مجله مهندسی ساخت و تولید ایران، فروردین 1400، دوره 8، شماره 1، ص‌ص. 55- 67

ماه‌نامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

تعیین سیستم موقعیت‌دهی قطعات ورقی در قالب‌های شکل‌دهی کششی به‌صورت خودکار

قاسم اعظمی راد[1*]، بهروز آرزو[2]

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

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

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

اطلاعات مقاله

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

چکیده

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 به‌صورت خودکار تحلیل‌های المان‌محدود را انجام داده و باتوجه‌به 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 به‌صورت کاملاً خودکار ادامه می‌یابد. برای مقایسه نتایج حاصل از این سیستم با طراحی سنتی دو مثال ارائه شده است که نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد با تعداد گیج کمتر از روش سنتی می‌توان قطعه ورقی را روی قالب به‌درستی و با دقت کافی موقعیت‌دهی نمود.

Automation of sheet metal positioning in stamping die design

Ghasem Azamirad[1*], Behrooz Arezoo[2]

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

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 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

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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)

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 خم‌کاری قطعه است. این سیستم در ابتدا پس از تشخیص قطعه و صفحه مبنای آن، شکل گسترده قطعه را تعیین می‌کند. در ماژول‌های 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 قطره‌نبی 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 مورداستفاده در قالب‌های شکل‌دهی قطعات ورقی ایجاد کردند که برای چند نمونه قطعه ورقی با اشکال عمومی تهیه شده است [3]. پوتک‌نیک 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 باتوجه‌به پارامترهای ورودی جنس و ابعاد قطعه ورقی قادر است تمامی اطلاعات ابعادی و هندسی اجزای قالب را محاسبه کرده و به‌صورت 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 قطعات ورقی پرداختند [5- 9]. این گروه تحقیقاتی با استفاده از نرم‌افزار طراحی کتیا و محیط کدنویسی آن به زبان VBA مجموعه‌ای نرم‌افزاری ایجاد کردند که به چندین پایگاه داده قطعات استاندارد قالب متصل است. کومار و همکارش در سال 2017 در تحقیقی با استفاده از هوش مصنوعی سیستمی نرم‌افزاری ایجاد کرد که طراح را در انجام تعدادی از مراحل طراحی قالب‌های کشش کمک می‌کند. محدودیت این سیستم این است که تنها برای قطعات متقارن محوری کاربرد دارد[10]. سوراج و همکارانش در سال 2020 روشی جدید در طراحی و مونتاژ قطعات قالب‌های مرحله‌ای ارائه کردند. ایشان با ترکیب دو نرم‌افزار اتوکد و NX توانستند بسیاری از مراحل طراحی قالب‌های مرحله‌ای را به‌صورت خودکار انجام دهند و باعث کاهش زمان طراحی و مونتاژ و در نتیجه کاهش هزینه انجام این مراحل گردند [11]. لی نیز در این سال روشی خودکار برای طراحی اینسرت‌های برش در قالب‌های بزرگ ورق‌های فلزی ارائه داد. در این پژوهش الگوریتمی پیشنهاد شده است که خط برش دورتادور قطعه را به خطوط کوتاهی تقسیم می‌کند، سپس هر قسمت را به اینسرت برش این بخش از قطعه تبدیل می‌نماید. ادعا شده در کاربردهای صنعتی استفاده از این الگوریتم خودکار، بهره‌وری را تا 80% بهبود می‌دهد [12].

باتوجه‌به موارد بیان‌شده و تحقیقات دیگری که در این زمینه انجام شده است، ملاحظه می‌شود که بسیاری از مراحل طراحی قالب‌های شکل‌دهی ورق‌های فلزی بسته به‌ضرورت و با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی و هوش مصنوعی می‌توانند به‌صورت خودکار و در حالت بهینه انجام شوند؛ لذا در تحقیق حاضر باتوجه‌به 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 موقعیت دهنده‌ها به طراح کمک کند. این سیستم پس از تنظیمات اولیه قادر است به‌صورت خودکار تحلیل‌های المان‌محدود را انجام داده و باتوجه‌به 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.

2- طراحی سیستم موقعیت‌دهی قطعه به‌صورت 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 جداشدن 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 درصورتی‌که 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 ورق‌گیر و به‌صورت شفاف نشان داده شده است.

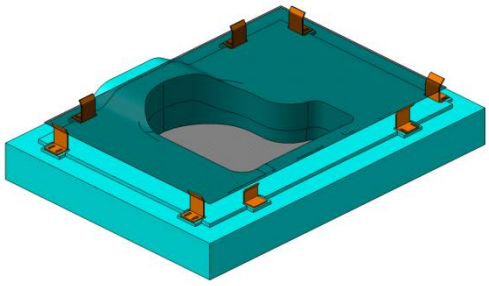

Fig. 1 Location of gauges on the blank holder around the blank.

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 درصورتی‌که موقعیت سطوح موقعیت‌دهنده باتوجه‌به کانتور بیرونی بلنک اولیه تعیین شود و سپس بلنک اولیه تغییرشکل 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 3-2-1 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 ورق‌گیر و سنبه سه درجه آزادی آن مهار می‌شود؛ تنها کافی است کانتور بیرونی آن در دو راستا محدود شود. برای محدودکردن 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 3-2-1 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 نه‌تنها باعث افزایش هزینه ساخت و مونتاژ می‌شود، بلکه دقت موقعیت‌دهی را کاهش می‌دهد. موقعیت‌دهنده اضافی درواقع به‌جای یکی از موقعیت‌دهنده‌های اصلی عمل کرده و سیستم موقعیت‌دهی را دچار اخلال 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 ازبین‌رفتن دقت موقعیت‌دهی می‌شوند و همچنین هزینه ساخت و مونتاژ قالب را افزایش می‌دهند، تابع هدف در این مسئله کمینه‌کردن تعداد گیج‌های موقعیت‌دهنده انتخاب شده است. البته مشروط بر این‌که تعداد آن باتوجه‌به سیستم 3-2-1 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

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 به‌اختصار در معادله (1) بیان کرد.

$$\begin{aligned} &Minimize\ N_G \\ &Subject\ to: \begin{cases} N_G \geq 3 \\ At\ least\ on\ one\ of\ the\ edges:\ N_{Gi} = 2 \\ Sheet\ displacement\ in\ the\ positioning\ step\ must\ be\ less\ than\ e. \\ Sheet\ displacement\ in\ the\ forming\ step\ must\ be\ less\ than\ e. \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

که N_G تعداد کل گیج‌ها، N_{Gi} تعداد گیج‌های لبه i-ام و e خطای مجاز جابجایی لبه های ورق است. در ادامه مدل‌سازی سه‌بعدی، شبیه‌سازی فرآیند و پیاده‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی بر روی مسئله به‌صورت 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

4-1- 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 به‌صورت صلب در نظر گرفته می‌شوند، لذا این قطعات در محیط مدل‌سازی سطحی[1] 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 قرارگیری در شروع عملیات شکل‌دهی در موقعیت مختصاتی دقیق خود مدل‌سازی شده‌اند تا پس از ورود به نرم‌افزار شبیه‌سازی نیاز به جابه‌جایی آن‌ها نباشد.

4-2- 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 به‌صورت صریح مدل شده است. در ابتدا همه اجزای قالب به‌صورت صلب وارد شده ولی قطعه ورقی خام به‌صورت تغییرشکل‌پذیر در نظر گرفته می‌شود. در عملیات شکل‌دهی ورق ابتدا قطعه ورقی خام به‌صورت 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.

4-3- پیاده‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی

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

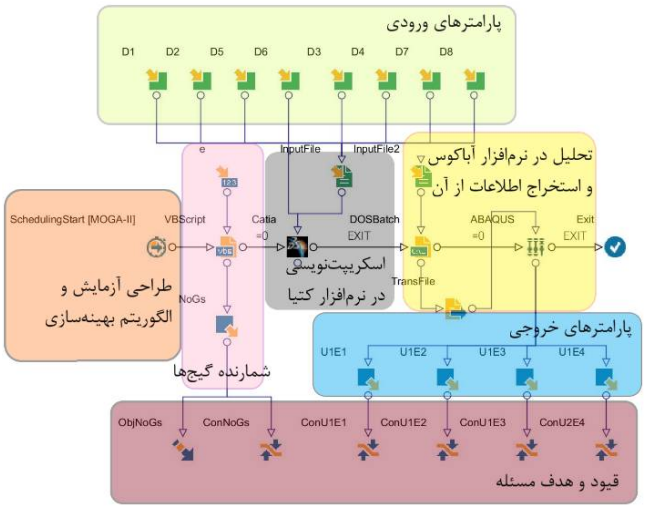

Fig. 3 Workflow of modefrontier software

شکل 3 نمودار جریان‌کار در نرم‌افزار مدفرانتیر

[1] Surface modeling

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 به‌صورت تقریباً یکسان پوشش دهد و نسبت به روش تصادفی که ممکن است قسمت‌های زیادی از فضای کار را به‌خوبی پوشش ندهد مناسب‌تر است. درصورتی‌که تعداد موقعیت‌دهنده‌ها کمتر از سه عدد باشد الگوریتم از اجرای تحلیل المان‌محدود این آزمایش خودداری کرده و آزمایش بعدی را مورد بررسی قرار می‌دهد. در صورت تأیید شروط اولیه، مراحل بعدی مدل سه‌بعدی موقعیت‌دهنده‌ها به‌صورت خودکار در نرم‌افزار کتیا ایجاد می‌شود. پس از انجام آزمایش‌های نسل اول، الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک باتوجه‌به نتایج به‌دست‌آمده 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 درنظرگرفتن 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. آیکون برنامه‌نویسی ویژوال‌بیسیک 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 سه‌بعدی اجزای قالب و قطعه ورقی خام به کمک ورودی‌های مسئله است. برای این امر نیاز به برنامه‌ای از محیط ویژوال‌بیسیک 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 مورداستفاده قرار خواهند گرفت. برای اجرای خودکار تحلیل المان‌محدود لازم است تا برنامه‌ای به زبان پایتون در محیط پنجره دستوری[1] آباکوس اجرا شود. برای دسترسی به این محیط لازم است از آیکون با نام DoSBatch در نمودار جریان‌کار استفاده شود. در این مرحله برنامه پایتون اجرا شده و تحلیل المان‌محدود به‌صورت کاملاً خودکار انجام می‌شود. از این مرحله فایل خروجی آباکوس ایجاد می‌شود و به گام نهایی تحویل داده می‌شود.

در گام نهایی نتایج شبیه‌سازی المان‌محدود مورد بررسی قرار می‌گیرد و مقادیر موردنظر استخراج شده و با مقادیر مرزی که به‌عنوان قید در نظر گرفته شده‌اند مقایسه می‌شود. درصورتی‌که قیود مسئله رعایت شده باشد این اجرا موردقبول واقع می‌شود و در غیر این صورت غیرقابل‌قبول است. الگوریتم بهینه‌سازی ضمن درنظرگرفتن 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 ارائه‌شده 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 المان‌محدود و پیاده‌سازی آن‌ها در نرم‌افزار بهینه‌سازی به همراه نتایج مسئله در ادامه ارائه شده است.

5-1- مثال 1

5-1-1- مدل‌سازی سه‌بعدی 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 ورق‌گیر و سنبه را به‌خوبی 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 به‌صورت شفاف نمایش داده شده است.

5-1-2- شبیه‌سازی فرایند در نرم‌افزار آباکوس

در این فرایند شبیه‌سازی تمامی اجزای قالب به‌صورت پوسته‌ای مدل شده و به‌صورت صلب وارد نرم‌افزار تحلیل المان‌محدود گردیده و تنها قطعه ورقی خام به‌صورت تغییرشکل‌پذیر در نظر گرفته شده است. در فرایند شبیه‌سازی دو مرحله تغییرشکل 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 ورق‌گیر و سنبه قرار می‌گیرد. در مرحله دوم ماتریس به مقدار کورس حرکتی پایین می‌آید. ورق‌گیر تنها مجاز به حرکت در راستای حرکت ماتریس است و در زیر آن

[1] Command Window

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

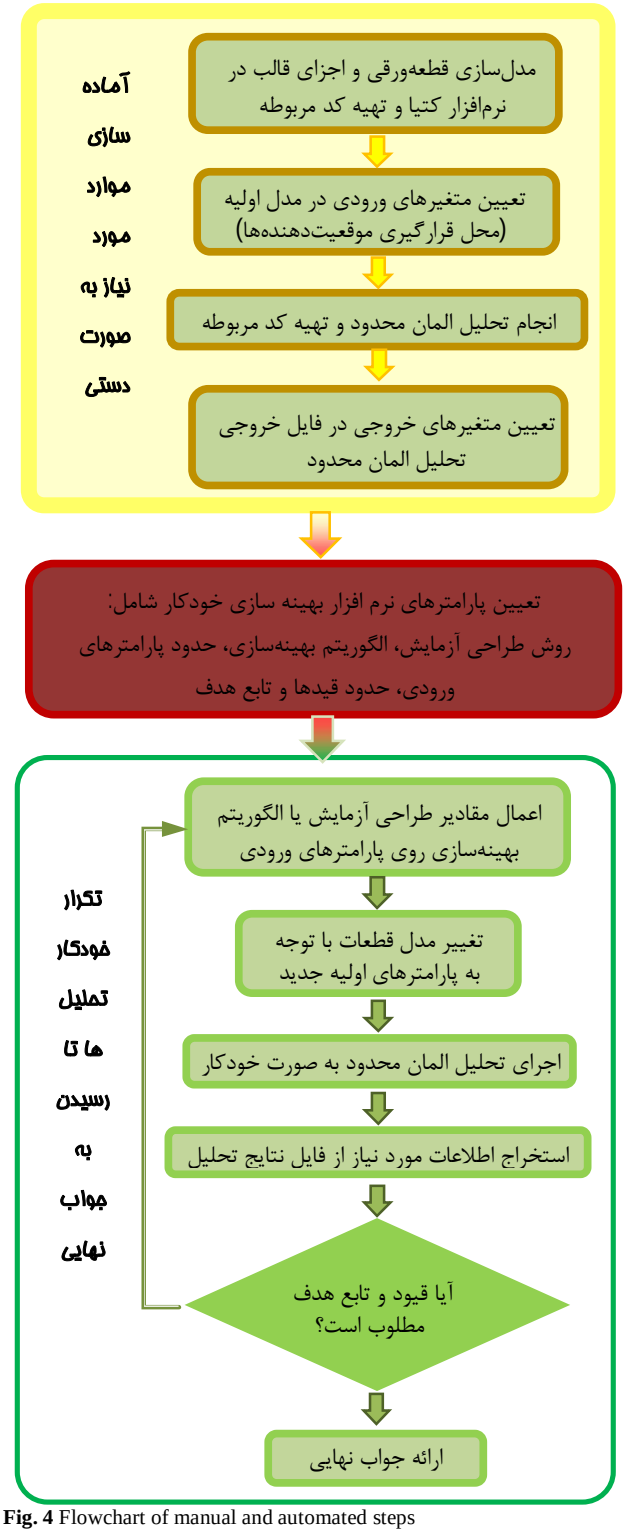

Fig. 4 Flowchart of manual and automated steps

شکل 4 نمودار جریان مراحل انجام کارهای دستی و خودکار

جنس ورق فولاد st14 در نظر گرفته شده است. خواص این جنس در جدول 1 آمده است. همه اجزای قالب شامل سنبه، ماتریس، ورق‌گیر و موقعیت‌دهنده‌ها و همچنین قطعه ورقی به‌صورت چهارضلعی پوسته‌ای المان‌بندی می‌شوند.

شرایط و پارامترهای شبیه‌سازی المان‌محدود فرایند شکل‌دهی قطعه ورقی به‌صورت اختصار در جدول 2 ارائه شده است.

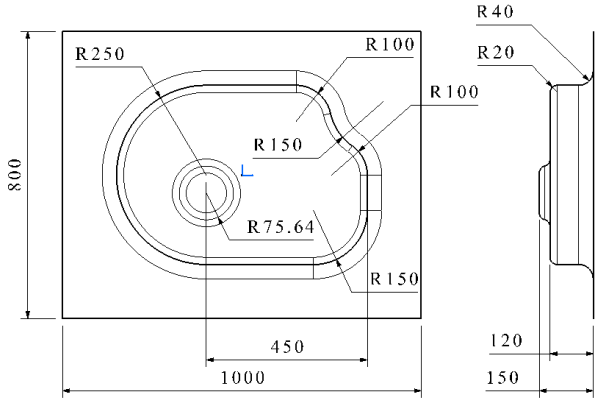

Fig. 5 Dimensions of the sheet metal part

شکل 5 ابعاد هندسی قطعه ورقی

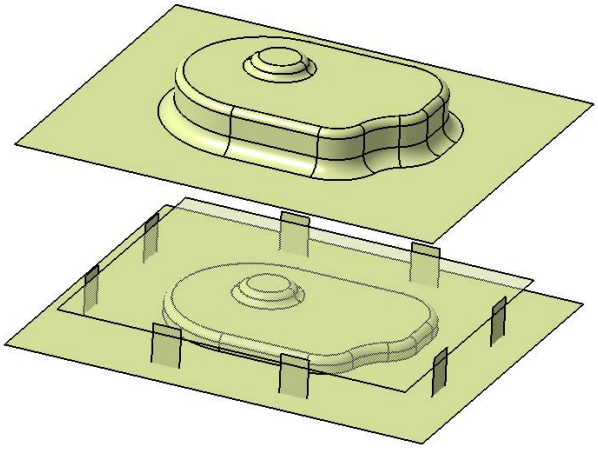

Fig. 6 Die components and sheet metal part 3-D model

شکل 6 مدل سه‌بعدی اجزای قالب و قطعه ورقی خام

جدول 1 خصوصیات جنس قطعه ورقی

Table 1 Material property of sheet metal

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

جدول 2 پارامترهای شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی ورق

Table 2 Simulation parameters of sheet metal forming process

تنظیم پارامترها	اندازه
ضخامت قطعه ورقی خام	1mm
کورس حرکتی ماتریس	160mm
سرعت حرکت ماتریس	0/5m/s
ضریب اصطکاک	0/1
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 گیج‌های در راستای y می‌باشند؛ در سه سطح در نظر گرفته شده‌اند. سطح ابتدا یعنی گیج در مرکز قالب قرار دارد و سطح انتهایی حالتی است که گیج از محدوده قطعه ورقی خام بیرون زده و در موقعیت‌دهی ورق مشارکت ندارد. سطوح دیگر به‌صورت مساوی تقسیم‌بندی شده‌اند. باتوجه‌به بزرگ‌تر بودن اضلاع در راستای x پارامترهای این راستا یعنی D3، D4، D7 و D8 در چهار سطح انتخاب شده‌اند. درمجموع 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 المان‌محدود وجود ندارد. به همین دلیل از طراحی آزمایشات و الگوریتم بهینه‌سازی برای کاهش تعداد تحلیل‌ها و پیداکردن حالت مناسب از بین آن‌ها استفاده شده است. پارامترهای انتخابی در این مثال در جدول 3 بیان گردیده است.

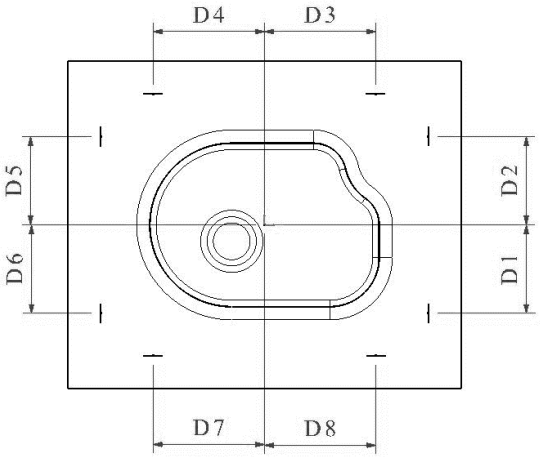

Fig. 7 The values of the input parameters in Example 1

شکل 7 مقادیر پارامترهای ورودی در مثال 1

در گام نهایی نتایج شبیه‌سازی المان‌محدود مورد بررسی قرار می‌گیرد و با قیدهای تعریف‌شده مقایسه می‌شود. در 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. باتوجه‌به 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 گیج‌های 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

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

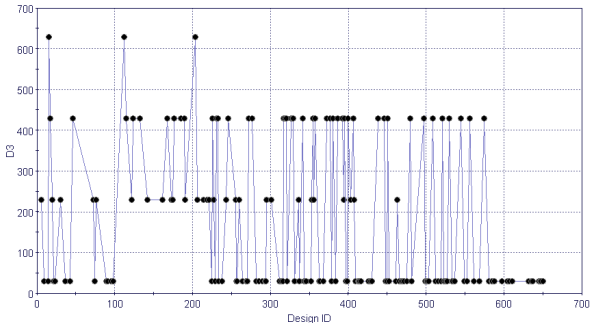

Fig. 8 Diagram of changes of parameter D3 in the first example

شکل 8 نمودار تغییرات پارامتر D3 در مثال اول

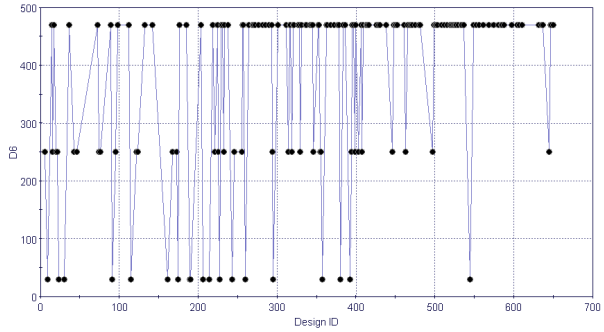

Fig. 9 Diagram of changes of parameter D6 in the first example

شکل 9 نمودار تغییرات پارامتر D6 در مثال اول

در این مثال با اجرای برنامه و انجام حدود 500 تحلیل آباکوس، نتایج به‌خوبی 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 قابل‌مشاهده است. در این شکل قطعه ورقی خام به‌صورت شفاف نشان داده شده تا اجزای دیگر نیز قابل‌مشاهده باشند.

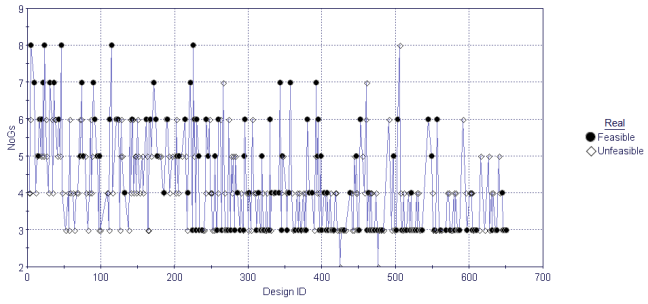

Fig. 10 Diagram of feasible and unfeasible analyzes

شکل 10 نمودار تحلیل‌های صحیح و ناصحیح

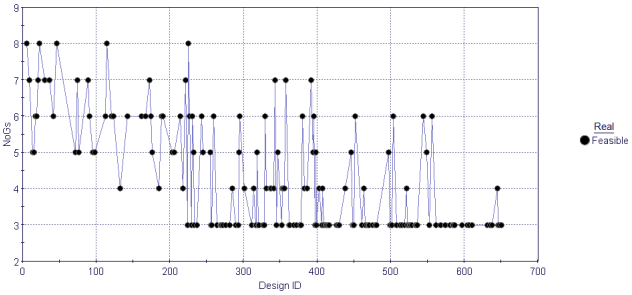

Fig. 11 Convergence diagram of the number of positioning gauges

شکل 11 نمودار همگرایی تعداد گیج‌های موقعیت‌دهنده

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

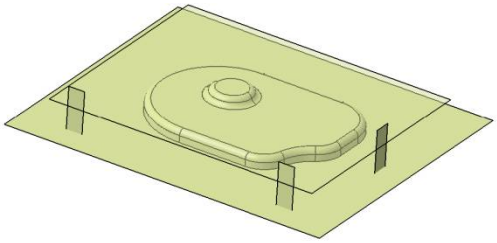

Fig. 12 The best arrangement of gauges for the least deviation and the least number of gauges

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

5-1-5- صحه‌گذاری نتیجه بهینه‌سازی

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

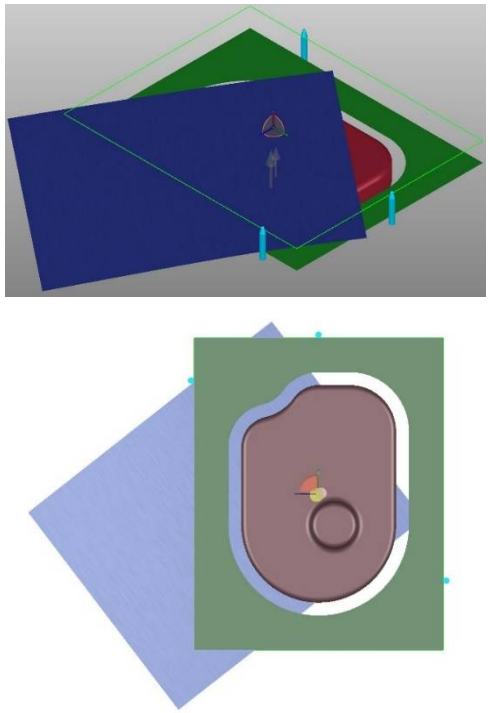

Fig. 13 Improper positioning and displacement of the blank from the blank-holder

شکل 13 موقعیت‌دهی نامناسب و جابجایی ورق از روی ورق‌گیر

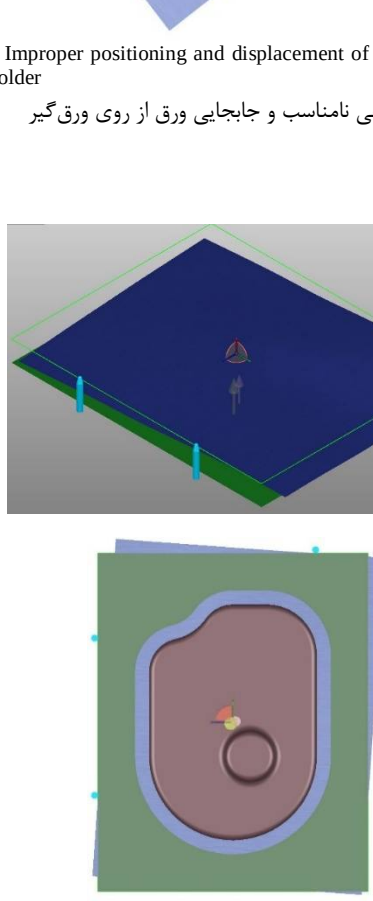

Fig. 14 Improper positioning and incorrect placement of the blank

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.

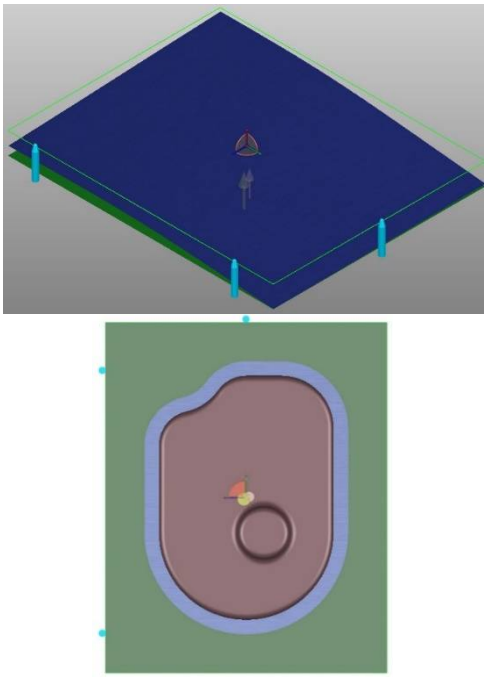

Fig. 15 Optimized arrangement of gauges and proper placement of the blank

شکل 15 چیدمان بهینه موقعیت‌دهنده‌ها و جایابی مناسب ورق

5-2- مثال 2

5-2-1- 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.

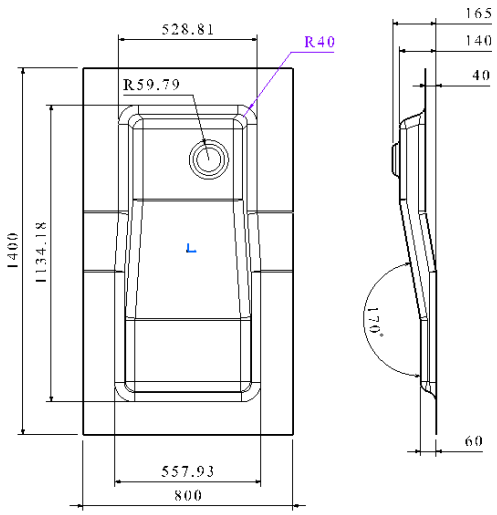

Fig. 16 Dimensions of the sheet metal part

شکل 16 ابعاد هندسی قطعه ورقی

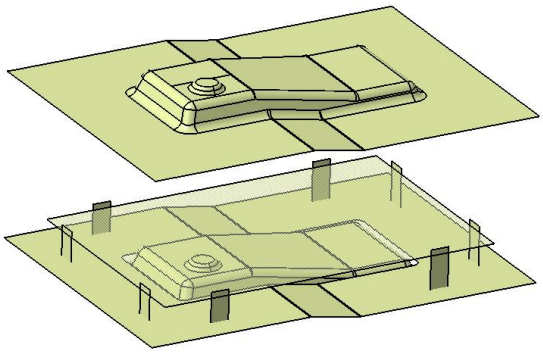

Fig. 17 Die components and sheet metal part 3-D model

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 باتوجه‌به تغییر هندسه قطعه می‌باشد و برابر با 121mm است. شرایط و پارامترهای شبیه‌سازی المان‌محدود فرایند شکل‌دهی قطعه ورقی به‌صورت 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 گردش‌کار آن بدون تفاوت ایجاد می‌شود.

جدول 5 پارامترهای شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی ورق

Table 5 Simulation parameters of sheet metal forming process

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

جدول 6 پارامترهای تنظیم‌شده نرم‌افزار مدفرانتیر

Table 6 Parameters of modefrontier software

تنظیم پارامترها	اندازه
مقادیر چهار ورودی در راستای x (mm)	(۴۰،۳۱۵،۵۹۰)
مقادیر چهار ورودی در راستای y (mm)	(۴۰،۳۱۰،۵۸۰،۸۵۰)

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.

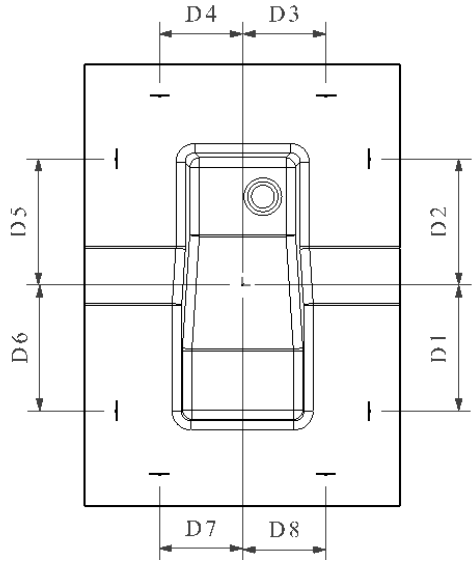

Fig. 18 The values of the input parameters in Example 2

شکل 18 مقادیر پارامترهای ورودی در مثال 2

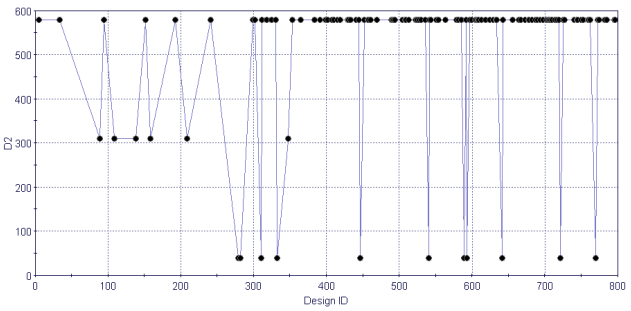

Fig. 19 Diagram of changes of parameter D2 in the second example

شکل 19 نمودار تغییرات پارامتر D2 در مثال 2.

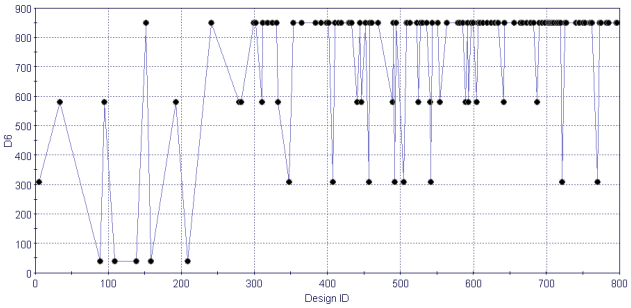

Fig. 20 Diagram of changes of parameter D6 in the second example

شکل 20 نمودار تغییرات پارامتر D6 در مثال 2

در این مثال با اجرای برنامه، نتایج به‌خوبی 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 تغییرشکل 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.

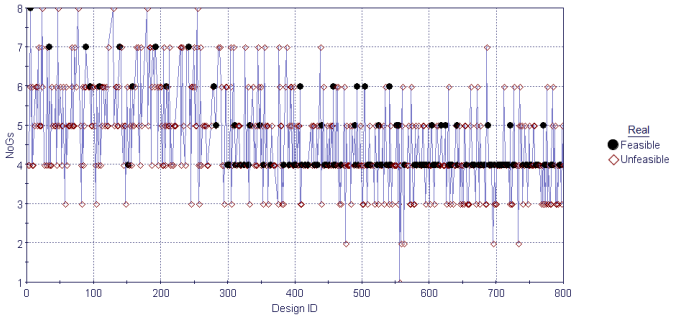

Fig. 21 Diagram of feasible and unfeasible analyzes

شکل 21 نمودار تحلیل‌های صحیح و ناصحیح

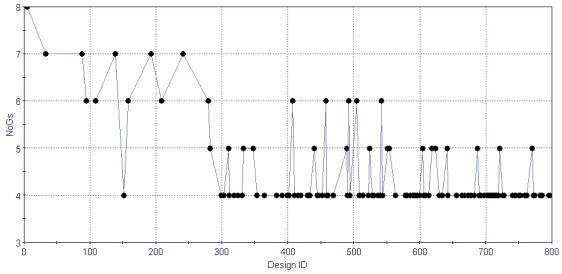

Fig. 22 Convergence diagram of the number of positioning gauges

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. ازاین‌بین 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 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

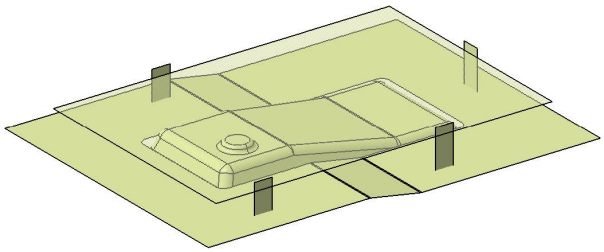

Fig. 23 The best arrangement of gauges for the least deviation and the least number of gauges

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

5-2-5- صحه‌گذاری نتیجه بهینه‌سازی

در این مثال نیز برای تأیید نتایج به‌دست‌آمده چند نمونه از حالات چیدمان موقعیت‌دهنده‌ها در نرم‌افزار اتوفرم مدل 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 به‌صورت 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 به‌خوبی موقعیت‌دهی شده است.

6- نتیجه‌گیری

در این تحقیق سیستمی نرم‌افزاری ایجاد شده که قادر است تعداد و محل موقعیت‌دهنده‌ها را در قالب‌های شکل‌دهی قطعات ورقی مشخص کند. این چیدمان به‌گونه‌ای 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 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 ارائه‌شده برای دو مثال نشان می‌دهد که با چیدمان سه یا چهار موقعیت‌دهنده می‌توان قطعه ورقی را در طی انجام عملیات شکل‌دهی به‌صورت 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 جریان‌کار 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 به‌صورت عملی بر روی قالب‌های شکل‌دهی اعمال شود و دقت قطعات تولیدی با قطعه‌ای که با 8 گیج موقعیت‌دهی شده است مقایسه گردد.

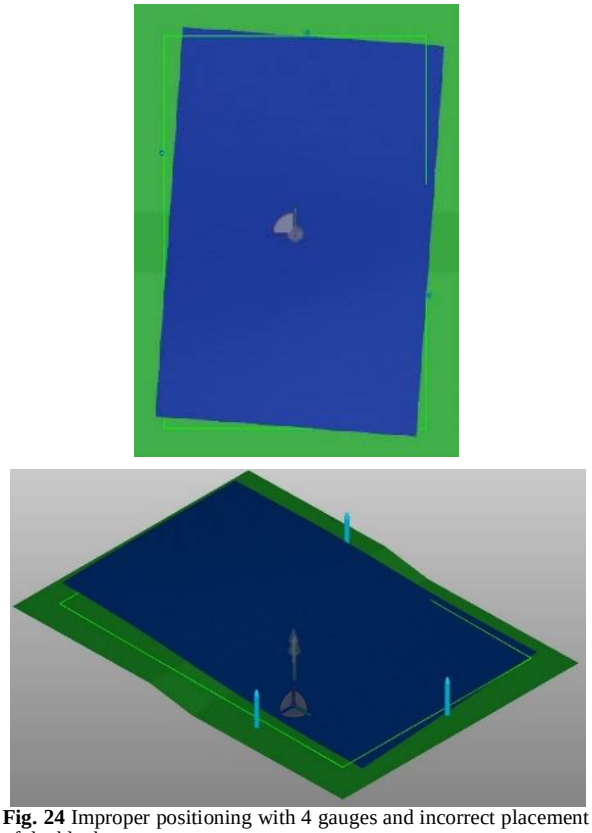

Fig. 24 Improper positioning with 4 gauges and incorrect placement of the blank

شکل 24 موقعیت‌دهی نامناسب با 3 گیج و جایابی نادرست ورق

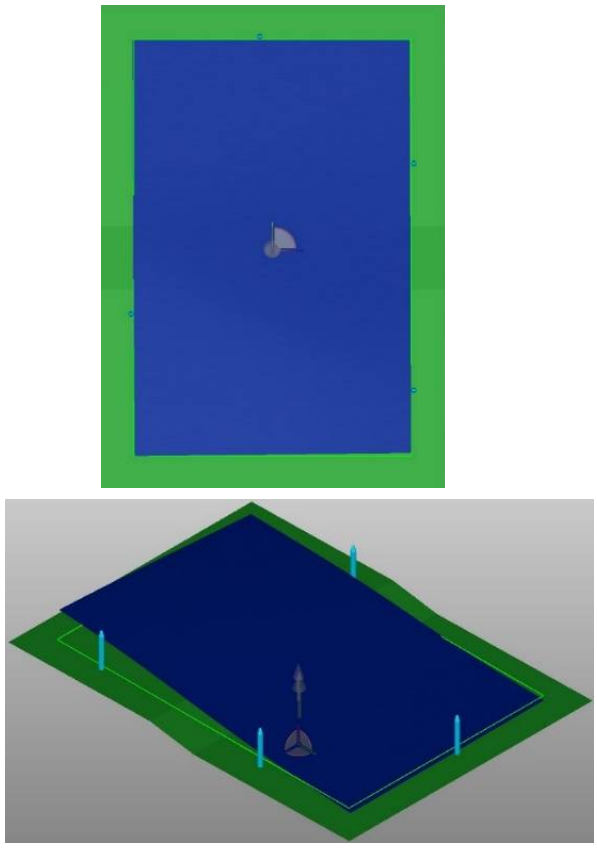

Fig. 25 Optimized arrangement of the 4 gauges and proper placement of the blank

شکل 25 چیدمان بهینه 4 عدد موقعیت‌دهنده و جایابی مناسب ورق

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

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. 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.