ماهنامه علمى پژوهشى





mme.modares.ac.ir

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

مجيد مولائی¹، حامد ديلمىعضدى^{2*}، مهدى صفرى²

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

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

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

چکیدہ	اطلاعات مقاله
کشش عمیق هیدرومکانیکی یک فرأیند پیشرفته شکلدهی فلزات است که در أن از فشار بالای سیال جهت شکلدادن قطعات پیچیده استفاده	مقاله پژوهشی کامل
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	دریافت: 28 ادر 1395 بزیرش: 19 برمیز 1395
مراحل شکلدهی آنها زیاد است. در این مقاله به بررسی تجربی و عددی فرآیند شکلدهی هیدرومکانیکی یک قطعه مخروطی دولایه از	پدیرس. ۲۰ بهمی <i>ن دروا</i> ارائه در سایت: 11 اسفند 1395
جنسهای آلومینیوم 3003 و فولاد IF پرداخته میشود. بدین منظور اثر پارامترهای مختلف فرآیند از جمله ضریب اصطکاک، ترتیب چیدمان	كليد واژتحان:
لایهها و همچنین نسبت ضخامت لایهها بر ناحیه ایمنکاری مورد مطالعه قرار میگیرد. ناحیه ایمنکاری در این فرآیند، محدوده مناسب فشار	كشش عميق هيدرومكانيكي
محفظهای و نسبت کشش را برای دستیابی به قطعه بدون پارگی مشخص میکند. نتایج نشان میدهد کاهش اصطکاک میان ورق و ورقگیر،	ورق دولايه
افزایش ضریب اصطکاک بین سنبه و ورق، افزایش ضخامت لایه با شکلپذیری بالاتر و همچنین قرارگیری فولاد به عنوان لایه بیرونی، سبب	قطعه مخروطى
افزایش نسبت حدی کشش و گستردهتر شدن محدوده کاری مجاز جهت تولید قطعه مخروطی دولایه بدون پارگی میشود. در نهایت با مقایسه	روش اجزای محدود
نتایج بهدستآمده از بررسی تجربی و شبیهسازی عددی انطباق خوبی بین نتایج مشاهده شد.	ناحیه ایمن کاری

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

Majid Molaei¹, Hamed Deilami Azodi^{1*}, Mehdi Safari¹

1- Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran * P.O.B. 38135-1177 Arak, Iran, hdazodi@arakut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION	ABSTRACT
Original Research Paper Received 18 December 2016 Accepted 07 February 2017 Available Online 01 March 2017	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-
Keywords: Hydro-mechanical deep drawing Two-layer sheet Conical part Finite element method Safe working zone	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.

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

فرآیند شکل دهی قطعات مخروطی به طور قابل ملاحظهای پیچیدهتر از شکل دهی قطعات استوانه ای است. این امر به دلیل سطح تماس کم میان پیشانی سنبه و ورق است که نازک شدگی و بروز پارگی را در مراحل شکل دهی افزایش می دهد. در این میان شکل دهی قطعات مخروطی دو لایه با توجه به امکان بهره گیری از خواص مکانیکی، شیمیایی، حرارتی و الکتریکی

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

1- مقدمه

قرارگیری لایه ها را بر نسبت کشش در فرآیند کشش عمیق و بازکشش معكوس فنجان استوانهاي آلومينيوم- فولاد بررسي كردند. نتايج 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 می دهد. باقرزاده و همکاران [3] به پیش بینی تنش و وقوع ناپایداری در فرآیند شکل دهی فنجان استوانهای دولایه آلومینیوم – فولاد پرداختند. روابط تحلیلی استخراج شده از پژوهش آنها برای پیشبینی ناحیه ایمن کاری تطابق مناسبی را با نتایج آزمایش های تجربی نشان داد. لانگ و همکاران [4] توزیع ضخامت ورقهای سه لایه با لایه میانی بسیار نازک را در فرآيند هيدروفرمينگ بهصورت تجربي و عددي بررسي كردند. نتايج آنها نشان داد که توزیع ضخامت لایهها در حالت فولاد/ فولاد/ آلومینیوم بهتر از حالت آلومينيوم/ آلومينيوم/ فولاد است، همچنين آنها دريافتند كه با افزايش ضريب اصطكاك بين لايهها شكل پذيرى لايه ميانى افزايش خواهد يافت. مروتی و همکاران [5] یدیده چروکیدگی را در کشش عمیق قطعات دو لایه آلومینیوم/ فولاد بررسی و با چروکیدگی قطعات تکلایه مقایسه کردند. نتایج آنها اهمیت نیروی ورق گیر 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 مخروطي با مقطع مربعي را به صورت تجربي و عددي مطالعه كرده و پدیده گلویی شدن، توزیع ضخامت و چروکیدگی را بررسی کردند. در تحقیقی دیگر باقرزاده و همکاران [8] بررسی تجربی و عددی بر پارامترهای مؤثر بر ناحيه كارى فنجان استوانهاى دولايه آلومينيوم 1050- فولاد St13 انجام دادند و تأثیر پارامترهای فرآیند را بر ناحیه کاری و توزیع کرنش بررسی كردند. نتايج آن ها نشان داد كه ناحيه ايمن كارى با افزايش نسبت كشش و كاهش ضخامت فولاد محدودتر مىشود.

هدف این مقاله تعیین ناحیه ایمن کاری برای شکل دهی 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 می شود.

2- شبیهسازی اجزای محدود

ارائه یک مدل صحیح و تأیید شده با نتایج تجربی جهت دستیابی به نتایج قابل اعتماد در شبیه سازی های عددی از اهمیت بالایی برخوردار است. این عمل برای امکان سنجی تولید، تحلیل و بهینه سازی کیفیت محصول نهایی و قابلیت اطمینان بودن فرآیند انجام می شود [9]. شبیه سازی عددی فرآیند با استفاده از حلگر صریح در نرمافزار اجزای محدود آباکوس انجام می شود. شکل 1 مجموعه شبکه بندی شده ورق و قالب را نشان می دهد. به دلیل تقارن شکل نهایی نسبت به دو صفحه XY و ZZ تنها یک چهارم از قالب و ورق امدل سازی می شود. ورق به صورت جسم سه بعدی ⁷ و تغییر شکل پذیر با R3D4 بودا زنوع R3D4 بوده و المان های اجزای صلب قالب از نوع R3D4 است. از نمودار نیروی سنبه بر حسب تعداد المان ها برای بهینه سازی تعداد المان های مورد استفاده در ورق ها استفاده می شود. همان طور که در شکل 2

¹ Explicit ² Abaqus ³ Solid

مشخص است به ازای تعداد 2225 المان حل همگرا می شود، همچنین تعداد المان ها در راستای ضخامت 4 المان جهت جلوگیری از بروز عیوب قفل برشی و ساعت شنی در نظر گرفته می شود. در شبیه سازی ها به جای مدل سازی سیال اثر آن به صورت اعمال یک فشار یکنواخت بر سطح ورق مدل شده است. مسیرهای فشار اعمال شده در شبیه سازی های عددی مطابق شکل 3 است. بخش OA از مسیرهای فشار مربوط به فشار پیش بالج است که پیش AB از حرکت سنبه به سطح زیرین ورق اعمال می شود، سپس مطابق مسیر AB فشار محفظه ای با حرکت سنبه به داخل محفظه قالب افزایش یافته تا به مقدار تنظیم شده برای شیر کنترل فشار نهایی برسد. پس از آن شیر محدود کننده فشار باز شده و ادامه فرآیند تحت فشار ثابت انجام می شود.

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 می شود.

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- معيار شكست

شکل 1 مدل اجزای محدود فرآیند

در این پژوهش حداکثر میزان نازکشدگی ورق به عنوان معیار واماندگی در



Fig. 1 Finite element model of process





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 AI-3003 and IF steel sheets			
خواص (یکا)	نماد	آلومينيوم 3003	فولاد IF
ضخامت(mm)	t	0.6	0.7
مدول یانگ (GPa)	Ε	70	210
ضريب پواسون	v	0.33	0.3
تنش تسليم (MPa)	σ_y	62	140
استحکام کششی(MPa)	$\sigma_{ m UT}$	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				
اندازه	نماد	بعد (یکا)		
32	D_p	قطر بزرگ سنبه (mm)		
16	d_p	قطر کوچک سنبه (mm)		
60		زاویه راس سنبه (degree)		
3	r_p	شعاع سر سنبه (mm)		
37	D_d	قطر دهانه ی ورودی ماتریس کشش (mm)		
3.5	r_d	شعاع ورودی ماتریس کشش (mm)		

نظر گرفته شده است [12]. حداکثر مقدار نازکشدگی با محاسبه کرنش ضامتی بیشینه (£) مطابق رابطه (1) تعیین شده است.

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

در رابطه (1) t₀ ضخامت اولیه ورق و t_f ضخامت نهایی ورق پس از شکلدهی است.

 $(d\varepsilon_{ heta} = 4$ با توجه به برقراری شرایط کرنش صفحهای در دیواره قطعه ($c_{ ext{tmax}}$) مطابق رابطه (2) (0، حداکثر کرنش در راستای ضخامت ورق $(\varepsilon_{t_{ ext{max}}})$ مطابق رابطه (2) محاسبه می شود [13].

$$\varepsilon_{t\,\text{Max}} = \ln\left[1 + (23.3 + \frac{360}{25.4}t_0)(\frac{n}{0.21})\right]$$
(2)
در آن *n* توان کرنش سختی ورق است.

4- مطالعه تجربي

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 می شود. آزمایش ها بر ورق دولایه ساخته شده از لایه های آلیاژ آلومینیوم 3003-AI و فولاد IF انجام گرفته است. خواص مکانیکی ورق های مورد استفاده با استفاده از آزمون کشش استاندارد مطابق جدول 1 استخراج شده است. جهت اتصال ورق های آلومینیوم AI-3003 و فولاد IF و ساخت ورق دولایه، ابتدا سطوح ورق ها اکسیدزدایی، پلیسه گیری و چربی زدایی شده و سپس با استفاده از چسب پلی اورتان یکدیگر متصل شده اند.

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 نتیجه گیری

1-5- ناحیه کاری بهدست آمده از آزمایش های تجربی و شبیه سازی 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 ایمن کاری 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 ایمن کاری 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. همان گونه که مشخص است با



Fig. 4 a- The geometry of used die set, b- Hydraulic circuit of process شكل 4 الف- هندسه مجموعه قالب مورد استفاده، ب- مدار هيدروليكي فرآيند



Fig. 5 Experimental setup

شکل 5 تجهیزات تجربی









B 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.

2-5- 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: MPa 3، 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- (b) 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- (b) مارکت (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 می شود اثر اصطکاک بر محدوده مجاز کاری در فشارهای محفظهای بالا مشهودتر است.

همان گونه 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.

3-5- 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 ایمن کاری با افزایش ضخامت لایه با استحکام بالاتر (فولاد IF) بزرگتر شده و دستیابی به نسبتهای کشش بالاتر امکان پذیر خواهد شد.

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

هندسه قطعه جهت بررسى توزيع ضخامت قطعه مخروطي دولايه مطابق

شكل 14 به نواحي مختلف تقسيم شده است.

در شکل 15 توزیع ضخامت لایه ها در دو حالت مختلف قرارگیری لایه ها 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 می افتد و از این رو این ناحیه را می توان به عنوان بحرانی ترین ناحیه قطعه در نظر گرفت. دلیل این مسئله می تواند برای اثرات خم کاری ایجادشده در این ناحیه باشد [14]. نتایج به دست آمده نشان می دهد میزان کاهش ضخامت لایه بیرونی (لایه ای که در تماس با سنبه نیست)در هر دو حالت St/St و St/Al بیشتر بوده؛ بنابراین قرارگیری لایه با استحکام بالاتر به عنوان لایه بیرونی جهت دستیابی به قطعه مخروطی دولایه با نسبت کشش بالاتر مناسبتر است.

6- نتیجه گیری

در این مقاله فرآیند شکل دهی قطعه مخروطی دولایه آلومینیوم AI-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 آزمایش های تجربی و شبیه سازی های عددی تعیین و اثر عوامل مختلف فرآیند بر ناحیه مجاز فشار محفظه بررسی شد. همچنین توزیع ضخامت لایه ها در قطعه مخروطی دولایه شکل داده شده مورد مطالعه قرار گرفت. مهم ترین نتایج به دست آمده 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 آزمایش های تجربی و شبیهسازهای Al/St (b) -ب. St/Al عددی برای حالتهای الف- ا



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 می شود، همچنین نسبت کشش بهدست آمده در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی به طور 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 می کند.

- 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 امکان پذیر 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 نازکشدگی در ناحیه شعاع نوک مخروط در میتوان بهعنوان St/Al اتفاق میافتد، از اینرو این ناحیه را میتوان بهعنوان بحرانیترین ناحیه قطعه در نظر گرفت.
- 7- براساس نتایج بهدست آمده میزان کاهش ضخامت لایه بیرونی (لایه ای که در تماس با سنبه نیست) در هر دو حالت Al/St و St/Al بیشتر بوده؛ بنابراین قرار گیری لایه با استحکام بالاتر بهعنوان لایه بیرونی جهت دستیابی به قطعه مخروطی دولایه با نسبت کشش بالاتر مناسب تر است.





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



Fig. 14 Various regions of formed conical specimen شكل 14 نواحى مختلف قطعه مخروطى شكل دادهشده

0.5

0

properties of components on formability of two-layer metallic sheets, Advanced Manufacturing Technology, Vol. 66, No. 5, pp. 809–823, 2013.

- M. H. Parsa, K. Yamaguchi, N. Takakura, Redrawing analysis of aluminumstainless-steel laminated sheet using FEM simulations and experiments, *Mechanical Sciences*, Vol. 43, No. 10, pp. 2331–2347, 2001.
 S. Bagherzadeh, B. Mollaei Dariani, K. Malekzadeh, Theoretical study on
- [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 hydromechanical 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, *International 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 conicalcylindrical cups, *The Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 56, No. 9, pp. 915–927, 2011.



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

5 10 15 20 True distance along path (mm)

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

25

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