

Experimental and Numerical Study of the Affecting Parameters on Single Point Incremental Forming Process of Perforated Aluminum-Copper Bimetal Sheet

Abdollahi Taheri A.¹ *MSc*, Golabi S.*¹ *PhD*

¹ Solid Mechanics Department, Mechanical Engineering Faculty, University of Kashan, Kashan, Iran

Abstract

In recent years, industrial applications of composite sheets have been increasingly expanded due to their extremely different properties such as high strength, low density, and good corrosion resistance compared to single layer sheets. For this reason, in the current study, it is investigated the flanging of composite metal sheets. Also, the behavior of an aluminum-copper sheet, clad using explosive welding, during incremental forming of a circular collar have been experimentally and numerically studied. In addition, the experimental results are used to validate the numerical simulation of the forming process. At first, in order to understand collar forming of the perforated sheet, the effect of hole diameter, forming direction or layer arrangement on dimensional accuracy, thickness distribution and forming force were investigated and then, the effect of hole flanging and collar forming were compared using two strategies. The results show that by decreasing the initial hole diameter of sheet, the average vertical maximum force increases by 9%, the minimum thickness decreases and its location shifts toward the center of sheet. Aluminum-copper arrangement also experiences a 7% reduction in average force and a 4% increase in minimum thickness due to the protective property of copper layer in tensile state compares to copper-aluminum. Besides, the multi-step method leads to a 6% minimum thickness increase due to better material flow compared to single-step method.

Keywords

Single Point Incremental Forming (SPIF)
Aluminum-Copper Bimetal Sheet
Collar Forming
Forming Force

*Corresponding Author

Tel: +98 (31) 55914280

Fax: +98 (31) 55913281

Post Address: Solid Mechanics Department, Mechanical Engineering Faculty, University of Kashan, 6th km of Ravand Road, Kashan, Iran. Postal Code: 8731753153.

golabi-s@kashanu.ac.ir

Received: December 12, 2019

Accepted: March 18, 2020

ePublished: June 20, 2020

مطالعه تجربی و عددی پارامترهای موثر بر فرآیند شکل‌دهی نموی تک‌نقطه‌ای ورق سوراخ‌دار دولایه آلومینیوم-مس

علی عبدالهی طاهری MSc

گروه مکانیک جامدات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

سعید گلابی* PhD

گروه مکانیک جامدات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

چکیده

در سال‌های اخیر، کاربردهای صنعتی ورق‌های کامپوزیتی به دلیل خواص فوق‌العاده متفاوت مانند استحکام بالا، چگالی کم و مقاومت به خوردگی خوب در مقایسه با ورق‌های تک‌لایه به‌طور فزاینده‌ای گسترش یافته است. به همین دلیل در این مقاله فلنج‌کاری ورق سوراخ‌دار کامپوزیتی بررسی شده است. در پژوهش حاضر، پارامترهای موثر بر شکل‌دهی ورق سوراخ‌دار دولایه جوش انفجاری آلومینیوم-مس مورد بررسی تجربی و عددی قرار گرفته‌اند. همچنین به‌منظور اعتبارسنجی شبیه‌سازی عددی فرآیند شکل‌دهی از نتایج تجربی کمک گرفته شده است. در ابتدا به‌منظور درک ماهیت یقه‌دهی ورق سوراخ‌دار، تاثیر قطر سوراخ و ترتیب چینش لایه‌ها بر دقت ابعادی، توزیع ضخامت و نیرو مورد بررسی قرار گرفتند و سپس تاثیر فلنج‌کاری و یقه‌دهی با استفاده از دو روش با هم مقایسه شدند. نتایج حاصل نشان می‌دهند که با کاهش قطر سوراخ اولیه ورق، نیرو بیشینه عمودی متوسط به میزان ۹٪ افزایش می‌یابد و همچنین کمینه ضخامت کاهش و موقعیتش به سمت مرکز ورق متمایل می‌شود. چینش آلومینیوم-مس نیز به دلیل خاصیت محافظتی لایه مس در حالت کششی، ۷٪ کاهش نیروی متوسط و ۴٪ افزایش کمینه ضخامت، نسبت به مس-آلومینیوم را تجربه می‌کند. همچنین روش چندمرحله‌ای به دلیل جریان مواد بهتر نسبت به روش تک‌مرحله‌ای افزایش ۶ درصدی کمینه ضخامت را ایجاد می‌کند.

کلیدواژه‌ها: شکل‌دهی نموی تک‌نقطه‌ای، ورق دوفلزی آلومینیوم-مس، ایجاد یقه، نیروی شکل‌دهی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۹/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۲۸

*نویسنده مسئول: golabi-s@kashanu.ac.ir

مقدمه

شکل‌دهی نموی برای اولین بار توسط آیکن^[1] و لسزاک^[2] به صورت اختراع ارایه شد. جسویت^[3]، به تشریح فرآیند شکل‌دهی نموی منفی پرداخته است. در این تحقیق تغییر شکل با دو روش با ابزار و بدون ابزار پشتیبان انجام شد. شیم و پارک^[4]، یک ابزار شکل‌دهی با مکانیزم حرکت آزاد چرخشی ساچمه را توسعه دادند و برای تعیین قابلیت شکل‌پذیری ورق Al-1050 آتیل شده استفاده کردند. ایسکی و ناگاتاوا^[5]، یک ماشین شکل‌دهی نموی چند مرحله‌ای با استفاده از غلتک‌های کروی و استوانه‌ای برای شکل‌دهی سطوح دیواره عمودی پانل‌های نازک مستطیلی توسعه دادند. این فرآیند شامل سه مرحله شکل‌دهی با غلتک کروی، شکل‌دهی تحت زاویه مناسب و مسطح کردن با غلتک‌های استوانه‌ای است. همچنین روشی برای محاسبه توزیع تقریبی کرنش در راستای ضخامت ورق و ماکزیمم

ارتفاع شکل‌دهی در پانل مستطیلی پیشنهاد شد. کیم و پارک^[6]، تاثیر پارامترهای فرآیند همچون نوع ابزار، اندازه ابزار، نرخ پیشروی، اصطکاک در میان سطوح ابزار و ورق و ناهمگنی سطحی ورق را بر روی قابلیت شکل‌پذیری بررسی کردند. پارک و کیم^[7]، قابلیت شکل‌پذیری یک ورق آلومینیوم تحت شرایط مختلف شکل‌دهی را ارزیابی و اشکال پیچیده هندسی را با این تکنیک تولید کردند. با استفاده از دانش و تجربه کسب‌شده در این تحقیق، امکان تولید بسیاری از سطوح وجود دارد. فلیس و همکاران^[8]، با طراحی آزمایش‌های تجربی برای تعیین منحنی حد شکل‌دهی، نشان دادند که افزایش در شکل‌پذیری به دلیل تغییر شکل پلاستیک موضعی در منطقه اطراف ابزار است. در مطالعه‌های دیگر، فراتینی و همکاران^[9]، با بررسی اثر برخی خواص مهم مکانیکی مواد بر روی حد شکل‌دهی آنها در هر دو فرآیند شکل‌دهی سنتی و نموی، نشان دادند که توان کرنش سختی مواد، بیشترین تاثیر را بر روی شکل‌پذیری دارد. آمبروگیو و همکاران^[10]، بر روی قابلیت شکل‌پذیری ماده در فرآیند شکل‌دهی نموی و خصوصاً ارزیابی و جبران برگشت فنری متمرکز شدند. برای این منظور، ابتدا تحقیقات آزمایشگاهی بر روی تعدادی از پارامترهای مرتبط با فرآیند صورت گرفت. همزمان با آن، یک شبیه‌سازی المان محدود از فرآیند شکل‌دهی نموی انجام شد و پس از مقایسه نتایج شبیه‌سازی دقت ابعادی و برگشت فنری با خروجی آزمایشگاه، نتایج مورد تایید قرار گرفتند. سرو و همکاران^[11]، تاثیر پارامترهای فرآیند همچون سرعت پیشروی، نیروی شکل‌دهی و استراتژی شکل‌دهی بر ویژگی‌های هندسی قطعات (ضخامت، دقت هندسی، زبری و غیره) را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند و امکان بهینه‌سازی کیفیت قطعات شکل‌دهی شده توسط کنترل صحیح پارامترهای فرآیند نشان داده شد. در همین سال آتاناسیو و همکاران^[12]، در ارتباط با بهینه‌سازی مسیر ابزار در فرآیند شکل‌دهی نموی مثبت ورق به صورت نامتقارن مطالعه کردند. جکسون و آلود^[13] مکانیزم شکل‌دهی نموی را بر روی ورق‌های مسی به‌طور آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. همچنین در این تحقیق توزیع کرنش در ضخامت ورق در حالت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت و نیز اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که مکانیزم شکل‌دهی نموی به صورت برش و کشش در صفحه عمود بر راستای ابزار و همچنین برش در صفحه موازی با راستای ابزار است. دجاردین و همکاران^[14]، تحقیقی در رابطه با تحلیل تاثیرات اعوجاج و برگشت فنری حاصل از فرم‌دهی نموی به‌منظور مطالعه استفاده از مدل المان محدود بر پایه المان‌های پوسته‌ای برای شبیه‌سازی فرآیند اجرا شد. همچنین یک مقایسه بین نتایج عددی و آزمایشگاهی برای به دست آوردن مدل مناسب انجام شد. قاسمی و سلطانی^[15]، به مطالعه برخی پارامترهای موثر بر روی تغییر ضخامت قطعه تغییر شکل‌یافته و نیروها در فرآیند شکل‌دهی نموی پرداختند و نشان دادند که با افزایش سرعت پیشروی نیروی عمودی کاهش می‌یابد و با افزایش سرعت چرخشی ابزار نیروی افقی کاهش می‌یابد و باعث توزیع یکنواخت‌تر ضخامت می‌شود. میزیا و مولایی داریانی^[16]، با روش

در ورق‌های دولایه جوش انفجاری شده مس/آلومینیوم پرداختند. قیصریان و هنرپیشه^[27]، به بررسی عمق شکست ورق دولایه آلومینیوم- مس فرم‌دهی شده به روش شکل‌دهی نموی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که شکل‌پذیری این ورق‌های دولایه با کاهش قطر ابزار و گام عمودی به میزان ۵ و ۱۲٪ افزایش می‌یابد.

با توجه به مرور ادبیات، تلاش‌های گسترده ای برای تحقیق روی فرم‌دهی نموی ورق‌های دولایه صورت گرفته است اما تا بحال تحقیقی بر روی شکل‌دهی ورق‌های دولایه سوراخ‌دار و یقه‌دهی و فلنج‌کاری آنها با استفاده از روش شکل‌دهی نموی انجام نشده است. در پژوهش حاضر هدف آن است که تاثیر عوامل مختلف همچون قطر سوراخ اولیه ورق، ترتیب چینش لایه‌ها و استراتژی فرم‌دهی بر دقت هندسی، برگشت فنری، توزیع ضخامت و نیروی وارد بر ابزار در ورق سوراخ‌دار دولایه آلومینیوم- مس با روش شکل‌دهی نموی بررسی گردد.

مواد و روش تحقیق

در این مطالعه، شکل‌دهی نموی بر روی ورق دولایه آلومینیوم/مس به ضخامت ۱/۶ میلی‌متر شامل ۱ میلی‌متر آلومینیوم و ۰/۶ میلی‌متر اجرا شده است که در شکل ۱ نشان داده شده است. ورق‌ها به صورت مربعی و در ابعاد ۲۰۰×۲۰۰ میلی‌متر بریده شده‌اند. برای اتصال ورق‌ها به یکدیگر از روش جوش انفجاری استفاده شده است. به منظور شکل‌دهی ورق مسیر ابزار مارپیچ مطابق شکل ۲ در نظر گرفته شده است. این مسیر ابزار به دلیل پیوستگی و نموی بودن در فرم‌دهی از کارایی بیشتری برخوردار است.

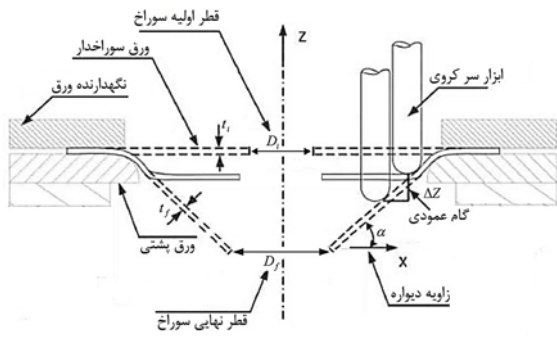
شماتیکی از پارامترها مانند قطر اولیه و نهایی سوراخ، گام عمودی، زاویه دیواره و ضخامت اولیه و نهایی ورق و همچنین اجزا فرم‌دهی شامل یک نگه‌دارنده، ورق پشتی، ابزار فرم‌دهی و ورق خام را در شکل ۳ نمایش داده شده است. همچنین در فرم‌دهی ورق از دستگاه ماشین فرز CNC سه‌محوره (شرکت Heidenhein؛ آلمان) استفاده شده است. یک ابزار استوانه‌ای سرکروی به قطر ۱۲ میلی‌متر برای فرم‌دهی نموی تکنقطه ورق به کار گرفته شد. جنس ابزار از کاربید سمنته با سختی ۵۰ راکول سی است. جنس سخت سر ابزار، مانع از سایش آن در برابر ورق می‌شود همچنین با توجه به انتخاب طول به قطر مناسب برای ابزار از کمناش پیشگیری شده است. همچنین شکل ۲ تجهیزات فرم‌دهی ورق سوراخ‌دار در چینش مس- آلومینیوم را نمایش می‌دهد. در ادامه برای بیان حالت‌های چینش ورق به صورت مختصر از عبارات AC و CA که در شکل ۴ وجود دارد، استفاده می‌شود.

به منظور شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی نموی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس برخی از پارامترها در آزمون‌های مختلف می‌بایست اندازه‌گیری شوند. برای به دست آوردن خواص مکانیکی ورق، آزمون کشش تک‌محور با استفاده از دستگاه آزمون کشش محوری KOOPA انجام شده است که در شکل ۵ نشان داده شده است. برای این منظور مطابق با استاندارد ASTM E08-04 سه نمونه از

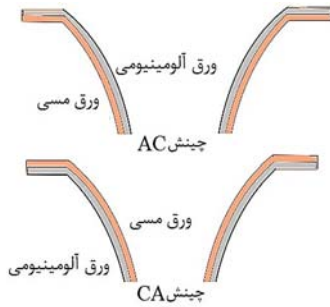
حد بالا به تحلیل نیروهای مماسی در این فرآیند پرداختند و نشان دادند که با افزایش گام عمودی و ضخامت ورق، نیروها افزایش می‌یابند. آنها همچنین نشان دادند که با افزایش شعاع ابزار، متوسط کرنش معادل کاهش می‌یابد. گلابی و خزایی^[17]، توانستند نمودارهایی را ارائه کنند که با داشتن ضخامت و قطر بزرگ فرم‌دهی، عمق شکل‌دهی و زاویه مخروط برای استیل گرید ۳۰۴ قابل پیش‌بینی باشد. همچنین ترکش/صفهانی و همکاران^[18]، جهت یقه‌دهی بر روی ورق به دلیل کاربرد زیاد آن از فرآیند شکل‌دهی لیزر نیز استفاده نمودند.

ورق‌های دولایه ساخته شده با روش جوش انفجاری (Explosive Welding) به دلیل یکنواختی تداخل لایه‌ها با یکدیگر، با کاربردهای گسترده در اجزا و ساختارهای کامپوزیتی در صنایع شیمیایی الکتریکی و هوافضا استفاده شده‌اند. اخیراً توجه زیادی در ادبیات به شکل‌دهی ورق‌های دوفلزی معطوف شده است. حبیبی پارسا و همکاران^[19]، تاثیرات نسبت ضخامت و ترتیب لایه‌ها روی نسبت کشش قابل دسترسی در فرآیند شکل‌دهی کشش عمیق ورق استیل آلومینیوم به صورت عددی و تجربی بررسی کردند و نتایج نشان دادند که نسبت ضخامت ۱ به ۳ آلومینیوم به استیل می‌تواند منجر به بیشترین نسبت کشش شود. باقرزاده و همکاران^[20]، مدل تحلیلی برای آنالیز تنش در کشش عمیق هیدرومکانیک ورق‌های آلومینیوم استیل گسترش دادند و تاثیر ضخامت، ترتیب و نسبت کشش را در فرآیند شکل‌دهی مورد بررسی قرار دادند. عطریان و صنیعی^[21]، به تحقیق درباره تاثیر عوامل کلیدی روی کشش عمیق ورق استیل- برنج با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی و عددی پرداختند. تحلیل آزمایشگاهی و عددی به وسیله دهقانی و سلیمی^[22]، برای مطالعه روی شکل‌پذیری ورق مس- استیل در کشش عمیق اجرا شد و به این نتیجه رسیدند که تغییر ضخامت لایه قوی‌تر (استیل) یکنواخت‌تر از لایه ضعیف‌تر (مس) است.

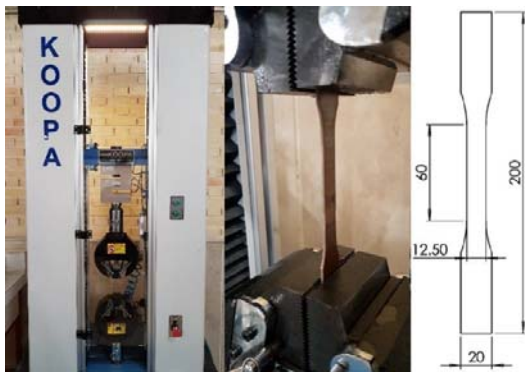
با توجه به تقاضای رو به افزایش قطعات پیچیده و کاربردهای فراوان ورق‌های دوفلزی به دلیل متنوع بودن خواصی از قبیل خواص مکانیکی، رسانایی الکتریکی، مقاومت به خوردگی و در نهایت ارائه خواص ترکیبی، محققان را بر این داشته است که با استفاده از شکل‌دهی نموی به فرم‌دهی ورق‌های دولایه بپردازند. با استفاده از مطالعه تجربی و عددی روی ورق آلومینیوم- مس، هنرپیشه و همکاران^[23]، نشان دادند که با افزایش قطر ابزار و اندازه گام عمودی، نیروی فرم‌دهی افزایش و ضخامت دیواره در طی فرآیند شکل‌دهی نموی کاهش می‌یابد. ساختمانیان و همکاران^[24]، همچنین به تاثیر چینش لایه‌های ورق دولایه استیل- تیتانیوم روی فرآیند شکل‌دهی نموی به صورت آزمایشگاهی و عددی پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که چینش تیتانیوم- استیل نیروی فرم‌دهی بیشتری را به دلیل چگالی مضاعف لایه تیتانیوم نسبت به استیل- تیتانیوم است که منجر به سخت‌شوندگی بیشتر می‌شود. در زمینه شکل‌دهی افزایشی ورق‌های چندلایه، قیصریان و هنرپیشه^[25] و هنرپیشه و قیصریان^[26] به بررسی و بهینه‌سازی پارامترهای شکل‌دهی افزایشی



شکل ۳ شماتیک پارامترها و قرارگیری ورق و تجهیزات



شکل ۴ شماتیک چینش ورق آلومینیوم- مس



شکل ۵ دستگاه آزمون کشش و اندازه ابعادی نمونه آزمون



شکل ۶ نمونه‌های آزمون کشش

جدول ۱) خواص مکانیکی ورق‌های آلومینیوم ۱۰۵۰ و مس ۱۰۱۰

مس	آلومینیوم	خواص مکانیکی
۸۹۰۰	۲۷۰۰	چگالی (kg/m^3)
۱۰۴	۷۱	مدول یانگ (GPa)
۳۱۰	۱۳۵	استحکام تسلیم (MPa)
۰/۱۶	۰/۱۴	توان سخت‌شوندگی (n)
۵۳۰	۲۳۹	ضریب استحکام (MPa)

هر جنس و ورق دولایه جوش انفجاری شکل ۶ در راستاهای ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه با جهت نورد با روش ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی (Electro Discharge Machining; EDM) بریده و آماده آزمون شدند. آزمون کشش با سرعت ثابت ۲ میلی‌متر بر دقیقه اجرا شد. در این تحقیق از الگوریتم تماس عمودی برای شبیه‌سازی رفتار تماس بین ورق و ابزار استفاده شد. در این الگوریتم انواع تماس‌ها بین سطوح وجود دارد که در اینجا با توجه به نوع تماس از روش پنالتی استفاده شده است. برای تعریف شرایط اصطکاک بین ورق و ابزار، از اصطکاک کولمبی بهره گرفته شد. خواص مکانیکی ورق آلومینیومی و مسی در جدول ۱ ارایه شده است.

به دلیل سوختار داخل ورق امکان استفاده از روانکار روغن در اثر خارج شدن از ناحیه فرم‌دهی وجود ندارد، بر همین اساس به منظور پایین نگه‌داشتن دما و جلوگیری از فرسایش سطح ورق در تماس با ابزار روانکار گریس نسوز که در شکل ۷ نشان داده شده، حین فرآیند شکل‌دهی نمودی استفاده شده است.

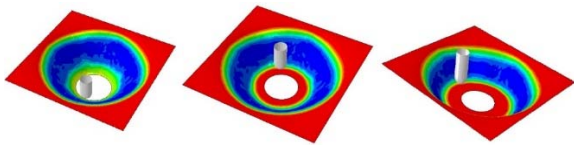
پارامترهای مورد بررسی در این فرآیند همراه با سطوح آنها در جدول ۲ به‌طور خلاصه آورده شده است. زاویه دیواره با پارامتر (α) بین ۴۵ تا ۵۵ درجه تغییر میکند، قطر سوختار (D_i) میزان قطر بریده‌شده با روش EDM از مرکز ورق است. گام عمودی (p) به میزان آفت در راستای Z در هر بار چرخش کامل گفته می‌شود.



شکل ۷) قراردادن و پرداخت کاری مقطع ورق دوفلزی آلومینیوم- مس و تصویر VMM گرفته‌شده از نمونه



شکل ۸) تجهیزات فرم‌دهی ورق سوختار و شماتیک مسیر ابزار



شکل ۸) مراحل میانی و نهایی شبیه‌سازی و شکل‌دهی ورق (توزیع ضخامت)



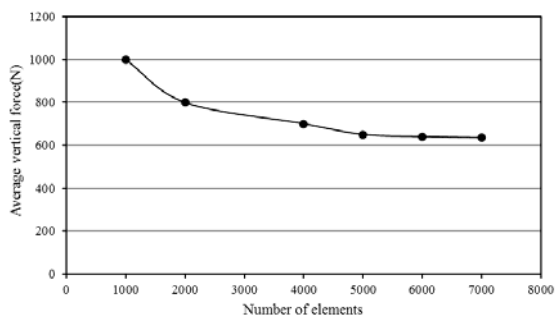
شکل ۷) گریس نسوز جهت روانکاری ورق

نتایج و بحث

در این بخش به بررسی نتایج عددی و تجربی تحقیق حاضر پرداخته و تاثیر پارامترهای فرآیند بر توزیع ضخامت، دقت ابعادی و نیروی وارد بر ابزار بررسی می‌شود. شکل‌دهی ورق دولایه در دو حالت چینش نیز مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، در حالت اول، ورق آلومینیومی لایه بالایی بوده و در تماس با ابزار شکل‌دهی است (AC) و در حالت دوم، برخلاف حالت اول، ورق مسی لایه بالایی بوده و در تماس با ابزار است (CA).

اعتبارسنجی مدل عددی

تحلیل حساسیت اندازه مش برای به‌دست‌آوردن اندازه بهینه مش اجرا شده است. همان‌طور که در نمودار ۱ مشاهده می‌شود، نیروی عمودی در تعداد المان‌های بیش از ۵۰۰۰ به عدد ۶۲۰ نیوتن همگرا می‌شود.



نمودار ۱) تحلیل حساسیت به ابعاد مش

به‌منظور اعتبارسنجی نتایج عددی، نیروی شکل‌دهی عمودی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و همچنین معادلات تحلیلی تری‌دینگ و همکاران [28]، برای محاسبه نیروی عمودی در فلنج‌کاری ورق سوراخ‌دار مطابق نمودار ۲ به‌دست‌آورده شده است. در این تحلیل، شکل‌دهی ورق دوفلزی سوراخ‌دار با چینش AC با ضخامت ۱/۶ میلی‌متر، قطر ابزار ۱۲ میلی‌متر، گام عمودی ۰/۵ میلی‌متر و مخروط با زاویه ۵۵ درجه در نظر گرفته شده است.

نیروی عمودی متوسط به‌منظور مقایسه نتایج نیرو بسیار مفید است. نیروی عمودی متوسط با در نظر گرفتن میانگین نیروهای اندازه‌گیری‌شده در حال نوسان محاسبه می‌شود. نیروی بیشینه محاسبه‌شده با استفاده از نتایج تحلیلی و شبیه‌سازی نرم‌افزار به ترتیب ۵۸۱ و ۶۳۱ نیوتن به‌دست آمدند که دارای ۸/۱٪ خطا است. همچنین برای استناد به نتایج ابعادی، اعتبارسنجی ابعادی مدل عددی انجام شده است. نتایج تجربی با استفاده از دستگاه CMM

جدول ۲) پارامترهای مورد استفاده در این تحقیق

پارامترها	نمادها	سطح‌بندی
ترتیب لایه‌ها	-	AC, CA
زاویه دیواره	α	۵۵، ۴۵ درجه
قطر سوراخ	D_i	۳۰، ۲۰ و ۴ میلی‌متر
گام عمودی	p	۰/۵ و ۱ میلی‌متر
قطر ابزار	d	۱۲ میلی‌متر
ضخامت اولیه ورق دولایه	t_i	۱/۶ میلی‌متر
سرعت چرخش ابزار	ω	۵۰۰ دور در دقیقه
سرعت شکل‌دهی	v	۱۰۰۰ میلی‌متر در دقیقه

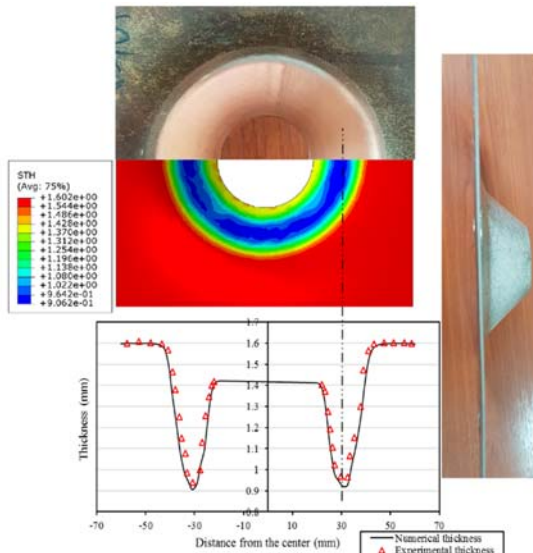
شبیه‌سازی عددی

برای مدل‌سازی فرآیند فرم‌دهی از نرم‌افزار تجاری اجزا محدود آباکوس بهره‌گرفته شده است. در این تحلیل می‌توان از دو روش ضمنی و صریح استفاده نمود. حل ضمنی انطباق بهتری را با نتایج تجربی نشان می‌دهد اما به صرف زمان محاسبه بیشتر برای فرم‌دهی اشکال ساده نیاز دارد. اما در تحلیل صریح زمان به بخش‌های کوچک‌تر تقسیم می‌شود و امکان رسیدن به نتایج مطلوب نسبت به نتایج تجربی در زمان کم را فراهم می‌سازد. در تحلیل حاضر، حل گر صریح در طول فرآیند شبیه‌سازی به‌کار گرفته شده است. ابزار به‌صورت صلب تحلیلی در نظر گرفته شده است و جهت ثابت‌کردن ورق از قید تکیه‌گاه کاملاً بند استفاده شده است. ورق دولایه به‌صورت مربع ۱۶۰×۱۶۰ میلی‌متر و به‌صورت تغییر شکل‌پذیر تعیین شدند و با توجه به ضخامت لایه‌های آلومینیوم و مس که به ترتیب ۱ و ۰/۶ میلی‌متر است، با در نظر گرفتن ۵ نقطه انتگرال‌گیری در هر لایه برای محاسبه ضخامت از روش سیمپسون به دو قسمت مجزا تقسیم شدند. شرایط اصطکاک ورق و ابزار اصطکاک کلمبی و با استفاده از دستگاه دینامومتر ۰/۱۸ محاسبه شد. مسیر حرکت ابزار که به‌صورت حلزونی است مطابق با رابطه ۱ و براساس تعیین ثوابت A ، C و ω بر مبنای عمق، گام و زاویه دیواره با استفاده از زیربرنامه فورترن VDISP به نرم‌افزار معرفی شد. نوع المان در نرم‌افزار آباکوس المان پوسته‌ای مرتبه اول با انتگرال کاهش یافته و دارای ۴ گره (S4R) تعریف شده است. مراحل شبیه‌سازی تا مرحله پایانی یقه‌دهی در شکل ۸ نشان داده شده است. در شبیه‌سازی از ۶۳۲۰ المان برای تحلیل تغییر شکل ورق استفاده شده است.

$$\begin{aligned} X &= At \sin \omega t \\ Y &= At \cos \omega t \\ Z &= Ct \end{aligned} \quad (1)$$

شکل ۹ به‌دست آورده شده است. همان طور که در نمودار ۳ مشاهده می‌شود، نتایج توافق خوبی در ناحیه دیواره دارند. خطای نتایج تجربی و عددی در ناحیه دیواره به کمتر از ۶٪ رسیده است. در لبه فلنج به دلیل برگشت فنی و تنش‌های الاستیک محیطی در ناحیه سوراخ ورق دارای خطا و برگشت فنی بیشتری است.

ضخامت ورق یکی از پارامترهای بسیار مهم در پایداری ورق در طی فرآیند فرم‌دهی نمودی است. بنابراین موقعیت کمینه ضخامت ورق بسیار اهمیت دارد. ضخامت ورق با استفاده از میکرومتر در حالت تجربی در نمودار ۴ محاسبه شده و با نتایج نرم‌افزار مقایسه شده است که نتایج دارای خطای کمتر از ۵٪ است.



نمودار ۴) اعتبارسنجی توزیع ضخامت و مقایسه نتایج تجربی و عددی ضخامت

تاثیر قطر سوراخ اولیه ورق بر روی نیروی ابزار، ابعاد و توزیع ضخامت در هنگام یقه‌دهی

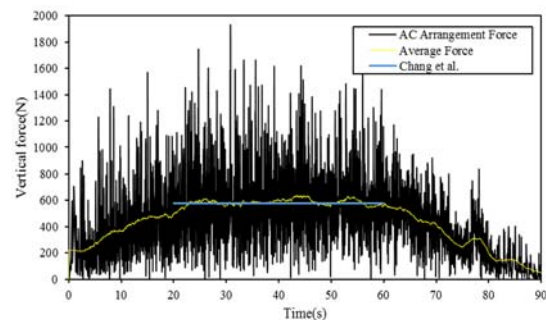
پس از اعتبارسنجی مدل عددی المان محدود و به‌منظور تحقیق بر روی برخی تاثیر پارامترهای فرآیندی و هندسی قطعه، نتایج عددی در این بخش ارائه می‌شود. سه قطر سوراخ اولیه برای ورق خام مطابق جدول ۲ در نظر گرفته شده است که پس از یقه‌دهی نتایج نیروی وارد بر ابزار برای قطرهای مختلف مطابق نمودار ۵ است. در این تحلیل قطر ابزار ۱۲ میلی‌متر، گام عمودی ۰/۵ میلی‌متر و زاویه دیواره ۵۵ درجه استفاده شده است. همان طور که در نمودار ۵ قابل مشاهده است ماکزیمم نیروی متوسط عمودی با افزایش قطر سوراخ ورق کاهش می‌یابد و همچنین با رسیدن ابزار به لبه آزاد در وسط ورق، نیرو عمودی در هر سه حالت قطر کاهش می‌یابد.

همچنین نمودار ۶ ابعاد قطعه فرم‌دهی‌شده در سه حالت قطر سوراخ اولیه ۲۰، ۳۰ و ۴۰ میلی‌متر را نمایش می‌دهد که با کاهش قطر سوراخ میزان برگشت فنی و خطای دیواره نسبت به دیواره ۵۵ درجه کاهش می‌یابد و هر چه قطر سوراخ یقه‌دهی کاهش می‌یابد میزان عمق فرم‌دهی نیز افزایش می‌یابد که این نیز ناشی از میزان برگشت فنی کمتر است. قطر سوراخ یقه نیز پس از فرم‌دهی با افزایش قطر کاهش بیشتری را تجربه می‌کند.

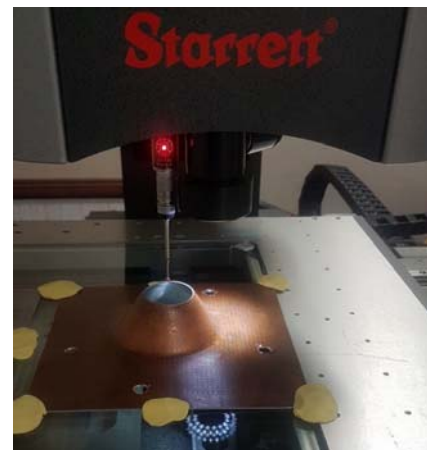
توزیع ضخامت برای هر قطر سوراخ در نمودار ۷ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با کاهش قطر سوراخ اولیه ورق، ضخامت کمینه نیز کاهش می‌یابد و همچنین موقعیت آن با کاهش قطر سوراخ در ورق به سمت مرکز میل می‌کند.

تاثیر ترتیب چینش لایه‌ها بر روی ابعاد، ضخامت و نیروی وارد بر ابزار

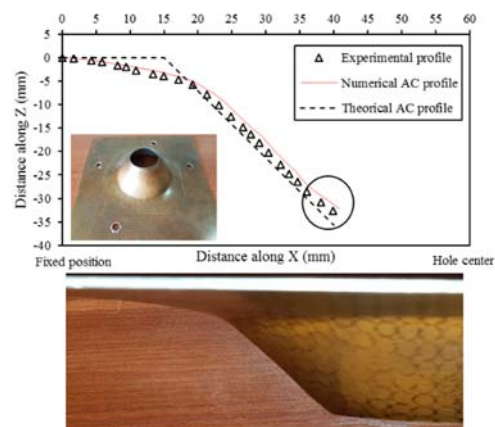
با توجه به کاربرد زیاد ورق‌های چندلایه ترتیب چینش لایه‌ها که به واسطه جوش انفجاری تولید شده‌اند از اهمیت زیادی برخوردار است. در این بخش به تاثیر ترتیب لایه‌ها بر روی دقت ابعادی و توزیع ضخامت به‌صورت تجربی و عددی پرداخته می‌شود. همچنین در



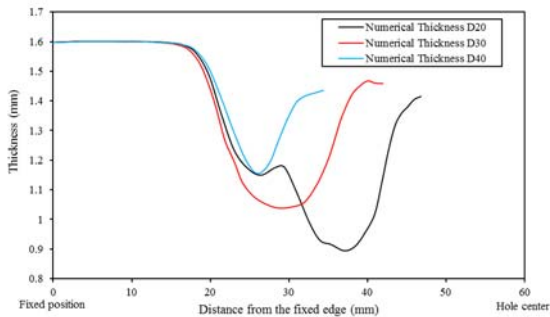
نمودار ۵) اعتبارسنجی نیرو عمودی وارد بر ابزار و مقایسه نتایج عددی و تئوری



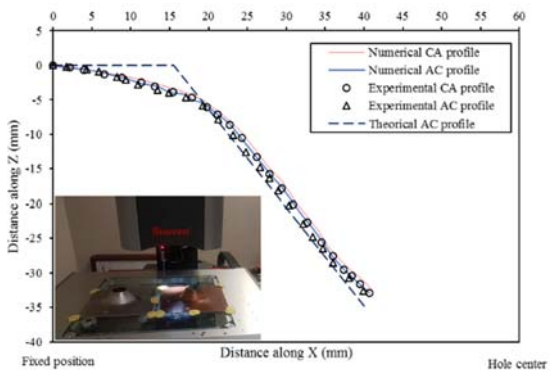
شکل ۹) دستگاه اندازه‌گیری ابعادی CMM و VMM



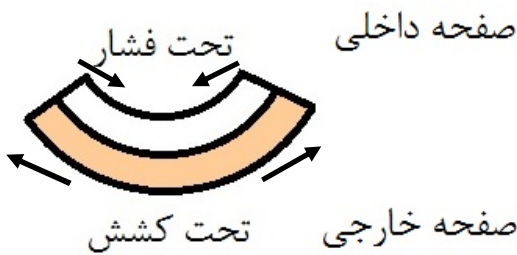
نمودار ۱۳) اعتبارسنجی ابعادی و مقایسه نتایج تجربی، عددی و تئوری



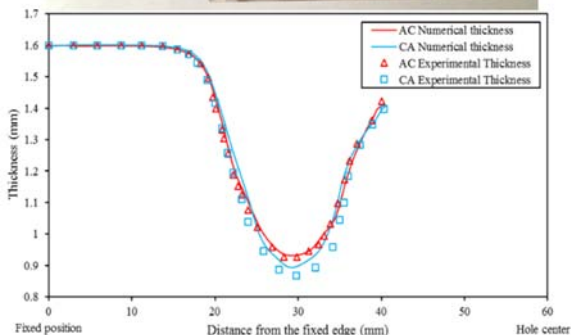
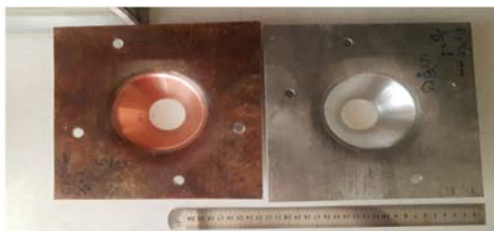
نمودار ۷) تاثیر قطر سوراخ اولیه در ورق بر روی توزیع ضخامت و ضخامت کمینه دیواره ورق



نمودار ۸) تاثیر چینش لایه‌ها بر دقت ابعادی تجربی و عددی ورق دولایه



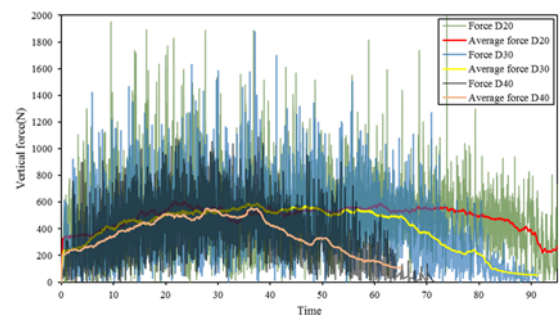
شکل ۱۰) شماتیک حالت تغییر شکل لایه‌های داخلی و خارجی ورق در حین شکل‌دهی



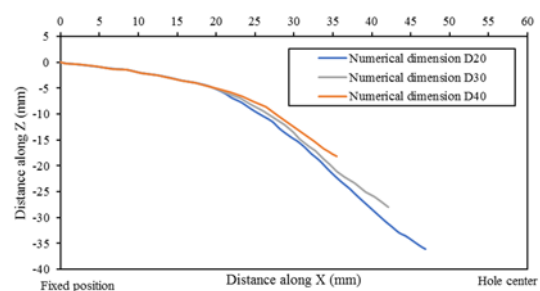
نمودار ۹) تاثیر چینش لایه‌ها بر توزیع ضخامت تجربی و عددی ورق

پایان بر روی نیروهای وارد بر ابزار به صورت عددی بحث می‌شود. دقت ابعادی از پارامترهای مهم در فرم‌دهی است. همان طور که در نمودار ۸ مشاهده می‌شود، نتایج نشان می‌دهد که عمق شکل‌دهی ورق دولایه کاملاً به چینش لایه‌ها وابسته است و برای ورق جوش انفجاری مذکور چینش AC عمق شکل‌دهی بالاتری را منجر می‌شود. دلیل این موضوع آن است که در چینش AC لایه مس از لایه آلومینیومی با قابلیت شکل‌دهی کمتر محافظت می‌کند و با توجه به قابلیت شکل‌دهی بیشتر مس دارای خطای کمتری نسبت به تئوری است و بدین ترتیب دقت ابعادی چینش AC از چینش CA بیشتر است. همچنین نتایج عددی و تجربی دارای توافق خوبی با هم هستند. با توجه به آزمون‌های کشش انجام‌شده در این تحقیق ورق مسی دارای شکل‌پذیری بالاتر و استحکام کششی بیشتری نسبت به آلومینیوم است. همان طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود فرآیند شکل‌دهی ورق با استفاده از یک ابزار سرکروی شکل خمشی زیر را به ورق القا می‌کند به شکلی که در قسمت خارجی ورق کشش و در قسمت داخلی ورق فشار القا می‌شود و با توجه به استحکام کششی بالاتر مس قابلیت مقاومت کل ورق در مقابل تنش افزایش می‌یابد. تغییرات ضخامت در دو حالت چینش ورق را در نمودار ۹ نمایش داده شده است. چینش AC دارای کمینه ضخامت بیشتری نسبت به چینش CA است. علت این موضوع پایداری بیشتر ورق در چینش AC با محافظت مس در لایه بیرونی است.

نمودار نیروی وارد بر ابزار در دو حالت چینش ورق را در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. در این شکل نیز ماکزیمم نیروی متوسط وارده به ابزار در چینش AC مطابق با انتظار به دلیل استحکام کششی بالاتر مس نسبت به آلومینیوم و اینکه در حالت AC مس نقش کششی بیشتری را بازی می‌کند، بیشتر است.

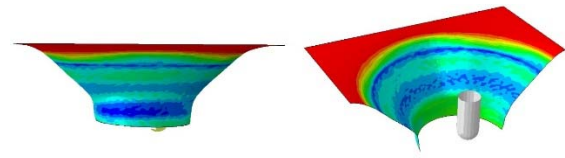


نمودار ۵) نیروهای عمودی شامل متوسط نیروها با استفاده از امان محدود برای سه قطر سوراخ اولیه ۲۰، ۳۰ و ۴۰

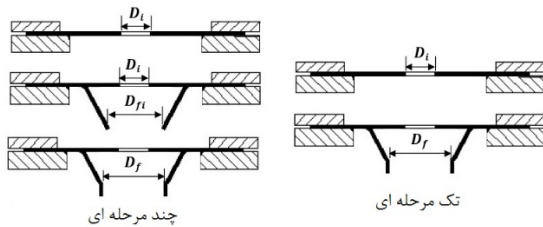


نمودار ۶) تاثیر قطر سوراخ اولیه در ورق بر روی دقت ابعادی و میزان برگشت فنی

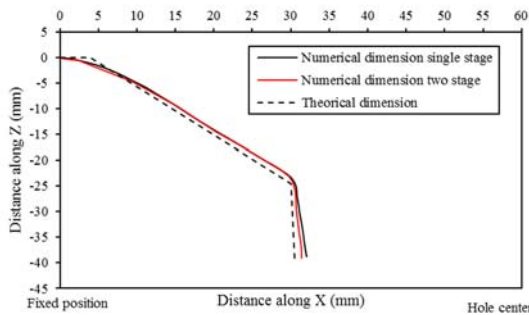
برای مقایسه ابعادی، ضخامت و نیرو وارد بر ابزار ارایه شده‌اند. تفاوت دو استراتژی در دقت ابعادی در نمودار ۱۱ نشان داده شده است که استراتژی دومرحله‌ای دارای دقت بیشتری نسبت به تئوری است و همچنین برگشت فنی در قسمت یقه‌دهی تقریباً یکسان و در قسمت فلنج کاری ۹۰ درجه، برگشت فنی در استراتژی دومرحله‌ای نسبت به تک‌مرحله‌ای کمتر است.



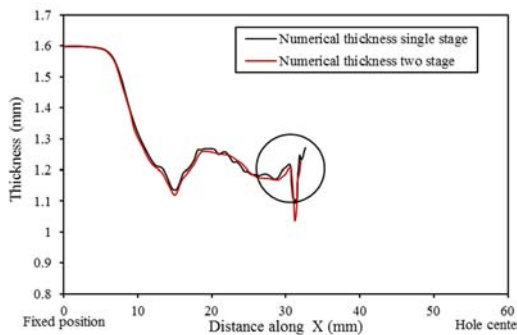
شکل ۱۱ شبیه‌سازی و نمای برش‌داده‌شده فلنج کاری و یقه‌دهی ۴۵ و ۹۰ درجه (توزیع ضخامت)



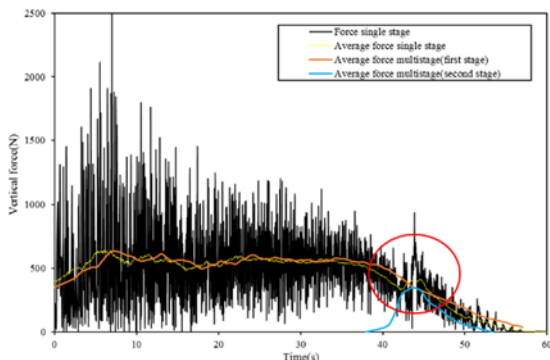
شکل ۱۲ شماتیک مراحل استراتژی‌های پیشنهادی در تحقیق حاضر



نمودار ۱۱ تاثیر استراتژی بر دقت ابعادی ورق دولایه



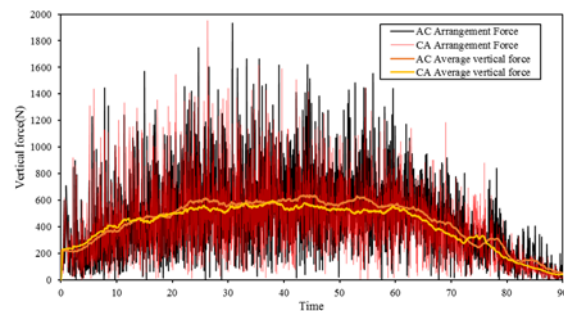
نمودار ۱۲ تاثیر استراتژی بر توزیع ضخامت ورق دولایه



نمودار ۱۳ تاثیر استراتژی بر نیروی متوسط عمودی وارد بر ابزار

تاثیر استراتژی فرآیند فلنج کاری بر روی دقت ابعادی، ضخامت و نیروی شکل‌دهی

فلنج کاری از فرآیندهای کاربردی در صنایع مختلف است. از کاربردهای آن می‌توان به صنایع نفت، گاز، پتروشیمی، هوافضا، ساخت درب‌های ورودی و خروجی مخازن تحت فشار اشاره نمود. دلیل این امر آن است که با رساندن زاویه دیواره مخروط به زاویه ۹۰ درجه می‌توان ورق سوراخ‌دار را آماده برای جوش کاری لب به لب نمود. در تحقیق حاضر مطابق نمودار ۱۰ از دو استراتژی فرم‌دهی تک‌مرحله‌ای و فرم‌دهی چندمرحله‌ای برای شکل‌دهی ورق استفاده شده است.



نمودار ۱۰ تاثیر چینش لایه‌ها بر نیروی عمودی وارد بر ابزار

دقت ابعادی و توزیع ضخامت قطعه نهایی از مسایل مهم در قطعات صنعتی به شمار می‌رود. همچنین طبیعت فرآیند فرم‌دهی نمودی دست‌یابی به دقت بالا و توزیع ضخامت یکنواخت‌تر را دشوار می‌کند. روش‌ها و استراتژی‌های مختلف فرم‌دهی در کنار این قضیه می‌تواند راه‌گشا باشد. در این بخش به بررسی دقت ابعادی، توزیع ضخامت و نیروی وارد به ابزار در استراتژی‌های مذکور در بالا پرداخته می‌شود. پارامترهای فرآیندی و هندسی شامل قطر ابزار ۱۲ میلی‌متر، زاویه دیواره یقه‌دهی ۴۵ درجه، قطر فلنج در حالت دیواره ۹۰ درجه ۶۰ میلی‌متر، گام عمودی ابزار ۱ میلی‌متر، ضخامت ورق ۱/۶ میلی‌متر و بقیه پارامترها مطابق با جدول ۲ است. در استراتژی اول کل فرآیند یقه‌دهی ۴۵ درجه و فلنج کاری قطر ۶۰ میلی‌متر در یک مرحله انجام می‌شود اما در استراتژی دوم مطابق نمودار ۱۰ طی دو مرحله ابتدا مرحله یقه‌دهی به شکل کامل انجام شده و سپس فلنج کاری روی قطر مذکور اجرا می‌شود. مرحله‌ای از شبیه‌سازی فلنج کاری و یقه‌دهی و برشی از قطعه را که توسط نرم‌افزار آباکوس اجرا شده است، در شکل ۱۲ نمایش داده شده است.

به‌منظور نمایش تفاوت‌های دو استراتژی، نمودارهای ۱۱، ۱۲ و ۱۳

در بخش دوم این تحقیق دو استراتژی فرم‌دهی مورد مقایسه قرار گرفتند. در این بخش شبیه‌سازی المان محدود که قبلاً اعتبارسنجی شده بود، برای یقه‌دهی و فلنج‌کاری ورق دوفلزی سوراخ‌دار استفاده شد که پس از مقایسه دو روش، نتایج زیر حاصل شدند:

۱- استراتژی چندمرحله‌ای دارای دقت بیشتری نسبت به مسیر ابزار تئوری در مقایسه با تک‌مرحله‌ای است و همچنین برگشت فنری در قسمت یقه‌دهی تقریباً یکسان و در قسمت فلنج‌کاری ۹۰ درجه، برگشت فنری در استراتژی دومرحله‌ای نسبت به تک‌مرحله‌ای کمتر است.

۲- همچنین در استراتژی چندمرحله‌ای جریان مواد بهتر شکل گرفته و در اثر آن ضخامت نیز به میزان ۶٪ کاهش بیشتری در ازای عمق شکل‌دهی بیشتر، تجربه می‌کند.

۳- نیروی لازم جهت فرم‌دهی بعد از شروع فلنج‌کاری ۹۰ درجه در استراتژی چندمرحله‌ای به میزان ۱۱٪ کاهش بیشتری را در تناسب با استراتژی تک‌مرحله‌ای تجربه می‌کند.

تشکر و قدردانی: بدین وسیله از واحد آزمایشگاه‌های شرکت پویان صنعت نهاد و دانشگاه کاشان و همچنین واحد ماشین‌کاری شرکت تقطیران، تشکر و قدردانی می‌شود.

تاییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به‌طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده و همچنین برای بررسی و چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. محتوای علمی و ادبی مقاله حاضر مستخرج از فعالیت علمی نویسندگان است.

تعارض منافع: نویسندگان اعلام می‌کنند که این اثر حاصل پژوهشی مستقل بوده، هیچ گونه تضاد منافی با اشخاص یا سازمان‌های دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: علی عبدالمی طاهری (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۷۵٪)؛ سعید گلایی (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی (۲۵٪).

منابع مالی: مطالعه حاضر تحت حمایت پژوهشی شرکت بهسازان بازو به‌عنوان پروژه دکتری ثبت‌شده در دانشگاه کاشان است.

منابع

- 1- Aiken H. Machine for shaping sheet metal. United States patent US41116A. 1889 Sep 17.
- 2- Leszak E. Apparatus and process for incremental dieless forming. United States patent US3342051A. 1967 Sep 19.
- 3- Jeswiet J. Incremental single point forming. Transactions of the North American Manufacturing Research Institute of SME. 2000;29:75-79.
- 4- Shim MS, Park JJ. The formability of aluminum sheet in incremental forming. Journal of Material Processing Technology. 2001;113(1-3):654-658.
- 5- Iseki H, Naganawa T. Vertical wall surface forming of rectangular shell using multistage incremental forming with spherical and cylindrical rollers. Journal of Materials Processing Technology. 2002;130-131:675-679.
- 6- Kim Y H, Park JJ. Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal. Journal

دایره نشان‌داده‌شده در نمودار ۱۲ کاهش ضخامت در قسمت فلنج‌کاری را نمایش می‌دهد و این در حالی است که کمینه موضعی نیز در ناحیه دیواره رخ داده است. در استراتژی چندمرحله‌ای جریان مواد بهتر شکل گرفته و در اثر آن ضخامت نیز کاهش بیشتری در ازای عمق شکل‌دهی بیشتر، یافته است.

ماکزیمم نیروی عمودی متوسط وارد بر ابزار که در نمودار ۱۳ نشان داده شده است در ناحیه دیواره و قبل از رسیدن به نقطه شروع فلنج (دایره) در هر دو استراتژی تقریباً در یک باند قرار می‌گیرند اما تفاوت در ناحیه بعد از شروع فلنج‌کاری مشاهده می‌شود که دارای پرش نیروی عمودی به دلیل تغییر زاویه فرم‌دهی است و در استراتژی چندمرحله‌ای کاهش نیرو در ناحیه فلنج‌کاری نسبت به استراتژی تک‌مرحله‌ای بیشتر مشاهده می‌شود.

نتیجه‌گیری

در بخش اول این تحقیق، تاثیر برخی پارامترهای فرآیندی و هندسی مهم در شکل‌دهی نموی تک‌نقطه‌ای ورق دوفلزی سوراخ‌دار از جنس آلومینیوم- مس به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته شدند. همچنین تحقیق بر روی تاثیر چینش ورق‌ها در شکل‌دهی ورق سوراخ‌دار دوفلزی اجرا شد که این نتایج در فهم بهتر رفتار ورق سوراخ‌دار دوفلزی در شکل‌دهی کمک می‌کند. نتایج به صورت زیر خلاصه می‌شود:

۱- ماکزیمم نیروی متوسط عمودی با افزایش قطر سوراخ اولیه ورق به میزان ۹٪ کاهش می‌یابد و همچنین با رسیدن ابزار به لبه آزاد در وسط ورق، نیرو عمودی در هر سه حالت قطر کاهش می‌یابد اما نیرو در قطره‌های بزرگ‌تر کاهش شدیدتری دارد.

۲- میزان برگشت فنری و خطای دیواره نسبت به دیواره ۵۵ درجه با کاهش قطر سوراخ کاهش می‌یابد و هر چه قطر سوراخ یقه‌دهی کاهش می‌یابد میزان عمق فرم‌دهی در کل نیز افزایش می‌یابد که این نیز ناشی از میزان برگشت فنری کمتر در قطر سوراخ بزرگ‌تر است. قطر سوراخ یقه نیز پس از فرم‌دهی با افزایش قطر کاهش بیشتری را تجربه می‌کند.

۳- با کاهش قطر سوراخ اولیه ورق از ۴۰ به ۲۰ میلی‌متر در یقه‌دهی ورق، ضخامت کمینه به میزان ۱۹٪ کاهش می‌یابد و همچنین موقعیت آن با کاهش قطر سوراخ در ورق به سمت مرکز سوراخ ورق میل می‌کند.

۴- ابعاد شکل‌دهی ورق دولایه سوراخ‌دار به چینش لایه‌ها وابسته است و برای ورق جوش انفجاری مذکور چینش AC عمق شکل‌دهی بیشتری را نسبت به چینش CA تجربه می‌کند. همچنین دقت ابعادی بعد از یقه‌دهی در چینش AC از چینش CA بیشتر است.

۵- ماکزیمم نیروی متوسط وارد بر ابزار در چینش AC به دلیل استحکام کششی بالاتر مس نسبت به آلومینیوم نسبت به چینش CA، ۷٪ مقدار بیشتری را تجربه می‌کند. همچنین چینش AC دارای ۴٪ کمینه ضخامت بیشتر نسبت به چینش CA است.

- finite element model of laser forming in circular path using genetic algorithms and ANFIS. *Soft Computing*. 2016;20(5):2031-2045.
- 19- Habibi Parsa M, Yamaguchi K, Takakura N. Redrawing analysis of aluminum stainless-steel laminated sheet using FEM simulations and experiments. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2001;43(10):2331-2347.
- 20- Bagherzadeh S, Mollaei Dariani B, Malekzadeh K. Theoretical study on hydro-mechanical deep drawing process of bimetallic sheets and experimental observations. *Journal of Materials Processing Technology*. 2012;212(9):1840-1849.
- 21- Atrian A, Fereshteh-Saniee F. Deep drawing process of steel/brass laminated sheets. *Composites Part B: Engineering*. 2013;47:75-81.
- 22- Dehghani F, Salimi M. Analytical and experimental analysis of the formability of copper-stainless-steel 304L clad metal sheets in deep drawing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016;82(1-4):163-177.
- 23- Honarpisheh M, Keimasi M, Alinaghian I. Numerical and experimental study on incremental forming of Al/Cu bimetals: Influence of process parameters on the forming force, dimensional accuracy and thickness variations. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*. 2018;13(1):35-51.
- 24- Sakhtemanian MR, Honarpisheh M, Amini S. Numerical and experimental study on the layer arrangement in the incremental forming process of explosive-welded low-carbon steel/CP-titanium bimetal sheet. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;95(9-12):3781-3796.
- 25- Gheysarian A, Honarpisheh M. Process Parameters Optimization of the Explosive Welded Al/Cu Bimetal in the Incremental Sheet Metal Forming Process. *Iranian Journal of Science and Technology: Transactions of Mechanical Engineering*. 2019;43:945-956. [Persian]
- 26- Honarpisheh M, Gheysarian A. An Experimental Study on the process parameters of Incremental Forming of Explosively-Welded Al/Cu Bimetal. *Journal of Computational and Applied Research in Mechanical Engineering*. 2017;7(1):73-83.
- 27- Gheysarian A, Honarpisheh M. Investigation of Fracture Depth of Al/Cu Bimetallic Sheet in Single Point Incremental Forming Process. *Iranian Journal of Materials Forming*. 2019;6(1):2-15.
- 28- Zhidong Ch, Ming L, Jun C. Analytical modeling and experimental validation of the forming force in several typical incremental sheet forming processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2019;140:62-76.
- of Materials Processing Technology. 2002;130-131:42-46.
- 7- Park JJ, Kim YH. Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003;140(1-3):447-453.
- 8- Filice L, Fratini L, Micari F. Analysis of Material Formability in Incremental Forming. *CIRP Annals*. 2002;51(1):199-202.
- 9- Fratini L, Ambrogio G, Di Lorenzo R, Filice L, Micari F. Influence of mechanical properties of the sheet material on formability in single point incremental forming. *CIRP Annals*. 2004;53(1):207-210.
- 10- Amborgio G, Costantino I, Denapoli L, Filice L, Muzzupappa M. Influence of some relevant process parameters on the dimensional accuracy in incremental forming: a numerical and experimental investigation. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004;153-154:501-507.
- 11- Cerro I, Maidagan E, Arana J, Rivero A, Rodriguez PP. Theoretical and experimental analysis of the dieless incremental sheet forming process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006;177(1-3):404-408.
- 12- Attansio A, Ceretti E, Giardini C. Optimization of tool path in two points incremental forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006;177(1-3):409-412.
- 13- Jackson K, Allwood J. The mechanics of incremental sheet forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009;209(3):1158-1174.
- 14- Dejardina S, Thibaudb S, Gelina JC, Michel G. Experimental investigations and numerical analysis for improving knowledge of incremental sheet forming process for sheet metal parts. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010;210(2):363-369.
- 15- Ghasemi G, Soltani B. Experimental investigation on the effective parameters on forming force, dimensional accuracy and thickness distribution in single point incremental forming. *Modares Mechanical Engineering*. 2014;14(1):89-96. [Persian]
- 16- Mirnia MJ, Dariani BM. Analysis of incremental sheet metal forming using the upper-bound approach. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2012;226(8):1309-1320.
- 17- Golabi S, Khazaali H. Determining frustum depth of 304-stainless steel plates with various diameters and thicknesses by incremental forming. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2014;28(8):3273-3278.
- 18- Tarkesh Esfahani R, Golabi S, Zojaji Z. Optimization of