



مطالعه‌ی اجزاء محدود پلاستیسیته‌ی بلور رفتار گلویی ورق آلیاژ آلومینیوم تحت اثر تنش ضخامتی

محمدرضا کارگر درونکلای، سید هادی قادری*

دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۹

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۱۳

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۶

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۶/۱۰

کلمات کلیدی:

پلاستیسیته بلور

روش المان محدود

آزمون کشش تک‌محوره

شکل‌پذیری ورق فلزی

تنش ضخامتی

خلاصه: این مقاله به بررسی اثر تنش ضخامتی ورق بر شکل‌پذیری ورق آلیاژ آلومینیوم با روش المان محدود پلاستیسیته بلور استفاده می‌پردازد. یک رفتار خود-کار سخت‌شوندگی برای سیستم‌های لغزش در نظر گرفته شد. برای پیش‌بینی ایجاد و رشد گلویی، در آزمون کشش تک‌محوره از معیار بیشینه کرنش برشی برای شروع و تکامل آسیب در مدل رفتاری استفاده شد. برای به کارگیری مدل در ابکوس، یک زیربرنامه بر اساس معادلات ساختاری گسسته‌سازی شده و تکنیک انتگرال‌گیری اوپلر پیشرو توسعه یافت. پس از صحت‌سنجی کد، پارامترهای آن بر اساس نتایج آزمون کشش تک‌محوره کالیبره شد. برای شبیه‌سازی آزمون کشش ورق به ضخامت ۱ mm، حجم نماینده‌ای به ابعاد $3 \times 1/5 \times 0/5 \text{ mm}^3$ با توسعه‌ی یک اسکریپت پایتون، به ۱۴۷۹۰ دانه تقسیم‌بندی و با المان‌های چهاروجهی با ابعاد $50 \mu\text{m}$ گسسته‌سازی شد. با استفاده از داده‌های تجربی موجود و در نظر گرفتن بافت مناسب برای ورق، جهت‌های بلوری با زوایای اوپلر تعیین شد. آزمون کشش تک‌محوره با در نظر گرفتن فشار در راستای ضخامت روی حجم نماینده انجام شد. نتایج نشان داد، در کشش تک‌محوره، با اعمال فشار، کرنش محوری لحظه‌ی گلویی رشد کرده، و در نتیجه، گلویی به تأخیر افتاده، شکل‌پذیری بهبود می‌یابد. همچنین، نیروی محوری مورد نیاز برای شکل‌دهی کاهش می‌یابد.

۱- مقدمه

تغییر شکل ارائه می‌دهد و سوم به دلیل بررسی جزئی‌تر رفتار فلزات در سطوح بلورها، نتایج آن دقت بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها خواهد داشت.

برای مطالعه‌ی شکل‌پذیری در فرآیندهای شکل‌دهی ورق فلزی، معمولاً یک تحلیل تنش صفحه‌ای به کار گرفته می‌شود. حال آنکه در فرآیندهایی چون هیدروفرمینگ، شکل‌دهی الکترومغناطیس و انفجاری، تنش در راستای ضخامت قابل چشم‌پوشی نیست. در زمینه تأثیر تنش در راستای ضخامت ورق بر شکل‌پذیری، تا کنون تحقیقات متعددی انجام شده است. عاصم‌پور و همکاران [۱] مطالعه‌ای در مورد اثر تنش عمودی فشاری بر منحنی حد شکل‌دهی^۱ به کمک معیار تسلیم هیل درجه دوم و بر مبنای مدل مارسنیاک-کوزینسکی (M-K) [۲] انجام دادند و دریافتند که در اثر افزایش تنش نرمال فشاری

فرآیند شکل‌دهی ورق‌های فلزی عبارت است از تغییر شکل مومسان ورق برای تولید یک قطعه مهندسی با هندسه‌ی معمولاً سه بعدی. فلزات و آلیاژهای آن، موادی با ساختار بلوری هستند. به‌طور کلی تغییرشکلی که در فلزات مشاهده می‌شود، ناشی از لغزش صفحات بلوری روی یکدیگر است. عامل اصلی این لغزش‌ها تنش برشی است که روی صفحه لغزش ایجاد می‌شود. با این دیدگاه، می‌توان از تئوری پلاستیسیته بلور برای مدل‌سازی موضعی تغییر شکل در شبیه‌سازی در مقیاس میکروسکوپی استفاده کرد. از جمله دلایل برتری روش پلاستیسیته بلور بر روش‌های کلاسیک را می‌توان در ۳ مورد برشمرد؛ اول اینکه این مدل، لغزش بلوری را عامل اصلی تغییر شکل مومسان در نظر گرفته است. دوم مدل بلوری مناسبی منطبق بر فیزیک

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: s.h.ghaderi@shahroodut.ac.ir

1 Forming limit diagram



تا حدود ۰/۵۶ تنش تسلیم ورق AA۶۰۱۱، منحنی حد شکل‌دهی به اندازه ۱۹٪ رشد می‌کند و برای ورق STKM-۱۱A با اعمال فشاری حدود ۰/۳۳ تنش تسلیم، ۲۷٪ بهبود شکل‌پذیری را گزارش کردند. آن‌ها برای بررسی نتایج، از داده‌های منتشر شده برای AA۶۰۱۱ و STKM-۱۱A استفاده کردند. ما و همکاران [۳] پژوهشی در مورد اثر تنش عمودی در راستای ضخامت بر منحنی حد شکل‌دهی انجام دادند. آن‌ها با تجزیه و تحلیل تنش در آزمون ناکازیمما [۴]، رابطه‌ای بین تنش‌های اصلی در ضخامت‌های مختلف ورق پیدا کردند. آن‌ها نشان دادند که یک رابطه‌ی خطی بین ضخامت ورق و افزایش منحنی حد شکل‌دهی در حالت بارگذاری کشش-کشش وجود دارد. عباسی [۵] پژوهشی در مورد ناپایداری پلاستیک تحت بارگذاری سه محوره روی یک ورق تخت فلزی به کمک تئوری گلوبی شدن پخشی سوئیفت انجام داد که در این تحقیق، اثر ناهمسانگردی پلاستیک در ورق با معیار تسلیم هیل درجه دو مورد بررسی قرار گرفت. او در نتایج خود متوجه شد که شکل‌پذیری کرنش صفحه‌ای به دو پارامتر توان کارسختی و نسبت تنش عمودی وابسته بوده و با افزایش قدر مطلق نسبت تنش عمودی و توان کارسختی، منحنی حد شکل‌دهی به صورت خطی افزایش می‌یابد. او منحنی حد شکل‌دهی را برای ورق AA۶۰۱۱ در فشارهای مختلف به دست آورد که نتایج نشان می‌دهد با افزایش تنش عمودی، سطح منحنی حد شکل‌دهی در تمام مسیرهای کرنش افزایش می‌یابد. حسین پور و همکاران [۶] اثر فشار سیال بر کشش عمیق ورق آلومینیوم ۵۰۵۲ را به کمک فرآیند هیدروفرمینگ گرم بررسی کردند و مشخص شد افزایش فشار تا یک مقدار معین باعث بهبود ضخامت فنجان تولید شده می‌شود، اگرچه نیروی سنبه برای انجام کشش عمیق افزایش پیدا کرد.

از سوی دیگر، روش المان محدود پلاستیسیته بلور^۱، در زمینه‌های مختلف از جمله شکل‌پذیری ورق مورد استفاده محققان قرار گرفته است. گاه برای افزایش راندمان محاسباتی، تحلیل المان محدود پلاستیسیته بلور در حالت تنش صفحه‌ای یا کرنش صفحه‌ای انجام می‌شود. با این حال، تحلیل دوبعدی قادر به پیش‌بینی تغییرشکل‌های برون صفحه‌ای نمی‌باشد [۷]. علاوه بر این، تغییرشکل موضعی پس از گلوبی شدن سه بعدی می‌باشد. این تغییرشکل موضعی را نمی‌توان در تحلیل دوبعدی به درستی مدل‌سازی کرد [۸]. کیم و یون [۹]

امکان اینکه تمرکز تنش در یک مرزخانه (ناشی از عدم انطباق آرایش دانه‌ها) به عنوان نقص عمل کند و در نهایت سبب گلوبی شود را بررسی کردند. آن‌ها با پیشنهاد چندین مدل آسیب برای آلومینیوم AA۶۰۲۲-T۴ در چارچوب پلاستیسیته بلور، پیش‌بینی این روش برای رفتار گلوبی را با نتایج تجربی تنش-کرنش، شکل و زاویه‌ی گلوبی مقایسه کردند. حداکثر خطای شکل پیش‌بینی شده‌ی ناحیه گلوبی با نتایج تجربی حدود ۲۴٪ درصد بود. جعفری و همکاران [۱۰]، برای بررسی اثر جهت‌های بلوری و بافت ماده بر رفتار فلز آهن تحت بارگذاری کشش ساده، از معادلات ساختاری پلاستیسیته بلور برای شبیه‌سازی استفاده کرده و نتایجی نزدیک به داده‌های تجربی به دست آوردند. برای مطالعه شکل‌پذیری ورق فلزی، مدل نقص M-K در ترکیب با مدل ساختاری پلاستیسیته بلور به کار گرفته شده است [۱۱]. در این روش کرنش‌های حدی متناظر با گلوبی شدن محاسبه شده، منحنی حد شکل‌پذیری استخراج می‌شود. بونگ و لی [۱۲] با بکارگیری این روش، منحنی حد شکل‌دهی را برای ورق‌های بسیار نازک از جنس فولاد زنگ‌نزن فرریتی، به دست آوردند. آن‌ها با در نظر گرفتن زبری به میزان چند میکرومتر روی سطح ورق، به تحلیل اثر زبری بر کرنش حد گلوبی پرداختند.

در این مقاله با استفاده از روش المان محدود پلاستیسیته بلور، به مطالعه اثر تنش در راستای ضخامت بر رفتار گلوبی ورق فلزی از جنس آلیاژ آلومینیوم در کشش تک‌محوره پرداخته شده است. ورق فلزی در حالت نورد شده، با بافت مشخص و سیستم‌های لغزشی بلورهای آن با رفتار خود-سخت‌شوندگی در نظر گرفته شده است. از معیار پیشینه کرنش برشی برای شروع و تکامل آسیب در مدل رفتاری ماده استفاده می‌شود. یک زیربرنامه VUMAT برای به‌کارگیری مدل در اباکوس^۲ توسعه می‌یابد. سپس، آزمون کشش تک محوره با در نظر گرفتن فشار در راستای ضخامت روی حجم نماینده انجام خواهد شد.

۲- مدل پلاستیسیته بلور

۲-۱- سیستم‌های لغزش

تغییرشکلی که در فلزات مشاهده می‌شود، ناشی از لغزش صفحات بلوری بر روی یکدیگر است. به صفحاتی که روی یکدیگر می‌لغزند،

جدول ۱. سیستم‌های لغزش آلیاژ آلومینیوم
Table 1. Slip systems of Aluminum alloy AA6022-T4

سیستم لغزش	صفحه لغزش	جهت لغزش
۱		$[01\bar{1}]$
۲	(۱۱۱)	$[\bar{1}01]$
۳		$[1\bar{1}0]$
۴		$[\bar{1}0\bar{1}]$
۵	($\bar{1}11$)	$[110]$
۶		$[0\bar{1}1]$
۷		$[011]$
۸	($\bar{1}\bar{1}1$)	$[\bar{1}\bar{1}0]$
۹		$[10\bar{1}]$
۱۰		$[0\bar{1}\bar{1}]$
۱۱	(۱۱ $\bar{1}$)	$[101]$
۱۲		$[\bar{1}01]$

برش ساده روی یک سیستم لغزش دچار تغییر شکل مومسان می‌شود. در مرحله دوم اتساع و چرخش شبکه اتفاق می‌افتد. بنابراین گرادیان تغییر شکل F را می‌توان به دو بخش مومسان F^P و کشسان F^e مطابق رابطه (۱)، تجزیه نمود:

$$F = F^e \cdot F^P \quad (1)$$

قسمت کشسان F^e ناشی از اتساع کشسان و چرخش شبکه بلوری و قسمت مومسان F^P ناشی از لغزش مومسان سیستم‌های لغزش می‌باشد.

معادله (۱) منجر به تجزیه جمعی گرادیان سرعت L به دو قسمت کشسان L^e و مومسان L^P می‌شود:

$$L = L^e + L^P \quad (2)$$

همچنین گرادیان سرعت مومسان L^P را می‌توان به صورت مجموع دو تنسور متقارن و پادمتقارن مطابق رابطه (۳) نوشت، که در آن نرخ تغییر شکل D^P و نرخ چرخش W^P به ترتیب قسمت‌های

صفحه‌ی لغزش می‌گویند. این صفحات دارای چگالی اتمی بیشتری می‌باشند. همچنین، به جهتی که این صفحات بر روی یکدیگر می‌لغزند، جهت لغزش گفته می‌شود. روی جهت‌های لغزش هم، چگالی اتمی بیشتری است. عامل اصلی این لغزش‌ها تنش برشی است که روی صفحه لغزش ایجاد می‌شود. با توجه به این توضیحات و جنس ورق مورد مطالعه، آلیاژ آلومینیوم AA۶۰۲۲-T۴ با ساختار FCC، لغزش در صفحات (۱۱۱) و در جهت‌های $\langle 110 \rangle$ این فلز رخ می‌دهد. جدول ۱ صفحات، جهت‌ها و سیستم‌های لغزش ورق فلزی مورد نظر را نشان می‌دهد.

۲-۲- سینماتیک تغییر شکل

از تئوری پلاستیسته بلور برای نمایش جریان نابجایی‌ها در راستای سیستم‌های لغزشی بر حسب تنش برشی مؤلفه شده $\tau^{(s)}$ استفاده می‌شود. در واقع طبق این تئوری تغییر شکل مومسان زمانی اتفاق می‌افتد که تنش برشی مؤلفه شده به یک حد بحرانی رسیده باشد. در ادامه به برخی از معادلات پایه به صورت مختصر اشاره می‌شود. در جامد بلوری فرض می‌شود که نمو تغییر شکل در دو مرحله اتفاق می‌افتد. در مرحله اول ماده از حالت مرجع توسط

متقارن و پادمقارن L^p می‌باشند:

$$L^p = D^e + W^p \quad (3)$$

گرادیان سرعت مومسان L^p مرتبط با نابجایی در هر سیستم لغزش α ، مطابق رابطه (۴) می‌باشد:

$$L^p = \sum_{\alpha=1}^N \dot{\gamma}^\alpha s^\alpha m^\alpha \quad (4)$$

در این رابطه، s^α بردار جهت لغزش، m^α بردار یکه عمود بر صفحه لغزش و $\dot{\gamma}^\alpha$ نرخ برش در هر سیستم لغزش از کل سیستم‌های لغزش N است. قسمت مومسان گرادیان سرعت را می‌توان به صورت مجموع دو تنسور متقارن و پادمقارن مطابق رابطه (۲) نوشت که در آن

$$D^p = \sum_{\alpha=1}^N \dot{\gamma}^\alpha \text{symm}[s^\alpha m^\alpha] = \sum_{\alpha=1}^N \dot{\gamma}^\alpha P_\alpha \quad (5)$$

$$W^p = \sum_{\alpha=1}^N \dot{\gamma}^\alpha \text{skew}[s^\alpha m^\alpha] = \sum_{\alpha=1}^N \dot{\gamma}^\alpha W_\alpha \quad (6)$$

۳-۲- مدل آسیب مومسان

مدل‌های آسیب متفاوت توسط محققین برای تحلیل رفتار شکست در فلزات مطرح شده است. در مطالعه‌ی حاضر از مدل آسیب حداکثر کرنش برشی استفاده می‌شود. همچنین، برای پیش‌بینی رفتار گلوپی از مدل آسیب همسان‌گرد استفاده شده است و اثر ناهمسان‌گردی به‌طور غیرمستقیم از طریق مدل پلاستیسیته بلور در نظر گرفته می‌شود. در محاسبات در نظر گرفته شده، آسیب زمانی آغاز شده و تکامل می‌یابد که بیشینه کرنش برشی $\gamma_m = \varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}$ از یک مقدار بحرانی معین بیشتر شود. بر این اساس، پارامتر آسیب D به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D = \begin{cases} 0 & (\gamma_m \leq \gamma_{m,ini}) \\ D_{\max} \left(\frac{\gamma_m - \gamma_{m,ini}}{\gamma_{m,max} - \gamma_{m,ini}} \right)^M & (\gamma_{m,ini} < \gamma_m < \gamma_{m,max}) \\ D_{\max} & (\gamma_{m,ini} \leq \gamma_m) \end{cases} \quad (7)$$

در این معادله، $\gamma_{m,ini}$ بیشینه کرنش برشی متناظر با آغاز آسیب و $\gamma_{m,max} = \gamma_{m,ini} + \Delta\gamma_m$ و

M و D_{\max} توان کنترل کننده رشد آسیب است. در این مقاله، برای اینکه تغییرات تنش بر حسب تکامل آسیب به صورت یک منحنی هموار اتفاق بیفتد و همگرایی بهبود یابد، از $M = 2$ استفاده می‌شود. با تکامل آسیب در ماده، ظرفیت تحمل بار کاهش می‌یابد. برای سنجیدن میزان کاهش ظرفیت تحمل بار از رابطه‌ی (۸) استفاده می‌شود.

$$\bar{\sigma}_D(\bar{\varepsilon}, D) = (1-D)\bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}) \quad (8)$$

که در این معادله $\bar{\sigma}(\bar{\varepsilon})$ تنش جریان محاسبه شده با استفاده از کرنش پلاستیک معادل در ماده بدون آسیب و $\bar{\sigma}_D(\bar{\varepsilon}, D)$ تنش جریان اصلاح شده با در نظر گرفتن تکامل آسیب می‌باشد. در اینجا فرض شده است که آسیب و کرنش سختی همسانگرد هستند.

۴-۲- معادلات ساختاری و انتگرال‌گیری

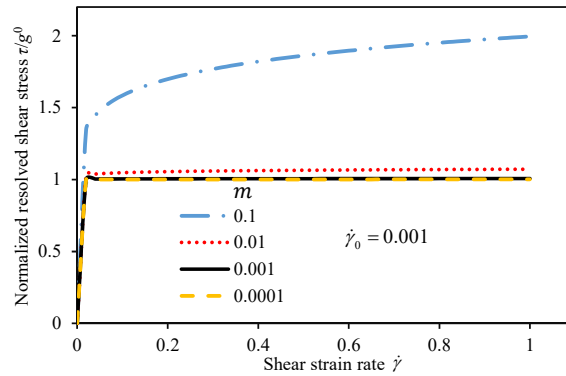
با فرض یک تکامل آسیب همسانگرد ساده، مقدار آسیب در یک نقطه انتگرالی محاسبه شده، با حل معادله غیر خطی (۱۲) به سیستم لغزش اعمال می‌شود و آسیب به روش صریح طبق مراحل زیر محاسبه می‌شود. تنش آزمایشی در سیستم لغزش α با فرض تغییرشکل کاملاً کشسان، توسط یون و همکاران [۱۳] به صورت زیر محاسبه شد:

$$\tau_{n+1}^{T\alpha} = \tau_n^\alpha + \Delta t \dot{\tau}_\alpha = \tau_n^\alpha + \Delta t \mathbf{R}_\alpha : \mathbf{D} \quad (9)$$

در معادله (۹)، $\tau_{n+1}^{T\alpha}$ و تنش برشی مؤلفه شده آزمایشی در گام جاری و τ_n^α تنش برشی مؤلفه شده در گام قبلی است که از معادله (۱۴) محاسبه می‌شود. \mathbf{R} یک تنسور چرخش معادل است که به عمود بر صفحه لغزش، جهت لغزش، مدول‌های کشسانی و تنش وابسته است [۹]. تنش برشی مؤلفه شده از رابطه‌ی (۱۰) به دست می‌آید.

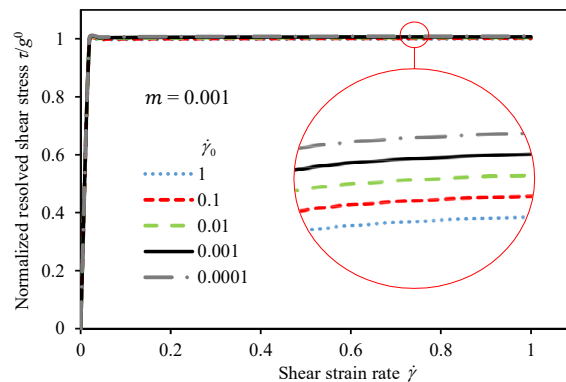
$$\tau_{n+1}^\alpha = g^0 \left(\frac{|\dot{\gamma}^\alpha|}{\dot{\gamma}_0} \right)^m \text{sign}(\dot{\gamma}^\alpha) \quad (10)$$

که $g = a(\varepsilon + \Gamma)^n$ استحکام سیستم‌های لغزش است. F لغزش



شکل ۱. اثر توان حساسیت به نرخ کرنش بر تنش برشی مؤلفه شده

Fig. 1. Effect of strain rate exponent on the resolved shear stress



شکل ۲. اثر نرخ کرنش مرجع بر تنش برشی مؤلفه شده

Fig. 2. Effect of reference strain rate on the resolved shear stress

هنگامی که ماده به صورت مومسان تغییرشکل می‌دهد، تنش سیستم لغزش در معادله‌ی (۹) باید با تنش برشی مؤلفه شده در معادله‌ی (۱۰) برابر شود. با حل معادله‌ی غیرخطی زیرمی‌توان $\dot{\gamma}^\alpha$ را برای هر سیستم لغزشی α یافت.

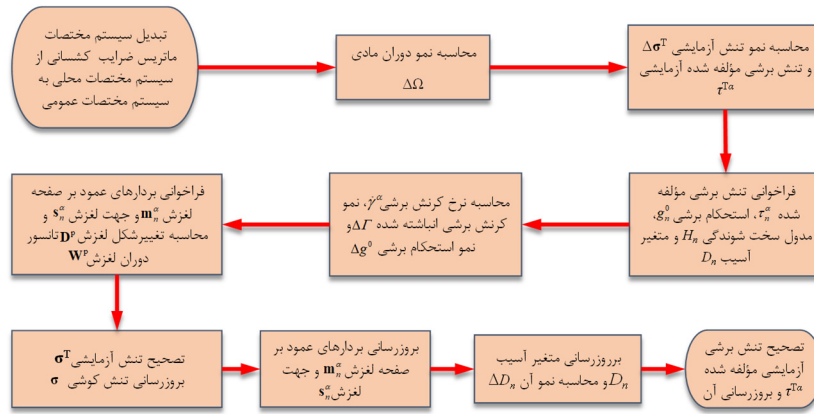
$$\tau_{n+1}^{T\alpha} - \Delta t \sum_{\alpha=1}^N \dot{\gamma}^\beta \mathbf{R}_\alpha : \mathbf{P}_\alpha - (1 - D_n) \tau^\alpha = 0 \quad (11)$$

در معادله‌ی (۱۱)، D_n آسیب در گام قبلی می‌باشد. با داشتن $\dot{\gamma}^\alpha$ ، می‌توان پارامتر آسیب و تنش برشی مؤلفه شده را بروز کرد.

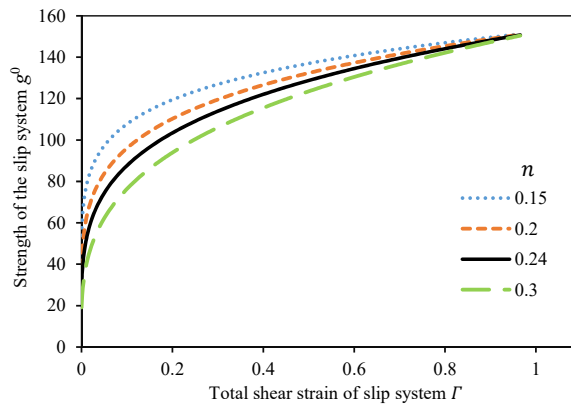
$$\Delta D_{n+1} = \int_{t_n}^{t_{n+1}} dD \quad (12)$$

$$D_{n+1} = D_n + \Delta D_{n+1} \quad (13)$$

انباشته بر روی تمام سیستم لغزش است و به صورت $\Gamma = \Gamma_n + \dot{\Gamma} \Delta t$ بیان می‌شود که $\dot{\Gamma} = \sum |\dot{\gamma}^\alpha|$ است. همچنین، m توان حساسیت به نرخ کرنش و $\dot{\gamma}$ نرخ کرنش مرجع است. شکل‌های ۱ و ۲ به ترتیب تأثیر پارامترهای حساسیت به نرخ کرنش m و نرخ کرنش مرجع $\dot{\gamma}$ را بر تنش برشی مؤلفه شده بی‌بعد نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که انتخاب $\dot{\gamma}$ بر حساسیت رفتار نسبت به نرخ کرنش تأثیر قابل‌اعتنایی ندارد. در عوض، مقدار m بر روی این رفتار به صورت قابل‌توجهی مؤثر است. به ازای $m = 0.001$ رفتار تقریباً مستقل از نرخ کرنش است. در هنگام گلوبی، تغییر شکل در یک ناحیه متمرکز شده و نرخ کرنش در این منطقه بالا می‌رود. این افزایش نرخ کرنش می‌تواند منجر به افزایش قابل توجه تنش در سیستم لغزشی شود. به این دلیل، در این مطالعه، برای ایجاد رفتار مستقل از نرخ کرنش، $m = 0.001$ و $\dot{\gamma} = 0.001$ در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۳. گردش کار محاسبات در زیربرنامه VUMAT
 Fig. 3. The calculation cycle in VUMAT subroutine



شکل ۴. تأثیر توان کرنش سختی n بر استحکام سیستم لغزش
 Fig. 4. Effect of strain hardening exponent on the resolved shear stress

$$\tau_{n+1}^\alpha = (1 - \Delta D_{n+1})(\tau_{n+1}^{T\alpha} - \Delta t \sum_{\alpha=1}^N \dot{\gamma}^\beta \mathbf{R}_\alpha : \mathbf{P}_\alpha) = 0 \quad (14)$$

رابطه‌ی (۱۵) در واقع حاصل میانگین پاسخ سیستم‌های لغزشی برای یک بس بلور می‌باشد. اگرچه رابطه‌ی تنش-کرنش در سطح دانه با رابطه‌ی (۱۵) تفاوت دارد، اما می‌تواند متناسب و مشابه با آن در نظر گرفته شود. در این مطالعه، سخت‌شوندگی بلور، رفتاری مطابق رابطه (۱۶) دارد

$$g^0 = a(\varepsilon_0 + \Gamma)^n = 151.5(0.001 + \Gamma)^{0.24} \quad (16)$$

که در آن، g استحکام سیستم لغزش، a ثابت مادی، n توان کرنش سختی و Γ کرنش برشی انباشته در کل سیستم‌های لغزش می‌باشد. شکل ۴ تأثیر متغیر توان کرنش سختی n ، را بر استحکام

در معادلات (۱۲) تا (۱۴)، ΔD_{n+1} نمو آسیب در هر نقطه‌ی انتگرال‌گیری و τ_{n+1}^α تنش بروز شده سیستم لغزش در گام جاری است. معادلات ساختاری در یک زیربرنامه VUMAT برای به‌کارگیری در حلگر دینامیکی صریح اَبکوس پیاده‌سازی شد. شکل ۳ گردش کار محاسبات در زیربرنامه توسعه داده شده را نشان می‌دهد.

۲-۵- قانون سخت‌شوندگی

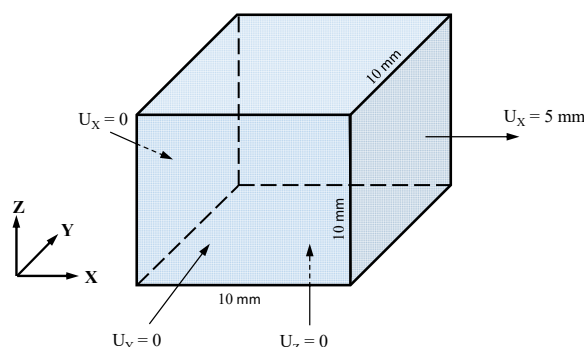
رابطه‌ی تنش-کرنش آلیاژ آلومینیوم AA۶۰۲۲-T۴ که توسط کیم و یون [۹] از طریق آزمایش کشش در جهت نورد به‌دست آمد، مطابق (۱۵) است:

$$\bar{\sigma}_D(\bar{\varepsilon}) = 479.9(\bar{\varepsilon} + 0.001)^{0.258} \quad (15)$$

جدول ۲. خواص فیزیکی مکانیکی آلیاژ آلومینیوم

Table 2. Physical and mechanical properties of Aluminum alloy AA6022-T4

چگالی	مدول کشسانی	مدول کشسانی	مدول کشسانی
ρ	C_{44}	C_{12}	C_{11}
g/cm^3	GPa	GPa	GPa
۲/۷۰۸	۲۸/۵	۶۱/۳	۱۰۸/۲



شکل ۵. مدل تک المان مورد استفاده در صحت‌سنجی محاسبات

Fig. 5. Single element model used in the calculation verification tests

به حداکثر مقدار خود برسد به ترتیب برابر $\gamma_{m,ini} = 0/4$ و $0/376$ +
 $\gamma_{m,max} = \gamma_{m,ini}$ می‌باشند. شکل ۴، نتایج تحلیل برای زوایای اوپلر
 $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ را نشان می‌دهد. برای همگرایی بهتر، حداکثر مقدار
 پارامتر آسیب برابر $D_{max} = 0/5$ در نظر گرفته شد.

در شکل ۶- (a)، با رسیدن حداکثر کرنش برشی به مقدار $\gamma_{m,ini}$
 ، آسیب آغاز شده و با تکامل آسیب، تنش طولی به علت نرم‌شوندگی
 در اثر آسیب، کاهش می‌یابد. همچنین، اثر انتخاب پارامترهای $\gamma_{m,ini}$
 و $\Delta\gamma_m$ بر رفتار نرم‌شوندگی ماده در این شکل نشان داده شده است.
 پس از رسیدن پارامتر آسیب به میزان بیشینه خود $D_{max} = 0/5$ ، تنش
 سیستم لغزشی به میزان نصف مقدار متناظر بدون آسیب می‌رسد.
 شکل ۶- (b)، تنش برشی مؤلفه شده در راستای سیستم لغزش را
 نشان می‌دهد. سیستم‌های لغزش ۱، ۶، ۷، ۱۰ عمود بر جهت کشش
 هستند و به همین خاطر تنش برشی مؤلفه شده در آنها صفر است. در
 سیستم‌های لغزش ۲، ۸، ۹، ۱۱ جهت لغزش با محور بارگذاری زاویه
 45° می‌سازد. بنابراین، تنش برشی مؤلفه شده هم مثبت است. برای
 سیستم‌های لغزش ۳، ۴، ۵، ۱۲، تنش برشی مؤلفه شده منفی است،

سیستم لغزش g' نشان می‌دهد. افزایش n سبب کاهش شیب
 منحنی سخت‌شوندگی می‌شود.

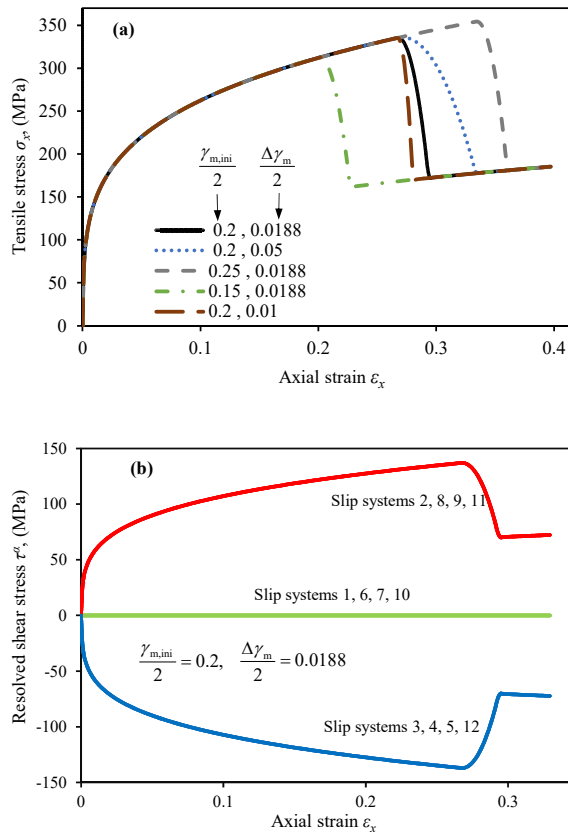
۳- صحت‌سنجی مدل

۳-۱- خواص ورق فلزی

مدل مورد استفاده در این تحقیق از جنس آلیاژ آلومینیوم
 AA۶۰۲۲-T۴ می‌باشد. به دلیل تقارن سیستم مکعبی FCC سه
 ثابت C_{11} ، C_{12} و C_{44} برای معرفی خواص کشسانی شبکه استفاده
 می‌شوند. این خواص از مرجع [۱۴] استخراج شده و در جدول ۲ قابل
 مشاهده می‌باشد.

۳-۲- مدل تک المان

به منظور بررسی و تأیید روش انتگرال‌گیری تنش و مدل تکامل
 آسیب، تحلیل برای حالت تک المان انجام شد. شکل ۵ مدل تک المان
 را نشان می‌دهد. تحلیل برای دو مجموعه زوایای اوپلر $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ و
 $(45^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ انجام شده است. مقادیر حداکثر کرنش برشی که آسیب
 را آغاز می‌کند و کرنش برشی که باعث می‌شود آسیب بعد از شروع



شکل ۶. نتایج تحلیل تک المان برای زوایای اوپلر $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$

Fig. 6. Results obtained for single element using Euler angles $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$, (a) tensile stress and (b) resolves stress

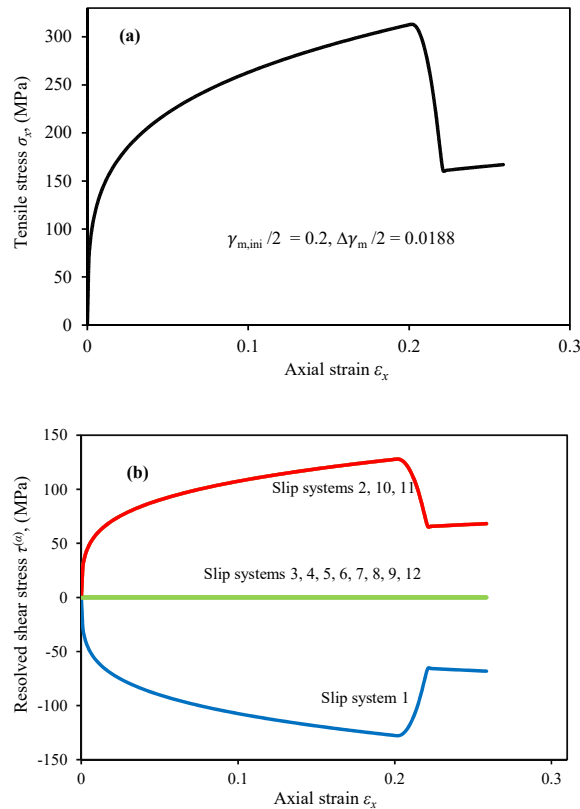
حجم نماینده‌ی مورد تحلیل این مطالعه، مطابق شکل ۸ دارای ابعاد ۳ mm در طول، ۱/۵ mm در عرض و ۰/۵ mm در ضخامت می‌باشد. ضخامت ورق ۱ mm است و با در نظر گرفتن تقارن، نصف این مقدار برای تحلیل در نظر گرفته شد. روی صفحه‌ی Y_1 ، جابجایی تمام گره‌ها در جهت Y به هم وابسته است تا مشابه شرایط کشش و کاهش عرض ورق، تمام این گره‌ها در جهت Y با هم حرکت کنند. جابجایی گره‌های واقع بر Z ، در راستای Z و گره‌های واقع بر Y ، در راستای Y محدود شده است تا شرایط تقارن صفحه‌ای روی این وجوه حاصل شود. برای اعمال کشش تک محوره، گره‌های واقع بر X_1 و X با سرعت ثابت ۲/۵ mm/s در خلاف جهت هم کشیده می‌شود. با توسعه یک اسکریپت پایتون در محیط CAE بسته نرم‌افزاری ابکوس، مدل هندسی به ۱۴۷۹۰ دانه الماسی شکل (هشت وجهی) $C2D4$ تقسیم‌بندی و با المان‌های پیوسته چهار وجهی خطی (به ابعاد $50 \mu\text{m}$ گسسته سازی شد. در این مطالعه با استفاده از بسته نرم‌افزاری MTEX در محیط متلب، با توجه به بافت به دست آمده برای ورق فلزی از روش تجربی توسط یون و همکاران

چرا که، فاکتور اشیمید^۱ برای این سیستم‌های لغزش، منفی می‌شود. شکل ۷، نتایج تحلیل تک المان را برای زوایای اوپلر $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ نشان می‌دهد. در این مورد، بلور حول محور Z به اندازه 45° دوران کرده است. با دوران 45° درجه‌ای ساختار بلور، سیستم‌های لغزش ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۲ موازی یا عمود بر جهت بارگذاری شده‌اند. بنابراین تنش برشی مؤلفه شده در آنها صفر است. همانند شکل ۶- (b)، تنش برشی مؤلفه شده در سیستم‌های لغزش ۲، ۱۰، ۱۱ مثبت‌اند و برعکس در سیستم لغزش ۱ منفی است.

۳-۳- مدل المان محدود آزمون کشش تک محوره ورق

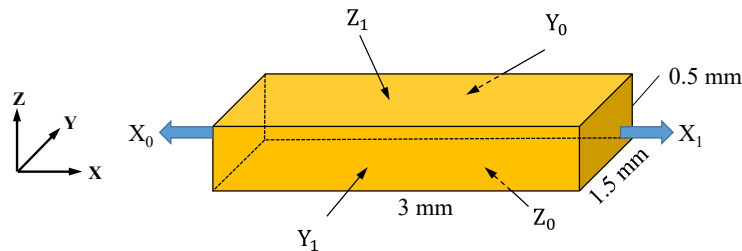
برای پیش‌بینی رفتار گلوبی و تأثیر تنش در راستای ضخامت بر ورق آلیاژ آلومینیوم T4-۲۲AA6، تحلیل المان محدود آزمون کشش با روش پلاستیسیت بلور انجام شد. روش پلاستیسیت بلور و مدل آسیب استفاده شده که در بخش‌های قبلی توضیح داده شد، به کمک VUMAT در نرم‌افزار تجاری ابکوس به کار گرفته شد.

1 Schmid factor



شکل ۷. نتایج تحلیل تک المان برای زوایای اویلر $(45^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$

Fig. 7. Results obtained for single element using Euler angles $(45^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$, (a) tensile stress and (b) resolves stress



شکل ۸. حجم نماینده ورق تحت کشش تک محوره

Fig. 8. Representative volume element of the sheet metal subject to uniaxial load

مقاله‌ی کیم و همکاران [۹]، استفاده شد. آن‌ها آزمایش کشش را بر روی آلیاژ آلومینیوم AA۶۰۲۲-T۴ انجام داده‌اند. شکل ۱۰، منحنی نیرو-جابجایی حاصل از آزمایش آنها را در مقایسه با منحنی نیرو-جابجایی به دست آمده از تحلیل با مدل آسیب حداکثر کرنش برشی، نشان می‌دهد. از آنجا که حجم نماینده مورد استفاده در تحلیل کوچک است، نتایج نیرو-جابجایی آزمایش تجربی به نحو مناسب مقیاس شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، اگرچه در نزدیکی ناحیه گلوبی کمی خطا را می‌توان مشاهده کرد اما منحنی به دست آمده از تحلیل با آزمایش تجربی [۹] تطابق خوبی دارد. پارامترهایی

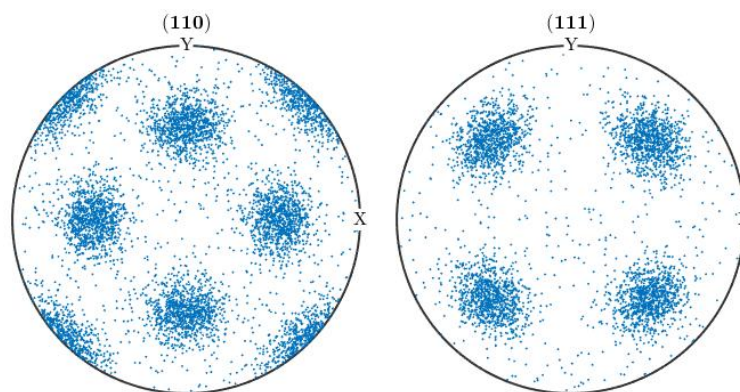
[۱۳]، مجموعه‌ای شامل ۱۰۰۰ جهت‌گیری^۱ تولید شده است. این جهت‌گیری‌ها به صورت تصادفی به دانه‌ها اختصاص داده شده است. تصاویر قطبی در شکل ۹، توزیع جهت‌گیری دانه‌های مدل را نشان می‌دهد.

۴- نتایج و بحث

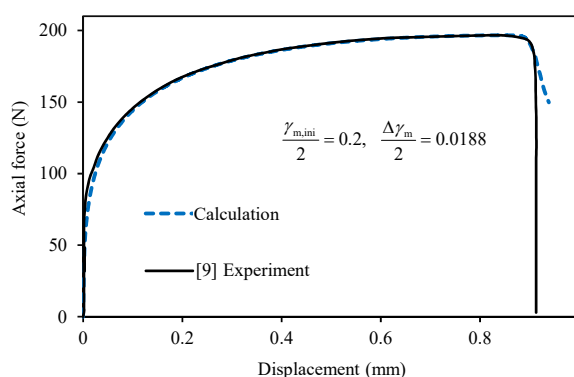
۴-۱- تعیین پارامترهای مدل آسیب

برای کالیبره کردن پارامترهای مدل رفتاری ماده از نتایج تجربی

1 Orientation



شکل ۹. تصویر قطبی صفحات (۱۱۰) و (۱۱۱) در دامنه محاسباتی
Fig. 9. Pole figures of (1 1 0) and (1 1 1) planes in the calculation domain



شکل ۱۰. منحنی نیرو-جابجایی حاصل از تحلیل در مقایسه با آزمایش تجربی
Fig. 10. Force-displacement curve obtained from calculation compared to the experiment

جدول ۳. پارامترهای مدل سخت شوندهگی و آسیب به کار رفته در تحلیل

Table 3. Parameters of strain hardening and damage models used in the analyses

$\gamma_{m,ini}$	$\gamma_{m,max}$	D_{max}	M	a	m	$\dot{\gamma}$	n	پارامتر
۰/۴	۰/۴۳۷۶	۰/۵	۲	۱۵۱/۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۲۴	مقدار

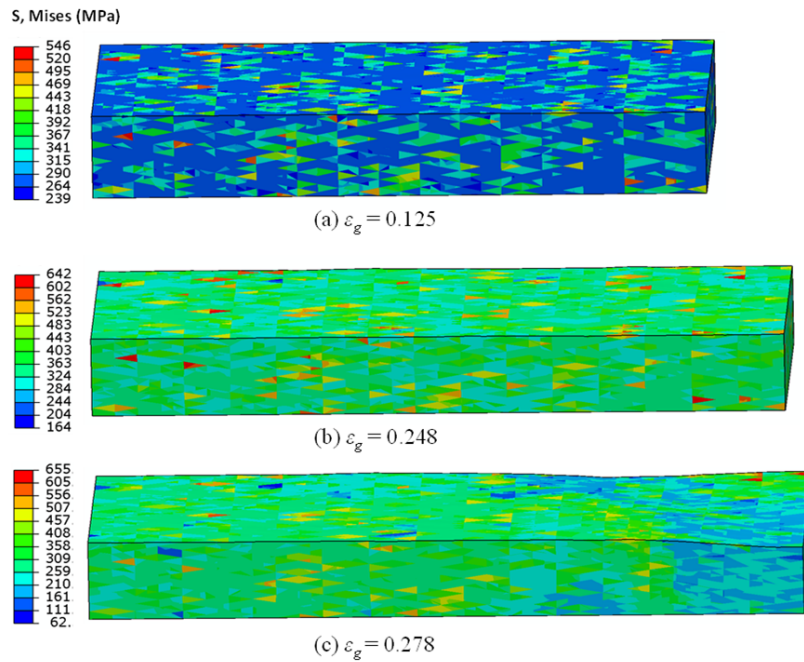
می‌افتد. این تمرکز تنش در اثر اختلاف جهت‌گیری‌ها بین دانه‌های همسایه رخ می‌دهد. با افزایش کرنش کششی، ناحیه تمرکز تنش افزایش می‌یابد. در شکل ۱۱- (c)، مشاهده می‌شود که در ناحیه‌ی گلوبی با تکامل آسیب، تنش مؤثر کاهش یافته است.

شکل ۱۲ توزیع آسیب را برای کرنش‌های متفاوت نشان می‌دهد. طبق این شکل، تا زمانی که اندازه کرنش کوچکتر مساوی ۰/۲۳۶ باشد، آسیب آغاز نشده است. شکل ۱۲- (a)، لحظه‌ی شروع آسیب را نشان می‌دهد. هرچه اندازه کرنش بیشتر می‌شود، ناحیه آسیب

که منجر به بهترین انطباق با منحنی نیرو-جابجایی تجربی شده، در جدول ۳ آمده است.

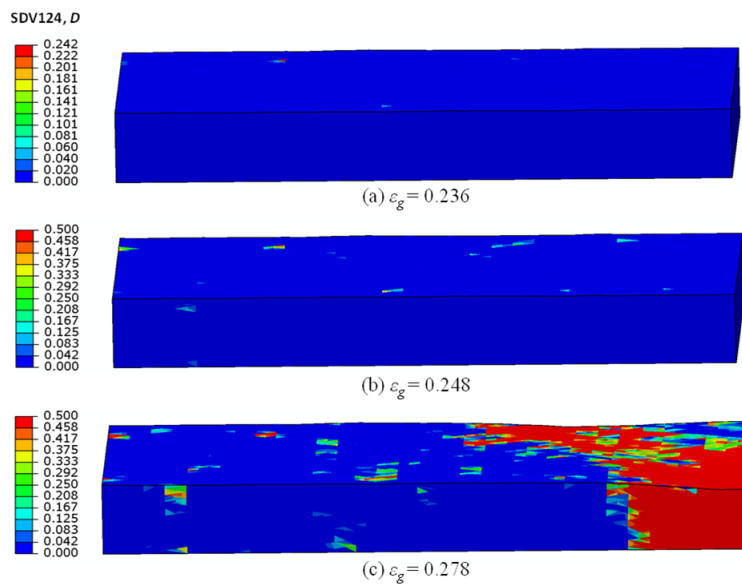
۲-۴- شروع و تکامل آسیب

شکل ۱۱ توزیع تنش را در چند نقطه از مسیر بارگذاری، نشان می‌دهد. ϵ_g اندازه کرنش طولی است و از طول اولیه l_0 و جابجایی کششی u مطابق رابطه‌ی $\epsilon_g = \ln(1+u/l_0)$ محاسبه می‌شود. همانطور که انتظار می‌رود با اعمال بار، تمرکز تنش در مرزخانه‌ها اتفاق



شکل ۱۱. توزیع تنش معادل در کشش تک محوره

Fig. 11. Equivalent Mises stress distribution in the course of uniaxial tensile loading



شکل ۱۲. توزیع پارامتر آسیب D در طی اعمال کشش

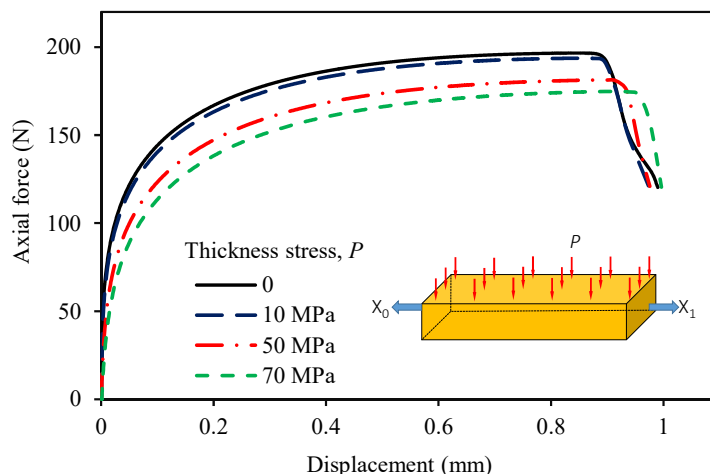
Fig. 12. Damage variable D distribution in during uniaxial tensile loading

با افزایش کرنش، منطقه وسیعی در اطراف ناحیه گلویی دچار آسیب شده است.

۴-۳- اثر تنش در راستای ضخامت بر شکل پذیری ورق

برای بررسی اثر تنش در راستای ضخامت بر شکل پذیری ورق

افزایش می‌یابد و باعث به هم پیوستن مناطق آسیب دیده‌ی همسایه می‌شود. در نهایت بیشتر المان‌های موجود در ناحیه گلویی آسیب دیده می‌شوند. در تحلیل حاضر، گلویی زمانی آغاز می‌شود که اندازه کرنش به مقدار 0.248 برسد و شکل ۱۲- (b)، توزیع آسیب در لحظه آغاز گلویی را نشان می‌دهد. در شکل ۱۲- (c)، مشاهده می‌شود که



شکل ۱۳. مقایسه منحنی نیرو-جابجایی تحت فشارهای مختلف در راستای ضخامت

Fig. 13. Comparison of the force-displacement curves obtained under various through thickness pressures

و همکاران [۱] همخوانی دارد. آن‌ها اثر تنش در راستای ضخامت ورق بر شکل‌پذیری آن را بر مبنای مدل مارسینیاک-کوزینسکی بر روی ورق‌های AA۶۰۱۱ و STKM-۱۱A مطالعه کردند و دریافتند شکل‌پذیری برای ورق AA۶۰۱۱ در اثر فشار ۶۲ MPa، ۱۹/۴٪ و برای ورق STKM-۱۱A تحت فشار ۲۳۱ MPa، ۲۷/۴٪ بهبود می‌یابد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه از روش المان محدود پلاستیسیته بلور برای بررسی اثر تنش در راستای ضخامت ورق AA۶۰۲۲-T۴ بر شکل‌پذیری استفاده شد. یک مدل سه بعدی از قسمت کوچکی از ورق تحت اثر کشش تک محوره با فشارهای مختلف در راستای ضخامت، مورد تحلیل قرار گرفت. ماده ورق فلزی مورد بررسی دارای ساختار بلورین و جوه مرکزپر (FCC) با ۱۲ سیستم لغزشی در نظر گرفته شد. رفتار کار سخت شوندگی حین تسلیم و نیز نرم‌شوندگی ناشی از تکامل آسیب در کشش تک محوره بر مبنای مدل حداکثر کرنش برشی در نظر گرفته شد. بر اساس معادلات حاکم بر پلاستیسیته بلور، یک زیر برنامه VUMAT توسعه داده شده، در اباکوس به کار گرفته شد. با طراحی آزمایش‌های مختلف اثر فشار بر شروع گلویی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده شامل موارد ذیل می‌باشد:

- از روش پلاستیسیته بلور می‌توان برای مدل‌سازی میکروسکوپییک شروع گلویی در ورق فلزی استفاده کرد.

در حالت کشش تک محوره، ۳ آزمایش تحت فشارهای ۱۰، ۴۰ و ۷۰ MPa انجام شد. مدل مورد آزمایش، مشابه مدلی است که در بخش ۳-۳ توضیح داده شد. شرایط مرزی گره‌های وجوه Y_1 ، Y_2 و Z_1 مطابق قبل است. تحلیل در دو گام انجام می‌شود. در گام اول فشار روی سطح Z_1 ، با یک دامنه‌ی هموار به مقدار بیشینه خود می‌رسد. در گام دوم، در حالی که فشار ثابت روی سطح Z_1 اعمال می‌شود، گره‌های واقع بر X_1 و X_2 با سرعت ثابت ۲/۵ mm/s در خلاف جهت هم کشیده می‌شود. شکل ۱۳، منحنی نیرو-جابجایی حاصل از آزمایش‌های کشش تحت فشار در مقایسه با حالت بدون فشار را نشان می‌دهد.

از نتایج آزمایش چنین برمی‌آید که نیروی مورد نیاز برای شکل‌دهی در اثر افزایش فشار، کاهش پیدا می‌کند. به طوری که در حالت بدون فشار، نیرو در لحظه‌ی گلویی برابر ۱۹۶ N است، در شرایطی که اگر فشار ۷۰ MPa اعمال شود، نیرو در لحظه‌ی گلویی به ۱۷۲ N کاهش می‌یابد. لذا در صورت اعمال فشار ۷۰ MPa، نیروی شکل‌دهی حدود ۱۲/۳٪ کاهش پیدا می‌کند. از دیگر نتایج قابل مشاهده در این آزمایش‌ها، به تأخیر افتادن گلویی در اثر اعمال فشار می‌باشد. در آزمایش‌های انجام شده، در حالت بدون اعمال فشار، گلویی در کرنش ۰/۲۴۸ اتفاق افتاد، در صورتی که تحت فشار ۷۰ MPa، در کرنش ۰/۲۷۷ گلویی مشاهده شد. در واقع با افزایش فشار، گلویی ۱۱/۷٪ دیرتر اتفاق افتاده و در نتیجه شکل‌پذیری ورق بهبود می‌یابد. این با نتایج به‌دست آمده حاصل از مطالعه عاصم‌پور

نرخ لغزش	$\dot{\gamma}$
کرنش طولی	ϵ
کرنش مومسان مؤثر	$\bar{\epsilon}$
تنش مؤثر	$\bar{\sigma}$
چگالی	ρ

مراجع

- [1] A. Assempour, H.K. Nejadkhaki, R. Hashemi, Forming limit diagrams with the existence of through-thickness normal stress, *Computational Materials Science*, 48(3) (2010) 504-508.
- [2] Z. Marciniak, K. Kuczyński, Limit strains in the processes of stretch-forming sheet metal, *International journal of mechanical sciences*, 9(9) (1967) 609-620.
- [3] B. Ma, K. Diao, X. Wu, X. Li, M. Wan, Z. Cai, The effect of the through-thickness normal stress on sheet formability, *Journal of Manufacturing Processes*, 21 (2016) 134-140.
- [4] K. Nakazima, T. Kikuma, K. Hasuka, Study on the formability of steel sheets, *Yawata technical report*, September 1968 (264), 8517-8530.
- [5] Abbasi A, Analytical and numerical study on effect of through thickness stress on plastic instability of sheet metals, MSc dissertation, Shahrood University of Technology, 2014 (In Persian)
- [6] M. Hosseinpour, A. Gorji, M. Bakhshi, On the experimental and numerical study of formability of Aluminum sheet in warm hydroforming process, *Modares Mechanical Engineering*, 15(2) (2015) 159-168.
- [7] F. Roters, P. Eisenlohr, L. Hantcherli, D.D. Tjahjanto, T.R. Bieler, D. Raabe, Overview of constitutive laws, kinematics, homogenization and multiscale methods in crystal plasticity finite-element modeling: Theory, experiments, applications, *Acta Materialia*, 58(4) (2010) 1152-1211.
- [8] C.H.M. Simha, K. Inal, M.J. Worswick, Orientation and Path Dependence of Formability in the Stress- and the Extended Stress-Based Forming Limit Curves, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 130(4) (2008)

- اعمال تنش در راستای ضخامت، سبب بهبود شکل پذیری ورق می شود. در فرآیند کشش تک محوره، با اعمال فشار ۷۰ MPa، شکل پذیری ۱۱/۷٪ بهبود یافت.
- اعمال تنش در راستای ضخامت، نیروی مورد نیاز برای شکل دهی را کاهش داد. در فرآیند کشش تک محوره با اعمال فشار ۷۰ MPa، نیروی شکل دهی ۱۲/۳٪ کاهش یافت.
- مدل آسیب مورد استفاده برای بررسی رفتار گلوبی در این مطالعه، از نوع حداکثر کرنش برشی می باشد. می توان از مدل های آسیب دیگر استفاده و رفتار گلوبی را مورد بررسی قرار داد.
- بارگذاری در این مطالعه به صورت کشش تک محوره می باشد. می توان با انتخاب یک حجم نماینده مناسب و اعمال بارگذاری در مسیرهای مختلف کرنش، منحنی حد شکل دهی را در هنگام اعمال تنش ضخامتی پیش بینی کرد.

نشانه ها

a	ضریب کرنش سخت شوندگی
C	مدول کشسانی
D	نرخ کرنش
D	پارامتر آسیب
F	گرادیان تغییر شکل
g	استحکام سیستم لغزش
L	گرادیان سرعت
m	توان حساسیت به نرخ کرنش
m	بردار عمود بر صفحه ی لغزش
M	پارامتر مدل آسیب
n	توان کرنش سخت شوندگی
P_{α}	تنسور تغییر شکل سیستم لغزش α
R	تنسور چرخش معادل
s	بردار راستای لغزش
t	زمان
W	نرخ چرخش
W_{α}	تنسور دوران سیستم لغزش α
γ	کرنش برشی مهندسی
Γ	لغزش انباشته

- 116517.
- [12] H.J. Bong, J. Lee, Crystal plasticity finite element–Marciniak-Kuczynski approach with surface roughening effect in predicting formability of ultra-thin ferritic stainless steel sheets. *International Journal of Mechanical Sciences*, 191 (2021), 106066.
- [13] J.W. Yoon, F. Barlat, J.J. Gracio, E. Rauch, Anisotropic strain hardening behavior in simple shear for cube textured aluminum alloy sheets, *International Journal of Plasticity*, 21(12) (2005) 2426-2447.
- [14] M.A. Meyers, K.K. Chawla, *Mechanical behavior of materials*, Cambridge University press, 2008.
- 041009,1-14.
- [9] J.-B. Kim, J.W. Yoon, Necking behavior of AA 6022-T4 based on the crystal plasticity and damage models, *International Journal of Plasticity*, 73 (2015) 3-23.
- [10] M. Jafari, M. Talaei, S. Ziaei-Rad, Simulation the mechanical behavior of polycrystalline Fe by using crystal plasticity and Molecular dynamic methods, *Modares Mechanical Engineering*, 13(9) (2013) 138-148.
- [11] J.W. Signorelli, M.A. Bertinetti, A. Roatta, A review of recent investigations using the Marciniak-Kuczynski technique in conjunction with crystal plasticity models, *Journal of Materials Processing Technology* 287 (2021):

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. R. Kargar Daroonkolae, S. H. Ghaderi, Crystal Plasticity Finite Element Study of Necking Behavior of Aluminum Alloy Sheet Subject to Thickness-Stress, Amirkabir J. Mech Eng., 53(12) (2022) 5755-5768.

DOI: [10.22060/mej.2021.19957.7146](https://doi.org/10.22060/mej.2021.19957.7146)

