مجله مهندسی مکانیک مدرس، فوق‌العاده اسفند ۱۳۹۳، دوره ۱۴، شماره ۱۶، ص‌ص ۲۱۲-۲۲۲

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی عددی اثر نرخ کرنش بر پیش بینی آسیب به کمک معیارحدشکل‌دهی دینامیکی در فرآیند شکل‌دهی ورق‌های فلزی با سرعت بالا

مرتضی سرادار[۱]، علی باستی[۲*]، محمد زعیمی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

۳- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

*رشت، صندوق پستی ۱۳۷۶۹- ۴۱۹۹۶، basti@guilan.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۴ تیر ۱۳۹۳

پذیرش: ۲۷ مرداد ۱۳۹۳

ارائه در سایت: ۱۷ آبان ۱۳۹۳

کلید واژگان:

نرخ کرنش

نمودار حد شکل‌دهی

تحلیل شبه استاتیک

رفتار ناهمسانگردی

چکیده

در این مقاله، نمودار حد شکل‌دهی دینامیکی به عنوان یک معیار شکست برای فولاد St۱۳ بررسی شده است. در واقع اثر نرخ کرنش‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. این معیار شکست براساس مدل مارسینیاک و کوزینسکی می‌باشد و حل معادلات با استفاده از روش نیوتن رافسون به انجام رسیده است. بعد از حل معادلات سه نوع نمودار حد شکل‌دهی به‌دست آمده است: نمودار حد شکل‌دهی غیروابسته به نرخ کرنش، وابسته به نرخ کرنش و نمودار حد شکل‌دهی دینامیکی، معیار آسیب دینامیکی نمودار حد شکل‌دهی را در هر نرخ کرنش بررسی می‌کند. ملاحظه می‌شود که با افزایش نرخ کرنش حد شکل‌دهی افزایش پیدا کرده است. همچنین به‌منظور لحاظ کردن رفتار ناهمسانگردی و الاستیک پلاستیک ماده به‌ترتیب معیار تسلیم ناهمسانگرد هیل ۱۹۴۸ و رابطه سخت شوندگی سویفت استفاده شده است. همچنین این مقاله به ویژگی‌های کششی تک محوره و شکل‌پذیری ورق فلزی در رابطه با اثرات نرخ کرنش پرداخته است. برای تایید نتایج، آزمایش‌های تجربی با یک چکش ضربه‌ای به انجام رسیده است که یک دستگاه ضربه‌ای سرعت بالا می‌باشد. برای مقایسه بین معیارهای آسیب شبه استاتیکی و دینامیکی، تمام مراحل آزمایش در نرم‌افزار المان محدود آباکوس شبیه‌سازی شده و نتایج با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

Numerical study of the effect of strain rate on damage prediction by dynamic forming limit diagram in high velocity sheet metal forming

Morteza Saradar[1], Ali Basti[2*], Mohammad Zaeimi[3]

1- Department of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran
3- Department of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
*P.O.B. 41996-13769, Rasht, Iran, basti@guilan.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 05 July 2014
Accepted 18 August 2014
Available Online 08 November 2014

Keywords:
Strain rate
forming limit diagram
quasi static analysis
anisotropic behavior

ABSTRACT

In this paper dynamic forming limit diagram has been investigated as fracture criteria for St13 steel. In fact, effect of various strain rates has been studied. This fracture criterion is based on the Marciniak-Kuczynski (M-K) theory and solution of equations has been obtained by applying the Newton-Raphson method. After solution, three forming limit diagrams were created: independent strain rate, dependent strain rate and dynamic forming limit diagram. Dynamic damage criteria investigates forming limit diagram in every strain rate. It is observed that the forming limit is increased by increasing the strain rate. Also, for considering the anisotropic and the elastic-plastic behavior of material, the Hill 1948 yield criterion and the Swift hardening rule have been used respectively. This paper is concerned with the uniaxial tensile properties and formability of sheet metal in relation to the strain rate effects. In order to verify the results several experiments were done with a Drop Hammer, which is a high speed impact machine. For comparison between quasi static and dynamic damage criterions, all stages of the experiment were simulated in finite element software Abaqus and results compared.

۱- مقدمه

یک روش مناسب برای شکل‌پذیری ورق‌های فلزی، استفاده از نمودارهای حدشکل‌دهی[۱] می‌باشد که در واقع نشان دهنده تغییر در شکل‌دهی تحت بارگذاری‌های مختلف است. نمودار حد شکل‌دهی، ابزاری مفید برای تعیین شکل‌دهی ورق‌های فلزی در فرآیندهای شکل‌دهی مانند کشش عمیق[۲] است. توسعه استفاده از نمودارهای حد شکل‌دهی به عنوان یک ابزار قدرتمند

1- Forming limit diagram(FLD)

2- Deep drawing

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Saradar, A. Basti, M. Zaeimi, Numerical study of the effect of strain rate on damage prediction by dynamic forming limit diagram in high velocity sheet metal forming, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 16, pp. 2012-222, 2015 (In Persian)

برای ارزیابی علمی و عملی رفتار شکل‌پذیری ورق بسیارچشم‌گیراست. این نمودار، کرنش حداکثر اصلی را به کرنش حداقل اصلی نشان می‌دهد که ورق می‌تواند تا آستانه گلویی شدن موضعی تحمل کند. این مقدارکرنش را که ورق فلزی قبل از گلویی شدن موضعی تحمل می‌کند، کرنش حدی می‌گویند. نمودار حد شکل‌دهی میزان حداکثر کرنش‌های حدی را در بارگذاری‌های مختلف نشان می‌دهد.

نظریه نمودار حد شکل‌دهی برای اولین بار توسط کیلر [۱] وگودوین [۲] مطرح شد، مارسینیاک و کوزینسکی این نظریه را بسط دادند و مدلی را بنا نهادند که قادر بود گلویی شدن موضعی را پیش‌بینی کند [۴،۳]. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که شکست در ورق به طور ناگهانی اتفاق نمی‌افتد بلکه غیریکنواختی و ناهمگنی در ریزدانه‌های تشکیل دهنده ماده، سبب ایجاد باریک شدگی موضعی و در نهایت شکست می‌شود. این ناهمگنی به صورت یک شیار فرض می‌شود که سطح ورق را به دو قسمت همگن[1] و ناهمگن[2] تقسیم می‌کند. محققان زیادی با استفاده از این مدل، تاثیر عوامل مختلفی را روی نمودارحدشکل‌دهی بررسی کرده‌اند. باراتا و همکاران [۵] تاثیر بارگذاری‌های خطی و غیرخطی را روی ورق‌های ناهمسانگرد بررسی کردند و نتیجه گرفتند که فرضیه عمود بودن شیار نسبت به محور اصلی برای مواد ناهمسانگرد معتبر نیست. ساوبری و همکاران [۶] تاثیر مشخصات مکانیکی، مانند نماد کرنش سختی و کرنش حد ارتجاعی را روی سمت راست نمودار حد شکل‌دهی بررسی کرده‌اند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش نماد کرنش سختی و کرنش حد ارتجاعی سمت راست نمودار حد شکل‌دهی افزایش می‌یابد. مشکسار و همکاران [۷] نمودار حد شکل‌دهی AL۳۱۰۵ را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها تاثیر روغن‌کاری را روی شکست بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که اگر روغن‌کاری مناسب باشد شکل‌دهی مناسب‌تر می‌شود و زمان وقوع شکست به تاخیر می‌افتد. کامپوس و همکاران [۸] نمودار حد شکل‌دهی فولاد زنگ نزن AISI۳۰۴ را هم به صورت تجربی و هم به صورت عددی مورد بررسی قرار داده‌اند و به این نتیجه رسیدند که نمودار حد شکل‌دهی آلومینیوم به نرخ کرنش وابستگی بسیار کمی دارد. احمدی و همکاران [۹] نمودار حد شکل‌دهی را با استفاده از روش تجربی و نظری برای سه نوع فولاد مختلف بدست آوردند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش نماد کرنش سختی، سطح نمودار افزایش پیدا کرده، اما با افزایش ضریب ناهمسانگردی عمودی، سمت راست نمودار حد شکل‌دهی کاهش و سمت چپ آن افزایش می‌یابد. کیم و همکاران [۱۰] تاثیر نرخ کرنش را روی معیار حد شکل‌دهی فولاد CQ بررسی کرده‌اند و با انجام آزمایش در جهت‌های مختلف نسبت به نورد، ثابت کردند که این ماده به نرخ کرنش وابسته است.

تمام بررسی‌های انجام شده در زمینه نمودار حد شکل‌دهی در حالت شبه استاتیک می‌باشد و این پرسش پیش می‌آید که آیا این نمودار برای فرآیندهای سرعت بالا که نرخ کرنش قابل توجهی دارند، می‌تواند موثر باشد یا خیر. این پژوهش به بررسی نمودار حد شکل‌دهی دینامیکی فولاد St۱۳ پرداخته و تاثیر پارامتر نرخ کرنش را به عنوان یک کمیت مستقل بر روی نمودار بررسی کرده است.

در این پژوهش، سه نمودار حد شکل‌دهی به صورت عددی محاسبه می‌شوند: نمودار حد شکل‌دهی غیروابسته به نرخ کرنش[3]، نمودار حد شکل‌دهی وابسته به نرخ کرنش[4] و نمودار حد شکل‌دهی‌دینامیکی[5]. برای اعتبارسنجی نتایج و مقایسه بین معیارهای مختلف آسیب بدست آمده، یک قالب کشش عمیق طراحی و ساخته شد و با استفاده از چکش ضربه‌ای[6] که یک دستگاه ضربه‌ای سرعت بالا می‌باشد، فرآیند کشش عمیق درسرعت بالا مورد آزمایش قرار گرفت. نرخ کرنش در این فرآیند دینامیکی سرعت بالا به ۲۰ بر ثانیه هم می‌رسد و این در حالیست که درفرآیند کشش عمیق، در حالت معمولی، مقدار نرخ کرنش بین ۰/۰۰۱ تا ۰/۱ برثانیه است. تمامی مراحل فوق در نرم افزار المان محدود آباکوس شبیه‌سازی شده و معیارهای آسیب به‌دست آمده به عنوان داده وارد آن می‌شوند، سپس نتایج شبیه‌سازی و نتایج آزمایش، با هم مورد مقایسه قرار گرفته شده و به بررسی صحت نتایج بین معیارهای آسیب بدست آمده، پرداخته شده است.

۲- مدل مارسینیاک -کوزینسکی (M-K)

در این مقاله، معیار آسیب که مبتنی بر بدست آوردن کرنش‌های حدی است، بر پایه مدل (M-K) می‌باشد. دراین مدل یک شیار باریک روی سطح ورق فرض می‌شود، بنابراین ورق به دو قسمت همگن و ناهمگن (قسمت شیار) تقسیم می‌شودکه به ترتیب با نمادهای a و b نمایش داده می‌شوند. در شکل ۱ فرض وجود شیار در این مدل نشان داده شده است. برای مدل کردن شیار، ضریب ناهمگنی تعریف می‌شود که در رابطه ۱، بیان شده است [۳].

$$f=\frac{t_b}{t_a} \qquad (۱)$$

در رابطه ۱، t_a و t_b به ترتیب ضخامت ورق در قسمت همگن و ناهمگن می‌باشند. کرنش‌های حدی وقتی بدست می‌آیند که نسبت بین کرنش موثر در قسمت ناهمگن به کرنش موثر در قسمت همگن از ۱۰ تجاوز کند[۵]. از معادلات تعادل در جهت شیار می‌توان نوشت:

$$F_{nt}^a=F_{nt}^b \qquad (۲\text{-الف})$$

$$F_{nn}^a=F_{nn}^b \qquad (۲\text{-ب})$$

که در روابط ۲، F_{nn} و F_{nt} نیروهای وارده درجهت عمود و مماس برشیار و در واحد طول هستند. مطابق رابطه بین تنش و نیرو در رابطه ۳ داریم:

$$\sigma_{nt}^a\exp(\varepsilon_3^a)t_0^a=\sigma_{nt}^b\exp(\varepsilon_3^b)t_0^b \qquad (۳\text{-الف})$$

$$\sigma_{nn}^a\exp(\varepsilon_3^a)t_0^a=\sigma_{nn}^b\exp(\varepsilon_3^b)t_0^b \qquad (۳\text{-ب})$$

که در روابط ۳، σ_{nn} و σ_{nt} مولفه‌های عمودی و مماسی تنش هستند. t_0^a و t_0^b ضخامت‌های اولیه قسمت‌های همگن و ناهمگن می‌باشند. ε_3 کرنش در راستای ضخامت می‌باشد که با توجه به اصل ثابت بودن حجم ماده می‌توان نوشت:

$$\varepsilon_3=-(\varepsilon_1+\varepsilon_2) \qquad (۴)$$

رابطه ۱ را می‌توان برحسب ناهمگنی اولیه نشان داد [۳]:

$$f=f_0\exp(\varepsilon_3^b-\varepsilon_3^a) \qquad (۵\text{-الف})$$

که در رابطه ۵- الف:

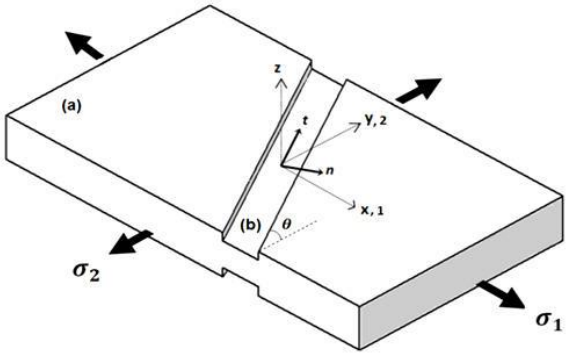
$$f_0=\frac{t_0^b}{t_0^a} \qquad (۵\text{-ب})$$

$$t=t_0\exp(\varepsilon_3) \qquad (۵\text{-ج})$$

با توجه به مجموعه روابط ۳ و مجموعه روابط ۵ می‌توان نوشت:

$$f\sigma_{nn}^b=\sigma_{nn}^a \qquad (۶\text{-الف})$$

1- Homogeneous
2- Inhomogeneous
3- Independent Strain rate
4- Dependent Strain rate
5- Dynamic Forming Limit Diagram
6- Drop Hammer



شکل ۱ مدل (M-K) و فرض وجود شیار

$$f\sigma_{nt}^{b}=\sigma_{nt}^{a} \qquad (۶-ب)$$

در راستای مماس بر شیار معادله سازگاری به‌صورت رابطه ۷ می‌باشد:

$$d\varepsilon_{tt}^{a}=d\varepsilon_{tt}^{b} \qquad (۷)$$

بنابراین می‌توان تمام مولفه‌های تنش وکرنش را در قسمت همگن محاسبه کرد و در ادامه، دیگر پارامترهای مجهول، با استفاده از روابط ۱ تا ۷ بدست می‌آیند. پارامترهای مجهول عبارتند از $\sigma_{nt}{}^{b}$ و $\sigma_{nn}{}^{b}$ و $\sigma_{tt}{}^{b}$ و $\overline{d\varepsilon}^{b}$.

۳- حل عددی معادلات

برای محاسبه کرنش‌های حدی، ابتدا باید مولفه‌های تنش و کرنش را در قسمت همگن بدست آورد. در این تئوری، نسبت بین تنش‌ها در قسمت همگن در تمام طول بارگذاری ثابت می‌باشد، همچنین فرض می‌شود که در این رابطه، حالت تنش صفحه‌ای برقرار است. این نسبت با نماد α در رابطه ۸، نمایش داده شده است. α مقداری بین ۰ و ۱ دارد.

$$\alpha=\frac{\sigma_{22}}{\sigma_{11}} \qquad (۸)$$

تنش و کرنش موثر، تحت رابطه سویفت[1] به هم مرتبط می‌شوند [۱۱].

$$\bar{\sigma}_Y=K(\varepsilon_0+\bar{\varepsilon})^n\dot{\varepsilon}^m \qquad (۹)$$

که در رابطه ۹، $\bar{\sigma}_Y$ و $\bar{\varepsilon}$ به ترتیب تنش وکرنش موثر، $\dot{\varepsilon}$ نرخ کرنش، K ضریب استحکام، n نماد کرنش سختی، m توان حساسیت به نرخ کرنش و ε_0 کرنش حد ارتجاعی می‌باشند. برای شروع، یک نموکرنش موثر $\overline{d\varepsilon}^{a}$ به اندازه ۰/۰۰۰۴ اعمال می‌شود.

معیار تسلیم هیل ۱۹۴۸ به صورت رابطه ۱۰- الف می‌باشد [۱۱]:

$$2f(\sigma)=[G(\sigma_{22}-\sigma_{33})^2+F(\sigma_{11}-\sigma_{33})^2+H(\sigma_{11}-\sigma_{22})^2+3\sigma_{31}{}^2+3\sigma_{23}{}^2+3\sigma_{12}{}^2]^{1/2} \qquad (۱۰-الف)$$

که در رابطه ۱۰- الف، σ تنش در جهت‌های مختلف و $f(\sigma)$ تابع تسلیم می‌باشند. همچنین F,G,H,L,M,N ضرایب ناهمسانگردی می‌باشند.

در رابطه ۱۰- الف می‌توان نوشت:

$$H=\frac{r_0}{r_0+1} \qquad (۱۰-ب)$$

$$F=\frac{r_0}{(r_0+1)r_{90}} \qquad (۱۰-ج)$$

$$G=\frac{1}{r_0+1} \qquad (۱۰-د)$$

1- Swift Equation

که در روابط ۱۰، r_0 و r_{90} به ترتیب ضرایب ناهمسانگردی در جهت نورد و عمود بر جهت نورد می‌باشند. با فرض صفحه‌ای بودن تنش و همچنین منطبق بودن محورهای اصلی بر محورهای موجود در صفحه ورق، رابطه ۱۱، حاصل خواهد شد:

$$2f(\sigma)=\sqrt{G(\sigma_{22})^2+F(\sigma_{11})^2+H(\sigma_{11}-\sigma_{22})^2} \qquad (۱۱)$$

بااستفاده از رابطه ۸ و روابط ۱۰، روابط ۱۲ حاصل خواهد شد:

$$\sigma_{11}=\frac{\bar{\sigma}_Y(r_{90}(r_0+1))}{\sqrt{r_{90}+r_0\alpha^2+r_0r_{90}(1-\alpha)^2}} \qquad (۱۲-الف)$$

$$\sigma_{22}=\alpha\sigma_{11} \qquad (۱۲-ب)$$

برای به‌دست آوردن کرنش‌های موثر در قسمت همگن، از قانون شارش[2] استفاده شده است که در رابطه ۱۳- الف بیان شده است [۱۱].

$$d\varepsilon_{ij}=d\lambda\frac{\partial f(\sigma)}{\partial\sigma_{ij}} \qquad (۱۳-الف)$$

که در رابطه ۱۳- الف:

$$d\lambda=\frac{d\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} \qquad (۱۳-ب)$$

با توجه به روابط ۱۰، ۱۱ و ۱۳، روابط ۱۴ حاصل خواهد شد:

$$q1=\frac{2r_{90}(\sigma_{11})+2r_0r_{90}(\sigma_{11}-\sigma_{22})}{2r_{90}(r_0+1)\bar{\sigma}_Y} \qquad (۱۴-الف)$$

$$q2=\frac{2r_{90}(\sigma_{11})-2r_0r_{90}(\sigma_{11}-\sigma_{22})}{2r_{90}(r_0+1)\bar{\sigma}_Y} \qquad (۱۴-ب)$$

با استفاده از روابط ۱۴ می‌توان کرنش‌های اصلی را در قسمت همگن مطابق روابط ۱۵ بیان نمود:

$$d\varepsilon_{11}=q1(d\bar{\varepsilon}) \qquad (۱۵-الف)$$

$$d\varepsilon_{22}=q2(d\bar{\varepsilon}) \qquad (۱۵-ب)$$

تمام مولفه‌های روابط ۱۵، در جهت‌های اصلی می‌باشند، با توجه به این که نیاز به معلوم بودن مولفه‌های تنش در قسمت شیار است، از ماتریس دوران مطابق رابطه ۱۶- الف استفاده شده است:

$$\sigma^{ntz}=T\sigma^{xyz}T^T=\begin{bmatrix}\sigma_{nn} & \sigma_{nt}\\ \sigma_{nt} & \sigma_{tt}\end{bmatrix} \qquad (۱۶-الف)$$

که در رابطه ۱۶- الف:

$$T=\begin{bmatrix}\cos\theta & -\sin\theta\\ \sin\theta & \cos\theta\end{bmatrix} \qquad (۱۶-ب)$$

زاویه θ، در رابطه ۱۶- ب، زاویه بین راستای شیار و محور ۲ می‌باشد و از رابطه ۱۷ بدست می‌آید [۶]:

$$\tan(\theta+d\theta)=\frac{1+d\varepsilon_{11}^{a}}{1+d\varepsilon_{22}^{a}}\tan(\theta) \qquad (۱۷)$$

با بدست آوردن مولفه‌های تنش در قسمت همگن با استفاده از روابط ۸ تا ۱۷ می‌توان مولفه‌های مجهول که همان تنش و کرنش‌های قسمت ناهمگن هستند را بدست آورد.

اگر بردار مجهولات را با X نشان دهیم، مطابق رابطه ۱۸خواهیم داشت:

$$X=\left[\sigma_{nt}^{b};\sigma_{nn}^{b};\sigma_{tt}^{b};\overline{d\varepsilon}^{b}\right] \qquad (۱۸)$$

در این نظریه فرض می‌کنیم که لحظه آغاز گلویی شدن زمانی است که نمو کرنش موثر در قسمت ناهمگن به ۱۰ برابر نمو کرنش موثر در قسمت همگن برسد[۵]. ذکر این نکته ضروری است که به ازای هر α، حداکثر یک

2- Flow rule

جواب خواهیم داشت. الگوریتم این برنامه با استفاده از زبان برنامه‌نویسی فرترن نوشته شده و جواب‌های حاصل شده، برگرفته از خاصیت حل به روش نیوتن رافسون[1] می‌باشد. با کنار هم قرار دادن جواب‌ها به‌ازای هر نسبت تنش α، مجموعه‌ای از نقاط بدست می‌آیند که همان کرنش‌های حدی مورد نظر در نمودار حد شکل‌دهی می‌باشند.

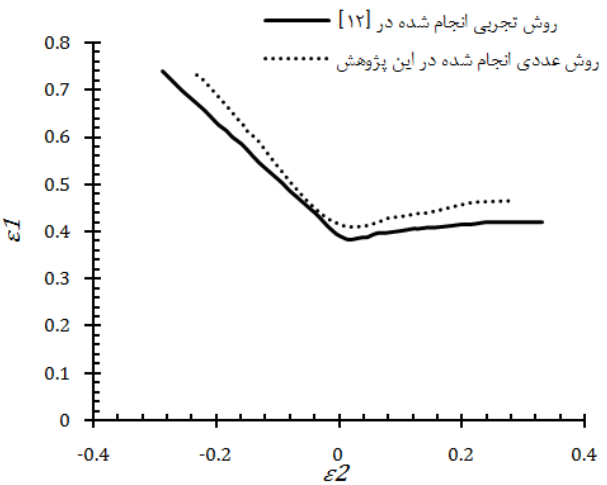
جای و همکاران [۱۲] به بررسی عددی و تجربی نمودار حد شکل‌دهی فولاد ALDQ پرداخته‌اند. جدول ۱، مشخصه‌های مکانیکی این ماده را نشان می‌دهد. آن‌ها از مدل آسیبی به نام مدل گوشه[2] استفاده کرده و به مقایسه نمودار حد شکل‌دهی بدست آمده از مدل گوشه و روش تجربی پرداخته‌اند. آن‌ها در نرخ کرنش ۴ برثانیه، نمودار حد شکل‌دهی را بدست آوردند. نتایج کار آن‌ها در [۱۲] نشان می‌دهد که اختلاف بسیار کمی بین دو نمودار ترسیم شده از طریق روش عددی و روش تجربی وجود دارد، اما روش انجام این پژوهش براساس مدل آسیب (M-K) می‌باشد. برای بررسی صحت الگوریتم نوشته شده در این پژوهش، برای فولاد ALDQ، نمودار حد شکل‌دهی با استفاده از مدل (M-K) و با توجه به مشخصات مکانیکی مندرج در جدول ۱ بدست آمده و با نتایج بدست آمده در[۱۲] که با استفاده از روش تجربی و مدل گوشه حاصل شده، مقایسه گردیده است، شکل (۲).

۴- آزمایش‌های کششی تک محوره

در این پژوهش فولاد St۱۳ مورد نظر می‌باشد. برای به دست آوردن نمودار شکل‌دهی فولاد St۱۳، نیاز به دانستن مشخصات مکانیکی آن خواهد بود. آزمایش‌های کششی تک محوره در جهت ۰، ۴۵ و۹۰ درجه نسبت به نورد انجام شدند. این آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه تست کشش سروهیدرولیک

جدول ۱ مشخصه‌های مکانیکی فولاد ALDQ در [۱۲]

مشخصه مکانیکی	مقدار
نمادکرنش سختی(n)	۰/۲
ضریب استحکام(K) برحسب MPa	۴۰۰
توان حساسیت به نرخ کرنش(m)	۰/۰۵
کرنش حد ارتجاعی (ε_0)	۰/۰۰۰۳



شکل ۲ مقایسه بین نمودار حد شکل‌دهی بدست آمده از مدل (M-K) دراین پژوهش و نمودار حد شکل‌دهی بدست آمده از روش تجربی در [۱۲]

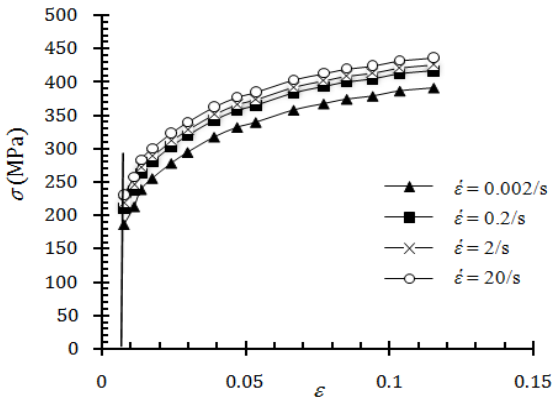
اکسیال به انجام رسیده است. این دستگاه قادر خواهد بود در نرخ کرنش‌های مختلف رفتارماده را مورد آزمایش قرار دهد.

نمونه آزمایشی تحت ۴ نرخ کرنش ۰/۰۰۲، ۰/۲، ۲ و۲۰ برثانیه مورد آزمایش قرار گرفت. شکل‌های ۳، ۴ و ۵ نمودار تنش و کرنش St۱۳ را در سه جهت مختلف نسبت به نورد و در نرخ کرنش‌های مختلف نشان می‌دهند. با توجه به این شکل‌ها می‌توان متوجه شد که این ماده به نرخ کرنش وابسته بوده و با افزایش نرخ کرنش، تنش تسلیم افزایش پیدا می‌کند. با توجه به نمودارهای تنش و کرنش، در پایین‌ترین نرخ کرنش مورد آزمایش، نرخ کرنش ۰/۰۰۲ بر ثانیه، کمیت‌های K، n و ε_0 در هرسه جهت نورد بدست می‌آیند. در واقع باتوجه به این که کمترین نرخ کرنش مورد استفاده به وسیله دستگاه سروهیدرولیک موجود، ۰/۰۰۲ بر ثانیه می‌باشد ثوابت K و n را بدست می‌آوریم. این ثوابت زمانی بدست می‌آیند که نرخ کرنش به میزان ناچیزی بوده و توان حساسیت به نرخ کرنش در رابطه ۹ صفر است[۱۲]. لازم به ذکر است که کرنش حد ارتجاعی در رابطه ۹ که معرف رابطه رفتار پلاستیکی ماده می‌باشد کرنشی است که لحظه آغاز تسلیم را نشان می‌دهد. به عنوان مثال برای بدست آوردن پارامترهای K و n در جهت نورد، باید نمودار تنش موثر برحسب کرنش موثر در شکل ۳ را در مقیاس لگاریتمی و در نرخ کرنش پایین بدست آورد. شیب این نمودار با توجه به رابطه ۹ و با در نظر گرفتن m=0 برابر n و عرض از مبدا برابر K خواهد بود. همچنین مقدار پارامتر کرنش حد ارتجاعی ε_0، مستقیما از خود نمودار تنش و کرنش بدست می‌آید، به نحوی که در آغاز لحظه تغییر شکل پلاستیک، اگر خطی عمود بر محور کرنش رسم کنیم، محور کرنش را در نقطه‌ای قطع می‌کند که به آن کرنش حد ارتجاعی می‌گویند. شکل ۳ معرف این موضوع است. همین مراحل برای جهت‌های دیگر نورد انجام می‌شود. با استفاده از رابطه ۹ می‌توان به رابطه ۱۹ رسید:

$$\log\sigma = m\log\dot{\varepsilon} + \log[K(\varepsilon_0+\varepsilon)^n] \qquad (۱۹)$$

که در رابطه ۱۹، m شیب نمودار تنش و نرخ کرنش در مقیاس لگاریتمی می‌باشد، برای بدست آوردن m باید توجه داشت که دو پارامتر کرنش و نرخ کرنش روی این کمیت تاثیرگذار هستند. روش بدست آوردن این کمیت به این ترتیب است که به عنوان مثال در جهت نورد، ابتدا در یک کرنش ثابت طبق رابطه ۱۹، لگاریتم تنش موثر برحسب لگاریتم نرخ کرنش ترسیم می‌شود. شکل ۶، برای شروع کار از کرنش بسیار پایین که حتی پایین‌تر از کرنش حد ارتجاعی است استفاده می‌کنیم. علت این امر آن است که برای افزایش دقت از مقدار میانگین m استفاده می‌کنیم، بنابراین تمامی کرنش‌های به کار رفته باید لحاظ شود که البته همین امر در رابطه با نرخ کرنش نیز بایدرعایت شود، یعنی در رابطه ۱۹ نرخ کرنش بسیار پایین ۰/۰۰۲ برثانیه نیز مورد استفاده قرار گرفته است. به عبارت دیگر پارامتر m اگر چه نشان دهنده وابستگی ماده به نرخ کرنش است اما حتی نرخ کرنش در محدوده استاتیکی نیز تاثیر دارد اگرچه این تاثیر بسیار ناچیز است اما برای محاسبه دقیق‌تر بایستی مورد توجه قرار گیرد. ذکر این نکته ضروری است که در کرنش ثابت و در ۴ نرخ کرنش ذکر شده، مقادیر لگاریتم تنش با استفاده از شکل ۳ بدست می‌آیند. شیب این نمودار رسم شده که یک معادله خط مرتبه اول را تشکیل می‌دهد برابر مقدار m در کرنش فرض شده می‌باشد. این کار باید برای کرنش‌های دیگر نیز انجام شده و در نهایت میانگین مقادیر بدست آمده از شیب نمودارها همان مقدار مورد نظر برای پارامتر m می‌باشد.

1- Newton-Raphson
2- Vertex model



شکل ۳ نمودار تنش وکرنش St۱۳ درجهت نورد و اندازه‌گیری کرنش حد ارتجاعی

شاید به نظر برسد که با در نظر گرفتن مقدار میانگین برای m پارامترهای دیگر تغییر کنند، اما باید در نظر داشت که ثوابت n و K درحالتی بدست می‌آیند که مقدار m صفر است یعنی اصلا موضوع تاثیر نرخ کرنش در میان نیست. ثوابت n و K مربوط به قسمت استاتیکی بوده و ثابت هستند. در نظر گرفتن مقدار میانگین برای m به دلیل تاثیر کرنش می‌باشد و ربطی به پارامترهای K و n ندارد. باتوجه به شکل ۶ مقدار m در جهت نورد برابر ۰/۰۱۸۷ می‌باشد. این مراحل را برای جهت‌های دیگر نورد نیز می‌توان انجام داد.

باتوجه به رفتارماده در نرخ کرنش‌های مختلف می‌توان تاثیر این پارامتر مهم را در مورد تغییر طول نسبی[1] و نسبت بین تنش تسلیم به تنش نهایی بررسی کرد. با افزایش نرخ کرنش، میزان تنش تسلیم به تنش نهایی در تمام جهت‌ها افزایش می‌یابد، در حالی که با افزایش نرخ کرنش، تغییر طول نسبی در تمام جهات، کاهش می‌یابد. شکل‌های ۷ و ۸ این موضوع را نشان می‌دهند. تاثیر نرخ کرنش روی تغییر طول نسبی بستگی به محدوده نرخ کرنش و رفتار ماده در سطح مرزدانه‌های تشکیل‌دهنده دارد، به‌طوری‌که برای بعضی از مواد مانند فولاد DP۵۹۰ این پارامتر در محدوده نرخ کرنش بین ۰/۰۰۰۱ تا ۱ برثانیه، با افزایش نرخ کرنش کاهش یافته و در محدوده بین ۱ تا ۱۰۰ برثانیه با افزایش نرخ کرنش، افزایش می‌یابد، در حالی که تغییرطول نسبی فولاد CQ در همه محدوده‌های نرخ کرنش با افزایش این مقدار کاهش می‌یابد[۱۰]. بنابراین تاثیر نرخ کرنش روی تغییر طول نسبی را باید با انجام آزمایش کشش تک محوره و در نرخ کرنش‌های مختلف مشخص کرد. جدول ۲ مشخصه‌های مکانیکی فولاد St۱۳ رادر هر سه جهت نورد نشان می‌دهد.

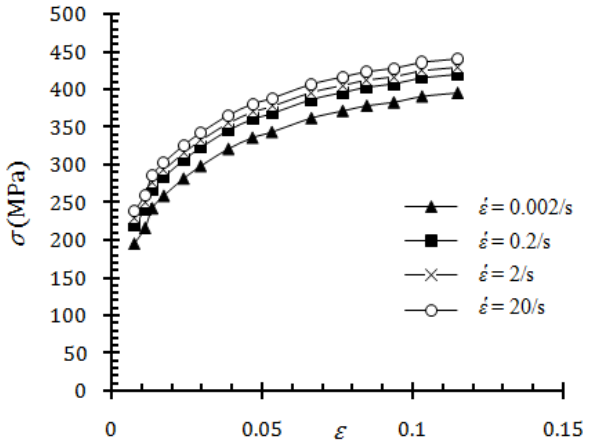
۵- نمودارحدشکل‌دهی غیروابسته به نرخ کرنش، وابسته به نرخ کرنش و نمودارحد شکل‌دهی دینامیکی

نمودار حد شکل‌دهی، وابسته به ویژگی‌های ماده می‌باشد، با وارد کردن مشخصات مکانیکی St13 که در جدول ۲ مندرج گردیده است، در برنامه نوشته شده برطبق الگوریتم (M-K)، نمودار شکل‌دهی ماده مزبور بدست آمده است. اگر ضریب حساسیت به نرخ کرنش صفر باشد، در واقع به این معناست که ماده دارای رفتاری غیروابسته به نرخ کرنش می‌باشد، در این صورت رابطه ۹ به صورت رابطه ۲۰ تبدیل می‌شود:

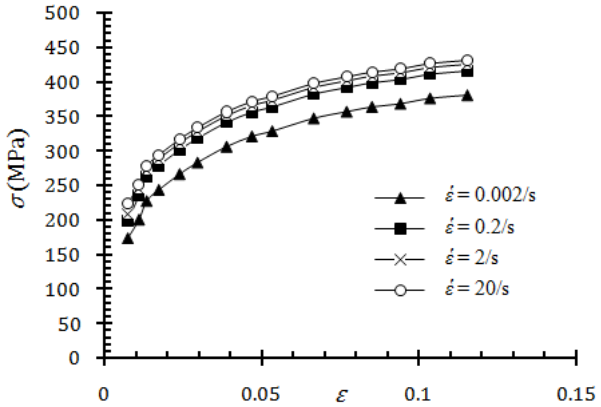
$$\bar{\sigma}_Y = K(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon})^n \qquad (۲۰)$$

شکل ۹، هر دو نمودار غیر وابسته به نرخ کرنش و وابسته به نرخ کرنش

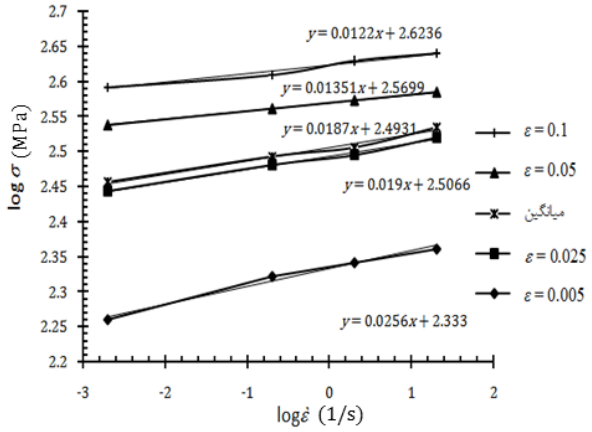
1- Elongation



شکل ۴ نمودار تنش وکرنش St۱۳، ۹۰ درجه نسبت به نورد

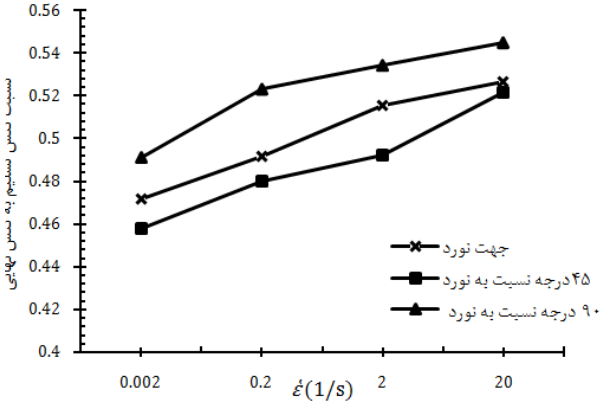


شکل ۵ نمودار تنش و کرنش St۱۳، ۴۵ درجه نسبت به نورد

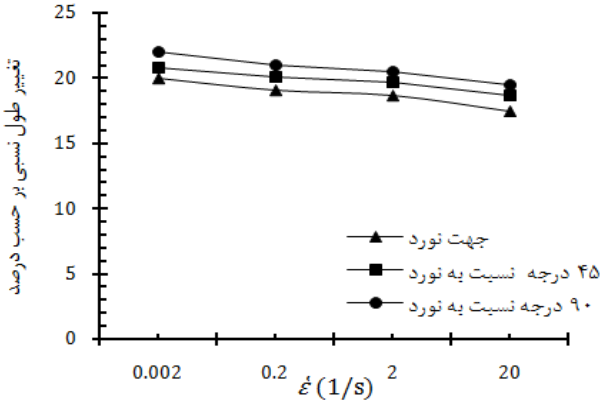


شکل۶ وابستگی پارامتر توان حساسیت به نرخ کرنش به کرنش و نرخ کرنش

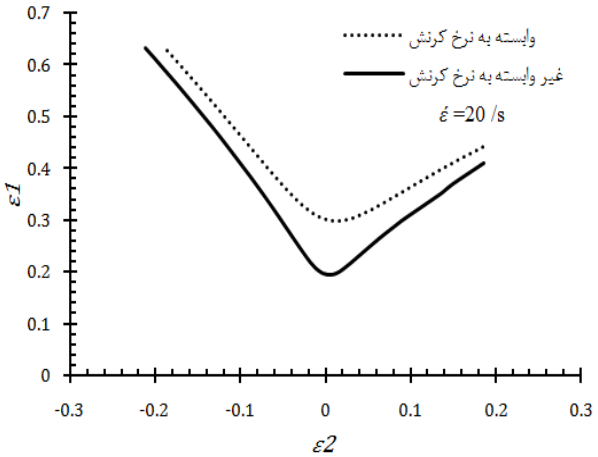
را نشان می‌دهد. نمودار وابسته به نرخ کرنش در شکل ۹، در نرخ کرنش ۲۰ بر ثانیه دست آمده است. با در نظر گرفتن پارامتر توان حساسیت به نرخ کرنش، سطح نمودار حد شکل‌دهی فلزات افزایش پیدا کرده است، همان‌طوری که عاصم‌پور و همکاران در [۱۳] به این نتیجه رسیده‌اند که افزایش مقدار m باعث بالا رفتن حدشکل‌دهی خواهد شد. در واقع پارامتر m باعث می‌شود که لحظه آغاز شدن باریک شدن موضعی به تاخیر بیفتد زیرا سطح نمودار به سمت بالا منتقل شده است.



شکل ۷ نسبت تنش تسلیم به تنش نهایی برحسب نرخ کرنش



شکل ۸ تغییر طول نسبی برحسب نرخ کرنش در سه جهت نورد



شکل ۹ نمودار حد شکل‌دهی غیر وابسته و وابسته به نرخ کرنش فولاد St۱۳

جدول ۲ مشخصه‌های مکانیکی فولاد St۱۳ در هرسه جهت نورد

موقعیت نسبت به نورد	درجهت نورد	۹۰ درجه	۴۵ درجه
نماد کرنش سختی(n)	۰/۲۳۸۷	۰/۲۳۵۶	۰/۲۳۹۴
ضریب استحکام (K) برحسب MPa	۶۵۰	۶۴۳	۶۵۴
توان حساسیت به نرخ کرنش(m)	۰/۰۱۸۷	۰/۰۱۸۱	۰/۰۱۷۸
کرنش حد ارتجاعی(ε_0)	۰/۰۰۷	۰/۰۰۷	۰/۰۰۷

نمودارهای حدشکل‌دهی فولاد St۱۳ چه به صورت وابسته به نرخ کرنش، چه به صورت غیروابسته به نرخ کرنش شبه استاتیک هستند، زیرا پارامتر نرخ کرنش به صورت عددی در رابطه ۹ گنجانده نشده است. معیار دینامیکی در هر نرخ کرنش، حد شکل‌دهی را مشخص می‌کند. با وارد کردن مقدار عددی نرخ کرنش در رابطه ۹ و تاثیر آن در روابط دیگر ذکر شده، نمودار دینامیکی حد شکل‌دهی محاسبه خواهد شد، به نوعی کمیت نرخ کرنش در این معیار گنجانده شده است. شکل۱۰ نمودار حد شکل‌دهی دینامیکی فولاد St۱۳ را در ۴ نرخ کرنش ۰/۰۰۲، ۰/۲، ۲ و ۲۰ بر ثانیه نشان می‌دهد. کاملا مشخص است که با افزایش نرخ کرنش نمودارحد شکل‌دهی به سمت بالا رفته است.

برای مقایسه می‌توان از پایین‌ترین نقطه در نمودار حد شکل‌دهی که معرف حالت کرنش صفحه‌ای می‌باشد استفاده کرد، همان‌طوری که از شکل ۱۰ مشخص است، در نرخ کرنش ۲ بر ثانیه، در پایین‌ترین نقطه نمودار حد شکل‌دهی، کرنش اصلی بیشتر، برابر ۰/۳ است که این تقریبا برابر با مقدار همین نقطه در نمودار وابسته به نرخ کرنش در شکل ۹ است. در حالی‌که در نرخ کرنش بسیار پایین ۰/۰۰۲ برثانیه، کرنش حدی بیشتر برابر ۰/۲ شده است که مشابه حالت نمودار غیروابسته به نرخ کرنش در شکل ۹ است. مالاست دهرا و همکاران [۱۴] با استفاده از آزمایش تجربی روی فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیسی[1] نشان دادند که با افزایش نرخ کرنش، نمودار حد شکل‌دهی افزایش پیدا می‌کند. نرخ کرنش بدست آمده برای آزمایش آن-ها بین محدوده ۱ تا ۱۰۰۰ بر ثانیه قرار گرفته بود.

۶- ناهمسانگردی در نمودارحدشکل‌دهی

با تعریف معیار ناهمسانگرد هیل ۱۹۴۸ در الگوریتم نوشته شده، می‌توان تاثیر این پارامتر مهم را بررسی کرد. ضرایب ناهمسانگردی با استفاده از رابطه ۲۱ بدست می‌آیند:

$$r = \frac{\varepsilon_W}{\varepsilon_T} \qquad (۲۱)$$

که در رابطه ۲۱، ε_W کرنش در جهت پهنا و ε_T کرنش در جهت ضخامت می‌باشند. بدست آوردن کرنش ضخامتی بسیار سخت است، به همین سبب از اصل ثابت بودن حجم مطابق رابطه ۲۲ استفاده می‌شود:

$$\varepsilon_T = -(\varepsilon_W + \varepsilon_L) \qquad (۲۲)$$

در رابطه ۲۲، ε_L کرنش در جهت طول می‌باشد، برای بررسی اثر ناهمسانگردی بر نمودار حد شکل‌دهی، باید علاوه بر تغییر در تابع تسلیم، پارامترهای دیگر نظیر نماد کرنش سختی، ضریب استحکام، توان حساسیت به نرخ کرنش در جهت‌های مختلف نسبت به نورد بدست آیند، در نتیجه از مقدار متوسط آن‌ها طبق روابط ۲۳ استفاده شده است[۱۱].

$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \qquad (۲۳\text{-الف})$$

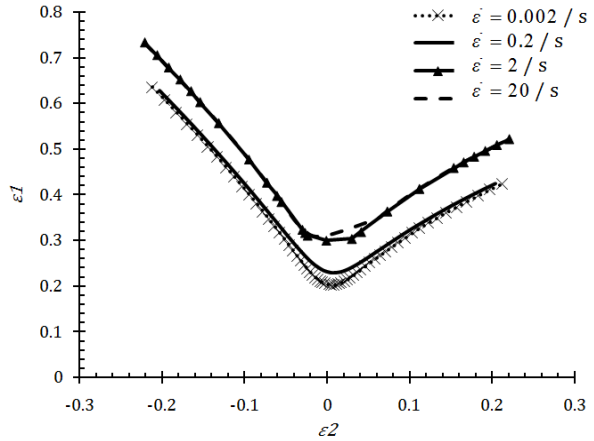
$$\bar{K} = \frac{K_0 + 2K_{45} + K_{90}}{4} \qquad (۲۳\text{-ب})$$

$$\bar{n} = \frac{n_0 + 2n_{45} + n_{90}}{4} \qquad (۲۳\text{-ج})$$

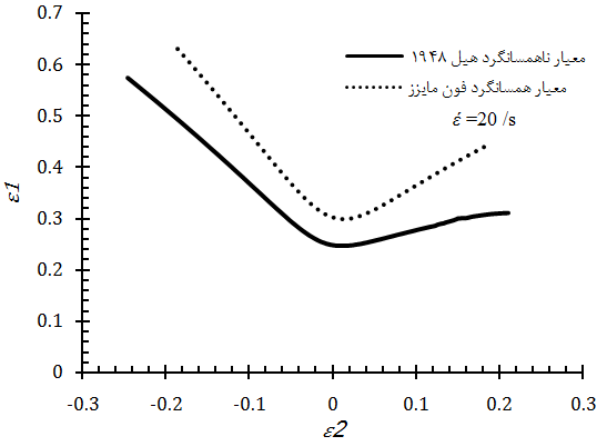
$$\bar{m} = \frac{m_0 + 2m_{45} + m_{90}}{4} \qquad (۲۳\text{-د})$$

با قرار دادن این مقادیر متوسط، می‌توان تاثیر ناهمسانگردی را نیز بر نمودار حد شکل‌دهی بررسی کرد. شکل ۱۱، نشان دهنده تاثیر ناهمسانگردی بر نمودار حد شکل‌دهی در نرخ کرنش ۲۰ بر ثانیه می‌باشد. همان‌طور که مشخص است ناهمسانگردی سطح نمودار را تغییر داده است.

1- Electro-Magnetic-Forming



شکل ۱۰ نمودار حد شکل‌دهی دینامیکی فولاد St۱۳



شکل ۱۱ تاثیر ناهمسانگردی بر نمودار حد شکل‌دهی فولاد St۱۳

۷- آزمایش فرآیند کشش عمیق در سرعت بالا

تفاوت معیارهای آسیب استاتیکی و دینامیکی در تعریف پارامتر نرخ کرنش می‌باشد. برای این که در عمل تفاوت دو معیار آشکار شود، فرآیندکشش عمیق در سرعت بالا به انجام رسید. کشش عمیق معمولا با استفاده از پرس‌های لنگ و هیدرولیکی انجام می‌شود، اما نرخ کرنش در این فرآیندها بسیار ناچیز است، برای تشخیص درست معیارهای آسیب بدست آمده نیاز به فرآیند کشش عمیق در نرخ کرنش بالا خواهد بود، به همین ترتیب از دستگاه چکش ضربه‌ای در این مقاله استفاده شده است. این دستگاه شامل یک وزنه ۱۰۰ کیلوگرمی است که در اسلایدهایش تا ارتفاع ۳ متری می‌تواند بالا برود و رها شود. یک آهن‌ربای[1] بسیار قوی این وزنه را نگه می‌دارد. سرعت‌سنج نصب شده روی دستگاه سرعت وزنه را هنگام برخورد نشان می‌دهد که این سرعت بستگی به ارتفاع رها شدن وزنه دارد که با توجه به حداکثر ارتفاع ۳ متری، سرعت‌سنج، سرعت ۷/۵ متر بر ثانیه را نشان می‌دهد که این میزان سرعت، نرخ کرنش زیادی ایجاد خواهد کرد.

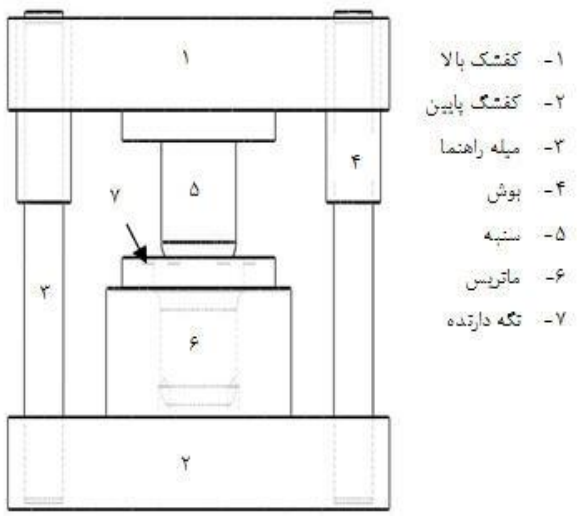
شکل ۱۲، این دستگاه را نشان می‌دهد. برای انجام این فرآیند، یک قالب کشش عمیق شامل سنبه، ماتریس و نگه‌دارنده ورق طراحی و ساخته شد، ورق با استفاده از سنبه به سمت قالب کشیده شده و شکل قالب را به خودش می‌گیرد. برای جلوگیری از چروک خوردگی از نگه‌دارنده ورق استفاده می‌شود. شکل ۱۳، قالب و شکل ۱۴ شماتیکی از اجزای قالب را نشان می‌دهد.

قالب، زیر چکش ضربه‌ای قرار داده شده، وزنه از ارتفاع ۲ متری رها شده و کفشک بالا را به سمت پایین فشار می‌دهد، در این هنگام سرعت‌سنج،

شکل ۱۲ دستگاه چکش ضربه‌ای

شکل ۱۳ قالب کشش عمیق طراحی شده

1- Magnet



شکل ۱۴ اجزای قالب کشش عمیق

سرعت ۶/۲ متر بر ثانیه را نشان می‌دهد. سنبه که به کفشک بالا با استفاده از ۴ پیچ وصل شده، ورق را شکل می‌دهد. جنس تمامی اعضا از فولاد VCN ۱۵۰ می باشد که در برابر ضربه[1] بسیار مقاوم است. طول و عرض ورق ۱۸سانتی‌متر می‌باشد. نگه‌دارنده دارای ۴ فنر می‌باشد که نیروی ۱۰ کیلو نیوتن را به ورق وارد می‌کند. قطر ماتریس ۶۰/۴۴ میلی‌متر و قطر سنبه نیز ۵۸ میلی‌متر می‌باشد. شعاع سرسنبه و شعاع سر ماتریس به ترتیب ۵ و ۶ میلی‌متر می‌باشند، فاصله بین سنبه و ماتریس نیز ۱/۲۲ میلی‌متر می‌باشد. برای بهتر نشان دادن نتایج نیز، از ورق با دو ضخامت ۰/۸ و ۱ میلی‌متر استفاده می‌شود، همچنین با در نظر گرفتن فشار بسیار بالای وزنه در هنگام سقوط، علاوه بر موارد ذکر شده در شکل ۱۴ یک قطعه نیز از همان جنس فولاد VCN۱۵۰ طراحی شده و روی کفشک بالا مونتاژ شده است. وزنه ابتدا به این قطعه برخورد کرده و سپس کفشک بالا و در نهایت سنبه تحت نیرو قرار می‌گیرند.

۸- شبیه‌سازی فرآیند کشش عمیق در سرعت بالا

برای بررسی توانایی‌های معیارهای آسیب بدست آمده، از نرم‌افزار تجاری المان محدود آباکوس استفاده شد. این نرم‌افزار دارای دو محیط صریح و استاندارد می‌باشد. در محیط صریح می‌توان علاوه بر تعریف معیار آسیب، رشد آسیب را نیز تعریف نمود. برای شبیه‌سازی فرآیند کشش عمیق، ورق را شکل‌پذیر و بقیه اعضا را صلب فرض می‌کنیم. خواص فیزیکی مانند چگالی، خواص الاستیک شامل مدول یانگ و ضریب پواسون، خواص پلاستیک و معیارهای آسیب بدست آمده که به وسیله الگوریتم (M-K) نوشته شده به صورت داده وارد نرم‌افزار می‌شوند. این معیارها، شامل نمودار حد شکل‌دهی فولادSt۱۳، وابسته به نرخ کرنش نشان داده شده در شکل ۹ و نمودار حد شکل‌دهی دینامیکی نشان داده شده در شکل۱۰ می‌باشند. لازم به یادآوری است که در نمودار حد شکل‌دهی شکل ۹، پارامتر نرخ کرنش به‌صورت عددی تعریف نشده و این معیار، شبه استاتیکی می‌باشد. معیار حد شکل‌دهی استاتیکی با استفاده از معیارآسیب FLD و معیاردینامیکی با استفاده از مدل آسیب MSFLD[2] وارد نرم‌افزار شده‌اند. خواص الاستیک فولاد St۱۳ عبارتنداز:

1- Impact
2- Muschenborn-Sonne Forming Limit Diagram

E= ۱۸۰GPa و ν=۰/۳، که E مدول یانگ و ν ضریب پواسون می‌باشند. شکل ۱۵، مدل مونتاژ شده را در محیط مونتاژ نرم‌افزار نشان می‌دهد.

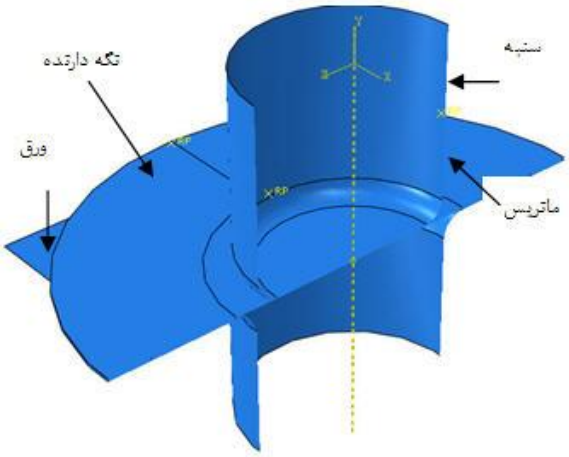
در ادامه، نوع تحلیل را صریح دینامیکی و زمان حل ۰/۰۰۶۷ در نظر گرفته می‌شود. با توجه به سرعت ۶/۲ متر بر ثانیه و همچنین خطی فرض کردن جابجایی سنبه نسبت به زمان و با توجه به این که سنبه ۴۱ میلی‌متر قابلیت پایین آوردن ورق را در ماتریس دارد، این زمان برای فرآیند در نظر گرفته شده است. شرایط تماس بین ورق و نگه‌دارنده، ورق و سنبه، ورق و ماتریس به صورت تماسی ساده تعریف می‌شود و ضریب اصطکاک بین ورق، نگه‌دارنده و ماتریس برابر ۰/۰۵ و بین ورق و سنبه برابر ۰/۱ قرار داده می‌شود.

ویورل پانویو و همکاران [۱۵] با انجام آزمایش‌های مختلف و شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود به این نتیجه رسیدند که در فرآیند کشش عمیق، ضریب اصطکاک بین دو ماده از جنس فولاد می‌تواند مقداری بین ۰/۰۵ تا ۰/۱۵ داشته باشد. انتخاب دقیق یک مقدار برای ضریب اصطکاک بستگی به نحوه روغن‌کاری بین سطوح مورد نظر دارد و در بهترین حالت روغن‌کاری، می‌توان از مقدار ۰/۰۵ برای ضریب اصطکاک بین دو سطح فولادی استفاده نمود. در فرآیند کشش عمیق معمولا از سطح روغن بیشتری بین ورق و ورق‌گیر و همچنین ورق و ماتریس استفاده می‌کنند. این امر به این علت است که شکست در ناحیه لبه ماتریس اتفاق نیفتد. نیروی نگه‌دارنده برابر ۱۰ کیلو نیوتن به ورق اعمال شده و از طرفی تمامی شرایط مرزی سنبه به غیر از جابه جایی در جهت رها شدن آن، مقید شده، ماتریس و نگه دارنده در تمامی جهات مقید می‌شوند. همچنین اعضای صلب با المان R3D4 و ورق با المان S4R مش بندی می‌شوند، شکل۱۶ نحوه مش بندی اعضا را نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است که اعضای صلب به صورت گسسته[3] مدل شده اند زیرا درمسائل شکل‌دهی فلزات به دلیل شرایط تماسی بین اعضا، نیاز است که اعضای صلب نیز مش‌بندی شوند. این در حالیست که در مدل‌سازی به روش پیوسته، اعضا مش‌بندی نمی‌شوند و بیشتر مناسب مسائل دو بعدی هستند.

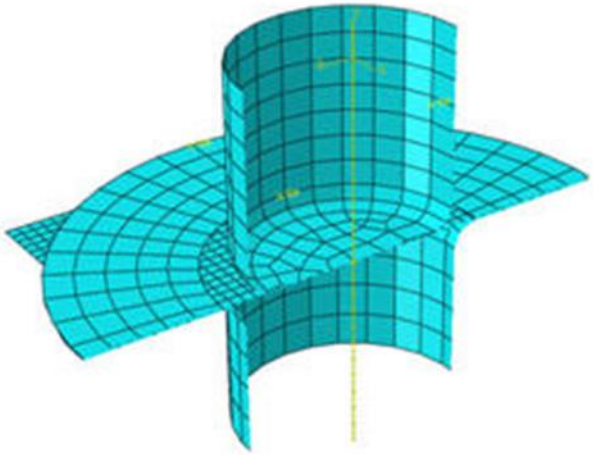
۹- مقایسه

ورق فولادی St۱۳ با ضخامت ۱ میلی‌متر تحت فرآیند شکل‌دهی با استفاده از چکش ضربه‌ای قرار گرفت و تمام مراحل آزمایش، در نرم افزار آباکوس،



شکل ۱۵ اجزای قالب کشش عمیق در نرم افزار آباکوس

3- Discrete Rigid



شکل ۱۶ المان بندی اعضای قالب

شبیه‌سازی شدند و دو معیار آسیب استاتیکی و دینامیکی به صورت داده وارد نرم‌افزار شدند. شکل ۱۷، ورق شکل داده شده توسط چکش ضربه‌ای را نشان می دهد. این ورق، با استفاده از رها شدن وزنه از ارتفاع ۲ متری شکل داده شده است و هیچ گونه ترک در آن مشاهده نمی‌شود. شکل ۱۸ و شکل ۱۹ شبیه‌سازی این فرآیند را با استفاده از معیار استاتیکی شکل ۹ و معیاردینامیکی شکل ۱۰ نشان می‌دهند، مقدار پارامتر آسیب در هردو معیار به ترتیب برابر ۰/۷۰۹ و ۰/۸۶۱ می‌باشد که نشان دهنده عدم وقوع پارگی در ورق است، ذکر این نکته ضروری است که مقدار بحرانی پارامتر آسیب در نرم افزار آباکوس که نشان دهنده وقوع پارگی در ورق است برابر ۱ می‌باشد.

محاسبه پارامتر آسیب در نرم افزار آباکوس برای تمامی معیارهای آسیب تعریف شده مشابه هم می‌باشد. شکل ۲۰ نحوه محاسبه پارامتر آسیب D برای معیار آسیب FLD تعریف شده در نرم افزار را نشان می‌دهد. برای این معیار، پارامتر آسیب از رابطه ۲۴ محاسبه می‌شود[۱۶]:

$$D=\frac{\varepsilon_1^A}{\varepsilon_1^B} \qquad (۲۴)$$

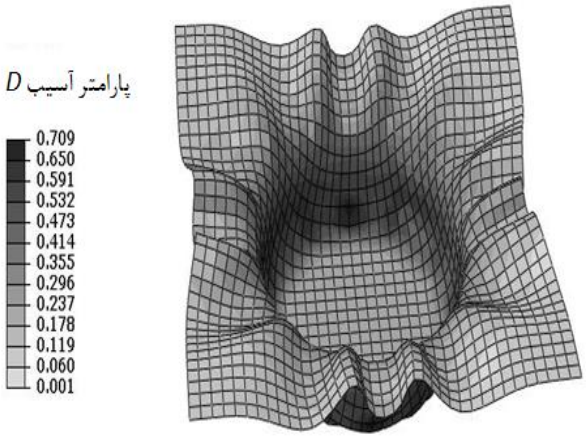
در رابطه ۲۴، ε_1^A کرنش اصلی محاسبه شده توسط نرم افزار در طول انجام فرآیند و ε_1^B کرنش اصلی داده شده به نرم افزار توسط معیار آسیب نوشته شده (شکل ۹) می‌باشد. محاسبه پارامتر آسیب برای معیار MSFLD نیز مشابه رابطه ۲۴ می‌باشد. اگر پارامتر آسیب D در رابطه ۲۴ به مقدار حدی ۱ برسد آن المان به طور کامل آسیب دیده و ورق در این ناحیه دچار پارگی می‌شود. برای مقایسه بهتر، آزمایش روی ورق با ضخامت ۰/۸ میلی‌متر به انجام رسید، شکل ۲۱، ورق شکل داده شده را نشان می‌دهد که دچار پارگی شده است.

این پارگی در دیواره قطعه اتفاق افتاده است، بنابراین در این حالت می‌توان معیارهای آسیب محاسبه شده را با یکدیگر مورد مقایسه قرارداد.

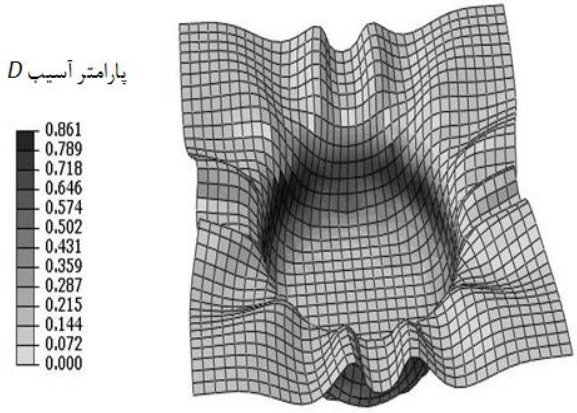
شکل ۲۲، پیش‌بینی معیار آسیب استاتیکی برای فولاد St۱۳ را نشان می‌دهد که پارامتر آسیب بحرانی[1] در آن برابر ۰/۷۴۵می‌باشد که نشان دهنده عدم وقوع پارگی در ورق است، در حالی که شکل۲۳، حاکی از پیش‌بینی معیار شکل‌دهی دینامیکی می‌باشد که پارامتر آسیب درآن به مقدار بحرانی ۱ رسیده است.

1- Critical Damage

شکل ۱۷ ورق شکل داده شده با چکش ضربه‌ای با ضخامت ۱ میلی‌متر



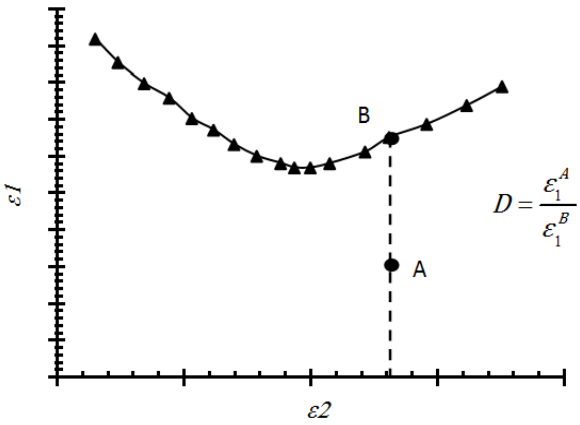
شکل ۱۸ نتیجه پیش‌بینی شده برای ورق ۱ میلی‌متر با استفاده از معیار استاتیکی



شکل ۱۹ نتیجه پیش‌بینی شده برای ورق ۱میلی‌متر با استفاده از معیاردینامیکی

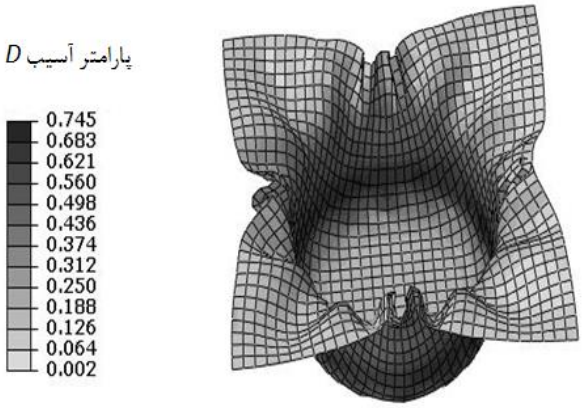
با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش می‌توان نتیجه گرفت که معیار استاتیکی نتوانسته پیش‌بینی درستی از فرآیند شکل‌دهی داشته باشد و این حاکی از تاثیر پارامتر نرخ کرنش است که در این شبیه سازی به ۲۰ برثانیه هم می‌رسد و تاثیر آن در پارگی کاملا مشخص است.

آزمایش‌های مشابه انجام شده برای سه قطعه با ضخامت ۰/۸ میلی‌متر و سه قطعه با ضخامت ۱ میلی‌متر به انجام رسیدند و تمامی شرایط آزمایش، در



شکل ۲۰ نحوه محاسبه پارامتر آسیب بحرانی در نرم افزار آباکوس

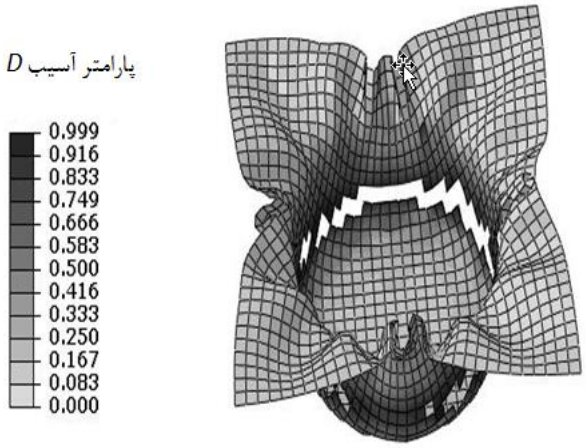
شکل ۲۱ ورق شکل داده شده با چکش ضربه‌ای با ضخامت ۰/۸ میلی‌متر



شکل ۲۲ نتیجه پیش‌بینی شده برای ورق ۰/۸ میلی‌متر با استفاده از معیار استاتیکی

نرم افزار قرارداده شدند. برای بررسی صحت انجام آزمایش به کمک شبیه‌سازی، می‌توان پاره شدن احتمالی ورق و در ادامه عمق وقوع پارگی را هم در قطعه آزمایش شده و هم در شبیه سازی با یکدیگر مقایسه کرد. برای هر سه قطعه آزمایش شده با ضخامت ۱ میلی‌متر پارگی اتفاق نیفتاد و در شبیه سازی نیز هیچ گونه پارگی مشاهده نشد. برای هر سه قطعه آزمایش شده با ضخامت ۰/۸ میلی‌متر، پارگی ایجاد شده در ورق به فاصله ۸ میلی‌متر از کف قطعه می‌باشد، این آزمایش برای سه قطعه در شرایط کاملا یکسان انجام شد.

برای اندازه گیری مکان عمق وقوع پارگی در شبیه‌سازی می‌توان تعداد



شکل ۲۳ نتیجه پیش‌بینی شده برای ورق ۰/۸ میلی‌متر با استفاده از معیار دینامیکی

المان‌های ورق را از کف قطعه شمرد و با دانستن طول المان، مکان وقوع پارگی را تخمین زد.

در شبکه‌بندی مدل، طول هر المان سه میلی‌متر تعیین شده و با توجه به این که از کف قطعه تا مکان پاره شده سه المان موجود می‌باشد، پارگی ایجاد شده از کف قطعه برابر ۹ میلی‌متر می‌باشد که تطابق خوبی با آزمایش انجام شده دارد. با استفاده از تکنیک حذف المان و فعال کردن گزینه حذف المان[1] ، می‌توان به نرم افزار فهماند که اگر در المانی پارامتر آسیب محاسبه شده توسط رابطه ۲۳ به مقدار ۱ برسد آن المان حذف شود. همچنین از آنجاکه تخمین پارگی در آزمایش از کف قطعه تا شروع ترک ایجاد شده می‌باشد در شبیه‌سازی نیز باید تعداد المان‌ها را از کف قطعه تا بالاترین المانی شمرد که دچار پارگی شده است.

بدیهی است که فرآیند شکل‌دهی سرعت بالا[2] نیازمند به معیاریست که وابسته به سرعت و یا به عبارتی وابسته به نرخ کرنش باشد، اما موادی که غیروابسته به نرخ کرنش می‌باشند، تفاوتی در رفتار آن‌ها درهردو معیار دیده نمی‌شود. بیشتر فولادها از جمله St13 وابسته به این پارامتر مهم بوده و این وابستگی کاملا در رفتار ماده در هر سه جهت نورد آشکار است. در شکل‌دهی کشش عمیق که با استفاده از انواع پرس انجام می‌شود به دلیل شبه استاتیک بودن فرآیند، نمودارحدشکل‌دهی استاتیکی که در داخل نرم افزار تعریف شده است، می‌تواند کاملا مفید و دقیق فرآیند را بررسی کند و اصلا نیازی به معیار دینامیکی نیست. حال اگر فرآیند مورد نظر دارای سرعت بالا باشد و یا به عبارتی دارای نرخ کرنش بالا باشد، آن‌وقت، معیار استاتیکی نمی‌تواند پیش‌بینی صحیحی داشته باشد. همان‌طور که از نتایج مشاهده شد معیار استاتیکی، در پیش‌بینی صحیح آسیب در ورق با ضخامت ۱ میلی‌متر صحیح، اما در مورد ضخامت ۰/۸ میلی‌متر نادرست عمل کرده است.

۱۰- نتیجه گیری

از این مقاله نتیجه می‌شود که برای مسائلی که دارای سرعت قابل توجهی هستند و نرخ کرنش در آن‌ها قابل ملاحظه است، نمی‌توان از نمودار حد شکل‌دهی استاتیکی استفاده نمود. همان‌گونه که در این مقاله برای ورق با ضخامت ۰/۸ میلی‌متر، این معیار، پیش‌بینی نادرستی به عمل آورد. این معیار برای فرآیندهای شبه استاتیکی نظیر کشش عمیق معمولی مناسب بوده و

1- Element Remove
2- High velocity sheet metal forming

می‌تواند به خوبی و با دقت بالا به پیش‌بینی آسیب بپردازد، اما برای فرآیندهایی مانند فرآیند شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی[1] و فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیسی که متداول‌ترین روش‌های شکل‌دهی با سرعت بالا هستند، این روش، خطای بالایی داشته و قادر به پیش‌بینی صحیح آسیب نیست. برای این‌گونه فرآیندها، باید از نمودار حد شکل‌دهی دینامیکی استفاده نمود. از این مقاله همچنین می‌توان نتیجه گرفت که نرخ کرنش، پارامتری تاثیرگذار بر رفتار ماده بوده و نمودار حد شکل‌دهی این مواد نیز به نرخ کرنش وابسته می‌باشد. بنابراین اگر فرآیند انجام شده، دارای سرعت بالا و ماده استفاده شده نیز وابسته به نرخ کرنش باشد، تنها معیار دقیق برای پیش‌بینی صحیح آسیب، معیار حد شکل‌دهی دینامیکی خواهد بود.

۱۱- فهرست علایم

F_{nn}	نیروی عمودی در راستای n $(kgms^{-2})$
F_{nt}	نیروی مماسی $(kgms^{-2})$
f	ضریب ناهمگنی
f_0	ضریب ناهمگنی اولیه
K	ضریب استحکام $(kgm^{-1}s^{-2})$
$\bar{K}$	ضریب استحکام موثر $(kgm^{-1}s^{-2})$
m	توان حساسیت به نرخ کرنش
$\bar{m}$	توان حساسیت به نرخ کرنش موثر
n	نماد کرنش سختی
$\bar{n}$	نماد کرنش سختی موثر
r_0	ضریب ناهمسانگردی در جهت نورد
r_{45}	ضریب ناهمسانگردی ۴۵ درجه نسبت به نورد
r_{90}	ضریب ناهمسانگردی ۹۰ درجه نسبت به نورد
$\bar{r}$	ضریب ناهمسانگردی موثر
t	ضخامت (m)
t_0	ضخامت اولیه (m)

علایم یونانی

ε_0	کرنش حد ارتجاعی
$\dot{\varepsilon}$	نرخ کرنش (s^{-1})
ε_T	کرنش در راستای ضخامت
σ_{nn}	تنش عمودی در راستای n $(kgm^{-1}s^{-2})$
σ_{nt}	تنش برشی $(kgm^{-1}s^{-2})$
σ_{tt}	تنش عمودی در راستای t $(kgm^{-1}s^{-2})$
σ_{11}	تنش اصلی درجهت ۱ $(kgm^{-1}s^{-2})$
σ_{22}	تنش اصلی درجهت ۲ $(kgm^{-1}s^{-2})$
σ_{33}	تنش اصلی درجه ۳ $(kgm^{-1}s^{-2})$
ε_1	کرنش اصلی در جهت ۱
ε_2	کرنش اصلی درجهت ۲
ε_3	کرنش اصلی درجهت ۳
ε_w	کرنش عرضی
ε_L	کرنش طولی
$\bar{\varepsilon}$	کرنش موثر
$d\theta$	نمو زاویه
$d\bar{\varepsilon}$	نمو کرنش موثر
α	نسبت تنش
$d\varepsilon_{11}$	نمو کرنش اصلی درجهت ۱
$d\varepsilon_{22}$	نمو کرنش اصلی در جهت ۲
$d\varepsilon_{33}$	نمو کرنش اصلی در جهت ۳

۱۲- مراجع

[1] S. P. Keeler, Circular Grid System: A valuabe Aid for Evaluation Sheet Forming, *Sheet Met Ind,* pp. 633-640, 1965.
[2] G. M. Goodwin, Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems, *Metal. Ital,* pp. 767-771, 1969.
[3] Z. Marciniak, K. Kuczynski, Limit Strains in the Process of Stretch Forming Sheet Metal, *Int. J. Mech. Sci*, pp. 609-620, 1967.
[4] Z. Marciniak, K. Kuczynski, T. Pokora, Influence of the Plastic Properties of a Material on the Forming Limit Diagram for Sheet Metal in Tension, *Int. J. Mec. Sci,* pp. 789-805, 1973.
[5] A. Barata da Rocha, F. Barlat, J.M. Jalinear, Prediction of the Forming Limit Diagram of Anisotropic Sheets in Linear and Non-linear Loading, *Mat. Sci, Eng,* pp. 151-164, 1984.
[6] R. Sowerby, J. L. Duncant, Failure in Sheet Metal in Biaxial Tension, *Int. J. Mech. Sci,* pp. 217-229, 1971.
[7] M. M. Moshksar, S. Mansorzadeh, Determination of the forming limit diagram for Al3105 sheet, *Journal of Materials Processing Technology,* pp. 138-142, 2003.
[8] Haroldo Beria Campos, Marelina Carmen Butuc, Jose Joaquim Gracio, Joao E. Rocha, Jose Manuel Ferreira Duarte, Teorical and Experimental Determination of forming limit diagram for AISI304 stainless steel, *Journal of Material Processing Technology.* Pp. 56-60, 2006.
[9] S. Ahmadi, A. R. Eivani, A. Akbarzadeh, Experimental and analytical studies on the prediction of forming limit diagrams, *Computational Materials Science,* pp. 1252-1257, 2009.
[10] S. B. Kim, H. Huh, H. H. Bok, M. B. Moon, Forming Limit of Diagram of auto-body steel Sheets for high-speed Sheet Metal Forming, *Journal of Materials Processing Technology,* pp. 851-862, 2011.
[11] Wiliam Hosford, *Metal Forming Mechanics and Metallurgy* ,in: Robert M. Caddell, *Plastic Anisotropy*, pp. 13.207-13.209, Mishigan, 2007.
[12] M. Jie, C. H. Cheng, L. C. Chan, C. L. Chow, Forming Limit Diagrams of Strain-rate-dependent Sheet Metals, *International Journal of Mechanical Sciences,* pp. 269-275, 2009.
[13] A. Assempour, M. Ganjiani, Implementation of a robust algorithm for prediction of Forming limit diagrams, *Journal of Materials Enginering and Performance*, Vol 17, pp. 1-6, 2008.
[14] Mala Seth Dehra, *High Velicity Formability and Factors Affecting it, Tube Expansion Experiments,* pp. 99-111, Ohio, United states, 2006
[15] Viorel Paonoiu, Dumitru Nicoara, Simulation of Friction Phenomenon in Deep drawing Process, in *The national Tribology Conference*, Galaty, Romania, 2003.
[16] *Abaqus Analysis user's Manual*, Accessed16 July 2013;www.simulia.com /products/products_legal.html.

1- Electro Hydraulic Forming