

# ارائه فرمولاسیون جدید میدان سرعت با در نظر گرفتن مؤلفه محوری سرعت به منظور بهینه‌سازی فشار اکستروژن مستقیم

پریسا فرهمند<sup>۱</sup> و کارن ابرینیا<sup>۲</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۹۰/۰۲/۰۵؛ تاریخ پذیرش: ۹۰/۱۱/۱۶)

## چکیده

اکستروژن یکی از مهم‌ترین فرایندهای شکل‌دهی حجمی است. به منظور طراحی صحیح قالب اکستروژن و تولید موفقیت‌آمیز مقاطع، نیاز به تحلیل دقیق فرایند است. میدان سرعت پیشنهادی اساسی‌ترین نکته در تحلیل و ارائه فرمولاسیون حد بالا برای اکستروژن مستقیم پروفیل‌های مختلف، اعم از مدور و غیر مدور است. در این مقاله، فرمولاسیون جدیدی برای میدان سرعت با تغییرات مؤلفه سرعت محوری ارائه شده است. میدان سرعت کلی برحسب پارامترهای متغیر تعریف شده است، به طوری که در ابتدا و انتهای منطقه تغییر شکل، سطح انفصال سرعت شکل سه‌بعدی داشته و می‌تواند حالت مقعر، تخت و یا محدب داشته باشد. با بهینه‌سازی میدان سرعت نسبت به پارامترهای تعریف‌کننده سطوح و با استفاده از روش حد بالا، توان لازم در فرایند اکستروژن قابل بهینه‌سازی است. در این پژوهش به منظور تعریف میدان تغییر شکل پارامتریک و وابسته به پارامترهای ورودی، از منحنی تابع B-Spline استفاده شد که نسبت به منحنی‌های قبلی ارائه شده، فشار بهینه‌تری را نتیجه می‌دهد. در حل تئوری به منظور بررسی تغییر شکل و تعیین الگوی جریان مواد در طول قالب اکستروژن از روش الگوی تغییر شکل استفاده شده است. همچنین تأثیر پارامترهای مختلف مؤثر بر فرایند از جمله طول قالب و درصد کاهش سطح و ضریب اصطکاک بررسی شد. در نهایت نتایج تئوری به دست آمده از فرمولاسیون جدید با نتایج تحقیقات تحلیلی و تجربی پیشین مقایسه شده و بهبود قابل توجهی مشاهده شد.

**واژه‌های کلیدی:** فرایند اکستروژن، میدان سرعت، اکستروژن مستقیم، روش حد بالا، منحنی B-Spline

## A New 3D Velocity Field with a Variable Axial Component for Optimizing Forward Extrusion Pressure

P. Farahmand and K. Abrinia

Mech. Eng. Dep't.

Univ. of Tehran

(Received: 25 April , 2010; Accepted: 5 February , 2012)

## ABSTRACT

A new velocity field with variable axial velocity has been proposed in this paper. By using this new formulation the velocity field and upper bound on extrusion pressure have been computed. Incorporating the B-Spline curve into the upper bound formulation, 3D surfaces of velocity discontinuity at entry and exit have been assumed. Theoretical prediction of grid deformation pattern was also computed using the present theory. Experiments were carried out and extrusion pressure as well as grid deformation were obtained. The present theoretical results were in good agreement with experimental ones and compared to previous work improvements were observed.

**Keywords:** Velocity Field, Forward Extrusion, Flow Pattern

۱- کارشناسی ارشد: Pfarahmand1@gmail.com

۲- استاد (نویسنده پاسخگو): cabrinia@ut.ac.ir

## فهرست علائم

d	اندازه انحنا سطح انفصال سرعت خروجی در جهت محوری
L	منطقه تغییر شکل
u,q,t	پارامترهای بی بعد در مختصات استوانه‌ای
f,g,z	مؤلفه‌های بردار موقعیت در راستای X,Y,Z
m	ضریب اصطکاک برشی قالب
RA	کاهش سطح مقطع
$t_s$	زمان کل برای طی مسیر خط جریان به ازای $u=1$
$t_x$	زمان برای طی ناحیه تغییر شکل به ازای $0 \leq u < 1$
$t_i$	زمان برای گذر از صفحه جدایش ورودی
$t_e$	زمان برای گذر از صفحه جدایش خروجی
$t_o$	زمان لازم برای طی مسافت d
$v$	متغیر تابع B-Spline
$\eta$	نسبت اکستروژن

## ۱- مقدمه

از آنجا که اکستروژن یکی از مهم‌ترین فرایندهای شکل‌دهی حجمی است و کاربرد زیادی در صنایع از جمله صنایع هوافضا دارد، تحلیل این فرایند و انطباق هر چه بیشتر نتایج حاصل از تحلیل با واقعیت، دارای اهمیت فراوانی است. تحلیل سه‌بعدی اکستروژن یکی از اساسی‌ترین بخش‌های حل تئوری در فرایند است که نتایج حاصل از آن در بسیاری از بخش‌های صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد. با بهبود روابط تحلیلی حاکم بر جریان ماده در ناحیه تغییرشکل، می‌توان کنترل بیشتری بر روی جریان ماده داشت و با تغییر پارامترهای اثرگذار بر روی جریان ماده، فشار بهینه قابل دستیابی است. جونجا و پراکاش<sup>۱</sup> [۱] در سال ۱۹۷۵ با استفاده از تئوری حد بالا، روشی را برای اکستروژن سه‌بعدی مقاطع چند وجهی

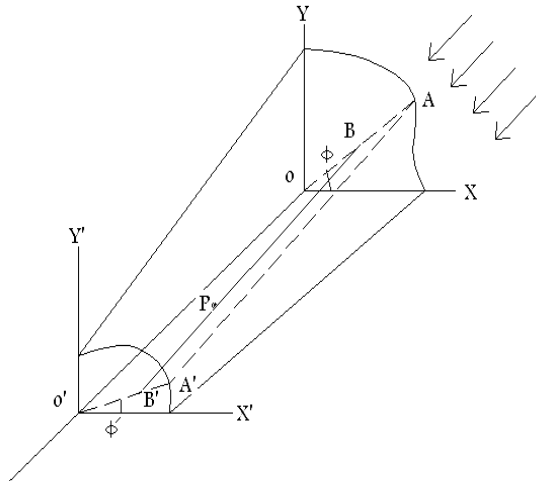
با استفاده از قالب‌های خطی و به‌کار بردن میدان سرعت کروی ارائه کردند. ناگپال و آلتان<sup>۲</sup> [۲] ایده‌ای را که در آن با استفاده از توابع مربوط به خطوط جریان، معادلات سرعتی را که از لحاظ سینماتیکی قابل قبول بود، برای اکستروژن مقاطع سه‌بعدی ارائه کردند. گاناسکرا و هوشینو<sup>۳</sup> [۳] در سال ۱۹۸۰ نتایج تحقیق خود را در مورد حل حد بالای اکستروژن مقطع مربعی از میله‌های گرد با قالب‌های همگرا منتشر کردند. چیتکارا و ابری نیا<sup>۴</sup> [۴] در سال ۱۹۹۰ مقاله‌ای ارائه کردند که در آن یک میدان سرعت کلی در مختصات استوانه‌ای برای جریان مواد در نظر گرفته شده بود. از مزایای آن سازگاری سینماتیکی با شرایط مرزی در سطوح ورودی و خروجی قالب و همچنین سهولت تبدیل مختصاتی فضای تغییر شکل درون قالب به یک مکعب واحد در مختصات دکارتی و در نتیجه ساده‌تر شدن محاسبات توان تغییر شکل، توان اصطکاکی و توان ناشی از انفصال سرعت است. بخشی [۵] در سال ۲۰۰۲ مقاله‌ای ارائه کرد که در آن شرایط کارسختی در اکستروژن مستقیم مدل شده بود، این مدل برای اکستروژن سرد آلومینیوم با شرایط اصطکاکی خشک بسیار مناسب بوده ولی برای اکستروژن گرم همراه با روان‌کار قابل کاربرد نیست. ابراهیمی و همکاران [۶] در سال ۲۰۰۸ فرمولاسیون جدیدی را با استفاده از روش حد بالا برای اکستروژن شعاعی ارائه کردند که با استفاده از معادله ارائه شده در این مقاله، فشار اکستروژن به‌صورت مجزا برحسب میزان نیروی لازم برای تغییر شکل، غلبه بر اصطکاک موجود و ناشی از انفصال سرعت به‌دست می‌آید. پرچمی [۷] در رساله کارشناسی ارشد خود میدان سرعتی را برای اکستروژن دایره به مربع در مختصات کارتیزین ارائه داد که تا حدودی فشار حاصل از حل روش حد بالا را بهینه می‌کرد، اما میدان سرعت ارائه شده عمومیت لازم را نداشت و برای انواع اکستروژن قابل کاربرد نبود.

مقاطع به‌دست آمده از فرایند اکستروژن به دو گروه مقاطع مدور و غیر مدور تقسیم‌بندی می‌شود. تحلیل فرایند اکستروژن مقاطع غیر مدور باید به‌صورت سه‌بعدی انجام گیرد، که این امر باعث تغییرات سرعت در راستای محور

2- Nagpal and Billhardt  
3- Gunasekera and Hoshino  
4- Chitkara. and Abrinia

1- Juneja and Prakash

قالب و  $t$  پارامتری است که بین صفر در ورودی و یک در خروجی قالب تغییر می‌کند. تعیین مختصات هر نقطه در ناحیه تغییر شکل، پارامترهای بی‌بعد  $u$ ،  $q$  و  $t$  به گونه‌ای تعریف می‌شود که بین صفر تا یک تغییر کند.



شکل (۱): میدان تغییر شکل کلی در یک چهارم سطح مقطع تغییر شکل [۱].

در شکل ۱ سطوح ورودی و خروجی با در نظر گرفتن شرایط حاکم بر مسئله خاص مورد نظر تعریف می‌شوند. سطح  $OAA'O'$  از خطوط جریان مثل  $BB'$  تشکیل شده است. این سطح، سطح جریانی است که در طول آن مواد بدون انفصال سرعت عبور می‌کنند. در این پژوهش، همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، بر خلاف گذشته سطح ورودی و خروجی به صورت سه‌بعدی تعریف شده است. یعنی بر خلاف فرض قبلی، برخورد مواد در سطح ورودی و خروجی به یک سطح دوطرفه، فرض می‌شود که مواد در سطح ورودی و خروجی به یک سطح سه‌بعدی که در راستای محور  $Z$  کشیده شده است، برخورد می‌کنند.

بر این اساس، بردار موقعیت یک ذره در ناحیه تغییر شکل را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$\begin{aligned} r(u, \varphi, t) &= f(u, \varphi, t)i + g(u, \varphi, t)j + h(u, \varphi, t)k, \\ X &= f(u, \varphi, t), \\ Y &= g(u, \varphi, t), \\ Z &= h(u, \varphi, t). \end{aligned} \quad (3)$$

می‌شود. در تحقیقات و مطالعات انجام شده در این زمینه، مؤلفه سرعت محوری ثابت فرض شده که این فرض موجب می‌شود جریان ماده مطابق با واقعیت نباشد. در این پژوهش، به منظور نزدیک شدن به فرایند واقعی، تغییرات سرعت در راستای محور در نظر گرفته شده است. با بررسی کامل تغییرات سرعت محوری در هر مقطع دلخواه، یک فرمولاسیون جدید میدان سرعت، با لحاظ شدن تغییرات سرعت محوری، برای اکستروژن مقاطع غیر مدور ارائه شده است.

## ۲- روش حل مسئله

در تحلیل تئوری اکستروژن سه بعدی، نیرو و فشار بر اساس مکانیزم جریان به دست می‌آیند. به دلیل پیچیدگی روابط مرزی سینماتیکی و استاتیکی و تنش‌های داخلی و جریان مواد در حل دقیق ریاضی مسائل شکل‌دهی، روش‌های حل تقریبی مانند روش‌های آنالیز بارگذاری حدی و روش حد بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند.

### ۲-۱- روش حد بالا به منظور تحلیل سه‌بعدی فرایند

برای حل ریاضی مسئله ابتدا می‌بایست ناحیه تغییر شکل تعریف شود و سپس میدان سرعت قابل قبولی بر اساس حل حد بالا در نظر گرفته شود. اولین گام برای به دست آوردن معادلات خطوط جریان، ایجاد تناظر یک به یک بین مقطع ورودی و مقطع خروجی با فرض تراکم‌ناپذیری است. در شکل ۱ تناظر یک به یک بین مقاطع ورودی و خروجی نشان داده شده است.

### ۲-۲- میدان تغییر شکل قالب خطی

معادله میدان تغییر شکل به صورت زیر بیان می‌شود [۴]:

$$\bar{r} = \begin{bmatrix} 1 & t \\ 1 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} +1 & 0 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} w &= u.R & u &= w/R & 0 \leq u \leq 1, \\ \phi &= q.2\pi & \Rightarrow & q = \phi/2\pi & 0 \leq q \leq 1, \\ z &= t.L & t &= z/L & 0 \leq t \leq 1, \end{aligned} \quad (2)$$

که  $r_1$  و  $r_2$  بردارهای مکان سطح مقطع ورودی و خروجی

B-Spline است. منحنی‌ها و سطوح B-Spline، نمودارهای پارامتریکی هستند که توسط آن می‌توان چندین نقطه موجود (نقاط کنترلی) را به هم متصل کرد. این منحنی‌ها براساس یک سری شرایط پیوسته بین بخش‌هایی از منحنی که به صورت چند جمله‌ای تکه‌ای هستند، تشکیل می‌شود.

#### ۲-۴- الگوریتم تعیین معادله B-Spline

براساس الگوریتم‌های انتخاب نقاط کنترلی و کشیدن منحنی تابع B-Spline [۸]، معادله‌ی چند جمله‌ای برای هر تکه  $Q_i$  به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Q_i(t) = a(t-t_i)^3 + b(t-t_i)^2 + c(t-t_i) + d, \quad (7)$$

$$t_i < t < t_{i+1},$$

$$Z(v) = \frac{3v^3 - 6v^2 + 4}{6} \times d/4 + \frac{-3v^3 + 3v^2 + 3v + 1}{6} \times 3d/4 + \frac{v^3}{6} d. \quad (8)$$

با جایگذاری مختصات نقاط کنترلی و شرایط مرزی در فرمول بالا و با جایگذاری معادله (۸) در معادله (۴) خواهیم داشت:

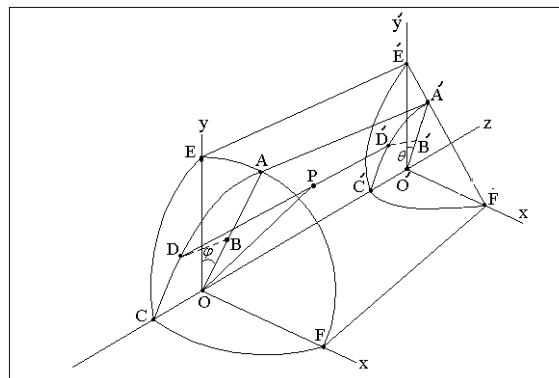
$$h = a(1-u^2) \times (1-t) + t \left( \frac{(L+3 \times v^3) - 6 \times v^2 + 4}{6} \right) \times d/4 + (-3 \times v^3 + 3 \times v^2 + 3 \times v + 1) / 6 \times 3 \times d/4 + ((v^3/6) \times d). \quad (9)$$

رابطه (۹) فرمولاسیون جدید مؤلفه متغیر محوری سرعت بر پایه تابع پایه B-spline است.

#### ۲-۵- تئوری الگوی جریان

هدف استفاده از تئوری الگوی جریان، بررسی مسیر حرکت فلز در قالب در طول فرایند اکستروژن و نحوه تأثیرگذاری میدان سرعت بر مسیر حرکت فلز در طول قالب است. فرضیه الگوی جریان فلز بر پایه مطالعات ویسکوپلاستیسیته است [۹]. بدین ترتیب که هر نقطه از ماده روی صفحه ورودی به یک صفحه از قالب می‌رسد و سپس موازی با صفحه قالب حرکت می‌کند. در واقع هیچ نقطه‌ای از ماده نمی‌تواند وارد قالب شود و به صورت موازی با قالب حرکت نکنند. مسیر حرکت فلز در شکل ۳ نشان داده شده است. قالب در طول انجام فرایند اکستروژن به سه منطقه تقسیم می‌شود که عبارت است از:

- منطقه ۱: منطقه قبل از ناحیه تغییر شکل،
- منطقه ۲: ناحیه تغییر شکل پلاستیک و
- منطقه ۳: منطقه بعد از ناحیه تغییر شکل.



شکل (۲): سطح انفصال سرعت سه‌بعدی.

با بسط معادله (۳) براساس شرایط هندسی شکل ۱ بردار موقعیت ذره به صورت زیر درمی‌آید:

$$X = f(u, \varphi, t) = u \left( R \cos(\varphi) (1-t) + F_2 t \right),$$

$$Y = g(u, \varphi, t) = u \left( R \sin(\varphi) (1-t) + G_2 t \right), \quad (4)$$

$$Z = h(u, \varphi, t) = (1-t)Z + t(L + Z').$$

در معادله (۴) توابع  $F_2$  و  $G_2$  بیانگر سطح مقطع خروجی اکستروژن در دو راستای  $X$  و  $Y$  می‌باشند که بنابر شکل سطح مقطع خروجی تغییر می‌کنند.

#### ۲-۳- تحلیل کمی فشار براساس میدان سرعت

توان کل مصرف شده در فرایند اکستروژن ( $w_{total}$ ) برابر است با: مجموع توان لازم برای تغییر شکل پلاستیک ماده در ناحیه تغییر شکل ( $w_i$ )، توان اتلافی ناشی از انفصال سرعت در مقطع ورودی ( $w_e$ ) و مقطع خروجی قالب ( $w_s$ ) و توان مورد نیاز برای غلبه بر نیروی اصطکاکی بین ماده و سطح قالب ( $w_f$ ) [۴]:

$$w_{total} = w_i + w_e + w_f + w_s. \quad (5)$$

با توجه به روابط فوق، میزان فشار اکستروژن به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{ext} = \frac{w_{total}}{Y(A_0 V_0)}. \quad (6)$$

در این رابطه،  $A_0$  سطح مقطع بیلت ورودی و  $V_0$  سرعت اولیه بیلت ورودی است.

برای تعریف میدان سرعت جدید، تابعی پارامتریک تعریف شد تا بنابر شرایط هندسی خاص هر مسئله قابلیت تغییر داشته باشد. یکی از بهترین‌ترین توابع پارامتریک، تابع

$$t = \int_0^1 \frac{dt}{v(t)} \times \frac{\partial r}{\partial q} \times \frac{\partial r}{\partial t}, \quad (10)$$

$$t\partial = t_s - (t_e + t_i + t_x). \quad (11)$$

با جایگذاری  $\bar{U}$  مربوط به هر نقطه از ماده در شعاع مشخص و به دست آوردن سرعت آن با استفاده از میدان سرعت جدید و جایگذاری آن در معادلات (۱۰) و (۱۱) می توان زمان لازم برای طی انحنا سطح انفصال سرعت خروجی را به دست آورد و با استفاده از آن مکان هر نقطه از ماده در راستای شعاع و پس از خروج قالب محاسبه کرد.

### ۳- آزمایش های تجربی

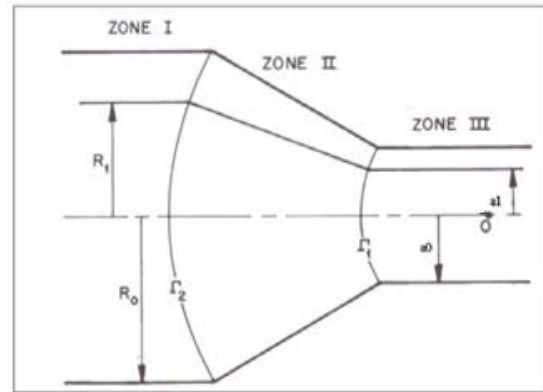
به منظور بررسی صحت نتایج حاصل از تحلیل تئوری، پنج آزمایش تجربی با شرایط ورودی مشابه تحلیل تئوری، طراحی شد. به دلیل نیاز به نیروهای کم متناسب با دستگاه پرس موجود و همچنین به خاطر شباهت به فولاد در دمای بالای تجدید تبلور، از فلز سرب به عنوان ماده اولیه استفاده شد. در شکل ۴ نمونه بیلت های به کار گرفته شده، نشان داده شده است.



شکل (۴): بیلت های اولیه سربی الف) بیلت دو تکه، ب) بیلت یک تکه.

در این آزمایش ها از دو نوع قالب استفاده شد که عبارت است از:

- ۱- قالب های یک تکه با ورودی دایروی به خروجی مربع با درصد های مختلف کاهش سطح و
- ۲- قالب های دو تکه با ورودی دایروی و خروجی دایره و مربع.



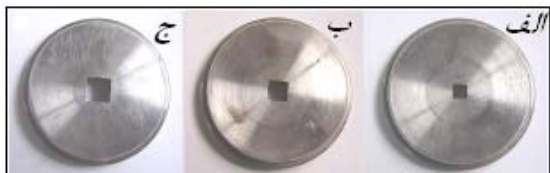
شکل (۳): مسیر حرکت فلز در صفحه 45 قالب اکستروژن مستقیم دایره به مربع.

جریان فلز در هیچ یک از سه منطقه بالا موازی و منطبق با یکدیگر نیست. این سه ناحیه توسط سطوح انفصال سرعت که در ابتدا و انتهای ناحیه تغییر شکل پلاستیک قرار دارند، از یکدیگر جدا می شوند. سطوح انفصال سرعت در این تحقیق بر اساس منحنی پایه B-Spline تعریف شده اند. از آنجا که بیلت اولیه در ابتدای قالب به صورت صلب حرکت می کند، تمام نقاط در سطح انفصال سرعت ورودی به صورت موازی با یکدیگر حرکت می کنند. این سطح به صورت یک سطح صاف و بدون انحنا بیان می شود که با گذر از آن، هنگامی که نقاط وارد منطقه تغییر شکل پلاستیک می شوند، حرکتشان از یک تابع سرعت انحنادار تبعیت کرده تا از سطح انفصال دوم نیز گذر کنند و بعد از آن نقاط به صورت موازی با محور تقارن قالب به حرکت خود ادامه می دهند.

توزیع سرعت در منطقه تغییر شکل پلاستیک بر این اساس است که نقاط روی سطح خارجی بیلت به علت برخورد نقاط با سطح صلب قالب و اصطکاک موجود به مراتب آرام تر از سایر نقاط داخلی و نزدیک به مرکز حرکت می کنند. از طرفی نقاط هرچه از مرکز بیلت دورتر باشند، باید فاصله بیشتری را طی کنند. پس در فاصله زمانی مشخص دیرتر از بقیه نقاط به سطح انفصال سرعت خروجی می رسند. با نزدیک شدن به مرکز، سرعت نقاط افزایش پیدا کرده و بیشترین سرعت در مرکز قالب رخ می دهد.

معادله (۱۰) بیانگر زمان کلی طی قالب برای هر نقطه از ماده در قالب اکستروژن است.

از قالب‌های یک تکه برای انجام اکستروژن مستقیم دایره به مربع با درصد‌های مختلف کاهش سطح استفاده شد. هدف این آزمایش بررسی تأثیر درصد کاهش سطح بود که یکی از پارامترهای مهم در فرایند اکستروژن است. در شکل ۶ قالب‌های یک تکه با درصد‌های کاهش سطح مختلف نشان داده شده‌اند.



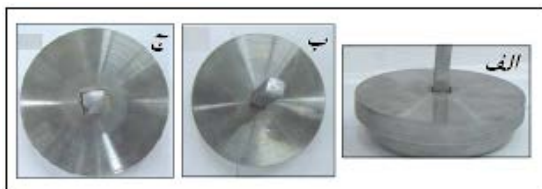
شکل (۶): قالب یک تکه از ورودی دایره به مربع با درصد کاهش سطح؛ الف) ۸۰٪، ب) ۶۰٪، ج) ۴۰٪.

از قالب‌های دو تکه برای مشاهده الگوی جریان فلز در طول فرایند اکستروژن استفاده شد که در شکل ۹ نمونه قالب‌ها نشان داده شده است.

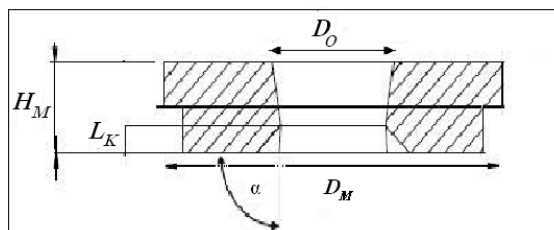


شکل (۷): قالب دو تکه؛ الف) ورودی دایره به خروجی مربع ب) ورودی دایره به خروجی دایره.

در شکل‌های ۸ و ۹ بیلت‌های خروجی پس از انجام فرایند اکستروژن از قالب‌های یک تکه و دو تکه نشان داده شده است.



شکل (۸): بیلت خروجی از قالب اکستروژن مستقیم دایره به مربع با درصد کاهش سطح مقطع؛ الف) ۸۰٪، ب) ۶۰٪، ج) ۴۰٪.



شکل (۵): نمای شماتیکی از سطح مقطع قالب

آزمایشگاهی.

جدول (۱): شرایط هندسی قالب‌ها (مطابق با شکل ۵).

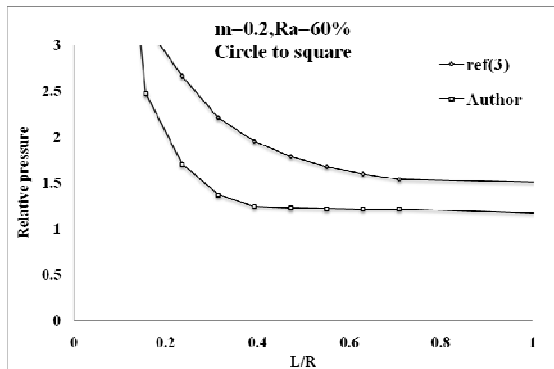
ردیف	پارامتر	واحد	اندازه
۱	زاویه قالب ( $\alpha$ )	degree( $^{\circ}$ )	۹۰
۲	شعاع خارجی قالب ( $D_M$ )	mm	۸۹/۵
۳	ارتفاع قالب ( $H_M$ )	mm	۲۰
۴	شعاع ورودی سطح مقطع ( $D_O$ )	mm	۷/۶, ۵, ۲/۴
۵	طول خروجی آزاد قالب ( $L_K$ )	mm	۴

جدول (۲): شرایط آزمایشگاهی.

ردیف	پارامتر	واحد	اندازه
۱	دما	$^{\circ}C$	۲۳ $^{\circ}$
۲	شعاع بیلت	mm	۲۰
۳	طول بیلت	mm	۳۰
۴	نسبت اکستروژن	-	۴۰٪، ۰/۶، ۰/۸
۵	سرعت اکستروژن (سرعت رام پرس)	mm/min	۱

جدول (۳): خصوصیات مکانیکی فلز سرب.

ردیف	پارامتر	واحد	اندازه
۱	مدول الاستیسته	Mpa	۱۵۰۰۰
۲	تنش تسلیم	Mpa	۱۵
۳	استحکام نهایی	Mpa	۲۵
۴	چگالی	Kg/m $^3$	۱۱۳۴۰



شکل (۱۰): مقایسه حل روش قدیم و جدید.

علاوه بر مقایسه روش حل این تحقیق با روش قدیمی، بایستی میدان سرعت ارائه شده با پژوهش‌های پیشین که هر کدام به نوعی میدان سرعت را انحنا دار فرض کردند، مقایسه شود. در شکل ۱۱ فشار اکستروژن مطالعه حاضر با دو تحقیقی که در آنها با ارائه میدان سرعت، سطوح انفصال سرعت انحنا دار فرض شده بود، مقایسه شده است. در رساله کارشناسی ارشد پرجمی [۷] میدان سرعت بر پایه تابع دوبعدی بیضی که با چرخش حول محور  $Z$  تمام نقاط فضا را پوشش می‌دهد، بیان شده است. از جمله مشکلات این میدان سرعت پوشش ندادن برخی شرایط خاص اکستروژن است. بدین ترتیب که تابع ارائه شده همواره ثابت بوده و با شرایط ورودی قابل تغییر نیست. درحالی که تابع سرعت برای آنکه همواره و برای هر نوع اکستروژنی فشار بهینه را نتیجه دهد، بایستی براساس شرایط ورودی متغیر باشد. میدان سرعت مطرح شده در مقاله وو و هسو [۱۰] نیز دارای مشکلات مشابهی است.

همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، میدان سرعت ارائه شده در این تحقیق نسبت به پژوهش‌های پیشین به دلیل پوشش‌دهی نواقص میدان سرعت‌های قبل و انطباق بیشتر تغییرات مؤلفه محوری سرعت با حالت واقعی، فشار عملیات نزدیک‌تری را به واقعیت ارائه می‌دهد.

#### ۴-۲- بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر فرایند

##### اکستروژن

مهم‌ترین عوامل مؤثر بر اکستروژن، عبارت است از: درصد کاهش سطح و میزان اصطکاک قالب. در ادامه، نحوه اثرگذاری



شکل (۹): بیلت خروجی دو تکه اکستروژن دایره به مربع.

#### ۴- نتایج و بحث

همان‌طور که اشاره شد، هدف پروژه حاضر معرفی یک میدان سرعت بهینه و نزدیک به واقعیت در مختصات سیلندری در فرایند اکستروژن مستقیم بود که به کمک آن بتوان رفتار ماده تحت اکستروژن را نزدیک به واقعیت پیش‌بینی کرد. نزدیک شدن فشار به دست آمده از محاسبات روش حد بالا به فشار واقعی عملیات نیز از اهداف دیگر این پژوهش است. در این قسمت به تحلیل نتیجه‌های به دست آمده از کد نرم‌افزاری پرداخته می‌شود و مقایسه‌ای بین نتایج تئوری، نتایج حاصل از آزمایش‌های عملی و نتایج تحقیقات قبلی انجام شده است.

#### ۴-۱- مقایسه میدان سرعت ارائه شده با پژوهش‌های

##### قبلی

از آنجا که در تحلیل سه‌بعدی فرایند اکستروژن از روش حد بالا استفاده می‌شود، نتایج فشار عملیاتی هیچ‌گاه منطبق بر واقعیت به دست آید و همیشه درصدی از خطا وجود دارد. بنابراین، هر میدان سرعتی که فشار را نزدیک‌تر به فشار واقعی فرایند محاسبه کند، بهینه‌تر است.

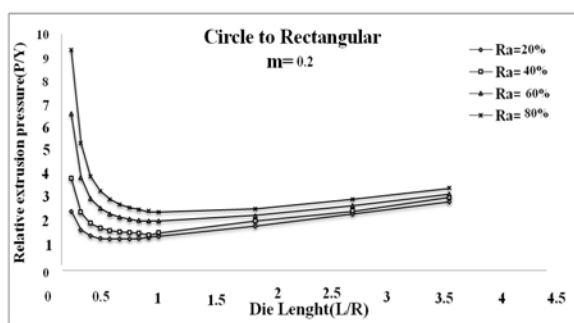
در شکل ۱۰ منحنی فشار نسبت به پارامتر  $L/R$  حاصل از روش‌های قدیمی همراه با سطوح انفصال سرعت تخت و بدون انحنا با روش جدید همراه با سطوح انفصال سرعت جدید و مطابق با واقعیت مقایسه شده است.

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، فشار اکستروژن با میدان سرعت ارائه شده مطالعه حاضر به دلیل در نظر گرفتن تغییرات مؤلفه محوری سرعت و سطوح انفصال سرعت سه‌بعدی، نسبت به حل قدیمی بهینه‌تر و نزدیک‌تر به واقعیت به دست آمده است. این نمودار بیانگر نزدیک بودن میدان سرعت ارائه شده و همچنین رفتار حدس زده شده برای فلز به رفتار واقعی آن است.

$L/R$  های بزرگ تأثیر پارامتر  $m$  بر روی  $P/Y$  بیشتر است، زیرا با افزایش طول قالب، نیروی اصطکاک در طول بزرگ تری به دست می آید و بالعکس در  $L/R$  های کوچک تأثیر پارامتر  $m$  کمتر است، زیرا طول قالب کمتر شده و نیروی اصطکاک  $W_f$  کاهش می یابد.

#### ۴-۲-۲- تأثیر پارامتر مقدار کاهش سطح مقطع

در شکل ۱۳ تأثیر درصد کاهش سطح در اکستروژن مستقیم دایره به مربع نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، با افزایش میزان درصد کاهش سطح، فشار اکستروژن افزایش می یابد که این پدیده به دلیل افزایش میزان توان لازم برای تغییر شکل پلاستیک ماده است. هرچه درصد کاهش سطح افزایش یابد، میزان تغییر شکل پلاستیک بیشتر شده و در نتیجه میزان توان لازم برای تغییر شکل پلاستیک ماده و فشار اکستروژن افزایش می یابد.



شکل (۱۳): بررسی تأثیر درصد کاهش سطح بر فشار اکستروژن با مقطع خروجی مربع.

#### ۴-۲-۳- الگو تغییر شکل

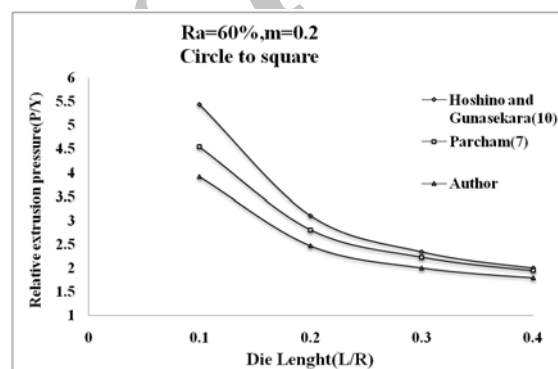
همان طور که در شکل ۱۴-الف نشان داده شده است، در  $0 < t < 1$  یعنی داخل منطقه تغییر شکل با توجه به آنکه سرعت حرکت فلز کم است، الگوی جریان فلز در  $t$  های مختلف تفاوت چندانی ندارد.

در حالت کلی میزان جابه جایی نقاط در یک  $t$  مشخص و برای  $0 \leq u \leq 1$  با وجود درصد کمی از خطا در نتایج حل تئوری و عملی برهم منطبق است. همچنین روند جابه جایی برای نقاط در  $t$  های مختلف در دو حل تئوری و عملی کاملاً مشابه است.

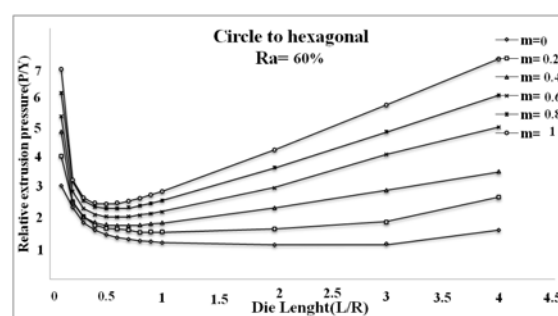
این پارامترها بر فشار اکستروژن بررسی شده است. مقاطع خروجی مورد بررسی چهار و شش ضلعی می باشد.

#### ۴-۲-۱- تأثیر پارامتر اصطکاک (m)

پارامتر  $m$  بیانگر اصطکاک میان فلز و سطح داخلی قالب است که از خصوصیات فیزیکی قالب می باشد. البته استفاده از روان کارها می تواند به کاهش اصطکاک میان فلز و قالب کمک کند، ولی اصطکاک تا حدود زیادی به صافی، زبری و نرمی سطوح بستگی دارد. در ابتدا، تأثیر پارامتر  $m$  بر روی نیروی پرس ( $P/Y$ ) بررسی می شود. بدین منظور در کاهش سطح ۶۰٪، نمودار نیروی پرس بر حسب  $L/R$  در مقاطع خروجی چهار ضلعی رسم شده است.



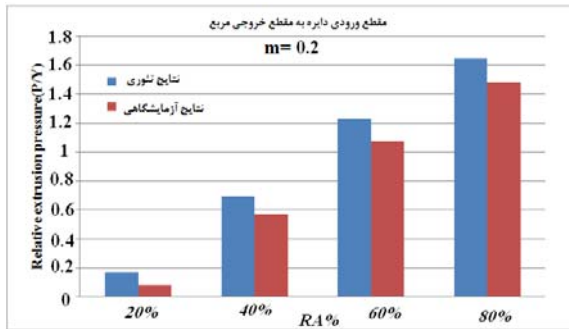
شکل (۱۱): مقایسه حل ارائه شده در این تحقیق با پژوهش های دیگر.



شکل (۱۲): بررسی تأثیر ضریب اصطکاک بر فشار اکستروژن با مقطع خروجی مربع.

همان طور که در شکل ۱۲ مشاهده می شود، با افزایش اصطکاک، نیروی پرس  $P/Y$  افزایش می یابد. این موضوع به افزایش کار ناشی از اصطکاک ( $W_f$ ) برمی گردد. برای





شکل (۱۶): مقایسه نتایج آزمایش‌های تئوری و آزمایشگاهی در قالب یک تکه.

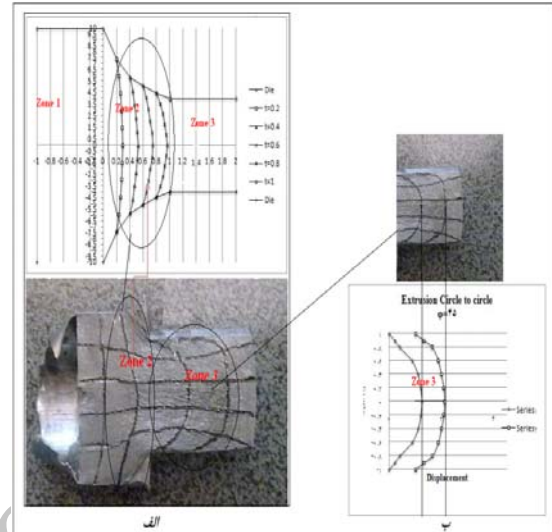
### ۵- نتیجه‌گیری

در این پروژه به منظور پیش‌بینی هر چه نزدیک‌تر فشار اکستروژن به واقعیت، میدان سرعت پارامتریکی و سه‌بعدی براساس تابع پایه B-Spline بیان شد و با استفاده از روش حد بالا در کد نرم‌افزاری، فشاری به دست آمد که نسبت به سایر نتایج موجود ۶٪ بهینه‌تر است. سطح انفصال سرعت خروجی در واقعیت به صورت سه‌بعدی است و این میزان انحنا سطح انفصال سرعت خروجی وابسته به شرایط مختلف اکستروژن می‌باشد. با افزایش درصد کاهش سطح و ضریب اصطکاک این انحنا در راستای محوری افزایش می‌یابد که این موضوع در بررسی‌های تئوری و آزمایشگاهی بررسی شد. الگوی جریان فلز بیانگر رفتار ماده در طول فرایند اکستروژن است. در این پروژه نحوه حرکت ماده در داخل و خارج منطقه تغییر شکل با لحاظ کردن میدان سرعت جدید به دست آمد و با مقایسه با نتایج تجربی تطابق خوبی (اختلاف ۲٪) بین رفتار پیش‌بینی شده برای فلز و رفتار واقعی مشاهده شد.

### مراجع

1. Juneja, B.L. and Prakash, R., "An Analysis for Drawing and Extrusion of Polygonal Section", Int. J. Mach Tool Des Res. Vol. 15, No.1, pp. 1-30, 1975.
2. Nagpal, V., Billhardt, C.F., and Altan, T. "Lubricated Extrusion of the Section from Aluminum, Titanium and Steel Using Computer - Aided Techniques", J. Eng. for Ind., Vol. 101, No.1, pp. 319- 325, 1979.
3. Gunasekera, J.S. And Hoshino, S. "Extrusion of Non-circular Section Through Shaped Dies",

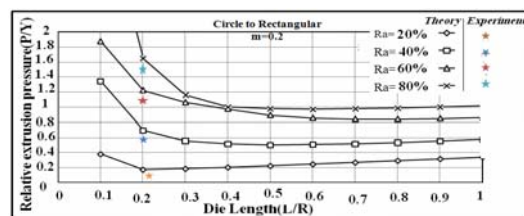
در شکل ۱۴- ب الگوی جریان فلز در مرز خارجی منطقه تغییر شکل  $t = 1$  نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۴- ب الگوی جریان به دست آمده از تئوری در خارج منطقه تغییر شکل نیز مطابق با جریان واقعی ماده است.



شکل (۱۴): مقایسه الگوی جریان فلز بین محاسبات تئوری و نتایج عملی (الف) داخل قالب، (ب) خارج از منطقه تغییر شکل.

در تحقیق آزمایشگاهی دو نوع قالب (قالب یک تکه دایره به مربع و قالب دو تکه دایره به مربع) مورد آزمایش قرار گرفت.

با توجه به شکل ۱۵ و ۱۶ مشاهده می‌شود که تطابق خوبی میان نتایج تحلیلی و عملی برقرار است. اختلاف موجود بین نیروی حاصل از روش تحلیلی و تجربی در تحلیل فوق می‌تواند ناشی از تفاوت عمده بین شرایط تئوری و واقعی انجام فرایند باشد. نقاطی که در شکل با ستاره مشخص شده‌اند، نتایج آزمایش‌های عملی می‌باشند.



شکل (۱۵): مقایسه نتایج آزمایش‌های عملی و تئوری در قالب یک تکه.

7. Parchami R. "Development of new velocity field for 3-dimensional extrusion process", Master thesis, Mech. Dep. Tehran University. 2007 ( In Persian)
8. Gerald Farin , "Curves and Surfaces for Computer Aided Geometry Design" , Fourth Ed., Academic Press, Inc. Orlando, 1996.
9. Avitzler, B. "Metal Forming Processes and Analysis", Mc GrawHill, 1985.
10. Wu, C.W. and Hsu, R.Q. "A Universal Velocity Field for the Extrusion of Non-axisymmetric Rods with Non-uniform Velocity Distribution in the Extrusion Direction", J. Materials Processing Tech., Vol 97, No.1-3, pp180-185, 2000.
- Annals of the CRIP, Vol. 29, No.1, pp.141-147, 1980.
4. Chitkara, N.R. and Abrinia, K. "Analysis Generalized Upper Solution for Three Dimensional Extrusion of Shaped Section Using CAD-CAM Bilinear Surface Dies", 28th Int. MATADOR Conf. on CIM. FMS & Robotics. CAD- CAM Manufacturing Metrology and Metal Forming, 18th and 19th April, 1990.
5. Bakhshi-Joibari, M. "A Theoretical and Experimental Study of Friction in Metal Forming by the Use of Forward Extrusion Process", J. Material Processing Tech. Vol.125, No.125-126, PP. 369-374, 2002.
6. Ebrahimi, R., Reihanian, M., and Moshksar, M.M. "An Analytical Approach for Radial-forward Extrusion Process", J. Materials and Design, Vol.29, No.9, pp. 1694-1700, 2008.

Archive of SID