



Experimental Investigation and Finite Element Simulation of Hole-Flanging Process by Single Point Incremental Forming

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Soltani B.^{*1} PhD,
Babaeian M.¹ MSc,
Ghasemi H.¹ MSc

How to cite this article

Soltani B, Babaeian M, Ghasemi H. Experimental Investigation and Finite Element Simulation of Hole-Flanging Process by Single Point Incremental Forming. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(7):1861-1872.

ABSTRACT

Incremental forming method with lower cost and more flexibility can be a suitable alternative for traditional methods of the hole-flanging. In this study, the possibility of square hole-flanging of AL1050 aluminum sheet using incremental forming method has been investigated and the quality of the pyramid flange has been compared with conical flange. The final shape of the flange is defined so that wall angle increases with raising height. The process simulation was performed using Abaqus software and an experimental test was done to validate the simulation results. After performing the experimental tests, flange features such as the final size of the hole, flange height, and wall thickness were measured. The results showed that at the created flange around the circular hole, there is less spring back and more dimensional accuracy, however, it can be flanged a square hole by incremental approach with consideration of the height and hole size. The dimensional measurements showed that the final size of the hole will increase after the hole-flanging. By investigation of the various holes, it was found that in the larger initial hole, increasing the hole size after the flanging will be lower.

Keywords Incremental Forming; Hole-Flanging; Finite Element Simulation; Dimensional Accuracy; Thickness Distribution

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

*Correspondence

Address: Solid Design Department, Mechanical Engineering Faculty, University of Kashan, Kashan, Iran.
Postal Code: 8731751167.
Phone: +98 (31) 55913426
Fax: -
bsoltani@kashanu.ac.ir

Article History

Received: November 18, 2019
Accepted: April 10, 2020
ePublished: July 20, 2020

CITATION LINKS

[1] Apparatus and process for incremental dieless forming [2] Deformation modes and lip fracture during hole-flanging of circular plates of anisotropic materials [3] Studies on hole-flanging process using multistage incremental forming [4] Backward drawing of necks using incremental approach [5] Hole-flanging by incremental sheet forming [6] Hole flanging with ironing of two-ply thick sheet metals [7] A new process design for performing hole-flanging operations by incremental sheet forming. Procedia Engineering [8] Preliminary investigation on homogenization of the thickness distribution in hole flanging by SPIF [9] Experimental study of hole-flanging by single-stage incremental sheet forming [10] Finite element simulations of laser-assisted incremental forming and investigation on the process parameters in incremental forming by experimental approach [11] Experimental study and simulation using the finite element method for sheet hole flanging process by incremental sheet forming and process improvement using the Taguchi process [12] Analysis of hole flanging on AA5052 alloy by single point incremental forming process [13] Investigations on hole-flanging by paddle forming and a comparison with single point incremental forming [14] Deformation mechanics and failure mode in stretch and shrink flanging by double-sided incremental forming [15] Deformation feature of sheet metals during inclined hole-flanging by two-point incremental forming [16] Experimental investigation on the effective parameters on forming force, dimensional accuracy and thickness distribution in single point incremental forming [17] Numerical and experimental investigation of single point incremental forming of two-layer sheet metals

بررسی تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود فرآیند لبه‌دارکردن سوراخ ورق با استفاده از شکل‌دهی نموی تک‌نقطه‌ای

بهزاد سلطانی* PhD

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

مهرداد بابائیان MSc

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

حسین قاسمی MSc

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

چکیده

روش شکل‌دهی نموی تک‌نقطه‌ای با هزینه پایین و انعطاف‌پذیری بالا می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش‌های مرسوم لبه‌دارکردن سوراخ ورق باشد. در این مطالعه، امکان لبه‌دارکردن سوراخ مربعی ورق آلومینیوم AL1050 با استفاده از روش شکل‌دهی نموی مورد بررسی قرار گرفته و کیفیت فلنج هرمی ایجادشده با فلنج مخروطی مقایسه شده است. شکل نهایی فلنج به‌گونه‌ای تعریف شده است که زاویه دیواره با افزایش ارتفاع به‌تدریج افزایش یابد. شبیه‌سازی فرآیند با نرم‌افزار آباکوس انجام شد و برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی، آزمایش عملی نیز انجام گرفت. پس از انجام آزمایش‌های تجربی، ویژگی‌های فلنج مانند اندازه نهایی سوراخ، ارتفاع فلنج و ضخامت دیواره، بررسی شدند. نتایج نشان داد که در لبه ایجادشده حول سوراخ دایره‌ای برگشت فنی کمتر و دقت ابعادی بیشتر است ولی با ملاحظه ارتفاع و اندازه سوراخ، می‌توان سوراخ مربعی را نیز با روش نموی لبه‌دار کرد. نتایج اندازه‌گیری ابعادی فلنج‌ها نشان داد که ابعاد نهایی سوراخ پس از لبه‌دارشدن، افزایش خواهد یافت. با بررسی سوراخ‌های مختلف مشاهده شد که هر چه سوراخ اولیه بزرگ‌تر باشد، میزان افزایش ابعاد سوراخ پس از فلنج‌کردن، کمتر خواهد بود.

کلیدواژه‌ها: شکل‌دهی نموی، لبه‌دارکردن سوراخ، شبیه‌سازی المان محدود، دقت ابعادی، توزیع ضخامت

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۲۲

*نویسنده مسئول: bsoltani@kashanu.ac.ir

مقدمه

در سال‌های اخیر به‌دلیل افزایش تولید و رقابت و تمایل برای بالابردن تنوع محصولات، کوتاه‌ترنمودن زمان انجام فرایندها و کاهش هزینه تولید مورد توجه قرار گرفته است. بدین منظور صنایع تولیدی به دنبال روش‌هایی هستند که با انعطاف‌پذیری بالاتر، به ابزارهای کمتری نیاز داشته باشند. یکی از موارد با اهمیت، ساخت سریع نمونه اولیه قطعات است. ساخت نمونه اولیه با استفاده از روش‌های معمول مانند کشش عمیق، به‌دلیل نیاز به ساخت قالب، زمان‌بر و پرهزینه است. امروزه استفاده از کامپیوتر در فرآیندهای تولید، گسترش روش‌های جدید را ممکن ساخته است. یکی از روش‌هایی که اخیراً بدان پرداخته شده است، روش شکل‌دهی نموی تک‌نقطه‌ای برای شکل‌دهی ورق‌ها است. در این فرآیند نیازی به ساخت قالب نبوده و یک ابزار با شکل ساده به‌وسیله ماشین CNC (Computer Numerical Control)

حرکت کرده و باعث ایجاد تدریجی تغییر شکل پلاستیک در ورقی که از اطراف در یک نگه‌دارنده ثابت شده است، می‌شود. مزیت این روش هزینه پایین و زمان آماده‌سازی کوتاه آن است. بنابراین برای تولید با تعداد محدود و ساخت سریع نمونه اولیه مناسب است.

فرآیند شکل‌دهی تدریجی ورق‌های فلزی توسط لیزر/بیه‌عنوان یک ایده اولیه مطرح شد^[1] و در سال ۱۹۹۰، با انجام آزمایش‌های اولیه در کشور ژاپن، تحقیقات گسترده در این زمینه آغاز شد. در فرآیند شکل‌دهی تدریجی ورق‌های فلزی، پارامترهایی از قبیل جنس ورق، ضخامت ورق، شعاع ابزار، گام عمودی ابزار، سرعت دورانی ابزار، سرعت پیشروی ابزار بر شکل‌پذیری ورق تأثیر دارند. در این راستا، تحقیقات گوناگونی به‌منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر فرآیند انجام شده است.

لبه‌دارکردن سوراخ یک روش مرسوم شکل‌دهی است. این فرآیند به‌طور گسترده، برای تقویت لبه‌های سوراخ، بهبود ظاهر قطعه و همچنین جهت اتصال قسمتی از ورق به لوله و سایر کاربردهای دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

روش صنعتی برای فلنج‌کردن سوراخ، پرس‌کاری است. مطالعات زیادی در این زمینه صورت گرفته است که در آن ورقی که در مرکز یک سوراخ قرار دارد و از اطراف توسط یک نگه‌دارنده ثابت نگاه داشته شده است، توسط یک پانچ برای ایجاد فلنج مخروطی و استوانه‌ای تحت تغییر شکل قرار می‌گیرد. این فرآیند شامل تغییر شکل محلی به‌صورت خمش و کشش می‌شود. جانسون و همکاران^[2]، به بررسی تغییر شکل در فلنج‌کردن سوراخ‌ها پرداختند و عواملی مانند هندسه و ویژگی‌های پلاستیک ماده را بررسی کردند.

روش صنعتی مرسوم برای لبه‌دارکردن سوراخ که از سنبه و ماتریس و پرس استفاده می‌کند، به تجهیزات زیادی نیاز داشته و هزینه تولید با این روش بالا است. از این‌رو فقط برای تولید انبوه، مناسب است. برای تولید با حجم کم و محدود و ساخت نمونه اولیه، روش شکل‌دهی نموی با انعطاف‌پذیری بیشتر و هزینه کمتر، می‌تواند جایگزین خوبی به‌جای روش‌های سنتی باشد. همچنین در مواردی که امکان استفاده از پرس‌کاری به‌دلیل نبود فضای لازم برای حرکت سنبه و قرارگیری قالب وجود ندارد، روش نموی کارآمد خواهد بود. شماتیک از مراحل فرآیند لبه‌دارکردن سوراخ با روش نموی در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ورق از اطراف در یک نگه‌دارنده بسته شده و ابزار با یک گام عمودی مشخص، لبه سوراخ را به طرف بیرون خم کرده و شکل می‌دهد.

در سال‌های اخیر پژوهش‌هایی با هدف بررسی امکان استفاده از لبه‌دارکردن سوراخ ورق با استفاده از روش شکل‌دهی نموی صورت گرفته است. کوی و گائو^[3] با استفاده از روش شکل‌دهی نموی نشان دادند که با به‌کارگیری یک استراتژی شکل‌دهی چند مرحله‌ای می‌توان قطر سوراخ را به‌صورت تدریجی افزایش داد و با این کار از نازک‌شدگی بیش از حد ورق در دیواره لبه جلوگیری

پارامترهای مختلف تعیین شد. همچنین در این پژوهش از روش شکل‌دهی نموی چند مرحله‌ای برای بهبود نازک‌شدگی دیواره فلنج استفاده شد.

موجندیرانا و ناناولبابو^[12]، تلاش نموده‌اند که در فرآیند لبه‌دارکردن با استفاده از شکل‌دهی نموی بر روی ورق از جنس AA5052، با استفاده از تغییر در پارامترهای سرعت دورانی و حرکتی اسپیندل و همچنین گام عمودی ابزار، زبری سطح و کاهش ضخامت دیواره را به حداقل برسانند. همچنین مطابق بررسی انجام‌شده بیان شد که ورق‌هایی که قطر سوراخ میانی آنها بزرگ‌تر هست، شکل‌پذیرتر است. بساگ و همکاران^[13]، به مقایسه روش شکل‌دهی نموی تک‌نقطه‌ای و روش شکل‌دهی پره‌ای برای لبه‌دارکردن سوراخ ورق پرداخته‌اند که مطابق نتایج حاصل‌شده، شکل‌پذیری ورق آلومینیومی (6181-T1) در اشکال متقارن محوری، در روش شکل‌دهی پره‌ای بهتر از روش شکل‌دهی نموی تک‌نقطه‌ای مشاهده شده است. ژانگ و همکاران^[14]، به بررسی روش شکل‌دهی نموی دونقطه‌ای بر روی ورق‌هایی با سوراخ منحنی شکل پیچیده‌تر از دایره، پرداختند که مطابق نتایج حاصل‌شده، تنش‌های نصف‌النهاری در شکل‌پذیری آن در قسمت‌های محدب منحنی سطح مقطع سوراخ، اثر مثبت و در قسمت‌های مقعر آن، اثر منفی دارد. چن و همکاران^[15]، روش شکل‌دهی نموی دونقطه‌ای را برای لبه‌دارکردن سوراخ بر روی ورق‌هایی از جنس آلومینیم (Al 6061) و فولاد ضد زنگ (SUS 304) با ضخامت‌های ۱ و ۳ میلی‌متر و در حالتی که محور سوراخ عمود بر سطح ورق نیست، انجام دادند که مشاهده نمودند شکل‌پذیری محلی در ورق‌های نازک‌تر و با جنس فولاد ضد زنگ، راحت‌تر و بهتر صورت می‌پذیرد و همچنین مطابق نتایج به‌دست‌آمده مشخص شد که شکل‌پذیری در حالتی که محور حفره عمود بر سطح ورق نیست بسیار به استراتژی حرکت، سرعت و گام ابزار بستگی دارد.

در تمام تحقیقات انجام‌گرفته، سوراخ ورق به شکل دایره به روش شکل‌دهی نموی، لبه‌دار شده است اما تاکنون از این روش، برای لبه‌دارکردن سوراخ مربعی استفاده نشده است. در این مقاله امکان لبه‌دارکردن سوراخ مربعی ورق آلومینیوم AL1050 با استفاده از روش شکل‌دهی نموی مورد مطالعه قرار گرفته است و کیفیت فلنج هرمی ایجادشده با فلنج مخروطی مقایسه شده است. برای این منظور، فرآیند شکل‌دهی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شد. در این مقاله هدف آن است که بتوان با بررسی و به‌دست‌آوردن اطلاعات دقیق از سوراخ‌های لبه‌دارشده، شناخت بهتری از ویژگی‌های لبه ایجادشده، مانند اندازه نهایی سوراخ، ارتفاع لبه و میزان کاهش ضخامت دیواره قبل از انجام فرآیند به‌دست آورد. همچنین جهت صحت‌سنجی نتایج حاصل از تحلیل نرم‌افزار، آزمایش تجربی بر روی ورق انجام شد و نتایج تجربی و شبیه‌سازی با هم مقایسه شدند.

کرد. روش آنها قادر به لبه‌دارکردن سوراخ قطاعی که فرم بسته‌ای دارند، نبود. بنابراین پتک و همکاران^[4]، برای لبه‌دارکردن سوراخ، قطعه‌ای که در آن امکان حرکت ابزار به‌طور مستقیم نبود از روش شکل‌دهی نموی چند مرحله‌ای با حرکت معکوس ابزار از پشت استفاده کردند. سنتنو و همکاران^[5]، به بررسی مکانیزم تغییر شکل در فرآیند لبه‌دارکردن سوراخ به روش نموی پرداختند. آنها اثر اندازه سوراخ را بر قابلیت شکل‌پذیری در روش شکل‌دهی نموی تک‌نقطه‌ای بررسی نمودند و مقادیر کرنش شکست را به‌دست آوردند. لبه سوراخ به شکل یک مخروط با زاویه دیواره متغیر شکل‌دهی شد. کوماگای و همکاران^[6]، با مقایسه نتایج تحلیلی به روش اجزای محدود و نتایج آزمایشگاهی برای لبه‌دارکردن ورق ضخیم دولایه نشان دادند که از نتایج اجزای محدود به‌طور تاثیرگذاری می‌توان برای پیش‌بینی فرآیند شکل‌دهی و شکل نهایی ورق‌های دولایه فلزی استفاده نمود. بامباچ و همکاران^[7]، محدودیت‌های لبه‌دارکردن نموی را بررسی کردند و دو روش جدید با هدف کاهش زمان فرآیند شکل‌دهی و افزایش دقت هندسی ارائه نمودند.

مورالس-پالما و همکاران^[8]، با استفاده از استراتژی شکل‌دهی دو مرحله‌ای و اصلاح کد NC دستگاه شکل‌دهی به بهینه‌سازی توزیع ضخامت ورق در دیواره فلنج استوانه‌ای با هدف رسیدن به ضخامت یکنواخت پس از شکل‌دهی پرداختند.

بورگو و همکاران^[9]، به بررسی شکست در ورق آلومینیوم در فرآیند لبه‌دارکردن سوراخ با استفاده از روش شکل‌دهی نموی تک مرحله‌ای پرداختند و حد شکل‌پذیری را برای دو نمونه سوراخ به‌دست آوردند.

قاسمی^[10] به مقایسه فرآیند شکل‌دهی نموی و پرس‌کاری برای لبه‌دارکردن سوراخ با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود دو فرآیند پرداخته است. در پژوهش انجام‌شده ورق از جنس AL1050 بود و مقایسه روی فلنج به شکل مخروط با زاویه دیواره متغیر انجام شد. با توجه به تحلیل‌های انجام‌شده و مقایسه دو فرآیند، در شکل‌دهی نموی تعداد کمی از المان‌ها دارای تنش بحرانی هستند در حالی که در پرس‌کاری در لحظه تماس قالب با ورق تمام قسمت درگیر تماس دارای تنش بحرانی هستند. همچنین شکل‌دهی نموی عمق و زاویه دیواره نزدیک‌تری نسبت به مخروط هدف ارائه داده و دقت هندسی فلنج ایجادشده به روش نموی بالاتر از فلنج ایجادشده به روش پرس‌کاری است. ولی در شکل‌دهی نموی ضخامت ورق کاهش بیشتری می‌یابد.

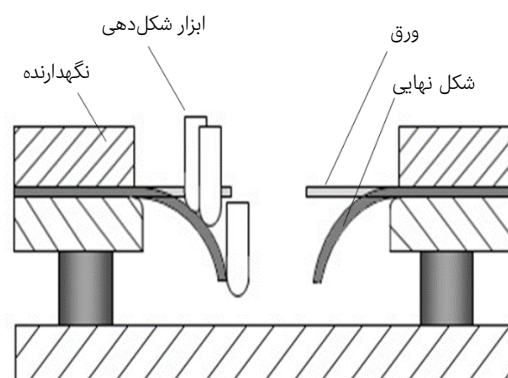
حسینی‌خواه^[11] به بررسی پارامترهای قطر ابزار، گام عمودی و سرعت پیشروی روی دقت ابعادی فلنج پرداخت. در این پژوهش، ورق از جنس Al1050 بود و سوراخ ورق به شکل مخروط با زاویه دیواره ثابت ۴۵ درجه لبه‌دار شد. تاثیر همزمان پارامترهای ذکرشده روی زاویه دیواره و ارتفاع فلنج با طراحی آزمایش‌های تجربی به روش تاگوچی، بررسی شد و حالت بهینه از میان ترکیب

به شکل استوانه با سر نیم کره به قطر ۱۰ میلی متر ساخته شده است. از آنجایی که عامل اصطکاک و در نتیجه سایش مهم ترین عامل وارد بر ابزار در این فرآیند شکل دهی است، ابزار از جنس تنگستن کارباید ساخته شده که استحکام سایشی بسیار بالایی دارد. سرعت پیشروی ابزار ۱۰۰۰ میلی متر بر دقیقه در نظر گرفته شده است. مسیر حرکت ابزار به شکل حلزونی با گام ۱ میلی متر است. در استراتژی حرکت حلزونی ابزار به طور پیوسته هم زمان به سمت پایین حرکت کرده و هم به سمت داخل هرم و مخروط پیش می رود. بنابراین در استراتژی حرکت حلزونی، به دلیل یکنواخت تر بودن حرکت ابزار و تغییر شکل ورق، حداکثر نیروی لازم برای شکل دهی کمتر است، عمق قطعه شکل دهی شده به عمق هدف نزدیک تر و توزیع ضخامت یکنواخت تر خواهد بود.

برای تعیین مسیر ابزار، ابتدا مدل هندسی قطعه به شکل هرم و مخروط ناقص با ابعاد مورد نظر در نرم افزار کتیا شبیه سازی شد. سپس مدل ساخته شده به نرم افزار پاور میل انتقال داده شد و پس از تعریف مشخصات ابزار، گام عمودی، سرعت حرکت ابزار، نقطه شروع حرکت ابزار و مسیر حرکت ابزار به صورت حلزونی روی نمونه مدل سازی شد، فایل خروجی G-Code مسیر حرکت ابزار، توسط ماشین CNC خوانده شد و حرکت دستگاه و در نتیجه شکل دهی، مطابق برنامه، انجام شد.

زهدی و همکاران^[17]، برای تعیین حد شکل پذیری ورق از مدل هندسی استفاده کردند که شیب دیواره آن به صورت افزایشی است. همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، دیواره قطعه کمانی از یک دایره است. اگر شعاع این کمان R باشد با در اختیار داشتن مختصات مرکز دایره می توان مختصات نقاط روی کمان که مسیر حرکت ابزار است را به دست آورد. برای انجام فرآیند لبه دار کردن سوراخ، در مرکز ورق، یک سوراخ با ابعاد گفته شده ایجاد شد. شکل دهی به صورت هرم و مخروط با زاویه دیواره متغیر از ۳۰ تا ۸۰ درجه انجام شده است که شماتیک آن در شکل ۳ نشان داده شده است. ابعاد مقطع بزرگ هرم و قطر مقطع بزرگ مخروط ۹۶ میلی متر و مقطع کوچک آن به اندازه سوراخ مرکز ورق فرض شده است. ویژگی های هندسی هرم و مخروط در جدول ۱ شرح داده شده است. در واقع به روش شکل دهی نموی با حرکت ابزار حول سوراخ، لبه های آن به سمت بیرون خم شده و فرم می گیرد.

برای تعیین خواص مکانیکی ورق، از آزمون کشش تک محوری استفاده شد. برای این منظور دو نمونه آزمون از ورق آلومینیوم AL1050 طبق استاندارد ASTM B557، در جهت نورد و عمود بر جهت نورد ساخته شد و آزمون کشش روی نمونه ها انجام گرفت. نمودار تنش- کرنش ورق آلومینیومی مورد استفاده در این فرآیند که از طریق آزمون کشش استخراج شده در نمودار ۱ نشان داده شده است. چگالی ورق آلومینیومی ۲۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، ضریب پواسون ۰/۳۳ و مدول ینگ ۶۶ گیگاپاسکال است.

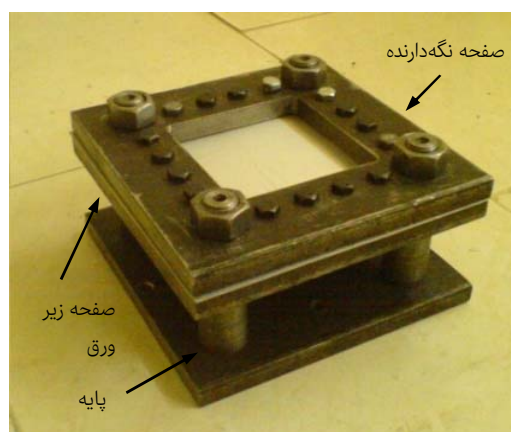


شکل ۱) فرآیند لبه دار کردن سوراخ ورق به روش شکل دهی نموی

آزمایش تجربی

در این پژوهش، فرآیند شکل دهی ورق از جنس آلومینیوم AL1050 با ضخامت ۱ میلی متر و با در نظر گرفتن سوراخ هایی مربعی و دایره ای در مرکز آن، جهت تولید فلنج به شکل هرم ناقص و مخروط ناقص، انجام شده است.

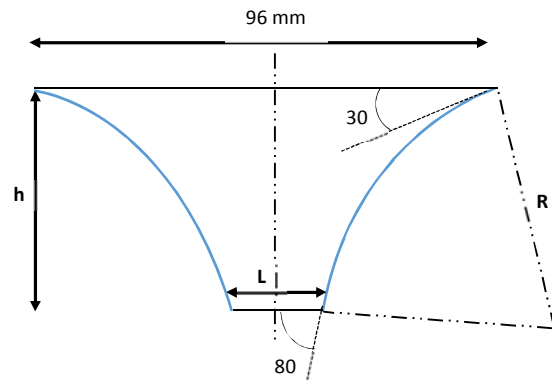
ورق ها با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰ میلی متر بریده شدند و در مرکز ورق سوراخ هایی مربعی با ابعاد ۴۵×۴۵، ۳۰×۳۰، ۶۰×۶۰ و ۶۰×۶۰ میلی متر و دایره ای با قطر ۳۰، ۴۵ و ۶۰ میلی متر ایجاد شد. در فرآیند شکل دهی نموی باید ورق از اطراف در یک نگهدارنده ثابت شود. برای انجام آزمایش تجربی، یک نگهدارنده طراحی و ساخته شد. که همان طور که در شکل ۲ نمایش داده شده است شامل قسمت های پایه، صفحه نگهدارنده ورق و صفحه زیر ورق است. صفحه زیر ورق قابل تعویض بوده و برای لبه دار کردن سوراخ مربعی از صفحه دارای یک حفره مربعی به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰ میلی متر و برای لبه دار کردن سوراخ دایره ای از صفحه دارای یک حفره دایره ای به قطر ۱۰۰ میلی متر استفاده شده است.



شکل ۲) نگهدارنده ورق

پارامترهای شکل دهی براساس نتایج پژوهش قبلی نویسندگان در زمینه شکل دهی نموی، انتخاب شده است^[16]. در این آزمایش ابزار

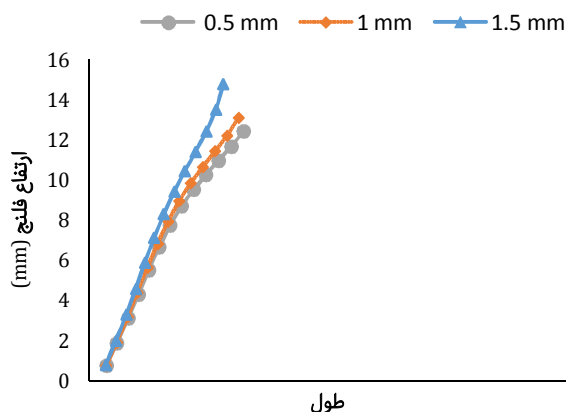
تشخیص اندازه بهینه مش در مدل‌سازی، برای ورق با سوراخ 60×60 میلی‌متر، مش‌بندی در سایزهای $1/5$ و $5/5$ میلی‌متر انجام و مطابق نمودار ۲، نتایج حاصل از عمق حاصل‌شده در فرآیند شکل‌دهی، با یکدیگر مقایسه شد. همان گونه که مشاهده می‌شود تفاوت نتایج در سایزهای $1/5$ و $5/5$ میلی‌متر کمتر از ۵٪ است، در صورتی که افزایش زمان تحلیل مابین این دو حالت، بیش از ۱۰ برابر است. بنابراین و به دلیل افزایش سرعت تحلیل، از سایز $1/5$ میلی‌متر، جهت مش‌بندی ورق، استفاده شده است. پس از مدل‌سازی مجموعه قطعات و اختصاص خواص ماده به ورق مطابق آنچه در قسمت قبل مطرح شد، قطعات مطابق شکل ۴، بر روی یکدیگر مونتاژ شدند.



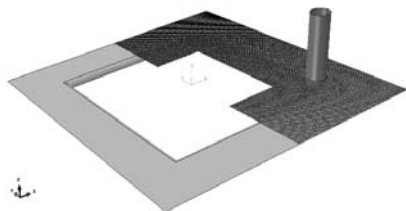
شکل (۳) هرم ناقص با زاویه دیواره متغیر

جدول (۱) مشخصات دیواره منحنی شکل مسیر (اعداد به میلی‌متر هستند)

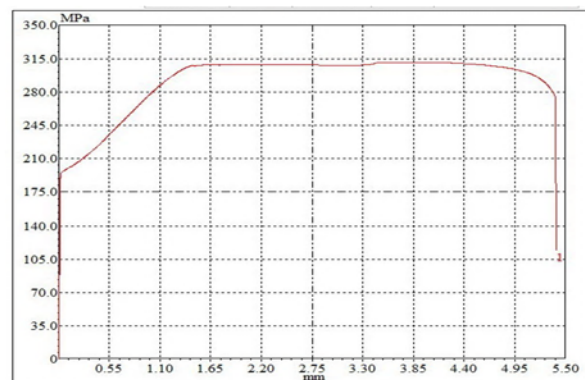
شعاع دیواره	ارتفاع هرم	طول ضلع (قطر) سوراخ
۶۸	۴۷	۳۰
۵۲/۵۷	۳۶/۴	۴۵
۳۷/۱۱	۲۵/۷	۶۰



نمودار (۲) مقایسه نتایج حاصل از تحلیل در سه اندازه مختلف مش‌بندی



شکل (۴) نحوه چیدمان قطعات



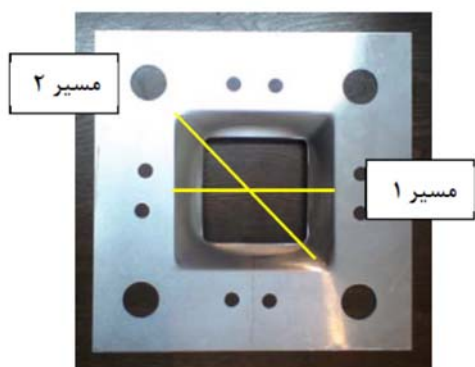
نمودار (۱) نمودار تنش- کرنش ورق فرم‌دهی‌شده

شبیه‌سازی اجزای محدود

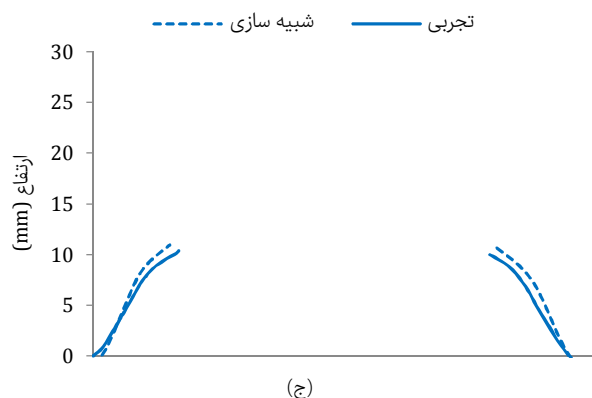
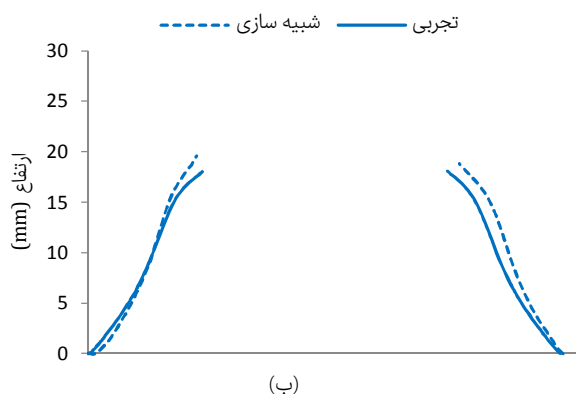
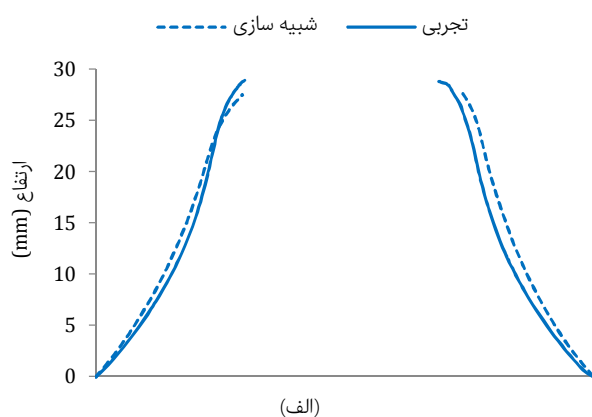
برای شبیه‌سازی فرآیند از نرم‌افزار آباکوس استفاده شد و با توجه به ماهیت کاملاً دینامیکی و ایجاد کرنش‌هایی با نرخ بالا در آن، از حل‌گر صریح جهت تحلیل استفاده شد و به دلیل عدم تقارن، فرآیند به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شد.

ابزار به صورت پوسته استوانه‌ای صلب با سر کروی و قسمتی از صفحه نگه‌دارنده که با ورق در تماس است به صورت صلب، مدل شده است. ورق به شکل صفحه سوراخ‌دار به صورت تغییر شکل‌پذیر با ضخامت $1/5$ میلی‌متر مدل شده است.

برای شبیه‌سازی تماس بین ابزار و نگه‌دارنده با ورق از الگوریتم پنالتی و ضریب اصطکاک بین سطوح $0/1$ در نظر گرفته شده است. ورق از چهار طرف کاملاً ثابت و بدون حرکت و صفحه نگه‌دارنده زیرین نیز کاملاً ثابت مدل شده است. مسیر حرکت ابزار به صورت حلزونی با گام عمودی $1/5$ میلی‌متر تعریف شد. المان انتخاب‌شده برای تحلیل، المان پوسته‌ای ۴ گره‌ای (S4R) است. به منظور



شکل ۶) مسیرهای بررسی دقت هندسی فلنچ‌های هرمی



نمودار ۳) شکل نهایی فلنچ هرمی در مسیر ۱؛ (الف) ورق با سوراخ مربعی 30×30 میلی‌متر، (ب) ورق با سوراخ مربعی 40×40 میلی‌متر، (ج) ورق با سوراخ مربعی 60×60 میلی‌متر

دومحوری در گوشه‌ها است. تنش اصطکاکی بین ابزار و ورق شامل دو قسمت، تنش نصف‌النهاری (در راستای ضخامت) و تنش محیطی می‌شود. تنش محیطی در طول مسیر حرکت ابزار تغییر چندانی ندارد، اما تنش در راستای ضخامت ورق، در گوشه‌های مسیر مربع شکل، تقریباً دو برابر سطوح صاف است. بنابراین، با حرکت ابزار به سمت گوشه‌های مسیر، تنش اصطکاکی افزایش خواهد یافت [16].

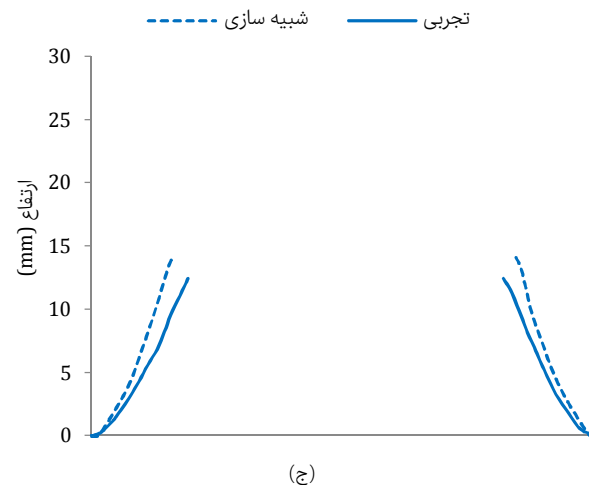
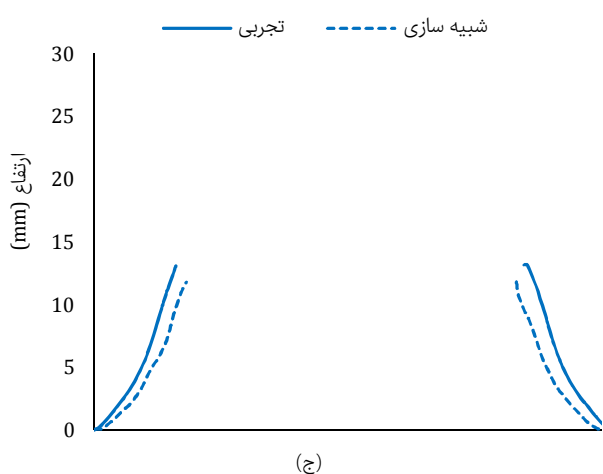
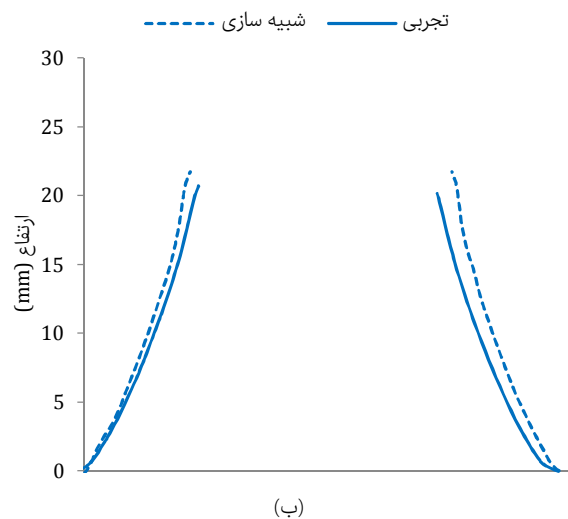
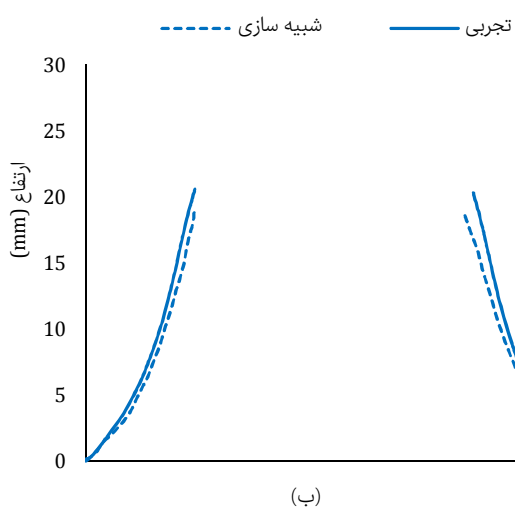
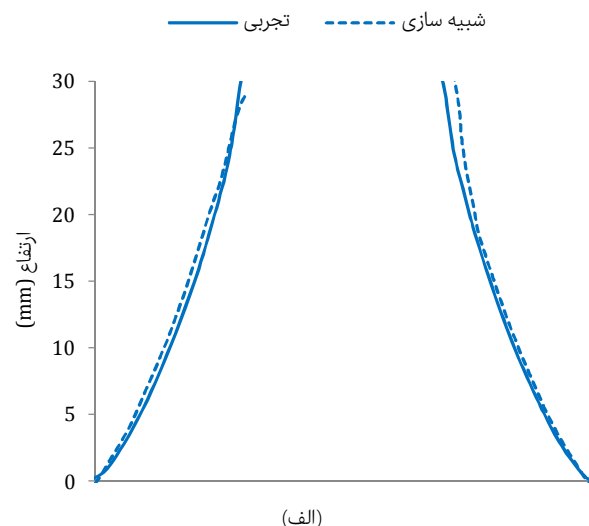
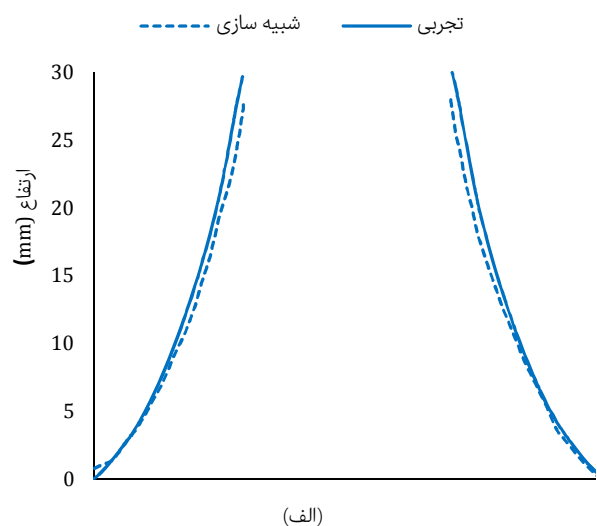
با استفاده از استراتژی شکل‌دهی دو مرحله‌ای مشکل پارگی در گوشه فلنچ هرمی قابل حل است. همان طور که در تصویر مربوط به ورق با سوراخ دایره‌ای در شکل ۵ مشاهده می‌شود، مشکل پارگی که در گوشه‌های سوراخ مربعی اتفاق افتاد، به دلیل شکل دایره‌ای، در اینجا وجود ندارد در حالی که زاویه دیواره از 30° تا 80° درجه تغییر کرده است.



شکل ۵) فلنچ هرمی با سوراخ 30×30 میلی‌متر و فلنچ مخروطی با سوراخ به قطر 30 میلی‌متر

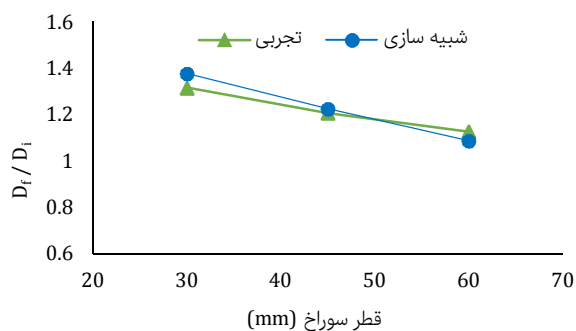
بررسی دقت ابعادی

برای بررسی دقت ابعادی، هندسه فلنچ مخروطی روی قطر دایره و برای فلنچ هرمی روی دو مسیر بررسی شده است. یکی خط تقارن که از وسط اضلاع سوراخ می‌گذرد و دیگری مسیر قطری که گوشه‌های قاعده هرم را به یکدیگر وصل می‌کند که در شکل ۶ نشان داده شده است. ابتدا با استفاده از دستگاه CMM مختصات نقاط واقع بر روی دیواره فلنچ، اندازه‌گیری شد؛ سپس با استفاده از نقاط استخراج‌شده، پروفیل هندسی هرم و مخروط شکل‌دهی‌شده ترسیم شده است. در ادامه با استفاده از این پروفیل‌های دوبعدی، به مقایسه نمونه‌های تجربی و شبیه‌سازی پرداخته شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش تجربی پس از انجام شکل‌دهی نموی تک‌نقطه‌ای ورق با سوراخ مربعی و دایره‌ای در سه ابعاد مطرح شده که در قسمت شرح مساله، در نمودارهای ۳ تا ۵ نمایش داده شده است.



نمودار ۵) شکل نهایی فلنج مخروطی؛ الف) ورق با سوراخ دایره به قطر ۳ میلی‌متر، ب) ورق با سوراخ دایره به قطر ۴۵ میلی‌متر، ج) ورق با سوراخ دایره به قطر ۶۰ میلی‌متر

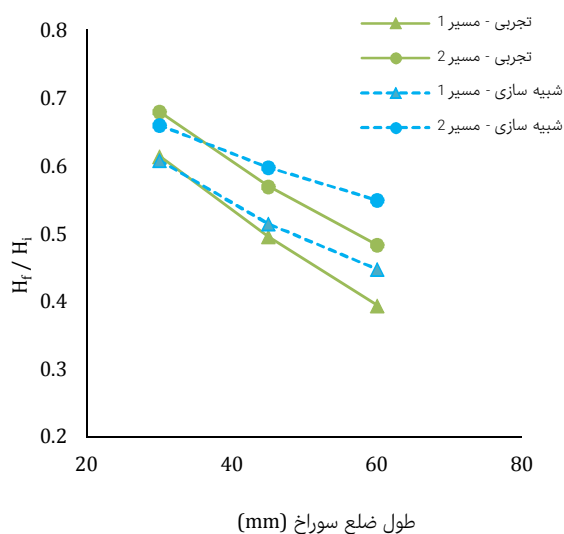
نمودار ۴) شکل نهایی فلنج هرمی در مسیر ۲؛ الف) ورق با سوراخ مربعی ۳۰×۳۰ میلی‌متر، ب) ورق با سوراخ مربعی ۴۵×۴۵ میلی‌متر، ج) ورق با سوراخ مربعی ۶۰×۶۰ میلی‌متر



نمودار ۷) بررسی نسبت قطر نهایی فلنج مخروطی به قطر اولیه سوراخ

بررسی خطا از ارتفاع مورد نظر

برای لبه‌دارکردن سوراخ‌ها همان‌طور که گفته شد ابزار در مسیر مشخص در اطراف سوراخ حرکت کرده و در واقع روی دیواره یک هرم یا مخروط فرضی که ارتفاع آن برابر ماکزیمم عمق حرکت ابزار است حرکت می‌کند. پس از شکل‌دهی و اتمام فرآیند، با اندازه‌گیری ارتفاع لبه ایجادشده مشاهده شد که ارتفاع حاصله از ارتفاع فرضی اولیه یا همان ماکزیمم عمق حرکت ابزار کمتر است. این پدیده به دلیل برگشت فنری ورق در شکل‌دهی نمودی است. دلیل دیگر، حفره موجود در ورق است؛ چون ورق در ناحیه اطراف سوراخ باز است و در مراحل انتهایی فرآیند، ابزار حین تماس با ورق از یک سمت آزاد است. در این مراحل از فرآیند شکل‌دهی، کرنش‌های کمتری در ورق نسبت به مراحل قبلی ایجاد می‌شود و بنابراین ارتفاع مورد نظر حاصل نمی‌شود. هر چه ابعاد سوراخ بزرگ‌تر باشد، اختلاف بین عمق فرضی اولیه و عمق نهایی ایجادشده بیشتر خواهد شد. چون همان‌طور که توضیح داده شد، در سوراخ‌های کوچک‌تر ابزار در مراحل بیشتری از فرآیند با ورق در تماس است، بنابراین برگشت فنری و خطای هندسی در فلنج‌های با سوراخ کوچک‌تر کمتر رخ خواهد داد. نسبت ارتفاع نهایی فلنج به ارتفاع هرم و مخروط فرضی بدون سوراخ در نمودارهای ۸ و ۹ نشان داده شده است.



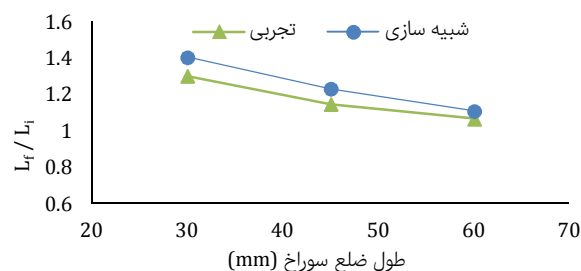
نمودار ۸) نسبت ارتفاع نهایی فلنج به ارتفاع فرضی اولیه (فلنج هرمی)

همان‌طور که از نمودارها مشاهده می‌شود، در فلنج‌های چهارگوش در مسیر اول، لبه ورق کمی خم شده است که این نشان‌دهنده برگشت فنری بیشتر ورق، در مرکز اضلاع هرم است. با توجه به نمودارها در گوشه‌های هرم، شکل‌دهی بهتر صورت گرفته است. بررسی هندسی فلنج‌های با سوراخ دایره‌ای نشان داد که در این فلنج‌ها لبه سوراخ به میزان ناچیزی به داخل خم شده است. نتایج نشان می‌دهد که هر چه اندازه سوراخ کوچک‌تر باشد، دقت ابعادی فلنج ایجادشده بیشتر بوده و به هندسه هدف نزدیک‌تر است. در فرآیند لبه‌دارکردن به روش نمودی بیشترین خطای هندسی ایجادشده در مرحله‌ای از فرآیند شکل‌دهی رخ می‌دهد که ابزار به‌طور کامل روی سطح ورق نبوده و قسمتی از ابزار با سطح ورق در تماس است. این حالت در مراحل پایانی فرآیند و با نزدیک‌شدن ابزار به لبه سوراخ بیشتر نمود پیدا می‌کند. بر این اساس در سوراخ‌های کوچک‌تر ابزار در مراحل بیشتری از فرآیند با ورق در تماس است بنابراین برگشت فنری و خطای هندسی در فلنج‌های با سوراخ کوچک‌تر کمتر رخ خواهد داد.

از مقایسه فلنج‌های مربعی و دایره‌ای، می‌توان نتیجه گرفت که در لبه ایجادشده حول سوراخ دایره‌ای برگشت فنری کمتر و دقت ابعادی بیشتر است. البته برای کاهش برگشت فنری در لبه‌دارکردن سوراخ مربعی می‌توان از روش‌هایی مانند روش شکل‌دهی چند مرحله‌ای استفاده کرد. با توجه به نمودارها، نتایج حاصل از شکل‌دهی سوراخ بین دوحالت آزمایش تجربی و شبیه‌سازی المان محدود، نسبتاً بر یکدیگر منطبق هستند.

بررسی انحراف سوراخ

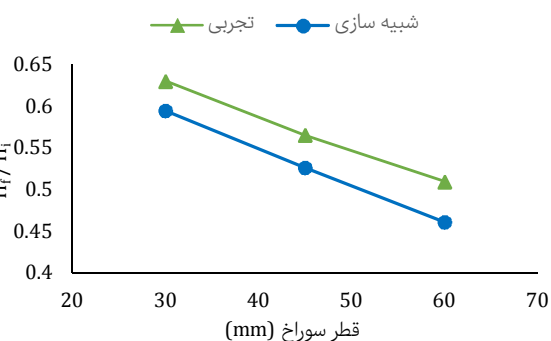
به دلیل کشیده‌شدن ورق حین فرآیند، ابعاد سوراخ تا اندازه‌ای افزایش خواهد یافت. نمودار ۶ نسبت طول ضلع نهایی فلنج (L_f) به طول ضلع اولیه سوراخ (L_i) را برای سه فلنج هرمی نشان می‌دهد. و نمودار ۷ نسبت قطر نهایی فلنج (D_f) به قطر اولیه سوراخ (D_i) را برای سه فلنج مخروطی نشان می‌دهد. با توجه به نمودارهای ۶ و ۷ هر چه اندازه سوراخ بزرگ‌تر باشد انحراف از اندازه اولیه کمتر خواهد بود. در نمودارهای ۶ و ۷ تغییرات، تقریباً خطی است بنابراین با استفاده از نمودار، می‌توان میزان افزایش اندازه سوراخ را برای سوراخ‌های دیگر نیز با تقریب خوبی تخمین زد. به عنوان مثال اگر بخواهیم فلنجی را با قطر ۴۲ میلی‌متر با این روش تولید کنیم، به‌طور تقریبی می‌توان حدس زد که قطر اولیه سوراخ قبل از لبه‌دارکردن، باید ۳۴ میلی‌متر باشد.



نمودار ۶) بررسی نسبت طول ضلع نهایی فلنج هرمی به طول ضلع اولیه سوراخ مربعی

بیشتر است.

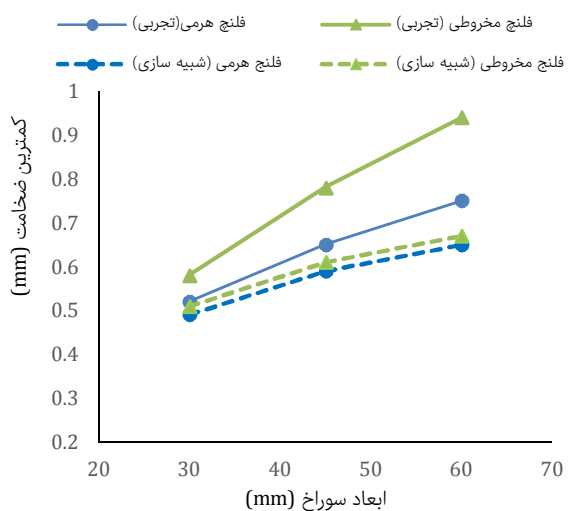
گستره تنش فون مایز بر روی سطح ورق تغییر شکل یافته، در شکل ۸ نمایش داده شده است. هر چه سوراخ مربعی، ابعاد کوچکتری داشته باشد، تغییر شکل ورق بیشتر بوده و به دلیل افزایش ارتفاع لبه، نیروی شکل دهی و در نتیجه آن، ماکزیمم تنش فون مایز وارد شده به گوشه های فلنج، بیشتر است ولی به دلیل برگشت فنی کمتر پس از شکل دهی، تنش یکنواختتری در ورق ایجاد شده است.



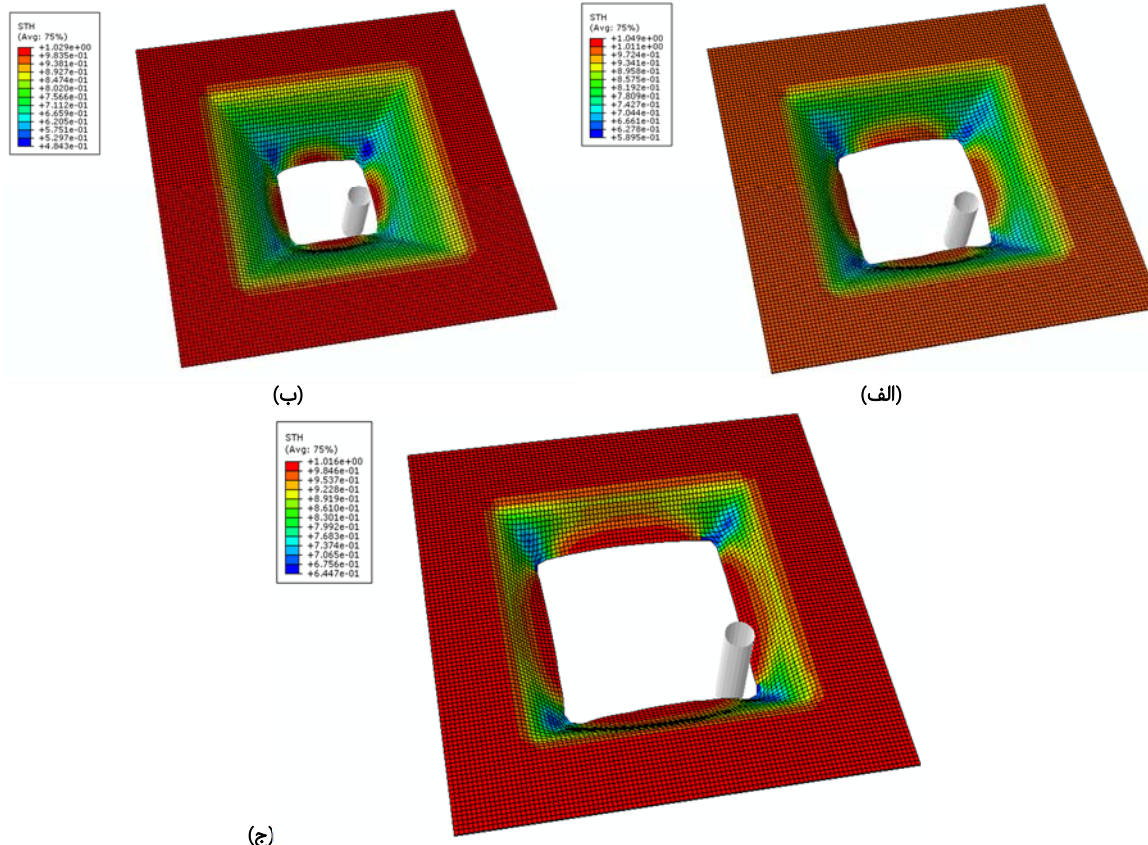
نمودار ۹) نسبت ارتفاع نهایی فلنج به ارتفاع فرضی اولیه (فلنج مخروطی)

توزیع ضخامت

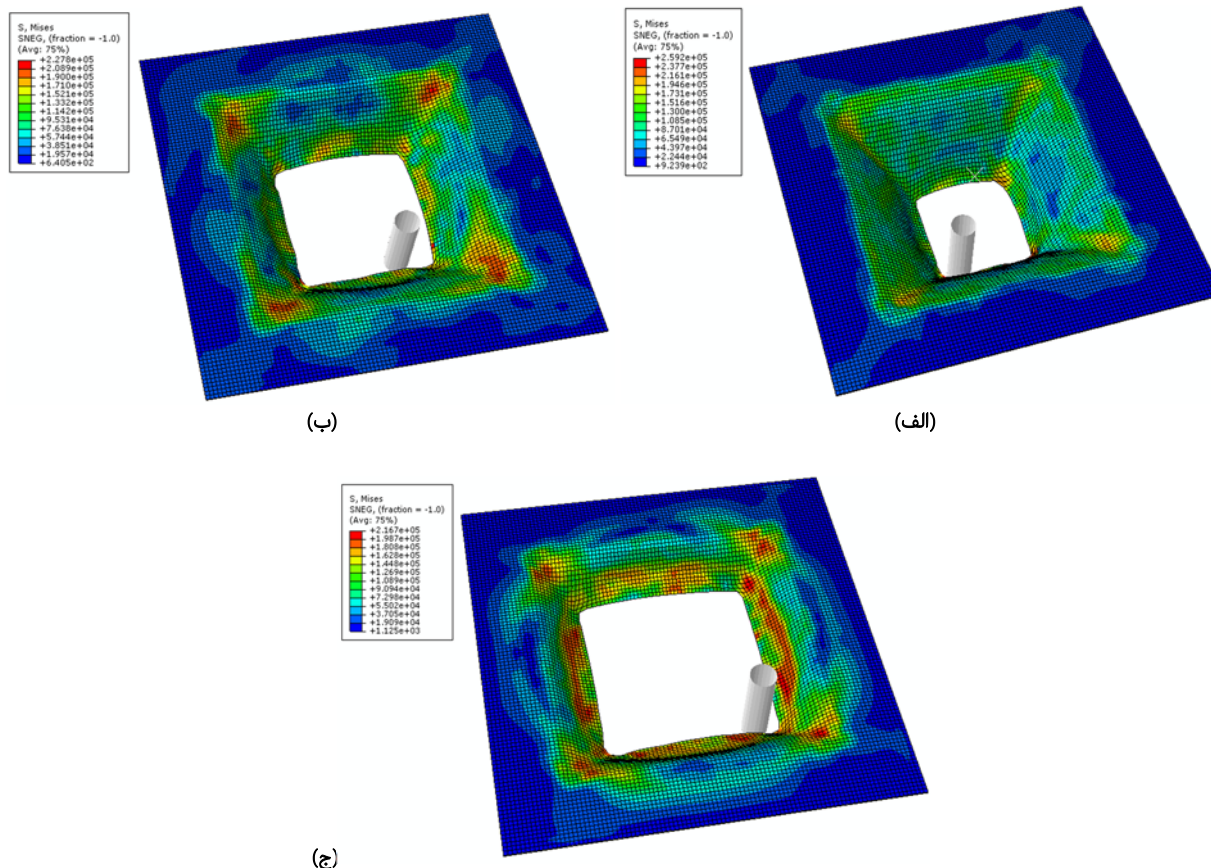
برای بررسی نازک شدگی ورق در فرآیند لبه دار کردن سوراخ، ضخامت نمونه های شکل دهی شده با میکرومتر اندازه گیری شد. مقدار کمترین ضخامت در دیواره فلنج ایجاد شده در دو حالت تجربی و شبیه سازی، در نمودار ۱۰ نشان داده شده است. توزیع ضخامت سه نمونه فلنج هرمی در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به شکل، هر چه اندازه سوراخ بزرگتر باشد، ارتفاع نهایی فلنج، کمتر و بنابراین نازک شدگی کمتر است. ضمن اینکه همان طور که گفته شد تنش در راستای ضخامت ورق، در گوشه های مسیر مربع شکل، تقریباً دو برابر سطوح صاف است؛ این تنش بالاتر موجب ایجاد کرنش و تغییر شکل بیشتر شده در نتیجه نازک شدگی بیشتر در گوشه های فلنج مشهود است و احتمال پارگی در این نواحی



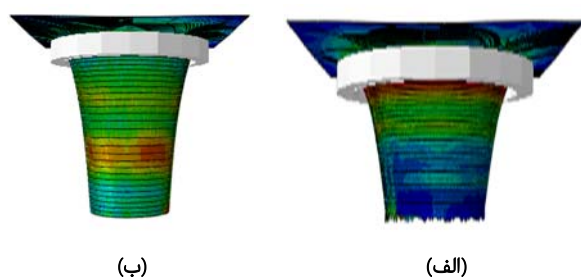
نمودار ۱۰) کمترین ضخامت ورق در فلنج های تولید شده



شکل ۷) گستره ضخامت در ورق تغییر شکل یافته: (الف) سوراخ مربعی ۳۰×۳۰ میلی متر، (ب) سوراخ مربعی ۴۵×۴۵ میلی متر، (ج) سوراخ مربعی ۶۰×۶۰ میلی متر



شکل ۸) گستره تنش فون مایز در ورق تغییر شکل یافته: الف) سوراخ مربعی ۳۰×۳۰ میلی‌متر، ب) سوراخ مربعی ۴۵×۴۵ میلی‌متر، ج) سوراخ مربعی ۶۰×۶۰ میلی‌متر



شکل ۹) شکل نهایی لبه ایجاد شده به دو روش: الف) پرس کاری، ب) شکل دهی نمود

جدول ۲) مقایسه لبه ایجاد شده در فرآیند پرس کاری و شکل دهی نمودی (اعداد به میلی‌متر هستند)

شکل دهی نمودی	پرس کاری	روش شکل دهی
۲۷/۸	۱۷/۴	ارتفاع فلنج
۵۵	۵۷	قطر نهایی فلنج
۰/۶۱	۰/۸۴	کمترین ضخامت

نتیجه‌گیری

برای فلنج کردن سوراخ در تعداد محدود و ساخت نمونه اولیه، روش شکل دهی نمودی با انعطاف پذیری بیشتر و هزینه کمتر، می‌تواند جایگزین خوبی به جای روش‌های سنتی باشد. همچنین با استفاده از روش شکل دهی نمودی می‌توان بدون پارگی، ارتفاع لبه را نسبت به روش پرس کاری افزایش داد. در این مقاله به

مقایسه روش شکل دهی نمودی و پرس کاری

برای مقایسه فرآیند لبه دار کردن سوراخ ورق با دو روش پرس کاری و شکل دهی نمودی تک نقطه‌ای هر دو فرآیند در نرم افزار آباکوس شبیه سازی شده است. برای مقایسه دو روش، سوراخ دایره‌ای به قطر ۴۵ میلی‌متر و به شکل مخروط با زاویه دیواره متغیر مطابق با ابعاد ذکر شده در جدول ۱ لبه دار شد. پس از شبیه سازی دو فرآیند، لبه‌های ایجاد شده با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

در فرآیند لبه دار کردن به روش پرس کاری، سنبه به شکل مخروط با ابعاد گفته شده در مرکز ورق قرار دارد و با حرکت آن به داخل سوراخ ورق، شکل دهی انجام می‌گیرد.

به ترتیب شکل نهایی ورق در شکل دهی نمودی و پرس کاری در شکل ۹ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود در شکل دهی نمودی عمق بیشتری ایجاد شده و بدون چین خوردگی است در صورتی که در پرس کاری لبه‌های سوراخ دچار چین خوردگی و پارگی شده است.

نتایج مقایسه بین فلنج ایجاد شده با استفاده از دو فرآیند در جدول ۲ آمده است. با توجه به نتایج جدول ۲ مزیت اصلی روش شکل دهی نمودی این است که ارتفاع لبه ایجاد شده در فرآیند نمودی تقریباً دو برابر روش پرس کاری است و پارگی در لبه سوراخ رخ نداده است. این پدیده به دلیل خاصیت تدریجی بودن کرنش و تغییر شکل در فرآیند شکل دهی نمودی است. نازک شدگی دیواره در شکل دهی نمودی به دلیل بیشتر بودن ارتفاع لبه، بیشتر است.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

سهم نویسندگان: بهزاد سلطانی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۵۰٪)؛ مهرداد بابائیان (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی (۲۵٪)؛ حسین قاسمی (نویسنده سوم)، پژوهشگر اصلی (۲۵٪).
منابع مالی: موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

منابع

- 1- Leszak E. Apparatus and process for incremental dieless forming, United States: Google Patents; 1967.
- 2- Johnson W, Chitkara NR, Minh HV. Deformation modes and lip fracture during hole-flanging of circular plates of anisotropic materials. *Journal of Engineering for Industry. Transactions of ASME*. 1977;99(3):738-748.
- 3- Cui Z, Gao L. Studies on hole-flanging process using multistage incremental forming. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2010;2(2):124-128.
- 4- Petek A, Kuzman K, Fijavz R. Backward drawing of necks using incremental approach. *Key Engineering Materials*. 2011;473:105-112.
- 5- Centeno G, Silva MB, Cristino VAM, Vallellano C, Martins PAF. Hole-flanging by incremental sheet forming. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2012;59:46-54.
- 6- Kumagai T, Hirokyu S, Meng Y. Hole flanging with ironing of two-ply thick sheet metals. *Journal of Materials Processing Technology*. 1999;89-90:51-57.
- 7- Bambach M, Voswinckel H, Hirt G. A new process design for performing hole-flanging operations by incremental sheet forming. *Procedia Engineering*. 2014;81:2305-2310.
- 8- Morales-Palma D, Borrego M, Martínez-Donaire AJ, Centeno G, Vallellano C. Preliminary investigation on homogenization of the thickness distribution in hole flanging by SPIF. *Procedia Manufacturing*. 2017;13:124-131.
- 9- Borrego M, Morales-Palma D, Martínez-Donaire AJ, Centeno G, Vallellano C. Experimental study of hole-flanging by single-stage incremental sheet forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016;237:320-330.
- 10- Ghasemi H. Finite element simulations of laser-assisted incremental forming and investigation on the process parameters in incremental forming by experimental approach [dissertation]. Kashan: Kashan University; 2014. [Persian]
- 11- Hosseinihah H. Experimental study and simulation using the finite element method for sheet hole flanging process by incremental sheet forming and process improvement using the Taguchi process [dissertation]. Kashan: Kashan University; 2017. [Persian]
- 12- Mugendirana V, Gnanavelbabu A. Analysis of hole flanging on AA5052 alloy by single point incremental forming process. *Materials Today: Proceedings*. 2018;5(2):8596-8603.
- 13- Besong LI, Buhl J, Bambach M. Investigations on hole-flanging by paddle forming and a comparison with single point incremental forming. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019;164:105143.
- 14- Zhang H, Zhang Z, Ren H, Cao J, Chen J. Deformation mechanics and failure mode in stretch and shrink flanging by double-sided incremental forming.

بررسی امکان ایجاد فلنج هرمی با استفاده از روش شکل‌دهی نموی پرداخته شد. آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی فرآیند روی سوراخ مربعی و دایره‌ای انجام شد. بدین ترتیب که لبه سوراخ‌ها به شکل یک هرم و مخروط ناقص با زاویه دیواره متغیر شکل‌دهی شد.

نتایج آزمایش‌ها نشان داد در فلنج مربعی به‌دلیل برگشت فنی ورق، لبه ورق در وسط اضلاع سوراخ مربعی به سمت داخل بر می‌گردد و این باعث ایجاد شکل نامطلوب می‌شود. با استفاده از استراتژی شکل‌دهی چند مرحله‌ای که برای بهبود دقت هندسی در شکل‌دهی نموی به‌کار می‌رود می‌توان این مشکل را تا حدودی برطرف نمود. که در پژوهش‌های بعدی به آن پرداخته خواهد شد. با اندازه‌گیری دقیق ویژگی‌های فلنج، به بررسی اثر اندازه سوراخ بر ارتفاع فلنج و قطر نهایی سوراخ و تغییر ضخامت ورق، پرداخته شد. نتایج اندازه‌گیری ابعادی فلنج‌ها نشان داد که ابعاد نهایی سوراخ پس از لبه‌دارشدن، افزایش خواهد یافت. با بررسی سوراخ‌های مختلف مشاهده شد که هر چه سوراخ اولیه بزرگ‌تر باشد، نسبت اندازه‌ی نهایی سوراخ به اندازه اولیه به یک نزدیک‌تر است بنابراین میزان افزایش ابعاد سوراخ پس از فلنج‌کردن، کمتر خواهد بود.

به‌دلیل پدیده برگشت فنی ورق، ارتفاع لبه ایجادشده از ارتفاع هدف، کمتر خواهد بود. بررسی‌ها نشان داد هر چه سوراخ ورق بزرگ‌تر باشد، ارتفاع فلنج نسبت به ارتفاع فرضی اولیه خطای بیشتری دارد. همچنین نتایج حاکی از آن است که این ارتفاع، در گوشه‌های سوراخ مربعی (مسیر ۲) بیشتر از وسط اضلاع (مسیر ۱) است و خاصیت برگشت فنی در وسط اضلاع نسبت به گوشه‌ها، مشهودتر است.

اندازه‌گیری ضخامت دیواره فلنج نشان داد که ضخامت ورق پس از شکل‌دهی کاهش می‌یابد. هر چه اندازه سوراخ ورق کوچک‌تر باشد، ضخامت ورق در دیواره کاهش بیشتری خواهد داشت که علت آن افزایش طول محدوده تغییر شکل‌یافته و کشیدگی بیشتر ورق، در آنها است. کاهش ضخامت در فلنج هرمی بیشتر از فلنج مخروطی بود.

همان گونه که اشاره شد، مابین نتایج حاصل از آزمایش تجربی و نتایج حاصل از تحلیل نرم‌افزاری، تطابق مقبولی مشاهده می‌شود که این امر سبب می‌شود تا بتوان از شبیه‌سازی انجام‌شده، جهت پیش‌بینی وضعیت ورق، پس از انجام فرآیند شکل‌دهی، کمک گرفت. بنابراین می‌توان از روش انجام‌شده در این تحقیق، جهت حذف و یا کاهش آزمون‌های تجربی و عملیات سعی و خطا به‌منظور بهینه‌سازی این فرآیند، استفاده نمود که این امر باعث کاهش هزینه‌ها و افزایش سرعت در رسیدن به پارامترهای بهینه جهت حصول اطمینان از انجام صحیح این فرآیند می‌شود.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

تاییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

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]

17- Zahedi A, Mollaei-Dariani B, Morovvati MR. Numerical and experimental investigation of single point incremental forming of two-layer sheet metals. Modares Mechanical Engineering. 2015;14(14):1-8. [Persian]

International Journal of Mechanical Sciences. 2019;144:216-222.

15- Chen X, Wen T, Qin J, Hu J, Zhang M, Zhang Z. Deformation feature of sheet metals during inclined hole-flanging by two-point incremental forming. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2020;21:169-176.

16- Ghasemi H, Soltani B. Experimental investigation on