



تعیین نسبت بهینه ضخامت لایه‌ها در ورق‌های دو لایه فلزی با استفاده از الگوریتم ژنتیک چند هدفه

رویا دارابی^۱، حامد دیلمی عضدی^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک
۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک
* اراک، صندوق پستی ۳۸۱۳۵-۱۱۷۷ hdazodi@arakut.ac.ir

چکیده

امروزه ورق‌های دولایه به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد در صنایع مختلف کاربردهای فراوانی یافته است. ویژگی‌های مانند وزن و شکل‌پذیری ورق دولایه تابع جنس و ضخامت لایه‌های تشکیل‌دهنده ورق دولایه است. نایابداری پلاستیک و بروز گلوبی موضعی فرآیند شکل‌دهی ورق‌ها را محدود می‌کند و منحنی حد شکل‌دهی (FLD) جهت ارزیابی شکل‌پذیری استفاده می‌شود. در این مقاله با استفاده از روش بهینه‌سازی چند هدفه با کمک الگوریتم ژنتیک، نسبت بهینه ضخامت لایه‌ها در ورق دولایه تشکیل شده از لایه‌های از الیاژ آلومینیوم Al3105 و فولاد St14 جهت دستیابی به کمترین وزن برای ورق دو لایه و بیشترین شکل‌پذیری تعیین می‌شود. منحنی حد شکل‌دهی ورق دولایه با کمک روابط تحیلی براساس مدل مارسینیک و کوزینسکی (M-K) و بر پایه معیار تسلیم ناهمسانگرد بارلات و لاین محاسبه می‌شود. آزمایش‌های تجربی جهت استخراج منحنی حد شکل‌دهی ورق دولایه Al3105-St14 به صورت تجربی و ارزیابی درستی مدل تئوری انجام می‌گیرد. پس از تعیین توابع وزن واحد سطح ورق دولایه و شکل‌پذیری آن بر حسب متغیرهای ضخامت، با استفاده از الگوریتم ژنتیک مقادیر بهینه ضخامت لایه‌ها برای دستیابی به کمترین وزن واحد سطح و بیشترین شکل‌پذیری با کمک جبهه پارتو تعیین می‌شود. جبهه پارتو به دست آمده مجموعه‌ای از پاسخ‌های بهینه ممکن را ارائه می‌دهد، همچنین با استفاده از تکنیک حداقل فاصله، نقطه زانویی به عنوان مناسب‌ترین پاسخ از میان مجموعه پاسخ‌های جبهه پارتو تعیین می‌شود.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل	دریافت: ۱۴ بهمن ۱۳۹۵
پذیرش: ۲۴ فروردین ۱۳۹۶	پذیرش: ۲۴ فروردین ۱۳۹۶
ارائه در سایت: ۳۰ اردیبهشت ۱۳۹۶	ارائه در سایت: ۳۰ اردیبهشت ۱۳۹۶
کلید واژگان:	کلید واژگان:
ورق‌های دو لایه	ورق‌های دو لایه
شکل‌پذیری	شکل‌پذیری
بهینه‌سازی چند هدفه	بهینه‌سازی چند هدفه
الگوریتم ژنتیک	الگوریتم ژنتیک

Determining the optimum thickness ratio of two-layer metallic sheets using multi-objective genetic algorithm

Roya Darabi¹, Hamed Deilami Azodi^{1*}

۱- Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.
* P.O.B. 38135-1177 Arak, Iran, hdazodi@arakut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 02 February 2017
Accepted 13 April 2017
Available Online 20 May 2017

Keywords:
Two layer sheet
Formability
Multi objective optimization
Genetic algorithm

ABSTRACT

Nowadays, two-layer sheets have many applications in various industries due to their superlative characteristics. Characteristics such as weight and formability of two-layer sheet depend on the material and the thickness of the layers which compose the two-layer sheet. Plastic instability and occurrence of localized necking limit the forming of the sheets. Forming limit diagram is used to evaluate the formability of sheet. In this paper, a multi-objective genetic algorithm is applied to optimize the thickness ratio of layers in Al3105-St14 two-layer sheet. The optimal model minimizes the weight and maximizes the formability of two-layer sheet simultaneously. Forming limit diagram of two-layer sheet is determined by analytical model based on Marciniaik and Kuckzinsky (M-K) method using Barlat and Lian non-quadratic yield criterion. Experiments are also carried out on Al3105-St14 two-layer sheet in order to examine the validity of the theoretical results. Pareto-based multi-objective optimization is used in order to make the objective function of weight per unit area minimized and the objective function of formability maximized. The Pareto front provides a set of optimal solutions. In addition, the knee point as the most satisfactory solution from Pareto-set is determined using minimum distance method.

محوری، مدل نقص در ورق اولیه را پیشنهاد کردند. سمتیاتین و پیهر [۵,۶]

شکل‌پذیری ورق دو لایه فولادی با روکش آلومینیوم و همچنین ورق آلومینیومی با روکش فولادی را تحت بارهای کششی محوری و غیرمحوری با استفاده از مدل کرنش سختی هولومون و تئوری‌های سوئیفت و بایفورکیشن بررسی کردند. الگوریتم ژنتیک توسط هلاند و همکارانش [۶] با تکیه بر علوم طبیعی معرفی شد. نخستین بهینه‌سازی با تابع چند هدفه توسط اسکافر [۷] انجام شد.

۱- مقدمه

در آغاز سال ۱۹۶۳، کیلر-بکافن [۱] و سپس در سال ۱۹۶۸، گودوین [۲] برای نخستین بار مفهوم نمودار حد شکل‌دهی^۱ را معرفی کردند. مارسینیاک و کوزینسکی [۳] براساس بررسی‌های تجربی در خصوص کرنش در نمونه‌های تحت کشش دو

^۱ Forming Limit Diagram (FLD)

Please cite this article using:

R. Darabi, H. Deilami Azodi, Determining the optimum thickness ratio of two-layer metallic sheets using multi-objective genetic algorithm, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 446-452, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

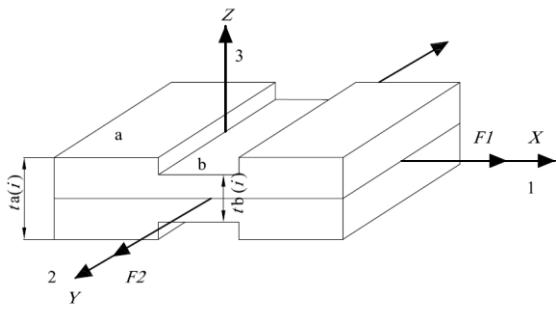


Fig. 1 Model of localized necking for two layer sheet

شکل ۱ مدل گلویی موضعی برای ورق دو لایه

بوده، در نتیجه می‌توان نسبت ناهمگونی را در هر لحظه از فرآیند تغییر شکل به صورت رابطه (2) بیان کرد.

$$f = f_0 e^{(\varepsilon_3^b - \varepsilon_3^a)} \quad (2)$$

ضخامت اولیه منطقه معیوب را می‌توان به صورت تابعی از صافی سطح ورق به صورت رابطه (3) در نظر گرفت [17-19].

$$t_0^{b(i)} = t_0^{a(i)} - \beta^{(i)} R_Z^{(i)} \quad (3)$$

که در آن $R_Z^{(i)}$ مقدار زبری سطح و $\beta^{(i)}$ ضریب صافی سطح مربوط به هر لایه است. مقدار $R_Z^{(i)}$ در حین تغییر شکل به صورت رابطه (4) تعیین می‌شود [18].

$$R_Z^{(i)} = k^{(i)} d_0^{(i)} \bar{\varepsilon}^{b(i)} + R_0^{(i)} \quad (4)$$

در رابطه بالا $R_0^{(i)}$ زبری سطح اولیه ورق‌ها $d_0^{(i)}$ اندازه اولیه دانه‌ها، $\bar{\varepsilon}^{b(i)}$ ضریب اندازه دانه و $k^{(i)}$ کرنش مؤثر در ناحیه معیوب برای هر لایه است. ضخامت لایه‌ها در نواحی سالم و معیوب مطابق روابط (6,5) به ضخامت اولیه نواحی مذکور در ارتباط است.

$$t^{a(i)} = t_0^{a(i)} \exp(\varepsilon_3^{a(i)}) \quad (5)$$

$$t^{b(i)} = t_0^{b(i)} \exp(\varepsilon_3^{b(i)}) \quad (6)$$

رابطه تعادل به صورت رابطه (7) نوشته می‌شود.

$$\sum_{i=1}^2 F_1^{a(i)} = \sum_{i=1}^2 F_1^{b(i)} \quad (7)$$

$F_1^{b(i)}$ نیروهای اعمالی به نواحی سالم و معیوب ورق برای لایه‌های مختلف است. تعریف رابطه (8) به صورت زیر است.

$$\varphi^{a(i) \downarrow b(i)} = \frac{\sigma_1^{a(i) \downarrow b(i)}}{\bar{\sigma}^{a(i) \downarrow b(i)}} \quad (8)$$

رابطه (7) را می‌توان به صورت رابطه (9) بازنویسی کرد.

$$\sum_{i=1}^2 \varphi^{a(i)} \bar{\sigma}^{a(i)} t^{a(i)} = \sum_{i=1}^2 \varphi^{b(i)} \bar{\sigma}^{b(i)} t^{b(i)} \quad (9)$$

و $\bar{\sigma}^{b(i)}$ به ترتیب نتش مؤثر در ناحیه‌های سالم و معیوب هر یک از لایه هاست که با در نظر گرفتن ویژگی کرنش سختی و حساسیت به آهنگ کرنش برای ورق‌ها به صورت رابطه (10) بیان می‌شود.

$$\bar{\sigma}^{(i)} = K^{(i)} (\dot{\varepsilon}^{(i)})^{n(i)} (\dot{\varepsilon}^{(i)})^{m(i)} \quad (10)$$

ضریب استحکام، $K^{(i)}$ توان کرنش سختی، $n(i)$ ضریب حساسیت به آهنگ کرنش، $m(i)$ کرنش مؤثر و $\dot{\varepsilon}^{(i)}$ آهنگ کرنش مؤثر برای هر یک از

جالی و همکاران در سال 2008 [8] به بررسی و تحلیل شکل‌پذیری ورق‌های دو لایه Al1100/St12 با تکیه بر شکل‌پذیری هر یک از لایه‌ها به صورت مستقل پرداختند. در این بررسی با استفاده از روش مارسینیاک و کوزینسکی با کمک معیار تسلیم هیل و همچنین روش تجربی منحنی حد شکل‌دهی ورق دو لایه به دست آورده شد. آن‌ها نشان دادند منحنی حد شکل‌دهی هیل منحنی حد شکل‌دهی بین منحنی‌های حد شکل‌دهی هر یک از لایه‌ها قرار دارد و موقعیت دقیق آن به ویژگی لایه‌ها بستگی دارد. آن‌ها همچنین در سال 2013 [9] به بررسی تأثیر خصوصیات مواد بر شکل‌پذیری ورق دو لایه به دو روش تئوری و تجربی پرداختند. آن‌ها با استفاده از روش M-K و بهره‌گیری از معیار تسلیم هیل منحنی حد شکل‌دهی را تحت تأثیر زاویه ناحیه معیوب و تأثیر عواملی چون توان کرنش سختی، ضریب حساسیت به نزد کرنش و اندازه دانه‌ها را بر حد شکل‌دهی به دست آوردند. کرجیانی و همکاران [10] در سال 2015 به بررسی حد شکل‌دهی ورق‌های دولاویه در فرآیند کشش عمیق پرداختند. در سال 2016 کرجیانی و همکاران Al/St12 [11] به بررسی عددی شکل‌پذیری ورق‌های دولاویه AA3004/St12 براساس دو معیار مختلف شتاب تغییرات ضخامتی و کرنش اصلی پرداختند، اثر پارامترهای فرآیند را بر حد شکل‌دهی مطالعه کردند. آنها [13,12] شکل‌پذیری ورق دو لایه Al/Cu را به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. هاشمی و کرجیانی [14] به بررسی منحنی حد شکل‌دهی ورق‌های دولاویه Al/Cu به صورت تحلیلی براساس مدل اصلاح شده مارسینیاک و کوزینسکی پرداختند.

تا به امروز برخی پژوهش‌ها بر بهینه‌سازی ورق‌های تک لایه انجام گرفته است، همچنین مطالعاتی بر ویژگی‌های ورق‌های کامپوزیتی انجام شده که در این مطالعات اغلب از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. در خصوص ورق‌های دولاویه در سال 2014 اینگل و همکاران [15] به مدل سازی فرآیند خمکاری ورق‌های ساندویچی با هدف بهینه‌سازی حدود خمکاری آن‌ها پرداختند. مطابق بررسی‌های انجام شده در زمینه بهینه‌سازی ساختمان ورق‌های دولاویه مطالعه‌ای تاکنون انجام نشده و از این رو این موضوع در این مقاله مورد توجه قرار گرفته است.

در این مقاله هدف تعیین ضخامت بهینه هر یک از لایه‌های تشکیل‌دهنده ورق دو لایه جهت دستیابی به کمترین وزن برای ورق دولاویه و بیشترین شکل‌پذیری است. به این منظور نخست براساس مدل مارسینیک و کوزینسکی (M-K) و بر پایه معیار تسلیم ناهمسانگرد بارلات و لاین روابط تحلیلی جهت محاسبه کرنش‌های حدی و منحنی حد شکل‌دهی ورق دولاویه استخراج شده، پس از ارزیابی درستی مدل تحلیلی از طریق مقایسه نتایج تحلیل با نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی، متغیرهای ضخامت در شرایط مرزی با روش فاکتوریل کامل تعیین و توابع وزن و شکل‌پذیری براساس متغیرهای ضخامت بدست می‌آید. با استفاده از بهینه‌سازی چند هدفه به کمک الگوریتم ژنتیک براساس جهله پارتو بهترین نسبت ضخامتی به شرط برآورده شدن هر دو تابع هدف تعیین می‌شود.

2- تعیین حد شکل‌دهی ورق دولاویه

2-1- مدل تحلیلی M-K برای ورق دولاویه

مدل M-K بر پایه در نظر گرفتن یک نقص در ورق به شکل یک شیار عمود بر راستای کرنش اصلی بنا شده است [16]. همان‌طور که در شکل 1 نشان داده شده منطقه a در این مدل منطقه همگن و یکنواخت است، ناحیه b منطقه معیوب و گلویی نامیده می‌شود. ضخامت اولیه (قسمت سالم ورق) t_0^a بیشتر از ضخامت منطقه معیوب t_0^b است و ورق تحت بارگذاری σ_1 و σ_2 قرار دارد.

رابطه (1) ضریب ناهمگونی اولیه را برای ورق دو لایه بیان می‌کند.

$$f_0 = \frac{\sum_{i=1}^2 t_0^{b(i)}}{\sum_{i=1}^2 t_0^{a(i)}} \quad (1)$$

آن شانگر شماره لایه‌های است. ضخامت ورق‌ها حین تغییر شکل در حال تغییر

لایه‌ها محاسبه می‌شود. با فرض عدم لغزش بین لایه‌ها ($\rho_{layer1} = \rho_{layer2}$)، نسبت تنش در ناحیه معیوب برای هر یک از لایه‌ها ($\alpha^{b(1)}, \alpha^{b(2)}$) با استفاده از رابطه تعادل به دست می‌آید. با محاسبه مقادیر φ و β در ناحیه معیوب لایه‌ها، اجزاء کرنش در ناحیه معیوب به دست می‌آید. چنان‌چه نسبت $d\bar{\varepsilon}^b/d\varepsilon^b$ برای هر یک از لایه‌ها بزرگ‌تر از مقدار حدی (10) شود [21-24]، مقادیر $(\varepsilon_2^{a(i)}, \varepsilon_1^{a(i)})$ در آن لایه به عنوان نقطه‌ای از منحنی حد شکل‌دهی در نظر گرفته می‌شود؛ در غیر این صورت با افزودن یک جزء کرنش ($d\varepsilon_1^a$) دیگر به کرنش اعمال شده به منطقه سالم (ε_1^a) روند محاسبات تا برقراری شرط یادشده ادامه می‌یابد. با تکرار محاسبات برای مسیرهای کرنش مختلف (ρ از 0.5-تا 1.0) منحنی حد شکل‌دهی تعیین می‌شود.

4-2- تعیین تجربی منحنی حد شکل‌دهی ورق دولایه

آزمایش‌های تجربی جهت تعیین کرنش‌های حدی و استخراج منحنی حد شکل‌دهی ورق دولایه و ارزیابی درستی مدل تئوری، بر ورق دولایه تشکیل شده از لایه‌های از جنس آلیاژ آلومینیوم Al 3105 و فولاد St 14 انجام گرفته است. در جدول 1 خواص لایه‌های تشکیل‌دهنده ورق دو لایه Al 3105-St 14 ارائه شده است. خصوصیات مکانیکی لایه‌ها با استفاده از آزمون کشش استاندارد به دست آمده است. نمونه‌های ورق دولایه استفاده شده در آزمایش‌های تجربی از لایه‌های فولادی و آلومینیومی به ضخامت 0.5 mm بوده، که اتصال لایه‌ها با کمک چسب پلی اورتان انجام شده است. آزمون کشش خارج از صفحه هکر برای استخراج منحنی حد شکل‌دهی بکار گرفته شده است. هشت نمونه با هندسه‌های مختلف برای ایجاد مسیرهای کرنش مختلف استفاده شده که برای اندازه‌گیری کرنش، سطح آن‌ها با استفاده از مهر ژلاتینی به صورت دوایری به قطر داخلی 4.5 mm و قطر خارجی 5.5mm شبکه‌بندی شده است. در تمامی آزمایش‌ها لایه فولادی نمونه‌ها در تماس با سنبه بوده است. در شکل 2 نمایی از تجهیزات آزمایش و تعدادی از نمونه‌ها نشان داده شده است.

در شکل 3 منحنی حد شکل‌دهی تجربی و تحلیلی برای ورق دو لایه Al 3105-St 14 با ضخامت لایه‌های 0.5 mm (ضخامت کل ورق دولایه 1 mm) نشان داده است. منحنی‌های حد شکل‌دهی تجربی و تحلیلی برای ورق‌های تک‌لایه فولاد St 14 و آلومینیوم Al 3105 با ضخامت ۰.۵ mm نشان آورده شده است. به روشنی تطابق خوبی بین نتایج تجربی و تحلیلی برقرار است.

جدول 1 خواص مکانیکی لایه‌های آلومینیومی و فولادی مورد استفاده

Table 1 mechanical property of used aluminum and steel layers			
St 14	Al 3105	نماد (پکا)	خصوصیت
210	70	E (GPa)	مدول الاستیک
0.3	0.33	ν	نسبت پواسون
7850	2700	ρ (kg/m ³)	چگالی
548.44	302	K (MPa)	ضریب استحکام
0.229	0.103	n	توان کرنش سختی
0.01	0.001	m	ضریب حساسیت به آهنگ کرنش
4	1.6	R_0 (μm)	زیری اولیه سطح
1.77	0.2	r_0	ضرایب ناهمسانگردی
1.95	0.24	r_{90}	
10	20	d_0 (μm)	اندازه دانه ورق

لایه‌است. با جای‌گذاری رابطه (10) در رابطه (9) رابطه تعادل به صورت رابطه (11) نوشته می‌شود.

$$\sum_{i=1}^2 \varphi^{a(i)} K^{(i)} (\bar{\varepsilon}^{a(i)} + d\bar{\varepsilon}^{a(i)})^{n(i)} t_0^{a(i)} e^{\varepsilon_3^{a(i)}} = \sum_{i=1}^2 \varphi^{b(i)} K^{(i)} (\bar{\varepsilon}^{b(i)} + d\bar{\varepsilon}^{b(i)})^{n(i)} t_0^{b(i)} e^{\varepsilon_3^{b(i)}} \quad (11)$$

شرط سازگاری بین نواحی سالم و معیوب منجر به برابری جزء کرنش‌ها در راستای 2 در این نواحی می‌شود که به صورت رابطه (12) نوشته می‌شود:

$$d\varepsilon_2^{b(i)} = d\varepsilon_2^{a(i)} \quad (12)$$

2-2- معیار تسلیم ناهمسانگرد غیردرجه دو بارلات-لاین

معیار تسلیم ناهمسانگرد غیردرجه دو بارلات-لاین [20] در حالت تنش صفحه‌ای بر حسب مؤلفه‌های تنش اصلی به صورت روابط (13-15) نوشته می‌شود.

$$|\sigma_1|^a + |u\sigma_2|^a + \frac{c}{2-c} |\sigma_1 - u\sigma_2|^a = \frac{2}{2-c} \bar{\sigma}^a \quad (13)$$

$$c = 2 \sqrt{\frac{r_0 - r_{90}}{1+r_0 + r_{90}}} \quad (14)$$

$$u = \sqrt{\frac{r_0 - 1+r_{90}}{1+r_0 - r_{90}}} \quad (15)$$

a به شکل سطح تسلیم واگسته بوده، برای مواد با ساختار C برابر با 6 برای مواد F.C.C برابر با 8 است. قانون شارش وابسته¹ مطابق رابطه (16) در نظر گرفته می‌شود.

$$d\varepsilon_{ij} = d\gamma \frac{\partial h}{\partial \sigma_{ij}} \quad (16)$$

که ضریب پلاستیک و hتابع تسلیم است. با در نظر گرفتنتابع تسلیم بارلات-لاین، قوانین شارش مطابق رابطه (17) نوشته می‌شود.

$$\begin{aligned} \frac{d\varepsilon_1}{\text{sign}(\sigma_1)|\sigma_1|^{a-1} + \text{sign}(\sigma_1 + u\sigma_2)\frac{c}{2-c}|\sigma_1 - u\sigma_2|^{a-1}} &= \\ &= \frac{d\varepsilon_2}{\text{sign}(u\sigma_2)u|u\sigma_2|^{a-1} - \text{sign}(\sigma_1 + u\sigma_2)\frac{cu}{2-c}|\sigma_1 - u\sigma_2|^{a-1}} \\ &= \frac{d\varepsilon_2}{\text{sign}(\sigma_1)|\sigma_1|^{a-1} + \text{sign}(u\sigma_2)u|u\sigma_2|^{a-1} + \frac{c}{2-c}\text{sign}(\sigma_1 - u\sigma_2)|\sigma_1 - u\sigma_2|^{a-1}} \\ &= \frac{d\bar{\varepsilon}}{\frac{2}{2-c}\bar{\sigma}^{a-1}} \end{aligned} \quad (17)$$

2-3- محاسبه منحنی حد شکل‌دهی ورق دولایه

ضرایب ρ ، β ، و α برای نواحی سالم و معیوب هر یک از لایه‌ها مطابق روابط (20-18) تعریف می‌شوند.

$$\rho^{a(i)b(i)} = \frac{d\varepsilon_2^{a(i)b(i)}}{d\varepsilon_1^{a(i)b(i)}} \quad (18)$$

$$\beta^{a(i)b(i)} = \frac{d\bar{\varepsilon}^{a(i)b(i)}}{d\varepsilon_1^{a(i)b(i)}} \quad (19)$$

$$\alpha^{a(i)b(i)} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad (20)$$

جهت محاسبه کرنش‌های حدی و تعیین منحنی حد شکل‌دهی با در نظر گرفتن مسیر کرنش (ρ) و اعمال جزء کرنش به منطقه سالم ($d\varepsilon_1$)، مقادیر

¹ Associated Flow Rule

$$\begin{aligned} \text{Minimize } F(X) &= (f_1(x_1), f_2(x_2), \dots, f_j(x_i)) \\ j &= 1, 2, \dots, m \\ \text{Subject to } b_i^{\text{lower}} < x_i < b_i^{\text{upper}}, \quad g_k(x_i) \leq 0 \\ i &= 1, 2, \dots, n \quad k = 1, 2, \dots, p \end{aligned} \quad (21)$$

در آن x_i متغیر طراحی نام بوده، b_i^{upper} و b_i^{lower} به ترتیب کران‌های پایین و بالای متغیر x_i است، همچنین (x_i) به عنوان j -امینتابع هدف برای متغیر x_i و (x_i) تابع قید k -ام برای متغیر x_i است [25].

براساس شکل 3 به طور کلی منحنی حد شکل‌دهی ورق‌های دولاویه بین منحنی‌های حد شکل‌دهی ورق‌های تک‌لایه از جنس لایه‌های تشکیل‌دهنده آن و با ضخامت برابر با ضخامت ورق دولاویه قرار دارد؛ به عبارت دیگر شکل‌پذیری ورق دولاویه کمتر از لایه با شکل‌پذیری بالاتر و بیشتر از لایه با شکل‌پذیری کمتر است. مقدار دقیق شکل‌پذیری و محل دقیق منحنی حد شکل‌دهی به نسبت ضخامت لایه‌ها وابسته است. به گونه‌ای که افزایش نسبت ضخامت لایه فولاد به ضخامت لایه آلومینیومی ($t_{\text{St}14}/t_{\text{Al}3105}$) در ورق دولاویه مورد بررسی سبب افزایش شکل‌پذیری آن می‌شود. این افزایش به دلیل چگالی بالاتر فولاد نسبت به آلومینیوم با سنتین تر شدن ورق دولاویه همراه خواهد بود. هدف به کارگیری توابع بهینه‌سازی چند هدفه در این پژوهش دستیابی به تعیین بهترین ترکیب برای ضخامت لایه‌ها در ورق دولاویه جهت دستیابی به بهترین شکل‌پذیری و کمترین وزن ورق دولاویه است.

1-3- تعریف متغیرها

در ورق دولاویه تشکیل شده از لایه‌های از جنس آلیاژ آلومینیوم Al 3105 و فولاد St 14، با توجه به تفاوت قابل توجه شکل‌پذیری و چگالی لایه‌ها، با فرض ثابت بودن ضخامت کلی ورق دولاویه نسبت ضخامت لایه‌ها تأثیر بسیاری بر وزن و شکل‌پذیری ورق دولاویه خواهد داشت. از این‌رو ضخامت لایه‌های Al 3105 و St 14 به عنوان لایه‌های تشکیل‌دهنده ورق دولاویه Al 3105-St 14 با ثابت در نظر گرفتن ضخامت کلی به عنوان متغیرهای مسئله لحاظ شده است. روابط (23,22) کران‌های متغیرهای در نظر گرفته شده را نشان می‌دهد.

$$0 \text{ mm} \leq t_{\text{St}14} \text{ and } t_{\text{Al}3105} \leq 2 \text{ mm} \quad (22)$$

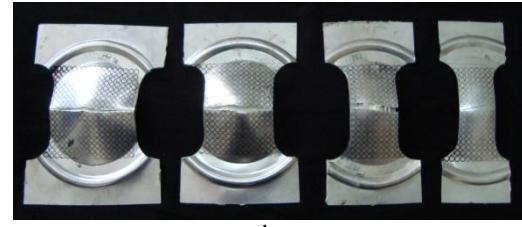
$$t_{\text{St}14} + t_{\text{Al}3105} = 2 \text{ mm} \quad (23)$$

2- توابع هدف

شکل‌پذیری ورق دولاویه و وزن آن به عنوان دو تابع هدف در نظر گرفته شده است. در تعریف تابع شکل‌پذیری (Obj_f)، با توجه به این که مفهوم شکل‌پذیری با کمک منحنی حد شکل‌دهی بیان می‌شود، از مقدار عددی مرسوم FLD_0 که محل تقاطع منحنی حد شکل‌دهی با محور عمودی در فضای کرنش‌های اصلی و فرعی ($\epsilon_1 - \epsilon_2$) استفاده شده است. در FLD_0 در واقع مقدار کرنش حدی ورق در شرایط کرنش صفحه‌ای است. برای تعریف تابع وزن (Obj_w) نیز با توجه به ثابت بودن ضخامت کلی ورق دولاویه از وزن واحد سطح ورق دولاویه استفاده شده است. پس از تعیین حالات مختلف قرارگیری ضخامت دو ورق Al 3105 و St 14، میزان شکل‌پذیری (FLD_0) با کمک مدل تحلیلی ارائه شده در بخش 2، همچنین وزن ورق دولاویه با توجه به چگالی لایه‌ها تعیین شده است. نحوه توزیع داده‌ها به روش فاکتوریل بوده و تمام حالات برای متغیرها لحاظ شده است. در جدول 2 توزیع متغیرها و مقدار توابع وزن و شکل‌پذیری به ازای حالات مختلف ضخامت لایه‌ها آورده شده است.



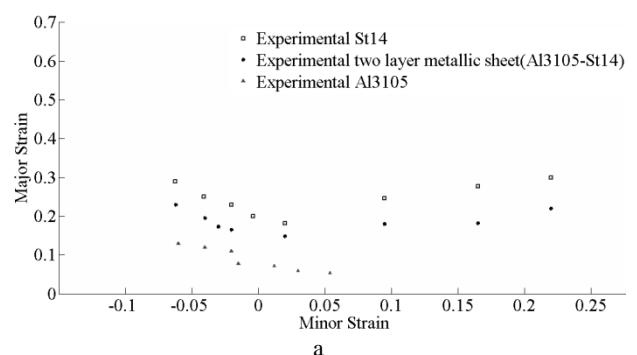
a



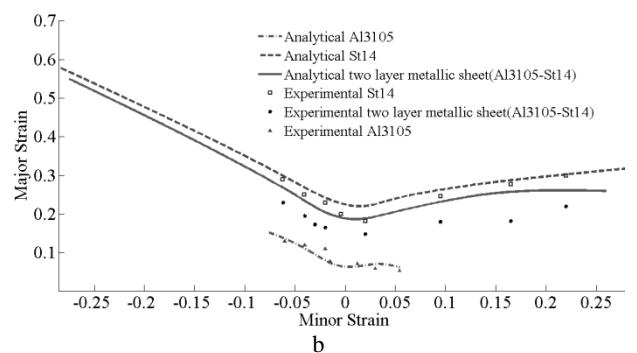
b

Fig. 2 a- Experimental set-up, b- Some deformed specimens

شکل 2 الف- تجهیزات آزمایش، ب- تعدادی از نمونه‌های تغییر شکل یافته



a



b

Fig. 3 a- Experimental FLDs of Al 3105-St 14 two-layer sheet and separate layers, b- Comparison of analytical FLDs of Al 3105-St 14 two-layer sheet and separate layers with experimental results

شکل 3 الف- منحنی‌های حد شکل‌دهی تجربی ورق دولاویه Al 3105-St 14 و لایه‌های مجزا، ب- مقایسه منحنی‌های حد شکل‌دهی تحلیلی ورق دولاویه Al 3105 و لایه‌های مجزا با نتایج تجربی

3- مدل بهینه‌سازی چند هدفه

شرایط و متغیرهای ورودی برای بهینه‌سازی همزمان توابع هدف مختلف و گاه متضاد در بهینه‌سازی با چند تابع به دست آورده می‌شود. تابع بهینه‌سازی چند هدفه را می‌توان به صورت رابطه (21) در نظر گرفت.

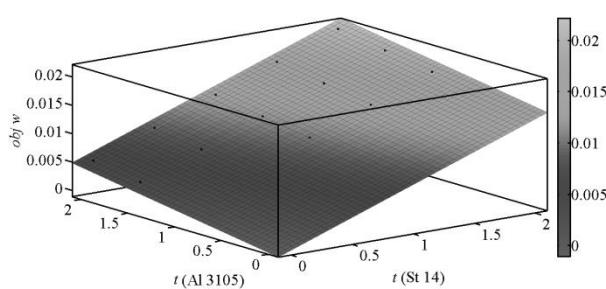


Fig. 5 Best-fitting polynomial surface for weight per unit area function of two-layer sheet

شکل ۵ بهترین برآش سطح چندجمله‌ای برای تابع وزن واحد سطح ورق دولايه

4- الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه

در مسائل بهینه‌سازی چند هدفه کمینه یا بیشینه کردن هم‌زمان تمام توابع هنگامی که در یک رابطه ناسازگارند پیجیده خواهد بود. در این پژوهش از الگوریتم ژنتیک و مفهوم جبهه پارتولو برای انجام یافتن پاسخ‌های بهینه استفاده شده است. در الگوریتم ژنتیک جمعیتی تصادفی از زن‌ها در فضای ایستاده شده است. در توزیع شده با بررسی نتایج شایستگی^۱ آن‌ها بهترین‌ها انتخاب شده، نسلی جدید تولید می‌شود. تکثیرهای متواالی جمعیت فضای حالت را جستجو کرده، به سمت بهترین راه حل همگرا خواهد شد. در واقع در الگوریتم ژنتیک به جای تولید یک نقطه در هر تکرار، جمعیتی شامل تعدادی نقطه تولید می‌شود و هنگام انتخاب جمعیت بعدی برخلاف روش‌های متداول به جای انتخاب‌های قطعی از انتخاب‌های تصادفی در محاسبات استفاده می‌شود. در بهینه‌سازی چند هدفه بهینه کردن هم‌زمان چند پارامتر شایستگی مورد نظر است. در این گونه مسائل نظریه بهینگی پارتولو یا جبهه کارآئی به جای مفاهیم بهینه‌سازی تک‌هدفی مطرح شده، پاسخ نهایی از میان مجموعه بهینه پارتولو انتخاب می‌شود. در کمینه کردن^۲ x پاسخی ممکن برای جبهه پارتولو است اگر فقط اگر هیچ x دیگری در رابطه (26) برقرار نباشد [26].

$$f_i(x) < f_i(x^*) \quad (26)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

حداقل برای یک j , $j \leq n$ (1) به صورت رابطه (27) است [12].

$$f_j(x) < f_j(x^*) \quad (27)$$

در اجرای الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی چند هدفه پارامترهای زیر در نظر گرفته شده است:

اندازه جمعیت^۳ •

احتمال تقاطع^۴ •

احتمال جهش^۵ •

کسر مهاجرت^۶ •

$P_p = 0.35$ •
کسر جمعیت جبهه پارتولو^۷ •
شرط اتمام تولید نسل^۸ $T = 600$ •

در این پژوهش از نرم‌افزار متلب و جعبه ابزار بهینه‌سازی جهت انجام بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. پس از اجرای الگوریتم بهینه‌سازی راه حل‌های بهینه پارتولو مطابق شکل ۶ بهدست آمده

جدول ۲ حالات ممکن برای ضخامت لایه‌ها با روش فاکتوریل کامل

Table 2 Possible condition for thickness of layers with full factorial approaching

obj_w	obj_f	$t_{St 14}$	$t_{Al 3105}$	N
0	0	0	0	1
0.00135	0.065	0	0.5	2
0.0027	0.09037	0	1	3
0.00405	0.097	0	1.5	4
0.0054	0.1082	0	2	5
0.003925	0.2087	0.5	0	6
0.005275	0.1837	0.5	0.5	7
0.006625	0.1785	0.5	1	8
0.007975	0.1735	0.5	1.5	9
0.009325	0.1617	0.5	2	10
0.00785	0.255	1	0	11
0.0092	0.2315	1	0.5	12
0.01055	0.223	1	1	13
0.0119	0.2061	1	1.5	14
0.01325	0.2054	1	2	15
0.011775	0.2728	1.5	0	16
0.013125	0.26	1.5	0.5	17
0.014475	0.2431	1.5	1	18
0.015825	0.2332	1.5	1.5	19
0.017175	0.2152	1.5	2	20
0.0157	0.2878	2	0	21
0.01705	0.2728	2	0.5	22
0.0184	0.2578	2	1	23
0.01975	0.253	2	1.5	24
0.0211	0.2454	2	2	25

پس از تعیین مقادیر توابع هدف برای حالات‌های مختلف متغیرهای مسئله، با توجه به فاکتور خطای میانگین مربعات (خطای استاندارد) در نرم‌افزار متلب دقیق‌ترین رویه‌ای که با مقادیر موجود همپوشانی داشته باشد به عنوان بهترین برآش سطح برای مقادیر بهدست آمده انتخاب شده است. شکل‌های ۴ و ۵ بهترین توابع هدف برای دو متغیر ضخامت لایه آلومینیومی و لایه فولادی نشان می‌دهد.

روابط (25,24) به ترتیب توابع هدف چند جمله‌ای شکل‌پذیری و وزن واحد سطح را بر حسب ضخامت لایه‌های تشکیل‌دهنده بیان می‌کند.

$$Obj_f(t_{St 14}, t_{Al 3105}) = 0.008434 + 0.5564t_{St 14} - 0.1089t_{Al 3105} - 0.4312 t_{St 14}^2 + 0.328t_{St 14}t_{Al 3105} - 0.03018t_{Al 3105}^2 + 0.1427t_{St 14}^3 + 0.2047t_{St 14}^2t_{Al 3105} + 0.06461t_{St 14}t_{Al 3105}^2 - 0.01576t_{St 14}^4 - 0.03699t_{St 14}^3t_{Al 3105} - 0.02451t_{St 14}^2t_{Al 3105}^2 \quad (24)$$

$$Obj_w(t_{St 14}, t_{Al 3105}) = 5.211e^{-18} + 0.00785t_{St 14} + 0.0027t_{Al 3105} \quad (25)$$

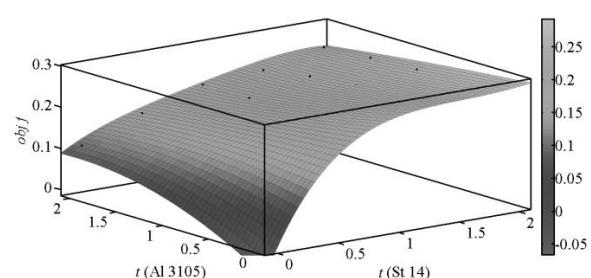


Fig. 4 Best-fitting polynomial surface for formability function of two-layer sheet

شکل ۴ بهترین برآش سطح چندجمله‌ای برای تابع شکل‌پذیری ورق دولايه

¹ Fitness

² Population Size

³ Crossover Probability

⁴ Mutation Probability

⁵ Migration Fraction

⁶ Pareto Front Population Fraction

⁷ Termination Generation

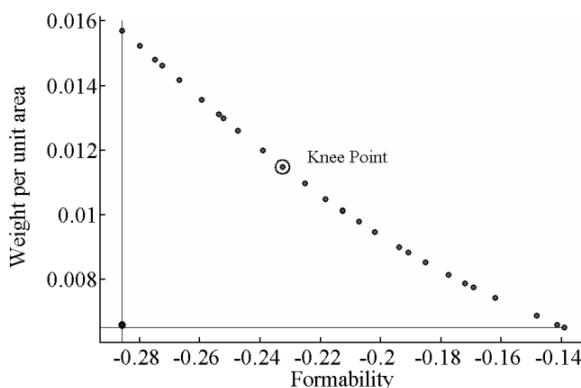


Fig. 8 The knee point on the Pareto front for objective functions of weight per unit area and formability as the best answer

شکل 8 نقطه زانویی در جبهه پارتو توابع هدف وزن واحد سطح و شکل‌پذیری به عنوان مناسب‌ترین پاسخ بهینه

جدول 3 مقادیر بهینه ضخامت لایه‌های فولاد و آلمینیوم و مقادیر بهدست‌آمده برای توابع هدف شکل‌پذیری و وزن واحد سطح ورق در نقطه زانویی

Table 3 The optimum values for thicknesses of steel and aluminum layers and the values obtained for the objective functions of weight per unit area and formability at the knee point

obj_w	obj_f	$t_{Al\ 3105}$	$t_{St\ 14}$
0.011986	-0.23921	0.720552	1.279052

نقطه زانویی بهدست‌آمده براساس روش حداقل فاصله به عنوان مناسب‌ترین پاسخ بهینه در جبهه پارتو در شکل 8 نشان داده شده است، همچنین مقادیر متغیرهای ضخامت لایه‌های فولاد و آلمینیوم و مقادیر توابع هدف شکل‌پذیری و وزن واحد سطح ورق در این نقطه مطابق جدول 3 بهدست آمده است.

5- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از روش بهینه‌سازی چند هدفه با کمک الگوریتم ژنتیک، نسبت بهینه ضخامت لایه‌ها در ورق دولايه تشکیل شده از لایه‌های از آلیاژ آلمینیوم Al3105 و فولاد St14 تعیین شد. به این منظور کرنش‌های حدی در ورق دولايه با کمک روابط تحلیلی براساس مدل مارسینیک و کوزینسکی (M-K) و بر پایه معیار تسلیم ناهمسانگرد بارلات و لاین محاسبه و متحمن حد شکل‌دهی ورق دولايه استخراج شد، همچنین آزمایش‌های تجربی جهت استخراج منحنی حد شکل‌دهی ورق دولايه Al 3105-St 14 بهصورت تجربی و ارزیابی درستی مدل تئوری انجام گرفت.

با ثابت در نظر گرفتن ضخامت کلی ورق دولايه متغیرهای ضخامت براساس شرایط مرزی تعیین و با روش فاکتوریل کامل، توابع وزن واحد سطح ورق دولايه و شکل‌پذیری آن بر حسب متغیرهای ضخامت بهدست آورده شد. با استفاده از الگوریتم ژنتیک مقادیر بهینه ضخامت لایه‌ها برای دستیابی به کمترین وزن واحد سطح و بیشترین شکل‌پذیری با کمک جبهه پارتو تعیین شد. جبهه پارتو بهدست‌آمده مجموعه‌ای از پاسخ‌های بهینه ممکن را ارائه داده است، همچنین نقطه زانویی به عنوان مناسب‌ترین پاسخ از میان مجموعه پاسخ‌های پارتو تعیین شده است.

است. توابع هدف شکل‌پذیری و وزن واحد سطح ورق دولايه با یکدیگر ناسازگار بوده، هیچ نقطه‌ای وجود ندارد که در آن دو تابع به صورت همزمان به ترتیب بیشینه و کمینه شوند. جبهه پارتو نشان داده شده مجموعه‌ای از پاسخ‌های بهینه ممکن را ارائه می‌دهد و هر یک از نقاط این شکل یک راه حل بهینه پارتو است. مقادیر منفی بهدست‌آمده در شکل 6 برای تابع شکل‌پذیری در واقع مقادیر قرینه FLD_0 است. با توجه به این که هدف مسئله بیشینه کردن تابع شکل‌پذیری و کمینه کردن تابع وزن بوده، برای این که مسئله به صورت کمینه‌سازی هر دو تابع هدف تبدیل شود، قرینه مقادیر شکل‌پذیری به عنوان تابع هدف برای کمینه کردن تعریف شده است.

در این پژوهش برای یافتن مناسب‌ترین پاسخ از میان مجموعه پاسخ‌های جبهه پارتو از تکنیک حداقل فاصله¹ [27] استفاده شده است. مطابق این تکنیک نقطه زانویی² می‌تواند به عنوان مناسب‌ترین پاسخ از میان مجموعه پاسخ‌های جبهه پارتو در نظر گرفته شود. در شکل 7 نقطه زانویی به صورت شماتیک نشان داده شده است. D فاصله هر نقطه از جبهه پارتو تا نقطه آرمانی³ است، که برای نقطه زانویی حداقل خواهد بود. نقطه آرمانی براساس مقادیر بهینه هر یک از توابع هدف به صورت مجزا تعریف می‌شود که با وجود ناسازگاری رفتار توابع هدف در واقعیت قابل دستیابی نیست.

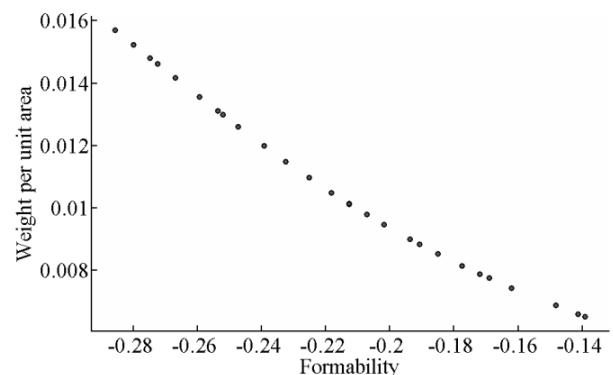


Fig. 6 Pareto front for objective functions of weight per unit area and formability

شکل 6 جبهه پارتو برای توابع هدف وزن واحد سطح و شکل‌پذیری

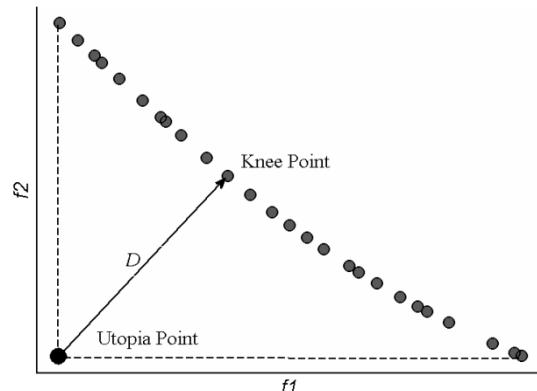


Fig. 7 The schematic position of the knee point on the Pareto front [27]
شکل 7 موقعیت شماتیک نقطه زانویی در جبهه پارتو [27]

¹ Minimum Distance Selection Method (TMDSM)

² Knee Point

³ Utopia Point

- composite sheets, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 66, No. 5, pp. 809-823, 2013.
- [10] E. Karajibani, A. Fazli, R. Hashemi, Numerical and experimental study of formability in deep drawing of two-layer composite sheets, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 80, No. 1-4, pp. 113-121, 2015.
- [11] E. Karajibani, R. Hashemi, M. Sedighi, Determination of forming limit curve in two-layer metallic sheets using the finite element simulation, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Materials: Design and Applications*, Vol. 230, No. 6, pp. 1018-1029, 2016.
- [12] E. Karajibani, R. Hashemi, M. Sedighi, Experimental determination of forming limit diagram in Aluminum-Copper two-layer metallic sheets, *Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No. 4, pp. 45-50, 2016. (In Persian) (فارسی)
- [13] E. Karajibani, R. Hashemi, M. Sedighi, Forming limit diagram of aluminum-copper two-layer sheets: Numerical simulations and experimental verifications, *Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1-10, Published Online: 21 October, 2016.
- [14] R. Hashemi, E. Karajibani, Forming limit diagram of Al-Cu two-layer metallic sheets considering the Marciniaik and Kuczynski theory, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Published Online: 27 June, 2016.
- [15] B. Engel, J. Buhl, C. Heftrich, Modelling and optimization of lightweight-sandwich-sheet with an adhesive interlayer for the forming process die bending, *Procedia CIRP*, Vol. 18, No. 4, pp. 168-173, 2014.
- [16] J. Z. Gronstajski, Z. Zimniak, The effect of changing of heterogeneity with strain on the forming limit diagram, *Materials Processing Technology*, Vol. 34, No. 1-4, pp. 457-464, 1992.
- [17] B. M. Dariani, H. D. Azodi, Finding the optimum Hill index in the determination of the forming limit diagram, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Engineering Manufacture*, Vol. 217, No. 12, pp. 1677-1683, 2003.
- [18] K. Yamaguchi, P. B. Mellor, Thickness and grain size dependence of limit strains in sheet metal stretching, *Mechanical Sciences*, Vol. 18, No. 2, pp. 85-90, 1976.
- [19] P. P. Date, K. A. Padmanabhan, On the prediction of the Forming limit diagram of sheet metals, *Mechanical Sciences*, Vol. 34, No. 5, pp. 363-374, 1992.
- [20] F. Barlat, K. Lian, Plastic behavior and stretchability of sheet metals, Part I: A yield function for orthotropic sheets under plane stress conditions, *Plasticity*, Vol. 5, No. 1, pp. 55-66, 1989.
- [21] B. M. Dariani, H. D. Azodi, Finding the optimum hill index in the determination of the forming limit diagram, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 217, No. 12, pp. 1677-1683, 2003.
- [22] S. M. Mirfalah-Nasiri, A. Basti, R. Hashemi, Forming limit curves analysis of aluminum alloy considering the through-thickness normal stress, Anisotropic yield functions and strain rate, *Mechanical Sciences*, Vol. 117, pp. 93-101, 2016.
- [23] M. Zohoor, S. Shahi, M. Hoseinpour Gollo, An experimental and theoretical investigation for determination of advanced yield criteria parameters and forming limit diagram of Aluminum alloy 2024, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 192-202, 2016. (In Persian) (فارسی)
- [24] A. A. Allahdadian, K. Hasanzadeh, Comparison of the effect of different yield loci to prediction of Ti64 titanium alloy forming limit diagram, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 390-396, 2015. (In Persian) (فارسی)
- [25] W. Liu, Y. Yang, Multi-objective optimization of sheet metal forming process using Pareto-based genetic algorithm, *Materials Processing Technology*, Vol. 208, No. 1-3, pp. 499-506, 2008.
- [26] E. M. Kasprzak, K. E. Lewis, Pareto analysis in multiobjective optimization using the collinearity theorem and scaling method, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 22, No. 3, pp. 208-218, 2001.
- [27] G. Sun, G. Li, Z. Gong, X. Cui, X. Yang, Q. Li, Multi-objective robust optimization method for drawbead design in sheet metal forming, *Materials and Design*, Vol. 31, No. 4, pp. 1917-1929, 2010.

6- فهرست عالم

نام تابع تسلیم بارلات-لاین	a
اندازه دانه	d_0
مدل الاستیک	E
ضریب ناهمگونی ورق	f
ضریب ناهمگونی اولیه ورق	f_0
ضریب استحکام	K
ضریب اندازه دانه	k
توان حساسیت به آهنگ کرنش	m
توان کرنش سختی	n
ضرایب ناهمسانگردی در راستاهای 90° نسبت به راستای نورده	r_0, r_{90}
زبری سطح اولیه ورق	R_0
زبری سطح ورق	R_z
ضخامت ورق	t
ضخامت اولیه ورق	t_0
علم بونانی	
نسبت مؤلفه‌های تنش اصلی	α
نسبت جزء کرنش مؤثر به جزء کرنش در راستای 1	β
مؤلفه‌های کرنش اصلی	ε_i
کرنش مؤثر	$\bar{\varepsilon}$
آهنگ کرنش مؤثر	$\dot{\varepsilon}$
نسبت پواسون	ν
نسبت مؤلفه‌ای کرنش اصلی	ρ
مؤلفه‌های تنش اصلی	σ_i
تنش مؤثر	$\bar{\sigma}$
نسبت تنش اصلی در راستای 1 به تنش مؤثر	φ

7- مراجع

- [1] S. P. Keeler, W. A. Backofen, Plastic instability and fracture in sheets stretched over rigid punches, *Trans ASM*, Vol. 56, No. 1, pp. 25-48, 1963.
- [2] G. M. Goodwin, Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop, *Society of Automotive Engineers Technical Paper 680093*, pp. 380-387, 1968.
- [3] Z. Marciniaik, K. Kuczynski, Limit strains in the processes of stretch forming sheet metal, *Mechanical Sciences*, Vol. 9, No. 9, pp. 609-620, 1967.
- [4] S. L. Semiatin, H. R. Piehler, Deformation of sandwich sheet materials in uniaxial tension, *Metallurgical Transactions A*, Vol. 10, No. 1, pp. 85-96, 1979.
- [5] S. L. Semiatin, H. R. Piehler, Formability of sandwich sheet materials in plane strain compression and rolling, *Metallurgical Transactions A*, Vol. 10, No. 1, pp. 97-107, 1979.
- [6] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.
- [7] J. D. Schaffer, Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms, *Proceedings of the 1st International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications*, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, July 24-26, 1985.
- [8] A. J. Aghchai, M. Shakeri, B. Mollaei-Dariani, Theoretical and experimental formability study of two-layer composite sheet (Al1100/St12), *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 222, No. 9, pp. 1131-1138, 2008.
- [9] A. J. Aghchai, M. Shakeri, B. Mollaei Dariani, Influences of material properties of components on formability of two-layer