

مقایسه نتایج تجربی و شبیه سازی اثرات شعاع لبه سنبه و ماتریس بر فرایند کشش عمیق فولاد زنگ‌زن ۳۰۴

محمد کاظم بشارتی گیوی^{۱*} و آرش مشایخی^۲

^۱استادیار دانشکده مهندسی مکانیک - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

^۲دانش آموخته کارشناسی ارشد مکانیک - ساخت و تولید - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۵/۷/۵ ، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۶/۶/۳۰ ، تاریخ تصویب ۸۶/۷/۷)

چکیده

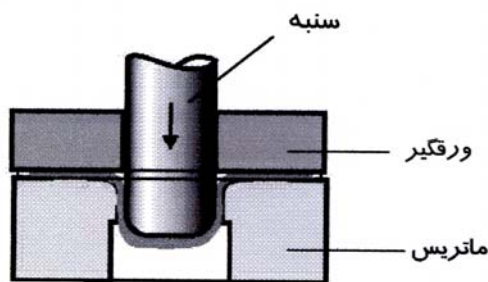
در این مقاله، اثرات تغییر شعاع سنبه و ماتریس، بر برخی پارامترهای فرایند کشش عمیق فولاد AISI 304 بررسی شده است. بدین منظور، فرایند کشش عمیق یک فنجان استوانه ای به صورت یک مدل عددی شبیه سازی و تحلیل شده و نتایج حاصل با یک سری آزمایشات کشش عملی مقایسه گردیده است، که به روشنی نشان می دهد با افزایش شعاع لبه ماتریس، حداکثر نیروی کشش به طور پیوسته کاهش و با افزایش شعاع لبه سنبه در فرآیند کشش عمیق، تغییر ضخامت در ناحیه شعاع سنبه کاهش یافته و موضع لاغری در این ناحیه به سمت دیواره فنجان که کار سختی بیشتری شده انتقال می یابد و بالاخره اینکه، این مقایسه تطابق خوبی میان نتایج تجربی و شبیه سازی کامپیوتری نشان می دهد.

واژه‌های کلیدی: شکل‌دهی ورق - کشش عمیق - سنبه - ماتریس - ورق‌گیر - اجزاء محدود

مقدمه

مبنای فرایند شکل‌دهی ورق، در فرم دهی ورقهای فلزی، انجام یک تغییر شکل پلاستیکی عمدی و خواسته شده روی ورق مسطح، جهت تولید یک قطعه مهندسی با شکل خاص می باشد. این تغییر شکل پلاستیکی بوسیله یک نیروی خارجی بر روی ورق فلزی ایجاد می گردد. البته این نیرو باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا ماده را کاملاً وارد ناحیه پلاستیک کرده و این اطمینان حاصل شود که بعد از برداشتن نیروی خارجی از روی ورق، قطعه دچار تغییر شکل و برگشت فنی نمی شود.

در عملیات کشش عمیق، تغییر شکل ورق بدین صورت می باشد که ابتدا پیرامون ورق توسط یک ورق‌گیر گرفته شده و سپس ورق توسط یک سنبه صلب به داخل محفظه ماتریس کشیده و شکل سنبه را به خود می گیرد. در این عملیات، ورق‌گیر، ورق را طوری می گیرد که امکان حرکت و لغزش به درون حفره ماتریس را داشته باشد (شکل ۱). از این روش برای تولید قطعات مختلف صنعتی از قبیل مخزنهای فولادی تحت فشار، قوطی‌های کنسرو، ظروف آشپزخانه و ... استفاده می شود.



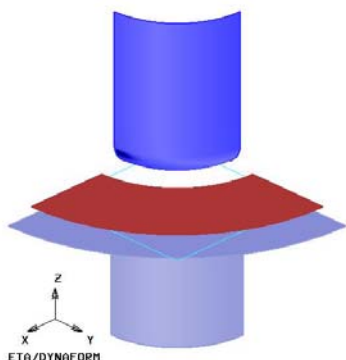
شکل ۱: فرایند کشش عمیق.

در سالهای گذشته کارهای زیادی در زمینه تحلیل فرایند کشش عمیق صورت گرفته که از آن جمله می توان به موارد زیر اشاره نمود:

وو [۱] روشهای عددی را برای تحلیل کشش عمیق استوانه ای با سنبه دارای سر نیمکروی بکار برده است. سوربای [۲] و همکارانش یک روش جهت محاسبه کرنشهای سطح فلانچ تغییر شکل یافته، تحت فرایند کشش عمیق با سنبه استوانه ای ارائه کردند. چانگ [۳] و همکارانش یک برنامه مدلسازی اجزای محدود برای شبیه سازی سه بعدی اتساع ورق تهیه نمودند. چن و سوربای [۴] یک روش جهت محاسبه ابعاد ورق اولیه برای بهینه نمودن فرایند کشش عمیق ورق و افزایش کیفیت محصول ارائه نمودند. سوخومیلینف و همکارانش [۵] یک روش محاسباتی برای

مراحل مدل‌سازی و پردازش، طبق روند زیر انجام گرفته است [۷]

۱. ایجاد مدل‌های هندسی یک چهارم ، ورق (گرده) ، سنبه ، ماتریس و ورق گیر ، توسط یک نرم افزار CAD و گرفتن خروجی IGES از آن .
۲. فراخوانی مدل‌های CAD ، با فرمت IGES به داخل نرم افزار eta/Dynaform شکل (۲) .



شکل ۲: مدل‌های CAD فراخوانی شده به نرم افزار Dynaform

۳. مش‌بندی سطوح سنبه، ماتریس و ورق گیر با استفاده از المان‌هایی با حداکثر اندازه ۱ میلی‌متر و حداقل ۰/۵ میلی‌متر و در صورت لزوم اصلاح و بهینه سازی آن .
۴. تعریف سنبه، ماتریس و ورق گیر مش بندی شده ، بعنوان ابزار، تحت عناوین : Punch ، Binder و Die ، البته با در نظر گرفتن آنها بعنوان یک جسم صلب انعطاف ناپذیر (Rigid body) .
۵. تعریف تماس بین قطعه و ابزار از نوع « Forming one way surface to surface » و وارد کردن مقادیر ضرایب اصطکاک بین سطوح قطعه و ابزار [۹] .
۶. تعریف منحنی مسیر طول کورس سنبه شکل (۳) .
۷. تعریف منحنی مسیر بارگذاری برای ورق گیر، شکل (۴) .
۸. مش بندی ورق با استفاده المان‌های مربعی Belytschko-Tsay با حداکثر اندازه ۰/۵۶ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر و در صورت لزوم اصلاح و بهینه سازی آن [۸] ، شکل (۵) .
۹. تعریف ورق مش بندی شده به عنوان Blank و اصلاح مدل مش بندی شده ورق.

تحلیل فرایند شکل دهی متقارن ورق‌های فلزی مانند کشش عمیق بیان کردند . اندرسون [۶] یک تحلیل عددی بر اساس روش اجزاء محدود برای مطالعه فرایند کشش عمیق متقارن انجام داده است.

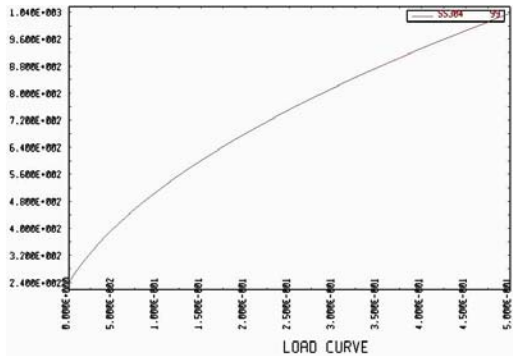
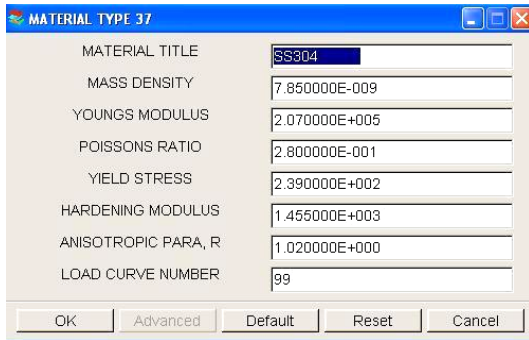
در این مقاله ابتدا به بررسی مدل‌سازی و شبیه سازی کامپیوتری فرایند کشش عمیق، سپس به مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی با نتایج تجربی و در نهایت به نتیجه گیری می پردازیم .

مدلسازی و شبیه سازی فرایند کشش عمیق یک فنجان استوانه ای

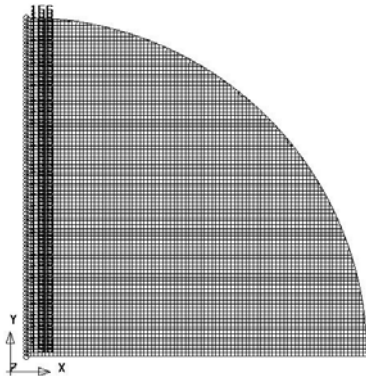
در این پژوهش برای افزایش سرعت شبیه سازی ، از مدل های یک چهارم پوسته ای با تعریف ضخامت استفاده شده است [۷].

فرضیاتی که در شبیه سازی در نظر گرفته شده، به شرح ذیل می‌باشد :

۱. محیط اولیه Blank ، کاملاً دایروی می‌باشد.
 ۲. ضخامت اولیه ورق، در سرتاسر سطح آن یکنواخت است و برابر ۱ میلی‌متر می باشد .
 ۳. رفتار تغییر شکل ماده، غیر ایزوتروپیک یا ناهمسانگرد می‌باشد.
 ۴. ناهمسانگردی ماده، قائم می باشد .
 ۵. ماده وابسته با نرخ کرنش (Rate sensitive) نمی‌باشد .
 ۶. اصطکاک بین سطوح با استفاده از مدل کولمب شبیه‌سازی شده و ضریب اصطکاک در تمام نقاط و در تمام مراحل شکل‌دهی یکنواخت است.
 ۷. صافی سطح سطوح، بالا می‌باشد.
 ۸. قالب کاملاً صلب (Rigid body) در نظر گرفته شده است.
 ۹. تا سه مرحله امکان مش‌بندی تطبیقی وجود دارد [۸].
- شبیه سازی فرآیند در سه مرحله کلی صورت گرفته است :
۱. مدل‌سازی شامل مختصات گره‌ها ، نوع و اندازه المانها، تماسها، مشخصات جنس، بارگذاریها و ... ، با استفاده از نرم افزار eta/Dynaform
 ۲. پردازش با استفاده از نرم افزار LS-Dyna
 ۳. مشاهده و مقایسه نتایج با استفاده از

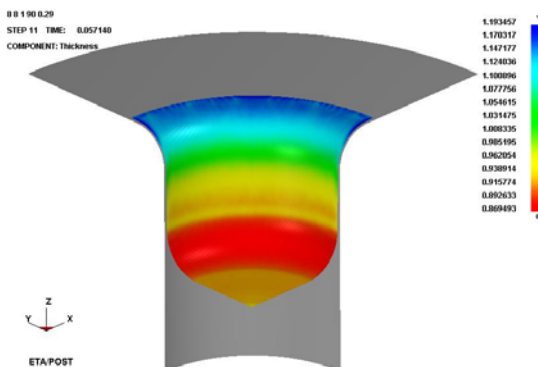


شکل ۶: مدل الاستیک پلاستیک نا همسانگرد قائم و منحنی بار.



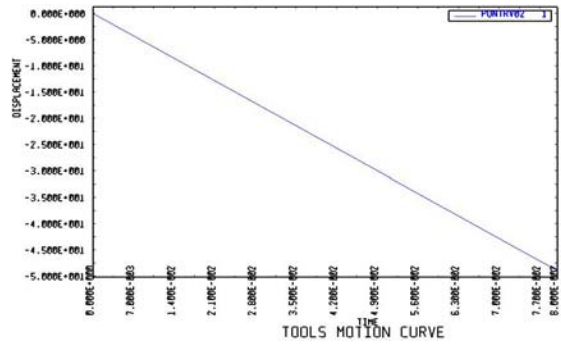
ETA/DYNAFORM

شکل ۷: اعمال شرایط مرزی.

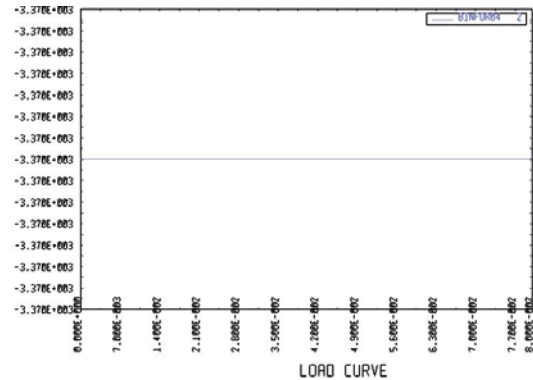


شکل ۸: مدل آنالیز شده ورق پس از انجام فرایند کشش عمیق.

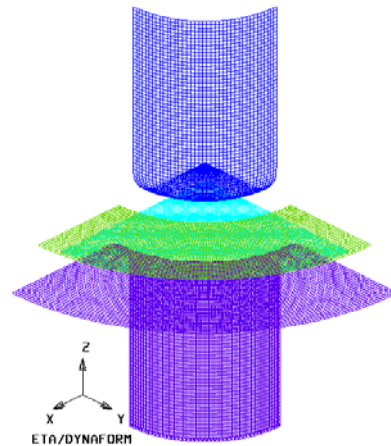
۲. انتخاب نمای مناسب جهت دیدن جزئیات قطعه فرم گرفته و در صورت لزوم حذف قطعات slave از نما.



شکل ۳: منحنی جابجائی سنبه بر حسب زمان.



شکل ۴: منحنی نیرو بر حسب زمان در ورق گیر.



ETA/DYNAFORM

شکل ۵: مدل مش بندی شده ورق و قالب کشش عمیق.

۱۰. رفتن فایل خروجی با فرمت Dyn ، جهت پردازش توسط نرم افزار LS-Dyna .

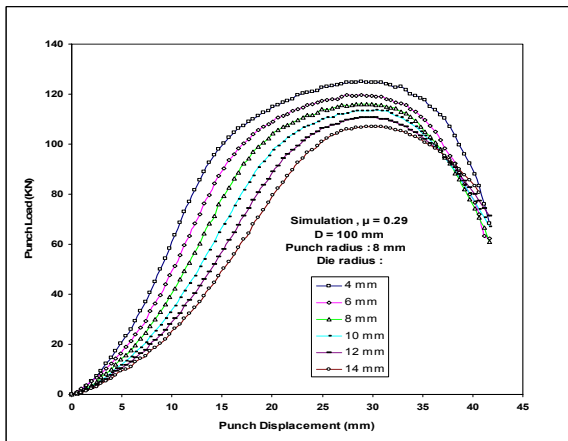
۱۱. اصلاح متن فایل خروجی و انجام تغییرات ضروری در صورت لزوم .

مشاهده و مقایسه نتایج بدین ترتیب صورت گرفته است [۱۰] :

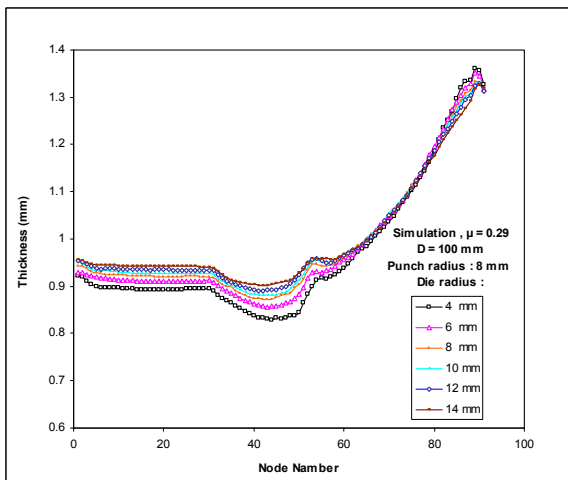
۱. فراخوانی فایل های dynain و 3dplot حاصله از پردازش Ls-Dyna ، توسط نرم افزار eta/post-processor .

میلیمتر اقدام به تعویض شعاع در ماتریس از ۴ تا ۱۴ میلیمتر نمودیم، مطابق شکل (۱۱) و (۱۲) با افزایش شعاع لبه ماتریس، حداکثر نیروی کشش و تغییرات ضخامت در ورق کاهش می یابد.

با مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی و آزمایش های تجربی (که با دستگاه Insstron، با نرخ جابجایی سنبه 30 mm/min و تحت نیروی ورقگیر 13.5 KN انجام گرفت) برای شعاع های مختلف لبه ماتریس مطابق شکل (۱۳-الف-ی) می توان مشاهده نمود که منحنی های نیرو - جابجایی تطابق خوبی با یکدیگر دارند، به عبارت دیگر با شبیه سازی تا حد زیادی می توان نیروی فرم دهی را در فرایند پیش بینی نمود.



شکل ۱۱: مقایسه نیروی شکل دهی ورق برای شش شعاع مختلف لبه ماتریس.



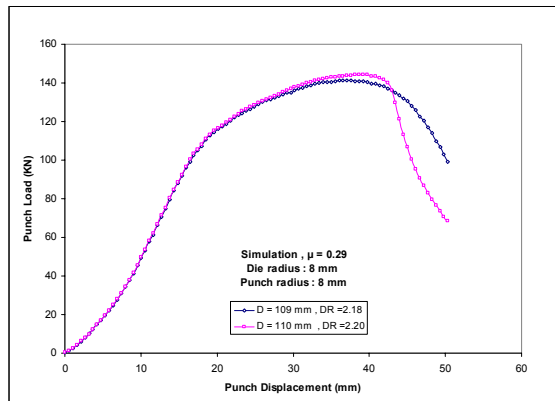
شکل ۱۲: تغییرات ضخامت در ورق برای شعاع های مختلف ماتریس.

۳. انتخاب گزینه Contour، جهت نمایش تحلیلهای سه بعدی نرم افزار مانند کانتور تغییرات ضخامت ورق، تنش برشی ماکزیمم، تنش میانگین، دیاگرام FLD و ... (شکل (۸)).

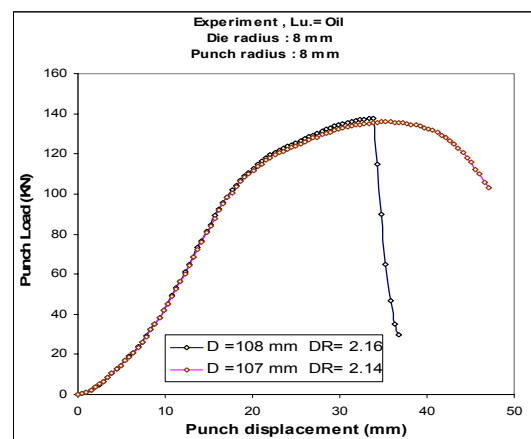
۴. انتخاب گزینه Graph، جهت ترسیم تحلیلهای دو بعدی نرم افزار، مانند منحنی های نیرو، جابجایی، انرژی و ...

بحث در نتایج

به منظور تعیین حد کشش، به شبیه سازی فرایند کشش فنجان استوانه ای با شعاع لبه سنبه و ماتریس ۸ میلیمتر پرداختیم و مطابق شکل (۹)، حد کشش ۲/۱۸ بدست آمد، در حالی که با آزمایش تجربی حد کشش ۲/۱۴ حاصل گردید، شکل (۱۰).

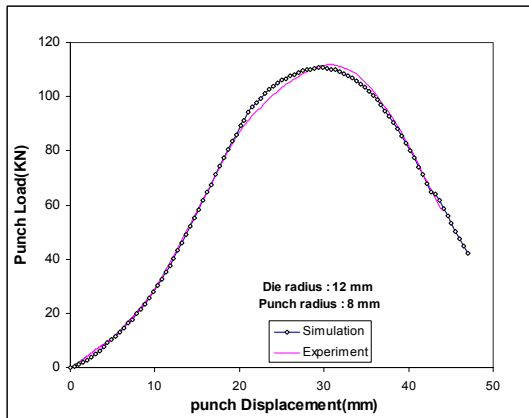


شکل ۹: نمودار مقایسه نیروی شکل دهی برای حد نسبت کشش و بالاتر از حد نسبت کشش (FEM).

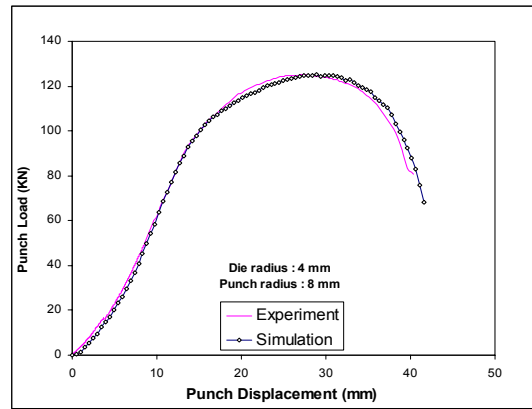


شکل ۱۰: مقایسه نیروی شکل دهی ورق برای حد نسبت کشش و بالاتر از حد نسبت کشش (تجربی).

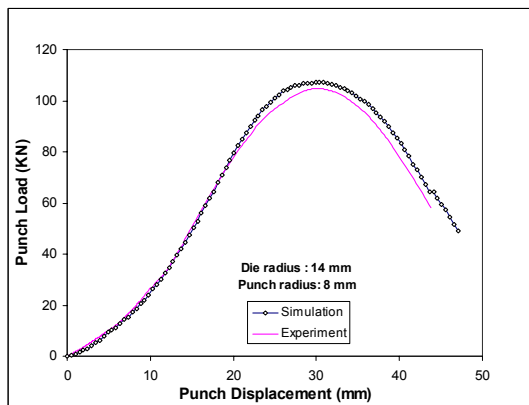
در ادامه برای مقایسه تاثیر شعاع ماتریس بر کشش عمیق با ثابت نگه داشتن اندازه شعاع لبه سنبه در ۸



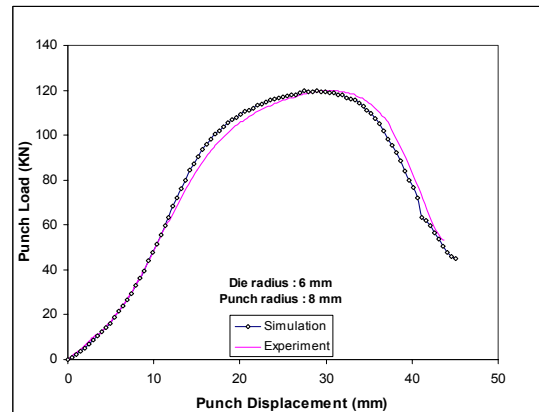
9



الف



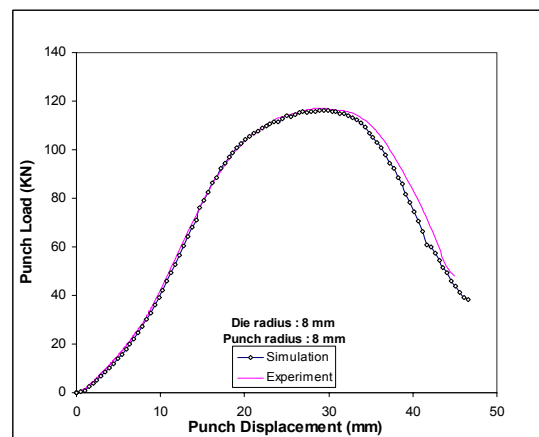
ی



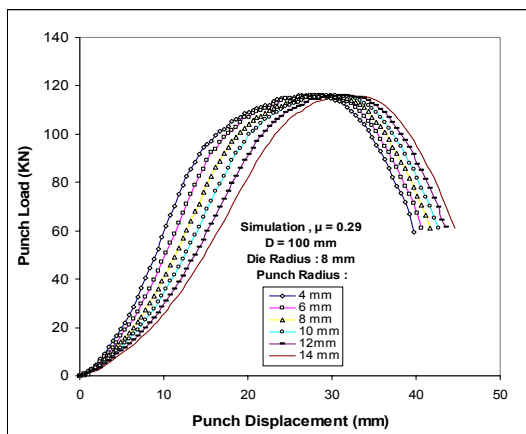
ب

شکل ۱۳: مقایسه بین نیروی کشش FEM با نتایج تجربی برای شعاع مختلف ماتریس.

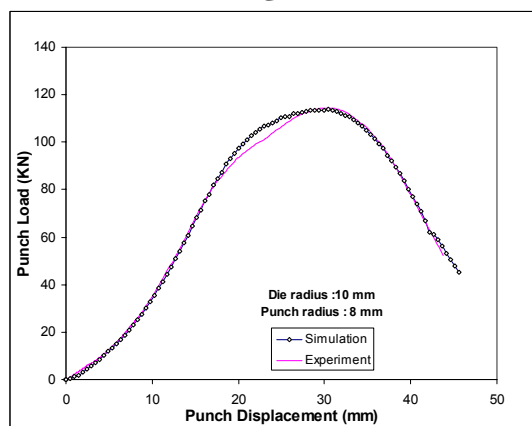
به منظور مقایسه تاثیر شعاع لبه سنبه در کشش عمیق، با ثابت نگه داشتن اندازه شعاع لبه ماتریس در ۸ میلیمتر اقدام به تعویض شعاع سر سنبه از ۴ تا ۱۴ میلیمتر نمودیم، مطابق شکل (۱۴) با افزایش شعاع سر سنبه، حداکثر نیروی کشش تغییر نمی کند و فقط جابجایی سنبه تا رسیدن به بار ماکزیمم افزایش می یابد، به عبارت دیگر منحنی با شیب کمتری به میزان حداکثر خود می رسد.



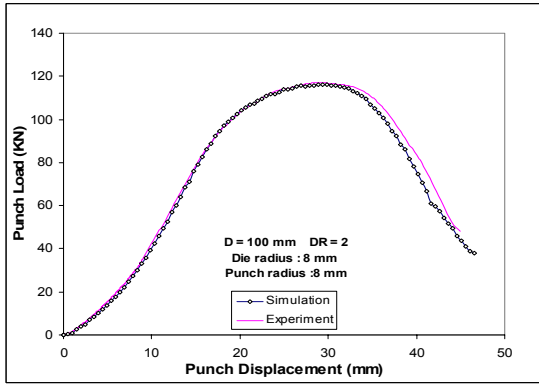
ج



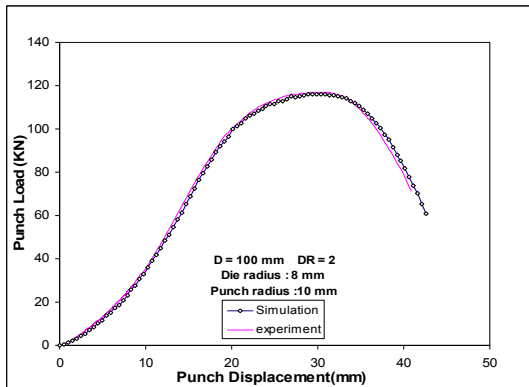
شکل ۱۴: تاثیر شعاع سر سنبه روی نیروی کشش ورق.



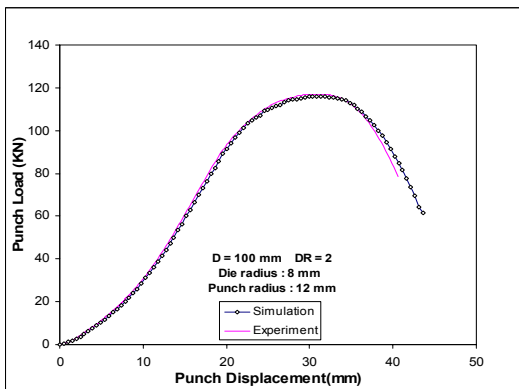
د



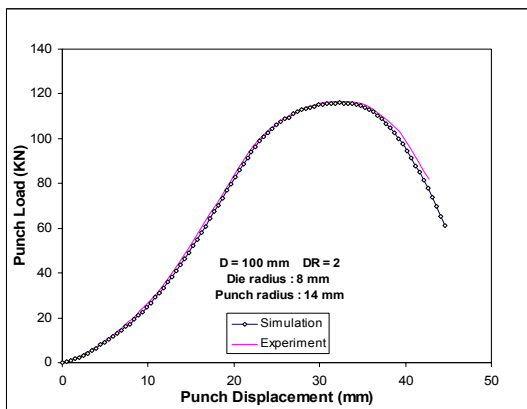
ح



د

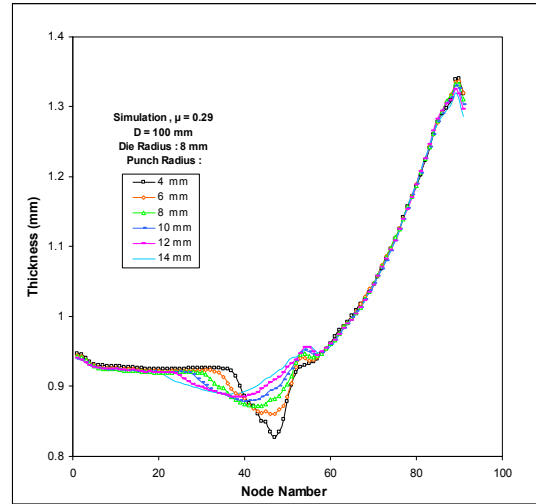


و



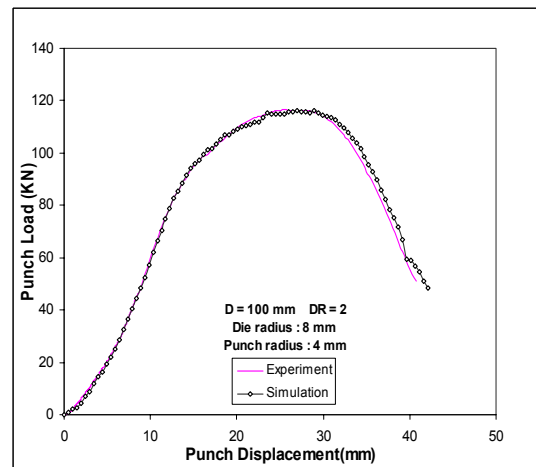
ی

شکل ۱۶: مقایسه بین نیروی کشش FEM با نتایج تجربی برای شعاع مختلف سنبه.

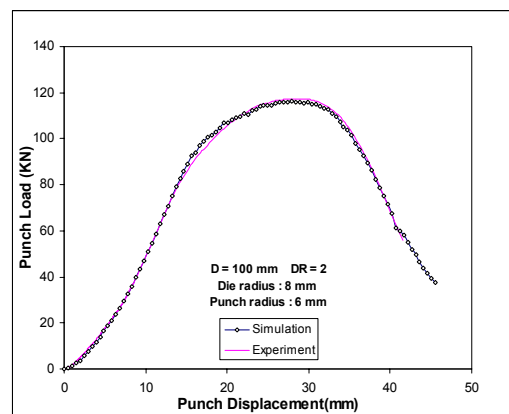


شکل ۱۵: تغییرات ضخامت ورق برای شعاعهای مختلف سر سنبه.

مطابق شکل (۱۵) با افزایش شعاع سر سنبه تغییرات ناگهانی ضخامت در ناحیه شعاع سنبه، کاهش چشمگیری یافته و ضخامت ورق در گستره فوجان یکنواخت تر می گردد.



الف



ب

۵. با افزایش شعاع لبه ماتریس، حداکثر نیروی کشش به طور پیوسته کاهش می یابد.
۶. با افزایش شعاع لبه سنبه، نیروی حداکثر کشش تغییری پیدا نمی کند، ولی باعث کاهش شیب صعود نیروی کشش و انتقال آن به دیواره ظرف می گردد.
۷. با افزایش شعاع لبه سنبه در فرآیند کشش عمیق، تغییر ضخامت در ناحیه شعاع سنبه کاهش یافته و موضع لاغری در این ناحیه به سمت دیواره ظرف که کار سختی بیشتری شده انتقال می یابد، در نتیجه با افزایش شعاع سرسنبه، نیروی شکست و شکل پذیری قطعه افزایش می یابد.
۸. نتایج شبیه سازی کامپیوتری مانند نیروی کشش ورق، تعیین حد نسبت کشش، با نتایج حاصل از آزمایشهای تجربی تطابق بسیار خوبی دارند. لذا می توان با دقت بالایی از شبیه سازی کامپیوتری برای طراحی و کنترل فرآیند کشش عمیق استفاده کرد.

فهرست علائم

- l: ضریب اصطکاک
D: قطر گرده اولیه
DR: حد کشش
LDR: دیاگرام حد شکل دهی

با مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی و آزمایش های تجربی برای شعاع های مختلف سرسنبه، مطابق شکل (۱۶-الف - ی) ملاحظه می گردد که منحنی های نیرو - جابجائی از تطابق مناسبی برخوردارند .

نتیجه گیری

با توجه به آزمایش های تجربی و نتایج تحلیل نرم افزاری به منظور بررسی تاثیر شعاع سنبه و ماتریس روی شکل پذیری کشش عمیق فنجان استوانه ای، نتایج ذیل حاصل گردید:

۱. حد نسبت کشش تجربی ورق AISI 304 با استفاده از روانکاری روغن، شعاع سرسنبه و ماتریس ۸ میلیمتر و لقی ۱/۲۲ میلیمتر، ۲/۱۴ می باشد.
۲. حد نسبت کشش ورق AISI 304 با استفاده از شبیه سازی کامپیوتری (شعاع سرسنبه و ماتریس ۸ میلیمتر، لقی ۱/۲۲ میلیمتر و ضریب اصطکاک ۰/۲۹)، ۲/۱۸ می باشد.
۳. با افزایش شعاع لبه ماتریس در فرآیند کشش عمیق نیروی کشش به طور پیوسته کاهش یافته و جابجائی در بار ماکزیمم افزایش می یابد.
۴. با افزایش شعاع لبه ماتریس، تغییرات ضخامت ورق در گستره فنجان کاهش یافته و در نتیجه شکل پذیری ورق بهبود پیدا می کند.

مراجع

- 1 - Woo, D. M. (1968). "On the complete solution of the deep drawing problem." *Int. J. of. Mech. Sci*, Vol. 10, PP.83-94.
- 2 - Sowerby, R., Dunean. J. and chu. E. (1986). "The modeling of sheet metal stamping." *Int. J. of. Mech. Sci*, Vol. 28, PP.415- 430 .
- 3 - Chung. L., Wanger, R. H. and Germain, Y. (1988). "A rigid- viscoplastic finite element program for sheet metal forming analysis." *Int. J. of. Mech. Sci*, Vol. 31, PP.1-24.
- 4 - Chen, X. and sowerby, R. (1991). "The development of blank shapes by the method of plane stress characteristics." *Int. J. of. Mech. Sci* , Vol. 35, PP.491-516.
- 5 - Sukhomolinov, L. G., Engelsberg, V. K. and Dargdov, N. M. (1992). "A finite element membrane model for the analysis of axisymmetric sheet forming processes." *Int. J. of. Mech. Sci* , Vol. 34 , PP. 17-193.
- 6 - Andersin, B. S. (1982). "A numerical study of the deep – drawing process." *Number. Mech. Indust. Forming process*, 12th- 16th , July, Sunsea, U.K. , PP.709-721.
- 7 - "Dynaform-PC application manual." *Engineering Technology Associates Inc*, 1999.
- 8 - Hallquist, J. O. (1998) . *LS-Dyna 970 theoretical manual*, Livermore Software Technology Corporation.
- 9 - Reid, J. D. Ph.D, (1998). *LS-Dyna 970 Examples manual*, Livermore Software Technology Corporation.
- 10 - *eta/Post user's manual*, Engineering Technology Associates Inc, 2004.