



## تحلیل تئوری فرآیند ایکپ به روش کران بالا و بررسی تجربی آن در وضعیت مقطع دایروی کانال

رضا ناصری<sup>۱\*</sup>، مهران کدخدایان<sup>۲</sup>، محمود شریعتی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۳۰

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۰۹

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۲

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۴/۲۳

### کلمات کلیدی:

فرآیند ایکپ

نظریه کران بالا

خواص الاستیک- پلاستیک

نیروی شکل‌دهی

**خلاصه:** فرآیند ایکپ، یکی از موثرترین فرآیندهای تغییر شکل پلاستیکی شدید جهت تولید فلزات فوق ریزدانه است. نظریه کران بالا نیز یکی از ابزارهای تئوری قابل اعتماد جهت پیش‌بینی تغییر شکل کرنشی و نیروی شکل‌دهی می‌باشد. در این تحقیق، تحلیل روش ایکپ با استفاده از نظریه کران بالا در زاویه کانال و گوشه دلخواه انجام و رابطه‌ای کلی و کاربرپسند جهت پیش‌بینی نیروی شکل‌دهی، بر اساس هندسه فرآیند و خواص الاستیک-پلاستیک ماده پیشنهاد گردید. با مقایسه‌ی مقدار نیروی به دست آمده از رابطه تئوری با مقدار تجربی حاصل از اعمال فرآیند روی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵، انطباق مناسبی بین نتایج مشاهده شد که این مهم قابلیت اعتماد به این رابطه را برای نیروی ایکپ تضمین می‌کند. بر اساس نتایج تحقیق حاضر، در ایکپ این ماده در شرایط زاویه کانال، زاویه گوشه، قطر و طول بیلت به ترتیب برابر  $135^\circ$ ،  $20^\circ$ ،  $10\text{ mm}$  و  $90\text{ mm}$  میزان نیروی شکل‌دهی در دو حالت تجربی و تئوری به ترتیب برابر  $48\text{ kN}$  و  $55/04\text{ kN}$  به دست آمد. همچنین با افزایش زاویه کانال از  $60^\circ$  به  $150^\circ$  درجه در زاویه گوشه ثابت  $20^\circ$  درجه، میزان نیروی فرآیند با  $41/3\%$  کاهش از  $86/4\text{ kN}$  به  $50/7\text{ kN}$  تغییر یافت. با افزایش زاویه گوشه از صفر به  $40^\circ$  درجه در زاویه کانال ثابت  $135^\circ$  درجه نیز کاهش قابل چشم‌پوشی به میزان  $2/5\%$  از  $56\text{ kN}$  به  $54/6\text{ kN}$  مشاهده شد.

### ۱- مقدمه

که تحت زاویه نسبت به یکدیگر قرار گرفته‌اند، با نیروی پرس عبور داده می‌شود. از آنجا که سطح مقطع دو کانال با یکدیگر برابر است، امکان پرسکاری مجدد قطعه تحت عنوان گذر بعدی وجود دارد. با افزایش گذرهای شکل‌دهی، بر میزان کرنش وارده افزوده می‌شود. در محل تغییر زاویه‌ی کانال، دو زاویه موسوم به زاویه کانال ( $\varphi$ ) و زاویه گوشه ( $\psi$ ) وجود دارد که دیگر پارامترهای مؤثر بر میزان کرنش وارده بر قطعه کار می‌باشند. با توجه به تعداد گذرهای تکرار فرآیند ( $N$ )، میزان کرنش معادل ( $\varepsilon_{eq}$ ) اعمالی بر قطعه کار با استفاده از معادله (۱) محاسبه می‌شود [۶]:

$$\varepsilon_{eq} = N / \sqrt{3} \left[ 2 \cot \left( \frac{\varphi + \psi}{2} \right) + \psi \csc \left( \frac{\varphi + \psi}{2} \right) \right] \quad (1)$$

در یک فرآیند شکل‌دهی، تعیین نیرو و کرنش اعمالی پیش

فرآیند ایکپ<sup>۱</sup> یا پرسکاری در کانال‌های هم‌مقطع زاویه‌دار یکی از مهمترین و موثرترین فرآیندهای تغییر شکل پلاستیکی شدید<sup>۲</sup> جهت تولید ساختارهای فوق ریزدانه و حتی نانوساختار و در نتیجه ارتقای خواص مکانیکی در فلزات خالص و آلیاژی است [۱]. در فرآیند ایکپ، مشابه سایر فرآیندهای تغییر شکل پلاستیکی شدید، کرنش‌های بسیار بالای اعمالی در اثر برش ساده، منجر به افزایش چگالی نابجایی‌ها و در نتیجه آرایش مجدد آنها و تغییر ساختار دانه‌بندی شده [۲] و خواص استاتیکی [۳ و ۴] و دینامیکی - خستگی [۵] ماده‌ی فلزی بهبود می‌یابد. در این تکنیک شکل‌دهی، قطعه کار از میان دو کانال هم‌مقطع

1 Equal Channel Angular Pressing (ECAP)

2 Severe Plastic Deformation (SPD)

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: rnaseri@tvu.ac.ir



از انجام تجربی، جهت طراحی و بررسی میزان بهینه بودن فرآیند، ضروری است. امروزه برای پیش‌بینی میزان کرنش اعمالی و نیروی مورد نیاز در یک فرآیند شکل‌دهی، عموماً از دو روش تحلیلی و عددی استفاده می‌شود [۷]. تکنیک کران بالا [۸] به عنوان روشی تحلیلی و روش اجزاء محدود [۹] به عنوان شیوه‌ای عددی، نمونه‌هایی از متداول‌ترین، در دسترس‌ترین و مطمئن‌ترین ابزارهای تعیین این پارامترها می‌باشند. ثابت شده است که این تکنیک‌ها از دقت کافی برخوردار بوده و انطباق مناسبی با نتایج تجربی نیروی شکل‌دهی [۱۰] و کرنش‌های تغییرشکل [۹] دارند. لازم به ذکر است که استفاده از روش کران بالا، محدود در یک فرآیند شکل‌دهی خاص نبوده و قابلیت تعمیم به سایر روش‌های شکل‌دهی را دارا می‌باشد [۱۱].

تاکنون مطالعات بسیاری بر پیش‌بینی نیروی شکل‌دهی در فرآیند ایکپ با استفاده از روش کران بالا انجام شده است. آلکوتا و سیولانو دو روش کران بالا و اجزاء محدود را جهت بررسی کرنش و بار شکل‌دهی، در ایکپ با مقطع مربعی و زاویه کانال کلی مقایسه کردند [۱۲]. روش کران بالا در ایکپ با شعاع انحنای برابر در محل تغییر شکل، توسط پرز مورد استفاده و پارامترهای نیرو و کرنش به دست آمده با نتایج اجزاء محدود مقایسه شد. در تحقیق مذکور از مقطع دایروی با زاویه کانال کلی استفاده گردید [۱۳]. آلتان و همکاران [۱۴] کرنش، نیرو و منطقه‌ی تغییر شکل ایکپ با مقطع مربعی و زاویه کانال ۹۰ درجه را به روش کران بالا مورد بررسی قرار دادند. یک تحلیل کران بالا در فرآیند ایکپ مربعی با زاویه کانال ۹۰ درجه و دارای زاویه گوشه، توسط ایوانی و کریمی‌طاهری [۱۵] صورت گرفت و نیروی شکل‌دهی با نتایج تجربی مقایسه شد. فرآیند ایکپ مربعی با زاویه کانال ۹۰ درجه با روش کران بالا توسط پرز و لوری [۱۶] بررسی شد و بهینه‌سازی طراحی قالب روی آن صورت گرفت. پایدار و همکاران [۱۷] روش کران بالا را در تقریب نیروی شکل‌دهی ایکپ ۹۰ درجه دارای زاویه گوشه و با مقطع دایروی استفاده و نتایج را با مطالعات تجربی مقایسه کردند. ریحانیان و همکاران [۱۸] برای بررسی تغییرشکل و نیروی شکل‌دهی فرآیند ایکپ با استفاده از روش کران بالا، از میدان سرعت خطی و دورانی استفاده نمودند. طالبانپور و ابراهیمی [۱۹] روش کران بالا را روی فرآیند جدید ایکپ دو کاناله اعمال نموده و نیروی شکل‌دهی، کرنش و رفتار تغییرشکل را مورد

بررسی قرار دادند. ابداع یک مدل بر اساس میدان سرعت سینماتیکی سه‌بعدی جدید در روش کران بالا برای پیش‌بینی کرنش و بار شکل‌دهی در فرآیند ایکپ با مقطع دایروی و زاویه کانال کلی، توسط ناروئی و کریمی‌طاهری [۲۰] انجام شد. پیش‌بینی شکل منطقه مرده تحت شرایط متغیر اصطکاکی به روش کران بالا در فرآیند ایکپ مربعی با زاویه کانال ۹۰ درجه، توسط ابری‌نیا و میرنیا [۸] صورت گرفت. فاشانو و همکاران [۲۱] نتایج کرنش اعمالی و بار وارده در ایکپ مربعی با زاویه کانال ۹۰ درجه و به دست آمده با روش کران بالا را با نتایج اجزاء محدود مقایسه کردند. سیلوا و همکاران [۷] اثر خواص ترمومکانیکی ماده را بر نیروی تغییرشکل فرآیند ایکپ مربعی با زاویه کانال ۹۰ درجه به دو روش کران بالا و شبیه‌سازی اجزاء محدود بررسی کردند. میدان کرنش و میزان بار شکل‌دهی در فرآیند ایکپ دایروی با زاویه کانال کلی، در حالت استفاده از قطعه‌کار دو فلزی با استفاده از روش کران بالا توسط ناروئی و کریمی‌طاهری [۲۲] مورد تحلیل واقع شد. لاپتف و همکاران [۲۳] از روش کران بالا با مدل بلوک صلب برای تحلیل نیرو و تغییرشکل ایکپ مربعی با زاویه کانال ۹۰ درجه استفاده کردند. وی و همکاران [۲۴] نیز روش کران بالا را در تحلیل شکل‌دهی فرآیند ایکپ T شکل مورد استفاده قرار دادند. در جدیدترین مطالعه، غفوریان نصرتی و همکاران [۲۵] تحلیل تئوری و عددی از گشتاور پیچشی مورد نیاز جهت انجام فرآیند ایکپ-کانفرم روی تیتانیوم خالص تجاری را بر اساس اعمال روش کران بالا روی منطقه تغییرشکل ایکپ و ناحیه خم اولیه ارائه کردند. مروری بر مطالعات پیشین نشان می‌دهد که عموم تحقیقات، بر استفاده از روش کران بالا در فرآیند ایکپ با مقطع مربعی و دایروی با زاویه کانال ۹۰ درجه معطوف شده‌اند. به وضوح مشخص است که استفاده از روش کران بالا در بررسی تغییرشکل و نیروی شکل‌دهی فرآیند ایکپ با مقطع دایروی با زاویه کانال دلخواه یا کلی، مغفول مانده است و از این حیث بررسی استفاده از روش کران بالا در تحلیل نیرویی فرآیند ایکپ با مقطع دایروی و در زوایای هندسی دلخواه دارای نوآوری می‌باشد. همانطور که از مروری بر منابع مشخص است نیاز به رابطه‌ای جامع با قابلیت استفاده آسان توسط کاربر وجود دارد. در تحقیق حاضر، پیش‌بینی نیروی مورد نیاز جهت شکل‌دهی فرآیند ایکپ با مقطع دایروی و هر زاویه کانال، با استفاده از روش کران بالا

سرعت حقیقی، معادله‌ی توان ارائه شده در معادله (۲) را کمینه می‌کند [۱۷]:

$$J = 2\bar{k} \int_V \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}} dV + \int_{S_v} \bar{k} \Delta v ds + \int_{S_f} m \bar{k} \Delta v ds - \int_{S_i} T_i v_i ds \quad (2)$$

در این رابطه،  $J$ ، توان مصرفی،  $\bar{k}$ ، متوسط تنش تسلیم برشی،  $\dot{\epsilon}_{ij}$ ، مولفه‌های نرخ کرنش،  $m$ ، عامل اصطکاک ثابت،  $V$ ، حجم منطقه‌ی تغییرشکل پلاستیک،  $S_v$ ، سطح ناپیوستگی سرعت،  $S_f$ ، سطوح اصطکاکی،  $S_i$ ، سطحی که ممکن است در آن ترکشن (بردار تنش) وجود داشته باشد،  $\Delta v$ ، مقدار ناپیوستگی سرعت روی سطوح اصطکاکی و ناپیوستگی،  $v_i$ ، سرعت اعمال شده روی سطح  $S_i$  و  $T_i$ ، ترکشن‌های اعمال شده روی سطح  $S_i$  می‌باشند. جمله‌ی اول در این رابطه توان مصرفی در منطقه‌ی تغییرشکل را ارائه می‌دهد. جمله‌های دوم و سوم توان مصرفی در طول سطوح ناپیوستگی سرعت و سطوح اصطکاکی را بیان می‌کنند. جمله‌ی آخر نیز توان ناشی از ترکشن‌های جسم را معرفی می‌کند [۱۷].

## ۲-۲- تحلیل تغییرشکل در فرآیند ایکپ

مهم‌ترین موضوع در تحلیل کران بالا، درک هندسه‌ی منطقه‌ی تغییرشکل و محل‌های ناپیوستگی مولفه‌ی سرعت ماده است. ناپیوستگی مولفه‌ی سرعت، زمانی اتفاق می‌افتد که جهت یا مقدار بردار سرعت در حین تغییرشکل، تغییر کند. در این تحقیق جهت تحلیل تغییرشکل در فرآیند ایکپ، از تعمیم و گسترش روابط به دست آمده توسط پایدار و همکاران [۱۷] استفاده شد تا تغییرشکل در زاویه کانال کلی غیر از ۹۰ درجه بررسی گردد. در شکل ۱ مدل تغییرشکل در قالب ایکپ با کانال‌های با سطح مقطع دایروی متقاطع در زاویه‌ی کانال  $\varphi$  و زاویه گوشه‌ی  $\psi$  نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، حجم مورد تحلیل به سه منطقه‌ی I، II و III تقسیم شده است. در منطقه‌ی I و III ماده به صورت صلب با سرعت  $v$  حرکت می‌کند. سطوح ناپیوستگی سرعت بیضی شکل So و Si، منطقه‌ی II را از مناطق I و III جدا می‌کند. So و Si به ترتیب بیانگر سطوح ورودی و خروجی از منطقه‌ی تغییرشکل II می‌باشند. سطح این دو بیضی با هم برابر و قطرهای بزرگ و کوچک آنها به ترتیب برابر  $2a / \cos\alpha$  و  $2a$  می‌باشد که  $a$  شعاع کانال و  $\alpha$  زاویه‌ی ثابت بین سطح OA و سطح بیضی Si و یا سطح OB

صورت گرفته است و استفاده از رابطه‌ی کاربرپسند<sup>۱</sup> نهایی با توضیح گام به گام پارامترهای مورد نیاز، تسهیل شده است. از آزمون تجربی نیز جهت صحت‌سنجی روابط تئوری استفاده گردیده است.

## ۲- تحلیل تغییرشکل

### ۱-۲- نظریه‌ی کران بالا در تغییرشکل پلاستیک

بر اساس قضیه‌ی کران بالا هر تخمینی از بار فروپاشی یک سازه، که با برابر در نظر گرفتن نرخ مصرف انرژی داخلی، با نرخ انجام کار نیروهای خارجی در الگوی تغییرشکل فرضی به دست آید، از بار واقعی بیشتر یا با آن برابر است [۲۶]. با توجه به این قضیه، روش کران بالا یک مدل تحلیلی برای پیش‌بینی میزان بار می‌باشد که برابر یا بزرگتر از بار مورد نیاز برای ایجاد شارش مومسان یا نیروی واقعی در فرآیندهای شکل‌دهی است [۱۷]. در این روش به تعادل تنش توجه نشده و بر ارضای یک معیار تسلیم و فرض انجام تغییرشکل پلاستیک در منطقه‌ی تغییرشکل به ازای تنش اعمالی بر ماده، تأکید می‌گردد [۲۶].

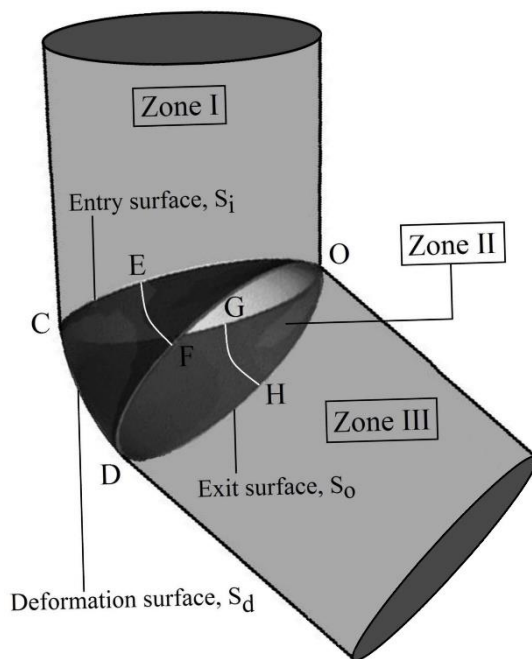
اصول، فرض‌ها و شرایط یک تحلیل کران بالا در موارد زیر خلاصه می‌شود [۲۶]:

- انرژی مصرفی داخلی در منطقه‌ی تغییرشکل بر اساس میدان سیلان داخلی و با استفاده از خواص مکانیکی ماده و حداکثر استحکام آن محاسبه می‌شود.
- با برابر قراردادن کار یا انرژی خارجی با انرژی مصرفی داخلی در منطقه‌ی تغییرشکل، نیروی مورد نیاز برای انجام تغییرشکل به دست می‌آید.
- ماده به صورت همگن و همسانگرد است.
- ماده تراکم‌ناپذیر است و حجم آن در تغییرشکل پلاستیکی ثابت باقی می‌ماند.
- فرض می‌شود در فصل مشترک ابزار-قطعه کار تنش برشی ثابت برقرار است.
- از آثار کرنش‌سختی و آهنگ کرنش بر تنش سیلان چشم‌پوشی می‌شود.

بر اساس این مدل، برای یک ماده‌ی فون میزز صلب-پلاستیک<sup>۲</sup> از میان همه‌ی میدان‌های سرعت قابل قبول سینماتیکی، میدان

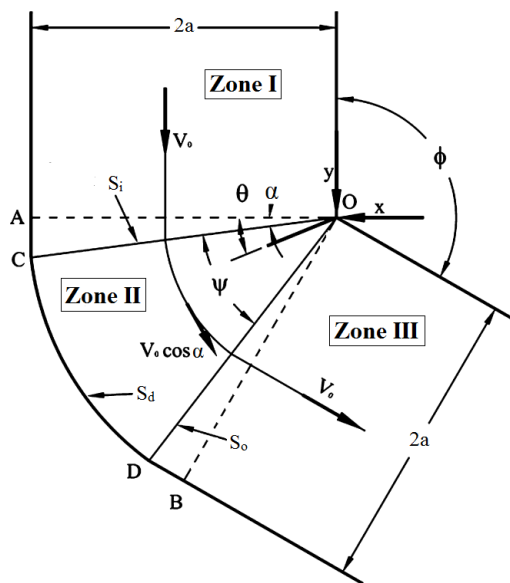
1 User friendly

2 Rigid-Plastic Von-Misses



شکل ۱. مدل تغییرشکل سه‌بعدی مورد استفاده در تحلیل کران بالای فرآیند ایکپ مقطع دایروی با قوس خارجی

Fig. 1. Three-dimensional deformation model utilized in the upper-bound analysis of ECAP process with circular cross-section and outer curve



شکل ۲. مدل تغییرشکل دوبعدی مورد استفاده در تحلیل کران بالای فرآیند ایکپ مقطع دایروی با قوس خارجی

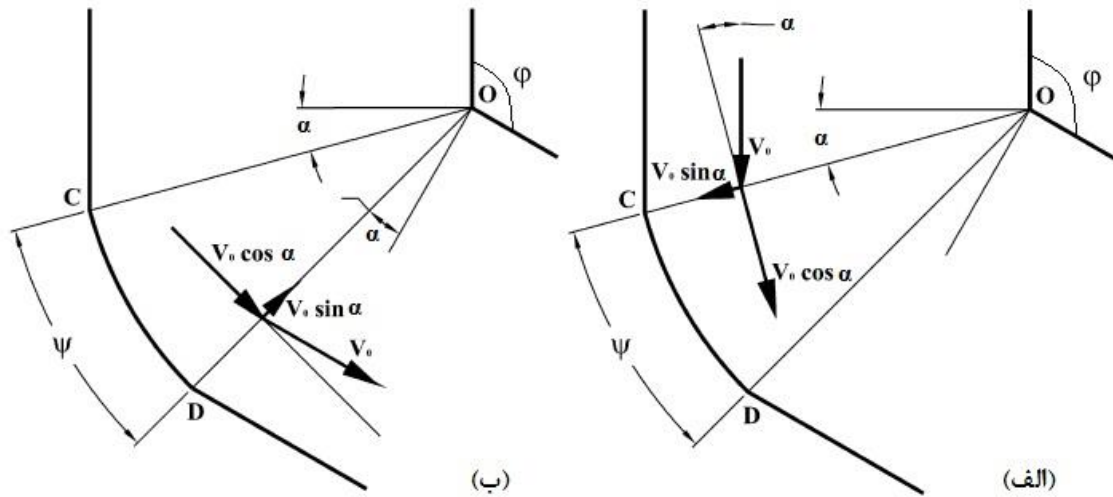
Fig. 2. Two-dimensional deformation model utilized in the upper-bound analysis of ECAP process with circular cross-section and outer curve

فرض‌های مورد استفاده در محل تغییرشکل به شرح زیر است [۱۷]:

- منطقه‌ی تغییرشکل یا منطقه‌ی II، از دوران بیضی  $S_i$  حول محور  $z$  در نقطه‌ی O از  $\alpha$  تا  $(\alpha + \psi)$  به دست می‌آید.
- در منطقه‌ی II ماده در امتداد دواپر هم‌مرکز به مرکز O حرکت می‌کند.

و سطح بیضی  $S_o$  است. مدل تغییرشکل، زوایا، سطوح و مناطق، در شکل ۲ به خوبی نشان داده شده است. با توجه به این شکل، زاویه‌ی  $\alpha$  توسط معادله (۳) بیان می‌گردد:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \left( \frac{\phi + \psi}{2} \right) \quad (3)$$



شکل ۳. ناپیوستگی سرعت روی سطوح (الف) ورودی و (ب) خروجی منطقه تغییرشکل  
 Fig. 3. Velocity discontinuities on the (a) entry and (b) exit surfaces of the deformation zone

توان کل مصرفی در حین فرآیند ایکپ توسط معادله (۶) به دست می‌آید:

$$\dot{W}_{total} = \dot{W}_d + \dot{W}_{S_i} + \dot{W}_{S_o} + \dot{W}_{S_d} + \dot{W}_{S_{OAC}} + \dot{W}_{S_{OBD}} + \dot{W}_{S_l} \quad (۶)$$

در معادله (۶) هر جمله معرف موارد زیر هستند:

$\dot{W}_{total}$ ، توان کل مصرفی در فرآیند ایکپ

$\dot{W}_d$ ، توان مصرفی در منطقه تغییرشکل (منطقه II)

$\dot{W}_{S_i}$ ، توان مصرفی روی سطح ناپیوستگی سرعت ورودی Si

$\dot{W}_{S_o}$ ، توان مصرفی روی سطح ناپیوستگی سرعت خروجی So

$\dot{W}_{S_d}$ ، توان مصرفی روی سطح جانبی منطقه تغییرشکل Sd

$\dot{W}_{S_{OAC}}$ ، توان مصرفی روی سطح جانبی نیم‌استوانه‌ای کانال

ورودی  $S_{OAC}$

$\dot{W}_{S_{OBD}}$ ، توان مصرفی روی سطح جانبی نیم‌استوانه‌ای کانال

خروجی  $S_{OBD}$

$\dot{W}_{S_l}$ ، توان مصرفی روی سطح جانبی دیواره‌ی کانال ورودی و

خروجی

هریک از جمله‌های معادله‌ی توان کل مصرفی یعنی معادله (۶)، در ادامه با جزئیات و به تفصیل اثبات و ارائه خواهند شد. لذا با استفاده از روابط به دست آمده، توان مصرفی کل در حین فرآیند ایکپ در کانال با مقطع دایروی به صورت معادله (۷) به دست می‌آید:

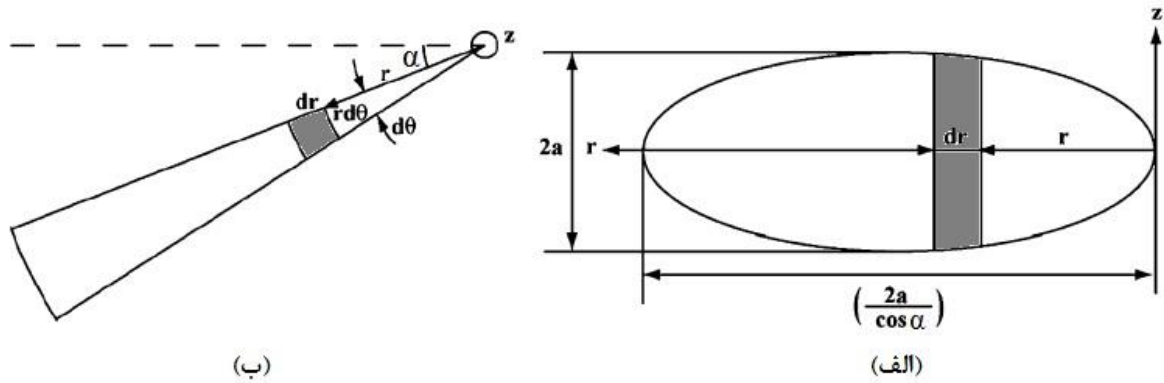
با این فرض‌ها، ماده در مناطق I و III با سرعت ثابت  $v$  و در منطقه II نیز با سرعت ثابت  $v \cos \alpha$  حرکت می‌کند. لذا در سطوح ورودی و خروجی Si و So منطقه تغییرشکل، ناپیوستگی سرعت وجود دارد. Sd نیز سطح جانبی منطقه تغییرشکل را که حاصل از دوران بیضی Si حول محور z در نقطه‌ی O است، را نشان می‌دهد. در مجاورت این سطح نیز مطابق با کلیه‌ی نقاط منطقه‌ی تغییرشکل، ماده با سرعت ثابت  $v \cos \alpha$  حرکت می‌کند. شکل ۳ ناپیوستگی سرعت را روی سطوح ورودی و خروجی Si و So نشان می‌دهد.

اگر  $r$  فاصله‌ی شعاعی از نقطه‌ی O،  $\theta$  زاویه از خط OA و Z محور عمود بر محورهای مختصات x و y، به سمت بیرون صفحه باشد، با استفاده از یک مختصات استوانه‌ای، میدان سرعت فرض شده در منطقه II به صورت معادله (۴) بیان می‌شود:

$$v_r = 0 \quad v_\theta = v_0 \cos \alpha \quad v_z = 0 \quad (۴)$$

بر اساس این میدان سرعت، تنها مولفه‌های نرخ کرنش در منطقه‌ی تغییرشکل، به شرح معادله (۵) است [۱۴ و ۱۷]:

$$\dot{\epsilon}_{r\theta} = \dot{\epsilon}_{\theta r} = -\frac{1}{2} \frac{v_0 \cos \alpha}{r} \quad (۵)$$



شکل ۴. جزء حجمی در نظر گرفته شده در منطقه تغییرشکل، (الف) نمای بالایی و (ب) نمای جانبی  
 Fig. 4. Volume element considered in deformation zone, (a) top view and (b) side view

$$P = \bar{k} \left[ \begin{array}{l} \psi + 2 \cot\left(\frac{\varphi + \psi}{2}\right) + \\ \frac{4m}{\pi} \psi \csc\left(\frac{\varphi + \psi}{2}\right) + \\ 4m \cot\left(\frac{\varphi + \psi}{2}\right) + \frac{2ml}{a} \end{array} \right] \quad (10)$$

$$\dot{W}_{total} = \pi a^2 \bar{k} v_0 \left[ \begin{array}{l} \psi + 2 \cot\left(\frac{\varphi + \psi}{2}\right) + \\ \frac{4m}{\pi} \psi \csc\left(\frac{\varphi + \psi}{2}\right) + \\ 4m \cot\left(\frac{\varphi + \psi}{2}\right) + \frac{2ml}{a} \end{array} \right] \quad (7)$$

### ۳-۲- مؤلفه‌های توان کل مصرفی در حین فرآیند ایکپ

#### (الف) توان مصرفی در منطقه تغییرشکل

شکل ۴ سطح بیضی ناپیوستگی Si و جزء حجمی در نظر گرفته شده در منطقه تغییرشکل را در دو نمای بالایی و جانبی نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن معادله هندسی حاکم بر بیضی افقی، رابطه‌ی بین  $r$  و  $z$  به صورت معادله (۱۱) به دست می‌آید:

$$z = \pm \sqrt{2ar \cos \alpha - r^2 \cos^2 \alpha} \quad (11)$$

همچنین با انتخاب جزء مکعب مستطیل تغییرشکل، به طول  $2z$  و سطح مقطع  $rdrd\theta$ ، جزء حجمی می‌تواند به صورت معادله (۱۲) تعریف شود:

$$dV = 2zrdrd\theta \quad (12)$$

بر اساس قضیه‌ی کران بالا، توان مصرفی در منطقه تغییرشکل یا به عبارتی توان داخلی، توسط معادله (۱۳) به دست می‌آید:

$$\dot{W}_d = 2\bar{k} \int_V \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}} dV \quad \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} = 2\dot{\epsilon}_{r\theta}^2 \quad (13)$$

که  $l$  برابر مجموع طول لحظه‌ای بیلت در کانال ورودی قبل از نقطه‌ی A یعنی  $l_i$  و طول لحظه‌ای بیلت در کانال خروجی بعد از نقطه‌ی B یعنی  $l_o$  می‌باشد.

توان به کار گرفته شده جهت تغییرشکل ماده در فرآیند ایکپ،  $J$ ، به صورت معادله (۸) است:

$$J = F v_0 = \pi a^2 P v_0 \quad (8)$$

که  $P$  و  $F$  به ترتیب بیشینه‌ی نیرو و فشار به کار گرفته شده در پرسکاری را نشان می‌دهند. همچنین  $a$  و  $v$  به ترتیب برابر شعاع کانال دایروی و سرعت پرسکاری می‌باشند.

با برابر قرار دادن معادله (۷) و معادله (۸) یعنی  $\dot{W}_{total} = J$  معادله (۹) و معادله (۱۰) برای بیشینه‌ی نیرو ( $F$ ) و فشار ( $P$ ) پرسکاری به دست می‌آید:

$$F = \pi a^2 \bar{k} \left[ \begin{array}{l} \psi + 2 \cot\left(\frac{\varphi + \psi}{2}\right) + \\ \frac{4m}{\pi} \psi \csc\left(\frac{\varphi + \psi}{2}\right) + \\ 4m \cot\left(\frac{\varphi + \psi}{2}\right) + \frac{2ml}{a} \end{array} \right] \quad (9)$$



(ت) توان مصرفی روی سطح جانبی نیم‌استوانه‌ی کانال ورودی

و خروجی

نیم‌استوانه‌ی OAC در واقع استوانه‌ای است با قطر مقطع  $2a$  و ارتفاع AC که به صورت قطری برش داده شده است. مقدار AC برابر  $\frac{2a}{\cos\alpha} \sin\alpha$  می‌باشد، لذا سطح جانبی نیم‌استوانه برابر  $2\pi a^2 \tan\alpha$  خواهد بود. با مقدار سرعت ناپیوستگی برابر  $v$  در این ناحیه، مقدار توان مصرفی روی سطح جانبی نیم‌استوانه‌های مفروض به صورت معادله (۱۸) است:

$$\dot{W}_{S_{OAC}} = \dot{W}_{S_{OBD}} = \int_{S_{OAC}=S_{OBD}}^0 m\bar{k} \Delta v ds = 2\pi a^2 m\bar{k} v_0 \cot\left(\frac{\varphi + \psi}{2}\right) \quad (18)$$

(ث) توان مصرفی روی سطح جانبی دیواره‌ی کانال ورودی و

خروجی

سرعت ناپیوستگی در کانال‌های ورودی و خروجی  $v$  می‌باشد. سطوح جانبی دیواره‌های کانال ورودی و خروجی به ترتیب برابر  $2\pi a l_i$  و  $2\pi a l_o$  است. با احتساب و جمع دو سطح مذکور، سطح جانبی دیواره‌ی کانال‌های ورودی و خروجی قبل و بعد از منطقه‌ی تغییرشکل برابر با  $2\pi a l$  خواهد بود. با در نظر گرفتن  $L$  به عنوان طول بیلت اولیه و  $a$  به عنوان شعاع مقطع کانال، مقدار  $l$  به صورت معادله (۱۹) می‌باشد:

$$l = l_i + l_o \cong \begin{cases} = L - 2a & \varphi = 90^\circ \\ \approx L - 2a & \varphi \neq 90^\circ \end{cases} \quad (19)$$

لذا می‌توان مقدار توان مصرفی روی سطح جانبی دیواره‌ی کانال‌های ورودی و خروجی را به صورت معادله (۲۰) تعریف کرد:

$$\dot{W}_{S_i} = 2\pi a l m\bar{k} v_0 \quad (20)$$

#### ۲-۴- تعیین تنش تسلیم برشی متوسط

اگر بر منطقه‌ی کرنش‌سختی حاصل از آزمون کشش تک‌محوره که در آن تنش تسلیم لحظه‌ای در حال افزایش است، معادله‌ی توانی هولومان<sup>۱</sup> ( $\sigma = c\varepsilon^n$ ) با ضریب و توان کرنش‌سختی به ترتیب  $c$  و  $n$  را منطبق کنیم، مقدار تنش تسلیم میانگین ( $\bar{\sigma}_Y$ ) از معادله (۲۱)

1 Holloman power equation

با استفاده از جمله‌ی اول معادله (۲) و همچنین معادلات (۳)، (۵)

و (۱۱) الی (۱۳)، توان مصرفی در منطقه‌ی تغییرشکل یا توان داخلی ( $\dot{W}_d$ ) به صورت معادله (۱۴) به دست می‌آید:

$$\dot{W}_d = 4\bar{k} v_0 \int_{\alpha}^{\alpha+\psi} \int_0^{2a/\cos\alpha} \cos\alpha \sqrt{2ar \cos\alpha - r^2 \cos^2\alpha} dr d\theta = \pi a^2 \bar{k} v_0 \psi \quad (14)$$

(ب) توان مصرفی روی سطح ناپیوستگی سرعت ورودی و خروجی

مساحت سطوح ناپیوستگی سرعت Si و So برابر با مساحت یک بیضی با قطر بزرگ و کوچک به ترتیب برابر  $2a$  و  $2a/\cos\alpha$  می‌باشد. مقدار ناپیوستگی سرعت روی این سطوح برابر  $v \sin\alpha$  و مساحت بیضی برابر  $\frac{\pi a^2}{\cos\alpha}$  است. لذا توان مصرفی روی سطوح ناپیوستگی سرعت ورودی و خروجی به صورت معادله (۱۵) به دست می‌آید:

$$\dot{W}_{S_i} = \dot{W}_{S_o} = \int_{S_{Ellipse}}^0 \bar{k} \Delta v ds = \pi a^2 \bar{k} v_0 \cot\left(\frac{\varphi + \psi}{2}\right) \quad (15)$$

(پ) توان مصرفی روی سطح جانبی منطقه‌ی تغییرشکل

مقدار ناپیوستگی سرعت روی سطح جانبی منطقه‌ی تغییرشکل برابر  $v \cos\alpha$  است. این سطح برابر سطح جانبی حجم تشکیل شده از دوران بیضی حول محور Z در نقطه‌ی O می‌باشد که با مجموع سطوح تحت عناوین OGCDH و OECDF برابر است. جزء سطحی این سطح به صورت معادله (۱۶) بیان می‌شود:

$$ds = \psi (r \sin^2\alpha + a \cos\alpha) \quad (16)$$

توان مصرفی ناشی از اصطکاک روی این سطح به صورت معادله (۱۷) تخمین زده می‌شود:

$$\dot{W}_{S_d} = \int_{S_d}^0 m\bar{k} \Delta v ds = \int_0^{2a} m\bar{k} v_0 \psi \cos\alpha (r \sin^2\alpha + a \cos\alpha) dr = 4m\bar{k} v_0 a^2 \psi \csc\left(\frac{\varphi + \psi}{2}\right) \quad (17)$$

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ (درصد وزنی)  
Table 1. Chemical composition of Al-7075 alloy (% wt)

Mn	Cr	Si	Fe	Cu	Mg	Zn	Al
۰/۰۵	۰/۲۱	۰/۳۴	۰/۳۶	۱/۴۷	۲/۷۳	۵/۷۸	فلز پایه

نیروی به دست آمده از نظریه‌ی کران بالا، بیلت از جنس آلومینیوم ۷۰۷۵ آنیل شده با طول ۹۰ mm و قطر تقریبی ۱۰ mm تحت یک گذر ایکپ با زاویه کانال و گوشه‌ی به ترتیب برابر ۱۳۵ و ۲۰ درجه و با سرعت فک ۹ mm/s قرار گرفت. شکل ۵ نمایی واقعی از پیکربندی فرآیند (الف) و قالب (ب) و شکل ۶ بیلت یک گذر ایکپ شده را نشان می‌دهد. جهت کاهش نیروی اصطکاک نیز از روانکار دی‌سولفیدمولیبدن<sup>۲</sup> بین بیلت و جداره‌ی داخلی کانال استفاده شد. لازم به ذکر است که برای تعیین مقدار نیروی شکل‌دهی، از گیج فشار با دقت بالا استفاده و پس از ثبت تصویری تغییرات فشار گیج و بر اساس هندسه دقیق سطح مقطع سیلندرهای دستگاه پرس، مقادیر کالیبره شده‌ی نیروی شکل‌دهی با سه تکرار به دست آورده شد.

#### ۴- تعیین عامل اصطکاک

در فرآیندهای شکل‌دهی جهت تعیین دقیق مقدار عامل اصطکاک، می‌توان از آزمون تجربی فشار حلقه<sup>۳</sup> تحت روانکاری مشابه استفاده کرد [۲۸]. یک روش قابل اعتماد دیگر برای تخمین تقریبی فاکتور اصطکاک، استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود تست فشار حلقه و بهره‌گیری از منحنی کالیبراسیون است. در این روش از تغییرات ابعادی در ارتفاع و قطر داخلی حلقه استفاده کرده و میزان فاکتور اصطکاک تعیین می‌گردد [۲۹].

در پژوهش حاضر از نرم‌افزار شبیه‌ساز اجزاء محدود آباکوس<sup>۴</sup> استفاده شد. حلقه با قطر خارجی، قطر داخلی و ارتفاع به ترتیب برابر ۲۴، ۱۲ و ۸ میلی‌متر و نسبت ابعادی (۶:۳:۲) معادل (ارتفاع: قطر داخلی: قطر خارجی) در نظر گرفته شد و خواص ماده آلومینیوم ۷۰۷۵ شامل چگالی (۲۸۱۰ kg/m<sup>۳</sup>)، ضریب پواسون (۰/۳۳)، مدول الاستیسیته (۷۱/۷ GPa) و خواص پلاستیک مطابق شکل ۹ به نرم‌افزار وارد گردید. جهت آزمون فشار حلقه، دو صفحه‌ی گرد صلب ثابت و متحرک با سرعت ۰/۰۷ mm/s [۲۹] به عنوان فک ثابت و

به دست می‌آید [۱۵]:

$$\bar{\sigma}_Y = \frac{1}{\epsilon_U - \epsilon_Y} \int_{\epsilon_Y}^{\epsilon_U} c \epsilon^n d\epsilon = \frac{1}{\epsilon_U - \epsilon_Y} \frac{c}{n+1} (\epsilon_U^{n+1} - \epsilon_Y^{n+1}) \quad (21)$$

که در آن  $\epsilon_U$  و  $\epsilon_Y$  به ترتیب بیانگر کرنش تسلیم و نهایی حاصل از آزمون کشش تک‌محوره می‌باشد. لذا با استفاده از معیار فون میزز، مقدار تنش تسلیم برشی متوسط به صورت معادله (۲۲) تعیین می‌گردد [۱۵]:

$$\bar{k} = \frac{\bar{\sigma}_Y}{\sqrt{3}} \quad (22)$$

#### ۳- مواد و فرآیندهای تجربی

۳-۱- ماده

ماده‌ی مورد استفاده جهت اعمال فرآیند ایکپ از نوع آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ انتخاب شد. ترکیب شیمیایی این ماده که با استفاده از روش اسپکترومتری نشری به دست آمده است، به صورت درصد وزنی در جدول ۱ ارائه شده است. این ماده جهت اعمال فرآیند ایکپ به صورت میله‌گرد با طول ۹۰ mm و قطر تقریبی ۱۰ mm تراشکاری شد و سپس جهت فرآیند آنیل به مدت یک ساعت در دمای حدود ۴۱۵ °C در کوره قرار گرفت و پس از آن در داخل کوره خاموش دربسته سرد گردید [۲۷].

جهت بررسی خواص الاستیک- پلاستیک ماده‌ی مورد استفاده، نمونه‌های آنیل شده بر اساس استاندارد ASTM E ۸M-۰۰ به صورت دمبلی‌شکل تراشکاری و با نرخ کرنش  $0/001 s^{-1}$  [۲۷] توسط دستگاه کشش تک‌محوره‌ی زوئیک<sup>۱</sup> با سه تکرار تحت آزمون کشش قرار گرفت.

#### ۳-۲- فرآیند ایکپ

جهت مقایسه‌ی نیروی آزمایشگاهی شکل‌دهی به روش ایکپ با

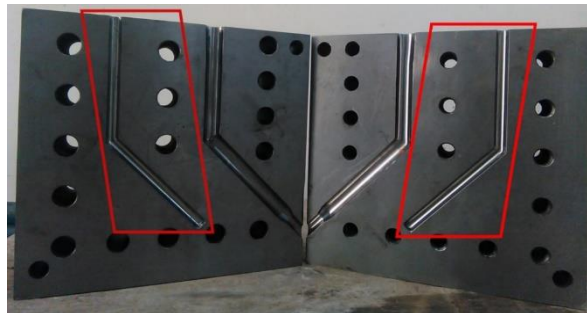
2 MoS<sub>2</sub>  
3 Ring compression test  
4 Abaqus/CAE 6.12-1

1 Zwick-Z 250





(الف)



(ب)

شکل ۵. نمایی واقعی از (الف) پیکربندی فرآیند و (ب) قالب ایکپ و کانال مورد استفاده با زاویه کانال ۱۳۵ درجه، زاویه گوشه ۲۰ درجه و قطر ۱۰ mm (مشخص شده در کادر)

Fig. 5. The real view of (a) set-up of process and (b) ECAP die and used channel with angle of 135 degree, corner angle of 20 degree and diameter of 10 mm (shown in the red box)



شکل ۶. بیلت از جنس آلومینیوم ۷۰۷۵ آنیل شده بعد از اعمال یک گذر ایکپ ۱۳۵ درجه در کانال با قطر مقطع ۱۰ mm

Fig. 6. Al-7075 annealed billet after applying one pass of ECAP in channel angle of 135 degree and cross-section diameter of 10 mm

## ۵-۲- تحلیل نیرویی

جهت صحت‌سنجی رابطه‌ی نیروی به دست آمده برای فرآیند ایکپ با مقطع دایروی و دارای زاویه‌ی گوشه، از مطالعات آزمایشگاهی استفاده شد. ابتدا بیلت از جنس آلومینیوم ۷۰۷۵ آنیل شده تحت فرآیند ایکپ در کانال ۱۳۵ درجه و زاویه گوشه‌ی ۲۰ درجه قرار گرفت و مقدار نیروی صرف شده جهت ایکپ به میزان ۴۸ kN ثبت شد.

در این تحقیق، معادله (۹) برای به دست آوردن نیروی شکل‌دهی به روش ایکپ با استفاده از روش کران بالا ارائه گردید. جهت تعیین نیروی شکل‌دهی در این فرآیند از نرم‌افزار محاسبات ریاضی وُلفرم مِتمتیکا<sup>۱</sup> استفاده شد. در جدول ۳، پارامترهای ورودی و خروجی و نحوه به دست آوردن آنها مشخص شده است. با اعمال تنش برشی میانگین آلومینیوم ۷۰۷۵، قطر بیلت، طول بیلت، زاویه‌ی کانال، زاویه‌ی گوشه و همچنین فاکتور اصطکاک به دست آمده از شبیه‌سازی اجزاء محدود، مقدار نیروی مورد نیاز جهت شکل‌دهی در روش تحلیلی برابر  $55/04 \text{ kN}$  به دست آمد. خواص کرنش‌سختی آلومینیوم ۷۰۷۵ آنیل شده مورد استفاده در جدول ۲ و شرایط آزمایشگاهی و پارامترهای هندسی بیلت و ایکپ در جدول ۴ ارائه شده است.

همان‌طور که از مقایسه‌ی مقدار نیروی شکل‌دهی به دست آمده از روش تحلیلی ( $55/04 \text{ kN}$ ) و تجربی ( $48 \text{ kN}$ ) می‌توان دریافت، انطباق بسیار مناسبی بین تحلیل نیرویی حاصل از نظریه‌ی کران بالا و حالت واقعی وجود دارد و این مهم به معنی قابلیت اطمینان بالا به معادله (۹) برای پیش‌بینی نیروی شکل‌دهی به روش ایکپ است. بیشتر بودن مقدار نیروی تحلیلی نسبت به تجربی را می‌توان به ذات پیش‌بینی بالادستی در روش تحلیلی کران بالا نسبت داد، به طوری که  $14/7\%$  اختلاف قابل اغماض بوده و نشان می‌دهد بار مورد نیاز با ضریب اطمینان مناسبی، بالاتر از مقدار واقعی است. این پیش‌بینی بالادستی می‌تواند در اطمینان‌بخشی به طراحی قالب و اعمال فرآیند، مفید باشد.

جهت صحت‌سنجی مجدد، از تحقیقات انجام شده در گذشته روی فرآیند ایکپ با مقطع دایروی و زاویه کانال ۹۰ درجه نیز استفاده شد [۱۷]. بدین منظور پارامترهای زاویه کانال ( $\varphi$ )، زاویه گوشه (

متحرک پرس به کار گرفته شد و تغییر ابعادی شعاع حلقه بعد از تغییر ارتفاع از ۸ mm به ۶ mm یعنی ۲۵٪ کاهش ارتفاع، ثبت گردید. نتایج نشان داد که مطابق شرایط روانکاری واقعی، با اعمال ضریب اصطکاک (m) برابر ۰/۱ [۹] به سطوح حلقه و صفحات، قطر داخلی متوسط حلقه از ۱۲ mm به ۱۳/۳۱۳ mm یعنی به میزان ۱۰/۹۴٪ افزایش یافته است. لازم به ذکر است که مش‌بندی حلقه از نوع هشت‌گه‌ای C۲D۸R و تعداد ۲۶۴۰ جزء یا المان و صفحات گرد از نوع چهار‌گه‌ای R۳D۳ و تعداد ۲۱۵۰ جزء انتخاب شد. اندازه یا تعداد مش در حلقه با استفاده از تکنیک حساسیت مش به صورت بهینه در نظر گرفته شده است. شکل ۷ نمای قبل و بعد از تغییر شکل در آزمون فشار حلقه را نشان می‌دهد.

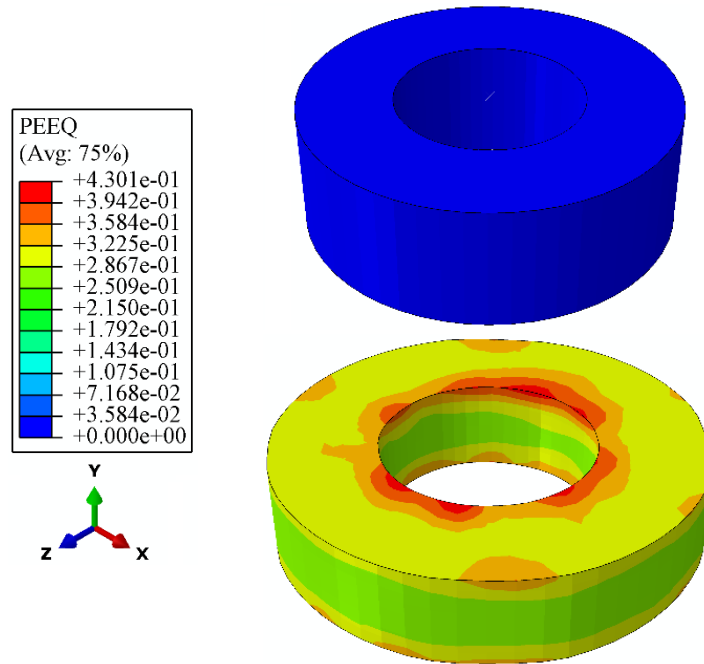
بر اساس تغییرات ابعادی به دست آمده از شبیه‌سازی اجزاء محدود، درصد کاهش ارتفاع برابر ۲۵٪ و درصد کاهش قطر داخلی برابر ۱۰/۹۴٪- می‌باشد. با استفاده از منحنی مرجع کالیبراسیون آزمون فشار حلقه برای نسبت ابعادی ۶:۳:۲ [۲۸ و ۳۰]، مقدار تقریبی فاکتور اصطکاک برابر با ۰/۱ به دست می‌آید. لازم به ذکر است که در منحنی کالیبراسیون مذکور، محل تلاقی مقادیر درصد کاهش ارتفاع و درصد کاهش قطر داخلی، تخمینی تقریبی از مقدار عامل اصطکاک را ارائه می‌کند.

## ۵- نتایج و بحث

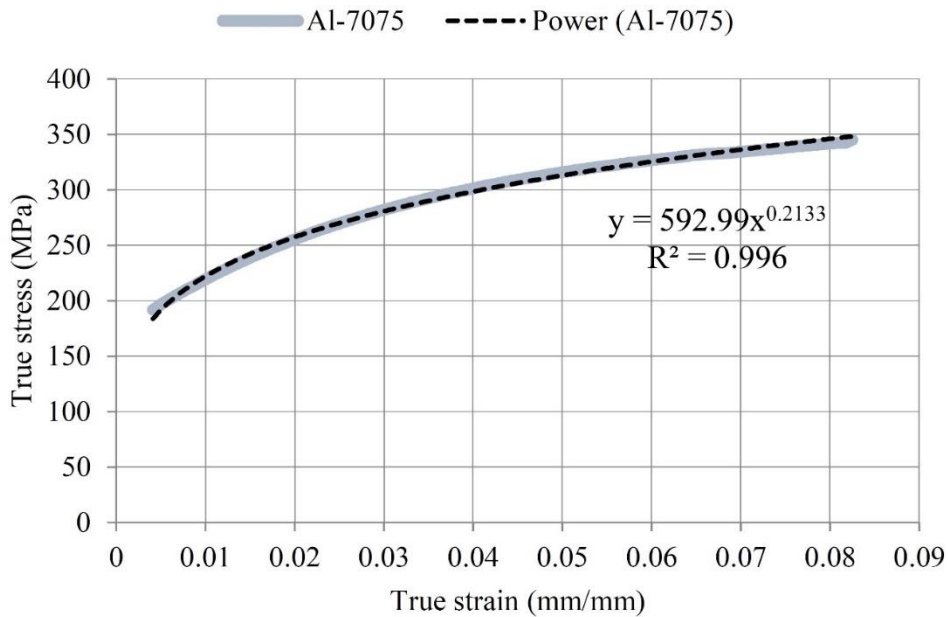
### ۵-۱- خواص مکانیکی

در شکل ۸ نمودار تنش-کرنش حقیقی آلومینیوم ۷۰۷۵ آنیل شده‌ی حاصل از آزمون کشش تک‌محوره ارائه شده است.  $0/004108$  و  $0/082505$  مقادیر کرنش به ترتیب در نقطه‌ی تسلیم و نهایی می‌باشد. با استفاده از این مقادیر و رابطه‌ی توانی گزارش شده در منطقه‌ی کرنش‌سختی حقیقی، مقدار تنش تسلیم برشی متوسط ( $\bar{k}$ ) بر اساس معادله (۲۱) و معادله (۲۲) مطابق جدول ۲ برابر با  $169/8 \text{ MPa}$  به دست می‌آید. با استفاده از مشخصات هندسی قالب و خواص مکانیکی ماده‌ی بیلت، می‌توان توسط رابطه‌ی نیروی به دست آمده از نظریه‌ی کران بالا یعنی معادله (۹)، نیروی شکل‌دهی را به دو روش آزمایشگاهی و تحلیلی مقایسه و رابطه‌ی تحلیلی نیرو را صحت‌سنجی کرد.

1 Wolfram Mathematica 9.0



شکل ۷. نمای گرافیکی از تغییر شکل و کرنش‌های وارده روی حلقه از جنس آلومینیوم ۷۰۷۵ آنیل شده، طی آزمون فشار در محیط شبیه‌ساز اجزاء محدود  
 Fig. 7. The graphical view of deformation and introduced strains on the Al-705 annealed ring during the compression test in environment of finite element simulator



شکل ۸. نمودار تنش-کرنش حقیقی آلومینیوم ۷۰۷۵ آنیل شده در منطقه‌ی کرنش‌سختی  
 Fig. 8. True stress-strain diagram of annealed Al-705 in strain-hardening region

قرار داده شد و مقدار نیروی شکل‌دهی برابر با ۲۱/۴ kN به دست آمد. نتایج آزمایشگاهی ارائه شده در تحقیق مذکور نشان داد که مقدار نیروی واقعی مورد نیاز حدوداً برابر با ۲۲ kN است. انطباق بسیار

$(\psi)$ ، قطر بیلت  $(2a)$ ، طول مؤثر بیلت  $(l)$ ، عامل اصطکاک  $(m)$  و تنش سیلان متوسط  $(\bar{\sigma}_Y)$  به ترتیب برابر ۹۰ درجه، صفر درجه، ۱۰ میلی‌متر، ۳۰ میلی‌متر، ۰/۱۷ و ۱۰۰ مگاپاسکال در معادله (۹)

جدول ۲. خواص کرنش‌سختی آلومینیوم ۷۰۷۵ آنیل شده

Table 2. Strain-hardening properties of annealed Al-7075

ماده (آنیل شده)	کرنش‌سختی		کرنش حقیقی		تنش حقیقی (MPa)		تنش برشی میانگین
	$\sigma = c \varepsilon^n$		تسلیم	نهایی	تسلیم	نهایی	(MPa)
	$c$ (MPa)	$n$	$\varepsilon_Y$	$\varepsilon_U$	$\sigma_Y$	$\sigma_U$	$\bar{k}$
Al-7075	۵۹۲/۹۹	۰/۲۱۳۳	۰/۰۰۴۱۰۸	۰/۰۸۲۵۰۵	۱۹۱/۷۳۷	۳۱۷/۶۶۷	۱۶۹/۸۳۶

جدول ۳. پارامترهای ورودی و خروجی و نحوه‌ی به دست آوردن آنها در تعیین نیروی شکل‌دهی

Table 3. Input and output parameters and how to obtain them in determination of forming force

پارامترهای ورودی								
$\varphi$	$\psi$	$a$	$L$	$m$	$c$	$n$	$\varepsilon_Y$	$\varepsilon_U$
هندسه قالب و قطعه‌کار				*	آزمون کشش تک‌محوره			
پارامترهای خروجی								
$l$	$\bar{k}$			$\bar{\sigma}_Y$		$F$		
معادله (۱۹)، $l = L - 2a$	معادله (۲۲)			معادله (۲۱)		معادله (۹)		

\* ۱- آزمون فشار حلقه، ۲- شبیه‌سازی آزمون فشار حلقه و استفاده از منحنی کالیبراسیون [۲۸ و ۳۰]

جدول ۴. نیروی شکل‌دهی به روش ایکپ در دو روش تجربی و نظریه‌ی کران بالا

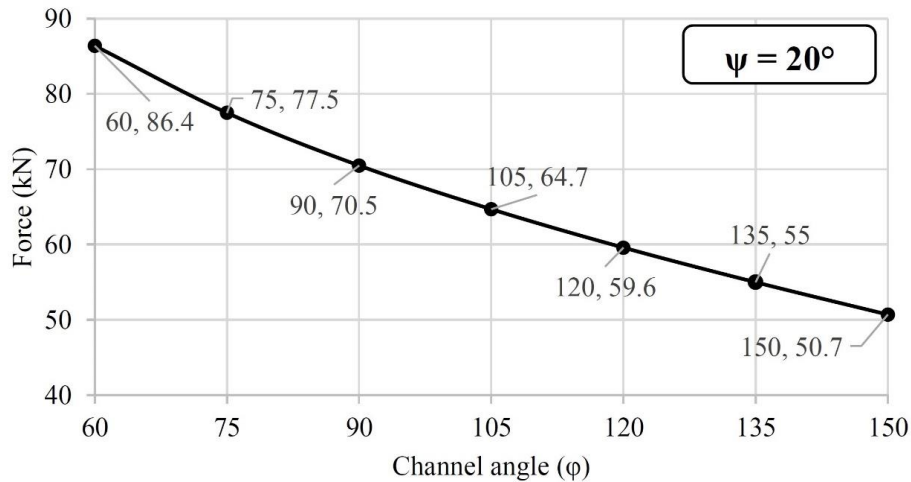
Table 4. Forming force in ECAP technique in experimental and upper-bound methods

نیروی پیشینه		عامل اصطکاک	طول بیلت	قطر کانال	زاویه‌ی گوشه	زاویه‌ی کانال
$F$ (kN)		m	$L$ (mm)	$2a$ (mm)	$\psi$ (°)	$\varphi$ (°)
تجربی	تحلیلی					
۴۸	۵۵/۰۴	~ ۰/۱	۹۰	۱۰	۲۰	۱۳۵

۴۰ درجه مقادیر نیروی شکل‌دهی مطابق شکل ۱۰ به دست آورده شد. همانطور که از نتایج مشخص است با افزایش زاویه کانال از ۶۰ تا ۱۵۰ درجه، مقدار نیرو از ۸۶/۴ kN به ۵۰/۷ kN یعنی به میزان ۴۱/۳٪ کاهش می‌یابد و با افزایش زاویه گوشه از ۰ تا ۴۰ درجه، نیروی شکل‌دهی از ۵۶ kN به ۵۴/۶ kN یعنی به میزان ۲/۵٪ می‌رسد. نتایج به وضوح نشان داد که با افزایش مقدار زوایای کانال و گوشه از میزان بار شکل‌دهی کاسته می‌شود ولی تأثیر زاویه کانال بر کاهش نیرو بسیار مشهودتر و چشمگیرتر از اثر زاویه گوشه است. این مهم به تأثیر بیشتر زاویه کانال در مقدار کرنش اعمالی بر اساس معادله (۱) وابسته است. در واقع در زاویه کانال کمتر با

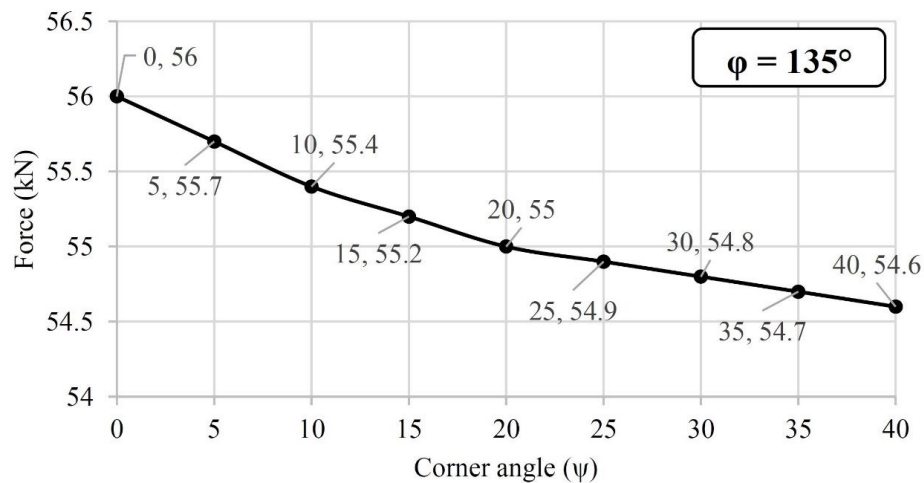
مناسبتی بین نتایج تئوری و تجربی مشاهده می‌شود که حاکی از دقت بالای رابطه نیرویی به دست آمده است.

با استفاده از رابطه به دست آمده از روش کران بالا برای پیش‌بینی نیروی فرایند شکل‌دهی با مقطع دایروی، معادله (۹)، مقادیر نیروی مورد نیاز برای اعمال یک گذر فرایند ایکپ در زوایای گوناگون کانال ( $\varphi$ ) و گوشه ( $\psi$ ) و در شرایط قید شده به دست آورده شد. بدین منظور با ثابت نگه داشتن مقدار زاویه گوشه برابر با ۲۰ درجه و تغییر زاویه کانال از ۶۰ تا ۱۵۰ درجه، روند تغییر نیروی شکل‌دهی در شکل ۹ ثبت شد. همچنین با ثابت نگه داشتن مقدار زاویه کانال برابر با ۱۳۵ درجه و تغییر زاویه گوشه از ۰ تا



شکل ۹. اثر زاویه کانال ( $\varphi$ ) بر نیروی تئوری شکل‌دهی حاصل از روش تحلیلی کران بالا

Fig. 9. Effect of channel angle ( $\varphi$ ) on the theoretical forming force obtained by upper-bound analytical method



شکل ۱۰. اثر زاویه گوشه ( $\psi$ ) بر نیروی تئوری شکل‌دهی حاصل از روش تحلیلی کران بالا

Fig. 10. Effect of corner angle ( $\psi$ ) on the theoretical forming force obtained by upper-bound analytical method

وارده را به دست دهد بسیار ضروری است که طی این تحقیق رابطه‌ای کلی و تعمیم‌یافته برای نیروی شکل‌دهی به روش ایکپ به دست آمد و بر خلاف سایر روابط به دست آمده، از حیث درک پارامترها و کاربرد، یک رابطه‌ی تسهیل‌یافته و اصطلاحاً کاربرپسند است.

• در این تحقیق با استفاده از خواص الاستیک-پلاستیک ماده‌ی قطعه‌کار و نظریه‌ی کران بالا، رابطه‌ای برای پیش‌بینی مقدار نیروی مورد نیاز برای اعمال فرآیند ایکپ با کانال با سطح مقطع دایروی در هر زاویه کانال و گوشه، به دست آمد.

اعمال کرنش بزرگتر، نیروی بیشتری برای اعمال تنش برشی ساده و همچنین سیلان ماده نیاز می‌باشد [۶ و ۳۱].

#### ۶- نتیجه‌گیری

نتایج کیفی و کمی تحقیق حاضر شامل موارد زیر است:

• تغییر شکل پلاستیکی شدید فلزات و آلیاژها طی فرآیند ایکپ با مقطع دایروی بسیار متداول است، لذا وجود رابطه‌ای کلی که بدون محدودیت در مقدار زاویه‌ی کانال و گوشه، پیش‌بینی مناسبی از بار

طول لحظه‌ای بیلت در کانال ورودی	$l_i$
طول لحظه‌ای بیلت در کانال خروجی	$l_o$
طول اولیه بیلت	$L$
عامل اصطکاک ثابت	$m$
توان کرنش‌سختی هولومان	$n$
تعداد گذرهای تکرار فرآیند	$N$
بیشینه‌ی فشار	$P$
سطح جانبی منطقه‌ی تغییرشکل	$S_d$
سطوح اصطکاکی	$S_f$
سطح ورودی منطقه تغییرشکل	$S_i$
سطح خروجی منطقه تغییرشکل	$S_o$
سطح ترکشن	$S_t$
سطح ناپیوستگی سرعت	$S_v$
ترکشن‌های اعمال شده روی سطح $S_t$	$T_i$
حجم منطقه‌ی تغییرشکل پلاستیک	$V$
سرعت اعمال شده روی سطح $S_t$	$v_i$
سرعت حرکت ماده	$v_0$
مقدار ناپیوستگی سرعت روی سطوح اصطکاکی و ناپیوستگی	$\Delta v$
توان مصرفی در منطقه‌ی تغییرشکل (منطقه‌ی II)	$\dot{W}_d$
توان مصرفی روی سطح جانبی منطقه‌ی تغییرشکل $S_d$	$\dot{W}_{S_d}$
توان مصرفی روی سطح ناپیوستگی سرعت ورودی $S_i$	$\dot{W}_{S_i}$
توان مصرفی روی سطح جانبی دیواره‌ی کانال ورودی و خروجی	$\dot{W}_{S_t}$
توان مصرفی روی سطح ناپیوستگی سرعت خروجی $S_o$	$\dot{W}_{S_o}$
توان مصرفی روی سطح جانبی نیم‌استوانه‌ی کانال ورودی $S_{OAC}$	$\dot{W}_{S_{OAC}}$
توان مصرفی روی سطح جانبی نیم‌استوانه‌ی کانال خروجی $S_{OBD}$	$\dot{W}_{S_{OBD}}$
توان کل مصرفی در فرآیند ایکپ	$\dot{W}_{total}$

#### علائم یونانی

$\alpha$ : زاویه منطقه تغییرشکل

• مقایسه‌ی یک گذر نیروی شکل‌دهی به دست آمده از روش نظریه‌ی کران بالا (۵۵/۰۴ kN) با نتیجه‌ی تجربی (۴۸ kN) اعمال فرآیند ایکپ روی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ آنیل شده در شرایط زاویه کانال ۱۳۵ درجه، زاویه گوشه ۲۰ درجه و طول و قطر بیلت به ترتیب برابر با ۹۰ و ۱۰ میلی‌متر نشان داده است که می‌توان به تحلیل نیرویی بر اساس این نظریه و رابطه‌ی به دست آمده در این تحقیق برای ایکپ با مقطع دایروی با زاویه‌ی کانال و گوشه‌ی دلخواه، اعتماد کرد.

• مشاهده شد که مقدار نیروی شکل‌دهی با استفاده از رابطه‌ی کران بالای به دست آمده (۵۵/۰۴ kN)، کمی از مقدار نیروی آزمایشگاهی (۴۸ kN) بالاتر است که با توجه به اساس پیش‌بینی بالادستی نظریه‌ی کران بالا، این مقادیر قابل قبول بوده و اعتماد به رابطه‌ی به دست آمده تضمین می‌گردد.

• بررسی اثر زوایای کانال در مقدار نیروی مورد نیاز برای شکل‌دهی با استفاده از رابطه‌ی تئوری به دست آمده نشان داد که با افزایش زوایای کانال از ۶۰ تا ۱۵۰ درجه در زاویه گوشه ثابت ۲۰ درجه، نیروی شکل‌دهی از ۸۶/۴ kN به ۵۰/۷ kN یعنی به میزان قابل توجه ۴۱/۳٪ کاهش می‌یابد. لذا نتیجه شد با کاهش زاویه کانال به دلیل افزایش کرنش وارده و کاهش سیلان ماده، نیروی مورد نیاز به صورت چشمگیری افزایش می‌یابد.

• با افزایش زاویه گوشه از ۰ تا ۴۰ درجه نشان داده شد که در زاویه کانال ثابت ۱۳۵ درجه، نیروی شکل‌دهی با کاهش قابل اغماض ۲/۵٪ از ۵۶ kN به ۵۴/۶ kN رسیده است. لذا بر خلاف زاویه کانال، تأثیر زاویه گوشه در تغییر بار شکل‌دهی قابل چشمپوشی می‌باشد.

#### فهرست علائم

#### علائم انگلیسی

$a$ : شعاع کانال دایروی
$c$ : ضریب کرنش‌سختی هولومان
$F$ : بیشینه‌ی نیرو
$J$ : توان مصرفی
$\bar{k}$ : متوسط تنش تسلیم برشی

$l$ : مجموع طول لحظه‌ای بیلت در کانال ورودی و خروجی



- for the processing of ultra-fine grained materials, Scripta Materialia, 35(2) (1996) 143-146.
- [7] F.R.F. Silva, N. Medeiros, L.P. Moreira, J.F.C. Lins, J.P. Gouvêa, Upper-bound and finite-element analyses of non-isothermal ECAP, Materials Science and Engineering A, 546 (2012) 180-188.
- [8] K. Abrinia, M.J. Mirnia, A new generalized upper-bound solution for the ECAE process, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 46(1-4) (2010) 411-421.
- [9] R. Naseri, M. Kadkhodayan, M. Shariati, An experimental investigation of casing effect on mechanical properties of billet in ECAP process, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 90(9-12) (2017) 3203-3216.
- [10] F. Djavanroodi, H. Ahmadian, K. Koohkan, R. Naseri, Ultrasonic assisted-ECAP, Ultrasonics, 53(6) (2013) 1089-1096.
- [11] I. Jalili, H. Yousefian, M. Sedighi, M. Kasaeian, Analytical solution for tube spinning process of metallic cone: The ideal work and upper bound method, Modares Mechanical Engineering, 18(8) (2018) 55-60.
- [12] J. Alkorta, J.G. Sevillano, A comparison of FEM and upper-bound type analysis of equal-channel angular pressing (ECAP), Journal of Materials Processing Technology, 141(3) (2003) 313-318.
- [13] C.J.L. Pérez, Upper bound analysis and FEM simulation of equal fillet radii angular pressing, Modelling Simulation in Materials Science Engineering, 12(2) (2004) 205-214.
- [14] B.S. Altan, G. Purcek, I. Miskioglu, An upper-bound analysis for equal-channel angular extrusion, Journal of Materials Processing Technology, 168(1) (2005) 137-146.
- [15] A.R. Eivani, A. Karimi Taheri, An upper bound solution of ECAE process with outer curved corner, Journal of Materials Processing Technology, 182(1-3) (2007) 555-563.
- [16] C.J.L. Pérez, R. Luri, Study of the ECAE process by the upper bound method considering the correct die design, Mechanics of Materials, 40(8) (2008) 617-628.
- [17] M.H. Paydar, M. Reihanian, R. Ebrahimi, T.A. Dean, M.M. Moshksar, An upper-bound approach for equal
- کرنش نهایی :  $\epsilon_U$   
 کرنش تسلیم :  $\epsilon_Y$   
 کرنش معادل :  $\epsilon_{eq}$   
 مؤلفه‌های نرخ کرنش :  $\dot{\epsilon}_{ij}$   
 تنش نهایی :  $\sigma_U$   
 تنش تسلیم :  $\sigma_Y$   
 تنش تسلیم میانگین :  $\bar{\sigma}_Y$   
 زاویه کانال :  $\phi$   
 زاویه گوشه :  $\psi$
- مراجع**
- [1] R. Naseri, M. Shariati, M. Kadkhodayan, Effect of work-piece cross section on the mechanical properties of commercially pure titanium produced by Equal Channel Angular Pressing, Modares Mechanical Engineering, 15(6) (2015) 157-166.
- [2] M. Ebrahimi, M.H. Shaeri, R. Naseri, C. Gode, Equal channel angular extrusion for tube configuration of Al-Zn-Mg-Cu alloy, Materials Science and Engineering A, 731 (2018) 569-576.
- [3] R. Naseri, M. Kadkhodayan, M. Shariati, Static mechanical properties and ductility of biomedical ultrafine-grained commercially pure titanium produced by ECAP process, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 27(9) (2017) 1964-1975.
- [4] R. Naseri, M. Kadkhodayan, M. Shariati, The investigation of springback of UFG commercially pure titanium in three-point bending test, Modares Mechanical Engineering, 16(11) (2017) 266-276.
- [5] R. Naseri, H. Hiradfar, M. Shariati, M. Kadkhodayan, A comparison of axial fatigue strength of coarse and ultrafine grain commercially pure titanium produced by ECAP, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 18(3) (2018) 755-767.
- [6] Y. Iwahashi, Z. Horita, M. Nemoto, J. Wang, T.G. Langdon, Principle of equal-channel angular pressing

- upper bound analysis of T-shaped equal channel angular pressing, *Acta Metallurgica Slovaca*, 21(1) (2015) 4-12.
- [25] H. Ghaforian Nosrati, K. Khalili, M. Gerdooei, Theoretical and numerical investigation of required torque in ECAP-Conform process, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 51(2) (2020) 519-528.
- [26] W.F. Hosford, R.M. Caddell, *Metal forming: Mechanics and Metallurgy*, Cambridge University Press, 2011.
- [27] M.H. Shaeri, F. Djavanroodi, M. Sedighi, S. Ahmadi, M.T. Salehi, S.H. Seyyedain, Effect of copper tube casing on strain distribution and mechanical properties of Al-7075 alloy processed by equal channel angular pressing, *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 48(8) (2013) 512-521.
- [28] F. Fereshteh Saniee, I. Pillinger, P. Hartley, Friction modelling for the physical simulation of the bulk metal forming processes, *Journal of Materials Processing Technology*, 153-154 (2004) 151-156.
- [29] M.K. Besharati Givi, A. Sarvi, Determination of flow stress and friction factor of aluminum 7075 by inverse analysis, *Journal of the College of Engineering*, 42(5) (2008) 617-623.
- [30] E.M. Mielnik, *Metalworking science and engineering*, 1st ed., McGraw-Hill College, 1991.
- [31] R.Z. Valiev, T.G. Langdon, Principles of equal-channel angular pressing as processing tool for grain refinement, *Progress in Materials Science*, 51(7) (2006) 881-981.
- channel angular extrusion with circular cross-section, *Journal of Materials Processing Technology*, 198(1) (2008) 48-53.
- [18] M. Reihanian, R. Ebrahimi, M.M. Moshksar, Upper-bound analysis of equal channel angular extrusion using linear and rotational velocity fields, *Materials Design*, 30(1) (2009) 28-34.
- [19] B. Talebanpour, R. Ebrahimi, Upper-bound analysis of dual equal channel lateral extrusion, *Materials Design*, 30(5) (2009) 1484-1489.
- [20] K. Narooei, A. Karimi Taheri, A new model for prediction the strain field and extrusion pressure in ECAE process of circular cross section, *Applied Mathematical Modelling*, 34(7) (2010) 1901-1917.
- [21] T.A. Fashanu, S.T. Adedokun, B.Y. Ogunmola, Finite element method and upper-bound type analysis of equal channel angular pressing, *International Journal of Engineering Technology*, 2(10) (2012) 1666-1671.
- [22] K. Narooei, A. Karimi Taheri, Strain field and extrusion load in ECAE process of bi-metal circular cross section, *Applied Mathematical Modelling*, 36(5) (2012) 2128-2141.
- [23] A.M. Laptev, A.V. Perig, O.Y. Vyal, Analysis of equal channel angular extrusion by upper bound method and rigid blocks model, *Materials Research*, 17(2) (2014) 359-366.
- [24] K. Wei, P. Liu, Z. Ma, W. Wei, I.V. Alexandrov, J. Hu, An

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. Naseri, M. Kadkhodayan, M. Shariati, *Theoretical Analysis of Equal Channel Angular Pressing Process by Upper Bound Method and Its Experimental Investigation in Condition of Circular Cross-Section Channel*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(8) (2021) 4729-4744.

DOI: [10.22060/mej.2021.18754.6883](https://doi.org/10.22060/mej.2021.18754.6883)

