

# بررسی عددی شکل‌دهی انقباضی لوله به روش الکترومغناطیسی توسط تکنیک المان محدود و طراحی آزمایش

مه‌دی ظهور<sup>۱</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

بهمن قربانی<sup>۲</sup>

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۲/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۱/۱۹)

## چکیده

شکل‌دهی الکترومغناطیسی یکی از روش‌های شکل‌دهی پرسرعت است که از نیروی الکترومغناطیسی لورنتس جهت شکل‌دهی، اتصال و مونتاژ قطعات با هدایت الکتریکی بالا استفاده می‌شود. در این مقاله، اثر پارامترهای مهم فرایند، مانند ولتاژ تخلیه، ضریب اصطکاک، لقی بین قالب و لوله، طول و ضخامت دیواره لوله، بر روی جابه‌جایی شعاعی و نازک‌شدگی قطعه کار بررسی شده است. خروجی معادلات حاکم الکترومغناطیسی به شکل فشار در نرم‌افزار المان محدود، بر روی قطعه کار اعمال شده است. در این تحلیل، آنالیز دینامیکی با به کار بردن یک مدل دوبعدی تقارن محوری به انجام رسید و مدل کرنش سختی جانسون- کوک برای توصیف حساسیت نرخ کرنش و نشان دادن رفتار پلاستیک ماده به کار رفت. نتایج به دست آمده با نتایج تجربی موجود در مراجع معتبر دیگر مقایسه شد و تطابق خوبی حاصل شد.

**واژه‌های کلیدی:** شکل‌دهی الکترومغناطیسی، المان محدود، طراحی آزمایش، نازک‌شدگی

## Numerical Investigation of Tube Compression Electromagnetic Forming by Finite Element Method and Design of Experiment

M. Zohoor

Faculty of Mechanical Engineering  
K.N.Toosi University of Technology

B. Ghorbani

Faculty of Engineering  
Islamic Azad University Islamshahr Branch

(Received:30/April/2014; Accepted:8/February/2015.)

## ABSTRACT

Electromagnetic forming is a high energy rate forming process which is 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. In this article, the influence of important process parameters such as discharge voltage, friction coefficient, clearance between the tube and die, wall thickness and length of tube, on the radial displacement and workpiece thinning were investigated. The output of governing equations in the form of pressure applied on the part via a subroutine in a Fortran Program. A dynamic analysis using two dimensional axisymmetric models were performed and Johnson-Cook theory was applied to represent the effect of strain rate sensitivity and show the plastic behavior in the deformation process. Finally, the numerical results were compared with the results reported by other researchers and found a good agreement between them.

**Keywords:** Electromagnetic Forming, Finite Element, Design of Experiment, Thinning

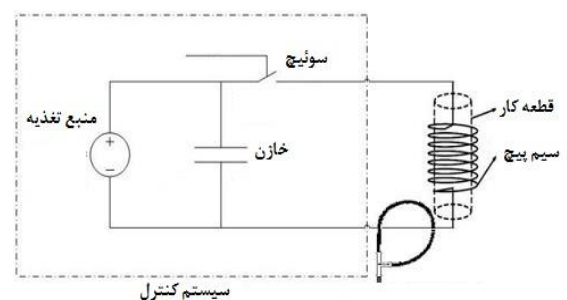
۱- دانشیار(نویسنده پاسخگو): mzohoor@kntu.ac.ir

۲- مربی: bahman.ghorbani64@gmail.com

## ۱- مقدمه

شکل‌دهی ورق‌های فلزی به دلیل کاربرد وسیع در صنایع مختلف، یکی از مهمترین فرایندهای ساخت محسوب می‌شود که همواره با مشکلاتی از قبیل بازگشت فنری زیاد، چین خوردگی، قابلیت شکل‌پذیری پایین ورق که منجر به پارگی آن می‌شود، روبروست. نتایج آزمایش‌ها تجربی نشان داده است که در فرایندهای شکل‌دهی با نرخ کرنش بالا از قبیل شکل‌دهی انفجاری، شکل‌دهی الکترومغناطیسی و شکل‌دهی الکترومغناطیسی، مشکلات مذکور تا حدود زیادی مرتفع می‌شوند. هنگامی که تغییر فرم با نرخ کرنش بسیار بالا صورت می‌گیرد، قابلیت شکل‌پذیری فلز تا حد قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته، بازگشت الاستیک آن کم‌تر شده و احتمال وقوع چین‌خوردگی در آن کاهش می‌یابد [۱-۲]. یکی از پرجاذبه‌ترین روش‌های شکل‌دهی پرسرعت به لحاظ کاربردی، شکل‌دهی الکترومغناطیسی است که برای فلزاتی با قابلیت هدایت الکتریکی بالا مانند آلیاژهای آلومینیوم، مس، نقره، برنج و برخی فولادها بسیار مناسب است. با به‌کارگیری همزمان این روش با روش‌های متداول شکل‌دهی، می‌توان بسیاری از قطعات را با تعداد عملیات کم‌تر تولید کرد و ساخت بسیاری از قطعات با جنس‌های دشوار مانند آلومینیوم امکان‌پذیر می‌شود. این امر در نهایت می‌تواند منجر به کاهش وزن قطعات و افزایش بازدهی محصولات صنعتی شود [۳].

سیستم شکل‌دهی الکترومغناطیسی عمدتاً از یک منبع تغذیه پالسی، منبع ذخیره انرژی (خازن)، کلید آمپر بالا (اسپارک گپ)، یک سیم‌پیچ قابل تعویض به‌عنوان ابزار، و قطعه کار تشکیل شده است.



شکل (۱): شماتیک اجزاء شکل‌دهی الکترومغناطیسی [۴].

با تخلیه خازن، بسته‌شدن ناگهانی سوئیچ فشار قوی باعث ایجاد جریان نوسانی میرا در سیم‌پیچ می‌شود. به این ترتیب در اطراف سیم‌پیچ یک میدان مغناطیسی متغیر نسبت به

زمان ایجاد کرده است [۱]. طبق قانون لنز، میدان مغناطیسی پالسی شکل ایجادشده جریان الکتریکی ثانویه‌ای در قطعه القا کرده که جهت آن، خلاف جهت سیم‌پیچ ابزار است. این جریان به‌وجودآمده یک میدان مغناطیسی دیگری تشکیل می‌دهد [۳]. دو میدان مغناطیسی موجود، نیروهایی به‌وجود می‌آورند که مخالف یک‌دیگر می‌باشند (نیروی الکترومغناطیسی لورنتس)، نیروی دافعه به میزانی است که منجر به تغییر شکل پلاستیک قطعه می‌شود [۵-۶].

این روش برای شکل‌دهی و اتصال فلزات و دیگر مواد با دقت و تکرارپذیری بالا می‌تواند استفاده شود. کاربرد این فرایند در کارخانجات فلزکاری شامل خودرو، هوافضا و غیره مخصوصاً در قطعات مونتاژی است [۶-۷]. از مزایای این روش، بالا بودن سرعت شکل‌دهی است. بنابراین، علاوه بر بالا بودن سرعت تولید (سرعت ماده از مرتبه  $100 \text{ m/s}$  و زمان شکل‌دهی کم‌تر از  $0/1$  ثانیه)، برخی قطعات که نمی‌توان با روش‌های معمول تولید کرد را می‌توان به راحتی با این روش ساخت زیرا با بالا رفتن نرخ کرنش نمودار حد شکل‌دهی<sup>۱</sup> بهبود می‌یابد. محدودیت این روش شکل‌دهی این است که قطعه موردنظر می‌بایستی هادی الکتریسیته باشد [۴ و ۷].

شکل‌دهی انقباضی لوله یکی از فرایندهای شکل‌دهی لوله با استفاده از نیروی الکترومغناطیسی می‌باشد که در آن با استفاده از سیم‌پیچ‌های فشاری یا انبساطی بر روی سطح داخلی یا خارجی لوله برجستگی ایجاد می‌کند (شکل ۲).



شکل (۲): لوله تغییرشکل‌یافته با استفاده از این فرایند [۲].

در سال‌های اخیر تلاش‌هایی در راستای مطالعه دقیق‌تر این فرایند صورت گرفته است که به برخی از مهم‌ترین آن‌ها اشاره می‌شود.

۱- در طول فرایند شکل‌دهی الکترومغناطیسی، قطعه‌کار در عرض چند میکروثانیه به یک سرعت خیلی بالا دست یافته و از سیم‌پیچ دور می‌شود. در این حالت، میدان الکترومغناطیسی به دلیل تغییرات اندوکتانس متقابل بین سیم‌پیچ و قطعه‌کار، تغییر می‌کند. لذا اثر متقابل بین جابه‌جایی قطعه‌کار و چگالی میدان مغناطیسی قابل اغماض می‌باشد و فرض شده که سرعت ورق بر روی میدان مغناطیسی تاثیر ندارد.

۲- باتوجه به این‌که فرایند شکل‌دهی الکترومغناطیسی در زمان خیلی کوتاه انجام می‌شود، لذا اندوکتانس در طول فرایند شکل‌دهی ثابت فرض می‌شود.

۳- به دلیل تقارن فرایند، یک شکل‌بندی تقارن محوری برای قطعه کار و سیم‌پیچ جهت حل عددی استفاده شده است. در نتیجه، میدان مغناطیسی و فشار الکترومغناطیسی اعمالی بر روی لوله در جهت پیرامونی تغییر نمی‌کند. بنابراین، سیستم مختصات استوانه‌ای برای مسئله حاضر معرفی شده است. محور  $Z$  محور تقارن شکل‌بندی است.

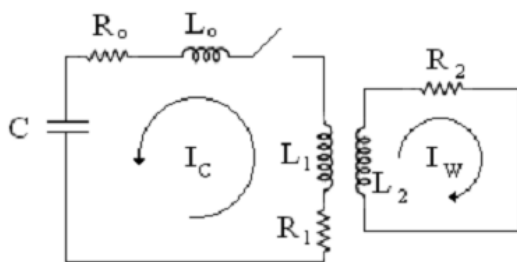
۴- خواص الکترومغناطیسی در دما و زمان ثابت فرض شده و تاثیرات حرارت در نظر گرفته نشده است.

### ۳- معادلات الکترومغناطیسی

در این قسمت به شرح معادلات الکترومغناطیسی پرداخته شده است.

#### ۳-۱- تحلیل مداری

مدل مداری شماتیک فرایند شکل‌دهی الکترومغناطیسی در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل (۳): مدل مداری شماتیک فرایند شکل‌دهی الکترومغناطیسی.

باتوجه به قانون ولتاژ کریشف (در هر حلقه جمع جبری ولتاژها برابر صفر می‌باشد)، معادله‌های (۱-۲) از تحلیل مداری، مدار شماتیک به دست می‌آیند.

چانفنگ<sup>۱</sup> و همکارانش [۸] در سال ۲۰۰۵ تاثیر طول لوله را بر شکل‌دهی انقباضی لوله بررسی کردند. آن‌ها دریافتند با افزایش طول لوله، میزان فشار شعاعی در وسط لوله کاهش می‌یابد.

کوریآ<sup>۲</sup> و همکارانش [۹] در سال ۲۰۰۸ فشار الکترومغناطیسی را با فرض مستقل بودن دو قسمت الکترومغناطیسی و سازه این فرایند و با حل عددی معادلات ماکسول برای هندسه ورق تخت، محاسبه کردند. آن‌ها با اعمال این فشار بر روی ورق، شکل نهائی ورق را توسط نرم‌افزار المان محدود آباکوس بررسی کردند.

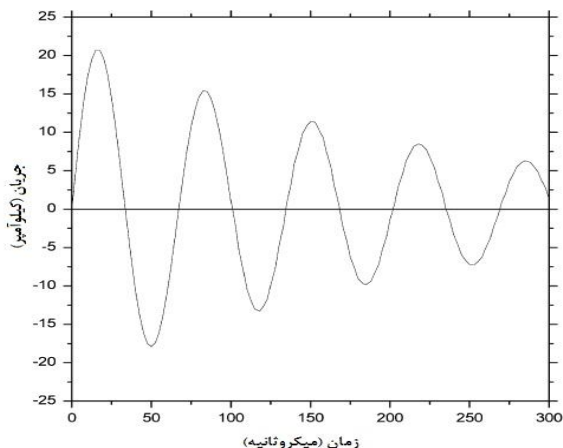
وی ژو<sup>۳</sup> و همکارانش [۱۰] در سال ۲۰۰۸ اثر پارامتر فاصله بین سیم‌پیچ و قطعه کار را بر روی پارامترهای مدار تخلیه بررسی کردند. آن‌ها دریافتند با افزایش فاصله بین سیم‌پیچ و قطعه کار، مقدار پیک جریان تخلیه و ضریب دمپینگ و مقاومت فعال کاهش می‌یابد، اما زمان پیک جریان تخلیه، زمان نیم سیکل اولیه جریان تخلیه و ضریب خودالقائی معادل افزایش می‌یابد.

در مطالعات دیگران، بیش‌تر به مطالعه یک پارامتر به تنهایی پرداخته شده است. بنابراین در این مقاله سعی شده است چند پارامتر به صورت همزمان مورد بررسی قرار گیرد و پارامترهای تاثیرگذار بر جابه‌جایی شعاعی و درصد نازک‌شدگی لوله با استفاده از فشار الکترومغناطیسی جهت پیش‌بینی چروک‌خوردگی و پاره‌شدن لوله بررسی شود. همچنین، این روش کم‌تر توسط دیگر محققان مطالعه شده است. لذا در این نوشتار، شکل‌دهی به سمت داخل یک لوله از جنس آلومینیوم ۱۱۰۰، با استفاده از سیم‌پیچ فشاری و به صورت عددی انجام شده است. سپس پارامترهای فرایند مانند ولتاژ تخلیه، ضریب اصطکاک و لقی بین قالب و لوله، طول و ضخامت دیواره لوله بر روی جابه‌جایی شعاعی و درصد نازک‌شدگی قطعه‌کار توسط نرم‌افزار المان محدود آباکوس و نتایج حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها تحلیل می‌شود.

### ۲- فرضیات

باتوجه به ماهیت فیزیکی پیچیده این فرایند فرضیات زیر برای ساده‌سازی در نظر گرفته شده است:

1-Chunfeng  
2-Correia  
3-Wei Xu



شکل (۴): تغییرات جریان تخلیه مدار در سیم پیچ ماریچ [۱۲].

### ۳-۳- فشار الکترومغناطیس

طبق معادلات شبه سکون ماکسول برای یک سیستم مختصات استوانه‌ای، که برای لوله مدور کاربرد دارد، چگالی میدان مغناطیسی  $B_z$  دارای دو مولفه شعاعی  $B_r$  و محوری  $B_z$  می‌باشد که به صورت زیر به دست می‌آیند [۱۲]:

$$-\frac{1}{\mu_0 \sigma_w} \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{r^2} \right) B_r + \frac{\partial B_r}{\partial t} = 0 \quad (۹)$$

$$-\frac{1}{\mu_0 \sigma_w} \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) B_z + \frac{\partial B_z}{\partial t} = 0 \quad (۱۰)$$

در روابط بالا،  $\sigma_w$  قابلیت هدایت الکتریکی قطعه،  $\mu_0$  نفوذپذیری (پرما بیلته) فضای خالی و  $t$  زمان را نشان می‌دهد. با فرض تقارن محوری، جریان گردابی فقط یک مولفه پیرامونی دارد، که به صورت زیر معین می‌شود [۹]:

$$j_\theta = \frac{1}{\mu_0} \left( \frac{\partial B_r}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial r} \right) \quad (۱۱)$$

چگالی نیروی لورنتس دارای مولفه‌های شعاعی و محوری می‌باشد، که عبارتند از [۹]:

$$f_r = j_\theta B_z \quad (۱۲)$$

$$f_z = -j_\theta B_r \quad (۱۳)$$

مولفه‌های شعاعی و محوری فشار الکترومغناطیس با عمل انتگرال‌گیری به صورت زیر محاسبه می‌شوند [۹]:

$$P_r = \int_{z=0}^{z=lw} f_r dz \quad (۱۴)$$

$$P_z = \int_{z=0}^{z=lw} f_z dz \quad (۱۵)$$

$$(L_0 + L_1) \frac{dI_c(t)}{dt} + M \frac{dI_w(t)}{dt} + (R_0 + R_1) I_c(t) + \frac{1}{C} \int I_c(t) dt = 0 \quad (۱)$$

$$L_2 \frac{dI_w(t)}{dt} + M \frac{dI_c(t)}{dt} + R_2 I_w(t) = 0 \quad (۲)$$

$M$  = ضریب القاء متقابل

$R$  = مقاومت اهمی

$C$  = ظرفیت خازن

$L$  = ضریب خودالقائی (اندوکتانس)

$I_c$  = جریان سیم پیچ

$I_w$  = جریان گردابی قطعه کار

شرایط اولیه برای معادلات (۱-۲) به صورت زیر می‌باشد [۱۱]:

$$I_w = 0; \quad I_c = 0; \quad (L_0 + L_1) \frac{dI_c(t)}{dt} = V \quad (۳)$$

در این نمونه، معادله مدار به شکل زیر می‌باشد [۱۱]:

$$L \frac{dI_c(t)}{dt} + R I_c(t) + \frac{1}{C} \int I_c(t) dt = 0 \quad (۴)$$

### ۲-۲- جریان سیم پیچ

با حل معادله (۴) جریان تخلیه شده در کوئل ماریچ با فرض صرف نظر از تغییرات ضریب خودالقائی معادل در حین فرایند شکل‌دهی، با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود [۱۲]:

$$I(t) = I_0 e^{-t/\tau} \sin \omega t \quad (۵)$$

که در آن،  $I_0$  ماکزیمم شدت دشارژ مدار،  $\tau$  ضریب میرایی مدار و  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای می‌باشد، که با استفاده از روابط ذیل به دست می‌آیند [۱۲]:

$$I_0 = V \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (۶)$$

$$\tau = \frac{2L}{R} \quad (۷)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \quad (۸)$$

در روابط فوق،  $V$  ولتاژ اولیه ذخیره شده در بانک خازن،  $C$  ظرفیت کلی مدار،  $L$  ضریب القاء مغناطیسی کلی مدار و  $R$  مقاومت کلی مدار می‌باشد.

برای فرایند شکل‌دهی الکترومغناطیسی جریان دشارژ مدار اولیه یک تابع هارمونیک سینوسی میرا می‌باشد، که بیشترین میزان جریان در حین اولین نیم‌سیکل رخ می‌دهد.

که در روابط بالا،  $l_w$  ارتفاع لوله می‌باشد. در الگوریتم کوپل ترتیبی، شبیه‌سازی الکترومغناطیسی و شبیه‌سازی سازه‌ای به‌طور متناوب انجام می‌شود و تغییر هندسه قطعه کار تابع زمان در حل معادلات حاکم بر قسمت الکترومغناطیس مساله لحاظ می‌شود.

#### ۴- الگوریتم کوپل شبیه‌سازی

در شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی الکترومغناطیسی، در حین فرایند شکل‌دهی، بین نیروی الکترومغناطیس و شکل قطعه کار، تعامل وجود دارد و نیروی وارد شده بر قطعه کار وابسته به جابه‌جایی‌های قطعه در مراحل قبل است. یعنی بین قسمت الکترومغناطیس و قسمت سازه کوپل وجود دارد. به این صورت که برای هر فاصله زمانی کوچک، جریان کوپل و میدان کوپل محاسبه می‌شود و با دانستن موقعیت جدید لوله، چگالی میدان مغناطیسی در جداره لوله محاسبه شده و در هر بازه زمانی باتوجه به شرایط مرزی جدید، جریان گردابی، چگالی نیرو و فشار الکترومغناطیسی محاسبه می‌شود.

الگوریتم‌های استفاده‌شده برای شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی الکترومغناطیسی به شرح ذیل می‌باشد [۱۵-۱۳]:

الف) الگوریتم کوپل ضعیف<sup>۱</sup>

ب) الگوریتم کوپل ترتیبی<sup>۲</sup>

در روش کوپل ضعیف میدان الکترومغناطیس، در تمام بازه با حل معادله زیر مبنی بر معادلات ماکسول به‌دست می‌آید [۱۶،۱۳].

$$[L(\gamma)] \left[ \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right] + [K(\mu)] \begin{bmatrix} \vec{A} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{J} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (۱۶)$$

که در آن،  $A$  پتانسیل بردار مغناطیس،  $J$  چگالی جریان،  $[L]$  و  $[K]$  قابلیت هدایت (رسانندگی) و ماتریس نفوذپذیری و  $\varphi$  پتانسیل اسکالر (عددی) الکتریکی می‌باشد.

محاسبات ساختار مکانیکی فرایند در یک شبیه‌سازی مکانیکی ثانویه باحل معادله حرکت ابتدایی زیر انجام می‌شود [۱۶،۱۳].

$$[M]\{\ddot{u}\} + [D]\{\dot{u}\} + [D]\{u\} = \{F(t)\} \quad (۱۷)$$

$[M]$  ماتریس جرم،  $[D]$  ماتریس میرایی و  $[C]$  ماتریس سختی<sup>۳</sup> می‌باشد.  $\{u\}$  بردار تغییر مکان گره‌ها،  $\{\dot{u}\}$  بردار سرعت گره،  $\{\ddot{u}\}$  بردار شتاب گره و  $\{F(t)\}$  بردار نیرو را نشان می‌دهد [۱۴]. به بیان دیگر، معادلات حاکم بر الکترومغناطیس مساله و معادلات حاکم بر قسمت سازه‌ای مساله مستقل از هم حل می‌شوند.

#### ۵- شبیه‌سازی المان محدود

کد معادلات الکترومغناطیسی به زبان فورترن نوشته شد و سپس در قالب زیربرنامه قرار گرفت تا محاسبات الکترومغناطیسی را انجام داده و فشار الکترومغناطیسی اعمالی به لوله را محاسبه کند. فشار الکترومغناطیس به‌دست‌آمده از زیربرنامه، در نرم‌افزار آباکوس به‌صورت فشار مکانیکی بر روی مدل اعمال می‌شود. این فشار بر تک‌تک گره‌های لوله در هر لحظه زمانی و در قسمت مکانیکی اعمال شده و تغییر شکل قطعه را منجر می‌شود. در هر گام زمانی این محاسبات انجام می‌شود. مطابق مرجع [۱۷] از افزایش حرارت به‌دلیل جریان القایی صرف‌نظر شده است. گام زمانی استفاده‌شده جهت پایداربودن فرایند شبیه‌سازی [۱۲]  $0.1 \mu s$  و کل فرایند شکل‌دهی الکترومغناطیس مورد بررسی [۶]  $3.5 \mu s$ ، به طول می‌انجامد.

لوله به‌صورت ماده شکل‌پذیر همگن و همسانگرد، و مدل ماده در این شبیه‌سازی به‌علت بالابودن سرعت شکل‌دهی، مدل ویسکوپلاست جانسون- کوک در نظر گرفته شد. این معادله به‌صورت زیر می‌باشد [۱۸]:

$$\bar{\sigma} = [A + B\bar{\epsilon}^n] \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (۱۸)$$

در این معادله،  $\bar{\sigma}$  تنش جریان،  $A$  تنش جاری‌شدن،  $n$  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 (معمولا دمای محیط)،  $m$  ضریب ماده که نرم‌شدن ماده در دماهای بالا می‌باشد. این ثابت‌ها به‌همراه خواص فیزیکی و مکانیکی، برای جنس آلومینیوم مورد بررسی در جداول ۱-۲ آورده شده است.

**جدول (۱):** خواص فیزیکی و مکانیکی لوله H12 AL1100

[۱۹].

چگالی (Kgm <sup>-3</sup> )	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون
۲۷۰۰	۱۴۸/۳۶۱	۳۴۵/۵۱۳	۶۵/۷۶۲	۰/۳

1-Loose-Coupled  
2-Sequential-Coupled  
3-Stiffness

جدول (۲): ضرایب جانسون-کوک لوله AL1100-H12 [۱۹].

$\dot{\epsilon}_0$	n	m	C	B(MPa)	A(MPa)
۱	۰/۱۸۳	۰/۸۵۹	۰/۰۰۱	۳۴۵/۵۱۳	۱۴۸/۳۶۱

در این شبیه‌سازی مدل قطعه کار به صورت المان سیمی تقارن محوری و شکل‌پذیر با المان SAX1 و قالب از جنس صلب مدل شده و همچنین، جهت مدل‌کردن اصطکاک بین قالب و لوله از مدل کلمب استفاده شده است (شکل ۵).

جدول (۳): پارامترهای مورد بررسی به همراه سطوح آن‌ها.

پارامتر	سطح پایین	سطح بالا
A ولتاژ تخلیه (کیلو ولت)	۴	۵
B طول لوله (میلی متر)	۳۰	۵۰
C لقی بین لوله و قالب (میلی متر)	۰/۰۴	۰/۱۵
D ضخامت دیواره لوله (میلی متر)	۰/۵	۰/۷
E ضریب اصطکاک بین لوله و قالب	۰/۱۵	۰/۳۵

با استفاده از روش طرح عاملی با کسر  $\frac{1}{3}$  [۲۰]،  $16 = 5 - 1$  ۲

آزمایش ممکن برای طرح مورد بررسی وجود خواهد داشت.

به منظور مشخص کردن حداکثر مقدار نازک‌شدگی در دیواره لوله از رابطه (۱۹) استفاده می‌شود:

$$\% \text{Thinning} = \frac{t_0 - t_f}{t_0} \times 100 \quad (19)$$

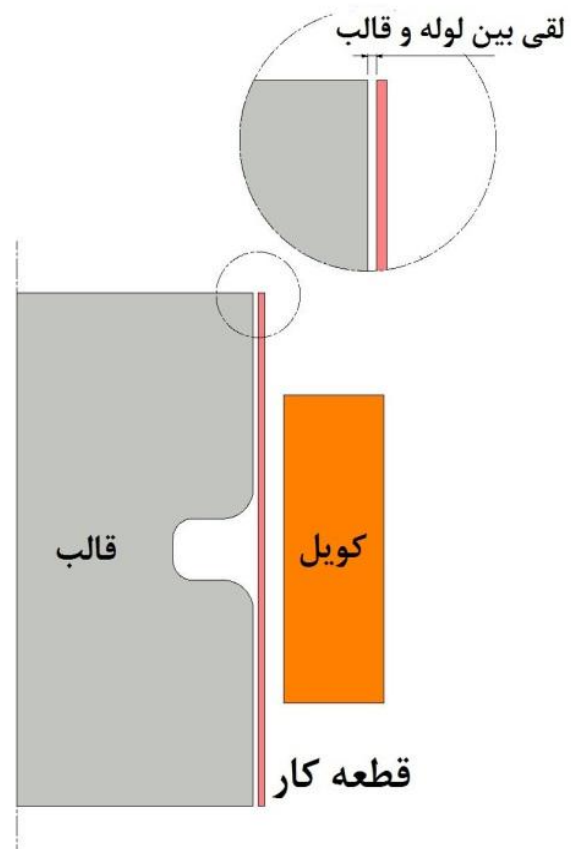
$t_0$  ضخامت اولیه دیواره لوله و  $t_f$  ضخامت نهایی دیواره لوله.

جدول (۴): ماتریس آزمایش به همراه نتایج شبیه‌سازی.

شماره آزمایش	ولتاژ تخلیه	طول لوله	لقی بین لوله و قالب	ضخامت دیواره لوله	ضریب اصطکاک	جابه‌جایی شعاعی	نازک‌شدگی
۱	۴	۳۰	۰/۰۴	۰/۵	۰/۳۵	۳/۰۰۶	۲/۵۲
۲	۵	۳۰	۰/۰۴	۰/۵	۰/۱۵	۴/۰۲۴	۳/۳۲
۳	۴	۵۰	۰/۰۴	۰/۵	۰/۱۵	۳/۰۷۷	۳/۶۶
۴	۵	۵۰	۰/۰۴	۰/۵	۰/۳۵	۳/۸۸۷	۸/۳۸
۵	۴	۳۰	۰/۱۵	۰/۵	۰/۱۵	۳/۱۹	۱/۹
۶	۵	۳۰	۰/۱۵	۰/۵	۰/۳۵	۴/۱۱۱	۳/۱
۷	۴	۵۰	۰/۱۵	۰/۵	۰/۳۵	۳/۲۰۸	۳/۰۶
۸	۵	۵۰	۰/۱۵	۰/۵	۰/۱۵	۴/۱۵۶	۶/۴۲
۹	۴	۳۰	۰/۰۴	۰/۷	۰/۱۵	۱/۸۳۲	۰/۵۲۸
۱۰	۵	۳۰	۰/۰۴	۰/۷	۰/۳۵	۲/۷۳۶	۳/۰۱۴
۱۱	۴	۵۰	۰/۰۴	۰/۷	۰/۳۵	۱/۹۷۲	۱/۶۵۷
۱۲	۵	۵۰	۰/۰۴	۰/۷	۰/۱۵	۲/۸۵	۳/۲۷۱
۱۳	۴	۳۰	۰/۱۵	۰/۷	۰/۳۵	۱/۹۶۲	۰/۸۱۴
۱۴	۵	۳۰	۰/۱۵	۰/۷	۰/۱۵	۲/۹۱۹	۲/۳۲۸
۱۵	۴	۵۰	۰/۱۵	۰/۷	۰/۱۵	۲/۱۲۷	۱/۴۱۴
۱۶	۵	۵۰	۰/۱۵	۰/۷	۰/۳۵	۲/۹۸۷	۳/۴۴۲

### ۷- نتایج و بحث

در شبیه‌سازی و نتایج تجربی [۶ و ۲۱] مشاهده شد که بیش‌ترین نازک‌شدگی در ناحیه تماس با شعاع قالب به دلیل تنش‌های کششی رخ می‌دهد. همچنین، بیش‌ترین افزایش

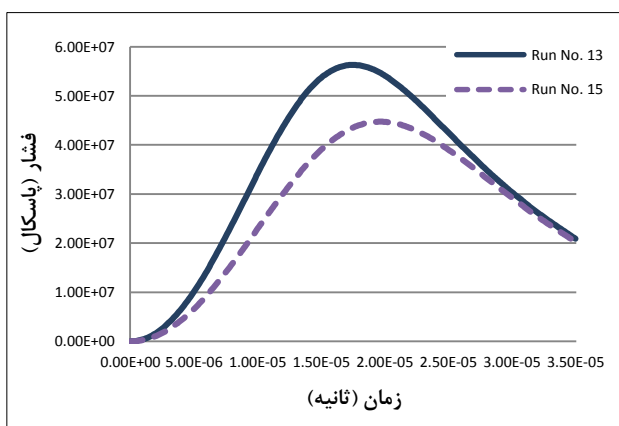


شکل (۵): شماتیک قطعه کار، سیم‌پیچ و قالب به صورت تقارن محوری در فرایند تراکم لوله.

### ۶- طراحی آزمایش

به منظور بررسی پارامترهای فرایند مانند ولتاژ تخلیه، ضریب اصطکاک و لقی بین قالب و لوله، طول و ضخامت دیواره لوله بر روی جابه‌جایی شعاعی و نازک‌شدگی قطعه کار آزمایش دو سطحی طراحی نموده و جابه‌جایی شعاعی و نازک‌شدگی قطعه کار را به عنوان پاسخ‌های این آزمایش در نظر می‌گیریم.

شکل های ۸-۷ نشان می دهند که افزایش ولتاژ تخلیه منجر به افزایش جابه جایی شعاعی و نازک شدگی می گردد، که علت آن افزایش چگالی میدان مغناطیسی و فشار مغناطیسی بوده که منجر به افزایش فروروی لوله داخل قالب و افزایش نازک شدگی در ناحیه تماس ورق در شعاع قالب می باشد. با مقایسه آزمایش های شماره ۱۵ و ۱۳ مشخص می گردد که فشار الکترومغناطیسی با افزایش طول لوله کاهش یافته که کاملاً موافق با مرجع [۸] می باشد (شکل ۹).



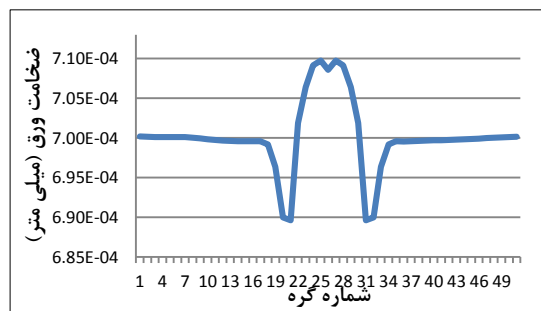
شکل (۹): تغییرات فشار نسبت به زمان.

با افزایش طول لوله، سطح تماس بین لوله و قالب و به عبارت دیگر نیروی اصطکاک افزایش می یابد. همچنین، موافق با مرجع [۸]، با افزایش طول لوله، انرژی الکتریکی بر روی سطح بیش تری تخلیه شده که منجر به کاهش فشار مغناطیسی اعمالی بر روی قطعه کار می گردد.

فاصله بین سیم پیچ و قطعه کار نقش اصلی را در فرایند فرمدهی و نقش مهمی در توزیع میدان مغناطیسی بازی می کند. وقتی که فاصله بین ورق و سیم پیچ افزایش می یابد، ضریب خودالقایی متقابل در اجزاء مدار تغییر می کند. فاصله کوچک تر (افزایش لقی بین قالب و لوله) باعث ضریب خودالقایی پایین تر و نفوذ نیروی مغناطیسی بهتر می شود و باعث می گردد که فشار مغناطیسی بین قطعه کار و سیم پیچ بیشتر شده و در نتیجه افزایش جابه جایی شعاعی می گردد.

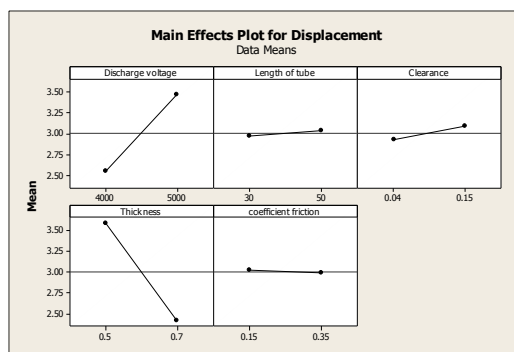
ضخامت ورق تاثیر موثری بر روی چگالی شار مغناطیسی، نیروی لورنتس دارد. با افزایش ضخامت ورق نفوذ میدان مغناطیسی آرام تر می شود. با کاهش ضخامت ورق عنصر محوری نیروی لورنتس افزایش می یابد. ضخامت ورق خیلی پایین ممکن است منجر به نشی میدان مغناطیسی از طریق

بررسی عددی شکل دهی انقباضی لوله به روش الکترومغناطیسی ... ضخامت در نوک فروروی مشاهده شده است که به دلیل وجود تنش های فشاری در حین فرایند شکل دهی می باشد (شکل ۶).

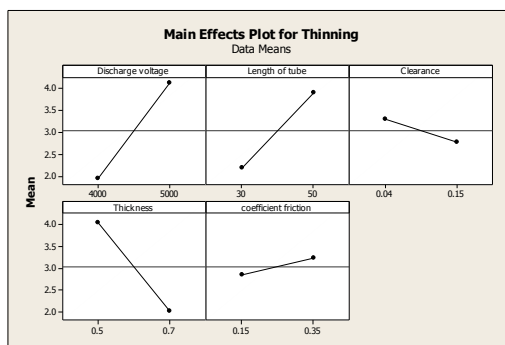


شکل (۶): تغییرات ضخامت در طول لوله در پایان زمان شکل دهی.

باتوجه به این که آزمایش ها فقط یک بار انجام شدند، اگر همه اثرهای اصلی و اثر تعامل در نظر گرفته شوند، به دلیل صفر شدن خطای میانگین مربع<sup>۱</sup> نمی توان تحلیل را انجام داد. بنابراین، باتوجه به این که اثر تعامل هر پنج عامل به احتمال قوی ناچیز خواهد بود، لذا از این اثر صرف نظر گردید و سپس تحلیل انجام شد.



شکل (۷): اثرات اصلی پارامترها بر روی جابه جایی شعاعی.



شکل (۸): اثرات اصلی پارامترها بر روی نازک شدگی.

1- Mean Square Error (MSE)

## ۸- منابع

- Zohoor, M. and Ghorbani, B. "Influence of Groove Parameters on Strength of Assembled Tube by Using Electromagnetic Process", 3rd International Engineering Materials and Metallurgy Conference, iMat2014, Tehran, 2014 (In Persian).
- Murakoshi, Y., Takahashi, M., Sano, T., Hanada, K., and Negishi, H. "Inside Bead Forming of Aluminum Tube by Electro-Magnetic Forming", Journal of Materials Processing Technology, Vol's. 80-81, pp.695-699, 1998
- Sedighi, M., Karimi-nemch, H., and Khandai, M. 2012. "Effect of Sheet Thickness on Magnitude and Distribution of Magnetic Force in Electromagnetic Sheet Metal Forming Process". Applied Mechanics and Materials, Vol's. 110-116, pp. 3506-3511.
- Ebrahimi Haratmeh, H., Fallahi Arezoodar, A.R., Farzin, M., Attaran, M., and Toroghi, S. "Electromagnetic Bulge Forming: Investigation of Electrical and Mechanical parameters on Forming Process", 6th International Conference on Electromagnetic Processes of Materials, Germany, 2009.
- Zohoor, M. "Metal Forming", K.N.Toosi University of Technology, 2nd Edition, 2008 (In Persian).
- Fallahi Arezoodar, A.R., Ebrahimi Haratmeh, H., and Farzin, M. "Numerical and Experimental Investigation of Inward Tube Electromagnetic Forming-Electromagnetic Study", Advanced Materials Research, Vol's. 383-390, pp. 6710-6716, 2012.
- El-Azab, A., Garnich, M. and Kapoor, A. "Modeling of the Electromagnetic Forming of Sheet Metals: State-of-the-Art and Future Needs", J. Mat. Proc. Tech., ELSEVIER, Vol. 142, pp. 744-754, 2003.
- Chunfeng L., Zhiheng Z., Jianhui L., and Zhong L. "The Effect of Tube Length on Magnetic Pressure in Tube Electromagnetic Bulging", Journal of Materials Processing Technology, Vol's. 166, pp. 381-386, 2005.
- Correia, J.P.M., Siddiqui, M.A., Ahzi, S., Belouettar, S., and Davies, R. "A Simple Model to Simulate Electromagnetic Sheet Free Bulging Process", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 50, No's. 10-11, pp. 1466-1475, 2008.
- Wei X., Hongyuan F., and Wenli X. "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 203, Vol. 203, No's. 1-3, pp. 216-220, 2008.
- Dorin L. and Rodica D. "on the Possibility of Agile Manufacturing of Religious Objects by Electromagnetic Forming Method", European

عمق پوستی و در نتیجه کاهش نیروی لورنتس گردد. افزایش ضخامت جداره لوله باعث کاهش عمق فروروی می‌گردد.

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. زمانی که نیروی اصطکاک بیش‌تر از نیروی شکل‌دهی شود احتمال پارگی در ناحیه تماس جداره لوله با شعاع قالب، وجود خواهد داشت و به‌طور مشابه زمانی که نیروی شکل‌دهی بیش‌تر از نیروی اصطکاک شود احتمال چروکیدگی، وجود خواهد داشت.

بنابراین معادله رگرسیون برای آزمایش طراحی‌شده به‌صورت زیر می‌باشد، که معادله خطی عمق فروروی نوک بید و درصد نازک‌شدگی را براساس پارامترهای مورد بررسی نشان می‌دهد.

$$Displacement = 3.00275 + 0.456A + 0.03025B + 0.07975C - 0.57962D - 0.01912E \quad (20)$$

$$Thinning = 3.03321 + 1.08893A + 0.855B - 0.26071C - 1.0118D + 0.19036E \quad (21)$$

## ۷- نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی انقباضی لوله به روش الکترومغناطیسی توسط نرم‌افزار المان محدود (آباکوس) انجام شد و برخی پارامترهای فرایند بر روی جابه‌جایی شعاعی و نازک‌شدگی قطعه کار مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل گردید:

- با افزایش ولتاژ تخلیه، چگالی میدان مغناطیسی و فشار مغناطیسی افزایش می‌یابد که منجر به افزایش جابه‌جایی شعاعی و نازک‌شدگی می‌گردد،

- با کاهش فاصله بین ورق و سیم‌پیچ، نفوذ میدان مغناطیسی بهتر شده و باعث می‌گردد که فشار مغناطیسی بین قطعه کار و سیم‌پیچ اضافه شود،

- با افزایش طول لوله، انرژی الکتریکی بر روی سطح بیش‌تری تخلیه شده و منجر به کاهش فشار مغناطیسی می‌گردد و

- تغییرات نیروی اصطکاک بین لوله آلومینیومی و قالب رابطه مستقیم با میزان فشار مغناطیسی، ضریب اصطکاک و سطح تماس بین لوله و قالب دارد.



17. Jablonski J., and Wrinkler R. "Analysis of the Electromagnetic Forming Process", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 20, No. 5, pp.315–25, 1978.
18. Johnson, G.R., and Cook, W.H. "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, 1983.
19. Gupta, N.K., Iqbal, M.A., and Sekhon, G.S. "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.
20. Montgomery, D.C. "Design and Analysis of Experiments, John Wiley & Sons", New York, 2001.
21. Van Wonterghem, M. and Vanhulsel, P. "Magnetic Pulse Crimping of Mechanical Joints", MSc. Thesis, Gent University, 2011.
12. Siddiqui, M.A. "Numerical Modeling and Simulation of Electromagnetic Forming Process", PhD thesis, Strasbourg University, 2009.
13. Bartels, G., Schätzing, W., Scheibe, H.-P., and Leone, M. "Comparison of Two Different Simulation Algorithms for the Electromagnetic Tube Compression", Int J Mater Form, Vol. 2, No. 1, pp. 693–696, 2009.
14. Iñaki P., Iñigo A., Beatriz G., and Iñaki E., "Electromagnetic Forming: a New Coupling Method", Int J Mater Form, Vol. 2, N. 1, pp. 637–640, 2009.
15. Haiping, Y.U., Chunfeng, L.I., and Jianghua, D.E.N.G. "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.
16. Bartels, G., Schätzing, W., Scheibe, H.-P., and Leone, M. "Models for Electromagnetic Metal Forming", 3rd International Conference on High Speed Forming, 2008.