

## Automatic Determination of Non-Uniform Blank-Holder Force in Sheet Metal Forming

Ghasem Azamirad<sup>1</sup>, Behrooz Arezoo<sup>2</sup>

### 1. Introduction

Blank holder force in sheet metal forming operations can be very effective in repairing fracture and wrinkling defects. The supply of blank holder force in different dies is done in different ways. In many cases, as the shape of the sheet metal parts becomes more complex, it is necessary for the sheet to flow into the die in different parts of the die. One way to control the flow of the sheet into the die is to change the size and location of the blank holder forces. Today, in designing sheet metal forming dies, designers use analytical relationships or finite element software to determine the value of the blank holder force. In most cases, the amount of blank holder force in each position is assumed to be fixed and the designer calculates the number of positions according to this value. For shaping asymmetric axial sheet metal parts, several researches have been conducted to determine non-uniform blank holder forces to reduce forming defects. Despite the various researches that have been done in this field, the role of the designer in determining the amount of force in different points of the sheet is under researched and important and it is necessary to do extensive researches in order to automate the optimization in this field.

In this study, by establishing a relationship between Abaqus and Catia and with the help of optimization methods, a software system was created that after initial settings by the user, finite element analyses are performed automatically and according to the output of each analysis, changes are made in the input file and the next analysis is performed with new conditions. Applying these changes and performing various analyses until the problem converges to the optimal answer continues completely automatically.

### 2. Automatic software system for determining the number and size of blank holder forces

This study proposed a software system that is able to suggest the arrangement of the blank holder force of different parts in such a way that the sheet piece is formed without fracture and with the low possibility of wrinkling. In this system, possible states are introduced for the blank holder forces and the fracture and wrinkling of the sheet piece are specified as objective functions and problem constraints. Using the optimization algorithm and performing finite element analyses automatically, different arrangement modes are examined and the arrangement design of the forces is changed so that the problem constraint is satisfied and the objective functions are minimized. In this system, positions under the sheet metal are provided to apply the blank holder force. The optimization algorithm must change the value of each

position and finally suggest the appropriate layout. To optimize the objective function, it is necessary to create a workflow diagram in modefrontier software. Figure 1 shows the workflow diagram designed to solve this problem.

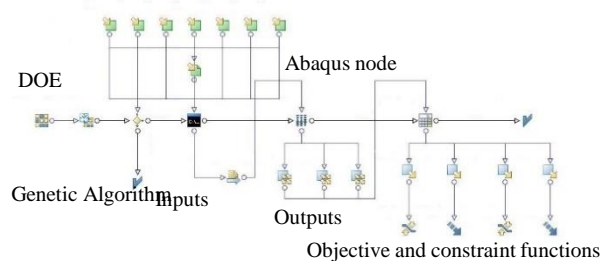


Figure 1. Workflow diagram in modefrontier software

### 3. Numerical simulation

The dimensions of the sheet metal part are 1050 mm by 900 mm with a thickness of 1 mm. Figure 2 shows the 3-D explosive model of the die components with the blank piece.

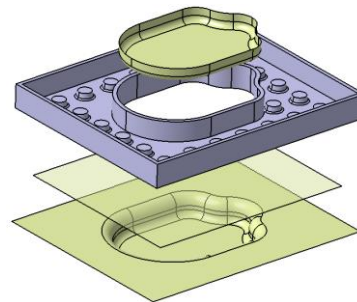


Figure 2. Explosive model of die components with the blank piece

The material of blank is st14 and the material of blank holder is GGG60 cast iron. In analytical software the shell components are meshed in the form of quadrilateral elements and blank holder with hexagonal cubic elements. Table 1 shows the conditions and parameters of the finite element simulation of sheet metal forming process.

Table 1. Parameters of simulation process

Parameters	Value
Sheet thickness	1 mm
Course of die motion	100 mm
Die movement speed	0.5 m/s
Friction coefficient	0.15

### 4. Results and discussion

By running the program in the fifth generation of the genetic algorithm and in the 274th run, the first analysis in which the problem is realized is obtained. The diagram of the change in the values of the fracture constraint is shown in Figure 3. Figures 4 and 5 show the changes in the values of the fracture and wrinkling objective function. As can be seen, with the continuation of the program, it can be said that the results have converged from the eighth generation

\*Manuscript received, October, 27, 2021; Revised. May, 1, 2022, Accepted. May, 25, 2022.

<sup>1</sup> Corresponding author. Assistant Professor of Mechanical Engineering, Yazd University. Email: azamirad@yazd.ac.ir.

<sup>2</sup> Professor of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology.

onwards and there is not much change in the continuation. For this reason, the program was stopped after performing 600 analyses.

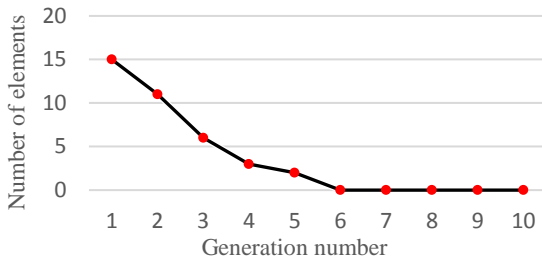


Figure 3. Diagram of fracture constraint changes

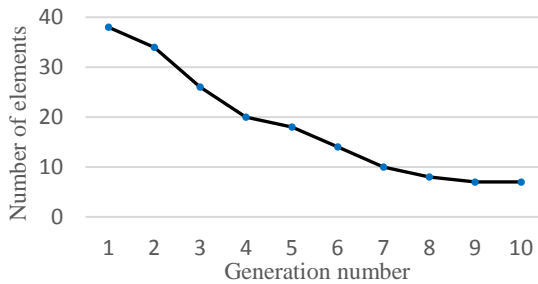


Figure 4. Convergence diagram of the fracture objective function

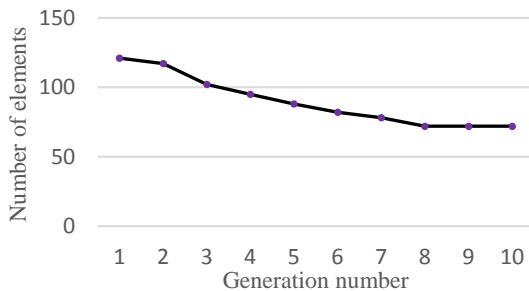


Figure 5. Convergence diagram of the wrinkling objective function

Table 2 shows the number of elements in the objective and constraint areas for the final result. These values are the best of all cases.

Table 2. Program output for objective and constraint functions

Constraint functions	Number of Elements
Constraint of fracture	0
Objective function of fracture	7
Objective function of wrinkling	72

Among the results obtained, the final blank holder force arrangement is equal to the best case, i.e., analysis No. 485. This force arrangement is shown in Figure 6 from the bottom view of the blank holder. As expected, due to the greater flow of the sheet on the left side of the die cavity, the blank holder force at these points is more than the right.

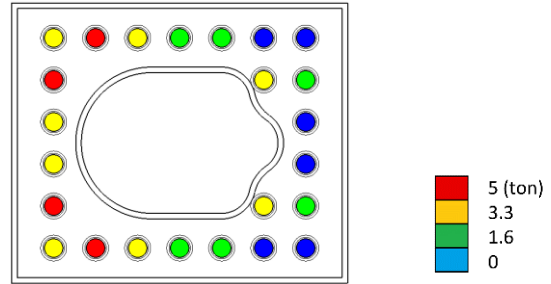


Figure 6. Force values of each position for the final state

Figure 7 shows the result of the simulation process in Abacus software for the final layout. In this figure, the fracture criterion distribution is visible.

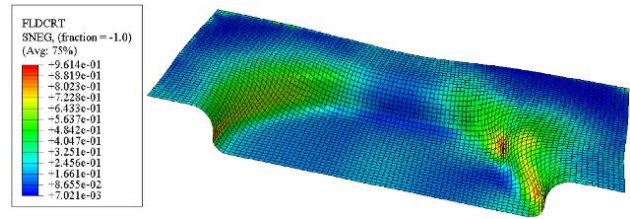


Figure 7. Simulation result for the final state

### 5. Conclusion

In the present study, a structure was created that is able to suggest the appropriate arrangement of blank holder forces in the form of sheet metal parts to the designer. This arrangement is such that the production part is created without fracture defect and with low potential for the possibility of wrinkling defect. The results presented for the example show that by non-uniform arrangement of blank holder forces for asymmetric and relatively complex part, it is possible to produce a part without fracture with low wrinkling potential. This structure was done in the environment of modefrontier software by creating a connection between Catia and Abaqus software. To perform this process, you need to code in Python, VBA and C # languages in the workflow diagram icons. The combination of these cases provided a suitable environment for the present study. The results presented in this research are expressed for a sheet with st14 material and thickness of 1 mm. Changing the material and thickness and considering cases such as sheet anisotropy can be suitable topics for future researches in this field.

**تعیین خودکار نیروی ورق گیر غیریک نواخت در قالب‌های شکل دهی قطعات ورقی\***

مقاله پژوهشی

قاسم اعظمی راد<sup>(۱)</sup>بهروز آرزو<sup>(۲)</sup>

**چکیده** نیروی ورق‌گیر از جمله پارامترهای مهم و تأثیرگذار در عملیات شکل‌دهی قطعات ورقی است. اندازه این نیرو در اطراف قطعه می‌تواند در رفع عیوب پارگی و چین‌خوردگی در نقاط مختلف قطعه بسیار مؤثر باشد. در قطعات متقارن محوری نیروی ورق‌گیر یک‌نواخت مناسب می‌تواند از بروز هر دو عیب مذکور جلوگیری کند. ولی برای قطعات غیرمتقارن محوری رسیدن به نیروی ورق‌گیر یک‌نواخت مناسب معمولاً دشوار است. در این حالت نیروی ورق‌گیر غیریک‌نواخت می‌تواند در بهبود کیفیت قطعات تولیدی تأثیر به‌سزایی داشته باشد. واضح است که شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی در نرم‌افزارهای المان محدود و استفاده مؤثر از الگوریتم‌های بهینه‌سازی می‌تواند کمک شایانی به طراح در تعیین مقدار نیروی ورق‌گیر غیریک‌نواخت داشته باشد. در این پژوهش راه‌کاری برای تعیین خودکار نیروی ورق‌گیر غیریک‌نواخت برای شکل‌دهی قطعات ورقی ارائه شده است. در این روش که به کمک نرم‌افزارهای کتیا، آباکوس و مدفرانتیر ایجاد شده است انجام شبیه‌سازی‌های مختلف و تغییر پارامترهای ورودی نیرو به صورت کاملاً خودکار انجام می‌گیرد تا این‌که شرایط مناسب برای شکل‌دهی ورق مشخص شود. برای نمایش شیوه عملکرد این ساختار دو قطعه با هندسه‌های متنوع مورد بررسی قرار گرفت. در این دو هندسه رسیدن به قطعه بدون عیب پارگی و چین‌خوردگی با نیروی ورق‌گیر یک‌نواخت امکان‌پذیر نبود، ولی نتایج نشان داد با استفاده از روش بیان‌شده در این پژوهش می‌توان به صورت خودکار به چیدمان غیریک‌نواخت مناسبی از نیروهای ورق‌گیری دست یافت که قطعه‌ای بدون عیب پارگی و با پتانسیل کم چین‌خوردگی تولید می‌کند.

**واژه‌های کلیدی** نیروی ورق‌گیر غیریک‌نواخت، شکل‌دهی قطعات ورقی، نرم‌افزار مدفرانتیر.

**مقدمه**

چین‌خوردگی قطعه در آن منطقه افزایش می‌یابد. در نتیجه جایگاه قرارگیری این نیروها می‌تواند تأثیر مستقیمی در پارگی و چین‌خوردگی قطعه ورقی در حین انجام عملیات شکل‌دهی داشته باشد.

امروزه در طراحی قالب‌های شکل‌دهی، طراحان برای تعیین اندازه نیروی ورق‌گیری از روابط تحلیلی یا نرم‌افزارهای المان محدود استفاده می‌کنند. در اکثر موارد مقدار نیروی ورق‌گیری در هر جایگاه ثابت و مشخص فرض می‌شود و طراح با توجه به این مقدار تعداد جایگاه‌ها را محاسبه می‌کند. موقعیت این نیروها معمولاً با توجه به جانمایی قالب و میز پرس و بدون در نظر گرفتن شرایط شکل‌دهی ورق مشخص می‌شود که نتیجه آن ارائه چیدمانی منظم از نیروها در زیر ورق‌گیر برای قطعات مختلف است [3] ولی تحقیقات متعددی برای تعیین نیروهای غیریک‌نواخت ورق‌گیری به منظور کاهش عیوب شکل‌دهی انجام شده است که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

چنگ‌زنی و همکاران برای بهبود شکل‌پذیری قطعات ورقی از نیروی ورق‌گیر غیریک‌نواخت در سطح ورق‌گیر استفاده کردند

نیروی ورق‌گیری در عملیات شکل‌دهی قطعات ورقی می‌تواند در رفع عیوب پارگی و چین‌خوردگی بسیار مؤثر باشد. تأمین نیروی ورق‌گیری در قالب‌های مختلف به شیوه‌های متفاوتی انجام می‌گیرد. این نیرو در قالب‌های یک‌ضرب به زیر ورق‌گیر و در چندین نقطه اعمال می‌شود. در این قالب‌ها معمولاً نیروی ورق‌گیر توسط فنرهای گازی و یا پین‌های هوا فشار تأمین می‌گردد. تغییر موقعیت و اندازه هر یک از این نیروها می‌تواند در شکل‌دهی ورق تأثیرگذار باشد [1]. در بسیاری موارد با پیچیده شدن شکل قطعات ورقی لازم است جریان ورق به داخل قطعه در قسمت‌های مختلف قالب متفاوت باشد. یکی از راه‌های کنترل جریان ورق به داخل قالب تغییر اندازه و محل قرارگیری نیروهای ورق‌گیری است [2]. برای مثال اگر در یک قسمت از قالب نیروی ورق‌گیری بیشتر باشد، گیرش ورق بیشتر می‌شود و جریان ورق به سمت داخل قالب کاهش می‌یابد که احتمال پارگی را افزایش خواهد داد و در صورتی که تعداد و اندازه نیروهای ورق‌گیری کاهش یابد، شرایط دقیقاً به عکس خواهد شد و احتمال

\* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۷/۲۹ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۲/۲۸ می‌باشد.

(۱) استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد.

(۲) استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

آزمایش شده و نتایج خوبی به دست آورده است. اندلت و همکاران در دو تحقیقی که نتایج آن را دو مقاله منتشر کردند موفق شدند به صورت تجربی سیستم کنترلی با بازخورد لحظه‌ای ایجاد کنند که با تنظیم نیروی ورق‌گیر در طول عملیات شکل‌دهی ورق امکان تولید قطعات ورق‌ی بدون عیب را داشته باشد [13,14]. بارتا و همکاران با کنترل حلقه بسته در طول فرایند کشش عمیق توانستند به استحکامی بالاتر از یک فرایند کشش عمیق معمولی دست یابند. علاوه بر این، با این روش افزایش قابل توجهی در عمق کشش امکان‌پذیر شد [15]. پکسینو و همکاران در تحقیقی نشان دادند که با استفاده از ورق‌گیری با سختی غیریک‌نواخت که از مواد مختلفی ساخته شده است می‌توان ورق‌های فولادی با مقاومت بالا را بدون استفاده از روش‌های دیگر مثل شکل‌دهی داغ شکل داد. استفاده از این روش باعث بهبود کیفیت و کاهش پارگی موضعی در قطعات تولیدی شد [16]. برون برای بهبود شکل‌دهی قطعات پیچیده ورق‌ی از عملگرهای مغناطیسی برای کنترل فعال نیروی ورق‌گیر و جریان ورق به داخل قالب استفاده کرده است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی حاکی از تأثیر این روش در بهبود عملیات شکل‌دهی است [17].

علی‌رغم تحقیقات متنوعی که در زمینه قالب‌های شکل‌دهی قطعات ورق‌ی انجام گرفته است همچنان نقش طراح در تعیین مقادیر نیرو در نقاط مختلف ورق‌گیر حایز اهمیت است و لازم است پژوهش‌های گسترده‌ای به منظور بهینه‌سازی خودکار در این زمینه انجام گیرد. در تحقیق حاضر با برقراری ارتباط بین نرم‌افزار تحلیلی آباکوس و نرم‌افزار مدل‌سازی کتیا و به کمک روش‌های بهینه‌سازی، سیستمی نرم‌افزاری ایجاد شده است که پس از تنظیمات اولیه توسط کاربر، تحلیل‌های المان محدود به صورت خودکار انجام می‌شوند و با توجه به خروجی هر تحلیل، تغییراتی در فایل ورودی ایجاد شده و تحلیل بعدی با شرایط جدید انجام می‌گیرد. اعمال این تغییرات و انجام تحلیل‌های مختلف تا همگرا شدن مسئله به جوابی که چیدمان نیروهای ورق‌گیری را برای ایجاد قطعه‌ای بدون عیب پارگی و با پتانسیل کم چین‌خوردگی معرفی کند، به صورت کاملاً خودکار ادامه می‌یابد.

### تحلیل شکل‌پذیری ورق توسط نمودار حد شکل‌دهی

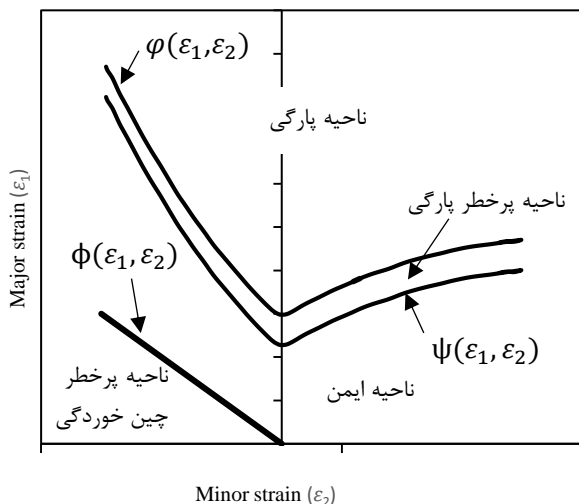
نمودار حد شکل‌دهی، ابزاری مفید برای تعیین حدود شکل‌دهی

[4]. در این تحقیق عیوب پارگی و چین‌خوردگی در تابع هدف مورد توجه قرار گرفت و از روش سطح پاسخ برای بهینه‌سازی این مهم استفاده شد. در این تحقیق برای شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی، ورق‌گیر به صورت شش قطعه صلب مجزا در نظر گرفته شد. پالانی‌سوامی و همکاران حالات مختلف نیروی ورق‌گیر متغیر را در زمان و مکان مورد بررسی قرار دادند [3]. در این تحقیق که عملیات شکل‌دهی ورق به صورت هیدروفورمینگ انجام می‌شود چهار حالت تغییر نیرو بیان شده است. در این روش تابع هدف کاهش پارگی و قید مسئله بررسی پدیده چین‌خوردگی ورق است. در این تحقیق روش ارائه شده برای سه نمونه مورد بررسی قرار گرفته است و بیان شده است که با نتایج به دست آمده انجام مراحل آزمون و خطا برای رسیدن به تولید قطعه ورق‌ی بدون عیب بسیار کاهش خواهد یافت. وانگ و همکاران در چهار مقاله مرتبط به تحقیق در زمینه تأثیر نیروی ورق‌گیر متغیر در شکل‌دهی قطعات ورق‌ی پرداختند. در تحقیق اول نیروی ورق‌گیر را در نقاط مختلف، متفاوت در نظر گرفتند و چند مورد از پارامترهای هندسی اجزای قالب را نیز به عنوان متغیر در نظر گرفتند و تلاش کردند آن‌ها را بهینه کنند [5]. در تحقیق دوم به کمک روش بهینه‌سازی پاسخ سطح نیروی ورق‌گیر در نقاط مختلف ورق‌گیر تغییر داده شد تا بهترین حالت شکل‌دهی به دست آید [6]. در تحقیق سوم نیروی ورق‌گیر در نقاط مختلف با زمان متغیر در نظر گرفته شد تا قطعه‌ای بدون عیب تولید گردد [7]. همین موضوع در تحقیق چهارم با استفاده از روش PID حلقه بسته انجام پذیرفت [8]. در این مجموعه تحقیق‌ها ورق‌گیر به صورت تعدادی قطعه پوسته‌ای صلب مجزا مدل شده و نیروی زیر هر یک از این اجزا به عنوان متغیرهای طراحی تعریف شده است. و رونگ و همکاران در دو تحقیق تأثیر انواع روش‌های مدل‌سازی ورق‌گیر را بر شکل‌پذیری ورق بررسی کردند [9,10]. در این پژوهش قطعه ورق‌گیر به سه روش ورق‌گیر چند قطعه پوسته‌ای صلب، ورق‌گیر یکپارچه مسطح و تغییر شکل‌پذیر و ورق‌گیر یکپارچه مخروطی و تغییر شکل‌پذیر مدل‌سازی شده است. نتایج تحلیل المان محدود و تجربی روش سوم تشابه بیشتری دارد. کیتایاما و همکاران در دو تحقیق با استفاده از شبکه عصبی توانستند سیستمی ایجاد کنند که مقدار نیروی ورق‌گیر را با بازخوردی که از عملیات شکل‌دهی ورق می‌گیرد در هر لحظه مشخص کند [11,12]. این سیستم برای یک نمونه مستطیلی شکل

پارگی به عنوان قید مسئله طراحی شده است؛ یعنی با عبور حتی یک نقطه از این منحنی تحلیل مورد نظر غیر قابل قبول خواهد بود و قطعه آن ناسالم ارزیابی می شود. برای کاهش احتمال عیب پارگی همان طور که در شکل (۱) قابل مشاهده است ضریب ایمنی  $\Delta_f$  برای منحنی پارگی در نظر گرفته می شود که منحنی جدیدی به صورت معادله (۱) به دست می آید. مقدار  $\Delta_f$  با نظر کاربر قابل تغییر است. المان هایی که در این ناحیه یعنی بین دو منحنی  $\varphi$  و  $\psi$  قرار بگیرند در معرض پارگی قرار دارند. هر چه تعداد المان های موجود در این ناحیه کمتر باشد احتمال پارگی کاهش می یابد. به همین منظور کمینه کردن تعداد نقاط موجود در این ناحیه به عنوان بخشی از تابع هدف در تحقیق حاضر در نظر گرفته شده است.

$$\psi(\varepsilon_1, \varepsilon_2) = \varphi(\varepsilon_1, \varepsilon_2) - \Delta_f \quad (1)$$

با توجه به این که تشخیص دقیق پدیده چین خوردگی با استفاده از نمودار حد شکل دهی به صورت دقیق و قطعی امکان پذیر نیست، از این نمودار برای کاهش احتمال وقوع این عیب استفاده می شود. ناحیه پرخطر چین خوردگی نیز با نام  $\emptyset$  در شکل (۱) نشان داده شده است. در تعریف بخش دیگری از تابع هدف تعداد المان های موجود در این منطقه نیز شمارش و کمینه می شوند.



شکل ۱ نواحی پرخطر پارگی و چین خوردگی در نمودار حد شکل دهی

ورق های فلزی در فرایندهای شکل دهی مانند کشش عمیق است. این نمودار نسبت کرنش اصلی ( $\varepsilon_{major}$ ) را به کرنش فرعی ( $\varepsilon_{minor}$ ) نشان می دهد که ورق می تواند تا آستانه گلوبی شدن موضعی تحمل کند. این مقدار کرنش که ورق فلزی قبل از گلوبی شدن موضعی تحمل می کند، کرنش حدی نامیده می شود. نمودار حد شکل دهی میزان حداکثر کرنش های حدی را در بارگذاری های مختلف نشان می دهد.

### تشخیص پارگی و چین خوردگی با نمودار حد شکل دهی

دو عیب رایج در فرایند شکل دهی ورق پارگی و چین خوردگی است. پارگی پدیده ای است که به علت کاهش ضخامت ورق در مناطقی که جریان ورق کم است اتفاق می افتد و باعث تخریب قطعه تولیدی می شود. هر امری که جریان ورق را تسهیل کند، از نازک شدن موضعی ورق می کاهد و از پدیده پارگی جلوگیری می کند. در تحقیقات مختلف از روش های متفاوتی برای تشخیص این عیب استفاده شده است.

چین خوردگی به دلیل افزایش ضخامت ورق تحت تنش های محیطی فشاری ( $\sigma_\theta$ ) به وجود می آید. در فرایند شکل دهی ورق هرگاه مقدار  $\sigma_\theta$  فشاری بزرگتر از  $\sigma_c$  که حد تحمل فشاری ورق است، باشد ورق چین می خورد. تعیین مقدار تنش بحرانی چین خوردگی ( $\sigma_c$ ) که شروع چین خوردگی را نشان می دهد در منابع مختلف مورد بحث قرار گرفته است. در تحقیق حاضر نیز برای بررسی این دو پدیده از این نمودار استفاده شده است. در ادامه، تعریف تابع هدف در تحقیق حاضر بیان شده است.

### تعریف تابع هدف

در این پژوهش به منظور کاهش احتمال ایجاد عیوب پارگی و چین خوردگی نمودار حد شکل دهی به چهار ناحیه ایمن، پارگی، پرخطر پارگی و پرخطر چین خوردگی تقسیم می شود. این نواحی در شکل (۱) نشان داده شده است. در نمودار حد شکل دهی نقاط بالای منحنی  $\varphi$  دچار پارگی می شوند و نقاط پایین تر از منحنی  $\Phi$  پتانسیل زیادی برای چین خوردگی دارند. وجود تمامی نقاط در منطقه ایمن به معنی عدم پارگی و کاهش احتمال چین خوردگی قطعه است. در تحقیق حاضر عبور نقاط از منحنی

## سیستم نرم‌افزاری برای تعیین خودکار تعداد و اندازه

### نیروهای ورق‌گیری

در تحقیق حاضر سیستمی نرم‌افزاری ارائه شده که قادر است چیدمان نیروی ورق‌گیری قطعات ورقی مختلف را در زیر ورق‌گیر به‌گونه‌ای پیشنهاد دهد که قطعه ورقی بدون پارگی و با احتمال چین‌خوردگی کم شکل‌دهی شود. در این سیستم حالات ممکن برای نیروهای ورق‌گیری معرفی شده و پارگی و چین‌خوردگی قطعه ورقی به‌عنوان توابع هدف و قیود مسئله مشخص شده‌اند. با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی و انجام خودکار تحلیل‌های المان‌محدود، حالات مختلف چیدمان مورد بررسی قرار می‌گیرند و طراحی چیدمان نیروها به‌گونه‌ای تغییر داده می‌شود که قید مسئله ارضا شود و توابع هدف کمینه شوند. در این سیستم جایگاه‌هایی در زیر ورق‌گیر برای اعمال نیروی ورق‌گیری در نظر گرفته شده‌است. الگوریتم بهینه‌سازی باید مقدار هر جایگاه را تغییر دهد و درنهایت چیدمان مناسب را پیشنهاد دهد. در ادامه مدل‌سازی سه‌بعدی، شبیه‌سازی فرایند و پیاده‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی بر روی مسئله بیان شده‌است.

### شبیه‌سازی فرایند در نرم‌افزار آباکوس

برای مدل‌سازی اولیه اجزای قالب و قطعه ورقی خام از نرم‌افزار کتیا استفاده شده و قطعات پس از طراحی به نرم‌افزار آباکوس منتقل شده‌است. در تحلیل المان‌محدود، تعدادی از اجزای قالب به‌صورت پوسته‌ای و صلب در نظر گرفته می‌شوند، لذا این قطعات در محیط مدل‌سازی سطحی کتیا مدل‌سازی شده‌اند. با توجه به این‌که قطعه ورقی خام دارای ضخامت ثابتی است این قطعه نیز به‌صورت سطحی مدل شده ولی به‌صورت انعطاف‌پذیر وارد نرم‌افزار تحلیلی می‌شود. با توجه به این‌که در تحلیل المان‌محدود تغییر شکل قطعه ورق‌گیر تأثیرگذار است، این قطعه به‌صورت توپر و در محیط قطعه‌سازی کتیا مدل شده‌است. تمامی قطعات با توجه به موقعیت قرارگیری در شروع عملیات شکل‌دهی در موقعیت مختصاتی دقیق خود مدل‌سازی شده‌اند تا پس از ورود به نرم‌افزار شبیه‌سازی نیاز به جابه‌جایی آن‌ها نباشد. فرایند شکل‌دهی ورق در نرم‌افزار المان‌محدود آباکوس شبیه‌سازی شده‌است. با توجه به ماهیت فرایند شکل‌دهی ورق که نیمه‌استاتیکی محسوب می‌شود در این پژوهش نیز مانند اکثر منابع این عملیات به‌صورت صریح مدل شده‌است. در ابتدا

مدل‌های سه‌بعدی قطعات با فرمت کتیا به نرم‌افزار وارد می‌شوند. در عملیات شکل‌دهی ورق با حرکت رو به پایین ماتریس، ابتدا ورق بین ورق‌گیر و ماتریس گرفته می‌شود و سپس بر روی سنبه تحت کشش شکل می‌گیرد. در فرایند شبیه‌سازی نیز این عملیات در یک مرحله و با یک گام تعریف شده‌است.

در شبیه‌سازی فرایند سنبه به‌طور کامل مقید شده‌است و ماتریس به مقدار کورس حرکتی پایین می‌آید. قطعه ورقی بدون هیچ قیدی تحت حرکت اجزای قالب و نیروهای وارده شکل می‌گیرد. ورق‌گیر تنها مجاز به حرکت در راستای حرکت ماتریس است و در زیر آن نیروی ورق‌گیری وارد می‌شود. نیروی ورق‌گیری به صفحات دایره‌ای شکل که در محل قرارگیری فنرها قرار گرفته‌اند اعمال می‌شود. مقدار هر نیرو با توجه به فنر طراحی شده برای آن موقعیت تعیین می‌شود و در شبیه‌سازی اعمال می‌گردد. اصطکاک بین اجزای متحرک نیز در شرایط کلمب مدل شده‌است.

سنبه، ماتریس و ورق به المان‌های چهارضلعی پوسته‌ای تقسیم شده‌اند. ورق‌گیر نیز با کمک دستور تقسیم‌بندی به چند جزء ساده‌تر با المان‌های شش‌وجهی مکعبی شبکه‌بندی شده‌است. ابعاد این شبکه‌بندی‌ها با توجه به هم‌گرایی نتایج در اندازه‌های کوچک‌تر برای قطعات در نظر گرفته شده‌اند.

### پیاده‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی

برای بهینه‌سازی تابع هدف لازم است یک نمودار گردش کار در نرم‌افزار مدفرانتیر ایجاد شود. در شکل (۲) نمودار گردش کار طراحی شده برای حل این مسئله ارائه گردیده‌است. در قسمت بالای این نمودار آیکون‌های پارامترهای ورودی مسئله نمایش داده شده‌است. در سمت چپ آیکون‌های مربوط به روش طراحی آزمایش و روش حل بهینه‌سازی قرار دارد. سپس در یک آیکون شرط، ورودی‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند و در صورتی که مجموع آن‌ها خیلی کوچک و یا خیلی بزرگ نباشد تحلیل المان محدود انجام می‌گیرد در غیر این صورت اجرای بعدی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

آیکون‌های بعدی مربوط به اسکریپت‌نویسی پایتون، تحلیل نتایج آباکوس و درنهایت انجام محاسبات می‌باشند. آیکون‌های پایین خروجی‌ها، توابع هدف و شروط مسئله هستند. مسئله می‌تواند دارای چندین قید و چندین تابع هدف باشد.

در کد پایتون اولیه لازم است از آیکون Python-Code استفاده شود. در این مرحله برنامه پایتون اجرا می‌شود و تحلیل المان محدود به صورت خودکار انجام می‌شود. نتیجه این مرحله ایجاد فایل خروجی آباکوس است که به گام بعدی تحویل داده می‌شود.

در گام بعدی نتایج شبیه‌سازی المان محدود مورد بررسی قرار می‌گیرند و مقادیر موردنظر از آن استخراج می‌شود. مقادیر خروجی در این مسئله کرنش اصلی و کرنش فرعی پلاستیک المان‌های قطعه ورقی با نام‌های PEmax و PEmin و همچنین پارامتر نمودار حد شکل‌دهی با نام FLDCRT است که نشان‌دهنده نسبت کرنش اصلی هر المان به کرنش اصلی بیشینه مجاز می‌باشد. با توجه به این‌که این مقادیر به تعداد المان‌های قطعه ورقی می‌باشند باید آیکون خروجی به صورت برداری باشد تا امکان ذخیره‌سازی تمامی این مقادیر با یک نام وجود داشته باشد. این آیکون تمامی مقادیر را با اندیس‌های متوالی در خود نگه‌داری می‌کند.

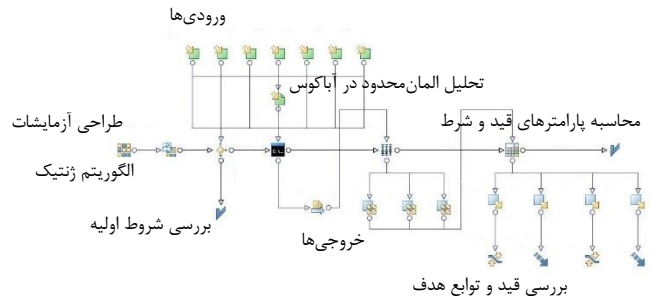
مقادیر استخراج‌شده در آیکون ماشین حساب با نام Calculator مورد بررسی قرار می‌گیرند. در صورتی که از حدود مجاز در نمودار حد شکل‌دهی تجاوز کرده باشند و از منطقه ایمن خارج شده باشند به عنوان المان‌های پاره‌شده و یا محتمل برای چین خوردگی شمارش می‌شوند. این مقادیر به عنوان خروجی‌های پارگی و چین خوردگی باید صفر یا کمینه شوند. البته برای کاهش این مقادیر از حدود مرزی برای شمارش المان‌هایی که در منطقه پرخطر قرار گرفته‌اند استفاده می‌شود. در تابع هدف تعداد المان‌های موجود در این مناطق کمینه می‌شوند.

### تحلیل نتایج

از بین تحلیل‌های انجام‌شده که قیود مسئله را رعایت کرده‌اند مواردی که احتمال عیوب پارگی و چین خوردگی در آن‌ها کمتر است، برای ورق‌گیری قطعه انتخاب می‌شوند. نرم‌افزار در قسمت نتایج قادر است انواع نمودارهای موردنظر را نیز ارائه کند که در مثال‌های ارائه‌شده آمده است.

### ارائه مثال کاربردی

توانایی سیستم نرم‌افزاری ارائه‌شده با دو مثال در ادامه نشان داده شده است. در این دو مثال سعی شده از قطعاتی با اشکال مختلف استفاده شود تا اهمیت چیدمان نیروهای ورق‌گیری مورد بررسی



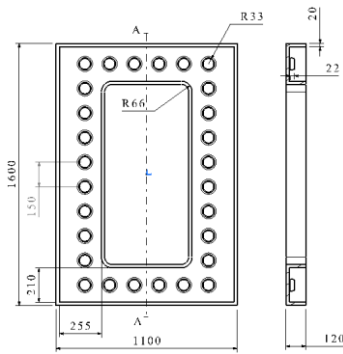
شکل ۲ نمودار جریان کار در نرم‌افزار مدفرانتیر

ورودی‌های مسئله که مقادیر نیروهای ورق‌گیری هستند و در نمودار با نام‌های F1 تا F7 نمایش داده شده‌اند، می‌توانند در سطوح مختلف تعریف شوند. در آیکون شرط، مجموع مقادیر نیروها مورد بررسی قرار می‌گیرد و در صورتی که از یک مقدار حداقلی کمتر و یا از یک مقدار حداکثری بیشتر باشد این تحلیل انجام نمی‌شود. این آیکون به این منظور تعبیه شده است که از اجرای تحلیل‌هایی که قطعاً مورد قبول نخواهند بود جلوگیری شود. مقادیر حداقل و حداکثر نیروها توسط کاربر تعیین می‌شود. الگوریتم بهینه‌سازی مورد استفاده در تحقیق حاضر الگوریتم ژنتیک چندهدفه است که در شکل با آیکونی با نام MOGA-II نشان داده شده است. در این الگوریتم نسل اول را می‌توان به صورت تصادفی ایجاد کرد ولی در سیستم حاضر امکان ایجاد نسل اول به روش‌های متنوعی وجود دارد از جمله روش سبل (Sobol) که قادر است تمام حالات ممکن را به صورت تقریباً یکسان پوشش دهد و نسبت به روش تصادفی که ممکن است قسمت‌هایی از فضای کار را به خوبی پوشش ندهد مناسب‌تر است. در این مسئله از روش سبل برای ایجاد نسل اول الگوریتم بهینه‌سازی استفاده شده و در شکل با نام DOE نمایش داده شده است.

با اجرای نسل اول نسل‌های بعدی با در نظر گرفتن پاسخ‌های هر یک از ورودی‌های نسل‌های پیش ایجاد می‌شوند. این انتخاب به پارامترهای تعریف‌شده در الگوریتم ژنتیک شامل احتمال جهش، احتمال ترکیب و احتمال انتخاب از نخبه‌های نسل پیش وابسته است. حداکثر تعداد نسل‌های الگوریتم را کاربر مشخص می‌کند.

برای اجرای خودکار تحلیل المان محدود لازم است تا برنامه‌ای به زبان پایتون در محیط پنجره دستوری آباکوس اجرا شود. برای دسترسی به این محیط از آیکونی با نام DOSBatch در نمودار جریان کار استفاده شده است. برای اعمال مقادیر ورودی





شکل ۵ ابعاد هندسی ورق‌گیر

با توجه به تقارن قطعه در دو راستا، یک‌چهارم مدل آن در تحلیل‌های المان‌محدود مورد بررسی قرار گرفته‌است. قطعه ورقی نیز با توجه به مدل‌سازی یک‌چهارم قطعه در دو لبه داخلی با قیود تقارن مقید شده‌است.

جنس ورق فولاد st14 و جنس ورق‌گیر چدن GGG60 در نظر گرفته شده‌است. خواص این جنس‌ها در جداول (۱ و ۲) آمده‌است. اصطکاک بین اجزای متحرک نیز در شرایط کلمب با ضریب اصطکاک ۰/۱۵ مدل شده‌است. برای اعمال نیروی ورق‌گیر در هر جایگاه از دستور اعمال فشار در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده‌است که به صورت یک‌نواخت و گسترده بر سطح مقطع دایروی جایگاه وارد می‌شود. مقدار این فشار نیز از تقسیم مقدار نیروی هر جایگاه بر مساحت سطح مقطع آن قابل محاسبه است. قطعات پوسته‌ای به صورت المان‌های چهارضلعی پوسته‌ای و ورق‌گیر با المان‌های مکعبی شش‌وجهی شبکه‌بندی شده‌است. برای محاسبه اندازه مناسب مش آزمون‌های متعددی با اندازه‌های مختلف انجام شد و در نهایت اندازه ۱۰ mm برای قطعات مختلف مناسب ارزیابی شد. مدل مونتاژی قطعات در حالت شبکه‌بندی شده در نرم‌افزار تحلیلی در شکل (۶) نمایش داده شده‌است. شرایط و پارامترهای شبیه‌سازی المان‌محدود فرایند شکل‌دهی ورقی در جدول (۳) ارائه شده‌است.

جدول ۱ خصوصیات جنس قطعه ورقی [18]

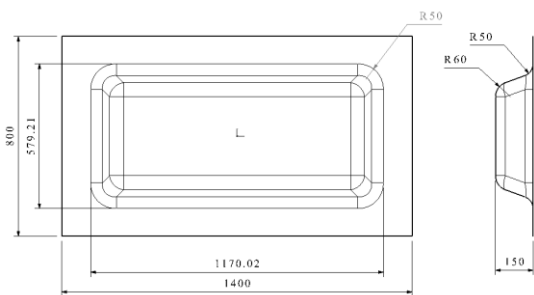
اندازه	خواص جنس قطعه ورقی
۲۱۰ GPa	مدول یانگ
۰/۳	نسبت پواسون
۲۱۰ MPa	تنش تسلیم
۵۸۰ MPa	ثابت تنش
۰/۲۳	توان کرنش سختی
۷۸۰۰ (kg/m <sup>3</sup> )	چگالی

قرار گیرد. شرایط مدل‌سازی قطعه ورقی و اجزای قالب در نرم‌افزار طراحی و شبیه‌سازی و تحلیل در نرم‌افزار المان‌محدود و پیاده‌سازی آن‌ها در نرم‌افزار بهینه‌سازی به همراه نتایج مسئله در ادامه بیان شده‌است.

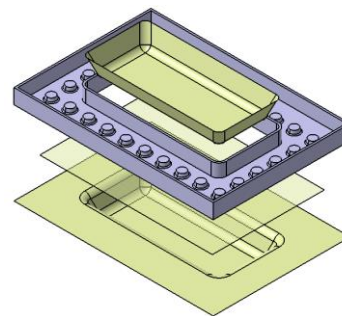
## مثال اول

### شبیه‌سازی فرایند در نرم‌افزار آباکوس

در این مثال قطعه ورقی مستطیل‌شکل ساده‌ای در نظر گرفته شده تا تأثیر مقادیر نیروهای ورق‌گیری در آن مورد بررسی قرار گیرد. ابعاد قطعه نهایی ۱۴۰۰ mm در ۸۰۰ mm با ضخامت ۱ mm است. ابعاد هندسی قطعه ورقی در شکل (۳) نمایش داده شده‌است. در شکل (۴) مدل انفجاری اجزای قالب و قطعه ورقی به صورت کامل آمده‌است. در این شکل فاصله قطعات به گونه‌ای تنظیم شده‌است که اجزای مختلف قابل رؤیت باشد. قطعه ورقی خام در این اشکال به صورت شفاف نمایش داده شده‌است. ابعاد هندسی قطعه ورق‌گیر در شکل (۵) نمایش داده شده‌است. در این قطعه جایگاه‌های قرارگیری نیروهای ورق‌گیری به صورت مخروط طراحی شده‌است تا تأثیر اعمال نیروی ورق‌گیری متغیر بیشتر شود. فاصله آن‌ها با توجه به فاصله سوراخ‌های محل پین‌های فشاری در پرس‌های سنگین در نظر گرفته شده‌است.

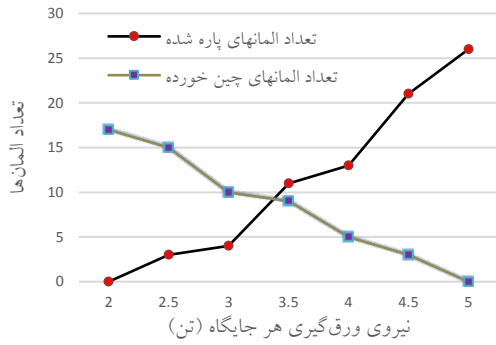


شکل ۳ ابعاد هندسی قطعه ورقی



شکل ۴ مدل انفجاری اجزای قالب و قطعه ورقی از نمای پایین



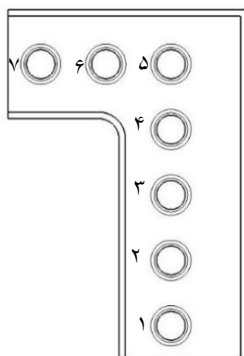


شکل ۷ بررسی نیروی ورق‌گیر یک‌نواخت در مثال اول

در صنعت برای رفع این مشکل از ترمز در مناطقی که پدیده چین خوردگی اتفاق می‌افتد، استفاده می‌شود که در بسیاری موارد نیز کار ساز خواهد بود ولی در صورتی که پس از ساخت هم‌چنان یکی از عیوب مذکور و یا هر دو آن‌ها وجود داشته باشد اصلاح قالب کاری بسیار دشوار، زمان‌بر و پرهزینه است.

### پیاده‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی

نمودار گردش کار طراحی شده برای حل این مثال در شکل (۲) نمایش داده شده است. در بالای نمودار پارامترهای ورودی که ۷ عدد هستند و بیان‌کننده مقادیر نیروهای ورق‌گیری می‌باشند آمده است. چیدمان آن‌ها در شکل (۸) نمایش داده شده است. این نیروها از صفر تا ۵ تن به چهار سطح تقسیم شده‌اند.

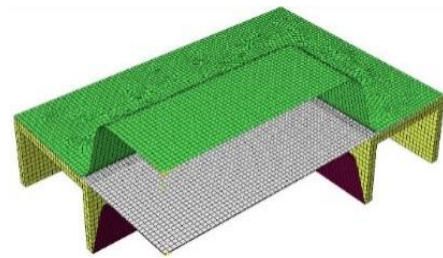


شکل ۸ جایگاه اعمال نیروهای ورق‌گیری در مثال اول

طراحی آزمایش به روش سبیل انجام شده است و تعداد آزمایش‌های نسل اول ۵۰ عدد است. از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای طراحی چیدمان نیروها بهره گرفته شده است. احتمال ترکیب در این مثال برابر با عدد ۰.۵٪ که مقداری رایج برای این پارامتر در منابع مختلف است در نظر گرفته شده است. در منابع مختلف مقدار احتمال جهش معمولاً

جدول ۲ خصوصیات جنس ورق‌گیر [19]

اندازه	خواص جنس قطعه ورقی
۱۷۰ GPa	مدول یانگ
۰/۲۹	نسبت پواسون
۳۶۰ MPa	تنش تسلیم
۱۵۸۵ MPa	ثابت تنش
۰/۱۹	توان کرنش سختی
۷۲۰۰ (kg/m <sup>3</sup> )	چگالی



شکل ۶ مدل سه‌بعدی مونتاژی اجزای قالب و قطعه ورقی شبکه‌بندی‌شده

جدول ۳ پارامترهای شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی ورق

اندازه	تنظیم پارامترها
۱ mm	ضخامت قطعه ورقی خام
۱۵۲ mm	کورس حرکتی ماتریس
۰/۵ m/s	سرعت حرکت ماتریس
۰/۱۵	ضریب اصطکاک

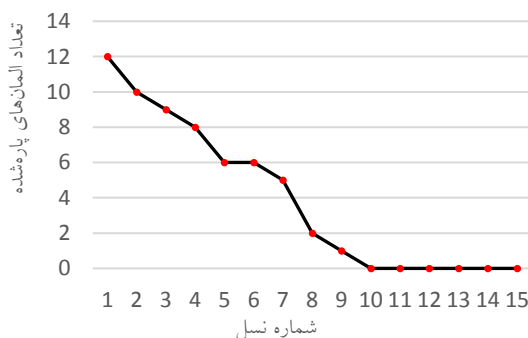
### تحلیل فرایند با نیروی ورق‌گیر یک‌نواخت

با توجه به هندسه غیریک‌نواخت قطعه، نیروی ورق‌گیر یک‌نواخت برای هدایت جریان ورق به داخل حفره ماتریس مناسب نخواهد بود. برای بررسی این موضوع مقادیر مختلف نیرویی برای شکل‌دهی قطعه در نظر گرفته شد. نتایج این تحلیل‌ها در شکل (۷) آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود و قابل‌انتظار است با افزایش مقدار نیروی ورق‌گیر تعداد المان‌های پاره‌شده افزایش و تعداد المان‌های چین‌خورده کاهش یافته است. در حالت اول که نیروی تمام پین‌های فشاری برابر ۲ تن است پارگی اتفاق نمی‌افتد ولی تعداد المان‌های چین‌خورده قابل توجه است. در حالت پایانی که نیروی تمام پین‌ها ۵ تن در نظر گرفته شده است عیب چین خوردگی برطرف شده، ولی تعداد زیادی از المان‌ها دچار پارگی شده‌اند. در موارد میانی نیز نمی‌توان به حالتی رسید که هر دو عیب پارگی و چین خوردگی برطرف شوند.

می‌گردد. برای تابع هدف تعداد المان‌های موجود در مناطق پرخطر پارگی و چین‌خوردگی شمارش و با نام‌های  $FObj$  و  $WObj$  ذخیره‌سازی می‌شوند. برای شمارش تابع هدف چین‌خوردگی از خطی با  $10^\circ$  زاویه نسبت به خط نیم‌ساز ربع دوم نمودار حد شکل‌دهی استفاده شده‌است و منطقه پرخطر به این صورت مشخص شده‌است و المان‌های موجود در این ناحیه برای کمینه‌شدن شمارش شده‌اند. مقدار ضریب ایمنی برای پارگی در این مثال  $0/05$  در نظر گرفته شده‌است و تعداد المان‌های موجود در منطقه پرخطر پارگی با نام  $FObj$  برای کمینه‌شدن شمارش شده‌اند.

با اجرای برنامه در نسل ۱۰ ام از الگوریتم ژنتیک و آزمایش ۴۶۴ ام اولین تحلیل که قید مسئله در آن محقق شده دیده می‌شود که در شکل (۹) نمایش داده شده‌است. در ادامه فرایند الگوریتم بهینه‌سازی برای کاهش توابع هدف تلاش خواهد کرد. تغییرات مقادیر تابع هدف پارگی و چین‌خوردگی در نسل‌های متوالی در شکل‌های (۱۰ و ۱۱) ارائه شده‌است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با ادامه برنامه می‌توان گفت نتایج از نسل ۱۲ به بعد هم‌گرا می‌شود و تغییر زیادی در توابع هدف و تابع قید قابل مشاهده نیست. به همین دلیل اجرای برنامه در نسل ۱۵ که معادل انجام ۷۵۰ آزمایش است، متوقف شده‌است.

زمان انجام هر تحلیل در این مثال حدود ۲۰ دقیقه در کامپیوتر با پردازشگر ۸ هسته‌ای و رم ۸ گیگابایت طول می‌کشد. البته برای انجام ۷۵۰ حالت نشان داده شده در این مثال نیاز به انجام تمامی تحلیل‌ها نیست زیرا تعدادی از حالات شرط اولیه را ندارند و مورد بررسی قرار نمی‌گیرند و تعدادی نیز تکراری هستند و بدون انجام تحلیل نتایج آن‌ها در نمودارها نمایش داده می‌شود. انجام تحلیل‌های مثال حاضر حدود ۱۰۰ ساعت به طول انجامید.



شکل ۹ نمودار تغییرات قید پارگی در مثال اول

بین ۱٪ تا ۵٪ در نظر گرفته می‌شود ولی در این مثال به دلیل این‌که تعداد جمعیت اولیه به اندازه کافی بزرگ نیست تا همه فضای طراحی را به خوبی پوشش دهد، مقدار درصد جهش برابر با ۱۰٪ در نظر گرفته شده‌است. توجه به این نکته ضروری است که با توجه به انتخاب نخبه در هر نسل، بزرگ بودن این مقدار باعث از دست دادن مقادیر بهینه و نخبه نخواهد شد و فقط اندکی سرعت همگرایی را کاهش می‌دهد که با توجه به اهمیت زیاد پوشش همه فضای طراحی، بزرگ بودن این پارامتر در این تحقیق قابل توجیه است.

در این مثال در آیکون شرط ابتدا مواردی که نیروی ورق‌گیری آن‌ها کمتر از ۱۵ تن است شناسایی شده و مورد تحلیل قرار نمی‌گیرد. پس از عبور از این مرحله تحلیل المان محدود به صورت خودکار انجام شده و در مرحله بعدی از فایل خروجی آباکوس مقادیر معیار FLD، کرنش اصلی و کرنش فرعی المان‌های قطعه ورقی استخراج می‌شود. این مقادیر در ماتریس‌های تعریف شده در قسمت خروجی مقداردهی می‌شود. در مرحله آخر این مقادیر مورد بررسی قرار گرفته و تعداد المان‌هایی که شرط مسئله را رعایت نکرده‌اند یا تعداد المان‌هایی که باید به عنوان تابع هدف کمینه شوند، شمارش می‌شوند و در چهار مقدار خروجی قرار می‌گیرند. مسئله دارای یک قید و دو تابع هدف است. پارامترهای تنظیم شده در این نرم‌افزار در جدول (۴) ارائه شده‌است.

جدول ۴ پارامترهای تنظیم شده در نرم‌افزار مدفرانتیر

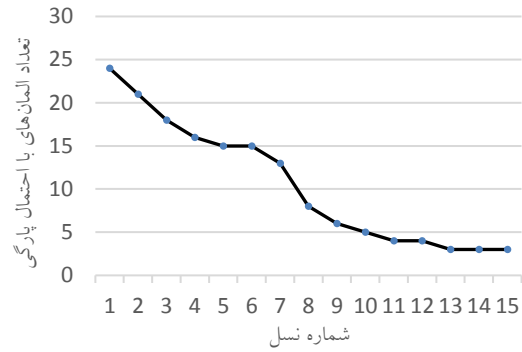
اندازه	تنظیم پارامترها
۷	تعداد پارامترهای ورودی
(۰، ۱/۶، ۳/۳، ۵)	سطوح پارامترهای ورودی (تن)
۵۰	تعداد آزمایش‌های نسل اول
۲۰	تعداد حداکثر نسل‌ها
۵۰٪	احتمال ترکیب
۱۰٪	احتمال جهش
۲	تعداد توابع هدف
۱	تعداد قیود

## ارائه نتایج

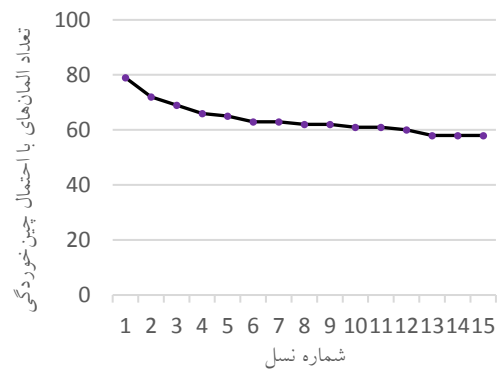
در این مسئله سه پارامتر خروجی وجود دارد. دو مورد مربوط به تابع هدف و یک مورد دیگر بیان‌کننده قید مسئله است. برای تعریف قید المان‌های موجود در منطقه پارگی از نمودار حد شکل‌دهی شناسایی و شمارش می‌شود و با نام  $FCon$  ذخیره

جدول ۵ دو چیدمان مناسب برای مثال اول

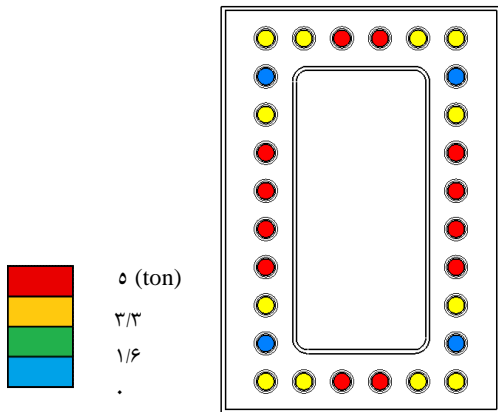
تحلیل شماره	تحلیل شماره	
۶۳۲	۵۶۵	
۵	۵	نیروی جایگاه ۱ (ton)
۵	۵	نیروی جایگاه ۲ (ton)
۱.۶	۳.۳	نیروی جایگاه ۳ (ton)
۱.۶	۰	نیروی جایگاه ۴ (ton)
۳.۳	۳.۳	نیروی جایگاه ۵ (ton)
۳.۳	۳.۳	نیروی جایگاه ۶ (ton)
۵	۵	نیروی جایگاه ۷ (ton)
۰	۰	قید پارگی (FCon)
۳	۴	تابع هدف پارگی (FObj)
۵۸	۶۰	تابع هدف چین خوردگی (WObj)



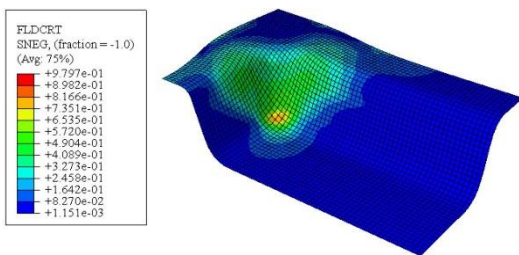
شکل ۱۰ نمودار هم‌گرایی تابع هدف پارگی در مثال اول



شکل ۱۱ نمودار هم‌گرایی تابع هدف چین خوردگی در مثال اول



شکل ۱۲ مقادیر نیروی هر جایگاه برای حالت نهایی



شکل ۱۳ نتیجه شبیه‌سازی برای حالت نهایی

### مثال دوم

#### شبیه‌سازی فرایند در نرم‌افزار آباکوس

قطعه ورقی مورد بحث در این قسمت قطعه ورقی با کانتور بیرونی منحنی شکل است. ابعاد قطعه نهایی ۱۰۵۰mm در ۹۰۰mm با ضخامت ۱mm است. ابعاد هندسی قطعه ورقی در

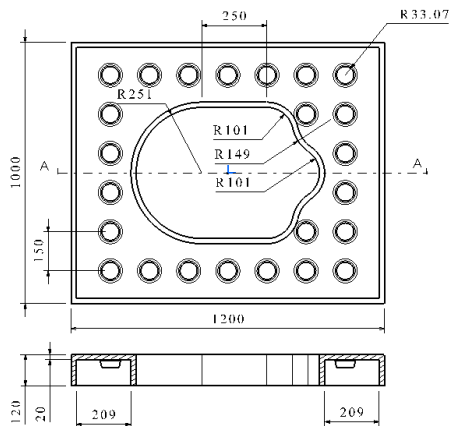
### تحلیل نتایج

در بین نتایج به دست آمده دو چیدمان نیرو که در جدول (۵) بیان شده‌اند دارای کمترین مقادیر توابع هدف ضمن محقق شدن قید مسئله هستند. همان‌طور که انتظار می‌رود با توجه به جریان بیشتر ورق در وسط اضلاع مستطیل نیروی ورق‌گیری در این نقاط بیشتر از گوشه‌ها پیشنهاد شده‌است. البته از بین دو چیدمان مذکور چیدمان ارائه شده در تحلیل ۵۶۵ مناسب‌تر است زیرا تعداد نیروهای ورق‌گیری کاهش یافته‌است و این به معنای کاهش هزینه اعمال نیروی ورق‌گیری است. این چیدمان در شکل (۱۲) از نمای پایین ورق‌گیر نمایش داده شده‌است. در این شکل برای نمایش بهتر چیدمان نیروها از رنگ‌های مختلف استفاده شده‌است.

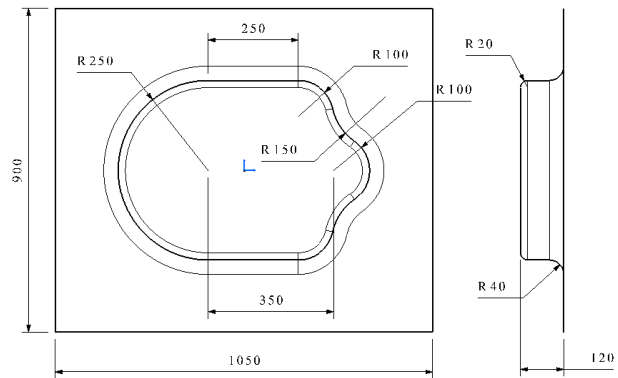
نتیجه فرایند شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس برای حالت نهایی در شکل (۱۳) نمایش داده شده‌است. در این شکل توزیع معیار پارگی قابل مشاهده است.

شکل (۱۴) نمایش داده شده‌است.

شکل ۱۵ مدل انفجاری اجزای قالب و قطعه ورقی از نمای پایین



شکل ۱۶ ابعاد هندسی قطعه ورق‌گیر



شکل ۱۴ ابعاد هندسی قطعه ورقی

در شکل (۱۵) مدل انفجاری سه‌بعدی و دید از پایین اجزای قالب به‌همراه قطعه ورقی آماده‌است. در این نما قطعه ورقی خام به‌صورت شفاف نمایش داده شده‌است. در شکل (۱۶) ابعاد هندسی قطعه ورق‌گیر نشان داده شده‌است.

به علت تقارن این قطعه ورقی، نیمی از قطعه و اجزای قالب در تحلیل المان محدود مورد بررسی قرار می‌گیرد. قطعه ورقی نیز با توجه به مدل‌سازی نصف قطعه در یک لبه داخلی با قيود تقارن مقید شده‌است. جنس ورق فولاد st14 و جنس ورق‌گیر چدن GGG60 در نظر گرفته شده‌است. خواص این دو جنس در جداول (۱ و ۲) آمده‌است. اصطکاک بین اجزای متحرک نیز در شرایط کلمب با ضریب اصطکاک ۰/۱۵ مدل شده‌است. قطعات پوسته‌ای به‌صورت المان‌های چهارضلعی پوسته‌ای و ورق‌گیر با المان‌های مکعبی شش‌وجهی شبکه‌بندی شده‌است. مدل مونتاژی قطعات در حالت شبکه‌بندی شده در نرم‌افزار تحلیلی در شکل (۱۷) نمایش داده شده‌است. شرایط و پارامترهای شبیه‌سازی المان محدود فرایند شکل‌دهی ورقی در جدول (۶) ارائه شده‌است.



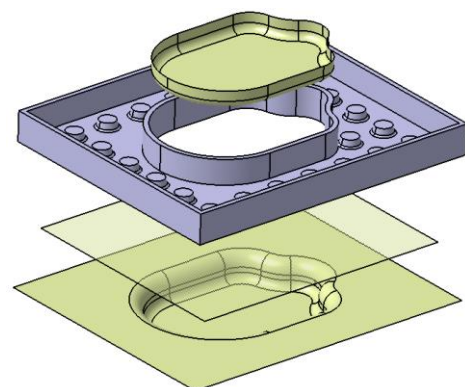
شکل ۱۷ مدل سه‌بعدی مونتاژی اجزای قالب و قطعه ورقی در نرم‌افزار آباکوس

جدول ۶ پارامترهای شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی ورق

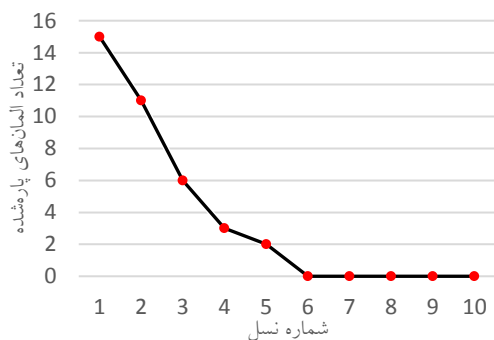
مقدار	تنظیم پارامترها
۱mm	ضخامت قطعه ورقی خام
۱۰۰mm	کورس حرکتی ماتریس
۰/۵m/s	سرعت حرکت ماتریس
۰/۱۵	ضریب اصطکاک

### تحلیل فرایند با نیروی ورق‌گیر یک‌نواخت

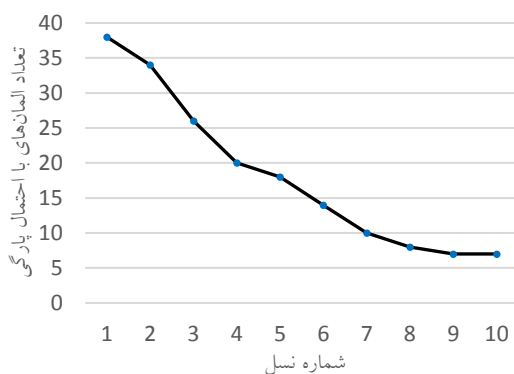
در این مثال نیز ابتدا استفاده از نیروی ورق‌گیر یک‌نواخت برای هدایت جریان ورق به داخل حفره ماتریس مورد بررسی قرار گرفته‌است. نتایج این تحلیل‌ها مشابه مثال ۱ است و در شکل (۱۸) قابل مشاهده‌است. در حالت اول که نیروی تمام پین‌های فشاری برابر ۱/۵ تن است پارگی در کمترین مقدار ممکن که البته بزرگ‌تر از صفر است قرار دارد ولی تعداد المان‌های چین‌خورده قابل توجه است. در حالت پایانی که نیروی تمام پین‌ها ۵ تن در نظر گرفته شده‌است عیب چین‌خوردگی برطرف شده‌است ولی



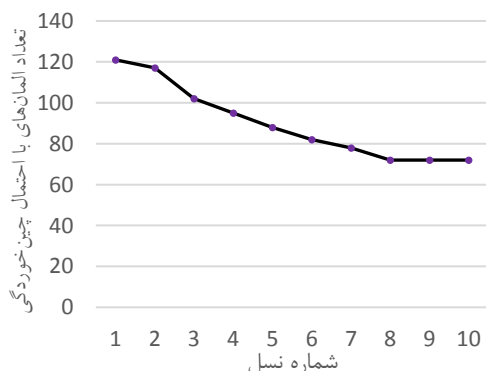
با اجرای برنامه در نسل پنجم الگوریتم ژنتیک و در آزمایش ۲۷۴ ام اولین تحلیل که قید مسئله در آن محقق شده است به دست می آید. نمودار تغییر مقادیر قید پارگی در شکل (۲۰) آمده است. تغییرات مقادیر تابع هدف پارگی و چین خوردگی در شکل های (۲۱ و ۲۲) ارائه شده است. همان طور که ملاحظه می شود با ادامه برنامه می توان گفت نتایج از نسل هشتم به بعد هم گرا شده اند و تغییر زیادی در ادامه مشاهده نمی شود. به همین دلیل برنامه پس از اجرای ۶۰۰ تحلیل متوقف گردید.



شکل ۲۰ نمودار تغییرات قید پارگی

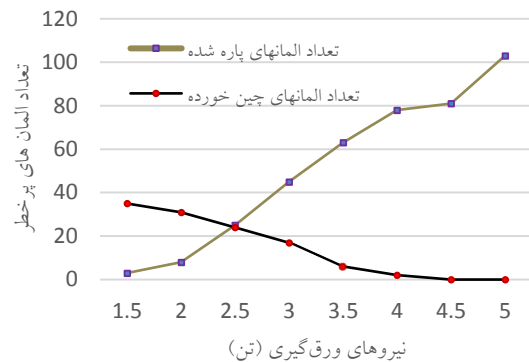


شکل ۲۱ نمودار هم گرایی تابع هدف پارگی



شکل ۲۲ نمودار هم گرایی تابع هدف چین خوردگی

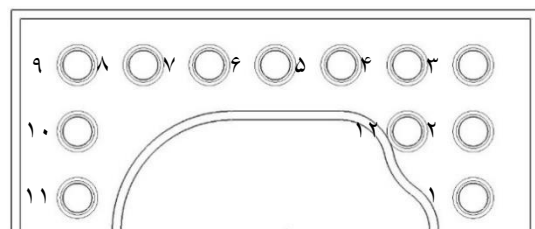
تعداد زیادی از المانها دچار پارگی شده اند. در موارد میانی نیز نمی توان به حالتی رسید که هر دو عیب پارگی و چین خوردگی برطرف شده باشند. در نتیجه باید برای رفع مشکل از نیروی ورق گیر غیریک نواخت استفاده کرد. در ادامه به کمک الگوریتم معرفی شده چیدمان مناسب نیروهای ورق گیری مورد بررسی قرار می گیرد.



شکل ۱۸ تعداد المانهای پرخطر برای نیروی ورق گیر یک نواخت

### پایه سازی الگوریتم بهینه سازی

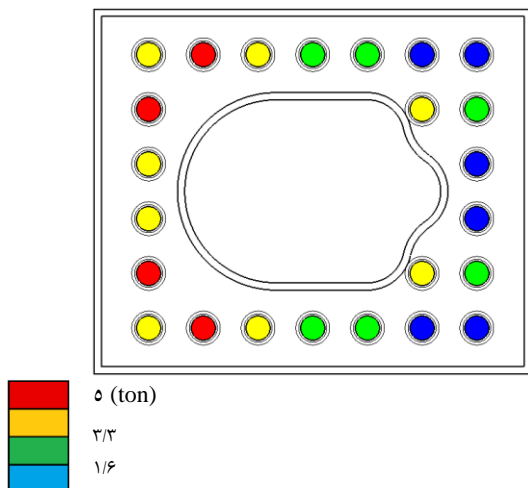
نمودار گردش کار طراحی شده برای حل این مثال مانند شکل (۳) است تنها تفاوت در تعداد پارامترهای ورودی است که ۱۲ عدد می باشد. چیدمان آنها در شکل (۱۹) آمده است. این نیروها از صفر تا ۵ تن به چهار سطح تقسیم شده اند. طراحی آزمایش به روش سبل انجام شده و تعداد آزمایش های نسل اول ۶۰ عدد است. مابقی موارد مانند مثال اول است که در جدول (۴) آمده است.



شکل ۱۹ جایگاه اعمال نیروهای ورق گیری

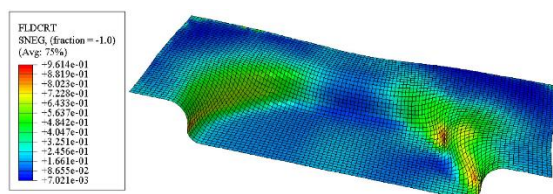
### ارائه نتایج

توابع هدف و قید و هم چنین مقدار ضریب اطمینان مناطق پارگی و چین خوردگی در این مسئله همانند مثال اول تعریف شده است.



شکل ۲۳ مقادیر نیروی هر جایگاه برای حالت نهایی

نتیجه فرایند شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس برای چیدمان نهایی که در جدول (۸) بیان شد در شکل (۲۴) نمایش داده شده‌است. در این شکل توزیع معیار پارگی قابل مشاهده است.



شکل ۲۴ نتیجه شبیه‌سازی برای حالت نهایی

### نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر ساختاری ایجاد شده‌است که قادر است چیدمان مناسب نیروهای ورق‌گیری را در قالب‌های شکل‌دهی قطعات ورقی به طراح پیشنهاد دهد. این چیدمان به گونه‌ای است که قطعه تولیدی بدون عیب پارگی و با پتانسیل کم برای امکان پدیده چین‌خوردگی ایجاد می‌شود. در این مسئله توابع هدف و قید الگوریتم، تعداد المان‌های در معرض این عیوب انتخاب شدند. نتایج ارائه شده برای دو مثال ارائه شده نشان می‌دهد که با چیدمان غیریک‌نواخت نیروهای ورق‌گیری برای قطعات نامتقارن و نسبتاً پیچیده می‌توان به تولید قطعه‌ای بدون عیب پارگی با پتانسیل کم چین‌خوردگی رسید. این ساختار در محیط نرم‌افزار مدفرانتیر و با ایجاد ارتباط بین نرم‌افزارهای کتیا و آباکوس انجام شده‌است. برای این مهم لازم است با زبان‌های Python، VBA و C# در

تعداد المان‌های موجود در نواحی قید و توابع هدف برنامه برای نتیجه نهایی در جدول (۷) مشخص شده‌است. این مقادیر بهترین حالتی است که از بین تمامی موارد به دست آمده‌است.

جدول ۷ خروجی برنامه برای توابع قید و هدف مسئله

توابع قید و هدف	تعداد المان‌ها
قید پارگی (FCon)	۰
تابع هدف پارگی (FObj)	۷
تابع هدف چین‌خوردگی (WObj)	۷۲

### تحلیل نتایج

در بین نتایج به دست آمده چیدمان نهایی نیرویی برابر با نخبه نسل آخر یعنی تحلیل شماره ۴۸۵ است که در جدول (۸) بیان شده‌است. در این چیدمان ضمن برقراری قید مسئله مقادیر توابع هدف نیز کمینه می‌باشند. این چیدمان نیرویی در شکل (۲۳) از نمای پایین ورق‌گیر نمایش داده شده‌است. در این شکل برای نمایش بهتر چیدمان نیروها از رنگ‌های مختلف استفاده شده‌است. همان‌طور که انتظار می‌رود با توجه به جریان بیشتر ورق در سمت چپ حفره ماتریس نیروی ورق‌گیری در این نقاط بیشتر از سمت راست پیشنهاد شده‌است. البته در این چیدمان‌ها تاحدودی قالب از لحاظ نیرویی نامتعادل می‌شود و نیروی وارد به صفحات سایشی افزایش می‌یابد که با افزایش اندازه و فاصله آن‌ها می‌توان این نیروی جانبی و گشتاور حاصل را خنثی کرد.

جدول ۸ خروجی برنامه برای تعیین نیروی هر جایگاه

شماره جایگاه	نیروی ورق‌گیر (تن)
۱	۰
۲	۱/۶
۳	۰
۴	۰
۵	۱/۶
۶	۱/۶
۷	۳/۳
۸	۰
۹	۳/۳
۱۰	۰
۱۱	۳/۳
۱۲	۳/۳



Sheet metal forming die	قالب شکل‌دهی قطعات ورقی	محیطی مناسب را برای انجام تحقیق حاضر مهیا نموده‌است. نتایج
Fracture defect	عیب پارگی	ارائه‌شده در این تحقیق برای ورقی با جنس st14 و ضخامت ۱ میلی‌متر بیان شده‌است تغییر جنس و ضخامت و در نظر گرفتن
Wrinkling defect	عیب چین‌خوردگی	مواردی از جمله ناهمسان‌گردی ورق می‌تواند موضوعات مناسبی
Forming limit diagram	نمودار حد شکل‌دهی	برای تحقیقات آینده در این زمینه باشد.
Minor strain	کرنش اصلی	
Major strain	کرنش فرعی	
Workflow diagram	نمودار جریان کار	واژه نامه
		Non-uniform blank-holder force
		نیروی ورق‌گیر غیریک‌نواخت

## مراجع

- Obermeyer, E. J. and Majlessi, S. A., "A Review of Recent Advances in the Application of Blank-Holder Force towards Improving the Forming Limits of Sheet Metal Parts", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 75, No. 1-3, Pp. 222-234, (1998).
- Sheng, Z. Q., Jirathearanat, S. and Altan, T., "Adaptive FEM Simulation for Prediction of Variable Blank Holder Force in Conical Cup Drawing", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, No. 5, Pp. 487-494, (2004).
- Palaniswamy, H., et al., "Optimal Programming of Multi-Point Cushion Systems for Sheet Metal Forming", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 55, No. 1, Pp. 249-254, (2006).
- Chengzhi, S., Guanlong, C. and Zhongqin, L., "Determining the Optimum Variable Blank-Holder Forces Using Adaptive Response Surface Methodology (ARSM)", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 26, No. 1-2, Pp. 23-29, (2005).
- Wang, L., and Lee, T., "Numerical Simulation of the Effects of the Space-Variant Blank-Holder Force and Geometrical Variables in the Deep-Drawing Process", *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 40, No. 4, Pp. 375-384, (2005).
- Wang, L. and Lee, T., "Controlled Strain Path Forming Process with Space Variant Blank Holder Force Using RSM Method", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 167, No. 2, Pp. 447-455, (2005).
- Wang, L., Chan, L. and Lee, T., "Process Modeling of Controlled Forming with Time Variant Blank Holder Force Using RSM Method", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, No. 12, Pp. 1929-1940, (2007).
- Wang, W., et al., "Determination of Optimal Blank Holder Force Trajectories for Segmented Binders of Step Rectangle Box Using PID Closed-Loop FEM Simulation", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 32 No. 11-12, Pp. 1074-1082, (2007).
- Wu-rong, W., Guan-long, C. and Zhong-qin, L., "The Effect of Binder Layouts on the Sheet Metal Formability in the Stamping with Variable Blank Holder Force", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 10, Pp. 1378-1385, (2010).

10. Zhong-qin, L., Wu-rong, W. and Guan-long, C., "A New Strategy to Optimize Variable Blank Holder Force towards Improving the Forming Limits of Aluminum Sheet Metal Forming", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 183, No. 2, Pp. 339-346, (2007).
11. Kitayama, S., et al., "A Closed-Loop Type Algorithm for Determination of Variable Blank Holder Force Trajectory and its Application to Square Cup Deep Drawing", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 51, No. 5-8, Pp. 507-517, (2010).
12. Kitayama, S., Kita, K. and Yamazaki, K., "Optimization of Variable Blank Holder Force Trajectory by Sequential Approximate Optimization with RBF Network", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 61, No. 9-12, Pp. 1067-1083, (2012)
13. Tommerup, S. and Endelt, B., "Experimental Verification of a Deep Drawing Tool System for Adaptive Blank Holder Pressure Distribution", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, No.11, Pp. 2529-2540, (2012).
14. Endelt, B., Tommerup, S. and Danckert, J., "A Novel Feedback Control System—Controlling the Material Flow in Deep Drawing Using Distributed Blank-Holder Force", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 213, No. 1, Pp. 36-50, (2013).
15. Barthau, M. and Liewald, M., "New Approach on Controlling Strain Distribution Manufactured in Sheet Metal Components during Deep Drawing Process", *Journal of Procedia Engineering*, Vol. 207, No. 1, Pp. 66-71, (2017).
16. Peixinho, N., Costa, S. and Blanco, V., "Development of Forming Tool Concept Validator with Variable Stiffness Blank-Holder for High Strength Steel Applications", *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, Vol. 2, No. 2, Pp. 116-122, (2019).
17. Brun, M., Ghiotti, A., Bruschi, S. and Filippi, S., "Active Control of Blank-Holder in Sheet Metal Stamping", *Procedia CIRP*, Vol. 100, Pp. 151-156, (2021).
18. Fazli, A., Arezoo, B. and Hasanniya, M.H., "An Automated Process Sequence Design and Finite Element Simulation of Axisymmetric Deep Drawn Components", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 136, No. 3, Pp. 031005-1-031005-9, (2014).
19. Abebe, B.H., "Fatigue Life Assessment of a Diesel Engine Pump Part Subjected to Constant and Variable Amplitude Loading", Master Thesis, Bauhaus University, (2008).