بررسی عددی شکلدهی انقباضی لوله به *ر*وش الکترومغناطیسی توسط تکنیک المان محدود و طراحی آزمایش

بهمن قربانی دانشکده فنی و مهندسی مهدی ظهور ا

دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی (تاريخ دريافت: ٩٢/٠٩/١۶ ؛ تاريخ يذيرش: ٩٣/١١/١٩)

چکیدہ

شکلدهی الکترومغناطیس یکی از روشهای شکلدهی پرسرعت است که از نیروی الکترومغناطیسی لورنتس جهت شکلدهی، اتصال و مونتاژ قطعات با هدایت الکتریکی بالا استفاده می شود. در این مقاله، اثر یارامترهای مهم فرایند، مانند ولتاژ تخلیه، ضریب اصطکاک، لقی بین قالب و لوله، طول و ضخامت دیواره لوله، بر روی جابجایی شعاعی و نازکشدگی قطعهکار بررسی شده است. خروجی معادلات حاکم الکترومغناطیسی بهشکل 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 بهکار رفته است. نتایج بهدست آمده با نتایج تجربی موجود در مراجع معتبر دیگر مقایسه شد و تطابق خوبی حاصل گردید.

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

B. Ghorbani

Faculty of Mechanical Engineering Faculty of Engineering K.N.Toosi University of Technology Islamic Azad University, Islamshahr Branch (Received: 7/December/2013; 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 by using 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

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

۲- مربی: bahman.ghorbani64@gmail.com

۱– مقدمه

٨۴

شکلدهی ورقهای فلزی به دلیل کاربرد وسیع در صنایع مختلف، یکی از مهم ترین فرایندهای ساخت محسوب می گردد که همواره با مشکلاتی از قبیل بازگشت فنری زیاد، چین خوردگی، قابلیت شکل پذیری پایین ورق که منجر به پارگی آن می شود، روبه روست. نتایج آزمایش ها تجربی نشان داده است که در فرایندهای شکلدهی با نرخ کرنش بالا از قبیل شکلدهی انفجاری، شکلدهی الکتریکی- هیدرولیکی و شکلدهی الكترومغناطيس، مشكلات مذكور تا حدود زيادى مرتفع می شوند. هنگامی که تغییر فرم با نرخ کرنش بسیار بالا صورت می گیرد، قابلیت شکل پذیری فلز تا حد قابل ملاحظه ای افزایش يافته، بازگشت الاستيک آن کمتر شده و احتمال وقوع چين خوردگی در آن کاهش می یابد [۲و۱]. یکی از پرجاذبه ترین روشهای شکلدهی پرسرعت به لحاظ کاربردی، شکلدهی الكترومغناطيس است كه براى فلزاتى با قابليت هدايت الكتريكي بالا مانند آلياژهاي آلومينيم، مس، نقره، برنج و برخي فولادها بسیار مناسب است. با به کارگیری همزمان این روش با روشهای متداول شکلدهی، می توان 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 می تواند منجر به کاهش وزن قطعات و افزایش بازدهی محصولات صنعتی شود [۳].

سیستم شکل دهی الکترومغناطیس عمدتاً از یک منبع تغذیه پالسی، منبع ذخیره انرژی (خازن)، کلید آمپر بالا (اسپارک گپ)، یک سیم پیچ قابل تعویض بهعنوان ابزار، و قطعه کار تشکیل شده است. (شکل **۱**)



شكل (۱): شماتيك اجزاء شكلدهي الكترومغناطيسي [۴].

با تخلیه خازن، بسته شدن ناگهانی سوئیچ فشار قوی باعث ایجاد جریان نوسانی میرا در سیم پیچ می شود. به این ترتیب در اطراف سیم پیچ یک میدان مغناطیسی متغیر نسبت به زمان ایجاد کرده [1]. طبق قانون لنز، میدان مغناطیس پالسی شکل ایجاد شده جریان الکتریکی ثانویهای در قطعه القا کرده

که جهت آن خلاف جهت سیم پیچ ابزار است. این جریان بهوجود آمده 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 [عو۵].

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 [۷و۶]. از مزایای این روش بالا بودن سرعت شکلدهی است. بنابراین علاوهبر بالا بودن سرعت تولید سرعت ماده از مرتبه ۲۰ و زمان شکلدهی کمتر از ۱۰ 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^۱ بهبود مییابد. محدودیت این روش شکلدهی این است که قطعه مورد نظر میایستی هادی الکتریسیته باشد[۲۹].

شکل دهی انقباضی لوله یکی از فرایندهای شکل دهی لوله با استفاده از نیروی الکترومغناطیس میباشد که در آن با استفاده از سیم پیچهای فشاری یا انبساطی بر روی سطح داخلی یا خارجی لوله برجستگی ایجاد می کند. (شکل **۲**)



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

در سالهای اخیر تلاشهایی در راستای مطالعه دقیق تر این فرایند صورت گرفته است که به برخی از مهم ترین آنها اشاره می شود.

چانفنگ^۲ و همکارانش [۸] در سال ۲۰۰۵ تاثیر طول لوله را بر شکلدهی انقباضی لوله بررسی کردند. آنها دریافتند با

- 1- Forming Limit Diagram
- 2- Chunfeng

افزایش طول لوله، میزان فشار شعاعی در وسط لوله کاهش مییابد.

کوریا و همکارانش [۹] در سال ۲۰۰۸ فشار الکترومغناطیس را با فرض مستقل بودن دو قسمت الکترومغناطیس 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 نهایی ورق را توسط نرمافزار المان محدود آباکوس بررسی کردند.

وی ژو^۲ و همکارانش [۱۰] در سال ۲۰۰۸ اثر پارامتر فاصله بین سیم پیچ و قطعه کار را بر روی پارامترهای مدار تخلیه بررسی کردند. آنها دریافتند با افزایش فاصله بین سیم پیچ و قطعه کار، مقدار پیک جریان تخلیه و ضریب دمپینگ و مقاومت فعال کاهش می یابد، اما زمان پیک جریان تخلیه، زمان نیم سیکل اولیه جریان تخلیه و ضریب خودالقایی معادل افزایش می یابد.

در مطالعات دیگران، بیشتر به مطالعه یک پارامتر به تنهایی پرداخته شده است. بنابراین در این مقاله سعی شده است چند پارامتر بهصورت همزمان مورد بررسی قرار گیرد و پارامترهای تأثیرگذار بر جابجایی شعاعی و درصد نازک شدگی لوله با استفاده از فشار الکترومغناطیس جهت پیشبینی چروک خوردگی و پاره شدن لوله بررسی شود. همچنین این روش کمتر توسط دیگر محققان مطالعه شده است. لذا در این نوشتار، شکل دهی به سمت داخل یک لوله از جنس آلومینیوم ۱۱۰۰، ستفاده از سیم پیچ فشاری و بهصورت 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 جابه جایی شعاعی و درصد نازک شدگی قطعه کار توسط نرمافزار المان محدود آباکوس و نتایج حاصل از شبیه سازی با استفاده از روش طراحی آزمایش ها تحلیل می شود.

۲- فرضيات

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

۱- در طول فرایند شکلدهی الکترومغناطیس، قطعه کار در عرض چند میکروثانیه به یک سرعت خیلی بالا دستیافته و از سیم پیچ دور می شود. در این حالت، میدان الکترومغناطیس به دلیل تغییرات اندوکتانس متقابل بین سیم پیچ و قطعه کار، تغییر می کند. لذا اثر متقابل بین جابه جایی قطعه کار و چگالی

1- Correia 2- Wei Xu

۲- حواص الكترومعناطيس در دما و زمان نابت قرص شده و
 تأثيرات حرارت در نظر گرفته نشده است.

۳–۱– تحلیل مداری

11.

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



با توجه به قانون ولتاژ کریشهف دو معادله (۱) و (۲) از
تحلیل مداری، مدار شماتیک به دست میآیند.
$$(L_0 + L_1) \frac{dI_c(t)}{dt} + M \frac{dI_w(t)}{dt} + (R_0 + R_1)I_c(t) + \frac{1}{C} \int_{t}^{t} I_c(t)dt = 0,$$

$$L_{2}\frac{dI_{w}(t)}{dt} + M\frac{dI_{c}(t)}{dt} + R_{2}I_{w}(t) = 0, \qquad (7)$$

جریان گردابی قطعه کار = I_w

شرایط اولیه برای معادلات (۱) و (۲) به صورت زیر می باشد :[11]

$$I_{w}=0, \quad I_{C}=0, \quad (L_{0}+L_{1})\frac{dI_{c}(t)}{dt}=V, \quad (7)$$

$$L\frac{dI_{c}(t)}{dt} + RI_{c}(t) + \frac{1}{C}\int I_{c}(t)dt = 0,$$
(*)

۲-۳- جریان سیم پیچ

با حل معادله (۴) جریان تخلیه شده در کویل مارپیچ با فرض صرفنظر از تغییرات ضریب خودالقایی معادل در حین فرایند شکلدهی، با استفاده از معادله زیر محاسبه می شود [۱۲]:

$$I(t) = I_0 e^{-t/\tau} \text{Sin } \omega t, \qquad (\Delta)$$

که در آن، I_0 ماکزیمم شدت دشارژ مدار، au ضریب میرایی مدارو ω فركانس زاويهاى مىباشد، كه با استفاده از روابط ذيل بەدست مىآيند [17]:

$$I_0 = V \sqrt{\frac{C}{L'}}$$
(%)

$$\tau = \frac{2L}{R},$$
 (V)

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}},\tag{A}$$

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

براى فرايند شكلدهي الكترومغناطيسي جريان تخليه شده مدار اولیه یک تابع هارمونیک سینوسی میرا میباشد که در شکل ۴ نشان داده شده است؛ البته بیشترین میزان جریان در حين اولين نيم سيكل رخ ميدهد.



شکل (۴): تغییرات جریان تخلیه مدار در سیمپیچ مارپیچ [17].

٣-٣- فشار الكترومغناطيس بر طبق معادلات شبه سکون ماکسول برای یک سیستم مختصات استوانهای، که برای لوله مدور کاربرد دارد، چگالی \mathbf{B}_z میدان مغناطیسی \mathbf{B}_r دارای دو مولفه شعاعی \mathbf{B}_r ومحوری میباشد که بهصورت زیر بهدست میآیند [۱۲]: $\frac{1}{\mu_0\sigma_w} \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{r^2} \right) B_r + \frac{\partial B_r}{\partial t} = 0,$ (٩) $-\frac{1}{\mu_0\sigma_{\rm w}}\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)B_z + \frac{\partial B_z}{\partial t} = 0,$ $(1 \cdot)$ μ_0 هابليت هدايت الكتريكي قطعه، σ_w در روابط بالا نفوذپذیری (پرمابیلیته) فضای خالی و t زمان را نشان میدهد. با فرض تقارن محوری، جریان گردابی فقط یک مؤلفه پیرامونی دارد، که بهصورت زیر معین میشود [۹]: $J_{\theta} = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\partial B_r}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial r} \right),$ (11)چگالی نیروی لورنتس دارای مؤلفههای شعاعی و محوری می-باشد، که عبارتند از [۹]: $f_r = j_{\theta} B_z$, (17)(17) $f_z = -j_\theta B_r$, مؤلفههای شعاعی و محوری فشار الکترومغناطیس با عمل انتگرال گیری به صورت زیر محاسبه می شوند [۹]: $P = \int_{z=lw}^{z=lw} f dz$ (14)

$$P_r = \int_{z=0}^{r_r dz} f_r dz,$$
 (14)
 $P_z = \int_{z=0}^{z=lw} f_z dz,$ (14)
که، در روابط بالا س

۴- الگوريتم کوپل شبيهسازي

در شبیهسازی فرایند شکلدهی الکترومغناطیسی، در حین فرايند شكلدهي، بين نيروي الكترومغناطيس و شكل قطعه کار، تعامل وجود دارد و نیروی وارد شده بر قطعه کار وابسته به جابهجاییهای قطعه در مراحل قبل است. یعنی بین قسمت الكترومغناطيس و قسمت سازه كوپل وجود دارد. به اين صورت، که برای هرفاصله زمانی کوچک، جریان کوپل و میدان کوپل محاسبه می شود و با دانستن موقعیت جدید لوله، چگالی میدان مغناطیسی در جداره لوله محاسبه شده و در هر بازه زمانی با توجه به شرایط مرزی جدید، جریان گردابی، چگالی نیرو و فشار الكترومغناطيسي محاسبه مي شود.

الگوریتمهای کوپل ضعیف و کوپل ترتیبی برای شبيهسازى فرايند شكلدهى الكترومغناطيسى مورد استفاده می باشد [۱۵–۱۳]:

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

$$[L(\gamma)] \begin{bmatrix} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \\ \varphi \end{bmatrix} + [K(\mu)] \begin{bmatrix} \vec{A} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{J} \\ 0 \end{bmatrix}, \qquad (19)$$

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

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

 $[M]{\{```\}} + [D]{\{```\}} + [D]{\{```\}} = \{F(t)\},$ (1Y)

[M] ماتریس جرم، [D] ماتریس میرایی و [C] ماتریس سختی^۲ میباشد. {u} بردار تغییر مکان گره ها، {u} بردار سرعت گره، {"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 مسئله مستقل از هم حل میشوند.

در الگوریتم کوپل ترتیبی، شبیهسازی الکترومغناطیسی وشبیه سازی سازهای بهطور متناوب انجام میشود و تغییر هندسه قطعه کار تابع زمان در حل معادلات حاکم بر قسمت الکترومغناطیس مسئله لحاظ میشود.

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 به دست آمده از زیر برنامه، در نرمافزار آباکوس به صورت فشار مکانیکی بر روی مدل اعمال می شود. این فشار بر تک تک گرههای لوله در هر لحظه زمانی و در قسمت مکانیکی اعمال شده و تغییر شکل قطعه را منجر می شود. در هر گام زمانی این محاسبات انجام می شود. مطابق مرجع [۱۷] از افزایش حرارت به دلیل جریان می شود. مطابق مرجع [۱۷] از افزایش حرارت به دلیل جریان القایی صرفنظر شده است. گام زمانی استفاده شده جهت پایدار بودن فرایند شبیه سازی [۱۲] مالا/۰ و کل فرایند شکل دهی الکترومغناطیس مورد بررسی [۶] ۳۵μ۲، به طول می انجامد.

لوله به صورت ماده شکل پذیر همگن و همسانگرد، و مدل ماده در این شبیه سازی به علت بالا بودن سرعت شکل دهی،

مدل ویسکوپلاست جانسون- کوک در نظرگرفته شد. این معادله بهصورت زیر میباشد [۸۸]: معادله بهصورت زیر میباشد [۱۸]: $\overline{\sigma} = [A + B\overline{\epsilon}^n] + CLn\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^m\right],$ (۱۸) در این معادله $\overline{\sigma}$ تنش جریان، A تنش جاری شدن، n توان کرنش سختی، D ضریب حساسیت به نرخ کرنش، غ نرخ کرنش پلاستیک لحظه ای و $0^{\dot{3}}$ نرخ کرنش پلاستیک مرجع، کرنش پلاستیک لحظه ای و $0^{\dot{3}}$ نرخ کرنش پلاستیک مرجع، کرنش و ماده، T_r دمای تبدیل (معمولاً دمای محیط)، m ضریب ماده که نرم شدن ماده در دماهای بالا میباشد. این ثابتها به همراه خواص فیزیکی و مکانیکی، برای جنس آلومینیم مورد بررسی در جداول **۱** و **۲** آورده شده است.

جدول (۱): خواص فیزیکی و مکانیکی لوله H12-AL1100.[۱۹].

ضريب يواسون	مدول الاستىسىتە	استحکام نھایی (MPa)	استحکام تسلیم	چگالی (Kgm ⁻³)
0, ,,	(GPa)		(MPa)	
۰/۳	80/182	340/013	148/281	۲۷۰۰

جدول (٢): ضرايب جانسون- کوک لوله AL1100-H12 [١٩].

έ ₀	n	m	С	B(MPa)	A(MPa)
١	•/١٨٣	۰/۸۵۹	•/•• ١	340/013	148/261

در این شبیه سازی مدل قطعه کار به صورت المان سیمی تقارن محوری و شکل پذیر با المان SAX1 و قالب از جنس صلب مدل شده و همچنین جهت مدل کردن اصطکاک بین قالب و لوله از مدل کلمب استفاده شده است (شکل **۵**).



شکل (۵): شماتیک قطعه کار، سیم پیچ و قالب بهصورت تقارن محوری در فرایند تراکم لوله.

۶- طراحی آزمایش

بهمنظور بررسی پارامترهای فرایند مانند ولتاژ تخلیه، ضریب اصطکاک و لقی بین قالب و لوله، طول و ضخامت دیواره لوله بر روی جابهجایی شعاعی و نازک شدگی قطعه کار آزمایش دو

¹⁻ Sequential-Coupled

²⁻ Stiffness

سطحی طراحی نموده و جابهجایی شعاعی و نازک شدگی قطعهکار را بهعنوان پاسخهای این آزمایش در نظر میگیریم.

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

سطح	سطح	بالمتن			
بالا	پايين	پاراشتر			
۵	۴	ولتاژ تخليه (كيلو ولت)	А		
۵۰	٣٠	طول لوله (میلی متر)	В		
•/1۵	•/•۴	لقى بين لوله و قالب (ميلىمتر)	С		
• /Y	• /۵	ضخامت ديواره لوله (ميلىمتر)	D		
۰/۳۵	•/1۵	ضریب اصطکاک بین لوله و قالب	Е		

۲ ^{۵-۱} با استفاده از روش طرح عاملی با کسر $\frac{1}{7}$ [۲۰]، ۱۶ = ۲۰ ۲ آزمایش ممکن برای طرح مورد بررسی وجود خواهد داشت. بهمنظور مشخص کردن حداکثر مقدار نازک شدگی در دیواره لوله از رابطه (۱۹) استفاده میشود. دیواره لوله از رابطه (۱۹) ستفاده میشود. (۱۹) $Thinning = \frac{t_0 - t_f}{t_0} \times 100,$ (۱۹) خامت اولیه دیواره لوله و tf ضخامت نهایی دیواره

لوله است.

به همراه نتایج شبیهسازی.	ِ آزمایش	ماتريس	جدول (۴):
--------------------------	----------	--------	-----------

شماره آزمایش	ولتاژ تخليه	طول لوله	لقى بين لوله و قالب	ضخامت ديواره لوله	ضريب اصطكاك	جابه جا یی ش ع اعی	درصد نازک شدگی
١	۴	۳۰	•/•۴	• /۵	۰/۳۵	۳/۰۰۶	۲/۵۲
٢	۵	۳۰	•/•۴	• /۵	۰/۱۵	4/•74	٣/٣٢
٣	۴	۵۰	•/•۴	۰/۵	٠/١۵	۳/۰۷۷	۳/۶۶
۴	۵	۵۰	•/•۴	• /۵	۰/۳۵	۳/۸۸۷	۸/۳۸
۵	۴	۳۰	۰/۱۵	• /۵	۰/۱۵	۳/۱۹	۱/۹
۶	۵	۳.	۰/۱۵	۰/۵	۰/۳۵	4/111	٣/١
۷	۴	۵۰	۰/۱۵	۰/۵	۰/۳۵	۳/۲۰۸	٣/•۶
٨	۵	۵۰	۰/۱۵	۰/۵	٠/١۵	4/108	8/47
٩	۴	٣٠	•/•۴	• /Y	۰/۱۵	۱/۸۳۲	۰/۵۲۸
١٠	۵	٣٠	•/•۴	• /Y	۰/۳۵	۲/۷۳۶	31.14
11	۴	۵۰	•/•۴	• /Y	٠/٣۵	1/977	1/804
١٢	۵	۵۰	•/•۴	• /Y	۰/۱۵	۲/۸۵	٣/٢٧١
۱۳	۴	۳۰	٠/١۵	• /Y	٠/٣۵	1/988	٠/٨١۴
14	۵	۳۰	٠/١۵	• /Y	۰/۱۵	۲/۹۱۹	۲/۲۲۸
۱۵	۴	۵۰	٠/١۵	• /Y	۰/۱۵	7/177	1/414
18	۵	۵۰	٠/١۵	• /Y	۰/۳۵	۲/۹۸۷	٣/٢۴٢

۷- نتايج و بحث

در شبیه سازی و نتایج تجربی [۶] و [۲۱] مشاهده شد که بیشترین نازک شدگی در ناحیه تماس با شعاع قالب به دلیل تنشهای کششی رخ می دهد. همچنین بیشترین افزایش ضخامت در نوک فروروی مشاهده شده است که به دلیل وجود تنشهای فشاری در حین فرایند شکل دهی می باشد (شکل ۶).



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

با توجه به اینکه آزمایشها فقط یک بار انجام شدند، اگر همه اثرهای اصلی و اثر تعامل در نظر گرفته شوند، بهدلیل صفر شدن خطای میانگین مربع^۱ نمیتوان تحلیل را انجام داد. بنابراین، با توجه با اینکه 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 جابهجایی شعاعی.

www.SID.ir



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

شکلهای ۷ و ۸ نشان می دهند که افزایش ولتاژ تخلیه منجر به افزایش جابجایی 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 آزمایشهای شماره ۱۳ و ۱۵ مشخص می گردد که فشار الکترومغناطیسی با افزایش طول لوله کاهش یافته که کاملا موافق با مرجع شماره [۸] میباشد (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 مییابد. همچنین موافق با مرجع [۸]، با افزایش طول لوله، انرژی الکتریکی بر روی سطح بیشتری تخلیه شده که منجر به کاهش فشار مغناطیسی اعمالی بر روی قطعه کار می گردد.

فاصله بین سیمپیچ و قطعه کار نقش اصلی را در فرایند فرمدهی و نقش مهمی در توزیع میدان مغناطیسی بازی میکند. وقتی که فاصله بین ورق و سیمپیچ افزایش مییابد، ضریب خودالقایی متقابل در اجزاء مدار تغییر میکند. فاصله

کوچکتر (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 تأثیر مؤثری بر روی چگالی شار مغناطیسی، نیروی لورنتس دارد. با افزایش ضخامت ورق نفوذ میدان مغناطیسی آرامتر میشود. با کاهش ضخامت ورق عنصر محوری نیروی لورنتس افزایش مییابد. ضخامت ورق خیلی پایین ممکن است منجر به نشتی میدان مغناطیسی از طریق عمق پوستی و در نتیجه کاهش نیروی لورنتس گردد. افزایش ضخامت جداره لوله باعث کاهش عمق فروروی می گردد.

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 به طور مشابه زمانی که نیروی شکلدهی بیشتر از نیروی اصطکاک شود احتمال چروکیدگی، وجود خواهد داشت.

بنابراین معادله رگرسیون برای آزمایش طراحی شده به صورت زیر میباشد، که معادله خطی عمق فروروی نوک بید و درصد نازک شدگی را بر اساس پارامترهای مورد بررسی نشان میدهد.

Displacement = 3.00275 + 0.456A + 0.03025B	
+ 0.07975 <i>C</i> - 0.57962 <i>D</i>	(۲・)
-0.01912E,	
Thinning = 3.03321 + 1.08893A + 0.855B	
-0.26071C - 1.0118D	(۲۱)
+ 0.19036E	

۷- نتیجهگیری

شبیه سازی فرایند شکل دهی انقباضی لوله به روش الکترومغناطیسی توسط نرم افزار المان محدود (آباکوس) انجام شد و برخی پارامترهای فرایند بر روی جابه جایی شعاعی و نازک شدگی 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 نازک شدگی میگردد. International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 50, pp. 1466-1475, 2008.

- 10. Xu, W., Fang, H. and Xu, W. "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, pp.216–220, 2008.
- Luca, D. and Diaconescu, R. "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.
- 12.Siddiqui, M.A. "Numerical Modeling and Simulation of Electromagnetic Forming Process", PhD Thesis, Strasbourg University, 2009.
- 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.
- Pérez, I., Aranguren, I., González, B. and Eguia1, I. "Electromagnetic Forming: A New Coupling Method", Int J. Mater Form, Vol. 2, No. 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, pp.707–713, 2009.
- Bartels, G., Schätzing, W., Scheibe, H.P. and Leone, M. "Models for Electromagnetic Metal Forming", 3rd International Conference on High Speed Forming, 2008.
- 17.Jablonski, J and Wrinkler, R. "Analysis of the Electromagnetic Forming Process", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 20, pp. 315– 25, 1978.
- 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, pp.1921–1944, 2006.
- 20.Montgomery, D.C. "Design and Analysis of Experiments", John Wiley & Sons, New York, 2001.
- 21.Wonterghem, M.V. and Vanhulsel, P. "Magnetic Pulse Crimping of Mechanical Joints", MSc. Thesis, Gent University, 2011.

با کاهش فاصله بین ورق و سیم پیچ، نفوذ میدان مغناطیسی
 بهتر شده و باعث می گردد که فشار مغناطیسی بین قطعه کار و
 سیم پیچ اضافه شود.
 با افزایش طول لوله، انرژی الکتریکی بر روی سطح بیشتری
 تخلیه شده و منجر به کاهش فشار مغناطیسی می گردد.
 تغییرات نیروی اصطکاک بین لوله آلومینیومی و قالب رابطه
 مستقیم با میزان فشار مغناطیسی، ضریب اصطکاک و سطح
 تماس بین لوله و قالب دارد.

۸- مراجع

- 1. 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 Electromagnetic Forming", Journal of Materials Processing Technology, Vols. 80-81, pp.695-699, 1998.
- Sedighi, M., Karimi-nemch, H. and Khandai, M. "Effect of Sheet Thickness on Magnitude and Distribution of Magnetic Force in Electromagnetic Sheet Metal Forming Process", Applied Mechanics and Materials, Vols. 110-116, pp.3506-3511, 2012.
- 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.
- 5. 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, Vols. 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", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 142, pp.744-754, 2003.
- Li, C., Zhao, Z., Li, J. and Li, Z. "The Effect of Tube Length on Magnetic Pressure in Tube Electromagnetic Bulging", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 166, pp.381–386, 2005.
- Correia, J.P.M., Siddiqui, M.A., Ahzi, S., Belouettar and S., Davies, R. "A Simple Model to Simulate Electromagnetic Sheet Free Bulging Process",