



## شبیه‌سازی کوپل شکل‌دهی الکترومغناطیسی لوله توسط نرم‌افزارهای آنسیس و ال‌اس‌دینا 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 نجف‌آباد، نجف‌آباد

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

شکل‌دهی الکترومغناطیسی یکی از روش‌های شکل‌دهی ورق‌های فلزی با سرعت بالا است که از نیروی الکترومغناطیسی به عنوان عامل فرم‌دهی استفاده می‌شود. در این مقاله، تحلیل گذرای کوپل الکترومغناطیسی و سپس تحلیل سازه‌ای این فرایند شکل‌دهی سریع به صورت شبیه‌سازی انجام می‌شود. در این تحلیل مدل ماده مورد استفاده وابسته به نرخ کرنش فرض می‌شود. در این روش شبیه‌سازی، کل زمان فرایند شکل‌دهی سریع به چند مرحله تقسیم می‌شود. در ابتدای مرحله اول ولتاژ و مشخصات هندسی، فیزیکی و مکانیکی قطعه‌کار، سیم‌پیچ و قالب به نرم‌افزار آنسیس داده می‌شود و پارامترهای مغناطیسی پروسه مانند چگالی میدان مغناطیسی و جریان لحظه‌ای و همچنین نیروهای الکترومغناطیسی از برنامه آنسیس استخراج شده و با اعمال آنها به قطعه‌کار در نرم‌افزار دینا تحلیل سازه‌ای فرایند انجام می‌شود و شکل قطعه‌کار در این مرحله بدست می‌آید. در مرحله دوم با استخراج تغییرشکل لوله از بخش سازه‌ای مرحله اول، به بخش الکترومغناطیسی فرایند در نرم‌افزار آنسیس انتقال داده می‌شود. در این مرحله نیز پس از محاسبه نیروها در آنسیس، به بخش سازه‌ای فرایند در نرم‌افزار دینا منتقل می‌شود. این تعامل بین دو نرم‌افزار چندین مرتبه ادامه پیدا کرده تا کل زمان فرایند به اتمام رسیده و شکل نهایی لوله بدست آید. سپس نتایج جابه‌جایی بدست آمده از شبیه‌سازی با نتایج آزمون تجربی مطابقت داده شد که تطابق منطقی داشت. بنابراین صحت این روش تحلیل تأیید گردید. نتایج شبیه‌سازی و تجربی این شکل‌دهی نشان می‌دهد که با افزایش انرژی خازن، جریان بیشینه و نیروی الکترومغناطیسی افزایش یافته و در نتیجه مقدار جابه‌جایی ورق نیز افزایش می‌یابد.

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 30 آذر 1393  
پذیرش: 11 اسفند 1393  
ارائه در سایت: 15 فروردین 1394  
کلید واژگان:  
شکل‌دهی سرعت بالا  
شبیه‌سازی کوپل شکل‌دهی الکترومغناطیسی  
مدل ماده جانسون-کوک

## 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 فرم‌دهی استفاده می‌شود. در این روش شکل‌دهی، میدان مغناطیسی گذرا<sup>2</sup> و شدیدی<sup>3</sup> به عنوان منبع فشار

شکل‌دهی الکترومغناطیسی<sup>1</sup> یکی از روش‌های شکل‌دهی ورق‌های 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:

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)

جهت شکل‌دهی بکار گرفته می‌شود [1].

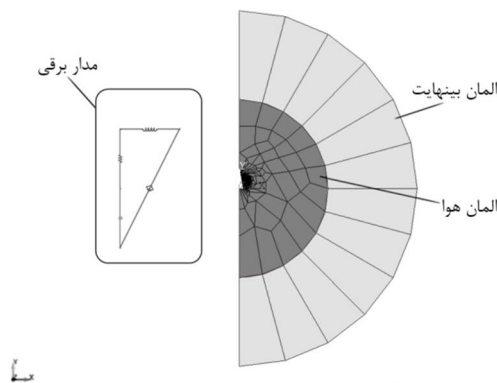
آن در این شبیه‌سازی استخراج می‌شود.

## 2- شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی الکترومغناطیسی

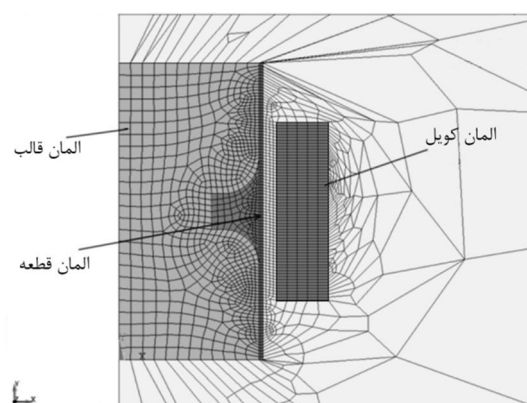
### 2-1- شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار انسیس

به کمک قسمت الکترومغناطیسی انسیس<sup>2</sup> می‌توان تحلیل کوپل مدار الکتریکی با مغناطیس را انجام داد. می‌توان مدار الکتریکی را به صورت مستقیم به سیم‌پیچ مغناطیسی کوپل نمود. در انسیس می‌توان تحلیل کوپل را به دو صورت دوبعدی و سه‌بعدی انجام داد در حالی که المان‌هایی مانند سیم‌پیچ<sup>3</sup> و هدایت‌کننده‌ها در دسترس قرار داده شده‌اند. برای انجام این تحلیل از المان جریان<sup>4</sup> 124 به عنوان عنصر مدار و المان صفحه<sup>5</sup> 53 برای سیم‌پیچ و هدایت‌کننده استفاده شده است.

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



شکل 1 مدل المان محدود طراحی شده در نرم‌افزار انسیس



شکل 2 مدل المان محدود قالب و قطعه در نرم‌افزار انسیس

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

بعد از آن شبیه‌سازی‌های مختلفی انجام شد تا اینکه در سال 2007 کوریا و همکارانش دو قسمت الکترومغناطیسی و سازه این پروسه را بصورت کوپل در نظر گرفتند [6]. کوپل در نظر گرفتن این فرایند منجر به این می‌شد که تمامی تغییرات حاصل شده در مدار الکتریکی و مغناطیسی، در سازه اعمال شود. ابراهیمی و همکارانش نیز در سال 2010 شکل‌دهی انبساطی لوله‌ای از جنس آلومینیوم را به روش الکترومغناطیسی با نرم‌افزار انسیس شبیه‌سازی کردند [7] و سپس در سال 2012 تحلیل گذرای کوپل الکترومغناطیسی و تحلیل سازه‌ای فرایند شکل‌دهی الکترومغناطیسی را به صورت عددی و شبیه‌سازی انجام دادند. آنها تحلیل کوپل الکتریک و مغناطیس را توسط نرم‌افزار انسیس شبیه‌سازی کردند و نتایج نیرویی آن را استخراج و با اعمال این نیروها به قطعه، تحلیل سازه‌ای را در نرم‌افزار آباکوس انجام دادند [8].

تاکنون نرم‌افزار مجزایی که هر دو قسمت الکترومغناطیسی و سازه‌ای فرایند را همزمان و به صورت کوپل شبیه‌سازی کند ارائه نشده است. برای تحلیل این فرایند شکل‌دهی سرعت بالا عموماً از نرم‌افزار انسیس استفاده می‌شود. نرم‌افزار انسیس تنها قابلیت کوپل قسمت الکتریکی و مغناطیسی فرایند را دارد و لذا نیروهای الکترومغناطیسی را می‌تواند محاسبه کند ولی علاوه بر عدم توانایی کوپل شدن قسمت‌های الکترومغناطیسی و سازه فرایند در این نرم‌افزار، حتی آخرین نسخه آن، توانایی تحلیل شکل‌دهی سرعت بالا و تخصیص خواص ماده وابسته به نرخ کرنش را ندارد، لذا از نرم‌افزار داینا در تحلیل سازه‌ای فرایند استفاده می‌شود. همچنین با ملاحظه این نکته که در واقعیت اندوکتانس سیم‌پیچ در مقدار انرژی تأثیرگذار است و نیز با توجه به اینکه مقدار فاصله قطعه کار تا سیم‌پیچ خود عامل موثری در مقدار اندوکتانس می‌باشد، پس تغییر لحظه‌ای این فاصله می‌تواند 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 شبیه‌سازی رعایت شود. در این روش شبیه‌سازی، بین نیروی الکترومغناطیسی و شکل قطعه کار در حین شکل‌دهی تعامل وجود دارد و نیروی وارد شده بر قطعه کار، وابسته به جابه‌جایی‌های قطعه در مراحل قبل است. یعنی بین قسمت الکترومغناطیسی و قسمت سازه کوپل وجود دارد. لذا جابه‌جایی دقیق قطعه کار و فرم دقیق

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

1- MARC

عدم تغییر مش‌بندی قطعه و قالب بدان خاطر است که در مراحل بعدی بتوان نیروی الکترومغناطیس 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 الکترومغناطیس از مدل جانسون کوک برای قطعه کار استفاده می‌شود. 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 نرم‌شدن ماده را در دماهای بالا نشان می‌دهد،  $\dot{\epsilon}$  نرخ کرنش پلاستیک لحظه‌ای و  $\dot{\epsilon}_0$  نرخ کرنش پلاستیک مرجع می‌باشد. این ثابت‌ها برای جنس آلومنیوم مورد استفاده در جدول 3 آورده شده است.

چنانچه مدل ماده جانسون کوک برای المان‌های با خاصیت تقارن محوری یا حجمی در نظر گرفته شود، باید از معادله حالت در جزئیات 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  $C_6$  ضریب‌های معادله هستند و به عنوان مشخصه رشد فشار در داخل ماده در نظر گرفته می‌شوند که در جدول شماره 4 مقدار این پارامترها ذکر شده است.

نرم‌افزار داینا تنظیم‌های بسیار متفاوتی دارد. در این بررسی از کنترل‌های انرژی، المان پوسته و خاتمه آنالیز استفاده شده است.

### 3- نحوه تحلیل کوپل

با توجه به اینکه یکی از شرایط تأثیرگذار در مقدار جابه‌جایی نهایی، اندوکتانس مدار برقی است و با در نظر گرفتن اینکه مقدار اندوکتانس رابطه مستقیمی با فاصله موجود بین سیم‌پیچ و قطعه دارد، در حین فرایند شکل‌دهی الکترومغناطیس این مقدار مکرراً تغییر خواهد کرد. ولی در شبیه‌سازی‌های انجام شده تاکنون، این تغییر لحاظ نشده است. به همین علت در این تحقیق زمان صفر تا زمان بیشینه نیروی الکترومغناطیس که 50 میکروثانیه می‌باشد، به بازه‌های 20، 30، 40 و 50 میکروثانیه تقسیم‌بندی می‌شود و پس از متوقف‌سازی هر مرحله، نیروها از انسیس محاسبه شده و به داینا وارد می‌شوند و تحلیل تغییر شکل غیرخطی انجام می‌شود و سپس به انسیس بازگردانده شده و نیروهای الکترومغناطیس محاسبه شده و چرخه ادامه می‌یابد.

### 3-1- مرحله اول از شبیه‌سازی شکل‌دهی الکترومغناطیس

در این مرحله زمان پایان تحلیل بر روی 20 میکروثانیه تنظیم شده است. پس از اتمام 20 میکروثانیه از تحلیل الکترومغناطیس در انسیس، نیروهای الکترومغناطیس به داینا وارد شده و پس از شبیه‌سازی غیرخطی، پروفایل تغییر شکل یافته قطعه کار بدست می‌آید و در این قسمت تحلیل مرحله اول پایان می‌پذیرد.

جدول 3 ضریب‌های 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	$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$
مقادیر	0	$7/42 \times 10^{10}$	$6/05 \times 10^{10}$	$3/65 \times 10^{10}$	1/96	0	0

جدول 1 المان‌ها و درجه‌های آزادی استفاده شده در مدل‌ها

محل المان	درجه آزادی	نوع المان
مرز بی‌نهایت	AZ	نامحدود <sup>1</sup>
هوا	AZ	صفحه 53
کوپل	جریان <sup>2</sup> ، نیروی الکترومغناطیس <sup>3</sup> ، AZ	صفحه 53
قطعه کار	حرارت <sup>4</sup> ، Uy، Ux، AZ	صفحه 13 <sup>5</sup>
قالب	حرارت <sup>4</sup> ، Uy، Ux، AZ	صفحه 13
اینداکتور	-	جریان 124
خازن	-	جریان 124
مقاومت	-	جریان 124

پس از مدل‌سازی مدل کوپل، اقدام به تحلیل یک چرخه از طراحی می‌شود. در ابتدا تمام نودهای محور Y که محور تقارن مدل محسوب می‌شوند، در راستای Uy و AZ مقید شده‌اند. یک سر المان سیم‌پیچ نیز به زمین وصل است و بنابراین ولتاژ آن نود صفر اعمال می‌شود. سپس تحلیل به صورت گذرا با بازه زمانی 1 میکروثانیه انجام می‌شود.

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

با توجه به اینکه بیشترین مقدار نیرو و جابه‌جایی در این بازه زمانی به قطعه اعمال می‌شود، بنابراین تمامی محاسبات و شبیه‌سازی باید در این بازه زمانی انجام شود.

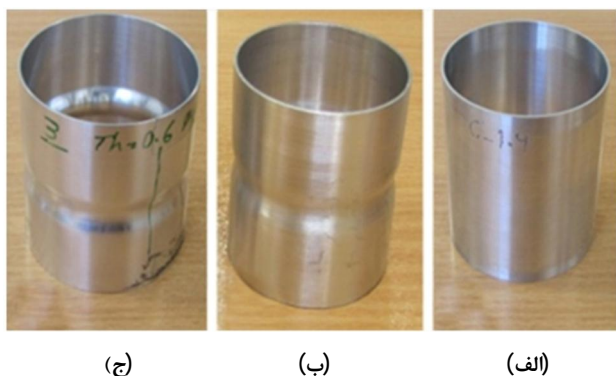
### 2-2- شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار داینا

در داینا قطعه‌ها متمایز از یکدیگرند و توسط دستور ایجاد قطعه<sup>6</sup> از یکدیگر جدا می‌شوند. در واقع به تعداد قطعه‌های 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 پوسته‌ای<sup>7</sup> است که به صورت تقارن محوری در نظر گرفته می‌شود. تمام مشخصه‌های نود (موقعیت X، Y، Z و شماره نود) و المان (نودهای تشکیل دهنده و شماره المان) بدون هیچ‌گونه تغییری از مدل انسیس به محیط داینا وارد می‌شوند.

جدول 2 مشخصه‌های الکتریکی و مکانیکی مواد استفاده شده در شبیه‌سازی

قطعات	نفوذپذیری مغناطیسی ( $\mu$ )	هدایت الکتریکی ( $\Omega m$ )	مدول الاستیک (Pa)
سیم‌پیچ	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- Infin110  
2- CURR  
3- EMF  
4- Temp  
5- Plane13  
6- \*PART  
7- Shell

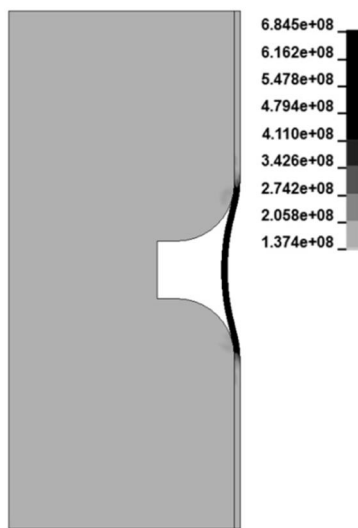


شکل 4 قطعه‌های تولید شده به روش شکل‌دهی الکترومغناطیسی با ولتاژهای مختلف (الف) قطعه خام (ب) با ولتاژ 4 کیلوولت (ج) با ولتاژ 5 کیلوولت

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)	$1/59 \times 10^{-3}$	$2/34 \times 10^{-3}$	$2/53 \times 10^{-3}$	$2/78 \times 10^{-3}$

### 2-3- 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 به‌روزآوری هندسه<sup>1</sup>، به‌روزآوری می‌شود.
- در نرم‌افزار انسیس تحلیل الکترومغناطیسی تا بازه زمانی مرحله بعد انجام می‌شود در حالی که تمام نوده‌های 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 نوده‌های قطعه کار تا زمان مرحله پیشین مقید می‌شوند و از شروع بازه بعدی قید آنها برداشته و اجازه تغییر شکل می‌گیرند.

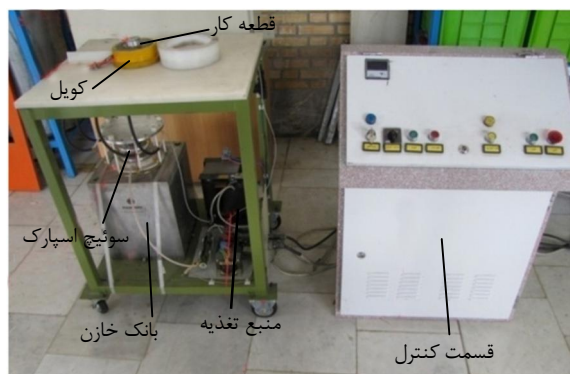
### 4- کارهای تجربی

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 جابه‌جایی شبیه‌سازی (متر) با ولتاژ 4300 ولت در چهار مرحله مختلف

بر اساس شکل 8 مشاهده شد که انطباق خوبی بین جابه‌جایی پیش‌بینی شده در روش کوپل با جابه‌جایی تجربی وجود دارد. همچنین با افزایش انرژی تخلیه، مقدار جابه‌جایی افزایش می‌یابد که افزایش انرژی تخلیه از طریق افزایش ولتاژ صورت گرفته است. به عبارت دیگر برای افزایش عمق فروروی می‌توان ولتاژ تخلیه را افزایش داد. مشاهده می‌شود که با افزایش زمان فرایند، اختلاف بین جابه‌جایی به دست آمده از شبیه‌سازی غیرکوپل و جابه‌جایی تجربی افزایش می‌یابد.

شکل 8 نشان می‌دهد که شبیه‌سازی توسط روش به کار رفته مقدار جابه‌جایی را حدود 9 درصد بیشتر از مقدار جابه‌جایی اندازه‌گیری شده تجربی محاسبه می‌کند که با افزایش تعداد سیکل‌های شبیه‌سازی، این خطا می‌تواند کاهش یابد.

### 6- نتیجه‌گیری

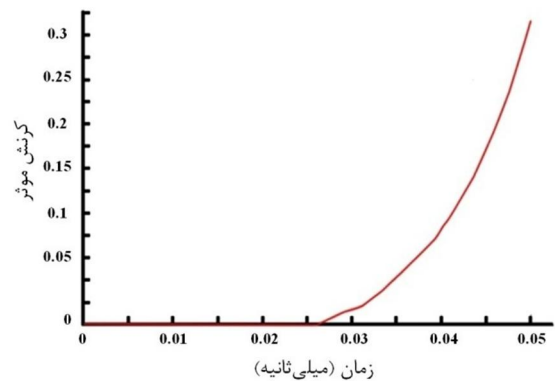
مزیت این شیوه شبیه‌سازی در نظر گرفتن خواص وابسته به نرخ کرنش ماده در حین شکل‌دهی است. به دلیل اینکه این فرایند شکل‌دهی با سرعت بالا انجام می‌شود، لذا در شبیه‌سازی این فرایند شکل‌دهی، باید سرعت بالای جریان مواد لحاظ می‌شود، که با تعریف خواص ماده بر اساس مدل وابسته به نرخ کرنش جانسون-کوک صورت گرفت.

در این تحقیق شبیه‌سازی کوپل فرایند شکل‌دهی الکترومغناطیسی توسط نرم‌افزار انسیس و نرم‌افزار داینا با دقت قابل قبولی انجام شد و نتیجه گرفته شد که با افزایش مقدار ولتاژ تخلیه مدار، جابه‌جایی قطعه کار نیز افزایش می‌یابد و مشاهده گردید که این روش شبیه‌سازی کوپل باعث بهبود قابل توجه جابه‌جایی محاسبه شده نسبت به روش غیرکوپل می‌شود. همچنین برای صحت‌گذاری این شیوه شبیه‌سازی، نتایج نهایی با نتایج آزمون‌های تجربی مقایسه و مشاهده شد که نتایج حاصل از شبیه‌سازی کوپل، جابه‌جایی بیشتری را نسبت به آزمون تجربی نشان می‌دهد.

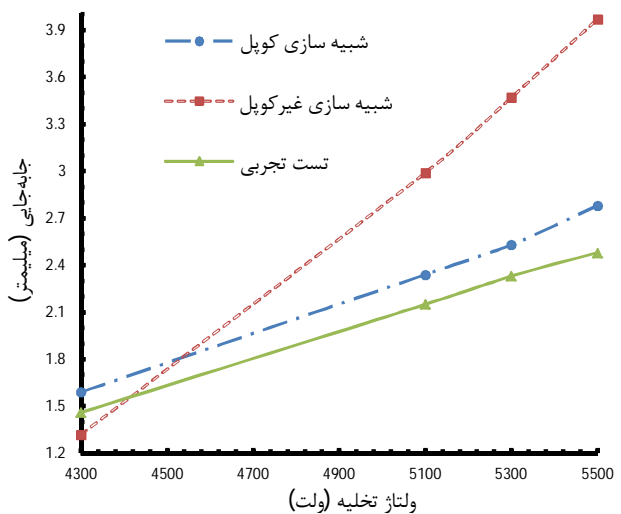
### 7- مراجع

[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 می‌دهد که تا زمان 25 میکروثانیه کرنش و جابه‌جایی ناچیز بوده و بعد از آن شکل‌دهی شروع می‌شود. شکل 8 نیز جابه‌جایی‌های ایجاد شده به روش شبیه‌سازی کوپل، غیرکوپل و آزمون تجربی با ولتاژ تخلیه 4300 ولت را به صورت نمودار مقایسه‌ای نشان می‌دهد.



شکل 7 نمودار کرنش بدست آمده از شبیه‌سازی کوپل



شکل 8 نمودار مقایسه جابه‌جایی شبیه‌سازی کوپل، غیرکوپل 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.