http://mme.modares.ac.ir

مجله علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

آذر ۱۳۹۲، دوره ۱۳ شماره ۹ ص‌ص ۴۷-۵۷

مقاله پژوهشی کامل
تاریخ دریافت ۹۱/۱۱/۹
تاریخ پذیرش ۹۲/۱/۱۵
ارائه در سایت ۹۲/۶/۳۰

بهینه‌سازی چند هدفه قالب شکل‌دهی ورق با استفاده از آنالیز اجزا محدود همراه با مدل سطح پاسخ

پرویز کحال[۱]، سید یوسف احمدی بروغنی[۲*]، حامد دیلمی عضدی[۳]

۱- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند
۲- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند
۳- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک
* بیرجند، صندوق پستی ۹۷۱۷۵/۶۱۵، syahmadi@birjand.ac.ir

چکیده- این پژوهش یک روش را برای کمک به مهندسین در بهینه‌سازی شکل‌دهی ورق شرح می‌دهد که در آن از مدل سطح پاسخ همراه الگوریتم ژنتیک چند هدفه بر پایه جبهه پارتو، استفاده شده است. در بسیاری از مقاله‌ها، برای دست‌یابی به پارامترهای بهینه فرایند شکل‌دهی ورق، مسأله چند هدفه به یک مسأله تک هدفه تبدیل شده و سپس از آنالیز اجزا محدود و تکنیک بهینه‌سازی استفاده شده است. در این پژوهش هدف کمینه کردن توابع ناسازگار گسیختگی و چروکیدگی به صورت همزمان بوده است. متغیرهای طراحی نیروی ورقگیر و هندسه بیدهای کششی (طول و قطر) در نظر گرفته شده اند. برای طراحی فضای آزمایش و پیدا کردن رابطه بین متغیرها و توابع هدف از مدل سطح پاسخ استفاده شده است. همچنین منحنی حد شکل‌دهی برای تعریف توابع هدف به کار گرفته شده است. برای شبیه‌سازی فرایند از آنالیز اجزا محدود استفاده شده است. روش ارائه شده روی یک فنجان صلیبی شکل کشیده شده بررسی شده و این روش موثرتر و دقیقتر از روش سنتی آنالیز اجزا محدود و آزمون و خطا مشاهده شده است.

کلیدواژگان: بهینه‌سازی چند هدفه، شکل‌دهی ورق، مدل سطح پاسخ، الگوریتم ژنتیک، منحنی حد شکل‌دهی.

Multi-objective optimization of sheet metal forming die using FEA coupled with RSM

P. Kahhal[1], S. Y. Ahmadi Brooghani[2*], H. D. Azodi[3]

1- PhD. Student., Mech. Eng., Birjand Univ., Birjand, Iran
2- Assist. Prof., Mech. Eng., of Arak Univ. of Tech. Arak, Iran
3- Assist. Prof., Mech. Eng., Arak Univ. of Tech., Arak, Iran.
* P.O.B. 97175/615, Birjand, Iran. syahmadi@birjand.ac.ir

Abstract- Present study describes the approach of applying Response Surface Methodology (RSM) with a Pareto-based multi-objective genetic algorithm to assist engineers in optimization of sheet metal forming. 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 (length and Diameter). Response surface model has been used for design of experiment and finding relationships between variables and objective functions. Forming Limit Curve (FLC) has been used to define the objective functions. Finite element analysis applied for simulating the forming process. Proposed approach has been investigated on a cross-shaped cup drawing case and it has been observed that it is more effective and accurate than traditional finite element analysis methods and the 'trial and error' procedure.

Keywords: Multi-Objective Optimization, Sheet Metal Forming, Response Surface Model, Genetic Algorithm, Forming Limit

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.9.3.1]

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، شبیه‌سازی‌های عددی به یک ابزار قدرتمند در پیش‌بینی قابلیت شکل‌دهی فرایند کشش عمیق و طراحی قطعات جدید با هندسه سه بعدی پیچیده تبدیل شده است. مزیت مدل‌سازی اجزا محدود[1] کاهش هزینه‌های تولید از طریق پیش‌بینی عیوب قطعه مانند بازگشت فنری، پارگی، چروکیدگی، کمانش، خطاهای شکل و همچنین بهینه‌سازی پارامترهای فرایند، است.

با این حال، برای دست‌یابی به کیفیت خوب محصول و قابلیت اعتماد بالای فرایند، روش آنالیز اجزا محدود باید به صورت دستی و با ترکیب‌های مختلفی از پارامترهای فرایند، بارها تکرار شود. علاوه بر این، برای مهندسین در نظر گرفتن تعداد زیادی از پارامترها برای یک مسأله پیچیده بسیار مشکل می‌شود، زیرا روش اجزا محدود روشی وقت گیر است و بستگی زیادی به تجربه کاربر دارد. بنابر این در راستای نیاز به کاهش زمان طراحی، کاهش هزینه پیشرفت، و کاهش وزن قطعات، وجود یک روش موثرتر و دقیق‌تر برای بهبود شرایط طراحی موجود ضروری است.

بسیاری از محققان از شبیه‌سازی عددی و روش‌های بهینه‌یابی در شکل‌دهی ورق استفاده نموده‌اند. در این راستا، ماکینوچی [۱] با موفقیت از روش اجزا محدود برای پیش‌بینی عیوب گسیختگی، چروکیدگی و بازگشت فنری ورق استفاده کرده است. اوهاتا و همکاران [۲] با یک‌پارچه‌سازی روش جاروبی ساده[2] و آنالیز اجزا محدود حرکت سنبه و مراحل شکل‌دهی را بهینه‌سازی کردند تا به یک توزیع ضخامت یکنواخت برسند. گو و همکاران [۳] یک روند معکوس را با یک روش برنامه‌نویسی درجه دوم متوالی[3] ترکیب کردند تا شکل گرده اولیه را بهینه کنند. ناصر و همکاران [۴] از یک الگوریتم ریاضی در روند معکوس استفاده کردند تا نیروهای محدود کننده و بنابراین طراحی بید کششی را بهینه‌سازی کنند. کایاباسی و اکیسی [۵] سه روش آنالیز اجزا محدود، مدل سطح پاسخ[4] و الگوریتم ژنتیک را ترکیب کرده‌اند تا مناسبترین مقادیر را برای پارامترهای فرایند شکل‌دهی به دست آورند. چن و همکاران [۶] اثرات گپ ورق گیر و نوع المان پوسته‌ای را روی قابلیت شکل‌پذیری یک سینک شستشو بررسی کرده‌اند. آزازی و همکاران [۷] یک روند طراحی اتوماتیک از نرم افزارهای اجزا محدود را توسعه دادند و یک الگوریتم بهینه‌سازی اکتشافی[5] تطبیقی را برای طراحی شکل گرده اولیه قطعات فلزی با دقت بالا در یک فرایند استمپینگ خاص ارائه دادند. خلیلی و همکاران [۸] از ترکیب مدل سطح پاسخ و تکنیک کاهش اشکال پایه برای به دست آوردن شکل گرده اولیه بهینه بدون نیاز به دوره بری استفاده کرده اند. هانگ و همکاران [۹] از مدل سطح پاسخ برای بهینه‌سازی سطوح میانی ابزار در فرایند استمپینگ چند مرحله ای ورق استفاده کرده‌اند تا کیفیت بالاتری برای محصول نهایی به دست آورند. اوهاتا و همکاران [۱۰] از مدل سطح پاسخ برای بهینه‌سازی دمای آنیلینگ و زمان رسیدن به یکنواختی ضخامت قطعه استمپ شده استفاده کرده اند. هو و همکاران [۱۱] یک روش سطح پاسخ انطباقی را برای طراحی شکل گرده اولیه و نیروی ورق‌گیر به کار برده‌اند تا به ضخامت ورق یکنواخت دست یابند، و به نتایج قابل ملاحظه‌ای رسیده‌اند.

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 شکل‌دهی ورق یک مسأله چند هدفه با روابط ناسازگار بین توابع هدف می‌باشد که در این زمینه تحقیقات زیادی انجام شده است. جانسون و همکاران [۱۲] مدل سطح پاسخ را برای بهینه‌سازی نیروی محدود کننده بید کششی به کار برده‌اند که ترکیب این روش با یک تکنیک نگاشت فضایی به طور قابل ملاحظه‌ای راندمان محاسبات را افزایش داده است. آنها این روش را بعداً با استفاده از مدل سطح پاسخ تکراری بهبود بخشیدند [۱۳]. گوانک یونگ و همکاران [۱۴] از ترکیب مدل Curve.

1. Finite Element Model
2. Sweeping Simplex Method
3. Sequential Quadratic Programming (SQP)
4. Response Surface Model (RSM)
5. Heuristic Optimization Algorithm (HOA)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.9.3.1]

سطح پاسخ دوگانه و اصل شش سیگما با بهینه‌یابی ازدحام ذره[1] برای بهینه کردن طراحی بیدهای کششی استفاده نمودند.

پژوهش‌های مذکور در مسأله بهینه‌سازی چند هدفه، از تبدیل مسأله به یک مسأله 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 بهینه‌سازی به شدت به این ضرایب حساس می‌باشند. مشکل دیگر این است که هر دسته از این ضرایب تنها به یک راه حل بهینه ختم می‌شوند، فهمیدن این که راه حل پیدا شده، بهینه واقعی است، مشکل می‌باشد.

در زمینه طراحی مهندسی، اخیراً توجه ویژه‌ای به الگوریتم ژنتیک چند هدفه[2] شده است که از فرایند طبیعی انتخابی تقلید می‌کند که در آن مخلوقات برتر هم‌زمان با تولید نسل جدید، مخلوقات نامرغوب را از جمعیت خود بیرون می‌کنند [۱۵-۱۷].

بسیاری از مزایای الگوریتم ژنتیک چند هدفه قابل توجه هستند [۱۸]، از قبیل قابلیت کاوش در یک فضای طراحی بزرگ و این که به اطلاعات گرادیان نیازی ندارد. اما مهمترین آنها این است که الگوریتم ژنتیک چند هدفه می‌تواند چندین تابع هدف مستقل را در یک اجرای بهینه‌سازی، به‌طور هم‌زمان و بدون تبدیل توابع هدف چندگانه به یک تابع هدف، بهینه نماید. بنابر این، الگوریتم ژنتیک چند هدفه می‌تواند برای مسائل بهینه‌سازی چند هدفه غیرخطی مانند شکل‌دهی ورق به کار گرفته شود.

برخی پژوهش‌ها با اجرای الگوریتم ژنتیک چند هدفه به نتایج خوبی دست یافته‌اند [۱۹]، اما در این پژوهش‌ها به جای هندسه بید کششی از نیروهای بازدارنده روی بید استفاده شده است که در اغلب شرایط آزمایشگاهی عملی نیست.

در این پژوهش، بخش دوم به بررسی مدل بهینه‌سازی چند هدفه خواهد پرداخت، بخش سوم درباره روند الگوریتم ژنتیک چند هدفه، و بخش چهارم درباره مدل در نظر گرفته شده بحث می‌شود و بخش‌های پنجم و ششم نتایج مورد استفاده را بررسی و درباره روش مورد استفاده نتیجه‌گیری خواهند کرد.

۲- مدل بهینه‌سازی چند هدفه

هدف از این بهینه‌سازی به دست آوردن بهترین ترکیب از پارامترهای فرایند یا متغیرهای هندسی طراحی است که طراح را به سوی یک ورق شکل داده شده بدون هیچ کدام از عیوب گسیختگی و چروکیدگی، هدایت می‌کند. فرایند بهینه‌سازی شکل‌دهی ورق را می‌توان به صورت زیر فرموله کرد:

کمینه‌سازی:

$$F(X) = (f_1(x_1), f_2(x_2), \ldots, f_j(x_i)), \quad j = 1, 2, \ldots, m \qquad (۱)$$

تحت قیود:

$$b_i^{lower} \le x_i \le b_i^{upper}, \; i = 1, 2, \ldots, n$$
$$g_k(x_i) \le 0, \; k = 1, 2, \ldots, p \qquad (۲)$$

که x_i متغیر طراحی iام، b_i^{lower} و b_i^{upper} کران‌های پایین و بالای x_i، $f_j(x_i)$ تابع هدف jام مربوط به x_i و $g_k(x_i)$ تابع قید kام مربوط به x_i می‌باشند.

۲-۱- متغیرهای طراحی

در شکل‌دهی ورق، نیروی ورق‌گیر[3] و پارامترهای هندسی بید کششی (قطر[4] و طول[5]) روی قابلیت فرم‌دهی بسیار مؤثرند، زیرا زیرا نیروی ورق‌گیر و بیدهای کششی روی آن باعث توزیع فشار یکنواخت و محدود کردن جریان ورق به داخل قالب می‌شوند. در این پژوهش نیروی ورق‌گیر و پارامترهای هندسی بید کششی (قطر و طول) به عنوان متغیرهای طراحی و بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند.

۲-۲- توابع هدف

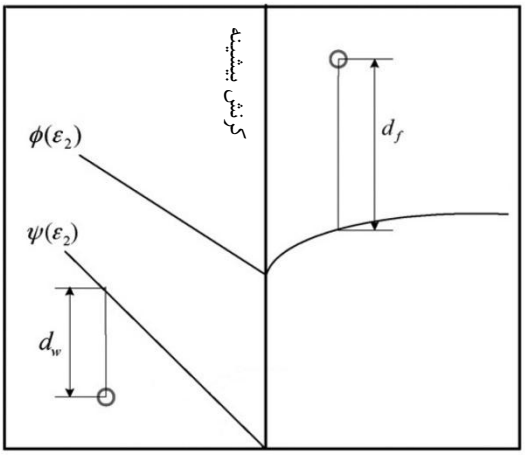
به منظور جلوگیری از وقوع عیوب شکل‌دهی، برای این عیوب در شکل‌دهی ورق باید معیارهایی تعریف کرد. در این پژوهش برای تعریف این معیارها از مقادیر کرنش‌های به دست آمده المان‌ها در آنالیز اجزا محدود استفاده شده است که در ادامه توضیح داده شده‌اند.

۲-۱-۱- گسیختگی[6]

1. Particle Swarm Optimization
2. Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA)
3. Blank Holder Force (BHF)
4. Drawing Bead Diameter (DBD)
5. Drawing Bead Length (DBL)
6. Fracture

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.9.3.1]

هنگامی که کرنش‌های بیشینه برخی المان‌ها در بالای منحنی حد شکل‌دهی (خط $\psi(\varepsilon_2)$) 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 فاصله تمام المان‌ها به عنوان تابع گسیختگی در نظر گرفته شده است:



شکل ۱ شماتیک تعریف توابع هدف [۱۹]

$$Obj_f = \begin{cases} \sum_{i=1}^{n}(d_f^i)^2 \\ \quad = \sum_{i=1}^{n}(\varepsilon_1^i - \varphi(\varepsilon_1^i)^2) & \varepsilon_1^i > \varphi(\varepsilon_2^i) \\ 0 & \varepsilon_1^i \le \varphi(\varepsilon_2^i) \end{cases} \quad (۳)$$

در این پژوهش منحنی حد شکل‌دهی[1] توسط آزمایش کشش خارج از صفحه (سنبه نیم کروی) روی ورق به دست آمده است.

۲-۱-۲- چروکیدگی[2]

به‌طور 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 (۴) محاسبه شده است:

$$Obj_w = \begin{cases} \sum_{i=1}^{n}(d_w^i)^2 \\ \quad = \sum_{i=1}^{n}(\varepsilon_1^i - \psi(\varepsilon_2^i))^2 & \varepsilon_1^i < \psi(\varepsilon_2^i) \\ 0 & \varepsilon_1^i \ge \psi(\varepsilon_2^i) \end{cases} \quad (۴)$$

۳- الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه

شکل‌دهی ورق یک مسأله 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[3] استفاده شده است و همچنین الگوریتم ژنتیک[4] و جبهه پارتو[5] برای انجام بهینه‌سازی ترکیب شده‌اند.

در الگوریتم ژنتیک معمولی یک جمعیت تصادفی از ژن‌ها (افراد) در فضای حالت توزیع شده و نتایج شایستگی[6] آنها ارزیابی می‌شود. سپس بهترین‌ها باقی می‌مانند (انتخاب می‌شوند) و یک جمعیت جدید تولید می‌شود (تکثیر)، با ترکیب عملگرهای جهش[7] و تقاطع[8] دسته جدیدی از ممکن‌ها ممکن‌ها (تغییرات) به دست 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.

در الگوریتم ژنتیک چند هدفه تقریباً همین کار انجام می‌شود، به جز این که 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 کرد. برای این منظور، از راه حل بهینه پارتو استفاده شده است.

برای یک مسأله کمینه‌سازی، جواب عملی x^* یک راه حل بهینه پارتو است اگر و تنها اگر هیچ گونه راه حل عملی x دیگری به صورت رابطه (۵) وجود نداشته باشد.

۵۰

1. Forming Limit Curve (FLC)
2. Wrinkle
3. Design of Experiment (DOE)
4. Genetic Algorithm (GA)
5. Pareto Front
6. Fitness
7. Mutation
8. Crossover

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]

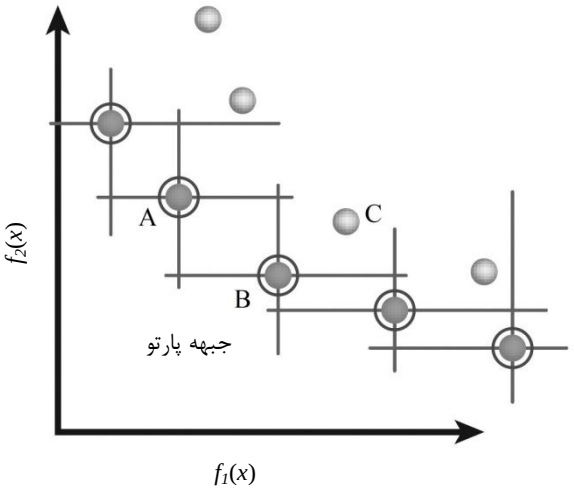
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.9.3.1]

$$f_i(x) \le f_i(x^*) \qquad i=1,2,\ldots,n \qquad (۵)$$

و حداقل یک j، ($1 \le j \le n$) در معادله (۶) صدق کند.

$$f_j(x) < f_i(x^*) \qquad (۶)$$

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



شکل ۲ جبهه پارتو [۱۷]

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.

۳-۱- روند بهینه‌سازی

روند مسأله بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک چند هدفه را می‌توان 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

روش‌های سطح پاسخ در مواقعی به کار گرفته می‌شوند که تصمیم گیرنده می‌خواهد: ۱- پیش‌بینی تقریباً دقیق از رابطه ورودی و خروجی یک سیستم مهندسی به دست آورد و ۲- کل سیستم در حال طراحی را بهینه یا تنظیم کند. در بسیاری از کاربردهای سطح پاسخ، چه خطی و چه درجه دو فرض این است که مقادیر پاسخ مشاهده شده دقیقاً مدل می‌شوند. اگرچه این فرض برای تمای حالت‌ها درست نخواهد بود، ولی روش سطح پاسخ در صورت استفاده از چند جمله‌ای‌های درجه سه و بالاتر و وجود چندین متغیر به روشی گرانقیمت تبدیل خواهد شد. به علاوه مدل‌های چند جمله‌ای درجه سه یا بالاتر ممکن است شامل یک یا چند نقطه عطف باشند. در بهینه‌سازی‌های عددی بر مبنای گرادیان، ممکن است مسأله به جای همگرا شدن به یک بهینه محلی یا کلی، به نقطه عطف همگرا شود.

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

$$y^{(p)} = c_o + \sum_{1 \le j \le n_v} c_j \; x_j^{(p)} + \sum_{1 \le j \le k \le n_v} c_{(n_v - 1 + j + k)} \; x_j^{(p)} X_k^{(p)} \qquad (۷)$$

که $y(p)$ پاسخ، $X^{(p)}_j$ و $X^{(p)}_k$ متغیرهای طراحی شماره n_v و c_o، c_j و $c_{(nv-1+j+k)}$ ضرایب مجهول چند جمله‌ای می‌باشند.

ساختن این مدل‌های جانشین نیاز به چند نمونه برای ساختاربندی سطح پاسخ مربوط به فرایند کشش دارد، و این نمونه‌ها می‌توانند توسط روش‌های طراحی آزمایش، از قبیل مراحل‌هالتون[1]، فرا مکعب لاتین[2]، روش تاگوچی[3] و طراحی کلاسیک[4]، تولید شوند. روش طراحی آزمایش یک ابزار قدرتمند در طراحی و تحلیل مسائل طراحی صنعتی پیچیده می‌باشد و می‌تواند به درک مشخصه‌های فرایند و بررسی اثر ورودی‌ها روی پاسخ خروجی کمک کند. به علاوه، می‌تواند به صورت سیستماتیک پارامترهای بهینه فرایند را با تعداد تست‌های کمتر، تعیین نماید.

در این پژوهش از یک طراحی کلاسیک بنام فاکتوریل کامل[5] برای طراحی آزمایش استفاده شده و یک مدل درجه دو دو برای ساختن مدل سطح پاسخ به کار رفته است.

1. Halton Sequence
2. Latin Hypercube Design (LHD)
3. Taguchi Method
4. Classic Design
5. Full Factorial

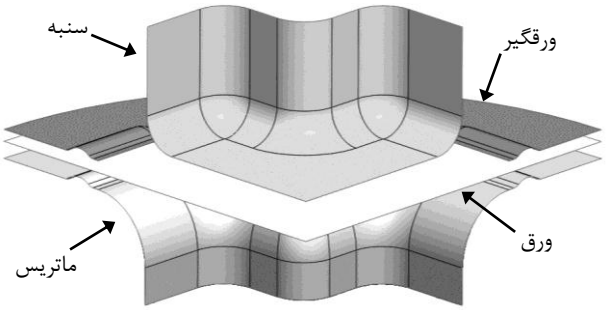
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.9.3.1]

۴- مورد مطالعه

۴-۱- مدل اجزا محدود

در راستای بهبود قابلیت اعتماد فرایند بهینه‌سازی، از تحلیل اجزا محدود دینامیکی صریح برای شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی ورق استفاده شده است. در شبیه‌سازی اجزا 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.

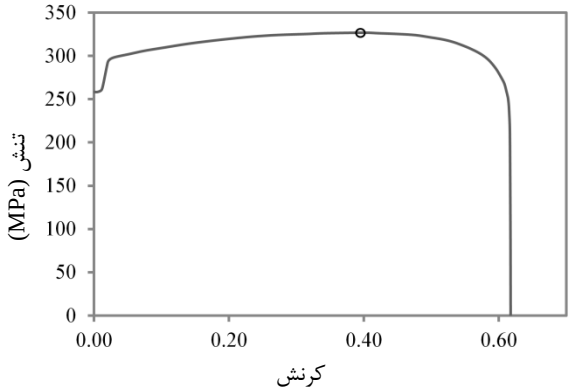
در این پژوهش یک فنجان صلیبی شکل به عنوان مورد مطالعه انتخاب شده است و مدل اجزا محدود آن در شکل ۳ نشان داده شده است. ماده انتخاب شده برای ورق فولاد St14 می‌باشد. خصوصیات ماده ورق در جدول ۱ آورده شده اند. خصوصیات و کارسختی ماده ورق توسط آزمون کشش تک محوری به دست آمده است که نمودار تنش-کرنش حقیقی به دست آمده در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳ مدل اجزا محدود فنجان صلیبی شکل

جدول ۱ خصوصیات مکانیکی فولاد St14

مدول یانگ (GPa)	۲۰۰
ضریب پوآسون	۰/۳
استحکام تسلیم (MPa)	۱۸۵
استحکام نهایی (MPa)	۳۲۷



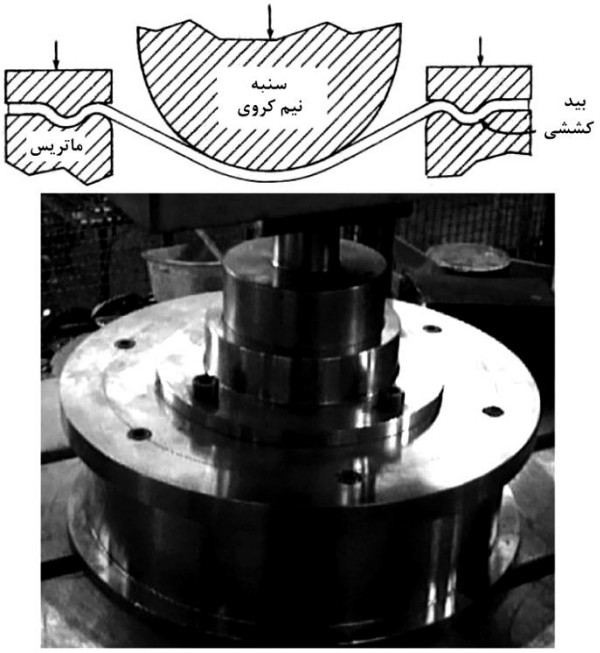
شکل ۴ نمودار تنش-کرنش حقیقی فولاد St14

نمودار حد شکل‌دهی برای گسیختگی توسط آزمایش کشش خارج از صفحه (سنبه نیم کروی) روی ورق به دست آمده است [۲۱،۲۰] که شماتیک و نمونه قالب ساخته شده در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. برای ایجاد مسیرهای کرنش متفاوت از هشت نمونه ورق با هندسه‌های مختلف استفاده شده است که با استفاده از مهر ژلاتینی دوایر با قطر خارجی ۵ میلی‌متر و قطر داخلی ۴ میلی‌متر روی ورق منقوش شده‌اند. پس از کشش و پارگی اولیه نمونه‌ها از روی دوایر تغییر شکل داده شده، با فاصله ۱/۵ برابر قطر دایره اولیه از منطقه پارگی، کرنش‌های کششی و فشاری اندازه‌گیری شده‌اند تا نمودار حد شکل‌دهی برای گسیختگی به دست آید.

المان پوسته‌ای چهار گرهی[1] با دانه‌بندی[2] ۴ میلی‌متر برای شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی ورق به کار گرفته شده است و تعداد المان‌ها در مش ۵۷۹۵ می‌باشد. ابزارها به صورت صلب و بدون هیچ گونه تغییر شکل الاستیکی در نظر گرفته شده‌اند و با المان پوسته‌های چهار گرهی[3] مش‌بندی شده اند. ابزارها در مناطق دارای انحنا ریزتر مش‌بندی شده‌اند.

1. S4R Quad-Dominated
2. Seeds
3. R3D4

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.9.3.1]



شکل ۵ شماتیک و نمونه قالب آزمایش کشش خارج از صفحه

ورق‌گیر با سرعت ۶ m/s از بالا به سمت ماتریس حرکت کرده و متوقف می‌شود، سپس سنبه با سرعت ۹ m/s به سمت پایین حرکت می‌کند.

برای مدل‌سازی تماس، حالت سطح به سطح[1] 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. به علت تقارن قطعه، یک چهارم آن مدل‌سازی شده است. شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس[2] انجام شده است.

۴-۲- مدل بهینه‌سازی

برای بهینه‌سازی شکل‌پذیری فرایند شکل‌دهی ورق، نیروی ورق‌گیر و پارامترهای هندسی بیدهای کششی (قطر و طول) 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.

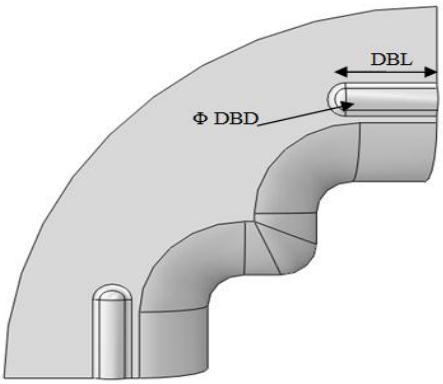
مسأله بهینه‌سازی را می‌توان به صورت مدل غیر خطی زیر توصیف کرد:

کمینه سازی:

$$F(x) = (Obj_w , Obj_f) \qquad (۸)$$

تحت قیود:

$$30 \le BHF \le 100\,(\text{kN})$$
$$50 \le DBL \le 80\,(\text{mm})$$
$$15 \le DBD \le 40\,(\text{mm}) \qquad (۹)$$



شکل ۶ پارامترهای هندسی بیدهای کششی

۴-۳- روند بهینه‌سازی

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

گام ۱- مدل اولیه: مدل اجزا محدود و مدل بهینه‌سازی اولیه برای شرایط اولیه راه‌اندازی شده و پارامترهای زیر برای مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک چند هدفه در نظر گرفته می‌شوند:

(۱) اندازه جمعیت[3] $P = 45$،

(۲) احتمال تقاطع[4] $P_c = 0.8$،

(۳) احتمال جهش[5] $P_m = 0.35$،

(۴) کسر مهاجرت[6] $P_g = 0.2$،

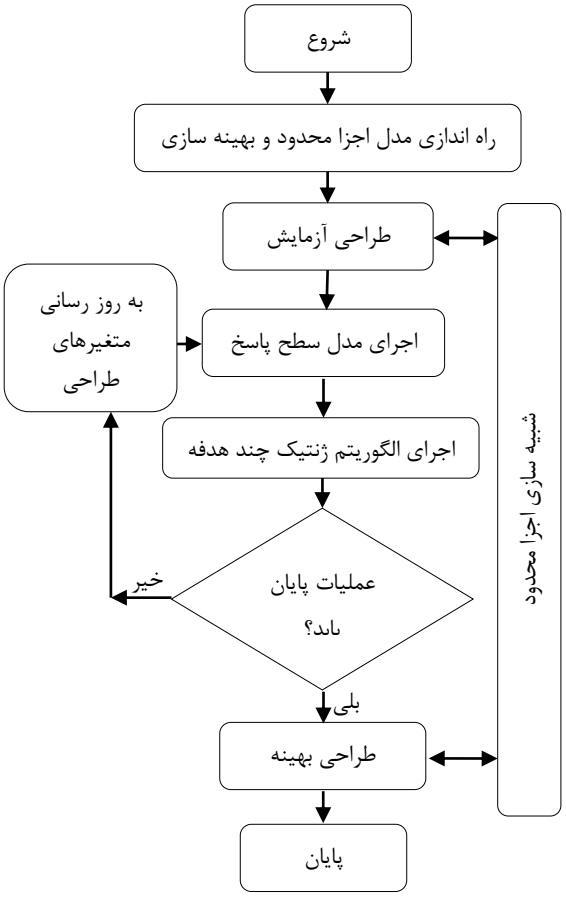
(۵) کسر جمعیت جبهه پارتو[7] $P_p = 0.35$،

(۶) شرط اتمام تولید نسل[8] $T = 600$.

1. Surface to Surface Contact
2. ABAQUS/CAE

3. Population Size
4. Crossover Probability
5. Mutation Probability
6. Migration Fraction
7. Pareto Front Population Fraction
8. Termination Generation

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.9.3.1]



شکل ۷ دیاگرام روند بهینه سازی

در این پژوهش از نرم‌افزار متلب[1] 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 اجزا محدود اجرا شده و توابع هدف برای هر نقطه از ماتریس طراحی آزمایش به دست می‌آیند. ماتریس طراحی آزمایش و نتایج آنالیز اجزا 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 آمده اند:

$$Obj_f = 1.0707 + 0.012428\,BHF - 0.0004656\,DBL - 0.10101\,DBD + 0.00027245\,BHF^2 - 1.9212\times10^{-5}\times BHF\times DBL - 0.0012984\times BHF\times DBD - 1.2534\times10^{-5}\times DBL^2 + 0.00020577\times DBL\times DBD + 0.0025425\times DBD^2 \quad (۱۰)$$

$$Obj_w = 3.613 + 0.029187\,BHF - 0.021877\,DBL + 0.14154\,DBD - 0.00023173\,BHF^2 + 0.00015868\times BHF\times DBL - 0.00035499\times BHF\times DBD + 0.00011581\times DBL^2 + 8.837\times10^{-5}\times DBL\times DBD - 0.0017542\times DBD^2 \quad (۱۱)$$

در این پژوهش از نرم‌افزار متلب برای ساختن مدل سطح پاسخ استفاده شده است.

گام ۴- اجرای الگوریتم ژنتیک چند هدفه: هنگامی که مدل سطح پاسخ ساخته شد، تکنیک بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک چند هدفه را می‌توان برای جستجوی راه حل بهینه پارتو استفاده کرد. در روند بهینه‌سازی نیازی به اجرای آنالیز اجزا 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 بهینه‌سازی متوقف می‌شود و پارامترهای بهینه مورد بررسی قرار می گیرند. در صورت بررسی و رسیدن به نتایج دلخواه فرایند بهینه‌سازی پایان می‌یابد، در غیر این صورت آنالیزهای جدید به نمونه‌های قبلی اضافه شده و الگوریتم به گام سوم بر می‌گردد.

جدول ۲ ماتریس طراحی آزمایش و نتایج آنالیز اجزا محدود

ردیف	نیروی ورق‌گیر (KN)	قطر بید (mm)	طول بید (mm)	تابع چروکیدگی	تابع گسیختگی
۱	۳۰	۱۵	۵۰	۵/۶۳۰۶۴۵	۰
۲	۶۵	۱۵	۵۰	۶/۰۹۰۰۲۷	۰/۳۹۰۳۱۷
۳	۱۰۰	۱۵	۵۰	۴/۷۸۲۷۴۵	۲/۲۴۰۰۹۳
۴	۳۰	۱۵	۶۵	۵/۰۳۳۹۹۱	۰
۵	۶۵	۱۵	۶۵	۶/۳۷۲۴۲۶	۰/۰۳۶۱۳۶
۶	۱۰۰	۱۵	۶۵	۵/۳۵۲۶۲۹	۲/۴۱۱۱۲۸
۷	۳۰	۱۵	۸۰	۴/۶۶۸۰۱	۰
۸	۶۵	۱۵	۸۰	۶/۲۶۴۹۲۹	۰/۰۰۱۷۸۴
۹	۱۰۰	۱۵	۸۰	۵/۸۹۳۰۹۳	۲/۱۶۵۶۵۱
۱۰	۳۰	۲۷/۵	۵۰	۵/۸۵۰۳۵۹	۰
۱۱	۶۵	۲۷/۵	۵۰	۶/۱۴۰۰۷	۰
۱۲	۱۰۰	۲۷/۵	۵۰	۶/۱۶۹۴۶۴	۰/۰۴۵۰۵۵
۱۳	۳۰	۲۷/۵	۶۵	۶/۲۸۷۸۰۳	۰
۱۴	۶۵	۲۷/۵	۶۵	۶/۱۳۰۱	۰

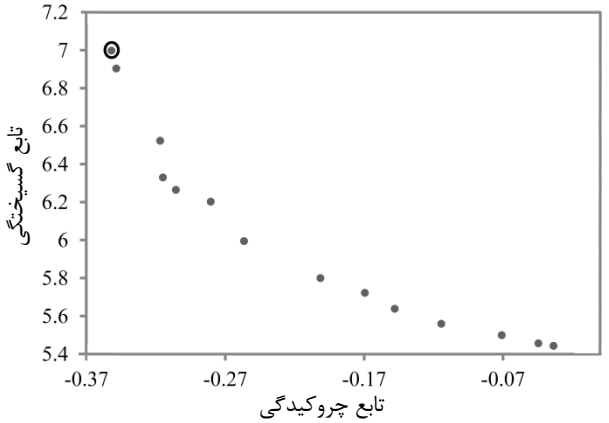
1. MATLAB

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.9.3.1]

۱۵	۱۰۰	۲۷/۵	۶۵	۶/۱۸۱۶۲۹	۰/۰۰۰۴۰۸
۱۶	۳۰	۲۷/۵	۸۰	۶/۳۷۴۸۳۹	۰/۰۰۱۶۲۱
۱۷	۶۵	۲۷/۵	۸۰	۶/۱۴۹۶۲۲	۰
۱۸	۱۰۰	۲۷/۵	۸۰	۶/۳۹۰۸۳	۰/۰۰۰۰۸۱
۱۹	۳۰	۴۰	۵۰	۶/۲۵۳۹۵۱	۰
۲۰	۶۵	۴۰	۵۰	۶/۲۹۹۷۳۵	۰
۲۱	۱۰۰	۴۰	۵۰	۶/۰۹۱۶۰۶	۰
۲۲	۳۰	۴۰	۶۵	۶/۲۰۴۸۰۶	۰
۲۳	۶۵	۴۰	۶۵	۶/۱۷۸۶۴۷	۰
۲۴	۱۰۰	۴۰	۶۵	۶/۱۳۱۷۷۸	۰/۰۰۰۰۱۲
۲۵	۳۰	۴۰	۸۰	۶/۹۹۵۷۱۶	۰
۲۶	۶۵	۴۰	۸۰	۶/۱۰۷۸۱	۰
۲۷	۱۰۰	۴۰	۸۰	۶/۰۶۳۲۱۲	۰

۵- نتایج

پس از ۲۷ بار تکرار آنالیز برای طراحی آزمایش و انجام بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک چند هدفه بر اساس مدل سطح پاسخ، راه حل‌های بهینه پارتو به دست آمد (شکل ۸)، که هر کدام از نقاط نشان داده شده در شکل یک راه حل بهینه پارتو می‌باشد. مقادیر بهینه توابع هدف با یکدیگر ناسازگارند و هیچ نقطه‌ای وجود ندارد که در آن هر دو تابع هدف هم‌زمان کمینه شوند.



شکل ۸ راه حل های بهینه پارتو

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود برای تابع گسیختگی در جبهه پارتو و همچنین رابطه سطح پاسخ مقدار منفی به دست آمده است، در صورتی که تعریف اولیه تابع مذکور طبق رابطه ۳ باید مثبت باشد. علت این مسأله این است که مدل سطح پاسخ برای این تابع یک چند جمله‌ای درجه دوم تقریبی می‌باشد که می‌تواند مقدار منفی نیز داشته باشد (رابطه ۱۰). می‌توان مقدار منفی این تابع را به عنوان میزان عدم تمایل ورق به گسیختگی در نظر گرفت.

در این پژوهش، هر نقطه می‌تواند یک راه حل بهینه باشد و نقطه نشان داده شده در شکل ۸ 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 بهینه‌سازی، بر اساس مدل سطح پاسخ در جدول آورده شده است. همچنین مقدار توابع هدف به ازای متغیرهای مذکور، در شبیه‌سازی اجزا محدود نیز آنالیز شده‌اند و با مقادیر به دست آمده از مدل سطح پاسخ مقایسه شده‌اند.

جدول ۳ مقادیر متغیرهای طراحی و توابع هدف

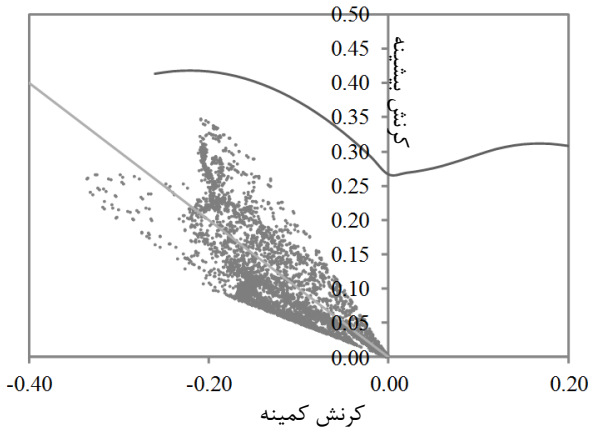
متغیرها	مقدار اولیه	مقدار بهینه به دست آمده بر اساس مدل سطح پاسخ	مقدار بهینه تعیین شده با استفاده از آنالیز اجزا محدود
نیروی ورق‌گیر (kN)	۳۰	۵۱/۹۹۴۵۲۱۳	۵۱/۹۹۴۵۲۱
طول بید (mm)	۵۰	۷۹/۵۴۵۰۳۰۰۱	۷۹/۵۴۵۰۳۰۰۱
قطر بید (mm)	۱۵	۳۰/۰۰۴۰۷۴۹۱	۳۰/۰۰۴۰۷۴۹۱
تابع گسیختگی	۲/۴۱۱۱۲۷	-۰/۳۵۱۹۵	۰
تابع چروکیدگی	۵/۳۵۲۶۲۸	۶/۹۹۸۶۷۵	۶/۲۳۸۸۵۴

همان‌طور که در نمودار حد شکل‌دهی در شکل ۹ نشان داده شده است، قطعه بهینه شده از نظر گسیختگی در منطقه ایمن قرار دارد. شکل ۱۰ نیز کانتور تنش قطعه کشیده شده را نشان می‌دهد.

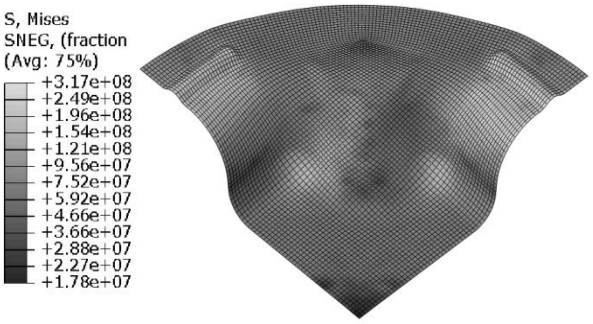
پس از بهینه‌سازی، مقدار عددی تابع هدف گسیختگی به صفر رسیده است، که مشخص می کند در قطعه کشیده شده هیچگونه گسیختگی روی نداده است. با این حال مقدار تابع چروکیدگی به مقدار ۱۶/۵ درصد نسبت به مدل اولیه افزایش یافته است که این به طبیعت ناسازگاری توابع هدف و تعریف تابع چروکیدگی بر می‌گردد، اگرچه با وجود این افزایش، هیچ چروکیدگی در لبه قطعه در شکل ۹ دیده نمی‌شود.

با توجه به شکل‌های ۹ و ۱۰ و همچنین بر اساس پارامترهای بهینه‌سازی، قطعه صلیبی شکل با موفقیت تحت کشش قرار گرفته که این نشان دهنده کاهش چشمگیر و همزمان توابع هدف توسط روش بهینه‌سازی ارائه شده است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.9.3.1]



شکل ۹ نمودار حد شکل دهی قطعه صلیبی شکل



شکل ۱۰ کانتور قطعه صلیبی شکل

۶- نتیجه‌گیری

گسیختگی و چروکیدگی عیوب برجسته فرایند شکل‌دهی 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 بهینه‌سازی متنوعی به‌طور موفقیت‌آمیزی به فرایند شکل‌دهی ورق اعمال شده‌اند. مشاهده شده است که همیشه روابط ناسازگاری بین این توابع هدف وجود دارد و کمینه سازی تمامی آنها به صورت توأم تقریباً غیرممکن است.

در این پژوهش نشان داده شده است که روش الگوریتم ژنتیک چند هدفه می‌تواند تمامی راه‌حل‌های بهینه پارتو را تنها در یک مرحله جستجوی کلی و بدون ترکیب توابع هدف به یک تابع منفرد، به دست آورد. بنابراین با بررسی روش پیشنهادی از طریق ترکیب آنالیز اجزا محدود، طراحی آزمایش، مدل سطح پاسخ و الگوریتم ژنتیک چند هدفه، این روش در شکل‌دهی ورق بسیار مؤثر و کاربردی شناخته شد. روش بررسی شده در این پژوهش به طراح امکان زمان تحلیل کوتاه‌تر و نتایج طراحی دقیق‌تر نسبت به روش‌های بهینه‌سازی قدیمی تر را می‌دهد.

کار ارائه شده تماماً درباره شبیه‌سازی می‌باشد و می‌توان برای تعیین محصول مطلوب از راه‌حل‌های بهینه به دست آمده توسط این روش در آزمایش‌های عملی استفاده کرد. همچنین روش ارائه شده را می‌توان به طراحی دیگر فرایندهای کشش بسط داد و از آن در بهینه‌سازی این فرایندها در شرایط آزمایشگاهی نیز بهره گرفت.

۷- مراجع

[1] Makinouchi A., "Sheet Metal Forming Simulation in Industry", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 60, 1996 , pp. 19-26.

[2] Ohata T., Nakamura Y., Katayama T., Nakamachi E., Nakano K., "Development of Optimum Process Design System by Numerical Simulation", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 60, 1996, pp. 543-548.

[3] Guo Y.Q., Batoz J.L., Naceur H., Bouabdallah S., Mercier F., Barlet O., "Recent Developments on the Analysis and Optimum Design of Sheet Metal Forming Parts using a Simplified inverse Approach", *Computers and Structures*, Vol. 78, 2000, pp. 133-148.

[4] Naceur H., Guo Y.Q., Batoz J.L., Knopf-Lenoir C., "Optimization of Drawbead Restraining Forces and Drawbead Design in Sheet Metal Forming Process", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 43, 2001, pp. 2407-2434.

[5] Kayabasi O., Ekici B., "Automated Design Methodology for Automobile Side Panel Die using an Effective Optimization Approach", *Materials and Design*, Vol. 28, 2007, pp. 2665–2672.

[6] Chen L., Yang J.C., Zhang L.W., Yuan S.Y., "Finite Element Simulation and Model Optimization of Blankholder Gap and Shell Element Type in the Stamping of a Washing-Trough", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 182, 2007, pp. 637-643.

[7] Azaouzi M., Naceur H., Delameziere A., Batoz J.L., Belouettar S., "An Heuristic Optimization Algorithm for the Blank Shape Design of high Precision Metallic Parts Obtained by a Particular Stamping Process", *Finite Elements in Analysis and Design* , 2008, pp. 842-850.

[8] Khalili Kh., Kahhal P., Efthekhari Shahri E., Khalili

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.9.3.1]

M. S., "Blank Optimization in Elliptical-Shaped Sheet Metal Forming using Response Surface Model Coupled by Reduced Basis Technique and Finite Element Analysis", *Key Engineering Materials*, Vol. 473, 2011, pp. 683-690.

[9] Huang Y., Lo Z.Y., Du R., "Minimization of the Thickness Variation in Multi-Step Sheet Metal Stamping", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 177, 2006, pp. 84–86.

[10] Ohata T., Nakamura Y., Katayama T., Nakamachi E., "Development of Optimum Process Design System for Sheet Fabrication using Response Surface Method", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 143-144, 2003, pp. 667-672.

[11] Hu W., Yao L.G., Hua Z.Z., "Optimization of Sheet Metal Forming Processes by Adaptive Response Surface based on Intelligent Sampling Method", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 197, 2008, pp. 77–88.

[12] Jansson T., Nilsson L., "Optimizing Sheet Metal Forming Processes-using a Design Hierarchy And Response Surface Methodology", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 178, 2006, pp. 218-233.

[13] Jansson T., Andersson A., Nilsson L., "Optimization of Draw-in for an Automotive Sheet Metal Part: an Evaluation using Surrogate Models and Response Surfaces", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 159, 2005, pp. 426–434.

[14] Guangyong S., Guangyao L., Zhihui G., Xiangyang C., Xujing Y., Qing L., "Multiobjective Robust Optimization Method for Drawbead Design in Sheet Metal Forming", *Materials and Design*, Vol. 31, 2010, pp. 1917–1929.

[15] Konak A. , Coit D. W., Smith A. E., "Multi-Objective Optimization using Genetic Algorithms: A Tutorial", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 91, 2006, pp. 992–1007.

[16] Farhang-Mehr A., Azarm S., "Entropy-Based Multi-Objective Genetic Algorithm for Design Optimization", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 24, 2002, pp. 351–361.

[17] Hiroyasu T., Miki M., Kamiura J., Watanabe S., Hiroyasu H., "Multi-Objective Optimization of Diesel Engine Emissions and Fuel Economy using Genetic Algorithms and Phenomenological Model", *SAE paper no. 2002-01-2778.*

[18] Kasprzak E.M., Lewis K.E., "Pareto Analysis in Multiobjective Optimization using the Collinearity Theorem and Scaling Method", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 22, 2001, pp. 208–218.

[19] Liu W., Yang Y., "Multi-Objective Optimization of Sheet Metal Forming Process using Pareto-Based Genetic Algorithm", *Journal of materials processing technology*, Vol. 208, 2008, pp. 499–506.

[20] Hosford W. F., Caddel R. M., *Metal Forming Mechanics and Metallurgy*, Cambridge University Press, 2007, chapter 15, pp. 241-244.

[21] Safari, M., "*Experimental study and finite element simulation of sheet metal forming limit diagrams of strain rate on 3105*", Thesis of M.Sc, Mazandaran university, 2009

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.9.3.1]