



بررسی عددی اثر نرخ کرنش بر پیش بینی آسیب به کمک معیار حد شکل دهی دینامیکی در فرآیند شکل دهی ورق های 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 ۴۱۹۹۶-۱۳۷۶۹، basti@guilan.ac.ir

چکیده

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 شکل دهی

تحلیل شبه استاتیکی

رفتار ناهمسانگردی

در این مقاله، نمودار حد شکل دهی دینامیکی به عنوان یک معیار شکست برای فولاد St13 بررسی شده است. در واقع اثر نرخ کرنش های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. این معیار شکست براساس مدل مارسینیاک و کوزینسکی می باشد و حل معادلات با استفاده از روش نیوتن رافسون به انجام رسیده است. بعد از حل معادلات سه نوع نمودار حد شکل دهی به دست آمده است: نمودار حد شکل دهی غیروابسته به نرخ کرنش، وابسته به نرخ کرنش و نمودار حد شکل دهی دینامیکی، معیار آسیب دینامیکی نمودار حد شکل دهی را در هر نرخ کرنش بررسی می کند. ملاحظه می شود که با افزایش نرخ کرنش حد شکل دهی افزایش پیدا کرده است. همچنین به منظور لحاظ کردن رفتار ناهمسانگردی و الاستیک پلاستیک ماده به ترتیب معیار تسلیم ناهمسانگرد هیل ۱۹۴۸ و رابطه سخت شوندگی سوئیفت استفاده شده است. همچنین این مقاله به ویژگی های کششی تک محوره و شکل پذیری ورق فلزی در رابطه با اثرات نرخ کرنش پرداخته است. برای تایید نتایج، آزمایش های تجربی با یک چکش ضربه ای به انجام رسیده است که یک دستگاه ضربه ای سرعت بالا می باشد. برای مقایسه بین معیارهای آسیب شبه استاتیکی و دینامیکی، تمام مراحل آزمایش در نرم افزار المان محدود آباکوس شبیه سازی شده و نتایج با یکدیگر مقایسه می شوند.

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

Morteza Saradar¹, Ali Basti^{2*}, Mohammad Zaeimi³

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

بارگذاری های مختلف است. نمودار حد شکل دهی، ابزاری مفید برای تعیین شکل دهی ورق های فلزی در فرآیندهای شکل دهی مانند کشش عمیق^۱ است. توسعه استفاده از نمودارهای حد شکل دهی به عنوان یک ابزار قدرتمند

یک روش مناسب برای شکل پذیری ورق های فلزی، استفاده از نمودارهای حد شکل دهی^۱ می باشد که در واقع نشان دهنده تغییر در شکل دهی تحت

2- Deep drawing

1- Forming limit diagram (FLD)

Please cite this article using:

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 ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

اعتبارسنجی نتایج و مقایسه بین معیارهای مختلف آسیب بدست آمده، یک قالب کشش عمیق طراحی و ساخته شد و با استفاده از چکش ضربه ای^۶ که یک دستگاه ضربه ای سرعت بالا می باشد، فرآیند کشش عمیق در سرعت بالا مورد آزمایش قرار گرفت. نرخ کرنش در این فرآیند دینامیکی سرعت بالا به ۲۰ بر ثانیه هم می رسد و این در حالیست که در فرآیند کشش عمیق، در حالت معمولی، مقدار نرخ کرنش بین ۰/۰۰۱ تا ۰/۱ بر ثانیه است. تمامی مراحل فوق در نرم افزار المان محدود آباکوس شبیه سازی شده و معیارهای آسیب به دست آمده به عنوان داده وارد آن می شوند، سپس نتایج شبیه سازی 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 کرنش های حدی است، بر پایه مدل (M-K) می باشد. در این مدل یک شیار باریک روی سطح ورق فرض می شود، بنابراین ورق به دو قسمت همگن و ناهمگن (قسمت شیار) تقسیم می شود که به ترتیب با نمادهای a و b نمایش داده می شوند. در شکل ۱ فرض وجود شیار در این مدل نشان داده شده است. برای مدل کردن شیار، ضریب ناهمگنی تعریف می شود که در رابطه ۱، بیان شده است [۳].

$$f = \frac{t_b}{t_a} \quad (1)$$

در رابطه ۱، t_a و t_b به ترتیب ضخامت ورق در قسمت همگن و ناهمگن می باشند. کرنش های حدی وقتی بدست می آیند 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 می توان نوشت:

$$F_{nt}^a = F_{nt}^b \quad (2-الف)$$

$$F_{nm}^a = F_{nm}^b \quad (2-ب)$$

که در روابط ۲، F_{nt} و F_{nm} نیروهای وارده در جهت عمود و مماس بر شیار و در واحد طول هستند. مطابق رابطه بین تنش و نیرو در رابطه ۳ داریم:

$$\sigma_{nt}^a \exp(\epsilon_3^a) t_0^a = \sigma_{nt}^b \exp(\epsilon_3^b) t_0^b \quad (3-الف)$$

$$\sigma_{nm}^a \exp(\epsilon_3^a) t_0^a = \sigma_{nm}^b \exp(\epsilon_3^b) t_0^b \quad (3-ب)$$

که در روابط ۳، σ_{nt} و σ_{nm} مولفه های عمودی و مماسی تنش هستند. t_0^a و t_0^b ضخامت های اولیه قسمت های همگن و ناهمگن می باشند. ϵ_3 کرنش در راستای ضخامت می باشد که با توجه به اصل ثابت بودن حجم ماده می توان نوشت:

$$\epsilon_3 = -(\epsilon_1 + \epsilon_2) \quad (4)$$

رابطه ۱ را می توان بر حسب ناهمگنی اولیه نشان داد [۳]:

$$f = f_0 \exp(\epsilon_3^b - \epsilon_3^a) \quad (5-الف)$$

که در رابطه ۵- الف:

$$f_0 = \frac{t_0^b}{t_0^a} \quad (5-ب)$$

$$t = t_0 \exp(\epsilon_3) \quad (5-ج)$$

با توجه به مجموعه روابط ۳ و مجموعه روابط ۵ می توان نوشت:

$$f \sigma_{nm}^b = \sigma_{nm}^a \quad (6-الف)$$

برای ارزیابی علمی و عملی رفتار شکل پذیری ورق بسیار چشم گیر است. این نمودار، کرنش حداکثر اصلی را به کرنش حداقل اصلی نشان می دهد که ورق می تواند تا آستانه گلوپی شدن موضعی تحمل کند. این مقدار کرنش را که ورق فلزی قبل از گلوپی شدن موضعی تحمل می کند، کرنش حدی می گویند. نمودار حد شکل دهی میزان حداکثر کرنش های حدی را در بارگذاری های مختلف نشان می دهد.

نظریه نمودار حد شکل دهی برای اولین بار توسط کیلر [۱] و گودوین [۲] مطرح شد، مارسینیاک و کوزینسکی این نظریه را بسط دادند و مدلی را بنا نهادند که قادر بود گلوپی شدن موضعی را پیش بینی کند [۴، ۳]. آن ها به این نتیجه رسیدند که شکست در ورق به طور ناگهانی اتفاق نمی افتد بلکه غیریکنواختی و ناهمگنی در ریزدانه های تشکیل دهنده ماده، سبب ایجاد باریک شدگی موضعی و در نهایت شکست می شود. این ناهمگنی به صورت یک شیار فرض می شود که سطح ورق را به دو قسمت همگن^۱ و ناهمگن^۲ تقسیم می کند. محققان زیادی با استفاده از این مدل، تاثیر عوامل مختلفی را روی نمودار حد شکل دهی بررسی کرده اند. باراتا و همکاران [۵] تاثیر بارگذاری های خطی و غیرخطی را روی ورق های 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 شکل دهی بررسی کرده اند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش نماد کرنش سختی و کرنش حد ارتجاعی سمت راست نمودار حد شکل دهی افزایش می یابد. مشکسار و همکاران [۷] نمودار حد شکل دهی $AL3105$ را مورد مطالعه قرار دادند. آن ها تاثیر روغن کاری را روی شکست بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که اگر روغن کاری مناسب باشد شکل دهی مناسب تر می شود و زمان وقوع شکست به تاخیر می افتد. کامپوس و همکاران [۸] نمودار حد شکل دهی فولاد زنگ نزن $AISI304$ را هم به صورت تجربی و هم به صورت عددی مورد بررسی قرار داده اند و به این نتیجه رسیدند که نمودار حد شکل دهی آلومینیوم به نرخ کرنش وابستگی بسیار کمی دارد. احمدی و همکاران [۹] نمودار حد شکل دهی 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 شکل دهی کاهش و سمت چپ آن افزایش می یابد. کیم و همکاران [۱۰] تاثیر نرخ کرنش را روی معیار حد شکل دهی فولاد CQ بررسی کرده اند و با انجام آزمایش در جهت های مختلف نسبت به نور، ثابت کردند که این ماده به نرخ کرنش وابسته است.

تمام بررسی های انجام شده در زمینه نمودار حد شکل دهی در حالت شبه استاتیکی می باشد و این پرسش پیش می آید که آیا این نمودار برای فرآیندهای سرعت بالا که نرخ کرنش قابل توجهی دارند، می تواند موثر باشد یا خیر. این پژوهش به بررسی نمودار حد شکل دهی دینامیکی فولاد $St13$ پرداخته و تاثیر پارامتر نرخ کرنش را به عنوان یک کمیت مستقل بر روی نمودار بررسی کرده است.

در این پژوهش، سه نمودار حد شکل دهی به صورت عددی محاسبه می شوند: نمودار حد شکل دهی غیروابسته به نرخ کرنش^۲، نمودار حد شکل دهی وابسته به نرخ کرنش^۴ و نمودار حد شکل دهی دینامیکی^۵. برای

- 1- Homogeneous
- 2- Inhomogeneous
- 3- Independent Strain rate
- 4- Dependent Strain rate

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

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

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

$$\sigma_{11} = \frac{\bar{\sigma}_y(r_{90}(r_0 + 1))}{\sqrt{r_{90} + r_0\alpha^2 + r_0r_{90}(1 - \alpha)^2}} \quad (12-الف)$$

$$\sigma_{22} = \alpha\sigma_{11} \quad (12-ب)$$

برای به دست آوردن کرنش های موثر در قسمت همگن، از قانون شارش^۲ استفاده شده است که در رابطه ۱۳- الف بیان شده است [۱۱].

$$d\varepsilon_{ij} = d\lambda \frac{\partial f(\sigma)}{\partial \sigma_{ij}} \quad (13-الف)$$

که در رابطه ۱۳- الف:

$$d\lambda = \frac{d\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} \quad (13-ب)$$

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

$$q1 = \frac{2r_{90}(\sigma_{11}) + 2r_0r_{90}(\sigma_{11} - \sigma_{22})}{2r_{90}(r_0 + 1)\bar{\sigma}_y} \quad (14-الف)$$

$$q2 = \frac{2r_{90}(\sigma_{11}) - 2r_0r_{90}(\sigma_{11} - \sigma_{22})}{2r_{90}(r_0 + 1)\bar{\sigma}_y} \quad (14-ب)$$

با استفاده از روابط ۱۴ می توان کرنش های اصلی را در قسمت همگن مطابق روابط ۱۵ بیان نمود:

$$d\varepsilon_{11} = q1(d\bar{\varepsilon}) \quad (15-الف)$$

$$d\varepsilon_{22} = q2(d\bar{\varepsilon}) \quad (15-ب)$$

تمام مولفه های روابط ۱۵، در جهت های اصلی می باشند، با توجه به این که نیاز به معلوم بودن مولفه های تنش در قسمت شیار است، از ماتریس دوران مطابق رابطه ۱۶- الف استفاده شده است:

$$\sigma_{ntz} = T\sigma^{xyz}T^T = \begin{bmatrix} \sigma_{nn} & \sigma_{nt} \\ \sigma_{nt} & \sigma_{tt} \end{bmatrix} \quad (16-الف)$$

که در رابطه ۱۶- الف:

$$T = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (16-ب)$$

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

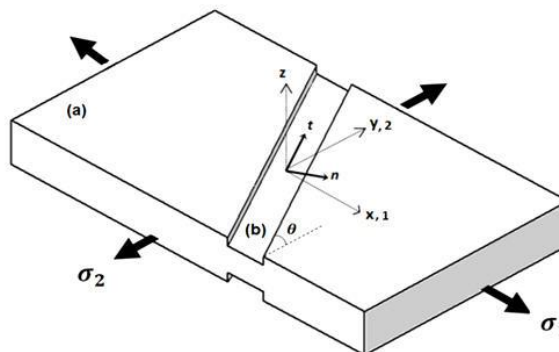
$$\tan(\theta + d\theta) = \frac{1 + d\varepsilon_{11}^a}{1 + d\varepsilon_{22}^a} \tan(\theta) \quad (17)$$

با بدست آوردن مولفه های تنش در قسمت همگن با استفاده از روابط ۸ تا ۱۷ می توان مولفه های مجهول که همان تنش و کرنش های قسمت ناهمگن هستند را بدست آورد.

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

$$X = [\sigma_{nt}^b; \sigma_{nn}^b; \sigma_{tt}^b; d\varepsilon^b] \quad (18)$$

در این نظریه فرض می کنیم که لحظه آغاز گلوئی 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



شکل ۱ مدل (M-K) و فرض وجود شیار

$$f\sigma_{nt}^b = \sigma_{nt}^a \quad (6-ب)$$

در راستای مماس بر شیار معادله سازگاری به صورت رابطه ۷ می باشد:

$$d\varepsilon_{tt}^a = d\varepsilon_{tt}^b \quad (7)$$

بنابراین می توان تمام مولفه های تنش و کرنش را در قسمت همگن محاسبه کرد و در ادامه، دیگر پارامترهای مجهول، با استفاده از روابط ۱ تا ۷ بدست می آیند. پارامترهای مجهول عبارتند از σ_{nt}^b و σ_{nn}^b و σ_{tt}^b و $d\varepsilon^b$.

۳- حل عددی معادلات

برای محاسبه کرنش های حدی، ابتدا باید مولفه های تنش و کرنش را در قسمت همگن بدست آورد. در این تئوری، نسبت بین تنش ها در قسمت همگن در تمام طول بارگذاری ثابت می باشد، همچنین فرض می شود که در این رابطه، حالت تنش صفحه ای برقرار است. این نسبت با نماد α در رابطه ۸، نمایش داده شده است. α مقداری بین ۰ و ۱ دارد.

$$\alpha = \frac{\sigma_{22}}{\sigma_{11}} \quad (8)$$

تنش و کرنش موثر، تحت رابطه سويفت^۱ به هم مرتبط می شوند [۱۱].

$$\bar{\sigma}_y = K(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon})^n \varepsilon^m \quad (9)$$

که در رابطه ۹، $\bar{\sigma}_y$ و $\bar{\varepsilon}$ به ترتیب تنش و کرنش موثر، ε نرخ کرنش، K ضریب استحکام، n نماد کرنش سختی، m توان حساسیت به نرخ کرنش و ε_0 کرنش حد ارتجاعی می باشند. برای شروع، یک نمو کرنش موثر $d\varepsilon^a$ به اندازه ۰/۰۰۰۴ اعمال می شود.

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

$$2f(\sigma) = [G(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + F(\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 3\sigma_{31}^2 + 3\sigma_{23}^2 + 3\sigma_{12}^2]^{1/2} \quad (10-الف)$$

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

در رابطه ۱۰- الف می توان نوشت:

$$H = \frac{r_0}{r_0 + 1} \quad (10-ب)$$

$$F = \frac{r_0}{(r_0 + 1)r_{90}} \quad (10-ج)$$

$$G = \frac{1}{r_0 + 1} \quad (10-د)$$

اکسیال به انجام رسیده است. این دستگاه قادر خواهد بود در نرخ کرنش های مختلف رفتار ماده را مورد آزمایش قرار دهد.

نمونه آزمایشی تحت ۴ نرخ کرنش ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۲ و ۰/۰۰۲ بر ثانیه مورد آزمایش قرار گرفت. شکل های ۴ و ۵ نمودار تنش و کرنش St13 را در سه جهت مختلف نسبت به نورد و در نرخ کرنش های مختلف نشان می دهند. با توجه به این شکل ها می توان متوجه شد که این ماده به نرخ کرنش وابسته بوده و با افزایش نرخ کرنش، تنش تسلیم افزایش پیدا می کند. با توجه به نمودارهای تنش و کرنش، در پایین ترین نرخ کرنش مورد آزمایش، نرخ کرنش ۰/۰۰۲ بر ثانیه، کمیت های K ، n و ϵ_0 در هر سه جهت نورد بدست می آیند. در واقع با توجه به این که کمترین نرخ کرنش مورد استفاده به وسیله دستگاه سرویدرولیک موجود، ۰/۰۰۲ بر ثانیه می باشد ثوابت K و n را بدست می آوریم. این ثوابت زمانی بدست می آیند 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 می باشد کرنشی است که لحظه آغاز تسلیم را نشان می دهد. به عنوان مثال برای بدست آوردن پارامترهای K و n در جهت نورد، باید نمودار تنش موثر بر حسب 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 ، مستقیماً از خود نمودار تنش و کرنش بدست می آید، به نحوی که در آغاز لحظه تغییر شکل پلاستیک، اگر خطی عمود بر محور کرنش رسم کنیم، محور کرنش را در نقطه ای قطع می کند که به آن کرنش حد ارتجاعی می گویند. شکل ۳ معرف این موضوع است. همین مراحل برای جهت های دیگر نورد انجام می شود. با استفاده از رابطه ۹ می توان به رابطه ۱۹ رسید:

$$\log \sigma = m \log \dot{\epsilon} + \log [K(\epsilon_0 + \epsilon)^n] \quad (19)$$

که در رابطه ۱۹، m شیب نمودار تنش و نرخ کرنش در مقیاس لگاریتمی می باشد، 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 بر حسب لگاریتم نرخ کرنش ترسیم می شود. شکل ۶، برای شروع کار از کرنش بسیار پایین که حتی پایین تر از کرنش حد ارتجاعی است استفاده می کنیم. علت این امر آن است که برای افزایش دقت از مقدار میانگین m استفاده می کنیم، بنابراین تمامی کرنش های به کار رفته باید لحاظ شود که البته همین امر در رابطه با نرخ کرنش نیز باید رعایت شود، یعنی در رابطه ۱۹ نرخ کرنش بسیار پایین ۰/۰۰۲ بر ثانیه 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 دقیق تر 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 می آیند. شیب این نمودار رسم شده که یک معادله خط مرتبه اول را تشکیل می دهد برابر مقدار m در کرنش فرض شده می باشد. این کار باید برای کرنش های دیگر نیز انجام شده و در نهایت میانگین مقادیر بدست آمده از شیب نمودارها همان مقدار مورد نظر برای پارامتر m می باشد.

جواب خواهیم داشت. الگوریتم این برنامه با استفاده از زبان برنامه نویسی فرترن نوشته شده و جواب های حاصل شده، برگرفته از خاصیت حل به روش نیوتن رافسون^۱ می باشد. با کنار هم قرار دادن جواب ها به ازای هر نسبت تنش α ، مجموعه ای از نقاط بدست می آیند که همان کرنش های حدی مورد نظر در نمودار حد شکل دهی می باشند.

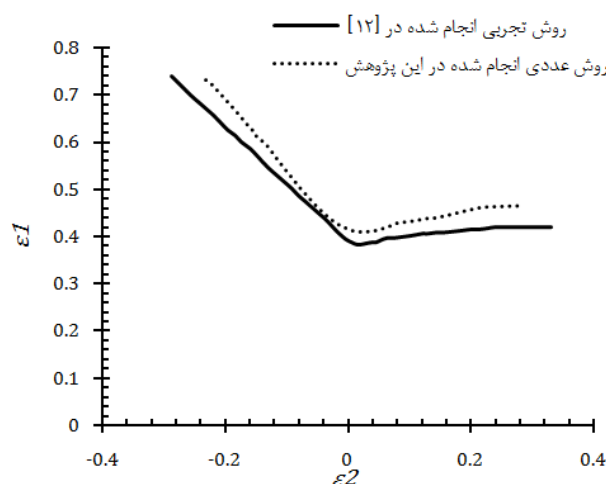
جای و همکاران [۱۲] به بررسی عددی و تجربی نمودار حد شکل دهی فولاد ALDQ پرداخته اند. جدول ۱، مشخصه های مکانیکی این ماده را نشان می دهد. آن ها از مدل آسیبی به نام مدل گوشه^۲ استفاده کرده و به مقایسه نمودار حد شکل دهی بدست آمده از مدل گوشه و روش تجربی پرداخته اند. آن ها در نرخ کرنش ۴ بر ثانیه، نمودار حد شکل دهی را بدست آوردند. نتایج کار آن ها در [۱۲] نشان می دهد 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) می باشد. برای بررسی صحت الگوریتم نوشته شده در این پژوهش، برای فولاد ALDQ، نمودار حد شکل دهی 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- آزمایش های کششی تک محوره

در این پژوهش فولاد St13 مورد نظر می باشد. برای به دست آوردن نمودار شکل دهی فولاد St13، نیاز به دانستن مشخصات مکانیکی آن خواهد بود. آزمایش های کششی تک محوره در جهت ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به نورد انجام شدند. این آزمایش ها با استفاده از دستگاه تست کشش سرویدرولیک

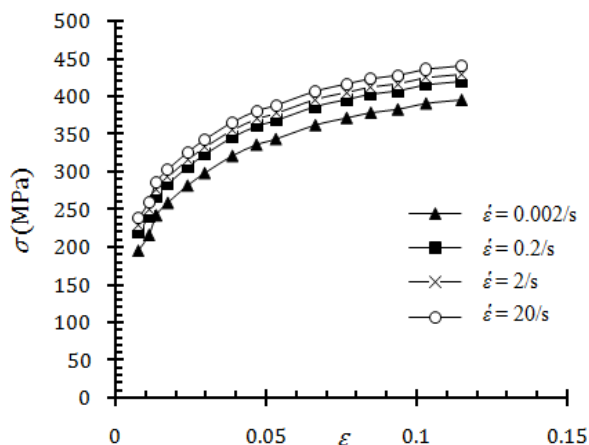
جدول ۱ مشخصه های مکانیکی فولاد ALDQ در [۱۲]

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

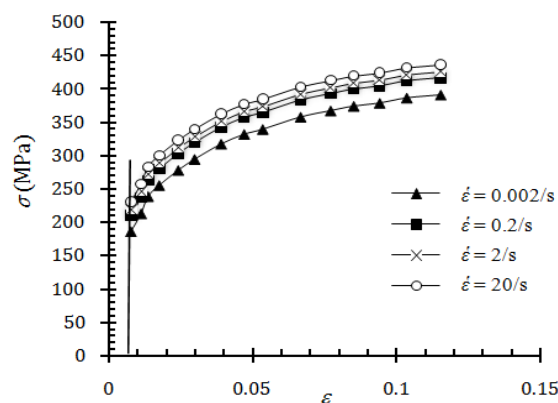


شکل ۲ مقایسه بین نمودار حد شکل دهی بدست آمده از مدل (M-K) در این پژوهش و نمودار حد شکل دهی بدست آمده از روش تجربی در [۱۲]

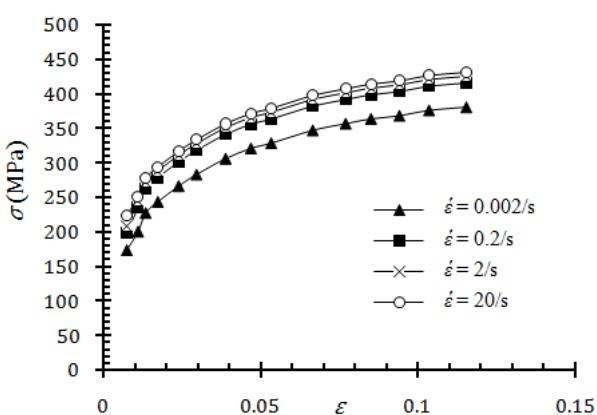
1- Newton-Raphson
2- Vertex model



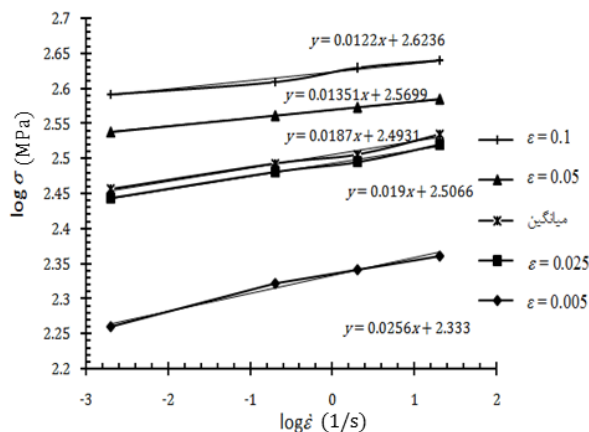
شکل ۴ نمودار تنش و کرنش St13، ۹۰ درجه نسبت به نورد



شکل ۵ نمودار تنش و کرنش St13، ۴۵ درجه نسبت به نورد



شکل ۶ وابستگی پارامتر توان حساسیت به نرخ کرنش و نرخ کرنش



شکل ۷ وابستگی پارامتر توان حساسیت به نرخ کرنش و نرخ کرنش

را نشان می دهد. 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 شکل دهی فلزات افزایش پیدا کرده است، همان طوری که عاصم پور و همکاران در [۱۳] به این نتیجه رسیده اند که افزایش مقدار m باعث بالا رفتن حد شکل دهی خواهد شد. در واقع پارامتر m باعث می شود که لحظه آغاز شدن باریک شدن موضعی به تاخیر بیفتد زیرا سطح نمودار به سمت بالا منتقل شده است.

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 در حالتی بدست می آیند که مقدار m صفر است یعنی اصلاً 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 می باشد و ربطی به پارامترهای n و K ندارد. باتوجه به شکل ۶ مقدار m در جهت نورد برابر ۰/۱۸۷ می باشد. این مراحل را برای جهتهای دیگر نورد نیز می توان انجام داد. باتوجه به رفتار ماده در نرخ کرنش های مختلف می توان تاثیر این پارامتر مهم را در مورد تغییر طول نسبی^۱ و نسبت بین تنش تسلیم به تنش نهایی بررسی کرد. با افزایش نرخ کرنش، میزان تنش تسلیم به تنش نهایی در تمام جهتها افزایش می یابد، در حالی که با افزایش نرخ کرنش، تغییر طول نسبی در تمام جهات، کاهش می یابد. شکل های ۷ و ۸ این موضوع را نشان می دهند. تاثیر نرخ کرنش روی تغییر طول نسبی بستگی به محدوده نرخ کرنش و رفتار ماده در سطح مرز دانه های تشکیل دهنده دارد، به طوری که برای بعضی از مواد مانند فولاد DP۵۹۰ این پارامتر در محدوده نرخ کرنش بین ۰/۰۰۱ تا ۱ بر ثانیه، با افزایش نرخ کرنش کاهش یافته و در محدوده بین ۱ تا ۱۰۰ بر ثانیه با افزایش نرخ کرنش، افزایش می یابد، در حالی که تغییر طول نسبی فولاد CQ در همه محدوده های نرخ کرنش با افزایش این مقدار کاهش می یابد [۱۰]. بنابراین تاثیر نرخ کرنش روی تغییر طول نسبی را باید با انجام آزمایش کشش تک محوره و در نرخ کرنش های مختلف مشخص کرد. جدول ۲ مشخصه های مکانیکی فولاد St13 را در هر سه جهت نورد نشان می دهد.

۵- نمودار حد شکل دهی غیروابسته به نرخ کرنش، وابسته به نرخ

کرنش و نمودار حد شکل دهی دینامیکی

نمودار حد شکل دهی، وابسته به ویژگی های ماده می باشد، با وارد کردن مشخصات مکانیکی St13 که در جدول ۲ مندرج گردیده است، در برنامه نوشته شده بر طبق الگوریتم (M-K)، نمودار حد شکل دهی 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 می باشد، در این صورت رابطه ۹ به صورت رابطه ۲۰ تبدیل می شود:

$$\bar{\sigma}_Y = K(\epsilon_0 + \bar{\epsilon})^n \quad (20)$$

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

نمودارهای حد شکل دهی فولاد $St13$ چه به صورت وابسته به نرخ کرنش، چه به صورت غیر وابسته 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 شکل دهی را مشخص می کند. با وارد کردن مقدار عددی نرخ کرنش در رابطه ۹ و تاثیر آن در روابط دیگر ذکر شده، نمودار دینامیکی حد شکل دهی محاسبه خواهد شد، به نوعی کمیت نرخ کرنش در این معیار گنجانده شده است. شکل ۱۰ نمودار حد شکل دهی دینامیکی فولاد $St13$ را در ۴ نرخ کرنش 0.002 ، 0.2 ، 2 و 20 بر ثانیه نشان می دهد. کاملاً مشخص است که با افزایش نرخ کرنش نمودار حد شکل دهی به سمت بالا رفته است.

برای مقایسه می توان از پایین ترین نقطه در نمودار حد شکل دهی که معرف حالت کرنش صفحه ای می باشد استفاده کرد، همان طوری که از شکل ۱۰ مشخص است، در نرخ کرنش ۲ بر ثانیه، در پایین ترین نقطه نمودار حد شکل دهی، کرنش اصلی بیشتر، برابر 0.3 است که این تقریباً برابر با مقدار همین نقطه در نمودار وابسته به نرخ کرنش در شکل ۹ است. در حالی که در نرخ کرنش بسیار پایین 0.002 بر ثانیه، کرنش حدی بیشتر برابر 0.2 شده است که مشابه حالت نمودار غیر وابسته به نرخ کرنش در شکل ۹ است. مالاست دهر و همکاران [۱۴] با استفاده از آزمایش تجربی روی فرآیند شکل دهی الکترومغناطیسی^۱ نشان دادند که با افزایش نرخ کرنش، نمودار حد شکل دهی افزایش پیدا می کند. نرخ کرنش بدست آمده برای آزمایش آن ها بین محدوده ۱ تا 1000 بر ثانیه قرار گرفته بود.

۶- ناهمسانگردی در نمودار حد شکل دهی

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

$$r = \frac{\varepsilon_W}{\varepsilon_T} \quad (21)$$

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

$$\varepsilon_T = -(\varepsilon_W + \varepsilon_L) \quad (22)$$

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

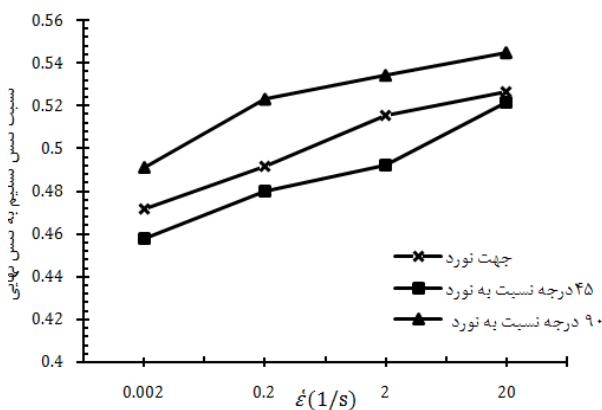
$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (23-الف)$$

$$\bar{K} = \frac{K_0 + 2K_{45} + K_{90}}{4} \quad (23-ب)$$

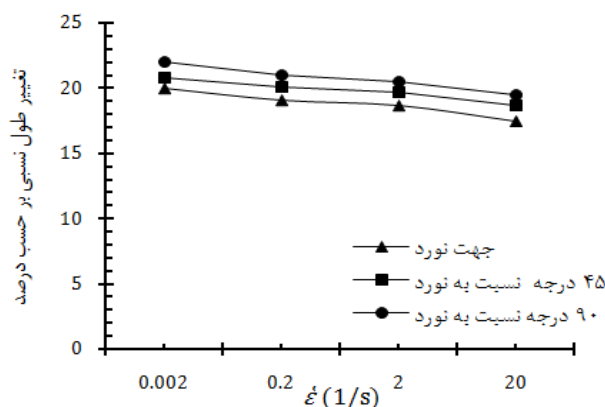
$$\bar{n} = \frac{n_0 + 2n_{45} + n_{90}}{4} \quad (23-ج)$$

$$\bar{m} = \frac{m_0 + 2m_{45} + m_{90}}{4} \quad (23-د)$$

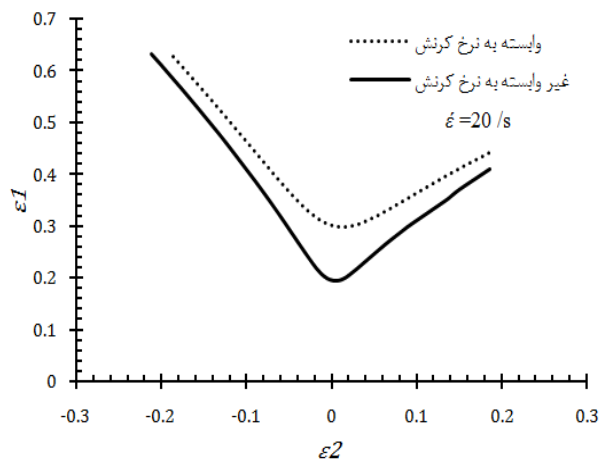
با قرار دادن این مقادیر متوسط، می توان تاثیر ناهمسانگردی را نیز بر نمودار حد شکل دهی بررسی کرد. شکل ۱۱، نشان دهنده تاثیر ناهمسانگردی بر نمودار حد شکل دهی در نرخ کرنش ۲۰ بر ثانیه می باشد. همان طور که مشخص است ناهمسانگردی سطح نمودار را تغییر داده است.



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 شکل دهی غیر وابسته و وابسته به نرخ کرنش فولاد $St13$

جدول ۲ مشخصه های مکانیکی فولاد $St13$ در هر سه جهت نورد			
موقعیت نسبت به نورد	درجه نورد	درجه ۹۰	درجه ۴۵
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

می دهد.

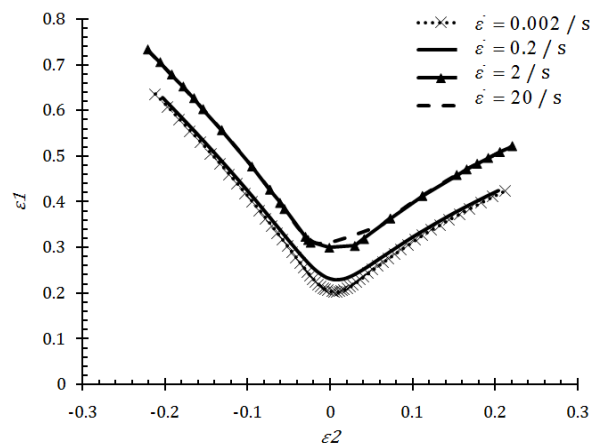
قالب، زیر چکش ضربه ای قرار داده شده، وزنه از ارتفاع ۲ متری رها شده و کفشک بالا را به سمت پایین فشار می دهد، در این هنگام سرعت سنج،



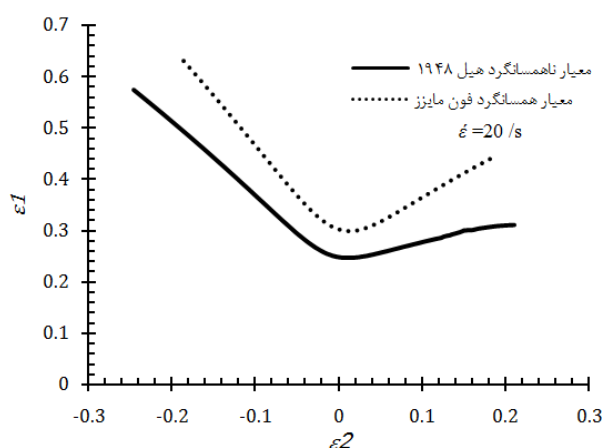
شکل ۱۲ دستگاه چکش ضربه ای



شکل ۱۳ قالب کشش عمیق طراحی شده



شکل ۱۰ نمودار حد شکل دهی دینامیکی فولاد St13



شکل ۱۱ تاثیر ناهمسانگردی بر نمودار حد شکل دهی فولاد St13

۷- آزمایش فرآیند کشش عمیق در سرعت بالا

تفاوت معیارهای آسیب استاتیکی و دینامیکی در تعریف پارامتر نرخ کرنش می باشد. برای این که در عمل تفاوت دو معیار آشکار شود، فرآیند کشش عمیق در سرعت بالا به انجام رسید. کشش عمیق معمولاً با استفاده از پرس های لنگ و هیدرولیکی انجام می شود، 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 ضربه ای در این مقاله استفاده شده است. این دستگاه شامل یک وزنه ۱۰۰ کیلوگرمی است که در اسلایدهایش تا ارتفاع ۳ متری می تواند بالا برود و رها شود. یک آهنربای^۱ بسیار قوی این وزنه را نگه می دارد. سرعت سنج نصب شده روی دستگاه سرعت وزنه را هنگام برخورد نشان می دهد که این سرعت بستگی به ارتفاع رها شدن وزنه دارد که با توجه به حداکثر ارتفاع ۳ متری، سرعت سنج، سرعت ۷/۵ متر بر ثانیه را نشان می دهد که این میزان سرعت، نرخ کرنش زیادی ایجاد خواهد کرد.

شکل ۱۲، این دستگاه را نشان می دهد. برای انجام این فرآیند، یک قالب کشش عمیق شامل سنبه، ماتریس و نگه دارنده ورق طراحی و ساخته شد، ورق با استفاده از سنبه به سمت قالب کشیده شده و شکل قالب را به خودش می گیرد. برای جلوگیری از چروک خوردگی از نگه دارنده ورق استفاده می شود. شکل ۱۳، قالب و شکل ۱۴ شماتیکی از اجزای قالب را نشان

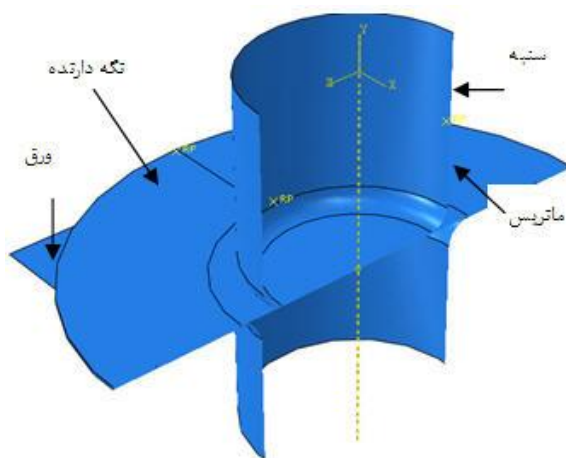
با $E = 180 \text{ GPa}$ و $\nu = 0.3$ که E مدول یانگ و ν ضریب پواسون می باشند. شکل ۱۵، مدل مونتاژ شده را در محیط مونتاژ نرم افزار نشان می دهد. در ادامه، نوع تحلیل را صریح دینامیکی و زمان حل 0.0067 در نظر گرفته می شود. با توجه به سرعت $6/2$ متر بر ثانیه و همچنین خطی فرض کردن جابجایی سنبه نسبت به زمان و با توجه به این که سنبه 41 میلی متر قابلیت پایین آوردن ورق را در ماتریس دارد، این زمان برای فرآیند در نظر گرفته شده است. شرایط تماس بین ورق و نگه دارنده، ورق و سنبه، ورق و ماتریس به صورت تماسی ساده تعریف می شود و ضریب اصطکاک بین ورق، نگه دارنده و ماتریس برابر 0.05 و بین ورق و سنبه برابر 0.1 قرار داده می شود.

ویورل پانویو و همکاران [۱۵] با انجام آزمایش های مختلف و شبیه سازی با استفاده از نرم افزار المان محدود به این نتیجه رسیدند که در فرآیند کشش عمیق، ضریب اصطکاک بین دو ماده از جنس فولاد می تواند مقداری بین 0.05 تا 0.15 داشته باشد. انتخاب دقیق یک مقدار برای ضریب اصطکاک بستگی به نحوه روغن کاری بین سطوح مورد نظر دارد و در بهترین حالت روغن کاری، می توان از مقدار 0.05 برای ضریب اصطکاک بین دو سطح فولادی استفاده نمود. در فرآیند کشش عمیق معمولاً از سطح روغن بیشتری بین ورق و ورق گیر و همچنین ورق و ماتریس استفاده می کنند. این امر به این علت است که شکست در ناحیه لبه ماتریس اتفاق نیفتد. نیروی نگه دارنده برابر 10 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 می شوند. همچنین اعضای صلب با المان R3D4 و ورق با المان S4R مش بندی می شوند، شکل ۱۶ نحوه مش بندی اعضا را نشان می دهد.

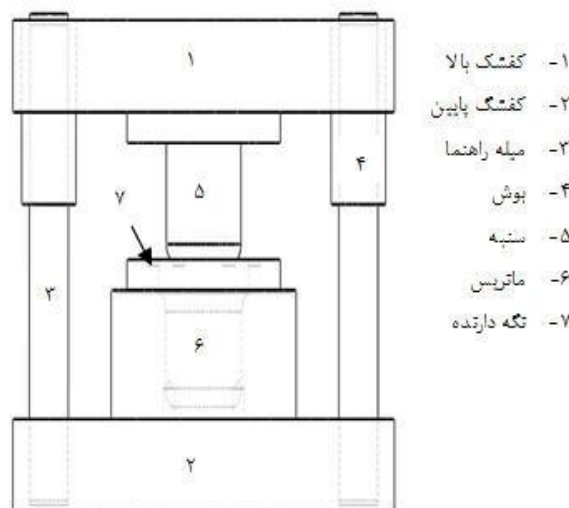
لازم به ذکر است که اعضای صلب به صورت گسسته^۲ مدل شده اند زیرا در مسائل شکل دهی فلزات به دلیل شرایط تماسی بین اعضا، نیاز است که اعضای صلب نیز مش بندی شوند. این در حالیست که در مدل سازی به روش پیوسته، اعضا مش بندی نمی شوند و بیشتر مناسب مسائل دو بعدی هستند.

۹- مقایسه

ورق فولادی St13 با ضخامت 1 میلی متر تحت فرآیند شکل دهی با استفاده از چکش ضربه ای قرار گرفت و تمام مراحل آزمایش، در نرم افزار آباکوس،



شکل ۱۵ اجزای قالب کشش عمیق در نرم افزار آباکوس



شکل ۱۴ اجزای قالب کشش عمیق

سرعت $6/2$ متر بر ثانیه را نشان می دهد. سنبه که به کفشک بالا با استفاده از پیچ وصل شده، ورق را شکل می دهد. جنس تمامی اعضا از فولاد VCN 150 می باشد که در برابر ضربه^۱ بسیار مقاوم است. طول و عرض ورق 18 سانتی متر می باشد. نگه دارنده دارای 4 فنر می باشد که نیروی 10 کیلو نیوتن را به ورق وارد می کند. قطر ماتریس $60/44$ میلی متر و قطر سنبه نیز 58 میلی متر می باشد. شعاع سر سنبه و شعاع سر ماتریس به ترتیب 5 و 6 میلی متر می باشند، فاصله بین سنبه و ماتریس نیز $1/22$ میلی متر می باشد. برای بهتر نشان دادن نتایج نیز، از ورق با دو ضخامت 0.8 و 1 میلی متر استفاده می شود، 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 VCN150 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 می گیرند.

۸- شبیه سازی فرآیند کشش عمیق در سرعت بالا

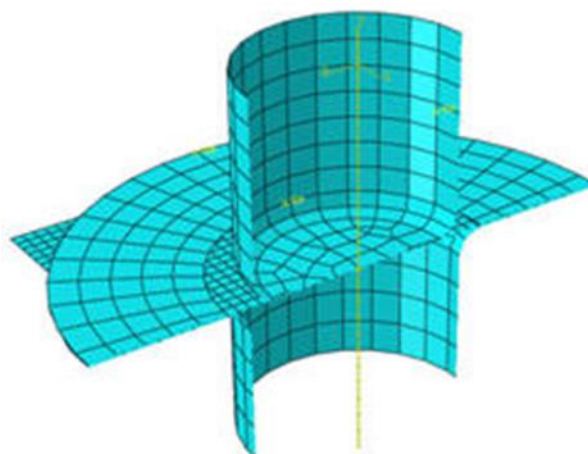
برای بررسی توانایی های معیارهای آسیب بدست آمده، از نرم افزار تجاری المان محدود آباکوس استفاده شد. این نرم افزار دارای دو محیط صریح و استاندارد می باشد. در محیط صریح می توان علاوه بر تعریف معیار آسیب، رشد آسیب را نیز تعریف نمود. برای شبیه سازی فرآیند کشش عمیق، ورق را شکل پذیر و بقیه اعضا را صلب فرض می کنیم. 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 نرم افزار می شوند. این معیارها، شامل نمودار حد شکل دهی فولاد St13، وابسته به نرخ کرنش نشان داده شده در شکل ۹ و نمودار حد شکل دهی دینامیکی نشان داده شده در شکل ۱۰ می باشند. لازم به یادآوری است که در نمودار حد شکل دهی شکل ۹، پارامتر نرخ کرنش به صورت عددی تعریف نشده و این معیار، شبه استاتیکی می باشد. معیار حد شکل دهی استاتیکی با استفاده از معیار آسیب FLD و معیار دینامیکی با استفاده از مدل آسیب MSFLD^۲ وارد نرم افزار شده اند. خواص الاستیک فولاد St13 عبارتند از:

1- Impact

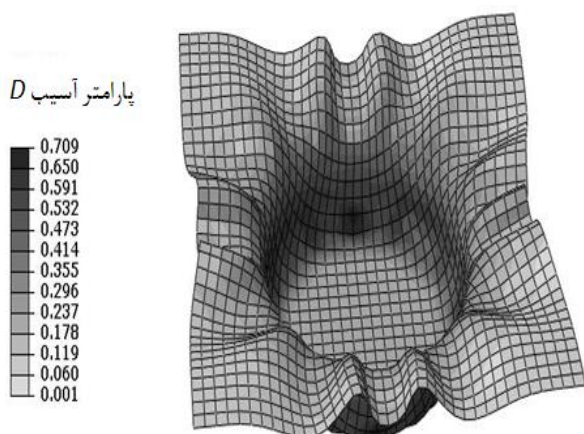
2- Muschenborn-Sonne Forming Limit Diagram



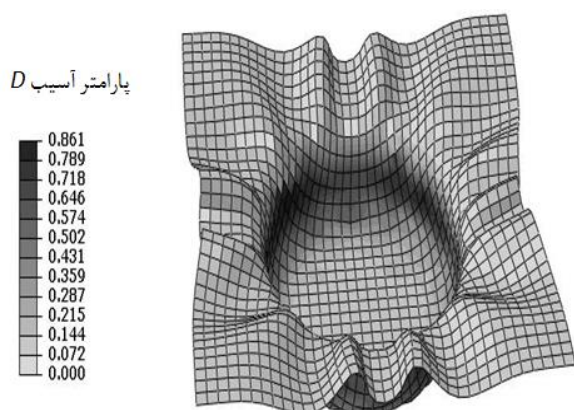
شکل ۱۷ ورق شکل داده شده با چکش ضربه ای با ضخامت ۱ میلی متر



شکل ۱۶ المان بندی اعضای قالب



شکل ۱۸ نتیجه پیش بینی شده برای ورق ۱ میلی متر با استفاده از معیار استاتیکی



شکل ۱۹ نتیجه پیش بینی شده برای ورق ۱ میلی متر با استفاده از معیار دینامیکی

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش می توان نتیجه گرفت که معیار استاتیکی نتوانسته پیش بینی درستی از فرآیند شکل دهی داشته باشد و این حاکی از تاثیر پارامتر نرخ کرنش است که در این شبیه سازی به ۲۰ برثانیه هم می رسد و تاثیر آن در پارگی کاملاً مشخص است. آزمایش های مشابه انجام شده برای سه قطعه با ضخامت ۰/۸ میلی متر و سه قطعه با ضخامت ۱ میلی متر به انجام رسیدند و تمامی شرایط آزمایش، در

شبیه سازی شدند و دو معیار آسیب استاتیکی و دینامیکی به صورت داده وارد نرم افزار شدند. شکل ۱۷، ورق شکل داده شده توسط چکش ضربه ای 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 نمی شود. شکل ۱۸ و شکل ۱۹ شبیه سازی این فرآیند را با استفاده از معیار استاتیکی شکل ۹ و معیار دینامیکی شکل ۱۰ نشان می دهند، مقدار پارامتر آسیب در هر دو معیار به ترتیب برابر ۰/۷۰۹ و ۰/۸۶۱ می باشد 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 می باشد.

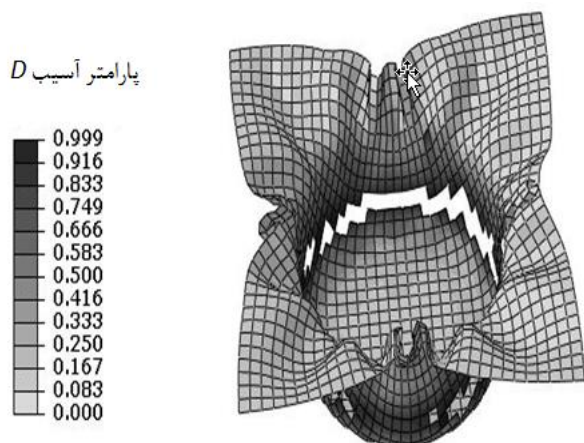
محاسبه پارامتر آسیب در نرم افزار آباکوس برای تمامی معیارهای آسیب تعریف شده مشابه هم می باشد. شکل ۲۰ نحوه محاسبه پارامتر آسیب D برای معیار آسیب FLD تعریف شده در نرم افزار را نشان می دهد. برای این معیار، پارامتر آسیب از رابطه ۲۴ محاسبه می شود [۱۶]:

$$D = \frac{\varepsilon_1^A}{\varepsilon_1^B} \quad (24)$$

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) می باشد. محاسبه پارامتر آسیب برای معیار MSFLD نیز مشابه رابطه ۲۴ می باشد. 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 می شود. برای مقایسه بهتر، آزمایش روی ورق با ضخامت ۰/۸ میلی متر به انجام رسید، شکل ۲۱، ورق شکل داده شده را نشان می دهد که دچار پارگی شده است.

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

شکل ۲۲، پیش بینی معیار آسیب استاتیکی برای فولاد St13 را نشان می دهد که پارامتر آسیب بحرانی^۱ در آن برابر ۰/۷۴۵ می باشد که نشان دهنده عدم وقوع پارگی در ورق است، در حالی که شکل ۲۳، حاکی از پیش بینی معیار شکل دهی دینامیکی می باشد که پارامتر آسیب در آن به مقدار بحرانی ۱ رسیده است.



شکل ۲۳ نتیجه پیش بینی شده برای ورق ۰/۸ میلی متر با استفاده از معیار دینامیکی

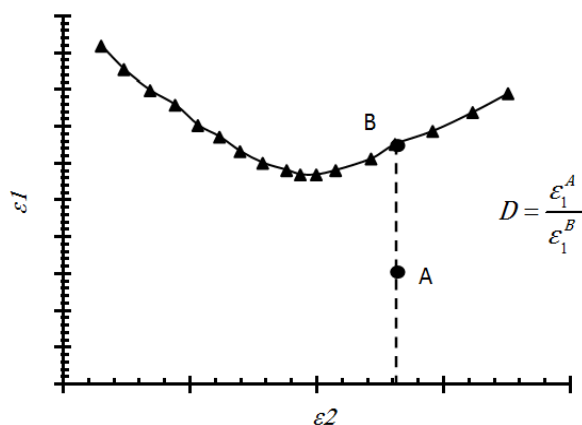
المان های ورق را از کف قطعه شمرد و با دانستن طول المان، مکان وقوع پارگی را تخمین زد.

در شبکه بندی مدل، طول هر المان سه میلی متر تعیین شده و با توجه به این که از کف قطعه تا مکان پاره شده سه المان موجود می باشد، پارگی ایجاد شده از کف قطعه برابر ۹ میلی متر می باشد که تطابق خوبی با آزمایش انجام شده دارد. با استفاده از تکنیک حذف المان و فعال کردن گزینه حذف المان^۱، می توان 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 آنجا که تخمین پارگی در آزمایش از کف قطعه تا شروع ترک ایجاد شده می باشد در شبیه سازی نیز باید تعداد المان ها را از کف قطعه تا بالاترین المانی شمرد که دچار پارگی شده است.

بدیهی است که فرآیند شکل دهی سرعت بالا^۲ نیازمند به معیار است که وابسته به سرعت و یا به عبارتی وابسته به نرخ کرنش باشد، اما موادی که غیروابسته به نرخ کرنش می باشند، تفاوتی در رفتار آن ها در هر دو معیار دیده نمی شود. بیشتر فولادها از جمله St13 وابسته به این پارامتر مهم بوده و این وابستگی کاملاً در رفتار ماده در هر سه جهت نورد آشکار است. در شکل دهی کشش عمیق که با استفاده از انواع پرس انجام می شود به دلیل شبه استاتیکی بودن فرآیند، نمودار حد شکل دهی استاتیکی که در داخل نرم افزار تعریف شده است، می تواند کاملاً مفید و دقیق فرآیند را بررسی کند و اصلاً نیازی به معیار دینامیکی نیست. حال اگر فرآیند مورد نظر دارای سرعت بالا باشد و یا به عبارتی دارای نرخ کرنش بالا باشد، آن وقت، معیار استاتیکی نمی تواند پیش بینی صحیحی داشته باشد. همان طور که از نتایج مشاهده شد معیار استاتیکی، در پیش بینی صحیح آسیب در ورق با ضخامت ۱ میلی متر صحیح، اما در مورد ضخامت ۰/۸ میلی متر نادرست عمل کرده است.

۱۰- نتیجه گیری

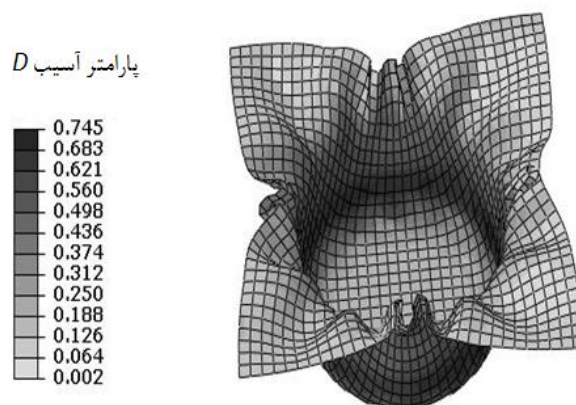
از این مقاله نتیجه می شود که برای مسائلی که دارای سرعت قابل توجهی هستند و نرخ کرنش در آن ها قابل ملاحظه است، نمی توان از نمودار حد شکل دهی استاتیکی استفاده نمود. همان گونه که در این مقاله برای ورق با ضخامت ۰/۸ میلی متر، این معیار، پیش بینی نادرستی به عمل آورد. این معیار برای فرآیندهای شبه استاتیکی نظیر کشش عمیق معمولی مناسب بوده و



شکل ۲۰ نحوه محاسبه پارامتر آسیب بحرانی در نرم افزار آباکوس



شکل ۲۱ ورق شکل داده شده با چکش ضربه ای با ضخامت ۰/۸ میلی متر



شکل ۲۲ نتیجه پیش بینی شده برای ورق ۰/۸ میلی متر با استفاده از معیار استاتیکی

نرم افزار قرارداد شده. برای بررسی صحت انجام آزمایش به کمک شبیه سازی، می توان 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 میلی متر پارگی اتفاق نیفتاد و در شبیه سازی نیز هیچ گونه پارگی مشاهده نشد. برای هر سه قطعه آزمایش شده با ضخامت ۰/۸ میلی متر، پارگی ایجاد شده در ورق به فاصله ۸ میلی متر از کف قطعه می باشد، این آزمایش برای سه قطعه در شرایط کاملاً یکسان انجام شد.

برای اندازه گیری مکان عمق وقوع پارگی در شبیه سازی می توان تعداد

1- Element Remove

2- High velocity sheet metal forming

تنش اصلی درجه ۳ ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)	σ_{33}	می تواند به خوبی و با دقت بالا به پیش بینی آسیب بپردازد، اما برای
کرنش اصلی در جهت ۱	ε_1	فرآیندهایی مانند فرآیند شکل دهی الکترو هیدرولیکی ^۱ و فرآیند شکل دهی
کرنش اصلی در جهت ۲	ε_2	الکترو مغناطیسی که متداول ترین روش های شکل دهی با سرعت بالا هستند،
کرنش اصلی در جهت ۳	ε_3	این روش، خطای بالایی داشته و قادر به پیش بینی صحیح آسیب نیست. برای
کرنش عرضی	ε_w	این گونه فرآیندها، باید از نمودار حد شکل دهی دینامیکی استفاده نمود. از این
کرنش طولی	ε_L	مقاله همچنین می توان نتیجه گرفت که نرخ کرنش، پارامتری تاثیر گذار بر
کرنش موثر	$\bar{\varepsilon}$	رفتار ماده بوده و نمودار حد شکل دهی این مواد نیز به نرخ کرنش وابسته
نمو زاویه	$d\theta$	می باشد. بنابراین اگر فرآیند انجام شده، دارای سرعت بالا و ماده استفاده شده
نمو کرنش موثر	$d\bar{\varepsilon}$	نیز وابسته به نرخ کرنش باشد، تنها معیار دقیق برای پیش بینی صحیح
نسبت تنش	α	آسیب، معیار حد شکل دهی دینامیکی خواهد بود.

۱۱- فهرست علائم

نیروی عمودی در راستای n (kgms^{-2})	F_{nn}
نیروی مماسی (kgms^{-2})	F_{nt}

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

علائم یونانی

کرنش حد ارتجاعی ε_0 نرخ کرنش (s^{-1}) $\dot{\varepsilon}$ کرنش در راستای ضخامت ε_T تنش عمودی در راستای n ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$) σ_{nn} تنش برشی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$) σ_{nt} تنش عمودی در راستای t ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$) σ_{tt} تنش اصلی درجه ۱ ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$) σ_{11} تنش اصلی درجه ۲ ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$) σ_{22}

۱۲- مراجع

- [1] S. P. Keeler, Circular Grid System: A valuable 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. Jaliné, 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, Theoretical 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] William Hosford, *Metal Forming Mechanics and Metallurgy*, in: Robert M. Caddell, *Plastic Anisotropy*, pp. 13.207-13.209, Michigan, 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. Ganjani, Implementation of a robust algorithm for prediction of Forming limit diagrams, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol 17, pp. 1-6, 2008.
- [14] Mala Seth Dehra, *High Velocity 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*, Accessed 16 July 2013; www.simulia.com/products/products_legal.html.