مجله مهندسی مکانیک مدرس، دی 1396، دوره 17، شماره 10، ص‌ص 333-340

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی اثر سرعت شکل‌دهی بر روی منحنی حدشکل‌دهی برای ورق‌های آلومینیوم 6061

شهاب شجاعی[1]، رامین هاشمی[2*]، داود رحمت آبادی[1]

1- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم وصنعت ایران، تهران

* تهران، صندوق پستی 13114-16846، rhashemi@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 21 تیر 1396

پذیرش: 28 شهریور 1396

ارائه در سایت: 05 آبان 1396

کلید واژگان:

نرخ کرنش

نمودار حد شکل‌دهی

آلومینیوم 6061

چکیده

نمودارهای حدشکل‌دهی در حقیقت محدوده‌ی ترکیب کرنش‌هایی است که شروع گلویی موضعی را مشخص می‌کنند. پارامترهای مختلفی مانند ضخامت ورق، عیوب ساختاری، دما، مسیر بارگذاری، سرعت شکل‌دهی و غیره روی این نمودارها تأثیرگذار هستند که یکی از تأثیرگذارترین آن‌ها سرعت شکل‌دهی است که در شکل‌دهی ورق‌ها، ارتباط مستقیمی با سرعت پرس دارد. در این تحقیق نمودار حدشکل‌دهی برای ورق‌های آلومینیوم 6061 با ضخامت 3mm در سرعت‌های 20، 100 و 200mm/min به‌صورت تجربی و 20، 100، 200، 500 و 800mm/min به‌صورت عددی محاسبه شده است. تست‌های تجربی به صورت تست بالج توسط پرس هیدرولیک و قالب فولادی روی ورق‌هایی که در شش اندازه مختلف مطابق استاندارد آماده شده‌اند، انجام گرفت. همچنین مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس و معیار بیشینه شتاب کرنش بزرگ با وارد کردن داده‌های مدل جانسون‌کوک انجام شد. صحت نتایج تجربی و مدل‌سازی توسط بررسی محل پارگی و میزان هم‌خوانی نمودارهای حد شکل‌دهی رسم شده از دو روش، بررسی شد و نتایج نشان داد که داده‌های تجربی و عددی با خطای قابل قبول با هم هم‌خوانی دارند. همچنین مشاهده شد با افزایش سرعت پرس نمودار حد شکل‌دهی افزایش می‌یابد به گونه‌ای که با افزایش سرعت پرس از 20mm/min به 200mm/min، نمودار 30% بهبود یافته است. این تغییرات می‌تواند دلایل مختلفی مثل اثر اصطکاک و شرایط تماسی بین قالب و ورق داشته باشد، زیرا در سرعت پایین (نرخ کرنش کمتر از 100میلی‌متر بر ثانیه) و دمای محیط اثر نرخ کرنش و اینرسی جرم بر شکل‌پذیری بسیار اندک است.

Survey on the effect of forming speed on fld for Al 6061 sheets

Shahab Shojaei, Ramin Hashemi*, Davood Rahmatabadi

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, rhashemi@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 12 July 2017
Accepted 19 September 2017
Available Online 27 October 2017

Keywords:
Strain rate
FLD
Al 6061

ABSTRACT

FLDs, in fact, are the range of strain combinations which identify the beginning of local necking. Different parameters such as sheet thickness, structural defects, temperature, loading direction, forming speed, etc. influence these diagrams and one of the most effective parameters is forming speed whichhas a direct connection with press speed in sheet forming. In this research FLDs are calculated for aluminum 6061 sheets with 3mm thickness at rates of 20, 100 and 200 mm/min experimentally and simulated at rates of 20, 100, 200, 500 and 800mm/min. In order to do the experimental tests, bulge test is conducted in sheets in six different sizes according to standard by hydraulic press and built steel die. Also, numerical modeling was done using the Abaqus finite element software and the maximum strain gauge criterion by entering the Johnson Cook data. Experimental and simulation results verification is studied by surveying the tearing location and errors between FLDs and the result showed that experimental and numerical data are compatible with acceptable errors. It was observed that by increasing forming speed FLD increases in such a way that by increasing the press speed from 20 mm/min to 200 mm/min, FLD increases 30 percent. This variation can have different reasons such as friction effect and interaction effects between die and sheets, because at the low forming speed (of less than 100 1/s for strain rate) and at room temperature, the effect of strain rate and mass inertia are minimal.

1- مقدمه

با توسعه صنایع خودرو، صنایع هوایی، دریایی و صنایع نظامی در طول دهه‌های اخیر، توجه دوچندانی معطوف به فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی شده است، به‌گونه‌ای که ساخت حجم وسیعی از تولیدات کشورهای صنعتی به این فرآیندها مرتبط شده است. همچنین امروزه با توجه به اهمیت مسائلی از قبیل دور ریز مواد، هزینه‌های زمان و انرژی، توجه ویژه‌ای به میزان شکل‌پذیری، تعداد مراحل رسیدن به شکل مدنظر و مسائلی از این قبیل می‌شود، لذا مطالعه اثرات شیوه‌های نوین شکل‌دهی مانند شکل‌دهی‌های سرعت بالا روی منحنی‌های شکل‌دهی که معیاری از میزان شکل‌پذیری فلزات هستند، نیز اهمیت می‌یابد. از بین عیوب ایجاد شده در فرآیندهای

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Sh. Shojaei, R. Hashemi, D. Rahmatabadi, Survey on the effect of forming speed on fld for Al 6061 sheets, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 10, pp. 333-340, 2017 (in Persian)

شکل‌دهی ورق، پارگی[1]، چین‌خوردگی[2] و برگشت فنری[3] بیش از دیگر عیوب، مشکل آفرین و در نتیجه مورد بررسی قرار گرفته است [1]. در فرآیندهای شکل‌دهی که عموماً دارای طبیعت کششی هستند، زمانی که تنش‌های کششی اعمال شده به ورق از حد تحمل آن بیشتر باشد؛ نخست ناپایداری پلاستیک[4] و سپس پارگی رخ می‌دهد [2]. معمولاً مشکل چین‌خوردگی را با روش‌های خاصی مانند افزایش نیروی ورق‌گیر و تعبیه آویزه[5] می‌توان حل نمود و لذا عامل تعیین کننده در سلامت فرآیند شکل‌دهی ورق، تخمین گلویی شدن و پارگی ورق می‌باشد.

استفاده از نمودارهای حد شکل‌دهی یکی از روش‌های مناسب برای بررسی شکل‌پذیری ورق‌های فلزی می‌باشد. این نمودارها تغییرات شکل‌پذیری را تحت بارگذاری‌های مختلف نشان می‌دهد. توسعه استفاده از نمودارهای حد شکل‌دهی به‌عنوان یک ابزار قدرتمند برای ارزیابی علمی و عملی رفتار شکل‌پذیری ورق بسیار چشم‌گیر است. معمولاً بررسی شکل‌پذیری ورق‌های فلزی با استفاده از منحنی‌های حد شکل‌دهی[6] انجام می‌گیرد. این منحنی‌ها ترکیب کرنش‌هایی را که یک ورق می‌تواند تحمل کند، نشان داده و یک مرز بحرانی برای گلویی شدن موضعی[7] و یا پارگی به‌دست می‌دهند [3]. در شرایطی که ورق تحت بارگذاری دو محوری قرار دارد، این منحنی‌ها بر روی صفحه کرنش‌های اصلی بزرگتر و کوچکتر ترسیم می‌شود که در اصطلاح به این دو مؤلفه از تانسور کرنش، کرنش اصلی[8] و کرنش فرعی[9] اطلاق می‌شود. منحنی‌های حد شکل‌دهی، نواحی ایمن و نواحی منجر به خطر پارگی را از یکدیگر جدا می‌کند.

از آغاز دهه 1960 تاکنون تحقیقات وسیعی در خصوص تأثیر پارامترهای ذاتی ورق بر روی شکل‌پذیری به عمل آمده است. لکن بررسی نحوه تأثیر مشخصه‌های محیطی، خصوصاً سرعت شکل‌دهی، بر شکل‌پذیری به علت وابستگی پارامترهای ذاتی به محیطی، مشکل بوده و کمتر مورد توجه محققین این رشته قرار گرفته است. البته همین تحقیقات محدود حاکی از این حقیقت است که شکل‌پذیری ورق‌های فلزی در شرایط خاص (مانند دمای بالا و سرعت بالای تغییر شکل) به شدت متأثر از سرعت شکل‌دهی می‌باشد.

جانسون و کوک[10] مدل تجربی خود را برای توصیف رفتار فلزات در نرخ کرنش‌های بالا با به همراه داشتن اثرات دمایی ارائه کردند. در این مدل تنش طبق فرمول (1) به‌صورت ضرب توابعی از کرنش، نرخ کرنش و دما معرفی می‌شود؛ یعنی به‌ترتیب عبارت کارسختی، سخت‌گردانی نرخ کرنش و نرم‌گردانی دمایی:

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n][1 + C\ln(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})][1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0}\right)^m] \quad (1)$$

که در آن A مقاومت تسلیم در دمای اتاق، B و n نماینده اثرات سخت‌گردانی کرنشی، C نماینده حساسیت به نرخ کرنش، $\dot{\varepsilon}_0$ نرخ کرنش مرجع (معمولا برابر یک است)، m نشان دهنده اثر نرم‌گردانی دمایی، T_0 دمای اتاق و T_m دمای ذوب ماده است.

این مدل دارای پنج ثابت A، B، n، C و m است که از طریق آزمایش بدست می‌آیند. معمول‌ترین روش مورد استفاده در استخراج ثابت‌های مادی استفاده از تست هاپکینسون[11] است که در شکل‌های مختلف فشاری، کششی و پیچشی انجام می‌گیرد[4]. مدل تجربی جانسون کوک به‌طور گسترده در بسیاری از کدهای کامپیوتری برای پیش‌بینی رفتار تنش مواد در نرخ کرنش‌ها و دماهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. مزیت مهم این مدل سادگی نسبی آن در تعیین ثابت‌ها با حداقل آزمایش‌ها است. در این پژوهش جهت مدل‌سازی، از مدل و پارامترهای مدل تجربی جانسون کوک استفاده شد. در این زمینه فعالیت‌هایی انجام شده است و محققین به نتایج مطلوبی رسیده‌اند. در ادامه نمونه فعالیت از محققین آورده شده است.

سرادار و همکارانش [5] اثر نرخ کرنش‌های مختلف روی نمودار حد شکل‌دهی برای فولاد St13 را بررسی کردند. آن‌ها از معیار شکست براساس مدل مارسینیاک و کوزینسکی استفاده کردند و حل معادلات به وسیله روش نیوتن رافسون انجام شده است. آن‌ها نمودار حدشکل‌دهی غیروابسته به نرخ کرنش، وابسته به نرخ کرنش و نمودار حدشکل‌دهی دینامیکی را در هر نرخ کرنش بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش نرخ کرنش، حد شکل‌پذیری افزایش می‌یابد.

گردوئی و همکارانش [6] با بهره‌گیری از معادلات حرکت (به جای معادلات تعادل) در تحلیل فرآیند کشش دو محوری ورق، تغییر شکل تدریجی یک نقص اولیه را شبیه‌سازی کردند. آن‌ها برای یک ماده با رفتار کرنش‌سخت و حساس به نرخ کرنش، اثر بارگذاری بر روی شکل و موقعیت منحنی‌های حدشکل‌دهی را در محدوده وسیعی از نرخ کرنش به صورت تئوری بررسی کردند. همچنین در بارگذاری کرنش صفحه‌ای، نحوه تأثیر متقابل نرخ کرنش و پارامترهای ذاتی ورق (چگالی، توان کرنش سختی و حساسیت به نرخ کرنش) بر کرنش حدی را نیز مورد مطالعه قرار دادند. تحقیقات آن‌ها نشان داد که بعد از رسیدن به یک نرخ کرنش مشخص، با افزایش سرعت شکل‌دهی، تحت اثر پدیده اینرسی، گلویی شدن موضعی به تأخیر افتاده و شکل‌پذیری بهبود قابل توجهی پیدا می‌کند.

داریانی و همکارانش [7] با انجام سه سری آزمایش مختلف، اثر سرعت شکل‌دهی را روی شکل‌پذیری ورق‌های فولادی AISI 1045 بررسی کردند. آن‌ها علاوه بر تعیین متداول نمودار حد شکل‌دهی در شرایط شبه استاتیک، این نمودار را در شرایط فشار کم و انفجار آزاد نیز مشخص کردند. آن‌ها از مدل ساختاری جانسون-کوک برای ورق های فلزی و مدل JWL برای مواد منفجره استفاده کردند. نتایج تجربی نشان داد که حد شکل‌پذیری در نرخ کرنش‌های بالا به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد.

مسلمی و همکارانش [8]، نمودار حدشکل‌دهی فولاد St14 را به طور تجربی و عددی محاسبه کرده و تأثیر سرعت شکل‌دهی بر آن را بررسی کردند. آن‌ها از سه سرعت 10، 100 و 200 میلی‌متر بر دقیقه استفاده کردند. آن‌ها از آزمون کشش برون صفحه‌ی هکر استفاده کرده، و برای پیش‌بینی پارگی معیار دوشاخه‌ای شدن را به کار گرفتند. افزون بر این، آزمایشات تجربی به منظور مقایسه‌ی نتایج انجام شدند. نتایج حاصل از مدل‌سازی نمودار حد شکل‌دهی با استفاده از معیار دو شاخه‌ای شدن نشان دادند که سطح کل نمودار با افزایش سرعت تغییر شکل، افزایش می‌یابد.

در این تحقیق، به بررسی اثر سرعت پرس بر روی نمودارهای حد شکل‌پذیری برای آلومینیوم آلیاژی 6061 با ضخامت سه میلی‌متر و در دمای اتاق پرداخته شد. نمودارهای حد شکل‌پذیری به‌ترتیب برای سه و پنج سرعت مختلف به‌صورت تجربی و عددی بررسی شد. شایان ذکر است که نمودارهای حد شکل‌دهی برای ورق‌های مذکور، با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود

[1] Tearing
[2] Wrinkling
[3] Spring-back
[4] Plastic instability
[5] Draw bead
[6] Forming limit diagram:FLD
[7] Localized necking
[8] Major strain
[9] Minor strain
[10] Johnson cook
[11] Hopkinson bar

آباکوس و معیار بیشینه شتاب کرنش بزرگ، در سرعت‌های گوناگون ارائه شد. جهت صحه‌گذاری داده‌های حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، نتایج تجربی با دو معیار محل وقوع پارگی و نمودار حد شکل‌دهی با نتایج تجربی مقایسه شد.

2- کار تجربی

در این پژوهش آزمایشگاهی، نمودار حد شکل‌دهی ورق‌های Al 6061-T6 در ضخامت 3 میلی‌متر و با سرعت‌های مختلف 20 تا 200 میلی‌متر بر دقیقه، از طریق آزمایشات تجربی ارائه می‌شود.

تعداد نمونه‌های در نظر گرفته شده برای آزمون نمودار حد شکل‌دهی، 6 عدد با عرض‌های مختلف و طول ثابت 110 میلی‌متر [9] و هر کدام با 2 بار تکرار می‌باشد. ابعاد نمونه‌های موردنیاز برای انجام تست کشش خارج از صفحه‌ی ناکازیما در "شکل 1" ارائه شده است. به‌منظور آماده‌سازی و برش نمونه‌ها از دستگاه برش وایرکات استفاده گردید. از آن‌جایی که در طی انجام فرآیند کشش برای نمونه‌های با عرض کمتر از 150 میلی‌متر، تمرکز تنش در ناحیه دهانه‌ی حفره ماتریس بسیار بالا است، بنابراین به منظور جلوگیری از پارگی دراین ناحیه بریدگی‌های کناری در هندسه این نمونه‌ها اعمال شده است[10]. شعاع این بریدگی‌های کناری در تمامی نمونه‌ها ثابت و برابر 25 میلی‌متر می‌باشد.

با استفاده از دستگاه حک الکتروشیمیایی، شبکه‌بندی مش‌های دایروی به قطر 2.54 mm بر روی ورق با تبعیت از استاندارد ISO12004 مطابق "شکل 2" صورت گرفت.

آزمون تجربی با قالب سنبه سرکروی با استفاده از دستگاه پرس

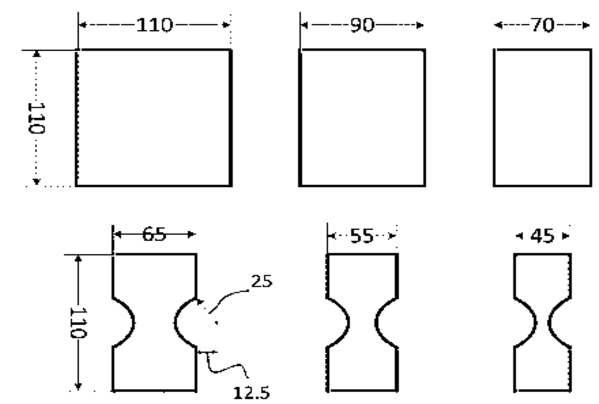

Fig. 1 Initial geometry of the sheet samples of FLD test

شکل 1 ابعاد ورق‌های نمونه برای تست حد شکل‌پذیری

Fig. 2 sample of graded sheets

شکل 2 نمونه ورق‌های شبکه‌بندی شده

هیدرولیک "شکل 3" انجام شده است. سرعت ماکزیمم رمپ این دستگاه برابر 200 میلی‌متر بر دقیقه می‌باشد که در انجام تست‌های فوق سرعت دستگاه سه عدد 20، 100 و 200 میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شد. در این دستگاه امکان بارگذاری کششی و فشاری با کنترل سرعت و نیرو مقدور می‌باشد. همچنین کنترل لحظه به لحظه فرایند بصورت دستی و دیجیتالی از طریق سیستم نمایش دستگاه فراهم می‌باشد. متمرکز شدن تغییر شکل به نوار نازک گلویی به افت ناگهانی نیرو منجر می‌شود که تحت این شرایط دستگاه بصورت خودکار فرایند بارگذاری را متوقف خواهد کرد.

به‌منظور دستیابی به خواص مکانیکی عمومی ورق، تست کشش تک محوری مطابق استاندارد ASTM-B557M با نرخ کرنش پایین و استفاده از دستگاه تست کشش گالدابینی اجرا شد. همچنین با توجه به عدم امکان اجرای تست کشش تک محوری در نرخ کرنش‌های بسیار زیاد در داخل کشور، داده‌های مدل جانسون کوک از سایر مراجع استخراج شد [11]. نمودار تنش-کرنش مهندسی آلومینیوم آلیاژی 6061 در "شکل 4" ارائه شده است. خواص مکانیکی حاصل از تست کشش و خواص فیزیکی ورق‌های مذکور نیز در "جدول 1" ذکر شده است.

در "شکل 5"، نمونه‌ی پس از آزمون FLD ارائه شده است و ناحیه گلویی در نمونه مشاهده می‌شود. پس از انجام آزمون FLD، جهت ترسیم

Fig. 3 The employed press for testing

شکل 3 دستگاه پرس استفاده شده جهت انجام تست‌ها

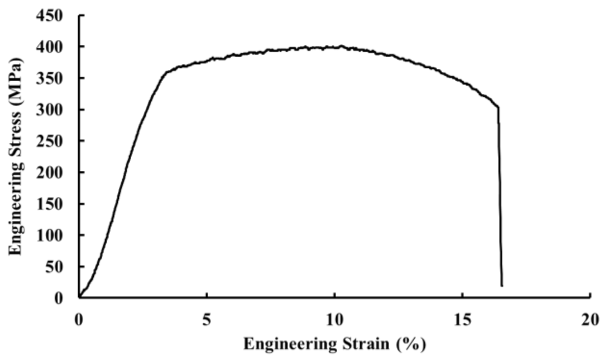

Fig. 4 The enginnering stress-strsin curve for Al6061

شکل 4 نمودار تنش کرنش مهندسی برای آلومینیوم 6061

نمودار بایستی کرنش‌های ایجادشده در نمونه‌ها را اندازه‌گیری کرد. لذا استفاده از یک ابزار با دقت بالا جهت اندازه‌گیری کرنش‌های کوچک و بزرگ که بتواند با حداقل خطا بالاترین دقت این مقادیر را اندازه‌گیری کند، بسیار ضروری است. "شکل 6" اندازه‌گیری کرنش‌ها با میکروسکوپ ورنیه دار را نشان می‌دهد. دقت این میکروسکوپ برابر 1 میکرومتر می‌باشد. در این مرحله دو خطای عمده خودنمایی می‌کند که عبارت‌اند از: خطای ناشی از عدم تختی ناحیه اندازه‌گیری و تعامد راستای دید بر ناحیه که اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به این‌که شعاع سر سنبه تعیین‌کننده شعاع نمونه‌ها بوده و نسبت به قطر دوایر شبکه‌بندی شده بسیار بزرگ است لذا این خطا قابل اغماض است. ولی خطایی که بایستی در حین اندازه‌گیری از آن اجتناب کرد عدم تعامد راستای دید بر ناحیه اندازه‌گیری است که در این‌جا با تغییر حالت قرار دادن نمونه‌ها و چندین مرحله تکرار سعی در حداقل کردن این خطا شده است.

با محاسبه مقدار تغییرات قطر بزرگ و کوچک بیضی‌های ایجاد شده، کرنش‌های اصلی و فرعی طبق فرمول‌های (2) و (3) و درنهایت نمودار کلی حد شکل‌پذیری حاصل شود.

$$e_{\max} = \frac{a-d}{d} \times 100 \tag{2}$$

$$e_{\min} = \frac{b-d}{d} \times 100 \tag{3}$$

3- مدل‌سازی

در این پژوهش، شبیه‌سازی فرآیند کشش خارج از صفحه به‌منظور تعیین نمودار حد شکل‌دهی ورق آلومینیم مورد بررسی قرارگرفته و به منظور انجام شبیه‌سازی از نرم‌افزار آباکوس 6.9 استفاده شده است.

جهت مدل‌سازی فرآیند، اجزای قالب شامل سنبه، ماتریس و ورق‌گیر به‌صورت صلب فرض کرده و از تغییر شکل احتمالی آن‌ها حین فرآیند نادیده گرفته‌شده است. البته از آنجایی‌که در عمل نیز چون اجزای قالب دارای سختی بالا هستند، لذا این فرض تأثیر چندانی در نتایج شبیه‌سازی ندارد. اجزای مدل شده‌ی قالب از لحاظ هندسی کاملاً مطابق قالب استفاده‌شده جهت انجام آزمایش‌های نمودار حد شکل‌دهی می‌باشد. برای هر قطعه صلب

Fig. 5 sheet sample after necking

شکل 5 نمونه ورق پس از گلویی

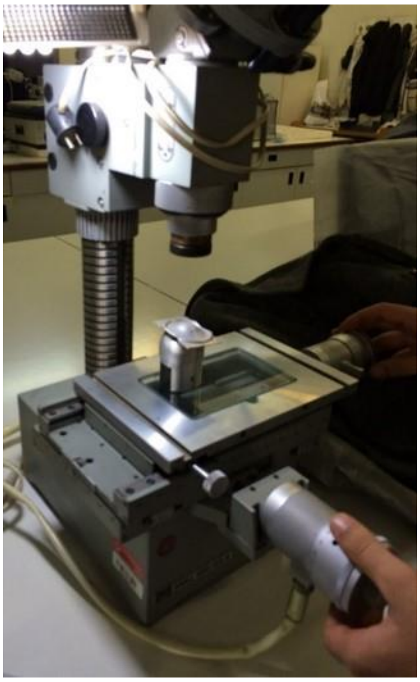

Fig. 6 Traveling microscopy

شکل 6 میکروسکوپ ورنیه دار

یک نقطه مرجع تعریف می‌شود که تمام پارامترها و شرایط مرزی به آن نسبت داده می‌شود. قطعه شکل‌پذیر، ورق می‌باشد که به‌صورت پوسته در نظر گرفته‌شده است. در شبیه‌سازی به دلیلی تقارن هندسی و به جهت این‌که تحلیل‌ها در زمان کمتری انجام شود، یک‌چهارم مجموعه قالب و نمونه مدل شده است.

خواص مکانیکی ورق ازجمله چگالی، خواص الاستیک مانند مدول الاستیسیته و ضریب پواسون، خواص پلاستیک مانند ضرایب مدل جانسون کوک طبق "جدول 1" و "جدول 2" وارد شد.

پس از این‌که خواص ورق به آن نسبت داده شد اجزای مختلف قالب به همراه ورق در موقعیت‌های مکانی صحیح خودشان قرارگرفته و مونتاژ شده‌اند. نوع تماس بین اجزای مدل شده، به صورت تماس سطح به سطح[1] در آباکوس تعریف شده که از نوع تماسی ساده است [5]. تماس بین سنبه- ورق، ماتریس-ورق و ورق‌گیر-ورق از مدل اصطکاکی کولمب بوده و ضریب اصطکاک بین این سطح‌ها 0.16 در نظر گرفته شده است.

تمام فرآیند شبیه‌سازی در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله اول ورق‌گیر که در ابتدا بر روی سطح ورق مماس است به اندازه 2.5 میلی‌متر به سمت پایین پیشروی می‌کند و ورق را به‌صورت کامل بر روی ماتریس نگه می‌دارد به‌طوری‌که در طی فرآیند کاملاً ثابت مانده و از سرخوردن آن به

جدول 1 خواص مکانیکی آلومینیوم 6061

Table 1 mechanical property of Al 6061

خواص مکانیکی	مقدار
چگالی	2.75 (gr/cm^3)
مدول الاستیسیته	69 (GPa)
ضریب پواسون	0.33
تنش تسلیم	275 (MPa)
استحکام نهایی	400 (MPa)

[1] Surface to surface

جدول 2 ثوابت مدل جانسون- کوک آلومینیوم 6061 [12]

Table 2 Johnson – cook constants of Al 6061[12]

ثوابت مدل جانسون- کوک	مقدار
A	275 (MPa)
B	393.16 (MPa)
C	0.011
M	1.34
N	0.441
دمای ذوب	650 (°C)

درون ماتریس جلوگیری می‌شود. درمرحله دوم سنبه با سرعت مشخص که همان سرعت پرس در شرایط برابر با آزمون تجربی است، ورق را که در مرحله قبل روی قالب قرار گرفته است را فرم می‌دهد. "شکل 6" مدل را در مرحله مونتاژ قطعات نشان می‌دهد.

در هر دو مرحله از اعمال نیرو به سنبه خودداری شده است و فرآیند کاملاً مطابق روال عملی با کنترل جابجایی و با سرعت ثابت تعریف شده است. در تمامی مراحل، شرط مرزی تقارن در دو قسمت لبه ورق که دارای تقارن هندسی بوده، اعمال‌شد.

در حل اجزاء محدود انتخاب نوع المان‌ها و تعداد آن‌ها مهم است. نوع المان بکار رفته بایستی متناسب با شرایط و فیزیک مسئله باشد. اندازه و تعداد المان‌ها در یک مدل اجزای محدود، به‌وضوح به‌طور معکوس به هم وابسته‌اند. هر چه تعداد المان‌ها بیشتر باشد، اندازه المان کوچک‌تر می‌شود و دقت مدل بیشتر می‌شود و بالعکس. با افزایش تعداد المان‌ها از یک حد مشخص، دیگر تغییر محسوسی در دقت حل مسئله نخواهیم داشت. درنتیجه یکی از مهم‌ترین پارامترهای کنترلی در شبیه‌سازی، ابعاد المان می‌باشد. با توجه به مدل‌سازی ورق، جهت شبکه‌بندی از المان پوسته، S4R استفاده شده است و برای قطعات صلب المان R3D4 استفاده شده است. به‌منظور این‌که بهترین دقت در شبیه‌سازی به‌دست بیاید المان‌های ورق به‌اندازه کافی کوچک در نظر گرفته شده‌اند بدین منظور نمودار حساسیت مش برای تمام مدل‌ها تهیه شد تا بهترین سایز مش انتخاب شود.

جهت تعیین کرنش‌های حدی از معیار حداکثر مقدار کرنش پلاستیک بزرگ استفاده شد. لذا ابتدا با استخراج تاریخچه کرنش برای تمامی المان‌ها، المانی که دارای حداکثر مقدار کرنش بزرگ می‌باشد را به‌عنوان مکان گلویی شدن در نظر گرفته شد. پس از انتخاب المان مناسب که دارای حداکثر

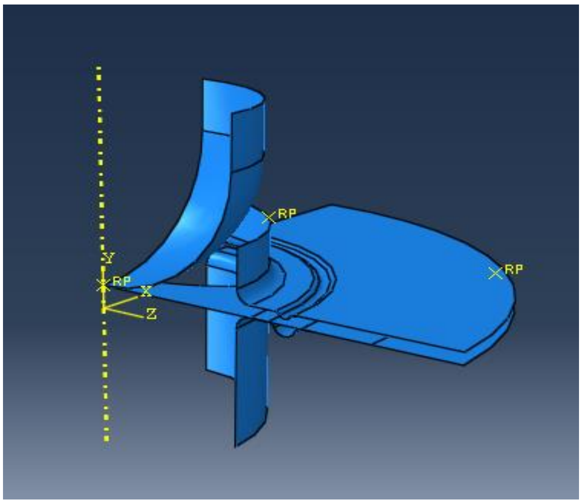

Fig. 7 Assemble model in abaqus software

شکل 7 مدل مونتاژ شده در نرم افزار آباکوس

کرنش پلاستیک در مدل تحلیل شده و گرفتن تاریخچه کرنش آن با توجه به زمان حل مسئله، انتخاب یک تابع که به‌خوبی بتواند داده‌های خروجی را درون‌یابی کند، از اهمیت بالایی برخوردار است. بدین منظور با استفاده از برازش منحنی با استفاده از معادلات توانی و نرم‌افزار متلب این کار انجام شد. درجات معادلات بین 5 تا 8 را انتخاب نموده و با سعی و خطا بهترین درجه تابع جهت برازش منحنی انتخاب شد [14,13].

پس از برازش منحنی و به‌دست آوردن منحنی‌های نرخ کرنش و شتاب کرنش مطابق با "شکل 7"، لحظه‌ی گلویی شدن زمانی که شتاب کرنش به حداکثر مقدار خود برسد، در نظر گرفته شده و کرنش‌های بزرگ و کوچک در آن لحظه به‌عنوان کرنش‌های حدی انتخاب می‌شوند. با تکرار همین روش برای مسیرهای کرنش مختلف که با تغییر در عرض نمونه‌ها انجام شد، می‌توان کرنش‌های حدی را برای تمامی محدوده نمودار حد شکل‌دهی تعیین کرد [14,13].

4- نتایج و بحث

4-1- صحت‌سنجی و نمودارهای حاصل از حل عددی

قبل از این‌که نتایج حاصل از مدل‌سازی اجزای محدود مورد بررسی قرار گیرند ابتدا باید صحت شبیه‌سازی تأیید شود. بدین منظور و برای تأیید صحت شبیه‌سازی می‌بایستی محل پارگی و منحنی نمودار حد شکل‌پذیری حاصل از کار تجربی و شبیه‌سازی برای هر نمونه با یکدیگر مقایسه شوند و در صورت تطابق مناسب (میزان خطا و اختلاف قابل قبول)، صحت شبیه‌سازی تأیید شده است که پس از آن می‌توان داده‌های حاصل از شبیه‌سازی را مورد بحث و بررسی قرار داد. به همین منظور در ابتدا برای بررسی محل پارگی نمونه‌ها در آزمون تجربی و شبیه‌سازی "شکل 9" ارائه شد. در "شکل 9" صحت‌سنجی محل پارگی را در نمونه تجربی و نمونه مدل‌سازی شده در سرعت شکل‌دهی 20 میلی‌متر بر دقیقه را نشان می‌دهد.

به‌منظور صحت‌سنجی داده‌های حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار حل عددی آباکوس، نمودار شکل‌پذیری برای ورق آلومینیوم 6061 با سرعت 20میلی‌متر بر دقیقه مطابق با "شکل 10" برای هر دو حالت تجربی و عددی ترسیم گردید. همان‌طور که در "شکل 10"مشاهده می‌شود، نمودارهای حاصل از آزمون تجربی و عددی در سرعت 20 میلی‌متر بر دقیقه با دقت مناسب به یکدیگر نزدیک می‌باشند و می‌توان به داده‌های عددی اطمینان کرد.. همچنین به منظور بررسی دقیق‌تر مقدار متوسط خطا و مقدار خطا در حالت بارگذاری کرنش صفحه‌ای در نمودارهای "شکل 10" در جدول 3 نشان داده شده است. میزان متوسط خطا و خطا در حالت کرنش صفحه‌ای به ترتیب 8.3 و 8.9% می‌باشد. نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی نمودارهای حد شکل‌پذیری بیانگر خطای قابل قبول می‌باشد و با تأیید داده‌های عددی می‌توان با رسم پنج نمودار حد شکل‌دهی در سرعت‌های مختلف اثر سرعت شکل‌پذیری را روی منحنی حد شکل‌دهی برای ورق آلومینیوم 6061 با ضخامت 3 میلی‌متر و به‌صورت تجربی بررسی کرد.

یکی از دلایل اصلی خطاهای موجود در داده‌های حاصل از شبیه‌سازی

جدول 3 مقایسه نمودارهای تجربی و شبیه‌سازی

Table 3 Comparison between experimental and simulated diagrams

سرعت تست‌گیری (میلی‌متر بر دقیقه)	اختلاف نمودار حاصل از آزمون تجربی و شبیه‌سازی در حالت کرنش صفحه‌ای (٪)	متوسط اختلاف نمودار حاصل تست تجربی و شبیه‌سازی (٪)
20	8.9	8.3

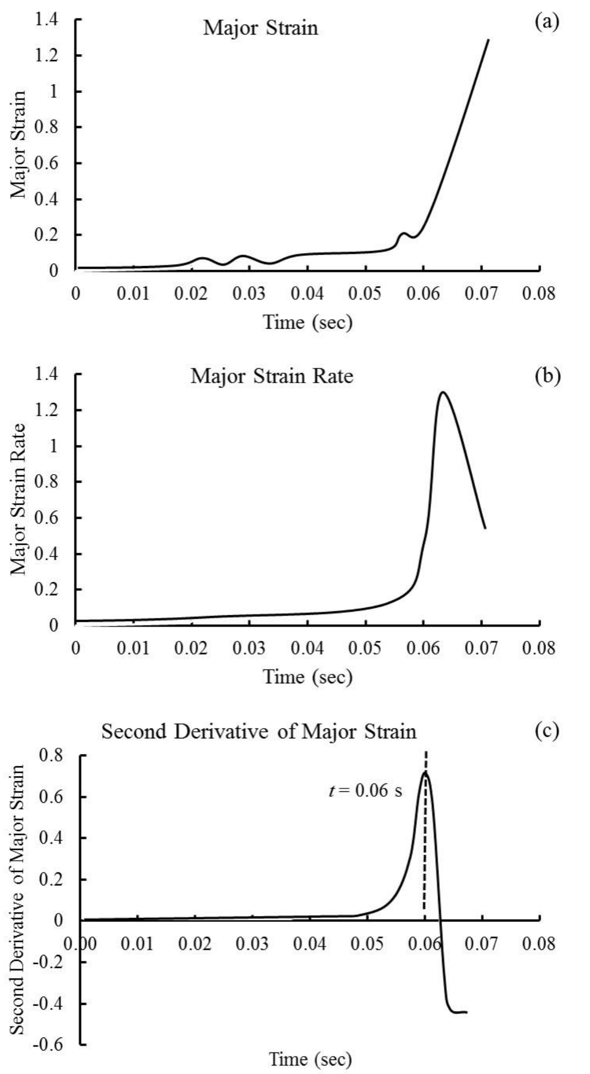

Fig. 8 Determine the rupture time in the sample: (a) major strain history data, (b) first derivative of the major strain history data, (c) second derivative of the major strain history data

شکل 8 تعیین زمان وقوع پارگی در نمونه : (a) تاریخچه کرنش بزرگ، (b) مشتق اول از تاریخچه کرنش بزرگ و (c) مشتق دوم از تاریخچه کرنش بزرگ

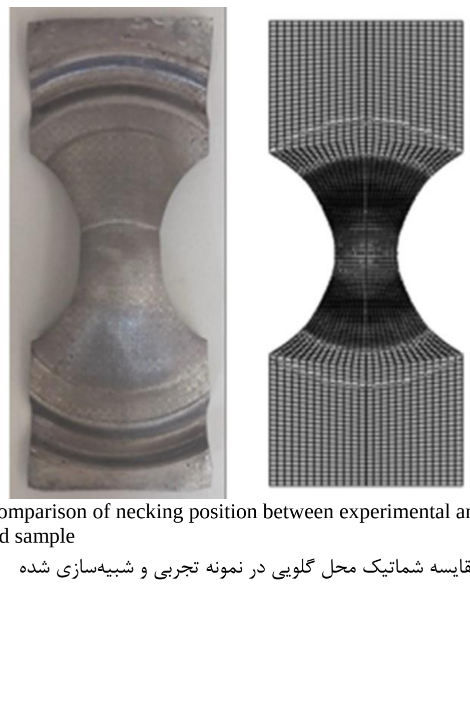

Fig. 9 Comparison of necking position between experimental and simulated sample

شکل 9 مقایسه شماتیک محل گلویی در نمونه تجربی و شبیه‌سازی شده

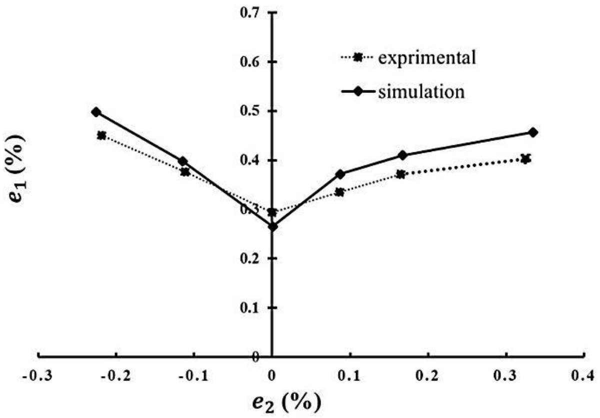

Fig. 10 The Comparison between experimental and simulated FLDs of 3 mm thickness Al 6061 sheet at 20 mm/min rate

شکل 10 مقایسه نمودارهای تجربی و شبیه‌سازی شده حد شکل‌دهی، برای ورق آلومینیوم 6061 با ضخامت 3 میلی‌متر در سرعت 20 میلی‌متر بر دقیقه

نمودارهای حدشکل‌پذیری، استفاده از روش جانسون کوک می‌باشد زیرا همان‌گونه که قبلا هم اشاره شد این مدل برای نرخ کرنش‌های بالاتر مناسب‌تر بوده و دارای خطای کمتری می‌باشد. از دلایل دیگر وجود خطا در داده‌های شبیه‌سازی، استفاده از ضرایب جانسون کوک محاسبه شده در مراجع می‌باشد. به‌دلیل عدم امکان انجام آزمون هاپکینگستون ضرایب معادله جانسون کوک از مراجع برداشته شد. همچنین نمودار حاصل از مدل‌سازی، نقطه صفر نمودار (حالت کرنش صفحه‌ای) را پایین‌تر پیش‌بینی کرده است و این مسئله می‌تواند حاکی از این نکته باشد که در مدل‌سازی، اثر پارامتری در نظر گرفته نشده است و با توجه به شرایط مدل‌سازی و استفاده از مدل جانسون-کوک، این پارامتر می‌تواند به ساختار داخلی ورق و نحوه توزیع آخال‌ها و ناهمگنی‌های داخلی ورق و اثر اینرسی جرم متناسب با سرعت شکل‌دهی برگردد.

پس از صحت‌سنجی داده‌های حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از داده‌های تجربی در سرعت 20 میلی‌متر بر دقیقه، نمودارهای حد شکل‌پذیری به‌دست آمده از حل عددی در سرعت‌های مختلف ترسیم گردید. در "شکل 11"، نمودار حد شکل‌پذیری در سرعت‌های 20، 100، 200، 500 و 800 میلی‌متر بر دقیقه ارائه شده است. همچنین در جدول 4 مقدار پایین‌ترین نقطه نمودار (مقدار کرنش اصلی در حالت بارگذاری کرنش صفحه‌ای) برای بررسی دقیق‌تر اثر سرعت شکل‌پذیری بر نمودارهای شکل‌پذیری در سرعت‌های مختلف با استفاده از حل عددی ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت شکل‌پذیری سطح منحنی و میزان کرنش اصلی در حالت کرنش صفحه‌ای بالاتر می‌رود که بیانگر بهبود شکل‌پذیری می‌باشد. البته این میزان بهبود چندان محسوس نمی‌باشد. به‌عنوان مثال با افزایش سرعت پرس از 20 به 800 میلی‌متر بر دقیقه (40 برابر) مقدار شکل‌پذیری 31% افزایش یافته است. البته این مقدار افزایش با روابط تئوری هم‌خوانی دارد و با توجه به کوچک بودن پارامتر ضریب حساسیت به نرخ کرنش ورق استفاده شده (حدود 0.011) روند تغییرات در نتایج حاصل از شبیه‌سازی کاملا طبیعی و درست به‌نظر می‌رسد، زیرا افزایش سرعت پرس در نرخ کرنش پایین نمی‌تواند باعث تغییر در خواص ماده شود و با افزایش سرعت پرس در سرعت پایین نمی‌توان انتظار افزایش قابل ملاحظه در شکل‌دهی را داشت.

4-2- آزمون تجربی

در این تحقیق نمودار حد شکل‌پذیری در سه سرعت مختلف 20، 100 و 200

ترک، تقریباً به دایره‌هایی با قطر بزرگ تبدیل می‌شوند و با کاهش عرض نمونه‌ها دایره‌های مشبک بر روی نمونه‌ها در اطراف پارگی به بیضی تغییر شکل می‌دهند و این عمل به گونه‌ای است که هر چه عرض نمونه کمتر باشد، نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک بیضی تغییر شکل یافته، بزرگ‌تر می‌شود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت شکل‌دهی از 20 به 100 (ده برابر شدن سرعت پرس) و از 20 به 200 میلی‌متر بر دقیقه (ده برابر شدن سرعت پرس) میزان نمودار حد شکل‌دهی به ترتیب کمتر از 10% و 30% افزایش پیدا کرده است. مقدار متوسط بهبود شکل‌دهی در تغییرات سرعت مشخص در "جدول 5" آورده شده است. با توجه به توضیحات داده شده این افزایش می‌توان عوامل مختلفی مثل اثر اینرسی جرم، شرایط تماسی و فشار اعمالی، روانکاری و اثر اصطکاک داشته باشد که در ادامه میزان تاثیر و نحوه اثرگذاری هرکدام توضیح داده می‌شود.

در فرآیندهای شکل‌دهی، برخورد سریع دو فلز با یکدیگر موجب فشار بسیار زیاد در ناحیه تماس خواهد شد. جزئیات کامل مربوط به میزان و نحوه توزیع این فشار خارج از بحث می‌باشد که در کتاب جانسون به تفصیل مورد توجه قرار گرفته است، یکی از نتایج مفید و قابل ارائه آن است که وقتی دو جسم الاستیک نیمه بی‌نهایت[1] با سرعت نسبی v_i با هم برخورد می‌کنند، فشار بینابین آن‌ها طبق فرمول (4) برابر است با:

$$P = \frac{\rho_1 \rho_2 C_1 C_2}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2} v_i \qquad (4)$$

در این رابطه، ρ چگالی و C سرعت موج طولی در ماده می‌باشد. این تحلیل ساده نشان می‌دهد که فشار ایجاد شده به سادگی می‌تواند منجر به تسلیم و تغییر شکل پلاستیک فلز در ناحیه تماس گردد. براساس توضیحات داده شده می‌توان اثرگذار بودن شرایط تماسی را روی بهبود شکل‌دهی ورق توجیه کرد.

پارامتر دیگری که در سرعت بالا می‌تواند بر شکل‌پذیری ورق‌های فلزی اثرگذار باشد، اثر اینرسی جرم می‌باشد به‌طوری که نیروی اینرسی موجب نفوذ تغییر شکل در قطعه و پایداری بیشتر تغییر شکل در مقابل رشد گلویی می‌شود.

$$F_{in} = \int_0^l \rho A \left(\frac{\Delta v}{\Delta t}\right) dx \qquad (5)$$

طبق فرمول (5)، در لحظه ایجاد شدن گلویی موضعی با متمرکز شدن تغییر شکل در یک نوار باریک، پروفیل سرعت سریعاً تغییر می‌کند. شتاب ایجاد شده از تغییر پروفیل سرعت در واحد زمان، با نیروی مقاوم اینرسی مواجه می‌شود که در نتیجه تنش و کرنش حاصل از اینرسی، در خارج از نوار گلویی (در ناحیه یکنواخت) ماکزیمم خواهد شد که طبق آن نیروی اینرسی موجب نفوذ تغییر شکل در قطعه و پایداری بیشتر تغییر شکل در مقابل رشد گلویی می‌شود. البته همان‌گونه که در قسمت بالا نیز اشاره شد، اثر اینرسی جرم در سرعت‌های بالا (نرخ کرنش بالای 100) بر روی شکل‌پذیری قابل مشاهده می‌باشد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که با افزایش

جدول 5 مقدار متوسط بهبود شکل‌دهی در تغییرات سرعت مشخص

Table 5 The Average amount of forming improvement in specific speed changes

تغییر سرعت تست‌گیری (میلی‌متر بر دقیقه)	میزان بهبود در نقطه‌ی کرنش صفحه‌ای (٪)	متوسط میزان بهبود نمودارها (٪)
rate 20 to 100 mm/min	8.95	8.41
rate 20 to 200 mm/min	29.07	27.87

[1] Semi-infinite

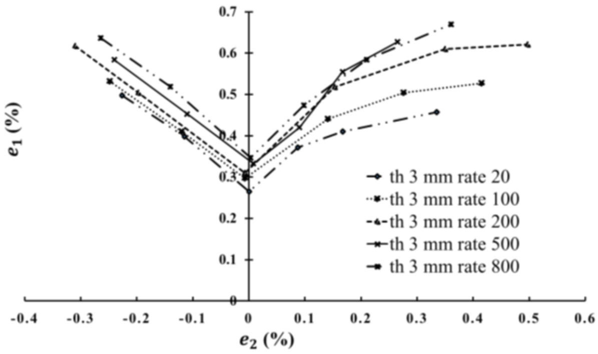

Fig. 11 The Comparison between simulated FLDs of 3 mm thickness Al 6061 sheet at 20, 100, 200, 500, and 800 mm/min rates

شکل 11 مقایسه نمودارهای شبیه‌سازی شده حد شکل‌دهی برای ورق آلومینیوم 6061 با ضخامت 3 میلی‌متر، در سرعت‌های 20، 100،200، 500 و 800 میلی‌متر بر دقیقه

جدول 4 مقایسه مقدار کرنش اصلی در حالت کرنش صفحه‌ای برای داده‌های شبیه‌سازی شده در سرعت‌های 20، 100،200، 500 و 800 میلی‌متر بر دقیقه

Table 4 The Comparison between simulated FLD0 of 3 mm thickness Al 6061 sheet at 20, 100, 200, 500, and 800 mm/min rates

سرعت تست‌گیری (میلی‌متر بر دقیقه)	مقدار کرنش اصلی در حالت کرنش صفحه‌ای (٪)
20	2.65
100	2.97
200	3.10
500	3.33
800	3.47

میلی‌متر بر دقیقه به‌صورت تجربی انجام شد. پس از انجام آزمایشات تجربی و اندازه‌گیری قطرهای اصلی بیضی‌های اطراف پارگی، کرنش‌های اصلی و فرعی در راستای ورق استخراج گردید. با استفاده از کرنش‌های اصلی در راستای سطح ورق، نمودار حد شکل‌دهی برای ورق‌ها رسم شد به‌طوری که محور عمودی بیانگر کرنش بزرگ و محور افقی بیانگر کرنش کوچک در راستای سطح ورق است. در "شکل 12" نتایج حاصل از آزمون تجربی در سرعت‌های مختلف ارائه شده است.

با توجه به نمودارهای ترسیم شده در "شکل 12"، نتایج به دست آمده در هر نمودار حاکی از این است که با کاهش عرض نمونه، نقاط به سمت چپ نمودار حرکت می‌کنند به طوری که برای نمونه مربعی شکل، کرنش‌ها در محدوده حالت کشش دو محوره هستند یعنی دایره‌های شبکه‌بندی اطراف

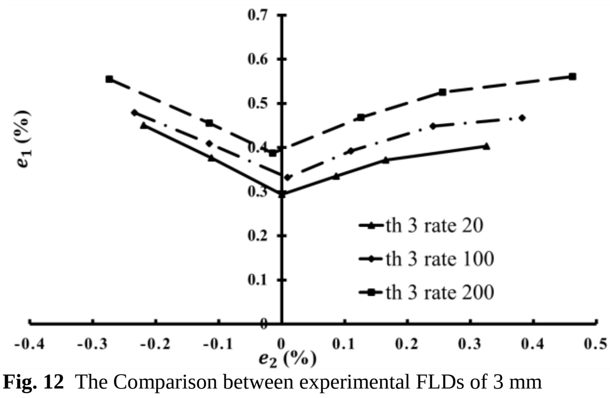

Fig. 12 The Comparison between experimental FLDs of 3 mm thickness Al 6061 sheet at 20, 100 and 200 mm/min rate

شکل 12 مقایسه نمودارهای تجربی حد شکل‌دهی برای ورق آلومینیوم 6061 با ضخامت 3 میلی‌متر، در سه سرعت 20، 100 و 200 میلی‌متر بر دقیقه

سرعت پرس، در میزان شکل‌پذیری افزایش قابل توجهی ایجاد نشد و با افزایش 50 برابر سرعت پرس تنها به میزان 31% شکل‌پذیری بهبود یافت. این نتیجه با توجه به کوچک بودن ضریب حساسیت به نرخ کرنش ماده و در نظر گرفتن شرایط یکسان تماسی بین ورق و قالب در سرعت‌های مختلف طبیعی به نظر می‌رسد. همچنین در این تحقیق به‌دلیل سرعت شکل‌دهی کم، اثر اینرسی جرم چندان نمی‌تواند دخیل باشد و نتایج حاصل از داده‌های تجربی و شبیه‌سازی نیز بیانگر این مطلب می‌باشد و عواملی همچون اثر اصطکاک، شرایط تماس و ایجاد فشار بالا بین قالب و نمونه باعث ایجاد تغییرات شکل‌دهی در سرعت‌های مختلف می‌باشد.

لازم به ذکر است با توجه به اثر مثبت روان‌کاری در بهبود شکل‌دهی ورق‌ها، و با توجه به این‌که در تست‌های مختلف روان‌کاری به‌صورت مجزا انجام می‌شود، می‌توان بخشی از بهبود در نمودارها را نیز ناشی از روان‌کاری بهتر دانست.

5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به بررسی اثر سرعت پرس بر روی نمودارهای حد شکل‌پذیری برای آلومینیوم آلیاژی 6061 در دمای اتاق پرداخته شد. نمودارهای حد شکل‌پذیری به‌ترتیب برای سه و پنج سرعت مختلف به‌صورت تجربی و عددی ترسیم گردید. شایان ذکر است که نمودارهای حد شکل‌دهی برای ورق‌های مذکور، با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود و معیار بیشینه شتاب کرنش بزرگ، در سرعت‌های گوناگون ارائه شد. جهت صحه‌گذاری داده‌های حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، نتایج تجربی با دو معیار محل وقوع پارگی و نمودار حد شکل‌دهی با نتایج تجربی مقایسه شد.

در بررسی محل پارگی ورق، محل گلویی در نمونه‌های تجربی با محل پارگی در آزمایش‌های مدل‌سازی شده با یکدیگر مقایسه شد و هر دو محل پارگی تقریباً یکسان پیش‌بینی کردند، همچنین نمودار حدشکل‌دهی حاصل از داده‌های تجربی با نمودار حاصل از داده‌های مدل‌سازی مقایسه شد. مقدار خطا بین نمودارهای تجربی و عددی در سرعت 20 میلی‌متر بر دقیقه 8.43% بوده که این میزان خطا در محدوده تقریبا استاندارد است و لذا داده‌ها برای تحلیل با اطمینان استفاده شد. البته از دلایل اصلی خطاهای موجود استفاده از مدل جانسون کوک می‌باشد که می‌توان گفت این مدل برای سرعت شکل‌دهی بالا می‌تواند نتایج دقیق‌تری ارائه دهد. از دلایل دیگر نیز می‌توان به استفاده از ضرایب جانسون کوک از مراجع به‌دلیل عدم امکان محاسبه برای نمونه‌های بررسی شده در این تحقیق باشد.

جهت بررسی تجربی اثر نرخ کرنش بر روی منحنی‌های حد شکل‌دهی، نمودار برای ورق 3 میلی‌متر در سه سرعت مختلف رسم شد. مشاهده شد که با افزایش نرخ کرنش نمودار حد شکل‌دهی بهبود می‌یابد به‌گونه‌ای که با افزایش 10 برابری سرعت پرس (از 20mm/min تا 200mm/min) نمودار حد شکل‌پذیری به میزان کمتر از 29% افزایش می‌یابد و این بیانگر این مطلب می‌باشد.

این بهبود می‌تواند به سبب ایجاد فشار بسیار زیاد در ناحیه تماس بین قالب و ورق، ساختار داخلی ورق، شرایط روانکاری مختلف تست‌ها و برگردد و اثر اینرسی جرم و نرخ کرنش بالا برای بهبود شکل‌پذیری در سرعت‌های پایین و دمای محیط بسیار ناچیز است.

نتایج بررسی عددی نشان داد که با افزایش 50 برابری سرعت شکل‌دهی میزان شکل‌پذیری به ترتیب 31% افزایش یافت. همچنین از مقایسه داده‌های تجربی و عددی مشخص می‌شود که میزان شکل‌پذیری در حالت عددی کمتر بوده و دلیل اصلی آن یکسان فرض شدن اثر اصطکاک و شرایط تماسی در سرعت‌های مختلف می‌باشد.

همچنین در این تحقیق مشاهده شد که استفاده از سرعت‌های پایین نمی‌تواند باعث افزایش چشم‌گیر شکل‌دهی شود و در سرعت پایین شرایط اصطکاکی بین ورق و قالب مهم‌ترین پارامتری است که باعث ایجاد تغییرات در شکل‌پذیری می‌شود.

6- مراجع

[1] A. S. Wifi, An incremental complete solution of the stretch-forming and deep-drawing of a circular blank using a hemispherical punch, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 18, No. 1, pp. 23-31, 1976.

[2] R. T. Hill, On discontinuous plastic states, with special reference to localized necking in thin sheets, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 1, No. 1, pp. 19-30, 1952.

[3] D. Rahmatabadi, R. Hashemi, Experimental investigation of formability of aluminum sheets produced by cold roll bonding process used Nakazima test, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 451-454, 2017.

[4] G. R. Johnson, W. H. Cook, A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures, *Proceeding of* The Netherlands, pp. 541-547.

[5] 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, 2015.

[6] M. Gerdooei, B. Dariani, Strain-rate-dependent forming limit diagrams for sheet metals, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 222, No. 12, pp. 1651-1659, 2008.

[7] B. Dariani, G. Liaghat, M. Gerdooei, Experimental investigation of sheet metal formability under various strain rates, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 223, No. 6, pp. 703-712, 2009.

[8] M. Moslemi, J. Hosseinpour, H. Azodi, A. Gorji, Numerical Evaluation of the Effect of Forming Velocity on Forming Limit Diagram (FLD) of St14 Steel using Bifurcation Theory and Comparison with Experimental Results, *Journal of Metallurgical and Materials Engineering,* Vol. 24, No. 1, pp. 20-38, 2013.

[9] M. Hajian, A. Assempour, Experimental and numerical determination of forming limit diagram for 1010 steel sheet: a crystal plasticity approach, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 76, No. 9-12, pp. 1757-1767, 2015.

[10] J. B. Han, V. Tvergaard, Effect of inertia on the necking behaviour of ring specimens under rapid radial expansion, *European Journal of Mechanics, A, Solids*, Vol. 14, No. 2, pp. 287-307, 1995.

[11] F. Zhalehfar, S. Hosseinipour, S. Nourouzi, A. Gorji, A different approach for considering the effect of non-proportional loading path on the forming limit diagram of AA5083, *Materials & Design*, Vol. 50, pp. 165-173, 2013.

[12] G. R. Johnson, W. H. Cook, Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 21, No. 1, pp. 31-48, 1985.

[13] H. Mamusi, A. Masoumi, R. Hashemi, R. Mahdavinejad, A novel approach to the determination of forming limit diagrams for tailor-welded blanks, *Journal of Materials Engineering and Performance,* Vol. 22, No. 11, pp. 3210-3221, 2013.

[14] E. Karajibani, R. Hashemi, M. Sedighi, Forming limit diagram of aluminum-copper two-layer sheets: Numerical simulations and experimental verifications, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* Vol. 90, No. 9-12, pp. 2713-2722, 2017.