مکانیک سازهها و شارهها/ سال ۱۳۹۵/ دوره ۶/ شماره ۱/ صفحه ۲۹-۴۲

ሐ مبدیکی رویش*ی ککایک س*ازونه و شار

مجله علمى تروبهش مكانيك سازه باو شاره با



شکلدهی الکترومغناطیس ورق با استفاده از شکلدهی به روی پانچ به جای شکلدهی به درون قالب

> اسماعیل عشقی^۱، مهران کدخدایان^{۴.®} ^۱کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد ^۱استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۰/۲۵: تاریخ بازنگری: ۱۳۹۲/۱۰۲/۲۶، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۱/۲۷

چکیدہ

سرعت بالا و عدم کنترل دقیق بر توزیع فشار،شکل دهی الکترومغناطیس ورق به درون قالب را محدود به هندسههای ساده با عمق کم کرده است. میتوان با استفاده از پانچ محدب به جای قالب مقعر عمق بیشتری برای ورق بدست آورد. در این مقاله شکل دهی الکترومغناطیس ورق به روی پانچ محدب و به درون قالب مقعر بررسی شده است. بخش الکترومغناطیس مسئله بصورت تحلیلی و بخش مکانیکی بصورت عددی با کمک نرمافزار آباکوس به روش اجزا محدود حل شده است و برای همبستگی دو بخش مسئله از روش عدم همبستگی استفاده شده است. درستی این روش حل بوسیلهی مقایسهی نتایج بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی مطالعات پیشین درشکل دهی بدون قالب ورق تایید شده است. مادهی انتخابی آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ است که در مطالعات آزمایشگاهی قبلی استفاده شده است. سختشوندگی وابسته به سرعت و مستقل از سرعت برای رفتار مکانیکی ماده در نظر گرفته شده است. روش حل با در نظر گرفتن مدل سختشوندگی مناسب برای ماده نتایج قابل قبولی را ارائه می دهد. برای دستیابی به عمق بیشتر در شکل دهی الکترومغناطیس ورق میتوان از پانچ محدب به جای قالب مقعر استفاده کرد.

كلمات كليدى: شكلدهى سريع؛ شكلدهى الكترومغناطيس؛ پانچ؛ نرخ كرنش.

Sheet EMF using Convex Punch Instead of Concave Die

E. Eshghi¹, and M. Kadkhodayan^{2,*}

¹ MSc Student, Mech. Eng., Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
² Professor, Mech. Eng., Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Abstract

A high speed and the absence of a precise control over pressure distribution have confined the sheet EMF in a die to simple shapes having shallow depths. It is possible to reach a higher depth by applying a convex punch instead of a concave die. In this work, sheet EMF on a punch and sheet EMF in a die are investigated. The electromagnetic part of the work is analytically investigated, and its mechanical part is numerically studied using FEM in the Abaqus software. In order to couple the electromagnetic and mechanical parts, the no-coupling method is used. The results obtained are verified by comparing them with the earlier experimental ones in the literature. Al 1050 is used in this work. The rate-dependent and rate-independent hardenings are taken into consideration for the mechanical behavior of the material. Using an appropriate hardening model for the material yields acceptable results. Furthermore, a convex punch is used instead of a concave die to reach a higher depth in sheet EMF.

Keywords: High Speed Forming; Electromagnetic Forming; Punch; Strain Rate.

* نويسنده مسئول؛ آدرس يست الكترونيك: <u>kadkhoda@um.ac.ir</u>

عشقی و همکاران ۲۰

۱- مقدمه

رفتار مکانیکی مواد در شرایط بارگذاری دینامیکی در مقایسه با شرایط شبهاستاتیک بطور قابل ملاحظهای تغییر میکند. این تغییر رفتار ماده مزیتهایی چون بهبود شکلپذیری و کاهش بازگشتفنری را سبب میشود. این مزایا در فرآیندهای شکلدهی سریع موجود است زیرا شرایط دینامیکی بر مسئله حاکم است. مطالعه و صنعتی کردن تکنیکهای شکلدهی سریع شکلههی حائز اهمیت است و میتواند موضوع بسیاری از تحقیقات در شکلدهی فلزات باشد.

شكلدهي الكترومغناطيس يك فرآيند شكلدهي پالسي یا سریع است که اساس کار، تولید نیروهای لورنتس ' توسط یک میدان مغناطیسی گذرا و شدید روی قطعهکار (با رسانایی الکتریکی بالا) است. میدان مغناطیسی ذکر شده سبب ایجاد جریان گردابی در قطعه کار می شود. این جریان گردابی، میدان مغناطیسی ثانویهای تولید میکند که با میدان مغناطیسی اولیه تعامل میکند و باعث دفع متقابل قطعهکار و کویل میشود. نیروی دافعه به اندازهی کافی بزرگ است تا تنشى بزرگتر از استحكام تسليم ماده اعمال كند و باعث تغيير شكل دايمي قطعه شود. شكلدهي الكترومغناطيس فنآوری نسبتا جدیدی در شکلدهی است. این فرآیند در مقایسه با دیگر فرآیندهای معمول شکلدهی فواید زیادی دارد، بهبود شکلپذیری، کاهش چروکیدگی، کاهش بازگشت فنرى و عدم تماس بين قطعهكار و قالب در طي انجام فرآيند برخی از برتریهای فرآیندشکلدهی الکترومغناطیس نسبت به روشهای معمول شکلدهی است.

فرآیند شکل دهی الکترومغناطیس به دو گروه عمده ی شکل دهی اجزای مدور و شکل دهی ورق مسطح تقسیم بندی می شود. هر چند برخی کاربر دهای دیگر نیز در مطالعات، مانند اتصال 0یا ترکیب با فرآیندهای معمول [7] مشاهده می شود، اما اکثر مطالعات مربوط به همان دو گروه عمده ی مذکور است. تاکنون اکثر مطالعات در زمینه ی شکل دهی اجزای مدور صورت پذیرفته است و تعداد کمتری مربوط به شکل دهی ورق مسطح می شود. به همین دلیل نیاز به

مطالعهی بیشتر در این زمینه محسوس است. در این بخش مروری بر تاریخچهی مطالعات و بطور خاص مطالعات در شكل دهى الكترومغناطيس ورق انجام شده است. كاپيتزا [٣] در سال ۱۹۲۴ اولین کسی بود که از نیروی الکترومغناطیس برای شکل دهی مواد رسانا استفاده کرد. هاروی و براور 0در سال ۱۹۵۸ اولین کسانی بودند که کارهای ابتدایی را در زمينهى توليدات الكترومغناطيس براى فشردن، انبساط و شکلدهی انجام دادند و این تلاشها را تا سال ۱۹۶۹ ادامه دادند. گوبل 0بیان کرد که حل تحلیلی بسته برای شکل دهی الكترومغناطيس ورق وجود ندارد و دليل عمدهى اين امر تغيير شكل قطعهكار است. الحسنى [۶] درشكلدهي الكترومغناطيس ورق رابطهاى تحليلي تقريبي براى محاسبهي فشار ناشی از کویل طراحی شده توسط خودش ارائه داد. تاکاتسو و همکاران [۷] ۱۰ز کویل مارپیچ تخت برای شکلدهی بدون قالب ورق استفاده کردند و نتایج آزمایشگاهی با حل عددی که ارائه دادند همخوانی داشت. ریسچ و همکاران [۸] شکلدهی ورق بدون قالب را بصورت عددی و آزمایشگاهی مطالعه و تغییر برخی پارامترها نظیر انرژی شارژ و هندسه سیمپیچ بر کیفیت شکل پذیری را بررسی کردند. آنها بیان کردند که شکلدهی الكترومغناطيس ورق با قالب در مقايسه با شكل دهى بدون قالب، مشکلات و پیچیدگیهای بیشتری دارد. ایمبرت و همکاران 0شکل پذیری آلیاژهای آلومینیوم AA۵۷۵۴ و AA۶۱۱۱ که در صنعت خودروسازی کاربرد دارند را در فرآيند شكلدهى الكترومغناطيس بصورت آزمايشگاهي بررسی کردند. ایشان برای آزمایش از قالبهای مخروطی ۴۰ و ۴۵ استفاده کردند و نتیجه گرفتند که در شکلدهی الكترومغناطيس، شكل پذيرى اين آلياژها افزايش مىيابد. الیویرا و همکاران [۱۰] شبیهسازی عددی و کار آزمایشگاهی برای شکلدهی آلیاژهای آلومینیوم AA۵۱۸۲ و AA۵۷۵۴ انجام دادند. شبیهسازی و آزمایش برای شکلدهی بدون قالب ورق و همچنین بررسی پرشدن قالب انجام گردید. نوگباوور و همکاران 0در یک بررسی آزمایشگاهی آلیاژ آلومینیوم ۵۱۸۲ AAرا به درون یک قالب مکعب مستطیل شکل دادند و نتایج رابرای تغییر مقدار انرژی شارژ با هم مقایسه کردند. آنها همچنین نشان دادند که اگر مسئله خلاء قالب بدرستی صورت نگیرد هوای محبوس شده از شکل پذیری کامل ورق

¹ Lorentz Force

² Eddy Current

جلوگیری می کند. کریرا و همکاران 0با روش تفاضل محدود بخش الکترومغناطیس شکل دهی الکترومغناطیس ورق را حل و فشار وارد بر ورق را محاسبه کردند. از دادههای تجربی تاکاتسو و همکاران [۷] برای بررسی نتایج حل عددی استفاده کردند. ژو و همکاران [۱۳] رابطهی تقریبی قابل قبولی برای تعیین توزیع فشار مغناطیسی وارد بر ورق در فرآیند شکل دهی الکترومغناطیس ورق ارائه دادند. ژائو و همکاران [۱۴] شکل دهی الکترومغناطیس ورق را بصورت سه ممکاران [۱۴] شکل دهی الکترومغناطیس ورق را بصورت سه آمده از شبیه سازی عددی را با نتایج آزمایشگاهی تاکاتسو و همکاران [۷] مقایسه کردند.

شكلدهى الكترومغناطيس ورق همانطور كه بيان شد هنوز نیاز به مطالعات گستردهتری دارد. با جستجو در میان مقالات مشاهده می شود که اکثر مطالعات در این زمینه مربوط به شکل دهی بدون قالب ورق است و در تعداد معدودی به شکل دهی ورق با قالب پرداخته شده است. شكل دهى الكترومغناطيس ورق به همراه قالب تاكنون محدود به هندسههای ساده با عمق کم بوده است و بدست آوردن عمق بیشتر شکلدهی میتواند یکی از اهداف اصلی مطالعات آینده باشد [۱۱]. در این مطالعه با هدف بدست آوردن عمق بیشتر برای قطعه کار در انتهای فرایند از شکل دهی به روی پانچ محدب بجای شکل دهی به درون قالب مقعر استفاده می شود. فرآیند به دو بخش مسئلهی الکترومغناطیس و مسئلهی مکانیکی تقسیم و از روش بدون همبستگی برای حل استفاده مىشود. قسمت الكترومغناطيس مسئله بصورت تحلیلی و قسمت مکانیکی بصورت عددی حل می شود. از کار آزمایشگاهی تاکاتسو و همکاران [۷] برای بررسی صحت نتايج استفاده مىشود. جنس ورق مشابه مرجع [۷] آلومینیوم ۱۰۵۰ انتخاب شده است. برای رفتار مکانیکی ماده از هر دو مدل سختشوندگی وابسته به نرخ کرنش و سختشوندگی مستقل از نرخ کرنش استفاده میشود و نتایج حاصل از این دو مدل سختشوندگی با هم میشوند. پس از بررسی و تایید روش حل، فرآیند شکلدهی الکترومغناطیس ورق به روی پانچ و شکل دهی ورق به درون قالب مطالعه می شوند. در شکل دهی ورق به روی پانچ و شکل دهی به درون قالب بخاطر شرایط مرزی متفاوت نسبت به شکل دهی بدون قالب، نیاز است که کویل جدید طراحی شود.

۲- بررسی الکترومغناطیس فرایند

برای شکلدهی الکترومغناطیس ورق از کویل مارپیچ مسطح استفاده میشود. فشار مغناطیسی که کویل روی قطعهکار رسانا در مجاورتش تولید میکند از رابطهی زیر به دست میآید [۸]،

عشقی و همکاران

۳١

$$p(r, z, t) = \frac{\mu^{\circ}}{2} B^{2}(r, z, t)$$
(1)

که در این رابطه p فشار مغناطیسی، μ ضریب نفوذپذیری مغناطیسی در خلاء، B میدان مغناطیسی، r راستای شعاعی، z جهت ایجاد تغییر شکل و t زمان است. در روش حل بدون همبستگی برای محاسبهی فشار مغناطیسی وارد به ورق از تغییر شکل قطعهکار صرفنظر میشود. پس میتوان رابطهی (۱) را بصورت زیر بازنویسی کرد،

$$p(r,t) = \frac{\mu^{3}}{2}B^{2}(r,t)$$
(Y)

تغییرات میدان مغناطیسی بر حسب زمان مشابه تغییرات جریان الکتریکی در قطعهکار و مدار تغذیه کویل است. سیستم شکلدهی الکترومغناطیس را میتوان با یک مدار RLC معادل نمایش داد. شکل ۱ مدار CR مربوط به شکلدهی الکترومغناطیس را نشان میدهد که در این شکل مدار RLC سمت چپ مربوط به مدار کویل و بانک خازنی مدار RLC سمت راست نمایندهی قطعهکار است. دستگاه معادله دیفرانسیل حاکم بر این سیستم در زیر آورده شده است 0.



شكل ۱- نمودار RLC معادل براى شكلدهى الكترومغناطيس

$$\begin{cases} L_{1}\frac{d}{dt}i_{1}(t) + \frac{d}{dt}(M.i_{2}(t)) + R_{1}.i_{1}(t) + \frac{1}{c}\int_{0}^{t}i_{1}(t)dt = 0 \\ \frac{d}{dt}(L_{2}.i_{2}(t)) + \frac{d}{dt}(M.i_{1}(t)) + R_{2}.i_{2}(t) = 0 \end{cases}$$
(7)

$$\begin{split} i_1(0) &= 0, i_2(0) = 0, [L_1 \frac{d}{dt} i_1(t)]_{t=0} = V_\circ \\ \end{split}$$
 كه در اين رابطه V_\circ ولتاژ اوليه تخليه است،(1)، و $i_2(t)$ به ترتيب جريان كويل و جريان گردابی القايی در قطعهكار

 R_2 هستند، L_1 و R_1 بترتیب اندوکتانس و مقاومت کویل، L_2 و Mبترتیب اندوکتانس و مقاومت قطعه کار هستند و M اندوکتانس دوجانبه بین دو مدار که نشان دهندهی تعامل مغناطیسی بین کویل و قطعه کار میباشد [۷].

با حل دستگاه معادلات دیفرانسیل (۳) جریان کویل $i_1(t)_1$ و جریان گردابی قطعهکار $i_2(t)$ بدست خواهند آمد. اندوکتانس دوجانبه M و اندوکتانس قطعهکار L₂ با تغییر شکل قطعهکار تغییر میکنند و تغییر شکل نیز شدیدا به M و L₂ وابسته است. این وابستگی دوطرفه حل ریاضی این دستگاه معادله دیفرانسیل را بدون استفاده از روشهای عددی و فرضهای ساده کننده غیر ممکن میکند [1۵]. فرض میشود M و L₂ مقادیری ثابت و مستقل از تغییر شکل قطعهکار هستند. این فرض ساده کننده قسمتی از روش بدون همبستگی است. با این فرض، دستگاه معادله (۳)

$$\begin{split} L_c \frac{d}{dt} i_c(t) + R_c. i_c(t) + \frac{1}{C_c} \int_0^t i_t(t) dt &= 0 \end{split} \tag{$$\$$}$$
با شرایط اولیه:

رابطه (۴)، معادله دیفرانسیل مدار RLC است و پس از حل این رابطه جریان الکتریکی بر حسب زمان بصورت معادله (۵) بدست میآید[۱۷]،

$$i(t) = \frac{V_{\circ}}{\omega L_{c}} e^{-\delta t} \sin(\omega t)$$
 (Δ)

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{L_c C_c} - (\frac{R_c}{2L_c})^2}$$
(%)

در اینجا ∞ فرکانس زاویهایی و δ ضریب میرایی جریان است. با توجه به رابطه (۵) جریان الکتریکی برحسب زمان بصورت سینوسی میرا میشود که نشان دهندهی گذرا بودن جریان و فشار مغناطیسی اعمالی است. میزان نرخ میرایی و فرکانس جریان وابسته به پارامترهای مدار RLC است. با استفاده از پارامترهای الکتریکی تاکاتسو و همکاران [۷] که

در جدول ۱ آورده شده است نمودار تغییرات جریان بر حسب زمان مطابق شکل ۲ بدست میآید که در این نمودار نوسانی بودن و میرایی جریان بر حسب زمان مشخص است.

عشقی و همکاران

۳۲

سو و همکاران[۷]	لكتريكي تاكاتس	ً – پارامترهای ا	جدول ۱
-----------------	----------------	------------------	--------

•••••	• • • • • • • •
مقدار	پارامتر
۲۸.۵ (mΩ)	مقاومت الكتريكى R_c
۲.λ۶ (μΗ)	اندوکتانس کلی L_{c}
۴۰ (µF)	ظرفیت کلی سیستم $C_{\mathbf{c}}$
۶(kV)	ولتاژ اوليه V_0



برای بدست آوردن توزیع فشار مغناطیسی در راستای شعاعی حل تحلیلی ذیل برای نیروی لورنتس حاصل از کویل مارپیج روی ورق قابل استفاده است [۱۳].

$$\begin{split} f_{z} &= -\mu \Big(\frac{\eta N I_{max}}{2\pi h} \Big)^{2} \sqrt{(\alpha\beta)^{2} + \Big(\frac{\alpha}{\beta} \Big)^{2}} \\ &\quad * \ e^{2(\alpha\beta z - \delta t)} \sin(\omega t + \frac{\alpha}{\beta} z \\ &\quad + \theta) \sin(\omega t + \frac{\alpha}{\beta} z) R^{2}(r) \end{split} \tag{Y}$$

$$\theta = \tan^{-1}(\frac{1}{\beta^2}) \tag{(A)}$$

$$\beta = \sqrt{\sqrt{\left(\frac{\psi(r) - \delta\mu\sigma}{\omega\mu\sigma}\right)^2 + 1} + \left(\frac{\psi(r) - \delta\mu\sigma}{\omega\mu\sigma}\right)}$$
(9)

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega\mu\alpha}{2}} \tag{(1.1)}$$

$$\psi(\mathbf{r}) = -\frac{1}{R(\mathbf{r})} \left[\frac{\partial^2 R(\mathbf{r})}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{R(\mathbf{r})}{\partial r} - \frac{1}{r^2} R(\mathbf{r}) \right]$$
(11)

$$R(r) = R_r(r) - R_f(r)$$
(17)

www.SID.ir

¹ Mutual inductance

$$\begin{split} \mathsf{R}_r(r) &= (l_2 - r) ln \left[\frac{(l_2 - r)^2 + h_2^2}{(l_2 - r)^2 + h_1^2} \right] \\ &+ 2h_2 \tan^{-1} \left(\frac{l_2 - r}{h_2} \right) \\ &- 2h_1 \tan^{-1} \left(\frac{l_2 - r}{h_1} \right) - (l_1 \\ &- r) ln \left[\frac{(l_1 - r)^2 + h_2^2}{(l_1 - r)^2 + h_1^2} \right] \\ &- 2h_2 \tan^{-1} \left(\frac{l_1 - r}{h_2} \right) \\ &+ 2h_1 \tan^{-1} \left(\frac{l_1 - r}{h_1} \right) \end{split} \tag{17}$$
 $\\ \mathsf{R}_f(r) &= (l_2 + r) ln \left[\frac{(l_2 + r)^2 + h_2^2}{(l_2 + r)^2 + h_1^2} \right] \\ &+ 2h_2 \tan^{-1} \left(\frac{l_2 + r}{h_1} \right) - (l_1 \\ &+ r) ln \left[\frac{(l_1 + r)^2 + h_2^2}{(l_1 + r)^2 + h_1^2} \right] \\ &- 2h_2 \tan^{-1} \left(\frac{l_1 + r}{h_1} \right) - (l_1 \\ &+ r) ln \left[\frac{(l_1 + r)^2 + h_2^2}{(l_1 + r)^2 + h_1^2} \right] \\ &- 2h_2 \tan^{-1} \left(\frac{l_1 + r}{h_2} \right) \\ &+ 2h_1 \tan^{-1} \left(\frac{l_1 + r}{h_2} \right) \end{aligned} \tag{17}$

که در این معادلات، f_z نیروی لورنتس، θ , η نیروی لورنتس، θ , η (r)، α و R(r)، $R_f(r)$ توابعی میانی میباشند که برای جلوگیری از حجیم شدن بیش از حد معادلات تعریف شدهاند. در اینجا δ ضریب میرایی مدار تخلیه، t زمان، ω مرکانس زاویه ای، μ ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی، I_{max} حداکثر جریان الکتریکی، N تعداد دور سیم پیچ، r معاع، l_2 معاع بیرونی کویل، h و h_1 e_1 معاع h_1 و h_1 و h_1 و h_1 معاع درونی کویل، h و h_1 و h_2 و فاصله کویل از ورق شعاع بیردی می مربوط به ارتفاع کویل و فاصله کویل از ورق هستند که در شکل π نمایش داده شدهاند، σ رسانایی الکتریکی، η ضریب برای جبران خطای ابررسانا فرض کردن ماده و z و است.

باید توجه داشت که توزیع میدان مغناطیسی، نیروی لورنتز و فشار مغناطیسی روی ورق یکسان هستند. با کمک نرمافزار متلب و پارامترهای کار آزمایشگاهی تاکاتسو و همکاران [۷]، توزیع فشار بدست آمده توسط این حل روی آمده توسط ژو در مقابل توزیع فشار تاکاتسو برای مقایسه رسم شدهاند. در جدول ۲ دادههای آزمایش تاکاتسو و همکاران آورده شده است. همانطور که از شکل ۴ مشخص است، حل تحلیلی علیرغم فرضهای ساده کننده زیاد، تقریب خوبی از توزیع فشار مغناطیسی ورق در اختیار قرار میدهد.

عشقی و همکاران ۳۳



 ${f 0}$ شکل ۳- پارامترهای استفاده شده درحل ژو و همکاران



شکل ۴- توزیع فشار تاکاتسو و همکاران [۷] در مقابل توزیع فشار ژو

جدول۲- پارامترهای استفاده شده در مرجع [۱۳]

\mm	h	۴.۱۳*۱۰ ^۳ 1/s	δ
Al ۱۰۵۰	ماده ورق	۹.۳۴*۱۰ [*] rad/s	ω
۴ mm	l,	۳. ۰	η
۳۲ Mm	l _r	۳ mm	ضخامت
۵	Ν	۳۶ MS/m	σ
۲.۹ Mm	h,	rr.fr kA	I _{max}
۳.۹ Mm	h,	۱۷.۵ μs	t

دو عامل میرایی و تغییر شکل باعث حذف تاثیر فشار مغناطیسی از فرآیند میشوند. در روش حل بدون همبستگی از تاثیرات تغییر شکل ورق در محاسبه ی فشار مغناطیسی صرفنظر میشود و این خطای بزرگی در محاسبات وارد می-کند. هاشیموتو و همکاران 0 بیان کردند که فقط اولین سیکل از فشار مغناطیسی سینوسی در فرآیند تاثیرگذار است. شکل ۵شکل تغییرات فشار مغناطیسی [۷] را بر حسب زمان نشان میدهد که با فرکانس جریان الکتریکی میرا میشود و مدت زمان اولین سیکل ۳۵ ۶۹ است. در این مدلسازی مدت زمان اعمال فشار مغناطیسی به ورق μ ۶۲

مکانیک سازهها و شارهها/ سال ۱۳۹۵/ دوره ۶/ شماره ۱

عشقی و همکاران ۲۴

فرآیند و توقف نوسان ورق در نظر گرفته میشود. این زمان ۲۶۷μs بدست آمد.

۳- بررسی مکانیکی فرایند

بررسی مکانیکی بصورت عددی و با روش اجزا محدود به کمک نرم افزار آباکوس انجام می شود. فشار مغناطیسی بدست آمده از حل بخش الکترومغناطیس بعنوان ورودی بخش مکانیکی در نظر گرفته می شود.



۳–۱– مدلسازی هندسی

در این مطالعه از ورق آلومینیوم ۱۰۵۰ بکار برده شده درمرجع 0 استفاده می شود. مشخصات ورق در جدول ۳ آورده شده است. ورق بین دو نگهدارنده با پهنای ۳۰ mm ثابت نگه داشته می شود. شکل ۶ نمودار حساسیت به اندازهی المانهای در مشبندی را نشان میدهد. با تعداد المان ۳۹۶۰۰ میزان تغییر شکل مرکز ورق در انتهای فرآیند ۲۵.۳۶mm است که به اندازهی ۳.۰۵ mm از تغییر شکل بدست آمده برای تعداد المان ۱۶۰۰۰۰ کمتر است که نشان دهنده ۰.۲٪ اختلاف است. با در نظر گرفتن افزایش بسیار زياد زمان حل براى تعداد المان زياد، اين مقدار اختلاف مىتواند قابل قبول باشد. پس براى تحليلها تعداد المان ۳۹۶۰۰ برای یک چهارم در نظر گرفته می شود. شکل مونتاژ شده برای یک چهارم ورق در شکل –الف نشان داده شده است. به دلیل تقارن یک چهارم مسئله مدل شده است. ورق با مش ساختاری المانبندی شده است و شکل -ب یک چهارم ورق را در حالت مش زده شده نشان میدهد.

جدول۳- مشخصات ورق بکار برده شده			
۲۷۵۰ ^{kg} /m³	چگالی	Alı٠۵٠	مادہ
۰/۳۳	ضريب پواسون	۸۰.۷ GPa	مدول يانگ
80 mm	قطر تحت تغيير	110 mm	قطر ورق
00 11111			

0.5 mm

ضخامت

شكل



شکل ۶- حساسیت تغییر نتایج نسبت به اندازهی المانها



شکل ۷- الف) مونتاژ شدهی ورق ونگهدارنده درشکلدهی بدون قالب ورق، ب) مشبندی شدهی یک چهارم ورق

۲-۳- سختشوندگی ماده

فرایندالکترومغناطیس ورق یک فرایند شکلدهی سریع می-باشد و سرعت انجام فرآیندبر سختشوندگی ماده تاثیر میگذارد. با این حال در تحلیلها هم از سختشوندگی وابسته به سرعت و هم مستقل از سرعت استفاده شده است. فنتون و داهن [۱۸] برای سختشوندگی ورق ۱۵-۱۱۱ از مدل ساده شدهی استینبرگ^۱ استفاده کردند. در این مدل از تاثیرات نرخ کرنش بر سختشوندگی ماده چشمپوشی میشود. رابطهی (۱۵) مدل استینبرگ استفاده شده بوسیلهی [۱۸] میباشد. $\sigma = 93(1 + 125\epsilon^{p})^{0.1}$

¹ Simplified Steinberg Model

عشقی و همکاران ۲۵

می گردد. پانچ قطاعی از کره با شعاعی برابر شعاع ورق یعنی ۴۰ mm در نظر گرفته می شود. موقعیت ورق زیر پانچ بگونهای است که نوک پانچ در تماس با مرکز ورق قرار می گیرد و مرکز ورق نسبت به پانچ ثابت می شود. موقعیت قرار گرفتن پانچ و ورق در شکل ۱۰ نمایش داده شده است.







شکل ۱۰- موقعیت قرارگرفتن ورق زیر پانچ در شکلدهی ورق به روی پانچ

با بررسیهای انجام شده مشاهده گردید که کویلهای پیشنهادی پژوهشهای قبلی درشکلدهی ورق به روی پانچ نتایج قابل قبولی ارائه نمیدهند. بنابراین با استفاده از حل تحلیلی کویلهای جدیدی طراحی و با اعمال فشار مغناطیسی ایجاد شده توسط هر کویل نتایج بدست آمده بررسی شدند. با سعی و خطا میتوان پارامترهای کویل مناسب را تعیین کرد. بهترین نتایج برای شکلدهی ورق به روی پانچ را کویلی با مشخصات جدول ۴ با حداکثر فشار تولیدی MPa ۵.۹ بدست میدهد. توزیع فشار تولیدی این کویل به روی ورق در شکل ۱۱ نشان داده شده است. کریرا و همکاران [۱۲] از قانون توانی نوع هولومون وابسته به نرخ کرنش⁽ استفاده کردند که در رابطهی (۱۶) نمایش داده شده است.

 $\sigma = \sigma_{\circ}(\epsilon^{p})^{n} D(\dot{\epsilon}^{p})^{m}$ (۱۶) $m = \sigma_{\circ}(\epsilon^{p})^{n} D \cdot (D = 1.7 \cdot \sigma_{\circ} - 11 \Lambda MPa)$ در این رابطه: $n = 0.77 \cdot \sigma_{\circ} - 11 \Lambda MPa$ و ϵ^{p} در معادلات (۱۵) و (۱۵)، σ تنش موثر، ϵ^{p} کرنش پلاستیک موثر است.

نمودارهای تنش-کرنش این مدلها در شکل ۸ برای نرخ کرنشهای مختلف تا حداکثر نرخ کرنش ۱/s رسم شده است. این مقدار، توسط [۱۸] برای حداکثر نرخ کرنش در شکلدهی الکترومغناطیس ورق تاکاتسو پیشبینی شده است. با بکار بردن این مدلهای سختشوندگی در شبیهسازی، در نهایت مدل مناسب برای ادامهی کار انتخاب خواهد شد.



شکل ۸- مقایسه مدلهای سختشوندگی در نرخ کرنشهای مختلف[۱۲]

در شکل ۹ هندسه نهایی بدست آمده ورق با اعمال دو مدل سختشوندگیهای مختلف و نتایج آزمایشگاهی 0 مقایسه شدهاند. مدل وابسته به نرخ کرنش جوابهای دقیقتری را در اختیار میدهد. نتایج بدست آمده تاثیر نرخ کرنش بر سختشوندگی ماده را نشان میدهد.

۴- شکلدهی الکترومغناطیس ورق به روی پانچ

برای شکلدهی ورق به روی پانچ از آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ به قطر ۸۰ mm و ضخامت ۰.۵ mm استفاده می شود. برای سخت شوندگی از مدل هولومون وابسته به نرخ کرنش استفاده

² Strain Rate Dependent Hollomon-Type Power Law

اعوجاج لبهی ورق و فاصلهی عمودی ورق و پانچ پس از صحیح شکل تکمیل فرآیند دو پارامتری هستند که برای کیفیت شکلدهی ص شکلپذیری ورق به روی پانچ مطالعه میشوند. سه عامل را نتیجه مے میتواند باعث ایجاد فاصله بین ورق و سطح پانچ شود. اولین شده است. ب عامل بازگشت فنری است که به خاطر بازگشت الاستیک بصورت شکل اتفاق میافتد. دومین عامل کوچکتر بودن نیروی روی ورق در زمانهای از حداقل مقدار مورد نیاز برای شکلدهی ورق و سومین فرایند برگش عامل بازگشت ورق پس از برخورد با سطح پانچ بخاطر اعمال می شود.

جدول ۴- پارامترهای کویل مطلوب

برای شکلدهی ورق به روی پانچ

۲۸ mm	شعاع دروني كويل	مس	مادہ
۴۰ mm	شعاع بيروني كويل	۶	تعداددور
۳۶ MS/m	رسانايي الكتريكي	۲mm	گام پیچش





شکل ۱۳ تصویر کانتوری و شکلهای ۱۲ و ۱۴ موقعیت نهایی ورق در راستای شعاعی و راستای محیطی را نشان میدهند. با توجه به شکلها مشخص است که ورق بطور صحیح به روی پانچ شکل داده شده است.

۴-۱- برگشت لبهی ورق در جهت عکس در شکلدهی ورق به روی پانچ

توزیع فشار تاثیر بسیار زیادی بر کیفیت شکل پذیری ورق در شکل دهی الکترومغناطیس به روی پانچ دارد. در حالتی که توزیع فشار نامناسب باشد ممکن است لبهی ورق در انتهای فرایند بطور کامل به روی خودش برگردد. کویل استفاده شده در مرجع [۷] که در شکل دهی بدون قالب، ورق را بطور

صحیح شکل میدهد، در شکلدهی به روی پانچ موفق به شکلدهی صحیح ورق نمیشود و برگشت لبه در جهت عکس را نتیجه میدهد. مشخصات این کویل در جدول ۱ آورده شده است. با اعمال حداکثر فشار MPa تغییر شکل ورق بصورت شکل ۱۶ بدست میآید. در این شکل موقعیت ورق در زمانهای مختلف فرایند نشان داده شده است و در انتهای فرایند برگشت کامل لبهی ورق به روی خودش مشاهده میشود.

عشقی و همکاران

38



شکل ۱۲- موقعیت ورق نسبت به سطح پانچ در راستای شعاعی



شکل ۱۳- تصویر نهایی شکلدهی ورق به روی پانچ



درصفحهي افقي

۴-۲- تاریخچه تغییرشکل ورق در شکلدهی ورق به روی پانچ

شکل دهی ورق به روی پانچ بر حسب زمان در شکل ۱۵ نمایش داده شده است. نحوه ی حرکت ورق از شروع تا پایان فرآیند بصورت موج است که مشابه شکل دهی بدون قالب و شکل دهی ورق به درون قالب است. این نوع تغییر شکل ورق ناشی از نحوه ی منحصر بفرد بار گذاری در فرآیند شکل دهی الکترومغناطیس ورق است. در ابتدا قسمتهایی که تحت فشار قرار دارند تغییر شکل مییابند و بعد از آن قسمتهای فشار قرار دارند تغییر شکل مییابند و بعد از آن قسمتهای میشوند. تاثیر نیروی کشش و اینرسی دچار تغییر شکل می مشوند و در این زمان حداکثر مقدار تغییر شکل ورق به میزان mm ۵ یعنی تنها حدود ۲۰٪ از حداکثر ارتفاع نهایی ورق است. بقیه ی فرآیند را نیروی اینرسی ورق تکمیل میکند که به درستی مبین نقش تعیین کننده ی نیروی اینرسی در تکمیل فرآیند است.

۴–۳– شکل پذیری ورق در شکل دهی ورق به روی پانچ حداکثر اندازه سرعت در لبه ی ورق ۳/۸ و برای شعاع ۲۰mm برابر ۸۰ m/۶ است. مشخص است که پس از برخورد این قسمت با سطح پانچ سرعت ناگهان کاهش می یابد و در کمتر از ۳۵ ۲۰ به صفر می رسد. شکل تغییرات ضخامت در راستای شعاع را نشان می دهد. کمترین ضخامت ۹۶٪ ضخامت اولیه است که در مجاورت مرکز ورق اتفاق می افتد. کاهش ضخامت در اینجا نسبت به شکل دهی بدون قالب (کاهش ضخامت ۸۸٪ بود) کمتر است.



عشقي و همكاران

۳۷

درشكلدهي الكترومغناطيس

ضخامت از مرکز به سمت لبه به تدریج افزایش مییابد و در لبه به اندازهmm ۰.۰۱ افزایش مییابد. این افزایش ضخامت به معنای وجود مادهی اضافی در لبهی ورق نسبت به سطح پانچ است که باعث ایجاد اعوجاج در لبهی ورق میشود.

تغییرات مولفههای کرنش پلاستیک بر حسب زمان در شکل ۱۹ برای دو نقطه روی سطح بالایی و پایینی لبهی ورق رسم شدهاند. در این شکل r_1^p مولفهی شعاعی، r_2^s مولفهی محیطی و r_3^a مولفهی محوری (راستای ضخامت) هستند. r_1^a و r_3^a تقریبا با هم برابرند. مقدار مثبت مولفهی محوری به معنای افزایش ضخامت ورق در لبه است. اندازهی محوری کرنش پلاستیک در لبهی ورق منفی است. اندازهی کرنش پلاستیک در سطح بالایی که در تماس با پانچ است، بیشتر از سطح پایینی ورق است.



شکل ۱۶- برگشت لبهی ورق درشکلدهی به روی پانچ، الف) موقعیت ورق در طی زمان، ب) شکل نهایی ورق



⁴^{3ء} طع بلایو رزن (_(μs) ¹ عطع بلایو رزن شکل ۱۹– تغییرات کرنش پلاستیک بر حسب زمان در لبهی ورق برای شکلدهی ورق به روی پانچ

مولفه شعاعی کرنش پلاستیک برای تمامی شعاعها مثبت است ولی شکلهای ۲۰ و ۲۱ نشان میدهند که مولفههای محیطی و محوری برای برخی شعاعها مثبت و در برخی منفی هستند. در شعاعهای نزدیک به مرکز ورق در دو r_3^p منفی است. به عبارت دیگر، در نزدیکی مرکز ورق در دو جهت شعاعی و محیطی ورق تحت کشش است و این سبب

عشقی و همکاران ۲۸

کم شدن ضخامت میشود. با افزایش شعاع، کشش در جهت محیطی به فشار تبدیل میشود و ²ع منفی میشود. در نزدیکی لبه مقدار منفی ²²ع به اندازهای بزرگ میشود که باعث افزایش ضخامت ورق میشود. شکل ۲۱ نشان میدهد که در مجاورت لبه ²3 مثبت است و ضخامت ورق افزایش یافته است.







شکل ۲۱– مولفهی محوری کرنش پلاستیک برحسب زمان برای سطح بالایی ورق در شعاعهای مختلف

۵- شکلدهی الکترومغناطیس ورق به درون قالب کروی

یکی از اهداف مطالعه جاری دستیابی به عمق نهایی بیشتر قطعهکار توسط شکلدهی به روی پانچ به جای شکلدهی به درون قالب است. برای اینکه بتوان نسبت عمق را مقایسه کرد پارامتری به نام نسبت عمق به قطر برای قالب بصورت معق قلل معمق قالب تعریف میشود. ریسچ و همکاران [۸] موفق به شکلدهی ورق به درون قالبی کروی با نسبت عمق به قطر ۰۰۶۶ شدند. در این مطالعه نسبت عمق به قطرهای مختلف برای ورق آلومینیوم ۱۰۵۰ با ضخامت mm ۵۰ بررسی شد و ۳٩

عشقی و همکاران

مکانیک سازهها و شارهها/ سال ۱۳۹۵/ دوره ۶/ شماره ۱

حداکثر نسبت عمق به قطر به دست آمده برابر با حداکثر نسبت عمق به قطر قابل دستیابی در شکلدهی به درون قالب برابر با ۰.۱۱ بدست آمد. حداکثر تلرانس بین هندسه ی نهایی ایدهال و هندسه ینهایی بدست آمده برابر با ۵.۳ ش میباشد که ۲۵.۵٪ ارتفاع قالب است. برای هر نسبت عمق به قطر نیاز به طراحی کویلی خاص است. برای شکلدهی ورق به درون قالب با نسبت عمق به قطر ۰.۱۱ قالب باید قطاعی از کره به قطر mm ۱۲۸ و دارای ارتفاع mm ۱۴ باشد. برای شکلدهی ورق به درون این قالب کویلی با مشخصات جدول شکلدهی ورق به درون این قالب کویلی با مشخصات جدول در اختیار قرار میدهد. حداکثر فشار بهینه برای شکلدهی به درون این قالب MP است. با اعمال این توزیع فشار درون این قالب ۲۵ مال به صورت شکل می بدست میآید.

جدول ۵- مشخصات کویل مناسب برای

شکلدهی ورق به درون قالب

۲۵ mm	شعاع دروني كويل	مس	مادہ
۳۷ mm	شعاع بيروني كويل	۵	تعداد دور
۳۶ S/m	رسانايي الكتريكي	۲.۵ mm	گام پیچش

۶- تاثیر توزیع فشار بر چگونگی و کیفیت تغییر شکل ورق

شکل ۲۴ تاریخچهی تغییر شکل ورق به درون قالب با نسبت عمق به قطر ۲۰۱۱ توسط کویل تاکاتسو، کویل (۵) و کویلی با شعاع درونی ۳۵ ۳۳ و شعاع بیرونی ۴۰ ۳۳ را نشان میدهد. شکل ۲۴-الف نتایج حاصل از شکلدهی توسط کویل تاکاتسو را نشان میدهد. توزیع فشار تولیدی توسط کویل تاکاتسو به گونهای است که حداکثر فشار در شعاع کویل تاکاتسو به گونهای است که حداکثر فشار در شعاع قالب تماس پیدا نمیکند. حداکثر فشار ۳۹۸ ۲۰ انتخاب شده است. مرکز ورق پس از برخورد به بالای قالب به سمت پایین برگشته است که نشان میدهد نیرو برای شکلدهی به اندازهی کافی بزرگ است. افزایش بیشتر فشار باعث برگشت بیشتر مرکز ورق پس از برخورد به بالای قالب میشود و اندازهی فشار باعث افزایش فاصلهی ورق از دیوارهی قالب میشود.



شکل-ب نتایج حاصل از شکلدهی توسط کویلی با شعاع داخلی mm و شعاع بیرونی ۴۰ mm را نشان میدهد. محل اعمال حداکثر فشار تولید شده توسط این کویل در شعاع mm و حداکثر فشار بهینه برای این فرآیند ۲۱.۵MPa است. با استفاده از این کویل انحنای دیوارهی قالب بطور صحيح پر مي شود ولي مركز ورق بطور صحيح به سمت بالا حركت نمى كند. با اعمال فشار حاصل از كويل تاکاتسو که حداکثر فشار در شعاع ۲۰ mm به ورق وارد می شود انحنای دیوارهی قالب پر نمی شود ولی مرکز ورق بطور صحیح به سمت بالا حرکت میکند. برای حالتی که حداکثر فشار در شعاع mm ۳۵ به ورق وارد می شود انحنای ديواره قالب بطور صحيح پر مىشود ولى مركز ورق بطور صحيح شكل نمى پذيرد. اين نشان مىدهد كه توزيع فشار تاثیر بسیار زیادی بر کیفیت و چگونگی تغییر شکل دارد. اگر فشار تولیدی از فاصله ای معین به مرکز نزدیکتر باشد انحنای دیوارهی قالب پر نمی شود و در مقابل اگر این فاصله زیاد شود مرکز ورق به درستی شکل نمی پذیرد.

عشقی و همکاران ۴۰

شکل۲۹پ شکلدهی توسط کویل جدول ۵ را نشان بدست میدهد. حداکثر فشار این کویل در شعاع ۳۰ ۳۰ به ورق بیشتر وارد میشود. با اعمال این توزیع فشار با حداکثر مقدار بهینه است. د ورق بطور صحیح در مرکز و دیواره به درون قالب شکل داده برابری آ میشود. با بررسیهایی که صورت گرفت بیشترین نسبت ممق به قطر قابل دستیابی در شکلدهی به درون قالب ۲۰۱۰ پارامتره بدست آمد. برای این نسبت عمق به قطر، ارتفاع قالب بدست آمد. برای این نسبت عمق به قطر، ارتفاع قالب بدست آمد. برای این نسبت مق به قطر، ارتفاع قالب وجود نه ورق به روی پانچ کروی به قطر ۳۰ شکل داده شد و بهتری و

بدست آمده در شکل دهی به روی پانچ ۲۰.۵ است که ۲۷٪ بیشتر از نسبت بدست آمده در شکل دهی به درون قالب است. در شکل دهی به روی پانچ با وجود افزایش بیش از دو برابری نسبت عمق به قطر، حداکثر تلرانس بین ورق و پانچ برابری نسبت عمق به قطر، حداکثر تلرانس بین ورق و پانچ پارامترها برای شکل دهی به درون قالب برای نسبت ۱۱.۱ به ترتیب ۲۶۳۰۳ و ۲۰۲۳ هستند. ملاحظه می شود با وجود نسبت عمق به قطر بیشتر شکل دهی به روی پانچ نتایج بهتری را در اختیار قرار می دهد.



شکل۲۴– تاریخچهی تغییرشکل ورق به درون قالب با نسبت عمق به قطر ۰/۱۱، الف) شکلدهی با استفاده از کویل [۷]، ب) شکلدهی باکویلی باشعاع درونی ۳۵ mm وشعاع بیرونی ۳۵ ۴۰ س) شکلدهی با استفاده از کویل جدول ۵

41	و همکاران	عشقى
----	-----------	------

aluminum alloys. Ph.D. Dissertation. The Ohio State University, Columbus, Ohio.

- [3] Kapitza PL (1924) A method for producing strong magnetic fields. P Roy Soc Edinb A 105: 691–710.
- [4] Harvey GW, Brower DF (1958) Metal forming device and method. US-Patent Nr. 2976907.
- [5] Gobl N (1969)Elektromagnetische umformversuche mit flachspulen. In DrittesKolloquium uber Grundlagen der elektrischen Hochgeschwindigkeitsbearbeitung. Berlin 78-94.
- [6] Al-Hassani STS (1975) Magnetic pressure distributions in sheet metal forming. In Proceedings of the Conference on Electrical Methods of Machining, Forming and Coating, London 1–10.
- [7] Takatsu N, Kato M, Sato K, Tobe T (1988) High speed forming of metal sheets by electromagnetic force. JSME Int J A-Mech M 31(1): 142-148.
- [8] Risch D, Beerwald C, Brosius A, Kleiner M (2004) On the significance of the die design for the electromagnetic sheet metal forming. In Proceedings of the First International Conference on High speed Forming, Dortmund 191–200.
- [9] Imbert J, Winkler SL, Worswick M, Golovashchenko S (2004) Formabilityand damage in electromagnetically formed AA5754 and AA6111. In Proceedings of the First International Conference on High speed Forming, Dortmund 201–210.
- [10] Oliveira DA, Worswick MJ, Finn M, Newman D (2005) Electromagnetic formingof aluminum alloy sheet: free-form and cavity fill experiments and model. J Mater Process Tech 170: 350–362.
- [11] Neugebauer R, Loschmann F, Putz M, Koch T, Laux G (2006) A productionoriented approach in electromagnetic forming of metal sheets. In Proceedingsof the Second International Conference on High Speed Forming, Dortmund 129–139.
- [12] Correia JPM, Siddiqui MA, Ahzi S, Belouettar S, Davies R (2008) A simple model to simulate electromagnetic sheet free bulging process. Int J Mech Sci 50:1466–1475.
- [13] Xu D, Liu X, Fang K, Fang H (2010) Calculation of electromagnetic force in electromagnetic forming process of metal sheet. J Appl Phys 107-124907.
- [14] Xiao-hui C, Jian-hua M, Ying Z (2012) 3D modeling and deformation analysis for electromagnetic sheet forming process. T Nonferr Metal Soc 164-169.
- [15] Abdelhafeez AM, Nemat-Alla MM, El-Sebaie MG (2012) Finite element analysis of electromagnetic bulging of sheet metals. IJSER 3(2): 180-186.

مکانیک سازهها و شارهها/ سال ۱۳۹۵/ دوره ۶/ شماره ۱

۷- نتیجهگیری

- شبیه سازی دقیق با روش همبستگی قوی فرآیند شکل دهی الکترومغناطیس ورق، کاری دشوار و انجام یک شبیه سازی دقیق بسیار زمان بر خواهد بود. در این مطالعه نشان داده شد که با در نظر گرفتن فرض های مطالعه نشان داده شد که با در نظر گرفتن فرض های معناطیسی، روش بدون همبستگی نیز نتایج قابل قبولی را بدست می دهد.
- با مطالعه ینتایج حاصل از مدلهای سخت شوندگی وابسته به سرعت و مستقل از سرعت در شکل دهی الکترومغناطیس ورق آلومینیومی، نتیجه شد که سرعت تغییر شکل ورق در این فرآیند بزرگ است و نرخ کرنش بر رفتار مکانیکی آلومینیوم تاثیر می گذارد.
- استفاده از شکل دهی الکترومغناطیس ورق به روی پانچ محدب بجای شکل دهی الکترومغناطیس ورق به درون قالب مقعر،عمق شکل دهی را بطور قابل ملاحظه ای افزایش خواهد داد. دلایل عمده ای که از پر شدن صحیح قالب توسط ورق جلوگیری می کنند شامل جذب انرژی جنبشی ورق توسط دیوارههای قالب و بجذب انرژی جنبشی ورق است. در شکل دهی به روی پانچ چون مرکز ورق ثابت و لبهی آن آزاد است، قبل از جذب کامل انرژی جنبشی ورق توسط دیوارهها، دستیابی به شکل دهی صحیح در عمق های بیشتر امکان پذیر است.
- در شکلدهی به درون قالب، توزیع فشار تاثیر بسیار زیادی بر کیفیت و چگونگی تغییر شکل ورق دارد. اگر فشار تولیدی از فاصلهای معین به مرکز نزدیکتر باشد انحنای دیوارهی قالب کامل نمی شود و در مقابل اگر این فاصله زیاد شود مرکز ورق به درستی شکل نمی پذیرد. برای شکل دهی صحیح ورق به درون قالب اعمال توزیع فشار مناسبی مورد نیاز است.

۸- مراجع

- [1] Park YB, Kim HY,Oh SI (2005) Design of axial torque joint made by electromagnetic forming. Thin Wall Struct 43: 826-844.
- [2] Vohnout VJ (1998) A hybrid quasi-static/dynamic process for forming large sheet metal parts from

Archive	of	SID
1 21 01001 0	~./	~~~

47	عشقی و همکاران	مکانیک سازهها و شارهها/ سال ۱۳۹۵/ دوره ۶/ شماره ۱

- [17] Serway RA (1990) Physics for scientists and engineers with modern physics. 3rd edn. Saunders College Publishing, Toronto.
- [18] Fenton GK, Daehn GS (1998) Modeling of electromagnetically formed sheet metal. J Mater Process Tech 75: 6-16.
- [16] Hashimoto Y, Hideki H, Miki S, Hideaki N (1999) Local deformation and buckling of a cylindrical Al tube under magnetic impulsive pressure. J Mater Process Tech 85: 209-212.