

بررسی عددی شکل دهی انقباضی لوله به روش الکترومغناطیسی توسط تکنیک المان محدود و طراحی آزمایش

بهمن قربانی^۲

دانشکده فنی و مهندسی
دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر
(تاریخ دریافت: ۹۲/۰۹/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۱/۱۹)

مهدی ظهور^۱

دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

چکیده

شکل دهی الکترومغناطیسی یکی از روش های شکل دهی پرسرعت است که از نیروی الکترومغناطیسی لورنتس جهت شکل دهی، اتصال و مونتاژ قطعات با هدایت الکتریکی بالا استفاده می شود. در این مقاله، اثر پارامترهای مهم فرایند، مانند ولتاژ تخلیه، ضریب اصطکاک، لقی بین قالب و لوله، طول و ضخامت دیواره لوله، بر روی جابجایی شعاعی و نازک شدگی قطعه کار بررسی شده است. خروجی معادلات حاکم الکترومغناطیسی به شکل فشار در نرم افزار 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 رفته است. نتایج به دست آمده با نتایج تجربی موجود در مراجع معتبر دیگر مقایسه شد و تطابق خوبی حاصل گردید.

واژه های کلیدی: شکل دهی الکترومغناطیسی، المان محدود، طراحی آزمایش، نازک شدگی

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: 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

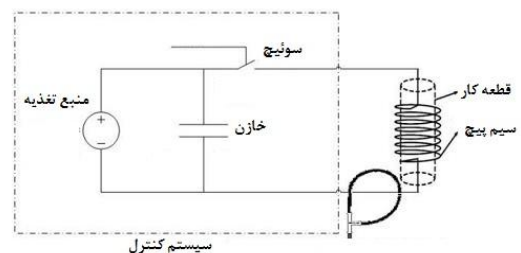
۱- دانشیار (نویسنده پاسخگو): mzohoor@kntu.ac.ir

۲- مربی: bahman.ghorbani64@gmail.com

۱- مقدمه

شکل‌دهی ورق‌های فلزی به دلیل کاربرد وسیع در صنایع مختلف، یکی از مهم‌ترین فرایندهای ساخت محسوب می‌گردد که همواره با مشکلاتی از قبیل بازگشت فنری زیاد، چین خوردگی، قابلیت شکل‌پذیری پایین ورق که منجر به پارگی آن می‌شود، روبه‌روست. نتایج آزمایش‌ها تجربی نشان داده است که در فرایندهای شکل‌دهی با نرخ کرنش بالا از قبیل شکل‌دهی انفجاری، شکل‌دهی الکتریکی- هیدرولیکی 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 چین خوردگی در آن کاهش می‌یابد [۱ و ۲]. یکی از پرچاینده‌ترین روش‌های شکل‌دهی پرسرعت به لحاظ کاربردی، شکل‌دهی الکترومغناطیسی است که برای فلزاتی با قابلیت هدایت الکتریکی بالا مانند آلیاژهای آلومینیم، مس، نقره، برنج و برخی فولادها بسیار مناسب است. با به کارگیری 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 سیم پیچ قابل تعویض به‌عنوان ابزار، و قطعه کار تشکیل شده است. (شکل ۱)



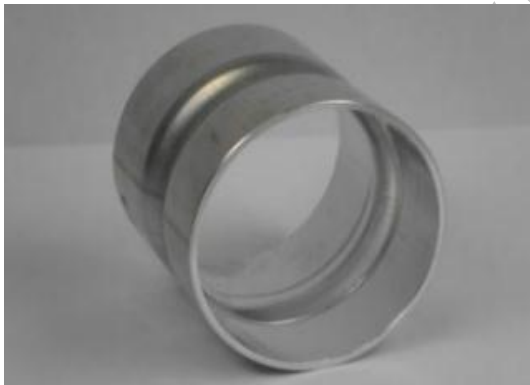
شکل (۱): شماتیک اجزاء شکل‌دهی الکترومغناطیسی [۴].

با تخلیه خازن، بسته شدن ناگهانی سوئیچ فشار قوی باعث ایجاد جریان نوسانی میرا در سیم پیچ می‌شود. به این ترتیب در اطراف سیم پیچ یک میدان مغناطیسی متغیر نسبت به زمان ایجاد کرده [۱]. طبق قانون لنز، میدان مغناطیسی 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 [۵ و 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 و ۷]. از مزایای این روش بالا بودن سرعت شکل‌دهی است. بنابراین علاوه بر بالا بودن سرعت تولید (سرعت ماده از مرتبه 100 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^۱ بهبود می‌یابد. محدودیت این روش شکل‌دهی این است که قطعه مورد نظر 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 سیم پیچ‌های فشاری یا انبساطی بر روی سطح داخلی یا خارجی لوله برجستگی ایجاد می‌کند. (شکل ۲)



شکل (۲): لوله تغییر شکل یافته 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.

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

میدان مغناطیسی قابل اغماض می باشد و فرض شده که سرعت ورق بر روی میدان مغناطیسی تأثیر ندارد،

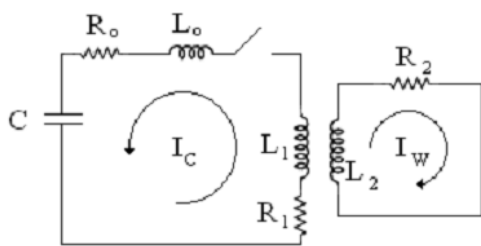
۲- با توجه به اینکه فرایند شکل دهی الکترومغناطیسی در زمان خیلی کوتاه انجام می شود، لذا اندوکتانس در طول فرایند شکل دهی ثابت فرض می شود،

۳- به دلیل تقارن فرایند، یک شکل بندی تقارن محوری برای قطعه کار و سیم پیچ جهت حل عددی استفاده شده است. در نتیجه، میدان مغناطیسی و فشار الکترومغناطیسی اعمالی بر روی لوله در جهت پیرامونی تغییر نمی کند. بنابر این، سیستم مختصات استوانه ای برای مسئله حاضر معرفی شده است. محور Z محور تقارن شکل بندی است و

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

۳-۱- تحلیل مداری

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



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

با توجه به قانون ولتاژ کریشهف دو معادله (۱) و (۲) از تحلیل مداری، مدار شماتیک به دست می آیند.

$$(L_0 + L_1) \frac{dI_C(t)}{dt} + M \frac{dI_W(t)}{dt} + (R_0 + R_1) I_C(t) + \frac{1}{C} \int I_C(t) dt = 0, \quad (1)$$

$$L_2 \frac{dI_W(t)}{dt} + M \frac{dI_C(t)}{dt} + R_2 I_W(t) = 0, \quad (2)$$

M = ضریب القاء متقابل

R = مقاومت اهمی

C = ظرفیت خازن

L = ضریب خودالقایی (اندوکتانس)

I_C = جریان سیم پیچ

I_W = جریان گردابی قطعه کار

افزایش طول لوله، میزان فشار شعاعی در وسط لوله کاهش می یابد.

کوریا^۱ 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 نهایی ورق را توسط نرم افزار 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 به صورت همزمان مورد بررسی قرار گیرد و پارامترهای تأثیرگذار بر جابجایی شعاعی و درصد نازک شدگی لوله با استفاده از فشار الکترومغناطیسی جهت پیش بینی 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، با استفاده از سیم پیچ 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 جابه جایی شعاعی و درصد نازک شدگی قطعه کار توسط نرم افزار المان محدود آباکوس و نتایج حاصل از شبیه سازی با استفاده از روش طراحی آزمایش ها تحلیل می شود.

۲- فرضیات

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

۱- در طول فرایند شکل دهی الکترومغناطیسی، قطعه کار در عرض چند میکروثانیه به یک سرعت خیلی بالا دست یافته و از سیم پیچ دور می شود. در این حالت، میدان الکترومغناطیسی 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

۳-۳- فشار الکترومغناطیس

بر طبق معادلات شبه سکون ماکسول برای یک سیستم مختصات استوانه‌ای، که برای لوله مدور کاربرد دارد، چگالی میدان مغناطیسی B ، 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 σ_w قابلیت هدایت الکتریکی قطعه، μ_0 نفوذپذیری (پرمابیلیته) فضای خالی و t زمان را نشان می‌دهد. با فرض تقارن محوری، جریان گردابی فقط یک مؤلفه 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 مؤلفه‌های شعاعی و محوری می‌باشد، که عبارتند از [۹]:

$$f_r = j_\theta B_z, \quad (۱۲)$$

$$f_z = -j_\theta B_r, \quad (۱۳)$$

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

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

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

که، در روابط بالا lw ارتفاع لوله می‌باشد.

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 محاسبه می‌شود 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 الکترومغناطیسی محاسبه می‌شود.

الگوریتم‌های کوپل ضعیف^۱ و کوپل ترتیبی^۱ برای شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی الکترومغناطیسی مورد استفاده می‌باشد [۱۳-۱۵]:

شرایط اولیه برای معادلات (۱) و (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]:

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

۳-۲- جریان سیم‌پیچ

با حل معادله (۴) جریان تخلیه شده در کوپل مارپیچ با فرض صرف‌نظر از تغییرات ضریب خودالقایی 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، τ ضریب میرایی مدار و ω فرکانس زاویه‌ای می‌باشد، که با استفاده از روابط ذیل به دست می‌آیند [۱۲]:

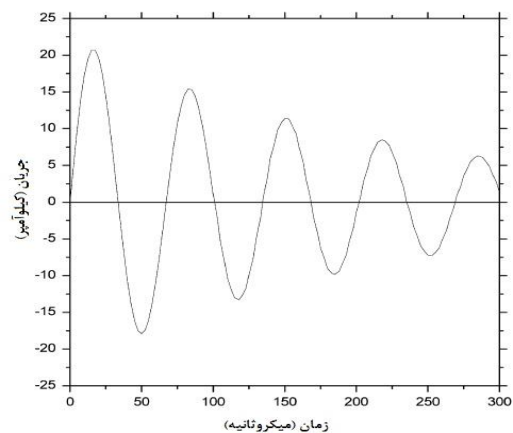
$$I_0 = V \sqrt{\frac{C}{L}}, \quad (۶)$$

$$\tau = \frac{2L}{R}, \quad (۷)$$

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

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 تخلیه شده مدار اولیه یک تابع هارمونیک سینوسی میرا می‌باشد که در شکل ۴ نشان داده شده است؛ البته بیشترین میزان جریان در حین اولین نیم سیکل رخ می‌دهد.



شکل (۴): تغییرات جریان تخلیه مدار در سیم‌پیچ مارپیچ

[۱۲].

مدل ویسکوپلاست جانسون- کوک در نظر گرفته شد. این معادله به صورت زیر می باشد [۱۸]:

$$\bar{\sigma} = [A + B\bar{\epsilon}^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right], \quad (18)$$

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 لحظه ای و $\dot{\epsilon}_0$ 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 می باشد. این ثابت ها به همراه خواص فیزیکی و مکانیکی، برای جنس آلومینیم مورد بررسی در جداول ۱ و ۲ آورده شده است.

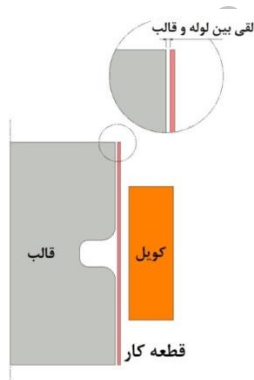
جدول (۱): خواص فیزیکی و مکانیکی لوله AL1100-H12 [۱۹].

چگالی (Kg ^m - ³)	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون
۲۷۰۰	۱۴۸/۳۶۱	۳۴۵/۵۱۳	۶۵/۷۶۲	۰/۳

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

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

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 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 جابه جایی شعاعی و نازک شدگی قطعه کار آزمایش دو

در روش کوپل ضعیف میدان الکترومغناطیس، در تمام بازه با حل معادله زیر مبنی بر معادلات ماکسول به دست می آید [۱۶،۱۳].

$$[L(\gamma)] \left[\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right] + [K(\mu)] \left[\frac{\vec{A}}{0} \right] = \left[\vec{J} \right], \quad (16)$$

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 می باشد. محاسبات ساختار مکانیکی فرایند در یک شبیه سازی مکانیکی ثانویه با حل معادله حرکت ابتدایی زیر انجام می شود [۱۶،۱۳].

$$[M]\{\ddot{u}\} + [D]\{\dot{u}\} + [D]\{u\} = \{F(t)\}, \quad (17)$$

$[M]$ ماتریس جرم، $[D]$ ماتریس میرایی و $[C]$ ماتریس سختی ^۲ می باشد. $\{u\}$ بردار تغییر مکان گره ها، $\{u\}$ بردار سرعت گره، $\{u\}$ بردار شتاب گره و $\{F(t)\}$ بردار نیرو را نشان می دهد [۱۴]. به بیان دیگر، معادلات حاکم بر الکترومغناطیس مساله و معادلات حاکم بر قسمت سازه ای مسئله مستقل از هم حل می شوند.

در الگوریتم کوپل ترتیبی، شبیه سازی الکترومغناطیسی و شبیه سازی سازه ای به طور متناوب انجام می شود و تغییر هندسه قطعه کار تابع زمان در حل معادلات حاکم بر قسمت الکترومغناطیس مسئله لحاظ می شود.

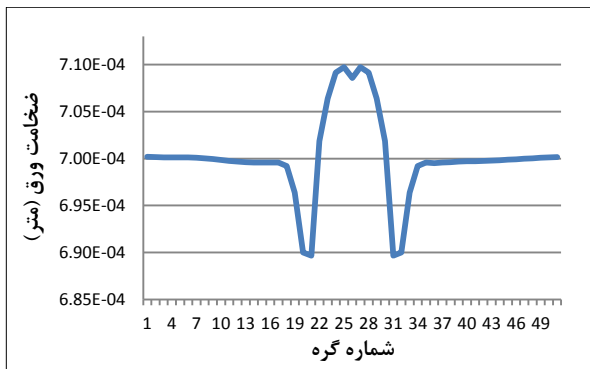
۵- شبیه سازی المان محدود

کد معادلات الکترومغناطیسی به زبان فورترن نوشته شد و سپس در قالب زیر برنامه 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 نرم افزار آباکوس به صورت فشار مکانیکی بر روی مدل اعمال می شود. این فشار بر تک تک گره های 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 القایی صرف نظر شده است. گام زمانی استفاده شده جهت پایدار بودن فرایند شبیه سازی [۱۲] $0.1 \mu s$ و کل فرایند شکل دهی الکترومغناطیس مورد بررسی [۶] $35 \mu s$ 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،

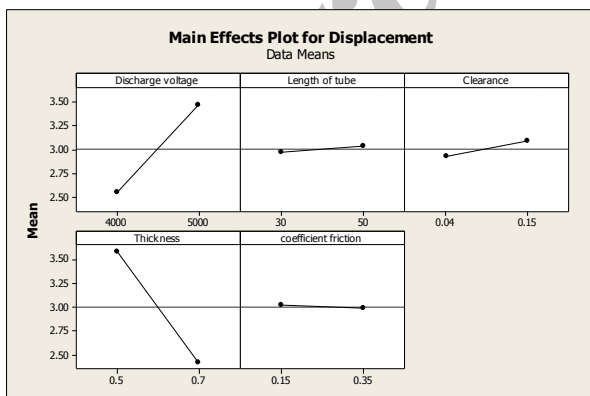
۷- نتایج و بحث

در شبیه‌سازی و نتایج تجربی [۶] و [۲۱] مشاهده شد که بیشترین نازک شدگی در ناحیه تماس با شعاع قالب به دلیل تنش‌های کششی رخ می‌دهد. همچنین بیشترین افزایش ضخامت در نوک فروروی مشاهده شده است که به دلیل وجود تنش‌های فشاری در حین فرایند شکل‌دهی می‌باشد (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، به دلیل صفر شدن خطای میانگین مربع^۱ نمی‌توان تحلیل را انجام داد. بنابراین، با توجه به 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.

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.

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 (میلی‌متر)	۰/۰۴	۰/۱۵
D ضخامت دیواره لوله (میلی‌متر)	۰/۵	۰/۷
E ضریب اصطکاک بین لوله و قالب	۰/۱۵	۰/۳۵

با استفاده از روش طرح عاملی با کسر $\frac{1}{2}$ [۲۰]، $2^{5-1} = 16$

آزمایش ممکن برای طرح مورد بررسی وجود خواهد داشت. به‌منظور مشخص کردن حداکثر مقدار نازک شدگی در دیواره لوله از رابطه (۱۹) استفاده می‌شود.

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

t_0 ضخامت اولیه دیواره لوله و t_f ضخامت نهایی دیواره

لوله است.

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

شماره آزمایش	ولتاژ تخلیه	طول لوله	لقی بین لوله و قالب	ضخامت دیواره	ضریب اصطکاک	جابه‌جایی شعاعی	درصد نازک شدگی
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	۳/۲۴۲

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 می شود. با کاهش ضخامت ورق عنصر محوری نیروی لورنتس افزایش می یابد. ضخامت ورق خیلی پایین ممکن است منجر به نشستی 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 شکل دهی را می توان به دو دسته، نیروی شکل دهی 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 شکل دهی وابسته به فشار مغناطیسی و عرض شیار، می باشد. زمانی که نیروی اصطکاک بیشتر از نیروی شکل دهی شود احتمال پارگی در ناحیه تماس جداره لوله با شعاع قالب، وجود خواهد داشت و به طور مشابه زمانی که نیروی شکل دهی بیشتر از نیروی اصطکاک شود احتمال چروکیدگی، وجود خواهد داشت.

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

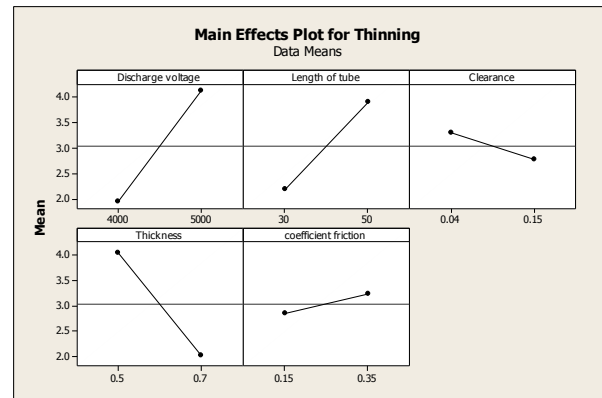
$$Displacement = 3.00275 + 0.456A + 0.03025B + 0.07975C - 0.57962D - 0.01912E, \quad (20)$$

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

۷- نتیجه گیری

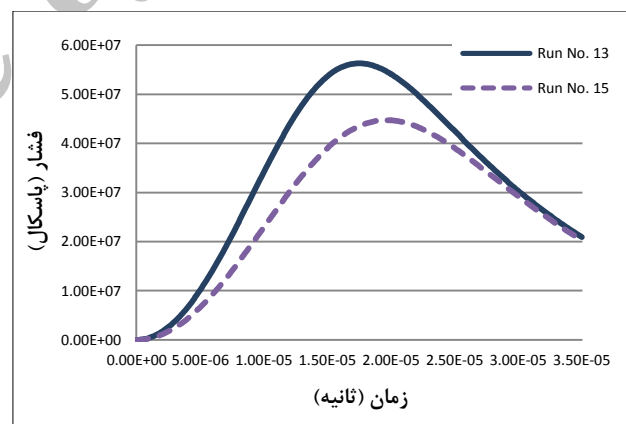
شبیه سازی فرایند شکل دهی انقباضی لوله به روش الکترومغناطیسی توسط نرم افزار المان محدود (آباکوس) انجام شد و برخی پارامترهای فرایند بر روی جابه جایی شعاعی و نازک شدگی قطعه کار مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل گردید:

- با افزایش ولتاژ تخلیه، چگالی میدان مغناطیسی و فشار مغناطیسی افزایش می یابد که منجر به افزایش جابه جایی شعاعی و نازک شدگی می گردد.



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

شکل های ۷ و ۸ 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 ۱۳ و ۱۵ مشخص می گردد که فشار الکترومغناطیسی با افزایش طول لوله کاهش یافته که کاملا موافق با مرجع شماره [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 بیشتری 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 فرم دهی 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

- 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.
 11. 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.
 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. Pérez, I., Aranguren, I., González, B. and Eguia, 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.
 16. 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.
 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, 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 می‌گردد 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 می‌گردد.
- 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).
 2. 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.
 3. 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.
 4. 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).
 6. 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.
 7. 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.
 8. 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.
 9. Correia, J.P.M., Siddiqui, M.A., Ahzi, S., Belouettar and S., Davies, R. "A Simple Model to Simulate Electromagnetic Sheet Free Bulging Process",