

Numerical optimization of the blank shape in order to minimize the earring defect in the deep drawing process of SAE 1015 stainless steel square sections

Mahdi Chavoshi ^a, Siamak Mazdak ^{b*}, Abbas Amoochi ^c, Mahdi Bayat Kazazi ^d,
Mohamad Mehdi Najafizadeh ^e

^a Department of mechanical engineering, Arak branch, Islamic Azad university, Arak, Iran

^b Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Tafresh University, Tafresh, 79611-39518, Iran

^c Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, 38156-88349, Iran

^d Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

^e Department of mechanical engineering, Arak branch, Islamic Azad university, Arak, Iran

Original Article

Use your device to scan
and read the article online



Citation: Chavoshi M, Mazdak S, Amoochi A, Bayat Kazazi M, Najafizadeh M M. Numerical optimization of the blank shape in order to minimize the earring defect in the deep drawing process of SAE 1015 stainless steel square sections. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2023;3(1):67-82.

 <https://10.52547/masm.3.1.67>

KEYWORDS

Deep drawing,
Optimization,
Earring defects,
Numerical simulation.

ABSTRACT

The deep drawing process is one of the most widely used metal forming methods, which is widely used in the mass production of parts. The earring defect has always been one of the defects in deep drawing processes, which increases material waste and decreases the production speed of parts. This phenomenon is caused by plane anisotropy resulting from cold rolling operation. One of the methods to reduce the earring defect is to optimize the initial plate. In this article, with the help of optimization of the primary plate, the earring defect in the deep drawing process of square sections made of SAE 1015 steel has been significantly reduced. For this purpose, the initial plate made of SAE 1015 steel and the deep drawing process are simulated in Abaqus, and then by using the specified objective function, the primary plate is radially optimized in certain directions. Finally, by comparing the results of simulations and evaluating parameters such as; changes in thickness, distribution of stress, and changes in strain, it was found that in case of using the provided optimal plate number 2, not only the earring defect is significantly reduced, but also the plastic stress and strain in the plate is placed in an optimal state.

Extended Abstract

1. Introduction

Deep drawing is one of the sheet metal forming processes in which the sheet is drawn radially into the forming die. In other words, this is the process of changing the shape of flat blanks into hollow parts and volumes, which are used to make parts with different shapes [1]. The deep drawing process is one of the compressive and tensile deformation processes. Equipment and parameters affecting the deep drawing process include; Mandrel radius, mold radius, the distance between mandrel and mold, mandrel speed, lubrication, and type of metal flow inhibition [2]. The earring defect of the upper edges of the deep drawn parts is not completely smooth and waviness can be seen in it. This defect is caused by sheet anisotropy. Often, the mechanical properties of sheets are not the same in all directions, and as a result, sheets show anisotropic behavior in most forming processes. The phenomenon of earring is an undesirable phenomenon that attempts to eliminate or reduce is observed in most of the shaping researches. at the same time, and also the authors will be responsible for the accuracy of the content mentioned in the articles.

Kishor and Kumar [4] by changing the anisotropy values in the three directions of 0, 45, and 90 degrees compared to the sheet rolling direction. They found when the extra material in the direction of 0 and 90 degrees is removed from the initial blank, the earring defect was dramatically reduced in the optimal blank. Park et al. [5] proposed a new method to design the

* Corresponding author. Tel.: +98-9183636009

E-mail address: s.mazdak@tafreshu.ac.ir

DOI: <https://10.52547/masm.3.1.67>

Received: April 28, 2023; Received in revised form: June 8, 2023; Accepted: June 9, 2023

© Author



optimal blank using ideal shaping theory and path repetition method. Zaky et al. [6] obtained an optimal shape to blank cylindrical parts by using theoretical relationships. Shim et al. [3] proposed a method to design the initial blank of the deep drawing process for parts with a non-circular cross-section. By examining the results obtained from this method and the results obtained from the experimental test, it was found that this method can optimize the initial blank.

Sharwari et al. [7] researched on minimizing the earring defect in polyhedral parts and reported that the initial blank with a circular cross-section creates the least earring defect in forming 8-sided cups. Chen and Sowerby [8] predicted the behavior of earring defects of the cylindrical cups' deep drawing process by studying the slip field pattern that does not deny Hencky equations. Using the finite element method, Yang and Shyu [9] found that if the optimal blank is used, the height of the square cup becomes more uniform and the earring defect is significantly reduced. Pawan et al. [10] studied the finite element simulation of the deep drawing process to minimize the earring defect in cylindrical shaped cups and it was found that the height of the earring was reduced if modified blanks were used.

2. Numerical Simulation

In this article, using Abaqus software, the process of deep drawing of a cup with a square cross-sectional surface is simulated in three dimensions. In simulating the deep drawing process, defining the relationship between the mold components is one of the most important parameters of the process. The contact used in this simulation is surface to surface type. The crucial point is that the process can be solved by a static-quasi-static solution. Therefore, the dynamic terms should be removed in the explicit solution method. If the deformation time is considered large enough, then dynamic effects can be neglected. The process components such as; blank, blank holder, die, and punch were modeled in three dimensions and in dimensions according to Figure 1. It should be noted that due to symmetry in process geometry, boundary conditions have been applied for only a quarter of the real model.

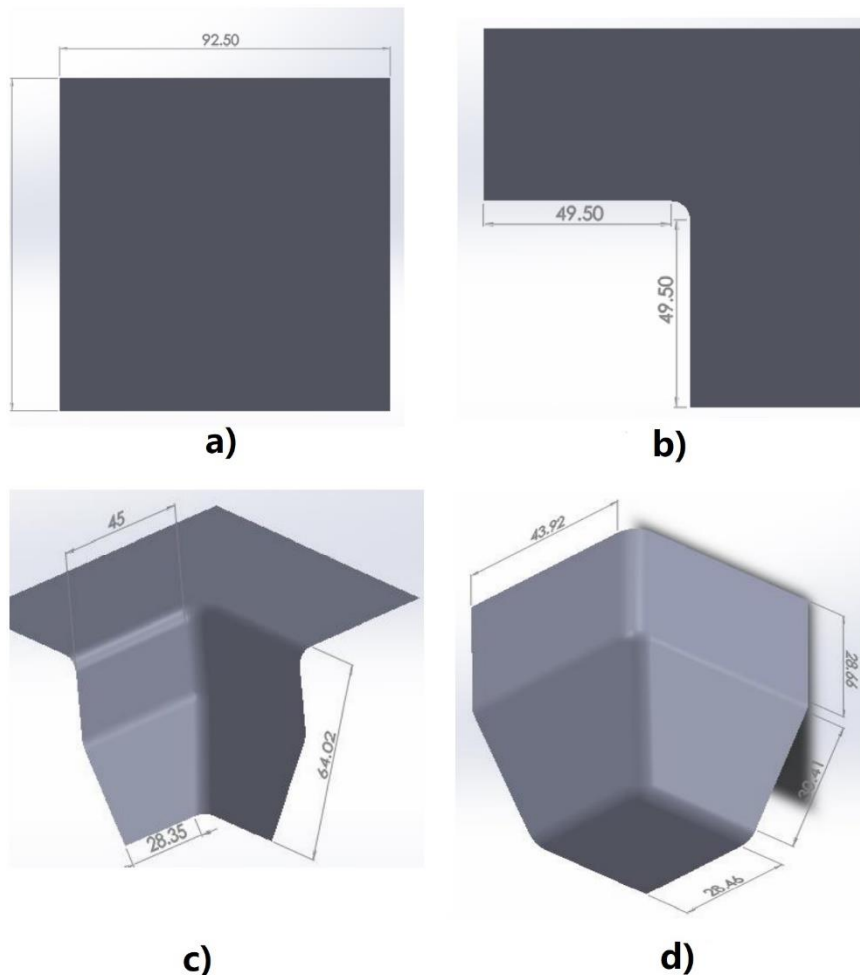


Figure 1. Geometry and dimensions of the mold parts; a) Blank b) Blank holder. c) Die. d) Punch.

3. Optimization

In this article, in order to design an optimal blank, a specific objective function has been used. According to this method, the initial blank is radially divided into equal parts, and then the intersection of the dividing lines with the objective function and the result obtained from the deep drawing of the initial blank is determined. By measuring the difference between these points and applying it to the path of the objective function, the optimal blank number 1 is designed.

In the next step, again, the result obtained from the deep drawing of the optimal blank number 1 is divided into equal parts and compared with the objective function. By measuring the difference between these points and applying it to the path of the

objective function, the optimal blank number 2 is designed. Figure 2 shows the shape of the optimal blank number 2. Finally, by performing a numerical simulation on the optimal blank number 2, a square-shaped cup according to Figure 2b was obtained, which has fewer earring defects than the optimal blank number 1 and is closer to the shape of the objective function.

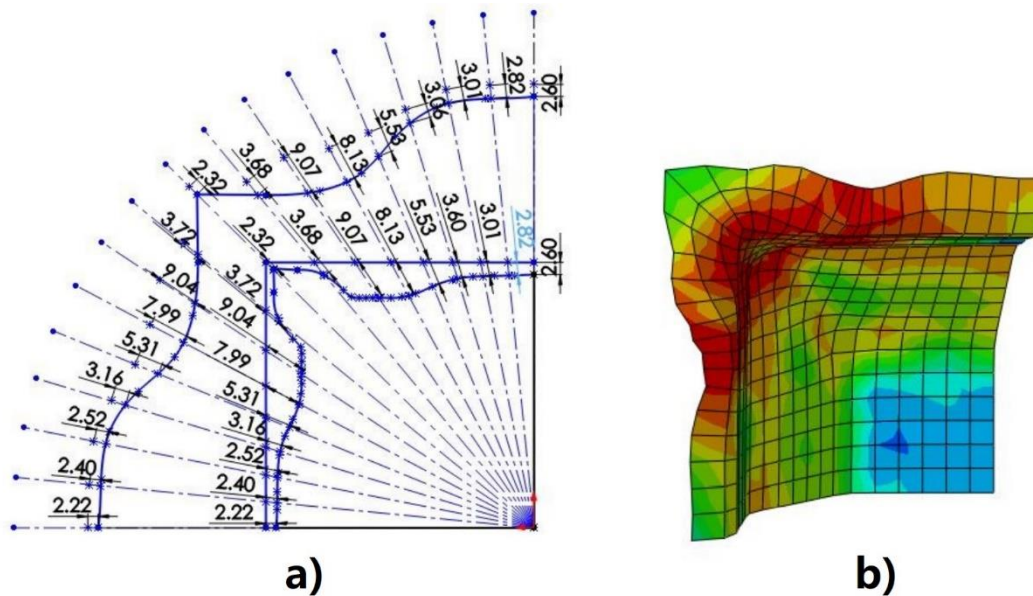


Figure 2. Optimal blank design number 2; a) the difference between the objective function and the optimal blank number 1. b) The cup resulting from the simulation of the optimal blank number 2.

4. Conclusion

According to many applications of the deep drawing method as a forming process, in this article, with the help of Abaqus software, the numerical simulation of the deep drawing process of SAE 1015 steel square sections is done, and in the next step, an objective function of the initial plate shape is used in order to reduce the earring defect is optimized. This is because earring defect occurs due to planar anisotropy in the primary plate. By using this function, the initial plate was radially optimized in certain directions, then by re-simulating the deep drawing process, it is found that if the optimal plate is used, the earring defect is reduced. In the following, parameters of thickness changes, stress distribution and strain change on two different paths of optimal plates are investigated. By Studying the 3 optimally designed plates, it is observed that optimal plate number 2, in addition to reducing the earring defect compared to optimal plate 1, reduces the plastic strain and stress during the process compared to optimal plate 3, and as a result, it is considered the ideal optimal plate.



بهینه‌سازی عددی شکل لوح اولیه به منظور کمینه کردن عیب گوشواره‌ای در فرایند کشش عمیق مقاطع مربعی فولاد ضدزنگ SAE 1015

مهدی چاووشی^{الف}، سیامک مزدک^{ب*}، عباس عموچی^ج، مهدی بیات کزازی^د، محمد مهدی نجفی زاده^ه

^{الف} کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک، ایران، Chavoshi.mahdi67@yahoo.com

^ب استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران، s.mazdak@tafreshu.ac.ir

^ج کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، abbas.amoochi97@gmail.com

^د کارشناسی ارشد، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران،

mahdi-bayat@email.kntu.ac.ir

^ه استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک، ایران، m-najafizadeh@iau-arak.ac.ir

چکیده	واژگان کلیدی
فرایند کشش عمیق یکی از روش‌های مهم شکل‌دهی ورقی می‌باشد که به صورت گسترده در تولید انبوه قطعات مورد استفاده قرار می‌گیرد. پدیده گوشواره‌ای شدن همواره از عیوب مطرح در فرایندهای کشش عمیق بوده که موجب افزایش دورریز مواد و کاهش سرعت تولید قطعات می‌گردد. این پدیده در اثر ناهمسانگردی صفحه‌ای حاصل از عملیات نورد سرد ایجاد می‌شود. یکی از روش‌های کاهش عیب گوشواره‌ای، بهینه‌سازی لوح اولیه است. در این مقاله به کمک بهینه‌سازی لوح اولیه، عیب گوشواره‌ای در فرایند کشش عمیق مقاطع مربعی از جنس فولاد SAE 1015 به شکل چشم‌گیری کاهش یافته است. برای این منظور، لوح اولیه از جنس فولاد SAE 1015 و فرایند کشش عمیق در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شد و در ادامه با به کارگیری تابع هدف مشخص، لوح اولیه به صورت شعاعی در مسیرهای مشخصی بهینه شد. در نهایت با مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌ها و بررسی پارامترهایی همچون؛ تغییرات ضخامت، توزیع تنش و تغییرات کرنش، مشخص شد که در صورت استفاده از لوح بهینه شماره ۲ ارائه شده نه تنها عیب گوشواره‌ای به طرز چشم‌گیری کاهش می‌یابد، بلکه تنش و کرنش پلاستیکی در لوح در حالت بهینه قرار می‌گیرد.	کشش عمیق، بهینه‌سازی، عیب گوشواره‌ای، شبیه‌سازی عددی.
	تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۸
	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۳/۱۸
	تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۹

۱- مقدمه

کشش عمیق^۱ یک فرآیند شکل‌دهی ورق‌های فلزی است که در آن ورق توسط سنبه به درون حفره قالب کشیده می‌شود. در این فرایند قطعات توخالی از تغییر شکل لوح^۲ تخت تولید می‌شوند [۱]. فرایند کشش عمیق جزء فرایندهای تغییر شکل فشاری و کششی محسوب می‌شود. تجهیزات و پارامترهای مؤثر بر فرایند کشش عمیق شامل؛ شعاع سنبه، شعاع قالب، فاصله سنبه و قالب، سرعت سنبه، روان کاری و نحوه جریان فلز است [۲]. از عیوب به وجود آمده در فرایند کشش عمیق می‌توان به

^۱ Deep drawing

^۲ Blank

چروکیدگی^۲، پارگی^۴، خراشیدگی^۵ و گوشواره‌ای شدن^۶ اشاره کرد [۱]. در عیب گوشواره‌ای شدن لبه‌های بالایی قطعه کاملاً صاف نبوده و موجی در آن دیده می‌شود. این نقص در اثر ناهمسانگردی^۷ ورق ایجاد می‌شود. ورق استفاده‌شده در این فرایند عمدتاً به روش نورد سرد تولید می‌شود تولید ورق به این روش سبب می‌شود که خصوصیات ورق در راستاهای مختلف یکسان نباشد و در ورق خاصیت ناهمسانگرد ایجاد می‌شود. پدیده گوشواره‌ای شدن یک پدیده نامطلوب بوده که تلاش برای حذف یا کاهش آن سبب صرفه اقتصادی زیادی می‌شود. در این راستا سمت‌گیری عمده پژوهش‌های مرتبط، به سمت بهینه‌سازی شکل اولیه لوح به‌منظور کاهش دورریز مواد و افزایش سرعت تولید قطعه نهایی می‌باشد. روش‌های تعیین لوح بهینه شامل؛ روش میدان لغزش^۸، روش نگاهت هندسی^۹، روش آزمون‌وخطا به کمک تحلیل اجزاء محدود^{۱۰}، روش معکوس^{۱۱}، روش شکل‌دهی ایده‌آل^{۱۲}، روش ردیابی رو به عقب^{۱۳}، روش تکرار مسیر^{۱۴}، روش تحلیل حساسیت^{۱۵} و غیره است [۲]. کیشور و کومار [۴] به بهینه‌سازی شکل اولیه لوح در فرایند کشش عمیق قطعات استوانه‌ای با کف تخت پرداختند. آن‌ها با شبیه‌سازی فرایند کشش عمیق در نرم‌افزار ال اس داینما^{۱۶}، جریان مواد در هنگام فرایند کشش عمیق را بررسی کردند. در ادامه آن‌ها با تغییر اختلاف نسبت‌های کشش یا به‌عبارت‌دیگر با تغییر مقادیر ناهمسانگردی در سه راستای ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به راستای نورد ورق، مواد اضافه در راستای ۰ و ۹۰ درجه را از لوح اولیه حذف کرده و در نتیجه به لوح بهینه‌ای که در آن عیب گوشواره‌ای به طرز چشم‌گیری کاهش یافته بود، دست یافتند. پارک و همکاران [۵] روشی جدید به منظور طراحی لوح بهینه با استفاده از تئوری شکل‌دهی ایده‌آل و روش تکرار مسیر پیشنهاد کردند. در این روش، طراحی لوح بهینه از دو مرحله تشکیل شده است؛ در مرحله اول، لوح اولیه بر اساس تئوری شکل‌دهی ایده‌آل طراحی شده و در مرحله دوم، لوح اولیه با استفاده از روش تکرار مسیر و با به‌کارگیری روش اجزا محدود، بهینه‌سازی شده است. در این روش با مقایسه لوح اولیه و شکل هدف، مقادیر مشخصی از مرز لوح اولیه کم و زیاد می‌شود. اگر خطای شکلی همچنان باقی‌مانده باشد، این روش مجدداً تکرار شده تا زمانی که خطا از محدوده خطای مشخص شده کوچک‌تر شود. در ادامه پارک و همکاران به طراحی لوح اولیه قطعات با مقاطع مربعی شکل پرداخته و توانستند با دو بار تکرار به شکل بهینه لوح دست یابند. زاکی و همکاران [۶] با استفاده از روابط تئوری به شکل بهینه‌ای برای لوح قطعات استوانه‌ای شکل دست یافتند. آن‌ها با مطالعه خواص ناهمسانگردی در ورق‌های فلزی توانستند رفتار گوشواره‌ای را در تغییر شکل قطعات پیش‌بینی نمایند و به شکل بهینه لوح دست یابند. با به‌کارگیری لوح بهینه مشاهده شد که گوشواره‌های ناشی از کشش عمیق قطعات استوانه‌ای شکل در فولادهای کم‌کربن و آلومینیومی کاهش می‌یابد. همچنین آن‌ها دریافتند که در صورت استفاده از لوح بهینه حد نسبت‌های کشش در فلزات دارای نسبت ناهمسانگردی بالا، بهبود می‌یابد. شیم و همکاران [۳] روشی برای طراحی لوح اولیه فرایند کشش عمیق قطعات با سطح مقطع غیر دایروی پیشنهاد کردند. در این روش با استفاده از یک کد تحلیل دینامیک صریح^{۱۷} با نام PAM-STAMP، حساسیت شکل به دست آمده است. برای به دست آوردن حساسیت شکل به‌صورت عددی، چند فرایند تغییر شکل تحلیل شده است. در ادامه به‌منظور اعتبارسنجی این روش، لوح‌های کشش عمیق یک فنجان مربع شکل، یک فنجان شیدری شکل^{۱۸} و یک فنجان L شکل به‌عنوان نمونه انتخاب شده است. با بررسی نتایج به‌دست‌آمده از این روش و نتایج حاصل از آزمون تجربی مشخص شد که این روش به خوبی می‌تواند لوح اولیه را بهینه کند. شرور و همکاران [۷] بر روی کمینه کردن عیب گوشواره‌ای در قطعات چندوجهی تحقیق کرده و ناهمسانگردی را به‌عنوان یک مشکل اساسی در شکل‌دهی ورق بیان

³ Wrinkling

⁴ Tearing

⁵ Scratches

⁶ Earing

⁷ Anisotropy

⁸ Slip line field

⁹ Geometric mapping

¹⁰ Trial-and-error method based on the FE

¹¹ Inverse

¹² Ideal forming

¹³ Backward tracing

¹⁴ Path iteration

¹⁵ Sensitivity analysis

¹⁶ LS-DYNA

¹⁷ Dynamic explicit

¹⁸ Clover-shaped

کردند. آن‌ها با شبیه‌سازی کشش عمیق یک فنجان ۸ وجهی، جریان مواد در مراحل مختلف شبیه‌سازی را بررسی کرده و بر اساس آن لوح بهینه را طراحی کردند. در این پژوهش چهار شکل متفاوت لوح اولیه در نرم‌افزار پم‌استمپ^{۱۹} شبیه‌سازی و بررسی شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی این چهار شکل بیانگر آن است که لوح اولیه با سطح مقطع دایروی کمترین گوشواره را در شکل‌دهی فنجان‌های ۸ وجهی ایجاد می‌کند. چن و سواربی [۸] به پیش‌بینی اشکال لوح بهینه با استفاده از روش میدان لغزش و خصوصیات کرنش صفحه‌ای پرداختند. آن‌ها با مطالعه الگوی میدان لغزشی که معادلات هنکی^{۲۰} را نقض نمی‌کند، توانستند رفتار گوشواره‌ای حاصل از فرایند کشش عمیق فنجان‌های استوانه‌ای را پیش‌بینی کنند. قابل ذکر است که این روش عددی، رشد گوشواره‌ها را در کل فرایند کشش عمیق محاسبه می‌کند در نتیجه، از این روش می‌توان برای تعیین لوح بهینه استفاده کرد. یانگ و شی یو [۹] با به‌کارگیری روش اجزاء محدود و شبیه‌سازی فرایند کشش عمیق فنجان‌های مربعی شکل توانستند، تأثیرهای شکل لوح اولیه را بر ارتفاع فنجان، نیروی شکل‌دهی، حداکثر تنش مؤثر و حداکثر کرنش مؤثر مورد بررسی قرار دهند. در ادامه به منظور اعتبارسنجی این روش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزاء محدود با نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی مقایسه شد. با بررسی نتایج به‌دست‌آمده از این روش و نتایج حاصل از آزمون تجربی مشخص شد که در صورت استفاده از لوح بهینه، ارتفاع فنجان مربعی شکل یکنواخت‌تر شده و عیب گوشواره‌ای به طرز چشم‌گیری کاهش یافته است علاوه بر آن، در صورت استفاده از لوح بهینه، حداکثر نیروی شکل‌دهی، حداکثر تنش مؤثر و حداکثر کرنش مؤثر نیز کاهش یافته است. پاون و همکاران [۱۰] به شبیه‌سازی اجزاء محدود فرایند کشش عمیق برای به حداقل رساندن عیب گوشواره‌ای در فنجان‌های استوانه‌ای شکل پرداختند. آن‌ها با شبیه‌سازی فرایند کشش عمیق در نرم‌افزار آباکوس^{۲۱}، توانستند ارتفاع گوشواره را در ورق‌های فولادی کشش فوق‌العاده عمیق^{۲۲} اندازه‌گیری کنند. در ادامه به منظور بهینه‌سازی و کاهش عیب گوشواره‌ای، لوح دایروی شکل اولیه به صورت شعاعی به ۲۴ قسمت مساوی تقسیم‌شده و سپس با استفاده از ضریب ناهمسانگردی^{۲۳}، لوح اولیه اصلاح شد. با شبیه‌سازی و اندازه‌گیری ارتفاع گوشواره‌های حاصل از لوح‌های اصلاح‌شده، مشخص شد که در صورت استفاده از لوح‌های اصلاح‌شده ارتفاع گوشواره‌ها کاهش یافته است. زائد محمود و همکاران [۱۱] به بهینه‌سازی شکل لوح مربعی شکل اولیه در فرایند کشش عمیق میکرو انعطاف‌پذیر^{۲۴} پرداختند. آن‌ها روشی برای مدل‌سازی اجزاء محدود فرایند کشش عمیق میکرو انعطاف‌پذیر فولاد ضدزنگ ۳۰۴ در نرم‌افزار آباکوس ارائه کردند. در مطالعه صورت گرفته تأثیر ضخامت اولیه لوح مربعی شکل بر کیفیت نهایی محصول از نظر توزیع ضخامت دیواره و مقدار نازک شدن بررسی شده است. در ادامه با ارائه یک روش بهینه‌سازی، شکل اولیه لوح در ۳ مرحله بهینه شده و مشخص شد که استفاده از روش بهینه‌سازی شکل لوح اولیه در تولید قطعات میکرو مؤثر است. بوچالا و همکاران [۱۲] تأثیر شعاع لبه پانچ و شعاع لبه قالب را بر ایجاد عیب گوشواره‌ای در فرایند کشش عمیق استوانه‌ای بررسی کردند. در این پژوهش بوچالا و همکاران یک روش شبیه‌سازی سه‌بعدی برای پیش‌بینی ارتفاع عیب گوشواره‌ای در فرایند کشش عمیق استوانه‌ای آلایزهای آلومینیوم AA1050 و AA1100 با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس ارائه کردند. با بررسی و مقایسه میان نتایج تجربی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزاء محدود، مشخص شد که شعاع لبه سنبه و شعاع لبه قالب در تشکیل عیب گوشواره‌ای شدن و ارتفاع آن مؤثر است. مین‌تران و همکاران [۱۳] به کاهش عیب گوشواره‌ای در اثر تغییر نیروی نگه‌دارنده لوح در فرایند کشش عمیق پرداختند. آن‌ها با به‌کارگیری و استفاده از شبکه عصبی، تأثیر نیروی نگه‌دارنده لوح بر شکل‌گیری عیب گوشواره‌ای را در آلایزهای آلومینیومی بررسی کردند. در ادامه به منظور کاهش عیب گوشواره‌ای شدن، پروفیل ارتفاع گوشواره و تغییرات ضخامت در اثر نیروهای مختلف نگه‌دارنده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و نیروی نگه‌دارنده بهینه مشخص شده است. کومار و همکاران [۱۴] به مطالعه تجربی و عددی فرایند کشش عمیق به منظور کاهش عیب گوشواره‌ای پرداختند. به گفته آن‌ها، علی‌رغم اینکه پدیده‌ی گوشواره‌ای شدن به پارامترهای مختلفی همچون، ناهمسانگردی مواد، اصطکاک بین سنبه و قالب و نیروی نگه‌دارنده لوح بستگی دارد، شکل لوح اولیه نیز در تشکیل این عیب مؤثر بوده و انتخاب بهینه آن می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر ارتفاع عیب گوشواره‌ای داشته باشد. در ادامه کومار و همکاران با شبیه‌سازی فرایند کشش عمیق در نرم‌افزار DEFORM 3D و مقایسه نتایج

¹⁹ PAM-Stamp 2G

²⁰ Hencky equations

²¹ ABAQUS

²² Extra deep drawing

²³ Anisotropy coefficient

²⁴ Flexible micro deep drawing (FMDD)

آن با نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی، لوح اولیه را به‌منظور کاهش عیب گوشواره‌ای بهینه کردند.

در این مقاله با استفاده از روش تکرار و با در نظر گرفتن شکل مقطع به‌عنوان تابع هدف، شکل بهینه‌ی لوح اولیه برای مقطع مربعی شکل، حاصل گردیده است. برای دستیابی به این امر، در ابتدا فرایند کشش عمیق مقاطع مربعی شکل در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده است. در ادامه شکل لوح اولیه به‌صورت شعاعی به قسمت‌های برابر تقسیم شده و سپس اختلاف بین لبه قطعه تغییر شکل یافته با تابع هدف محاسبه شده است. مطابق با این مقدار اختلاف، شکل لوح اولیه تغییر پیدا کرده و در نهایت شکل لوح اولیه مناسب برای کمینه کردن عیب گوشواره‌ای بهینه شده است.

۲- ناهمسانگردی

همانطور که گفته شد پدیده گوشواره‌ای شدن در اثر ناهمسانگردی ورق ایجاد می‌شود. ناهمسانگردی عبارت است از تفاوت خواص مکانیکی ماده در جهات مختلف [۱۵]. به علت عملیات نورد بر روی ورق‌ها و تغییر شکل ترجیحی دانه‌ها در ورق، خواص مکانیکی ورق‌ها در تمام جهات یکسان نبوده و ورق‌ها در اغلب فرایندهای شکل‌دهی رفتاری ناهمسانگرد از خود به نمایش می‌گذارند. در این بین برخی از خواص مکانیکی مانند استحکام کششی و رفتار پلاستیکی با جهت‌گیری دانه‌ها ارتباط داشته و نسبت به راستاهای مختلف جهت نورد، متفاوت می‌باشند. ضریب لنک فورده^{۲۵} مطابق رابطه (۱) برای تعیین میزان ناهمسانگردی استفاده می‌شود. برای تعیین این ضریب از آزمایش کشش استفاده می‌شود [۱۵].

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\ln\left(\frac{W}{W_0}\right)}{\ln\left(\frac{t}{t_0}\right)} \quad (1)$$

در معادله (۱)؛ r ، میزان ناهمسانگردی، ε_w ، کرنش عرضی، ε_t ، کرنش ضخامتی، w ، عرض ورق بعد از کشیده شدن، w_0 ، عرض ورق اولیه، t ، ضخامت ورق بعد از کشیده شدن و t_0 ، عرض ورق اولیه است. از آنجاکه اندازه‌گیری دقیق ضخامت در ورق‌های نازک امکان‌پذیر نمی‌باشد. با توجه به قانون ثابت بودن حجم در هنگام تغییر شکل پلاستیک، می‌توان میزان ناهمسانگردی را از معادله (۲) نیز محاسبه کرد [۱۵].

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = -\frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_w + \varepsilon_l} = -\frac{\ln\left(\frac{W}{W_0}\right)}{\ln\left(\frac{W}{W_0}\right) + \ln\left(\frac{l}{l_0}\right)} \quad (2)$$

در معادله (۲)؛ ε_l ، کرنش طولی، l ، طول ورق بعد از کشیده شدن و l_0 ، طول ورق اولیه است. میزان ناهمسانگردی معمولاً با امتداد انجام آزمون کشش نسبت به جهت نورد ورق تغییر می‌کند. مطابق با شکل ۱، برای به دست آوردن ناهمسانگردی متوسط یا ناهمسانگردی نرمال^{۲۶}، آزمون کشش در سه جهت ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به جهت نورد ورق انجام شده و سپس ناهمسانگردی نرمال از معادله (۳) حاصل می‌گردد [۱۵].

$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (3)$$

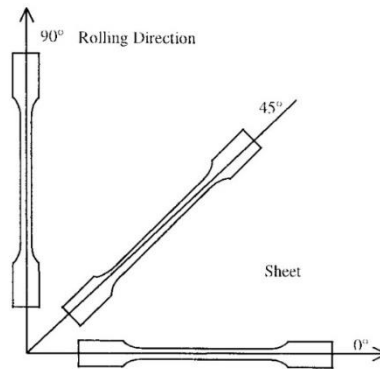
در معادله (۳)؛ \bar{r} ، ناهمسانگردی نرمال، r_0 ، ناهمسانگردی در جهت ۰ درجه، r_{45} ، ناهمسانگردی در جهت ۴۵ درجه و r_{90} ، ناهمسانگردی در جهت ۹۰ درجه نسبت به جهت نورد ورق است. ارتباط میان گوشواره‌ای شدن و ناهمسانگردی نرمال بدین‌صورت است که با افزایش ناهمسانگردی نرمال، دیواره‌های فنجان حاصل از کشش عمیق نازک‌تر و بلندتر شده و در نتیجه احتمال گوشواره‌ای شدن افزایش می‌یابد. علاوه بر آن عیب گوشواره‌ای شدن حاصل از ناهمسانگردی دیگری به نام ناهمسانگردی صفحه‌ای^{۲۷} نیز می‌باشد که این کمیت با استفاده از معادله (۴) محاسبه می‌شود.

²⁵ Lankford coefficient

²⁶ Normal anisotropy

²⁷ Planar anisotropy

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2r_{45} + r_{90}}{2} \quad (۴)$$



شکل ۱ محاسبه ناهمسانگردی در جهات مختلف نسبت به جهت نورد ورق [۱۶].

۳- شبیه‌سازی عددی

توصیف فرایند کشش عمیق به دلایلی همچون رفتار غیرخطی ماده، کرنش‌های بزرگ، اصطکاک، شرایط مرزی و غیره، دشوار و دارای پیچیدگی‌های خاص است. این پیچیدگی مطالعه تحلیلی فرایند کشش عمیق را به هندسه‌های ساده محدود می‌سازد. روش‌های فراوانی جهت یافتن یک راه‌حل تحلیلی جامع در فرایند کشش عمیق استفاده شده است که در این بین، روش‌های عددی از جایگاه ویژه‌ای برخوردار بوده و دهه‌های اخیر بسیار مورد استفاده قرار گرفته است. در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار آباکوس فرایند کشش عمیق یک فنجان با سطح مقطع مربعی شکل به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شده است. در ادامه مراحل شبیه‌سازی این فرایند شرح داده شده است.

۳-۱- مدل‌سازی

در این مرحله تمامی اجزای قالب از قبیل: لوح اولیه، ورق‌گیر، قالب و سنبه به صورت سه‌بعدی و در ابعادی مطابق با شکل ۲ و مدل‌سازی شدند. لازم به ذکر است که به دلیل تقارن در هندسه فرآیند، شرایط مرزی و قید گذاری‌ها تنها برای یک‌چهارم از مدل واقعی، مدل‌سازی شده است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود لوح اولیه مربعی شکل با ضخامت ۱ میلی‌متر و به صورت تغییر شکل‌پذیر مدل‌سازی شده و این در حالی است که، سایر اجزاء به صورت صلب (بدون تغییر شکل) مدل‌سازی شده‌اند.

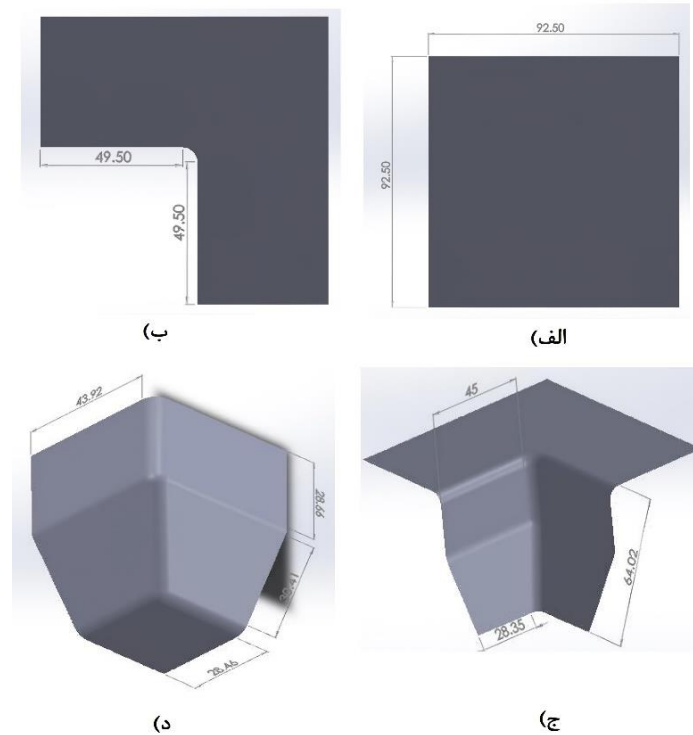
۳-۲- خصوصیات مواد

در این شبیه‌سازی لوح اولیه از جنس فولاد کربنی SAE 1015 انتخاب شده است. خصوصیات مکانیکی فولاد کربنی SAE 1015 که از آزمون کشش به دست آمده است، در جدول ۱ آورده شده است. در ادامه جنس لوح اولیه به صورت همسانگرد و برای تحلیل‌هایی به صورت ارتجاعی-خمیری در نظر گرفته شدند. با به کارگیری این تحلیل، رفتار ماده در حالت الاستیک و پلاستیک به ترتیب از قانون هوک و قانون کار سختی سوئیف^{۲۸} پیروی می‌کند.

جدول ۱ خصوصیات مکانیکی فولاد SEA 1015 به دست آمده از آزمون کشش [۱۷].

ماده	مدول یانگ	نسبت پواسون	تنش تسلیم	ضریب کار سختی	توان کار سختی	حداکثر کرنش الاستیک
SAE 1015 Carbon Steel	۲۱۰ GPa	۰/۳	۲۳۸ MPa	۶۱۷/۲	۰/۱۴۳	٪۱۱

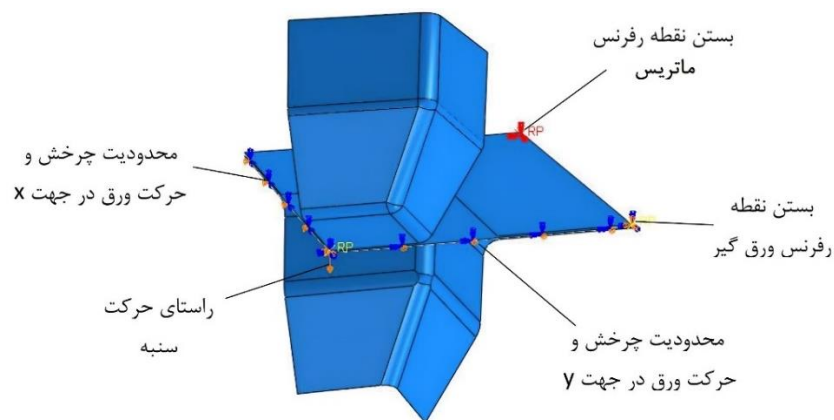
²⁸ Swift hardening law



شکل ۲ هندسه و ابعاد اجزاء تشکیل دهنده قالب؛ الف) لوح اولیه (ورق)؛ ب) ورق گیر؛ ج) قالب (ماتریس)؛ د) سنبه.

۳-۳- بارگذاری و برهم کنش

در قدم بعدی شبیه سازی فرایند کشش عمیق، تعریف تماس میان اجزاء قالب از اهمیت ویژه ای برخوردار است. تماس به کار گرفته شده در این شبیه سازی از نوع تماس سطح به سطح^{۲۹} است که میان اجزایی همچون؛ لوح و قالب، لوح و ورق گیر و ورق گیر و قالب تعریف می شود. در ادامه از مدل اصطکاکی کولمب برای تعریف اصطکاک میان سطوح تماس استفاده شده و ضریب اصطکاک در تمامی سطوح برابر با ۰/۱ در نظر گرفته شده است. پس از مشخص شدن تماس میان اجزاء قالب، شرایط مرزی شبیه سازی تعریف می شوند. از آنجایی که در این شبیه سازی تنها یک چهارم اجزاء قالب مدل سازی شده است، در لبه اجزاء قید تقارن به کار گرفته شده است. در ادامه لوح، ورق گیر و قالب در تمامی جهات مقید شده و جابجایی سنبه تنها در راستای عمودی و برابر با ۶۲ میلی متر و به سمت پایین تعریف شده است. شکل ۳، نشان دهنده طرحواره شرایط مرزی و بارگذاری در این شبیه سازی است.

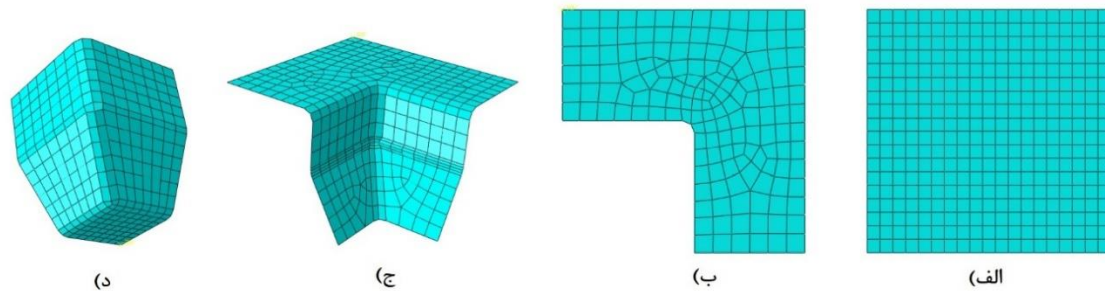


شکل ۳ طرحواره شرایط مرزی و بارگذاری.

²⁹ Surface to surface

۳-۴- شبکه‌بندی

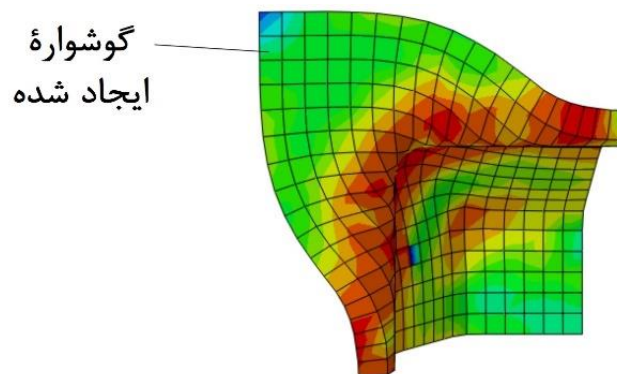
به‌منظور شبکه‌بندی لوح اولیه از المان پوسته‌ای چهار نقطه با انتگرال کاهش‌یافته (S4R) استفاده شده است و سایر اجزاء قالب با استفاده از المان چهار نقطه خطی (R3D4) شبکه‌بندی شده‌اند. شبکه‌بندی اجزاء قالب در شکل ۴ قابل‌مشاهده هستند. در ادامه برای اطمینان از درستی شبیه‌سازی، عدم وابستگی به شبکه‌بندی انجام شده است. برای این منظور، تأثیر اندازه المان بر انرژی کرنشی در حالت‌های مختلف اندازه المان بررسی گردید که در نهایت با در نظر گرفتن مقدار انرژی کرنشی، تعداد المان مورد نیاز برای لوح اولیه برابر با ۳۴۲ المان انتخاب گردید.



شکل ۴ شبکه‌بندی اجزاء تشکیل‌دهنده قالب؛ الف) لوح اولیه (ورق)، ب) ورق‌گیر، ج) قالب (ماتریس)، د) سنبه.

۳-۵- روش حل مسئله

به‌طور کلی روش‌های حل عددی در مسائل مربوط به تغییر شکل فلزات به دو دسته؛ ضمنی^{۳۰} و صریح^{۳۱} تقسیم‌بندی می‌شوند. نکتهٔ حائز اهمیت آن است که در فرایند بسیاری از عملیات‌های شکل‌دهی حالت استاتیکی- شبه استاتیکی دارند. از این رو می‌بایست ترم‌های دینامیکی در روش حل صریح حذف شوند. روش رایجی که برای حذف آثار دینامیکی صریح و تبدیل آن به حالت شبه استاتیک در نظر گرفته می‌شود روش مقیاس زمان می‌باشد. مطابق با این روش اگر زمان انجام تغییر شکل به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شود، آنگاه می‌توان از آثار دینامیکی صرف نظر کرد. در ادامه و با مشخص شدن روش حل مسئله، شبیه‌سازی عددی فرایند کشش عمیق مقاطع مربعی شکل انجام شده است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود با انجام تحلیل، عیب گوشواره‌ای شدن در لوح اولیه ایجاد گردید.



شکل ۵ گوشواره حاصل از لوح اولیه مربعی شکل.

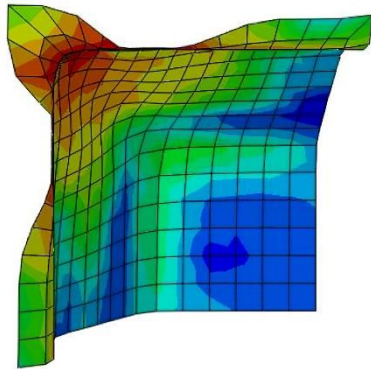
۴- بهینه‌سازی و طراحی لوح بهینه

از روش‌های کاربردی جهت کاهش عیب گوشواره‌ای، می‌توان به اصلاح شکل لوح اولیه و تعیین لوح بهینه اشاره کرد. در این مقاله، به‌منظور طراحی لوح بهینه از تابع هدف مشخصی استفاده شده است. مطابق با این روش در ابتدا لوح اولیه به‌صورت شعاعی

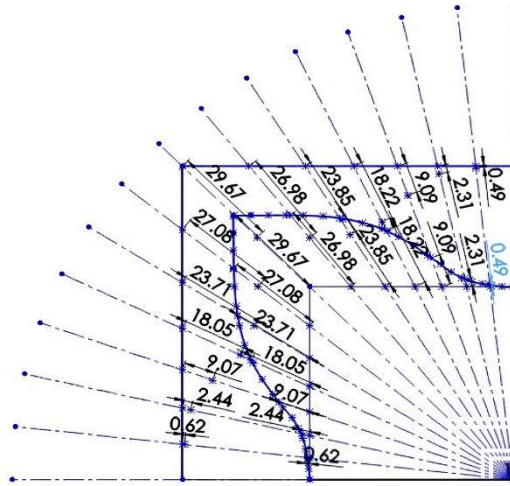
³⁰ Implicit

³¹ Explicit

به قسمت‌های برابر تقسیم شده و در ادامه محل تلاقی خطوط تقسیم‌بندی با تابع هدف و نتایج به‌دست‌آمده از کشش عمیق لوح اولیه مشخص شده است. با اندازه‌گیری اختلاف میان این نقاط و اعمال آن بر روی مسیر تابع هدف، لوح بهینه شماره ۱ طراحی شده است. شکل ۶ الف، نشان‌دهنده شکل لوح بهینه شماره ۱ می‌باشد. درنهایت با انجام شبیه‌سازی عددی بر روی لوح بهینه شماره ۱، فنجان مربعی شکلی مطابق با شکل ۶ ب، حاصل شد که از عیب گوشواره‌ای کمتری برخوردار است.



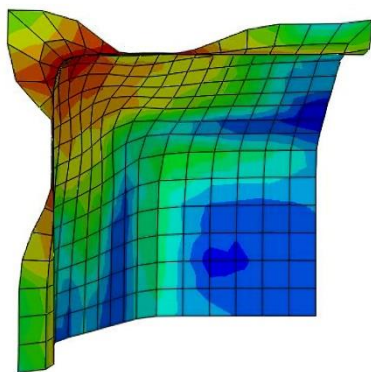
(ب)



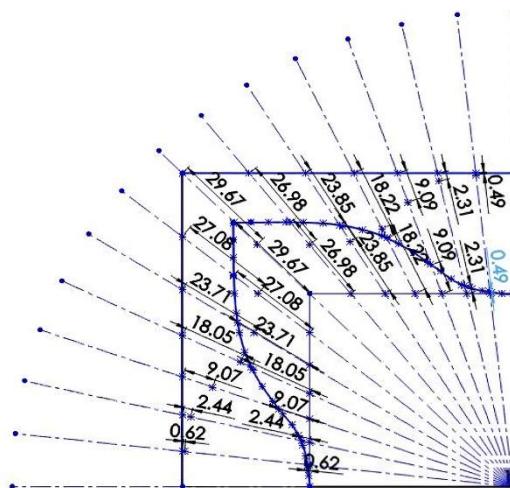
(الف)

شکل ۶ طراحی لوح بهینه شماره ۱؛ الف) اختلاف میان تابع هدف و لوح اولیه. ب) فنجان حاصل از شبیه‌سازی لوح بهینه شماره ۱.

در گام بعد، مجدداً نتیجه به‌دست‌آمده از کشش عمیق لوح بهینه شماره ۱ به قسمت‌های برابر تقسیم و با تابع هدف مقایسه شده است. با اندازه‌گیری اختلاف میان این نقاط و اعمال آن بر روی مسیر تابع هدف، لوح بهینه شماره ۲ طراحی شده است. شکل ۷ الف، نشان‌دهنده شکل لوح بهینه شماره ۲ می‌باشد. درنهایت با انجام شبیه‌سازی عددی بر روی لوح بهینه شماره ۲، فنجان مربعی شکلی مطابق با شکل ۷ ب، حاصل شد که از عیب گوشواره‌ای کمتری نسبت به لوح بهینه شماره ۱ برخوردار بوده و به شکل تابع هدف نیز نزدیک‌تر است.



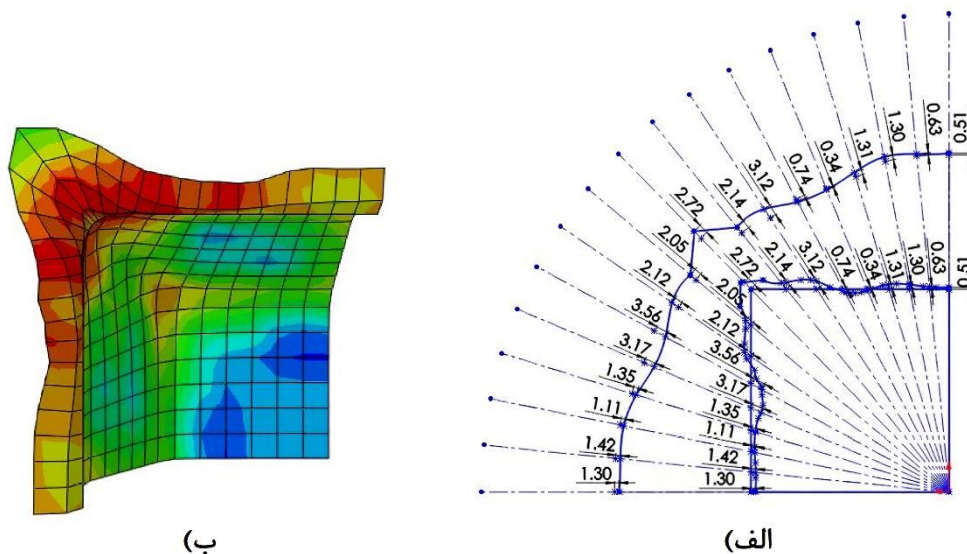
(ب)



(الف)

شکل ۷ طراحی لوح بهینه شماره ۲؛ الف) اختلاف میان تابع هدف و لوح بهینه شماره ۱. ب) فنجان حاصل از شبیه‌سازی لوح بهینه شماره ۲.

در ادامه مشابه با روشی که گفته شد لوح بهینه شماره ۳ مطابق با شکل ۸ الف، طراحی و بر روی آن شبیه‌سازی انجام شده است. شکل ۸ ب، نشان‌دهنده نتیجه حاصل از شبیه‌سازی لوح بهینه شماره ۳ است.

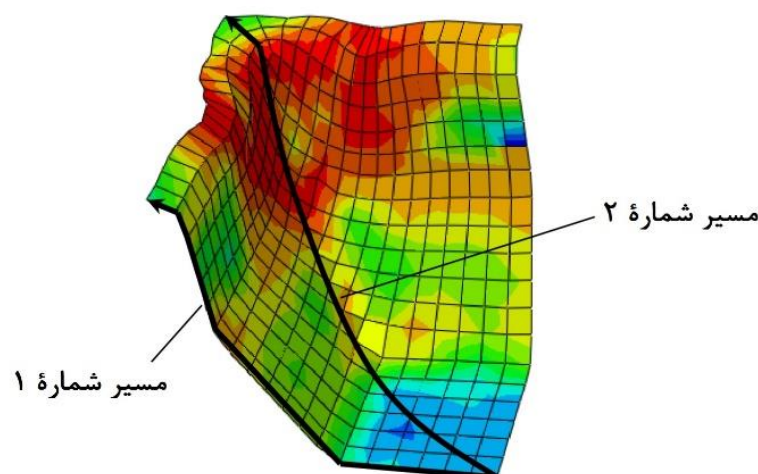


شکل ۶ طراحی لوح بهینه شماره ۳؛ الف) اختلاف میان تابع هدف و لوح بهینه شماره ۲. ب) فنجان حاصل از شبیه‌سازی لوح بهینه شماره ۳.

به منظور بررسی صحت نتایج، شکل بلانک به‌دست‌آمده از لوح بهینه ۲ با لوح به‌دست‌آمده در مرجع [۱۸] مقایسه شد. در مرجع [۱۸] لوح به‌دست‌آمده با ساده‌سازی که در شکل انجام شده به صورت یک چندضلعی منتظم می‌باشد. در صورتی که در این مقاله با توجه به تعداد تقسیمات روی لوح اولیه شکلی نزدیک به چندضلعی می‌باشد. همچنین نواحی به‌دست‌آمده در شکل نهایی در این مقاله و در مرجع [۱۸] مشابهت‌های فراوانی دارد که نشان‌دهنده صحت نتایج به‌دست‌آمده می‌باشد.

۵- نتایج

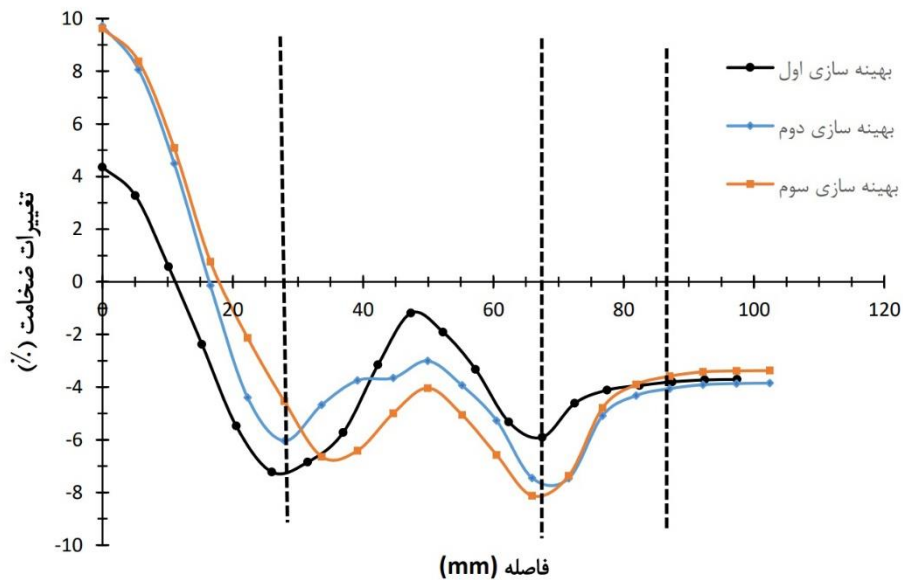
به منظور تعیین لوح بهینه، نتایج حاصل از شبیه‌سازی لوح‌های بهینه شماره ۱ تا ۳ با یکدیگر مقایسه شدند. در این مقایسه پارامترهایی همچون؛ تغییرات ضخامت، توزیع تنش و تغییرات کرنش بر روی دو مسیر متفاوت ۱ و ۲ که در شکل ۹ نشان داده شده است، بررسی شدند.



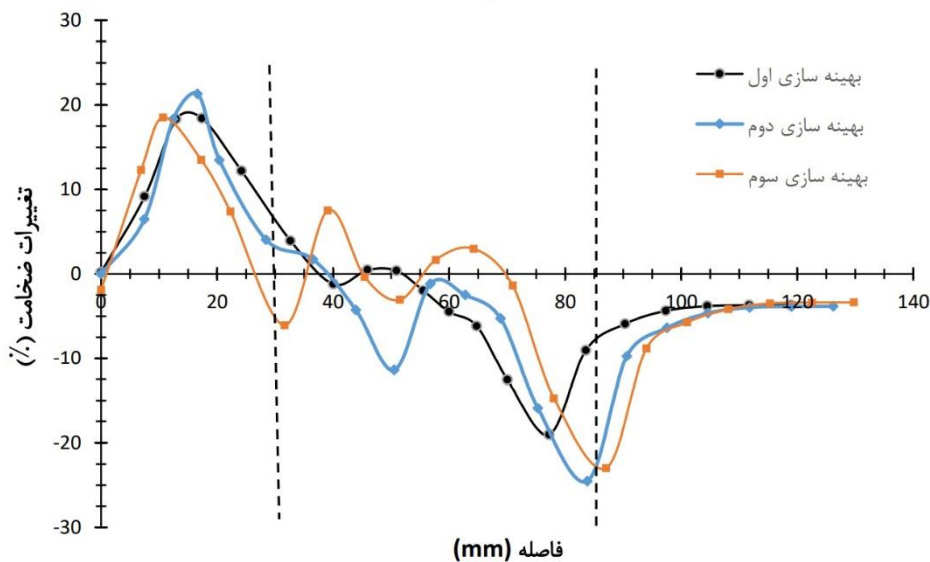
شکل ۷ مسیرهای تعیین‌شده به منظور بررسی پارامترهای ضخامت، تنش و کرنش.

در گام نخست تاثیر تغییرات ضخامت در دو مسیر ۱ و ۲ در شکل ۱۰ به کمک نتایج شبیه‌سازی ثبت شده‌اند. همانطور که در شکل ۱۰ الف مشاهده می‌شود، در مسیر شماره ۱ حداکثر تغییر ضخامت متعلق به بهینه سازی دوم و سوم می‌باشد در حالی

که بهینه‌سازی شماره ۱ به دلیل دارا بودن ضخامت اولیه کمتر، تغییرات ضخامت کمتر و یکنواخت‌تری را در طول فرایند تجربه کرده است. همچنین مطابق با شکل ۱۰ ب، می‌توان دریافت که دامنه تغییرات ضخامت در مسیر ۲ به علت نازک شونده‌گی لوح در دو راستای متفاوت از مسیر شماره ۱ بیشتر می‌باشد و سه لوح اولیه مقدار تغییر ضخامت مشابهی را تجربه کرده‌اند. در نهایت از مقایسه تغییرات ضخامت حاصل از کشش عمیق لوح‌های بهینه شماره ۱ تا ۳ در دو مسیر می‌توان دریافت که لوح بهینه شماره ۱ از وضعیت بهتری نسبت به دو لوح دیگر برخوردار است و این در حالی است که لوح‌های بهینه شماره ۲ و ۳ وضعیتی مشابه یکدیگر دارند.



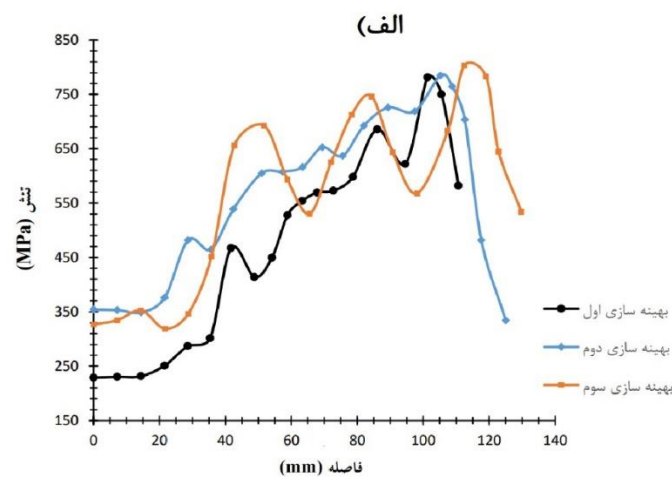
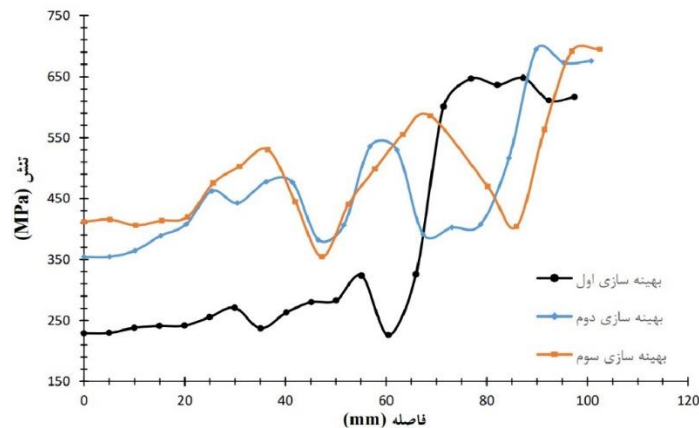
(الف)



(ب)

شکل ۸ تغییرات ضخامت در سه لوح بهینه؛ (الف) مسیر شماره ۱. (ب) مسیر شماره ۲.

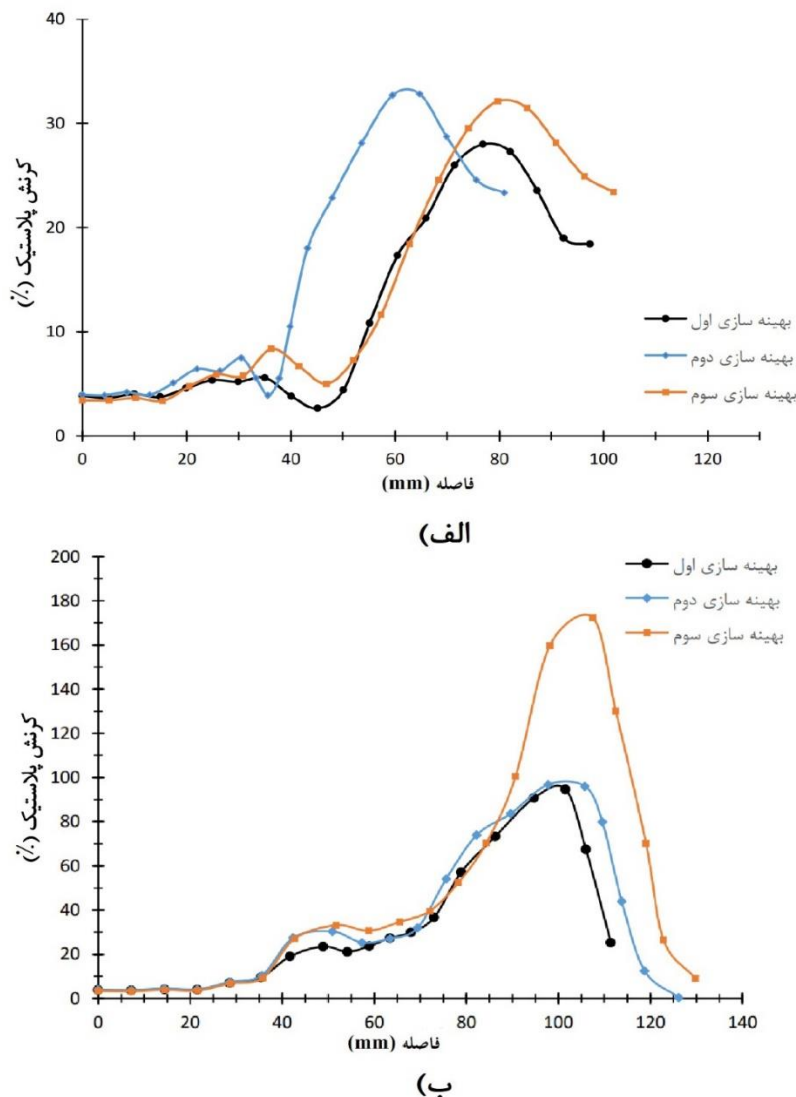
نتایج حاصل از تغییرات توزیع تنش ون‌مایسز در مسیرهای تعیین‌شده شماره ۱ و ۲، در شکل ۱۱ گزارش شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار تنش در مسیرهای شماره ۱ و ۲، در نزدیکی ورق‌گیر و درجایی است که لوح دارای خم ۹۰ درجه است زیرا تغییر شکل شدید در این قسمت باعث ایجاد تنش شدیدتر می‌شود. مطابق شکل ۱۱ الف، لوح بهینه شماره ۱ در مسیر ۱ تنش بیشتری را در محدوده تماس با ورق‌گیر نسبت به دو لوح بهینه دیگر تجربه کرده است. همچنین با بررسی تغییرات تنش در مسیر شماره (شکل ۱۱ ب) مشاهده می‌شود که با وجود رفتار نسبتاً مشابه هر سه لوح در مسیر شماره ۲، لوح بهینه شماره ۲ در قسمت‌های حساس نهایی تنش کمتری را ثبت کرده است. بنابراین لوح بهینه شماره ۲ ایده آل‌ترین توزیع تنش ممکن را ثبت کرده است.



شکل ۹ تغییرات تنش در سه لوح بهینه: الف) مسیر شماره ۱. ب) مسیر شماره ۲.

در نهایت کرنش پلاستیک که نشان‌دهنده مقدار تغییر شکل ماده در حین فرایند کشش عمیق می‌باشد در دو مسیر در شکل ۱۲ بررسی شده‌اند. مشابه با تغییرات کرنش در سه لوح، حداکثر کرنش پلاستیک نیز در محدوده تماس ورق‌گیر با لوح اولیه به دلیل حداکثر تغییر شکل اتفاق می‌افتد. رفتار هر سه لوح اولیه در مسیر ۱ مشابه یکدیگر ثبت شده‌اند (شکل ۱۲ الف) و هر ۳ حداکثر کرنش نزدیک به ۳۰ درصد را تجربه می‌کنند. بررسی رفتار سه لوح بهینه در مسیر ۲ بر اساس شکل ۱۲ ب نشان می‌دهد لوح بهینه شماره ۲ تغییرات کرنش پلاستیک به مراتب کمتری را نسبت به لوح بهینه شماره ۳، به دلیل هندسه اولیه تجربه می‌کند.

باتوجه به نتایج بررسی شده با توجه به کاهش عیب گوشواره‌ای در لوح بهینه شماره ۲ و ۳، توزیع تنش و تغییرات کرنش پلاستیک کمتر در لوح شماره ۲ نشان‌دهنده ایده آل بودن این لوح برای دستیابی به فرایند با نتایج بهینه است.



شکل ۱۰ تغییرات کرنش پلاستیک در سه لوح بهینه: الف) مسیر شماره ۱. ب) مسیر شماره ۲.

۶- مراجع

- [1] Handbook AS. Volume 14B Metalworking: sheet forming. ASM International. 2006;924.
- [2] Moon YH, Kang YK, Park JW, Gong SR. Tool temperature control to increase the deep drawability of aluminum 1050 sheet. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2001;41(9):1283-94.
- [3] Shim H, Son K, Kim K. Optimum blank shape design by sensitivity analysis. Journal of Materials Processing Technology. 2000;104(3):191-9.
- [4] Kishor N, Kumar DR. Optimization of initial blank shape to minimize earing in deep drawing using finite element method. Journal of Materials Processing Technology. 2002;130:20-30.
- [5] Park SH, Yoon JW, Yang DY, Kim YH. Optimum blank design in sheet metal forming by the deformation path iteration method. International Journal of Mechanical Sciences. 1999;41(10):1217-32.
- [6] Zaky AM, Nassr AB, El-Sebaie MG. Optimum blank shape of cylindrical cups in deep drawing of anisotropic sheet metals. Journal of Materials Processing Technology. 1998;76(1-3):203-11.
- [7] Desai SG, Pardeshi RH, Date PP. Study of various initial blank shapes to minimize the earing in the different

- shaped formed parts using finite element analysis. In AIP Conference Proceedings 2005 (Vol. 778, No. 1, pp. 855-860). American Institute of Physics.
- [8] Chen X, Sowerby R. Blank development and the prediction of earing in cup drawing. International journal of mechanical sciences. 1996;38(5):509-16.
- [9] Yang TS, Shyu RF. The design of blank's initial shape in the near net-shape deep drawing of square cup. Journal of mechanical science and technology. 2007;21:1585-92.
- [10] Nagda PS, Bhatt PS, Shah MK. Finite element simulation of deep drawing process to minimize earing. International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering. 2017;11(2):413-6.
- [11] Mahmood, Zaid H., Ihsan K. Irthia, and Ahmed K. Ahmed. "Optimization of initial blank shape for flexible micro deep drawing of square parts." Materials Today: Proceedings 20.2020: 555-559.
- [12] Bouchaâla, K., et al. "Numerical investigation of the effect of punch corner radius and die shoulder radius on the flange earrings for AA1050 and AA1100 aluminum alloys in cylindrical deep drawing process." Heliyon 7.4. 2021: e06662.
- [13] Tran, Minh Tien, et al. "Earing reduction by varying blank holding force in deep drawing with deep neural network." Metals 11.3. 2021: 395.
- [14] Pratheesh Kumar, S., et al. "Experimental and Simulation Study on Deep Drawing Process to Reduce Earing." Materials, Design and Manufacturing for Sustainable Environment: Select Proceedings of ICMDMSE 2022. Singapore: Springer Nature Singapore. 2022. 397-419.
- [15] Hosford WF, Caddell RM. Metal forming: mechanics and metallurgy. Cambridge university press; 2011.
- [16] Thomas WJ. Product, tool, and process design methodology for deep drawing and stamping of sheet metal parts. The Ohio State University; 1999.
- [17] Ma Z, Zhao H, Wang K, Zhou X, Hu X, Lu S, Cheng H. Novel correction methods on a miniature tensile device based on a modular non-standard layout. Measurement Science and Technology. 2013;24(8):085901.
- [18] Kitayama, Satoshi, et al. "Multi-objective optimization of blank shape for deep drawing with variable blank holder force via sequential approximate optimization." Structural and Multidisciplinary Optimization 52 (2015): 1001-1012