

## شکل دهی قطعات استوانه‌ای - نیم‌کروی به روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی

بهروز زارع  
 محمد بخشی  
 سلمان نوروزی  
 عبدالحمید گرجی

دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی (نوشیروانی) بابل  
 استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی (نوشیروانی) بابل  
 استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی (نوشیروانی) بابل  
 دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی (نوشیروانی)

### چکیده

به علت خاصیت شکل‌پذیری سرد پایین آلیاژهای آلومینیومی در فرآیند کشش عمیق، روشهای متعددی برای شکل‌دهی و افزایش نسبت کشش این آلیاژها مورد مطالعه قرار گرفته است. هیدروفرمینگ ورق یکی از روشهایی است که قابلیت تولید قطعات با نسبت کشش بالا و از جنس‌های با شکل‌پذیری سرد پایین را تسهیل کرده است. در این مقاله، شکل‌دهی قطعات استوانه‌ای - نیم‌کروی از جنس آلیاژ آلومینیومی AA6063-T4 با استفاده از روش جدید کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی به صورت تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود مورد مطالعه قرار گرفته است. با بررسی مسیرهای فشار مختلف، تأثیر مسیر فشار بر روی پارگی و توزیع ضخامت قطعات شکل داده شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داده‌اند که با استفاده از فرآیند فوق و اعمال مسیر فشار مناسب می‌توان قطعات سالم با عمق کشش بالا و توزیع ضخامت یکنواختی را در یک مرحله شکل‌دهی کرد. همچنین در این مقاله با بکارگیری شبیه‌سازی اجزای محدود و تکنیک تاگوچی، روشی اصولی برای مطالعه و تحلیل همزمان تأثیر پارامترهای کلیدی شکل‌دهی، بر روی کیفیت شکل‌پذیری قطعات و تخمین ترکیب بهینه پارامترهای شکل‌دهی در فرآیند هیدروفرمینگ ورق ارائه شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که فشار سیال بیشترین تأثیر را بر روی شکل‌پذیری قطعه‌کار در فرآیند هیدروفرمینگ ورق دارد. همچنین با استفاده از سنبه خشن‌تر، فاصله مابین سطح لبه محیطی قالب با سطح ورق‌گیر کمتر و شعاع ورودی بزرگتر شرایط شکل‌دهی بهتر خواهد شد.

کلمات کلیدی: هیدروفرمینگ ورق - کشش عمیق هیدرودینامیکی - شبیه‌سازی اجزای محدود

## Forming of Hemispherical-Cylindrical Cups Using Hydrodynamic Deep Drawing Assisted by Radial Pressure

B.Zareh M.Sc. Student, Department of Mechanical Engineering, Babol University of Technology  
 M.Bakhshi Professor, Department of Mechanical Engineering, Babol University of Technology  
 S.Nourouzi Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Babol University of Technology  
 A.H.Gorji Ph.D. Student, Department of Mechanical Engineering, Babol University of Technology

### Abstract

Due to the bad cold-formability of aluminum alloys in deep drawing process, many forming methods have been explored to increase the drawing ratio of these alloys. Sheet Hydro-Forming is one of the processes that can be used to the forming of cups with high drawing ratio from bad cold-formability materials. In this paper, the forming of AA6063-T4 aluminum alloy hemispherical-cylindrical cups by hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure were investigated experimentally and analyzed using finite element simulation. By examining several pressure paths, the effect of pressure path on bursting and thickness distribution of the sheet was studied. The results indicated that by using this process and applying an appropriate pressure path, the sound cups, with high drawing ratio and uniform thickness distribution could be formed in one stage. Also, in this paper by using FE simulation and Taguchi technique, a systematically method was developed to analyze the effects of the forming parameters on the quality of part formability and determine the optimal combination of the forming parameters for sheet Hydro-Forming process. The results of analysis indicated that fluid pressure has the greatest influence on the part formability in sheet Hydro-Forming process. And also by using rough punch, lower gap between die rim block and blank holder and greater die entrance radius the formability of sheet will be improved.

**Keywords:** Sheet Hydro-Forming, hydrodynamic deep drawing, Finite element simulation

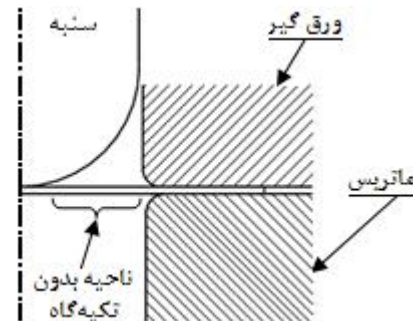
## ۱- مقدمه

قابلیت تولید قطعات با هندسه پیچیده و از آلیاژهای سبک با خواص شکل‌پذیری پایین را تسهیل کرده، و مورد توجه زیادی در صنعت اتومبیل‌سازی و صنایع هوا و فضا قرار گرفته است [۱]. در مقایسه با فرآیند کشش عمیق معمولی، هیدروفورمینگ ورق دارای مزایای زیادی همچون نسبت کشش بالا، قابلیت شکل‌دهی قطعات پیچیده، دقت ابعادی بالا، کیفیت سطحی بهتر، هزینه ابزار پایین و غیره می‌باشد [۲ و ۳].

در سالهای اخیر مطالعات زیادی بر روی فرآیند هیدروفورمینگ ورق و پارامترهای مؤثر بر آن انجام گرفته است و بر اساس نحوه بکارگیری فشار سیال روش‌های متعددی برای هیدروفورمینگ ورق ارائه شده است که می‌توان به روش‌های هیدروفورمینگ استاندارد، کشش عمیق هیدرورویم، کشش عمیق هیدرومکانیکی، کشش عمیق هیدرودینامیکی و غیره اشاره کرد [۲ و ۳]. هسو و هسیه [۴] تولید فنجانهای نیم‌کروی را در فرآیند هیدروفورمینگ استاندارد مورد مطالعه قرار دادند. آنان روابطی را برای پیدا کردن مکان هندسی دو فشار بحرانی و بدست آوردن محدوده کاری ارائه دادند و تأثیر توان کار سختی و ضریب ناهمسانگردی را بر روی نمودارهای حد بالایی و پایینی فشار مورد بررسی قرار دادند. روش هیدروفورمینگ استاندارد به علت معایبی همچون خرابی زودرس لایه لاستیکی و عدم شکل‌دهی لبه‌های تیز مورد توجه زیادی از سوی صنعتگران قرار نگرفت و روش‌های جدیدی بر پایه این روش توسط محققان دیگر ارائه شده است. ژانگ و همکارانش [۵] نشان دادند که ناهمسانگردی ورق تأثیر قابل توجهی بر روی تغییرات هندسی دیواره و توزیع ضخامت قطعه-کار استوانه‌ای دارد. ایدرابو و همکارانش [۶] پدیده چروکیدگی را در شکل‌دهی قطعات نیم‌کروی از جنس آلیاژ AA6111-T4 با فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی به صورت تجربی و شبیه‌سازی بررسی کردند. لانگ و دانکرت [۷] با مطالعه شکل‌دهی قطعات با مقطع مربعی با استفاده از روش کشش عمیق هیدرودینامیکی نشان دادند که شکل گرده اولیه تأثیر قابل توجهی بر چروکیدگی گوشه‌های فنجان دارد.

کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی یکی از روش‌های جدیدی است که اخیراً مورد توجه زیادی در شکل‌دهی قطعات با نسبت کشش بالا و از جنس‌های با شکل‌پذیری پایین قرار گرفته است [۸ و ۹]. در شکل ۳- الف روش کشش عمیق هیدرودینامیکی معمولی نشان داده شده است، روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی، تنها با اعمال کمی تغییرات بر روی فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی معمولی بدست آمده است. همانطور که از شکل ۳- ب می‌توان مشاهده کرد در این روش ورق توسط سنبه به داخل محفظه قالب که پر

قطعات گنبدی شکل همچون قطعات کروی، سهموی، مخروطی در صنعت هوا و فضا، صنایع نظامی، صنایع خودرو سازی و دیگر صنایع کاربردهای فراوانی دارند. شکل‌دهی این قبیل قطعات با روش‌های متداول کشش عمیق به راحتی امکان پذیر نبوده، و به ویژه در زمانی که ورق مورد استفاده از خواص شکل‌پذیری پایینی برخوردار می‌باشد با مشکلات بسیاری همراه است. مطابق شکل ۱ در شکل‌دهی این قطعات، در مراحل اولیه کشش عمیق به علت کم بودن سطح تماس سنبه با ورق، مقدار تنش بالایی به ورق اعمال می‌شود که این امر می‌تواند منجر به پارگی ورق در پیشانی قطعه‌کار گردد. همچنین بخش قابل توجهی از ورق در اطراف سنبه بدون تکیه‌گاه می‌باشد و بر اثر تنش‌های محیطی دچار کمانش شده و در نتیجه می‌تواند منجر به چروکیدگی بدنه نیم‌کروی گردد.



شکل ۱- ناحیه بدون تکیه‌گاه و مستعد برای پارگی و چروکیدگی

شکل ۲ پارگی و چروکیدگی ایجاد شده را در کشش عمیق این نوع قطعات نشان می‌دهد.



شکل ۲- پارگی و چروکیدگی ایجاد شده در شکل‌دهی قطعات نیم‌کروی با روش کشش عمیق معمولی

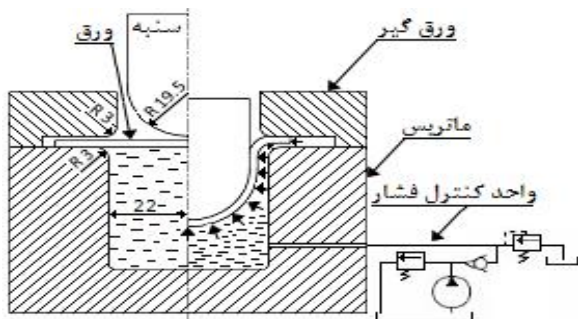
هیدروفورمینگ ورق یکی از روش‌های پیشرفته‌ای است که

کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی به صورت تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود مورد مطالعه قرار گرفته است. با بررسی مسیرهای فشار مختلف، تأثیر مسیر فشار بر روی پارگی و توزیع ضخامت قطعات شکل داده شده مورد بررسی قرار گرفته است.

همچنین با توجه به اینکه تمامی تحقیقات ارائه شده در زمینه هیدروفرمینگ ورق به بررسی مجزای تأثیر پارامترها پرداخته‌اند، بنابراین لازم است که تأثیر پارامترهای مختلف بر روی رفتار شکل‌پذیری ورق فلزی در فرآیند هیدروفرمینگ ورق به صورت همزمان مورد ملاحظه قرار گیرد. از اینرو، هدف دیگر این مقاله توسعه یک روش اصولی برای مطالعه و تحلیل همزمان تأثیر پارامترهای شکل‌دهی، بر روی کیفیت شکل‌پذیری قطعات در فرآیند هیدروفرمینگ ورق و بدست آوردن ترکیب بهینه این پارامترها می باشد. در این مقاله با بکارگیری شبیه‌سازی اجزای محدود و تکنیک تاگوچی به همراه تحلیل واریانس (ANOVA) درجه اهمیت و میزان تأثیر پارامترهای کلیدی شکل‌دهی همچون فشار سیال محفظه، ضریب اصطکاک مابین فصل مشترک سطح سنبه و ورق، فاصله مابین سطح لبه محیطی قالب با سطح ورق‌گیر و شعاع ورودی قالب در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی مورد بحث قرار گرفته است.

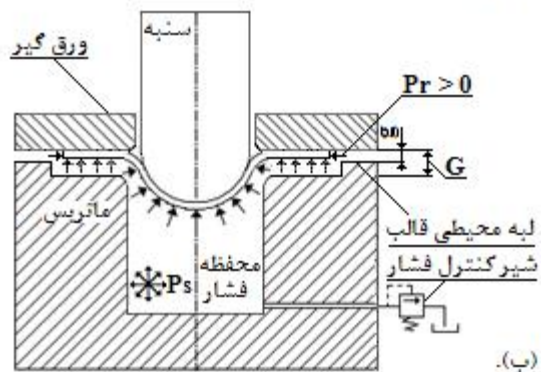
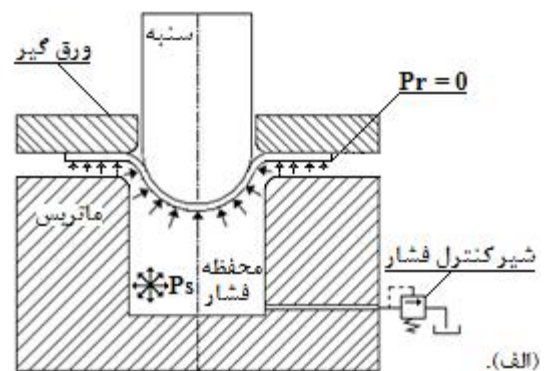
## ۲- مراحل آزمایشگاهی

طرحواره قالب طراحی شده و ابعاد هندسی اجزای مختلف آن در شکل ۴ نشان داده شده است. برای انجام آزمایشات گردهایی به قطر ۸۰ میلی‌متر، از جنس آلیاژ آلومینیومی AA6063-T4 و مس خالص آماده سازی شده است. به منظور تعیین خواص مکانیکی ورق‌های مورد استفاده، طبق استاندارد ASTM E8M (2008) نمونه‌هایی در سه راستای مختلف ( $0^\circ$ ،  $45^\circ$  و  $90^\circ$ ) نسبت به جهت نورد ورق‌ها آماده‌سازی شده و آزمون کشش تک محوره در سه راستا انجام گردید.



شکل ۴ - طرحواره قالب طراحی شده و ابعاد هندسی آن

از سیال است، کشیده شده و همزمان سیال فشرده شده ورق را به سطح سنبه می‌چسباند. ضمن حرکت سنبه به سمت پایین، سیال از فاصله مابین قالب و ورق‌گیر (g) به سمت بیرون جریان می‌یابد، اما به علت اینکه این فاصله به دلیل ایجاد یک لبه محیطی بر روی قالب خیلی کوچک است، نشت سیال را به سمت بیرون به تأخیر می‌اندازد و جریان سیال باعث ایجاد یک فشار شعاعی بر روی لبه‌های ورق می‌گردد که ایجاد این فشار شعاعی تفاوت این روش با روش کشش عمیق هیدرودینامیکی معمولی می باشد. فشار شعاعی ایجاد شده می‌تواند نیروی کشش را کاهش داده، و منجر به جریان یافتن بهتر ورق گردد. از طرف دیگر در اثر فشار سیال اعمال شده به سطح زیرین ورق، سطح تماس سنبه با ورق افزایش یافته و می‌توان از وقوع پارگی و چروکیدگی در ناحیه بدون تکیه‌گاه ورق جلوگیری کرد. از این رو روش فوق می‌تواند برای شکل‌دهی قطعات با نسبت کشش بالا و از جنس‌هایی با خواص شکل‌پذیری پایین استفاده شود.



شکل ۳- الف - کشش عمیق هیدرودینامیکی معمولی

ب - کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی

در این مقاله شکل‌دهی قطعات استوانه‌ای - نیم‌کروی از جنس آلیاژ آلومینیومی AA6063-T4، با استفاده از فرآیند

تنظیم شده، شیر کنترل فشار، فشار سیال درون محفظه را ثابت نگه می‌دارد.



شکل ۵- الف- دستگاه پرس و واحد هیدرولیکی مورد استفاده در آزمایشات ب- مجموعه قالب ساخته شده

همچنین برای تأمین فشار اولیه، از یک واحد هیدرولیکی نیز استفاده گردیده است. یک نمونه از مسیر فشار اعمال شده در آزمایشات و شبیه سازی‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که می‌توان مشاهده کرد قبل از شروع حرکت سنبله یک فشار اولیه پیش‌بالمج به سطح زیرین ورق اعمال می‌گردد، که این فشار توسط واحد هیدرولیکی تأمین می‌گردد. اعمال این فشار اولیه منجر به ایجاد حالت بالج (pre-bulge) در ورق می‌شود. همچنین اعمال این فشار اولیه باعث ایجاد یک روانکاری بهتر ما بین سطح ورق با سطوح اجزای قالب شده و منجر به بهتر شدن جریان فلز می‌شود. از این رو در ابتدای اجرای تمامی آزمایشات، یک فشار اولیه ثابت ۲ MPa به سطح زیرین ورق اعمال شده (مسیر OA)، و سپس سنبله شروع به حرکت می‌کند. در ادامه متناسب با نفوذ حجمی سنبله به محفظه سیال، فشار سیال افزایش می‌یابد (مسیر AB)، نهایتاً بعد از رسیدن فشار سیال به مقدار بیشینه از پیش تنظیم شده، شیر کنترل فشار، فشار محفظه را ثابت نگه می‌دارد (مسیر BC).

نتایج حاصل از این آزمون جهت تعیین خواص مکانیکی و رفتار ناهمسانگردی ورق‌های فوق مورد استفاده قرار گرفت. ورق‌های مسی مورد استفاده دارای رفتار همسانگردی بوده و خواص مکانیکی آن در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی ورق از جنس مس خالص

E = 117	مدول الاستیسیته (GPa)
$\nu = 0.32$	ضریب پواسون
$\sigma_y = 116$	استحکام تسلیم (Mpa)
$\sigma_u = 231$	استحکام نهایی (MPa)
n = 0.44	توان کرنش سختی

در حالیکه خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیومی AA6063-T4 مطابق جدول ۲ در جهات مختلف اندکی متفاوت بوده و همچنین دارای ضرایب ناهمسانگردی پایین‌تر از یک می‌باشد. ضخامت ورق‌های مسی و آلومینیومی مورد استفاده در آزمایشات به ترتیب ۱ و ۲ میلی‌متر می‌باشد. برای اجرای آزمایشات از یک دستگاه تست انیورسال DMG (Denison Mayers Group)، با ظرفیت ۶۰۰ KN استفاده شده است.

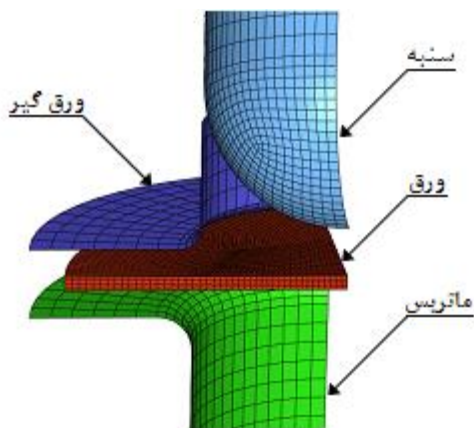
جدول ۲- مشخصات مکانیکی آلیاژ آلومینیومی AA6063-T4

پارامتر	راستای ورق نسبت به جهت نورد		
	۹۰°	۴۵°	۰°
استحکام تسلیم (MPa)	87.00	87.00	85.50
استحکام نهایی (MPa)	168.0	169.0	167.0
مدول الاستیسیته (GPa)	70.00	70.00	70.00
توان کرنش سختی	0.236	0.234	0.212
نسبت ناهمسانگردی	0.492	0.511	0.573

در طول انجام آزمایشات این دستگاه متصل به یک واحد کامپیوتری بوده و تمامی حرکات دستگاه توسط این واحد کنترل می‌شود. دستگاه پرس، به همراه واحد هیدرولیکی در شکل ۵- الف نشان داده شده است. همچنین مجموعه قالب ساخته شده برای انجام آزمایشات در شکل ۵- ب قابل مشاهده می‌باشد. در طول فرآیند شکل‌دهی فشار سیال داخل محفظه در هر لحظه توسط یک شیر کنترل فشار الکترونیکی، کنترل شده و به کامپیوتر متصل به آن بازخورد داده می‌شود و به این طریق می‌توان از صحت مسیر فشار اعمال شده اطمینان حاصل کرد.

در فرآیند هیدروفورمینگ ورق به علت طبیعت خود فرآیند با نفوذ سنبله به داخل محفظه سیال، فشار سیال متناسب با نفوذ حجمی سنبله افزایش یافته و فشار لازم برای شکل‌دهی را فراهم می‌کند و بعد از رسیدن فشار سیال به مقدار بیشینه از پیش

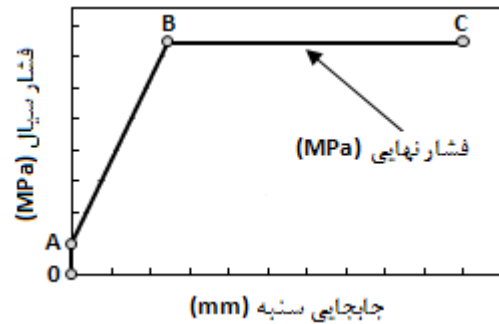
محدود ایجاد شده برای شبیه‌سازی فرآیند را نشان می‌دهد. به علت تقارن فقط  $\frac{1}{4}$  ورق و مجموعه قالب مدل سازی شده است. ورق به عنوان یک ماده الاستیک - پلاستیک تغییر شکل پذیر در نظر گرفته شده است و به منظور اینکه بتوان فشار شعاعی را بر روی لبه‌های ورق اعمال کرد، به صورت جامد (توپر) مدل سازی شده است. از المان سه بعدی C3D8R که یک المان جامد هشت گرهی قابل تغییر شکل می باشد، برای مش بندی ورق استفاده شده است. جهت معرفی خواص ورق نتایج بدست آمده از تست کشش ورق به صورت جدول تنش- کرنش به نرم افزار وارد گردید. خواص مکانیکی ورق‌های مورد استفاده در جدول ۱ و ۲ ذکر گردید. سایر تجهیزات به صورت صلب مدل شده، و از المان‌های صلب R3D4 برای مش بندی آنها استفاده شده است. ضریب اصطکاک مابین سطح تماس ورق با ورق گیر و قالب ۰،۰۵، و برای سطح تماس مابین سنبه و ورق ۰،۱۴ می باشد [۱۰]. نوع تماس بین ورق و سطوح قالب در شبیه سازی از نوع سطح به سطح انتخاب شده است. اجرای شبیه سازی‌ها در دو گام تنظیم شده است که، در گام اول فشار پیش- بالچ اعمال گردیده و در گام دوم، با اعمال فشار سیال سنبه به داخل محفظه قالب نفوذ می‌کند. به علت دقت و سرعت بالای روش Dynamic/Explicit در حل مسایل تماسی پیچیده از روش فوق جهت تحلیل استفاده شده است.



شکل ۸- مدل اجزای محدود ایجاد شده در نرم افزار

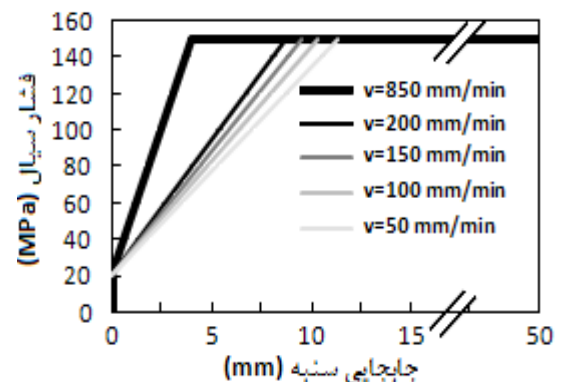
در این پژوهش برای بررسی پارگی ورق‌های آلومینیومی از معیار پارگی کاکرافت و لاتهم در شبیه‌سازی‌ها استفاده شد [۱۱]. این معیار بر مبنای کار پلاستیک کلی در واحد حجم می‌باشد و بر طبق این معیار، شکست در مواد نرم زمانی اتفاق می‌افتد که شرایط زیر فراهم گردد:

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \sigma_{max} d\bar{\epsilon} = C_1 \quad (1)$$



شکل ۶- نمونه مسیر فشار اعمال شده در آزمایشات و شبیه سازی‌ها

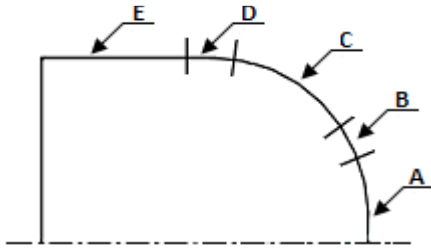
همانطور که در شکل ۶ نشان داده شد، افزایش فشار در مسیر فشار AB متناسب با نفوذ حجمی سنبه به محفظه سیال می‌باشد، بنابراین با تغییر در سرعت حرکت سنبه شیب این مسیر قابل تغییر بوده و می‌توان زمان رسیدن به فشار بیشینه را با تغییر سرعت حرکت سنبه تغییر داد. شکل ۷ تغییرات مسیر فشار را با تغییر در سرعت جابجایی سنبه نشان می‌دهد. به دلیل هیدرودینامیکی بودن فرآیند شکل دهی، آب بندی انجام شده بین ورق گیر و ماتریس از نوع فلز به فلز بوده، و در انجام آزمایشات از هیچ گونه اورینگ برای آب بندی استفاده نشده است. بنابراین از فاصله مابین ورق گیر و ماتریس، سیال حین شکل دهی نشت می‌کرد ولی به علت کوچک بودن این فاصله مقدار این نشتی خیلی کمتر از میزان آن، در مقایسه با فرآیند هیدرودینامیکی معمولی است. در نتیجه جریان سیال باعث ایجاد یک فشار شعاعی بر روی لبه‌های ورق می‌گردد. سیال مورد استفاده در آزمایشات روغن SAE 10 می‌باشد.



شکل ۷- تغییرات شیب مسیر فشار با تغییر در سرعت جابجایی سنبه

### ۳- شبیه سازی اجزای محدود

نرم افزار اجزای محدود ABAQUS 6.7.1 برای انجام شبیه سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۸ مدل اجزای



شکل ۹- نواحی مختلف مورد مطالعه در قطعه استوانه‌ای - نیم-کروی

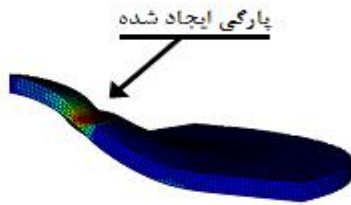
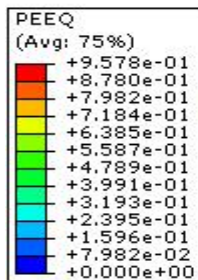
۴-۱-۱- تأثیر مسیر فشار شکل‌دهی بر روی پارگی

شکل ۱۰ نمونه شکل داده شده به روش کشش عمیق معمولی را نشان می‌دهد. همانطور که می‌توان مشاهده کرد به علت تنش بالایی که در ناحیه پیشانی سنبه به ورق وارد می‌شود، اندکی پس از نفوذ سنبه به داخل ماتریس، ورق در ناحیه‌ای کمی پایین‌تر از نوک سنبه یعنی ناحیه B دچار گسیختگی شده است. علت واقع شدن پارگی در ناحیه B این است که در حین عملیات شکل‌دهی به دلیل وجود تنش تماسی اصطکاکی، حداکثر کشش و کرنش در فاصله معینی از رأس سنبه رخ می‌دهد بطوریکه نمونه در صورت پارگی، به جای رأس سنبه در ناحیه B دچار پارگی می‌شود.

پارگی ایجاد شده



آزمایش تجربی



شبیه‌سازی

شکل ۱۰- نمونه شکل داده با استفاده از فرآیند کشش عمیق معمولی و وقوع پارگی در ناحیه B

شکل ۱۱ نمونه شکل داده شده با استفاده از مسیر فشار با فشار بیشینه ۵ MPa را به همراه نتیجه بدست آمده از شبیه-

که در اینجا  $\sigma_{max}$  بیشینه تنش کششی بوده و  $\bar{\epsilon}_f$  کرنش معادلی است که در آن پارگی رخ می‌دهد. همچنین در رابطه فوق  $C_1$  ثابت مربوط به جنس ماده می‌باشد.

همچنین برای بررسی پارگی ورق‌های مسی بر طبق مرجع [۱۲] مقدار بیشینه کرنش موثر به عنوان معیار پارگی در نظر گرفته شده است. بر طبق این معیار، پارگی زمانی اتفاق می‌افتد که:

$$\bar{\epsilon} = nS \quad (3)$$

که در اینجا:

$$S = \frac{(1+R)}{(1+2R)^{1/2}} \quad (4)$$

که در رابطه‌های بالا  $\bar{\epsilon}$  کرنش موثر،  $n$  نمای کرنش سختی و  $R$  نسبت کرنش پلاستیک است. با توجه به اینکه برای ورق مسی مورد استفاده  $R = 1$  و  $n = 0.44$  می‌باشد بنابراین با جایگذاری مقادیر فوق در رابطه (۳) معیار پارگی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\bar{\epsilon} = 0.508$$

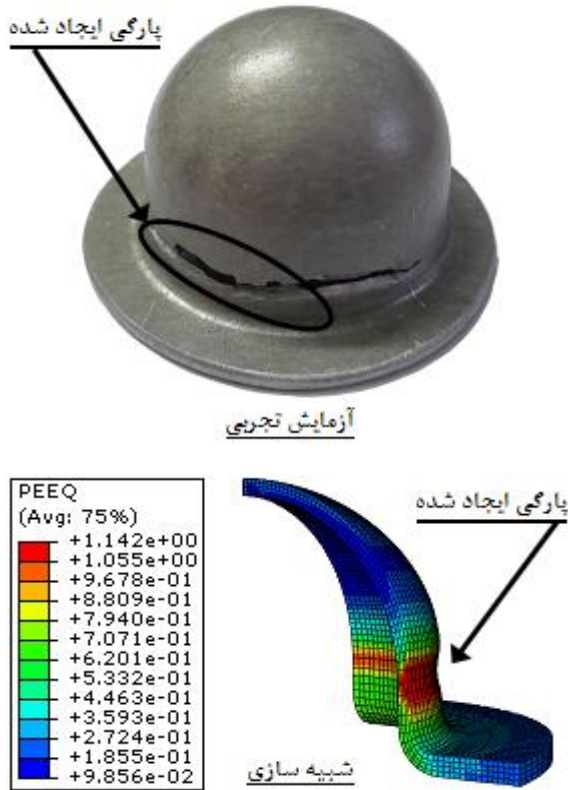
۴- نتایج و بحث

نتایج حاصل از این پژوهش در دو بخش مورد بحث قرار می‌گیرد. در بخش اول شکل‌دهی قطعات استوانه‌ای- نیم‌کروی از جنس آلیاژ آلومینیومی AA6063-T4 مورد بحث قرار گرفته و تأثیر مسیر فشار بر روی عیوب ایجاد شده و توزیع ضخامت قطعات شکل داده شده مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش دوم با ارائه یک روش سیستماتیک، تأثیر پارامترهای کلیدی شکل‌دهی به صورت همزمان تحلیل و بررسی گردیده است.

۴-۱- تأثیر مسیر فشار

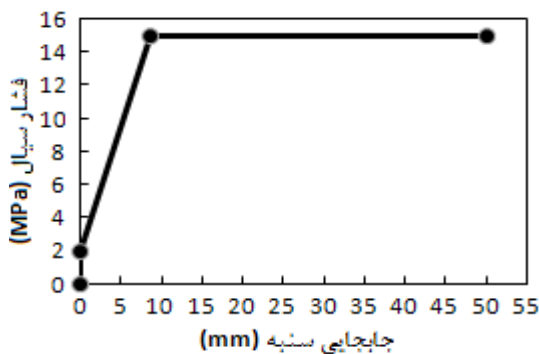
مسیر فشار نمونه اعمالی در آزمایشات و شبیه‌سازی‌ها در شکل ۶ نشان داده شد. همانطور که در بخش ۲ بحث گردید به ازای تغییر در سرعت جابجایی سنبه و یا تغییر در بیشینه فشار اعمالی می‌توان مسیر فشارهای متفاوتی را بدست آورد. بنابراین برای سرعت‌های کورس مختلف، فرآیند شکل‌دهی در نرم افزار شبیه‌سازی گردید. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی اجزای محدود نشان داد که سرعت جابجایی  $200 \text{ mm/min}$  یک مسیر فشار مناسبی را برای شکل‌دهی قطعات استوانه‌ای- نیم‌کروی فراهم می‌کند، بنابراین برای مطالعه دقیق‌تر، آزمایشات تجربی بیشتری با استفاده از سرعت جابجایی  $200 \text{ mm/min}$  و برای بیشینه فشارهای متفاوتی اجرا گردید. برای بررسی دقیق‌تر اثر مسیر فشار بر روی کیفیت شکل‌پذیری قطعات، بر اساس توزیع ضخامت بدست آمده از نتایج شبیه‌سازی و تجربی، نمونه‌های تولید شده مطابق شکل ۹ به چندین ناحیه تقسیم-بندی گردیده‌اند و در ادامه به این نواحی ارجاع شده است.

هم در آزمایشات تجربی قابل مشاهده است.



شکل ۱۲- نمونه شکل داده با استفاده از اعمال مسیر فشار با فشار بیشینه ۱۰ MPa

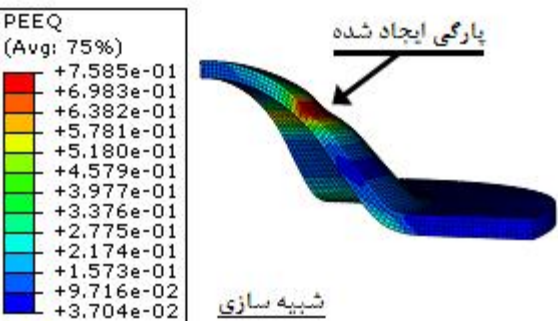
در شکل ۱۳ مسیر فشار متناظر با بیشینه فشار ۱۵ MPa نشان داده شده است.



شکل ۱۳- مسیر فشار مطلوب با فشار نهایی ۱۵ MPa

شکل ۱۴ نمونه شکل داده شده با استفاده از اعمال مسیر فشار فوق را به همراه نتیجه بدست آمده از شبیه سازی نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۱۴ مشاهده می‌شود اعمال مسیر فشار فوق منجر به شکل‌گیری نمونه سالمی در آزمایشات و شبیه سازی

سازی نشان می‌دهد. همانطور که می‌توان مشاهده کرد با استفاده از روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی و اعمال مسیر فشار فوق نمونه به دلیل افزایش سطح تماس ورق با سنبه تا عمق بیشتری نسبت به حالت کشش عمیق معمولی کشیده می‌شود اما به علت پایین بودن فشار اعمال شده به سطح زیرین ورق، فرآیند مشابه کشش عمیق معمولی عمل کرده، و در نتیجه‌ای تنش بسیار بالای که در ناحیه پیشانی سنبه به ورق اعمال می‌شود، نمونه در ناحیه B دچار پارگی شده است. بنابراین برای برطرف کردن عیب پارگی به وجود آمده در ناحیه B اجرای آزمایشات برای مسیرهای فشار با فشار بیشینه بالاتر ادامه یافت.

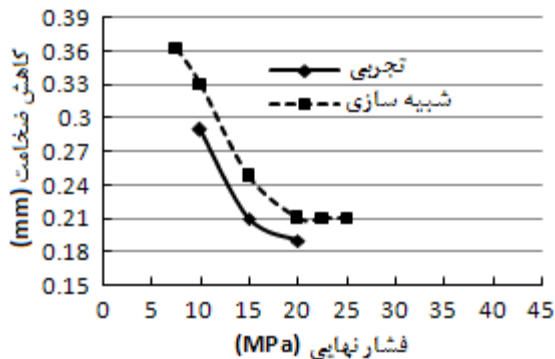


شکل ۱۱- نمونه شکل داده با استفاده از فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی با اعمال مسیر فشار با فشار بیشینه ۵ MPa

در شکل ۱۲ نمونه شکل داده شده در آزمایشات و شبیه سازی، با اعمال مسیر فشار با فشار بیشینه ۱۰ MPa نشان داده شده است. همانطور که مشخص است اعمال مسیر فشار فوق با افزایش سطح تماس نگهدارنده اصطکاکی مابین ورق و سنبه، منجر به برطرف شدن عیب پارگی بوجود آمده در ناحیه B شده است. اما همانطور که می‌توان مشاهده کرد نمونه در ناحیه D، یعنی ناحیه انتقال سطح نیم‌کروی به استوانه‌ای دچار گسیختگی گردیده است که این پدیده هم در شبیه سازی اجزای محدود و

گردیده است.

مابین نتایج تجربی و شبیه‌سازی برقرار است. همچنین مشاهده می‌شود که نمونه شکل داده شده دارای توزیع ضخامت غیر یکنواختی بوده و کاهش ضخامت شدیدی در ناحیه D اتفاق افتاده است. همانطور که قبلاً ذکر شد یکی از مزایای فرآیند هیدروفرمینگ ورق توزیع ضخامت یکنواخت قطعات شکل داده شده با استفاده از این روش می‌باشد. بنابراین برای دستیابی به نمونه‌هایی با توزیع ضخامت یکنواخت مسیرهای فشار با بیشینه فشار بالاتر مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج بدست آمده از آزمایشات تجربی و شبیه‌سازی نشان داده است که دو ناحیه B و D، بحرانی‌ترین نواحی در قطعات استوانه‌ای- نیم‌کروی می‌باشند و نمونه می‌تواند در این دو ناحیه دچار پارگی گردد، بنابراین برای تعیین مناسبترین مسیر فشار جهت حصول قطعه با توزیع ضخامت یکنواخت، تغییرات بیشترین کاهش ضخامت در نواحی B و D در فشارهای مختلف مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. شکل ۱۶ منحنی تغییرات بیشترین کاهش ضخامت قطعه در ناحیه B را بر حسب بیشینه فشار شکل‌دهی نشان می‌دهد.



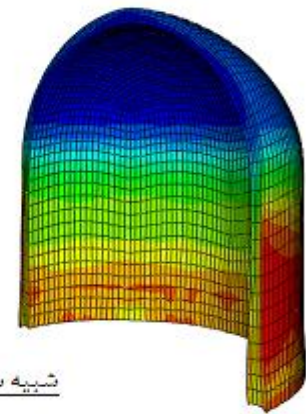
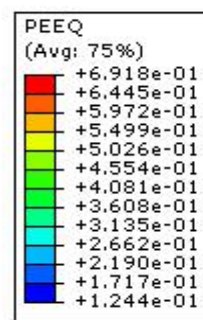
شکل ۱۶- منحنی تغییرات بیشترین کاهش ضخامت ناحیه B بر حسب بیشینه فشار شکل‌دهی

از شکل ۱۶ می‌توان مشاهده کرد که بیشترین کاهش ضخامت در استفاده از مسیر فشار ۷.۵ MPa اتفاق می‌افتد، در ادامه با افزایش فشار تا مقدار ۲۰ MPa بیشترین کاهش ضخامت با شیب تندی کاهش می‌یابد. بعد از فشار ۲۰ MPa افزایش فشار تأثیری در بهبود ضخامت در ناحیه B نخواهد داشت. شایان ذکر است که در استفاده از مسیرهای فشار بالاتر از ۲۵ MPa به علت یکنواخت شدن تغییرات ضخامت در قسمت نیم‌کروی قطعه، نازک شدگی موضعی در ناحیه B مشاهده نمی‌شود.

منحنی تغییرات بیشترین کاهش ضخامت قطعه در ناحیه D، بر حسب بیشینه فشار شکل‌دهی در شکل ۱۷ نشان داده شده است. همانطور که می‌توان مشاهده کرد بیشترین کاهش



آزمایش تجربی

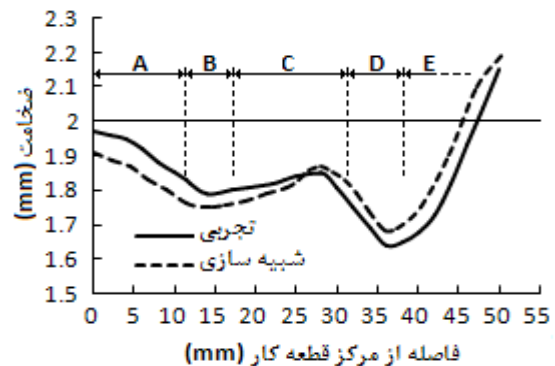


شبیه‌سازی

شکل ۱۴- نمونه شکل داده با استفاده از اعمال مسیر فشار با فشار بیشینه ۱۵ MPa

#### ۴-۱-۲- تأثیر فشار شکل‌دهی بر روی توزیع ضخامت

منحنی توزیع ضخامت بدست آمده از نتایج آزمایشات و شبیه‌سازی برای اولین نمونه سالم شکل داده شده که تحت اعمال مسیر فشار ۱۵ MPa بدست آمد در شکل ۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۵- مقایسه منحنی توزیع ضخامت بدست آمده از نتایج شبیه‌سازی و آزمایش تجربی برای مسیر فشار ۱۵ MPa همانگونه که در شکل ملاحظه می‌شود مطابقت قابل قبولی



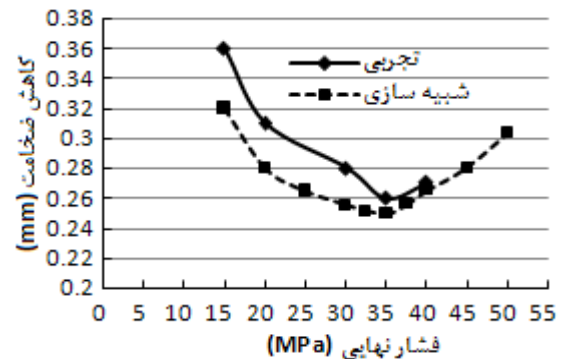
#### ۴-۲-۲- ارائه یک روش اصولی و سیستماتیک جهت بررسی و تحلیل همزمان پارامترهای کلیدی شکل‌دهی

##### ۴-۲-۱- اصول و روش کار

در مسایل مهندسی، به علت بالا بودن تعداد پارامترهای مؤثر، طرح ریزی آزمایشات با در نظر گرفتن تمامی فاکتورها به همراه سطوح متناظر با آنها، منجر به بالا رفتن تعداد ترکیبات و شرایط آزمایشی ممکن شده، و در نتیجه باعث بالا رفتن هزینه‌ها می‌گردد. برای کاهش تعداد آزمایشات، روش مرسوم استفاده از آزمایشات فاکتوریلی جرئی است. تاگوچی مجموعه‌ای از آرایه-های متعامد استاندارد را برای طراحی آزمایشات فاکتوریلی ایجاد کرده است. استفاده از آرایه‌های متعامد منجر به کم شدن تعداد آزمایشات لازم می‌گردد، در حالیکه همچنان می‌توان بیشترین اطلاعات را از نتایج آزمایشات استخراج کرد. برای رسیدن به کیفیت مطلوب محصول، تاگوچی فرآیند سه مرحله‌ای را پیشنهاد کرد که شامل (۱)- طراحی سیستمها، (۲)- طراحی پارامتر و (۳)- طراحی تیرانس می‌باشد. طراحی سیستمها شامل به کارگیری علوم و اطلاعات مهندسی برای تولید یک محصول می‌باشد، در پایان این مرحله، پارامترهای مهم شناسایی شده، و سطوح کاری مناسبی برای هر یک از آنها تعیین می‌گردد. در مرحله طراحی پارامتر سطوح بهینه هر پارامتر که باعث بهترین عملکرد از محصول/ فرآیند می‌شوند تعیین می‌گردند. شرایط بهینه طوری انتخاب می‌شوند که تأثیر فاکتورهای غیر قابل کنترل، باعث حداقل تغییرات در عملکرد سیستم و کیفیت محصولات خروجی گردند. در مرحله طراحی تیرانس با محدود کردن تیرانس فاکتورهایی که تأثیر عمده‌ای بر خواص نهایی محصول دارند، می‌توان کیفیت محصول را افزایش داد [۱۳].

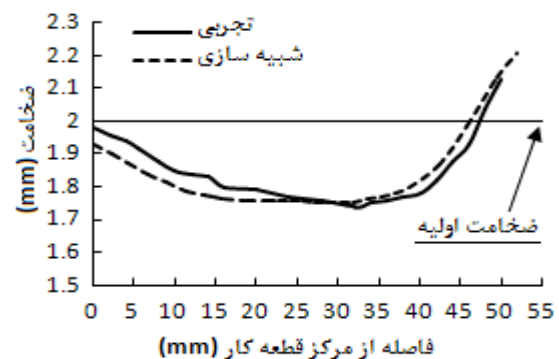
در مقاله حاضر، با بکارگیری مزایای روش تاگوچی و ترکیب آن با شبیه‌سازی اجزای محدود و آنالیز واریانس (ANOVA)، یک روش سیستمی و اصولی برای بررسی تأثیر پارامترهای شکل‌دهی بر روی شکل‌پذیری ورق و تولید قطعات با کیفیت نهایی بهتر در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی ارائه شده است. برای رسیدن به این هدف ابتدا پارامترهای شکل‌دهی و مشخصه‌های ارزیابی انتخاب شده و آرایه استاندارد مناسب تاگوچی ایجاد گردیده است. مدل اجزای محدود با استفاده از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS ایجاد گردیده است که در بخش ۳ مورد بحث قرار گرفت. بعد از اثبات تجربی درستی مدل توسعه داده شده، شبیه‌سازی‌ها بر اساس آزمایشات طراحی شده توسط آرایه استاندارد تاگوچی اجرا گردیده‌اند. در ادامه نتایج بدست آمده از آزمایشات به نسبت‌های S/N (سیگنال به نویز) تبدیل شده و برای مشخص کردن پارامترهای مهم تأثیرگذار،

ضخامت در ناحیه D برای مسیر فشار ۱۵ MPa می‌باشد که این فشار حداقل فشار لازم برای شکل‌دهی یک نمونه سالم می‌باشد. در ادامه با افزایش فشار از ۱۵ MPa تا ۳۵ MPa بیشترین کاهش ضخامت با شیب تندی کاهش می‌یابد و نمونه شکل داده شده کاهش ضخامت کمتری را تجربه خواهد کرد. اما در استفاده از مسیرهای فشار بالاتر از ۳۵ MPa این روند معکوس شده و افزایش فشار باعث بدتر شدن شرایط شکل‌دهی می‌گردد، در نتیجه کاهش ضخامت بار دیگر تشدید می‌گردد.



شکل ۱۷- منحنی تغییرات بیشترین کاهش ضخامت ناحیه D بر حسب پیشینه فشار شکل‌دهی

با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ می‌توان به این نتیجه رسید که برای نمونه مورد نظر و شرایط موجود، مسیر فشار با پیشینه فشار ۳۵ MPa مناسبترین مسیر برای رسیدن به نمونه سالم با توزیع ضخامت یکنواخت می‌باشد. شکل ۱۸ منحنی توزیع ضخامت بدست آمده از نتایج شبیه‌سازی و آزمایش تجربی را برای نمونه شکل داده شده با استفاده از اعمال مسیر فشار ۳۵ MPa را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل ملاحظه می‌شود مطابقت قابل قبولی مابین نتایج تجربی و شبیه‌سازی برقرار است و نمونه شکل داده با اعمال مسیر فشار فوق دارای توزیع ضخامت یکنواختی می‌باشد.



شکل ۱۸- منحنی توزیع ضخامت بدست آمده از نتایج شبیه سازی و آزمایش تجربی برای مسیر فشار ۳۵ MPa

اول شماره آزمایش و ستونهای بعدی سطح هر یک از فاکتورها را برای هر یک از موقعیت‌های آزمایشی نشان می‌دهد. به منظور بررسی تاثیر پارامترهای فوق قطعات استوانه‌ای- نیم‌کروی از ورق‌های از جنس مس خالص با استفاده از فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی شکل‌دهی گردیده‌اند. انتخاب جنس مس خالص به این دلیل است که مس خالص در مقایسه با آلیاژ آلومینیومی AA6063-T4 دارای خواص شکل‌پذیری مناسبتری می‌باشد بنابراین محدوده کاری مجاز شکل‌دهی برای مس خالص وسیع‌تر خواهد بود، در نتیجه می‌توان دامنه وسیع‌تری برای پارامترهای لیست شده در جدول ۳ انتخاب کرد.

### جدول ۳- پارامترهای فرآیندی و هندسی و سطوح متناسب هر

#### یک از پارامترها

پارامتر	سطوح		
	1	2	3
A: فشار شکل دهی P (MPa)	10.0	20.0	30.0
B: ضریب اصطکاک $\mu$	0.08	0.14	0.20
C: جابجایی g (mm)	0.00	0.05	0.10
D: شعاع ورودی قالب R (mm)	3.00	4.00	5.00

برای اندازه‌گیری کیفیت شکل‌دهی از معیار عمومی بیشینه نسبت نازک شدگی استفاده شده است. آزمایشات برای یک عمق کشش ثابت اجرا گردیده‌اند و بیشینه نسبت نازک شدگی در نواحی بحرانی اندازه‌گیری شده است. نسبت نازک شدگی به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۵]:

$$\text{Thinning ratio } (\%) = \frac{t_0 - t_1}{t_0} \times 100 \quad (5)$$

### جدول ۴- آرایه متعامد استاندارد تاگوچی (L-9)

شماره آزمایش	پارامتر			
	P (MPa)	$\mu$	g (mm)	R (mm)
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

در شکل ۱۹ یک نمونه از قطعه‌کار مسی شکل داده شده در آزمایشات نشان داده شده است. برای بررسی صحت نتایج شبیه‌سازی، توزیع ضخامت قطعه‌کار شکل داده شده در آزمایشات، با

آنالیز آماری واریانس (ANOVA) بر روی نتایج بدست آمده اجرا گردیده است و بدین ترتیب می‌توان پارامترهایی را که تاثیر عمده‌ای بر روی کیفیت نمونه شکل داده دارند شناسایی کرده و همچنین یک ترکیب بهینه‌ای از پارامترهای مورد مطالعه را بدست آورد.

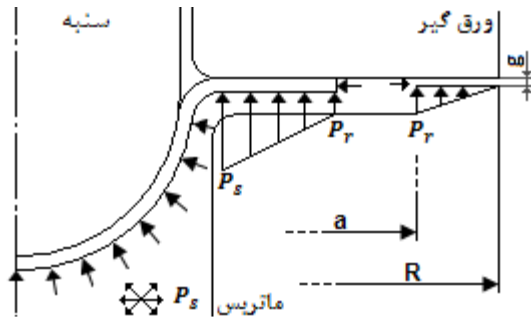
### ۴-۲-۲ انتخاب پارامترها و ایجاد آرایه استاندارد

به طور کلی سه نوع تقسیم بندی برای پارامترهای تاثیرگذار بر روی شکل‌پذیری ورق در فرآیند هیدروفرمینگ وجود دارد که عبارتند از (۱)- پارامترهای هندسی (۲)- پارامترهای مواد و (۳)- پارامترهای فرآیندی. از میان پارامترهای فوق مطابق بر طبق مراجع [۱۴ و ۱۵]، پارامترهای مواد همچون توان کرنش سختی، نسبت تنش اسمی و نسبت ناهمسانگردی تأثیر خیلی کمی بر روی شکل‌پذیری ورق در مقایسه با پارامترهای هندسی و پارامترهای فرآیندی دارند. ثانیاً در بیشتر موارد برای یک قطعه‌کار خاص، انعطاف‌پذیری بسیار کمی در تغییر، در پارامترهای ماده وجود دارد، بنابراین در این مقاله مطالعه پارامترهای هندسی و پارامترهای فرآیندی مورد توجه قرار گرفته است. از جمله پارامترهای فرآیندی و هندسی که فرآیند هیدروفرمینگ ورق را تحت تأثیر قرار می‌دهند می‌توان به فشار محفظه سیال، فشار پیش‌بالج، شرایط اصطکاکی مابین ورق و اجزای مختلف قالب، شعاع ورودی قالب، شعاع ورودی ورق‌گیر، ضخامت ورق و غیره اشاره کرد. همچنین همانطور که در بخش-های قبلی بیان شد، در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی، در نتیجه محدود کردن فاصله مابین سطح لبه قالب و ورق‌گیر (g)، یک فشار شعاعی بر روی لبه‌های ورق حین شکل‌دهی اعمال می‌شود. بنابراین اندازه این فاصله نیز می‌تواند با تحت تأثیر قرار دادن میزان فشار شعاعی اعمال شده بر لبه‌های ورق، شکل‌پذیری ورق را تحت تأثیر قرار دهد. لذا در این مقاله پارامتر فوق به همراه سه پارامتر فشار سیال محفظه شکل‌دهی، ضریب اصطکاک مابین فصل مشترک سطح سنبه و ورق، و شعاع ورودی قالب به عنوان پارامترهای ورودی برای طراحی آزمایشات مورد توجه قرار گرفته‌اند. پارامترهای مورد ارزیابی به همراه سطوح انتخاب شده برای هر یک از آنها در جدول ۳ نشان داده شده است. برای مطالعه اثرات چهار فاکتور در سه سطح  $3^4 = 81$  ترکیب ممکن از موقعیتهای آزمایشی وجود خواهد داشت، اما با استفاده از آرایه متعامد استاندارد تاگوچی (L-9)، که برای طراحی آزمایش، با داشتن چهار فاکتور با سه سطح کاری مناسب است می‌توان تعداد موقعیتهای آزمایشی را به عدد ۹ کاهش داد. آرایه متعامد (L-9) همراه با مکان فاکتورها و سطوح انتخابی آنها در جدول ۴ آمده است. که ستون

رابطه بین فشار شعاعی اعمال شده بر روی لبه‌های ورق با سایر پارامترهای قالب را نشان می‌دهد [۸]:

$$P_r = \frac{6\eta Q}{\pi g^3} \ln\left(\frac{R}{a}\right) \quad (۶)$$

در این رابطه  $Q$  جریان سیال،  $\eta$  ویسکوزیته سیال و  $g$  فاصله ما بین سطح لبه محیطی قالب با سطح ورق گیر می‌باشد. همچنین  $R$  شعاع خارجی و  $a$  شعاع داخلی لبه محیطی قالب می‌باشد که در شکل ۲۱ نشان داده شده‌اند.



شکل ۲۱- الگوی رفتاری تغییرات فشار سیال در ناحیه فلانج با تغییرات فشار شعاعی

در معادله بالا فشار اعمال شده بر روی لبه‌های ورق، با عکس توان سوم  $g$  رابطه دارد. بنابراین با تغییرات جزئی در این پارامتر، فشار شعاعی دستخوش تغییرات فراوانی می‌شود. دامنه در نظر گرفته شده برای بررسی تاثیرات این پارامتر طوری تنظیم شده است که فرآیند از حالت فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار یکنواخت روی لبه‌های ورق (فشار شعاعی برابر با فشار محفظه سیال)، تا حالت کشش عمیق هیدرودینامیکی معمولی (فشار شعاعی صفر) تغییر می‌کند. همچنین برای مطالعه تأثیرات فشار محفظه سه مسیر فشار با فشارهای نهایی متفاوت انتخاب گردیده‌اند. نرم افزار ABAQUS قابلیت لینک شدن با نرم افزار فرترن را داشته و برای اعمال فشار سیال و تغییرات آن در سطح زیرین ورق، و همچنین تغییرات فشار شعاعی اعمال شده بر لبه ورق، زیر روال مرتبط با آن (VDLOAD) در نرم افزار فرترن نوشته شده و هنگام اجرای شبیه‌سازی‌ها با مدل ایجاد شده توسط نرم افزار ABAQUS ترکیب می‌شود.

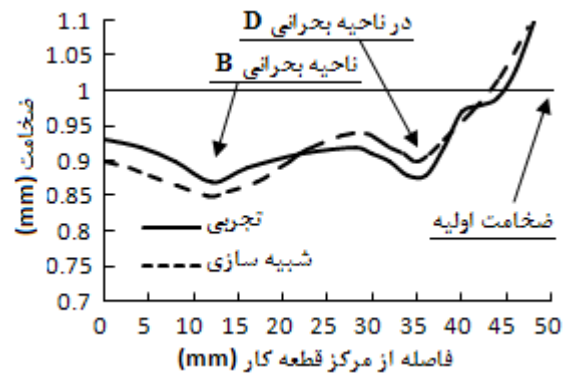
#### ۲-۳-۴ اجرای آزمایشات و تحلیل نتایج

برای بررسی تأثیر پارامترهای نشان داده شده در جدول ۳، شبیه‌سازی‌ها برای هر دسته از پارامترهای ورودی طراحی شده در جدول ۴ تنظیم و اجرا گردیده‌اند و بیشینه نسبت نازک شدگی به عنوان معیار ارزیابی در نظر گرفته شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در بخش ۴-۱-۲ و همچنین شکل ۲۰ برای

نمودار تغییرات ضخامت بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها مقایسه شده است، که همانطور که در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود با نتایج تجربی مطابقت خوب و قابل قبولی دارد. از اینرو مدل اجزای محدود ایجاد شده می‌تواند برای انجام آزمایشات نشان داده شده در جدول ۴ مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱۹- نمونه شکل داده شده در آزمایشات تجربی



شکل ۲۰- مقایسه منحنی توزیع ضخامت بدست آمده از نتایج تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود

در اجرای آزمایشات نشان داده شده در جدول ۴ پارامترهای ضریب اصطکاک مابین ورق و سنبله، و شعاع ورودی قالب به آسانی در شبیه‌سازی‌ها قابل تنظیم بودند.

اما نکته مهم در شبیه‌سازی فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی، فشار محفظه و تغییرات آن در سطح زیرین ورق می‌باشد که در شکل ۲۱ نشان داده شده است. علاوه بر این در فرآیند فوق، با تغییر میزان گپ مابین سطح لبه محیطی قالب و سطح ورق گیر مقدار فشار شعاعی اعمال شده بر روی لبه‌های ورق نیز تغییر می‌کند. معادله (۶)

در رابطه بالا  $l$  تعداد سطوح فاکتور  $p$  (در این مقاله  $l=3$ )،  $t$  تعداد آزمایشات برای فاکتور  $p$  در سطح  $j$  و  $\left(\frac{S}{N}\right)_j$  میانگین نسبت  $S/N$  برای فاکتور  $p$  در سطح  $j$  می باشد. درصد مشارکت فاکتور  $p$  را با استفاده از رابطه زیر می توان محاسبه کرد:

$$P_p(\%) = \frac{SS_p}{SS_T} \times 100 \quad (11)$$

#### ۴-۲-۳-۳ بررسی و تحلیل نتایج

جدول ۵ بیشینه نسبت نازک شدگی و نسبت  $S/N$  متناظر را برای دو ناحیه بحرانی B و D در ۹ شرایط آزمایشی مختلف نشان می‌دهد. برای بدست آوردن درجه اهمیت و میزان تأثیر هر یک از فاکتورها بر روی بیشینه نسبت نازک شدگی در نواحی بحرانی، آنالیز واریانس (ANOVA) بر روی نتایج نشان داده شده در جدول ۵ اجرا گردیده است.

#### جدول ۵- بیشینه نسبت نازک شدگی در مناطق بحرانی B و D

و نسبت  $S/N$  متناظر

بیشینه نسبت نازک شدگی				شماره آزمایش
ناحیه B		ناحیه D		
Thin...-R	S/N	Thin...-R	S/N	
0.08148	21.7786	0.13467	17.4145	1
0.06685	23.4969	0.12610	17.9857	2
0.05168	25.7333	0.12028	18.3961	3
0.03806	28.3885	0.11260	18.9692	4
0.05359	25.4176	0.10114	19.9015	5
0.02757	31.1890	0.07709	22.2600	6
0.05600	25.0360	0.12608	17.9870	7
0.02309	32.7307	0.08859	21.0523	8
0.04601	26.7423	0.09619	20.3374	9

از آنجایی که کمترین نسبت نازک شدگی در نواحی B و D مطلوب‌تر است مشخصه ارزیابی کوچکتر- بهتر برای تحلیل نتایج مورد استفاده قرار گرفت. جدول ۶ میانگین نسبت  $S/N$  سطوح مختلف هر یک از فاکتورها را در ناحیه بحرانی B نشان می‌دهد.

#### جدول ۶- میانگین نسبت $S/N$ ماکزیمم نسبت نازک شدگی در

ناحیه بحرانی B برای سطوح مختلف فاکتورها

میانگین نسبت $S/N$			پارامتر
سطح 3 (L-3)	سطح 2 (L-2)	سطح 1 (L-1)	
17.93214	20.37694	19.79226	A
18.12363	19.64652	20.33119	B
20.24231	19.09744	18.76158	C
19.21784	19.41094	19.47256	D

همچنین نتایج آنالیز واریانس برای بیشینه نسبت نازک شدگی در ناحیه بحرانی B در جدول ۷ آمده است. نتایج بدست

قطعه کار استوانه‌ای- نیم‌کروی دو ناحیه بحرانی B و D قابل شناسایی است که نازک شدگی در این دو منطقه قابل توجه بوده، و می تواند منجر به خرابی زودرس قطعه کار گردد. بنابراین بیشینه نسبت نازک شدگی در این دو ناحیه از نتایج شبیه‌سازی-ها استخراج شده است. در ادامه نتایج بدست آمده به نسبت های  $S/N$  تبدیل گردیده‌اند و آنالیز واریانس (ANOVA) برای شناسایی پارامترهای که بیشترین تأثیر را دارند به طور مجزا بر روی نتایج بیشینه نسبت نازک شدگی دو ناحیه B و D اجرا گردیده است.

#### ۴-۲-۳-۱ آنالیز $S/N$

عموماً مشخصه ارزیابی می تواند یکی از سه مشخصه کیفی (۱)- کوچکتر- بهتر (۲)- بزرگتر- بهتر و (۳)- مقدار اسمی- بهتر باشد. در روش تاگوچی برای اندازه‌گیری انحراف مشخصه ارزیابی از مقدار مطلوب آن از نسبت  $S/N$  استفاده می گردد. نسبت  $S/N$  به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۳]:

$$S/N = -10 \log(MSD) \quad (7)$$

که در این رابطه  $MSD$  میانگین مربعات انحرافات از مشخصه کیفی می‌باشد. مشخصه ارزیابی بیشینه نسبت نازک شدگی، مشخصه ارزیابی با تابع هدف کوچکتر- بهتر می باشد. میانگین مربعات انحرافات برای مشخصه ارزیابی کوچکتر- بهتر به صورت زیر تعریف می شود:

$$MSD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (8)$$

در این رابطه  $y_i$  مقدار مشخصه ارزیابی کوچکتر- بهتر بوده و  $n$  تعداد تستها برای یک شرایط آزمایشی می باشد.

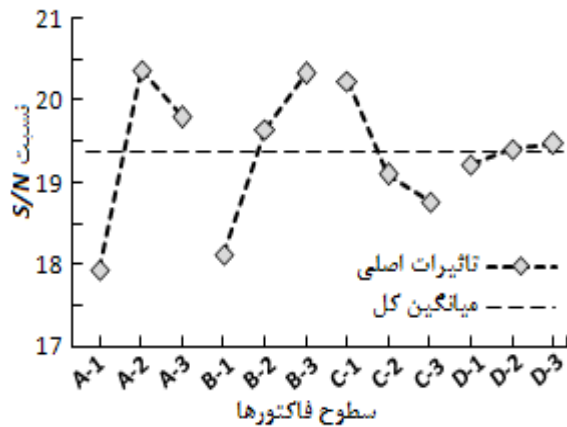
#### ۴-۲-۳-۲ آنالیز واریانس (ANOVA)

برای بررسی تأثیر کمی پارامترهای مورد مطالعه، آنالیز واریانس بر روی نتایج اجرا گردیده است. در این روش با مقایسه واریانس تاثیرات پارامترهای مختلف ارزیابی می‌گردد [۱۶]. مجموع مربعات کل ناشی از انحراف از میانگین کلی  $S/N$  به صورت زیر می‌باشد:

$$SS_T = \sum_{i=1}^m \left(\frac{S}{N}\right)_i^2 - \frac{1}{m} \left[\sum_{i=1}^m \left(\frac{S}{N}\right)_i\right]^2 \quad (9)$$

که در این رابطه  $m$  تعداد کل آزمایشات می باشد. مجموع مربعات کل ناشی از انحراف از میانگین کلی  $S/N$  برای فاکتور  $P$  از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$SS_P = \sum_{j=1}^l \frac{\left(\left(\frac{S}{N}\right)_j\right)^2}{t} - \frac{1}{m} \left[\sum_{i=1}^m \left(\frac{S}{N}\right)_i\right]^2 \quad (10)$$



شکل ۲۲- تأثیر اصلی فاکتورها بر روی بیشینه نسبت نازک شدگی در ناحیه بحرانی B

میانگین نسبت  $S/N$ ، بیشینه نسبت نازک شدگی در ناحیه بحرانی D برای سطوح مختلف فاکتورها در جدول ۸ آمده است همچنین جدول ۹ نتایج آنالیز واریانس را برای بیشینه نسبت نازک شدگی در این ناحیه نشان می دهد. مشاهده می شود، که مشابه با نتیجه بدست آمده برای ناحیه بحرانی B، فشار سیال تأثیر گذارترین پارامتر بر روی بیشینه نسبت کاهش ضخامت در ناحیه بحرانی D می باشد. شعاع ورودی قالب نیز تأثیر قابل توجهی روی کاهش ضخامت در ناحیه بحرانی D دارد که نتیجه فوق مشابه نتیجه بدست آمده در روش کشش عمیق معمولی می باشد [۱۷]. فاصله لبه محیطی قالب با ورق گیر (g) و ضریب اصطکاک مابین سطح تماس سنبه با ورق پارامترهای بعدی تأثیر گذار در بیشینه نسبت نازک شدگی در ناحیه بحرانی D می باشند. شکل ۲۳ تأثیر اصلی هر یک از فاکتورها را بر روی بیشینه نسبت نازک شدگی در ناحیه D نشان می دهد.

جدول ۸- میانگین نسبت  $S/N$  بیشینه نسبت نازک

شدگی در ناحیه بحرانی D برای سطوح مختلف فاکتورها

میانگین نسبت $S/N$			پارامتر
سطح 1 (L-1)	سطح 2 (L-2)	سطح 3 (L-3)	
23.66966	28.33177	28.16975	A
25.06777	27.21513	27.88828	B
28.56616	26.20930	25.39571	C
24.64624	26.57403	28.95091	D

آمده نشان می دهد که فشار سیال و ضریب اصطکاک ما بین سطح تماس سنبه با ورق به ترتیب تأثیر گذارترین پارامترها بر روی بیشینه نازک شدگی در ناحیه B می باشند، و در ادامه پارامتر فاصله مابین لبه محیطی قالب و ورق گیر g (فشار شعاعی) نازک شدگی در ناحیه بحرانی B را تحت تأثیر قرار خواهد داد. تأثیر شعاع ورودی قالب بر روی بیشینه نازک شدگی در ناحیه بحرانی B در مقایسه با سایر پارامترها بسیار کم می باشد.

جدول ۷- نتایج آنالیز ANOVA (بیشینه نسبت نازک شدگی در ناحیه بحرانی B)

پارامتر	درجه آزادی	مجموع مربعات	درصد مشارکت
A: فشار سیال	2	9.7789	46.2093
B: ضریب اصطکاک	2	7.6617	36.2047
C: گپ (g)	2	3.6153	17.0840
D: شعاع ورودی *	2	0.1064*	0.5028
کل:	8	21.1622	
خطا:	2	0.1051	

\* فاکتور ادغام شده

شکل ۲۲ تأثیر اصلی هر یک از فاکتورها را بر روی بیشینه نسبت نازک شدگی در ناحیه B نشان می دهد. در این شکل تغییرات (شیب) و دامنه منحنی‌های متناظر با هر یک از پارامترها، درجه اهمیت آن پارامتر را بر روی نتیجه نهایی نشان می دهد. با توجه به اینکه نتایج بدست آمده از آزمایشات به نسبت‌های  $S/N$  تبدیل شده‌اند، مستقل از مشخصه ارزیابی انتخاب شده، نسبت  $S/N$  بالاتر سطح یک فاکتور، نشان دهنده تأثیر مطلوبتر آن بر روی نتیجه نهایی می باشد. بنابراین از شکل ۲۲ می توان مشاهده کرد استفاده از فشار سیال بالاتر منجر به کاهش ضخامت کمتری در ناحیه بحرانی B خواهد شد. دلیل این امر، این است که، فشار سیال اعمال شده به سطح زیرین ورق به عنوان تکیه‌گاه عمل کرده و با افزایش سطح تماس ورق با سنبه و عملکرد مثبت نگهدارنده اصطکاک از نازک شدگی بیش از حد ورق در ناحیه بدون تکیه‌گاه و بویژه در پیشانی قطعه کار جلوگیری می کند. البته با افزایش بیش از حد فشار سیال این روند معکوس شده و قطعه کار کاهش ضخامت بیشتری را در ناحیه B تجربه خواهد کرد. نتایج نشان می دهد ضریب اصطکاک نیز تأثیر بالایی در ماکزیمم نسبت نازک شدگی در ناحیه بحرانی B داشته و با استفاده از سنبه خشن تر شرایط شکل دهی مطلوب تر می شود. همچنین فاصله لبه محیطی قالب با ورق گیر (g) کمتر، به علت اعمال فشار شعاعی بالاتر و شعاع ورودی قالب بزرگتر منجر به کاهش ضخامت کمتری در ناحیه B خواهند شد.

جدول ۹- نتایج آنالیز ANOVA (بیشینه نسبت نازک شدگی

در ناحیه بحرانی D)

پارامتر	درجه آزادی	مجموع مربعات $SS_p$	درصد مشارکت $P_p(\%)$
A: فشار سیال	2	42.0122	42.3526
B: ضریب اصطکاک	2	13.0195	13.1250
C: گپ (g)	2	16.2684	16.4003
D: شعاع ورودی	2	27.8960	28.1220
کل:	8	99.1963	
خطا:	0	0.00000	

شده نشان داد که با افزایش فشار تا یک حد معین، توزیع ضخامت قطعات یکنواخت‌تر شده، و کاهش ضخامت کمتری در کل قطعه و بویژه نواحی بحرانی اتفاق می‌افتد.

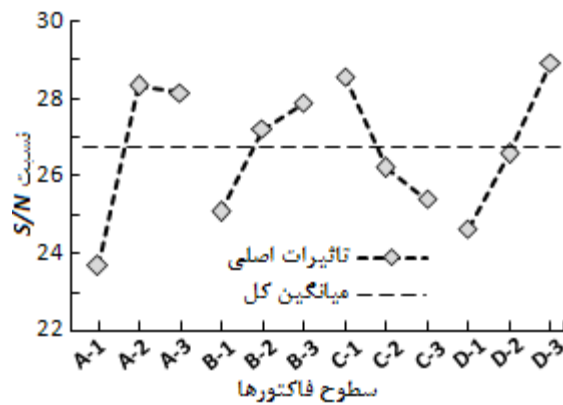
همچنین در این مقاله با ارائه یک روش سیستمی تأثیر پارامترهای کلیدی شکل‌دهی به صورت همزمان مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. نتایج بدست آمده به شرح زیر می‌باشد:

۱- برای هر دو ناحیه بحرانی فشار سیال بیشترین تأثیر را بر روی کیفیت شکل‌پذیری قطعه‌کار دارد، که نشان می‌دهد در فرآیند هیدروفرمینگ ورق برای شکل‌دهی قطعات با توزیع ضخامت یکنواخت و با عمق کشش بالا، انتخاب مسیر فشار مناسب از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است.

۲- استفاده از سنبه خشن‌تر و شعاع ورودی قالب بزرگتر منجر به بهتر شدن شرایط شکل‌دهی شده، و کاهش ضخامت کمتری در هر دو ناحیه بحرانی قطعه‌کار رخ خواهد داد.

۳- برای هر دو ناحیه بحرانی، در استفاده از فاصله مابین سطح لبه محیطی قالب و ورق گیر کمتر، به علت اعمال فشار شعاعی بالاتر شرایط شکل‌دهی بهبود می‌یابد که، حاکی از عملکرد مثبت فشار شعاعی اعمال شده در بهبود توزیع ضخامت قطعات شکل داده می‌باشد و نشان می‌دهد که روش کشش عمیق هیدروفرمینگ با فشار شعاعی می‌تواند به عنوان یک روش مناسب، برای شکل‌دهی قطعات با نسبت کشش بالا و از آلیاژهای با شکل‌پذیری پایین مطرح گردد.

۴- با استفاده نتایج بدست آمده از آنالیز واریانس مطالعات بهینه سازی بعدی می‌تواند بر اساس میزان تأثیر و درجه اهمیت پارامترها صورت گیرد.



شکل ۲۳- تأثیر اصلی فاکتورها بر روی ماکزیمم نسبت نازک

شدگی در ناحیه بحرانی D

همانطور که از شکل فوق مشخص است در استفاده از فشار سیال بالاتر، سنبه خشن‌تر، فاصله گپ کوچکتر (فشار شعاعی بالاتر) و شعاع ورودی بزرگتر کاهش ضخامت کمتری در ناحیه بحرانی D رخ خواهد داد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله شکل‌دهی قطعه استوانه‌ای- نیم‌کروی با استفاده از روش جدید کشش عمیق هیدروفرمینگ با فشار شعاعی مورد بررسی قرار گرفت. نشان داده شد که با استفاده از فرآیند فوق می‌توان قطعات با عمق کشش بالایی را در یک مرحله شکل‌دهی کرد. بر اساس نتایج بدست آمده دو ناحیه بحرانی، اولی در قسمت پیشانی قطعه‌کار و دومی در ناحیه انتقال سطح کروی به استوانه‌ای شناسایی شد. بررسی مسیرهای فشار مختلف نشان داد که مسیر فشار تأثیر بسیار مهمی بر پارگی و توزیع ضخامت قطعات شکل داده شده دارد، بطوریکه در استفاده از مسیرهای فشار با بیشینه فشار پایین، فرآیند شکل‌دهی همانند کشش عمیق معمولی عمل کرده و ورق در پیشانی سنبه دچار پارگی می‌شود. بررسی توزیع ضخامت نمونه‌های شکل داده

مراجع

[1] Amino, H., Nakamura, K., Nakagawa, T. "Counter-pressure deep drawing and its application in the forming of automobile parts", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 23, pp.243-265, 1990.

[2] Lang, L.H., Wang, Z.R., Kang, D.C., Yuan, S.J., Zhang, S.H., Danckert, J., Nielsen, K.B. "Hydroforming highlights: sheet hydroforming and tube hydroforming", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 151, pp. 165-177, 2004.

[3] Thiruvarduchelvan, S. and Travis, F.W. "Hydraulic- Pressure-Enhanced Cup-Drawing Processes-An Appraisal", J. Material Process Tech. Vol. 140.No. 1, pp. 70-75, 2003.

[4] Hesu, T.C., Hsieh, Sh.J. "Theoretical and experimental analysis of failure the hemispherical punch hydroforming processes",

- method” *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 28, pp.23–30, 2006.
- [16] Ross, P.J. “Taguchi Techniques For Quality Engineering”, (McGraw-Hill, Singapore, 1989).
- [17] Padmanabhan, R., Oliveira, M.C., Alves, J.L., Menezes, L.F. “Influence of process parameters on the deep drawing of stainless steel”, *Finite Element in Analysis and Design*, Vol. 43, pp. 1062-1067, 2007.
- journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 118, pp. 434-438, 1996.
- [5] Zhang, S.H., Jensen, M.R., Nielsen, K.B., Danckert, J. Lang, L.H., Kang, D.C. “Effect of anisotropy and prebulging on hydromechanical deep drawing of mild steel cups”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol 142, pp.544-550, 2003.
- [6] Abedrabbo, N., Zampaloni, M., Pourboghrat, F. “Wrinkling control in aluminum sheet hydroforming”, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 47, pp. 333-358, 2005.
- [7] Lang, L., Danckert, J. “Key technologies of the simulation of the hydrodynamic deep drawing of irregular part”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.150, pp.40-47, 2004.
- [8] Lang, L., Danckert, J., Nielsen, K.B. “Investigation into hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure Part I. Experimental observations of the forming process of aluminum alloy”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.148, pp. 119-131, 2004
- [9] Lang, L., Danckert, J., Nielsen, K.B. “Investigation into hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure Part II. Numerical analysis of the drawing mechanism and the process parameters”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.166, pp. 150–161, 2004.
- [10] LIU, X., XU, Y., YUAN, S. “Effects of Loading Paths on Hydrodynamic Deep Drawing with Independent Radial Hydraulic Pressure of Aluminum Alloy Based on Numerical Simulation”, *J. Mater. Sci. Technol.*, Vol. 24 No.3, pp.395-399, 2008.
- [11] Tai, W.H., Yang, B.X. “Fracture prediction in plastic deformation processes”, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 32, pp. 1-17, 1990.
- [12] Wu, J., Balendra, R., and Qin, Y., “A study on the Forming Limits of the Hydromechanical Deep Drawing of Components with Stepped Geometries”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 145(4), pp. 242-246, 2004.
- [13] Ranjit k. Roy. “Design of experiments using the Taguchi approach”, John Wiley and Sons, 2001.
- [14] Sharma, A.K., Rout, D.K. “Finite element analysis of sheet hydromechanical forming of circular cup”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp.1445-1453, 2009.
- [15] Li, B., Nye, T., Metzger, D.R. “Multi-objective optimization of forming parameters for tube hydroforming process based on the Taguchi