



تأثیر فشار محفظه‌ای و پیش‌بالج بر ناحیه کاری در فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی قطعات سرکروی

علیرضا رحمانی - کارشناسی ارشد مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات کرمانشاه
حسن صیدی - استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان
علی باروتی‌ها - دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک طراحی کاربردی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان
محمود صمدی - کارشناسی ارشد مهندسی طراحی کاربردی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان

E-mail: Alireza4390@yahoo.com

چکیده: امروزه شکل‌دهی ورق‌های فلزی، کاربرد وسیعی در صنایع دارد که یکی از مهمترین فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی کشش عمیق هیدرومکانیکی می‌باشد. در فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی محفظه‌ای از مایع جایگزین ماتریس شده است و شکل نهایی قطعه بر اساس شکل یک سنبه صلب تعیین می‌گردد. ناحیه کاری نشان‌دهنده حداکثر نسبت کشش قابل دستیابی برحسب حداکثر فشار محفظه‌ای است. در این مقاله کشش عمیق هیدرومکانیکی قطعات مربعی با استفاده از روش اجزای محدود (FEM) و با کمک نرم‌افزار ABAQUS تحلیل شده و با تعیین ناحیه کاری فرایند و توزیع ضخامت قطعه نهایی، تأثیر عوامل مختلف فرایند مانند ارتفاع پیش‌بالج، فشار پیش‌بالج و فشار محفظه‌ای بر آنها بررسی گردیده است. علاوه بر این، با طراحی تجهیزات آزمایشگاهی، مطالعه تجربی با هدف تایید نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود انجام شده است. نتایج عددی و تجربی نشان می‌دهد با اعمال فشار محفظه‌ای سیال نسبت حد کشش فرایند ابتدا افزایش یافته تا در یک فشار بهینه، حداکثر نسبت کشش قابل حصول به دست آید.

واژه‌های کلیدی: کشش عمیق هیدرومکانیکی، روش اجزای محدود، ناحیه کاری.

The Effect of Confined Pressure and pre bulging on the Working Region in a Deep Tensile Hydrodynamic Process

A. Zamiri Mokhanlo, Member of Association for Young Researchers, IAU, Branch of Ardabil

Abstract: Photovoltaic cells are exchanging energy of polarization into electrical energy directly and without intermediate process, that mathematical investigation and analysis of this process is main the goal. In this research, by using of matrix model the light absorption phenomena in semiconductor-composite-polymer photovoltaic cells has been simulated. And electrical field and energy of absorption are expressed by mathematical relations. This simulation has been analyzed using MATLAB software. The result of analysis shows that, the optical absorption process completely depends on the optical parameters of layers and the thickness of layers and incident wavelength, and this result is very important to optimization of optical absorption process and energy of absorption in a photovoltaic cell.

Keywords: Photovoltaic cells, Optical absorption, Mathematical study, Matrix model, MATLAB software.

۱- مقدمه

روش کشش عمیق هیدرومکانیکی یک تکنولوژی جدید در شکل دهی ورقهای فلزی است که جنبه هایی از تکنولوژی کشش عمیق سنتی و تکنولوژی هیدروفورمینگ را با هم تلفیق نموده است. از مزایای این روش نسبت به کشش عمیق سنتی می‌توان به امکان دستیابی به نسبت‌های کشش بالاتر، دقت ابعادی بهتر و برگشت فنری کمتر، کیفیت سطح بهتر، توزیع ضخامت یکنواخت‌تر، ساده‌تر شدن مجموعه ابزارها و در نتیجه کاهش هزینه‌های ابزار و در نهایت قابلیت شکل دهی قطعات با اشکال پیچیده اشاره کرد.

پارامترهای مختلفی مانند فشار مایع داخل محفظه، جنس ورق، ضخامت ورق، نیروی ورق گیر، نیروی سنبه، هندسه قطعه و سنبه، نسبت کشش، تختی اولیه ورق، پیش‌الجینگ و اصطکاک بر این فرآیند موثرند. موفقیت آمیز بودن عملیات و عدم ایجاد عیوبی مانند پارگی و چین خوردگی و تولید قطعه ای با کیفیت مناسب در گرو انتخاب و تنظیم مناسب پارامترهای مختلف فرآیند می‌باشد. از اینرو شناخت دقیق و درست اثرات پارامترها و شرایط کاری مختلف می‌تواند در طراحی موفقیت آمیز عملیات، افزایش کیفیت قطعه و راندمان کاری بسیار مفید باشد.

مطالعات اخیر بر روی بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند برای محصولات غیردایره‌ای متمرکز شده است

نیلسن [۱] با استفاده از روش اجزای محدود سعی در بهبود عملکرد فرآیندهای شکل دهی و بهبود کیفیت قطعات تولیدی از این روش‌ها نمودند. ژانگ [۲، ۳، ۴] 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 [۵] با حل معادله‌ی رینولدز به روش تفاضل محدود برای جریان مایع بین ورق و ماتریس کشش در عملیات کشش عمیق هیدرومکانیکی، از این مدل به عنوان الگوریتم تماسی در شبیه‌سازی فرآیند به روش اجزای محدود استفاده نمودند. حبیبی پارسا و شهابی زاده [۶] با شبیه‌سازی فرآیند هیدروفورمینگ دو حفره‌ی نامتقارن به روش اجزای محدود بوسیله‌ی نرم افزارهای ABAQUS و ANSYS و با انجام آزمایش‌های تجربی اثر پارامترهای اصطکاک، فشار، ابعاد لوح اولیه و . . . را بررسی نمودند. فضلی و ملایی داریانی [۷، ۸] با شبیه‌سازی عددی فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی به کمک روش اجزای محدود و انجام آزمایشهای تجربی، اثر عواملی از قبیل شعاع پروفیل ماتریس، شرایط اصطکاک، ضخامت ورق و . . . را بر محدوده‌ی کاری مطالعه کردند.

۲- مدل سازی فرآیند

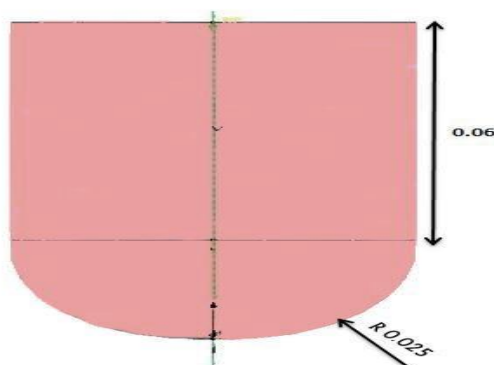
شبیه‌سازی این فرآیند در نرم افزار ABAQUS 6.8.1 انجام شده است. تحلیل این فرآیند در دو مرحله انجام شده است. در مرحله اول با توجه به قطعه مورد نظر و همچنین ابعاد به‌دست آمده از قبیل ابعاد سنبه، ماتریس، ورق‌گیر و صفحه‌کشش، شبیه‌سازی در محیط ABAQUS/CAE انجام شده است. سپس در مرحله دوم شرایط مرزی، المان مناسب و همچنین شرایط اولیه ورق و اجزای دیگر قالب اعمال گردیده است. خواص ماده و پارامترهای فرآیند مورد استفاده در شبیه‌سازی در جدول ۱ آمده است.

مطابق شکل ۱ برای انجام شبیه‌سازی یک سنبه استوانه‌ای با سر کروی به ارتفاع ۶۰mm و با شعاع سر کروی به اندازه ۲۵mm طراحی شد و این شعاع در راستای استوانه‌ای نیز ادامه ندارد. ضخامت لوح ۱ mm و لقی بین سنبه و ورق‌گیر برابر ۱۰ mm می‌باشد. برای انجام سریع شبیه‌سازی همه قطعات به صورت پوسته‌ای در نظر گرفته شده‌اند.

جدول ۱- خواص مواد و پارامترهای فرایند

اندازه	ویژگی (یکا)
فولاد کم کربن St-12	جنس
1	ضخامت (mm)
294	تنش تسلیم (MPa)
401	تنش نهایی (MPa)
7.8	چگالی (g/cm ³)
515	ضریب استحکام (MPa)
0.22	توان کرنش سختی
0.3	ضریب پواسون
210	مدول الاستیسته (GPa)
150×150	ابعاد سنبه (mm×mm)
37.5	شعاع سنبه (mm)
160×160	ابعاد حفره ماتریس (mm×mm)

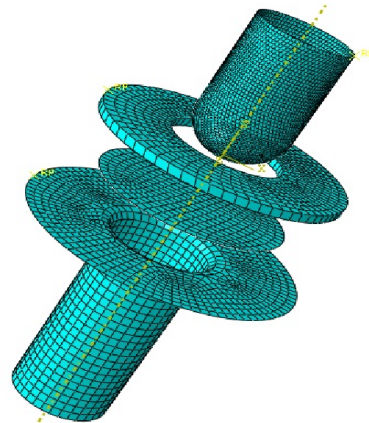
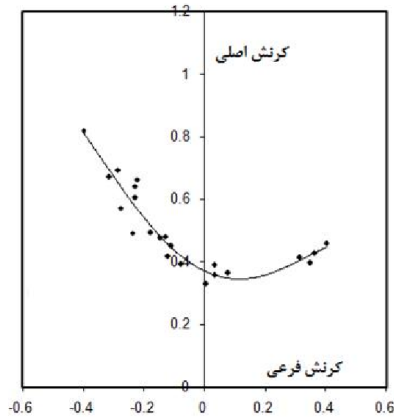
بارگذاری به صورت توزیع فشار مستقیم بر سطح ورق بوده و تغییرات فشار به صورت خطی که در طول فرایند افزایش می‌یابد.



شکل ۱: ابعاد سنبه مورد استفاده

به منظور تشخیص شروع پارگی در شبیه‌سازی از نمودار حد شکل دادن (FLD) فولاد کم کربن ST12 که از آزمایش‌های تجربی

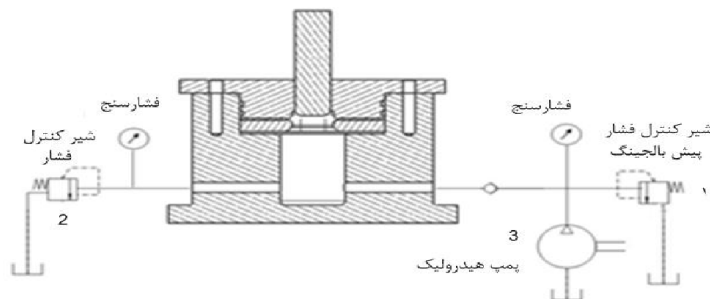
بدست آمده، استفاده شده که در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- مدل شبیه سازی شده شکل ۳- نمودار حد شکل دادن [۹ST12]

۳- بررسی تجربی

به منظور تایید شبیه سازی عددی یک سیستم آزمایشگاهی فرایند HDD طراحی و ساخته شد. این سیستم در شکل ۴ نشان داده شده است دو شیر اطمینان ۱ و ۲ به ترتیب فشار پیش بالچ و فشار حداکثر محفظه ای را کنترل می کنند. در مرحله پیش بالچینگ روغن به کمک پمپ ۳ به محفظه وارد شده، فشار داخل محفظه افزایش می یابد. در مرحله شکل دهی با حرکت سنبه به داخل محفظه، فشار روغن به شدت افزایش می یابد. شیر یکطرفه مانع از برگشت روغن و تخلیه آن از طریق مسیر پمپ روغن می شود. پس از رسیدن فشار به حد نهایی تعیین شده، عملیات در فشار ثابت ادامه می یابد. فرایند کشش عمیق تحت نسبت های کشش متفاوت انجام گرفت و ناحیه کاری مربوط به این شرایط تعیین شد.



شکل ۴- سیستم آزمایش تجربی فرایند HDD

۴- نتایج و بحث

هنگام حرکت سنبه به سمت محفظه و فرایند کشش به علت وجود فاصله انداز بین ورق و ماتریس، سیال از فاصله بین ورق و ورق گیر به سمت بیرون جریان پیدا می کند. سرعت سنبه نقش اساسی در نحوه توزیع فشار در منطقه فلنج دارد. اگر سرعت سنبه پایین

باشد سیال فرصت کافی جهت جریان از زیر ورق خواهد داشت و فشار سیال فرصت کافی جهت جریان از فاصله‌انداز بین ورق و ورق‌گیر نخواهد داشت و فشار سیال اعمال شده به فلنج با فاصله گرفتن از لبه حفره ماتریس کمتر خواهد شد. حجم محفظه سیال نیز یک پارامتر تعیین کننده دیگر است. هر چه حجم محفظه سیال بیشتر باشد، سرعت افزایش فشار سیال در آن کمتر خواهد بود و سیال دیرتر به فشار نهایی تنظیم شده بر آن خواهد رسید. لذا با در نظر گرفتن سرعت و حجم مشخص سیال مسیر افزایش فشار محفظه یک مسیر ثابت و غیر قابل تغییر خواهد بود. بررسی تجربی اثر فشار سیال بر روی نسبت حد کشش در اثر اعمال فشار سیال با انجام آزمایش‌های بررسی شد. آزمایشات ابتدا با فاصله‌انداز 1 mm بین ورق‌گیر و ماتریس انجام شد. نتایج نشان دهنده این بود که به علت فاصله‌انداز بالا بین ورق و ورق‌گیر قطعات از منطقه فلنج چین‌خورده و در ادامه فرایند با افزایش نیروی ورق‌گیر به علت چین‌خوردگی ورق پارگی در شعاع سرسنبه اتفاق می‌افتد. در بقیه آزمایش‌ها از فاصله‌انداز 0.5 mm بین ورق و ماتریس استفاده گردید. برای به دست آوردن نسبت حد کشش ورق مورد آزمایش در شرایط کشش عمیق سنتی بدون استفاده از فشار سیال در درون محفظه عملیات کشش انجام گردید. با توجه به طراحی قالب و لقی نه چندان زیاد بینسنبه و ماتریس (2 mm)، می‌توان از آن برای کشش عمیق سنتی نیز استفاده کرد. نسبت حد کشش در شرایط سنتی $1/8$ به دست آمد.

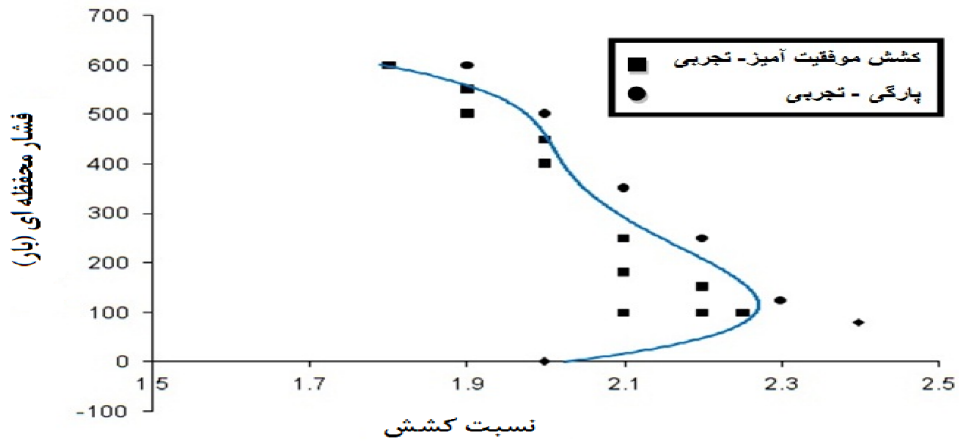


شکل ۵: پارگی در منطقه شعاع سرسنبه

برای بررسی تأثیر اعمال فشار سیال، فشار پیش‌بالج 20 Bar ثابت گردید. مناسب است که گنج فشار که بتواند فشارهای پایین‌تر را اندازه بگیرد، در مدار قرار گیرد تا فشار پیش‌بالج توسط آن تنظیم گردد. با اعمال فشارهای نهایی مختلف، قطعاتی با نسبت کشش‌های مختلف کشیده شدند و نتایج پارگی یا کشش سالم آنها ثبت گردید.

۴-۱ اثر اعمال فشار سیال بر روی نسبت حد کشش

شکل ۶ نتیجه آزمایش‌های کشش تحت فشارهای مختلف را نشان می‌دهد. آزمایش‌های نشاندهنده آن است که با افزایش فشار سیال تا 150 Bar حد کشش فرایند از $1/8$ تا $2/3$ افزایش یافته است. با افزایش بیشتر فشار سیال حد کشش فرایند کاهش می‌یابد. افزایش حد کشش با اعمال سیال است. شکل ۷ قطعه‌های کشیده شده با فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی در کنار قطعه کشش عمیق سنتی را نشان می‌دهد.



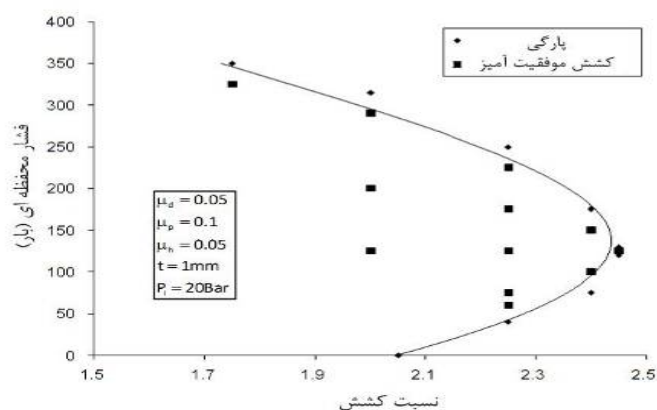
شکل ۶: ناحیه کاری به دست آمده با آزمایش



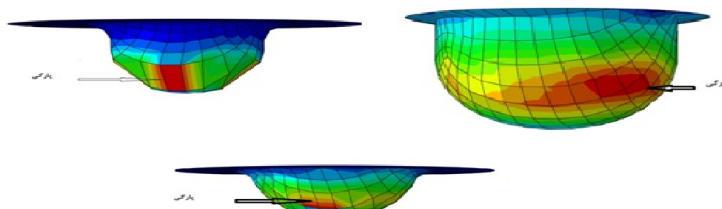
شکل ۷: نمونه ها

۲-۴ ناحیه کاری

با ثابت نگه داشتن همه پارامترهای فرایند به جز فشار محفظه‌ای و نسبت کشش می‌توان ناحیه کاری برای شرایط ویژه فرایند بدست آورد. با تغییر نسبت کشش و ثابت نگه داشتن فشار محفظه‌ای می‌توان نسبت کشش بهینه برای فشار محفظه‌ای مورد نظر بدست آورد. نسبت کشش‌های بهینه بدست آمده برای فشارهای محفظه‌ای متفاوت ناحیه کاری را تعریف می‌کند که در آن محصول بدون عیب می‌باشد. شکل ۶ ناحیه کاری مربوط به شرایط ویژه آمده در **Error! Unknown switch argument.** جدول ۱ را نمایش می‌دهد. با توجه به شکل با بالا رفتن فشار وارده به بلانک نسبت کشش بهینه افزایش می‌یابد. بیشینه نسبت کشش بهینه در فشار ۱۵۰ بار بدست می‌آید که با افزایش یا کاهش فشار محفظه‌ای نسبت کشش بهینه نیز کاهش می‌یابد. شکل ۸ نمونه‌های از محصولات شکل داده شده در شبیه سازی را نمایش می‌دهد. همانطور که در شکل دیده می‌شود برای نسبت کشش ۲/۴ در فشار ۵۰ و ۲۰۰ بار قطعه شبیه سازی شده دارای پارگی می‌باشد در حالی که در فشار ۱۵۰ بار قطعه سالم تولید شده است.



شکل ۸- ناحیه کاری کشش موفقیت آمیز برای فرایند HDD

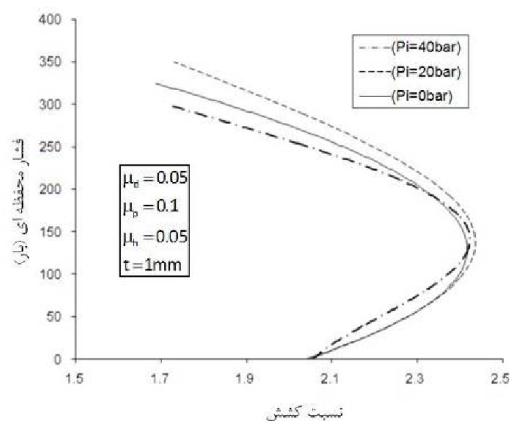


شکل ۹- نتایج کشش LDR=2.4 در فشارهای متفاوت (a) ۲۰۰ بار (b) ۱۵۰ بار (c) ۵۰ بار

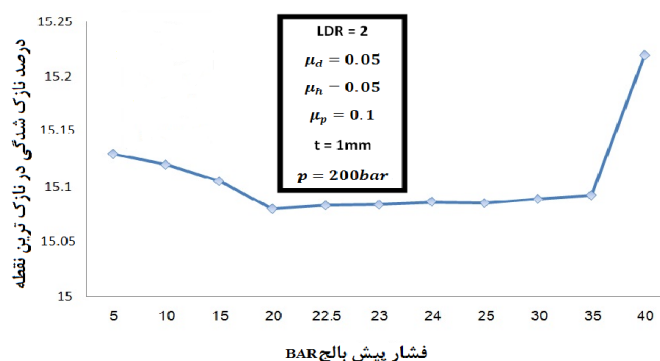
۳-۴ تأثیر فشار پیش‌بالج

شکل ۱۰ تأثیر فشارهای پیش‌بالج متفاوت را بر روی ناحیه کاری با ثابت نگه داشتن همه پارامترها را نشان می‌دهد. با افزایش فشارپیش‌بالج از ۰ به ۲۰ بار حداکثر نسبت کشش قابل دستیابی بدون پارگی در ورق افزایش می‌یابد. دلیل این پدیده، بالج ورق در ابتدای فرایند و جلوگیری از تماس آن با پروفیل شعاع قالب می‌باشد. در فشارهای مفظه‌ای پایین بین فشار پیش‌بالج ۰ و ۲۰ بار تفاوت چندانی وجود ندارد. در فشارهای مفظه‌ای پایین، برای هر دو فشار پیش‌بالج گفته شده بلانک با پروفیل شعاع قالب در تماس است.

در فشار پیش‌بالج ۴۰ بار هم در فشارهای مفظه‌ای پایین و هم در فشارهای مفظه‌ای بالا نسبت کشش کاهش می‌یابد. با اعمال فشار پیش‌بالج ۴۰ بار کرنش اولیه ورق در ناحیه تماس آن با ورق گیر افزایش یافته و ضخامت ورق در ابتدا فرایند کاهش می‌یابد که باعث ایجاد عیب در محصول نهایی می‌شود.



شکل ۱۰- تاثیر فشار پیش بالج بروی نسبت کشش در فشارهای متفاوت



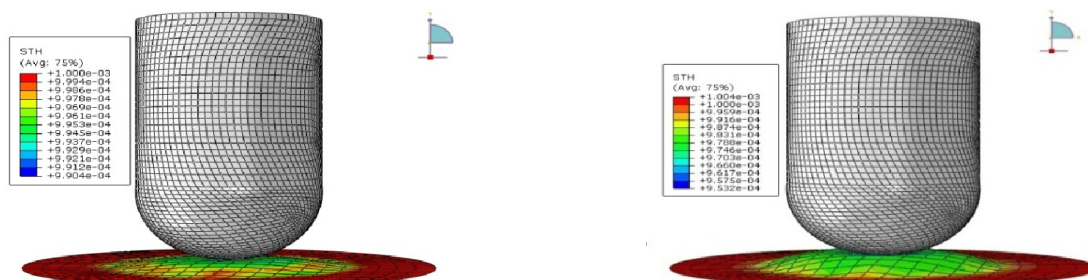
شکل ۱۱: نازک شدگی در فشارهای پیش بالج متفاوت

۴-۴ تاثیر ارتفاع پیش بالج

ارتفاع پیش بالج، فاصله بین لوح و سنبه در ابتدای شکل دهی می باشد. با زیاد شدن ارتفاع پیش بالج، کشش اولیه ورق افزایش می یابد. تاثیر ارتفاع های پیش بالج های متفاوت در شکل ۱۲ مشاهده می شود. برای هر فشار محفظه ای و فشار پیش بالج ثابت یک مقدار بهینه برای ارتفاع پیش بالج وجود دارد. با توجه به شکل ۱۳ ارتفاع پیش بالج ۳۵ Bar، ارتفاع های کمتر از ۵ mm به دلیل کم بودن کشش اولیه در لوح، مناسب نمی باشند و نازک شدگی بیشتری دارند. ارتفاع های بیشتر از ۵ Bar نیز به دلیل فاصله زیاد و نجسبیدن لوح به سنبه و عدم شکل گیری اولیه نازک شدگی زیادتری دارند. بنابراین بهترین ارتفاع ۵ mm بوده و کمترین کاهش ضخامت را داشته است.

Error! Unknown switch argument. ۱۴ مقایسه نتایج تجربی با نتایج شبیه سازی را نشان می دهد. نتایج نشان دهنده

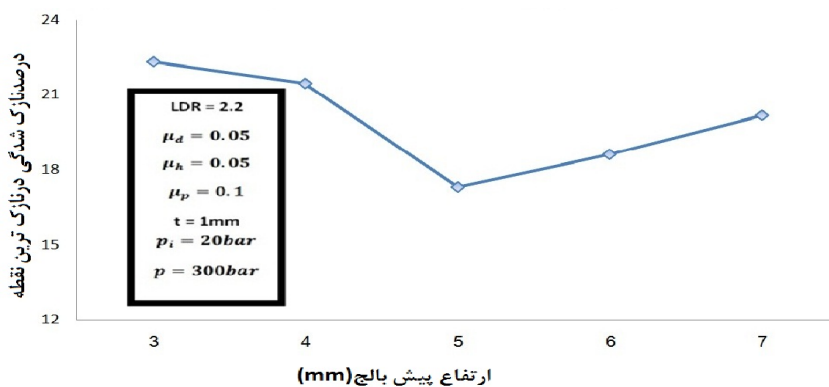
انطباق نسبتاً خوب این دو منحنی است. علت اختلاف موجود در شبیه سازی و تجربی، به خاطر ایزوترپ نبودن ورق در کار تجربی و همچنین نتوانستن اعمال دقیق ضرایب اصطکاکی در کار تجربی باشد. اما مشاهده می شود که نتایج مدل سازی در فشاری که حداکثر نسبت کشش به دست می آید را پایین تر از تئوری نشان می دهد. اختلاف بین نتایج شبیه سازی و تجربی را می توان در شبیه سازی دقیق توزیع فشار سیال در منطقه فلنج دانست. در شبیه سازی فرض شده است که به علت سرعت پایین فرایند کشش توزیع فشار در منطقه به صورت یکنواخت می باشد



ارتفاع پیش‌بالج = ۳ mm

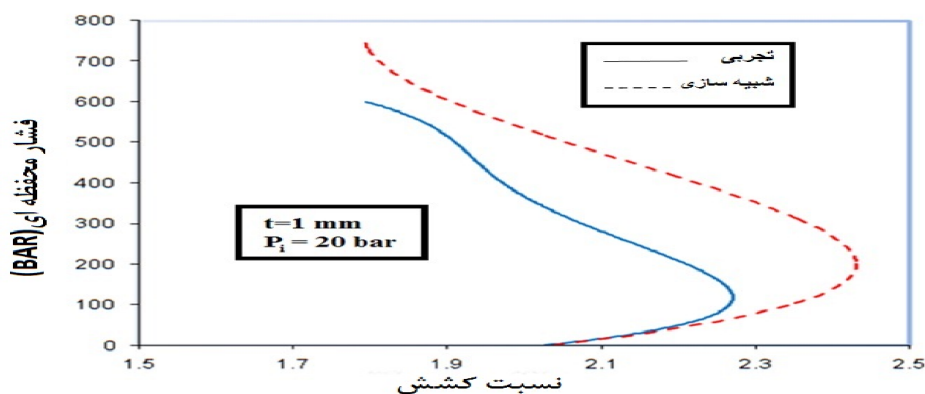
ارتفاع پیش‌بالج = ۷ mm

شکل ۱۲: تأثیر ارتفاع‌های پیش‌بالج‌های متفاوت



شکل ۱۳: تغییراتنازک‌شدگی در ارتفاع‌های پیش‌بالج‌های متفاوت

د.



شکل ۱۴: مقایسه ناحیه کاری تجربی و شبیه‌سازی

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله بررسی عددی و تجربی حد شکل‌دهی در فرایند کشش عمیق قطعات مربعی انجام شد و تأثیر پارامترهای فرایند مانند:

فشار پیش‌بالج، ضریب ضخامت اولیه و شعاع سرسنبه بر روی ناحیه کاری مورد بررسی قرار گرفت. برطبق نتایج بدست با افزایش ضخامت ورق می‌توان به ناحیه کاری بزرگتر و نسبت کشش بالاتر دست یافت. با افزایش شعاع سر سنبه سطح تماس ورق و سنبه زیادتر می‌شود و در نتیجه امکان تولید قطعات با نسبت کشش‌های بالاتر ایجاد می‌شود.

نتایج عددی نیز مشابه نتایج تجربی نشان می‌دهد که با اعمال فشار 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 می‌شود. در فشارهای پایین‌تر از فشار بهینه، پارگی از شعاع سرسنبه بوده در حالی که در فشارهای بالاتر، قطعات از شعاع سر ماتریس پاره می‌گردد.

۶- مراجع

- 1- K.B. Nielsen, M.R. Jensen, J. Danckert, "Optimization of Sheet Metal Forming Processes Using Finite Element simulations", Acta Metallurgica Sinca (English Letters), Vol. 13, 2000, pp. 531-539.
 - 2- 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", J. Mater. Process. Technol., Vol. 103, 2000, pp. 367-373.
 - 3- 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", J. mater. Process. Technol., Vol. 102, 2000, pp. 1-8.
 - 4- 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", Int. J. Machine Tools & Manuf., Vol. 40, 2000, pp. 1479-1492.
 - 5- M.R. Jensen, L. Olovsson, J. Danckert, "Numerical model for the oil prerssure distribution in the hydromechanical deep drawing process", J. Mater. Process. Technol., Vol. 103, 2000, pp. 74-79.
- ۶- م. ح. پارسا، م. شهبازی زاده، "شکل دادن قطعات نامتقارن"، ششمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران، ۱-۴ دی ۱۳۸۲، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.
- 7- A. Fazli, B.M. Dariani, "Investigation of friction effect in limit drawing ratio of hydromechanical deep drawing process", Tehran International Congeress on Manufacturing Engineering.(TICME2005), December 12-15, 2005, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
 - 8- A. Fazli, B. Mollaei Dariani, "Parameter study of the axisymmetric hydromechanical deep drawing process", Proc. IMechE., Vol. 220, Part B: J. Engineering Manufacture, 2006, pp. 1937-1944.

