مجله مهندسی مکانیک مدرس، مرداد 1396، دوره 17، شماره 5، ص‌ص 446-452

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

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

رویا دارابی[1]، حامد دیلمی‌عضدی[2*]

1- کارشناسی‌ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

* اراک، صندوق پستی 38135-1177، hdazodi@arakut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 14 بهمن 1395

پذیرش: 24 فروردین 1396

ارائه در سایت: 30 اردیبهشت 1396

کلید واژگان:

ورق‌های دو لایه

شکل‌پذیری

بهینه‌سازی چند هدفه

الگوریتم ژنتیک

چکیده

امروزه ورق‌های دولایه به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد در صنایع مختلف کاربردهای فراوانی یافته است. ویژگی‌هایی مانند وزن و شکل‌پذیری ورق دولایه تابع جنس و ضخامت لایه‌های تشکیل‌دهنده ورق دولایه است. ناپایداری پلاستیک و بروز گلویی 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 آلیاژ 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 تحلیلی 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 به‌صورت تجربی و ارزیابی درستی مدل تئوری انجام می‌گیرد. پس از تعیین توابع وزن واحد سطح ورق دولایه و شکل‌پذیری آن برحسب 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 به‌دست‌آمده 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.

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

Roya Darabi[1], Hamed Deilami Azodi[1*]

1- 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 Marciniak 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.

1- مقدمه

در آغاز سال 1963، کیلر- بکافن [1] و سپس در سال 1968، گودوین [2]، برای نخستین بار مفهوم نمودار حد شکل‌دهی[1] را معرفی کردند. مارسینیاک و کوزینسکی [3]براساس بررسی‌های تجربی در خصوص کرنش در نمونه‌های تحت کشش دو محوری، مدل نقص در ورق اولیه را پیشنهاد کردند. سمیاتین و پیهلر [5,4] 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 [6] با تکیه بر علوم طبیعی معرفی شد. نخستین بهینه‌سازی با تابع چند هدفه توسط اسکافر [7] انجام شد.

[1] 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:

جلالی 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 فلز دو لایه به‌دست آورده شد. آن‌ها نشان دادند منحنی حد شکل‌دهی ورق دولایه 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 نرخ کرنش و اندازه دانه‌ها را بر حد شکل‌دهی به دست آوردند. کرجیبانی و همکاران [10] در سال 2015 به بررسی حد شکل‌دهی ورق‌های دولایه Al/St12 در فرآیند کشش عمیق پرداختند. در سال 2016 کرجیبانی و همکاران [11] به بررسی عددی شکل‌پذیری ورق‌های دولایه AA3004/St12 براساس دو معیار مختلف شتاب تغییرات ضخامتی و کرنش اصلی پرداخته، 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 کرجیبانی [14] به بررسی منحنی حد شکل‌دهی ورق‌های دولایه Al/Cu به صورت تحلیلی براساس مدل اصلاح‌شده مارسینیاک و کوزینسکی پرداختند.

تا به امروز برخی پژوهش‌ها بر بهینه‌سازی ورق‌های تک‌لایه 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 دولایه در سال 2014 اِنگل و همکاران [15] به مدل‌سازی فرآیند خمکاری ورق‌های ساندویچی با هدف بهینه‌سازی حدود خمکاری آن‌ها پرداختند. مطابق بررسی‌های انجام شده در زمینه بهینه‌سازی ساختمان ورق‌های دولایه مطالعه‌ای تاکنون انجام نشده و از این‌رو 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 دولایه 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 دولایه 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 به‌دست می‌آید. با استفاده از بهینه‌سازی چند هدفه به کمک الگوریتم ژنتیک براساس جبهه پارتو بهترین نسبت ضخامتی به شرط برآورده‌شدن هر دو تابع هدف تعیین می‌شود.

2- تعیین حد شکل‌دهی ورق دولایه

2-1- مدل تحلیلی M-K برای ورق دولایه

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 دراین 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.

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

i نشانگر شماره لایه‌هاست. ضخامت ورق‌ها حین تغییر شکل در حال تغییر

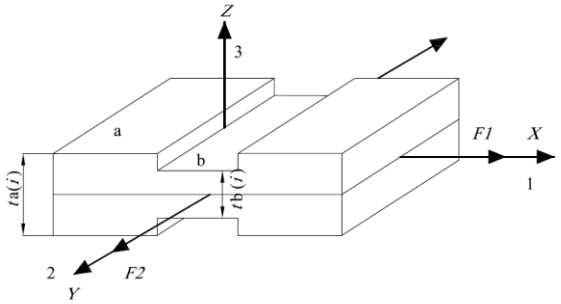


Fig. 1 Model of localized necking for two layer sheet

شکل 1 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.

$$f = f_0 \mathrm{e}^{(\varepsilon_3^{\mathrm{b}} - \varepsilon_3^{\mathrm{b}})} \tag{2}$$

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

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

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

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

در رابطه بالا $R_0^{(i)}$ زبری سطح اولیه ورق‌ها $d_0^{(i)}$ اندازه اولیه دانه‌ها، $k^{(i)}$ ضریب اندازه دانه و $\bar{\varepsilon}^{\mathrm{b}(i)}$ 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.

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

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

رابطه تعادل به‌صورت رابطه (7) نوشته می‌شود.

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

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

$$\varphi^{\mathrm{a}(i) \text{ یا } \mathrm{b}(i)} = \frac{\sigma_1^{\mathrm{a}(i) \text{ یا } \mathrm{b}(i)}}{\bar{\sigma}^{\mathrm{a}(i) \text{ یا } \mathrm{b}(i)}} \tag{8}$$

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

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

$\bar{\sigma}^{\mathrm{a}(i)}$ و $\bar{\sigma}^{\mathrm{b}(i)}$ به ترتیب تنش 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 به‌صورت رابطه (10) بیان می‌شود.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

a به شکل سطح تسلیم وابسته بوده، برای مواد با ساختار B.C.C برابر با 6 و برای مواد F.C.C برابر با 8 است.

قانون شارش وابسته[1] مطابق رابطه (16) در نظر گرفته می‌شود.

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

که $d\gamma$ ضریب پلاستیک و h تابع تسلیم است. با در نظر گرفتن تابع تسلیم بارلات-لاین، قوانین شارش مطابق رابطه (17) نوشته می‌شود.

$$\frac{d\varepsilon_1}{\mathrm{sign}(\sigma_1)|\sigma_1|^{a-1} + \mathrm{sign}(\sigma_1+u\sigma_2)\frac{c}{2-c}|\sigma_1-u\sigma_2|^{a-1}} = \frac{d\varepsilon_2}{\mathrm{sign}(u\sigma_2)u|u\sigma_2|^{a-1} - \mathrm{sign}(\sigma_1+u\sigma_2)\frac{cu}{2-c}|\sigma_1-u\sigma_2|^{a-1}} = \frac{-d\varepsilon_3}{\mathrm{sign}(\sigma_1)|\sigma_1|^{a-1} + \mathrm{sign}(u\sigma_2)u|u\sigma_2|^{a-1} + \frac{c}{2-c}\mathrm{sign}(\sigma_1-u\sigma_2)|\sigma_1-u\sigma_2|^{a-1}} = \frac{d\bar{\varepsilon}}{\frac{2}{2-c}\bar{\sigma}^{a-1}} \quad (17)$$

3-2- محاسبه منحنی حد شکل‌دهی ورق دولایه

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

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

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

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

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 α، β، φ، $d\varepsilon_2$ و $d\varepsilon_3$ و همچنین $d\bar{\varepsilon}$ و $\bar{\sigma}$ در ناحیه سالم برای هر یک از لایه‌ها محاسبه می‌شود. با فرض عدم لغزش بین لایه‌ها ($\rho_{\mathrm{layer1}} = \rho_{\mathrm{layer2}}$)، نسبت تنش در ناحیه معیوب برای هر یک از لایه‌ها ($\alpha^{\mathrm{b}(1)}, \alpha^{\mathrm{b}(2)}$) با استفاده از رابطه تعادل به دست می‌آید. با محاسبه مقادیر α، β و φ در ناحیه معیوب لایه‌ها، اجزاء کرنش در ناحیه معیوب به‌دست می‌آید. چنان‌چه نسبت $d\bar{\varepsilon}^{\mathrm{b}}/d\bar{\varepsilon}^{\mathrm{a}}$ برای هر یک از لایه‌ها بزرگ‌تر از مقدار حدی (10) شود [21-24]، مقادیر $\left(\varepsilon_2^{\mathrm{a}(i)}, \varepsilon_1^{\mathrm{a}(i)}\right)$ در آن لایه به عنوان نقطه‌ای از منحنی حد شکل‌دهی در نظر گرفته می‌شود؛ در غیر این صورت با افزودن یک جزء کرنش ($d\varepsilon_1^{\mathrm{a}}$) دیگر به کرنش اعمال شده به منطقه سالم ($\varepsilon_1^{\mathrm{a}}$) 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 به‌دست 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 به‌صورت دوایری به قطر داخلی4.5 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 یکسان آورده شده است. به روشنی تطابق خوبی بین نتایج تجربی و تحلیلی برقرار است.

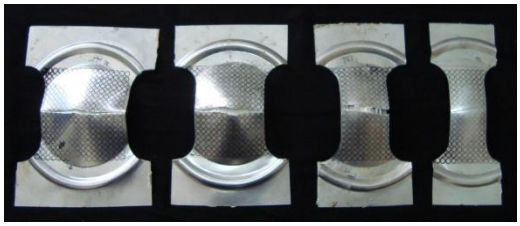
جدول 1 خواص مکانیکی لایه‌های آلومینیومی و فولادی مورد استفاده

Table 1 mechanical property of used aluminum and steel layers

St 14	Al 3105	نماد (یکا)	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 کرنش‌سختی
0.01	0.001	m	ضریب حساسیت به آهنگ کرنش
4	1.6	R_0 (μm)	زبری اولیه سطح
1.77	0.2	r_0	ضرایب ناهمسانگردی
1.95	0.24	r_{90}	
10	20	d_0 (μm)	اندازه دانه ورق

[1] Associated Flow Rule

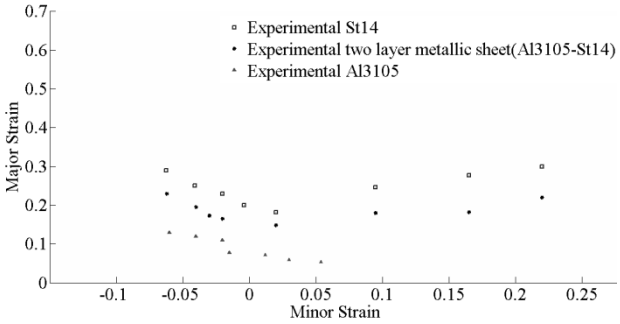
a



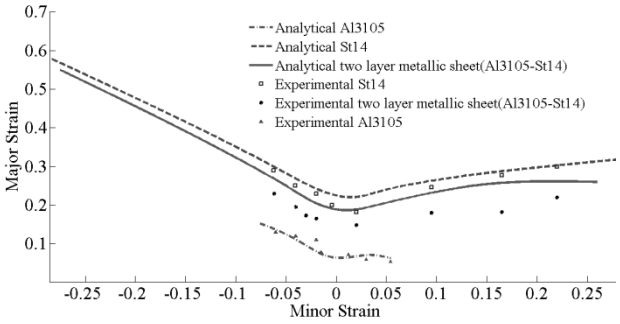
b

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

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



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 دولایه Al 3105-St 14 و لایه‌های مجزا، ب- مقایسه منحنی‌های حد شکل‌دهی تحلیلی ورق دولایه-Al 3105 St 14 و لایه‌های مجزا با نتایج تجربی

3- مدل بهینه‌سازی چند هدفه

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

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

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

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

3-1- تعریف متغیرها

در ورق دولایه تشکیل‌شده از لایه‌های از جنس آلیاژ آلومینیوم3105 Al و فولاد St 14، با توجه به تفاوت قابل توجه شکل‌پذیری و چگالی لایه‌ها، با فرض ثابت بودن ضخامت کلی ورق دولایه نسبت ضخامت لایه‌ها تأثیر بسیاری بر وزن و شکل‌پذیری ورق دولایه خواهد داشت. از این‌رو ضخامت لایه‌های Al 3105 و St 14 به عنوان لایه‌های تشکیل‌دهنده ورق دولایه 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.

$$0\ \text{mm} \le t_{\text{St 14}} \text{ و } t_{\text{Al 3105}} \le 2\ \text{mm} \tag{22}$$

$$t_{\text{St 14}} + t_{\text{Al 3105}} = 2\ \text{mm} \tag{23}$$

3-2- توابع هدف

شکل‌پذیری ورق دولایه و وزن آن به عنوان دو تابع هدف در نظر گرفته شده است. در تعریف تابع شکل‌پذیری (Obj_f)، با توجه به این‌که 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 $(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$ استفاده شده است. 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 دولایه از وزن واحد سطح ورق دولایه 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 دولایه 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.

جدول 2 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	$t_{\mathrm{St}\,14}$	$t_{\mathrm{Al}\,3105}$	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 حالت‌های 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 برازش برای مقادیر به‌دست‌آمده انتخاب شده است. شکل‌های 4 و 5 بهترین توابع شکل‌پذیری و وزن واحد سطح را 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 برحسب ضخامت لایه‌های تشکیل‌دهنده بیان می‌کند.

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

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

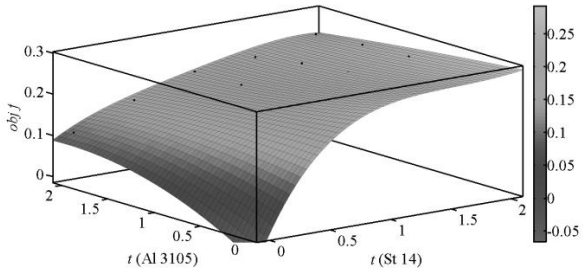


Fig. 4 Best-fitting polynomial surface for formability function of two-layer sheet

شکل 4 بهترین برازش سطح چندجمله‌ای برای تابع شکل‌پذیری ورق دولایه

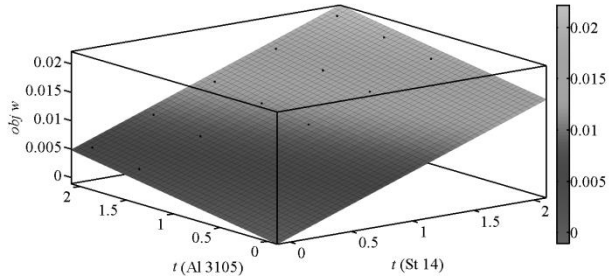


Fig. 5 Best-fitting polynomial surface for weight per unit area function of two-layer sheet

شکل 5 بهترین برازش سطح چندجمله‌ای برای تابع وزن واحد سطح ورق دولایه

4- الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه

در مسائل بهینه‌سازی چند هدفه کمینه یا بیشینه‌کردن هم‌زمان تمام توابع هنگامی‌که در یک رابطه ناسازگارند پیچیده خواهد بود. در این پژوهش از الگوریتم ژنتیک و مفهوم جبهه پارتو برای انجام یافتن پاسخ‌های بهینه استفاده شده است. در الگوریتم ژنتیک جمعیتی تصادفی از ژن‌ها در فضای حالت توزیع شده با بررسی نتایج شایستگی[1] آن‌ها بهترین‌ها انتخاب شده، نسلی جدید تولید می‌شود. تکثیرهای متوالی 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 بهینه‌کردن هم‌زمان چند پارامتر شایستگی مورد نظر است. در این گونه مسائل نظریه بهینگی پارتو و یا جبهه کارآیی به‌جای مفاهیم بهینه‌سازی تک‌هدفی مطرح شده، پاسخ نهایی از میان مجموعه بهینه پارتو انتخاب می‌شود. در کمینه‌کردن x^* پاسخی ممکن برای جبهه پارتو است اگر و فقط اگر هیچ x دیگری در رابطه (26) برقرار نباشد [26].

$$f_i(x) < f_i(x^*) \quad i = 1,2,\dots,n \quad (26)$$

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

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

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

- اندازه جمعیت[2] $P = 45$
- احتمال تقاطع[3] $P_c = 0.8$
- احتمال جهش[4] $P_m = 0.35$
- کسر مهاجرت[5] $P_g = 0.2$
- کسر جمعیت جبهه پارتو[6] $P_p = 0.35$
- شرط اتمام تولید نسل[7] $T = 600$

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 پارتو مطابق شکل 6 به‌دست آمده

[1] Fitness
[2] Population Size
[3] Crossover Probability
[4] Mutation Probability
[5] Migration Fraction
[6] Pareto Front Population Fraction
[7] Termination Generation

است. توابع هدف شکل‌پذیری و وزن واحد سطح ورق دولایه با یکدیگر ناسازگار بوده، هیچ نقطه‌ای وجود ندارد که در آن دو تابع به‌صورت 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 راه‌حل بهینه پارتو است. مقادیر منفی به‌دست‌آمده در شکل 6 برای تابع شکل‌پذیری در واقع مقادیر قرینه FLD_0 است. با توجه به این‌که هدف مسئله بیشینه‌کردن تابع شکل‌پذیری و کمینه‌کردن تابع وزن بوده، برای این‌که مسئله به صورت کمینه‌سازی هر دو تابع هدف تبدیل شود، قرینه مقدار شکل‌پذیری به عنوان تابع هدف برای کمینه‌کردن تعریف شده است.

در این پژوهش برای یافتن مناسب‌ترین پاسخ از میان مجموعه پاسخ‌های جبهه پارتو از تکنیک حداقل فاصله[1] [27] استفاده شده است. مطابق این تکنیک نقطه زانویی[2] می‌تواند به عنوان مناسب‌ترین پاسخ از بین 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 آرمانی[3] است؛ که برای نقطه زانویی حداقل خواهد بود. نقطه آرمانی براساس مقدار بهینه هر یک از توابع هدف به صورت مجزا تعریف می‌شود که با وجود ناسازگاری رفتار توابع هدف در واقعیت قابل دستیابی نیست.

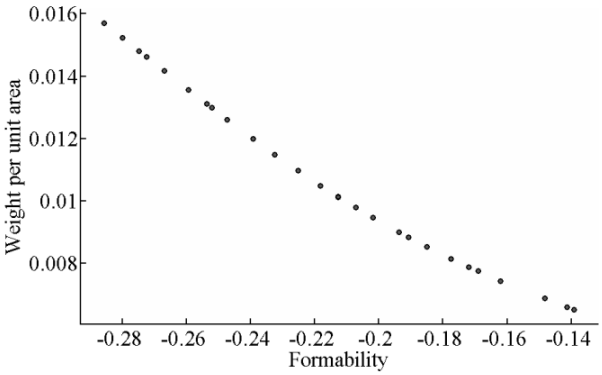


Fig. 6 Pareto front for objective functions of weight per unit area and formability

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

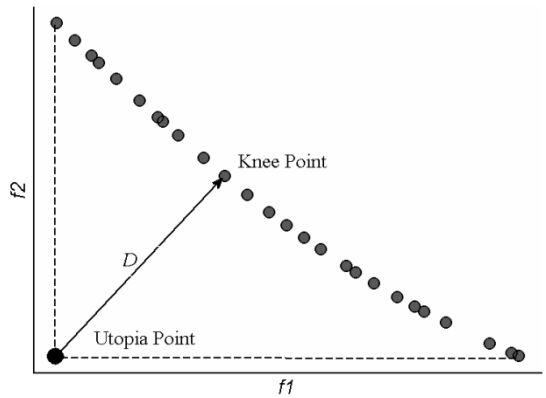


Fig. 7 The schematic position of the knee point on the Pareto front [27]

شکل 7 موقعیت شماتیک نقطه زانویی در جبهه پارتو [27]

[1] Minimum Distance Selection Method (TMDSM)
[2] Knee Point
[3] Utopia Point

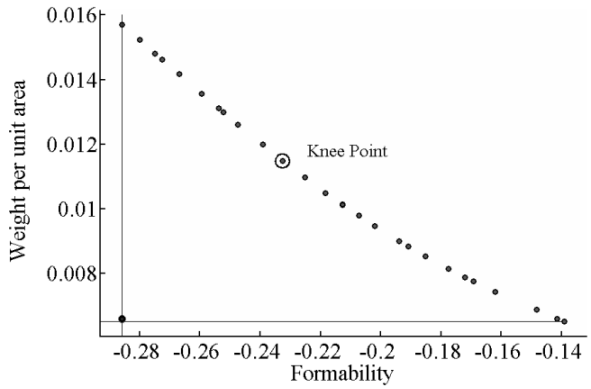


Fig. 8 The knee point on the Pareto front for objective functions of weight per unit area and formability as the best answer

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 آلومینیوم 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	$t_{\text{Al 3105}}$	$t_{\text{St 14}}$
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 مقدار متغیرهای ضخامت لایه‌های فولاد و آلومینیوم 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 دولایه تشکیل شده از لایه‌های از آلیاژ آلومینیوم Al3105 و فولاد St14 تعیین شد. به این منظور کرنش‌های حدی در ورق دولایه با کمک روابط تحلیلی براساس مدل مارسینیک و کوزینسکی (M-K) و بر پایه معیار تسلیم ناهمسانگرد بارلات و لاین محاسبه و منحنی حد شکل‌دهی ورق دولایه استخراج شد، همچنین آزمایش‌های تجربی جهت استخراج منحنی حد شکل‌دهی ورق دولایه Al 3105-St 14 به‌صورت تجربی و ارزیابی درستی مدل تئوری انجام گرفت.

با ثابت در نظر گرفتن ضخامت کلی ورق دولایه متغیرهای ضخامت براساس شرایط مرزی تعیین و با روش فاکتوریل کامل، توابع وزن واحد سطح ورق دولایه و شکل‌پذیری آن برحسب 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 جبهه پارتو با استفاده از تکنیک حداقل فاصله تعیین شد.

6- فهرست علائم

a	نمای تابع تسلیم بارلات- لاین
d_0	اندازه دانه
E	مدول الاستیک
f	ضریب ناهمگونی ورق
f_0	ضریب ناهمگونی اولیه ورق
K	ضریب استحکام
k	ضریب اندازه دانه
m	توان حساسیت به آهنگ کرنش
n	توان کرنش سختی
r_0 , r_{90}	ضرایب ناهمسانگردی در راستاهای $0^\circ, 90^\circ$ نسبت به راستای نورد
R_0	زبری سطح اولیه ورق
R_z	زبری سطح ورق
t	ضخامت ورق
t_0	ضخامت اولیه ورق

علائم یونانی

α	نسبت مؤلفه‌های تنش اصلی
β	نسبت جزء کرنش مؤثر به جزء کرنش در راستای 1
ε_i	مؤلفه‌های کرنش اصلی
$\bar{\varepsilon}$	کرنش مؤثر
$\dot{\bar{\varepsilon}}$	آهنگ کرنش مؤثر
ν	نسبت پواسون
ρ	نسبت مولف‌های کرنش اصلی
σ_i	مؤلفه‌های تنش اصلی
$\bar{\sigma}$	تنش مؤثر
φ	نسبت تنش اصلی در راستای 1 به تنش مؤثر

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. Marciniak, 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 Algorithm 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 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 Marciniak 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. Hasanpour, 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, Zh. 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.