



راهکار بهینه سازی چند هدفه برای طراحی بید های کششی و نیروی ورقگیر در فرآیند شکل دهی ورق

پرویز کحال^{۱*}، سید یوسف احمدی بروغنی^۲ و حامد دیلمی عضدی^۳

^۱ استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی (ره)، بروجرد

^۲ دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

^۳ استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۶/۰۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۳/۰۶/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۱۶

چکیده

در این پژوهش از راهکار بهینه سازی چند هدفه، برای طراحی موثر پارامترهای هندسی و نیروی ورقگیر قالب در شکل دهی ورق استفاده شده است. در بسیاری از مقاله ها، برای دستیابی به پارامترهای بهینه فرآیند شکل دهی ورق، مسئله چند هدفه به یک مسئله تک هدفه تبدیل شده و سپس از آنالیز اجزا محدود و تکنیک بهینه سازی استفاده شده است. در این پژوهش هدف کمینه کردن توابع ناسازگار گسیختگی و چروکیدگی به صورت همزمان بوده است. برای پیدا کردن رابطه بین متغیر ها و توابع هدف از مدل سطح پاسخ و طراحی واریانس بهینه استفاده شده است. همچنین منحنی حد شکل دهی برای تعریف توابع هدف به کار گرفته شده است. برای شبیه سازی فرآیند از آنالیز اجزا محدود استفاده شده است. روش ارائه شده روی یک قطعه بدنه خودرو (گل سپر وانت نیسان) بررسی و به صورت عملی تایید شده است. این روش، یک راه حل موثر برای طراحی پارامترهای بهینه و دستیابی به کیفیت محصول بهتر بدون آزمون و خطا مشاهده شده است.

کلمات کلیدی: بهینه سازی چند هدفه؛ شکل دهی ورق؛ مدل سطح پاسخ؛ الگوریتم ژنتیک؛ منحنی حد شکل دهی.

Multiobjective Optimization Method for Drawbead and Blank-Holder Force Design in Sheet Metal Forming Process

P. Kahhal^{1,*}, S.Y. Ahmadi Brooghani², H.D. Azodi³

¹ Assistant Professor, Mechanical Engineering, University of Ayatollah Aozma Boroujerd, Boroujerd, Iran

² Associate Professor, Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

³ Assistant Professor, Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

Abstract

Present study describes the approach of applying Multi-Objective optimization method to optimizing of sheet metal forming Die. In many studies, Finite element analysis and optimization technique have been integrated to solve the optimal process parameters of sheet metal forming by transforming multi-objective problem into a single-objective problem. This paper aims to minimize the objective functions of fracture and wrinkle simultaneously. Design variables are blank-holding force and draw-bead geometry. Response surface model has been used for design of experiment and finding relationships between variables and objective functions. In designing of experiments v-optimal design has been used which minimizes the average prediction error variance, to obtain accurate predictions. Forming Limit Curve has been used to define the objective functions. Finite element analysis applied for simulating the forming process. Proposed approach has been investigated on a drawing part and experimentally verified. The optimal design showed a good agreement with experimental species. It has been observed that proposed approach provides an effective solution to design of process parameters without a the 'trial and error' procedure.

Keywords: Multi-objective Optimization; Sheet Metal Forming; Response Surface Model; Genetic Algorithm.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۶۶۴۲۴۶۸۳۲۰؛ فکس: ۰۶۶۴۲۴۶۸۲۲۳

آدرس پست الکترونیک: parviz_pkl@yahoo.com

نموده‌اند. آزازی و همکاران [۹] یک روند طراحی اتوماتیک از نرم افزارهای اجزاء محدود را توسعه دادند و یک الگوریتم بهینه سازی اکتشافی^۴ (HOA) تطبیقی را برای طراحی شکل گرده اولیه قطعات فلزی با دقت بالا در فرآیند استمپینگ ارائه دادند. هدف اصلی آن‌ها تعیین گرده اولیه برای قطعه نهایی با تolerانس پایین بوده و از روند معکوس برای بهینه سازی و حدس اولیه استفاده شده است، سپس حدس اولیه با به کارگیری HOA و FEM به روز رسانی گردیده است. خلیلی و همکاران [۱۰] از ترکیب مدل سطح پاسخ و روش کاهش اشکال پایه برای بدست آوردن شکل گرده اولیه بهینه بدون نیاز به دوره بری استفاده کرده‌اند. آن‌ها با اختصاص دادن ضرایب وزنی به چند شکل اولیه ساده و طراحی آزمایش^۵ با استفاده از RSM توانستند ترکیب بهینه ضرایب را برای گرده اولیه در چند مرحله پیدا نمایند. هانگ و همکاران [۱۱] از مدل سطح پاسخ برای بهینه سازی سطوح میانی ابزار در فرآیند استمپینگ چند مرحله‌ای ورق استفاده کرده‌اند تا کیفیت بالاتری برای محصول نهایی بدست آورند. از نرم افزار DYNAFORM برای شبیه سازی استفاده نموده اند و روند معکوس با RSM ترکیب شده است تا تغییرات ضخامت در مرحله نهایی کمینه شود. برای این هدف سطوح ابزار میانی بهینه سازی شده‌اند. همچنین گسیختگی محلی به عنوان یک قید و با استفاده از منحنی حد شکل دهی تعریف شده است. اوهااتا و همکاران [۱۲] از مدل سطح پاسخ برای بهینه سازی دمای آنیلینگ و زمان رسیدن به یکنواختی ضخامت قطعه استمپ شده استفاده کرده‌اند. هدف پژوهش کمک به تصمیم گیری درباره شرایط پردازش ماده برای قابلیت شکل پذیری بهتر ورق در فرآیند استمپینگ بوده است و سیستم ارائه شده برای یافتن شرایط آنیلینگ مناسب طراحی شده بود. پارامترهای بهینه سازی دمای آنیلینگ و زمان در نظر گرفته شده‌اند. همچنین تابع هدف یکنواختی ضخامت قطعه تعریف شده است. هو و همکاران [۱۳] یک روش سطح پاسخ انطباقی را برای طراحی شکل گرده اولیه و نیروی ورقگیر^۶ به کار برده‌اند تا به ضخامت ورق یکنواخت

جاروبی ساده^۱ و آنالیز اجزاء محدود حرکت سنبه و مراحل شکل دهی را بهینه‌سازی کردند تا به یک توزیع ضخامت یکنواخت برسند. تعریف تابع هدف به صورت انحراف از ضخامت متوسط مطلوب بوده است و متغیرهای طراحی ارتفاع دو سنبه در مرحله اول کشش بوده است. مسئله کشش عمیق در دو مرحله تعریف شده است. همچنین نتایج به صورت آزمایشگاهی تایید شده‌اند. گو و همکاران [۵] یک روند معکوس را با یک روش برنامه نویسی درجه دوم متوالی^۲ ترکیب کردند تا شکل گرده اولیه را بهینه کنند. تاثیرات خمشی در المان‌ها در نظر گرفته شده است و روابط تحلیلی برای نیروهای بیدهای کششی ارائه شده است. تغییرات ضخامت به عنوان تابع هدف تعریف شده است. ناصر و همکاران [۶] از یک الگوریتم ریاضی در رویکرد معکوس^۳ استفاده کردند تا نیروهای محدود کننده و سپس طراحی بید کششی را بهینه سازی کنند. برای شبیه سازی از نرم افزار *OPTRIS_{TM}* استفاده شده است. از شکل نهایی قطعه برای تعیین شکل گرده اولیه استفاده گردیده است. کایاباسی و اکیسی [۷] سه روش آنالیز اجزاء محدود، مدل سطح پاسخ و الگوریتم ژنتیک را ترکیب کرده‌اند تا مناسبترین مقادیر را برای پارامترهای فرآیند شکل دهی به دست آورند. آن‌ها دو راهکار برای افزایش قابلیت شکل پذیری پانل جانبی خودرو پیشنهاد داده‌اند. در راهکار اول اثر نگهدارنده دابل روی بازگشت فنری، چروکیدگی و کاهش ضخامت مطالعه شده است و سپس در راهکار دوم از روش بهینه سازی برای بهینه‌سازی بهتر پانل استفاده شده است. متغیرهای طراحی موقعیت قسمت بالایی قالب و بیدهای کششی، شعاع بید کششی، نیروهای اعمالی بر سطح بالایی قالب و سطوح نگهدارنده دابل در نظر گرفته شده‌اند. هدف نیز کمینه سازی بازگشت فنری، کاهش ضخامت و چروکیدگی بوده است. چن و همکاران [۸] اثرات گپ ورق گیر و نوع المان پوسته‌ای را روی قابلیت شکل پذیری یک سینک شستشو بررسی کرده‌اند. برای شبیه سازی از نرم افزار ABAQUS استفاده شده است. آن‌ها نوع جدیدی از ورق گیر را معرفی کرده و با استفاده از آن، چروکیدگی را به عنوان تابع هدف کمینه

⁴ Heuristic Optimization Algorithm (HOA)

⁵ Design of Experiment (DOE)

⁶ Blank Holder Force (BHF)

¹ Sweeping Simplex Method

² Sequential Quadratic Programming (SQP)

³ Inverse Approach

با تعریف توابع هدف گسیختگی و چروکیدگی، و با استفاده از نمودار حد شکل دهی (FLD) انجام شده است. از اصل شش سیگما برای اندازه‌گیری تغییرات و از RSM دوگانه برای طراحی آزمایش (DOE) استفاده شده است. پارامترها به دو دسته متغیرها و نویزها تقسیم و تغییرات نویزها در حین فرآیند در نظر گرفته شده‌اند. در این پژوهش برای یافتن مقادیر بهینه، مسئله به یک مسئله تک هدفه ازدحام ذره تبدیل و بهینه سازی شده است.

پژوهش‌های مذکور در مسئله بهینه سازی چند هدفه، از تبدیل مسئله به یک مسئله تک هدفه منفرد استفاده کرده‌اند، مانند روش ضرایب وزنی که توابع چندگانه را در یک تابع ترکیب می‌کند. مشکل اصلی این روش، تعیین مقادیر این ضرایب می‌باشد و نتایج بهینه سازی به شدت به این ضرایب حساس می‌باشند. مشکل دیگر اینست که هر دسته از این ضرایب تنها به یک راه حل بهینه ختم می‌شوند، فهمیدن اینکه راه حل پیدا شده، بهینه واقعی است، مشکل می‌باشد.

در زمینه طراحی مهندسی، اخیراً توجهات ویژه‌ای به الگوریتم ژنتیک چند هدفه^۳ شده است، که از فرآیند طبیعی انتخابی تقلید می‌کند که در آن مخلوقات برتر همزمان با تولید نسل جدید، مخلوقات نامرغوب را از جمعیت خود بیرون می‌کنند [۱۷-۱۹].

بسیاری از مزایای الگوریتم ژنتیک چند هدفه قابل توجه هستند [۲۰]، از قبیل قابلیت کاوش در یک فضای طراحی بزرگ و اینکه به اطلاعات گرادیان نیازی ندارد. اما مهمترین آنها اینست که الگوریتم ژنتیک چند هدفه می‌تواند چندین تابع هدف مستقل را در یک اجرای بهینه سازی، بطور همزمان و بدون تبدیل توابع هدف چندگانه به یک تابع هدف، بهینه نماید. بنابر این، الگوریتم ژنتیک چند هدفه می‌تواند برای مسائل بهینه سازی چند هدفه غیرخطی مانند شکل دهی ورق به کار گرفته شود.

در شکل دهی ورق عوامل بسیاری روی قابلیت فرم دهی دارای تاثیر زیادی هستند، از جمله نیروی ورقگیر و پارامترهای هندسی بید کششی، خواص ماده، ضخامت گرده، موقعیت دهی گرده، ابعاد گرده، خواص اصطکاکی و شعاع‌های قالب (سنجه و ماتریس). در یک طراحی صنعتی که نقشه

دست یابند و به نتایج قابل ملاحظه‌ای رسیده‌اند. از نرم افزار LSDYNA970 برای شبیه سازی استفاده شده است. بهینه سازی در دو مرحله انجام شده است، نخست گرده اولیه و سپس نیروهای ورقگیر بهینه سازی شده‌اند. متغیرها ابعاد گرده اولیه و مقادیر نیروهای ورقگیر در نظر گرفته شده‌اند. تابع هدف نیز تغییرات ضخامت ورق بوده است. همچنین برای بالا بردن سرعت و دقت از روش بهینه سازی ازدحام ذره با نمونه گیری هوشمند^۱ استفاده گردیده است.

با این حال پژوهش‌های ذکر شده همگی با یک تابع هدف سر و کار داشته‌اند و تابع مورد نظر را با روش خود بهینه نموده‌اند. اغلب مسائل در طبیعت، چندین هدف احتمالاً ناسازگار برای دستیابی دارند. ممکن است دسترسی به یک هدف باعث دور شدن از هدفی دیگر شود. بسیاری از این مسائل با تبدیل تمامی اهداف به یک هدف با قیود مشخص حل می‌شوند. واضح است که شکل دهی ورق یک مسئله چند هدفه با روابط ناسازگار بین توابع هدف می‌باشد که در این زمینه تحقیقات زیادی انجام شده است. جانسون و همکاران [۱۴] مدل سطح پاسخ را برای بهینه سازی نیروی محدود کننده بید کششی به کار برده‌اند، که ترکیب این روش با تکنیک نگاشت فضایی^۲ به طور قابل ملاحظه‌ای راندمان محاسبات را افزایش داده است. آن‌ها نیروی محدود کننده بیدهای کششی را در شرایط آزمایشگاهی به هندسه بیدها ربط داده و در نقاطی که نیروی بیشتری نیاز دارند، هندسه بید اصلاح شده است. استفاده از روش نگاشت فضایی امکان استفاده همزمان از دو مدل برای بهینه سازی را میسر نموده است، یک مدل دقیق و زمان‌بر و یک مدل با دقت کم، از دقت مدل دقیق استفاده و حل با زمان کم توسط مدل با دقت کم انجام گردیده است. اکثر توابع از روی مدل با دقت کم محاسبه و از طریق مدل دقیق اصلاحاتی انجام شده است. بعداً، آن‌ها این روش را با استفاده از مدل سطح پاسخ سلسله مراتبی در شش مرحله بهبود بخشیدند [۱۵]. گوانگ یونگ و همکاران [۱۶] از ترکیب مدل سطح پاسخ دوگانه و اصل شش سیگما همراه با بهینه یابی ازدحام ذره برای بهینه کردن طراحی بیدهای کششی استفاده نموده‌اند. بهینه سازی

¹ Particle Swarm Optimization Intelligent Sampling (PSOIS)

² Space Mapping Technique

³ Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA)

عیوب گسیختگی و چروکیدگی، هدایت می‌کند. فرآیند بهینه سازی شکل دهی ورق را می‌توان بصورت زیر فرموله کرد:

$$F(X) = (f_1(x_1, x_2, \dots, x_i), f_2(x_1, x_2, \dots, x_i), \dots, f_j(x_1, x_2, \dots, x_i)) \quad (1)$$

$$j=1, 2, \dots, m$$

تحت قیود:

$$b_i^{lower} \leq x_i \leq b_i^{upper}, i=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$g_k(x_i) \leq 0, k=1, 2, \dots, p$$

که x_i متغیر طراحی i ام، b_i^{upper} و b_i^{lower} کران‌های پایین و بالای x_i تابع هدف $f_j(x_i)$ تابع j ام مربوط به x_i ، $g_k(x_i)$ تابع قید k ام مربوط به x_i و m و p به ترتیب تعداد توابع هدف و توابع قید می‌باشند.

۲-۱- متغیرهای طراحی

در شکل دهی ورق، نیروی ورقگیر و پارامترهای هندسی بید کششی (به ویژه قطر) روی قابلیت فرم دهی بسیار موثرند، زیرا نیروی ورق گیر و بیدهای کششی روی آن باعث توزیع فشار یکنواخت و محدود کردن جریان ورق به داخل قالب می‌شوند [۲۵]. در این پژوهش نیروی ورقگیر و شعاع بیدهای کششی به عنوان متغیرهای طراحی و بهینه سازی در نظر گرفته شده‌اند.

۲-۲- توابع هدف

به منظور جلوگیری از وقوع عیوب شکل دهی، برای این عیوب در شکل دهی ورق باید معیارهایی تعریف کرد. در این پژوهش برای تعریف این معیارها از مقادیر کرنش‌های بدست آمده آلمان‌ها در آنالیز اجزای محدود استفاده شده است، که در ادامه توضیح داده شده‌اند.

۲-۱-۱- گسیختگی

هنگامی که کرنش‌های بیشینه برخی آلمان‌ها در بالای منحنی حد شکل دهی خط $\phi(\epsilon_2)$ (برای احتیاط $\phi(\epsilon_2)$) قرار می‌گیرند، در این منطقه از قطعه گسیختگی روی خواهد داد و فاصله بیشتر با این منحنی، تمایل بیشتر به گسیختگی را نشان می‌دهد (شکل ۱). در این پژوهش، مجموع مربع

قطعه مطلوب مشخص می‌باشد، برخی موارد ثابت می‌باشند و در طراحی قابل تغییر نیستند، مانند شعاع‌های سنبه و ماتریس، خواص ماده و ضخامت گرده. همچنین در شرایط کشش نیز برخی از این پارامترها قابل تغییر نیستند و در واقع برای تمامی فرآیندهای مشابه یکسان می‌باشند، مانند شرایط اصطکاکی، موقعیت دهی گرده و ابعاد گرده که در شرایط بهره برداری از قالب ثابت می‌باشند. در این میان نیروی ورقگیر و هندسه بیدهای کششی تاثیر بسزایی در طراحی قالب دارند، زیرا نیروی ورقگیر و بیدهای کششی روی آن باعث توزیع فشار یکنواخت و محدود کردن جریان ورق به داخل قالب می‌شوند.

در این راستا، برخی پژوهش‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک چند هدفه به نتایج خوبی دست یافته‌اند [۲۱]، اما در این پژوهش‌ها به جای هندسه بید کششی از نیروهای بازدارنده روی بید استفاده شده است که در اغلب شرایط آزمایشگاهی عملی نمی‌باشد. کمال و همکاران نیز با استفاده از بهینه سازی چند هدفه یک قطعه کشش عمیق را بهینه نموده‌اند، لیکن نتیجه به صورت آزمایشگاهی بررسی نشده و صرفاً شبیه سازی انجام گرفته است، همچنین رابطه طراحی آزمایش با دقت نسبتاً پایین به دست آمده است [۲۲].

در این پژوهش بهینه سازی چند هدفه فرآیند شکل دهی ورق از طریق کمینه سازی توابع هدف ناسازگار گسیختگی و چروکیدگی به صورت همزمان انجام شده است. از مدل سطح پاسخ و طراحی واریانس بهینه برای پیدا کردن رابطه بین متغیرها و توابع هدف استفاده شده است. همچنین برای تعریف توابع هدف از منحنی حد شکل دهی و برای شبیه سازی فرآیند آنالیز اجزای محدود استفاده شده است. روش ارائه شده روی یک قطعه بدنه خودرو (گل سپر وانت نیسان) بررسی و در نهایت به صورت آزمایشگاهی تایید شده است. این روش، یک راه حل موثر و کم هزینه برای تعیین پارامترهای بهینه و دستیابی به کیفیت بالاتر محصول بدون انجام آزمون و خطا مشاهده شده است.

۲-۲- مدل بهینه سازی چند هدفه

هدف از این بهینه سازی بدست آوردن بهترین ترکیب از پارامترهای فرآیند یا متغیرهای هندسی طراحی می‌باشد که طراح را به سوی یک ورق شکل داده شده بدون هیچ کدام از

۳- الگوریتم بهینه سازی چند هدفه

شکل دهی ورق یک مسئله چند هدفه است. در این موارد، کمینه یا بیشینه کردن همزمان تمامی توابع هدف هنگامی که این توابع در یک رابطه ناسازگار هستند، مشکل است. در این پژوهش، مدل پاسخ سطح برای طراحی آزمایش استفاده شده است و همچنین الگوریتم ژنتیک^۱ و جبهه پارتو^۲ برای انجام بهینه سازی ترکیب شده اند.

در الگوریتم ژنتیک معمولی یک جمعیت تصادفی از ژن‌ها (افراد) در فضای حالت توزیع شده و نتایج شایستگی^۳ آن‌ها ارزیابی می‌شود. سپس بهترین‌ها باقی می‌مانند (انتخاب می‌شوند) و یک جمعیت جدید تولید می‌شود (تکثیر)، با ترکیب عملگرهای جهش^۴ و تقاطع^۵ دسته جدیدی از ممکن‌ها (تغییرات) بدست می‌آیند. با انجام تکثیرهای متعدد، جمعیت فضای حالت را جستجو خواهد کرد و به صورت صعودی به سمت بهترین راه حل که بهینه کلی می‌باشد، همگرا خواهد شد [۱۰].

در الگوریتم ژنتیک چند هدفه تقریباً همین کار انجام می‌شود، به جز اینکه در اینجا تلاش در جهت بهینه کردن تنها یک پارامتر شایستگی نمی‌باشد، بلکه تعدادی از این پارامترها بهینه می‌شوند. برای دستیابی به این منظور باید یک دسته اهداف یک تعریف شایستگی ارائه شود تا بتوان راه حل‌ها را با هم مقایسه نمود. برای این منظور، از راه حل بهینه پارتو استفاده شده است.

برای یک مسئله کمینه سازی، جواب عملی x^* یک راه حل بهینه پارتو است اگر و تنها اگر هیچگونه راه حل عملی x دیگری به صورت زیر وجود نداشته باشد:

$$f_i(x) \leq f_i(x^*) \quad i=1,2,\dots,n \quad (5)$$

و حداقل یک j ($1 \leq j \leq n$) در معادله زیر صدق کند:

$$f_j(x) < f_j(x^*) \quad (6)$$

برای مثال، در شکل ۲ نقاط دایره‌ای نمایشگر راه حل‌های عملی هستند و مقادیر کوچکتر به مقادیر بزرگتر ارجح

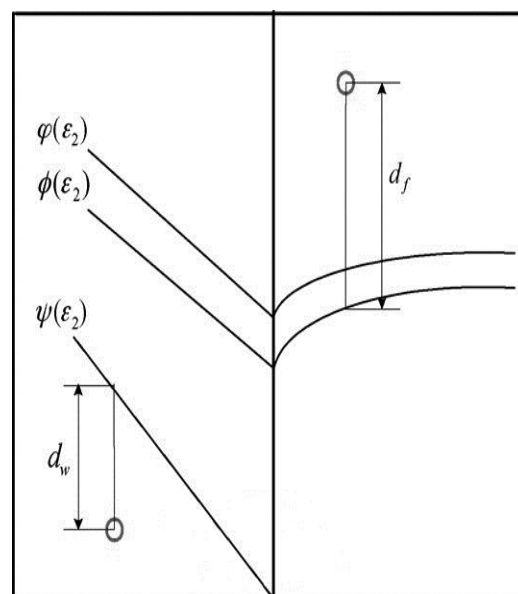
فاصله تمام المان‌ها به عنوان تابع گسیختگی در نظر گرفته شده است [۲۱]:

$$Obj_f = \begin{cases} \sum_{i=1}^n (d_f^i)^2 \\ = \sum_{i=1}^n (\varepsilon_1^i - \varphi(\varepsilon_2^i))^2 & \varepsilon_1^i > \varphi(\varepsilon_2^i) \\ 0 & \varepsilon_1^i \leq \varphi(\varepsilon_2^i) \end{cases} \quad (3)$$

۲-۱-۲- چروکیدگی

بطور مشابه، هنگامی که کرنش‌های بیشینه زیر منحنی حد چروکیدگی قرار گیرند (خط $\psi(\varepsilon_2)$)، ممکن است چروکیدگی در این منطقه از قطعه اتفاق افتد هر چه فاصله بیشتر شود میل به چروکیدگی افزایش می‌یابد (شکل ۱). بنابراین، معیار چروکیدگی به صورت فاصله کرنش اصلی هر المان تا منحنی حد چروکیدگی تعریف شده است. برای تعریف تابع هدف چروکیدگی مجموع مربعات این فواصل به صورت معادله زیر محاسبه شده است [۲۱]:

$$Obj_w = \begin{cases} \sum_{i=1}^n (d_w^i)^2 \\ = \sum_{i=1}^n (\varepsilon_1^i - \psi(\varepsilon_2^i))^2 & \varepsilon_1^i < \psi(\varepsilon_2^i) \\ 0 & \varepsilon_1^i \geq \psi(\varepsilon_2^i) \end{cases} \quad (4)$$



شکل ۱- شماتیک تعریف توابع هدف [۲۱]

¹ Genetic Algorithm (GA)

² Pareto Front

³ Fitness

⁴ Mutation

⁵ Crossover

رابطه ورودی و خروجی یک سیستم مهندسی بدست آورد و (۲) کل سیستم در حال طراحی را بهینه یا تنظیم نماید. در بسیاری از کاربرد های سطح پاسخ، چه خطی و چه درجه دو فرض اینست که مقادیر پاسخ مشاهده شده دقیقا مدل می-شوند. اگرچه این فرض برای تمامی حالت ها درست نخواهد بود، ولی روش سطح پاسخ در صورت استفاده از چند جمله‌ای‌های درجه سه و بالاتر و وجود چندین متغیر به روشی گرانیقیمت تبدیل خواهد شد. به علاوه مدل های چند جمله ای درجه سه یا بالاتر ممکن است شامل یک یا چند نقطه عطف باشند. در بهینه سازی های عددی بر مبنای گرادیان، ممکن است مسئله به جای همگرا شدن به یک بهینه محلی یا کلی، به نقطه عطف همگرا شود.

اگر تعداد n_s تحلیل انجام شده باشد و $p = 1, 2, \dots, n_s$ آنگاه یک مدل سطح پاسخ درجه دو به فرم زیر خواهد بود:

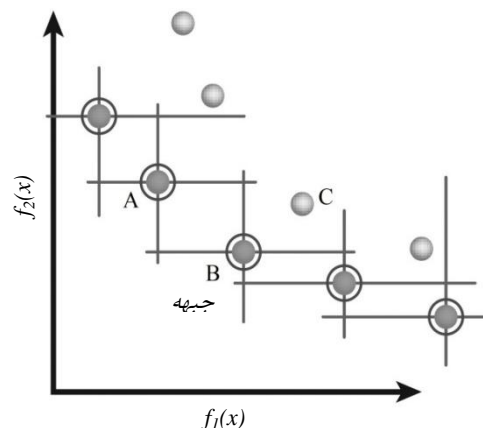
$$y^{(p)} = c_0 + \sum_{1 \leq j \leq n_v} c_j x_j^{(p)} + \sum_{1 \leq j \leq k \leq n_v} c_{(n_v - 1 + j + k)} x_j^{(p)} x_k^{(p)} \quad (7)$$

که $y^{(p)}$ پاسخ، $X_j^{(p)}$ و $X_k^{(p)}$ متغیر های طراحی شماره n_v ، c_0 ، c_j و $c_{(m-1+j+k)}$ ضرایب مجهول چند جمله ای می‌باشند [۱۰].

ساختن این مدل های جانشین نیاز به چند نمونه برای ساختار بندی سطح پاسخ مربوط به فرآیند کشش دارد، و این نمونه ها می‌توانند توسط روش های طراحی آزمایش، از قبیل مراحل هالتون^۱، فرا مکعب لاتین^۲، روش تاگوچی^۳ و طراحی کلاسیک^۴، تولید شوند. روش طراحی آزمایش یک ابزار قدرتمند در طراحی و تحلیل مسائل طراحی صنعتی پیچیده می‌باشد و می‌تواند به درک مشخصه های فرآیند و بررسی اثر ورودی ها روی پاسخ خروجی کمک کند. به علاوه، می‌تواند به صورت سیستماتیک پارامترهای بهینه فرآیند را با تعداد تست های کمتر، تعیین نماید.

در این پژوهش از طراحی واریانس بهینه^۵ برای طراحی آزمایش استفاده شده است که واریانس متوسط پارامترها را

هستند. نقطه C یک راه حل پارتو نیست زیرا نقطه B بر آن چیره شده است ($f_1(B) < f_1(C)$ و $f_2(B) < f_2(C)$). دو نقطه A و B نمی‌توانند بر یکدیگر چیره شوند ($f_1(A) < f_1(B)$ ولی $f_2(A) > f_2(B)$) و بنابراین در جبهه پارتو قرار می‌گیرند [۱۹].



شکل ۲- جبهه پارتو [۱۹]

۳-۱- روند بهینه سازی

روند مسئله بهینه سازی الگوریتم ژنتیک چند هدفه را می-توان به صورت زیر شرح داد:

گام ۱

انتخاب یک استراتژی تبدیل، جمعیت اولیه، قرار دادن $i=0$ ، و تعیین پارامترها.

گام ۲

ترکیب جمعیت حاضر با جمعیت والد و رتبه بندی جمعیت ترکیب شده

گام ۳

به روز رسانی جبهه پارتو

گام ۴

محاسبه مقادیر شایستگی بر طبق نتایج رتبه بندی.

گام ۵

مشخص نمودن اتمام کار بر اساس معیار توقف.

۳-۲- مدل سطح پاسخ

روش های سطح پاسخ در مواقعی به کار گرفته می‌شوند که تصمیم گیرنده می‌خواهد: (۱) یک پیش بینی تقریباً دقیق از

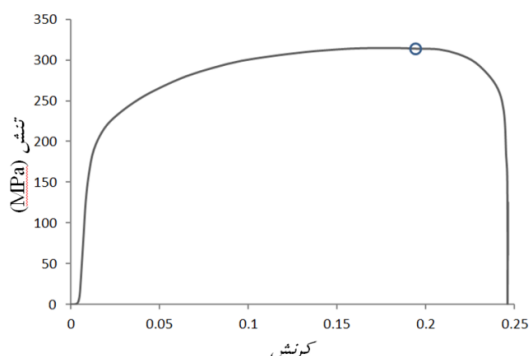
¹ Halton Sequence

² Latin Hypercube Design (LHD)

³ Taguchi Method

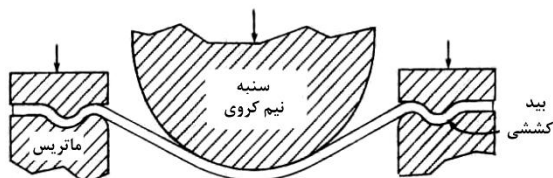
⁴ Classic Design

⁵ V-Optimal



شکل ۴- نمودار تنش-کرنش حقیقی ورق فولاد St14

نمودار حد شکل دهی برای گسیختگی توسط آزمایش کشش خارج از صفحه (سنبه نیم کروی) روی ورق به دست آمده است [۲۳-۲۴] که شماتیک و نمونه قالب ساخته شده در شکل ۵ نشان داده شده اند. برای ایجاد مسیرهای کرنش متفاوت از هشت نمونه ورق با هندسه های مختلف استفاده شده است که با استفاده از مهر ژلاتینی دواير با قطر خارجی ۵ میلیمتر و قطر داخلی ۴ میلیمتر روی ورق منقوش شده اند. پس از کشش و پارگی اولیه نمونه ها از روی دواير تغییر شکل داده شده، با فاصله ۱/۵ برابر قطر دایره اولیه از منطقه پارگی، کرنش های کششی و فشاری اندازه گیری شده اند تا نمودار حد شکل دهی برای گسیختگی به دست آید.



شکل ۵- شماتیک و نمونه قالب آزمایش کشش خارج از

صفحه

کمینه می‌کند. همچنین یک مدل درجه دو برای ساختن مدل سطح پاسخ به کار رفته است.

۴- مورد مطالعه

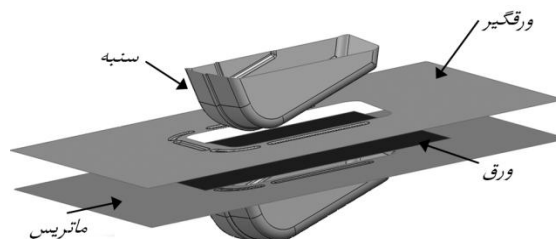
مورد مطالعه در این پژوهش قطعه گل سپر نیسان در نظر گرفته شده است.

۴-۱- مدل اجزای محدود

در راستای بهبود قابلیت اعتماد فرآیند بهینه سازی، از تحلیل اجزای محدود دینامیکی صریح برای شبیه سازی فرآیند شکل دهی ورق استفاده شده است. در شبیه سازی اجزای محدود، سرعت ابزار خیلی بیشتر از سرعت واقعی در نظر گرفته شده که باعث اثرات دینامیکی روی ورق می‌شود. برای غلبه بر این اثرات دینامیکی، جرم ورق کاهش داده شده است.

در این پژوهش یک قطعه بدنه خودرو (گل سپر نیسان) به عنوان مورد مطالعه انتخاب شده است و مدل اجزای محدود آن در شکل ۳ نشان داده شده است.

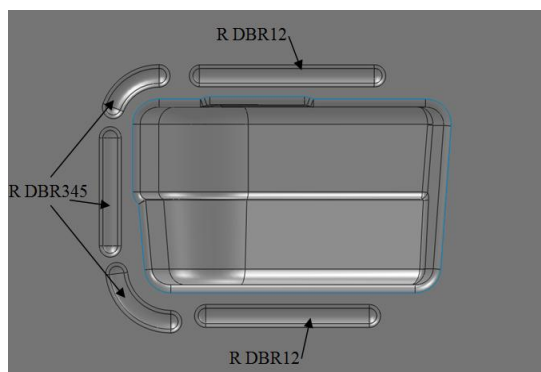
ماده انتخاب شده برای ورق فولاد St14 می‌باشد. خصوصیات ماده ورق در جدول ۱ آورده شده اند. خصوصیات و کارسختی ماده ورق توسط آزمون کشش تک محوری بدست آمده است که نمودار تنش-کرنش حقیقی بدست آمده در شکل ۴ نشان داده شده است.



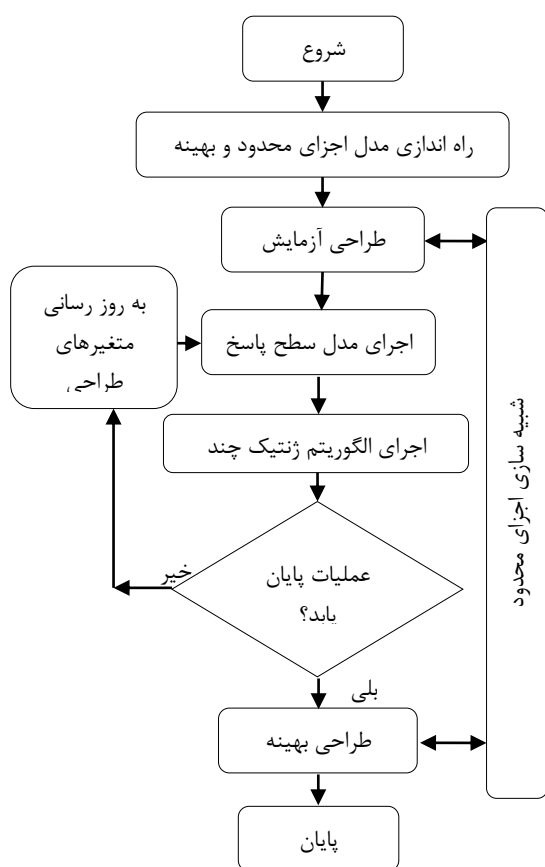
شکل ۳- مدل اجزای محدود گل سپر نیسان

جدول ۱- خصوصیات مکانیکی ورق فولاد St14

۱۵۷	مدول یانگ (GPa)
۰/۳	ضریب پواسون
۱۸۰	استحکام تسلیم (MPa)
۳۱۷	استحکام نهایی (MPa)
۱/۶	ضخامت (mm)
۳۸۰ × ۳۴۰	ابعاد (mm)



شکل ۶- شعاع‌های بیدهای کششی



شکل ۷- دیاگرام روند بهینه‌سازی

گام ۱. مدل اولیه: مدل اجزای محدود و مدل بهینه سازی اولیه برای شرایط اولیه راه‌اندازی شده و پارامترهای زیر برای مدل بهینه سازی الگوریتم ژنتیک چند هدفه در نظر گرفته می‌شوند:

المان پوسته ای سه گرهی^۱ با اندازه مش^۲ ۴ میلی‌متر برای شبیه سازی فرآیند شکل دهی ورق به کار گرفته شده است و تعداد المان‌ها در مش ۱۶۱۵۰ می‌باشد. ابزارها به صورت صلب و بدون هیچ گونه تغییر شکل الاستیکی در نظر گرفته شده‌اند و با المان پوسته‌های سه گرهی مش بندی شده‌اند. ورقگیر با سرعت ۵/۴ m/s از بالا به سمت ماتریس حرکت کرده و متوقف می‌شود، سپس سنبه با سرعت ۱۰/۵ m/s به سمت پایین حرکت می‌کند.

جهت مدل‌سازی تماس، حالت سطح به سطح^۳ انتخاب شده است. ضریب اصطکاک در تماس سنبه - ورق ۰/۱۵ و در تماس ماتریس - ورق و همچنین ورقگیر - ورق ۰/۱۰ در نظر گرفته شده است. شبیه سازی با استفاده از نرم افزار آباکوس^۴ انجام شده است.

۴-۲- مدل بهینه سازی

برای بهینه سازی شکل پذیری فرآیند شکل دهی ورق، نیروی ورقگیر و شعاع‌های بیدهای کششی به عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته شده‌اند و در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. محدوده متغیرهای طراحی با توجه به روابط تقریبی و تجربیات موجود در صنعت در نظر گرفته شده‌اند.

مسئله بهینه سازی را می‌توان به صورت مدل غیر خطی زیر توصیف کرد:

کمینه سازی:

$$F(x) = (Obj_w, Obj_f) \quad (8)$$

تحت قیود:

$$\begin{aligned} 100 &\leq BHF \leq 1000 \text{ (kN)} \\ 5 &\leq DBR12 \leq 15 \text{ (mm)} \\ 5 &\leq DBR345 \leq 14.5 \text{ (mm)} \end{aligned} \quad (9)$$

۴-۳- روند بهینه سازی

شکل ۷ دیاگرام روند بهینه سازی را نشان می‌دهد که به پنج گام تقسیم می‌شود:

¹ S3 Triangular

² Seeds

³ Surface to Surface Contact

⁴ ABAQUS/CAE

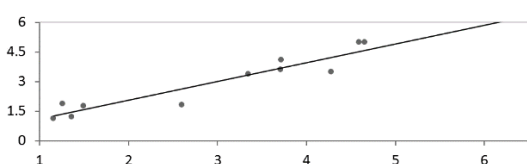
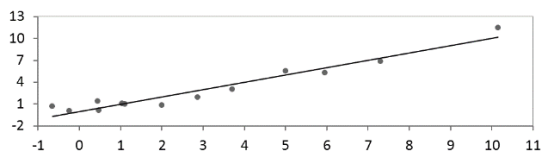
$$Obj_f = 1.9815 - 0.017494 \times BHF + 0.18317 \times DBR12 + 0.62229 \times DBR345 + 1.2699 \times 10^{-5} \times BHF^2 + 0.0001538 \times BHF \times DBR12 - 0.00042416 \times BHF \times DBR345 + 0.0084732 \times DBR12^2 + 0.047602 \times DBR12 \times DBR345 + 0.017282 \times DBR345^2 \quad (10)$$

$$Obj_w = 11.4178 - 0.0076076 \times BHF - 1.41619 \times DBR12 - 0.177699 \times DBR345 + 9.1195 \times 10^{-7} \times BHF^2 + 0.00048866 \times BHF \times DBR12 + 2.04638 \times 10^{-6} \times BHF \times DBR345 + 0.0496427 \times DBR12^2 + 0.0423725 \times DBR12 \times DBR345 - 0.00932008 \times DBR345^2 \quad (11)$$

شکل ۸ مقایسه توابع تخمینی هدف را به ازای توابع هدف متناظرشان در آزمایش‌ها نشان می‌دهد. در این پژوهش از نرم افزار متلب برای ساختن مدل سطح پاسخ استفاده شده است.

گام ۴. اجرای الگوریتم ژنتیک چند هدفه: هنگامی که مدل سطح پاسخ ساخته شد، تکنیک بهینه سازی الگوریتم ژنتیک چند هدفه را می‌توان برای جستجوی راه حل بهینه پارتو استفاده کرد. در روند بهینه سازی نیازی به اجرای آنالیز اجزای محدود نیست، اما از مدل سطح پاسخ برای جایگزینی محاسبات طولانی برای ارزیابی مقادیر توابع هدف، استفاده می‌شود.

گام ۵. بررسی شرایط پایان: اگر تعداد تولید نسل‌ها به حد مورد نظر برسد، روند بهینه سازی متوقف می‌شود و پارامترهای بهینه مورد بررسی قرار می‌گیرند. در صورت بررسی و رسیدن به نتایج دلخواه فرآیند بهینه سازی پایان می‌یابد، در غیر این صورت آنالیزهای جدید به نمونه‌های قبلی اضافه شده و الگوریتم به گام سوم بر می‌گردد.



شکل ۸- توابع تخمینی هدف به ازای توابع هدف

(۱) اندازه جمعیت $P = 45$

(۲) احتمال تقاطع $P_c = 0.9$

(۳) احتمال جهش $P_m = 0.01$

(۴) کسر مهاجرت $P_g = 0.2$

(۵) کسر جمعیت جبهه پارتو $P_p = 0.35$

(۶) شرط اتمام تولید نسل $T = 600$

در این پژوهش از نرم افزار متلب^۷ برای انجام الگوریتم ژنتیک چند هدفه استفاده شده است.

گام ۲. طراحی آزمایش: برای ساختن مدل سطح پاسخ درجه دوم، هر کدام از چینش‌های متغیرهای طراحی در آنالیز اجزای محدود اجرا شده و توابع هدف برای هر نقطه از ماتریس طراحی آزمایش بدست می‌آیند. ماتریس طراحی آزمایش و نتایج آنالیز اجزای محدود در جدول ۲ نشان داده شده‌اند.

گام ۳. ساختن مدل سطح پاسخ: بر اساس رابطه (۷)، توابع سطح پاسخ با استفاده از طراحی آزمایش به صورت زیر به دست آمده‌اند:

جدول ۲- ماتریس طراحی آزمایش و نتایج FEA

تابع	تابع	شعاع بید	شعاع بید	نیروی	ورقگیر
گسیختگی	چروکیدگی	۳-۵	۱ و ۲		
۰/۸۱۶۴۹	۳/۷۱۸۲۱	۵	۱۵	۱۰۰۰	۱
۰/۱۱۹۴۵	۱/۲۵۹۶۱	۹/۵	۹/۵	۵۵۰	۲
۶/۸۲۸۸۶	۴/۵۹۱۲۰	۱۴/۵	۱۳/۵	۱۰۰	۳
۱۱/۴۳۵۷	۳/۷۰۶۹۰	۱۴/۵	۵	۱۰۰	۴
۱/۳۹۹۵۳	۶/۵۱۲۷۹	۱۲	۱۵	۱۰۰۰	۵
۰/۰۵۴۱۲	۱/۱۵۸۲۱	۷/۵	۵	۱۰۰۰	۶
۲/۹۹۷۰۳	۴/۶۵۷۶۳۶	۵	۵	۱۰۰	۷
۰/۹۸۷۷۰	۱/۴۹۳۷۶	۱۴/۵	۹/۵	۱۰۰۰	۸
۰/۶۹۲۵۸	۲/۵۹۹۸۶	۵	۹/۵	۶۴۰	۹
۵/۵۶۴۸۵	۳/۳۴۶۳۲۶	۵	۱۵	۱۰۰	۱۰
۱/۹۰۵۷۳	۱/۳۵۷۵۰	۱۴/۵	۵	۶۴۰	۱۱
۱/۰۳۸۲۹	۶/۳۹۸۰۷	۱۴/۵	۱۵	۵۵۰	۱۲
۵/۳۳۳۷۳	۴/۲۷۸۷۸	۱۰	۱۰	۱۰۰	۱۳

^۱ Population Size

^۲ Crossover Probability

^۳ Mutation Probability

^۴ Migration Fraction

^۵ Pareto Front Population Fraction

^۶ Termination Generation

^۷ MATLAB

۵- نتایج

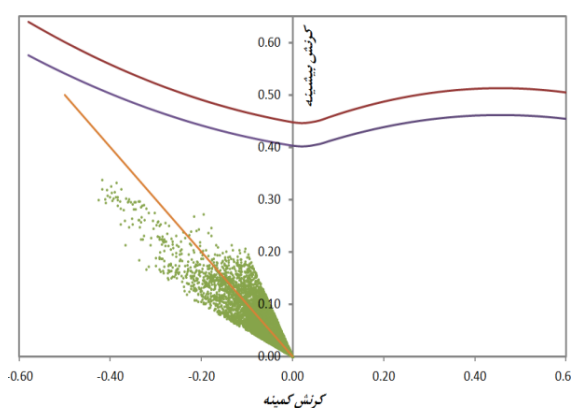
پس از ۱۳ بار تکرار آنالیز برای طراحی آزمایش و انجام بهینه سازی الگوریتم ژنتیک چند هدفه بر اساس مدل سطح پاسخ، راه حل های بهینه پارتو به دست آمد (شکل ۹)، که هر کدام از نقاط نشان داده شده در شکل یک راه حل بهینه پارتو می باشد. مقادیر بهینه توابع هدف با یکدیگر ناسازگارند و هیچ نقطه ای وجود ندارد که در آن هر دو تابع هدف همزمان کمینه شوند.

در این پژوهش، هر نقطه می تواند یک راه حل بهینه باشد و نقطه نشان داده شده در شکل ۹ به عنوان راه حل بهینه استفاده شده است. جدول ۳ مقادیر متغیرهای طراحی بهینه را نشان می دهد. مقدار توابع هدف به ازای متغیرهای بهینه به دست آمده از الگوریتم بهینه سازی، بر اساس مدل سطح پاسخ در جدول آورده شده است. همچنین مقدار توابع هدف به ازای متغیرهای مذکور، در شبیه سازی اجزای محدود نیز آنالیز شده اند و با مقادیر بدست آمده از مدل سطح پاسخ مقایسه شده اند.

همانطور که در نمودار حد شکل دهی در شکل ۱۰ نشان داده شده است، قطعه بهینه شده از نظر گسیختگی در منطقه ایمن قرار دارد.

۶- قالب، تجهیزات و شرایط آزمایشگاهی

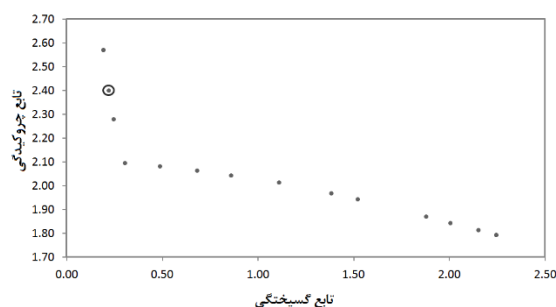
قالب ساخته شده بر اساس نتایج جدول ۳ در شکل ۱۱ نشان داده شده است. سنبه و ماتریس قالب از جنس فولاد CK45 ساخته شده است. فولاد ساده کربنی CK45 با توجه به خواص خوب مکانیکی و متالورژی آن قیمت نسبتا مناسبی دارد. برای انجام عملیات کشش نیز از پرس ۱۰۰ تن هیدرولیک استفاده شده است. لازم به ذکر است که برای تنظیم فشار هیدرولیک نیروی ورقگیر بر سطح مقطع پیستون مربوطه تقسیم شده است.



شکل ۱۰- نمودار حد شکل دهی قطعه گل سپر نیسان



شکل ۱۱- قالب ساخته شده گل سپر نیسان



شکل ۹- راه حل های بهینه پارتو

جدول ۳- مقادیر متغیرهای طراحی و توابع هدف

متغیرها	مقدار بهینه بدست آمده بر اساس مدل سطح پاسخ	مقدار بهینه تعیین شده با استفاده از آنالیز اجزای محدود
نیروی ورقگیر	۵۹۹/۹۸	۵۹۹/۹۸
شعاع بید ۲-۱	۹/۸۱۸۲۳	۹/۸۱۸۲۳
شعاع بید ۵-۳	۹/۶۱۳۱۱۴	۹/۶۱۳۱۱۴
تابع گسیختگی	۰/۲۱۷۸۸۹	۰
تابع چروکیدگی	۲/۴۰۰۷۵۲	۳/۹۴۱۲۴۳۴

۷- نتیجه‌گیری

گسیختگی و چروکیدگی عیوب برجسته فرآیند شکل دهی ورق می‌باشند. وجود این عیوب ممکن است به کیفیت سطح آسیب بزند، دقت ابعادی را کاهش دهد، باعث ترک محلی شود و در مجموع باعث ایجاد ضایعات شود. در راستای بهبود کیفیت محصول و کاهش هزینه، تکنیک‌های بهینه سازی متنوعی بطور موفقیت آمیزی به فرآیند شکل دهی ورق اعمال شده اند. مشاهده شده است که همیشه روابط ناسازگاری بین این توابع هدف وجود دارد و کمینه سازی تمامی آنها بصورت توأم تقریباً غیر ممکن است.

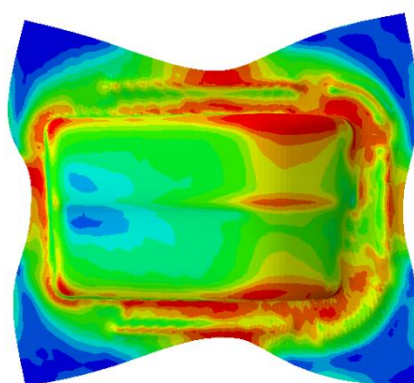
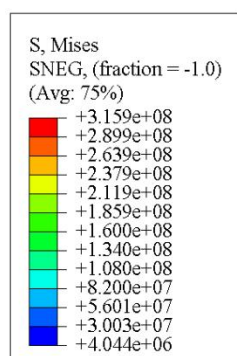
شکل ۱۲ کانتور تنش قطعه کشیده شده و نمونه عملی تولید شده را نشان می‌دهد. پس از بهینه سازی، مقدار عددی تابع هدف گسیختگی به صفر رسیده است، که مشخص می‌کند در قطعه کشیده شده هیچگونه گسیختگی روی نداده است. مقدار تابع چروکیدگی صفر نشده است که این به طبیعت ناسازگاری توابع هدف و تعریف تابع چروکیدگی بر می‌گردد. در واقع می‌توان نتیجه گرفت که تابع هدف چروکیدگی با ضریب اطمینان تعریف شده است و تابع هدف مذکور می‌توانست با شیب کمتری نیز تعریف شود. اگرچه با وجود این مساله، هیچ چروکیدگی در لبه قطعه دیده نمی‌شود و با روش به کار گرفته شده چروکیدگی در قطعه بهینه رخ نداده است.

با توجه به شکل‌های ۱۰ و ۱۲ و همچنین بر اساس پارامترهای بهینه سازی، قطعه گل سپر با موفقیت تحت

کشش قرار گرفته که این نشان دهنده کاهش چشمگیر و همزمان توابع هدف توسط روش بهینه سازی ارائه شده است. در ضمن تعریف یک حاشیه اطمینان برای منحنی حد گسیختگی نیز باعث افزایش قابلیت اطمینان فرآیند شکل دهی قطعه گل سپر شده است. همچنین الگوریتم بهینه سازی معرفی شده در یک مرحله و با موفقیت روی توابع هدف تخمینی اعمال شده است.

در این پژوهش نشان داده شده است که روش الگوریتم ژنتیک چند هدفه می‌تواند تمامی راه حل‌های بهینه پارتو را تنها در یک مرحله جستجوی کلی و بدون ترکیب توابع هدف به یک تابع منفرد، بدست آورد. بنابراین با بررسی روش پیشنهادی از طریق ترکیب آنالیز اجزای محدود، طراحی آزمایش، مدل سطح پاسخ و الگوریتم ژنتیک چند هدفه، این روش در شکل دهی ورق بسیار موثر و کاربردی شناخته شد. روش بررسی شده در این پژوهش به طراح امکان زمان تحلیل کوتاه تر و نتایج طراحی دقیق تر نسبت به روش‌های بهینه سازی قدیمی تر را می‌دهد.

کار ارائه شده توسط ساخت قالب به صورت عملی تایید شده است و می‌توان روش ارائه شده را می‌توان به طراحی دیگر فرآیند‌های کشش برای تعیین محصول مطلوب بسط داد، و از آن در بهینه سازی این فرآیند‌ها در شرایط متفاوت نیز بهره گرفت.



شکل ۱۲- کانتور تنش قطعه گل سپر نیشان و نمونه عملی تولید شده

۸- مراجع

- [13] Hu W, Yao LG, Hua ZZ (2008) Optimization of sheet metal forming processes by adaptive response surface based on intelligent sampling method. *J Mater Process Tech* 197: 77-88.
- [14] Jansson T, Nilsson L (2006) Optimizing sheet metal forming processes – using a design hierarchy and response surface methodology. *J Mater Process Tech* 178: 218-233.
- [15] Jansson T, Andersson A, Nilsson L (2005) Optimization of draw-in for an automotive sheet metal part: an evaluation using surrogate models and response surfaces. *J Mater Process Tech* 159: 426-434.
- [16] Guangyong S, Guangyao L, Zhihui G, Xiangyang C, Xujing Y, Qing L (2010) Multiobjective robust optimization method for drawbead design in sheet metal forming. *Mater Design* 31: 1917-1929.
- [17] Konak A, Coit DW, Smith AE (2006) Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial. *Reliab Eng Syst Safe* 91(9): 992-1007.
- [18] Farhang-Mehr A, Azarm S (2002) Entropy-based multi-objective genetic algorithm for design optimization. *Struct Multidiscip O* 24: 351-361.
- [19] Hiroyasu T, Miki M, Kamiura J, Watanabe S, Hiroyasu H (2002) Multi-objective optimization of diesel engine emissions and fuel economy using genetic algorithms and phenomenological model. SAE paper no. 2002-01-2778.
- [20] Kasprzak EM, Lewis KE (2001) Pareto analysis in multiobjective optimization using the collinearity theorem and scaling method. *Struct Multidiscip O* 22: 208-218.
- [21] Liu W, Yang Y (2008) Multi-objective optimization of sheet metal forming process using Pareto-based genetic algorithm. *J Mater Process Tech* 208: 499-506.
- [22] Kahhal P, Ahmadi SY, Deilami H (2013) Multi-objective optimization of sheet metal forming die using genetic algorithm coupled with RSM and FEA. *J Fail Anal Prev* 13(6): 771.
- [23] Hosford WF, Caddel RM (2007) *Metal Forming Mechanics and Metallurgy*. Cambridge University Press, chapter 15, 241-244.
- [۲۴] صفری، م (۱۳۸۸) بررسی تجربی و شبیه سازی اجزای محدود اثر نرخ کرنش بر نمودار حد شکل دهی ورق آلومینیومی ۳۰۵. پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد، بابل، دانشگاه مازندران.
- [۲۵] ایری، د (۱۳۸۷) اصول پرسکاری و طراحی قالب پرس. ترجمه مسعود رخس خورشید، انتشارات جهان نو.
- [1] Makinouchi A (1996) Sheet metal forming simulation in industry. *J Mater Process Tech* 60: 19-26.
- [2] Panthi SK, Ramakrishnan N, Pathak KK, Chouhan JS (2007) An analysis of springback in sheet metal bending using finite element method (FEM). *J Mater Process Tech* 186: 120-124.
- [3] Dong HZ, Lin ZQ (2000) Investigation of sheet metal forming by numerical simulation and experiment. *J Mater Process Tech* 103: 404-410.
- [4] Ohata T, Nakamura Y, Katayama T, Nakamachi E, Nakano K (1996) Development of optimum process design system by numerical simulation. *J Mater Process Tech* 60: 543-548.
- [5] Guo YQ, Batoz JL, Naceur H, Bouabdallah S, Mercier F, Barlet O (2000) Recent developments on the analysis and optimum design of sheet metal forming parts using a simplified inverse approach. *Comput Struct* 78: 133-148.
- [6] Naceur H, Guo YQ, Batoz JL, Knopf-Lenoir C (2001) Optimization of drawbead restraining forces and drawbead design in sheet metal forming process. *Int J Mech Sci* 43: 2407-2434.
- [7] Kayabasi O, Ekici B (2007) Automated design methodology for automobile side panel die using an effective optimization approach. *Mater Design* 28: 2665-2672.
- [8] Chen L, Yang JC, Zhang LW, Yuan SY (2007) Finite element simulation and model optimization of blankholder gap and shell element type in the stamping of a washing-trough. *J Mater Process Tech* 182: 637-643.
- [9] Azaouzi M, Naceur H, Delameziere A, Batoz JL, Belouettar S (2008) An Heuristic optimization algorithm for the blank shape design of high precision metallic parts obtained by a particular stamping process. *Finite Elem Anal Des* 842-850.
- [10] Khalili Kh, Kahhal P, Eftekhari Shahri E, Khalili MS (2011) Blank optimization in elliptical-shaped sheet metal forming using response surface model coupled by reduced basis technique and finite element analysis. *Key Eng Mat* 473: 683-690.
- [11] Huang Y, Lo ZY, Du R (2006) Minimization of the thickness variation in multi-step sheet metal stamping. *J Mater Process Tech* 177: 84-86.
- [12] Ohata T, Nakamura Y, Katayama T, Nakamachi E (2003) Development of optimum process design system for sheet fabrication using response surface method. *J Mater Process Tech* 143-144: 667-672.