مجله مهندسی مکانیک مدرس، آذر 1396، دوره 17، شماره 9، ص‌ص 137-144

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

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

مهدی ظهور[1*]، سید میثم موسوی[2]

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

**اطلاعات مقاله**

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 03 خرداد 1396
پذیرش: 05 مرداد 1396
ارائه در سایت: 17 شهریور 1396

*کلید واژگان:*
فرایند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی
پارامترهای مؤثر
عمق کشش
بهینه‌سازی
روش سطح پاسخ

**چکیده**

امروزه روش‌های شکل‌دهی با سرعت بالا به‌دلیل توانائی آن‌ها در بهبود شکل‌پذیدی مواد مختلف در مقایسه با روش‌های سنتی، مورد توجه شرکت‌های صنعتی قرار گرفته است. شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی یک فرایند 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 فرایند در نظر گرفته شده‌اند. مدل‌سازی و بهینه‌سازی به روش سطح پاسخ برای بهبود عملکرد فرایند (ازنظر 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 تنگستنی، کارآمدتر می‌باشد. همچنین برای طول و قطر سیم بین الکترودها، یک مقدار بهینه وجود دارد که با توجه به شرایط آزمایش تعیین می‌شوند.

# 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

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 فرایند، 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 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 فرایند شکل‌دهی

**برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:**

**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)

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 روش-های شکل‌دهی با سرعت بالا (شکل‌دهی الکترومغناطیسی و انفجاری) را می-توان 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 مشاهده‌ها از ایجاد نیروی قوی مکانیکی حاصل از تخلیه الکتریکی در سیال، مربوط می‌شود به گزارش‌های لین در سال 1767 [7] و پریستلی 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. کُمان و همکارانش [14] در رُمانی نیز تلاش‌هایی در جهت بررسی پارامترهای مؤثر این فرایند انجام داده‌اند. بخش دیگری از تحقیقات انجام شده درزمینهٔ شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی، به بررسی میدان فشار حاصل از تخلیه الکتریکی و نحوه بهینه‌سازی آن پرداخته است. نیازیف 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 گریننکو [16] مقایسه و رابطه‌ای جهت تخمین آن ارائه شده است. ولتزل و همکارانش [17] اثر سیم بین دو الکترود 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 الکترود) مشخص شود. در ادامه با استفاده از مدل‌سازی ریاضی و روش‌های آماری به تحلیل داده‌های آزمایش پرداخته شده است. در انتها با توجه به اثر پارامترهای اصلی و برهم‌کنش آن‌ها نقطه بهینه کاری فرایند ارائه شده است.

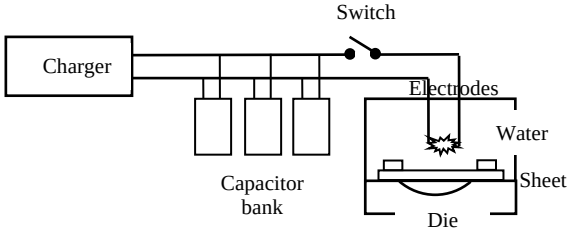


**Fig. 1** Schematic of sheet metal forming with EHF [1]

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

## 2- آزمایش‌های تجربی

تجهیزات فرایند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی شامل دو قسمت الکتریکی و مکانیکی است. اجزاء الکتریکی شامل سیستم کنترل، واحد تولید پالس و الکترودها به‌همراه پایهٔ 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 به‌راحتی قابلیت تعبیه سیم، بین آن‌ها را داشته باشند (شکل 4). جهت رعایت ملاحظات عایق‌کاری، پایهٔ نگهدارنده الکترودها از فیبر استخوانی و پلی آمید ساخته شده است. تنظیم فاصله الکترودها از یکدیگر و الکترودها از ورق، از طریق پایهٔ نگهدارنده امکان‌پذیر است. فرایند شکل‌دهی ورق در این پژوهش، درواقع، شکل‌دهی بدون قالب[1] 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).

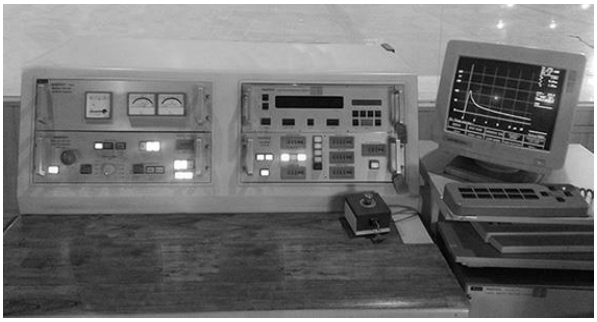

**Fig. 2** Control unit

**شکل 2** واحد کنترل

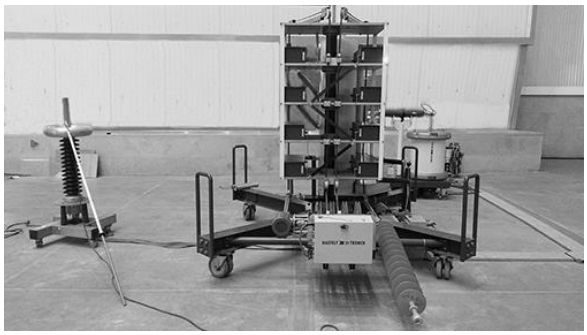

**Fig. 3** Pulsed power generator

**شکل 3** واحد تولید پالس

[1] Free Forming

**Fig. 4** Electrode tips

**شکل 4** نوک الکترودها

**Fig. 5** Electrode system in the water chamber

**شکل 5** سیستم الکترود در محفظه آب

پس از انجام آزمایش‌ها، جهت تعیین دقیق‌تر تغییر شکل نهایی ورق‌ها، از دستگاه اندازه‌گیری مختصات[1] استفاده گردید. برای اندازه‌گیری میزان ارتفاع تغییر شکل ورق در شعاع‌ها و مقاطع مختلف، در ابتدا، لبه‌های ورق (که توسط کلمپ مقید شده بود) به‌عنوان 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- روش آماری سطح پاسخ

روش سطح پاسخ[2] ازجمله 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 رابطهٔ بین ورودی‌ها و خروجی‌های یک آزمایش را به‌صورت یک معادله ریاضی، مدل‌سازی کند [18].

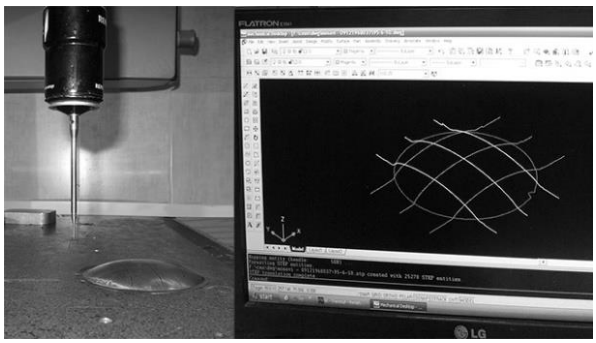

**Fig. 6** Coordinate Measuring of deformed sheet

**شکل 6** اندازه‌گیری مختصات ورق تغییر شکل یافته

[1] Coordinate Measuring Machine (CMM)
[2] Response Surface Methodology (RSM)

پارامترهای متعددی بر عمق کشش[3](DD) ورق تحت فرایند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی مؤثرند (شکل 7). در این مقاله (با توجه به امکانات و اهمیت پارامترها) اثر چهار پارامتر انرژی تخلیه[4](DE)، جنس سیم بین دو الکترود[5](WM)، طول سیم بین دو الکترود[6](WL) و قطر سیم بین دو الکترود[7](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 به‌صورت تقریبی است. در این تحقیق آزمایش‌ها براساس طراحی مرکب مرکزی[8] بنا شده‌اند. متغیرهای موردبحث در این آزمایش مطابق جدول 1 در سه سطح و به همراه مقادیر آن‌ها آورده شده‌اند. نهایتاً مطابق با نتایجی که برای عمق کشش به‌دست 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 به‌شکل رابطهٔ (1) می‌باشد. نرم‌افزار مینی‌تب[9] 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[10] 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 $\alpha=1$[11] (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 به‌دست‌آمده برای عمق کشش در جدول 2 ارائه شده است.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_1 x_1 + \sum_{i=1}^{k} \beta_1 x_1^2 + \sum_{i} \sum_{j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \qquad (1)$$

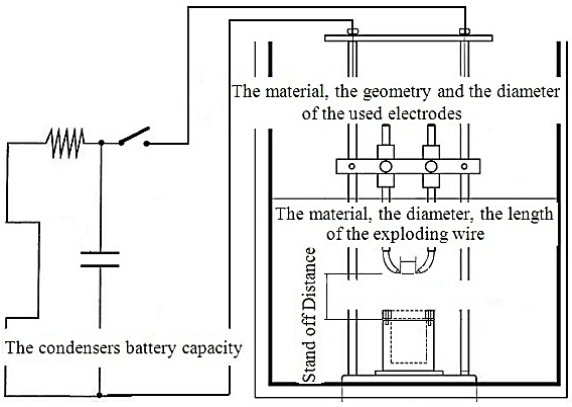


**Fig. 7** Effective parameters in electrohydraulic forming

**شکل 7** پارامترهای مؤثر فرایند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی

[3] Drawing Depth
[4] Discharge Energy
[5] Wire Material
[6] Wire Length
[7] Wire Diameter
[8] Central Composite Design(CCD)
[9] Minitab
[10] ANOVA
[11] Face-Centered Cub(FCD)

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.

### 3-2- 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 نرمال‌بودن[1] است. همچنین پیروی نکردن باقیمانده‌ها از هیچ الگوئی[2] در شکل 8(c) و 8(d) نمایانگر برقراری فرض استقلال[3] است [18].

**جدول 1** مقادیر کدشده فاکتورهای ورودی آزمایش

**Table 1** Coded factors

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

**جدول 2** نتایج آزمایش‌های شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی

**Table 2** Results of EHF experiments

| شماره آزمایش | DE | WM | WL | WD | عمق کشش(mm) |
|---|---|---|---|---|---|
| 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 |

[1] Normality assumption
[2] Structure less
[3] Independence assumption

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 منزلهٔ 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.

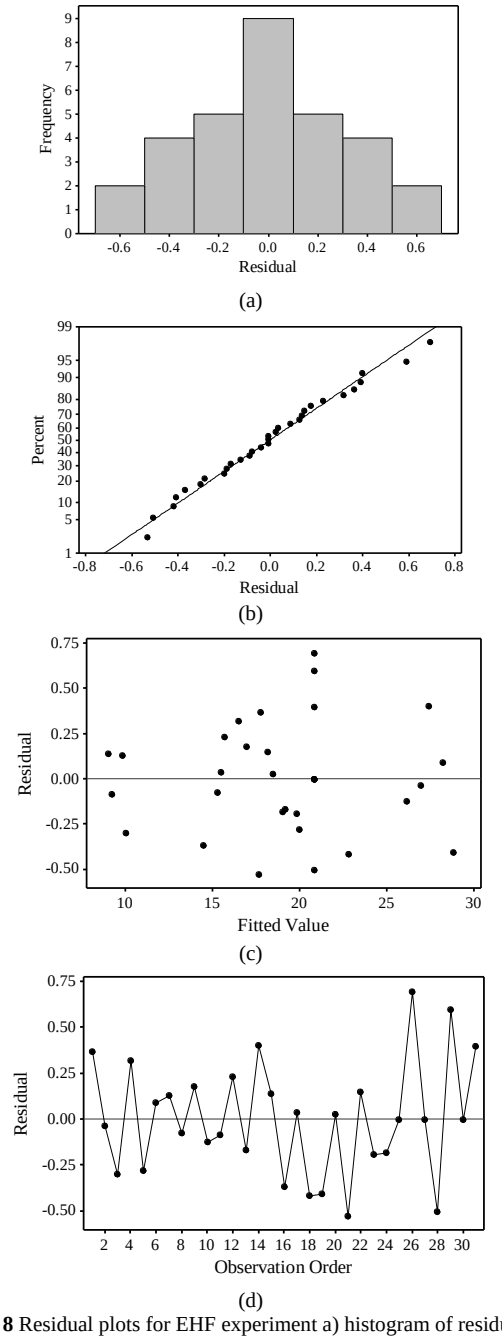


**Fig. 8** Residual plots for EHF experiment a) histogram of residuals b) normal probability of residuals c) residuals versus fitted values d) residuals versus run order

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

**جدول 3** آنالیز واریانس در مدل اولیه و مدل اصلاح‌شده

**Table 3** ANOVA for full and reduced model

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

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

پدیده پیچیده انفجار سیم فلزی در زیر آب[1] 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 نقطه‌جوش[2] می‌گردد. با افزایش دما (از آنجائی شرایط جوشش متعادل فراهم نیست)، شرایط فوق‌داغ[3] اتفاق می‌افتد. در ادامه سیم به‌صورت انفجارگونه‌ای تبخیر و ابتدا لایه بیرونی و سپس کل آن (و آب اطراف آن) به پلاسما تبدیل می‌شود [20,19]. انرژی ایجادشده در این مرحله به انرژی موج شوک، حباب گازی 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 قرارداد. در این بخش در ابتدا به اثر هریک 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[4]) 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[5] 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[6] و قطر الکترودها به ترتیب 50 و 18 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. همچنین از آب شیر[7] 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 تخلیه‌شده 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[8] پائین‌تر نسبت به مس و تنگستن، بهره‌وری بهتری نشان می‌دهد. این موضوع با توجه به این‌که مقدار فوق‌داغی در فلزات با دمای جوش پائین، 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

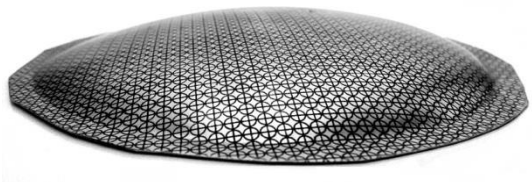

**Fig. 9** Electrohydraulic deformed specimens

**شکل 9** نمونه قطعات تغییر شکل یافته تحت فرایند الکتروهیدرولیکی

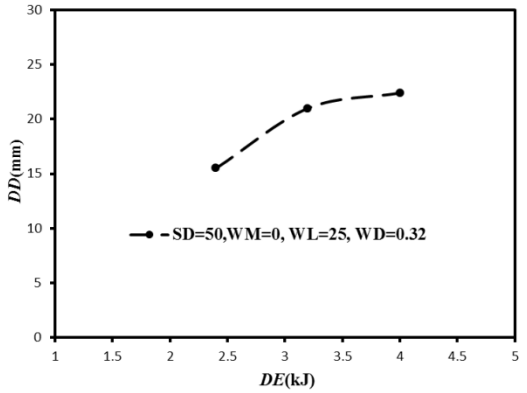


**Fig. 10** The effect of discharge energy

**شکل 10** اثر انرژی تخلیه

[1] Underwater Electrical Wire Explosion(UEWE)
[2] Boiling point
[3] Superheating
[4] Center point
[5] Delay Time
[6] Standoff Distance
[7] Tap water
[8] Vaporization heat

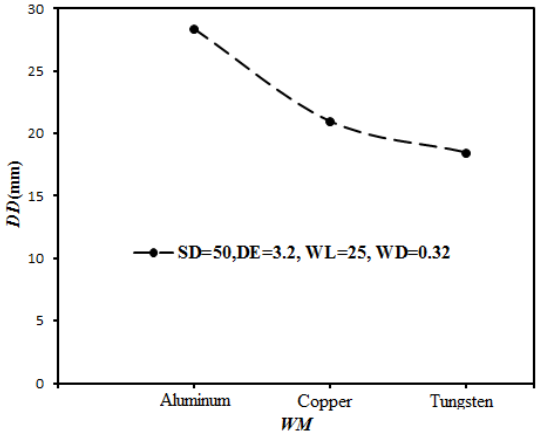


**Fig. 11** The effect of wire material

**شکل 11** اثر جنس سیم

یک اکسترمم 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 الکترود) است. با افزایش فاصله بین الکترودها، شکل کانال پلاسما (و در نتیجه شکل جبهه‌ی موج شوک[1]) به دایره نزدیک می‌شود. با ادامه این روند مجدداً شکل کانال پلاسما مجدداً بیضوی شده (این بار با قطر بزرگ در راستای خط واصل دو الکترود) و در نتیجه جبهه‌ی موج شوک از کروی به سمت بیضوی 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 بیشینه این است که با افزایش قطر سیم، درواقع قطر کانال پلاسما که بین دو الکترود 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.

[1] Shock wave front

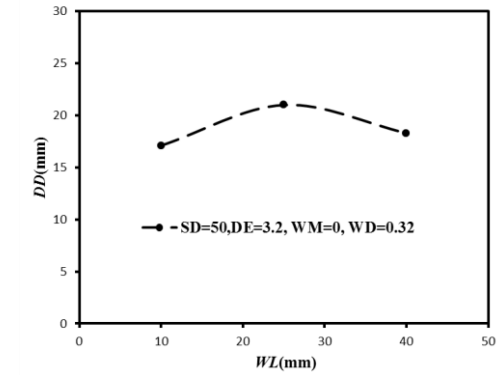


**Fig. 12** The effect of wire length

**شکل 12** اثر طول سیم

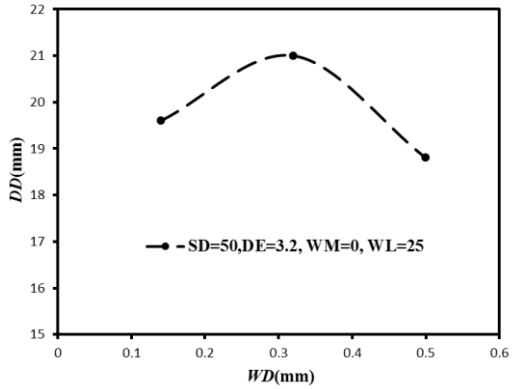


**Fig. 13** The effect of wire diameter

**شکل 13** اثر قطر سیم

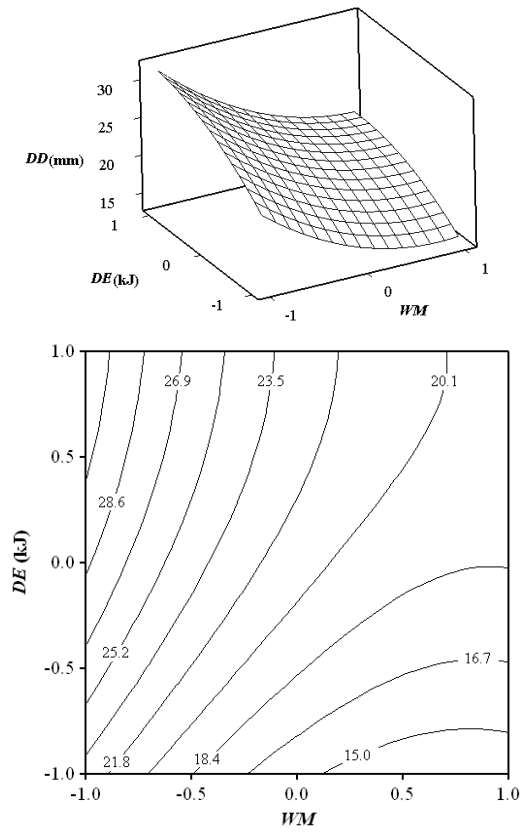


**Fig. 14** Interaction of discharge energy and wire material

**شکل 14** اندرکنش انرژی تخلیه و جنس سیم

همان‌طور که در "شکل 15" مشهود است استفاده از سیم آلومینیومی با هر طولی، تضمین‌کننده رسیدن به عمق کشش بالاست؛ اما ازلحاظ 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 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 میلی-متر) را تا ٪240 افزایش داد.

## 5- نتیجه‌گیری

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

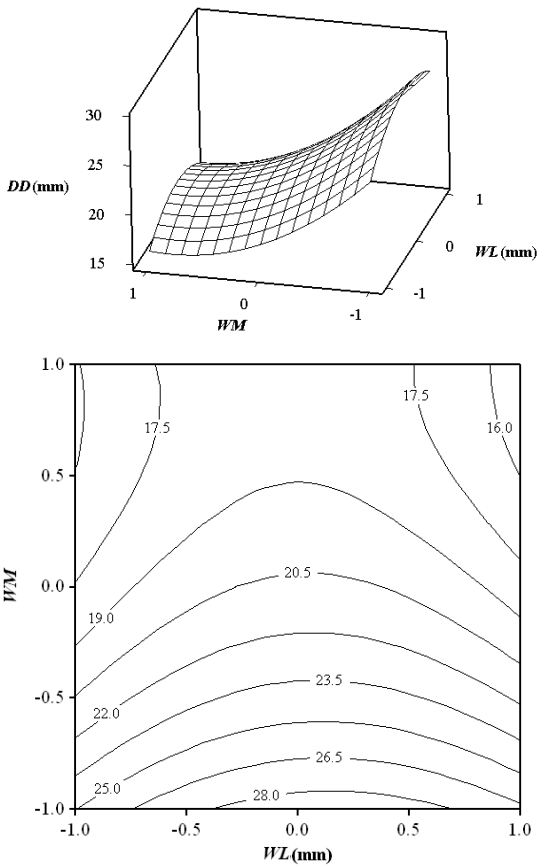


**Fig. 15** Interaction of wire material and wire length

**شکل 15** برهمکنش جنس سیم و طول سیم

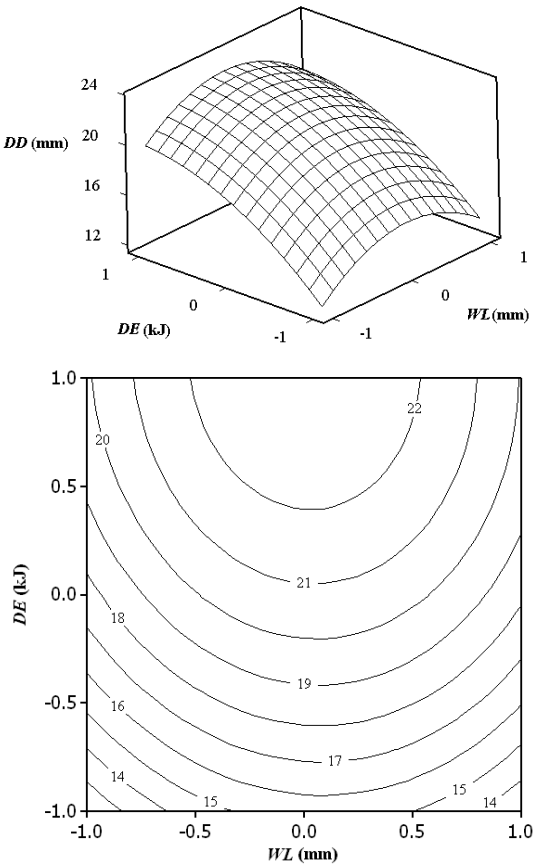


**Fig. 16** Interaction of discharge energy and wire length

**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 فاکتورهای حاضر در مدل اصلاح‌شده دارد.

- 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.

[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.