



## تعیین سیستم موقعیت‌دهی قطعات ورقی در قالب‌های شکل‌دهی کششی به صورت خودکار

قاسم اعظمی راد<sup>1\*</sup>، بهروز آرزو<sup>2</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

\* یزد، صندوق پستی 89195741، azamirad@yazd.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

موقعیت‌دهی صحیح ورق در قالب‌های شکل‌دهی از اهمیت زیادی برخوردار است. وجود خطا در موقعیت‌دهی اولیه می‌تواند منجر به تولید قطعه ناسالم شود. تعداد و محل اجزای موقعیت‌دهنده در موقعیت‌دهی صحیح قطعه بسیار مؤثر است. در طراحی دستی و سنتی قالب‌های شکل‌دهی قطعات ورقی بزرگ برای موقعیت‌دهی ورق معمولاً در هر لبه از آن دو موقعیت‌دهنده استفاده می‌شود یعنی در چهار جهت ورق از هشت عدد گیج استفاده می‌شود که به نظر می‌آید تعدادی از آن‌ها ضروری نباشد. در تحقیق حاضر با برقراری ارتباط بین نرم‌افزار مدل‌سازی کتیا و نرم‌افزار تحلیلی آباکوس و به کمک روش‌های بهینه‌سازی، سیستم نرم‌افزاری یک‌پارچه‌ای ایجاد شده که قادر است به صورت خودکار تحلیل‌های المان محدود را انجام داده و با توجه به خروجی هر تحلیل، تغییراتی در فایل ورودی ایجاد کرده و تحلیل بعدی را انجام دهد. در هر مرحله برای یک چیدمان خاص از گیج‌ها میزان انحراف ورق حین قرارگیری و شکل‌دهی مورد بررسی قرار می‌گیرد که نباید از حد مجاز بیشتر باشد. اعمال تغییرات در پارامترهای ورودی طبق الگوریتم بهینه‌سازی و انجام تحلیل‌های بعدی تا همگرا شدن مسئله به جوابی که بهترین چیدمان سطوح موقعیت‌دهنده را پیشنهاد می‌دهد به صورت کاملاً خودکار ادامه می‌یابد. برای مقایسه نتایج حاصل از این سیستم با طراحی سنتی دو مثال ارائه شده است که نتایج به دست آمده نشان می‌دهد با تعداد گیج کمتر از روش سنتی می‌توان قطعه ورقی را روی قالب به درستی و با دقت کافی موقعیت‌دهی نمود.

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 13 آبان 1399

داوری اولیه: 29 آبان 1399

پذیرش: 10 بهمن 1399

### کلیدواژگان:

سیستم موقعیت‌دهی خودکار  
قالب‌های شکل‌دهی قطعات ورقی  
نرم‌افزار مدفرانتیر

## Automation of sheet metal positioning in stamping die design

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

1- Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 89195741 Yazd, Iran, azamirad@yazd.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received: 4 November 2020  
First Decision: 20 November 2020  
Accepted: 30 January 2021

### Keywords:

Automatic positioning system  
Stamping die design  
Modefrontier software

### Abstract

Proper positioning of the blank in the sheet metal forming dies is very important. An error in the initial positioning can lead to the production of a defective part. The number and location of positioning gauges are very effective in positioning the part correctly. In the manual and traditional design of dies for forming large sheet metal parts, two positioners are usually used to position the sheet at each edge, therefore eight gauges are used in the four directions of the sheet, some of which do not seem to be necessary. In the present study, by establishing a relationship between Catia and Abaqus softwares and with the help of optimization methods, an integrated software system has been created that is able to automatically perform finite element analyzes and make changes in the input file according to the output of each analysis and perform the next analysis. At each stage, for a specific arrangement of gauges, the amount of deviation of the sheet during placement and forming is examined, which should not be more than the allowable limit. Applying changes to the input parameters according to the optimization algorithm and performing subsequent analyzes will continue until the problem converges to the best answer that suggests the arrangement of the positioning levels. To compare the results of this system with the traditional design, two examples are presented. The results show that with a smaller number of gauges than the traditional method, the blank can be positioned correctly and accurately in the die.

### 1- مقدمه

در طول فرایند طراحی است که باعث کاهش زمان طراحی و افزایش دقت آن می‌گردد. در پژوهش‌های متعددی به استفاده از کامپیوتر در طراحی قالب‌های مرحله‌ای برش، خم و فرم پرداخته شده و برای جانمایی اشکال در نوار ورق، چیدمان مراحل تولید

امروزه خودکارسازی فرایند طراحی اجزای قالب‌های پرس و چیدمان اجزای آن در موقعیت مناسب مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفته است. هدف از این فرایند کاهش نقش انسان

Please cite this article using:

Gh. Azamirad, B. Arezoo, Automation of sheet metal positioning in stamping die design, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 1, pp. 55- 67, 2021(in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

قطعه ورقی و غیره سیستم‌های نرم‌افزاری متنوعی ایجاد گردیده است. باتوجه به زمینه کاری تحقیق حاضر که طراحی چیدمان موقعیت‌دهنده‌ها در قالب‌های شکل‌دهی قطعات ورقی است در ادامه به بیان پژوهش‌هایی پرداخته می‌شود که موضوع اصلی آن‌ها استفاده از کامپیوتر در طراحی چیدمان اجزای قالب‌های شکل‌دهی قطعات ورقی است.

فارسی و همکارانش در سال 2009 نرم‌افزاری برای طراحی خودکار چیدمان عملیات در قالب‌های خم مرحله‌ای با استفاده از مجموعه‌های فازی ایجاد کرد. ورودی این نرم‌افزار مدل سه‌بعدی قطعه و خروجی آن ترتیب چیدمان عملیات خم کاری قطعه است. این سیستم در ابتدا پس از تشخیص قطعه و صفحه مبنای آن، شکل گسترده قطعه را تعیین می‌کند. در مازول‌های بعدی نرم‌افزار با استفاده از الگوریتم ابداعی بر اساس کلاسه‌بندی و مجموعه‌های فازی برگرفته از قوانین طراحی قالب و دانش افراد خبره، اقدام به طراحی ترتیب چیدمان ایستگاه‌ها می‌نماید. این سیستم می‌تواند به‌عنوان یک سیستم مشاور برای طراحان قالب مرحله‌ای بسیار مفید باشد [1]. در پژوهشی دیگر قطرهنی در همین سال به طراحی چیدمان قالب‌های مرحله‌ای برش به کمک کامپیوتر پرداخت. در این تحقیق چهار مرحله از مراحل مهم طراحی قالب شامل طراحی جانمایی، طراحی سیستم راهنمایی ورق، تشخیص و تخصیص سنبه‌های برش و طراحی چیدمان ورق مورد بررسی قرار گرفتند. معیار بهبود روش در این پژوهش افزایش خودکارسازی فرایند طراحی چیدمان قالب‌های مرحله‌ای برش به کمک کامپیوتر در نظر گرفته شده است [2].

تیسای و همکارانش در تحقیقی که نتایج آن در سال 2010 به چاپ رسید بانک اطلاعاتی خوبی از اجزای متعارف مورد استفاده در قالب‌های شکل‌دهی قطعات ورقی ایجاد کردند که برای چند نمونه قطعه ورقی با اشکال عمومی تهیه شده است [3].

پوتونیک و همکارانش در سال 2011 در نرم‌افزار کتیا برنامه‌ای تهیه کردند که قادر است قالب شکل‌دهی قطعات استوانه‌ای با فلنج را با تمامی اجزای آن در زمانی اندک با دقت بسیار خوب ایجاد نماید. این برنامه که دارای فرمول‌های استاندارد برای طراحی اجزای مختلف قالب است باتوجه به پارامترهای ورودی جنس و ابعاد قطعه ورقی قادر است تمامی اطلاعات ابعادی و هندسی اجزای قالب را محاسبه کرده و به صورت سه‌بعدی مدل‌سازی نماید [4]. لین و همکارانش در مجموعه تحقیقاتی که در سال‌های 2008 تا 2012 انجام دادند و در 5 مقاله در مجلات مختلف منتشر ساختند به بحث افزایش سرعت و دقت در طراحی اجزا و چیدمان مناسب اجزای قالب‌های شکل‌دهی

باتوجه به موارد بیان شده و تحقیقات دیگری که در این زمینه انجام شده است، ملاحظه می‌شود که بسیاری از مراحل طراحی قالب‌های شکل‌دهی ورق‌های فلزی بسته به ضرورت و با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی و هوش مصنوعی می‌توانند به صورت خودکار و در حالت بهینه انجام شوند؛ لذا در تحقیق حاضر باتوجه به ضرورت کاهش هزینه ساخت قالب‌های بزرگ صنعتی و استفاده بهینه از موقعیت‌دهنده‌ها و همچنین عدم ملاحظه تحقیق و پژوهشی که به این موضوع پرداخته باشد، سعی شد تا با استفاده از نرم‌افزارهای تحلیلی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی سیستم یکپارچه نرم‌افزاری ایجاد شود که در تعیین تعداد و محل موقعیت‌دهنده‌ها به طراح کمک کند. این سیستم پس از تنظیمات اولیه قادر است به صورت خودکار تحلیل‌های المان محدود را انجام داده و باتوجه به خروجی هر تحلیل، تغییراتی در فایل ورودی ایجاد کرده و تحلیل بعدی را اجرا نماید. اعمال این تغییرات و انجام تحلیل‌های مختلف تا همگرا شدن مسئله به جوابی که تعداد و محل موقعیت‌دهنده‌ها را پیشنهاد دهد ادامه می‌یابد. نتایج دو مثال ارائه شده در انتهای مقاله نشان می‌دهد که با تعداد کمتری از روش سنتی می‌توان قطعه ورقی را روی قالب موقعیت‌دهی کرد.

دهد تعدادی از سطوح موقعیت‌دهنده و یا تمامی آن‌ها از کانتور بیرونی بلنک اولیه جدا می‌شوند و وظیفه اصلی خود که تعیین موقعیت دقیق قطعه است را انجام نخواهند داد. به همین علت باید ابتدا وزن را به کانتور بیرونی بلنک اولیه اعمال کرد سپس موقعیت سطوح موقعیت‌دهنده را مشخص نمود.

### 3-1- استفاده از کمترین تعداد سطوح موقعیت‌دهنده

برای موقعیت‌دهی بلنک اولیه از سیستم موقعیت‌دهی 1-2-3 استفاده می‌شود تا تمامی شش درجه آزادی قطعه مهار شود. در این سیستم لازم است سه موقعیت‌دهنده در زیر قطعه، دو عدد در کنار قطعه و روی یک لبه و موقعیت‌دهنده آخر در راستای سوم قرار گیرد. باتوجه‌به این‌که با قرارگیری قطعه ورقی روی ورق گیر و سنبه سه درجه آزادی آن مهار می‌شود؛ تنها کافی است کانتور بیرونی آن در دو راستا محدود شود. برای محدود کردن هر راستا نیاز به یک سطح موقعیت‌دهنده است. برای جلوگیری از چرخش حول محور قائم نیز نیاز به یک موقعیت‌دهنده دیگر است که البته باید در یکی از دو لبه قبلی قرار بگیرد تا سیستم موقعیت‌دهی 1-2-3 به‌درستی اعمال شود. با این حساب کمترین تعداد سطوح موقعیت‌دهنده برای یک قطعه ورقی سه عدد خواهد بود که البته در صورت بزرگ بودن ورق اولیه و یا پیچیدگی بیش از حد مدل قطعه نهایی امکان افزایش این تعداد در طراحی‌ها وجود دارد. توجه به این نکته ضروری است که استفاده از موقعیت‌دهنده اضافی نه تنها باعث افزایش هزینه ساخت و مونتاژ می‌شود، بلکه دقت موقعیت‌دهی را کاهش می‌دهد. موقعیت‌دهنده اضافی در واقع به جای یکی از موقعیت‌دهنده‌های اصلی عمل کرده و سیستم موقعیت‌دهی را دچار اختلال می‌کند.

### 4- سیستم نرم‌افزاری تعیین تعداد و محل موقعیت‌دهنده‌ها

در تحقیق حاضر سیستمی نرم‌افزاری ارائه شده که قادر است تعداد و محل گیج‌های موقعیت‌دهی را برای قطعات مختلف پیشنهاد دهد. باتوجه‌به این نکته که در بسیاری موارد موقعیت‌دهنده‌های اضافی باعث از بین رفتن دقت موقعیت‌دهی می‌شوند و همچنین هزینه ساخت و مونتاژ قالب را افزایش می‌دهند، تابع هدف در این مسئله کمینه کردن تعداد گیج‌های موقعیت‌دهنده انتخاب شده است. البته مشروط بر این‌که تعداد آن باتوجه‌به سیستم 1-2-3 حداقل 3 عدد باشد و حداقل یکی از لبه‌ها با 2 عدد گیج هدایت شود. دو شرط دیگر نیز در این الگوریتم وجود دارد و آن اینکه جابه‌جایی لبه‌های ورق در هنگام

### 2- طراحی سیستم موقعیت‌دهی قطعه به صورت سنتی

قطعه ورقی خام که دوربری شده است به‌عنوان ورودی قالب شکل‌دهی، معمولاً توسط ربات و یا به‌صورت دستی بر روی نیمه پایینی قالب قرار می‌گیرد. پیش از حرکت پرس و انجام عملیات پرس‌کاری باید از موقعیت‌دهی صحیح قطعه مطمئن بود. برای این منظور ضروری است از سیستمی تحت عنوان سیستم قرار یا سیستم موقعیت‌دهی قطعه استفاده نمود. این سیستم باتوجه‌به شکل قطعه از تنوع بالایی برخوردار است. قطعه پس از جداسدن از ربات و یا دست اپراتور باتوجه‌به مسیری که این سطوح برای آن مشخص می‌کنند هدایت می‌شود و در محل مناسب قرار می‌گیرد. امروزه در طراحی سنتی و دستی قالب‌های شکل‌دهی قطعات ورقی بزرگ برای موقعیت‌دهی قطعات ورقی خام معمولاً در هر جهت از 2 سطح موقعیت‌دهنده برای موقعیت‌دهی صحیح قطعه ورقی استفاده می‌شود یعنی در چهار جهت ورق از 8 عدد گیج استفاده می‌شود. البته در صورتی که یک بعد ورق نسبتاً کوچک باشد با 6 عدد گیج قطعه موقعیت‌دهی می‌شود یعنی موقعیت‌دهی ضلعی که بعد کوچک‌تری دارد تنها با یک گیج انجام می‌گیرد. در شکل 1 چگونگی قرارگیری 8 عدد از این سطوح موقعیت‌دهنده در اطراف بلنک اولیه نمایش داده شده است. در این شکل بلنک اولیه با فاصله از ورق گیر و به‌صورت شفاف نشان داده شده است.

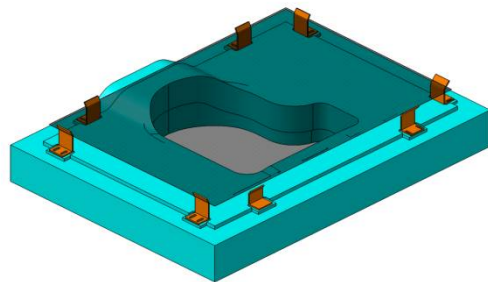


Fig. 1 Location of gauges on the blank holder around the blank.

شکل 1 نحوه قرارگیری سطوح موقعیت‌دهنده روی ورق‌گیر در اطراف بلنک

### 3- طراحی سیستم موقعیت‌دهی باتوجه‌به تغییرشکل

#### حاصل از نیروی وزن

با قراردادن قطعه ورقی خام روی نیمه پایینی قالب به علت نیروی وزن ورق، تغییرشکل بلنک اولیه اجتناب‌ناپذیر است که باید در تعیین موقعیت سطوح موقعیت‌دهنده به آن توجه نمود؛ زیرا در صورتی که موقعیت سطوح موقعیت‌دهنده باتوجه‌به کانتور بیرونی بلنک اولیه تعیین شود و سپس بلنک اولیه تغییرشکل

قرارگیری در شروع عملیات شکل‌دهی در موقعیت مختصاتی دقیق خود مدل‌سازی شده‌اند تا پس از ورود به نرم‌افزار شبیه‌سازی نیاز به جابه‌جایی آن‌ها نباشد.

#### 2-4- شبیه‌سازی فرایند در نرم‌افزار آباکوس

فرایند شکل‌دهی ورق در نرم‌افزار المان‌محدود آباکوس شبیه‌سازی شده است. باتوجه‌به ماهیت فرایند شکل‌دهی ورق که نیمه استاتیکی محسوب می‌شود در این پژوهش نیز مانند اکثر منابع این عملیات به صورت صریح مدل شده است. در ابتدا همه اجزای قالب به صورت صلب وارد شده ولی قطعه ورقی خام به صورت تغییرشکل‌پذیر در نظر گرفته می‌شود. در عملیات شکل‌دهی ورق ابتدا قطعه ورقی خام به صورت دستی یا توسط ربات بر روی ورق‌گیر و سنبه و در بین موقعیت‌دهنده‌ها قرار داده می‌شود و تحت اثر وزن خود تغییرشکل می‌دهد. سپس با حرکت رو به پایین ماتریس، ابتدا ورق بین ورق‌گیر و ماتریس گرفته می‌شود و سپس بر روی سنبه تحت کشش شکل می‌گیرد.

#### 3-4- پیاده‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی

در شکل 3 نمودار گردش کار طراحی شده برای حل این مثال نمایش داده شده است. در ابتدای این نمودار آیکن‌های مربوط به روش طراحی آزمایش و روش حل بهینه‌سازی قرار دارد. سپس آیکن‌های برنامه‌نویسی ویژوال بیسیک، کتیا، اسکریپت‌نویسی پایتون و درنهایت آباکوس نمایش داده شده‌اند. آیکن‌های بالا ورودی‌ها و موارد پایین خروجی‌های مسئله هستند. مسئله دارای چهار قید و یک تابع هدف است.

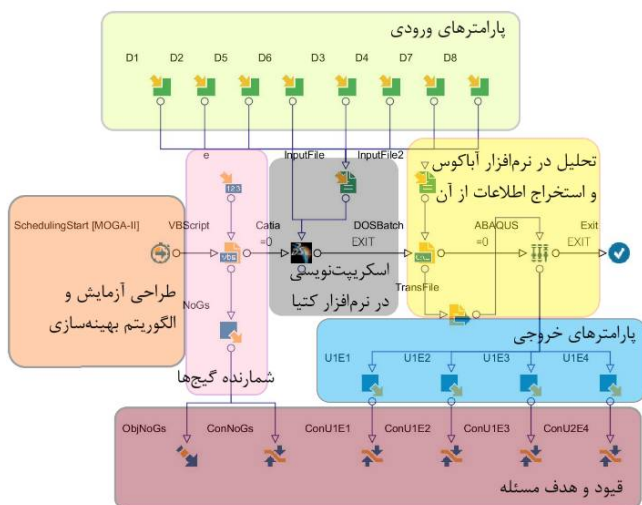


Fig. 3 Workflow of modefrontier software

شکل 3 نمودار جریان کار در نرم‌افزار مدفرانتیر

تغییرشکل حاصل از وزن و همچنین تغییرشکل حاصل از حرکت ماتریس روی ورق‌گیر تا شکل‌دهی ورق کمتر از مقدار مشخصی باشد. این مقدار را کاربر باتوجه‌به دقت قطعه نهایی می‌تواند تعیین کند. تابع هدف و قیود این الگوریتم بهینه‌سازی را می‌توان به اختصار در معادله (1) بیان کرد.

Minimize  $N_G$

$$\text{Subject to: } \left\{ \begin{array}{l} \bullet N_G \geq 3 \\ \bullet \text{At least on one of the edges: } N_{Gi} = 2 \\ \bullet \text{Sheet displacement in the positioning step must be less than } e. \\ \bullet \text{Sheet displacement in the forming step must be less than } e. \end{array} \right.$$

(1)

که  $N_G$  تعداد کل گنج‌ها،  $N_{Gi}$  تعداد گنج‌های لبه  $i$ -م و  $e$  خطای مجاز جابجایی لبه‌های ورق است. در ادامه مدل‌سازی سه‌بعدی، شبیه‌سازی فرایند و پیاده‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی بر روی مسئله به صورت کامل بیان گردیده است. در شکل 2 مسیر انجام فرآیندها به صورت شماتیک نمایش داده شده است.



Fig. 2 Process loop in modefrontier software

شکل 2 حلقه انجام فرایندها در نرم‌افزار مدفرانتیر

#### 1-4- مدل‌سازی سه‌بعدی در نرم‌افزار کتیا

برای مدل‌سازی اولیه اجزای قالب و قطعه ورقی خام از نرم‌افزار کتیا استفاده شده است. در تحلیل المان‌محدود، اجزای قالب به صورت صلب در نظر گرفته می‌شوند، لذا این قطعات در محیط مدل‌سازی سطحی<sup>1</sup> کتیا مدل‌سازی شده‌اند. باتوجه‌به اینکه قطعه ورقی خام دارای ضخامت ثابتی است این قطعه نیز باید در این محیط مدل شود و تنها ورود آن به نرم‌افزار شبیه‌سازی المان‌محدود متفاوت خواهد بود. تمامی قطعات باتوجه‌به موقعیت

<sup>1</sup> Surface modeling

آباکوس ایجاد می‌شود و به گام نهایی تحویل داده می‌شود. در گام نهایی نتایج شبیه‌سازی المان محدود مورد بررسی قرار می‌گیرد و مقادیر مورد نظر استخراج شده و با مقادیر مرزی که به عنوان قید در نظر گرفته شده‌اند مقایسه می‌شود. در صورتی که قیود مسئله رعایت شده باشد این اجرا مورد قبول واقع می‌شود و در غیر این صورت غیر قابل قبول است. الگوریتم بهینه‌سازی ضمن در نظر گرفتن قیود باید تابع هدف را در حد ممکن کاهش دهد. تمامی این مراحل در شکل 4 نشان داده شده است.

### 5- ارائه مثال

توانایی سیستم نرم‌افزاری ارائه شده با دو مثال در ادامه نشان داده شده است. در این دو مثال سعی شده از قطعاتی با پیچیدگی نسبتاً زیاد استفاده شود تا اهمیت سیستم موقعیت‌دهی صحیح مورد بررسی قرار گیرد. شرایط مدل‌سازی قطعه ورقی و اجزای قالب در نرم‌افزار طراحی و شبیه‌سازی و تحلیل در نرم‌افزار المان محدود و پیاده‌سازی آن‌ها در نرم‌افزار بهینه‌سازی به همراه نتایج مسئله در ادامه ارائه شده است.

#### 5-1-1- مثال 1

##### 5-1-1- مدل‌سازی سه بعدی در نرم‌افزار کتیا

در این قسمت قطعه ورقی منحنی شکل با برجستگی دایره‌ای در نظر گرفته شده است تا حرکت قطعه ورقی خام بر روی سطح ورق گیر و سنبه را به خوبی نشان دهد. ابعاد قطعه ورقی نهایی 1000mm در 800mm با ضخامت 1mm است. ابعاد هندسی قطعه ورقی و مدل مونتاژی اجزای قالب و قطعه ورقی خام به ترتیب در شکل‌های 5 و 6 نشان داده شده است. قطعه ورقی خام در مدل مونتاژی به صورت شفاف نمایش داده شده است.

##### 5-1-2- شبیه‌سازی فرایند در نرم‌افزار آباکوس

در این فرایند شبیه‌سازی تمامی اجزای قالب به صورت پوسته‌ای مدل شده و به صورت صلب وارد نرم‌افزار تحلیل المان محدود گردیده و تنها قطعه ورقی خام به صورت تغییر شکل پذیر در نظر گرفته شده است. در فرایند شبیه‌سازی دو مرحله تغییر شکل تحت اثر وزن و شکل‌دهی، در دو گام تعریف شده است. در مرحله اول همه اجزای قالب ثابت هستند و قطعه ورقی خام با اعمال وزن بر روی ورق گیر و سنبه قرار می‌گیرد. در مرحله دوم ماتریس به مقدار کورس حرکتی پایین می‌آید. ورق گیر تنها مجاز به حرکت در راستای حرکت ماتریس است و در زیر آن

در این الگوریتم ابتدا تعدادی آزمایش اولیه که به روش طراحی آزمایشات سبل مشخص شده، مورد بررسی قرار می‌گیرد. این روش قادر است تمام حالات ممکن را به صورت تقریباً یکسان پوشش دهد و نسبت به روش تصادفی که ممکن است قسمت‌های زیادی از فضای کار را به خوبی پوشش ندهد مناسب‌تر است. در صورتی که تعداد موقعیت‌دهنده‌ها کمتر از سه عدد باشد الگوریتم از اجرای تحلیل المان محدود این آزمایش خودداری کرده و آزمایش بعدی را مورد بررسی قرار می‌دهد. در صورت تأیید شروط اولیه، مراحل بعدی مدل سه بعدی موقعیت‌دهنده‌ها به صورت خودکار در نرم‌افزار کتیا ایجاد می‌شود. پس از انجام آزمایش‌های نسل اول، الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک با توجه به نتایج به دست آمده اهمیت وجود یا عدم وجود هر یک از موقعیت‌دهنده‌ها را تشخیص داده و همچنین محل مناسب آن‌ها را نیز مورد بررسی قرار می‌دهد. برای تعیین بهترین چیدمان لازم است تا چندین نسل از آزمایشات ایجاد شده و تحلیل شوند تا جواب‌های مسئله به نتیجه مطلوب همگرا شود.

با اجرای نسل اول نسل‌های بعدی با در نظر گرفتن پاسخ‌های هر یک از ورودی‌های نسل‌های پیش ایجاد می‌شوند. این انتخاب به پارامترهای تعریف شده 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. آیکون برنامه‌نویسی ویزوال بیسیک به کمک چندین شرط تمامی ورودی‌ها را چک کرده و مواردی که در سیستم موقعیت‌دهی دخیل هستند را شمارش می‌کند و مقدار آن را برای بهینه‌سازی سیستم تحویل می‌دهد.

گام بعدی ایجاد مدل‌های سه بعدی اجزای قالب و قطعه ورقی خام به کمک ورودی‌های مسئله است. برای این امر نیاز به برنامه‌ای از محیط ویزوال بیسیک داخل نرم‌افزار کتیا است تا فایل موجود از اجزای موقعیت‌دهنده قالب را باز کرده و با اعمال تغییرات لازم، آن‌ها را با نامی جدید ذخیره کند. این قطعات جدید در گام بعدی برای تحلیل آباکوس مورد استفاده قرار خواهند گرفت. برای اجرای خودکار تحلیل المان محدود لازم است تا برنامه‌ای به زبان پایتون در محیط پنجره دستوری<sup>1</sup> آباکوس اجرا شود. برای دسترسی به این محیط لازم است از آیکون با نام DoSBatch در نمودار جریان کار استفاده شود. در این مرحله برنامه پایتون اجرا شده و تحلیل المان محدود به صورت کاملاً خودکار انجام می‌شود. از این مرحله فایل خروجی

<sup>1</sup> Command Window



جنس در جدول 1 آمده است. همه اجزای قالب شامل سنبه، ماتریس، ورق‌گیر و موقعیت‌دهنده‌ها و همچنین قطعه ورقی به صورت چهارضلعی پوسته‌ای المان‌بندی می‌شوند. شرایط و پارامترهای شبیه‌سازی المان محدود فرایند شکل‌دهی ورقی به صورت اختصار در جدول 2 ارائه شده است.

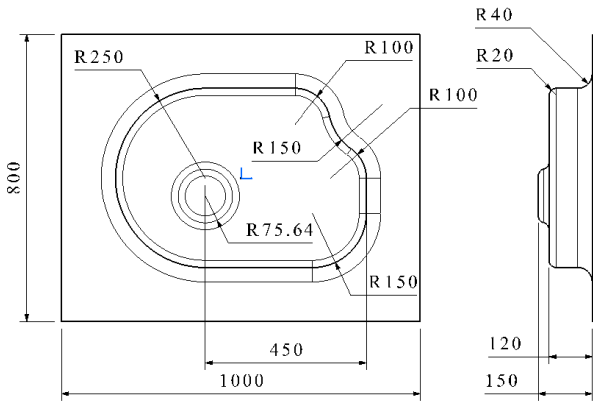


Fig. 5 Dimensions of the sheet metal part

شکل 5 ابعاد هندسی قطعه ورقی

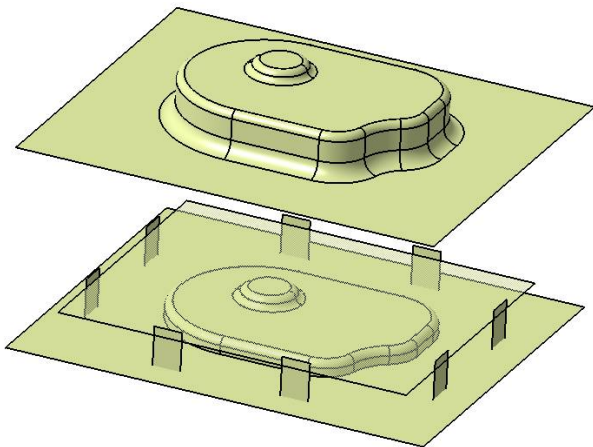


Fig. 6 Die components and sheet metal part 3-D model

شکل 6 مدل سه‌بعدی اجزای قالب و قطعه ورقی خام

جدول 1 خصوصیات جنس قطعه ورقی

Table 1 Material property of sheet metal

اندازه	خواص جنس قطعه ورقی
210 GPa	مدول یانگ
0/3	نسبت پواسون
210MPa	تنش تسلیم
580MPa	ثابت تنش
0/23	توان کرنش سختی
7800 (kg/m <sup>3</sup> )	چگالی

نیروی ورق‌گیری وارد می‌شود. سنبه به طور کامل مقید شده است ولی قطعه ورقی کاملاً آزادانه تحت حرکت قطعات قالب شکل می‌گیرد.

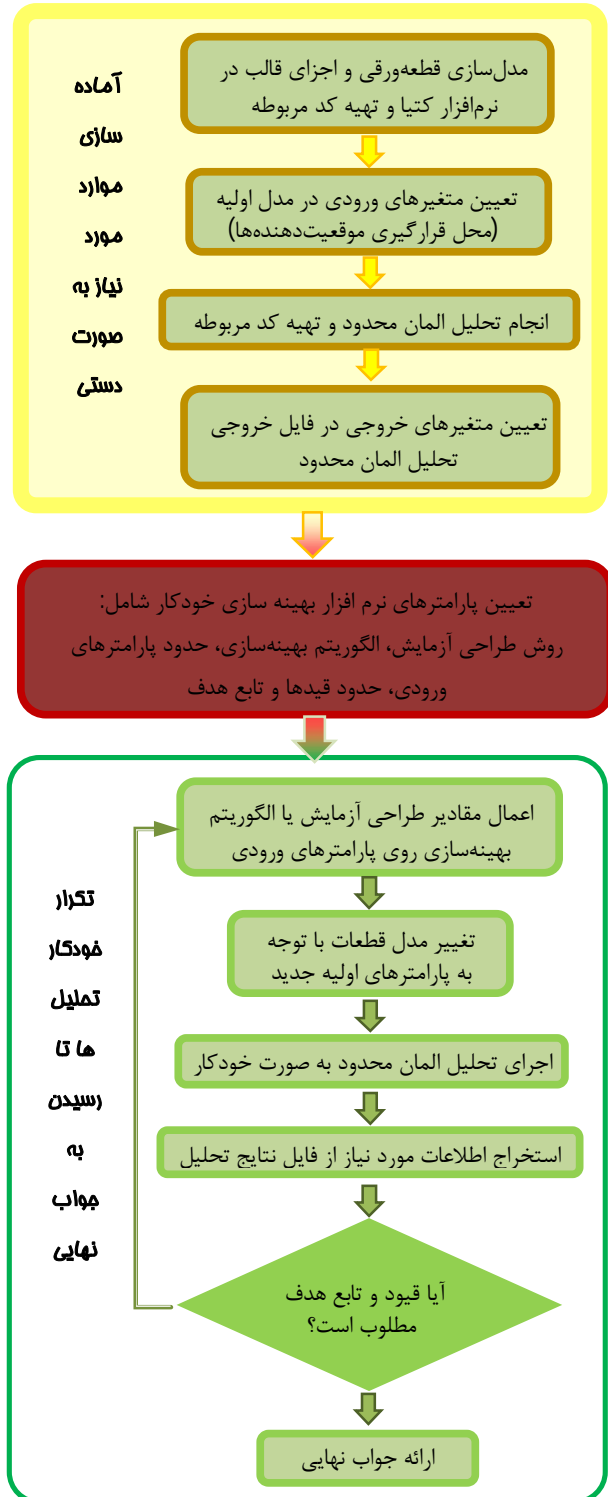


Fig. 4 Flowchart of manual and automated steps

شکل 4 نمودار جریان مراحل انجام کارهای دستی و خودکار

جنس ورق فولاد st14 در نظر گرفته شده است. خواص این

مثال 8 قید تعریف شده که مربوط به جابه‌جایی‌های چهار لبه قطعه در دو نقطه پایانی گام‌های تعریف‌شده در مرحله شبیه‌سازی است یعنی چهار قید برای نقطه پایانی مرحله تغییرشکل ورق و چهار قید دیگر برای نقطه پایانی مرحله شکل‌دهی ورق است. با توجه به اینکه دقت ابعادی لبه‌های بیرونی ورق در قالب‌های شکل‌دهی از اهمیت کمی برخوردار است، مقدار این قیود 1mm در نظر گرفته شده است. سیستم نرم‌افزاری تحلیل‌هایی که قیود مسئله در آن تعریف شده است را مورد قبول قرار می‌دهد و به سمتی حرکت می‌کند که تعداد گنج‌های موجود را نیز کاهش دهد.

#### 5-1-4- نتایج اجرای برنامه

با اجرای برنامه مقادیر پارامترهای ورودی برای تحلیل‌های مختلف تغییر می‌کند تا به بهترین جوابی که قیود مسئله در آن رعایت شده و تابع هدف نیز کمینه باشد برسد. این تغییرات بعد از تعدادی اجرا به یک سطح از پارامترهای ورودی نزدیک می‌شود. در شکل‌های 8 و 9 نمودار تغییرات دو مورد از پارامترهای ورودی نشان داده شده است. ذکر این نکته ضروری است که در این نمودارها تنها نتایجی که قیود در آن‌ها رعایت شده، آمده است.

جدول 3 پارامترهای تنظیم‌شده در نرم‌افزار مدفرانتیر

Table 3 Parameters of modefrontier software

اندازه	تنظیم پارامترها
8	تعداد پارامترهای ورودی
(۳۰،۲۵۰،۴۷۰)	مقادیر چهار ورودی در راستای x (mm)
(۳۰،۲۳۰،۴۳۰،۶۳۰)	مقادیر چهار ورودی در راستای y (mm)
50	تعداد آزمایش‌های نسل اول
20	تعداد حداکثر نسل‌ها
%50	احتمال ترکیب
%10	احتمال جهش
1	تعداد توابع هدف
9	تعداد قیود

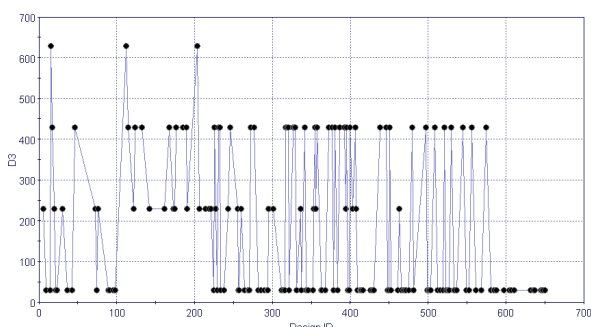


Fig. 8 Diagram of changes of parameter D3 in the first example

شکل 8 نمودار تغییرات پارامتر D3 در مثال اول

جدول 2 پارامترهای شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی ورق

Table 2 Simulation parameters of sheet metal forming process

اندازه	تنظیم پارامترها
1mm	ضخامت قطعه ورقی خام
160mm	کورس حرکتی ماتریس
0/5m/s	سرعت حرکت ماتریس
0/1	ضریب اصطکاک
نوع المان قطعه ورقی خام و اجزای قالب المان چهارضلعی پوسته‌ای	

#### 5-1-3- پیاده‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی

در این مثال 8 پارامتر ورودی وجود دارد که فاصله سطوح موقعیت‌دهی از مرکز قالب است. این پارامترها با نام‌های D1 تا D8 در شکل 7 نمایش داده شده است. پارامترهای D1، D2، D5 و D6 که مربوط به گنج‌های در راستای y می‌باشند؛ در سه سطح در نظر گرفته شده‌اند. سطح ابتدا یعنی گنج در مرکز قالب قرار دارد و سطح انتهایی حالتی است که گنج از محدوده قطعه ورقی خام بیرون زده و در موقعیت‌دهی ورق مشارکت ندارد. سطوح دیگر به صورت مساوی تقسیم‌بندی شده‌اند. با توجه به بزرگ‌تر بودن اضلاع در راستای x پارامترهای این راستا یعنی D3، D4، D7 و D8 در چهار سطح انتخاب شده‌اند. در مجموع تعداد حالات ممکن برای انجام تحلیل در این مثال برابر با  $3^4 \times 4^4 = 20736$  می‌شود که امکان بررسی تمامی حالات با تحلیل‌های المان محدود وجود ندارد. به همین دلیل از طراحی آزمایشات و الگوریتم بهینه‌سازی برای کاهش تعداد تحلیل‌ها و پیدا کردن حالت مناسب از بین آن‌ها استفاده شده است. پارامترهای انتخابی در این مثال در جدول 3 بیان گردیده است.

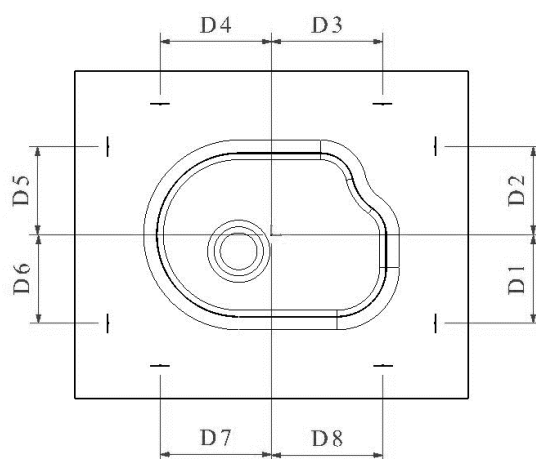


Fig. 7 The values of the input parameters in Example 1

شکل 7 مقادیر پارامترهای ورودی در مثال 1

در گام نهایی نتایج شبیه‌سازی المان محدود مورد بررسی قرار می‌گیرد و با قیدهای تعریف‌شده مقایسه می‌شود. در این

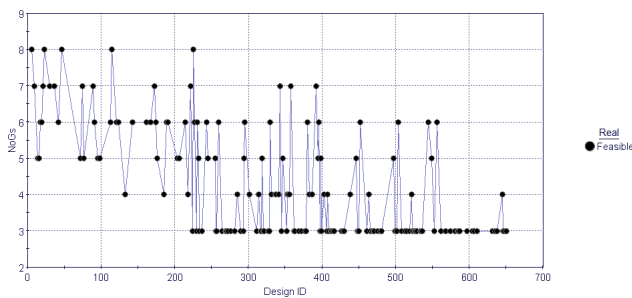


Fig. 11 Convergence diagram of the number of positioning gauges

شکل 11 نمودار همگرایی تعداد گیج‌های موقعیت‌دهنده

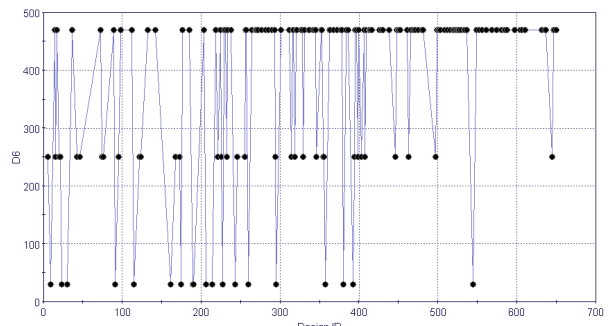


Fig. 9 Diagram of changes of parameter D6 in the first example

شکل 9 نمودار تغییرات پارامتر D6 در مثال اول

جدول 4 پارامترهای ورودی بهترین چیدمان سطوح موقعیت‌دهنده

Table 4 Input parameters for the best configuration of gauges

D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8
30	470	430	430	470	470	630	630

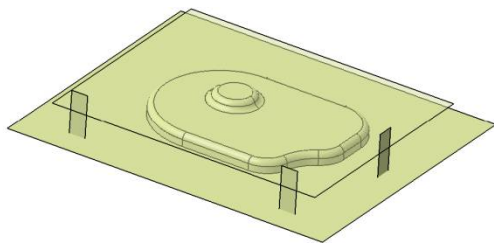


Fig. 12 The best arrangement of gauges for the least deviation and the least number of gauges

شکل 12 بهترین چیدمان سطوح موقعیت‌دهنده برای کمترین انحراف و کمترین تعداد موقعیت‌دهنده

### 5-1-5- صحنه‌گذاری نتیجه بهینه‌سازی

در این مرحله برای تأیید نتایج به دست آمده چند نمونه از حالات چیدمان موقعیت‌دهنده‌ها در نرم‌افزار اتوفرم مدل شد و با نتایج آباکوس مورد ارزیابی قرار گرفت. باتوجه به این که تعداد بهینه در این مثال 3 عدد بدست آمده است و بدیهی است که با تعداد کمتر نمی‌توان موقعیت‌دهی کرد تنها محل آنها مورد بحث قرار می‌گیرد. در ادامه نتایج شبیه‌سازی چند نمونه از چیدمان‌های مورد بررسی در الگوریتم بهینه‌سازی به صورت سه‌بعدی و دوبعدی نمایش داده است. در بعضی از حالات مانند شکل 13 ورق تمایل به خارج شدن از روی ورق‌گیر دارد و کاملاً از سطح آن جدا می‌شود که قطعاً مورد پذیرش نخواهد بود. پیش‌فرض ورق با خطی نازک مشخص شده است.

در تعدادی از حالات دیگر ورق روی ورق‌گیر خواهد ماند ولی از یکی از گیج‌ها جدا می‌شود و در نتیجه موقعیت مناسب خود را از دست می‌دهد. یک حالت از این نوع در شکل 14 آمده است.

در این مثال با اجرای برنامه و انجام حدود 500 تحلیل آباکوس، نتایج به خوبی همگرا می‌شوند. البته در این مثال برای حصول اطمینان نتایج 650 تحلیل در نمودارها نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل 10 نشان داده شده است کمترین تعداد گیج موقعیت‌دهنده که قیود مسئله را رعایت می‌کند، 3 عدد است. این مقدار حداقل تعداد گیج برای موقعیت‌دهی در صفحه است و با کمتر از آن امکان موقعیت‌دهی صحیح وجود ندارد. در شکل 11 همگرایی تعداد گیج‌ها به عدد 3 نمایش داده شده است.

در بین نتایجی که با استفاده از 3 گیج قطعه را موقعیت‌دهی کرده‌اند باید جستجو کرد و تحلیلی که کمترین انحراف را در دو مرحله شکل‌دهی ورق داشته است انتخاب کرد. از بین این موارد تحلیل 272 کمترین انحراف ورق را داراست. در این حالت بیشترین خطا برابر با 0/85mm است که نسبت به همه حالات دیگر کمتر است. این خطا برای عملیات شکل‌دهی ورق در کانتور بیرونی که قرار است در مراحل بعد دوربری شود خطای قابل‌قبولی است. مقادیر پارامترهای ورودی در این تحلیل در جدول 4 ارائه شده است. موقعیت 3 گیج برای این حالت در شکل 12 قابل مشاهده است. در این شکل قطعه ورق خام به صورت شفاف نشان داده شده تا اجزای دیگر نیز قابل مشاهده باشند.

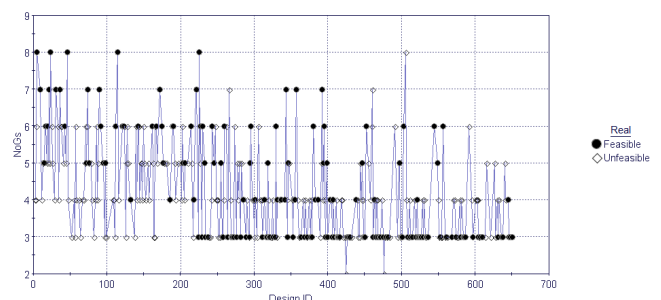


Fig. 10 Diagram of feasible and unfeasible analyzes

شکل 10 نمودار تحلیل‌های صحیح و ناصحیح



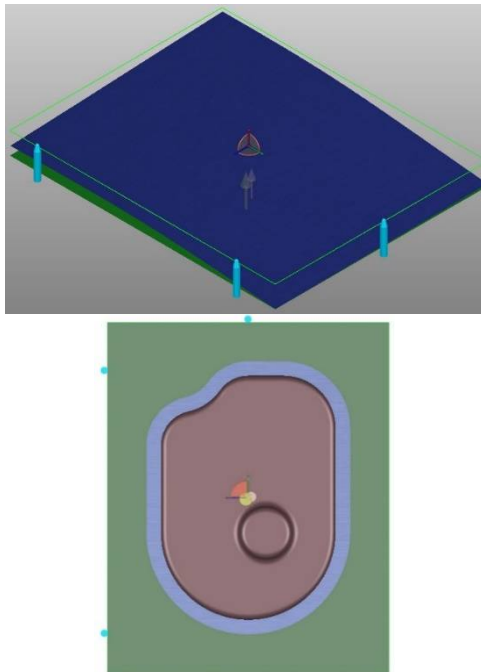


Fig. 15 Optimized arrangement of gauges and proper placement of the blank

شکل 15 چیدمان بهینه موقعیت‌دهنده‌ها و جایابی مناسب ورق

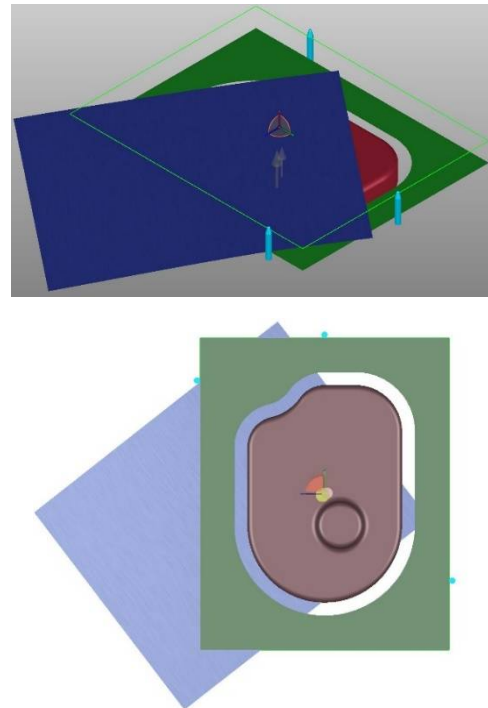


Fig. 13 Improper positioning and displacement of the blank from the blank-holder

شکل 13 موقعیت‌دهی نامناسب و جایابی ورق از روی ورق‌گیر

## 2-5- مثال 2

### 1-2-5- مدل‌سازی سه‌بعدی در نرم‌افزار کتیا

در این قسمت قطعه ورقی مستطیلی شکل پله‌دار با سطحی شیب‌دار در نظر گرفته شده است تا حرکت قطعه ورقی خام بر روی سطح ورق‌گیر و سنبه را به‌خوبی نشان دهد. ابعاد قطعه ورقی نهایی 1400mm در 800mm با ضخامت 1mm است. ابعاد هندسی قطعه ورقی و مدل سه‌بعدی آن و همچنین مدل مونتاژی اجزای قالب و قطعه ورقی خام به ترتیب در شکل 16 و شکل 17 نشان داده شده‌اند.

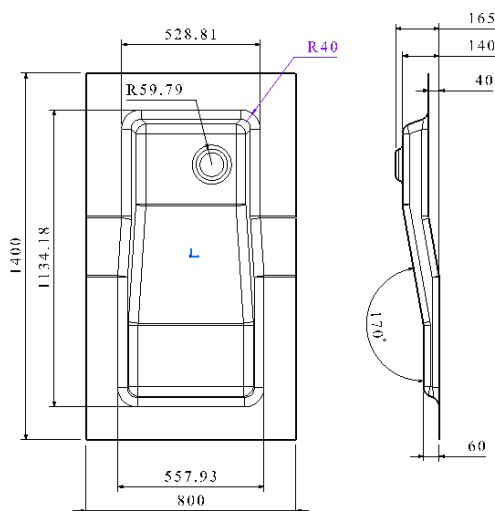


Fig. 16 Dimensions of the sheet metal part

شکل 16 ابعاد هندسی قطعه ورقی

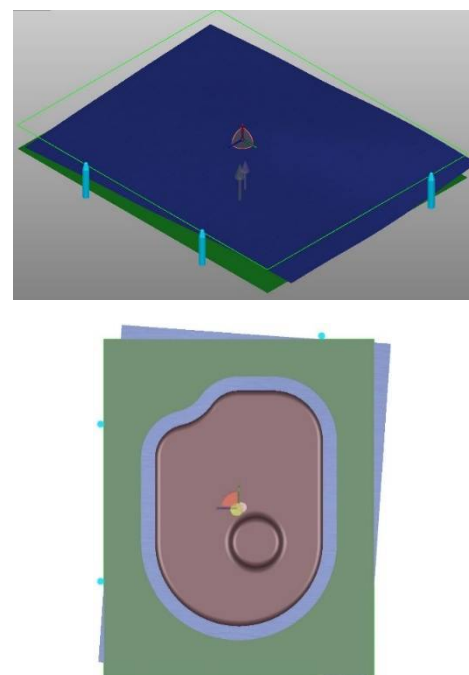


Fig. 14 Improper positioning and incorrect placement of the blank

شکل 14 موقعیت‌دهی نامناسب و جایابی نادرست ورق روی ورق‌گیر

در شکل 15 چیدمان بهینه بدست آمده از این تحقیق نمایش داده شده است. همان‌طور که مشهود است ورق با کمترین تعداد گیج بدون جداشدن از آنها به‌خوبی موقعیت‌دهی شده است.

5-2-4- نتایج اجرای برنامه

در شکل‌های 19 و 20 نمودار تغییرات دو مورد از پارامترهای ورودی نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تقریباً از اجرای 600 به بعد می‌توان مسئله را همگرا در نظر گرفت. نقاط پرش در نمودار حاصل از عملیات جهش در الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک بر روی چیدمان‌های پارامترهای ورودی است. این عملیات حتی در تحلیل‌های پایانی نیز مشاهده می‌شود.

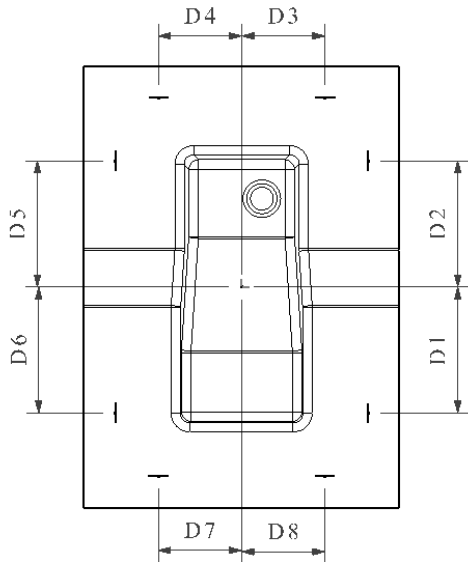


Fig. 18 The values of the input parameters in Example 2  
شکل 18 مقادیر پارامترهای ورودی در مثال 2

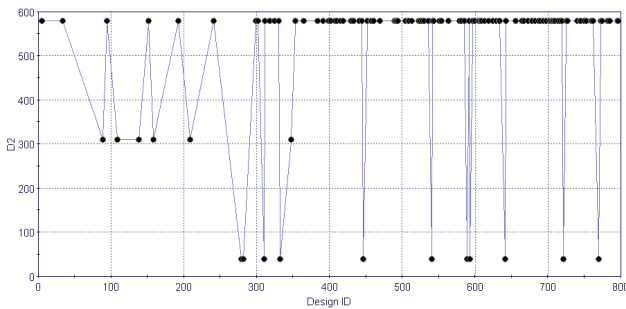


Fig. 19 Diagram of changes of parameter D2 in the second example  
شکل 19 نمودار تغییرات پارامتر D2 در مثال 2.

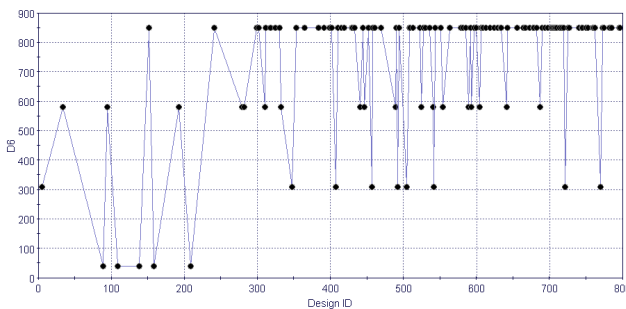


Fig. 20 Diagram of changes of parameter D6 in the second example  
شکل 20 نمودار تغییرات پارامتر D6 در مثال 2

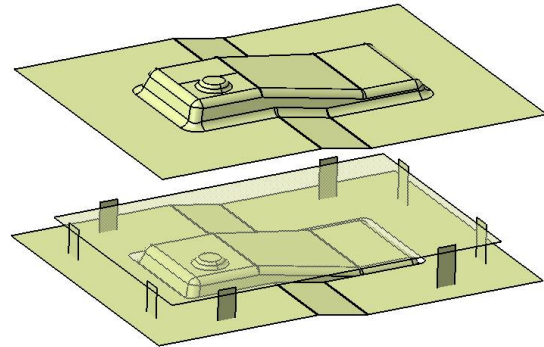


Fig. 17 Die components and sheet metal part 3-D model  
شکل 17 مدل سه‌بعدی اجزای قالب و قطعه ورقی خام

5-2-2- شبیه‌سازی فرایند در نرم‌افزار آباکوس

مدل‌سازی و انتقال اجزای قالب و قطعه ورقی، تعداد گام‌های تحلیل، تعریف جنس ورق، اصطکاک بین اجزا، شبکه‌بندی و تعیین اندازه المان‌ها، چگونگی حرکت و قیدگذاری اجزای قالب و قطعه ورقی مانند مثال 1 است و تنها تفاوت در مقدار حرکت ماتریس است که باتوجه به تغییر هندسه قطعه می‌باشد و برابر با 121mm است. شرایط و پارامترهای شبیه‌سازی المان محدود فرایند شکل‌دهی ورقی به صورت اختصار در جدول 5 ارائه شده است.

5-2-3- پیاده‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی

در این مثال نیز 8 پارامتر ورودی وجود دارد که فاصله سطوح موقعیت‌دهی از مرکز قالب است. این پارامترها با نام‌های D1 تا D8 در شکل 16 نمایش داده شده است. سطوح انتخابی برای هر یک از این ورودی‌ها در جدول 6 آمده است. پیاده‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی در این مثال نیز مشابه مثال 1 است و نمودار گردش کار آن بدون تفاوت ایجاد می‌شود.

جدول 5 پارامترهای شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی ورق

Table 5 Simulation parameters of sheet metal forming process

مقدار	تنظیم پارامترها
1mm	ضخامت قطعه ورقی خام
121mm	کورس حرکتی ماتریس
0/5m/s	سرعت حرکت ماتریس
0/1	ضریب اصطکاک
	نوع المان قطعه ورقی خام و اجزای قالب
	المان چهارضلعی پوسته‌ای

جدول 6 پارامترهای تنظیم‌شده نرم‌افزار مدرفرانتر

Table 6 Parameters of modefroniter software

اندازه	تنظیم پارامترها
(۴۰.۳۱۵.۵۹۰)	مقادیر چهار ورودی در راستای x (mm)
(۴۰.۳۱۰.۵۸۰.۸۵۰)	مقادیر چهار ورودی در راستای y (mm)

برای عملیات شکل‌دهی ورق در کانتور بیرونی که قرار است در مراحل بعد دوربری شود خطای قابل‌قبولی است. مقادیر پارامترهای ورودی در این تحلیل در جدول 7 ارائه شده است. موقعیت 4 گیج برای این حالت در شکل 23 قابل‌مشاهده است.

جدول 7 پارامترهای ورودی بهترین چیدمان سطوح موقعیت‌دهنده

Table 7 Input parameters for the best configuration of gauges							
D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8
310	580	590	590	310	850	590	40

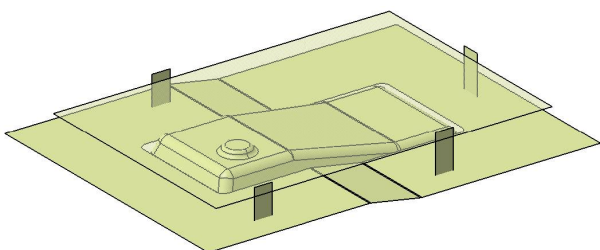


Fig. 23 The best arrangement of gauges for the least deviation and the least number of gauges

شکل 23 بهترین چیدمان سطوح موقعیت‌دهنده برای کمترین انحراف و کمترین تعداد موقعیت‌دهنده

### 5-2-5- صحنه‌گذاری نتیجه بهینه‌سازی

در این مثال نیز برای تأیید نتایج به دست آمده چند نمونه از حالات چیدمان موقعیت‌دهنده‌ها در نرم‌افزار اتوفرمدل می‌شود. تعداد بهینه در این مثال 4 است به همین دلیل در شکل 24 دو حالت از حالات سه‌تایی نمایش داده شده است تا جایابی نامناسب قطعات در این حالات را نمایش دهد. البته حالات ممکن برای موقعیت‌دهی با سه گیج به صورت خودکار مورد بررسی قرار گرفته است و از بین آنها هیچ مورد مناسبی یافت نشده است. در این قسمت تنها دو مورد برای تأیید نتایج آمده است. در شکل‌های زیر محل پیش‌فرض ورق با خطی نازک مشخص شده است.

در شکل 25 چیدمان بهینه بدست آمده از این تحقیق نمایش داده شده است. همان‌طور که قابل‌مشاهده است ورق با 4 عدد موقعیت‌دهنده به خوبی موقعیت‌دهی شده است.

### 6- نتیجه‌گیری

در این تحقیق سیستمی نرم‌افزاری ایجاد شده که قادر است تعداد و محل موقعیت‌دهنده‌ها را در قالب‌های شکل‌دهی ورقی مشخص کند. این چیدمان به گونه‌ای است که قطعه ورقی خام روی ورق‌گیر با دقت لازم موقعیت‌دهی شود و قطعه در حین شکل‌دهی نیز از محل خود منحرف نگردد.

در این مثال با اجرای برنامه، نتایج به خوبی همگرا می‌شوند. همان‌طور که در شکل 21 نشان داده شده است کمترین تعداد گیج موقعیت‌دهنده که قیود مسئله را رعایت می‌کند، 4 عدد است. در تمامی ران‌هایی که با 3 گیج یا کمتر اجرا شده است انحراف قطعه ورقی بیش از اندازه مجاز بوده و حداقل یکی از قیود مسئله رعایت نشده است. این بدان معناست که موقعیت‌دهی صحیح قطعه در طول عملیات شکل‌دهی ورق با 3 گیج ممکن نیست. البته با 3 گیج امکان موقعیت‌دهی ورق در مرحله تغییر شکل حاصل از وزن وجود دارد ولی به دلیل هندسه قطعه ورقی در هنگام انجام عملیات شکل‌دهی نوعی پیچش و انحراف در ورق به وجود می‌آید که 3 گیج موجود در مرحله قبل توانایی جلوگیری از جابه‌جایی ورق را ندارند و نیاز به گیج چهارمی است تا قطعه را در موقعیت صحیح خود نگه دارد. در شکل 22 همگرایی تعداد گیج‌ها به عدد 4 نمایش داده شده است.

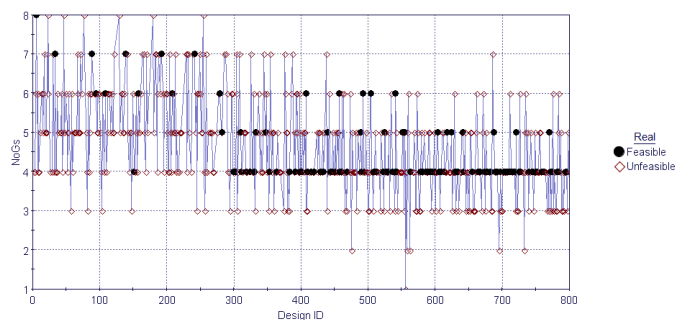


Fig. 21 Diagram of feasible and unfeasible analyzes

شکل 21 نمودار تحلیل‌های صحیح و نامصحیح

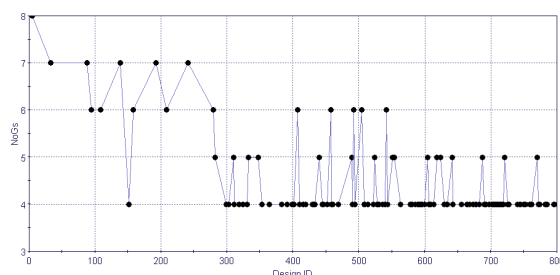


Fig. 22 Convergence diagram of the number of positioning gauges

شکل 22 نمودار همگرایی تعداد گیج‌های موقعیت‌دهنده

در بین نتایجی که با 4 گیج قطعه را موقعیت‌دهی کرده‌اند باید جستجو کرد و تحلیلی که کمترین انحراف را در دو مرحله شکل‌دهی داشته انتخاب کرد. از این بین تحلیل 458 کمترین انحراف ورق را داراست. در این حالت بیشترین خطا برابر با 0/89mm است که نسبت به مابقی موارد کمتر است. این خطا

در این مسئله تابع هدف کمینه کردن تعداد اجزای موقعیت‌دهنده است و قیود الگوریتم، جابه‌جایی لبه‌های قطعه ورقی خام در هنگام قرارگیری بر روی قالب و شکل‌دهی می‌باشد. نتایج ارائه شده برای دو مثال نشان می‌دهد که با چیدمان سه یا چهار موقعیت‌دهنده می‌توان قطعه ورقی را در طی انجام عملیات شکل‌دهی به صورت دقیق موقعیت‌دهی کرد. سیستم نرم‌افزاری با ایجاد ارتباط بین نرم‌افزارهای کتیا و آباکوس در محیط نرم‌افزار مدفرانتیر ایجاد شده است. برای این مهم لازم است با زبان‌های Python، VBA و C# در آیکون‌های نمودار جریان کار کدنویسی شود. ترکیب این موارد، محیطی مناسب را برای انجام تحقیق حاضر مهیا نموده است. در تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ساده‌تری برای حل مسئله استفاده شود تا با تعداد ران کمتر و در زمان کمتری به جواب بهینه دست‌یافت. همچنین در صورت امکان نتایج این تحقیق به صورت عملی بر روی قالب‌های شکل‌دهی اعمال شود و دقت قطعات تولیدی با قطعه‌ای که با 8 گیج موقعیت‌دهی شده است مقایسه گردد.

## 7- مراجع

- [1] Farsi MA, Arezoo B. Development of a new method to determine bending sequence in progressive dies. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2009 Jul 1; 43(1-2) pp. 52-60.
- [2] Ghatrehnaby M, Arezoo B. A fully automated nesting and piloting system for progressive dies. Journal of Materials Processing Technology. 2009 Jan 1; 209(1) pp. 525-35.
- [3] Y.-L. Tsai, et al., Knowledge-based engineering for process planning and die design for automotive panels. Computer-Aided Design and Applications, 2010. 7(1) p. 75-87.
- [4] D. Potocnik, et al., Intelligent system for the automatic calculation of stamping parameters. Advances in Production Engineering & Management, 2011. 6(2) pp. 129-137.
- [5] B.-T. Lin, C.-K. Chan, and J.-C. Wang, A knowledge-based parametric design system for drawing dies. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008. 36(7-8) p. 671-680.
- [6] B.-T. Lin and S.-H. Hsu, Automated design system for drawing dies. Expert Systems with Applications, 2008. 34(3) pp. 1586-1598.
- [7] B.-T. Lin and C.-C. Kuo, Application of an integrated CAD/CAE/CAM system for stamping dies for automobiles. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008. 35(9-10) pp. 1000-1013.
- [8] B.-T. Lin, et al., Computer-aided structural design of drawing dies for stamping processes based on

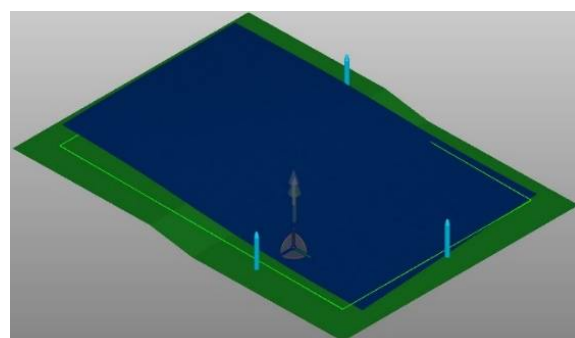


Fig. 24 Improper positioning with 4 gauges and incorrect placement of the blank

شکل 24 موقعیت‌دهی نامناسب با 3 گیج و جایابی نادرست ورق

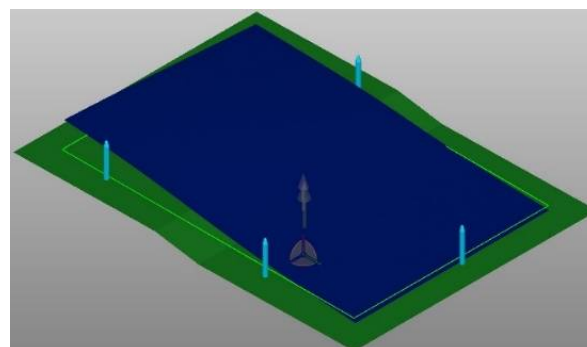


Fig. 25 Optimized arrangement of the 4 gauges and proper placement of the blank

شکل 25 چیدمان بهینه 4 عدد موقعیت‌دهنده و جایابی مناسب ورق

- 93-119. Springer, Singapore.
- [11] PRL. Suraj, et al., A novel approach for design of progressive die for sheet metal. International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development. 2020; 10(5): pp. 523-534.
- [12] Li J, Kong C, Zhou XH. Automatic design for trimming die insert of automotive panel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020 Feb; 106(9) pp. 4451-65.
- functional features. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009. 42(11-12) pp. 1140-1152.
- [9] B.T. Lin and M.R. Chang. A Functional-Based Stack-up Design System for Stamping Dies. In Applied Mechanics and Materials. 2012 Trans Tech Publ.
- [10] Naranje, V., & Kumar, S. Knowledge-based system for design of deep drawing die for axisymmetric parts. In AI Applications in Sheet Metal Forming, 2017. pp.