



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

اسماعیل عشقی^۱، مهران کدخدایان^{۲*}

ا'کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

آستاذ، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۰/۲۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۳/۰۴/۰۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۲۷

چکیده

سرعت بالا و عدم کنترل دقیق بر توزیع فشار، شکل‌دهی 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 شکل‌دهی 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 در شکل‌دهی بدون قالب ورق تایید شده است. ماده‌ی انتخابی آلایژ 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 می‌دهد. برای دستیابی به عمق بیشتر در شکل‌دهی الکترومغناطیس ورق می‌توان از پانچ محدب به جای قالب مقعر استفاده کرد.

کلمات کلیدی: شکل‌دهی سریع؛ شکل‌دهی الکترومغناطیس؛ پانچ؛ نرخ کرنش.

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.

* نویسنده مسئول؛

آدرس پست الکترونیک: kadkhoda@um.ac.ir

۱- مقدمه

رفتار مکانیکی مواد در شرایط بارگذاری دینامیکی در مقایسه با شرایط شبه‌استاتیکی بطور قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کند. این تغییر رفتار ماده مزیت‌هایی چون بهبود شکل‌پذیری و کاهش بازگشت‌فتری 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 شکل‌دهی حائز اهمیت است و می‌تواند موضوع بسیاری از تحقیقات در شکل‌دهی فلزات باشد.

شکل‌دهی الکترومغناطیس یک فرآیند شکل‌دهی پالسی یا سریع است که اساس کار، تولید نیروهای لورنتس^۱ توسط یک میدان مغناطیسی گذرا و شدید روی قطعه‌کار (با رسانایی الکتریکی بالا) است. میدان مغناطیسی ذکر شده سبب ایجاد جریان گردابی^۲ در قطعه‌کار می‌شود. این جریان گردابی، میدان مغناطیسی ثانویه‌ای تولید می‌کند که با میدان مغناطیسی اولیه تعامل می‌کند و باعث دفع متقابل قطعه‌کار و کوئل می‌شود. نیروی دافعه به اندازه‌ی کافی بزرگ است تا تنشی بزرگتر از استحکام تسلیم ماده اعمال کند و باعث تغییر شکل دائمی قطعه شود. شکل‌دهی الکترومغناطیس فن‌آوری نسبتاً جدیدی در شکل‌دهی است. این فرآیند در مقایسه با دیگر فرآیندهای معمول شکل‌دهی فواید زیادی دارد، بهبود شکل‌پذیری، کاهش چروکیدگی، کاهش بازگشت فتری و عدم تماس بین قطعه‌کار و قالب در طی انجام فرآیند برخی از برتری‌های فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیس نسبت به روش‌های معمول شکل‌دهی است.

فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیس به دو گروه عمده‌ی شکل‌دهی اجزای مدور و شکل‌دهی ورق مسطح تقسیم‌بندی می‌شود. هر چند برخی کاربردهای دیگر نیز در مطالعات، مانند اتصال 0 یا ترکیب با فرآیندهای معمول [۲] مشاهده می‌شود، اما اکثر مطالعات مربوط به همان دو گروه عمده‌ی مذکور است. تاکنون اکثر مطالعات در زمینه‌ی شکل‌دهی اجزای مدور صورت پذیرفته است و تعداد کمتری مربوط به شکل‌دهی ورق مسطح می‌شود. به همین دلیل نیاز به

مطالعه‌ی بیشتر در این زمینه محسوس است. در این بخش مروری بر تاریخچه‌ی مطالعات و بطور خاص مطالعات در شکل‌دهی الکترومغناطیس ورق انجام شده است. کاپیتزا [۳] در سال ۱۹۲۴ اولین کسی بود که از نیروی الکترومغناطیس برای شکل‌دهی مواد رسانا استفاده کرد. هاروی و براور در سال ۱۹۵۸ اولین کسانی بودند که کارهای ابتدایی را در زمینه‌ی تولیدات الکترومغناطیس برای فشردن، انبساط و شکل‌دهی انجام دادند و این تلاش‌ها را تا سال ۱۹۶۹ ادامه دادند. گوئل (بیان کرد که حل تحلیلی بسته برای شکل‌دهی الکترومغناطیس ورق وجود ندارد و دلیل عمده‌ی این امر تغییر شکل قطعه‌کار است. الحسینی [۶] در شکل‌دهی الکترومغناطیس ورق رابطه‌ای تحلیلی تقریبی برای محاسبه‌ی فشار ناشی از کوئل طراحی شده توسط خودش ارائه داد. تاکاتسو و همکاران [۷] از کوئل مارپیچ تخت برای شکل‌دهی بدون قالب ورق استفاده کردند و نتایج آزمایشگاهی با حل عددی که ارائه دادند همخوانی داشت. ریسیج 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 شکل‌پذیری را بررسی کردند. آن‌ها بیان کردند که شکل‌دهی الکترومغناطیس ورق با قالب در مقایسه با شکل‌دهی بدون قالب، مشکلات و پیچیدگی‌های بیشتری دارد. ایمبرت و همکاران [۹] شکل‌پذیری آلیاژهای آلومینیوم AA۵۷۵۴ و AA۶۱۱۱ که در صنعت خودروسازی کاربرد دارند را در فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیس بصورت آزمایشگاهی بررسی کردند. ایشان برای آزمایش از قالب‌های مخروطی ۴۰ و ۴۵ استفاده کردند و نتیجه گرفتند که در شکل‌دهی الکترومغناطیس، شکل‌پذیری این آلیاژها افزایش می‌یابد. الیویرا و همکاران [۱۰] شبیه‌سازی عددی و کار آزمایشگاهی برای شکل‌دهی آلیاژهای آلومینیوم AA۵۷۵۴ و AA۵۱۸۲ انجام دادند. شبیه‌سازی و آزمایش برای شکل‌دهی بدون قالب ورق و همچنین بررسی پرشدن قالب انجام گردید. نوگباور و همکاران [۱۱] در یک بررسی آزمایشگاهی آلیاژ آلومینیوم ۵۱۸۲ AA را به درون یک قالب مکعب مستطیل شکل دادند و نتایج را برای تغییر مقدار انرژی شارژ با هم مقایسه کردند. آن‌ها همچنین نشان دادند که اگر مسئله خلاء قالب بدرستی صورت نگیرد هوای محبوس شده از شکل‌پذیری کامل ورق

¹ Lorentz Force² Eddy Current

۲- بررسی الکترومغناطیس فرایند

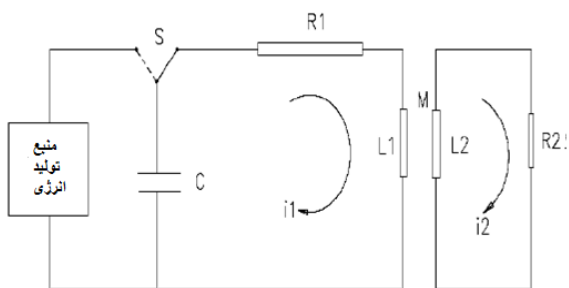
برای شکل‌دهی الکترومغناطیس ورق از کوئل مارپیچ مسطح استفاده می‌شود. فشار مغناطیسی که کوئل روی قطعه‌کار رسانا در مجاورتش تولید می‌کند از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید [۸].

$$p(r, z, t) = \frac{\mu_0}{2} B^2(r, z, t) \quad (1)$$

که در این رابطه p فشار مغناطیسی، μ_0 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،

$$p(r, t) = \frac{\mu_0}{2} B^2(r, t) \quad (2)$$

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



شکل ۱- نمودار RLC معادل برای شکل‌دهی الکترومغناطیس

$$\begin{cases} L_1 \frac{d}{dt} i_1(t) + \frac{d}{dt} (M \cdot i_2(t)) + R_1 \cdot i_1(t) + \frac{1}{C} \int_0^t i_1(t) dt = 0 \\ \frac{d}{dt} (L_2 \cdot i_2(t)) + \frac{d}{dt} (M \cdot i_1(t)) + R_2 \cdot i_2(t) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

با شرایط اولیه:

$$i_1(0) = 0, i_2(0) = 0, [L_1 \frac{d}{dt} i_1(t)]_{t=0} = V_0$$

که در این رابطه V_0 ولتاژ اولیه تخلیه است، $i_1(t)$ و $i_2(t)$ به ترتیب جریان کوئل و جریان گردابی القایی در قطعه‌کار

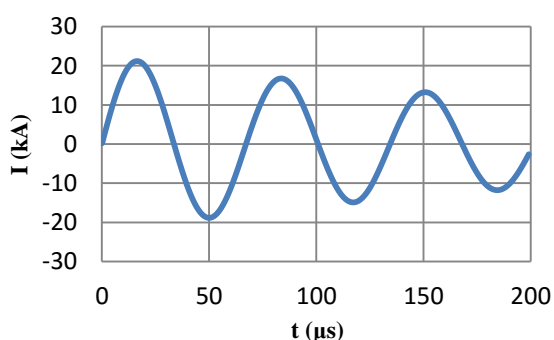
جلوگیری می‌کند. کریرا و همکاران 0 با روش تفاضل محدود بخش الکترومغناطیس شکل‌دهی الکترومغناطیس ورق را حل و فشار وارد بر ورق را محاسبه کردند. از داده‌های تجربی تاکاتسو و همکاران [۷] برای بررسی نتایج حل عددی استفاده کردند. ژو و همکاران [۱۳] رابطه‌ی تقریبی قابل قبولی برای تعیین توزیع فشار مغناطیسی وارد بر ورق در فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیس ورق ارائه دادند. ژائو و همکاران [۱۴] شکل‌دهی الکترومغناطیس ورق را بصورت سه بعدی و با همبستگی قوی شبیه‌سازی کردند و نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی عددی را با نتایج آزمایشگاهی تاکاتسو و همکاران [۷] مقایسه کردند.

شکل‌دهی الکترومغناطیس ورق همانطور که بیان شد هنوز نیاز به مطالعات گسترده‌تری دارد. با جستجو در میان مقالات مشاهده می‌شود که اکثر مطالعات در این زمینه مربوط به شکل‌دهی بدون قالب ورق است و در تعداد معدودی به شکل‌دهی ورق با قالب پرداخته شده است. شکل‌دهی الکترومغناطیس ورق به همراه قالب تاکنون 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 قطعه‌کار در انتهای فرایند از شکل‌دهی به روی پانچ محدب بجای شکل‌دهی به درون قالب مقعر استفاده می‌شود. فرآیند به دو بخش مسئله‌ی الکترومغناطیس و مسئله‌ی مکانیکی تقسیم و از روش بدون همبستگی برای حل استفاده می‌شود. قسمت الکترومغناطیس مسئله بصورت تحلیلی و قسمت مکانیکی بصورت عددی حل می‌شود. از کار آزمایشگاهی تاکاتسو و همکاران [۷] برای بررسی صحت نتایج استفاده می‌شود. 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 شکل‌دهی ورق به درون قالب مطالعه می‌شوند. در شکل‌دهی ورق به روی پانچ و شکل‌دهی به درون قالب بخاطر شرایط مرزی متفاوت نسبت به شکل‌دهی بدون قالب، نیاز است که کوئل جدید طراحی شود.

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.

جدول ۱- پارامترهای الکتریکی تاکاتسو و همکاران [۷]

پارامتر	مقدار
مقاومت الکتریکی R_C	۲۸.۵ (mΩ)
اندوکتانس کلی L_C	۲.۸۶ (μH)
ظرفیت کلی سیستم C_C	۴۰ (μF)
ولتاژ اولیه V_0	۶ (kV)



شکل ۲- تغییرات جریان الکتریکی بر حسب زمان

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

$$f_z = -\mu \left(\frac{\eta N I_{\max}}{2\pi h} \right)^2 \sqrt{(\alpha\beta)^2 + \left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^2} * e^{2(\alpha\beta z - \delta t)} \sin(\omega t + \frac{\alpha}{\beta} z + \theta) \sin(\omega t + \frac{\alpha}{\beta} z) R^2(r) \quad (7)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{1}{\beta^2} \right) \quad (8)$$

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

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega\mu\alpha}{2}} \quad (10)$$

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

$$R(r) = R_r(r) - R_f(r) \quad (12)$$

هستند، R_1 و L_1 بترتیب اندوکتانس و مقاومت کویل، R_2 و L_2 بترتیب اندوکتانس و مقاومت قطعه کار هستند و M اندوکتانس دوجانبه^۱ بین دو مدار که نشان دهنده‌ی تعامل مغناطیسی بین کویل و قطعه کار می‌باشد [۷].

با حل دستگاه معادلات دیفرانسیل (۳) جریان کویل $i_1(t)$ و جریان گردابی قطعه کار $i_2(t)$ بدست خواهند آمد. اندوکتانس دوجانبه M و اندوکتانس قطعه کار L_2 با تغییر شکل قطعه کار تغییر می‌کنند و تغییر شکل نیز شدیداً به M و L_2 وابسته است. این وابستگی دوطرفه حل ریاضی این دستگاه معادله دیفرانسیل را بدون استفاده از روش‌های عددی و فرض‌های ساده کننده غیر ممکن می‌کند [۱۵]. فرض می‌شود M و L_2 مقادیری ثابت و مستقل از تغییر شکل قطعه کار هستند. این فرض ساده کننده قسمتی از روش بدون همبستگی است. با این فرض، دستگاه معادله (۳) به صورت رابطه (۴) کاهش می‌یابد [۱۶].

$$L_C \frac{d}{dt} i_C(t) + R_C \cdot i_C(t) + \frac{1}{C_C} \int_0^t i_t(t) dt = 0 \quad (4)$$

با شرایط اولیه:

$$i_C(0) = 0, [L_C \frac{d}{dt} i_C(t)]_{t=0} = V_0$$

که در این رابطه L_C اندوکتانس کلی، R_C مقاومت الکتریکی کلی سیستم، C_C ظرفیت کلی سیستم، $i_C(t)$ جریان کویل و V_0 ولتاژ تخلیه اولیه از بانک خازن هستند.

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

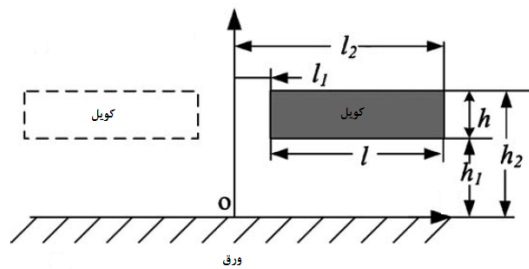
$$i(t) = \frac{V_0}{\omega L_C} e^{-\delta t} \sin(\omega t) \quad (5)$$

که

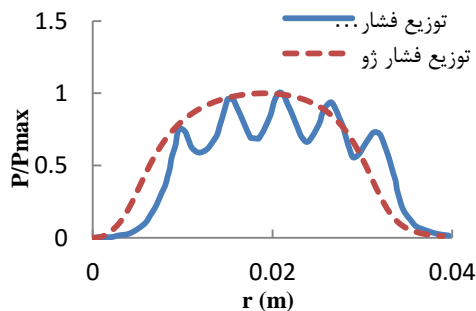
$$\omega = \sqrt{\frac{1}{L_C C_C} - \left(\frac{R_C}{2L_C}\right)^2} \quad (6)$$

در اینجا ω فرکانس زاویه‌ای و δ ضریب میرایی جریان است. با توجه به رابطه (۵) جریان الکتریکی بر حسب 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

¹ Mutual inductance



شکل ۳- پارامترهای استفاده شده در حل ژو و همکاران [۷]



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

جدول ۲- پارامترهای استفاده شده در مرجع [۱۳]

۱mm	h	4.13×10^{-3} 1/s	δ
Al ۱۰۵۰	ماده ورق	9.34×10^{-4} rad/s	ω
۴ mm	l_1	۰.۳	η
۳۲ Mm	l_2	۳ mm	ضخامت
δ	N	۳۶ MS/m	σ
۲.۹ Mm	h_1	۲۲.۴۲ kA	I_{max}
۳.۹ Mm	h_2	۱۷.۵ μ s	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 محاسبه‌ی فشار مغناطیسی صرف نظر می‌شود و این خطای بزرگی در محاسبات وارد می‌کند. هاشیموتو و همکاران [۷] بیان کردند که فقط اولین سیکل از فشار مغناطیسی سینوسی در فرآیند تاثیرگذار است. شکل ۵ شکل تغییرات فشار مغناطیسی [۷] را بر حسب زمان نشان می‌دهد که با فرکانس جریان الکتریکی میرا می‌شود و مدت زمان اولین سیکل ۶۷ μ s است. در این مدل سازی مدت زمان اعمال فشار مغناطیسی به ورق ۶۷ μ s و زمان کل فرایند برابر با حداقل زمان لازم برای تکمیل

$$R_r(r) = (l_2 - r) \ln \left[\frac{(l_2 - r)^2 + h_2^2}{(l_2 - r)^2 + h_1^2} \right] + 2h_2 \tan^{-1} \left(\frac{l_2 - r}{h_2} \right) - 2h_1 \tan^{-1} \left(\frac{l_2 - r}{h_1} \right) - (l_1 - r) \ln \left[\frac{(l_1 - r)^2 + h_2^2}{(l_1 - r)^2 + h_1^2} \right] - 2h_2 \tan^{-1} \left(\frac{l_1 - r}{h_2} \right) + 2h_1 \tan^{-1} \left(\frac{l_1 - r}{h_1} \right) \quad (13)$$

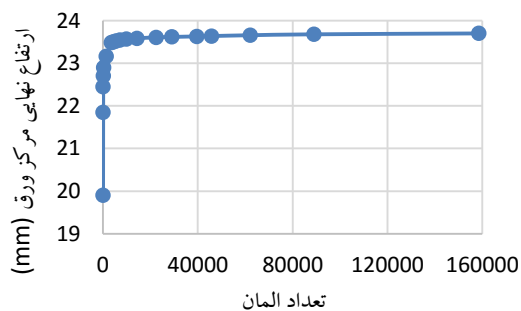
$$R_f(r) = (l_2 + r) \ln \left[\frac{(l_2 + r)^2 + h_2^2}{(l_2 + r)^2 + h_1^2} \right] + 2h_2 \tan^{-1} \left(\frac{l_2 + r}{h_2} \right) - 2h_1 \tan^{-1} \left(\frac{l_2 + r}{h_1} \right) - (l_1 + r) \ln \left[\frac{(l_1 + r)^2 + h_2^2}{(l_1 + r)^2 + h_1^2} \right] - 2h_2 \tan^{-1} \left(\frac{l_1 + r}{h_2} \right) + 2h_1 \tan^{-1} \left(\frac{l_1 + r}{h_1} \right) \quad (14)$$

که در این معادلات، f_z نیروی لورنتس، θ ، α ، $\psi(r)$ ، β و $R(r)$ ، $R_f(r)$ توابعی می‌باشند که برای جلوگیری از حجیم شدن بیش از حد معادلات تعریف شده‌اند. در اینجا δ ضریب میرایی مدار تخلیه، t زمان، ω فرکانس زاویه‌ای، μ ضریب نفوذپذیری مغناطیسی، I_{max} حداکثر جریان الکتریکی، N تعداد دور سیم پیچ، r شعاع، l_2 شعاع بیرونی کویل، l_1 شعاع درونی کویل، h و h_1 و h_2 پارامترهای مربوط به ارتفاع کویل و فاصله‌ی کویل از ورق هستند که در شکل ۳ نمایش داده شده‌اند، σ رسانایی الکتریکی، η ضریب برای جبران خطای ابررسانا فرض کردن ماده و z پارامتر عمق ضخامت ورق است.

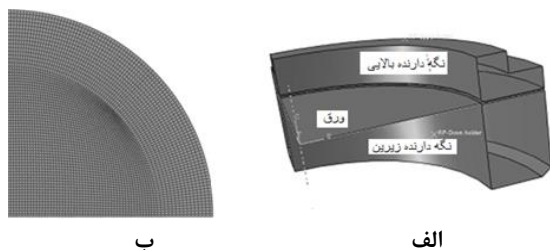
باید توجه داشت که توزیع میدان مغناطیسی، نیروی لورنتز و فشار مغناطیسی روی ورق یکسان هستند. با کمک نرم افزار متلب و پارامترهای کار آزمایشگاهی تاکاتسو و همکاران [۷]، توزیع فشار بدست آمده توسط این حل روی ورق تاکاتسو بدست می‌آید. در شکل ۴ توزیع فشار بدست آمده توسط ژو در مقابل توزیع فشار تاکاتسو برای مقایسه 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.

جدول ۳- مشخصات ورق بکار برده شده

ماده	Al1۰۵۰	چگالی	2750 kg/m^3
مدول یانگ	۸۰.۷ GPa	ضریب پواسون	۰.۳۳
قطر ورق	110 mm	قطر تحت تغییر شکل	80 mm
ضخامت	0.5 mm		



شکل ۶- حساسیت تغییر نتایج نسبت به اندازه‌ی المان‌ها



شکل ۷- (الف) مونتاژ شده‌ی ورق و نگه‌دارنده در شکل‌دهی بدون قالب ورق، (ب) مش‌بندی شده‌ی یک چهارم ورق

۳-۲- سخت‌شوندگی ماده

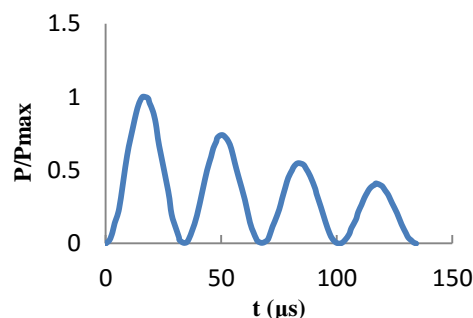
فرایند الکترومغناطیس ورق یک فرایند شکل‌دهی سریع می‌باشد و سرعت انجام فرآیند بر سخت‌شوندگی ماده تأثیر می‌گذارد. با این حال در تحلیل‌ها هم از سخت‌شوندگی وابسته به سرعت و هم مستقل از سرعت استفاده شده است. فنتون و داهن [۱۸] برای سخت‌شوندگی ورق Al1۰۵۰ از مدل ساده شده‌ی استینبرگ^۱ استفاده کردند. در این مدل از تأثیرات نرخ کرنش بر سخت‌شوندگی ماده چشم‌پوشی می‌شود. رابطه‌ی (۱۵) مدل استینبرگ استفاده شده بوسیله‌ی [۱۸] می‌باشد.

$$\sigma = 93(1 + 125\varepsilon^P)^{0.1} \quad (15)$$

فرایند و توقف نوسان ورق در نظر گرفته می‌شود. این زمان $267 \mu\text{s}$ بدست آمد.

۳- بررسی مکانیکی فرایند

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



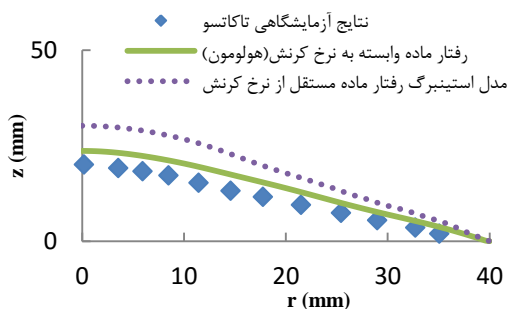
شکل ۵- تغییرات فشار بر حسب زمان [۷]

۳-۱- مدل‌سازی هندسی

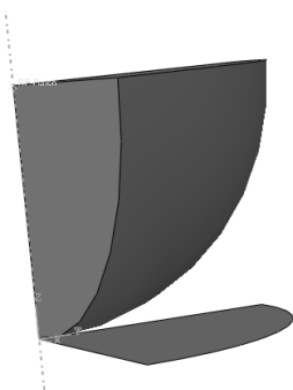
در این مطالعه از ورق آلومینیوم ۱۰۵۰ بکار برده شده در مرجع [۰] استفاده می‌شود. مشخصات ورق در جدول ۳ آورده شده است. ورق بین دو نگه‌دارنده با پهنای ۳۰ mm ثابت نگه داشته می‌شود. شکل ۶ نمودار حساسیت به اندازه‌ی المان‌های در مش‌بندی را نشان می‌دهد. با تعداد المان ۳۹۶۰۰ میزان تغییر شکل مرکز ورق در انتهای فرایند 25.36 mm است که به اندازه‌ی ۰.۰۵ 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 زیاد زمان حل برای تعداد المان زیاد، این مقدار اختلاف می‌تواند قابل قبول باشد. پس برای تحلیل‌ها تعداد المان ۳۹۶۰۰ برای یک چهارم در نظر گرفته می‌شود. شکل مونتاژ شده برای یک چهارم ورق در شکل ۷-الف نشان داده شده است. به دلیل تقارن یک چهارم مسئله مدل شده است. ورق با مش ساختاری المان‌بندی شده است و شکل ۷-ب یک چهارم ورق را در حالت مش زده شده نشان می‌دهد.

¹ Simplified Steinberg Model

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



شکل ۹- مقایسه‌ی تغییر شکل ورق در مدل‌های سخت‌شوندگی مختلف با نتایج آزمایشگاهی تاکاتسو



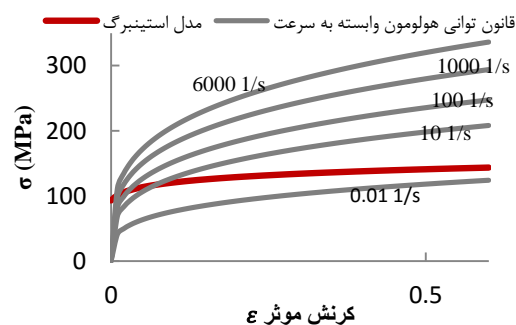
شکل ۱۰- موقعیت قرار گرفتن ورق زیر پانچ در شکل‌دهی ورق به روی پانچ

با بررسی‌های انجام شده مشاهده گردید که کوپل‌های پیشنهادی پژوهش‌های قبلی در شکل‌دهی ورق به روی پانچ نتایج قابل قبولی ارائه نمی‌دهند. بنابراین با استفاده از حل تحلیلی کوپل‌های جدیدی طراحی و با اعمال فشار مغناطیسی ایجاد شده توسط هر کوپل نتایج بدست آمده بررسی شدند. با سعی و خطا می‌توان پارامترهای کوپل مناسب را تعیین کرد. بهترین نتایج برای شکل‌دهی ورق به روی پانچ را کوپلی با مشخصات جدول ۴ با حداکثر فشار تولیدی ۹.۵ MPa بدست می‌دهد. توزیع فشار تولیدی این کوپل به روی ورق در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

کریرا و همکاران [۱۲] از قانون توانی نوع هولومون وابسته به نرخ کرنش^۱ استفاده کردند که در رابطه‌ی (۱۶) نمایش داده شده است.

$$\sigma = \sigma_0 (\dot{\epsilon}^P)^n D (\dot{\epsilon}^P)^m \quad (16)$$

در این رابطه: $\sigma_0 = 118 \text{ MPa}$, $D = 1.7$, $n = 0.27$ و $m = 0.075$ است. در معادلات (۱۵) و (۱۶)، تنش موثر، $\dot{\epsilon}^P$ کرنش پلاستیک موثر و $\dot{\epsilon}^P$ نرخ کرنش پلاستیک موثر است. نمودارهای تنش-کرنش این مدل‌ها در شکل ۸ برای نرخ کرنش‌های مختلف تا حداکثر نرخ کرنش ۶۰۰۰ 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]

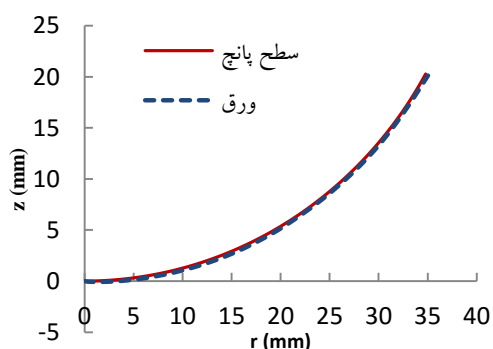
در شکل ۹ هندسه نهایی بدست آمده ورق با اعمال دو مدل سخت‌شوندگی‌های مختلف و نتایج آزمایشگاهی 0 مقایسه شده‌اند. مدل وابسته به نرخ کرنش جواب‌های دقیق‌تری را در اختیار می‌دهد. نتایج بدست آمده تاثیر نرخ کرنش بر سخت‌شوندگی ماده را نشان می‌دهد.

۴- شکل‌دهی الکترومغناطیس ورق به روی پانچ

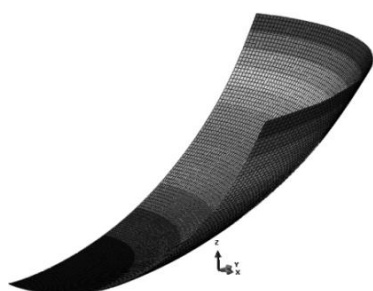
برای شکل‌دهی ورق به روی پانچ از آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ به قطر ۸۰ mm و ضخامت ۰.۵ mm استفاده می‌شود. برای سخت‌شوندگی از مدل هولومون وابسته به نرخ کرنش استفاده

² Strain Rate Dependent Hollomon-Type Power Law

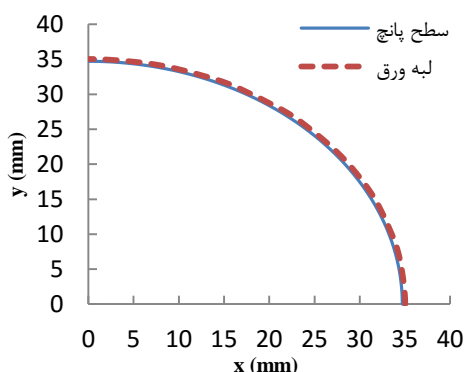
صحيح شكل مي‌دهد، در شكل‌دهي به روي پانچ موفق به شكل‌دهي صحيح ورق نمي‌شود و برگشت لبه در جهت عكس را نتيجه مي‌دهد. مشخصات اين كويل در جدول ۱ آورده شده است. با اعمال حداكثر فشار ۲۰ MPa تغيير شكل ورق بصورت شكل ۱۶ بدست مي‌آيد. در اين شكل موقعيت ورق در زمان‌هاي مختلف فرآيند نشان داده شده است و در انتهاي فرآيند برگشت كامل لبه‌ي ورق به روي خودش مشاهده مي‌شود.



شكل ۱۲- موقعيت ورق نسبت به سطح پانچ در راستاي شعاعي



شكل ۱۳- تصوير نهايي شكل‌دهي ورق به روي پانچ



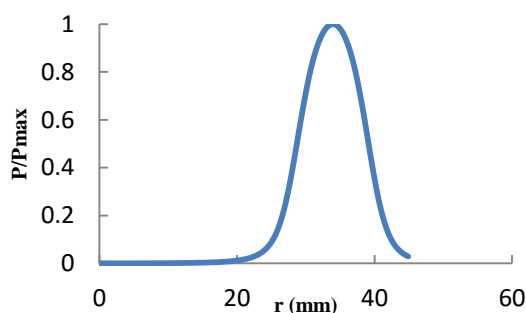
شكل ۱۴- موقعيت لبه‌ي ورق نسبت به پانچ تصوير شده در صفحه‌ي افقي

اعوجاج لبه‌ي ورق و فاصله‌ي عمودي ورق و پانچ پس از تکميل فرآيند دو پارامترى هستند که برای کیفیت شكل‌پذيري ورق به روي پانچ مطالعه مي‌شوند. سه عامل مي‌تواند باعث ايجاد فاصله بين ورق و سطح پانچ شود. اولين عامل بازگشت فنري است که به خاطر بازگشت الاستيك اتفاق مي‌افتد. دومين عامل کوچک‌تر بودن نيروي روي ورق از حداقل مقدار مورد نياز برای شكل‌دهي ورق و سومين عامل بازگشت ورق پس از برخورد با سطح پانچ بخاطر اعمال نيروي بيش از حد است.

جدول ۴- پارامترهاي كويل مطلوب

برای شكل‌دهي ورق به روي پانچ

ماده	مس	شعاع دروني كويل	۲۸ mm
تعداد دور	۶	شعاع بيروني كويل	۴۰ mm
گام پيچش	۲ mm	رسانايي الكتريكي	۳۶ MS/m

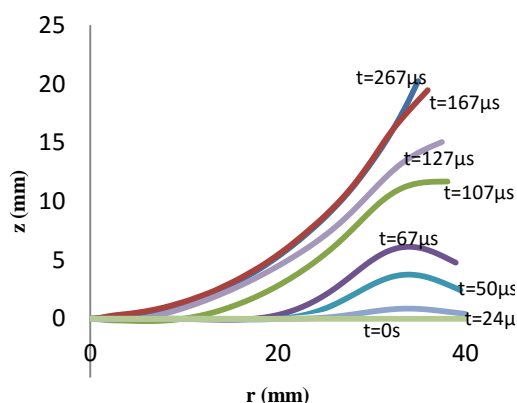


شكل ۱۱- توزيع فشار مغناطيسي كويل با مشخصات جدول ۴ روي ورق

شكل ۱۳ تصوير كانتوري و شكل‌هاي ۱۲ و ۱۴ موقعيت نهايي ورق در راستاي شعاعي و راستاي محيطي را نشان مي‌دهند. با توجه به شكل‌ها مشخص است که ورق بطور صحيح به روي پانچ شكل داده شده است.

۴-۱- برگشت لبه‌ي ورق در جهت عكس در شكل‌دهي ورق به روي پانچ

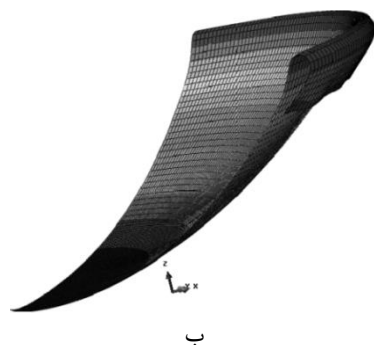
توزيع فشار تاثير بسيار زيادي بر كيفيت شكل‌پذيري ورق در شكل‌دهي الكترومغناطيس به روي پانچ دارد. در حالي که توزيع فشار نامناسب باشد ممكن است لبه‌ي ورق در انتهاي فرآيند بطور كامل به روي خودش برگردد. كويل استفاده شده در مرجع [۷] که در شكل‌دهي بدون قالب، ورق را بطور



شکل ۱۵. تاریخچه‌ی شکل‌پذیری ورق به روی پانچ در شکل‌دهی الکترومغناطیسی

ضخامت از مرکز به سمت لبه به تدریج افزایش می‌یابد و در لبه به اندازه 0.01 mm 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 ϵ_1^p مولفه‌ی شعاعی، ϵ_2^p مولفه‌ی محیطی و ϵ_3^p مولفه‌ی محوری (راستای ضخامت) هستند. ϵ_1^p و ϵ_3^p تقریباً با هم برابرند. مقدار مثبت مولفه‌ی محوری به معنای افزایش ضخامت ورق در لبه است. مولفه‌ی 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 در شکل‌دهی به روی پانچ، الف) موقعیت ورق در طی زمان، ب) شکل نهایی ورق

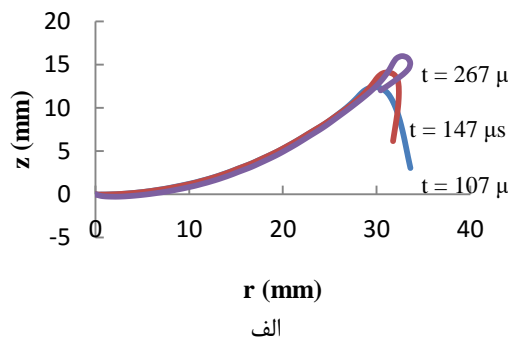
۲-۴- تاریخچه تغییر شکل ورق در شکل‌دهی ورق به

روی پانچ

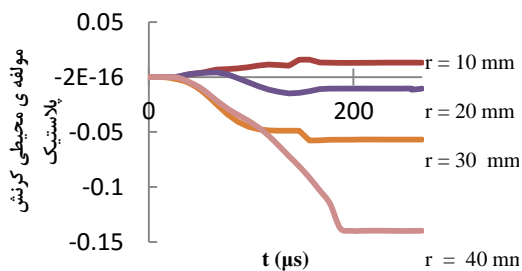
شکل‌دهی ورق به روی پانچ بر حسب زمان در شکل ۱۵ نمایش داده شده است. نحوه‌ی حرکت ورق از شروع تا پایان فرآیند بصورت موج است که مشابه شکل‌دهی بدون قالب و شکل‌دهی ورق به درون قالب است. این نوع تغییر شکل ورق ناشی از نحوه‌ی منحصر بفرود بارگذاری در فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیسی ورق است. در ابتدا قسمت‌هایی که تحت فشار قرار دارند تغییر شکل می‌یابند و بعد از آن قسمت‌های دیگر تحت تاثیر نیروی کشش و اینرسی دچار تغییر شکل می‌شوند. تاثیر نیروی اینرسی در تکمیل این فرآیند کاملاً مشهود است. فشار فقط تا زمان $67 \mu\text{s}$ فشار به ورق اعمال می‌شود و در این زمان حداکثر مقدار تغییر شکل ورق به میزان 5 mm یعنی تنها حدود 20% از حداکثر ارتفاع نهایی ورق است. بقیه‌ی فرآیند را نیروی اینرسی ورق تکمیل می‌کند که به درستی مبین نقش تعیین کننده‌ی نیروی اینرسی در تکمیل فرآیند است.

۳-۴- شکل‌پذیری ورق در شکل‌دهی ورق به روی پانچ

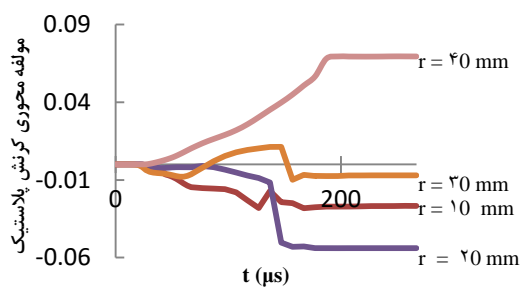
حداکثر اندازه‌ی سرعت در لبه‌ی ورق 175 m/s و برای شعاع 20 mm برابر 80 m/s است. مشخص است که پس از برخورد این قسمت با سطح پانچ سرعت ناگهان کاهش می‌یابد و در کمتر از $20 \mu\text{s}$ به صفر می‌رسد. شکل تغییرات ضخامت در راستای شعاع را نشان می‌دهد. کمترین ضخامت 96% ضخامت اولیه است که در مجاورت مرکز ورق اتفاق می‌افتد. کاهش ضخامت در اینجا نسبت به شکل‌دهی بدون قالب (کاهش ضخامت 18% بود) کمتر است.



کم شدن ضخامت می‌شود. با افزایش شعاع، کشش در جهت محیطی به فشار تبدیل می‌شود و ϵ_2^p منفی می‌شود. در نزدیکی لبه مقدار منفی ϵ_2^p به اندازه‌ای بزرگ می‌شود که باعث افزایش ضخامت ورق می‌شود. شکل ۲۱ نشان می‌دهد که در مجاورت لبه ϵ_3^p مثبت است و ضخامت ورق افزایش یافته است.



شکل ۲۰- مولفه‌ی محیطی کرنش پلاستیک بر حسب زمان برای سطح بالایی ورق در شعاع‌های مختلف

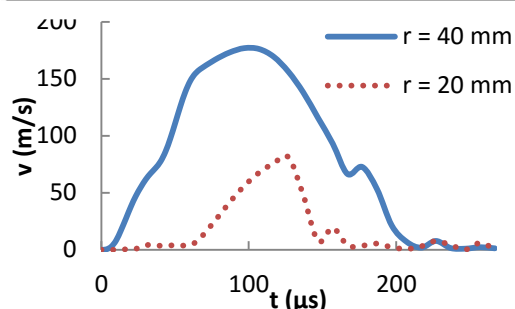


شکل ۲۱- مولفه‌ی محوری کرنش پلاستیک بر حسب زمان برای سطح بالایی ورق در شعاع‌های مختلف

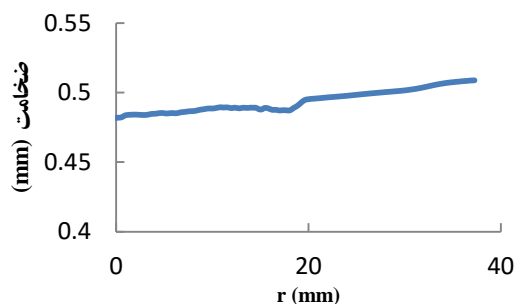
۵- شکل‌دهی الکترومغناطیس ورق به درون قالب

کروی

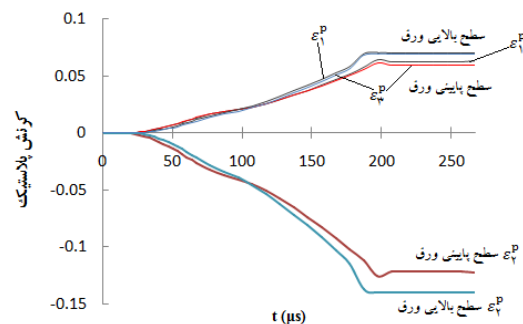
یکی از اهداف مطالعه جاری دستیابی به عمق نهایی بیشتر قطعه‌کار توسط شکل‌دهی به روی پانچ به جای شکل‌دهی به درون قالب است. برای اینکه بتوان نسبت عمق را مقایسه کرد پارامتری به نام نسبت عمق به قطر برای قالب بصورت $\frac{\text{عمق قالب}}{\text{قطر قالب}}$ تعریف می‌شود. ریسچ و همکاران [۸] موفق به شکل‌دهی ورق به درون قالبی کروی با نسبت عمق به قطر ۰.۰۶۶ شدند. در این مطالعه نسبت عمق به قطرهای مختلف برای ورق آلومینیوم ۱۰۵۰ با ضخامت ۰.۵ mm بررسی شد و



شکل ۱۷- تغییر سرعت در لبه و شعاع ۲۰ mm ورق بر حسب زمان در شکل‌دهی ورق به روی پانچ

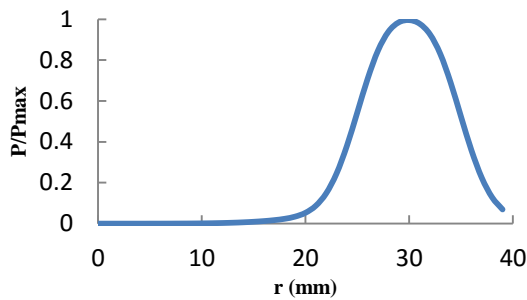


شکل ۱۸- تغییرات ضخامت ورق در راستای شعاعی برای شکل‌دهی ورق به روی پانچ

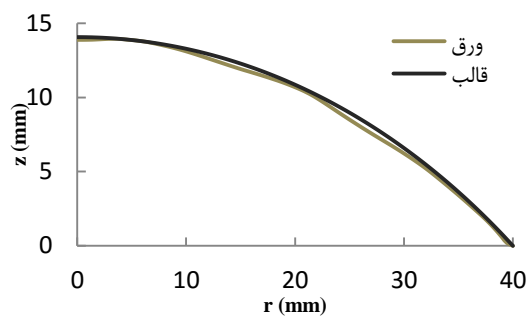


شکل ۱۹- تغییرات کرنش پلاستیک بر حسب زمان در لبه‌ی ورق برای شکل‌دهی ورق به روی پانچ

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 ϵ_2^p مثبت و ϵ_3^p منفی است. به عبارت دیگر، در نزدیکی مرکز ورق در دو جهت شعاعی و محیطی ورق تحت کشش است و این سبب



شکل ۲۲- توزیع فشار تولیدی کویلی با مشخصات



شکل ۲۳- شکل‌دهی ورق به درون قالب با نسبت عمق به قطر ۰/۱۱

شکل-ب نتایج حاصل از شکل‌دهی توسط کویلی با شعاع داخلی ۳۵ mm و شعاع بیرونی ۴۰ mm را نشان می‌دهد. محل اعمال حداکثر فشار تولید شده توسط این کویل در شعاع ۳۵ mm و حداکثر فشار بهینه برای این فرآیند ۲۱.۵ MPa است. با استفاده از این کویل انحنای دیواره‌ی قالب بطور صحیح پر می‌شود ولی مرکز ورق بطور صحیح به سمت بالا حرکت نمی‌کند. با اعمال فشار حاصل از کویل تاکاتسو که حداکثر فشار در شعاع ۲۰ mm به ورق وارد می‌شود انحنای دیواره‌ی قالب پر نمی‌شود ولی مرکز ورق بطور صحیح شکل نمی‌پذیرد. این نشان می‌دهد که توزیع فشار تاثیر بسیار زیادی بر کیفیت و چگونگی تغییر شکل دارد. اگر فشار تولیدی از فاصله‌ای معین به مرکز نزدیکتر باشد انحنای دیواره‌ی قالب پر نمی‌شود و در مقابل اگر این فاصله زیاد شود مرکز ورق به درستی شکل نمی‌پذیرد.

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 تیرانس بین هندسه‌ی نهایی ایده‌آل و هندسه‌ی نهایی بدست آمده برابر با ۰.۵ mm می‌باشد که ۳.۵٪ 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 قطعی از کره به قطر ۱۲۸ mm و دارای ارتفاع ۱۴ mm باشد. برای شکل‌دهی ورق به درون این قالب کویلی با مشخصات جدول ۵ که توزیع فشار شکل ۲۲ را تولید می‌کند، بهترین نتایج را در اختیار قرار می‌دهد. حداکثر فشار بهینه برای شکل‌دهی به درون این قالب ۱۵.۵ MPa است. با اعمال این توزیع فشار شکل نهایی ورق درون قالب به صورت شکل ۲۳ بدست می‌آید.

جدول ۵- مشخصات کویل مناسب برای

شکل‌دهی ورق به درون قالب

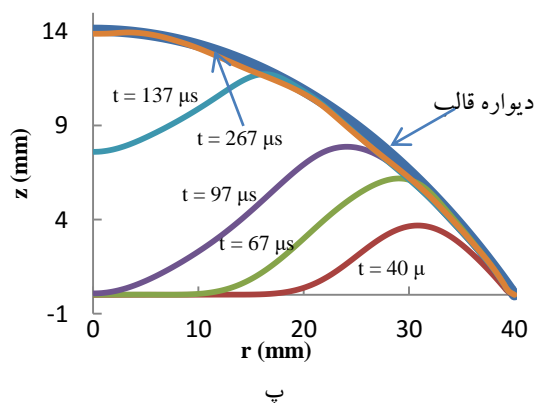
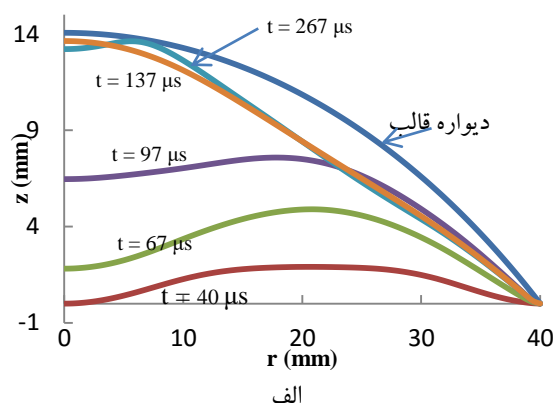
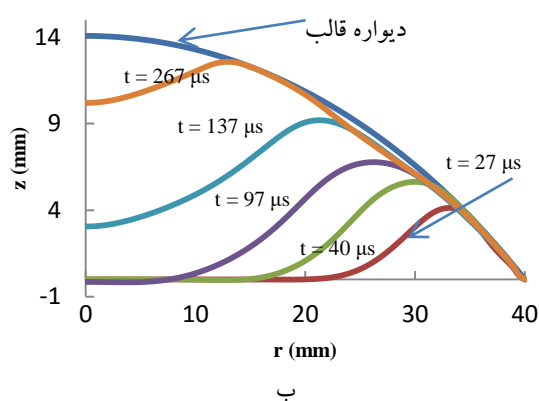
ماده	مس	شعاع درونی کویل	۲۵ mm
تعداد دور	۵	شعاع بیرونی کویل	۳۷ mm
گام پیچش	۲.۵ mm	رسانایی الکتریکی	۳۶ S/m

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 ۰.۱۱ توسط کویل تاکاتسو، کویل (۵) و کویلی با شعاع درونی ۳۵ mm و شعاع بیرونی ۴۰ mm 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 ۲۰ mm به ورق وارد می‌شود. در این حالت ورق با دیواره‌ی قالب تماس پیدا نمی‌کند. حداکثر فشار ۷.۸ MPa 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 کاهش فشار باعث افزایش فاصله‌ی ورق از دیواره‌ی قالب می‌شود.

بدست آمده در شکل‌دهی به روی پانچ ۰.۲۵ است که ۲۲٪ بیشتر از نسبت بدست آمده در شکل‌دهی به درون قالب است. در شکل‌دهی به روی پانچ با وجود افزایش بیش از دو برابری نسبت عمق به قطر، حداکثر تیرانس بین ورق و پانچ ۰.۲۸ mm و میانگین تیرانس ۰.۱۷ mm می‌باشد. این پارامترها برای شکل‌دهی به درون قالب برای نسبت ۰.۱۱ به ترتیب ۰.۴۶mm و ۰.۲۲ mm هستند. ملاحظه می‌شود با وجود نسبت عمق به قطر بیشتر شکل‌دهی به روی پانچ نتایج بهتری را در اختیار قرار می‌دهد.

شکل ۲۴ پ شکل‌دهی توسط کوپل جدول ۵ را نشان می‌دهد. حداکثر فشار این کوپل در شعاع ۳۰ mm به ورق وارد می‌شود. با اعمال این توزیع فشار با حداکثر مقدار بهینه ورق بطور صحیح در مرکز و دیواره به درون قالب شکل داده می‌شود. با بررسی‌هایی که صورت گرفت بیشترین نسبت عمق به قطر قابل دستیابی در شکل‌دهی به درون قالب ۰.۱۱ بدست آمد. برای این نسبت عمق به قطر، ارتفاع قالب ۱۴mm که قطعی از کره به قطر ۱۲۸ mm است. در مقابل ورق به روی پانچ کروی به قطر ۸۰ mm شکل داده شد و عمق نهایی ورق ۲۰ mm بدست آمد. نسبت عمق به قطر



شکل ۲۴- تاریخچه‌ی تغییر شکل ورق به درون قالب با نسبت عمق به قطر ۰/۱۱، الف) شکل‌دهی با استفاده از کوپل [۷]، ب) شکل‌دهی با کوپلی با شعاع درونی ۳۵ mm و شعاع بیرونی ۴۰ mm، پ) شکل‌دهی با استفاده از کوپل جدول ۵

- 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 Drittes Kolloquium 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) Formability and 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 forming of 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 production oriented approach in electromagnetic forming of metal sheets. In Proceedings of 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 Nonferrous 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.

۷- نتیجه‌گیری

- شبیه‌سازی دقیق با روش همبستگی قوی فرآیند شکل دهی الکترومغناطیس ورق، کاری دشوار و انجام یک شبیه‌سازی دقیق بسیار زمان‌بر خواهد بود. در این مطالعه نشان داده شد که با در نظر گرفتن فرض‌های صحیح مانند تصحیح مدت زمان اعمال فشار مغناطیسی، روش بدون همبستگی نیز نتایج قابل قبولی را بدست می‌دهد.
- با مطالعه‌ی نتایج حاصل از مدل‌های سخت‌شوندگی وابسته به سرعت و مستقل از سرعت در شکل‌دهی الکترومغناطیس ورق آلومینیومی، نتیجه شد که سرعت تغییر شکل ورق در این فرآیند بزرگ است و نرخ کرنش بر رفتار مکانیکی آلومینیوم تاثیر می‌گذارد.
- استفاده از شکل‌دهی الکترومغناطیس ورق به روی پانچ محدب بجای شکل‌دهی الکترومغناطیس ورق به درون قالب مقعر، عمق شکل‌دهی را بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش خواهد داد. دلایل عمده‌ای که از پر شدن صحیح قالب توسط ورق جلوگیری می‌کنند شامل جذب انرژی جنبشی ورق توسط دیواره‌های قالب و ایجاد کرنش سختی در ورق است. در شکل‌دهی به روی پانچ چون مرکز ورق ثابت و لبه‌ی آن آزاد است، قبل از جذب کامل انرژی جنبشی ورق توسط دیواره‌ها، دستیابی به شکل‌دهی صحیح در عمق‌های 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 انحنا دیواره‌ی قالب کامل نمی‌شود و در مقابل اگر این فاصله زیاد شود مرکز ورق به درستی شکل نمی‌پذیرد. برای شکل‌دهی 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

- [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.