



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

ABSTRACT

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

[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

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

ابوالفضل رجبلو

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

محمد بخشی

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

حمید گرجی*

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

چکیده

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 به‌وجود آمدن چروکیدگی نیز وجود دارد. از این‌رو، برای شکل‌دهی این دسته از قطعات، همواره روش‌های نو مورد بررسی قرار گرفته‌اند. شکل‌دهی الکترومغناطیسی (Electromagnetic Forming)، از جمله 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 به‌دست‌آمده، سیم‌پیچ 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

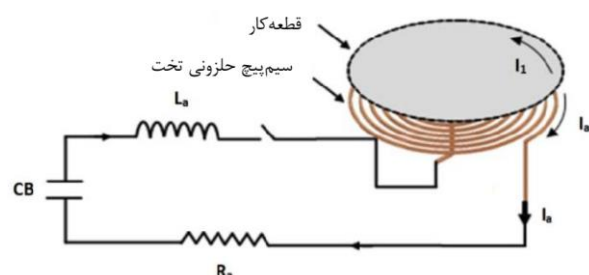
۱- مقدمه

برای شکل‌دهی قطعات ورق‌ی، از فرآیندهایی مانند کشش عمیق، هیدروفرمینگ، استمپینگ و خمکاری استفاده می‌شود. 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 رسانایی الکتریکی بالا) استفاده می‌شود. اعمال نیرو در این روش به‌صورت غیرتماسی است [1]. شکل ۱ طرحواره مدار شکل‌دهی الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد که در آن I_a ، L_a و R_a به ترتیب

مقاومت، اندوکتانس و جریان مدار اصلی و I_1 جریان القاشده در قطعه‌کار می‌باشد [2].

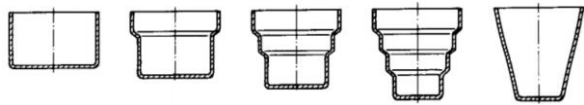
به منظور بهره‌مندی از مزیت‌های این فرآیند، می‌توان از آن برای شکل‌دهی برخی از قطعات استوانه‌ای که با کشش عمیق تولید می‌شوند، استفاده کرد. ژین زیوفنگ و همکاران [3] روش جدیدی را برای شکل‌دهی چندمرحله‌ای قطعات استوانه‌ای ارائه کردند. این روش، ترکیبی از فرآیندهای شکل‌دهی کشش عمیق و الکترومغناطیسی است. در این فرآیند، با جاگذاری یک سیم‌پیچ در بالا و پایین ناحیه فلنج ورق، نیروی الکترومغناطیسی در راستای شعاعی و رو به مرکز در ورق ایجاد می‌شود. در این تحقیق از یک سیم‌پیچ 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 شکل‌دهی سنتی می‌شود. استفاده هم‌زمان از این دو سیم‌پیچ تأثیر زیادی بر مقدار عمق شکل‌دهی قطعات استوانه‌ای داشته است. بهبود توزیع ضخامت قطعه‌کار در این روش نسبت به حالت سنتی، دیگر نتیجه به‌دست‌آمده از این پژوهش بوده است. به‌علاوه، نتایج شبیه‌سازی نشان داد که بیشترین مقدار نیروی پیش‌ران شعاعی در لبه انتهایی ورق اعمال می‌شود.

سوی و همکاران [4] در مطالعه‌ای که به‌صورت تجربی و شبیه‌سازی انجام شد، توانستند با ترکیب فرآیندهای شکل‌دهی استمپینگ و الکترومغناطیسی و به‌صورت چندمرحله‌ای، عمق قطعات شکل‌دهی شده استوانه‌ای را نسبت به حالت استمپینگ سنتی تا ۳۱ درصد افزایش دهند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که با جاگذاری سیم‌پیچ 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، عمق قطعات استوانه‌ای تولیدشده افزایش می‌یابد. برای انجام شبیه‌سازی ابتدا نیروهای الکترومغناطیسی توسط نرم‌افزار ANSYS/EMAG محاسبه شد، سپس این نیروها به نرم‌افزار ANSYS/LSDYNA منتقل شد تا شکل‌دهی صورت گیرد. این کار در چندمرحله انجام شد تا جایی که شبیه‌سازی به اتمام برسد. سوی و همکاران [5] در مطالعه‌ای دیگر، شبیه‌سازی سه‌بعدی فرآیند



شکل ۱) طرحواره فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیسی ورق [2]

مرحله پیش‌فرم استفاده شود^[9]. شکل ۲ مراحل شکل‌دهی قطعات مخروطی به روش چندمرحله‌ای کشش عمیق را نشان می‌دهد.



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

سیرواروچلوگان 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 استفاده شده بود. آن‌ها در این تحقیق توانستند با استفاده از ۵ مرحله شکل‌دهی پیش‌فرم، برای ورق‌های مسی و آلومینیومی به ترتیب به نسبت کشش ۱/۷۱ 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.

گرچی^[13] در رساله دکتری خود نشان داد که برای تولید قطعات مخروطی نوک‌تیز (با زاویه رأس ۶۰ درجه)، در صورت انتخاب پیش‌فرم مناسب می‌توان تعداد کل مراحل شکل‌دهی را به دو مرحله کاهش داد. او ابتدا با تحلیل مسیر فشار و سایر پارامترهای فرآیند شکل‌دهی هیدروپلاستیکی، 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 به صورت حلزونی بود. ورق‌های آلومینیوم ۵۷۷۴ و ۶۱۱۱ به ضخامت ۱ mm 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 می‌دهد که استفاده از فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیسی باعث افزایش حد شکل‌دهی جنس‌های یادشده می‌شود. شکل‌دهی هر دو جنس یادشده با قالبی که زاویه نوک ۹۰ درجه (قالب نوک تیزتر) داشت ناکام ماند و بررسی‌های

شکل‌دهی الکترومغناطیسی را انجام دادند. مطالعه انجام شده بر روی شکل‌دهی ورق به صورت آزاد انجام شد. استراتژی انجام شبیه‌سازی نیز مطابق تحقیق قبلی به صورت مرحله‌به‌مرحله صورت گرفت. نشان داده شد که مدل شبیه‌سازی ارائه شده به خوبی 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.

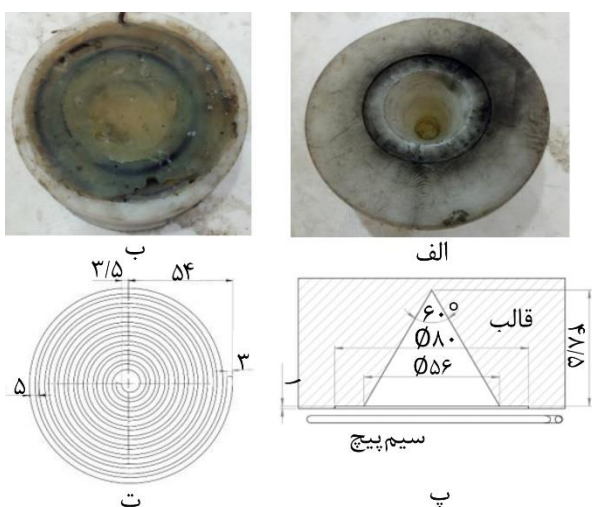
احمد و همکاران^[6] در پژوهش خود یک سیم‌پیچ مفهومی طراحی کردند. هدف از انجام این طراحی، اعمال توزیع نیروی بهتر به ورق برای انجام فرآیند شکل‌دهی بود. برخلاف سیم‌پیچ حلزونی معمول که گام و سطح مقطع ثابتی در هر دور از سیم‌پیچ دارد، سیم‌پیچ طراحی شده در این پژوهش با افزایش تعداد دور، سطح مقطع و گام آن افزایش می‌یابد. نتایج این تحقیق نشان داد که در فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیسی با اعمال تغییرات در هندسه سیم‌پیچ، می‌توان 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 وارد شده به قطعه‌کار را به سمت مرکز جابجا می‌کند و همچنین توزیع یکنواخت‌تری دارد.

لای و همکاران^[7] در مطالعه‌ای که بر اساس آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی انجام شد، یک روش جدید برای انجام فرآیند شکل‌دهی کشش عمیق 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 هر کدام به صورت جداگانه، فرآیند شکل‌دهی را می‌توان به صورت انعطاف‌پذیر مدیریت کرد.

قطعاتی که از شکل‌دهی ورق ساخته می‌شوند ممکن است دارای اشکال پیچیده باشند. قطعات مخروطی جزء این دسته از قطعات هستند. انجام فرآیند شکل‌دهی قطعات مخروطی با نسبت کشش بالا به صورت 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]. ازاین‌رو، برای شکل‌دهی این دسته از قطعات ممکن است از چندین

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 ۱ mm توسط دستگاه برش لیزر به شکل دایره با قطر ۸۰ mm بریده شد. فرآیند آنیل کردن در دمای ۶۳۰ K 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 توسط دستگاه تراش روی میلگرد تفلون تراشکاری شد. روی قالب، یک پله 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 پولکی برش خورده درون پله 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 پله قالب نسبت به ضخامت قطعه کار به اندازه ۱ mm به ۰/۰۲ به این دلیل است که قطعه کار جای خلاصی داشته باشد تا در صورت بروز خطا در گشتاور سفت کردن پیچ دستی، تاثیری روی نیروی ورق‌گیر قالب و قطعه کار بوجود نیاید. دو سر سیمپیچ به دستگاه متصل شده و سپس با تخلیه خازن شارژ شده، در درون سیمپیچ جریان سینوسی میرایی ایجاد می‌کند که باعث ایجاد نیروی شکل‌دهی می‌شود. در شکل ۳ تصویر قالب مخروطی و سیمپیچ ساخته شده به همراه طرحواره مشخصات هندسی سیمپیچ و مونتاژ قطعات در کنار هم دیده می‌شود. 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 تکرارپذیری آن اطمینان حاصل شود.



شکل ۳ (الف) قالب مخروطی ساخته شده (ب) سیمپیچ ساخته شده (پ) طرحواره سیمپیچ و قالب مخروطی (ت) مشخصات هندسی سیمپیچ

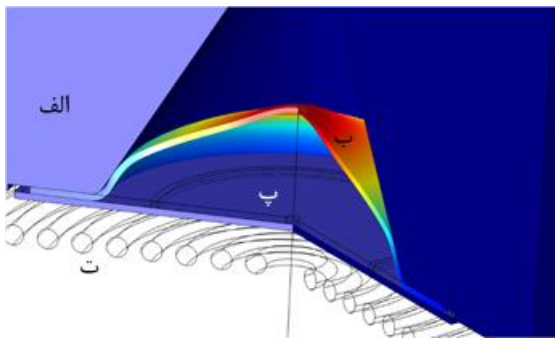
میکروگرافی نشان داد نازک‌شدگی‌ها و پارگی‌های به وجود آمده ترکیبی از فروریزش پلاستیکی (Plastic collapse)، شکست نرم (Ductile fracture) و شکست باند برشی (Shear band fracture) است. همچنین بررسی‌ها نشان داد در شکل‌دهی آزاد مخروط (بدون قالب) نسبت به شکل‌دهی در حضور قالب، نازک‌شدگی و پارگی در کرنش‌های پایین‌تری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

با بررسی مطالعات انجام شده در زمینه شکل‌دهی مخروط‌های نوک تیز، دیده می‌شود که حتی با استفاده از فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیسی که باعث افزایش حد شکل‌دهی مواد می‌شود^[14]، نمی‌توان در یک مرحله به قطعه کار 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 انجام شده است. مطالعات بررسی شده نشان می‌دهد که تاکنون اثر هندسه سیمپیچ بر روی توزیع نیرو در راستای شعاعی و محوری در شکل‌دهی قطعات مخروطی نوک تیز مورد بررسی 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 الکترومغناطیسی پیش‌فرم مناسب قطعات مخروطی نوک‌تیز پرداخته شده است. پیش‌فرم مطلوب، پیش‌فرمی بدون نازک‌شدگی یا پارگی است که تا جای ممکن به ابعاد نهایی قطعه کار نزدیک است چرا که باعث کاهش تعداد مراحل تولید قطعه نهایی می‌شود. در این مقاله ابتدا با استفاده از سیمپیچ 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 کمک شبیه‌سازی‌های انجام شده، 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 توزیع نیروی سیمپیچ جدید، به میزان قابل‌توجهی کیفیت 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 به ترتیب با گام، قطر داخلی و قطر خارجی ۵، ۸ و ۱۰۵ mm طراحی شد. از مفتول مس خالص به قطر ۳ mm برای ساخت سیمپیچ اولیه



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

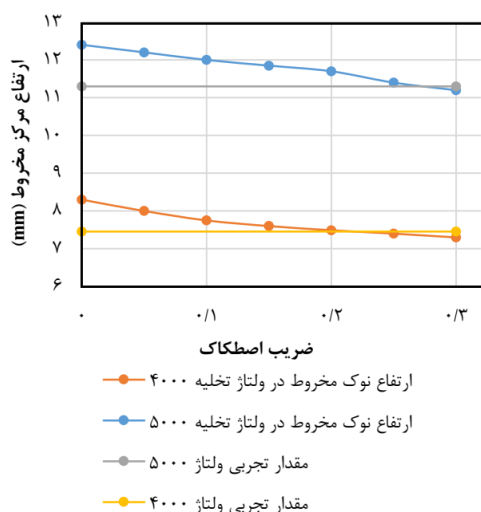
جدول ۱) خواص الکتریکی و مکانیکی (جانسون کوک) مواد مورد استفاده [18]

نام ماده	ضریب A (MPa)	ضریب B (MPa)	ضریب n	ضریب C	مدول یانگ (GPa)	چگالی (Kg/M3)	هدایت الکتریکی (S/m)
آلومینیوم ۱۰۵۰	۵۶	۱۳۴	۰/۳۸۳	۰/۰۴	۷۰	۲۷۰۰	$3/55 \times 10^{-7}$
مس	-	-	-	-	-	۸۹۶۰	$5/6 \times 10^{-7}$

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] استخراج شده و به صورت ضرایب معادله ۱ در جدول ۱ آورده شده است.

$$\sigma_{ys} = (A + B * \epsilon_p^n) * (1 + C * \ln(\dot{\epsilon}_p)) \quad (1)$$

در بخش مکانیکی نرم‌افزار، برای تعیین مقدار دقیق ضریب اصطکاک برخورد در شبیه‌سازی، از مقایسه منحنی‌های افزایش ارتفاع نوک مخروط، به دست آمده از شبیه‌سازی و نتایج تجربی، استفاده شد. مطابق شکل ۶، با تغییر دادن ضریب اصطکاک در شبیه‌سازی، مقدار ضریب اصطکاک که کمترین اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی را حاصل کند، انتخاب شد. بدین ترتیب، مقدار



شکل ۶) نمودار ارتفاع مرکز مخروط بر حسب ضریب اصطکاک‌های مختلف در شبیه‌سازی

برای انجام آزمون‌های تجربی از دستگاه ساخته شده توسط شرکت شتابگران فناوری گلستان استفاده شد. این دستگاه ظرفیت خازنی معادل $205 \mu F$ را داشته و این قابلیت را دارد که تا سقف $10/5 kV$ (معادل $12 kJ$) شارژ و تخلیه شود. از ولتاژهای ۴، ۵ و $6 kV$ برای انجام آزمون‌های تجربی استفاده شد. تصویر دستگاه و قالب مونتاژ شده مورد استفاده برای انجام آزمون تجربی در شکل ۴ دیده می‌شود.

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 سه بعدی حل نماید و در حضور چالش‌هایی نظیر میدان‌های الکترومغناطیسی، کشش، دینامیک سیالات و دینامیک گاز به خوبی راهگشا باشد.

با توجه به اینکه قطعه‌کار و قالب متقارن محوری هستند، انجام شبیه‌سازی در محیط متقارن محوری می‌تواند در زمان مورد نیاز برای شبیه‌سازی صرفه جویی قابل توجهی به همراه داشته باشد، اما نتایج مطالعات انجام شده [17] و نیز نتایج تجربی مشاهده شده در این پژوهش، حاکی از آن است که عدم تقارن سیم‌پیچ به خاطر مارپیچ حلزونی بودن آن، باعث اعمال نامتقارن نیرو به قطعه‌کار می‌شود و در نهایت فرآیند شکل‌دهی نامتقارن را در پی دارد. از این رو، با در نظر گرفتن فرض اعمال نامتقارن نیرو توسط سیم‌پیچ برای دقیق‌تر شدن فرآیند شبیه‌سازی، شبیه‌سازی‌ها به صورت سه بعدی انجام شد. در قسمت هندسه، مدل‌سازی‌های هندسی سیم‌پیچ، قطعه‌کار، قالب، سطح بالایی سیم‌پیچ و هوای اطراف انجام شد. شکل ۵ اجزای یاد شده 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 آن که توسط پیچ‌دستی به هم محکم شده‌اند. ب) دستگاه مورد استفاده برای انجام آزمون تجربی

بالتر، مقادیر افزایش ارتفاع مخروط شکل گرفته، ضخامت نهایی و کمینه کیفیت المان‌ها ثابت پیدا کرده و تعداد المان تأثیری بر روی نتایج خروجی ندارد. از این رو، تعداد المان ۸۵۰۰۰ برای انجام شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- سیم پیچ حلزونی ساده

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

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

ولتاژ اعمال شده (kV)	تکرار اول (mm)	تکرار دوم (mm)	تکرار سوم (mm)	میانگین (mm)
۴	۷/۵	۷/۴	۷/۴	۷/۴۳
۵	۱۱/۵	۱۱/۲	۱۱/۲	۱۱/۳
۶	۱۴/۵	۱۴/۷	۱۴/۶	۱۴/۶

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 ایجاد شده توسط آن نامتقارن است و در نتیجه شکل‌دهی نامتقارن قطعه‌کار را در پی دارد. هر چه مقدار گام حلزونی سیم‌پیچ بیشتر شود، مقدار عدم تقارن ذکر شده بیشتر خود را نشان می‌دهد^[۱۷]. همچنین دیده می‌شود با افزایش ولتاژ، مقدار عدم تقارن قطعات شکل‌دهی شده افزایش می‌یابد. در صورتی که شکل‌دهی کاملاً متقارن باشد، مقدار



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

مناسب ضریب اصطکاک، ۰/۲۵ تعیین شد. اعمال نیرو به قطعه‌کار توسط نیروی حجمی لورنتس الکترومغناطیسی تعریف شد. به علت ثابت نگه‌داشته شدن و عدم تغییر شکل، 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 حلقه‌ها و سایر پارامترها محاسبه شد. در شبیه‌سازی مدار الکتریکی، قسمت‌های خازن شارژ شده، سلف و مقاومت مطابق با مقادیر ارائه شده در جدول ۲ مدل‌سازی شدند. سپس مشخص شد که جریان به وجود آمده در سیم‌پیچ متناظر با جریان مدار الکتریکی مدل شده است. همانند آزمون‌های تجربی، در شبیه‌سازی نیز شکل‌دهی در ولتاژهای ۴، ۵ و ۶ kV انجام شد.

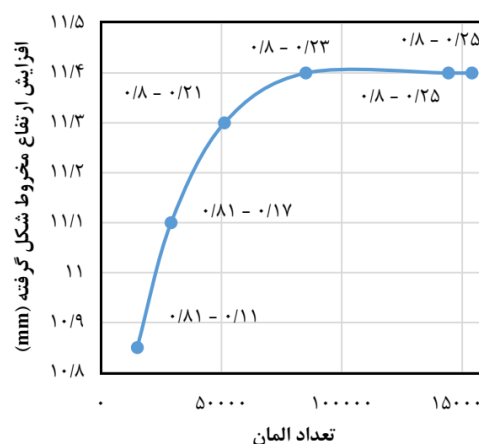
برای شبکه بندی از المان مثلثی ۳ نقطه‌ای استفاده شد. نوع مطالعه برای انجام شبیه‌سازی نیز از نوع گذرا (متغیر با زمان) انتخاب شد. کل زمان حل مسئله ۲۰۰ μs برای نرم‌افزار تعریف شد.

۳-۱- همگرایی شبکه

انتخاب صحیح تعداد و کیفیت المان‌های شبکه بر روی صحت نتایج خروجی و زمان مورد نیاز برای پردازش تأثیر بسزایی دارد. شکل ۷ نمودار تغییرات نتایج خروجی مربوط به ولتاژ ۵ kV را نسبت به تعداد المان نشان می‌دهد. برای بررسی تعداد و کیفیت المان‌های شبکه بر روی نتایج خروجی، متغیرهای افزایش ارتفاع مخروط شکل گرفته و اندازه ضخامت نهایی در مرکز قطعه‌کار مورد بررسی قرار گرفته‌اند. 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 می‌شود که در شبیه‌سازی با تعداد المان ۸۵۰۰۰ و

جدول ۲) مشخصات المان‌های به کاررفته در مدار شبیه‌سازی

المان	ظرفیت خازن (μF)	مقاومت ($m\Omega$)	اندوکتانس (μH)
مقدار کمیت	۲۰۵	۱۵	۳/۶۳



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

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

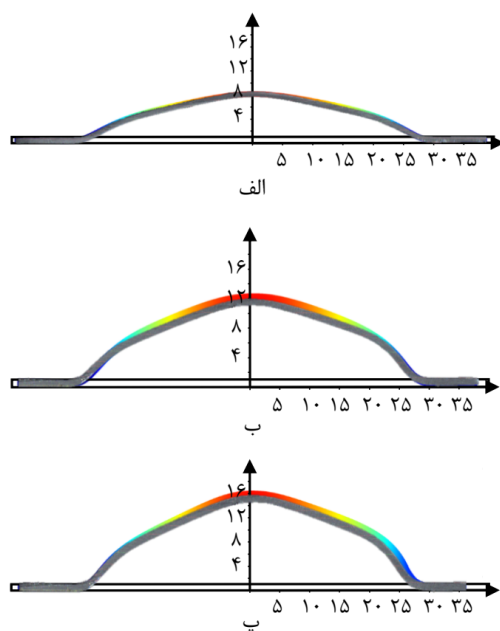
ولتاژ تخلیه شده (kV)	درصد اختلاف عدم تقارن	درصد اختلاف افزایش ارتفاع مرکز ورق	درصد اختلاف محیط لبه خارجی
۴	۴	۵	۱
۵	۴	۴/۵	۱
۶	۲/۵	۷	۱

المان‌ها است. مقایسه‌ها نشان می‌دهد که شبیه‌سازی‌های انجام شده می‌توانند به صورت قابل قبول هندسه قطعه کار نهایی را پیش‌بینی کنند.

۴-۱-۲- بررسی توزیع ضخامت

شکل ۱۱ نمودار تغییرات ضخامت ورق شکل‌دهی شده را از مرکز تا لبه خارجی آن نشان می‌دهد. مقطع انتخاب شده برای اندازه‌گیری توزیع ضخامت در نمونه‌های آزمون تجربی و شبیه‌سازی، مقطع‌های آورده شده در شکل ۱۰ هستند. به دلیل غیرمقارن 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 مقطع‌های 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 آورده شده تأییدی دیگر بر صحت شبیه‌سازی‌های انجام شده 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 فرایند شکل‌دهی به ترتیب در ولتاژهای الف) ۴kV، ب) ۵kV، پ) ۶kV

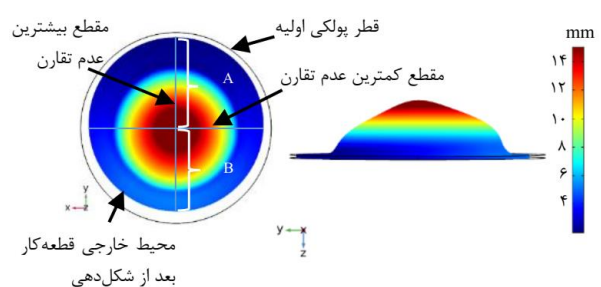
فاصله قله مرکز قطعه کار از تمامی نقاط لبه خارجی آن به یک اندازه خواهد بود. برای کمی کردن مقدار عدم تقارن قطعات شکل‌دهی شده، در مقطعی که بیشترین عدم تقارن را دارد (مطابق شکل ۹)، اختلاف فاصله دو نقطه روبه‌روی هم روی لبه خارجی (A-B) از قله قطعه کار شکل‌دهی شده به عنوان مقدار عدم تقارن محاسبه می‌شود. هر چه عدد محاسبه شده کمتر باشد مقدار عدم تقارن کمتر خواهد بود.

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

۴-۱-۱- مطابقت نتایج تجربی و شبیه‌سازی

در جدول ۴، مقدار محاسبه شده و اندازه‌گیری شده پارامترهای افزایش ارتفاع مرکز مخروط شکل‌دهی شده، عدم تقارن و محیط لبه خارجی در حالت شبیه‌سازی و تجربی برای مقایسه آورده شده است. شکل ۹ نتیجه شبیه‌سازی مربوط به ولتاژ ۶ kV را نشان می‌دهد. در این شکل طیف رنگی نشان‌دهنده مقدار جابجایی هر المان است که در آن مقطعی که بیشترین و کمترین مقدار عدم تقارن ناشی از شکل‌دهی در آن‌ها وجود دارد مشخص شده‌اند. برای محاسبه مقدار عدم تقارن و مقایسه پروفیل شبیه‌سازی با حالت تجربی، مقطعی که بیشترین عدم تقارن را دارد، در نظر گرفته شده است. در جدول ۵، مقدار درصد اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی آورده شده است. دیده می‌شود که بیشترین درصد اختلاف مربوط به پارامتر افزایش ارتفاع مرکز ورق، در ولتاژ ۶ kV و به مقدار ۷ درصد است.

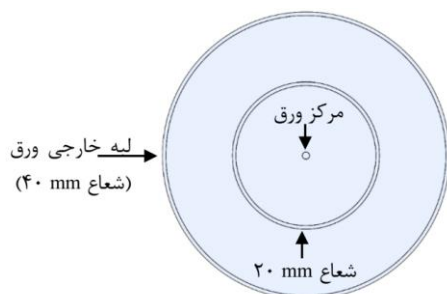
شکل ۱۰، مقایسه پروفیل مقطع برش خورده قطعات در حالت‌های تجربی (خاکستری) و شبیه‌سازی (طیف رنگی) را نشان می‌دهد. طیف رنگی در نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده مقدار جابجایی



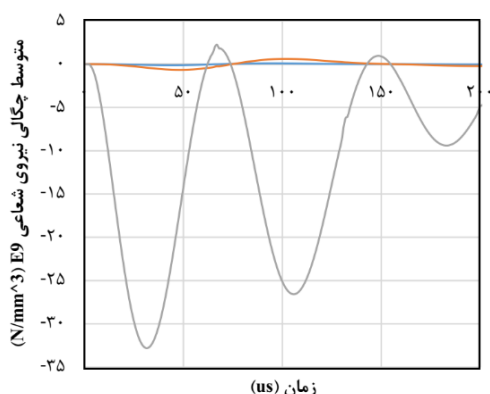
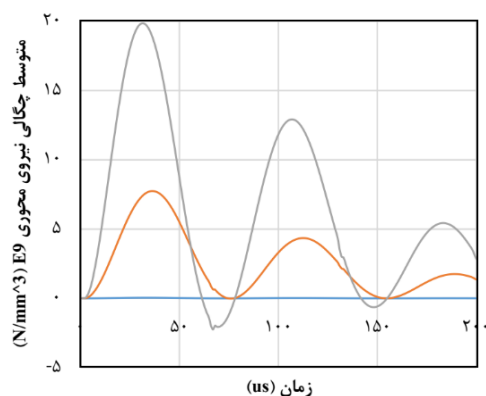
شکل ۹) نتایج شبیه‌سازی سه‌بعدی ولتاژ ۶ kV. الف) نمای روبرو ب) نمای بالا

جدول ۴) مقدار پارامترهای محاسبه شده توسط شبیه‌سازی المان محدود

ولتاژ (kV)	عدم تقارن (mm)	افزایش ارتفاع (mm)	محیط لبه خارجی (mm)	تجربی	شبیه‌سازی	تجربی	شبیه‌سازی
۴	۱	۰/۹۵	۷/۴۳	۷/۴	۲۴۵	۲۴۷	شبیه‌سازی
۵	۲	۲/۱	۱۱/۳	۱۱/۸	۲۴۰	۲۴۲	شبیه‌سازی
۶	۴	۴/۱	۱۴/۶	۱۵/۶	۲۲۵	۲۲۹/۵	شبیه‌سازی

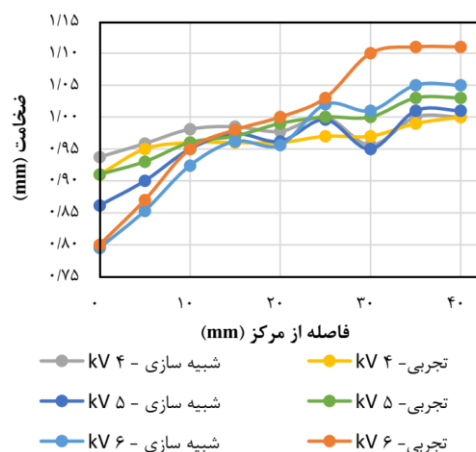


شکل ۱۲) حلقه‌های انتخاب شده برای انجام تحلیل توزیع نیرو در مرکز تا شعاع 1mm، شعاع ۱۹/۵ تا ۵/۲۲ mm و شعاع ۳۹ تا ۴۰ mm



شکل ۱۳) نمودار چگالی نیرو بر حسب زمان برای ولتاژ ۴ kV. 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 ۳ kV 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 وارد شده حین شکل‌دهی متناسب با مجذور ولتاژ تخلیه شده در سیم‌پیچ است. از طرفی مقدار انرژی ذخیره شده در



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

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

۳-۱-۴- بررسی توزیع چگالی نیروی الکترومغناطیسی

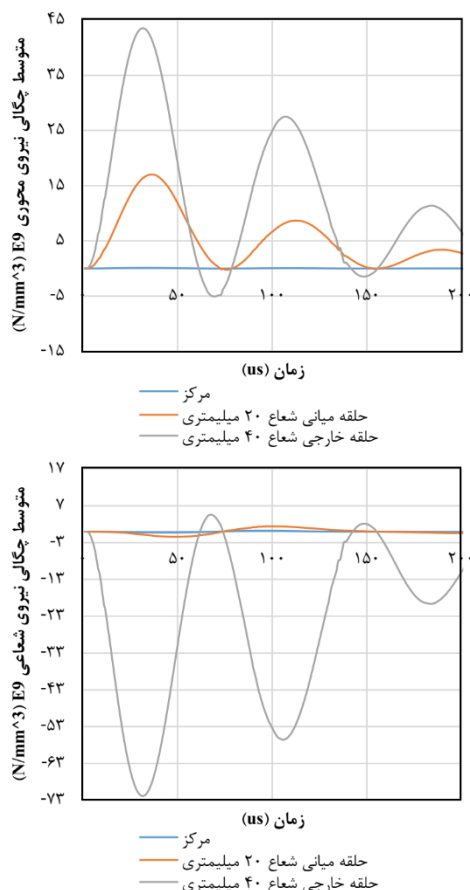
سه حلقه از قطعه‌کار در مرکز تا شعاع ۱ mm، شعاع ۱۹/۵ تا ۲۰/۵ mm و شعاع ۳۹ تا ۴۰ mm مطابق شکل ۱۲ انتخاب شد و متوسط چگالی نیروی حجمی در راستای محوری و شعاعی بر حسب زمان برای این سه حلقه از نتایج شبیه‌سازی استخراج شد. نتایج این نمودارها می‌تواند در به‌دست‌آوردن توزیع مطلوب نیروی الکترومغناطیسی برای جریان یافتن بهتر ورق حین فرآیند شکل‌دهی کمک شایانی نماید.

به دلیل عدم تقارن نیروی اعمال شده به قطعه‌کار در تمامی ولتاژها، در تمامی نتایج استخراج شده از شبیه‌سازی‌ها در این قسمت، مقدار متوسط چگالی نیروی الکترومغناطیسی محاسبه شده است. در شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ نمودارهای مربوط به تابع چگالی نیروی الکترومغناطیسی بر حسب زمان حین فرآیند شکل‌دهی آورده شده است.

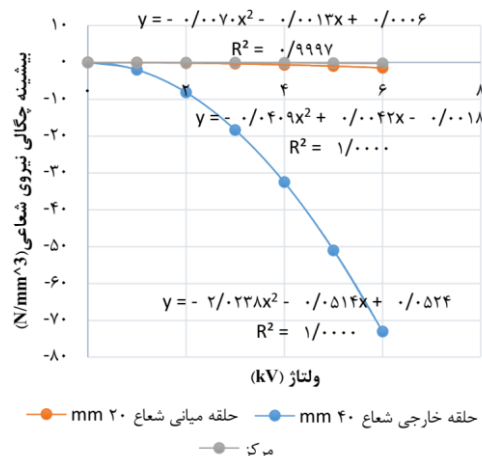
الگوی تغییرات تمامی نمودارها در شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ به صورت نوسانی و میرا است. بیشینه مقدار هرکدام از نمودارها در زمان ۳۰ μs اتفاق می‌افتد. با بررسی نمودارها در هر ولتاژ می‌توان دریافت که روند کلی هر نمودار با افزایش مقدار شعاع به صورت افزایشی است. این افزایش در مورد متوسط چگالی نیرو در راستای شعاعی نمود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

در تمامی ولتاژها، نمودار مربوط به لبه خارجی ورق (شعاع ۴۰ mm) در بازه‌های زمانی ۶۰ الی ۷۵ و ۱۴۰ الی ۱۵۵ μs مقداری منفی دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد نمودارهای مربوط به ولتاژهای مختلف با یکدیگر مشابه هستند و افزایش ولتاژ تخلیه از ۴ تا ۶ kV تفاوتی در روند و شکل کلی نمودارها ایجاد نمی‌کند و فقط باعث افزایش مقدار متوسط چگالی نیروی وارد شده (کشیده شدن نمودارها در راستای مؤلفه عمودی) به ورق می‌شود.

برای بررسی کمی اثر افزایش ولتاژ روی مقدار بیشینه متوسط چگالی نیروی وارد شده (زمان ۳۰ μs در نمودار تصاویر ۱۳ تا ۱۵)، نمودار بیشینه متوسط چگالی نیرو در طی مدت زمان شکل‌دهی بر حسب ولتاژ



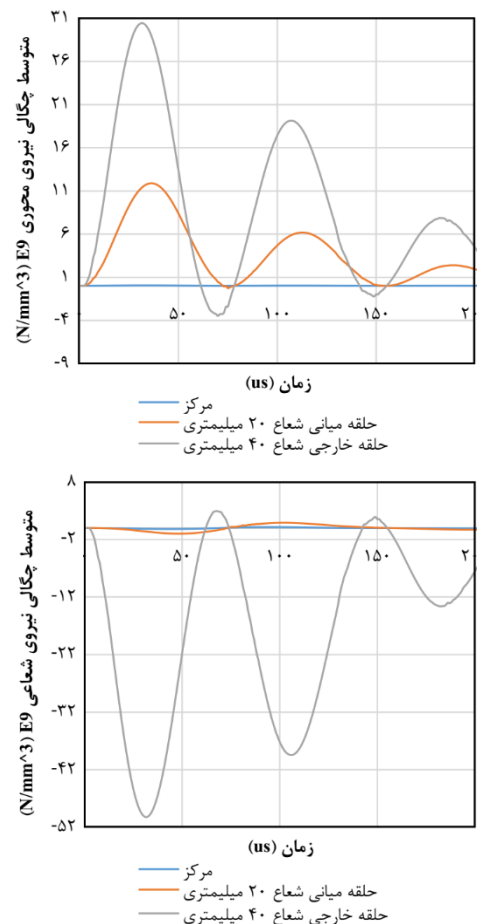
شکل ۱۵ نمودار چگالی نیرو برحسب زمان برای ولتاژ ۶ kV. الف) شعاعی (ب) محوری



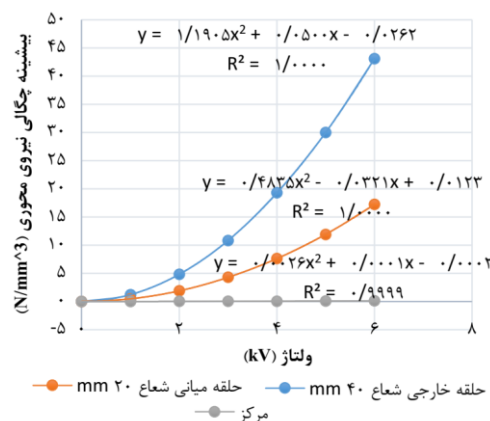
شکل ۱۶ متوسط چگالی نیروی شعاعی و درجۀ مختلف ورق برحسب ولتاژ شارژ شده خازن در زمان ۳۰ μs (بیشینه نیرو)

خازن نیز متناسب با مجذور ولتاژ شارژ خازن است. پس می‌توان گفت که بیشینه نیروی وارد شده حین شکل‌دهی متناسب با انرژی ذخیره شده در خازن است.

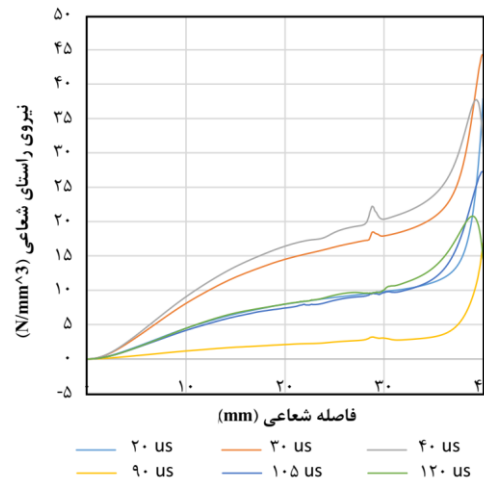
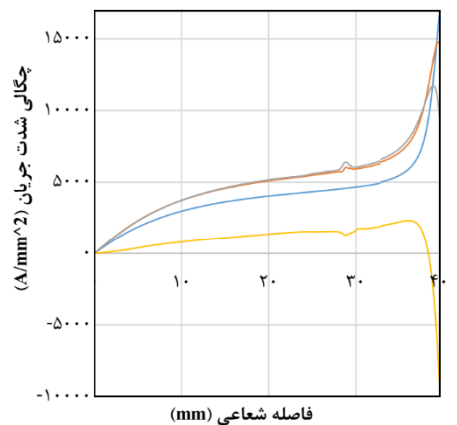
برای درک بهتر رابطه متوسط چگالی نیرو با شعاع قطعه کار حین شکل‌دهی، نمودار متوسط چگالی نیروهای شعاعی و محوری در ولتاژ ۶ kV (به عنوان نمونه) برحسب شعاع قطعه کار در زمان‌های ۲۰، ۳۰، ۴۰ mm به صورت غیرخطی افزایش شدیدی می‌یابد. چگالی نیرو



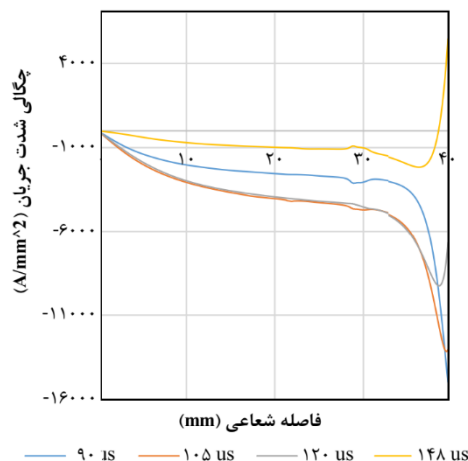
شکل ۱۷ نمودار چگالی نیرو برحسب زمان برای ولتاژ ۵ kV. الف) شعاعی (ب) محوری



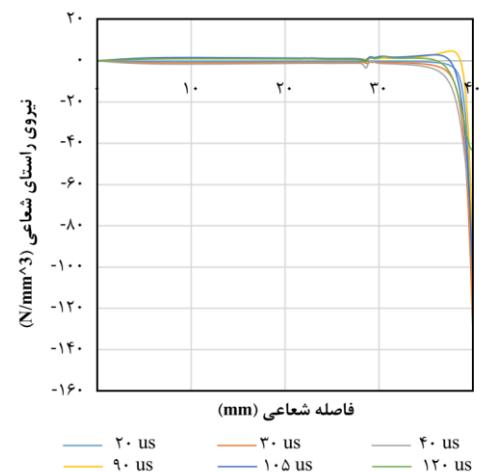
شکل ۱۸ متوسط چگالی نیروی محوری و درجۀ مختلف ورق برحسب ولتاژ شارژ شده خازن در زمان ۳۰ μs (بیشینه نیرو)



شکل ۱۸) نمودار چگالی نیروی محوری وارد شده به قطعه کار در زمان های مختلف در ولتاژ ۶ kV



شکل ۲۰) نمودار چگالی شدت جریان بر حسب شعاع قطعه کار در زمان های مختلف در ولتاژ ۶ kV



شکل ۱۹) نمودار چگالی نیروی شعاعی وارد شده به قطعه کار در زمان های مختلف در ولتاژ ۶ kV

۱ mm آخر شعاع قطعه کار (۳۹ تا ۴۰ mm) برخلاف جریان اصلی القاشده می شود. البته طبق شکل های ۱۳ تا ۱۵، بزرگی این نیروها کم است و در بازه زمانی نسبتاً کوچک به مساحت اندکی از قطعه کار (کمتر از ۵ درصد) تأثیر می گذارد. از این رو، تأثیر چشم گیری بر روند فرآیند شکل دهی ندارد.

با توجه به نتایج به دست آمده، مشاهده شد که سیم پیچ حلزونی ساده توانایی شکل دهی قطعه پیچیده پیش فرم مخروطی را ندارد. از این رو، برای شکل دهی این دسته از قطعات سیم پیچ جدیدی مورد نیاز است تا بتواند با توزیع نیروی بهتر، کیفیت قطعات شکل دهی شده را افزایش دهد.

۴-۲- طراحی و ساخت سیم پیچ جدید

پس از بررسی نتایج تجربی و شبیه سازی های انجام شده و همچنین نتایج مطالعات قبلی، طراحی سیم پیچ مناسب در محیط نرم افزار المان محدود بر مبنای اصول زیر انجام شد:

- ۱- تکیه بر نیروی شعاعی: محدوده شعاعی ۲۸ الی ۴۰ mm قطعه کار که در تماس با ورق گیر است، پتانسیل مناسبی برای استفاده از نیروی شعاعی برای افزایش جریان ورق رو به داخل دارد. طراحی سیم پیچ در این قسمت از قطعه کار، 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

شعاعی از مرکز تا شعاع ۳۵ mm (۸۸ درصد شعاع قطعه کار) قطعه کار تقریباً صفر است و می توان گفت در این محدوده هیچ نیروی شعاعی رو به داخل به قطعه کار اعمال نمی شود اما از شعاع ۳۵ mm قطعه کار تا لبه خارجی ورق (شعاع ۴۰ mm) مقدار این چگالی نیرو به صورت غیرخطی افزایش بسیار شدیدی دارد. این موضوع نشان می دهد 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 می شود که برای نمودارهای زمان ۴۰ و ۱۲۰ μs، در انتهای نمودار (شعاع ۴۰ mm) افت چگالی نیرو دیده می شود. علت این پدیده را می توان در نمودار متوسط چگالی جریان القاشده بر حسب شعاع قطعه کار در شکل ۲۰ پیدا کرد. جایی که برای زمان های ۴۰ و ۱۲۰ μs مقدار چگالی جریان القاشده در لبه خارجی ورق افت محسوسی دیده می شود و برای زمان های ۶۸ و ۱۴۸ μs (مرکز بازه های زمانی در تصاویر ۱۳ تا ۱۵ که مقدار چگالی نیرو در شعاع ۴۰ منفی است) تغییرات چگالی جریان القاشده به حدی است که در



شکل ۲۲) سیم‌پیچ جدید و قالب ساخته شده

شود. پس از انجام آزمون‌های تجربی، قطعات همانند آنچه در قسمت ۴/۱ 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 اندازه‌گیری شده تجربی در جدول شماره ۶ ارائه شده است. عدم چروکیدگی ورق در قسمت ورق‌گیر نشان می‌دهد که استفاده از نیروی وارد شده 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 مشخص شده است. طیف رنگی نتایج شبیه‌سازی مقدار جابجایی هر



شکل ۲۳) تصویر قطعات شکل‌دهی شده توسط سیم‌پیچ جدید. الف) ۷ و ۳۰۰۰ (ب) ۳۴۰۰، ۳۴۰۰ (پ) ۳۷۰۰، ۴۰۰۰ (ت) ۴۰۰۰

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

ولتاژ (V)	عدم‌تقارن (mm)	افزایش ارتفاع (mm)	محیط لبه خارجی (mm)
تجربی	شبیه‌سازی	تجربی	شبیه‌سازی
۳۰۰۰	۰/۲	۰/۲۵	۱۷
۳۴۰۰	۰/۳	۰/۳۵	۱۹/۴
۳۷۰۰	۰/۷	۰/۶۵	۲۳/۱
۴۰۰۰	۰/۹	۰/۹۵	۲۴/۲
۳۰۰۰	۰/۲	۰/۲۵	۱۷
۳۴۰۰	۰/۳	۰/۳۵	۱۹/۴
۳۷۰۰	۰/۷	۰/۶۵	۲۳/۱
۴۰۰۰	۰/۹	۰/۹۵	۲۴/۲

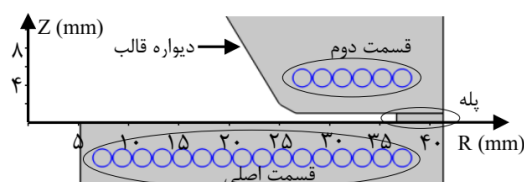
شعاعی می‌شد، توسط نیرویی برابر و مخالف جهت با آن از بین برود و هم اینکه نیروی شعاعی تا دو برابر افزایش یابد. ضمن اینکه متقارن بودن نیروی محوری در محدوده شعاعی یادشده، خود باعث ایجاد یک نیروی ورق‌گیر می‌شود که از تمایل ورق به چروک خوردن می‌کاهد.

۲- برای کاهش گام سیم‌پیچ به حداقل ممکن و نزدیک‌تر شدن به حالت مطلوب، سیم‌پیچ با حلقه‌های هم‌مرکز به منظور به حداقل رساندن عدم‌تقارن توزیع نیرو، قطر مفتول سیم‌پیچ از ۳ mm به ۲ mm کاهش یافت و فاصله خالی بین حلقه‌های سیم‌پیچ نیز حذف شد. با توجه به اینکه ضخامت عایق مفتول مورد استفاده ۰/۵ mm است، فاصله بین حلقه‌های سیم‌پیچ به اندازه دو برابر ضخامت عایق روی مفتول یعنی ۰/۱ mm خواهد بود. از این رو، گام سیم‌پیچ جدید ۲/۱ mm خواهد بود.

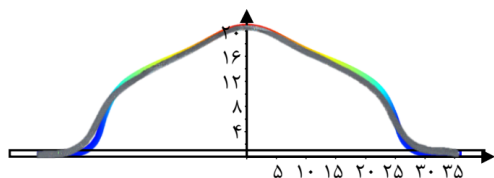
۳- در محدوده شعاعی ۰ تا ۲۸ mm قطعه‌کار، طراحی سیم‌پیچ به گونه‌ای انجام شد که توزیع نیرو در این قسمت ضمن اعمال مناسب نیروی محوری، از مرکز ورق فاصله مناسبی داشته باشد تا مقدار تمرکز نیرو روی مرکز ورق و در ادامه نازک‌شدگی در این قسمت به حداقل برسد.

پس از اتمام طراحی مطابق با اصول ذکرشده، سیم‌پیچ جدید ساخته شد. شکل ۲۱ شماتیک برش خورده مقطع سیم‌پیچ طراحی شده را نشان می‌دهد. سیم‌پیچ به صورت دوتکه ساخته شد. قسمت اول به صورت 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 ۴۰ mm رو به پایین برای از بین بردن نیروی محوری سیم‌پیچ اصلی (عامل اصطکاک)، ایجاد نیروی ورق‌گیر الکترومغناطیسی و همچنین ایجاد نیروی شعاعی رو به داخل را دارد. پله ایجادشده برای قرارگیری قطعه‌کار روی سیم‌پیچ اصلی، به اندازه ۰/۲ mm بیشتر از ضخامت ورق در نظر گرفته شده است، تا در صورت بروز خطا در اعمال گشتاور بستن پیچ دستی تأثیری روی نیروی ورق‌گیر بین قطعه کار و قالب به وجود نیاید. شکل ۲۲ سیم‌پیچ ساخته شده را نشان می‌دهد. همانند سیم‌پیچ حلزونی ساده، دو قسمت ساخته شده با اعمال فشار پیچ دستی به هم محکم می‌شوند.

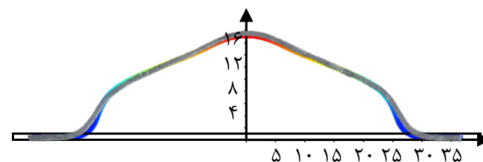
آزمون‌های تجربی برای ولتاژهای ۳۰۰۰، ۳۴۰۰، ۳۷۰۰ و ۴۰۰۰ انجام شد. در هر ولتاژ دو بار آزمون تکرار شد تا مجدداً از تکرارپذیری دستگاه و صحت نتایج اطمینان حاصل شود. برای انجام آزمون تجربی ابتدا یک سر هرکدام از دو سیم‌پیچ به هم متصل شد، سپس دو سر باقی‌مانده به دستگاه متصل شدند تا ولتاژ تخلیه شده و آزمون انجام



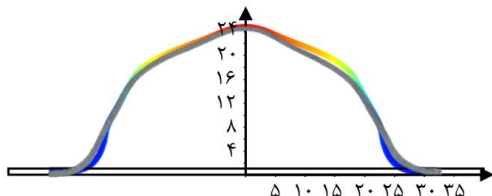
شکل ۲۱) مدل برش خورده سیم‌پیچ جدید و قالب بصورت متقارن محوری. قسمت‌های مختلف سیم‌پیچ طراحی شده جدید در تصویر مشخص شده‌اند



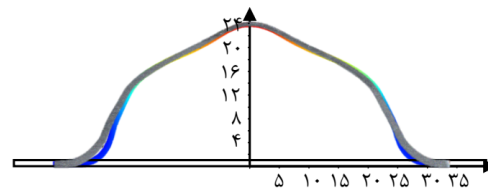
شکل ۲۵) مقایسه پروفیل قطعه شکل‌دهی شده و شبیه‌سازی در ولتاژ ۷ و ۳۴۰۰



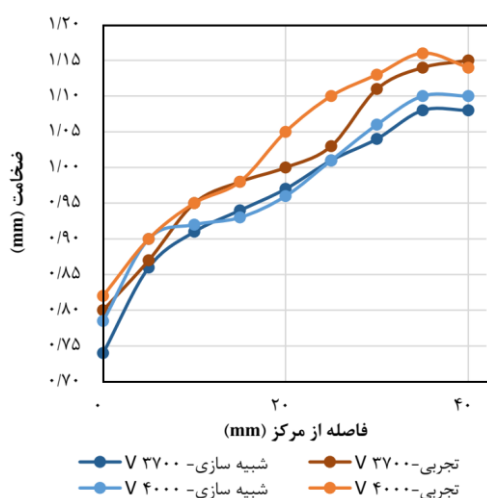
شکل ۲۴) مقایسه پروفیل قطعه شکل‌دهی شده و شبیه‌سازی در ولتاژ ۳۰۰۰۷



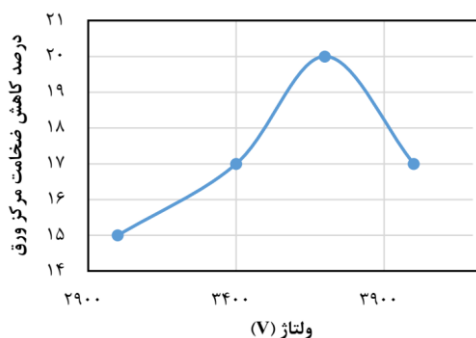
شکل ۲۷) مقایسه پروفیل قطعه شکل‌دهی شده و شبیه‌سازی در ولتاژ ۴۰۰۰۷



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



شکل ۲۹) مقایسه توزیع ضخامت نتایج تجربی و شبیه‌سازی در ولتاژ ۳۷۰۰ و ۴۰۰۰



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

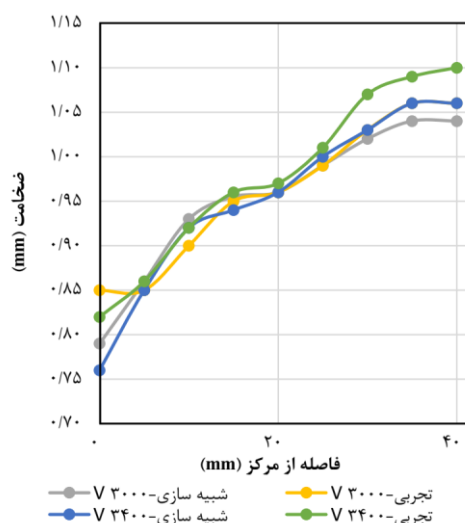
۳-۲-۴- مقایسه نتایج سیم‌پیچ جدید و ساده

شکل ۳۱ مقایسه بین پروفیل قطعه‌کار شکل‌دهی شده در ولتاژ ۷ و 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.

المان را مشخص می‌کند. طبق آنچه قبلاً بیان شد سطح مقطع قطعات شکل داده شده 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 که قسمت بحرانی است را برحسب ولتاژ تخلیه شده نشان می‌دهد. با افزایش ولتاژ تا ۳۷۰۰ مقدار نازک‌شدگی اندکی افزایش می‌یابد اما با افزایش ولتاژ از ۳۷۰۰ تا ۴۰۰۰ مقدار نازک‌شدگی هم در نتایج 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

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] روی شکل‌دهی پیش‌فرم قطعات مخروطی انجام شد. سپس با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، یک مجموعه سیم‌پیچ و قالب جدید طراحی و ساخته شد که با تغییر دادن الگوی توزیع نیرو حین فرآیند شکل‌دهی قطعات مخروطی پیچیده، موجب افزایش ارتفاع و کاهش نازک‌شدگی قطعه‌کار در مرکز، افزایش بهره‌وری انرژی، از بین رفتن چروکیدگی 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 mm کاهش 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 بر افزایش ۲ برابری نیروی شعاعی روبه‌داخل، به دلیل برهم‌کنش نیروی‌های محوری وارد شده از طرف سیم‌پیچ‌های بالا و پایین، نیروی عامل اصطکاک را به حداقل می‌رساند. ضمناً این برهم‌کنش نیروهای محوری خود باعث بوجود آمدن نیروی ورق‌گیر الکترومغناطیسی می‌شود که در حذف‌کردن چروکیدگی ورق بسیار موثر است.

مدیریت توزیع نیرو اعمال‌شده 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.

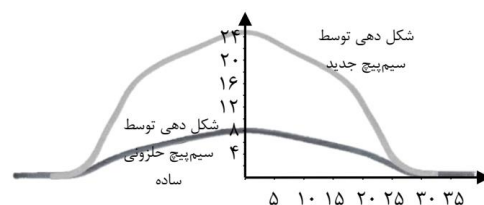
تأییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده است. همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. محتویات علمی مقاله حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده است.

تعارض منافع: مقاله حاضر از رساله دکتری ابوالفضل رجب‌لو با عنوان " تعیین نرخ کرنش مناسب در شکل‌دهی قطعات مخروطی با استفاده از فرایند شکل‌دهی الکترومغناطیسی " در دانشگاه نوشیروانی بابل

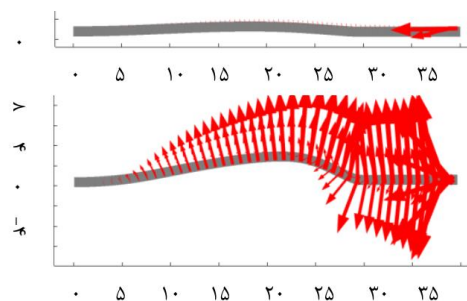
شکل ۳۲ به مقایسه بزرگی و جهت توزیع متوسط چگالی نیروی وارده به قطعه‌کار بین سیم‌پیچ اولیه و جدید در زمانی که شدت جریان تخلیه‌شده در مدار بیشینه است می‌پردازد. دیده می‌شود که در سیم‌پیچ جدید، مقدار توزیع نیرو نسبت به سیم‌پیچ اولیه بسیار همگن‌تر است و تغییرات بزرگی نیرو در راستای شعاعی شیب ملایم‌تری دارد. برای سیم‌پیچ جدید، در شعاع ۲۸ الی ۴۰ mm 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 سیم‌پیچ جدید، نشان دهنده موثر بودن اعمال نیروی ورق‌گیر توسط خود سیم‌پیچ جدید است. همچنین مقایسه مقدار بزرگی نیروها نشان 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 علی‌رغم 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 ۴۰۰۰V توسط سیم‌پیچ‌های اولیه و جدید



شکل ۳۲) بزرگی و جهت توزیع نیروی ایجاد در نقاط مختلف قطعه‌کار حین شکل‌دهی با ولتاژ ۴۰۰۰V. الف) سیم‌پیچ اولیه در بیشینه جریان (زمان ۳۰ μs)، ب) سیم‌پیچ جدید در بیشینه جریان (زمان ۵۶ μs)

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

- 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 داده‌ها، نگارنده مقدمه، نگارنده بحث، درصد مشارکت ۵۰٪؛ محمد بخشی جویباری (نویسنده دوم)، پژوهشگر فرعی، تحلیل گر داده‌ها، روش شناس، درصد مشارکت ۲۵٪؛ حمید گرجی (نویسنده سوم)، پژوهشگر فرعی، تحلیل گر داده‌ها، 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- Thiruvarduchelvan S, Gan JG. Drawing of conical cups with friction actuated blank holding. *Journal of materials shaping technology*. 1991;9(2):59-65.
- 11- Thiruvarduchelvan S, Tan MJ. The drawing of conical cups using an annular urethane pad. *Journal of materials processing technology*. 2004;147(2):163-6.