



Experimental and Theoretical Study of Formability Behavior of Aluminum Alloy 5083 Sheet for Determination of Advanced Anisotropic Yield Criteria Coefficient and Prediction of Forming Limit Diagram

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Gholamzadeh E.¹
Panahzadeh V.^{1*}
Hosseinpour M.¹
Alizad kamran M.²

How to cite this article

Gholamzadeh E. Panahzadeh V. Hosseinpour M. Alizad kamran M. Experimental and Theoretical Study of Formability Behavior of Aluminum Alloy 5083 Sheet for Determination of Advanced Anisotropic Yield Criteria Coefficient and Prediction of Forming Limit Diagram. Modares Mechanical Engineering, 2022; 22(01):23-35.

¹ Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Lavizan, Tehran, Iran.

² Department of Mechanical Engineering, Amir Kabir University, Tehran, Iran.

*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Lavizan, Tehran, Iran. P. O. Box: 16785-163 v.panahzadeh@sru.ac.ir

Article History

Received: May 20, 2021
Accepted: August 12, 2021
ePublished: November 14, 2022

ABSTRACT

Forming limit diagrams (FLDs) are very important in predicting the behavior of the sheet. Therefore, predicting and drawing these diagrams by theoretical and experimental methods has been one of the main objectives of this paper. In this paper, the formability behavior of 5083 aluminum sheet was investigated by considering the strain hardening behavior. Tensile tests have been performed in seven directions 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° and 90° from the rolling direction to identify and calibrate coefficients of BBC2008 advanced yield criteria. The yield stresses were defined in the plane strain mode, also the anisotropy coefficients and the appropriate error function were extracted and then the relationships of the plane strain yield stress were added to the error function. The error function was optimized using Genetic Algorithm and limit strains were calculated using yield coefficients. The results showed that if the strain hardening exponent increases by 0.1, the limit strains increase by 30 to 40%. Also the results showed that the initial imperfection factor (f_0) has a great effect on determining the FLD and with a very small change, it has a great effect on the FLD; so that by increasing this factor to about 0.016, the values of the limit strains are almost doubled. Using the results of this paper and having sheet properties such as yield strengths and anisotropy coefficients and proper selection of yield criteria, the FLD of different sheets can be theoretically determined with acceptable accuracy.

Keywords Forming Limit Diagram, Al 5083, BBC2008 Advanced Yield Criteria, Optimization, Plane Strain Tensile Test

CITATION LINKS

[1] Plastic Instability and Fracture in Sheet Stretched over Rigid Punches. [2] Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop. [3] On discontinuous plastic states, with special reference to localized necking in thin sheets. [4] Limit strains in the processes of stretch-forming sheet metal. [5] The influence of strain-path changes on forming limit diagrams of A1 6111 T4. [6] Investigation of formability of low carbon steel sheets by forming limit diagrams. [7] Theoretical determination of forming limit diagram for steel, brass and aluminum alloy sheets. [8] Experimental and numerical evaluation of forming limit diagram for Ti6Al4V titanium and Al6061-T6 aluminum alloys sheets. [9] Experimental and numerical analysis of forming limit diagram (FLD) and forming limit stress diagram (FLSD). [10] Forming limit and fracture mechanism of ferritic stainless steel sheets. [11] Calculation of forming limit diagrams using Hill's 1993 yield criterion. [12] The effects of anisotropic yield functions and their material parameters on prediction of forming limit diagrams. [13] The Effect of Advanced BBC2003, Yld2004 and BBC2008 Yield Criteria on FLDs Based on MK, Swift's and Hill's Models. [14] An experimental and theoretical investigation for determination of yield criteria parameters... [15] The forming limit curve for multiphase advanced high strength steels... [16] Forming limits of dual phase steels using crystal plasticity in conjunction with MK approach. [17] Prediction of FLD for sheet metal by considering through-thickness shear stresses. [18] Investigation on the effective range of the through thickness shear stress... [19] Controlling factors of forming limit curve: A review. [20] Crystal plasticity finite element-Marciniak-Kuczynski approach with surface roughening effect... [21] Plane stress yield criterion for highly anisotropic sheet metals. [22] Techniques of measurement of body composition Part II. [23] An improved analytical description of orthotropy in metallic sheets. [24] A study of microstructure and tribological properties of Al 5083 MMC processed by direct extrusion. [25] A novel and simple method for the measurement of plane strain work hardening.

تحلیل تئوری و تجربی رفتار شکل‌پذیری ورق آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ برای تعیین ضرایب معیارهای تسلیم ناهمسانگرد پیشرفته و پیش‌بینی نمودار حد شکل‌پذیری

ارمیا غلامزاده

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران
ولی‌اله پناهی زاده*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

محمد حسین پور

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

مرتضی علیزاد کامران

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

نمودارهای حد شکل‌پذیری در پیش‌بینی رفتار ورق از اهمیت بالایی برخوردار است، لذا پیش‌بینی و ترسیم این نمودارها به روش تئوری و تجربی یکی از اصلی‌ترین اهداف مقاله حاضر بوده است. در این مقاله رفتار شکل‌پذیری ورق آلومینیوم ۵۰۸۳، با در نظر گرفتن رفتار کرنش-سختی برای ورق مورد بررسی قرار گرفت. جهت به دست آوردن و کالیبره نمودن ضرایب معیار تسلیم پیشرفته‌ی BBC2008، آزمون کشش در ۷ راستا با زوایای ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه نسبت به جهت نورد انجام شد. تنش‌های تسلیم در حالت کرنش صفحه‌ای محاسبه و ضرایب ناهمسانگردی استخراج شده و تابع خطای مناسب تعریف گردید؛ سپس روابط مربوط به محاسبه تنش تسلیم کرنش صفحه‌ای به تابع خطا افزوده شد. تابع خطا با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شد و با استفاده از ضرایب معیار تسلیم به دست آمده، کرنش‌های حدی محاسبه گردید. نتایج نشان دادند که با افزایش ۰/۱ توان کرنش سختی، کرنش‌های حدی بین ۳۰ تا ۴۰ درصد افزایش می‌یابند. همچنین نتایج نشان دادند که ضریب ناهمگنی اولیه (f_0) در تعیین نمودار حد شکل‌دهی تأثیر زیادی دارد و با تغییر بسیار جزئی، تأثیر به سزایی در نمودار حد شکل‌دهی می‌گذارد؛ به گونه‌ای که با افزایش این ضریب در حدود ۰/۱۰۶ مقادیر کرنش‌های حدی تقریباً دو برابر می‌شوند. با استفاده از نتایج این مقاله، می‌توان با داشتن خواص ورق از جمله استحکام‌های تسلیم و ضرایب ناهمسانگردی و انتخاب مناسب معیار تسلیم، منحنی حد شکل‌پذیری ورق‌های مختلف را به صورت تئوری با دقت قابل قبولی تعیین کرد. **کلیدواژه‌ها:** نمودار حد شکل‌پذیری، آلومینیوم ۵۰۸۳، معیار تسلیم پیشرفته‌ی BBC2008، بهینه‌سازی، آزمون کشش کرنش صفحه‌ای

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۲۱

*نویسنده مسئول: v.panahizadeh@sru.ac.ir

۱- مقدمه

در تمام فرایندهای تولید در زمینه‌ی شکل‌دهی ورق‌های فلزی، هدف اصلی فرایند این است که ورق دچار عیب‌هایی همچون گلوبی یا پارگی نشود. برای جلوگیری از گلوبی شدن، کرنش‌ها یا تنش‌های حدی که به گلوبی شدن می‌انجامد باید معین شود؛

بنابراین پژوهش‌های تئوری و تجربی بسیاری برای پیش‌بینی نمودارهای حد شکل‌دهی و حد تنش شکل‌دهی انجام شده است. مقدار حدی کرنش‌های اصلی ϵ_1 و ϵ_2 را با به کارگیری شبکه‌بندی دایروی و اندازه‌گیری کرنش‌ها در واماندگی (گلوبی، شکست، چین خوردگی و ...) می‌توان تعیین کرد. شروع تحقیقات در این زمینه توسط کیلر^[۱] انجام گرفت. گودوین^[۲] با استفاده از آزمون‌های مکانیکی مختلف منحنی را برای ناحیه‌ی کشش/ فشار رسم کرد. نمودارهای کیلر (سمت راست) و گودوین (سمت چپ)، نمودار حد شکل‌دهی نامیده می‌شوند. هیل^[۳] روشی را ایجاد کرد که نشان می‌دهد چگونه در طی تغییر شکل یکنواخت و در شرایط ناپایداری، گلوبی موضعی ایجاد می‌شود. درکشش تک‌محوره، گلوبی موضعی در راستایی که نسبت به جهت بارگذاری شیب‌دار است، گسترش می‌یابد. هیل فرض کرد که جهت گلوبی منطبق بر جهت بدون تغییر طول بوده و بنابراین کرنش در ناحیه‌ی گلوبی تنها به دلیل نازک شدن ورق است. مدل ناهمگنی اولیه در ورق که توسط مارسینیاک و کوزینسکی^[۴] ارائه شد و به مدل MK نیز معروف است، بیشترین کاربرد را در بین تئوری‌های ذکر شده دارد. در مدل MK فرض می‌شود به علت تغییرات ضخامت ورق، اندازه‌ی دانه، بافت یا غلظت عناصر حل شده، در ورق فلزی یک ناهمگنی ایجاد می‌شود. مارسینیاک و کوزینسکی، این ناهمگنی در ورق را به عنوان یک عیب هندسی و به شکل یک نوار باریک با ضخامت کمتر مدل کردند. این عیب اولیه می‌تواند هر ترکیبی از ناهمگنی‌های ماده و هندسه‌ی قطعه باشد. برای پیش‌بینی شروع گلوبی با مدل MK، ورق در معرض حالت تنش یکنواخت و تناسبی قرار می‌گیرد. هم‌چنان‌که تغییر شکل پلاستیک افزایش می‌یابد، کرنش اصلی در نوار به‌طور فزاینده‌ای بزرگ‌تر از بقیه‌ی ورق می‌شود. در نتیجه نسبت ضخامت‌ها ($\frac{t_b}{t_a}$) کاهش می‌یابد تا این‌که گلوبی موضعی ایجاد می‌شود. گراف و هاسفورد^[۵] به بررسی نمودار حد شکل‌دهی برای آلیاژ آلومینیوم ۶۱۱۱ پرداختند. آن‌ها نمودار حد شکل‌دهی را در دو راستای ۰ و ۹۰ درجه نسبت به راستای نورد ورق به دست آوردند.

جهرمی و همکاران^[۶] برای سه آلیاژ فولادی IF، St14 و St12 با انجام آزمون کشش بر روی سنبه کروی به صورت تجربی، نمودارهای حد شکل‌دهی را به دست آوردند. آن‌ها به بررسی تأثیر خواص مکانیکی بر نمودار حد شکل‌دهی پرداختند و نتیجه گرفتند که، نمودار حد شکل‌دهی در St12 کمتر و پایین‌تر از St14 و IF است. ادريس و ولید^[۷] با استفاده از معیارهای تسلیم مختلف مانند معیار هیل ۱۹۴۸ و معیار اصلاح‌شده‌ی هاسفورد ۱۹۸۵ نمودارهای حد شکل‌دهی را به دست آوردند. همچنین با بررسی نتایج، نتیجه گرفتند که معیار تسلیم هاسفورد ۱۹۸۵ به همراه مدل مارسینیاک-کوزینسکی نتایج دقیق‌تری نسبت به سایر معیارهای مورد بررسی می‌دهد. جوانرودی و همکاران^[۸] شکل‌پذیری در طی شکل‌دهی ورق‌های آلومینیوم Al6061-t6 و آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V را مورد

شکل‌دهی را تعیین نمودند. برای حل معادلات، از روش نیوتن-رافسون استفاده نمودند. علاوه بر این، آزمایش ناکازیمما را برای بررسی وضعیت تنش ایجاد شده در ورق، که در طول آزمون رخ می‌دهد، شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش تنش در ضخامت، شکل‌پذیری ورق فلز می‌تواند بهتر باشد. عاصم‌پور و همکاران^[18] در تحقیق دیگری نشان دادند که تنش برشی ضخامتی کمتر از ۱۰ درصد تنش تسلیم، تأثیری قابل توجهی بر نمودار حد شکل‌پذیری ندارد. پائول^[19] نیز به بررسی کامل در خصوص عوامل کنترل‌کننده در منحنی‌های حد شکل‌دهی از جمله روش تعیین کرنش حدی، هندسه پانچ، ریزساختار، مسیرهای کرنش، نرخ کرنش و دما پرداخته است. جانگ و همکاران^[20] منحنی حد شکل‌دهی برای ورق‌های با ضخامت بسیار کم فولادهای با استحکام بالای فریتی، بر اساس مدل‌سازی اجزای محدود کریستال پلاستیسیته را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از مدل مارسینیاک-کوزینسکی استفاده کرده و اثر زبری سطح را نیز بررسی نمودند.

با توجه به اهمیت نمودارهای حد شکل‌پذیری در پیش‌بینی رفتار ورق، مخصوصاً در ورق‌هایی که ناهمسانگردی زیادی دارند (مانند ورق فلزی بررسی شده در این مقاله) که باعث عدم دقت در پیش‌بینی این نمودارها می‌شوند؛ بنابراین رفتار شکل‌پذیری ورق آلومینیوم ۵۰۸۳، با در نظر گرفتن رفتار کرنش-سختی مورد بررسی قرار گرفت. تست کرنش صفحه‌ای عنوان در بدست آوردن ضرایب معیارهای تسلیم نقش موثری را ایفا می‌کند و دقت نتایج را بالاتر خواهد برد. از آنجایی که در کارهای قبلی از نتایج این تست در بدست آوردن نمودار حد شکل‌دهی استفاده نشده است در کار حاضر با اضافه نمودن این تست و استفاده از نتایج آن در مقاله حاضر انتظار می‌رود دقت نمودار حد شکل‌پذیری بدست آمده برای جنس مورد نظر افزایش یابد. اضافه شدن این تست جهت تعیین ضرایب معیار تسلیم یکی از نوآوریهای مقاله حاضر است؛ همچنین با تعریف درست پارامترهای مهمی مثل ضریب ناهمگنی اولیه و ضرایب معیارهای تسلیم، مدل MK توانست نمودار حد شکل‌دهی (FLD) ورق آلومینیوم ۵۰۸۳ را هم به خوبی پیش‌بینی کند. با استفاده از نتایج به دست آمده در این مقاله، می‌توان با داشتن خواص ورق از جمله استحکام‌های تسلیم و ضرایب ناهمسانگردی و انتخاب مناسب معیار تسلیم، منحنی حد شکل‌پذیری ورق‌های مختلف را به صورت تئوری با دقت قابل قبولی تعیین کرد.

۲- روابط تئوری

۲-۱- معیار تسلیم BBC2008

معیار تسلیم BBC2008 یک معیار تسلیم تنش صفحه‌ای است که اغلب برای ورق‌های دارای ناهمسانگردی زیاد به منظور تشریح رفتار پلاستیک استفاده می‌شود. با فرض این‌که ورق فلزی تحت

مطالعه قرار داده و با استفاده از فرایند کشش عمیق کرنش‌های حدی را به دست آوردند. در مدل‌سازی به روش اجزای محدود به این نتیجه رسیدند که معیار هیل و سوئیفت بهترین پیش‌بینی را ارائه می‌دهد. صفری و همکاران^[9] به صورت تجربی نمودار حد شکل‌دهی را برای آلیاژ آلومینیوم ۳۱۰۵ را به دست آورد. ایشان با کرنش‌های به دست آمده از روش تجربی، با استفاده از معیار شکست نرم، شبیه‌سازی را انجام داد. مسیرهای کرنش تعیین شده از شبیه‌سازی اجزای محدود پوشش مناسبی برای هر دو سمت نمودار حد شکل‌دهی ارائه داد. لی و بارلات^[10] نمودارهای حد شکل‌دهی دو فولاد فریتی را با قانون کارسختی سوئیفت و با معیار تسلیم yld2000-2d، به کمک مدل مارسینیاک-کوزینسکی به دست آوردند. با انجام آزمون‌های تجربی و به دست آوردن نمودار تجربی به این نتیجه رسیدند که نمودار تئوری دقت مناسبی در مقایسه با نمودار تجربی دارد. نوری و رضایی^[11] برای دو آلیاژ آلومینیوم و یک آلیاژ فولاد نمودار تجربی حد شکل‌دهی را به دست آوردند. سپس نمودار تجربی را با نمودارهای تحلیلی مبتنی بر مدل جونز-جیلیس و معیار تسلیم هیل ۱۹۹۳ مقایسه کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که منحنی‌های تئوری به دست آمده بالاتر از نمودارهای تجربی قرار می‌گیرند. داساپا و اینال^[12] از ۵ معیار مختلف مانند هیل ۱۹۴۸ و پلانکت ۲۰۰۸ جهت به دست آوردن نمودارهای حد شکل‌دهی استفاده کردند. آن‌ها برای به دست آوردن نمودارهای فوق از مدل ناهمگنی مارسینیاک-کوزینسکی استفاده کردند. مقایسه با نمودارهای تجربی نشان داد که پیش‌بینی تئوری نمودارهای حد شکل‌دهی بستگی زیادی به روش انتخاب پارامترهای خواص مواد و نوع معیار تسلیم انتخاب شده دارد. حسین‌پور و همکاران^[13] از معیارهای پیشرفته‌ی BBC2003 و yld2004 و BBC2008 با قانون سخت‌شوندگی سوئیفت بر اساس مدل‌های مارسینیاک-کوزینسکی، گلوبی پخش سوئیفت و گلوبی موضعی در محاسبه‌ی کرنش‌های حدی را بررسی کردند. ظهور و همکاران^[14] مطالعات تجربی و تئوری پیش‌بینی نمودار حد شکل‌دهی را برای آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ انجام دادند. بسام محمد و همکاران^[15] منحنی حد شکل‌دهی برای فولادهای با استحکام بالای پیشرفته‌ی چند فازی، بر اساس مدل‌سازی اجزای محدود کریستال پلاستیسیته را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از مدل مارسینیاک-کوزینسکی استفاده کردند. با مقایسه‌ی نتایج تئوری با نتایج تجربی، دقت مناسبی مشاهده کردند. جیونگ و همکاران^[16] به بررسی حد شکل‌دهی برای فولادهای دوفازی، مبتنی بر مدل ناهمگنی مارسینیاک-کوزینسکی پرداختند. دقت بررسی‌های آن‌ها با مقایسه با کرنش‌های حدی تجربی به دست آمده از آزمایش ناکازیمما سنجیده شد. عاصم‌پور و همکاران^[17] در مطالعه‌ای، تأثیر تنش برشی ضخامتی ورق را بر روی نمودارهای حد شکل‌دهی بررسی کرده‌اند. آن‌ها از مدل مارسینیاک-کوزینسکی با برخی تغییرات در شرایط تنش، نمودارهای حد

$$\sigma_{12} = \sigma_{21} = 0 \quad (۸-ب)$$

Y_b تنش تسلیم دومحوری تئوری است. در نتیجه رابطه ی ۸ به شکل رابطه ی ۹ بیان می شود.

$$\sigma_b = Y_b \cdot F_b \quad (۹)$$

در این رابطه σ_b ، تنش تسلیم دومحوره ی تجربی است. ضریب ناهمسانگردی دومحوری به صورت نسبت کرنش های اصلی به شکل رابطه ی ۱۰ تعریف می شود.

$$r_b = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \quad (۱۰)$$

به علت ساختار بسط پذیر معیار تسلیم، روش های شناسایی زیادی می تواند به کار رود. در این مقاله بحث به فرایندی که از تنش های تسلیم نرمالیزه شده و ضرایب r به دست آمده از آزمون های کشش تک محوره و دومحوره، استفاده می کند، محدود می شود.

Y_θ تنش تسلیم تئوری پیش بینی شده توسط معیار تسلیم در حالت کشش تک محوری در راستای جهتی با زاویه ی θ نسبت به جهت نورد است. رابطه ی ۱۱ مؤلفه های صفحه ای تانسور تنش را نشان می دهد.

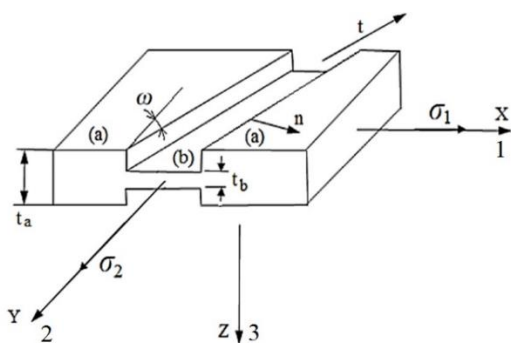
$$\sigma_{11}|\theta = Y_\theta \cos^2 \theta \quad (۱۱-الف)$$

$$\sigma_{22}|\theta = Y_\theta \sin^2 \theta \quad (۱۱-ب)$$

$$\sigma_{12}|\theta = \sigma_{21}|\theta = Y_\theta \sin \theta \cos \theta \quad (۱۱-ج)$$

۲-۳- مدل گلوبی مارسینیاک-کوزینسکی

مدل MK بر مبنای رشد ناهمگنی اولیه به شکل یک نوار باریک است که نسبت به محورهای اصلی دارای زاویه ی ω است که در شکل ۱ نشان داده شده است. ماده به حالت صلب-پلاستیک، شرایط تنش صفحه ای و کار سختی همسانگرد فرض شده است. محورهای x, y و z مربوط مدل MK بر مبنای رشد ناهمگنی اولیه به شکل یک نوار باریک است که نسبت به محورهای اصلی هم راستای جهت های نورد، عمود بر جهت نورد و عمود بر ورق بوده و محورهای ۱ و ۲ جهت های تنش و کرنش اصلی در ناحیه ی همگن را نشان می دهند. دستگاه مختصات مربوط به شیار، با محورهای n, t و z نشان داده شده اند که t محور طولی است. با اعمال کشش افزایشی به منطقه ی همگن، این دو ناحیه ی ماده در معرض تغییر شکل پلاستیک قرار داده می شوند. حد شکل دهی بر اساس این معیار زمانی رخ می دهد که نسبت نمو کرنش در



شکل ۱) هندسه ی مدل MK [6]

شرایط تنش صفحه ای مانند یک پوسته ی اورتوتروپیک پلاستیک رفتار می کند، از تعریفی که در رابطه ی ۱ نشان داده شده، برای سطح تسلیم استفاده شده است. لازم به توضیح است که تمامی روابطی که در بخش ۲ بکار برده شده است از مراجع [۲۱-۲۳] استفاده شده است.

$$\bar{\sigma}(\sigma_{\alpha\beta}) - Y = 0 \quad (۱)$$

در رابطه ی (۱)، $\bar{\sigma}(\sigma_{\alpha\beta}) \geq 0$ تنش معادل است که در رابطه ی (۳) تعریف خواهد شد. $Y > 0$ پارامتر تسلیم و $\sigma_\beta = \sigma_{\beta\alpha}$ ($\alpha, \beta = 1, 2$) و مؤلفه های صفحه ای تانسور تنش هستند. سایر مؤلفه ها از قید رابطه ی ۲ تبعیت می کنند.

$$\sigma_{3i} = \sigma_{i3} = 0, \quad i = 1, 2, 3 \quad (۲)$$

تنش معادل به کاررفته در معادله ی (۱) به صورت رابطه ی ۳ تعریف می شود.

$$\frac{\bar{\sigma}^{2k}}{w-1} = \sum_{i=1}^s \left\{ \frac{w^{i-1} [(L^{(i)} + M^{(i)})^{2k} + (L^{(i)} - M^{(i)})^{2k}]}{w^{s-i} [(M^{(i)} + N^{(i)})^{2k} + (M^{(i)} - N^{(i)})^{2k}]} \right\} \quad (۳)$$

برای فلزات با ساختار BCC، $k=3$ و برای فلزات FCC، $k=4$ پیشنهاد شده است و $w, L^{(i)}, M^{(i)}$ و $N^{(i)}$ مطابق رابطه ی ۴ عبارت اند از:

$$L^{(i)} = l_1^{(i)} \sigma_{11} + l_2^{(i)} \sigma_{22} \quad (۴-الف)$$

$$M^{(i)} = \sqrt{[m_1^{(i)} \sigma_{11} - m_2^{(i)} \sigma_{22}]^2 + [m_3^{(i)} (\sigma_{12} + \sigma_{21})]^2} \quad (۴-ب)$$

$$N^{(i)} = \sqrt{[n_1^{(i)} \sigma_{11} - n_2^{(i)} \sigma_{22}]^2 + [n_3^{(i)} (\sigma_{12} + \sigma_{21})]^2} \quad (۴-ج)$$

$$w = (3/2)^{\frac{1}{s}} > 1 \quad (۴-د)$$

که $(i = 1, \dots, s)$ $n_3^{(i)}, n_2^{(i)}, n_1^{(i)}, m_3^{(i)}, m_2^{(i)}, m_1^{(i)}, l_2^{(i)}, l_1^{(i)}$ پارامترهای ماده هستند.

۲-۲- روش محاسبه ی تنش های تسلیم و ضرایب ناهمسانگردی

تنش تسلیم تک محوره مربوط به زاویه ی θ نسبت به جهت نورد با Y_θ نمایش داده می شود. در مورد بار تک محوره، مؤلفه های تانسور تنش به شکل رابطه ی ۵ بیان می شوند [21] (روابط از مرجع ۲۱ آورده شده اند).

$$\sigma_{11} = Y_\theta \cdot \cos^2 \theta \quad (۵-الف)$$

$$\sigma_{22} = Y_\theta \cdot \sin^2 \theta \quad (۵-ب)$$

$$\sigma_{12} = \sigma_{21} = Y_\theta \sin \theta \cos \theta \quad (۵-ج)$$

با جایگذاری روابط ۵ در رابطه ی تنش معادل، رابطه ی ۶ حاصل می شود.

$$\sigma = Y_\theta \cdot F_\theta \quad (۶)$$

در این رابطه، تابع F_θ به زاویه ی θ وابسته است. F_θ بر اساس فرمولاسیون تنش معادل تعریف می شود. رابطه ی تعریف کننده ی ضریب ناهمسانگردی مربوط به زاویه ی θ به شکل رابطه ی ۷ است.

$$r_\theta = - \frac{\sin^2 \theta \cdot \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_{11}} - 0.5 \sin 2\theta \cdot \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_{12}} + \cos^2 \theta \cdot \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_{22}}}{\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_{11}} + \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_{22}}} \Big|_{\sigma_\theta} \quad (۷)$$

در مورد تنش دومحوری در امتداد جهت نورد و عمود بر آن، رابطه ی ۸ برقرار است.

$$\sigma_{11} = \sigma_{22} = Y_b \quad (۸-الف)$$

$$F_2 = d\varepsilon_{tt}^b - d\varepsilon_{tt}^a = 0 \quad (20-ب)$$

$$F_3 = f\sigma_{nn}^b - \sigma_{nn}^a = 0 \quad (20-ج)$$

$$F_4 = f\sigma_{nt}^b - \sigma_{nt}^a = 0 \quad (20-د)$$

چنانچه ماتریس معادلات به صورت $[F] = [F_1 F_2 F_3 F_4]^T$ و ماتریس متغیرها به صورت $[X] = [\sigma_{tt}^b \sigma_{nn}^b \sigma_{nt}^b d\varepsilon^b]^T$ تعریف گردد، روش نیوتن-رافسون را می توان به صورت رابطه ی ۲۱ خلاصه نمود.

$$[X]_{i+1} = [X]_i + [dX]_i \quad (21-الف)$$

$$[dX]_i = -[j]_{ij}^{-1}[F]_j \quad (21-ب)$$

که در آن $[j]_{ij}^{-1}$ معکوس ماتریس ژاکوبین $[j]_{ij}$ است و به صورت رابطه ۲۲ تعریف می شود.

$$[j]_{ij} = \left[\frac{\partial F_i}{\partial X_j} \right] \quad (22)$$

۲-۴- تنش تسلیم تئوری در شرایط کرنش صفحه ای

در شرایط کرنش صفحه ای، رابطه ی ۲۳ برای محاسبه ی کرنش ها با استفاده از بردار تنش و ماتریس مدول های کشسان، صادق است [22].

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \frac{(1+\nu)}{E} \begin{pmatrix} (1-\nu) & -\nu & 0 \\ -\nu & (1-\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (23)$$

با توجه به اینکه در شرایط کرنش صفحه ای ε_{12} صفر است؛ بنابراین رابطه ی ۲۴ نتیجه گیری می شود:

$$\varepsilon_{12} = 0 \rightarrow \sigma_{12} = 0 \quad (24)$$

با اعمال شرایط کرنش صفحه ای در راستای ۲، رابطه ی ۲۵ به دست می آید:

$$\varepsilon_{22}^{pl} = \lambda \frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{22}} = 0 \quad (25)$$

از آنجایی که $\lambda \neq 0$ ، می توان رابطه ی ۲۶ را نتیجه گرفت:

$$\frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{22}} = 0 \quad (26)$$

با فرض $\alpha_1^{ps} = \frac{\sigma_{22}}{\sigma_{11}}$ ، نسبت تنش های واقع در صفحه، می توان برای حالتی که ورق در راستای نورد، تحت کشش کرنش صفحه ای قرار می گیرد، رابطه ی ۲۷ را برحسب α_1^{ps} به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{22}} \Big|_{\alpha_1^{ps}} = & \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial L^{(1)}} \Big|_{\alpha_1^{ps}} \times \frac{\partial L^{(1)}}{\partial \sigma_{22}} \Big|_{\alpha_1^{ps}} + \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial M^{(1)}} \Big|_{\alpha_1^{ps}} \times \frac{\partial M^{(1)}}{\partial \sigma_{22}} \Big|_{\alpha_1^{ps}} \\ & + \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial N^{(1)}} \Big|_{\alpha_1^{ps}} \times \frac{\partial N^{(1)}}{\partial \sigma_{22}} \Big|_{\alpha_1^{ps}} \quad (27) \\ & + \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial L^{(2)}} \Big|_{\alpha_1^{ps}} \times \frac{\partial L^{(2)}}{\partial \sigma_{22}} \Big|_{\alpha_1^{ps}} + \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial M^{(2)}} \Big|_{\alpha_1^{ps}} \times \frac{\partial M^{(2)}}{\partial \sigma_{22}} \Big|_{\alpha_1^{ps}} \\ & + \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial N^{(2)}} \Big|_{\alpha_1^{ps}} \times \frac{\partial N^{(2)}}{\partial \sigma_{22}} \Big|_{\alpha_1^{ps}} = 0 \end{aligned}$$

که در رابطه ی ۲۷ پارامترهای $N_{\alpha_1^{ps}}^{(1)}$ ، $M_{\alpha_1^{ps}}^{(1)}$ ، $L_{\alpha_1^{ps}}^{(2)}$ ، $N_{\alpha_1^{ps}}^{(2)}$ ، $M_{\alpha_1^{ps}}^{(2)}$ ، $L_{\alpha_1^{ps}}^{(1)}$ و $H_1(\alpha_1^{ps})$ به صورت روابط ۲۸ و ۲۹ تعریف می شوند:

$$L_{\alpha_1^{ps}}^{(1)} = (l_{11} + \alpha_1^{ps} l_{12}) \quad (28-الف)$$

$$L_{\alpha_1^{ps}}^{(2)} = (l_{21} + \alpha_1^{ps} l_{22}) \quad (28-ب)$$

ناحیه ی b به نمو کرنش در ناحیه ی a از حدی عبور کند.

بر اساس تئوری مدل MK لازم است یک تابع تسلیم، قانون سخت شوندگی و قانون جریان تعریف شود. برای تشریح کارسختی ماده، قانون سخت شوندگی سوئیفت مطابق رابطه ی ۱۲ در نظر گرفته شده است.

$$\bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}, \bar{\varepsilon}) = K(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon})^n \bar{\varepsilon}^m \quad (12)$$

که $\bar{\varepsilon}$ و $\bar{\varepsilon}$ تنش مؤثر، کرنش مؤثر و نرخ کرنش مؤثر هستند. ε_0 و ضرایب K ، n و m ثابت های ماده هستند.

قانون جریان که رابطه ی بین نمو کرنش ها را شرح می دهد، در رابطه ی ۱۳ آورده شده است.

$$d\varepsilon_{ij} = d\bar{\varepsilon} \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_{ij}} \quad (13)$$

که $d\bar{\varepsilon}$ و $d\varepsilon_{ij}$ به ترتیب نمو کرنش مؤثر و نمو کرنش مربوط به جهت تنش σ_{ij} هستند.

برای استفاده از قانون جریان مطابق رابطه ی ۱۳، به مشتقات جزئی تابع تسلیم نسبت به مؤلفه های صفحه ای تانسور تنش نیاز است. با محاسبه ی تنش و جزء کرنش در ناحیه ی همگن $(\sigma_{tt}^a, \sigma_{nn}^a, \sigma_{nt}^a)$ ، مقادیر تنش و جزء کرنش مربوطه در ناحیه ی b با استفاده از روابط تعادل و سازگاری به دست می آیند. برای به دست آوردن تنش ها و جزء کرنش ها در ناحیه ی b ، ۶ معادله مورد نیاز است؛ اما با توجه به این که مقادیر جزء کرنش $d\varepsilon_{ij}$ توسط قانون جریان با جزء کرنش مؤثر ارتباط دارد، تعداد معادله های مورد نیاز به ۴ عدد کاهش می یابد. شرایط تعادل به رابطه ی ۱۴ منجر می شود.

$$\sigma_{nn}^b t^b = \sigma_{nn}^a t^a \quad (14-الف)$$

$$\sigma_{nt}^b t^b = \sigma_{nt}^a t^a \quad (14-ب)$$

$$\sigma_{tt}^b t^b = \sigma_{tt}^a t^a \quad (14-ج)$$

شرایط سازگاری، رابطه ی ۱۵ را نتیجه می دهد.

$$d\varepsilon_{tt}^b = d\varepsilon_{tt}^a \quad (15)$$

معادلات تعادل به شکل رابطه ی ۱۶ خلاصه می شوند.

$$f\sigma_{nn}^b = \sigma_{nn}^a \quad (16-الف)$$

$$f\sigma_{nt}^b = \sigma_{nt}^a \quad (16-ب)$$

که $f = \frac{t^b}{t^a}$ ، فاکتور ناهمگنی بوده و در حین تغییر شکل طبق رابطه ی ۱۷ بیان می شود.

$$f = f_0 \exp(\varepsilon_{zz}^b - \varepsilon_{zz}^a) \quad (17)$$

فاکتور ناهمگنی اولیه f_0 در معادله ی ۱۸ تعریف شده است.

$$f_0 = \frac{t_0^b}{t_0^a} \quad (18)$$

با استفاده از معادلات ۱۵ و ۱۶ مجهولات σ_{tt}^b ، σ_{nt}^b ، σ_{nn}^b به دست می آیند. معادله ی چهارم، بر اساس پایداری انرژی است که طبق رابطه ی ۱۹ بیان می شود.

$$d\varepsilon_{nn}^b \sigma_{nn}^b + d\varepsilon_{nt}^b \sigma_{nt}^b + d\varepsilon_{tt}^b \sigma_{tt}^b = d\varepsilon^b \bar{\sigma} \quad (19)$$

چهار معادله، در مجموع به صورت رابطه ی ۲۰ نشان داده شده است.

$$F_1 = d\varepsilon_{nn}^b \sigma_{nn}^b + d\varepsilon_{nt}^b \sigma_{nt}^b + d\varepsilon_{tt}^b \sigma_{tt}^b - d\varepsilon^b \bar{\sigma} = 0 \quad (20-الف)$$

$$\sigma_2^{PS} = \frac{Y_2^{PS.exp}}{H_2(\alpha_2^{PS})} \quad (۳۴)$$

که در رابطه‌ی ۳۴ تابع $H_2(\alpha_2^{PS})$ و ضرایب آن به صورت روابط ۳۵ و ۳۶ محاسبه می‌شود:

$$H_2(\alpha_2^{PS}) = \left((w-1) \sum_{i=1}^s \left(w^{i-1} \left(\begin{matrix} (L_{\alpha_2^{PS}}^i + M_{\alpha_2^{PS}}^i)^{2k} \\ + (L_{\alpha_2^{PS}}^i - M_{\alpha_2^{PS}}^i)^{2k} \end{matrix} \right) + w^{s-i} \left(\begin{matrix} (M_{\alpha_2^{PS}}^i + N_{\alpha_2^{PS}}^i)^{2k} \\ + (M_{\alpha_2^{PS}}^i - N_{\alpha_2^{PS}}^i)^{2k} \end{matrix} \right) \right) \right)^{\frac{1}{2k}} \quad (۳۵)$$

$$L_{\alpha_2^{PS}}^{(1)} = (\alpha_2^{PS} l_{11} + l_{12}) \quad (۳۶-الف)$$

$$L_{\alpha_2^{PS}}^{(2)} = (\alpha_2^{PS} l_{21} + l_{22}) \quad (۳۶-ب)$$

$$M_{\alpha_2^{PS}}^{(1)} = (\alpha_2^{PS} m_{11} - m_{12}) \quad (۳۶-ج)$$

$$M_{\alpha_2^{PS}}^{(2)} = (\alpha_2^{PS} m_{21} - m_{22}) \quad (۳۶-د)$$

$$N_{\alpha_2^{PS}}^{(1)} = (\alpha_2^{PS} n_{11} - n_{12}) \quad (۳۶-ه)$$

$$N_{\alpha_2^{PS}}^{(2)} = (\alpha_2^{PS} n_{21} - n_{22}) \quad (۳۶-و)$$

اکنون با داشتن دو رابطه برای نسبت تنش‌ها و سایر روابط اثبات شده، می‌توان شازنده ثابت معیار تسلیم را با داشتن شازنده خواص مکانیکی، محاسبه کرد.

۲-۵- به دست آوردن ضرایب معیار تسلیم

برای به دست آوردن ضرایب معیار تسلیم از داده‌های تجربی استفاده می‌شود. به این منظور، پارامترهای تجربی بدین صورت در نظر گرفته می‌شوند: تنش‌های تسلیم و ضرایب ناهمسانگردی جهتی به دست آمده از تست‌های کشش تک‌محوره در نمونه‌های ورق با زوایای مختلف نسبت به جهت نورد که با σ_ϕ و r_ϕ مشخص می‌شوند، تنش تسلیم کرنش صفحه‌ای σ_{ps} مشخص می‌شود. برای تعیین ضرایب تابع تسلیم، دو روش متفاوت وجود دارد یک روش حل دستگاه n معادله‌ای غیرخطی است که n به تعداد ضرایب مجهول وابسته است. در این روش با توجه به مقادیر تجربی σ_{θ_i} و r_{θ_i} و حل دستگاه معادلات غیرخطی (رابطه‌ی ۳۷)، ضرایب معیار تسلیم محاسبه می‌شوند.

$$\begin{cases} \bar{\sigma}(\sigma_{\theta_i}) - Y = 0 \\ \bar{\sigma}(\sigma_{ps}) - Y = 0 \\ r_{\theta_i}(\sigma_{\theta_i}) - r_{\theta_i}^{exp} = 0 \end{cases} \quad (۳۷)$$

روش دیگر، کمینه‌سازی تابع خطا است. یکی از مهم‌ترین تسهیلات به کار بردن این روش، این است که برای تعیین n پارامتر مجهول ماده، نیازی به استفاده از n داده‌ی تجربی نیست. به عبارت دیگر، با استفاده از تعداد متفاوتی از داده‌های تجربی، تشکیل تابع خطا و به دست آوردن پارامترهای مجهول ممکن خواهد بود. یک راهبرد مؤثر تعیین پارامترها، اعمال کمینه‌سازی تابع خطای رابطه‌ی ۳۸ است که توسط بانابیک پیشنهاد شده است [23].

$$M_{\alpha_1^{PS}}^{(1)} = (m_{11} - \alpha_1^{PS} m_{12}) \quad (۲۸-ج)$$

$$M_{\alpha_1^{PS}}^{(2)} = (m_{21} - \alpha_1^{PS} m_{22}) \quad (۲۸-د)$$

$$N_{\alpha_1^{PS}}^{(1)} = (n_{11} - \alpha_1^{PS} n_{12}) \quad (۲۸-ه)$$

$$N_{\alpha_1^{PS}}^{(2)} = (n_{21} - \alpha_1^{PS} n_{22}) \quad (۲۸-و)$$

$$H_1(\alpha_1^{PS}) = \left((w-1) \sum_{i=1}^s \left(w^{i-1} \left(\begin{matrix} (L_{\alpha_1^{PS}}^i + M_{\alpha_1^{PS}}^i)^{2k} \\ + (L_{\alpha_1^{PS}}^i - M_{\alpha_1^{PS}}^i)^{2k} \end{matrix} \right) + w^{s-i} \left(\begin{matrix} (M_{\alpha_1^{PS}}^i + N_{\alpha_1^{PS}}^i)^{2k} \\ + (M_{\alpha_1^{PS}}^i - N_{\alpha_1^{PS}}^i)^{2k} \end{matrix} \right) \right) \right)^{\frac{1}{2k}} \quad (۲۹-الف)$$

$$S = 2 \quad (۲۹-ب)$$

رابطه‌ی ۲۹ بر اساس ۱۶ ثابت معیار تسلیم و متغیر α_1^{PS} بیان شده است و مستقل از تنش‌ها است. مقدار α_1^{PS} به دست آمده از رابطه‌ی ۲۹، نسبت تنش در شرایط کرنش صفحه‌ای در راستای نورد ورق را نشان می‌دهد.

برای محاسبه‌ی تنش تسلیم کرنش صفحه‌ای، در معادله‌ی تنش تسلیم رابطه‌ی ۱، تنش برشی σ_{12} برابر صفر قرار داده می‌شود. سپس، از تنش σ_{11} فاکتور گرفته می‌شود. در این صورت رابطه‌ی ۳۰ به دست می‌آید:

$$\bar{\sigma} | \alpha_1^{PS} = \sigma_{11} H_1(\alpha_1^{PS}) \quad (۳۰)$$

در رابطه‌ی ۳۰ مقدار σ_{11} برابر تنش تسلیم در حالت کرنش صفحه‌ای در نظر گرفته شده و با نماد α_1^{PS} نشان داده می‌شود. با قرار دادن این معادله در رابطه‌ی سطح تسلیم، رابطه‌ی ۳۱ برای تنش تسلیم کرنش صفحه‌ای به دست می‌آید:

$$\sigma_1^{PS} = \frac{Y_1^{PS.exp}}{H_1(\alpha_1^{PS})} \quad (۳۱)$$

برای به دست آوردن شازنده‌مین معادله از دستگاه معادلات، کافی است تا تنش تسلیم کرنش صفحه‌ای در راستای عمود بر راستای نورد نیز محاسبه شود. برای به دست آوردن این رابطه، کرنش در راستای نورد باید برابر صفر شود تا در این جهت شرایط کرنش صفحه‌ای ایجاد گردد، برای این منظور به صورت رابطه‌ی ۳۲ عمل می‌شود:

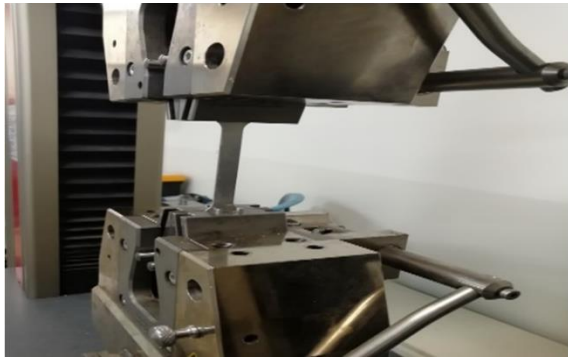
$$\varepsilon_{11}^{pl} = \lambda \frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{11}} = 0 \quad (۳۲-الف)$$

$$\alpha_2^{PS} = \frac{\sigma_{11}}{\sigma_{22}} \quad (۳۲-ب)$$

بنابراین رابطه‌ی ۳۳ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\bar{\sigma} | \alpha_2^{PS} = \sigma_{22} H_2(\alpha_2^{PS}) \quad (۳۳)$$

در رابطه‌ی ۳۳ مقدار σ_{22} برابر تنش تسلیم در حالت کرنش صفحه‌ای در نظر گرفته شده و با نماد σ_2^{PS} نشان داده می‌شود. با قرار دادن این معادله در رابطه‌ی سطح تسلیم (رابطه ۱)، رابطه‌ی ۳۴ برای تنش تسلیم کرنش صفحه‌ای به دست می‌آید:



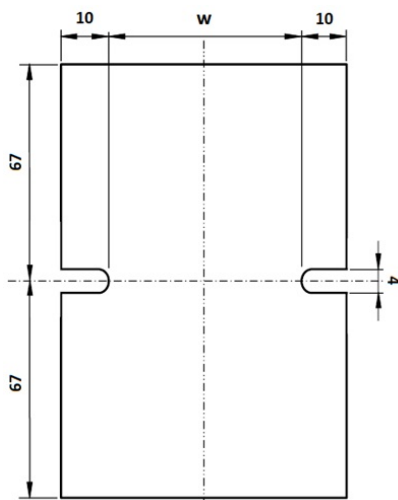
شکل ۳) تست کشش



شکل ۴) نمونه ها پس از تست کشش

۳-۳-۳- تست کشش کرنش صفحه ای

یکی از روش‌های متداول برای به تعیین تنش تسلیم در حالت کرنش صفحه‌ای، آزمون فشار کرنش صفحه‌ای است [25]. در این روش، از نمودارهای شیاردار با عرض ضخامت زیاد استفاده می‌شود. ابعاد یکی از این نمونه‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است. از نمونه‌هایی که تست کشش کرنش صفحه‌ای روی آنها انجام شد (شکل ۶) شش عدد در سه عرض مختلف ۴۷، ۵۷ و ۶۷ میلی‌متر، در راستای نورد ورق و شش عدد نیز در راستای عمود بر نورد آماده شد.



شکل ۵) ابعاد نمونه تست کشش کرنش صفحه [25]

$$\zeta = \left(\frac{\sigma_{ps} - \sigma_{ps}^{(exp)}}{\sigma_{ps}^{(exp)}} \right)^2 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\bar{\sigma}_{\phi i} - \sigma_{\phi i}^{(exp)}}{\sigma_{\phi i}^{(exp)}} \right)^2 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{r_{\phi i} - r_{\phi i}^{(exp)}}{r_{\phi i}^{(exp)}} \right)^2 \quad (38)$$

برای کمینه کردن تابع خطا از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. برای هر یک از ضرایب مجهول یک محدوده‌ی منطقی به صورت تجربی تعیین می‌شود. جمعیت اولیه به صورت تصادفی تولید می‌شوند. با استفاده از استراتژی تقاطع تک نقطه‌ای و استراتژی جهش ژنی تصادفی، فرزندان تولید می‌شوند. از میان جمعیت تولیدشده، والدین و فرزندان تولیدشده از جمعیت قبلی، براساس مقدار تابع شایستگی انتخاب و جایگزین می‌شوند. چرخه جهش و تقاطع تا رسیدن به مقدار مناسب تابع شایستگی و یا رسیدن به حداکثر تعداد تکرار چرخه، ادامه می‌کند. همچنین مقدار احتمال رخداد جهش و تقاطع به صورت تجربی مشخص شده است.

۳- روش تجربی

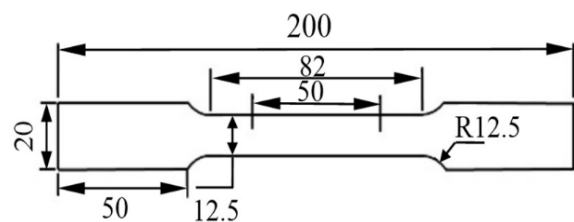
۳-۱- معرفی آلیاژ استفاده شده

آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳، دارای عناصر آلیاژی منیزیم و منگنز اکساید می‌باشد. جوش پذیری بالا و استحکام بعد از جوش خوبی دارد. در مقابل آب دریا و مواد شیمیایی از مقاومت به خوردگی بالایی برخوردار می‌باشد، قابلیت شکل پذیری بالایی نیز دارد. آلومینیوم ۵۰۸۳ در بین آلیاژهای سری ۵۰۰۰ بالاترین خواص مکانیکی را داراست. ورق آلومینیوم ۵۰۸۳ به خاطر خواص فوق العاده‌اش در شرایط کاری سخت، جزو فلزات شاخص محسوب می‌گردد. ورق آلومینیوم ۵۰۸۳ مقاومت به خوردگی خوبی در برابر آب دریا و محیط‌های شیمیایی دارد. این ورق بیشترین استحکام در بین آلیاژهای عملیات حرارتی ناپذیر را داراست. نکته‌ی مهم راجع به این ورق این است که نباید در شرایط کاری با دمای بیش از ۶۵ درجه سانتی‌گراد استفاده شود [24].

۳-۲- تست کشش

ابعاد نمونه‌ها جهت انجام تست کشش برای تعیین استحکام‌های تسلیم و ضرایب ناهمسانگردی مطابق استاندارد ASTM E8/E8M استخراج شد (شکل‌های ۲-۴).

جمعاً ۲۱ نمونه، ۳ نمونه در ۷ زاویه‌ی متفاوت نسبت به جهت نورد ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه استفاده شد.



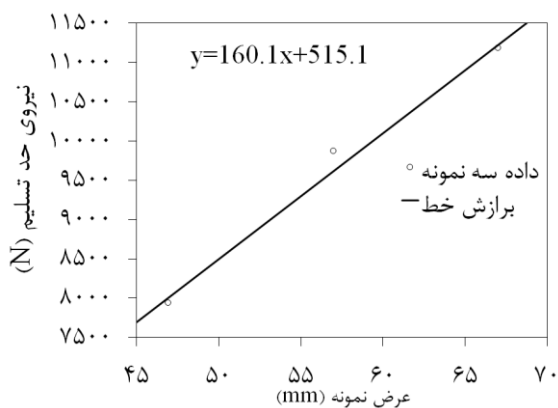
شکل ۲) ابعاد نمونه‌ها جهت انجام آزمون کشش

متفاوت به دست آمد. سپس با برازش خط از این نیروها برای سه نمونه، رابطه‌ای خطی به دست آمد. با تقسیم شیب این رابطه بر ضخامت نمونه‌ها، تنش تسلیم مهندسی کرنش صفحه‌ای، محاسبه شد (شکل‌های ۷ و ۸).

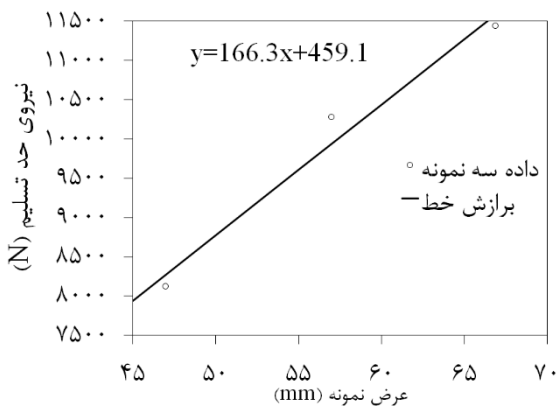
۳-۴-آزمون FLD

برای آماده‌سازی نمونه‌های آزمون کشش بر روی سنبه کروی، نمونه‌ها در سه راستای مختلف ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به جهت نورد ورق بریده شدند. سطح نمونه‌هایی که برای به دست آوردن نمودار حد شکل‌دهی در سه راستا برش خورده‌اند، با انجام حکاکی الکتروشیمیایی به صورت شبکه‌بندی‌های منظم دایره‌ای شکل تقسیم شدند. برای انجام حکاکی الکتروشیمیایی از شبکه‌بندی با دایری به قطر ۲/۵ میلی‌متر استفاده شد. شکل ۹ شماتیک قالب تست FLD را نشان می‌دهد.

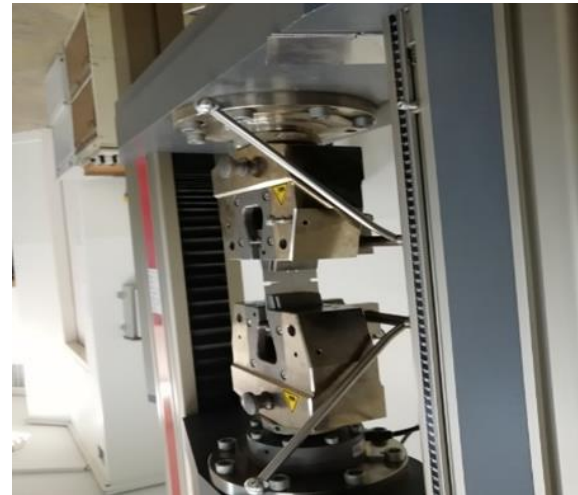
ابعاد نمونه‌های تست کشش بر روی سنبه کروی شکل برای به دست آوردن کرنش‌های حدی به صورت شکل ۱۰-الف است که با دستگاه برش لیزر، بریده شده‌اند. اندازه‌گیری کرنش‌های حدی نمونه تست شده که در شکل ۱۰-ب نشان داده شده است با اندازه‌گیری قطرهای بیضی ایجادشده در نزدیک‌ترین موقعیت نسبت به مکان گلویی شدن با توجه به رابطه‌های (۴۱-۴۳) انجام گردید.



شکل ۷) نیروی حد کرنش صفحه‌ای برحسب عرض نمونه برای راستای نورد



شکل ۸) نیروی حد کرنش صفحه‌ای برحسب عرض نمونه برای راستای عمود بر نورد



شکل ۶) انجام تست کشش کرنش صفحه‌ای

درکشش یک ورق با عرض زیاد، در تمام عرض قطعه شرایط کرنش صفحه‌ای صادق نیست و در لبه‌ها حالت کرنش سه‌بعدی است؛ بنابراین برای تعیین تنش کرنش صفحه‌ای در آزمون کشش، باید این دو ناحیه از یکدیگر جدا شوند و سپس نیروی هر ناحیه تعیین شود. دو نتیجه‌ی زیر برای دست‌یابی به این منظور مؤثر است.

۱. کرنش‌های موجود در وسط نمونه که حالت کرنش صفحه‌ای دارند، توزیع یکنواختی تا لبه‌های نمونه دارد.
۲. توزیع کرنش در لبه‌ها، تحت تأثیر اندازه‌ی w نیست.

برای تعیین نیروی خالص کشش کرنش صفحه‌ای، می‌توان نیروی کل کشش را به صورت تابعی از نیروی کشش در لبه‌ها، ضخامت ورق، تنش صفحه‌ای و اندازه W_{ps} بیان کرد. این تابع را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۳۹ نوشت:

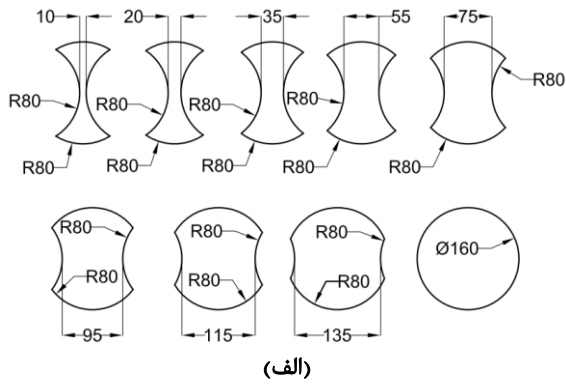
$$F_{tot} = \sigma_{ps} \times t \times W_{ps} + F_{edge} \quad (39)$$

در رابطه‌ی بالا F_{tot} نیروی کل کشش، F_{edge} نیروی لبه‌ی قطعه، W_{ps} عرض ناحیه‌ی کرنش صفحه‌ای است که مقدار ثابتی از اندازه w است، σ_{ps} تنش مهندسی کرنش صفحه‌ای و t ضخامت ورق است.

با توجه به نتیجه شماره ۲، اندازه لبه‌های ورق که در طی آزمایش شرایط کرنش صفحه‌ای ندارند، با افزایش w ثابت می‌ماند. با ثابت در نظر گرفتن ضخامت ورق، می‌توان نتیجه گرفت که مساحت این ناحیه، با افزایش w ثابت می‌ماند. در نتیجه در رابطه‌ی ۳۹، F_{edge} مقداری ثابت و عرض از مبدأ معادله‌ای خطی در نظر گرفته می‌شود. در این رابطه، متغیر مستقل عرض ناحیه‌ی کرنش صفحه‌ای و تنش مهندسی کرنش صفحه‌ای در ضخامت ورق، شیب نمودار است. در نتیجه، رابطه‌ی ۳۹ را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۴۰ بازنویسی کرد:

$$F_{tot} = \sigma_{ps} \times W_{ps} + F_{edge} \quad (40)$$

با توجه به رابطه‌ی ۴۰، کل نیروی کشش تابعی خطی از عرض ناحیه‌ی کرنش صفحه‌ای هستند. برای به دست آوردن تنش تسلیم کرنش صفحه‌ای، ابتدا نیروی حد تسلیم برای سه نمونه با w



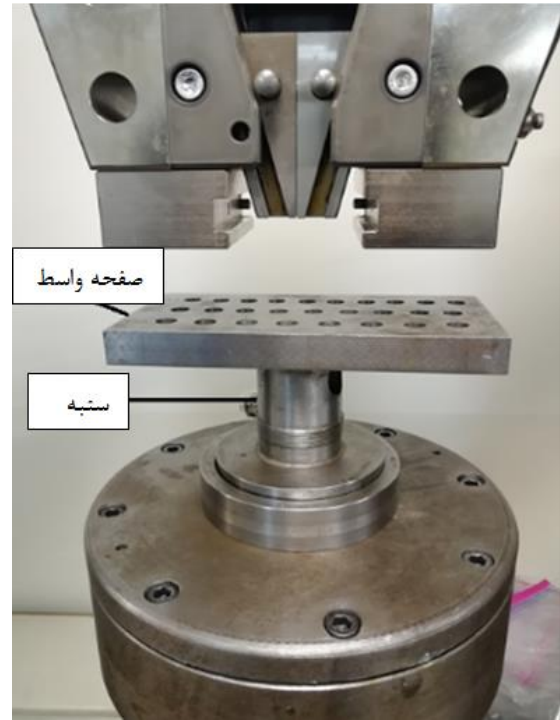
(ب)

شکل ۱۰ (الف) ابعاد نمونه‌ها (ب) نمونه‌ها پس از تست

پروفایل پروژکتور در بخش دوبعدی نرم افزار ترسیم می‌گردد؛ سپس با توجه به شعاع سنبه و عمق نفوذ سنبه در قطعه که از فایل‌های نمونه‌های مورد آزمون قرار گرفته قابل استخراج می‌باشد، مدل سه بعدی هر نمونه ایجاد می‌شود و سپس فایل دوبعدی کد بر روی سطح منحنی قطعه تصویر می‌شود، در این صورت طول قوس اقطار بیضی‌ها بطور واقعی اندازه‌گیری می‌شوند. شکل ۱۲ شمایی از نحوه اندازه‌گیری با دستگاه پروفایل پروژکتور را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲ نحوه اندازه‌گیری با دستگاه پروفایل پروژکتور



شکل ۹ شماتیک قالب تست FLD

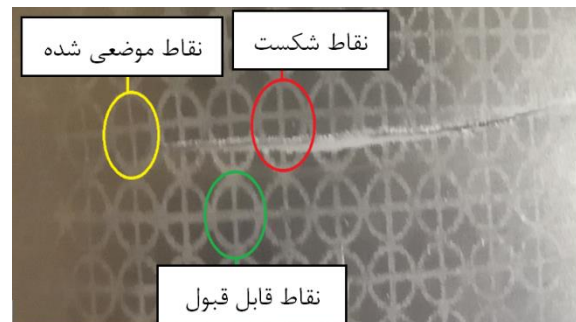
$$\varepsilon_r = \ln \frac{D_1}{D_0} \quad (41)$$

$$\varepsilon_t = \ln \frac{D_2}{D_0} \quad (42)$$

$$\varepsilon_z = -(\varepsilon_r + \varepsilon_t) = \ln \frac{t}{t_0} \quad (43)$$

معمولاً در انتخاب بیضی مناسب برای اندازه‌گیری قطرهای آن و به دست آوردن کرنش‌های حدی، نزدیک‌ترین و بزرگ‌ترین بیضی به نقاط شکست انتخاب می‌شود (شکل ۱۱).

برای خواندن اندازه دواير تغییر شکل یافته با استفاده از دستگاه پروفایل پروژکتور ابتدا دواير حکاکی شده و قابل قبول بر روی قطعه‌ی مورد نظر، در مرکز دستگاه قرار گرفته و اندازه‌ی قطرهای بیضی شکل اندازه‌گیری می‌شوند. چون در واقعیت دایره‌های حک شده بر قطعه که به بیضی تبدیل شده‌اند بر روی انحنایی از کره قرار دارند نه بر روی سطح صاف و آنچه دیده می‌شود و اندازه‌گیری می‌شود مقدار تصویر شده بیضی‌های انحنا دار به سطح صاف هستند بنابراین تصویری دوبعدی اندازه‌گیری شده با دستگاه



شکل ۱۱ انتخاب بیضی حدی مناسب

۴- بررسی نتایج

با استفاده از نتایج تست کشش تک‌محوره و نمودار تنش کرنش، ضرایب ناهمسانگردی و تنش تسلیم برای راستاهای مختلف نسب به راستای نورد محاسبه شد جدول ۱ مقادیر تنش و ضرایب ناهمسانگردی را نشان می‌دهد.

با تقسیم کردن شیب معادله‌ی خط‌های برازش شده در نمودار نیروی حد تسلیم برحسب عرض نمونه‌ها، تنش تسلیم کرنش صفحه‌ای در دو راستای موازی و عمود با راستای نورد ورق، در جدول ۲ به‌دست آمد. مشاهده شد که تنش تسلیم در راستای عمود برجهت نورد نسبت به راستای نورد بیشتر است.

با استفاده از تنش تسلیم کرنش صفحه‌ای در دو راستای ۰ و ۹۰ درجه نسبت به راستای نورد ورق و با اضافه کردن توابع آن‌ها به تابع خطا، ۱۶ معادله در تابع خطا بهینه‌سازی شد. با وجود دو معادله مربوط به تست کرنش صفحه‌ای، دو مجهول جدید که نسبت تنش‌ها هستند، به ۱۶ معادله فوق اضافه شد. در نتیجه ۱۸ معادله هم‌زمان توسط الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شد و ضرایب معیار تسلیم مشخص شدند جدول ۳ این ضرایب را نشان می‌دهد؛ که با قرار دادن این ضرایب در کد FLD، نمودار حد شکل‌دهی ورق آلومینیوم ۵۰۸۳ به‌دست می‌آید. در شکل ۱۳ نمودار حد شکل‌دهی ورق آلومینیوم ۵۰۸۳ برای راستای صفر درجه نشان داده شده است. برای اطمینان از صحت و دقت ضرایب، آن‌ها را در توابع جایگذاری کرده و مشاهده شد که در تمامی معادلات با میانگین

جدول ۱) مقادیر تنش تسلیم و ضرایب ناهمسانگردی

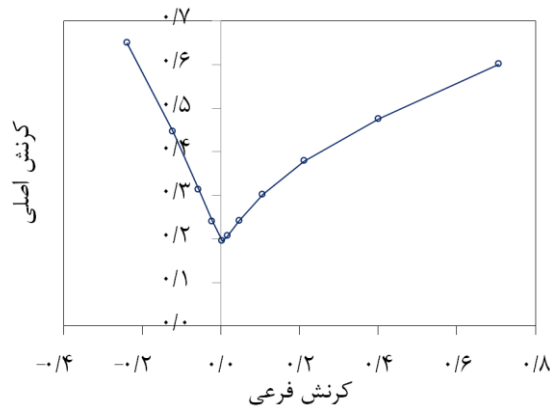
زاویه (درجه)	تنش (مگاپاسکال)	ناهمسانگردی
۰	۱۵۹	۰/۶۳۳۳
۱۵	۱۵۶/۳	۰/۷۳۴۲
۳۰	۱۵۶/۶	۰/۷۰۱۶
۴۵	۱۵۱/۵	۰/۹۱۲۳
۶۰	۱۵۱/۲	۰/۸۷۲۳
۷۵	۱۵۰/۸	۰/۸۳۱۶
۹۰	۱۵۱/۸	۰/۷۳۸۶

جدول ۲) مقادیر تنش تسلیم کرنش صفحه‌ای

راستا نسبت به جهت نورد (درجه)	تنش تسلیم کرنش صفحه‌ای (مگاپاسکال)
۰	۱۶۰/۱
۹۰	۱۶۶/۳

جدول ۳) ضرایب معیار تسلیم BBC2008-16p

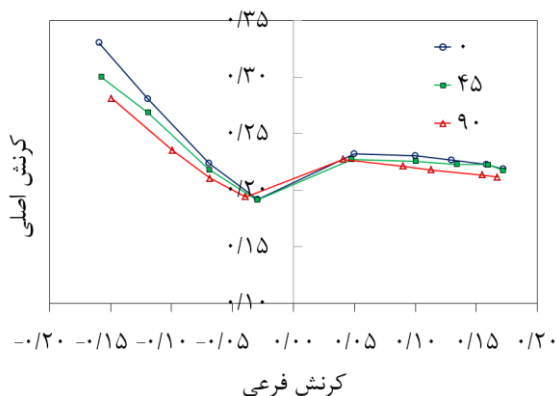
ضرایب	L11	L21	L12	L22
مقدار	۰/۳۶	۰/۱۱۵	-۰/۵۲	-۰/۴۴۶
ضرایب	M11	M21	M31	M12
مقدار	۰/۷۹۹	۰/۰۲۰	۰/۵۴	۰/۲۳
ضرایب	M22	M32	N11	N21
مقدار	۰/۵۷	۰/۵۴	۰/۴۰	۰/۷۰۸
ضرایب	N31	N21	N22	N32
مقدار	۰/۳۳	۰/۵۵۱	۰/۶۲	۰/۵۵



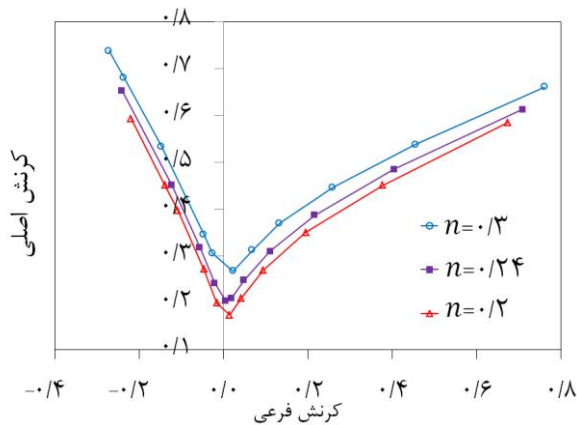
شکل ۱۳) نمودار حد شکل دهی ورق آلومینیوم ۵۰۸۳ برای راستای صفر درجه

خطای بسیار کم، صدق می‌کند. بعد از به‌دست آمدن نمودارهای تئوری FLD، با استفاده از روش تجربی و تغییر اندازه‌ی قطرهای دایره‌های حکاکی شده که به بیضی تبدیل شده بودند، نمودارهای تجربی در سه راستای مختلف ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به راستای نورد ورق، به‌دست آمدند که در شکل ۱۴ این سه نمودار تجربی مشاهده می‌شود. با مقایسه این نمودارها مشخص شد که کرنش‌های حادی در راستای موازی با جهت نورد، بیشترین مقدار را نسبت به دو راستای دیگر دارند و راستای عمود بر جهت نورد کمترین مقادیر را دارند.

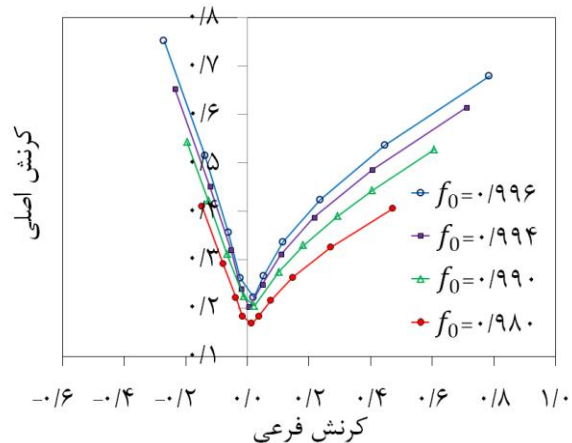
در نمودار شکل ۱۵ تأثیر ضریب ناهمگنی اولیه یا f_0 بر نمودار حد شکل‌دهی بررسی شده است. ضریب ناهمگنی اولیه از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر نمودار حد شکل‌دهی است که انتخاب دقیق آن منجر به افزایش دقت نمودار تئوری حد شکل‌دهی خواهد شد. مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب ناهمگنی اولیه کرنش‌های حادی افزایش می‌یابد و این منجر به بهبود شکل‌دهی ورق می‌شود. یکی دیگر از عوامل مهم و تأثیرگذار بر نمودار حد شکل‌دهی و کرنش‌های حادی، توان کرنش سختی است. در نمودار شکل ۱۶ تأثیر توان کرنش سختی بررسی شده است. با افزایش توان کرنش سختی، کرنش‌های حادی نیز افزایش می‌یابد و باعث بهبود شکل‌پذیری ورق می‌شوند.



شکل ۱۴) نمودار حد شکل دهی تجربی در سه راستای مختلف



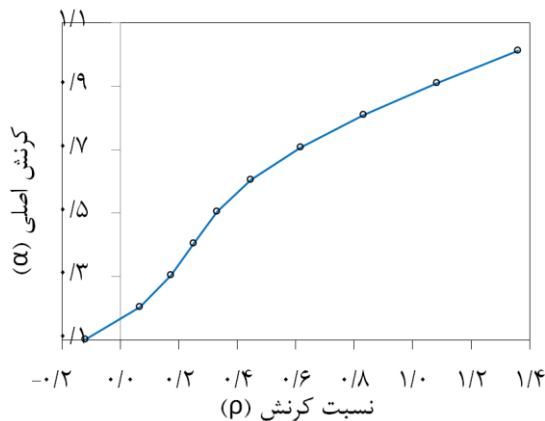
شکل ۱۶) تأثیر توان کرنش سختی بر نمودار حد شکل دهی



شکل ۱۵) تأثیر ضریب ناهمگنی اولیه بر نمودار حد شکل دهی

ضرایب ناهمسانگردی در مسیرهای کرنش مختلف، به دست آمد. همچنین ضرایب ناهمسانگردی با انجام آزمون‌های کشش تک‌محوره در هفت راستا به دست آمد. کرنش‌های حدی در سه راستا نسبت به راستای نورد، با انجام آزمون FLD تعیین گردید. همچنین تنش تسلیم در حالت کرنش صفحه‌ای با استفاده از آزمون کشش کرنش صفحه‌ای در سه راستا نسبت به راستای نورد، تعیین شد. با به دست آوردن معادلات مربوط به ضرایب تنش تسلیم کرنش صفحه‌ای و اضافه شدن این معادلات به تابع خطا، به کمک الگوریتم ژنتیک تابع خطا بهینه‌سازی و ضرایب معیار تسلیم و نمودار تئوری حد شکل‌دهی مشخص شد. بررسی‌های انجام شده نشان دادند که اگر پارامترهای ضریب ناهمگنی اولیه و ضرایب معیارهای تسلیم، به درستی تعریف شوند، مدل MK به خوبی می‌تواند نمودار حد شکل‌دهی (FLD) ورق‌های فلزی با ناهمسانگردی زیاد را هم پیش‌بینی کند. برخی دیگر از مهم‌ترین نتایج به دست آمده شامل موارد زیر است:

۱- با استفاده از الگوریتم ژنتیک تابع خطا با درصد خطای کمتری نسبت به سایر روش‌ها بهینه‌سازی شد درصد خطای بهینه‌سازی تابع خطا در حدود ۲ درصد حاصل شد.



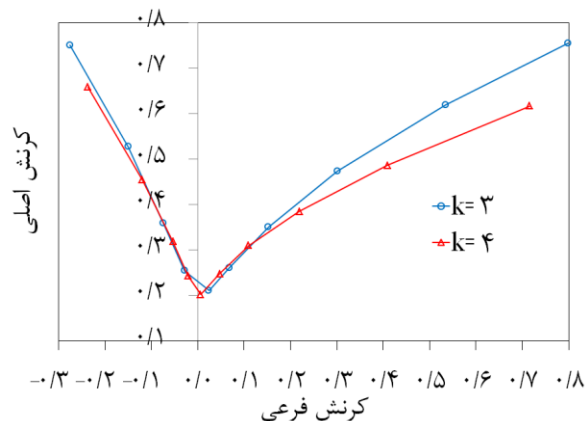
شکل ۱۸) تأثیر نسبت نمو کرنش‌های مؤثر بر نسبت تنش‌های اصلی

یکی از عوامل دیگری که مورد بررسی قرار گرفت ضریب k است. این ضریب بستگی به ساختار کریستالی ورق فلزی دارد و برای فلزات با ساختار BCC مقدار آن برابر ۳ و برای مواد با ساختار FCC مقدار آن برابر ۴ است. همان‌طور که در نمودار شکل ۱۷ مشخص است در شرایط یکسان کرنش‌های حدی برای مواد با ضریب $k=4$ از کرنش‌های حدی برای مواد با ضریب $k=3$ کم‌تر است.

نسبت نموهای کرنش (ρ) توسط تابع تسلیم به‌طور مستقیم با نسبت تنش‌ها (α) مرتبط است. همچنین با داشتن نمودارهای بر پایه‌ی کرنش، نمایش دادن نمودارهای حد شکل‌دهی بر پایه‌ی تنش امکان‌پذیر است. ارتباط بین نسبت‌های تنش و کرنش در شکل ۱۸ آورده شده است. برای محاسبه‌ی کرنش‌های حدی برای مسیر کرنش‌های متفاوت، در ناحیه‌ی سمت چپ نمودار حد شکل‌دهی بر پایه‌ی کرنش، نقطه‌ی شروع، متناظر $\alpha = 0$ و نقطه‌ی پایان $\rho = 0$ است. برای سمت راست، نقطه‌ی شروع، شرایط کرنش صفحه‌ای $\rho = 0$ و نقطه‌ی پایان، $\rho = 1$ است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله نمودار حد شکل‌دهی بر اساس تئوری مارسینیاک-کوزینسکی، با پارامترهای ورودی از جمله استحکام‌های تسلیم و



شکل ۱۷) تأثیر ضریب k بر نمودار حد شکل دهی

θ	زاویه نسبت به جهت نورد
λ	ضریب قانون کار سختی
r	ضریب ناهمسانگردی دوماحوری
f	فاکتور ناهمگنی
f_0	فاکتور ناهمگنی اولیه
ε_i	کرنش محوری
ε_{ij}	کرنش صفحه ای
$\bar{\varepsilon}$	کرنش مؤثر
σ_{ij}	مؤلفه‌های صفحه‌ای تانسور تنش
$\dot{\varepsilon}$	نرخ کرنش مؤثر
α_1^{ps}	نسبت تنش‌های واقع در صفحه در راستای نورد
$d\varepsilon_{ij}$	نمو کرنش مربوط به جهت تنش مربوطه

۲- پارامتر ضریب ناهمگنی اولیه (f_0) در تعیین نمودار حد شکل‌دهی تأثیر زیادی دارد به‌گونه‌ای که با تغییر بسیار جزئی، تأثیر به سزایی در نمودار حد شکل‌دهی می‌گذارد. با افزایش این ضریب در حدود ۰/۱۶ مقادیر کرنش‌های حدی تقریباً دو برابر شد. در شرایط یکسان کرنش‌های حدی برای مواد فلزی با ساختار FCC با ضریب $k=4$ از کرنش‌های حدی برای مواد فلزی با ساختار BCC با ضریب $k=3$ کم‌تر است.

۳- افزایش توان کرنش‌سختی موجب افزایش مقادیر کرنش‌های حدی می‌شود. با افزایش ۰/۱ توان کرنش سختی (از ۰/۲ تا ۰/۳) کرنش‌های حدی بین ۳۰ تا ۴۰ درصد افزایش می‌یابند. بنابراین ورق‌هایی که ضریب ناهمگنی اولیه بالاتر و توان کرنش بالاتر و راستای موازی با نورد دارد حالت بهینه فرایند است.

تشکر و قدردانی: سپاس خداوندی را که به ما نعمت اندیشیدن بخشید. نویسندگان این مقاله از تمامی افراد مؤثر در به ثمر رسیدن این مقاله کمال تشکر و قدردانی را دارند.

۴- کرنش‌های حدی تجربی در راستای نورد ورق دارای بیشترین مقدار خود می‌باشند و در جهت عمود بر نورد ورق کم‌ترین مقدار خود را دارد. کرنش‌های حدی تجربی مقادیر کم‌تری نسبت به کرنش‌های حدی تئوری دارا هستند (در بعضی از راستاها تا حدود ۰/۳۵ درصد) و نمودار حد شکل‌دهی تجربی در پیش‌بینی کرنش‌های حدی محتاط‌تر عمل می‌کند.

تاییدیه اخلاقی: نویسندگان این مقاله متعهد می‌شوند که این مقاله در زمان ارسال برای این مجله در هیچ نشریه ایرانی یا غیرایرانی در حال بررسی نبوده و تا تعیین تکلیف قطعی در این نشریه برای هیچ نشریه ایرانی یا غیرایرانی دیگری ارسال نخواهد شد.

۶- فهرست نمادها و نشانه‌ها

تعارض منافع: نویسندگان این مقاله با اختیار و آگاهی کامل، کلیه حقوق مادی مربوط به انتشار این مقاله را به نشریه دانشگاه تربیت مدرس، واگذار می‌نمایند و نشریه در انتشار این مقاله به هر صورت اختیار تام دارد و منافع مادی احتمالی متعلق به نشریه است.

$l_1^{(i)}$	پارامترهای ماده مرتبط با معیار تسلیم
$l_2^{(i)}$	پارامترهای ماده مرتبط با معیار تسلیم
$m_1^{(i)}$	پارامترهای ماده مرتبط با معیار تسلیم
$m_2^{(i)}$	پارامترهای ماده مرتبط با معیار تسلیم
$m_3^{(i)}$	پارامترهای ماده مرتبط با معیار تسلیم
$n_1^{(i)}$	پارامترهای ماده مرتبط با معیار تسلیم
$n_2^{(i)}$	پارامترهای ماده مرتبط با معیار تسلیم
$n_3^{(i)}$	پارامترهای ماده مرتبط با معیار تسلیم
w	پارامترهای ماده مرتبط با معیار تسلیم
$L^{(i)}$	پارامترهای ماده مرتبط با معیار تسلیم
$M^{(i)}$	پارامترهای ماده مرتبط با معیار تسلیم
$N^{(i)}$	پارامترهای ماده مرتبط با معیار تسلیم
\emptyset	تابع تسلیم
F_θ	تابع تنش معادل وابسته به زاویه نورد
ζ	تابع خطا
Y	تنش تسلیم تک محوره
Y_θ	تنش تسلیم تک محوره وابسته به زاویه نورد
σ_b	تنش تسلیم دوماحوره‌ی تجربی
Y_b	تنش تسلیم دوماحوری تئوری
σ_{ps}	تنش تسلیم کرنش صفحه‌ای
$\bar{\sigma}$	تنش معادل یا مؤثر
n	ثابت ماده (توان کرنش سختی)
m	ثابت ماده (توان نرخ کرنش معادل)
K	ثابت ماده (ضریب کارسختی)
ε_0	ثابت ماده (کرنش اولیه)

سهم نویسندگان: ۱- ارمیا غلامزاده ۲۵٪، ۲- ولی‌اله پناهی‌زاده ۲۵٪، ۳- محمد حسین پور ۲۵٪، ۴- مرتضی علیزاد کامران ۲۵٪.

منابع مالی: منابع مالی بصورت شخصی تأمین شده است.

منابع

1- Keeler SP, Backhofen WA. Plastic Instability and Fracture in Sheet Stretched over Rigid Punches. *ASM Transactions Quarterly*. 1963; 56 (11): 25-48.

2- Goodwin GM. Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop. *Sae Transactions*. 1968:380-7.

3- Hill RT. On discontinuous plastic states, with special reference to localized necking in thin sheets. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1952;1(1):19-30.

4- Marciniak Z, Kuczyński K. Limit strains in the processes of stretch-forming sheet metal. *International journal of mechanical sciences*. 1967;9(9):609-20.

5- Graf A, Hosford W. The influence of strain-path changes on forming limit diagrams of A1 6111 T4. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1994;36(10):897-910.

6- JENABALI JS, Nazarboland A, Mansouri E, ABASI S. Investigation of formability of low carbon steel sheets by forming limit diagrams. *Iranian Journal of Science and Technology Transaction B: Engineering*. 2006; 30 (B3): 377-385.

- 21- Comsa DS, Banabic D. Plane stress yield criterion for highly anisotropic sheet metals. *Numisheet 2008*, Interlaken, Switzerland. 2008:43-8.
- 22- Brodie DA. Techniques of measurement of body composition Part II. *Sports Medicine*. 1988;5(2):74-98.
- 23- Banabic D, Aretz H, Comsa DS, Paraianu L. An improved analytical description of orthotropy in metallic sheets. *International Journal of Plasticity*. 2005;21(3):493-512.
- 24- Prasad VJ, Rao NM, Kamaluddin S, Surya KV. A study of microstructure and tribological properties of Al 5083 MMC processed by direct extrusion. *Materials Today: Proceedings*. 2018;5(2):8232-40.
- 25- An YG, Vegter H, Elliott L. A novel and simple method for the measurement of plane strain work hardening. *Journal of materials processing technology*. 2004;155:1616-22.
- 7- O Edrees A, J Ali W. Theoretical determination of forming limit diagram for steel, brass and aluminum alloy sheets. *Al-Rafidain Engineering Journal (AREJ)*. 2007;15(1):40-55.
- 8- Djavanroodi F, Derogar A. Experimental and numerical evaluation of forming limit diagram for Ti6Al4V titanium and Al6061-T6 aluminum alloys sheets. *Materials & Design*. 2010;31(10):4866-75.
- 9- Safari M, Hosseinipour SJ, Azodi HD. Experimental and numerical analysis of forming limit diagram (FLD) and forming limit stress diagram (FLSD). *Materials Sciences and Applications*. 2011;2(05):496.
- 10- Xu L, Barlat F, Ahn DC, Bressan JD. Forming limit and fracture mechanism of ferritic stainless steel sheets. *Materials Science and Engineering: A*. 2011;528(7-8):3113-21.
- 11- Rezaee-Bazzaz A, Noori H, Mahmudi R. Calculation of forming limit diagrams using Hill's 1993 yield criterion. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2011;53(4):262-70.
- 12- Dasappa P, Inal K, Mishra R. The effects of anisotropic yield functions and their material parameters on prediction of forming limit diagrams. *International Journal of Solids and Structures*. 2012;49(25):3528-50.
- 13- Hossein Pour M, Seyedkashi SM, Shahi S. The Effect of Advanced BBC2003, Yld2004 and BBC2008 Yield Criteria on FLDs Based on MK, Swift's and Hill's Models. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(1):141-50.
- 14- Zohoor M, Shahi S, HoseinpourGollo M. An experimental and theoretical investigation for determination of yield criteria parameters and forming limit diagram of Aluminum alloy 2024. *Modares Mechanical Engineering*. 2016;16(1):192-202.
- 15- Mohammed B, Park T, Kim H, Pourboghrat F, Esmaeilpour R. The forming limit curve for multiphase advanced high strength steels based on crystal plasticity finite element modeling. *Materials Science and Engineering: A*. 2018;725:250-66.
- 16- Jeong Y, Panich S. Forming limits of dual phase steels using crystal plasticity in conjunction with MK approach. *Procedia Manufacturing*. 2018;15:1816-24.
- 17- Ghazanfari A, Soleimani SS, Keshavarzzadeh M, Habibi M, Assempour A, Hashemi R. Prediction of FLD for sheet metal by considering through-thickness shear stresses. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. 2020;48(6):755-72.
- 18- Ghazanfari A, Assempour A, Habibi M, Hashemi R. Investigation on the effective range of the through thickness shear stress on forming limit diagram using a modified Marciniak-Kuczynski model. *Modares Mechanical Engineering*. 2016;16(1):137-43.
- 19- Paul SK. Controlling factors of forming limit curve: A review. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*. 2021:100033.
- 20- Bong HJ, Lee J. Crystal plasticity finite element-Marciniak-Kuczynski approach with surface roughening effect in predicting formability of ultra-thin ferritic stainless steel sheets. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2021;191:106066.