



## بررسی عددی و تجربی پارامترهای مهم در کشش عمیق مقاطع مربعی ورق‌های دولایه با ماتریس لاستیکی

حمید گل‌مکانی<sup>1</sup>، سامان مرادی بشلی<sup>1</sup>، سیامک مزدک<sup>2\*</sup>، ابراهیم شریفی<sup>2</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش

\* تفرش، 39518 - 79611، s.mazdak@tafreshu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 04 آبان 1394

پذیرش: 22 آذر 1394

ارائه در سایت: 14 بهمن 1394

کلیدواژگان:

ماتریس لاستیکی

فاصله اولیه

ورق دولایه

نازک‌شدگی

### چکیده

کشش عمیق با اجزاء لاستیکی یکی از روش‌های متداول برای حذف هزینه‌های ساخت و همچنین افزایش نسبت کشش می‌باشد. در این روش سنبه یا ماتریس از جنس لاستیک ساخته می‌شود. کشش عمیق ورق‌های دولایه نیز یکی از روش‌های جدید برای دستیابی به خواص مطلوب در قطعات تولیدی می‌باشد که در این روش دو ورق فلزی بر روی هم توسط چسب، به یکدیگر متصل شده‌اند که با هم به شکل موردنظر شکل داده می‌شوند. کنترل نازک‌شدگی به‌خصوص درحالی که از دو جنس و یا دو ضخامت، متفاوت باشد باحالت تک لایه متفاوت است. در این مقاله از تکنیک فاصله اولیه بین ورق گیر و حلقه ثابت استفاده شده است. در این تحقیق، نمونه مربعی با استفاده از قالب با ماتریس لاستیکی به صورت عملی و شبیه‌سازی سه‌بعدی، شکل داده شده است. در این مقاله، با استفاده از روش المان محدود و مدل هایپرلاستیک، شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی انجام شده است. در ادامه برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی‌ها، یک قالب با اجزای لاستیکی برای نمونه مربعی یا در نظر گرفتن جایگشت لایه‌ها برای جنس‌های آلومینیومی و فولادی ساخته شد و آزمایش‌هایی عملی انجام گرفت و سپس نتایج تجربی و عددی با هم مقایسه شده است. درنهایت با استفاده از روش تاگوچی، شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌های عملی جهت بررسی پارامترهایی از جمله شعاع سنبه، جایگشت، جنس ورق و مقدار فاصله اولیه بین ورق گیر بر روی نازک‌شدگی، نیروی وارد بر سنبه و نیروی ورق گیر انجام شد.

## Experimental and numerical investigation of the important parameters in deep drawing square sections two-layer sheet with rubber matrix

Hamid Golmakani, Saman Moradi Besheli, Siamak Mazdak\*, Ebrahim Sharifi

Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran.

\* P.O.B. 79611-39518 Tafresh, Iran, s.mazdak@tafreshu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 26 October 2015

Accepted 13 Decembaer 2015

Available Online 03 February 2016

Keywords:

Rubber die

Initial gap

two layers sheet

Thining

### ABSTRACT

Deep Drawing with rubber components is one of the conventional methods to reduce the cost of manufacturing, also this method is core cause for increase of LDR and has positive effect on improving the thinning defect. Moreover, the punch or matrix is made of rubber. Deep drawing of two-layer sheets is one of the new ways to achieve the desired properties in the produced parts in which two layer metal sheets are connected to each other by glue and are transformed together to the desired shape. Thinning control is different in the single layer when there are different materials or thicknesses. In this paper used the technique of initial gap distance between blank holder and fixed ring. In this study a square sample using die along with rubber matrix by experimental and three-dimensional simulation has been formed. In this paper, using the finite element method and hyper-elastic model and the numerical model simulation for this process is three-dimensional. Then, to validate the obtained result from simulations, a die with rubber components is made for square cups by considering permutation of layers for aluminum and steel and then, experimental and numerical results were compared. Finally, for evaluation effect of process parameters on thinning defect, force of punch and blank holder force used from Taguchi methodology.

### 1- مقدمه

بالایی بکار رود، زمانی که تنها فقط نیاز به ساخت یک ابزار صلب باشد، می‌توان گفت که در این حالت یعنی قالب با اجزای لاستیکی، در هزینه و زمان ساخت یک جزء با دقت بالا صرفه‌جویی می‌شود. استفاده از ورق‌های دولایه موجب به دست آوردن مزایای مختلفی در قطعاتی تولیدی از قبیل سبکی وزن، افزایش استحکام و رسانایی الکتریکی و حرارتی متفاوت در هر

روش شکل‌دهی با لاستیک، در مقایسه با کشش عمیق معمولی دارای مزایایی است که از آن جمله می‌توان به موردنیاز بودن ساخت تنها نیمی از قالب فلزی اشاره کرد که در این صورت، نیمه دیگر با لاستیک جایگزین خواهد شد. از آنجاکه در ساخت سنبه یا ماتریس، در قالب کشش عمیق باید دقت

Please cite this article using:

H. Golmakani, S. Moradi Besheli, S. Mazdak, E. Sharifi, Experimental and numerical investigation of the important parameters in deep drawing square sections two-layer sheet with rubber matrix, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 79-87, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

کاسته و عمق کشش افزایش یابد. در این تحقیق ابعاد نمونه‌ای که در لاستیک شکل داده می‌شود نسبت به نمونه‌های انجام شده بزرگ‌تر بوده و نیز مقطع به شکل مربعی است. در انتها با طراحی آزمایش به روش تاگوچی، مجموعه شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌های عملی برای بررسی پارامترهایی از قبیل شعاع سنبه، جنس ورق، فاصله اولیه و ضخامت ورق بر روی نازک شدگی، نیروی وارد بر سنبه و نیروی ورق گیر انجام شده است.

## 2- کار تجربی

### 2-1- خصوصیات رفتار مواد

آزمایش کشش طبق استاندارد ASTM (E8M-98) بر روی ورق‌های آلومینیوم 1100 و فولاد ST 14 با ضخامت 0.7 میلی‌متر انجام گرفته است. نمونه آماده شده از ورق آلومینیومی و فولادی جهت انجام آزمایش کشش در شکل 1 نشان داده شده است.

شکل 2 و 3 به ترتیب، نمودار تنش کرنش حقیقی ورق آلومینیوم 1100 و ورق ST 14 را نشان می‌دهد.

ضخامت هرکدام از ورق‌ها در هر دو آزمایش کشش و فرایند کشش عمیق اصلی برابر 0.7 میلی‌متر می‌باشند. هر لایه از ورق دولایه به صورت دایره‌ای در قطر 80 میلی‌متر توسط چسب به یکدیگر چسبانده شده‌اند. خواص مکانیکی ورق‌های مورد استفاده در این بررسی در جدول 1 نشان داده شده است.

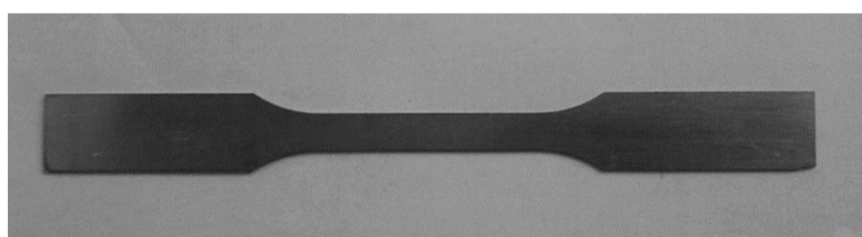


Fig. 1 Tensile test sample

شکل 1 نمونه آزمایش کشش

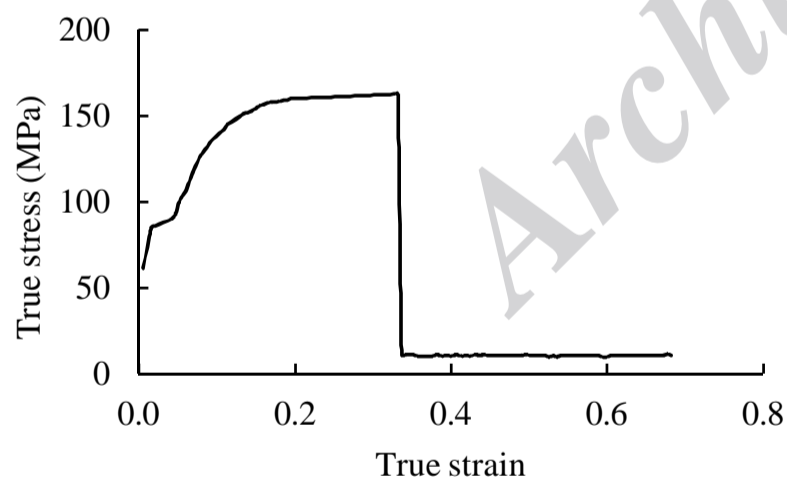


Fig. 2 True stress strain AL 1100

شکل 2 نمودار تنش کرنش حقیقی 1100

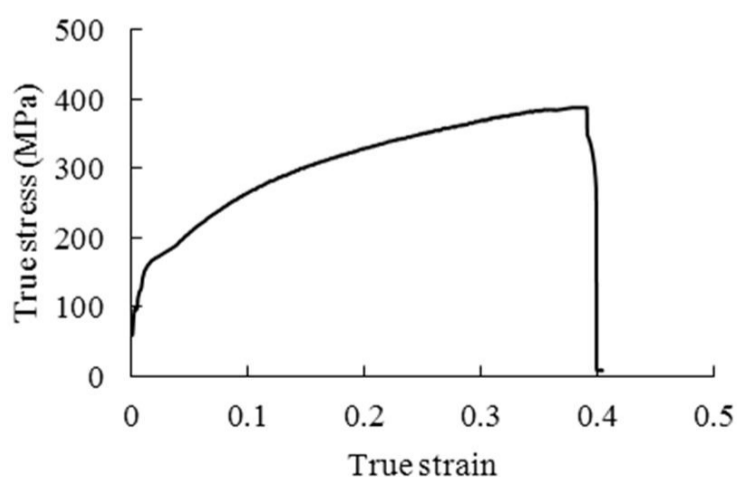


Fig. 3 True stress strain ST 14

شکل 3 نمودار تنش کرنش حقیقی ST 14

لایه می‌باشد. علاوه بر این مزایا، در این فرایند پیش‌بینی هرگونه عیب در قطعات کشیده شده موردنیاز می‌باشد، به علت اینکه به صورت همزمان یک ورق دولایه با دو جنس و ضخامت متفاوت کشیده می‌شود، نازک‌شدگی عیب مهمی بشمار می‌آید. [1-5]

احسان ایرتیه و همکارانش [6] به بررسی عددی و تجربی فرایند کشش عمیق فویل استیل 304 با استفاده از ابزار انعطاف‌پذیر پرداخته‌اند. آن‌ها با بکار بردن تکنیک فاصله اولیه و به دست آوردن فاصله اولیه بهینه، توانستند ورق‌های خیلی نازک را با روش کشش عمیق با ماتریس لاستیکی، شکل داده و نسبت کشش را افزایش دهند.

یانکسیون لی و همکارانش [7] انواع شکل‌دهی با لاستیک جهت ساخت صفحات شیاردار را بررسی کرده‌اند. آن‌ها به صورت شبیه‌سازی عددی و تجربی، شکل‌دهی با روش‌های محدب و مقعر را در تولید صفحات شیاردار بررسی کرده‌اند و ثابت کردند که در روش محدب نیروی کمتری به نمونه و اجزای فلزی وارد شده در نتیجه قطعه دچار ترک خوردگی نمی‌شود.

مازیار رضانی و همکارانش [8] شکل‌دهی به کمک سنبه انعطاف‌پذیر با یک روش عددی و تجربی معتبر را بررسی کرده‌اند. سه نوع جنس لاستیک مورد آزمایش قرار گرفت و خواص نمونه شکل گرفته با هر سه لاستیک نیز مورد بررسی قرار گرفت و لاستیک پلی اورتان کمترین نازک‌شدگی نمونه را به دنبال داشته و به عنوان لاستیک مناسب انتخاب شده است.

لینفا پنگ و همکارانش [9] به بررسی عددی و تجربی فرایند شکل‌دهی ورق با سنبه انعطاف‌پذیر، پرداخته‌اند. آزمایش‌های عملی و شبیه‌سازی‌های المان محدود روی لاستیک پلی اورتان با سختی‌های متفاوت انجام گرفت. آن‌ها دریافتند که دانه‌بندی ورق، در شکل‌پذیری و توزیع ضخامت نمونه تأثیر داشته و اینکه ضریب اصطکاک بین لاستیک و اجزای فلزی از جمله ورق، در نتایج تأثیر مهمی ندارد.

کارم موهسین یونس و همکارانش [10] در سال 2011 فرایند کشش عمیق مربعی را به صورت تجربی و تئوری مورد بررسی قرار دادند. عیب لبه‌دار شدن در گوشه فنجان (45 درجه از جهت نوردکاری) آشکار می‌شود. محل عیب لبه‌دار شدن بر اساس شکل اولیه بلانک، ناهمسانگردی صفحه‌ای و شرایط مؤثر بر نرخ جریان فلز متفاوت است. نتایج به دست آمده از بلانک دایره‌ای برای عیب لبه‌دار شدن بهتر از بلانک مربعی و هشت‌ضلعی می‌باشد. نیروی سنبه با افزایش اندازه بلانک، افزایش می‌یابد.

امیر عطریان و همکارانش [11] در سال 2013 فرایند کشش عمیق ورق دولایه فولاد-برنج را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که جایگشت لایه‌ها در فرایند کشش عمیق نقش اساسی را ایفا می‌کنند. توزیع تنش و کرنش ضخامت در فنجان کشیده شده نشان می‌دهد، بیشترین ناحیه خطر برای شکست، در ناحیه شعاعی پروفیل سنبه می‌باشد.

رحمن سیفی و همکارانش [12] در سال 1393 چین‌خوردگی فلجی ورق‌ها در کشش عمیق دوفلزی را به صورت تجربی و عددی بررسی کرده‌اند. مقدار نیروی ورق گیر لازم برای جلوگیری از کمانش موضعی و ایجاد چین در قسمت فلنجی، به صورت خطی با افزایش پهنای فلنج کاهش می‌یابد. دو پارامتر لقی و شرایط تماس ورق‌ها بیشترین تأثیر را بر تعداد چین‌خوردگی دارند. با افزایش اندازه شعاع لبه‌ی سنبه، نیروی سنبه به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

در این تحقیق، نمونه مربعی دولایه با استفاده از قالب با ماتریس لاستیکی به صورت عملی و شبیه‌سازی سه‌بعدی، شکل داده شده است. فاصله‌ای بین ورق گیر و حلقه ثابت، در نظر گرفته شده است تا در طی فرایند شکل‌دهی، ورق گیر بتواند با حرکت به سمت مخالف سنبه، از فشار لاستیک

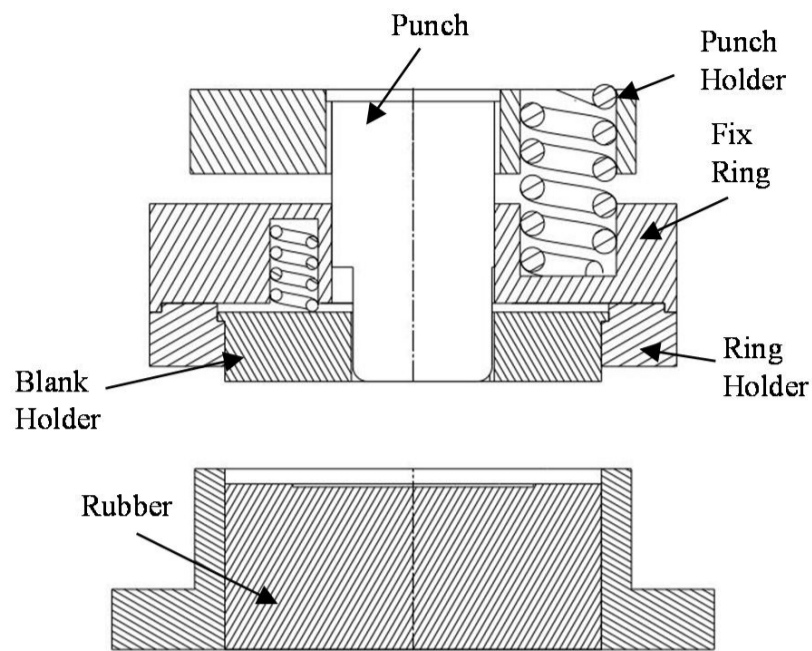


Fig. 6 Assembly of the tooling for rubber-pad forming process

شکل 6 شمای قالب لاستیکی مورد استفاده در فرآیند شکل‌دهی

ورق گیر توسط 4 فتر که نیروی 2000 N را تأمین می‌کند، نگه‌داشته شده است. حلقه ثابت نیز توسط 4 فتر که نیروی 12000 N را تأمین می‌کنند، مهار شده است.

با پایین آمدن قالب، سطح ورق‌گیر و سنبه با ورق مماس شده و با حرکت سنبه از داخل ورق‌گیر، سنبه ورق را به داخل لاستیک فرو می‌برد. با افزایش پیشروی سنبه به داخل لاستیک، لاستیک به سمت مخالف حرکت سنبه، فشار وارد می‌کند. با افزایش فشار، ورق‌گیر نیز به سمت مخالف حرکت کرده و فضایی که تحت عنوان فاصله اولیه تعبیه شده بود را پر می‌کند. پس‌از آن، حلقه ثابت از حرکت بیش‌ازحد ورق‌گیر جلوگیری می‌کند. وجود این فاصله که قابل تنظیم است، از فشار بیش‌ازحد لاستیک در طی فرآیند کشش و نفوذ سنبه به داخل آن، کاسته و باعث افزایش عمق کشش و کاهش فشار وارد بر نمونه و در نتیجه جلوگیری از اعوجاج و عیب‌نازک‌شدگی می‌شود. شکل 7 و 8 مجموعه قالب مونتاژ شده و اجزای قالب را نشان می‌دهد.

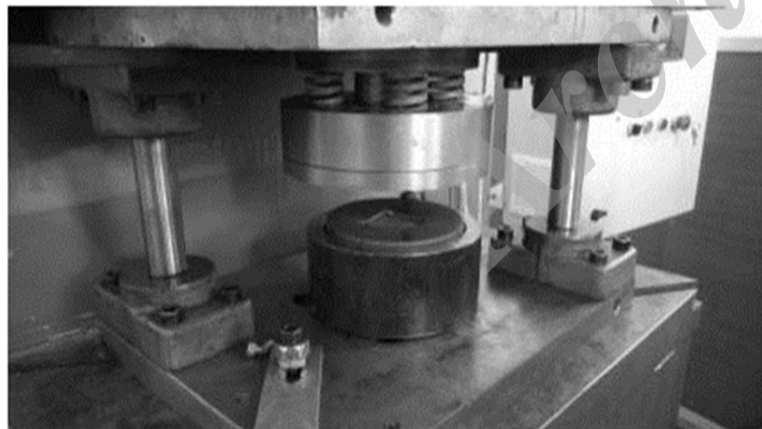


Fig. 7 The experimental apparatus

شکل 7 مجموعه قالب مونتاژ شده

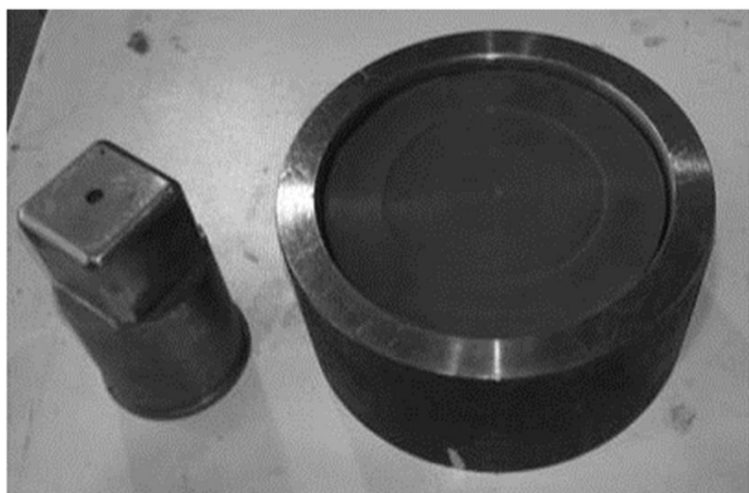


Fig. 8 Die components used in the experiment

شکل 8 اجزای قالب مورد استفاده در آزمایش تجربی

جدول 1 خصوصیات مکانیکی مواد

Table 1 Mechanical properties of materials

جنس	مدول یانگ (GPa)	تنش تسلیم (MPa)	چگالی (kg/mm <sup>3</sup> )	ضریب استحکام نهایی توان کار سختی
AL1100	70	79	$2.6 \times 10^{-6}$	0.149
ST 14	200	180.3	$7.8 \times 10^{-6}$	0.23

## 2-2- آزمایش فشار لاستیک

لاستیک از جنس سیلیکون، با سختی 60 شور، نوع A انتخاب شده است. برای به دست آوردن رفتار لاستیک، آزمایش فشار تک‌محوره انجام گرفته است و داده‌های تنش کرنش ظاهری، به‌عنوان ورودی شبیه‌سازی، مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش فشار لاستیک طبق استاندارد ASTM D 575 انجام گرفته است. در جدول 2 نتایج و پارامترهای آزمایش فشار لاستیک آورده شده است.

شکل 4 نمودار تنش کرنش مهندسی لاستیک را نشان می‌دهد.

در شکل 5، تجهیزات آزمایش فشار لاستیک نشان داده شده است.

شکل 6 شمای قالب مورد استفاده را نشان می‌دهد.

## 2-3- مجموعه قالب

شمای قالب مورد استفاده در این تحقیق، در شکل 6 نشان داده شده است. قالب تشکیل شده است از نیمه بالایی و نیمه پایینی. نیمه پایینی که شامل محفظه لاستیک، واسطه بین لاستیک و ورق و لاستیک که نقش ماتریس را دارد. نیمه بالایی تشکیل شده از ورق‌گیر، حلقه نگه‌دارنده، حلقه ثابت که حرکت آن توسط 4 فتر قوی محدود شده است، سنبه گیر و سنبه فلزی.

جدول 2 نتایج و پارامترهای آزمایش فشار لاستیک

Table 2 results of the stress test parameters rubber

نمونه	مدول یانگ (MPa)	قطر لاستیک ارتفاع لاستیک (mm)	سرعت آزمایش فشار لاستیک (mm/min)
سیلیکون	3.92	120	64.5
			12

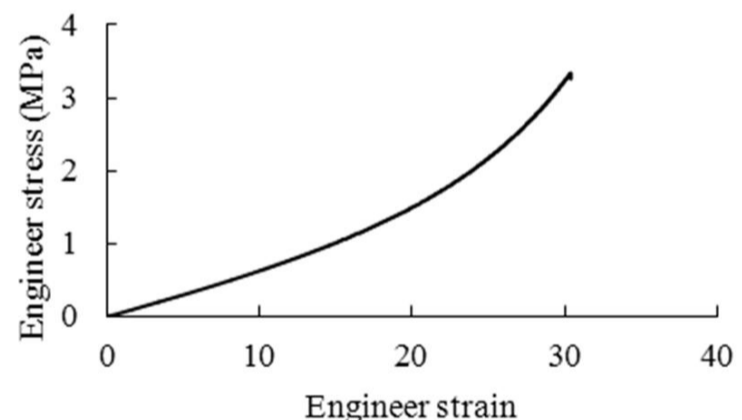


Fig. 4 Rubber engineering stress-strain curve

شکل 4 نمودار تنش کرنش مهندسی لاستیک

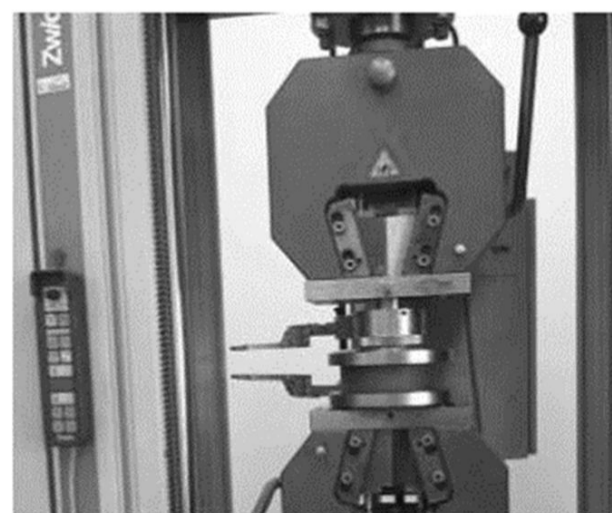


Fig. 5 Terms and pressure testing equipment rubber

شکل 5 شرایط و تجهیزات آزمایش فشار لاستیک

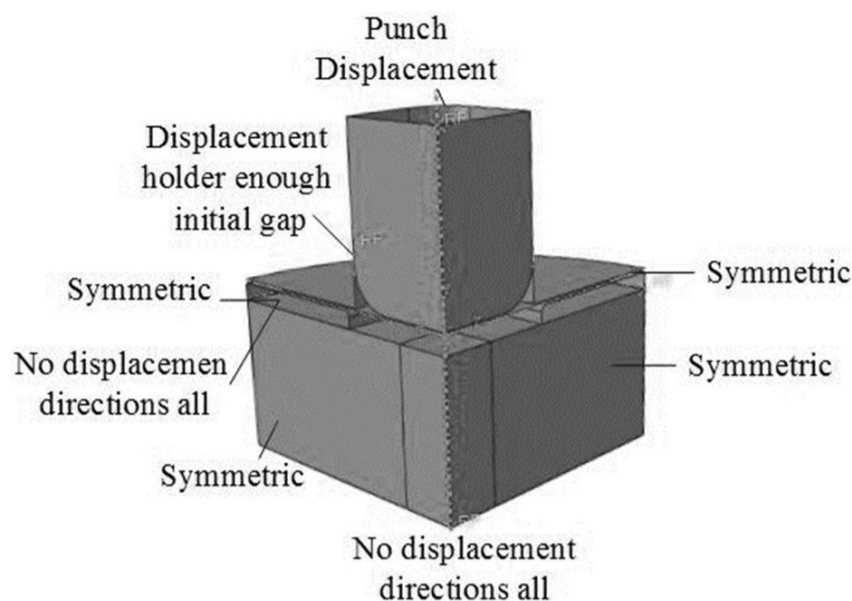


Fig. 9 Simulation model boundary conditions

شکل 9 شرایط مرزی مدل شبیه‌سازی

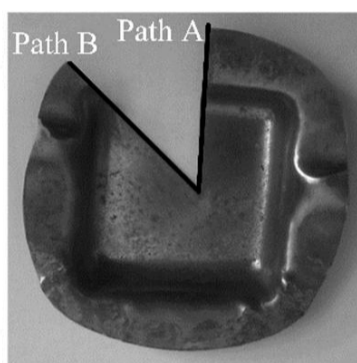


Fig. 10 Measurement paths

شکل 10 مسیرهای اندازه‌گیری نمونه

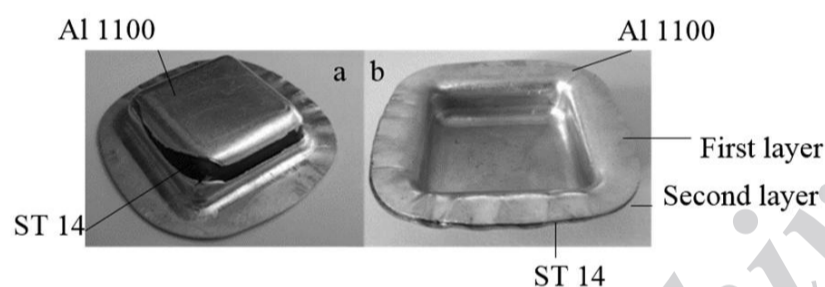


Fig. 11 The sample manufactured with two layers sheet in experimental work arrangement a) ST-AL sheet b) AL-ST sheet

شکل 11 قطعات تولیدی با ورق‌های دولایه در کار عملی به ترتیب قرارگیری. (الف) ورق ST-AL. (ب) ورق AL-ST

#### 4-1- نمونه‌های به‌دست‌آمده از آزمایش عملی

شکل 11 نمونه‌های به دست آمده از آزمایش تجربی و ترتیب لایه‌ها در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

به‌طور مثال، قرارگیری لایه‌های نمونه AL-ST بدین گونه است که لایه بالایی یا همان لایه اول که قسمت مقعر نمونه را پوشانده، آلومینیوم است و لایه پایینی یا دوم که جداره محدب نمونه را پوشانده، فولاد است.

در قطعات شکل داده شده در این روش مشاهده می‌شود، ورق آلومینیومی با قرارگیری در لایه زیرین به سبب استحکام کششی پایین و تشکیل ناحیه بیرونی فنجان دچار پارگی شده است، زیرا لایه‌های خارجی به دلیل موقعیت قرارگیری در فنجان شکل گرفته شده تحت کشش بیشتری نسبت به لایه‌های بالایی قرار می‌گیرند، می‌توان این پدیده را با قرارگیری ورق آلومینیومی در لایه بالایی مشاهده کرد که علاوه بر آن تحت حمایت لایه فولادی از ناحیه زیرین نیز قرار گرفته است در نتیجه از ایجاد پارگی در آن جلوگیری به عمل آمده است. در دو حالت جایگشت مشاهده می‌شود که چروکیدگی در دو لبه از فنجان تشکیل شده است و لبه‌های دیگر فنجان صاف می‌باشند. علت این رخداد، عدم توزیع فشار یکنواخت ورق‌گیر به تمام نقاط لبه فنجان می‌باشد. چروکیدگی در اثر کم بودن نیروی ورق‌گیر تشکیل می‌شود.

برای توزیع بهتر فشار، بین لاستیک و ورق، واسطه‌ای فلزی به قطر 120 mm با ضخامت 2 mm قرار داده شده است که در هنگام نفوذ سنبه در لاستیک، مانع از تمرکز فشار در سطح فشار شده و نیروی فشار را جهت شکل‌گیری بهتر، به اطراف نمونه نیز منتقل می‌کند در نتیجه در نمونه‌ای با ابعاد بزرگ، شکل‌دهی در لاستیک امکان‌پذیر می‌شود.

#### 3- شبیه‌سازی عددی

##### 3-1- مدل‌سازی ورق

شبیه‌سازی به صورت سه‌بعدی و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، انجام شده است. برای پایین آمدن زمان تحلیل و سادگی کار، نمونه به صورت یک چهارم مدل شده است. برای تعیین رفتار ورق در نرم‌افزار، یک مدل الاستیک-پلاستیک استفاده شده است. ورق‌ها به صورت همسانگرد در نظر گرفته شده‌اند. در مش بندی ورق از المان پوسته‌ای چهار نقطه با انتگرال کاهش یافته (S4R) استفاده شده است. تحلیل به صورت دینامیکی ضمنی، انجام شد. برای اطمینان از صحت شبیه‌سازی، عدم وابستگی به مش بندی بررسی شد. مش بندی و شرایط تحلیل به گونه‌ای لحاظ شد تا انرژی جنبشی همواره کمتر از 10% انرژی کل شود.

##### 3-2- مدل هایپر الاستیک برای ماتریس لاستیکی

خواص لاستیک مورد استفاده در ماتریس، به وسیله یک رابطه تنش کرنش غیرخطی برای تغییر شکل‌های بزرگ، تعریف شده است. با توجه به اینکه لاستیک، تقریباً غیرقابل تراکم است، مدل هایپر الاستیک مونی ریولین، این رفتار را به خوبی می‌تواند تشریح کند. لاستیک مورد استفاده دارای ابعاد، دایره به قطر 120 mm و ارتفاع 100 mm است. ابعاد سنبه مورد استفاده یک مربع 40x40mm با شعاع لبه 5 mm که باید حداقل تا ارتفاع 10 mm پیشروی داشته باشد، در نظر گرفته شده است.

المان استفاده شده برای لاستیک، از نوع سه‌بعدی هشت نقطه با انتگرال کاهش یافته و خاصیت هایپرید، (C3D8RH) در نظر گرفته شده است. ضریب اصطکاک سطوح لاستیک در شبیه‌سازی صفر در نظر گرفته شده است. جدول 3 نوع المان اجزاء قالب در مدل المان محدود را نشان می‌دهد.

##### 3-3- شرایط مرزی

در مدل شبیه‌سازی، قطعاتی که بصورت یک‌چهارم در نظر گرفته شده‌اند، قید تقارن و لاستیک با ثابت شدن محفظه لاستیک، در محل خود استقرار یافته است. شکل 9 شرایط مرزی اعمال شده روی مدل المان محدود را نشان می‌دهد.

#### 4- روش اندازه‌گیری تجربی

جهت اندازه‌گیری توزیع ضخامت در راستاهای متفاوت در نمونه، دو راستا تعیین و برش خورده است. در شکل 10 مسیرهای اندازه‌گیری نشان داده شده است.

جدول 3 نوع المان اجزاء قالب در مدل المان محدود

Table 3 Elements of the die components in the finite element Model

نام قطعه	تغییر شکل	نوع المان	تعداد المان
سنبه	صلب	R3D4	318
لاستیک	تغییر شکل‌پذیر	C3D8RH	770
ورق	تغییر شکل‌پذیر	S4R	140
محفظه لاستیک	صلب	R3D4	420
ورق‌گیر	صلب	R3D4	247
حلقه وسط	صلب	R3D4	320

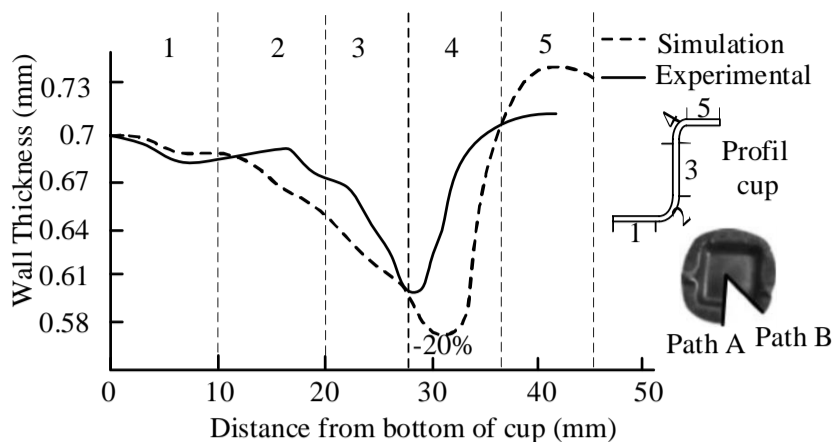


Fig. 14 Thickness distribution layer ST in path B Based on experimental and simulation

شکل 14 نمودار توزیع ضخامت در لایه فولادی در راستای B بر اساس کار تجربی و شبیه‌سازی

### 3-5- نحوه اندازه‌گیری پارامترهای خروجی

برای تعیین توزیع ضخامت در راستاهای A و B، مسیریابی در همین راستاها تعیین می‌شوند که میزان ضخامت را در هر نقطه از این مسیر نشان می‌دهند. نمودارهای نازک‌شدگی به دست آمده نیز با اندازه‌گیری در 14 نقطه از قطعه تولیدی به روش تجربی و همچنین مدل ایجادشده به روش المان محدود و در دو راستای A و B، به دست آمده‌اند. نقاط اندازه‌گیری شده در پنج ناحیه از قسمت‌های مختلف قطعه تولیدی قرار دارند.

### 6- صحت سنجی

#### 6-1- ورق دولایه AL-ST

در این بررسی، لایه آلومینیومی در تماس با سنبه بوده و لایه فولادی بر روی ماتریس لاستیکی قرار می‌گیرد.

شکل 12، نمودار توزیع ضخامت ورق AL-ST را بر اساس بررسی عددی نشان می‌دهد.

شکل 13، نمودار توزیع ضخامت لایه آلومینیومی ورق دولایه AL-ST را در راستای B، بر اساس بررسی تجربی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد.

در شکل 12 تفاوت توزیع ضخامت در دو راستای A و B، قابل مشاهده می‌باشد. همچنین بیشترین نازک‌شدگی در هر دولایه، در راستای B اتفاق می‌افتد. در همین راستا، بیشترین درصد نازک‌شدگی برای لایه فولادی در لبه بیرونی فنجان، 30 درصد ضخامت اولیه ورق است که در مقایسه با لایه آلومینیومی 16 درصد افزایش یافته است. با وجود کشش بیشتر در لایه فولادی، به دلیل استحکام بالای این لایه، پارگی در آن رخ نداده است.

در شکل 13، بیشترین نازک‌شدگی در ناحیه دیواره وسط و لبه بالایی فنجان رخ می‌دهد. در این ناحیه بیشترین درصد نازک‌شدگی، 14 درصد ضخامت اولیه ورق است. بیشترین اختلاف بین داده‌های تجربی و عددی در نمودار، 12.2 درصد است.

شکل 14، نمودار توزیع ضخامت در لایه فولادی، ورق دولایه AL-ST را در راستای B بر اساس کار عملی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد مشابه به لایه آلومینیومی، بیشترین نازک‌شدگی در لایه زیرین نیز در دیواره وسط و لبه بالایی فنجان اتفاق می‌افتد. بیشترین درصد نازک‌شدگی در این ناحیه، 20 درصد ضخامت اولیه ورق می‌باشد. بیشترین اختلاف بین داده‌های تجربی و عددی در نمودار 4.3 درصد است.

#### 6-2- ورق دولایه ST-AL

در این بررسی، لایه فولادی در تماس با سنبه می‌باشد و لایه آلومینیومی قسمت خارجی فنجان مربعی را تشکیل خواهد داد.

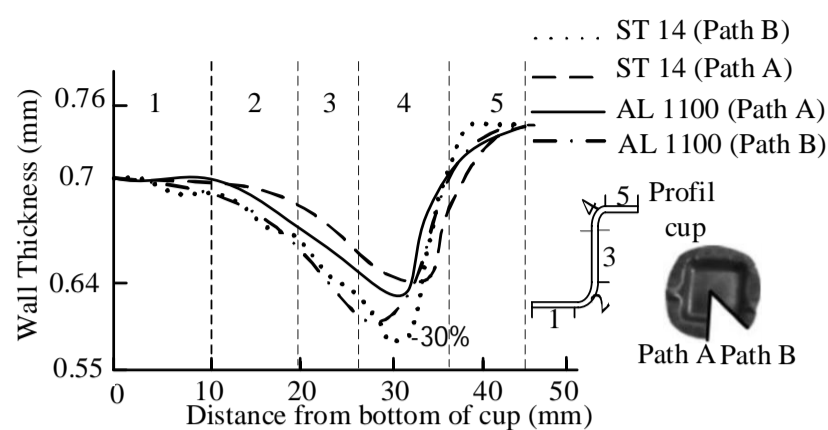


Fig. 12 Thickness distribution two layers AL-ST sheet in simulation

شکل 12 نمودار توزیع ضخامت ورق دولایه AL-ST بر اساس شبیه‌سازی

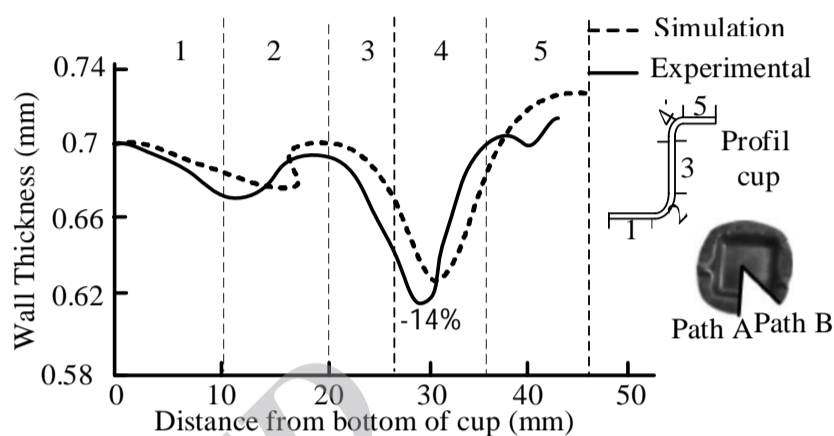


Fig. 13 Thickness distribution layer AL in path B Based on experimental and simulation

شکل 13 نمودار توزیع ضخامت در لایه آلومینیومی در راستای مسیر B بر اساس کار تجربی و شبیه‌سازی

جدول 4 پارامترهای ورودی در طراحی آزمایش

Table 4 Input parameters in experimental design

پارامتر ورودی	واحد	سطح اول	سطح دوم	سطح سوم	سطح چهارم
شعاع سنبه	میلیمتر	3	5	7	-
ضخامت ورق	میلیمتر	0.7	0.7	0.7	0.2
جنس و جایگشت ورق		AL ST14	AL ST14	ST14 ST14	AL AL

### 5- طراحی آزمایش

در طراحی آزمایش از روش تاگوچی استفاده شده است.

#### 5-1- پارامترهای ورودی

در این روش پارامترهای ورودی، پارامترهای تأثیرگذار و قابل تغییر در فرآیند هستند که یک دسته از این پارامترها در آزمایش عملی بکار برده شده است. با مشخص شدن این پارامترها، واحد و بازه تغییرات آنها، یک سری شبیه‌سازی با تلفیقی از پارامترهای ورودی، توسط نرم‌افزار داده می‌شود.

در جدول 4 پارامترهای ورودی و نحوه جایگشت لایه‌ها نشان داده شده است. با توجه به پارامترهای ورودی که هرکدام شامل اعداد انتخابی هستند، تعداد 9 شبیه‌سازی تلفیقی از پارامترهای ورودی، توسط نرم‌افزار پیش‌بینی شده است.

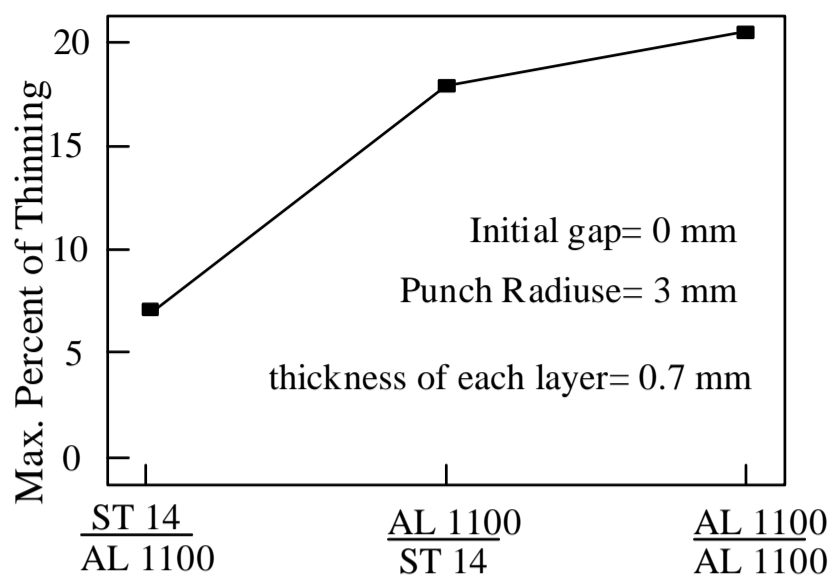
#### 5-2- پارامترهای خروجی

1- نازک‌شدگی

2- نیروی ورق گیر

3- نیروی وارد بر سنبه

در این تحقیق، دو مسیر روی نمونه مربعی یکی در راستای قطری و دیگری در راستای ضلع مربع ترسیم‌شده و از روی کانتور، روند تغییرات پارامتر خروجی موردنظر، استخراج می‌شود. صحت نتایج طراحی آزمایش توسط تحلیل آنوا بررسی شد.



Material and Permutation Two Layers Sheet

Fig. 18 The Effect Material and Permutation Two Layers Sheet on Maximum Percent of Thinning of Top Layer

شکل 18 نمودار تأثیر جنس و جایگشت ورق دولایه بر بیشترین درصد نازک‌شدگی لایه‌های بالایی

شکل 17، نمودار توزیع ضخامت را در لایه آلومینیومی، بر اساس جایگشت آن در ورق دولایه AL-ST و ST-AL به صورت تجربی نشان می‌دهد. همچنین واضح است لایه آلومینیومی در ورق دولایه AL-ST، به علت قرارگیری در ناحیه خارجی فنجان تحت کشش بیشتری نسبت به ورق دولایه AL-ST قرار گرفته است، همین امر موجب پارگی در این لایه آلومینیوم شده است. بیشترین درصد نازک‌شدگی در لایه آلومینیومی ورق ST-AL، 50 درصد بیشتر از لایه آلومینیومی ورق دولایه AL-ST می‌باشد

## 7- تحلیل نتایج

### 7-1- تأثیر جنس و جایگشت بر نازک‌شدگی

شکل 18، نمودار تأثیر جنس و جایگشت ورق دولایه را بر روی بیشترین نازک‌شدگی لایه‌های بالایی نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود با تغییر جایگشت و جابجایی جنس در لایه‌های ورق دولایه، درصد نازک‌شدگی تغییر خواهد یافت. بیشترین درصد نازک‌شدگی در ورق دولایه فولاد-آلومینیوم (لایه بالایی-لایه زیرین)، در مقایسه با ورق دولایه آلومینیوم-فولاد، 59 درصد افزایش پیدا خواهد کرد، این درصد برای ورق دولایه آلومینیوم-آلومینیوم، 15 درصد بیشتر از ورق دولایه فولاد-آلومینیوم می‌باشد.

مشاهده می‌شود علاوه بر نوع جنس لایه بالایی، جنس لایه زیرین نیز بر میزان نازک‌شدگی لایه بالایی تأثیرگذار است.

شکل 19 نمودار تأثیر فاصله اولیه را بر روی بیشترین درصد نازک‌شدگی ورق دولایه نشان می‌دهد. فاصله بین ورق گیر و حلقه ثابت به این منظور در نظر گرفته شده است که فضایی جهت افزایش حجم لاستیک وجود داشته باشد، این امر موجب افزایش پیشروی سنبه به داخل لاستیک خواهد شد.

همچنین فشار هیدرو استاتیکی وارد شده از طرف لاستیک به نمونه کشیده شده، باعث توزیع یکنواخت‌تر نیروی شکل‌دهی و نازک‌شدگی در نقاط مختلف نمونه می‌شود، در نتیجه با افزایش فاصله اولیه، فشار وارده از طرف لاستیک به نمونه کاهش یافته و نازک‌شدگی در هر دولایه ورق افزایش می‌یابد. بر همین اساس، با افزایش فاصله اولیه از صفر به 3 میلی‌متر، بیشترین درصد نازک‌شدگی برای لایه بالایی و زیرین، به ترتیب 39 و 74 درصد افزایش خواهد یافت.

شکل 20 نمودار تأثیر شعاع سنبه بر روی بیشترین درصد نازک‌شدگی ورق‌های دولایه نشان می‌دهد. در هر دولایه، با افزایش شعاع سنبه به 5

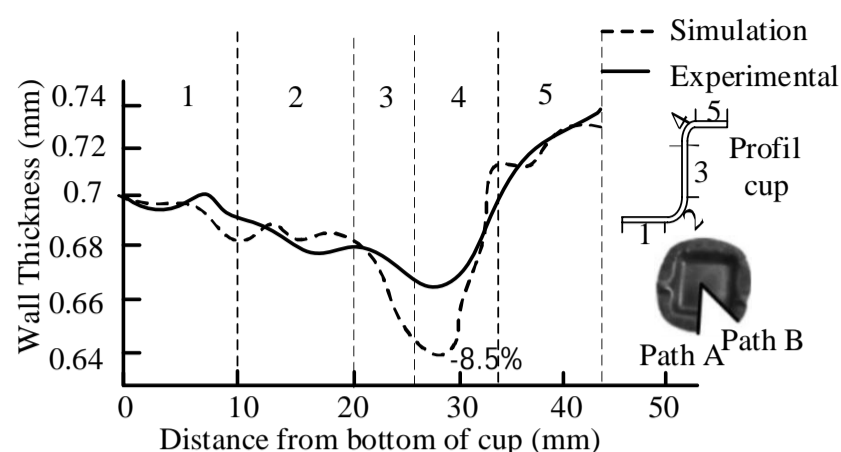


Fig. 15 Thickness distribution layer ST in path B Based on experimental and simulation

شکل 15 نمودار توزیع ضخامت لایه فولادی در راستای B بر اساس بررسی تجربی و شبیه‌سازی

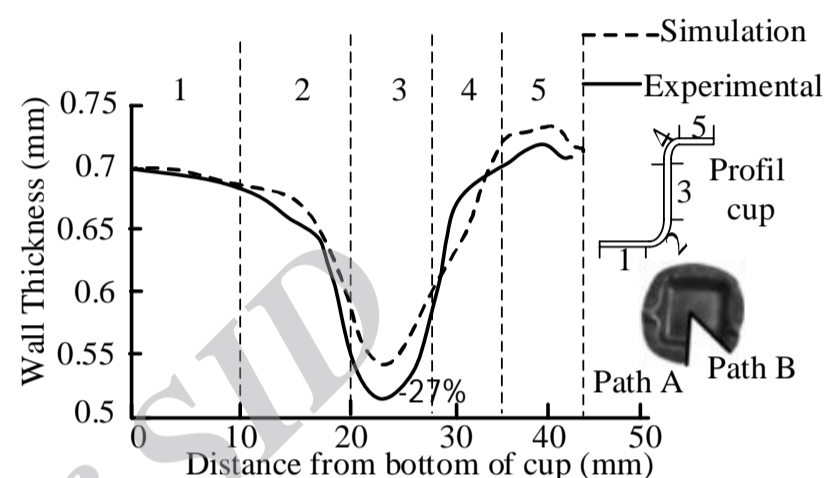


Fig. 16 Thickness distribution layer AL in path B Based on experimental and simulation

شکل 16 نمودار توزیع ضخامت لایه آلومینیومی در راستای مسیر B بر اساس کار تجربی و عددی

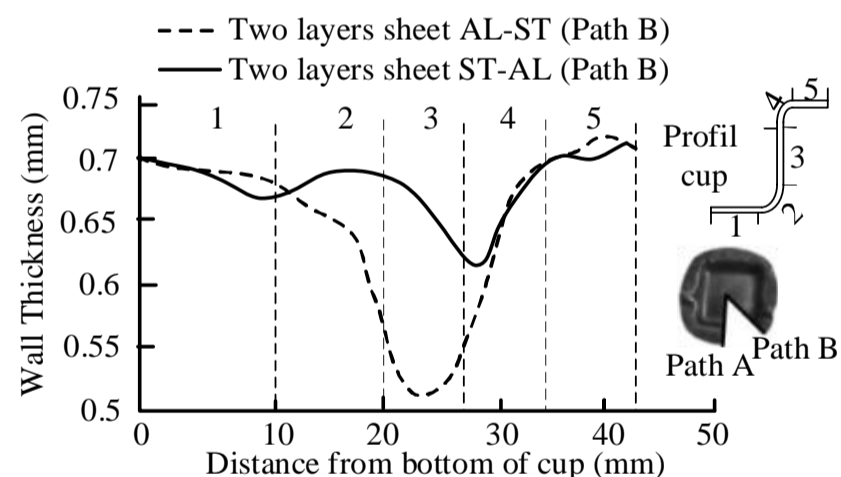


Fig. 17 Thickness distribution layer AL Based on permutations in two layers sheet in experiment

شکل 17 نمودار توزیع ضخامت لایه آلومینیومی بر اساس جایگشت در ورق‌های دولایه به صورت تجربی

شکل 15، نمودار توزیع ضخامت لایه فولادی در ورق دولایه ST-AL در راستای B بر اساس بررسی تجربی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد. نتایج هر دو بررسی نشان می‌دهد، لایه فولادی در ناحیه دیواره وسط و لبه بالایی فنجان، دچار بیشترین نازک‌شدگی می‌شود. بیشترین درصد نازک‌شدگی در این ناحیه با توجه به نتایج عددی 8.5 درصد است.

بیشترین اختلاف بین داده‌های تجربی و عددی در نمودار 33 درصد است. شکل 16، نمودار توزیع ضخامت لایه آلومینیومی را در ورق دولایه ST-AL در راستای B بر اساس کار تجربی و عددی نشان می‌دهد. بر اساس نتایج هر دو بررسی، این لایه در ناحیه دیواره وسط با بیشترین نازک‌شدگی مواجه می‌شود. بیشترین درصد نازک‌شدگی در بررسی تجربی به دلیل پارگی ایجاد شده در این ناحیه، 27 درصد می‌باشد.

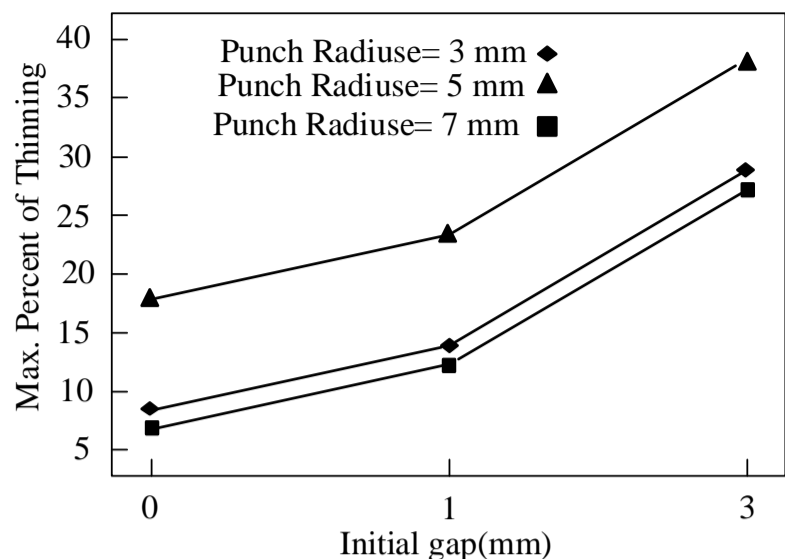


Fig. 21 The Effect Punch Radiuse and Initial gap on Maximum Percent of Thinning

شکل 21 نمودار تأثیر شعاع سنبه و فاصله اولیه بر بیشترین درصد نازک‌شدگی

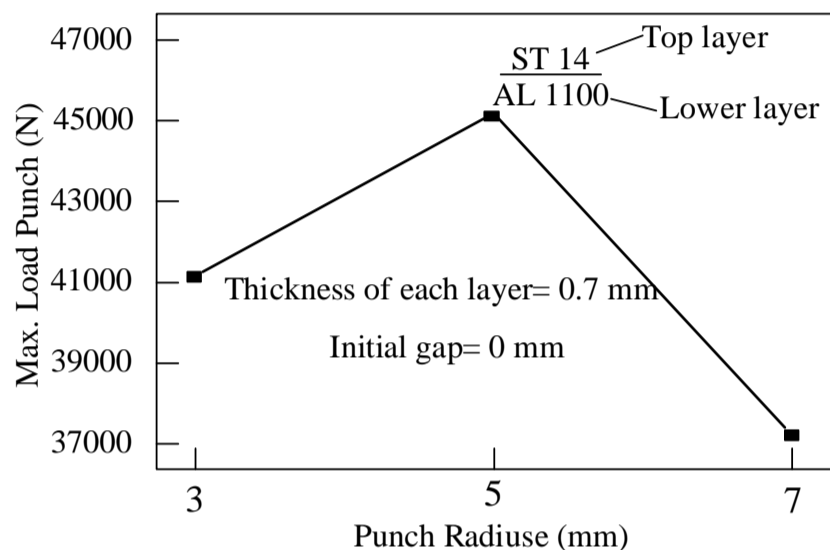


Fig. 22 The Effect Punch Radiuse on Maximum Load Punch

شکل 22 نمودار تأثیر شعاع سنبه بر بیشترین بار سنبه

ملاحظه می‌شود، با ایجاد جایگشت و تغییر جنس لایه‌های ورق به آلومینیوم، بیشترین بار سنبه کاهش خواهد یافت، اما این رویه، با افزایش فاصله اولیه، افزایش می‌یابد. در این بررسی، بیشترین بار سنبه در ورق دولایه آلومینیوم - فولاد و فاصله اولیه 3 میلی‌متر اتفاق می‌افتد که با به‌کارگیری ورق دولایه آلومینیومی و حذف فاصله اولیه این بار با کاهش 44 درصدی مواجه می‌شود. شکل 24، نمودار تأثیر فاصله اولیه روی نیروی وارد بر سنبه را نشان می‌دهد. با افزایش فاصله اولیه، لاستیک فضای بیشتری برای حرکت داشته در نتیجه کمتر متراکم می‌شود و سنبه راحت‌تر به داخل لاستیک نفوذ می‌کند. در نتیجه فشار عکس‌العملی که لاستیک به سنبه وارد می‌کند، کاهش می‌یابد. به طوری که با افزایش فاصله اولیه از کمترین مقدار به حداکثر مقدار مورد نظر، نیروی وارد بر سنبه تا 35.8% کاهش می‌یابد.

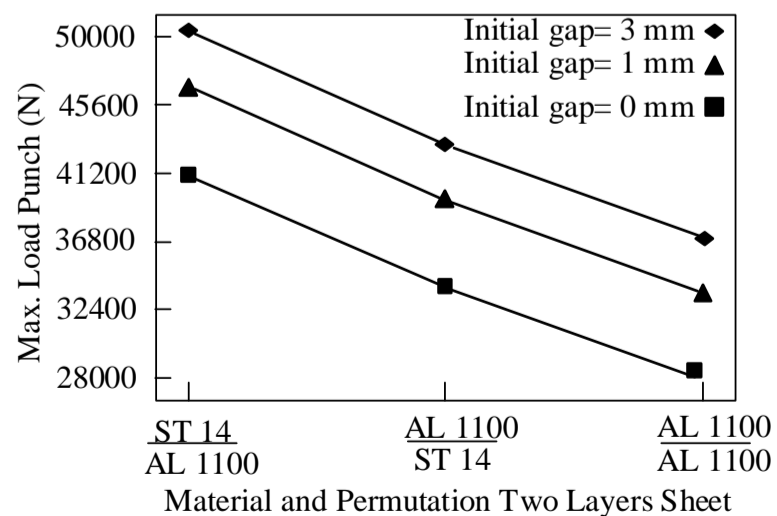


Fig. 23 The Effect Material and Initial Distance on Maximum Load Punch

شکل 23 نمودار تأثیر جنس و فاصله اولیه بر بیشترین بار سنبه

میلی‌متر، درصد نازک‌شدگی به دلیل ایجاد جریان موضعی در نمونه کشش، افزایش پیدا می‌کند که درصد افزایش در لایه زیرین و بالایی به ترتیب برابر، 64 و 49 درصد می‌باشد؛ اما با افزایش بیشتر شعاع لبه سنبه، جریان راحت‌تر ورق فراهم می‌شود و همین موجب کاهش نازک‌شدگی در فنجان دولایه می‌شود. با افزایش 28 درصدی شعاع سنبه، بیشترین درصد نازک‌شدگی در لایه زیرین و بالایی به ترتیب، 55 و 38 درصد کاهش خواهد یافت.

شکل 21 نمودار تأثیر شعاع سنبه و فاصله اولیه را بر روی بیشترین درصد نازک‌شدگی نشان می‌دهد. تأثیر هر یک از این دو پارامتر بیان شده است، اما بیشترین درصد نازک‌شدگی در این بررسی، در حالی که از فاصله اولیه 3 میلی‌متر و شعاع سنبه 5 میلی‌متر استفاده می‌شود، اتفاق می‌افتد که با افزایش 28 درصدی شعاع سنبه و حذف فاصله اولیه، بیشترین درصد نازک‌شدگی در این بررسی، 80 درصد کاهش خواهد یافت.

شکل 22، نمودار تأثیر شعاع سنبه را بر روی بیشترین بار سنبه نشان می‌دهد. با افزایش شعاع سنبه به 5 میلی‌متر، بار سنبه به دلیل جریان پیدا نکردن ورق پیرامون لبه سنبه، افزایش پیدا می‌کند. همین امر موجب افزایش نازک‌شدگی نیز می‌شود؛ اما با افزایش 28 درصدی شعاع سنبه، جریان ورق بهبود می‌یابد و در نتیجه بیشترین بار وارد بر سنبه، 18 درصد کاهش پیدا می‌کند.

شکل 23، نمودار تأثیر جنس، جایگشت و فاصله اولیه را بر روی بیشترین بار سنبه نشان می‌دهد.

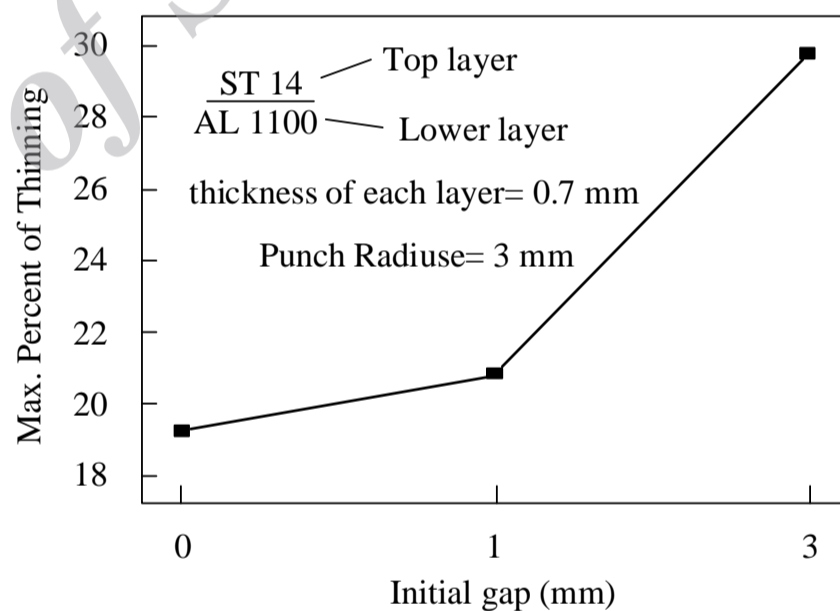


Fig. 19 The Effect Initial Distance on Maximum Percent of Thinning on Lower Layer

شکل 19 نمودار تأثیر فاصله اولیه بر بیشترین درصد نازک‌شدگی در لایه زیرین

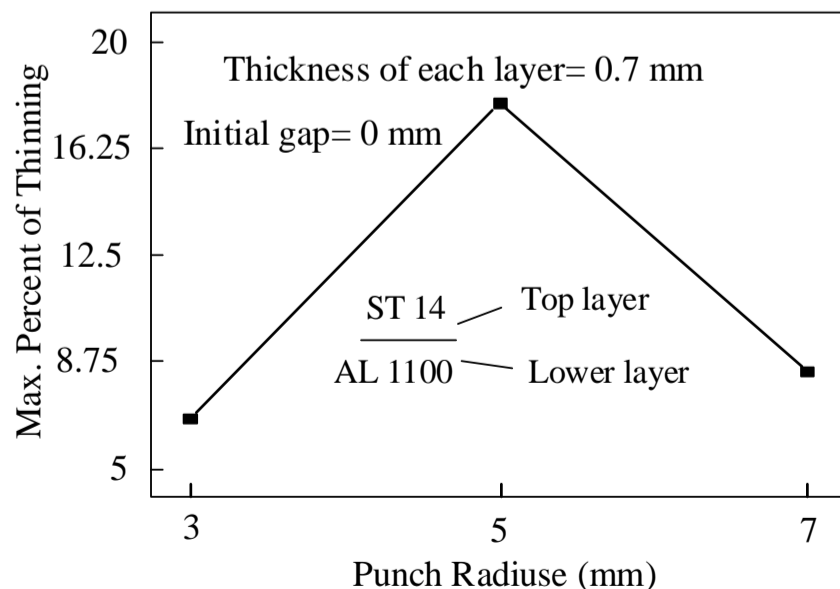


Fig. 20 The Effect Punch Radiuse on Maximum Percent of Thinning on Top Layer

شکل 20 نمودار تأثیر شعاع سنبه بر بیشترین درصد نازک‌شدگی در لایه بالایی

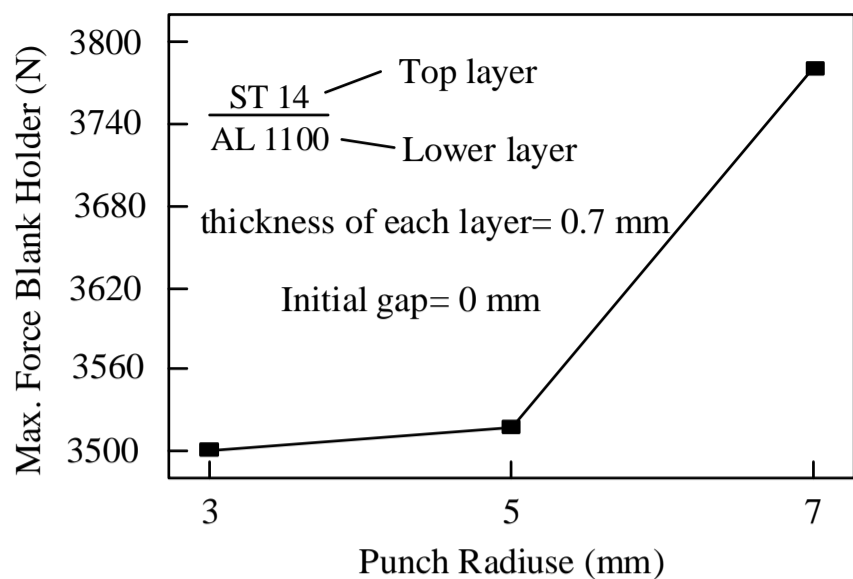


Fig. 27 The Effect Punch Radius on Maximum Force Blank Holder

شکل 27 نمودار تأثیر شعاع سنبه بر بیشترین نیروی ورق گیر

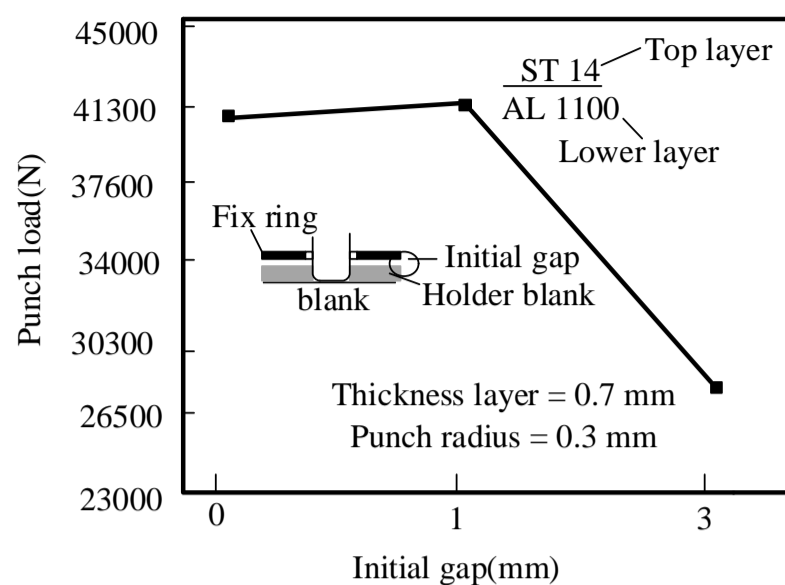


Fig. 24 Effects of initial gap on the force of the punch

شکل 24 نمودار تأثیر فاصله اولیه بر نیروی وارد بر سنبه

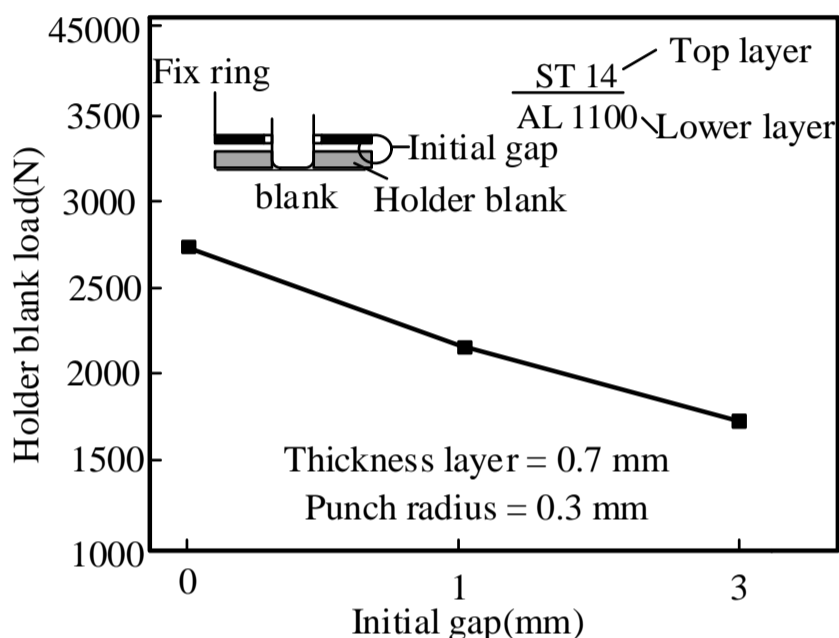


Fig. 28 Effects of initial gap on the force of the holder

شکل 28 نمودار تأثیر فاصله اولیه روی نیروی ورق گیر

با افزایش استحکام کششی ورق، بیشترین نیروی ورق گیر نیز افزایش می‌یابد. بیشترین نیروی ورق گیر در ورق دولایه آلومینیومی، 24 درصد کمتر از ورق دولایه آلومینیوم-فولاد می‌باشد.

شکل 27، نمودار تأثیر شعاع سنبه بر بیشترین نیروی ورق گیر در ورق دولایه را نشان می‌دهد. با افزایش شعاع سنبه، چروکیدگی در ناحیه لبه فنجان افزایش می‌یابد، لذا برای حذف چروکیدگی، افزایش نیروی ورق گیر الزامی می‌باشد. با افزایش 57 درصدی شعاع لبه سنبه، بیشترین نیروی ورق گیر نیز 7 درصد افزایش می‌یابد.

شکل 28 نمودار تأثیر فاصله اولیه روی نیروی ورق گیر را نشان می‌دهد. با افزایش فاصله اولیه، لاستیک فضای بیشتری برای حرکت داشته در نتیجه کمتر متراکم می‌شود و سنبه راحت‌تر به داخل لاستیک نفوذ می‌کند در نتیجه فشار عکس‌العملی که لاستیک به ورق گیر وارد می‌کند، کاهش می‌یابد. با افزایش فاصله اولیه از کمترین مقدار یعنی صفر به 3 میلی‌متر، نیروی وارد بر ورق گیر تا 44.4 درصد کاهش یافته است.

### 8- نتیجه گیری

- 1- در نمونه‌های دولایه آلومینیوم-فولاد و فولاد-آلومینیوم، پارگی فقط در لایه آلومینیوم زیرین اتفاق افتاده است.
- 2- بیشترین نازک‌شدگی در مسیر A که مسیر 45 درجه قطری نمونه است اتفاق می‌افتد که حداکثر مقدار آن 30- درصد است.
- 3- در نمونه آلومینیوم-فولاد، بیشترین نازک‌شدگی در لایه آلومینیوم،

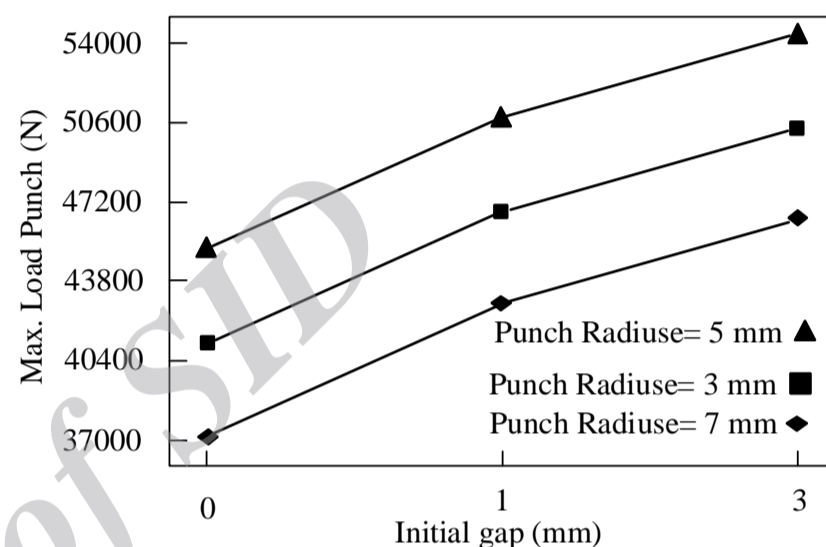


Fig. 25 The Effect Punch Radius and Initial gap on Maximum Load Punch

شکل 25 نمودار تأثیر شعاع سنبه و فاصله اولیه بر بیشترین بار سنبه

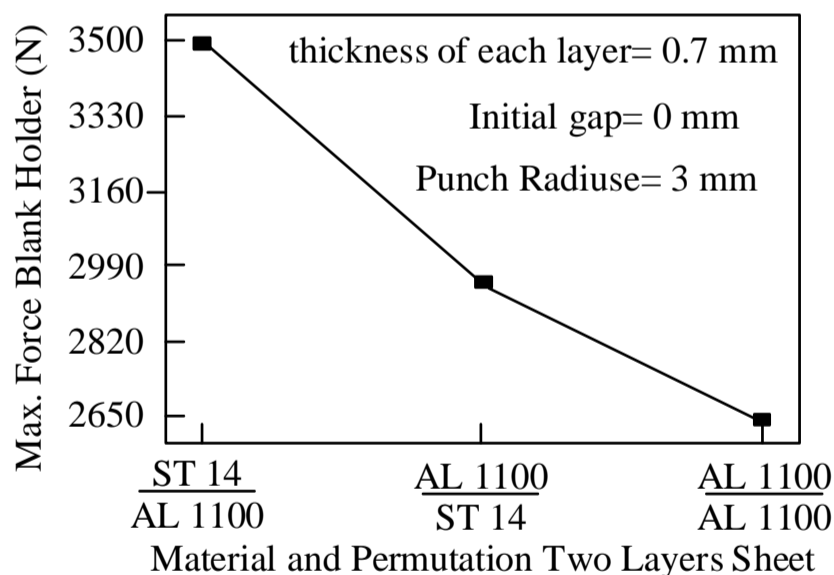


Fig. 26 The Effect Material and Permutation Two Layers Sheets on Maximum Force Blank Holder

شکل 26 نمودار تأثیر جنس و جایگشت ورق دولایه بر بیشترین نیروی ورق گیر

شکل 25، نمودار تأثیر شعاع سنبه و فاصله اولیه را بر بیشترین بار سنبه نشان می‌دهد. در این بررسی، با افزایش فاصله اولیه، بیشترین بار سنبه افزایش پیدا می‌کند، ملاحظه می‌شود، بیشترین بار سنبه در فاصله اولیه 3 میلی‌متر و شعاع سنبه 5 میلی‌متر به بالاترین مقدار خود می‌رسد؛ اما با حذف فاصله اولیه و افزایش 28 درصدی شعاع سنبه، بیشترین بار سنبه کاهش، 31 درصدی خواهد یافت.

شکل 26 نمودار تأثیر جنس و جایگشت ورق دولایه را بر روی بیشترین نیروی ورق گیر نشان می‌دهد. بیشترین نیروی ورق گیر جهت تولید قطعه‌ای بدون چروکیدگی، به‌طور مستقیم وابسته به جنس ورق خام می‌باشد.



## 9- مراجع

- 14- درصد و در لایه فولاد، 20- درصد است.
- 4- در نمونه فولاد-آلومینیوم، بیشترین نازک‌شدگی در لایه فولاد 8.5- درصد و در لایه آلومینیوم، 27- درصد است
- 5- با افزایش فاصله اولیه در نمونه فولاد-آلومینیوم، از صفر به 3 میلی‌متر، بیشترین درصد نازک‌شدگی برای لایه زیرین و بالایی، به ترتیب 74 و 39 درصد افزایش خواهد یافت.
- 6- با افزایش 28 درصدی شعاع سنبه در نمونه فولاد-آلومینیوم، بیشترین درصد نازک‌شدگی در لایه زیرین و بالایی به ترتیب، 55 و 38 درصد کاهش خواهد یافت.
- 7- بیشترین بار سنبه برای ورق دولایه فولاد-آلومینیوم (لایه بالایی-لایه زیرین)، 17 درصد کمتر از ورق دولایه آلومینیوم-فولاد می‌باشد که با به‌کارگیری ورق دولایه آلومینیوم-آلومینیوم، این نیرو کاهش 32 درصد می‌یابد.
- 8- با افزایش شعاع سنبه از 3 میلی‌متر به 7 میلی‌متر، بیشترین بار وارد بر سنبه، 18 درصد کاهش پیدا می‌کند.
- 9- در تأثیر جنس و فاصله اولیه، بیشترین بار سنبه در ورق دولایه آلومینیوم-فولاد و فاصله اولیه 3 میلی‌متر اتفاق می‌افتد که با به‌کارگیری ورق دولایه آلومینیومی و حذف فاصله اولیه این بار با کاهش 44 درصدی مواجه می‌شود.
- 10- با افزایش فاصله اولیه از کمترین مقدار به حداکثر مقدار موردنظر، نیروی وارد بر سنبه تا 35.8 درصد کاهش می‌یابد.
- 11- در تأثیر جنس و جایگشت ورق‌های دولایه، بیشترین نیروی ورق‌گیر در ورق دولایه آلومینیومی، 24 درصد کمتر از ورق دولایه آلومینیوم-فولاد می‌باشد.
- 12- با افزایش 57 درصدی شعاع لبه سنبه، بیشترین نیروی ورق‌گیر نیز 7 درصد افزایش می‌یابد.
- 13- با افزایش فاصله اولیه از کمترین مقدار یعنی صفر به 3 میلی‌متر، نیروی وارد بر ورق‌گیر تا 44.4 درصد کاهش یافته است.
- [1] F. N. Huei Yeh, Ch. N. Lun Li, Y. U. Hwa Lu, Study of thickness and grain size effects on material behavior in micro-forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 201, No. 1, pp. 237–241, 2008.
- [2] F. A. Vollertsen, Zh. Y. Hu, H. D. Niehoff, H. Schulze, Carmen Theiler, State of the art in micro forming and investigations into micro deep drawing, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 151, No. 1-3, pp. 70–79, 2004.
- [3] L. V. Raulea, A. M. Goijaerts, L. E. Govaert, F. P. T. Baaijens, Size effects in the processing of thin metal sheets, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 115, No. 1, pp. 44–48, 2001.
- [4] M. H. Parsa, K. D. Yamaguchi, N. S. Takakura. Redrawing analysis of aluminum stainless-steel laminated sheet using FEM simulations and experiments. *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 43, No. 10, pp. 31–47, 2010.
- [5] Li. H. Chen, J. Yang, Experimental and numerical simulation on delamination during the laminated steel sheets forming processes, *Iranian Journal of advanced manufacturing technology*, Vol. 68, No. 1-4, pp. 641-649, 2013.
- [6] I. S. Irthiea, G. H. Green, S. F. Hashim, A. B. Kriama, Experimental and numerical investigation on micro deep drawing process of stainless steel 304 foil using flexible tools, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 76, pp. 21–33, January 2014.
- [7] Y. X. Li, L. N. Hua, J. A. Lan, Studies of the deformation styles of the rubber-pad forming process used for manufacturing metallic bipolar plates, *Journal of Power Sources*, Vol. 195, No. 24, pp. 8177–8184, 2010.
- [8] M. Z. Ramezani, Z. I. Mohd Ripin, R. S. Ahmad, Sheet metal forming with the aid of flexible punch, numerical approach and experimental validation-CIRP, *Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 3, No. 3, pp. 196–203, 2010.
- [9] L. F. Peng, P. N. Hu, X. M. La, Investigation of micro/meso sheet soft punch stamping process simulation and experiments, *Materials and Design*, Vol. 30, No. 3, pp. 783–790, 2009.
- [10] K. M. Younis & A. Sh. Jaber, Experimental and Theoretical Study of Square Deep Drawing, *International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 29, No.12, pp. 2456-2467 2011.
- [11] A. I. Atrian, F. M. Fereshteh-Saniee, Deep drawing process of steel/brass laminated sheets, *Composites: Part B*, Vol. 47, No.47 pp.75–81, 2013.
- [12] R. seyfi, j. abbasi, Investigation numerical and experimental wrinkles sheets in deep drawing bimetallic plats, *Master's article, Journal of Applied and computational mechanics*, Vol. 25, No. 2, pp. 10, 1393. (in persian)