



## مطالعه پنجره فرایند در کشش عمیق هیدرومکانیکی فنجانی مربعی با ورق دولایه آلومینیوم-فولاد

سیدمحمدحسین سیدکاشی<sup>1\*</sup>، فرزاد رحمنی<sup>2</sup>، حسین امیرآبادی<sup>3</sup>، محمد حسین پور گللو<sup>4</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

4- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

\* بیرجند، صندوق پستی 97175/376، seyedkashi@birjand.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 17 مرداد 1395

پذیرش: 14 مهر 1395

ارائه در سایت: 16 آبان 1395

کلید واژگان:

ورق دولایه

کشش عمیق هیدرومکانیکی

پنجره فرایند

نمودار حد شکل دهی

فنجانی مربعی

در فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی محفظه‌ای از سیال جایگزین ماتریس شده است و شکل نهایی قطعه براساس شکل سنبه‌ی صلب تعیین می‌گردد. جهت جلوگیری از بروز پارگی و چین‌خوردگی در قطعه لازم است فشار سیال در حین فرایند در محدوده‌ی کاری مجاز تغییر نماید. منحنی ناحیه کاری نشان‌دهنده محدوده حداکثر نسبت کشش قابل دستیابی بدون ایجاد پارگی در ورق، تحت بیشترین فشار محفظه‌ای می‌باشد. در این مقاله کشش عمیق هیدرومکانیکی فنجانی‌های با مقطع مربعی از جنس ورق دولایه آلومینیوم-فولاد به دلیل بالا بردن نسبت کشش آلومینیوم به صورت ورق دولایه ترکیبی با فولاد، با استفاده از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های اجزای محدود بررسی شده است. به منظور تشخیص شروع پارگی در شبیه‌سازی از نمودار حد شکل‌دهی که به روش تجربی برای ورق دولایه آلومینیوم/فولاد بدست آمد، استفاده شد. از آزمایش‌های تجربی به منظور مقایسه و تایید صحت مدل اجزای محدود استفاده گردید. تاثیر پارامترهای فرایند مانند ضخامت لایه‌های مختلف ورق، فشار پیش‌بالج، فشار محفظه‌ای و ضریب اصطکاک بر روی ناحیه‌ی کاری و پنجره فرایند بررسی گردیده است. نتایج عددی نشان می‌دهد که برای هر فشار پیش‌بالج یک مقدار بهینه برای نسبت کشش مشخص وجود دارد. همچنین با افزایش فشار محفظه‌ای، چروکیدگی در ناحیه فالنج کاهش می‌یابد. با افزایش اصطکاک بین ورق و قالب یا ورق و ورق‌گیر ناحیه کاری کوچکتر شده، در حالی که با افزایش اصطکاک بین ورق و سنبه ناحیه کاری بزرگتر می‌شود. برای ارزیابی نتایج عددی برای نسبت کشش‌های متفاوت آزمایش‌های تجربی انجام شد که تطابق خوبی بین نتایج تجربی و عددی مشاهده گردید.

## Study of Process Window in Square Cup Hydromechanical Deep Drawing of Aluminium/Steel Double Layer Sheet

Seyed Mohammad Hossein Seyedkashi<sup>1\*</sup>, Farzad Rahmani<sup>1</sup>, Hossein Amirabadi<sup>1</sup>,  
Mohammad Hoseinpour Gollo<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 97175/376, Birjand, Iran, seyedkashi@birjand.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 07 August 2016  
Accepted 05 October 2016  
Available Online 06 November 2016

**Keywords:**  
Double Layer Sheet  
Hydromechanical Deep Drawing  
Process Window Diagram  
Forming Limit Diagram  
Square Cup

### ABSTRACT

In hydromechanical deep drawing process, the traditional matrix is replaced by pressurized fluid, and the final shape is determined based on the shape of a rigid punch. It is necessary to change the fluid pressure within the allowed working zone during the process to prevent the workpiece from rupturing and wrinkling. Working zone curve represents the range of maximum available drawing ratios without rupture under the highest chamber pressure. In this paper, hydromechanical deep drawing of square cups made of aluminum-steel double layer sheets are studied by experiments and finite element simulations. In order to detect the rupture onset in simulations, experimental forming limit diagrams were obtained using aluminum/steel double layer sheet. Experimental data were used to validate the finite element model. The effects of process parameters such as thickness of the various layers, prebulge pressure, chamber pressure and the friction coefficient were investigated on the working zone and the process window. The numerical results show that an optimum amount for the drawing ratio exists for each prebulge pressure. Also, with increasing the chamber pressure, shrinkage is reduced on the flange area. By increasing the friction between the sheet and matrix or the sheet and blank-holder, working zone becomes smaller; while with increasing the friction between the sheet and the punch it becomes larger. Experiments were performed for different drawing ratios to evaluate the numerical results and good agreement was observed.

Please cite this article using:

S. M. H. Seyedkashi, F. Rahmani, H. Amirabadi, M. Hoseinpour Gollo, Study of Process Window in Square Cup Hydromechanical Deep Drawing of Aluminium/Steel Double Layer Sheet, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 11, pp. 277-283, 2016 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## 1- مقدمه

امروزه صنایع مرتبط با فرایندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی به سمت ایجاد محصولاتی کم وزن و دارای خواص ترکیبی پیش می‌روند. در این میان در سال‌های اخیر استفاده از ورق‌های چند لایه فلزی و بطور خاص ورق‌های دولایه فلزی متشکل از دولایه ورق با جنس‌های مختلف در صنایعی همچون خودروسازی، هوایی، الکتریکی، شیمیایی و غذایی توسعه یافته است [1-3]. کاربرد عمده این ورق‌ها می‌تواند به دو دلیل عمده باشد: (1) بهبود شکل پذیری ورق‌های سبک وزن و با شکل‌پذیری پایین، (2) ایجاد خواص ترکیبی در سازه همچون مقاومت الکتریکی، مقاومت در برابر خوردگی، نسبت استحکام به وزن بالا و غیره.

ملایی و همکاران [4] شکل‌پذیری ورق‌های دولایه فلزی با مدل‌سازی المان محدود را مورد بررسی قرار دادند و نتایج را با روش‌های تئوری و تجربی مقایسه کردند. از مهم‌ترین نتایجشان می‌توان به این اشاره کرد که استفاده از روش تئوری راهی مناسب برای دست‌یابی به منحنی حد شکل‌دهی این ورق‌ها می‌باشد. کدخدایان و همکاران [5] نیز به اصلاح هندسه قالب در فرآیند خمش U شکل ورق دولایه فلزی با هدف جبران‌سازی پدیده بازگشت فنری پرداختند.

ژانگ و همکاران [6-8] در پژوهش‌های جداگانه‌ای ساخت قطعات استوانه‌ای، جعبه‌های مخروطی با مقطع چهار ضلعی و قطعات سهمی‌گون را با روش کشش عمیق هیدرومکانیکی مورد بررسی قرار دادند. جنسن و همکاران [9] با حل معادله‌ی رینولدز به روش تفاضل محدود برای جریان سیال بین ورق و ماتریس در عملیات کشش عمیق هیدرومکانیکی، از این مدل به عنوان الگوریتم تماسی در شبیه‌سازی فرایند به روش اجزای محدود استفاده نمودند. رحمنی و همکاران [10] تاثیر پارامترهای موثر بر کشش عمیق قطعات مربعی را مورد بررسی قرار داده و با نتایج تجربی مقایسه کردند.

هدف از این مقاله بررسی ناحیه شکل‌دهی امن در کشش عمیق هیدرومکانیکی ورق‌های دولایه و دستیابی به یک پنجره فرایند مناسب برای تولید نمونه بدون عیب برای قطعات مربعی می‌باشد. این نوع کشش عمیق به دلیل خاص بودن شکل سنبه دارای پیچیدگی‌های خاص در انتخاب شکل لوح<sup>1</sup> اولیه است. با استفاده از نتایج این تحقیق مهندسان طراح در صنعت، بسادگی می‌توانند محدوده کاری ایمن را برای تولید این محصول استخراج نمایند.

## 2- مدل سازی

برای شبیه‌سازی عددی، فرایند در نرم افزار تحلیلی آباکوس<sup>2</sup> مدل شده است و مدل ساخته شده در آباکوس/صریح<sup>3</sup> مورد استفاده قرار گرفت. در شبیه‌سازی از فشار با توزیع یکنواخت سطحی استفاده شده است. تغییرات فشار در مراحل پیش‌بالج و شکل‌دهی به صورت خطی می‌باشد.

لوح به صورت جسم شکل‌پذیر و سه‌بعدی در نظر گرفته شده و با وجود اینکه لوح اولیه معمولاً کاملاً یکنواخت و بدون عیب نیست، از تنش باقیمانده صرف‌نظر شده است. با استفاده از رابطه (1) می‌توان نسبت کشش را برای قطعات غیرگرد به‌دست آورد [11]. همچنین ارتفاع کشش نیز با استفاده از رابطه (2) قابل محاسبه می‌باشد.

$$\beta_{eq}^2 = \frac{A_0}{A_m} \quad (1)$$

<sup>1</sup> Blank<sup>2</sup> Abaqus<sup>3</sup> Abaqus/Explicit

که در آن  $A_0$  مساحت لوح تغییر شکل نیافته و  $A_m$  مساحت متوسط سنبه و حفره قالب است. با ثابت در نظر گرفتن حجم، عمق هر قطعه توسط رابطه (2) محاسبه می‌شود:

$$h = \frac{A_0 - A_m - A_f}{C_m} \quad (2)$$

که  $A_f$  مساحت فلنج باقی مانده در انتهای فرایند و  $C_m$  محیط متوسط سطح مقطع سنبه و حفره قالب می‌باشد.

برای به‌دست آوردن هندسه ورق اولیه در سطوح مقطع‌های مربعی که در شکل 1 نشان داده شده‌اند، باید ابعاد دقیق لوح مورد نظر را در یک ضریب  $Z$  که در شکل 2 نشان داده شده، وارد نمود. ضریب  $Z$  با استفاده از رابطه نسبت کشش طبق روابط (3) الی (5) قابل محاسبه است.  $L_1$  و  $L_2$  طول و عرض سنبه مورد نظر و  $R$  شعاع سرسنبه مورد نظر می‌باشد.

$$\beta_{eq}^2 = \frac{A_0}{A_m} \rightarrow A_0 = L_1 L_2 + 2L_1 Z + 2L_2 Z + 1.50015Z^2 \quad (3)$$

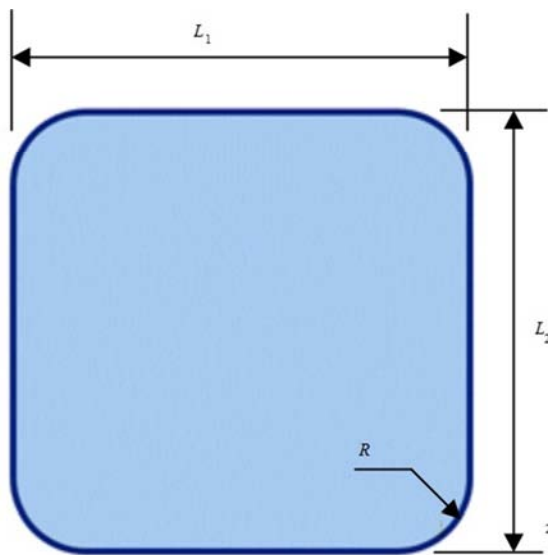


Fig. 1 Punch dimensions [10]

شکل 1 ابعاد سنبه [10]

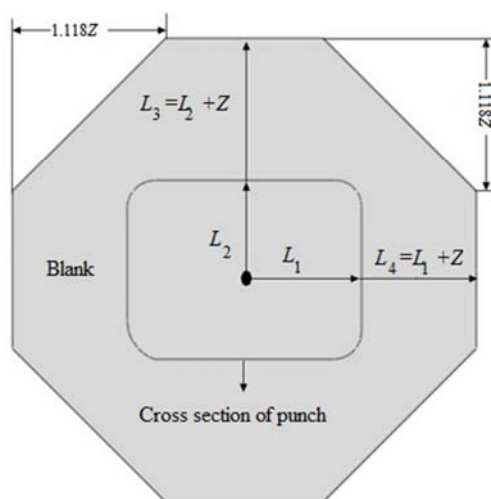


Fig. 2 Initial blank shape [10]

شکل 2 هندسه لوح اولیه [10]

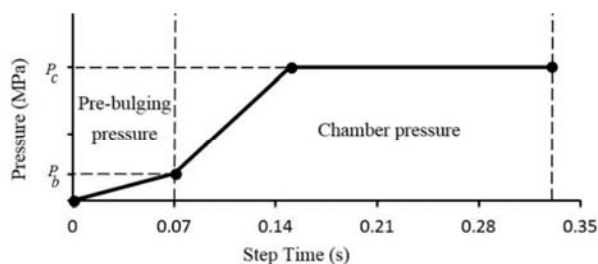


Fig. 4 Chamber pressure during the forming process

شکل 4 تغییرات فشار محفظه ای در طول زمان فرایند

جدول 1 ابعاد لوح و ارتفاع کشش برای نسبت‌های کشش متفاوت برای ورق دولایه آلومینیوم- فولاد

Table 1 Blank dimension and drawing depth for different drawing ratios

(mm) Z	ارتفاع کشش (mm)	نسبت کشش
13.522	12.168	1.75
17.168	19.662	2
19.348	21.22	2.1
22.246	29.07	2.25
25.412	32.22	2.4
27.632	36.52	2.5

خورده‌اند، از آزمون استاندارد لایه کنی استفاده گردید. برای انجام این آزمون، ورق‌ها با اندازه مشخص بریده شده و انتهای ورق دولایه اندکی از یکدیگر جدا می‌شوند و لبه‌های ورق‌ها را برگردانده و به فک دستگاه کشش بسته می‌شود.

برای معرفی جنس ورق‌ها به نرم‌افزار باید نمودار تنش- کرنش حقیقی هر یک از ورق‌ها موجود باشد. بنابراین باید پس از اینکه ورق دولایه با استفاده از فرایند نورد ساخته و آماده شد، دو لایه با استفاده از آزمون لایه کنی از یکدیگر جدا شده و سپس نمونه آزمون کشش به صورت استاندارد برای هر لایه تهیه شود. زمانی که ورق با فرایند نورد تولید شود، تمامی قسمت‌های ورق در راستای نورد دارای استحکام کششی یکسان می‌شود و به راحتی از انتهای ورق می‌توان برای آزمون کشش سرد استفاده نمود. نمونه‌های آزمون کشش سرد در شکل 5 مشاهده می‌شود. منحنی تنش کرنش حاصل از کشش برای هر کدام از جنس‌ها جداگانه به نرم‌افزار وارد گردیده است.

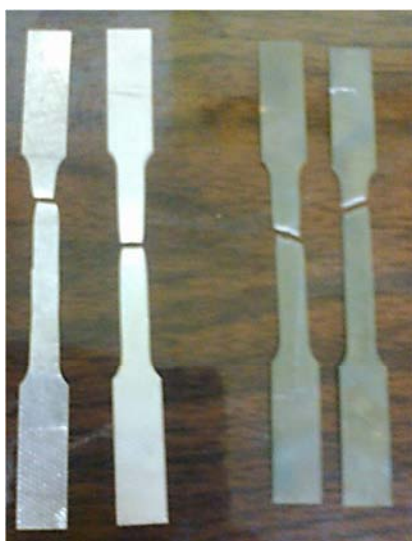


Fig. 5 Tensile test specimens

شکل 5 نمونه‌های آزمون کشش

$$A_m = L_1 L_2 - (4R^2 - \pi R^2) \quad (4)$$

$$\beta_{eq}^2 = \frac{L_1 L_2 + 2L_1 Z + 2L_2 Z + 1.50015Z^2}{L_1 L_2 - (4R^2 - \pi R^2)} \quad (5)$$

در نهایت با قرار دادن نسبت کشش مورد نظر در رابطه فوق می‌توان ضریب Z را به راحتی محاسبه کرد و لوح مورد نظر را طراحی نمود. ضریب Z و ارتفاع کشش مربوط به نسبت کشش‌های متفاوت برای قطعه مربعی با ابعاد 30×30 mm در جدول 1 آمده است.

برای مقاطع مربعی، لوح هشت ضلعی با ضخامت اولیه 1 میلی‌متر با استفاده از المان‌های پوسته‌ای S4R مدل شده است. کل لوح شامل 3621 گره و 3500 المان می‌باشد. مدل شبیه‌سازی شده در شکل 3 نشان داده شده است.

قالب، سنبه و ورق‌گیر به صورت صلب مدل شده‌اند. ضریب اصطکاک بین ورق و ورق‌گیر  $(\mu_h)$  0.05، بین ورق و سنبه  $(\mu_p)$  0.1 و بین بلانک و قالب  $(\mu_d)$  0.05 با مدل اصطکاکی کولمب در نظر گرفته شده است [10].

در شبیه‌سازی به جای تاثیر فشار سیال شکل‌دهی از فشار با توزیع یکنواخت سطحی استفاده و به منظور صرفه‌جویی در زمان محاسبه، کل زمان شکل‌دهی 0.33 ثانیه در نظر گرفته شده است. تغییرات فشار در مراحل پیش‌بالج و شکل‌دهی به صورت خطی می‌باشد (شکل 4). در عمل فشار پیش‌بالج توسط پمپ ایجاد می‌شود، در حالی که فشار محفظه‌ای با حرکت سنبه به سمت پایین تا فشار نهایی به صورت خطی افزایش می‌یابد.

### 3- بررسی تجربی

#### 3-1- نحوه تولید ورق‌های دولایه

برای ساخت ورق‌های دولایه به روش نورد سرد، در ابتدا باید ورق‌های یک لایه معمولی تهیه شوند. ابعاد این ورق‌ها باید با توجه به توان دستگاه نورد و ... یکسان شود. سپس یک سطح از هرکدام از ورق‌ها آماده می‌شود. در مرحله بعد ورق‌ها از سمتی که آماده شده‌اند روی یکدیگر قرار گرفته و در دمای محیط نورد می‌شوند. سپس ورق‌ها عملیات حرارتی می‌شوند.

#### 3-2- آزمون لایه کنی و کشش ورق‌های دولایه

برای اطمینان از اینکه دولایه ورق با استحکام کافی به یکدیگر جوش

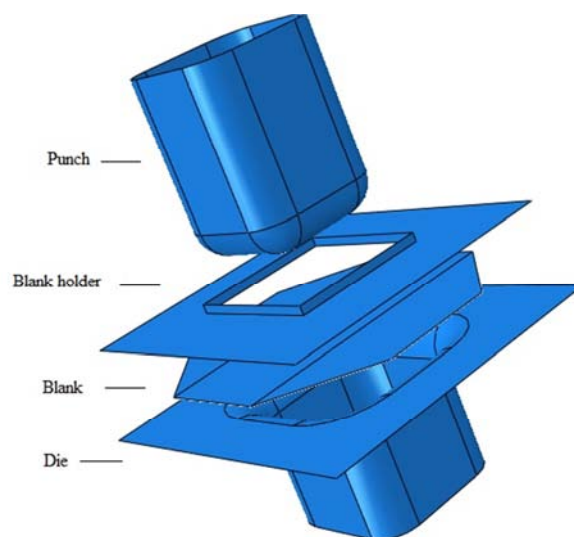


Fig. 3 Simulated model

شکل 3 مدل شبیه‌سازی شده

جدول 2 مشخصات ورق‌های فولادی و آلومینیومی

Table 2 Profile sheet steel and aluminum

جنس	نوع	مدول یانگ	ضریب پواسون	چگالی
فولاد	St12	207GPa	0.3	7800kg/m <sup>3</sup>
آلومینیوم	AA1100	70GPa	0.3	2700 kg/m <sup>3</sup>

### 3-4- تجهیزات آزمایشگاهی

به منظور تایید شبیه‌سازی عددی، یک سیستم آزمایشگاهی برای فرایند HDD طراحی و ساخته شد. این سیستم در شکل 10 نشان داده شده است. دو شیر اطمینان 1 و 2 به ترتیب فشار پیش‌بالم و فشار حداکثر محفظه‌ای را کنترل می‌کنند. در مرحله پیش‌بالم روغن به کمک پمپ 3 به محفظه وارد شده، و فشار داخل محفظه افزایش می‌یابد. در مرحله شکل‌دهی با حرکت سنبه به داخل محفظه، فشار روغن به شدت افزایش می‌یابد. شیر یکطرفه مانع از برگشت روغن و تخلیه آن از طریق مسیر پمپ روغن می‌شود. پس از رسیدن فشار به حد نهایی تعیین شده، عملیات در فشار ثابت ادامه می‌یابد. با توجه به ضخامت 2 میلیمتری ورق، فاصله بین ورق و قالب 1 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. با کنترل فشار محفظه‌ای به وسیله دو شیر اطمینان 1 و 2 فرایند کشش عمیق تحت نسبت‌های کشش متفاوت انجام گرفت و توزیع ضخامت و ناحیه کاری مربوط به این شرایط تعیین شد.

آزمایش‌های تجربی با استفاده از یک پرس 40 تن هیدرولیکی که در شکل 11 مشاهده می‌شود انجام شده است. نمونه‌ای از لوح‌های اولیه بریده شده، برای نسبت کشش‌های متفاوت در شکل 12 نشان داده شده است. همچنین دو نمونه تولید شده با دو نسبت کشش 1.8 و 2.2 در شکل 13 مشخص شده است.

### 4- نتایج و بحث

#### 4-1- تاثیر ضخامت‌های مختلف بین آلومینیوم و فولاد

ضخامت‌های متفاوت دو جنس اثری کاملاً متفاوت برروی نسبت حد کشش دارد. شکل 14 اثر سه ضخامت متفاوت بین آلومینیوم و فولاد برروی نسبت حدی کشش را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت فولاد

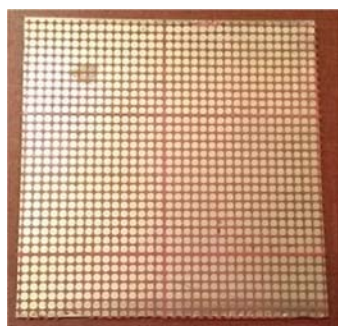


Fig. 7 A sample of a grid layout on the plate

شکل 7 نمونه‌ای از طرح شبکه بندی شده برروی ورق

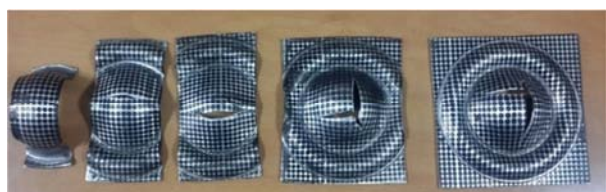


Fig. 8 An example of formed sheets for FLD test

شکل 8 نمونه‌ای از ورق‌های شکل داده شده برای منحنی حد شکل‌دهی

منحنی‌های تنش-کرنش فولاد و آلومینیوم مورد استفاده در شکل 6 نمایش داده شده است.

فولاد مورد استفاده، St12 و ورق آلومینیومی AA1100 می‌باشد. البته قابل ذکر است که به دلیل انجام فرایند نورد روی این ورق‌ها به جهت ساخت ورق دولایه، کارسختی شدیدی در این ورق‌ها روی داده است. مدول یانگ، ضریب پواسون و چگالی نیز برای هر کدام از جنس‌ها در جدول 2 آورده شده است.

### 3-3- نمودار حد شکل‌دهی

میزان یا وسعت تغییر شکلی که در فرایند شکل‌دادن بدون ایجاد هرگونه وضعیت نامطلوب، مانند تخریب یا شکست، در ماده می‌توان به آن دست یافت، شکل‌پذیری آن ماده را مشخص می‌کند. در هر فرایند تغییر شکل، ارتباط با شکل هندسی آن فرایند محدودیت‌هایی وجود دارد که برای هر ماده متفاوت است. کمیتی که شکل‌پذیری را مشخص می‌کند، معمولاً تغییر شکل نسبی تا شکست است. این کمیت معمولاً از طریق آزمایش‌های مختلف مانند: کشش، فشار و پیچش تعیین می‌شود. به منظور تشخیص شروع پارگی در شبیه‌سازی از نمودار حد شکل‌دهی<sup>1</sup> (FLD) که از آزمایش‌های تجربی به‌دست آمده، استفاده شده است.

منحنی‌های حد شکل‌دهی ورق با استفاده از کشش قالب سنبه و ماتریس به دست می‌آید. نحوه انتخاب قالب و نمونه‌های ورق با استفاده از استاندارد ASTM E-2218 محاسبه شده است. قطر سنبه مورد نظر 50 میلی‌متر و قطر دایره‌های حک شده برروی ورق‌های براساس استاندارد ASTM E-2218 به قطر 3 میلی‌متر و فاصله مرکز تا مرکز 3.5 میلی‌متر شبکه‌بندی شده است. پس از انجام آزمایش، برای اندازه‌گیری دایره‌های تغییرشکل یافته از نوار مایلر و کولیس دیجیتال استفاده شد. در تمامی آزمون‌های حد شکل‌دهی و کشش، لایه فولادی با سنبه در تماس می‌باشد.

برای ترسیم منحنی حد شکل‌دهی حداقل با انجام آزمون چهار نمونه می‌توان یک منحنی رسم کرد. در این تحقیق نمونه‌ای از ورق دولایه آلومینیوم/فولاد که برروی هم نورد شده‌اند، استفاده شده است. 12 نمونه با طول 19.5 میلیمتر و عرض‌های مختلف، 2، 3.5، 5، 6.5، 8، 9.5، 11، 12.5، 14، 15.5، 18 و به ضخامت 2 میلی‌متر بریده شدند. شکل 7 لوح شبکه‌بندی شده برای انجام آزمایش، و شکل 8 نمونه‌هایی از قطعات شکل‌داده شده را نشان می‌دهند. با استفاده از آزمایش‌های تجربی، نمودار حد شکل‌دهی (FLD) برای ورق‌های دولایه آلومینیوم/فولاد بدست آمده که در شکل 9 نشان داده شده است.

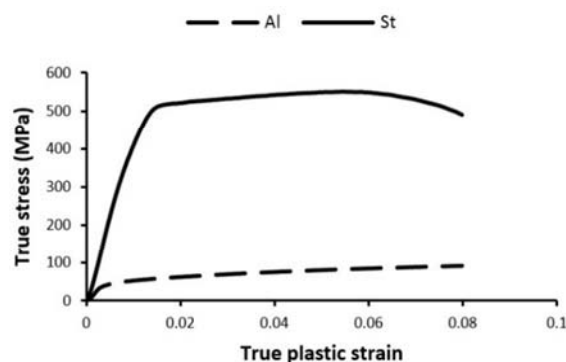


Fig. 6 True stress-strain curve for aluminum and steel sheets

شکل 6 منحنی تنش-کرنش حقیقی برای ورق آلومینیومی و فولادی

<sup>1</sup> Forming Limit Diagram





Fig. 12 Initial blank for experiments with two drawing ratio

شکل 12 لوح اولیه برای انجام آزمایش عملی دو نسبت کشش متفاوت



Fig. 13 Samples produced by hydro mechanical deep drawing with drawing ratios of 1.8 and 2.2

شکل 13 نمونه‌های تولید شده به روش کشش عمیق هیدرومکانیکی با نسبت کشش 2.2 و 1.8

دلیل شرایط اصطکاکی بین سنبه و قالب، از منطقه شعاع سرسنبه بوده، اما در کشش عمیق هیدرومکانیکی بخاطر وجود فشار هیدرومکانیکی بالا با چسبیدن ورق به سنبه و عدم تماس با قالب، پارگی در دیواره قطعه اتفاق افتاده است.

در حین فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی، فشار سیال به ورق وارد می‌شود و باعث می‌شود که ورق در مقابل ورق‌گیر فشرده شود. این عمل باعث تأمین نیروی ورق‌گیر شده که مقدار آن به فشار سیال و سطحی از ورق که با ورق‌گیر در تماس است، بستگی دارد.

هنگامیکه فشار سیال از حد فشار بالایی تجاوز کند، نیروی ورق‌گیر از مقدار "بحرانی" بیشتر می‌شود و پارگی در ورق بوجود می‌آید. از طرف دیگر، اگر فشار به کار رفته کمتر از حد مقدار پائینی باشد و در نتیجه نیروی ورق‌گیر برای جلوگیری از توسعه تنش‌های فشاری در فلانچ کافی نبوده و در نهایت چروکیدگی بوجود می‌آید. در شکل 16 حدود بحرانی پارگی و چین‌خوردگی در پنجره فرایند به صورت شماتیک نشان داده شده است.

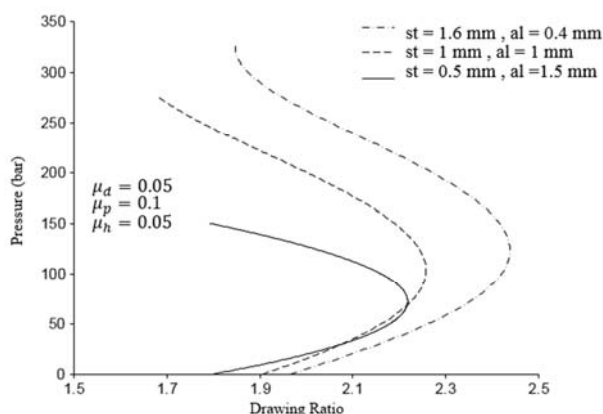


Fig. 14 The effect of different blank thicknesses on working zone

شکل 14 اثر ضخامت‌های مختلف ورق روی محدوده کاری

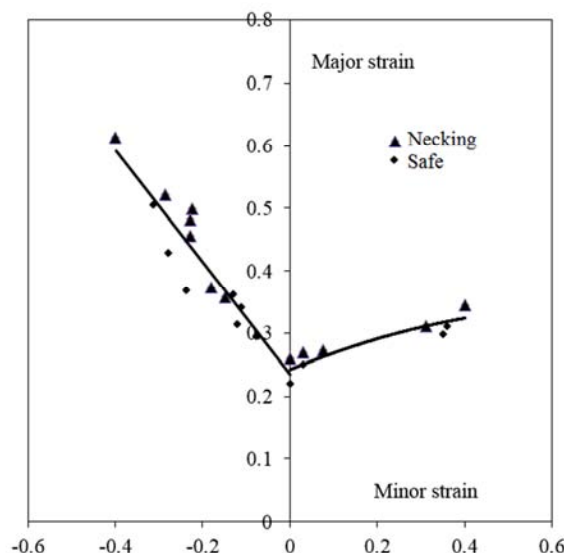


Fig. 9 FLD of two layer steel/aluminum sheet

شکل 9 منحنی حد شکل‌دهی ورق دولایه آلومینیوم-فولاد

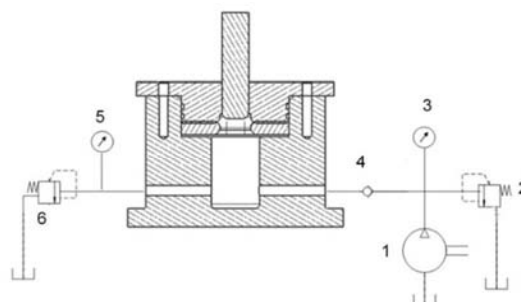


Fig. 10 Experimental test system process HDD [10]

شکل 10 سیستم آزمایش تجربی فرایند HDD [10]



Fig. 11 Hydromechanical deep drawing equipment

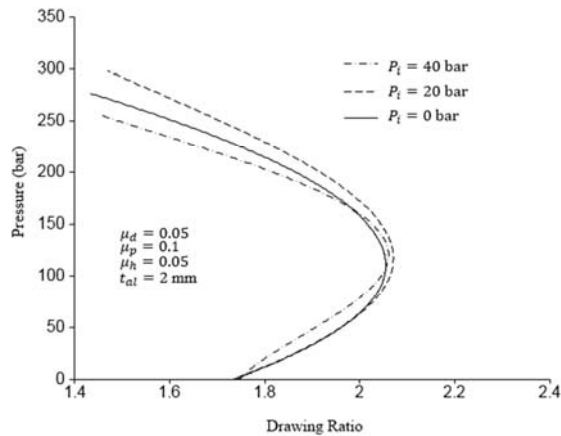
شکل 11 دستگاه کشش عمیق هیدرومکانیکی

نسبت به آلومینیوم، نسبت حدی کشش افزایش می‌یابد. در این شکل سه ضخامت متفاوت برای ورق دولایه 2 میلی‌متری مورد مقایسه قرار گرفته است. شکل 15 قطعه‌های کشیده شده تحت شرایط ضخامت آلومینیوم 0.4 میلی‌متر و فولاد 1.6 میلی‌متری را نشان می‌دهد که تحت دو شرایط کشش عمیق سنتی و کشش عمیق هیدرومکانیکی با فشار سیال 250 bar کشیده شده‌اند. همانگونه که مشخص است پارگی در قطعه کشش عمیق سنتی به

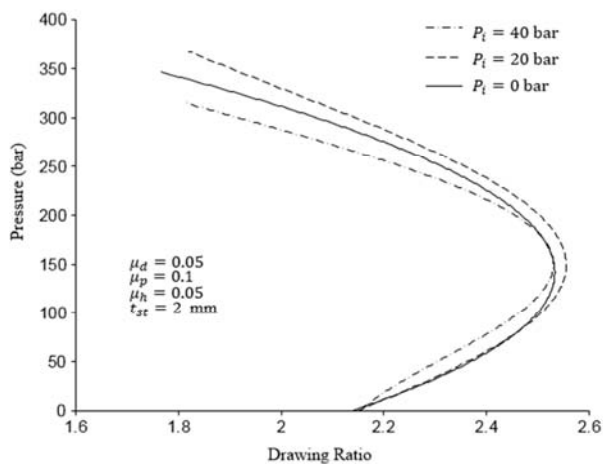
را امکان پذیر می کند.

### 3-4- مقایسه نتایج تجربی و شبیه سازی

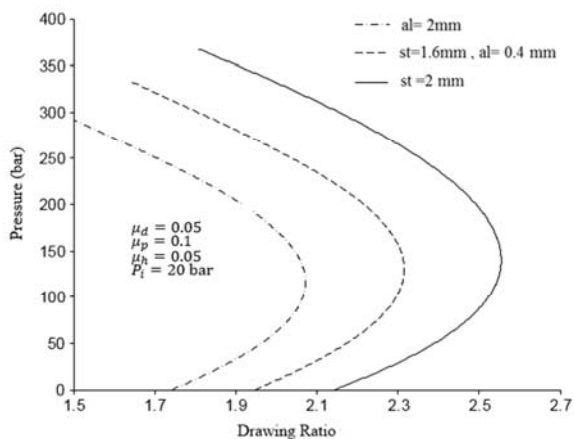
شکل 21 نتیجه آزمایش های کشش تحت فشارهای مختلف برای ورق های



**Fig. 17** The effect of pre bulging in Single-layer AA1100 sheet  
شکل 17 تاثیر فشار پیش بالج بر روی ورق تک لایه AA1100



**Fig. 18** The effect of prebulge pressure in single-layer ST12 sheet  
شکل 18 تاثیر فشار پیش بالج بر روی ورق تک لایه ST12



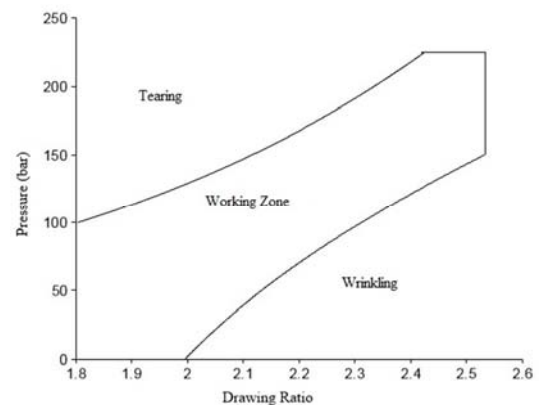
**Fig. 19** The effect of prebulge pressure in working zone from different thickness ratios

شکل 19 اثر فشار پیش بالج بر محدوده کاری در نسبت ضخامت های متفاوت



**Fig. 15** Comparison of Al(0.4mm)/St(1.6mm) sheet forming with traditional (left) and hydromechanical (right) methods

شکل 15 قطعه کشیده شده در ضخامت آلومینیوم 0.4 میلی متر و فولاد 1.6 میلی متر به دو روش سنتی (شکل چپ) و هیدرومکانیکی (شکل راست)



**Fig. 16** Process window diagram for Al/St bilayer sheet

شکل 16 پنجره فرایند برای ورق های دو لایه آلومینیوم-فولاد

### 2-4- تاثیر فشار پیش بالج

شکل های 17 و 18 تاثیر فشارهای پیش بالج متفاوت را بر روی ناحیه کاری ورق های تک لایه ST12 و AA1100 با ثابت نگه داشتن همه پارامترها نشان می دهد. با افزایش فشار پیش بالج از 0 به 20 بار حداکثر نسبت کشش قابل دستیابی بدون پارگی در هر دو ورق افزایش می یابد، با این تفاوت که ناحیه کاری ورق های فولادی بیشتر از ورق های آلومینیوم می باشد. دلیل این پدیده، بالج ورق در ابتدای فرایند و جلوگیری از تماس آن با پروفیل شعاع قالب می باشد. در فشارهای محفظه ای پایین، بین فشار پیش بالج 0 و 20 بار، تفاوت چندانی وجود ندارد. در فشارهای محفظه ای پایین، برای هر دو فشار پیش بالج گفته شده، لوح با پروفیل شعاع قالب در تماس است.

در فشار پیش بالج 40 بار هم در فشارهای محفظه ای پایین و هم در فشارهای محفظه ای بالا نسبت کشش کاهش می یابد. با اعمال فشار پیش بالج 40 بار، کرنش اولیه ورق در ناحیه تماس آن با ورق گیر افزایش یافته و ضخامت ورق در ابتدای فرایند کاهش می یابد که باعث ایجاد عیب در محصول نهایی می شود.

با توجه به اینکه فشار پیش بالج اولیه 20 بار برای هر دو ورق تک لایه به عنوان فشار اولیه مناسب شناسایی شده، همانطور که در شکل 19 مشاهده می شود برای سه ضخامت متفاوت بین آلومینیوم و فولاد در فشار پیش بالج 20 بار دامنه های کاری متفاوتی بدست آمده است.

شکل 20 ناحیه کاری برای ورق های دولایه آلومینیوم فولاد با فشارهای پیش بالج متفاوت را نشان می دهد. همانطور که از شکل مشخص است ناحیه کاری این ورق به مراتب بهتر از ورق های تک لایه آلومینیومی و نزدیک ورق های فولادی می باشد. فشار پیش بالج 20 بار دستیابی به ناحیه بزرگتری

سیال، نسبت حد کشش فرایند ابتدا افزایش یافته تا در یک فشار بهینه، حداکثر نسبت کشش قابل حصول به دست آید. با افزایش بیشتر فشار، نسبت حد کشش فرایند کمتر می شود.

نتایج نشان می دهد در فشارهای پیش بالچ کمتر از 20 bar، لوح نمی تواند به سنبه بچسبد و شکل اولیه سنبه را به خود بگیرد، در نتیجه میزان نازک شدگی افزایش می یابد. فشار بیشتر از 40 bar نیز برای شکل دهی مناسب نیست، زیرا میزان نازک شدگی زیاد است. در نتیجه بهترین فشارهای پیش بالچ بین 20 bar تا 40 bar می باشد.

نتایج عددی نشان دهنده کاهش قابل ملاحظه حد شکل دهی در اثر افزایش اصطکاک بین ورق و ورق گیر است.

در فشارهای بالا افزایش اصطکاک بین ورق و ماتریس در حالت فاصله انداز ثابت، تاثیر چندانی بر روی نسبت حد کشش ندارد، در حالی که در فشارهای پایین به علت تماس ورق با شعاع ماتریس، با افزایش اصطکاک بین ورق و ماتریس، نسبت کشش کاهش می یابد.

اصطکاک بین ورق و سنبه نیز اثر کاملاً متفاوت دارد. با افزایش آن نسبت حد کشش افزایش می یابد. علت این رفتار آن است که با افزایش فشار سیال، محل پارگی از شعاع سرسنبه به سمت شعاع ماتریس جابجا می شود.

## 6- مراجع

- [1] J. K. Kim, T. X. Yu, Forming and failure behavior of coated, laminated and sandwiched sheet metals, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 63, No. 1, pp. 33-42, 1997.
- [2] F. Yoshida, R. Hino, Forming limit of stainless steel clad aluminum sheets under plane stress condition, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 63, No. 1, pp. 66-71, 1997.
- [3] A. J. Aghchai, M. Shakeri, B. M. Dariani, Theoretical and experimental formability study of two-layer metallic sheet (Al1100/St12), *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 222, No. 9, pp. 1131-1138, 2008.
- [4] A. Jalali Aghchai, M. Shakeri, B. M. dariani, Formability analysis of metal double layer sheets with finite element simulation and comparison with theoretical and experimental results, *Proceedings of The 10th International Conference on Manufacturing Engineering*, Babol, Iran, March 1-3, 2010. (in Persian)
- [5] M. Kadkhodayan, S. J. Noei, Compensation of springback phenomenon in Al/St sheet forming using die geometry modification, *Proceedings of The 1st Regional Congress on Mechanical Engineering*, Tehran, Iran, March, 2013. (in Persian)
- [6] S. H. Zhang, M. R. Jensen, J. Danckert, K. B. Nielsen, D. C. Kang, L. H. Lang, Analysis of the hydromechanical deep drawing of cylindrical cups, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 103, No 3, pp. 367-373, 2000.
- [7] S. H. Zhang, K. B. Nielsen, J. Danckert, D. C. Kang, L. H. Lang, Finite element analysis of the hydromechanical deep-drawing process of tapered rectangular boxes, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 102, No 1, pp. 1-8, 2000.
- [8] S. H. Zhang, L. H. Lang, D. C. Kang, J. Danckert, K. B. Nielsen, Hydromechanical deep-drawing of aluminum parabolic workpieces-experiments and numerical simulation, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 40, No 10, pp. 1479-1492, 2000.
- [9] M. R. Jensen, L. Olovsson, J. Danckert, Numerical model for the oil pressure distribution in the hydromechanical deep drawing process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 103, No 1, pp. 74-79, 2000.
- [10] F. Rahmani, S. J. Hashemi, H. M. Naeini, H. D. Azodi, Numerical and experimental study of the efficient parameters on hydromechanical deep drawing of square parts, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 22, No. 2, pp. 338-344, 2013.
- [11] E. Onder, A. E. Tekkaya, Numerical simulation of various cross sectional workpieces using conventional deep drawing and hydroforming technologies, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 48, No. 5, pp. 532-542, 2007.

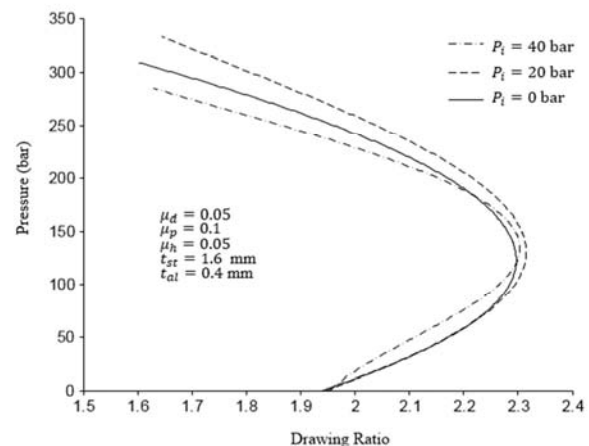


Fig. 20 The effect of different prebulging in bilayer sheets

شکل 20 اثر پیش بالچ های متفاوت بر روی ورق دولایه آلومینیوم - فولاد

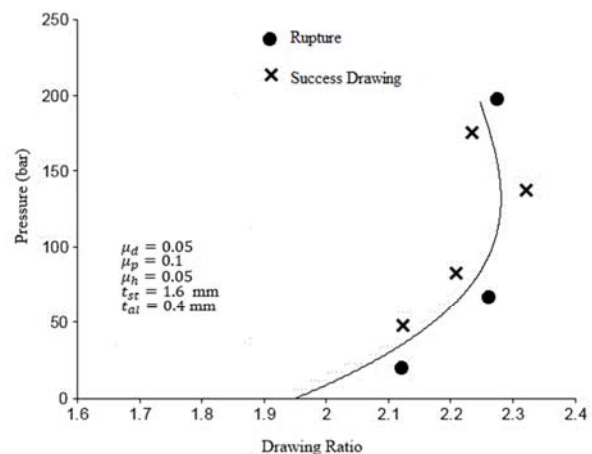


Fig. 21 Working zone obtained from experiments

شکل 21 ناحیه کاری به دست آمده با آزمایش

دولایه آلومینیوم فولاد با ضخامت های 1.6 میلی متر فولاد و 0.4 میلی متر آلومینیوم را نشان می دهد. آزمایش ها نشان دهنده آن است که با افزایش فشار سیال تا 150 بار حد کشش فرایند از 1.85 تا 2.35 افزایش یافته است. با افزایش بیشتر فشار سیال حد کشش فرایند کاهش می یابد.

## 5- نتیجه گیری

در این مقاله بررسی عددی و تجربی حد شکل دهی در فرایند شکل دهی هیدرومکانیکی ورق های دولایه قطعات مربعی انجام شد و تاثیر پارامترهای فرایند مانند فشار پیش بالچ، ضخامت لایه های مختلف و اثر ضریب اصطکاک بر روی ناحیه کاری مورد بررسی قرار گرفت. همچنین دستیابی به یک ناحیه کاری مناسب برای تولید نمونه بدون عیب از مهم ترین عوامل می باشد.

بر طبق نتایج بدست آمده با افزایش ضخامت ورق می توان به ناحیه کاری بزرگتر و نسبت کشش بالاتر دست یافت.

نتایج عددی نیز مشابه نتایج تجربی نشان می دهد که با اعمال فشار