



بررسی چروکیدگی با استفاده از یک الگوریتم هندسی در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی و جریان روبرو داخل سیال

مازیار خادمی¹، محمد بخشی جویباری^{2*}، عبدالحمید گرجی³، میلاد صادق یزدی⁴

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

4- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

* بابل، صندوق پستی 484 bakhshi@nit.ac.ir

چکیده

پیش‌بینی چروکیدگی و جلوگیری از آن، در طراحی ابزار و تعیین پارامترهای مؤثر در فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی بسیار مهم می‌باشد. در شکل‌دهی فتحان‌های فلزی، چروک ممکن است در دو ناحیه فلنج و یا دیواره رخ دهد. کنترل چروک در ناحیه فلنج با کنترل فشار سیال واقع در سطح زیرین ورق چندان دشوار نیست، اما در ناحیه دیواره به دلیل آزاد بودن ورق، امری دشوار محسوب می‌شود. در این مقاله، با استفاده از یک روش هندسی مبتنی بر شبیه‌سازی عددی، به بررسی چروکیدگی در دیواره قطعات متقارن مخروطی در فرآیند توسعه یافته کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی و جریان سیال رو به داخل پرداخته شده است. در فرآیند به کار گرفته شده، از دو فشار مستقل برای شکل‌دهی ورق استفاده می‌شود. با توجه به ماهیت فرآیند، اثراخた هم فشار محفظه بر پدیده چروکیدگی مورد مطالعه قرار گرفته است. به علاوه، اثر جنس، ضخامت اولیه ورق و سرعت سنبه بر روی چروکیدگی در دیواره قطعه بررسی شده است. به منظور ساخت‌سنجی نتایج، آزمایش تحریبی بر روی ورق‌های فولادی و مسی انجام شده است که قابل اعتماد بودن این روش را در بررسی چروکیدگی نشان داد. یافته‌ها نشان داد که افزایش فشار شعاعی یا کاهش فشار محفظه منجر به افزایش چروکیدگی می‌گردد. همچنین افزایش ضخامت، کاهش مؤثر چروکیدگی را به دنبال دارد. علاوه بر این، نشان داده شد که شبیه‌سازی چروکیدگی، وابستگی شدیدی به پارامترهای ورودی در مدل سازی همچون سرعت سنبه و اندازه مناسب المان دارد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 10 بهمن 1395

پذیرش: 04 فروردین 1396

ارائه در سایت: 17 اردیبهشت 1396

کلید واژگان:

چروکیدگی

هیدروفرمینگ

قطعات مخروطی

فشار شعاعی

Investigation of Wrinkling in Hydrodynamic Deep Drawing assisted by Radial Pressure with Inward Flowing Liquid Based on a Geometric Method

Maziar Khademi, Mohammad Bakhshi Jooybari*, Abdolhamid Gorji, Milad Sadegh-Yazdi

Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
* P.O.B. 484, Babol, Iran, bakhshi@nit.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 29 January 2017

Accepted 24 March 2017

Available Online 07 May 2017

Keywords:

Wrinkling

Hydroforming

Conical part

Radial pressure

ABSTRACT

Prediction and prevention of wrinkling are very important in tool design and determining the effective parameters in sheet metal forming processes. In forming metallic cups, wrinkling generally occurs in the two regions of flange and wall. The control of wrinkling in flange area is made less difficult by controlling the fluid pressure applied on the lower surface of the sheet, but in the wall region it is difficult because the sheet is not supported. In this paper, using a geometric method based on numerical simulation, the wrinkling in the wall of the symmetric conical parts in the developed hydrodynamic deep drawing with radial pressure and inward flowing liquid is investigated. In the process, two independent pressure supplies have been used for forming the sheets. Due to the nature of the process, the effects of radial and cavity pressures on wrinkling have been investigated. In addition, the effects of material, initial blank thickness and punch velocity on wrinkling in wall area were investigated. To verify the results of the simulation, several experimental tests have been done on the St13 and copper sheets. Good agreement between the simulation and experimental results shows the reliability of this method in the wrinkling study. It was also demonstrated that increasing the maximum radial pressure or decreasing cavity pressure leads to increasing wrinkling. Additionally, wrinkling was decreased with increasing blank thickness. Moreover, it was shown that wrinkling simulation is very dependent on input parameters such as punch velocity and appropriate element size.

1- مقدمه

Please cite this article using:

M. Khademi, M. Bakhshi-Jooybari, A. Gorji, M. Sadegh-Yazdi, Investigation of Wrinkling in Hydrodynamic Deep Drawing assisted by Radial Pressure with Inward Flowing Liquid Based on a Geometric Method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 276-286, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

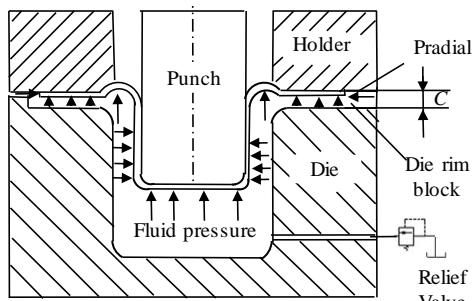


Fig. 1 Pressure system and die set in the process of hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure [8]

شکل ۱ سیستم فشار و مجموعه قالب در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی [8]

تنش فشاری لازم برای ایجاد چروک در ناحیه فلنچ است. ۲. شکل گیری چروک در دیواره به علت زیاد بودن نسبت ابعاد دیواره به ضخامت ورق راحتتر است. ۳. چروکیدگی در ناحیه فلنچ به علت این که فلنچ عموماً از قطعه جدا می‌شود، با یک عملیات اضافی حذف می‌شود اما چروکیدگی در دیواره عموماً از قطعه نهایی می‌ماند و اصطلاحاً چروک، ماندگار نام دارد. برای بررسی پدیده چروکیدگی از روش‌های مختلف تحلیلی، تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود استفاده شده است. ونگ و همکاران [15] با بررسی چروکیدگی در دیواره قطعات، تنش بحرانی برای ایجاد چروک را در فرآیند کشش عمیق قطعات مخروطی و مستطیلی به دست آوردند. روش مورد استفاده این محققان یک تئوری تحلیلی بر مبنای روش اجزای محدود بود. انارستانی و همکاران [16] با استفاده از روش تحلیلی دوشاخگی به بررسی چروکیدگی در ورق‌های دولایه پرداختند. محققان یاد شده نمودارهای حد چروکیدگی را براساس نیروی ورق‌گیر و ارتفاع شکل‌دهی در فرآیند کشش عمیق به دست آوردند. صحت‌سنجی نتایج به دست آمده تطبیق خوبی را میان روش تحلیلی و آزمایش تجربی در پژوهش آن‌ها نشان داد. هاشمی و همکاران [17] با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود پنجره حد شکل‌دهی در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی را به دست آوردند. پارامترهای مناسب فرآیندی مانند فشار بیشینه برای تولید قطعه سالم و بدون چروکیدگی با استفاده از پنجره حد شکل‌دهی، از نتایج گرفته شده این محققان بوده است. در پژوهش‌های صورت گرفته، پدیده چروکیدگی کمتر در فرآیندهای نوین هیدروفرمینگ بررسی شده است. علاوه‌بر این، مطالعات صورت گرفته اکثرًا این پدیده را به صورت کیفی و در قالب ذکر بهبود یا عدم بهبود چروکیدگی در نظر می‌گیرند. همچنان در رابطه با روش‌های بررسی این عیب، روش‌های تحلیلی عموماً برای اشکال هندسی پیچیده، بسیار وقت‌گیر هستند و در برخی مواقع این روش‌ها تنها در برگیرنده حالتی خاص از پدیده مورد بررسی می‌باشد. تاکنون گزارشی پیرامون بررسی چروکیدگی در فرآیند هیدروفرمینگ با فشار شعاعی در دیواره قطعات مخروطی ارائه نشده است. از این‌رو، در این پژوهش سعی شده تا در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی و جریان رو به داخل سیال، پدیده چروکیدگی با استفاده از یک روش هندسی بررسی شود. در قسمت آزمایش تجربی و پیاده‌سازی فرآیند، دو پمپ مستقل برای ایجاد فشار شعاعی و محفظه به منظور کنترل لحظه‌ای و نقطه به نقطه روی مسیر فشارها به کار گرفته شد. استفاده از دو پمپ مستقل از یکدیگر در تأمین فشار محفظه و فشار جانبی، امکان تعییر و کنترل همزمان فشار جانبی و فشار محفظه را فراهم می‌آورد که متفاوت از فرآیند ونگ و همکاران [12] می‌باشد، زیرا آن‌ها تنها قادر به

در میان فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی مانند کشش عمیق، شکل‌دهی الکترومغناطیسی و شکل‌دهی چرخشی، هیدروفرمینگ^۱ یکی از فرآیندهای نسبتاً جدید می‌باشد [1]. این فرآیند که در سال‌های قبل از جنگ جهانی دوم ابداع و توسعه داده شد، در دهه ۱۹۹۰ مورد اقبال گستردۀ صنایع خودروسازی و هواپیمایی قرار گرفت [2] و در سال‌های اخیر توجه محققان را در تولید و کاربردهای متفاوت به خود جلب کرده است [4,3]. حالت تنش بهتر نسبت به فرآیندهای سنتی مثل کشش عمیق، موجب شده است تا بتوان به قطعاتی با عمق بیشتر در این فرآیند دست یافت [5]. علاوه بر این، کاهش مناسب اصطکاک میان ورق و ابزار، انعطاف‌پذیری، کیفیت سطح بالا، دقت ابعادی زیاد و قابلیت تکرار از مزایای این فرآیند می‌باشد [6].

در سال‌های اخیر روش‌های نوین هیدروفرمینگ مانند کشش عمیق هیدرودینامیکی، کشش عمیق هیدرومکانیکی، کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی و هیدروفرمینگ با کنواخت روى ورق ارائه شده است. در میان این روش‌ها، کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی برای شکل‌دهی قطعات پیچیده و قطعات با نسبت کشش بالا مناسب می‌باشد [7]. این فرآیند مطابق "شکل ۱"، با یک تغییر در مجموعه قالب کشش عمیق هیدرودینامیکی برای ایجاد فشار شعاعی توسعه یافته است. در این فرآیند که در مقایسه با هیدروفرمینگ معمولی نیاز به تجهیزات خاص آبندی ندارد، فشار روغن موجود در اطراف گرده ورق که در هیدروفرمینگ معمولی وجود ندارد، نقش مؤثری را در افزایش نسبت کشش و کاهش نیروی شکل‌دهی ایفا می‌کند [11-8].

گرجی و همکاران [7] با استفاده از فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی^۲ توانستند به نسبت کشش ۹.۷۶ در شکل‌دهی قطعات مخروطی مسی و با توزیع ضخامت مناسب و یکنواخت دست پیدا کنند. ایده وجود فشار شعاعی در اطراف گرده ورق در ادامه توسعه این روش، منجر به ابداع روشی به نام کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی و جریان رو به داخل سیال شده است [12]. در این روش، با استفاده از یک مکانیزم هیدرولیکی، فشاری بالاتر از فشار محفظه در ناحیه لبه ورق ایجاد می‌شود. فشار شعاعی ایجاد شده به تغذیه ورق به داخل محفظه قالب کمک می‌کند و در نتیجه آن، نسبت کشش افزایش و نیروی شکل‌دهی به طور مؤثری کاهش می‌یابد. علاوه بر مزایای گفته شده درباره فشار شعاعی، وجود این فشار منجر به ایجاد تنش‌های محیطی و در نتیجه بروز یکی از عیوب فرآیندهای شکل‌دهی به نام چروکیدگی در قطعات استوانه‌ای و مخروطی می‌شود. با توجه به آزاد بودن بخش قابل توجهی از ورق در ناحیه بین نوک سنبه و ورق‌گیر در قطعات مخروطی، امکان بیشتر ایجاد چروک در دیواره این قطعات نسبت به قطعات استوانه‌ای وجود دارد [13]. چروکیدگی که نوعی تاپیداری در فشار محسوب می‌شود، از اهمیت بالایی برخوردار است. پیچیدگی و اهمیت این پدیده باعث شده تحقیقات فراوانی در این زمینه انجام شود. تشکیل چروک به طور کلی در دو ناحیه اتفاق می‌افتد: چروک در ناحیه‌ای از قطعه که ورق با ابزار شکل‌دهی در تماس است (فلنج^۳) و شکل‌گیری چروک در ناحیه‌ای از قطعه که ورق با ابزار در تماس نیست (دیواره) [14]. چروکیدگی در دیواره نسبت به چروکیدگی در فلنچ از اهمیت بیشتری برخوردار است. دلیل این امر را می‌توان در سه عامل زیر بر شمرد: ۱. میزان تنش فشاری موردنیاز برای شروع چروکیدگی در دیواره عموماً کمتر از میزان

¹ Hydroforming

² HDDRP

³ Flange

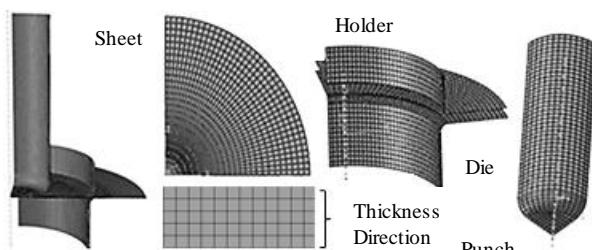
جدول 2 مقادیر مشخصه‌های ناهمسانگردی برای ورق St13

Table 2 Anisotropy values for St13 sheet

مقدار	مشخصه ناهمسانگردی
0.972	r_0
1.176	r_{45}
1.131	r_{90}
1.0376	R_{22}
1.0298	R_{33}
0.9742	R_{12}

3- شبیه‌سازی اجزای محدود

شبیه‌سازی اجزای محدود به عنوان روشی برای بررسی و اندازه‌گیری پارامترهای فرآیندی که در حالت آزمایشگاهی قابل اندازه‌گیری نمی‌باشد یا هزینه بالایی برای آن لازم است، روش کارآمدی است. به همین خاطر توسعه و بهره‌گیری از این روش در سال‌های اخیر به دلیل فوایدی همچون افزایش سرعت محاسبات، کاهش هزینه‌ها و قابلیت تکرارپذیری، شدت بیشتری یافته است. به منظور شبیه‌سازی فرآیند، در این پژوهش از نرم‌افزار اجزای محدود تجاری آبکوس^۳ نسخه 6.13.4 استفاده شده است. رفتار مکانیکی و فیزیکی ورق‌های فولادی و مس خالص با مشخصاتی که در بخش قبل و در جدول 1 آرائه شد، به نرم‌افزار معرفی گردید. رفتار ماده برای مس خالص به صورت همسانگرد و برای ورق فولادی به صورت ناهمسانگرد در نظر گرفته شده است. در تعیین حد تسلیم ماده در ورق فولادی و مس خالص به ترتیب از معیارهای تسلیم میزز^۴ و هیل^۵ استفاده شده است [۷]. ورق استفاده شده در فرآیند به صورت شکل پذیر و سایر اجزای قالب، صلب در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به تقارن مجموعه قالب و خواص مکانیکی مواد، یک‌چهارم مجموعه قالب و ورق و به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شده است. در مدل سازی ورق از المان‌های 8 گره‌ای جامد^۶ و درجهت ضخامت از 5 المان استفاده شد. همچنین ورق شکل پذیر شامل 2020 المان می‌باشد. "شکل 2" مدل سازی مجموعه قالب و مدل مونتاژ شده فرآیند هیدروفرمینگ در نرم‌افزار شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. "شکل 3" شماتیک مجموعه قالب را نشان می‌دهد. در شکل نشان داده شده، سنبه به صورت استوانه‌ای انتخاب شده است. در جدول 3 مشخصات و ابعاد هندسی قالب و گرده ورق آمده است. شبیه‌سازی با استفاده از حل گر صریح دینامیکی^۷ که قابلیت شبیه‌سازی فرآیندهای شبیه استاتیک از جمله شکل دهنده فلزات را دارد، انجام شده است. در تمام فرآیند، مجموعه قالب و نگهدارنده، ثابت می‌باشد. همچنین، سنبه تنها می‌تواند در راستای موازی با محور مرکزی خود جابجا گردد. در تعریف



شکل 2 مدل اجزای محدود در حالت مونتاژ شده به همراه مجموعه قالب

³ABAQUS

⁴Mises

⁵Hill

⁶C3D8R

⁷Dynamic Explicit

کنترل یک مسیر فشار شعاعی و یا محفظه در هر لحظه بودن. فشار جانبی و فشار محفظه در هر لحظه، دو مورد از مهم‌ترین پارامترهای کنترلی در این فرآیند می‌باشند که نسبت و مقدار لحظه‌ای آن‌ها نقش مهمی را در تولید قطعه‌ای سالم بازی می‌کند. بنابراین، در این پژوهش تأثیر فشار جانبی و فشار محفظه روی چروکیدگی به‌کمک شبیه‌سازی اجزای محدود بررسی شده است. همچنین برای بررسی اثر جنس بر پدیده چروکیدگی دو جنس متفاوت فولاد و مس خالص در نظر گرفته شده است.

2- خواص مواد

خواص فیزیکی و مکانیکی مواد استفاده شده در جدول 1 آمده است. مواد به کار رفته در آزمایش‌های تجربی، ورق فولادی و مس خالص با ضخامت اولیه 1 mm می‌باشد.

برای مدل‌سازی دقیق و تعیین پارامترهای ناهمسانگردی، براساس استاندارد [۲۰]، نمونه‌های آزمون کشش در جهت‌های ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به جهت نورد کشیده شدند.

ناهمسانگردی ورق در زاویه θ نسبت به جهت نورد براساس کرنش‌های پلاستیک به صورت معادله (۱) تعریف می‌شود [۲۱]:

$$r_\theta = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} \quad (1)$$

که ϵ_w و ϵ_t به ترتیب کرنش در جهت عرضی و ضخامت نمونه آزمون کشش در زاویه θ نسبت به جهت نورد می‌باشد. برای شبیه‌سازی ناهمسانگردی ورق ضروری است تا نسبت‌های تنش تسلیم (R) به صورت معادله (۲) به نرم‌افزار اجزای محدود معروف شود:

$$\begin{aligned} R_{11} &= \sigma_{11}/\sigma, R_{22} = \sigma_{22}/\sigma, \\ R_{33} &= \sigma_{33}/\sigma, R_{12} = \sigma_{12}/\sigma \end{aligned} \quad (2)$$

که $\sigma = \sigma$ تنش تسلیم در راستای نورد می‌باشد. نسبت‌های کرنش پلاستیک را می‌توان با استفاده از معادلات (۳) تا (۶) تبدیل کرد [۲۲]:

$$R_{11} = 1 \quad (3)$$

$$R_{22} = \sqrt{\frac{r_{90}(r_0 + 1)}{r_0(r_{90} + 1)}} \quad (4)$$

$$R_{33} = \sqrt{\frac{r_{90}(r_0 + 1)}{r_0 + r_{90}}} \quad (5)$$

$$R_{12} = \sqrt{\frac{3r_{90}(r_0 + 1)}{(2r_{45} + 1)(r_0 + r_{90})}} \quad (6)$$

نتایج تجربی نشان داد که ناهمسانگردی بسیار ناچیزی در ورق مس خالص وجود دارد که از آن صرف‌نظر شده است.

جدول 2 مقادیر مشخصه‌های ناهمسانگردی را نشان می‌دهد.

جدول 1 خصوصیات مکانیکی ورق‌های St13 و مس خالص

خواص مکانیکی و فیزیکی	مس خالص	St13	واحد
چگالی [۷,۱۸]	8940	7850	kg/m³
مدول یانگ ^۱ [۷,۱۹]	117	210	GPa
تشش تسلیم	123	158	MPa
ضریب استحکام	531	539	MPa
توان کار سختی	0.44	0.29	-
ضریب پوآسون ^۲ [۱۸]	0.32	0.32	-

¹ Young's modulus

² Poisson's ratio

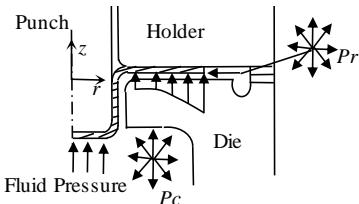


Fig. 4 Non-uniform pressure distribution on the sheet in the flange area in hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure with inward flowing liquid [12]

شکل 4 توزیع فشار غیریکنواخت در ناحیه فلنج در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی و جریان روبه داخل سیال [12]

نوشته شده، توزیع فشار در ناحیه فلنج در هر لحظه وابسته به مکان هندسی انتهای ورق می‌باشد. بدین ترتیب، در هر لحظه با توجه به پیش روی شبیه‌سازی مقادیر از نرم‌افزار وارد زیربرنامه می‌شود و توزیع فشار موردنظر به صورت یک توزیع فشار غیریکنواخت غیرخطی اعمال می‌گردد.

3-2- الگوریتم بررسی و کنترل چروکیدگی

به منظور بررسی شکل‌گیری چروکیدگی از یک روش هندسی بهره گرفته شده است. برای بررسی هندسی چروکیدگی مدل "شکل 5" در نظر گرفته شده است که در آن H ارتفاع، r_s شعاع کوچک، r_b شعاع بزرگ و α نصف زاویه راس مخروط می‌باشد. در این روش، تغییرات موج چروکیدگی بر روی محیط مخروط اندازه‌گیری می‌شود. با به دست آوردن تغییرات پارامتر R_N در مسیر تعیین شده بر روی محیط دیواره مخروط در ارتفاع مشخص h و درجهت عمود بر دیواره، چروکیدگی در ناحیه دیواره بررسی می‌شود. "شکل 6" نمونه‌ای از تغییرات پارامتر R_N به دست آمده از مدل هندسی را در دو حالت با و بدون چروک در دیواره مخروط در صفحه X-Y نشان می‌دهد.

پس از اتمام هر مرحله از شبیه‌سازی داده‌های موردنیاز از نرم‌افزار آباکوس به نرم‌افزار متلب³ جهت محاسبه R_N انتقال داده می‌شود و نمودارهای دو بعدی از موج چروکیدگی روی دیواره مخروط ایجاد می‌شود. با محاسبه تغییرات R_N روی محیط مخروط به صورت نمودارهای موج، ارتفاع چروکیدگی را می‌توان اختلاف میان نقاط حداکثر و حداقل دامنه موج چروکیدگی تعریف کرد. از نمودارهای دو بعدی موج چروکیدگی، در بخش 5

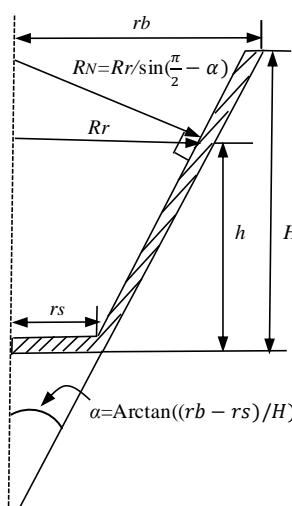


Fig. 5 Geometric method for wrinkling study on conical parts

شکل 5 روش هندسی برای بررسی چروکیدگی در قطعات مخروطی

³ Matlab

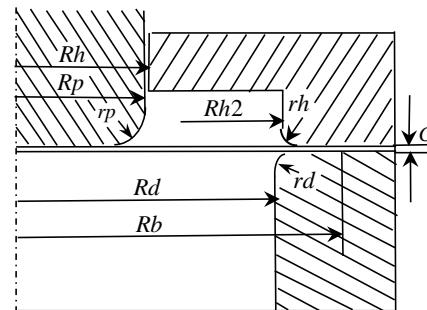


Fig. 3 schematic of the die set used in this study

شکل 3 شماتیک مجموعه قالب مورد استفاده

جدول 3 مشخصات و ابعاد هندسی قالب و گرد ورق

Table 3 The main parameters and dimensions of the die set and blank

مشخصه	علامت	مقدار (mm)
شعاع سنبه	R_p	20
شعاع نوک سنبه	r_p	6
شعاع قالب	R_d	42
شعاع ورودی قالب	r_d	3
شعاع راهنمای سنبه	R_h	21
شعاع نگهدارنده	R_{h2}	43
شعاع داخلی نگهدارنده	r_h	2
شعاع ورق	R_b	51
فاصله بین نگهدارنده و قالب	C	1.04

پارامترهای دیگر شبیه‌سازی مانند شرایط تماسی، میزان اصطکاک میان سنبه و ورق 0.14 و میزان اصطکاک بین ورق گیر و ورق و همچنین قالب و ورق در نظر گرفته شده است [23,7]. ضریب اصطکاک در همه نقاط ثابت و مدل اصطکاک کولمب می‌باشد.

3-1- مدل توزیع فشار

با توجه به اختلاف فشاری که بین فشار جانبی و فشار محفظه در روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی و جریان سیال روبه داخل در هر لحظه وجود دارد، فشار در همه نقاط روی ورق در ناحیه فلنج یکسان نمی‌باشد. توزیع فشار در ناحیه فلنج در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی و جریان روبه داخل سیال به صورت "شکل 4" می‌باشد. با استفاده از شرایط مرزی حاکم در این ناحیه، توزیع لحظه‌ای فشار سیال بر روی ورق در ناحیه فلنج و در فاصله r از محور مرکزی سنبه برابر است با معادله (7) [12]:

$$Pr = PR - (PR - PC) \left(\frac{\ln\left(\frac{r}{R}\right)}{\ln\left(\frac{R_1}{R}\right)} \right) \quad (7)$$

که در آن R_1 فاصله شعاع ورودی قالب از مرکز سنبه و R فاصله انتهای ورق از مرکز سنبه در هر لحظه، $P = PR$ و $r = R$ فشار جانبی در $r = R_1$ می‌باشد. برای اعمال فشار با توجه به قابلیت‌های فشار محفظه در نرم‌افزار آباکوس، از زیر برنامه تعریف فشار¹ در حل‌گر صریح استفاده شده است. زیر برنامه تعریف فشار، برنامه‌ای است که قابلیت تعریف توزیع بارهای غیریکنواخت را دارد [22]. در این زیر برنامه، معادله فشار حاکم با استفاده از نرم‌افزار فرتون² کدنویسی شد و به ناحیه موردنظر اعمال گردید. براساس کد

¹ Vload
² Fortran

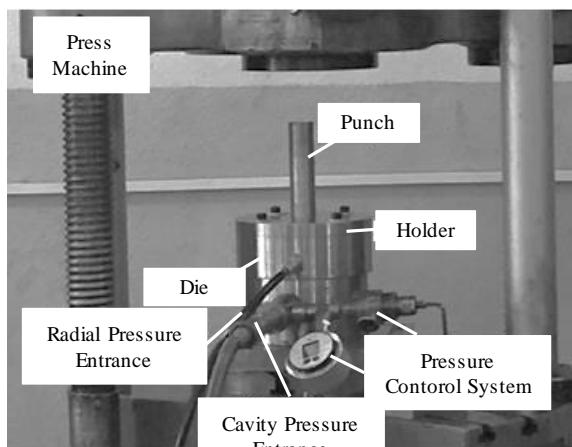


Fig. 8 Components of the die set, forming machine and pressure system
شکل 8 اجزای مجموعه قالب، ماشین شکل دهنده و سیستم تأمین فشار

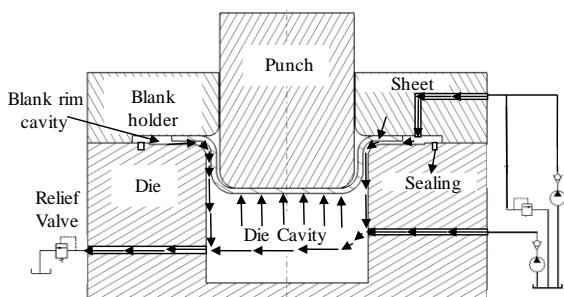


Fig. 9 Schematic of die and pressure set in this study
شکل 9 طرح واره ای از مجموعه تأمین فشار و قالب در پژوهش حاضر

بین ورق و ورق گیر که نقش مهمی در ایجاد فشار شعاعی ایفا می کند، معمولاً در حدود ۰.۳٪ ضخامت ورق می باشد که در این پژوهش، این مقدار 0.04 mm و در تمام نقاط ثابت می باشد [۸]. در این فرآیند، ابتدا فشار محافظه به ورق وارد می گردد تا آن را به سطح ورق گیر بچسباند. با این کار، یک ناحیه آببند بین سطح بالایی ورق و ورق گیر شکل می گیرد که از خروج سیال از درون قالب جلوگیری می نماید. سپس، فشار جانبی به مجموعه قالب اضافه می گردد. مسیر بارگذاری فشار محافظه و فشار جانبی بر حسب جابجایی سنبه در حین فرآیند در "شکل 10" نمایش داده است.

به منظور آببندی قالب، بر طبق استاندارد [۲۴] از یک آببند بر روی قالب استفاده شده است تا به ایجاد فشار شعاعی کمک کند. مقدار اندکی فشار پیش بشکه‌ای^۱ قبل از شروع حرکت سنبه، شکل پذیری ورق را در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی بهبود می بخشد [۲۵]. بنابراین براساس "شکل 10" قبل از شروع فرآیند شکل دهنده، پیش فشار 1 MPa به انتهای و اطراف ورق اعمال شده است (OA). بعد از شروع حرکت سنبه، فشار محافظه و شعاعی به طور خطی تا مقدار حداقل افزایش می یابد (AB) و (BC). شبیه افزایش فشار در این ناحیه به سرعت سنبه و مشخصات پمپ بستگی دارد. در حین انجام فرآیند برای اعمال و کنترل دقیق مسیر فشار از یک مانومتر دیجیتال^۲ استفاده شد و مسیر فشار توسط نرم افزار کنترل مسیر فشار به طور لحظه‌ای کنترل می گردید. در ادامه فرآیند، هنگامی که به ترتیب فشار محافظه و فشار جانبی به مقدار تنظیم شده ثابت می رسد (B'C)، شیر کنترل فشار باز شده و فشار تا پایان فرآیند شکل دهنده

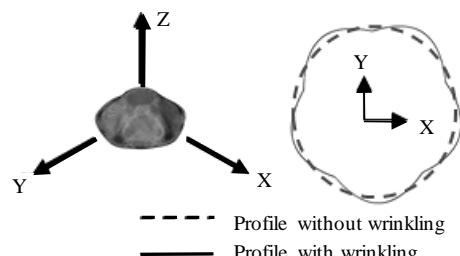


Fig. 6 R_N variation in X-Y plane
شکل 6 تغییرات پارامتر R_N در صفحه X-Y

جهت بررسی اثر پارامترهای مانند فشار، جنس، سرعت سنبه و ضخامت بر چروکیدگی استفاده می شود. با توجه به بررسی چروکیدگی در ناحیه دیواره مخروط یک مسیر مانند "شکل 7" در نظر گرفته شده است. با توجه به روند افزایش تنش فشاری در نواحی نزدیک به شعاع ورودی قالب و مستعد بودن این نواحی نسبت به نواحی نزدیک به سنبه و مرکز ورق برای تشکیل چروکیدگی، این مسیر نزدیک به شعاع ورودی قالب انتخاب شده است.

4- مراحل آزمایشگاهی

مجموعه مورد استفاده در انجام آزمایش‌ها شامل مجموعه قالب، ماشین ضخامت دهنده و سیستم تأمین فشار، در "شکل 8" آمده است.

به منظور تأمین فشار محافظه از یک پمپ دبی متغیر با حداقل فشار ۵۰ MPa استفاده شده است. همچنین برای ایجاد فشار شعاعی یک پمپ با دبی ثابت و حداقل فشار ۱۰۰ MPa در نظر گرفته شده است. روغن هیدرولیک ۵۶ cst با ویسکوزیته SAE10 مورد استفاده قرار گرفت که فشار لازم برای شکل دهنده در این فرآیند را تأمین می کند.

طراحی مجموعه قالب به صورتی است که فشار محافظه مستقیماً از طریق اتصال پمپ دبی متغیر به محافظه قالب تأمین می گردد. همچنین با اتصال پمپ دبی ثابت به ورق گیر، سیال از طریق راهگاه تعییه شده در ورق گیر به اطراف گرده ورق می رسد و فشار شعاعی موردنظر تأمین می شود. به علت ارتباط دو بخش محافظه داخلی و حلقه جانبی از طریق فاصله بین ورق و ورق گیر، کنترل این دو فشار در هر لحظه مستلزم طراحی یک سیستم آزمایشگاهی ویژه‌ای می باشد. بنابراین، طراحی و ساخت سیستمی جهت ایجاد فشار شعاعی و همچنین کنترل مستقل هم زمان فشار شعاعی و فشار محافظه در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی و جریان رویه داخل سیال و همچنین آزمایش‌های متعدد برای ایجاد یک شبیه‌سازی قابل اطمینان از اهداف این بخش محسوب می شوند. طرح واره‌ای از مجموعه تأمین فشار در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی و جریان رویه داخل سیال در این پژوهش در "شکل 9" نمایش داده شده است.

بیشینه فشار ایجاد شده در محافظه قالب و بر روی کناره‌های ورق توسط دو شیر کنترلی که در مسیر پمپ‌ها قرار دارد، کنترل می گردد. میزان فاصله



Fig. 7 Defined path on cone circumference for wrinkle wave study

شکل 7 مسیر در نظر گرفته شده در ناحیه دیواره مخروط برای بررسی چروک

¹ Pre-bulge
² Digital manometer



Fig. 11 a) Steel wrinkled conical cups b) Copper wrinkled conical cups, using HDDRP with inward flowing liquid

شکل 11 الف) مخروط فولادی چروک شده ب) مخروطی مسی چروک شده، در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی و جریان رویه داخل سیال

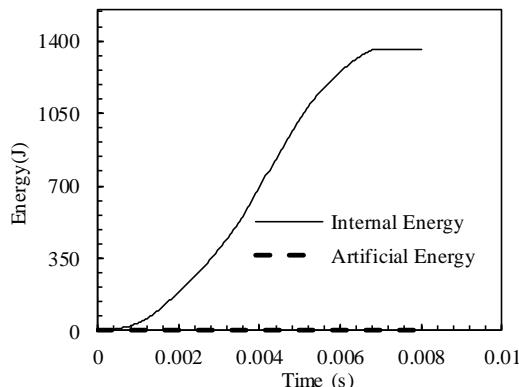


Fig. 12 Comparison of artificial energy and internal energy

شکل 12 مقایسه انرژی مصنوعی و انرژی داخلی

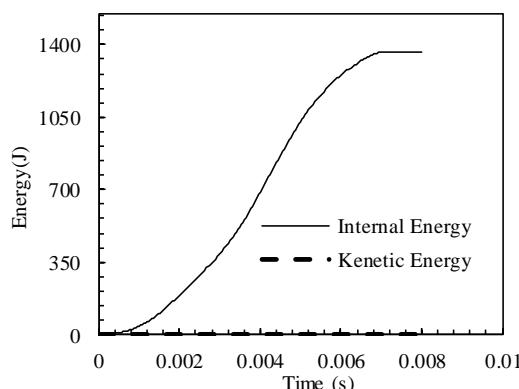


Fig. 13 Comparison of kinetic energy and internal energy

شکل 13 مقایسه انرژی جنبشی و انرژی داخلی

فشار "شکل 10" به دست آمده است.

5-3-3- مقاطعه چروکیدگی

اندازه‌گیری مقاطعه چروکیدگی به عنوان معیاری جهت سنجش پدیده

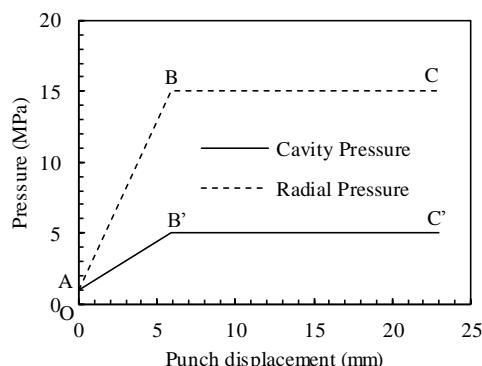


Fig. 10 Radial and cavity pressures versus punch displacement

شکل 10 نمودار مسیر فشار محفظه و شعاعی بر حسب جابجایی سنبه

ثابت می‌باشد. همچنین ارزیابی کمی پدیده چروکیدگی برای مقایسه دقیق نتایج تجربی و عددی می‌تواند مناسب باشد. بدین جهت در این پژوهش مقاطعه چروک با استفاده از مجموعه‌ای از ساعتهای اندازه‌گیری، اندازه‌گیری شده است. نمونه قطعات شکل داده شده در "شکل 11" مشاهده می‌شود.

5- نتایج و بحث

5-1- صحبت سنجی

صحبت سنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمایش تجربی یک از مهم‌ترین بخش‌های یک پژوهش می‌باشد. صحبت سنجی در مسائل اجزای محدود از آن جهت دارای اهمیت می‌باشد که یک شبیه‌سازی قابل اطمینان می‌تواند به عنوان مبنای برای بررسی سایر پارامترهای مورد مطالعه قرار گیرد. در این پژوهش سعی شده است ابتدا نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی به طور دقیق صحبت سنجی گردد و در مرحله بعد به بررسی تاثیر پارامترهایی همچون تأثیر ضخامت، مسیرهای متفاوت فشار، سرعت سنبه و جنس بر چروکیدگی پرداخته شود.

5-1-1- نمودار انرژی جنبشی و انرژی مصنوعی

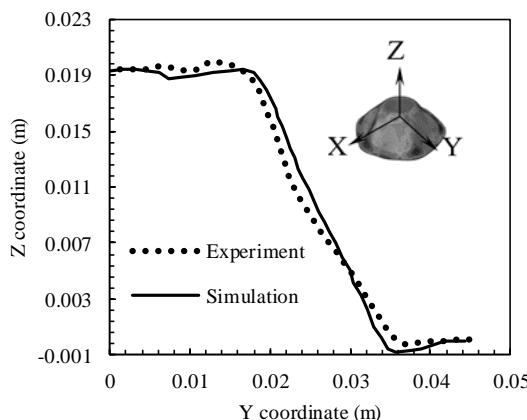
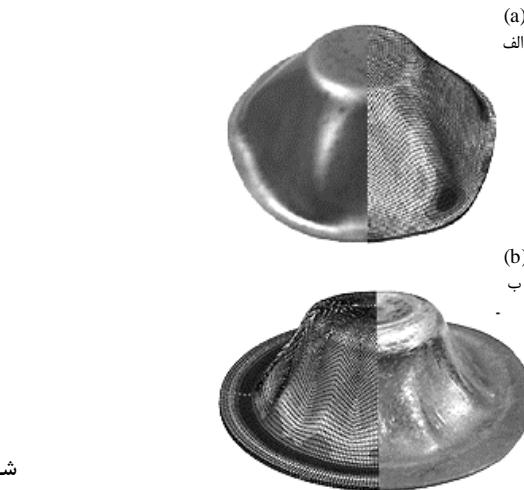
انرژی مصنوعی در یک شبیه‌سازی اجزای محدود باید بخش کوچکی (تقریباً در حدود ۰/۵) از انرژی داخلی باشد تا از پدیده ساعت شنی^۱ در شبیه‌سازی جلوگیری شود [۲۶]. در این پژوهش نتایج بررسی نسبت این انرژی به انرژی داخلی در "شکل 12" آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان انرژی مصنوعی در برابر انرژی داخلی بسیار کم است. به علاوه، یک حل شبه استاتیک زمانی مورد قبول است که انرژی جنبشی مدل بیش از ۵ درصد از انرژی داخلی آن نباشد [۲۷]. همان‌طور که از "شکل ۱۳" ملاحظه می‌گردد مقدار انرژی جنبشی در برابر انرژی داخلی آن بسیار ناقیز است. بنابراین می‌توان این شبیه‌سازی را شبه استاتیک در نظر گرفت.

5-1-2- تعداد موج چروکیدگی و شکل چروک

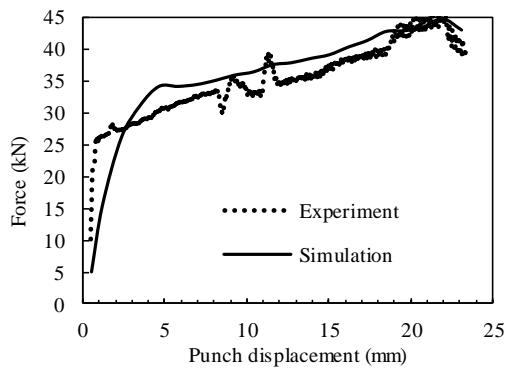
"شکل 14" قطعات چروک شده را در حالت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی برای دو ماده متفاوت نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که هندسه موج چروکیدگی برای هر ماده در دو حالت تجربی و شبیه‌سازی یکسان می‌باشد.

تعداد ۵ موج چروک در شبیه‌سازی و آزمایش تجربی ورق فولادی مشاهده شد و تعداد موج چروکیدگی مشاهده شده در نمونه تجربی از جنس مس ۱۱ و در حالت شبیه‌سازی ۱۲ می‌باشد که دقت شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. این تعداد موج چروک در پیش روی 24 mm سنبه و براساس مسیر

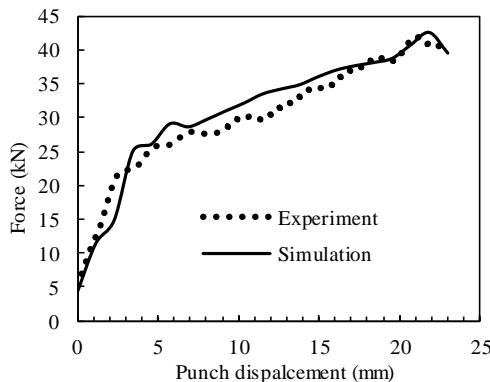
^۱ Hourglass phenomenon

**Fig. 16** Wrinkling profile diagram for pure copper part**Fig. 14** Formed conical cups of a) St13 sheet b) Pure copper sheet, obtained from experiment and simulation

شکل 14 قطعه شکل گرفته شده از جنس (الف) فولاد (ب) مس خالص، در حالت شبیه‌سازی و تجربی

**Fig. 17** Load-displacement diagram of pure copper specimen

شکل 17 نمودار نیرو بر حسب جابجایی سنبه برای نمونه مسی

**Fig. 18** Load-displacement diagram of St13 specimen

شکل 18 نمودار نیرو بر حسب جابجایی سنبه برای نمونه فولادی

از تطابق خوبی برخوردار است. بیشترین اختلاف در حالت شبیه‌سازی و تجربی برای نمونه مسی در حدود ۰.۷٪ و برای نمونه فولادی ۰.۴٪ می‌باشد. به دلیل اختلاف میان مسیر فشار اعمالی و مسیر فشار داده شده به نرمافزار شبیه‌سازی، این میزان اختلاف میان نمودار نیرو جابجایی در حالت تجربی و شبیه‌سازی دیده می‌شود.

5-1-5- انتخاب اندازه المان شبیه‌سازی

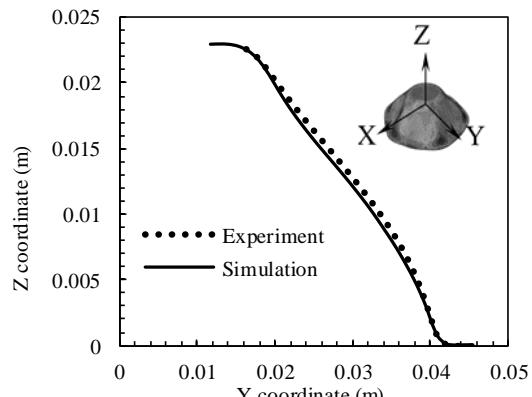
نتایج شبیه‌سازی مخصوصاً هندسه و شکل چروکیدگی به اندازه المان بسیار حساس می‌باشد. بنابراین انتخاب مناسب اندازه المان برای شبیه‌سازی

چروکیدگی می‌تواند بسیار مناسب باشد. با توجه به این مبنا می‌توان گفت کفی‌سازی میزان چروکیدگی یکی از اهداف این پژوهش می‌باشد که در این بخش به آن پرداخته می‌شود. در این پژوهش با استفاده از مجموعه‌ای از ساعت‌های اندازه‌گیری، مقطع موج چروک اندازه‌گیری شده و با نمونه حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود مقایسه گردید. "شکل 15" و "شکل 16" نتایج حاصل از "شکل 15" و "شکل 16" نشان می‌دهد که تطابق داده‌های حاصل از آزمایش و شبیه‌سازی از دقت خوبی برخوردار است.

5-1-4- نمودار نیرو - جابجایی

از دیگر پارامترهای مهم در تعیین صحت یک شبیه‌سازی، نمودار نیروی عکس‌العمل سنبه می‌باشد که در انتخاب دقیق و صحیح سایر پارامترهای فرآیند مثل ضریب اصطکاک مؤثر است [28]. "شکل‌های 17" و "18" مقایسه نیروی شکل‌دهی را در دو حالت شبیه‌سازی و تجربی و بهترین براز نمونه‌های مسی و فولادی نشان می‌دهد.

به دلیل اعمال پیش فشار، در هر دو نمودار نیروی شکل‌دهی در آغاز حرکت سنبه از ۵ kN شروع شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج

**Fig. 15** Wrinkling profile diagram for St13 part

شکل 15 نمودار مقطع چروکیدگی نمونه فولادی St13

با توجه به مشخصات سیستم تأمین فشار و هندسه قالب مورد بررسی در این پژوهش، حداقل اختلاف فشار ایجاد شده بین فشار جانبی و فشار محفظه برابر با 15 MPa در نظر گرفته شد. بنابراین، مسیر فشار با بیشینه فشار حداقل 5 MPa و حداقل 20 MPa بعنوان بازه مورد بررسی انتخاب شدند.

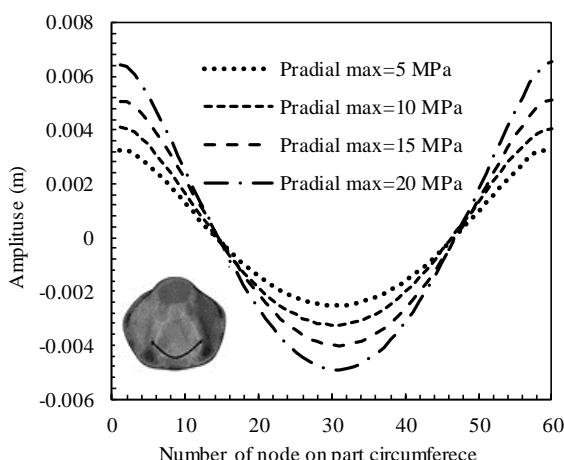
5-2-بررسی پارامتر

5-2-1-اثر فشار شعاعی

در این بخش به بررسی اثر مسیرهای فشار شعاعی مختلف با بیشینه فشار متفاوت بر روی چروکیدگی قطعه مخروطی شکل داده شده از جنس فولاد پرداخته شده است. برای این کار، مسیرهای فشار با بیشینه های $5, 10, 15, 20 \text{ MPa}$ برای فشار شعاعی در شبیه سازی های گوناگون مورد استفاده قرار گرفتند. در همه این شبیه سازی ها از مسیر فشار با بیشینه 5 MPa برای فشار محفظه استفاده شده است. نتایج حاصل از بررسی اثر فشار شعاعی بر چروکیدگی در "شکل 21" نمایش داده شده است. با توجه به این شکل، مشاهده می شود که با افزایش فشار شعاعی از 5 MPa به 20 MPa در فشار ثابت محفظه، شدت چروکیدگی افزایش می یابد. افزایش چروکیدگی درنتیجه فشار شعاعی را می توان به افزایش تنش های فشاری نسبت داد که در ناحیه دیواره عامل چروک محسوب می شود. از سوی دیگر با افزایش تغذیه ورق به داخل محفظه در نتیجه وجود فشار شعاعی، این عامل هم سهم مهمی در افزایش شدت چروکیدگی دارد.

5-2-2-اثر فشار محفظه

به منظور بررسی اثر فشار محفظه، چهار فشار از $5 \text{ to } 11 \text{ MPa}$ مورد بررسی قرار گرفته شده است. همان طور که در "شکل 22" مشاهده می شود در فشار شعاعی ثابت (البته با فرض بزرگ تر بودن فشار شعاعی در هر چهار حالت) با افزایش فشار محفظه شدت چروکیدگی (دامنه موج چروک) تا 76% کم می شود. در واقع در طول فرآیند هیدروفرمینگ با افزایش این فشار در ناحیه پشتیبانی نشده (دیواره) از ناپایداری ورق کم می شود که نتیجه آن کم شدن چروکیدگی است. "شکل 23" تنش فشاری محیطی را روی سطح ورق، تنש فشاری در ناحیه γ (دیواره) تا 36 درصد کاهش می یابد که منجر به کاهش چروکیدگی می شود. همچنین بیشترین تنش فشاری محیطی هم در این ناحیه انفاق افتاده است که نشان می دهد تغییرات تنش فشاری درنتیجه

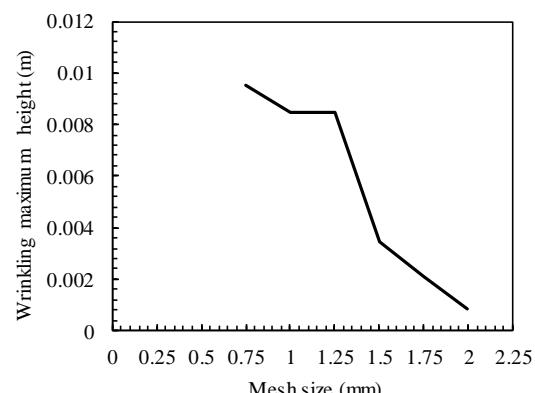


شکل 21 اثر فشار شعاعی بر چروکیدگی در بیشینه فشار محفظه 5 MPa

چروکیدگی، نقطه کلیدی در دقت و صحت پیش بینی چروک در قطعه شکل داده شده می باشد [29]. در "شکل 19" مقدار بیشینه ارتفاع چروکیدگی به ازای اندازه های مختلف المان از مقدار 0.75 mm تا 2 mm آمده است.

همان طور که مشخص است با افزایش اندازه شبکه مقدار بیشینه چروکیدگی کم می شود. بررسی ها نشان داد که این مقدار حساسیت در اندازه شبکه ممکن است موجب عدم ایجاد چروک در شبیه سازی ها شود. برای مثال همان طور که در "شکل 20" دیده می شود در اندازه شبکه 2 mm در مقایسه با اندازه 0.75 mm چروکیدگی مشاهده نمی شود. بنابراین برای انتخاب بهترین اندازه المان با توجه به پراکندگی نتایج در این مطالعه از اندازه مش ۱.25 mm با توجه به انتباط نتایج حاصل از شبیه سازی در این اندازه المان با داده های تجربی "شکل 15" و "شکل 16" برای هر دو ماده استفاده شده است. همچنین داده های حاصل از اندازه مش 1 mm از تطبیق قابل قبولی با نتایج تجربی برخوردار بوده که جهت صرفه جویی در زمان شبیه سازی از اندازه 1.25 mm استفاده شده است.

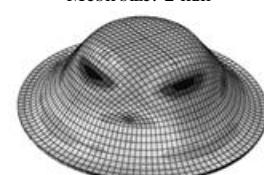
بنابراین به کمک شبیه سازی اجزای محدود می توان فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی و جریان رو به داخل سیال را با دقت مدل سازی کرد و به کمک آن می توان اثر پارامترهای مختلف بر چروکیدگی را بدون صرف وقت و هزینه زیاد بررسی کرد. برای بررسی اثر فشار محفظه و فشار جانی در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار متفاوتی انجام رو به داخل سیال، شبیه سازی های مختلفی با مسیرهای فشار متفاوتی انجام گرفته است. مقدار فشار بیشینه ای که در یک زمان معین ایجاد می گردد نقطعه تمایز اصلی این مسیرها از یکدیگر را تشکیل می دهد. نتایج حاصل از شبیه سازی های صورت گرفته، نشان می دهد که برای شکل دهنده قطعه مخروطی مورد بررسی از جنس فولاد در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی و جریان رو به داخل سیال منطبق با مسیر فشار در نظر گرفته شده در "شکل 10"، به فشار محفظه بیشینه، حداقل 5 MPa نیاز می باشد.



شکل 19 اثر اندازه المان بر بیشینه ارتفاع چروکیدگی

شکل 19 اثر اندازه المان بر بیشینه ارتفاع چروکیدگی

Mesh size: 2 mm



Mesh size: 0.75 mm



شکل 20 اثر اندازه شبکه بر پیش بینی چروکیدگی

عددی اجتناب ناپذیر است. شبیه‌سازی و بررسی چروکیدگی با استفاده از این حل گر به پارامترهای ورودی متعددی از جمله نوع المان، اندازه شبکه، سرعت شبیه‌سازی وغیره بستگی دارد.

هدف از آوردن این بخش بررسی میزان دقیق نتایج در سرعت‌های شبیه‌سازی متفاوت می‌باشد زیرا در شبیه‌سازی با حل گر صریح انتخاب مناسب سرعت شبیه‌سازی به عملت صرف‌جویی در زمان برای دست‌یابی به نتایج قابل اعتماد بسیار مهم است. بنابراین، از آنجا که در یک فرآیند سرد، مانند فرآیند مورد مطالعه، سرعت شکل‌دهی بر رفتار ماده تأثیری ندارد و رفتار ماده به نرخ کرنش وابسته نیست، هدف از بررسی سرعت سنبه در واقع مطالعه اثر سرعت شبیه‌سازی بر چروکیدگی می‌باشد. به همین دلیل براساس "شکل 25" با افزایش سرعت سنبه و درنتیجه کاهش زمان شبیه‌سازی یا افزایش سرعت شبیه‌سازی، بیشینه ارتفاع چروکیدگی تغییراتی بین ۱ تا ۲.۵ دارد؛ که وابستگی نتایج به سرعت شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

۵-۲-۵ اثر ضخامت ورق

در بررسی اثر اندازه ضخامت در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی و جریان رویه داخل سیال سه ضخامت، ۱، ۱.۵ و ۲ mm در نظر گرفته شده است. با توجه به "شکل 26" مشاهده می‌شود افزایش ضخامت ورق تأثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش و حتی جلوگیری از چروکیدگی در دیواره قطعات مخروطی دارد. برای مثال دامنه موج چروکیدگی در اندازه المان

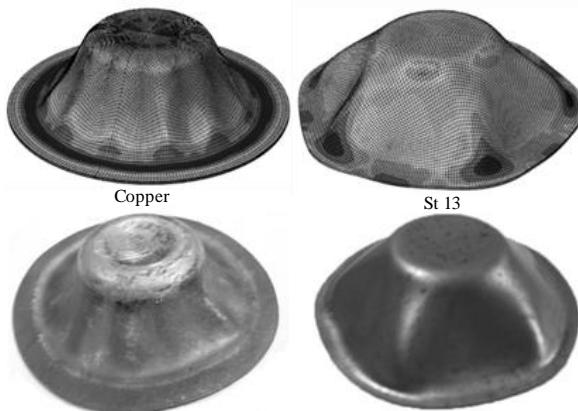


Fig. 24 Material effect on wrinkling wave

شکل 24 اثر نوع ماده بر موج چروکیدگی

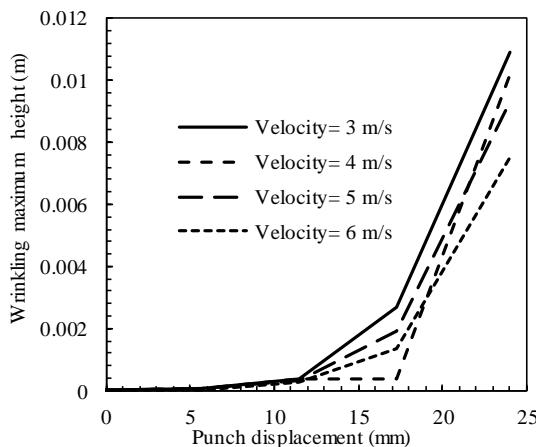
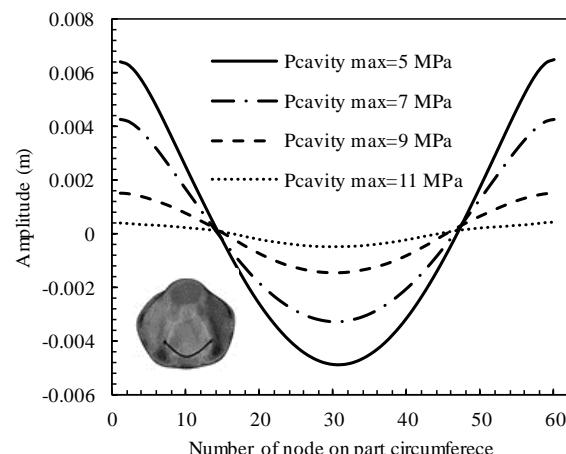
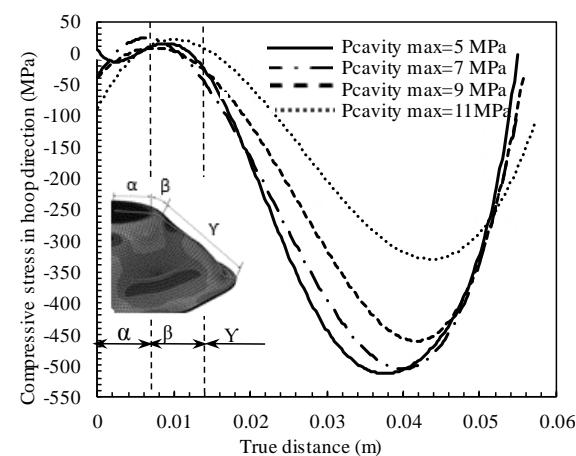


Fig. 25 Effect of simulation speed on wrinkling maximum height

شکل 25 تأثیر سرعت شبیه‌سازی بر بیشینه ارتفاع چروکیدگی



شکل 22 نمودار اثر فشار محفظه بر چروکیدگی در بیشینه فشار شعاعی 20 MPa



شکل 23 اثر افزایش فشار محفظه بر کاهش تنش فشاری در بیشینه فشار شعاعی 20 MPa

تغییرات فشار محفظه تأثیر قابل توجهی بر موج چروک دارد.

۵-۳-۳ اثر جنس ورق

جهت بررسی اثر جنس بر روی پدیده چروکیدگی، از ورق مسی نیز استفاده شده است. ورق مس در این بررسی همسانگرد و به‌منظور یک مقایسه دقیق با ورق فولادی، آزمایش در شرایط برابر انجام شده است.

نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی فرآیند در "شکل 24" آمده است. در بررسی نوع چروکیدگی بین نمونه مسی و فولادی می‌توان گفت که در مخروط مسی ارتفاع چروکیدگی مقادیر کمتری نسبت به مخروط فولادی دارد، اما تعداد موج چروکیدگی دیده می‌شود که همین امر می‌تواند علت کاهش ارتفاع موج چروکیدگی باشد؛ بدین معنی که در یک محیط محدود تعداد موج بیشتر با ارتفاع کمتری دیده می‌شود. به دلیل اینکه چروکیدگی در موادی با تنش تسلیم بالاتر و درنتیجه جریان ماده بیشتر از موادی با تنش تسلیم کمتر، زودتر اتفاق می‌افتد [30]، بنابراین ارتفاع چروکیدگی در مخروط فولادی از شدت بیشتری برخوردار است.

۵-۴-۲-۴ اثر سرعت سنبه

در یک شبیه‌سازی عددی با استفاده از حل گر صریح، همواره وجود خطاهای

1. افزایش فشار شعاعی به میزان بالاتری از فشار محفظه علاوه بر افزایش نسبت کشش، احتمال ایجاد چروک در قطعه را افزایش می‌دهد. به طوری که افزایش فشار شعاعی از ۵ به ۲۰ MPa ارتفاع چروک را به میزان ۲.۵ mm افزایش می‌دهد.
2. در این پژوهش تأثیر فشار محفظه بر موج چروکیدگی بررسی و نشان داده شد که با افزایش آن به میزان ۵۴٪ موجب کاهش دامنه موج چروک به میزان ۷۶ درصد می‌شود (قریباً حذف چروک) که علت آن را می‌توان افزایش مقاومت ورق در مقابل ناپایداری منجر به چروکیدگی در اثر افزایش فشار در ناحیه آزاد قطعه (دیواره) دانست.
3. علاوه بر مسیر فشار، اثرات پارامترهای مختلف بر روی چروکیدگی بررسی شد. نتایج نشان داد افزایش ضخامت ورق منجر به کاهش چروکیدگی می‌شود. این کاهش به میزانی است که حتی افزایش آن از ۱ به ۲ mm موجب حذف چروکیدگی می‌شود.
4. همچنین در این پژوهش نشان داده شده که شبیه‌سازی اجزای محدود چروکیدگی با استفاده از حل گر صریح وابستگی شدیدی به پارامترهای ورودی دارد. بررسی اثر سرعت شبیه‌سازی و اندازه المان شیکه بر تغییرات در بیشینه ارتفاع موج چروکیدگی این وابستگی را نشان داد.
5. استفاده از روش هندسی علاوه بر سادگی، معیار مناسبی جهت بررسی پدیده چروکیدگی بهصورت کمی می‌باشد و با استفاده از آن می‌توان بررسی دقیق‌تری از پارامترهای مؤثر در فرآیند که بر روی عیب چروکیدگی تأثیر دارند، انجام داد.

7- مراجع

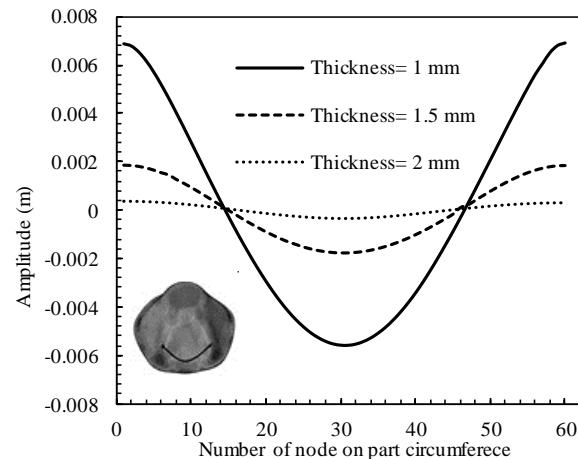
- [1] V. Modanloo, A. Doniavi, R. Hasanzadeh, Application of multi criteria decision making methods to select sheet hydroforming process parameters, *Decision Science Letters*, Vol. 5, No. 3, pp. 349-360, 2016.
- [2] S. H. Zhang, Developments in hydroforming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 91, No. 1, pp. 236-244, 1999.
- [3] N. Mohammadtabar, M. Bakhshi-Jooybari, S. J. Hosseinpour, A. Gorji, Study of effective parameters in hydroforming of fuel cell metallic bipolar plates with parallel serpentine flow field, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 8, pp. 150-158, 2014. (in persian)
- [4] R. Mousavipoor, A. Gorji, M. Bakhshi, G. M. Alinejad, Experimental and numerical study of effective parameters in forming of double-stepped parts and optimization of the initial blank shape, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 177-188, 2015. (in persian)
- [5] M. Bakhshi-Jooybari, A. Gorji, M. Elyasi, *Developments in sheet hydroforming for complex industrial parts*: Kazeminezhad M (ed.), pp. 56-84, RijekaCroatia, InTech, 2012.
- [6] S. Zhang, Z. Wang, Y. Xu, Z. Wang, L. Zhou, Recent developments in sheet hydroforming technology, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 151, No. 1, pp. 237-241, 2004.
- [7] A. Gorji, H. Alavi-Hashemi, M. Bakhshi-Jooybari, S. Nourouzi, S. J. Hosseinpour, Investigation of hydrodynamic deep drawing for conical-cylindrical cups, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 56, No. 9-12, pp. 915-927, 2011.
- [8] L. Lang, J. Danckert, K. B. Nielsen, 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, No. 1, pp. 150-161, 2005.
- [9] S. Zhao, Z. Zhang, Y. Zhang, J. Yuan, The study on forming principle in the process of hydro-mechanical reverse deep drawing with axial pushing force for cylindrical cups, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 187, pp. 300-303, 2007.
- [10] L. Lang, J. Danckert, K. B. Nielsen, Study on hydromechanical deep drawing with uniform pressure onto the blank, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, No. 5, pp. 495-502, 2004.
- [11] D. Yang, J. Kim, D. Lee, Investigation into manufacturing of very long cups by hydromechanical deep drawing and ironing with controlled radial pressure, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 44, No. 1, pp. 255-258, 1995.
- [12] 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.

2 کمتر از 0.00035 m می‌باشد.

چروکیدگی در دیواره قطعات مخروطی همان‌طور که در قسمت مقدمه گفته شد، به ناحیه آزاد ورق بین سنبه و قالب بستگی دارد و شکل گیری چروک در دیواره به علت زیاد بودن نسبت ابعاد دیواره به ضخامت ورق، راحت‌تر است. بنابراین، با افزایش ضخامت از مقدار ۱ به ۱.۵ و سپس ۲ mm این نسبت تا ۲ برابر کاهش پیدا می‌کند. در نتیجه منجر به کاهش دامنه موج چروکیدگی می‌گردد. در واقع اگر مطابق "شکل 27" سطح باریکی از قسمت فشاری (در اینجا تنفس فشاری محیطی) قرار دارد با افزایش ضخامت، ضربی لاغری ستون کم می‌شود و از کمانش ستون (در اینجا چروکیدگی) می‌کاهد.

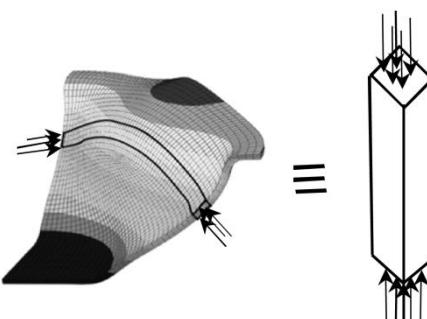
6- نتیجه‌گیری

در این مقاله چروکیدگی در دیواره قطعات مخروطی از جنس مس خالص و فولاد، با استفاده از یک روش هندسی در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی و جریان رویه داخل سیال با به کارگیری از شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمایش‌های تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. ابتدا با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی و آزمایش تجربی یک مدل صحبت‌سنگی شده ارائه شد که نشان داده شد نتایج حاصل از شبیه‌سازی تطابق خوبی با نتایج آزمایش تجربی دارند. سپس به‌منظور بررسی اثر فشارهای محفظه و شعاعی، مسیر فشارهای مختلفی انتخاب شد و تأثیر این مسیر فشارها بر تغییرات موج چروکیدگی مطالعه شد. نتایج گرفته شده عبارت است از:



شکل 26 نمودار اثر ضخامت ورق بر موج چروکیدگی

شکل 26 نمودار اثر ضخامت ورق بر موج چروکیدگی



شکل 27 مشابه‌سازی چروکیدگی در ورق با کمانش ستون‌ها

- [23] M. Salahshoor, A. Gorji, M. Bakhshi-Jooybari, The study of forming concave-bottom cylindrical parts in hydroforming process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 79, No. 5-8, pp. 1139-1151, 2015.
- [24] J. Whitlock, *The Seal Man's O-Ring Handbook*, pp. 108-111, USA, EPM, Inc, 2004.
- [25] 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.
- [26] H. Z. Poor, H. Moosavi, An investigation of wrinkling and thinning in hydroforming deep drawing process with hemispherical punch, *International Journal of Mechanical Systems Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 89-96, 2013.
- [27] M. Habibi, R. Hashemi, A. Ghazanfari, R. Naghdabadi, A. Assempour, Forming limit diagrams by including the M-K model in finite element simulation considering the effect of bending, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, Accessed on 5 April 2016, <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1464420716642258>.
- [28] F. Djavanroodi, M. Ebrahimi, Effect of die parameters and material properties in ECAP with parallel channels, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 29, pp. 7593-7599, 2010.
- [29] D. Neto, M. Oliveira, R. Dick, P. Barros, J. Alves, L. Menezes, Numerical and experimental analysis of wrinkling during the cup drawing of an AA5042 aluminium alloy, *International Journal of Material Forming*, Accessed on 4 September 2015, <https://link.springer.com/article/10.1007/s12289-015-1265-4>.
- [30] Y. S. Kim, Y. J. Son, J. Y. Park, Bifurcation analysis of wrinkling formation for anisotropic sheet, *KSME International Journal*, Vol. 13, No. 3, pp. 221-228, 1999.
- [13] M. Kawka, L. Olejnik, A. Rosochowski, H. Sunaga, A. Makinouchi, Simulation of wrinkling in sheet metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 109, No. 3, pp. 283-289, 2001.
- [14] M. A. Shafaat, M. Abbasi, M. Katabchi, Investigation into wall wrinkling in deep drawing process of conical cups, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211, No. 11, pp. 1783-1795, 2011.
- [15] X. Wang, J. Cao, On the prediction of side-wall wrinkling in sheet metal forming processes, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 42, No. 12, pp. 2369-2394, 2000.
- [16] S. S. Anarestani, M. Morovvati, Y. A. Vaghlasloo, Influence of anisotropy and lubrication on wrinkling of circular plates using bifurcation theory, *International Journal of Material Forming*, Vol. 8, No. 3, pp. 439-454, 2015.
- [17] A. Hashemi, M. H. Gollo, S. H. Seyedkashi, Process window diagram of conical cups in hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 25, No. 9, pp. 3064-3071, 2015.
- [18] C. Smithells, *Smithells Metals Reference Book*, pp. 1313-1371, Oxford, Butter Heinemann Publication, 1992.
- [19] S. Bagherzadeh, M. Mirnia, B. M. Dariani, Numerical and experimental investigations of hydro-mechanical deep drawing process of laminated aluminum/steel sheets, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 18, pp. 131-140, 2015.
- [20] A. International, *A370-10 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*, Philadelphia, ASTM International, 2010.
- [21] J. Hu, Z. Marciniak, J. Duncan, *Mechanics of sheet metal forming*: pp.26-27, Oxford, Butterworth-Heinemann Publication 2002.
- [22] K. Hibbit, *ABAQUS: User's Manual: Version 6.13: Hibbit*, pp. 369-372, USA, Karlsson & Sorensen, 2013.