مجله مهندسی مکانیک مدرس، مرداد 1396، دوره 17، شماره 5، ص‌ص 276-286

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

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

مازیار خادمی[1]، محمد بخشی جویباری[2*]، عبدالحمید گرجی[3]، میلاد صادق یزدی[4]

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، صندوق‌پستی 484، bakhshi@nit.ac.ir

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

چکیده

پیش‌بینی چروکیدگی و جلوگیری از آن، در طراحی ابزار و تعیین پارامترهای مؤثر در فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی بسیار مهم می‌باشد. در شکل‌دهی فنجان‌های 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 به‌داخل پرداخته شده است. در فرآیند به‌کار گرفته شده، از دو فشار مستقل برای شکل‌دهی ورق استفاده می‌شود. با توجه به ماهیت فرآیند، اثرات هم فشار شعاعی و هم فشار محفظه بر پدیده چروکیدگی مورد مطالعه قرار گرفته است. به‌علاوه، اثر جنس، ضخامت اولیه ورق و سرعت سنبه بر روی چروکیدگی در دیواره قطعه بررسی شده است. به‌منظور صحت‌سنجی نتایج، آزمایش تجربی بر روی ورق‌های فولادی و مسی انجام شده است که قابل اعتماد بودن این روش را در بررسی چروکیدگی نشان می‌دهد. 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 مدل‌سازی هم‌چون سرعت سنبه و اندازه مناسب المان دارد.

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:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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)

در میان فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی مانند کشش عمیق، شکل‌دهی الکترومغناطیسی و شکل‌دهی چرخشی، هیدروفرمینگ[1] یکی از فرآیندهای نسبتا جدید می‌باشد [1] . این فرآیند که در سال‌های قبل از جنگ جهانی دوم ابداع و توسعه داده شد، در دهه 1990 مورد اقبال گسترده صنایع خودروسازی و هواپیمایی قرار گرفت [2] و در سال های 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 فشار یکنواخت روی 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 1"، 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 آب‌بندی 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 [8-11].

گرجی و همکاران [7] با استفاده از فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی[2] توانستند به نسبت کشش 9.76 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 به‌طور مؤثری کاهش می‌یابد. علاوه بر مزایای گفته‌شده 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 قابل‌توجهی 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 ناپایداری 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[3]) و شکل‌گیری چروک در ناحیه‌ای از قطعه که ورق با ابزار در تماس نیست (دیواره) [14]. چروکیدگی در دیواره نسبت به چروکیدگی در فلنج از اهمیت بیشتری برخوردار است. دلیل این امر را می‌توان در سه عامل زیر برشمرد: 1. میزان تنش فشاری موردنیاز برای شروع چروکیدگی در دیواره معمولاً کمتر از میزان

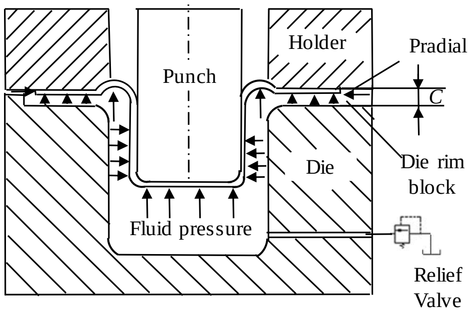

Fig. 1 Pressure system and die set in the process of hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure [8]

شکل 1 سیستم فشار و مجموعه قالب در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی [8]

تنش فشاری لازم برای ایجاد چروک در ناحیه فلنج است.

2. شکل‌گیری چروک در دیواره به علت زیاد بودن نسبت ابعاد دیواره به ضخامت ورق راحت‌تر است. 3. چروکیدگی در ناحیه فلنج به‌علت این‌که فلنج معمولاً از قطعه جدا می‌شود، با یک عملیات اضافی حذف می‌شود اما چروکیدگی در دیواره معمولاً در 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 به‌دست آوردند. روش مورد استفاده این محققان یک تئوری تحلیلی برمبنای 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 به‌دست آوردند. صحت‌سنجی نتایج به‌دست آمده تطابق 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 به‌دست 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 اکثراً این پدیده را به‌صورت کیفی و در قالب ذکر بهبود یا عدم بهبود چروکیدگی در نظر می‌گیرند. همچنین در رابطه با روش‌های بررسی این عیب، روش‌های تحلیلی معمولاً برای اشکال هندسی پیچیده، بسیار وقت‌گیر هستند و در برخی مواقع این روش‌ها تنها دربرگیرنده 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 روبه‌داخل 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 به‌منظور کنترل لحظه‌ای و نقطه به نقطه روی مسیر فشارها به‌کار گرفته شد. استفاده از دو پمپ مستقل از یکدیگر در تأمین فشار محفظه و فشار جانبی، امکان تغییر 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

[1] Hydroforming
[2] HDDRP
[3] Flange

کنترل یک مسیر فشار شعاعی و یا محفظه در هرلحظه بودند. 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 استفاده‌شده 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 [20]، نمونه‌های آزمون کشش در جهت‌های 0، 45 و 90 درجه نسبت به جهت نورد کشیده شدند.

ناهمسانگردی ورق در زاویه θ نسبت به جهت نورد براساس کرنش‌های پلاستیک به صورت معادله (1) تعریف می‌شود [21]:

$$r_\theta = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \tag{1}$$

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 (2) به نرم‌افزار اجزای محدود معرفی شود:

$$R_{11} = \sigma_{11}/\sigma \,, R_{22} = \sigma_{22}/\sigma \,, \quad R_{33} = \sigma_{33}/\sigma \,, R_{12} = \sigma_{12}/\sigma \tag{2}$$

که $\sigma = \sigma_{11}$ تنش تسلیم در راستای نورد می‌باشد. نسبت‌های کرنش پلاستیک را می‌توان با استفاده از معادلات (3) تا (6) تبدیل کرد [22]:

$$R_{11} = 1 \tag{3}$$

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

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

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

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

Table 1 Mechanical properties of pure copper and St13 sheets

خواص مکانیکی و فیزیکی	St13	مس خالص	واحد
چگالی [7,18]	7850	8940	kg/m3
مدول یانگ [1] [7,19]	210	117	GPa
تنش تسلیم	158	123	MPa
ضریب استحکام	539	531	MPa
توان کار سختی	0.29	0.44	-
ضریب پوآسون [2] [18]	0.32	0.32	-

[1] Young's modulus
[2] Poisson's ratio

جدول 2 مقادیر مشخصه‌های ناهمسانگردی برای ورق St13

Table 2 Anisotropy values for St13 sheet

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

3- شبیه‌سازی اجزای محدود

شبیه‌سازی اجزای محدود به‌عنوان روشی برای بررسی و اندازه‌گیری پارامترهای فرآیندی که در حالت آزمایشگاهی قابل‌اندازه‌گیری نمی‌باشد یا هزینه بالایی برای آن لازم است، روش کارآمدی است. به همین خاطر توسعه و بهره‌گیری از این روش در سال‌های اخیر به‌دلیل فوایدی همچون افزایش سرعت محاسبات، کاهش هزینه‌ها و قابلیت تکرارپذیری، شدت بیشتری یافته است. به‌منظور شبیه‌سازی فرآیند، در این پژوهش از نرم‌افزار اجزای محدود تجاری آباکوس [3] 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 ارائه شد، به نرم‌افزار معرفی گردید. رفتار ماده برای مس خالص به‌صورت همسانگرد و برای ورق فولادی به‌صورت ناهمسانگرد در نظر گرفته شده است. در تعیین حد تسلیم ماده در ورق فولادی و مس خالص به ترتیب از معیارهای تسلیم میزز [4] و هیل [5] استفاده شده است [7]. ورق استفاده شده در فرآیند به‌صورت شکل‌پذیر 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 به‌صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شده است. در مدل‌سازی ورق از المان‌های 8 گره‌ای جامد [6] و در جهت ضخامت از 5 المان استفاده شد. همچنین ورق شکل‌پذیر شامل 7020 المان می‌باشد."شکل 2" مدل‌سازی 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 به‌صورت استوانه ای انتخاب شده است. در جدول 3 مشخصات و ابعاد هندسی قالب و گرده ورق آمده است.

شبیه‌سازی با استفاده از حل‌گر صریح دینامیکی [7] که قابلیت شبیه‌سازی فرآیندهای شبه استاتیک از جمله شکل‌دهی 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

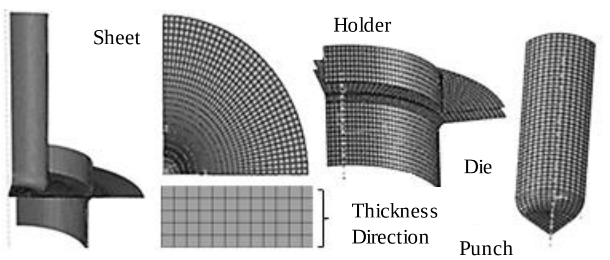

Fig. 2 Finite element model in the assembly with Finite element model of the die set

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

[3] ABAQUS
[4] Misses
[5] Hill
[6] C3D8R
[7] Dynamic Explicit

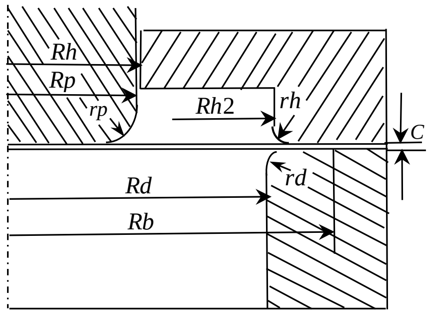

Fig. 3 schematic of the die set used in this study

شکل 3 شماتیک مجموعه قالب مورد استفاده

جدول 3 مشخصات و ابعاد هندسی قالب و گرده ورق

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

مشخصه	علامت	مقدار (mm)
شعاع سنبه	*Rp*	20
شعاع نوک سنبه	*rp*	6
شعاع قالب	*Rd*	42
شعاع ورودی قالب	*rd*	3
شعاع راهنمای سنبه	*Rh*	21
شعاع نگه‌دارنده	*Rh*2	43
شعاع داخلی نگه‌دارنده	*rh*	2
شعاع ورق	*Rb*	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 0.04 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 روبه‌داخل 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 روبه‌داخل سیال به‌صورت "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]:

$$Pr = PR - (PR - PC)(\frac{\ln\left(\frac{r}{R}\right)}{\ln\left(\frac{R1}{R}\right)}) \tag{7}$$

که در آن $R1$ فاصله شعاع ورودی قالب از مرکز سنبه و R فاصله انتهای ورق از مرکز سنبه در هرلحظه، $P = PR$ فشار جانبی در $r = R$ و $P = PC$ فشار محفظه در $r = R1$ ، می‌باشد. برای اعمال فشار با توجه به قابلیت‌های در نرم‌افزار آباکوس، از زیر برنامه تعریف فشار[1] 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 فرترن[2] کدنویسی شد و به ناحیه موردنظر اعمال گردید. براساس کد

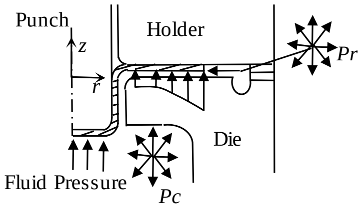

Fig. 4 Non-uniform pressure distribution on the sheet in the flange area in hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure with inward flowing liquid [12]

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

نوشته شده، توزیع فشار در ناحیه فلنج در هرلحظه وابسته به مکان هندسی انتهای ورق می‌باشد. بدین ترتیب، در هرلحظه با توجه به پیشروی شبیه‌سازی مقادیر به نرم‌افزار وارد زیربرنامه می‌شود و توزیع فشار موردنظر به‌صورت یک توزیع فشار غیریکنواخت غیرخطی اعمال می‌گردد.

3-2- الگوریتم بررسی و کنترل چروکیدگی

به‌منظور 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 در جهت عمود بر دیواره، چروکیدگی در ناحیه دیواره بررسی می‌شود. "شکل 6" نمونه‌ای از تغییرات پارامتر R_N به‌دست 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 متلب[3] جهت محاسبه R_N انتقال داده می‌شود و نمودارهای دوبعدی از موج چروکیدگی روی دیواره مخروط ایجاد می‌شود. با محاسبه تغییرات R_N روی محیط مخروط به‌صورت نمودارهای موج، ارتفاع چروکیدگی را می‌توان اختلاف میان نقاط حداکثر و حداقل دامنه موج چروکیدگی تعریف کرد. از نمودارهای دوبعدی موج چروکیدگی، در بخش 5

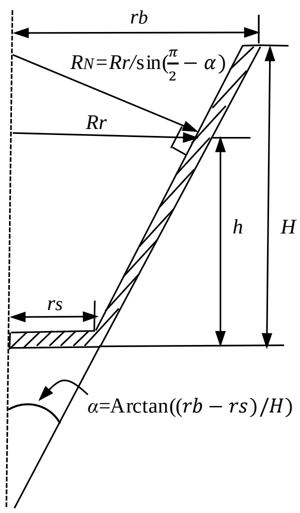

Fig. 5 Geometric method for wrinkling study on conical parts

شکل 5 روش هندسی برای بررسی چروکیدگی در قطعات مخروطی

[1] Vdload
[2] Fortran
[3] Matlab

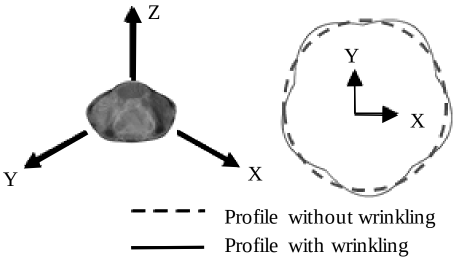

Fig. 6 R_N variation in X-Y plane

شکل 6 تغییرات پارامتر R_N در صفحه X-Y

جهت بررسی اثر پارامترهایی مانند فشار، جنس، سرعت سنبه و ضخامت بر چروکیدگی استفاده می‌شود. 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 شکل‌دهی و سیستم تأمین فشار، در "شکل 8" آمده است.

به‌منظور تأمین فشار محفظه از یک پمپ دبی متغیر با حداکثر فشار 50 MPa استفاده شده است. همچنین برای ایجاد فشار شعاعی یک پمپ با دبی ثابت و حداکثر فشار 100 MPa در نظر گرفته شده است. روغن هیدرولیک SAE10 با ویسکوزیته 56 cst، به‌عنوان سیال مورد استفاده قرار گرفت که فشار لازم برای شکل‌دهی در این فرآیند را تأمین می‌کند.

طراحی مجموعه قالب به صورتی است که فشار محفظه مستقیماً از طریق اتصال پمپ دبی متغیر به محفظه قالب تأمین می‌گردد. همچنین با اتصال پمپ دبی ثابت به ورق گیر، سیال از طریق راهگاه تعبیه شده در ورق گیر به اطراف گرده ورق می‌رسد و فشار شعاعی موردنظر تأمین می‌شود. به علت ارتباط دو بخش محفظه داخلی و حلقه جانبی از طریق فاصله بین ورق و ورق‌گیر، کنترل این دو فشار در هرلحظه مستلزم طراحی یک سیستم آزمایشگاهی ویژه‌ای می‌باشد. بنابراین، طراحی و ساخت سیستمی جهت ایجاد فشار شعاعی و همچنین کنترل مستقل و هم زمان فشار شعاعی و فشار محفظه در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی و جریان روبه داخل سیال و همچنین آزمایش‌های متعدد برای ایجاد یک شبیه‌سازی قابل‌اطمینان از اهداف این بخش محسوب می‌شوند. طرح‌واره‌ای از مجموعه تأمین فشار در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی و جریان روبه‌داخل سیال در این پژوهش در "شکل 9" نمایش داده شده است.

بیشینه فشار ایجاد شده در محفظه قالب و بر روی کناره‌های ورق توسط دو شیر کنترلی که در مسیر پمپ‌ها قرار دارد، کنترل می‌گردد. 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

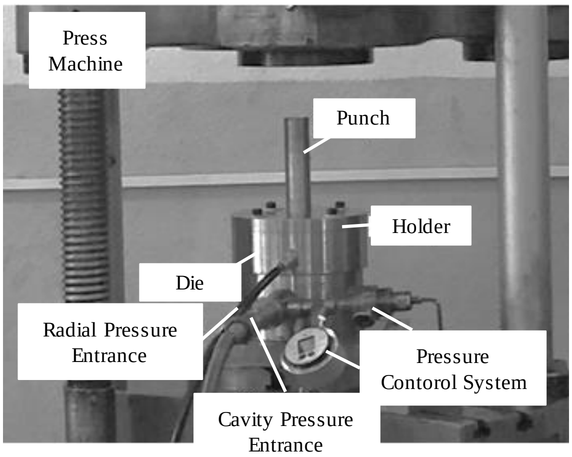

Fig. 8 Components of the die set, forming machine and pressure system

شکل 8 اجزای مجموعه قالب، ماشین شکل‌دهی و سیستم تأمین فشار

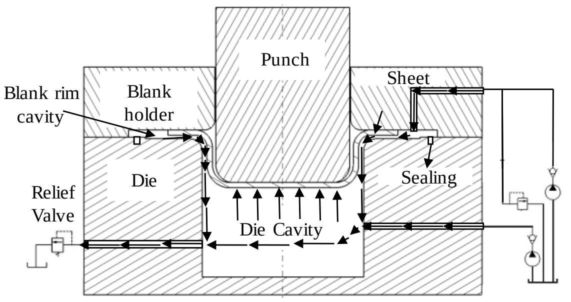

Fig. 9 Schematic of die and pressure set in this study

شکل 9 طرحواره ایی از مجموعه تأمین فشار و قالب در پژوهش حاضر

بین ورق و ورق‌گیر که نقش مهمی در ایجاد فشار شعاعی ایفا می‌کند، معمولاً در حدود 3٪ ضخامت ورق می‌باشد که در این پژوهش، این مقدار 0.04 mm و در تمام نقاط ثابت می‌باشد [8]. در این فرآیند، ابتدا فشار محفظه به ورق وارد می‌گردد تا آن را به سطح ورق‌گیر بچسباند. با این کار، یک ناحیه آب‌بند بین سطح بالایی ورق و ورق‌گیر شکل می‌گیرد که از خروج سیال از درون قالب جلوگیری می‌نماید. سپس، فشار جانبی به مجموعه قالب اضافه می‌گردد. مسیر بارگذاری فشار محفظه و فشار جانبی برحسب جابجایی سنبه در حین فرآیند در "شکل 10" نمایش داده شده است.

به منظور آب‌بندی قالب، بر طبق استاندارد [24] از یک آب‌بند بر روی قالب استفاده شده است تا به ایجاد فشار شعاعی کمک کند. مقدار اندکی فشار پیش بشکه‌ای[1] قبل از شروع حرکت سنبه، شکل‌پذیری ورق را در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی بهبود می‌بخشد [25]. بنابراین براساس "شکل10" قبل از شروع فرآیند شکل‌دهی، پیش فشار 1 MPa به انتها و اطراف ورق اعمال شده است (OA). بعد از شروع حرکت سنبه، فشار محفظه و شعاعی به‌طور خطی تا مقدار حداکثر افزایش می‌یابد (AB و AB’). شیب افزایش فشار در این ناحیه به‌سرعت سنبه و مشخصات پمپ بستگی دارد. در حین انجام فرآیند برای اعمال و کنترل دقیق مسیر فشار از یک مانومتر دیجیتال[2] استفاده شد و مسیر فشار توسط نرم‌افزار کنترل مسیر فشار به‌طور لحظه‌ای کنترل می‌گردید. در ادامه فرآیند، هنگامی که به ترتیب فشار محفظه و فشار جانبی به مقدار تنظیم‌شده ثابت می‌رسد (BC و B’C’)، شیر کنترل فشار باز شده و فشار تا پایان فرآیند شکل‌دهی

[1] Pre-bulge
[2] Digital manometer

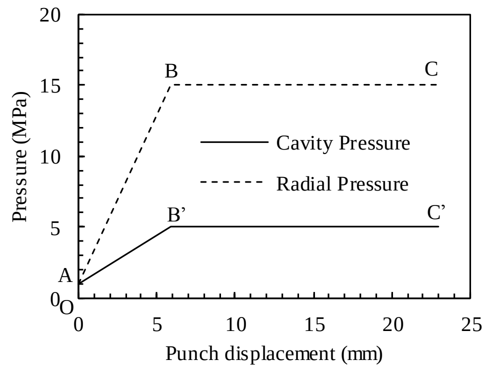

Fig. 10 Radial and cavity pressures versus punch displacement

شکل 10 نمودار مسیر فشار محفظه و شعاعی برحسب جابجایی سنبه

ثابت می‌باشد. همچنین ارزیابی کمی پدیده چروکیدگی برای مقایسه دقیق نتایج تجربی و عددی می‌تواند مناسب باشد. بدین جهت در این پژوهش مقطع 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- صحت سنجی

صحت‌سنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمایش تجربی یک از مهم‌ترین بخش‌های یک پژوهش می‌باشد. صحت‌سنجی در مسائل اجزای محدود از آن‌جهت دارای اهمیت می‌باشد که یک شبیه‌سازی قابل‌اطمینان می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای بررسی سایر پارامترهای مورد مطالعه قرار گیرد. در این پژوهش سعی شده است ابتدا نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی به‌طور دقیق صحت‌سنجی 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 5٪) از انرژی داخلی باشد تا از پدیده ساعت شنی[1] در شبیه‌سازی جلوگیری شود [26]. 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 5 درصد از انرژی داخلی آن نباشد [27]. همان‌طور که از "شکل 13" ملاحظه می‌گردد مقدار انرژی جنبشی در برابر انرژی داخلی آن بسیار ناچیز 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 5 موج چروک در شبیه‌سازی و آزمایش تجربی ورق فولادی مشاهده شد و تعداد موج چروکیدگی مشاهده شده در نمونه تجربی از جنس مس 11 و در حالت شبیه‌سازی 12 می‌باشد که دقت شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. این تعداد موج چروک در پیشروی 24 mm سنبه و براساس مسیر

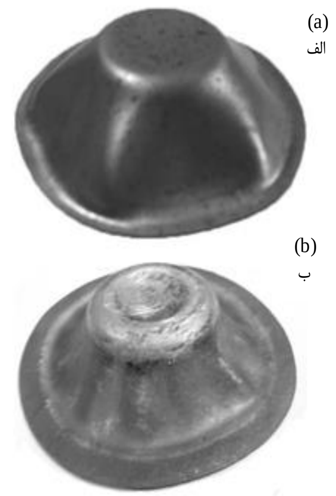

Fig. 11 a) Steel wrinkled conical cups b) Copper wrinkled conical cups, using HDDRP with inward flowing liquid

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

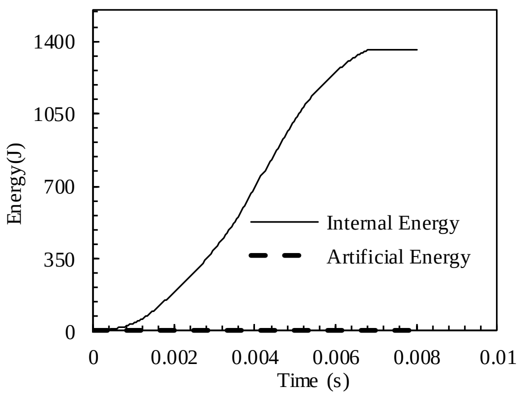

Fig. 12 Comparison of artificial energy and internal energy

شکل 12 مقایسه انرژی مصنوعی و انرژی داخلی

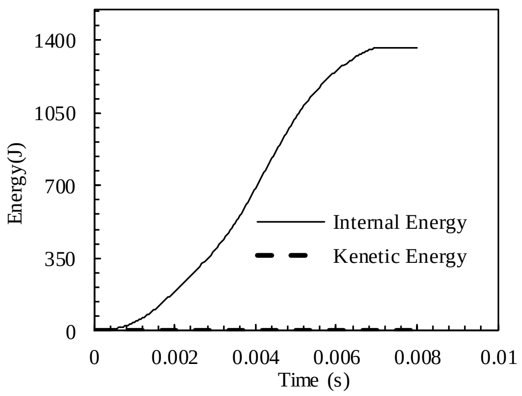

Fig. 13 Comparison of kinetic energy and internal energy

شکل 13 مقایسه انرژی جنبشی و انرژی داخلی

فشار "شکل 10" به‌دست آمده است.

5-1-3- مقطع چروکیدگی

اندازه‌گیری مقطع چروکیدگی به‌عنوان معیاری جهت سنجش پدیده

[1] Hourglass phenomenon

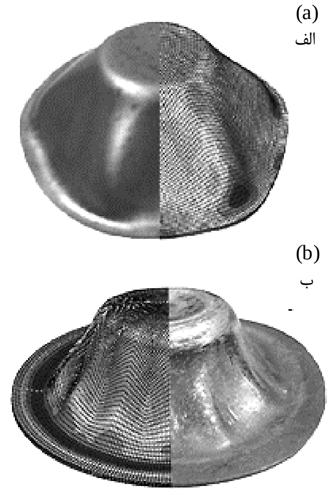

Fig. 14 Formed conical cups of a) St13 sheet b) Pure copper sheet, obtained from experiment and simulation

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

چروکیدگی می‌تواند بسیار مناسب باشد. با توجه به این مبنا می‌توان گفت کمّی‌سازی 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 اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. اندازه‌گیری‌های انجام شده با توجه به "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 به‌ترتیب برای نمونه‌های مسی و فولادی نشان می‌دهد.

به دلیل اعمال پیش فشار، در هر دو نمودار نیروی شکل‌دهی در آغاز حرکت سنبه از 5 kN شروع شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج

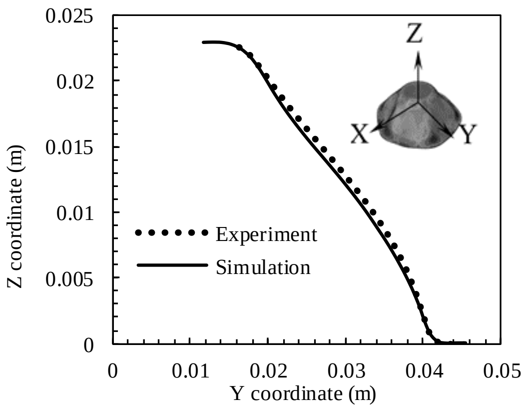

Fig. 15 Wrinkling profile diagram for St13 part

شکل 15 نمودار مقطع چروکیدگی نمونه فولادی St13

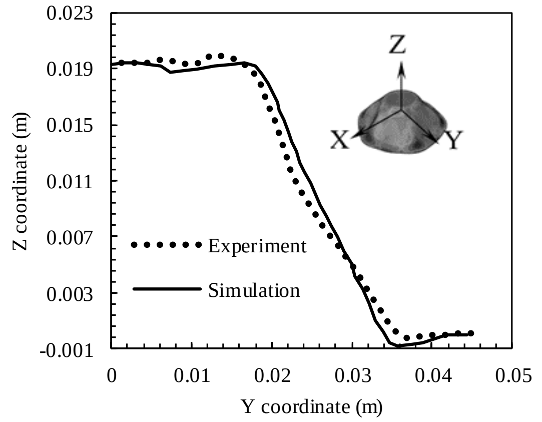

Fig. 16 Wrinkling profile diagram for pure copper part

شکل 16 نمودار مقطع چروکیدگی نمونه مسی

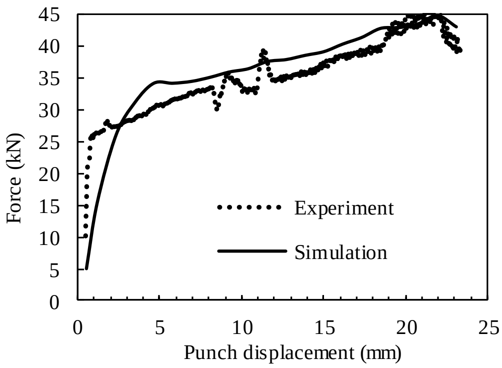

Fig. 17 Load _ displacement diagram of pure copper specimen

شکل 17 نمودار نیرو برحسب جابجایی سنبه برای نمونه مسی

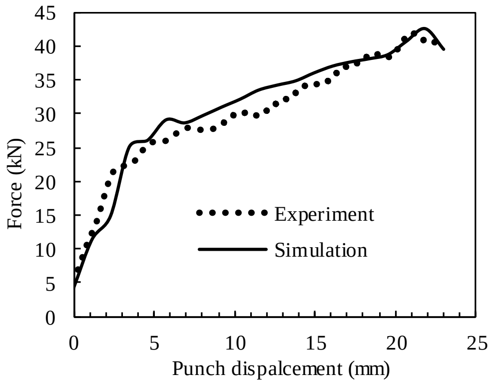

Fig. 18 Load _ displacement diagram of St13 specimen

شکل 18 نمودار نیرو برحسب جابجایی سنبه برای نمونه فولادی

از تطابق خوبی برخوردار است. بیشترین اختلاف در حالت شبیه‌سازی و تجربی برای نمونه مسی در حدود 7٪ و برای نمونه فولادی 4٪ می‌باشد. به‌دلیل 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 به‌اندازه المان بسیار حساس می‌باشد. بنابراین انتخاب مناسب اندازه المان برای شبیه‌سازی

چروکیدگی، نقطه کلیدی در دقت و صحت پیش‌بینی چروک در قطعه شکل داده شده می‌باشد [29]. در "شکل 19" مقدار بیشینه ارتفاع چروکیدگی به ازای اندازه‌های مختلف المان از مقدار 0.75 mm تا 2 mm آمده است.

همان‌طور که مشخص است با افزایش اندازه شبکه مقدار بیشینه چروکیدگی کم می‌شود. بررسی‌ها نشان داد که این مقدار حساسیت در اندازه شبکه ممکن است موجب عدم ایجاد چروک در شبیه‌سازی‌ها شود. برای مثال همان‌طور که در "شکل 20" دیده می‌شود در اندازه شبکه 2 mm در مقایسه با اندازه 0.75 mm چروکیدگی مشاهده نمی‌شود. بنابراین برای انتخاب بهترین اندازه المان با توجه به پراکندگی نتایج در این مطالعه از اندازه مش 1.25 mm با توجه به انطباق نتایج حاصل از شبیه‌سازی در این اندازه المان با داده‌های تجربی "شکل 15" و "شکل 16" برای هر دو ماده استفاده شده است. همچنین داده‌های حاصل از اندازه مش 1 mm هم از تطابق قابل قبولی با نتایج تجربی برخوردار بوده که جهت صرفه‌جویی در زمان شبیه‌سازی از اندازه 1.25 mm استفاده شده است.

بنابراین به کمک شبیه‌سازی اجزای محدود می‌توان فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی و جریان روبه‌داخل سیال را با دقت مدل‌سازی کرد و به کمک آن می‌توان اثر پارامترهای مختلف بر چروکیدگی را بدون صرف وقت و هزینه زیاد بررسی کرد. برای بررسی اثر فشار محفظه و فشار جانبی در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی و جریان روبه‌داخل سیال، شبیه‌سازی‌های مختلفی با مسیرهای فشار متفاوتی انجام گرفته است. مقدار فشار بیشینه‌ای که در یک زمان معین ایجاد می‌گردد نقطه تمایز اصلی این مسیرها از یکدیگر را تشکیل می‌دهد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، نشان می‌دهد که برای شکل‌دهی قطعه مخروطی مورد بررسی از جنس فولاد در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی و جریان روبه‌داخل سیال منطبق با مسیر فشار در نظر گرفته شده در "شکل 10"، به فشار محفظه بیشینه، حداقل 5 MPa نیاز می‌باشد.

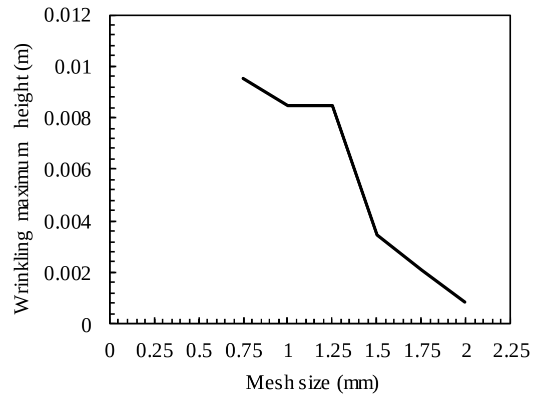

Fig. 19 Effect of mesh size on wrinkling mazimum height

شکل 19 اثر اندازه المان بر بیشینه ارتفاع چروکیدگی

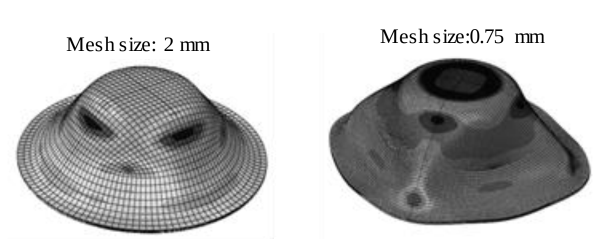

Fig. 20 Effect of mesh size on wrinkling prediction

شکل 20 اثر اندازه شبکه بر پیش‌بینی چروکیدگی

با توجه به مشخصات سیستم تأمین فشار و هندسه قالب مورد بررسی در این پژوهش، حداکثر 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 حداکثر 20 MPa به‌عنوان 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 بیشینه‌های 5 ,10 ,15 و 20 MPa برای فشار شعاعی در شبیه‌سازی‌های گوناگون مورد استفاده قرار گرفتند. در همه این شبیه‌سازی‌ها 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 داده‌شده است. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که با افزایش فشار شعاعی از 5 به 20 MPa در فشار ثابت محفظه، شدت چروکیدگی افزایش می‌یابد. افزایش چروکیدگی درنتیجه فشار شعاعی را می‌توان به افزایش تنش‌های فشاری نسبت داد که در ناحیه دیواره عامل چروک محسوب می‌شود. 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

به‌منظور بررسی اثر فشار محفظه، چهار فشار از 5 تا 11 MPa مورد بررسی قرار گرفته شده است. همان‌طور که در "شکل 22" مشاهده می‌شود در فشار شعاعی ثابت (البته با فرض بزرگ‌تر بودن فشار شعاعی در هر چهار حالت) با افزایش فشار محفظه شدت چروکیدگی (دامنه موج چروک) تا 76٪ کم می‌شود. در واقع در طول فرآیند هیدروفرمینگ با افزایش این فشار در ناحیه پشتیبانی نشده (دیواره) از ناپایداری ورق کم می‌شود که نتیجه آن کم شدن چروکیدگی است."شکل 23" تنش فشاری محیطی را روی موج چروک در مسیر α-β-γ نشان می‌دهد. با افزایش فشار محفظه روی سطح ورق، تنش فشاری در ناحیه γ (دیواره) تا 36 درصد کاهش می‌یابد که منجر به کاهش چروکیدگی می‌شود. همچنین بیشترین تنش فشاری محیطی هم در این ناحیه اتفاق افتاده است که نشان می‌دهد تغییرات تنش فشاری درنتیجه

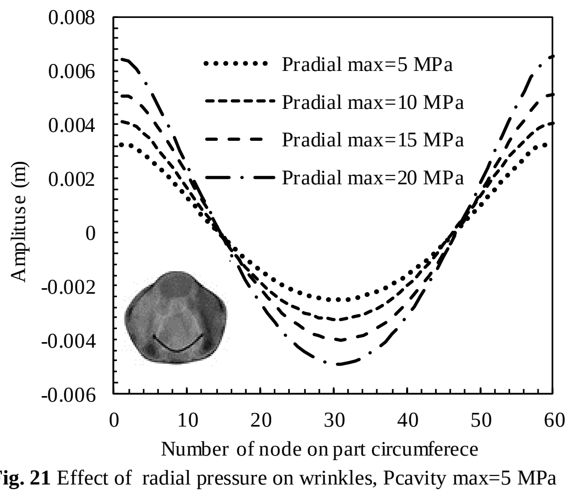

Fig. 21 Effect of radial pressure on wrinkles, Pcavity max=5 MPa

شکل 21 نمودار اثر فشار شعاعی بر چروکیدگی در بیشینه فشار محفظه5 MPa

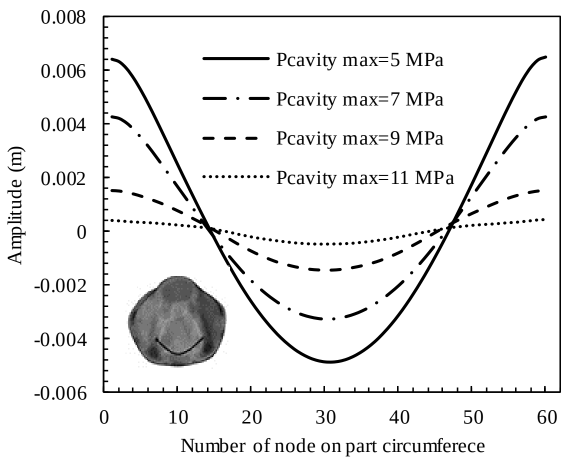

Fig. 22 Effect of cavity pressure on wrinkles, Pradial max=20 MPa

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

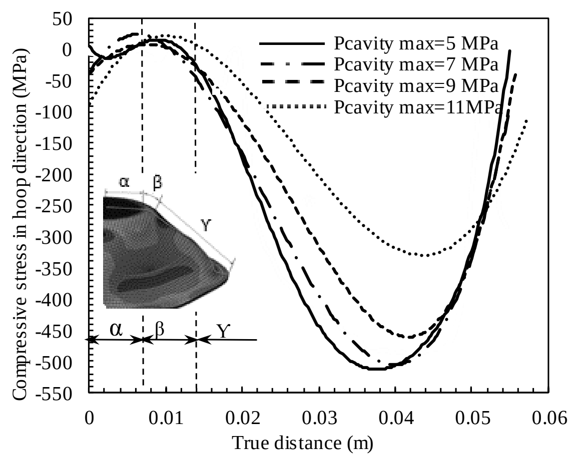

Fig. 23 Effect of increased cavity pressure to decrease compressive stress, Pradial max=20 MPa

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

تغییرات فشار محفظه تأثیر قابل‌توجهی بر موج چروک دارد.

5-2-3- 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 چروک بیشتری دیده می شود 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.

5-2-4- اثر سرعت سنبه

دریک شبیه‌سازی عددی با استفاده از حل‌گر صریح، همواره وجود خطاهای عددی اجتناب‌ناپذیر است. شبیه‌سازی و بررسی چروکیدگی با استفاده از این حل‌گر به پارامترهای ورودی متعددی از جمله نوع المان، اندازه شبکه، سرعت شبیه‌سازی و غیره بستگی دارد.

هدف از آوردن این بخش بررسی میزان دقت نتایج در سرعت‌های شبیه‌سازی متفاوت می‌باشد زیرا در شبیه‌سازی با حل‌گر صریح انتخاب مناسب سرعت شبیه‌سازی به‌علت صرفه‌جویی در زمان برای دست‌یابی به نتایج قابل‌اعتماد 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 1 تا 2.5 mm دارد؛ که وابستگی نتایج به‌سرعت شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

5-2-5- اثر ضخامت ورق

در بررسی اثر اندازه ضخامت در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی و جریان روبه‌داخل سیال سه ضخامت 1، 1.5 و 2 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

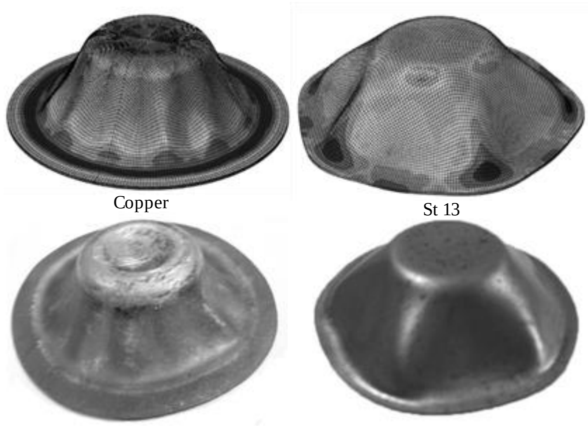

Fig. 24 Material effect on wrinkling wave

شکل 24 اثر نوع ماده بر موج چروکیدگی

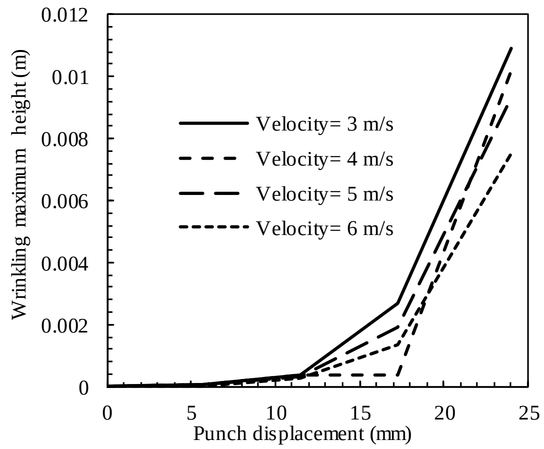

Fig. 25 Effect of simulation speed on wrinkling maximum height

شکل 25 تأثیر سرعت شبیه‌سازی بر بیشینه ارتفاع چروکیدگی

2 mm کمتر از 0.00035 m می باشد.

چروکیدگی در دیواره قطعات مخروطی همان‌طور که در قسمت مقدمه گفته شد، به ناحیه آزاد ورق بین سنبه و قالب بستگی دارد و شکل‌گیری چروک در دیواره به علت زیاد بودن نسبت ابعاد دیواره به ضخامت ورق، راحت‌تر است. بنابراین، با افزایش ضخامت از مقدار 1 به 1.5 و سپس 2 mm، این نسبت تا 2 برابر کاهش پیدا می‌کند. در نتیجه منجر به کاهش دامنه موج چروکیدگی می‌گردد. در واقع اگر مطابق "شکل 27" سطح باریکی از قسمت دیواره با یک ستون به‌صورت معادل فرض شود که از دو سمت تحت بار فشاری (در اینجا تنش فشاری محیطی) قرار دارد با افزایش ضخامت، ضریب 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 روبه‌داخل سیال با به‌کارگیری از شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمایش‌های تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. ابتدا با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی و آزمایش تجربی یک مدل صحت‌سنجی 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:

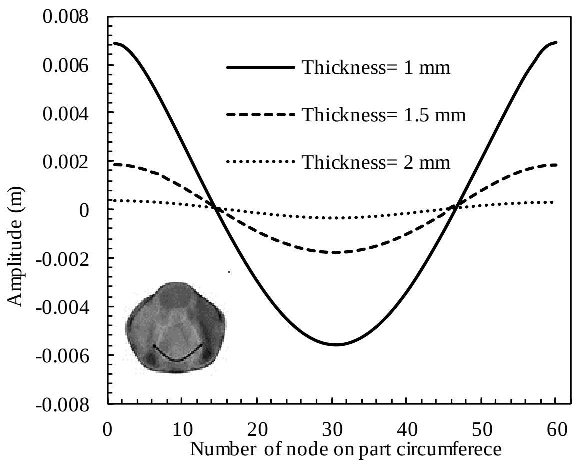

Fig. 26 Effect of sheet thickness on wrinkling wave

شکل 26 نمودار اثر ضخامت ورق بر موج چروکیدگی

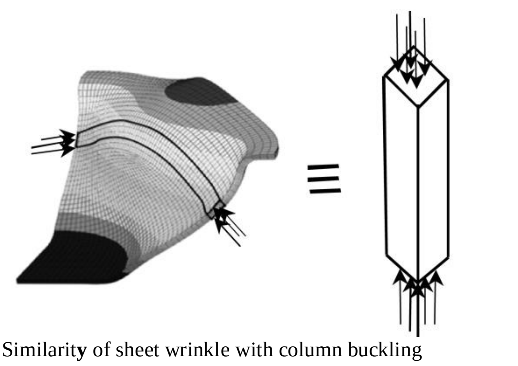

Fig. 27 Similarity of sheet wrinkle with column buckling

شکل 27 مشابه‌سازی چروکیدگی در ورق با کمانش ستون‌ها

1. افزایش فشار شعاعی به میزان بالاتری از فشار محفظه علاوه برافزایش نسبت کشش، احتمال ایجاد چروک در قطعه را افزایش می‌دهد. به‌طوری‌که افزایش فشار شعاعی از 5 به 20 MPa ارتفاع چروک را به میزان 2.5 mm افزایش می‌دهد.
2. در این پژوهش تأثیر فشار محفظه بر موج چروکیدگی بررسی و نشان داده شد که با افزایش آن به میزان 54٪ موجب کاهش دامنه موج چروک به میزان 76 درصد می‌شود (تقریباً 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 1 به 2 mm موجب حذف چروکیدگی می‌شود.
4. همچنین در این پژوهش نشان داده شده که شبیه‌سازی اجزای محدود چروکیدگی با استفاده از حل‌گر صریح وابستگی شدیدی به پارامترهای ورودی دارد. بررسی اثر سرعت شبیه‌سازی و اندازه المان شبکه 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. Hosseinipour, A. Gorji, Study of effective parameters inhydroforming of fuel cell metallic bipolar plates with parallel serpentine flow field, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 8, pp. 150-158, 2014. (in persian فارسی)

[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 فارسی)

[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. Hosseinipour, 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.

[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. Ketabchi, 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. Vaghasloo, 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 Publcation, 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 Publication2002.
[22] K. Hibbitt, *ABAQUS: User's Manual: Version 6.13: Hibbitt*, pp. 369-372, USA, Karlsson & Sorensen, 2013.
[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 April2016, 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.