

مطالعه تجربی و شبیه‌سازی فرآیند هیدروفرمینگ قطعه مخروطی با بدست آوردن فشار مناسب سیال

سید محمد حسین پور

دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران،
mohammad.irka77@yahoo.com

حمید گرچی*

دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران، hamidgorji@nit.ac.ir

محمد بخشی جویباری

استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران، bakhshi@nit.ac.ir

چکیده

یکی از فرآیندهایی که امروزه در شکل‌دهی قطعات فلزی کاربرد دارد، فرآیند هیدروفرمینگ است. یک نوع از قطعات پرکاربرد در صنایع، به‌ویژه صنایع نظامی، قطعات مخروطی است. شکل‌دهی این قطعات با روش‌های سنتی دشوار بوده و عیوبی را به‌وجود می‌آورد. به منظور رفع این محدودیت‌ها، در این پژوهش شکل‌دهی قطعات مخروطی با فرآیند هیدروفرمینگ به‌صورت تجربی و شبیه‌سازی مورد مطالعه قرار گرفت. ابتدا فشار شکل‌دهی و مسیر فشار اعمالی سیال مورد بررسی قرار گرفت و قوانینی جهت بدست آوردن فشار مناسب در شکل‌دهی قطعات مخروطی حاصل شد. به کمک این قوانین، فلوچارتی تدوین و با کدنویسی با نرم‌افزار پایتون، با صرف کمترین وقت و هزینه، فشار مناسب به صورت خودکار بدست آمد. این قوانین برای قطعات با هندسه مخروطی و با ابعاد مختلف کاربرد دارد. جهت بدست آوردن قوانین برای تدوین فلوچارت، تأثیر فشار، قطر ورق اولیه و ابعاد مختلف نیم‌مخروط بر روی نازک‌شدگی بررسی شد. نتایج نشان داده است که با وجود تأثیر مستقل هر یک از پارامترها بر روی تغییرات میزان نازک‌شدگی، در همه بررسی‌ها میزان نازک‌شدگی بیشینه با افزایش فشار ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی: هیدروفرمینگ، قطعات مخروطی، مسیر فشار، قوانین فرآیند، فلوچارت فشار.

Experimental and simulation study of conical parts hydroforming by obtaining suitable fluid pressure

S. M. Hosseinpour

Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani university of Technology, Babol, Iran

H. Gorji

Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani university of Technology, Babol, Iran

M. Bakhshi

Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani university of Technology, Babol, Iran

Abstract

One of the processes that is recently used in forming of metallic parts is hydroforming. Conical parts are among the most frequently used parts in industries, especially in military industries. Forming of these components by traditional methods is difficult and normally defects appear on the parts. To overcome this limitation, in this research the production of conical parts by hydroforming process has been studied experimentally and performing simulation. At first, the forming pressure and the applied fluid pressure path were investigated and some rules have been extracted to obtain the suitable pressure in the forming of conical parts. Based on the rules, a flowchart has been developed and by programming it using Python software, the suitable pressure is thus obtained with minimal time and cost. In fact, these rules are applicable for conical parts with different dimensions. To obtain the rules for developing the flowchart, the influence of pressure, sheet diameter and different dimensions of half cones on thinning of the part was investigated. The results showed that despite the independent effect of each parameter on changes in thinning, in all the studies the maximum thinning was increased with increasing pressure and then decreased.

Keywords: Hydroforming, Conical parts, pressure path, Process rules, Pressure flowchart.

۱- مقدمه

در طی سال‌های اخیر، فرآیند هیدروفرمینگ به عنوان جایگزینی مناسب برای شکل‌دهی قطعات پیچیده ورق، مورد توجه قرار گرفته است [۱]. فرآیند هیدروفرمینگ ورق یک روش کشش عمیق است که در آن از یک سیال تحت فشار در درون محفظه فشار به عنوان محیط تغییر شکل دهنده استفاده می‌شود [۲]. شکل‌دهی قطعات مخروطی جزء پیچیده‌ترین و دشوارترین زمینه‌های شکل‌دهی فلزات است و کاربرد زیادی در صنایع مختلف خودروسازی، نظامی و هوافضا دارد [۳]. از جمله کاربردهای آن می‌توان به استفاده از این قطعات در تولید

سرجنگی، خرج گود و دماغه هواپیما اشاره نمود. روش‌های گوناگونی برای شکل دادن این دسته از قطعات وجود دارد که به عنوان نمونه می‌توان به روش کشش عمیق سنتی اشاره نمود [۴ و ۵]. شکل‌دهی قطعات مخروطی با استفاده از این فرآیند دارای مشکلاتی است که می‌توان به پارگی نوک آن به دلیل تماس کم بین ورق و سنبه در این ناحیه در ابتدای فرآیند و در پی آن به وجود آمدن تنش زیاد در ناحیه نوک، اشاره نمود. مشکل دیگر، ایجاد چروک در دیواره قطعه به دلیل آزاد بودن ورق در ناحیه بین نوک سنبه و ورق گیر و نیز چروک در فلنج به دلیل کم بودن نیروی ورق گیر می‌باشد [۶ و ۷]. به منظور کاستن از محدودیت‌های روش کشش عمیق سنتی در تولید قطعات مخروطی، این

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: hamidgorji@nit.ac.ir

قطعات در صنایع با روش‌های کشش عمیق چند مرحله‌ای، اسپینینگ و شکل‌دهی انفجاری تولید می‌شوند [۷]. روش شکل‌دهی انفجاری نیاز به کنترل زیاد فرآیند از نظر ایمنی دارد و برای ساخت قطعات بزرگ و تعداد کم استفاده می‌شود. این روش به عنوان شکل‌دهی سرعت بالا شناخته می‌شود. روش کشش عمیق چند مرحله‌ای [۴] نیازمند ساخت چند قالب و در پی آن، افزایش زمان تولید به دلیل چند مرحله‌ای بودن است، در نتیجه موجب بالا رفتن هزینه تولید می‌گردد. در روش اسپینینگ، نیاز به تأمین دستگاه‌های خاص می‌باشد. دستگاهی که با آن بتوان قطعات پیچیده و دقیق را ایجاد کرد، باید خودکار باشد که در آن صورت، گران‌قیمت بوده و هزینه بالایی خواهد بود. این روش، دارای سرعت تولید و دقت بالا است ولی برای قطعات خیلی کوچک و خیلی بزرگ دارای محدودیت می‌باشد [۵]. روش دیگر تولید قطعات مخروطی روش شکل‌دهی تدریجی است که دارای سرعت پایین و دقت کم می‌باشد. از این رو، نمی‌توان برای تولید انبوه و قطعات دقیق از آن استفاده کرد.

برای رفع محدودیت‌های روش‌های یاد شده در شکل‌دهی قطعات مخروطی، شکل‌دهی این قطعات با استفاده از فرآیند هیدروفرمینگ مورد مطالعه قرار گرفته است. مزیت این روش آن است که فشار سیال باعث افزایش اصطکاک بین سنبه و ورق و در پی آن کنترل جریان ورق در نواحی بحرانی می‌شود [۶]. فرآیند هیدروفرمینگ دارای انواع مختلفی است که از جمله می‌توان به کشش عمیق هیدروفرمینگ با فشار شعاعی اشاره نمود که سبب افزایش نسبت کشش می‌شود [۸].

زارع و همکاران [۹] شکل‌دهی قطعات استوانه‌ای - نیم‌کروی از جنس آلومینیوم AA6063-T4 را با روش کشش عمیق هیدروفرمینگ با فشار شعاعی مورد مطالعه قرار دادند. آنان با بررسی مسیرهای فشار مختلف، تأثیر آن را بر روی پارگی و توزیع ضخامت مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که فشار سیال بیشترین تأثیر را بر روی شکل‌پذیری در فرآیند دارد. به علاوه، با استفاده از این فرآیند و اعمال مسیر فشار مناسب می‌توان به عمق کشش بیشتر و توزیع ضخامت یکنواخت‌تر دست یافت. همچنین با افزایش اصطکاک بین سنبه و ورق و نیز با افزایش شعاع ورودی قالب، شرایط شکل‌دهی بهتر می‌شود. هاشمی و همکاران [۱۰] به بررسی پارامترهای تأثیرگذار در شکل‌دهی فنجان‌های مخروطی دو لایه با استفاده از هیدروفرمینگ پرداختند. از جمله پارامترهای تأثیرگذار مورد ارزیابی، مسیر فشار و نحوه قرارگیری لایه‌ها بوده است. بررسی‌ها با استفاده از آزمایش و شبیه‌سازی اجزای محدود بر روی ورق‌های دولایه Al/St و Cu/St انجام شد. نتایج آنان نشان داد که زمانی که فشار سیال کم باشد در ناحیه شعاع سنبه و زمانی که فشار زیاد باشد در ناحیه شعاع ورودی قالب، پارگی مشاهده می‌شود. آن‌ها نشان دادند که در صورتی که فشار شکل‌دهی خیلی کم باشد در قطعه چروک مشاهده می‌شود.

تیرووارودچلوان و تان [۱۱] روش جدیدی را برای تولید قطعات مخروطی با فرآیند کشش عمیق ارائه دادند که در آن از یک لایه اورتان برای شکل‌دهی استفاده گردید. لایه اورتان مانع تماس نوک سنبه با ورق و موجب جلوگیری از نازک‌شدگی و پارگی ورق می‌گردد هاشمی و همکاران [۱۲] به بررسی شکل‌دهی قطعات مخروطی از جنس‌های آلومینیوم ۱۰۵۰ آنیل شده، مس و St13 با استفاده از فرآیند کشش عمیق هیدروفرمینگ با فشار شعاعی پرداختند. آنان پنجره فرآیندی را

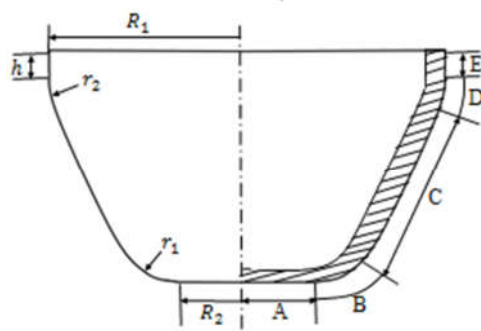
نیز برای آن قطعات به‌دست آوردند. با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود، پارامترهای فرآیندی شامل مسیر فشار، جنس و ضخامت ورق را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که ورق‌های با ضخامت اولیه کمتر و استحکام بیشتر، دارای یکنواختی بیشتر ضخامت و شکل‌دهی بهتر می‌باشند. رضایی و همکارش [۱۳] به بررسی شکل-دهی لوله با استفاده از فرآیند هیدروفرمینگ جهت بدست آوردن روشی کارآمد برای دستیابی به مسیر بارگذاری مناسب پرداختند. در این پژوهش، جهت تعیین مسیر بارگذاری مناسب، از الگوریتم کنترل فازی استفاده شده است. در این روش، کاهش ضخامت، چروکیدگی و میزان شکل‌پذیری به عنوان معیارهای کنترل و محدود کننده، در طول شبیه-سازی و در هر مرحله محاسبه شده و در اختیار کنترل فازی قرار داده می‌شود تا خروجی کنترل، فشار داخلی و جابجایی محوری را بدست آورد. الگوریتم کنترل‌کننده با هدف انبساط زیاد لوله و به حداقل رساندن تغییرات ضخامت دیواره و چروکیدگی طراحی شده است.

صادق یزدی و همکاران [۱۴] به کمک یک روش ترکیبی، به بهینه‌سازی مسیرهای فشار محفظه و فشار جانبی در فرآیند کشش عمیق هیدروفرمینگ با فشار شعاعی و با جریان رو به داخل سیال پرداختند. آنان از یک شبیه‌سازی تطبیقی یک‌پارچه شده با الگوریتم کنترل فازی، و همچنین از الگوریتم زنبور عسل مصنوعی، برای تعیین مسیرهای بهینه با هدف رسیدن به حداقل نازک‌شدگی در سراسر آن و بدون چروکیدگی استفاده نمودند. نتایج نشان داده است که استفاده از مسیر فشارهای بهینه محفظه و جانبی، منجر به دستیابی به قطعه‌ای با حداکثر نازک‌شدگی کمتر و بدون چروکیدگی می‌گردد. جهت صحت‌سنجی نتایج بدست آمده، آزمایش‌های تجربی انجام شد. دیلونزو و همکاران [۱۵] و [۱۶] به منظور کاهش تکرار شبیه‌سازی اجزای محدود برای بهینه‌سازی مسیر فشار در هیدروفرمینگ لوله Y شکل از ترکیب روش‌های سطح پاسخ و گرادیانی استفاده کردند و مسیر فشار بهینه را بدست آوردند.

پارک و همکاران [۱۷] با استفاده از روش تکرار بر اساس منطق فازی به کنترل و بدست آوردن فشار شکل‌دهی برای تولید قطعه سالم با هیدروفرمینگ پرداختند. بدین منظور آنان از مجموعه‌ای از قوانین فازی که بر پایه آزمایش‌ها و داده‌های تجربی بود، استفاده نمودند. گرچی و همکاران [۷] به مطالعه تجربی و شبیه‌سازی تأثیر فشار پیش-بار، مسیر فشار و مقدار فشار بیشینه بر هیدروفرمینگ قطعات مخروطی پرداختند. آنان به این نتیجه رسیدند که افزایش فشار تا یک حد خاص، سبب بهبود توزیع ضخامت در قطعه می‌شود و افزایش بیشتر فشار بیشینه، تأثیری بر نازک‌شدگی ندارد. گرچی [۶] با استفاده از آزمایش-های تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود روشی جدید را برای شکل-دهی قطعات مخروطی نوک تیز ارائه داد. ایشان دو مرحله برای شکل-دهی این دسته از قطعات در نظر گرفت. در مرحله اول، برای قطعه پیش‌فرم از فرآیند هیدروفرمینگ استفاده نمود. در مرحله دوم، قالب کشش عمیق سنتی جدیدی برای کنترل نازک‌شدگی ناحیه نوک و افزایش ضخامت در نواحی بحرانی دیگر ارائه داد.

مشکل اصلی در تولید قطعات مخروطی نوک تیز، پارگی قطعه در ناحیه نوک آن و در صورت تولید قطعه، توزیع ضخامت غیر یکنواخت به دلیل نازک‌شدگی زیاد در این ناحیه می‌باشد. یکی از کاربردهای قطعات مخروطی ناقص، استفاده از آن به عنوان پیش‌فرم برای تولید

می‌شود. شماتیک قالب قبل و بعد از فرآیند در شکل ۴ مشاهده می‌شود. در جدول ۳ ابعاد هندسی اجزای قالب آورده شده است.



شکل ۱- طرحواره قطعه مخروطی و ناحیه بندی جهت توزیع ضخامت

نام قطعه	پارامتر هندسی	مقدار (mm)
a	R_1	۵۰
	R_2	۳۰
b	R_1	۵۰
	R_2	۲۰
c	R_1	۱۹/۵
	R_2	۱۱

از یک دستگاه آزمایش اونیورسال هیدرولیکی DMG با ظرفیت ۶۰۰ kN برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد. این دستگاه متصل به یک واحد کامپیوتری برای کنترل حرکات آن می‌باشد و می‌توان مقدار نیرو بر حسب جابجایی را در هر لحظه توسط کامپیوتر ثبت نمود. برای اعمال فشار سیال از یک پمپ هیدرولیکی با قابلیت اعمال فشار بیشینه ۴۵۰ bar استفاده شد. سیال به کمک یک شیر یک‌طرفه وارد محفظه قالب می‌شود. برای کنترل فشار بیشینه سیال، در محفظه ماتریس، از یک شیر کنترل فشار استفاده شد. برای اندازه‌گیری فشار، از یک فشارسنج دیجیتالی استفاده شد که در مدار اصلی قرار گرفته است. این فشارسنج قادر است تا با اتصال به واحد کامپیوتری، مقدار فشار را در هر لحظه از زمان ثبت و مسیر فشار اعمالی را مشخص کند. با انجام آزمایش تجربی برای تولید قطعه با قطر دهانه ۱۰۰ mm، مسیر فشار و مسیر حرکت سنبه بر حسب زمان، بدست آمد.

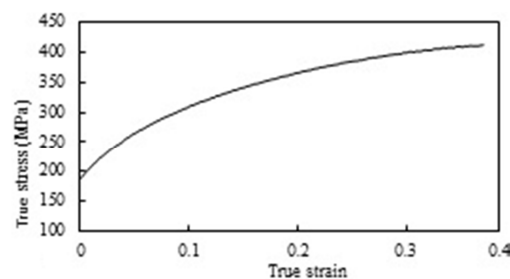
خواص	مقدار
چگالی [6] (Kg/m^3)	۷۸۵۰
مدول یانگ (GPa)	۲۱۰
ضریب پواسون [16]	۰/۳
تنش تسلیم (MPa)	۱۹۵

قطعات مخروطی نوک‌تیز می‌باشد. تولید قطعات مخروطی نوک‌تیز با روش جایگزین هیدروفرمینگ دارای اهمیت زیادی برای صنعت می‌باشد. با این روش، تعداد مراحل به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. گزارش شده است که در یک قطعه تعداد مراحل از ۱۳ مرحله به ۲ مرحله کاهش یافته و سبب کاهش شدید هزینه و افزایش سرعت تولید شده است [۶]. با توجه به تنوع قطعات از نظر شکل، اندازه و جنس، بدست آوردن هندسه مطلوب برای پیش‌فرم (به دلیل تغییر پارامترها و تأثیر آن‌ها بر روی پیش‌فرم) امری ضروری است. در این راستا، یکی از موارد تأثیرگذار، بدست آوردن مسیر فشار مناسب در فرآیند هیدروفرمینگ است. با تغییر جنس و ضخامت ورق، اندازه مخروط، زاویه مخروط و همچنین تغییر در هندسه مخروط، مسیر فشار تغییر می‌کند. بدست آوردن مسیر فشار مناسب در بررسی‌های پیشین با استفاده از تعداد بالای شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی و یا به کمک روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری انجام شد. در این روش‌ها مهارت و خلاقیت فردی جهت انجام و تحلیل خروجی‌ها و همچنین ساخت مجموعه قالب‌ها بسیار مهم می‌باشد.

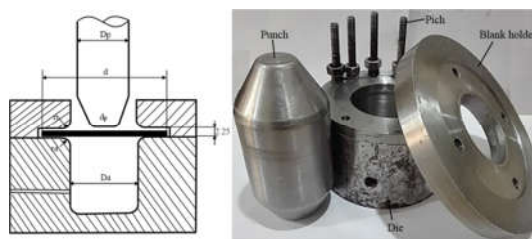
در این پژوهش به بررسی شکل‌دهی قطعات مخروطی ناقص با هدف ارائه روشی برای دستیابی به مسیر فشار مناسب در شکل‌دهی قطعات مخروطی با استفاده از فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی پرداخته شده است. جهت رسیدن به این هدف، پارامترهای تأثیرگذار در شکل‌دهی این قطعات (اثر ابعاد قطعه، فشار بیشینه سیال، مسیر فشار اعمالی و ضخامت و قطر اولیه ورق بر روی نازک‌شدگی) مورد مطالعه قرار گرفت. با بررسی‌های پارامتری، قوانینی استخراج شد که به کمک آنها می‌توان به فشار مناسبی دست یافت که بر اساس آن بتوان با کمترین کاهش ضخامت بیشینه، قطعات مخروطی ناقص را با ابعاد و جنس‌های مختلف شکل داد. با استفاده از این قوانین که نوآوری پژوهش می‌باشد، فلوچارتی تدوین و به زبان پایتون کدنویسی شد تا بتوان به صورت خودکار به اهداف مقاله دست یافت. استفاده از این قوانین در قالب فلوچارت ارائه شده، نیاز به دانش فنی و تجربه بالایی ندارد و در زمان کوتاه و با هزینه کم و بدون استفاده از نیروی ماهر جهت انجام آزمایش‌های گسترده تجربی و یا شبیه‌سازی اجزای محدود، فشار بیشینه مناسب برای شکل‌دهی قطعه مخروطی با هندسه، ضخامت و جنس مختلف حاصل می‌شود.

۲- آزمایش تجربی

برای انجام بررسی‌ها در این پژوهش، قطعه‌های مخروطی a، b و c با ابعاد ذکر شده در شکل ۱ و جدول ۱ انتخاب شده‌اند. تفاوت دو قطعه a و c در مقدار R_2 می‌باشد و برای بررسی کامل‌تر، قطعه b با ابعاد کوچکتر در نظر گرفته شد. ورق مورد استفاده، ورق فولادی St14 با ضخامت ۲ mm بوده که در جدول ۲ خواص مکانیکی و فیزیکی آن بیان شده است. منحنی‌های تنش-کرنش حقیقی ماده با استفاده از آزمون کشش طبق استاندارد ASTM370 و با استفاده از نمونه کشش به طول و عرض گیج ۵۰/۸ و ۱۲/۷ میلیمتر بدست آمد که در شکل ۲ نشان داده شده است. برای انجام آزمایش‌ها دو قالب ساخته شد که در شکل ۳ قالب مربوط به تولید قطعات با $R_1 = 50 \text{ mm}$ (a و c) مشاهده



شکل ۲- منحنی تنش- کرنش حقیقی پلاستیک ورق St14



شکل ۳- اجزای مجموعه قالب

جدول ۳- ابعاد هندسی مجموعه قالب

مشخصه	قطعه a (mm)	قطعه b (mm)	قطعه c (mm)
قطر سنبه، Dp	100	100	39
قطر سر سنبه، dp	60	40	22
قطر محفظه قالب، Dd	104.5	104.5	43.5
لقی بین ورق و ورق گیر	0.25	0.25	0.25
شعاع ورودی قالب، rd	6	6	6
شعاع گوشه سنبه، rp	6	6	6

۳- شبیه سازی اجزای محدود

برای شبیه سازی، از نرم افزار ABAQUS/ Explicit 6-13 استفاده شد. با توجه به تقارن مجموعه قالب و لوله، از یک مدل متقارن محوری برای شبیه سازی استفاده گردید. در شبیه سازی های فرآیند هیدروفورمینگ، ورق به صورت شکل پذیر^۱ و پوسته ای^۲ و اجزای قالب به دلیل عدم شکل پذیری به صورت صلب تحلیلی^۳ مدل شد. با توجه به معیار پارگی استفاده شده در این پژوهش، لازم است مقدار ضخامت در هر لحظه اندازه گیری شود و با مقدار بحرانی آن مقایسه گردد. در حالت پوسته ای، ضخامت هر لحظه توسط نرم افزار به عنوان خروجی داده می شود ولی در حالت توپر^۴ ضخامت داده نمی شود و با استفاده از مختصات گره ها باید مقدار ضخامت را محاسبه کرد. لذا از مدل پوسته ای برای مدل کردن ورق استفاده شد. در قسمت خواص^۵ خواص مکانیکی و فیزیکی ورق، به مدل نسبت داده شد. نمودار تنش- کرنش حقیقی به دست آمده از آزمایش تجربی به صورت جدولی تعریف و به

قطعه اعمال گردید. ماده مدل شده، دارای خاصیت الاستیک- پلاستیک بوده و از معادله هولومون مطابق رابطه (۱) تبعیت می کند. در رابطه زیر σ تنش، K ضریب استحکام ماده، ϵ کرنش و n نمای کرنش سختی می باشد. با توجه به منحنی تنش کرنش حقیقی نشان داده شده شکل ۲، در مقادیر $n = 0.35$ و $K = 638.96 \text{ MPa}$ بدست آمد.

$$\sigma = K\epsilon^n \quad (1)$$

با توجه به نوع فرآیند که در حالت سرد انجام می شود و تغییر شکل زیاد ماده، از گزینه حل صریح دینامیکی^۶ برای تحلیل فرآیند استفاده شد. برای تعریف تماس ها از تماس سطح به سطح^۷ پنهانی [۱۸] استفاده شده است. در قسمت تعیین مشخصات سطوح تماس، از مدل اصطکاکی کولمب استفاده شده است. ضریب اصطکاک برای تماس بین قالب با سطح ورق 0.4 و تماس بین سنبه با ورق 0.17 تعریف شده است [۱۱]. (با استفاده از مراجع، ضریب اصطکاک انتخاب شد. جهت اطمینان از مقدار آن، شبیه سازی ها با استفاده از مقادیر مختلف ضریب اصطکاک انجام شد و نتایج حاصل از آنها با نتایج تجربی مقایسه و ضرایب مربوط به نزدیک ترین نمودار انتخاب شد.) در واحد بار^۸، به سطح زیرین و همچنین به دلیل اینکه فرآیند مورد مطالعه فرآیند کشش عمیق هیدروپلاستیکی با فشار شعاعی می باشد، به لبه ورق در راستای شعاعی فشار سیال اعمال گردید. برای المان بندی ورق، از المان متقارن محوری چهارگره ای CAX4RT استفاده شده است و در راستای ضخامت چهار المان تعریف شد و اجزای قالب به دلیل عدم تغییر شکل، المان بندی نشده اند.

به منظور بررسی وقوع پارگی در ورق، از معیار نازک شدگی پیشینه استفاده شده است که مطابق رابطه زیر محاسبه می شود [۲۰، ۱۹]:

$$\% \text{Thinning} = \frac{t_0 - t_f}{t_0} \times 100 \quad (2)$$

در رابطه بالا t_0 و t_f به ترتیب ضخامت اولیه و ضخامت نهایی ورق اند که از رابطه زیر بدست می آید:

$$\epsilon_t = \ln\left(\frac{t_0}{t_f}\right) \quad (3)$$

که در آن، ϵ_t کرنش ضخامتی می باشد. طبق مرجع [۲۱] در حالت کرنش صفحه ای، کرنش اصلی مهندسی (e_θ) طبق رابطه زیر بدست می آید:

$$e_\theta = \left(23.3 + \frac{360}{25.4} t_0\right) \left(\frac{n}{0.21}\right) \quad (4)$$

که در آن، n نمای کرنش سختی می باشد.

e_θ با استفاده از رابطه زیر بدست می آید:

$$\epsilon_\theta = \ln(1 + e_\theta) \quad (5)$$

با فرض ثابت بودن حجم، آن گاه:

$$\epsilon_t + \epsilon_\theta + \epsilon_r = 0 \quad (6)$$

در این رابطه، ϵ_r کرنش در راستای محیطی و e_θ کرنش طولی می باشد و با توجه به شرایط کرنش صفحه ای در دیواره قطعه (در مرحله پارگی، ورق به دور سنبه قرار می گیرد و در جهت محیطی کرنش ندارد. بنابراین می توان آن را کرنش صفحه ای فرض کرد)، داریم:

$$\epsilon_t = -\epsilon_\theta \quad (7)$$

در این معیار مقدار حداکثر نازک شدگی با توجه به معادلات ذکر

^۶ Dynamic Explicit

^۷ Surface to surface

^۸ Load

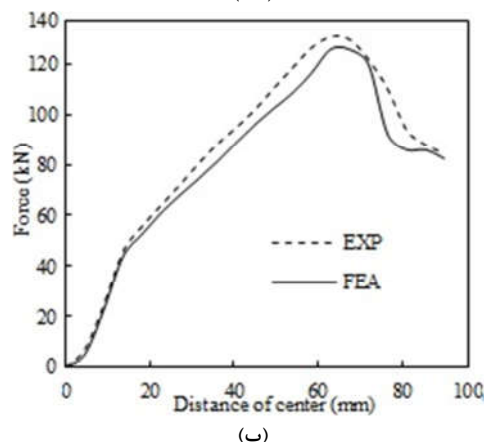
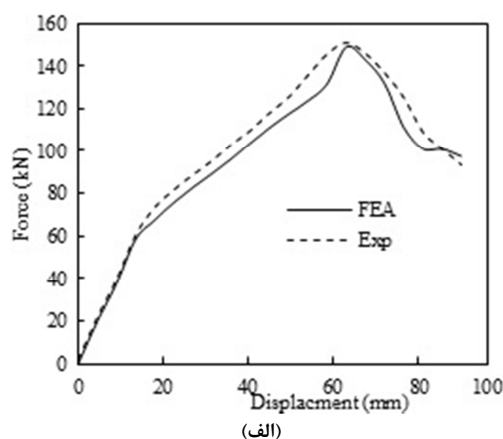
^۱ Deformable

^۲ Shell

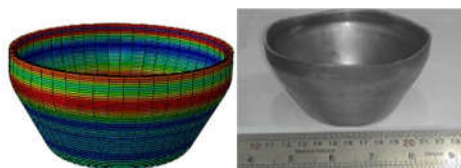
^۳ Analytical Rigid

^۴ Solid

^۵ Property



شکل ۵- منحنی‌های تجربی و شبیه‌سازی نیروی سنبه قطعه a در فشار بیشینه الف- ۱۲ MPa ب- ۸ MPa



شکل ۶- قطعه a شکل‌داده شده (تجربی و شبیه‌سازی) در فشار بیشینه ۱۲MPa

۴-۲- ارائه روش جدید برای بدست آوردن فشار شکل-دهی مناسب

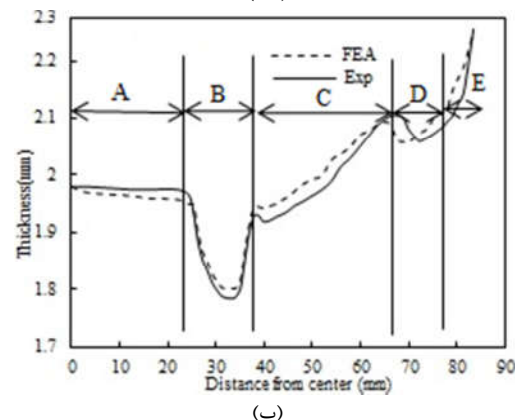
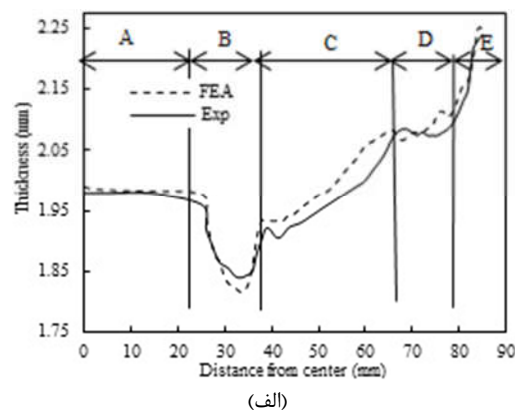
همانطور که ذکر شد، هدف از این پژوهش ارائه روشی برای بدست آوردن فشار مناسب جهت شکل‌دهی قطعات مخروطی با استفاده از فرآیند هیدروفرمینگ می‌باشد تا با کاهش هزینه، صرفه‌جویی در وقت و کاهش آزمایش‌های تجربی و انجام شبیه‌سازی مکرر، فشار مناسب بدست آید. در این روش با بررسی پارامترهای شکل‌دهی و تأثیر آن بر فشار، قوانینی با هدف رسیدن به فشار مناسب با کمترین کاهش ضخامت بیشینه جهت شکل‌دهی قطعات مخروطی با ابعاد و جنس‌های مختلف حاصل شد. قوانین بدست آمده، به صورت فلوچارت نشان داده شده در شکل ۷ در این مقاله ارائه گردید.

شده برای جنس و ضخامت مورد نظر محاسبه می‌شود. مقدار محاسبه شده به عنوان مقدار بحرانی ضخامت می‌باشد و اگر نازک‌شدگی از این مقدار بیشتر شود به عنوان پارگی در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از یک زیربرنامه کمترین ضخامت ورق در هر مرحله با ضخامت بحرانی مقایسه می‌شود، اگر مقدار کمترین ضخامت ورق از مقدار بحرانی کمتر شود، نرم افزار متوقف می‌شود. عدد محاسبه شده با استفاده از روابط تئوری با مقدار ضخامت پارگی در حالت تجربی مقایسه شد و اختلاف بسیار ناچیزی وجود داشت. بنابراین از این معیار به عنوان معیار نازک‌شدگی استفاده شد. با توجه به روابط بالا، ورودی این معیار مقدار n و t_0 و خروجی آن حداکثر درصد نازک‌شدگی مجاز می‌باشد.

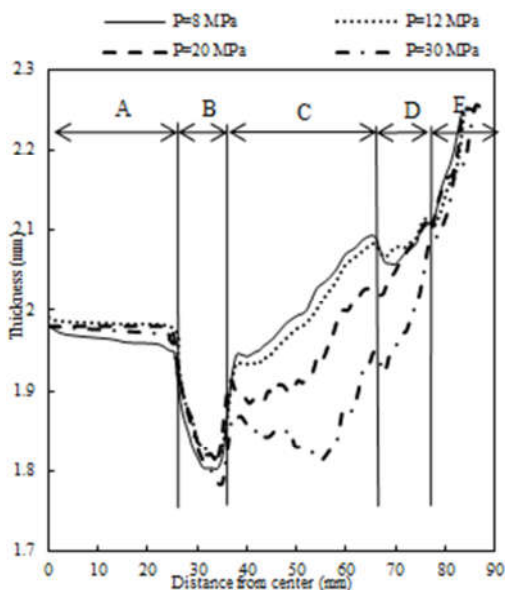
۴- نتایج

۴-۱- درست آزمایی

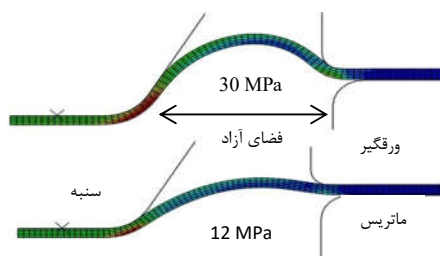
شکل ۴ منحنی‌های توزیع ضخامت آزمایش تجربی و شبیه‌سازی را برای شکل‌دهی قطعه a با فشار بیشینه ۸ و ۱۲ MPa را نشان می‌دهد. حداکثر اختلاف بین نمودارها، ۲/۵ درصد است. در شکل ۵، نمودارهای نیروی سنبه در دو فشار مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همانطور که از شکل پیداست، تطابق قابل قبولی بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی وجود دارد. شکل ۶ قطعه a که با آزمایش تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود شکل داده شد، مشاهده می‌شود که از نظر ظاهر نیز مشابه می‌باشند.



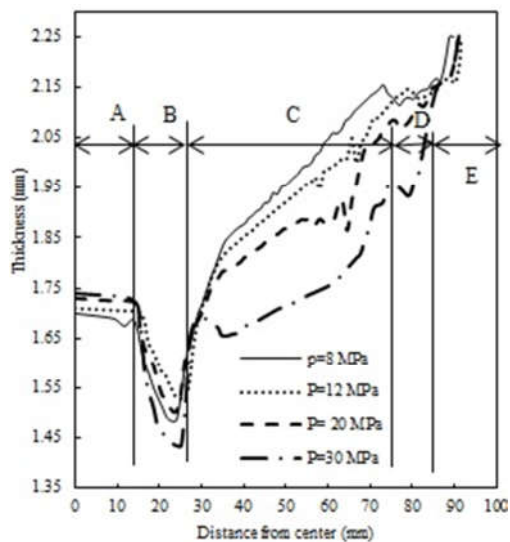
شکل ۴ - منحنی‌های تجربی و شبیه‌سازی توزیع ضخامت قطعه a در فشار بیشینه الف- ۱۲ MPa ب- ۸ MPa



شکل ۸- نمودار توزیع ضخامت حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود در فشارهای مختلف برای قطعه a و قطر ورق اولیه ۱۵۰ میلی‌متر



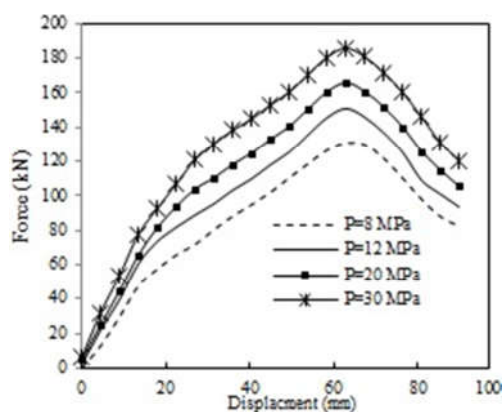
شکل ۹- ایجاد خمش در ورق در زمان‌های اولیه شکل‌دهی در فشارهای مختلف



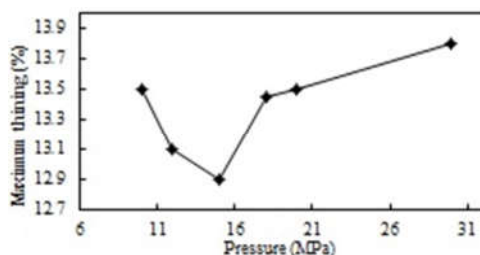
شکل ۱۰- نمودار توزیع ضخامت حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود در فشارهای مختلف برای قطعه b و قطر ورق اولیه ۱۵۰ mm

معروف است و دیواره مخروط (C) را تشکیل می‌دهد، در فشارهای شکل‌دهی بالا، به دلیل اعمال فشار سیال از زیر، حالت بالج (بشکه‌ای شدن یا برآمدگی) در ورق ایجاد می‌شود و سبب کشیدگی و در پی آن نازک‌شدگی ورق در این ناحیه می‌شود. از آنجایی که در حین شکل‌دهی ورق از یک سمت با سنبه و از سمت دیگر با ماتریس و ورق‌گیر درگیر می‌باشد و با توجه به هندسه قطعه و وجود فضای آزاد، با اعمال فشار سیال از زیر، حالت برآمدگی در این فضا برای ورق روی می‌دهد که به اصطلاح به آن بشکه‌ای شدن (بالج) گفته می‌شود.

با توجه به روند تغییرات ضخامت با تغییر فشار، مشاهده می‌شود که با افزایش فشار، به دلیل افزایش مقدار بالج در ورق، به مقدار نازک‌شدگی نیز افزوده می‌شود، به طوری که بیشترین نازک‌شدگی در ناحیه C و برای فشار ۳۰ MPa (مقدار ۹ درصد) می‌باشد. در شکل مشاهده می‌شود که در ناحیه دیواره (C)، با بالا رفتن فشار با توجه به بشکه‌ای شدن بیشتر ورق، نازک‌شدگی افزایش می‌یابد. روند صعودی نمودارها مربوط به هر فشار در ناحیه C نیز به دلیل افزایش فشار شعاعی و همچنین کاهش تماس بین ورق و ورق‌گیر و در پی آن جریان راحت‌تر ورق به درون محفظه قالب می‌باشد. (تماس بین ورق و ورق‌گیر به دلیل وجود اصطکاک بین این دو، مانند ترمزی برای جریان ورق به درون قالب عمل می‌کند و سبب افزایش کشش و در پی آن نازک‌شدگی در ورق می‌شود). در ناحیه D نیز، به دلیل ایجاد خم با افزایش فشار، نازک‌شدگی بیشتر می‌شود. برای بررسی‌های بیشتر، شکل‌دهی قطعه b نیز مورد مطالعه قرار گرفت. همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود روند تغییرات مانند شکل‌دهی قطعه a می‌باشد. در فشار کمتر از ۵ MPa، در قطعه پارگی ایجاد می‌شود و در این فشار قطعه شکل می‌گیرد ولی نازک‌شدگی بیشینه زیاد است با توجه به دو شکل ۸ و ۱۰، مشاهده می‌شود که نازک‌شدگی ایجاد شده در ناحیه کف قطعه‌کار (A)، برای قطعه a نسبت به قطعه b، کمتر می‌باشد. دلیل آن فضای آزاد کمتر بین قالب و سنبه و تماس بیشتر ورق با سطح سنبه و در نتیجه اصطکاک بیشتر است که مانع کشیدگی ورق (مانع نازک‌شدگی) می‌گردد. نازک‌شدگی ایجاد شده در ناحیه A مربوط به فشار ۳۰ MPa، در قطعه a و b به ترتیب ۲ و ۱۵ درصد می‌باشد. در شکل ۱۱ قطعه پاره شده در فشار شکل‌دهی ۴ MPa و قطعه شکل‌داده شده در فشار ۱۲ MPa نشان داده شد. شکل ۱۲ روند تغییرات حداکثر نازک‌شدگی (ناحیه B) قطعه a و b را در قطر ۱۵۰ و ۱۷۰ mm و فشار بیشینه مختلف نشان می‌دهد. در این شرایط نیز حداکثر نازک‌شدگی ایجاد شده در قطعه، با افزایش فشار ابتدا کاهش (به دلیل تماس بیشتر ورق با سنبه و در نتیجه کنترل کشیدگی) و سپس افزایش (به دلیل بالج شدن زیاد با توجه به شکل ۹ در منطقه آزاد) می‌یابد. در نمودار شکل ۱۲ اثر قطر ورق اولیه نیز نشان داده شده است. با بزرگتر شدن قطر ورق اولیه، به دلیل افزایش تماس ورق با اجزای قالب و وجود اصطکاک بین ورق و ورق‌گیر و نیز ورق و قالب و مخالفت در مقابل جریان راحت‌تر ورق به درون محفظه قالب، نازک‌شدگی افزایش یافته است. از طرفی مشاهده می‌شود که نازک‌شدگی ایجاد شده در قطعه b بیشتر از قطعه a می‌باشد. دلیل این اتفاق آن می‌باشد که ارتفاع قطعه b بیشتر از قطعه a بوده و نیاز به کشش بیشتر در ورق جهت شکل‌گیری کامل است.



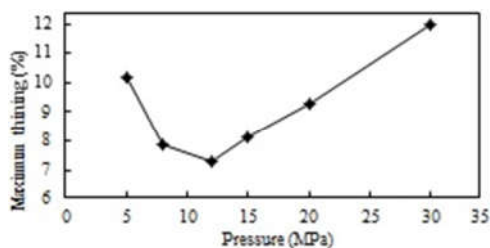
شکل ۱۳- نیروی سنبه مورد نیاز در فشار های مختلف برای قطعه a



شکل ۱۴- تأثیر فشار سیال بر نازک شدگی بیشینه برای تولید قطعه c
حاصل از آزمایش تجربی، $t_0 = 2 \text{ mm}$



شکل ۱۵- قطعه c تولید شده با روش هیدروفرمینگ



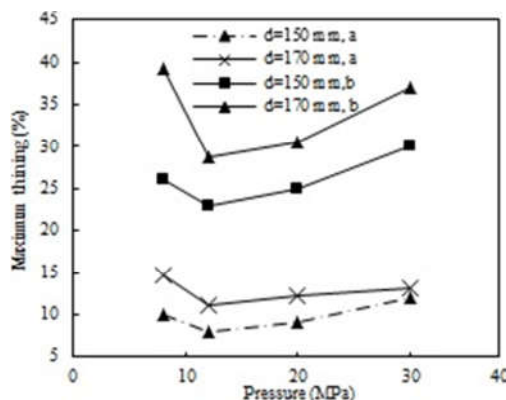
شکل ۱۶- تأثیر فشار سیال بر نازک شدگی (قطعه a)، $t_0 = 1.5 \text{ mm}$

۴-۲-۲- بررسی اثر شیب مسیر فشار

در این پژوهش، سیال با مسیر فشارهایی مطابق با شکل ۱۷ به ورق اعمال می‌شود. شیب قسمت اول به سرعت سنبه بستگی دارد که هر چه سرعت سنبه بیشتر باشد زمان رسیدن به فشار بیشینه کمتر و شیب منحنی بیشتر می‌شود. تأثیر شیب، در شکل‌دهی قطعه c مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۱۷ دو مسیر فشار مختلف نشان داده شد. شکل ۱۸ اثر تغییر مسیر فشار بر نازک‌شدگی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، با کاهش زمان رسیدن به فشار بیشینه، حداکثر نازک‌شدگی به دلیل خمش زیاد در ورق، در ناحیه بین سنبه و ورق گیر (مطابق با



شکل ۱۱- الف- پارگی ایجاد شده در فشار ۴ MPa ب- قطعه شکل داده شده در فشار ۱۲ MPa

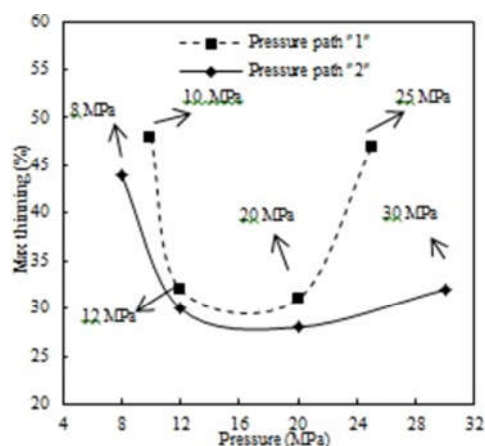


شکل ۱۲- تأثیر فشار بر نازک شدگی (قطعه‌های a و b) با ضخامت ورق ۲ mm و قطر ورق اولیه مختلف، حاصل از آزمایش‌های تجربی

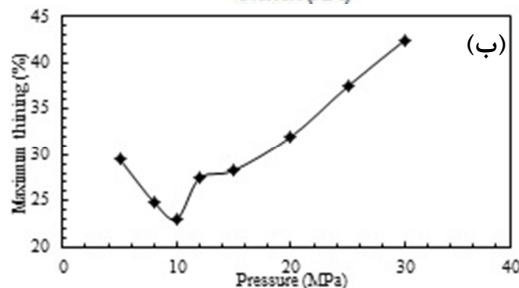
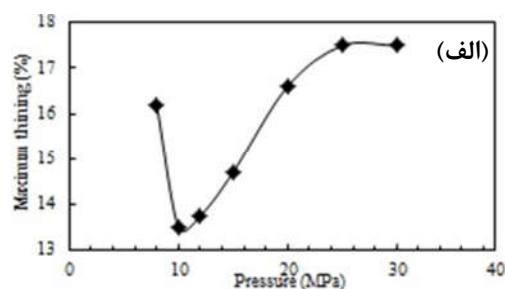
برای مطالعه بیشتر تأثیر مسیر فشار بر شکل‌دهی قطعه، نیروی مورد نیاز سنبه در فشارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت و نمودارهای شکل ۱۳ حاصل شد. همانطور که از منحنی‌ها پیداست، نیروی سنبه ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. نیروی سنبه تشکیل شده‌است از نیروی مربوط به فشار سیال، نیروی شکل‌دهی ورق و نیروی اصطکاکی. در اثر ایجاد تغییر شکل، در ورق کار سختی رخ می‌دهد و در نتیجه، مقاومت آن به تغییر شکل افزایش می‌یابد. با توجه به جریان یافتن مواد و کاهش سطوح تماس ورق با ورقگیر و ماتریس، نیروهای اصطکاکی در طول فرآیند روند کاهشی دارد. در ابتدای فرآیند، آهنگ افزایش نیروی کارسختی بیشتر از آهنگ کاهش نیروی اصطکاکی است و در نتیجه، نیروی سنبه افزایش می‌یابد. در ادامه، این روند برعکس شده و نیروی سنبه کم می‌شود. با توجه به شکل، نیروی بیشینه سنبه با افزایش فشار سیال، افزایش می‌یابد.

جهت بررسی اثر تغییر فشار بیشینه بر هندسه قطعه شکل‌دهی، قطعه c مورد مطالعه قرار گرفت. بررسی‌ها در فشارهای ۱۰، ۱۲، ۱۵، ۱۸، ۲۰، ۳۰ MPa انجام شدند و نمودار شکل ۱۴ حاصل شد. با توجه به شکل، مشخص است که روند تغییرات، مانند شکل‌دهی قطعات a و b (مطابق شکل ۱۲) می‌باشد، در شکل ۱۵ قطعه شکل گرفته شده مربوط به این بررسی نشان داده شده است. جهت بررسی پارامتر ضخامت ورق، ورق با ضخامت $1/5 \text{ mm}$ از شبیه‌سازی برای تولید قطعه a بررسی شد. همانطوریکه در شکل ۱۶ نشان داده شد، روند تغییرات (اثر تغییر فشار بیشینه بر روی حداکثر نازک‌شدگی) مانند ورق ۲ mm می‌باشد، به طوریکه با افزایش فشار نازک‌شدگی بیشینه ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد.

نتایج بدست آمده، صحت فلوجارت نوشته شده با استفاده از قوانین بدست آمده در این پژوهش به عنوان روش جدیدی برای بدست آوردن فشار مناسب را می‌رساند. حداکثر نازک‌شدگی ایجاد شده در قطعه (۱)، ۱۳/۵ درصد و در قطعه (۲) ۲۳/۰۵ درصد می‌باشد. با تغییر در هندسه قطعه، احتمال تغییر در مقدار فشار مناسب شکل‌دهی وجود دارد، بطوریکه در شکل ۱۶، مقدار فشار مناسب ۱۲ MPa است و نیز با توجه به شکل ۱۹ (مربوط به شکل‌دهی قطعات ۱ و ۲) مقدار فشار مناسب ۱۰ MPa می‌باشد. انتخاب قطعات با ابعاد مختلف به منظور ایجاد گستردگی در درست آزمایی بوده است. جهت بررسی قابلیت تعمیم فلوجارت ارائه شده به ابعاد بالاتر، از نتایج آزمایش‌های تجربی در مرجع [۶] استفاده شد و مشخص گردید که فلوجارت ارائه شده برای ابعاد بالاتر نیز پاسخگو می‌باشد. از آنجایی که جنس‌های استفاده شده در آن مرجع، دو جنس مس و فولاد st14 بوده‌اند، صحت‌سنجی گسترده‌تری برای فلوجارت ارائه شده در این مقاله از نقطه نظر جنس صورت گرفت.

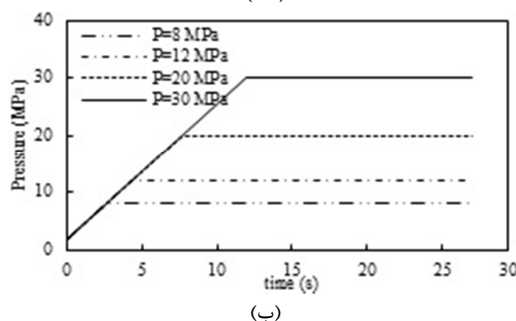
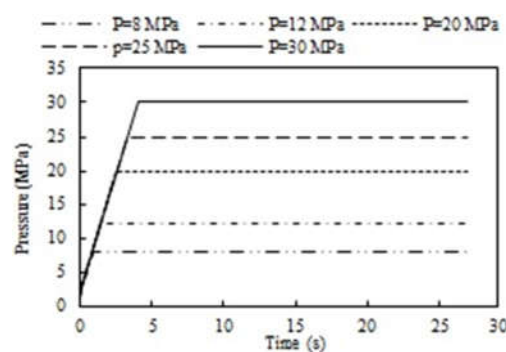


شکل ۱۸- تأثیر مسیر فشارهای ۱ و ۲ بر نازک‌شدگی بیشینه (قطعه C)



شکل ۱۹- درصد نازک‌شدگی بیشینه در فشارهای بیشینه مختلف با استفاده از آزمایش تجربی الف- قطعه ۱ ب- قطعه ۲

شکل ۹)، بیشتر می‌شود و از طرفی با کاهش فشار نیز به دلیل تماس کمتر ورق و سنبه کشیدگی بیشتر و نازک‌شدگی افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش شیب مسیر فشار، در یک زمان برابر، فشار بیشتری به ورق از زیر اعمال می‌گردد که باعث ایجاد کشیدگی بیشتر می‌شود. با توجه به این توضیحات، محدوده فشار برای شکل‌دادن قطعه با افزایش شیب مسیر فشار، کاهش می‌یابد. نکته دیگر، اختلاف بسیار ناچیز دو منحنی در محدوده فشار مناسب (کمترین نازک‌شدگی) می‌باشد. مسیر فشار در این محدوده، تأثیر زیادی بر نازک‌شدگی ندارد. قابل ذکر است قطعه با فشار بیشینه ۸ و ۳۰ مگاپاسکال طبق مسیر فشار الف دچار پارگی شد. یکی از مهمترین نتایجی که جهت رسیدن به هدف مسأله با انجام این بررسی بدست آمد این است که روند تغییرات حداکثر نازک‌شدگی ایجاد شده با افزایش فشار، در مسیر فشارهای مختلف، یکسان و همانند بررسی‌های قبلی در پژوهش می‌باشد.



شکل ۱۷- مسیر فشارهای مختلف الف- شیب زیاد ب- شیب کم

۴-۱- درست آزمایی روش جدید ارائه شده

جهت درست‌آزمایی روش جدید ارائه شده، شکل‌دهی مخروط‌های ناقص با ابعاد مختلف (قطعه ۱: با شعاع بزرگ ۶۰ mm و شعاع کوچک ۳۰ mm و قطعه ۲: با شعاع بزرگ ۷۵ mm و شعاع کوچک ۳۰ mm) مورد مطالعه قرار گرفت. با بررسی‌های انجام شده در فشار بیشینه مختلف، نمودارهای شکل ۱۹ بدست آمد. در شکل‌دهی این قطعات نیز روند تغییرات نازک‌شدگی بیشینه با تغییرات فشار مانند بررسی‌های قبلی می‌باشد، بطوریکه افزایش فشار تا یک مقدار خاص سبب بهبود شکل‌دهی و افزایش بیشتر فشار سبب بیشتر شدن نازک‌شدگی شده است و فشار بیشینه شکل‌دهی مناسب جهت شکل‌دهی این قطعات حدوداً ۱۰ MPa بوده است. با استفاده از روش ارائه شده، فشار بیشینه مناسب برای شکل‌دهی این قطعات نیز حدوداً ۱۰ MPa بوده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی شکل‌دهی ورق فولادی برای تولید قطعه مخروطی سر تخت با استفاده از فرآیند کشش عمیق هیدروپلاستیکی با فشار شعاعی با هدف ارائه یک روش جدید جهت بدست آوردن فشار مناسب شکل‌دهی پرداخته شد. بدین منظور، تأثیر پارامترهای مختلف شامل ضخامت و قطر ورق اولیه، ابعاد هندسی مخروط و مسیر فشار مورد مطالعه قرار گرفت. با بررسی‌های انجام شده، قوانینی به دست آمد که برگرفته از تأثیر پارامترها بر روی فشار مناسب شکل‌دهی برای شکل‌دهی قطعه مخروطی با ابعاد مختلف با کمترین کاهش ضخامت بیشینه می‌باشد. بررسی‌ها برای مخروط‌های با ابعاد مختلف، جهت جامعیت دادن قوانین بدست آمده انجام شد. این قوانین در قالب یک فلوجارت برای تعریف مراحل رسیدن به هدف، ارائه شد. به منظور خودکارسازی دستیابی به فشار مناسب، فلوجارت مذکور با زبان پایتون کدنویسی شد. با بررسی پارامتری مشخص شد که با افزایش فشار، حداکثر نازک‌شدگی ایجاد شده در قطعه تولیدی ابتدا کاهش و سپس افزایش یافته است. همچنین این نتیجه با تغییر ضخامت ورق اولیه ورق نیز بدست آمد که با افزایش قطر ورق اولیه نازک‌شدگی ایجاد شده بیشتر ولی روند تغییرات نازک‌شدگی با تغییر فشار در همه قطر‌ها، یکسان بود. از طرفی با تغییر ابعاد مخروط، نتیجه‌گیری شد که با افزایش فشار، نازک‌شدگی بیشینه ابتدا کاهش و سپس افزایش یافت.

۶- مراجع

- [1] Thiruvarduchelvan S., Travis F., Hydraulic-pressure-enhanced cup-drawing processes—an appraisal, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 140, No. 1, pp. 70-75, 2003.
- [2] Kawka M., Olejnik L., Rosochowski A., Sunaga H., Makinouchi A., Simulation of wrinkling in sheet metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 109, No. 3, pp. 283-289, 2001.
- [3] Xu H., Seyedkashi S., Joo B., Moon Y., Analytical prediction of forming pressure for three-layered tube hydroforming, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 229, No. 9, pp. 1575-1583, 2015.
- [4] Lange k., Handbook of metal forming, McGraw - Hill Book Company, pp. 1216, 1985.
- [5] Wong C., Dean T., Lin J., A review of spinning, shear forming and flow forming processes, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, No. 14, pp. 1419-1435, 2003.
- [6] عبدالحمد گرجی، یک روش آزمایشگاهی - شبیه‌سازی اجزای محدود برای شکل‌دهی قطعات مخروطی نوک تیز، رساله دکترا، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ۱۳۸۹.
- [7] Gorji A., Alavi-Hashemi H., Bakhshi-Jooybari M., Nourouzi S., Hosseini-pour S.J., Investigation of hydrodynamic deep drawing for conical-cylindrical cups, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 56, No. 1, pp. 915-927, 2011.
- [8] Lang L., Danckert J., 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, No. 1, pp. 119-131, 2004.
- [9] زارع، ب.، بخشی، م.، نوروزی، س. و گرجی، ع.، شکل‌دهی قطعات استوانه‌ای - نیم کروی به روش کشش عمیق هیدروپلاستیکی با فشار شعاعی. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۰، ش. ۲، ص ۳۱-۴۵، ۱۳۸۹.
- [10] Hashemi A., Gollo M. H., Seyedkashi S. 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, No. 5, pp. 2217-2224, 2016.
- [11] Thiruvarduchelvan S., Tan M., The drawing of conical cups using an annular urethane pad, *Journal of materials processing technology*, Vol. 147, No. 2, pp. 163-166, 2004.
- [12] Hashemi A., Gollo M. H., Seyedkashi S. H., Process window diagram of conical cups in hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 25, No. 9, pp. 3064-3071, 2015.
- [۱۳] رضایی آشتیانی، ر. و بیاتی، ص.، بهینه‌سازی مسیر بارگذاری در فرآیند هیدروفرمینگ لوله با استفاده از منطق فازی. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۵۰، ش. ۲، ص ۹۳-۱۰۱، ۱۳۹۹.
- [۱۴] صادقی‌یزدی، م.، بخشی، م.، گرجی، ح.، شاکری، م. و خادمی، م.، بهینه‌یابی مسیرهای فشار در فرآیند کشش عمیق هیدروپلاستیکی با فشار شعاعی و با جریان روبه‌داخل سیال به کمک یک روش ترکیبی. *مجله مهندسی مکانیک مدرس*، د. ۱۷، ش. ۱۱، ص ۳۱۱-۳۲۲، ۱۳۹۶.
- [15] Lorenzo R. D., Ingarao G., Chinesta F., Integration of gradient based and response surface methods to develop a cascade optimisation strategy for Y-shaped tube hydroforming process design, *Advances in Engineering Software*, Vol. 41, No. 2, pp. 336-348, 2010.
- [16] Ingarao G., Di Lorenzo R., Micari F., Internal pressure and counterpunch action design in Y-shaped tube hydroforming processes: a multi-objective optimization approach, *Computers & Structures*, Vol. 87, No. 9, pp. 591-602, 2009.
- [17] Park H.J., Cho H.S., A fuzzy rule-based iterative learning control method with application to hydroforming processes, *Mechatronics*, Vol. 2, No. 6, pp. 577-593, 1992.
- [18] Xiaojing L., Yongchao X., Shijian Y., Effects of loading paths on hydrodynamic deep drawing with independent radial hydraulic pressure of aluminum alloy based on numerical simulation, *Journal of Materials Sciences and Technology*, Vol. 24, No. 3, pp. 395-399, 2009.
- [19] Shirkharkolae E.M., Bakhshi M., Gorji A., The Possibility of Producing a Tractor's Hood in a Single Stage Hydroforming Process, *mechanical engineering*, Vol. 42, No. 2, pp. 287-400, 2017.
- [20] Aue Y., Lan U., Ngaile G., Altan T., Optimizing tube hydroforming using process simulation and experimental verification, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146, No. 1, pp. 137-143, 2004.
- [21] Wu J., Balendra R., Qin Y., A study on the forming limits of the hydromechanical deep drawing of components with stepped geometries, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 145, No. 2, pp. 242-246, 2004.