ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2021;21(7):453-468

Analytical and Experimental Study of Blank Optimal Shape in the Deep Drawing Process of Rectangular Parts Using Sheet Flow Equations

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Ahmadian S.A.[1]
Taheri M.[1]
Modabberifar M.[1*]
Jabbari A.[1]

How to cite this article
Ahmadian S A, Taheri M, Modabberifar M, Jabbari A. Analytical and Experimental Study of Blank Optimal Shape in the Deep Drawing Process of Rectangular Parts Using Sheet Flow Equations. Modares Mechanical Engineering. 2021;21(7):453-468.

[1] Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran

***Correspondence**
Address: Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.
Phone: -
Fax: -
m-modabberifar@araku.ac.ir

Article History
Received: February 19, 2021
Accepted: April 06, 2021
ePublished: June 17, 2021

ABSTRACT

Deep drawing is one of the sheet forming processes, in which a metal sheet with mechanical operation, reaches the desired shape. One of the most important issues in deep drawing is the optimal design of the initial blank. In this paper, the main purpose is to design the optimal initial blank (with minimum circumference and minimum defects), for deep drawing of parts with a rectangular shape. To this end, in this study, a program in Visual Basic has been written in SolidWorks software, in which the press velocity variables and tensile depth are inputs, designs the optimal blank for rectangular shapes. Also in this program, blanks with rectangular, circular, octagonal, and rhombus contours have been obtained; So that they are tangent to the initial contour. A separate program has also been written to display contour blanks at different times. The blank design program obtained in this study has this unique feature that for any type of rectangular sheet and with any desired dimensions, according to the dimensions of the sheet and the depth of tension, it will be possible to design the optimal blank. To ensure the accuracy of the program written in Visual Basic language, the results of the program have been compared and validated by performing experimental work. Experimental results prove that the blanks obtained by the program have acceptable accuracy. During experimentation, defects such as earring and shrinkage have also been observed in parts produced with optimal blanks.

Keywords Deep Drawing, Initial Blank, Optimization

CITATION LINKS

[1] Deformation analysis and blank design in... [2] Blank design in rectangular cup drawing by an... [3] Forming of aluminum alloys—application of computer simulations and… [4] Process design and blank modification in the multistage rectangular... [5] Investigation on the variation of deep drawability of... [6] FEM-based optimum design of multi-stage deep drawing... [7] Numerical simulation of various cross sectional workpieces using conventional... [8] Stress analysis of rectangular cup drawing. [9] A deformation based blank design method for formed parts. [10] Realisation and application of size dependent FEM-simulation for... [11] Multi-objective optimization of blank shape for deep drawing... [12] Analisis Dan Eksperimen Blank Holder Gap Minimum Pada Proses... [13] Formability Effects of Variable Blank Holder Force on... [14] Investigation of the Effects of Process Parameters on the Welding Line... [15] Investigation of holder pressure and size effects in micro... [16] Optimization of blank shape and segmented variable blank holder force trajectories in... [17] Reverse deep drawing process: Material anisotropy and… [18] Experimental and numerical study of DC04 sheet metal behaviour... [19] Experimental and numerical evaluation of micro flexible deep drawing... [20] The determination of optimum blank shapes when deep drawing... [21] A study of a computer-aided process design system for axisymmetric... [22] Using forming simulations to improve mechanical simulation accuracy. [23] Design and modification of tool to manufacture rectangular cup of... [24] Temperature and Processability of Magnesium Alloy AZ31 on... [25] Tailor welded blank shape optimization in rectangular cup... [26] Blank shape optimization on deep drawing of a twin elliptical cup using... [27] Simulation and optimization of deep drawing process parameters for cylindrical cup by... [28] Contribution in analyzing dimensional deviations in...

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

مطالعه تحلیلی و تجربی شکل بهینه بلانک در فرآیند کشش عمیق قطعات مستطیل شکل با استفاده از معادلات جریان ورق

سید امیر احمدیان
گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران.
معین طاهری
گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران
مهدی مدبری‌فر*
گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران.
علی جباری
گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

چکیده
کشش عمیق، یکی از فرآیندهای شکل‌دهی ورق محسوب می‌شود، که در آن یک ورق فلزی با عملیات مکانیکی، به شکل مطلوب می‌رسد. یکی از مهم‌ترین مسائل در کشش عمیق، طراحی بهینه بلانک اولیه است که از نظر اقتصادی بسیار حائز اهمیت است. هدف اصلی این مقاله، طراحی بلانک اولیه بهینه (با حداقل دور ریز وکم‌ترین عیوب)، برای کشش عمیق قطعات با شکل مستطیلی می‌باشد. برای این هدف، در این پژوهش، یک برنامه به زبان ویژوآل‌بیسیک در نرم‌افزار سالیدورک نوشته شده است، که یک قطعه مستطیل‌شکل با متغیرهای سرعت پرس و عمق کشش را به عنوان ورودی گرفته و بلانک بهینه را طراحی می‌کند. همچنین در این برنامه، بلانک‌هایی با کانتور مستطیل، دایره، هشت‌ضلعی و لوزی به دست آمده‌است؛ به طوری که بر کانتور اولیه مماس باشند. همچنین یک برنامه مجزا جهت نمایش کانتور بلانک‌ها در زمانهای مختلف نیز نوشته شده‌است. برنامه طراحی بلانک به دست آمده در این پژوهش، این ویژگی منحصر به فرد را دارا می‌باشد که برای هر نوع قطعه مستطیل شکل و با هر ابعاد دلخواهی، با توجه به ابعاد قطعه و عمق کشش، قابلیت طراحی بلانک بهینه را خواهد داشت. برای اطمینان از صحت برنامه نوشته‌شده به زبان ویژوآل بیسیک، نتایج حاصل از برنامه، با انجام کارهای تجربی، مقایسه و صحت‌سنجی شده‌اند. نتایج تجربی اثبات می‌کنند که بلانک‌های به‌دست‌آمده توسط برنامه، از دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشند. در قطعات تولیدی تجربی، همچنین کاهش عیوب مانند گوشواره‌ای شدن و چروکیدگی در قطعات تولید شده با بلانک بهینه مشاهده شده است.

کلیدواژه‌ها: کشش عمیق، بلانک اولیه، بهینه‌سازی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۰۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۱۷
*نویسنده مسئول: m-modabberifar@araku.ac.ir

۱- مقدمه
فرآیند کشش عمیق را می‌توان یکی از مهم‌ترین فرآیندهای شکل‌دهی سرد ورق فلزی دانست که دارای کاربردهای متنوع و گسترده‌ای در صنعت و به‌ویژه فرآیندهای ساخت و تولید است. در فرآیند کشش عمیق، عملیات، شکل‌دهی با جریان ورق فلزی بین سطوح جانبی سنبه و ماتریس صورت می‌گیرد. در این روش تولید، ورق مسطح و هموار به شکل استوانه‌ای، مخروطی شکل و جعبه‌ای (احجام تو خالی) تبدیل می‌شود. قیمت نسبتاً پایین، نرخ تولید نسبتاً بالا، ساخت قطعات هندسی با محور متقارن و نامتقارن با تعداد عملیات محدود و استفاده از نیروی کار غیر ماهر، از دلایل کاربرد فراوان کشش عمیق در صنایع مختلف می‌باشد. همچنین تولید قطعه نهایی با کم‌ترین میزان دور ریز و ضایعات کم در مراحل ساخت امکان‌پذیر است. محصولات کشش عمیق در صنایع مختلف از جمله صنایع هوایی، خوروسازی، ساختمان‌سازی و غیره استفاده می‌گردد. یکی از ویژگی‌های بارز این فرآیند را می‌توان در تولید قطعاتی با استحکام بالا، هزینه نسبتاً پایین و وزن کم یافت. هدف اصلی تمام فرآیندهای شکل‌دهی ورق فلزی، ایجاد تغییر شکل مطلوب از ورق فلزی به محصول نهایی می‌باشد. بدیهی است که قطعات تولید شده باید از لحاظ خواص مختلف مکانیکی، کیفیت سطح نهایی و دقت ابعادی برای کاربردهای مورد نظر، کیفیت مطلوب و مناسبی را داشته باشند. این پیشرفت، نیازمند دست‌یابی به مواد با خواص مکانیکی مطلوب‌تر، فن‌آوری‌ها و تکنولوژی‌های پیشرفته‌تر، تجهیزات و وسایل اندازه‌گیری دقیق‌تر و نرم‌افزارهای با توانایی بیشتر جهت استفاده از عملیات شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل فرآیندها و مطالعات گسترده و متنوع می‌باشد. توی و کوبایاشی[1] با استفاده از روش المان محدود، به شبیه‌سازی فرآیند کشش عمیق قطعه فلزی مربعی شکل با در نظر گرفتن خواص ایزوتروپیک ماده پرداخته‌اند و شکل هندسی بلانک اولیه را به دست آورده‌اند. آنها نتایج به دست آمده را با کار تجربی بر روی دو ورق از جنس‌های آلومینیوم و فولاد ضد زنگ AISI304 مقایسه نموده و ارتباط خوبی بین پیش‌بینی المان محدود و آزمایش تجربی برای منحنی نیروی کشش و تغییر شکل بلانک پیدا کرده‌اند. کیم و کوبایاشی[2] یک روش تقریبی برای تعیین یک شکل بهینه بلانک در کشش قطعه مستطیل شکل به کار گرفته‌اند، که یک قطعه کشش عمیق با فلنج، با اندازه یکنواخت در حاشیه آن می‌دهد. با فرض یک میدان سرعت در سیستم مختصات دو بعدی، خطوط گذرنده نقاط مواد در بلانک فرموله می‌شوند و خطوط فلنج برای شکل‌های بلانک داده شده در چند مرحله کشش سنبه برای قطعه مستطیلی و مربعی مشخص می‌شود. اعتبارسنجی این روش نیز توسط آزمایش بر روی فولاد ضد زنگ AISI304 انجام شده است.

احمداغلو و همکاران[3] یک هندسه مستطیل شکل و آلیاژ آلومینیومی AA2008-T4، را برای توسعه روش‌های ارزیابی و بهبود کیفیت قطعه نهایی انتخاب کرده‌اند. آنها اثرات شکل بلانک و ورق‌گیر بر روی چروکیدگی و پارگی را مورد بررسی قرار داده‌اند. در تحقیقات آنها از سه شکل مختلف بلانک استفاده شده است. نتایج کار تجربی آنها نشان داده است که هندسه بیضوی بلانک سبب بدتر شدن شرایط شکل‌پذیری ورق شده است.

پارک و همکارانش[4] برای به حداقل رساندن مقدار دورریز، یک رویکرد عددی با استفاده از روش المان محدود را بررسی کرده‌اند. در این روش مجموعه‌ای از آزمایش‌های کشش عمیق چند مرحله‌ای قطعه مستطیلی بر روی آلیاژ آلومینیومی AA3003-

H16، انجام شده و پارامترهای قطعه با نتایج تجزیه و تحلیل المان محدود مقایسه شده است.

لی و چون[5] به بررسی تغییرات کشش عمیق فولاد ضد زنگ STS304 پرداخته‌اند. آنها ترکیب اثرات ویژگی‌های مکانیکی ورق فلزی و پارامترهای فرآیند کشش عمیق مانند دما، شکل بلانک و نیروی ورق‌گیر را مورد بررسی قرار داده‌اند. در پژوهش آنها تجزیه و تحلیل المان محدود از روند کشش عمیق به منظور بررسی رفتار تغییر شکل و پیش بینی نقص در طی فرآیند انجام شده است، همچنین متغیرهای فرآیند بهینه مانند نیروی ورق‌گیر، شکل بلانک و درجه حرارت، بر رفتار تغییر شکل بلانک توصیف شده است. کیم و هونگ[6] یک فرآیند کشش عمیق چند مرحله‌ای در قطعه استوانه‌ای برای یک ورق مولیبدن را طراحی نموده‌اند که در افزایش قابلیت کشش موثر است. یک مطالعه پارامتری نیز با استفاده از تحلیل اجزای محدود کشش عمیق برای ارزیابی تأثیر متغیرهای طراحی قالب انجام شده است. از نتایج مطالعه پارامتری، متغیرهای طراحی فرآیند کشش عمیق چند مرحله‌ای انتخاب شده‌اند. سپس، بهینه‌سازی فرآیند غیرخطی، بر اساس شبیه‌سازی المان محدود، برای به دست آوردن مراحل بهینه کشش عمیق چند مرحله‌ای، با استفاده از یک الگوریتم کلی انجام شده است.

آندره و تکایا[7] در تعیین بلانک اولیه بهینه جهت فرآیند کشش عمیق از شبیه‌سازی عددی برای ورق‌های فولادی استفاده کرده‌اند، که از نیروی سیال برای بهبود فرآیند کشش استفاده شده است. در پژوهش آنها از ورق فولادی St14 و ورق فولاد کم کربن DC04 استفاده شده است. داکسین و همکاران[8] با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش تجربی و شبیه‌سازی المان محدود و استفاده از یک ورق‌گیر پیشرفته، بهینه‌سازی طرح بلانک کشش عمیق را انجام داده‌اند. کار تجربی آنها بر روی مس خالص صورت پذیرفته است. مقایسه نتایج پیش‌بینی شده از مدل نظری با نتایج تجربی و شبیه‌سازی المان محدود، توافق خوبی را نشان داده است. همچنین نتایج به دست آمده در این پژوهش که حداکثر تنش شعاعی در امتداد دهانه همواره در محل گوشه های قطعه قرار دارد.

همامی و همکارانش[9] تعیین شکل بهینه بلانک و تأثیر آن بر کیفیت محصول را برای فولاد ضد زنگ AISI304 مورد مطالعه قرار داده‌اند. آنها به بهینه‌سازی شکل بلانک با اصلاح مکرر در الگوریتم پرداخته‌اند و نمونه مورد بررسی را قطعه مستطیل شکل کشش عمیق قرار داده‌اند. سپس نتایج حاصل از الگوریتم را با نتایج نرم‌افزار آباکوس مقایسه نموده‌اند که هر دو روش برآورد شکل بهینه بلانک مشابهی داشته‌اند. هو[10] با یک آزمایش تجربی و روش المان محدود بر روی قطعات کشش عمیق مستطیل شکل از آلیاژ آلومینیوم با ضخامت مختلف و ابعاد مختلف استفاده نموده و بلانک بهینه را طراحی نموده است. اثر اندازه تریبولوژیکی بیشتر در کشش عمیق قطعات با هندسه مستطیل شکل بررسی شده است. مقایسه منحنی فشار-ضربه و شبیه‌سازی تجربی سنبه نشان داده که توابع اصطکاک کشش عمیق قطعات دایره‌ای، برای کشش عمیق قطعات مستطیلی نیز معتبر است. وی بیان نموده است که شبیه‌سازی المان محدود وابسته به اندازه با استفاده از توابع اصطکاک را می‌توان برای تعیین شکل بلانک بهینه برای یک قطعه میکرو مستطیل شکل استفاده نمود.

کیتایاما و همکاران[11] یک روش برای تعیین طراحی شکل بهینه بلانک قطعه مربعی کشش عمیق با استفاده از بهینه‌سازی تقریبی پی در پی پیشنهاد نموده‌اند. بر اساس نتایج عددی، آزمایشات با استفاده از پرس سروو انجام شده است. تست تجربی بر روی ورق فولادی SPFC440 صورت پذیرفته است. از طریق آزمایش تجربی هیچ پارگی و چین و چروکی مشاهده نشده و لذا اعتبار روش پیشنهادی تأیید شده است. کاندرا و همکاران[12] به بررسی میزان حداقل ضریب ورق‌گیر برای جلوگیری از چین و چروک پرداخته‌اند. تست‌های تجربی آنها بر روی ورق قلع T4-CA-B صورت پذیرفته است.

کواتاناسوچات و همکاران[13] به بررسی اثرات غیر یکنواخت نیروی ورق‌گیر بر روی کشش عمیق پرداخته‌اند. مقادیر مختلفی از نیروهای ورق‌گیر برای رعایت شکل‌پذیری تنظیم شده‌اند، که درصد نازک شدن ورق را نشان داده است. نتایج نشان داده است که نیروهای نگهدارنده در محل لبه‌های ورق اطراف نواحی گوشه، غالب هستند تا درصد نازک شدن را کاهش دهند و بنابراین شکل‌پذیری را افزایش دهند. فضلی[14] فرآیند کشش عمیق بلانک‌های فولادی که به یکدیگر جوش شده‌اند، را با استفاده از روش المان محدود شبیه‌سازی نموده و نتایج را با یک کار تجربی مقایسه نموده است. همچنین وی بیان نموده است که مؤثرترین پارامترهای ماده در حرکت خط جوش، تفاوت بین ضخامت ورق و ضریب مقاومت دو ورق جوش داده شده است و مشاهده می‌شود که مؤثرترین پارامتر قالب در حرکت خط جوش ضریب اصطکاک بین سنبه و بلانک است. نتایج به دست آمده همچنین نشان داده است که با افزایش ضریب اصطکاک بین سنبه و یلانک، حرکت خط جوش کاهش می‌یابد.

امین‌زاده و همکاران[15] از محرک پیزوالکتریک به عنوان یک رویکرد جدید در زمینه تولید استفاده نموده و تأثیرات فشار ورق‌گیر بر توزیع ضخامت، نیروی سنبه و برگشت فنری ورق را بررسی کرده‌اند. در این پژوهش تست تجربی بر روی ورق آلومینیوم Al99.5 صورت پذیرفته است. با توجه به نتایج این پژوهش، افزایش فشار ورق‌گیر در کشش عمیق، بر خلاف ضخامت قسمت کشیده شده، باعث کاهش نیروهای سنبه می‌شود. کیتایاما و همکارانش[16] نیز یک روش بهینه‌سازی کشش عمیق پیشنهاد نموده‌اند. آنها تحقیقات خود را بر روی ورق فولادی SUS304 انجام داده‌اند. از طریق نتایج عددی و تجربی، اعتبار روش پیشنهادی آنها تأییدشده است.

اودمن و همکاران[17] به بررسی تأثیر مدل‌های سازنده در شبیه‌سازی کشش عمیق قطعات استوانه‌ای پرداخته‌اند. در پژوهش آنها چندین قانون اساسی برای پیش‌بینی اثرات ترکیبی ناهمسانگردی و همچنین تغییر در جهت مسیر کرنش از فولاد ضد زنگ AISI304-L در نظر گرفته شده است و برای شناسایی پارامترهای مدل، تست‌های کششی و برشی تک محوره در جهت‌های مختلف به جهت چرخش و همچنین تست‌های برشی معکوس انجام شده است. غنایی و همکاران[18] به شناسایی و مدل‌سازی رفتار تغییر شکل ورق فلزی پرداخته‌اند. آنها از مدل شبیه‌سازی کشش عمیق در المان محدود استفاده کرده‌اند. در ابتدا، مدل رفتار پلاستیکی، از جمله ناهمسانگردی پلاستیکی اولیه و سخت شدن، شناسایی شده، سپس در شبیه‌سازی المان محدود از کشش عمیق که در آن تأثیر نیروی ورق‌گیر بر کیفیت کشش، به منظور تعیین بلانک بهینه، مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تأثیر ترکیب بین ناهمسانگردی پلاستیک و ناهمسانگردی اصطکاک در توزیع ضخامت ورق بررسی شده است. در پژوهش آنها جهت تست‌های تجربی از فولاد DC04 استفاده شده است. تجزیه و تحلیل انجام شده نشان داده است که ناهمسانگردی‌های پلاستیکی و اصطکاک بر تغییر شکل ورق فلزی تأثیر دارند.

ایرثیا[19] یک روش جدید شکل‌گیری با استفاده از انعطاف‌پذیر کردن ماتریس، ارائه داده است. وظیفه اصلی بخش ورق‌گیر، غلبه بر چروکیدگی است که معمولاً در فرآیندهای شکل‌گیری اتفاق می‌افتد و همچنین تولید قطعات درابعاد کوچک با دقت بالا به ویژه در لبه می‌باشد. وی تاثیر ضخامت و زاویه سطح به وجود آمده و ابعاد بلانک را بررسی نموده است. از نرم افزار آباکوس برای ساخت مدل‌های المان محدود در شبیه‌سازی فرآیندهای شکل‌گیری استفاده شده است. بر این اساس، تعدادی از آزمایش‌های کشش عمیق برای بررسی نتایج شبیه‌سازی انجام شده است. برای انجام کار تجربی، از ورق فولادی SS304 استفاده شده و یک مجموعه ویژه با جنبه‌های طراحی خاص برای برآوردن شرایط مدل المان محدود ساخته شده است. نتایج به دست آمده نشان داده است که افزایش اختلاف اولیه منجر به کاهش نیروی شکل‌دهی می‌شود. یافته مهم این است که استفاده از حلقه شناور با سطح مایل بر چروک خوردگی جزئی غلبه می کند.

لیو و سوربی[20] برخی از روش‌ها برای تعیین شکل بهینه بلانک کشش عمیق را زمانی که قطعه منشوری شکل می‌باشد، مورد بحث قرار داده‌اند. طراحی شکل بلانک به نحوی صورت پذیرفته است که دارای حداقل فلنج لازم و کم‌ترین ورق مصرفی باشد. پارک و همکارانش[21] با استفاده از سیستم طراحی به کمک کامپیوتر به طراحی قطعات کشش عمیق متقارن در نرم‌افزار اتوکد، مبتنی بر دانش تجربی کارشناسان این حوزه و نتایج تجربی فرموله شده پرداخته‌اند. در این بررسی یک روش جدید طراحی بلانک به عنوان ابزاری مؤثر در ترکیب نظریه شکل‌گیری ایده‌آل با یک روش تکرار مسیر شکل دهی بر اساس تجزیه و تحلیل المان محدود پیشنهاد شده است. این روش شامل دو مرحله طراحی بلانک و بهینه‌سازی می‌باشد. مرحله اول یک بلانک اولیه از تئوری شکل‌گیری ایده‌آل ایجاد می‌کند. سپس، با استفاده از روش تکرار مسیر تغییر شکل، یک بلانک بهینه از شکل هدف به دست می‌آید، تا خطاهای شکل را در مرحله بهینه‌سازی به حداقل برساند.

میلایکاسکی[22] مزایای گنجاندن حالت واقعی یک قسمت قطعه فلزی به جای خواص ایزوتروپیک اسمی را بررسی نموده است. قطعات پوشش فلزی با کشش عمیق ساخته شده و فرآیند با یک عملگر یک مرحله‌ای شبیه‌سازی شده است. کو و همکارانش[23] یک مکانیسم نامطلوب را در کشش عمیق برای بخش مستطیل شکل مشخص نموده و با استفاده از شبیه‌سازی عددی فرآیند کشش عمیق با کنترل ضخامت دیواره قطعه، طراحی جدیدی از این فرآیند را ارائه داده‌اند. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل المان محدود با طراحی ابزار بهبود یافته نشان داده است که نه تنها نازک شدن دیواره و احتمال خرابی کاهش یافته، بلکه باعث بهبود کیفیت کشش محصول از طریق اصلاح ابزارها شده است.

ناکایاما و همکاران[24] روش تجزیه و تحلیل ترکیب حرارتی-مکانیکی جهت بررسی کشش عمیق ورق آلیاژ منیزیم AZ31 را مورد استفاده قرار داده‌اند. در نتایج شبیه‌سازی‌های عددی، نشان داده شده است که فرآیند کشش عمیق با گرم کردن محل قالب بهبود یافته است. جباری و سلیمی[25] به بهینه‌سازی شکل بلانک، با توجه به رفتار ناهمسانگرد ورق برای کاهش نقص گوشواره‌ای شدن در کشش عمیق پرداخته‌اند، که در آن از روش المان محدود و طراحی آزمایش استفاده شده است. هدف اصلی این روش کاهش متغیرهای طراحی برای تعریف شکل بلانک بوده است.

گلشنی و جباری[26] به بهینه‌سازی شکل بلانک قطعه بیضوی دوقلویی در فرآیند کشش عمیق پرداخته‌اند. نتایج بهینه‌سازی نشان داده که علاوه بر ارتفاع گوشواره‌ای شدن، با استفاده از این روش‌ها، می‌توان تعدادی از متغیرهای طراحی و زمان فرآیند را کاهش داده و این امر منجر به دستیابی به نتایج بهتر در پایان فرآیند بهینه‌سازی، کاهش متغیرهای طراحی و همچنین جلوگیری از تکرار مراحل بهینه‌سازی برای شکل‌های نامتقارن شده است. سراوانی و الکیا[27] به تعیین عوامل مؤثر بر فرآیند کشش و تجزیه و تحلیل فرآیند با تغییر شعاع ماتریس، ضخامت بلانک، نیروی اعمال شده و ثابت نگه داشتن اصطکاک پرداخته‌اند. در ادامه این پژوهش، بررسی تأثیر شعاع ماتریس، ضخامت ورق و نیروی اعمال شده بر قطعه در تغییر شکل بلانک با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود ارائه شده است. در این پژوهش، ترکیبی از روش المان محدود و طراحی آزمایش تاگوچی برای تجزیه و تحلیل پارامترهای فرآیند تأثیرگذار برکشش عمیق برای اجزای قطعه استوانه‌ای استفاده شده است.

سلطانی و همکاران[28] به تجزیه و تحلیل انحراف ابعادی درب‌های فولاد غیر آلیاژی DC04 لایه نازک کروی پرداخته‌اند، که برای مخازن ترمز هوا با فشار بالا استفاده می‌گردد. انحراف ابعادی با توجه به پارامترهای هندسی ورودی مانند ابعاد سنبه و ماتریس، شعاع سنبه و ماتریس و توزیع ضخامت در طول فرآیند کشش نسبت داده می‌شوند. تحقیقات آنها در نرم افزار آباکوس جهت بهینه‌سازی ابعاد بلانک انجام شده است.

با توجه به مطالعات صورت گرفته در رابطه با کشش عمیق قطعات مستطیلی، از محدودیت‌های پژوهش‌های گذشته می‌توان به این نکته اشاره کرد، که بیشتر این موارد برای ابعاد خاصی از قطعات و در عمق کشش خاص بوده است و با تغییر ابعاد قطعه نهایی و یا تغییر در عمق کشش، نیاز به انجام مجدد شبیه‌سازی، مدل‌سازی و کارهای تجربی خواهد بود. لذا در این پژوهش یکی از نوآوری‌های مهم، ایجاد یک کد جامع برای ابعاد مختلف قطعه‌ی نهایی و در عمق کشش‌های مختلف می‌باشد.

در این پژوهش، در ابتدا ماده به صورت تراکم ناپذیر فرض شده و از تغییرات ضخامت ورق هنگام تغییر شکل صرف نظر شده است، میزان لقی، ضریب اصطکاک، ضخامت ورق، شعاع گوشه‌های سنبه و ماتریس ثابت فرض شده‌اند و همچنین رفتار ورق همسانگرد فرض شده است. سپس با این فرضیات به استخراج معادلات و مدل‌سازی فرآیند کشش عمیق با استفاده از معادلات جریان ورق پرداخته شده است. بدین منظور کدنویسی به زبان ویژوآل‌بیسیک در نرم‌افزار سالیدورک صورت پذیرفته است. سپس با استفاده از مدل‌سازی صورت گرفته، بلانک بهینه و بلانک‌هایی با کانتور مستطیل، دایره، هشت‌ضلعی و لوزی با حداقل دورریز و کم‌ترین عیوب طراحی شده‌اند. سپس جهت صحت‌سنجی بلانک‌های طراحی شده، به آزمایش تجربی پرداخته شده و برای سه عمق کشش مختلف ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر، بلانک‌های مختلف که با استفاده از مدل و معادلات جریان ورق، طراحی شده‌اند، مورد زمایش قرار گرفته‌اند. نتایج تئوری با نتایج تجربی مقایسه شده و نتایج مناسبی مشاهده گردیده است.

نوآوری اصلی این پژوهش، استفاده از معادلات جریان ورق و مدل عمومی استخراج شده می‌باشد، که برای قطعه مستطیل شکل، با هر ابعاد و عمق کششی، قابلیت طراحی بلانک بهینه را به راحتی خواهد داشت، که این موضوع با استفاده از نتایج تجربی صورت گرفته نیز، تأیید شده است.

۲- مدل‌سازی، شبیه‌سازی و کارتجربی

در این بخش به بررسی مراحل مدل‌سازی، شبیه‌سازی و کارتجربی پرداخته شده است. در الگوریتم شکل ۱ مراحل کلی این فرآیند نشان داده شده است.

۲-۱- مدل‌سازی فرآیند کشش عمیق در نرم‌افزار سالیدورک

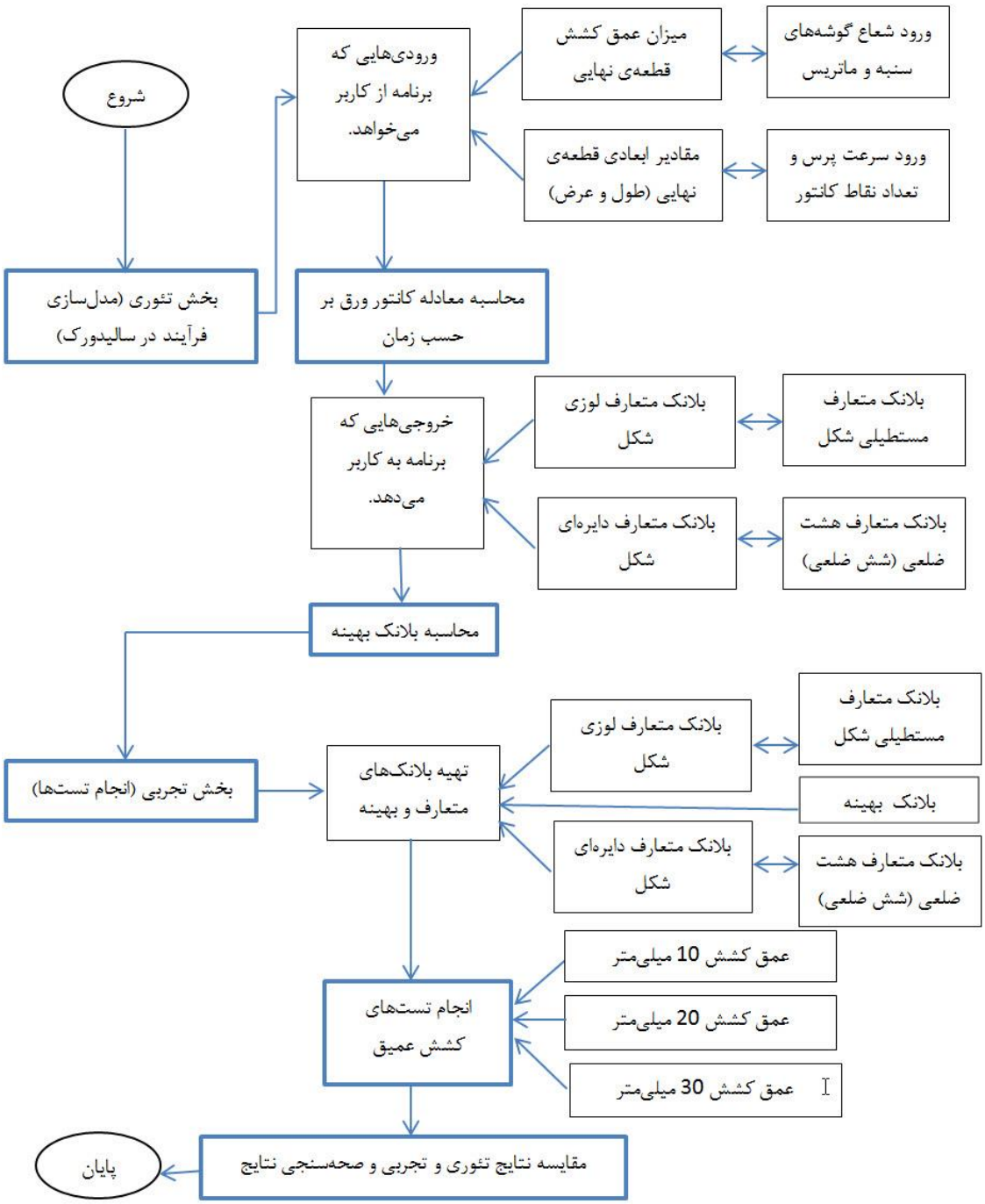
در این بخش در ارتباط با جزئیات برنامه‌ی نوشته شده به زبان ویژوآل‌بیسیک در نرم‌افزار سالیدورک، نتایج حاصل و انتخاب بلانک اولیه بهینه با توجه به پارامترهای مورد نظر بحث شده است. همچنین راجع به بخشی از برنامه که جهت نمایش کانتور ورق در زمان‌های مختلف نیز نوشته شده، توضیحاتی ارائه شده است. شایان ذکر است که از نرم‌افزار سالیدورک برای تحلیل نتایج استفاده نشده است، بلکه از کدنویسی در محیط ماکروی این نرم‌افزار جهت به دست آوردن بلانک بهینه و بلانک‌های متعارف استفاده شده است. هدف اصلی ایجاد یک کد جامع بوده است که با گرفتن ورودی‌هایی از جمله ابعاد قطعه نهایی، عمق کشش و غیره بتواند بلانک بهینه و همچنین بلانک‌های متعارف را تولید و به عنوان خروجی نمایش دهد.

۲-۱-۱- طرح کلی برنامه

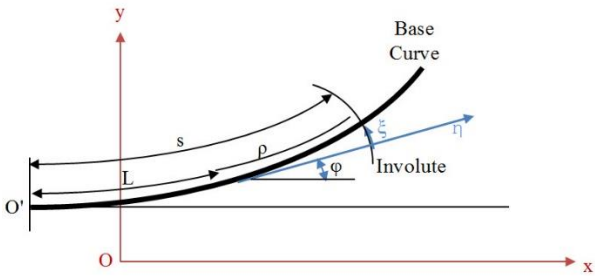
در این برنامه، ایده کلی به این شکل است که با استفاده از معادلات جریان ورق، ابتدا مختصات کارتزین x-y نقاط مرزی کانتور نهایی (s_1) به دست می‌آید و سپس این داده‌ها به مختصات s-φ_i تبدیل می‌شوند. در مرحله بعد، مختصات نقاط بلانک اولیه در مختصات s-φ_i به دست می‌آید، که در انتهای فرآیند، با توجه به این که نقاط انتهایی جریان منطبق بر لبه‌های کانتور نهایی می‌باشند، یعنی $s=s_1$ است، لذا تنها مجهول مسأله، که نقاط مربوط به بلانک اولیه بهینه (s_0) می‌باشد، به دست خواهد آمد. سپس بلانک اولیه بهینه (s_0) با استفاده از داده‌ها به مختصات کارتزین x-y تبدیل می‌شوند. در نهایت با متصل کردن نقاط به یکدیگر توسط منحنی غیرتحلیلی خط‌فضایی کانتور بلانک اولیه به دست می‌آید.

۲-۱-۲- محاسبه معادله کانتور ورق بر حسب زمان

ابتدا مختصات خطی- منحنی η-ξ تعریف می‌شود و با استفاده از این مختصات، معادله‌ی معادله کانتور ورق در زمان‌های مختلف به دست می‌آید. برای به دست آوردن کانتور بلانک اولیه ابتدا باید مختصات خطی-منحنی η-ξ تعریف شود (شکل ۲). این مختصات شامل مماس و اینولوت منحنی پایه داده شده می‌باشد. همچنین طول s نیز برابر با طول قوس در امتداد منحنی پایه از یک نقطه مرجع (O') تا محل تقاطع منحنی با اینولوت می‌باشد. اما در مورد منحنی پایه نیز فرض می‌شود که این منحنی بر تمام خطوط جریان ماده مماس می‌باشد (یعنی تمام خطوط جریان، محور ξ می‌باشند.). دلیل تعریف این مختصات، سادگی روابط کانتور ورق بر حسب زمان در آن و پیچیدگی این معادلات در مختصات کارتزین می‌باشد.



شکل ۱) الگوریتم کلی فرآیند



شکل ۲) نمایش مختصات خطی- منحنی η-ξ [2]

در سیستم مختصات η-ξ، نرخ کرنش به شکل معادلات ۱ تا ۳ بیان می‌شود:

$$\dot{\varepsilon_\xi} = \frac{\partial u_\xi}{\partial s_\xi} - u_\eta \frac{\partial \varphi}{\partial s_\xi} \quad (۱)$$

$$\dot{\varepsilon_\eta} = \frac{\partial u_\eta}{\partial s_\eta} + u_\xi \frac{\partial \varphi}{\partial s_\eta} \quad (۲)$$

$$\dot{\gamma_{\xi\eta}} = \frac{\partial u_\xi}{\partial s_\eta} - u_\eta \frac{\partial \varphi}{\partial s_\eta} + \frac{\partial u_\eta}{\partial s_\xi} + u_\xi \frac{\partial \varphi}{\partial s_\xi} \quad (۳)$$

که در آن، u سرعت در راستای محورها، s طول در راستای محورها و اندیس‌های η ,ξ نشانه محورها می‌باشند. با فرض این که خطوط

جریان ماده در فلنج بر محورهای ξ (خطوط جریان) مماس می‌باشند:

$$u_\eta = 0 \quad (۴)$$

همچنین به دلیل این که محور های ξ خطوط صاف می‌باشند:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial s_\xi} = 0 \quad (۵)$$

ساده شده معادلات ۱ تا ۳ به شکل معادلات ۶ تا ۸ می‌باشد:

$$\dot{\varepsilon_\xi} = \frac{\partial u_\xi}{\partial s_\xi} \quad (۶)$$

$$\dot{\varepsilon_\eta} = u_\xi \frac{\partial \varphi}{\partial s_\eta} \quad (۷)$$

$$\dot{\gamma_{\xi\eta}} = \frac{\partial u_\xi}{\partial s_\eta} \quad (۸)$$

در این روش، ماده به صورت تراکم ناپذیر فرض می‌شود و اگر از تغییرات ضخامت ورق هنگام تغییر شکل صرف نظر شود، با فرض تراکم ناپذیری و با استفاده از معادلات ٦ و ٧ نتیجه می‌شود:

$$\frac{\partial u_\xi}{\partial s_\xi} + u_\xi \frac{\partial \varphi}{\partial s_\eta} = 0 \quad (۹)$$

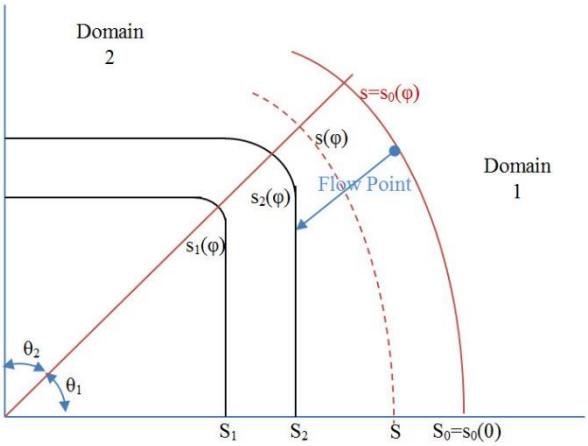
و چون:

$$\rho d\varphi = ds_\eta \quad (۱۰)$$

که ρ شعاع انحنای محور η است؛ در نتیجه معادله ۹ به شکل معادله ۱۱ تبدیل می‌شود:

$$\frac{\partial u_\xi}{\partial s_\xi} + \frac{u_\xi}{\rho} = 0 \quad (۱۱)$$

به منظور تعریف میدان سرعت در کشش ظرف، جریان ماده نه تنها در ناحیه فلنج، بلکه در گوشه ماتریس نیز باید تعریف شود. در شکل ۳ جریان ماده به شکل هندسی نمایش داده شده‌است. یک منحنی فلنج ابتدایی نیز توسط منحنی $s = s_0(\varphi)$ نمایش داده شده‌است. گوشه‌ی ماتریس نیز از $s = s_0(\varphi)$ آغاز می‌شود و شکل ظرف کشیده شده نیز با $s = s_1(\varphi)$ نمایش داده شده است. در شکل مقادیر S, S_0, S_1, S_2 در φ=0 می‌باشند.



شکل ۳) نمایش هندسی جریان ماده [2]

اگر u_ξ سرعت در راستای گوشه ماتریس باشد، تصویر آن در صفحه x-y برابر با محور ξ خواهد بود. نرخ کرنش در راستای شعاع ماتریس به شکل معادلات ۱۲ و ۱۳ است:

$$\dot{\varepsilon_l} = \frac{\partial u_\xi}{\partial l} = \frac{\partial u_\xi}{\partial s_\xi} cos\alpha \quad (۱۲)$$

$$\dot{\varepsilon_\eta} = u_\xi \, cos\alpha \frac{\partial \varphi}{\partial s_\eta} \quad (۱۳)$$

همچنین معادلات ۱۲ و ۱۳ جریان در گوشه ماتریس را نیز بیان می‌کند.

به ازای φ ثابت:

$$ds_\xi = ds \quad (۱۴)$$

همچنین:

$$\rho = s - L(\varphi) \quad (۱۵)$$

که L(φ)برابر با طول کمان بین نقطه مبدأ و نقطه برخورد مماس بر منحنی پایه می‌باشد. با انتگرال‌گیری از رابطه‌ی ۱۱:

$$u_\xi = -\frac{A(\varphi)}{s - L(\varphi)} \quad (\varphi = const.) \quad (۱۶)$$

شرایط مرزی به صورتی فرض می‌شوند که نقاط ماده با حرکت سنبه (هنگامی که از ناحیه‌ی تغییر شکل عبور می‌کند) حرکت می‌کنند. در نتیجه به ازای $s = s_1(\varphi)$ و $u_\xi = -1$، با استفاده از شرایط مرزی داده‌شده از معادله ۱۶، معادله‌ی ۱۵ به شکل معادله ۱۷ در می‌آید:

$$u_\xi = -\frac{s_1(\varphi) - L(\varphi)}{s - L(\varphi)} = -\frac{\rho_1(\varphi)}{\rho} \quad (۱۷)$$

این معادله در ناحیه تغییر شکل که به وسیله‌ی $0 \le \varphi \le \upsilon_1$ و $s \ge s_1$ تعریف می‌شود، برقرار است. در معادله‌ی ۱۷، $\rho_1(\varphi)$ شعاع انحنای محور ξ در $s = s_1(\varphi)$ می‌باشد. برای کامل بودن میدان سرعت در کشش عمیق قطعات مستطیلی، مید آنهای سرعت دو ناحیه نشان داده شده در شکل ۳ باید در راستای قطر مستطیل، پیوسته باشند. از معادله ۱۷ نتیجه می‌شود که شرط پیوستگی، برقراری معادله ۱۸ است:

$$\rho\,(domain\ 1)_{\varphi=\theta_1} = \rho\,(domain\ 2)_{\varphi=\theta_2} \quad (۱۸)$$

شرط ارضا شدن معادله ۱۸ این است که نقاط تداخل خطوط جریان قطری و مماس بر منحنی پایه، در دو ناحیه بر هم منطبق شوند. اگر معادله پروفیل یک بلانک در $t = 0$ برابر با $s = s_0(\varphi)$ باشد، معادله آن در لحظه‌ی $t = T$ که به شکل $s(\varphi)$ می‌باشد، با انتگرال گرفتن از سرعت‌ها در راستای خطوط، جریان به دست می‌آید. در دامنه‌ی $s_2 \le s \le s_0$، کانتور s روی صفحه مسطح قرار می‌گیرد و به دلیل این که $u_\xi = {ds}/{dt}$ در نتیجه:

$$\int_0^T dt = \int_{s_0}^{s} \frac{ds}{u_\xi} \quad (\varphi = const.) \quad (۱۹)$$

که با کمک معادله ۱۷ نتیجه می‌دهد:

$$T = \frac{\frac{s_0^2 - s^2}{2} - L(s_0 - s)}{s_1 - L} \quad (۲۰)$$

زمان T در معادله ۲۰، باید برای تمامی φها یکسان باشد. با گرفتن $T = T_0$برای $\varphi = 0$ به عنوان یک مقیاس زمانی، اگر $L(0) = 0$ باشد، از معادله ۲۰ نتیجه می‌شود:

$$T = \frac{s_0^2 - s^2}{2s_1} = \frac{\frac{s_0^2 - s^2}{2} - L(s_0 - s)}{s_1 - L} \quad (۲۱)$$

که S، $s(0)$ را بیان می‌کند. در دامنه$s_1 \le s \le s_2$ ، کانتور s در صفحه گوشه ماتریس قرار می‌گیرد و سرعت u_ξ به شکل $u_\xi = {}^{dl}/_{dt}$ تعریف می‌شود. زمان کلی مورد نیاز برای حرکت یک نقطه از ماده از s_0 تا کانتور s برابر با $T = T_1 + T_2$می‌باشد که T_1 زمان حرکت آن نقطه از ماده از s_0 تا s_2 و به شکل $T_1 = (T_0)_{s=s_2}$و T_2 زمان حرکت آن نقطه از ماده از s_2 تا s می‌باشد. در نتیجه:

$$T_2 = \int_0^{\alpha} r\left(\frac{s - L}{s_1 - L}\right) d\alpha \approx \frac{r_d}{s_1 - L}\{(s_2 - L)\alpha + r_d(cos\alpha - 1)\} \quad (۲۲)$$

که با تخمین زدن $r \approx r_d$ برای تمام φها می‌باشد. بنابراین:

$$T = \frac{\frac{s_0^2 - s_2^2}{2} - L(s_0 - s_2)}{s_1 - L} + \frac{r_d}{s_1 - L}\{(s_2 - L)\alpha + r_d(cos\alpha - 1)\} = \frac{S_0^2 - S_2^2}{2S_1} + \frac{r_d}{S_1}\{S_2\alpha + r_d(cos\alpha - 1)\} \quad (۲۳)$$

در معادلات ۲۲ و ۲۳، $s_1(\varphi), s_2(\varphi), S_1, S_2$ به ازای هندسه قالب داده شده مشخص می‌باشند. معادلات ۲۲ و ۲۳ برای محاسبات ذیل کاربرد دارند:

۱- به دست آوردن کانتور فلنج برای بلانک داده‌شده: کانتور $s = s(\varphi)$از معادله‌ی ۲۲ در $s \ge s_2$، به ازای $s_0(\varphi)$ داده‌شده و با در نظر گرفتن S به عنوان مقیاس زمانی، به دست می‌آید.

۲- طراحی بلانک برای ظرف با فلنج باقیمانده یکنواخت: کافی است $s = s_2(\varphi)$ در معادله‌ی ۲۲ جایگزین شده و معادله برای s_0 به عنوان تابعی از φ و با در نظر گرفتن s_0 به عنوان مرجع زمانی حل شود.

۳- طراحی بلانک برای ظرف با ارتفاع یکنواخت: کافی است $\alpha = {}^{\pi}/_{2}$ در معادله ۲۳ جایگذاری شده و $s_0(\varphi)$به ازای مقادیر مختلف داده‌شده‌ی S_0 جایگزین شود.

البته در این پژوهش به دلیل عدم نیاز به فلنج، تنها معادله ۲۰ حائز اهمیت است که در این معادله همان طور که گفته‌شد، T زمان، s فاصله نقطه مرجع تا نقاط کانتور در زمان T، s_1 فاصله نقطه مرجع تا نقاط کانتور نهایی، s_0 فاصله نقطه مرجع تا نقاط کانتور بلانک اولیه و L فاصله نقطه مرجع تا نقاط تلاقی منحنی پایه و مماس آن می‌باشد. لذا در هر زمانی از فرآیند، کانتور ورق قابل محاسبه می‌باشد. در انتهای فرآیند، با توجه به این که $s = s_1$است، لذا تنها مجهول مسأله s_0 می‌باشد. بدیهی است که به ازای هر نقطه از کانتور نهایی، یک نقطه از کانتور اولیه به دست می‌آید.

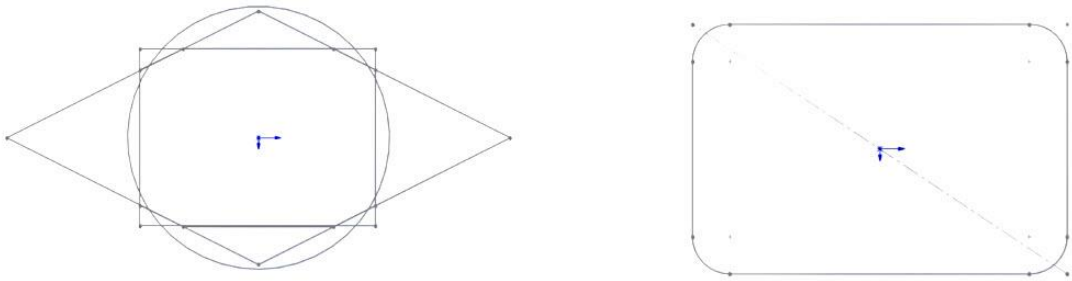
۲-۲- شبیه‌سازی در سالیدورک و به‌دست آوردن بلانک اولیه

در این بخش پس از وارد نمودن مقطع قطعه نهایی و سایر ورودی‌ها شامل سرعت پرس، عمق کشش و تعداد نقاط کانتور بلانک، مختصات کارتزین $x - y$ نقاط مرزی کانتور نهایی به مختصات $s - \varphi_I$ تبدیل می‌شوند. در مرحله بعد معادله ۲۰ حل می‌شود که در انتهای فرآیند، با توجه به این که $s = s_1$ است، لذا تنها مجهول مسأله s_0 می‌باشد. مختصات نقاط بلانك اولیه در مختصات $s - \varphi_I$ به دست می‌آید، که مجدداً به مختصات کارتزین $x - y$ تبدیل می‌شوند. این عملیات در یک حلقه انجام می‌شود که در آن، تعداد مراحل تکرار برابر با تعداد نقاط لازم برای رسم کانتور می‌باشد و در عملگر قابل‌تنظیم می‌باشد. در مرحله بعد، با متصل‌کردن نقاط به یکدیگر توسط منحنی‌های خط‌فضایی، کانتور بلانک اولیه به دست می‌آید. رسم منحنی‌های خط‌فضایی بینابین نیز در یک حلقه انجام می‌شود که در هر بار انجام حلقه، نقاط تک‌تک به یکدیگر متصل می‌شوند تا کانتور بلانک اولیه به دست آید. اما در صنعت، برش یک بلانک که از شکل هندسی تحلیلی تبعیت نمی‌کند، بسیار هزینه‌بر و یا تقریباً غیرممکن است. لذا برای این که برنامه علاوه بر جنبه تحقیقاتی، جنبه صنعتی نیز پیدا کند، کار دیگری که در برنامه انجام شده‌است، به دست‌آوردن بلانک‌هایی با کانتور مستطیل، دایره، هشت‌ضلعی و لوزی می‌باشد؛ به طوری که بر کانتور اولیه مماس باشند. بلانک‌های با شکل هندسی ساده‌تر و نزدیک به شکل بلانک بهینه برای مصارف صنعتی کاربردی و کم‌هزینه‌تر خواهدبود، لذا دراین پژوهش سعی شده تا بلانک‌های مختلف موردبررسی قرار گیرند. شایان ذکر است که از ابتدا پیش‌بینی می‌شد که بلانک لوزی، شکل مناسبی نخواهد بود، ولی برای اطمینان از این موضوع، بلانک لوزی شکل نیز مورد بررسی قرار گرفته است. بلانک‌های اولیه برای یک قطعه با مقطع مستطیلی در شکل ۴ نمایش داده‌شده‌اند.

با انتخاب هر بلانک اولیه (مستطیل، دایره، هشت‌ضلعی و لوزی) یک سری ابعاد در عملگر نمایش داده می‌شود که این ابعاد برای هر کدام از بلانک‌ها در شکل ۵ نمایش داده شده‌اند.

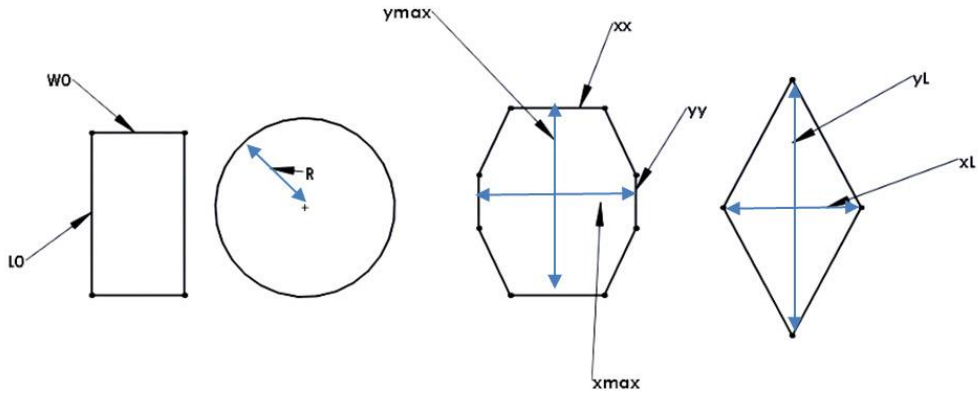
۲-۳- ساخت قطعه مستطیل شکل

لازمه تولید قطعه مستطیلی، ساخت قالب کشش عمیق می‌باشد. قطعات قالب در سه قسمت اصلی سنبه، ماتریس و ورق گیر می‌باشند. این قالب بر روی پرس هیدرولیک دو حرکته نصب می‌گردد و جهت روانکاری از روغن و نایلون استفاده می‌شود، که در آن ورق‌گیر در رام دوم می‌باشد. ابعاد قالب برای ساخت قطعه مستطیل شکل تا عمق کشش ۳۵ میلی متر در نظر گرفته شده است. بلانک‌های مورد استفاده از جنس آلیاژ آلومینیوم سری ۳۰۰۰



(الف) (ب)

شکل ۴) نمایش مقطع رسم شده؛ (الف) قطعه مستطیلی، (ب) بلانک‌های متعارف



شکل ۵) نمایش پارامتری ابعاد بلانک‌های اولیه

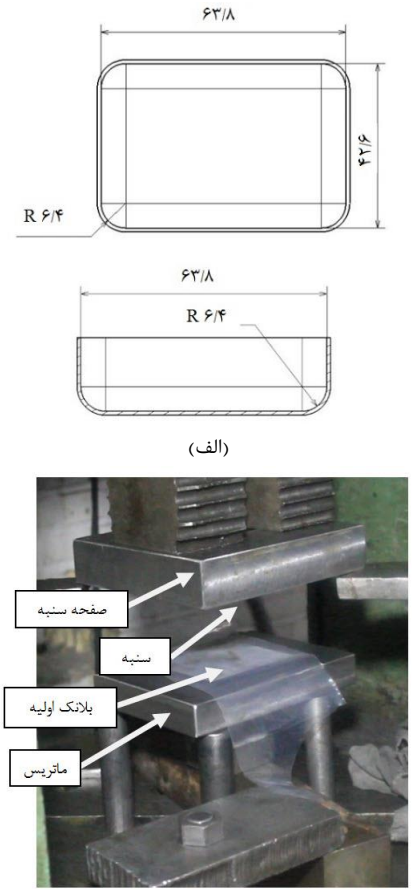
می‌باشند، که به کمک برش لیزر در ابعاد مورد نظر برش کاری شده‌اند. بر روی آلیاژ مورد بررسی، در بنیاد علوم کاربردی رازی، آزمون تعیین ترکیب شیمیایی به روش اسپکترومتری نشری انجام گرفته و ترکیب شیمیایی نمونه بر حسب درصد وزنی عناصر در جدول ۱ ذکر شده است.

۲-۳-۱- طراحی قالب

با توجه به بلانک‌های به دست آمده، ابعاد قالب در برگیرنده مساحت بلانک‌ها می‌باشد. شکل ۶-الف، ابعاد قطعه نهایی را نشان می‌دهد. همچنین مطابق شکل ۶-ب قالب از سه قسمت اصلی، سنبه، ماتریس و ورق‌گیر به همراه صفحه پشت سنبه تشکیل می‌شود. در این آزمون قالب بر روی پرس هیدرولیک دو حرکته نصب می‌شود، به صورتی که سنبه به میز ثابت پرس و ماتریس با قطعات واسطه به رام متحرک مهار می‌گردد. قطعه ورق‌گیر به صورت آزاد بر روی رام دوم که در میز ثابت می‌باشد، قرار می‌گیرد و سنبه در وسط ورق، مانع از حرکت صحفه‌ای ورق‌گیر می‌شود .قطعات قالب به کمک نرم افزار کتیا و به صورت تجربی طراحی شده‌اند، لقی در نظر گرفته شده بین سنبه و ماتریس با توجه به ضخامت یک میلی‌متری ورق، ۱/۲۵ میلی‌متر می‌باشد و حفره ماتریس به دلیل تخت بودن کف قطعه راه به در است.

جدول ۱) ترکیب شیمیایی نمونه بر حسب درصد وزنی عناصر

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ni	Ti	Be	Ca	Li
0.29	0.85	0.05	0.50	0.05	0.08	0.003	0.002	0.029	None	Trace	None
Pb	Sn	Sr	V	Na	Bi	Zr	B	Ga	Al		
Trace	0.002	None	0.014	Trace	<0.003	Trace	0.002	0.01	Base		



(الف)

(ب)

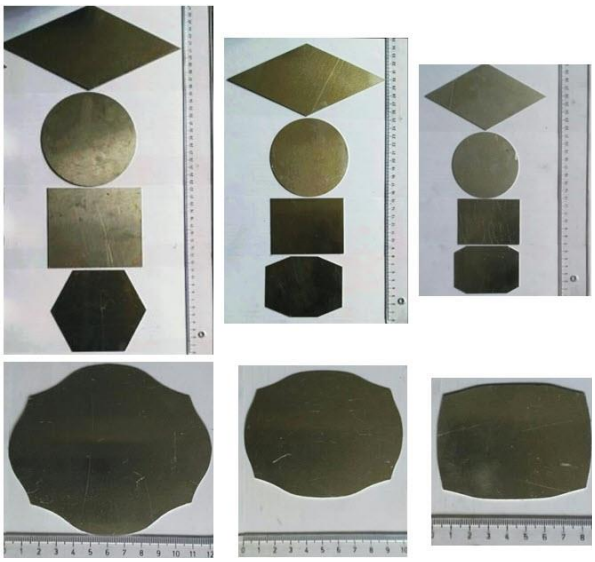
شکل ۶) مدل قطعه و اجزای قالب کشش عمیق قطعه مستطیل شکل: (الف) مدل قطعه مستطیل شکل، (ب) اجزای قالب کشش عمیق

۲-۳-۲- ساخت قالب

مواد اولیه ساخت قالب با توجه به جنس بلانک‌ها، فولاد ST50 انتخاب گردیده است. قطعات ابتدا برای براده‌برداری نهایی با دستگاه‌های دستی به اندازه مناسب براده برداری شدند. سپس با فرز CNC ناحیه حفره و ساخت قطعه در سنبه و ماتریس و ورق‌گیر ایجاد شدند. سطح مشترک بین ماتریس و ورق‌گیر نیاز به صافی سطح و تختی مناسب دارد، به همین دلیل این سطوح به روش سنگ‌زنی به اندازه مورد نظر رسیده‌اند.

۲-۳-۳- تهیه بلانک های متعارف و بهینه

نتایج به دست آمده از عملگر بلانک بهینه اشکال هندسی متعارف و بهینه محیط بلانک‌ها می‌باشد. جهت تولید بلانک‌ها در ورق آلومینیوم سری ۳۰۰۰ که در ابعاد ۲×۱ متر موجود می‌باشد، تهیه گردیده و بلانک‌ها در آن، جهت برش‌کاری چیدمان شدند (شکل ۷). برش‌کاری توسط دستگاه برش لیزر انجام گرفته است. جدول ۲ نیز با توجه به شکل ۵، ابعاد بلانک‌های متعارف را نشان می‌دهد.



(الف) (ب) (ج)

شکل ۷) بلانک‌های اولیه؛ (الف) عمق کشش ۱۰ میلیمتر (ب) عمق کشش ۲۰ میلیمتر (ج) عمق کشش ۳۰ میلیمتر

جدول ۲) ابعاد به دست آمده از روش تئوری جهت بلانک‌های متعارف برای عمق کشش‌های مختلف

نوع بلانک متعارف	ابعاد بلانک متعارف	عمق کشش		
		۱۰ میلی‌متر	۲۰ میلی‌متر	۳۰ میلی‌متر
بلانک لوزی	XL	۸۸/۶	۹۱/۶	۱۲۰
	YL	۱۷۶/۵	۲۲۲/۴	۲۵۰
بلانک دایره‌ای	R	۹۱/۸	۱۰۳/۲	۱۲۰
بلانک مستطیلی	W0	۶۲/۲	۸۰/۶	۹۹
	L0	۸۲/۴	۱۰۰/۸	۱۱۸/۵
بلانک هشت‌ضلعی	XX	۴۶/۸	۵۰/۲	۰
	Xmax	۶۲/۲	۸۰/۶	۹۹
	YY	۵۲/۶	۵۷/۳	۷۰/۵۵
	Ymax	۸۲/۴	۱۰۰/۸	۱۱۸/۵

۲-۳-۴- تولید قطعات مستطیل شکل

با توجه به سرعت پرس و نیروی فشاری، رام متحرک پس از نصب قالب به دستگاه، ارتفاع مورد نظر برای کشش روی دستگاه تنظیم می‌شود. سپس سطح بلانک و ورق،گیر که در تماس با ماتریس می‌باشد با مواد روانکار آغشته و یا پوشانده می‌شود، با حرکت رام متحرک، ماتریس و ورق‌گیر بلانک را بر روی سنبه می‌کشند. پس از برگشت ماتریس به نقطه اول، رام دوم که ورق‌گیر را بر روی خود دارد، به سمت بالا حرکت می‌کند و قطعه را از سنبه خارج می‌کند.

۳-نتایج و بحث

در نرم‌افزارهای طراحی و مدل‌سازی مانند کتیا و سالیدورک، عملگر مناسب جهت تعیین بلانک قطعات کشش عمیق وجود ندارد. به طور مثال در کتیا، محیط سطح‌سازی برای شکل‌هایی مشابه به ظرف مستطیل شکل، گسترده‌ای از جنس سطح به دست می‌آید. در این پژوهش با ساخت عملگر بلانک بهینه در نرم‌افزار سالیدورک و با اعمال متغیرها در این عملگر طراحی بلانک بهینه انجام می‌شود. سپس در آزمون تجربی قالب کشش قطعه مستطیل شکل از این بلانک ساخته می‌شود. پس از اجرای عملگر، در هر لینک نتیجه محاسبات به صورت ترسیمی در یک مدل سیمی سالیدورک نمایش داده می‌شود. در لینک بلانک اولیه جواب محاسبات و معرفی بلانک‌های متعارف با شکل‌های هندسی مستطیلی، دایره‌ای، لوزی و هشت ضلعی می‌باشد. این نتایج، بلانک متعارف با ابعاد مناسب را جهت فرآیند کشش معرفی می‌کند. همچنین درصد دورریز پس از آرایش هر کدام از این بلانک‌ها در نمایشگر پنجره عملگر ارائه می‌گردد. نتیجه طراحی بلانک بهینه نیز در مدل سیمی به همراه بلانک‌های متعارف نمایش داده می‌شود.

قطعات مستطیل شکل در قالب کشش عمیق نصب شده روی دستگاه پرس هیدرولیکی از بلانک‌های به دست آمده از عملگر نرم‌افزار سالیدورک ساخته شده‌اند. نیروی این دستگاه ۸۰ تن می‌باشد که قسمت سنبه قالب روی میز ثابت پرس مهار شده است و ماتریس بر روی رام متحرک نصب می‌گردد. ورق‌گیر نیز روی قسمت نگهدارنده ورق‌گیر سوار می‌شود. در این قسمت نیروی هیدرولیک میزان نیروی ورق‌گیر را تنظیم می‌کند. بر اساس نتایج عملگر بلانک‌های بهینه از ورق آلومینیومی بریده شده و برروی ورق‌گیر به همراه روان‌کار قرار می‌گیرند. روان‌کار در این فرآیند روغن پایه نفتی و ورق نایلون می‌باشد. این عملیات برای سه عمق کشش متفاوت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر صورت گرفته است. بدین صورت که در ابتدا با توجه به ابعاد قطعه‌ی نهایی و عمق کشش، بلانک بهینه و بلانک‌های متعارف به دست آمده است. سپس مجدداً با کدهای منحصر به فرد این پژوهش، جریان ورق برای بلانک‌های متعارف ترسیم شده است. سپس کار تجربی صورت گرفته و نتایج تئوری با استفاده از کار تجربی مورد صحت‌سنجی قرار گرفته‌اند.

۳-۱- عمق کشش ۱۰ میلی‌متر

۳-۱-۱- نتیجه کدهای سالیدورک و استخراج بلانک‌های بهینه و متعارف

نتیجه طراحی بلانک‌های متعارف و بلانک بهینه برای قطعه مورد نظر با عمق کشش ۱۰ میلی‌متر در شکل ۸ ترسیم شده است.

۳-۱-۲- مقایسه‌ی نتایج تئوری و تجربی

برای عمق کشش ۱۰ میلی‌متر بلانک‌های متعارف لوزی (شکل ۹-الف)، مستطیل (شکل ۹-ج)، هشت ضلعی (شکل ۹-ه)، و دایره‌ای (شکل ۹-ز)، با استفاده از تئوری به دست آمده در این مقاله استخراج شده و خطوط جریان نیز در حین کشش عمیق رسم شده است، سپس نتایج تجربی کشش عمیق بلانک‌های متعارف لوزی (شکل ۹-ب)، مستطیل (شکل ۹-د)، هشت ضلعی (شکل ۹-و)، و دایره‌ای (شکل ۹-ح)، به دست آمده است. مقایسه بین آخرین کانتور در شکل ۹-الف و شکل۹-ب، نشان از صحت نتایج تئوری بر پایه تست‌های تجربی دارد. در شکل‌های ۹-ج و ۹-د نیز مشاهده می‌گردد که نتایج تئوری آخرین کانتور تا حد زیادی بر نتایج کار تجربی منطبق است. همین تطابق بین نتایج تئوری و تجربی در شکل‌های ۹-ه و ۹-و نیز قابل مشاهده است. در مورد شکل‌های ۹-ز و ۹-ح اختلافی در کانتور نهایی و نتایج تجربی به‌ویژه در گوشه‌های قطعه کار قابل مشاهده است که احتمالا با افزایش تعداد نقاط کانتور تئوری و یا افزایش نیروی ورق‌گیر در تست‌های تجربی این اختلاف کاهش خواهد یافت. به طور کلی نتایج تجربی به دست آمده بیانگر صحت نسبی نتایج تئوری بوده و بر مدل به‌دست آمده صحه‌گذاری می‌نماید. در نهایت شکل ۹-ط نیز نتایج تجربی بلانک بهینه را نمایش می‌دهد که می‌توان گفت نسبت به نتایج تجربی سایر بلانک‌های متعارف، نتایج مطلوب‌تری دارد.

۳-۲- عمق کشش ۲۰ میلی‌متر

۳-۲-۱- نتیجه کدهای سالیدورک و استخراج بلانک‌های بهینه و متعارف

در شکل ۱۰ نتیجه طراحی بلانک‌های متعارف و بلانک بهینه برای قطعه مورد نظر با عمق کشش ۳۰ میلی‌متر مشاهده می‌گردد.

۳-۲-۲- مقایسه نتایج تئوری و تجربی

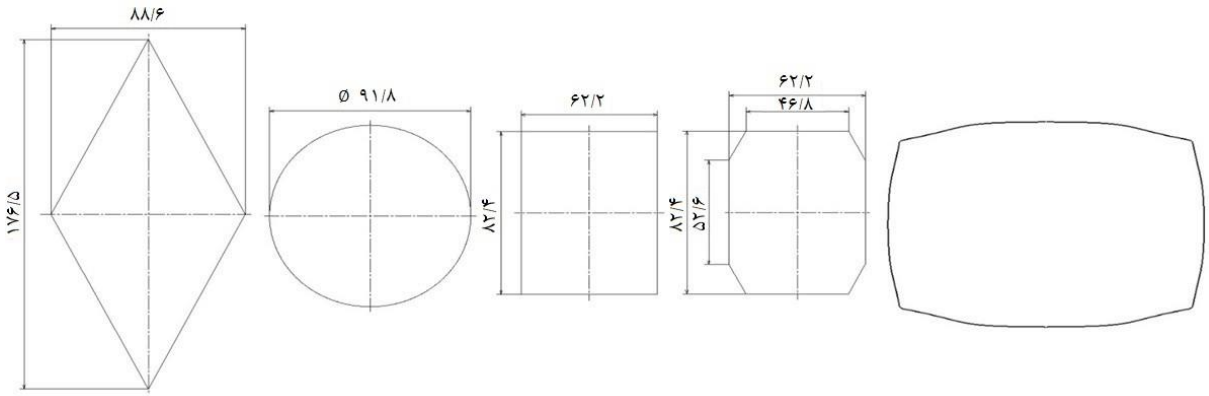
در شکل ۱۱ مقایسه نتایج تئوری و تجربی برای عمق کشش ۲۰ میلی‌متر صورت پذیرفته است. بلانک متعارف لوزی در شکل ۱۱-الف، بلانک متعارف مستطیلی در شکل ۱۱-ج، بلانک متعارف هشت ضلعی در شکل ۱۱-ه، و بلانک متعارف دایره‌ای نیز در شکل ۱۱-ز، نمایش داده شده است، که این نتایج حاصل از مدل توسعه داده شده در این مقاله می‌باشند. با استفاده از تئوری به دست آمده خطوط جریان نیز در حین کشش عمیق در این شکل‌ها، رسم شده است، سپس نتایج تجربی کشش عمیق بلانک‌های متعارف لوزی مطابق شکل ۱۱-ب، مستطیل مطابق شکل ۱۱-د، هشت ضلعی مطابق شکل ۱۱-و، و دایره‌ای مطابق شکل ۱۱-ح، به دست آمده است. مقایسه دو به دو بین شکل‌های سمت چپ و سمت راست (نتایج تجربی و تئوری) درشکل ۱۱ نیز همانند شکل ۹، بیانگر این امر است که نتایج تجربی به دست آمده مشابهت نسبی و قابل قبولی با نتایج تئوری داشته و بر درستی کار صحه می‌گذارد. همچنین شکل ۱۱-ط نیز نتیجه کشش عمیق بلانک بهینه را نمایش می‌دهد.

۳-۳- عمق کشش ۳۰ میلی‌متر

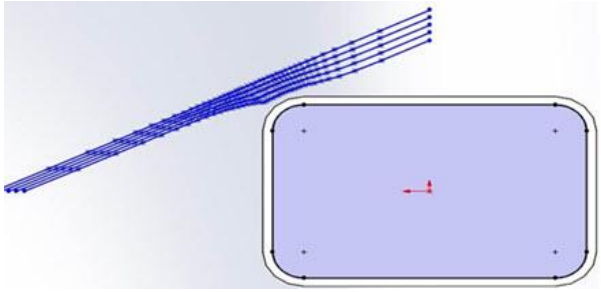
۳-۳-۱- نتیجه کدهای سالیدورک و استخراج بلانک‌های بهینه و متعارف

۳-۳-۲- مقایسه‌ی نتایج تئوری و تجربی

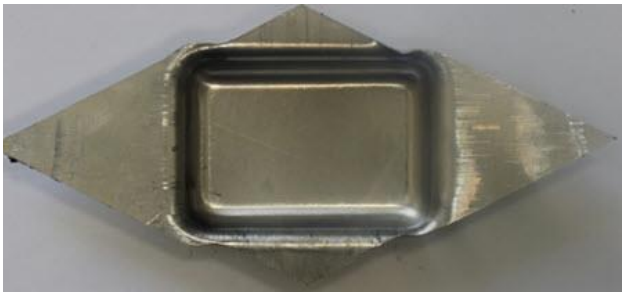
برای عمق کشش ۳۰ میلی‌متر با توجه به شکل ۱۲، بلانک متعارف مستطیل و خطوط جریان مربوطه، در شکل ۱۳-الف، بلانک متعارف شش ضلعی و خطوط جریان مربوطه در شکل ۱۳-ج، و



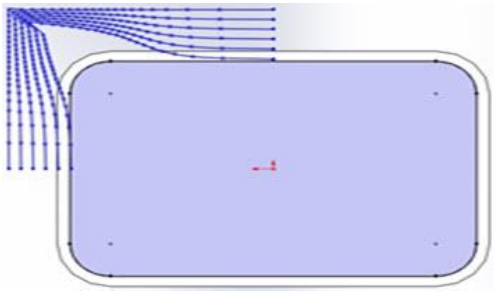
شکل ۸) بلانک بهینه و بلانک‌های متعارف برای عمق کشش ۱۰ میلی‌متر (ابعاد همگی برحسب میلی‌متر است).



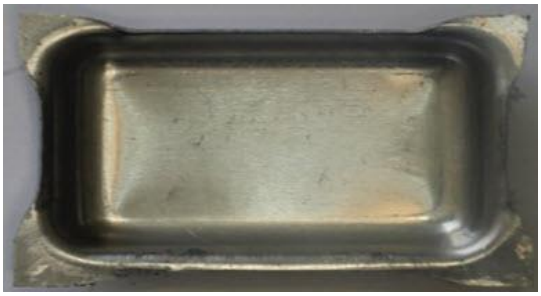
(الف)



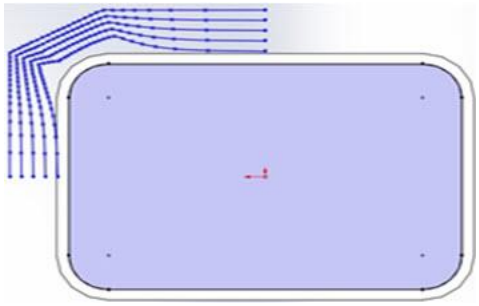
(ب)



(ج)

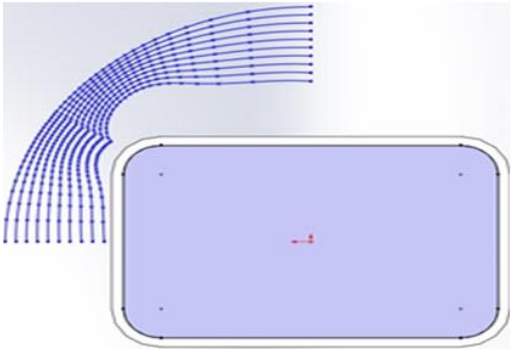


(د)



(ه)

(و)

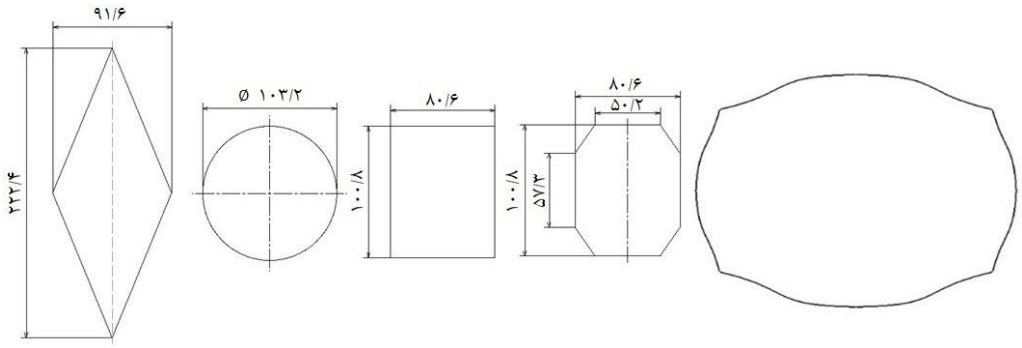


(ز)

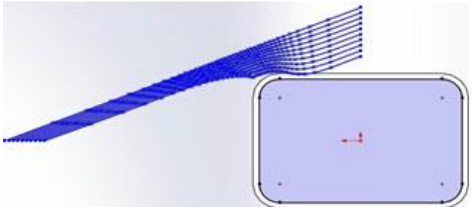
(ح)

(ط)

شکل ۹) نتایج تئوری و تجربی بلانک‌های متعارف و بهینه برای عمق کشش ۱۰ میلیمتر؛ (الف) نتایج تئوری بلانک متعارف لوزی، (ب) نتایج تجربی بلانک متعارف لوزی، (ج) نتایج تئوری بلانک متعارف مستطیلی، (د) نتایج تجربی بلانک متعارف مستطیلی، (ه) نتایج تئوری بلانک متعارف هشت ضلعی، (و) نتایج تجربی بلانک متعارف هشت ضلعی، (ز) نتایج تئوری بلانک متعارف دایره‌ای، (ح) نتایج تجربی بلانک متعارف دایره‌ای، (ط) نتایج تجربی بلانک بهینه

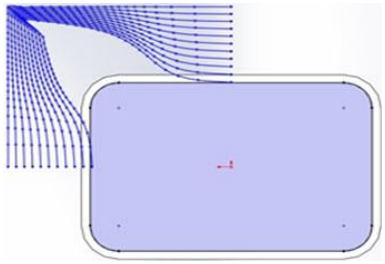


شکل ۱۰) بلانک بهینه و بلانک‌های متعارف برای عمق کشش ۲۰ میلی‌متر (ابعاد همگی برحسب میلی‌متر است).



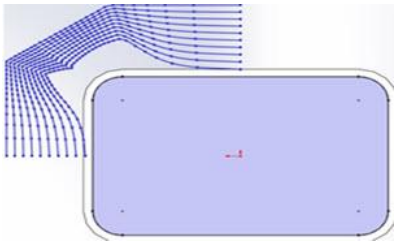
(الف)

(ب)



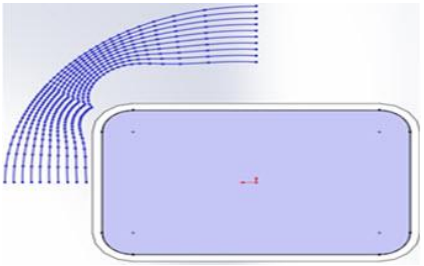
(ج)

(د)



(ه)

(و)

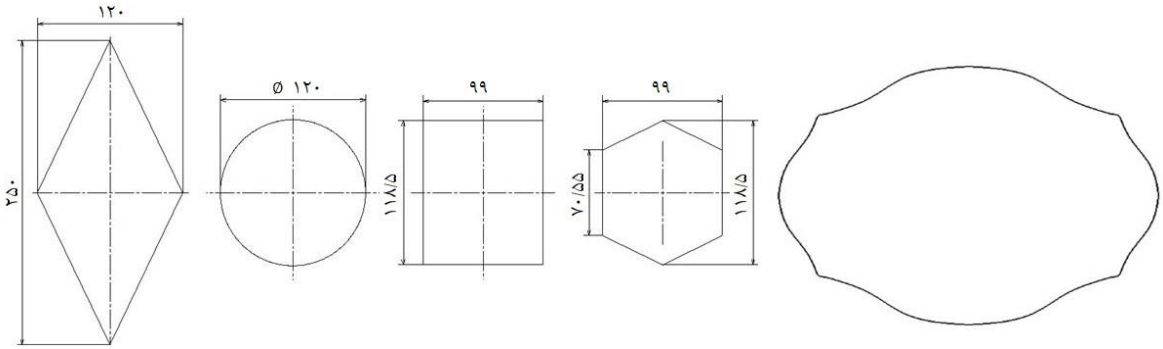


(ز)

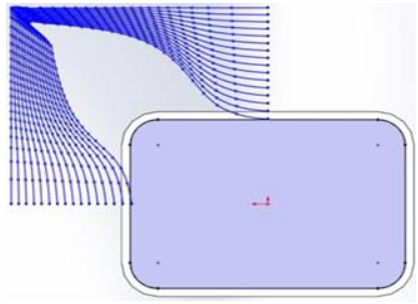
(ح)

(ط)

شکل ۱۱) نتایج تئوری و تجربی بلانک‌های متعارف و بهینه برای عمق کشش ۲۰ میلی‌متر؛ (الف) نتایج تئوری بلانک متعارف لوزی، (ب) نتایج تجربی بلانک متعارف لوزی، (ج) نتایج تئوری بلانک متعارف مستطیلی، (د) نتایج تجربی بلانک متعارف مستطیلی، (ه) نتایج تئوری بلانک متعارف هشت ضلعی، (و) نتایج تجربی بلانک متعارف هشت ضلعی، (ز) نتایج تئوری بلانک متعارف دایره‌ای، (ح) نتایج تجربی بلانک متعارف دایره‌ای، (ط) نتایج تجربی بلانک بهینه.

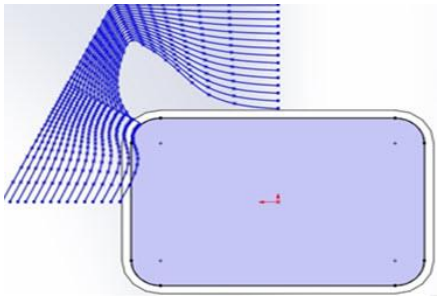


شکل ۱۲) بلانک بهینه و بلانک‌های متعارف برای عمق کشش ۳۰ میلی‌متر (ابعاد همگی برحسب میلی‌متر است).

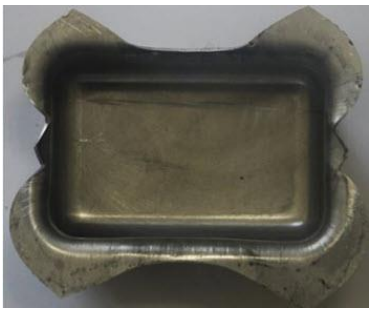


(الف)

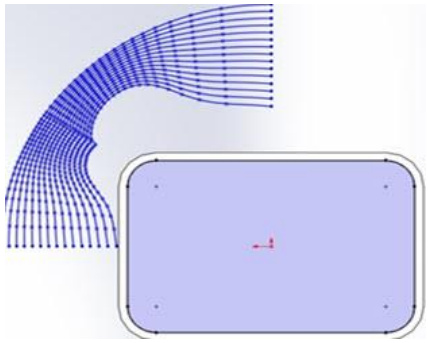
(ب)



(ج)



(د)



(ه)

(و)

(ز)

شکل ۱۳) نتایج تئوری و تجربی بلانک‌های متعارف و بهینه برای عمق کشش ۳۰ میلی‌متر؛ (الف) نتایج تئوری بلانک متعارف مستطیلی، (ب) نتایج تجربی بلانک متعارف مستطیلی، (ج) نتایج تئوری بلانک متعارف شش ضلعی، (د) نتایج تجربی بلانک متعارف شش ضلعی، (ه) نتایج تئوری بلانک متعارف دایره‌ای، (و) نتایج تجربی بلانک متعارف دایره‌ای،(ز) نتایج تجربی بلانک بهینه.

بلانک متعارف دایره‌ای و خطوط جریان مربوطه در شکل ۱۳-ه مشاهده می‌گردد. نتایج تجربی کشش عمیق بلانک‌های متعارف مستطیل مطابق شکل ۱۳-ب، شش ضلعی مطابق شکل ۱۳-د، و دایره‌ای مطابق شکل ۱۳-و به دست آمده است. همچنین شکل۱۳-ز نیز نتیجه کشش عمیق بلانک بهینه را نمایش می‌دهد. مقایسه بین نتایج تئوری بلانک متعارف مستطیلی (شکل ۱۳-الف) و نتایج تجربی این بلانک شکل ۱۳-ب) حاکی از نزدیکی نسبی نتایج تئوری و تجربی در رابطه با این نوع بلانک است. همچنین این موضوع را می‌توان در شکل‌های ۱۳-ج و۱۳-د و در مورد بلانک شش ضلعی نیز مشاهده نمود. البته در مورد بلانک دایره‌ای (شکل‌های ۱۳-ه و ۱۳-و) همان‌گونه که پیش از این توضیح داده شد، در گوشه‌های ورق تطابق کمتری مشاهده می‌گردد.

مقایسه شکل ۱۳ با شکل‌های ۹ و ۱۱ مشان می‌دهد که با افزایش عمق، شکل بلانک هشت ضلعی به دست آمده، ساده‌تر شده و به شش ضلعی میل می‌کند (پارامتر XX مطابق شکل ۵ برابر صفر می‌گردد)، تا جایی که در عمق کشش ۳۰ میلی‌متر، به جای بلانک هشت ضلعی، بلانک شش ضلعی خواهیم داشت.

۴-نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک کد و برنامه جامع کامپیوتری تهیه شده است تا با گرفتن برخی پارامترها از کاربر همچون سرعت پرس، عمق کشش، و ابعاد و شکل نهایی قطعات کشش عمیق با مقاطع مستطیلی به عنوان پارامترهای ورودی، شکل بلانک اولیه بهینه و بلانک‌های متعارف لوزی، مستطیلی، هشت ضلعی و دایره‌ای را محاسبه نماید. برای این امر ابتدا مختصات خطی- منحنی η-ξ معرفی شده و سپس روابط کانتور ورق با توجه به مسیرهای جریان در این مختصات تشریح گردیده است. همچنین برنامه و مدل توسعه یافته در این مقاله، به گونه‌ای می‌باشد که امکان استخراج خطوط جریان و رسم محیط ورق به صورت تئوری در حین عملیات کشش را دارا می‌باشد. برای بررسی صحت مدل‌سازی و کدهای به دست آمده، عملیات تجربی نیز در سه عمق کشش مختلف ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر صورت پذیرفته است. مقایسه نتایج تئوری و تجربی نیز حاکی از دقت بالای نتایج می‌باشد.

نتایج به دست آمده حاکی از این امر است که بلانک متعارف لوزی شکل، به هیچ وجه بلانک مناسبی نبوده و به‌ویژه در عمق‌های کشش بالا، دچار پارگی خواهد شد. همچنین این نوع بلانک با بالای ۳۰ درصد دورریز، بیشترین میزان دور ریز را در بین بلانک‌های متعارف بررسی شده دارا می‌باشد. بلانک متعارف مربعی شکل نیز در گوشه‌های قطعه دچار چین خوردگی خواهد شد و بالای ۱۰ درصد دورریز خواهد داشت. همچنین بلانک متعارف دایره‌ای به‌دلیل دورریز بالا (بیش از ۲۰درصد دورریز) توصیه نمی‌گردد. در حالی‌که بلانک هشت ضلعی (بعد از بلانک بهینه) مناسب‌ترین بلانک اولیه متعارف برای قطعات کشش عمیق با مقاطع مستطیلی، می‌باشد و دورریز این نوع بلانک نیز زیر ۶ درصد برآورد شده است. شایان ذکر است که با توجه به ابعاد قطعه نهایی، با افزایش عمق کشش، بلانک متعارف هشت ضلعی به شکل شش ضلعی میل می‌کند.

به طور کلی با توجه به نتایج به دست آمده پیشنهاد نهایی این است که برای انتخاب بلانک با حداقل میزان دورریز و حداقل عیوب در صورت امکان بلانک بهینه به دست آمده در این پژوهش مورد استفاده قرارگیرد و یا در مواردی که امکان برش این نوع بلانک موجود نیست، پیشنهاد بعدی استفاده از بلانک‌های هشت ضلعی (شش ضلعی) می‌باشد.

پیشنهادهایی نیز در ادامه این پژوهش برای کارهای آتی وجود دارد، از جمله بررسی فرآیند با ورق‌گیر با نیروی ثابت، طراحی بلانک اولیه برای قطعات با فلنج و ایجاد برنامه‌ی کامپیوتری برای بهینه‌سازی سایر پارامترها نظیر سرعت پرس، عمق کشش و غیره. همچنین می‌توان از نرم‌افزارهای تحلیلی علاوه بر کار تجربی برای مقایسه نتایج استفاده نمود.

تشکر و قدردانی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

تاییدیه اخلاقی: محتویات علمی و ادبی مقاله نتیجه‌ی فعالیت پژوهشی نویسندگان بوده است.

تعارض منافع: هیچ گونه تعارض منافعی وجود ندارد.

سهم نویسندگان: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

منابع مالی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

منابع

1-Toh CH, Kobayashi S. Deformation analysis and blank design in square cup drawing. International Journal of Machine Tool Design and Research. 1985 Jan 1;25(1):15-32.

2-Kim N, Kobayashi S. Blank design in rectangular cup drawing by an approximate method. International Journal of Machine Tool Design and Research. 1986 Jan 1;26(2):125-35.

3-Ahmetoglu MA, Kinzel G, Altan T. Forming of aluminum alloys—application of computer simulations and blank holding force control. Journal of materials processing technology. 1997 Nov 1;71(1):147-51.

4-Park CS, Ku TW, Kang BS, Hwang SM. Process design and blank modification in the multistage rectangular deep drawing of an extreme aspect ratio. Journal of Materials Processing Technology. 2004 Nov 10;153:778-84.

5- Lee JH, Chun BS. Investigation on the variation of deep drawability of STS304 using FEM simulations. Journal of materials processing technology. 2005 Feb 10;159(3):389-96.

6-Kim, H.K. and Hong, S.K., 2007. FEM-based optimum design of multi-stage deep drawing process of

molybdenum sheet. Journal of Materials Processing Technology, 184(1-3), pp.354-362.
7- Önder E, Tekkaya AE. Numerical simulation of various cross sectional workpieces using conventional deep drawing and hydroforming technologies. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2008 Apr 1;48(5):532-42.
8- Daxin E, Mizuno T, Li Z. Stress analysis of rectangular cup drawing. Journal of materials processing technology. 2008 Aug 26;205(1-3):469-76.
9-Hammami W, Padmanabhan R, Oliveira MC, BelHadjSalah H, Alves JL, Menezes LF. A deformation based blank design method for formed parts. International Journal of Mechanics and Materials in Design. 2009 Dec;5(4):303-14.
10-Hu, Z., 2011. Realisation and application of size dependent FEM-simulation for deep drawing of rectangular work pieces. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 4(1), pp.90-95.
11- Kitayama S, Saikyo M, Kawamoto K, Yamamichi K. Multi-objective optimization of blank shape for deep drawing with variable blank holder force via sequential approximate optimization. Structural and Multidisciplinary Optimization. 2015 Nov 1;52(5):1001-12.
12- Candra S, Batan I, Berata W, Pramono AS. Analisis Dan Eksperimen Blank Holder Gap Minimum Pada Proses Rectangular Cup Deep Drawing. Teknoin. 2016;22(5):372-82.
13-Koowattanasuchat P, Mahayotsanun N, Ngernbamrung S, Mahabunphachai S. Formability Effects of Variable Blank Holder Force on Deep Drawing of Stainless Steel. InMATEC Web of Conferences 2016 (Vol. 80, p. 15005). EDP Sciences.
14-Fazli A. Investigation of The Effects of Process Parameters on The Welding Line Movement in Deep Drawing of Tailor Welded Blanks. ADMT Journal. 2016 Jun 1;9(2):45-52.
15-Aminzahed I, Mashhadi MM, Sereshk MR. Investigation of holder pressure and size effects in micro deep drawing of rectangular work pieces driven by piezoelectric actuator. Materials Science and Engineering: C. 2017 Feb 1;71:685-9.
16-Kitayama, S., Koyama, H., Kawamoto, K., Miyasaka, T., Yamamichi, K. and Noda, T., 2017. Optimization of blank shape and segmented variable blank holder force trajectories in deep drawing using sequential approximate optimization. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 91(5-8), pp.1809-1821.
17- Ben Othmen K, Sai K, Manach PY, Elleuch K. Reverse deep drawing process: Material anisotropy and work-hardening effects. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications. 2019 Apr;233(4):699-713.
18- Ghennai W, Boussaid O, Bendjama H, Haddag B, Nouari M. Experimental and numerical study of DC04 sheet metal behaviour—plastic anisotropy identification and application to deep drawing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019 Jan 16;100(1-4):361-71.
19- Ghennai W, Boussaid O, Bendjama H, Haddag B, Nouari M. Experimental and numerical study of DC04 sheet metal behaviour—plastic anisotropy identification and application to deep drawing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019 Jan 16;100(1-4):361-71.
20- Liu F, Sowerby R. The determination of optimum blank shapes when deep drawing prismatic cups. Journal of materials shaping technology. 1991 Sep 1;9(3):153-9.
21-Park SB, Choi Y, Kim BM, Choi JC. A study of a computer-aided process design system for axisymmetric deep-drawing products. Journal of Materials Processing Technology. 1998 Mar 1;75(1-3):17-26.
22-Myllykoski P. Using forming simulations to improve mechanical simulation accuracy. Journal of materials processing technology. 2006 Jul 3;177(1-3):422-5.
23- Ku TW, Kim Y, Kang BS. Design and modification of tool to manufacture rectangular cup of Ni-MH battery for hybrid cars. Journal of materials processing technology. 2007 Jun 12;187:197-201.
24-Nakayama Y, Naka T, Uemori T, Shimizu I. Temperature and Processability of Magnesium Alloy AZ31 on Rectangular Cup Deep Drawing. InKey Engineering Materials 2013 (Vol. 535, pp. 326-329). Trans Tech Publications Ltd.
25-Jabbari A, Salimi S. Tailor welded blank shape optimization in rectangular cup deep drawing. Journal of Mechatronics. 2014 Sep 1;2(3):201-6.
26- Golshani MH, Jabbari A. Blank shape optimization on deep drawing of a twin elliptical cup using the reduced basis technique method. Advances in Science and Technology. Research Journal. 2015;9(27).
27- Sravani V, Alekya M. SIMULATION AND OPTIMIZATION OF DEEP DRAWING PROCESS PARAMETERS FOR CYLINDRICAL CUP BY USING FEM AND TAGUCHI.
28- Soltani H, Amirat A, Boussaid O. Contribution in analyzing dimensional deviations in ellipsoidal steel heads during deep drawing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019 Jun;102(5):2451-63.