

بررسی تجربی و عددی منحنی حد شکل‌دهی ورق

آلومینیوم ۶۰۶۱

رسول صفدریان^۱

دانشکده فنی مهندسی

دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا بهبهان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۶/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۶)

چکیده

ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ به دلیل نسبت استحکام به وزن بالایی که دارد کاربردهای زیادی در صنایع مختلف از جمله صنعت خودروسازی و هواپیماسازی دارد و از این طریق به کاهش مصرف سوخت و کاهش آلودگی هوا کمک می‌کند. نمودار حد شکل‌دهی یک روش مفید برای شناسایی شکل پذیری ورق‌های فلزی می‌باشد. از آنجایی که انجام آزمایش‌های تجربی برای محاسبه منحنی حد شکل‌دهی مستلزم صرف زمان و هزینه است، در این تحقیق دو معیار عددی برای پیش‌بینی منحنی حد شکل‌دهی (FLD) ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ ارائه می‌شود. برای انجام شبیه‌سازی عددی از نرم‌افزار آباکوس استفاده می‌شود و معیارهای عددی پیش‌بینی منحنی حد شکل‌دهی پس از محاسبه پارامترهای آن وارد نرم‌افزار آباکوس می‌شود تا از این طریق بتوان منحنی حد شکل‌دهی آلومینیوم ۶۰۶۱ را پیش‌بینی کرد. معیارهای عددی استفاده‌شده در این تحقیق، معیار شکست نرم و معیار منحنی حد شکل‌دهی می‌باشد که نتایج پیش‌بینی آن‌ها با نتایج تجربی مقایسه شد. روش براگارد برای خواندن کرنش‌های حد شکل‌دهی تجربی استفاده شد. این روش نسبت به سایر روش‌ها که کرنش‌های حد شکل‌دهی را از منطقه نزدیک پارگی می‌خوانند، دقیق‌تر است. نتایج مقایسه نشان می‌دهد که معیار عددی شکست نرم از دقت بهتری برای پیش‌بینی منحنی حد شکل‌دهی ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ برخوردار است. علاوه بر این، نتایج عددی در زمینه پیش‌بینی نمودار نیرو-جابه‌جایی سنبه با نتایج تجربی مقایسه شد که نتایج عددی از نزدیکی خوبی با تجربی برخوردارند.

واژه‌های کلیدی: آلومینیوم ۶۰۶۱، منحنی حد شکل‌دهی، معیار شکست نرم، روش اجزای محدود

Experimental and Numerical Investigation of Forming Limit Diagram of 6061 Aluminum Sheet

R. Safdarian

Mechanical Engineering Department

Behbahan Khatam Alanbia University of Technology

(Received:21/September/2015; Accepted:26/January/2016)

ABSTRACT

Because of high strength to weight ratio, 6061 aluminum has many applications in different industries like automotive and aerospace industries and can help to reduction of fuel consumption. Forming limit diagram (FLD) is a useful method for sheet metal formability identification. Whereas calculation of forming limit diagram by experimental tests is expensive and time consumption, in the present research two numerical criteria is presented for forming limit diagram calculation of 6061 aluminum. Numerical simulation is done by Abaqus software. Numerical criteria of FLD prediction are imported to the Abaqus software to predict the forming limit diagram of 6061 aluminum. Bragard method was used for calculation of experimental forming limit diagram. This method is more accurate than other methods which read forming limit strains from the elements which are near the fracture zoon. Numerical criteria are ductile fracture and FLD criteria which their prediction was compared with experimental forming limit diagram. Results show that ductile fracture criterion has more accuracy for forming limit diagram prediction of 6061 aluminum. Moreover, numerical results of punch's force-displacement were compared with experimental results. Results show that numerical results have a good agreement with experiment.

Keywords: 6061 Aluminum, Forming Limit Diagram, Ductile Fracture Criterion, Finite Element Method

۱- استادیار (نویسنده پاسخگو): safdarian_rasool@yahoo.com

۱- مقدمه

آلیاژهای آلومینیوم به دلیل نسبت استحکام به وزن بالایی که دارند کاربردهای زیادی در صنایع حمل و نقل از جمله صنعت خودروسازی و هواپیماسازی دارند و از این طریق به کاهش مصرف سوخت و کاهش آلودگی هوا کمک می‌کنند. آلومینیوم ۶۰۶۱، یکی از پرکاربردترین آلیاژهای آلومینیوم است که علاوه بر صنایع خودروسازی و هواپیماسازی در کشتی‌سازی و دوچرخه‌سازی استفاده می‌شود. از آنجایی که اکثراً آلیاژ آلومینیوم به صورت ورق در فرآیندهای شکل‌دهی فلزات استفاده می‌شود، بررسی شکل‌پذیری آن از اهمیت خاصی برخوردار است. یکی از آزمون‌هایی که به عنوان معیاری برای شناسایی شکل‌پذیری ورق استفاده می‌شود، منحنی حد شکل‌دهی^۱ می‌باشد که برای ورق‌های فلزی که در فرآیندهای شکل‌دهی استفاده می‌شوند کاربرد دارد. بر این اساس در تحقیق حاضر منحنی حد شکل‌دهی ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

تخمین شکل‌پذیری ورق یک نقش اساسی در طراحی فرآیندهای شکل‌دهی ورق دارد. شکل‌پذیری ورق‌های فلزی به وسیله پدیده گلوبی شدن محدود می‌شود. شکل‌پذیری ورق‌ها اولین بار با استفاده از روش تجربی کِلر و بکوفن^۲ [۱] و پس از آن به وسیله گودوین^۳ [۲] برای پیش‌بینی حد شکل‌دهی بررسی شد و پس از آن در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گرفت. سه روش برای تعیین نمودار حد شکل‌دهی وجود دارد: روش تحلیلی، روش تجربی و روش عددی. حد شکل‌دهی ورق‌های فلزی عموماً به صورت کرنش‌های اصلی حد شکل‌دهی تحت شرایط مختلف بارگذاری قبل از شروع گلوبی شدن بیان می‌شود و نمودار حد شکل‌دهی نامیده می‌شود. روش تجربی تعیین حد شکل‌دهی مستلزم این است که ورق‌های فلزی تحت مسیرهای کرنش مختلف قرار گیرند. برای این کار ورق‌هایی با پهنای متفاوت اما طول یکسان تحت آزمون منحنی حد شکل‌دهی که یک آزمون تغییر شکل خارج از صفحه ۴ با یک سنبه کروی است، قرار می‌گیرند [۳]. از آنجایی که تعیین منحنی حد شکل‌دهی با استفاده از روش تجربی مستلزم صرف زمان و هزینه زیادی است، تحقیقات زیادی برای پیش‌بینی منحنی حد شکل‌دهی با روش‌های

تئوری انجام شد. پیش‌بینی منحنی حد شکل‌دهی با استفاده از روش‌های تئوری اولین بار توسط سویت^۵ [۴] و هیل^۶ [۵] تحت شرایط تنش صفحه‌ای ارائه شد. بعد از آن مارسینیاک و کوچینسکی^۷ [۶] یک معیار براساس وجود یک ناهمگنی در ورق ارائه کردند که این ناهمگنی با فاکتور f (نسبت ضخامت قسمت نازک به ضخیم) معرفی شد. آنها یک روش عددی برای پیش‌بینی حد شکل‌دهی ورق گسترش دادند.

به موازات روش‌های وقت‌گیر تجربی یک روش عددی براساس شبیه‌سازی در کامپیوتر گسترش پیدا کرد. در سال ۱۹۹۱ ناراشیما و واگونر^۸ [۷] تاثیر یک شیار را روی حد شکل‌دهی در شرایط کشش صفحه‌ای با استفاده از روش اجزای محدود بررسی کردند و نتایج آن را با مدل مارسینیاک-کوچینسکی مقایسه کردند. این تحقیق نشان داد که در حین شبیه‌سازی کشش دو محوری ورق، گرادایان کرنش‌ها در نمونه‌ها افزایش می‌یابد تا این‌که ناگهان کرنش‌های بزرگی در محدوده‌ای که گلوبی شدن اتفاق می‌افتد ایجاد شود. ناراشیما و واگونر [۷] سه معیار متفاوت ارائه کردند: ۱- معیاری براساس تغییرات نرخ کرنش بیشینه (R_1) ۲- معیاری براساس تغییرات نرخ کرنش کمینه (R_2) ۳- معیاری براساس تغییرات نرخ کرنش موثر (R_3) بین منطقه گلوبی شده و منطقه سالم. نتایج آن‌ها نشان داد وقتی $R_1 \geq 4$, $R_2 \geq 10$ و $R_3 \geq 4$ گلوبی شدن اتفاق خواهد افتاد. برون^۹ [۸] پیشنهاد کرد که ماده در زمانی که نازک‌شدگی شتاب می‌گیرد شروع به گلوبی شدن می‌کند. این پدیده توسط نویسندگان متفاوتی که با استفاده از روش عددی و اجزای محدود منحنی حد شکل‌دهی را تعیین کردند، دنبال شد [۹]. صفدریان و همکاران [۱۰] در تحقیقی کارایی تعدادی روش عددی را در پیش‌بینی حد شکل‌دهی ورق‌های ترکیبی بررسی کردند و نتیجه گرفتند که معیار مشتق دوم نازک‌شدگی از دقت خوبی برای پیش‌بینی حد شکل‌دهی ورق‌های ترکیبی برخوردار است. ماموسی^{۱۰} و همکاران [۱۱] از تعدادی روش استفاده کردند. مشتق دوم نازک‌شدگی، کرنش ضخامت و کرنش معادل پلاستیک معیارهای عددی بودند که برای

5 - Swift

6 - Hill

7 - Marciniak and Kuczynski

8 - Narasimhan and Wagoner

9 - Brun

10 - Mamusi

1- Forming Limit Diagram

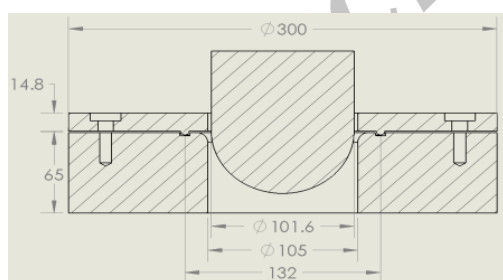
2- Keeler and Backofen

3- Goodwin

4- Out of Plane

این قالب مطابق شکل ۲ روی یک دستگاه کشش ۱۵ تن نصب شد. این دستگاه مجهز به نیروسنج و سیستم اندازه‌گیری جابه‌جایی فک‌های پرس می‌باشد و نمودار نیرو- جابه‌جایی را به صورت همزمان در حین آزمایش می‌توان مشاهده کرد. در زمان شکل‌دهی نمونه‌ها، وقتی که نمونه دچار پارگی می‌شود نیروی شکل‌دهی یک‌باره افت پیدا می‌کند. از این اصل برای متوقف کردن آزمون LDH استفاده می‌شود و وقتی نمودار نیرو- جابه‌جایی و همچنین، اطلاعاتی مانند حداکثر نیرو و حداکثر ارتفاع کشش در لحظه پارگی ذخیره می‌شود. نتایج این آزمون‌ها شامل موقعیت پارگی و حداکثر ارتفاع کشش می‌باشد که با نتایج شبیه‌سازی‌هایی که با همین شرایط انجام می‌شود مقایسه می‌شود.

برای انجام آزمون‌های حد شکل‌دهی نیاز است که نمونه‌های ورق قبل از انجام آزمون آماده شوند. ۷ نمونه ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ طبق استاندارد هسک^۳ [۱۴] با طول یکسان ۱۷۵ میلی‌متر و عرض‌های متفاوت مطابق شکل ۳ برای انجام آزمون حد شکل‌دهی آماده شدند. علت استفاده از هندسه نشان‌داده‌شده در این شکل (استاندارد هسک)، جلوگیری از شکست نمونه‌ها در محل ترمز کشش می‌باشد. قبل از شکل‌دهی سطح نمونه‌ها با استفاده از دستگاه حک الکتروشیمیایی با دایره‌هایی شبکه‌بندی شدند تا بتوان کرنش نمونه‌ها را پس از تغییر شکل اندازه‌گیری و وارد منحنی حد شکل‌دهی نمود.



شکل (۱): قالب استاندارد هکر برای بررسی میزان شکل‌پذیری.

پیش‌بینی منحنی حد شکل‌دهی ورق ترکیبی استفاده شد. مقایسه نتایج عددی و تجربی نشان داد که معیارهای عددی از دقت خوبی برای پیش‌بینی حد شکل‌دهی برخوردار هستند. کرجیانی^۱ و همکاران [۱۲] از دو معیار عددی مشتق دوم نازک‌شدگی و معیار کرنش بیشینه برای پیش‌بینی منحنی حد شکل‌دهی ورق‌های دولایه آلومینیوم و فولاد استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که روش‌های عددی از نزدیکی خوبی با نتایج تجربی برخوردار هستند. جوانرودی و دروگر [۱۳] در تحقیقی به بررسی عددی و تجربی منحنی حد شکل‌دهی ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ و ورق تیتانیوم پرداختند. در این تحقیق از فرایند کشش عمیق هیدروفورمینگ برای بررسی منحنی حد شکل‌دهی ورق‌های ذکرشده استفاده شد. از منحنی حد شکل‌دهی پیشنهادشده به وسیله موسسه کشش عمیق آمریکای شمالی (NADDRG) در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس برای پیش‌بینی منحنی حد شکل‌دهی استفاده شد.

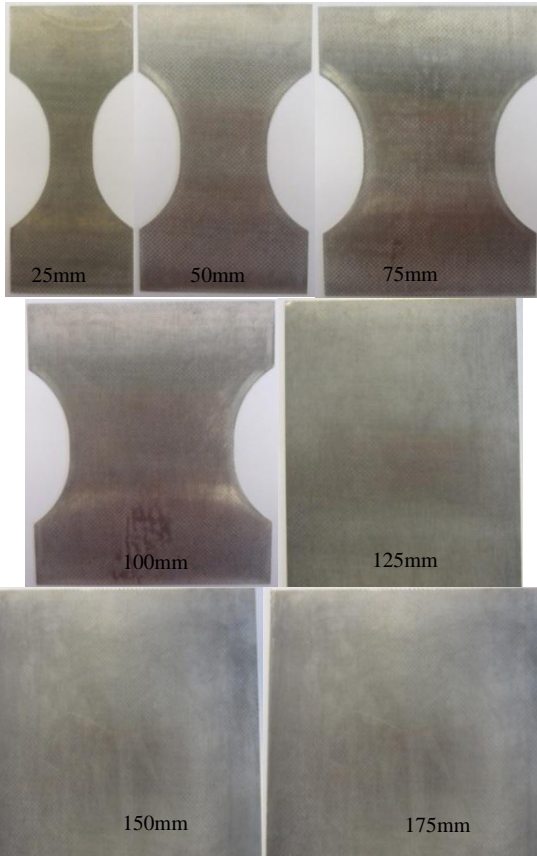
در تحقیق حاضر منحنی حد شکل‌دهی ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ به صورت تجربی مورد بررسی قرار می‌گیرد. از آنجایی که انجام آزمایش‌های تجربی زمان‌بر و مستلزم صرف هزینه زیادی است، دو روش عددی برای پیش‌بینی منحنی حد شکل‌دهی ارائه می‌شود. معیار عددی شکست نرم برای اولین بار در تحقیق حاضر جهت پیش‌بینی منحنی حد شکل‌دهی ورق استفاده می‌شود. نتایج روش‌های عددی در مورد پیش‌بینی منحنی حد شکل‌دهی ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ با نتایج تجربی مقایسه می‌شود تا معیار عددی مناسب انتخاب شود. از روش براگارد^۲ برای محاسبه کرنش‌های حد شکل‌دهی نمونه‌های تجربی استفاده می‌شود. نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود در مورد پیش‌بینی منحنی نیرو- جابه‌جایی فرآیند شکل‌دهی با نتایج تجربی مقایسه می‌شود.

۲- آزمایش‌های تجربی

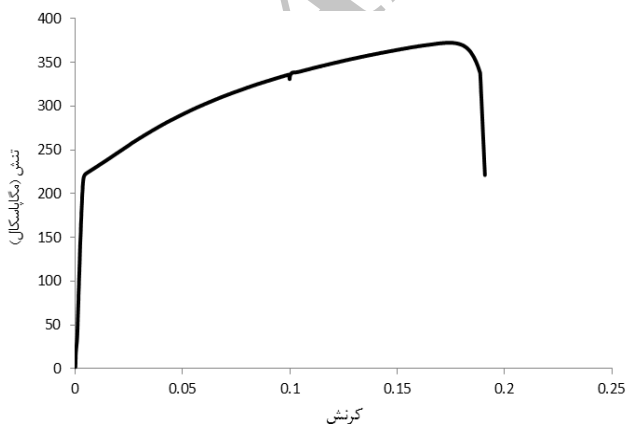
برای بررسی میزان شکل‌پذیری ورق‌های آلومینیوم نیاز به یک قالب استاندارد می‌باشد. این قالب براساس استاندارد هکر برای بررسی میزان شکل‌پذیری ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ با استفاده از آزمون میزان ارتفاع شکل‌دهی (LDH) در لحظه پارگی، ساخته شد (شکل ۱).

1 - Karajibani
2 - Bragard

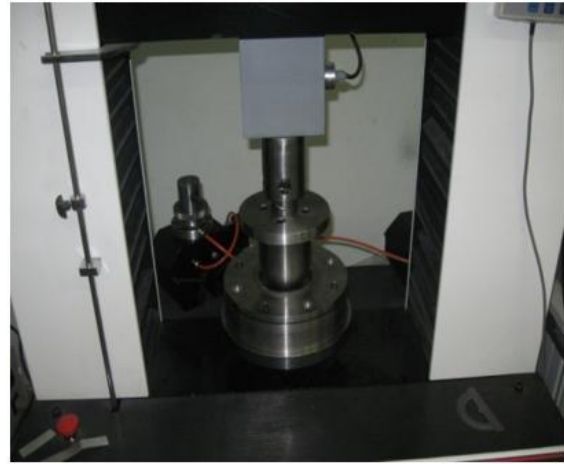
آماده شده در نرم افزار را نشان می دهد. از المان پوسته چهارگه (S4R) برای مش بندی ورق استفاده شد. از آنجایی که در آزمون های تجربی بین ورق و سطح سنبه از روانکار روغن استفاده شد، تماس بین ورق و سنبه بدون اصطکاک و تماس سایر سطوح با ضریب اصطکاک ۰/۱۵ در نظر گرفته شد.



شکل (۳): نمونه های ورق های آلومینیوم ۶۰۶۱ برای آزمون حد شکل دهی.



شکل (۴): منحنی تنش- کرنش مهندسی ورق آلومینیوم ۶۰۶۱.



شکل (۲): دستگاه مورد استفاده برای انجام آزمون حد شکل دهی.

دایره هایی که در معرض تغییر شکل هستند پس از فرآیند به شکل بیضی در می آیند و برحسب موقعیت در یکی از سه ناحیه ایمن، ناحیه گلوبی و ناحیه شکست قرار می گیرند. کرنش های اصلی در صفحه ورق براساس کرنش های حقیقی بیان شد. کرنش های حقیقی کمینه و بیشینه با اندازه گیری قطر کوچک (b) و بزرگ (a) بیضی ها و مقایسه آن با قطر اولیه (d_0) با استفاده از روابط زیر اندازه گیری می شود [۱۵].

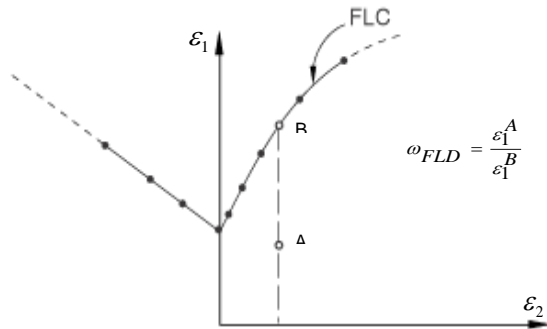
$$\epsilon_{\text{major}} = \ln\left(\frac{a}{d_0}\right), \epsilon_{\text{minor}} = \ln\left(\frac{b}{d_0}\right) \quad (1)$$

از آنجایی که برای انجام شبیه سازی اجزای محدود شکل دهی ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ نیاز به خواص مکانیکی آن می باشد، آزمون کششی مطابق استاندارد ASTM-E8 انجام شد تا منحنی تنش- کرنش این نوع ورق استخراج شود. شکل ۴ منحنی تنش- کرنش مهندسی حاصل از آزمون کشش را نشان می دهد که برای استفاده از آن در نرم افزار به تنش- کرنش حقیقی تبدیل شد.

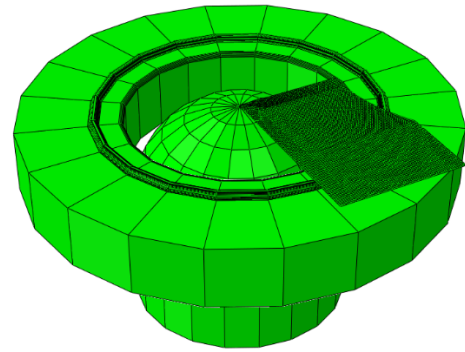
۳- شبیه سازی عددی فرآیند

برای انجام شبیه سازی از نرم افزار اجزای محدود آباکوس ۶/۱۳ استفاده شد. مدل مورد استفاده برای شبیه سازی براساس آزمایش استاندارد هکر^۱ مدل سازی شد. سنبه، قالب و ورق گیر به دلیل تغییر شکل ناچیز به صورت صلب مدل شدند ولی ورق به صورت تغییر شکل پذیر مدل سازی شد. شکل ۵، مدل

1- Hecker



شکل (۶): منحنی حد شکل‌دهی و نحوه محاسبه معیار گلوبی شدن در آباکوس [۱۶].



شکل (۵): مدل طراحی شده در نرم‌افزار آباکوس.

در این تحقیق منحنی حد شکل‌دهی تجربی ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ به‌عنوان معیار FLD_{crit} به نرم‌افزار آباکوس وارد می‌شود. پس از پایان یافتن شبیه‌سازی، اولین المانی که $\omega_{FLD} = 1$ ، به‌عنوان المانی که گلوبی شدن از آن شروع می‌شود در نظر گرفته می‌شود و کرنش بیشینه و کمینه آن المان به‌عنوان نقطه‌ای از منحنی حد شکل‌دهی در نظر گرفته می‌شود. این مراحل برای تمام نمونه‌های شبیه‌سازی شده تکرار می‌شود تا تمام نقاط منحنی حد شکل‌دهی عددی استخراج شود.

۲-۴- معیار شکست نرم (DFC_{crit})^۲

شکست مواد نرم بیش‌تر به‌خاطر رشد و بهم پیوستن حفره‌های میکروسکوپی موجود در ماده اتفاق می‌افتد. این مدل فرض می‌کند که کرنش پلاستیک معادل در شروع شکست، $\bar{\epsilon}_D^{pl}$ ، تابعی از تنش سه‌محوری^۳ و نرخ کرنش پلاستیک می‌باشد [۱۶].

$$\bar{\epsilon}_D^{pl}(\eta, \dot{\epsilon}^{pl}) \quad (۲)$$

که، η تنش سه‌محوری و $\dot{\epsilon}^{pl}$ نرخ کرنش پلاستیک معادل می‌باشد. این معیار وقتی شروع شکست را نشان می‌دهد که [۱۶]:

$$\omega_D = \int \frac{d\bar{\epsilon}^{pl}}{\bar{\epsilon}_D^{pl}(\eta, \dot{\epsilon}^{pl})} = 1 \quad (۳)$$

تنش سه‌محوری را می‌توان به‌صورت زیر محاسبه نمود:

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_{VM}} = \frac{\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{\sqrt{1/2[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]}} \quad (۴)$$

قالب در حین فرایند ثابت بود و سنبه با سرعت 1000 mm/s به‌سمت پایین حرکت می‌کند تا ورق را شکل دهد. این سرعت براساس شرط شبه‌استاتیک بودن فرآیند انتخاب شده است که جزئیات آن در مرجع [۱۰] ارائه شده است. برای بررسی عددی حد شکل‌دهی ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ از دو روش عددی برای این منظور استفاده شد که در ادامه توضیح داده می‌شود.

۴- معیارهای عددی پیش‌بینی حد شکل‌دهی ورق

برای بررسی عددی حد شکل‌دهی ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ از دو روش عددی برای این منظور استفاده شد. نتایج این روش‌های عددی با نتایج تجربی تحقیق حاضر مقایسه می‌شود تا روش مناسب‌تر برای پیش‌بینی منحنی حد شکل‌دهی شناسایی شود. این دو معیار عددی، معیار FLD_{crit}^۱ و معیار شکست نرم می‌باشند که در ادامه توضیح داده می‌شود.

۴-۱- معیار FLD_{crit}

کرنش‌های بیشینه‌ای که یک ورق فلزی می‌تواند تا قبل از شروع گلوبی شدن تحمل کند را به‌عنوان کرنش‌های حد شکل‌دهی در نظر می‌گیرند. منحنی حد شکل‌دهی یک منحنی از کرنش‌های حد شکل‌دهی در فضای کرنش‌های اصلی است. شروع گلوبی شدن براساس معیار FLD_{crit} در نرم‌افزار آباکوس با استفاده از شرط $\omega_{FLD} = 1$ بیان می‌شود. متغیر ω_{FLD} تابعی از حالت تغییر شکل کنونی می‌باشد و به‌صورت نسبت کرنش بیشینه کنونی، ϵ_1 ، به کرنش بیشینه حد روی منحنی حد شکل‌دهی در مقدار کنونی کرنش کمینه، ϵ_2 ، تعریف می‌شود. شکل ۶ نحوه محاسبه ω_{FLD} را در نرم‌افزار آباکوس نشان می‌دهد.

2- Ductile Fracture Criterion
3- Stress Triaxiality

1- Forming Limit Diagram (FLD) Criterion

$$\bar{\sigma} = k\bar{\epsilon}^n \quad (۱۲)$$

k و n ثابت‌های ماده هستند. $\bar{\epsilon}$ با استفاده از معادله (۱۳) قابل محاسبه است:

$$\bar{\epsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_1 \epsilon_2} \quad (۱۳)$$

در این معادله ϵ_1 و ϵ_2 به ترتیب کرنش بیشینه و کمینه می‌باشند که از آزمایش‌های تجربی منحنی حد شکل‌دهی ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ به دست می‌آیند. با جایگذاری معادلات (۱۰) و (۱۲) در معادله (۹)، σ_1 محاسبه می‌شود. سپس σ_2 با معادله (۵) محاسبه می‌شود. با استفاده از σ_1 ، σ_2 و شرط تنش صفحه‌ای، تنش سه‌محوری با معادله (۴) محاسبه می‌شود. برای وارد کردن DFCCrt به نرم‌افزار آباکوس، دو پارامتر تنش سه محوری و کرنش شکست نیاز می‌باشد که کرنش شکست در واقع کرنش معادل شکست در لحظه شروع شکست می‌باشد. کرنش معادل شکست در لحظه شروع شکست، $\bar{\epsilon}^{pl}$ را می‌توان با استفاده از معادله (۱۳) محاسبه کرد. اولین المانی که $\omega_D = 1$ ، به‌عنوان المانی که گلوبی شدن از آن آغاز می‌شود، انتخاب می‌شود و کرنش بیشینه و کمینه آن المان وارد نمودار حد شکل‌دهی می‌شود. این روند برای تمام نمونه‌ها تکرار می‌شود تا منحنی حد شکل‌دهی با استفاده از این روش به دست آید.

۵- صحنه‌گذاری نتایج و بحث

در این قسمت به مقایسه تجربی و عددی منحنی نیرو-جابجایی سنبه و مقایسه منحنی حد شکل‌دهی تجربی و عددی پرداخته شده است.

۵-۱- مقایسه تجربی و عددی منحنی نیرو-جابجایی سنبه

شکل ۷ موقعیت شکست در نمونه‌های تجربی را پس از آزمون حد شکل‌دهی نشان می‌دهد. به دلیل استفاده از روانکار روغن در تماس بین سنبه و ورق، ورق در محل تماس با سنبه دچار کشیدگی شده و نیروی مقاوم اصطکاک وجود ندارد تا از این منطقه در برابر پارگی محافظت کند. بنابراین تمام نمونه‌ها از منطقه نزدیک راس گنبد دچار پارگی شده‌اند. منحنی نیرو-جابجایی استخراج شده از آزمایش‌های تجربی و نتایج شبیه‌سازی‌ها در شکل ۸ برای نمونه‌هایی با ابعاد متفاوت مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که نتایج شبیه‌سازی از

که، σ_m تنش میانگین، $\bar{\sigma}_{VM}$ تنش معادل فون میزز و σ_1 ، σ_2 ، σ_3 تنش‌های اصلی می‌باشند. با در نظر گرفتن فرض تنش صفحه‌ای $\sigma_3 = 0$ ، σ_1 و σ_2 را می‌توان با استفاده از کرنش بیشینه (ϵ_1) و کرنش کمینه (ϵ_2) تجربی محاسبه نمود. نسبت تنش حقیقی کمینه، σ_2 ، به تنش حقیقی بیشینه، σ_1 و همچنین نسبت کرنش حقیقی کمینه، ϵ_2 ، به کرنش حقیقی بیشینه، ϵ_1 با استفاده از روابط زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad (۵)$$

$$\beta = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \quad (۶)$$

با استفاده از معادلات (۵) و (۶)، با در نظر گرفتن قانون جریان و فرض ناهمسانگردی نرمال برای ورق فلزی، ارتباط بین α و β با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۷]:

$$\alpha = \frac{(1 + \bar{\Gamma})\beta + \bar{\Gamma}}{1 + \bar{\Gamma} + \bar{\Gamma}\beta} \quad (۷)$$

با استفاده از تئوری پلاستیسیته تنش موثر، $\bar{\sigma}$ ، به صورت تابعی از اجزای تنسور تنش و تعدادی از پارامترهای ماده تعریف می‌شود. برای مواد با ناهمسانگردی نرمال، تنش موثر را می‌توان با استفاده از تنش‌های اصلی به صورت زیر تعریف کرد:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \frac{2\bar{\Gamma}}{1 + \bar{\Gamma}}\sigma_1\sigma_2} \quad (۸)$$

این ارتباط را می‌توان با معادله زیر نیز برحسب σ_1 و α بیان کرد:

$$\bar{\sigma} = \sigma_1 \psi(\alpha) \Rightarrow \sigma_1 = \frac{\bar{\sigma}}{\psi(\alpha)} \quad (۹)$$

که $\psi(\alpha)$ تابعی از پارامترهای ماده می‌باشد و می‌توان با رابطه زیر آن را محاسبه نمود:

$$\psi = \sqrt{1 + \alpha^2 - \frac{2\bar{\Gamma}}{1 + \bar{\Gamma}}\alpha} \quad (۱۰)$$

α ، از معادله (۷) و با استفاده از کرنش‌های بیشینه و کمینه منحنی حد شکل‌دهی تجربی، محاسبه می‌شود. ارتباط بین تنش موثر و کرنش موثر را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}) \quad (۱۱)$$

یکی از رایج‌ترین روابط نشان‌دهنده ارتباط بین تنش و کرنش موثر، رابطه هولومون می‌باشد:

۵-۲- مقایسه منحنی حد شکل‌دهی تجربی و عددی

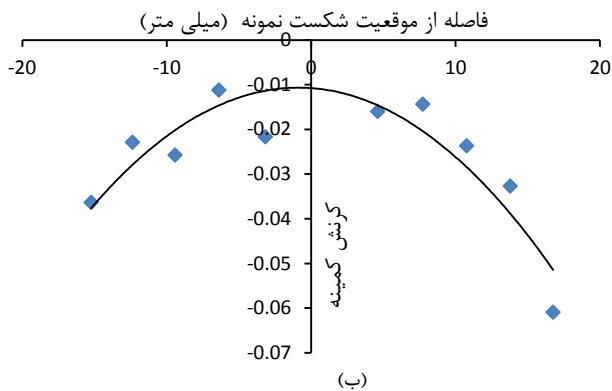
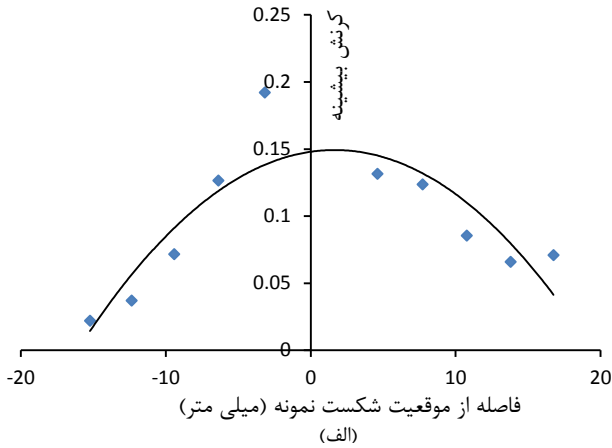
منحنی حد شکل‌دهی تجربی با استفاده از روش براگارد [۱۸] از روی نمونه‌ها خوانده شده است. برای خواندن منحنی حد شکل‌دهی با این روش از روی مسیری عمود بر خط شکست نمونه، کرنش‌های بیشینه و کمینه خوانده می‌شود. روی نمونه‌های شکل ۷ این مسیرها با نقاط سیاه رنگ نشان داده شده است. پس از خواندن کرنش‌های بیشینه و کمینه، این کرنش‌ها در نمودارهای جداگانه‌ای مشابه شکل ۹ رسم می‌شوند. شکل ۹ تغییرات کرنش کمینه و بیشینه را در طول مسیر مشخص شده برای نمونه‌ای با عرض ۷۵ میلی‌متر را نشان می‌دهد. محل تقاطع منحنی این شکل با محور عمودی نمودار، کرنش‌های مد نظر برای یک نمونه می‌باشد. این روند برای تمام نمونه‌ها تکرار می‌شود تا منحنی حد شکل‌دهی استخراج شود. خواندن کرنش‌های منحنی حد شکل‌دهی با روش براگارد از دقت بیشتری نسبت به روش‌های دیگر برخوردار است. منحنی حد شکل‌دهی ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ پیش‌بینی شده با دو روش عددی و نتایج تجربی در شکل ۱۰ مقایسه شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است از بین دو معیار عددی، معیار شکست نرم با دقت بهتری منحنی حد شکل‌دهی را پیش‌بینی می‌کند. در معیار عددی FLDCert هر چند از منحنی حد شکل‌دهی تجربی استفاده می‌شود، اما دقت خوبی در پیش‌بینی منحنی حد شکل‌دهی ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ ندارد. تمام نقاط پیش‌بینی شده توسط این معیار در منطقه شکست قرار دارند. بنابراین این معیار برای پیش‌بینی حد شکل‌دهی این ورق مناسب نیست.

معیار شکست نرم (DFCcert) نزدیکی خوبی به نتایج تجربی دارد و از دقت خوبی برای پیش‌بینی منحنی حد شکل‌دهی ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ برخوردار است. نیمه سمت راست منحنی حد شکل‌دهی پیش‌بینی شده با معیار شکست نرم از نتایج تجربی فاصله دارد و این معیار برای منطقه کشش دومحوری یکسان از نتایج تجربی دور شده اما همچنان در منطقه ایمن قرار دارد. عدم توانایی معیارهای عددی در پیش‌بینی نیمه سمت راست منحنی حد شکل‌دهی توسط محققین دیگر [۱۹] نیز بیان شده است.

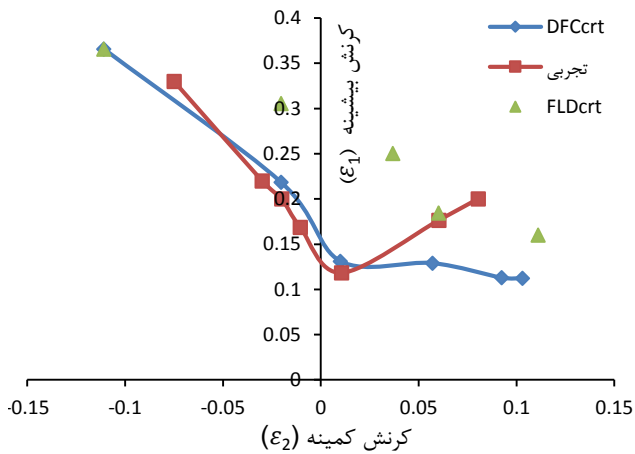
نزدیکی خوبی با نتایج تجربی برخوردارند. نتایج نشان می‌دهد که منحنی نیرو- جابه‌جایی تجربی و عددی افزایش پیدا می‌کند تا به مقدار حداکثری می‌رسد. زمانی که منحنی نیرو یک‌باره کاهش می‌یابد، نمونه دچار شکست می‌شود.



شکل (۷): نمونه‌های ورق‌های آلومینیوم ۶۰۶۱ پس از آزمون حد شکل‌دهی.



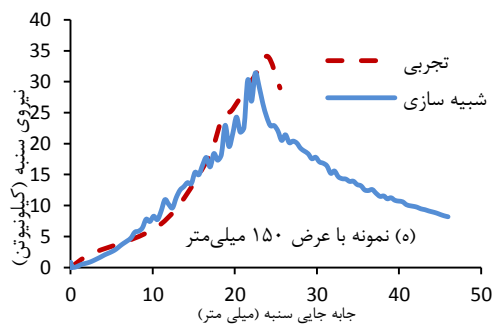
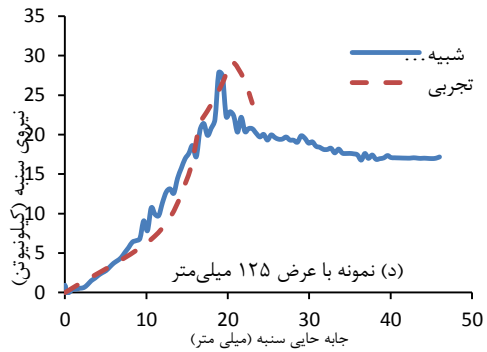
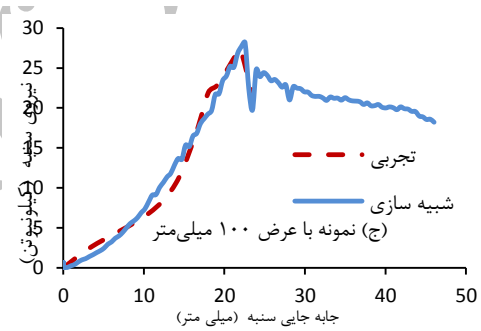
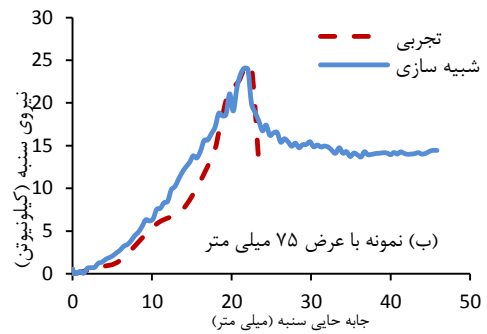
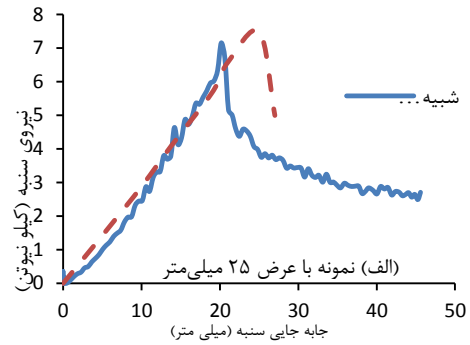
شکل (۹): خواندن کرنش حد شکل دهی با استفاده از روش براگارد برای نمونه با عرض ۷۵ میلی متر (الف) کرنش بیشینه، (ب) کرنش کمینه.



شکل (۱۰): مقایسه عددی و تجربی منحنی حد شکل دهی ورق آلومینیوم ۶۰۶۱

۶- نتیجه گیری

در مقاله حاضر تلاش شد منحنی حد شکل دهی ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ با دو روش تجربی و عددی مورد بررسی قرار گیرد. این نوع ورق به دلیل نسبت استحکام به وزن بالایی که



شکل (۸): مقایسه عددی و تجربی منحنی نیرو- جابه جایی سنبه برای نمونه های مختلف.

5. Hill, R. "On Discontinuous Plastic States, with Special Reference to localized Necking in Thin Sheets", *Journal of Mechanics and Physics Solids*, Vol. 1, pp. 19–30, 1952.
6. Marciniak, Z. and Kuczynski, K. "Limit Strains in the Processes of Stretch-Forming Sheet Metal", *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 9, pp. 609–620, 1967.
7. Narasimhan, K. and Wagoner, R.H. "Finite Element Modeling Simulation of In-plane Forming Limit Diagrams of Sheets Containing Finite Defects", *Metall Trans*, Vol. 22A, pp. 2655–2665, 1991.
8. Brun, R., Chambard A., Lai, M., and de Luca, P. "Actual and Virtual Testing Techniques for a Numerical Definition of Materials", *Proc NUMISHEET'99*, Besançon France, pp. 393-398, 1999.
9. Pepelnjak, T., Petek, A., and Kuzman, K. "Analysis of the Forming Limit Diagram in Digital Environment", *Sheet Metal Erlangen, Germany*, pp. 697-704, 2005.
10. Safdarian, R., Moslemi Naeini, H., Ighat Gh., Noghahi M., and Rahimi E. "Investigation of Forming Limit Diagram and Weld Line Movement in Tailor Welded Blank Forming by Numerical Methods", *Journal of Practical Science in Mechanic*, 2012 (In Persia).
11. Mamusi, H., Masoumi, A., Hashemi, R., and Mahdavinjad, R. "A Novel Approach to the Determination of Forming Limit Diagrams for Tailor-Welded Blanks", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 22, pp. 3210-3221, 2013.
12. Karajibani, E., Hashemi, R., Sedighi, M. "Determination of Forming Limit Curve in Two-Layer Metallic Sheets using the Finite Element Simulation", *Journal of Materials Design and Applications*, 2015.
13. Djavanroodi, F. and Derogar, A. "Experimental and Numerical Evaluation of Forming Limit Diagram for Ti6Al4V titanium and Al6061-T6 Aluminum Alloys Sheets", *Journal of Materials and Design*, Vol. 31, pp. 4866-4875, 2010.
14. Hasek, V. "Research and Theoretical Description Concerning the Influences on the FLDs", Germany, 1978.
15. Safdarian, R. "Theoretical and Experimental Model for Forming Limit Diagram of Tailor Welded Blanks in Sheet Metal Forming Process", PhD Thesis, Tarbiat Modares University, 2013 (In Persis).
16. Abaqus User Guide. *Abaqus Analysis User's Manual*.
17. Thomas, B. Stoughton, "A General Forming Limit Criterion for Sheet Metal Forming", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 42, pp. 1-27, 2000.
18. Bragard, A., Baret, J.C., and Bonnarens, H. "A

دارد کاربرد زیادی در صنایع خودروسازی و هواپیماسازی دارد. برای استخراج منحنی حد شکل‌دهی تجربی از روش براگارد که روشی وقت‌گیر اما دقیق‌تر می‌باشد استفاده شد. در اکثر کارهای تحقیقاتی کرنش‌های حد شکل‌دهی را از المان‌های اطراف منطقه پاره‌شده می‌خوانند که روش دقیقی نیست. در روش براگارد کرنش‌های حد شکل‌دهی را با عبور دادن منحنی از کرنش‌های مسیری عمود بر خط شکست نمونه تجربی استخراج می‌کنند.

از دو معیار عددی شکست نرم (DFC_{CrT}) و معیار منحنی حد شکل‌دهی (FLD_{CrT}) برای پیش‌بینی حد شکل‌دهی ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ استفاده شد. مقایسه منحنی حد شکل‌دهی تجربی و عددی نشان داد که کرنش‌های حد شکل‌دهی پیش‌بینی‌شده به‌وسیله معیار FLD_{CrT} در منطقه شکست قرار دارد و دقت مناسب برای پیش‌بینی منحنی حد شکل‌دهی این نوع ورق را ندارد. معیار شکست نرم با دقت بسیار خوبی نیمه سمت چپ منحنی را پیش‌بینی می‌کند و برای نیمه سمت راست مقداری از نتایج تجربی دور می‌شود اما با این وجود هنوز پیش‌بینی آن در منطقه ایمن قرار دارد و وارد منطقه شکست نمی‌شود. بنابراین نتایج این تحقیق استفاده از معیار شکست نرم را برای پیش‌بینی منحنی حد شکل‌دهی ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ مناسب می‌داند.

مقایسه تجربی و عددی نمودار نیرو-جابجایی پرس نشان می‌دهد که شبیه‌سازی عددی از دقت خوبی برای پیش‌بینی میزان نیرو-جابجایی پرس برخوردار است. از این روش می‌توان برای پیش‌بینی تناژ پرس مورد نیاز برای شکل‌دهی قطعات استفاده کرد و انتخاب مناسبی در این زمینه داشت.

۷- مراجع

1. Keeler, S.P. and Backofen, W.A. "Plastic Instability and Fracture in Sheets Stretched Over Rigid Punches", *Transactions of the ASM*, Vol. 56, 1963.
2. Goodwin, G.M. "Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop", *SAE* pp. 680093, 1968.
3. Hecker, S.S. "A Simple Forming Limit Curve Technique and Results on Aluminum Alloys, Sheet Metal Forming and Formability", In: *Proceedings of the 7th Biennial Congress of the International Deep Drawing Research Group*. Amsterdam 5.1–5.8, 1972.
4. Swift, H.W. "Plastic instability under plane stress. *Journal of Mechanics and Physics Solids*, Vol.1, pp.1–18, 1952.

Simplified Method to Determine the FLD Onset of localised Necking", Liège, Rapport Centre de Recherche de la Métallurgie, 1972.

19. Ozturk, F. and Lee, D. "Analysis of Forming Limits using Ductile Fracture Criteria", Journal of Material Processing Technology, Vol. 3, pp. 397-404, 2004.

Archive of SID