مجله مهندسی مکانیک مدرس، تیر 1396، دوره 17، شماره 4، ص‌ص 299-306

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مطالعه فرایند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی با استفاده از مشاهدات تجربی و شبیه‌سازی عددی به روش لاگرانژی- اویلری انتخابی

مهدی ظهور[1*]، سید میثم موسوی[2]، امین اشرافی تفرشی[2]

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* تهران، صندوق پستی 1999-19395، 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:

شکل‌دهی با سرعت‌بالا

فرایند الکتروهیدرولیکی

شبیه‌سازی عددی

لاگرانژی- اویلری انتخابی

چکیده

شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی یک فرایند شکل‌دهی ورق فلزی با سرعت بالا است که در آن دو (یا تعداد بیشتر) الکترود در محفظه‌ای پر از آب قرار دارند و تخلیه الکتریکی ولتاژ بالا بین آن‌ها، فشار بالائی جهت شکل دادن ورق ایجاد می‌کند. در این تحقیق، جهت بررسی اثر پارامترهای مختلف (از جمله انرژی تخلیه، فاصله الکترودها از ورق و فاصله الکترودها از هم) بر روی عمق کشش حداکثر و (به‌طور ضمنی) فشار بیشینه موج شوک، آزمایش‌های تجربی گسترده‌ای انجام شد. شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی یک پدیده پیچیده می‌باشد و آزمایش‌های تجربی به تنهائی، برای درک مناسب این فرایند کافی نیست. برای توضیح جنبه‌های مختلف این موضوع از کوپل فرمولاسیون لاگرانژی- اویلری انتخابی با الگوریتم اندرکنش سیال و سازه (که در نرم‌افزار ال‌اس‌داینا در دسترس است) جهت شبیه‌سازی عددی آن استفاده شده است. جهت مدل کردن اثر تخلیه الکتریکی دو رویکرد متفاوت مورداستفاده قرارگرفته 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 تی‌ان‌تی تبدیل شده است. در رویکرد دوم، فاصله بین الکترودها 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. درنهایت، تطابق خوبی میان نتایج تجربی و شبیه‌سازی حاصل گردید.

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

Mehdi Zohoor [*], 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

شکل‌دهی انفجاری، الکترومغناطیسی و الکتروهیدرولیکی، مهم‌ترین فرایندهای شکل‌دهی با سرعت‌بالا می‌باشند. شکل دادن با استفاده از انرژی حاصل از انفجار و به‌کارگیری محیط واسط (آب، هوا و ...) برای انتقال انرژی را فرآیند شکل‌دهی انفجاری می‌نامند. شکل‌دهی الکترومغناطیسی یکی دیگر از روش‌های شکل‌دهی قطعات فلزی با سرعت بالاست که در آن از نیروی الکترومغناطیس به‌عنوان عامل شکل‌دهی استفاده می‌شود. در فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیس مقدار قابل‌توجهی انرژی الکتریکی در بانک خازنی

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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)

ذخیره شده و با استفاده از سوئیچ‌های ولتاژ بالا، به‌سرعت درون سیم‌پیچی تخلیه می‌شود. جریان الکتریکی در سیم‌پیچ، یک میدان مغناطیسی گذرای شدید تولید می‌کند. جریان گردابی القاشده درون قطعه‌کار، با میدان مغناطیسی اولیه تعامل کرده و باعث دفع متقابل قطعه‌کار و سیم‌پیچ می‌شود. نیروی دافعه به‌قدری زیاد است که تنشی بزرگ‌تر از استحکام تسلیم ماده اعمال می‌کند و باعث تغییر شکل دائمی آن می‌گردد.

شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی یکی از فرآیندهای منحصربه‌فرد شکل‌دهی با سرعت‌بالا 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 (یا بیشتر)، 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 عبارتند از: تخلیه خازن از میان شکاف بین دو الکترود و تخلیه خازن از طریق سیم بسیار نازک تعبیه‌شده بین دو الکترود. در روش دوم، مسیر تخلیه الکتریکی به‌صورت از پیش تعیین‌شده است که این امر منجر به تبدیل انرژی کارآمدتر و کنترل بهتر می‌گردد؛ اما نرخ تولید پایین‌تری را نیز موجب می‌شود. شماتیک فرایند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی در شکل 1 نشان داده شده است.

اولین مشاهده‌ها از ایجاد نیروی قوی مکانیکی حاصل از تخلیه الکتریکی در سیال، مربوط می‌شود به گزارش‌های لین در سال 1767 [1] و پریستلی در سال 1769 [2]. توسعه اولیه فرایند الکتروهیدرولیکی توسط یوتکین [3] در روسیه به ثبت رسیده است. آزمایش‌های اولیه جهت استفاده از این پدیده در شکل‌دهی ورق‌ها برمی‌گردد به کارهای برونو در سال 1968 [4]، داویس و آستین در سال 1970 [5] و چاچین در سال 1978 [6].

مزیت فرایند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی نسبت به انفجاری (قابلیت اتوماسیون بیشتر) و الکترومغناطیسی (قابلیت استفاده روی تمام مواد ازجمله موادی که دارای هدایت الکتریکی پائینی هستند و ایجاد اشکال پیچیده) باعث شده تا این فرایند بعد از یک افول چند دهه‌ای، مجدداً موردتوجه قرار گیرد. محققین تلاش می‌کنند با استفاده از الکترودهای بادوام‌تر، آب‌بندی بهتر و مدیریت بهتر فشار ایجادشده توسط تخلیه الکتریکی، از این فرایند برای تولید با تیراژ بالا در صنایع استفاده کنند.

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

دائن و بالانتیرام [10] نتایج بسیار خوش‌بینانه‌ای از افزایش شکل‌پذیری ورق (در حدود 5.5 برابر برای AA6061-T4 و 3.5 برابر برای چدن و مس) توسط فرایند الکتروهیدرولیکی در مقایسه با فرایندهای سنتی گزارش

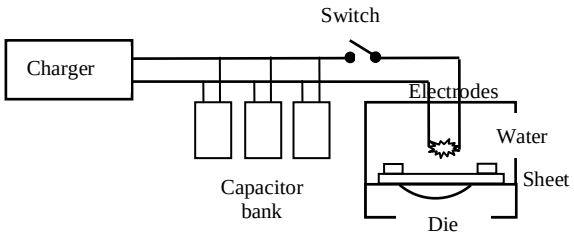

Fig. 1 Schematic of sheet metal forming with EHF

شکل 1 شماتیک شکل‌دهی ورق فلزی توسط فرایند الکتروهیدرولیکی

کرده‌اند. تحقیقات رهتگی و همکارانش [11] (با به دست آوردن میزان سرعت، کرنش و نرخ کرنش به کمک تکنیک دیجیتالی همبستگی تصویر[1]) یکسری توجیه‌های کیفی در مورد علت افزایش شکل‌پذیری ورق آلومینیوم در اثر شکل‌دهی به روش الکتروهیدرولیکی در اختیار خواننده قرار می‌دهد. همبرگ و همکارانش [12] در تلاش خود برای ایجاد منحنی‌هایی با شعاع کوچک در ورق، به مقایسه شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی با دیگر فرایندها (هیدروفرمینگ، شکل‌دهی الکترومکانیکی و شکل‌دهی پنومکانیکی) پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که رسیدن به شعاع‌های کوچک به کمک فرایند الکتروهیدرولیکی میسرتر است. گلواشنکو و همکارانش از افزایش (در حدود 10 تا 15 درصد) شکل‌پذیری لوله‌های آلومینیومی، مسی و فولادی در اثر شکل‌دهی به روش الکتروهیدرولیکی در قالب‌های مثلثی، مربعی و شش‌گوش خبر داده‌اند [13].

ایان و ماساکی در مقالاتی که در دهه 60 به چاپ رساندند [14] به بررسی پارامترهای مؤثر این فرایند (جنس سیم بین دو الکترود، قطر و طول سیم بین دو الکترود و ...) بر روی پالس فشار ایجادشده پرداختند. روش‌های مختلف اندازه‌گیری فشار سیال در اطراف جرقه (شامل روش‌های مستقیم و غیرمستقیم)، توسط سایاپین و گرینکو [15] مقایسه و رابطه‌ای جهت تخمین آن ارائه شده است. ولتزل و همکارانش [16] اثر سیم بین دو الکترود (آلومینیوم، مس و ...) و سیالی (آب، روغن و هوا) که جرقه در آن اتفاق می‌افتد را بررسی کردند.

تفاوت شبیه‌سازی‌های ارائه‌شده از فرآیند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی توسط محققین مختلف، عمدتاً در نحوهٔ اعمال اثر تخلیه الکتریکی است. تبدیل انرژی الکتریکی ذخیره‌شده در خازن به مقدار حساب‌شده‌ای از ماده منفجره و شبیه‌سازی شکل‌دهی انفجاری بجای شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی، یکی از رایج‌ترین روش‌های مدل‌سازی تخلیه الکتریکی در آب می‌باشد. دائن و همکاران [17] با استفاده از همین روش به شبیه‌سازی این فرایند پرداختند. مِن [18] ازجمله محققینی است که با استفاده از اعمال پالس فشار بجای تخلیه الکتریکی، سعی در مدل‌سازی 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 آزمایش‌های تجربی، شناخت مناسبی از پارامترهای مؤثر فرایند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی حاصل شود. در ادامه با اتخاذ دو رویکرد متفاوت، شبیه‌سازی عددی این فرایند انجام شده است.

2- آزمایش‌های تجربی

تجهیزات فرایند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی شامل دو قسمت الکتریکی و مکانیکی است.

اجزاء الکتریکی شامل سیستم کنترل، واحد تولید پالس، الکترودها و نگهدارندهٔ آن‌ها، 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

[1] Digital Image Correlation technique

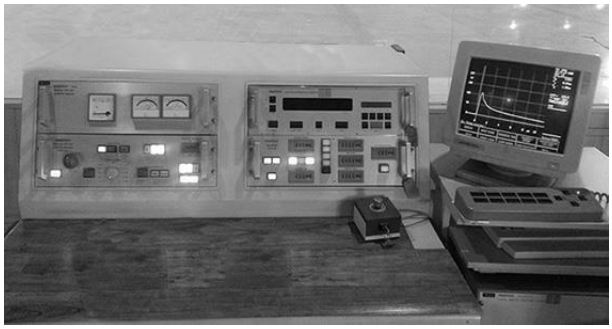

Fig. 2 Control unit

شکل 2 واحد کنترل

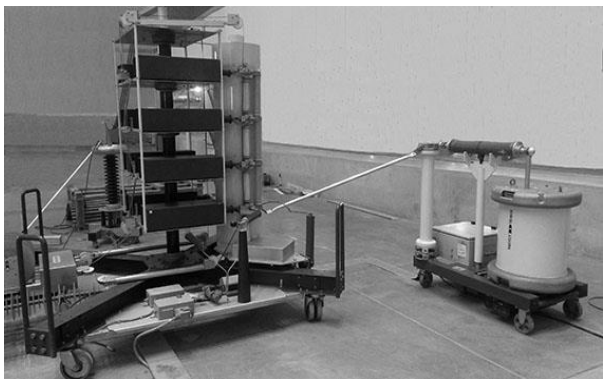

Fig. 3 Pulsed power generator

شکل 3 واحد تولید پالس

ولتاژ بالا پوشیده شده‌اند) می‌باشند. در اثر تخلیه‌های الکتریکی شدید، نوک الکترود سریعاً دچار تخریب می‌شود. برای جلوگیری از اختلال در روند آزمایش‌ها؛ نوک الکترود، طوری طراحی شده است که به‌راحتی قابلیت تعویض داشته باشد. جهت رعایت ملاحظات عایق‌کاری، سیستم نگهدارنده الکترودها از فیبر استخوانی و پلی آمید ساخته شده است. تنظیم فاصله الکترودها از یکدیگر و الکترودها از ورق، از طریق سیستم نگهدارنده امکان‌پذیر است (شکل 4).

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

Fig. 4 Electrode system in the water chamber

شکل 4 سیستم الکترود در محفظه آب

[1] Free Forming

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

3- شبیه‌سازی عددی

در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار ال‌اس‌داینا[2] و اتخاذ دو رویکرد متفاوت در اعمال اثر تخلیه الکتریکی، فرایند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی در دیدگاه لاگرانژی-اویلری انتخابی[3] شبیه‌سازی شده است. به دلیل تقارن هندسی و بارگذاری، تنها یک‌چهارم آن، مدل شده است.

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

یکی از مهم‌ترین موضوعات در شبیه‌سازی مسائل مربوط به دینامیک سیالات یا مکانیک جامدات غیرخطی، انتخاب توصیف سینماتیکی[4] مناسب برای محیط پیوسته است. منظور از توصیف سینماتیکی تعیین رابطهٔ بین محیط تغییرشکل دهنده با شبکه (یا مش) است.

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

1- دیدگاه لاگرانژی: در این فرمولاسیون هر گره از شبکه، ذره مادی را دنبال می‌کند. توصیف لاگرانژی امکان ردیابی ساده تداخل و اندرکنشِ مواد مختلف را فراهم می‌سازد. ضعف این مدل به ناتوانی شبکه در دنبال کردن تغییرشکل‌های بزرگ در ماده مربوط می‌شود.

2- دیدگاه اویلری: در این فرمولاسیون که بیشتر در دینامیک سیالات بکار می‌رود، شبکه ثابت است و محیط پیوسته نسبت به شبکه حرکت می‌کند. ازاین‌رو تغییرشکل‌های بزرگ در ماده بر روی ساختار مش تأثیر نمی‌گذارد. هرچند این فرمولاسیون در مدل‌سازی تداخل مواد مختلف دارای ضعف است.

3- دیدگاه لاگرانژی-اویلری انتخابی: به دلیل ضعف‌های مدل‌های خالص لاگرانژی و اویلری تکنیکی توسعه پیدا کرده است که قابلیت‌های هردوی این فرمولاسیون‌ها را باهم ترکیب کرده است و لاگرانژی-اویلری انتخابی نامیده می‌شود. در این دیدگاه گره‌های شبکه می‌توانند با سرعتی مستقل از ذرات مادی (برخلاف حالت لاگرانژی که به هم کوپل بودند) حرکت کنند.

ازجمله قابلیت‌های ال‌اس‌داینا برای دیدگاه‌های اویلری و لاگرانژی-اویلری انتخابی، استفاده از حالت چندماده‌ای[5] برای این المان‌ها است. در این حالت هر المان (جزء) می‌تواند ترکیبی از مواد مختلف باشد.

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

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

[2] LS-DYNA
[3] Arbitrary Lagrangian-Eulerian
[4] Kinematical Description
[5] Multi-Material
[6] Cavitation Limit

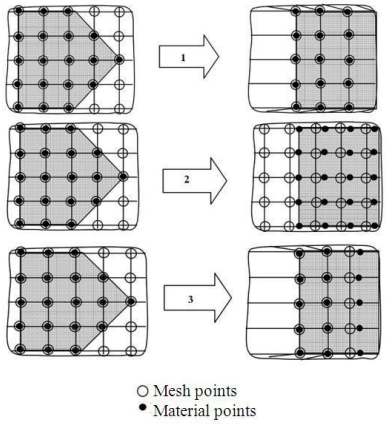

Fig. 5 Kinematical description of deformation zone 1)Lagrangian, 2)Eulerian, 3)ALE

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

می‌کند (شکل 6). در رویکرد اول (که از این به بعد به‌اختصار ALE-TNT نامیده می‌شود) با در نظر گرفتن تشابه پدیده انفجار و تخلیه الکتریکی در سیال، از یک‌سو و مقایسه میزان انرژی آزادشده توسط ماده منفجره (4183 کیلوژول به ازای یک کیلوگرم برای تی‌ان‌تی[1]) با انرژی ذخیره‌شده در خازن‌ها، از سوی دیگر؛ اثر تخلیه الکتریکی با جرم معادل تی‌ان‌تی جایگزین شده است.

برای تی‌ان‌تی از مدل مادی سوزش قوی ماده منفجره[2] و معادله حالت جونز-ویکینز-لی[3] (رابطه 1) استفاده شده است (جدول 1).

$$P = A\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)e^{R_1V} + B\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)e^{R_2V} + \frac{\omega E}{V} \qquad (1)$$

در رویکرد دوم (که از این به بعد به‌اختصار ALE-Energy Leak نامیده می‌شود) با اندازه‌گیری مقادیر ولتاژ و جریان تخلیه در آزمایش‌های تجربی، میزان انرژی تزریق‌شده به کانال پلاسما محاسبه می‌گردد. توان الکتریکی تزریق‌شده به کانال پلاسما برابر است با:

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

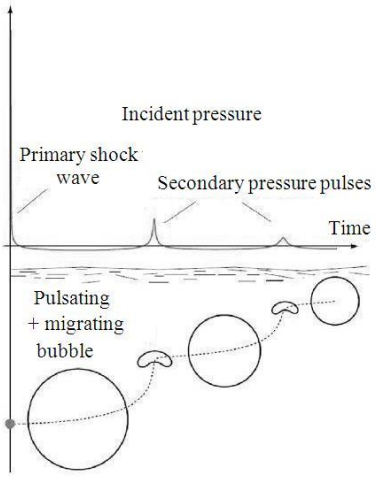

Fig. 6 Sequence of events for underwater explosion bubble [21]

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

[1] TNT
[2] HIGH_EXPLOSIVE_BURN
[3] JONES_WILKINS_LEE

جدول 1 پارامترهای مورداستفاده در مدل ماده و معادله حالت تی‌ان‌تی

Table 1 Material and equation of state parameters for TNT

پارامتر	مقدار
چگالی (g/cm^3)	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
ω	0.35
V	1
(kJ/M^3) E_0	6.0 e +6

که در آن $I(t)$ و $U(t)$ به ترتیب جریان و ولتاژ تخلیه اندازه‌گیری شده بین دو الکترود است. شماتیک نمودارهای $I(t)$ ، $U(t)$ و $N(t)$ که از آزمایش به دست می‌آید، در شکل 7 نشان داده شده است.

در این رویکرد کانال پلاسما به‌عنوان حباب گاز ایده‌آلی که منبسط می‌شود، در نظر گرفته می‌شود. امکان استفاده از حباب گاز ایده‌آل برای مدل کردن رفتار کانال پلاسما به اثبات رسیده است [22]. انرژی الکتریکی محاسبه‌شده از (2) به‌طور یکنواخت در کل حجم کانال پلاسما (که برابر حجم ماده منفجره در رویکرد اول است) وارد شده است. فشار هر یک از المان‌های کانال پلاسما با استفاده از معادله حالت (3) (که درواقع تعادل انرژی برای گاز ایده‌آل در حال انبساط آدیاباتیک است) محاسبه می‌گردد.

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

که در آن P_{ch} فشار، ρ چگالی جرمی لحظه‌ای، ρ_0 چگالی جرمی اولیه و E انرژی تولیدشده در گاز درون کانال است. γ شاخص آدیاباتیک پلاسما است که برابر 1.26 می‌باشد [23].

برای کانال پلاسما از ماده بلااثر[4] و معادله حالت خطی چندجمله‌ای همراه نشت انرژی[5] (رابطه 4) استفاده شده است.

$$P_{ch} = C_0 + C_1\mu^2 + C_2\mu^3 + C_3\mu + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)\acute{E}$$
$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \qquad (4)$$

C_0 الی C_6 ضریب‌های ثابتی هستند که با انجام یک محاسبه ساده می‌توانند طوری تعیین شوند که رابطه 3 را به 4 تبدیل کند.

3-3- مشخصات مدل

مشخصات هندسی مورداستفاده در شبیه‌سازی، دقیقاً مطابق آزمایش‌های 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 میلی‌متر) استفاده شده است. مدل توصیف‌کننده رفتار ورق، نقش بسزایی در کیفیت شبیه‌سازی دارد. ناهمسانگردی و نرخ کرنش، در رفتار ورق

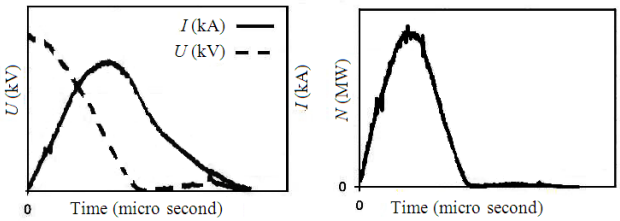

Fig. 7 Typical diagrams for current I(t), voltage U(t) and energy N(t)

شکل 7 نمونه‌ای از نمودارهای به‌دست‌آمده برای جریان، ولتاژ و توان الکتریکی

[4] NULL
[5] LINEAR_POLYNOMIAL_WITH_ENERGY_LEAK

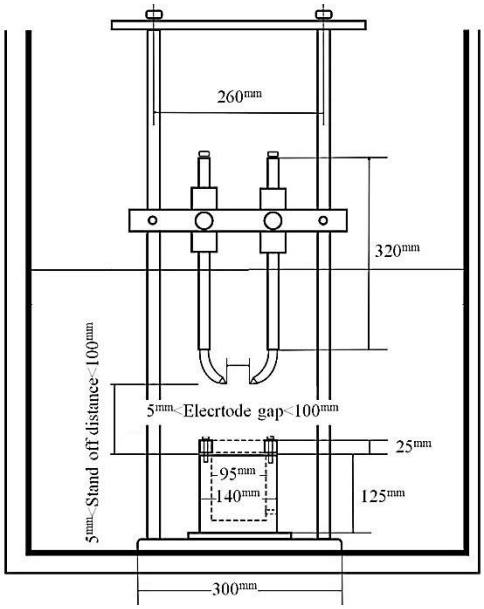

Fig. 8 Dimensions of EHF setup

شکل 8 ابعاد تجهیزات فرایند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی

تحت فرایند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی بسیار مؤثر هستند. در این تحقیق از ناهمسانگردی در مقابل نرخ کرنش صرف‌نظر شده است. ورق به‌صورت پوسته[1] با المان‌های مربعی (به طول ضلع تقریبی 1.3 میلی‌متر) در نظر گرفته شده است. درنهایت برای توصیف رفتار ورق از مدل جانسون-کوک[2] (معادله 5) استفاده شده است (جدول 2).

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

برای مدل‌سازی رفتار آب، از مدل ماده بلااثر و معادله حالت گرونیزن[3] (رابطه 6) استفاده شده است. پارامترهای موردنیاز جهت مدل کردن رفتار آب در جدول 3 آورده شده است.

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

برای انتقال موج شوک از آب به ورق از نوع خاصی از قیود[4] که در

جدول 2 پارامترهای مورداستفاده 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 مورداستفاده در ماده و معادله حالت آب

Table 3 Material and equation of state parameters for water

پارامتر	مقدار
چگالی اولیه ρ_0	1000
سرعت صوت C	1480
Υ_0	0.5
a	0
S_1	2.56
S_2	1.986
S_3	1.2268

[1] SHELL
[2] JOHNSON_COOK
[3] GRUNEISEN
[4] CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID

ال‌اس‌داینا به همین منظور تعبیه شده است استفاده گردید. همچنین برای تعریف تماس المان‌های ماده منفجره (و کانال پلاسما) و آب که هر دو از نوع لاگرانژی- اویلری انتخابی هستند از فرمولاسیون مواد چندگانه[5] استفاده شده است. المان‌های آب، از نوع توپر[6] و مکعبی (در مرکز با طول ضلع تقریبی 1 میلی‌متر و در فواصل دورتر به شکل شعاعی با طول ضلع بزرگ‌تر) می‌باشند. همچنین لبه‌های ورق، مطابق شرایط آزمایش تجربی کاملاً کلمپ شده است. شکل 9 مدل ایجادشده را نشان می‌دهد.

عوامل متعددی (ازجمله اندازه المان‌ها و پارامترهای موجود در دستورات مختلف ال‌اس‌داینا) بر نتیجه شبیه‌سازی مؤثرند. با در نظر گرفتن نتیجه سه آزمون تجربی و انجام شبیه‌سازی‌های مقدماتی (با اندازه المان‌های متفاوت و پارامترهای تنظیمی مختلف)، سعی در انتخاب بهترین اندازه المان و پارامترهای مؤثر، شد. پس‌ازآن در دیگر شبیه‌سازی‌ها از همان اندازه المان‌ها و پارامترها استفاده گردید.

4- نتایج و بحث

آزمایش‌های اولیه نشان داد تکرارپذیری فرایند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی پایین است. به نظر می‌رسد علت عمده این امر، تأثیرگذاری شدید پارامترهای الکتریکی فرایند باشد. مشاهدات اولیه حاکی از وجود یک تأخیر زمانی[7] در تخلیه الکتریکی بین دو الکترود (بعد از زدن کلید تخلیه) است. با افزایش انرژی ذخیره‌شده در خازن، میزان تأخیر زمانی نیز افزایش می‌یابد. در مورد فاصله بین دو الکترود نیز روند مشابهی مشاهده شد.

چند نمونه از ورق‌های تغییر شکل یافته در شکل 10 نشان داده شده است.

در شکل 11 اثر میزان انرژی تخلیه‌شده از طریق خازن‌ها بین دو الکترود بر عمق کشش مرکز ورق، نشان داده شده است. با افزایش میزان انرژی تخلیه، ارتفاع تغییر شکل ورق به‌طور غیرخطی افزایش می‌یابد. این روند تا پارگی ورق از مرکز ادامه می‌یابد. علت این رفتار غیرخطی در نتایج، عمدتاً ناشی از این واقعیت است که رفتار ورق متأثر از نرخ کرنش (که آن‌هم به‌نوبه خود وابسته به میزان انرژی ذخیره‌شده در خازن‌ها می‌باشد) است. علاوه بر

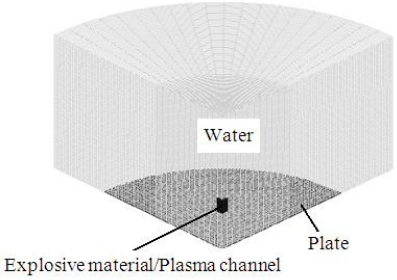

Fig. 9 Finite element model

شکل 9 مدل اجزاء محدود

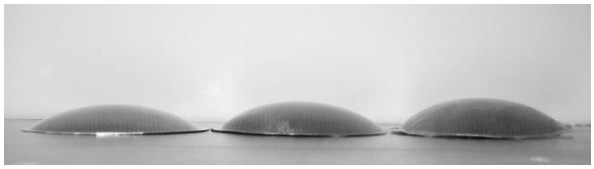

Fig. 10 Electrohydraulic deformed specimens

شکل 10 نمونه قطعات تغییر شکل یافته تحت فرایند الکتروهیدرولیکی

[5] ALE_MULTI-MATERIAL_GROUP
[6] Solid
[7] Delay Time

رفتار غیرخطی ورق، از سایر پارامترهای الکتریکی مدار (ازجمله اندوکتانس و ...) که تأثیر مستقیم بر نحوهٔ تشکیل کانال پلاسما دارند نباید غافل شد. تقریباً در اکثر موارد تغییر شکل حاصل از آزمایش‌های تجربی در مقایسه با نتایج شبیه‌سازی عددی، کمتر است. دلیل این امر عمدتاً به این خاطر است که کل انرژی ذخیره‌شده در خازن، بین دو الکترود تخلیه نمی‌شود و مقداری از آن تا قبل از رسیدن به الکترودها هدر می‌رود. همچنین پیش‌بینی‌های حاصل از شبیه‌سازی با رویکرد دوم عمدتاً بیشتر از رویکرد اول می‌باشد.

نمودار 12 جابجایی مرکز ورق برحسب زمان (حاصل از شبیه‌سازی فرایند با انرژی ذخیره‌شده 3.2 کیلوژول، فاصله الکترود از ورق 30 میلی‌متر و فاصله الکترود از یکدیگر 15 میلی‌متر) را نمایش داده است. در انتهای هر دو نمودار (بعد از 400 میکروثانیه) مشاهده می‌شود ورق مقدار ناچیزی برگشت می‌کند که ناشی از پدیده‌ی برگشت فنری[1] است.

شکل‌های 13 و 14 نحوهٔ تغییر شکل ورق و مقایسه دو رویکرد مختلف در اعمال اثر تخلیهٔ الکتریکی در طول فرایند را نمایش می‌دهند.

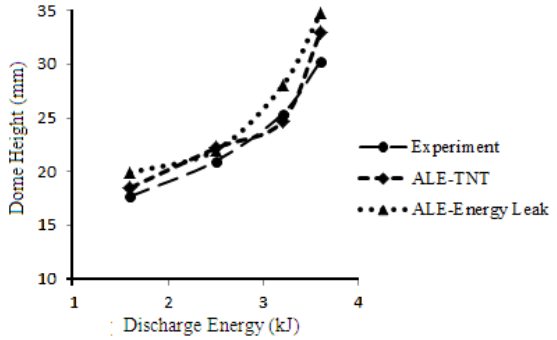

Fig. 11 The effect of discharge energy on dome height

شکل 11 اثر انرژی تخلیه روی ارتفاع گنبد

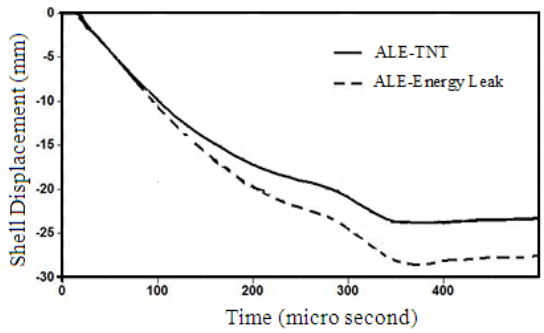

Fig. 12 Displacement of the middle node of the blank

شکل 12 تغییر مکان گره در مرکز ورق

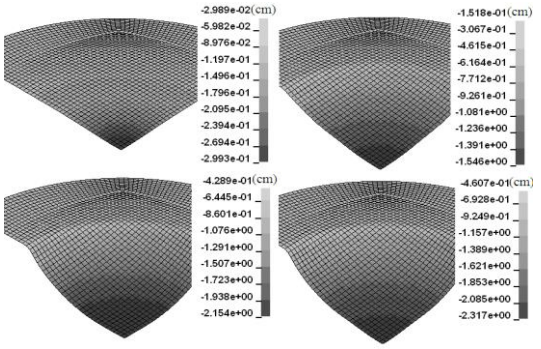

Fig. 13 Deformation of the blank during the EHF

شکل 13 تغییر شکل ورق طی فرایند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی

[1] Spring back

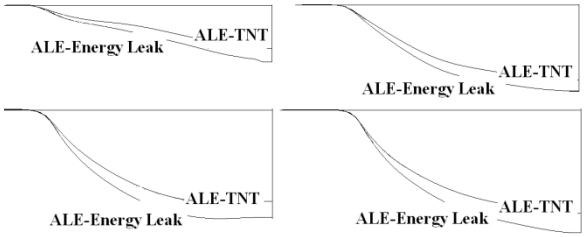

Fig. 14 Time history of the sheet profile

شکل 14 تاریخچه تغییرشکل پروفیل ورق

سرعت بالای تغییر شکل ورق تحت فرایند الکتروهیدرولیکی (با همان شرایط بالا) در مقایسه با روش‌های سنتی، به‌خوبی در شکل 15 قابل‌مشاهده 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 فنری 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). همان‌طور که قابل‌مشاهده است، تقریباً یک رابطه خطی بین فاصله الکترودها از ورق و عمق کشش ورق، وجود دارد.

اثر تغییر فاصله بین الکترودها (ضمن ثابت نگه‌داشتن بقیهٔ پارامترهای مؤثر) بر خیز ماندگار مرکز ورق در شکل 17 قابل‌مشاهده است. در این نمودار یک مقدار بهینه برای فاصله بین دو الکترود وجود دارد (که با تغییر سایر پارامترها، تغییر می‌کند). با افزایش فاصله بین الکترودها، شکل جبههٔ موج شوک[2] از کروی به سمت بیضوی متمایل شده که همین امر منجر به تغییر پروفیل ورق‌های تغییرشکل‌یافته از حالت گنبدی به اشکالی پخ‌تر (و در نتیجه ارتفاع گنبد کمتر) می‌شود.

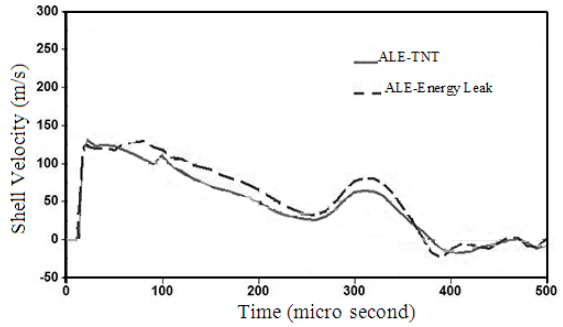

Fig. 15 Velocity at the dome apex (Z-direction)

شکل 15 سرعت در رأس گنبد (در جهت Z)

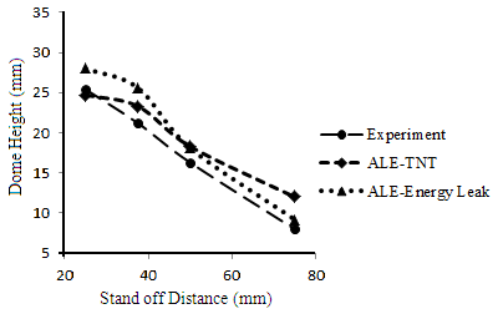

Fig. 16 The effect of stand off distance on dome height

شکل 16 اثر فاصله الکترودها تا ورق بر روی ارتفاع گنبد

[2] Shock wave front

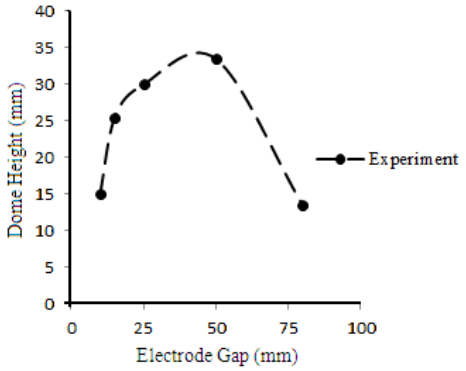

Fig. 17 The effect of electrode gap on dome height

شکل 17 اثر فاصله بین الکترودها بر روی ارتفاع گنبد

در شکل 18 فشار حاصل از دو رویکرد در اعمال اثر تخلیه الکتریکی (در نزدیکی سطح ورق) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود شکل و بیشینهٔ فشار، تطابق خوبی با نمودارها و روابط گزارش‌شده برای موج شوک در منابع معتبر دارد [25]. نوسانات ناچیزی که در ادامه موج شوک اولیه (بعد از 50 میکروثانیه) مشاهده می‌شود ناشی از موج شوک ثانویه و ... می‌باشد که نحوهٔ ایجاد آن قبلاً توضیح داده شده است.

چگونگی انتشار موج شوک حاصل از انفجار تی‌ان‌تی 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- نتیجه‌گیری

بر اساس مشاهدات تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی انجام‌شده در این

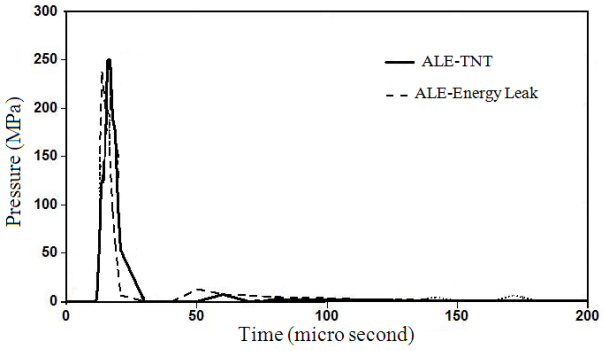

Fig. 18 Shock wave pressure-time history on the surface of the blank

شکل 18 تاریخچه فشار موج شوک روی سطح ورق

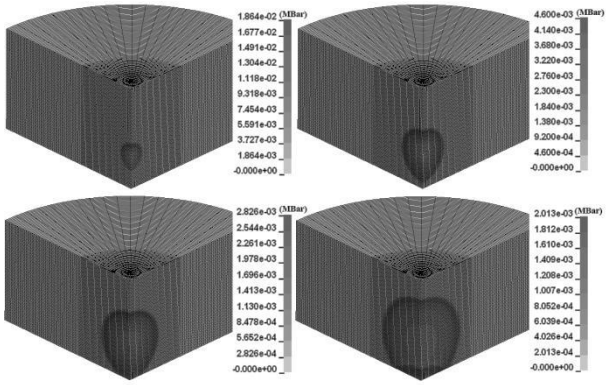

Fig. 19 Shock wave propagation at various times (first approach)

شکل 19 نحوه انتشار موج شوک در زمان‌های مختلف (رویکرد اول)

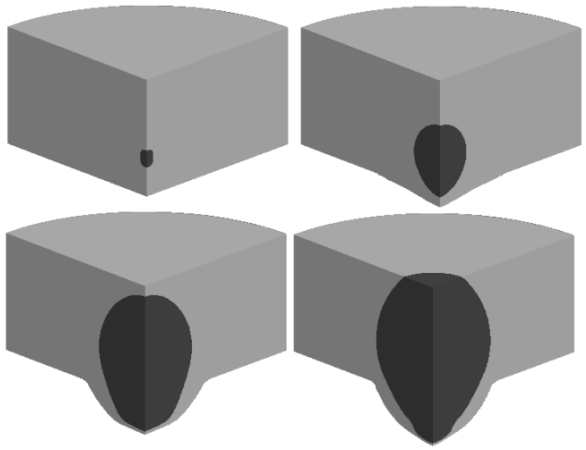

Fig. 20 Discharge channel expansion (second approach)

شکل 20 نحوه انبساط کانال تخلیه (رویکرد دوم)

پژوهش، موارد ذیل استنتاج گردید:

- بر طبق آزمایش‌های تجربی، تکرارپذیری فرایند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی پایین است (به دلیل تأثیرگذاری شدید پارامترهای الکتریکی).
- آزمایش‌های اولیه حاکی از آن است که استفاده از یک سیم نازک بین دو الکترود موجب سهولت در تخلیه الکتریکی می‌شود (هرچند آزمایش‌هایی که نتایج آن‌ها در قسمت‌های قبل این مقاله ارائه شده است، همگی بدون سیم بین دو الکترود انجام شده‌اند).
- از زمان اتصال کلید تخلیه تا انجام تخلیه، یک فاصله زمانی وجود دارد (تأخیر زمانی). به نظر می‌رسد هرچه این تأخیر زمانی بیشتر باشد میزان هدر رفتن انرژی ذخیره‌شده در خازن‌ها نیز بیشتر می‌شود. پارامترهای بسیاری (عمدتاً الکتریکی) در این تأخیر زمانی مؤثر می‌باشند که بررسی آن‌ها احتیاج به آزمایش‌های بیشتری دارد.
- روند تغییر خیز ماندگار ورق با افزایش انرژی تخلیه، افزایشی و با افزایش فاصله محور الکترودها از ورق، کاهشی است؛ اما در مورد اثر فاصله الکترودها 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 الگوریتم‌های بهینه‌سازی (به‌عنوان نمونه روش سطح پاسخ[1]) می‌باشد.
- استفاده از المان‌های لاگرانژی- اویلری انتخابی برای شبیه‌سازی فرایند (در مقایسه با المان‌های آکوستیک که برخی محققین جهت شبیه‌سازی انتشار موج شوک استفاده می‌کنند) منجر به نتایج بهتر و واقعی‌تری می‌شود. هرچند زمان شبیه‌سازی و زحمت تعیین پارامترهای مرتبط را افزایش می‌دهد.
- نحوهٔ اعمال اثر تخلیه الکتریکی در این پژوهش در مقایسه با اعمال فشار، اعمال شتاب حجمی و سایر روش‌های دیگر محققین از مزیت‌های غیرقابل‌انکاری برخوردار است. هر دو رویکرد اعمال اثر تخلیه الکتریکی (جرم معادل تی‌ان‌تی و تزریق انرژی) با خطای کمتر از ده درصد، تطابق خوبی با نتایج تجربی داشته است.

[1] Response surface methodology (RSM)

6- مراجع

[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 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. Roii, *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.