

## بررسی اثر ضریب اصطکاک بر نیروی شکل‌دهی ورق مسی در فرآیند پرسکاری در قالب‌های شیاردار مقید

سعید رهنما<sup>۱\*</sup>، معین غلامی<sup>۲</sup>، پیام عسکری<sup>۲</sup>، عباس یعقوب زاد<sup>۳</sup>

۱- دکترای تخصصی، دانشیار مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، ایران

۲- دانشجوی دکترا، دانشگاه بیرجند، ایران

۳- کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد دزفول، ایران

### چکیده

روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید روش‌هایی هستند که می‌توان به کمک آن، موادی با نسبت استحکام به وزن بالا تولید نمود. فرآیند پرسکاری شیاری، یک روش تغییر شکل پلاستیک شدید است که به منظور تولید ورق‌های فلزی با ساختار بسیار ریزدانه بکار گرفته می‌شود. در این تحقیق به صورت عددی و با استفاده از روش اجزاء محدود فرآیند پرسکاری شیاری محدود تا یک پاس کامل بر روی نمونه‌ی مسی خالص مورد مطالعه قرار می‌گیرد. لذا بوسیله‌ی نرم‌افزار ABAQUS ۶-۱۴ مدل‌سازی عددی انجام شد که با استفاده از این روش نتایج خروجی هر مرحله به عنوان ورودی مرحله بعد منتقل می‌شود. نتایج عددی نشان داد که با اعمال هر مرحله از فرآیند (Constrained Groove Pressing) میزان کرنش پلاستیک بیشتر می‌شود و همچنین در راستای طول نمونه میزان کرنش موثر پلاستیک به صورت نوسانی تغییر می‌کند. با بررسی تغییرات نیروی شکل‌دهی حین فرآیند مشاهده شد روند تغییرات نیرو در مراحل فرد شامل سه بخش است و در بخش سوم شیب تغییرات نیرو به شدت افزایش می‌یابد که دلیل آن افزایش سطوح تماس و اثر اصطکاک به منظور پر شدن گوشه‌های قالب است. با بررسی اثر ضریب اصطکاک بر روی نیروی شکل‌دهی مشاهده گردید با افزایش ضریب اصطکاک مقدار ماکزیمم نیروی شکل‌دهی بیشتر می‌شود.

### کلمات کلیدی

مدل‌سازی، ورق مسی، کارسختی، نیروی شکل‌دهی.

## Investigating the effect of friction coefficient on the forming force of copper sheet in the pressing process in bound groove molds

Saeed Rahnama<sup>1\*</sup>, Moein gholami<sup>1</sup>, Payam askari<sup>1</sup>, Abbas Yaghobzadeh<sup>1</sup>

<sup>1</sup>-Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Tehran University, Iran.

### Abstract

Extreme plastic deformation methods are methods that can be used to produce materials with a high strength-to-weight ratio. Groove pressing process is a severe plastic deformation method used to produce metal sheets with very fine grain structure. In this research, numerically and using the finite element method, the groove pressing process is studied up to one full pass on a pure copper sample. Therefore, numerical modeling was done by ABAQUS 6-14 software, and by using this method, the output results of each stage are transferred as input to the next stage. Numerical results showed that with the application of each step of the process (Constrained Groove Pressing), the amount of plastic strain increases and also along the length of the sample, the amount of effective plastic strain changes in an oscillating manner. By examining the changes in the forming force during the process, the trend of force changes was observed. It consists of three parts in odd stages, and in the third part, the slope of force changes increases sharply, which is due to the increase of contact surfaces and the effect of friction in order to fill the corners of the mold. By examining the effect of the friction coefficient on the forming force, it was observed that with the increase of the friction coefficient, the maximum value of the forming force increases.

### Keywords

Modeling, Copper sheet, Hardness, Forming force

## ۱- مقدمه

روش‌های تغییرشکل پلاستیک شدید شامل فرآیندهایی هستند که با تغییر دانه‌بندی ریزساختار مواد از ابعاد میکرون به ابعاد نانومتری منجر به تولید محصولاتی با استحکام بسیار بالاتر می‌شوند. ویژگی مشترک و منحصر به فرد فرآیندهای تغییرشکل پلاستیک شدید، ثابت بودن ابعاد و عدم تغییر شکل ظاهری ماده حین فرآیند است، که در نتیجه آن محدودیت اعمال کرنش از بین می‌رود. فلزاتی که تحت فرآیندهای تغییرشکل پلاستیک شدید قرار گرفته‌اند، خواص بسیار خوبی همانند استحکام زیاد در دمای محیط، مقاومت در برابر سایش، خاصیت سوپر پلاستیک در دمای بالا و نرخ کرنش کم، خواص خستگی خوب و مقاومت عالی در برابر خوردگی از خود نشان می‌دهند [۱،۶]. فرآیندهای تغییرشکل پلاستیک شدید شامل روش‌های بسیار متعددی مانند فشار در کانال‌های یکسان زاویه‌دار<sup>۱</sup> ECAP [۷-۸] و پیچش با فشار بالا<sup>۲</sup> HPT [۹-۱۰] و اتصال با نورد تجمعی<sup>۳</sup> ARB [۱۱-۱۲] می‌باشد. بیشتر این روش‌ها نیازمند ابزار گران‌قیمت و انجام مراحل پیچیده‌ای هستند که استفاده به روش صنعتی را با مشکل مواجه کرده است [۱۳-۱۴]. یکی از انواع این فرآیندها، فرآیند پرس‌کاری شیاری محدود<sup>۴</sup> CGP است که در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است [۳،۶]. روشی نسبتاً جدید در تغییر شکل پلاستیک شدید است. این فرآیند اولین بار در سال ۲۰۰۲ توسط شین<sup>۵</sup> و همکارانش توسعه داده شده است [۱۵]. آن‌ها فرآیند را بر روی ورق‌های آلومینیومی اعمال کردند و نتیجه گرفتند با این روش بهبود خواص مکانیکی و همچنین ریزدانه‌سازی ریز ساختار در ورق‌های فلزی امکان‌پذیر است. در همین سال لی<sup>۶</sup> و همکاران [۱۶] برای نخستین بار به شبیه‌سازی اجزاء محدود این روش پرداختند و نتایج حاصل را با نتایج فرآیند CGR مقایسه کردند. بررسی فرآیند CGP در دو دمای متفاوت (دمای اتاق و تبرید) تحقیقی بود که کریشناپایا<sup>۷</sup> و

همکاران [۱۷] در سال ۲۰۰۵ به آن پرداختند. در سال ۲۰۱۰ [۱۸] گانش<sup>۹</sup> و همکاران تاثیر فرآیند CGP ورق آلومینیوم را بر روی فرآیند کشش عمیق بررسی کردند و نشان دادند که فرآیند CGP روی این ورق‌ها قابلیت فرآیند کشش عمیق را بهبود می‌بخشد. در همان سال حسینی و همکاران [۱۹] با استفاده از یک مدل رفتاری ماده که بر پایه‌ی فرضیات فیزیکی و متالورژیکی استوار بود به پیش‌بینی منحنی تنش-کرنش با فرض متغیر بودن وضعیت چگالی نابجایی پرداختند. آن‌ها با کمک این منحنی با روش اجزاء محدود به بررسی کرنش، نرخ کرنش و توزیع سختی در ورق‌های CGP شده پرداختند. آن‌ها بیان کردند بین نتایج اجزاء محدود و آزمایش تجربی تطابق خوبی برقرار است. بررسی اثر فرآیند CGP بر روی غیر یکنواختی میکروساختار موضوعی بود که یاداو و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۱۶ بررسی کردند و نتیجه گرفتند که نمونه‌های CGP شده دارای غیر یکنواختی موضعی هستند که به صورت سینوسی در ساختار ماده تکرار می‌شود. وانگ<sup>۱۰</sup> و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۴، اثر زاویه قالب و عرض شیار بر خواص مکانیکی و ریزساختاری ورق نیکل تحت فرآیند پرس‌کاری شیاری محدود را به صورت تئوری و تجربی بررسی کردند و گزارش کردند افزایش پهنا و زاویه شیارها موجب افزایش نیروی فرآیند می‌شود. این محققین در پژوهشی دیگر [۲۲] اثر اصطکاک را به صورت تجربی در فرآیند CGP بررسی کردند و نشان دادند با بهبود شرایط سطح امکان اعمال تعداد پاس‌های بالاتر فراهم می‌گردد. غلامی و همکاران [۲۵] به صورت تجربی و عددی اثر فرآیند CGP را بر روی ورق آلومینیومی ۶۰۶۱ مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه گرفتند که توزیع خواص مکانیکی در نمونه‌های CGP شده غیر یکنواخت است. در نهایت گزارش کردند که با بهینه‌سازی پارامترهای هندسی فرآیند می‌توان یکنواختی خواص مکانیکی را افزایش داد. غلامی و همکاران در پژوهشی دیگر [۲۶]، به صورت عددی اثر استفاده از ورق‌گیر را

<sup>۱</sup> Equal channel angular pressing

<sup>۲</sup> High pressure torsion

<sup>۳</sup> Accumulative roll bonding

<sup>۴</sup> Equal channel angular rolling

<sup>۵</sup> Constrained Groove Pressing

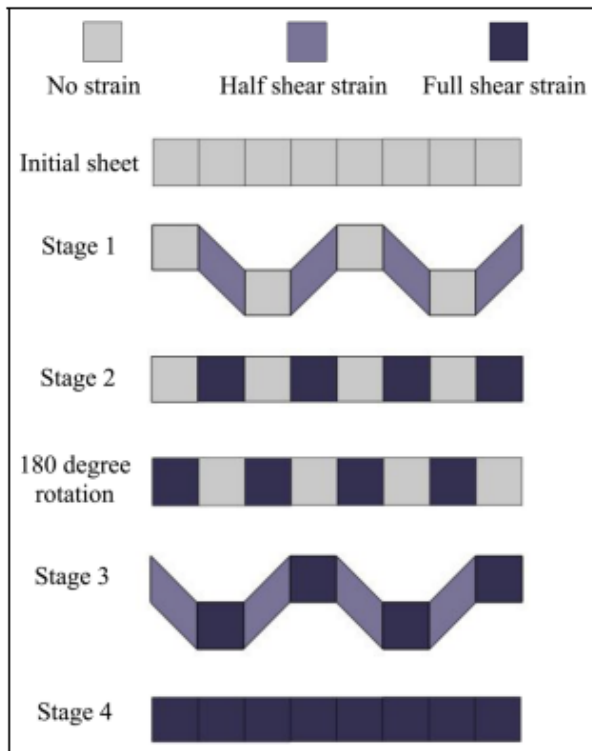
<sup>۶</sup> Shin

<sup>۷</sup> Lee

<sup>۸</sup> Krishnaiah

<sup>۹</sup> Ganesh

<sup>۱۰</sup> Wang



شکل ۱: نمایی ساده از مراحل عملی فرآیند پرسکاری در قالب‌های شیاردار مقید [۲۵].

در این فرآیند چهار مرحله متوالی فشار ورق یک پاس کامل محسوب می‌شود که دو مرحله توسط قالب‌های شیاردار و دو مرحله توسط قالب‌های تخت انجام می‌گیرد. قبل از پرس کاری یک جفت قالب شیاردار نامتقارن (شکل ۱ (a)) و یک جفت قالب تخت (شکل ۱ (C)) آماده می‌شوند. در ابتدا، نمونه توسط قالب‌های شیاردار با عرض شیار  $T$  و یک زاویه شیار  $\theta$  (شکل ۱ (a)) که فاصله بین صفحات قالب بالا و پایین برابر با ضخامت نمونه است نگه‌داشته می‌شود. اولین مرحله در هر پاس، یک ورق فلزی به ضخامت  $t$  بین دو قالب شیاردار که شکل نامتقارن دارند، قرار می‌گیرد. قالب پایینی در تمام جهات و زوایا کاملاً مقید شده است و قالب بالایی می‌تواند در راستای عمودی حرکت کند. پس از نزدیک شدن قالب‌ها به یکدیگر و اعمال فشار به ورق تا اندازه‌ای که فاصله میان آن‌ها برابر ضخامت ورق باشد، بخش‌هایی از ورق که در نواحی مورب قالب‌ها شکل‌دهی می‌شوند (مناطق تک هاشورخورده در شکل ۱ (b))، در معرض تغییر شکل توسط تنش برشی قرار گرفته‌اند در صورتی که نواحی تخت ورق (مناطق ب

روی یکنواختی کرنش پلاستیک انباشته شده در نمونه مسی را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که استفاده از ورق گیر حین فرآیند به طور قابل ملاحظه‌ای موجب یکنواختی کرنش پلاستیک و در نتیجه یکنواختی خواص مکانیکی می‌شود. جبلی و همکاران [۲۷] در سال ۲۰۲۳، روش CGP را در دمای بالا ( $250^{\circ}\text{C}$  به صورت تجربی بکار گرفته و اثر این روش را روی خواص مکانیکی نمونه شکل‌دهی شده بررسی کردند. در نهایت با مطالعه شکست‌نگاری مشخص شد که با افزایش تعداد پاس‌های فرآیند، مکانیزم شکست از حالت ترد به حالت نرم تغییر می‌یابد. وانگ و همکاران [۲۸] در سال ۲۰۲۳، اثر CGP با بکارگیری کوبش التراسونیک در دماهای مختلف را بررسی کردند و نتیجه گرفتند، در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد با مدت زمان کوبش ۱۰۰ ثانیه، تلفیق مناسبی از شکل‌پذیری و استحکام حاصل می‌شود. یاداو و همکاران [۲۹] در سال ۲۰۲۳، به مطالعه اثر فرآیند CGP بر روی رفتار سایشی نمونه‌های آلومینیومی پرداختند و نتیجه گرفتند مقاومت به سایش نمونه‌های CGP شده به دلیل اعمال کرنش نیز، افزایش می‌یابد. ب توجه به تحقیقات گذشته، اثر ضریب اصطکاک در فرآیند CGP بر روی نیروی شکل‌دهی صورت نگرفته است. در تحقیق حاضر، علاوه بر مطالعه کرنش پلاستیک ایجاد شده در نمونه، به بررسی اثر اصطکاک روی نیروی شکل‌دهی پرداخته شده است و نتایج بدست آمده نشان‌دهنده آن است که با افزایش ضریب اصطکاک میزان ماکزیمم نیروی شکل‌دهی افزایش می‌یابد.

## ۲- فرآیند CGP

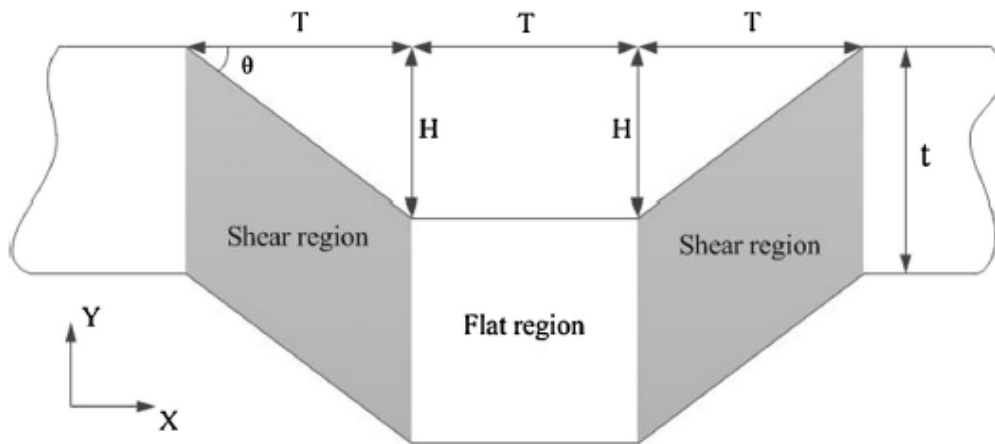
در فرآیند CGP، چهار مرحله پرس کاری متوالی مانند شکل ۱ انجام می‌شود که یک سیکل پرس کاری شیاردار محدود نامیده می‌شود. انجام هر سیکل پرس کاری می‌تواند همراه با ریزتر کردن دانه‌بندی‌های ورق منجر به افزایش استحکام و سختی ورق شود، ولی با افزایش تعداد سیکل‌ها اثرات فرآیند بر بهبود رفتار مکانیکی ورق کاهش می‌یابد، همچنین ایجاد ترک‌های سطحی و کاهش شکل‌پذیری نمونه از عوامل محدود کننده تعداد سیکل‌های قابل انجام روی یک ورق است.

سوم و چهارم باعث می‌شود یک تغییرشکل پلاستیک با توزیع تقریباً یکنواخت در سراسر ورق بوجود بیاید. با تکرار روش CGP تا زمانیکه هیچ‌گونه ترک در ورق و شکست آن پدیدار نشده است مقدار زیادی کرنش پلاستیک در ورق همزمان با عدم تغییر در ابعاد اولیه آن انباشته می‌شود که منجر به ایجاد یک ساختار بسیار ریزدانه یا نانومتری در ماده می‌شود.

۲-۱- محاسبه کرنش برشی پلاستیک مؤثر در فرآیند CGP

کرنش برشی پلاستیک مؤثر در یک سیکل کامل فرآیند پرس‌کاری شیاری محدود در حالت ایده‌آل با حل عددی محاسبه شده و با نتایج تحلیلی منتشر شده مقایسه شده است.

شکل ۲ قسمتی از ورق که تحت فرآیند CGP قرار گرفته است را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، روابط نظری برای محاسبه کرنش مؤثر انباشته شده پس از فشار اول CGP در نواحی تغییرشکل یافته‌ی ورق استخراج شده است.



T- Groove width,  $\theta$  - Groove angle, H- Groove height, t- Sample thickness

شکل ۲: طرح‌واره بخشی از ورق پس از تغییر شکل در مرحله اول فرآیند پرسکاری در قالب‌های شیاردار مقید [۵].

$$\epsilon_{xy} = \frac{\gamma_{xy}}{2} \quad (۲)$$

کرنش مؤثر ون میزز ( $\epsilon_{eff}$ ) از رابطه زیر بدست می‌آید [۵].

$$\epsilon_{eff} = \sqrt{\frac{2}{3}[(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + (\epsilon_y - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_x)^2] + \frac{4}{3}[\epsilon_{xy}^2 + \epsilon_{yz}^2 + \epsilon_{zx}^2]} \quad (۳)$$

بدون هاشور در شکل ۱ (b)) بدون اینکه تغییرشکلی در آن نواحی ایجاد شود باقی می‌مانند. دومین مرحله از هر پاس، ورق فلزی توسط یک جفت قالب مسطح ساده فشرده می‌گردد (شکل ۱ (C)) که باعث می‌شود قسمت‌هایی از ورق که در مرحله اول دچار تغییر شکل شده‌اند، تحت یک تغییر شکل برشی معکوس قرار بگیرند. این در حالی است که بخش‌هایی که در مرحله اول تغییرشکل نیافته‌اند، همچنان بدون تغییر شکل باقی می‌مانند. پس از پایان مرحله دوم و قبل از اجرای مراحل سوم و چهارم فرآیند، قطعه‌کار به اندازه ۱۸۰ درجه حول محور ضخامتش دوران می‌کند به صورتی که نواحی تغییر شکل یافته در مرحله اول روی نواحی تخت قالب شیاردار و نواحی تخت که تغییر شکل نیافته‌اند، روی مناطق مورب قالب‌های شیاردار قرار بگیرد. (شکل ۱ (d)) تا به این ترتیب با اعمال فشار مجدد ورق فلزی توسط قالب‌های شیاردار نامتقارن (شکل ۱ (e)) و همچنین مسطح شدن آن (شکل ۱ (f)) در این دو مرحله، آن قسمت‌هایی که در دو مرحله اول دچار تغییر شکل نشده‌اند، دچار تغییر شکل می‌شوند. مراحل

مقدار کرنش برشی مهندسی از رابطه ۱ محاسبه می‌شود

$$\gamma_{xy} = \frac{H}{T} = \tan \theta \quad (۱)$$

که در این رابطه  $H$ ،  $T$  و  $\theta$  به ترتیب ارتفاع، پهنا و زاویه‌ی شیار هستند. مقدار تانسور کرنش برشی نصف مقدار محاسبه شده در رابطه ۱ است.

#### ۴- شبیه‌سازی اجزاء محدود

در این تحقیق از نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS ۶-۱۴ برای شبیه‌سازی عددی مساله استفاده شده است. چون با اعمال هر مرحله از فرآیند CGP به دلیل کارسختی خواص مکانیکی نمونه تغییر می‌کند، در تحلیل عددی حاضر از روشی استفاده شده است که می‌تواند نتایج خروجی هر مرحله را به عنوان ورودی مرحله بعد منتقل کند. ورق مسی در این شبیه‌سازی به صورت جسم جامد تغییرشکل پذیر مدل شده است. به منظور مطالعه دقیق‌تر از نظر توزیع و مقدار نیروی شکل‌دهی، قالب‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی به صورت صلب / تحلیلی مدل شده است. از آنجا که در فرآیند CGP تغییرات اندازه نمونه پس از هر پاس در امتداد جهت شیارها ناچیز است، این فرآیند کرنش صفحه‌ای محسوب می‌شود. در مدل اجزاء محدود، ابعاد قالب و نمونه  $2 \times 20$  میلی‌متر در نظر گرفته شده است. از نتایج این مدل برای ارزیابی کرنش پلاستیک انباشته در حین فرآیند و نیروی شکل‌دهی استفاده شده است. در این شبیه‌سازی مقدار ضریب اصطکاک مطابق با منبع [۱۲] برابر  $0.25$  در نظر گرفته شده است. در هر مرحله از تحلیل، درجات آزادی قالب‌های پایین (تخت و شیاردار) در تمام جهات مقید شده است. کفه بالایی قالب نیز تنها در راستای عمود بر ورق امکان جابجایی دارد. میزان جابجایی قالب در حین فرآیند تغییر شکل به میزان ضخامت ورق می‌باشد. در شبیه‌سازی انجام گرفته در این تحقیق، به‌منظور جلوگیری از ازدیاد طول ورق بدون ایجاد لبه در قالب، طرفین ورق مقید شده است.

با فرض تغییرشکل برشی خالص تحت شرایط کرنش صفحه‌ای ( $\epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon_z = \epsilon_{yz} = \epsilon_{zx} = 0$ ) کرنش مؤثر ایجاد شده در نواحی تغییرشکل یافته پس از هر فشار در فرآیند PGC از رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$\epsilon_{eff} = \sqrt{\frac{4\epsilon_{xy}^2}{3}} = \sqrt{4\left(\frac{\gamma_{xy}}{3}\right)^2} = \frac{\gamma_{xy}}{\sqrt{3}} = \frac{\tan \theta}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

بنابراین، کرنش مؤثر کل جمع شده در یک ورق عبور کرده از  $n$  سیکل کامل فرآیند CGP از رابطه زیر محاسبه خواهد شد [۵]:

$$\epsilon_{total} = n \frac{2 \tan \theta}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

اگر زاویه یارب ( $\theta$ ) برابر  $45$  درجه باشد، پهنای شیار ( $T$ ) برابر ارتفاع شیار ( $H$ ) است. لذا کرنش برشی مهندسی برابر  $1$  خواهد بود  $\gamma_{xy} = 1$  و در هر فشار کرنش مؤثری برابر با  $\epsilon_{eff} = \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0.58$  بر نواحی تغییرشکل یافته اعمال خواهد شد. لذا از لحاظ نظری یک سیکل فرآیند CGP با این زاویه شیار، چنانچه کل تنش به صورت تنش برشی لحاظ شود، منجر به اعمال کرنش مؤثر کل برابر  $1/16$  بر ورق می‌شود [۵].

#### ۳- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق، شبیه‌سازی اجزاء محدود دوپاس کامل فرآیند پرس کاری شیاری محدود توسط نرم‌افزار آباکوس بر روی ورق مسی خالص به صورت دوبعدی انجام می‌شود. خواص مکانیکی و ضرایب جانسون-کوک ورق مسی مورد استفاده در شبیه‌سازی در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است

جدول ۱- چگالی و خواص الاستیک ورق مس خالص مورد استفاده در شبیه‌سازی [۲۳].

چگالی ( $\text{Kg/m}^3$ )	نسبت پواسون ( $\nu$ )	مدول یانگ (GPa)
۸۹۶۰	۰/۳۳	۱۱۷

جدول ۲- ثوابت و پارامترهای جانسون-کوک مورد استفاده در شبیه‌سازی [۲۳].

A (MPa)	B (MPa)	n	C	m	Tr (K)	Tm (K)	$\phi_0$
۹۰	۲۹۲	۰,۳۱	۰,۰۲۵	۱,۰۹	۲۹۸	۱۳۵۶	۱

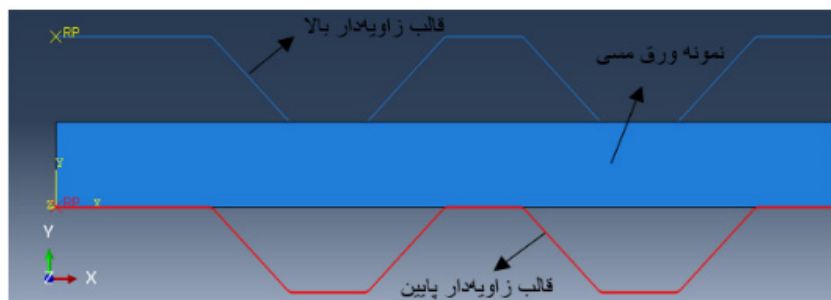
### ۵- ارائه نتایج و بحث

در این بخش، نتایج بدست آمده از پژوهش مورد نقد و بررسی قرار گرفته است. مهمترین نتایج بدست آمده توزیع کرنش پلاستیک انباشته شده و نیروی شکل‌دهی حین انجام فرآیند است. در نهایت اثر ضریب اصطکاک روی نیروی شکل‌دهی فرآیند مورد مطالعه قرار گرفته است.

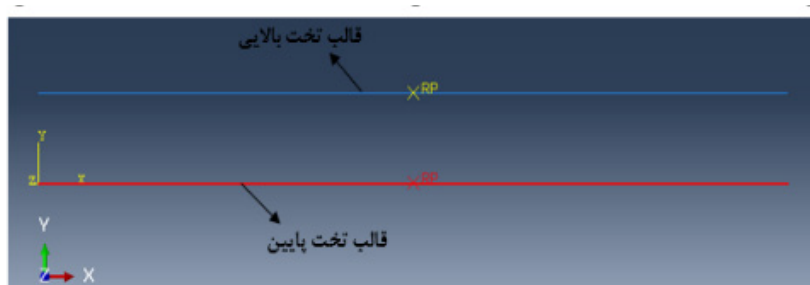
#### ۵-۱- توزیع کرنش پلاستیک انباشته شده

در شکل ۴ نتایج شبیه‌سازی برای یک سیکل کامل فرآیند CGP نشان داده شده است. نتایج به صورت کانتورهای کرنش پلاستیک مؤثر در مراحل چهارگانه ترسیم شده است. همانطور که مشخص است کرنش پلاستیک مؤثر انباشته در طی چهار مرحله افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهد نواحی که در دو مرحله اول تغییر شکل نداشته‌اند در مرحل سوم و چهارم بیشترین میزان کرنش در ورق را دارا هستند.

در این شبیه‌سازی با توجه به شکل ساده ورق از المان دو بعدی-CPE4R: A 4-node bilinear plane strain quad-rilateral, reduced integration, hourglass control جهت مش‌بندی ورق استفاده شده است. این المان مربعی دارای یک درجه آزادی برای هر گره است که با بهره‌گیری از انتگرال‌گیری کاهش یافته، از پدیده قفل شونده‌گی برشی جلوگیری می‌شود. با توجه به ماهیت حل روش‌های عددی از جمله تحلیل اجزاء محدود، سائز المان تاثیر زیادی بر روی نتایج حاصله دارد. لذا به منظور انتخاب سائز مناسب المان در تحلیل اجزاء محدود از روش همگرایی مش برای پارامتر کرنش پلاستیک مؤثر استفاده شده است. با توجه به توضیحات داده شده، سائز مناسب المان به روش همگرایی برابر با  $0.35$  میلی‌متر بدست آمده است. لذا تعداد  $348$  المان در مدل اجزاء محدود برای ورق وجود دارد. در شکل ۳ قالب‌های شیاری، تخت و نمونه ایجاد شده در شبیه‌سازی اجزاء محدود نشان داده شده است.

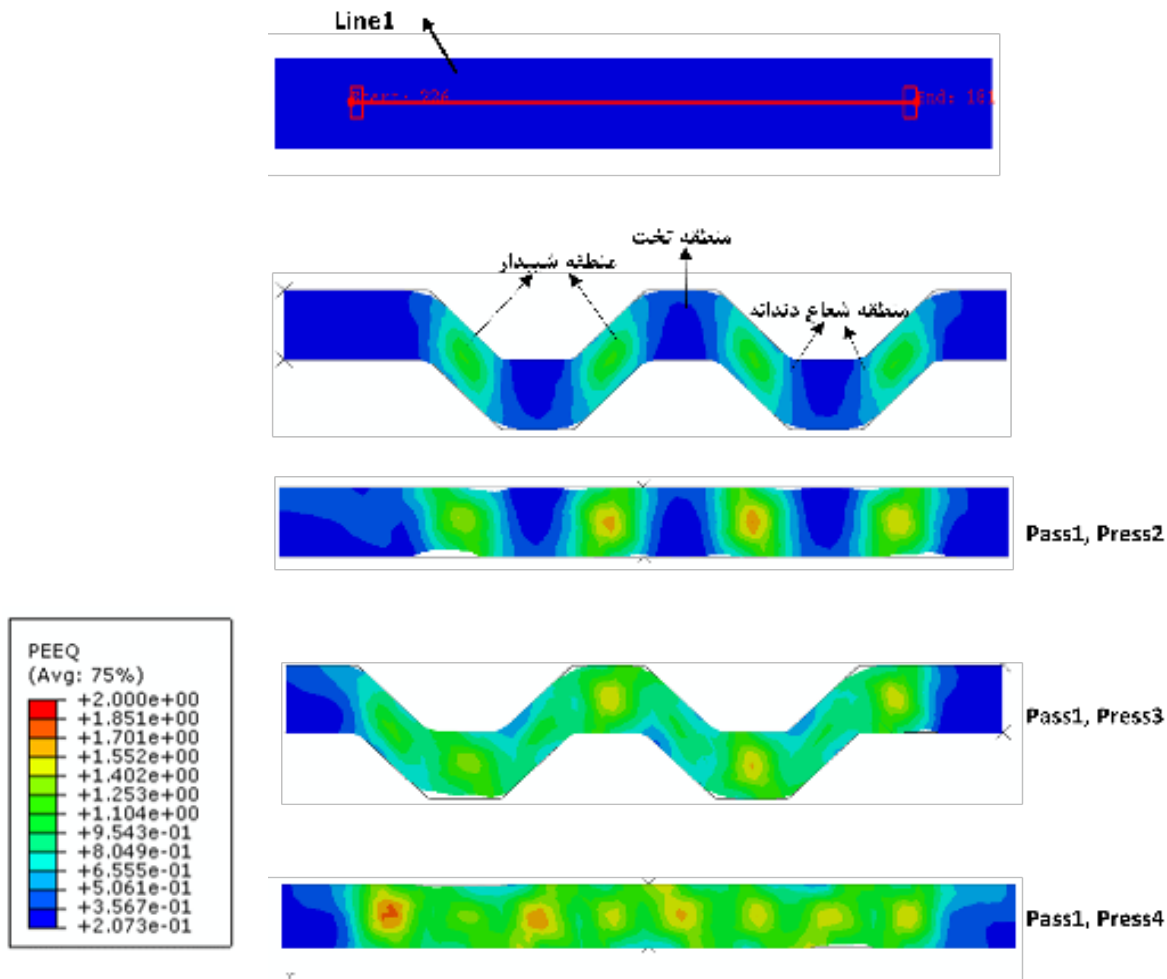


الف



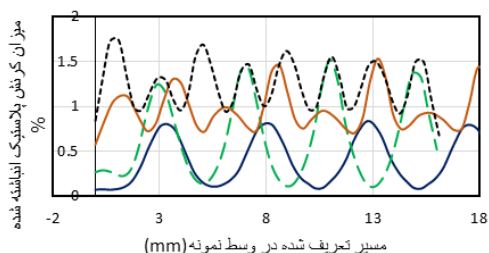
ب

شکل ۳ نمایی از قالب‌های: الف) شیاری، و نمونه ب) قالب‌های تخت، ایجاد شده در شبیه‌سازی اجزاء محدود.



شکل ۴: کانتورهای کرنش پلاستیک مؤثر در مراحل چهارگانه.

کرنش مؤثر پلاستیک در پایان مرحله چهارم غیریکنواخت است [۲۵،۳۰]. دلیل این غیر یکنواختی در ادامه تشریح خواهد شد. برای مطالعه و مقایسه بهتر توزیع کرنش مؤثر پلاستیک در مراحل چهارگانه فرآیند پرس کاری شیاری محدود، بر اساس منابع [۲۵،۲۶،۳۰] یک مسیر در وسط نمونه واقع بر گره‌های خط مرکزی در فواصل مساوی تعریف شد و در شکل ۵ منحنی‌های توزیع کرنش مؤثر پلاستیک برای مراحل چهارگانه فرآیند نشان داده شده است



شکل ۵: منحنی‌های توزیع کرنش مؤثر پلاستیک برای مراحل چهارگانه فرآیند CGP (در راستای خط ۱- شکل ۴).

همانطور که از شکل ۴ مشخص است در مرحله اول مناطق مورب دچار تغییر شکل و در نتیجه کرنش برشی شده‌اند در حالی که مناطق تخت بدون تغییر شکل باقی مانده‌اند [۲۵،۲۶،۳۰]. در مرحله دوم از پاس اول مناطق تغییر شکل یافته در مرحله اول در معرض تغییر شکل برشی معکوس قرار گرفته و حدود دو برابر مقدار کرنش مؤثر پلاستیک بیشتر می‌شود و این در حالی است که مناطق تغییر شکل نیافته همچنان بدون تغییر باقی می‌مانند [۲۵،۲۶]. در مراحل سوم و چهارم (چرخش ۱۸۰ درجه ورق حول محور ضخامت) مناطقی که در مراحل اول و دوم تغییر شکل نداشته‌اند با قالب در تماس بوده و مطابق روند گفته شده دچار تغییر شکل می‌شوند. در حالت ایده آل انتظار می‌رود که پس پایان مرحله چهارم (یک پاس کامل) توزیع کرنش مؤثر پلاستیک یکنواختی در سراسر ورق ایجاد شود، اما توزیع

باعث غیریکنواختی کرنش در نقاط مختلف نمونه می‌شوند که در نتیجه باعث غیر یکنواختی در میزان ریزش دانه در فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید به روش CGP می‌شود [۲۵]. در جدول ۳، مقدار میانگین کرنش پلاستیک بدست آمده در شبیه‌سازی اجزاء محدود در پایان مرحله چهارم فرآیند، با سایر پژوهش‌ها مقایسه شده است.

جدول ۳- مقایسه مقدار میانگین کرنش پلاستیک با سایر

پژوهش‌ها		
Researchers	Material	average effective plastic strain
Gholami et al[25]	Al ۶۰۶۱	۱.۳۶
Gholami et al[26]	Copper	۱.۲۷
Sunil Kumar et al [۳۱]	AA۵۰۸۳	۱.۲۲
Honarpisheh et al [۳۰]	Pure Copper	۱.۳۱
Current study	Copper	۱.۲۳

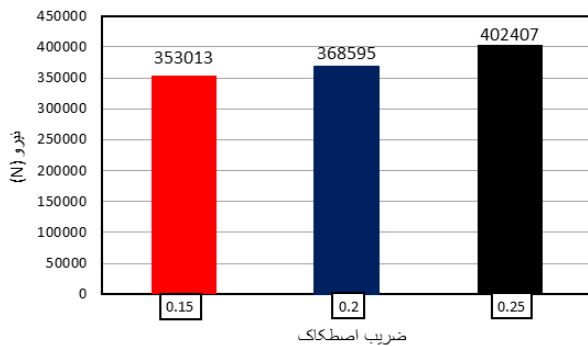
#### ۵-۵- نیروی شکل‌دهی حین فرآیند

در شکل ۶ مقدار نیروی شکل‌دهی حاصل از شبیه‌سازی اجزاء محدود برای مراحل مختلف یک پاس فرآیند نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌گردد، با جابجایی قالب بالا به سمت پایین میزان نیروی شکل‌دهی در همه مراحل فرآیند، روند افزایشی دارد. در مرحله اول فرآیند، با جابجایی قالب، تغییرات نیروی شکل‌دهی شامل سه بخش است. در بخش اول نیرو افزایش می‌یابد که دلیل آن مقاومت الاستیک ورق مسی در برابر تغییر شکل است. بخش دوم پس از تسلیم نمونه، شیب تغییرات نیرو کاهش یافته، اما همچنان روند صعودی دارد. بخش سوم پایان شکل‌دهی و پر شدن قالب است. روند تغییرات نیروی شکل‌دهی مشابه با نتایج گزارش شده در منابع [30,22] می‌باشد. این سه ناحیه در شکل ۷ برای مرحله اول از پاس اول فرآیند با کمک کانتور کرنش نشان داده شده است. مطابق شکل ۶ شیب نمودار در مراحل ۱ و ۳ بیشتر از مراحل ۲ و ۴ است که می‌توان آنرا به لغزش ورق روی شیارهای قالب بالا و پایین به دلیل نیروی قالب بالا و در نتیجه افزایش اصطکاک نسبت داد. رفتار پایانی نمودار در مراحل ایجاد شیار (مراحل ۱ و ۳) با مراحل

با توجه به شکل ۵ در مرحله اول از پاس اول، میزان کرنش پلاستیک موثر از کمترین مقدار در نواحی تخت (با مقدار کرنش برابر ۰.۰۷) تا بیشترین مقدار در نواحی مورب شیارها (با مقدار کرنش برابر ۰.۸۳) تغییر می‌کند. در شکل ۴ این مناطق مشخص شده است. در مرحله دوم بیشترین کرنش موثر پلاستیک در نواحی شیاری به مقدار ۱.۵۱ رسیده است در حالیکه کرنش نواحی تخت در کمینه مقادیر باقی مانده است. مطابق با این روند انباشت کرنش در مراحل سوم و چهارم (چرخش ۱۸۰ درجه‌ای ورق حول محور ضخامت) میانگین کرنش پلاستیک به ترتیب در حدود ۰.۹۵ و ۱.۲۳ رسیده است.

در حالت ایده آل و بر اساس مدل تحلیلی، بایستی مقادیر کرنش پلاستیک در مراحل اول و دوم به ترتیب به مقادیر ۰/۵۸ و ۱/۱۶ برسد و همچنین کرنش پلاستیک موثر در مراحل سوم و چهارم (مناطق که در مرحله اول و دوم تغییر شکل نداشته‌اند) باید به همین مقادیر برسند [۵]. بر اساس نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی اجزاء محدود میزان کرنش پلاستیک بیشتر از این مقادیر هستند. دلیل این موضوع وجود تغییر شکل بیشتر در نواحی برشی در فرآیند پرسکاری شیاری محدود نسبت به برش ساده در مدل تحلیلی است، چرا که تماس بین ناحیه برشی و ناحیه مسطح در فرآیند، برش ساده نیست. این مورد هم در شبیه‌سازی و هم در عمل مشاهده شده است [۲۴]. همانگونه که در شکل‌های ۴ و ۵ مشخص است، دو میلی‌متر در نواحی ابتدایی و انتهایی ورق صرفاً جهت انطباق با دو دیواره داخلی حفره قالب در نظر گرفته شده‌اند که در مراحل شکل‌دهی تغییر شکل نمی‌دهند. در سایر نقاط، میزان کرنش پلاستیک مؤثر در پایان پاس اول در بازه 0.2 الی 2 متغیر می‌باشد. به عبارتی به دلیل شرایط متفاوت ایجاد شده در حین فرآیند، میزان انباشت کرنش پلاستیک در نواحی مختلف ورق یکسان نیست و توزیع غیر یکنواختی دارد. یکی از دلایل این غیریکنواختی را می‌توان به شعاع گوشه لبه دندانه‌های قالب نسبت داد [۲۵]. وجود شعاع گوشه باعث می‌شود که نواحی ورق در تماس با آن، در معرض تغییر شکل برشی کمتری نسبت به نواحی مورب و تخت قرار بگیرند. تفاوت تغییر شکل در این مناطق،

این تحقیق اثر ضریب اصطکاک بر نیروی شکل‌دهی مورد مطالعه قرار گرفته و در شکل ۸ نتایج آن نشان داده شده است. شایان ذکر است این نتایج برای مرحله اول از پاس اول فرآیند پرسکاری شیاری محدود گزارش شده است.



شکل ۸ مقایسه مقادیر ماکزیمم نیروی شکل‌دهی بر اساس ضریب اصطکاک‌های مختلف در مرحله اول از پاس اول فرآیند CGP.

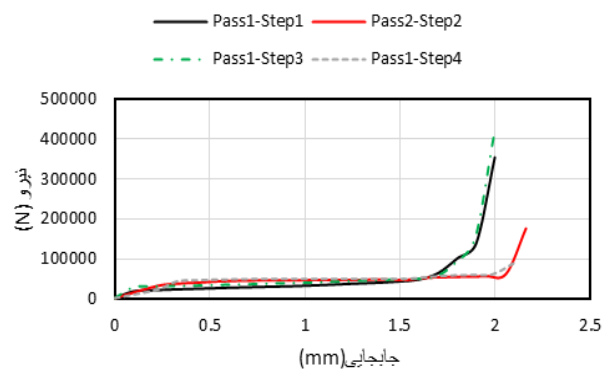
شکل ۸ نشان می‌دهد که افزایش میزان ضریب اصطکاک باعث افزایش ماکزیمم نیروی شکل‌دهی می‌گردد. به عبارت دیگر این دو پارامتر باهمدیگر رابطه مستقیم دارند. میزان افزایش نیروی شکل‌دهی در حالتی که ضریب اصطکاک 0/2 است نسبت به حالت اولیه (ضریب اصطکاک 0/15) 4/41 درصد و با افزایش ضریب اصطکاک به مقدار 0/25 این مقدار به 13/99 درصد می‌رسد. همانطور که در بخش قبل بیان شد علت افزایش ماکزیمم نیروی شکل‌دهی در اثر پر شدن شدن گوشه‌های قالب است که در آن حالت به دلیل افزایش سطوح تماس و از سوی دیگر ضریب اصطکاک بالا موجب افزایش میزان ماکزیمم نیروی شکل‌دهی می‌گردد.

## ۶- نتیجه‌گیری

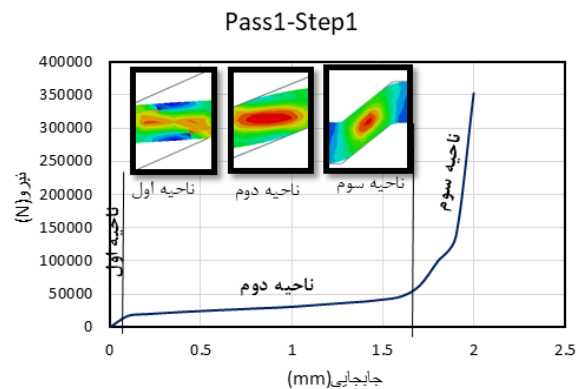
در این مقاله، شبیه‌سازی اجزاء محدود فرآیند CGP با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام شد و مهمترین نتایج بدست آمده به صورت خلاصه در این بخش ارائه می‌گردد.

۱- روابط تحلیلی حاکم بر فرآیند کرنش پلاستیک را ۱/۱۶ پیش‌بینی می‌کند که به صورت تصاعدی با افزایش تعداد پاس افزایش می‌یابد. اما در شبیه‌سازی انجام شده مشاهده شد که

مسطح‌سازی ورق (مراحل ۲ و ۴) متفاوت است. با حرکت ورق در درون شیارها و در مراحل پایانی پر شدن گوشه‌های تیز قالب، به دلیل افزایش بسیار زیاد سطح تماس و افزایش زیاد نیروی مقاوم اصطکاکی، میزان نیروی شکل‌دهی با شیب زیاد افزایش می‌یابد. افزایش نیرو در مراحل پایانی مراحل مسطح‌سازی، مربوط به وجود دیواره‌های جانبی قالب‌ها است که در مراحل تخت‌کردن سبب مقید شدن تغییر شکل و افزایش نیرو می‌شوند [۲۱،۳۰].



شکل ۶ نتایج مربوط به تغییرات نیروی شکل‌دهی بر حسب جابجایی قالب بالا در مراحل چهارگانه فرآیند در پاس اول



شکل ۷ روند تغییرات نیرو در سه ناحیه مختلف از مرحله اول پاس اول فرآیند

## ۳-۵- بررسی اثر ضریب اصطکاک روی نیروی شکل‌دهی

یکی دیگر از پارامترهای تاثیرگذار بر نیروی شکل‌دهی فرآیند، ضریب اصطکاک است. افزایش میزان ضریب اصطکاک باعث می‌شود ورق در برابر تغییر شکل بیشتر مقاومت کند و به همین دلیل میزان نیروی مورد نیاز جهت شکل‌دهی افزایش می‌یابد. در

fluences of die structure on constrained groove pressing of commercially pure Ni sheets, *Materials Processing Technology*, Vol. 215, No. 1, pp. 205-218, 2015.

[6] A. Shirdel, A. Khajeh, M. Moshksar, Experimental and finite element investigation of semi-constrained groove pressing process, *Materials & Design*, Vol. 31, No. 2, pp. 946-950, 2010.

[7] M. A. Ranaci, A. Afsari, S. Y. Ahmadi, Brooghani, M. M. Moshksar, Microstructure, mechanical and electrical properties of commercially pure copper deformed severely by equal channel angular pressing, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 257-267, 2014. (in Persian).

[8] M. Nili Ahmadabadi, H. Shirazi, H. Ghasemi-Nanesa, S. Hossein Nedjad, B. Poorganji, T. Furuha, Role of severe plastic deformation on the formation of nanograins and nano-sized precipitates in Fe-Ni-Mn steel, *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 3526-31, 2011.

[9] Y.u. Ivanisenko, R.Z. Valiev, H.J. Fecht, Grain boundary statistics in nanostructured iron produced by high pressure torsion, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 390, pp. 159-65, 2005.

[10] Z. Horita, D.J. Smith, M. Furukawa, M. Nemoto, R.Z. Valiev, T.G. Langdon, An investigation of grain boundaries in submicrometergrained Al-Mg solid solution alloys using high-resolution electron microscopy, *Journal of Materials Research*, Vol. 11, No. 08, pp. 1880-1890, 1996.

[11] Y. Saito, N. Tsuji, H. Utsunomiya, T. Sakai, R. G. Hong, Ultrafine grained bulk aluminum produced by accumulative rollbonding (ARB) process, *Scripta Materialia*, Vol. 39, No. 9, pp. 1221-1227, 1998.

[12] Y. Saito, N. Tsuji, H. Utsunomiya, T. Sakai, Novel ultra-high straining process for bulk materials—development of the accumulative roll-bonding (ARB) process, *Acta Materilia*, Vol. 47, pp. 579-83, 1999.

[13] G. Faraji, HS. Kim, Review of principles and methods of severe plastic deformation for producing ultrafine-grained tubes, *Materials Science and Technology*, Vol. 4, pp. 1-9, 2016.

[14] H.Torabzadeh Ksshi, G. Faraji, A review of the production of ultrafine grained and nanograined metals by applying severe plastic deformation, *Modares Mechanical Engineering*, pp. 271-282, 2016.

میانگین کرنش در وسط نمونه پس از پایان پاس اول برابر  $1/23$  است. با توجه به خطای کم ( $0.3/6$ ) و ماهیت اندازه‌گیری کرنش در مدل تحلیلی توسعه یافته و مدل اجزاء محدود میزان خطا قابل توجیه است.

۲- در راستای طول نمونه، تغییرات کرنش نوسانی بوده و در منطقه شعاع گوشه کمترین میزان کرنش ایجاد می‌شود.

۳- با استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود در حالت دو بعدی و کرنش صفحه‌ای، امکان پیش‌بینی رفتار نیروی شکل‌دهی وجود دارد. با توجه به روند تغییرات نیرو در مراحل شیاردار کردن (مراحل ۱ و ۳) و مراحل مسطح کردن (مراحل ۲ و ۴) مشابه هستند. نیرو در مراحل شیاردار کردن به سه ناحیه تقسیم می‌شود که در مرحله سوم و در زمان تکمیل محفظه شیار نیرو با شیب زیاد افزایش می‌یابد. افزایش نیروی مضاعف در پایان مراحل ۱ و ۳ ناشی از نیروی شکل‌دهی برای پر شدن گوشه‌های قالب است.

۴- با بررسی اثر ضریب اصطکاک بر روی نیروی شکل‌دهی فرآیند مشخص گردید افزایش میزان ضریب اصطکاک باعث افزایش ماکزیمم نیروی شکل‌دهی می‌گردد.

## ۷-منابع

[1] M. Borhani, F. Djavanroodi, Rubber pad-constrained groove pressing process: Experimental and finite element investigation, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 546, No. 1, pp. 1-7, 2012.

[2] A. Sajadi, M. Ebrahimi, F. Djavanroodi, Experimental and numerical investigation of Al properties fabricated by CGP process, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 552, No. 1, pp. 97-103, 2012.

[3] K. Peng, L. Su, L. L. Shaw, K.-W. Qian, Grain refinement and crack prevention in constrained groove pressing of two-phase Cu-Zn alloys, *Scripta Materialia*, Vol. 56, No. 11, pp. 987-990, 2007.

[4] K. Peng, Y. Zhang, L. L. Shaw, K.-W. Qian, Microstructure dependence of a Cu-38Zn alloy on processing conditions of constrained groove pressing, *Acta Materialia*, Vol. 57, No. 18, pp. 5543-5553, 2009.

[5] Z.-S. Wang, Y.-J. Guan, G.-C. Wang, C.-K. Zhong, In-

Vol. 237(12) 1836–1846 IMechE 2022.

- [26] Moein Gholami, Ali Hasanabadi. Investigation of Effective Plastic Strain Heterogeneity and the Effect of Using Interface Sheet in Constrained Groove Pressing of Copper Sheet. *Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production*, Volume 12, No. 1, Autumn 2023.
- [27] A. Ahmadi Jebelli, F. Fereshteh-Saniee. (2023). Superior combined strength and elongation by conducting elevated temperature constrained groove pressing on Al–Mg–Mn sheets. *Materials Chemistry and Physics* 307 128090.
- [28] Meng Kong a,b, Tong Zang a,b, Zongshen Wang a,b, Lihua Zhu a,b, Hongyu Zheng a,b, Shan Gao c, Harry M. Ngwangwa. (2023). Effects of constrained groove pressing and temperature-assisted ultrasonic shot peening on microstructure and mechanical properties of a twophase MgLi alloy. *journal of materials research and technology*;23:1947 e1967.
- [29] Prabhat Chand Yadav a, Gaurav Gupta b, Rajat Gupta c, Ambreen Nisar. (2023). Directional fretting wear behaviour of constrained groove pressed aluminium sheet. *Materials Today Communications* 35 105669, doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105669.
- [30] Honarpisheh, M, Tavajjohi M.H.1, Nazari F. (2019). Experimental and Numerical Study of Severe Plastic Deformation in the Constrained Groove Pressing Process on the Pure Copper Sheets. *Modares Mechanical Engineering*. 2019;19(2):269-280. (in Persian).
- [31] Kumara, S., Hariharanb, K., Digavallia, R. K. and Paulc, S. K. 2019. Accounting Bauschinger effect in the numerical simulation of constrained groove pressing process. *Journal of Manufacturing Processes*. 38: 49–62.
- [15] Shin DH, Park JJ, Kim YS, Park KT. Constrained groove pressing and its application to grain refinement of aluminum. *Mater SciEng A*; Volume 328 pp 98–103, (2002).
- [16] Lee, J. W., & Park, J. J. (2002). Numerical and experimental investigations of constrained groove pressing and rolling for grain refinement. *Journal of Materials Processing Technology*, 130, 208-213.
- [17] Krishnaiah, A., Chakkingal, U., & Venugopal, P. (2005). Applicability of the groove pressing technique for grain refinement in commercial purity copper. *Materials Science and Engineering: A*, 410, 337-340.
- [18] Niranjana, G. G., & Chakkingal, U. (2010). Deep drawability of commercial purity aluminum sheets processed by groove pressing. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(11), 1511-1516.
- [19] Hosseini, E., & Kazeminezhad, M. (2010). Integration of physically based models into FE analysis: Homogeneity of copper sheets under large plastic deformations. *Computational Materials Science*, 48(1), 166-173.
- [20] Yadav PC, Sinhal A, Sahu S, Roy A, Shekhar S. Microstructural inhomogeneity in constrained groove pressed Cu-Zn alloy sheet. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2016;25(7):2604-2614.
- [21] Wang, Z., Liang, P., Guan, Y., Liu, Y., & Jiang, L. (2014). Experimental investigation of pure aluminum sheets processed by constrained groove pressing.
- [22] Wang, Z.S., Y.J. Guan, and C.K. Zhong. Effects of Friction on Constrained Groove Pressing of Pure Al Sheets. in *Advanced Materials Research*. 2014. Trans Tech Publ.
- [23] Kuns L, Collini L. Mechanical properties of copper processed by equal channel angular pressing – a review. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2012;6(19):61-75.
- [24] H.S.Siddesha1, M. Shantharaja2, DilipKumar.K3, C.K.Umesh. EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL SIMULATION OF PRODUCING ULTRA-FINE GRAIN. *IJARSE*, Vol. No.4, Special Issue (02), February 2015.
- [25] Seyyed Ehsan Eftekhari Shahri, Moein Gholami and Masoud Rakhshkhorshid. Numerical-experimental study of die geometry in the constrained groove pressing of 6061 aluminum sheets. *J Engineering Manufacture* 2023,