

کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی فنجان‌های مربعی دولایه آلومینیوم- فولاد

سید حسن علوی هاشمی

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

سید محمد حسین سیدکاشی*

دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

حسین امیرآبادی

دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

چکیده

در این پژوهش شکل‌دهی فنجان‌های مربعی از ورق دولایه آلومینیوم-فولاد در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی با هدف بررسی پارامترهای فرآیند و تأثیر آنها بر ضخامت فنجان مطالعه شده است. نخست، با شبیه‌سازی اجزای محدود با نرم‌افزار آباکوس، مسیرهای فشار متفاوت برای شکل‌دهی فنجان مربعی بررسی و آزمایش‌های تجربی برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی انجام شد. بر اساس نتایج مشخص شد مقادیر کمتر فشار بیشینه و سرعت سنبه، منجر به وقوع پارگی در ناحیه تماس شعاع سنبه با ورق می‌گردد. همچنین در فشارها و سرعت‌های بالاتر، توزیع ضخامت فنجان‌های مربعی به مسیر فشار وابسته است. با تعیین مسیر فشار مطلوب و اعمال آن، فنجان مربعی با نسبت کشش بالا شکل داده شد. در مرحله بعد، تأثیر پارامترهای هندسی و فرآیندی با شبیه‌سازی اجزای محدود در مسیر فشار مطلوب، توسط طراحی آزمایش بررسی و با روش آماری تحلیل واریانس مورد تفسیر قرار گرفت. از بین عوامل بررسی شده، اثر مستقیم شعاع نوک سنبه و اثر متقابل بین نسبت ضخامت لایه‌ها و جانمایی ورق، تأثیر معناداری بر حداقل ضخامت فنجان مربعی داشتند. در نهایت نیز مقادیر بهینه عوامل مؤثر به دست آمدند.

واژه‌های کلیدی: فنجان مربعی، ورق دو لایه آلومینیوم-فولاد، کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی، شبیه‌سازی اجزای محدود، طراحی آزمایش.

Hydrodynamic Deep Drawing Assisted by Radial Pressure of Al/St Bimetal Square Cups

S. H. Alavi Hashemi

S. M. H. Seyedkashi

H. Amirabadi

Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

Abstract

In this research, forming of Bimetal (Al/St) square cups in hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure process has been studied aiming to investigate the parameters and their effects on the thickness of cups. At first, using finite element simulations by Abaqus software, different pressure paths were tried to form the square cup, and experiments were utilized to validate the results. The results showed that lower maximum pressure and lower punch velocity lead to tearing on the sheet contact area with the punch tip. Also, they demonstrated that at higher levels of pressures and punch velocities, the wall thickness distribution of the square cups depends on the pressure path. By applying the pressure path with the desired maximum amount, the square cups with high deep drawing ratio were formed. In the next step, the effect of several important parameters in terms of the desired pressure path was investigated using design of experiments, and the results were interpreted using ANOVA. Among the studied factors, direct effect of the punch tip radius and the interaction of the layers layout and thickness ratio had a significant effect on the minimum thickness of square cups. Finally, the optimal factor values were also obtained.

Keywords: Square cup, Bimetal Al/St sheet, Hydrodynamic Deep Drawing Assisted by Radial Pressure, Finite Element Simulation, Design of Experiments.

۱-مقدمه

در طی سال‌های اخیر فناوری هیدروفورمینگ به دلیل مزایای زیاد آن از جمله نسبت کشش زیاد، کیفیت سطح مطلوب، دقت ابعادی بالا و قابلیت شکل‌دهی قطعات پیچیده برای شکل‌دهی قطعات در زمینه‌های مختلف ساخت و تولید از جمله صنایع اتومبیل‌سازی، صنایع هوا و فضا و صنایع نفت و گاز کاربرد وسیعی یافته است [۱-۴]. تاکنون نوآوری‌های زیادی در زمینه هیدروفورمینگ ورق ارائه شده است که به عنوان مثال می‌توان از روش هیدروریم، هیدروفورمینگ استاندارد، کشش عمیق آکوادرا^۱، کشش عمیق هیدرومکانیکی، کشش عمیق هیدرودینامیکی، هیدروفورمینگ ورق با قالب متحرک، هیدروفورمینگ

ورق دو بشکه‌ای^۲ و کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی نام برد [۱-۴]. در این میان، استفاده از کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی برای تولید قطعات استوانه ای با نسبت کشش بالا در یک مرحله نتایج خوبی داشته است. در این روش در حالیکه ورق بین ورقگیر و ماتریس آزاد است، سیال در زیر ورق قرار می‌گیرد و ضمن اعمال فشار در جهت محوری قائم، همراه با نشست سیال در جهت شعاعی نیز بر لبه ورق فشار وارد می‌کند که بوجود آمدن این فشار باعث جریان یافتن راحت‌تر ورق می‌شود [۴و۵].

مطالعات اخیر بر روی بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند، جهت تولید محصولات غیردایره‌ای و نامنظم متمرکز شده است؛ با این حال، مطالعات کمی در زمینه هیدروفورمینگ قطعه‌های مربعی انجام شده است. لانگ و همکاران [۶] به ارائه فناوری‌های کلیدی در شبیه‌سازی

^۱ Aquadraw

^۲ Twin bulging

فرآیند کشش عمیق هیدروپنمایی قطعات نامنظم پرداختند. آنها با اعمال یک مدل ریاضی برای جریان سیال بین فلنج و قالب در شبیه سازی، به بررسی پارامترهای فرآیند از جمله شعاع ورودی قالب، روانکاری، هندسه ورق اولیه، و کنترل جریان مواد برای کشش یک فنجان مستطیل شکل مخروطی پرداخته و نتایج را با آزمایش‌های تجربی مقایسه نمودند. باقرزاده و همکاران [۷] مدل‌های تحلیلی را جهت تجزیه و تحلیل تنش و شرایط ناپایداری در کشش عمیق هیدرومکانیکی فنجان استوانه‌ای آلومینیوم فولاد بررسی کردند. ایشان بر اساس این مدل‌ها، مطالعه پارامتری را بر روی تأثیر ضخامت و جانمایی لایه‌ها، نسبت کشش و شرایط اصطکاکی، بر روی پارامتر کلیدی فشار بحرانی انجام دادند و توسط آزمایش‌های تجربی صحت نتایج تحلیلی و پیش‌بینی پنجره فشار را بررسی کردند. آنها نشان دادند که پنجره فشار سیال می‌تواند به طور سریع و با دقت قابل قبولی توسط مدل تحلیلی پیش‌بینی شود. در پژوهشی دیگر، باقرزاده و همکاران [۸] فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی فنجان استوانه‌ای دو لایه آلومینیوم فولاد را با استفاده از شبیه سازی اجزای محدود و کد اصلی فرترن جهت مدلسازی دقیق توزیع نامتقارن فشار سیال مورد تجزیه و تحلیل قرار داده و جهت تأیید نتایج اجزای محدود، آزمایش‌های تجربی را به طور گسترده انجام دادند. ایشان اثر پارامترهای فرآیند مانند ضخامت لایه‌ها، ترتیب جانمایی ورق، پنجره فرآیند فشار سیال، نیروی شکل‌دهی و قابلیت شکل‌پذیری را به عنوان پارامترهای کلیدی بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد که شرایط مناسب فرآیند را می‌توان توسط مدل اجزای محدود توسعه یافته، به طور منطقی پیش‌بینی نمود. هاشمی و همکاران [۹] تجزیه و تحلیل المان محدود تطبیقی کشش عمیق هیدروفرمینگ فنجان دو لایه مخروطی-استوانه‌ای را بررسی نمودند. آنها شرایط شکل‌دهی را توسط شبیه سازی المان محدود و با استفاده از زبان طراحی پارامتری انسیس به دست آوردند و پارامترهای مؤثر، از جمله مسیر فشار، جانمایی لایه‌ها و نسبت ضخامت را برای ورق‌های دو لایه آلومینیوم فولاد و مس فولاد بررسی نمودند و جهت اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی، آزمایش‌های تجربی انجام دادند. هاشمی و همکاران [۱۰] در پژوهشی دیگر از یک روش ترکیبی برای بهینه‌سازی مسیر فشار در فرآیند کشش عمیق هیدروپنمایی ورق دو لایه آلومینیوم فولاد بهره بردند. آنها با سازگارسازی و گسترش الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده (SA) همراه با یک کد المان محدود تطبیقی، تعریف جدیدی را از پارامترهای الگوریتم به منظور شکل‌دهی قطعه بدون چروکیدگی و شکست ارائه دادند؛ و در نهایت صحت روش تطبیقی را با آزمایش تجربی اثبات کردند. سیدکاشی و همکاران [۱۱] با استفاده از آزمایش تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود به ارائه یک پنجره فرآیند در کشش عمیق هیدرومکانیکی فنجان‌های مربعی دولایه آلومینیوم-فولاد پرداختند. آنها تأثیر پارامترهای ضخامت لایه‌های ورق، فشار پیش‌بالج، فشار محفظه‌ای و ضریب اصطکاک را بر روی ناحیه‌ی کاری بررسی نمودند.

تاکنون تحقیقاتی در مورد شکل‌دهی فنجان مربعی از ورق دو لایه توسط فرآیند کشش عمیق هیدروپنمایی با فشار شعاعی انجام نشده است. فرآیند کشش عمیق هیدروپنمایی با فشار شعاعی دارای مزایایی از جمله، عدم استفاده از آب بندی، ایجاد فشار شعاعی در ناحیه فلنج ورق و ایجاد مسیر فشار با استفاده از حرکت سنبه است. از

این روش شناخت دقیق و درست اثرات پارامترها و شرایط فرآیند در افزایش کیفیت فنجان مربعی، با توجه به ماهیت غیر دوار آن ضروری است. از این روش تفاوت پژوهش حاضر با پژوهش‌های پیشین را می‌توان در بکارگیری نوع فرآیند متفاوت و در نتیجه ایجاد شرایط متفاوت در شکل‌دهی فنجان مربعی، استفاده از ورق دو لایه با جنس و ضخامت متفاوت، بررسی تأثیر پارامترهای هندسی قالب هیدروپنمایی با فشار شعاعی و بررسی تأثیر تغییر سرعت سنبه بر مسیر فشار و در نتیجه بر کیفیت فنجان مربعی که قبلاً مورد بحث و بررسی قرار نگرفته است اشاره کرد.

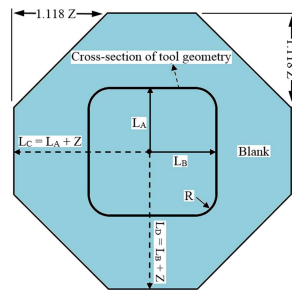
مسیر فشار یکی از مهمترین پارامترها در فرآیند هیدروفرمینگ است که توسط تعداد زیادی از محققان بررسی شده است [۱۲-۱۴]. در این مقاله، ابتدا هدف، بررسی اثر مسیر فشار بر شکل‌پذیری و ضخامت قطعات مربعی با استفاده از روش کشش عمیق هیدروپنمایی با فشار شعاعی می‌باشد. به جهت تعیین مسیر فشار مطلوب، با روش شبیه‌سازی اجزای محدود، مسیرهای فشار متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. برای تأیید و صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی، آزمایش‌های تجربی نیز انجام شدند. همچنین تأثیر سرعت سنبه بر مسیر فشار شکل‌دهی و در نتیجه اثر آن بر مقدار حداقل ضخامت فنجان‌های مربعی مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله بعد، تأثیر عواملی از قبیل شعاع نوک سنبه، شعاع گوشه قالب، لقی بین سنبه و ماتریس، نسبت ضخامت لایه‌ها در ورق دو لایه و جانمایی ورق در قالب در شرایط فشار مطلوب، توسط طراحی آزمایش به روش عاملی کامل و شبیه‌سازی المان محدود انجام شده و نتایج با استفاده از روش تحلیل آماری تفسیر واریانس مورد بحث قرار گرفته است.

۲- مراحل آزمایشگاهی

شکل ۱ طرحواره مجموعه قالب هیدروپنمایی استفاده شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. آزمایش‌های تجربی با استفاده از یک دستگاه پرس اوینیورسال ۴۰ تن انجام شد. شکل ۲ مجموعه قالب استفاده شده را در حالت نصب شده بر روی دستگاه نشان می‌دهد. برای بهبود بخشیدن به جریان فلز در حین فرآیند هیدروفرمینگ، ابتدا یک فشار اولیه در زیر ورق اعمال گردید. سپس همزمان با حرکت سنبه و افزایش فشار درون محفظه ماتریس، ورق به داخل ماتریس کشیده شد. پس از رسیدن فشار سیال به مقدار بیشینه، شیر کنترل فشار باز گردید و از آن پس عملیات شکل‌دهی با فشار ثابت انجام شد. بدلیل استفاده از فرآیند هیدروپنمایی در این پژوهش، آب‌بندی انجام شده بین ورق‌گیر و ماتریس از نوع فلز با فلز بوده و از هیچ اورینگ برای آب بندی استفاده نگردید. در نتیجه از فاصله بین ورق‌گیر و ماتریس سیال نشت می‌کرد و امکان اعمال فشار اولیه بالا وجود نداشت. در مجموعه قالب این مقاله حداکثر فشار اولیه قابل اعمال MPa ۲/۵ بود. شکل ۴ مسیر فشار نمونه اعمالی در این پژوهش را نشان می‌دهد که در آن مسیر فشار OA، مسیر فشار اولیه است که بدون حرکت سنبه اعمال می‌گردید. مسیر فشار BC مسیر فشار ثابتی است که فشار حداکثر اعمالی است و در طی آن سیال از شیر کنترل فشار تخلیه می‌گردید. مسیر فشار AB مسیر فشار خطی است که با تغییر در سرعت سنبه شیب آن قابل تغییر بود. همچنین جنس سیال استفاده شده در آزمایش‌ها روغن SAE 20 می‌باشد.

$$\beta_{eq}^2 = \frac{A_0}{A_m}$$

(۱)

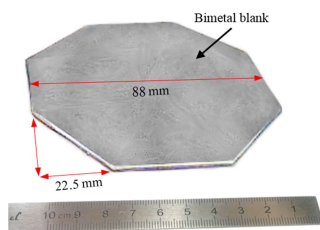


شکل ۴- هندسه ورق اولیه [۱۵ و ۱۶]

در رابطه (۱)، β_{eq} نسبت کشش معادل، A_0 مساحت ورق تغییر شکل نیافته و A_m متوسط مساحت سنبه و حفره قالب است. ابعاد هندسه ورق اولیه، مطابق با شکل ۴ محاسبه می شود. L_B و L_A نصف طول و عرض سنبه مورد نظر و R شعاع سنبه می باشد. جهت تعیین ابعاد ورق هشت ضلعی اولیه، لازم است مقدار Z را با قرار دادن نسبت کشش مورد نظر در رابطه (۱) محاسبه و لوح مورد نظر را طراحی نمود. در تحقیق حاضر قطعه مربعی با نسبت کشش ۲/۶ شکل داده شد. ابعاد سطح مقطع سنبه مورد استفاده در این پژوهش، در شکل ۱ نشان داده شده است. از این رو پس از محاسبه، ابعاد ورق اولیه دولایه آلومینیوم فولاد مطابق شکل ۵ آماده گردید و در آزمایش های تجربی استفاده شد.

۳- شبیه سازی اجزای محدود

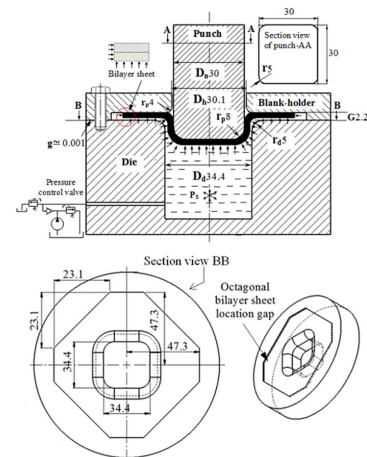
برای انجام شبیه سازی از نرم افزار اجزای محدود آباکوس نسخه ۶/۱۲ استفاده شد. شکل ۶ مجموعه قالب شبیه سازی شده را نشان می دهد. بدلیل تقارن، از مدل های یک چهارم و سه بعدی برای شبیه سازی قالب و ورق استفاده گردید. ورق بصورت سه بعدی شکل پذیر و با المان C3D8R مدل شد. اندازه المان توسط تجزیه و تحلیل حساسیت، ۴ المان در جهت ضخامت و ۸۰ المان در طول تعیین شد.



شکل ۵- ورق دولایه اولیه آلومینیوم-فولاد (Al1100-St14)

اجزای قالب به صورت صلب گسسته^۱ سه بعدی و با المان پوسته ای چهار گره ای (R3D4) مش بندی و مدل گردیدند. بر اساس مرجع [۱۲] مقدار ضریب اصطکاک در شبیه سازی برای سطح تماس سنبه با ورق برابر ۰/۱۴ و برای سایر سطوح ۰/۰۵ در نظر گرفته شد. سرعت سنبه ۲۰۰ mm/min در نظر گرفته شد و از مدل مستقل از نرخ استفاده شده است. برای کاهش زمان شبیه سازی از مقیاس زمانی که در آن نسبت انرژی جنبشی به انرژی داخلی ناچیز است استفاده شد. نوع تماس بین

¹ Discrete Rigid

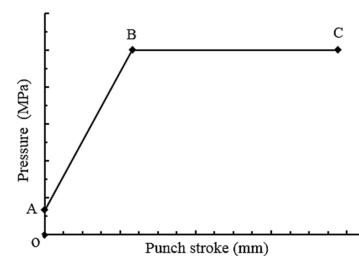


شکل ۱- ابعاد و طرحواره مجموعه قالب کشش عمیق هیدروپنمایی با فشار شعاعی

ورق مورد آزمایش در این تحقیق، ورق دو لایه از جنس آلومینیوم (Al 1100) و فولاد (St14) با ضخامت ۲ میلی متر مورد استفاده قرار گرفت. لایه ها توسط چسب پلی اورتان به یکدیگر متصل و پیوسته شدند. جهت ایجاد یک اتصال پایدار و توزیع ضخامت مناسب، لایه ها به طور مکانیکی تحت فشار قرار داده شدند که در نتیجه آن چسب اضافی تحت بار، به سمت بیرون جریان یافت. از این رو فیلم پلی اورتان



شکل ۲- مجموعه قالب نصب شده بر روی دستگاه آزمایش



شکل ۳- مسیر فشار نمونه اعمالی در آزمایش ها

اثر ناچیزی بر روی ضخامت ورق دو لایه فلزی دارد. بر اساس مراجع [۶]، [۱۵ و ۱۶] برای مقطع مربعی، ورق اولیه هشت ضلعی ترجیح داده می شود. طبق تحقیقات انجام شده، با شبیه سازی و آزمایش های تجربی مشخص شد که جهت کاهش ناحیه فلنج ورق و ایجاد شکل نهایی مناسب در لبه فنجان مربعی، هندسه مناسب ورق اولیه، یک ورق مربعی است که در گوشه ها برش داده شده است (ورق هشت ضلعی). با استفاده از رابطه (۱) می توان نسبت کشش فنجان مربعی را به دست آورد [۱۵ و ۱۶].

جدول ۱- مشخصات مکانیکی و فیزیکی ورق فولاد و آلومینیوم

جنس	St14	Al 1100
چگالی (kg/m ³)	۷۸۵۰	۲۷۱۰
مدول یانگ (GPa)	۲۱۰	۶۹
ضریب پواسون	۰٫۳	۰٫۳۳
ضریب استحکام K (MPa)	۶۳۸٫۹۶	۱۹۴٫۶۵
تنش تسلیم (MPa)	۱۹۰	۱۰۳
نمای کرنش سختی (n)	۰٫۳۵	۰٫۲۲

در این پژوهش از معیار تسلیم هیل شامل نسبت‌های تنش تسلیم جهت اعمال ضرایب ناهمسانگردی در شبیه‌سازی استفاده شده است. مقادیر ثابت در معیار هیل بر اساس نسبت‌های تنش تسلیم ناهمسانگردی به صورت R11, R22, R33, R12, R23 و R13 معرفی می‌شوند [۱۸ و ۱۹]. برای شبیه‌سازی ورق‌های ناهمسانگرد با استفاده از کد المان محدود، نسبت‌های تنش تسلیم توسط روابط (۵) تا (۷) با فرض $R_{11}=R_{13}=R_{23}=1$ محاسبه شد و اعمال گردید [۲۰]. نسبت‌های کرنش و تنش پلاستیک برای ورق‌های آلومینیوم و فولاد با ضخامت ۱ میلیمتر در جدول ۲ نشان داده شده است.

$$R_{22} = \sqrt{\frac{(1+r_0)r_{90}}{(1+r_{90})r_0}} \quad (5)$$

$$R_{33} = \sqrt{\frac{(1+r_0)r_{90}}{r_0+r_{90}}} \quad (6)$$

$$R_{12} = \sqrt{\frac{3(1+r_0)r_{90}}{(r_0+r_{90})(2r_{45}+1)}} \quad (7)$$

جدول ۲- نسبت کرنش (r values) و نسبت تنش (R values) پلاستیک

جنس	St14	Al 1100
ضریب ناهمسانگردی r_0	۱/۷۹	۱/۶۵
ضریب ناهمسانگردی r_{45}	۲/۲۷	۱/۲۵
ضریب ناهمسانگردی r_{90}	۱/۰۱	۱/۹۴
R_{11}, R_{13}, R_{23}	۱	۱
R_{22}	۱/۰۴۰۲	۱/۰۲۹۴
R_{33}	۱/۲۴۸۹	۱/۱۹۶۶
R_{12}	۱/۰۷۸۹	۱/۱۰۷۹

در این پژوهش طبق مراجع [۲۱-۲۴]، حداکثر مقدار نازک‌شدگی به عنوان معیاری برای شروع پارگی ورق در شبیه‌سازی استفاده شده است. حداکثر نازک‌شدگی با استفاده از رابطه (۸) مشخص می‌شود.

$$\%thinning = \frac{t_0 - t_f}{t_0} \quad (8)$$

در رابطه (۸) t_0 ضخامت اولیه ورق می‌باشد و مقدار ضخامت نهایی t_f از رابطه (۹) بدست می‌آید.

$$t_f = t_0 \exp(\epsilon_t) \quad (9)$$

از طرفی کرنش مهندسی اصلی (ϵ_0) در شرایط کرنش صفحه‌ای به صورت رابطه (۱۰) تخمین زده می‌شود:

$$\epsilon_0 = \left(23.3 + \frac{360}{25.4} t_0 \right) \left(\frac{n}{0.21} \right) \quad (10)$$

که در آن، n نمای کرنش سختی و t_0 ضخامت اولیه ورق می‌باشد.

ورق و اجزای قالب سطح به سطح^۱ می‌باشد. نوع مدل ماده الاستوپلاستیک و معادله مشخصه هولمان^۲ ($\sigma = K\epsilon^n$) استفاده گردید. در مدل‌سازی، ورق دو لایه مربوطه با استفاده از ابزار پارتیشن‌بندی به دو قسمت تقسیم شد؛ به‌طوری‌که هر لایه خواص مکانیکی خاص خود را دارد. بدلیل خروج چسب اضافی تحت بار در هنگام اتصال ورق‌ها و همچنین جهت ساده‌سازی شرایط تحلیل فرآیند، از اثر لایه نازک چسب پلی اورتان صرف نظر شده است. خواص مکانیکی ورق‌های آلومینیوم و فولاد بدست آمده از آزمون کشش تک‌محوره طبق استاندارد ASTM-E8 و خواص فیزیکی که در شبیه‌سازی اعمال شد در جدول ۱ نشان داده شده است. در شبیه‌سازی، ورق ناهمسانگرد در نظر گرفته شد. ناهمسانگردی ورق توسط نسبت کرنش پلاستیک و بر اساس نتایج آزمون کشش روی نمونه‌های مختلف در سه جهت با زوایای ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به راستای نورد ورق تعیین شدند [۱۷].

$$r_\theta = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} \quad (2)$$

در رابطه (۲) r_θ نسبت کرنش پلاستیک و ϵ_w و ϵ_t به ترتیب کرنش عرضی و ضخامتی مربوط به نمونه تست کشش تحت زاویه θ نسبت به جهت نورد هستند. از آنجایی‌که در ورق‌های نازک اندازه‌گیری کرنش ضخامتی دشوار است، با فرض ثابت بودن حجم، نتیجه‌گیری می‌شود:

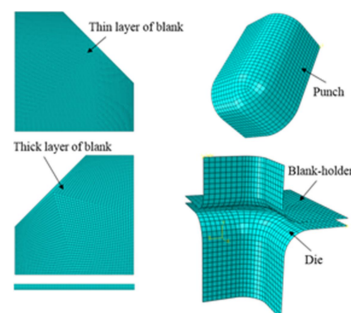
$$r_\theta = \frac{-\epsilon_w}{\epsilon_1 + \epsilon_w} \quad (3)$$

که در رابطه (۳) ϵ_1 و ϵ_w برابر است با:

$$\epsilon_1 = Ln \frac{L}{L_0} \quad \epsilon_w = Ln \frac{W}{W_0}$$

از این رو نتیجه می‌شود:

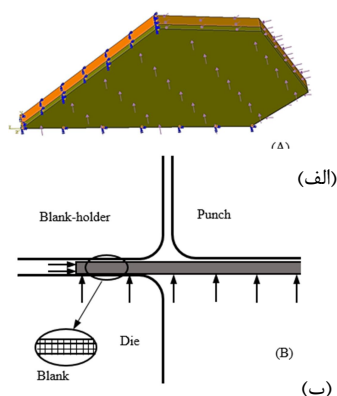
$$r_\theta = \frac{\left[\frac{W}{W_0} \right]}{\left[\frac{W_0 t_0}{W t_f} \right]} \quad (4)$$



شکل ۶- مدل اجزای محدود مجموعه قالب

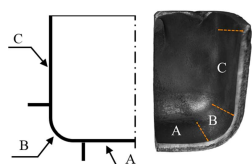
^۱ Surface to surface

^۲ Hollomon



شکل ۶- شرایط مرزی فشار اعمالی بر ورق
(الف) مدل ورق در شبیه سازی (ب) شماتیک ورق در مجموعه قالب

برای بررسی دقیق تر توزیع ضخامت در نمونه های تولید شده، فنجان مربعی مطابق شکل ۷ به نواحی مختلفی تقسیم شد که در ادامه به این نواحی ارجاع شده است.



شکل ۷- ناحیه های مختلف مورد مطالعه در فنجان مربعی

۴- مسیر فشار

۴-۱- اثر فشار حداکثر

مسیر فشار نمونه اعمالی در این مقاله در شکل ۳ نشان داده شد و مورد بحث قرار گرفت. به ازای هر فشار حداکثر معین (مسیر BC)، یک فشار اولیه (مسیر OA) و یک مسیر فشار خطی (AB) با شیب های متفاوت قابل تعریف بود. شیب مسیر فشار AB با تغییر در سرعت سنبه تعیین می گردد. از این رو، برای سرعت ثابت 200 mm/min در فشارهای حداکثر دلخواه و متفاوت، فرآیند شکل دهی فنجان مربعی در نرم افزار شبیه سازی گردید تا بتوان یک مسیر فشار مطلوب را بدست آورد. از آنجائیکه مقدار فشار نهایی نقش بسیار مهمی در ایجاد پارگی و توزیع ضخامت قطعات تولید شده ایفا می کند، جهت بررسی تأثیر آن بر کیفیت قطعه شکل داده شده، مسیرهای فشار با فشارهای نهایی متفاوت مورد مطالعه قرار گرفت. شکل ۸ مسیرهای فشار را در فشارهای نهایی ۱۰ تا ۶۰ MPa نشان می دهد که در شبیه سازی اعمال گردید. جهت بررسی تأثیر مسیرهای فشار، آزمایش های تجربی و شبیه سازی اجزای محدود با ورق دو لایه St14/Al1100 و با نسبت ضخامت ۵۰٪-۵۰٪ (ضخامت لایه ۱ mm در ورق دو لایه با ضخامت کل ۲ mm) انجام شد. در اینجا جهت شکل دهی فنجان مربعی، جانمایی ورق در قالب به گونه ای انجام شد که در هنگام شکل دهی لایه آلومینیومی در بالا (معرف سطح داخلی قطعه) و لایه فولادی در پایین (معرف سطح بیرونی) قرار گرفته است.

همچنین با توجه به برقراری روابط (۱۱) و (۱۲) در شرایط کرنش صفحای، مقدار کرنش حقیقی اصلی ϵ_0 و کرنش ضخامتی ϵ_t تعیین می شود. در نهایت با استفاده از روابط (۱۱) و (۱۲) و محاسبه ϵ_t و جایگذاری در رابطه (۹) مقدار t_f بدست آمده و متعاقب آن طبق رابطه (۱) حداکثر نازک شدگی محاسبه می شود.

$$\epsilon_0 = \ln(1 + e_0) \quad (11)$$

$$\epsilon_t = -\epsilon_0 \quad (12)$$

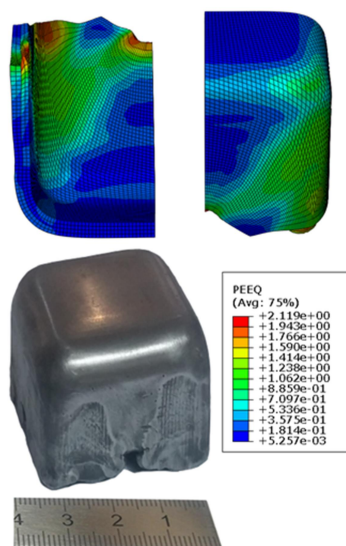
بر این اساس، با داشتن نمای کرنش سختی n و ضخامت اولیه t_0 ، درصد نازک شدگی ورق دو لایه از مجموع نازک شدگی هر لایه از ورق محاسبه می شود. ضخامت نهایی ورق دولایه (t_{f-thin}) توسط معادله (۱۳) تعریف شده است؛ که معرف مجموع ضخامت لایه های اول و دوم پس از شکل دهی قطعه است. در این معادله t_{f1} و t_{f2} معرف ضخامت نهایی لایه اول و دوم و t_{01} و t_{02} معرف ضخامت اولیه لایه اول و دوم است. در نهایت حداکثر درصد نازک شدگی با قرار دادن ضخامت نهایی $t_{f-total}$ و $t_{0-total}$ (ضخامت کل ورق اولیه) در معادله (۸) به دست می آید. معادله (۱۴) حداکثر درصد نازک شدگی ورق دولایه را نشان می دهد.

$$t_f = t_{f-total} = t_{f1} + t_{f2} = t_{01} \exp(\epsilon_{t1}) + t_{02} \exp(\epsilon_{t2}) \quad (13)$$

$$\% \text{thinning} = \frac{t_{0-total} - t_{f-total}}{t_{0-total}} \quad (14)$$

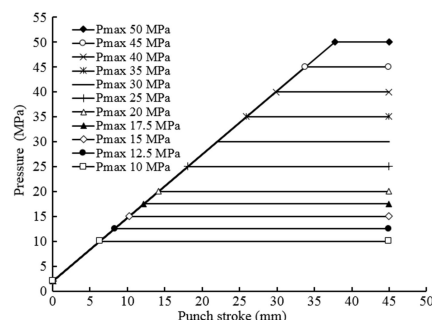
جهت تعیین شکست، ابتدا حداکثر نازک شدگی محاسبه گردید، سپس کمترین ضخامت فنجان شبیه سازی شده اندازه گیری شد و با مقدار بدست آمده از معیار نازک شدگی مقایسه گردید. بنابراین حداکثر نازک شدگی برای ورق دو لایه آلومینیوم-فولاد با ضخامت کل ۲ میلی متر و در نسبت ضخامت های مختلف بر اساس معادلات (۱۳) و (۱۴) محاسبه و به عنوان معیار پارگی در شبیه سازی استفاده شد. از این رو، حداکثر نازک شدگی مجاز برای ورق St/Al و Al/St با نسبت ضخامت ۵۰٪-۵۰٪، ۳۳٫۱۶٪ و ۳۳٫۱۶٪ و برای نسبت ضخامت ۲۵٪-۲۵٪، به ترتیب ۳۲٫۳٪ و ۳۸٫۰۳٪ محاسبه شد.

همانطور که قبلاً اشاره شد در فرآیند هیدرودمینامیکی یک فشار شعاعی بوجود می آید که باید به لبه ورق در مدل شبیه سازی اعمال شود. برای اعمال فشار سیال بر ورق در شبیه سازی، فشار سیال به صورت یکنواخت بر سطح زیر و لبه ورق اعمال گردید. با توجه به مرجع [۳] از آنجایی که در فرآیند کشش عمیق هیدرودمینامیکی با فشار شعاعی مقدار نشت سیال کم است، جهت ساده سازی و اعمال فشار شعاعی در شبیه سازی، شرایط مرزی فشار در ناحیه فلنج ورق، برابر فشار محفظه و توزیع آن به صورت یکنواخت بر ورق در نظر گرفته شد. شکل ۶ مدل ورق در شبیه سازی و شماتیک آن را در مجموعه قالب به همراه شرایط مرزی فشار اعمالی نشان می دهد.



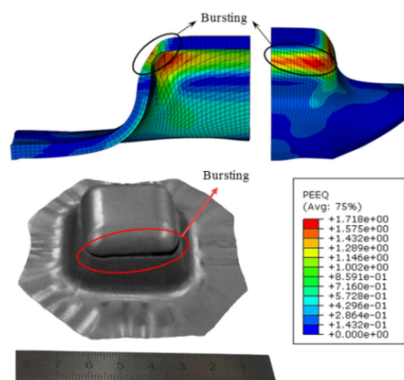
شکل ۱۰- قطعه شکل داده شده با فشار نهایی 30 MPa

شکل ۱۱ نمودارهای توزیع ضخامت قطعه را در مسیر A-C شکل ۷ برای فشار نهایی ۳۰ MPa نشان می دهد. مشاهده می شود که نتایج توزیع ضخامت در حالت تجربی و شبیه سازی به هم نزدیک بوده و انطباق قابل قبولی دارد. همچنین در شکل دیده می شود که بیشترین کاهش ضخامت مربوط به ناحیه B است که ناحیه بحرانی است. برای تعیین مناسبترین مسیر فشار جهت حصول قطعه با بهترین توزیع ضخامت، منحنی های تغییرات کاهش ضخامت ناحیه B در فشارهای مختلف مورد مقایسه قرار گرفتند. شکل ۱۲ منحنی تغییرات کاهش ضخامت قطعه شکل داده شده را در ناحیه B بر حسب فشار نهایی سیال نشان می دهد. همانطور که از شکل پیداست بیشترین کاهش ضخامت مربوط به مسیر فشار نهایی ۱۵ MPa می باشد. در این فشار در ناحیه B قطعه، نازک شدگی رخ داده است. از شکل پیداست که با افزایش فشار حداکثر تا ۳۰ MPa کاهش ضخامت با شیب تندی کاهش می یابد. از فشار حداکثر حدود ۳۰ MPa و بیشتر از آن، این شیب به صورت تقریباً افقی در می آید. بنابراین می توان نتیجه گرفت که افزایش فشار از ۱۵ تا ۳۰ MPa تاثیر زیادی بر جلوگیری از کاهش ضخامت در نقاط مختلف قطعه به ویژه در ناحیه بحرانی B دارد. همانگونه که در شکل ۱۲ مشاهده می شود با افزایش فشار حداکثر به بیش از ۳۰ MPa در ضخامت ناحیه بحرانی B تاثیر مثبتی دیده نمی شود. با ملاحظه مباحث نتیجه گیری می شود که برای قطعه مورد نظر در شرایط ذکر شده، مسیر فشار مربوط به فشار نهایی ۳۰ MPa مناسبترین مسیر برای دستیابی به بهترین توزیع ضخامت فنجان مربعی است.



شکل ۸- مسیرهای فشار با مقادیر نهایی (P_{max}) مختلف

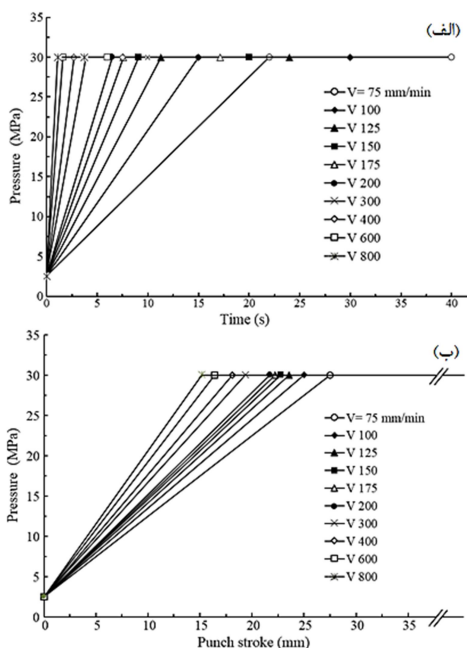
در شکل ۹ قطعه شکل داده شده در حالت تجربی و شبیه سازی متناظر با مسیر فشار شکل ۸ با فشار حداکثر ۱۲٫۵ MPa نشان داده شده است. همانطور که از شکل پیداست در ناحیه شعاع نوک فنجان مربعی پارگی رخ داده است. دلیل عیب ایجاد شده را می توان پایین بودن سطح فشار نهایی دانست که باعث شده فرآیند ماهیت کشش عمیق معمولی را به خود گرفته و بدلیل افزایش بیش از حد تنش کششی، پارگی در ناحیه شعاع نوک سینه رخ دهد. برای مسیر فشار شکل ۸ با فشار حداکثر ۱۵ MPa شکل پذیری فنجان مربعی بررسی



شکل ۹- قطعه معیوب مربوط به مسیر فشار با فشار نهایی 15 MPa

شد. نتایج بدست آمده نشان داد که با اعمال این فشار نهایی، قطعه شکل داده می شود ولی در ناحیه تماس شعاع نوک سینه با ورق عیب نازک شدگی رخ می دهد که مطلوب نمی باشد. در ادامه پژوهش، شکل- پذیری فنجان مربعی با مسیر فشار شکل ۸ با فشار حداکثر ۳۰ MPa بررسی شد. در شکل ۱۰ فنجان مربعی شبیه سازی شده و تجربی بر اساس این مسیر فشار نشان داده شده است. مشابه حالت قبل ابتدا یک فشار اولیه ۲٫۵ MPa در زیر ورق اعمال گردید تا قطعه در خلاف جهت حرکت سینه اندکی کشیده (بالج) شود. در طی حرکت سینه، فشار به تدریج افزایش یافته تا به مقدار حداکثر ۳۰ MPa برسد. اعمال این فشار در مرحله پایانی سبب شکل گیری کامل قطعه بدون عیب نازک شدگی و ایجاد شکل هندسی دقیق شد.

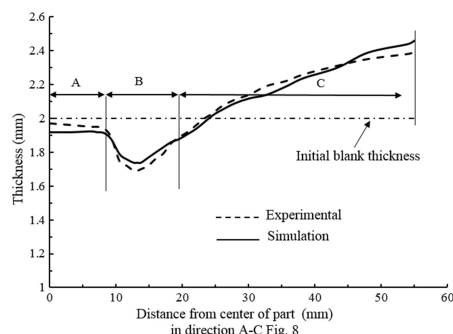
شکل ۱۴ مسیرهای فشار مربوط به سرعت‌های مختلف سنبه از ۷۵ تا ۸۰۰ mm/min را نشان می‌دهد که در شبیه‌سازی اعمال گردید. در همه آزمایش‌ها فشار اولیه ۲/۵ MPa قبل از حرکت سنبه اعمال شد. همانگونه که در شکل ۱۴ دیده می‌شود، برای یک سرعت ثابت سنبه، فشار درون محفظه در یک زمان و یک فاصله جابجایی مشخص به حداکثر مقدار خود می‌رسد. از طرف دیگر، بدلیل نشت سیال از فضای g شکل ۱، با تغییر سرعت سنبه، فشار درون محفظه در زمان‌ها و فواصل جابجایی متفاوت به مقدار حداکثر می‌رسد. لازم به ذکر است که برای سرعت سنبه ۵۰ mm/min، حداکثر فشار به مقدار بیشینه ۳۰ MPa نرسیده و در نتیجه پارگی در ناحیه شعاع نوک سنبه قبل از رسیدن به فشار حداکثر رخ داد. از این‌رو این مسیر فشار در نمودار شکل ۱۴ نشان داده نشد. جهت دستیابی به سرعت سنبه مناسب،



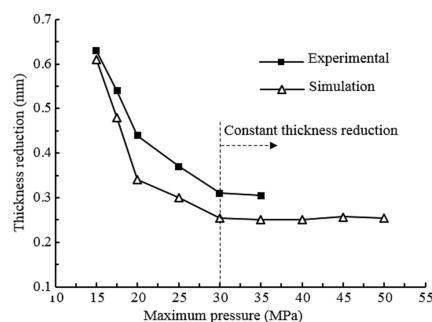
شکل ۱۴- مسیرهای فشار مربوط به سرعت‌های مختلف سنبه، الف) بر حسب زمان ب) بر حسب جابجایی سنبه

آزمایش‌ها بر اساس مسیرهای فشار در سرعت‌های بالاتر سنبه انجام شد و کاهش ضخامت، در نقطه بحرانی قطعه (ناحیه B شکل ۷) بررسی گردید. شکل ۱۵ نشان می‌دهد که بیشترین کاهش ضخامت فنجان مربعی مربوط به شکل‌دهی با سرعت ۷۵ mm/min می‌باشد. همچنین در این شکل مشاهده می‌شود که از سرعت سنبه ۷۵ تا ۲۰۰ mm/min میزان کاهش ضخامت با شیب تندی تغییر می‌کند و از سرعت سنبه ۲۰۰ mm/min و بیشتر، شیب نمودار کاهش ضخامت، به طور محسوس کاهش می‌یابد.

با توجه به نتایج این بخش و نتایج بدست آمده از بخش ۴-۱، مسیر فشار مطلوب در شرایط مورد بررسی، مسیر فشار با سرعت سنبه ۲۰۰ mm/min و فشار حداکثر ۳۰ MPa معرفی می‌گردد که مبنای انجام شبیه‌سازی‌ها در طراحی آزمایش جهت بررسی تأثیر سایر پارامترها بر ضخامت فنجان مربعی قرار گرفت.



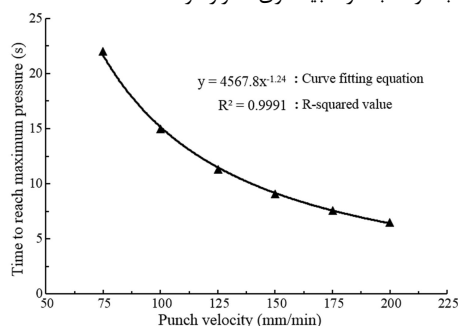
شکل ۱۱- منحنی‌های توزیع ضخامت فنجان مربعی برای مسیر فشار نهایی 30 MPa



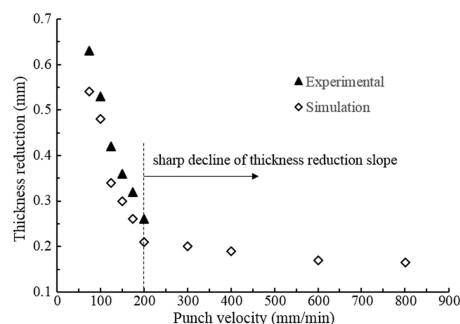
شکل ۱۲- منحنی کاهش ضخامت در فشارهای حداکثر برای ناحیه B شکل ۷

۲-۴- اثر سرعت سنبه

برای مطالعه اثر سرعت سنبه بر مسیر فشار، شکل‌پذیری فنجان مربعی در سرعت‌های مختلف سنبه بررسی شد. همانگونه که پیش‌تر اشاره شد، در مسیر فشار نمونه در شکل ۳، شیب مسیر AB توسط سرعت سنبه تعیین می‌گردد. در اینجا برای سرعت‌های مختلف سنبه، توسط آزمایش‌های تجربی زمان رسیدن به فشار حداکثر مطلوب ۳۰ MPa، که در بخش اول معرفی شد، بررسی گردید. بدین منظور آزمایش‌ها در سرعت‌های سنبه ۵۰ تا ۲۰۰ mm/min توسط دستگاه اونیورسال با قابلیت تغییر سرعت از ۰ تا ۲۰۰ mm/min انجام شد. سپس نتایج حاصل بر حسب زمان رسیدن به فشار حداکثر، ثبت گردید. شکل ۱۳ منحنی زمان رسیدن به فشار حداکثر-سرعت سنبه را به همراه منحنی تطبیقی نشان می‌دهد که توسط نرم افزار متلب بدست آمده است. بر این اساس، بهترین منحنی گذرنده از نقاط حاصل از نتایج تجربی به عنوان مبنای تعیین مسیرهای فشار مربوط به سرعت‌های بالاتر سنبه در شبیه‌سازی‌ها قرار گرفت.



شکل ۱۳- منحنی برازش بدست آمده از آزمایش‌ها تجربی



شکل ۱۵- متحنی کاهش ضخامت در سرعت‌های مختلف
مربوط به ناحیه B شکل ۷

۵- طراحی آزمایش

عواملی که در آزمایش‌ها تأثیر آنها بر روی میزان حداقل ضخامت بررسی شد شامل پنج پارامتر است که به صورت پنج عامل دو و سه سطحی شامل، شعاع سر سنبه، شعاع ورودی ماتریس، لقی بین سنبه و ماتریس، نسبت ضخامت‌های آلومینیوم و فولاد در ورق دولایه و ترتیب جانمایی ورق دولایه در نظر گرفته شده است. همانگونه که پیش‌تر اشاره شد با توجه به نتایج بدست آمده در قسمت اول این تحقیق، تمامی آزمایش‌ها بر اساس مسیر فشار مطلوب با فشار نهایی ۳۰ MPa انجام شد. در شبیه‌سازی‌های انجام شده، از روش طراحی آزمایش به شیوه عاملی کامل استفاده شده است؛ از این رو نخستین گام، مشخص کردن تعداد عوامل و سطوح آنهاست. عوامل در نظر گرفته شده در این تحقیق و سطوح آنها در جدول ۳ نشان داده شده است. تعداد نقاط طراحی برابر با $n = 3^2 \times 2^3 = 72$ آزمایش است که تمام آنها انجام شده است. در طراحی آزمایش، به منظور بررسی هر یک از عوامل، داده خروجی "حداقل ضخامت" به عنوان متغیر پاسخ در نظر گرفته شد و تأثیر پنج عامل مستقل بر آن بدست آمد. لازم به ذکر است، در جدول ۳ مبنای تعیین نسبت ضخامت، ضخامت لایه بالایی ورق اولیه بر ضخامت کل ورق اولیه (۲ mm) پس از قرار گرفتن در قالب است. از این رو برای ضخامت لایه بالایی ورق با ابعاد ۱ و ۱٫۵ میلی‌متر سطوح نسبت ضخامت به ترتیب ۲۵٪، ۵۰٪ و ۷۵٪ در نظر گرفته شد. همچنین جهت تعریف سطوح پارامتر "جانمایی ورق"، جنس لایه بالایی ورق پس از قرار گرفتن در قالب، مینا قرار داده شد. بر این اساس برای ورق با لایه بالایی آلومینیوم پس از جانمایی در قالب (Al up) و برای فولاد (St up) تعیین گردید.

جدول ۳- عوامل و سطوح آنها

ابعاد اصلی قالب	سطح یک	سطح دو	سطح سه
شعاع نوک سنبه A (mm)	۵	۸	
شعاع لبه ورودی ماتریس B (mm)	۵	۸	
لقی بین سنبه و ماتریس C (mm)	۲٫۲	۲٫۶	۳
نسبت ضخامت (D)	۰٫۲۵	۰٫۵	۰٫۷۵
ترتیب جانمایی (E)	Al up	St up	

۶- تحلیل نتایج

در این تحقیق تمامی آزمایش‌های شبیه‌سازی جهت بررسی تأثیر عوامل ذکر شده، بر اساس طراحی آزمایش به روش عاملی کامل انجام شده است. به طور کلی اهمیت عوامل تأثیرگذار در یک فرآیند به جهت

تعیین مقدار بهینه و مطلوب آنها و حصول قطعه ای سالم و با کیفیت همواره مورد بحث و بررسی است. در این تحقیق، تأثیر چهار عامل هندسی (شعاع سر سنبه، شعاع ورودی ماتریس، لقی بین سنبه و ماتریس، نسبت ضخامت‌های آلومینیوم و فولاد) و یک عامل فرآیندی (ترتیب جانمایی ورق دولایه) بر حداقل ضخامت فنجان مربعی بررسی شده است. لازم به ذکر است، با توجه به بررسی‌های انجام شده در مراحل قبلی، مقادیر سایر پارامترها در شبیه‌سازی‌ها ثابت و بر اساس مسیر فشار مطلوب انجام شد. در ادامه تحلیل نتایج توسط نرم افزار مینی تب^۱ انجام پذیرفت و به کمک نمودارهای آماری مورد بررسی قرار گرفت.

۶-۱- تحلیل واریانس نتایج

لازمه تحلیل صحیح نتایج در جداول و نمودارهای پیش رو، تأیید اثرات عوامل مورد تحقیق با استفاده از تحلیل واریانس است. این تحلیل با فرض نرمال بودن توزیع داده‌ها، گوسی بودن توزیع خطا و استقلال آن و ثابت بودن واریانس، به آزمون فرضیه تپی با استفاده از مقدار P می‌پردازد. بنابراین لازم است پیش از بکارگیری این تحلیل، فرضیه‌های این روش در مورد داده‌های آزمایش پژوهش حاضر بررسی شود. ترتیب انجام آزمایش‌ها به صورت کاملاً تصادفی انجام شده تا از تأثیر نویزهای احتمالی جلوگیری شود. در این تحقیق سطح اطمینان ۹۵٪ و سطح معناداری برابر ۰٫۰۵ در نظر گرفته شده است. از این رو مقدار P کمتر از ۰٫۰۵ نشان‌دهنده معنادار بودن تأثیر پارامتر مربوطه بر حداقل ضخامت فنجان مربعی است. نمودار احتمال نرمال مقادیر باقیمانده در شکل ۱۶ آورده شده است که از روی نمودار آن می‌توان گوسی بودن توزیع خطا را بررسی کرد. پراکندگی نقاط آزمایش در اطراف خط مورب، پیروی نتایج طراحی آزمایش صورت گرفته از مدل توزیع نرمال را نشان می‌دهد. نمودار مقادیر باقیمانده در برابر نقاط برازش یافته برای متغیر پاسخ مورد نظر در شکل ۱۷ مشخص شده است. پراکندگی نقاط طراحی و عدم وجود یک ساختار منظم در نقاط این نمودار، نشان‌دهنده برابری واریانس‌هاست.

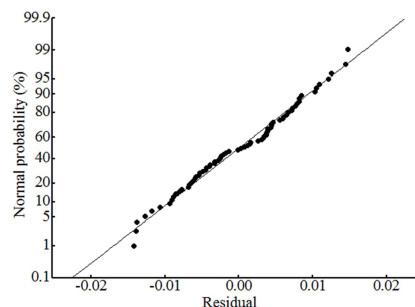
این دو شکل صحت فرض‌های اولیه تحلیل واریانس و در نتیجه صحت نتایج آن را تأیید می‌کنند. با اثبات صحت فرض‌های یادشده، میتوان به نتایج تحلیل واریانس که در جداول و شکل‌ها در ادامه آورده شده، اعتماد کرد. جدول ۴، نتایج تحلیل واریانس را در طراحی آزمایش انجام شده نشان می‌دهد. در این جدول درجه آزادی و مجموع مربعات و درصد تأثیرگذاری عوامل ارائه شده است. مقدار P کمتر از ۰٫۰۵ نشان دهنده آن است که عامل متناظر تأثیری معنادار بر میزان حداقل ضخامت در ناحیه بحرانی دارد. از نتایج بدست آمده مشخص شد که بیشترین تأثیر بر شکل‌دهی فنجان مربعی در فرآیند هیدروپلاستیک با فشار شعاعی را ابتدا اثر پارامتر جانمایی (۷۸٫۲۱٪)، سپس اثر متقابل دو پارامتر جانمایی و نسبت ضخامت (۷٫۲۶٪) و بعد از آن اثر شعاع نوک سنبه (۵٫۲۷٪) و در نهایت پارامتر نسبت ضخامت (۱٫۹٪) داشتند. بقیه عوامل نیز کمتر از یک درصد تأثیر داشتند. در ادامه به صورت منفرد اثر عوامل مورد تحقیق بر فرآیند کشش عمیق هیدروپلاستیک با فشار شعاعی فنجان مربعی از جمله شعاع سر سنبه، اثر شعاع ماتریس، لقی

^۱ Minitab

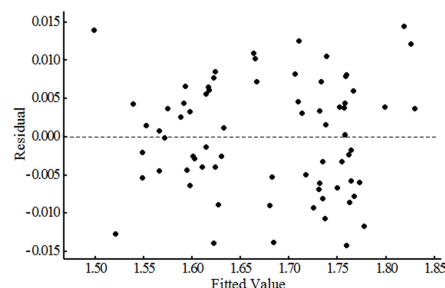
بین سنبه و ماتریس و اثر متقابل نسبت ضخامت و جانمایی بررسی شده است.

جدول ۴- مشخصات جدول تحلیل واریانس برای ضخامت حداقل

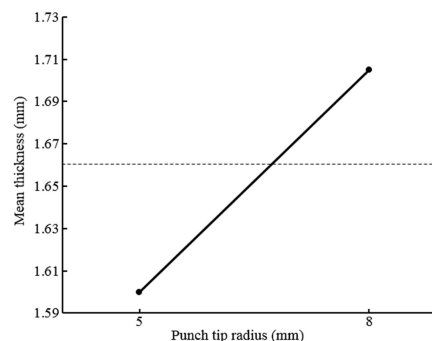
منابع	درجه آزادی	مجموع مربعات	مقدار P	درصد تأثیر
A	1	0.026792	0.000	5.27
B	1	0.003600	0.004	0.71
C	2	0.004195	0.008	0.83
D	2	0.009722	0.000	1.91
E	1	0.400169	0.000	78.71
D × E	4	0.036933	0.000	7.26



شکل ۱۶- نمودار احتمال نرمال مقادیر باقیمانده



شکل ۱۷- نمودار مقادیر باقیمانده به مقادیر برازش یافته



شکل ۱۸- تأثیر شعاع نوک سنبه بر ضخامت

۲-۶- اثر شعاع نوک سنبه

همانگونه که در شکل ۱۸ مشخص است نتایج تحلیل نشان می‌دهد که با افزایش شعاع نوک سنبه از ۵ میلی‌متر به ۸ میلی‌متر "میانگین حداقل ضخامت" فنجان مربعی ۵٪ افزایش یافته است.

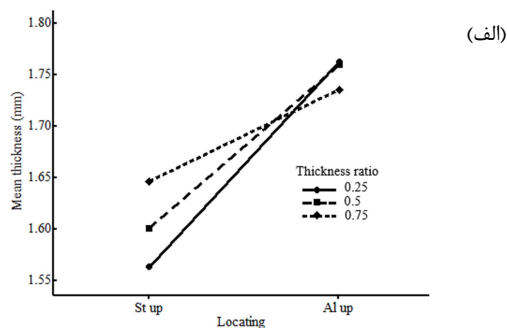
در صورتیکه بین عوامل اثر متقابل وجود داشته باشد، اثرات اصلی اهمیت خود را از دست می‌دهند و نتیجه‌گیری بدون در نظر داشتن اثرات متقابل فاقد اعتبار علمی خواهد بود. از بررسی مقادیر P و درصد

تأثیر عوامل می‌توان نتیجه گرفت که اثرات متقابل بین دو پارامتر نسبت ضخامت و جانمایی، بر حداقل ضخامت فنجان مربعی تأثیرگذار است و لذا اثرات اصلی آنها اهمیت خود را از دست داده و باید برای درک صحیح فرآیند، اثرات متقابل آنها بررسی شود.

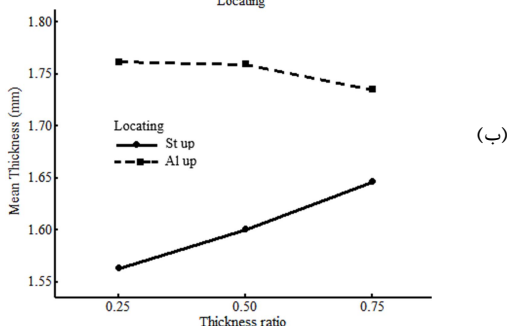
۳-۶- اثرات متقابل

با توجه به نتایج بدست آمده از جدول تحلیل واریانس، به دلیل معناداری اثر متقابل D (نسبت ضخامت) و E (جانمایی ورق) بر حداقل ضخامت، اهمیت این اثر مورد توجه است. جهت توضیح و بررسی اثر ذکر شده در مورد "نسبت ضخامت در ورق دو لایه" همانگونه که ذکر شد مینا، تغییر ضخامت لایه بالایی ورق نسبت به ضخامت کل ورق، در نظر گرفته شد. از این رو در سه سطح ۲۵٪، ۵۰٪ و ۷۵٪ آزمایش‌ها انجام شد. همانگونه که در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود، با تغییر جانمایی از حالت St-up به Al-up، ضخامت حداقل افزایش یافته است که این افزایش برای نسبت ضخامت‌های ۲۵٪، ۵۰٪ و ۷۵٪ میلی‌متر به ترتیب ۴٫۵٪، ۸٪ و ۱۰٪ می‌باشد که اختلاف در میزان شیب تغییرات منجر به اثر متقابل معنی‌دار شده است.

همچنین در شکل ۱۹، اثر متقابل "نسبت ضخامت" و "جانمایی ورق" نشان داده شده است. در این شکل با تغییر نسبت ضخامت از ۲۵ تا ۷۵ میلی‌متر میزان متوسط حداقل ضخامت در جانمایی Al-up کاهش می‌یابد؛ در صورتیکه با افزایش نسبت ضخامت در شرایط مشابه و در جانمایی St-up میزان متوسط حداقل ضخامت به مقدار ۴٫۵٪ درصد افزایش می‌یابد. پر واضح است که اگر در این فرآیند همراه با افزایش پارامتر نسبت ضخامت، روند تغییر جانمایی منجر به تغییرات متغیر پاسخ ضخامت با دو شیب مخالف شود، مقدار متوسط ضخامت تغییر خواهد یافت.



(الف)

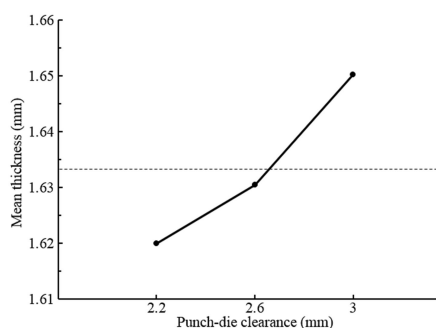


(ب)

شکل ۱۹- اثرات متقابل عامل‌های E و D بر حداقل ضخامت (الف) برحسب تغییرات جانمایی (ب) برحسب تغییرات نسبت ضخامت

۴-۶- اثر لقی بین سنبه و ماتریس

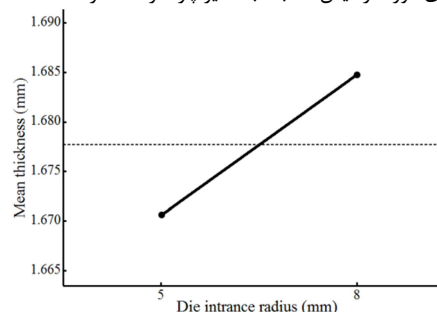
یکی از پارامترهایی که در فرآیند کشش عمیق سنتی در حد نسبت کشش و ضخامت قطعه شکل‌دهی تأثیرگذار است، لقی بین سنبه و ماتریس می‌باشد. جهت بررسی اثر لقی در فرآیند کشش عمیق هیدروفرمینگ با فشار شعاعی، در این تحقیق اثر لقی بین سنبه و ماتریس بر حداقل ضخامت فنجان مربعی مورد بررسی قرار گرفت. از این رو برای ورق اولیه دولایه به ضخامت ۲ میلی‌متر با در نظر گرفتن سه مقدار ۰/۲، ۰/۶ و ۱ میلی‌متر مازاد بر ضخامت ورق، لقی بین سنبه و ماتریس به ترتیب ۲/۲، ۲/۶ و ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. تحلیل نتایج در شکل ۲۰، نشان می‌دهد که با افزایش لقی بین سنبه و ماتریس در محدوده انتخابی، حداقل ضخامت قطعه به میزان ۱/۵٪ افزایش می‌یابد. با توجه به مقدار تأثیر بدست آمده می‌توان دریافت که در فرآیند هیدروفرمینگ با فشار شعاعی تأثیر پارامتر لقی در حداقل ضخامت ورق نسبت به سایر پارامترها کمتر است که در خصوص شعاع ماتریس نیز نتیجه مشابه است.



شکل ۲۰- تأثیر لقی بین سنبه و ماتریس بر ضخامت

۵-۶- اثر شعاع لبه ورودی ماتریس

همانگونه که در شکل ۲۱ مشخص است نتایج تحلیل نشان می‌دهد که با افزایش شعاع ورودی ماتریس از ۵ میلی‌متر به ۸ میلی‌متر حداقل ضخامت فنجان مربعی ۱٪ افزایش یافته است. نتیجه بدست آمده نشان می‌دهد که اثر شعاع ورودی ماتریس بر حداقل ضخامت در محدوده مورد آزمایش، نسبت به سایر پارامترها کمتر است.



شکل ۲۱- تأثیر شعاع ورودی ماتریس بر ضخامت

۶-۶- انتخاب حالت مطلوب

با توجه به تحلیل واریانس‌های انجام شده در مراحل قبل، حالت بهینه اجرای فرآیند کشش عمیق هیدروفرمینگ با فشار شعاعی در

شکل‌دهی فنجان مربعی با استفاده از روش بهینه ساز پاسخ^۱ در نرم-افزار مینی‌تب بررسی گردیده است. بر این اساس؛ هدف این تحلیل، رسیدن به ترکیبی از تنظیمات جهت بهینه سازی، یعنی داشتن بیشینه ضخامت فنجان مربعی در شرایط مسیر فشار مطلوب با سرعت سنبه ۲۰۰ mm/min و فشار نهایی ۳۰ MPa است. در نهایت سطوح برای هر یک از عوامل برای رسیدن به حالت بهینه تعیین شده که در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵- مقادیر بهینه عوامل مؤثر در شرایط مسیر فشار مطلوب

ابعاد اصلی قالب	مقادیر و حالت‌های بهینه
شعاع نوک سنبه (A)	۸
شعاع ورودی ماتریس (B)	۸
لقی بین سنبه و ماتریس (C)	۳
نسبت ضخامت (D)	۰/۵
ترتیب جانمایی (E)	Al up
حداقل ضخامت (mm)	۱/۸۲

۷- نتیجه گیری

در این مقاله چگونگی شکل دهی یک فنجان مربعی از جنس ورق دولایه آلومینیوم فولاد در فرآیند هیدروفرمینگ به روش هیدروفرمینگ با فشار شعاعی به صورت شبیه سازی و تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. در مرحله اول پژوهش، جهت تعیین فشار مناسب، مسیرهای مختلف فشار مورد مطالعه قرار گرفت. مشاهده شد که در فشار پایین‌تر از ۱۵ MPa به دلیل ایجاد تنش زیاد در ناحیه تماس نوک سنبه با ورق، پارگی در آن ناحیه ایجاد می‌گردد. در فشارهای بالاتر، فنجان مربعی به طور کامل شکل داده شد. نتایج نشان دادند توزیع ضخامت فنجان‌های مربعی در فشار ۱۵ MPa و بالاتر از آن متفاوت است. در فشار ۳۰ MPa کیفیت قطعه مطلوب بوده و افزایش بیشتر فشار تأثیری بر بهبود توزیع ضخامت قطعه ندارد. همچنین مشاهده شد که اعمال یک فشار پیش‌بالج ۲/۵ MPa در ابتدای فرآیند تأثیر مثبتی بر شکل دهی مطلوب محصول دارد. با مطالعه اثر سرعت‌های مختلف سنبه بر مسیر فشار با فشار حداکثر مطلوب ۳۰ MPa و شکل‌پذیری قطعه، مشخص شد که بیشترین کاهش ضخامت مربوط به کمترین سرعت اعمالی بود. همچنین مشاهده شد که از سرعت سنبه ۷۵ تا ۲۰۰ mm/min میزان کاهش ضخامت در فنجان مربعی با شیب تندی تغییر می‌کند و از سرعت سنبه ۲۰۰ mm/min و بیشتر، شیب نمودار کاهش ضخامت، به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

در ادامه تأثیر پنج عامل با استفاده طراحی آزمایش و روش آماری تحلیل واریانس بررسی شد. نتایج نشان دادند که بیشترین تأثیر بر شکل‌دهی فنجان مربعی در فرآیند هیدروفرمینگ با فشار شعاعی را ابتدا اثر پارامتر جانمایی (۷۸/۷۱٪)، سپس اثر متقابل دو پارامتر جانمایی و نسبت ضخامت (۷/۲۶٪) و بعد از آن اثر شعاع نوک سنبه (۵/۲۷٪) و در نهایت پارامتر نسبت ضخامت (۱/۹٪) داشتند. با تغییر جانمایی از حالت St-up به Al-up حداقل ضخامت افزایش یافته است که این افزایش برای نسبت ضخامت‌های ۲۵٪، ۵۰٪ و ۷۵٪ میلی‌متر به

^۱ Response optimizer

Aluminium/Steel Double Layer Sheet. *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 99, No 9, pp. 1-11, 2016 (in Persian).

- [13] Liu X., Xu Y., Yuan S., Effects of loading paths on hydrodynamic deep drawing with independent radial hydraulic pressure of aluminum alloy based on numerical simulation, *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 24, pp. 395-399, 2008.
- [14] Lang L., Danckert J., Nielsen KB., Investigation into the effect of pre-bulging during hydromechanical deep drawing with uniform pressure onto the blank. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, pp 649-657, 2004.
- [15] Hashemi A., Hoseinpour Gollo M., Seyedkashi S.M.H., Bimetal Cup Hydroforming of Al/St and Cu/St Composites: Adaptive Finite Element Analysis and Experimental Study, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 30 (5), 2016, pp. 2217-2224, 2016.
- [16] Rahmani F., Hashemi S.J., Moslemi H., Deylami H., Numerical and Experimental Study of the Efficient Parameters on Hydromechanical Deep Drawing of Square Parts. *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 22, pp. 338-344, 2013.
- [17] öndera E., Tekkaya E., Numerical simulation of various cross sectional workpieces using conventional deep drawing and hydroforming technologies. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 48, pp. 532-542, 2008.
- [18] Marciniak Z., Duncan J.L., Hu S.J., Mechanics of sheet metal forming. Butterworth Heinemann, Oxford, 2002.
- [19] Janbakhsh M., Loghmanian S.M.R. and Djavanroodi F., Application of Different Hill's Yield Criteria to Predict Limit Strains for Aerospace Titanium and Aluminum Sheet Alloys. *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*, Vol. 7, pp. 35-44, 2014.
- [20] Banabic, D., Bunge, H.J., Pohlant, K., Tekkaya, A.E. Formability of metallic materials, *Springer Verlag*: Berlin, 2000.
- [21] ABAQUS 6.12. Documentation, User's manual, Providence, RI, USA: Dassault Systèmes Simulia Corp., 2012.
- [22] Bayraktar E., Isac N. and Arnold G., An experimental study on the forming parameters of deep-drawable steel sheets in automotive industry. *Journal of Materials Processing Technology*, 162-163 pp 471-476, 2005.
- [23] Djavanroodi F., Abbasnejad D. Sh. and Nezami E. H., Deep Drawing of Aluminum Alloys Using a Novel Hydroforming Tooling. *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 26 (5), pp. 796-801, 2011.
- [24] Slota J., Spisak E., Comparison Of The Forming Limit Diagram (Fld) Models For Drawing Quality (Dq) Steel Sheets. *Metalurgija*, Vol. 44, pp. 249-253, 2005.
- [25] Aue-U-Lan Y., Ngaile G., Altan T., Optimizing tube hydroforming using process simulation and experimental verification. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146, pp. 137-143, 2004.

ترتیب ۴/۵٪، ۸٪ و ۱۰٪ می باشد که اختلاف در میزان شیب تغییرات منجر به اثر متقابل معنی دار شده است. با افزایش شعاع نوک سنبه از ۵ میلی متر به ۸ میلی متر، حداقل ضخامت فنجان مربعی ۵٪ افزایش یافته است. از طرفی با تغییر نسبت ضخامت از ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ میلی متر، میزان متوسط حداقل ضخامت در جانمایی Al-up کاهش می یابد، در صورتیکه با افزایش نسبت ضخامت در شرایط مشابه و در جانمایی up St- میزان متوسط حداقل ضخامت به مقدار ۴/۵٪ درصد افزایش می یابد. در نهایت، مقادیر بهینه عامل های مورد تحقیق، در شرایط مسیر فشار مطلوب معرفی شدند.

۸-مراجع

- [1] Thiruvurudchelvan S., and Travis F.W., Hydraulic-Pressure-Enhanced Cup-Drawing Processes-An Appraisal. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 140, pp. 70-75, 2003.
- [2] Zhang S.H., Wang Z.R., Xu Y., Wang Z.T., and Zhou L.X., Recent developments in sheet hydroforming technology. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 151, pp. 237-241, 2004.
- [3] Lang L., Danckert J., and Nielsen K.B., Investigation into hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure Part II, Numerical analysis of the drawing mechanism and the process parameters. *J Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 166, pp. 150-161, 2005.
- [4] Lang L., Danckert J., and Nielsen K.B., Investigation into hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure Part I, Experimental observations of the forming process of aluminum alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 148, pp. 119-131, 2004.
- [5] Lang L., Danckert J., Nielsen KB., Analysis of key parameters in sheet hydroforming compined with stretching forming and deep drawing.
- [6] *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 218, pp 845-856, 2004.
- [7] Lang L.H., Danckert J., Nielsen K.B., Kangb D.C., Zhang S.H., Key technologies of the simulation of the hydrodynamic deep drawing of irregular parts. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 150, pp. 40-47, 2004.
- [8] Bagherzadeh S., Mollaei Darian B., Malekzadeh K., Theoretical study on hydro-mechanical deep drawing process of bimetallic sheets and experimental observations. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, pp. 1840-1849, 2012.
- [9] Bagherzadeh S., Mirmia MJ., Mollaei Darian B., Numerical and experimental investigations of hydro-mechanical deep drawing process of laminated aluminum/steel sheets. *Journal of Manufacturing Processes*, Vol.18, pp.131-140, 2015.
- [10] Hashemi A., Hoseinpour Gollo M., Seyedkashi S.M.H., Study of Al/St Laminated Sheet and Constituent Layers in Radial Pressure Assisted Hydrodynamic Deep Drawing. *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 32 (1), pp. 54-61, 2017.
- [11] Hashemi A., Hoseinpour Gollo M., Seyedkashi S.M.H., Pourkamali-Anaraki A., A new simulation-based metaheuristic approach in optimization of bilayer composite sheet hydroforming. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 39, pp. 4011-4020, 2017.
- [12] Seyedkashi S.M.H., F.Rahmani, H.Amirabadi, M. Hoseinpour Gollo, Study of Process Window Diagram in Hydromechanical Deep Drawing of Square Cup with