

تحلیل پرشدگی و طراحی هندسه ورق اولیه در فرآیند هیدروفرمینگ شعاعی ورق برای تولید قطعات پله‌ای با هندسه متفاوت با روش آنالیز حساسیت

دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران،
mousavipoor.reza@yahoo.com
استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران، hamidgorji@nit.ac.ir
استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران، bakhshi@nit.ac.ir
استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران، shakeri@nit.ac.ir

رضا موسوی پور

حمید گرجی*

محمد بخشی جوبباری

محسن شاکری

چکیده

در این تحقیق برای قطعات پیچیده مستطیلی مانند کارتر و باک بنزین و با بکارگیری روش هیدروفرمینگ، شکل‌دهی سه هندسه مستطیلی ساده، وسط-پله و کنار-پله به‌صورت تجربی و شبیه‌سازی بررسی شده‌است و با مطالعه تأثیر پارامترهای هندسی، فشار، شعاع سنبه و ارتفاع، تغییر شکل اولیه ورق و پرشدگی در ارتفاع‌های مختلف مقایسه شده‌است. نشان داده شد که با افزایش نسبت کشش در پله تحتانی قطعات پله‌ای، میزان پرشدگی در یک فشار ثابت کاهش می‌یابد. به‌علاوه، با انجام بهینه‌سازی و افزایش حداکثر فشار در قطعات وسط-پله و کنار-پله به ۳۰ و ۴۰ مگاپاسکال، پرشدگی بیشینه به‌ترتیب ۸ و ۱۲ درصد افزایش می‌یابد. به‌علاوه، با تغییر ارتفاع و نسبت کشش در قطعات پله‌ای، شکل ورق اولیه بهینه برای تطابق منحنی ورق شکل یافته و کانتور هدف، تغییر می‌یابد. این تغییر برای مختصات گره در دیواره‌های عرضی، طولی و شعاع گوشه ورق اولیه بهینه متفاوت خواهد بود. **واژه‌های کلیدی:** بهینه سازی، پرشدگی قالب، قطعات پله ای، شکل اولیه ورق، هیدروفرمینگ، فشار بیشینه.

Filling analysis and initial sheet geometry design in the radial sheet hydroforming process to produce stepped parts with different geometry by sensitivity analysis method

R. Mousavipoor

H. Gorji

M. Bakhshi

M. Shakeri

Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

Abstract

In this research, for complicated rectangular parts such as oil and gas tanks, and using hydroforming, forming of three geometries of simple, middle-step and the side-step, rectangular cups were investigated, and by examining the effect of geometrical parameters such as pressure, punch radius, and height, change in the initial shape of the sheet and the filling at different heights are compared. Moreover, by performing optimization and increasing the maximum pressure in middle-stepped and side-stepped cups to 30 and 40 MPa, the maximum filling can be increased by 8 and 12%, respectively. Also, by changing the height and drawing ratio in the stepped parts, the optimal shape of the initial sheet changes for conforming the curve of the formed sheet and the modified target contour. This change is variable for the coordinates of the node in the transverse wall, longitudinal wall, and corner radius of the optimal initial sheet.

Keywords: Optimization, Mold Fill, the step parts, Initial shape of sheet the maximum pressure.

فرآیند دارای انواع مختلفی است که یک نمونه رایج آن کشش عمیق هیدروفرمینگ با فشار شعاعی می‌باشد [۴].

در زمینه هیدروفرمینگ قطعات ورقی با هندسه چهارگوش، تحقیقات محدودی انجام گرفته است. هوبن و همکاران [۵]، پارامترهای طراحی در فرآیند کشش عمیق هیدروفرمینگ را برای فنجان پله‌ای به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که در طی شکل‌دهی فنجان پله‌ای، به منظور شکل‌پذیری کامل ورق، فشار شکل‌دهی بیشینه می‌بایست در ناحیه فصل مشترک بین پله‌ها اعمال گردد تا در نهایت هندسه کامل سنبه در ورق ایجاد گردد. این محققان همچنین با بررسی توزیع ضخامت نمونه در مسیر فشارهای مختلف به این نتیجه رسیدند که بیشترین نازک‌شدگی در یک ارتفاع پله مشخص، در ناحیه شعاع سنبه و در فصل مشترک پله اول و دوم اتفاق می‌افتد. هو و همکاران [۶]، محدوده شکل‌پذیری اجزای پله‌ای در

۱- مقدمه

یکی از فرآیندهای نوین شکل‌دهی فلزات فرآیند هیدروفرمینگ است که در طی سال‌های اخیر در صنایع گوناگون، به‌ویژه صنعت خودروسازی، رشد فزاینده‌ای داشته است [۱]. این فرآیند به‌دلیل برخورداری از مزایایی همچون قابلیت شکل‌پذیری بیشتر، کیفیت سطحی مناسب، حد کشش بالاتر و دقت ابعادی بالا جایگزین مناسبی برای فرآیندهای رایج و سنتی شکل‌دهی می‌باشد [۲ و ۳]. یکی از چالش‌هایی که صنعت خودروسازی با آن روبه رو است، تولید قطعات ورقی با کیفیت مطلوب و با هزینه تولید پایین می‌باشد. قطعات غیردوار، به‌طور خاص هندسه‌های مستطیلی، کاربرد زیادی در صنعت، به‌ویژه صنعت خودروسازی دارند. برای تولید بسیاری از این نوع قطعات، فرآیند هیدروفرمینگ می‌تواند جایگزین مناسبی باشد. این

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

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۴

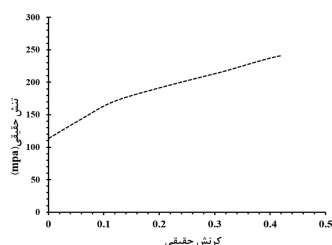
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۹

فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که در این فرآیند یک منطقه مناسب وجود دارد که از چروکیدگی و پارگی جلوگیری می‌شود. به‌علاوه، مشخص گردید که با افزایش ارتفاع پله، نازک شدگی در پله اول و فصل مشترک پله‌ها افزایش یافته و برای قطعات پله‌ای کوچکتر، خصوصیات شکست در پله دوم و ناحیه فصل مشترک افزایش می‌یابد. آن محققان با استفاده از فشار شکل‌دهی مختلف به این نتیجه رسیدند که فشار کم، سبب می‌شود تا چروکیدگی و شکست در یک زمان رخ دهد، به طوری که چروکیدگی در ناحیه اطراف فلنج و شکست در شعاع سنبه رخ خواهد داد. حق پرست و همکاران [۷]، به بررسی تجربی و عددی فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی سینک ظرف‌شویی با سطح مقطع مستطیلی و بهینه‌سازی ابعاد ورق پرداختند. در این تحقیق اثر فشار شکل‌دهی بر روی توزیع ضخامت مورد بررسی قرار گرفت و این نتیجه حاصل گردید که با افزایش فشار، توزیع ضخامت بهبود می‌یابد. همچنین با انجام بهینه‌سازی و حذف گوشه تیز مشخص گردید که علاوه بر بهبود ضخامت، کم کردن یک مرحله تولید موجب کاهش زمان و هزینه خواهد شد. صادق یزدی و همکاران [۸]، به کمک یک روش ترکیبی، به بهینه‌سازی مسیرهای فشار محفظه و فشار جانبی در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی 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 قطعاتی با حداکثر نازک‌شدگی کمتر و بدون چروکیدگی می‌گردد. خادمی و همکاران [۹]، به مطالعه پدیده چروکیدگی دیواره قطعات متقارن مخروطی فولادی در فرآیند توسعه یافته کشش عمیق هیدرومکانیکی با فشار شعاعی و جریان رو به داخل سیال، با روش هندسی مبتنی بر شبیه‌سازی اجزای محدود پرداختند. با توجه به فرآیند مورد بررسی، تأثیر فشار شعاعی و فشار محفظه قالب بر روی چروکیدگی مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفت. آنها دریافتند که با افزایش فشار شعاعی، چروکیدگی افزایش می‌یابد. افزایش چروکیدگی در نتیجه فشار شعاعی را می‌توان به افزایش تنش‌های فشاری نسبت داد که در دیواره به عنوان عامل پدیده چروکیدگی به شمار می‌رود. یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار، افزایش تغذیه ورق به درون قالب بر اثر فشار شعاعی می‌باشد. با بررسی اثر فشار داخلی محفظه قالب مشاهده شد که با افزایش این پارامتر، به دلیل کاهش تنش‌های فشاری در ناحیه دیواره، دامنه موج چروکیدگی (شدت چروک) تا ۷۶ درصد کاهش می‌یابد. وفا صفت و همکاران [۱۰]، بهینه‌سازی شکل بهینه ورق اولیه را برای دو هندسه مربعی و مستطیلی پله‌ای از جنس فولاد St114 با روش اجزای محدود تکراری مورد بررسی قرار دادند. با انجام شبیه‌سازی و تحلیل اجزای محدود، با در نظر گرفتن هندسه مربعی در تحلیل اجزای محدود تکراری، به دلیل عدم جریان ورق، خطا ایجاد شد. در ادامه با انجام مراحل تحلیل اجزای محدود تکراری در مرحله سوم، کانتور هدف و قطعه شکل داده شده، با میزان خطای شکل ۰/۹۴۳۵ میلی متر منطبق شدند و شکل ورق بهینه بدست آمد و قطعه نهایی شکل داده شد. فیسا و همکاران [۱۱]، افزایش شکل‌پذیری فولاد

زنگ نزن AA5083 آنیل شده با مقطع جعبه‌ای شکل را در دو فرآیند کشش عمیق سنتی و هیدروفرمینگ مورد بررسی قرار دادند. این محققان با ایجاد پنجره شکل‌دهی بر اساس فشار سیال و نیروی گیره-بندی دریافتند که با ترکیب فشار و نیروی گیره‌بندی مناسب و انجام بهینه‌سازی شکل ورق اولیه، می‌توان توزیع ضخامت را بهبود بخشید و از پارگی قطعه جلوگیری نمود. آنان همچنین دریافتند که افزایش فشار موجب بهبود پرشدگی و نازک‌شدگی در منطقه شعاع انحنای سنبه می‌شود. در حال حاضر با توجه به روش‌های مختلف ارایه شده توسط محققان، روش‌های بهینه‌سازی را می‌توان به دو دسته طرح رترو-مارچینگ و تکرارشونده تقسیم کرد [۱۲]. روش میدان خطوط لغزش [۱۳]، روش نگاشت هندسی [۱۴]، روش جمع و تفریق مساحت [۱۵]، روش اجزای محدود معکوس [۱۶]، تئوری شکل‌دهی ایده‌آل [۱۷]، ردیابی اجزای محدود روبه عقب [۱۸] از جمله روش‌های متعلق به طرح رترو-مارچینگ می‌باشند. با این حال، از آنجا که در این طرح امکان جبران خطای شکل، یعنی اختلاف بین هندسه مورد نظر نهایی و هندسه تغییر شکل یافته با تحلیل اجزای محدود (بدست آمده از شکل اولیه پیش‌بینی شده)، وجود ندارد، روش‌های مذکور دقت محدودی را ارایه می‌دهند. در روش تکرار شونده، منحنی هندسه ورق اولیه با در نظر گرفتن خطای شکل تا زمانی که منحنی هندسه تغییر شکل یافته بر روی شکل نهایی مورد نظر منطبق شود مکرراً اصلاح می‌شود. روش حساسیت [۱۹] و روش بردار شعاع [۱۴] از این دسته می‌باشند. از آنجا که این طرح‌ها دقت عالی و همگرایی مناسبی را ارایه می‌دهند، می‌توان آنها را برای پیش‌بینی ورق اولیه بهینه اشکال پیچیده در فرایندهایی از جمله استمپینگ و کشش عمیق بکار برد. با توجه به تحقیقات پیشین انجام شده، کار شاخص و بارزی که در این مقاله انجام شده است این می‌باشد که تاکنون محققان به طور مجزا و موردی به بررسی پرشدگی قطعات پله‌ای پرداخته‌اند. به‌علاوه، بررسی جامع در ارتباط با بررسی بهینه‌سازی شکل ورق اولیه با تغییرات ارتفاع و نسبت کشش در فرآیند شکل‌دهی انجام نشده است و به طور مجزا تأثیرات شکل ورق اولیه بهینه بر روی پرشدگی و ارتفاع کشش مورد بررسی قرار نگرفته است. از این‌رو، در مقاله حاضر با انتخاب سه هندسه پرکاربرد با مقطع مستطیلی، تغییراتی که در تعیین ابعاد ورق اولیه با تغییر ارتفاع و شکل هندسی قطعات ساده و پله‌ای ایجاد می‌شود (با در نظر گرفتن میزان پرشدگی بین فصل مشترک پله‌ها برای تولید قطعه سالم) مورد بررسی قرار گرفته است. با انجام این تحقیق فشار مناسب شکل‌دهی برای شکل‌دهی قطعات پرکاربرد مستطیلی، با در نظر گرفتن ورق اولیه بهینه مشخص گردید و این نتایج می‌تواند تا حد زیادی به انتخاب شکل ورق بهینه با در نظر گرفتن پرشدگی کامل در قطعه برای تولید قطعه سالم با توزیع ضخامت قابل قبول کمک نماید.

۲- مراحل آزمایشگاهی

در این تحقیق از فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی با فشار شعاعی استفاده شده است [۴]. به منظور بررسی شکل‌پذیری قطعات مستطیلی، از سه هندسه مستطیلی ساده، پله‌ای متقارن و هندسه مشابه مخزن سوخت خودور استفاده شده است. در شکل ۱ و ۲ به ترتیب هندسه‌های تعریف شده و قالب مورد استفاده در تحقیق نشان



شکل ۳- نمودار تنش - کرنش حقیقی آزمایش کشش

جدول ۱- مشخصات ورق فولادی بکار رفته

مقدار	مشخصه	ردیف
۱۱۶	استحکام تسلیم (MPa)	۱
۸۷۵۰	چگالی (Kg/m ³)	۲
۲۱۰	مدول الاستیسیته (GPa)	۳
۰/۳۳	ضریب پواسون	۴
۰/۴۴	توان کرنش سختی (n)	۵
-۱/۰۱۸ - ۱/۰۴	ناهمسانگردی (۴۵،۰ و ۹۰ درجه)	۶

۳- شبیه سازی اجزای محدود

فرآیند هیدروفرمینگ ورق در قالب پله‌ای شکل توسط نرم‌افزار آباکوس ABAQUS/Explicit6-13 استفاده شده است. در این نرم‌افزار برای تحلیل مدل شکست، از حل گر هیل ۴۸ استفاده می‌شود. با توجه به تقارن هندسه‌های تعریف شده فقط نیمی از اجزای قالب و ورق مدل شده است. برای اعمال فشار شعاعی به لبه ورق، ورق به صورت شکل‌پذیر^۱ و مجموعه قالب به دلیل عدم شکل‌پذیری به صورت صلب تحلیلی^۲ در نظر گرفته شده است. بر اساس مرجع [۲۰]، ضریب اصطکاک بین سنبه و ورق ۰/۱۵ و بین ورق با ورق‌گیر و ورق با قالب ۰/۰۴ در نظر گرفته شده است. تعداد المان ورق در امتداد ضخامت چهار می‌باشد. اجزای استفاده شده برای ورق از نوع C3D8R است. قالب و سنبه با المان مدلسازی R3D4 مدلسازی شده است. با توجه به نوع فرآیند و تغییر شکل زیاد ماده، از حل سریع دینامیکی^۳ استفاده شده است [۲۱]. در بخش خواص، خواص فیزیکی و مکانیکی برای ورق تعریف شده است. به منظور بررسی وقوع پارگی و کنترل ضخامت در ورق، از معیار نازک‌شدگی بیشینه استفاده شده است که مطابق معادله (۱) محاسبه می‌شود [۲۲ و ۲۳].

$$\%Thinning = \frac{t_0 - t_f}{t_0} \times 100 \quad (1)$$

در معادله (۱) t_0 و t_f به ترتیب ضخامت اولیه و ضخامت نهایی ورق‌اند که از معادله (۲) بدست می‌آید:

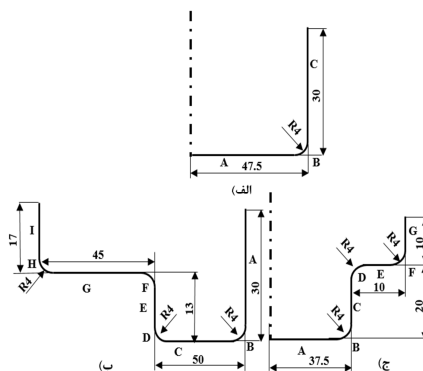
$$\epsilon_t = \ln\left(\frac{t_f}{t_0}\right) \quad (2)$$

¹Deformable

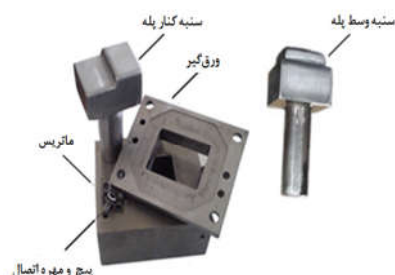
²Analytical Rigid

³Dynamic explicit

داده شده است. با توجه به شکل ۱ برای قطعات پله‌ای (وسط پله و کنار پله) به ترتیب ارتفاع پله تحتانی ۱۳ و ۲۰ میلی‌متر و ارتفاع پله بالایی ۱۷ و ۱۰ میلی‌متر و در نظر گرفته شده است. بدین منظور در قطعه مستطیلی ساده ارتفاع ۳۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۱- هندسه مورد استفاده در تحقیق، الف) قطعه ساده با ارتفاع ۳۰ میلی‌متر، ب) قطعه وسط پله با ارتفاع پله اول و تحتانی به ترتیب ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر، ج) قطعه کنار پله با ارتفاع پله اول ۱۷ و پله تحتانی ۱۳ میلی‌متر



شکل ۲- قالب مورد استفاده در تحقیق

نمودار تنش کرنش بدست آمده از آزمایش کشش در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به محدوده وسیع کاربرد ورق فولادی در صنعت و گستره کاربرد بیشتر آن در تولیدات قطعات، جنس ورق استفاده شده در تحقیق، از فولاد St1۳ می‌باشد که مشخصات و خواص آن در جدول ۱ آمده است. بعلاوه، به منظور بررسی خواص ناهمسانگردی ورق، نمونه‌هایی در راستاهای ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به راستای نورد آماده و مورد آزمایش قرار گرفتند که ضرایب آن در جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به مقدار ناچیز ناهمسانگردی و نیز هم‌گرایی در جهت‌های مختلف، در انجام مدلسازی از ناهمسانگردی صرف نظر شده است. ابعاد اولیه ورق برای انجام فرآیند، ۱۵۲*۱۵۰ میلی‌متر و با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. جنس قالب از فولاد ابزار سردکار و جنس ورق، فولاد کم کربن بوده و طول، عرض و ضخامت آن به ترتیب ۱۵۰، ۱۵۲ و ۱،۵ میلی‌متر است. ورق، به وسیله سنبه از بالا با سرعت ۱۵۰ میلی‌متر بر دقیقه و در پایین توسط سیال محبوس شده در حفره ماتریس فشرده می‌شود. کل جابجایی سنبه برابر ۳۰ میلی‌متر است.

که در آن، ε_t کرنش ضخامتی می‌باشد. طبق مرجع [۲۴] در حالت کرنش صفحه‌ای، کرنش اصلی مهندسی (e_0) طبق معادله (۳) بدست می‌آید:

$$e_0 = (23.3 + \frac{360}{25.4} t_0) (\frac{n}{0.21}) \quad (3)$$

که در آن، نمای کرنش سختی می‌باشد.

ε_0 با استفاده از معادله (۴) بدست می‌آید:

$$\varepsilon_0 = \ln(1 + e_0) \quad (4)$$

با فرض ثابت بودن حجم، آن‌گاه مطابق معادله (۵):

$$\varepsilon_t + \varepsilon_0 + \varepsilon_r = 0 \quad (5)$$

در این رابطه، ε_r ، کرنش در راستای محیطی و ε_0 ، کرنش طولی می‌باشد و با توجه به شرایط کرنش صفحه‌ای در دیواره قطعه (در مرحله پارگی، ورق به دور سنبه قرار می‌گیرد و در جهت محیطی کرنش ندارد. بنابراین می‌توان آن را کرنش صفحه‌ای فرض کرد)، مطابق معادله (۶) داریم:

$$\varepsilon_t = -\varepsilon_0 \quad (6)$$

در این معیار مقدار حداکثر نازک‌شدگی با توجه به معادلات ذکر 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 زیر-برنامه، 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 نظری با مقدار ضخامت پارگی در حالت تجربی مقایسه شد و اختلاف بسیار ناچیزی وجود داشت [۲۵].

۴-روش بهینه سازی آنالیز حساسیت

در این تحقیق از روش آنالیز حساسیت برای بهینه‌سازی شکل اولیه ورق استفاده می‌شود. فرض کنید (X) نشان‌دهنده بردار موقعیت یک نقطه مادی واقع درخارجی‌ترین گره ورق اولیه قبل از تغییرشکل و (x) نشان‌دهنده بردار موقعیت همان نقطه مادی پس از تغییر شکل نهایی می‌باشد. با ورق اولیه تعریف شده توسط بردار موقعیت (X)، فرآیند تغییرشکل به روش اجزای محدود تجزیه و تحلیل شده است. اگر پس از تجزیه و تحلیل، بردار موقعیت (x) بر روی منحنی هدف (XT) منطبق نشود، موقعیت آن نقطه مادی قبل از تغییر شکل (X) باید به منظور ایجاد منحنی شکل‌یافته منطبق با منحنی هدف (XT) انتقال یابد. انتقال (X)، یعنی تغییر شکل ورق اولیه، با معرفی مفهوم حساسیت شکل صورت می‌گیرد. حساسیت شکل به صورت عددی با در نظر گرفتن دو ورق، یعنی ورق اصلی و ورق آفست یافته بدست می‌آید. بردار موقعیت نقاط مادی بر روی منحنی ورق آفست یافته، از اطلاعات تجزیه و تحلیل تغییر شکل با ورق اولیه تعریف شده توسط (X) به صورت معادله (۸) تعیین می‌شود:

$$X_8 = X + \delta N \quad (8)$$

که در آن (X_8) نشان دهنده بردار موقعیت یک نقطه مادی واقع در خارجی‌ترین گره ورق آفست یافته قبل از تغییرشکل، (N) بردار واحد درجهت تغییرشکل در مرحله اول و (δ) مقدار آفست است. با ورق آفست یافته تعریف شده توسط (X_8)، تجزیه و تحلیل فرآیند تغییر شکل برای بدست آوردن (x_8) بردار موقعیت نقاط مادی تغییر شکل‌یافته با (X_8)، مجدداً

صورت می‌گیرد. حساسیت به تغییر شکل در هر گره به صورت رابطه (۹) تعریف می‌شود [۱۸]:

$$S = \frac{|X_8 - X|}{|X_8 - X|} \quad (9)$$

تا زمانیکه (x) بر روی منحنی هدف منطبق شود، موقعیت اولیه هر گره بر طبق معادله (۱۰) انتقال می‌یابد.

$$X^i = X^{i-1} + \varepsilon SN \quad (10)$$

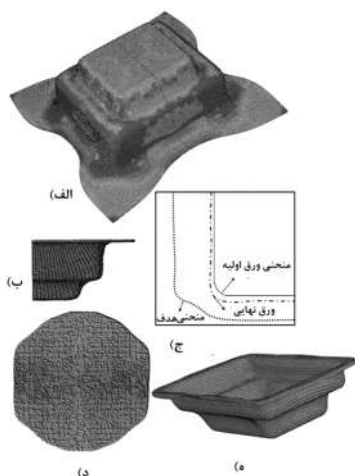
که در آن (ε) خطای انحراف از منحنی هدف بوده و با فاصله بین (XT) و (x) تعریف می‌شود. (N) بردار واحد درجهت تغییرشکل در حالت اولیه است و بالا نویس i نیز به معنی تعداد تکرارها می‌باشد. در این بررسی به ترتیب برای قطعات ساده و پله ای تعداد ۹۰ و ۱۲۰ گره با فاصله مساوی در محیط ورق اندازه‌گیری شده (تعداد گره‌ها در محیط ورق ۱۸۰ و ۲۴۰ گره بوده) و کلیه محاسبات در نرم‌افزار Excell صورت گرفته است. در نهایت منحنی جدید ورق بهینه شده با توجه به مختصات بدست آمده به کمک نرم‌افزار Solidwork رسم شده و مجدداً به نرم‌افزار آباکوس ارسال می‌گردد. پس از اصلاح شکل ورق، تجزیه و تحلیل فرآیند تغییر شکل تا رسیدن مقدار خطای انحراف از منحنی هدف، (ε)، به مقدار تعیین شده در هر گره خارجی، مجدداً تکرار می‌شود. دقت بهینه‌سازی ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

۵- نتایج

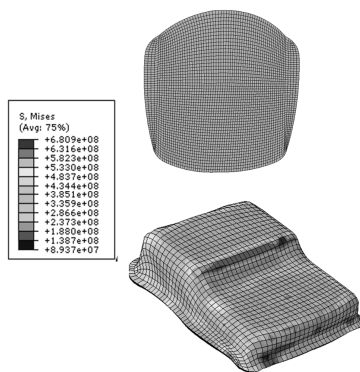
۵-۱-صحت سنجی نتایج شبیه‌سازی و تجربی

به منظور بررسی شکل پذیری قطعه مستطیلی، ارتفاع پله ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. با بررسی فشارهای ۱۰ تا ۱۸ مگاپاسکال، پارگی در ناحیه دیواره و شعاع سنبه مشاهده می‌شود که دلیل آن عدم چسبندگی کافی بین ورق و سنبه می‌باشد. هدف از انجام این کار بدست آوردن بررسی روند شکل‌پذیری قطعه مستطیلی ساده با تغییر ارتفاع و فشار شکل‌دهی بوده تا از اینرو روند تعیین فشار مناسب در ابعاد و ارتفاع مختلف تعیین شود. در ادامه با افزایش فشار شکل‌دهی تا ۲۴ مگاپاسکال در ارتفاع ۳۰ میلی متر، قطعه سالم با روند توزیع ضخامت قابل قبول بر اساس معیار نازک‌شدگی ایجاد گردید. در شکل ۴ به ترتیب قطعه ساده و کنار پله شکل داده شده از تست تجربی و شبیه سازی در فشار ۲۴ و ۴۰ مگاپاسکال نشان داده شده است. با انجام مراحل شکل دهی قطعات پله ای در یک مرحله، قطعه وسط-پله در فشار ۳۰ مگاپاسکال و قطعه کنارپله در فشار ۴۰ مگاپاسکال شکل-دهی شدند. در شکل ۵ و ۶ صحت سنجی نتایج تجربی و شبیه سازی به ترتیب برای قطعه ساده و کنار پله نشان داده شده است. مقدار بیشترین اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی در حدود ۶ درصد برای قطعه ساده و ۸ درصد برای قطعه کنار پله می‌باشد.

مذکور می‌باشد. در ابتدا به منظور انجام مراحل شبیه‌سازی و تجربی، ورق اولیه با ابعاد 152×150 میلی‌متر در نظر گرفته شد. در شکل ۷ ورق اولیه بهینه شده برای قطعه وسط پله (با سه مرحله بهینه‌سازی) و قطعه شکل داده شده با ورق بهینه، نشان داده شده است. همچنین در شکل ۸ قطعه کنار پله بدست آمده از شبیه‌سازی با ورق اولیه بهینه نشان داده شده است.



شکل ۷- مراحل بهینه‌سازی قطعه وسط پله در شبیه‌سازی: الف) شکل‌دهی با ورق اولیه، ب) ورق بهینه‌سازی شده، ج) یک چهارم قطعه به دلیل تقارن، د) مراحل بهینه‌سازی، ه) قطعه تولید شده از آن

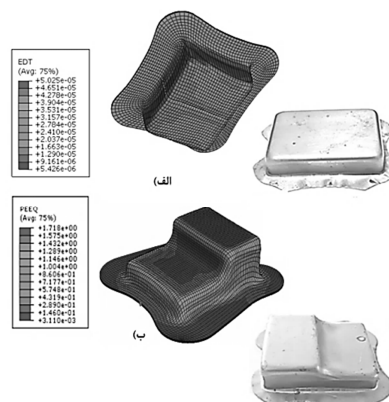


شکل ۸- شکل دهی قطعه کنار با ورق اولیه بهینه در فشار ۴۰ مگاپاسکال

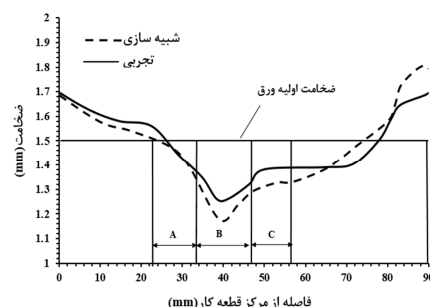
به منظور درست آزمایی نتایج حاصل از شبیه‌سازی، آزمایش تجربی با ورق بهینه شده در هر مرحله، انجام گرفت. با انجام آزمایش تجربی، تطابق قابل قبولی، با اختلاف حداکثر ۸ درصد بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایش تجربی بدست آمد. با انجام هر مرحله بهینه‌سازی، شبیه‌سازی قطعه با ورق بدست آمده مورد بررسی قرار گرفت و ناحیه فلنج بدست آمده با منحنی نهایی مقایسه شد.

۵-۳- بررسی پرشدگی گوشه

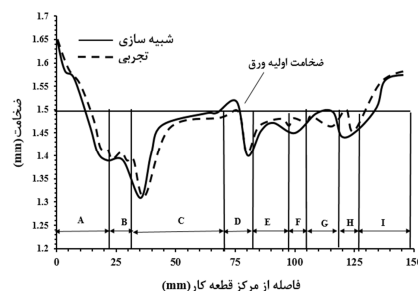
به طور کلی با توجه به نوع هندسه قطعات پله ای، یکی از مشکلات



شکل ۴- الف) قطعه ساده بدست آمده از شبیه‌سازی و تست تجربی در فشار ۲۴ مگاپاسکال، ب) قطعه کنار پله بدست آمده از شبیه‌سازی در فشار ۴۰ مگاپاسکال



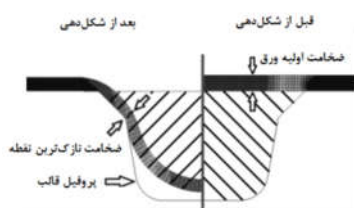
شکل ۵- نمودار توزیع ضخامت قطعه کنار پله در فشار ۲۴ مگاپاسکال، بدست آمده از تست تجربی و شبیه‌سازی



شکل ۶- نمودار توزیع ضخامت قطعه کنار پله در فشار ۴۰ مگاپاسکال، بدست آمده از تست تجربی و شبیه‌سازی

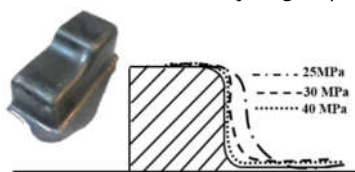
۵-۲- تعیین شکل ورق بهینه

در این تحقیق در ابتدا فشار مناسب برای هندسه‌های متفاوت تعیین و تأثیر پارامترهای وابسته مختلف بر روی توزیع ضخامت مورد بررسی قرار گرفتند. در ادامه، روند بدست آوردن شکل ورق اولیه بهینه و تأثیر پارامترهای مختلف بر روند بهینه‌سازی برای سه هندسه متفاوت مورد مطالعه قرار گرفت. در شکل‌دهی قطعات، با توجه به مقطع اولیه ورق و وجود گوشه‌های تیز، تنش در این نواحی زیاد و در حین شکل‌دهی، ماده در این ناحیه جریان نیافته و پرشدگی قالب به طور کامل ایجاد نمی‌شود. بدین منظور، بهینه‌سازی یک راهکار مناسب برای رفع مشکل



شکل ۱۰- طرحواره محاسبه درصد پرشدگی برای قطعات وسط پله و کنار پله [۲۷]

با توجه به اینکه همواره قطعات پله‌ای در صنعت دارای هندسه و ابعاد مختلفی می‌باشند، هر گونه تغییر در شکل هندسی قطعه، خصوصا در ناحیه شعاع انحنا فصل مشترک بین پله‌ها، میزان پرشدگی و حداکثر فشار شکل‌دهی را تغییر خواهد داد. برای بررسی شکل‌دهی این دسته از قطعات، شکل‌دهی قطعه کنار پله به عنوان نمونه یک قطعه با کاربرد صنعتی (مخزن سوخت)، مورد بررسی قرار گرفت. برای انجام بررسی ها، برای ارتفاع پله اول در کف سنبه، اندازه‌های ۱۰، ۱۳، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر و شعاع انحنا فصل مشترک ۵ میلی متر انتخاب شد. در شکل ۱۱ تأثیر فشار بر میزان پرشدگی در یک ارتفاع ثابت (پله تحتانی) ۱۰ میلی‌متر نشان داده شد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش فشار به دلیل کرنش و کشیدگی بیشتر و در پی آن، چسبیدن ورق به سنبه، پرشدگی افزایش می‌یابد. به طوریکه در فشار ۴۰ مگاپاسکال حداکثر پرشدگی به ۹۸ درصد می‌رسد. با بررسی روند تغییرات پرشدگی با تغییر هندسه قطعه، بررسی‌ها در ارتفاع پله مختلف در فشار سیال ثابت ۴۰ مگاپاسکال بررسی گردید. میزان پرشدگی مطابق معیار شکل ۱۰، در فشار ثابت، در ارتفاع ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر به ترتیب از ۹۶ درصد در ارتفاع ۱۰ میلی متر به ۸۹ و ۸۴ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین این نتیجه بدست می‌آید که با افزایش ارتفاع، میزان پرشدگی در فصل مشترک، در فشار ثابت کاهش می‌یابد به طوریکه برای ایجاد پرشدگی ۹۶ درصد در ارتفاع بیش از ۱۵ میلی‌متر، باید فشار سیال را از ۴۰ مگاپاسکال به ۴۳ مگاپاسکال تغییر داد.

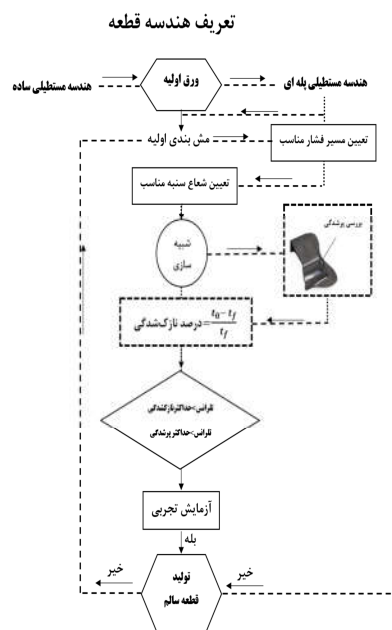


شکل ۱۱ - بررسی تأثیر فشار سیال بر روی پرشدگی شعاع انحنا فصل مشترک بین پله‌ها، در قطعه کنار پله، در ارتفاع پله تحتانی ۱۰ میلی‌متر

۵-۴- بهینه‌سازی در ارتفاع‌های مختلف

برای دستیابی به روند تغییرات توزیع ضخامت و تأثیر فشار سیال در ارتفاع‌های مختلف، شبیه‌سازی از ارتفاع ۱۰ میلی‌متر و فشار اولیه ۱۰ مگاپاسکال انجام گردید و مشخص شد که تا ارتفاع پله ۲۰ میلی‌متر، به دلیل کشیدگی کمتر در دیواره قطعه، با افزایش فشار از یک حد مشخص، میزان نازک شدگی در دیواره قطعه افزایش می‌یابد و فشار مناسب برای ارتفاع ۲۰ میلی‌متر برابر ۱۸ مگاپاسکال می‌باشد. با افزایش ارتفاع پله تا ۳۰ میلی‌متر، فشار شکل‌دهی جهت چسبندگی بهتر بین

شکل‌دهی در اینگونه قطعات، پرشدگی در ناحیه شعاع انحنا گوشه در فصل مشترک بین پله‌ها می‌باشد که از دلایل اصلی دشوار بودن شکل‌دهی اینگونه قطعات می‌باشد. از جمله پارامترهای تأثیرگذار بر روی پرشدگی، شعاع سنبه و فشار شکل‌دهی می‌باشد [۲۶]. در شکل ۹ فلوچارتی مربوط به بررسی پرشدگی فصل مشترک پله‌ها نشان داده شده است.



شکل ۹- فلوچارت شکل دهی قطعات ساده و پله ای

در این تحقیق برای بررسی میزان پرشدگی از معیار حداکثر پرشدگی استفاده شده است [۲۷]. در شکل ۱۰ روش محاسبه آن نشان داده شده است. در معادله (۱۱)، A_0 مساحت سطح جاروب شده توسط قطعه و A ، مساحت قطعه می‌باشد. برای بررسی پرشدگی، با در نظر گرفتن ارتفاع بترتیب ۱۳ و ۲۰ میلی متر در پله اول، با اعمال فشار شکل‌دهی ۲۰ مگاپاسکال برای قطعه کنار پله و وسط پله، پرشدگی کامل ایجاد نمی‌شود و میزان پرشدگی به ترتیب ۶۸ و ۶۰ درصد می‌باشد. دلیل این امر، عدم جریان مواد و عدم چسبندگی کامل ورق و سنبه می‌باشد. در ادامه با توجه به عدم پرشدگی در فصل مشترک پله‌ها، فشار شکل‌دهی افزایش داده شد و مشاهده گردید که با افزایش فشار، به دلیل افزایش اصطکاک بین ورق و سنبه و افزایش جریان ورق در ناحیه فلنج (با توجه به افزایش فشار شعاعی)، پرشدگی افزایش یافت به طوریکه در فشارهای به ترتیب ۳۰ و ۴۰ مگاپاسکال، میزان پرشدگی به ترتیب ۸۴ و ۹۳ درصد حاصل شد. افزایش فشار از یک طرف باعث افزایش پرشدگی و از طرف دیگر باعث افزایش نیروی شکل دهی می‌شود.

$$\%F = \frac{A_0}{A} \quad (11)$$

جدول ۲- تغییرات ضخامت با تأثیر بهینه سازی، بدست آمده از

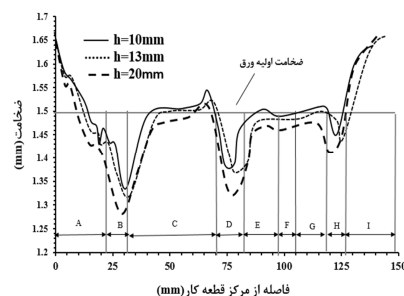
شبیه سازی

نوع هندسه	ورق اولیه	بهینه سازی	شعاع اولیه	شعاع بهینه
ساده	۱۶	۸	۱۷	۶
کنار پله	۱۸	۱۰	۲۰	۱۴
وسط پله	۱۷	۶	۱۸	۱۰

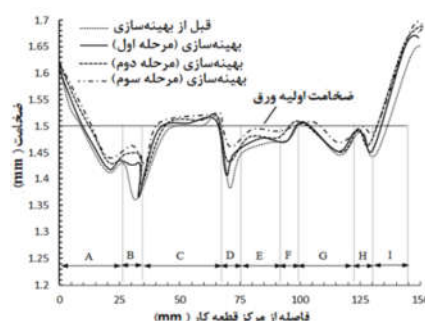
۵-۵- منحنی اولیه در ارتفاع های مختلف

شکل ۱۴ نمودار تغییرات جریان مواد در ورق اولیه و ورق با حذف گوشواره را نشان می دهد. با بررسی منحنی ورق اولیه برای سه هندسه تعریف شده (شکل ۱۵)، مشخص گردید که با تغییر در شکل قطعه، شکل ورق اولیه بهینه بسیار متفاوت خواهد بود و نمی توان برای دست-یابی به شکل ورق اولیه برای هر هندسه ساده و یا پله ای، روند بهینه سازی واحد برای هندسه های دیگر جامعیت قرار داد بطوریکه در نواحی گوشواره و دیوارهای فلنج در جهت طولی و عرضی نیاز به تغییرات مختصات گره (جهت X و Y) برای هر هندسه می باشیم. از طرف دیگر همانطور که در شکل ۱۵ نشان داده شده است در صورتی که قطعات پله ای دارای هندسه پله تحتانی متفاوت باشند جریان مواد و تغییرات مختصات گره در شعاع و دیواره ها نسبت به هم نیز متفاوت می باشد. به طور کلی منحنی ورق بهینه در ارتفاع مختلف برای یک قطعه تغییر می کند. به منظور دست یابی به روند تغییرات منحنی ورق اولیه در ارتفاع مختلف، ارتفاع پله ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ میلی متر مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به شکل، سه ناحیه کلی گوشواره، دیواره عرضی و طولی تعریف می شود. با بررسی نمودار تغییرات شکل ورق اولیه در ارتفاع های مختلف برای قطعه ساده، کنار پله و وسط پله در سه ارتفاع ۱۵، ۲۰ و ۳۵ میلی متر مشاهده شد که برای یک شکل قطعه واحد نیز چنانچه ارتفاع و نسبت کشش تغییر کند، تغییرات مختصات گره متفاوت برای یک هندسه ثابت ایجاد خواهد شد و در صورتی که هندسه های پله ای مدنظر قرار گیرد تغییرات ارتفاع تأثیرات بسیار بیشتری بر روی گوشه های ورق بهینه مد نظر ایجاد می کند و دلیل این موضوع عدم جریان مواد در فصل مشترک می باشد. با بررسی های کلی انجام شده برای سه هندسه تعریف شده، برای قطعه مستطیلی ساده، با توجه به ورق اولیه و وجود گوشه های تیز، بیشتر کشیدگی در دیواره عرضی می باشد. برای قطعه کنارپله، جریان مواد با حذف گره در مختصات گوشواره جریان در دیواره ها و گوشه ایجاد می شود. با بررسی روند تغییرات جریان مواد در سه ناحیه در ارتفاع های مختلف مشخص گردید که در ارتفاع های پله ۱۰ و ۱۵ میلی متر با ورق اولیه، به دلیل وجود گوشه های تیز در ورق و عدم جریان مواد به دلیل فواصل کم دیواره عرضی، کرنش در جهت ارتفاع در دیواره عرضی بیش از نواحی دیگر می باشد و با بکارگیری روش حساسیت و تعیین مختصات گره و حذف گوشه تیز در گوشواره ها، جریان در سه ناحیه متعادل شده و با تغییر مختصات گره در گوشواره، شکل بهینه ورق ایجاد می شود. در شکل ۱۶ و ۱۷ به ترتیب نمودار مقایسه تغییرات ورق شکل داده شده در سه ناحیه، برای قطعه

ورق و دیواره سنبه، افزایش می یابد. فشار مناسب برای ارتفاع ۳۰ میلیمتر برابر ۲۲ مگاپاسکال می باشد. افزایش ارتفاع پله، به دلیل افزایش کرنش و کشیدگی بیشتر در پله اول، نازک شدگی در ناحیه دیواره پله اول و شعاع گوشه سنبه افزایش یافت. درصد کاهش ضخامت در ارتفاع پله ۱۰، ۱۳ و ۲۰ میلی متر به ترتیب ۱۱، ۱۳ و ۱۳ درصد می باشد که با توجه به معیار نازک شدگی در نظر گرفته شده مشاهده گردید که در قطعه پارگی رخ نمی دهد. در شکل ۱۲ و ۱۳ به ترتیب نمودار توزیع ضخامت قطعه کنار پله با ورق اولیه بهینه نشده در ارتفاع مختلف و مقایسه توزیع ضخامت قبل و بعد از بهینه سازی نشان داده شده است. با انجام مراحل بهینه سازی انجام شده، مقدار نازک شدگی در ناحیه بحرانی در قطعه ساده، کنار پله و وسط پله به ترتیب ۱۰، ۸ و ۱۱ درصد کاهش یافت. در جدول ۲ تغییرات ضخامت ورق شکل داده شده را با در نظر گرفتن پارمترهای مختلف نشان می دهد.



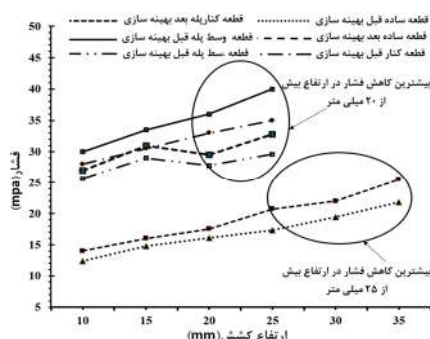
شکل ۱۲- نمودار تأثیر ارتفاع پله بر روی توزیع ضخامت قطعه کنارپله با ورق بهینه نشده در جهت برش طولی (از نقطه A تا I) ، بدست آمده از آزمایش تجربی در فشار ۴۰ مگاپاسکال



شکل ۱۳- نمودار توزیع ضخامت قطعه کنار پله در فشار ۴۰ مگاپاسکال در جهت برش طولی (از نقطه A تا I)، در مراحل بهینه سازی، بدست آمده از شبیه سازی

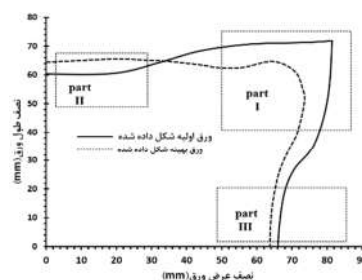
۵-۶- فشار در بهینه سازی با ارتفاع مختلف

در فرآیند شکل‌دهی به روش سیال، افزایش فشار بحرانی باعث بروز پارگی در ورق می‌شود و خواص مواد در زوایای مختلف با توجه به جهت نورد بر میزان فشار بحرانی تاثیر می‌گذارد [۲۸]. در شکل ۱۸ نمودار تأثیر بهینه‌سازی بر روی حداکثر فشار بیشینه شکل‌دهی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود بدلیل جریان راحت‌تر مواد و کشیدگی کمتر ورق در نواحی بحرانی، کشش غالب می‌باشد و به دنبال آن فشار شکل‌دهی برای انجام فرآیند و شکل‌گیری قطعه کاهش می‌یابد که این روند برای هر دو هندسه تعریف شده از قطعات پله‌ای یکسان می‌باشد. همچنین بدلیل حذف نواحی تیز از گوشه‌های ورق، فشار بیشینه به اندازه قابل توجه ۱۰ درصد کاهش می‌یابد و از آن پس در مراحل بعدی تا رسیدن به منحنی نهایی بهینه شده، این کاهش چندان زیاد نمی‌باشد و در حدود ۴ درصد می‌باشد. در شکل ۱۹ به ترتیب قطعات ساده، وسط پله و کنار پله بدست آمده با ورق اولیه بهینه در حالت شبیه‌سازی و تجربی نشان داده شده است. برای قطعه های پله‌ای با توجه به مسیر فشار تعیین شده و ضرورت به اعمال فشار حداکثری در شروع فرآیند، به دلیل الزام به پرشدگی در فصل مشترک پله اول و دوم، بهینه سازی اثر گذاری بیشتری دارد و در شروع فرآیند با جریان یافتن بهتر ورق حداکثر فشار شکل دهی را تا ۲۱ دصد بهبود می بخشد.

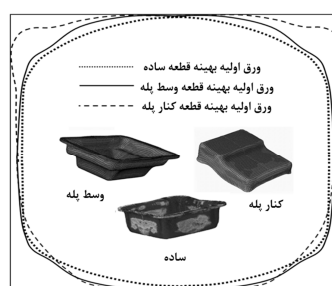


شکل ۱۸- روند تأثیر کاهش فشار بیشینه با انجام بهینه سازی ورق اولیه

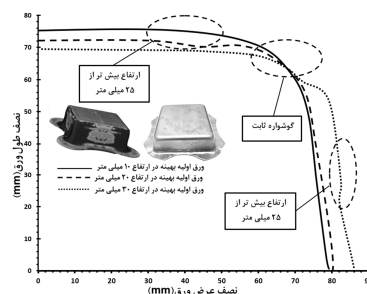
ساده با ارتفاع‌های مختلف و تغییرات شکل ورق اولیه برای قطعه کنار پله در ارتفاع مختلف نشان داده شده است.



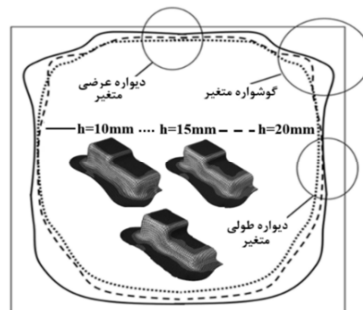
شکل ۱۴- نمودار تغییرات جریان مواد در ورق اولیه و ورق با حذف گوشواره، بدست آمده از شبیه سازی



شکل ۱۵- نمودار منحنی ورق اولیه بهینه شده برای سه هندسه ساده، وسط پله و کنار پله، بدست آمده از شبیه سازی



شکل ۱۶- نمودار تغییرات ورق شکل داده شده در سه ناحیه، برای قطعه ساده با ارتفاع‌های مختلف، بدست آمده از شبیه سازی



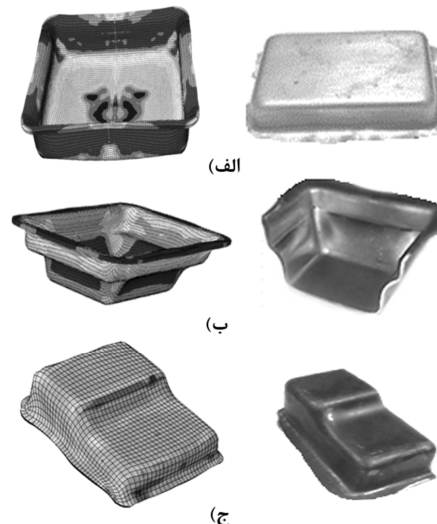
شکل ۱۷- تغییرات شکل ورق اولیه برای قطعه کنار پله در ارتفاع مختلف، بدست آمده از شبیه‌سازی

پرشدهی را کاهش داده و میزان پرشدگی در فشار ثابت در ارتفاع ۲۰ و ۱۵ میلیمتر به ترتیب از ۹۶ درصد در ارتفاع ۱۰ میلی متر به ۸۹ و ۸۴ درصد کاهش می یابد.

با بررسی تغییرات شکل ورق بهینه در ارتفاع مختلف، جریان مواد بر حسب تغییرات مختصات گره تا یک ارتفاع معین، در گوشواره می باشد و از ارتفاع بیش از ۲۵ میلی متر، بر حسب تغییر مختصات در دیواره طولی می باشد.

۷- مراجع

- [1] Thiruvurudchelva S., Travis F. W., Hydraulic pressure enhanced cup drawing processes-an appraisal, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 140, No. 5, pp. 70-75, 2003.
 - [2] Kocaña A., Sadłowska H., Automotive component development by means of hydroforming, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 8, No. 8, pp. 55-72, 2008.
 - [3] Zhang S. H., Developments in hydroforming, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 91, No. 6, pp. 236-244, 1999.
 - [4] Lang L., Danckert J. and Nielsen K. B., Investigation into hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure: Part I. Experimental observations of the forming process of aluminum alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 148, No. 8, pp. 119-131, 2004.
 - [5] Hul H., Wang J., Fanl K., Chen T. and Wang sh., Development of sheet hydroforming for making an automobile fuel tank, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 154, No. 4, pp. 142-151, 2015.
 - [6] Wu J. a., Balendra R. b. and Qinb Y., A study on the forming limits of the hydro mechanical deep drawing of components with stepped geometries, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 145, No. 6, pp. 242-256, 2004.
- ۷/ حق پرست، ا. بخشی، م. گرجی، ح. یک مطالعه در محدوده شکل دهی کشش عمیق هیدرومکانیکی اجزای با هندسه پله ای. مجله مهندسی مکانیک امیرکبیر، د. ۱۷، ش. ۱۱، ص ۳۱۱-۳۲۲، ۱۳۹۶.
- ۸/ صادقی زدی، م. بخشی، م. گرجی، ح. شاکری، م و خادمی، م. بهینه یابی مسیرهای فشار در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی با فشار شعاعی و با جریان روبه داخل سیال به کمک یک روش ترکیبی. مجله مهندسی مکانیک مدرس، د. ۱۷، ش. ۵، ص ۲۸۶-۲۷۶، ۱۳۹۶.
- ۹/ خادمی، م. بخشی، م. گرجی، ح. صادقی زدی، م. بررسی چروکیدگی در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی با فشار شعاعی با جریان رو به - داخل سیال، مجله مهندسی مکانیک مدرس، د. ۱۷، ش. ۱۱، ص ۳۱۱-۳۲۲، ۱۳۹۶.
- [10] Vafaeesefat A., Finite Element Simulation for Blank Shape Optimization in Sheet Metal Forming, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 91, No. 5, pp. 236-244, 2011.
 - [11] Feyissa F., ravi kumar D., Enhancement of drawability of cryorolled AA5083alloy sheets by hydroforming, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* vol.44, No. 4, pp.87-94, 20۱۶.
 - [12] Huiting-Wang B.N., LinGao B., Minghe-Chen B., Hydrodynamic deep drawing process assisted by radial pressure with inward flowing liquid, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 53, No. 4, pp. 793-799, 2011.
 - [13] Kim T., Yang D. and Han S., Numerical modeling of the multi-stage sheet pair hydroforming process, *Journal of materials processing technology*, vol. 151, No. 3 pp. 48-53, 2004.
 - [14] 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



شکل ۱۹- قطعه نهایی شکل داده شده با ورق اولیه بهینه، الف) قطعه ساده در فشار ۲۴ مگاپاسکال، ب) قطعه وسط پله در فشار ۳۰ مگاپاسکال و ج) قطعه کنار پله در فشار ۴۰ مگاپاسکال، بدست آمده از تست تجربی و شبیه سازی



شکل ۱۹- قطعه نهایی شکل داده شده با ورق اولیه بهینه، الف) قطعه ساده در فشار ۲۴ مگاپاسکال، ب) قطعه وسط پله در فشار ۳۰ مگاپاسکال و ج) قطعه کنار پله در فشار ۴۰ مگاپاسکال، بدست آمده از تست تجربی و شبیه سازی

۶- نتیجه گیری

با انجام بهینه سازی، مقدار نازک شدگی در ناحیه شعاع سنبه و دیواره برای قطعات مستطیلی به ترتیب به اندازه ۱۴ و ۸ درصد کاهش یافت. با انجام بهینه سازی، دلیل جریان راحت تر مواد و کشیدگی کمتر ورق در نواحی بحرانی، فشار بهینه در شروع و انتها شکل دهی به ترتیب ۱۰ و ۲۱ درصد کاهش می یابد.

با افزایش ارتفاع، به دلیل نازک شدگی بیشتر در دیواره پله و عدم جریان ورق، فشار کمتری به شعاع انحنا وارد شده و کرنش کمتر،

- aluminum alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 148, No. 5 pp. 119-131, 2004.
- [15] Kanga B.S., Sona B.M. and Kim J., A comparative study of stamping and hydroforming processes for an automobile fuel tank using FEM, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* vol.132, No.44 87-94. 2004.
- [16] Zhanga S.H., Nielsena K.B., Danckerta J., Kangb D.C. and Lang L.H., Finite element analysis of the hydromechanical deep- drawing process of tapered rectangular boxespp, *Journal of Materials Processing Technology*, vol.102, No.4, pp.142-151, 2000.
- [17] Wu J., Balendra R. and Qinb 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.6, pp.242-246, 2004.
- [18] Barlat F., Chung K. and Richmond O., Anisotropic plastic potentials for polycrystals and application to the design of optimum blank shapes in sheet forming, *Metall MaterTrans.* Vol.24, No.2 pp.1209-1216, 1994.
- [19] Shim H. B., Determination of optimal blank shape by the radius vector of boundary nodes, *Engineering Manufacture*, vol. 218, No.7, pp. 1099-1111, 2004.
- [20] Kang B.S., Sona B.M. and Kim J., A comparative study of stamping and hydroforming processes for an automobile fuel tank using FEM, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, No.2, pp.87-94, 2004.
- [21] Xiaojing L., ongchao X.Y., 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.
- [22] Shirkharkolae E.M., Bakhshi M. and 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.
- [23] Aue Y., Lang U., Ngaile G. and Altan T., Optimizing tube hydroforming using process simulation and experimental verification, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146, No. 1, pp. 137-143, 2004.
- [24] Wu J., Balendra R. and 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.
- [۲۵] حسین پور. م، بخشی. م، گرجی. ح، مطالعه تجربی و شبیه سازی فرآیند هیدروفرمینگ قطعه مخروطی با بدست آوردن فشار سیال، *مجله مهندسی مکانیک تبریز*، د. ۱۴، ش. ۸، ص ۱۷-۲۷، ۱۴۰۱.
- [26] kumar S., ahmed M. and panti.S.K, Effect of punch profile on deformation behaviour of AA5052 sheet in stretch flanging process, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol.145, No.6, pp.72-81, 2020.
- [۲۷] محمد تبارن، حسینی پور. ج، گرجی. ح، بخشی. م، بررسی پارامترهای موثر در هیدروفرمینگ صفحات دوقطبی فلزی پیل سوختی با میدان جریان موازی، *مجله مهندسی مکانیک مدرس*، د. ۱۴۵، ش. ۶، ص ۷۲-۸۱، ۱۳۹۵
- [28] Alizad M., hosseinpour M. and Hashemi A., Determination of critical pressure in analyzing of rupture instability for hydromechanical deep drawing using advanced yield criterion, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 18, No.5, pp. 103-118, 2018