



## مطالعه شکل دهی فنجان های فولادی با استفاده از فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی

وحید مدانلو<sup>۱\*</sup>، بهنام آخوندی<sup>۱</sup>، احمد مشایخی<sup>۱</sup>، حسین طالبی قادیکلای<sup>۲</sup>، علی زین العابدین بیگی<sup>۳</sup>

۱- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

۳- کارشناس ارشد، گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

\* سیرجان، صندوق پستی: ۷۸۱۳۷۳۳۳۸۵، v.modanloo@sirjantech.ac.ir

## چکیده

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۷ بهمن ۱۴۰۱

داوری اولیه: ۱۰ اسفند ۱۴۰۱

پذیرش: ۱۴ اسفند ۱۴۰۱

## کلیدواژگان:

کشش عمیق هیدرودینامیکی

فنجان فولادی

شبیه سازی اجزای محدود

نازک شدگی

توزیع ضخامت یکی از پارامترهای مهم در فرایندهای شکل دهی فلزات ورقی می باشد. در این مقاله شکل دهی فنجان های استوانه ای سرتخت فولادی با استفاده از فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی به صورت آزمایشگاهی و شبیه سازی مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا فرایند با استفاده از نرم افزار اجزای محدود آباکوس شبیه سازی شد. در ادامه نتایج حاصل از شبیه سازی اجزای محدود با نتایج آزمایش های تجربی مقایسه شده است. مقایسه نتایج نشان داد که توزیع ضخامت و نیروی سنبه در دو روش آزمایشگاهی و عددی از تطابق قابل قبولی برخوردارند. سپس با استفاده از مدل اجزای محدود صحت سنجی شده، تأثیر پارامترهای فرایند نظیر ضریب اصطکاک بین سنبه و ورق، ضریب اصطکاک بین ورق گیر و ورق، شعاع گوشه سنبه و ماتریس و همچنین فاصله بین ورق گیر و ماتریس بر روی حداکثر میزان نازک شدگی فنجان های فولادی بررسی شده است. در پایان این نتیجه حاصل شد که ناحیه شعاع گوشه سنبه، ناحیه بحرانی شکل دهی می باشد زیرا بیشینه میزان نازک شدگی در این ناحیه رخ می دهد. همچنین با افزایش ضریب اصطکاک بین ورق با سنبه میزان نازک شدگی حداکثر در ناحیه شعاع سنبه به میزان ۱۰٪ کاهش می یابد. به علاوه، با افزایش ضریب اصطکاک بین ورق با ورق گیر میزان نازک شدگی حداکثر به میزان ۲۰٪ افزایش می یابد. همچنین با افزایش شعاع گوشه سنبه و ماتریس، میزان نازک شدگی حداکثر به میزان ۲۵٪ کاهش یافته است و نیز با افزایش فاصله بین ماتریس و ورق گیر میزان نازک شدگی حداکثر به میزان ۱۰٪ کاهش می یابد.

## The study of forming of steel cups using hydrodynamic deep drawing process

Vahid Modanloo<sup>1\*</sup>, Behnam Akhoundi<sup>1</sup>, Ahmad Mashayekhi<sup>1</sup>, Hossein Talebi-Ghadikolae<sup>2</sup>, Ali Zeinolabedin Beygi<sup>3</sup>

1- Mechanical Engineering Department, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

2- Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 7813733385 Sirjan, Iran, v.modanloo@sirjantech.ac.ir

## Article Information

Original Research Paper

Received: 16 February 2023

First Decision: 1 March 2023

Accepted: 5 March 2023

## Keywords:

Hydrodynamic Deep Drawing

Steel Cup

Finite Element Simulation

Thinning

## Abstract

Thickness distribution is one of the important parameters in the sheet metal forming processes. This paper investigates the forming of flat cylindrical cups made of steel using the hydrodynamic deep drawing process via experiment and simulation. At first, the process was simulated using the ABAQUS finite element software. Afterward, the results of the finite element simulation are compared with results of the experiments. Comparing the results showed that the thickness distribution and punch force have an acceptable agreement in the experiment and numerical methods. Then, using the validated finite element model, the effect of the process parameters including the friction coefficient between the punch and the sheet, the friction coefficient between the blank holder and the sheet, the corner radius of the punch and the die, as well as the gap between the blank holder and the die on the maximum thinning of the steel cups have been investigated. Finally, the obtained results revealed that the corner radius zone of the punch is the critical forming zone since the maximum thinning occurs in this region. Also, by increasing the friction coefficient between the sheet and the punch, the maximum thinning decreases by 10% at the corner radius zone of the punch. In addition, by increasing the friction coefficient between the sheet and the blank holder, the maximum thinning increases by 20%. Likewise, by increasing the corner radius of the punch and the die, the maximum thinning decreases by 25%, and also, by increasing the gap between the die and the blank holder, the maximum thinning decreases by 10%.

## Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

V. Modanloo, B. Akhoundi, A. Mashayekhi, H. Talebi Ghadikolae, A.Z. Beygi, The study of forming of steel cups using hydrodynamic deep drawing process, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 8, pp. 56- 64, 2022 (in Persian). <https://www.doi.org/10.22034/IJME.2023.385634.1748>

## ۱- مقدمه

طی سال‌های اخیر، پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه فرایند شکل‌دهی فنجان‌های فلزی با استفاده از کشش عمیق به کمک سیال گزارش شده است که برخی از آن‌ها به صورت آزمایشگاهی، برخی به صورت شبیه‌سازی و برخی به صورت تحلیلی بوده‌اند. لنگ و همکاران [۲۱] تأثیر پارامترهای مهم مربوط به فرایند کشش عمیق سنتی نظیر شعاع گوشه ماتریس، شعاع گوشه سنبه و لقی بین سنبه و ماتریس را در فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی با فشار یکنواخت یک قطعه استوانه‌ای به صورت تجربی و شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که لقی بین سنبه و ماتریس تأثیری در شکل‌دهی ورق در فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی با فشار یکنواخت ندارد، در حالی که این امر در کشش عمیق سنتی بسیار حائز اهمیت است؛ به همین دلیل می‌توان از لقی بیشتری در روش شکل‌دهی کشش عمیق هیدرومکانیکی با فشار یکنواخت استفاده کرد. سینگ و کومار [۲۲] تأثیر فشار پیش‌بشکه‌ای بر روی صافی سطح و توزیع ضخامت را بر روی ورق‌هایی از جنس فولاد کم‌کربن بررسی کردند. آن‌ها در مطالعات خود از آزمایش‌های تجربی استفاده کردند و دریافتند که در فشار پیش‌بشکه‌ای بسیار کم، گلوبی شدن در ورق در ناحیه شعاع گوشه سنبه (مشابه فرایند کشش عمیق سنتی) اتفاق می‌افتد؛ همچنین در فشار پیش‌بشکه‌ای خیلی زیاد، گلوبی به سمت ناحیه دیواره فنجان حرکت می‌کند. شارما و روت [۲۳] فرایند شکل‌دهی قطعات استوانه‌ای با پیشانی کروی با استفاده از روش کشش عمیق هیدرومکانیکی به صورت تجربی و شبیه‌سازی را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها پارامترهای ماده نظیر توان کرنش سختی و نسبت ناهمسانگردی و همچنین ضریب اصطکاک بین ورق با اجزای قالب را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با استفاده از طراحی آزمایش به روش تاگوچی، فرایند شکل‌دهی ورق را در دو حالت اتساع و کشش تحلیل نمودند. در تحلیل آن‌ها بیشینه عمق فنجان و میزان نازک‌شدگی به‌عنوان توابع پاسخ (خروجی) در نظر گرفته شد. این محققان دریافتند که عمق فنجان شکل داده شده در حالت شکل‌دهی اتساعی، به پارامتر ضریب اصطکاک، نسبت به سایر پارامترها حساس‌تر است. همچنین در حالت کشش، میزان نازک‌شدگی کمتر با افزایش ضریب اصطکاک بین سنبه و ورق و روانکاری بهتر ورق با ماتریس و ورق‌گیر حاصل خواهد شد. لنگ و همکاران [۲۴] تأثیر پارامتر فشار پیش‌بشکه‌ای شدن را در روش کشش عمیق هیدرومکانیکی با فشار یکنواخت جهت شکل‌دهی قطعات استوانه‌ای با پیشانی تخت مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که اثر

فرایندهای شکل‌دهی نظیر شکل‌دهی لاستیکی [۱]، شکل‌دهی غلتکی [۲] و غلتکی انعطاف‌پذیر [۳]، شکل‌دهی به کمک لیزر [۴]، خم‌کاری [۵] و شکل‌دهی نمودی [۶] به‌منظور شکل دادن ورق‌های فلزی به کار می‌روند. علاوه بر فرایندهای مذکور، فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی یکی از روش‌های پرکاربرد برای شکل‌دهی ورق‌های فلزی می‌باشد که در آن از فشار سیال استفاده می‌شود [۷-۱۱]. این روش در مقایسه با سایر روش‌های شکل‌دهی ورق نظیر کشش عمیق سنتی، دارای مزایایی از جمله دقت ابعادی بالاتر، نسبت کشش بیشتر، برگشت فنری کمتر، صافی سطح بهتر و توزیع ضخامت یکنواخت‌تر می‌باشد [۱۳]. طی سال‌های اخیر، این فرایند در صنایعی نظیر خودروسازی، صنایع هوافضا و صنایع نفت و گاز از جایگاه ویژه‌ای برخوردار شده است [۱۳، ۱۴]. تفاوت اصلی فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی در مقایسه با فرایند کشش عمیق سنتی، استفاده از محیط واسطه می‌باشد. در این فرایند از یک سیال تحت فشار (آب یا روغن) که درون محفظه قالب قرار دارد، برای شکل‌دهی ورق استفاده می‌شود. در اثر فشار سیال درون محفظه و نیز حرکت سنبه، ورق به سطح سنبه چسبیده و به شکل آن در می‌آید [۱۵]. در سال‌های اخیر محققان از روش‌های متفاوتی برای هیدروفورمینگ ورق استفاده نموده‌اند که برخی از آن‌ها عبارتند از: روش هیدروفورمینگ استاندارد [۱۶]، کشش عمیق هیدرووریم [۱۷]، کشش عمیق هیدرومکانیکی [۱۸] و کشش عمیق هیدرومکانیکی با فشار شعاعی [۱۹]. در روش کشش عمیق هیدرومکانیکی با فشار شعاعی، اعمال یک فشار شعاعی موجب جریان راحت‌تر ورق به داخل محفظه قالب و در نتیجه افزایش نسبت کشش و کاهش نیروی پرس می‌شود. همچنین با این روش می‌توان شکل‌های پیچیده‌تری را نسبت به روش کشش عمیق سنتی شکل داد [۲۰]. در شکل ۱ شماتیک فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی با فشار شعاعی نشان داده شده است.

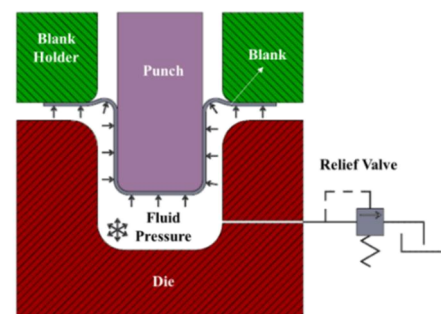


Fig. 1 The hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure

شکل ۱ فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی با فشار شعاعی

پارگی نوع دوم در اثر اختلاف بین نیروی کشش ورق و بیشترین نیروی سنبه اتفاق می‌افتد. همچنین پارگی نوع سوم در اثر خم و واخم نسبتاً زیاد در ناحیه شعاع ورودی ماتریس رخ می‌دهد. ژو و همکاران [۲۸] به شکل‌دهی ورق از جنس آلایژ منیزیم با استفاده از فرایند کشش عمیق به کمک سیال به صورت گرم پرداختند. آن‌ها برای به دست آوردن محصولاتی با کیفیت قابل قبول شکل‌دهی، یک روش جدید شکل‌دهی گرم برای ورق آلایژ منیزیم پیشنهاد دادند به این صورت که ورق و قالب شکل‌دهی در روغن داغ غوطه‌ور می‌شوند تا به فرایند شکل‌دهی دمای ثابت دست یابند. آن‌ها فرایند شکل‌دهی را به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه قرار دادند و تأثیر پارامترهای پخ گوشه قالب، دمای شکل‌دهی، ضریب اصطکاک، فشار هیدرولیک و نیروی ورق‌گیر را بر روی پنجره شکل‌دهی ورق آلایژ منیزیم بررسی کردند. نتایج نشان داد که نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی از مطابقت خوبی برخوردار است و امکان توسعه مدل شبیه‌سازی شده وجود دارد. با توجه به شبیه‌سازی‌های عددی و آزمایش‌های تجربی، بهترین پنجره فرایند برای شکل‌دهی گرم ورق آلایژ منیزیم به کمک فشار سیال به ضخامت یک میلی‌متر به دست آمد. علی‌میرزالی و مدانلو [۲۹] فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی بر روی ورق مسی را با استفاده از روش طراحی آزمایش رویه پاسخ مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها تأثیر پارامترهای شعاع گوشه سنبه، شعاع گوشه ماتریس و فشار بیشینه سیال را به عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفتند؛ همچنین میزان نازک‌شدگی حداکثر در ناحیه شعاع گوشه سنبه و همچنین نیروی سنبه به عنوان توابع پاسخ (خروجی) در نظر گرفته شدند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش شعاع گوشه سنبه و ماتریس، نازک‌شدگی بیشینه کاهش و بیشینه نیروی سنبه افزایش می‌یابد. بعلاوه، افزایش فشار بیشینه سیال منجر به افزایش بیشینه نیروی سنبه می‌شود. آن‌ها به کمک بهینه‌سازی چندهدفه توانستند نتایج نازک‌شدگی و نیروی سنبه را به میزان ۱۰٪ بهبود دهند. کای و همکاران [۳۰] به ارائه یک روش جدید به منظور پیش‌بینی پدیده چروکیدگی ورق‌های آلومینیومی حین فرایند کشش عمیق به کمک سیال در حالت گرم پرداختند. آن‌ها از آزمون کمانش توسعه یافته یوشیدا برای پیش‌بینی چروکیدگی در ورق استفاده کردند؛ همچنین به منظور بررسی صحت مدل پیشنهادی از چند ماده مختلف استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از شبیه‌سازی عددی به این نتیجه رسیدند که با استفاده از المان درجه دوم در مقایسه با المان خطی، نتایج شبیه‌سازی به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر است. علاوه بر این

مهمی که پیش‌بشکه‌ای در شکل‌دهی به روش کشش عمیق به کمک سیال دارد، ایجاد فشار در مرحله اولیه شکل‌دهی و نیز تغییر جهت تنش در ناحیه‌ای که ورق به دور سنبه چسبیده است، می‌باشد. این دو عامل از پارگی و چروکیدگی ورق در مراحل ابتدایی فرایند شکل‌دهی ورق جلوگیری می‌کنند؛ همچنین آن‌ها به این نکته دست یافتند که با استفاده از روش فشار پیش‌بشکه‌ای مثبت، بیشترین نسبت ارتفاع ۶ و با استفاده از روش فشار پیش‌بشکه‌ای منفی، کمترین نسبت ارتفاع ۴ قابل دستیابی است. ونگ و همکاران [۲۵] عملیات شکل‌دهی قطعات استوانه‌ای با پیشانی تخت را با استفاده از فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی مستقل به صورت تجربی و شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها توانستند با استفاده از این روش، فشار شعاعی بیشتر از محفظه قالب را به گوشه‌های ورق اعمال کنند که این امر در روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی ممکن نیست. این امر موجب افزایش نسبت کشش در ورق و کاهش نیروی سنبه می‌شود. آن‌ها اثر فشار شعاعی بر روی نیروی سنبه را نیز مورد بررسی قرار داده و دریافتند که با افزایش فشار شعاعی، نیروی سنبه کاهش خواهد یافت. مدانلو و همکاران [۲۶] اثر پدیده لزجت را بر روی نسبت کشش و توزیع ضخامت در فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی با استفاده از چندین سیال به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در آزمایش‌های خود از آب، آب صابون، روغن SAE10 و روغن SAE40 به عنوان محیط واسطه سیال استفاده کردند. ورق استفاده شده در پژوهش آن‌ها از جنس مس خالص با درجه خلوص ۹۹٪ بود. آن‌ها با بررسی نتایج دریافتند که با افزایش لزجت سیال، نازک‌شدگی بیشینه در ناحیه شعاع گوشه سنبه کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش لزجت سیال و در نتیجه افزایش فشار شعاعی وارد به لبه‌های ورق، نیروی سنبه افزایش می‌یابد؛ همچنین افزایش لزجت سیال تأثیری در میزان ضخیم‌شدگی حداکثر ورق در ناحیه دیواره فنجان ندارد. آن‌ها همچنین دریافتند که با انتخاب سیال با لزجت مناسب (روغن SAE10)، می‌توان به قطعه نهایی با توزیع ضخامت یکنواخت‌تر دست یافت. لنگ و همکاران [۲۷] با استفاده از روش آزمایشگاهی، فرایند شکل‌دهی یک نوع آلایژ آلومینیوم را به روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها پارگی در قطعه کار را به سه نوع اول، دوم و سوم دسته‌بندی نمودند. پارگی نوع اول در اثر فشار شکل‌دهی کم، فاصله کم بین ورق‌گیر و ماتریس، نسبت کشش زیاد و عدم روانکاری مناسب در لبه‌های ورق رخ می‌دهد.

میلی‌متر شبیه‌سازی شد. برای استخراج خواص ماده از آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTM با استفاده از دستگاه SANTAM با ظرفیت ۲۵ تن استفاده شد. شکل ۲ نمودار تنش- کرنش حقیقی حاصل از آزمون کشش را نشان می‌دهد. مشخصات مکانیکی ورق فولادی استفاده شده و نیز پارامترهای شبیه‌سازی نظیر تنش تسلیم، مدول الاستیک، چگالی و ضریب پواسون در جدول ۱ آمده است. همچنین در جدول ۲ مشخصات هندسی ابزار (قطر سنبه و شعاع گوشه سنبه، قطر محفظه و شعاع گوشه محفظه قالب) ارائه شده است.

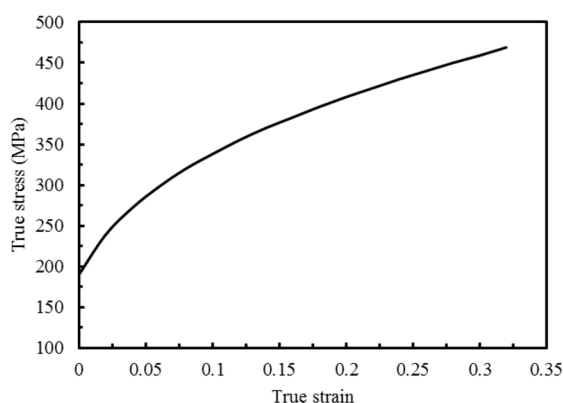


Fig. 2 True stress-strain curve of the St14

شکل ۲ نمودار تنش-کرنش حقیقی فولاد St14

جدول ۱ خواص مکانیکی ورق فولادی

مقدار	مشخصه (واحد)
190	تنش تسلیم (MPa)
210	مدول الاستیک (GPa)
7850	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )
0.3	ضریب پواسون

جدول ۲ ابعاد هندسی مجموعه قالب

اندازه (mm)	مشخصه
38.5	قطر سنبه
6	شعاع گوشه سنبه
44	قطر محفظه قالب
5	شعاع گوشه محفظه قالب

نشان دادند که مدل توسعه یافته یوشیدا با دقت قابل قبولی چروکیدگی ورق‌های فلزی در فرایند شکل‌دهی را پیش‌بینی می‌کند. با وجود پژوهش‌های ارزشمند در زمینه شکل‌دهی ورق با استفاده از فرایند کشش عمیق به کمک سیال، در بسیاری از فرایندهای تولید محصولات فلزی ورق، پیش‌بینی پارامترها و شرایط بهینه تولید یک امر حیاتی می‌باشد [۳۱]. روش‌های سنتی طراحی در فرایندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی معمولاً بر پایه آزمون و خطا و یا دیدگاه‌های تجربی می‌باشند. این موضوع علاوه بر صرف وقت زیاد، منجر به دوباره‌کاری و افزایش هزینه می‌گردد. امروزه محققان این حوزه، همزمان با توسعه روش‌های محاسباتی نظیر روش‌های حل عددی و نیز با توجه به ماهیت نرم‌افزاری بودن این روش‌ها، توانسته‌اند از هزینه‌های فرایند به میزان قابل توجهی بکاهند. با وجود تحقیقات متعدد در زمینه هیدروفورمینگ ورق، بررسی همزمان تأثیرات پارامترهای فرایندی و هندسی بر روی نازک‌شدگی ورق فولادی در فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی یافت نشد. تغییرات فاصله بین ماتریس و ورق‌گیر به دلیل ایجاد تغییر در میزان فشار شعاعی وارده به ورق حین فرایند حائز اهمیت می‌باشد. همچنین تغییرات اصطکاک بین ورق و اجزای قالب در چسبندگی ورق و متعاقباً میزان نازک‌شدگی تأثیرگذار می‌باشد.

در این مقاله، شکل‌دهی فنجان‌های استوانه‌ای با پیشانی تخت از جنس فولاد St14 با استفاده از روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی بر روی گرده‌هایی به قطر ۸۰ و ضخامت ۲/۵ میلی‌متر مورد مطالعه قرار گرفته است. در ابتدا فرایند با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس، به‌منظور تعیین اثر پارامترهای فرایند بر روی توزیع ضخامت شبیه‌سازی شد. در ادامه برای کسب اطمینان از صحت نتایج عددی، از آزمون‌های تجربی کمک گرفته شده است. با بررسی مشخص شد که توزیع ضخامت ورق و نیروی سنبه به روش عددی و تجربی مطابقت قابل قبولی دارند. همچنین اثرات پارامترهای فرایند مانند ضریب اصطکاک بین ورق با سنبه و ورق با ورق‌گیر، اثرات شعاع گوشه سنبه و ماتریس و نیز تأثیر فاصله بین ماتریس و ورق‌گیر بر روی میزان نازک‌شدگی حداکثر قطعه نهایی بررسی شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این مقاله، در ابتدا فرایند شکل‌دهی فنجان‌های استوانه‌ای با پیشانی تخت، به کمک فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی بر روی ورق فولادی به ضخامت ۲/۵ و شعاع ۸۰

## ۳- شبیه‌سازی اجزای محدود

به‌منظور شبیه‌سازی فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی، از نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده شد. به دلیل خاصیت ناهمسانگردی ورق فولادی و نیز افزایش دقت، فرایند

شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی، فشار بیشینه شکل‌دهی ۳۴ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. به دلیل انجام فرایند به صورت هیدرودینامیکی با فشار شعاعی، از هیچ‌گونه اورینگی جهت آب‌بندی استفاده نگردید؛ همچنین از روغن SAE10 به عنوان محیط واسطه سیال استفاده شد. در این مقاله، جهت مطالعه دقیق‌تر توزیع ضخامت، طبق شکل ۶ قطعه نهایی به سه ناحیه مختلف شامل ناحیه کف قطعه، شعاع گوشه و دیواره قطعه تقسیم شده که در نمودارهای توزیع ضخامت، به این نواحی ارجاع داده شده است.



Fig. 4 The forming press used in the experiments

شکل ۴ پرس شکل‌دهی استفاده شده در آزمایش‌های تجربی

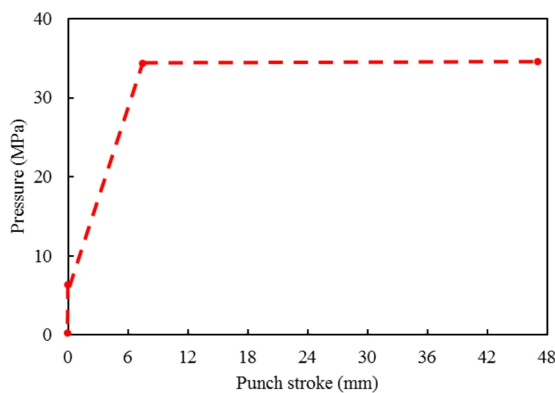


Fig. 5 The pressure path used in simulation and experiments

شکل ۵ مسیر فشار استفاده شده در شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی

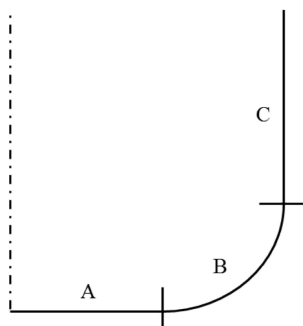


Fig. 6 Various zones in the formed part

شکل ۶ نواحی مختلف در قطعه شکل داده شده

به صورت سه‌بعدی مدل‌سازی و تحلیل شد. همچنین با توجه به تقارن هندسی مسئله، به منظور ساده‌سازی و کاهش حجم محاسبات، یک‌چهارم هندسه مجموعه به جای کل آن شبیه‌سازی شد که این موضوع در شکل ۳ نشان داده شده است. مطابق با مرجع [۳۲]، ضریب اصطکاک در سطح تماس سنبه با ورق ۰/۱۴ و ضریب اصطکاک در سطح تماس ورق‌گیر و محفظه قالب با ورق ۰/۰۴ تعریف شده است. در شبیه‌سازی‌های انجام شده در این مقاله، ورق به صورت شکل‌پذیر<sup>۱</sup> به نرم‌افزار معرفی و ورق اولیه با استفاده از المان توپر هشت‌گره‌ای<sup>۲</sup> مدل‌سازی شد. همچنین برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر، ورق به صورت چهار قسمت مجزا شبکه‌بندی شد. در مناطقی که ورق به گوشه سنبه می‌چسبد از المان‌های کوچک‌تری استفاده شده است؛ همچنین در راستای ضخامت ورق از تعداد پنج المان استفاده شد. اجزای قالب نظیر سنبه، ماتریس و ورق‌گیر نیز به صورت صلب گسسته<sup>۳</sup> با استفاده از المان پوسته‌ای چهارگره‌ای<sup>۴</sup> مدل شدند. در ناحیه شعاع گوشه سنبه نیز اندازه المان‌ها، کوچک‌تر شد؛ همچنین برای هر کدام از اجزای صلب، یک گره مرجع تعریف شده است که برای اختصاص شرایط مرزی از این نقطه مرجع استفاده شده است.

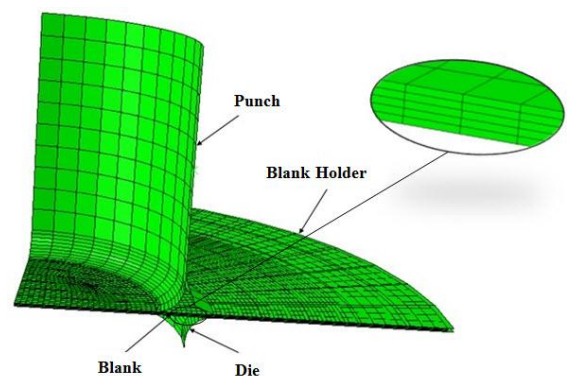


Fig. 3 The simulated die setup

شکل ۳ مجموعه قالب شبیه‌سازی شده

#### ۴- آزمایش‌های تجربی

برای انجام آزمایش‌های کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی از یک دستگاه شکل‌دهی اونیورسال با ظرفیت ۶۰۰ کیلونیوتن استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، واحد کامپیوتری متصل به دستگاه تمامی حرکت‌های آن را حین آزمایش کنترل می‌کند. مسیر فشار استفاده شده در شبیه‌سازی‌های عددی و آزمایش‌های تجربی در

<sup>1</sup> Deformable

<sup>2</sup> C3D8R

<sup>3</sup> Discrete Rigid

<sup>4</sup> R3D4

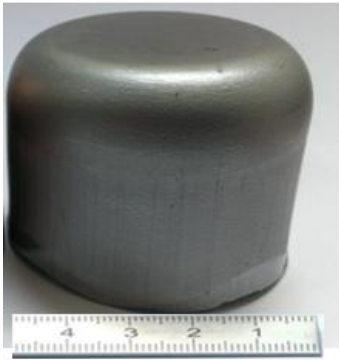


Fig. 9 The formed part by experiment

شکل ۹ قطعه شکل داده شده به روش تجربی

در این مقاله، اثرات ضریب اصطکاک بین ورق با سنبه و ورق با ورق‌گیر به‌طور جداگانه بررسی گردید. ضرایب اصطکاک برای سنبه به ترتیب ۰/۱۴، ۰/۱۶ و ۰/۱۸ در شبیه‌سازی استفاده شد. در شکل ۱۰ نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان داده شده است. با بررسی نمودار استنباط می‌گردد که با افزایش ضریب اصطکاک بین سنبه و ورق نازک‌شدگی حداکثر در ناحیه شعاع گوشه سنبه (ناحیه B) کاهش می‌یابد (از ۲۰ به ۱۸٪) که این موضوع در فرایندهای شکل‌دهی ورق مطلوب است؛ دلیل این موضوع این است که با افزایش اصطکاک بین ورق و سنبه، ورق به سطح سنبه چسبیده و همزمان با حرکت سنبه به سمت محفظه قالب، سیلان ورق با سرعت کمتری رخ داده و در نتیجه کاهش ضخامت کمتری حاصل می‌شود. با انجام شبیه‌سازی‌ها جهت بررسی اثر اصطکاک بین ورق‌گیر و ورق، این نتیجه حاصل شد که با افزایش ضریب اصطکاک بین ورق با ورق‌گیر، نازک‌شدگی حداکثر در ناحیه شعاع گوشه (ناحیه B) افزایش می‌یابد (از ۲۰ به ۲۴٪). این موضوع به این دلیل رخ می‌دهد که با افزایش اصطکاک، ورق به ورق‌گیر چسبیده و همزمان با حرکت سنبه، میزان کشش در ورق افزایش یافته و در نتیجه افزایش میزان نازک‌شدگی در ورق به وقوع می‌پیوندد. در شبیه‌سازی جهت تعیین اثر اصطکاک ورق‌گیر، به ترتیب از ضرایب اصطکاک ۰/۰۴، ۰/۰۵ و ۰/۰۶ استفاده شد. شکل ۱۱ نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی را نشان می‌دهد؛ در نتیجه، می‌توان این نکته را متذکر شد که تأثیر اصطکاک ورق با ورق‌گیر بیشتر از اثر مشابه سنبه می‌باشد.

در ادامه اثر شعاع گوشه سنبه و ماتریس بر روی میزان نازک‌شدگی حداکثر ورق فولادی بررسی شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با افزایش شعاع گوشه سنبه، تغییرات ضخامت در ناحیه شعاع گوشه، کاهش قابل توجهی

## ۵- نتایج و بحث

در فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی، پارامتر توزیع ضخامت نقش مهمی را در تضمین کیفیت قطعه نهایی ایفا می‌کند. شکل ۷ منحنی توزیع ضخامت حاصل از نتایج شبیه‌سازی و تجربی برای مسیر فشار با فشار نهایی ۳۴ مگاپاسکال را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که انطباق قابل قبولی بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی وجود دارد. با توجه به شکل در قسمت کف سنبه (ناحیه A) کاهش ضخامت کمی وجود دارد که به دلیل وجود تنش‌های کششی در این ناحیه است. بیشترین کاهش ضخامت در این ناحیه به میزان ۲٪ می‌باشد. همچنین بیشترین میزان کاهش ضخامت در قطعات استوانه‌ای با پیشانی تخت در ناحیه شعاع گوشه سنبه (ناحیه B) می‌باشد (به میزان ۱۴٪) که دلیل آن خمش ورق در این ناحیه است. در دیواره قطعات استوانه‌ای به دلیل وجود تنش‌های فشاری افزایش ضخامت در حدود ۱۲٪ اتفاق می‌افتد (ناحیه C). همچنین شکل ۸ نمودار نیروی سنبه بر اساس جابجایی آن برای شبیه‌سازی عددی و آزمایش تجربی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود انطباق بین نتایج عددی و تجربی قابل قبول و مطلوب می‌باشد. همچنین بیشینه نیروی سنبه به میزان ۱۳۲ کیلونیوتن می‌باشد. قطعه شکل داده شده به‌صورت تجربی در شکل ۹ نشان داده شده است.

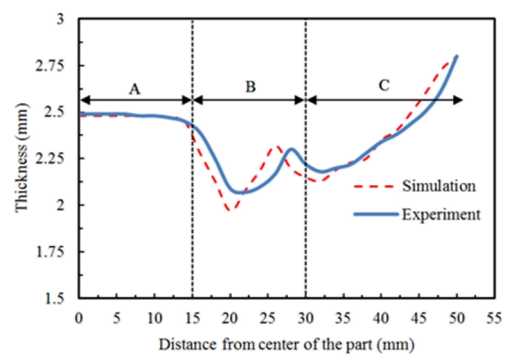


Fig. 7 Thickness distribution curve obtained from simulation and experiment

شکل ۷ منحنی توزیع ضخامت حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش تجربی

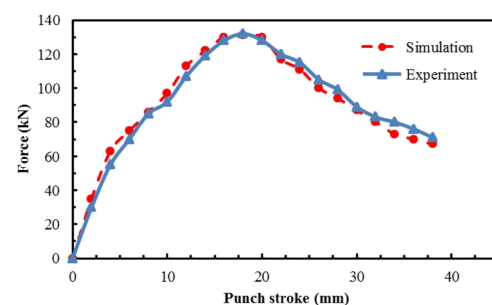


Fig. 8 Force-punch stroke curve

شکل ۸ منحنی نیرو-جابجایی سنبه

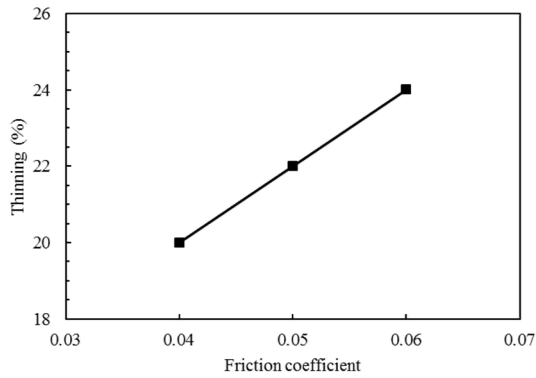


Fig. 11 Thinning curve versus sheet/blank holder friction

شکل ۱۱ منحنی نازک‌شدگی بر حسب ضریب اصطکاک ورق با ورق‌گیر

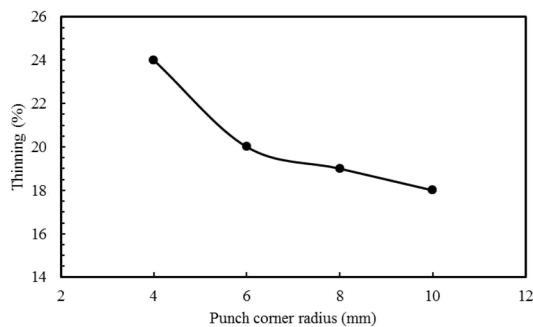


Fig. 12 Thinning curve versus corner radius of the punch

شکل ۱۲ منحنی نازک‌شدگی بر حسب شعاع گوشه سنبه

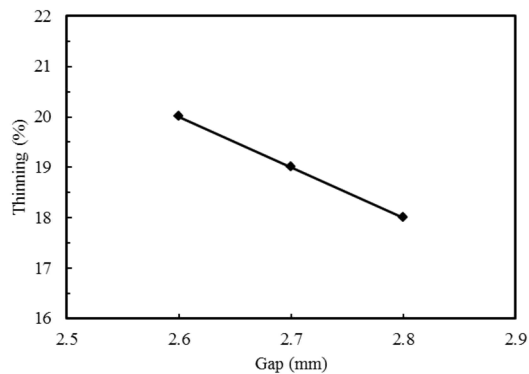


Fig. 13 Thinning curve versus gap between blank holder and die

شکل ۱۳ منحنی نازک‌شدگی بر حسب فاصله بین ورق‌گیر با ماتریس

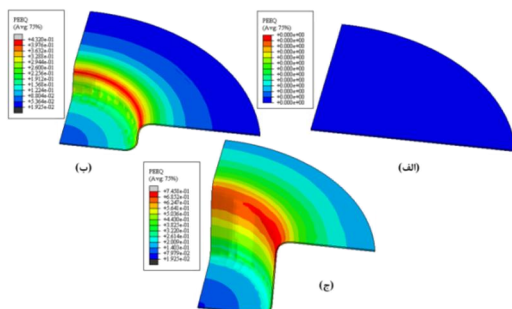


Fig. 14 Distribution of equivalent plastic strain in the sheet during the deformation with a displacement of (a) 0 mm, (b) 10 mm, (c) 20 mm

شکل ۱۴ توزیع کرنش پلاستیک معادل در ورق حین تغییرشکل با جابجایی (الف) ۰ میلی‌متر، (ب) ۱۰ میلی‌متر، (ج) ۲۰ میلی‌متر

داشته (از ۲۴ به ۱۸٪) و توزیع ضخامت یکنواخت‌تر می‌گردد. در شبیه‌سازی برای سنبه به ترتیب از شعاع‌های گوشه ۴، ۶، ۸ و ۱۰ میلی‌متر استفاده شد که نتایج آن در شکل ۱۲ نشان داده شده است؛ همچنین با افزایش شعاع گوشه ماتریس نیز نتایج مشابه به دست آمد. در شبیه‌سازی برای ماتریس نیز از همان شعاع‌های گوشه استفاده شده برای سنبه، استفاده گردید. در توجیه این نتایج می‌توان گفت که با افزایش شعاع گوشه، مسیر حرکت ورق روی سطح قالب هموارتر شده و سیلان ورق راحت‌تر اتفاق می‌افتد و در نتیجه میزان نازک‌شدگی کاهش می‌یابد. به‌منظور بررسی اثر فاصله بین ماتریس و ورق‌گیر، شبیه‌سازی فرایند در سه فاصله مختلف، به ترتیب با اندازه‌های ۲/۶، ۲/۷ و ۲/۸ میلی‌متر انجام شده و این نتیجه حاصل شد که با افزایش فاصله بین ماتریس و ورق‌گیر، میزان نازک‌شدگی حداکثر در ناحیه شعاع گوشه سنبه (ناحیه B) کاهش می‌یابد (از ۲۰ به ۱۸٪). با افزایش فاصله، میزان نشی سیال نیز بیشتر شده و در نتیجه فشار شکل‌دهی کاهش می‌یابد. در شکل ۱۳ منحنی درصد نازک‌شدگی حداکثر بر حسب فاصله بین ورق‌گیر با ماتریس نشان داده است. در شکل ۱۴، کانتور توزیع کرنش پلاستیک معادل در شروع فرایند، جابجایی سنبه ۱۰ میلی‌متر و جابجایی سنبه ۲۰ میلی‌متر نشان داده شده است. طبق شکل، با حرکت سنبه به سمت پایین، مقاومت ورق در برابر تغییرشکل افزایش می‌یابد به طوری که به نیروی بیشتری برای تغییرشکل نیاز است؛ به عبارت دیگر، حین تغییرشکل ورق کار سخت می‌شود. همچنین این کانتور نشان می‌دهد که حداکثر میزان کرنش در ناحیه شعاع گوشه سنبه (ناحیه B) رخ می‌دهد.

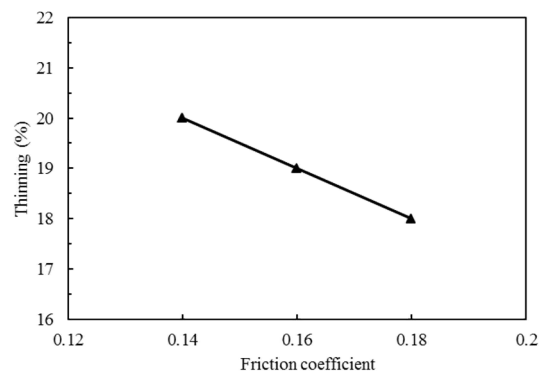


Fig. 10 Thinning curve versus sheet/punch friction

شکل ۱۰ منحنی نازک‌شدگی بر حسب ضریب اصطکاک ورق با سنبه

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، شکل‌دهی فنجان‌های استوانه‌ای با پیشانی تخت و از جنس فولاد St14، با استفاده از روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی به صورت تجربی و شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا فرایند با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس تحلیل شد. در ادامه با استفاده از آزمایش‌های تجربی، صحت نتایج حاصل از شبیه‌سازی تأیید و مشاهده شد که توزیع ضخامت و نیروی سنبه در دو روش مطابقت قابل قبولی دارند. همچنین در این مقاله، به بررسی تأثیر پارامترهای هندسی فرایند بر روی نازک‌شدگی حداکثر ورق فولادی پرداخته شد که پس از انجام شبیه‌سازی اجزای محدود، نتایج زیر حاصل شد:

۱. با بررسی منحنی توزیع ضخامت مشخص شد که نازک‌شدگی حداکثر در ناحیه شعاع گوشه سنبه به میزان ۱۴٪ نسبت به ضخامت اولیه ورق رخ می‌دهد.
۲. با افزایش ضریب اصطکاک در سطح تماس سنبه و ورق نازک‌شدگی حداکثر به میزان ۱۰٪ کاهش می‌یابد.
۳. با افزایش ضریب اصطکاک بین ورق با ورق‌گیر، نازک‌شدگی حداکثر به میزان ۲۰٪ افزایش می‌یابد.
۴. با افزایش شعاع گوشه سنبه تغییرات ضخامت در ناحیه شعاع گوشه، کاهش قابل توجهی داشته (در حدود ۲۵٪) و توزیع ضخامت ورق یکنواخت‌تر می‌شود؛ همچنین با افزایش شعاع گوشه ماتریس نیز نتایج مشابه به دست آمد.
۵. با افزایش فاصله بین ورق‌گیر با ماتریس، نازک‌شدگی حداکثر به میزان ۱۰٪ کاهش می‌یابد.

## ۷- مراجع

- [4] A. Maleki, A. Ahmadi, H. Talebi-Ghadikolaee, Numerical investigation of bending angle and entropy generation in laser forming of high strength steel, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, vol. 9, no. 4, pp. 151-166, 2019. doi:10.22044/JSFM.2020.7875.2791 (in Persian)
- [5] H. Talebi-Ghadikolaee, H. Moslemi Naeini, A. H. Rabiee, A. Zeinolabedin Beygi, S. Alexandrov, Experimental-numerical analysis of ductile damage modeling of aluminum alloy using a hybrid approach: ductile fracture criteria and adaptive neural-fuzzy system (ANFIS), *International Journal of Modelling and Simulation*, pp. 1-16, 2022. <https://doi.org/10.1080/02286203.2022.2121675>
- [6] H. Deilami Azodi, S. Rezaee, H. Badparva, A. Zeinolabedin Beygi, Optimizing AA3105-St12 two-layer sheet in incremental sheet forming process using neural network and multi-objective genetic algorithm, *Modares Mechanical Engineering*, vol. 22, no. 2, pp. 121-132, 2022. (in Persian)
- [7] S. Hossein Seyedkashi, V. Panahizadeh R, H. Xu, S. Kim, Y. H. Moon, Process analysis of two-layered tube hydroforming with analytical and experimental verification, *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 27, pp. 169-175, 2013. <https://doi.org/10.1007/s12206-012-1216-7>
- [8] M. Parto, S. Seyedkashi, G. Liaghat, H. Moslemi Naeini, V. Panahizadeh, Investigation of aluminum-copper tube hydroforming with axial feeding, *AIP Conference Proceedings*, vol. 1315, no. 1: American Institute of Physics, pp. 475-480, 2011. <https://doi.org/10.1063/1.3552491>
- [9] S. J. Hashemi, Y. Dadgar Asl, Numerical and experimental investigation of low pressure hydroforming of aluminum tubes, *Karafan Quarterly Scientific Journal*, vol. 18, no. 3, pp. 291-307, 2021. doi: 10.48301/KSSA.2021.296120.1643 (in Persian)
- [10] H. Moslemi Naeini, J. Hashemi, G. Liaghat, M. Mohammadi, H. Deilami Azodi, Analytical prediction of limit strains and limit stresses in hydroforming of anisotropic aluminum tubes, *Modares Mechanical Engineering*, vol. 14, no. 2, pp. 133-140, 2014. (in Persian)
- [11] F. Fereshteh-Saniee, S. Yaghoubi, S. Ghorbanhosseini, Microstructural studies and mechanical properties of hydroforming process of AZ31B magnesium and AA 2024 aluminum alloys sheets at elevated, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 8, No. 10, pp. 39-48, 2021. (in Persian)
- [12] W. Liu, Y. Z. Chen, L. Hu, Z. C. Zhang, Deformation of large curved shells using double-sided pressure sheet hydroforming process, *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, Vol. 5, No. 3, pp. 397-410, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2022.05.002>
- [13] S. M. Abedi, S. M. Seyedkashi, K. Khalili, A. Ashrafi, Experimental and numerical study of double Y-shaped hydroforming using analysis of variance method, *Iranian Journal of Manufacturing*
- [1] H. Talebi-Ghadikolaee, M. Elyasi, Y. Dadgar Asl, A. Zeinolabedin Beygi, M. Davoudi, Feasibility of forming U-shaped microchannels by the flexible-die forming process, *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 2022. <https://doi.org/10.48301/KSSA.2022.336972.2063> (in Persian)
- [2] M. S. Zeinali, H. Moslemi Naeini, H. Talebi-Ghadikolaee, V. Panahizadeh, Numerical and experimental investigation of fracture in roll forming process using Lou-Huh fracture criterion, *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 47, no. 12, pp. 15591-15602, 2022. <https://doi.org/10.1007/s13369-022-06662-3>
- [3] V. Panahizadeh, Y. Dadgar Asl, F. Saeidi, S. Afshin, Numerical and experimental analysis of spring-back defect in flexible roll forming process using anisotropic yield criteria, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, vol. 11, no. 4, pp. 93-105, 2021. doi: 10.22044/jsfm.2021.10554.3343 (in Persian)



- No. 3, pp. 1445-1453, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.03.070>
- [24] L. Lang, J. Danckert, K. B. Nielsen, Investigation into the effect of pre-bulging during hydromechanical deep drawing with uniform pressure onto the blank, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, No. 6, pp. 649-657, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2003.11.004>
- [25] H. Wang, L. Gao, M. Chen, Hydrodynamic deep drawing process assisted by radial pressure with inward flowing liquid, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 53, No. 9, pp. 793-799, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2011.07.002>
- [26] V. Modanloo, A. Gorji, M. Bakhshi-Jooybari, Experimental and numerical investigation of the sheet forming in hydroforming process, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 5, No. 4, pp. 27-33, 2015. doi: 10.22044/JSFM.2015.566 (in Persian)
- [27] L. Lang, J. Danckert, K. B. Nielsen, 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, No. 1, pp. 119-131, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.01.053>
- [28] Q. Q. Zhou, S. Huang, D. X. Wang, J. P. Li, F. A. Hua, P. Yang, Numerical simulation and experimental study of warm hydro-forming of magnesium alloy sheet, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 80, pp. 43-53, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.05.054>
- [29] V. Alimirzaloo, V. Modanloo, Minimization of the sheet thinning in hydraulic deep drawing process using response surface methodology and finite element method, *International Journal of Engineering*, Vol. 29, No. 2, pp. 264-273, 2016. doi: 10.5829/idosi.ije.2016.29.02b.16
- [30] G. Cai, J. Fu, D. Zhang, J. Yang, Y. Yuan, L. Lang, S. Alexandrov, A novel approach to predict wrinkling of aluminum alloy during warm/hot sheet hydroforming based on an improved Yoshida buckling test, *Materials*, Vol. 13, No. 5, pp. 1165, 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13051165>
- [31] H. Talebi Ghadikolaee, M. Elyasi, M. Hosseinzadeh, Investigation of the effect of rubber layers thickness on forming of bipolar plate's micro channels in rubber pad forming process, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 57-69, 2016. (in Persian)
- [32] X. Liu, Y. Xu, S. Yuan, Effects of loading paths on hydrodynamic deep drawing with independent radial hydraulic pressure of aluminum alloy based on numerical simulation, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 24, pp. 395-399, 2008.
- Engineering*, Vol. 6, No. 7, pp. 34-41, 2019. (in Persian)
- [14] A. Rabiee, E. Sherkatghanad, A. Zeinolabedin Beygi, H. Moslemi Naeini, L. Lang, Experimental investigation and modeling of fiber metal laminates hydroforming process by GWO optimized neuro-fuzzy network, *Journal of Computational and Applied Research in Mechanical Engineering*, vol. 12, no. 2, pp. 193-209, 2023. <https://doi.org/10.22061/jcarme.2022.8268.2101>
- [15] V. Modanloo, A. Gorji, M. Bakhshi-Jooybari, A comprehensive thinning analysis for hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, Vol. 43, pp. 487-494, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40997-018-0221-6>
- [16] S. H. Zhang, Z. R. Wang, Y. Xu, Z. T. Wang, L. X. Zhou, Recent developments in sheet hydroforming technology, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 151, pp. 237-241, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.054>
- [17] S. Thiruvarduchelvan, F. W. Travis, Hydraulic pressure enhanced cup drawing processes, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 151, pp. 70-75, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00726-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00726-X)
- [18] S. Yaghoubi, F. Fereshteh-Saniee, Optimization of the geometrical parameters for elevated temperature hydro-mechanical deep drawing process of 2024 aluminum alloy, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, Vol. 235, No. 2, pp. 151-161, 2021. <https://doi.org/10.1177/095440892094936>
- [19] V. Modanloo, A. Gorji, M. Bakhshi-Jooybari, Effects of forming media on hydrodynamic deep drawing, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 30, pp. 2237-2242, 2016. <https://doi.org/10.1007/s12206-016-0433-x>
- [20] V. Modanloo, A. Doniavi, R. Hasanzadeh, Application of multi criteria decision making methods to select sheet hydroforming process parameters, *Decision Science Letters*, Vol. 5, No. 3, pp. 349-360, 2016. doi: 10.5267/j.dsl.2016.2.005
- [21] L. Lang, L. Ti, X. Zhou, B. E. Kristensen, J. Danckert, K. B. Nielsen, Optimized decision of the exact material modes in the simulation for the innovative sheet hydroforming method, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 177, No. 1-3, pp. 692-696, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.04.100>
- [22] S. K. Singh, D. R. Kumar, Effect of process parameters on product surface finish and thickness variation in hydro-mechanical deep drawing, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 204, No. 1-3, pp. 169-178, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.060>
- [23] A. K. Sharma, D. K. Rout, Finite element analysis of sheet hydromechanical forming of circular cup, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209,