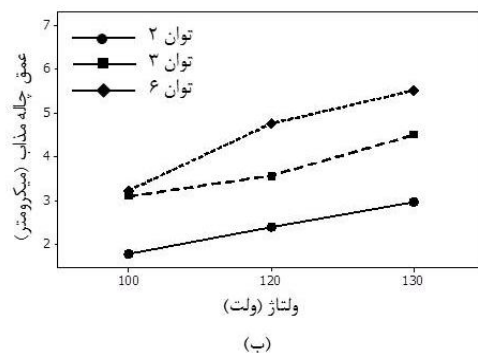
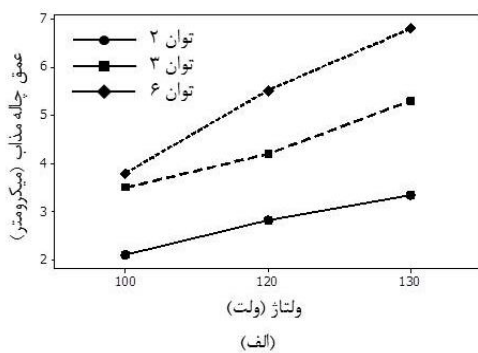
در این تحقیق با مقادیر متفاوت ولتاژ و جریان در اثر سرعت نسبی میان سیم برش و قطعه کار ناشی از ارتعاش آلتراسونیک ماکزیمم کشیدگی چاله مذاب بر روی سطح قطعه کار (آند) در راستای ارتعاش آلتراسونیک در حدود  $2/98$  میکرومتر می‌باشد و با مقدار ماکزیمم  $3/14$  میکرومتر بدست آمده از رابطه (6) تطابق مناسبی دارد. بنابراین از عوامل افزایش نرخ باربرداری در این فرایند می‌تواند کشیدگی چاله مذاب ناشی از ارتعاش آلتراسونیک باشد.

### 5-2- اثرهای ارتعاشات آلتراسونیک بر روی عمق و حجم چاله مذاب

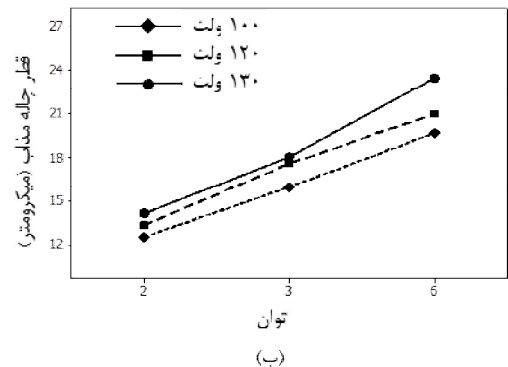
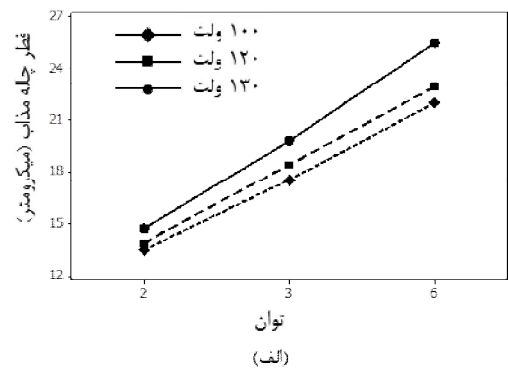
مقدار متوسط عمق چاله مذاب با افزایش ولتاژ از 100 تا 130 ولت و با اعمال ارتعاش آلتراسونیک حدود 160 درصد و بدون ارتعاش آلتراسونیک حدود 70 درصد افزایش یافته است (شکل 5). همچنین با افزایش سطح توان از 2 تا 6 نیز عمق چاله مذاب در حدود 180 درصد با اعمال ارتعاش آلتراسونیک و حدود 75 درصد بدون ارتعاش آلتراسونیک افزایش یافته است (شکل 6). با افزایش ولتاژ و توان (برآوردی از ماکزیمم جریان)، انرژی جرقه افزایش می‌یابد. با افزایش انرژی جرقه عمق چاله مذاب افزایش می‌یابد.

گسترش کانال پلاسما کاهش یافته و در نتیجه قطر کانال پلاسما و همچنین قطر چاله مذاب کاهش می‌یابد. هر چند در حالت استفاده از ارتعاش آلتراسونیک و با افزایش ولتاژ قطر کانال پلاسما و در نتیجه قطر چاله مذاب کاهش یافته است، اما با اعمال ارتعاش آلتراسونیک مواد بیشتری از چاله مذاب خارج شده است، بنابراین در این حالت قطر چاله مذاب کاهش کمتری نسبت به حالت بدون ارتعاش آلتراسونیک دارد.

از طرف دیگر با افزایش سطح توان از 2 تا 6 قطر چاله مذاب بطور متوسط حدود 65 درصد در حالت بدون استفاده از ارتعاش آلتراسونیک افزایش یافته است. همچنین قطر چاله مذاب با اعمال ارتعاش آلتراسونیک در جهت ماکزیمم کشیدگی در حدود 73 درصد افزایش یافته است (شکل 4). با افزایش توان، جریان الکتریکی در کانال پلاسما زیادتر شده و طبق رابطه (4) شتاب گسترش کانال پلاسما افزایش می‌یابد. در نتیجه قطر کانال پلاسما و در نهایت قطر چاله مذاب بر روی سطح قطعه کار (آند) افزایش یافته است. در این حالت نیز با اعمال ارتعاش آلتراسونیک مواد بیشتری از چاله مذاب در اثر ارتعاش آلتراسونیک خارج شده است و در این حالت شعاع چاله مذاب افزایش بیشتری نسبت به حالت بدون ارتعاش آلتراسونیک دارد.

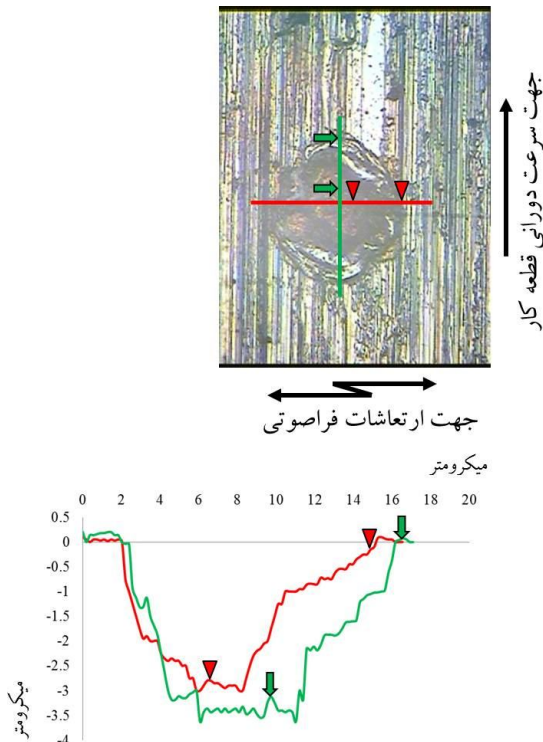


شکل 5 عمق متوسط چاله مذاب نسبت به ولتاژ، (الف) - با و (ب) - بدون بکارگیری ارتعاش آلتراسونیک

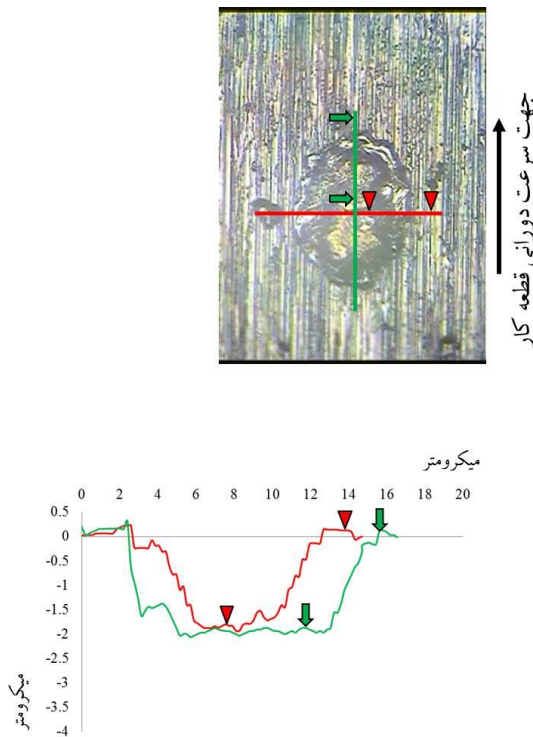


شکل 4 قطر متوسط چاله مذاب نسبت به توان، (الف) - با و (ب) - بدون بکارگیری ارتعاش آلتراسونیک

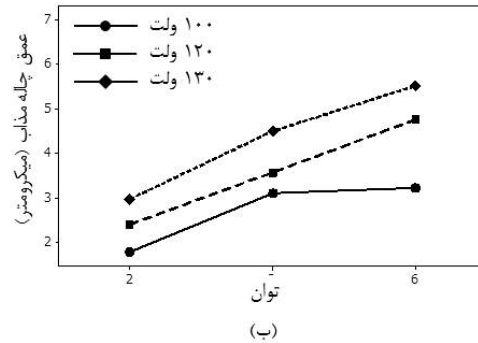
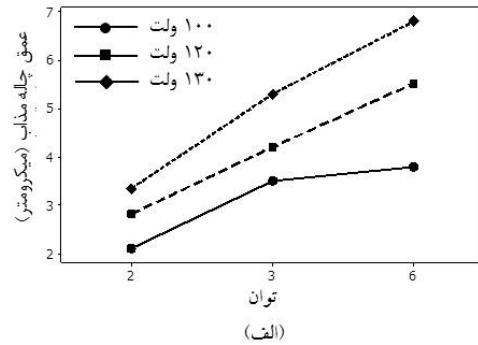
آلتراسونیک به دفع مواد از چاله مذاب و گپ ماشین کاری کمک می کند. بنابراین با اعمال ارتعاش آلتراسونیک در حالت فشاری و مکشی حجم چاله مذاب افزایش می یابد.



شکل 7 تصویر چاله مذاب و پروفیل سطح مقطع آن بر روی سطح قطعه کار با اعمال ارتعاش آلتراسونیک (ولتاژ 120 ولت، توان 3)



شکل 8 تصویر چاله مذاب و پروفیل سطح مقطع آن بر روی سطح قطعه کار بدون ارتعاش آلتراسونیک (ولتاژ 120 ولت، توان 3)



شکل 6 عمق متوسط چاله مذاب نسبت به توان، (الف) - با و (ب) - بدون بکارگیری ارتعاش آلتراسونیک

با اعمال ارتعاش آلتراسونیک در اثر فشار و مکش ایجاد شده بر روی چاله مذاب، جوشش حجمی و تخلیه مواد مذاب بیشتر شده و در نتیجه عمق چاله مذاب افزایش بیشتری نسبت به حالت بدون ارتعاش آلتراسونیک دارد.

یک نمونه از چاله مذاب و پروفیل های سطح مقطع آن با اعمال ارتعاش آلتراسونیک در شکل 7 نشان داده شده است. پروفیل های سطح مقطع چاله مذاب در راستای ارتعاش آلتراسونیک و عمود بر آن (در جهت سرعت دورانی قطعه کار) اندازه گیری و ترسیم شده است. ارتعاش آلتراسونیک موجب افزایش عمق چاله مذاب و همچنین کشیدگی قطر آن در جهت ارتعاش آلتراسونیک نسبت به حالت بدون ارتعاش آلتراسونیک شده است (شکل 8). نتایج بدست آمده از تحلیل جرقه ها بر روی سطح قطعه کار نشان می دهد که در اثر اعمال ارتعاش آلتراسونیک، عمق چاله مذاب بیشتر می باشد. حجم چاله مذاب در دو حالت با و بدون ارتعاش آلتراسونیک اندازه گیری شده است. با اعمال ارتعاش آلتراسونیک حجم چاله مذاب افزایش یافته است (شکل 9). در این تحقیق طبق رابطه (8) ماکزیمم تغییر فشار ناشی از ارتعاش آلتراسونیک  $2/356$  مگاپاسکال می باشد. در اثر این تغییر فشار، مقادیر دمای نقطه جوش و حجم ذوب و تبخیر ماده تغییر می کند. همچنین موقع افزایش فشار ناشی از ارتعاش آلتراسونیک نرخ افت فشار افزایش یافته و جوشش حجمی بیشتر می شود و نیز جبهه موج مکشی ناشی از ارتعاش

کمک می‌کند. در نتیجه هنگام قطع جرقه مقدار مواد بیشتری از چاله مذاب در اثر پدیده جوشش حجمی به بیرون پرتاب شده و ماکزیمم عمق چاله مذاب تا 180 درصد افزایش یافته است. در اثر کشیدگی و افزایش عمق چاله مذاب ناشی از ارتعاش آلتراسونیک نرخ باربرداری تا دو برابر افزایش یافته است.

## 7- فهرست علائم

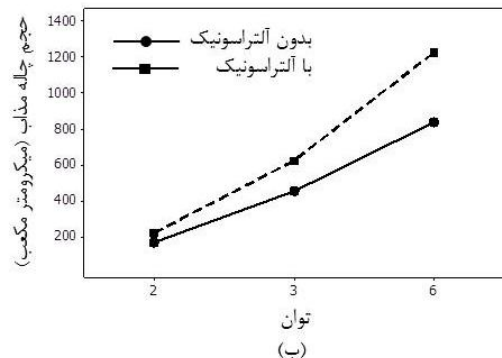
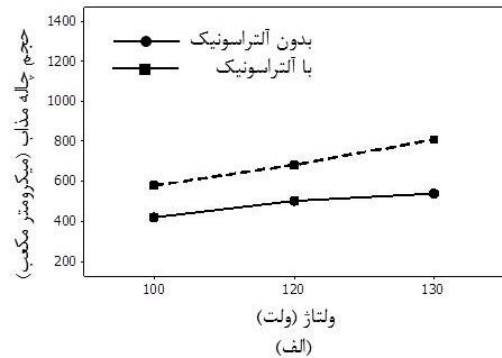
$F$	نیروی لورنتس (N)
$e$	بار الکتریکی یک الکترون (C)
$E$	میدان الکتریکی ( $NC^{-1}$ )
$B$	میدان مغناطیسی (T)
$I$	شدت جریان (A)
$n$	جرم یک الکترون (Kg)
$c_i$	سرعت نور در خلاء (m)
$v$	سرعت رانش الکترون ( $ms^{-1}$ )
$f_i$	فرکانس ارتعاشی آلتراسونیک (Hz)
$a$	دامنه نوسان ( $\mu m$ )
$x$	فاصله از منبع انتشار موج (m)
$c_i$	سرعت صوت در سیال ( $ms^{-1}$ )

## علائم یونانی

$\mu$	نفوذ پذیری مغناطیسی در خلاء ( $Hm^{-1}$ )
$\alpha$	فرکانس زاویه ای ( $rads^{-1}$ )
$\rho$	چگالی سیال ( $Kgm^{-3}$ )

## 8- مراجع

- [1] A. Mohammadi, *Theoretical and Experimental Analysis of Ultrasonic-Assisted Wire Electrical Discharge Turning Process*, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, 2014. (in Persian)
- [2] A. Abdullah, *Voltage injection and performance evaluation in EDM*, PhD Thesis, The Victoria University of Manchester, UK, 1981.
- [3] M. Kunieda, B. Lauwers, K. P. Rajurkar, B. M. Schumacher, *Advancing EDM through Fundamental Insight into the Process*, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 54, No. 2, pp. 64-87, 2005.
- [4] E. C. Jameson, *Electrical Discharge Machining*: Society of Manufacturing Engineers, Machining Technology Association, 2001.
- [5] F. V. Dijk, *Physico-Mathematical Analysis of the EDM process*, Ph.D. Thesis, Catholic University of Leuven, 1973.



شکل 9 حجم متوسط چاله مذاب با و بدون ارتعاش آلتراسونیک نسبت به (الف) - ولتاژ و (ب) - توان

## 6- نتیجه گیری

در این تحقیق، با مطالعه تجربی تک جرقه و تحلیل آن، درک بهتری از اثرهای مطلوب استفاده از ارتعاش آلتراسونیک بر روی مکانیزم باربرداری در فرایند تراش کاری تخلیه الکتریکی برش با سیم بدست آمده است. در فرایند تخلیه الکتریکی برش با سیم، اعمال ارتعاش آلتراسونیک موجب کشیدگی چاله مذاب و افزایش عمق آن می‌شود. ماکزیمم کشیدگی چاله مذاب بر روی سطح قطعه کار (آند) در راستای ارتعاش آلتراسونیک در حدود  $2/98$  میکرومتر اندازه‌گیری شده و با مقدار ماکزیمم  $3/14$  میکرومتر بدست آمده از رابطه تحلیلی تطابق مناسبی دارد. همچنین ارتعاش آلتراسونیک موجب ایجاد جبهه موج فشار و مکش در کانال پلاسما و بر روی چاله مذاب می‌شود. نتایج بررسی‌های تجربی بر روی چاله مذاب و تحلیل‌های انجام شده نشان می‌دهند که در موقعیت جبهه موج فشاری در اثر کاهش رشد حباب بخار و افزایش دانسیته کانال پلاسما، نرخ بیشتر افت فشار در انتهای جرقه و افزایش دانسیته جریان الکتریکی میزان مذاب به ازای هر جرقه بیشتر شده، دمای تبخیر محتویات کانال پلاسما افزایش یافته و توان صرف شده بر روی سطح قطعه کار بیشتر می‌شوند. همچنین در موقعیت جبهه موج مکشی، مکش ناشی از ارتعاش آلتراسونیک نیز به دفع مواد از گپ و چاله مذاب



- [12] D. K. Cheng, *Field and wave electromagnetics*, Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1992.
- [13] P. Govindan, A. Gupta, S. S. Joshi, A. Malshe, K. P. Rajurkar, Single-spark analysis of removal phenomenon in magnetic field assisted dry EDM, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 213, No. 7, pp. 1048-1058, 2013 .
- [14] M. Kunieda, A. Kameyama, Study on decreasing tool wear in EDM due to arc spots sliding on electrodes, *Precision Engineering*, Vol. 34, No. 3, pp. 546-553, 2010 .
- [15] E. Weingärtner, K. Wegener, F. Kuster, Wire electrical discharge machining applied to high-speed rotating workpieces, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, No. 6, pp. 1298-1304, 2012 .
- [16] E. Weingärtner, K. Wegener, F. Kuster, Influence of Workpiece Circumferential Speed in Wire Electrical Discharge Machining, *Procedia CIRP*, Vol. 6, No. 1, pp. 238-243, 2013 .
- [17] B. M. Schumacher, After 60 years of EDM the discharge process remains still disputed, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 149, No. 1-3, pp. 376-381, 2004 .
- [18] S. H. Yeo, W. Kurnia, P. C. Tan, Critical assessment and numerical comparison of electro-thermal models in EDM, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 203, No. 1-3, pp. 241-251, 2008 .
- [19] L. D. Rozenberg, *Ultrasonic cutting*: Consultants Bureau, 1964 .
- [6] M. R. Shabgard, *Machining characteristics of tungsten carbide (WC-Co) using ultrasonic assisted EDM*, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Tabriz university, 2006 (in Persian فارسی)
- [7] Y. Zhang, Y. Liu, R. Ji, C. Zheng, Y. Shen, X. Wang, Transient dynamics simulation of the electrical discharge-generated bubble in sinking EDM, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 68, No. 5-8, pp. 1707-1715, 2013.
- [8] D. Ghiculescu, N. I. Marinescu, G. Jitianu, G. Seritan, On precision improvement by ultrasonics-aided electrodischarge machining, *Estonian Journal of Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 24-33, 2009 .
- [9] A. Mohammadi, A. F. Tehrani, A. Abdullah, Introducing a New Technique in Wire Electrical Discharge Turning and Evaluating Ultrasonic Vibration on Material Removal Rate, *Procedia CIRP*, Vol. 6, No. 1, pp. 584-589, 2013 .
- [10] A. Mohammadi, A. Tehrani, A. Abdullah, Investigation on the effects of ultrasonic vibration on material removal rate and surface roughness in wire electrical discharge turning, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 70, No. 5-8, pp. 1235-1246, 2014.
- [11] A. Mohammadi, A. Fadaei Tehrani, A. Abdullah, M. Danesh, Investigation of ultrasonic-assisted wire electrical discharge turning based on single discharge analysis, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 228, No. 11, pp. 1372-1380, 2014 .