

## بررسی منطقه تغییر شکل فرایند ECAE توسط تئوری حد بالا

سید محمد جواد میرنیا<sup>۱</sup>، کارن ابری نیا<sup>۲</sup> و عباس راستگو<sup>۳</sup>  
Smjmirnia@yahoo.com

### چکیده

در تحقیق انجام شده حاضر، منطقه تغییر شکل فرآیند ECAE (Equal Channel Angular Extrusion) با استفاده از تئوری حد بالا مورد مطالعه قرار گرفت. برای این کار ابتدا خطوط جریان در منطقه تغییر شکل به صورت منحنی های بزیر درجه سه در نظر گرفته شدند. سپس با استفاده از تئوری حد بالا، پارامترهای تعریف کننده این خطوط به نحوی بدست آمدند که نیروی لازم برای انجام فرایند بهینه شود. با بدست آوردن خطوط جریان، مقدار کرنش معادل بدست آمد. با استفاده از این خطوط جریان، شکل منطقه مرده فلز حدس زده شد. تاثیر شرایط اصطکاکی مختلف بر روی منطقه تغییر شکل مورد مطالعه قرار گرفت. مقدار نیروی بهینه لازم برای انجام فرآیند توسط حد بالا تعیین شد و مقدار آن با مقادیر تجربی و تئوری گزارش شده توسط دیگران مقایسه شد که نزدیکی بسیار خوبی نسبت به تحلیل های حد بالای قبلی با مقادیر تجربی داشته است.

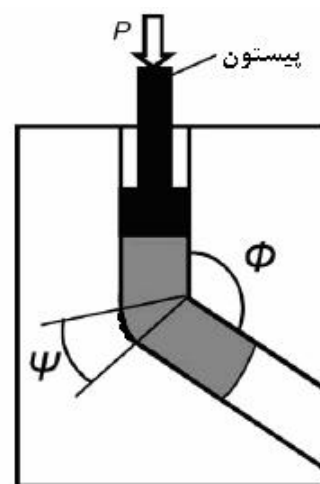
### کلید واژه:

ECAE- تئوری حد بالا- منحنی بزیر- خطوط جریان- شکل منطقه مرده

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران  
۲- دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، cabrinia@ut.ac.ir  
۳- دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، arastgoo@ut.ac.ir

## ۱- مقدمه

فرآیند ECEA، یکی از فرآیندهای شناخته شده در زمینه روشهای تغییر شکل زیاد می باشد. روش هایی مانند اکستروژن، فورج و نورد ایجاد کرنش های زیاد بر روی نمونه در طول فرآیند می کنند، ولی این فرایندها باعث تغییرات ابعادی در نمونه می شوند. قالب فرایند ECEA شامل دو کانال با سطح مقطع یکسان است که تحت زاویه مشخصی نسبت به یکدیگر قرار گرفته اند، در نتیجه نمونه ای که تحت این فرایند قرار می گیرد هیچ تغییری در ابعاد اولیه خود پیدا نمی کند. در شکل (۱)، یک قالب فرایند ECEA نشان داده شده است. نمونه اکستروژن شده توسط این روش می تواند چندین بار دیگر تحت فرآیند قرار بگیرد. دوران نمونه حول محور طولی بین هر پاس می تواند خواص مکانیکی و ریز ساختار متفاوتی ایجاد نماید. کرنش های زیاد ایجاد شده در این فرایند ایجاد ریز ساختار دانه ای در مقیاس نانو می کند.



شکل (۱): طرحی شماتیک از قالب فرایند ECEA.

ABAQUS تحلیل کردند. نتایج تحلیل با المان محدود سازگاری بسیار خوبی داشت. آنها نتیجه گرفتند که با اعمال فشار پشت، نایکنواختی کرنش در ضخامت ماده در مواد دارای کارسختی کاهش می یابد [۲]. آلتن و همکاران تغییر شکل ماده توسط فرایند ECEA با زاویه کانال  $90^\circ$  را توسط تئوری حد بالا تحلیل کردند. در این تحلیل اصطکاک بین ماده و دیواره قالب، شعاع گوشه داخلی قالب و منطقه مرده فلز در نظر گرفته شد. میدان سرعت بدست آمده با توجه به خطوط جریانی به شکل کمان های دایروی بدست آمد. با استفاده از این تحلیل مشاهده شد که با افزایش ضریب اصطکاک، منطقه تغییر شکل بزرگتر می شود و تغییر شکل ماده بسیار پیچیده تر می شود [۳].

ایوانی و کریمی طاهری فرایند ECEA با گوشه انحنا یافته خارجی را توسط حل حد بالا مورد مطالعه قرار دادند. خطوط فرض شده توسط آنها بصورت کمان های دایروی متحدالمرکز بود و سرعت ماده در منطقه تغییر شکل ثابت فرض شد. تاثیر زاویه قالب، اصطکاک بین ماده و دیواره قالب و زاویه گوشه انحنا یافته خارجی بر فشار اکستروژن در این تحلیل در نظر گرفته شد. مشاهده شد که با افزایش زاویه قالب و زاویه گوشه انحنا یافته خارجی، فشار اکستروژن کاهش می یابد. با انجام آزمایش تجربی بر روی نمونه آلومینیوم ۶۰۷۰، نزدیکی خوبی بین فشار بدست آمده از حل حد بالا با مقدار تجربی مشاهده شد [۴]. پایدار و همکاران برای اولین مرتبه توسط حد بالا فرایند ECEA از کانال ها با مقطع دایروی را تحلیل کردند. توافق خوبی بین تحلیل ارائه شده با مقادیر تجربی مشاهده شد. در این تحلیل اصطکاک و منطقه مرده فلز در گوشه تیز خارجی در نظر گرفته شد. مدل در نظر گرفته شده نشان داد که منطقه تغییر شکل و فشار اکستروژن با افزایش ضریب اصطکاک افزایش می یابد [۵]. ایوانی و کریمی طاهری مانند کار قبلی خود [۴]، یک حل حد بالا برای فرایند ECEA با در نظر گرفتن ایجاد منطقه مرده فلز در گوشه خارجی قالب بدست آوردند. سپس رابطه ای بین ضریب اصطکاک، گسترش منطقه مرده فلز و کرنش کل بدست آوردند. آنها نتیجه گرفتند که با افزایش زاویه قالب و ضریب اصطکاک کرنش کاهش پیدا می کند. مقایسه ای بین کار تحلیلی جدید خود و کار تجربی گذشته [۴] انجام شد و مشاهده شد که اختلاف کار تجربی با کار تحلیلی جدید کمتر از مدل ارائه شده قبلی می باشد [۶].

تحلیل هایی که در بالا بیان شد، بر اساس هندسه قالبی بودند که در آن ها گوشه داخلی و خارجی قالب تیز یا دارای انحنا بودند. لوئیس پرز و لوری یک تحلیل حد بالا برای قالبهایی که دارای شعاع داخلی و خارجی می باشند ارائه دادند. در این تحلیل دو حالت شعاع داخلی بزرگتر از خارجی و شعاع خارجی بزرگتر از داخلی در نظر

دانگ نیونگ لی یک حل حد بالا برای فرایند CAD (Channel Angular Deformation) که در آن دو کانال دارای سطح مقطع یکسان نمی باشند بدست آورد. فرایند ECEA حالت خاص از این فرایند می باشد. او در این تحلیل منطقه تغییر شکل را بصورت یک صفحه برشی در نظر گرفت و اصطکاک بین ماده و قالب را نیز به حساب آورد [۱]. آلکورتا و سویلانو فشار فرایند ECAP بدون حضور اصطکاک را برای مواد کاملاً پلاستیک یا دارای کار سختی توسط روش حد بالا و المان محدود مورد بررسی قرار دادند. آنها منطقه تغییر شکل را بصورت ناحیه ای متشکل از صفحات انفصال سرعت پیوسته در نظر گرفتند. در تحلیل آنها قالب دارای گوشه خارجی انحنا یافته بود. سپس فرایند را بصورت دوبعدی توسط نرم افزار

شد که خطوط جریان ماده لزوما بصورت کمان های دایروی نمی باشند. همچنین در حل های حد بالای ذکر شده [۴-۶]، میدان سرعت منطقه تغییر شکل مقداری ثابت در کل ناحیه تغییر شکل فرض شد. فرض های ذکر شده حل های حد بالای ارائه شده را بسیار ساده کردند. به همین جهت، مقادیر بدست آمده توسط این تحلیل ها با مقادیر واقعی دارای اختلاف زیادی می باشند.

به همین منظور در تحقیق حاضر، خطوط جریان ماده بصورت یک منحنی بزر درجه سه فرض شده است. این خطوط جریان برای شرایط مختلف اصطکاک و هندسه قالب دارای اشکال متفاوتی هستند که شکل آنها توسط پارامترهای تعریف کننده مشخص می شود و این پارامترها توسط بهینه سازی حل حد بالا بدست می آیند. شکل بهینه برای منطقه مرده فلز و خطوط جریان، آن شکلی است که توان صرف فرآیند را کمینه کند. سپس با استفاده از این پارامترها و تعیین خطوط جریان مقدار کرنش معادل در یک پاس از فرایند ECAE بدست آورده می شود.

## ۲- تحلیل منطقه تغییر شکل توسط حد بالا

در شکل (۲) هندسه قالب و پارامترهای بکارگرفته شده در تعریف منطقه تغییر شکل نمایش داده شده است. تغییر شکل بصورت کرنش صفحه ای فرض می شود. سرعت ماده در ورودی و خروجی منطقه تغییر شکل برابر  $v_0$  می باشد. عرض کانال ورودی و خروجی برابر  $a$  است بطوریکه سطح داخلی کانال به فاصله  $b$  از مبدا مختصات نشان داده شده در شکل (۲)، قرارگرفته است. در نتیجه گوشه داخلی قالب، با توجه به مقدار  $b$ ، میتواند بصورت لبه تیز یا انحنادار باشد که در این صورت این انحنا بصورت یک منحنی بزر می باشد. گوشه خارجی قالب دارای لبه تیز است که در این ناحیه منطقه مرده فلز ایجاد می شود. در این تحلیل فرض می شود که سطح منطقه مرده فلز و در پی آن خطوط جریان مواد در منطقه تغییر شکل منحنی های بزر درجه سه می باشند که این منحنی ها نسبت به خط OC متقارن هستند. در اینجا  $\phi$  زاویه قالب می باشد.

در این تحلیل چهار منطقه کلی وجود دارد: در منطقه I (قبل از خط D'D) و IV (بعد از خط E'E) ماده حرکت صلب دارد، منطقه II (ناحیه محصور در D'DE'E'G'G'F'F'D') ناحیه تغییر شکل می باشد.  $\frac{1}{3}$  مشخص کننده شروع منطقه تغییر شکل می باشد. منطقه III (DFCGED) منطقه مرده فلز می باشد.

برای تعریف منحنی بزر درجه سوم که بیان کننده خط جریان ماده در فاصله  $x$  از محور مختصات باشد به چهار نقطه  $p_1, p_2, p_3$  و  $p_4$  احتیاج داریم [۱۱]، که این نقاط با توجه به قرینه بودن منحنی

گرفته شد. میدان سرعت این تحلیل در صفحات ورودی و خروجی منطقه تغییر شکل دارای انفصال سرعت نبود. آنها در این تحلیل هندسه سه بعدی قالب را نیز در نظر گرفتند. تحلیل آنها برای مواد غیر کارسختی با سطح مقطع مربع شکل بود. با استفاده از این مدل دریافتند که با افزایش شعاع داخلی قالب، کرنش القا شده افزایش می یابد، در حالیکه تغییر کمی در افزایش نیروی اکستروژن واقع می شود. همچنین مقدار نیروی لازم برای اکستروژن که توسط تحلیل حد بالا بدست آمد با مقدار بدست آمده توسط روش المان محدود مقایسه شد و تطابق خوبی مشاهده گردید [۷].

ایوانی و همکاران حل تحلیلی ارائه شده در [۴] را برای فرایند ECAE متقارن محوری بسط دادند. در حل قبلی آنها [۴] فرایند بصورت کرنش صفحه ای در نظر گرفته شد ولی در حل جدید سطح مقطع بصورت دایره فرض شد. این تحلیل تاثیر زاویه قالب، اصطکاک بین نمونه و قالب و زاویه گوشه انحنا یافته خارجی در نظر گرفته شد. این تحلیل توسط دو قالب با زاویه یکسان ولی با زاویه گوشه انحنا یافته خارجی متفاوت و همچنین با یک، دو و سه پاس از فرایند ECAE ارزیابی شد و مشاهده شد که در پاس های دوم و سوم توافق بین مقدار فشار تجربی و فشار بدست آمده از تحلیل بسیار کمتر از پاس اول است. مشاهده شد که با افزایش زاویه قالب و زاویه گوشه انحنا یافته خارجی و کاهش ضریب اصطکاک، فشار اکستروژن کاهش می یابد [۸].

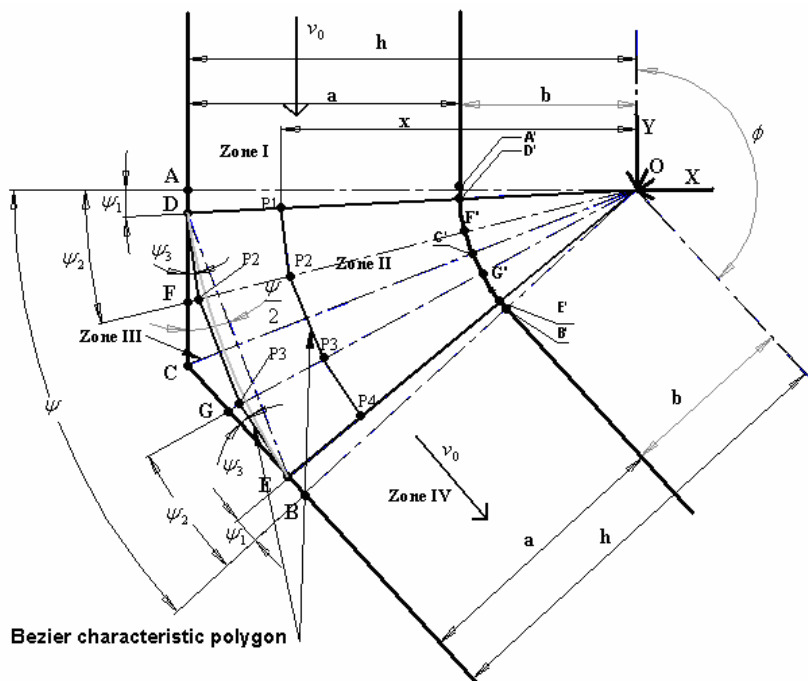
ریحانیان و همکاران روش ارائه شده برای حد بالا توسط اویترز و پاچلا را برای فرایند ECAE بکار بردند. در این روش منطقه تغییر شکل به تعداد متناهی منطقه صلب که می توانند نسبت به هم لغزش داشته باشند تقسیم می شود. هر منطقه می تواند حرکت خطی یا چرخشی داشته باشد و هر منطقه با منطقه مجاور توسط مرزهای انفصال سرعت جدا می شود. آنها منطقه تغییر شکل فرایند ECAE را به سه منطقه سرعت دورانی تقسیم کردند. معادلات و محور مرکزی هر صفحه انفصال سرعت بدست آورده شد. بر اساس نقاط مرزی و صفحات انفصال سرعت، کل انرژی از دست رفته بهینه شد. در نتیجه نیروی لازم برای انجام فرایند بدست آمد. مقدار آزمایش تجربی با مقدار فشار بدست آمده از تحلیل، سازگاری خوبی را نشان داد. مشاهده شد که با افزایش ضریب اصطکاک و شعاع گوشه داخلی، منطقه تغییر شکل بزرگتر می شود [۹].

در حل های حد بالای ارائه شده توسط دیگران که در بالا مورد بحث قرار گرفت [۴-۶]، خطوط جریان ماده در منطقه تغییر شکل بصورت کمانهایی متحدالمرکز در نظر گرفته شد. بر اساس آزمایش تجربی انجام شده توسط حسنی و همکاران [۱۰] که خطوط جریان ماده در هنگام عبور از منطقه تغییر شکل را بررسی کردند، مشخص

می باشد. در روابط (۱) تا (۴) مختصات این نقاط نشان داده شده است:

$$x_1 = uh, \quad y_1 = uh \tan\left(\frac{v\psi}{2}\right) \quad (1)$$

نسبت به خط OC توسط زوایای  $\psi_1, \psi_2$  و  $\psi_3$  پیدا می شوند ( $\psi_3$  زاویه انحراف ضلع  $P_1P_2$  چند ضلعی مشخصه بزیز از راستای سرعت اولیه ماده قبل از منطقه تغییر شکل می باشد). چند ضلعی  $P_1P_2P_3P_4$  در واقع چند ضلعی مشخصه منحنی بزیز



شکل (۲): مدل تغییر شکل برای یک قالب ECAE با در نظر گرفتن انفصال سرعت در ورودی و خروجی منطقه تغییر شکل

در روابط بالا از متغیرهای زیر به منظور بی بعد سازی استفاده شده است:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{x}{h} = u &\Rightarrow x = uh \\ \frac{\psi_1}{\psi} = v &\Rightarrow \psi_1 = \frac{v\psi}{2} \\ \frac{\psi_2}{\psi} = w &\Rightarrow \psi_2 = \frac{w\psi}{2} \\ \frac{\psi_3}{\psi} = r &\Rightarrow \psi_3 = \frac{r\psi}{2} \end{aligned} \right. \quad (5)$$

$$\frac{b}{h} \leq u \leq 1, 0 \leq v < 1, v < w \leq 1, 0 \leq r \leq 1$$

با توجه به تعریف منحنی بزیز درجه سوم، مختصات X و Y منحنی پارامتری بزیز بر حسب t و برای یک خط جریان در فاصله x (شکل (۲)) به صورت زیر در می آید:

$$x_1 + \frac{y_1}{\cot\left(\frac{r\psi}{2}\right)}, \quad y_2 = x_2 \tan\left(\frac{w\psi}{2}\right) \quad (2)$$

$$x_2 = \frac{\tan\left(\frac{w\psi}{2}\right)}{\cot\left(\frac{r\psi}{2}\right) + 1}$$

$$x_3 = \frac{x_4 \cot\left(\left(1 - \frac{r}{2}\right)\psi\right) + y_4}{\tan\left(\left(1 - \frac{w}{2}\right)\psi\right) + \cot\left(\left(1 - \frac{r}{2}\right)\psi\right)}, \quad (3)$$

$$y_3 = x_3 \tan\left(\left(1 - \frac{w}{2}\right)\psi\right)$$

$$x_4 = \frac{uh}{\cos\left(\frac{v\psi}{2}\right)} \cos\left(\left(1 - \frac{v}{2}\right)\psi\right), \quad (4)$$

$$y_4 = \frac{uh}{\cos\left(\frac{v\psi}{2}\right)} \sin\left(\left(1 - \frac{v}{2}\right)\psi\right)$$

یافتن توان کل صرف شده در فرآیند می توان از رابطه زیر نیروی پرسی لازم برای تغییر شکل را یافت:

$$\dot{W}_{total} = F \times v_0 \quad (13)$$

همچنین سه ناحیه در فرآیند ایجاد کرنش می کنند که عبارتند از: صفحه برشی ورودی (DD'), صفحه برشی خروجی (EE') و ناحیه تغییرشکل (منطقه II). جزئیات محاسبه هر یک از این کرنش ها در پیوست (ب) آورده شده است.

### ۳- نتایج و بحث

در این تحقیق برای بررسی صحت مدل ارائه شده و نیز بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر روی فرایند ECAE از ماده و هندسه قالبی با مشخصات ارائه شده در جدول (۱) استفاده شد. تمام این مقادیر بعنوان ورودی مسئله بوده و سپس با بهینه سازی حد بالا نتایج دلخواه بدست آورده شد.

با بهینه سازی حد بالا، نیروی لازم برای انجام فرایند ECAE برای قالب و ماده ای با مشخصات ذکر شده در جدول (۱) بدست آمد. برای تایید درستی نیروی بدست آمده توسط کار حاضر، این نیرو با مقدار کار تجربی انجام شده توسط [۴] مقایسه شد. همچنین برای نشان دادن دقت این تحلیل نسبت به کارهای گذشته در این زمینه، نیروی بدست آمده از این تحلیل با کارهای تحلیلی دیگر مقایسه شد. شکل (۳) مقادیر ذکر شده را با یکدیگر مقایسه می کند. همانطور که در شکل (۳) نشان داده شده است، نیروی بدست آمده توسط مدل ارائه شده در این تحقیق به مقدار تجربی در مقایسه با کار دیگران، نزدیکتر است. اختلاف کمتر بین مقدار تجربی با کار تحلیلی حاضر، بیانگر واقعی تر بودن و بهبود یافتن مدل ارائه شده برای منطقه تغییر شکل می باشد. علت کاهش نیروی انجام فرایند و نزدیکتر شدن آن به مقدار تجربی، مربوط به هندسه در نظر گرفته شده برای خطوط جریان منطقه تغییر شکل و منطقه مرده فلز است. در کارهای دیگران که در شکل (۳) بیان شده است و در مقدمه بطور مختصر توضیح داده شد، خطوط جریان و منطقه مرده فلز بصورت کمان های دایروی متحدالمرکز فرض شدند. در حالیکه در کار حاضر، خطوط جریان دارای شکل ثابتی نبوده و شکل هندسی آنها با بهینه سازی حد بالا بدست آورده می شود.

$$X(t) = x_1(1-t)^3 + 3x_2t(1-t)^2 + 3x_3t^2(1-t) + x_4t^3 \quad (6)$$

$$Y(t) = y_1(1-t)^3 + 3y_2t(1-t)^2 + 3y_3t^2(1-t) + y_4t^3 \quad (7)$$

که  $0 \leq t \leq 1$  تغییر می کند. در روابط بالا  $w$  و  $v$  پارامترهای تعیین کننده شکل منحنی بزیر می باشند که برای بهینه سازی حل حد بالا مورد استفاده قرار می گیرند و یا به تعبیر دیگر پارامترهای بهینه سازی حد بالا می باشند. باید توجه داشت که با تغییر این پارامترها شکل منحنی بزیر و در نتیجه هندسه منطقه مرده فلز و شکل خطوط جریان تغییر می کند.

با داشتن (۶) و (۷) و با استفاده از حل کلی حد بالای بیان شده در [۱۲] ارضای شرط مرزی مربوط به میدان سرعت در  $t=0$ ، میدان سرعت مجاز برای منطقه تغییر شکل برابر است با:

$$v_y = \frac{c}{Y_t X_u - Y_u X_t} Y_t \quad (8)$$

$$v_x = \frac{c}{Y_t X_u - Y_u X_t} X_t \quad (9)$$

$$c = \frac{v_0 h \left( \cot\left(\frac{r\psi}{2}\right) + \tan\left(\frac{v\psi}{2}\right) \right) \cos\left(\frac{v\psi}{2}\right) \cos\left(\frac{r\psi}{2}\right)}{\cot\left(\frac{r\psi}{2}\right) \cos\left(\frac{(v-r)\psi}{2}\right)} \quad (10)$$

که  $X_t, X_u, Y_t, Y_u$  به ترتیب مشتقات جزئی  $X$  و  $Y$  نسبت به  $t$  و  $u$  می باشند.

با توجه به میدان سرعت بالا و تبدیل مختصات می توان نرخ کرنش های مربوطه را با توجه به روابط زیر بیابیم:

$$\dot{\epsilon}_x = \frac{\partial v_x}{\partial x}, \dot{\epsilon}_y = \frac{\partial v_y}{\partial y}, \dot{\epsilon}_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \quad (11)$$

حال با داشتن نرخ کرنش ها و سرعت ها می توان به محاسبه توان های صرف شده در فرآیند پرداخت. جزئیات محاسبه توان های صرف شده، در پیوست (الف) موجود می باشد. توان صرف شده کل فرآیند عبارت است از:

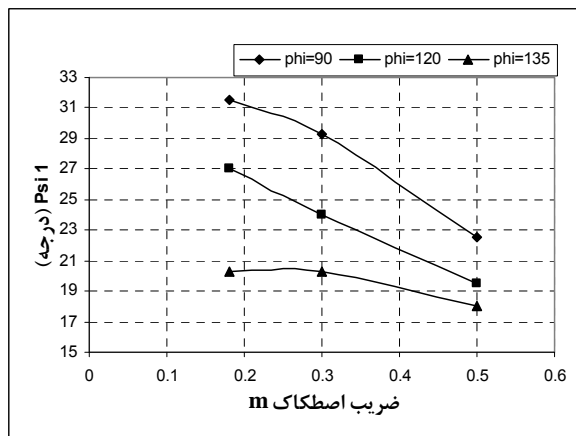
$$\dot{W}_{total} = \dot{W}_i + \dot{W}_{f1} + \dot{W}_{f2} + \dot{W}_{f3} + \dot{W}_l + \dot{W}_s \quad (12)$$

که در آن  $\dot{W}_i, \dot{W}_l, \dot{W}_{f3}, \dot{W}_{f2}, \dot{W}_{f1}, \dot{W}_s$  به ترتیب عبارتند از: توان صرف شده در منطقه تغییر شکل، توان صرف شده به دلیل ایجاد برش در سطح مشترک ماده و منطقه مرده، توان صرف شده به دلیل وجود اصطکاک در گوشه داخلی قالب، توان صرف شده به دلیل اصطکاک در مناطق AD و EB، توان صرف شده به دلیل اصطکاک قبل از نقطه A و بعد از نقطه B و توان صرف شده ناشی از برش در صفحه برشی ورودی D'D و صفحه برشی خروجی E'E. با

جدول (۱): پارامترها و مشخصات استفاده شده در تحلیل حاضر

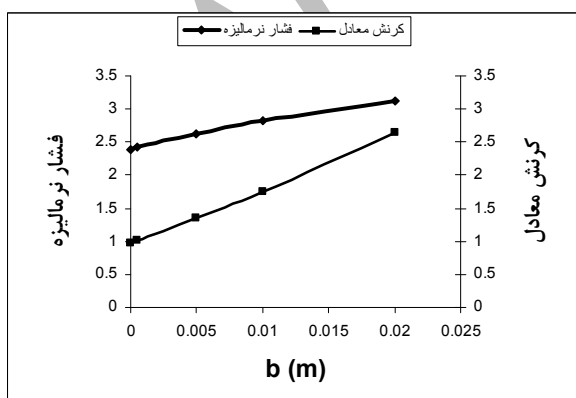
| زاویه قالب $\phi$ (°) | عرض کانال a(mm) | ضریب اصطکاک m | $l(mm) = l_o + l_i$ | ضریب استحکام k(Mpa) | توان کار سختی n | b (mm) |
|-----------------------|-----------------|---------------|---------------------|---------------------|-----------------|--------|
| ۹۰                    | ۱۴              | ۰/۱۸          | ۶۶                  | ۱۷۹/۳               | ۰/۲۶            | ۱۰-۱۵  |

در شکل (۵) مشاهده می شود که با افزایش ضریب اصطکاک مقدار  $\psi/1$  کاهش می یابد که این به معنی افزایش منطقه تغییر شکل می باشد. این روند برای هر زاویه قالب در صورت افزایش ضریب اصطکاک نیز مشاهده می شود.

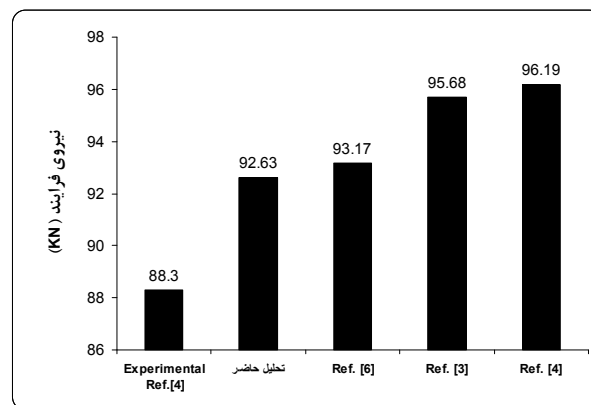


شکل (۵): تاثیر ضریب اصطکاک بر  $\psi/1$  در زوایای قالب متفاوت

پارامتر  $b$  تعریف کننده اندازه طول منحنی گوشه داخلی قالب می باشد. مقدار  $b$  بزرگتر یعنی اینکه گوشه داخلی قالب دارای منحنی بزرگتر می باشد و  $b$  کوچکتر نشان دهنده تیز تر بودن گوشه داخلی قالب است. در شکل (۶) تاثیر مقدار  $b$  بر فشار بی بعد شده یا نرمالیزه شده و کرنش معادل نشان داده شده است. با توجه به شکل (۶) می توان مشاهده کرد که هر چه گوشه داخلی قالب از حالت لبه تیز به سمت یک منحنی بزرگتر تغییر شکل بدهد فشار نرمالیزه و کرنش معادل افزایش می یابد ولی آهنگ افزایش فشار کمتر از آهنگ افزایش کرنش می باشد. در نتیجه با انتخاب بهینه  $b$  میتوان به کرنش های بزرگتری در یک پاس رسید در صورتیکه افزایش فشار کمی نسبت به افزایش قابل توجه کرنش داشته باشیم.



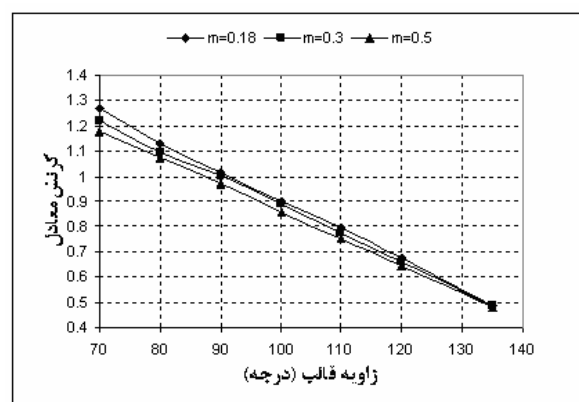
شکل (۶): تاثیر  $b$  بر کرنش معادل و فشار نرمالیزه



شکل (۳): مقایسه حل حد بالای ارائه شده توسط تحلیل حاضر با مقدار تجربی و کارهای تحلیل دیگران

از آنجا که اعمال کرنش های زیاد در ماده طی فرایند ECAE مهم می باشد، تاثیر زاویه قالب و ضریب اصطکاک بر روی کرنش معادل بوجود آمده در ماده پس از یک پاس از فرایند بررسی شد. شکل (۴) کاهش کرنش معادل در اثر افزایش زاویه قالب و ضریب اصطکاک را نشان می دهد. با افزایش زاویه قالب مقدار کرنش معادل ایجاد شده کاهش می یابد و از همین رو تعیین زاویه قالب مناسب که بتواند مقدار کرنش معادل مطلوب را در کمترین پاس بدهد از اهمیت برخوردار است.

همانطور که در شکل (۴) مشاهده می شود افزایش ضریب اصطکاک تاثیر نه چندان چشمگیری بر روی کرنش معادل دارد و با افزایش زاویه قالب تاثیر ضریب اصطکاک بر روی کرنش معادل به صفر میل می کند. با افزایش ضریب اصطکاک، منطقه مرده فلز و ناحیه تغییر شکل وسیع تر می شوند و در نتیجه شکل گیری یا چرخش مواد راحت صورت می پذیرد. بنابراین کرنش معادل مقداری کاهش می یابد. با افزایش زاویه قالب تغییر شکل کمتری در ماده بوجود می آید که منجر به کاهش کرنش معادل می شود.



شکل (۴): تغییرات کرنش معادل نسبت به زاویه قالب برای ضرایب اصطکاک مختلف

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق یک حل حد بالا برای فرآیند ECAE ارائه شد. این حل ساده سازی های سایر حل های ارایه شده تا کنون را ندارد؛ چرا که در این حل علاوه بر این که وسعت منطقه تغییر شکل قابل تغییر است، شکل خطوط جریان ماده و هندسه منطقه تغییر شکل نیز تغییر می کند:

- اختلاف مقدار نیروی تئوری بدست آمده برای انجام فرآیند توسط این روش از مقدار تجربی مربوطه، نسبت به حل های حد بالای ارائه شده قبلی کمتر است که این نشان دهنده صحت بیشتر این تحلیل نسبت به سایرین است.
- با بهینه سازی حد بالا، شکل و اندازه منطقه تغییر شکل و منطقه مرده فلز قابل حدس زدن است.
- با انتخاب بهینه و درست هندسه قالب نظیر شعاع گوشه داخلی قالب b و زاویه قالب می توان به کرنش های بزرگتری در یک پاس رسید، در صورتیکه افزایش فشار کمی در مقایسه با افزایش چشمگیر کرنش داشته باشیم.

#### ۵- پیوست ها

##### پیوست الف

توان صرف شده در منطقه تغییر شکل:

$Y_0$  تنش تسلیم ماده می باشد:

$$\dot{W}_i = \frac{2Y_0}{\sqrt{3}} \iiint \left[ \left( \frac{\dot{\epsilon}_x^2 + \dot{\epsilon}_y^2 + \dot{\epsilon}_z^2}{2} \right) + \dot{\epsilon}_{xy}^2 + \dot{\epsilon}_{xz}^2 + \dot{\epsilon}_{yz}^2 \right]^{\frac{1}{2}} dx dy dz \quad (\text{الف-۱})$$

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{W}_i &= \frac{2Y_0 a}{\sqrt{3}} \int_{\frac{b}{h}}^1 \int_0^1 \left[ \left( \frac{\dot{\epsilon}_x^2 + \dot{\epsilon}_y^2}{2} \right) + \dot{\epsilon}_{xy}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \left| \frac{\partial(x,y)}{\partial(u,t)} \right| dt du \\ \left| \frac{\partial(x,y)}{\partial(u,t)} \right| &= \begin{vmatrix} \frac{\partial X}{\partial u} & \frac{\partial Y}{\partial u} \\ \frac{\partial X}{\partial t} & \frac{\partial Y}{\partial t} \end{vmatrix} = X_u Y_t - Y_u X_t \end{aligned} \right. \quad (\text{الف-۲})$$

توان صرف شده به دلیل ایجاد برش در سطح مشترک ماده و منطقه مرده:

m ضریب ثابت اصطکاک می باشد.

$$\dot{W}_{f1} = \iint \tau_f |\Delta v| ds = \frac{my_0}{\sqrt{3}} \iint (v_x^2 + v_y^2)^{\frac{1}{2}} \Big|_{u=1} ds \quad (\text{الف-۳})$$

$$\dot{W}_{f1} = \frac{my_0 a}{\sqrt{3}} \int (v_x^2 + v_y^2)^{\frac{1}{2}} \Big|_{u=1} \frac{dy}{\cos \alpha} \quad (\text{الف-۴})$$

$\alpha$  زاویه بین مماس بر منحنی منطقه مرده و  $\vec{j}$  می باشد. با تبدیل متغیر dy به dt داریم:

$$\dot{W}_{f1} = \frac{my_0 a}{\sqrt{3}} \int_0^1 (v_x^2 + v_y^2)^{\frac{1}{2}} \Big|_{u=1} \frac{1}{\cos \alpha} Y_t dt \quad (\text{الف-۵})$$

یکه مماس عبارت است از:

$$T(t) = \frac{1}{(X_t^2 + Y_t^2)^{\frac{1}{2}}} (X_t \vec{i} + Y_t \vec{j}) \quad (\text{الف-۶})$$

$$\vec{T}(t) \cdot \vec{j} = |T| |j| \cos \alpha = \cos \alpha \quad (\text{الف-۷})$$

$$\frac{1}{\cos \alpha} = \frac{1}{T \cdot j} \quad (\text{الف-۸})$$

$$\frac{1}{\cos \alpha} = \frac{(X_t^2 + Y_t^2)^{\frac{1}{2}}}{Y_t} \quad (\text{الف-۹})$$

با جاگذاری (الف-۹) در (الف-۵) و ساده سازی و با توجه به این که به دلیل وجود برش در سطح مشترک منطقه مرده فلز m=1 داریم:

$$\dot{W}_{f1} = \frac{Y_0 a}{\sqrt{3}} \int_0^1 (v_x^2 + v_y^2)^{\frac{1}{2}} \Big|_{u=1} (X_t^2 + Y_t^2)^{\frac{1}{2}} \Big|_{u=1} dt \quad (\text{الف-۱۰})$$

توان صرف شده به دلیل وجود اصطکاک در گوشه داخلی قالب:

$$\dot{W}_{f2} = \frac{my_0 a}{\sqrt{3}} \int_0^1 (v_x^2 + v_y^2)^{\frac{1}{2}} \Big|_{u=\frac{b}{h}} (X_t^2 + Y_t^2)^{\frac{1}{2}} \Big|_{u=\frac{b}{h}} dt \quad (\text{الف-۱۱})$$

توان صرف شده به دلیل اصطکاک در مناطق OAD و OBE:

$$\tau_0 = \frac{Y_0}{\sqrt{3}} \text{ تنش تسلیم در برش می باشد و برابر است با}$$

$$\dot{W}_{f3} = 2(m\tau_0 v_0 h \tan \psi_1 a) = 2m\tau_0 v_0 h a \tan\left(\frac{\psi_1}{2}\right) \quad (\text{الف-۱۲})$$

توان صرف شده به دلیل اصطکاک قبل از نقطه a و بعد از نقطه b:

$l_0$  و  $l_i$  طول قالب قبل و بعد از نقاط a و b می باشد.

$$\dot{W}_l(i) = 4m\tau_0 v_0 l_i \quad (\text{الف-۱۳})$$

$$\dot{W}_l(o) = 4m\tau_0 v_0 l_o$$

#### پیوست ب

کرنش ایجاد شده در منطقه تغییر شکل (ناحیه II در شکل (۲)):

نرخ کرنش معادل بصورت زیر تعریف می شود:

$$\bar{\varepsilon}_s = \varepsilon_{si} + \varepsilon_{so} \quad (\text{ب- } 11)$$

در نتیجه کرنش کل ایجاد شده در ماده در یک پاس برابر است با:

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}_s + \bar{\varepsilon}_{stream} \quad (\text{ب- } 12)$$

کرنش معادل ایجاد شده در یک پاس در عرض نمونه ثابت است.

## ۶- مراجع

- [1] D. N. Lee, "An upper-bound solution of channel angular deformation", Scripta mater., Vol. 43, pp. 115-118, 2000.
- [2] J. Alkorta, and J. G. Sevillano, "A comparison of FEM and upper-bound type analysis of equal-channel angular pressing (ECAP)", J. Mater. Proc. Technol., Vol. 141, pp. 313-318, 2003.
- [3] B. S. Altan, G. Purcek and I. Miskioğlu, "An upper-bound analysis for equal-channel angular extrusion", j. mater. proc. technol., Vol. 168, pp. 137-146, 2005.
- [4] R. Eivani, and A. Karimi Taheri, "An upper bound solution of ECAE process with outer curved corner", j. mater. proc. technol., Vol. 182, pp. 555-563, 2007.
- [5] M. H. Paydar, M. Reihanian, R. Ebrahimi, T. A. Dean and M. M. Moshksar, "An upper-bound approach for equal channel angular extrusion with circular cross-section", j. mater. proc. technol., Vol. 198, pp. 48-53, 2008.
- [6] R. Eivani, and A. Karimi Taheri, "The effect of dead metal zone formation on strain and extrusion force during equal channel angular extrusion", Comput. Mater. Sci., Vol. 42, pp.14-20, 2008.
- [7] J. Luis Pérez, and R. Luri, " Study of the ECAE process by the upper bound method considering the correct die design", Mechanics of Materials, Vol. 40, pp. 617-628, 2008.
- [8] R. Eivani, S. Ahmadi, E. Emadoddin, S. Valipour and A. Karimi Taheri", The effect of deformations passes on the extrusion pressure in axi-symmetric equal channel angular extrusion", Computational Materials Science, Vol. 44, pp. 1116-1125, 2009.
- [9] M. Reihanian, R. Ebrahimi and M. M. Moshksar, "Upper-bound analysis of equal channel angular extrusion using linear and rotational velocity fields", Materials and Design, Vol. 30, pp. 28-34, 2009.
- [10] R. Hasani, L. S. Lapovok and A. Molinari, "Deformation field variations in equal channel angular extrusion due to back pressure", Scripta Mater., Vol. 58, pp. 771-774, 2008.
- [11] K. Abrinia, and M. J. Mirnia, "A new generalized upper-bound solution for the ECAE process", International journal of advanced manufacturing Technology, DOI: 10.1007/s00170-009-2103-y, 2009.
- [12] K. Abrinia, and H. Bloorbar, "A new improved upper bound solution for the extrusion of shaped sections using CAD techniques", COMPLAS VI Conference- Barcelona Spain, 2000.

$$\bar{\varepsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\varepsilon}_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left( \frac{\dot{\varepsilon}_x^2 + \dot{\varepsilon}_y^2 + \dot{\varepsilon}_z^2 + 2\dot{\varepsilon}_{xy}^2 + 2\dot{\varepsilon}_{xz}^2 + 2\dot{\varepsilon}_{yz}^2}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{ب- } 1)$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left( \frac{\dot{\varepsilon}_x^2 + \dot{\varepsilon}_y^2}{2} + \dot{\varepsilon}_{xy}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{ب- } 2)$$

با انتگرال گیری نسبت به زمان می توانیم کرنش معادل را بیابیم t) زمان می باشد):

$$\bar{\varepsilon} = \int \bar{\varepsilon} dt \quad (\text{ب- } 3)$$

ds المان خط جریان می باشد و v اندازه سرعت است:

$$\frac{ds}{dt} = v$$

$$ds \cos \alpha = dy$$

$$\frac{1}{\cos \alpha} = \frac{(X_t^2 + Y_t^2)^{\frac{1}{2}}}{Y_t} \quad (\text{ب- } 4)$$

$$dt = \frac{1}{v} \frac{1}{\cos \alpha} dy = \frac{(X_t^2 + Y_t^2)^{\frac{1}{2}}}{Y_t (v_x^2 + v_y^2)^{\frac{1}{2}}} dy$$

با جاگذاری (ب- 2) و (ب- 4) در (ب- 3) داریم:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \int \left( \frac{\dot{\varepsilon}_x^2 + \dot{\varepsilon}_y^2}{2} + \dot{\varepsilon}_{xy}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \frac{(X_t^2 + Y_t^2)^{\frac{1}{2}}}{Y_t (v_x^2 + v_y^2)^{\frac{1}{2}}} dy \quad (\text{ب- } 5)$$

با تبدیل dy به dt داریم:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \int_0^1 \left( \frac{\dot{\varepsilon}_x^2 + \dot{\varepsilon}_y^2}{2} + \dot{\varepsilon}_{xy}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \frac{(X_t^2 + Y_t^2)^{\frac{1}{2}}}{Y_t (v_x^2 + v_y^2)^{\frac{1}{2}}} Y_t dt \quad (\text{ب- } 6)$$

در نهایت با ساده سازی:

$$\bar{\varepsilon}_{stream} = \bar{\varepsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \int_0^1 \left( \frac{\dot{\varepsilon}_x^2 + \dot{\varepsilon}_y^2}{2} + \dot{\varepsilon}_{xy}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \frac{(X_t^2 + Y_t^2)^{\frac{1}{2}}}{(v_x^2 + v_y^2)^{\frac{1}{2}}} dt \quad (\text{ب- } 7)$$

کرنش ایجاد شده در صفحات برشی ورودی و خروجی (E'D و E'E):

در صفحات برشی ورودی و خروجی نیز کرنش برشی ایجاد می شود که این کرنش از تقسیم مقدار انفعال سرعت ( $|\Delta v|$ ) در راستای صفحه برشی بر مولفه سرعت عمود بر صفحه برشی بدست می آید:

$$\gamma_i = \gamma_o = \frac{|\Delta v|}{v_o \cos \psi_1} \quad (\text{ب- } 8)$$

$$|\Delta v| = \left| \frac{v_o \cos \psi_1}{\cos(\psi_3 - \psi_1)} \sin(\psi_3 - \psi_1) + v_o \sin \psi_1 \right| \quad (\text{ب- } 9)$$

که  $\gamma_i$  و  $\gamma_o$  کرنش برشی ایجاد شده در صفحات E'D و E'E می باشند. کرنش معادل ایجاد شده در این صفحات برابر است با:

$$\varepsilon_{si} = \varepsilon_{so} = \frac{1}{\sqrt{3}} \gamma_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \gamma_o \quad (\text{ب- } 10)$$