

شبیه سازی اجزای محدود و بررسی تجربی شکل دهی قطعات مخروطی با روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی

عبدالحمید گرجی^۱، حسن علوی هاشمی^۲ و محمد بخشی^۳ محمد ابراهیم ولی زاده^۴ و اکبر شیرخورشیدیان^۵

صنایع شهید صباد شیرازی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۰۳/۰۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۰۹/۱۴)

چکیده

شکل دهی قطعات مخروطی در صنعت یکی از زمینه‌های پیچیده و دشوار فرایندهای شکل دهی فلزات محسوب می‌شود. به علت تماس کم سطح ورق با سنبه در مراحل اولیه شکل دهی، تنش زیادی به ورق اعمال شده که موجب پارگی آن می‌شود. به علاوه، از آنجا که بخش عمده‌ای از سطح ورق در ناحیه بین نوک سنبه و ورق گیر آزاد است، در صورت کشیده شدن ورق، در دیواره قطعه مخروطی چروک ایجاد می‌شود. به همین دلیل، این قطعات را در صنعت عموماً با روش اسپینینگ، شکل دهی انفجاری و یا با کشش عمیق چند مرحله‌ای شکل می‌دهند. در زمینه شکل دهی قطعات مخروطی، تحقیقات محدودی صورت گرفته است. در این مقاله، شکل دهی قطعات مخروطی در فرآیند هیدروفرمینگ با استفاده از شبیه سازی اجزای محدود و مراحل آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است. با بررسی مسیرهای فشار متفاوت، تأثیر مسیر فشار بر پارگی و توزیع ضخامت قطعه مورد بررسی قرار گرفت. با اعمال مسیر فشار مطلوب، قطعات مخروطی با عمق زیاد و با کیفیت مناسب شکل داده شده است.

واژه های کلیدی: هیدروفرمینگ ورق، قطعات مخروطی، کشش عمیق هیدرودینامیکی، شبیه سازی اجزای محدود

Finite Element Simulation and Experimental Study of Forming Conical Parts, Using Hydrodynamic Deep Drawing with Radial Pressure

A. Gorji, H. Alavi Hashemi, and M. Bakhshi
Mech. Eng. Dep't., Babol Noshirvani Univ. of Tech.

M.E. Valizadeh and A. Shirshorshidian
Shahid Sayyad Shirazi Industries

ABSTRACT

Forming conical parts is one of the complex and difficult fields in metal forming processes. Because of low contact area of the sheet with punch in the initial stages of forming, high stresses is applied to the sheet that causes tearing. Moreover, since most of the sheet surface in the area between the punch tip and the blank holder is free, when the sheet is drawn, wrinkles are occurred in the wall of the part. Thus, these parts are normally formed by spinning, explosive forming, or multistage deep drawing processes. A few number of research works have been carried out in the area of forming conical parts. In this paper, forming these parts in the hydroforming process is studied, using finite element simulation and experiments. By examining several pressure paths, the effect of pressure path on tearing and thickness distribution of the sheet has been studied. By obtaining the desired pressure path, a conical part with a high depth has been formed.

Keywords: Sheet Hydroforming, Conical Parts, Hydrodynamic Deep Drawing, Finite Element Method

۱- دانشجوی دکترا (نویسنده پاسخگو): hamidgorji@nit.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد: h.alavi.memph@stu.nit.ac.ir

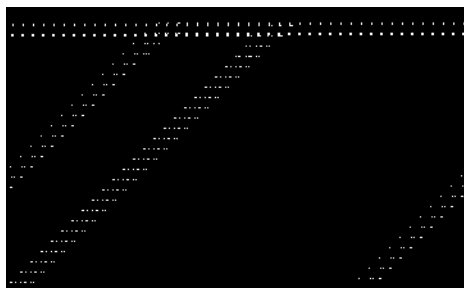
۳- استاد: bakhshi@nit.ac.ir

۴- کارشناس: ab.valizadeh@gmail.com

۵- کارشناس: khorshidian_99@yahoo.com

۱- مقدمه

قطعات مخروطی در صنعت دارای کاربرد گسترده ای می باشند. این قطعات در صنایع نظامی دارای کاربرد ویژه ای هستند. شکل دهی قطعات مخروطی با فرآیند کشش عمیق موضوع دشوار و پیچیده ای محسوب می گردد [۵-۸]. شکل ۲ شماتیک این فرآیند را برای شکل دهی یک قطعه مخروطی نشان می دهد. همانطور که در شکل نشان داده شده است به دلیل تماس کم سطح ورق و سنبه در مراحل اولیه، تنش زیادی در ناحیه تماس با سر سنبه، به ورق اعمال می شود که این امر موجب پارگی آن می گردد. بعلاوه، از آنجا که بخش عمده ای از سطح ورق در ناحیه بین نوک سنبه و ورقگیر آزاد است، در صورت کشیده شدن ورق، در دیواره قطعه مخروطی چروک ایجاد می شود. شکل ۳ چروکهای ایجاد شده در ناحیه های فلنج و دیواره قطعه مخروطی را که با روش کشش عمیق معمولی کشیده شده است، نشان می دهد. از این رو، قطعات مخروطی در صنعت عموماً با کشش عمیق چند مرحله ای [۷]، اسپینینگ [۹] یا با شکل دهی انفجاری [۱۰-۱۱] شکل داده می شوند.



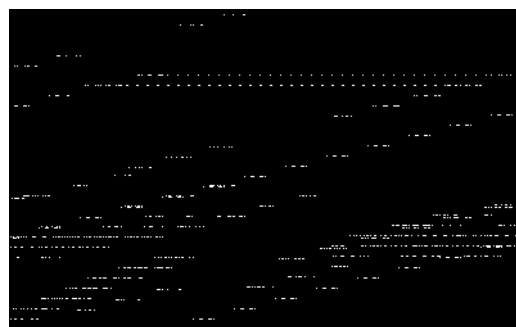
شکل (۲): شکل دهی قطعه مخروطی در قالب کشش عمیق معمولی.



شکل (۳): چروکهای ایجاد شده در ناحیه های فلنج و دیواره قطعه مخروطی در فرآیند کشش عمیق معمولی [۵].

در طی سال های اخیر تکنولوژی هیدروفرمینگ برای شکل دهی قطعات متنوع و پیچیده مورد توجه زیادی قرار گرفته و در زمینه های مختلف ساخت و تولید از جمله صنایع اتومبیل سازی، صنایع هوا و فضا و صنایع نفت و گاز کاربرد وسیعی یافته است. در مقایسه با سایر روش های شکل دهی، هیدروفرمینگ ورق دارای مزایای زیادی از جمله نسبت کشش زیاد، کیفیت سطح مطلوب، دقت ابعادی بالا و قابلیت شکل دهی قطعات پیچیده می باشد [۴-۱].

در طی سالهای گذشته نوآوریهای زیادی در زمینه هیدروفرمینگ ورق ارایه شده است که به عنوان مثال می توان از هیدروفریم [۱]، هیدرو فرمینگ استاندارد [۲،۱]، کشش عمیق آکوادرا [۲]، کشش عمیق هیدرومکانیکی [۲]، کشش عمیق هیدرودینامیکی [۲]، هیدروفرمینگ ورق با قالب متحرک [۲]، هیدروفرمینگ ورق دو بشکه ای [۲] و کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی [۳-۴] نام برد. از میان انواع روشهای ذکر شده، کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی برای تولید قطعات استوانه ای با نسبت کشش بالا در یک مرحله نتیجه خوبی داده است. در شکل ۱ شماتیک این فرآیند نشان داده شده است. در این روش سیال در زیر ورق قرار می گیرد و ضمن اعمال فشار در جهت محوری قائم، در جهت شعاعی نیز بر روی آن فشار وارد می کند. بعلاوه، ورق بین ورقگیر و ماتریس آزاد است.

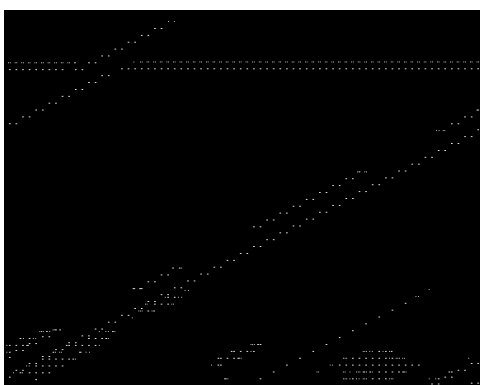


شکل (۱): شماتیک فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی [۳،۴].

ضخامت قطعات مخروطی با استفاده از روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی، می باشد. جهت تعیین مسیر فشار مطلوب، با روش شبیه سازی اجزای محدود، مسیرهای فشار متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. برای تایید نتایج شبیه سازی، آزمایشها نیز انجام شد. ابتدا مسیر های فشار که منجر به پارگی (عدم شکل پذیری) می شد بررسی، و در مراحل بعدی تغییر ضخامت قطعه مخروطی در مسیر های فشار که قطعه شکل داده شد مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مراحل آزمایشگاهی

شکل ۴ شماتیک مجموعه قالب هیدرودینامیکی استفاده شده در این پژوهش را نشان می دهد. همانگونه که از شکل مشخص است بوجود آمدن فشار شعاعی در ناحیه فلنج ورق باعث جریان یافتن راحت تر ورق می شود. از طرف دیگر، فشار سیال در زیر ورق، سطح تماس ورق و سنبه را افزایش داده و در نتیجه از ایجاد چروک در سطوح آزاد ورق در فاصله بین نوک سنبه و ورقگیر جلوگیری می کند. در شکل ۵ نقشه قطعه مورد تحقیق به همراه ابعاد آن نشان داده شده است.



شکل (۴): شماتیک مجموعه قالب هیدرودینامیکی استفاده شده.

کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی می تواند از ایجاد چروک در دیواره قطعات مخروطی جلوگیری کند. در این روش فشار سیال از یک طرف باعث افزایش اصطکاک بین سنبه و ورق و در نتیجه بهبود نسبت کشش در قطعات استوانه ای می شود. از سوی دیگر، بکارگیری سیال سبب روغنکاری بین سطوح تماس ورق با اجزای قالب و در نتیجه موجب کاهش اصطکاک می شود. این امر باعث بهبود قابلیت شکل پذیری می گردد [۳-۴].

در زمینه هیدروفرمینگ قطعات مخروطی تحقیقات محدودی انجام شده است. خاندپرکار^۱ و همکارش [۱۴] با استفاده از یک قالب جدید که آن را هیدرو مکانیکی به همراه فشار پشتیبان نامیدند به بررسی شکل دهی یک قطعه با هندسه پله دار (استوانه ای- مخروطی- استوانه ای) پرداختند. همچنین محققان تأثیر پیش-بالج و منحنی فشار بهینه بر بهبود شکل دهی قطعه مخروطی پله دار را با شبیه سازی اجزای محدود نشان دادند.

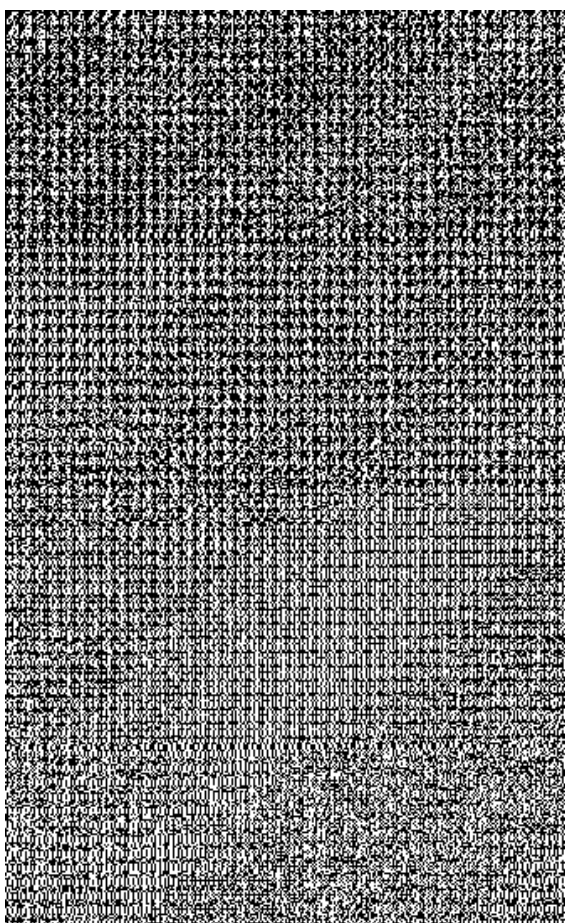
لانگ^۲ و همکاران [۱۵] بررسی تجربی و شبیه سازی اجزای محدود تأثیر مرحله کالیبراسیون را در فرآیند هیدروفرمینگ چند مرحله ای ورق برای شکل دهی قطعات مخروطی و شبه مخروطی بر روی موادی با قابلیت شکل دهی کم، از جمله آلیاژهای آلومینیم و آلیاژهای فولاد استحکام بالا مورد مطالعه قرار داده اند. آنها در تحقیق ارائه شده کالیبراسیون را به دو نوع تقسیم نمودند. نوع اول انجام کالیبراسیون بدون تغییر ابزار و انجام فرآیند به صورت پیوسته و بدون توقف، و نوع دوم کالیبراسیون با استفاده از تغییر ابزار (تغییر در سنبه و ماتریس) که در پایان هر مرحله از فرآیند تغییر می کند. محققان در نهایت تأکید می کنند که استفاده از مرحله کالیبراسیون می تواند از وقوع چروک و پارگی بویژه در قطعات پیچیده جلوگیری کند.

مهم ترین پارامتر مؤثر در شکل دهی ورقهای فلزی با روش هیدروفرمینگ، مسیر فشار اعمالی است که در بسیاری از تحقیقات انجام شده از سوی محققان مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است [۴-۱] و [۱۳-۱۲]. در این مقاله، هدف، بررسی اثر مسیر فشار بر شکل پذیری و

1-Khandeparkar

2-Lang

مسیر فشار BC مسیر فشار ثابتی است که فشار حداکثر اعمالی است و در طی آن سیال از شیر کنترل فشار تخلیه می گردید. مسیر فشار AB مسیر فشار خطی است که با تغییر در سرعت سنبه شیب آن قابل تغییر بود. ورق مورد آزمایش از جنس مس خالص به ضخامت ۲ میلیمتر و به قطر ۸۰ میلیمتر بوده است. شکل ۸ نمودار تنش-کرنش مربوط به ورق مسی را نشان می دهد که از آزمایش کشش بدست آمد. جنس سیال استفاده شده روغن SAE۱۰ می باشد.



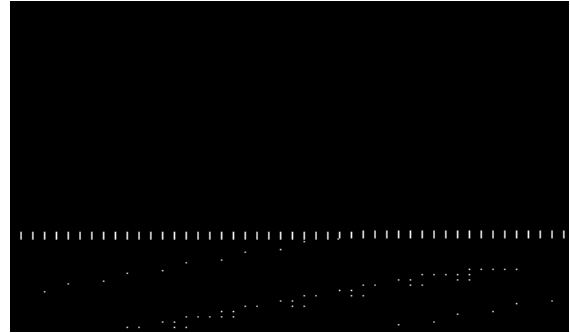
شکل (۶): (الف) اجزای قالب و (ب) مجموعه قالب ساخته شده در حالت نصب شده بر روی دستگاه آزمایش.



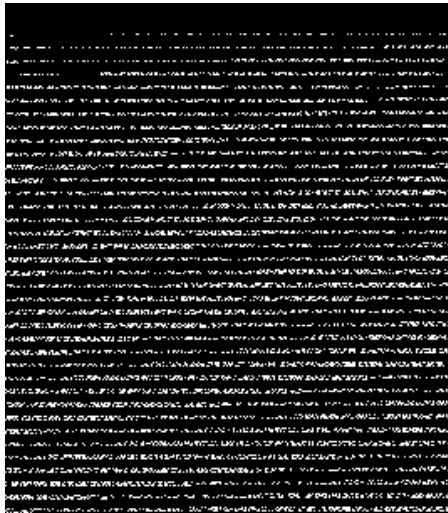
شکل (۵): نقشه قطعه مخروطی، ابعاد به میلیمتر.

تمام آزمایش‌ها با استفاده از یک دستگاه آزمایش اونیورسال DMG^۱ با ظرفیت ۶۰۰ KN انجام شد. کلیه حرکات دستگاه توسط واحد کامپیوتری متصل به آن قابل کنترل می باشد. شکل ۶ مجموعه قالب استفاده شده را در حالت نصب شده بر روی دستگاه نشان می دهد. در حین انجام آزمایش‌ها با حرکت سنبه به درون حفره ماتریس، فشار سیال افزایش می یافت و از این طریق فشار مورد نیاز برای شکل دهی تامین می گردید. با این وجود، جهت تامین فشار اولیه از یک واحد هیدرولیکی نیز استفاده شد. به منظور تنظیم حداکثر فشار، یک شیر کنترل فشار مورد استفاده قرار گرفت. برای بهبود بخشیدن به جریان فلز در حین فرآیند هیدروفرمینگ، ابتدا یک فشار اولیه محدودی 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 شکل دهی با فشار ثابت انجام گرفت. بدلیل استفاده از فرآیند هیدرودینامیکی در این پژوهش، آب بندی 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 می کرد. از این رو، امکان اعمال فشار اولیه بالا وجود نداشت. در مجموعه قالب این مقاله حداکثر فشار اولیه قابل اعمال ۲ MPa بود. شکل ۷ مسیر فشار نمونه اعمالی در این پژوهش را نشان می دهد که در آن مسیر فشار OA، فشار اولیه ۲ MPa است که بدون حرکت سنبه اعمال می گردید.

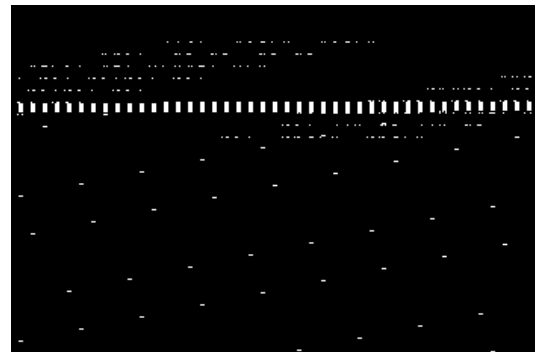
۲۰۰ mm/min در نظر گرفته شد و از مدل مستقل از نرخ استفاده شده است. نوع تماس بین ورق و اجزای قالب سطح به سطح^۳ می باشد. نوع مدل ماده استفاده شده از نوع الاستوپلاستیک^۴ می باشد. خواص مکانیکی ورق مسی که در شبیه سازی اعمال شد در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل (۷): مسیر فشار نمونه اعمالی در آزمایش.



شکل (۹): مجموعه قالب شبیه سازی شده.



شکل (۸): نمودار تنش- کرنش مس خالص.

جدول (۱): خواص مکانیکی و فیزیکی ورق مسی.

معادله مشخصه، [MPa]	$V 530.98 A^{44}$
مدول الاستیسیته، GPa	$E= 117$
چگالی، Kg/m^3	$\rho= 8940$
ضریب پواسون	$= 0.32$

در این پژوهش معیار پارگی در شبیه سازی طبق مرجع [۱۶] مقدار بیشینه کرنش مؤثر در نظر گرفته شد. بر طبق این معیار، پارگی زمانی اتفاق می افتد که:

$$\bar{\epsilon} \geq \epsilon_s \quad (1)$$

که در آن،

۳- شبیه سازی اجزای محدود

برای انجام شبیه سازی از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS 6.7 استفاده شد. در شبیه سازی، ماده همسانگرد فرض شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از این پژوهش، ملاحظه گردید که این فرض با دقت بالایی با نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارد. شکل ۹ مجموعه قالب شبیه سازی شده را نشان می دهد. بدلیل تقارن محوری، از مدل های دو بعدی برای شبیه سازی قالب و ورق استفاده گردید. ورق بصورت دو بعدی شکل پذیر^۱ و با المان CAX4R مدل شد. قالب ها به صورت صلب دو بعدی^۲ مدل گردید که به دلیل انتخاب نوع مسئله تماس (صلب تحلیلی)، مش بندی نشده و تحلیل نیز نگردیدند. در مدل شبیه سازی از روش ABAQUS/Explicit جهت تحلیل استفاده شد. بر اساس مرجع [۱۴] 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

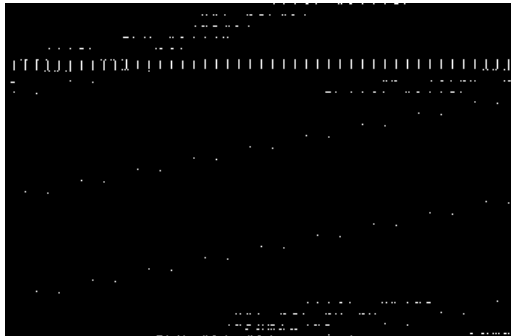
3- Surface to Surface

4- Elastoplastic

1 - Axisymmetric Deformable

2 - Axisymmetric Rigid Analytical

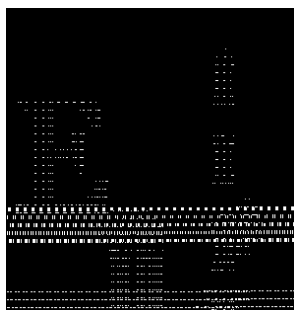
فشار های نهایی ۱۵ تا ۶۰ MPa نشان می دهد که با شبیه سازی بدست آمده است.



شکل (۱۰): مسیر فشار اعمالی مطلوب جهت شکل دهی قطعه مخروطی برای فشار نهایی $P_{max}=30\text{ MPa}$.



شکل (۱۱): مسیره‌های فشار مطلوب برای فشار های نهایی گوناگون P_{max} ، بدست آمده از شبیه سازی.



شکل (۱۲): ناحیه های مختلف مورد مطالعه در قطعه مخروطی.

$$s = \frac{1}{(1 - 2R)^{1/2}} \cdot R \quad (2)$$

در رابطه های بالا، $\bar{\epsilon}$ کرنش مؤثر، n نمای کرنش - سختی و R نسبت کرنش پلاستیک است.

با توجه به فرض همسانگرد بودن ورق مسی، $R = 1$ در نتیجه معیار پارگی به صورت زیر خواهد بود:

$$\bar{\epsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} n \quad (3)$$

از طرفی، مطابق شکل ۸ و جدول ۱، نمای کرنش - سختی ورق مسی استفاده شده در این پژوهش برابر 0.44 می باشد. با جایگذاری این مقدار در رابطه (۳) معیار پارگی به صورت زیر بدست می آید:

$$\bar{\epsilon} = 1.15 n \approx 0.5. \quad (4)$$

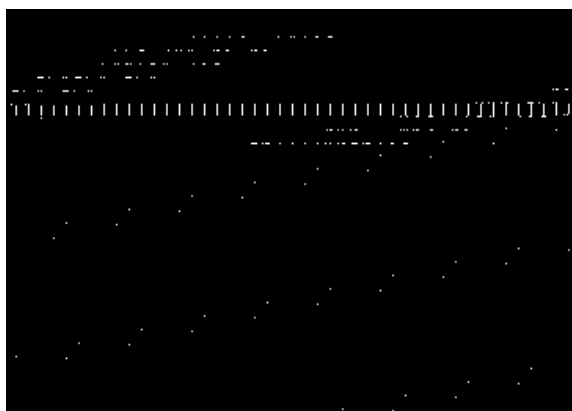
۴- نتایج و بحث

مسیر فشار نمونه اعمالی در این مقاله در شکل ۷ نشان داده شد و در بخش ۲ مورد بحث قرار گرفت. به ازای هر فشار بیشینه معین، یک فشار اولیه OA و یک مسیر فشار AB با شیب های متفاوت قابل تعریف بود. شیب مسیر فشار AB با تغییر در سرعت سنبه تعیین می گردد. از این رو، برای هر فشار حداکثر دلخواه، فرآیند شکل دهی قطعه مخروطی در نرم افزار شبیه سازی گردید تا بتوان یک مسیر فشار مطلوب را بدست آورد. شکل ۱۰ مسیر فشار مطلوب را برای فشار حداکثر 30 MPa نشان می دهد که با شبیه سازی بدست آمده است. در ابتدا یک فشار اولیه 2 MPa در زیر ورق اعمال گردید تا قطعه در خلاف جهت حرکت سنبه اندکی کشیده (بالج) شود. در طی حرکت سنبه، فشار به تدریج افزایش یافته تا به فشار ماکزیمم 30 MPa برسد در این مرحله با باز شدن شیر کنترل فشار، فشار تا انتهای عملیات شکل دادن ثابت ماند.

مقدار فشار نهایی نقش بسیار مهمی در ایجاد پارگی و توزیع ضخامت قطعات تولید شده ایفا می کند. جهت بررسی تاثیر آن بر کیفیت قطعه شکل داده شده، مسیره‌های فشار مطلوب برای فشارهای نهایی متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۱۱ مسیره‌های فشار مطلوب را در

شکل ۱۳ مسیر فشار را برای فشار حداکثر ۱۰ MPa نشان می دهد. در شکل ۱۴ قطعه شکل داده شده متناظر با این مسیر فشار به همراه نتیجه به دست آمده از شبیه سازی نشان داده شده اند. همانطور که از شکل پیداست در ناحیه B در قطعه پارگی رخ داده است.

شکل ۱۵ مسیر فشار را برای فشار حداکثر ۱۵ MPa نشان می دهد. در شکل ۱۶ قطعه مخروطی شکل داده شده بر اساس این مسیر فشار همراه با نتیجه بدست آمده از شبیه سازی آمده است. برای شکل دهی ابتدا مطابق شکل ۱۵ یک فشار اولیه ۲ MPa در زیر قطعه اعمال گردید. سپس با حرکت سنبه فشار به تدریج افزایش یافته تا در فشار ۱۵ MPa با باز شدن شیر کنترل فشار، ثابت شده است. اعمال این فشار در انتهای فرآیند سبب شکل گیری قطعه مخروطی شده است اما همانگونه که در شکل ملاحظه می شود در ناحیه B قطعه تولید شده، (ناحیه تماس شعاع نوک سنبه با ورق) عیب نازک شدگی (گلویی شدن) رخ داده است.



شکل (۱۳): مسیر فشار مطلوب با فشار نهایی ۱۰ MPa.

شکل ۱۷ منحنی توزیع ضخامت قطعه شبیه سازی شده و تجربی را در امتداد A-E شکل ۱۲ نشان می دهد. همانگونه که در شکل ملاحظه می شود انطباق قابل قبولی بین دو منحنی برقرار است.

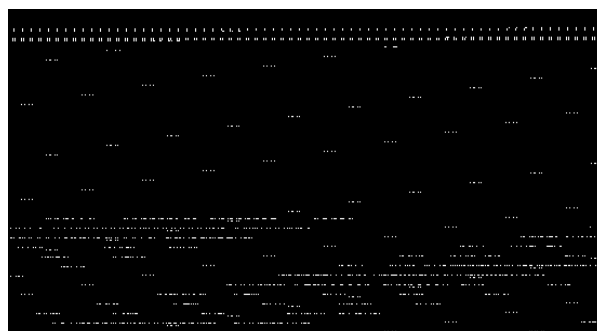
برای بررسی دقیق تر توزیع ضخامت در نمونه های تولید شده، قطعه مخروطی مطابق شکل ۱۲ به نواحی مختلفی تقسیم شده و در ادامه به این نواحی ارجاع شده است.



شکل (۱۴): مسیر فشار متناظر با فشار نهایی ۱۰ MPa.



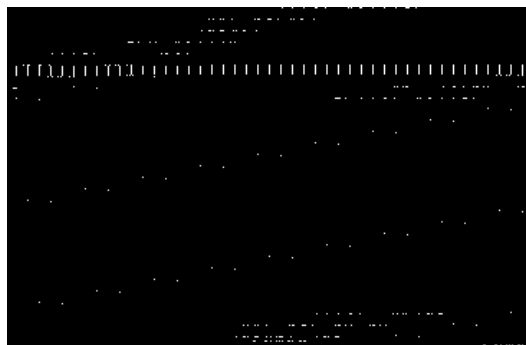
الف - قطعه تولید شده.



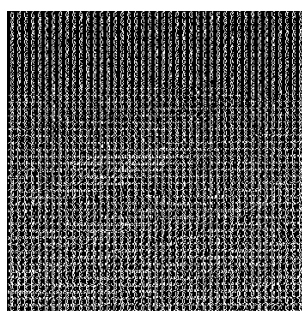
ب - نتیجه شبیه سازی.

شکل (۱۴): شکل دهی برای مسیر فشار نهایی ۱۰ MPa و ایجاد پارگی در قطعه در ناحیه B.

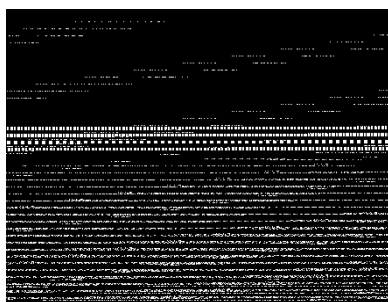
مشابه حالت قبل ابتدا یک فشار اولیه ۲ MPa در زیر ورق اعمال گردید تا قطعه در خلاف جهت حرکت سنبه اندکی کشیده (بالج) شود. در طی حرکت سنبه، فشار به تدریج افزایش یافته تا به مقدار حداکثر ۳۰ MPa برسد. اعمال این فشار در مرحله پایانی سبب شکل گیری کامل قطعه بدون عیب نازک شدگی (گلویی شدن) و ایجاد شکل هندسی دقیق شد.



شکل (۱۸): مسیر فشار مطلوب مربوط به فشار نهایی ۳۰ MPa



الف - قطعه تولید شده.

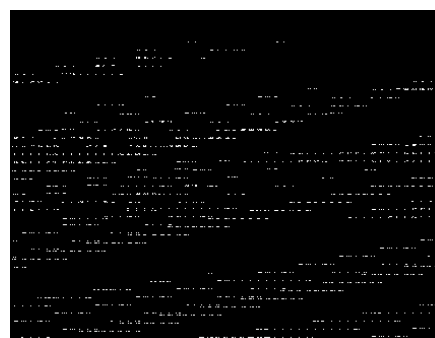


ب - نتیجه شبیه سازی.

شکل (۱۹): شکل دهی بر اساس مسیر با فشار نهایی ۳۰ MPa و تولید قطعه مطلوب.



الف - قطعه تولید شده.



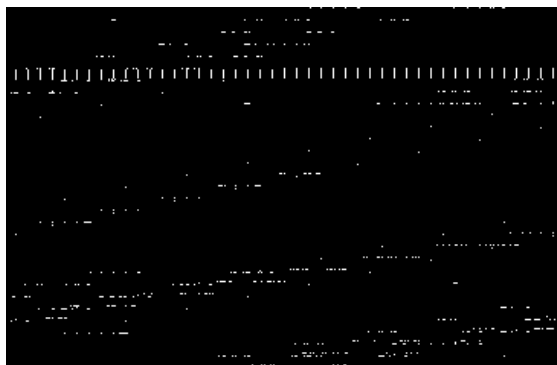
ب - نتیجه شبیه سازی.

شکل (۱۶): شکل دهی بر اساس مسیر با فشار نهایی ۱۵ MPa و ایجاد پدیده گلویی شدن در قطعه.



شکل (۱۷): مقایسه توزیع ضخامت قطعه مخروطی تولید شده و شبیه سازی برای فشار نهایی ۱۵ MPa، ضخامت اولیه ورق ۲ mm.

شکل ۱۸ مسیر فشار را برای فشار حداکثر ۳۰ MPa نشان می دهد. در شکل ۱۹ قطعه مخروطی شبیه سازی شده و تجربی بر اساس این مسیر فشار نشان داده شده است.



شکل (۲۱): توزیع ضخامت حاصل از شبیه سازی برای فشار نهایی مختلف، ضخامت اولیه ورق ۲ mm.

فشار نهایی ۱۵ MPa می باشد. همانطور که در شکل ۱۶ نشان داده شد، در این فشار در ناحیه B قطعه، نازک شدگی رخ داده است. از شکل پیداست که با افزایش فشار حداکثر به حدود 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. بنا براین افزایش فشار حداکثر به بیش از ۳۰ MPa بر ضخامت قطعه در ناحیه B تاثیر مثبتی ندارد.



شکل (۲۲): منحنی تغییرات کاهش ضخامت ناحیه B در فشار های مختلف نهایی.

شکل ۲۳ منحنی تغییرات کاهش ضخامت قطعه شکل داده شده را در ناحیه D بر حسب فشار نهایی سیال نشان می دهد. همانطور که از شکل پیداست کمترین کاهش ضخامت مربوط به فشار حداکثر ۱۵ MPa می باشد. با افزایش فشار حداکثر تا ۳۰ MPa کاهش ضخامت با شیب تندی افزایش می یابد. از فشار حداکثر حدود ۳۰ MPa و بیشتر از آن این شیب تقریباً به صورت افقی در می آید.

شکل ۲۰ نمودارهای توزیع ضخامت قطعه را در مسیر A-E شکل ۱۲ برای فشار نهایی ۳۰ MPa نشان می دهد. همانگونه که در شکل مشاهده می شود نتایج توزیع ضخامت در حالت تجربی و شبیه سازی به هم نزدیک بوده و انطباق قابل قبولی دارد.



شکل (۲۰): منحنی های توزیع ضخامت قطعه مخروطی برای مسیر فشار نهایی ۳۰ MPa، ضخامت اولیه ورق ۲ mm.

شکل ۲۱ منحنی توزیع ضخامت حاصل از شبیه سازی را برای فشارهای نهایی متفاوت نشان می دهد. همانطور که از شکل پیداست بیشترین کاهش ضخامت مربوط به ناحیه های B و D است و ناحیه بحرانی نیز ناحیه B می باشد که در نتایج قبلی هم این موضوع نشان داده شد. از شکل واضح است که افزایش فشار از ۱۵ تا ۳۰ MPa تاثیر زیادی بر جلوگیری از کاهش ضخامت در نقاط مختلف قطعه بویژه در منطقه بحرانی B دارد، در حالی که با افزایش فشار از ۳۰ MPa تغییر چندانی بر کاهش ضخامت دیده نمی شود.

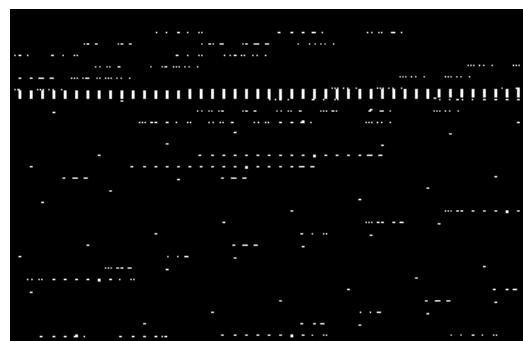
برای تعیین مناسبترین مسیر فشار شکل دهی جهت حصول قطعه با بهترین توزیع ضخامت، منحنی های تغییرات کاهش ضخامت نواحی B و D در فشار های مختلف مورد مقایسه قرار گرفتند. شکل ۲۲ منحنی تغییرات کاهش ضخامت قطعه شکل داده شده را در ناحیه B بر حسب فشار نهایی سیال نشان می دهد. همانطور که از شکل پیداست بیشترین کاهش ضخامت مربوط به مسیر

۵- نتیجه گیری

در این مقاله چگونگی شکل دهی یک قطعه مخروطی از جنس ورق مسی در فرآیند هیدروفورمینگ به روش هیدرودینامیکی با فشار شعاعی به صورت شبیه سازی و تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. جهت تعیین فشار مناسب، مسیر های مختلف فشار با شبیه سازی بررسی گردید و اثر آنها بر پارگی و توزیع ضخامت قطعه مورد مطالعه قرار گرفت. مشاهده شد که در فشار پایین تر از ۳۰ MPa ۱۵ عملیات شکل دهی شبیه فرآیند کشش عمیق معمولی عمل کرده و به دلیل ایجاد تنش زیاد در ناحیه تماس نوک سنبه با ورق، پارگی در آن ناحیه ایجاد می گردد. در فشار ۳۰ MPa و بالا تر از آن قطعه شکل می گیرد ولی توزیع ضخامت در قطعه شکل گرفته شده در فشار های مختلف متفاوت بوده است. با بررسی توزیع ضخامت در فشار های متفاوت مشاهده شد که در فشار ۳۰ MPa کیفیت قطعه مطلوب بوده و افزایش بیشتر فشار تاثیری بر بهبود توزیع ضخامت قطعه ندارد. همچنین مشاهده شد که اعمال یک فشار پیش کشش ۲ MPa در ابتدای فرآیند تاثیر مثبتی بر شکل دهی مطلوب محصول دارد. هم بطور تجربی و هم با شبیه سازی نشان داده شد که استفاده از مسیر فشار مناسب موجب افزایش عمق کشش و حصول قطعه ای مطلوب با صافی سطح مناسب در یک مرحله می گردد.

مراجع

1. Thiruvarduchelvan, S. and Travis, F.W., "Hydraulic-Pressure-Enhanced Cup-Drawing Processes-An Appraisal", J. Material Process Tech., Vol. 140, No. 1, 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", J. Material Process Tech., Vol. 151, No. 3, pp. 237-241, 2004.
3. 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", J. Material Process Tech., Vol. 148, No. 1, pp. 119-131, 2004.
4. Lang, L., Danckert, J., and Nielsen, K.B., "Investigation into Hydrodynamic Deep Dawing

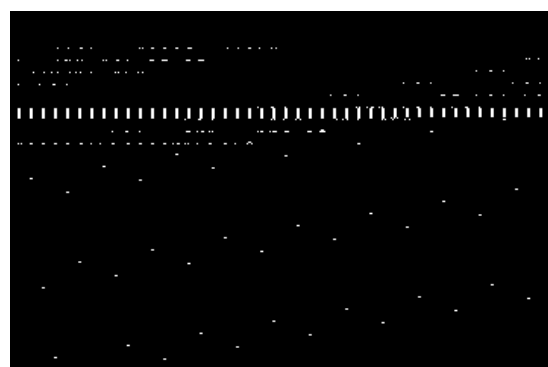


شکل (۲۳): منحنی تغییرات کاهش ضخامت ناحیه D در فشار های مختلف نهایی.

بنا بر این افزایش فشار حداکثر به بیش از ۳۰ MPa بر ضخامت قطعه در ناحیه D تاثیر مثبتی ندارد.

با ملاحظه مباحث مذکور این نتیجه گیری حاصل شده است که برای قطعه مورد نظر و شرایط موجود، مسیر فشار مربوط به فشار نهایی ۳۰ MPa مناسب ترین مسیر برای دستیابی به بهترین توزیع ضخامت قطعه می باشد.

نمودار نیرو بر حسب جابجایی سنبه برای شکل دهی قطعه مخروطی مطلوب در شکل ۲۴ برای حالت های شبیه سازی و تجربی نشان داده شده است. همانطور که از شکل پیداست بین نمودار های دو حالت هماهنگی قابل قبولی وجود دارد. حداکثر نیرو برای شکل دهی این قطعه حدود ۱۰۰ KN است که مقدار زیادی نمی باشد.



شکل (۲۴): نمودار نیرو_جابجایی سنبه.

- Sheet Hydroforming, Using Poor-formability Materials”, J. Material Process Tech., Vol. 201, No. 1, pp. 97-100, 2008.
16. Wu, J., Balendra, R., and Qin, Y., “A Study on the Forming Limits of the Hydromechanical Deep Drawing of Components with Stepped Geometries”, J. Material Process Tech., Vol. 145, No. 4, pp. 242–246, 2004.
 17. Thiruvarudchelvan, S. and Travis, F.W., “Hydraulic-Pressure-Enhanced Cup-Drawing Processes-An Appraisal”, J. Material Process Tech., Vol. 140, No. 1, pp. 70-75, 2003.
 - Asisted by Rdial Pessure Part II. Numerical Alalysis of the Drawing Mechanism and the Process Parameters”, J. Mater. Process Tech., Vol. 166, No. 1, pp. 150-161, 2005.
 5. Kawka, M., Olejnik, L., Rosochowski, A., Sunaga, H., and Makinouchi, A., “Simulation of Wrinkling in Sheet Metal Forming”, J. Material Process Tech., Vol. 109, No. 2, pp. 283-289, 2001.
 6. Thiruvarudchelvan, S. and Gan, J.G., “Drawing of Conical Cup with Friction Actuated Blank Holding”, J. Material Shaping Tech., Vol. 9, No. 1, pp. 59-65, 1991.
 7. Thiruvarudchelvan, S. and Tan, M.J., “The Drawing of Conical Cups, Using an Annular Urethane Pad”, J. Material Process Tech., Vol. 147, No. 1, pp. 163-166, 2004.
 8. Sheng, Z.Q., Jirathearanat, S., and Altan, T., “Adaptive FEM Simulation for Prediction of Variable Blank Holder Force in Conical Cup Drawing”, Int. J. Machine Tools & Manufacture, Vol. 44, No. 2, pp. 487-494, 2004.
 9. Wong, C.C., Dean, T.A., and Lin, J., “A Review of Spinning, Shear Forming and Flow Forming Processes”, Int. J. Machine Tools & Manufacture, Vol. 43, No. 1, pp. 1419-1435, 2003.
۱۰. اسماعیل آبادی، مریم، "بررسی پارامتر های مؤثر در شکل دهی انفجاری با گاز ور قهای مسی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه مازندران، ۱۳۸۴.
۱۱. لیاقت، غ، درویزه، ا، جواب ور، د. و عبدا...، ا، "تحلیل فرآیند شکل دهی انفجاری مخروط، مقایسه نتایج تجربی و شبیه سازی اجزای محدود"، مجله امیر کبیر، سال سیزدهم، شماره ۵۰، ص.ص. ۲۵۰-۲۶۴، ۱۳۸۱.
12. Liu, X., Xu, Y., and Yuan, Sh., “Effects of Loading Paths on Hydrodynamic Deep Drawing with Independent Radial Hydraulic Pressure of Aluminum Alloy Based on Numerical Simulation”, J. Material Sci. Tech., Vol. 24, No.3, pp. 395-399, 2008.
 13. Lang, L., Danckert, J., and Nielsen, K.B. “Investigation into the Effect of Pre-bulging During Hydromechanical Deep Drawing with Uniform Pressure onto the Blank”, Int. J. Machine Tools & Manufacture, Vol. 44, No. 1, pp. 649-657, 2004.
 14. Khandeparkar, T. and Liewald, M., “Hydromechanical Deep Drawing of Cups with Stepped Geometries”, J. Material Process Tech., Vol. 202, No. 2, pp. 246-254, 2008.
 15. Lang, L., Gu, G., Li, T., and Zhou, X., “Numerical and Experimental Confirmation of the Calibration Stage’s Effect in Multi-operation