



بهینه‌سازی ابعاد اولیه ورق در هیدروفرمینگ قطعات مستطیلی دو پله

رضا موسوی پور^۱، عبدالحمید گرجی^{۲*} و محمد بخشی^۳

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

^۲استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

^۳استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۰۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۰۲/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۸/۲۵

چکیده

فرآیند هیدروفرمینگ از روش‌هایی است که می‌تواند به عنوان یک راهکار مناسب برای رفع مشکل موجود در زمینه شکل‌دهی قطعات پیچیده مانند قطعات مستطیلی پله‌ای مطرح شود. در این فرآیند، توزیع ضخامت یکنواخت و کیفیت بالاتر قابل دست‌یابی است. در فرآیند هیدروفرمینگ، بهینه‌سازی ابعاد اولیه ورق، تاثیر زیادی در تولید محصولات با حداقل هزینه و کیفیت بالا دارد. در این مقاله با استفاده از روش حساسیت، بهینه‌سازی ابعاد اولیه ورق با دو هندسه متفاوت، مورد بررسی قرار گرفت. در پایان مراحل بهینه‌سازی، منحنی ورق شکل یافته و منحنی نهایی روی هم منطبق می‌شوند. در مراحل بهینه‌سازی از نرم-افزار آباکوس به منظور انجام شبیه‌سازی فرآیند استفاده گردید. پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق، تاثیر بهینه‌سازی ابعاد اولیه ورق بر روی توزیع ضخامت و فشار بیشینه شکل‌دهی می‌باشد. در پایان این نتیجه حاصل شد که با بهینه‌سازی ابعاد اولیه ورق در هر مرحله، میزان بیشترین نازک‌شدگی قطعه نهایی کاهش می‌یابد که در ناحیه شعاع سنبه و دیواره پله ایجاد می‌شود. همچنین با بررسی فشار بیشینه شکل‌دهی مشخص گردید که با انجام مراحل بهینه‌سازی، جریان مواد افزایش یافته و سبب کاهش حداکثر فشار بیشینه خواهد شد.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی؛ آنالیز حساسیت؛ ابعاد اولیه ورق؛ هیدروفرمینگ پله‌ای

Optimization of the initial blank shape in hydroforming double-stepped parts

Reza mousavipoor¹, Abdolhamid Gorji^{2*} and Mohammad Bakhshi³

¹Masters Student, Department of Mechanical engineering, Babol Noushirvani University of Technology

²Assistant Professor, Department of Mechanical engineering, Babol Noushirvani University of Technology

³Professor, Department of Mechanical engineering, Babol Noushirvani University of Technology

Abstract

Hydroforming is a suitable solution method for removing complex parts' forming problems such as stepped rectangular parts with uniform thickness distribution and higher quality. Optimization of the initial dimensions of the sheet in the hydroforming process has a large effect on producing products with lower price but higher quality. In this paper, optimizations of the sheet initial dimensions for two different geometries have been studied through sensitivity method. The same curves of formed sheet and final sheet has been seen at the end of the optimization step. In the optimization step, the ABAQUS software has been used to perform the simulation process. The examined parameters in this study are the effect of optimizing of the sheet initial dimensions on the thickness distribution and the maximum forming pressure. It has been concluded that the maximum thinning occurring in the punch radius and in the wall region is reduced by optimizing of the sheet initial dimensions at each stage. It must be mentioned that, investigating the maximum forming pressure shows that by the optimization step, material flow improves so, the maximum pressure will decrease.

Keywords: Optimization; sensitivity analysis; initial dimensions of the sheet; stepped hydroforming.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۱۱۱۱۴۵۷۶۰؛ فکس: ۰۱۱۳۲۳۳۴۴۰۱

آدرس پست الکترونیک: hamidgorji@nit.ac.ir

۱- مقدمه

هیدروفورمینگ، یکی از روش‌های نوین در تولید قطعات ورقی فلزی است. در سال‌های اخیر در صنایع خودروسازی و هوافضا، تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده است. از جمله پارامترهای تاثیرگذار در فرآیندهای شکل‌دهی ورق به کمک هیدروفورمینگ، ابعاد اولیه ورق است. ابعاد اولیه ورق در تولیدات صنعتی به خصوص از نظر مسایل اقتصادی، از اهمیت بالایی برخوردار است. از طرفی عموماً خواص مکانیکی ورق‌ها در تمام جهات یکسان نمی‌باشد که این امر، موجب رفتار ناهمسانگرد ورق در بیش فرآیندهای شکل‌دهی می‌شود. بعضی از خواص مکانیکی نظیر، استحکام کششی و رفتار مومسانی با جهت‌گیری دانه‌ها ارتباط دارند.

ورق بهینه به شکل اولیه ورق اطلاق می‌شود که یک شکل منظم را پس از انجام عملیات شکل‌دهی ایجاد کند. بدست آوردن ورق بهینه به سادگی ممکن نمی‌باشد. دلیل این امر، پیچیدگی رفتار ماده است. ورق اولیه بهینه نه تنها قابلیت شکل‌پذیری و کیفیت محصول را بهبود می‌بخشد، بلکه سبب کاهش هزینه ورق مصرفی و تعداد مراحل تولید می‌شود؛ در نتیجه در بازار رقابتی و چرخه کوتاه محصولات، زمینه مناسبی را برای فروش محصول فراهم می‌کند. با این حال، تعیین شکل بهینه اولیه ورق به دلیل پیچیدگی رفتار مواد و به خصوص در فرآیندهای مهرزنی^۱ و کشش عمیق بسیار مشکل است که در آن مکانیک تغییر شکل پیچیده دخیل می‌باشد. در حال حاضر، با توجه به روش‌های مختلف ارزیابی شده توسط محققان، روش‌های بهینه‌سازی را می‌توان به دو دسته طرح رترو- مارچینگ^۲ و تکرارشونده تقسیم کرد [۱]. روش میدان خطوط لغزش [۲]، روش نگاشت هندسی [۳]، روش جمع و تفریق مساحت [۴]، روش المان محدود معکوس [۵]، تئوری شکل‌دهی ایده‌آل [۶]، ردیابی المان محدود رو به عقب [۷] و غیره از جمله روش‌های متعلق به طرح رترو- مارچینگ هستند. با این حال از آنجا که در این طرح امکان جبران خطای شکل، یعنی اختلاف بین شکل مورد نظر نهایی و شکل تغییر شکل یافته با تجزیه و تحلیل المان محدود (بدست آمده از شکل اولیه پیش‌بینی شده)،

وجود ندارد، روش‌های مذکور دقت‌های محدودی را ارائه می‌دهند. در روش تکرار شونده، منحنی شکل ورق اولیه با در نظر گرفتن خطای شکل تا زمانی که شکل تغییر شکل یافته روی شکل نهایی مورد نظر منطبق شود، مکرراً اصلاح می‌شود. روش حساسیت [۸] و روش بردار شعاع [۱] متعلق به این دسته هستند. از آنجا که این طرح‌ها دقت عالی و همگرایی مناسبی را ارائه می‌دهند، می‌توان آن‌ها را برای پیش‌بینی ورق اولیه بهینه اشکال پیچیده در فرآیندهایی از جمله مهرزنی و کشش عمیق بکار برد.

در زمینه بهینه‌سازی ابعاد اولیه ورق، تحقیقات محدودی انجام گرفته است. شیم^۳ و همکاران [۱]، از روش آنالیز حساسیت برای بهینه‌سازی شکل ورق اولیه استفاده کردند. محققان یاد شده جهت بررسی روش ارائه شده، بهینه‌سازی ابعاد اولیه ورق برای قطعات با سطح مقطع مربعی، شبدر مانند و L شکل را مورد بررسی قرار دادند.

پادمانابان^۴ و همکاران [۹]، جهت رسیدن به شکل بهینه اولیه ورق، تاثیر ناهمسانگردی را مورد مطالعه قرار دادند و یک فرآیند تکراری را با استفاده از سه نرم‌افزار برای بهینه‌سازی، مورد استفاده قرار دادند که بر مبنای یک سطح اولیه نرزی^۵ پایه‌گذاری شده است. در ادامه محققان بهینه‌سازی ابعاد اولیه ورق، یک فنجان مربعی را بر اساس الگوریتم انجام دادند. بوستان شیرین و همکاران [۱۰]، یک تکنیک ترسیمی جدید را با در نظر گرفتن موقعیت میانی در کشش عمیق چند مرحله‌ای، مورد بررسی قرار دادند. این محققان، از روش جدید نگاشت برای پیدا کردن موقعیت گره در مراحل میانی و تکنیک آشکارسازی برای پیدا کردن موقعیت گره در ورق استفاده کردند. روش پیشنهادی، یک سیستم معادلات بدون مشکل همگرایی است. در مرحله اول، یک فرایند طراحی دو مرحله‌ای با یک فنجان دایره‌ای تجزیه و تحلیل شده، نتایج بدست آمده با نتایج آزمون تجربی مقایسه شده است. همچنین به منظور به کارگیری این شیوه در قطعات غیر متقارن، فرآیند شکل‌دهی چند مرحله‌ای یک فنجان مربعی مورد بررسی قرار گرفته که مطابقت قابل قبولی مشاهده شده است.

³ Shim⁴ Padmanabhan⁵ Pegada¹ Stamping² Retro marching

برای قطعه دو پله و با هدف حذف فلنج اضافی از اطراف ورق، ابعاد منحنی هدف با در نظر گرفتن ابعاد قطعه شکل داده شده نهایی (۹۵*۷۵ میلی‌متر)، بدون نیاز به برش فلنج اضافی پس از شکل‌دهی در نظر گرفته شد. در این بررسی، با توجه به استفاده از فرآیند هیدروفرمینگ در انجام عملیات شکل‌دهی و با در نظر گرفتن اهمیت شعاع ماتریس در شکل‌دهی ورق، ابعاد کانتور هدف می‌بایستی به اندازه ابعاد ماتریس بعلاوه شعاع ماتریس در نظر گرفته شود. در این پژوهش، ابعاد منحنی هدف با طول و عرض به ترتیب، ۱۰۰ و ۸۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. شکل ۱، فلوجارت بهینه‌سازی ابعاد اولیه ورق را نشان می‌دهد. با توجه به فلوجارت بهینه‌سازی، با تعیین شدن منحنی هدف، یک ورق اولیه حدس زده می‌شود. با حدس زدن ابعاد اولیه ورق، شبیه‌سازی در نرم افزار آباکوس انجام می‌شود و در انتهای فرآیند شکل‌دهی، فرآیند تغییر شکل به روش المان محدود، تجزیه و تحلیل می‌شود و میزان انحراف همه گره‌ها نسبت به منحنی هدف به دست آورده می‌شود. در شکل ۲، مسیر جابجایی یک نود در طول فرآیند کشش نشان داده شده است؛ اگر پس از تجزیه و تحلیل، بردار موقعیت x روی منحنی هدف XT منطبق نشود، موقعیت آن نقطه مادی قبل از تغییر شکل X باید به منظور ایجاد منحنی شکل یافته 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. در این بررسی، تعداد ۶۰ گره با فاصله مساوی در محیط ورق مشخص شده (تعداد گره‌ها در محیط ورق ۱۲۰ گره بوده) و کلیه محاسبات در نرم‌افزار اکسل صورت گرفته است. در نهایت، منحنی جدید ورق بهینه شده با توجه به مختصات بدست آمده به کمک نرم‌افزار طراحی رسم و دوباره به نرم‌افزار آباکوس ارسال گردید. پس از اصلاح شکل ورق، تجزیه و تحلیل فرآیند تغییر شکل تا رسیدن مقدار خطای انحراف از منحنی هدف، به مقدار تعیین شده در هر گره خارجی، مجدداً تکرار می‌شود [۸]. در پایان مراحل بهینه‌سازی، منحنی ورق شکل یافته و منحنی نهایی روی هم منطبق می‌شوند. در این بررسی، تعداد ۶۰ گره با فاصله مساوی در محیط ورق مشخص شده (تعداد گره‌ها در محیط ورق ۱۲۰ گره بوده) و کلیه محاسبات در نرم‌افزار

هاشمی و همکاران [۱۱]، یک نگرش متفاوت را برای تخمین پارامترهای فرآیند هیدروفرمینگ لوله، مورد بررسی قرار دادند. این محققان از روش المان محدود همراه با نمودار حد شکل‌دهی مبتنی بر فشار شکل‌دهی استفاده کردند. در این تحقیق، از روش مدل‌سازی به همراه محاسبات در فضای دو بعدی بجای فضای سه‌بعدی که معمولاً در هیدروفرمینگ لوله کاربرد داشته، استفاده شده است. در پایان، این نتیجه حاصل شد که استفاده و تفسیر نمودار حد شکل‌دهی مبتنی بر فشار شکل‌دهی، راحت‌تر از تشکیل نمودار حد مبتنی بر تنش است. در ادامه، نتایج تجزیه و تحلیل نمونه بالچ شده معمولی و مربعی با برخی از داده‌های تجربی مقایسه و نتایج به دست آمده توسط نرم افزار تجاری نشان می‌دهد که فشار مایع تخمین زده شده توسط این روش، ۲.۷٪ بیشتر از نتایج به دست آمده توسط آزمون در نمونه بالچ شده مربعی است. علاوه بر این، فشار مایع در نمونه معمولی، ۵.۶٪ بیشتر از نتایج تجربی است. یگادا^۴ و همکارانش [۱۲]، پدیده گوشواره‌ای شدن آلایاز آلومینیوم ۲۰۴۸ را بر اثر خاصیت ناهمسانگردی در قطعات فنجانی شکل، مورد بررسی قرار دادند. شکل اولیه ورق، دایره در نظر گرفته شد و از نرم‌افزار LS-DYNA3D برای شبیه‌سازی فرآیند کشش عمیق استفاده شد. با استفاده از این الگوریتم، آن‌ها در ابتدا فرآیند را شبیه‌سازی کردند. پس از مشخص کردن منحنی هدف، میزان انحراف هر گره از منحنی هدف به دست آورده می‌شود و میانگین این مقادیر، به عنوان خطا ثبت می‌شود. سپس با استفاده از یک ضریب که مقدار آن به صورت دلخواه انتخاب می‌شود، جای هر گره از ورق تغییر شکل نیافته، تغییر می‌یابد و شبیه‌سازی مجدداً تکرار می‌شود تا مقدار خطا کمتر از مقدار مورد نظر گردد.

۲- بهینه‌سازی ابعاد ورق اولیه

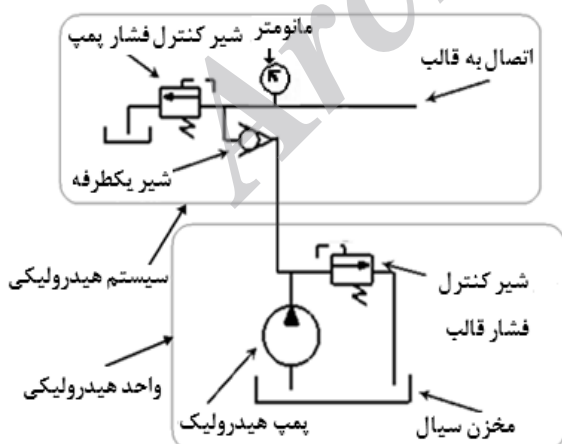
بهینه‌سازی ابعاد اولیه ورق با هدف کاهش چروکیدگی و نازک‌شدگی دیواره‌ها، بهبود جریان مواد و افزایش کیفیت قطعه تولیدی انجام می‌شود. تعیین شکل بهینه اولیه ورق به دلیل پیچیدگی رفتار مواد، بسیار مشکل است. در این پژوهش، بهینه‌سازی ابعاد اولیه ورق در طی چند مرحله به روش آنالیز حساسیت، مورد بررسی قرار گرفت. به منظور تعیین منحنی هدف، در ابتدا با توجه به هندسه تعریف شده

است. در شکل ۳، پرس هیدرولیکی مورد استفاده نشان داده شده است. کنترل دستگاه هنگام انجام آزمایش‌ها، توسط واحد کامپیوتری متصل به آن انجام می‌شود.

برای تنظیم فشار داخل مخزن، از یک مدار هیدرولیکی استفاده شده است. این مدار هیدرولیکی، از یک شیر کنترل فشار جهت تنظیم فشار نهایی، یک فشارسنج جهت نشان دادن مقدار فشار داخل لوله، یک شیر یک طرفه، سه راهی و اتصالات هیدرولیکی تشکیل می‌شود. شکل ۴، مدار هیدرولیکی استفاده شده را نشان می‌دهد. به دلیل استفاده از فرآیند هیدرودینامیکی در این پژوهش، از هیچ اوربیتی برای آب‌بندی استفاده نشده است؛ در نتیجه، از فاصله بین ورق گیر و ماتریس سیال خارج می‌شود.

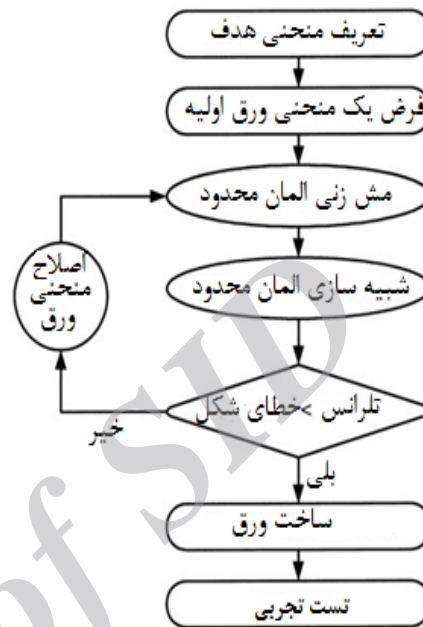


شکل ۳- پرس هیدرولیکی مورد استفاده

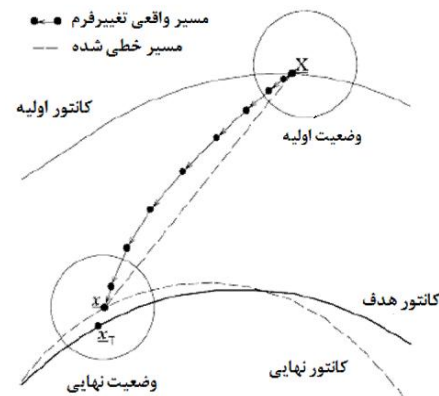


شکل ۴- مدار هیدرولیکی استفاده شده در آزمایش‌های تجربی

اکسل صورت گرفته است. در شکل ۲، مسیر جابجایی یک نود در طول فرآیند کشش نشان داده شده است.



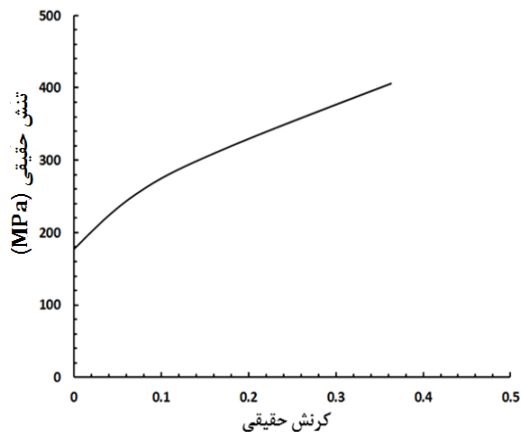
شکل ۱- فلوچارت بهینه‌سازی ابعاد اولیه ورق [۸]



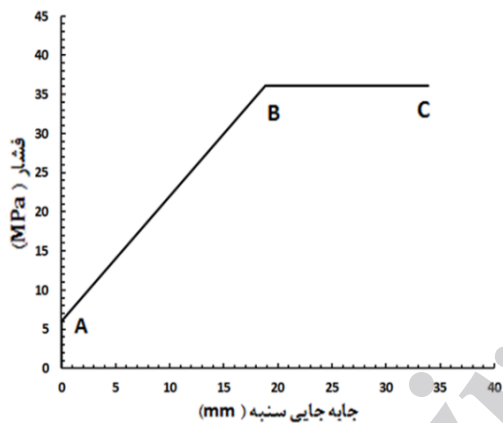
شکل ۲- مسیر جابجایی یک نود در طول فرآیند کشش [۸]

۳- شرایط آزمایشگاهی

یک دستگاه آزمایش اونیورسال هیدرولیکی DMG با ظرفیت ۶۰۰ کیلو نیوتن برای انجام آزمایش‌ها بکار گرفته شد. کلیه حرکات و تنظیمات این دستگاه، دارای قابلیت کنترل با کامپیوتر بوده، سرعت آن تا 200 mm.min^{-1} قابل تغییر است. آزمایش‌ها در سرعت 150 mm.min^{-1} انجام شده



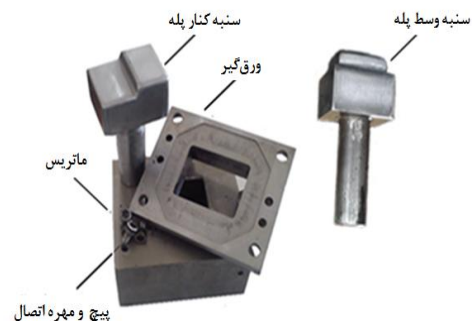
شکل ۶- نمودار تنش- کرنش حقیقی حاصل از آزمایش کشش



شکل ۷- مسیر فشار مورد استفاده در آزمایش‌ها و شبیه‌سازی

در این مقاله، دو هندسه از قطعات پله‌ای مورد مطالعه قرار گرفت. شماتیک این دو قطعه، در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، در قطعه (الف)، ارتفاع پله در وسط زیاد است و در کناره‌های قطعه، پله کوتاه‌تر ایجاد شده است. این قطعه از این پس، قطعه وسط پله نامیده می‌شود. به منظور بررسی یک قطعه با هندسه دو پله که دارای کاربرد صنعتی باشد، محفظه روغن خودرو (کارتز) به‌عنوان هندسه دوم انتخاب گردید. در شکل (ب)، هندسه محفظه روغن خودرو نشان داده شده است، پله سمت راست، دارای ارتفاع بیشتری است که در ادامه قطعه کنار پله نامیده می‌شود. در این شکل، دو قطعه مورد نظر به منظور بررسی دقیق‌تر ناحیه‌بندی شده، ابعاد هر قطعه نیز روی آن نشان داده شده است. در شکل ۹، نمونه قطعه وسط پله و کنار پله شکل داده شده در این شرایط، نشان داده شده است.

اجزای اصلی مجموعه قالب شامل سنبه، ماتریس و ورق‌گیر است. به منظور افزایش دقت همراستایی سنبه و ورق‌گیر، از راهنما استفاده شده که روی ورق‌گیر نصب شده است. در شکل ۵، مجموعه قالب استفاده شده در انجام مراحل آزمایشگاهی نشان داده شده است. جنس ورق استفاده شده از فولاد St ۱۳ است که مشخصات و خواص آن در جدول ۱ آمده است. در شکل ۶، نمودار تنش- کرنش حاصل از آزمایش‌ها و شبیه‌سازی نشان داده شده است. با توجه به مقدار ناچیز بدست آمده برای ضریب ناهمسانگردی، ورق به صورت همسانگرد در نظر گرفته شده است. ابعاد اولیه ورق در انجام آزمایش و شبیه‌سازی، $۱۵۲ * ۱۵۰$ میلی‌متر با ضخامت $۱/۵$ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی شکل‌پذیری قطعات پله‌ای، از مسیر فشار نشان داده شده در شکل ۷ استفاده شده است. با توجه به نمودار نشان داده شده در شکل، بخش OA فشار پیش‌بشکه‌ای است که توسط واحد هیدرولیک ایجاد می‌شود، AB، مسیر فشار تا رسیدن به حداکثر فشار و CD مسیر فشار در مرحله دوم را نشان می‌دهد. شیب خط AB با سرعت سنبه، شکل سنبه، نوع سیال و ضخامت ورق مربوط می‌شود.



شکل ۵- مجموعه قالب استفاده شده در آزمایش

جدول ۱- خواص مکانیکی و فیزیکی ورق فولادی St ۱۳

مقدار	مشخصه
۱۱۶	استحکام تسلیم (MPa)
۸۷۵۰	چگالی (kg/m^3)
۲۱۰	مدول الاستیسیته (GPa)
۰/۳۳	ضریب پواسون
۰/۴۴	توان کرنش سختی (n)
۱/۰۴	ناهمسانگردی (جهت نود درجه)
۱	ناهمسانگردی (جهت صفر درجه)

بعدی استفاده شده است. با توجه به تقارن طولی و عدم تقارن عرضی قطعه، فقط یک دوم مجموعه قالب و ورق جهت شبیه‌سازی، مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور اعمال فشار شعاعی به لبه ورق، ورق به صورت شکل‌پذیر^۲ و مجموعه مجموعه قالب به صورت صلب گسسته^۳ در نظر گرفته شده است. برای تعریف تماس اجزا از تماس سطح به سطح^۴ و قید تماسی بین سطوح در تماس با یکدیگر، از نوع قید جنبشی^۵ تعریف شد. برای بیان رفتار اصطکاکی، از مدل اصطکاکی کولمب^۶ و شرایط تماسی پنالتی^۷ برای سطوح استفاده شده است. در تعریف تماس بین ورق و اجزای قالب، از تماس سطح به سطح^۸ استفاده شده است. در قسمت تعیین مشخصات سطوح در تماس، از مدل اصطکاکی کولمب استفاده شده است. بر اساس مرجع [۱۳]، ضریب اصطکاک بین سنبه و ورق، 0.15 در نظر گرفته شده است. در آغاز شکل‌دهی به دلیل اعمال سیال به زیر ورق، ورق با ورق‌گیر تماس داشته، با ادامه شکل‌دهی و حرکت سنبه به سمت پایین، ورق با ناحیه شعاع ورودی محفظه و دیواره قالب تحت تماس قرار می‌گیرد؛ در نتیجه برای این سطوح تماس مطابق مرجع [۱۳]، ضریب اصطکاک 0.04 تعریف می‌شود. در شبکه بندی، ورق نوع المان هشت گره‌ای^۹ انتخاب شد. تعداد المان ورق در امتداد ضخامت چهار است. ابزارها صلب و نوع المان ابزارها، از نوع چهارگره‌ای^{۱۰} است. در جدول ۲، مشخصات ابعادی قالب مورد استفاده برای قطعه کنار پله و قطعه وسط پله نشان داده شده است. شکل ۱۰، مدل مونتاژ شده قالب-های شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد.

جدول ۲- مشخصات ابعادی قالب قطعات دو پله

ابعاد ماتریس (mm)	شعاع ماتریس (mm)	فاصله گپ (mm)	لقی ورق‌گیر و ماتریس (mm)
۹۵*۷۵	۴	۱/۷۵	۲۵

² Deformable

³ Discrete rigid

⁴ Surface to Surface

⁵ Kinematic Contact method

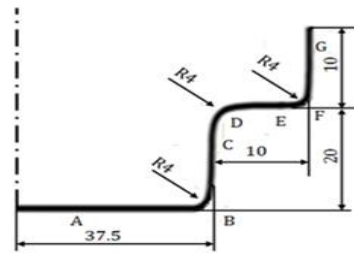
⁶ Colomb

⁷ Penalty

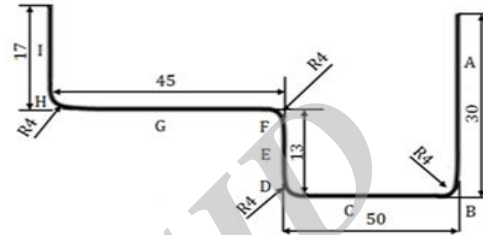
⁸ surface to surface

⁹ C3D8R

¹⁰ R3D4



الف



ب

شکل ۸- ناحیه‌بندی قطعات دو پله، الف) قطعه وسط پله، ب) قطعه کنار پله (محفظه روغن خودرو)



الف)



ب)

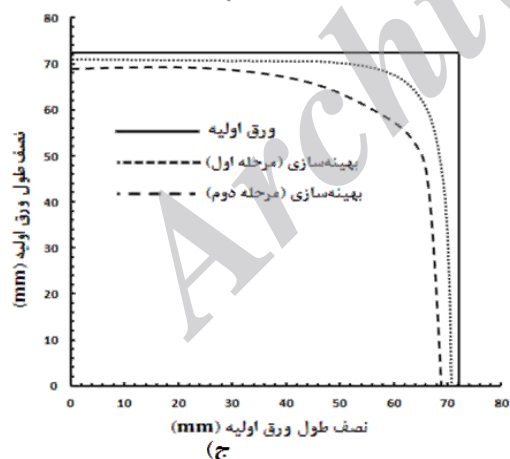
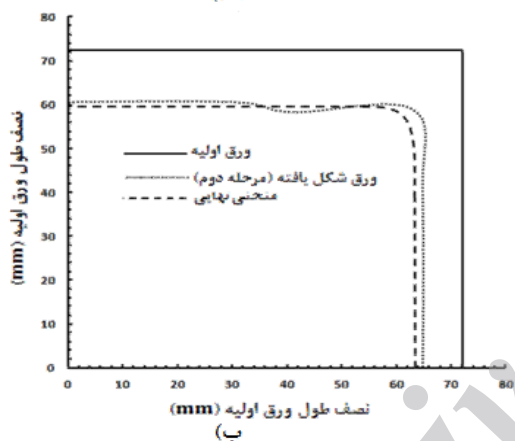
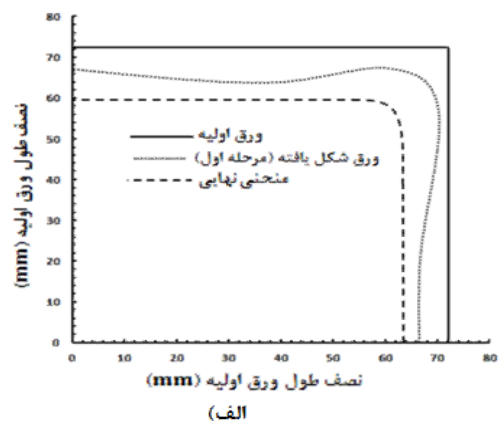
شکل ۹- الف) قطعه وسط پله، ب) قطعه کنار پله، شکل داده شده بترتیب در فشار ۳۵ و ۴۰ MPa، در مرحله اول بهینه‌سازی

۳- شبیه‌سازی فرآیند

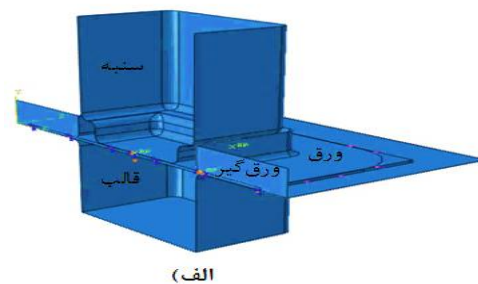
در این تحقیق، مدل‌سازی فرآیند کشش عمیق توسط نرم‌افزار آباکوس^۱ انجام شده است. به منظور افزایش دقت، از مدل

¹ Abaqus

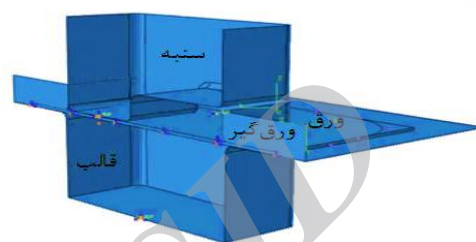
بررسی قرار گرفت و ناحیه فلنچی بدست آمده با منحنی نهایی مقایسه شده است.



شکل ۱۱- منحنی های بدست آمده از ورق اولیه در مراحل بهینه‌سازی قطعه وسط پله، الف و ب) ورق اولیه شکل یافته در مرحله اول و دوم بهینه‌سازی ج) منحنی ورق اولیه در مراحل بهینه‌سازی



(الف)



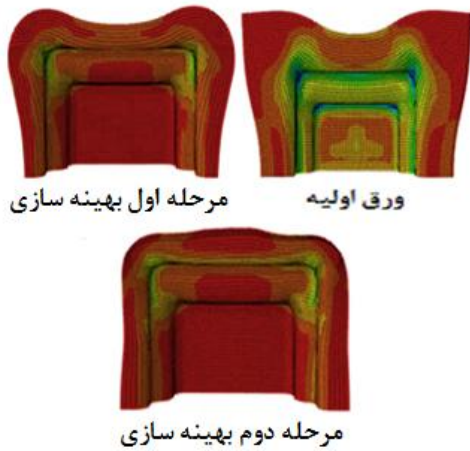
(ب)

شکل ۱۰- مدل مونتاژ شده اجزای قالب الف) قطعه کنار پله، ب) قطعه وسط پله

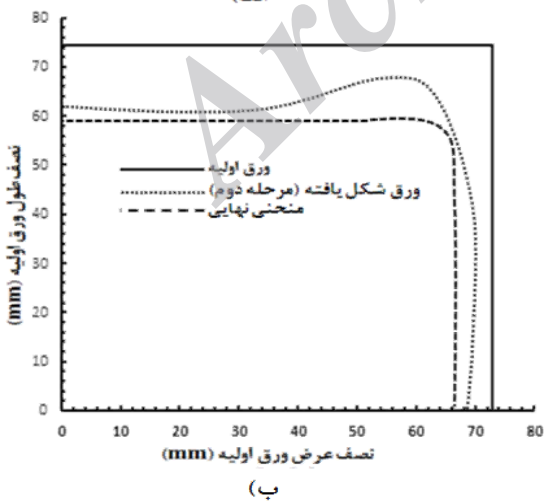
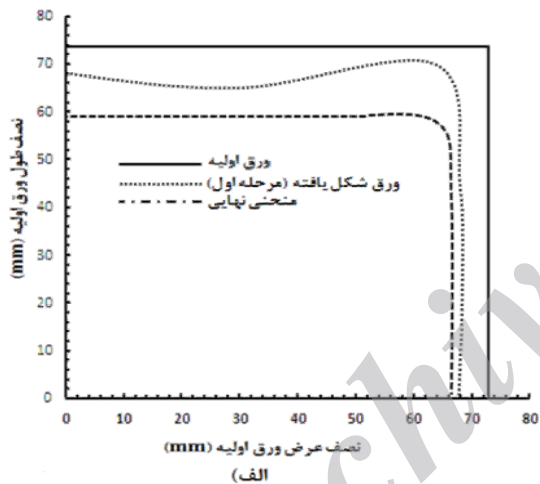
۴- بحث و بررسی نتایج

۴-۱- مراحل بهینه‌سازی ابعاد ورق اولیه

در شکل‌دهی قطعات مستطیلی پله‌ای، با توجه به مقطع اولیه ورق و وجود گوشه‌های تیز، تنش در این نواحی متمرکز و هنگام شکل‌دهی ورق، ماده در این ناحیه جریان نیافته، پرشدگی قالب به طور کامل ایجاد نمی‌شود. بدین منظور بهینه‌سازی، راهکار مناسب برای رفع مشکل مذکور است. در انجام شبیه‌سازی، مقدار فشار پیشنهادی سیال برای شکل‌گیری قطعه وسط پله و کنار پله بترتیب، ۳۵ و ۴۰ MPa بدست آمد. در ابتدا به منظور انجام مراحل شبیه‌سازی و تجربی، ورق اولیه با ابعاد ۱۵۲*۱۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. با انجام مراحل شبیه‌سازی فرآیند مطابق با ورق اولیه بهینه‌سازی شده، به منظور درست آزمایی نتایج حاصل از شبیه‌سازی، چند مرحله آزمایش تجربی با ورق بهینه‌سازی شده در هر مرحله انجام گرفت. با انجام مراحل آزمایش تجربی، مطابقت قابل قبولی با اختلاف حداکثر ۸ درصد بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایش تجربی بدست آمد. در شکل ۱۱، منحنی‌های بدست آمده ورق اولیه در مراحل بهینه‌سازی قطعه وسط پله طی دو مرحله، نشان داده شده است. با انجام هر مرحله بهینه‌سازی، شبیه‌سازی قطعه با ورق بدست آمده مورد



شکل ۱۳- قطعه وسط پله بدست آمده از شبیه‌سازی (الف)
ورق اولیه (ب) مرحله اول بهینه‌سازی (ج) مرحله دوم بهینه‌سازی



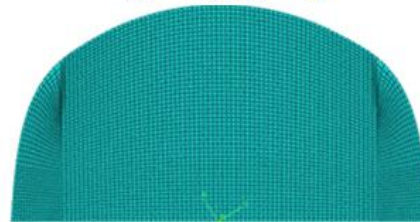
در شکل های ۱۲ و ۱۳ بترتیب، ورق اولیه بهینه‌سازی شده برای قطعه وسط پله طی دو مرحله و قطعه شکل داده شده از مراحل بهینه‌سازی نشان داده شده است. با انجام مراحل بهینه‌سازی قطعه وسط پله، با به‌کارگیری روش اصلاح حساسیت و با توجه به هندسه تعریف شده برای قطعه کنار پله در طی سه مرحله، ابعاد ورق اولیه اصلاح گردیده، منحنی نهایی روی منحنی هدف منطبق گردید. شکل ۱۴، منحنی-های بدست آمده از ورق اولیه در مراحل بهینه‌سازی قطعه کنار پله در طی سه مرحله را نشان می‌دهد. در شکل های ۱۵ و ۱۶ بترتیب، ورق اولیه بهینه‌سازی شده برای قطعه کنار پله در طی سه مرحله و قطعه بدست آمده از مراحل بهینه‌سازی نشان داده شده است.



ورق اولیه

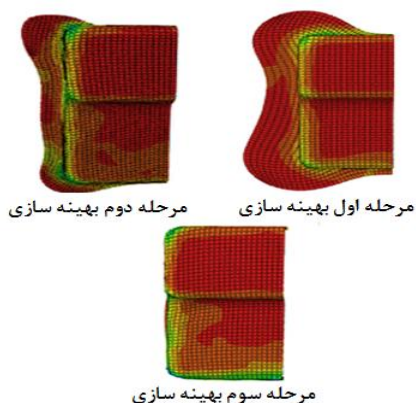


مرحله اول بهینه سازی



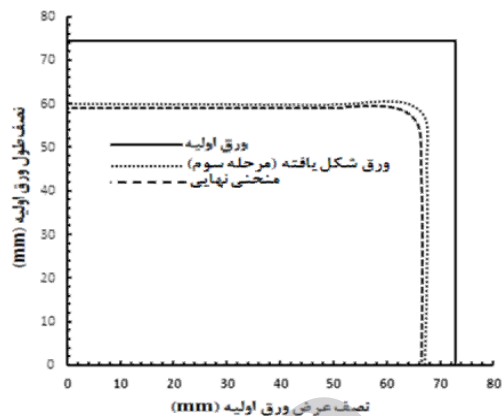
مرحله دوم بهینه سازی

شکل ۱۲- ورق‌های اولیه بدست آمده قطعه وسط پله، (الف)
ورق اولیه قبل از بهینه‌سازی، (ب) مرحله اول بهینه‌سازی، (ج)
مرحله دوم بهینه‌سازی

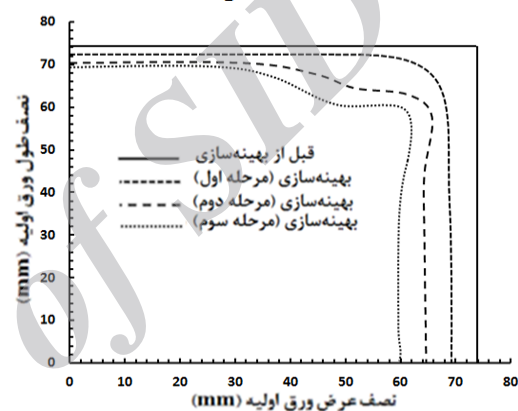


شکل ۱۶- قطعه وسط پله بدست آمده در مراحل بهینه‌سازی (الف) (مرحله اول بهینه‌سازی ب) (مرحله دوم بهینه‌سازی ج) (مرحله سوم بهینه‌سازی)

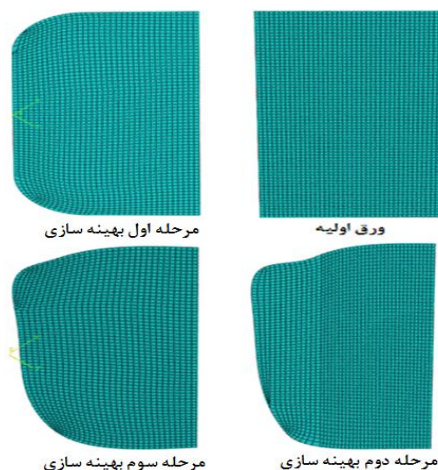
۲-۴- بررسی تاثیر بهینه‌سازی بر روی توزیع ضخامت یکی از مزیت‌های مهم بهینه‌سازی، توزیع ضخامت یکنواخت- تر در نواحی بحرانی است. با انجام بهینه‌سازی فرآیند، تاثیر بهینه‌سازی ابعاد اولیه ورق روی توزیع ضخامت قطعه وسط پله و کنار پله به صورت شبیه‌سازی و تجربی، مورد بررسی قرار گرفت. در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ بترتیب، نمودارهای تاثیر بهینه‌سازی ابعاد اولیه ورق روی توزیع ضخامت در قطعه وسط پله و کنار پله نشان داده شده است. با توجه به نمودار- های بدست آمده، در ناحیه‌های کف پله‌های اول و دوم (ناحیه‌های A و E در شکل ۸-الف) و (ناحیه‌های C و G در شکل ۸-ب)، با توجه به اعمال فشار سیال در زیر ورق، سنبه با ورق در تماس بوده، نازک‌شدگی در مراحل مختلف بهینه- سازی و قبل از آن ناچیز است. در سه ناحیه شعاع گوشه سنبه (ناحیه‌های B، D و F در شکل ۸-الف و ناحیه‌های B، D، F و H در شکل ۸-ب)، بدلیل خمش کششی^۱ ایجاد شده در ناحیه شعاع خم، نازک‌شدگی حداکثر است؛ اما با بهینه- سازی ابعاد اولیه ورق، بدلیل کاهش مقدار تنش در گوشه‌ها حداکثر نازک‌شدگی در نواحی مذکور کاهش می‌یابد. با انجام مراحل بهینه‌سازی، مقدار نازک‌شدگی در ناحیه شعاع سنبه در قطعه وسط پله و کنار پله بترتیب، به اندازه ۴ و ۸ درصد



(ج)

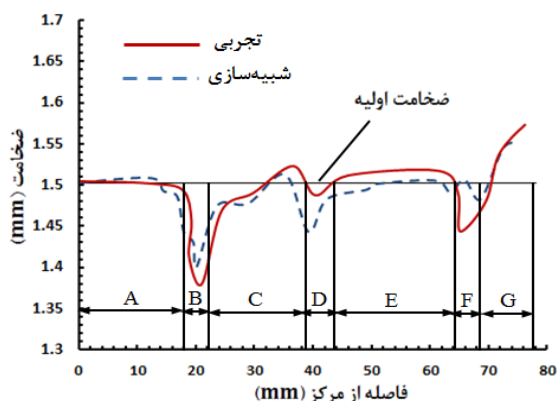


شکل ۱۴- منحنی‌های ورق اولیه در مراحل بهینه‌سازی قطعه وسط پله الف و ب) ورق اولیه شکل یافته در مرحله اول و دوم بهینه‌سازی ج) منحنی ورق اولیه در ورق اولیه در مراحل بهینه‌سازی

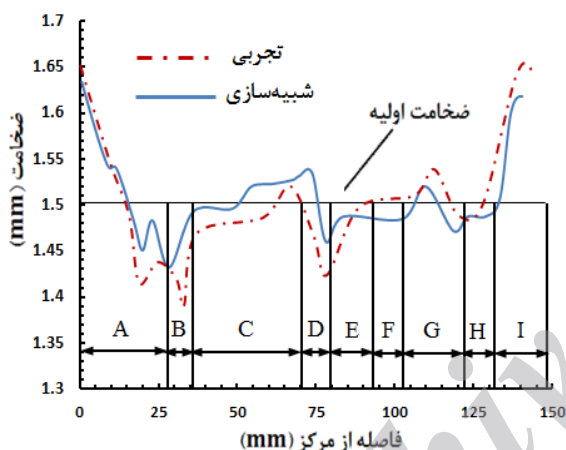


شکل ۱۵- ورق‌های اولیه بدست آمده قطعه کنارپله، (الف) ورق اولیه قبل از بهینه‌سازی ب) (مرحله اول بهینه‌سازی ج) (مرحله دوم بهینه‌سازی)

² Tensile bend



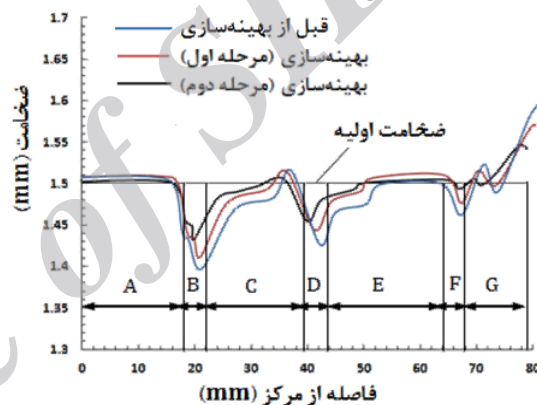
شکل ۱۹- نمودار مقایسه توزیع ضخامت بدست آمده از آزمایش تجربی و شبیه‌سازی در قطعه وسط پله، در فشار ۳۵ MPa



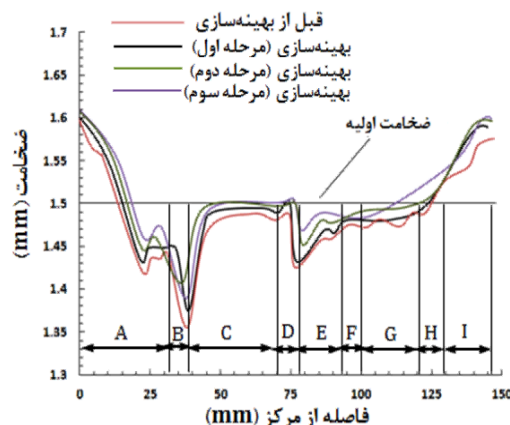
شکل ۲۰- نمودار مقایسه توزیع ضخامت بدست آمده از آزمایش تجربی و شبیه‌سازی در قطعه کنار پله، در فشار ۴۰ MPa

به منظور بررسی تاثیر بهینه‌سازی روی فشار بیشینه شکل‌دهی، تغییرات توزیع ضخامت قطعه نهایی در فشارهای مختلف در قطعه وسط پله و کنار پله، مورد بررسی قرار گرفت. شکل‌های ۲۱ و ۲۲ بترتیب، نمودارهای تاثیر فشار شکل‌دهی روی توزیع ضخامت قطعه وسط پله و کنار پله با ابعاد ورق اولیه بهینه شده را نشان می‌دهد. با توجه به اصلاح مواد اضافی در گوشه‌ها و افزایش جریان مواد، با افزایش فشار، به دلیل افزایش سطح تماس که موجب اصطکاک بیشتر ورق با سطح سنبه می‌شود، سرخوردگی ورق روی سنبه و به دنبال آن کشیدگی ورق کاهش می‌یابد. با کاهش کشیدگی ایجاد شده، کشش در نواحی بحرانی دیواره پله بیشتر می‌شود و حداکثر نازک‌شدگی کاهش می‌یابد. با توجه به نمودار،

کاهش یافت. در ناحیه دیواره بین دو پله (ناحیه‌های C و G در شکل ۸- الف) و (ناحیه‌های A و E در شکل ۸- ب)، با جابجایی سنبه، بدلیل کشیدگی ایجاد شده، نازک‌شدگی افزایش می‌یابد؛ اما میزان کشیدگی در ناحیه دیواره پله اول، (ناحیه C در شکل ۸- الف و ناحیه A در شکل ۸- ب) بدلیل کرنش بالاتر بیشتر است. با انجام مراحل بهینه‌سازی، حداکثر نازک‌شدگی در ناحیه مذکور در قطعه وسط پله و کنار پله بترتیب، ۳ و ۴ درصد کاهش می‌یابد. شکل‌های ۱۹ و ۲۰ بترتیب، مقایسه نمودار توزیع ضخامت بدست آمده از آزمایش تجربی و شبیه‌سازی، با ورق اولیه بهینه‌سازی شده برای قطعه وسط پله در فشار ۳۵ MPa و قطعه کنار پله در فشار ۴۰ MPa را نشان می‌دهد.



شکل ۱۷- نمودار تاثیر بهینه‌سازی ابعاد اولیه ورق روی توزیع ضخامت در قطعه وسط پله، در فشار ۳۵ MPa، بدست آمده از شبیه‌سازی



شکل ۱۸- نمودار تاثیر بهینه‌سازی ابعاد اولیه ورق روی توزیع ضخامت در قطعه کنار پله، در فشار ۴۰ MPa، بدست آمده از آزمایش تجربی

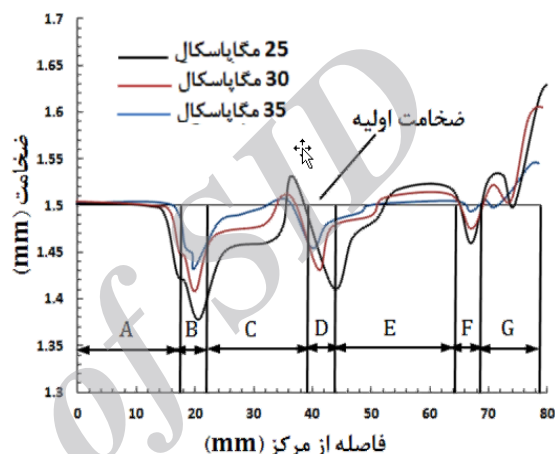
۴-۳- بررسی تاثیر بهینه‌سازی روی فشار سیال

از جمله پارامترهای تاثیرگذار در شکل‌دهی به روش هیدروفورمینگ، فشار سیال است. در این مقاله با توجه به انجام بهینه‌سازی ابعاد اولیه ورق و به دنبال آن کاهش تمرکز تنش که منجر به سهولت جریان مواد در نواحی بحرانی خواهد شد، تاثیرات بهینه‌سازی روی حداکثر فشار بیشینه، مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۲۳، نمودار تاثیر بهینه‌سازی روی حداکثر فشار بیشینه شکل‌دهی، نشان داده شده است. همانطور که از شکل مشاهده می‌شود، با انجام مراحل بهینه‌سازی، بدلیل جریان راحت‌تر مواد و کشیدگی کمتر ورق در نواحی بحرانی، کشش قالب است و به دنبال آن فشار شکل‌دهی مورد نیاز برای انجام فرآیند و شکل‌گیری قطعه کاهش می‌یابد که این روند برای هر دو هندسه تعریف شده از قطعات پله‌ای یکسان است؛ همچنین ملاحظه می‌شود که پس از انجام اولین مرحله بهینه‌سازی، 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 نیست و در حدود ۴ درصد است. همانطور که بیان شد، دلیل کاهش بیشتر در مرحله اول، کاهش تنش حاصل از حذف گوشه‌های تیز است. در شکل ۲۴، قطعه وسط پله و کنار پله بدست آمده با ورق بهینه‌سازی شده، نشان داده شده است.

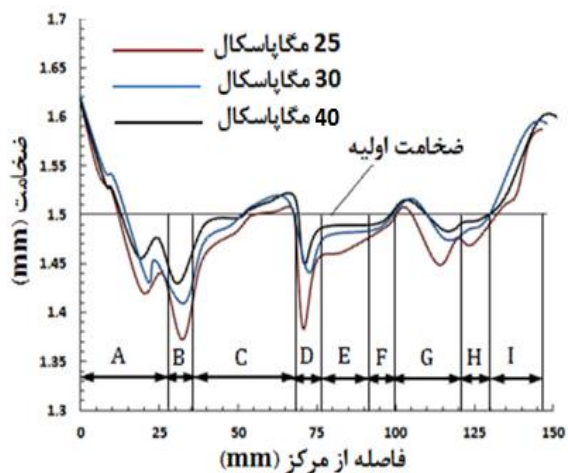


شکل ۲۳- نمودار تاثیر بهینه‌سازی روی فشار بیشینه در قطعه وسط پله و کنار پله، بدست آمده از شبیه‌سازی

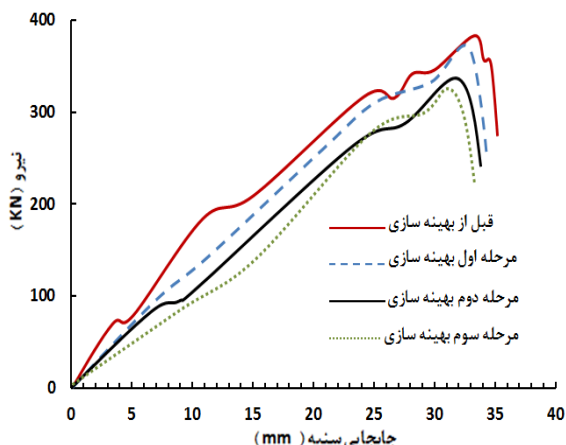
مشاهده می‌شود با افزایش فشار، حداکثر نازک‌شدگی در نواحی بحرانی شعاع سنبه (ناحیه‌های B، D و F در شکل ۸- الف و ناحیه‌های B، D، F و H در شکل ۸- ب) و دیواره پله (ناحیه‌های A و E در شکل ۸- الف و ناحیه‌های C و G در شکل ۸- ب) بیشتر می‌شود. در ناحیه دیواره پله دوم (ناحیه G در شکل ۸- الف و ناحیه E در شکل ۸- ب) بدلیل کشش کمتر، تغییرات توزیع ضخامت در فشارهای مختلف یکنواخت است.



شکل ۲۱- نمودار تاثیر فشار بیشینه شکل‌دهی روی توزیع ضخامت قطعه وسط پله، با ورق اولیه بهینه‌سازی شده، بدست آمده از آزمایش تجربی



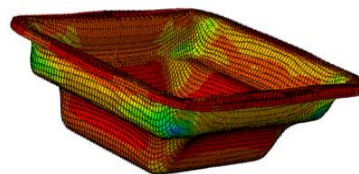
شکل ۲۲- نمودار تاثیر فشار بیشینه شکل‌دهی روی توزیع ضخامت قطعه کنار پله با ورق اولیه بهینه‌سازی شده، بدست آمده از آزمایش تجربی



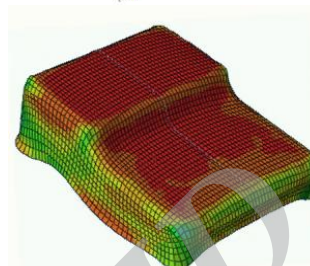
شکل ۲۶- نمودار نیرو و سنبه بر حسب جابجایی قطعه کنار پله، فشار ۴۰ MPa، در مراحل بهینه سازی، بدست آمده از آزمایش تجربی

۵- نتیجه گیری

- در این مقاله با استفاده از روش حساسیت، بهینه سازی ابعاد اولیه ورق در تولید قطعات ورقی دو پله از جمله قطعه کنارپله (کارت ر خودرو) مورد بررسی قرار گرفت که یک قطعه با کاربرد صنعتی است. در پایان در طی چند مرحله، اصلاح ناحیه فلنچی ورق، منحنی شکل یافته و منحنی نهایی بهینه سازی شده روی هم منطبق شدند.
- با انجام بهینه سازی ابعاد اولیه ورق، نازک شدگی در نواحی بحرانی شعاع سنبه و دیواره پله کاهش می یابد. حداکثر کاهش نازک شدگی به اندازه ۸ درصد بدست آمد.
- با بررسی تاثیر بهینه سازی روی حداکثر فشار شکل دهی، مشخص گردید که با انجام بهینه سازی، بدلیل کاهش مقدار تنش در نواحی اطراف فلنج که ناشی از حذف گوشه های تیز از اطراف ورق است، فشار بیشینه مورد نیاز شکل دهی، به اندازه ۱۰ درصد است که قابل توجه است.
- با بررسی تغییرات نیروی سنبه در طی مراحل مختلف بهینه سازی مشاهده گردید که در هر مرحله بهینه سازی، مقدار حداکثر نیروی سنبه کاهش می یابد. در این بررسی با انجام مراحل بهینه سازی، نیروی بیشینه، حداکثر به مقدار ۲۴ درصد در قطعه وسط پله کاهش یافت.



(الف)

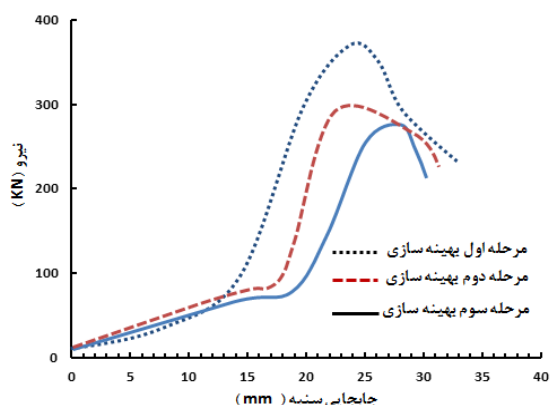


(ب)

شکل ۲۴- قطعات پله ای شکل داده شده با ورق اولیه اصلاح شده به روش حساسیت، (الف) قطعه وسط پله (ب) قطعه کنارپله

۴-۴ تاثیر بهینه سازی بر روی نیرو سنبه

در شکل های ۲۵ و ۲۶ به ترتیب، نمودار تاثیر بهینه سازی ابعاد اولیه ورق روی نیروی سنبه، نشان داده شده است. مشاهده می شود که با انجام مراحل بهینه سازی، بدلیل افزایش جریان مواد و چسبندگی بیشتر ورق به سنبه و همچنین کاهش کشیدگی که موجب افزایش کشش ورق در گوشه ها می شود، حداکثر نیروی مورد نیاز کاهش می یابد. با توجه به نمودارهای نشان داده شده، مقدار کاهش نیرو با انجام مراحل بهینه سازی برای قطعه وسط پله به اندازه ۲۴ درصد و در قطعه کنارپله، ۱۷ درصد کاهش یافت.



شکل ۲۵- نمودار نیرو و سنبه بر حسب جابجایی قطعه وسط پله، فشار ۳۵ MPa، در مراحل بهینه سازی، بدست آمده از آزمایش تجربی

blank shape prediction for sheet metal components having doubly-curved surfaces, *Int. J. Prod. Res.*, 33:993-1005.

- [13] Zhang S.H, Jensen M.R, Danckert J, Nielsen K.B, Lang L.H, Kang D.C, (2000) analysis of the mechanical deep drawing of cylindric cups, *Journal of Materials Processing Technology*, 103:367-373.

۶- مراجع

- [1] Shim H. B, (2004) Determination of optimal blank shape by the radius vector of boundary nodes, *Engineering Manufacture*, 218:1099-1111.
- [2] Gloeckl H, Lange K, (1983) Computer aided design of blanks for deep drawn irregular shaped components, *In Proceedings of the 11th North American Manufacturing Research Conference (NAMRC), Madison, Wisconsin*, 24: 243-251.
- [3] Blount G. N, Fischer V. B, (1995) Computerized blank shape prediction for sheet metal components having doubly-curved surfaces, *Int. J. Prod. Res.*, 33:993-1005.
- [4] Kim D. H, Lee J. M, Park S. H, Yang D. Y, Kim Y. H, (1997) Blank design system for sheet forming, *J. Korean Soc. Tech. Plasticity*, 6: 400-407.
- [5] Azizi R, Assempour A, (2008) Applications of Linear inverse finite element method in prediction of the optimum blank in sheet metal forming, *Materials & Design*, 29:1965-1972.
- [6] Barlat F, Chung K, Richmond O, (1994) Anisotropic plastic potentials for polycrystals and application to the design of optimum blank shapes in sheet forming, *Metall. Mater. Trans. A*, 24: 1209-1216.
- [7] Kim S, Park M, Kim S, Seo D, (1998) Blank design and formability for non-circular deep drawing processes by the finite-element method, *Journal of Materials Processing Technology*, 75: 94-99.
- [8] Hyunbo S, Kichan S, Kwanghee K, (2000) Optimum blank shape design by sensitivity analysis, *Materials Processing Technology*, 104: 191-199.
- [9] Padmanabhan R, Oliveira M, Baptista A, Alves J Menezes L, (2000) Optimum blank shape Design by sensitivity analysis, *Materials Processing Technology*, 104: 191-199.
- [10] M. Bostan shirin, A. Assempour, (2014) A new mapping technique to consider intermediate stages in multistep deep drawing, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 228 no. 9 1557-1569.
- [11] R. Hashemi, M. Bostan Shirin, M. Einolghozati, A. Assempour, (2014), A different approach to estimate the process parameters in tube hydroforming, *International Journal of Material Forming*, DOI 10.1007/s12289-014-1175-x
- [۱۲] Blount G. N, Fischer V. B, (1995) Computerized