



## مطالعه فرایند شکل دهی الکتروهیدرولیکی با استفاده از مشاهدات تجربی و شبیه سازی عددی به روش لاگرانژی- اویلری انتخابی

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

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران  
2- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران  
\* تهران، صندوق پستی 19395-1999، mzhoor@kntu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 15 دی 1395

پذیرش: 15 اسفند 1395

ارائه در سایت: 03 اردیبهشت 1396

کلید واژگان:

شکل دهی با سرعت بالا

فرایند الکتروهیدرولیکی

شبیه سازی عددی

لاگرانژی- اویلری انتخابی

### چکیده

شکل دهی الکتروهیدرولیکی یک فرایند شکل دهی ورق فلزی با سرعت بالا است که در آن دو (یا تعداد بیشتر) الکتروود در محفظه ای پر از آب قرار دارند و تخلیه الکتریکی ولتاژ بالا بین آن ها، فشار بالایی جهت شکل دادن ورق ایجاد می کند. در این تحقیق، جهت بررسی اثر پارامترهای مختلف (از جمله انرژی تخلیه، فاصله الکتروودها از ورق و فاصله الکتروودها از هم) بر روی عمق کشش حداکثر و (به طور ضمنی) فشار بیشینه موج شوک، آزمایش های تجربی گسترده ای انجام شد. شکل دهی الکتروهیدرولیکی یک پدیده پیچیده می باشد و آزمایش های تجربی به تنهایی، برای درک مناسب این فرایند کافی نیست. برای توضیح جنبه های مختلف این موضوع از کوپل فرمولاسیون لاگرانژی- اویلری انتخابی با الگوریتم اندرکنش سیال و سازه (که در نرم افزار آلاس داینا در دسترس است) جهت شبیه سازی عددی آن استفاده شده است. جهت مدل کردن اثر تخلیه الکتریکی دو رویکرد متفاوت مورد استفاده قرار گرفته است: جرم معادل ماده منفجره و تزریق انرژی. در رویکرد نخست، به دلیل شباهت پدیده انفجار و تخلیه الکتریکی در آب، انرژی تخلیه الکتریکی به جرم معادل از ماده منفجره تبدیل شده است. در رویکرد دوم، فاصله بین الکتروودها با یک کانال پلاسما جایگزین و انرژی تخلیه الکتریکی در یک زمان کوتاه درون آن تزریق شده است که همین امر منجر به انبساط کانال و ایجاد موج شوک به سمت قطعه کار گردید. در نهایت، تطابق خوبی میان نتایج تجربی و شبیه سازی حاصل گردید.

## Study of electrohydraulic forming process by using experimental observations and numerical simulation with ALE method

Mehdi Zohoor<sup>\*</sup>, Seyed Meysam Mousavi, Amin Ashrafi Tafreshi

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 04 January 2017  
Accepted 05 March 2017  
Available Online 23 April 2017

### Keywords:

High velocity forming  
Electrohydraulic process  
Numerical simulation  
Arbitrary Lagrangian Eulerian

### ABSTRACT

Electrohydraulic forming (EHF) is a high velocity sheet metal forming process in which two or more electrodes are positioned in a water filled chamber and a high-voltage discharge between the electrodes generates a high-pressure to form the sheet. In this study extensive experimental tests were carried out to investigate the effect of different parameters (such as discharge energy, stand off distance and electrodes gap) on the maximum drawing depth and implicit on shock wave maximal pressure in electrohydraulic free forming. EHF is a complex phenomenon and experimental work alone is not sufficient to properly understand this process. To explain different aspects of the problem, Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) formulations coupled with fluid-structure interaction (FSI) algorithms that are available in the advanced finite element code LS-DYNA were used for the numerical simulation. In order to model the effect of the electrical discharge, two different approaches were implemented; explosive equivalent mass and energy leak. In the first approach, according to the similarity between explosion and electrical discharge in the water, electrical discharge energy was converted to equivalent TNT mass. In the second approach electrodes gap is replaced by a plasma channel and electrical discharge energy was leaked to it in a short amount of time which makes the channel expand and generate shock waves propagating toward the workpiece. Finally, a good correlation was observed between the experimental and simulation results.

### 1- مقدمه

را فرآیند شکل دهی انفجاری می نامند. شکل دهی الکترومغناطیسی یکی دیگر از روش های شکل دهی قطعات فلزی با سرعت بالاست که در آن از نیروی الکترومغناطیس به عنوان عامل شکل دهی استفاده می شود. در فرآیند شکل دهی الکترومغناطیس مقدار قابل توجهی انرژی الکتریکی در بانک خازنی

شکل دهی انفجاری، الکترومغناطیسی و الکتروهیدرولیکی، مهم ترین فرایندهای شکل دهی با سرعت بالا می باشند. شکل دادن با استفاده از انرژی حاصل از انفجار و به کارگیری محیط واسط (آب، هوا و ...) برای انتقال انرژی

### Please cite this article using:

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. 299-306, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

کرده اند. تحقیقات رهنگی و همکارانش [11] (با به دست آوردن میزان سرعت، کرنش و نرخ کرنش به کمک تکنیک دیجیتالی همبستگی تصویر) یکسری توجیه های کیفی در مورد علت افزایش شکل پذیری ورق آلومینیوم در اثر شکل دهی به روش الکترویهیدرولیکی در اختیار خواننده قرار می دهد. همبرگ و همکارانش [12] در تلاش خود برای ایجاد منحنی هایی با شعاع کوچک در ورق، به مقایسه شکل دهی الکترویهیدرولیکی با دیگر فرایندها (هیدروفورمینگ، شکل دهی الکترومکانیکی و شکل دهی پنومکانیکی) پرداختند. آن ها نتیجه گرفتند که رسیدن به شعاع های کوچک به کمک فرایند الکترویهیدرولیکی میسرتر است. گلوآشکو و همکارانش از افزایش (در حدود 10 تا 15 درصد) شکل پذیری لوله های آلومینیومی، مسی و فولادی در اثر شکل دهی به روش الکترویهیدرولیکی در قالب های مثلثی، مربعی و شش گوش خبر داده اند [13].

ایان و ماساکی در مقالاتی که در دهه 60 به چاپ رساندند [14] به بررسی پارامترهای مؤثر این فرایند (جنس سیم بین دو الکترو، قطر و طول سیم بین دو الکترو و ...) بر روی پالس فشار ایجاد شده پرداختند. روش های مختلف اندازه گیری فشار سیال در اطراف جرقه (شامل روش های مستقیم و غیرمستقیم)، توسط سایپین و گرینکو [15] مقایسه و رابطه ای جهت تخمین آن ارائه شده است. ولتزل و همکارانش [16] اثر سیم بین دو الکترو (آلومینیوم، مس و ...) و سیالی (آب، روغن و هوا) که جرقه در آن اتفاق می افتد را بررسی کردند.

تفاوت شبیه سازی های ارائه شده از فرایند شکل دهی الکترویهیدرولیکی توسط محققین مختلف، عمدتاً در نحوه اعمال اثر تخلیه الکتریکی است. تبدیل انرژی الکتریکی ذخیره شده در خازن به مقدار حساب شده ای از ماده منفجره و شبیه سازی شکل دهی انفجاری بجای شکل دهی الکترویهیدرولیکی، یکی از رایج ترین روش های مدل سازی تخلیه الکتریکی در آب می باشد. دائن و همکاران [17] با استفاده از همین روش به شبیه سازی این فرایند پرداختند. مین [18] از جمله محققینی است که با استفاده از اعمال پالس فشار بجای تخلیه الکتریکی، سعی در مدل سازی این فرایند کرد. تعداد معدودی از محققین [19] نیز با اعمال پالس شتاب، اثر تخلیه الکتریکی را اعمال کردند. در این تحقیق، ابتدا سعی شده است با انجام آزمایش های تجربی، شناخت مناسبی از پارامترهای مؤثر فرایند شکل دهی الکترویهیدرولیکی حاصل شود. در ادامه با اتخاذ دو رویکرد متفاوت، شبیه سازی عددی این فرایند انجام شده است.

## 2- آزمایش های تجربی

تجهیزات فرایند شکل دهی الکترویهیدرولیکی شامل دو قسمت الکتریکی و مکانیکی است.

اجزاء الکتریکی شامل سیستم کنترل، واحد تولید پالس، الکترودها و نگهدارنده آن ها، می باشد. کنترل زمان و میزان شارژ خازن ها، 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، مقاومت های پیشانی و پشت موج و تقسیم کننده می باشد (شکل 3).

در این تحقیق الکترودها از جنس مس (که با چندلایه عایق الکتریکی

ذخیره شده و با استفاده از سوئیچ های ولتاژ بالا، به سرعت درون سیم پیچی تخلیه می شود. جریان الکتریکی در سیم پیچ، یک میدان مغناطیسی گذرای شدید تولید می کند. جریان گردابی القاشده درون قطعه کار، با میدان مغناطیسی اولیه تعامل کرده و باعث دفع متقابل قطعه کار و سیم پیچ می شود. نیروی دافعه به قدری زیاد است که تنش بزرگ تر از استحکام تسلیم ماده اعمال می کند و باعث تغییر شکل دائمی آن می گردد.

شکل دهی الکترویهیدرولیکی یکی از فرایندهای منحصربه فرد شکل دهی با سرعت بالا است. این فرایند مشابه شکل دهی انفجاری است با این تفاوت که برای ایجاد موج شوک، به جای استفاده از مواد منفجره، از انفجار الکتریکی استفاده می شود. در این فرایند، تخلیه الکتریکی با ولتاژ بالا بین دو الکترو (یا بیشتر)، در یک محفظه پر از سیال، موجب ایجاد کانال پلاسما بین آن ها می شود. انبساط این کانال پلاسما منجر به ایجاد موج شوک در سیال و شکل دهی ورق می گردد. دو روش رایج برای تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی در فرایند الکترویهیدرولیکی عبارتند از: تخلیه خازن از میان شکاف بین دو الکترو و تخلیه خازن از طریق سیم بسیار نازک تعبیه شده بین دو الکترو. در روش دوم، مسیر تخلیه الکتریکی به صورت از پیش تعیین شده است که این امر منجر به تبدیل انرژی کارآمدتر و کنترل بهتر می گردد؛ اما نرخ تولید پایین تری را نیز موجب می شود. شماتیک فرایند شکل دهی الکترویهیدرولیکی در شکل 1 نشان داده شده است.

اولین مشاهده ها از ایجاد نیروی قوی مکانیکی حاصل از تخلیه الکتریکی در سیال، مربوط می شود به گزارش های لین در سال 1767 [1] و پرستلی در سال 1769 [2]. توسعه اولیه فرایند الکترویهیدرولیکی توسط یوتکین [3] در روسیه به ثبت رسیده است. آزمایش های اولیه جهت استفاده از این پدیده در شکل دهی ورق ها برمی گردد به کارهای برونو در سال 1968 [4]، داویس و آستین در سال 1970 [5] و چاپین در سال 1978 [6].

مزیت فرایند شکل دهی الکترویهیدرولیکی نسبت به انفجاری (قابلیت اتوماسیون بیشتر) و الکترومغناطیسی (قابلیت استفاده روی تمام مواد از جمله موادی که دارای هدایت الکتریکی پائینی هستند و ایجاد اشکال پیچیده) باعث شده تا این فرایند بعد از یک افول چند دهه ای، مجدداً مورد توجه قرار گیرد. محققین تلاش می کنند با استفاده از الکترودهای بادوام تر، آب بندی بهتر و مدیریت بهتر فشار ایجاد شده توسط تخلیه الکتریکی، از این فرایند برای تولید با تیراژ بالا در صنایع استفاده کنند.

تحقیقات در زمینه شکل دهی ورق فلزی و حد شکل پذیری آن نشان داده است که وقوع حالت گلوئی شدگی در ورق فلزی متأثر از نرخ کرنش است [7-9].

دائن و بالانتیرام [10] نتایج بسیار خوش بینانه ای از افزایش شکل پذیری ورق (در حدود 5.5 برابر برای AA6061-T4 و 3.5 برابر برای چدن و مس) توسط فرایند الکترویهیدرولیکی در مقایسه با فرایندهای سنتی گزارش

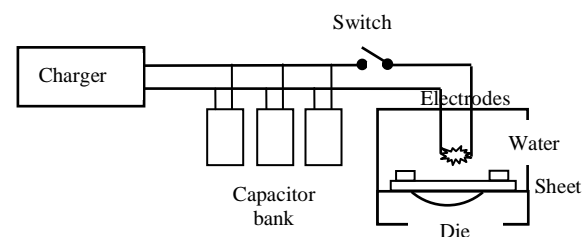


Fig. 1 Schematic of sheet metal forming with EHF

شکل 1 شماتیک شکل دهی ورق فلزی توسط فرایند الکترویهیدرولیکی

<sup>1</sup> Digital Image Correlation technique

باشد. علت ایجاد این سوراخ آن است که ورق در موقع تغییر شکل با مقاومت هوای محبوس داخل استوانه، مواجه نشود.

### 3- شبیه سازی عددی

در این تحقیق با استفاده از نرم افزار ال اس داین<sup>2</sup> و اتخاذ دو رویکرد متفاوت در اعمال اثر تخلیه الکتریکی، فرایند شکل دهی الکترویهیدرولیکی در دیدگاه لاگرانژی- اویلری انتخابی<sup>3</sup> شبیه سازی شده است. به دلیل تقارن هندسی و بارگذاری، تنها یک چهارم آن، مدل شده است.

#### 1-3- مقایسه دیدگاه لاگرانژی، اویلری و لاگرانژی- اویلری انتخابی

یکی از مهم ترین موضوعات در شبیه سازی مسائل مربوط به دینامیک سیالات یا مکانیک جامدات غیرخطی، انتخاب توصیف سینماتیکی<sup>4</sup> مناسب برای محیط پیوسته است. منظور از توصیف سینماتیکی تعیین رابطه بین محیط تغییر شکل دهنده با شبکه (یا مش) است.

بر مبنای رابطه بین محیط تغییر شکل دهنده با شبکه می توان سه نوع دیدگاه زیر را تعریف کرد (شکل 5):

1- دیدگاه لاگرانژی: در این فرمولاسیون هر گره از شبکه، ذره مادی را دنبال می کند. توصیف لاگرانژی امکان ردیابی ساده تداخل و اندرکنش مواد مختلف را فراهم می سازد. ضعف این مدل به ناتوانی شبکه در دنبال کردن تغییر شکل های بزرگ در ماده مربوط می شود.

2- دیدگاه اویلری: در این فرمولاسیون که بیشتر در دینامیک سیالات بکار می رود، شبکه ثابت است و محیط پیوسته نسبت به شبکه حرکت می کند. از این رو تغییر شکل های بزرگ در ماده بر روی ساختار مش تأثیر نمی گذارد. هر چند این فرمولاسیون در مدل سازی تداخل مواد مختلف دارای ضعف است.

3- دیدگاه لاگرانژی- اویلری انتخابی: به دلیل ضعف های مدل های خالص لاگرانژی و اویلری تکنیکی توسعه پیدا کرده است که قابلیت های هر دو این فرمولاسیون ها را با هم ترکیب کرده است و لاگرانژی- اویلری انتخابی نامیده می شود. در این دیدگاه گره های شبکه می توانند با سرعتی مستقل از ذرات مادی (برخلاف حالت لاگرانژی که به هم کوپل بودند) حرکت کنند.

از جمله قابلیت های ال اس داین برای دیدگاه های اویلری و لاگرانژی- اویلری انتخابی، استفاده از حالت چند ماده ای<sup>5</sup> برای این المان ها است. در این حالت هر المان (جزء) می تواند ترکیبی از مواد مختلف باشد.

#### 2-3- دو رویکرد متفاوت در اعمال اثر تخلیه الکتریکی

پدیده انفجار و تخلیه الکتریکی در سیال، از بسیاری جنبه ها مشابه یکدیگر هستند [20]. با انفجار ماده منفجره، موج شوک اولیه و حباب گازی منبسط شونده ای ایجاد می شود. کاهش فشار داخل حباب به حد کاویتاسیون<sup>6</sup> و فشار هیدرواستاتیک آب اطراف آن، مانع ادامه انبساط و موجب منقبض شدن حباب می شود. انقباض حباب تا زمانی که فشار داخل آن مانع نشود، ادامه می یابد. در ادامه مجدداً حباب شروع به انبساط کرده که همین امر منجر به ایجاد موج شوک ثانویه می شود. این روند نوسانی تا زمانی که فشار داخلی حباب توسط آب اطراف مستهلک شود یا به سطح آزاد برسد ادامه پیدا

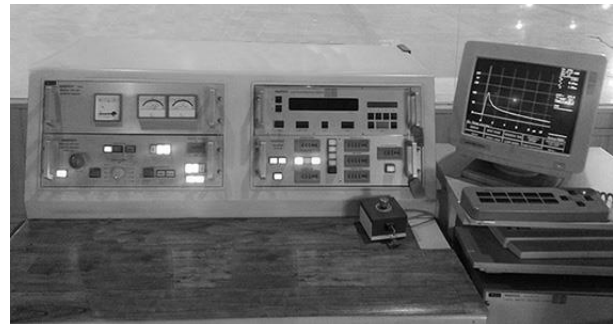


Fig. 2 Control unit

شکل 2 واحد کنترل

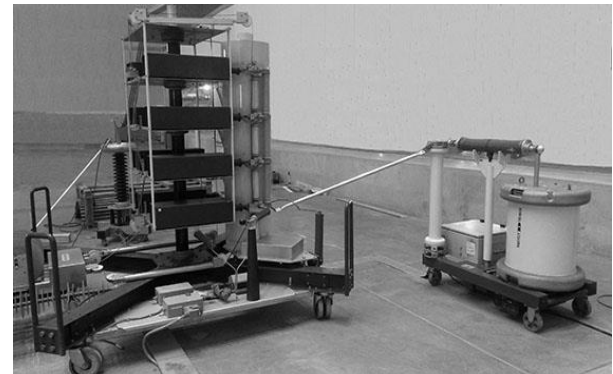


Fig. 3 Pulsed power generator

شکل 3 واحد تولید پالس

ولتاژ بالا پوشیده شده اند) می باشند. در اثر تخلیه های الکتریکی شدید، نوک الکتروود سریعاً دچار تخریب می شود. برای جلوگیری از اختلال در روند آزمایش ها؛ نوک الکتروود، طوری طراحی شده است که به راحتی قابلیت تعویض داشته باشد. جهت رعایت ملاحظات عایق کاری، سیستم نگهدارنده الکتروودها از فیبر استخوانی و پلی آمید ساخته شده است. تنظیم فاصله الکتروودها از یکدیگر و الکتروودها از ورق، از طریق سیستم نگهدارنده امکان پذیر است (شکل 4).

فرایند شکل دهی ورق در این پژوهش، در واقع، شکل دهی 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 امکان پذیر



Fig. 4 Electrode system in the water chamber

شکل 4 سیستم الکتروود در محفظه آب

<sup>1</sup> Free Forming

<sup>2</sup> LS-DYNA

<sup>3</sup> Arbitrary Lagrangian-Eulerian

<sup>4</sup> Kinematical Description

<sup>5</sup> Multi-Material

<sup>6</sup> Cavitation Limit

جدول 1 پارامترهای مورد استفاده در مدل ماده و معادله حالت تی ان تی

Table 1 Material and equation of state parameters for TNT

پارامتر	مقدار
چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	1.630
(m/s) $v_d$	6930
(GPa) $P_{CJ}$	21
(GPa) $A$	373.77
(GPa) $B$	3.747
$R_1$	4.15
$R_2$	0.90
$\omega$	0.35
$V$	1
(kJ/M <sup>3</sup> ) $E_0$	6.0 e+6

که در آن  $I(t)$  و  $U(t)$  به ترتیب جریان و ولتاژ تخلیه اندازه گیری شده بین دو الکتروود است. شماتیک نمودارهای  $I(t)$ ،  $U(t)$  و  $N(t)$  که از آزمایش به دست می آید، در شکل 7 نشان داده شده است.

در این رویکرد کانال پلاسما به عنوان حباب گاز ایده آلی که منبسط می شود، در نظر گرفته می شود. امکان استفاده از حباب گاز ایده آل برای مدل کردن رفتار کانال پلاسما به اثبات رسیده است [22]. انرژی الکتریکی محاسبه شده از (2) به طور یکنواخت در کل حجم کانال پلاسما (که برابر حجم ماده منفجره در رویکرد اول است) وارد شده است. فشار هر یک از المان های کانال پلاسما با استفاده از معادله حالت (3) (که در واقع تعادل انرژی برای گاز ایده آل در حال انبساط آدیاباتیکی است) محاسبه می گردد.

$$P_{ch} = (\gamma - 1) \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right) E \quad (3)$$

که در آن  $P_{ch}$  فشار،  $\rho$  چگالی جرمی لحظه ای،  $\rho_0$  چگالی جرمی اولیه و  $E$  انرژی تولید شده در گاز درون کانال است.  $\gamma$  شاخص آدیاباتیکی پلاسما است که برابر 1.26 می باشد [23].

برای کانال پلاسما از ماده بلا اثر<sup>4</sup> و معادله حالت خطی چند جمله ای همراه نشت انرژی<sup>5</sup> (رابطه 4) استفاده شده است.

$$P_{ch} = C_0 + C_1\mu^2 + C_2\mu^3 + C_3\mu + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)\dot{E} \quad (4)$$

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$$

$C_0$  الی  $C_6$  ضریب های ثابتی هستند که با انجام یک محاسبه ساده می توانند طوری تعیین شوند که رابطه 3 را به 4 تبدیل کند.

### 3-3- مشخصات مدل

مشخصات هندسی مورد استفاده در شبیه سازی، دقیقاً مطابق آزمایش های تجربی در نظر گرفته شده است (شکل 8).

در این تحقیق از ورق برنجی به شکل دایره (به ترتیب با قطر و ضخامت 110 و 1 میلی متر) استفاده شده است. مدل توصیف کننده رفتار ورق، نقش بسزایی در کیفیت شبیه سازی دارد. ناهمسانگردی و نرخ کرنش، در رفتار ورق

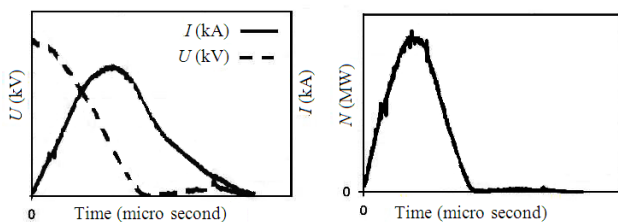


Fig. 7 Typical diagrams for current  $I(t)$ , voltage  $U(t)$  and energy  $N(t)$

شکل 7 نمونه ای از نمودارهای به دست آمده برای جریان، ولتاژ و توان الکتریکی

<sup>4</sup> NULL

<sup>5</sup> LINEAR\_POLYNOMIAL\_WITH\_ENERGY\_LEAK

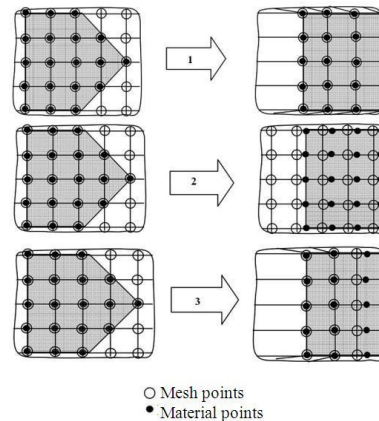


Fig. 5 Kinematical description of deformation zone 1) Lagrangian, 2) Eulerian, 3) ALE

شکل 5 توصیف سینماتیکی محیط تغییر شکل دهنده: 1) لاگرانژی 2) اویلری 3) لاگرانژی- اویلری انتخابی

می کند (شکل 6). در رویکرد اول (که از این به بعد به اختصار ALE-TNT نامیده می شود) با در نظر گرفتن تشابه پدیده انفجار و تخلیه الکتریکی در سیال، از یک سو و مقایسه میزان انرژی آزاد شده توسط ماده منفجره (4183 کیلوژول به ازای یک کیلوگرم برای تی ان تی<sup>1</sup>) با انرژی ذخیره شده در خازن ها، از سوی دیگر؛ اثر تخلیه الکتریکی با جرم معادل تی ان تی جایگزین شده است.

برای تی ان تی از مدل مادی سوزش قوی ماده منفجره<sup>2</sup> و معادله حالت جونز-ویکینز-لی<sup>3</sup> (رابطه 1) استفاده شده است (جدول 1).

$$P = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (1)$$

در رویکرد دوم (که از این به بعد به اختصار ALE-Energy Leak نامیده می شود) با اندازه گیری مقادیر ولتاژ و جریان تخلیه در آزمایش های تجربی، میزان انرژی تزریق شده به کانال پلاسما محاسبه می گردد. توان الکتریکی تزریق شده به کانال پلاسما برابر است با:

$$N(t) = I(t).U(t) \quad (2)$$

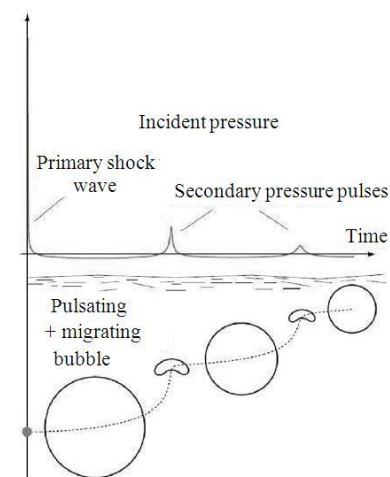


Fig. 6 Sequence of events for underwater explosion bubble [21]

شکل 6 توالی رویدادها حباب انفجار در زیر آب [21]

<sup>1</sup> TNT

<sup>2</sup> HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN

<sup>3</sup> JONES\_WILKINS\_LEE

الاس داینا به همین منظور تعبیه شده است استفاده گردید. همچنین برای تعریف تماس المان های ماده منفجره (و کانال پلاسما) و آب که هر دو از نوع لاگرانژی- اویلری انتخابی هستند از فرمولاسیون مواد چندگانه<sup>5</sup> استفاده شده است. المان های آب، از نوع توپر<sup>6</sup> و مکعبی (در مرکز با طول ضلع تقریبی 1 میلی متر و در فواصل دورتر به شکل شعاعی با طول ضلع بزرگ تر) می باشند. همچنین لبه های ورق، مطابق شرایط آزمایش تجربی کاملاً کلمپ شده است. شکل 9 مدل ایجاد شده را نشان می دهد.

عوامل متعددی (از جمله اندازه المان ها و پارامترهای موجود در دستورات مختلف الاس داینا) بر نتیجه شبیه سازی مؤثرند. با در نظر گرفتن نتیجه سه آزمون تجربی و انجام شبیه سازی های مقدماتی (با اندازه المان های متفاوت و پارامترهای تنظیمی مختلف)، سعی در انتخاب بهترین اندازه المان و پارامترهای مؤثر، شد. پس از آن در دیگر شبیه سازی ها از همان اندازه المان ها و پارامترها استفاده گردید.

#### 4- نتایج و بحث

آزمایش های اولیه نشان داد تکرارپذیری فرایند شکل دهی الکتروهیدرولیکی پایین است. به نظر می رسد علت عمده این امر، تأثیرگذاری شدید پارامترهای الکتریکی فرایند باشد. مشاهدات اولیه حاکی از وجود یک تأخیر زمانی<sup>7</sup> در تخلیه الکتریکی بین دو الکترود (بعد از زدن کلید تخلیه) است. با افزایش انرژی ذخیره شده در خازن، میزان تأخیر زمانی نیز افزایش می یابد. در مورد فاصله بین دو الکترود نیز روند مشابهی مشاهده شد. چند نمونه از ورق های تغییر شکل یافته در شکل 10 نشان داده شده است.

در شکل 11 اثر میزان انرژی تخلیه شده از طریق خازن ها بین دو الکترود بر عمق کشش مرکز ورق، نشان داده شده است. با افزایش میزان انرژی تخلیه، ارتفاع تغییر شکل ورق به طور غیرخطی افزایش می یابد. این روند تا پارگی ورق از مرکز ادامه می یابد. علت این رفتار غیرخطی در نتایج، عمدتاً ناشی از این واقعیت است که رفتار ورق متأثر از نرخ کرنش (که آن هم به نوبه خود وابسته به میزان انرژی ذخیره شده در خازن ها می باشد) است. علاوه بر

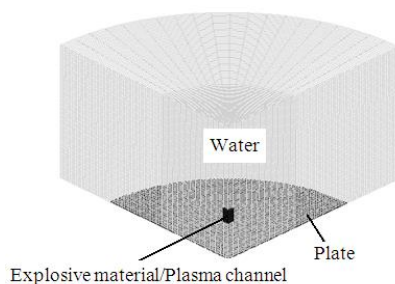


Fig. 9 Finite element model

شکل 9 مدل اجزاء محدود



Fig. 10 Electrohydraulic deformed specimens

شکل 10 نمونه قطعات تغییر شکل یافته تحت فرایند الکتروهیدرولیکی

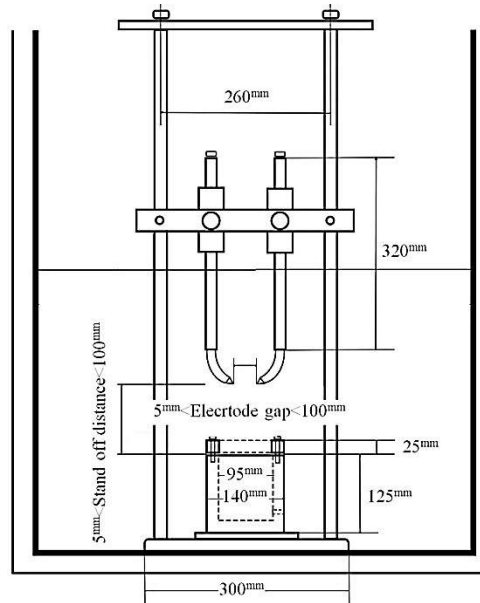


Fig. 8 Dimensions of EHF setup

شکل 8 ابعاد تجهیزات فرایند شکل دهی الکتروهیدرولیکی

تحت فرایند شکل دهی الکتروهیدرولیکی بسیار مؤثر هستند. در این تحقیق از ناهمسانگردی در مقابل نرخ کرنش صرف نظر شده است. ورق به صورت پوسته<sup>1</sup> با المان های مربعی (به طول ضلع تقریبی 1.3 میلی متر) در نظر گرفته شده است. در نهایت برای توصیف رفتار ورق از مدل جانسون-کوک<sup>2</sup> (معادله 5) استفاده شده است (جدول 2).

$$\sigma = [A + B(\epsilon)^n] \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \quad (5)$$

برای مدل سازی رفتار آب، از مدل ماده بلاثر و معادله حالت گرونینزن<sup>3</sup> (رابطه 6) استفاده شده است. پارامترهای مورد نیاز جهت مدل کردن رفتار آب در جدول 3 آورده شده است.

$$P = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[ 1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]} + (\gamma_0 + a \mu) \quad (6)$$

برای انتقال موج شوک از آب به ورق از نوع خاصی از قیود<sup>4</sup> که در

جدول 2 پارامترهای مورد استفاده در مدل ورق برنجی

Table 2 Material parameters used for brass sheet

پارامتر	مقدار
(MPa)A	112
(MPa)B	505
C	0.009
m	1.68
n	0.42

جدول 3 پارامترهای مورد استفاده در ماده و معادله حالت آب

Table 3 Material and equation of state parameters for water

پارامتر	مقدار
چگالی اولیه $\rho_0$	1000
سرعت صوت C	1480
$\gamma_0$	0.5
a	0
$S_1$	2.56
$S_2$	1.986
$S_3$	1.2268

<sup>1</sup> SHELL

<sup>2</sup> JOHNSON\_COOK

<sup>3</sup> GRUNEISEN

<sup>4</sup> CONSTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID

<sup>5</sup> ALE\_MULTI-MATERIAL\_GROUP

<sup>6</sup> Solid

<sup>7</sup> Delay Time

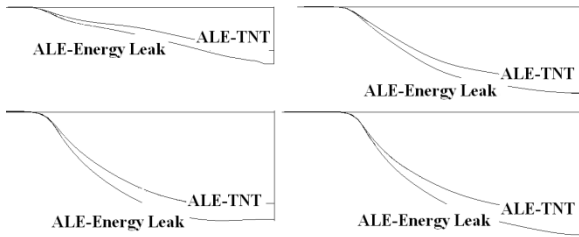


Fig. 14 Time history of the sheet profile

شکل 14 تاریخچه تغییر شکل پروفیل ورق

سرعت بالای تغییر شکل ورق تحت فرایند الکترویهیدرولیکی (با همان شرایط بالا) در مقایسه با روش های سنتی، به خوبی در شکل 15 قابل مشاهده است. نمودار سرعت - زمان دارای دو مقدار بیشینه؛ یکی در اوایل فرآیند (در زمان 30 میکروثانیه منطبق با موج شوک اولیه) و دیگری در انتهای فرایند (در زمان 300 میکروثانیه) است. منفی شدن سرعت در انتهای فرایند (بعد از 400 میکروثانیه) با پدیده برگشت فنی قابل توجیه است. این روند با نتایج تجربی دیگر محققین [24] در انطباق کامل است.

در ادامه با تغییر فاصله الکترودها از ورق، میزان خیز ماندگار ورق بررسی شد (شکل 16). همان طور که قابل مشاهده است، تقریباً یک رابطه خطی بین فاصله الکترودها از ورق و عمق کشش ورق، وجود دارد. اثر تغییر فاصله بین الکترودها (ضمن ثابت نگه داشتن بقیه پارامترهای مؤثر) بر خیز ماندگار مرکز ورق در شکل 17 قابل مشاهده است. در این نمودار یک مقدار بهینه برای فاصله بین دو الکترودها وجود دارد (که با تغییر سایر پارامترها، تغییر می کند). با افزایش فاصله بین الکترودها، شکل جبهه موج شوک<sup>2</sup> از کروی به سمت بیضوی متمایل شده که همین امر منجر به تغییر پروفیل ورق های تغییر شکل یافته از حالت گنبدی به اشکالی پختر (و در نتیجه ارتفاع گنبد کمتر) می شود.

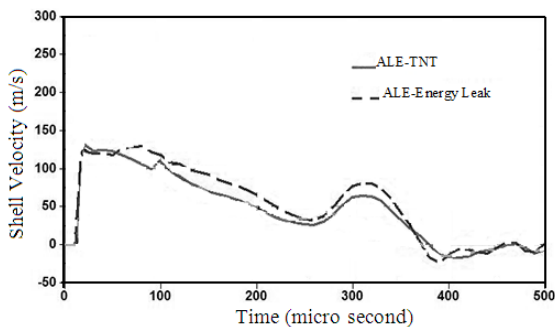


Fig. 15 Velocity at the dome apex (Z-direction)

شکل 15 سرعت در رأس گنبد (در جهت Z)

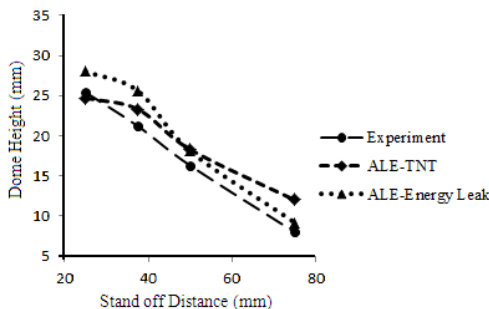


Fig. 16 The effect of stand off distance on dome height

شکل 16 اثر فاصله الکترودها تا ورق بر روی ارتفاع گنبد

رفتار غیرخطی ورق، از سایر پارامترهای الکتریکی مدار (از جمله اندوکتانس و ...) که تأثیر مستقیم بر نحوه تشکیل کانال پلاسما دارند نباید غافل شد. تقریباً در اکثر موارد تغییر شکل حاصل از آزمایش های تجربی در مقایسه با نتایج شبیه سازی عددی، کمتر است. دلیل این امر عمدتاً به این خاطر است که کل انرژی ذخیره شده در خازن، بین دو الکترودها تخلیه نمی شود و مقداری از آن تا قبل از رسیدن به الکترودها هدر می رود. همچنین پیش بینی های حاصل از شبیه سازی با رویکرد دوم عمدتاً بیشتر از رویکرد اول می باشد.

نمودار 12 جابجایی مرکز ورق بر حسب زمان (حاصل از شبیه سازی فرایند با انرژی ذخیره شده 3.2 کیلوژول، فاصله الکترودها از ورق 30 میلی متر و فاصله الکترودها از یکدیگر 15 میلی متر) را نمایش داده است. در انتهای هر دو نمودار (بعد از 400 میکروثانیه) مشاهده می شود ورق مقدار ناچیزی برگشت می کند که ناشی از پدیده برگشت فنی<sup>1</sup> است. شکل های 13 و 14 نحوه تغییر شکل ورق و مقایسه دو رویکرد مختلف در اعمال اثر تخلیه الکتریکی در طول فرایند را نمایش می دهند.

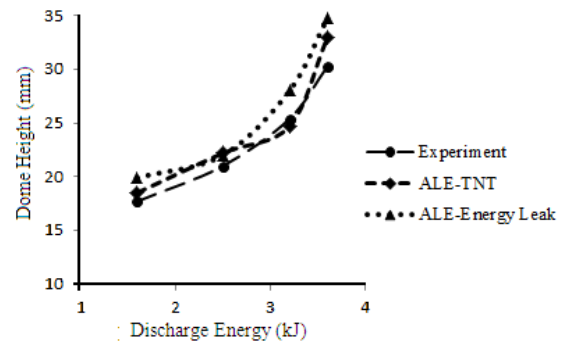


Fig. 11 The effect of discharge energy on dome height

شکل 11 اثر انرژی تخلیه روی ارتفاع گنبد

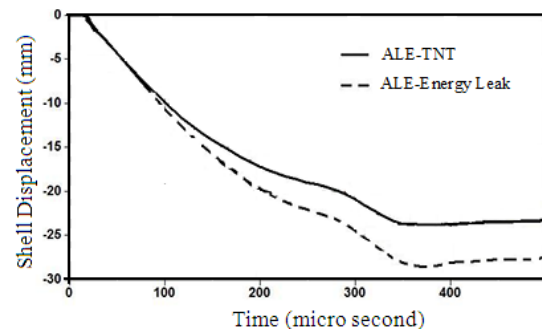


Fig. 12 Displacement of the middle node of the blank

شکل 12 تغییر مکان گره در مرکز ورق

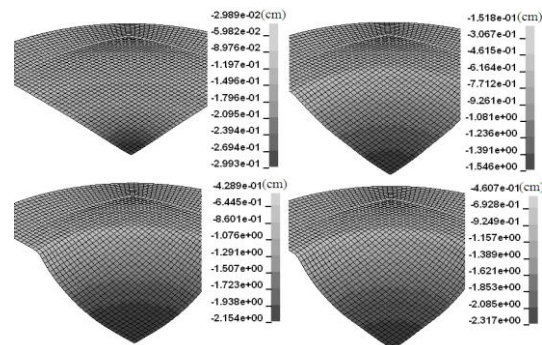


Fig. 13 Deformation of the blank during the EHF

شکل 13 تغییر شکل ورق طی فرایند شکل دهی الکترویهیدرولیکی

<sup>2</sup> Shock wave front

<sup>1</sup> Spring back

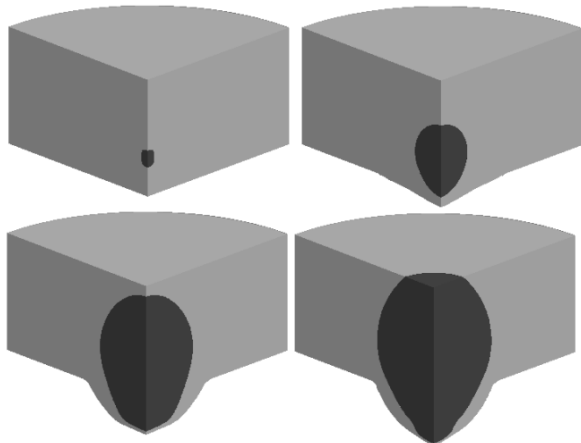


Fig. 20 Discharge channel expansion (second approach)  
 شکل 20 نحوه انبساط کانال تخلیه (رویکرد دوم)

پژوهش، موارد ذیل استنتاج گردید:

- بر طبق آزمایش های تجربی، تکرارپذیری فرایند شکل دهی الکتروهایدرولیکی پایین است (به دلیل تأثیرگذاری شدید پارامترهای الکتریکی).
- آزمایش های اولیه حاکی از آن است که استفاده از یک سیم نازک بین دو الکترو موجب سهولت در تخلیه الکتریکی می شود (هرچند آزمایش هایی که نتایج آن ها در قسمت های قبل این مقاله ارائه شده است، همگی بدون سیم بین دو الکترو انجام شده اند).
- از زمان اتصال کلید تخلیه تا انجام تخلیه، یک فاصله زمانی وجود دارد (تأخیر زمانی). به نظر می رسد هرچه این تأخیر زمانی بیشتر باشد میزان هدر رفتن انرژی ذخیره شده در خازن ها نیز بیشتر می شود. پارامترهای بسیاری (عمدتاً الکتریکی) در این تأخیر زمانی مؤثر می باشند که بررسی آن ها احتیاج به آزمایش های بیشتری دارد.
- روند تغییر خیز ماندگار ورق با افزایش تخلیه، افزایشی و با افزایش فاصله محور الکتروها از ورق، کاهش یافته است؛ اما در مورد اثر فاصله الکتروها از هم بر روی خیز ماندگار ورق باید گفت که با توجه به شرایط آزمایش یک نقطه بهینه وجود دارد. برای به دست آوردن این نقطه بهینه احتیاج به استفاده از الگوریتم های بهینه سازی (به عنوان نمونه روش سطح پاسخ) می باشد.
- استفاده از المان های لاگرانژی - اویلری انتخابی برای شبیه سازی فرایند (در مقایسه با المان های آکوستیک که برخی محققین جهت شبیه سازی انتشار موج شوک استفاده می کنند) منجر به نتایج بهتر و واقعی تری می شود. هرچند زمان شبیه سازی و زحمت تعیین پارامترهای مرتبط را افزایش می دهد.
- نحوه اعمال اثر تخلیه الکتریکی در این پژوهش در مقایسه با اعمال فشار، اعمال شتاب حجمی و سایر روش های دیگر محققین از مزیت های غیر قابل انکاری برخوردار است. هر دو رویکرد اعمال اثر تخلیه الکتریکی (جرم معادل تی ان تی و تزریق انرژی) با خطای کمتر از ده درصد، تطابق خوبی با نتایج تجربی داشته است.

<sup>1</sup> Response surface methodology (RSM)

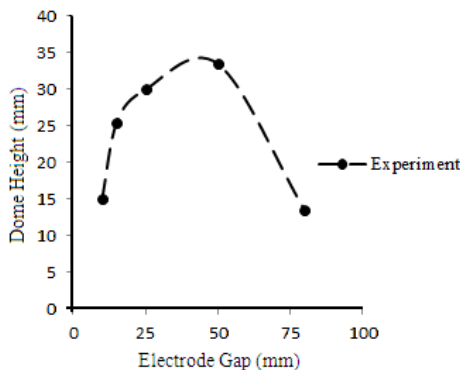


Fig. 17 The effect of electrode gap on dome height  
 شکل 17 اثر فاصله بین الکتروها بر روی ارتفاع گنبد

در شکل 18 فشار حاصل از دو رویکرد در اعمال اثر تخلیه الکتریکی (در نزدیکی سطح ورق) با یکدیگر مقایسه شده اند. همان طور که مشاهده می شود شکل و بیشینه فشار، تطابق خوبی با نمودارها و روابط گزارش شده برای موج شوک در منابع معتبر دارد [25]. نوسانات ناچیزی که در ادامه موج شوک اولیه (بعد از 50 میکروثانیه) مشاهده می شود ناشی از موج شوک ثانویه و ... می باشد که نحوه ایجاد آن قبلاً توضیح داده شده است. چگونگی انتشار موج شوک حاصل از انفجار تی ان تی در آب در شکل 19 نشان داده شده است. نحوه انبساط کانال پلاسما در اثر تزریق انرژی الکتریکی (در رویکرد دوم) مانند شکل 20 است.

### 5- نتیجه گیری

بر اساس مشاهدات تجربی و شبیه سازی های عددی انجام شده در این

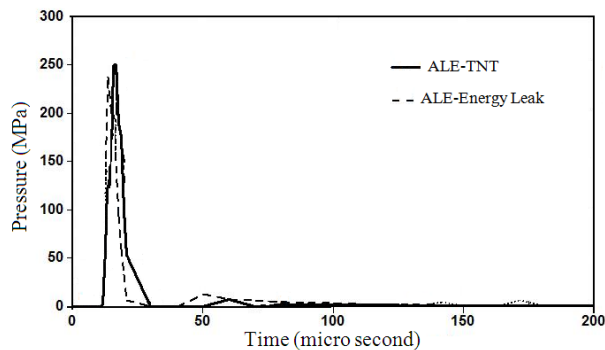


Fig. 18 Shock wave pressure-time history on the surface of the blank  
 شکل 18 تاریخچه فشار موج شوک روی سطح ورق

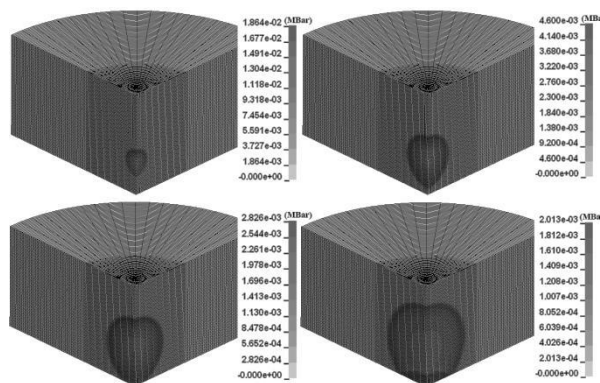


Fig. 19 Shock wave propagation at various times (first approach)  
 شکل 19 نحوه انتشار موج شوک در زمان های مختلف (رویکرد اول)

## 6- مراجع

- Forming, Ohio, USA, March 9-10, 2010.
- [13] S. F. Golovashchenko, V. S. Mamutov, V. V. Dmitriev, A. M. Sherman, Formability of sheet metal with pulsed electromagnetic and electrohydraulic technologies, *Proceeding of Aluminum conference*, San Diego, TMS, pp. 99-110, 2003.
- [14] M. Oyane, S. Masaki, Fundamental Study on Electrohydraulic Forming, *Bulletin of JSME*, Vol. 7, No. 26, pp. 474-480, 1964.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] G. Daehn, G. Fenton, V. Vohnout, Pressure heterogeneity in small displacement electrohydraulic forming processes, *Proceeding of the 4th International Conference on High Speed Forming*, Ohio, USA, March 9-10, 2010.
- [18] T. Mane, V. Goel, S. D. Kore, Finite Element Modelling of Electro-hydraulic Forming of Sheets, *Procedia Materials Science*, Vol. 6, pp. 105-114, 2014.
- [19] A. Hassannejadasl, D. E. Green, S. F. Golovashchenko, J. Samei, C. Maris, Numerical modelling of electrohydraulic free-forming and die-forming of DP590 steel, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 16, No. 3, pp. 391-404, 2014.
- [20] J. R. McGrath, Scaling underwater exploding wires, *Journal of Applied Physics*, Vol. 37, No. 12, pp. 4439-4443, 1966.
- [21] R. H. Cole, R. Weller, Underwater explosions, *Physics Today*, Vol. 1, pp. 35, 1948.
- [22] A. Kaklyugin, G. Norman, *Electrical conductivity of a non-Debye plasma*, Institute of High Temperatures, London, pp. 11-18 1973.
- [23] K. A. Naugolnykh, N. Røii, *Electrical discharges in water. A hydrodynamic description*, DTIC Document, New York, pp. 12-20, 1974.
- [24] A. Rohatgi, E. V. Stephens, R. W. Davies, M. T. Smith, A. Soulami, S. Ahzi, Electro-hydraulic forming of sheet metals: Free-forming vs. conical-die forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, No. 5, pp. 1070-1079, 2012.
- [25] L. Bjørnø, P. Levin, Underwater explosion research using small amounts of chemical explosives, *Ultrasonics*, Vol. 14, No. 6, pp. 263-267, 1976.
- [1] 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.
- [2] J. Priestley, Experiments on the Lateral Force of Electrical Explosions. By Joseph Priestley, L LDFRS, *Philosophical Transactions*, Vol. 59, No. 1, pp. 57-62, 1769.
- [3] L. Yutkin, *Electrohydraulic Effect*, Armed Services Technical Information Agency, Moscow, pp. 1-23, 1955.
- [4] E. Bruno, *High-velocity forming of metals*, pp. 43-70, Dearborn: American Society of Tool and Manufacturing Engineers, 1968.
- [5] R. Davies, E. R. Austin, *Developments in high speed metal forming*, pp. 85-120, New York: Industrial Press, 1970.
- [6] V. Chachin, *Electrohydraulic treatment of structural materials*, pp. 80-87, Minsk: Nauka i Texnika, 1978.
- [7] B. Dariani, G. Liaghat, M. Gerdooei, Experimental investigation of sheet metal formability under various strain rates, *Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 223, No. 6, pp. 703-712, 2009.
- [8] R. Hashemi, A. Ghazanfari, K. Abrinia, A. Assempour, The effect of the imposed boundary rate on the formability of strain rate sensitive sheets using the MK method, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 22, No. 9, pp. 2522-2527, 2013.
- [9] M. Moslemi, J. Hosseinpour, H. D. Azodi, A. Gorji, Numerical Evaluation of the Effect of Forming Velocity on Forming Limit Diagram (FLD) of St14 Steel using Bifurcation Theory and Comparison with Experimental Results, *Journal of Metallurgical and Materials Engineering*, Vol. 24, No. 1, pp. 20-38, 2013.
- [10] V. Balanethiram, G. S. Daehn, Hyperplasticity: increased forming limits at high workpiece velocity, *Scripta Metallurgica et Materialia*, Vol. 30, No. 4, pp. 515-520, 1994.
- [11] A. Rohatgi, E. V. Stephens, A. Soulami, R. W. Davies, M. T. Smith, Experimental characterization of sheet metal deformation during electro-hydraulic forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211, No. 11, pp. 1824-1833, 2011.
- [12] W. Homberg, C. Beerwald, A. Pröbsting, Investigation of the electrohydraulic forming process with respect to the design of sharp edged contours, *Proceeding of the 4th International Conference on High Speed*