

بررسی و تحلیل تأثیر پارامترهای شکل دهی در فرآیند هیدروفورمینگ ورق*

بهرز زارع^(۱) محمد بخش^(۲) عبدالحمید گرجی^(۳) سلمان نوروزی^(۴)

چکیده هدف این مقاله توسعه‌ی یک روش اصولی برای مطالعه و تحلیل تأثیر پارامترهای شکل دهی روی کیفیت شکل‌پذیری قطعات و تخمین ترکیب بهینه‌ی این پارامترها در فرآیند هیدروفورمینگ ورق می‌باشد. در این مقاله، تأثیر پارامترهای کلیدی شکل دهی هم‌چون فشار سیال محفظه‌ی شکل دهی، ضریب اصطکاک سطح تماس سنبه و ورق، فاصله‌ی بین سطح لبه محیطی قالب با سطح ورق‌گیر و شعاع ورودی قالب در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی مورد بحث قرار گرفته است. ابتدا مدل اجزای محدود برای شبیه‌سازی فرآیند ایجاد گردید و نشان داده شد که مدل توسعه‌داده‌شده مطابقت خوبی با نتایج تجربی دارد. سپس، با استفاده از ترکیب روش اجزای محدود و تکنیک تاگوچی به‌همراه تحلیل واریانس تأثیر پارامترهای نام‌برده‌شده بر قطعات شکل‌داده‌شده از دو جنس مس خالص و فولاد St14 مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که برای هر دو حالت بیش‌ترین نازک‌شدگی در یک عمق کشش ثابت و بیش‌ترین عمق کشش قابل دست‌یابی، فشار سیال بیش‌ترین تأثیر را بر شکل‌پذیری قطعه‌کار در فرآیند هیدروفورمینگ ورق دارد. هم‌چنین با استفاده از سنبه‌ی خشن‌تر، فاصله‌ی بین سطح لبه‌ی محیطی قالب با سطح ورق‌گیر کم‌تر و شعاع ورودی بزرگ‌تر شرایط شکل دهی به‌تر خواهد شد.

واژه‌های کلیدی کشش عمیق هیدرودینامیکی؛ روش اجزای محدود؛ تکنیک تاگوچی؛ تحلیل واریانس

Analysis of Forming Parameters in Sheet Hydro-Forming Process

B. Zareh M. Bakhshi A.H. Gorji S. Nourouzi

Abstract The aim of this paper is to develop a systematic method to analyze the effects of forming parameters on the quality of part formability and determine the optimal combination of the forming parameters for the sheet hydroforming process. In this paper, the effects of four important process parameters namely fluid pressure, friction coefficient at blank/punch interface, gap between die rim block and blank holder and die entrance radius in the process of hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure (HDDRP) were determined. A Finite Element (FE) model was developed for simulating the HDDRP process. After validation of the developed FE model by experimental results, by combining FE simulation with Taguchi method and using the analysis of variance test, the effect of mentioned parameters on the formability of the hydroformed cups was investigated. The applied materials were pure copper and St14 steel sheets. The results of analysis indicated that for both cases of maximum thinning ratio at the constant value of cup draw depth and maximum accessible draw depth, fluid pressure has the greatest influence on the formability of part in sheet hydroforming process. Moreover, using rough punch, having smaller gap between die rim block and blank holder or increasing the die entrance radius, the formability of sheet will improve.

Key Words Hydrodynamic deep drawing; Finite element simulation; Taguchi technique; Analysis of variance.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۱/۱/۱۶ و تاریخ پذیرش آن ۹۱/۹/۲۱ می‌باشد.

(۱) دانش آموخته‌ی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل.

(۲) نویسنده‌ی مسؤول: استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل.

(۳) استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل.

(۴) استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل.

مقدمه

با گسترش و توسعه‌ی صنعت اتومبیل‌سازی و هوا و فضا، نیاز به تولید قطعاتی که هندسه‌ی پیچیده دارند و استفاده از آلیاژهای سبک افزایش یافته است. هیدروفرمینگ ورق یکی از روش‌های پیشرفته‌ای است که قابلیت تولید قطعات با هندسه‌ی پیچیده و از آلیاژهای سبک را تسهیل کرده است. در مقایسه با کشش عمیق معمولی، فرآیند هیدروفرمینگ ورق دارای مزایای زیادی هم‌چون نسبت کشش بالا، قابلیت شکل دهی قطعات پیچیده، دقت ابعادی بالا، کیفیت سطحی به‌تر و هزینه‌ی ابزار پایین می‌باشد [1-4]. اگرچه این فرآیند مزایای زیاد و چشم‌انداز کاربردی فراوانی دارد، اما استفاده از سیال به‌عنوان واسطه شکل دهی، منجر به پیچیدگی بالای این فرآیند گردیده است و در مقایسه با کشش عمیق معمولی، تعداد پارامترهای بیش‌تری رفتار شکل‌پذیری ورق را در فرآیند هیدروفرمینگ تحت تأثیر قرار می‌دهند. در صورتی که این پارامترها به‌طور مناسبی انتخاب نشوند، ورق دچار عیوبی هم‌چون چروکیدگی یا پارگی خواهد شد. بنابراین، برای به‌دست آوردن قطعات با کیفیت مطلوب، مطالعه‌ی دقیق و آگاهی از میزان تأثیر هر یک از پارامترها بر رفتار شکل‌پذیری ورق فلزی امری ضروری می‌باشد.

در سال‌های اخیر مطالعات زیادی بر فرآیند هیدروفرمینگ و پارامترهای مؤثر بر آن انجام گرفته است. هسو و همسیه [5] روابطی را برای پیدا کردن مکان هندسی دو فشار بحرانی و به‌دست آوردن محدوده‌ی کاری ارائه دادند و تأثیر توان کارسختی و ضریب ناهمسان‌گردی را بر نمودارهای حد بالایی و پایینی فشار به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. ال-سبای و ملر [6] نشان دادند که برای به‌دست آوردن بالاترین نسبت کشش فشار سیال بالا مورد نیاز است، البته فشار بیش از حد می‌تواند منجر به پارگی ورق در ناحیه‌ی ورودی قالب گردد. ژانگ و همکاران

[7] نشان دادند که فشار پیش بشکه‌ای بر توزیع ضخامت قطعه‌کار تأثیر دارد و از چروکیدگی آن جلوگیری می‌کند. لی و همکاران [8] برای افزایش نسبت کشش، فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی مستقل را پیشنهاد دادند. آنان با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود، تأثیر مسیر فشارهای مختلف را بر توزیع ضخامت و کیفیت قطعات شکل‌داده‌شده مورد بررسی قرار دادند.

با این وجود، تمامی تحقیقات ارائه‌شده به بررسی مجزای پارامترها پرداخته‌اند و لازم است که تأثیر پارامترهای مختلف بر رفتار شکل‌پذیری ورق فلزی در فرآیند هیدروفرمینگ ورق به‌صورت هم‌زمان مورد ملاحظه قرار گیرد. هم‌چنین، بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند می‌تواند بر اساس میزان تأثیر و درجه‌ی اهمیت هر پارامتر بر خواص نهایی قطعه‌کار صورت گیرد. هدف این مقاله، توسعه‌ی یک روش اصولی برای مطالعه و تحلیل تأثیر پارامترهای شکل دهی بر کیفیت شکل‌پذیری قطعات و به‌دست آوردن ترکیب بهینه‌ی این پارامترها در فرآیند هیدروفرمینگ ورق می‌باشد. در این مقاله، با به‌کارگیری شبیه‌سازی اجزای محدود و تکنیک تاگوچی به‌همراه تحلیل واریانس (ANOVA) میزان تأثیر و درجه‌ی اهمیت پارامترهای کلیدی شکل دهی هم‌چون فشار سیال محفظه‌ی شکل دهی، ضریب اصطکاک سطح تماس سنبه و ورق، فاصله‌ی بین سطح لبه‌ی محیطی قالب با سطح ورق‌گیر و شعاع ورودی قالب در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی مورد بحث قرار گرفته است. مدل اجزای محدود فرآیند شکل دهی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS 6.7.1 ایجاد گردیده است. مدل اجزای محدود بعد از تأیید درستی و مطابقت آن با نتایج تجربی برای انجام آزمایش‌ها طراحی شده توسط آرایه‌ی متعامد تاگوچی مورد استفاده قرار گرفته است. به‌منظور به‌دست آوردن میزان تأثیر و درجه‌ی

[9,10].

هدف این مقاله، بررسی تأثیر پارامترهای شکل‌دهی بر شکل‌پذیری ورق در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی برای به‌دست آوردن قطعات با کیفیت نهایی به‌تر می‌باشد. برای رسیدن به این هدف، ابتدا پارامترهای شکل‌دهی و مشخصه‌های ارزیابی انتخاب‌شده و آرایه‌ی استاندارد مناسب تاگوچی ایجاد گردیده است. مدل اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS 6.7.1 ایجاد گردیده است. بعد از اثبات تجربی درستی مدل توسعه‌داده‌شده، شبیه‌سازی‌ها بر اساس آزمایش‌های طراحی‌شده توسط آرایه‌ی استاندارد تاگوچی اجرا گردیده‌اند. در ادامه نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها به نسبت‌های S/N (سیگنال به نویز) تبدیل شده و برای مشخص کردن پارامترهای مهم تأثیرگذار، آنالیز آماری واریانس (ANOVA) بر نتایج به‌دست آمده اجرا گردیده است. بدین ترتیب، می‌توان پارامترهایی را که تأثیر عمده‌ای بر کیفیت نمونه‌ی شکل‌داده‌شده دارند، شناسایی کرد و هم‌چنین ترکیب بهینه‌ای را از پارامترهای مورد مطالعه به‌دست آورد. به‌منظور بررسی و مطالعه‌ی جامع‌تر، روند فوق بر قطعات شکل‌داده‌شده با ورق‌های از دو جنس مس خالص و فولاد St14 پیاده‌سازی گردیده است.

روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار

شعاعی

کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی یکی از روش‌های جدید هیدروفورمینگ ورق می‌باشد که برای شکل‌دهی سرد قطعات با نسبت کشش بالا و از جنس‌های با شکل‌پذیری پایین، مورد توجه زیادی قرار گرفته است. در شکل (۱-الف) روش کشش عمیق هیدرودینامیکی معمولی نشان داده شده است. روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی، تنها با

اهمیت هر یک از پارامترها و ترکیب بهینه‌ی پارامترها نتایج شبیه‌سازی‌ها به‌عنوان ورودی برای آنالیز واریانس (ANOVA) استفاده شده‌اند.

اصول و روش کار

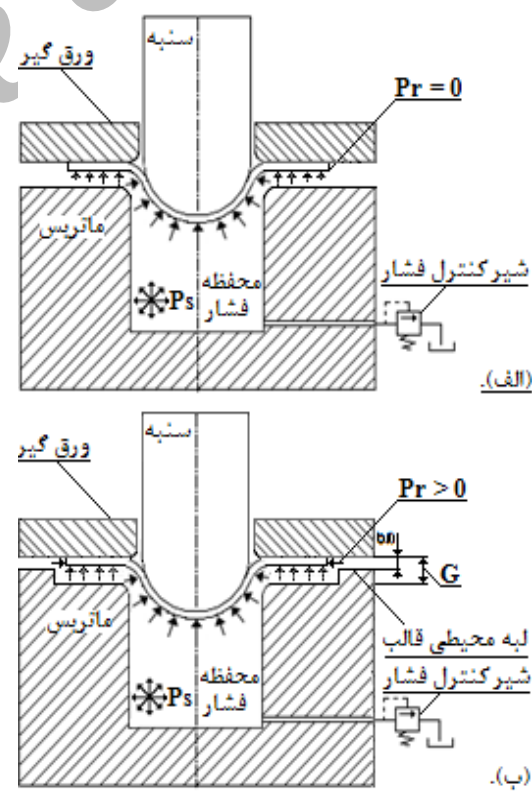
در مسایل مهندسی، به علت بالابودن تعداد پارامترهای مؤثر، طرح‌ریزی آزمایش‌ها با در نظر گرفتن تمامی فاکتورها به‌همراه سطوح متناظر با آن‌ها، منجر به بالا رفتن تعداد ترکیبات و شرایط آزمایشی ممکن می‌شود و در نتیجه هزینه‌ها را افزایش می‌دهد. برای کاهش تعداد آزمایش‌ها، روش مرسوم استفاده از آزمایش‌های فاکتوریلی جزئی است. تاگوچی مجموعه‌ی ویژه‌ای از طرح‌های کلی برای آزمایش‌های فاکتوریلی ایجاد کرده است. آرایه‌های متعامد استاندارد جزئی از این طراحی‌ها می‌باشد. استفاده از آرایه‌های متعامد منجر به کم‌شدن تعداد آزمایش‌های لازم می‌گردد، در حالی که هم‌چنان می‌توان بیش‌ترین اطلاعات را از نتایج آزمایش‌ها استخراج کرد. برای رسیدن به کیفیت مطلوب محصول، تاگوچی فرآیند سه مرحله‌ای را پیشنهاد کرد که شامل طراحی سیستم‌ها، طراحی پارامتر و طراحی تolerانس می‌باشد. طراحی سیستم‌ها شامل به‌کارگیری علوم و اطلاعات مهندسی برای تولید یک محصول می‌باشد. در پایان این مرحله، پارامترهای مهم شناسایی می‌شود و سطوح کاری مناسبی برای هر یک از آن‌ها تعیین می‌گردد. در مرحله‌ی طراحی پارامتر، سطوح بهینه‌ی هر پارامتر که باعث به‌ترین عملکرد از محصول/فرآیند می‌شوند تعیین می‌گردند. شرایط بهینه طوری انتخاب می‌شوند که تأثیر فاکتورهای غیرقابل کنترل باعث حداقل تغییرات در عملکرد سیستم و کیفیت محصولات خروجی گردد. در مرحله‌ی طراحی تolerانس، در اثر محدود کردن تolerانس فاکتورهایی که تأثیر عمده‌ای بر خواص نهایی محصول دارند، می‌توان کیفیت محصول را افزایش داد

با توجه به مزایای قابل توجه فرآیند فوق و هم‌چنین به دلیل این که این فرآیند شامل پارامترهای تأثیرگذار بیش‌تری نسبت به سایر فرآیندهای هیدروفرمینگ ورق می‌باشد، در این مقاله از روش فوق برای پیاده‌سازی روند ارائه‌شده در بخش پیشین استفاده شده است.

انتخاب پارامترها و ایجاد آرایه‌ی استاندارد

به‌طور کلی سه نوع تقسیم‌بندی برای پارامترهای تأثیرگذار بر روی شکل‌پذیری ورق در فرآیند هیدروفرمینگ وجود دارد که عبارتند از پارامترهای هندسی، پارامترهای مواد و پارامترهای فرآیندی. از میان پارامترهای فوق بر اساس مراجع [12,13] برای یک ماده‌ی مشخص، پارامترهای مواد هم‌چون توان کرنش سختی، نسبت تنش اسمی و نسبت ناهمسان‌گردی تأثیر خیلی کمی بر روی شکل‌پذیری ورق در مقایسه با پارامترهای هندسی و پارامترهای فرآیندی دارند. به‌علاوه، در بیش‌تر موارد برای یک قطعه‌کار خاص، انعطاف‌پذیری بسیار کمی در تغییر پارامترهای ماده وجود دارد. بنابراین، در این مقاله مطالعه‌ی پارامترهای هندسی و پارامترهای فرآیندی مورد توجه قرار گرفته است. از جمله پارامترهای فرآیندی و هندسی که فرآیند هیدروفرمینگ ورق را تحت تأثیر قرار می‌دهند می‌توان به فشار محفظه‌ی سیال، فشار پیش‌بشکه‌ای، شرایط اصطکاکی بین ورق و اجزای مختلف قالب، شعاع ورودی قالب، شعاع ورودی ورق‌گیر، ضخامت ورق و غیره اشاره کرد. هم‌چنین همان‌طور که در بخش‌های قبلی بیان شد، در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی و در نتیجه محدود کردن فاصله‌ی بین سطح لبه‌ی قالب و ورق‌گیر (g)، یک فشار شعاعی بر لبه‌های ورق حین شکل‌دهی اعمال می‌شود. بنابراین، اندازه‌ی این فاصله نیز می‌تواند با تحت تأثیر قرار دادن میزان فشار شعاعی اعمال‌شده بر لبه‌های ورق، شکل‌پذیری ورق را تحت

اعمال اندک تغییرات بر فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی معمولی به‌دست آمده است. همان‌طور که از شکل (۱-ب) می‌توان مشاهده کرد، در این روش ورق توسط سنبه به داخل محفظه‌ی قالب که پر از سیال است، کشیده می‌شود و هم‌زمان سیال فشرده‌شده‌ی ورق را به سطح سنبه می‌چسباند. ضمن حرکت سنبه به سمت پایین، سیال از فاصله‌ی بین لبه‌ی کناری قالب و ورق‌گیر (g) به سمت بیرون جریان می‌یابد، اما به علت این که این فاصله به دلیل ایجاد یک لبه محیطی بر روی قالب خیلی کوچک است، نشت سیال را به سمت بیرون به تأخیر می‌اندازد و جریان سیال باعث ایجاد یک فشار شعاعی بر لبه‌های ورق می‌گردد. ایجاد این فشار شعاعی تفاوت این روش با روش کشش عمیق هیدرودینامیکی معمولی می‌باشد [11].



شکل ۱- الف کشش عمیق هیدرودینامیکی معمولی ب- کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی

هم انتخاب شده است به طوری که، در ابتدا معیار عمومی بیشترین نسبت نازک‌شدگی برای یک عمق کشش ثابت مورد استفاده قرار گرفته است و آزمایش‌ها برای یک عمق کشش ثابت اجرا گردیده‌اند و بیشترین نسبت نازک‌شدگی در نواحی بحرانی اندازه‌گیری شده است.

جدول ۱ پارامترهای فرآیندی و هندسی و سطوح متناسب هر یک از پارامترها

سطوح			پارامتر
3	2	1	
30.0	20.0	10.0	F ₁ : فشار شکل‌دهی P (MPa)
0.20	0.14	0.08	F ₂ : ضریب اصطکاک μ
0.10	0.05	0.00	F ₃ : گپ g (mm)
5.00	4.00	3.00	F ₄ : شعاع ورودی قالب (mm)



شکل ۲ نمونه‌ای از عیوب ایجادشده در آزمایش‌ها تجربی انجام‌شده در این پژوهش
(الف- عیوب چروکیدگی ب- عیوب پارگی)

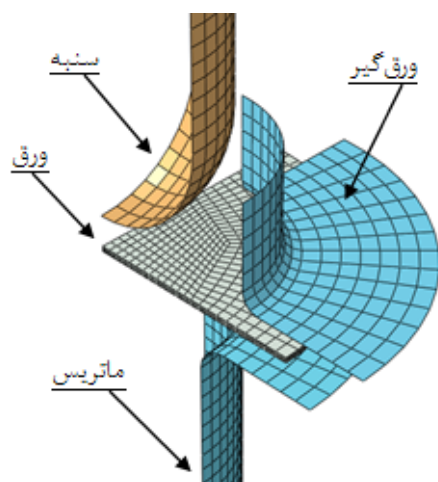
تأثیر قرار دهد. از این رو، در این مقاله پارامتر فوق به همراه سه پارامتر فشار سیال محفظه‌ی شکل‌دهی (P)، ضریب اصطکاک سطح تماس سنبه و ورق (μ) و شعاع ورودی قالب (R) به‌عنوان پارامترهای ورودی برای طراحی آزمایش‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند. پارامترهای مورد ارزیابی به‌همراه سطوح انتخاب‌شده برای هر یک از آن‌ها در جدول (۱) نشان داده شده است. سطوح در نظر گرفته شده برای پارامترهای فوق بر اساس پنجره‌ی فرآیند می‌باشد و دامنه‌ی کلی فاکتورها به گونه‌ای انتخاب شده است که قطعات شکل‌داده‌شده عاری از هر گونه عیوب نشان‌داده‌شده در شکل (۲) باشند. به‌عنوان مثال در جدول (۱) سطح اول انتخاب‌شده برای پارامتر فشار (فشار ۱۰ MPa) حداقل فشار نهایی لازم برای شکل‌دهی قطعه‌کار سالم (بدون عیب چروکیدگی) در آزمایش‌های تجربی می‌باشد. یا به‌عنوان مثالی دیگر، سطوح انتخابی برای پارامتر ضریب اصطکاک به‌صورتی است که اصطکاک کم‌ترین مقدار ممکن ($\mu=0.08$) تا شرایط اصطکاک خشک ($\mu=0.20$) تغییر می‌کند. برای مطالعه‌ی اثرات چهار فاکتور در سه سطح $3^4 = 81$ ترکیب ممکن از موقعیت‌های آزمایشی وجود خواهد داشت، اما با استفاده از آرایه‌ی متعامد استاندارد تاگوچی (L-9)، که برای طراحی آزمایش با داشتن چهار فاکتور با سه سطح کاری مناسب است می‌توان تعداد موقعیت‌های آزمایشی را به عدد ۹ کاهش داد. آرایه‌ی متعامد (L-9) همراه با مکان فاکتورها و سطوح انتخابی آن‌ها در جدول (۲) آمده است که ستون اول شماره‌ی آزمایش و ستون‌های بعدی سطح هر یک از فاکتورها را برای هر یک از موقعیت‌های آزمایشی نشان می‌دهد.

به‌منظور بررسی تأثیر پارامترهای فوق، قطعات استوانه‌ای - نیم‌کروی از ورق‌های از جنس مس خالص و فولاد St14 با استفاده از فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی شکل‌دهی گردیده‌اند. برای اندازه‌گیری کیفیت شکل‌دهی، دو معیار مجزا از

جدول ۲ آرایه متعامد استاندارد تاگوچی (L-9)

پارامتر				شماره آزمایش
R (mm)	g (mm)	μ	P (MPa)	
1	1	1	1	1
2	2	2	1	2
3	3	3	1	3
3	2	1	2	4
1	3	2	2	5
2	1	3	2	6
2	3	1	3	7
3	1	2	3	8
1	2	3	3	9

تک محوره در سه راستا انجام گردید. نتایج حاصل از این آزمون جهت تعیین خواص مکانیکی و رفتار ناهمسان گردی ورق های فوق مورد استفاده قرار گرفت. خواص مکانیکی به دست آمده از این آزمون در جدول (۳) آمده است.



شکل ۳ مدل اجزای محدود ایجاد شده در نرم افزار

جدول ۳ مشخصات مکانیکی و فیزیکی مواد

پارامتر	مس خالص	فولاد St14
مدول الاستیسیته E (GPa)	117	210
ضریب پواسون ν	0.32	0.30
استحکام تسلیم σ (MPa)	116	175
توان کرنش سختی n	0.44	0.36
ناهمسان گردی نرمال \bar{R}	1	1.53
چگالی ρ (Kg/m ³)	8940	7850

بر اساس نتایج به دست آمده از آزمایش ها این نتیجه حاصل شد که ورق های مسی رفتار همسان گردی در هر سه راستای اندازه گیری نسبت به جهت نورد دارند، در حالی که برای ورق های St14 ضرایب ناهمسان گردی مطابق مقادیر ارائه شده در جدول (۴) به دست آمد. در نرم افزار ABAQUS امکان معرفی مستقیم ضرایب ناهمسان گردی وجود ندارد [15].

نسبت نازک شدگی به صورت زیر تعریف می شود [12]:

$$\text{Thinning ratio (\%)} = \frac{t_0 - t_1}{t_0} \times 100 \quad (1)$$

بار دوم بیشترین عمق کشش قابل دستیابی به عنوان مشخصه ارزیابی انتخاب شده است و آزمایش ها یک بار دیگر برای رسیدن به بیشترین عمق کشش قابل دستیابی تکرار گردیده اند.

شبیه سازی اجزای محدود

شبیه سازی فرآیند کشش عمیق هیدرو دینامیکی با فشار شعاعی با استفاده از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS 6.7.1 انجام گرفته است. شکل (۳) مدل اجزای محدود ایجاد شده را نشان می دهد. به علت تقارن فقط ۱/۴ ورق و تجهیزات مدل سازی شده است. به صورت تغییر شکل پذیر مدل شده و برای مش بندی آن از المان های C3D8R استفاده گردیده است. جنس ورق های مورد استفاده در آزمایش ها و شبیه سازی، مس خالص و فولاد St14 با ضخامت یک میلی متر می باشد. به منظور تعیین خواص مکانیکی ورق های مورد استفاده، طبق استاندارد ASTM E8M (2008) نمونه هایی در سه راستای مختلف (0° ، 45° و 90°) نسبت به جهت نورد ورق ها آماده سازی شده است و آزمون کشش

$$P_r = \frac{6\eta Q}{\pi g^3} \ln\left(\frac{R}{a}\right) \quad (2)$$

در این رابطه Q جریان سیال، η ویسکوزیته سیال و g فاصله‌ی بین سطح لبه‌ی محیطی قالب با سطح ورق گیر می‌باشد. هم‌چنین R شعاع خارجی و a شعاع داخلی لبه‌ی محیطی قالب می‌باشد که در شکل (۴) نشان داده شده‌اند. در معادله‌ی بالا فشار اعمال‌شده بر لبه‌های ورق با عکس توان سوم g رابطه دارد. بنابراین، با تغییرات جزئی در این پارامتر، فشار شعاعی دست‌خوش تغییرات فراوانی می‌شود. برای بررسی تأثیرات این پارامتر، سطوح انتخاب‌شده طوری تنظیم شده است که فرآیند از حالت فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار یک‌نواخت روی لبه‌های ورق (فشار شعاعی برابر با فشار محفظه‌ی سیال) تا حالت کشش عمیق هیدرودینامیکی معمولی (فشار شعاعی صفر) تغییر می‌کند. بدین ترتیب، آزمایش‌های طراحی شده می‌تواند سه فرآیند مختلف هیدروفورمینگ ورق را تحت پوشش قرار دهد. هم‌چنین برای مطالعه تأثیر فشار محفظه، سه مسیر فشار با فشارهای نهایی متفاوت انتخاب گردیده‌اند. با توجه به شکل (۴)، در طول فرآیند شکل‌دهی فشار سیال درون محفظه، فشار سیال در ناحیه فلانچ و فشار شعاعی اعمال‌شده به لبه‌ی ورق در هر لحظه تابعی از مختصات و زمان می‌باشند. بنابراین، امکان اعمال مستقیم آن‌ها در مدل ایجادشده اجزای محدود وجود نداشت. نرم‌افزار ABAQUS قابلیت ارتباط با نرم‌افزار فرترن را دارد. بنابراین، برای اعمال فشار سیال و تغییرات آن در سطح زیرین ورق و هم‌چنین تغییرات فشار شعاعی اعمال‌شده بر لبه‌ی ورق، زیر روال مرتبط با آن (VDLOAD) در نرم‌افزار فرترن نوشته شده است و هنگام اجرای شبیه‌سازی‌ها با مدل ایجاد شده توسط نرم‌افزار ABAQUS ترکیب می‌شود.

بنابراین، برای در نظر گرفتن ناهمسان‌گردی ورق در شبیه‌سازی، با توجه به تابع تسلیم هیل برای یک ماده‌ی ناهمسان‌گرد به جای نسبت‌های فوق از نسبت تنش‌های تسلیم ناهمسان‌گردی ارائه‌شده در جدول (۵) استفاده شده است. مقادیر ارائه شده در جدول (۵) براساس ضرایب ناهمسان‌گردی نشان داده شده در جدول (۴) به دست آمده‌اند. سایر تجهیزات به‌صورت صلب مدل شده‌اند و از المان‌های R3D4 برای مش‌بندی آن‌ها استفاده شده است. ضریب اصطکاک سطح تماس ورق با ورق گیر و هم‌چنین ورق با قالب، ۰/۰۵ فرض شده است. برای سطح تماس بین سنبه و ورق بر اساس سطح انتخاب‌شده در طراحی آزمایش‌ها، ضریب اصطکاک می‌تواند یکی از مقادیر ۰/۰۸، ۰/۱۴ و یا ۰/۲۰ باشد. نوع تماس بین ورق و سطوح قالب در شبیه‌سازی از نوع سطح‌به‌سطح انتخاب شده است.

جدول ۴ ضرایب ناهمسان‌گردی فولاد St14.

راستا	R0	R45	R90	R12
مقدار	1.36	1.78	1.22	1.53

یکی از مهم‌ترین پارامترها در شبیه‌سازی فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی، فشار محفظه و تغییرات آن در سطح زیرین ورق می‌باشد که در شکل (۴) نشان داده شده است. علاوه بر این، در فرآیند فوق، با تغییر میزان فاصله‌ی (gap) بین سطح لبه محیطی قالب و سطح ورق‌گیر مقدار فشار شعاعی اعمال‌شده بر لبه‌های ورق نیز تغییر می‌کند. معادله‌ی (۲) رابطه‌ی بین فشار شعاعی اعمال‌شده بر لبه‌های ورق با سایر پارامترهای قالب را نشان می‌دهد [15]:

جدول ۵ نسبت‌های تنش تسلیم فولاد St14.

ضرایب	R11	R22	R33	R12	R13	R23
مقدار	1	0.97	1.05	0.85	1	1

مهندسی می‌باشد. با توجه به رابطه‌ی (۵) کرنش مهندسی را می‌توان به کرنش حقیقی تبدیل کرد:

$$\varepsilon_{\theta} = \ln(1 + e_{\theta}) \quad (5)$$

با در نظر گرفتن اصل ثابت بودن حجم و با توجه به این که $\varepsilon_z = 0$ ، رابطه‌ی (۶) قابل دست‌یابی می‌باشد:

$$\varepsilon_{\theta} + \varepsilon_z + \varepsilon_t = 0 \Rightarrow \varepsilon_t = -\varepsilon_{\theta} \quad (6)$$

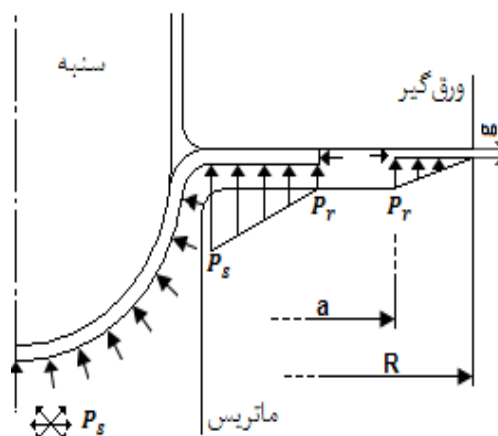
هم‌چنین حداکثر نازک‌شدگی از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$\% \text{thinning} = \frac{t_0 - t_f}{t_0} \quad (7)$$

با توجه به مقادیر ارائه‌شده در جدول (۳) و استفاده از روابط (۳-۷) حداکثر نازک‌شدگی مجاز برای ورق‌های مسی و فولاد St14 به ترتیب ۴۴٪ و ۳۹.۱۱٪ به‌دست آمده است.

مراحل آزمایشگاهی

برای انجام آزمایش‌ها، از یک دستگاه تست انیورسال DMG (Denison Mayers Group) با ظرفیت ۶۰۰KN استفاده شده است. این دستگاه در طول انجام آزمایش‌ها متصل به یک واحد کامپیوتری می‌باشد و تمامی عملیات دستگاه توسط آن واحد کنترل می‌شود. شکل (۵) دستگاه تست انیورسال، واحد هیدرولیکی و مجموعه قالب ساخته‌شده برای انجام آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. در طول فرآیند شکل‌دهی فشار سیال داخل محفظه در هر لحظه توسط یک شیر کنترل فشار الکترونیکی، کنترل می‌شود و به کامپیوتر متصل به آن بازخورد داده می‌شود. به این طریق می‌توان از درستی مسیر فشار اعمال‌شده اطمینان حاصل کرد. شکل (۶)



شکل ۴ الگوی رفتاری تغییرات فشار سیال در ناحیه‌ی فلانج با تغییرات فشار شعاعی

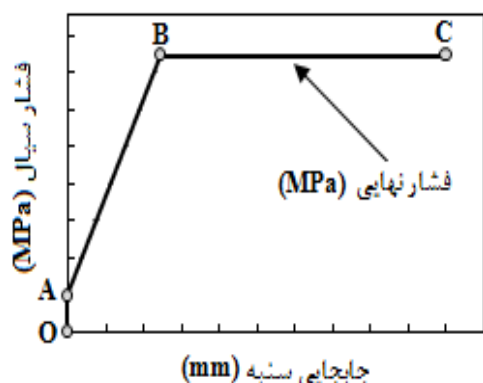
طبق مراجع [16,17] در این پژوهش نیز از حداکثر مقدار نازک‌شدگی t_f برای بررسی پارگی در قطعات شبیه‌سازی شده استفاده گردیده است. حداکثر مقدار نازک‌شدگی با استفاده از کرنش ضخامت در شرایط کرنش صفحه‌ای از دیاگرام حد شکل‌دهی به‌صورت رابطه‌ی (۳) به‌دست می‌آید [17]:

$$\varepsilon_t = \ln\left(\frac{t_f}{t_0}\right) \quad \text{یا} \quad t_f = t_0 \exp(\varepsilon_t) \quad (3)$$

در رابطه‌ی (۳)، t_0 ضخامت اولیه‌ی ورق و t_f ضخامت نهایی ورق در لحظه‌ی گلوئی می‌باشد. کرنش مهندسی اصلی، e_{θ} ، در شرایط کرنش صفحه‌ای توسط گروه تحقیقاتی کشش عمیق امریکای شمالی (North American Deep Drawing Research Group) به‌طور تقریبی به‌صورت رابطه‌ی (۴) به‌دست آمده است [17]:

$$e_{\theta} = \text{FLD}_0 = \left(23.3 + \frac{360}{25.4} t_0\right) \left(\frac{n}{0.21}\right) \quad (4)$$

که در آن FLD_0 کرنش مهندسی اصلی در شرایط کرنش صفحه‌ای، n نمای کرنش سختی و e_{θ} کرنش



شکل ۶ نمونه‌ای از مسیر فشار اعمال شده در آزمایش‌ها و شبیه‌سازی.

نمونه‌ای از مسیر فشار اعمال شده در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. در اجرای تمامی آزمایش‌ها این پژوهش از این منحنی فشار استفاده شده است. در این منحنی قسمت OA و AB برای تمامی آزمایش‌ها ثابت بود و تنها فشار نهایی (قسمت BC) بر حسب سطوح انتخاب شده برای پارامتر فشار (جدول ۲) تغییر می‌کرد. برای مطالعه‌ی تأثیر پارامترهای نام‌برده شده در بخش ۴، قطعات استوانه‌ای- نیم‌کروی از گرده‌هایی از جنس مس خالص و فولاد St14، با قطر اولیه ۸۰mm و ضخامت ۱mm، شکل داده شده‌اند. در شکل (۷) نمونه‌هایی از قطعات شکل داده شده در آزمایش‌ها نشان داده شده است. جنس سیال مورد استفاده در آزمایش‌ها روغن SAE 10 می‌باشد.



شکل ۷ قطعات شکل داده شده در آزمایش‌های تجربی (الف)- مس خالص، (ب)- فولاد St14

برای بررسی صحت نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود، توزیع ضخامت قطعات شکل داده شده در آزمایش‌ها با نمودار تغییرات ضخامت به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود برای هر دو جنس مورد بررسی با نتایج تجربی مطابقت خوب و قابل قبولی دارد. از این رو، مدل اجزای محدود ایجاد شده می‌تواند برای انجام آزمایش‌های نشان داده شده در جدول (۲) مورد استفاده قرار گیرد.



ورق گیر ورق سنبه محفظه سیال شیر کنترل فشار



شکل ۵ الف- دستگاه پرس و واحد هیدرولیکی مورد استفاده در آزمایش‌ها ب- مجموعه قالب ساخته شده

پارامترهایی که بیش‌ترین تأثیر را دارند، بر نتایج به‌دست آمده اجرا گردید.

آنالیز S/N. عموماً مشخصه‌ی ارزیابی می‌تواند یکی از سه مشخصه‌ی کیفی کوچک‌تر- به‌تر، بزرگ‌تر- به‌تر و مقدار اسمی- به‌تر باشد. در روش تاگوچی برای اندازه‌گیری انحراف مشخصه‌ی ارزیابی از مقدار مطلوب آن از نسبت S/N استفاده می‌گردد. نسبت S/N به‌صورت زیر تعریف می‌شود [9]:

$$S/N = -10 \log(\text{MSD}) \quad (8)$$

که در این رابطه MSD میانگین مربعات انحرافات از مشخصه‌ی کیفی می‌باشد.

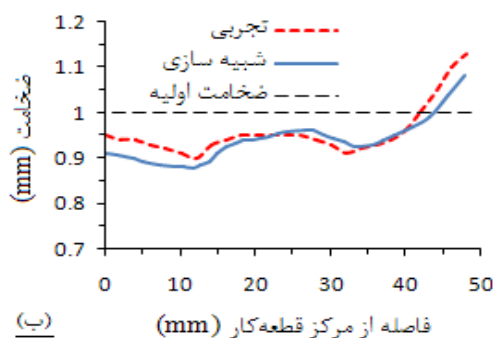
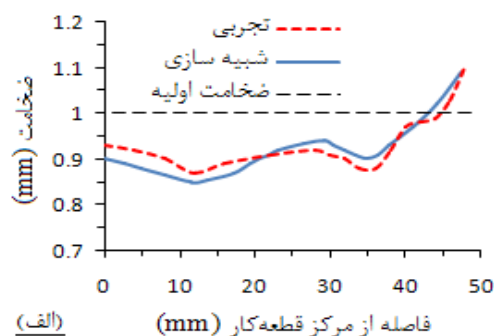
مشخصه‌ی ارزیابی بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی، مشخصه‌ی ارزیابی با تابع هدف کوچک‌تر- به‌تر می‌باشد. در حالی که بیش‌ترین عمق قابل‌کشش مشخصه‌ی ارزیابی با تابع هدف بزرگ‌تر- به‌تر می‌باشد. میانگین مربعات انحراف برای مشخصه‌ی ارزیابی کوچک‌تر- به‌تر به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{MSD} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (9)$$

در این رابطه y_i مقدار مشخصه‌ی ارزیابی کوچک‌تر- به‌تر است و n تعداد تست‌ها برای یک شرایط آزمایشی می‌باشد. بیش‌ترین عمق کشش قابل‌دستیابی، مشخصه‌ی ارزیابی با تابع هدف بزرگ‌تر- به‌تر می‌باشد. میانگین مربعات انحراف برای مشخصه‌ی ارزیابی بزرگ‌تر- به‌تر به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{MSD} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \quad (10)$$

در این رابطه y_i مقدار مشخصه‌ی ارزیابی بزرگ‌تر- به‌تر، و n تعداد تست‌ها برای یک شرایط آزمایشی می‌باشد.

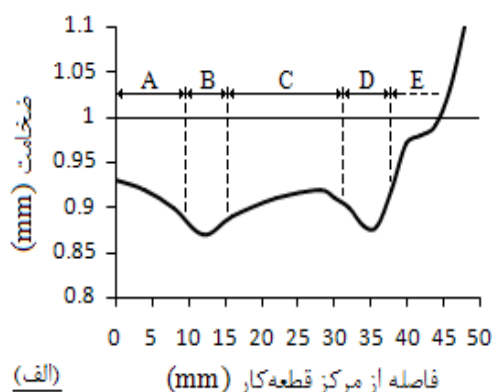


شکل ۸ مقایسه منحنی توزیع ضخامت به‌دست آمده از نتایج تجربی و شبیه‌سازی (الف- نمونه از جنس مس خالص، ب- نمونه از جنس فولاد St14)

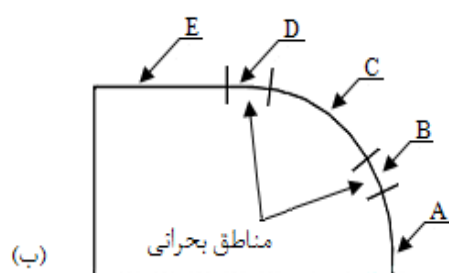
نتایج و بحث

با توجه به این که در این مقاله از دو مشخصه‌ی ارزیابی مجزا برای بررسی تأثیر پارامترهای نشان‌داده‌شده در جدول (۱) استفاده شده است، بنابراین شبیه‌سازی آزمایش‌های طراحی‌شده با استفاده از آرایه‌ی استاندارد تاگوچی برای هر دو جنس مورد استفاده دو بار اجرا شده است. بار اول عمق کشش ثابت اجرا گردید و بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی به عنوان معیار ارزیابی در نظر گرفته شد. در بار دوم بیش‌ترین عمق کشش قابل دستیابی به عنوان مشخصه‌ی ارزیابی در نظر گرفته شد و شبیه‌سازی‌ها برای به‌دست آوردن بیش‌ترین عمق کشش برای هر دسته پارامتر ورودی آرایه‌ی متعامد تکرار گردیدند. در ادامه نتایج به‌دست آمده برای دو مشخصه‌ی ارزیابی ذکر شده به نسبت‌های S/N تبدیل شد و آنالیز واریانس (ANOVA) برای شناسایی

قابل توجه است و می‌تواند منجر به خرابی زودرس در قطعه‌کار گردد (قبلاً نمونه‌ای از این خرابی در دو ناحیه‌ی ذکر شده در شکل (۲-ب) نشان داده شد). بنابراین، برای بررسی میزان تأثیر پارامترهای مورد مطالعه، آنالیز واریانس به طور مجزا بر روی نتایج بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی به‌دست آمده در این دو ناحیه‌ی بحرانی اجرا گردیده است.



(الف)



(ب)

شکل ۹ تقسیم‌بندی قطعه‌ی استوانه‌ای- نیم‌کروی بر اساس منحنی توزیع ضخامت (الف- منحنی توزیع ضخامت قطعه، ب- تقسیم‌بندی نواحی مختلف نمونه

جدول‌های (۷ و ۶) بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی و نسبت S/N متناظر را به ترتیب برای دو ناحیه‌ی بحرانی B و D در ۹ شرایط آزمایشی مختلف برای دو جنس مس خالص و فولاد St14 نشان می‌دهد. برای به‌دست آوردن درجه‌ی اهمیت و میزان تأثیر هر یک از فاکتورها بر بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی در نواحی بحرانی، آنالیز واریانس (ANOVA) بر روی نتایج نشان‌داده‌شده در جدول‌های (۷ و ۶) اجرا گردیده است. از آنجایی که کم‌ترین نسبت نازک‌شدگی در

آنالیز واریانس (ANOVA) برای بررسی تأثیر کمی پارامترهای مورد مطالعه، آنالیز واریانس بر روی نتایج اجرا گردیده است. در این روش با مقایسه‌ی واریانس، تأثیر پارامترهای مختلف ارزیابی می‌گردد [18]. مجموع مربعات کل ناشی از انحراف از میانگین کلی S/N به‌صورت زیر می‌باشد:

$$SS_T = \sum_{i=1}^m \left(\frac{S}{N}\right)_i^2 - \frac{1}{m} \left[\sum_{i=1}^m \left(\frac{S}{N}\right)_i\right]^2 \quad (11)$$

که در این رابطه m تعداد کل آزمایش‌ها می‌باشد. مجموع مربعات کل ناشی از انحراف از میانگین کلی S/N برای فاکتور P از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$SS_P = \sum_{j=1}^l \frac{\left(\frac{S}{N}\right)_j^2}{t} - \frac{1}{m} \left[\sum_{i=1}^m \left(\frac{S}{N}\right)_i\right]^2 \quad (12)$$

در رابطه‌ی بالا l تعداد سطوح فاکتور p (در این مقاله $l=3$)، t تعداد آزمایش‌ها برای فاکتور p در سطح j و $\left(\frac{S}{N}\right)_j$ میانگین نسبت S/N برای فاکتور p در سطح j می‌باشد. درصد مشارکت فاکتور p را با استفاده از رابطه‌ی زیر می‌توان محاسبه کرد:

$$P_p(\%) = \frac{SS_P}{SS_T} \times 100 \quad (13)$$

بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی. آزمایش‌ها برای هر دسته از پارامترهای ورودی آرایه‌ی متعامد تاگوچی برای یک عمق کشش ثابت اجرا گردیده‌اند و بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی متناظر با هر دسته پارامتر ورودی، از نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی‌ها استخراج شده است. بر اساس توزیع ضخامت به‌دست آمده از نتایج شبیه‌سازی و آزمایش تجربی، قطعه‌کار استوانه‌ای- نیم‌کروی را می‌توان به چندین ناحیه تقسیم‌بندی کرد. همان‌طور که در شکل (۹) نشان داده شده است، برای قطعه‌کار استوانه‌ای- نیم‌کروی دو ناحیه‌ی بحرانی B و D قابل شناسایی است که نازک‌شدگی در این دو منطقه

جدول ۷ بیشترین نسبت نازک‌شدگی در منطقه‌ی بحرانی D و نسبت S/N متناظر

بیشترین نسبت نازک‌شدگی				شماره آزمایش
فولاد St14		مس خالص		
Thin. R	S/N	Thin. R	S/N	
0.08570	21.3403	0.08148	21.7786	1
0.07664	22.3108	0.06685	23.4969	2
0.06092	24.3048	0.05168	25.7333	3
0.05403	25.3471	0.03806	28.3885	4
0.06531	23.7004	0.05359	25.4176	5
0.03895	28.1898	0.02757	31.1890	6
0.06384	23.8971	0.05600	25.0360	7
0.03569	28.9490	0.02309	32.7307	8
0.05743	24.8172	0.04601	26.74234	9

جدول ۸ میانگین نسبت S/N بیشترین نسبت نازک‌شدگی در ناحیه‌ی بحرانی B برای سطوح مختلف فاکتورها (مس خالص)

میانگین نسبت S/N			پارامتر
سطح 3 (L-3)	سطح 2 (L-2)	سطح 1 (L-1)	
19.7922	20.3769	17.9321	F ₁
20.3311	19.6465	18.1236	F ₂
18.7615	19.0974	20.2423	F ₃
19.4725	19.4109	19.2178	F ₄

جدول ۹ میانگین نسبت S/N بیشترین نسبت نازک‌شدگی در ناحیه‌ی بحرانی B برای سطوح مختلف فاکتورها (فولاد St14)

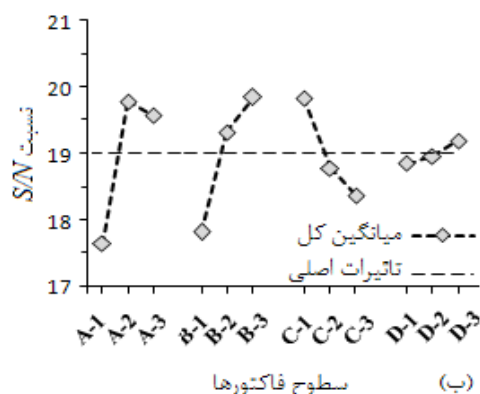
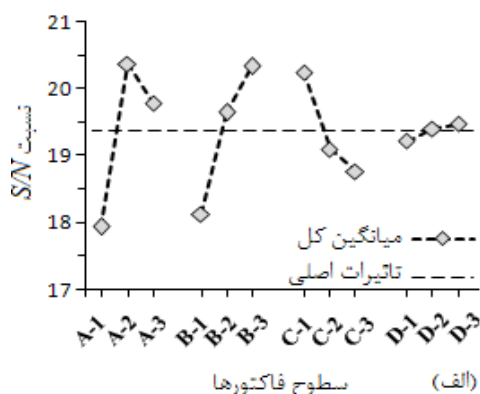
میانگین نسبت S/N			پارامتر
سطح 3 (L-3)	سطح 2 (L-2)	سطح 1 (L-1)	
19.5649	19.7795	17.6332	F ₁
19.8439	19.3217	17.8119	F ₂
18.3698	18.7790	19.8287	F ₃
19.1834	18.9513	18.8428	F ₄

نواحی B و D مطلوب‌تر است مشخصه‌ی ارزیابی کوچک‌تر - به‌تر برای تحلیل نتایج مورد استفاده قرار گرفت. جدول‌های (۹ و ۸) میانگین نسبت S/N سطوح مختلف هر یک از فاکتورها را در ناحیه‌ی بحرانی B نشان می‌دهد. هم‌چنین نتایج آنالیز واریانس برای بیشترین نسبت نازک‌شدگی در ناحیه‌ی بحرانی B در جدول‌های (۱۱ و ۱۰) آمده است. بر اساس جدول‌های (۱۱ و ۱۰) نتایج به‌دست آمده برای هر دو جنس موردبررسی تقریباً روند مشابهی دارند و می‌توان مشاهده کرد که پارامترهای فشار سیال و ضریب اصطکاک سطح تماس سنبه با ورق به ترتیب تأثیرگذارترین پارامترها بر بیشترین نازک‌شدگی در ناحیه B می‌باشند. پس از آن‌ها پارامتر فاصله‌ی بین لبه‌ی محیطی قالب و ورق‌گیر g (فشار شعاعی) نازک‌شدگی در ناحیه‌ی بحرانی B را تحت تأثیر قرار خواهد داد. تأثیر شعاع ورودی قالب بر بیشترین نازک‌شدگی در ناحیه‌ی بحرانی B در مقایسه با سایر پارامترها بسیار کم می‌باشد به همین علت این فاکتور حذف (ادغام) شده و تغییرات ناشی از آن به عنوان جزء خطا در نظر گرفته شده است.

جدول ۶ بیشترین نسبت نازک‌شدگی در منطقه‌ی بحرانی B و نسبت S/N متناظر

بیشترین نسبت نازک‌شدگی				شماره آزمایش
فولاد St14		مس خالص		
Thin. R	S/N	Thin. R	S/N	
0.13901	17.1390	0.13467	17.4145	1
0.13020	17.7077	0.12610	17.9857	2
0.12513	18.0527	0.12028	18.3961	3
0.11781	18.5763	0.11260	18.9692	4
0.10794	19.3363	0.10114	19.9015	5
0.08486	21.4259	0.07709	22.2600	6
0.13001	17.7204	0.12608	17.9870	7
0.08993	20.9212	0.08859	21.0523	8
0.09939	20.0531	0.09619	20.3374	9

این است که فشار سیال اعمال شده به سطح زیرین ورق به عنوان تکیه گاه عمل می کند و با افزایش سطح تماس ورق با سنبه و عملکرد مثبت نگه دارنده ی اصطکاکی از نازک شدگی بیش از حد ورق در ناحیه ی بدون تکیه گاه و به ویژه در پیشانی قطعه کار جلوگیری می کند. البته با افزایش بیش از حد فشار سیال این روند معکوس می شود و ضخامت قطعه کار بیش تر کاسته خواهد شد. نتایج نشان می دهد که اصطکاک نیز تأثیر بالایی در بیش ترین نسبت نازک شدگی در ناحیه ی بحرانی B دارد و با استفاده از سنبه ی خشن تر شرایط شکل دهی مطلوب تر می شود. هم چنین فاصله ی لبه ی محیطی قالب با ورق گیر (g) کم تر، به علت اعمال فشار شعاعی بالاتر و شعاع ورودی قالب بزرگ تر منجر به کاهش ضخامت کم تری در ناحیه ی بحرانی B خواهد شد.



شکل ۱۰ تأثیر اصلی فاکتورها بر بیش ترین نسبت نازک شدگی در ناحیه ی بحرانی B (الف - قطعه کار از جنس مس خالص، ب - قطعه کار از جنس فولاد St14)

جدول ۱۰ نتایج آنالیز ANOVA برای بیش ترین نسبت نازک شدگی در ناحیه ی بحرانی B (مس خالص)

پارامتر	درجه ی آزادی	مجموع مربعات	درصد مشارکت
F ₁	2	9.7789	46.2093
F ₂	2	7.6617	36.2047
F ₃	2	3.6153	17.0840
F ₄ *	2	0.1064*	0.5028
کل:	8	21.1622	100
خطا:	2	0.4254	

* فاکتور ادغام شده

جدول ۱۱ نتایج آنالیز ANOVA برای بیش ترین نسبت نازک شدگی در ناحیه ی بحرانی B (فولاد St14).

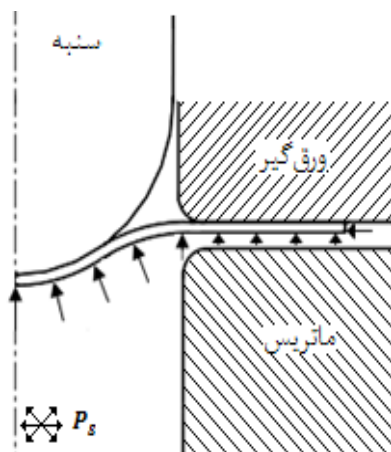
پارامتر	درجه ی آزادی	مجموع مربعات	درصد مشارکت
F ₁	2	8.3844	44.9691
F ₂	2	6.6811	35.8339
F ₃	2	3.3976	18.2227
F ₄ *	2	0.1816*	0.9741
کل:	8	18.6448	100
خطا:	2	0.72654	

* فاکتور ادغام شده

شکل (۱۰) تأثیر اصلی هر یک از فاکتورها را بر بیش ترین نسبت نازک شدگی در ناحیه ی B نشان می دهد. در این شکل تغییرات (شیب) و دامنه ی منحنی های متناظر با هر یک از پارامترها، درجه ی اهمیت آن پارامتر را بر نتیجه ی نهایی نشان می دهد. با توجه به این که نتایج به دست آمده از آزمایش ها به نسبت های S/N تبدیل شده اند و مستقل از مشخصه ی ارزیابی انتخاب شده اند، نسبت S/N بالاتر سطح یک فاکتور نشان دهنده ی تأثیر مطلوب تر آن بر نتیجه ی نهایی می باشد. بنابراین، از شکل (۱۰) می توان مشاهده کرد که استفاده از فشار سیال بالاتر منجر به کاهش کم تر ضخامت در ناحیه ی بحرانی B خواهد شد. دلیل این امر، همان طور که در شکل (۱۱) مشاهده می شود،

جدول ۱۳ میانگین نسبت S/N بیشترین نسبت نازک‌شدگی در ناحیه‌ی بحرانی D (فولاد St14)

میانگین نسبت S/N			پارامتر
سطح 3 (L-3)	سطح 2 (L-2)	سطح 1 (L-1)	
25.8878	25.7458	22.6520	F ₁
25.7706	24.9867	23.5282	F ₂
23.9674	24.1584	26.1597	F ₃
26.2003	24.7993	26.2003	F ₄



شکل ۱۱ افزایش سطح تماس ورق با سنبه در اثر اعمال فشار سیال بر سطح زیرین ورق



شکل ۱۲ تأثیر اصلی فاکتورها بر بیشترین نسبت نازک‌شدگی در ناحیه‌ی بحرانی D (الف - قطعه‌کار از جنس مس خالص، ب - قطعه‌کار از جنس فولاد St14)

میانگین نسبت S/N بیشترین نسبت نازک‌شدگی در ناحیه‌ی بحرانی D برای سطوح مختلف فاکتورها در جدول‌های (۱۲ و ۱۳) به ترتیب برای قطعه‌کار مسی و فولادی نشان داده شده است. هم‌چنین جدول‌های (۱۵ و ۱۴) نتایج آنالیز واریانس را برای بیشترین نسبت نازک‌شدگی در ناحیه‌ی بحرانی D نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که مشابه با نتیجه‌ی به‌دست آمده برای ناحیه‌ی بحرانی B، فشار سیال تأثیرگذارترین پارامتر بر بیشترین نسبت کاهش ضخامت در ناحیه‌ی بحرانی D می‌باشد.

جدول ۱۲ میانگین نسبت S/N بیشترین نسبت نازک‌شدگی در ناحیه‌ی بحرانی D (مس خالص)

میانگین نسبت S/N			پارامتر
سطح 3 (L-3)	سطح 2 (L-2)	سطح 1 (L-1)	
28.1697	28.3317	23.6696	F ₁
27.8882	27.2151	25.0677	F ₂
25.3957	26.2093	28.5661	F ₃
28.9509	26.5740	24.6462	F ₄

جدول ۱۴ نتایج آنالیز ANOVA برای بیشترین نسبت نازک‌شدگی در ناحیه‌ی بحرانی D (مس خالص)

پارامتر	درجه آزادی	مجموع مربعات	درصد مشارکت
F ₁	2	42.0122	42.3526
F ₂	2	13.0195	13.1250
F ₃	2	16.2684	16.4003
F ₄	2	27.8960	28.1220
کل:	8	99.1963	100
خطا:	0	0.0000	

شکل داده‌شده خواهد شد. اندک تفاوت موجود در نتیجه‌ی به‌دست آمده برای دو جنس مورد استفاده را می‌توان به تفاوت موجود در پنجره‌ی شکل‌دهی و رفتار شکل‌پذیری آن‌ها نسبت داد. هم‌چنین مطابق شکل فوق برای هر دو جنس مورد بررسی، در استفاده از سنه‌ی خشن‌تر، فاصله گپ کوچک‌تر (فشار شعاعی بالاتر) و شعاع ورودی بزرگ‌تر کاهش ضخامت کم‌تری در ناحیه‌ی بحرانی D رخ خواهد داد.

جدول ۱۵ نتایج آنالیز ANOVA برای بیشترین نسبت نازک‌شدگی در ناحیه‌ی بحرانی D (فولاد St14)

پارامتر	درجه آزادی	مجموع مربعات	درصد مشارکت
F ₁	2	20.0620	40.5896
F ₂	2	7.7700	15.7204
F ₃	2	8.8480	17.9014
F ₄	2	12.7463	25.7874
کل:	8	49.4264	100
خطا:	0	0.0000	

بیشترین عمق کشش. همان‌طور که در بخش‌های قبلی ذکر گردید، در این مقاله تأثیر پارامترهای فرآیندی بر بیشترین عمق کشش قابل دست‌یابی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، آزمایش‌ها طراحی شده توسط آرایه‌ی متعامد تاگوجی L-9 این بار برای بیشترین عمق کشش قابل دست‌یابی قطعات استوانه‌ای - نیم‌کروی اجرا گردیده‌اند. جدول (۱۶) بیشترین عمق کشش قطعات شکل داده‌شده و نسبت S/N متناظر با نتیجه‌ی به‌دست آمده را برای ورق‌های مسی و فولادی در ۹ شرایط آزمایشی مختلف نشان می‌دهد. با توجه به این که در شکل‌دهی قطعات ورقی، دست‌یابی به عمق کشش بالاتر مطلوب‌تر می‌باشد، در اجرای آنالیز واریانس بر نتایج نشان داده شده در جدول (۱۶) از مشخصه‌ی ارزیابی بزرگ‌تر - به‌تر استفاده شده است.

میانگین نسبت S/N بیشترین عمق کشش برای سطوح مختلف هر یک از فاکتورها در جدول‌های (۱۷ و ۱۸) آمده است. هم‌چنین نتایج آنالیز واریانس در جدول‌ها (۲۰ و ۱۹) نشان داده شده است که مشابه نتایج قبلی به‌دست آمده برای بیشترین نسبت نازک‌شدگی در نواحی بحرانی، فشار سیال مؤثرترین عامل در میزان بیشترین عمق کشش قابل دست‌یابی برای هر دو جنس می‌باشد. علاوه بر فشار سیال، شعاع ورودی قالب نیز تأثیر بسزایی در حداکثر عمق کشش قابل دست‌یابی دارد. هم‌چنین ضریب اصطکاک سطح تماس سنه با ورق و فاصله‌ی بین لبه‌ی محیطی قالب

شعاع ورودی قالب نیز تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش ضخامت در ناحیه‌ی بحرانی D دارد که نتیجه‌ی فوق مشابه نتیجه‌ی به‌دست آمده در روش کشش عمیق معمولی می‌باشد [19]. فاصله‌ی لبه‌ی محیطی قالب با ورق‌گیر (g) و ضریب اصطکاک بین سطح تماس سنه با ورق، پارامترهای بعدی تأثیرگذار در بیشترین نسبت نازک‌شدگی در ناحیه‌ی بحرانی D می‌باشند. شکل (۱۲) تأثیر اصلی هر یک از فاکتورها را بر بیشترین نسبت نازک‌شدگی در ناحیه‌ی D نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل فوق مشخص است استفاده از فشار سیال با سطح L-2 برای قطعه‌ی مسی و سطح L-3 برای قطعه‌ی فولاد St14 منجر به نسبت S/N بالاتر و در نتیجه نازک‌شدگی کم‌تر در قطعه‌ی

جدول ۱۹ نتایج آنالیز ANOVA برای بیشترین عمق کشش قابل دستیابی (مس خالص).

پارامتر	درجه آزادی	مجموع مربعات	درصد مشارکت
F ₁	2	1.3277	47.6202
F ₂	2	0.3080	11.0491
F ₃	2	0.3721	13.3479
F ₄	2	0.7801	27.9826
کل:	8	2.7881	100
خطا:	0	0.0000	

جدول ۲۰ نتایج آنالیز ANOVA برای بیشترین عمق کشش قابل دستیابی (فولاد St14).

پارامتر	درجه آزادی	مجموع مربعات	درصد مشارکت
F ₁	2	2.5002	37.3584
F ₂	2	1.6623	24.8387
F ₃	2	0.8360	12.4929
F ₄	2	1.6939	25.3102
کل:	8	6.6926	100
خطا:	0	0.0000	

جدول (۲۱) میزان تأثیر و سطح مطلوب هر یک از فاکتورها را برای سه تابع هدف انتخاب شده برای قطعه مسی مورد مقایسه قرار داده است. از نتایج به دست آمده می توان مشاهده کرد که برای هر سه تابع هدف انتخاب شده، یعنی بیشترین نسبت نازک شدگی در نواحی بحرانی B و D و هم چنین بیشترین عمق قابل کشش قطعه کار، فشار سیال بیشترین تأثیر را بر نتیجه نهایی دارد. این امر، حاکی از درجه اهمیت بالای این فاکتور است و نشان می دهد که برای شکل دهی قطعات با عمق کشش بالا، کیفیت مناسب و توزیع ضخامت یک نواخت با استفاده از فرآیند هیدروفرمینگ انتخاب مسیر فشار مناسب امری لازم و ضروری می باشد. مقایسه ی سطح مطلوب انتخاب شده برای فشار سیال در سه تابع هدف انتخاب شده نشان

با ورق گیر، پارامترهای بعدی مؤثر در بیشترین عمق قابل کشش قطعه کار می باشند. تأثیر اصلی فاکتورها بر بیشترین عمق کشش قابل دستیابی در شکل (۱۳) به صورت شماتیک نشان داده شده است. مطابق شکل با استفاده از فشار سیال بالاتر، سنبه ی خشن تر، فاصله گپ کوچک تر (فشار شعاعی بالاتر) و شعاع ورودی بزرگ تر می توان قطعات با عمق کشش بالاتری را شکل دهی کرد.

جدول ۱۶ بیشترین عمق کشش قابل دستیابی و نسبت S/N متناظر.

شماره آزمایش	مس خالص		فولاد St14	
	نسبت S/N	M. Draw (mm) Depth	نسبت S/N	M. Draw (mm) Depth
1	36.2853	65.2031	33.9799	50.0031
2	36.5609	67.3048	34.4846	52.9948
3	36.9650	70.5116	35.3596	58.6116
4	37.1965	72.4148	35.1955	57.5148
5	36.5613	67.3077	34.4374	52.7077
6	37.5710	76.6049	36.1378	64.1049
7	37.0621	71.3033	34.9952	56.2033
8	38.2073	81.3521	36.8711	69.7521
9	37.3616	73.8044	35.8310	61.8804

جدول ۱۷ میانگین نسبت S/N بیشترین عمق کشش قابل دستیابی (مس خالص)

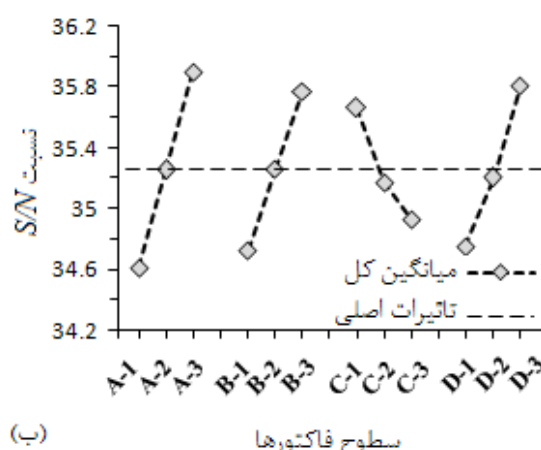
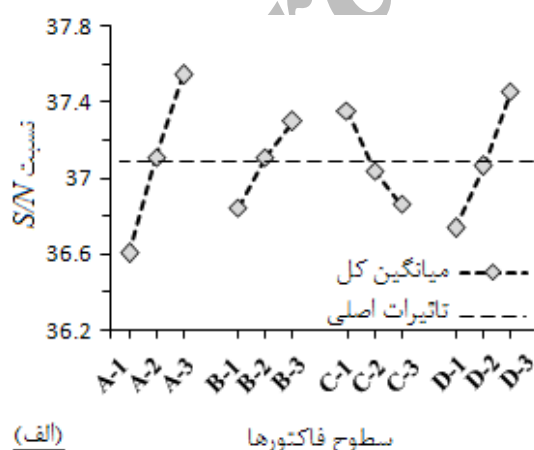
پارامتر	میانگین نسبت S/N		
	سطح 1 (L-1)	سطح 2 (L-2)	سطح 3 (L-3)
F ₁	36.6038	37.1096	37.5437
F ₂	36.8480	37.1098	37.2992
F ₃	37.3545	37.0397	36.8629
F ₄	36.7361	37.0647	37.4563

جدول ۱۸ میانگین نسبت S/N بیشترین عمق کشش قابل دستیابی (فولاد St14).

پارامتر	میانگین نسبت S/N		
	سطح 1 (L-1)	سطح 2 (L-2)	سطح 3 (L-3)
F ₁	34.6080	35.2569	35.8991
F ₂	34.7235	35.2644	35.7761
F ₃	35.6629	35.1704	34.9308
F ₄	34.7495	35.2059	35.8088

نسبت نازک‌شدگی در نواحی بحرانی و بیش‌ترین عمق کشش قابل دست‌یابی میزان تأثیر تقریباً مشابهی دارد. این امر، حاکی از عملکرد مثبت فشار شعاعی اعمال‌شده در بهبود توزیع ضخامت و افزایش بیش‌ترین عمق کشش قطعات شکل‌داده می‌باشد و نشان می‌دهد که روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی می‌تواند به‌عنوان یک روش بسیار مناسب برای شکل‌دهی قطعات با نسبت کشش بالا و آلیاژهایی با شکل‌پذیری پایین مطرح شود. نکته‌ی قابل توجه دیگر در جدول (۲۱) این است که میزان تأثیر و ترتیب درجه‌ی اهمیت پارامترها بر بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی در ناحیه‌ی D و بیش‌ترین عمق کشش قابل دست‌یابی در قطعات شکل‌داده‌شده شباهت بسیار زیادی با هم دارند. علت این تشابه این است که در شکل‌دهی قطعات استوانه‌ای- نیم‌کروی با عمق کشش بالا در بیش‌تر مواقع، پارگی در ناحیه‌ی انتقال سطح نیم‌کروی به استوانه‌ای یعنی ناحیه‌ی بحرانی D اتفاق می‌افتد. بنابراین، پارامترهای تأثیرگذار در بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی در ناحیه‌ی بحرانی D، مستقیماً بیش‌ترین عمق قابل کشش قطعات را نیز تحت تأثیر قرار خواهند داد.

می‌دهد که برای یک عمق کشش ثابت، استفاده از فشار سیال با سطح L-2 مناسب است و منجر به کاهش ضخامت کم‌تری در نواحی بحرانی B و D می‌گردد؛ در حالی که برای دست‌یابی به عمق کشش بالاتر استفاده از فشار سیال با سطح L-3 مناسب‌تر می‌باشد. این موضوع، نشان‌دهنده‌ی این حقیقت است که در فرآیند هیدروفورمینگ ورق برای شکل‌دهی قطعات با عمق کشش بالاتر فشار بالاتر سیال مورد نیاز است. با مقایسه‌ی نتایج قبلی ارائه‌شده همین روند برای قطعه‌کار فولادی نیز قابل مشاهده است. سایر پارامترهای مورد مطالعه اگرچه برای توابع هدف مختلف میزان تأثیرات متفاوتی نشان می‌دهند، ولی سطح مطلوب انتخاب‌شده برای تمامی پارامترها در هر سه تابع هدف یکسان می‌باشد به طوری که استفاده از سنبه‌ی خشن‌تر و شعاع ورودی بزرگ‌تر منجر به به‌تر شدن شرایط شکل‌دهی و کاهش ضخامت کم‌تر در نواحی بحرانی خواهد شد و قطعات با عمق کشش بالاتری را می‌توان شکل داد. هم‌چنین می‌توان مشاهده کرد که فاصله‌ی بین سطح لبه‌ی محیطی قالب و ورق گیر g که مستقیماً میزان فشار شعاعی اعمال شده به لبه‌های ورق را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بر بیش‌ترین



شکل ۱۳ تأثیر اصلی فاکتورها بر بیش‌ترین عمق کشش قابل دست‌یابی برای قطعات شکل‌داده‌شده (الف- قطعه‌کار از جنس مس خالص، ب- قطعه‌کار از جنس فولاد St14)

جدول ۲۱ مقایسه‌ی میزان تأثیر و سطح مطلوب هر یک از فاکتورها برای توابع هدف انتخاب شده (مس خالص)

بیشترین عمق کشش		ناحیه‌ی بحرانی D		ناحیه‌ی بحرانی B		فاکتور
سطح مطلوب	میزان تأثیر (%)	سطح مطلوب	میزان تأثیر (%)	سطح مطلوب	میزان تأثیر (%)	
3	47.6202	2	42.3526	2	46.2093	F ₁ : فشار سیال
3	11.0491	3	13.1250	3	36.2047	F ₂ : ضریب اصطکاک
1	13.3479	1	16.4003	1	17.0840	F ₃ : گپ (g)
3	27.9826	3	28.1220	3	0.5028	F ₄ : شعاع ورودی

نتیجه‌گیری

بیشترین عمق قابل کشش قطعه‌کار اجرا گردیدند. نتایج به دست آمده از آنالیز واریانس به شرح زیر می‌باشد:

۱. برای هر دو مشخصه‌ی کیفی بیشترین نسبت نازک‌شدگی در نواحی بحرانی و بیشترین عمق کشش قابل دستیابی فشار سیال بیشترین تأثیر را بر کیفیت شکل‌پذیری قطعه‌کار دارد. این امر، نشان می‌دهد که در فرآیند هیدروفرمینگ ورق برای شکل‌دهی قطعات با توزیع ضخامت یک‌نواخت و عمق کشش بالا، انتخاب مسیر فشار مناسب اهمیت بسیار بالایی دارد.

۲. مقایسه سطح مطلوب انتخاب شده برای فشار سیال برای دو مشخصه‌ی کیفی نشان می‌دهد که برای شکل‌دهی قطعات با عمق کشش بالاتر نیاز به فشار سیال بالایی می‌باشد.

۳. استفاده از سنبه‌ی خشن‌تر و شعاع ورودی قالب بزرگ‌تر منجر به به‌تر شدن شرایط شکل‌دهی می‌شود و کاهش ضخامت کم‌تری در قطعه‌کار رخ خواهد داد و می‌توان قطعات با عمق کشش بالاتری را شکل‌دهی کرد.

۴. برای هر دو مشخصه‌ی کیفی، در استفاده از فاصله‌ی بین سطح لبه‌ی محیطی قالب و ورق‌گیر g کم‌تر، به علت اعمال فشار شعاعی بالاتر شرایط شکل‌دهی بهبود می‌یابد که حاکی از عملکرد مثبت فشار شعاعی اعمال‌شده در بهبود توزیع ضخامت و افزایش بیشترین عمق کشش قطعات شکل‌دهی می‌باشد. به عبارت دیگر، روش کشش عمیق هیدروفرمینگ با

در این مقاله با استفاده از ترکیب روش اجزای محدود و تکنیک تاگوچی، یک روش اصولی برای مطالعه و تحلیل هم‌زمان تأثیر پارامترهای شکل‌دهی بر کیفیت شکل‌پذیری قطعات در فرآیند هیدروفرمینگ ورق توسعه داده شد. مدل اجزای محدود فرآیند با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS 6.7.1 ایجاد گردید و بعد از اثبات تجربی آن، با استفاده از ترکیب روش اجزای محدود و تکنیک تاگوچی تأثیر پارامترهای کلیدی شکل‌دهی مانند فشار سیال محفظه‌ی شکل‌دهی، ضریب اصطکاک سطح تماس سنبه و ورق، فاصله‌ی بین سطح لبه‌ی محیطی قالب با سطح ورق‌گیر و شعاع ورودی قالب در فرآیند کشش عمیق هیدروفرمینگ با فشار شعاعی مورد بحث قرار گرفت. برای بررسی تأثیر پارامترهای فوق قطعات استوانه‌ای- نیم‌کروی با استفاده از ورق‌هایی از جنس مس خالص و فولاد St14 شکل داده شد. به‌منظور شناسایی درجه‌ی اهمیت و میزان تأثیر هر یک از پارامترها بر کیفیت شکل‌پذیری قطعه‌کار و به‌دست آوردن ترکیب بهینه‌ی پارامترها، آنالیز واریانس (ANOVA) بر نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها اجرا شد. در این مقاله، برای اندازه‌گیری کیفیت شکل‌دهی از دو معیار مجزای بیشترین نسبت نازک‌شدگی در یک عمق کشش ثابت و حداکثر عمق کشش قابل دستیابی استفاده گردید. به این منظور، آزمایش‌های طراحی شده توسط آرایه‌ی متعامد یک بار برای عمق کشش ثابت و بار دوم برای به‌دست آوردن

تقریباً روند مشابهی داشت. بنابراین، با استفاده از نتایج به دست آمده از آنالیز واریانس مطالعات بهینه سازی بعدی می تواند بر اساس درجهی اهمیت پارامترها صورت گیرد.

فشار شعاعی می تواند به عنوان روش مناسبی برای شکل دهی قطعات با نسبت کشش بالا و از آلیاژهای با شکل پذیری کم مطرح گردد.
۵. نتایج به دست آمده برای هر دو جنس مورد استفاده

مراجع

1. Zhang, S.H., Wang, Z.R., Xu, Y., Wang, Z.T. and Zhou, L.X., "Recent developments in sheet hydroforming technology", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 151, pp. 237-241, (2004).
2. Soo-Ik, Oh., Jeon, B.H., Kim, H.Y. and Yang, J.B., "Applications of hydroforming processes to automobile parts", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 174, pp. 42-55, (2006).
3. Lang, L.H., Wang, Z.R., Kang, D.C., Yuan, S.J., Zhang, S.H., Danckert, J. and Nielsen, K.B. "Hydroforming highlights: sheet hydroforming and tube hydroforming", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 151, pp. 165-177, (2004).
4. Amino, H., Nakamura, K. and Nakagawa, T., "Counter-pressure deep drawing and its application in the forming of automobile parts", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 23, pp. 243-265, (1990).
5. Hsu, T.C. and Hsieh, S.J., "Theoretical and experimental analysis of failure the hemispherical punch hydroforming processes", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 118, pp. 434-438, (1996).
6. El-Sebaie, M.G. and Mellor, M.G., "pressure assisted deep drawing", *Ann, CIRP*, Vol. 22(1), pp. 71-72, (1973).
7. Zhang, S.H., Jensen, M.R., Nielsen, K.B., Danckert, J. Lang, L.H. and Kang, D.C., "Effect of anisotropy and prebulging on hydromechanical deep drawing of mild steel cups", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol 142, pp. 544-550, (2003).
8. Liu., X., Xu, Y. and Yuan, S., "Effects of loading paths on hydrodynamic deep drawing with independent radial hydraulic pressure of aluminum alloy based on numerical simulation", *Journal of Materials Processing Technology.*, Vol. 24, pp. 395-399, (2008).
9. Roy, R.K., "*Design of Experiment Using Taguchi Approach: 16 Steps to Product and Process Improvement*", Wiley Inter science., New York, (2001).
10. Roy, R., "*A Primer on the Taguchi Method*", Van Nostrand Reinhold., New York, (1990).

11. Lang, L., Danckert, J. and Nielsen, K.B., "Investigation into hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure Part II. Numerical analysis of the drawing mechanism and the process parameters", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 166, pp. 150-161, (2004).
12. Li, B., Nye, T., Metzger, D.R., "Multi-objective optimization of forming parameters for tube hydroforming process based on the Taguchi method", *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, Vol. 28, pp. 23–30, (2006).
13. Sharma, A.K. and Rout, D.K., "Finite element analysis of sheet hydromechanical forming of circular cup", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp. 1445-1453, (2009).
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 aluminum alloy", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 148, pp. 119-131, (2004).
15. Gorji, A.H., Alavi-Hashemi, H., Bakhshi-jooybari, M., Nourouzi, S. and Hosseinipour, S.J., "Investigation of hydrodynamic deep drawing for conical–cylindrical cups", *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, Vol. 56, pp. 915-927, (2011).
16. ABAQUS 6.9-PR11. Documentation, User's manual.
17. Yingyot, A.U.L., Ngaile, G. and Altan, T., "Optimizing tube hydroforming using process simulation and experimental verification", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146, pp. 137-143, (2004).
18. Ross, P.J., "*Taguchi Techniques For Quality Engineering*", McGraw-Hill., Singapore, (1989).
19. Padmanabhan, R., Oliveira, M.C., Alves, J.L. and Menezes, L.F., "Influence of process parameters on the deep drawing of stainless steel", *Finite Element in Analysis and Design*, Vol. 43, pp. 1062-1067, (2007).