



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
( پلی تکنیک تهران )

دوره ۴۸، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۵، صفحه ۲۱۵ تا ۲۲۶  
Vol. 48, No. 2, Summer 2016, pp. 215-226



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی مکانیک

AmirKabir Journal of Science & Research  
Mechanical Engineering  
ASJR-ME

## تحلیل عددی و تجربی شکل دهی الکترومغناطیس لوله به طرف داخل به روش کوپل

میلاذ شبان پور<sup>۱</sup>، علیرضا فلاحی آرزودار<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

(دریافت: ۱۳۹۴/۲/۲۱ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۲۶)

### چکیده

یکی از مهم‌ترین بحث‌ها در شبیه‌سازی فرایند شکل دهی الکترومغناطیس لوله به طرف داخل، چگونگی کوپل کردن دو قسمت مغناطیسی و سازه می‌باشد. در این مقاله این فرایند، به دو روش کوپل ضعیف و کوپل ترتیبی شبیه‌سازی شده است. در روش کوپل ضعیف، این دو قسمت به صورت جدا از هم حل شده اما در حالت کوپل ترتیبی با استفاده از معادلات ماکسول و روش حل تفاضل محدود و استفاده از یک زیربرنامه در محیط نرم‌افزار آباکوس، حل این دو قسمت به صورت هم‌زمان انجام شده است؛ از این رو تغییر شکل قطعه کار و تأثیر آن بر اندوکتانس قطعه کار در طول فرایند در روش کوپل ترتیبی لحاظ می‌شود. در روش کوپل ضعیف، میزان عمق فروروی مرکز قطعه کار در مقایسه با حالت تجربی ۳۵ درصد اختلاف دارد اما این اختلاف با استفاده از روش کوپل ترتیبی به حدود ۵ درصد می‌رسد. از مدل خسارت جانسون-کوک برای پیش‌بینی پارگی در این فرایند استفاده شده است. افزایش ولتاژ تخلیه موجب افزایش عمق فروروی و افزایش میزان خسارت جانسون-کوک شده و همچنین افزایش ضخامت قطعه کار نیز به عنوان دومین متغیر مهم، موجب کاهش میزان خسارت و در نتیجه کاهش احتمال پارگی می‌شود. به طور کلی میزان خسارت کمتر از ۰/۸ را می‌توان به عنوان یک منطقه ایمن بدون پارگی معرفی کرد.

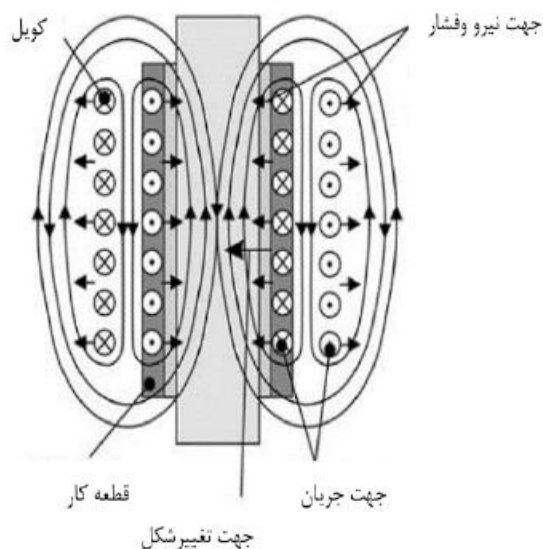
کلمات کلیدی:

شکل دهی الکترومغناطیس، شکل دهی الکترومغناطیس لوله به طرف داخل، شبیه‌سازی کوپل ترتیبی و ضعیف،

پارگی.

## ۱- مقدمه

فرایند شکل‌دهی الکترومغناطیس یکی از فرایندهای تغییر شکل مواد با سرعت و نرخ کرنش بالا است. از این فرایند برای انقباض و انبساط لوله و تغییر شکل ورق استفاده می‌شود. شکل ۱ اساس کار شکل‌دهی الکترومغناطیس لوله به طرف داخل (انقباض لوله) را نشان می‌دهد. مدار الکتریکی مجموعه متشکل از یک منبع تغذیه و بانک خازن است. با شارژ خازن و تخلیه‌ی یک‌باره‌ی آن جریان شدید در سیم‌پیچ به‌وجود می‌آید. بنابر قانون لنز<sup>۱</sup> نیز، یک جریان القایی در لوله به‌وجود می‌آید که با عامل به‌وجود آورنده‌ی خود مخالفت می‌کند و در نتیجه لوله از قالب دور می‌شود، نیروی وارد بر لوله که در اثر این دفع متقابل وارد می‌شود به‌عنوان نیروی لورنتس<sup>۲</sup> شناخته می‌شود [۱].



شکل ۱: شکل کلی فرایند شکل‌دهی الکترومغناطیس لوله به طرف داخل [۱]

لوله در طول فرایند توانستند به‌دقت خوبی در شبیه‌سازی برسند [۶و۵]. در سال ۲۰۰۹ نیز، بارتلز<sup>۷</sup> و همکاران به مقایسه دو حالت شبیه‌سازی متفاوت شکل‌دهی الکترومغناطیس لوله به طرف داخل پرداختند و بیان کردند که با افزایش زمان، میزان تفاوت در نتایج دو حالت شبیه‌سازی بیشتر خواهد شد [۷]. در سال ۲۰۱۱، شاهرخ و همکاران به استخراج معادلات حاکم در شکل‌دهی انقباضی لوله و نحوه به‌دست آوردن آنها از معادلات ماکسول پرداختند، سپس یک حل تحلیلی انجام داده و از نتایج آن در نرم‌افزار آباکوس<sup>۸</sup> استفاده کردند [۸]. در سال ۲۰۱۲، محمدی‌نیا و همکاران به بیان روش شکل‌دهی کویل برای شکل‌دهی لوله به طرف داخل پرداختند و با استفاده از این روش تأثیر پارامترهایی مانند ولتاژ تخلیه، ضخامت لوله، لقی بین قالب و قطعه‌کار را بر عمق فروری مرکز قطعه‌کار بررسی کردند [۹].

در این پژوهش به چگونگی شبیه‌سازی این فرایند در دو حالت مختلف کویل ضعیف و کویل ترتیبی متفاوت با روش‌های انجام شده‌ی قبلی پرداخته می‌شود. از نرم‌افزار ماکسول برای حل قسمت مغناطیسی در روش کویل ضعیف و از نرم‌افزار آباکوس برای حل قسمت سازه‌ای استفاده می‌شود. مزیت روش استفاده شده در این پژوهش نسبت به تحقیقات قبلی این است که، از یک زیربرنامه برای ایجاد فشار مغناطیس در یک نرم‌افزار واحد (آباکوس) استفاده می‌شود و در نهایت باعث کاهش زمان حل و افزایش دقت حل خواهد شد. در ادامه دو حالت شبیه‌سازی باهم مقایسه شده و برتری یک روش نسبت به روش دیگر بررسی خواهد شد. تاکنون برای فرایند شکل‌دهی الکترومغناطیس لوله، پارگی مدل نشده است، در این پژوهش از مدل خسارت جانسون-کوک نیز برای پیش‌بینی پارگی استفاده می‌شود و سعی می‌شود تا میزان دقت این مدل در پیش‌بینی پارگی بررسی شود. در نهایت نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی‌ها با نتایج آزمون تجربی مقایسه شده و صحه‌گذاری می‌شود.

## ۲- تعیین فشار وارد بر لوله

فرض می‌شود لوله رسانا، با شعاع  $R$ ، طول  $l$  و ضخامت  $h$  داخل سیم‌پیچ قرار گرفته باشد. جریان تخلیه شده در سیم‌پیچ با استفاده از معادله (۱) تقریب زده می‌شود [۴]:

$$I(t) = I_0 e^{-t/\tau} \sin \omega t \quad (1)$$

که در آن  $I_0$  بیشینه شدت جریان تخلیه مدار،  $\tau$  ضریب میرایی مدار و  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای است.

شدت جریان در قطعه‌کار با صرف‌نظر از تغییرات مقاومت و اندوکتانس قطعه‌کار به صورت رابطه (۲) محاسبه می‌شود [۴]:

تاکوتسا<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۱۹۸۸ معادلات حاکم بر شکل‌دهی الکترومغناطیس ورق را استخراج کردند و یک حل عددی برای آن ارائه دادند [۲]. در سال ۱۹۹۶، فنتون و داهن<sup>۴</sup> یک کد رایانه‌ای تفاضل محدود دوبعدی را ارائه کردند که این کد می‌توانست به‌طور دقیق دینامیک فرایند شکل‌دهی ورق را پیش‌بینی کند [۳]. کوریا<sup>۵</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۸ دو قسمت الکترومغناطیس و سازه‌ای این فرایند را مستقل از هم فرض کردند و با حل عددی معادلات ماکسول برای هندسه‌ی ورق تخت، فشار الکترومغناطیس را استخراج کردند [۴]. در سال ۲۰۰۹، هایپینگ<sup>۶</sup> و همکاران به شبیه‌سازی کویل ترتیبی فرایند شکل‌دهی لوله به طرف داخل به‌روش المان محدود پرداختند. آنها با در نظر گرفتن تغییر هندسه

1 Lenz law

2 Lorentz

3 Takatsu

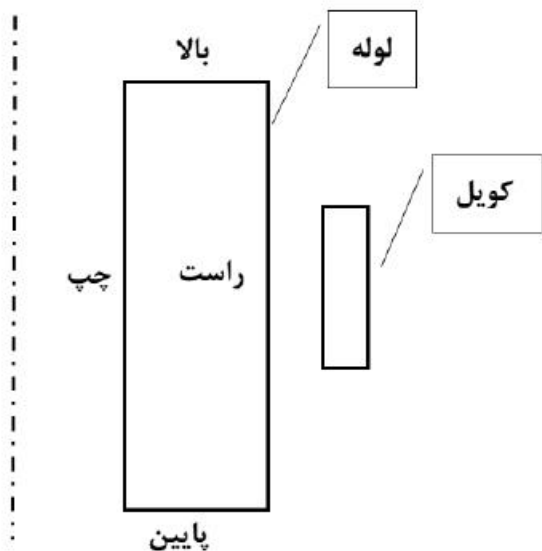
4 Fenton &amp; Daehn

5 Kore

6 Haiping

7 Bartels

8 ABAQUS



شکل ۲: شماتیک فرایند شکل‌دهی لوله به همراه مرزهای آن چگالی میدان مغناطیسی در مرز پایین لوله:

$$B_r^t(0, j) = 0 \quad (12)$$

$$B_z^t(0, j) = 0 \quad (13)$$

چگالی میدان مغناطیسی در مرز چپ لوله:

$$B_r^t(i, 0) = 0 \quad (14)$$

$$B_z^t(i, 0) = 0 \quad (15)$$

چگالی میدان مغناطیسی در مرز راست لوله:

$$B_r^t(i, m) = B_{0r}^t(0, j) + B_{1r}^t(0, j) \quad (16)$$

$$B_z^t(i, m) = B_{0z}^t(0, j) + B_{1z}^t(0, j) \quad (17)$$

که در روابط (۱۶) و (۱۷) میدان مغناطیسی  $B$  از جمع میدان سیم‌پیچ  $B_0$  و میدان مغناطیسی  $B_1$  که به واسطه‌ی جریان گردابی فعال بر لوله به وجود آمده است، به دست می‌آید. میدان مغناطیسی در شرایط مرزی بالا، پایین و چپ لوله برابر صفر است. برای به دست آوردن  $B_0$  و  $B_1$ ، قطعه‌کار و سیم‌پیچ را به المان‌های حلقوی دایره‌ای شکل تقسیم می‌کنند و اگر جریان  $I(t)$  و جریان گردابی القا می‌شود  $J_0$  مشخص باشند، میدان‌های مغناطیسی  $B_0$  و  $B_1$  از جمع همه‌ی سهم‌های المان‌های حلقه‌ها به دست می‌آیند.

مولفه‌های شعاعی و محوری چگالی میدان مغناطیسی به صورت روابط (۱۸) و (۱۹) به دست می‌آید [۴]:

$$B_r \quad (18)$$

$$= \frac{\mu_0}{2\pi} j(r_0, z_0) s_0 \frac{z}{r} \frac{1}{r[(r_0 + r)^2 + z^2]^{1/2}} \quad (19)$$

$$I_2(t) = -\frac{V_0 M}{L_1 L_2 \omega_a^2 + (\alpha - \gamma)^2} \left[ \frac{\omega_a^2 - \gamma(\alpha - \gamma)}{\alpha} e^{-\gamma t} \sin(\omega t) + \omega e^{-\gamma t} \cos(\omega t) - \omega e^{-\alpha t} \right] \quad (2)$$

که در آن:

$$\gamma = \frac{R_t}{2L_t} \quad (3)$$

$$L_t = L_c + L_1 - \frac{M^2}{L_2} \quad (4)$$

$$R_t = R_c + R_1 + \frac{M^2}{L_2^2} R_2 \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2} \quad (6)$$

در روابط بالا،  $\gamma$  و  $\omega$  به ترتیب ضریب میراگر و فرکانس زاویه‌ای و  $L_c$ ،  $R_c$  و  $C$  به ترتیب مقاومت، اندوکتانس و ظرفیت مدار معادل می‌باشند. اندوکتانس تقریبی قطعه‌کار را با توجه به لوله بودن می‌توان به صورت رابطه (۷) به دست آورد [۱۰]:

$$L_2 \approx \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left[ \ln\left(\frac{2l}{R}\right) - \frac{3}{4} \right] \quad (7)$$

که  $l$  و  $R$  به ترتیب طول و شعاع لوله و  $\mu_0$  نفوذپذیری هوا می‌باشد. همچنین مولفه‌های شعاعی و محوری چگالی میدان مغناطیسی به صورت رابطه (۸) و (۹) محاسبه می‌شوند [۴]:

$$-\frac{1}{\mu_0 \sigma_w} \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{r^2} \right) B_r + \frac{\partial B_r}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

$$-\frac{1}{\mu_0 \sigma_w} \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) B_z + \frac{\partial B_z}{\partial t} = 0 \quad (9)$$

## ۱-۲ شرایط مرزی و شرایط اولیه

برای حل معادلات (۸) و (۹)، لازم است شرایط مرزی که از نوع چگالی میدان مغناطیسی است، روی هندسه لوله تعریف شود. در شکل ۲ تصویری از فرایند شکل‌دهی الکترومغناطیسی لوله به طرف داخل نشان داده شده است. شرایط مرزی روی چهار مرز لوله به صورت روابط (۱۰) تا (۱۷) تعریف می‌شود [۸].

چگالی میدان مغناطیسی در مرز بالای لوله:

$$B_r^t(n, j) = 0 \quad (10)$$

$$B_z^t(n, j) = 0 \quad (11)$$



مولفه‌های شعاعی و محوری میدان مغناطیسی بر حسب زمان به ترتیب طبق روابط (۲۴) و (۲۵) به دست می‌آیند [۴]:

$$B_r^{t+1}(i, j) = \frac{1}{\mu_0 \sigma_w (\Delta r)^2} \left( B_r^k(i, j+1) + B_r^k(i, j-1) \right) - \frac{\Delta t}{2\Delta r(a+j\Delta r)\mu_0\sigma_w} \left( B_r^k(i, j-1) + B_r^k(i, j+1) \right) - \frac{\Delta t}{\mu_0\sigma_w} \left( \frac{2}{\Delta r^2} + \frac{2}{\Delta h^2} + \frac{1}{(a+j\Delta r)^2} \right) B_r^t(i, j) + B_r^t(i, j) + \frac{1}{\mu_0\sigma_w} \frac{\Delta t}{\Delta h^2} \left( B_r^t(i+1, j) + B_r^t(i-1, j) \right) \quad (24)$$

$$B_z^{t+1}(i, j) = \frac{1}{\mu_0 \sigma_w (\Delta r)^2} \left( B_z^k(i, j+1) + B_z^k(i, j-1) \right) - \frac{\Delta t}{2\Delta r(a+j\Delta r)\mu_0\sigma_w} \left( B_z^k(i, j-1) + B_z^k(i, j+1) \right) - \frac{\Delta t}{\mu_0\sigma_w} \left( \frac{2}{\Delta r^2} + \frac{2}{\Delta h^2} \right) B_z^t(i, j) + B_z^t(i, j) + \frac{1}{\mu_0\sigma_w} \frac{\Delta t}{\Delta h^2} \left( B_z^t(i+1, j) + B_z^t(i-1, j) \right) \quad (25)$$

یک طرف معادله (۲۴) و (۲۵) در زمان  $t+l$  و طرف دیگر در زمان  $t$  می‌باشد. در آخر فشار الکترومغناطیسی فعال بر لوله با معادلات (۲۶) و (۲۷) تخمین زده می‌شود.

$$P_r^t(i, j) = \sum_{i=0}^{n-1} \left[ \frac{F_r^t(i, j) + F_r^t(i+1, j)}{2} \Delta h \right] \quad (26)$$

$$P_z^t(i, j) = \sum_{i=0}^{n-1} \left[ \frac{F_z^t(i, j) + F_z^t(i+1, j)}{2} \Delta h \right] \quad (27)$$

به منظور حل رابطه‌های (۸) و (۹)، برای محاسبه‌ی  $B_\theta$ ، در معادله‌های (۱۸) و (۱۹)، جریان تخلیه شده در سیم‌پیچ و برای محاسبه‌ی  $B_r$ ، شدت جریان در قطعه کار قرار داده می‌شود.

برای حل معادله‌های (۱۶) و (۱۷) علاوه بر شرایط مرزی، نیاز به شرایط اولیه نیز است. در زمان  $t=0$  شرایط اولیه تعریف می‌شود، بنابراین در این زمان در هر نقطه مانند  $(i, j)$  شرایط اولیه به صورت رابطه (۲۰) و (۲۱) تعریف می‌شود [۴]:

$$t = 0, B_r^0(i, j) = 0 \quad (20)$$

$$t = 0, B_z^0(i, j) = 0 \quad (21)$$

۲۲ روش حل تفاضلات محدود برای حل معادلات شکل‌دهی الکترومغناطیس لوله

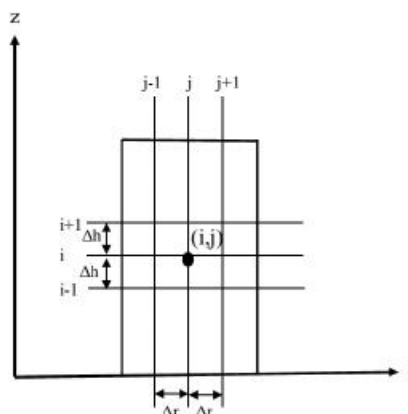
برای حل معادلات بالا از روش تفاضلات محدود استفاده می‌شود. در شکل ۳ شبکه مش در سیستم مختصات استوانه‌ای به صورت شماتیک آورده شده است. قطعه کار به سلول‌هایی با اندازه  $\Delta r \times \Delta h$  و به صورت یکنواخت تقسیم‌بندی شده است. در این شبکه هر نقطه با مختصات  $(i, j)$  به صورت رابطه (۲۲) تعریف می‌شود [۴]:

$$(r_j, z_i) = (a + j\Delta r, i\Delta h) \text{ with } 0 \leq i \leq n \text{ and } 0 \leq j \leq m \quad (22)$$

مقدار فاصله مکانی در جهت شعاع و ارتفاع لوله به ترتیب  $\Delta r$  و  $\Delta h$  می‌باشند، که از رابطه (۲۳) به دست می‌آیند:

$$\Delta r = \frac{h_w}{m} \text{ and } \Delta h = \frac{l_w}{n} \quad (23)$$

در روابط فوق  $a$  شعاع داخلی لوله،  $h_w$  ضخامت لوله و  $l_w$  طول لوله می‌باشد.



شکل ۳: شبکه مش‌بندی شده برای شکل‌دهی لوله به طرف داخل [۴]

معادلات با مشتقات جزئی، باید از روش تفاضلات محدود و روی هندسه لوله حل شوند، بنابراین با استفاده از روش حل تفاضلات محدود

## ۳- شبیه‌سازی

همان‌طور که بیان شد فرایند شکل‌دهی الکترومغناطیس متشکل از دو قسمت مغناطیسی و سازه می‌باشد. از این رو برای شبیه‌سازی فرایند، باید دو قسمت گفته شده مورد تحلیل قرار گیرد. به‌طور کلی دو حالت برای شبیه‌سازی این فرایند وجود دارد. یکی شبیه‌سازی غیر کوپل و یکی شبیه‌سازی کوپل. در شبیه‌سازی غیر کوپل قسمت سازه‌ای فرایند با یک فرض اولیه برای ایجاد فشار اولیه روی لوله شبیه‌سازی می‌شود. این شبیه‌سازی فقط برای مشاهده چگونگی انجام فرایند مناسب است. در شبیه‌سازی کوپل از نتایج حاصل از حل قسمت مغناطیسی در قسمت سازه‌ای استفاده می‌شود. روش کوپل خود به دو دسته‌ی کوپل ضعیف و کوپل ترتیبی تقسیم‌بندی می‌شود. در این پژوهش سعی می‌شود دو روش کوپل ضعیف و کوپل ترتیبی و چگونگی انجام آن مورد تحلیل قرار گرفته و در نهایت مقایسه شود.

## ۱۳ شبیه‌سازی کوپل ضعیف

در شبیه‌سازی کوپل ضعیف ابتدا قسمت مغناطیسی فرایند حل شده و در نهایت فشار الکترومغناطیس وارد بر لوله به‌عنوان یک ورودی در شبیه‌سازی قسمت سازه استفاده می‌شود. در این پژوهش ابتدا حل قسمت مغناطیسی فرایند با نرم‌افزار ماکسول انجام می‌شود. بدین صورت که با مدل کردن لوله، قالب و سیم‌پیچ، حل قسمت مغناطیسی فرایند انجام شده و فشار الکترومغناطیس وارد بر لوله در زمان بیشینه شدت جریان از نرم‌افزار استخراج می‌شود. جنس سیم‌پیچ مس و مشخصات آن طبق جدول ۱ انتخاب شد. جنس قطعه کار نیز آلومینیوم و مشخصات آن طبق جدول ۲ است. نقشه‌ی قالب استفاده‌شده نیز در شکل ۴ آورده شده است و مطابق با نقشه‌ی قالب در آزمون تجربی می‌باشد.

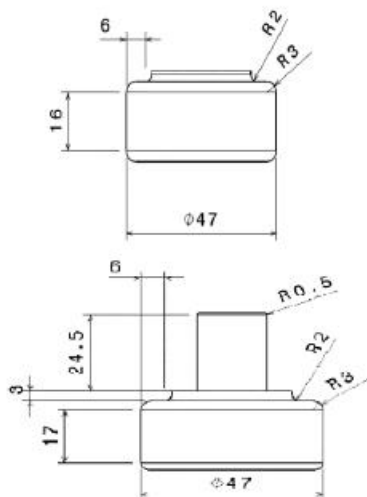
جدول ۱: مشخصات سیم‌پیچ استفاده شده در شبیه‌سازی و آزمون تجربی

مقدار	کمیت (میلیمتر)
۲۶/۱	شعاع داخلی
۴۵/۵	شعاع خارجی
۳۰	طول سیم‌پیچ
۱۳	تعداد حلقه‌ها
۲/۵	شعاع مقطع هر سیم

در نهایت حل قسمت سازه‌ای فرایند در نرم‌افزار آباکوس به‌صورت حل دینامیکی صریح<sup>۹</sup> انجام شد. مدل قالب صلب تحلیلی و مدل لوله به‌صورت سیمی<sup>۱۰</sup> دارای تقارن محوری در نظر گرفته شد. مدل قالب ایجاد شده در شبیه‌سازی در شکل ۵ آمده است. فشار وارد بر لوله به

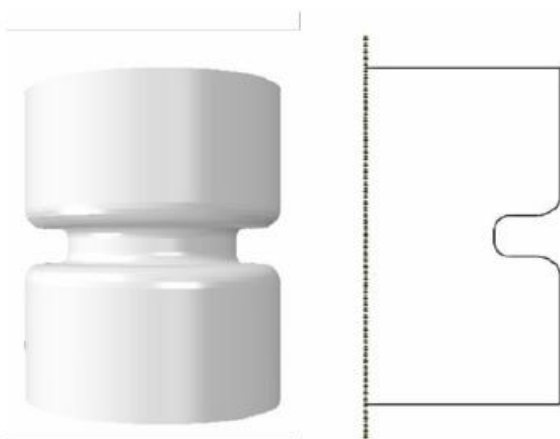
جدول ۲: خواص کلی آلومینیوم T6-6061 [۱۴]

اندازه	خواص
۲۷۰۰	چگالی ( $Kg/m^3$ )
۷۰	مدول الاستیسیته (GPa)
۰/۳۳	ضریب پواسون
۹۲۵	دمای ذوب (K)



شکل ۴: نقشه‌ی قالب استفاده‌شده در شبیه‌سازی و آزمون تجربی

صورت یک تابع برازش‌شده توسط نرم‌افزار متلب<sup>۱۱</sup> در قسمت بارگذاری شبیه‌سازی تعریف شد. با توجه به صلب بودن قالب نیازی به مش‌بندی قالب وجود ندارد اما برای مش‌بندی لوله از المان SAX1 (المان پوسته‌ای) جدار نازک خطی دونقطه‌ای) به تعداد ۱۰۰ عدد در طول لوله استفاده شد. با توجه به مرجع [۱۱] استفاده از تعداد ۱۰۰ عدد المان مناسب بوده و همگرایی در این حالت اثبات شده است.



شکل ۵: مدل قالب ترسیم شده در نرم‌افزار آباکوس به‌صورت صلب

## ۲۳ شبیه‌سازی کوپل ترتیبی

در شبیه‌سازی کوپل ترتیبی باید دو قسمت مغناطیسی و سازه‌ای فرایند هم‌زمان با هم حل شوند. شبیه‌سازی فرایند در نرم‌افزار آباکوس و دقیقاً مشابه قسمت شبیه‌سازی کوپل ضعیف انجام شد، با این تفاوت که معادلات حاکم بر فرایند شکل‌دهی الکترومغناطیس لوله به‌صورت یک زیربرنامه VDLOAD در نرم‌افزار آباکوس برای ایجاد فشار الکترومغناطیس استفاده شد. زیربرنامه ابتدا با توجه به ورودی‌هایی مانند هندسه لوله، هندسه سیم‌پیچ، پارامترهای الکتریکی و مغناطیسی سیم‌پیچ و لوله، فرکانس زاویه‌ای، ضریب میرایی مدار، بیشینه شدت جریان تخلیه مدار را محاسبه کرده و سپس به محاسبه‌ی شدت جریان تخلیه شده در سیم‌پیچ می‌پردازد. در ادامه مؤلفه‌های شعاعی و محوری چگالی میدان مغناطیسی محاسبه می‌شود. پس از آن مؤلفه‌های شعاعی و محوری میدان مغناطیسی، مؤلفه‌های شعاعی و محوری نیروی لورنتس و در آخر فشار الکترومغناطیس وارد بر لوله برای هر گره محاسبه می‌شود. این فشار به‌صورت یک فشار مکانیکی بر قطعه کار وارد می‌شود و در هر گام زمانی، هندسه‌ی قطعه کار در زیربرنامه به‌روزرآوری می‌شود و این چرخه ادامه می‌یابد تا زمان کل تحلیل به پایان برسد [۹]. در این پژوهش زمان کل تحلیل با توجه به شبیه‌سازی قسمت مغناطیسی برابر با ۵۰ میکروثانیه و گام زمانی ۰/۱ میکروثانیه در نظر گرفته می‌شود.

یکی از قسمت‌های مهم در نرم‌افزار آباکوس تعریف خواص مواد می‌باشد. همان‌طور که قبلاً بیان شد فرایند شکل‌دهی الکترومغناطیس، یک فرایند نرخ کرنش بالاست. از این رو در تعریف خواص مواد از مدل جانسون-کوک طبق رابطه (۲۸) برای تعریف رفتار ماده استفاده می‌شود [۱۲و۱۱]:

$$\bar{\sigma} = [A + B\bar{\epsilon}^n] \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (28)$$

که در آن  $\bar{\sigma}$  تنش جریان ماده،  $A$  و  $B$  برابر تنش تسلیم اولیه ماده و ضریب سختی در دمای محیط،  $T$  دمای قطعه کار،  $T_m$  دمای ذوب ماده،  $T_r$  دمای تبدیل (معمولاً دمای محیط)،  $C$  ضریب حساسیت به نرخ کرنش،  $m$  ضریب نرم‌شوندگی در دماهای بالا،  $\dot{\bar{\epsilon}}$  نرخ کرنش پلاستیک لحظه‌ای و  $\dot{\bar{\epsilon}}_0$  نرخ کرنش پلاستیک مرجع می‌باشد [۱۲]. ژیاوهی<sup>۱۲</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۲ برای فرایند شکل‌دهی انبساطی لوله، میزان افزایش دما در ناحیه مرکز فروروی لوله را حدود ۵ درجه سانتی‌گراد گزارش کردند. از این رو با توجه به محدود بودن افزایش دما و عدم تأثیر آن بر فرایند می‌توان از اثر دما صرف‌نظر کرد [۱۳].

برای به‌دست‌آوردن ضرایب معادله‌ی جانسون-کوک نیاز به آزمون میله هاپکینسون<sup>۱۳</sup> با نرخ کرنش بالا و دماهای مختلف می‌باشد. در این پژوهش از آلومینیوم 6061-T6 با خواص مطابق جدول ۳ و طبق مرجع

12 Xiaohui  
13 Hopkinson bar test

[۱۴] استفاده شد.

## ۴- پارگی

یکی از مهم‌ترین مسائل موجود در فرایند شکل‌دهی الکترومغناطیس لوله به طرف داخل، بحث پارگی است. در این پژوهش سعی شد که معیاری برای پیش‌بینی پارگی لوله معرفی شود. معیارهای متفاوتی مانند معیار شکست ویلکین<sup>۱۴</sup>، معیار شکست جانسون-کوک، معیار شکست بیشینه تنش برشی، معیار شکست کاکرافت-لاتهام<sup>۱۵</sup>، معیار شکست کرنش ثابت، معیار شکست بانو-ویرزبیک<sup>۱۶</sup> برای نرخ کرنش بالا وجود دارد [۱۵]. اما معیار شکست جانسون-کوک برای فرایندهای با نرخ کرنش بالا تطابق بهتری با نتایج آزمون تجربی دارد [۱۶]. معیار خسارت جانسون-کوک متشکل از سه عبارت به‌صورت معادله‌ی (۲۹) می‌باشد [۱۶]:

$$\epsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)] \left[ 1 + D_4 \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right] \left[ 1 + D_5 \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right] \quad (29)$$

که در آن،  $D_1$  تا  $D_5$  ثابت ماده و مرتبط به خواص و  $\sigma^*$  به‌صورت رابطه (۳۰) تعریف می‌شود. مقدار  $\epsilon_f$  در بعضی از مراجع به‌صورت میزان خسارت نیز بیان شده است، هرگاه این میزان خسارت به عدد یک برسد قطعاً جسم پاره می‌شود.

$$\sigma^* = \frac{P}{\bar{\sigma}} \quad (30)$$

جدول ۳ ثوابت لازم برای معیار خسارت جانسون-کوک برای آلومینیوم 6061-T6 را نشان می‌دهد.

جدول ۳: جدول ۳ ضرایب معادله خسارت جانسون کوک آلومینیوم 6061-T6 [۱۴]

ضرایب معادله مشخصه	ضرایب معادله خسارت جانسون-کوک	اندازه	اندازه
A(MPa)	$D_1$	۳۲۴	۰/۷۷
B(MPa)	$D_2$	۱۱۴	۱/۴۵
C	$D_3$	۰/۰۰۲	۰/۴۷
m	$D_4$	۱/۳۴	۰
n	$D_5$	۰/۴۲	۱/۶
$\dot{\epsilon}_0$	-	۱	-

14 Wilkins  
15 Cockcroft-Latham  
16 Bao-Wierzbicki



## ۵- آزمون تجربی

دستگاه الکترومغناطیس استفاده شده در آزمایشگاه مطابق شکل ۶ متشکل از ۱- قالب، ۲- سیم پیچ، ۳- سوئیچ، ۴- بانک خازن، ۵- منبع تغذیه و ۶- قسمت کنترل می باشد.



شکل ۶: تجهیزات آزمایش تجربی

مشخصات سیم پیچ استفاده شده در آزمون تجربی در جدول ۱ آمده است. ابتدا ۶ عدد لوله برای بررسی دو پارامتر ولتاژ تخلیه و ضخامت قطعه کار در سه سطح مطابق جدول ۴ از جنس آلومینیوم ۶۰۶۱ تهیه شد و برای تأیید جنس آن نیز آزمایش اسپکترومتری نوری<sup>۱۷</sup> (کوانتومتری) انجام شد. نتایج مربوط به تعیین ترکیب شیمیایی توسط آزمون کوانتومتری در جدول ۵ آمده است. با مقایسه نتایج به دست آمده با استاندارد ASTM برای ترکیب شیمیایی آلومینیوم درستی جنس نمونه تأیید شد.

جدول ۴: پارامترهای و سطوح آن در آزمون تجربی

پارامتر	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
ولتاژ تخلیه (ولت)	۴۰۰۰	۴۵۰۰	۵۰۰۰
ضخامت لوله	۰/۱۵	۰/۱۶	۰/۱۷

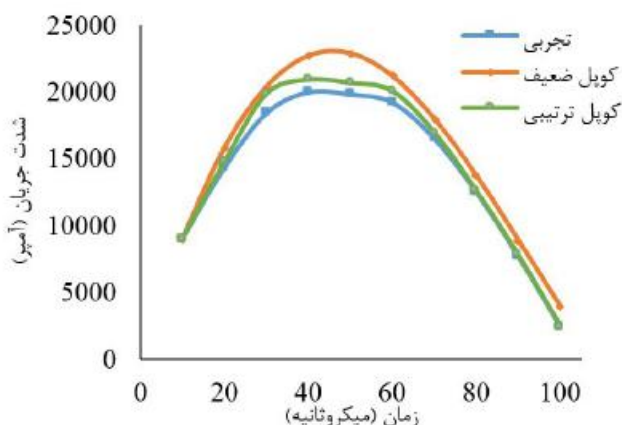
جدول ۵: نتایج به دست آمده از آزمون کوانتومتری

ترکیب شیمیایی	درصد وزنی	ترکیب شیمیایی	درصد وزنی
Al	پایه	Zn	۰/۲۰۱
Si	۰/۵۸۱	Ti	۰/۰۱۴۲
Fe	۰/۶۰۱	Be	۰/۰۰۰۳
Cu	۰/۲۹۴	Pb	۰/۰۵۳۷
Mn	۰/۰۶۰۳	Sb	۰/۰۰۴۴
Mg	۰/۹۰۴	Sn	۰/۰۰۳۹
Cr	۰/۱۲۱	V	۰/۰۰۴۵
Ni	۰/۰۱۵۳	Zr	۰/۰۰۱۶

پس از آن نمونه‌ها با استفاده از تراشکاری داخلی و خارجی و استفاده از یک مندرل برای جلوگیری از تغییر میزان گردی در طول لوله و کاهش میزان تنش باقی مانده در لوله، به قطر مورد نظر و طول ۵۰ میلیمتر، رسید. برای ثبت جریان نیز از سیم پیچ رگوسی<sup>۱۸</sup> و نوسان‌نما<sup>۱۹</sup> استفاده شد. برای اندازه‌گیری عمق فروروی مرکز قطعه کار نیز از کولیس با حساسیت ۰/۰۲ میلیمتر استفاده شد.

## ۶- تحلیل نتایج

در شکل ۷ نتایج مربوط به تغییرات شدت جریان در طول زمان در سه حالت تجربی و شبیه‌سازی کوپل و غیر کوپل برای ولتاژ ۴۰۰۰ ولت آمده است. در مرجع [۷] این نمودار به صورت سینوسی رسم شده است اما در شکل ۷ قسمتی از نمودار رسم شده و حالت سینوسی خود را از دست داده است، چون قله اول جریان برای شکل دهی مهم است و بیشینه فشار الکترومغناطیس در این زمان اتفاق می افتد.



شکل ۷: نمودار تغییرات جریان بر حسب زمان برای سه حالت شبیه‌سازی کوپل، غیر کوپل و آزمون تجربی در ولتاژ ۴۰۰۰ ولت

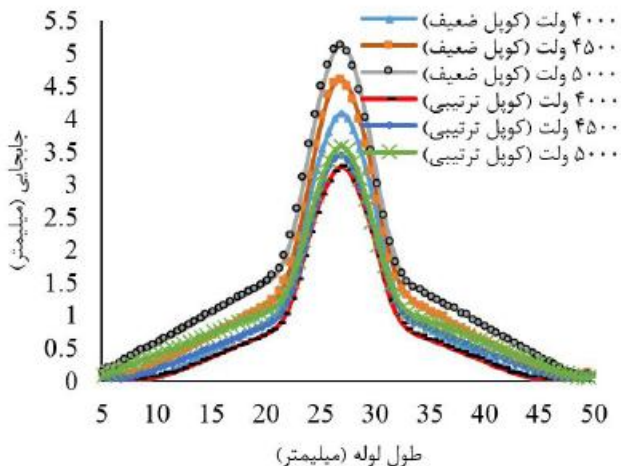
همان طور که از نمودار شکل ۷ مشخص است دو حالت کوپل ترتیبی و تجربی تقریباً بر هم منطبق هستند اما در حالت غیر کوپل نمودار متفاوت از دو حالت می باشد و زمانی که نمودار به بیشینه جریان خود می رسد بیشتر از حالت شبیه‌سازی کوپل ترتیبی است. دلیل این امر آن است که در حین شبیه‌سازی کوپل ضعیف با نرم افزار ماکسول، اندوکتانس ناشی از تغییر شکل قطعه کار ثابت فرض شده ولی در عمل با فاصله گرفتن قطعه از سیم پیچ، اندوکتانس قطعه افزایش می یابد، بنابراین جریان مربوط به شبیه‌سازی کوپل ضعیف بیشتر از مقدار تجربی و کوپل ترتیبی خواهد بود و زمان رسیدن به بیشینه جریان نیز برای کوپل ضعیف دیرتر اتفاق می افتد.

در شکل ۸ جایجایی شعاعی قطعه کار در طول لوله برای دو حالت شبیه‌سازی کوپل و غیر کوپل در ولتاژ تخلیه ۴۵۰۰ ولت، ضخامت لوله ۰/۵ میلیمتر و لقی بین قالب و لوله ۰/۱ میلیمتر آمده است. لقی بین قالب با لوله با حرف c در زیرنویس شکل نشان داده شده است.

18 Rogowski coil

19 Oscilloscope

17 Spectroscopy



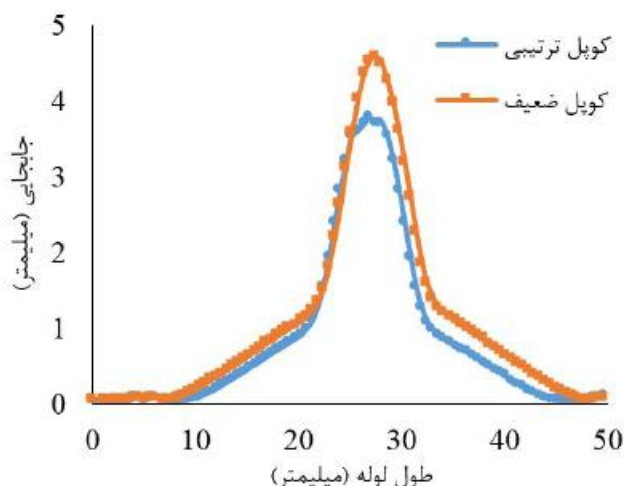
شکل ۹: تأثیر ولتاژ تخلیه بر جابجایی شعاعی قطعه‌کار در دو حالت شبیه‌سازی کویل و غیر کویل  $t=0/5 \text{ mm}$ ,  $c=0/1 \text{ mm}$

جدول ۶ میزان عمق فروروی مرکز قطعه‌کار را در سه حالت شبیه‌سازی کویل ضعیف، کویل ترتیبی و آزمون تجربی برای ضخامت‌های متفاوت در ولتاژ تخلیه ۴۰۰۰ ولت و لقی بین قالب و قطعه‌کار ثابت ۰/۱ میلی‌متر نشان می‌دهد.

از جدول ۶ می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ضخامت قطعه‌کار میزان عمق فروروی مرکز قطعه‌کار کاهش می‌یابد. این امر به دلیل افزایش مقاومت ماده به تغییر شکل در اثر افزایش حجم ماده‌ی موردنظر برای تغییر شکل پلاستیک است. درصد اختلاف حالت شبیه‌سازی کویل ضعیف و آزمون تجربی به حدود ۳۵ درصد رسیده است اما این اختلاف با استفاده از شبیه‌سازی کویل ترتیبی به حدود ۵ درصد کاهش یافته است. در مرجع [۱۱] نیز میزان اختلاف برای حالت شبیه‌سازی غیر کویل برای ولتاژ تخلیه ۴۳۰۰ ولت، ۳۱ درصد گزارش شده است. دلیل این اختلاف زیاد در حالت شبیه‌سازی کویل ضعیف، عدم در نظر گرفتن تغییر شکل قطعه‌کار در طول فرایند و تغییر اندوکتانس آن و تأثیر مستقیم آن بر فشار الکترومغناطیس وارد بر لوله است. با افزایش ضخامت قطعه‌کار از میزان عمق فروروی کاسته می‌شود در نتیجه میزان تغییر اندوکتانس قطعه‌کار نیز در طول فرایند کاهش می‌یابد و میزان تأثیر آن بر فشار الکترومغناطیس و در نتیجه میزان خطا به دنبال آن کاهش خواهد یافت. همچنین با افزایش ضخامت قطعه‌کار، میزان خسارت جانسون-کوک نیز کمتر شده است و این امر به دلیل کاهش عمق فروروی و در نتیجه کاهش احتمال پارگی است.

شکل ۱۰ کرنش لگاریتمی در جهت ضخامت روی طول لوله برای ولتاژ تخلیه ۴۵۰۰ ولت، ضخامت لوله ۰/۵ میلی‌متر و لقی بین قالب و لوله ۰/۱ میلی‌متر را نشان می‌دهد. میزان کرنش مثبت در مرکز لوله و نزدیک به نوک بید نشان‌دهنده افزایش ضخامت در نوک بید و کرنش منفی در نزدیکی شعاع قالب نشان‌دهنده کاهش ضخامت و نازک‌شدگی در این ناحیه است.

همان‌گونه که نمودار شکل ۸ نشان می‌دهد، بیشینه تغییر شکل قطعه‌کار در مرکز آن رخ می‌دهد و میزان عمق فروروی در حالت شبیه‌سازی کویل ضعیف بیشتر از حالت کویل ترتیبی است. این امر به دلیل در نظر نگرفتن تغییرات اندوکتانس قطعه‌کار در طول فرایند و ناشی از فاصله گرفتن قطعه‌کار از سیم‌پیچ در شبیه‌سازی کویل ضعیف است. اما چون در حالت کویل ترتیبی این فاصله گرفتن از سیم‌پیچ و تغییرات اندوکتانس قطعه‌کار لحاظ شده است، مقدار فشار وارد بر مرکز قطعه‌کار کاهش می‌یابد و در نتیجه میزان عمق فروروی نیز کمتر می‌شود.



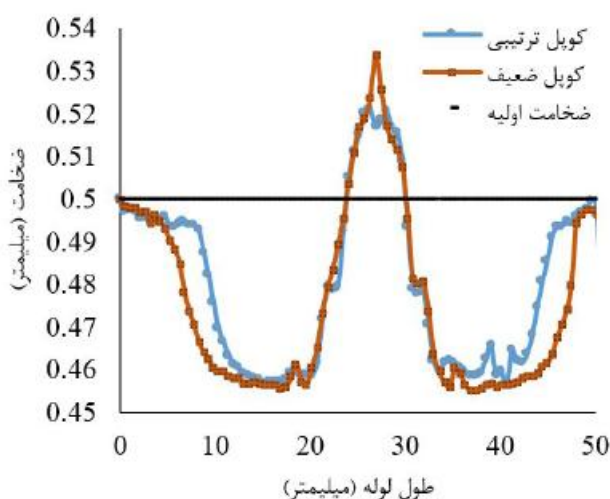
شکل ۸: نمودار جابجایی شعاعی قطعه‌کار در طول آن برای دو حالت شبیه‌سازی کویل و غیر کویل  $v=4500 \text{ V}$ ,  $t=0/5 \text{ mm}$ ,  $c=0/1 \text{ mm}$

در شکل ۹ نتایج مربوط به افزایش ولتاژ تخلیه و تأثیر آن بر میزان جابجایی قطعه‌کار در طول زمان برای دو حالت شبیه‌سازی کویل ضعیف و کویل ترتیبی برای ضخامت اولیه ۰/۵ میلی‌متر و لقی بین قالب و لوله ۰/۱ میلی‌متر آمده است. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش ولتاژ تخلیه میزان عمق فروروی مرکز قطعه‌کار افزایش یافته است و این افزایش به دلیل افزایش بیشینه جریان و به دنبال آن افزایش فشار الکترومغناطیس وارد بر لوله است. همچنین از شکل ۹ مشخص است که با افزایش ولتاژ تخلیه به دلیل افزایش میزان فروروی، دو نمودار مربوط به شبیه‌سازی کویل ضعیف و ترتیبی بیشتر فاصله می‌گیرد (در حالت بیشینه به ۳۵٪ درصد اختلاف می‌رسد) و این امر به دلیل تغییرات بیشتر اندوکتانس لوله ناشی از فاصله گرفتن بیشتر قطعه‌کار از سیم‌پیچ در پی افزایش عمق فروروی است. در مرجع [۵۶] نیز برای ولتاژ ۲۴۰۰ ولت، مقدار عمق فروروی مرکز قطعه‌کار برای حالت کویل ترتیبی، کویل ضعیف و حالت تجربی به ترتیب ۱/۸۵ میلی‌متر، ۲ میلی‌متر و ۱/۸ میلی‌متر گزارش شده است که ۱۱ درصد اختلاف بین نتایج کویل ضعیف و آزمون تجربی وجود دارد و این امر به دلیل کم بودن عمق فروروی و در نتیجه تأثیر کمتر تغییرات اندوکتانس بر این اختلاف است.



جدول ۶: نتایج مربوط به عمق فروروی مرکز قطعه کار و میزان خسارت جانسون کوک برای سه ضخامت مختلف و درسه حالت شبیه سازی کوپل. غیر کوپل و آزمون تجربی  $v=400V, t=0/5 mm, c=0/1 mm$

میزان خسارت جانسون-کوک	درصد اختلاف تجربی و کوپل ضعیف	درصد اختلاف تجربی و کوپل ترتیبی	عمق فروروی کوپل ضعیف (mm)	عمق فروروی کوپل ترتیبی (mm)	عمق فروروی تجربی (mm)	ضخامت قطعه-کار (mm)
۰/۴۴	۵/۱	۳۵/۳	۳/۷۲	۲/۸۹	۲/۷۵	۰/۵
۰/۳۷	۴/۸۵	۳۲/۴۶	۳/۵۵	۲/۸۱	۲/۶۸	۰/۶
۰/۳۵	۴/۳	۳۰/۸	۳/۳۵	۲/۶۷	۲/۵۶	۰/۷

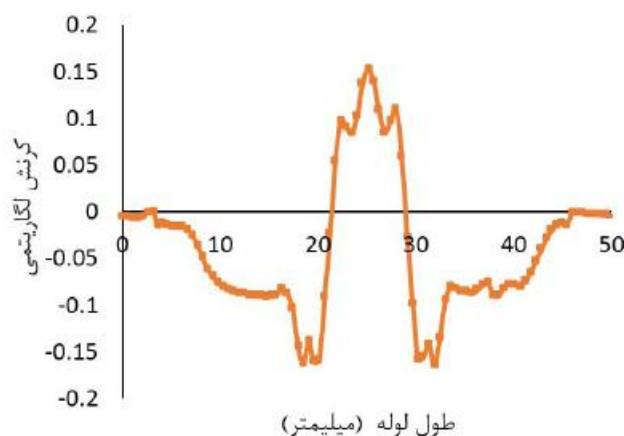


شکل ۱۰: تغییرات ضخامت قطعه کار در طول آن برای دو حالت

شبیه سازی کوپل و غیر کوپل  $v=450V, t=0/5 mm, c=0/1 mm$

از شکل ۱۲ کاملاً مشخص است که، در ابتدا تا زمان حدود ۲۵ میکروثانیه تغییرات ضخامت مرکز فرورفتگی ناچیز است، پس از آن تا زمان حدود ۳۰ میکروثانیه ضخامت افزایش یافته و پس از آن کاهش ضخامت رخ می دهد. در حالت شبیه سازی کوپل ضعیف چون میزان فشار اعمالی به قطعه کار بیشتر از حالت کوپل ترتیبی است، ضخامت ابتدا بیشتر افزایش می یابد.

در صورتی که عمق فروروی خیلی بیشتر باشد به علت وجود تنش های کششی در مرکز قطعه کار در نهایت ضخامت در حالت کوپل ضعیف کمتر از حالت کوپل ترتیبی می شود. همچنین در حالت کوپل ضعیف چون جریان بیشینه در زمان بزرگتری نسبت به کوپل ترتیبی اتفاق می افتد پس زمانی که در آن ضخامت قطعه کار شروع به افزایش کرده و پس از آن کاهش می یابد، برای کوپل ضعیف بیشتر از کوپل ترتیبی است. در شکل ۱۳ نیز نمودار تنش محیطی برای مرکز فرورفتگی قطعه کار را در ولتاژ تخلیه ۴۰۰۰ ولت، ضخامت ۰/۵ میلی متر و لقی بین قالب و قطعه کار ۰/۱ میلی متر بر حسب زمان برای دو حالت شبیه سازی کوپل ترتیبی و ضعیف نشان می دهد.



شکل ۱۱: تغییرات کرنش لگاریتمی در جهت ضخامت قطعه کار در

طول آن.  $v=450V, t=0/5 mm, c=0/1 mm$

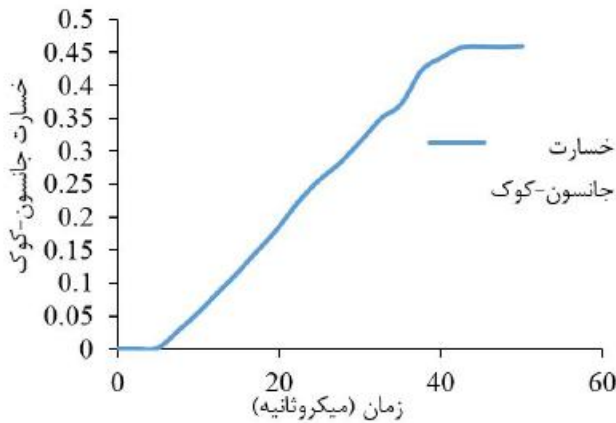
شکل ۱۱ میزان تغییرات ضخامت قطعه کار در طول آن را بر حسب اطلاعات به دست آمده از گره ها در زمان بیشینه شدت جریان الکتریکی برای دو حالت شبیه سازی کوپل ترتیبی و کوپل ضعیف در ولتاژ تخلیه ۴۵۰۰ ولت و ضخامت اولیه ۰/۵ میلی متر و لقی بین قالب و لوله ۰/۱ میلی متر نشان می دهد.

همان گونه در شکل ۱۱ مشاهده می شود در ناحیه وسط قطعه کار به دلیل وجود تنش های فشاری، ضخامت قطعه کار افزایش یافته است و در نواحی روی شعاع قالب نیز به دلیل وجود تنش کششی، از ضخامت قطعه کار کاسته شده است. همچنین به خوبی مشخص است که در حالت شبیه سازی کوپل ضعیف این افزایش و کاهش ضخامت بیشتر از حالت شبیه سازی کوپل ترتیبی است زیرا در حالت شبیه سازی کوپل ضعیف میزان افزایش عمق فروروی مرکز قطعه کار بیشتر بوده و در نتیجه تنش کششی بیشتر روی شعاع قالب و تنش فشاری بیشتری نیز روی مرکز قطعه کار به وجود می آید.

شکل ۱۲ تغییرات ضخامت مرکز فرورفتگی قطعه کار را در ولتاژ تخلیه ۴۰۰۰ ولت، ضخامت ۰/۵ میلی متر و لقی بین قالب و قطعه کار ۰/۱ میلی متر بر حسب زمان برای دو حالت شبیه سازی کوپل ترتیبی و ضعیف نشان می دهد.

منطقه ایمن بدون پارگی معرفی کرد.

شکل ۱۶ الف)، توزیع تنش ون میز در انتهای زمان پایانی فرایند و ب) لوله شکل‌دهی شده در آزمون تجربی را در ولتاژ تخلیه ۴۰۰۰ ولت و ضخامت لوله ۰/۵ میلی‌متر و لقی بین قالب و لوله ۰/۱ میلی‌متر نشان می‌دهد. بیشینه تنش در مرکز فرورفتگی قطعه‌کار ایجاد شده است، نواحی روی شعاع قالب نیز پس از آن بیشترین تنش را دارند.



شکل ۱۴: تغییرات میزان خسارت جانسون-کوک برای مرکز فرورفتگی قطعه‌کار در طول زمان  $v=4000V, t=0/5 mm, c=0/1 mm$

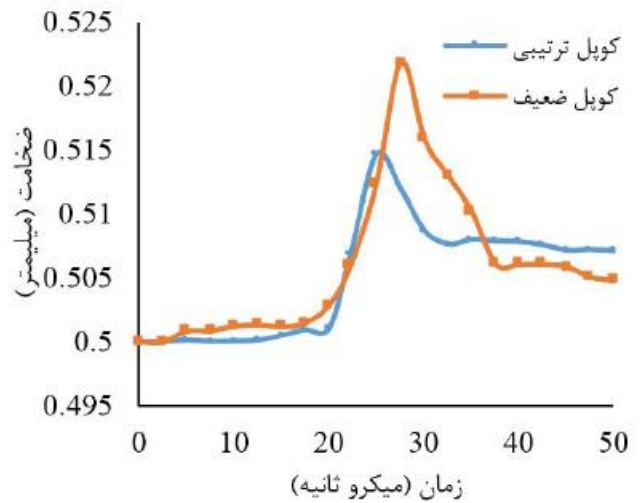


شکل ۱۵: لوله شکل‌دهی شده در آزمون تجربی برای  $v=6200V, t=0/6 mm, c=0/1 mm$

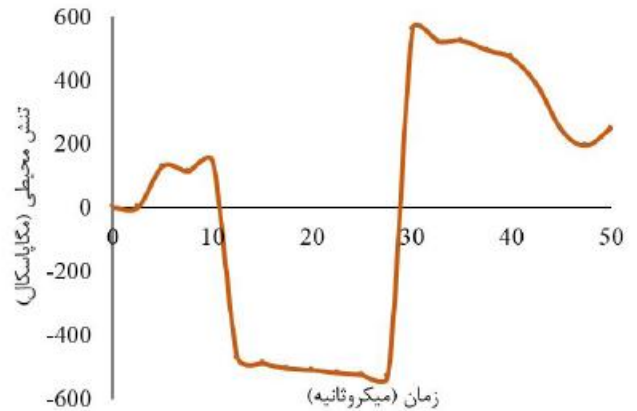
## ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی الکترومغناطیس لوله به طرف داخل به دو روش کوپل ضعیف و کوپل ترتیبی انجام شد و برای پیش‌بینی پارگی نیز از معیار خسارت جانسون-کوک استفاده شد. به‌طور کلی نتایج زیر به‌دست آمد:

۱. میزان عمق فروروی مرکز قطعه‌کار در حالت شبیه‌سازی کوپل ضعیف بیشتر از حالت کوپل ترتیبی است. اختلاف میزان عمق فروروی مرکز قطعه‌کار در حالت کوپل ضعیف در مقایسه با آزمون تجربی حدود ۳۵ درصد است این در حالی است که این اختلاف برای شبیه‌سازی کوپل ترتیبی به حدود ۵ درصد رسیده است.



شکل ۱۲: تغییرات ضخامت مرکز فرورفتگی قطعه‌کار در طول زمان  $v=4500V, t=0/5 mm, c=0/1 mm$

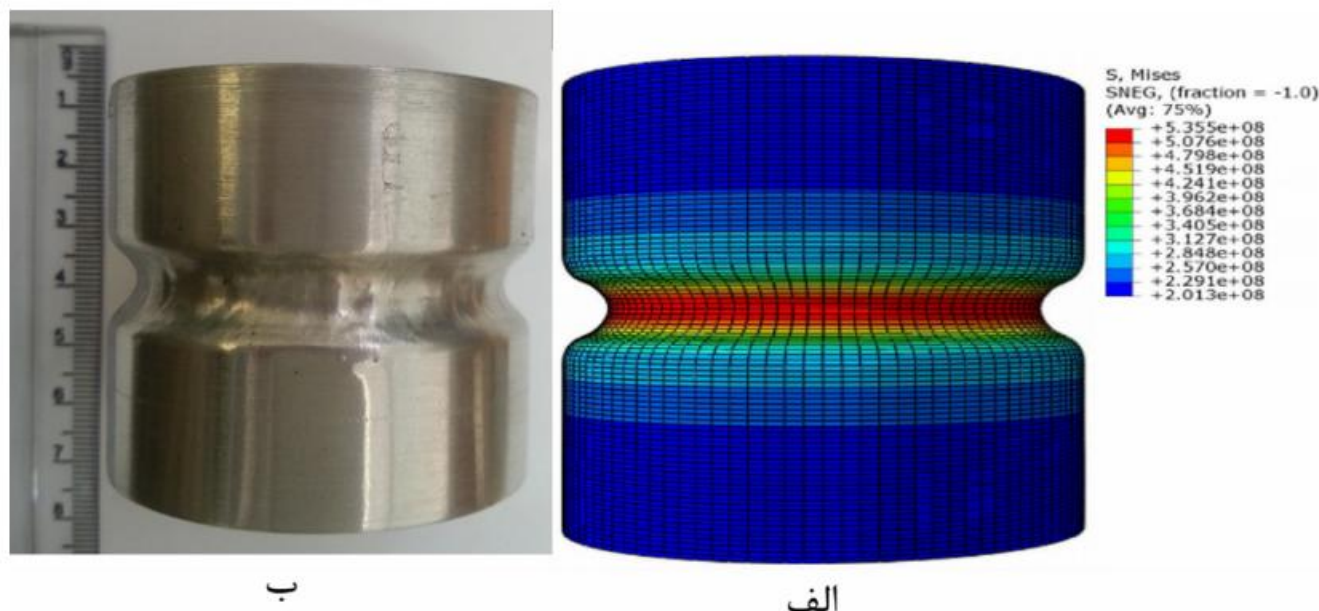


شکل ۱۳: تغییرات تنش محیطی مرکز فرورفتگی قطعه‌کار در طول زمان  $v=4500V, t=0/5 mm, c=0/1 mm$

با توجه به شکل ۱۳، مشخص است که تا زمان ۳۰ میکروثانیه در مرکز فرورفتگی تنش فشاری و پس از آن تنش کششی اعمال می‌شود و نازک‌شدگی به‌وجود می‌آید. اما به‌طور کلی ضخامت مرکز فرورفتگی افزایش می‌یابد.

شکل ۱۴ نمودار مربوط به میزان خسارت جانسون-کوک را در طول زمان برای المان روی مرکز فرورفتگی قطعه‌کار در ولتاژ تخلیه ۴۰۰۰ ولت، ضخامت ۰/۵ میلی‌متر و لقی بین قالب و قطعه‌کار ۰/۱ میلی‌متر در شبیه‌سازی کوپل ترتیبی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است بیشینه خسارت به حدود ۰/۴۵ رسیده است و در حالت آزمون تجربی نیز لوله سالم و بدون پارگی بود. برای بررسی پارگی از ولتاژ تخلیه ۶۲۰۰ ولت، ضخامت لوله ۰/۶ میلی‌متر و لقی بین قالب و لوله ۰/۱ میلی‌متر استفاده شد. در حالت شبیه‌سازی مقدار خسارت به ۰/۸۵ رسید و در آزمون تجربی نیز مانند شکل ۱۵ لوله به‌طور کامل پاره شد. پس مشاهده می‌شود که در این فرایند نیاز به رسیدن مقدار خسارت به عدد یک وجود ندارد از این رو می‌توان به‌صورت محافظه‌کارانه مقدار خسارت کمتر از ۰/۸ را یک





شکل ۱۶: الف) تغییرات تنش ون میزز در قطعه‌کار در انتهای فرایند ب) نمونه قطعه‌کار نهایی در آزمون تجربی  $v=400V, t=0.5 mm, c=1 mm$

۲. حداکثر میزان نازک‌شدگی روی شعاع قالب اتفاق می‌افتد و دلیل آن وجود تنش‌های کششی در این ناحیه است. همچنین حداکثر افزایش ضخامت نیز در مرکز فروروی قطعه‌کار اتفاق می‌افتد و دلیل آن وجود تنش‌های فشاری در این ناحیه است.
۳. ضخامت مرکز قطعه‌کار در ابتدای فرایند افزایش یافته و پس از آن به دلیل افزایش عمق فروروی بیشتر، کاهش می‌یابد، اما در نهایت ضخامت این ناحیه نسبت به ضخامت اولیه افزایش می‌یابد.
۴. افزایش ولتاژ تخلیه موجب افزایش عمق فروری روی قطعه‌کار و در نتیجه افزایش میزان خسارت جانسون-کوک خواهد شد، در مقابل افزایش ضخامت موجب کاهش عمق فروروی و در نتیجه کاهش احتمال پارگی می‌شود. به صورت محافظه‌کارانه، خسارت کمتر از ۰/۸ را می‌توان به عنوان منطقه ایمن بدون پارگی معرفی کرد.

#### ۸- فهرست علائم

اندوکتانس قطعه‌کار (H)	$L_0$	جریان تخلیه شده در سیم‌پیچ (A)	$I(t)$
اندوکتانس سیم‌پیچ (H)	$L_c$	بیشینه شدت جریان تخلیه مدار (A)	$I_0$
مقاومت مدار ( $\Omega$ )	$R_T$	زمان (s)	$t$
مقاومت قطعه‌کار ( $\Omega$ )	$R_0$	سرعت ( $ms^{-1}$ )	$V_0$
مقاومت سیم‌پیچ ( $\Omega$ )	$R_c$	اندوکتانس کل مدار (H)	$L_t$
القای متقابل بین سیم‌پیچ و قطعه‌کار	$M$	مقاومت کل مدار ( $\Omega$ )	$R_t$
طول لوله (m)	$l_w$	ظرفیت کل مدار (F)	$C$
شعاع لوله (m)	$R$	اندوکتانس مدار (H)	$L_1$
فاصله لوله و سیم‌پیچ (m)	$d$		
چگالی میدان مغناطیسی (T)	$B$		
چگالی میدان مغناطیسی در راستای شعاعی (T)	$B_r$		
چگالی میدان مغناطیسی در راستای محوری (T)	$B_z$		
میدان سیم‌پیچ (T)	$B_0$		
شعاع داخلی لوله (m)	$r_0$		
میدان مغناطیسی حاصل از جریان گردابی (T)	$B_l$		
شعاع داخلی لوله (m)	$a$		
مقدار فاصله مکانی در جهت شعاع لوله (m)	$\Delta r$		
مقدار فاصله مکانی در جهت ارتفاع لوله (m)	$\Delta h$		
تعداد تقسیمات در جهت شعاع	$m$		
تعداد تقسیمات در جهت طول	$n$		
ضخامت لوله (m)	$h_w$		
تغییرات زمان (s)	$\Delta t$		

- by finite element analysis", *Journal of Materials Processing Technology*, 209, pp. 707-713.
- [6] Y. U. Haiping, L. I. Chunfeng, 2009. "Effects of current frequency on electromagnetic tube compression", *Journal of Materials Processing Technology*, 209, No. 2, pp. 1053-1059.
- [7] G. Bartels, W. Schätzing, H. P. Scheibe, M. Leone, 2009. "comparison of two different simulation algorithms for the electromagnetic tube compression", *Int J Mater Form*, 2, pp. 693-696.
- [8] R. Shahrokh, 2012. "Calculating Electromagnetic Force and Simulation of Inward Tube Forming by Electromagnetic Forming", *Master of Science Thesis*, Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology. (In Persian)
- [9] M. Mohamadnia, 2012. " Couple simulation of Tube Electro-magnetic inward forming", *Master of Science Thesis*, Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology. (In Persian)
- [10] M. T. Thompson, 1999. Inductance Calculation Techniques Inductance Calculation Techniques, *online symposium for electrical engineering*.
- [11] A. R. Fallahi, H. Ebrahimi, M. Farzin, 2012. "Numerical and Experimental Investigation of Inward Tube Electromagnetic forming- Electromagnetic Study", *Advanced Materials Research*, 383-390, pp. 6710-6716.
- [12] G. R. Johnson, W. H. Cook, 1983. "A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures", In *Proc. 7th International Symposium on Ballistics*, pp. 541-547.
- [13] C. Xiaohui, M. Jianhua, H. Fei, 2012. "3D Multi-physics field simulation of electromagnetic tube forming", *Int J Adv Manuf Technol*, 59, pp. 521-529.
- [14] B.M. Corbett, 2006. " Numerical simulations of target hole diameters for hypervelocity impacts into elevated and room temperature bumpers", *International Journal of Impact Engineering*, 33, pp. 431-440.
- [15] Wierzbicki T, Bao, Y., Lee, Y.W., Bai, Y., 2005. "Calibration and evaluation of seven fracture models", *International Journal of Mechanical Sciences*, pp. 719-743.
- [16] Wang X, Shi, J, 2013. "Validation of Johnson-Cook plasticity and damage model using impact experiment.", *International Journal of Impact Engineering*, 60.
- فشار مغناطیسی در جهت شعاعی (Pa)  $P_r$
- فشار مغناطیسی در جهت محوری (Pa)  $P_z$
- ثابت ماده  $A$
- ثابت ماده  $B$
- ضریب نرم‌شدگی در دمای بالا  $m$
- ضریب کارسختی  $n$
- ضریب حساسیت به نرخ کرنش  $C$
- دمای لحظه‌ای ( $^{\circ}C$ )  $T$
- دمای تبدیل ( $^{\circ}C$ )  $T_r$
- دمای ذوب ( $^{\circ}C$ )  $T_m$
- لقی بین قالب و لوله (mm)  $c$
- علائم یونانی
- ضریب میرایی مدار  $\tau$
- فرکانس زاویه‌ای  $\omega$
- نسبت مقاومت به اندوکتانس  $\alpha$
- ضریب میراگر  $\gamma$
- نفوذپذیری هوا  $\mu_0$
- نرخ کرنش پلاستیک لحظه‌ای  $\dot{\epsilon}$
- نرخ کرنش پلاستیک مرجع  $\dot{\epsilon}_0$

## ۹- مراجع

- [1] V. Psyk, D. Risch, B. L. Kinsey, A. E. Tekkaya, M. Kleiner, 2011. "Electromagnetic forming—A review", *Journal of Materials Processing Technology*, 211, pp. 787-729.
- [2] N. Takatsu, M. Kato, K. Sato, T. Tobe, 1988. "High speed forming of metal sheets by electromagnetic forces", *International Journal of Japanese Society for Mechanical Engineering*, pp. 142-148.
- [3] G. K. Fenton, G. S. Daehn, 1998. "Modeling of electromagnetically formed sheet metal", *Journal of Materials Processing Technology*, 75, No. 1, pp. 6-16.
- [4] J. P. M. Correia, M. A. Siddiqui, S. B. S. Ahzi, R. Davies, 2008. "A simple model to simulate electromagnetic sheet free bulging process", *International Journal of Mechanical sciences*, pp. 1466-1475.
- [5] Y. U. Haiping, L. I. Chunfeng, D. E. N. G. Jianghua, 2009. "Sequential coupling simulation for electromagnetic-mechanical tube compression