

بررسی پارامترهای ولتاژ و تعداد دور سیمپیچ بر روی فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیس ورق‌های V شکل آلومینیوم

سجاد نادیان برسیانی^۱، احمد کشاورزی^{۲*}، امین کلاه‌دوز^۲

* نویسنده مسئول: keshavarzi@iaukhsh.ac.ir

چکیده

واژه‌های کلیدی

شکل‌دهی الکترومغناطیس، شکل‌دهی وی شکل، شبیه‌سازی المان محدود، روش آماری فاکتوریل

جهت شکل‌دهی قطعات بدون اثرگذاری سنبه بر روی آنها از نیروی الکترومغناطیس که یکی روش‌های شکل‌دهی سریع می‌باشد، استفاده می‌شود. استفاده از این نیرو باعث می‌شود که قطعات شکل‌دهی داده شده دارای کمترین برگشت فتری و پارگی را داشته باشند و به علت عدم اثرگذاری هزینه‌های ساخت تجهیزات مانند ساخت سنبه کاهش می‌یابد. در این مقاله از نیروی الکترومغناطیس جهت شکل‌دهی ورق‌های آلومینیوم به شکل وی شکل استفاده شده است. در شکل‌دهی الکترومغناطیس سیم-پیچ‌ها رابط بین دستگاه و قطعه کار می‌باشند. به همین جهت در این مقاله به بررسی تعداد دور و ولتاژ دستگاه در ۱۰ سطح پرداخته شده است. با توجه به نتایج بدست آمده و تحلیل آنها با استفاده از روش آماری فاکتوریل کامل، نشان داده شد که بهترین حالت شکل‌دهی در ولتاژ ۱۵۰۰ ولت و سیم‌پیچ ۳۵ دور می‌باشد که دلیل آن ولتاژ بالای دستگاه جهت ایجاد یک شدت جریان آنی و تعداد دور مناسب جهت انتقال کامل نیرو به قطعه کار می‌باشد. بطوریکه با افزایش تعداد دور به ۴۰ دور میزان شکل‌دهی به مقدار ۳/۳۴ درصد کاهش یافته است.

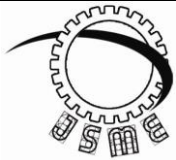
تاریخ ارسال: ۹۵/۰۸/۲۸

تاریخ بازنگری: ۹۵/۰۹/۲۶

تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۲۲

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، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، اصفهان، ایران.



Journal of
Solid Mechanics
in Engineering

Journal of Solid Mechanics in Engineering

<http://jsme.iaukhsh.ac.ir>



Experimental Study of the Voltage and Number of the Coil Rounds in Electromagnetic Forming Process of the V shape Aluminum sheets

Sajjad Nadian Bersiani¹, Ahmad Keshavarzi^{2,*}, Amin Kolahdooz²

* Corresponding Author: keshavarzi@iaukhsh.ac.ir

Abstract:

Electromagnetic power, which is one of the fast ways for forming, is used for forming workpieces without having any effect on them. Using it causes the workpieces to reach the minimum back spring and tear; consequently building the equipment like pistons will cost less than before. Electromagnetic power is used for forming Aluminium sheets into V shapes in this study. As the coils connect the machine and the workpieces, the number of rounds and the voltage in 10 levels will be discussed in this study. Considering the results and analysis that have been reached, the best forming occurs in the voltage of 1500 and 35 rounds. Because the machine creates a high ampere and a proper amount of rounds in this voltage in order to transfer the whole power to the workpiece. As the rounds increase to 40, the forming will decrease up to 34/3 percent.

Key words:

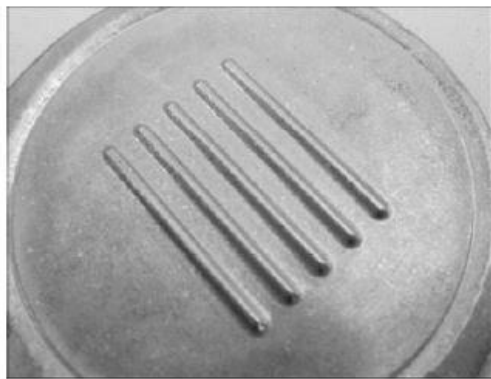
Electromagnetic Forming.
V Shape Forming.
Finite elements Simulation.
Factorial Statistical method.

1- MSc Student, Department of Mechanical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr/Isfahan, Iran.

2- Assistant Professor, Young researchers and elite club, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr/Isfahan, Iran.

۱- مقدمه

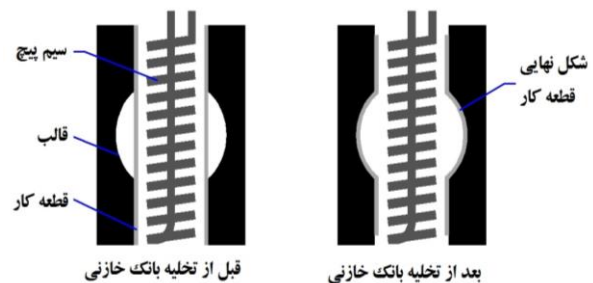
بگیرد را مختصراً شرح داده اند. همچنین بیان کردند که با ۳ برابر شدن دما، میزان مقاومت سیم ۲ برابر افزایش و استحکام ورق به میزان ۶۰ درصد کاهش می‌یابد. کینگ جوان و همکاران [۶] به بررسی برآمده سازی ریز ورق نازک مسی با استفاده از شکل دهی الکترومغناطیس پرداختند. آنها با استفاده از میکروسکوپ لیزری کانفوکال^۱ به مطالعه پارامترهای ولتاژ و عمق قالب پرداختند. ایشان که نشان دادند که با افزایش ولتاژ شکل‌دهی ورق بهتر انجام شده است. شکل‌دهی کامل در ولتاژ ۷/۵ کیلو ولت به دست می‌آید که پس از آن با افزایش و یا کاهش ولتاژ ظهور و یا تشکیل شیارهای ریز کاهش می‌یابد و فقط در یک ولتاژ خاص شکل کامل می‌شود. همچنین با کاهش فاصله، عمق شکل‌دهی افزایش و همچنین بیان کردند که یکی از عوامل- های ایجاد تاب و کاهش در عمق، خارج نشدن هوای محبوس در قالب است. به دلیل سریع بودن فرآیند، فرآیند فرصت خارج شدن هوا از قالب را نمی‌دهد. همچنین بیان کردند که با افزایش ولتاژ به میزان ۲/۳ برابر عمق شکل‌دهی ۲ برابر می‌شود. با چهار برابر شدن فاصله، عمق شکل‌دهی به میزان ۱/۷۳ درصد کاهش پیدا کرده است. در شکل (۲) نمونه ای از قطعه تولید شده از این روش نشان داده شده است



شکل (۲) شیارهای ایجاد شده بر روی ورق مسی با استفاده از نیروی الکترومغناطیسی با فاصله ۰/۳ میلی‌متر و ولتاژ ۱۰/۵ کیلو ولت

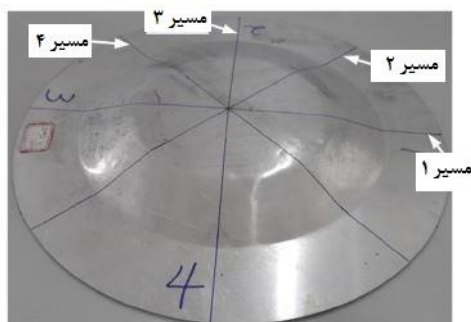
جهت شکل‌دهی قطعات بدون اثر گذاری تجهیزات شکل-دهی از قبیل سنبه، حرارات شعله و غیره از نیروی الکترومغناطیس استفاده می‌شد. از نیروی الکترومغناطیس جهت شکل‌دهی، برشکاری، مونتاژ کاری و غیره استفاده می‌شود. [۱].

در شکل‌دهی الکترومغناطیس قطعه کار که معمولاً از جنس آلومینیوم انتخاب می‌شود بین سیم‌پیچ و قالب قرار می‌گیرد. پس از ذخیره شدن انرژی الکتریکی در بانک خازنی، انرژی در سیم‌پیچ تخلیه می‌شود. شدت جریان بالای ذخیره شده در بانک خازنی با عبور از سیم‌پیچ باعث ایجاد میدان مغناطیسی قوی و گذرایی می‌شود که به قطعه کار نیرو وارد می‌کند. با اعمال این نیرو به قطعه کار که در مدت زمان کمتر از میکروثانیه انجام می‌شود قطعه کار به سمت قالب پرتاب شده و شکل قالب را به خود می‌گیرد. در شکل (۱) نمونه‌ای از شکل‌دهی الکترومغناطیس نشان داده شده است [۲ تا ۴].



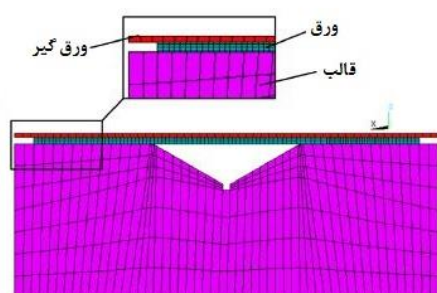
شکل (۱) شکل شماتیک شکل‌دهی الکترومغناطیس [۲]

با توجه به انواع شکل‌دهی الکترومغناطیس و مشکلات آن محققین مطالعات زیادی در این زمینه داشته‌اند. ال ازب و همکاران [۵] به بررسی مدل‌سازی شکل‌دهی الکترومغناطیس ورق فلزی پرداختند. آنها با بیان مزایای زیاد فرآیند الکترومغناطیس بیان کردند که مدل‌سازی باید به صورت دقیق انجام گیرد تا در طراحی سیستم شکل‌دهی استفاده شود. آنها خلاصه‌ای از روش‌های شکل‌دهی الکترومغناطیس و کاربرد های آن را بیان کردند و مروری بر مدل‌های موجود داشته‌اند. علاوه بر آن پیکر بندی ریاضی که به صورت عددی بسط داده می‌شود تا شبیه‌سازی صورت



شکل (۴) قطعه بزرگ به همراه مسیرهای شکل دهی داده شده بوسیله شکل دهی الکترومغناطیس [۸]

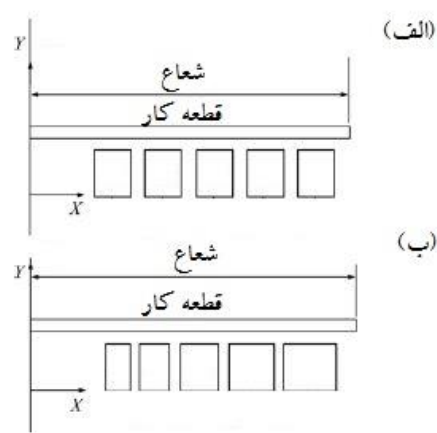
زانگ و همکاران [۹] به بررسی شکل هندسی در خم کاری ورق وی شکل فرآیند الکترومغناطیس آلومینیوم آلیاژ ۲۰۲۴ پرداختند. آنها با بررسی خم کاری ورق آلومینیوم آلیاژ ۲۰۲۴ با قالب وی شکل به صورت عددی و عملی مشکلات مربوط به هندسه شکل نهایی و ولتاژ را مورد بررسی قرار دادند. آنها در تحلیل‌های خود چهار جنبه توزیع نیروی الکترومغناطیس، به روز رسانی توزیع نیروی الکترومغناطیس، تاثیر برخورد بین ورق و قالب و مدت زمان پالس درون سیم پیچ 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 می شود.



شکل (۵) نحوه انجام آزمایشات و قرار گیری قطعه کار در تست‌های شبیه سازی و عملی [۹]

امینان و همکاران [۱۰] جهت شبیه سازی فرآیند الکترومغناطیس از کوپل نرم افزاری آباکوس و جی مگ استفاده کردند. آنها با استفاده از نرم افزار جی مگ تاثیر بانک خازنی، کلید تخلیه و غیره را مورد بررسی قرار داده و

احمد و همکاران [۷] به بررسی جایگزین طراحی سیم پیچ-های صفحه ای برای شکل دهی الکترومغناطیس پرداختند. آنها با بیان اینکه سیم پیچ‌ها مهمترین قسمت فرآیند شکل دهی الکترومغناطیس هستند این سیم پیچ‌ها را با استفاده از نرم افزارهای کامپیوتری طراحی کردند. آنها سیم پیچ‌های غیر یکنواخت را طراحی و ساختند که در شکل (۳) نشان داده شده است. ایشان با انجام آزمایش‌ها بیان کردند که سیم پیچ‌های غیر یکنواخت نسبت به سیم پیچ‌های یکنواخت نیروی بیشتری را به سمت قطعه کار انتقال داده‌اند.



شکل (۳) سیم پیچ های صفحه ای الکترومغناطیس (الف) سیم پیچ صفحه ای یکنواخت (ب) سیم پیچ صفحه ای غیر یکنواخت

سوی و همکاران [۸] به بررسی تغییر شکل ورق‌های بزرگ در فرآیند شکل دهی الکترومغناطیس پرداختند. ایشان با ساخت سیم پیچ‌های کوچک و انتقال آنها در موقعیت‌های متفاوت به شکل دهی 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 سیم پیچ به میزان دو برابر (۲۰۰۰ میکروثانیه) میزان جابجایی ورق به میزان ۲۵ درصد افزایش می یابد. همچنین آنها با استفاده از این روش و تکرار تخلیه الکتریکی در موقعیت‌های مختلف انرژی مورد نیاز را کاهش دادند. (شکل ۴)

کنند و در نهایت سرعت بیشتری بگیرند به همین منظور جهت افزایش سرعت می‌بایست علاوه بر در نظر گرفتن سیم پیچ‌های قوی پرتابه بزرگتر ساخته شود تا اشباع نشود. در این مقاله هدف بررسی سیم‌پیچ‌های فرایند الکترومغناطیس با تغییر پارامترهای تعداد دور و ولتاژ می‌باشد. جهت اندازه‌گیری تاثیر سیم‌پیچ‌ها از نیروی الکترومغناطیس جهت شکل‌دهی ورق‌ها به ورق‌های وی شکل استفاده شده است.

۲- روش 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 و قطر خارجی r_o و ورق در فاصله a از سطح سیم‌پیچ قرار دارد [۱۲ و ۱۳].

جریان گردابی حاصل از میدان مغناطیسی به صورت زیر بدست می‌آید [۱۲ و ۱۳].

$$J = -\frac{\partial H}{\partial r} \quad (1)$$

$$J = -\frac{\partial H}{\partial z} \quad (2)$$

همچنین نیروی لورنتس با توجه به رابطه (۱-۳) به صورت زیر بدست می‌آید [۱۲ و ۱۳].

$$F = J \times B \quad (3)$$

$$F_r = -\mu_0 H \frac{\partial H}{\partial r} = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{\partial (H^2)}{\partial r} \quad (4)$$

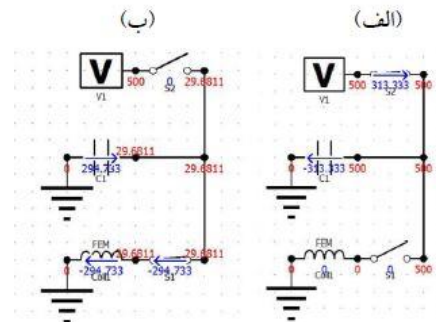
$$F_z = -\mu_0 H \frac{\partial H}{\partial z} = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{\partial (H^2)}{\partial z} \quad (5)$$

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 [۱۲ و ۱۳].

$$P_r = \int_{r_i}^{r_o} F_r dr \quad (6)$$

$$P_z = \int_{r_i}^{r_o} F_z dr \quad (7)$$

در ادامه با کوپل این نرم‌افزار با نرم‌افزار آباکوس مقدار تغییر شکل ورق را محاسبه نمودند. ایشان اعلام نمودند که استفاده از این کوپل می‌تواند خطای مربوط به شبیه‌سازی را تا ۶۰ درصد کاهش دهد. شکل (۶) نمونه‌ای از مدار رسم شده در کار ایشان را نشان می‌دهد.



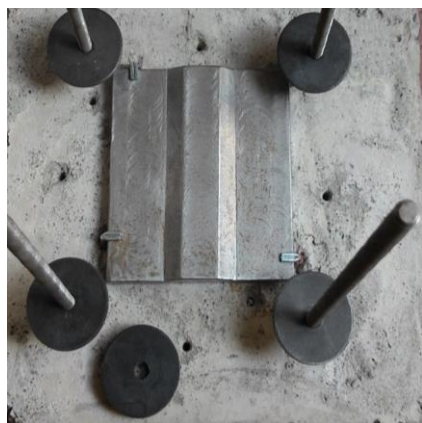
شکل (۶) مدارهای الکتریکی در نرم‌افزار جی‌مگ (الف) زمان شارژ بانک خازنی (ب) زمان تخلیه بانک خازنی [۱۰]

همچنین ایشان در کار دیگر خود [۱۱] به بررسی پارامتر-های موثر در سرعت پرتابه‌ها با استفاده از نیروی الکترومغناطیس پرداختند. آنها ابتدا دستگاه الکترومغناطیسی با قدرت ۳ کیلو ژول ساخته و سپس با استفاده از دستگاه سرعت‌سنج به اندازه‌گیری سرعت پرتابه‌ها پرداختند. آنها پارامترهای تعداد لایه، قطر سیم، طول سیم‌پیچ، جنس لوله، ولتاژ، طول و وزن پرتابه سیم‌پیچ‌های شتاب‌دهی الکترومغناطیس را مورد بررسی قرار داده و جهت کاهش آزمایش‌ها و تجزیه و تحلیل خروجی‌ها از روش آماری تاکوچی استفاده نمودند. آنها جهت شبیه‌سازی فرآیند از نرم‌افزارهای المان محدود جی‌مگ و آباکوس استفاده کردند. نتایج ایشان تطابق مناسبی را در دو حالت شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی نشان می‌دهد. ایشان در ادامه بیان می‌کنند 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 شتاب‌دهی 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

پس از ساخته شدن سیم پیچ ها جهت مستحکم نمودن ، سیم پیچ ها را در محلول های اپکسی قرار داده می شدند. سیم پیچ ها در محلول آراکس اف کا ۲۰ قرار داده شده اند. این محلول به صورت شفاف بوده و دارای استحکام بالایی می باشد.

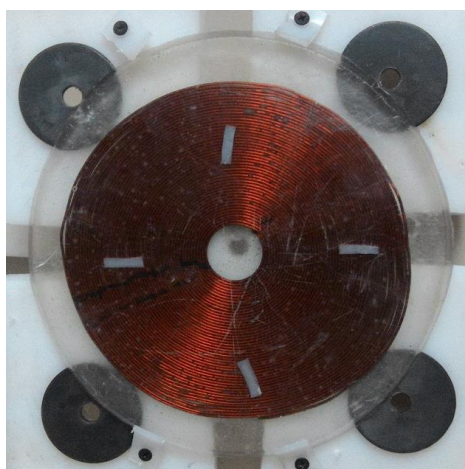
۲-۳- نحوه انجام آزمایش های عملی

فیکسچری مطابق شکل (۷) از جنس بتن ساخته شد و قالب روی آن نصب گردید. در اطراف این فیکسچر از پیچ های متری استفاده می شود تا بتوان فاصله سیم پیچ تا قطعه کار را بصورت دقیق مشخص نمود.



شکل (۷) ساخت فیکسچر قالب شکل دهی الکترومغناطیس

جهت قرار گرفتن سیم پیچ نیز فیکسچری طراحی شده است که سیم پیچ را در بر گرفته و بر روی فیکسچر قالب قرار می گیرد (شکل ۸).



شکل (۸) فیکسچر سیم پیچ شکل دهی الکترومغناطیس

با بدست آوردن مقدار H_r می توان مقدار فشار P_r را بدست آورد [۱۲ و ۱۳].

$$H_r = \frac{In}{\pi l} \left[\tan^{-1} \left(\frac{-2a_{r_1} \times r}{a_{r_1}^2 + r_{o_{سیم پیچ}}^2 - r^2} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{-2a_{r_1} r}{a_{r_1}^2 + r_{i_{سیم پیچ}}^2 - r^2} \right) \right] \quad (۸)$$

$$P_r = \frac{\mu_0 I^2 n^2}{2\pi^2 l^2} \left[\tan^{-1} \left(\frac{-2a_{r_1} \times r}{a_{r_1}^2 + r_{o_{سیم پیچ}}^2 - r^2} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{-2a_{r_1} r}{a_{r_1}^2 + r_{i_{سیم پیچ}}^2 - r^2} \right) \right]^2 \quad (۹)$$

در روابط فوق I شدت جریان ، n تعداد دور و l نشان دهنده عرض پیچ در پیچ می باشد که با استفاده از روابط بالا میزان نیروی اعمالی به ورق بدست می آید [۱۲ و ۱۳].

۲-۲- تعیین پارامترها

با توجه به اینکه پارامترهای زیادی در شکل دهی الکترومغناطیس دخالت دارند در این تحقیق پارامترهای ولتاژ و تعداد دور سیم پیچ در سطوح بالایی مورد بررسی قرار گرفتند که سطوح آن ها به صورت 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

۳- نتایج و بحث

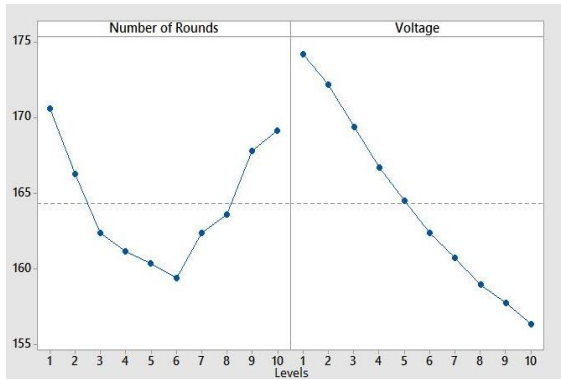
با انجام آزمایش‌ها قطعات شکل‌دهی داده شده مطابق شکل (۹) جمع آوری می‌شوند و برای اندازه‌گیری زوایا به دستگاه ویدیو پروفایل منتقل داده می‌شوند.



شکل (۸) جمع آوری قطعات شکل‌دهی داده شده

با بدست آوردن مقدار خروجی‌ها برای هر یک از آزمایش‌ها، خروجی‌ها به نرم افزار مینی تب منتقل داده می‌شوند و مورد تحلیل قرار می‌گیرند.

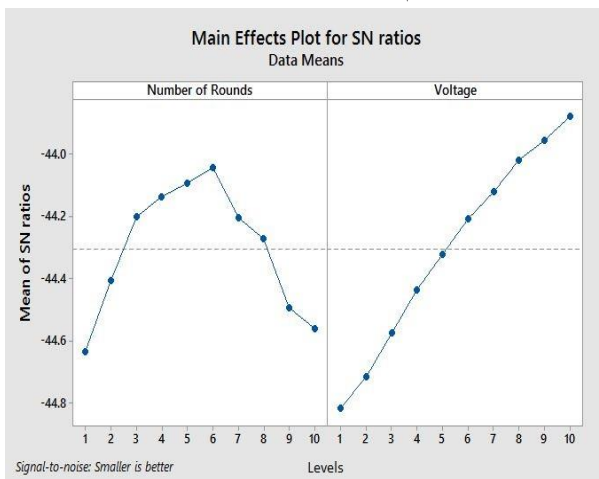
با تحلیل پارامترها توسط نرم افزار آماری مینی تب، می‌توان تاثیر متقابل هر پارامتر، تاثیر سطوح در شکل‌دهی و نمودار سیگنال به نویز را مشاهده نمود که در شکل (۱۱) و شکل (۱۲) نمودارهای مربوط به شکل‌دهی زاویه نشان داده شده است.



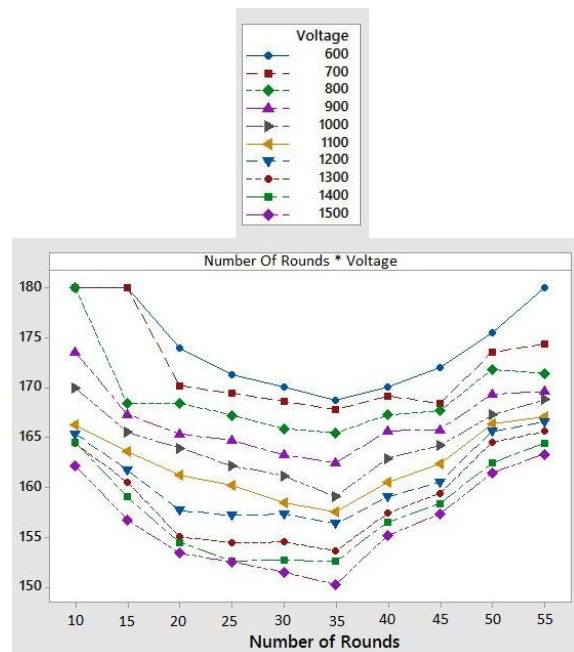
شکل (۱۰) نمودار تاثیر سطوح بر شکل‌گیری زاویه دوم

با توجه به نمودارهای نشان داده شده مشاهده می‌شود که سطح شش‌ام پارامتر تعداد دور بهترین سطح می‌باشد که از علت آن می‌توان به تعداد دور مناسب، مقاومت پایین، پوشش دادن تمامی سطح قطعه کار اشاره نمود. همچنین سطح ده‌ام پارامتر ولتاژ نیز بهترین سطح می‌باشد زیرا در این ولتاژ با توجه به مقدار مقاومت ثابت سیم پیچ جریان بیشتری از سیم پیچ عبور می‌کند.

جهت رسم نمودار سیگنال به نویز با توجه به اینکه خروجی زاویه می‌باشد و زاویه هرچه قدر کوچکتر شود بهتر است از فرمول (کوچک بهتر)^۱ استفاده می‌شود و نمودار آن مطابق شکل (۱۳) رسم می‌شود.



شکل (۱۱) نمودار سیگنال به نویز



شکل (۹) تاثیر متقابل پارامترها و سطوح بر تشکیل زاویه دوم

^۱ - Small is Better

سطوح ولتاژ ۶۰۰ الی ۸۰۰ ولت از انرژی کمی برخوردار هستند که در بیشتر سیم پیچ ها باعث ایجاد نشدن زاویه های ورق به خصوص زاویه های اول و چهارم می شود. بیشترین تغییر شکل مربوط به حداکثر ولتاژ یعنی ۱۵۰۰ ولت می باشد که با انتخاب سیم پیچ ۳۵ دور نیز به عنوان بهترین نوع سیم پیچ بهترین شکل دهی انجام می شود.

۴- نتیجه گیری

- بهترین ولتاژ برای شکل دهی الکترومغناطیس ورق های وی شکل ولتاژ ۱۵۰۰ ولت می باشد.
- سیم پیچ مناسب برای شکل دهی ورق ها باید به گونه ای باشد که کل قطعه کار را پوشش دهد و در غیر این صورت مطابق تحقیقات قبلی با حرکت بر روی یک مسیر شکل دهی را انجام دهد.
- بهترین تعداد دور برای سیم پیچ سیم ۱/۵ میلیمتر تعداد دور ۳۵ الی ۴۰ دور می باشد.
- سیم پیچ ها حتما باید در محلول های اپکسی قرار گیرند تا در زمان شکل دهی تغییر شکل ندهند.
- قالب باید از جنس فرومغناطیس باشد تا بتواند میدان مغناطیسی را بسمت خود جذب کند و از پراکندگی آن جلوگیری کند.

مراجع:

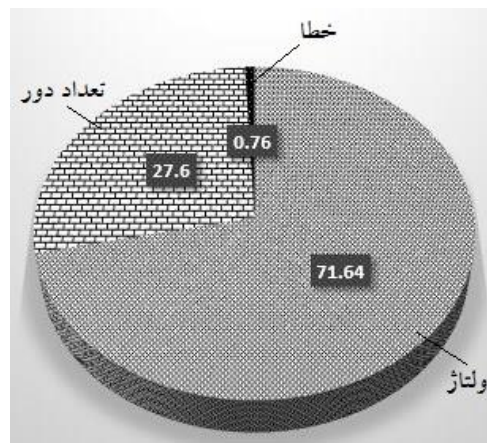
[1] Rees, D.W.A., Basic Engineering, Published by Elsevier Ltd., 2006, pp. 448-452.

[2] آخرین <http://ramin-jodeyri.blogfa.com/post/69> بازدید ۱۰ شهریور ۱۳۹۵

[3] Daehn G.S., High Velocity Metal Forming ASM Handbook, Volume 14B, Metalworking: Sheet Forming, ASM International, Materials Park, Ohio, pp. 405-418.

[4] Aminian Dehkordi, S., Kolahdooz, A., Lohmousavi, M., *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.

همچنین با بدست آوردن مقدار مجموع مربعات برای هر پارامتر می توان نمودار درصد تاثیر هر پارامتر را رسم نمود که درصد تاثیر هر پارامتر بصورت شکل (۱۴) نشان داده شده است.



شکل (۱۲) درصد تاثیر هر پارامتر

نتایج نشان می دهد که با افزایش ولتاژ و ثابت بودن مقاومت سیم پیچ میزان جریان عبوری از سیم پیچ افزایش می یابد و با افزایش شدت جریان، نیروی الکترومغناطیس افزایش می یابد. با توجه به نتایج هر سیم پیچ دارای تعداد دور و مقاومت منحصر به فرد است که در سیم پیچ های ۱۰ دور الی ۳۰ دور شکل دهی به صورت موجی انجام شده است. دلیل ایجاد لبه ها به صورت موجی کوچک بودن سطح مقطع سیم پیچ از سطح مقطع ورق است که باعث می شود نیروی شدیدی به مرکز ورق اعمال شود و اطراف آن به دلیل مقاومت هوا به صورت موجی شکل تبدیل شود.

همچنین با افزایش تعداد دور سیم پیچ در سیم پیچ های ۴۰ الی ۴۵ دور مشاهده می شود که با اینکه سیم پیچ سطح کل ورق را پوشش می دهد ولی شکل دهی را نمی تواند کامل انجام دهد که دلیل آن افزایش مقاومت سیم پیچ و کاهش جریان عبوری از سیم پیچ و کاهش نیروی الکترومغناطیس می باشد. این افزایش مقاومت در ولتاژهای بالا خود را بیشتر نشان می دهد به طوری که بیشتر انرژی به گرما تبدیل می شود. همچنین با توجه به اینکه نیروی الکترومغناطیس در سیم پیچ ۴۵ دور به اطراف قطعه کار نیز پراکنده می شود باعث هدر رفتن انرژی به اطراف می شود.

- [5] El-Azab, A., Garnich, M., Kapoor, A., Modeling of the electromagnetic forming of sheet metals: state of the art and future needs, *Journal of material processing technology*, Vol.142, 2003, pp. 744-754.
- [6] Qing-Juan , Z. , Chun-ju , W. , Hai-ping , Y. , Bin , G. , De-bin , S. ,Chun-feng , L. , Micro bulging of thin T2 copper sheet by electromagnetic forming , *Transaction of Nonferrous Metal Society of China*, Vol. 2, 2011, pp. 461-464.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Aminian Dehkordi, S., Kolahdooz, A., Loh-Mousavi, M., *Simulation of the electromagnetic energy on the speed of a projectile using Abaqus and J-Mag software coupled*, The 2th National Congress on Energy (A new approach to the production, productivity and storage), Islamic Azad university, Khomeinishahr Branch, Winter 2017, In Persian.
- [11] Aminian Dehkordi, S., Kolahdooz, A., Loh-Mousavi, M., 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.
- [12] Psyka, V., Risch, D., Kinsey, B.L., Tekkayaa, A.E., Kleinera, M. Electromagnetic forming-A review, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211, 2011, pp. 787-829.
- [13] Gayakwad, D., Kumar dargar, M., kumar sharma, P., Purohit, R., Rana, R.S., A Review on Electromagnetic forming process, *Procedia materials science*, Vol. 6, 2014, pp. 520-527.

