دریافت: ۴ بهمن ۹۵ پذیرش: ۲۱ اسفند ۹۵

بررسی عددی و تجربی پارامترهای تعداد دور سیم پیچ و ولتاژ در شکل دهی الکترومغناطیس صفحات آلومینیوم آلیاژ ۱۰۵۰

سجاد نادیان برسیانی[۱]، احمد کشاورزی[۲،*]، امین کلاه دوز[۲]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک ، واحد خمینی شهر ، دانشگاه آزاد اسلامی ، خمینی شهر ، اصفهان ، ایران.
۲- استادیار ، عضو باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان /دانشکده مهندسی مکانیک، واحد خمینی شهر ، دانشگاه آزاد اسلامی ، خمینی شهر ، اصفهان ، ایران.
*اصفهان، خمینی شهر ، صندوق پستی ۱۱۹-۸۴۱۷۵ ، keshavarzi@iaukhsh.ac.ir

چکیده

با پیشرفت علم دانشمندان روش‌های جدید را جایگزین روش‌های قدیمی می‌کنند. امروزه خودرو سازان جهت کاهش وزن خودروها از ورق‌هایی با ضخامت پایین استفاده می‌کنند که جهت شکل‌دهی آنها نیاز به روش‌های جدیدی می‌باشد. شکل‌دهی الکترومغناطیس یک روش شکل‌دهی می‌باشد که بوسیله آن می‌توان قطعات بسیار نازک را شکل‌دهی نمود. در شکل دهی الکترومغناطیس با تخلیه انرژی الکتریکی در سیم‌پیچ‌های آن میدان مغناطیسی به وجود می‌آید که همانند سنبه ولی بدون اثر گذاری قطعه‌کار را به سمت قالب هدایت می‌کند و باعث شکل‌دهی آن می‌شود. این عمل در مدت زمان کمتر از یک میکروثانیه انجام می‌شود و باعث می‌شود تعداد قطعات تولید شده از این روش افزایش یابند. با توجه به اینکه سیم‌پیچ‌ها رابط بین دستگاه و قطعه‌کار می‌باشند، در این پژوهش به بررسی عددی و تجربی تعداد دور سیم‌پیچ و ولتاژ در شکل‌دهی الکترومغناطیس پرداخته می‌شود. جهت انجام آزمایش‌های عملی سیم‌پیچ‌های الکترومغناطیس ساخته شده و با استفاده از دستگاه الکترومغناطیس با قدرت ۳ کیلوژول آزمایش‌ها انجام می‌شوند. جهت انجام آزمایش‌های عددی نیز از نرم‌افزار آباکوس و جی‌مگ استفاده شده است که نتایج عددی با نتایج تجربی مطابقت خوبی داشته است. پس از انجام آزمایش‌ها، مشاهده شد که سیم‌پیچ‌ها باید هم مساحت با قطعه‌کار در نظر گرفته شوند و جهت شکل‌دهی مساحت‌های بزرگی از ورق باید شکل‌دهی در چند مرحله با سیم‌پیچ‌های کوچک انجام شود. همچنین جهت افزایش استحکام سیم‌پیچ‌ها در زمان شکل‌دهی باید سیم‌پیچ‌ها در محلول‌های اف کا ۲۰ قرار گیرند.

کلیدواژگان

شکل دهی الکترومغناطیس ، تحلیل المان محدود ، آلومینیوم آلیاژ ۱۰۵۰ ، شکل‌دهی ورق‌ها

Numerical and Experimental Analysis of Coil's Number of Rounds and Voltage in Electromagnetic Sheet Forming of Aluminum Alloy 1050

Sajjad Nadian Bersiani[1], Ahmad Keshavarzi[2*], Amin Kolahdooz[2]

1- MSc Student, Department of Mechanic Engineering, Azad Islamic University, Khomeinishahr Branch, Khomeinishahr/Isfahan, Iran.
2- Assistant Professor, Young reserchers and elite club, Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Khomeinishahr Branch, Khomeinishahr/Isfahan, Iran.
* P.O.B. 84175-119 Khomeinishahr,Isfahan, Iran, keshavarzi@iaukhsh.ac.ir

Abstract

Scientists replace the old methods with the new ones as the science develops. Today, automobile makers use thin sheets in order to lessen the weight and forming these sheets needs new methods. Electromagnetic forming is a way with which very thin sheets are made. A magnetic field occurs in the Coils that leads the piece of work to its form like piston but without having effect and forms it when forming with Electronic evacuation. This process happens in less than a micro-second and increases the produced work pieces paying attention to the Coils which are the connection between the work piece and the engine, the amount of Coils in voltage in Electromagnetic forming is studied in digital and experimental ways in this study. For experimental examinations, Electromagnetic Coils are made and tested with Electromagnetic machines with 3 KJ power. In order to do digital experiments Abaqus and J-Mag softwares are used that the digital results have corresponded. The results shown that the area of the Coils should be the same with the work piece and for forming big areas of sheets, forming should be done in several levels with small Coils. Also, in order to increase the strength of Coils during the forming, the should be put in FK20 liquids.

Keywords

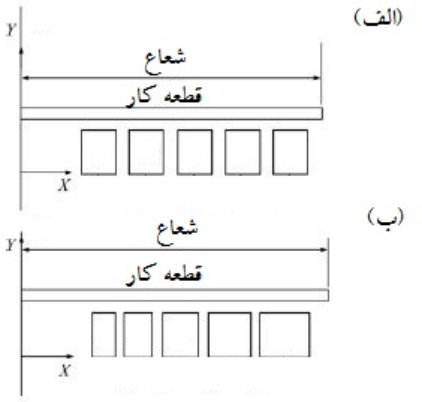
Electromagnetic Forming, Finite Element Method, Aluminum Alloy 1050, Sheet Forming

۱- مقدمه

با پیشرفت صنعت خودرو سازی، خودروسازان جهت کاهش وزن بدنه خودرو-ها، از ورق‌هایی با ضخامت پایین استفاده می‌کنند. جهت شکل‌دهی ورق‌های نازک و جلوگیری از پارگی آنها، از روش الکترومغناطیس استفاده می‌شود[۱]. شکل‌دهی الکترومغناطیس که از تخلیه انرژی الکتریکی در سیم‌پیچ بوجود می‌آید، بدون اثر گذاری بوده و در کمتر از ۱ میکروثانیه شکل‌دهی را انجام می‌دهد. در شکل(۱) یک قطعه تولید شده بوسیله شکل‌دهی الکترومغناطیس نشان داده شده است[۲و۳].

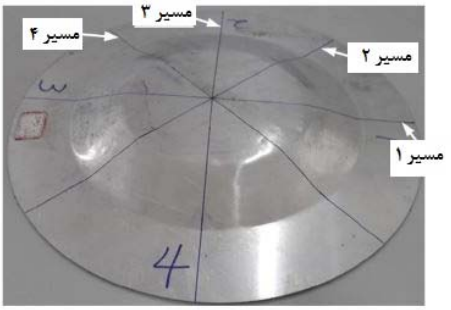
امینیان و همکاران [۴] از نیروی الکترومغناطیس جهت شتاب‌دهی قطعات استفاده نمودند. آنها به بررسی پارامترهای ولتاژ، وزن پرتابه ، تعداد لایه ، طول سیم‌پیچ ، قطر سیم سیم‌پیچ پرداختند و بیان کردند که با افزایش ولتاژ میدان مغناطیسی به دلیل ثابت بودن مقاومت سیم‌پیچ افزایش می‌یابد و باعث می‌شود نیروی بیشتری به پرتابه اعمال شود. همچنین آنها طول مناسب جهت سیم‌پیچ‌های شتاب دهی را ۱۵۰ میلیمتر معرفی نمودند . آنها جهت افزایش سرعت پرتابه‌ها و جلوگیری از اشباع شدن آن بیان کردند که باید این پرتابه‌ها متناسب با سرعت بزرگتر ساخته شوند تا بتوانند انرژی بیشتری جذب کنند و سرعت بیشتری بگیرند.

احمد و همکاران [۵] به بررسی جایگزین طراحی سیم‌پیچ‌های صفحه‌ای برای شکل‌دهی الکترومغناطیس پرداختند. آن‌ها با بیان اینکه سیم‌پیچ‌ها مهمترین قسمت فرآیند شکل دهی الکترومغناطیس هستند این سیم‌پیچ‌ها را با استفاده از نرم افزارهای کامپیوتری طراحی کردند. آن‌ها سیم‌پیچ‌های غیر یکنواخت را طراحی و ساختند که در شکل(۱) نشان داده شده است. ایشان با انجام آزمایش‌ها بیان کردند که سیم‌پیچ‌های غیریکنواخت نسبت به سیم-پیچ‌های یکنواخت نیروی بیشتری را به سمت قطعه‌کار انتقال داده‌اند.



شکل ۱ سیم پیچ های صفحه‌ای الکترومغناطیس (الف) سیم پیچ صفحه‌ای یکنواخت (ب) سیم پیچ صفحه‌ای غیر یکنواخت

سوی و همکاران [۶] به بررسی تغییر شکل ورق‌های بزرگ در فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیس پرداختند. ایشان با ساخت سیم‌پیچ‌های کوچک و انتقال آنها در موقعیت‌های متفاوت به شکل‌دهی ورق‌های بزرگ پرداختند و بیان کردند که با افزایش زاویه سیم پیچ به میزان ۵۰ درصد میزان جابجایی ورق به میزان ۵/۵ درصد کاهش و با افزایش زمان تخلیه انرژی در سیم‌پیچ به میزان دو برابر (۲۰۰۰ میکروثانیه) میزان جابجایی ورق به میزان ۲۵ درصد افزایش می‌یابد. همچنین آنها با استفاده از این روش و تکرار تخلیه الکتریکی در موقعیت‌های مختلف انرژی مورد نیاز را کاهش دادند. (شکل ۲)

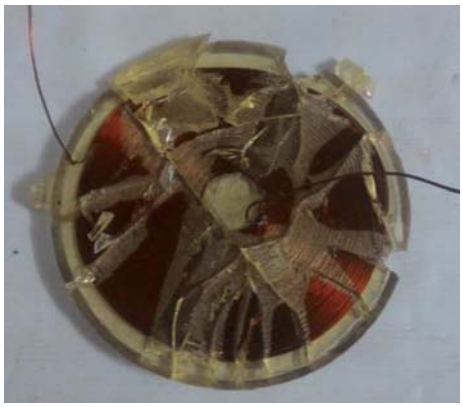


شکل ۲ قطعه بزرگ به همراه مسیرهای شکل دهی داده شده بوسیله شکل‌دهی الکترومغناطیس [۶]

کونجیو و همکاران [۷] به بررسی شکل دهی افزایش الکترومغناطیس تحت پانل یکپارچه و شرایط تخلیه متفاوت پرداختند. آنها با استفاده از آزمایشهای عملی و استفاده از روش جابجایی سیم‌پیچ بر روی قطعه کار استفاده کردند و به شکل‌دهی ورق‌های آلومینیوم تحت شکل‌های متفاوت پرداختند. آنها بیان کردند زمانی که دو تخلیه متوالی از ولتاژ پایین توسط یک ولتاژ بالا ایجاد می‌شود باعث ایجاد شکل‌دهی و عمق مناسب قطعه‌کار می‌شود. همچنین آنها بیان کردند که با کاهش ظرفیت خازنی و ثابت نگاه داشتن انرژی میزان شکل‌دهی افزایش می‌یابد بطوریکه با کاهش ۰/۷۵ درصد ظرفیت خازنی میزان جابجایی در محور Y به میزان ۰/۲۵ افزایش می‌یابد.

نینگ و همکاران [۸] به بررسی تسهیل مکانیزم انتقال تغییر شکل در شکل-دهی الکترومغناطیس برای آلومینیوم آلیاژ ۵۰۵۲ پرداختند. آنها به بررسی شناسایی مکانیزم تغییر شکل مختلف در آلیاژ آلومینیومی تحت شکل‌دهی الکترومغناطیس و مکانیزم‌های مکانیکی پرداختند. آنها با استفاده از یک استراتژیک خاص مقدار شکل‌دهی الکترومغناطیس و روش مکانیکی را با کرنش معادل و نرخ کرنش بدست آورند. آنها مکانیزم مکانیکی را با لغزش مسطح و مکانیزم الکترومغناطیس را با لغزش موجی مقابل هم قرار دادند. آنها بیان کردند که نرخ کرنش در مکانیزم الکترومغناطیس نسبت به مکانیزم مکانیکی بیشتر است بطوریکه مقدار نرخ کرنش در شکل‌دهی الکترومغناطیس ۲۵ درصد از نرخ کرنش مکانیکی بیشتر است. همچنین در آزمایش‌های عملی و شبیه‌سازی مقدار ارتفاع در شکل‌دهی الکترومغناطیس به میزان ۱۱/۱۱ درصد بیشتر از حالت مکانیکی است که علت آن دو جنس بودن ورق بصورت آلومینیوم – مس می‌باشد.

ناطقی و همکاران [۹و۱۰] به بررسی پارامترهای فاصله سیم‌پیچ از قطعه‌کار و قطر سیم سیم‌پیچ در شکل دهی الکترومغناطیس ورق‌های V شکل پرداختند. آنها با انجام آزمایش‌های عملی و تجربی بیان کردند که سیم‌پیچ‌ها باید به گونه‌ای ساخته شوند که در زمان شکل‌دهی دچار تغییر شکل نشوند آنها بیان کردند که در صورت استفاده از سیم با قطر بالا میدان مغناطیسی به صورت پراکنده ایجاد می‌شود و شکل‌دهی بصورت ناقص انجام می‌شود و متقابلاً در صورت استفاده از سیم‌پیچ‌هایی با قطر پایین، به دلیل پایین بودن مقاومت سیم‌پیچ، باعث از بین رفتن سیم‌پیچ(مطابق شکل(۳)) و عدم شکل‌گیری قطعه کار می‌شود. بنابراین بیان کردند که بهترین قطر سیم، قطرهای ۱/۵، ۲ و ۲/۵ می‌باشد و بهترین فاصله اثر گذاری میدان مغناطیسی بر روی قطعه‌کار فاصله ۱۰ میلیمتر می‌باشد.



شکل ۳ از بین رفتن سیم‌پیچ با قطر پایین[۹]

کوریا و همکاران [۱۱] به بررسی عددی شکل‌دهی ورق فلزی در زمان اعمال فشار الکترومغناطیس پرداختند. آنها با فرض مستقل بودن قسمت الکترومغناطیس و سازه این فرآیند و با استفاده از حل معادلات ماکسول برای هندسه ورق تخت فشار الکترومغناطیسی را خارج کردند و با اعمال این فشار به ورق در نرم افزار آباکوس شکل نهایی ورق را بدست آوردند و بیان کردند هندسه نهایی ورق به میزان زمان تخلیه انرژی خازن در سیم‌پیچ و فاصله از مرکز وابسته است که با فاصله گرفتن از مرکز سیم پیچ شدت میدان

مغناطیسی کاهش می‌یابد و با افزایش زمان میزان جابجایی ورق بیشتر می‌باشد بطوریکه برای ورق با شعاع ۲۰ میلیمتر میزان جابجایی ۱۸ درصد در مدت ۲۷۰ میکروثانیه افزایش می‌یابد.

زانگ و همکاران [۱۲] به بررسی شکل هندسی در خم‌کاری ورق وی شکل فرآیند الکترومغناطیس آلومینیوم آلیاژ ۲۰۲۴ پرداختند. آنها با بررسی خم کاری ورق آلومینیوم آلیاژ ۲۰۲۴ با قالب وی شکل به‌صورت عددی و انجام آزمایش‌های عملی مشکلات مربوط به هندسه شکل نهایی و ولتاژ را مورد بررسی قرار دادند. آنها در تحلیل‌های خود چهار جنبه توزیع نیروی الکترومغناطیس ، به روز رسانی توزیع نیروی الکترومغناطیس ، تاثیر برخورد بین ورق و قالب و مدت زمان پالس درون سیم‌پیچ را در نظر گرفتند. آنها جهت رفع مشکل زینی بودن قطعات ولتاژ را افزایش دادند و بیان نمودند با افزایش ۲۸/۲ درصدی ولتاژ نیروی الکترومغناطیس ۲ برابر و چگالی شدت جریان نیز ۲ برابر می‌شود.

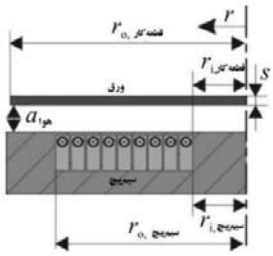
لوسا [۱۳] به بررسی مدل سازی المان محدود و تجربی برای بر آورد رفتار ورق AlMn0/5Mg0/5 در طی فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیس پرداخت. او با استفاده از آزمایش‌های المان محدود و تجربی مقدار تنش پسماند را با استفاده از پراش پرتو ایکس بدست آورد. همچنین ایشان کرنش را از اندازه‌گیری تغییر شکل گره‌های بدست آمده، بدست آورد و با یکدیگر مقایسه نمود که از تطابق خوبی بر خوردار بود. او درنهایت بیان کرد که مقدار برگشت فنری و تنش پسماند در قطعات با استفاده از آزمایش‌های المان محدود بدست آمده و تنوع تنش در قطعات زیاد است و همچنین تجزیه و تحلیل‌ها نشان می‌دهد که مواد تغییر شکل در معرض کشیدگی شعاعی و مماسی قرار دارند که تنگ شدن در امتداد جهت محوری است. همچنین با مقایسه نتایج مربوط به تنش شعاعی و تنش محوری بیان کرد که بیشترین خطای موجود ۶/۷۰ درصد در تنش محوری و ۵/۸۲ درصد در تنش محوری می‌باشد.

با توجه به اینکه در تحقیقات گذشته، تحقیقاتی در زمینه تعداد دور و ولتاژهای پایین صورت نگرفته است، در این پژوهش به بررسی تعداد دور و ولتاژ پرداخته می‌شود. جهت طراحی سیم‌پیچ‌ها از نرم‌افزارهای طراحی به کمک کامپیوتر استفاده می‌شود و سپس سیم‌پیچ‌ها ساخته شده و در محلول‌های اپکسی جهت افزایش استحکام قرار گرفته می‌شوند. در نهایت با انجام آزمایش‌های شبیه‌سازی و عملی و استفاده از روش آماری فاکتوریل پارامترها بررسی شده و بهترین سطوح معرفی می‌شوند.

۲-نحوه انجام کار

۲-۱-فرمول‌های حاکم

با توجه به نوع شکل‌دهی الکترومغناطیس که ورق می‌باشد در این نوع شکل‌دهی سیم‌پیچ دارای قطر داخلی r_i وقطر خارجی r_o و ورق در فاصله a از سطح سیم‌پیچ قرار دارد که در شکل(۴) نشان داده شده است[۲ و ۱۴].



شکل ۴ مشخصات سیم‌پیچ صفحه‌ای[۲]

جریان گردابی حاصل از میدان مغناطیسی به‌صورت زیر بدست می‌آید[۲ و ۱۴].

$$J = -\frac{\partial H}{\partial r} \quad (۱)$$

$$J = \frac{\partial H}{\partial z} \quad (۲)$$

همچنین نیروی لورنتس با توجه به رابطه (۳-۱) به‌صورت زیر بدست می‌آید[۲ و ۱۴].

$$F = J \times B \quad (۳)$$

$$F_r = -\mu_0 H \frac{\partial H}{\partial r} = \frac{1}{2}\mu_0 \frac{\partial (H^2)}{\partial r} \quad (۴)$$

$$F_z = -\mu_0 H \frac{\partial H}{\partial z} = \frac{1}{2}\mu_0 \frac{\partial (H^2)}{\partial z} \quad (۵)$$

در روابط فوق μ_0 مقدار نفوذ پذیری و H بزرگی میدان مغناطیسی می‌باشد که جهت محاسبه مقدار فشار باید از روابط در شعاع سیم‌پیچ انتگرال گرفته شود تا میزان فشار به ورق بدست آید[۲ و ۱۴].

$$P_r = \int_{r_i}^{r_o} F_r \, dr \quad (۶)$$

$$P_z = \int_{r_i}^{r_o} F_z \, dr \quad (۷)$$

با بدست آوردن مقدار H_r می‌توان مقدار فشار P_r را بدست آورد[۲ و ۱۴].

$$H_r = \frac{In}{\pi l}\left[\tan^{-1}\left(\frac{-2a_{\text{لوله}} \times r}{a_{\text{لوله}}^2 + r_{o,\text{سیم‌پیچ}}^2 - r^2}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{-2a_{\text{لوله}}\, r}{a_{\text{لوله}}^2 + r_{i,\text{سیم‌پیچ}}^2 - r^2}\right)\right] \quad (۸)$$

$$P_r = \frac{\mu_0 I^2 n^2}{2\pi^2 l^2}\left[\tan^{-1}\left(\frac{-2a_{\text{لوله}} \times r}{a_{\text{لوله}}^2 + r_{o,\text{سیم‌پیچ}}^2 - r^2}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{-2a_{\text{لوله}}\, r}{a_{\text{لوله}}^2 + r_{i,\text{سیم‌پیچ}}^2 - r^2}\right)\right]^2 \quad (۹)$$

در روابط فوق I شدت جریان ، n تعداد دور و l نشان دهنده عرض پیچ در پیچ می‌باشد که با استفاده از روابط بالا میزان نیروی اعمالی به ورق بدست می‌آید[۲ و ۱۴].

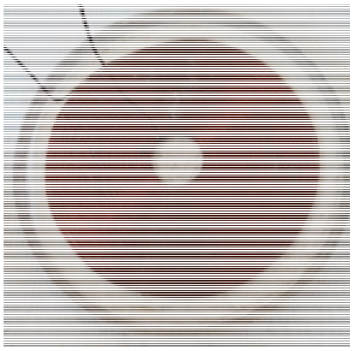
۲-۲-تعیین پارامترها

با توجه به اینکه پارامترهای زیادی در شکل‌دهی الکترومغناطیس دخالت دارند در این تحقیق پارامترهای ولتاژ و تعداد دور سیم‌پیچ در سطوح بالایی مورد بررسی قرار گرفتند که سطوح آن‌ها *به‌صورت* جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱ پارامترهای تعریف شده

ردیف	ولتاژ	تعداد دور
۱	۶۰۰	۱۰
۲	۷۰۰	۱۵
۳	۸۰۰	۲۰
۴	۹۰۰	۲۵
۵	۱۰۰۰	۳۰
۶	۱۱۰۰	۳۵
۷	۱۲۰۰	۴۰
۸	۱۳۰۰	۴۵
۹	۱۴۰۰	۵۰
۱۰	۱۵۰۰	۵۵

پس از ساخته شدن سیم‌پیچ‌ها جهت مستحکم نمودن، سیم‌پیچ‌ها در محلول‌های اپکسی قرار داده می‌شدند. سیم‌پیچ‌ها در محلول آراکس اف کا ۲۰ قرار داده شده‌اند. این محلول به‌صورت شفاف بوده و دارای استحکام بالایی می‌باشد. در شکل(۵) نمونه‌ای از سیم‌پیچ‌های ساخته شده با تعداد دور ۴۰ دور نشان داده شده است.



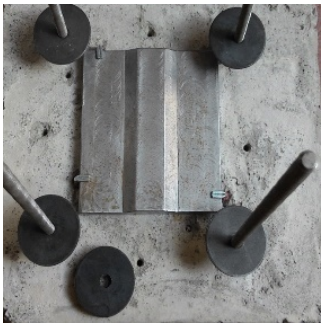
شکل ۵ سیم‌پیچ ۴۰ دور

۲-۳-نحوه انجام آزمایش‌های تجربی

جهت انجام آزمایش‌های تجربی از دستگاهی به قدرت ۳ کیلوژول استفاده شده است. جهت شکل‌دهی ورق‌ها قالبی آهنی مطابق شکل(۶) ساخته شده است.

شکل ۶ قالب ساخته شده جهت شکل‌دهی الکترومغناطیس

جهت جلوگیری از جابجایی قالب و سیم‌پیچ فیکسچری مطابق شکل(۷) از جنس بتن ایجاد شده است تا از جابجایی قالب و سیم‌پیچ به دلیل نیروهای عکس‌العمل جلوگیری کند.

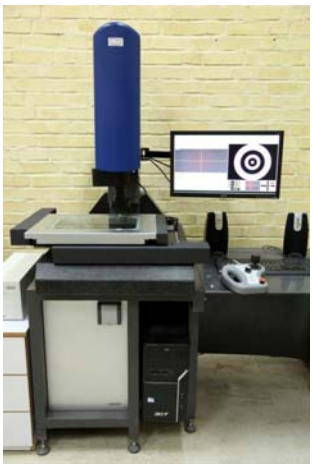


(الف)

(ب)

شکل ۷ فیکسچرهای ساخته شده (الف) فیکسچر قالب (ب) فیکسچر سیم‌پیچ

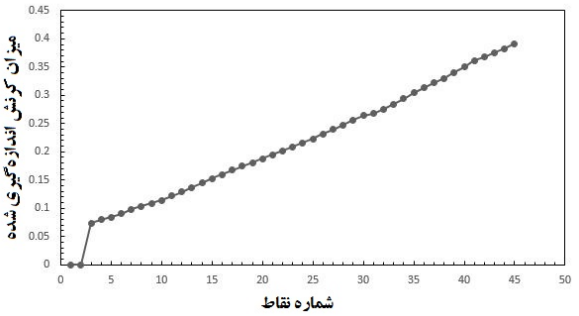
پس از بسته شدن دو فیکسچر بر روی هم، قطعات مطابق با پارامترها شکل‌دهی می‌شوند و سپس جهت اندازه‌گیری زوایای آن مطابق شکل(۸) از دستگاه ویدیوپروفایل استفاده می‌شود.



شکل ۸ دستگاه ویدیو پروفایل جهت اندازه‌گیری زوایای قطعات شکل‌دهی داده شده

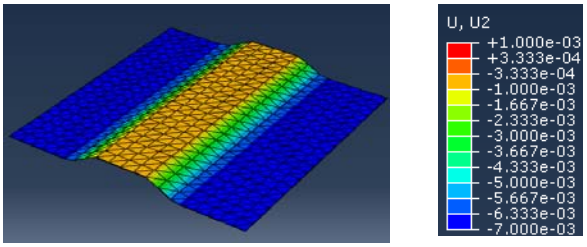
۴-۲-نحوه انجام آزمایش‌های عددی

جهت انجام آزمایش‌های عددی از نرم‌افزار جی‌مگ جهت حل قسمت الکتریکی و از نرم‌افزار آباکوس جهت حل قسمت مکانیکی استفاده شده است. جهت نزدیک بودن نتایج تجربی و عملی، جنس استفاده شده در آزمایش‌های تجربی را مورد آزمون کشش قرار داده تا بتوان نمودار آن را جهت وارد کردن به نرم‌افزار بدست آورد. در شکل(۹) نمودار بدست آمده در تعداد ۴۵ نقطه نشان داده شده است.



شکل ۹ نمودار بدست آمده از آزمون کشش

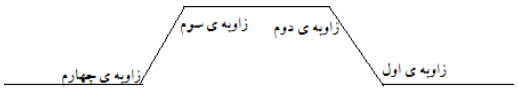
جهت انجام شکل‌دهی الکترومغناطیس ابتدا قسمت الکتریکی آن حل شده و سپس با انتقال نیرو به نرم‌افزار آباکوس قسمت مکانیکی حل می‌شود و شکل‌نهایی ورق مطابق شکل(۱۴) بدست می‌آید.



شکل ۱۰ میزان جابجایی ورق بر حسب میلیمتر در آزمایش‌های عددی برای سیم‌پیچ ۳۵ دور و ولتاژ ۱۵۰۰

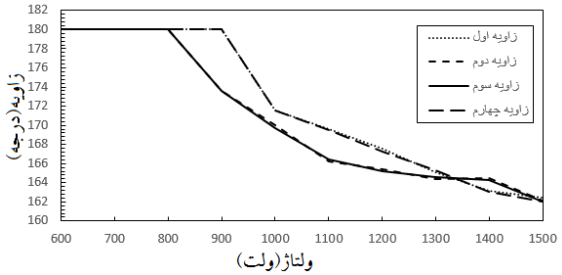
۳-نتایج و بحث

پس از انجام آزمایش‌ها قطعات بدست آمده با استفاده از دستگاه ویدیو پروفایل مورد بررسی قرار داده می‌شود تا اندازه هر یک از زوایا مطابق شکل(۱۵) بدست آید. سپس جهت تحلیل نتایج از نرم‌افزار آماری مینی تب استفاده می‌شود تا بتوان تاثیر میزان سیگنال به نویز، درصد تاثیر هر پارامتر را بدست آورد.



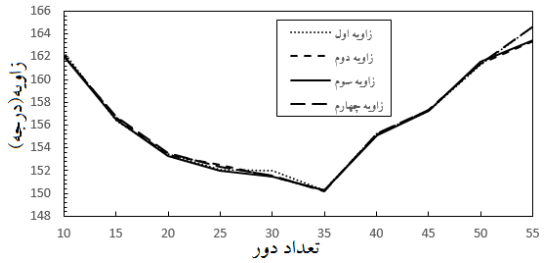
شکل ۱۱ شماره زوایای اندازه‌گیری شده

در نمودار شکل(۱۲) مقدار زوایای بدست آمده قطعات شکل‌دهی داده شده توسط سیم‌پیچ ۱۰ دور نشان داده شده است.



شکل ۱۲ نتایج مربوط به سیم‌پیچ ۱۰ دور و ولتاژ ۶۰۰ الی ۱۵۰۰ ولت

با توجه به نتایج مشاهده می‌شود با افزایش ولتاژ میزان جابجایی ورق و تغییر زوایای آن افزایش یافته است. همچنین نتایج مربوط به ولتاژ ۱۵۰۰ ولت و سایر دورها سیم‌پیچ (۱۰ الی ۵۵ دور) مطابق نمودار شکل(۱۳) نشان داده شده است.

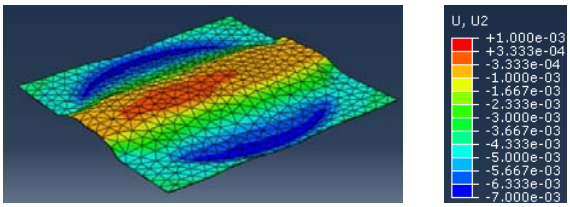


شکل ۱۳ نتایج مربوط به ولتاژ ۱۵۰۰ ولت و سیم‌پیچ‌های ۱۰ الی ۵۵ دور

با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که در ولتاژ ۱۵۰۰ ولت و سیم‌پیچ ۳۵ دور قطعه‌کار به صورت کامل شکل‌دهی داده شده است. در سیم‌پیچ‌های ۱۵ الی ۳۰ دور به دلیل کوچک بودن مساحت سطح سیم‌پیچ از قطعه‌کار قطعه تولید شده بصورت لبه‌دار مطابق شکل(۱۴) ایجاد شده است.

شکل ۱۴ قطعه شکل‌دهی داده شده با استفاده از سیم‌پیچ ۲۰ دور و ولتاژ ۱۵۰۰ ولت

همچنین با انجام آزمایش‌های عددی مطابق شکل(۱۵) نیز مشاهده می‌شود که لبه‌ها و مرکز قطعه کار مطابق آزمایش‌های تجربی شکل نهایی را به خود نگرفته‌اند.

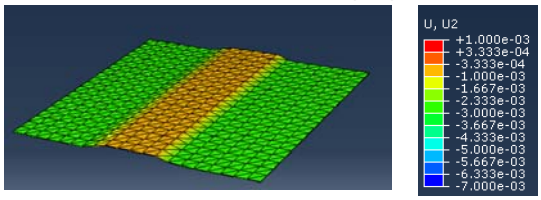


شکل ۱۵ میزان جابجایی ورق بر حسب میلیمتر در آزمایش‌های عددی برای سیم‌پیچ ۲۰ دور و ولتاژ ۱۵۰۰

همچنین با افزایش تعداد دور سیم‌پیچ، سیم‌پیچ‌های ۴۰ الی ۵۵ دور به دلیل افزایش مقاومت سیم‌پیچ و افزایش مساحت سطح سیم‌پیچ، باعث شده نیروی الکترومغناطیس هدر رفته و شکل‌دهی الکترومغناطیس بصورت کامل انجام نشود. در شکل(۱۶) قطعه‌کار شکل‌دهی داده شده با سیم‌پیچ ۵۵ دور نشان داده شده است.

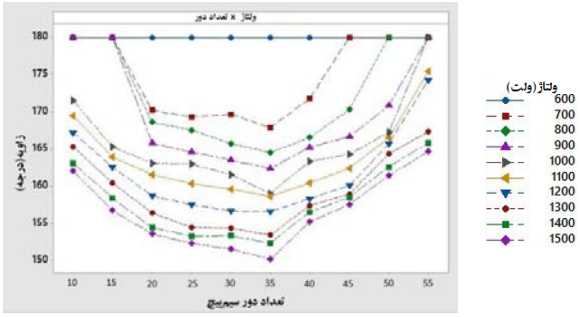
شکل ۱۶ قطعه شکل‌دهی داده شده با استفاده از سیم‌پیچ ۵۵ دور و ولتاژ ۱۵۰۰ ولت

همچنین با انجام آزمایش‌های عددی مطابق شکل(۱۷) مشاهده می‌شود که نیروی الکترومغناطیس در سیم‌پیچ‌ها با دور بالا هدر رفته و قطعه کار بصورت کامل شکل‌دهی نمی‌شود.

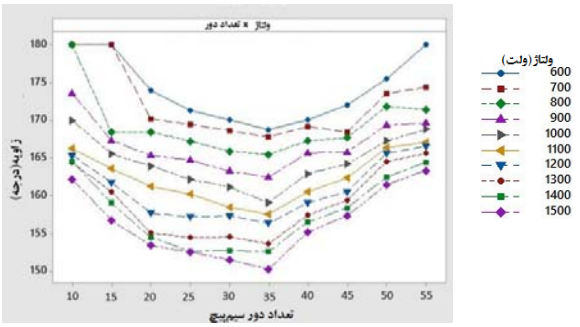


شکل ۱۷ میزان جابجایی ورق بر حسب میلیمتر در آزمایش‌های عددی برای سیم‌پیچ ۵۵ دور و ولتاژ ۱۵۰۰

با ورود نتایج به نرم‌افزار تحلیل آماری مینی تب نمودارهای تاثیر متقابل هر یک از پارامترها در شکل‌دهی زوایا بدست می‌آید که در شکل(۱۸) تاثیر متقابل پارامترها برای زاویه اول و چهارم و در شکل(۱۹) تاثیر متقابل پارامتر-ها برای زاویه دوم و سوم نشان داده شده است.

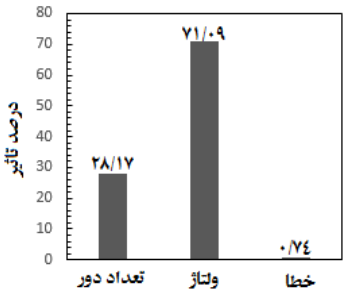


شکل ۱۸ تاثیر متقابل پارامترهای زوایای اول و چهارم



شکل ۱۹ تاثیر متقابل پارامترهای زوایای دوم و سوم

با توجه به نمودارهای نشان داده شده نتیجه می‌شود که بهترین سطح ولتاژ سطح ولتاژ ۱۵۰۰ ولت و بهترین تعداد دور، تعداد دور ۳۵ دور می‌باشد که باعث شکل‌گیری کامل تمام زوایای قطعه می‌شود. همچنین با استفاده از محاسبات مربوط به تحلیل واریانس میزان تاثیر هر یک از پارامترها بدست می‌آید که مطابق نمودار شکل(۲۰) نشان داده شده است.



شکل ۲۰ نمودار درصد تاثیر پارامترها

با توجه به نمودار بدست آمده مشاهده می‌شود که بیشترین درصد تاثیر مربوط به ولتاژ می‌باشد و این بدین معنی می‌باشد که می‌توان با افزایش ولتاژ تاثیر بیشتری بر روی شکل‌دهی الکترومغناطیس نسبت به پارامتر تعداد دور داشت. ولی با افزایش ولتاژ و ثابت بودن تعداد دور نیز باعث کاهش بازدهی می‌شود که می‌توان این امر را در سیم‌پیچ‌های ۱۰ الی ۳۰ دور مشاهده نمود. بنابراین پارامترهای شکل‌دهی الکترومغناطیس وابسته به یکدیگر هستند و باید متناسب با یکدیگر انتخاب شوند.

۴- نتیجه‌گیری

- با توجه به داده‌های بدست آمده در آزمایش‌ها نتیجه می‌شود که پس از اعمال نیروی الکترومغناطیس به ورق ابتدا زوایای دوم و سوم با توجه به بالاتر بودن آنها نسبت به سایر زوایا شکل می‌گیرند. پس از شکل‌گیری زاویه دوم و سوم با افزایش تدریجی ولتاژ زوایای اول و چهارم شروع به شکل‌گیری می‌کنند.

- ولتاژ ۶۰۰ الی ۸۰۰ ولت از قدرت کمتری برخودار است و در بیشتر آزمایش‌ها با استفاده از این مقادیر ولتاژ، شکل‌دهی انجام نشده است. همچنین بهترین سطح ولتاژ، ولتاژ ۱۵۰۰ ولت می‌باشد که باعث شکل‌دهی کامل قطعه می‌شود.

- سیم‌پیچ‌ها باید هم سطح قطعه‌کار ساخته شوند تا بتوانند نیروی الکترومغناطیس را به کل سطح قطعه اعمال کنند و در صورت استفاده از سیم‌پیچ‌های الکترومغناطیس کوچکتر باید شکل‌دهی در چندین مرحله(با توجه به ابعاد آن) انجام شود.

- سیم‌پیچ‌ها پس از طراحی و ساخته شدن باید در محلول‌های اف کا ۲۰ قرار گیرند تا در زمان تخلیه انرژی الکتریکی در آنها، دچار تغییر شکل نشوند.

۵- مراجع

[1] Herbert W. Yankee, 1979 , Manufacturing Processes, Englewood Cliffs, N.J. : Prentice-Hall, ISBN0135555574 ,pp 345,528, 523.

[2] Aminian Dehkordi, Sasan, Kolahdooz, Amin, Loh-mousavi, Mohsen, The application of electromagnetic energy in the mechanical engineering to the required force for movement, The 2th National Congress on Energy (A new approach to the production, productivity and storage), Islamic Azad university, Khomeinishahr Branch, Winter 2017. (in Persian فارسی)

[3] Schafer, R. , pasquale , p. , The electromagnetic pulse technology (EMPT) forming , welding , crimping and cutting , Biuletyn instytutu spawalnictwa, 2014 ,Vol.58, pp. 50-57.

[4] Aminian Dehkordi, Sasan, Kolahdooz, Amin, Loh-Mousavi, Mohsen, Study of Effective Parameters on Velocity of Projectile Using Electromagnetic Force, Journal of Mechanical Engineering and Vibration, Vol. 7, No. 3, (2016) pp. 21-31.(in Persian فارسی)

[5] Ahmed, M., Panthi, S.K. , Ramakrishanan, N. , JHA, A.k., Yegneswaran, A.H., Dasgupta, R., Ahmed, S., Alternative flat coil design for electromagnetic forming using FEM, Transaction of Nonferrous Metal Society of China, Vol. 21, 2011, pp. 618-625.

[6] Cui, X., Li, X., Mo, X., Fang, J., Zhu, Y., Zhong, K., Investigation of large sheet deformation process in electromagnetic incremental forming, Material and Design, Vol. 76. 2015, pp. 86-96.

[7] Kun Guo ,Xinpeng , Lei ,Mei Zhan, Jingqiang Tan, Electromagnetic Incremental Forming of Integral Panel under different discharge conditions, Journal of Manufacturing Processes , 2017 , In press.

[8] Ning, L., Haiping Y., Zhu, X., Zhisong, F., Lin, L. , Electromagnetic Forming facilitates the transition of Deformation mechanism in 5052 Aluminum Alloy , Material science and Engineerign A , 2016 , Vol.673 , pp.222-232.

[9] Nateghi Peykani, Abolfazl, Keshavarzi, Ahmad, Kolahdooz, Amin, Finite Element Simulation of Coil's Wire Diameter and Distance from Coil in Electromagnetic sheet Forming process of Aluminum Alloy 1050, The 9th National Congress on Mechanical Engineering, Islamic Azad university, Khomeinishahr Branch, Winter 2017. (in Persian فارسی)

[10] Nateghi Peykani, Abolfazl, Keshavarzi, Ahmad, Kolahdooz, Amin, An Investigation on the Coil's wire Diameter and Distance from Coil in Electromagnetic Forming of Aluminum V Shape, The 9th National Congress on Mechanical Engineering, Islamic Azad university, Khomeinishahr Branch, Winter 2017. (in Persian فارسی)

[11] Correia, J.P.M. , Siddiqui, M.A. , Ahzi, S. , Belouettar, S. , Davies, R. , "A simple model to simulate electromagnetic sheet free bulging process", Internatioal Journal of Mechanical sciences, 2008, pp. 1466-1475.

[12] Xiong, W., Wang, W., Wan, M., Li, X., Geometric issues in V bending electromagnetic forming process of 2024–T3 aluminum alloy, journal of manufacturing process, Vol. 19, 2015, pp. 171-182.

[13] Luca , D. , Finite element modeling and experiment for behavior estimation of AlMn0.5Mg0.5 sheet during electromagnetic forming , Trans. Nonferrous Met. Soc. Chine, 2015, Vol.25, pp. 2331-2341.

[14] Psyka, V., Rischa, D., Kinseyb, B.L., Tekkayaa, A.E., Kleinera, M. Electromagnetic forming-A review, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 211, 2011, pp. 787-829.