



## بهینه‌یابی مسیرهای فشار در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی و با جریان روبه داخل سیال به کمک یک روش ترکیبی

میلاذ صادق یزدی<sup>1</sup>، محمد بخشی<sup>2\*</sup>، حمید گرجی<sup>3</sup>، محسن شاکری<sup>2</sup>، مازیار خادمی<sup>5</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

2- استاده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

5- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

\* صندوق پستی 484، bakhshi@nit.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 14 شهریور 1396

پذیرش: 9 آبان 1396

ارائه در سایت: 27 آبان 1396

کلید واژگان:

هیدروفرمینگ

بهینه‌یابی

سیستم فازی

الگوریتم زنبور عسل مصنوعی

شبیه‌سازی تطبیقی

### چکیده

هیدروفرمینگ روشی مناسب در به‌کارگیری سیال برای تولید قطعات با نسبت استحکام به وزن بالا محسوب می‌گردد. فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی به کمک فشار شعاعی و با جریان روبه داخل سیال یکی از انواع هیدروفرمینگ محسوب می‌شود. در این روش فشار جانبی و فشار محفظه دو پارامتر کلیدی هستند که مقدار آن‌ها در هر لحظه نقش مهمی در کیفیت قطعه نهایی ایفا می‌کند. در این پژوهش به کمک یک روش ترکیبی مسیرهای فشار محفظه و فشار جانبی در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی با فشار شعاعی و با جریان روبه داخل سیال بهینه‌سازی شده است. در این روش یک شبیه‌سازی تطبیقی که با الگوریتم کنترل فازی یک‌پارچه شده است به همراه الگوریتم زنبور عسل مصنوعی برای تعیین مسیرهای بهینه استفاده شده است. دست‌یابی به قطعه‌ای با حداقل نازک‌شدگی در سراسر آن و بدون چروکیدگی به عنوان هدف بهینه‌سازی مشخص شده است. برای صحت‌سنجی مسیر فشارهای بهینه به‌دست‌آمده از الگوریتم بهینه‌یابی استفاده شده در این پژوهش از آزمایش‌های تجربی استفاده شده است. نتایج نشان داده است که استفاده از مسیر فشارهای بهینه محفظه و جانبی منجر به دست‌یابی به قطعه‌ای با حداکثر نازک‌شدگی کمتر در سراسر قطعه شکل داده شده و بدون چروکیدگی می‌گردد.

## Optimization of pressure paths in hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure with inward flowing liquid using a hybrid method

Milad Sadegh Yazdi<sup>1</sup>, Mohammad Bakhshi<sup>1\*</sup>, Hamid Gorji<sup>1</sup>, Mohsen Shakeri<sup>1</sup>, Maziar Khademi<sup>1</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

\* P.O.B. 484, Babol, Iran, bakhshi@nit.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 17 January 2017

Accepted 09 June 2017

Available Online 18 November 2017

### Keywords:

Hydroforming

Optimization

Fuzzy control system

ABC algorithm

Adaptive simulation

### ABSTRACT

Hydroforming is a convenient method for applying fluid to produce parts with high strength to weight ratio. Hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure with inward flowing liquid process is considered as a type of hydroforming. In this method, radial and cavity pressures are two most important parameters, the values of which at any moment play an important role on the quality of final part. In this study, based on a hybrid method, the cavity and radial pressure paths in hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure with inward flowing liquid process are optimized. In this method, an adaptive simulation that is integrated with the fuzzy control system with the ABC algorithm is used to determine the optimized radial and cavity pressure paths. The achievement of a cup with least thinning and without wrinkling has been defined as the optimization goal. The validity of radial and cavity pressure paths obtained from optimization algorithm is verified through an experiment. Results showed that utilization of the optimized loading path yields the part with lower maximum thinning and without wrinkling.

### 1- مقدمه

بیشتر در مقایسه با کشش عمیق سنتی یکی از اصلی‌ترین معایبی است که در پژوهش‌های پیشین به آن اشاره شده است [4,5].

کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی و با جریان روبه داخل سیال نوعی از فرآیند هیدروفرمینگ است که توسط ونگ و همکاران [6] ارائه گردید. فشار جانبی و فشار محفظه در هر لحظه دو تا از مهم‌ترین پارامترهای کنترلی در این فرآیند هستند که نسبت و مقدار آن‌ها در هر لحظه نقش

کشش عمیق هیدرودینامیکی یکی از فرآیندهای هیدروفرمینگ ورق‌های فلزی است [1]. این فرآیند با ترکیب فرآیندهای کشش عمیق و هیدروفرمینگ دربردارنده مزایای هر دو روش است [2]. با این فرآیند امکان دست‌یابی به قطعاتی با صافی سطح بالاتر، دقت ابعادی مناسب‌تر، نسبت کشش بیشتر فراهم شده است [3]. از سوی دیگر نیاز به نیروی شکل‌دهی

### Please cite this article using:

M. Sadegh Yazdi, M. Bakhshi, H. Gorji, M. Shakeri, M. Khademi, Optimization of pressure paths in hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure with inward flowing liquid using a hybrid method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 11, pp. 311-322, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

روش تطبیقی از روش‌هایی است که در تعیین مسیر فشار مناسب در هیدروفورمینگ استفاده شده است [15-17]. در این روش منحنی مسیر فشار توسط یک مرحله شبیه‌سازی با استفاده از کنترل لحظه‌ای به کمک هوش مصنوعی صورت می‌پذیرد. به این منظور یک الگوریتم کنترلی برای کنترل پارامترهای مورد نظر استفاده می‌شود که به صورت مرحله به مرحله پارامترهای مورد نظر را کنترل می‌نماید.

اوزترک و همکاران [18] به بهینه‌یابی مسیر فشار و نیروی نگه‌دارنده در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی با استفاده از الگوریتم کنترل فازی یک پارچه شده با شبیه‌سازی المان محدود پرداختند. دست‌یابی به قطعه‌ای با نسبت کشش بیشتر به عنوان هدف این بهینه‌یابی مشخص شده است. بیشترین مقدار کاهش ضخامت، ارتفاع چروکیدگی در ناحیه فلنج و مکان هندسی گره‌ها در ناحیه بدون حمایت ورق بین سنبه و قالب به عنوان شاخص‌های کنترلی در سیستم فازی انتخاب شدند. در این پژوهش از آزمایش تجربی برای صحت‌سنجی مسیرهای بهینه استفاده شده است.

یعقوبی و همکاران [19] به بهینه‌یابی مسیر فشار در فرآیند هیدروفورمینگ با استفاده از سیستم عصبی- فازی و الگوریتم تکاملی ژنتیک پرداختند. در این پژوهش برای بررسی اثر مسیر فشار روی حداکثر نازک‌شدگی در نواحی بحرانی قطعه شکل داده شده از توسعه یک مدل انقباضی بر پایه نتایج شبیه‌سازی، سپس از مدل توسعه داده شده به عنوان تابع هدف در فرایند بهینه‌یابی استفاده شده است. پژوهشگران یادشده برای صحت‌سنجی مسیر فشار به‌دست‌آمده حاصل از بهینه‌یابی از آزمایش تجربی و مقایسه مسیر به‌دست‌آمده با سه مسیر تصادفی استفاده کردند. سرعت بالا و اجتناب از سعی و خطا و شبیه‌سازی‌های متعدد از مهم‌ترین مزایای این روش محسوب می‌گردد. الگوریتم کنترلی به‌کار رفته که نتیجه دانش تجربی و یا تحلیلی طراح است اغلب به کمک الگوی فازی مدل‌سازی می‌گردد. ماهیت غیرخطی فرآیند و عدم کنترل بر گام‌های صورت گرفته، استفاده از این روش را با مشکلاتی روبه‌رو می‌سازد [7]. به علاوه تدوین دقیق و کارآمد این قوانین مستلزم مطالعات بسیار دقیقی از نقش هر یک از پارامترها و همچنین اثر ترکیبی آن‌هاست که فرآیندی زمان‌بر و پرهزینه است.

در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی با فشار شعاعی و با جریان روبه داخل سیال ارائه شده توسط ونگ و همکاران [6] از یک پمپ و یک شیر کنترل جریان برای تأمین فشارهای جانبی و محافظه استفاده شد؛ بنابراین در یک زمان مشخص تنها امکان کنترل یکی از فشارهای جانبی یا محافظه وجود دارد. پژوهش‌های گذشته نشان داده است که در شکل‌دهی قطعات استوانه‌ای با فرآیند هیدروفورمینگ حداکثر نازک‌شدگی در ناحیه شعاع نوک سنبه رخ می‌دهد [20]. علاوه بر این خمش ورق حول این ناحیه در مراحل ابتدایی فرایند اتفاق می‌افتد. کنترل فشار در مراحل ابتدایی فرایند نقش مهمی را در حداکثر نازک‌شدگی قطعه ایفا می‌کند. در تحقیق حاضر از دو پمپ مستقل از هم برای تأمین فشارهای جانبی و محافظه استفاده شده است تا امکان کنترل مستقل هر یک از فشارها و در هر لحظه فراهم گردد.

هدف از این پژوهش دست‌یابی به قطعه استوانه‌ای سالم، بدون چروکیدگی و با حداقل نازک‌شدگی در سراسر نمونه شکل داده شده از طریق بهینه‌یابی مسیرهای فشار محافظه و فشار جانبی در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی با فشار شعاعی و با جریان روبه داخل سیال است که برای نخستین بار در این تحقیق به آن پرداخته شده است. تعداد زیاد متغیرهای

مهمی را در تولید قطعه سالم ایفا می‌کند [6]. بر این اساس بهبود شکل‌پذیری با ارائه مسیرهای بهینه برای فشار محافظه و فشار جانبی موضوعی است که در پژوهش یاد شده به آن پرداخته شد.

روش سعی و خطا ساده‌ترین شیوه‌ای است که در انتخاب مسیر فشار مناسب به کار گرفته شده است. پارامترهای اولیه در این روش نوعاً بر پایه آزمایش استوار است که زمان‌بر و پرهزینه است و امروزه کمتر مورد توجه پژوهشگران قرار دارد [7]. از این‌رو از شبیه‌سازی عددی به عنوان جایگزینی مناسب استفاده می‌گردد. گرجی و همکاران [8] به بررسی شکل‌دهی قطعات مخروطی در فرآیند کشش عمیق هیدروپنایمی با فشار شعاعی به کمک شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمایش‌های تجربی پرداختند. آنان برای تعیین مناسب‌ترین مسیر فشار برای محافظه از تحلیل پارامترهای مؤثر به کمک شبیه‌سازی عددی استفاده کردند. در آن مطالعه حداقل نازک‌شدگی به عنوان معیار تعیین مسیر فشار بهینه انتخاب شد. نتایج آنان نشان داد که در فشارهای پایین در ناحیه شعاع نوک سنبه پارگی اتفاق می‌افتد و با افزایش فشار تا حد مشخصی قطعه به طور کامل شکل می‌گیرد.

به‌کارگیری معادلات تحلیلی روش دیگری است که در یافتن مسیر فشار بهینه استفاده شده است. عاصم‌پور و همکاران [9] به تخمین فشار در فرآیند هیدروفورمینگ ورق به کمک تحلیل حد بالایی پرداختند. آنان فشار حداکثر در هر بازه زمانی حل را با به دست آوردن میدان سرعت و نوشتن معادلات در تحلیل حد بالایی محاسبه نمودند. استفاده از این روش با در نظر گرفتن فرضیات ساده‌کننده‌ای از فرآیند همراه است که از دقت پاسخ‌ها می‌کاهد؛ بنابراین کاربرد این روش در عمل به هندسه‌های ساده محدود بوده است.

استفاده از الگوریتم‌های تکاملی روش دیگری است که در بهینه‌یابی مسیر فشار در فرآیند هیدروفورمینگ به کار گرفته شده است. هاشمی و همکاران [10] به تعیین مسیر فشار و سرعت سنبه در فرآیند هیدروفورمینگ قطعات فنجان‌ی شکل با استفاده از روش بهینه‌سازی تطبیقی بر پایه شبیه‌سازی پرداختند. آن‌ها هدف از پژوهش خود را دست‌یابی به قطعه‌ای سالم، بدون چروکیدگی و نازک‌شدگی عنوان کردند، همچنین این پژوهشگران با مقایسه نتایج تجربی و بهینه‌سازی حاصل از الگوریتم بازپخت شبیه‌سازی شده تطبیقی به این نتیجه رسیده‌اند که این روش بازدهی مناسبی را در تعیین مسیر فشار، سرعت سنبه و سایر پارامترهای مؤثر در فرآیند هیدروفورمینگ ورق خواهد داشت.

یعقوبی و همکاران [11] به بهینه‌یابی مسیر فشار در فرآیند هیدروفورمینگ ورق با استفاده از هوش مصنوعی و روش بازپخت شبیه‌سازی پرداختند. در این پژوهش ابتدا به کمک شبیه‌سازی اجزای محدود، شبکه عصبی برای پیش‌بینی مقدار بیشینه نازک‌شدگی در سراسر قطعه فرم داده شده طراحی شد. سپس از این شبکه به عنوان تابع عضویت در الگوریتم بازپخت شبیه‌سازی شده برای دست‌یابی به قطعه‌ای با حداقل نازک‌شدگی استفاده شد. امکان جستجو در فضای گسسته و همچنین بهینه‌یابی هم‌زمان چندین پارامتر از مزایای استفاده از الگوریتم‌های تکاملی در بهینه‌یابی پارامترهای فرآیند محسوب می‌شود. این الگوریتم‌ها برای ارائه مسیر مناسب نیاز به داده‌های ورودی زیادی دارند که عموماً از راه شبیه‌سازی تأمین می‌شوند [12,13]؛ بنابراین تأمین داده‌ها برای مدل‌سازی فضای مسأله در مواردی که با آزمایش‌های پرهزینه سروکار دارند، یا هندسه‌ها و روش‌های شکل‌دهی پیچیده موجب افزایش مدت زمان شبیه‌سازی می‌شود به یک چالش جدی در این روش تبدیل می‌گردد [14].

<sup>1</sup> Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS)

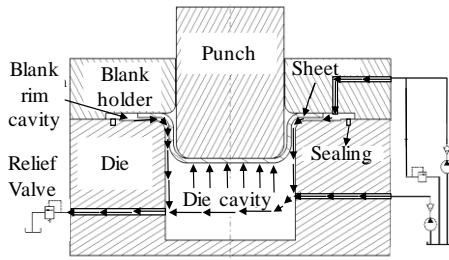


Fig. 1 Schematic of the die set and pressure system

شکل 1 طرح‌واره‌ای از مجموعه قالب و سیستم تأمین فشار

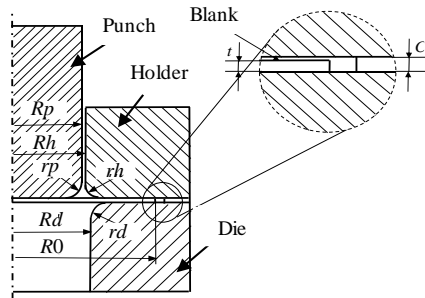


Fig. 2 Schematic of the die set used

شکل 2 طرح‌واره‌ای از مجموعه قالب مورد استفاده در پژوهش حاضر

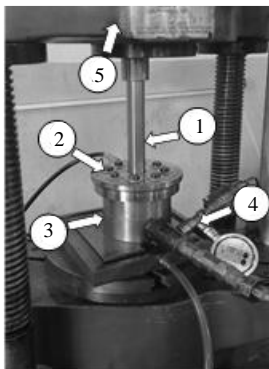


Fig. 3 Components of the die set 1- punch, 2- blank holder, 3- die, 4- pressure gauge, 5- forming machine

شکل 3 اجزای مجموعه قالب 1- سنبه، 2- ورق‌گیر، 3- قالب، 4- فشارسنج، 5- ماشین شکل‌دهی

جدول 1 اندازه‌های پارامترهای مجموعه قالب

Table 1 Dimensions of the die set parameters

مقدار (mm)	علامت	مشخصه
19.5	$R_p$	شعاع سنبه
5	$r_p$	شعاع نوک سنبه
22	$R_d$	شعاع قالب
5	$r_d$	شعاع ورودی قالب
20	$R_h$	شعاع ورق‌گیر
3	$r_h$	شعاع داخلی ورق‌گیر
1.54	$C$	فاصله بین ورق‌گیر و قالب
40	$R_0$	شعاع ورق

ناهمسانگردی ورق در زاویه  $\theta$  نسبت به جهت نورد براساس کرنش‌های پلاستیک به صورت رابطه (1) تعریف می‌شود [24].

$$r_\theta = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} \quad (1)$$

فرآیند که لازمه دست‌یابی به پاسخی با دقت مطلوب است استفاده از الگوریتم‌های تکاملی به تنهایی را برای بهینه‌یابی به دلیل تعداد بالای شبیه‌سازی‌های مورد نیاز با مشکل مواجه می‌کند. از سوی دیگر استفاده از شبیه‌سازی تطبیقی به کمک الگوریتم‌های فازی برای بهینه‌یابی نیازمند تدوین قوانین بسیار دقیقی است که با توجه به ماهیت غیرخطی فرآیند هیدروفرمینگ کاری سخت و زمان‌بر است. از این‌رو این روش بیشتر برای پیدا کردن مسیرهای امکان‌پذیر<sup>1</sup> به جای مسیرهای بهینه استفاده می‌گردد.

در این پژوهش ترکیبی از یک شبیه‌سازی تطبیقی که با الگوریتم فازی یک‌پارچه شده است و الگوریتم تکاملی زنبورعسل مصنوعی<sup>2</sup> برای تعیین مسیرهای بهینه فشارهای جانبی و محفظه استفاده شده است. روش ارائه شده برای بهینه‌یابی تاکنون در هیچ پژوهشی گزارش نشده و برای نخستین بار در این مقاله به آن پرداخته شده است. شاخص‌های چروکیدگی و نازک‌شدگی به‌دست‌آمده از نتایج شبیه‌سازی به عنوان ورودی‌های منطق کنترل فازی و مقدار فشارهای محفظه و جانبی در هر گام به عنوان خروجی آن در نظر گرفته می‌شود. از الگوریتم زنبورعسل مصنوعی که محدوده جستجوی آن با توجه به خروجی‌های سیستم کنترل فازی تعیین می‌گردد، برای تعیین مقدار بهینه فشارهای جانبی و محفظه استفاده شده است. برای نمایش اثربخشی روش ارائه شده مقایسه‌ای بین توزیع ضخامت نمونه‌های شکل داده شده با مسیرهای فشار جانبی و محفظه به‌دست‌آمده از این روش با توزیع ضخامت نمونه‌های شکل داده شده با دیگر مسیرهای فشار جانبی و محفظه انجام شده است. در انتها مسیرهای فشار جانبی و محفظه به‌دست‌آمده از روش ترکیبی استفاده شده در این پژوهش با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است.

## 2- مراحل تجربی

شکل 1 طرح‌واره مجموعه قالب و سیستم تأمین فشار این پژوهش را نمایش می‌دهد. بیشینه فشار ایجاد شده در محفظه قالب و بر کناره‌های ورق توسط دو شیر کنترل که در مسیر پمپ‌ها قرار دارد، کنترل می‌گردد. استفاده از دو پمپ مستقل از یکدیگر در تأمین فشار محفظه و فشار جانبی امکان تغییر و کنترل هم‌زمان فشار جانبی و فشار محفظه را فراهم می‌آورد.

شکل 2 و جدول 1 به ترتیب پارامترهای هندسی مجموعه قالب مورد استفاده در این پژوهش و اندازه‌های آن را نمایش می‌دهد. سیستم‌های استفاده شده در این پژوهش شامل مجموعه قالب، ماشین شکل‌دهی و سیستم تأمین فشار در شکل 3 نشان داده شده‌اند.

در انجام آزمایش‌ها از یک دستگاه آزمایش اونیورسال<sup>3</sup> با ظرفیت 600kN برای اعمال نیروی شکل‌دهی، یک پمپ هیدرولیکی دی‌متغیر با حداکثر فشار 50MPa و یک پمپ هیدرولیکی دی‌ثابت با حداکثر فشار 100MPa جهت تأمین فشارهای مورد نیاز استفاده شده است، همچنین از ورق St13 با ضخامت 1.5mm و قطر 80mm استفاده شده که جدول 2 مشخصات آن را نمایش می‌دهد.

برای تعیین ناهمسانگردی ورق براساس استاندارد [23] نمونه‌هایی در جهت‌های مختلف (0، 45 و 90 درجه) نسبت به جهت نورد تهیه شده و سپس پارامترهای ناهمسانگردی ورق به کمک آزمایش کشش تعیین شده است.

<sup>1</sup> Feasible paths

<sup>2</sup> Artificial Bee Colony (ABC)

<sup>3</sup> Universal

جدول 2 خصوصیات مکانیکی و فیزیکی ورق St13

خاصیت	مقدار	واحد
چگالی [21,7]	7850	kg/m <sup>3</sup>
مدول یانگ <sup>1</sup> [22,7]	210	GPa
تنش تسلیم	158	MPa
ضریب استحکام	539	MPa
توان کار سختی	0.29	-
ضریب پواسون <sup>2</sup> [21]	0.32	-

جدول 3 مقادیر مشخصه‌های ناهمسانگردی و نسبت‌های تنش تسلیم ورق

مشخصه ناهمسانگردی	مقدار
$r_0$	0.972
$r_{45}$	1.176
$r_{90}$	1.131
$R_{22}$	1.0376
$R_{33}$	1.0298
$R_{12}$	0.9742

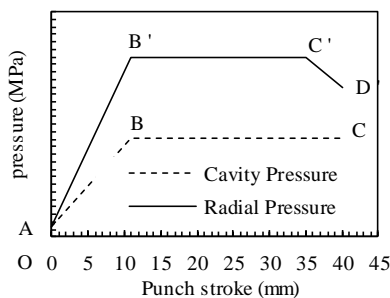


Fig. 4 Radial and chamber pressures versus punch stroke

شکل 4 مسیر فشارهای محفظه و شعاعی برحسب جابه‌جایی سنبه

بیشینه برسد، بر توزیع ضخامت نمونه شکل گرفته بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که اگر جابه‌جایی سنبه تا زمانی که میزان فشار محفظه به مقدار بیشینه می‌رسد، برابر با مجموع شعاع سنبه و شعاع ورودی قالب باشد نمونه‌ای با توزیع ضخامت یکنواخت‌تر و حداکثر نازک‌شدگی ایجاد شده کمتر به دست می‌آید؛ بنابراین در این پژوهش میزان جابه‌جایی سنبه هنگامی که فشارهای محفظه و جانبی به مقدار بیشینه می‌رسد برابر با 10mm در نظر گرفته شده که مجموع شعاع سنبه و شعاع ورودی قالب است. در BC و B'C' مقدار فشار به ترتیب در فشار محفظه و فشار جانبی به مقدار تنظیم شده ثابت می‌رسد. برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی مقادیر 26MPa و 48MPa به ترتیب برای BC و B'C' در نظر گرفته شده است.

### 3- شبیه‌سازی عددی

شبیه‌سازی اجزای محدود با فرمول‌بندی صریح نتایج قابل اعتمادتری را در پیش‌بینی کماتش، چروکیدگی و ترکیدگی حاصل می‌کند [15]. در این پژوهش از نرم‌افزار تجاری اجزای محدود آباکوس<sup>3</sup> 6-13 برای شبیه‌سازی عددی استفاده شده است. خواص فیزیکی و مکانیکی St13، براساس جدول 1 به نرم‌افزار معرفی گردید. در تعیین حد تسلیم ماده از معیار تسلیم هیل استفاده شده است [8]. مدل اجزای محدود تهیه شده از مجموعه قالب در شکل 5 نمایش داده شده است.

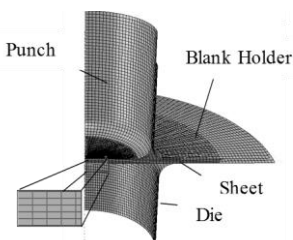


Fig. 5 The assembled finite element model

شکل 5 مدل اجزای محدود در حالت مونتاژ شده

که  $\epsilon_t$  و  $\epsilon_w$  به ترتیب کرنش عرضی و ضخامتی نمونه آزمون کشش و در زاویه  $\theta$  نسبت به جهت نورد است. جدول 3 مقادیر مشخصه‌های ناهمسانگردی را نشان می‌دهد. برای شبیه‌سازی ناهمسانگردی ورق ضروری است تا نسبت‌های تنش تسلیم ( $R$ ) به صورت رابطه (2) به نرم‌افزار اجزای محدود معرفی شود.

$$R_{22} = \sigma_{22}/\sigma, R_{11} = \sigma_{11}/\sigma$$

$$R_{33} = \sigma_{33}/\sigma, R_{12} = \sigma_{12}/\sigma \quad (2)$$

که  $\sigma_{ij}$  مؤلفه‌های تنش را نمایش می‌دهد. نسبت‌های کرنش‌های پلاستیک را می‌توان با استفاده از روابط (3-6) به صورت زیر تبدیل کرد [25].

$$R_{11} = 1 \quad (3)$$

$$R_{22} = \frac{r_{90}(r_0 + 1)}{r_0(r_{90} + 1)} \quad (4)$$

$$R_{33} = \frac{r_{90}(r_0 + 1)}{r_0 + r_{90}} \quad (5)$$

$$R_{12} = \frac{3r_{90}(r_0 + 1)}{\sqrt{(2r_{45} + 1)(r_0 + r_{90})}} \quad (6)$$

برای تأمین فشار مورد نیاز از روغن هیدرولیک با ویسکوزیته 5.6 cSt استفاده شده است. حداکثر اختلاف فشار ایجاد شده بین فشارهای جانبی و محفظه به پارامترهای متعددی همچون مشخصات پمپ‌های استفاده شده جهت تأمین هریک از فشارها، میزان فاصله بین قالب و ورق‌گیر و ضخامت ورق بستگی دارد. ورق‌گیر به وسیله 8 پیچ استحکام بالا به قالب پایینی محکم شده است. فاصله بین قالب و ورق‌گیر در سطح فلنج در طول فرآیند ثابت است. در این قالب از یک حلقه آب‌بندی در انتهای قالب استفاده شده است تا با جلوگیری از خروج سیال شکل‌دهی امکان ایجاد فشار جانبی بیشتر از فشار محفظه را فراهم آورد. در این فرآیند ابتدا فشار محفظه به ورق وارد می‌گردد تا آن را به سطح ورق‌گیر بچسباند. با این کار یک ناحیه آب‌بند بین سطح بالایی ورق و ورق‌گیر شکل می‌گیرد که از خروج سیال از درون قالب جلوگیری می‌نماید. شکل 4 طرح‌واره‌ای از مسیر فشارهای محفظه و جانبی به کار رفته برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی انجام شده را نشان می‌دهد.

مقدار کوچکی پیش‌بشک‌های قبل از شروع حرکت سنبه، شکل‌پذیری ورق را در فرآیند کشش عمیق هیدروپنایمی با فشار شعاعی بهبود می‌بخشد [7]. در مسیرهای فشار تعریف شده در این مقاله فشار 2 MPa به عنوان پیش‌بار برای فشارهای جانبی و محفظه اعمال گردید که در شکل 4 با OA نمایش داده شده است. شیب خطوط AB و AB' میزان جابه‌جایی سنبه را تا زمانی که فشار به بیشترین مقدار خود برسد، تعیین می‌کند. ونگ و همکاران [6] اثر مقدار جابه‌جایی سنبه را تا زمانی که فشار محفظه به مقدار

<sup>1</sup> Young's modulus

<sup>2</sup> Poisson's ratio

<sup>3</sup> Abaqus

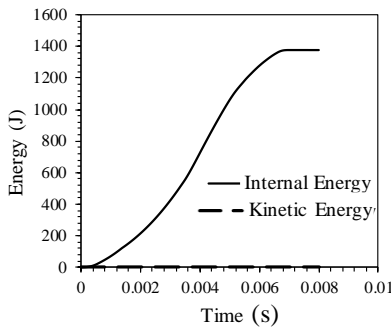


Fig. 6 Comparison of kinetic energy and internal energy

شکل 6 مقایسه انرژی جنبشی و انرژی داخلی

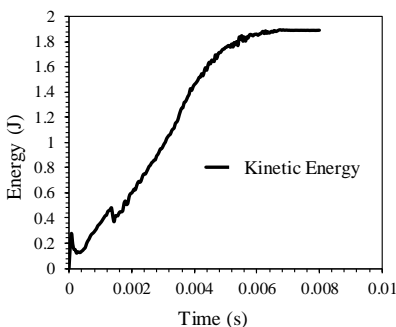


Fig. 7 Kinetic energy of the entire model

شکل 7 انرژی جنبشی کل مدل

روبه داخل سیال است که نسبت و مقدار آن‌ها در هر لحظه نقش مهمی را در تولید قطعه‌های سالم بازی می‌کند. در این فرآیند اگر فشار جانبی خیلی بیشتر از فشار محفظه باشد، تنش‌های فشاری ایجاد شده در دیواره و ناحیه فلنج و به تبع آن تمایل به چروکیدگی در این نواحی قطعه شکل داده شده افزایش می‌یابد [6]. از سوی دیگر فشار بالای محفظه می‌تواند منجر به افزایش نازک‌شدگی و یا حتی پارگی در نمونه مورد بررسی گردد [7]؛ بنابراین تعیین مسیر بهینه فشارهای جانبی و محفظه نقش مهمی را در دست‌یابی به قطعه‌ای با حداقل نازک‌شدگی و بدون چروکیدگی بازی می‌کند.

شکل 8 نمایی کلی از مسیر فشارهای محفظه و جانبی را نمایش می‌دهد، هر مسیر با 7 نقطه مشخص می‌گردد. براساس گفته بخش 2 مقدار 2MPa به عنوان پیش‌بار برای هر دو فشار در نظر گرفته شده است. با تعیین مقدار بهینه فشارهای محفظه و جانبی در 10، 20، 40، 60، 80 و 100 درصد از پیشرفت فرآیند می‌توان مسیرهای بهینه فشار محفظه و جانبی را مشخص نمود.

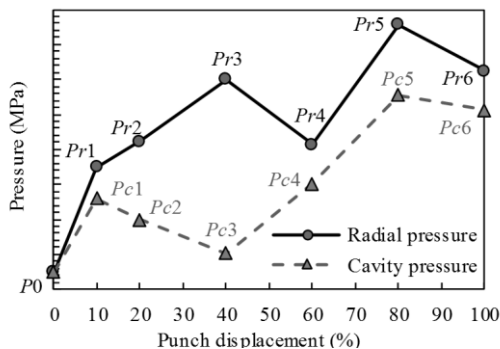


Fig. 8 General shape of the radial and cavity pressure paths

شکل 8 شکل کلی مسیرهای فشار جانبی و محفظه

به منظور بررسی پدیده چروکیدگی مدل‌سازی به صورت سه بعدی انجام شده است. با توجه به تقارن حاکم بر مسأله تنها یک چهارم مجموعه قالب شبیه‌سازی شده است. مجموعه قالب به صورت صلب با المان‌های 4 گره‌ای صفحه‌ای<sup>1</sup> و ورق به صورت انعطاف‌پذیر با المان‌های 8 گره‌ای جامد<sup>2</sup> مدل‌سازی گردید [22]. تغییرات ضخامت در نمونه تولید شده از پارامترهای مهم مورد بررسی در این پژوهش محسوب می‌گردد؛ بنابراین از پنج المان در راستای ضخامت ورق استفاده گردید تا تغییرات ضخامت در سراسر نمونه به خوبی مورد ارزیابی قرار گیرد. برای شبکه‌بندی ورق در نرم‌افزار اجزای محدود از 13200 المان استفاده شده است. در حین فرآیند مجموعه قالب و ورق گیر ثابت است و سنبه تنها می‌تواند در راستای موازی با محور مرکزی خود جابه‌جا گردد. براساس مرجع [26] ضریب اصطکاک بین سطح سنبه، ورق گیر و قالب با ورق به ترتیب برابر با 0.06، 0.12 و 0.05 در نظر گرفته شده است. مدل‌سازی تماس بین ورق و اجزای قالب با استفاده از الگوریتم تماس پنالتی<sup>3</sup> و مدل اصطکاک کولمب است. با توجه به اختلاف فشاری که بین فشار جانبی و فشار محفظه در روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی و با جریان روبه داخل سیال در هر لحظه وجود دارد، فشار در همه نقاط بر ورق در ناحیه فلنج یکسان نبوده و با گستره‌ای در هر زمان مواجه است. توزیع فشار سیال شکل‌دهی بر ورق در ناحیه فلنج در راستای شعاعی و در فاصله  $r$  از محور مرکزی سنبه در هر لحظه برابر با رابطه (7) است [6].

$$Pr = PR - (PR - PC) \left( \frac{\ln\left(\frac{r}{R}\right)}{\ln\left(\frac{R1}{R}\right)} \right) \quad (7)$$

که در آن  $PR$  فشار جانبی،  $PC$  فشار محفظه،  $R1$  فاصله شعاع ورودی قالب از مرکز سنبه و  $R$  فاصله انتهایی ورق از مرکز سنبه در هر لحظه است. برای معرفی توزیع فشار بر سطح ورق در هر لحظه در نرم‌افزار آباکوس از زیربرنامه تعریف فشار<sup>4</sup> استفاده شده است. زیربرنامه تعریف فشار برنامه‌ای است که برای تعریف تغییرات مقدار بارگذاری برحسب تابعی از زمان، مکان، سرعت و... برای گروهی از نقاط یا سطوح به کار می‌رود [25]. در این برنامه که با استفاده از نرم‌افزار فرترن<sup>5</sup> کدنویسی شده است، مقدار فشار محفظه، فشار جانبی و مکان هندسی لبه انتهایی ورق در هر لحظه به عنوان ورودی وارد شده و توزیع فشار در ناحیه فلنج به صورت یک توزیع غیریکنواخت غیرخطی در هر لحظه بر هر المان محاسبه و به مدل اعمال می‌گردد. پس از اتمام شبیه‌سازی ابتدا باید درستی نتایج حاصل از آن مورد ارزیابی قرار گیرد. خروجی‌های انرژی همواره بخش مهمی از یک تحلیل صریح است. شبیه‌سازی از یک فرآیند زمانی شبه‌استاتیکی فرض می‌شود که در آن انرژی جنبشی مدل بیش از 5% از انرژی داخلی آن نباشد [27]. شکل‌های 6 و 7 پیشینه انرژی جنبشی و انرژی داخلی کل مدل را در تحلیل صورت گرفته نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار انرژی جنبشی در برابر انرژی داخلی آن بسیار ناچیز است؛ بنابراین می‌توان این شبیه‌سازی را شبه‌استاتیکی در نظر گرفت.

#### 4- بهینه‌سازی

فشار جانبی و فشار محفظه در هر لحظه دو تا از مهم‌ترین پارامترهای کنترلی در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی به کمک فشار شعاعی و با جریان

<sup>1</sup> A 4-node 3-D bilinear rigid quadrilateral (R3D4)

<sup>2</sup> An 8-node linear brick, reduced integration, hourglass control (C3D8R)

<sup>3</sup> Penalty

<sup>4</sup> User subroutine to specify nonuniform distributed loads (VDLOAD)

<sup>5</sup> Fortran

زمان فرآیند با محاسبه مقدار فشارهای محفظه و جانبی در گام اول به عنوان ورودی به حل گر اجزای محدود آباکوس وارد می‌گردند. با توجه به این که روش المان محدود روندی گام به گام دارد، در پایان هر گام این اجازه را می‌دهد که مقادیر پارامترها برای گام بعد اصلاح گردد [14]. در پایان هر گام حداکثر نازک‌شدگی ایجاد شده در سراسر قطعه شکل‌داده شده و ارتفاع چروکیدگی به عنوان خروجی‌های حل گر اجزای محدود وارد سیستم کنترل‌کننده فازی می‌گردد. دست‌یابی به قطعه‌ای با کم‌ترین نازک‌شدگی در سراسر قطعه و بدون چروکیدگی، با کم‌ترین فشار محفظه و بیشترین فشار جانبی راهبرد اساسی استفاده شده در این سیستم فازی را تشکیل می‌دهند. نرخ افزایش فشار محفظه و جانبی در گام بعدی خروجی‌هایی هستند که از سیستم فازی حاصل می‌گردند. تعیین محدوده جستجو برای متغیرهای فرآیند، پارامتر تنظیمی در الگوریتم زنبورعسل مصنوعی است که با تأثیر از خروجی‌های سیستم فازی تعیین می‌گردند. با تولید پاسخ‌های جدید استفاده از مجموعه محاسبه تابع هدف و ارزیابی پاسخ‌ها در الگوریتم زنبورعسل مصنوعی بهترین مقادیر برای نرخ افزایش فشارهای محفظه و جانبی در گام بعدی محاسبه می‌گردد. با تکرار این چرخه در هر گام نرخ افزایش فشارهای محفظه و جانبی و به تبع آن مقادیر بهینه فشار جانبی و محفظه در هر گام زمانی تعیین می‌گردد.

#### 4-2- الگوریتم کنترل فازی

رویکرد تطبیقی بر پایه توانایی تشخیص شروع یا رشد عیوب و یا شرایط نامناسب و عکس‌العمل مناسب به آن‌ها قرار دارد [28]. در این پژوهش از

در این پژوهش از ترکیبی از روش الگوریتم زنبورعسل مصنوعی و شبیه‌سازی تطبیقی یک‌پارچه شده با الگوریتم فازی برای بهینه‌یابی مسیرهای فشار محفظه و جانبی استفاده شده است. در این روش سعی شده تا با حفظ مزایای روش تطبیقی با ایجاد کنترل انطباق‌پذیر بر گام‌های صورت گرفته در حین فرآیند به کمک طراحی مسیر بازگشتی دقت بهتری برای حل مسائل با چند متغیر فراهم گردد.

#### 4-1- روش ترکیبی

شکل 9 روندنمایی از روش بهینه‌یابی این پژوهش را جهت دست‌یابی به مسیر بهینه فشارهای جانبی و محفظه نمایش می‌دهد. برای پیاده‌سازی این روند از نرم‌افزار متلب استفاده شده است. در این بررسی فرآیند شبیه‌سازی به  $n$  گام تقسیم‌بندی می‌شود. در پایان هر گام نتایج شبیه‌سازی ارزیابی شده و مقادیر فشارهای جانبی و محفظه مناسب تعیین می‌شود. ارتفاع چروکیدگی و بیشترین درصد نازک‌شدگی در سراسر قطعه شکل داده شده، معیارهای ارزیابی نمونه‌های شبیه‌سازی شده در هر گام را تشکیل می‌دهند. در این فرآیند ابتدا پارامترهای اولیه شامل محدوده فشار مورد بررسی، مقدار نرخ افزایش فشارهای محفظه و جانبی در گام نخست و تعداد گام‌های کل فرآیند تعیین می‌گردد. هر چه تعداد گام‌های کل فرآیند بیشتر باشد مسیر بهینه برای فشارهای محفظه و جانبی با دقت بیشتری حاصل می‌گردد، اگرچه زمان محاسبات افزایش می‌یابد. مقدار فشار محفظه در گام  $n$ -ام ( $P_c^n$ ) با نرخ افزایش فشار محفظه ( $\alpha$ ) و مقدار فشار جانبی در گام  $n$ -ام ( $P_j^n$ ) با نرخ افزایش فشار جانبی ( $\beta$ ) تعیین می‌شود. این مقادیر به همراه حداکثر فشار و

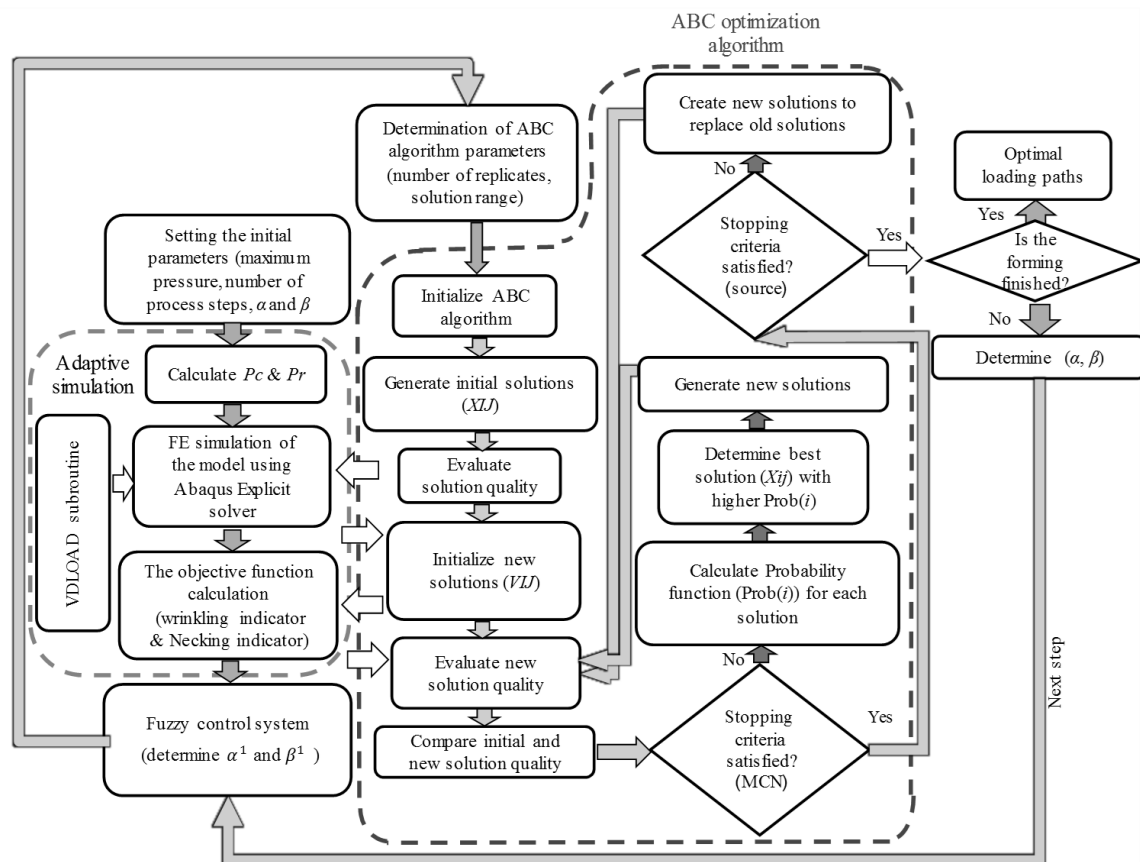


Fig. 9 Flowchart of the presented algorithm in this research

شکل 9 روندنمایی از الگوریتم ارائه شده در این پژوهش

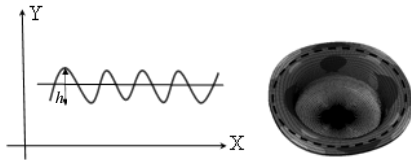


Fig. 11  $R_N$  variation on cylinder circumference

شکل 11 تغییرات پارامتر  $R_N$  در محیط استوانه

منحنی حد شکل‌دهی [37,38] و استفاده از معیار حداکثر نازک‌شدگی از گستردگی بیشتری برخوردارند. منحنی حد شکل‌دهی<sup>1</sup> اغلب از داده‌های گردآوری شده از آزمایش‌های تجربی متعدد با مسیرهای کرنش خطی متفاوت تشکیل می‌گردد [14]. با توجه به این‌که تعیین نمودار حد شکل‌دهی از طریق آزمایش‌های تجربی فرآیندی هزینه‌بر است، تعیین نمودار FLC با شبیه‌سازی اجزای محدود [39] موضوع تحقیقات بسیاری از محققان را تشکیل می‌دهد. کاهش ضخامت نمونه شکل داده شده در شبیه‌سازی المان محدود در معیار حداکثر نازک‌شدگی با اندازه‌گیری فاصله بین گره‌های بالایی المان‌های سطح بالا و گره‌های پایینی المان‌های سطح پایین محاسبه می‌گردد. در این حالت هنگامی که کاهش ضخامت بیش از درصد نازک‌شدگی مجاز باشد شکست اتفاق می‌افتد [40]. درصد حداکثر نازک‌شدگی در نمونه شکل‌داده شده عبارت از روابط (8,9) است.

$$\% \text{ Max Thinning} = \frac{t_0 - t}{t_0} \quad (8)$$

$$t = t_0 \exp(\epsilon_r) \quad (9)$$

در روابط بالا  $t_0$  ضخامت اولیه ورق  $t$  کم‌ترین ضخامت ایجاد شده در سراسر نمونه شکل‌داده شده و  $\epsilon_r$  کرنش حقیقی اتفاق افتاده در راستای ضخامت ورق است. از سوی دیگر با در نظر گرفتن شرایط کرنش صفحه‌ای روابط (10-12) را داریم.

$$\epsilon_t + \epsilon_\theta + \epsilon_r = 0 \quad (10)$$

$$\epsilon_\theta = 0 \quad (11)$$

$$\epsilon_t = -\epsilon_r = -\ln(1 + e_r) \quad (12)$$

در آن‌ها  $\epsilon_\theta$  کرنش محیطی حقیقی  $\epsilon_r$  کرنش شعاعی حقیقی و  $e_r$  کرنش شعاعی مهندسی است.

در شرایط کرنش صفحه‌ای از مدل ارائه شده توسط گروه تحقیقاتی کشش عمیق آمریکای شمالی<sup>2</sup> برای تخمین کرنش مهندسی محیطی به صورت رابطه (13) استفاده می‌گردد.

$$e_r = (23.3 + 14.13t_0) \left( \frac{n}{0.21} \right) \quad (13)$$

در آن  $n$  نمای کرنش سختی است. در این پژوهش از معیار حداکثر نازک‌شدگی برای تعیین حد شکست در الگوریتم فازی استفاده شده است. با توجه به رابطه (8) حداکثر نازک‌شدگی مجاز برای ورق فولادی با ضخامت اولیه 1.5mm برابر با 39.67% در نظر گرفته شده است.

#### 4-2-2- طراحی سیستم فازی

تعیین فشارهای محفظه و جانبی مناسب در هر لحظه از فرآیند هدف استفاده از سیستم فازی در این تحقیق را تشکیل می‌دهد. مقدار فشار محفظه در گام  $n$ -ام ( $P_c^n$ )، با نرخ افزایش فشار محفظه ( $\alpha$ )، و مقدار فشار جانبی در گام  $n$ -ام ( $P_r^n$ )، با نرخ افزایش فشار جانبی ( $\beta$ ) تعیین می‌گردد که عبارت از روابط (14,15) است.

$$P_c^n = P_c^{n-1} + \alpha \Delta P_c \quad (14)$$

الگوریتم کنترل فازی به همراه الگوریتم تکاملی زنبورعسل مصنوعی برای تعیین مقادیر فشار محفظه و جانبی بهینه در هر لحظه از شبیه‌سازی استفاده شده است. شاخص چروکیدگی و شاخص نازک‌شدگی در سراسر قطعه شکل داده شده به عنوان توابع ارزیابی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مقادیر توابع ارزیابی باید به عنوان متغیرهای ورودی کنترل‌کننده فازی‌سازی شوند.

#### 4-2-1- توابع ارزیابی

– چروکیدگی

در شکل‌دهی فلزات به تغییر شکل‌های موجی کوچک خارج از صفحه که در اثر یک ناپایداری مکانیکی منطقه‌ای شکل می‌گیرند، چروک می‌گویند [29,30]. چروک‌های ایجاد شده در نمونه شکل‌داده شده تحت تأثیر پارامترهای زیادی مانند خواص مکانیکی، هندسه قالب و شرایط تماسی قرار دارند [30]. استفاده از تئوری دوشاخگی پلاستیک [32]، روش انرژی [33] و روش هندسی [28] سه روش عمده در پیش‌بینی چروکیدگی را تشکیل می‌دهند. تئوری دوشاخگی و روش انرژی قادر به پیش‌گویی در مورد شروع چروکیدگی است، اما نمی‌توانند در مورد کیفیت چروک اطلاعاتی را ارائه دهند [34]. در مقابل استفاده از روش هندسی در پیش‌بینی چروکیدگی این امکان را می‌دهد که حساسیت چروک را در هر مکان بررسی و کمی‌سازی نمود [31]. در این پژوهش از روش هندسی به منظور بررسی شکل‌گیری چروکیدگی استفاده شده است.

برای بررسی چروکیدگی به روش هندسی از شیوه ارائه شده در شکل 10 استفاده شده که در آن  $R_N$  شعاع ورودی قالب است. با توجه به روند افزایش تنش فشاری در نواحی نزدیک به شعاع ورودی قالب و مستعد بودن این نواحی نسبت به نواحی نزدیک به سنبه و مرکز ورق برای تشکیل چروکیدگی، مسیر نزدیک به شعاع ورودی قالب جهت بررسی شروع چروکیدگی انتخاب شده است [35]. در این روش تغییرات موج چروکیدگی بر محیط دیواره استوانه اندازه‌گیری می‌شود. با به‌دست آوردن تغییرات پارامتر  $R_N$  در مسیر تعیین شده بر محیط فلنج نمونه در حال شکل‌گیری، چروکیدگی در ناحیه شعاع آن بررسی می‌گردد. با محاسبه تغییرات  $R_N$  بر محیط استوانه به صورت نمودارهای موج، ارتفاع چروکیدگی که اختلاف میان نقاط حداکثر و حداقل دامنه موج چروکیدگی است، تعیین می‌گردد (شکل 11). در این پژوهش ارتفاع چروکیدگی 0.05mm به عنوان حد شروع چروکیدگی در نظر گرفته شده است [36].

– نازک‌شدگی

ترکیدگی یکی از مرسوم‌ترین عیوبی است که در فرآیندهای شکل‌دهی فلزات به وجود می‌آید که به میزان شکل‌پذیری ماده مورد استفاده بستگی دارد [31].

هنگام شکل‌دهی ورق‌های فلزی ابتدا نازک‌شدگی اتفاق می‌افتد که با ادامه فرآیند به ترکیدگی منجر می‌گردد [14]. روش‌های زیادی برای تعیین نازک‌شدگی در شکل‌دهی ورق‌های فلزی وجود دارد که روش‌های استفاده از

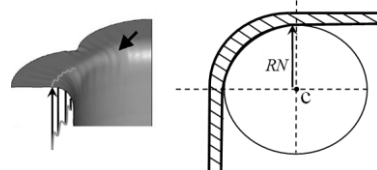


Fig. 10 Geometric method for wrinkling study on cylindrical parts

شکل 10 روش هندسی برای بررسی چروکیدگی در قطعات استوانه‌ای

<sup>1</sup> Forming Limit Curve (FLC)

<sup>2</sup> North American Deep Drawing Research Group (NADDRG)

یا زنبور کارگر<sup>۷</sup> (EB) را اختیار کند [44]. با توجه به وضعیت منبع غذا نقش زنبورها می‌تواند تغییر کند [45]. به طور کلی می‌توان مراحل گردآوری شهد توسط زنبورها را به شکل زیر توصیف نمود.

در ابتدا کلونی تنها حاوی زنبورهای دیده‌بان و زنبورهای ناظر است. زنبورهای دیده‌بان برای بررسی وضعیت منابع غذا به بیرون فرستاده می‌شوند و زنبورهای ناظر در نزدیکی کندو منتظر می‌مانند. هنگامی که هر زنبور دیده‌بان یک منبع غذایی پیدا می‌کند به زنبور کارگر تغییر نقش می‌دهد. سپس مقداری از منبع غذایی را برداشته و به کندو برمی‌گردد تا اطلاعات خود را در اختیار زنبورهای ناظر قرار دهد. او با حرکات موزونی که انجام می‌دهد اطلاعات مناسبی را در مورد وضعیت منبع غذایی، فاصله از کندو، مکان قرارگیری و... در اختیار زنبورهای ناظر قرار می‌دهد. زنبورهای ناظر با مشاهده این حرکات یکی از منابع غذایی یافت‌شده توسط همه زنبورهای دیده‌بان را براساس برآورد کیفیت منابع شهد انتخاب می‌کنند. در این مرحله

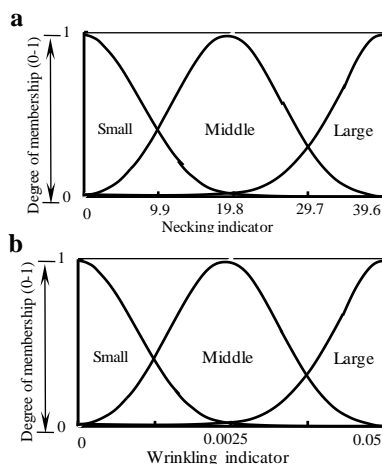


Fig. 12 The membership functions of a- necking, b- wrinkling indicators

شکل 12 توابع عضویت شاخص‌های الف- چروکیدگی، ب- نازک‌شدگی

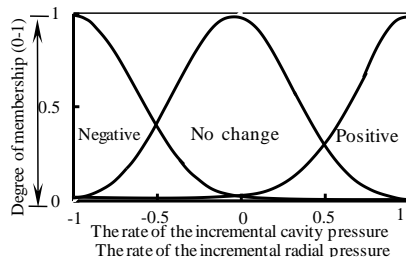


Fig. 13 The membership functions of the rate of incremental cavity and radial pressures

شکل 13 توابع عضویت نرخ تغییرات فشارهای جانبی و محفظه

جدول 4 مجموعه قوانین فازی برای سیستم کنترلی

$\beta/\alpha$	شاخص چروکیدگی		
	کم	متوسط	زیاد
کم	No/P	No/No	No/N
متوسط	No/P	No/No	No/N
زیاد	No/P	N/No	N/N

<sup>7</sup> Employed Bee (EB)

$$P_r^n = P_r^{n-1} + \beta \Delta P_r \quad (15)$$

به ترتیب مقدار فشارهای محفظه و جانبی در گام پیشین،  $P_c^{n-1}$  و  $P_r^{n-1}$  مقادیر از پیش تعیین شده‌ای هستند که در این تحقیق هر دو برابر با 40MPa در نظر گرفته شده‌اند. برای تشکیل یک سیستم فازی ابتدا باید ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم فازی‌سازی شوند. شاخص‌های چروکیدگی و نازک‌شدگی ورودی‌های مجموعه فازی را تشکیل می‌دهند که به سه مجموعه (کم، متوسط و زیاد) فازی‌سازی شده‌اند. نرخ افزایش فشار محفظه ( $\alpha$ ) و نرخ افزایش فشار جانبی ( $\beta$ ) خروجی‌های مجموعه فازی را تشکیل می‌دهند که به سه مجموعه منفی<sup>۱</sup> (N)، بدون تغییر<sup>۲</sup> (No) و مثبت<sup>۳</sup> (P) فازی‌سازی شده‌اند و می‌توانند مقادیر پیوسته بین 1 و -1 را اتخاذ کنند. تابع عضویت منحنی است که نحوه نگاشت هر نقطه از فضای ورودی به یک مقدار عضویت (درجه عضویت) بین 0 و 1 را مشخص می‌کند. مقادیر عضویت به عنوان ضرایبی در قوانین فازی ضرب می‌شوند تا میزان تأثیر آن‌ها بر خروجی تعیین گردد [31]. توابع عضویت می‌توانند شکل‌های مختلفی داشته باشند [41]. شکل‌های 12 و 13 توابع عضویت ورودی‌ها و خروجی‌ها را نشان می‌دهند. تعیین قوانین فازی بخش دیگری از تکمیل سیستم فازی را تشکیل می‌دهد. قوانین فازی ترکیبی از عبارات منطقی ساده‌ای هستند (بر پایه اگر آن‌گاه B) که برای حل مسأله بر پایه منطق استفاده می‌شوند [31]. قوانین فازی عموماً از دانش تجربی استخراج می‌شوند که در مورد فرآیندها وجود دارد [8]. سپس از الزام محدود برای تنظیم قوانین و توابع عضویت استفاده می‌شود [14]. در این پژوهش با در نظر گرفتن حالات مختلفی از توابع عضویت مثلثی، گوسی و... و تعیین قوانین فازی متناسب به کمک جدول ارجاع<sup>۴</sup> شکل گرفته از دانش تجربی، تابع عضویت گوسی با پارمترهای یادشده عملکرد بهتری را در پیش‌بینی رفتار مطلوب داشته است. مجموعه فازی طراحی شده دارای دو ورودی است که هر کدام به سه مجموعه تقسیم شده است؛ بنابراین در مجموع 9 قانون برای سیستم طراحی شده است. مجموعه قوانین در جدول 4 نمایش داده شده است که هر خانه از آن یک قانون را بیان می‌کند. در این جدول مقادیر خروجی هر قانون یک مجموعه فازی است که با جمع همه آن‌ها یک خروجی فازی شکل برای کنترل سیستم حاصل می‌شود [31].

در این پژوهش از مدل ممدانی برای سیستم استنتاج فازی استفاده شده است. در پایان نتیجه نهایی غیر فازی می‌گردد تا پاسخ نهایی حاصل شود. در این پژوهش از روش مرکز ثقل برای غیرفازی‌سازی استفاده شده است.

#### 4-3- الگوریتم تکاملی ABC

در سال‌های اخیر الگوریتم‌های هوشمند جدید متعددی برای حل مسائل بهینه‌سازی توسعه داده شده است. این الگوریتم‌ها توان پیدا کردن راه حل‌های نزدیک به پاسخ بهینه همراه با زمان محاسباتی قابل قبول را دارند [42]. الگوریتم زنبورعسل مصنوعی یک عضو به نسبت جدید از الگوریتم‌های هوشمند است که در سال 2005 توسط کارابوگا [43] به عنوان یک الگوریتم بهینه‌سازی رفتار زنبورهای یک کلونی را شبیه‌سازی می‌کند. در یک کلونی هر زنبور می‌تواند یکی از سه نقش زنبور دیده‌بان<sup>۵</sup> (SB)، زنبور ناظر<sup>۶</sup> (OB) و

<sup>1</sup> Negative

<sup>2</sup> No change

<sup>3</sup> Positive

<sup>4</sup> Look up table

<sup>5</sup> Scout Bee (SB)

<sup>6</sup> Onlooker Bee (OB)



دست‌یابی به قطعه‌ای با حداقل نازک‌شدگی ایجاد شده در سراسر قطعه شکل‌داده شده بدون چروکیدگی هدف اصلی این تحقیق را تشکیل می‌دهد. حداقل نازک‌شدگی ایجادشده در سراسر قطعه شکل‌داده شده و عاری از چروکیدگی به عنوان تابع ارزیابی در نظر گرفته شده است. در این الگوریتم از مجموعه محاسبه تابع هدف برای محاسبه توابع ارزیابی پاسخ‌های تولید شده توسط الگوریتم زنبورعسل مصنوعی استفاده می‌گردد.

## 5- نتایج و بحث

### 5-1- صحت‌سنجی نتایج

شبیه‌سازی صحت‌سنجی شده با نتایج آزمایشگاهی در حین فرآیند علاوه بر انتهای آن، نقش مهمی را در تهیه مدل شبیه‌سازی تطبیقی فرآیند یادشده ایفا می‌کند. نمونه‌هایی از قطعات استوانه‌ای شکل داده شده از جنس St13 در فرآیند کشش عمیق هیدروپنایمی با فشار شعاعی و با جریان روبه داخل سیال در حالت تجربی و شبیه‌سازی در شکل 14 نمایش داده شده است.

همان‌طور که در شکل 14 دیده می‌شود هندسه قطعات در حالت شبیه‌سازی و تجربی از تطابق خوبی برخوردار است. منحنی توزیع ضخامت در قطعه شکل‌داده شده و نیروی عکس‌العمل وارده به سنبه برای قطعه فولادی در شکل‌های 15 و 16 نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی وجود دارد؛ بنابراین به کمک مدل اجزای محدود ایجاد شده می‌توان فرآیند شکل‌دهی نمونه‌های مورد بررسی در فرآیند کشش عمیق هیدروپنایمی با فشار شعاعی و با جریان روبه داخل سیال را با مسیرهای فشار مختلف با دقت مطلوبی شبیه‌سازی کرد.

### 5-2- نتایج و بحث بهینه‌سازی

تعیین مسیر بهینه فشارهای محفظه و جانبی برای دست‌یابی به قطعه استوانه‌ای شکل‌داده شده با حداقل نازک‌شدگی ایجاد شده در سراسر قطعه و بدون چروک هدف از این مطالعه را تشکیل می‌دهد. همان‌طور که پیشتر بیان شد در این پژوهش کل فرآیند شبیه‌سازی به گام‌های مجزا از هم و به شش گام تقسیم شده است. در هر گام فشارهای بهینه محفظه و جانبی به کمک الگوریتم ارائه شده در بخش 4 تعیین می‌گردد. شکل 17 مسیرهای فشار بهینه در شکل‌دهی قطعه استوانه‌ای با روش کشش عمیق هیدروپنایمی با فشار شعاعی و با جریان روبه داخل سیال به کمک الگوریتم ارائه شده را نمایش می‌دهد. در ابتدای فرآیند فشار محفظه کم است هر چند که فشار جانبی در بیشترین اختلاف ممکن نسبت به آن قرار دارد. سپس فشار محفظه زیاد می‌شود تا به مقدار 30MPa برسد. در این مرحله فشار جانبی نیز افزایش می‌یابد و در گام بعدی به مقدار حداکثر خود، 60MPa، می‌رسد.

در ادامه که هندسه قطعه به شکل‌نهایی نزدیک می‌شود، مقادیر فشار محفظه و شعاعی کاهش می‌یابد و تا انتهای فرآیند تقریباً ثابت باقی می‌ماند. شکل‌های 18 و 19 منحنی‌های توزیع ضخامت و نیروی شکل‌دهی نمونه شکل‌داده شده با مسیرهای بهینه فشار محفظه و جانبی برای شکل‌دهی قطعه فولادی را نمایش می‌دهد. حداکثر اختلاف بین منحنی‌های توزیع ضخامت

جدول 5 پارامترهای تنظیم الگوریتم زنبور عسل مصنوعی

Table 5 Setting parameters of the ABC algorithm

جمعیت اولیه	حداکثر تعداد	ابعاد مسأله	آستانه رهاسازی <sup>1</sup>
15	60	3	2

<sup>1</sup> Triggering threshold

منبع بهتر احتمال بیشتری برای انتخاب شدن دارد. به محض این‌که هر منبع غذایی پایان می‌یابد، زنبورهای کارگر آن را رها می‌کنند و به زنبور دیده‌بان تبدیل می‌شوند تا بتوانند منبع غذایی جدید را پیدا کنند. کلونی زنبور عسل با تکرار این چرخه اعضای بیشتری را برای یافتن بهترین منبع غذایی اختصاص می‌دهد. در این الگوریتم موقعیت یک منبع غذایی یک راه‌حل مسأله بهینه‌سازی را نشان می‌دهد. موقعیت بهترین منبع غذا (نزدیک‌ترین پاسخ به حالت بهینه) یک بردار  $D$  بعدی است که  $D$  تعداد پارامترهای مسأله بهینه‌سازی است. برای هر مسأله خاص بردار راه‌حل  $X$  وجود دارد که کیفیت این راه‌حل توسط تابع هدف  $F(x)$  برای همان مسأله ارزیابی می‌شود. در الگوریتم ABC راه‌حل‌های اولیه با استفاده از رابطه (16) ایجاد می‌گردد [46] که در آن  $X_i(j)$  - $i$ امین عنصر از  $i$ -امین راه‌حل،  $\Phi(j)$  یک عدد حقیقی تصادفی با توزیع یکنواخت در محدوده بین  $[0, 1]$ ، و  $UB(j)$  و  $LB(j)$  به ترتیب، حداکثر و حداقل مقادیر متغیرهای مستقل مسأله به صورت رابطه (16) می‌باشند.

$$X_i(j) = LB(j) + \Phi(j) (UB(j) - LB(j)) \quad (16)$$

راه‌حل‌های  $X_i (i = 1 \dots SN)$  در محدوده پارامترهای تصادفی تولید می‌شوند که  $SN$  تعداد منابع غذایی و برابر با تعداد زنبورهای EB است. در مرحله بعد هر EB به صورت تصادفی یک عنصر  $X_i(j)$  از منبع  $i$  را تغییر می‌دهد. سپس برای هر EB یک منبع جدید توسط رابطه (17) ایجاد می‌شود [47].

$$V_i(j) = X_i(j) + \mu_i(j) (X_i(j) - X_k(j)) \quad (17)$$

که  $\mu_i(j)$  یک عدد حقیقی تصادفی توزیع شده در محدوده  $[-1, 1]$  را نشان می‌دهد. در رابطه (17)  $k$  شاخص راه‌حل انتخاب شده از کلونی به صورت تصادفی و  $j = 1 \dots D$  است. در ادامه تابع هدف برای راه‌حل جدید  $V_i(j)$  با راه‌حل قبل از توسعه  $X_i(j)$  مقایسه می‌گردد و بهترین پاسخ از میان آن‌ها در حافظه ذخیره می‌گردد. در مرحله بعدی الگوریتم، OBها یک منبع غذایی را با استفاده از تابع احتمال رابطه (18) انتخاب می‌کنند [45].

$$Prob(i) = \text{Fitness}(i) / \sum_{i=1}^{PN/2} \text{Fitness}(i) \quad (18)$$

که  $Prob(i)$  مقدار برازندگی راه‌حل  $X_i(j)$  است. در این مرحله زنبورهای دیده‌بان منبع غذایی جدید را با استفاده از مکانیزم چرخ‌های گردان انتخاب و یک منبع جدید انتخاب شده توسط رابطه (18) ایجاد می‌کنند. هنگامی که هر منبع پایان می‌یابد، زنبور کارگر مربوطه آن را رها می‌کند و تبدیل به زنبور ناظر می‌شود و یک جستجوی تصادفی را در فضای مسأله با استفاده از رابطه (16) شروع می‌کند. تمام راه‌حل‌ها پس از ارزیابی براساس میزان برازندگی (احتمال بیشتر برای انتخاب شدن) که دارند، رتبه‌بندی می‌شوند و بهترین راه‌حل چرخه ذخیره می‌گردد. هنگامی که شمارنده تعداد چرخه به حداکثر تعداد تعیین شده برسد، یا یک راه‌حل ایده‌آل پیدا شود، الگوریتم به پایان می‌رسد. در این پژوهش نرخ افزایش فشار محفظه ( $\alpha$ ) و نرخ افزایش فشار جانبی ( $\beta$ ) به عنوان متغیرهای فرآیند در نظر گرفته شده‌اند. جدول 5 پارامترهای ورودی الگوریتم زنبور عسل مصنوعی را نشان می‌دهد. حد بالایی و حد پایینی متغیرهای مسأله با توجه به مقدار نرخ افزایش فشار محفظه اولیه ( $\alpha^1$ ) و نرخ افزایش فشار جانبی اولیه ( $\beta^1$ ) به‌دست‌آمده از الگوریتم فازی تعیین می‌گردد.  $[\alpha^1 + \max(1, Q), \alpha^1 - \min(0, Q)]$  محدوده متغیر  $\alpha$ ، و  $[\beta^1 + \max(1, Q), \beta^1 - \min(0, Q)]$  محدوده متغیر  $\beta$  را مشخص می‌کند.  $Q$  یک عدد حقیقی ثابت در محدوده  $[0, 1]$  است که مقدار آن با توجه به میزان اطمینان از قوانین تدوین شده در بخش فازی تعیین می‌گردد. هر چه مقدار  $Q$  بزرگ‌تر باشد، محدوده بزرگ‌تری برای متغیرهای  $\alpha$  و  $\beta$  در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش  $Q=0.3$  در نظر گرفته شده است.

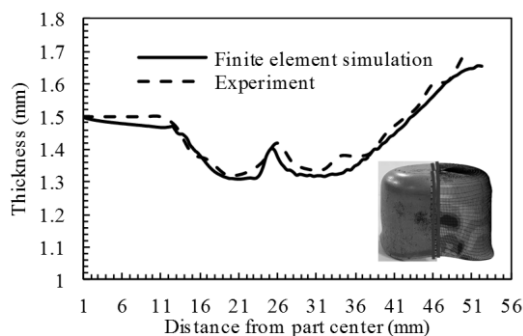


Fig. 18 Thickness distribution curve of St13 specimen obtained from optimized cavity and radial pressure paths

شکل 18 نمودار توزیع ضخامت در سراسر قطعه شکل‌داده شده برای نمونه فولادی به‌دست‌آمده از مسیرهای بهینه فشار محفظه و جانبی

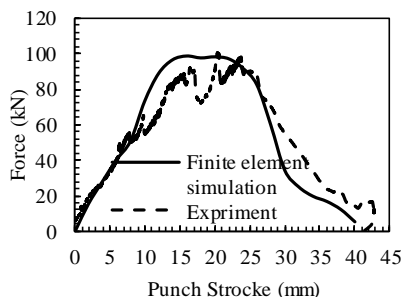


Fig. 19 Punch force-stroke of St13 specimen obtained from optimized cavity and radial pressure paths

شکل 19 نمودار نیرو برحسب جابه‌جایی سنبه برای نمونه فولادی به‌دست‌آمده از مسیرهای بهینه فشار محفظه و جانبی

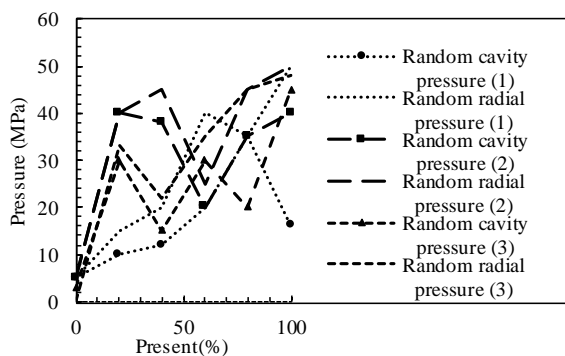


Fig. 20. Random pressure paths

شکل 20 مسیرهای فشار تصادفی

فشار تصادفی برای مسیر جانبی در نظر گرفته و شبیه‌سازی گردید (شکل 20). منحنی‌های توزیع ضخامت به‌دست‌آمده حاصل از شبیه‌سازی مسیرهای یادشده در شکل 21 نمایش داده شده است. همان‌طور که در جدول 6 نشان داده شده است، هنگامی که مسیرهای فشار محفظه و جانبی بهینه برای شکل‌دهی قطعه استوانه‌ای استفاده شده، نازک‌شدگی اتفاق افتاده در سراسر قطعه شکل‌داده شده در کم‌ترین میزان خود بوده است.

### 6- نتیجه‌گیری

در این پژوهش از یک روش ترکیبی برای بهینه‌یابی مسیر فشارهای جانبی و محفظه در فرآیند کشش عمیق هیدروپنمایی با فشار شعاعی و با جریان روبه داخل سیال استفاده شده است. این روش از یک شبیه‌سازی تطبیقی که با الگوریتم کنترل فازی یکپارچه شده است، به همراه الگوریتم تکاملی زنبور عسل مصنوعی برای تعیین مسیرهای بهینه فشارهای جانبی و محفظه

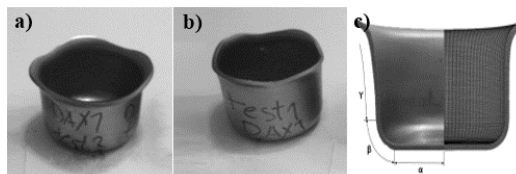


Fig. 14 St13 Formed cups, a- at stroke of 29.5mm, b- at stroke of 38mm, c- Sectional view of the formed part at stroke of 29.5mm at maximum cavity and radial pressures of 26 and 48 MPa, respectively. شکل 14 قطعات شکل‌داده شده St13، الف- در جابه‌جایی سنبه 29.5mm، ب- در جابه‌جایی سنبه 38mm، ج- نمای از مقطع قطعه شکل‌داده شده در حالت تجربی و شبیه‌سازی در جابه‌جایی سنبه 29.5mm و در فشار بیشینه محفظه و جانبی به ترتیب 26MPa و 48MPa

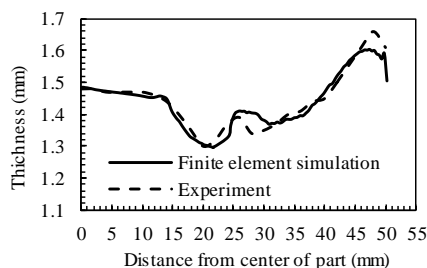


Fig. 15 Thickness distribution curve at stroke of 29.5 mm at maximum cavity and radial pressures of 26 and 48 MPa, respectively.

شکل 15 نمودار توزیع ضخامت در جابه‌جایی سنبه 29.5mm در بیشینه فشار محفظه 26MPa و بیشینه فشار جانبی 48MPa

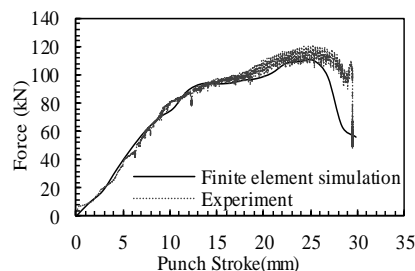


Fig. 16 Punch force-stroke at maximum cavity and radial pressures of 26 and 48 MPa, respectively

شکل 16 نمودار نیرو برحسب جابه‌جایی سنبه در بیشینه فشار محفظه 26MPa و بیشینه فشار جانبی 48MPa

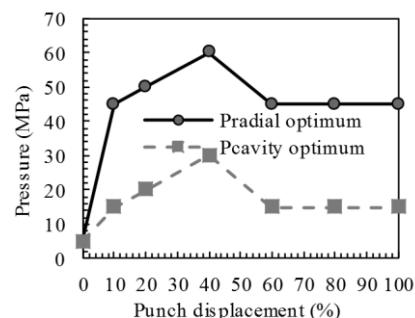


Fig. 17 Optimized radial and cavity pressure paths

شکل 17 مسیرهای بهینه فشار جانبی و محفظه

حاصل از نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی 2.9٪ است که نزدیکی خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایش تجربی را نشان می‌دهد. برای مقایسه هر چه بهتر نتایج مسیرهای فشار محفظه و جانبی بهینه شده با دیگر مسیرها سه مسیر فشار تصادفی برای فشار محفظه و سه مسیر

in convex die, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 10, pp. 150-158, 2014. (In Persian فارسی)

[4] V. Modanloo, A. Doniavi, R. Hasanzadeh, Application of multi criteria decision making methods to select sheet hydroforming process parameters, *Decision Science Letters*, Vol. 5, No. 3, pp. 349-360, 2016.

[5] R. Mousavipour, A. Gorji, M. Bakhshi, Gh. M. Alinejad, Experimental and numerical study of effective parameters in forming of Double-Stepped parts and optimization of the initial blank shape, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 177-187, 2015. (In Persian فارسی)

[6] H. Wang, L. Gao, M. Chen, Hydrodynamic deep drawing process assisted by radial pressure with inward flowing liquid, *Mechanical Sciences*, Vol. 53, No. 9, pp. 793-799, 2011.

[7] R. Kesvarakul, T. Intarakumthornchai, S. Jirathearanat. Semi-Forward adaptive simulation approach for tube hydroforming loading path determination using a strain trajectory based fuzzy logic control, *Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publications*. Vol. 598, pp. 498-504, 2014.

[8] A. Gorji, H. Alavi-Hashemi, M. Bakhshi-Jooybari, S. Nourouzi, S. J. Hosseini-pour, Investigation of hydrodynamic deep drawing for conical-cylindrical cups, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 56, No. 9-12, pp. 915-927, 2011.

[9] A. Assempour, M. R. Emami, Pressure estimation in the hydroforming process of sheet metal pairs with the method of upper bound analysis, *Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 5, pp. 2270-2276, 2009.

[10] A. Hashemi, M. H. Gollo, S. M. Seyedkashi, Determination of pressure path and punch velocity in hydroforming of cup-shaped products using adaptive simulation-based optimization, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 5, pp. 160-168, 2016. (in Persian فارسی)

[11] A. Yaghoobi, M. Bakhshi-Jooybari, A. Gorji, H. Baseri, Optimization of pressure path in sheet hydroforming process using artificial intelligence and simulated annealing, *Key Engineering Materials. Trans Tech Publications*, Vol. 622, pp. 772-779, 2014.

[12] R. Kesvarakul, T. Intarakumthornchai, S. Jirathearanat, Y. Aue-U-Lan, Feasible pressure and axial feeding path determination of fuel filler by genetic algorithm (GA), *6<sup>th</sup> International Conference On Tube Hydroforming*, Jeju, Korea, August 26-28, 2013.

[13] A. Ghosh, K. Deshmukh, G. Ngaile, Database for real-time loading path prediction for tube hydroforming using multidimensional cubic spline interpolation, *Materials Processing Technology*, Vol. 211, No. 1, pp. 150-166, 2011.

[14] A. Aydemir, J. H. De Vree, W. A. Brekelmans, M. G. Geers, W. H. Sillekens, R. J. Werkhoven, An adaptive simulation approach designed for tube hydroforming processes, *Materials Processing Technology*, Vol. 159, No. 3, pp. 303-310, 2000.

[15] E. Doege, R. Kisters, C. Ropers, Determination of optimised control parameters for internal high pressure forming processes with the FEM, *Proceedings of the International Conference on Sheet Metal*, Vol. 99, 1998.

[16] M. Strano, S. Jirathearanat, T. Altan, Adaptive FEM simulation for tube hydroforming: a geometry-based approach for wrinkle detection, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 50, No.1, pp. 185-190, 2001.

[17] P. Ray, B. Mac Donald, Determination of the optimal load path for tube hydroforming processes using a fuzzy load control algorithm and finite element analysis, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 41, No. 2, pp. 173-192, 2004.

[18] E. Öztürk, M. Türköz, H. S. Halkacı, M. Koç, Determination of optimal loading profiles in hydro-mechanical deep drawing process using integrated adaptive finite element analysis and fuzzy control approach, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 88, No. 9-12, pp. 2443-2459, 2017.

[19] A. Yaghoobi, M. Bakhshi-Jooybari, A. Gorji, H. Baseri, Application of adaptive neuro fuzzy inference system and genetic algorithm for pressure path optimization in sheet hydroforming process, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 86, No. 9-12, pp. 2667-2677, 2016.

[20] M. Hosseinzade, H. Mostajeran, M. Bakhshi-Jooybari, A. H. Gorji, S. Nourouzi, S. J. Hosseini-pour, Novel combined standard hydromechanical sheet hydroforming process, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Engineering Manufacture*, Vol. 224, No. 3, pp. 447-457, 2010.

[21] C. Smithells, *Smithells Metals Reference Book*, pp. 1313-1371, Oxford, Butter Heinemann Publication, 1992.

[22] S. Bagherzadeh, M. Mirnia, B. M. Dariani, Numerical and experimental investigations of hydro-mechanical deep drawing process of laminated aluminum/steel sheets, *Manufacturing Processes*, Vol. 18, pp. 131-140, 2015.

[23] A. International, *A370-10 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*, Philadelphia, ASTM International, 2010.

[24] J. Hu, Z. Marciniak, J. Duncan, *Mechanics of Sheet Metal Forming*, pp. 26-27, Oxford, Butterworth-Heinemann Publication, 2002.

[25] K. Hibbitt, *ABAQUS: User's Manual: Version 6.13: Hibbitt*, pp. 369-372, USA, Karlsson & Sorensen, 2013.

[26] S. H. Zhang, M. R. Jensen, J. Danckert, K. B. Nielsen, D. C. Kang, L. H. Lang, Analysis of the hydromechanical deep drawing of cylindrical cups, *Materials Processing Technology*, Vol. 103, No. 3, pp. 367-373, 2000.

[27] M. Habibi, R. Hashemi, A. Ghazanfari, R. Naghdabadi, A. Assempour, Forming limit diagrams by including the M-K model in finite element simulation considering the effect of bending, *Proceedings of the Institution*

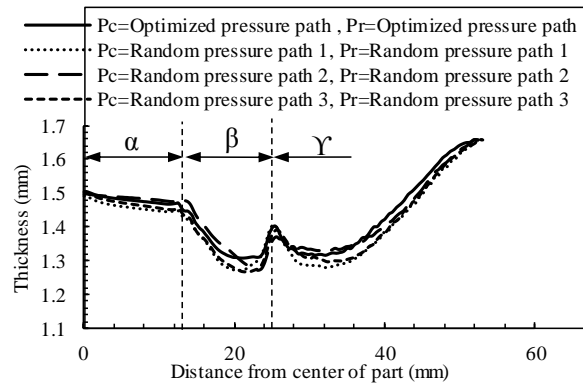


Fig 21. Thickness distribution curve corresponding to optimized pressure path in comparison with those of the random pressure paths

شکل 21 منحنی توزیع ضخامت مربوط به مسیر فشار بهینه در مقایسه با منحنی‌های مسیر فشارهای تصادفی

جدول 6 مقایسه حداکثر نازک‌شدگی در مسیر فشار بهینه با مسیرهای فشار تصادفی

Table 6 Comparison of maximum thinning of the optimized pressure path with those of the random pressure paths

مسیر فشار استفاده شده	مقدار حداکثر نازک‌شدگی (%)
مسیرهای فشار بهینه	12.72
مسیر فشار تصادفی (1)	15.36
مسیر فشار تصادفی (2)	15.21
مسیر فشار تصادفی (3)	15.67

استفاده می‌نماید. به‌طور کلی در این روش ابتدا مقادیر نرخ تغییر فشار جانبی و نرخ تغییر فشار محفظه که فشار جانبی و محفظه در هر گام را تعیین می‌کنند به کمک سیستم فازی تدوین شده مشخص می‌گردند.

شاخص چروکیدگی و شاخص نازک‌شدگی به‌دست‌آمده از نتایج شبیه‌سازی به عنوان ورودی و نرخ تغییر فشار جانبی و نرخ تغییر فشار محفظه به عنوان خروجی‌های سیستم کنترل فازی معرفی شدند. سپس فرآیند بهینه‌یابی با تعیین محدوده جستجوی از روی خروجی‌های سیستم فازی به کمک الگوریتم زنبورعسل مصنوعی کامل می‌گردد. استفاده از این الگوریتم برای بهینه‌یابی مسیرهای فشار محفظه و جانبی در فرآیند کشش عمیق هیدروپنایمی با فشار شعاعی و با جریان روبه داخل سیال این امکان را فراهم می‌کند که بتوان تعداد بالایی از پارامترها را در زمان کوتاه‌تر و با دقت مناسب بهینه‌یابی نمود. برای صحت‌سنجی مسیرهای فشار بهینه محفظه و جانبی به‌دست‌آمده از الگوریتم بهینه‌یابی استفاده شده در این پژوهش از آزمایش‌های تجربی استفاده شده است. نتایج نشان داد که استفاده از مسیرهای بهینه فشارهای محفظه و جانبی منجر به دستیابی به قطعه‌ای با حداکثر نازک‌شدگی کمتر (12.7%) در سراسر قطعه شکل داده شده و بدون چروکیدگی می‌گردد.

#### 7- مراجع

[1] H. Hu, J. F. Wang, K. T. Fan, T. Y. Chen, S. Y. Wang, Development of sheet hydroforming for making an automobile fuel tank, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Engineering Manufacture*, Vol. 229, No. 4, pp. 654-663, 2015.

[2] A. Hashemi, M. H. Gollo, S. H. Seyedkashi, Process window diagram of conical cups in hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 25, No. 9, pp. 3064-3071, 2015.

[3] M. Belali Owsia, S. J. Hosseini-pour, M. Bakhshi Jooybari, A. Gorji, Forming of metallic bipolar plate with pin-type pattern by using hydroforming process

- testing, forming limits, pp. 137-214, Berlin, Springer Science & Business Media, 2000.
- [38] M. Dutilly, J. Gelin, Design of sheet metal forming processes based on quality functions, *Proceedings of the Second International ESAFORM Conference on Material Forming*, Guimaraes, Portugal, April 13-16, 1999.
- [39] H. Xing, A. Makinouchi, Numerical analysis and design for tubular hydroforming, *Mechanical Sciences*, Vol. 43, No. 4, pp. 1009-1026, 2001.
- [40] A. Hashemi, M. H. Gollo, S. H. Seyedkashi, Bimetal cup hydroforming of Al/St and Cu/St composites: Adaptive finite element analysis and experimental study, *Mechanical Science and Technology*, Vol. 30, No. 5, pp. 2217-2224, 2016.
- [41] D. Driankov, H. Hellendoorn, M. Reinfrank, Stability of fuzzy control systems, *In An Introduction to Fuzzy Control*, pp. 245-292, Springer, 1993.
- [42] D. P. Acharjya, A. P. Kausar, *Swarm Intelligence in Solving Bio-Inspired Computing Problems: Reviews, Perspectives, and Challenges, Handbook of Research on Swarm Intelligence in Engineering*, pp. 74-98, IGI global book series, 2015.
- [43] D. Karaboga, An idea based on honey bee swarm for numerical optimization, *Technical report-tr06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department*, Vol. 200, 2005.
- [44] M. Yazdi, S. Latifi Rostami, A. Kolahdooz, Optimization of geometrical parameters in a specific composite lattice structure using neural networks and ABC algorithm, *Mechanical Science & Technology*, Vol. 30, No. 4, pp. 1763-1771, 2016.
- [45] Y. Yan, Y. Zhang, F. Gao, Dynamic artificial bee colony algorithm for multi-parameters optimization of support vector machine-based soft-margin classifier, *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, Vol. 2012, No. 1, pp. 160, 2012.
- [46] N. Bacanin, M. Tuba, Artificial bee colony (ABC) algorithm for constrained optimization improved with genetic operators, *Studies in Informatics and Control*, Vol. 21, No. 2, pp. 137-146, 2012.
- [47] G. Zhu, S. Kwong, Gbest-guided artificial bee colony algorithm for numerical function optimization, *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 217, No. 7, pp. 3166-3173, 2010.
- of Mechanical Engineers, Part L: *Materials Design and Applications*, Accessed on 5 April 2016, <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1464420716642258>.
- [28] B. Teng, K. Li, S. Yuan, Optimization of loading path in hydroforming T-shape using fuzzy control algorithm, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 69, No. 5-8, pp. 1079-1086, 2013.
- [29] H. Wisselink, G. Nagy, V. T. Meinders, Application of wrinkling criterion for prediction of side-wall wrinkles in deepdrawing of conical cups, *IDDRG Conference*, Mumbai, India, November 25, 2012.
- [30] S. S. Anarestani, M. Morovvati, Y. A. Vaghassloo, Influence of anisotropy and lubrication on wrinkling of circular plates using bifurcation theory, *Material Forming*, Vol. 8, No. 3, pp. 439-454, 2015.
- [31] S. H. Li, B. Yang, W. G. Zhang, Z. Q. Lin, Loading path prediction for tube hydroforming process using a fuzzy control strategy, *Materials & Design*, Vol. 29, No. 6, pp. 1110-1116, 2008.
- [32] M. Abbasi, M. Ketabchi, T. Labudde, U. Prah, W. Bleck, New attempt to wrinkling behavior analysis of tailor welded blanks during the deep drawing process, *Materials & Design*, Vol. 40, pp. 407-414, 2012.
- [33] M. A. Shafaat, M. Abbasi, M. Ketabchi, Effect of different yield criteria on prediction of wrinkling initiation of interstitial-free galvanized steel sheet, *Materials & Design*, Vol. 32, No. 6, pp. 3370-3376, 2011.
- [34] T. Intarakumthornchai, Y. Aue-U-Lan, R. Kesvarakul, S. Jirathearanat, Feasible pressure and axial feed path determination for fuel filler tube hydroforming by genetic algorithm, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Engineering Manufacture*, Vol. 229, No. 4, pp. 623-630, 2015.
- [35] M. Khademi, M. Bakhshi-Jooybari, A. Gorji, M. Sadegh-Yazdi, Investigation of wrinkling in hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure with inward flowing liquid based on a geometric method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 276-286, 2017. (in Persian)
- [36] X. Wang, J. Cao, On the prediction of side-wall wrinkling in sheet metal forming processes, *Mechanical Sciences*, Vol. 42, No. 12, pp. 2369-2394, 2000.
- [37] D. Banabic, *Formability of metallic materials: plastic anisotropy, formability*