



# ارزیابی و بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر عمق کشش در فرآیند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی (با استفاده از سیم بین الکترودها)

مهدی ظهور<sup>1\*</sup>، سید میثم موسوی<sup>2</sup>

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران

2- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران

\* تهران، صندوق پستی 19395-1999، mzhoor@kntu.ac.ir

## چکیده

امروزه روش‌های شکل‌دهی با سرعت بالا به دلیل توانائی آن‌ها در بهبود شکل‌پذیری مواد مختلف در مقایسه با روش‌های سنتی، مورد توجه شرکت‌های صنعتی قرار گرفته است. شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی یک فرآیند شکل‌دهی ورق فلزی با سرعت بالا است که در آن دو الکترود در محفظه‌ای پر از آب قرار دارند و تخلیه الکتریکی با ولتاژ بالا بین آن‌ها، فشار بالائی جهت شکل دادن ورق ایجاد می‌کند. در این تحقیق جهت بررسی پارامترهای مؤثر در شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی (با استفاده از سیم بین الکترودها)، آزمایش‌های تجربی گسترده‌ای با استفاده از تکنیک طراحی آزمایش‌ها طراحی گردیده است. انرژی تخلیه، جنس، طول و قطر سیم بین دو الکترود به‌عنوان متغیرهای ورودی مؤثر فرآیند در نظر گرفته شده‌اند. مدل‌سازی و بهینه‌سازی به روش سطح پاسخ برای بهبود عملکرد فرآیند (از نظر عمق کشش)، بر روی ورق برنجی 260 صورت پذیرفته است. با توجه به نتایج آزمایش‌ها می‌توان اظهار داشت بیشترین عمق کشش وقتی به دست می‌آید که انرژی تخلیه بیشینه باشد. سیم آلومینیومی در مقایسه با سیم مسی و تنگستن، کارآمدتر می‌باشد. همچنین برای طول و قطر سیم بین الکترودها، یک مقدار بهینه وجود دارد که با توجه به شرایط آزمایش تعیین می‌شوند.

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 03 خرداد 1396  
پذیرش: 05 مرداد 1396  
ارائه در سایت: 17 شهریور 1396  
کلید واژگان:  
فرآیند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی  
پارامترهای مؤثر  
عمق کشش  
بهینه‌سازی  
روش سطح پاسخ

## Evaluation and optimization of drawing depth in electrohydraulic forming (with bridge wire between electrodes)

Mehdi Zohoor\*, Seyed Meysam Mousavi

Faculty of Mechanical Engineering, Khaje Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran

\* P.O.B. 19395-1999, Tehran, Iran, mzhoor@kntu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 24 May 2017  
Accepted 27 July 2017  
Available Online 08 September 2017

#### Keywords:

Electrohydraulic forming process  
Effective parameter  
Drawing depth  
Optimization  
Response surface methodology (RSM)

### ABSTRACT

Nowadays high velocity forming methods have become popular among industrial companies due to their capability of improving formability in various materials in comparison to conventional methods. Electrohydraulic forming (EHF) is a high velocity sheet metal forming process in which two electrodes are positioned in a water filled chamber and a high-voltage discharge between the electrodes generates a high-pressure to form the sheet metal. In this work, extensive experimental tests have been designed based on design of experiments (DOE) technique to investigate the effective parameters in EHF (with bridge wire between electrodes). Discharge energy, material, length and diameter of bridge wire have been considered as effective input parameters. Response surface methodology (RSM) has been used to model and optimize the EHF performance with respect to drawing depth for Brass 260. Based on the results, it can be stated that maximum drawing depth is obtained when discharge energy is maximum. It was found that the aluminum wire was more efficient than copper and tungsten. There are optimum values for the length and diameter of bridge wire depended on the experimental conditions in order to increase the drawing depth.

### 1- مقدمه

می‌گردد. دو روش رایج برای تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی در فرآیند الکتروهیدرولیکی عبارت‌اند از: تخلیه خازن از میان شکاف بین دو الکترود (بدون استفاده از سیم بین الکترودها) و تخلیه خازن از طریق سیم بسیار نازک تعبیه‌شده بین دو الکترود (با استفاده از سیم بین الکترودها). در روش دوم، مسیر تخلیه الکتریکی به‌صورت از پیش تعیین شده است که این امر منجر به تبدیل انرژی کارآمدتر و کنترل بهتر می‌گردد؛ اما نرخ تولید پایین‌تری را نیز موجب می‌شود. شماتیک فرآیند شکل‌دهی

شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی یکی از فرآیندهای منحصر به فرد شکل‌دهی با سرعت بالا است. این فرآیند مشابه شکل‌دهی انفجاری است با این تفاوت که برای ایجاد موج شوک، به‌جای استفاده از مواد منفجره، از انفجار الکتریکی استفاده می‌شود. در این فرآیند، تخلیه الکتریکی با ولتاژ بالا بین دو الکترود، در یک محفظه پر از سیال، موجب ایجاد کانال پلاسما بین آن‌ها می‌شود. انبساط این کانال پلاسما منجر به ایجاد موج شوک در سیال و شکل‌دهی ورق

Please cite this article using:

M. Zohoor, S. M. Mousavi, Evaluation and optimization of drawing depth in electrohydraulic forming (with bridge wire between electrodes), *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 9, pp. 137-144, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

تحلیل داده‌های آزمایش پرداخته شده است. در انتها با توجه به اثر پارامترهای اصلی و برهم‌کنش آن‌ها نقطه بهینه کاری فرایند ارائه شده است.

## 2- آزمایش‌های تجربی

تجهیزات فرایند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی شامل دو قسمت الکتریکی و مکانیکی است. اجزاء الکتریکی شامل سیستم کنترل، واحد تولید پالس و الکترودها به همراه پایه نگهدارنده می‌باشد. کنترل زمان و میزان شارژ خازن‌ها، همچنین رسم نمودارهای ولتاژ و جریان تخلیه الکتریکی، از طریق سیستم کنترل میسر است (شکل 2).

قلب واحد تولید پالس، از چهار طبقه خازن با ظرفیت حداکثر 20 میکرو فاراد (که قابلیت شارژ تا حداکثر 50 کیلوولت را دارند) تشکیل شده است. اجزای جانبی واحد تولید پالس شامل شارژر، یکسو کننده، مقاومت‌های پیشانی و پشت موج و تقسیم‌کننده می‌باشد (شکل 3).

در این تحقیق الکترودها از جنس مس (که با چندلایه عایق الکتریکی ولتاژ بالا پوشیده شده‌اند) می‌باشند. نوک الکترودها، طوری طراحی شده است که به راحتی قابلیت تعبیه سیم، بین آن‌ها را داشته باشند (شکل 4). جهت رعایت ملاحظات عایق کاری، پایه نگهدارنده الکترودها از فیبر استخوانی و پلی امید ساخته شده است. تنظیم فاصله الکترودها از یکدیگر و الکترودها از ورق، از طریق پایه نگهدارنده امکان‌پذیر است. فرایند شکل‌دهی ورق در این پژوهش، در واقع، شکل‌دهی بدون قالب<sup>1</sup> است. صرفاً جهت کلمپ کردن ورق، از یک استوانه توخالی از جنس فولاد ضدزنگ در زیر ورق استفاده شده است. در قسمت پائین این استوانه یک سوراخ تعبیه شده تا خروج هوا توسط یک شلنگ به بیرون سیال امکان‌پذیر باشد. علت ایجاد این سوراخ آن است که ورق در موقع تغییر شکل با مقاومت هوای محبوس داخل استوانه، مواجه نشود (شکل 5).



Fig. 2 Control unit

شکل 2 واحد کنترل



Fig. 3 Pulsed power generator

شکل 3 واحد تولید پالس

الکتروهیدرولیکی در "شکل 1" نشان داده شده است. فرایند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی، بعد از یک افول چند دهه‌ای دوباره، مورد توجه محققین (مخصوصاً محققین صنعت خودروسازی) قرار گرفته است. بهره‌مندی از مزایای شکل‌دهی پرسرعت و دوری از نواقص سایر روش‌های شکل‌دهی با سرعت بالا (شکل‌دهی الکترومغناطیسی و انفجاری) را می‌توان علت اصلی این موضوع دانست.

دانشمندان بسیاری به مطالعه انفجار سیم نازک در اثر تخلیه الکتریکی پرداخته‌اند؛ از آن جمله می‌توان به کارهای چس و همکاران [2] و توبی [3]- [6] اشاره کرد. این کارها اگرچه به لحاظ علمی از تراز بالائی برخوردارند؛ اما از آنجائی که عمدتاً به انفجار سیم در خلأ (هوا) می‌پردازند و محدوده انرژی آن‌ها چیزی غیر از محدوده مورد استفاده در فرایند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی صنعتی می‌باشند، قابل استناد برای این فرایند نمی‌باشند. اولین مشاهدات از ایجاد نیروی قوی مکانیکی حاصل از تخلیه الکتریکی در سیال، مربوط می‌شود به گزارش‌های لین در سال 1767 [7] و پرستلی در سال 1769 [8]. توسعه اولیه فرایند الکتروهیدرولیکی توسط یوتکین [9] در روسیه به ثبت رسیده است. آزمایش‌های اولیه جهت استفاده از این پدیده در شکل‌دهی ورق‌ها برمی‌گردد به کارهای برونو در سال 1968 [10]، داویس و آستین در سال 1970 [11] و چاچین در سال 1978 [12].

بخش کمی از تحقیقات صورت گرفته در این زمینه به اثر پارامترهای مؤثر این فرایند و بهینه‌سازی آن پرداخته‌اند. ایان و ماساکی در مقالاتی که در دهه 60 به چاپ رساندند [13] به بررسی پارامترهای مؤثر این فرایند بر روی پالس فشار ایجاد شده پرداختند. گمان و همکارانش [14] در زمانی نیز تلاش‌هایی در جهت بررسی پارامترهای مؤثر این فرایند انجام داده‌اند. بخش دیگری از تحقیقات انجام شده در زمینه شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی، به بررسی میدان فشار حاصل از تخلیه الکتریکی و نحوه بهینه‌سازی آن پرداخته است. نیازف و ژونواتوک [15] در راستای بهینه‌سازی فرایند به بررسی میدان فشار پرداختند. روش‌های مختلف اندازه‌گیری فشار سیال در اطراف جرقه (شامل روش‌های مستقیم و غیرمستقیم)، توسط سایاپین و گرینکو [16] مقایسه و رابطه‌ای جهت تخمین آن ارائه شده است. ولترز و همکارانش [17] اثر سیم بین دو الکترودها و سیالی که جرقه در آن اتفاق می‌افتد را بررسی کردند.

ماهیت فیزیکی پیچیده انفجار سیم در اثر تخلیه الکتریکی ایجاب می‌کند (جهت کنترل بهتر، افزایش تکرارپذیری و اتوماسیون آن) اثر پارامترهای مؤثر بر آن را دقیق‌تر بشناسیم. در این پژوهش، ابتدا سعی شده است با طراحی و انجام یکسری آزمایش‌های تجربی، میزان عمق کشش ورق (در مرکز آن) تحت فرایند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی (با استفاده از سیم بین دو الکترودها) مشخص شود. در ادامه با استفاده از مدل‌سازی ریاضی و روش‌های آماری به

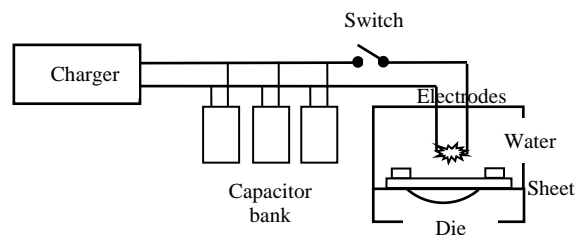


Fig. 1 Schematic of sheet metal forming with EHF [1]

شکل 1 شماتیک شکل‌دهی ورق فلزی توسط فرایند الکتروهیدرولیکی [1]

<sup>1</sup> Free Forming

پارامترهای متعددی بر عمق کشش<sup>3</sup> (DD) ورق تحت فرایند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی مؤثرند (شکل 7). در این مقاله (با توجه به امکانات و اهمیت پارامترها) اثر چهار پارامتر انرژی تخلیه<sup>4</sup> (DE)، جنس سیم بین دو الکترودها<sup>5</sup> (WM)، طول سیم بین دو الکترودها<sup>6</sup> (WL) و قطر سیم بین دو الکترودها<sup>7</sup> (WD) بر روی عمق کشش به روش سطح پاسخ بررسی می‌شود و در پایان شرایط لازم برای رسیدن به حالت بهینه مشخص می‌شود.

### 3-1- طراحی آزمایش‌ها و نتایج آن

اولین گام در روش سطح پاسخ، یافتن رابطه ریاضی موجود بین پاسخ آزمایش و مجموعه متغیرهای ورودی آزمایش به صورت تقریبی است. در این تحقیق آزمایش‌ها بر اساس طراحی مرکب مرکزی<sup>8</sup> بنا شده‌اند. متغیرهای مورد بحث در این آزمایش مطابق جدول 1 در سه سطح و به همراه مقادیر آن‌ها آورده شده‌اند. نهایتاً مطابق با نتایجی که برای عمق کشش به دست خواهد آمد، مدل‌سازی ریاضی برای این آزمایش به شکل یک معادله رگرسیون خطی درجه دو ایجاد خواهد شد که این معادله آماری از نقاط داده‌های جدول عبور کرده و یا در نزدیک‌ترین حالت نسبت به آن‌ها قرار می‌گیرد. شکل کلی معادله رگرسیون خطی درجه دو به شکل رابطه (1) می‌باشد. نرم‌افزار مینی-تب<sup>9</sup> نسخه 16، برای تحلیل و تفسیر نتایج و همچنین به دست آوردن ضرایب معادله ریاضی حاکم بر آزمایش استفاده شده است. برای تحلیل آماری نتایج، از آنالیز واریانس<sup>10</sup> استفاده می‌شود و بنابراین برای پیش‌بینی عمق کشش در هر حالت در فرایند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی، این نتایج قابل استفاده می‌باشد. با توجه به طراحی آزمایش صورت گرفته توسط نرم‌افزار برای تعداد 4 فاکتور ورودی و  $\alpha=1$  (دلیل این انتخاب آن است که تنها سیم‌هایی با قطر 0.14، 0.32 و 0.5 از هر سه جنس مس، آلومینیوم و تنگستن در دسترس می‌باشد) تعداد 31 آزمایش برای رسیدن به هدف تعیین شد که به همراه مقادیر به دست آمده برای عمق کشش در جدول 2 ارائه شده است.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_1 x_i + \sum_{i=1}^k \beta_2 x_i^2 + \sum_i \sum_j \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

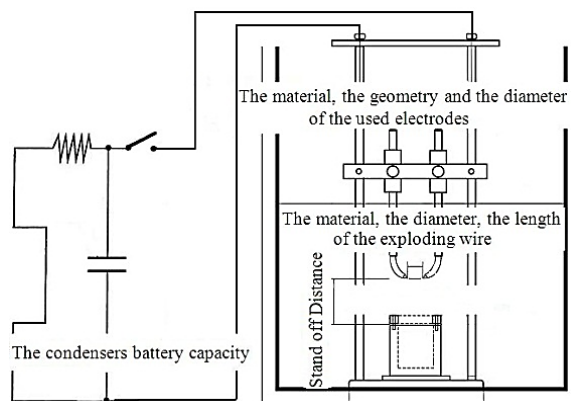


Fig. 7 Effective parameters in electrohydraulic forming

شکل 7 پارامترهای مؤثر فرایند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی



Fig. 4 Electrode tips

شکل 4 نوک الکترودها



Fig. 5 Electrode system in the water chamber

شکل 5 سیستم الکترودها در محفظه آب

پس از انجام آزمایش‌ها، جهت تعیین دقیق‌تر تغییر شکل نهایی ورق‌ها، از دستگاه اندازه‌گیری مختصات<sup>1</sup> استفاده گردید. برای اندازه‌گیری میزان ارتفاع تغییر شکل ورق در شعاع‌ها و مقاطع مختلف، در ابتدا، لبه‌های ورق (که توسط کلمپ مقید شده بود) به عنوان سطح مرجع تعریف شد. در ادامه، با گذراندن حسگر دستگاه از سه مقطع موازی (شامل خط گذرنده از مرکز ورق و خطوطی بافاصله سی میلی‌متر از هر دو طرف خط مرکزی) و در دو جهت عمود بر هم، ارتفاع این نقاط از سطح مرجع محاسبه شد (شکل 6).

### 3-2- روش آماری سطح پاسخ

روش سطح پاسخ<sup>2</sup> از جمله روش‌های ریاضی و آماری است که برای مدل‌سازی و تحلیل مسائلی که پاسخ متأثر از چندین متغیر قرار دارد، استفاده می‌شود و هدف آن مدل‌سازی و بهینه‌سازی این پاسخ است. اساس سطح پاسخ بر طراحی آزمایش‌ها و بهینه‌سازی آماری استوار است. این روش قادر است نمودارهای خروجی مناسبی را جهت مشخص کردن نقطه بهینه در میان چندین پارامتر ارائه دهد؛ همچنین رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌های یک آزمایش را به صورت یک معادله ریاضی، مدل‌سازی کند [18].

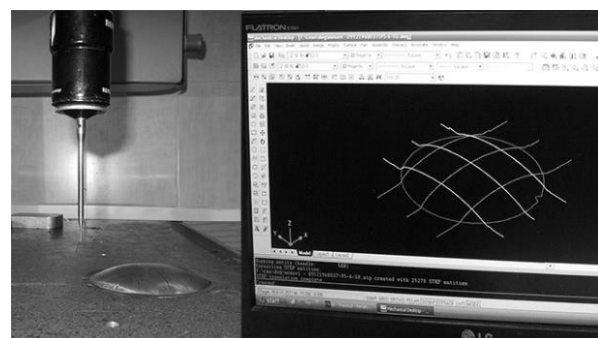


Fig. 6 Coordinate Measuring of deformed sheet

شکل 6 اندازه‌گیری مختصات ورق تغییر شکل یافته

<sup>3</sup> Drawing Depth

<sup>4</sup> Discharge Energy

<sup>5</sup> Wire Material

<sup>6</sup> Wire Length

<sup>7</sup> Wire Diameter

<sup>8</sup> Central Composite Design (CCD)

<sup>9</sup> Minitab

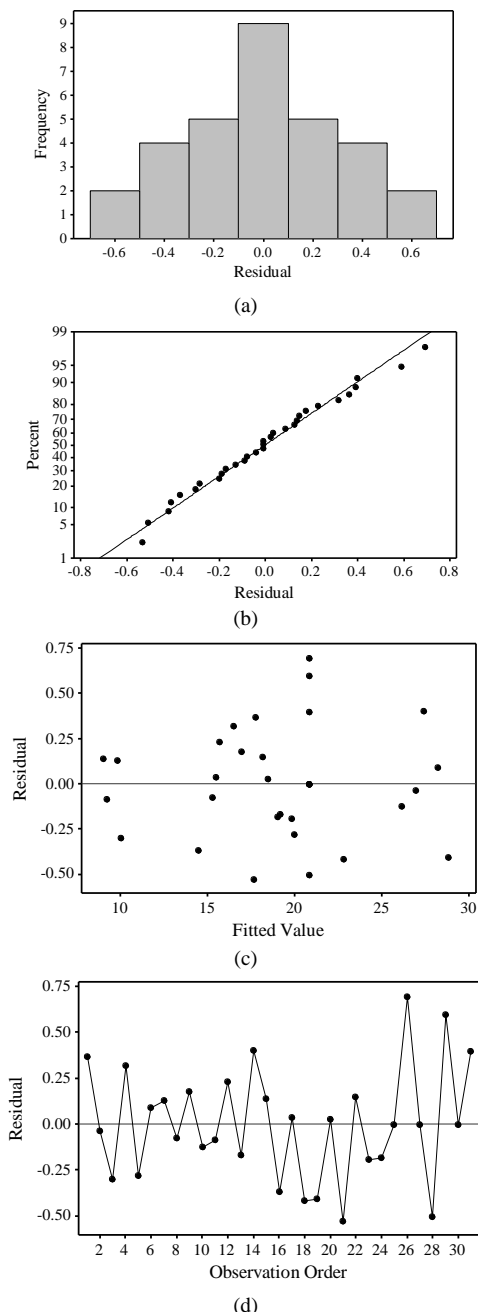
<sup>10</sup> ANOVA

<sup>11</sup> Face-Centered Cub (FCD)

<sup>1</sup> Coordinate Measuring Machine (CMM)

<sup>2</sup> Response Surface Methodology (RSM)

نتایج تحلیل و اصلاح مدل‌سازی (از طریق حذف عوامل غیر مؤثر)، جدول آنالیز واریانس و ضرایب معادله رگرسیون حاکم بر مسئله به‌صورت کد شده برای عمق کشش در جدول 3 آمده است. لازم به ذکر است که متغیرهایی در فرایند مؤثر هستند که مقدار  $P$  آن‌ها با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان 95٪ از 0.05 کمتر باشد. مقدار  $P$  به منزله کوچک‌ترین سطح معنی‌دار بودنی است که به رد فرض صفر،  $H_0$  می‌انجامد.  $R-Sq=99.66\%$  و  $R-Sq(adj)=99.47\%$  که نشان‌دهنده دقت بسیار خوب مدل‌سازی به روش سطح پاسخ به کار رفته می‌باشد.



**Fig. 8** Residual plots for EHF experiment a) histogram of residuals b) normal probability of residuals c) residuals versus fitted values d) residuals versus run order

**شکل 8** نمودارهای باقیمانده‌ها برای آزمایش‌های شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی (الف) تعداد تکرار باقیمانده‌ها (ب) احتمال نرمال باقیمانده‌ها (ج) باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر برآزیده (د) باقیمانده‌ها به ترتیب انجام آزمایش

لازم به ذکر است آزمایش‌ها به‌صورت تصادفی انجام شده‌اند و از انجام آن‌ها به ترتیب جدول خودداری شده است. ترتیبی که توسط نرم‌افزار مینی‌تب برای آزمایش‌ها ارائه می‌شود، دارای نظم خاصی در تنظیم فاکتورهای ورودی است و از آنجائی‌که اثر پارامترهای تنظیمی (بخصوص الکتریکی) در کارائی دستگاه در آزمایش‌های بعدی تا حدی مؤثر است؛ لذا در انجام آزمایش‌ها، علاوه بر دادن زمان کافی جهت برگشت دستگاه به حالت خنثی، ترتیب تصادفی برای آن‌ها اتخاذ شد.

### 2-3- مدل‌سازی ریاضی و بررسی کفایت آن

تحقیق دربارهٔ تخلف از فرض‌های اساسی و کفایت مدل، از طریق بررسی باقیمانده‌ها، میسر است. نزدیکی نمودار باقیمانده‌ها به نمودار توزیع نرمال استاندارد (شکل 8(a)) و عدم وجود نقاط پرت (در شکل 8(b)) نشان‌دهندهٔ برقراری فرض نرمال بودن<sup>1</sup> است. همچنین پیروی نکردن باقیمانده‌ها از هیچ الگویی<sup>2</sup> در شکل 8(c) و 8(d) نمایانگر برقراری فرض استقلال<sup>3</sup> است [18].

**جدول 1** مقادیر کد شده فاکتورهای ورودی آزمایش

Table 1 Coded factors		فاکتورهای ورودی	
-1	0	+1	
2.4	3.2	4	انرژی تخلیه (kJ)
آلومینیوم	مس	تنگستن	جنس سیم
10	25	40	طول سیم (mm)
0.14	0.32	0.5	قطر سیم (mm)

**جدول 2** نتایج آزمایش‌های شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی

Table 2 Results of EHF experiments		عمق کشش (mm)			
شماره آزمایش	DE	WM	WL	WD	
1	-1	-1	-1	-1	18.1
2	1	-1	-1	-1	26.9
3	-1	1	-1	-1	9.7
4	1	1	-1	-1	16.8
5	-1	-1	1	-1	19.7
6	1	-1	1	-1	28.3
7	-1	1	1	-1	9.9
8	1	1	1	-1	15.2
9	-1	-1	-1	1	17.1
10	1	-1	-1	1	26.0
11	-1	1	-1	1	9.1
12	1	1	-1	1	15.9
13	-1	-1	1	1	19.0
14	1	-1	1	1	27.8
15	-1	1	1	1	9.1
16	1	1	1	1	14.1
17	-1	0	0	0	15.5
18	1	0	0	0	22.4
19	0	-1	0	0	28.4
20	0	1	0	0	18.5
21	0	0	-1	0	17.1
22	0	0	1	0	18.3
23	0	0	0	-1	19.6
24	0	0	0	1	18.8
25	0	0	0	0	20.8
26	0	0	0	0	21.5
27	0	0	0	0	20.8
28	0	0	0	0	20.3
29	0	0	0	0	21.4
30	0	0	0	0	20.8
31	0	0	0	0	21.2

<sup>1</sup> Normality assumption

<sup>2</sup> Structure less

<sup>3</sup> Independence assumption

آب شیر<sup>7</sup> به‌عنوان سیال استفاده شده است.

با توجه به اثر فاکتور انرژی تخلیه که در "شکل 10" ارائه شده است می‌توان گفت که هرچه انرژی تخلیه بیشتر باشد، عمق کشش ورق نیز بیشتر خواهد بود (این روند تا پارگی ورق از مرکز ادامه می‌یابد). علت این امر ناشی از این حقیقت است که افزایش انرژی تخلیه شده در سیم، منجر به افزایش چگالی انرژی به طول و در نتیجه افزایش فوق‌داغی می‌شود. این موضوع، بیشینه فشار موج شوک حاصل از انفجار الکتریکی در سیال را افزایش داده که این خود موجب کشش بیشتر ورق می‌شود. لازم به ذکر است که تمامی انرژی ذخیره‌شده در خازن‌ها بین دو الکترود تخلیه نمی‌شود و معمولاً 20٪ تا 35٪ (بسته به شرایط آزمایش) آن هدر می‌رود. افزایش انرژی ذخیره‌شده در خازن‌ها از دو طریق میسر است؛ افزایش ظرفیت خازن‌ها و افزایش ولتاژ شارژ آن‌ها. لازم به ذکر است عمق کشش حاصل از افزایش انرژی تخلیه با استفاده از هر یک از این دو روش، مقداری متفاوت خواهد بود. این امر ناشی از تغییر پارامترهای الکتریکی مدار در صورت اتخاذ هر یک از این روش‌ها (به‌عنوان نمونه افزایش ناخواسته مقاومت مدار در اثر سری بستن خازن‌ها جهت افزایش ظرفیت خازن‌ها و ...) می‌تواند باشد.

در "شکل 11" اثر جنس سیم بین دو الکترود بر روی عمق کشش ورق نشان داده شده است. آلومینیوم به دلیل داشتن دمای جوش و گرمای تبخیر<sup>8</sup> پایین‌تر نسبت به مس و تنگستن، بهره‌وری بهتری نشان می‌دهد. این موضوع با توجه به این‌که مقدار فوق‌داغی در فلزات با دمای جوش پایین، بیشتر از فلزات با دمای جوش بالاست؛ قابل توجیه است.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده برای طول سیم (شکل 12) می‌توان نتیجه گرفت که در ابتدا با افزایش طول سیم، میزان عمق کشش بیشتر می‌شود ولی با عبور از یک حد مشخص، کم خواهد شد. در واقع شکل نمودار دارای

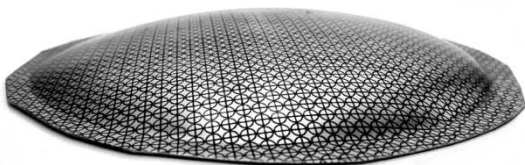


Fig. 9 Electrohydraulic deformed specimens

شکل 9 نمونه قطعات تغییر شکل یافته تحت فرایند الکتروهیدرولیکی

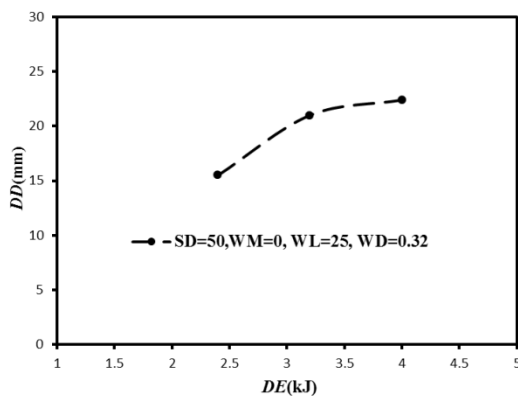


Fig. 10 The effect of discharge energy

شکل 10 اثر انرژی تخلیه

<sup>7</sup> Tap water

<sup>8</sup> Vaporization heat

جدول 3 آنالیز واریانس در مدل اولیه و مدل اصلاح‌شده

Table 3 ANOVA for full and reduced model

مقدار P	مدل اصلاح‌شده		مدل اولیه		ترم‌ها
	ضریب معادله	مقدار P	ضریب معادله	مقدار P	
0.000	20.8072	0.000	20.8072	0.000	ثابت
0.000	3.6778	0.000	3.6778	0.000	DE
0.000	-5.1667	0.000	-5.1667	0.000	WM
0.010	0.2611	0.018	0.2611	0.018	WL
0.000	-0.4056	0.001	-0.4056	0.001	WD
0.000	-1.6656	0.000	-1.6656	0.000	DE*DE
0.000	2.8344	0.000	2.8344	0.000	WM*WM
0.000	-2.9156	0.000	-2.9156	0.000	WL*WL
0.000	-1.4156	0.000	-1.4156	0.000	WD*WD
0.000	-0.6812	0.000	-0.6812	0.000	DE*WM
0.021	-0.2438	0.034	-0.2438	0.034	DE*WL
-----	-----	0.861	-0.0188	0.861	DE*WD
0.000	-0.6188	0.000	-0.6188	0.000	WM*WL
-----	-----	0.861	-0.0188	0.861	WM*WD
-----	-----	0.861	0.0187	0.861	WL*WD

### 3-3- اثر پارامترهای مؤثر بر عمق کشش ورق

پدیده پیچیده انفجار سیم فلزی در زیر آب<sup>1</sup> با تغییر فاز سیم (و آب اطراف آن) و ایجاد کانال پلاسمای غیرایده‌آل بین دو الکترود همراه است. عبور جریان الکتریکی شدید باعث افزایش دمای سیم بین دو الکترود و ذوب شدن آن می‌گردد. سیم ذوب شده با افزایش جریان عبوری، گرم‌تر می‌شود؛ ولی در اثر نیروی اینرسی و فشار مغناطیسی شکل خود را حفظ می‌کند. اضافه شدن گرما به سیم ذوب‌شده موجب رسیدن آن به نقطه جوش<sup>2</sup> می‌گردد. با افزایش دما (از آنجائی شرایط جوش متعادل فراهم نیست)، شرایط فوق‌داغ<sup>3</sup> اتفاق می‌افتد. در ادامه سیم به‌صورت انفجارگونه‌ای تبخیر و ابتدا لایه بیرونی و سپس کل آن (و آب اطراف آن) به پلازما تبدیل می‌شود [19,20]. انرژی ایجادشده در این مرحله به انرژی موج شوک، حباب‌گازی و تشعشع تبدیل می‌شود.

برای تحلیل دقیق اثر پارامترهای مؤثر در این فرایند می‌بایست به‌دقت اثر فاکتور اصلی و برهم‌کنش‌های مؤثر فاکتورها را مورد تحلیل قرار داد. در این بخش در ابتدا به اثر هر یک از فاکتورهای اصلی و در ادامه به اندرکنش آن‌ها پرداخته خواهد شد. لازم به ذکر است در تحلیل نمودارهای اثر برهم‌کنش فاکتورهای مؤثر، سایر متغیرها در حالت تعادل آزمایش‌ها (نقطه مرکزی<sup>4</sup>) در نظر گرفته شده‌اند.

آزمایش‌های اولیه نشان داد تکرارپذیری فرایند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی بسیار پایین است. به‌نظر می‌رسد علت عمده این امر، تأثیرگذاری شدید پارامترهای الکتریکی فرایند باشد. مشاهدات اولیه حاکی از وجود یک تأخیر زمانی<sup>5</sup> در تخلیه الکتریکی بین دو الکترود (بعد از زدن کلید تخلیه) است. تأخیر زمانی در حالتی که از سیم بین دو الکترود استفاده نشود بیشتر از حالتی است که از سیم بین دو الکترود استفاده شود. یک نمونه از ورق‌های تغییر شکل یافته در "شکل 9" نشان داده شده است.

لازم به ذکر است در تمامی آزمایش‌ها، فاصله الکترودها تا ورق<sup>6</sup> و قطر الکترودها به ترتیب 50 و 18 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. همچنین از

<sup>1</sup> Underwater Electrical Wire Explosion (UEWE)

<sup>2</sup> Boiling point

<sup>3</sup> Superheating

<sup>4</sup> Center point

<sup>5</sup> Delay Time

<sup>6</sup> Standoff Distance

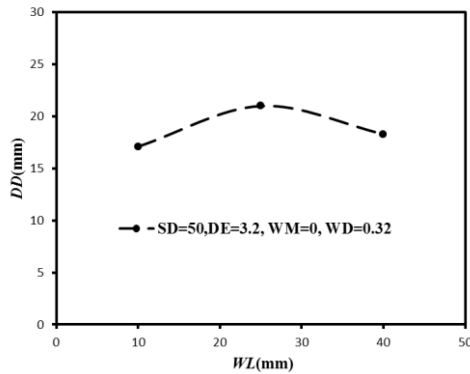


Fig. 12 The effect of wire length

شکل 12 اثر طول سیم

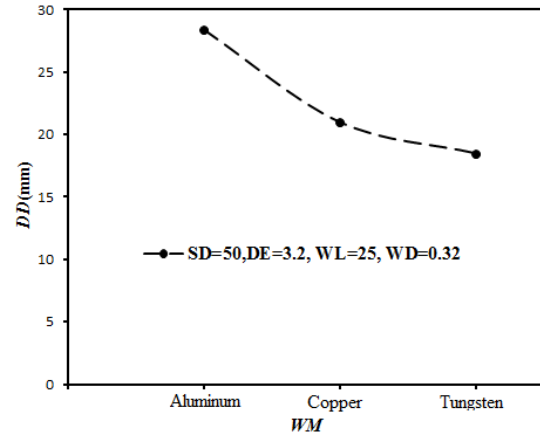


Fig. 11 The effect of wire material

شکل 11 اثر جنس سیم

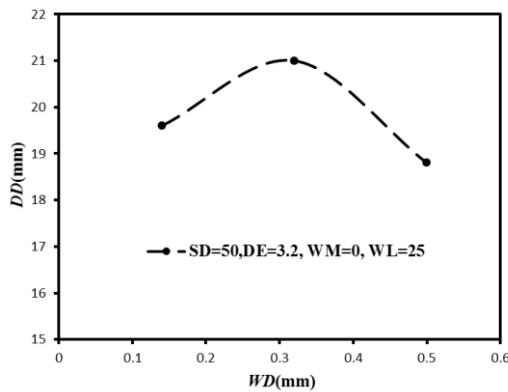


Fig. 13 The effect of wire diameter

شکل 13 اثر قطر سیم

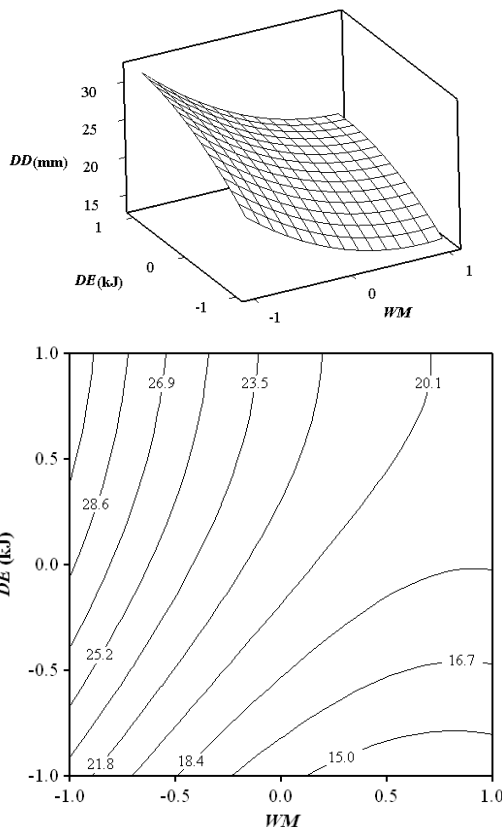


Fig. 14 Interaction of discharge energy and wire material

شکل 14 اندرکنش انرژی تخلیه و جنس سیم

یک اکستریم نسبی است که محدوده‌ی طول سیم برای رسیدن به بیشترین مقدار کشش را مشخص می‌سازد. ریشه این موضوع در این است که تا قبل از نقطه بهینه، کانال پلاسمایی که تشکیل می‌شود به شکل یک بیضی (با قطر بزرگ عمود به خط واصل دو الکتروده) است. با افزایش فاصله بین الکترودها، شکل کانال پلاسما (و در نتیجه شکل جبهه‌ی موج شوک<sup>1</sup>) به دایره نزدیک می‌شود. با ادامه این روند مجدداً شکل کانال پلاسما مجدداً بیضی شده (این بار با قطر بزرگ در راستای خط واصل دو الکتروده) و در نتیجه جبهه‌ی موج شوک از کروی به سمت بیضی متمایل شده که همین امر منجر به تغییر پروفیل ورق‌های تغییر شکل یافته از حالت گنبدی به اشکالی پخ‌تر (و در نتیجه عمق کشش کمتر) می‌شود.

"شکل 13" این نکته را نشان می‌دهد که قطر سیم نیز دارای یک مقدار بهینه می‌باشد. عمق کشش با افزایش قطر سیم تا این مقدار بهینه، افزایش می‌یابد و پس از آن کاهش خواهد یافت. آزمایش‌ها نشان می‌دهد این نقطه بهینه با افزایش انرژی تخلیه، افزایش می‌یابد (نمودار به سمت راست منتقل می‌شود). همچنین با افزایش انرژی تخلیه، اثر قطر سیم بر عمق کشش، محسوس‌تر خواهد بود. دلیل نزول نمودار بعد از نقطه بهینه این است که با افزایش قطر سیم، درواقع قطر کانال پلاسما که بین دو الکتروده تشکیل می‌شود افزایش می‌یابد (درحالی‌که چگالی انرژی کانال، ثابت است). این افزایش حجم کانال پلاسما به معنی فوق‌داغی کمتر و درنتیجه فشار کمتر می‌باشد. با توجه به این‌که ضریب معادله رگرسیون (از نظر قدر مطلق) برای فاکتور قطر سیم، بیشتر از طول آن است؛ می‌توان نتیجه گرفت که اثر این فاکتور بر عمق کشش بیشتر است.

با توجه به مقدار ضریب رگرسیون جدول آنالیز واریانس برای اندرکنش فاکتورهای مختلف، می‌توان نتیجه گرفت برهم‌کنش انرژی تخلیه با جنس سیم، اثر بیشتری (نسبت به برهم‌کنش سایر فاکتورها) روی فرایند دارد. همان‌طور که در "شکل 14" قابل مشاهده است با افزایش انرژی تخلیه و استفاده از سیمی که نقطه‌جوش پائین‌تری دارد (آلومینیوم در مقابل مس و تنگستن، مس در مقابل تنگستن)، میزان عمق کشش افزایش می‌یابد. همچنین تأثیر انرژی تخلیه (بر عمق کشش) در صورت استفاده از سیم آلومینیومی بسیار محسوس‌تر از حالتی است که از سیم مسی یا تنگستنی استفاده شود.

<sup>1</sup> Shock wave front

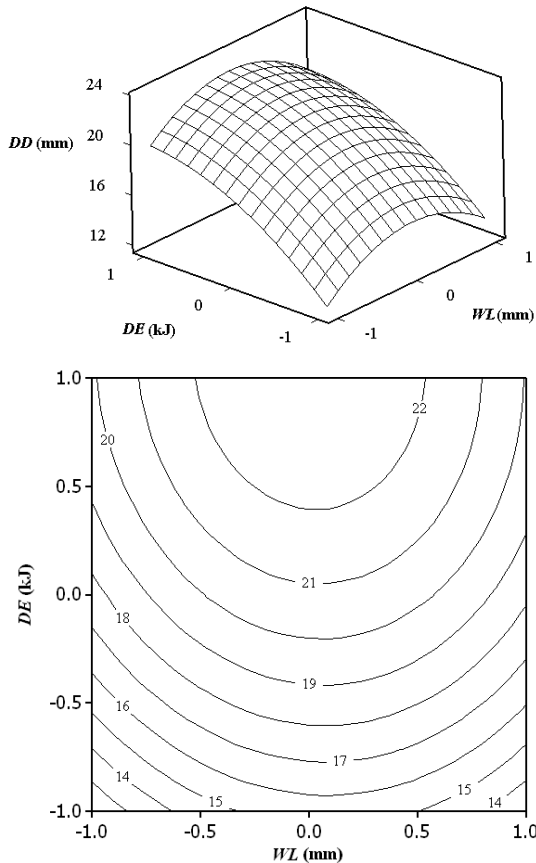


Fig. 16 Interaction of discharge energy and wire length  
 شکل 16 برهمکنش انرژی تخلیه و طول سیم

جدول 4 شرایط بهینه برای به حداکثر رساندن عمق کشش  
 Table 4 Optimum conditions to maximize drawing depth

بهینه‌سازی	DE	WM	WL	WD	عمق کشش (mm)
سطح پاسخ (غیر کدشده)	4	آلومینیوم	26.67	0.29	31.56
سطح پاسخ (کدشده)	1	-1	0.11	-0.15	31.56
آزمایش تجربی	4	آلومینیوم	27	0.32	31.3

- با افزایش انرژی تخلیه، عمق کشش ورق افزایش می‌یابد.
- سیم آلومینیومی نسبت به سایر سیم‌ها بهره‌وری را افزایش می‌دهد.
- جهت افزایش عمق کشش یک مقدار بهینه برای طول و قطر سیم وجود دارد که با توجه به شرایط آزمایش به دست می‌آید. این مقدار بهینه با افزایش انرژی تخلیه و فاصله الکترودها تا ورق، افزایش می‌یابد.
- برهم‌کنش انرژی تخلیه با جنس سیم، بیشترین اثر را نسبت به برهم‌کنش سایر فاکتورها روی فرایند دارد.
- برهم‌کنش انرژی تخلیه با طول سیم، کمترین اثر را نسبت به برهم‌کنش سایر فاکتورها حاضر در مدل اصلاح‌شده دارد.

همان‌طور که در "شکل 15" مشهود است استفاده از سیم آلومینیومی با هر طولی، تضمین‌کننده رسیدن به عمق کشش بالاست؛ اما از لحاظ عملی باید به این نکته اشاره شود که افزایش بیش‌ازحد طول سیم (بیشتر از 50 mm) باعث کاهش شدید بهره‌وری و تکرارپذیری خواهد شد.

با توجه به مقدار  $P$  جدول آنالیز واریانس برای اندرکنش فاکتورهای مختلف، می‌توان نتیجه گرفت برهم‌کنش فاکتور انرژی تخلیه با طول سیم (نسبت به سایر برهم‌کنش‌ها) اثر کمتری بر فرایند دارد (شکل 16).

#### 4- ارائه شرایط بهینه

با توجه به نتایج بیان‌شده از تحلیل نمودارها و مدل‌سازی ریاضی حاکم بر آزمایش، نرم‌افزار نیز یک پیشنهاد بهینه را معرفی و مقدار بیشینه عمق کشش را پیش‌بینی می‌کند که در جدول 4 به آن اشاره شده است. ملاحظه می‌شود همان نتایجی که از تحلیل آزمایش‌ها بیان شده، با دقت بسیار خوبی تأیید شده و می‌توان به عمق کشش 31.3 میلی‌متر دست‌یافت. این نتیجه بیانگر آن است که با تنظیم مناسب پارامترها می‌توان بیشترین عمق کشش دست‌یافته در آزمایش‌ها (28.4 میلی‌متر) را تا 11٪ و کمترین آن (9.1 میلی‌متر) را تا 240٪ افزایش داد.

#### 5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از آزمایش‌های تجربی و تحلیل آماری آن‌ها، اثر پارامترهای مختلف فرایند شکل‌دهی الکترویهیدرولیکی (با استفاده از سیم بین الکترودها) بر عمق کشش ورق برنجی 260، مطالعه و بررسی گردید.

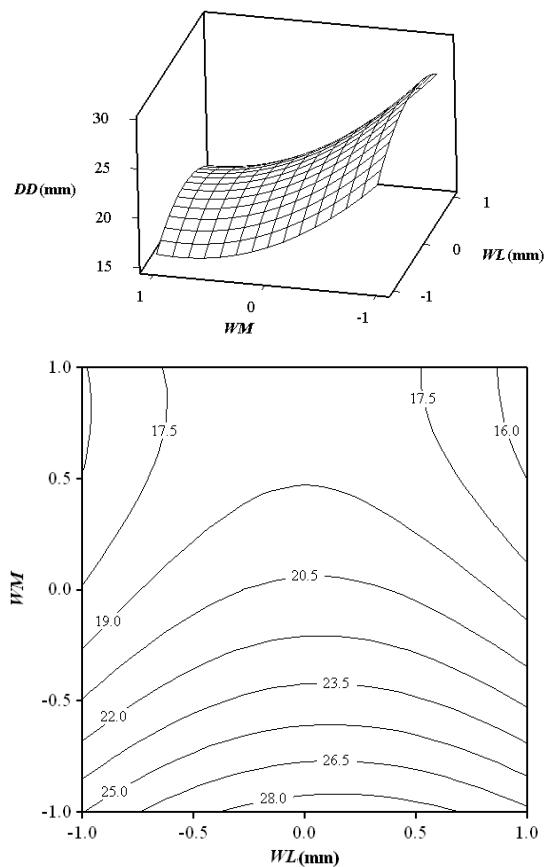


Fig. 15 Interaction of wire material and wire length

شکل 15 برهم‌کنش جنس سیم و طول سیم

- [8] J. Priestley, Experiments on the lateral force of electrical explosions. by Joseph Priestley, L LDFRS, *Philosophical Transactions*, Vol. 59, No. 4, pp. 57-62, 1769.
- [9] L. Yutkin, *Electrohydraulic Effect*, Armed Services Technical Information Agency, Moscow, pp. 1-23, 1955.
- [10] E. Bruno, *High-Velocity Forming of Metals*, pp. 43-70, Dearborn: American Society of Tool and Manufacturing Engineers, 1968.
- [11] R. Davies, E. R. Austin, *Developments in High Speed Metal Forming*, pp. 85-120, New York: Industrial Press, 1970.
- [12] V. Chachin, *Electrohydraulic Treatment of Structural Materials*, pp. 80-87, Minsk: Nauka i Texnika, 1978.
- [13] M. Oyane, S. Masaki, Fundamental study on electrohydraulic forming, *Bulletin of JSME*, Vol. 7, No. 26, pp. 474-480, 1964.
- [14] L. Coman, Using the initiation system of electrical discharge in the case of electrohydraulic forming, *U.E.M. Journal*, Vol. 59, No. 3, pp. 93-100, 2011.
- [15] M. Knyazyev, Y. S. Zhovnovatuk, Measurements of pressure fields with multi-point membrane gauges at electrohydraulic forming, *Proceeding of 4th International Conference on High Speed Forming*, Ohio, USA, March 9-10, 2010.
- [16] A. Sayapin, A. Grinenko, S. Efimov, Y. E. Krasik, Comparison of different methods of measurement of pressure of underwater shock waves generated by electrical discharge, *Shock Waves*, Vol. 15, No. 2, pp. 73-80, 2006.
- [17] M. Woetzel, M. Löffler, E. Spahn, H. Ritter, Preliminary examination of high-velocity metal-shaping with electrical wire explosion, *Proceeding of 1st Euro-Asian Pulsed Power Conference*, Chengdu, China, September 18-22, 2006.
- [18] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, pp. 400-450, New York: John Wiley & Sons, 2008.
- [19] F. Bennett, High temperature exploding wires, *Progress in High Temperature Physics and Chemistry*, Vol. 2, No. 1, pp. 1-63, 1968.
- [20] A. Luchinskii, *Electrical Explosion of Wires*, pp. 15-50, Moscow: Nauka, 1989.

• در محدوده‌ی آزمایش‌های این مقاله، با انتخاب بهینه پارامترهای فرایند، می‌توان عمق کشش را (از 9.1 به 31.3 میلی‌متر) تا 3.4 برابر افزایش داد.

## 6- مراجع

- [1] M. Zohoor, S. M. Mousavi, A. Ashrafi Tafreshi, Study of electrohydraulic forming process by using experimental observations and numerical simulation with ALE method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 301-308, 2017. (in Persian فارسی)
- [2] W. G. Chace, H. K. Moore, *Exploding Wires*, pp. 27-35, New York: Springer, 2014.
- [3] T. Tobe, K. Masana, H. Obara, Energy consumption at underwater exploding-wire gap in electric discharge metal forming, *Bulletin of JSME*, Vol. 21, No. 162, pp. 1780-1786, 1978.
- [4] T. Tobe, K. Masana, H. Obara, Metal forming by underwater wire explosion: 1. an analysis of plastic deformation of circular membranes under impulsive loading, *Bulletin of JSME*, Vol. 22, No. 164, pp. 271-278, 1979.
- [5] T. Tobe, K. Masana, H. Obara, Metal forming by underwater wire explosions: 2. experiments on bulging of circular aluminum sheets by copper wire explosions, *Bulletin of JSME*, Vol. 27, No. 223, pp. 130-135, 1984.
- [6] T. Tobe, K. Masana, H. Obara, Pressure pulses produced by underwater wire explosions in electric discharge metal forming, *Bulletin of JSME*, Vol. 22, No. 166, pp. 613-619, 1979.
- [7] T. Lane, Description of an electrometer invented by Mr. Lane; with an account of some experiments made by him with it: in a letter to Benjamin Franklin, LL. DFRS, *Philosophical Transactions*, Vol. 57 No. 1, pp. 451-460, 1767.