



## شبیه سازی کوپل شکل دهی الکترومغناطیسی لوله توسط نرم افزارهای انسیس و ال اس داینا و مقایسه با نتایج تجربی

مجتبی کاشانی<sup>1</sup>، رامین خامدی<sup>2\*</sup>، حسین ابراهیمی<sup>3</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد نجف آباد، نجف آباد

2- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان

3- استادیار، شرکت پالس نیرو، تهران

\* زنجان، صندوق پستی 45371-38791 khamedi@znu.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 30 آذر 1393

پذیرش: 11 اسفند 1393

ارائه در سایت: 15 فروردین 1394

کلید واژگان:

شکل دهی سرعت بالا

شبیه سازی کوپل شکل دهی الکترومغناطیسی

مدل ماده جانسون-کوک

شکل دهی الکترومغناطیسی یکی از روش های ورق های فلزی با سرعت بالا است که از نیروی الکترومغناطیسی به عنوان عامل فرم دهی استفاده می شود. در این مقاله، تحلیل گذرای کوپل الکترومغناطیسی و سپس تحلیل سازه ای این فرایند شکل دهی سریع به صورت شبیه سازی انجام می شود. در این تحلیل مدل ماده مورد استفاده وابسته به نرخ کرنش فرض می شود. در این روش شبیه سازی، کل زمان فرایند شکل دهی سریع به چند مرحله تقسیم می شود. در ابتدای مرحله اول ولتاژ و مشخصات هندسی، فیزیکی و مکانیکی قطعه کار، سیم پیچ و قالب به نرم افزار انسیس داده می شود و پارامترهای مغناطیسی پروسه مانند چگالی میدان مغناطیسی و جریان لحظه ای و همچنین نیروهای الکترومغناطیسی از برنامه انسیس استخراج شده و با اعمال آنها به قطعه کار در نرم افزار دینا تحلیل سازه ای فرایند انجام می شود و شکل قطعه کار در این مرحله بدست می آید. در مرحله دوم با استخراج تغییر شکل لوله از بخش سازه ای مرحله اول، به بخش الکترومغناطیسی فرایند در نرم افزار انسیس انتقال داده می شود. در این مرحله نیز پس از محاسبه نیروها در انسیس، به بخش سازه ای فرایند در نرم افزار داینا منتقل می شود. این تعامل بین دو نرم افزار چندین مرتبه ادامه پیدا کرده تا کل زمان فرایند به اتمام رسیده و شکل نهایی لوله بدست آید. سپس نتایج جابه جایی بدست آمده از شبیه سازی با نتایج آزمون تجربی مطابقت داده شد که تطابق منطقی داشت. بنابراین صحت این روش تحلیل تأیید گردید. نتایج شبیه سازی و تجربی این شکل دهی نشان می دهد که با افزایش انرژی خازن، جریان بیشینه و نیروی الکترومغناطیسی افزایش یافته و در نتیجه مقدار جابه جایی ورق نیز افزایش می یابد.

## Tube electromagnetic forming coupled simulation by ANSYS and LS-DYNA and comparison with experimental results

Mojtaba Kashani<sup>1</sup>, Ramin Khamedi<sup>2\*</sup>, Hossein Ebrahimi<sup>3</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

3- Pulse Niru Co., Tehran, Iran

\* P.O.B. 45371-38791 Zanjan, Iran, khamedi@znu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 21 December 2014

Accepted 02 March 2015

Available Online 04 April 2015

### Keywords:

High Speed Forming

Coupled Simulation of Electromagnetic

Forming

Johnson-Cook Material Model

### ABSTRACT

Electro Magnetic Forming (EMF) is one of the methods for forming the metal plates with high speed; electromagnet force is used as a forming agent in this process. In this thesis, transient analysis of electromagnetic coil and structure analysis of high speed forming process are simulated. All of the high speed forming process time is divided in several processes. At the beginning of the first stage the voltage and the geometric, physical and mechanical specifications of the workpiece, coil and the mold are entered to the ANSYS software and the magnetic parameters of the process such as magnetic field density and the simulation current are extracted. Also, in this stage magnetic force is obtained in Ansys software and by applying it in the workpiece in LS-DYNA software, agent analysis of the process and shape of piece are obtained. In the second stage the pipe deformation obtained in the first stage is transported to the electromagnetic section of the process in Ansys software. Also in this process, after computation of forces in Ansys, the results are sent to the agent section in Ls-Dyna software. This interaction between these two softwares is repeated several times until the whole process time is finished and the final shape of the pipe is obtained. The results of simulation are compared with the experimental test results, so the accuracy of this method was confirmed. The simulation and experimental results indicate that with increasing the capacitor energy, the peak current and electromagnet force are increased and finally displacement of pieces also increases.

### 1- مقدمه

که از نیروی الکترومغناطیسی به عنوان عامل فرم دهی استفاده می شود. در این روش شکل دهی، میدان مغناطیسی گذرا<sup>2</sup> و شدیدی<sup>3</sup> به عنوان منبع فشار

شکل دهی الکترومغناطیسی<sup>1</sup> یکی از روش های ورق های فلزی است

2- Transient

3- Intense

1- Electro Magnetic Forming (EMF)

Please cite this article using:

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

جهت شکل دهی بکار گرفته می شود [1].

این روش برای فرم دهی و اتصال فلزات و دیگر مواد با دقت و تکرارپذیری بالا بدون اثرگذاری ابزار روی قطعه کار استفاده می شود. کاربرد این فرایند در کارخانه های فلزکاری شامل خودرو، هوافضا، مهمات سازی، تجهیزات الکترونیکی، ماشین آلات اداری، اسباب آلات و در قطعات مونتاژی است [2,1]. استفاده از روش شبیه سازی، برای بررسی رفتار مواد و نتایج فرم دهی امری متداول است. نخستین بار در سال 1996 فنتون و داهن یک کد کامپیوتری تفاضل محدود دوبعدی را ارائه کردند. آنها برای شبیه سازی شکل دهی ورق نازک فلزی که تحت نیروی مغناطیس بارگذاری می شود یک سیستم کوپل معادلات جزئی را حل کردند [3]. سپس در سال 1998 موراوشی و همکارانش اولین شبیه سازی از این فرایند را به وسیله نرم افزار مارک<sup>1</sup> انجام دادند [4]. یو و همکارانش نخستین افرادی بودند که با تحلیل المان محدود توسط نرم افزار انسیس دریافتند که شکل دهنده نقش مهمی روی توزیع میدان و فشار مغناطیسی دارد [5].

بعد از آن شبیه سازی های مختلفی انجام شد تا اینکه در سال 2007 کوریا و همکارانش دو قسمت الکترومغناطیس و سازه این پروسه را بصورت کوپل در نظر گرفتند [6]. کوپل در نظر گرفتن این فرایند منجر به این می شد که تمامی تغییرات حاصل شده در مدار الکتریکی و مغناطیسی، در سازه اعمال شود. ابراهیمی و همکارانش نیز در سال 2010 شکل دهی انبساطی لوله ای از جنس آلومینیوم را به روش الکترومغناطیس با نرم افزار انسیس شبیه سازی کردند [7] و سپس در سال 2012 تحلیل گذاری کوپل الکترومغناطیس و تحلیل سازه ای فرایند شکل دهی الکترومغناطیس را به صورت عددی و شبیه سازی انجام دادند. آنها تحلیل کوپل الکتریک و مغناطیس را توسط نرم افزار انسیس شبیه سازی کردند و نتایج نیرویی آن را استخراج و با اعمال این نیروها به قطعه، تحلیل سازه ای را در نرم افزار آباکوس انجام دادند [8].

تاکنون نرم افزار مجزایی که هر دو قسمت الکترومغناطیس و سازه ای فرایند را همزمان و به صورت کوپل شبیه سازی کند ارائه نشده است. برای تحلیل این فرایند شکل دهی سرعت بالا عموماً از نرم افزار انسیس استفاده می شود. نرم افزار انسیس تنها قابلیت کوپل قسمت الکتریکی و مغناطیسی فرایند را دارد و لذا نیروهای الکترومغناطیسی را می تواند محاسبه کند ولی علاوه بر عدم توانایی کوپل شدن قسمت های الکترومغناطیسی و سازه فرایند در این نرم افزار، حتی آخرین نسخه آن، توانایی تحلیل شکل دهی سرعت بالا و تخصیص خواص ماده وابسته به نرخ کرنش را ندارد، لذا از نرم افزار داینا در تحلیل سازه ای فرایند استفاده می شود. همچنین با ملاحظه این نکته که در واقعیت اندوکتانس سیم پیچ در مقدار انرژی تأثیرگذار است و نیز با توجه به اینکه مقدار فاصله قطعه کار تا سیم پیچ خود عامل موثری در مقدار اندوکتانس می باشد، پس تغییر لحظه ای این فاصله می تواند در مقدار اندوکتانس و به تبع آن در مقدار انرژی مدار تأثیرگذار باشد. به همین دلیل در این مقاله سعی شده تا زمان کل فرایند به چند بازه زمانی تقسیم شود تا با این روش، تا حد ممکن تأثیرگذاری این عامل نیز در شبیه سازی رعایت شود. در این روش شبیه سازی، بین نیروی الکترومغناطیس و شکل قطعه کار در حین شکل دهی تعامل وجود دارد و نیروی وارد شده بر قطعه کار، وابسته به جابه جایی های قطعه در مراحل قبل است. یعنی بین قسمت الکترومغناطیس و قسمت سازه کوپل وجود دارد. لذا جابه جایی دقیق قطعه کار و فرم دقیق

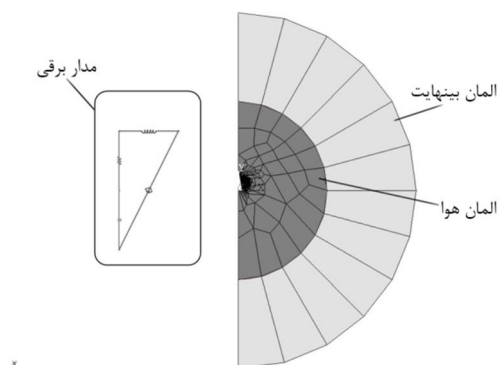
آن در این شبیه سازی استخراج می شود.

## 2- شبیه سازی فرایند شکل دهی الکترومغناطیس

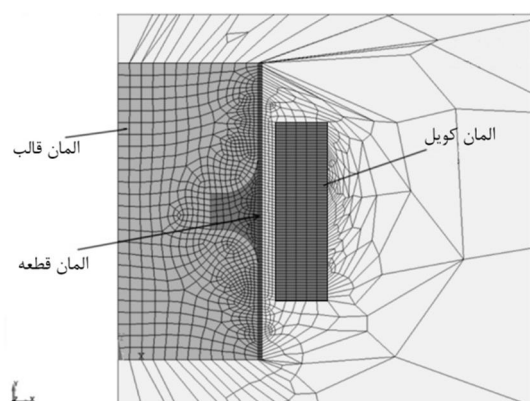
### 2-1- شبیه سازی توسط نرم افزار انسیس

به کمک قسمت الکترومغناطیس انسیس<sup>2</sup> می توان تحلیل کوپل مدار الکتریکی با مغناطیس را انجام داد. می توان مدار الکتریکی را به صورت مستقیم به سیم پیچ مغناطیسی کوپل نمود. در انسیس می توان تحلیل کوپل را به دو صورت دوبعدی و سه بعدی انجام داد در حالی که المان هایی مانند سیم پیچ<sup>3</sup> و هدایت کننده ها در دسترس قرار داده شده اند. برای انجام این تحلیل از المان جریان 124<sup>4</sup> به عنوان عنصر مدار و المان صفحه 53<sup>5</sup> برای سیم پیچ و هدایت کننده استفاده شده است.

در شکل 1 مدل المان محدود طراحی شده در نرم افزار انسیس نمایش داده شده است. در شکل 2 و جدول 1 نیز المان های مختلف به کار رفته برای هر قسمت از سازه و همچنین درجه های آزادی آنها بیان شده است. قطعه کار استفاده شده در این مقاله لوله ای از جنس آلومینیوم 6061 به قطر داخلی 47 میلیمتر و طول 54 میلی متر و ضخامت 0/6 میلی متر است. در جدول 2 مشخصات مکانیکی و الکتریکی مواد استفاده شده در شبیه سازی ذکر شده است. فرض شده است که بین قطعه کار و قالب اصطکاکی وجود ندارد. نیروی خارجی اعمالی در این شبیه سازی شامل اعمال ولتاژ روی سیم پیچ است.



شکل 1 مدل المان محدود طراحی شده در نرم افزار انسیس



شکل 2 مدل المان محدود قالب و قطعه در نرم افزار انسیس

2- Ansys Emag  
3- Stranded  
4- Circu124  
5- Plane53

1- MARC

جدول 1 المان ها و درجه های آزادی استفاده شده در مدل ها		
محل المان	درجه آزادی	نوع المان
مرز بی نهایت	AZ	نامحدود <sup>1</sup>
هوا	AZ	صفحه 53
کوپل	جریان <sup>2</sup> ، نیروی الکترومغناطیسی <sup>3</sup> ، AZ	صفحه 53
قطعه کار	حرارت <sup>4</sup> ، AZ، Uy، Ux	صفحه 13 <sup>5</sup>
قالب	حرارت <sup>4</sup> ، AZ، Uy، Ux	صفحه 13
اینداکتور	-	جریان 124
خازن	-	جریان 124
مقاومت	-	جریان 124

پس از مدل سازی مدل کوپل، اقدام به تحلیل یک چرخه از طراحی می شود. در ابتدا تمام نودهای محور Y که محور تقارن مدل محسوب می شوند، در راستای Uy و AZ مقید شده اند. یک سر المان سیم پیچ نیز به زمین وصل است و بنابراین ولتاژ آن نود صفر اعمال می شود. سپس تحلیل به صورت گذرا با بازه زمانی 1 میکروثانیه انجام می شود.

پس از انجام تحلیل، مقدار بیشینه جریان برابر با 50 میکروثانیه بدست آمد. این مقدار به عوامل مختلفی از جمله تعداد دور سیم پیچ، سطح مقطع سیم پیچ و مقدار ولتاژ اعمالی بستگی دارد که در این مقاله مقدار ولتاژ اعمالی برابر با 4300 ولت، تعداد دور سیم پیچ برابر با 13 و برای قطر داخلی، قطر خارجی و طول سیم پیچ به ترتیب مقادیر 26/5 و 40/1 و 30 میلیمتر در نظر گرفته شد.

با توجه به اینکه بیشترین مقدار نیرو و جابه جایی در این بازه زمانی به قطعه اعمال می شود، بنابراین تمامی محاسبات و شبیه سازی باید در این بازه زمانی انجام شود.

## 2-2- شبیه سازی توسط نرم افزار داینا

در داینا قطعه ها متمایز از یکدیگرند و توسط دستور ایجاد قطعه<sup>6</sup> از یکدیگر جدا می شوند. در واقع به تعداد قطعه های موجود در هر مدل باید دستور ایجاد قطعه وجود داشته باشد. در این بررسی، در قسمت داینا تعداد دو پارت وجود دارد. المان اصلی در این قسمت المان پوسته ای<sup>7</sup> است که به صورت تقارن محوری در نظر گرفته می شود. تمام مشخصه های نود (موقعیت X، Y، Z و شماره نود) و المان (نودهای تشکیل دهنده و شماره المان) بدون هیچ گونه تغییری از مدل انسیس به محیط داینا وارد می شوند.

جدول 2 مشخصه های الکتریکی و مکانیکی مواد استفاده شده در شبیه سازی			
قطعات	نفوذپذیری مغناطیسی (μ)	هدایت الکتریکی (Ωm)	مدول الاستیک (Pa)
سیم پیچ	1	$1/72 \times 10^{-8}$	-
قطعه کار (آلومنیوم)	1	$5 \times 10^{-8}$	$70 \times 10^9$
قالب	10	$17 \times 10^{-8}$	$30 \times 10^{20}$
هوا	1	-	-

1- Inf110  
2- CURR  
3- EMF  
4- Temp  
5- Plane13  
6- \*PART  
7- Shell

عدم تغییر مش بندی قطعه و قالب بدان خاطر است که در مراحل بعدی بتوان نیروی الکترومغناطیسی را در هر مرحله و در هر نود و هر المان محاسبه نمود و در داینا دقیقاً به همان محل اعمال کرد.

به دلیل سرعت بسیار بالای نیروی الکترومغناطیسی از مدل جانسون کوک برای قطعه کار استفاده می شود. رابطه تنش جریان در آن بصورت (1) است.

$$\sigma_y = (A + B\bar{\epsilon}^n) \left(1 + c \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right) (1 - T^{*m}) \quad (1)$$

که در این معادله A و B و n ثابت ماده، C ضریب حساسیت به نرخ کرنش، m ضریب ماده که نرم شدن ماده را در دماهای بالا نشان می دهد،  $\dot{\epsilon}$  نرخ کرنش پلاستیک لحظه ای و  $\dot{\epsilon}_0$  نرخ کرنش پلاستیک مرجع می باشد. این ثابت ها برای جنس آلومنیوم مورد استفاده در جدول 3 آورده شده است.

چنانچه مدل ماده جانسون کوک برای المان های با خاصیت تقارن محوری یا حجمی در نظر گرفته شود، باید از معادله حالت در جزییات ایجاد قطعه استفاده شود. در این مقاله برای قطعه کار از معادله حالت خطی استفاده شده است. رابطه فشار در فرمول (2) نشان داده شده است.

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E \quad (2)$$

پارامترهای  $C_0$  تا  $C_6$  ضریب های معادله هستند و به عنوان مشخصه رشد فشار در داخل ماده در نظر گرفته می شوند که در جدول شماره 4 مقدار این پارامترها ذکر شده است.

نرم افزار داینا تنظیم های بسیار متفاوتی دارد. در این بررسی از کنترل های انرژی، المان پوسته و خاتمه آنالیز استفاده شده است.

## 3- نحوه تحلیل کوپل

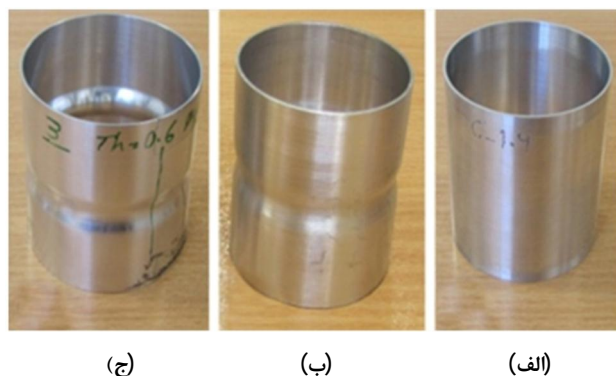
با توجه به اینکه یکی از شرایط تأثیرگذار در مقدار جابه جایی نهایی، اندوکتانس مدار برقی است و با در نظر گرفتن اینکه مقدار اندوکتانس رابطه مستقیمی با فاصله موجود بین سیم پیچ و قطعه دارد، در حین فرایند شکل دهی الکترومغناطیسی این مقدار مکرراً تغییر خواهد کرد. ولی در شبیه سازی های انجام شده تاکنون، این تغییر لحاظ نشده است. به همین علت در این تحقیق زمان صفر تا زمان بیشینه نیروی الکترومغناطیسی که 50 میکروثانیه می باشد، به بازه های 20، 30، 40 و 50 میکروثانیه تقسیم بندی می شود و پس از متوقف سازی هر مرحله، نیروها از انسیس محاسبه شده و به داینا وارد می شوند و تحلیل تغییر شکل غیرخطی انجام می شود و سپس به انسیس بازگردانده شده و نیروهای الکترومغناطیسی محاسبه شده و چرخه ادامه می یابد.

## 3-1- مرحله اول از شبیه سازی شکل دهی الکترومغناطیسی

در این مرحله زمان پایان تحلیل بر روی 20 میکروثانیه تنظیم شده است. پس از اتمام 20 میکروثانیه از تحلیل الکترومغناطیسی در انسیس، نیروهای الکترومغناطیسی به داینا وارد شده و پس از شبیه سازی غیرخطی، پروفایل تغییر شکل یافته قطعه کار بدست می آید و در این قسمت تحلیل مرحله اول پایان می پذیرد.

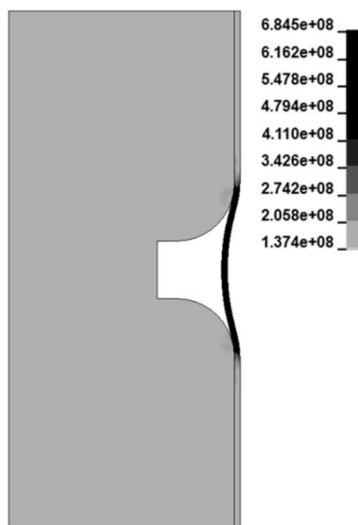
جدول 3 ضریب های معادله J-C برای ماده مورد استفاده

جنس	A (MPa)	B (MPa)	C	m	n	$\dot{\epsilon}_0$
Al 6061-T6	275	393/16	0/011	1/34	0/441	1
جدول 4 ضرایب معادله حالت						
ضرایب	$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$
مقادیر	0	$7/42 \times 10^{10}$	$6/05 \times 10^{10}$	$3/65 \times 10^{10}$	1/96	0



شکل 4 قطعه‌های تولید شده به روش شکل‌دهی الکترومغناطیسی با ولتاژهای مختلف (الف) قطعه خام (ب) با ولتاژ 4 کیلوولت (ج) با ولتاژ 5 کیلوولت

متفاوتی برای شبیه‌سازی استفاده شد. توزیع تنش و مقدار تنش وارد شده بر قطعه کار در شکل 5 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که بیشترین تنش در وسط قطعه و حداقل تنش در روی دیواره قالب اتفاق می‌افتد. تغییر شکل ایجاد شده در ولتاژهای مختلف در جدول 5 آورده شده است. همچنین شکل 6 مقدار این تغییر شکل‌ها را در بازه‌های زمانی مختلف برای ولتاژ 4300 ولت نشان می‌دهد.



شکل 5 مقدار تنش بوجود آمده (MPa) در زمان 50 میکروثانیه در شبیه‌سازی کوپل

جدول 5 نتایج جابه‌جایی در مراحل مختلف و با جریان‌های مختلف

ولتاژها	4300 ولت	5100 ولت	5300 ولت	5500 ولت
جابه‌جایی مرحله اول (m)	$4/56 \times 10^{-5}$	$6/41 \times 10^{-5}$	$6/93 \times 10^{-5}$	$9/06 \times 10^{-5}$
جابه‌جایی مرحله دوم (m)	$1/84 \times 10^{-4}$	$2/61 \times 10^{-4}$	$2/82 \times 10^{-4}$	$3/61 \times 10^{-4}$
جابه‌جایی مرحله سوم (m)	$4/2 \times 10^{-4}$	$5/31 \times 10^{-4}$	$5/43 \times 10^{-4}$	$5/69 \times 10^{-4}$
جابه‌جایی مرحله چهارم (m)	$9/36 \times 10^{-4}$	$1/48 \times 10^{-3}$	$1/64 \times 10^{-3}$	$1/76 \times 10^{-3}$
مجموع جابه‌جایی‌ها (m)	$1/59 \times 10^{-3}$	$2/34 \times 10^{-3}$	$2/53 \times 10^{-3}$	$2/78 \times 10^{-3}$

### 3-2- مرحله دوم تا مرحله پایانی شبیه‌سازی

ابتدای مرحله دوم تا مرحله انتهایی با انسیس شروع می‌شود و در زیر توضیح داده شده است.

- پروفایل با توجه به آنالیز مرحله قبل در انسیس توسط به کاربردن دستور به‌روزرسانی هندسه<sup>1</sup>، به‌روزرسانی می‌شود.
- در نرم‌افزار انسیس تحلیل الکترومغناطیسی تا بازه زمانی مرحله بعد انجام می‌شود در حالی که تمام نودهای قطعه کار تا زمان مرحله قبل مقید و بعد از آن رها شده‌اند چرا که دیگر نیروهای الکترومغناطیسی باعث تغییر شکل مجدد قطعه تا آن زمان نشوند و توانایی تغییر شکل قطعه را بعد از طی زمان مرحله قبل داشته باشند. به عنوان مثال در مرحله دوم که تا زمان 30 میکروثانیه تحلیل انجام می‌شود، قطعه تا زمان مرحله قبل یعنی 20 میکروثانیه کاملاً مقید است و بعد از آن قید برداشته شده و تا 30 میکروثانیه تحلیل انجام می‌شود.
- پس از اتمام هر مرحله از تحلیل انسیس، نیروهای الکترومغناطیسی بدست می‌آیند و به داینا وارد شده و در آنجا نیز شرایط مرزی قطعه مانند انسیس در نظر گرفته می‌شود. این بدان معنی است که نودهای قطعه کار تا زمان مرحله پیشین مقید می‌شوند و از شروع بازه بعدی قید آنها برداشته و اجازه تغییر شکل می‌گیرند.

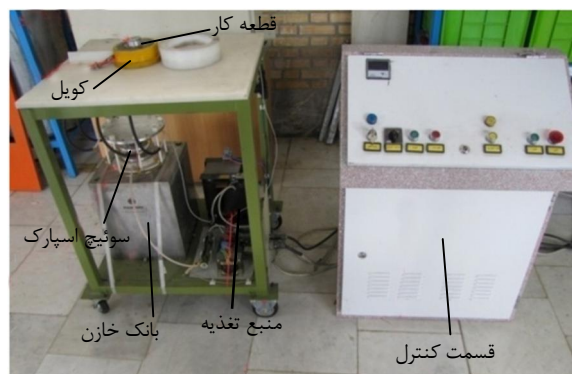
### 4- کارهای تجربی

در عملیات فرم‌دهی لوله به طرف داخل توسط فشار اعمالی خارجی، مواد به داخل قالب کشیده می‌شود. در این عملیات لوله تحت فشار الکترومغناطیسی به شکل مورد نظر خواهد رسید. ترتیب آزمایش که شامل بانک خازن، سوئیچ اسپارک گپ، قالب، سیم‌پیچ و قطعه کار می‌باشد، در شکل 3 آورده شده است.

همچنین قطعه کار نهایی شکل گرفته توسط شکل‌دهی الکترومغناطیسی با ولتاژهای مختلف در شکل 4 نشان داده شده است. سوئیچ اسپارک گپ وظیفه انتقال جریان الکتریکی ولتاژ بالا (در حد چند ده کیلوولت و چند ده کیلوآمپر) از بانک خازن به سیم‌پیچ را دارد. ضمناً بانک خازن مورد استفاده در آزمایش‌های تجربی 256 میکروفاراد است.

### 5- نتایج و بحث

پس از اعمال ولتاژ در نرم‌افزار انسیس و بدست آوردن نیروها و وارد کردن این نیروها به نرم‌افزار داینا، تغییر شکل نهایی بر روی قطعه ایجاد شد و نتایج زیر بدست آمد. برای بررسی مقدار تغییر پارامترهای مختلف، از ولتاژهای تخلیه



شکل 3 دستگاه شکل‌دهی الکترومغناطیسی



شکل 6 مقدار جابه جایی شبیه سازی (متر) با ولتاژ 4300 ولت در چهار مرحله مختلف

بر اساس شکل 8 مشاهده شد که انطباق خوبی بین جابه جایی پیش بینی شده در روش کوپل با جابه جایی تجربی وجود دارد. همچنین با افزایش انرژی تخلیه، مقدار جابه جایی افزایش می یابد که افزایش انرژی تخلیه از طریق افزایش ولتاژ صورت گرفته است. به عبارت دیگر برای افزایش عمق فروروی می توان ولتاژ تخلیه را افزایش داد. مشاهده می شود که با افزایش زمان فرایند، اختلاف بین جابه جایی به دست آمده از شبیه سازی غیر کوپل و جابه جایی تجربی افزایش می یابد.

شکل 8 نشان می دهد که شبیه سازی توسط روش به کار رفته مقدار جابه جایی را حدود 9 درصد بیشتر از مقدار جابه جایی اندازه گیری شده تجربی محاسبه می کند که با افزایش تعداد سیکل های شبیه سازی، این خطا می تواند کاهش یابد.

#### 6- نتیجه گیری

مزیت این شیوه شبیه سازی در نظر گرفتن خواص وابسته به نرخ کرنش ماده در حین شکل دهی است. به دلیل اینکه این فرایند شکل دهی با سرعت بالا انجام می شود، لذا در شبیه سازی این فرایند شکل دهی، باید سرعت بالای جریان مواد لحاظ می شد، که با تعریف خواص ماده بر اساس مدل وابسته به نرخ کرنش جانسون-کوک صورت گرفت.

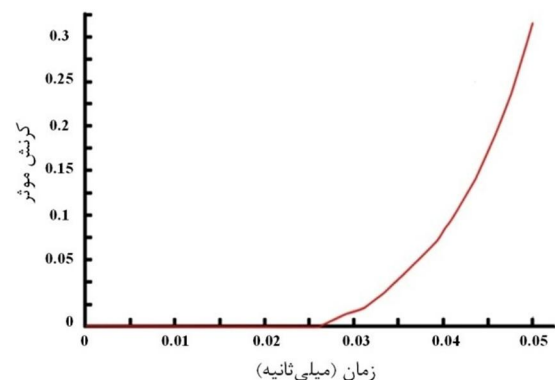
در این تحقیق شبیه سازی کوپل فرایند شکل دهی الکترومغناطیس توسط نرم افزار انسیس و نرم افزار داینا با دقت قابل قبولی انجام شد و نتیجه گرفته شد که با افزایش مقدار ولتاژ تخلیه مدار، جابه جایی قطعه کار نیز افزایش می یابد و مشاهده گردید که این روش شبیه سازی کوپل باعث بهبود قابل توجه جابه جایی محاسبه شده نسبت به روش غیر کوپل می شود.

همچنین برای صحت گذاری این شیوه شبیه سازی، نتایج نهایی با نتایج آزمون های تجربی مقایسه و مشاهده شد که نتایج حاصل از شبیه سازی کوپل، جابه جایی بیشتری را نسبت به آزمون تجربی نشان می دهد.

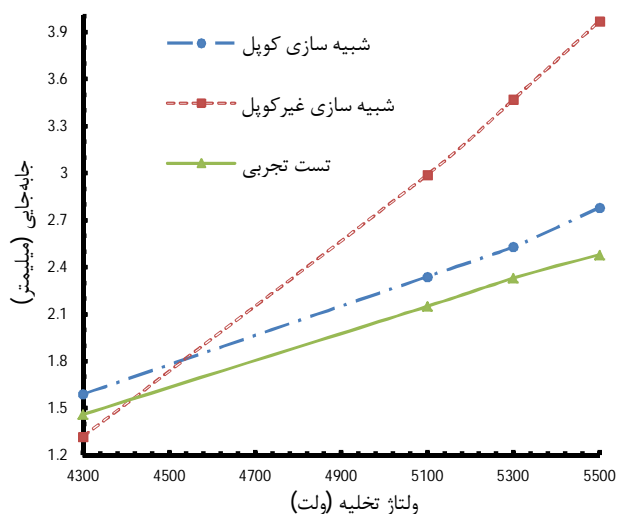
#### 7- مراجع

- [1] 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, pp. 744-754, 2003.
- [2] *ASM HandBook Vol. 14, Forming*, Electromagnetic Forming, Revised by Michael M. Plum, Maxwell Laboratories Inc., pp. 644-653, 1993.
- [3] G. K. Fenton, G. S. Daehn, "Modeling of electromagnetically formed sheet metal", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 75, pp. 6-16, 1996.
- [4] Y. Murakoshi, M. Takahashi, S. Toshio, K. Hanada, H. Negishi, Inside bead forming of aluminum tube by electro-magnetic forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 80-81, pp. 695-699, 1998.

مقدار کرنش ایجاد شده بر روی قطعه در طی فرایند نیز در شکل 7 نشان داده شده است. شکل 7 نشان می دهد که تا زمان 25 میکروثانیه کرنش و جابه جایی ناچیز بوده و بعد از آن شکل دهی شروع می شود. شکل 8 نیز جابه جایی های ایجاد شده به روش شبیه سازی کوپل، غیر کوپل و آزمون تجربی با ولتاژ تخلیه 4300 ولت را به صورت نمودار مقایسه ای نشان می دهد.



شکل 7 نمودار کرنش بدست آمده از شبیه سازی کوپل



شکل 8 نمودار مقایسه جابه جایی شبیه سازی کوپل، غیر کوپل و آزمون تجربی

- [7] H. Ebrahimi, A. Fallahi, M. Farzin, Numerical and Experimental study of tube forming with Electromagnetic forming, *11th manufacturing conference of iran*, 2010.
- [8] H. Ebrahimi, A. Fallahi, M. Farzin, Numerical and Experimental study of tube forming with Electromagnetic study, *Advanced Materials Research*, Vol. 383-390, pp. 6710-6716, 2012.
- [5] Y. Haiping, L. Chunfeng, Z. Zhiheng, L. Zhong, Effect of field shaper on magnetic pressure in electromagnetic forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 168, pp. 245-249, 2005
- [6] S.D. Kore, P.P. Date, S.V. Kulkarni, Effect of process parameters on electromagnetic impact welding of aluminum sheets, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 34, pp. 1327-1341, 2007.