مجله مهندسی مکانیک مدرس، خرداد 1396، دوره 17، شماره 3، ص‌ص 72-78

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

# مطالعه تجربی و عددی اثر پارامترهای فرآیند بر ناحیه کاری در شکل‌دهی قطعه مخروطی دولایه به روش کشش عمیق هیدرومکانیکی

مجید مولائی[1]، حامد دیلمی‌عضدی[2*]، مهدی صفری[2]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

* اراک، صندوق‌پستی 38135-1177، hdazodi@arakut.ac.ir

**اطلاعات مقاله**

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 28 آذر 1395

پذیرش: 19 بهمن 1395

ارائه در سایت: 11 اسفند 1395

*کلید واژگان:*

کشش عمیق هیدرومکانیکی

ورق دولایه

قطعه مخروطی

روش اجزای محدود

ناحیه ایمن‌کاری

**چکیده**

کشش عمیق هیدرومکانیکی یک فرآیند پیشرفته شکل‌دهی فلزات است که در آن از فشار بالای سیال جهت شکل‌دادن قطعات پیچیده استفاده می‌شود. قطعات مخروطی از جمله قطعاتی است که به دلیل سطح تماس کم میان پیشانی سنبه و ورق، امکان نازک‌شدگی و در نتیجه پارگی در مراحل شکل‌دهی آن‌ها زیاد است. در این مقاله به بررسی تجربی و عددی فرآیند شکل‌دهی هیدرومکانیکی یک قطعه مخروطی دولایه از جنس‌های آلومینیوم 3003 و فولاد IF پرداخته می‌شود. بدین منظور اثر پارامترهای مختلف فرآیند از جمله ضریب اصطکاک، ترتیب چیدمان لایه‌ها و همچنین نسبت ضخامت لایه‌ها بر ناحیه ایمن‌کاری مورد مطالعه قرار می‌گیرد. ناحیه ایمن‌کاری در این فرآیند، محدوده مناسب فشار محفظه‌ای و نسبت کشش را برای دستیابی به قطعه بدون پارگی مشخص می‌کند. نتایج نشان می‌دهد کاهش اصطکاک میان ورق و ورقگیر، افزایش ضریب اصطکاک بین سنبه و ورق، افزایش ضخامت لایه با شکل‌پذیری بالاتر و همچنین قرارگیری فولاد به عنوان لایه بیرونی، سبب افزایش نسبت حدی کشش و گسترده‌تر شدن محدوده کاری مجاز جهت تولید قطعه مخروطی دولایه بدون پارگی می‌شود. در نهایت با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از بررسی تجربی و شبیه‌سازی عددی انطباق خوبی بین نتایج مشاهده شد.

# Experimental and Numerical Study on Effects of Process Parameters on Working Zone in Hydro-mechanical Deep Drawing of Two-layer Conical Parts

**Majid Molaei[1], Hamed Deilami Azodi[1*], Mehdi Safari[1]**

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

* P.O.B. 38135-1177 Arak, Iran, hdazodi@arakut.ac.ir

**ARTICLE INFORMATION**

Original Research Paper

Received 18 December 2016

Accepted 07 February 2017

Available Online 01 March 2017

*Keywords:*

Hydro-mechanical deep drawing

Two-layer sheet

Conical part

Finite element method

Safe working zone

**ABSTRACT**

Hydro-mechanical deep drawing is an advanced process in metal forming in which high pressure fluid is used to form complicated parts. Conical parts are a kind of complex parts in which there is a high possibility of thinning and rupture during the forming process due to low contact area between the punch head and the blank. In this paper, the Hydro-mechanical deep drawing of Al3003-IF Steel two-layer conical parts is studied using the experimental and numerical approaches. The effects of process parameters such as friction coefficient, arrangement of layers and thickness ratio of two-layer sheet on working zone are investigated. Allowable working zone in this process indicates the applicable range of chamber pressure and drawing ratio to achieve a part without rupture. The results show that by decreasing the friction between blank and blank holder, increasing the friction between blank and punch, increasing the thickness of high formable layer and setting IF steel layer as outer layer increase the limit drawing ratio and make the allowable working zone more extensive. Finally, comparison of the results obtained from experimental investigation and numerical simulation shows a good agreement between the results.

## 1- مقدمه

فرآیند شکل‌دهی قطعات مخروطی به طور قابل ملاحظه‌ای پیچیده‌تر از شکل‌دهی قطعات استوانه‌ای است. این امر به دلیل سطح تماس کم میان پیشانی سنبه و ورق است که نازک‌شدگی و بروز پارگی را در مراحل شکل‌دهی افزایش می‌دهد. در این میان شکل‌دهی قطعات مخروطی دو لایه با توجه به امکان بهره‌گیری از خواص مکانیکی، شیمیایی، حرارتی و الکتریکی هر دو جنس از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در سال‌های اخیر مطالعات مختلفی در زمینه شکل‌دهی قطعات دو لایه صورت گرفته است. جلالی و همکاران [1] تأثیر خواص مکانیکی آلومینیوم Al1100/ فولاد St13 را بر شکل‌پذیری ورق‌های دولایه بررسی کردند و دریافتند که حد شکل‌دهی ورق‌های دولایه بین منحنی‌های حد شکل‌دهی ورق‌های تک لایه آلومینیومی و فولادی است. پارسا و همکاران [2] تأثیر نسبت ضخامت‌ها و ترتیب

**برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:**

**Please cite this article using:**

M. Molaei, H. Deilami Azodi, M. Safari, Experimental and Numerical Study on Effects of Process Parameters on Working Zone in Hydro-mechanical Deep Drawing of Two-layer Conical Parts, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 72-78, 2017 (in Persian)

قرارگیری لایه‌ها را بر نسبت کشش در فرآیند کشش عمیق و بازکشش معکوس فنجان استوانه‌ای آلومینیوم- فولاد بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در کشش عمیق برای دستیابی به بیشترین نسبت کشش، لایه فولادی باید در تماس با سنبه قرار گیرد. این در حالی است که در بازکشش معکوس عکس این حالت رخ می‌دهد. باقرزاده و همکاران [3] به پیش‌بینی تنش و وقوع ناپایداری در فرآیند شکل‌دهی فنجان استوانه‌ای دولایه آلومینیوم- فولاد پرداختند. روابط تحلیلی استخراج شده از پژوهش آن‌ها برای پیش‌بینی ناحیه ایمن‌کاری تطابق مناسبی را با نتایج آزمایش‌های تجربی نشان داد. لانگ و همکاران [4] توزیع ضخامت ورق‌های سه لایه با لایه میانی بسیار نازک را در فرآیند هیدروفرمینگ به‌صورت تجربی و عددی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که توزیع ضخامت لایه‌ها در حالت فولاد/ فولاد/ آلومینیوم بهتر از حالت آلومینیوم/ آلومینیوم/ فولاد است، همچنین آن‌ها دریافتند که با افزایش ضریب اصطکاک بین لایه‌ها شکل‌پذیری لایه میانی افزایش خواهد یافت. مروتی و همکاران [5] پدیده چروکیدگی را در کشش عمیق قطعات دو لایه آلومینیوم/ فولاد بررسی و با چروکیدگی قطعات تک‌لایه مقایسه کردند. نتایج آن‌ها اهمیت نیروی ورق‌گیر برای جلوگیری از ایجاد چروکیدگی در ناحیه فلنج را نشان داد. جلیل و همکاران [6] مدلی تحلیلی برای پیش‌بینی فشار بحرانی در شکل‌دهی قطعات مخروطی دولایه آلومینیوم 1050/ فولاد St13 به روش کشش عمیق هیدرودینامیکی ارائه کرده، تأثیر پارامترهای فرآیند از جمله شعاع نوک سنبه و ضریب اصطکاک را بر فشار بحرانی و ارتفاع کشش بررسی کردند. ژانگ و همکاران [7] فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی فنجان مخروطی با مقطع مربعی را به صورت تجربی و عددی مطالعه کرده و پدیده گلویی‌شدن، توزیع ضخامت و چروکیدگی را بررسی کردند. در تحقیقی دیگر باقرزاده و همکاران [8] بررسی تجربی و عددی بر پارامترهای مؤثر بر ناحیه کاری فنجان استوانه‌ای دولایه آلومینیوم 1050– فولاد St13 انجام دادند و تأثیر پارامترهای فرآیند را بر ناحیه کاری و توزیع کرنش بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که ناحیه ایمن‌کاری با افزایش نسبت کشش و کاهش ضخامت فولاد محدودتر می‌شود.

هدف این مقاله تعیین ناحیه ایمن‌کاری برای شکل‌دهی فنجان مخروطی دو لایه آلومینیوم 3003/ فولاد IF در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی است. اثر پارامترهای فرآیند شامل فشار محفظه‌ای، ضریب اصطکاک، نسبت ضخامت‌ها و چیدمان لایه‌ها بر ناحیه کاری بررسی می‌شود.

## 2- شبیه‌سازی اجزای محدود

ارائه یک مدل صحیح و تأیید شده با نتایج تجربی جهت دستیابی به نتایج قابل اعتماد در شبیه‌سازی‌های عددی از اهمیت بالایی برخوردار است. این عمل برای امکان‌سنجی تولید، تحلیل و بهینه‌سازی کیفیت محصول نهایی و قابلیت اطمینان بودن فرآیند انجام می‌شود [9]. شبیه‌سازی عددی فرآیند با استفاده از حلگر صریح[1] در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس[2] انجام می‌شود. شکل 1 مجموعه شبکه‌بندی‌شده ورق و قالب را نشان می‌دهد. به دلیل تقارن شکل نهایی نسبت به دو صفحه XY و YZ تنها یک چهارم از قالب و ورق مدل‌سازی می‌شود. ورق به صورت جسم سه‌بعدی[3] و تغییر شکل‌پذیر با المان‌های از نوع C3D8R بوده و المان‌های اجزای صلب قالب از نوع R3D4 است. از نمودار نیروی سنبه برحسب تعداد المان‌ها برای بهینه‌سازی تعداد المان‌های مورد استفاده در ورق‌ها استفاده می‌شود. همان‌طور که در شکل 2 مشخص است به ازای تعداد 2225 المان حل همگرا می‌شود، همچنین تعداد المان‌ها در راستای ضخامت 4 المان جهت جلوگیری از بروز عیوب قفل برشی و ساعت شنی در نظر گرفته می‌شود. در شبیه‌سازی‌ها به‌جای مدل‌سازی سیال اثر آن به صورت اعمال یک فشار یکنواخت بر سطح ورق مدل شده است. مسیرهای فشار اعمال شده در شبیه‌سازی‌های عددی مطابق شکل 3 است. بخش OA از مسیرهای فشار مربوط به فشار پیش بالج است که پیش از حرکت سنبه به سطح زیرین ورق اعمال می‌شود، سپس مطابق مسیر AB فشار محفظه‌ای با حرکت سنبه به داخل محفظه قالب افزایش یافته تا به مقدار تنظیم شده برای شیر کنترل فشار نهایی برسد. پس از آن شیر محدودکننده فشار باز شده و ادامه فرآیند تحت فشار ثابت انجام می‌شود.

مشخصات آلیاژ آلومینیوم Al-3003 و فولاد IF استفاده شده در این پژوهش در جدول 1 آورده شده است. شکل و ابعاد قالب و مدار هیدرولیکی فرآیند در جدول 2 و شکل 4 نشان داده شده است. با توجه به مراجع [11,10] ضرایب اصطکاک میان ورق و ورقگیر و سنبه و ورق به ترتیب 0.1 و 0.05 در نظر گرفته می‌شود.

در تمامی شبیه‌سازی‌ها مقدار انرژی جنبشی فرآیند با مقدار انرژی درونی جهت اطمینان از شبه استاتیک بودن حل مقایسه می‌شود. در تمامی شبیه‌سازی‌ها مقدار انرژی جنبشی همواره کمتر از 5% انرژی درونی مشاهده شده است.

## 3- معیار شکست

در این پژوهش حداکثر میزان نازک‌شدگی ورق به عنوان معیار واماندگی[4] در

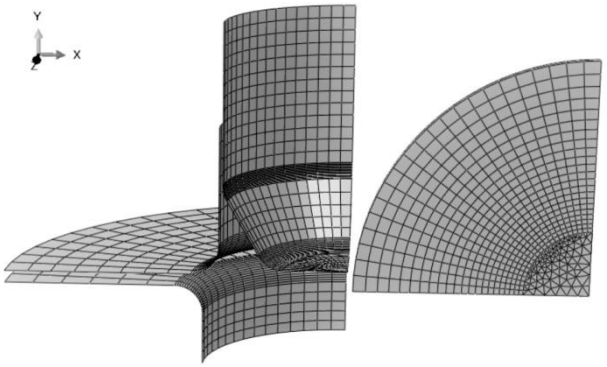


**Fig. 1** Finite element model of process

**شکل 1** مدل اجزای محدود فرآیند

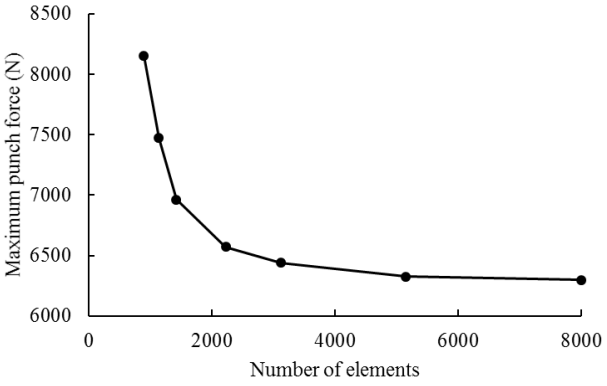


**Fig. 2** Variation of maximum punch force versus number of elements

**شکل 2** تغییرات بیشینه نیروی سنبه برحسب تعداد المان‌ها

[1] Explicit
[2] Abaqus
[3] Solid
[4] Failure

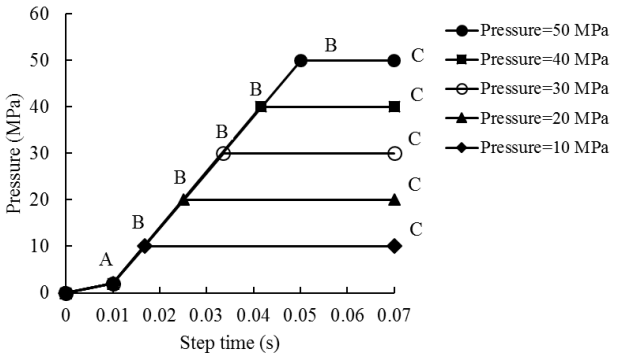


**Fig. 3** Employed pressure paths in the numerical simulations

**شکل 3** مسیرهای فشار سیال در شبیه‌سازی‌های عددی

**جدول 1** خواص مکانیکی ورق‌های آلومینیوم 3003 و فولاد IF

**Table 1** Mechanical properties of Al-3003 and IF steel sheets

| خواص (یکا) | نماد | آلومینیوم 3003 | فولاد IF |
|---|---|---|---|
| ضخامت(mm) | $t$ | 0.6 | 0.7 |
| مدول یانگ (GPa) | $E$ | 70 | 210 |
| ضریب پواسون | $\nu$ | 0.33 | 0.3 |
| تنش تسلیم (MPa) | $\sigma_y$ | 62 | 140 |
| استحکام کششی(MPa) | $\sigma_{UT}$ | 116 | 289 |
| توان کرنش سختی | $n$ | 0.25 | 0.3 |

**جدول 2** ابعاد مجموعه قالب و سنبه

**Table 2** Dimensions of die set and the Punch

| بعد (یکا) | نماد | اندازه |
|---|---|---|
| قطر بزرگ سنبه (mm) | $D_p$ | 32 |
| قطر کوچک سنبه (mm) | $d_p$ | 16 |
| زاویه راس سنبه (degree) | | 60 |
| شعاع سر سنبه (mm) | $r_p$ | 3 |
| قطر دهانه ی ورودی ماتریس کشش (mm) | $D_d$ | 37 |
| شعاع ورودی ماتریس کشش (mm) | $r_d$ | 3.5 |

نظر گرفته شده است [12]. حداکثر مقدار نازک‌شدگی با محاسبه کرنش ضخامتی بیشینه $(\varepsilon_t)$ مطابق رابطه (1) تعیین شده است.

$$\varepsilon_t = \ln\left(\frac{t_f}{t_0}\right) \quad (1)$$

در رابطه (1) $t_0$ ضخامت اولیه ورق و $t_f$ ضخامت نهایی ورق پس از شکل‌دهی است.

با توجه به برقراری شرایط کرنش صفحه‌ای در دیواره قطعه $(d\varepsilon_\theta = 0)$، حداکثر کرنش در راستای ضخامت ورق $(\varepsilon_{t\,\mathrm{Max}})$ مطابق رابطه (2) محاسبه می‌شود [13].

$$\varepsilon_{t\,\mathrm{Max}} = \ln\left[1 + (23.3 + \frac{360}{25.4}t_0)(\frac{n}{0.21})\right] \quad (2)$$

در آن $n$ توان کرنش سختی ورق است.

## 4- مطالعه تجربی

شکل و ابعاد قالب و مدار هیدرولیکی مورد استفاده در آزمایش‌های تجربی جهت اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی مطابق جدول 2 و شکل 4 بوده، تصویر تجهیزات مورد استفاده در شکل 5 نشان داده شده است. فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی با کمک دستگاه پرس هیدرولیک 40 تن و با سرعت 4mm/s انجام گرفته است. فرآیند برای نسبت‌های کشش مختلف و تحت فشارهای متفاوت برای تولید قطعه بدون پارگی انجام شده است. فشار نهایی محفظه و فشار پیش بالج توسط شیرهای محدودکننده فشار تنظیم می‌شود. آزمایش‌ها بر ورق دولایه ساخته شده از لایه‌های آلیاژ آلومینیوم Al-3003 و فولاد IF انجام گرفته است. خواص مکانیکی ورق‌های مورد استفاده با استفاده از آزمون کشش استاندارد مطابق جدول 1 استخراج شده است. جهت اتصال ورق‌های آلومینیوم Al-3003 و فولاد IF و ساخت ورق دولایه، ابتدا سطوح ورق‌ها اکسیدزدایی، پلیسه‌گیری و چربی‌زدایی شده و سپس با استفاده از چسب پلی‌اورتان یکدیگر متصل شده‌اند.

آزمایش‌ها برای بررسی اهمیت ترتیب چیدمان لایه‌ها در دو حالت Al/St (آلومینیوم به‌عنوان لایه‌ای که با سنبه در تماس است) و St/Al (فولاد IF به عنوان لایه در تماس با سنبه) انجام شده است. شکل 6 تعدادی از نمونه‌های شکل‌داده شده به‌صورت تجربی و عددی را در هر دو حالت ترتیب چیدمان لایه ها نشان می‌دهد.

## 5- بحث و نتیجه‌گیری

### 5-1- ناحیه کاری به‌دست‌آمده از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی

در شکل 7 نمونه‌ای از قطعات مخروطی دولایه Al/St شکل داده شده در آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی نشان داده شده است. با هدف تعیین ناحیه ایمن‌کاری در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی ورق دولایه، مقادیر مجاز فشار محفظه در نسبت‌های کشش مختلف برای جلوگیری از بروز پارگی در قطعه به‌صورت تجربی و عددی استخراج شد. فشار پیش‌بالج اعمال ده در این آزمایش‌ها مقدار ثابت 4 مگاپاسکال در نظر گرفته شد. شکل‌های8 و 9 ناحیه ایمن‌کاری یا محدوده قابل قبول فشار سیال به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌های عددی و آزمایش‌های تجربی برای تولید قطعه بدون پارگی در نسبت‌های کشش مختلف را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است با

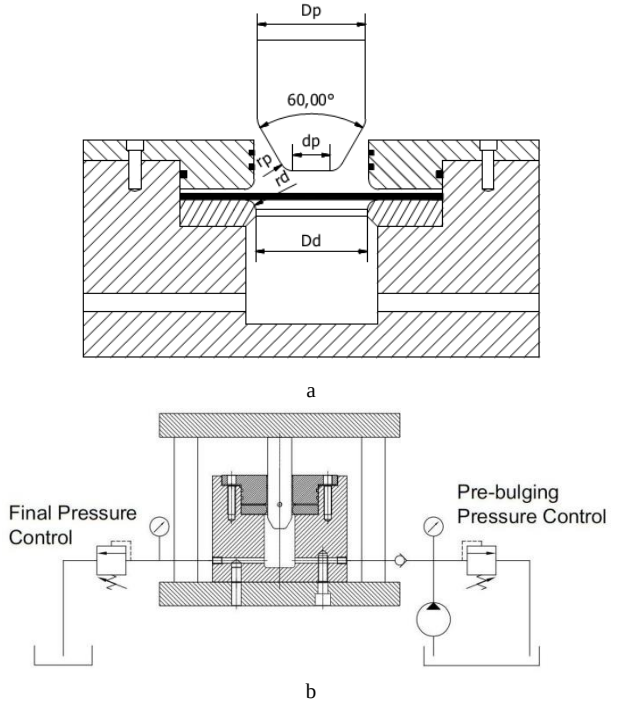


**Fig. 4** a- The geometry of used die set, b- Hydraulic circuit of process

**شکل 4** الف- هندسه مجموعه قالب مورد استفاده، ب- مدار هیدرولیکی فرآیند

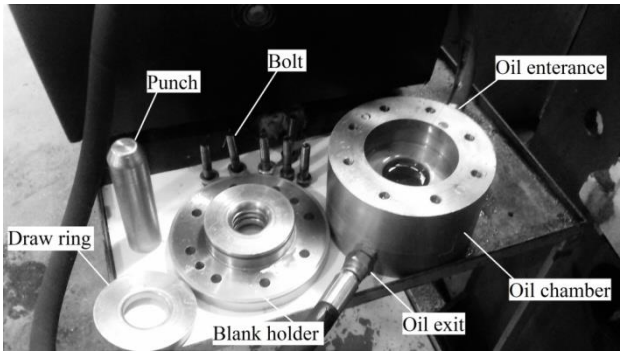


**Fig. 5** Experimental setup

**شکل 5** تجهیزات تجربی

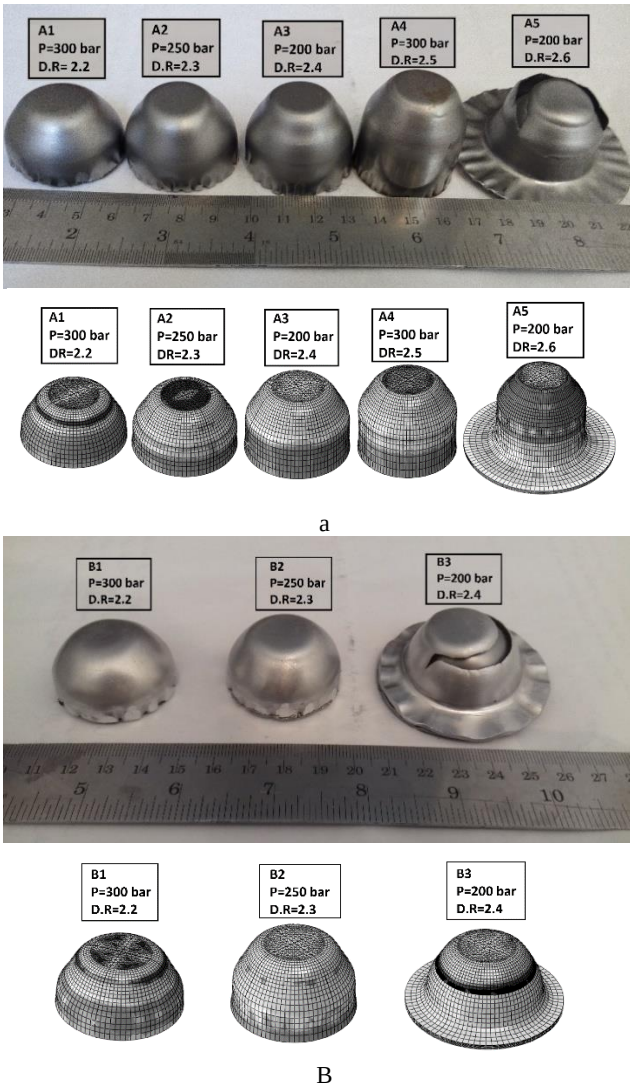


**Fig. 6** Some specimens formed in experimental and numerical studies in cases of, a- Al/St, b- St/Al.

**شکل 6** برخی نمونه‌های شکل داده شده در آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی در حالت‌های الف- Al/St، ب- St/Al

افزایش نسبت کشش، بازه قابل قبول فشار محفظه برای تولید قطعه سالم بدون پارگی محدودتر شده، کنترل فرآیند جهت جلوگیری از بروز پارگی دشوارتر می‌شود. مطابق نتایج نشان داده شده در شکل‌های 8 و 9 نسبت کشش به‌دست‌آمده در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی به‌طور قابل ملاحظه نسبت به بیشینه نسبت کشش قابل دستیابی در فرآیند کشش عمیق سنتی (فشار محفظه‌ای صفر) در هر دو حالت Al/St و St/Al بهبود یافته است. در شکل 10 نیز مقایسه‌ای بین نتایج تجربی و عددی در حالت‌های مختلف قرارگیری لایه‌ها ارائه شده که نشان‌دهنده انطباق مناسب نتایج تجربی و عددی است.

### 5-2- بررسی اثر اصطکاک بر ناحیه مجاز کاری

اصطکاک بین ورق با اجزاء مختلف قالب اثرات متفاوتی بر محدوده کاری در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی دارد. شکل 11 تأثیر ضریب اصطکاک در ناحیه تماس بین ورق و ورقگیر را بر محدوده مجاز فشار محفظه نشان می‌دهد. مطابق نتایج افزایش اصطکاک بین ورق و ورقگیر نسبت حدی کشش

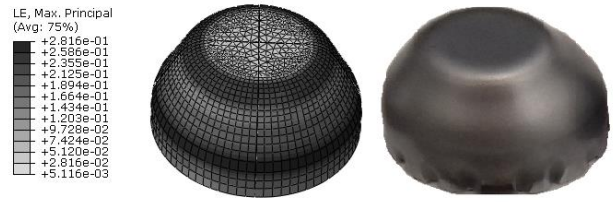


**Fig. 7** Comparison of specimens formed in experiment and numerical simulation (Al/St, Pre-bulging pressure: 3MPa, Final pressure: 20MPa, Drawing ratio: 2)

**شکل 7** مقایسه نمونه شکل داده‌شده در بررسی تجربی و شبیه‌سازی عددی (حالت Al/St، فشارپیش بالج: 3 MPa، فشار نهایی: 20MPa، نسبت کشش: 2)

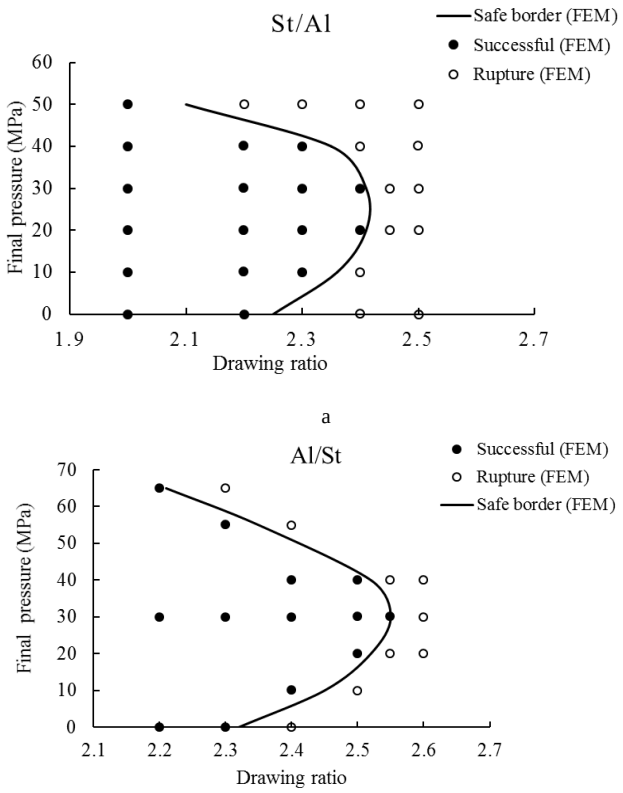


**Fig. 8** Working zones extracted from numerical simulations in cases of: (a) St/Al, (b) Al/St.

**شکل 8** نواحی کاری استخراج شده از شبیه‌سازی‌های عددی برای حالت‌های الف- St/Al، ب- Al/St (b)

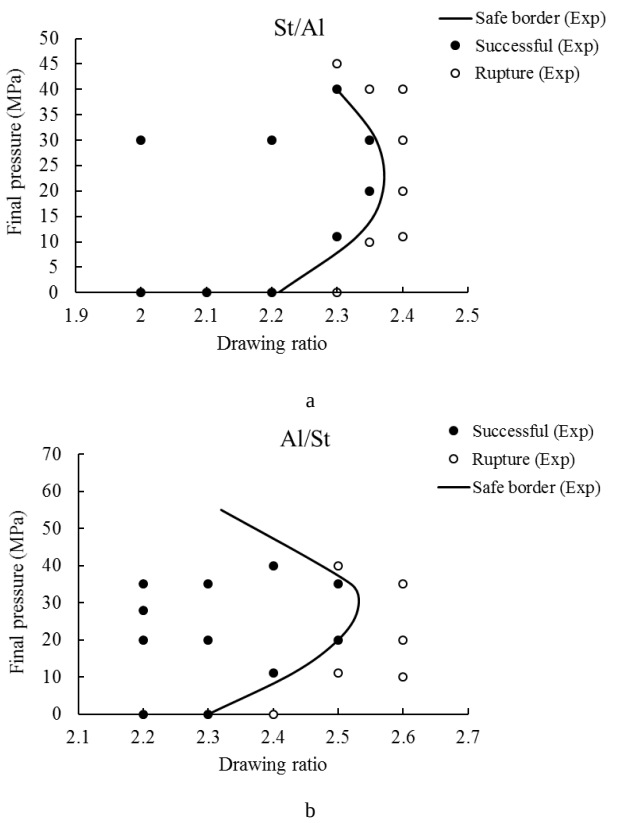


**Fig. 9** Working zones extracted from experiments in cases of: a- St/Al, b- Al/St.

**شکل 9** نواحی کاری استخراج شده از آزمایش‌های تجربی برای حالت‌های الف- St/Al، ب- Al/St (b)

را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داده، ناحیه کاری برای تولید قطعه سالم را محدودتر می‌کند. کاهش نسبت کشش حدی با دلیل افزایش اصطکاک در ناحیه فلنج ناشی از ممانعت ایجادشده در جریان ورق و در نتیجه افزایش نازک شدگی و احتمال پارگی است. چنان‌که در شکل 11 دیده می‌شود اثر اصطکاک بر محدوده مجاز کاری در فشارهای محفظه‌ای بالا مشهودتر است.

همان‌گونه در شکل 12 نشان داده شده اصطکاک بین سنبه و ورق اثر متفاوتی بر محدوده کاری و نسبت حدی کشش دارد. افزایش ضریب اصطکاک بین سنبه و ورق، سبب افزایش نسبت حدی کشش و گسترده‌ترشدن محدوده فشار کاری مجاز جهت تولید قطعه مخروطی دولایه بدون پارگی می‌شود. دلیل این امر گیرش بهتر ورق توسط سنبه هنگام انجام فرآیند و در نتیجه کاهش نازک‌شدگی و درنهایت به تعویق افتادن پارگی است.

### 5-3- بررسی اثر نسبت ضخامت ورق دولایه بر روی ناحیه مجاز کاری

شکل 13 ناحیه مجاز کاری در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی قطعه مخروطی دولایه را در نسبت‌های ضخامت مختلف نشان می‌دهد. با توجه به شکل ناحیه ایمن‌کاری با افزایش ضخامت لایه با استحکام بالاتر (فولاد IF) بزرگ‌تر شده و دستیابی به نسبت‌های کشش بالاتر امکان‌پذیر خواهد شد.

### 5-4- بررسی توزیع ضخامت در کشش عمیق هیدرومکانیکی قطعه مخروطی دولایه

هندسه قطعه جهت بررسی توزیع ضخامت قطعه مخروطی دولایه مطابق شکل 14 به نواحی مختلف تقسیم شده است.

در شکل 15 توزیع ضخامت لایه‌ها در دو حالت مختلف قرارگیری لایه‌ها نشان داده شده است. مطابق نتایج در هر دو حالت Al/St و St/Al بیشترین نازک‌شدگی در ناحیه شعاع نوک مخروط (ناحیه B) اتفاق می‌افتد و از این‌رو این ناحیه را می‌توان به‌عنوان بحرانی‌ترین ناحیه قطعه در نظر گرفت. دلیل این مسئله می‌تواند برای اثرات خم‌کاری ایجادشده در این ناحیه باشد [14].

نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد میزان کاهش ضخامت لایه بیرونی (لایه‌ای که در تماس با سنبه نیست)در هر دو حالت Al/St و St/Al بیشتر بوده؛ بنابراین قرارگیری لایه با استحکام بالاتر به‌عنوان لایه بیرونی جهت دستیابی به قطعه مخروطی دولایه با نسبت کشش بالاتر مناسب‌تر است.

## 6- نتیجه‌گیری

در این مقاله فرآیند شکل‌دهی قطعه مخروطی دولایه آلومینیوم Al-3003 و فولاد IF به روش کشش عمیق هیدرومکانیکی به صورت تجربی و عددی مورد مطالعه قرار گرفت. محدوده فشار مجاز کاری جهت جلوگیری از بروز پارگی در قطعه با استفاده از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی تعیین و اثر عوامل مختلف فرآیند بر ناحیه مجاز فشار محفظه بررسی شد. همچنین توزیع ضخامت لایه‌ها در قطعه مخروطی دولایه شکل‌داده شده مورد مطالعه قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده عبارت است از:

1- مقایسه محدوده مجاز کاری در هر دو حالت قرارگیری لایه‌ها نشان‌دهنده تطابق مناسب بین نتایج تجربی و عددی بوده است.

2- با افزایش نسبت کشش، بازه قابل قبول فشار محفظه برای تولید

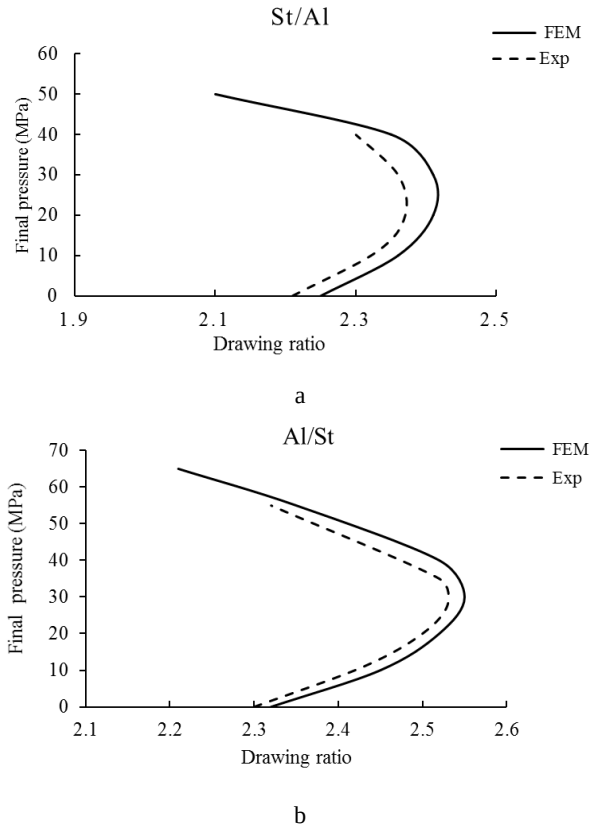


**Fig. 10** Comparison of working zones obtained from experiments and numerical simulations in cases of a- St/Al, b- Al/St.

**شکل 10** مقایسه نواحی کاری به‌دست‌آمده از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازهای عددی برای حالت‌های الف- St/Al، ب- Al/St (b)

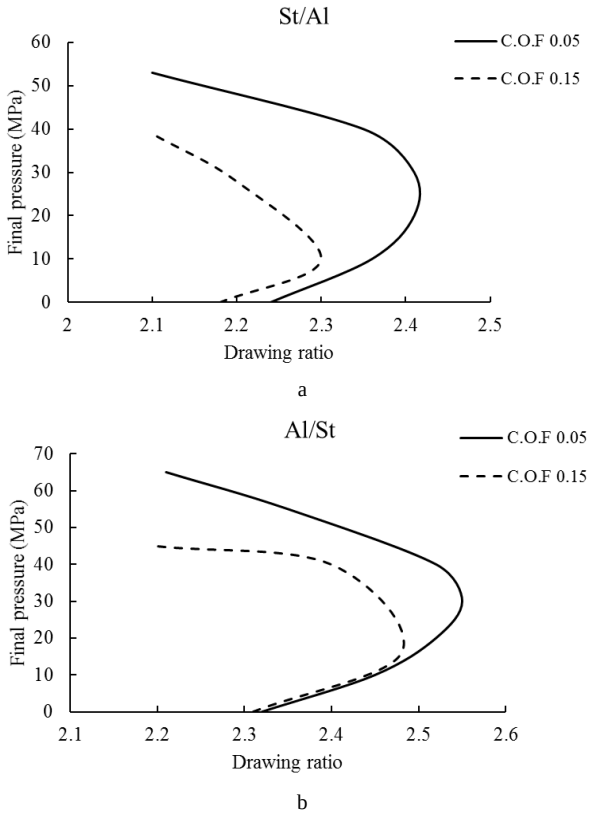


**Fig. 11** The effect of friction coefficient between blank and blank holder on working zone in numerical approach in cases of a- St/Al, b- Al/St.

**شکل 11** اثر اصطکاک بین ورق و ورقگیر بر ناحیه کاری در روش عددی برای حالت‌های الف- St/Al، ب- Al/St

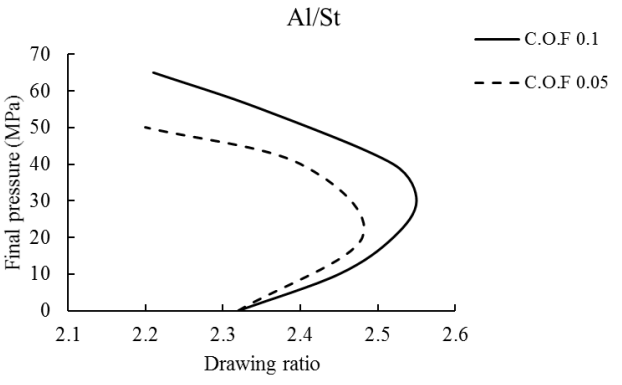


**Fig. 12** The effect of friction coefficient between blank and punch on working zone in numerical approach

**شکل 12** اثر اصطکاک بین ورق و سنبه بر ناحیه کاری در روش عددی

قطعه سالم بدون پارگی محدودتر شده، کنترل فرآیند جهت جلوگیری از بروز پارگی دشوارتر می‌شود، همچنین نسبت کشش به‌دست‌آمده در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی به‌طور قابل ملاحظه نسبت به حداکثر نسبت کشش قابل دستیابی در فرآیند کشش عمیق سنتی بهبود می‌یابد.

3- افزایش اصطکاک بین ورق و ورقگیر نسبت حدی کشش را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داده، ناحیه کاری برای تولید قطعه سالم را محدودتر می‌کند.

4- افزایش ضریب اصطکاک بین سنبه و ورق سبب افزایش نسبت حدی کشش و گسترده‌تر شدن محدوده فشار کاری مجاز جهت تولید قطعه مخروطی دولایه بدون پارگی می‌شود.

5- نتایج نشان داد با افزایش ضخامت لایه با استحکام بالاتر (فولاد IF)، ناحیه ایمن‌کاری بزرگ‌تر شده، دستیابی به نسبت‌های کشش بالاتر امکان‌پذیر خواهد شد.

6- مطالعه توزیع ضخامت قطعه مخروطی دولایه نشان داد بیشترین نازک‌شدگی در ناحیه شعاع نوک مخروط در هر دو حالت Al/St و St/Al اتفاق می‌افتد، از این‌رو این ناحیه را می‌توان به‌عنوان بحرانی‌ترین ناحیه قطعه در نظر گرفت.

7- براساس نتایج به‌دست‌آمده میزان کاهش ضخامت لایه بیرونی (لایه‌ای که در تماس با سنبه نیست) در هر دو حالت Al/St و St/Al بیشتر بوده؛ بنابراین قرارگیری لایه با استحکام بالاتر به‌عنوان لایه بیرونی جهت دستیابی به قطعه مخروطی دولایه با نسبت کشش بالاتر مناسب‌تر است.

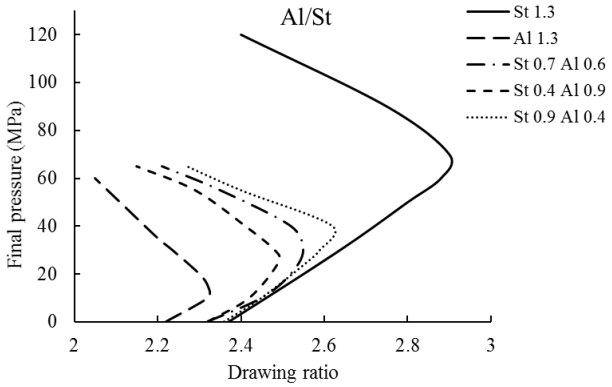


**Fig. 13** The effect of thickness ratio of two-layer sheet on working zone in numerical approach

**شکل 13** اثر نسبت ضخامت ورق دولایه بر ناحیه کاری در روش عددی

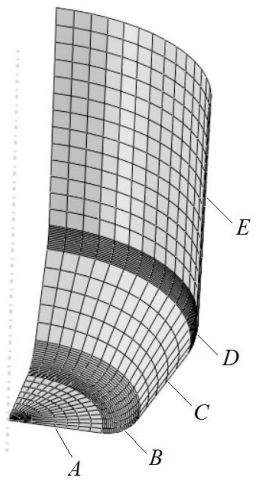


**Fig. 14** Various regions of formed conical specimen

**شکل 14** نواحی مختلف قطعه مخروطی شکل داده‌شده

propertiesof components on formability of two-layer metallic sheets, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 66, No. 5, pp. 809–823, 2013.
[2] M. H. Parsa, K. Yamaguchi, N. Takakura, Redrawing analysis of aluminum-stainless-steel laminated sheet using FEM simulations and experiments, *Mechanical Sciences*, Vol. 43, No. 10, pp. 2331–2347, 2001.
[3] S. Bagherzadeh, B. Mollaei Dariani, K. Malekzadeh, Theoretical study on hydro-mechanical deep drawing process of bimetallic sheets and experimental observations, *Materials Processing Technology*, Vol. 212, No. 9, pp. 1840–1849, 2012.
[4] L. Lang, J. Danckert, K. B. Nielsen, Multi-layer sheet hydroforming: Experimental and numerical investigation into the very thin layer in the middle, *Materials Processing Technology*, Vol. 170, No. 3, pp. 524–535, 2005.
[5] M. R. Morovvati, A. Fatemi, M. Sadighi, Experimental and finite element investi-gation on wrinkling of circular single layer and two-layer sheet metals in deepdrawing process, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 54, No. 1, pp. 113–121, 2011.
[6] A. Jalil, M. Hoseinpour Gollo, M. M. Sheikhi, S. M. H. Seyedkashi, Hydrodynamic deep drawing of double layered conical cups, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 26, No. 1, pp. 237–247, 2016.
[7] S. H. Zhang, J. Danckert, Development of Hydro-mechanical Deep Drawing, *Materials Processing Technology*, Vol. 83, No. 1-3, pp. 14–25, 1998.
[8] S. Bagherzadeh, M. J. Mirnia, B. Mollaei Dariani, Numerical and experimental investigations of hydro-mechanical deep drawing process of laminated aluminum/steel sheets, *Manufacturing Processes*, Vol. 18, pp. 131–140, 2015.
[9] J. O. Hallquist, *LS-Dyna 970 theoretical manual*, pp. 1.1-1.10, California: Livermore Software Technology Corporation, 1998.
[10] A. Fazli, B. Mollaei Dariani, Parameter study of the axisymmetric hydrome-chanical deep drawing process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 220, No. 12, pp. 1937–1944, 2006.
[11] S. H. Zhang, M. R. Jensen, K. B. Nielsen, J. Danckert, L. H. Lang, D. C. Kang, Effect of anisotropy and prebulging on hydromechanical deep drawing of mild steel cups. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 142, No. 2, pp. 544–550, 2003.
[12] A. Yingyot, N. Gracious, T. Altan, Optimizing tube hydroforming using process simulation and experimental verification, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146, No. 1, pp. 137–143, 2004.
[13] S. B. Levy, A comparison of empirical forming limit curves for low carbon steel with theoretical forming limit curves of Ramaekers and Bongaerts, I*nternational Deep Drawing Research Group*, WG3, Hungary, June 13-14, 1996.
[14] A. Gorji, H .Alavi-Hashemi, M. Bakhshi-jooybari, S. Nourouzi, S. J. Hosseinipour, Investigation of hydrodynamic deep drawing for conical–cylindrical cups, *The Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 56, No. 9, pp. 915–927, 2011.

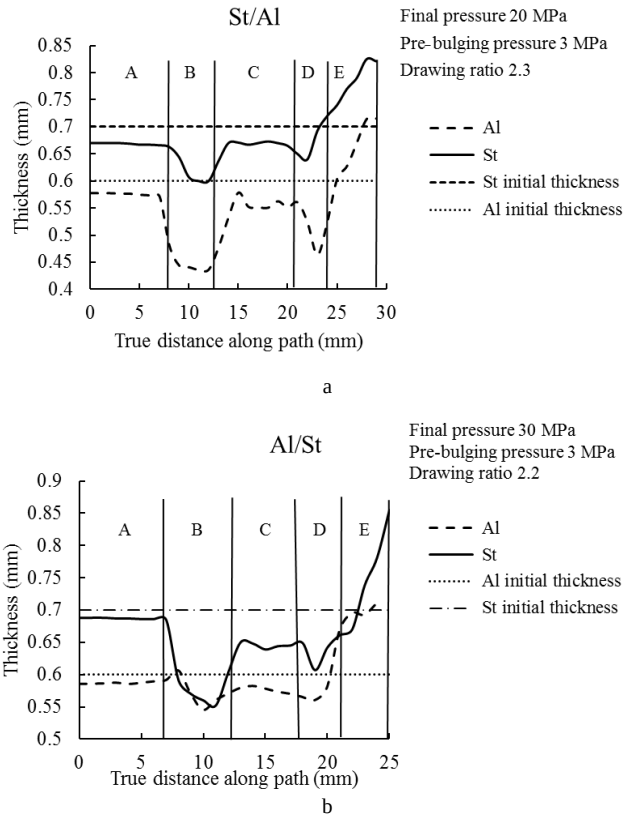


**Fig. 15** Thickness distribution of two-layer conical specimen in cases of a- St/Al, b- Al/St.

**شکل 15** توزیع ضخامت قطعه مخروطی دولایه برای حالت‌های الف- St/Al، ب- Al/St

## 7- مراجع

[1] A. Jalali Aghchai, M. Shakeri, B. Mollaei Dariani, Influences of material