



بررسی شکل دهی با استفاده از روش جدید کشش عمیق ساچمه‌ای و مقایسه توزیع ضخامت و نیروی شکل دهی با فرآیند کشش عمیق سنتی

اسماعیل محمدیان¹، عبدالحمید گرجی^{2*}، محمد علی میرزایی³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

* صندوق پستی 484، hamidgorji@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 09 آذر 1393

پذیرش: 08 بهمن 1393

ارائه در سایت: 06 اسفند 1393

کلید واژگان:

شکل دهی ورق

کشش عمیق

فرآیند ساچمه‌ای

شبیه سازی اجزای محدود

توزیع ضخامت

چکیده

محیط شکل دهی در فرآیندهای شکل دهی فلزات، از اهمیت بالایی برخوردار است. در این بین فرآیند کشش عمیق ساچمه‌ای به دلیل گسسته بودن محیط شکل دهی آن کاملاً انعطاف پذیر می باشد. در این مقاله، توزیع ضخامت و نیروی لازم برای شکل دهی قطعه مخروطی شکل توسط فرآیندهای کشش عمیق ساچمه‌ای و کشش عمیق سنتی با استفاده از شبیه سازی اجزای محدود و آزمایش های تجربی مورد مطالعه قرار گرفتند. در این تحقیق ورق هایی از جنس فولاد St14 و برنج با ضخامت 1 میلی متر مورد استفاده قرار گرفت. نتایج شبیه سازی تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارند. نتایج نشان می دهد که نمونه شکل داده شده توسط فرآیند کشش عمیق سنتی از توزیع ضخامت یکنواخت و مناسب تری نسبت به نمونه کشش عمیق ساچمه‌ای برخوردار است، ولی حداکثر نازک شدگی در قطعات مربوط به فرآیند ساچمه‌ای کمتر از فرآیند کشش عمیق سنتی بود. همچنین ملاحظه گردید که نیروی مورد نیاز برای فرآیند کشش عمیق ساچمه‌ای اندکی بیشتر از فرآیند کشش عمیق سنتی می باشد. همچنین مشاهده گردید که با افزایش شعاع ورودی ماتریس، نیروی لازم برای کشش برای هر دو فرآیند کشش عمیق و ساچمه ای کاهش می یابد. با افزایش اندازه شعاع ورودی ماتریس میزان نازک شدگی کاهش می یابد. ملاحظه گردید که یکی از مزیت های فرآیند کشش عمیق ساچمه‌ای نسبت به فرآیند کشش عمیق سنتی دست یافتن به قطعه با شیب منفی می باشد.

An investigation of Forming through using the new method of ball deep drawing and comparing its thickness distribution and forming force with the conventional deep drawing

Esmail Mohammadian¹, Abdolhamid Gorji^{2*}, Mohammad Ali Mirzai¹

1- Department of Mechanical Engineering, Hormozgan University, Bandar Abbas, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

* P.O.B. 484 Babol, Iran, hamidgorji@nit.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 30 November 2014
Accepted 28 January 2015
Available Online 25 February 2015

Keywords:

Sheet metal forming
deep drawing
ball forming process
finite element simulation
the thickness distribution

ABSTRACT

Forming media in metal forming processes is so important. Since the forming media in Ball deep-drawing process is discrete, it is quite flexible. In this paper, thickness distribution and required force for forming of conical part by ball deep-drawing and conventional deep-drawing processes using finite element simulation and experimental stages were studied. In this research, sheets used were made from St14 steel and brass having 1mm thickness. The experimental results are in good agreement with simulation results. The results showed the sample formed by conventional deep-drawing process had more uniform thickness distribution than ball deep-drawing, but the maximum thinning in the parts of ball forming process was less than conventional deep-drawing process. Also, it was observed that required force for ball deep drawing process is more than the conventional deep-drawing process. It was observed that with increasing radius of the input die, the force required to stretch the ball deep-drawing and ball processes is decreased, and with increasing radius of the input die thinning amount is reduced. It was noted that one of the advantages of ball deep drawing process over traditional deep drawing process is that a negative slope part is achieved.

1- مقدمه

مختلف تولید، فرآیندهای شکل دهی فلزات بدلیل تولید قطعاتی با خواص مکانیکی عالی از جایگاه ویژه ای برخوردار بوده است. هدف اصلی فرآیندهای شکل دهی فلزات ایجاد تغییر شکل مطلوب در ماده خام اولیه با هندسه ای نسبتاً

روش های تولید و توسعه آن، از جمله زمینه هایی است که همواره در طی دوره های مختلف بشری، از اهمیت بالایی برخوردار بوده است. در بین روش های

Please cite this article using:

E. Mohammadian, A. Gorji, M. A. Mirzai, An investigation of Forming through using the new method of ball deep drawing and comparing its thickness distribution and forming force with the conventional deep drawing, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 159-166, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

بخشی و همکارانش [1] تأثیر شعاع ورودی ماتریس را بر روی نیروی شکل دهی و هندسه محصول در فرآیند کشش عمیق سنتی بصورت تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود مورد مطالعه قرار دادند. آنان نتیجه گرفتند که با افزایش شعاع ورودی ماتریس، نیروی لازم برای کشش کاهش می‌یابد. آن‌ها بیان کردند که علت این کاهش نیرو آن است که با افزایش شعاع ورودی ماتریس، مواد فضای بیشتری را برای جریان پیدا کردن به درون حفره ماتریس می‌یابند.

اوزاک و بال [2] تأثیر تغییرات شعاع گوشه سنبه و شعاع ورودی ماتریس را بر روی نسبت کشش قطعه در روش کشش عمیق سنتی قطعات استوانه‌ای بصورت تجربی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که با افزایش شعاع گوشه سنبه و شعاع ورودی ماتریس نسبت کشش افزایش می‌یابد.

سیرواروداچلوان⁴ و گان⁵ [3] روش جدیدی را برای شکل دهی قطعات فنجان‌ی شکل با استفاده از سیستم ورق‌گیر اصطکاکی ارائه کردند. در این روش از یک لایه اورتانی بعنوان سنبه انعطاف‌پذیر استفاده شده است که نقش ورق‌گیر را در اثر نیروی اصطکاک بر عهده دارد. آن محققان نشان دادند که استفاده از این تکنیک سبب به حداقل رساندن فشار ورق‌گیر در ابتدا و انتهای فرآیند کشش می‌شود.

زیمیناک [4] در زمینه طراحی فرآیند کشش عمیق چند مرحله‌ای ورق‌های فلزی تحقیقی انجام داد. وی قالب‌های متعددی را برای بهبود شکل‌پذیری و نازک‌شدگی در هر مرحله کشش، با روش اجزای محدود شبیه‌سازی کرد.

یعقوبی [5] به مقایسه شکل‌دهی قطعات مخروطی با فرآیندهای هیدروفورمینگ و کشش عمیق سنتی پرداخت. او با مقایسه توزیع ضخامت قطعه‌های حاصل از فرآیندهای کشش عمیق سنتی و هیدروفورمینگ نتیجه گرفت که یکنواخت‌ترین توزیع ضخامت مربوط به قطعات هیدروفورمینگ است که به دلیل فشار یکنواخت سیال در حین فرآیند شکل‌دهی کمترین نازک‌شدگی در نقاط بحرانی اتفاق می‌افتد.

در این پژوهش، توزیع ضخامت و نیروی لازم برای شکل‌دهی قطعه مخروطی شکل توسط فرآیندهای کشش عمیق ساچمه‌ای و کشش عمیق سنتی با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمایش‌های تجربی مورد مطالعه قرار گرفتند. در انتها هم به چگونگی شکل‌گیری قطعه مخروطی با شیب منفی توسط فرآیند کشش عمیق ساچمه‌ای می‌پردازیم.

2- مراحل آزمایشگاهی

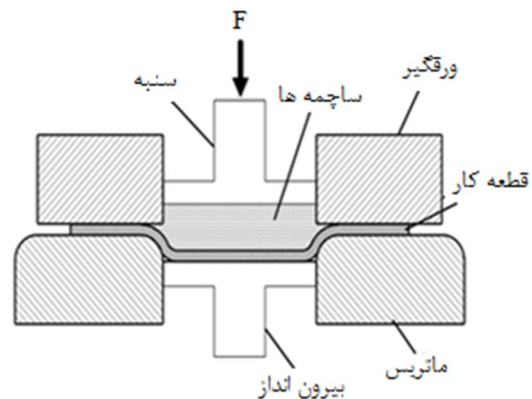
تمام آزمایش‌های شکل‌دهی با استفاده از دستگاه کشش اونیورسال، با ظرفیت 600 کیلو نیوتن انجام گردید. کلیه حرکات دستگاه توسط واحد کامپیوتری متصل به آن قابل کنترل می‌باشد. برای انجام فرآیندهای کشش عمیق ساچمه‌ای و کشش عمیق سنتی جهت کاهش هزینه از یک قالب استفاده شد. شکل 2 دستگاه آزمایش اونیورسال و مجموعه قالب آماده شده برای فرآیندهای کشش عمیق ساچمه‌ای و کشش عمیق سنتی را نشان می‌دهد. ابعاد هندسی مجموعه قالب استفاده شده در آزمایش‌های تجربی در جدول 1 آورده شده است. ساچمه‌های استفاده شده در فرآیند کشش عمیق ساچمه‌ای از نوع سندبلاست ریخته‌گری شده و به قطر 0/5 میلی‌متر می‌باشد. این ساچمه‌ها، بین ورق و سنبه‌ی شکل‌دهی قرار گرفته و نیروی سنبه از طریق آن‌ها به ورق

ساده و تبدیل آن به یک محصول با شکل نسبتاً پیچیده طی یک یا چند مرحله عملیات شکل‌دهی می‌باشد [1].

کشش عمیق¹ یکی از مهم‌ترین فرآیندهای شکل‌دهی ورق است که بطور وسیعی در تغییر شکل ورق‌های فلزی و تبدیل آن به قطعات توخالی به کار می‌رود. فرآیند کشش عمیق نخستین بار در اوایل قرن هیجدهم تجربه شده است. از مزایای فرآیند کشش عمیق سنتی، سادگی و سرعت زیاد تولید قطعه می‌باشد. این روش کاربرد زیادی در صنعت دارد. از این فرآیند می‌توان برای تولید مستقیم یک محصول با عنوان پیش‌فرمی برای تولید محصولات دیگر استفاده کرد. کشش عمیق در صنعت معمولاً برای تولید قطعاتی از قبیل بدنه و شاسی اتومبیل و هواپیما، انواع ظروف فلزی، مخزن‌های تحت فشار یا خلا، بدنه انواع دستگاه‌ها و ماشین‌ها، پوسته فشنگ و گلوله به کار می‌رود.

در فرآیند کشش عمیق معمولی، ورق فلزی بین سنبه و ماتریس قرار می‌گیرد. در اکثر فرآیندهای کشش عمیق، ورق توسط ورق‌گیر نگه داشته می‌شود تا از پدیده چروک‌خوردگی در ناحیه فلانچ² (ناحیه تماس ورق با ورق‌گیر و ماتریس) جلوگیری شود. سپس، سنبه به سمت پایین حرکت کرده و باعث تغییر شکل ورق می‌گردد. در نهایت، ورق بطور کامل بین سنبه و ماتریس شکل می‌پذیرد. در فرآیند کشش عمیق محیط شکل‌پذیری بصورت جامد می‌باشد. این فرآیند اگر چه برای تولید قطعات با استحکام بالا و وزن کم مناسب می‌باشد ولی در تولید بعضی قطعات با شیب منفی و فرم‌های پیچیده استفاده از این روش غیرممکن می‌باشد که می‌توان از روش کشش عمیق ساچمه‌ای استفاده کرد. کشش عمیق ساچمه‌ای³ فرآیند جدیدی می‌باشد که برای شکل‌دهی ورق‌های فلزی قابل استفاده است. در این روش اگر چه که محیط شکل‌دهی بصورت جامد بوده ولی بدلیل گسسته بودن، کاملاً انعطاف‌پذیر می‌باشد و در آن ساچمه بعنوان محیط شکل‌دهنده، نیرو را از سنبه به ورق منتقل می‌کند. در شکل 1 تصویر شماتیکی از این فرآیند مشاهده می‌شود. فرآیند ساچمه‌ای کشش عمیق دارای مزایای زیر است:

1. بسیار ساده و ارزان است.
 2. نیاز به تجهیزات گران قیمت ندارد.
 3. امکان ساخت قطعات با شیب منفی وجود دارد.
 4. این فرآیند برای تولید قطعات با فرم پیچیده مناسب است.
- با توجه به اینکه روش شکل‌دهی ساچمه‌ای فرآیند نوینی می‌باشد، تاکنون گزارشی در زمینه بررسی پارامترهای شکل‌دهی به روش شکل‌دهی ساچمه‌ای ارائه نشده است.



شکل 1 شماتیک فرآیند کشش عمیق ساچمه‌ای

1- Deep Drawing
2- Flange
3- Ball Forming

4- Thiruvarudchelvan
5- Gan

برای انجام آزمایش‌ها، از روغن 140° در سطوح تماس بین ماتریس و ورق، برای کاهش اصطکاک در این نواحی و در نتیجه افزایش جریان مواد به داخل ماتریس استفاده شده است. سرعت حرکت سنبه برای شکل دهی مورد نظر 200 میلی‌متر بر دقیقه می‌باشد. در شکل 4 نمونه های ساخته شده در این پژوهش با استفاده از فرآیندهای کشش عمیق ساچمه‌ای و کشش عمیق سنتی نشان داده شده است.

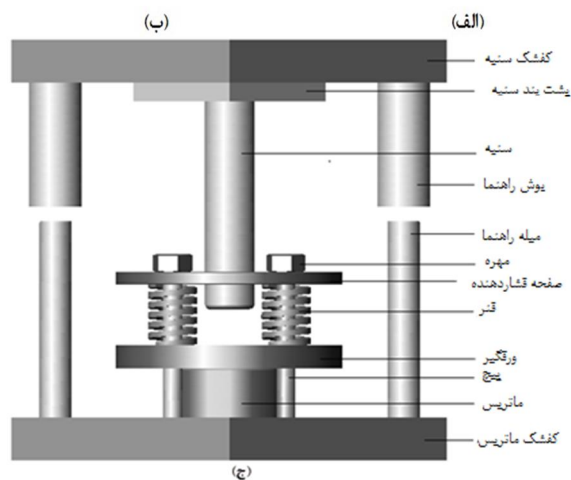
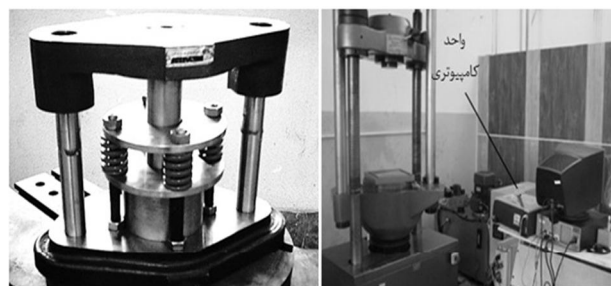
3- شبیه‌سازی اجزای محدود

برای انجام شبیه‌سازی از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس 10-26 استفاده شده است. در این پژوهش، انجام شبیه‌سازی فرآیند در یک گام³، بصورت دینامیکی مدل شده و نوع حل صریح⁴ بوده است. بدلیل تقارن محوری، از مدل‌های سه بعدی برای شبیه‌سازی قالب و ورق استفاده گردید. شکل 5 مجموعه قالب شبیه‌سازی شده برای فرآیندهای کشش عمیق سنتی و کشش عمیق ساچمه‌ای را نشان می‌دهد. به دلیل شکل‌پذیری ورق در حین فرآیند و نیز تقارن بودن قطعه، ورق بصورت شکل‌پذیر متقارن محوری سه‌بعدی⁵ و با المان چهار گره‌ای⁶ مدل شده است برای بدست آوردن اندازه المان از همگرایی نمودار نیرو بر حسب جایجایی و نمودار توزیع ضخامت استفاده شده و اندازه المان برای ورق 0/001 حاصل شد. برای مدل‌سازی قالب نیز از مدل صلب تحلیلی سه بعدی⁷ استفاده شده است. چون در فرآیند ساچمه‌ای بدلیل تعداد ساچمه‌های زیاد نمی‌توان از تماس سطح به سطح بین اجزا استفاده کرد و باید از تماس کامل بین سطوح⁸ استفاده شود، به همین دلیل اجزای قالب از نوع صلب گسسته انتخاب شده است که نیاز به المان‌بندی می‌باشد. در فرآیند کشش عمیق سنتی نوع تماس بین ورق و اجزای قالب سطح به سطح⁹ می‌باشد و در فرآیند کشش عمیق ساچمه‌ای برای تعریف تماس‌ها از مدل اصطکاک کولمب¹¹ و شرایط تماسی پنالتی¹² برای سطوح استفاده شده است. براساس مرجع [6] مقدار ضریب اصطکاک با توجه به استفاده در شبیه‌سازی برای تمامی سطوح 0/1 در نظر گرفته شده است. به منظور کاهش زمان محاسبات فاکتور سرعت 100 در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت [7].

ورق‌های مورد استفاده در این تحقیق، از جنس فولاد St14 و برنج می‌باشند. برای مقایسه توزیع ضخامت و نیروی شکل دهی دو فرآیند کشش عمیق سنتی و کشش عمیق ساچمه‌ای از ورق فولادی St14 و برای شکل دهی قطعه مخروطی با شیب منفی از ورق برنجی (شامل 35٪ روی و 65٪ مس) استفاده شد. مشخصات مکانیکی و خواص فیزیکی ورق‌ها حاصل از تست کشش که در شبیه‌سازی اعمال شد در جدول 2 نشان داده شده است.

یکی از مهمترین مشخصه‌های کیفی مورد بررسی در قطعات ورقی تولید شده به روش‌های مختلف شکل دهی ورقی، توزیع ضخامت قطعه کار شکل داده شده می‌باشد. از این رو، در فرآیند کشش عمیق سنتی و کشش عمیق ساچمه‌ای، منحنی توزیع ضخامت قطعات حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش

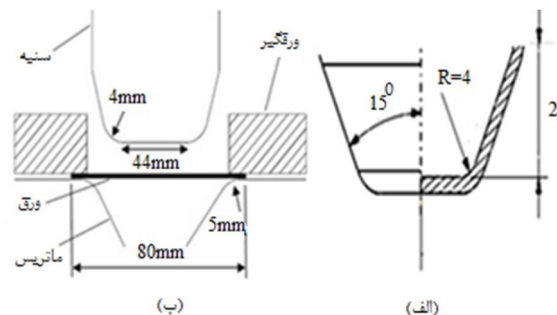
اعمال می‌شود. شکل 3 هندسه قطعه و شماتیک قالب استفاده شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل 2 الف- دستگاه آزمایش اونیورسال (DMG) ب- مجموعه قالب استفاده شده در آزمایش‌های تجربی ج- شماتیک قالب کشش عمیق

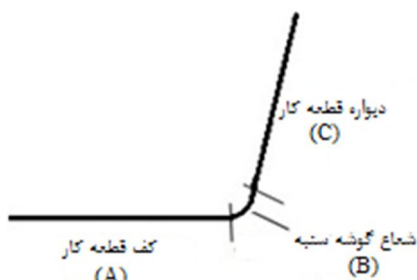
جدول 1 ابعاد هندسی مجموعه قالب و ورق

ابعاد هندسی	مقدار (mm)
قطر سنبه خارجی	55/5
شعاع لبه سنبه داخلی	4
قطر حفره ماتریس خارجی	58
شعاع لبه ماتریس داخلی	5
قطر حفره ورق گیر	56
قطر گره	80
ضخامت ورق	1



شکل 3 الف- هندسه قطعه ب- شماتیک قالب استفاده شده در این پژوهش

1- SAE40
2- ABAQUS 6-10
3- Step
4- Explicit
5- 3D deformable axisymmetric
6- CAX4R
7- 3D discrete rigid
8- General contact
9- Surface to Surface
10- General Contact
11- Colom
12- penalty



شکل 6 سه ناحیه مختلف مورد بررسی در قطعه

در معادله (3) n نمای کرنش سختی و t_0 ضخامت اولیه ورق می‌باشد. همچنین با توجه به شرایط کرنش صفحه‌ای و برقراری معادله‌های (4) و (5)، مقدار کرنش حقیقی اصلی (ϵ_θ) و کرنش ضخامتی (ϵ_t) بدست می‌آید.

$$\epsilon_\theta = \ln\left(1 + \frac{e_\theta}{100}\right) \quad (4)$$

$$\epsilon_t = -\epsilon_\theta \quad (5)$$

پس از محاسبه ϵ_t ، با جایگذاری در معادله (2) مقدار t_f یا همان ضخامت اولیه ورق بدست آمده و در نتیجه با استفاده از معادله (1) نازک‌شدگی حداکثر محاسبه می‌شود. در پژوهش حاضر مقدار نازک‌شدگی حداکثر برای ورق فولادی استفاده شده مقدار 38% بدست آمده است.

4- نتایج و بحث

شکل 7 منحنی توزیع ضخامت بدست آمده از شبیه‌سازی و آزمایش تجربی با استفاده از فرآیند کشش عمیق سنتی را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار مشاهده می‌گردد در ناحیه کف قطعه (A) مقدار نازک‌شدگی کم و در تمام این ناحیه مقدار ثابتی می‌باشد بیشترین مقدار نازک‌شدگی در قطعه مخروطی در شعاع سر سنبه (B) رخ داده است. دلیل این امر پدیده خم در ورق می‌باشد که باعث افزایش کرنش در این ناحیه شده است. از این رو این ناحیه را می‌توان بعنوان بحرانی‌ترین ناحیه از شکل‌دهی در نظر گرفت که در نمونه شبیه‌سازی نیز بیشترین کرنش در همین ناحیه به ورق اعمال شده است. ضخامت در ناحیه (C) بخاطر وجود کرنش‌های فشاری افزایش می‌یابد. از ناحیه (B) به سمت انتهای ناحیه (C) افزایش ضخامت مقدار بیشتری خواهد بود و در یک محدوده‌ای ضخامت در این ناحیه به اندازه ضخامت اولیه ورق (1mm) و از آن پس ضخامت بیشتر از اندازه ضخامت اولیه ورق می‌شود که این امر به دلیل جریان فلز و ایجاد کرنش منفی در قسمت‌های لبه ورق اولیه در اثر کشش می‌باشد. ملاحظه می‌شود که تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی فرآیند کشش عمیق وجود دارد. به دلیل وجود این تطابق بین نتایج شبیه‌سازی و کار تجربی می‌توان در بررسی از نتایج شبیه‌سازی‌ها بدون انجام آزمایش تجربی استفاده نمود.

شکل‌های 8 و 9 به ترتیب منحنی توزیع ضخامت بر حسب فاصله از مرکز قطعه نمونه‌های تجربی و شبیه‌سازی توسط فرآیندهای ساچمه‌ای و کشش عمیق برای ورق فولادی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در هر دو نمودار در ناحیه کف مخروط ناقص (A) نازک‌شدگی کم می‌باشد. در ابتدا مقدار نازک‌شدگی قطعه در هر دو فرآیند تقریباً یکسان می‌باشد ولی توزیع ضخامت در فرآیند کشش عمیق سنتی در تمام این ناحیه یکسان است ولی در کشش عمیق ساچمه‌ای از مرکز قطعه به سمت ناحیه (B) مقدار کاهش ضخامت افزایش می‌یابد.

در کشش عمیق سنتی با توجه به اینکه سنبه صلب می‌باشد نیروی اصطکاک در تمام نواحی کف قطعه ثابت بوده در نتیجه کاهش ضخامت در

تجربی بدست آمد. در این پژوهش به منظور مطالعه دقیق‌تر توزیع ضخامت، قطعه نهایی به سه ناحیه A، B و C تقسیم شده که در نمودارهای توزیع ضخامت، به این ناحیه‌ها ارجاع داده شده است. شکل 6 این ناحیه‌ها را نشان می‌دهد.

برای بررسی پارگی ورق فولادی مورد استفاده از معیار حداکثر نازک‌شدگی¹ استفاده شده است [8]. برای محاسبه نازک‌شدگی حداکثر، از معادله (1) استفاده می‌شود.

$$\% \text{ نازک‌شدگی} = \frac{t_0 - t_f}{t_0} \quad (1)$$

در معادله (1) t_0 ضخامت اولیه و t_f ضخامت نهایی ورق می‌باشد که از معادله (2) بدست می‌آید.

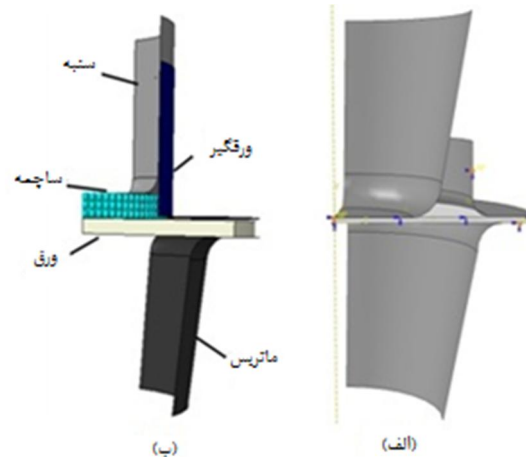
$$t_f = t_0 \exp(\epsilon_t) \quad (2)$$

در معادله فوق ϵ_t کرنش ضخامتی می‌باشد. از سوی دیگر کرنش مهندسی اصلی یا همان e_θ در شرایط کرنش صفحه‌ای با استفاده از معادله (3) محاسبه می‌شود.

$$e_\theta = \left(23.3 + \frac{360}{25.4} t_0\right) \left(\frac{n}{0.21}\right) \quad (3)$$



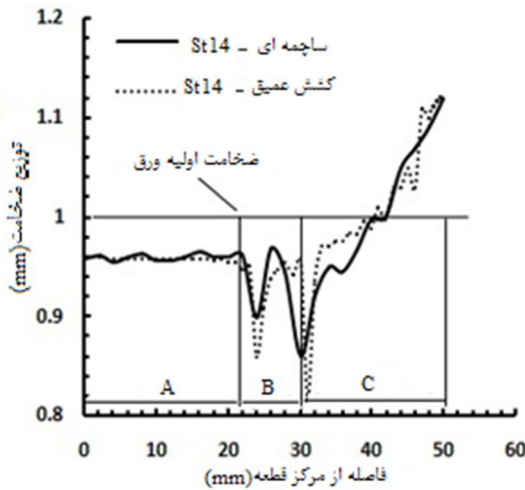
شکل 4 قطعه مخروطی ساخته شده از جنس فولاد St14 الف - فرآیند ساچمه‌ای ب - فرآیند کشش عمیق سنتی



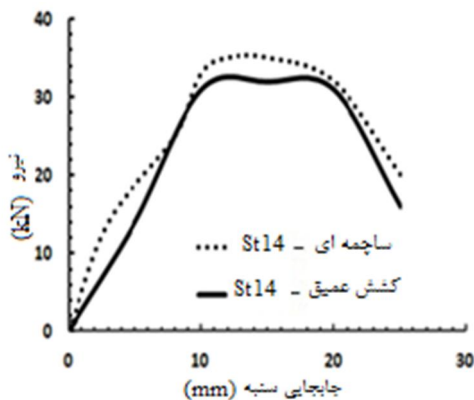
شکل 5 مدل شبیه‌سازی شده الف - کشش عمیق سنتی ب - کشش عمیق ساچمه‌ای جدول 2 مشخصات مکانیکی و خواص فیزیکی ورق‌ها حاصل از تست کشش

ماده	فولاد	برنج
استحکام تسلیم (MPa)	194	167
چگالی (kg/m ³)	7850	8670
مدول الاستیسیته	210	127
ضریب پواسون	0/3	0/35
توان کرنش سختی	0/34	0/32

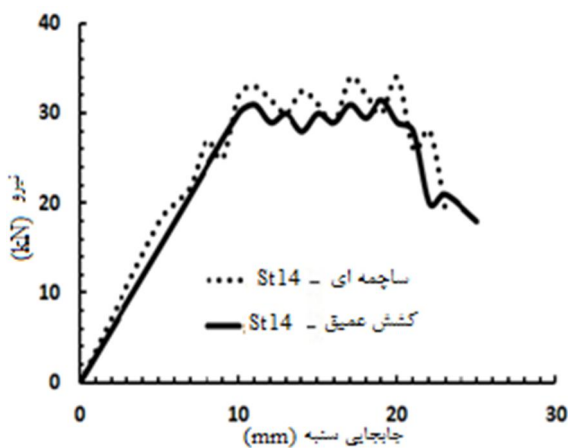
1- Thining



شکل 9 منحنی توزیع ضخامت توسط فرآیندهای ساچمه‌ای و کشش عمیق در شبیه‌سازی



شکل 10 نمودار تجربی نیرو - جابجایی سنبه ورق فولادی توسط فرآیندهای ساچمه‌ای و کشش عمیق

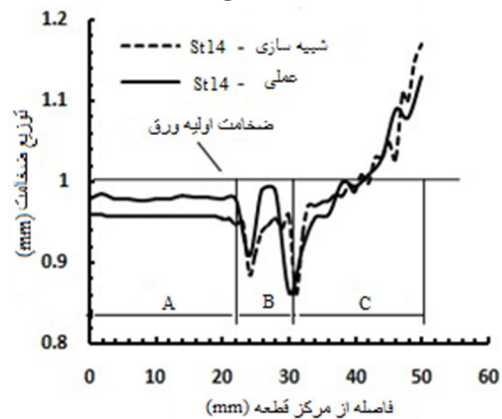


شکل 11 نمودار نیرو - جابجایی سنبه توسط فرآیندهای کشش عمیق و ساچمه‌ای با استفاده از شبیه‌سازی

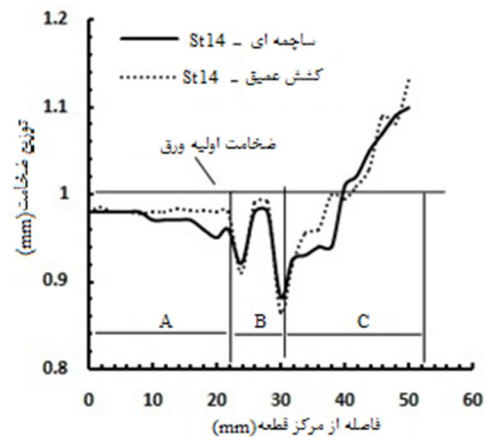
همانطور که از شکل مشاهده می‌شود نیروی شکل‌دهی در حالت ساچمه‌ای بیشتر از کشش عمیق سنتی است. درصد افزایش نیروی فرآیند ساچمه‌ای نسبت به فرآیند کشش عمیق 7/5% می‌باشد. ملاحظه گردید که فرآیند ساچمه‌ای برای هر دو نمودار تجربی و شبیه‌سازی به نیروی بیشتری در مقایسه با فرآیند کشش عمیق نیاز دارد که دلیل آن بخاطر اصطکاک بین سنبه و ساچمه برای شکل‌دهی در فرآیند ساچمه‌ای می‌باشد.

کف قطعه ناحیه (A) تقریباً ثابت است ولی در کشش عمیق ساچمه‌ای با توجه به اینکه ساچمه‌ها حین کشش دوران دارند در نتیجه کشش در تمام نقاط کف یکسان نبوده و هر چقدر به سمت ناحیه (B) نزدیکتر می‌شود نازک‌شدگی بیشتر می‌شود. ناحیه انتهایی (B) بعنوان بحرانی‌ترین ناحیه در هر دو فرآیند می‌باشد. با دور شدن از این ناحیه و وارد شدن به ناحیه (C) ضخامت قطعه در هر دو فرآیند مجدداً افزایش می‌یابد به طوری که در بخش انتهایی آن از مقدار ضخامت اولیه ورق 1 میلی‌متر نیز بیشتر می‌شود. همانطور که در شکل 5 مشاهده می‌شود در ناحیه (C) قطعه تولید شده توسط کشش ساچمه‌ای چروک‌های کوچکی ایجاد شده است. چروک‌های ایجاد شده در این ناحیه بخاطر استفاده از ساچمه و عدم صلبیت کامل می‌باشد.

شکل‌های 10 و 11 به ترتیب منحنی‌های تجربی و شبیه‌سازی نیرو - جابجایی سنبه با استفاده از فرآیندهای کشش عمیق سنتی و کشش عمیق ساچمه‌ای برای ورق فولادی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، نیروی شکل‌دهی در هر دو نمودار تجربی و شبیه‌سازی، با حرکت سنبه افزایش یافته و به حداکثر مقدار خود رسیده و بعد کمی ثابت مانده، سپس به طور محسوس گاهش می‌یابد. کرنش سختی باعث افزایش نیرو می‌شود از طرفی کاهش سطح تماس ورق با ورق‌گیر باعث کم شدن نیرو می‌شود. در ابتدای فرآیند نرخ آهنگ افزایش نیرو بر اثر کرنش سختی از نرخ آهنگ کاهش نیرو بر اثر کاهش سطح مقطع ورق‌گیر بیشتر است در نتیجه نیرو افزایش می‌یابد در یک نقطه این دو مقدار با هم برابر شده و سپس آهنگ افزایش نیرو بر اثر کرنش سختی از آهنگ کاهش نیرو بر اثر کاهش سطح ورق‌گیر کمتر شده در نتیجه نیرو کاهش می‌یابد.



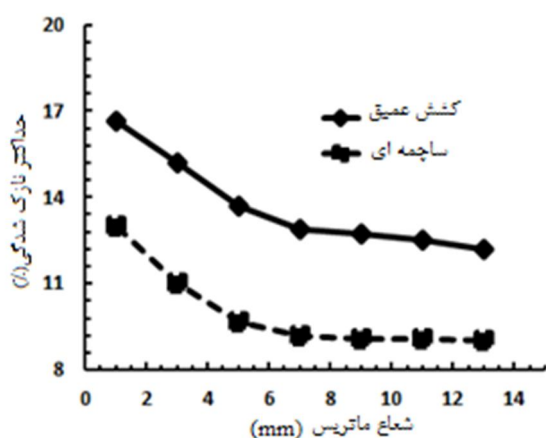
شکل 7 منحنی توزیع ضخامت شبیه‌سازی و تجربی در فرآیند کشش عمیق سنتی



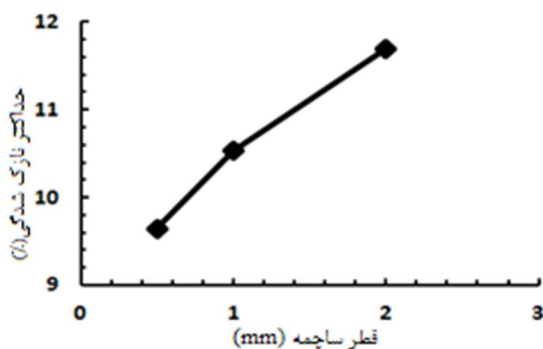
شکل 8 منحنی تجربی توزیع ضخامت توسط فرآیندهای ساچمه‌ای و کشش عمیق

بیشترین کاهش ضخامت قطعه برای ورق فولادی را نشان می‌دهد. همانگونه که از نمودار مشاهده می‌شود با افزایش قطر ساچمه کاهش ضخامت در ناحیه B افزایش می‌یابد، به عبارتی دیگر میزان نازک‌شدگی در ناحیه بحرانی B افزایش می‌یابد.

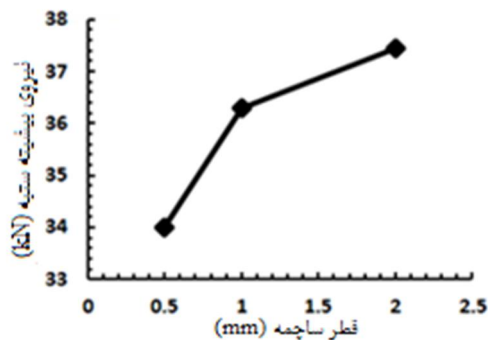
همچنین شکل 15 تأثیر پارامتر قطر ساچمه بر نیروی بیشینه سنبه را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که هر چه قطر ساچمه افزایش یابد نیروی بیشینه سنبه هم افزایش می‌یابد. شکل 16 شماتیکی از تأثیر قطر ساچمه بر نیروی بیشینه سنبه را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش قطر ساچمه، تعداد ساچمه‌ها کاهش می‌یابد، در نتیجه فضای خالی بین ساچمه‌ها بیشتر می‌شود، بنابراین به نیروی بیشتری برای شکل دهی قسمت‌هایی از ورق که فضای خالی بین ساچمه‌ها به وجود آورده نیاز است. هر چه قطر ساچمه‌ها کوچکتر باشد توزیع نیروها یکنواخت‌تر و هر چه توزیع نیروها یکنواخت‌تر باشد نیروی فرم‌دهی کاهش می‌یابد.



شکل 13 منحنی بیشترین نازک‌شدگی فنجان بر حسب شعاع ورودی ماتریس برای ورق فولادی



شکل 14 تأثیر پارامتر قطر ساچمه بر بیشترین کاهش ضخامت قطعه در ناحیه B برای ورق فولادی St14



شکل 15 تأثیر پارامتر قطر ساچمه بر نیروی بیشینه سنبه برای ورق فولادی St14

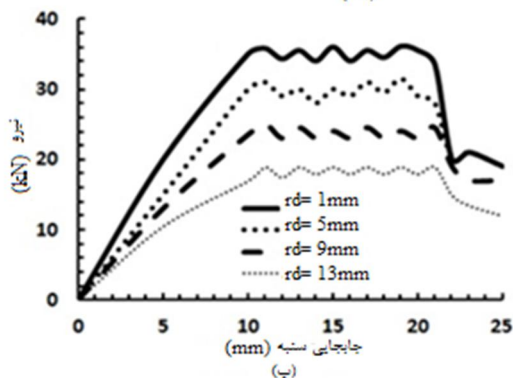
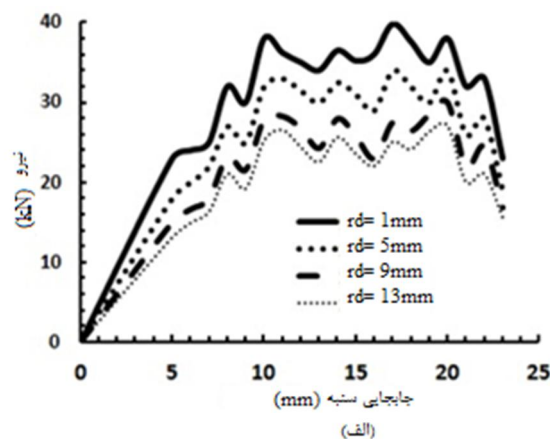
1-4- بررسی تأثیر پارامتر هندسی شعاع ورودی ماتریس

با ثابت نگه داشتن شعاع گوشه سنبه در 4 میلی‌متر و تغییر شعاع ورودی ماتریس (1، 5، 9 و 13 میلی‌متر)، اثر این پارامتر مورد بررسی قرار گرفت. شکل 12 منحنی‌های نیرو-جابجایی سنبه را در شعاع‌های مختلف ورودی ماتریس برای ورق فولادی مورد آزمایش برای فرآیندهای کشش عمیق و ساچمه‌ای نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود، با افزایش شعاع ورودی ماتریس، نیروی لازم برای کشش برای هر دو فرآیند کاهش می‌یابد. علت این کاهش آن است که با افزایش شعاع ورودی ماتریس، مواد فضای بیشتری را برای جریان پیدا کردن به درون حفره ماتریس می‌یابند. از این رو، انرژی کمتری برای هدایت مواد به درون محفظه ماتریس لازم است.

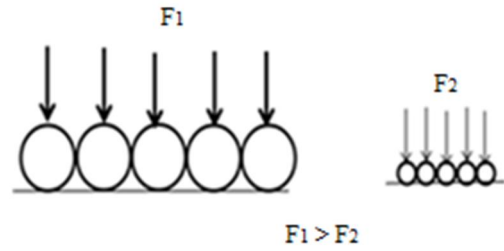
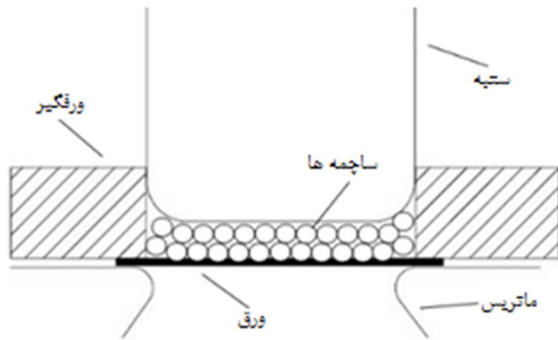
در ادامه اثر شعاع ورودی ماتریس را بر توزیع ضخامت قطعه مورد بررسی قرار گرفت. شکل 13 منحنی بیشترین نازک‌شدگی قطعه را بر حسب شعاع ورودی ماتریس نشان می‌دهد. همانطور که در شکل دیده می‌شود، با افزایش شعاع ورودی ماتریس میزان نازک‌شدگی کاهش می‌یابد. علت آن است که هر چه اندازه شعاع ورودی ماتریس افزایش یابد سهم کشیدگی در شکل‌پذیری ورق کاهش می‌یابد. کاهش کشیدگی در قطعه کار موجب کاهش در نازک‌شدگی آن می‌شود. افزایش شعاع ماتریس تا 6 میلی‌متر تأثیر زیادی روی کاهش ضخامت دارد ولی از آن پس تأثیر آن ناچیز خواهد بود.

2-4- بررسی تأثیر پارامتر قطر ساچمه

قطر ساچمه پارامتر مهمی در فرآیند شکل‌دهی ساچمه‌ای می‌باشد. در این بخش اثر پارامتر قطر ساچمه بر توزیع ضخامت قطعه شکل داده شده و نیروی شکل‌دهی مورد بررسی قرار گرفت. شکل 14 تأثیر پارامتر قطر ساچمه بر



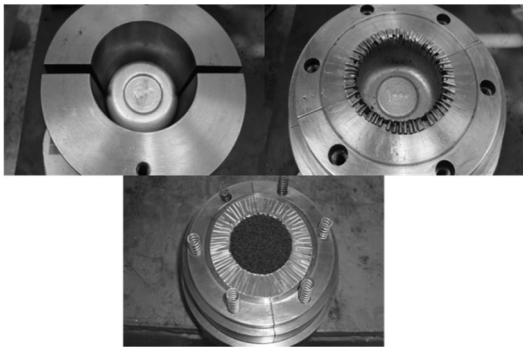
شکل 12 منحنی‌های نیرو-جابجایی سنبه در شعاع‌های مختلف ورودی ماتریس برای ورق فولادی St14 (الف) فرآیند ساچمه‌ای (ب) فرآیند کشش عمیق



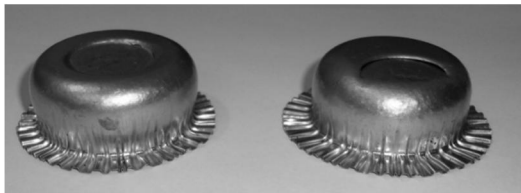
شکل 16 شماتیک تأثیر افزایش قطر ساچمه بر نیروی بیشینه سنبه

3-4- شکل دهی قطعه مخروطی با شیب منفی

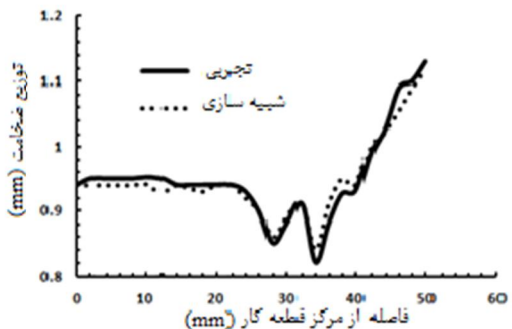
شکل 19 شماتیک قالب استفاده شده برای شکل دهی قطعه مخروطی با شیب منفی ضخامت بدست آمده از شبیه‌سازی و آزمایش تجربی با استفاده از فرآیند کشش عمیق ساچمه‌ای با شیب منفی برای قطعه برنجی را نشان می‌دهد. ملاحظه گردید که تطابق خوبی بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی وجود دارد. همانطور که مشاهده می‌شود روند توزیع ضخامت قطعه با شیب منفی مانند توزیع ضخامت قطعه بدون شیب منفی می‌باشد. در این شکل مشاهده می‌شود با توجه به اینکه زاویه خم در قطعه با شیب منفی بیشتر از قطعه بدون شیب منفی می‌باشد کاهش ضخامت بیشتری در ناحیه شعاع خم (ناحیه B) اتفاق می‌افتد.



شکل 20 نمایی از قرارگیری و شکل نهایی قطعه برنجی در فرآیند ساچمه‌ای



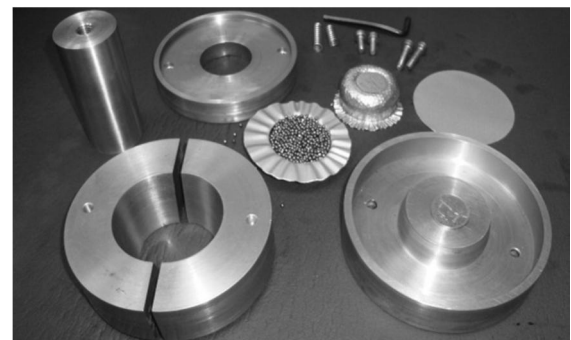
شکل 21 قطعه تولید شده با شیب منفی توسط فرآیند ساچمه‌ای از جنس برنج



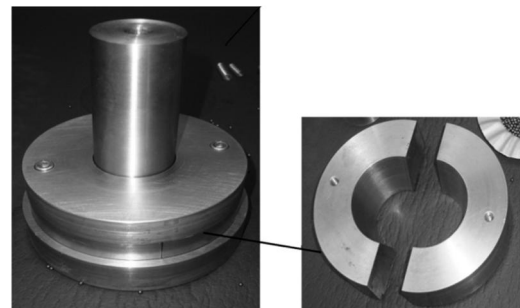
شکل 22 منحنی توزیع ضخامت حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش تجربی با استفاده از فرآیند کشش عمیق ساچمه‌ای با شیب منفی برای ورق برنجی

فرآیند کشش عمیق سنتی اگر چه برای تولید قطعات با استحکام بالا و وزن کم مناسب می‌باشد ولی در تولید بعضی قطعات با شیب منفی و شکل‌های پیچیده استفاده از این روش غیرممکن می‌باشد. برای رفع مشکل فوق از فرآیند کشش عمیق ساچمه‌ای که در آن محیط شکل‌دهی بصورت انعطاف‌پذیر جامد می‌باشد استفاده گردید. در این روش ساچمه بعنوان محیط شکل‌دهنده قدرت را از سنبه به ورق منتقل می‌کند. شکل 17 تصویر انفجاری فرآیند فرم‌دهی ساچمه‌ای برای تولید قطعه با شیب منفی را نشان می‌دهد. یکی از معایب روش ساچمه‌ای با شیب منفی بحث سالم بیرون آوردن قطعه است. چون در این روش قطر ورودی قالب از قطر خروجی آن کوچکتر است نمی‌توان از پران (بیرون انداز) استفاده کرد. برای رفع این عیب باید ماتریس را دوتکه کرد. شکل 18 تصویر ماتریس دوتکه با زاویه منفی 15 درجه را نشان می‌دهد. شماتیک قالب استفاده شده برای تولید قطعه با شیب منفی در شکل 19 نشان داده شده است.

شکل 20 نمایی از قرارگیری و شکل نهایی قطعه برنجی در فرآیند ساچمه‌ای را نشان می‌دهد. از آنجایی که این فرآیند باید توسط ساچمه شکل بگیرد ساچمه همزمان با نیروی پرس وارد آمده به آن باید نیروی کافی برای ایجاد شیب منفی را به ورق وارد کند. شکل 21 قطعات برنجی تولید شده با شیب منفی توسط فرآیند ساچمه‌ای را نشان می‌دهد. شکل 22 منحنی توزیع



شکل 17 تصویر انفجاری فرآیند فرم‌دهی ساچمه‌ای برای تولید قطعه با شیب منفی



شکل 18 تصویر ماتریس دو تکه برای تولید قطعه سالم با شیب منفی

5- نتیجه‌گیری

می‌توان به قطعه با شیب منفی دست پیدا کرد که این امر یکی از مهم‌ترین مزیت‌های فرآیند ساچمه‌ای نسبت به فرآیند کشش عمیق می‌باشد.

در این پژوهش، توزیع ضخامت و نیروی لازم برای شکل‌دهی قطعه مخروطی شکل توسط فرآیندهای کشش عمیق ساچمه‌ای و کشش عمیق سنتی با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود و مراحل آزمایشگاهی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفتند. نتایج بدست آمده از این تحقیق نشان داده است که:

1- فرآیند کشش عمیق سنتی از توزیع ضخامت یکنواخت‌تر و مناسب‌تری نسبت به نمونه کشش عمیق ساچمه‌ای برخوردار می‌باشد ولی حداکثر نازک-شدگی در قطعات مربوط به فرآیند کشش عمیق ساچمه‌ای کمتر از فرآیند کشش عمیق سنتی است.

2- با مقایسه نیروی شکل‌دهی در فرآیند کشش عمیق سنتی و ساچمه‌ای از طریق تجربی و شبیه‌سازی مشخص گردید که نیروی مورد نیاز در فرآیند ساچمه‌ای کمی بیشتر از فرآیند کشش عمیق می‌باشد که دلیلش وجود اصطکاک بین ساچمه‌ها در فرآیند کشش عمیق ساچمه‌ای می‌باشد.

3- با افزایش شعاع ورودی ماتریس، نیروی لازم برای کشش برای هر دو فرآیند کشش عمیق و ساچمه‌ای کاهش می‌یابد، همچنین با افزایش اندازه شعاع ورودی ماتریس میزان نازک‌شدگی کاهش می‌یابد.

4- همچنین در این پژوهش مشخص گردید که در فرآیند ساچمه‌ای

6- مراجع

- [1] M. Bakhshi, A. Demirchi, A. Gorji, The study of geometrical parameters in the form of deep-drawing process for annealed aluminum 1050, *Journal of Tabriz University*, Vol. 34, pp. 11-21, 2007. (In persian)
- [2] C. Özek, M. Bal: "The effect of die/blank holder and punch radiuses limit on drawing ratio in angular deep drawing dies"; *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*; vol.40, pp. 1077-1083; 2009.
- [3] S. Thiruvardhelvan, J. G. Gan, "Drawing of conical cups with friction actuated blank holding", *Journal of Materials Shaping Technology*, Vol. 9, pp. 59-65, 1991.
- [4] Zimniak, Z., Problems of multi-step forming sheet metal process design, *J. Mater. Process. Technol.*, 106, (2000) 152-158.
- [5] A. Yaghoobi, Comparison of Forming Conical Parts by Hydroforming and Conventional Deep Drawing Processes, *Journal of Babol Noshirvani University of Technology*, Vol. 1, pp. 91-97, 2011. (In persian)
- [6] X. Liu, Y. Xu, S. Yuan, Effects of loading paths on hydrodynamic deep drawing with independent radial hydraulic pressure of aluminium alloy based on numerical simulation, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 24, No. 3, pp. 395-399, 2008.
- [7] 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, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol 166, pp 150-161, 2005.
- [8] A. Yingyot, G. Ngalle, T. Altan, Optimizing tube hydroforming using process simulation and experimental verification, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146, pp. 137-143, 2004.