



بررسی تجربی و عددی اثر منحنی‌های مختلف فشار بر تغییرات ضخامت در فرآیند هیدروفرمینگ ورق‌های فلزی

سید محمود فرمانی¹، مجید علی طاوولی^{2*}، ابوالفضل درویشه³

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، مؤسسه آموزش عالی احرار رشت، رشت

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بندر انزلی، بندر انزلی

* رشت، صندوق پستی 3756-41635، tavoli@guilan.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 20 مرداد 1396

پذیرش: 22 آبان 1396

ارائه در سایت: 24 آذر 1396

کلید واژگان:

هیدروفرمینگ

بالجینگ

یکنواختی ضخامت

فشار پله‌ای

المان محدود

چکیده

در این مقاله نتایج تجربی و عددی اثر تغییر منحنی فشار بر تغییر ضخامت ورق، توزیع کرنش‌های شعاعی و محیطی و همچنین منحنی تنش و کرنش مؤثر ارائه شده است. مجموعه‌ای از آزمایش‌ها با استفاده از سامانه هیدروفرمینگ با اعمال منحنی‌های مختلف فشار (ممتد، اره‌ای، نردبانی و نوسانی) انجام پذیرفته و در هر گروه از آزمایش‌ها اثر تغییر منحنی فشار بر توزیع ضخامت به صورت کمی تعیین شده است. سپس با استفاده از نرم‌افزار آباکوس اثر تغییر منحنی فشار در فرآیند هیدروفرمینگ مدل‌سازی و ارائه شده است. هماهنگی مطلوبی بین نتایج تجربی و نتایج عددی مشاهده می‌شود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که با استفاده از منحنی فشار نردبانی می‌توان توزیع ضخامت یکنواخت‌تری را نتیجه گرفت. رفتار مکانیکی ورق در حین تغییر شکل پلاستیک تحت منحنی فشار نردبانی از الگوی مناسب‌تری برخوردار است و با استفاده از این نوع فشار می‌توان تأثیرات اصطکاک بین سطح قالب و ورق را به نحو مطلوب‌تری کنترل نمود. همچنین ثابت بودن مدت زمان پالس‌های اعمال فشار در منحنی‌های نردبانی و نوسانی حداکثر فشار لازم برای تغییر شکل ورق را کاهش می‌دهد.

Experimental and numerical investigation into the effect of different pressure curves on the thickness variations in hydroforming process of metal plates

Seyyed Mahmoud Farmani¹, Majid Alitavoli^{2*}, Abolfazl darvizeh³

1- Department of Mechanical Engineering, Ahrar Institute of Technology and Higher Education, Rasht, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Guilan University, Rasht, Iran.

3- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Bandar Anzali Branch, Bandar Anzali, Iran.

* P.O.B. 3756-41635 Rasht, Iran, tavoli@guilan.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 11 August 2017

Accepted 13 November 2017

Available Online 15 December 2017

Keywords:

Hydroforming

Bulging

Uniform Thickness

Incremental Step Pressures

Finite Element

ABSTRACT

In the present work, experimental and numerical results of the effects of different pressure curves on the thickness variation of sheet metal and distribution of radius and hoop strain for effective stress-strain curve have been presented. A series of experiments are carried out using a hydroforming apparatus by exerting different pressure curves including pendulous, steeped, saw and continuous. In each series, the effect of changes in pressure curve on thickness distribution was quantitatively measured. Different pressure curves such as continuous, stepped, and pendulous was produced in experiments. The ABACUS software was implemented to simulate the effect of changes in pressure curve. A good agreement between the experimental and numerical results was observed. The results show that stepped pressure produces more uniform distribution in sheet metal thickness. Mechanical behavior of sheet metal during plastic deformation phase under stepped pressure, produced satisfactory results, and using this type of pressure could control the effects of friction between the die surface and sheet metal specimen much better. Also, constant time duration of pressure pulses in stepped and pendulous curves leads to decreasing of maximum pressure needed for deformation of sheets.

1- مقدمه

خواهد بود [1]. در این تحقیق شرایط تماس ورق با سطح کروی داخلی قالب از تست اریکسون [2] و اعمال فشار هیدرولیکی نیز از تست بالجینگ [3,4] الگوبرداری شده است (بالجینگ با قالب). منحنی‌های مختلف فشار برحسب زمان بر ورق اعمال شده است. در مقایسه با آزمایش بالجینگ بدون قالب (آزاد) که با فشار ممتد انجام می‌گیرد [5,6]، در بالجینگ با قالب مواردی

فرآیند هیدروفرمینگ ورق (شکل‌دهی با فشار سیال) برای سال‌های زیادی تحت آزمون برآمدگی¹ مورد بررسی قرار گرفته است. شناخت پارامترهای این فرآیند در بهینه شدن تکنولوژی هیدروفرمینگ و کیفیت نهایی محصول مؤثر

¹ Bulging

Please cite this article using:

S. M. Farmani, M. Alitavoli, A. darvizeh, Experimental and numerical investigation into the effect of different pressure curves on the thickness variations in hydroforming process of metal plates, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 12, pp. 337-344, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

استفاده قرار گیرد. به عنوان مثال در صورت استفاده از شرایط اصطکاکی تست اریکسون توأم با فشار مستقیم سیال در تست بالجینگ آزاد، می‌توان تست بالجینگ با قالب را نیز مورد بررسی قرار داد [13].

در این پژوهش فرآیند هیدروفرمینگ به صورت بالجینگ با قالب (عرقچین) تحت اثر منحنی‌های مختلف فشارهای پله‌ای و ممتد بر نحوه توزیع ضخامت در ورق‌های فلزی بررسی می‌گردد.

2- روش کار تجربی

برای بررسی اثر نمودار فشار اعمال‌شده بر توزیع ضخامت در نقاطی از ورق منحنی‌های مختلف فشار را با استفاده از سامانه هیدروفرمینگ بر آن اعمال می‌کنیم. ورق به کار رفته برای شکل‌دهی در این پژوهش از جنس فولاد St12 با ضخامت‌های 0.6 و 0.75 میلی‌متر است که خواص مکانیکی آن در جدول 1 ارائه شده است، همچنین ابعاد هندسی مربوط به ورق و قالب در جدول 2 آمده است. قالب طراحی‌شده از دو صفحه دایروی ماشین‌کاری شده به ضخامت 20 میلی‌متر تشکیل می‌گردد (شکل 4). صفحه فوقانی نقش نگهدارنده و همچنین ایجاد اصطکاک ورق با قالب را بر عهده دارد.

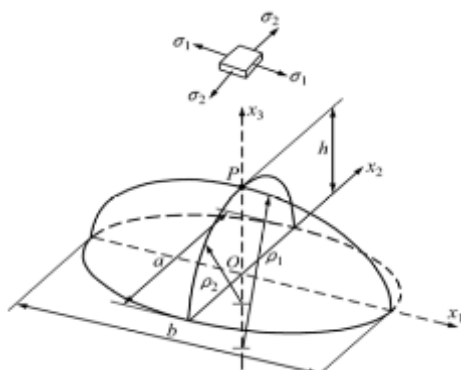


Fig. 1 Schematic of elliptical bulging test [7]

شکل 1 شماتیک آزمایش بالجینگ بیضی [7]



Fig. 2 Bulging test with martensitic transient steel [10]

شکل 2 آزمایش بالجینگ با فولاد استحاله مارتنزیتی [10]

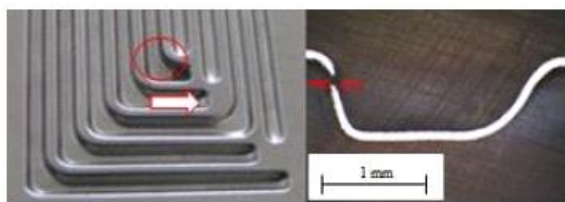


Fig. 3 Spiral grooved mold [11]

شکل 3 قالب شیاردار مارپیچی [11]

مانند شکل‌دهی با نسبت کشش زیاد، دقت ابعادی بیشتر به دلیل کاهش برگشت فبری¹، توزیع ضخامت یکنواخت‌تر و امکان شکل‌دهی ورق با قالب‌های پیچیده نیز قابل بررسی است. لازارسکو [7] به بررسی شاخص‌های رفتار پلاستیک در ورق‌ها توسط تست بالجینگ آزاد با هندسه بیضی پرداخت که شامل تحلیل اطلاعات تجربی است که با سیستم مکانیزه هوشمند اندازه‌گیری شده است. در روش بالجینگ بیضی نرخ تغییرات هندسی و معادله تنش- کرنش به تدریج به بالجینگ دایروی در بالاترین ارتفاع برآمدگی متمایل می‌گردد (شکل 1).

حسین‌زاده و همکاران [8] به بررسی اثر انرژی گرمایی در میزان شکل‌پذیری ورق و لوله در فرآیند هیدروفرمینگ پرداختند. این پژوهش به مطالعه شکل‌دهی فلزات سنگین برای شکل‌های پیچیده پرداخته است و نشان می‌دهد دما می‌تواند سبب کاهش فشار اعمالی تا 0.1 فشار شکل‌دهی در دمای محیط گردد.

کای و ژائو [9] به بررسی تست بالجینگ گرم با نرخ فشارهای مختلف و تعیین نمودار ارتفاع-فشار پرداختند. در این پژوهش میزان انطباق بین فشار برآمدگی با کرنش موثر و سطح برآمدگی بررسی شده است. جانکا [10] تغییرات ضخامت در ورق فولادی را با تست بالجینگ آزاد بررسی نمود. در این تحقیق شبیه‌سازی تغییرات ضخامت فولاد تحت تنش دومحوره به روش بالجینگ آزاد و اعمال فشار ممتد صورت گرفت و با نتایج تجربی مقایسه گردید (شکل 2).

بخشی جویباری و همکاران [11] به بررسی پارامترهای مؤثر در هیدروفرمینگ صفحات دوقطبی فلزی پیل سوختی تحت فشار ممتد سیال پرداختند. در این پژوهش، شکل‌دهی یک الگوی شیاری مارپیچ متصل به هم بر روی صفحاتی از جنس فولاد زنگ نزن 304 با فرآیند هیدروفرمینگ به صورت تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود مورد مطالعه قرار گرفته است. اثر پارامترهای فرآیند و هندسی قالب بر روی توزیع ضخامت و درصد پرشدگی پروفیل نیز مورد بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد (شکل 3) که با افزایش فشار شکل‌دهی، پرشدگی قالب افزایش می‌یابد و ضخامت ناحیه بحرانی به دلیل افزایش نسبت کشش با کاهش بیشتر همراه است. در تحقیقات یادشده اثر هندسه قالب، جنس و خواص مواد موردی هستند که در تست هیدروفرمینگ بررسی شده‌اند و نتایج به دست آمده تحت فشار ممتد حاصل شده است، همچنین ضخامت غیریکنواخت ورق در گوشه‌ها و نقاط دور از محدوده شکل‌دهی، ایجاد بهبود پرشدگی گوشه قالب و یافتن پارامترهای آن از موضوعاتی محسوب می‌شوند که همواره مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند [12]. کنترل پارامترهایی مانند زمان، میزان فشار، سرعت شکل‌دهی و اصطکاک، در آزمایش هیدروفرمینگ می‌توانند از لحظه شروع تا پایان فرآیند تغییر شکل قطعه نقش مهمی ایفا نمایند. عوامل دیگری که می‌توانند در بهبود فرم‌دهی مؤثر واقع شوند عبارت از نوع فشار اعمالی، اندازه فشارها و مدت‌زمان اعمال فشار است.

بررسی میزان اصطکاک موجود بین قطعه و قالب در فرآیند شکل‌دهی از اهمیت بالایی برخوردار است. در حین تغییر شکل به محض این‌که ورق با سطح قالب تماس پیدا می‌کند اصطکاکی بین آن‌ها ایجاد می‌شود که با توجه به میزان اصطکاک، توزیع کرنش ضخامتی یکنواخت نخواهد بود. نیروی تماس بین ورق و قالب با افزایش فشار داخل قالب نیز افزایش می‌یابد که در نتیجه این امر ممکن است اصطکاک لغزشی اتفاق بیفتد؛ بنابراین قوانین متفاوتی تحت شرایط متفاوت فشار جهت مدل کردن شرایط اصطکاک باید مورد

¹ Spring back

شده است که قابلیت اعمال فشار پله‌ای توسط شیرهای خاص را دارد. اجزای سامانه آزمایش هیدروفرمینگ در این پژوهش عبارت از واحد تولید توان هیدرولیک [14]، قالب تست (انبساط هیدرولیکی) و سیستم کنترل الکترونیکی¹ است. سیستم کنترل در این پژوهش یک پردازشگر و کنترل‌کننده الکترونیکی است و شرایط پله‌ای فشار توسط این پردازشگر ایجاد می‌شود، همچنین جهت نمایش و ترسیم نمودار فشار- زمان از یک دستگاه نمایشگر² استفاده می‌گردد. از یک حسگر فشار نیز به منظور سنجش مقدار فشار و ترسیم منحنی فشار بر کانال ورودی سیال به قالب استفاده شده است (شکل 5). شکل 6 اجزاء کامل سیستم هیدروفرمینگ مورد استفاده در پژوهش را نمایش می‌دهد.

2-2- نحوه انجام آزمایش‌ها

پیش از انجام آزمایش‌ها به منظور ایجاد منحنی فشار (شکل 7)، سیستم کنترل با استفاده از دستورات زمانی موجود در نرم افزار پردازشگر برنامه‌ریزی می‌شود، همچنین برای اعمال سریع فشار تأمین شده از سوی پمپ به ورق از سیال هیدرولیک با گرانیوی پایین در سیستم تولید توان هیدرولیکی استفاده شده است.



Fig. 5 Pressure sensor and monitor

شکل 5 حسگر فشار و نمایشگر ترسیم فشار



Fig. 6 Hydroforming system

شکل 6 سامانه هیدروفرمینگ مورد استفاده در پژوهش



Fig. 7 Pressure curves applied to the samples a- saw, b- pendulous

شکل 7 منحنی‌های فشار اعمال شده بر نمونه‌ها: الف- ارای، ب- نوسانی

کانال مرکزی در صفحه زیرین قالب به منظور ورود و خروج سیال هیدرولیکی تعبیه شده است. صفحات قالب توسط 4 عدد پیچ و مهره به یکدیگر متصل شده و ورق بین آن‌ها قرار می‌گیرد. روی سطح بالایی صفحه زیرین نیز شیار به قطر 72 میلی‌متر و عرض 6 و عمق 5 میلی‌متر برای قرارگیری آب‌بند پلیمری (لاستیکی) ایجاد شده است. پیش از انجام آزمایش بر کلیه ورق‌ها دواير هم‌مرکز با قطرهای 20، 30، 40 و 50 میلی‌متری ایجاد و کدگذاری شده‌اند (جدول 3). با اندازه‌گیری تغییرات قطر این دواير محاسبه کرنش محیطی و کرنش ضخامتی روی نمونه انجام شده است.

1-2- سامانه هیدروفرمینگ و آزمایش‌ها

تمام نمونه‌ها با استفاده از یک سامانه آزمایشگاهی جامع انجام شده و کلیه حرکات دستگاه توسط واحدکنترلی- الکترونیکی متصل به آن قابل‌کنترل است، همچنین تولید فشار توسط یک مجموعه تولید توان هیدرولیکی تأمین

جدول 1 مشخصات مکانیکی و فیزیکی ورق با ضخامت 0.6 میلی‌متر

مشخصه	مقدار
استحکام تسلیم (MPa)	165
مدول الاستیسیته (GPa)	236
ضریب پواسون	0.33
ضریب سختی	0.22
ضریب استحکام (MPa)	466
درصد کشیدگی (%)	0.39

جدول 2 ابعاد هندسی قالب تست و ورق

مشخصه	مقدار (میلی‌متر)
قطر گرده	130
ضخامت ورق	0.58
شعاع کره قالب	41.78
شعاع پایه قالب	34
ارتفاع قالب	13.7

جدول 3 کدگذاری ورق پیش از آزمایش

منحنی فشار	کد
ممتد	A_I
نردبانی	B_I
نوسانی	C_I
اره‌ای	D_I

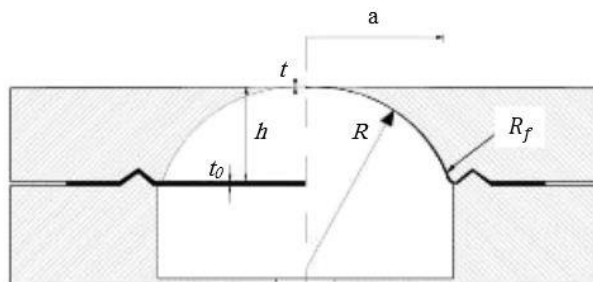


Fig. 4 Schematic of cross section cut of bulging mold

شکل 4 شمای برش خورده تست بالچینگ با قالب

¹ Programmer logic controller

² Human Machine Interface

3- شبیه‌سازی اجزای محدود

برای انجام شبیه‌سازی از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. طبق جدول 1 خواص ورق در نرم‌افزار تعیین و ورق به صورت شکل‌پذیر تعریف می‌گردد. مدل سایر اجزاء به صورت صلب و تحلیلی در نظر گرفته شده‌اند. المان مورد نظر در این شبیه‌سازی 3 a-4R S node به صورت همگن و از نوع چهار نقطه پوسته‌ای و نیز نوع بار در هر منحنی به صورت فشار یکنواخت تعریف می‌شود. گام‌های اعمال فشار در 9 مرحله (به منظور اعمال فشار پله‌ای) و با نمو فشار برابر 1 ایجاد شده است. در هر دو نوع آزمایش شرایط مرزی گیردار برای ورق در نظر گرفته شده و میزان ضریب اصطکاک ورق با قالب 0.1 و نوع تماس سطح به سطح تعریف شده است [15]. مش‌بندی با سایز 0.01 و با تقسیم‌بندی 0.1 به صورت آزاد در نظر گرفته شده است. شکل 8 مدل مونتاژ شده فرآیند تست بالچینگ را به همراه قالب مربوط به این پژوهش نشان می‌دهد. نوع حل در شبیه‌سازی فرآیند به صورت دینامیکی صریح¹ است.

4- بحث و بررسی نتایج

در این بخش نتایج مستخرج از مدل‌سازی عددی با نتایج حاصله از آزمایش‌های تجربی مقایسه و مورد بحث واقع شده‌اند.

4-1- تأثیر منحنی‌های فشار بر تغییر شکل و ضخامت

مقادیر کرنش ضخامتی مهندسی و کرنش حقیقی به ترتیب از روابط (2,1) به دست می‌آیند [16].

$$\varepsilon_3 = \frac{t}{t_0} \quad (1)$$

$$\varepsilon_t = \ln \left(\frac{t}{t_0} \right) \quad (2)$$

شکل‌های 9-12 تغییرات کرنش ضخامتی نسبت به قطر را به ترتیب برای فشارهای نوسانی و نردبانی و اره‌ای و ممتد نشان می‌دهند. در شکل 9 در محدوده قطر 30-45 میلی‌متری مقدار کرنش ضخامتی در حالت عددی بیش از حالت تجربی است. منحنی عددی در نمودارهای 9 و 10 از نظر هندسی به منحنی‌های تجربی شباهت بیشتری دارند. در منحنی‌های نردبانی و ممتد کرنش ضخامتی در حالت تجربی نسبت به عددی کمتر است که در واقع این اختلافات به دلیل اعمال دقیق‌تر الگوی فشار توسط نرم‌افزار نسبت به حالت تجربی ایجاد می‌گردد. معمولاً در ورق‌های با ضخامت پایین، میزان اختلاف ضخامت در نقاط مختلف حین تولید کمتر است، زیرا میزان ناهمگنی در آن‌ها کمتر است. ناهمگنی کمتر مربوط به فرآیند تولید و نوردکاری بهتر است. در شکل 11 تغییرات ضخامت در حالت تجربی نردبانی در محدوده قطر 20-50 میلی‌متری در مقایسه با منحنی عددی نردبانی و همچنین سایر

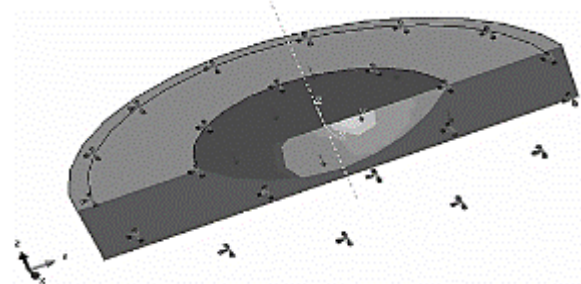


Fig. 8 Finite element model under pressure load and clamped boundary conditions

شکل 8 مدل اجزای محدود تحت بارگذاری فشاری و شرایط مرزی گیردار

¹ Dynamic explicit

منحنی‌های فشار یکنواخت‌تر است.

مطابق شکل‌های 11 و 12 در محدوده قطر 30-40 میلی‌متر شیب منحنی کرنش ضخامتی در فشار اره‌ای کمتر از فشارهای ممتد و نوسانی بوده و در منحنی نردبانی روند کرنش ضخامتی روبه کاهش است. تقریباً در همه نمودارها در محدوده قطر 30-40 میلی‌متری تغییرات ضخامت محسوسی را شاهد هستیم، در حالی که این میزان در حالت فشار نردبانی کمتر از سایر منحنی‌هاست. بیشترین کرنش ضخامت در محدوده قطر 50-60 میلی‌متری در همه نمونه‌ها رخ داده که این محدوده ناحیه بحرانی کرنش ضخامتی محسوب می‌گردد، همچنین کرنش ضخامتی در محدوده قطر 20-30 میلی‌متر در حالت عددی و تجربی، همگرا و میزان آن در منحنی‌های اره‌ای و نردبانی نسبت به نمودارهای دیگر بیشتر است. شکل 13 اندازه ضخامت ورق نمونه تغییر شکل یافته از آزمایش را برای فشار نردبانی در حالت تجربی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد. مطابق شکل الف مقدار کاهش ضخامت بر قطر به فاصله 20 میلی‌متر از دوایر هم‌مرکز برابر با 0.55 میلی‌متر است. براساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی (شکل ب)، این مقدار برابر با 0.546 میلی‌متر است. (با احتساب ضخامت اولیه اسمی 0.6 میلی‌متر برای ورق) است.

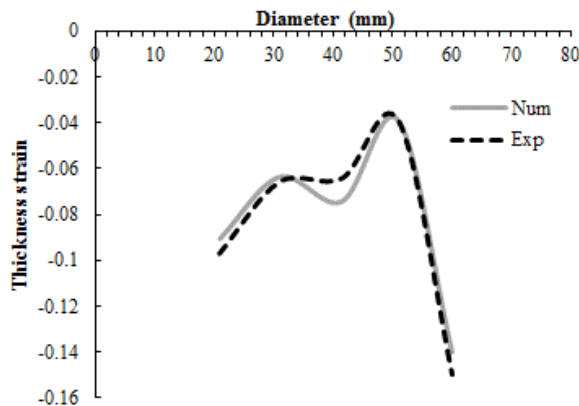


Fig. 9 Variations of thickness strain with diameter in pendulous pressure. Comparison of numerical and experimental results for C_1 test
شکل 9 تغییرات کرنش ضخامتی نسبت به قطر در حالت فشار نوسانی مقایسه نتایج عددی و تجربی مربوط به آزمایش C_1

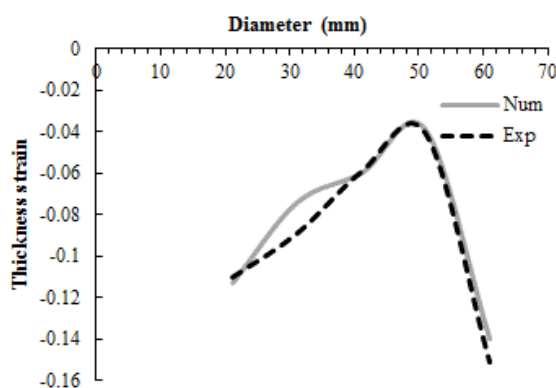
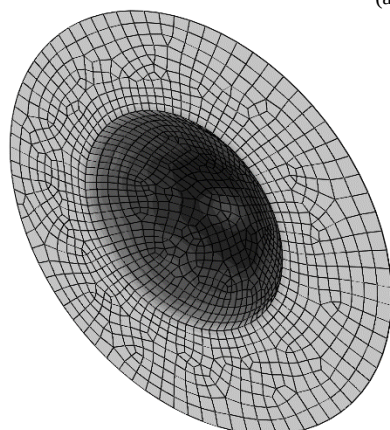
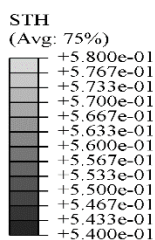


Fig. 10 Variations of thickness strain with diameter in stepped pressure. Comparison of numerical and experimental results for B_1 test
شکل 10 تغییرات کرنش ضخامتی نسبت به قطر در حالت فشار نردبانی، مقایسه نتایج عددی و تجربی مربوط به آزمایش B_1



(a)



(b)
Fig. 13 Sheet with initial thickness of 0.58 mm formed by ladder pressure. a- experimental, b- simulation

شکل 13 ورق با ضخامت اولیه 0.58 میلی‌متر شکل داده شده با فشار نردبانی، الف- تجربی، ب- شبیه‌سازی

بالایی برآمدگی تا قطر 43 میلی‌متری نسبت به سایر منحنی‌ها کمتر بوده و چون تغییرات کرنش محیطی وابسته به ارتفاع است، هر چه تغییرات ارتفاع در نقاط مختلف بیشتر باشد، میزان یکنواختی ضخامت کمتر خواهد بود. برای مثال منحنی فشار ممتد در محدوده 47-51 میلی‌متری دارای تغییر شیب و تغییر ارتفاع محسوسی است و در ادامه نیز روند مشابهی در مورد منحنی اره‌ای در محدوده قطر 27-41 میلی‌متری ملاحظه می‌گردد. شکل 15 اندازه ارتفاع برآمدگی در حالت تجربی و عددی را برای فشار نردبانی نشان می‌دهد. مقدار ارتفاع در حالت تجربی 13 میلی‌متر است که در مقایسه با حالت شبیه‌سازی شده، این مقدار در بالاترین نقطه از برآمدگی، اختلاف ناچیز 0.07

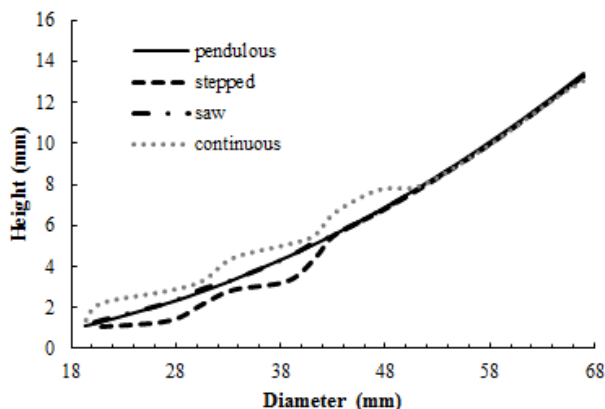


Fig. 14 Variations of bulging heights with diameter for different pressure curves

شکل 14 تغییرات ارتفاع برآمدگی نسبت به قطر برای منحنی‌های فشار مختلف

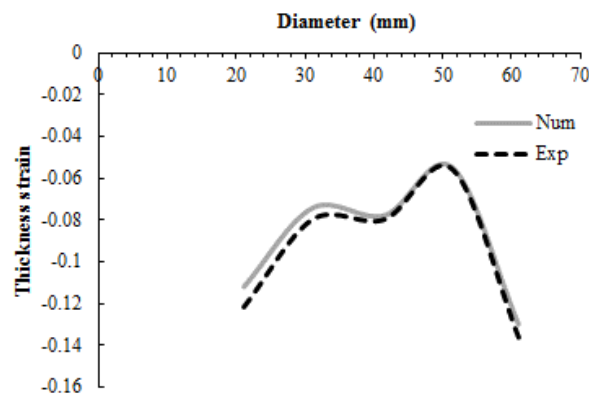


Fig. 11 Variations of thickness strain with diameter in saw pressure. Comparison of numerical and experimental results for D_1 test

شکل 11 تغییرات کرنش ضخامت نسبت به قطر در حالت فشار اره‌ای، مقایسه نتایج عددی و تجربی مربوط به آزمایش D_1

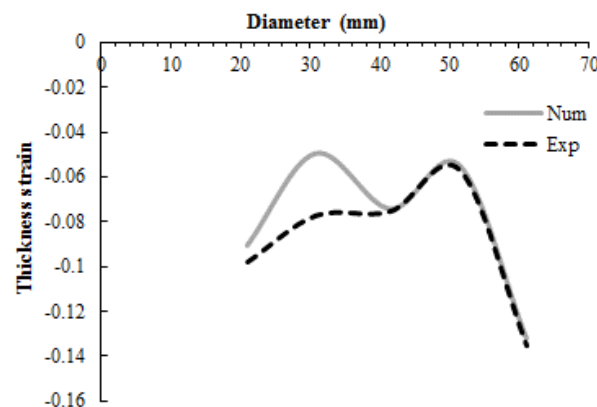


Fig. 12 Variations of thickness strain with diameter in continuous pressure. Comparison of numerical and experimental results for A_1 test

شکل 12 تغییرات کرنش ضخامت نسبت به قطر در حالت فشار ممتد، مقایسه نتایج عددی و تجربی مربوط به آزمایش A_1

4-2- تأثیر ارتفاع برآمدگی بر کرنش محیطی

از رابطه (3) مقدار حقیقی کرنش محیطی روی دواير هم‌مركز حاصل می‌شود، رابطه (4) بیانگر وابستگی شعاع کره بالچ (R) نسبت به ارتفاع برآمدگی (h) و فاصله مرکز تا لبه قالب بالچ (a) است. طبق رابطه (4) ارتفاع برآمدگی یکی از عوامل اصلی در به وجود آمدن کرنش محیطی، تنش مؤثر و کرنش ضخامت در تست انبساط هیدرولیکی محسوب می‌شود [16].

$$\varepsilon_1 = \ln\left(\frac{d_1}{d_0}\right) \quad (3)$$

$$R = \frac{a^2}{2h} \quad (4)$$

روابط (8.7) ارتباط بین تنش مؤثر $\bar{\sigma}$ و کرنش ضخامت با تنش محیطی را بیان می‌کند [17,16].

$$2a = d_1 \quad (5)$$

$$\bar{\varepsilon} = 2\varepsilon_1 \quad (6)$$

$$\bar{\sigma} = k\bar{\varepsilon}^n \quad (7)$$

$$2\ln\left(\frac{d_1}{d_0}\right) = \ln\left(\frac{t_1}{t_0}\right) \quad (8)$$

شکل 14 نمودار تغییرات ارتفاع برآمدگی نسبت به قطر را برای منحنی‌های فشار مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مقادیر ارتفاع نسبت به قطر در منحنی‌های مربوط به تست نردبانی از نقطه

است که در واقع محل آغاز کشیدگی محسوب می‌شود و تا انتهای فرآیند تغییر شکل ادامه دارد.

4-4- تأثیر منحنی فشار بر تنش مؤثر

رابطه (9) بیانگر تنش-کرنش مؤثر مواد در تست بالچینگ است [16]. جدول

جدول 4 مقادیر کرنش محیطی برحسب منحنی فشار و قطر اولیه و قطر تغییر یافته

Table 4 Values of hoop strain for incremental pressure curves

تغییرات کرنش محیطی برحسب قطر دایر هم‌مرکز				فشار	
50.98	41.48	30.96	20.92	قطر ثانویه (mm)	نوسانی
0.019	0.036	0.031	0.044	کرنش	
50.98	41.2	31.129	21.16	قطر ثانویه (mm)	نردبانی
0.019	0.029	0.036	0.056	کرنش	
51.37	41.56	31.12	21.16	قطر ثانویه (mm)	ارهای
0.027	0.038	0.036	0.056	کرنش	
51.37	41.48	30.75	20.92	قطر ثانویه (mm)	ممتد
0.027	0.036	0.024	0.044	کرنش	

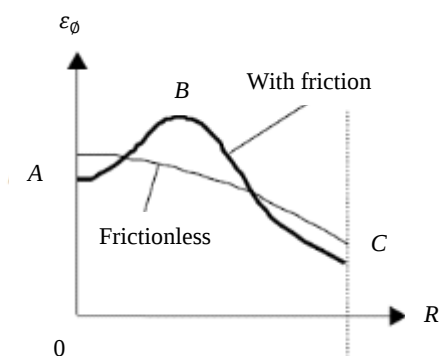


Fig. 16 Hoop strain-radius curve, with friction and frictionless [16]

شکل 16 منحنی کرنش محیطی برحسب شعاع محیطی، با اصطکاک و بدون اصطکاک [16]

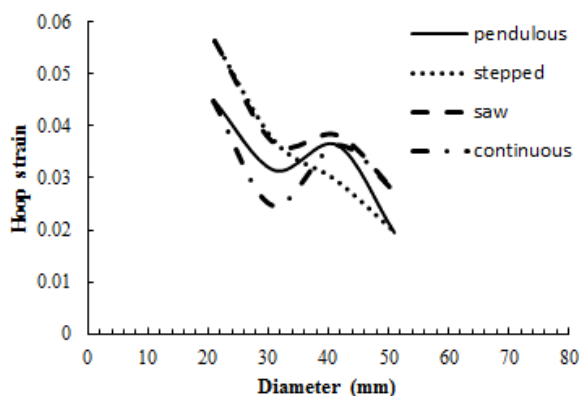


Fig. 17 Variations of hoop strain with diameter for different pressure curves

شکل 17 تغییرات کرنش محیطی نسبت به قطر برای منحنی‌های فشار مختلف

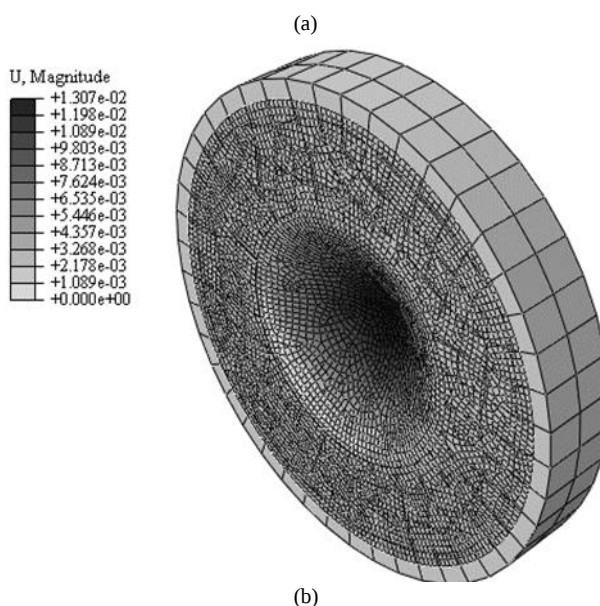


Fig. 15 Measuring of the deformed sheet height (max height=13.07 mm). a- experimental, b- simulation

شکل 15 اندازه‌گیری ارتفاع ورق تغییر شکل یافته (ماکزیمم ارتفاع 13.07 میلی‌متر)

a- تجربی، b- شبیه‌سازی شده

میلی‌متر را نشان می‌دهد.

4-3- تأثیر اصطکاک بر کرنش محیطی و توزیع ضخامت

شکل 16 منحنی کرنش محیطی برحسب شعاع برآمدگی حین فرآیندهای فرم‌دهی با اصطکاک و بدون اصطکاک را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود، حداکثر کرنش محیطی در شعاع متوسط ورق به دلیل تنش کششی حاصل از تماس اصطکاکی رخ می‌دهد و این جایی است که احتمال شکست انتظار می‌رود. مقایسه این شکل با منحنی‌های کرنش محیطی - قطر مربوط به نمودار 17 این تحقیق نشان می‌دهد شکل‌دهی با فشارهای ارهای، نوسانی و ممتد با اصطکاک همراه بوده در حالی که کرنش محیطی حاصل از فشار نردبانی به مدل بدون اصطکاک نزدیک‌تر است. جدول 4 مقادیر کرنش محیطی برحسب منحنی‌های فشار را نشان می‌دهد.

شکل 18 بیشترین کرنش ضخامت حاصل از کشیدگی ورق بر سطح قالب را روی یکی از نمونه نشان می‌دهد که در ناحیه تکیه‌گاهی آن دچار پارگی شده است. مطابق شکل این قسمت در واقع همان ناحیه بحرانی کشش

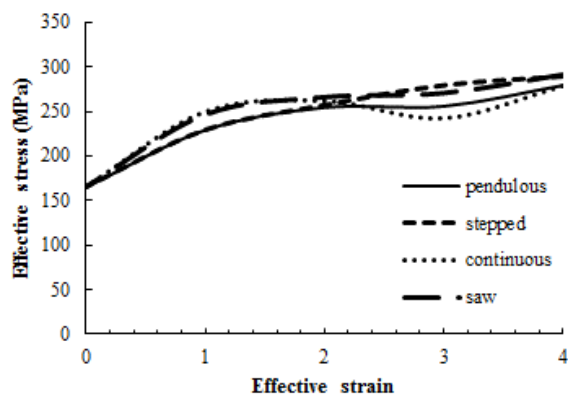


Fig. 19 Effective stress-strain based on pressure curve of concentric circles' diameters with different hoop strain

شکل 19 تنش مؤثر- کرنش مؤثر برحسب منحنی فشار روی قطر دایره هم مرکز به تفکیک کرنش‌های محیطی

در حالت‌های نردبانی و نوسانی باعث کاهش حداکثر فشار اعمال شده برای شکل‌دهی می‌گردد، زیرا مقادیر فشار در هر مرحله در بازه‌ای از زمان ثابت است.

3- توزیع ضخامت در فشارهای نردبانی نسبت به سایر فشارها یکنواخت‌تر است، زیرا در طول مراحل اعمال فشار پله‌ای به دلیل ثابت ماندن فشار در هر مرحله سبب کالیبراسیون (انطباق) و پرشدگی بهتر قطعه درون قالب می‌شود.

4- نوع فشار پله‌ای، مدت‌زمان اعمال فشار، مقدار بیشینه فشار لحظه‌ای در توزیع ضخامت در نقاط مختلف قطعه مؤثر هستند و یا به عبارتی مدت‌زمان اعمال هر پالس فشار با فواصل زمانی متفاوت (سرعت و مقدار شکل‌دهی) در تغییرات ضخامت، ارتفاع و کرنش محیطی نقش مؤثری را دارد.

6- مراجع

- [1] J. W. Beams, Mechanical properties of thin films of gold and silver, *The Structure and Properties of Thin Films*, Vol. 87, No. 3, pp. 524-525, 1959.
- [2] R. B. Ross, *Handbook of Metal Treatments and Testing*, Second Edition, pp. 120-122, London: Springer Science and Business Media, 1988.
- [3] B. Merle, *Mechanical Properties of Thin Films Studied by Bulge Testing*, PhD Dissertation, FAU University, Erlangen, 2013.
- [4] W. F. Hosford, *Mechanical Behavior of Materials*, Second Edition, pp. 41-46, Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- [5] R. Rajendran, K. Narasimhan, Damage prediction of clamped circular plates subjected to contact underwater explosion, *Impact Engineering*, Vol. 25, No. 4, pp. 373-386, 2001.
- [6] B. Martins, A. D. Santos, P. Teixeira, On the study for accurate determination of flow curve using bulge test, *15th International Conference on Experimental Mechanics*, Porto, Portugal, July 22-27, 2012.
- [7] L. Lasarescu, D. S. comsa, I. Nicodim, I. Ciobanu, D. Banabic, Characterization of plastic behaviour of sheet metals by hydraulic bulge test, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 22, No. 2, pp. 275-279, 2012.
- [8] M. Hosseinzadeh, H. Mostajeran, M. Bakhshi, A. H. Gorji, S. Norouzi, S. J. Hosseini-pour, Experimental and numerical investigations of the effective parameters in a new sheet hydroforming method, *Aerospace Mechanics*, Vol. 5, No. 3, pp. 55-68, 2009. (in Persian فارسی)
- [9] G. Cai, X. Zhou, L. Lang, S. Alex, Research on aluminum alloy sheet thermoplastic deformation behavior based upon warm bulging test, *AIP Advances*, Vol. 6, No. 2, pp. 23-25, 2016.
- [10] J. Majerníková, E. Spišák, Thickness change of spherical cup made from trip steel after biaxial tensile test, *Transfer Inovácií*, Vol. 28, No. 6, pp. 69-72, 2013.
- [11] M. Bakhshi-Jooybari, A. H. Gorji, N. Mohammadtabar, Study of effective parameters in hydroforming of fuel cell metallic bipolar plates with parallel serpentine flow field, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 8, 2014. (in Persian فارسی)
- [12] M. K. Small, *Use of the Bulge Test in Measuring the Mechanical Properties*



Fig. 18 Sheet rupture in 50-60 (mm) diameter due to thickness strain in continuous pressure

شکل 18 پارگی در قطر 60-50 میلی‌متر در اثر کرنش ضخامتی در فشار ممتد

5 مقادیر تنش مؤثر برحسب کرنش مؤثر روی قطر دایره هم‌مرکز را نشان می‌دهد که از رابطه (9) حاصل شده است. به منظور سهولت در مقایسه مقادیر تنش مؤثر به کرنش‌های مؤثر، دایره هم مرکز از 4-0 شماره‌گذاری شده‌اند، همچنین میزان کرنش حاصل از تنش تسلیم با شماره 0 بیان شده است. مقدار تنش مؤثر در قطرهای (20-30) میلی‌متر روی برآمدگی (نقاط بالایی برآمدگی) برای فشار نردبانی نسبت به سایر فشارها بیشتر است (شکل 19).

$$\bar{\sigma} = K(2\ln\frac{d_1}{d_0})^n \quad (9)$$

همچنین یکنواختی منحنی تنش-کرنش مؤثر در حالت فشار نردبانی مشاهده می‌شود. کرنش سختی در سایر منحنی‌ها (غیر از منحنی فشار نردبانی) به خصوص در حالت فشار ممتد کاملاً مشهود است. بدیهی است توزیع ضخامت یکنواخت‌تر امکان فرم‌دهی با نسبت کشش بیشتر را فراهم می‌آورد و پارگی ورق در نواحی بحرانی نیازمند کشش بیشتری است. البته متغیرهایی چون میزان دما، لزجت سیال هیدرولیک، کیفیت سطح قالب و انرژی جذب‌شده توسط قالب و اجزای آن در تحلیل نرم‌افزاری لحاظ نشده است. در واقع دلیل کرنش ضخامت کمتر در شبیه‌سازی‌ها آن است که در تحلیل نرم‌افزاری، حالت ایده‌آل بررسی می‌گردد.

5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش شکل‌دهی ورق‌های مختلف با روش آزمایش بالچینگ با قالب تحت اثر منحنی‌های مختلف فشار به صورت تجربی و شبیه‌سازی با نرم‌افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفت. در تست‌های تجربی موارد زیر مشاهده شد:

- 1- هنگام تغییر شکل، حین تماس ورق با سطح قالب که سبب بروز اصطکاک می‌شود، مقدار تغییر ضخامت ورق در فشارهای اره‌ای، نوسانی و ممتد بیشتر بوده و اثر اصطکاک در فشار نردبانی ناچیز است.
- 2- بررسی‌های انجام گرفته نشان می‌دهد که استفاده از فشارهای اعمالی

جدول 5 مقادیر تنش مؤثر - کرنش مؤثر برحسب قطر دایره اولیه به تفکیک فشار

Table 5 values of effective stress- strain based on primary circles diameter for different pressures

کرنش مؤثر	مقادیر تنش مؤثر بر حسب منحنی فشار (MPa)			
شماره قطر	نوسانی	نردبانی	ممتد	اره‌ای
4 (20)	279.17	289.27	279.17	291.42
3 (30)	255.74	279.17	242.78	270.79
2 (40)	254.35	256.94	262.48	266.15
1 (50)	229.02	229.02	250.01	246.38
0	165	165	165	165

- [15] J. Tirosh, Fundamental issues in hydroforming of deep drawing processes, *AIP Conference Proceedings*, Vol. 778, No. 1, pp. 519-525, 2005.
- [16] H. J. Z. Marciniak, J. L. Duncan, *Mechanics of Sheet Metal Forming*, Second Edition, pp. 129-135, London: Elsevier Science, 2002.
- [17] L. C. D. Reis, *Constitutive Parameters Identification of Metal Sheets using Circular Bulge Tests*, PhD Dissertation, University of Coimbra, Coimbra, 2015.
- of Thin Films*, PhD Dissertation, Stanford University, Stanford, 1992.
- [13] M. Plančak, K. Kuzman, D. Vilotić, T. Pepeljnjak, I. Kačmarčik, D. Movrin, Experimental investigation of non-uniform deformation in tube hydroforming, *Metalurgija*, Vol. 17, No. 3, pp. 131-138, 2011.
- [14] C. L. Wu, M. C. Yip, W. Fang, *Applied physics*, Accessed on 22 June 2009; <https://doi.org/10.1143/JJAP.48.06FK06>.