Archive of SID





Experimental and Finite Element Study of the Effect of Force Distribution on Electromagnetic Pre-Forming of Aluminum Alloy Conical Sheet Parts

ARTICLE INFO

Article Type Original Research

Authors Rajabloo A.¹ MSc, Bakhhi M.¹ PhD, Gorji H.^{1*} PhD

How to cite this article

Rajabloo A, Bakhhi M, Gorji H. *Experimental and Finite Element Study of the Effect of Force Distribution on Electromagnetic Pre-Forming of Aluminum Alloy Conical Sheet Parts. Modares Mechanical Engineering. 2021;21(5):327-340.

¹ Faculty of mechanical engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

*Correspondence Address: Faculty of mechanical engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran Phone: -Fax: hamidgorji@nit.ac.ir

Article History

Received: January 06, 2021 Accepted: February 26, 2021 ePublished: April 22, 2021 In forming conical parts by traditional deep drawing techniques, due to the stress concentration at the contact area between the punch and the workpiece, thinning and rupture occurs on the sheet. There is also a high possibility of wrinkling in the free area of the sheet; where there is no contact between the punch and the sheet. Therefore, new methods have been examined in forming this group of parts. Electromagnetic forming is one of the relatively old methods of high-speed forming that has attracted more attention in recent years. In the present study, the process of pre-forming of aluminum conical parts using electromagnetic force has been discussed numerically and experimentally. First, experiments were carried out by a simple spiral coil and after confirming the validity of the numerical simulations, the effect of electromagnetic force density in radial and axial directions was investigated in different areas of the sheet. Using the obtained results, a new coil was designed and built that has the ability to provide suitable distribution of the force in the radial and axial directions. Reduction in power consumption by up to a quarter, an increase in the amount of radial inward force and the height of the preform formed cone up to 2 times, minimizing the friction force, reduction of the workpiece center thinning by 3% (while increasing the height by 2 times) and elimination of wrinkles in the flange area of the sheet are the advantages of using the new coil compared to the primary coil.

Keywords Electromagnetic Sheet Forming, Explosive Forming, Finite Element Analysis, Electromagnetic Force Distribution

CITATION LINKS

ABSTRACT

[1] Electromagnetic forming—a review [2] Electromagnetic flat sheet forming by spiral type actuator coil [3] Electromagnetic pulse assisted progressive deep drawing [4] Incremental electromagnetic-assisted stamping (IEMAS) with radial magnetic pressure: a novel deep drawing method for forming aluminum alloy sheets [5] 3D modeling and deformation analysis for electromagnetic sheet forming process [6] Alternative flat coil design for electromagnetic forming using FEM [7] Radial-axial force controlled electromagnetic sheet deep drawing: electromagnetic analysis [8] Investigation of hydrodynamic deep drawing for conical-cylindrical cups [9] Handbook of metal forming [10] Drawing of conical cups with friction actuated blank holding [11] The drawing of conical cups using an annular urethane pad [12] Adaptive FEM simulation for prediction of variable blank holder force in conical cup drawing [13] Experimental and Finite element simulation method for forming a sharp conical part [14] Analysis of the increased formability of aluminum alloy sheet formed using electromagnetic forming [15] The effect of tool-sheet interaction on damage evolution in electromagnetic forming of aluminum alloy sheet [16] Formability and damage in electromagnetically formed AA5754 and AA6111 [17] Sheet metal electromagnetic forming using a flat spiral coil: Experiments, modeling, and validation [18] Strain rate dependence on mechanical properties in some commercial aluminum alloys

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

مطالعهی تجربی و المان محدود اثر توزیع نیرو بر پیش-شکلدهی الکترومغناطیسی قطعات ورقی مخروطی از جنس آلیاژ آلومینیوم

ابوالفضل رجبلو

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

محمد بخشى

استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران **حمید گرجی***

دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

چکیدہ

در شکلدهی قطعات مخروطی بهروش سنبه و ماتریس سنتی، بهدلیل بهوجود آمدن تمرکز تنش در محل برخورد سنبه و قطعهکار، نازکشدگی و پارگی در ورق رخ میدهد. همچنین در جایی که تماسی بین سنبه و ورق وجود ندارد، احتمال زیادی در به وجود آمدن چروکیدگی نیز وجود دارد. از این رو، برای شکل دهی این دسته از قطعات، همواره روشهای نو مورد بررسی قرارگرفتهاند. شکلدهی الکترومغناطیسی (Electromagnetic Forming)، ازجمله روشهای نسبتاً قدیمی شکلدهی سرعت-بالا است که در سالهای اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است. در پژوهش پیش رو، فرآیند شکلدهی پیشفرم قطعات مخروطی آلومینیومی به کمک نیروی الکترومغناطیسی به دو روش المان محدود و آزمون تجربی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. ابتدا شکلدهی تجربی توسط سیمپیچ حلزونی ساده مورد بررسی قرار گرفت و پس از تأیید اعتبار شبیهسازیها، تحلیل اثر چگالی نیرو در راستای شعاعی و محوری در نقاط مختلف ورق انجام شد. با استفاده از نتایج بهدست آمده، سیم پیچ جدیدی طراحی و ساخته شد که توانایی توزیع مناسب نیرو در راستای شعاعی و محوری را دارد. کاهش توان مصرفی تا یکچهارم، افزایش مقدار نیروی شعاعی رو به داخل و ارتفاع پیشفرم مخروط شکلگرفته تا ۲ برابر، به حداقل رساندن نیروی اصطکاک، کاهش نازکشدگی مرکز قطعهکار به مقدار ۳ درصد (ضمن افزایش ارتفاع ۲ برابری) و از بین رفتن چروکخوردگی در ناحیه فلنج ورق از مزایای استفاده از سیمپیچ جدید نسبت به سیمپیچ اولیه است.

کلیدواژهها: شکلدهی الکترومغناطیسی ورق، شکلدهی انفجاری، تحلیل المان محدود، توزیع نیروی الکترومغناطیسی

> تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۰۸ *نویسنده مسئول: hamidgorji@nit.ac.ir

۱– مقدمه

برای شکلدهی قطعات ورقی، از فرآیندهایی مانند کشش عمیق، هیدروفرمینگ، استمپینگ و خمکاری استفاده می شود. شکلدهی الکترومغناطیسی، نوعی از فرآیندهای شکلدهی انفجاری سرعت –بالا است که در آن از میدان مغناطیسی پالسی برای شکلدادن قطعهکارهایی از جنس مس و آلومینیوم (به دلیل برای شکلدادن قطعهکارهایی از جنس مس و آلومینیوم (به دلیل برای الکتریکی بالا) استفاده می شود. اعمال نیرو در این روش به صورت غیرتماسی است^[1]. شکل ۱ طرحواره مدار شکلدهی الکترومغناطیسی را نشان می دهد که در آن ای ایم ایم ایم ایم ترتیب

مقاومت، اندوکتانس و جریان مدار اصلی و I₁ جریان القاشده در قطعهکار میباشد^[2].

به منظور بهرهمندی از مزیتهای این فرآیند، می توان از آن برای شکلدهی برخی از قطعات استوانهای که با کشش عمیق تولید می شوند، استفاده کرد. ژین زیوفنگ و همکاران[3] روش جدیدی را برای شکلدهی چندمرحلهای قطعات استوانهای ارائه کردند. این روش، ترکیبی از فرآیندهای شکلدهی کشش عمیق و الکترومغناطیسی است. در این فرآیند، با جاگذاری یک سیمپیچ در بالا و یایین ناحیه فلنج ورق، نیروی الکترومغناطیسی در راستای شعاعی و رو به مرکز در ورق ایجاد می شود. در این تحقیق از یک سیمییچ دیگر نیز که در انتهای سنبه جاگذاری شده بود، برای اعمال نیرو به ورق در راستای محوری استفاده شد. نتایج آنان نشان داد که اعمال این شرایط باعث افزایش نسبت کشش در مقایسه با حالت شکل دهی سنتی می شود. استفاده همزمان از این دو سیمییچ تأثیر زیادی بر مقدار عمق شکلدهی قطعات استوانهای داشته است. بهبود توزیع ضخامت قطعهکار در این روش نسبت به حالت سنتی، دیگر نتیجه بهدست آمده از این پژوهش بوده است. بهعلاوه، نتایج شبیهسازی نشان داد که بیشترین مقدار نیروی پیشران شعاعی در لبه انتهایی ورق اعمال مىشود.

سوی و همکاران^[4] در مطالعهای که بهصورت تجربی و شبیهسازی انجام شد، توانستند با ترکیب فرآیندهای شکل دهی استمپینگ و الکترومغناطیسی و بهصورت چندمرحلهای، عمق قطعات شکل دهی شده استوانهای را نسبت به حالت استمپینگ سنتی تا ستم پیچ در لبه خارجی، نیروی مغناطیسی در راستای شعاعی سیم پیچ در لبه خارجی، نیروی مغناطیسی در راستای شعاعی ایجاد میشود که باعث جریان یافتن بهتر ورق رو به مرکز میشود و از نازک شدن ورق در مقاطع بحرانی جلوگیری میکند و در نتیجه، مق قطعات استوانهای تولیدشده افزایش مییابد. برای انجام شبیه سازی ابتدا نیروهای الکترومغناطیسی توسط نرم افزار شبیه سازی ابتدا نیروهای الکترومغناطیسی توسط نرم افزار شیم میزاد این کار در چندمرحله انجام شد تا جایی که شبیه سازی به اتمام برسد. سوی و همکاران^[5] در مطالعه ای دیگر، شبیه سازی سه بعدی فرآیند



شکل ۱) طرحواره فرآیند شکلدهی الکترومغناطیسی ورق^[2]

شکلدهی الکترومغناطیسی را انجام دادند. مطالعه انجام شده بر روی شکلدهی ورق بهصورت آزاد انجام شد. استراتژی انجام شبیهسازی نیز مطابق تحقیق قبلی بهصورت مرحلهبهمرحله صورت گرفت. نشان داده شد که مدل شبیهسازی ارائهشده بهخوبی توانایی پیشبینی مقدار خیز ورق در مرکز و شعاع ۲۰ mm را دارد. از نتایج این مطالعه میتوان به بررسی توزیع نیرو و کرنش در مرکز و شعاع ۲۰ mm قطعهکار در طی مدتزمان شکلدهی نیز اشاره کرد. طبق نتایج خروجی، بیشترین مقدار نازکشدگی در مرکز قطعهکار اتفاق میافتد.

احمد و همکاران^[6] در پژوهش خود یک سیمپیچ مفهومی طراحی کردند. هدف از انجام این طراحی، اعمال توزیع نیروی بهتر به ورق برای انجام فرآیند شکلدهی بود. برخلاف سیمپیچ حلزونی معمول که گام و سطح مقطع ثابتی در هر دور از سیمپیچ دارد، سیمپیچ طراحی شده در این پژوهش با افزایش تعداد دور، سطح مقطع و گام آن افزایش مییابد. نتایج این تحقیق نشان داد که در فرآیند شکل دهی الکترومغناطیسی با اعمال تغییرات در هندسه سیمپیچ، می توان توزیع نیروی اعمال شده به قطعهکار را مدیریت کرد. در سیمپیچ معمول توزیع نیروی مغناطیسی در مرکز ورق نسبت به لبهها کمتر است، اما سیمپیچ مفهومی طراحی شده، الگوی نیروی واردشده به قطعهکار را به سمت مرکز جابجا میکند و همچنین توزیع یکنواخت ری دارد.

لای و همکاران^[7] در مطالعهای که بر اساس آزمونهای تجربی و شبیهسازی انجام شد، یک روش جدید برای انجام فرآیند شکلدهی کششعمیق ورق به کمک فرآیند شکلدهی الکترومغناطیسی معرفی کردند. در این روش، برخلاف روش سنتی، با کنترل نیرو در راستای شعاعی، افزایش جریان ماده به سمت داخل، کاهش بیشینه کرنش و اصلاح توزیع ضخامت در منطقه فلنج ورق مشاهده شد. به منظور اعمال نیروی الکترومغناطیسی کنترل شده، دو سیمپیچ ساخته شد که یکی برای اعمال نیروی محوری در منطقه مرکزی ورق و دیگری برای اعمال نیروی شعاعی در منطقه فلنج ورق به کار گرفته شد. نتایج شبیهسازی نشان داد که در صورت کنترل مقدار انرژی تخلیه شده در هر سیمپیچ و زمان فعال شدن هرکدام به صورت جداگانه، فرآیند شکلدهی را میتوان به صورت انعطافیزیر مدیریت کرد.

قطعاتی که از شکلدهی ورق ساخته می شوند ممکن است دارای اشکال پیچیده باشند. قطعات مخروطی جزء این دسته از قطعات هستند. انجام فرآیند شکلدهی قطعات مخروطی با نسبت کشش بالا بهصورت سنتی چالشبرانگیز است. به دلیل برخورد نوک سنبه با ورق و ایجاد تمرکز تنش در مرکز قطعهکار، ابتدا نازکشدگی و سپس پارگی به وجود میآید. همچنین در قسمت آزاد ورق به دلیل نداشتن تماس با سنبه امکان چروکخوردگی وجود دارد^[8]. ازاین-رو، برای شکلدهی این دسته از قطعات ممکن است از چندین

مطالعهی تجربی و المان محدود اثر توزیع نیرو بر پیش-شکله Archive of SID مراحله پیش فرم استفاده شود^[9]. شکل ۲ مراحل شکل دهی قطعات مخروطی به روش چندمرحله ای کشش عمیق را نشان می دهد.



شکل ۲) مراحل تولید قطعه مخروطی به کمک کشش عمیق چندمرحلهای^[9]

سیروواروچلوگان و گان^[10] برای تولید چندمرحلهای قطعات مخروطی به روش کشش عمیق، از ورقگیر اصطکاکی استفاده کردند. در پژوهش تجربی که آنها انجام دادند، از ورقهای مس و آلومینیوم به ضخامت ۱ mm برای انجام دادن آزمون تجربی استفادهشده بود. آنها در این تحقیق توانستند با استفاده از ۵ مرحله شکلدهی پیشفرم، برای ورقهای مسی و آلومینیومی به ترتیب به نسبت کشش ۲۱/۷۱ و ۱/۶ برسند. بیشترین حد نازکشدگی در بالاترین نسبت کشش قطعه مسی ۴۶ درصد و برای قطعه آلومینیومی ۳۹ درصد گزارش شده است.

در پژوهشهای دیگر در زمینه شکلدهی قطعات مخروطی میتوان به استفاده از پدگذاری لایه اورتان^[11] و استفاده از نیروی ورقگیر متغیر برای افزایش نسبت کشش^[12] اشاره کرد.

گرجی^[13] در رساله دکتری خود نشان داد که برای تولید قطعات مخروطی نوکتیز (با زاویه رأس۶۰ درجه)، درصورت انتخاب پیشفرم مناسب می توان تعداد کل مراحل شکلدهی را به دو مرحله کاهش داد. او ابتدا با تحلیل مسیر فشار و سایر پارامترهای فرآیند شکلدهی هیدرودینامیکی، توانست به پیشفرم اولیه مخروط ناقص دست پیدا کند. سپس به کمک نتایج تجربی و شبیهسازی حاصل از شکلدهی پیشفرم اولیه، هندسه آن را برای رسیدن به نمودار توزیع ضخامت قابل قبول بهبود بخشید و آن را تولید کرد و پس از آن با فرآیند استمپینگ قطعهکار نهایی را تولید کرد.

امبرت و همکاران^[14-16] در پژوهشهای خود شکلدهی قطعات مخروطی را به روش شکلدهی الکترومغناطیسی در قالبهایی به زاویه رأس ۹۰ و ۱۰۰ و ۱۱۲ درجه و همچنین بصورت شکلدهی آزاد (بدون قالب) انجام دادند. جنس سیمپیچ مورد استفاده، مس خالص و هندسه آن بهصورت حلزونی بود. ورقهای آلومینیوم ک۵۷۷۴ و ۶۱۱۱ به ضخامت ۱۳ ۱ مورد آزمایش قرار گرفتند. در مطالعات انجام شده، هر دو جنس یادشده شکلدهی مطلوبی را در قالب با زاویه نوک ۱۰۰ و ۱۱۲ درجه نشان دادند و کرنشهای اندازهگیری شده، فراتر از نمودار حد شکلدهی در حالت سنتی بود. این نتیجه نشان می دهد که استفاده از فرآیند شکلدهی این نتیجه نشان می دهد که استفاده از فرآیند شکلدهی می شود. شکلدهی هر دو جنس یادشده با قالبی که زاویه نوک ۹۰ درجه (قالب نوک تیزتر) داشت ناکام ماند و بررسیهای

میکروگرافی نشان داد نازکشدگیها و پارگیهای بهوجود آمده ترکیبی از فروریزش پلاستیکی (Plastic collapse)، شکست نرم (buctile fracture) و شکست باند برشی (Shear band fracture) است. همچنین بررسیها نشان داد در شکلدهی آزاد مخروط (بدون قالب) نسبت به شکلدهی در حضور قالب، نازکشدگی و پارگی در کرنشهای پایینتری اتفاق می افتد؛ برخورد بین دیواره قالب و ورق مورد شکلدهی باعث تغییر وضعیت توزیع تنش در قطعهکار و افزایش حد شکلدهی آن می شود.

با بررسی مطالعات انجام شده در زمینه شکلدهی مخروطهای نوک تیز، دیده می شود که حتی با استفاده از فرآیند شکلدهی الکترومغناطیسی که باعث افزایش حد شکلدهی مواد می شود^{-14]} ¹⁶¹، نمی توان در یک مرحله به قطعهکار نهایی با زاویه رأس زیر ۱۰۰ درجه رسید. لذا استفاده از حداقل یک مرحله پیشفرم در شکلدهی این دسته از قطعات امری ضروری است.

در پژوهشهای یادشده مبتنی بر شکلدهی الکترومغناطیسی، تلاشهای مؤثری برای کنترل نیرو در راستای شعاعی و محوری در شکلدهی چندمرحلهای قطعات مدور استوانهای انجامشده است. مطالعات بررسیشدہ نشان میدھد کہ تاکنون اثر ھندسہ سیمپیچ بر روی توزیع نیرو در راستای شعاعی و محوری در شکلدهی قطعات مخروطی نوک تیز موردبررسی قرار نگرفته است. با در نظر داشتن این نکته که استفاده از پیشفرم در شکلدهی قطعات مخروطی نوکتیز الزامی است، در این مقاله به بررسی تجربی و عددی اثر هندسه سیمپیچ بر روی توزیع نیرو در فرآیند شکلدهی الكترومغناطيسى ييشفرم مناسب قطعات مخروطى نوكتيز پرداخته شده است. پیشفرم مطلوب، پیشفرمی بدون نازکشدگی یا پارگی است که تا جای ممکن به ابعاد نهایی قطعهکار نزدیک است چرا که باعث کاهش تعداد مراحل تولید قطعه نهایی می شود. در این مقاله ابتدا با استفاده از سیم پیچ حلزونی ساده شکلدهی پیشفرم قطعات مخروطی به روشهای تجربی و شبیهسازی انجام شد و نتایج نشان داد که سیمپیچ مذکور قابلیت شکلدهی مطلوب قطعه پیچیده مخروطی را ندارد. همچنین به كمک شبیهسازیهای انجامشده، توزیع نیروی سیمپیچ حلزونی ساده در راستای شعاعی و محوری مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. سپس بر اساس نتایج به دست آمده، طراحی و ساخت سیمپیچ جدیدی انجام شد و مشاهده شد که شکلدهی تحت توزيع نيروى سيمپيچ جديد، به ميزان قابلتوجهاى كيفيت قطعات تولیدشده را افزایش میدهد.

۲– مراحل آزمایشگاهی

برای انجام آزمونهای تجربی ابتدا یک سیمپیچ حلزونی ساده مشابه سیم پیچ استفاده شده توسط امبرت^[14-16] و بهترتیب با گام، قطر داخلی و قطر خارجی ۵، ۸ و mm ۱۰۵ طراحی شد. از مفتول مس خالص به قطر mm ۲ برای ساخت سیمپیچ اولیه

استفاده شد. حلزونی طراحی شده، توسط یک ماشین CNC بر روی یک استوانه از جنس تفلون فرزکاری شد. سپس مفتول مسی درون آن جاگذاری شد. برای مهار سیمپیچ و افزایش صلبیت آن، روی سیمپیچ با رزین اپوکسی پوشانده شد.

پولکی اولیه از ورق آلومینیوم ۱۰۵۰ به ضخامت ۱mm توسط دستگاه برش لیزر به شکل دایره با قطر ۸۰ mm بریده شد. فرآیند آنیل کردن در دمای ۲ ۶۳۰ به مدت ۲ ساعت در کوره انجام شد. پس از طی فرآیند آنیل شدن، قطعات در دمای اتاق خنک شدند. قالب به شکل مخروط با زاویه ۶۰ درجه، قطر دهانه ۵۶ و شعاع نوک ۸ mm ۲ توسط دستگاه تراش روی میلگرد تفلون تراشکاری شد. روی قالب، یک یله دایرهای به ارتفاع ۱/۰۲ mm و قطر ۸۰ mm ایجاد شد که وظیفه مرکز کردن پولکی ورق اولیه را با قالب دارد. برای انجام آزمون ابتدا یولکی برش خورده درون یله قالب قرار میگیرد، سپس سیمپیچ و قالب بعد از هممرکز شدن، با اعمال فشار توسط پیچدستی از مرکز به یکدیگر محکم میشوند. بیشتر بودن ارتفاع يله قالب نسبت به ضخامت قطعه كار به اندازه mm ۰/۰۲ به این دلیل است که قطعهکار جای خلاصی داشته باشد تا در صورت بروز خطا در گشتاور سفت کردن پیچ دستی، تاثیری روی نیروی ورقگیر قالب و قطعهکار بوجود نیاید. دو سر سیمییچ به دستگاه متصل شده و سپس با تخلیه خازن شارژشده، در درون سیمییچ جریان سینوسی میرایی ایجاد میکند که باعث ایجاد نیروی شکلدهی می شود. در شکل ۳ تصویر قالب مخروطی و سیمپیچ ساختهشده به همراه طرحواره مشخصات هندسی سیمپیچ و مونتاژ قطعات در کنار هم دیده می شود. برای حصول اطمینان از دقت دستگاه و قابلیت تکرارپذیری انجام فرآیند توسط آن، برای هر ولتاژ اعمالی به دستگاه سه بار آزمون انجام شد تا از دقت و تکراریذیری آن اطمینان حاصل شود.



شکل ۳) الف) قالب مخروطی ساختهشده ب) سیمپیچ ساختهشده پ) طرحواره سیمپیچ و قالب مخروطی ت) مشخصات هندسی سیمپیچ

برای انجام آزمونهای تجربی از دستگاه ساخته شده توسط شرکت شتابگران فناوری گلستان استفاده شد. این دستگاه ظرفیت خازنی معادل *µF* ۲۰۵ را داشته و این قابلیت را دارد که تا سقف ۱۰/۵ kV (معادل ۱۲ kJ) شارژ و تخلیه شود. از ولتاژهای۴، ۵ و ۶kV ۶ برای انجام آزمونهای تجربی استفاده شد. تصویر دستگاه و قالب مونتاژشده مورداستفاده برای انجام آزمون تجربی در شکل ۴ دیده می شود.

۳– شبیهسازی

برای انجام شبیهسازیها، از نرمافزار اجزای محدود کامسول (COMSOL Multiphysics) استفاده شد. این نرمافزار یک مجموعه کامل شبیهسازی است که میتواند معادلات دیفرانسیل سامانههای غیرخطی را توسط مشتقهای جزئی به روش اجزاء محدود در فضاهای یک، دو و سهبعدی حل نماید و در حضور چالشهایی نظیر میدانهای الکترومغناطیسی، کشش، دینامیک سیالات و دینامیک گاز بهخوبی راهگشا باشد.

با توجه به اینکه قطعهکار و قالب متقارن محوری هستند، انجام شبیهسازی در محیط متقارن محوری میتواند در زمان موردنیاز برای شبیهسازی صرفهجویی قابلتوجهی به همراه داشته باشد، اما نتایج مطالعات انجامشده^[17] و نیز نتایج تجربی مشاهدهشده در این پژوهش، حاکی از آن است که عدمتقارن سیمپیچ به خاطر مارپیچ حلزونی بودن آن، باعث اعمال نامتقارن نیرو به قطعهکار میشود و در نهایت فرآیند شکلدهی نامتقارن را در پی دارد. ازاین – میشود و در نهایت فرض اعمال نامتقارن نیرو توسط سیمپیچ برای رو، با درنظرگرفتن فرض اعمال نامتقارن نیرو توسط سیمپیچ برای انجام شد. در قسمت هندسه، مدلسازیهای هندسی سیمپیچ، قطعهکار، قالب، سطح بالایی سیمپیچ و هوای اطراف انجام شد. شکل ۵ اجزای یادشده را در کنار هم نشان میدهد.

خواص الکتریکی و مکانیکی آلومینیوم مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است. خواص مکانیکی مس به دلیل اینکه شکلدهی صرفاً در قطعهکار آلومینیومی صورت میگیرد، تعریف نشد و



شکل ۴) الف) سیمپیچ و قالب مخروطی در بالای آنکه توسط پیچدستی به هم محکم شدهاند. ب) دستگاه مورداستفاده برای انجام آزمون تجربی



شکل ۵) طرحواره کلی اجزای فرآیند شکلدهی. الف) قالب، ب) قطعهکار، پ) سطح بالای سیمپیچ، ت) مجموعه سیمهای سیمپیچ

جدول ۱) خواص الکتریکی و مکانیکی (جانسون کوک) مواد مورد استفاده^[18]

نام مادہ	ضريب A (MPa)	B ضريب (MPa)	ضریب n	ضريب C	مدول یانگ (GPa)	چگالی (Kg/M3)	هدایت الکتریکی (S/m)
آلومینیوم ۱۰۵۰	۵۶	146	•/٣٨٣	•/•۴	٧٠	44	٣/۵۵×1• ^v
مس	-	-	-	-	-	8980	۵/۶× ۱۰ ^۷

سیمپیچ مسی صلب در نظر گرفته شد و فقط خواص الکتریکی آن در جدول ۱ آورده شده است. خواص مکانیکی آلومینیوم از نتایج تحقیق هیگاشی^[18] استخراجشده و بهصورت ضرایب معادله ۱ در جدول ۱ آورده شده است.

 $\sigma_{ys} = (A + B * \varepsilon_p^n) * (1 + C * \ln(\dot{\varepsilon}_p))$ (۱) در بخش مکانیکی نرمافزار، برای تعیین مقدار دقیق ضریب اصطکاک برخورد در شبیهسازی، از مقایسه منحنیهای افزایش ارتفاع نوک مخروط، بهدستآمده از شبیهسازی و نتایج تجربی، استفاده شد. مطابق شکل ۶، با تغییر دادن ضریباصطکاک در شبیهسازی، مقدار ضریباصطکاکی که کمترین اختلاف بین نتایج شبیهسازی و تجربی را حاصل کند، انتخاب شد. بدین ترتیب، مقدار



شکل ۶) نمودار ارتفاع مرکز مخروط برحسب ضریباصطکاکهای مختلف در شبیهسازی

Volume 21, Issue 5, May 2021 *www.SID.ir*

Modares Mechanical Engineering

مناسب ضریب اصطکاک، ۲۵/۵ تعیین شد. اعمال نیرو به قطعه کار توسط نیروی حجمی لورنتس الکترومغناطیسی تعریف شد. به علت ثابت نگهداشته شدن و عدم تغییرشکل، قالب و مجموعه سیمپیچ (مس و تفلون نگهدارنده) به صورت صلب و ایستا تعریف شدند. در بخش مغناطیسی نرمافزار، سیمپیچ برای اعمال جریان تعریف شد. مقدار اندوکتانس و مقاومت سیمپیچ ساخته شده با توجه به تعداد حلقه ها و سایر پارامترها محاسبه شد. در شبیه سازی مدار الکتریکی، قسمتهای خازن شارژشده، سلف و مقاومت مطابق با مقادیر ارائه شده در جدول ۲ مدل سازی شدند. سپس مشخص شد که جریان به وجود آمده در سیمپیچ متناظر با جریان مشخص شد که جریان به وجود آمده در سیمپیچ متناظر با جریان مدار الکتریکی مدل شده است. همانند آزمون های تجربی، در مریه سازی نیز شکل دهی در ولتاژهای ۴، ۵ و ۷ ۶ انجام شد. نوی شبیه سازی نیز شکل دهی در ولتاژهای ۴، ۵ و ۷ ۶ انجام شد.

مطالعه برای انجام شبیهسازی نیز از نوع گذرا (متغیر با زمان) انتخاب شد. کل زمان حل مسئله ۲۰۰ ۲۰۰ برای نرمافزار تعریف شد. **۳-۱- همگرایی شبکه**

انتخاب صحیح تعداد و کیفیت المانهای شبکه بر روی صحت نتایج خروجی و زمان موردنیاز برای پردازش تأثیر بسزایی دارد. شکل ۷ نمودار تغییرات نتایج خروجی مربوط به ولتاژ ۷ ۵ ۵ را نسبت به تعداد المان نشان میدهد. برای بررسی تعداد و کیفیت المانهای شبکه بر روی نتایج خروجی، متغیرهای افزایش ارتفاع مخروط شکلگرفته و اندازه ضخامت نهایی در مرکز قطعهکار موردبررسی قرارگرفتهاند. برای هر نقطه از نمودار یک برچسب دو عددی مشخص شده است. عدد اول مقدار ضخامت نهایی و عدد دوم مقدار کمینه کیفیت المانها (MEQ) را در هر شبیهسازی بیان میکند. دیده می شود که در شبیهسازی با تعداد المان م

جدول ۲) مشخصات المانهای بهکاررفته در مدار شبیهسازی

دسارى	ررغبه در سار سبيا	يتق التقال تقال الم	
اندوکتانس (µH)	مقاومت (mΩ)	ظرفیت خازن (µF)	المان
٣/۶٣	۱۵	۲•۵	مقدار کمیت



شکل ۷) نمودار تأثیرگذاری کیفیت و کمیت المانهای شبکه بر نتایج خروجی شبیهسازی المان محدود

بالاتر، مقادیر افزایش ارتفاع مخروط شکلگرفته، ضخامت نهایی و کمینه کیفیت المانها ثبات پیداکرده و تعداد المان تأثیری بر روی نتایج خروجی ندارد. ازاینرو، تعداد المان ۸۵۰۰۰ برای انجام شبیهسازیها مورداستفاده قرار گرفت.

۴- نتایج و بحث ۴-۱- سیم پیچ حلزونی ساده

در جدول ۳ مقدار ارتفاع پیشفرم شکلگرفته در ولتاژهای ۴، ۵ و kv ۶ برای سه تکرار و مقدار میانگین آنها نشان داده شدهاست. اندازهگیریها نشان میدهد که حداکثر اختلاف بین نتایج تکرار شده در هر ولتاژ کمتر از ۳ درصد است و دستگاه و سیمپیچ مورداستفاده از تکرارپذیری بالایی برخوردار هستند.

جدول ۳) مقدار افرایش ارتفاع قطعات در ولتاژها و تکرارهای مختلف آزمون تجربی

میانگین (mm)	افزایش ارتفاع تکرار سوم (mm)	افزایش ارتفاع تکرار دوم (mm)	افزایش ارتفاع تکرار اول (mm)	ولتاژ اعمالشده (kV)
٨/۴٣	۷/۴	٨/۴	Y/۵	k
۱۱/۳	11/4	11/4	11/0	۵
14/8	116/8	14/4	116/0	۶

شکل ۸ تصویر قطعات شکلدهی شده در ولتاژهای مختلف را نشان میدهد. همانگونه که قبلاً در بخش شبیهسازی ذکر شد، به دلیل هندسه مارپیچ حلزونی سیمپیچ، توزیع نیرو ایجادشده توسط آن نامتقارن است و در نتیجه شکلدهی نامتقارن قطعهکار را در پی دارد. هر چه مقدار گام حلزونی سیمپیچ بیشتر شود، مقدار عدمتقارن ذکرشده بیشتر خود را نشان میدهد^[17]. همچنین دیده میشود با افزایش ولتاژ، مقدار عدمتقارن قطعات شکلدهی شده افزایش مییابد. درصورتیکه شکلدهی کاملاً متقارن باشد، مقدار



شکل ۸) تصاویر قطعات شکلدهی شده در ولتاژهای الف) ۴kV، ب) ۵kV ، ج) ۶kV

فاصله قله مرکز قطعهکار از تمامی نقاط لبه خارجی آن به یک اندازه خواهد بود. برای کمّی کردن مقدار عدمتقارن قطعات شکلدهی شده، در مقطعی که بیشترین عدمتقارن را دارد (مطابق شکل ۹)، اختلاف فاصله دو نقطه روبهرویهم روی لبه خارجی (A-B) از قله قطعهکار شکلدهی شده بهعنوان مقدار عدمتقارن محاسبه میشود. هر چه عدد محاسبهشده کمتر باشد مقدار عدمتقارن کمتر خواهد بود.

همچنین دیده میشود که در ولتاژ kV ۶ نیروی ورقگیر که توسط پیچدستی اعمال میشود، کافی نیست و پدیده چروکخوردگی بهوضوح در قطعات دیده میشود.

۴–۱–۱– مطابقت نتایج تجربی و شبیهسازی

در جدول ۴، مقدار محاسبه شده و اندازه گیری شده پارامترهای افزایش ارتفاع مرکز مخروط شکل دهی شده، عدم تقارن و محیط لبه خارجی در حالت شبیه سازی و تجربی برای مقایسه آورده شده است. شکل ۹ نتیجه شبیه سازی مربوط به ولتاژ k۷ ۶ را نشان می دهد. در این شکل طیف رنگی نشان دهنده مقدار جابجایی هر المان است که در آن مقاطعی که بیشترین و کمترین مقدار عدم تقارن ناشی از شکل دهی در آن ها وجود دارد مشخص شده اند. برای محاسبه مقدار عدم تقارن و مقایسه پروفیل شبیه سازی با حالت تجربی، مقطعی که بیشترین عدم تقارن را دارد، در نظر گرفته شده است. در جدول ۵، مقدار درصد اختلاف بین نتایج شبیه سازی و تجربی آورده شده است. دیده می شود که بیشترین درصد اختلاف مربوط به پارامتر افزایش ازتفاع مرکز ورق، در ولتاژ V k ۶ و به مقدار ۷ درصد است.

شکل ۱۰، مقایسه پروفیل مقطع برش خورده قطعات در حالتهای تجربی (خاکستری) و شبیهسازی (طیف رنگی) را نشان میدهد. طیف رنگی در نتایج شبیهسازی نشاندهنده مقدار جابجایی



شکل ۹) نتایج شبیهسازی سهبعدی ولتاژ kV ۶. الف) نمای روبرو ب) نمای بالا

جدول ۴) مقدار پارامترهای محاسبه شده توسط شبیه سازی المان محدود

محیط لبه خارجی (mm)		افزایش ارتفاع (mm)		عدمتقارن (mm)		ولتاژ (kV)
شبيەسازى	تجربى	شبيەسازى	تجربى	شبيەسازى	تجربى	
461	240	۷/۴	۷/۴۳	•/۹۵	١	۴
444	46.	۱۱/۸	11/٣	۲/۱	٢	۵
۲۲۹/۵	220	10/8	14/8	۴/۱	۴	۶

مطالعهی تجربی و المان محدود اثر توزیع نیرو بر پیش-شکل د Archive of SID

جدول ۵) مقایسه نتایج افزایش ارتفاع در آزمونهای تجربی و شبیهسازی و اختلاف آنها

درصد اختلاف محیط لبه خارجی	درصد اختلاف افزایش ارتفاع مرکز ورق	درصد اختلاف عدمتقارن	ولتاژ تخلیهشده (kV)
١	۵	k	۴
١	۴/۵	۴	۵
١	٧	۲/۵	۶

المانها است. مقایسهها نشان میدهد که شبیهسازیهای انجامشده میتوانند بهصورت قابلقبول هندسه قطعهکار نهایی را پیشبینی کنند.

۴–۱–۲– بررسی توزیع ضخامت

شکل ۱۱ نمودار تغییرات ضخامت ورق شکل دهی شده را از مرکز تا لبه خارجی آن نشان میدهد. مقطع انتخاب شده برای اندازه گیری توزیع ضخامت در نمونه های آزمون تجربی و شبیه سازی، مقطع های آورده شده در شکل ۱۰ هستند. به دلیل غیر متقارن بودن سمت چپ و راست مقاطع شکل ۱۰، مقدار ضخامت در هر نقطه از نمودار شکل ۱۱ میانگین ضخامت سمت چپ و راست پروفیل در هر فاصله شعاعی از مقطع های ذکر شده است.

حداکثر اختلاف دو نمودار مربوط به یک ولتاژ، ۶ درصد است. علاوه بر تطابق هندسه نتایج شبیهسازی و تجربی در قسمت قبل، نمودارهای آوردهشده تأییدی دیگر بر صحت شبیهسازیهای انجامشده است و نشان میدهد که از نتایج شبیهسازی میتوان برای تخمین توزیع ضخامت ورق شکلدهی شده استفاده کرد. این نتایج نشان میدهد که بیشترین کاهش ضخامت در قسمت مرکزی ورق اتفاق میافتد و هر چه فاصله از مرکز ورق بیشتر شود نازکشدگی کاهش مییابد.



شکل ۱۰) مقایسه پروفیل مقطع قطعات در حالتهای شبیهسازی و تجربی پس از اتمام فرآیند شکلدهی به ترتیب در ولتاژهای الف) ۴kV، ب) ۵kV ، پ) ۶kV



شکل ۱۱) نمودار توزیع ضخامت تجربی و شبیهسازی در ولتاژهای ۴ و ۵kV

همچنین این نتایج نشان میدهد که با افزایش ولتاژ، مقدار این نازکشدگی افزایش مییابد.

۴–۱–۳– بررسی توزیع چگالی نیروی الکترومغناطیسی

سه حلقه از قطعهکار در مرکز تا شعاع ۱۳۸ ، شعاع ۱۹/۵ تا ۲۰/۵ mm و شعاع ۳۹ تا ۳۹ ۴۰ مطابق شکل ۱۲ انتخاب شد و متوسط چگالی نیروی حجمی در راستای محوری و شعاعی برحسب زمان برای این سه حلقه از نتایج شبیهسازی استخراج شد. نتایج این نمودارها میتواند در بهدست آوردن توزیع مطلوب نیروی الکترومغناطیسی برای جریان یافتن بهتر ورق حین فرآیند شکل دهی کمک شایانی نماید.

به دلیل عدمتقارن نیروی اعمالشده به قطعهکار در تمامی ولتاژها، در تمامی نتایج استخراجشده از شبیهسازیها در این قسمت، مقدار متوسط چگالی نیروی الکترومغناطیسی محاسبهشده است. در شکلهای ۱۳ تا ۱۵ نمودارهای مربوط به تابع چگالی نیروی الکترومغناطیسی برحسب زمان حین فرآیند شکلدهی آورده شده است.

الگوی تغییرات تمامی نمودارها در شکلهای ۱۳ تا ۱۵ بهصورت نوسانی و میرا است. بیشینه مقدار هرکدام از نمودارها در زمان ۳۶ ۳۰ اتفاق میافتد. با بررسی نمودارها در هر ولتاژ میتوان دریافت که روند کلی هر نمودار با افزایش مقدار شعاع بهصورت افزایشی است. این افزایش در مورد متوسط چگالی نیرو در راستای شعاعی نمود بیشتری نسبت به راستای محوری دارد.

در تمامی ولتاژها، نمودار مربوط به لبه خارجی ورق (شعاع mm) در بازههای زمانی ۶۰ الی ۷۵ و ۱۴۰ الی *µ*۵ مقداری منفی دارد. بررسیها نشان میدهد نمودارهای مربوط به ولتاژهای مختلف با یکدیگر مشابه هستند و افزایش ولتاژ تخلیه از ۴ تا k۷ ۶ تفاوتی در روند و شکل کلی نمودارها ایجاد نمیکند و فقط باعث افزایش مقدار متوسط چگالی نیروی واردشده (کشیده شدن نمودارها در راستای مؤلفه عمودی) به ورق میشود.

برای بررسی کمّی اثر افزایش ولتاژ روی مقدار بیشینه متوسط چگالی نیروی واردشده (زمان ۳۵ ۳۰ در نمودار تصاویر ۱۳ تا ۱۵)، نمودار بیشینه متوسط چگالی نیرو در طی مدتزمان شکلدهی برحسب ولتاژ



شکل ۱۲) حلقههای انتخاب شده برای انجام تحلیل توزیع نیرو در مرکز تا شعاع ۱*mm* ، شعاع ۱۹/۵ تا ۵/۲۲ mm و شعاع ۳۹ تا ۴۰ *mm*



شکل ۱۳) نمودار چگالی نیرو برحسب زمان برای ولتاژ *kV* ۴. الف) شعاعی ب) محوری

برای مناطق انتخاب شده در شکل ۱۲، در شکلهای ۱۶ و ۱۷ آورده شده است. برای ارزیابی دقیقتر نقش ولتاژ در مقدار بیشینه متوسط چگالی نیرو، شبیهسازی برای ولتاژهای ۱، ۲ و ۷۷ ۳ نیز انجام شد.

برای هرکدام از نمودارها، یک معادله درجه دو درونیابی شد که همه این درونیابیها ضریب همبستگی (R) یک دارند. ضرایب نمودارهای بهدستآمده که در تصاویر مشخص شده است، نشان میدهد که مقدار نیروی شعاعی یا محوری واردشده حین شکلدهی متناسب با مجذور ولتاژ تخلیهشده در سیمپیچ است. از طرفی مقدار انرژی ذخیرهشده در



شکل ۱۵) نمودار چگالی نیرو برحسب زمان برای ولتاژ *kV ۶.* الف) شعاعی ب) محوری



شکل ۱۲) متوسط چگالی نیروی شعاعی وارده به نواحی مختلف ورق برحسب ولتاژ شارژشده خازن در زمان µ۶ ۳۰ (بیشینه نیرو)

۰۴، ۹۰، ۱۰۵ و ۲۶ ۱۲۰ در تصاویر ۱۸ و ۱۹ آورده شدهاند. در این دو تصویر روند تغییرات مقدار متوسط چگالی نیروی وارده به قطعهکار برحسب شعاع آن مشخصشده است.

برای چگالی نیروی محوری روند افزایش از مرکز قطعهکار تا شعاع mm ۳۰ تقریباً خطی است و از شعاع mm تا لبه خارجی ورق (شعاع ۴۰ mm) بهصورت غیرخطی افزایش شدیدی مییابد. چگالی نیروی



شکل ۱۴) نمودار چگالی نیرو برحسب زمان برای ولتاژ *kV* ۵. الف) شعاعی ب) محوری



شکل ۱۶) متوسط چگالی نیروی محوری وارده به نواحی مختلف ورق برحسب ولتاژ شارژشده خازن در زمان µ۶ ۳۰ (بیشینه نیرو)

خازن نیز متناسب با مجذور ولتاژ شارژ خازن است. پس میتوان گفت که بیشینه نیروی واردشده حین شکلدهی متناسب با انرژی ذخیرهشده در خازن است.

برای درک بهتر رابطه متوسط چگالی نیرو با شعاع قطعهکار حین شکلدهی، نمودار متوسط چگالی نیروهای شعاعی و محوری در ولتاژ ۶ kV (به عنوان نمونه) برحسب شعاع قطعهکار در زمانهای ۲۰، ۳۰،



شکل ۱۸) نمودار چگالی نیروی محوری واردشده به قطعهکار در زمانهای مختلف در ولتاژ *kV*



شکل ۱۹) نمودار چگالی نیروی شعاعی واردشده به قطعهکار در زمانهای مختلف در ولتاژ *kV ۶*

شعاعی از مرکز تا شعاع mm (۸۸ درصد شعاع قطعهکار) قطعهکار تقریباً صفر است و میتوان گفت در این محدوده هیچ نیروی شعاعی رو به داخل به قطعهکار اعمال نمیشود اما از شعاع mm ۳۵ قطعهکار تا لبه خارجی ورق (شعاع ۴۰ mm) مقدار این چگالی نیرو بهصورت غیرخطی افزایش بسیار شدیدی دارد. این موضوع نشان میدهد که برای افزایش نیروی شعاعی رو به داخل به منظور تشدید جریان ورق، لبه خارجی ورق پتانسیل بسیار بالاتری نسبت به مرکز و شعاع میانی دارد.

در تصاویر ۱۸ و ۱۹ همچنین دیده میشود که برای نمودارهای زمان ۴۰ و ۲۹ ۱۲۰، در انتهای نمودار (شعاع ۳۳ ۴۰) افت چگالی نیرو دیده میشود. علت این پدیده را میتوان در نمودار متوسط چگالی جریان القاشده برحسب شعاع قطعهکار در شکل ۲۰ پیدا کرد. جایی که برای زمانهای ۴۰ و ۲۵ ۱۲۰ مقدار چگالی جریان القاشده در لبه خارجی ورق افت محسوسی دیده میشود و برای زمانهای ۶۸ و ۲۸ (مرکز بازههای زمانی در تصاویر ۱۳ تا ۱۵ که مقدار چگالی نیرو در شعاع ۳۱ ۴۰ منفی است) تغییرات چگالی جریان القاشده به حدی است که در



شکل ۲۰) نمودار چگالی شدتجریان برحسب شعاع قطعهکار در زمانهای مختلف در ولتاژ *kV*

۱ mm آخر شعاع قطعهکار (۳۹ تا mm) ۴۰) برخلاف جریان اصلی القاشده میشود. البته طبق شکلهای ۱۳ تا ۱۵، بزرگی این نیروها کم است و در بازه زمانی نسبتاً کوچک به مساحت اندکی از قطعهکار (کمتر از ۵ درصد) تأثیر میگذارد. ازاینرو، تأثیر چشمگیری بر روند فرآیند شکلدهی ندارد.

با توجه به نتایج بهدستآمده، مشاهده شد که سیمپیچ حلزونی ساده توانایی شکلدهی قطعه پیچیده پیشفرم مخروطی را ندارد. ازاینرو، برای شکلدهی این دسته از قطعات سیمپیچ جدیدی موردنیاز است تا بتواند با توزیع نیروی بهتر، کیفیت قطعات شکلدهی شده را افزایش دهد.

۲-۴- طراحی و ساخت سیمپیچ جدید

پس از بررسی نتایج تجربی و شبیهسازیهای انجامشده و همچنین نتایج مطالعات قبلی، طراحی سیمپیچ مناسب در محیط نرمافزار المان محدود برمبنای اصول زیر انجام شد:

۲۰ سکیه بر نیروی شعاعی: محدوده شعاعی ۲۸ الی ۳۰ سرای قطعهکار که در تماس با ورقگیر است، پتانسیل مناسبی برای استفاده از نیروی شعاعی برای افزایش جریان ورق رو به داخل دارد. طراحی سیمپیچ در این قسمت از قطعهکار، مطابق شکل دارد. عراحی سیمپیچ در این قسمت از مطعهکار، مطابق شکل ۲۱ به صورت متقارن انجام شد تا هم نیروی محوری که باعث چسبیدن ورق به قالب و ایجاد نیروی اصطکاک در این محدوده

دوره ۲۱، شماره ۵، اردیبهشت ۱۴۰۰

شعاعی میشد، توسط نیرویی برابر و مخالف جهت با آن از بین برود و هم اینکه نیروی شعاعی تا دو برابر افزایش یابد. ضمن اینکه متقارن بودن نیروی محوری در محدوده شعاعی یادشده، خود باعث ایجاد یک نیروی ورقگیر میشود که از تمایل ورق به چروک خوردن میکاهد.

- ۲- برای کاهش گام سیمپیچ به حداقل ممکن و نزدیکتر شدن به حالت مطلوب، سیمپیچ با حلقههای هممرکز به منظور به منظور به مداقل رساندن عدمتقارن توزیع نیرو، قطر مفتول سیمپیچ از ۳ mm
 ۳ mm ۲ به mm ۲ کاهش یافت و فاصله خالی بین حلقههای سیمپیچ نیز حذف شد. با توجه به اینکه ضخامت عایق مفتول مورداستفاده mm ۰/۰ است، فاصله بین حلقههای سیمپیچ بهاندازه دو برابر ضخامت عایق روی مفتول یعنی mm ۱/۰ خواهد بود. ازاینرو، گام سیمپیچ جدید mm
- ۳- در محدوده شعاعی ۰ تا mm ۲۸ قطعهکار، طراحی سیمپیچ بهگونهای انجام شد که توزیع نیرو در این قسمت ضمن اعمال مناسب نیروی محوری، از مرکز ورق فاصله مناسبی داشته باشد تا مقدار تمرکز نیرو روی مرکز ورق و در ادامه نازکشدگی در این قسمت به حداقل برسد.

پس از اتمام طراحی مطابق با اصول ذکرشده، سیمپیچ جدید ساخته شد. شکل ۲۱ شماتیک برش خورده مقطع سیمپیچ طراحیشده را نشان میدهد. سیمپیچ بهصورت دوتکه ساخته شد. قسمت اول بهصورت سیمپیچ اصلی با ۱۶ دور پیچش سیم که هم نیروی محوری و هم نیروی شعاعی را ایجاد میکند و قسمت دوم با ۶ دور پیچش سیم در بیرون قالب مخروطی که وظیفه ایجاد نیروی محوری در محدوده شعاعی ۲۸ الی ۳۰ ۴۰ رو به پایین برای ازبین بردن نیروی محوری شیمپیچ اصلی (عامل اصطکاک)، ایجاد نیروی ورقگیر پله ایجادشده برای قرارگیری قطعهکار روی سیمپیچ اصلی، بهاندازه بروز خطا در اعمال گشتاور بستن پیچ دستی تأثیری روی نیروی ورقگیر بین قطعه کار و قالب به وجود نیاید. شکل ۲۲ سیمپیچ ساختهشده را نشان میدهد. همانند سیمپیچ حلزونی ساده، دو قسمت ساختهشده با اعمال فشار پیچ دستی به هم محکم میشوند.

آزمونهای تجربی برای ولتاژهای ۲۰۰۰، ۲۰۰۰ ، ۲۰۰۰ و ۷ ۲۰۰۰ انجام شد. در هر ولتاژ دو بار آزمون تکرار شد تا مجدداً از تکرارپذیری دستگاه و صحت نتایج اطمینان حاصل شود. برای انجام آزمون تجربی ابتدا یک سر هرکدام از دو سیمپیچ به هم متصل شد، سپس دو سر باقیمانده به دستگاه متصل شدند تا ولتاژ تخلیهشده و آزمون انجام



شکل ۲۱) مدل برش خورده سیمپیچ جدید و قالب بصورت متقارن محوری. قسمتهای مختلف سیمپیچ طراحیشده جدید در تصویر مشخصشدهاند



شکل ۲۲) سیمپیچ جدید و قالب ساخته شده

شود. پس از انجام آزمونهای تجربی، قطعات همانند آنچه در قسمت ۴/۱/۱ آورده شد، مقطع زنی شد و مقاطع آنها برای محاسبه عدمتقارن، مقایسه با نتایج شبیهسازی و ضخامتسنجی توسط اسکنر دوبعدی اسکن شد.

۴–۲–۱– مطابقت نتایج تجربی و شبیهسازی سیمپیچ جدید

در شکل ۲۳ قطعات شکلدهی شده توسط سیمپیچ جدید آورده شده است. مقدار پارامترهای محاسبه شبیهسازی و اندازهگیریشده تجربی در جدول شماره ۶ ارائه شده است. عدم چروکیدگی ورق در قسمت ورقگیر نشان میدهد که استفاده از نیروی واردشده توسط دو بخش مجزای سیمپیچ در ناحیه ورقگیر در جلوگیری از ایجاد چروک مؤثر بوده است.

در شکلهای ۲۴ تا ۲۷ سطح مقطع اسکن شده آزمون تجربی به رنگ خاکستری و نتیجه شبیهسازی مرتبط با آن با طیف رنگی مشخصشده است. طیف رنگی نتایج شبیهسازی مقدار جابجایی هر



شکل ۲۳) تصویر قطعات شکلدهی شده توسط سیمپیچ جدید. الف) ۷ ۳۰۰۰، ب) ۳۴۰۰۷، پ) ۳۷۰۰۷،ت) ۴۰۰۰۷

جدول ۶) مقایسه میانگین نتایج تجربی و شبیهسازی شکلدهی پیشفرم با سیمپیچ جدید

محیط لبه خارجی (mm)		افزایش ارتفاع (mm)		عدمتقارن (mm)		ولتاژ (۷)
شبيەسازى	تجربى	شبيەسازى	تجربى	شبيەسازى	تجربى	
۲۳•/۳	۲۳۰	۱۶/۸	۱۷	۰/۲۵	٠/٢	۳
441/4	222	۱۹/۸	19/14	۰/۳۵	+/٣	۳۴
۲۱۳	4.9	22/2	۲۳/۱	•/8۵	•/Y	۳۷
۲۰۶/۳	۲	4k/m	46/4	۰/۹۵	•/٩	۴





شکل ۲۵) مقایسه پروفیل قطعه شکلدهی شده و شبیهسازی در ولتاژ ۳۰۰۰۷ ۳۴۰۰ ۳۴۰۰





شکل ۲۶) مقایسه پروفیل قطعه شکلدهی شده و شبیهسازی در ولتاژ ۳۷۰۰۷ شکل ۲۷) مقایسه پروفیل قطعه شکلدهی شده و شبیهسازی در ولتاژ ۴۰۰۰۷

المان را مشخص میکند. طبق آنچه قبلاً بیان شد سطح مقطع قطعات شکل دادهشده همانند شکل ۹ از مقطعی انتخاب شد که بیشترین عدمتقارن را داشت. مقایسهها نشان از همخوانی مناسب نتایج آزمون تجربی و شبیهسازی دارد.

۴-۲-۲ بررسی توزیع ضخامت سیمپیچ جدید

نمودارهای شکلهای ۲۸ و ۲۹ مقایسه بین توزیع ضخامت مقطع قطعات شکلهای ۲۴ الی ۲۷ در آزمونهای تجربی و شبیهسازی را به تصویر کشیده شدهاند. شکل ۳۰ نیز مقدار کاهش ضخامت در مرکز ورق افزایش ولتاژ تا ۲۰۰۷ مقدار نازکشدگی اندکی افزایش مییابد اما با افزایش ولتاژ از ۲۰۰۰ مقدار نازکشدگی اندکی افزایش مییابد اما با شبیهسازی و هم تجربی کاهش مییابد. با توجه به شکلهای ۱۸ و ۱۹ میتوان گفت دلیل این اتفاق این است که با افزایش ولتاژ، مقدار نیروی شعاعی روبهداخل نسبت به نیروی محوری نرخ افزایش بیشتری دارد. افزایش چگالی نیروی شعاعی باعث جریان یافتن بیشتر ورق به سمت داخل و کاهش نازکشدگی میشود.



شکل ۲۸) مقایسه توزیع ضخامت نتایج تجربی و شبیهسازی در ولتاژ ۳۰۰۰ و ۳۴۰۰۷

1/1. 1/10 1/1 . 11.0 فنخامت 1/ .. ./90 (IIIII ./9. ./10 ·/٨· ·/YA ·/V · ۲. فاصله از مرکز (mm) شبیه سازی-۷۳۷۰۰ تجربى-٧٣٧٠٠ شبیه سازی- ۲۴۰۰۰ ۷ تجربی-۷ ۴۰۰۰۰ ۷

شکل ۲۹) مقایسه توزیع ضخامت نتایج تجربی و شبیهسازی در ولتاژ ۳۷۰۰ و ۲۰۰۰۷



شکل ۳۰) مقدار درصد کاهش ضخامت مرکز ورق برحسب ولتاژ در آزمون تجربی در شکلدهی توسط سیمپیچ جدید

۴–۲–۳– مقایسه نتایج سیمپیچ جدید و ساده

شکل ۳۱ مقایسه بین پروفیل قطعهکار شکلدهی شده در ولتاژ ۷ ۴۰۰۰ توسط سیمپیچ اولیه و جدید را نشان میدهد. این مقایسه نشان میدهد سیمپیچ جدید عملکرد بهتری در مدیریت انرژی مصرفی و کاهش توان اتلافی دارد، چراکه با صرف انرژی یکسان، پیشرفت بسیار بیشتری در شکلدهی قطعهکار اتفاق افتاده است.

> ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس www.SID.ir

دوره ۲۱، شماره ۵، اردیبهشت ۱۴۰۰

شکل ۳۲ به مقایسه بزرگی و جهت توزیع متوسط چگالی نیروی وارده به قطعهکار بین سیمپیچ اولیه و جدید درزمانی که شدتجریان تخلیهشده در مدار بیشینه است میپردازد. دیده میشود که در سیمپیچ جدید، مقدار توزیع نیرو نسبت به سیمپیچ اولیه بسیار همگنتر است سیمپیچ جدید، در شعاع ۲۸ الی شعاعی شیب ملایمتری دارد. برای سیمپیچ جدید، در شعاع ۲۸ الی ۳۰ ۳۰ قطعهکار که قسمت ورقگیر قالب است، نیروها در راستای محوری یکدیگر را خنثی و در راستای شعاعی رو به مرکز یکدیگر را تقویت میکنند که باعث کاهش شدید نیروی اصطکاک، افزایش نیروی ورقگیر و افزایش جریان یافتن ورق به داخل قالب میشود. عدم چروکخوردگی ورق شکلدهی شده توسط به داخل قالب میشود. عدم چروکخوردگی ورق شکلدهی شده توسط میمپیچ جدید، نشان دهنده موثر بودن اعمال نیروی ورقگیر توسط میدهد که در ولتاژ ثابت، سیمپیچ جدید نیروی بزرگتری اعمال میکند و اتلاف کمتری دارد.

مقایسه نمودارهای توزیع ضخامت نیز حاکی از این است که در قطعات شکلدهی شده توسط سیمپیچ جدید برخلاف سیمپیچ اولیه، مقدار نازکشدگی در نقطه بحرانی مرکز قطعهکار، با افزایش ولتاژ و ارتفاع مخروط، افزایش معناداری ندارد. علت این امر استفاده مناسب از نیروی شعاعی روبهمرکز در سیمپیچ جدید برای جریان یافتن بهتر ورق است که مانع از نازکشدگی بحرانی و پارگی آن در مرکز میشود.

در مورد عدمتقارن قطعات شکلدهی شده نیز مقایسه بین جداول ۴ و ۶ نشان میدهد علی رغم افزایش ارتفاع قطعه شکلگرفته توسط سیمپیچ جدید نسبت به سیمپیچ حلزونی ساده، مقدار عدمتقارن قطعه شکلدهیشده کاهش محسوسی داشته است. این نشاندهنده



شکل ۳۱) مقایسه بین مقطع قطعات شکلدهی شده تحت ولتاژ ۴۰۰۰۷ توسط سیمپیچهای اولیه و جدید



شکل ۳۲) بزرگی و جهت توزیع نیروی ایجاد در نقاط مختلف قطعهکار حین شکلدهی با ولتاژ ۴۰۰۰۷. الف) سیمپیچ اولیه در بیشینه جریان (زمان *µ*۶ ۳۰)، ب) سیمپیچ جدید در بیشینه جریان (زمان *۶*۶ ۵۶)

این است که در سیمپیچ جدید، با کاهش گام به حداقل ممکن و استفاده از مفتول نازکتر، عدمتقارن توزیع نیرو کاهش یافته است.

مطالعهی تجربی و المان محدود اثر توزیع نیرو بر پیش-شکلد Archrive of SIL

۵- نتیجهگیری

قابلیت مدیریت و کنترل توزیع نیرو یکی از ویژگیهای فرآیند شکلدهی الکترومغناطیسی است. با استفاده از این قابلیت میتوان تمرکز نیرو را از مقاطع بحرانی دور کرد و آن را به مکانهای ضروری انتقال داد. در این پژوهش ابتدا با استفاده از ابزار شبیهسازی المان محدود در محیط سه بعدی و آزمونهای تجربی، تحلیل نیروی ایجادشده توسط سیمپیچ حلزونی ساده مشابه مورد استفاده امبرت⁻¹⁴ ایجادشده توسط سیمپیچ حلزونی ساده مشابه مورد استفاده امبرت ¹⁶¹ روی شکلدهی پیشفرم قطعات مخروطی انجام شد. سپس با طراحی و ساخته شد که با تغییر دادن الگوی توزیع نیرو حین فرآیند شکلدهی قطعهکار در مرکز، افزایش بهرهوری انرژی، از بین رفتن نازکشدگی و کاهش عدمتقارن قطعهکار شد.

بر اساس نتایج آزمونهای تجربی، گام سیمپیچ تأثیر زیادی روی توزیع متقارن نیرو دارد. با افزایش گام حلزونی سیمپیچ، توزیع نیرو از حالت متقارن محوری فاصله گرفته که باعث بروز اعوجاج در قطعه میشود. همچنین با افزایش ولتاژ شارژ خازن، اعوجاج قطعهکار حاصل از عدمتقارن توزیع نیرو بیشتر نمود مییابد. برای از بین بردن این پدیده مخرب، بایستی حتیالامکان گام سیمپیچ کم در نظر گرفته شود. در طراحی سیمپیچ جدید، گام آن از ۵ به ۲/۱ سام یافت. نتیجه این تغییر، کاهش شدید عدمتقارن پیشفرمهای شکلدهی شده است. کاهش بیشتر گام سیمپیچ منوط به انجام بررسی و مطالعه اثر آن روی مقدار مقاومت، اندوکتانس و استحکام سیمپیچ در برابر نیروی عکسالعمل وارد به آن است.

نیروی شعاعی ایجادشده توسط سیمپیچ تأثیر زیادی روی افزایش جریان ورق و شکلپذیری آن دارد. طبق نتایج گرفتهشده این نیرو بیشترین تأثیر خود را (بالای ۹۰ درصد) در ۱۲ درصد انتهایی شعاع ورق مورد شکلدهی میگذارد. همچنین نتایج شبیهسازیها نشان داد استفاده از سیمپیچ متقارن در قسمت ورقگیر علاوه برافزایش ۲ برابری نیروی شعاعی روبهداخل، به دلیل برهمکنش نیرویهای محوری وارد شده از طرف سیمپیچهای بالا و پایین، نیروی عامل اصطکاک را به مداقل میرساند. ضمنا این برهمکنش نیروهای محوری خود باعث بوجود آمدن نیروی ورقگیر الکترومغناطیسی می شود که در حذفکردن چروکیدگی ورق بسیار موثر است.

مدیریت توزیع نیرو اعمال شده با استفاده از سیمپیچ جدید، جلوی هدررفت انرژی را میگیرد و مصرف انرژی تا یکچهارم کاهش مییابد.

تشکر و قدردانی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

تاییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده است. همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. محتویات علمی مقاله حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده است.

تعارض منافع: مقاله حاضراز رساله دکتری ابوالفضل رجبلو با عنوان " تعیین نرخ کرنش مناسب در شکلدهی قطعات مخروطی با استفاده از فرایند شکلدهی الکترومغناطیسی " در دانشگاه نوشیروانی بابل 12- Sheng ZQ, Jirathearanat S, Altan T. Adaptive FEM simulation for prediction of variable blank holder force in conical cup drawing. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2004;44(5):487-94.

13- Gorji A. Experimental and Finite element simulation method for forming a sharp conical part. Ph. D. thesis, Department of Mechanical Engineering, Noshirvani University. 2012.

14- Imbert J, Worswick M, Winkler S, Golovashchenko S, Dmitriev V. Analysis of the increased formability of aluminum alloy sheet formed using electromagnetic forming. SAE Technical Paper; 2005.

15- Imbert JM, Winkler SL, Worswick MJ, Oliveira DA, Golovashchenko S. The effect of tool–sheet interaction on damage evolution in electromagnetic forming of aluminum alloy sheet. J. Eng. Mater. Technol. 2005;127(1):145-53.

16- Imbert JM, Winkler SL, Worswick MJ, Golovashchenko S. Formability and damage in electromagnetically formed AA5754 and AA6111. InProc. 1st Int. Conf. High Speed Forming 2004 (pp. 201-210).

17- Paese E, Geier M, Homrich RP, Rosa P, Rossi R. Sheet metal electromagnetic forming using a flat spiral coil: Experiments, modeling, and validation. Journal of Materials Processing Technology. 2019;263:408-22.

18- Higashi K, Mukai T, Kaizu K, Tsuchida S, Tanimura S. Strain rate dependence on mechanical properties in some commercial aluminum alloys. Le Journal de Physique IV. 1991;1(C3):C3-341.

میباشد و هیچگونه تعارض منافع با سازمان یا اشخاص حقیقی و حقوقی وجود ندارد.

سهم نویسندگان: ابوالفضل رجبلو (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی، تحلیل گر داده ها، نگارنده مقدمه، نگارنده بحث، درصد مشارکت ۵۰%؛ محمد بخشی جویباری (نویسنده دوم)، پژوهشگر فرعی، تحلیل گر داده ها، روش شناس، درصد مشارکت ۲۵%؛ حمید گرجی (نویسنده سوم)، پژوهشگر فرعی، تحلیل گر داده ها، روش شناس، درصد مشارکت ۲۵%

منابع مالی: منابع مالی توسط دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل تأمین شده است.

منابع

1- Psyk V, Risch D, Kinsey BL, Tekkaya AE, Kleiner M. Electromagnetic forming—a review. Journal of Materials Processing Technology. 2011;211(5):787-829.

2- Akbar S, Aleem MA, Sarwar MN, Zillohu AU, Awan MS, Haider A, Ahmad Z, Akhtar S, Farooque M. Electromagnetic flat sheet forming by spiral type actuator coil. InIOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2016 (Vol. 146, No. 1, p. 012054). IOP Publishing.

3- Fang J, Mo J, Li J, Cui X, Fan S. Electromagnetic pulse assisted progressive deep drawing. Procedia Engineering. 2014;81:801-7.

4- Cui X, Li J, Mo J, Fang J, Zhou B, Xiao X, Feng F. Incremental electromagnetic-assisted stamping (IEMAS) with radial magnetic pressure: a novel deep drawing method for forming aluminum alloy sheets. Journal of Materials Processing Technology. 2016;233:79-88.

5- CUI XH, MO JH, Ying ZH. 3D modeling and deformation analysis for electromagnetic sheet forming process. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2012;22(1):164-9.

6- Ahmed M, Panthi SK, Ramakrishnan N, Jha AK, Yegneswaran AH, Dasgupta R, Ahmed S. Alternative flat coil design for electromagnetic forming using FEM. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2011;21(3):618-25.

7- Lai Z, Cao Q, Han X, Zhou Z, Xiong Q, Zhang X, Chen Q, Li L. Radial-axial force controlled electromagnetic sheet deep drawing: electromagnetic analysis. Procedia Engineering. 2014;81:2505-11.

8- Gorji A, Alavi-Hashemi H, Bakhshi-Jooybari M, Nourouzi S, Hosseinipour SJ. Investigation of hydrodynamic deep drawing for conical-cylindrical cups. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2011;56(9-12):915.

9- Lange K. Handbook of metal forming. McGraw-Hill Book Company, 1985.

10- Thiruvarudchelvan S, Gan JG. Drawing of conical cups with friction actuated blank holding. Journal of materials shaping technology. 1991;9(2):59-65.

11- Thiruvarudchelvan S, Tan MJ. The drawing of conical cups using an annular urethane pad. Journal of materials processing technology. 2004;147(2):163-6.