



## شبیه‌سازی و مطالعه تجربی ایجاد بید به سمت داخل لوله آلومینیومی به وسیله شکل دهی الکترومغناطیسی با استفاده از روش تاگوچی

مهدی ظهور<sup>1\*</sup>، بهمن قربانی<sup>2</sup>، محمد محمدی نیا<sup>3</sup>، علیرضا فلاحی آرزودار<sup>4</sup>

- 1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران  
 2- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران  
 3- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران  
 4- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران  
 \* تهران، صندوق پستی 19395-1999، mzohoor@kntu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
 دریافت: 19 شهریور 1394  
 پذیرش: 06 آذر 1394  
 ارائه در سایت: 02 دی 1394  
 کلید واژگان:  
 شکل دهی الکترومغناطیسی  
 شکل دهی سرعت بالا  
 المان محدود  
 طراحی آزمایش

### چکیده

شکل دهی الکترومغناطیسی یکی از روش‌های شکل دهی پرسرعت است. در این روش شکل دهی، از نیروی الکترومغناطیسی لورنتس جهت شکل دهی قطعات استفاده می‌شود. اتصال قطعات با استفاده از این فرایند یک روش نوین برای مونتاژ قطعات با هدایت الکتریکی بالا می‌باشد. ارزیابی فرایند شکل دهی بید به سمت داخل به منظور اطمینان از کیفیت و استحکام اتصالات تولید شده با این روش بسیار مهم است. در این نوشتار ابتدا فرایند به صورت شبیه‌سازی کوپل در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شد. بدین منظور، ابتدا مشخصات هندسی، فیزیکی و مکانیکی لوله، سیم‌پیچ در قالب زیر برنامه داده شده تا فشار الکترومغناطیسی فعال بر لوله محاسبه شود. فشار الکترومغناطیسی به صورت یک نیروی مکانیکی در نرم‌افزار آباکوس بر روی لوله اعمال شده و شکل نهایی لوله بدست می‌آید. آزمایش تجربی برای صحت‌سنجی نتایج انجام شد. سپس اثر پارامترهای مهم فرایند، مانند ولتاژ تخلیه، لقی بین قالب و لوله، طول و ضخامت دیواره لوله، بر روی عمق بید با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی و تحلیل سیگنال به نویز بررسی شدند. در نهایت تطابق بسیار خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی مشاهده گردید. عمق بید در شبیه‌سازی کوپل در مقایسه با نتایج تجربی، در حدود 4% خطا داشت.

## Simulation and experimental study on inward aluminum tube bead formation by using electromagnetic forming with taguchi method

Mehdi Zohoor<sup>1\*</sup>, Bahman Ghorbani<sup>1</sup>, Mohammad Mohammadi Nia<sup>2</sup>, Ali Reza Fallahi Arezoodar<sup>2</sup>

- 1- Faculty of Mechanical Engineering, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran  
 2- Faculty of Mechanical Engineering, Amir Kabir University of Technology, Tehran, Iran  
 \* P.O.B. 19395-1999 Tehran, Iran, mzohoor@kntu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
 Received 10 September 2015  
 Accepted 27 November 2015  
 Available Online 23 December 2015

**Keywords:**  
 Electromagnetic Forming  
 High Speed Forming  
 Finite Element  
 Design of Experience

### ABSTRACT

Electromagnetic forming is a high energy rate forming process applied for manufacturing and assembly of many parts that are used in automobile and aerospace industries. In this process, the electromagnetic body forces (Lorentz forces) are used to produce metallic parts. Joining high electrical conductivity parts by using electromagnetic forming process is an innovative method. Therefore, it is very important to use a proper technique to ensure the quality of the Strength of Electromagnetic Joints. In this article, this process was simulated in ABAQUS. Then geometric, physical and mechanical specifications of the tube and coil are entered to subroutine and the magnetic pressure is obtained; by applying them on tube in ABAQUS software, agent analysis of the process and deformation of the work-piece is obtained. The effective process parameters such as discharge voltage, clearance between the tube and die, wall thickness and length of the tube on depth of bead were experimentally investigated by design of experiment technique based on Taguchi Method and signal to noise. Finally, very good agreement was found between simulation and experimental results. The depth of bead in sequential coupled algorithm compared to experimental result had about 4% error.

### 1- مقدمه

شکل دهی، می‌توان بسیاری از قطعات را با تعداد عملیات کمتر تولید کرد. این امر در نهایت می‌تواند منجر به کاهش وزن قطعات و افزایش بازدهی محصولات صنعتی شود [1-3]. مطابق شکل 1، با تخلیه خازن و بسته شدن ناگهانی سوئیچ فشار قوی باعث ایجاد جریان نوسانی میرا در سیم‌پیچ می‌شود. به این ترتیب در اطراف

فرایند شکل دهی الکترومغناطیسی مانند شکل دهی انفجاری، یکی از فرایندهای شکل دهی با سرعت بالا است. این فرایند برای فلزاتی با قابلیت هدایت الکتریکی بالا مانند آلیاژهای آلومینیوم، مس، نقره، برنج و برخی فولادها بسیار مناسب است. با به کارگیری همزمان این فرایند با روش‌های متداول

Please cite this article using:

M. Zohoor, B. Ghorbani, M. Mohammadi Nia, A. R. Fallahi Arezoodar, Simulation and experimental study on inward aluminum tube bead formation by using electromagnetic forming with taguchi method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 129-132, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Zohoor, B. Ghorbani, M. Mohammadi Nia, A. R. Fallahi Arezoodar, Simulation and experimental study on inward aluminum tube bead formation by using electromagnetic forming with taguchi method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 129-132, 2016 (in Persian)

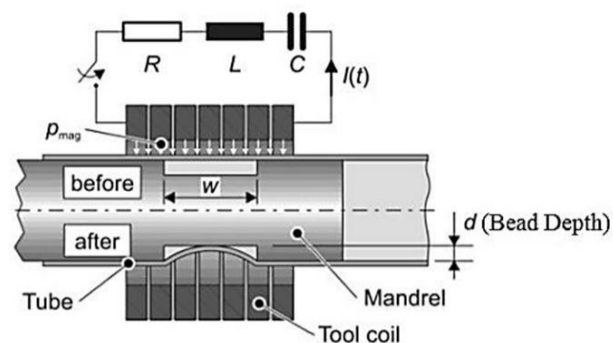


Fig. 2 Schematic of Electromagnetic Forming Joint [5]

شکل 2 شماتیک اتصال توسط فرایند الکترومغناطیسی [5]

کاشانی و همکارانش [2] در سال 2015 شبیه‌سازی کوپل فرایند شکل‌دهی الکترومغناطیسی توسط نرم‌افزار انسیس و نرم‌افزار داینا<sup>6</sup> را انجام دادند. آنها تحلیل کوپل الکتریک و مغناطیسی را توسط نرم‌افزار انسیس شبیه‌سازی کردند و نتایج نیرویی آن را استخراج و با اعمال این نیروها به لوله، تحلیل سازه‌ای را در نرم‌افزار داینا انجام دادند. این تعامل بین دو نرم‌افزار چندین مرتبه ادامه پیدا کرده تا کل زمان فرایند به اتمام رسیده و شکل نهایی لوله بدست آید.

تاکنون نرم‌افزار مجزایی که هر دو قسمت الکترومغناطیسی و سازه‌ای فرایند را همزمان و به صورت کوپل شبیه‌سازی کند، ارائه نشده است. نرم‌افزار انسیس تنها قابلیت کوپل قسمت الکتریک و مغناطیسی فرایند را دارا بوده و نیروهای الکترومغناطیسی را می‌تواند محاسبه کند. اما نرم‌افزار آباکوس توانایی تحلیل شکل‌دهی سرعت بالا و تخصیص خواص ماده وابسته به نرخ کرنش را دارد.

لذا در این نوشتار از نرم‌افزار المان محدود آباکوس برای شبیه‌سازی فرایند استفاده می‌شود. بدین صورت که، محاسبات الکترومغناطیسی در قالب زیربرنامه<sup>7</sup> انجام شده و فشار الکترومغناطیسی اعمالی به لوله را محاسبه می‌کند. فشار الکترومغناطیسی فعال بر روی لوله در هر لحظه زمانی و در نرم‌افزار آباکوس اعمال شده و تغییر شکل لوله را سبب می‌شود. سپس محاسبات الکترومغناطیسی جدیدی بعد از بروز رسانی هندسه لوله انجام می‌شود. در هر گام زمانی این محاسبات انجام می‌شود. این تعامل چندین مرتبه ادامه پیدا کرده تا کل زمان فرایند به اتمام رسیده و شکل نهایی لوله بدست آید. سپس جهت اعتبار سنجی روش مورد استفاده، شکل‌دهی بید به سمت داخل لوله آلومینیوم 1100 با استفاده از سیم‌پیچ فشاری، به صورت تجربی بررسی شد. برخی پارامترهای مهم فرایند مانند ولتاژ تخلیه، لقی بین قالب و لوله، طول و ضخامت دیواره لوله، بر روی عمق بید با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی، مطالعه شده است. بدین منظور عامل عمق فرو رفتگی به عنوان متغیر خروجی در نظر گرفته شده و عوامل (ولتاژ تخلیه، لقی بین قالب و لوله، طول و ضخامت دیواره لوله) به عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفته شده‌اند. پس از طراحی آزمایش‌ها، آزمون‌های تجربی مطابق این طراحی انجام شده و متغیر خروجی (عمق فرو رفتگی) اندازه‌گیری گردید. سپس با استفاده از روش آماری آنالیز واریانس<sup>8</sup>، تاثیر متغیرهای ورودی بر خروجی بررسی می‌گردد.

## 2- شبیه‌سازی

الگوریتم‌های کوپل ضعیف<sup>9</sup> و کوپل ترتیبی<sup>10</sup> برای شبیه‌سازی فرایند شکل-

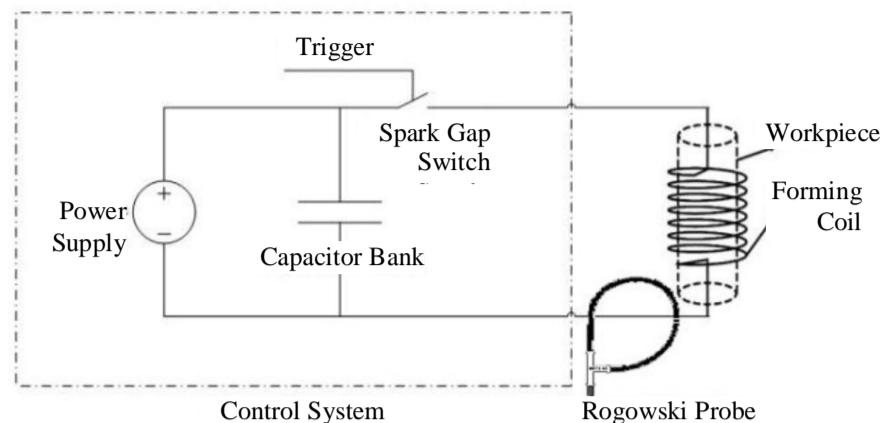


Fig. 1 Schematic of Electromagnetic Forming Circuit [4]

شکل 1 شماتیک اجزاء شکل‌دهی الکترومغناطیسی [4]

سیم پیچ یک میدان مغناطیسی متغیر نسبت به زمان ایجاد می‌شود. طبق قانون لنز، میدان مغناطیسی پالسی شکل ایجاد شده جریان الکتریکی ثانویه‌ای در قطعه کار (لوله) القا کرده که جهت آن خلاف جهت سیم‌پیچ ابزار است. این جریان بوجود آمده یک میدان مغناطیسی دیگری تشکیل می‌دهد. دو میدان مغناطیسی موجود، نیروهایی بوجود می‌آورند که مخالف یکدیگر می‌باشند (نیروی الکترومغناطیسی لورنتس)؛ نیروی دافعه به میزانی است که منجر به تغییر شکل پلاستیک لوله می‌شود [4-9].

این روش برای فرم‌دهی و اتصال فلزات با هدایت الکتریکی بالا می‌تواند استفاده شود (شکل 2). کاربرد این فرایند در کارخانجات فلزکاری شامل خودرو، هوافضا و غیره مخصوصاً در قطعات مونتاژی است [6-8]. از مزیت‌های فرایند شکل‌دهی الکترومغناطیسی می‌توان به عدم وجود تماس فیزیکی بین سیم‌پیچ و قطعه کار، تماس یک طرف قالب با قطعه کار، برگشت فوری کم نسبت به فرایندهای استاتیکی مشابه، بهبود خواص مکانیکی قطعه کار و قابلیت شکل‌پذیری به دلیل نرخ کرنش بالا در فرایند اشاره کرد [2,1]. از محدودیت‌های روش شکل‌دهی الکترومغناطیسی این است که قطعه کار باید رسانای جریان الکتریکی باشد.

نخستین بار موراکوشی<sup>1</sup> و همکارانش [3] در سال 1998 شکل‌دهی بید به سمت داخل یک لوله آلومینیومی را بررسی کردند. آنها در شبیه‌سازی که به وسیله نرم‌افزار مارک<sup>2</sup> انجام دادند، از یک روش استاتیکی برای اعمال فشار بر روی لوله استفاده کردند و فشار مغناطیسی به صورت مقداری ثابت در نظر گرفته شد.

کوریا<sup>3</sup> و همکارانش [10] در سال 2008 فشار الکترومغناطیسی را با فرض مستقل بودن دو قسمت الکترومغناطیسی و سازه‌ای این فرایند و با حل عددی معادلات ماکسول برای هندسه ورق تخت، محاسبه کردند.

ابراهیمی و همکارانش [4] نیز در سال 2009 شکل‌دهی انبساطی لوله-ای از جنس آلومینیوم را به روش الکترومغناطیسی با نرم‌افزار انسیس<sup>4</sup> شبیه‌سازی کردند؛ و سپس فلاحی آرزودار و همکارانش [6] در سال 2012 تحلیل گذرای کوپل الکترومغناطیسی و تحلیل سازه‌ای فرایند شکل‌دهی انقباضی لوله‌ای از جنس آلومینیوم را به روش شکل‌دهی الکترومغناطیسی را به صورت عددی و شبیه‌سازی انجام دادند. آنها تحلیل کوپل الکتریک و مغناطیسی را توسط نرم‌افزار انسیس شبیه‌سازی کردند و نتایج نیرویی آن را استخراج و با اعمال این نیروها به لوله، تحلیل سازه‌ای را در نرم‌افزار آباکوس<sup>5</sup> انجام دادند.

6- LS-DYNA  
7- Subroutine  
8- Analysis of Variance (ANOVA)  
9- Loose-coupled  
10- Sequential-coupled

1- Murakoshi  
2- MARC  
3- Correia  
4- ANSYS  
5- ABAQUS

و در عرض چند میکرو ثانیه انجام می‌شود. در این حالت، میدان الکترومغناطیسی ممکن است به دلیل تغییرات ضریب خودالقائی متقابل بین سیم پیچ و لوله، تغییر کند. لذا اثر متقابل بین جابجایی لوله و چگالی میدان مغناطیسی قابل اغماض می‌باشد و فرض شده که سرعت دیواره لوله بر روی میدان مغناطیسی تاثیر ندارد.

2- لوله غیر مغناطیس بوده و هدایت الکتریکی و نفوذپذیری آن ثابت فرض شده است.

3- خواص مواد (هدایت الکتریکی و هدایت مغناطیسی) ایزوتروپیک هستند و با افزایش دما و زمان ثابت فرض شده‌اند و تاثیرات حرارت در نظر گرفته نشده است. و همچنین مطابق مرجع [19] از افزایش حرارت به دلیل جریان القایی صرف نظر شده است.

برای انجام شبیه‌سازی از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شده است. مدل هندسی شامل یک قالب و لوله می‌باشد. بدلیل تقارن محوری لوله و قالب، شبیه‌سازی در حالت دو بعدی انجام گرفت (شکل 5). لوله به صورت ماده‌ی شکل پذیر همگن و همسانگرد و با المان سیمی تقارن محوری (SAX1) و همچنین قالب به صورت صلب تحلیلی مدل شده و تمام درجات آزادی قالب بسته (صلب) شده است. برای مدل کردن اصطکاک بین قالب و لوله از مدل کلمب استفاده و مقدار ضریب اصطکاک 0.15 فرض شده است. با توجه به اینکه فرایند شکل‌دهی الکترومغناطیسی منجر به ایجاد نرخ کرنش بین  $10^2$  و  $10^4$  می‌گردد. معادله‌های مشخصه زیادی همانند کوپر-سایمون<sup>1</sup> یا جانسون-کوک<sup>2</sup> به منظور در نظر گرفتن اثر دینامیکی در رفتار

دهی الکترومغناطیسی استفاده می‌شود [11-18]. در روش کوپل ضعیف میدان الکترومغناطیسی، معادلات حاکم بر الکترومغناطیسی مسأله و معادلات حاکم بر قسمت سازه‌ای مسأله مستقل از هم حل می‌شوند. اما در الگوریتم کوپل ترتیبی، شبیه‌سازی الکترومغناطیسی و شبیه‌سازی سازه‌ای به طور متناوب انجام می‌شود و تغییر هندسه قطعه‌کار تابع زمان در حل معادلات حاکم بر قسمت الکترومغناطیسی مسأله لحاظ می‌شود.

کوپل ترتیبی مورد استفاده در این تحقیق بدین صورت است که، ولتاژ و مشخصات هندسی، فیزیکی و مکانیکی لوله، سیم‌پیچ و قالب (جدول 1) و همچنین کد معادلات الکترومغناطیسی به زبان فورترن نوشته شد. سپس در قالب زیربرنامه قرار گرفت تا محاسبات الکترومغناطیسی را انجام داده و فشار الکترومغناطیسی اعمالی به لوله را محاسبه کند. فشار الکترومغناطیسی بدست آمده از زیر برنامه، در نرم افزار آباکوس بصورت فشار مکانیکی بر روی تک تک گره‌های مدل لوله اعمال می‌شود (شکل 3). سپس محاسبات الکترومغناطیسی جدیدی بعد از بروز رسانی هندسه لوله انجام می‌شود. در هر گام زمانی این محاسبات انجام می‌شود تا کل زمان فرایند به اتمام رسیده و شکل نهایی لوله بدست آید. کل زمان فرایند شکل‌دهی الکترومغناطیسی مورد بررسی  $35\mu\text{s}$ ، به طول می‌انجامد و گام زمانی جهت پایدار بودن فرایند شبیه‌سازی  $0.1\mu\text{s}$  می‌باشد. شکل 4 الگوریتم استفاده شده را نشان می‌دهد. با توجه به ماهیت فیزیکی پیچیده این فرایند، برخی از ساده‌سازی‌ها و فرضیات به شرح ذیل صورت گرفته است:

1- در طول فرایند شکل‌دهی الکترومغناطیسی، تغییر شکل با سرعت بالا

جدول 1 مشخصه‌های مواد استفاده شده در فرایند شبیه‌سازی

Table 1 used material parameters in simulation

مقدار	پارامتر	قطعات
1	نفوذپذیری مغناطیسی ( $\mu$ )	سیم پیچ (مس)
$1.72\text{e-}8$	مقاومت الکتریکی ( $m\Omega$ )	
13	تعداد دور	
1	نفوذپذیری مغناطیسی ( $\mu$ )	لوله (آلومینیوم 1100)
$5\text{e-}8$	مقاومت الکتریکی ( $m\Omega$ )	
2700	چگالی ( $\text{kgm}^{-3}$ )	
148.361	استحکام تسلیم (MPa)	
345.513	استحکام نهایی (MPa)	
65.762	مدول الاستیسیته (GPa)	
0.3	ضریب پواسون	

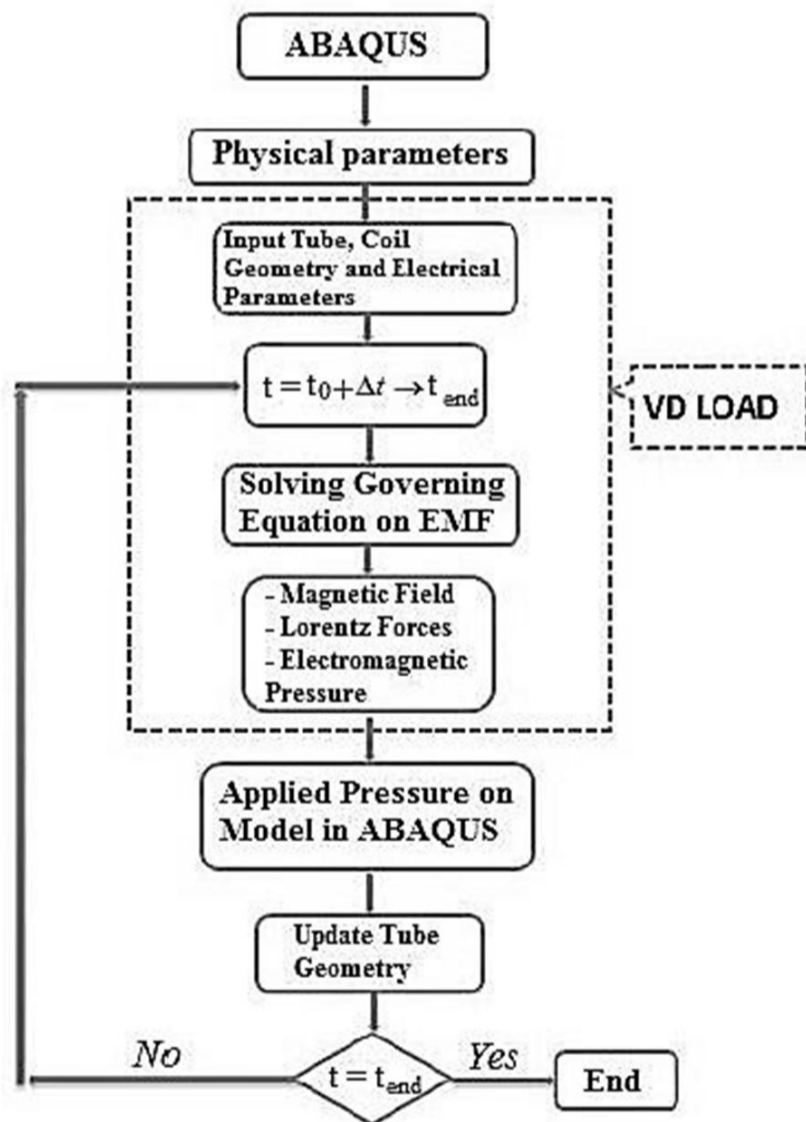


Fig. 4 used algorithm for simulation of electromagnetic forming process

شکل 4 الگوریتم استفاده شده برای شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی الکترومغناطیسی

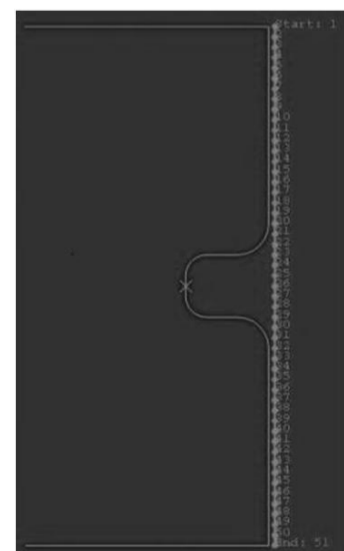


Fig. 3 2D finite element model with node number on tube

شکل 3 مدل 2 بعدی المان محدود به همراه شماره گره‌ها بر روی لوله

1- Cowper-Symonds  
2- Johnson-Cook

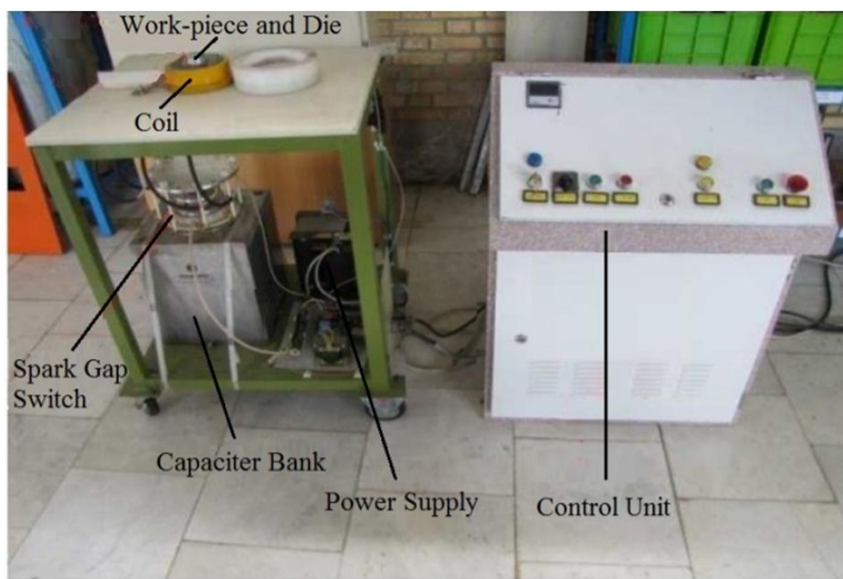


Fig. 6 Electromagnetic Forming Equipment

شکل 6 تجهیزات شکل‌دهی الکترومغناطیسی

جدول 3 پارامترهای الکتریکی و مغناطیسی مدار معادل

Table 3 Electrical and magnetic parameters of equivalent circuit

مقاومت الکتریکی (میلی اهم)	اندوکتانس معادل (میکرو هانری)	ظرفیت بانک خازن (میکرو فاراد)
30	3.6	253

جدول 4 پارامترهای مورد بررسی به همراه سطوح آنها

Table 4 investigating parameters with their levels

پارامتر	سطح 1	سطح 2	سطح 3
A ضخامت دیواره لوله (mm)	0.5	0.6	0.7
B لقی بین لوله و قالب (mm)	0.04	0.10	0.15
C طول لوله (mm)	30	40	50
D ولتاژ تخلیه (kV)	4	4.5	5

میلی‌متر می‌باشد، به نحوی آماده شدند که لقی‌های 0.04 و 0.10 و 0.15 بین قطر داخلی لوله و قطر خارجی قالب بوجود آید. (قطر داخلی لوله‌ها 47.08 و 47.20 و 47.30 میلی‌متر تراشکاری گردید) سپس نمونه‌ها با استفاده از تجهیزات موجود در شکل 5 مورد تست قرار گرفت و سپس میزان عمق بید با استفاده از دستگاه CMM اندازه‌گیری شد. لازم به توضیح است که در بعضی از آزمایش‌ها نمونه از چند ناحیه دچار پارگی و یا چروک گردید که در این موارد، میزان عمق فرو روی در نواحی سالم مورد سنجش قرار گرفت.

سپس از آنالیز واریانس برای ارزیابی تاثیر فاکتورها بر روی خروجی (عمق بید) استفاده شده است. و همچنین به منظور تعیین بهترین مقدار پارامترهای ورودی در محاسبات آماری از نسبت سیگنال به نویز (S/N) استفاده می‌شود. در روش تاگوچی، سیگنال مقدار مطلوب (میانگین) و نویز مقدار نامطلوب (انحراف استاندارد) بر روی مشخصه کیفی را نشان می‌دهد و از نسبت این دو حاصل می‌شود. در این تحقیق این نسبت از نوع بزرگ‌تر-بهرتر<sup>1</sup> می‌باشد، که این حالت مطابق رابطه (2) می‌باشد.

$$\left(\frac{S}{N}\right) = -\log \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (1)$$

#### 4- نتایج و بحث

جدول 5 نتایج مربوط به شبیه‌سازی و آزمون تجربی را در 9 حالت طراحی آزمایش تاگوچی نشان می‌دهد.

شکل 7 تغییرات ضخامت لوله را در اثر اعمال نیروهای حاصل از ولتاژ

1- The Larger The Better

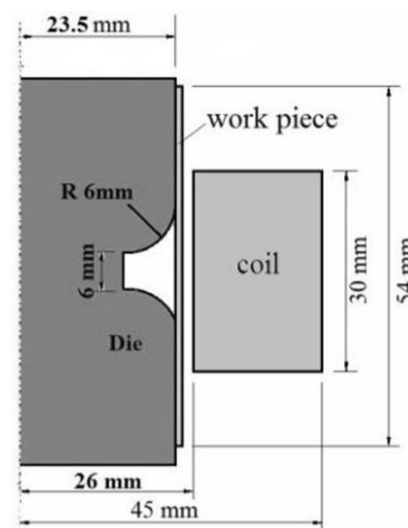


Fig. 5 Axi-Symmetry Schematic of workpiece, coil and die in inside bead forming

شکل 5 شماتیک قطعه کار، سیم‌پیچ و قالب به صورت تقارن محوری در فرایند بید به سمت داخل

مواد پیشنهاد شده‌اند. مدل ماده در این شبیه‌سازی به علت بالابودن سرعت شکل‌دهی، معادله ویسکوپلاستیک جانسون-کوک در نظر گرفته شد. این معادله به شکل (1) می‌باشد [20]:

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

در این معادله  $\bar{\sigma}$  تنش جریان،  $A$  تنش جاری شدن،  $n$  توان کرنش سختی،  $C$  ضریب حساسیت به نرخ کرنش،  $\dot{\bar{\epsilon}}$  نرخ کرنش پلاستیک لحظه‌ای و  $\dot{\bar{\epsilon}}_0$  نرخ کرنش پلاستیک مرجع،  $T$  دمای قطعه کار،  $T_m$  دمای ذوب ماده،  $T_r$  دمای تبدیل (معمولاً دمای محیط)،  $m$  ضریب ماده که نرم شدن ماده در دماهای بالا می‌باشد. برای به‌دست‌آوردن ضرایب معادله‌ی جانسون-کوک نیاز به آزمایش‌های پیکینسون با نرخ کرنش بالا و دماهای مختلف می‌باشد. لذا به دلیل عدم امکان انجام عملی این آزمایش، در این پژوهش از آلومینیوم 1100 با خواص مطابق جدول 2 و طبق مرجع [11] استفاده شد.

#### 3- کارهای تجربی

در عملیات شکل‌دهی، لوله تحت فشار الکترومغناطیسی، به داخل قالب کشیده شده و به شکل مورد نظر خواهد رسید. اجزاء سیستم شکل‌دهی که شامل بانک خازن، سویچ اسپارک گپ، قالب، سیم‌پیچ و قطعه‌کار می‌باشد، در شکل 6 آورده شده است.

همچنین پارامترهای الکتریکی و مغناطیسی مدار معادل در جدول 3 نشان داده شده است.

با استفاده از یک آرایه متعامد، بررسی پارامترها انجام شد.

سطوح پارامترهای مورد آزمایش، شامل ولتاژ تخلیه، لقی بین قالب و لوله، طول و ضخامت دیواره لوله در جدول 4 نشان داده شده است. معیار ارزیابی فرایند (متغیر پاسخ) عمق فرو روی می‌باشد.

از روش طراحی آزمایش تاگوچی با آرایه متعامد L9 برای طراحی آزمایش استفاده شده است که بر این اساس، 9 آزمایش ممکن برای طرح مورد بررسی وجود خواهد داشت [21].

با توجه به طراحی آزمایش، لوله‌هایی از جنس AL1100 که دارای یکی از ضخامت‌های 0.5 و 0.6 و 0.7 میلی‌متر و یکی از طول‌های 30 و 40 و 50

جدول 2 ضرایب جانسون-کوک برای ماده مورد استفاده [11]

جنس	A (MPa)	B (MPa)	C	m	n	$\dot{\bar{\epsilon}}_0$
Al 1100	148.361	345.513	0.001	0.859	0.183	1

جدول 5 نتایج جابجایی بدست آمده برای آزمایش‌های انجام شده در دو حالت تجربی و شبیه‌سازی

Table 5 obtained results for tests in experimental and simulation

شماره آزمایش	ضخامت دیواره لوله (mm)	لقی بین لوله و قالب (mm)	طول لوله (mm)	ولتاژ تخلیه (kV)	عمق فروروی نوک بید (mm)	میزان خطا (%)
1	0.5	0.04	30	4	3.219	7.3
2	0.5	0.10	40	4.5	3.516	3.41
3	0.5	0.15	50	5	4.223	17.3
4	0.6	0.04	40	5	3.37	3.69
5	0.6	0.10	50	4	2.762	2.29
6	0.6	0.15	30	4.5	3.40	3.03
7	0.7	0.04	50	4.5	2.896	1.61
8	0.7	0.10	30	5	3.446	1.35
9	0.7	0.15	40	4	2.659	2.26

در آن بوجود آمده است.

قطعه شماره 3 دارای چروکیدگی فراوان و پارگی شدید در 3 ناحیه می‌باشد و ضخامت جداره لوله در مجاورت شعاع لبه قالب به شدت کاهش پیدا کرده است. دلیل پارگی ایجاد شده در این قطعه، ولتاژ تخلیه بالا و ضخامت پایین جداره لوله، و همچنین دلیل چروکیدگی ایجاد شده لقی زیاد بین قالب و لوله است.

قطعه شماره 4 بدون چروکیدگی و پارگی شکل داده شده است. در این تست لقی بین قالب و لوله کم بوده و ولتاژ تخلیه شده بیشتر می‌باشد ولی ضخامت جداره لوله نیز در مقایسه با قطعه‌های تست شماره 1 و 3 بیشتر می‌باشد و این باعث شده که قطعه دچار چروکیدگی خیلی کمی شده و پاره نشود.

قطعه شماره 5 دارای چروکیدگی کمی شده اما دچار پارگی نشده است. هر چند ولتاژ تخلیه شده مانند تست شماره 1 بالا می‌باشد ولی در این قطعه به دلیل ضخامت و طول بیشتر و لقی بیشتر در مقایسه با با قطعه تست 1، پارگی رخ نداده و قطعه کمی چروکیده شده است.

قطعه شماره 6 دارای چروکیدگی شده اما دچار پارگی نشده است. در این تست، قطعه به دلیل لقی زیاد بین قالب و لوله دچار چروکیدگی شده است در صورتی که به دلیل ضخامت بالاتر، ولتاژ تخلیه و طول کمتر در مقایسه با قطعه شماره 3، قطعه دچار پارگی نشده است.

قطعه شماره 7 دارای چروکیدگی شده و پارگی خفیفی در 2 ناحیه رخ داده بعلاوه ضخامت جداره لوله در مجاورت شعاع لبه قالب کمی کاهش پیدا کرده است. دلیل پارگی ایجاد شده در این قطعه، لقی بسیار کم بین قالب و لوله است که از جریان فلز جلوگیری می‌کند و منجر به پارگی لوله می‌شود.

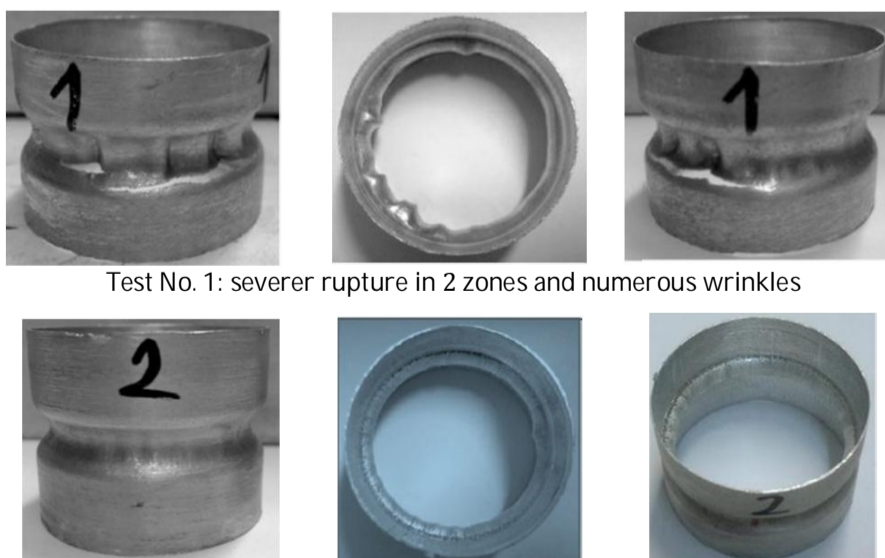


Fig. 7 thickness variations in tube length at the end of forming process

شکل 7 تغییرات ضخامت در راستای طول لوله در پایان زمان شکل‌دهی

تخلیه 4000V برای لوله با طول 40mm و با ضخامت 0.7 mm را در انتهای فرایند شکل‌دهی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، بیشترین نازک‌شدگی در ناحیه تماس لوله با شعاع قالب به دلیل تنش‌های کششی رخ می‌دهد. همچنین بیشترین افزایش ضخامت در ناحیه فرو رونده در شیار قالب به دلیل وجود تنش‌های فشاری در حین فرایند شکل‌دهی می‌باشد. همچنین موافق مراجع [6,4] مشاهده شده است که، در نوک بید نوده‌های ابتدایی افزایش ضخامت و در چند میکروثانیه انتهایی، نوک بید تحت کشش قرار می‌گیرد که منجر به کاهش جزئی ضخامت به صورت نسبی می‌شود.

همان‌طور که در جدول 5 مشاهده می‌شود، عمق بید فروروی درون شیار قالب در حالت شبیه‌سازی بیشتر از آزمون تجربی می‌باشد. دلیل این اختلاف این است که با تغییر مکان یا تغییر هندسه لوله، اندوکتانس لوله تغییر می‌کند و جریان گذرنده از لوله و نیروی اعمالی نیز تغییر می‌یابد. نتایج آزمون‌های تجربی در شکل 8 آورده شده است.

قطعه شماره 1 دارای چروکیدگی فراوان و پارگی شدید در 2 ناحیه می‌باشد و ضخامت جداره لوله در مجاورت شعاع لبه قالب به شدت کاهش پیدا کرده است. دلیل پارگی و چروکیدگی ایجاد شده در این قطعه، ضخامت پایین جداره لوله، طول کوتاه لوله و لقی بسیار کم بین قالب و لوله است که از جریان فلز جلوگیری می‌کند و منجر به پارگی لوله می‌شود.

قطعه شماره 2 دارای کمی چروکیدگی بوده اما دچار پارگی نشده است. در این تست به دلیل لقی مناسب بین قالب و لوله و طول بیشتر لوله در مقایسه با قطعه تست شماره 1، قطعه دچار پارگی نشده و چروکیدگی کمی

تست، ضخامت بالاتر و طول کوتاه‌تر قطعه و ولتاژ تخلیه کمتر در مقایسه با قطعه شماره 3، دلیل پاره نشدن و عدم چروکیدگی قطعه می‌باشد.

در ادامه، آنالیز واریانس با فرض خطای نوع اول به اندازه  $\alpha = 0.05$  انجام شده و درصد سهم هر فاکتور بر روی عمق فروروی تعیین می‌گردد که نتایج آن در جدول 6 نشان داده شده است.

نتایج آنالیز واریانس نشان می‌دهد که سهم اثر عامل ولتاژ تخلیه 72.34% می‌باشد که بیشترین تاثیر را روی عمق فرو روی بید دارد و پس از آن ضخامت لوله، طول لوله و لقی بین لوله و قالب به ترتیب بیشترین تاثیر بر روی عمق فرو روی دارند.

به منظور تعیین بهترین مقدار پارامترهای ورودی در محاسبات آماری از نسبت سیگنال به نویز (S/N) استفاده می‌شود. (شکل 9) در این تحقیق این نسبت از نوع بزرگ‌تر-بهرتر می‌باشد.

با افزایش طول لوله، سطح تماس بین لوله و قالب، و به عبارت دیگر نیروی اصطکاک افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش طول لوله، انرژی الکتریکی بر روی سطح بیشتری تخلیه شده که منجر به کاهش فشار مغناطیسی اعمالی بر روی لوله می‌گردد.

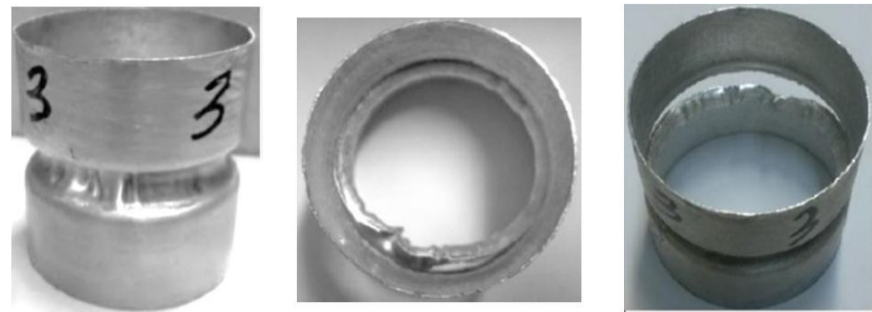
افزایش ضخامت دیواره لوله باعث کاهش عمق فروروی شده و احتمال چروکیدگی و پارگی لوله را کاهش می‌دهد.

فاصله بین سیم‌پیچ و لوله نقش مهمی در توزیع میدان مغناطیسی بازی می‌کند. وقتی که فاصله بین لوله و سیم‌پیچ افزایش می‌یابد، ضریب خودالقایی متقابل در اجزاء مدار تغییر می‌کند. فاصله کوچکتر (افزایش لقی بین قالب و لوله) باعث ضریب خودالقایی پایین‌تر و نفوذ نیروی مغناطیسی بهتر می‌شود و باعث می‌گردد که فشار مغناطیسی بین لوله و سیم‌پیچ بیشتر شده و در نتیجه افزایش جابه‌جایی شعاعی می‌گردد. اما لقی بین لوله و قالب برخورد دوگانه‌ای در برابر چروکیدگی و پارگی دارد به صورتیکه لقی کم از جریان فلز جلوگیری می‌کند و لوله پاره می‌شود و لقی زیاد باعث ایجاد چروکیدگی در لوله می‌شود. بدین صورت برای رسیدن به بهترین نتیجه باید لقی بین قالب و لوله به مقدار بهینه‌ای برسد که نه از جریان فلز جلوگیری کرده و سبب پاره شدن آن شود و نه باعث چروکیدگی لوله شود.

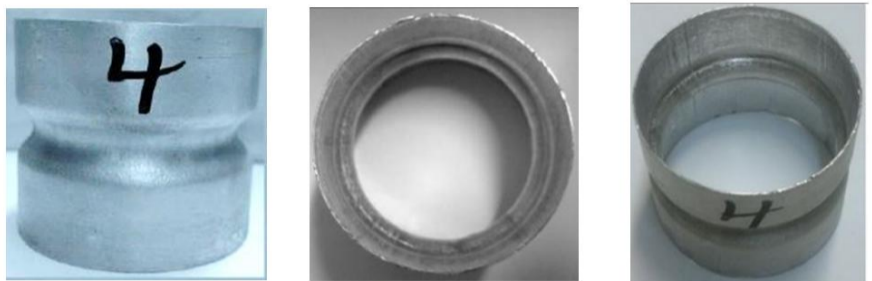
فشار محاسبه شده توسط زیر برنامه بر روی تمام المان‌ها یکسان نیست. با توجه به میدان مغناطیسی محوری ایجاد شده در اطراف لوله که موازی با محور لوله می‌باشد، مرکز میدان در وسط لوله (از نظر طولی) می‌باشد، لذا فشار اعمالی در وسط لوله بیشتر بوده و هر چه به سمت لبه‌های آن می‌رویم فشار کاهش می‌یابد. بیشینه فشار الکترومغناطیسی در ناحیه فرو رفتگی اتفاق می‌افتد و همچنین با افزایش میزان ولتاژ تخلیه، بیشینه فشار افزایش می‌یابد که موافق با مرجع [9] می‌باشد. افزایش ولتاژ تخلیه عمق فروروی در لوله را افزایش می‌دهد ولی باید توجه داشت که با توجه به پارامترهای دیگر از جمله ضخامت جداره لوله، افزایش ولتاژ تخلیه می‌تواند باعث پارگی لوله شود.

جدول 6 ANOVA پارامترهای مورد بررسی بر روی عمق فروروی

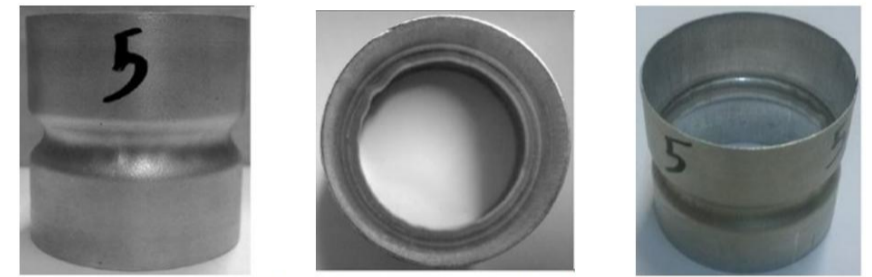
پارامتر	درجه آزادی (f)	مجموع مربعات (s)	واریانس (V)	عدد فیشر (F)	سهم هر عامل (%)
A ضخامت لوله	2	0.241	0.21	10850.3	14.283
B لقی	2	0.084	0.042	3799.5	5
C طول لوله	2	0.141	0.07	6350.3	8.359
D ولتاژ تخلیه	2	1.221	0.61	54950.2	72.344
خطا	9	-0.001	-0.001	-	0.014



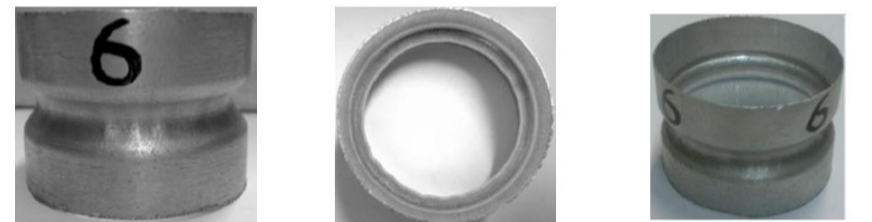
Test No. 3: severer rupture in 3 zones and numerous wrinkles



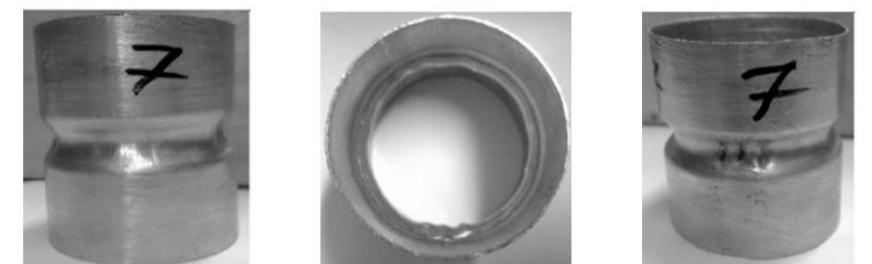
Test No. 4: without rupture and wrinkles



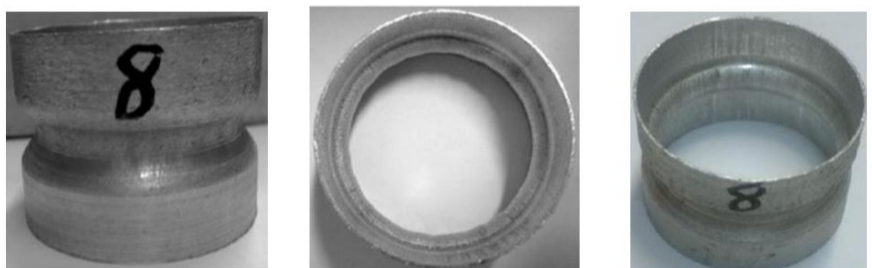
Test No. 5: without rupture and a few wrinkles



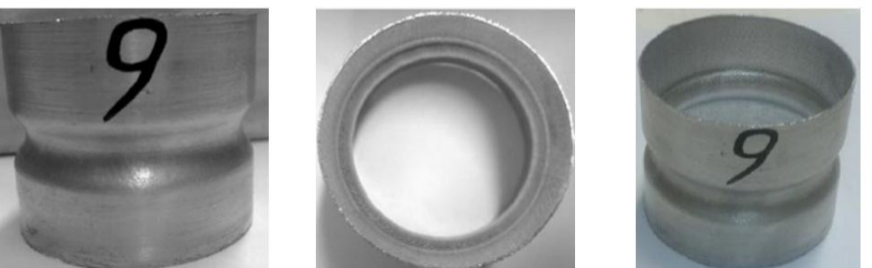
Test No. 6: without rupture and medial wrinkles



Test No. 7: Slight rupture and wrinkles in 2 zones



Test No. 8: without rupture and few wrinkles



Test No. 9: without rupture and wrinkles

Fig. 8 formed tubes in tests

شکل 8 لوله‌های شکل داده شده در آزمایش‌ها

قطعه شماره 8 دارای چروکیدگی خیلی کمی شده اما دچار پارگی نشده است. در این تست، ضخامت بالاتر و طول کوتاه‌تر قطعه در مقایسه با قطعه شماره 3، دلیل پاره نشدن قطعه می‌باشد و لقی مناسب از ایجاد چروکیدگی زیاد در این قطعه جلوگیری می‌کند.

قطعه شماره 9 بدون پارگی و چروکیدگی شکل داده شده است. در این

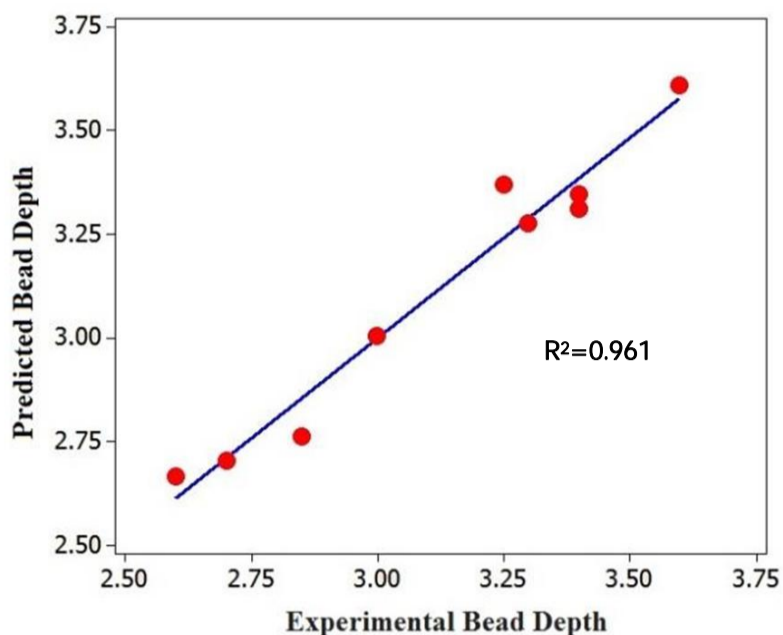


Fig. 10 Experimental vs. predicted results

شکل 10 دقت نتایج پیش بینی شده به وسیله مدل بدست آمده آورده شده است.

5- نتیجه گیری

در این تحقیق ابتدا شبیه‌سازی کوپل فرایند شکل‌دهی بید به سمت داخل با استفاده از شکل‌دهی الکترومغناطیسی توسط نرم‌افزار آباکوس انجام شد. در شبیه‌سازی این فرایند شکل‌دهی، تعریف خواص ماده بر اساس مدل وابسته به نرخ کرنش جانسون-کوک صورت گرفت. در ادامه برای صحنه‌گذاری این شیوه شبیه‌سازی، نتایج نهایی با نتایج آزمون‌های تجربی مقایسه گردید و مشاهده شد که نتایج حاصل از شبیه‌سازی، با خطایی به میزان کمتر از 4% جابه‌جایی بیشتری را نسبت به آزمون تجربی نشان می‌دهد.

- با افزایش ولتاژ تخلیه، چگالی میدان مغناطیسی و فشار مغناطیسی افزایش می‌یابد که منجر به افزایش عمق فروروی می‌گردد.

- با کاهش لقی بین ورق و سیم‌پیچ، نفوذ میدان مغناطیسی بهتر شده و باعث می‌شود که فشار مغناطیسی بین لوله و سیم‌پیچ افزایش یابد. لقی بین لوله و قالب برخورد دوگانه‌ای در برابر چروکیدگی و پارگی دارد به صورتی که لقی کم از جریان فلز جلوگیری می‌کند و لوله پاره می‌شود و لقی زیاد باعث ایجاد چروکیدگی در لوله می‌شود. بدین صورت برای رسیدن به بهترین نتیجه باید لقی بین قالب و لوله به مقدار بهینه‌ای برسد که نه از جریان فلز جلوگیری کرده و سبب پاره شدن آن شود و نه باعث چروکیدگی لوله شود.

- با افزایش طول لوله، سطح تماس بین لوله و قالب، و نیروی اصطکاک افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش طول لوله، انرژی الکتریکی بر روی سطح بیشتری تخلیه شده که منجر به کاهش فشار مغناطیسی اعمالی بر روی لوله می‌گردد.

در نهایت پیشنهاد می‌شود برای تحقیقات آتی، طراحی آزمایشی انجام شود که هر سه پارامتر، عمق فرو روی، پارگی و چروکیدگی و تاثیر متقابل آنها بر روی هم را در نظر گرفته و همچنین بهینه‌سازی فرایند با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی از قبیل الگوریتم ژنتیک انجام شود.

6- تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از همکاری و کمک آقایان دکتر حسین ابراهیمی هراتمه و دکتر کوریا که انجام این پژوهش بدون کمک آنها امکان‌پذیر نبود، کمال تشکر و قدردانی را نمایند.

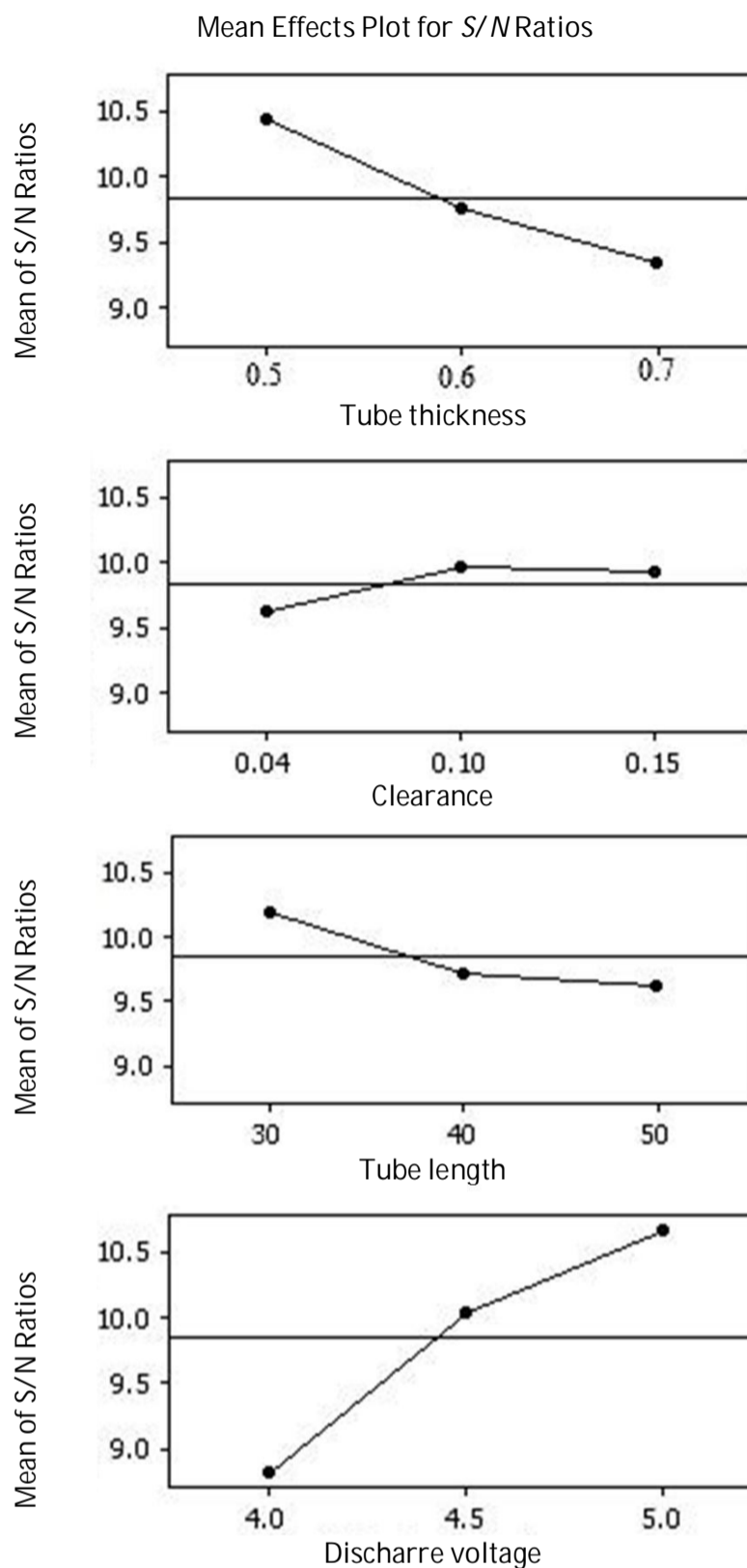


Fig. 9 S/N parameters effect on the bead depth

شکل 9 نمودار مقادیر متوسط نسبت سیگنال به نویز (S/N) پارامترهای مورد بررسی

نیروهای موجود در هنگام شکل‌دهی را می‌توان به دو دسته، نیروی شکل‌دهی و نیروی اصطکاک بین لوله آلومینیومی و قالب تقسیم کرد. نیروی اصطکاک وابسته به فشار مغناطیسی، ضریب اصطکاک و سطح تماس لوله و قالب بوده و نیروی شکل‌دهی وابسته به فشار مغناطیسی و عرض شیار، می‌باشد.

معادله رگرسیون برای آزمایش طراحی شده به صورت رابطه (3) بدست می‌آید، که معادله خطی عمق فروروی نوک بید را بر اساس پارامترهای مورد بررسی نشان می‌دهد.

$$\text{Bead Depth} = 1.59 - 1.92A + 1.25B - 0.00917C + 0.65D \quad (3)$$
 این رابطه نشان می‌دهد که ولتاژ تخلیه و لقی بین لوله و قالب ارتباط مستقیم و ضخامت و طول لوله ارتباط معکوس بر روی عمق فرو روی دارد. همچنین مقدار ضریب تعیین برای مدل  $(R^2)$  برابر 0.961 به دست آمده است که این بدان معناست، مدل به دست آمده توانایی تخمین 96.1% تغییرات پاسخ سیستم را دارد که نشان از نیکویی برازش در مدل به دست آمده دارد. مقایسه نتایج آزمایش و مقادیر پیش بینی شده توسط مدل در شکل 10

## 7- منابع

- [11] W. Xu, H. Fang, W. Xu, Analysis of the variation regularity of the parameters of the discharge circuit with the distance between work piece and inductor for electromagnetic forming processes, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 203, No. 1, pp.216–220, 2008.
- [12] N. K. Gupta, M. A. Iqbal, G. S. Sekhon, Experimental and numerical studies on the behavior of thin aluminum plates subjected to impact by blunt and hemispherical-nosed projectiles, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, No. 12, pp.1921–1944, 2006.
- [13] D. Luca, R. Diaconescu, On the possibility of agile manufacturing of religious objects by electromagnetic forming method, *European Journal of Science and Theology*, Vol. 9, No. 3, pp. 197-205, 2013.
- [14] M. A. Siddiqui, *Numerical modeling and simulation of electromagnetic forming process*, PhD thesis, Strasbourg University, 2009.
- [15] G. Bartels, W. Schätzing, H. P. Scheibe, M. Leone, Comparison of two different simulation algorithms for the electromagnetic tube compression, *International Journal of Material Forming*, Vol. 2, No. 1, pp. 693–696, 2009.
- [16] I. Pérez, I. Aranguren, B. González, I. Eguia, Electromagnetic forming: a new coupling method, *International Journal of Material Forming*, Vol. 2, No. 1, pp. 637–640, 2009.
- [17] Y. U. Haiping, L. I. Chunfeng, D. E. N. G. Jianghua, Sequential coupling simulation for electromagnetic–mechanical tube compression by finite element analysis, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 2, pp. 707–713, 2009.
- [18] G. Bartels, W. Schätzing, H. P. Scheibe, M. Leone, Models for electromagnetic metal forming, *3rd International Conference on High Speed Forming*, pp. 121-128, 2008.
- [19] J. Jablonski, R. Wrinkler, Analysis of the electromagnetic forming process, *International Journal of mechanical sciences*, Vol. 20, No. 5, pp. 315–25, 1978.
- [20] G. R. Johnson, W. H. Cook, A constitutive model and data for metal subjected to large strains, high strain rates and high temperatures, *The Netherlands Proceeding seventh International Symposium on ballistic*, pp. 541-547, 1983.
- [21] R. K. Roy, *A primer on the Taguchi method*, 2nd edition, Society of Manufacturing Engineering, pp. 50-150, Michigan, 1990.
- [1] M. Zohoor, B. Ghorbani, Analytical and numerical investigation of significant parameters on strength of electromagnetically assembled aluminum tube joints, *Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production*, Vol. 2, No. 3, pp. 35-45, 2014.
- [2] M. Kashani, R. Khamedi, H. Ebrahimi, Tube electromagnetic forming coupled simulation by ANSYS and LS-DYNA and comparison with experimental results, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 5, pp. 159-164, 2015. (in Persian فارسی)
- [3] Y. Murakoshi, M. Takahashi, T. Sano, K. Hanada, H. Negishi, Inside bead forming of aluminum tube by electromagnetic forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 80-81, pp. 695-699, 1998.
- [4] H. Ebrahimi Haratmeh, A. R. Fallahi Arezoodar, M. Farzin, M. Attaran, S. Toroghi, Electromagnetic bulge forming: investigation of electrical and mechanical parameters on forming process, *6th international conference on electromagnetic processes of materials*, Germany, 2009.
- [5] C. Weddeling, S. Woodward, J. Nellesen, V. Psyk, M. Marré, A. Brosius, A.E. Tekkaya, G.S. Daehn, W. Tillmann, Development of design principles for form-fit joints in lightweight frame structures, *4th International Conference on High Speed Forming*, pp. 137-148, 2010.
- [6] A. R. Fallahi Arezoodar, H. Ebrahimi Haratmeh, M. Farzin, Numerical and experimental investigation of inward tube electromagnetic forming-electromagnetic study, *Advanced Materials Research*, Vol. 383-390, pp. 6710-6716, 2012.
- [7] A. El-Azab, M. Garnich, A. Kapoor, Modeling of the electromagnetic forming of sheet metals: state-of-the-art and future needs, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 142, No. 3, pp. 744-754, 2003.
- [8] M. Zohoor, B. Ghorbani, Numerical investigation of tube compression electromagnetic forming by finite element method and design of experiment, *Aerospace Mechanics Journal*, Vol. 11, No. 3, pp. 83-90, 2015. (in Persian فارسی)
- [9] L. Chunfeng, Z. Zhiheng, L. Jianhui, L. Zhong, The effect of tube length on magnetic pressure in tube electromagnetic bulging, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 166, No. 3, pp. 381–386, 2005.
- [10] J. P. M. Correia, M. A. Siddiqui, S. Ahzi, S. Belouettar, R. Davies, A simple model to simulate electromagnetic sheet free bulging process, *Internatioal Journal of Mechanical sciences*, Vol. 50, No. 10, pp. 1466-1475, 2008.