



## طراحی قالب بهینه در فرایند کشش مفتول با مقطع مربع از مفتول با مقطع دایره

حشمت‌اله حقیقت<sup>۱\*</sup>، سید بابک الهویسی<sup>۲</sup>

\* نویسنده مسئول: hhaghighat@razi.ac.ir

### واژه‌های کلیدی

کشش، مفتول مربع، کرانه فوقانی، قالب بهینه.

### چکیده

در این مقاله اثر طراحی قالب بر نیروی کشش مفتول بررسی شده است. نیروی کشش با روش کرانه فوقانی محاسبه شده است. به دلیل پیچیدگی جریان فلز در قالب، تحلیل فرایند براساس قالب مدور انجام شده است. برای ایجاد قالب مدور معادل، مساحت و شعاع مقطع معادل در مقاطع مختلف محاسبه شده‌اند و سپس پروفیل قالب مدور معادل توسط یک میدان سرعت مشخص شده است. سپس نرخ کرنشها، توان داخلی، توان بررسی توان اصطکاکی و تنش کششی میانگین نسبی محاسبه شده‌اند. نتایج تحلیل با نتایج کرانه فوقانی و روش تعادلی نیروها مقایسه شده‌اند. نتایج مؤید آن است که با افزایش ثابت اصطکاک، زاویه بهینه قالب در هر دو طرح افزایش یافته است.

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی کرمانشاه.

۲- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی کرمانشاه.

## ۱- مقدمه

مفتول‌های با مقطع مربع کاربرد زیادی در صنعت دارند. شکل‌دهی این مفتول‌ها از طریق کشش مفتول گرد انجام می‌پذیرد. کشش مفتول با مقطع مربع از مفتول گرد با دو طرح مختلف قالب قابل انجام است: در طرح اول، قالب کشش به گونه‌ای است که ابتدا گوشه‌های مربع تشکیل و در انتها اضلاع آن شکل داده می‌شوند. در طرح دوم، قالب به گونه‌ای است که ابتدا ضلع‌های مربع شکل داده شده و در خروج ماده از قالب، گوشه‌های آن شکل داده می‌شوند. در این فرایند، مانند سایر فرایندهای شکل دهی فلزات، اطلاع از میزان نیروی شکل‌دهی و کمینه نمودن آن از اهمیت به سزایی برخوردار است. کاهش نیروی شکل‌دهی دارای مزایای متعددی از جمله کاهش انرژی مصرفی و افزایش عمر قالب است.

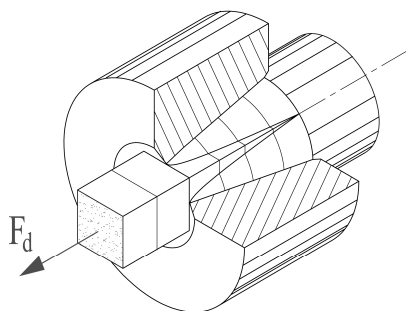
فرایند کشش به صورت تجربی اولین بار توسط ویستریخ مطالعه شد. آزمایش‌های انجام شده توسط وی ثابت کرد که برای هر فرایند کشش، نیروی کشش در مقدار مشخصی از زاویه قالب، حداقل است [۱]. وی این مقدار را زاویه بهینه نامید و نشان داد که فشار متوسط در سطح مشترک ماده-قالب ممکن است بیشتر از تنش تسلیم ماده در فشار باشد. سپس اویترز فرایند کشش را با روش کرانه فوقانی و در نظر گرفتن میدان سرعت کروی در ناحیه تغییر شکل تحلیل کرد [۲]. علاوه بر پیش بینی زاویه بهینه قالب، تحلیل وی انتقال تدریجی فرایند کشش را به فرایند تراش با افزایش زاویه قالب، نشان داد. در کلیه این مطالعات فرایند کشش مفتول‌های گرد به گرد با قالب مخروطی تحلیل شدند. چونجا و پراکاش تحلیل فرایند کشش مفتول با مقطع چند ضلعی منتظم از مفتول با مقطع چند ضلعی منتظم را به روش کرانه بالایی انجام دادند [۳]. تحلیل فرایند کشش مفتول گرد به مفتول با مقطع مربع را ابتدا بسیلی انجام داد [۴]. وی با استفاده از شبکه‌بندی ناحیه تغییر شکل و تعریف میدان سرعت کروی برای هر گره، در نهایت با استفاده از برنامه کامپیوتری به حل کل هندسه پرداخت و نیروی کشش را محاسبه کرد. همچنین وی حداکثر کاهش سطح مقطع را با توجه به قطر مفتول محاسبه کرد. بور روش کرانه فوقانی را برای تحلیل کشش مقطع گرد به مقطع مربع با استفاده از

بکارگیری روش انتقال مختصات ایجاد کرد [۵]. سپس گاناسکرا و هاشینو حل کرانه فوقانی را برای اکستروژن و کشش مقاطع مربعی از مفتول‌های گرد در میان قالب‌های همگرای شکل یافته به وسیله خطوط مستقیم به دست آوردند [۶]. گوردون و همکاران به تحلیل فرایند اکستروژن در قالب با پروفیل منحنی پرداختند [۷-۹]. سامچای به روش المان محدود، کشش مفتول دو فلزی گرد به مقطع شش ضلعی را بررسی کردند [۱۰]. حقیقت و الهویسی تخمین نیروی لازم در فرایند کشش مفتول گرد به مقطع مربع پیچش یافته، با قالب طرح اول بر اساس قالب مدور معادل را انجام دادند و درستی روش را اثبات کردند [۱۱].

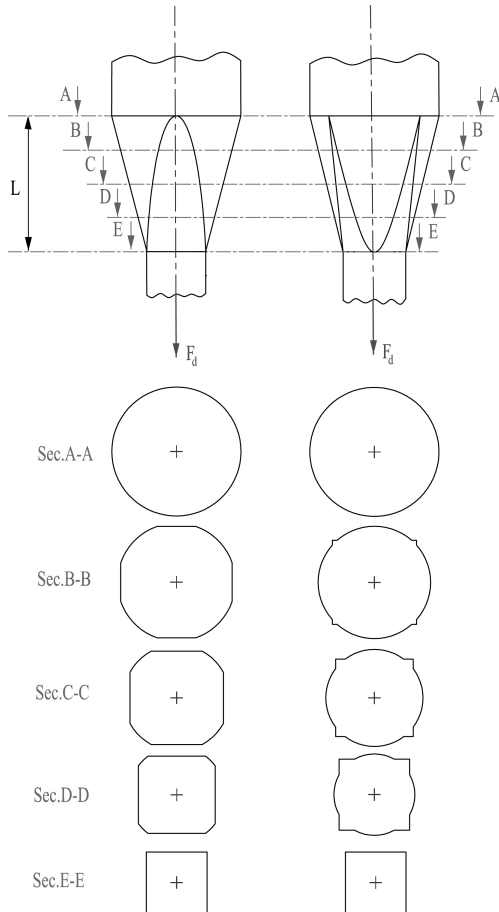
این مقاله به مقایسه نیروی کشش لازم برای دو طرح قالب ذکر شده بالا می‌پردازد. نیروی کشش با روش کرانه فوقانی محاسبه شده و به دلیل پیچیدگی جریان فلز داخل قالب، تحلیل فرایند واقعی پیچیده بوده و در این مقاله تحلیل کرانه فوقانی بر اساس قالب مدور معادل انجام شده است.

## ۲- تشریح فرایند و معادل سازی آن

در کشش مفتول گرد به مربع، مقطع ورودی قالب به شکل دایره با شعاع  $R_0$  و مقطع خروجی آن به صورت مربع با طول ضلع  $2d$  است. در این فرایند دو نوع شکل قالب می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. همانگونه که در شکل (۱) نشان داده شده در طرح I شکل‌گیری مربع از گوشه‌های آن شروع شده و در انتها اضلاع کامل می‌شوند. در طرح II فرایند با شکل‌گیری اضلاع شروع شده و با شکل‌گیری گوشه‌ها به اتمام می‌رسد. این نوع تغییر شکل در شکل (۲) نمایش داده شده است.



شکل (۱) قالب طرح I - شروع تغییر شکل از گوشه‌های مربع.



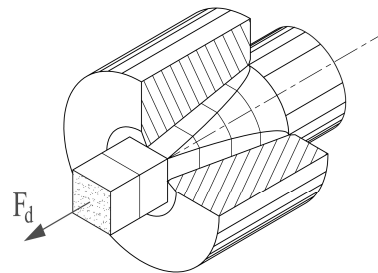
سطح مقطع‌های ماده داخل قالب برای هر دو طرح قالب در شکل (۳) نشان داده شده است. همانگونه که از شکل‌های (۱) و (۲) دیده می‌شود، سطوح داخلی قالب کشش دو گونه‌اند. سطوح به شکل مخروطی با نیم زاویه  $\alpha_C$  و سطوح تخت که نیم زاویه آن‌ها  $\alpha_S$  است. این زوایا نسبت به محور مفتول با مقطع گرد محاسبه می‌شوند. رابطه این زوایا در قالب طرح I به صورت رابطه (۱) است:

$$\tan \alpha_S = \frac{\sqrt{2}R_o - 2d}{\sqrt{2}L}, \quad \tan \alpha_C = \frac{R_o - d}{L} \quad (1)$$

روابط بین زوایای مخروطی و تخت در قالب طرح II به صورت رابطه (۲) می‌باشد:

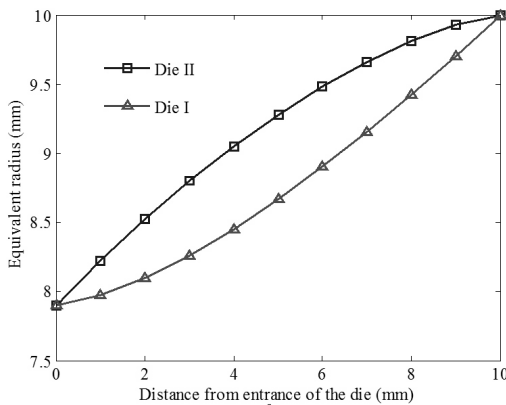
$$\tan \alpha_S = \frac{R_o - d}{L}, \quad \tan \alpha_C = \frac{R_o - \sqrt{2}d}{L} \quad (2)$$

همان‌گونه که از شکل‌های (۱) و (۲) و رابطه‌های (۱) و (۲) پیداست، در قالب طرح I نیم زاویه سطوح تخت از نیم زاویه سطوح مخروطی بزرگ‌تر است. در حالیکه در قالب طرح II نیم زاویه سطوح مخروطی از نیم زاویه سطوح تخت بزرگ‌تر است.



شکل (۲) قالب طرح II - شروع تغییر شکل از وسط اضلاع مربع.

شکل (۳) مقاطع مفتول داخل قالب در طرح‌های I (راست) و II (چپ).



شکل (۴) پروفیل‌های قالب مدور معادل برای دو طرح قالب.

در طرح I تقعر رو به بالا و در طرح II تقعر به سمت پایین است. در نتیجه در قالب طرح I، حجم ناحیه تغییر شکل بیشتر از حالت اول است. در شکل (۵) پارامترهای هندسی قالب مدور معادل نشان داده شده است. در این شکل  $R_o$

به دلیل پیچیدگی جریان فلز داخل حفره قالب، تحلیل فرایند واقعی پیچیده است. به این دلیل تحلیل فرایند واقعی با استفاده از فرایند معادل آن انجام می‌شود. برای این منظور در هر مقطع، مساحت آن محاسبه و برابر با مساحت یک دایره قرار داده شده و شعاع دایره معادل محاسبه می‌شود. با متصل کردن نقاط، پروفیل قالب مدور معادل برای هر دو شکل قالب به دست آمده است. در شکل (۴) پروفیل‌های قالب‌های مدور معادل برای هر دو طرح قالب برای کشش مفتول دایره‌ای با شعاع ۱۰ میلی‌متر و تبدیل آن به مربعی به طول ضلع ۱۴ میلی‌متر با طول قالب ۱۰ میلی‌متر رسم شده است.



$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{rr} &= \dot{u}_o \left( \frac{r_o}{r} \right)^2 \frac{\sin^2 \alpha_e \cos \theta}{\sin^2 \psi} \\ \dot{\epsilon}_{\theta\theta} &= -\dot{u}_o \left( \frac{r_o}{r} \right)^2 \frac{\sin^2 \alpha_e \cos \theta}{\sin^2 \psi} \left( \frac{1}{r} + \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) \\ \dot{\epsilon}_{\phi\phi} &= -\dot{u}_o \left( \frac{r_o}{r} \right)^2 \frac{\sin^2 \alpha_e \cos \theta}{\sin^2 \psi} \left( \frac{1}{r} + \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) \\ \dot{\epsilon}_{r\theta} &= -\frac{\dot{u}_o}{r} \left( \frac{r_o}{r} \right)^2 \frac{\sin^2 \alpha_e \sin \theta}{\tan \psi \sin^2 \psi} \left( r \frac{\partial \psi}{\partial r} - r \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{r}{\tan \psi} \left( \frac{\partial \psi}{\partial r} \right)^2 + r \left( \frac{\partial \psi}{\partial r} \right)^2 (1 + \tan^2 \psi) + \frac{\tan \psi}{r} \right) \\ \dot{\epsilon}_{\theta\phi} &= 0 \\ \dot{\epsilon}_{\phi r} &= 0 \end{aligned} \quad (17)$$

توان داخلی تغییر شکل در ناحیه دوم که با دو سطح ناپیوستگی سرعت  $S_1$  و  $S_2$  و دیواره قالب محصور شده است، به صورت رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود، همچنین توان برشی تلف شده در سطح ناپیوستگی سرعت  $S_1$  به صورت رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود.

$$\dot{W}_i = 2\pi \frac{\sigma_o}{\sqrt{3}} \int_{r_f}^{r_o} \int_0^\psi \left[ \frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{rr}^2 + \frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{\theta\theta}^2 + \frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{\phi\phi}^2 + \dot{\epsilon}_{r\theta}^2 \right] r^2 \sin \theta d\theta dr \quad (18)$$

$$\dot{W}_{S_1} = 2\pi \frac{\sigma_o}{\sqrt{3}} \int_0^{\alpha_e = \psi(r_o)} \left| \Delta U_{S_1} \right| r_o^2 \sin \theta d\theta \quad (19)$$

که در این رابطه:

$$\Delta U_{S_1} = \left( U_o \sin \theta + \frac{u_o r_o}{\tan \alpha_e} \frac{\partial \psi}{\partial r} \Big|_{r=r_o} \sin \theta \right) \quad (20)$$

توان برشی تلف شده در سطح ناپیوستگی سرعت  $S_2$  نیز از رابطه (۲۱) محاسبه می‌شود.

$$\dot{W}_{S_2} = 2\pi \frac{\sigma_o}{\sqrt{3}} \int_0^{\alpha_e = \psi(r_f)} \left| \Delta U_{S_2} \right| r_f^2 \sin \theta d\theta \quad (21)$$

که در این رابطه داریم:

$$\Delta U_{S_2} = \left( u_f \sin \theta + \frac{u_f r_f}{\tan \alpha_e} \frac{\partial \psi}{\partial r} \Big|_{r=r_f} \sin \theta \right) \quad (22)$$

توان اصطکاکی تلف شده روی دیواره قالب به صورت رابطه (۲۳) قابل محاسبه است:

حال اگر رابطه (۱۱) در رابطه (۹) جایگذاری شود، مؤلفه شعاعی میدان سرعت در ناحیه دوم به دست می‌آید:

$$U_r = -u_o \left( \frac{r_o}{r} \right)^2 \frac{\sin^2 \alpha_e \cos \theta}{\sin^2 \psi} \quad (12)$$

برای به دست آوردن مؤلفه میدان سرعت ناحیه دوم در راستای  $\theta$ ، با استفاده از قانون بقای حجم  $\dot{\epsilon}_{rr} + \dot{\epsilon}_{\theta\theta} + \dot{\epsilon}_{\phi\phi} = 0$  و اعمال شرط مرزی  $U_\theta|_{\theta=0} = 0$  خواهیم داشت:

$$U_\theta = -u_o \frac{r_o^2}{r} \frac{\frac{\partial \psi}{\partial r} \sin^2 \alpha_e \sin \theta}{\sin^2 \psi \tan \psi} \quad (13)$$

$$U_\phi = 0 \quad (14)$$

میدان سرعت ناحیه سوم مشابه میدان سرعت ناحیه اول بوده و توسط رابطه (۱۵) بیان می‌شود.

$$\begin{aligned} U_r &= -u_f \cos \theta \\ U_\theta &= u_f \sin \theta \\ U_\phi &= 0 \end{aligned} \quad (15)$$

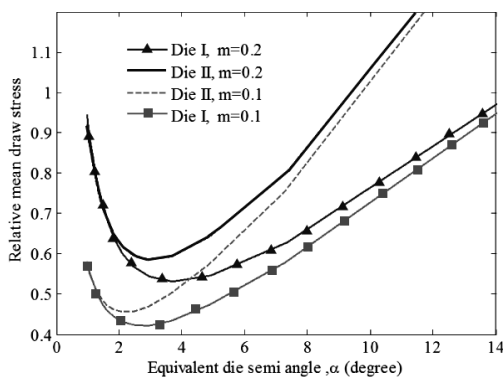
مؤلفه‌های تانسور نرخ کرنش در مختصات کروی توسط رابطه (۱۶) بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{rr} &= \frac{\partial U_r}{\partial r} \\ \dot{\epsilon}_{\theta\theta} &= \frac{1}{r} \frac{\partial U_\theta}{\partial \theta} + \frac{U_r}{r} \\ \dot{\epsilon}_{\phi\phi} &= \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial U_\phi}{\partial \phi} + \frac{U_r}{r} + \frac{U_\theta}{r} \cot \theta \\ \dot{\epsilon}_{r\theta} &= \frac{1}{r} \left( \frac{\partial U_\theta}{\partial r} - \frac{U_\theta}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_r}{\partial \theta} \right) \\ \dot{\epsilon}_{\theta\phi} &= \frac{1}{r} \left( \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial U_\theta}{\partial \phi} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_\phi}{\partial \theta} - \frac{\cot \theta}{r} U_\phi \right) \\ \dot{\epsilon}_{\phi r} &= \frac{1}{r} \left( \frac{\partial U_\phi}{\partial r} - \frac{U_\phi}{r} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial U_r}{\partial \phi} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

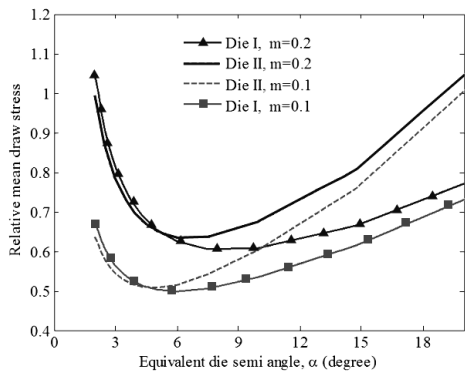
حال از میدان‌های سرعت به دست آمده، تانسور نرخ کرنش محاسبه می‌شود. با توجه به تانسور نرخ کرنش رابطه (۱۶) مشخص می‌شود که در نواحی تغییر شکل اول و سوم مؤلفه‌های تانسور نرخ کرنش برابر با صفر می‌باشند. مؤلفه‌های این تانسور در ناحیه دوم به صورت رابطه (۱۷) است.

همانگونه که در این شکل نشان داده شده نتایج روش مقطع معادل بین نتایج کرانه فوقانی و روش تعادل نیروها از مرجع [۴] قرار گرفته است.

در شکل‌های (۷) تا (۱۰) تغییر تنش کششی میانگین نسبی بر حسب زاویه قالب مدور معادل به ترتیب برای کاهش سطح مقطع‌های ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪، فاکتور اصطکاک ۰/۱ و ۰/۲ و شعاع مفتول گرد ورودی ۱۰ میلی‌متر رسم شده‌اند. همان‌گونه که در این شکل‌ها نشان داده شده در کاهش سطح مقطع فرایند ۱۰٪، اگرچه در حالت کلی حجم ناحیه تغییر شکل در قالب معادل قالبی که شکل‌گیری مربع را از رئوس آن شروع می‌کند کمتر از قالب دیگر است و در نتیجه توان داخلی کمتر از حالتی است که ابتدا اضلاع مربع شکل گیرد، اما کار اضافی در حالتی که اول اضلاع مربع شکل بگیرد کمتر از حالت دیگر است. زیرا در این حالت ماده راحت‌تر از حالت دیگر وارد قالب می‌شود. هنگامی که درصد کاهش سطح مقطع بیشتر شود این اثرات تشدید می‌شوند.



شکل (۷) تغییر تنش کششی میانگین نسبی بر حسب زاویه قالب معادل برای دو طرح قالب در ۱۰٪ کاهش سطح مقطع.



شکل (۸) تغییر تنش کششی میانگین نسبی بر حسب زاویه قالب معادل برای دو طرح قالب در ۲۰٪ کاهش سطح مقطع.

$$\dot{W}_f = 2\pi \frac{m\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_{r_f}^{r_0} |\Delta U_{Af}| r \sin \psi \, d\psi \quad (23)$$

در این رابطه داریم:

$$\Delta U_{Af} = [U_r \cos \xi + U_\theta \sin \xi] \Big|_{\theta=\psi} \quad (24)$$

$$\cos \xi = \frac{1}{\sqrt{\left(r \frac{\partial \psi}{\partial r}\right)^2 + 1}} \quad (25)$$

$$\sin \xi = \frac{1}{\sqrt{\left(r \frac{\partial \psi}{\partial r}\right)^2 + 1}}$$

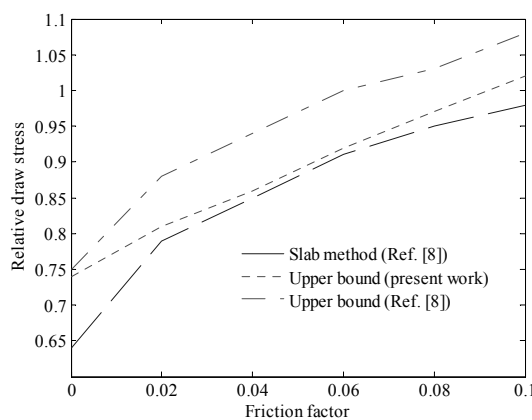
توان کلی تغییر شکل از رابطه (۲۶) به دست می‌آید و نیروی کشش  $F_d$  نیز از تقسیم توان کل بر سرعت کشش  $u_f$  به دست می‌آید.

$$J^* = \dot{W}_i + \dot{W}_{S_1} + \dot{W}_{S_2} + \dot{W}_f \quad (26)$$

$$F_d = \frac{J^*}{u_f} \quad (27)$$

#### ۴- نتایج و بحث

برای نشان دادن صحت تحلیل انجام شده، نتایج تحلیل تئوری (رابطه ۲۷) با نتایج تحلیل کرانه فوقانی و روش تعادل نیروها صورت گرفته توسط مرجع [۴] مقایسه شدند. در شکل (۶) تغییرات تنش کششی میانگین نسبی  $\sigma/\sigma_0$  (که  $\sigma$  تنش کششی لازم و  $\sigma_0$  تنش تسلیم ماده است) بر حسب ثابت اصطکاک با نتایج مرجع [۴] مقایسه شده‌اند.



شکل (۶) مقایسه تنش کششی میانگین نسبی بر حسب ثابت اصطکاک بین روش مقطع معادل و مرجع [۸].

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، نیروی کشش لازم برای دو طرح قالب در فرایند کشش مفتول با مقطع مربع از مفتول گرد مقایسه و نتایج زیر به دست آمد:

۱- نتایج تحلیل بر اساس قالب مدور معادل، با نتایج تئوری انجام شده توسط سایر محققان انطباق مناسبی دارند و بنابراین می توان از قالب مدور معادل برای تخمین نیروی کشش استفاده نمود.

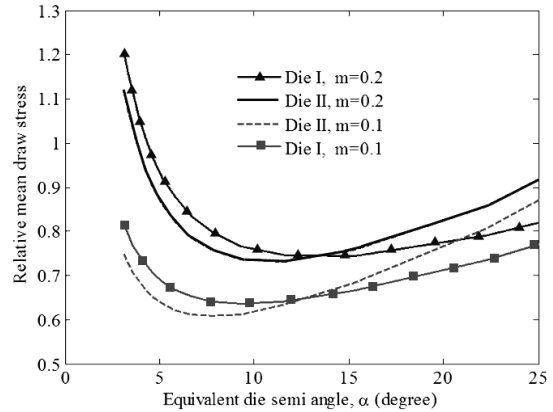
۲- حجم ناحیه تغییر شکل در طرح I کمتر از طرح II می باشد. این امر موجب کاهش توان داخلی در طرح اول نسبت به طرح دوم می شود.

۳- با افزایش ثابت اصطکاک، زاویه بهینه قالب در هر دو طرح افزایش می یابد.

۴- در مقادیر کاهش سطح مقطع کمتر از ۲۰٪، طرح I بهینه است و برای مقادیر کاهش سطح مقطع بیشتر از ۲۰٪، طرح II بهینه است.

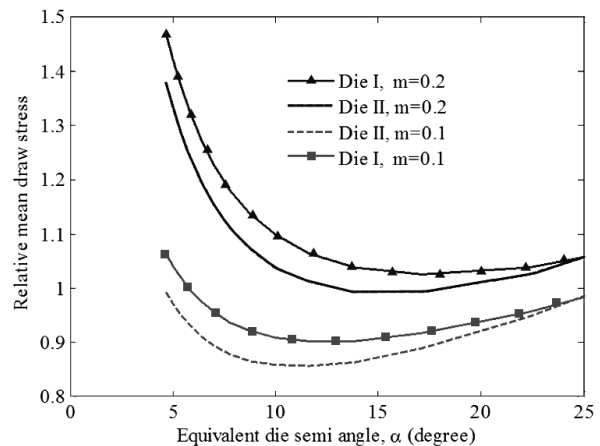
۵- فهرست علائم

$F_d$	نیروی کشش
$J^*$	توان کلی تغییر شکل
$L$	طول قالب
$m$	فاکتور اصطکاک ( $0 \leq m \leq 1$ )
$R$	شعاع قالب معادل
$R_f$	شعاع معادل مفتول با مقطع مربع
$R_o$	شعاع مفتول با مقطع دایره
$r, \theta, z$	دستگاه مختصات استوانه ای
$r_f$	موقعیت شعاعی سطح ناپیوستگی سرعت $S_2$
$r_o$	موقعیت شعاعی سطح ناپیوستگی سرعت $S_1$
$S_1$	سطح ناپیوستگی سرعت بین نواحی اول و دوم
$S_2$	سطح ناپیوستگی سرعت بین نواحی دوم و سوم
$U_r, U_\theta, U_\phi$	مؤلفه های میدان سرعت در دستگاه



شکل (۹) تغییر تنش کششی میانگین نسبی بر حسب زاویه قالب معادل برای دو طرح قالب در ۳۰٪ کاهش سطح مقطع.

در زوایای کم قالب اثر این عوامل تقلیل می یابند. با افزایش درصد کاهش سطح مقطع اثر کار اضافی نسبت به اثر اختلاف حجم بیشتر می شود. در نتیجه با افزایش درصد کاهش سطح مقطع، منحنی تنش کششی نسبی میانگین بر حسب شعاع معادل در قالبی که ابتدا گوشه های مربع را شکل می دهد بیشتر از قالب دیگر در جهت افزایش تنش کششی نسبی میانگین جابه جا می شود. در نتیجه منحنی مربوط به قالبی که ابتدا گوشه ها را شکل می دهد به تدریج بالای منحنی مربوط به قالبی که در آن شکل گیری مربع از اضلاع آن شروع می شود قرار می گیرد. در حالت کلی زاویه بهینه قالب معادل در طرح I بزرگتر از قالب طرح II است.



شکل (۱۰) تغییر تنش کششی میانگین نسبی بر حسب زاویه قالب معادل برای دو طرح قالب در ۴۰٪ کاهش سطح مقطع.

- [5] Boer, C.R., Webster, W.D., Direct upper-bound solution and finite element approach to round-to-square drawing, *J. Eng. Ind.*, Vol. 107, 1985, pp. 254-260.
- [6] Gunasekera J.S., Hoshino S., Analysis of extrusion or drawing of polygonal sections through straightly converging dies, *J. Eng. Ind. Trans, ASME*, Vol. 104, 1982, pp. 38-45.
- [7] Gordon, W.A., Van Tyne C.J., Moon Y.H., Axisymmetric extrusion through adaptable dies-Part 1: Flexible velocity fields and power terms, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 49, 2007, pp. 86-95.
- [8] Gordon, W.A., Van Tyne C.J., Moon Y.H., Axisymmetric extrusion through adaptable dies. part 2. comparison of velocity fields, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 49, 2007, pp. 96-103.
- [9] Gordon, W.A., Van Tyne C.J., Moon Y.H., Axisymmetric extrusion through adaptable dies-Part 3: Minimum pressure streamlined die shapes, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 49, 2007, pp. 104-115.
- [10] S. Norasethasopon, Influence of process parameters on shape quality and area fraction in round-to-hexagonal composite wire drawing, *Journal of materials processing technology*, Vol. 203, 2008, pp. 137-146.
- [11] Haghghat H., Allahveysi S.B., Akhavan A., Estimation of Drawing Force in Drawing of Twisted Square Section Rod from Round Bar, *International Journal of Engineering & Applied Sciences*, Vol. 3, 2011, pp.1-14.
- [12] Prager, W., Hodge, P.G., Theory of perfectly plastic solids, John Wiley and Sons Inc. New York, 1951.

مختصات کروی

 $u_f$  سرعت مفتول در خروجی قالب $u_o$  سرعت مفتول در ورودی قالب $\dot{W}_i$  توان داخلی تغییر شکل $\dot{W}_{S_1}$  توان برشی تلف شده در سطح ناپیوستگی سرعت  $S_1$  $\dot{W}_{S_2}$  توان برشی تلف شده در سطح ناپیوستگی سرعت  $S_2$  $\dot{W}_f$  توان اصطکاکی تلف شده روی دیواره قالب $\alpha_e$  نیم زاویه قالب مدور معادل $\alpha_s$  نیم زاویه سطوح تخت قالب $\alpha_c$  نیم زاویه سطوح مخروطی قالب $\beta$  زاویه اختیاری $\Delta U_{S_1}$  مؤلفه مماسی سرعت نسبی در سطح ناپیوستگی سرعت  $S_1$  $\Delta U_{S_2}$  مؤلفه مماسی سرعت نسبی در سطح ناپیوستگی سرعت  $S_2$  $\Delta U_f$  مؤلفه مماسی سرعت نسبی در سطح قالب $\dot{\epsilon}_{rr}$  مؤلفه قائم تانسور نرخ کرنش در راستای شعاعی $\dot{\epsilon}_{\theta\theta}$  مؤلفه قائم تانسور نرخ کرنش در راستای زاویه‌ای $\dot{\epsilon}_{\phi\phi}$  مؤلفه قائم تانسور نرخ کرنش در راستای چرخشی $\dot{\epsilon}_{r\theta}, \dot{\epsilon}_{r\phi}, \dot{\epsilon}_{\theta\phi}$  مؤلفه‌های برشی تانسور نرخ کرنش $\sigma_o$  تنش تسلیم متوسط مفتول $\psi$  موقعیت زاویه‌ای پروفیل قالب معادل نسبت به مبدأ

## مراجع

- [1] Wistreich, J.G., *Investigation of the Mechanics of Wire Drawing*, Proc. Inst. Mech. Engrs., (London), Vol. 169, 1955, pp. 654-665.
- [2] Avitzur, B., *Metal Forming Processes and Analysis*, McGraw-Hill, New York, 1968.
- [3] Juneja, B.L., Prakash, R., An analysis for drawing and extrusion of polygonal section, *Int. J. Mach. Tool. Des. Res.*, Vol. 15, 1975, pp. 1-30.
- [4] Basily, B.B., Sansome, D.H., Some theoretical considerations for the direct drawing of section rod from round bar, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 18, 1976, pp. 201-208.