ماهنامه علمى پژوهشى



mme.modares.ac.ir

ارائه یک راه حل تحلیلی به روش کران بالا برای اکستروژن معکوس جدید

*3 سىيد ھادى حسينى 1 ، كارن ابرى نيا 2 ، قادر فرجى

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشکاه تهران،تهران

* تهران، صندوق پستی ghfaraji@ut.ac.ir ،111554663

اطلاعات مقاله در این مقاله، یک تحلیل کران بالا برای اکستروژن معکوس جدید ارائه شده است. ابتدا منطقه تغییر شکل به چند ناحیه تقسیم شده و میدان مقاله پژوهشی کامل دريافت: 03 مرداد 1393 سرعت قابل قبولي براي هر ناحيه پيشنهاد شده است. با محاسبهي توان در هر ناحيه توان مصرفي و نيروي اكستروژن محاسبه شده و ارتباط بين پذيرش: 04 مهر 1393 متغیرهای هندسی و فرایندی با نیروی اکستروژن مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. علاوه بر این با بررسی رابطهی بین متغیرهای هندسی ارائه در سایت: 04 آبان 1393 با توانهای تغییر شکل، انفصال سرعت و اصطکاک میزان کارایی فرایند در شرایط کاری مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای بررسی كليد واژگان: صحت تحليل كران بالاى ارائه شده تحليل اجزاى محدود با استفاده از نرمافزار دفرم سه بعدى انجام شده است. بررسى تحليل كران بالا روى اكستروژن معكوس جديد نيروى اكستروژن نشان مىدهد كه با افزايش شعاع شمشال اوليه نيروى اكستروژن به صورت غيرخطى افزايش يافته و در اين شرايط اين فرايند تحليل كران بالا به اکستروژن معکوس متداول نزدیک میشود و این دلیلی بر کاهش نیروی لازم در این فرایند است. از طرفی با افزایش ضخامت, ابتدای شبيه سازى اجزاى محدود منطقهی تغییر شکل نیرو به صورت نمایی کاهش مییابد و در یک محدودهی مشخص با تغییر ضخامت تغییر محسوسی در نیروی اکستروژن مشاهده نمیشود. بررسی اثر پارامترهای هندسی روی توان تغییر شکل، توان انفصال سرعت و توان اصطکاکی نشان میدهد که با افزایش شعاع قطعه کار اکسترود شده راندمان فرایند به شدت کاهش یافته و در مقابل با افزایش ضخامت قطعه کار راندمان فرایند افزایش مییابد. مقایسه ی تحليل كران بالاى انجام شده با شبيهسازى اجزاى محدود مطابقت خوبى بين نتايج نشان مىدهد.

Upper bound analyses of novel backward extrusion

Seyed Hadi Hosseini¹, Karen Abrinia², Ghader Faraji^{3*}

1- Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

* P.O.B. 11155-4563 Tehran, Iran, ghfaraji@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper Received 25 July 2014 Accepted 26 September 2014 Available Online 26 October 2014

Keywords:

novel backward extrusion upper bound analysis finite element simulation

ABSTRACT

In this paper, an upper bound analysis of novel backward extrusion was presented. Initially, deformation zone was divided in four separate regions and an admissible velocity field for each was suggested. Then, total power in this process was calculated for each region, therefore, extrusion force was obtained. Moreover, investigation of relevance of extrusion force and process powers (friction, deformation, velocity discontinuity) with process parameters revealed better understanding in load estimation and process efficiency in this method. Finite element analysis by DEFORM™3D was utilized for validation of upper bound results. Upper bound analysis showed increasing initial billet diameter enhances extrusion force by nonlinear relation. In addition, big billet size remodels novel backward extrusion to conventional backward extrusion and proves lower requirement extrusion load in novel backward extrusion in comparison with conventional backward extrusion. Moreover, increasing the first region's thickness in this process diminishes extrusion force by exponential relation and no considerable change in extrusion force can be seen in a particular thickness domain. Investigation of process parameters in power efficiency showed that increasing theextruded part's diameter created a critical condition in process efficiency because of high friction power. But increasing thethickness enhances power efficiency. Finally, upper bound analysis results had good agreement with FEA.

1 - مقدمه

اکستروژن معکوس یکی از فرایندهای رایج و کاربردی شکلدهی حجمی فلزات است. این فرایند برای ساخت قطعاتی با سطح مقطع ثابت و انتهای بسته، که تولید آنها با سایر فرایندها مقرون به صرفه نیست به کار میرود[1]. این فرآیند در مقایسه با سایر روشهای تولید مزایای بسیاری دارد. کمترین میزان مادهی

مصرفی، دقت بالای ابعادی، صافی سطح بالا، حذف ماشین کاری نهایی، بهبود خواص مکانیکی و ریز ساختار از مزایای این روش تولید میباشند [2]. باوجود مزایای ذکر شده این روش معایبی هم دارد. در طول فرایند اکستروژن معکوس منطقهی تغییر شکل به طور پیوسته تغییر کرده و همین امر سبب تغییر میزان کرنشهای اعمالی در طول قطعهی اکسترود شده خواهد شد. به همین علت



ارائه یک راه حل تحلیلی به روش کران بالا برای اکستروژن معکوس جدید

پیشبینی میشود که قطعات تولید شده با اکستروژن معکوس متداول خواص مکانیکی یکنواختی در طول نداشته باشند[3].

اکستروژن معکوس جدید فرایندی است که در آن با طراحی قالب جدید سعی شده با محدود کردن و ثابت نگه داشتن منطقهی تغییر شکل، معایب اکستروژن معکوس متداول مانند غیر یکنواختی خواص مکانیکی بر طرف شود. نمای شماتیک فرایند اکستروژن معکوس جدید در شکل 1 نشان داده شده است. همان طور که مشاهده میشود در فرایند اکستروژن معکوس جدید شمشال اولیه در داخل محفظهای درون سنبهی ثابت محبوس شده است. با حرکت سنبهی متحرک به سمت پایین شمشال اولیه بین سنبهی ثابت و سنبهی متحرک جریان پیدا کرده و قطعه کار فنجانی شکل، شکل می گیرد[4].

در بین روش های مختلف تحلیل فرایندهای شکل دهی، روش تحلیل کران بالا و تحلیل اجزای محدود بیشتر مورد توجه قرار گرفته اند. اگرچه تحلیل اجزای محدود اطلاعات جامعی در مورد مسائل مورد بررسی ارائه می دهد، زمان محاسباتی زیادی صرف تحلیل مسئله می کند. به همین دلیل استفاده از تحلیل کران بالا راهحل بسیار مناسبی برای کاهش زمان محاسبات در تحلیل مسائلی است که هدف از انجام آنها دستیابی به متغیرهای خروجی محدود مانند پیش بینی نیرو و نحوه جریان مواد در قالب می اشد [5]. تحلیل کران بالای اکستروژن معکوس متداول توسط تعدادی از محققین مورد توجه قرار گرفته است که در ادامه به برخی از آنها پرداخته می شود.

در سال 1990 ویفی و همکارانش مدلی تلفیقی از کران بالا و اجزای محدود برای آنالیز جریان مواد و تنش در فرایندهای اکستروژن ارائه کردند. آنها کارائی تئوری خود را با مثالهایی از اکستروژن معکوس نشان دادند[6]. در سال 1992 بائه و یانگ با استفاده از تئوری کران بالا نیروی لازم برای اکستروژن سه بعدی با شمشال دایروی به قطعهکار بیضوی را تحلیل کردند. آنها با ارائهی یک میدان سرعت سه بعدی قابل قبول و در نظر گرفتن پارامترهای بهینهسازی، نیروی لازم برای اکستروژن را مینیمم کردند[7]. در سال 1993همین محققین یک میدان سرعت قابل قبول برای بدست آوردن نیروی اکستروژن در مرحلهی نهایی و محاسبهی ارتفاع متوسط قطعهی اکسترود شده، پیشنهاد کرده و آن را برای قطعات دوار توخالی غیرمتقارن به کار بردند[8].در سال 1998مشکسار و ابراهیمی فرآیند اکستروژن معکوس قطعات توخالی با شکل داخلی و خارجی چند ضلعی منتظم را با استفاده از روش کران بالا تحلیل کردند.

 آنها در این تحلیل برای مرحله شروع فرآیند یک میدان سرعت کروی در نظر گرفتند [9]. همچنین در همین سال کیم و پارک با استفاده از تئوری کران
 بد بالا به تحلیل فرایند اکستروژن معکوس پیچشی پرداختند. آنها دریافتند که فرایند اکستروژن معکوس به همراه چرخش قالب منجر به بهبود مشکلات
 د. رایج اکستروژن میکوس به همراه چرخش قالب منجر به بهبود مشکلات
 د. رایج اکستروژن معکوس برای الا یولید قوطی مای جداره نازک پرداختند. آنها
 د. در این مطالعه از روش اجزای محدود و کران بالا برای تحلیل این فرایند
 با استفاده کردند[11].

با وجود تحقیقات گسترده در زمینه اکستروژن معکوس هنوز تحلیلی روی فرایند اکستروژن معکوس جدید انجام نگرفته است. از این رو در این مطالعه یک تحلیل کران بالا برای اکستروژن معکوس جدید ارائه شده است. بدین منظور ابتدا با تفکیک مناطق تغییر شکل میدان سرعت مربوط به هر ناحیه محاسبه شده و با استفاده از روابط تحلیل کران بالا، نیروی لازم اکستروژن پیشبینی شده است. سپس برای بررسی صحت نتایج بدست آمده از تحلیل کران بالا، تعدادی شبیه سازی اجزای محدود با نرم افزار دفرم سه بعدی در شرایط مختلف انجام شده است. در انتها نتایج به دست آمده از هر دو روش مقایسه شده اند.

2- تحليل كران بالا

براساس تئوری کران بالا از بین میدانهای سرعت پیشنهاد شدهی قابل قبول در یک جسم شکلپذیر، یک و فقط یک میدان سرعت وجود دارد که در آن انرژی مصرف شده دقیقا برابر کار انجام شده توسط نیروهای خارجی است. یعنی هر تخمینی از میدان سرعت که در شرایط سازگاری صادق باشد همواره از مقدار واقعی بیشتر خواهد بود[12]. اگر اختلاف بین توان مصرف شده و توان ورودی را با لنمایش دهیم رابطهی آن به صورت زیر خواهد بود.

$$J^{*} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{av} \int_{V}^{V} \sqrt{\frac{1}{2}} \dot{\varepsilon}_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij} \, dV + \frac{\sigma_{av}}{\sqrt{3}} \oint_{S_{V}}^{S} |\Delta v| \, ds + m \frac{\sigma_{av}}{\sqrt{3}} \oint_{S_{f}}^{S} |\Delta v| \, ds - \oint_{S_{t}}^{S} T_{i} V_{i} \, ds$$
(1)

که در رابطهی فوق σ_{av} تنش سیلان متوسط، i_{ij} مولفههای تانسور نرخ کرنش، $v\Delta$ انفصال سرعت در مرز بین نواحی تغیر شکل روی سطوح انفصال سرعت v_{S} و s_{f} سطوح تماس قالب با مادهی شکلپذیر، m ضریب اصطکاک برشی، V_{e} و T_{f} سطوح تماس قالب با مادهی شکلپذیر، m ضریب اصطکاک توان مصرف شده در یک جسم در حال تغییر شکل را میتوان به توان تغییر شکل داخلی \dot{W}_{i} ، توان انفصال سرعت \dot{W}_{s} و توان مصرفی روی سطوح تماس به علت اصطکاک \dot{W}_{f} تقسیم کرد. که به تفکیک در رابطهی 2 نشان داده شدهاند.

$$\dot{W}_{i} = \frac{2\sigma_{av}}{\sqrt{3}} \int_{V}^{V} \sqrt{\frac{1}{2}} \dot{\varepsilon}_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}} \, dV$$

$$\dot{W}_{s} = \frac{\sigma_{av}}{\sqrt{3}} \oint_{S_{V}}^{S} |\Delta v| \, ds$$

$$\dot{W}_{f} = m \frac{\sigma_{av}}{\sqrt{3}} \oint_{S_{f}}^{S} |\Delta v| \, ds$$
(2)

برای محاسبهی مقدار م_{av} مقدار متوسط تنش سیلان را از روی نمودار تنش کرنش ماده با استفاده از رابطهی زیر محاسبه میکنیم.

$$\sigma_{av} = \frac{\int_{0}^{\varepsilon_{o}} \sigma d\varepsilon}{\varepsilon_{o}} \tag{3}$$

که در رابطهی 3 $arepsilon_o$ کرنش متوسط وارد شده به قطعه میباشد.

نرخ کرنشها در دستگاه مختصات استوانهی بهصورت رابطهی 4 بیان میشود.





با اعمال شرایط مرزی، سرعت در راستای ≤ به صورت رابطهی 8 حاصل خواهد شد.

$$V_{z2} = \frac{V_0 z}{t_0}$$
(8)

f 8 که در این رابطه V_0 سرعت سنبهی متحرک میباشد. با قرار دادن رابطهی در معادلهی تراکم ناپذیری 7 و حل معادلهی دیفرانسیل سرعت در راستای r به صورت رابطه 9 حاصل خواهد شد.

$$V_{r2} = -\frac{V_0 r}{2t_0}$$
(9)

با ادامهی این روند از طرق مشابه توزیع سرعت در نواحی 3 و 4 حاصل 4واهد شد. رابطهی 10و 11 توزیع سرعت در راستای z و r در نواحی 3 و4را نشان مر دهد.

$$V_{r3} = \frac{V_0 R_0^2}{2r(A + Br)}$$

$$V_{z3} = -\frac{V_0 R_0^2}{2} \left(\frac{Bz}{r(A + Br)^2}\right)$$

$$A = t_0 + R_0 \tan \alpha, B = -\tan \alpha, \tan \alpha = \frac{t_0 - t_1}{R_1 - R_0}$$
(10)
$$V_{z4} = -\frac{V_0 R_0^2 Z}{2\bar{R}_1 t_1}$$

$$V_{z4} = \frac{Cr}{2\bar{R}_1 t_1} + \frac{D}{2}$$

$$C = \frac{V_0 R_0^2}{2t_1}, D = -C \left(\mathbf{1} + \frac{R_1^2}{2\bar{R}_1 t_1} \right), \bar{R}_1 = R_1 + \frac{t_1}{2}$$
(11)

با قرار دادن مقادیر سرعتها در رابطه 1 میتوان توان کلی را محاسبه کرد. بدین ترتیب نیروی اکستروژن F_E از رابطهی 12 محاسبه خواهد شد. به دلیل پیچیدگی محاسبات برای محاسبهی توان برنامهای در نرمافزار متلب نوشته شده و توان به صورت عددی برای مقادیر مختلف متغیرهای هندسی و فرایندی محاسبه شده است. ...

$$F_E = \frac{W_{\text{tot}}}{V_0} \tag{12}$$

که در رابطهی بالا \dot{W}_{tot} توان برایند تغییر شکل میباشد.

3- شبیه سازی اجزای محدود

برای شبیهسازی فرایند اکستروژن معکوس جدید از نرمافزار تجاری دفرم سهبعدی استفاده شده است. مشخصهی کلیدی این نرمافزار که آن را برای

$$\begin{split} \dot{\varepsilon}_{rr} &= \frac{\partial V_r}{\partial r} \\ \dot{\varepsilon}_{\theta\theta} &= \frac{1}{r} \frac{\partial V_{\theta}}{\partial \theta} + \frac{V_r}{r} \\ \dot{\varepsilon}_{zz} &= \frac{\partial V_z}{\partial z} \\ \dot{\varepsilon}_{rz} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial V_r}{\partial z} \right) \\ \dot{\varepsilon}_{\theta z} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_{\theta}}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} \right) \\ \dot{\varepsilon}_{\theta r} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_{\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} - \frac{V_{\theta}}{r} \right) \end{split}$$
(4)

که در رابطهی بالا $\dot{\epsilon}_{
m rr}$ ، $\dot{\epsilon}_{
m rz}$ ، $\dot{\epsilon}_{
m rz}$ ، $\dot{\epsilon}_{
m zz}$ ، $\dot{\epsilon}_{
m 00}$ در دستگاه - مختصات استوانه ای و V_{0} و V_{z} به ترتیب سرعت ها در راستای $Z_{,} \partial_{,} f$ می باشند. چون قطعه کار دارای شرایط تقارن محوری است و چرخشی در سیلان ماده وجود ندارد، سرعت در راستای heta و مشتقات جزئی نسبت به این متغیر صفر خواهند شد. بعد از سادهسازی نرخ کرنشها به شکل ساده شدهی معادلەي 5 نشان دادە مىشوند.

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{rr} &= \frac{\partial V_r}{\partial r} \\ \dot{\varepsilon}_{\theta\theta} &= \frac{V_r}{r} \\ \dot{\varepsilon}_{zz} &= \frac{\partial V_z}{\partial z} \\ \dot{\varepsilon}_{rz} &= \frac{1}{2} \frac{\partial V_z}{\partial r} + \end{aligned}$$

2 dr مهمترین اصلی که در شکلدهی فلزات به حل معادلات کمک می کند اصل تراکم نابذیری است که در رابطهی 6 نشان داده شده است.

(5)

$$\xi_{rr} + \epsilon_{\theta\theta} + \epsilon_{zz} = 0$$
 (6)
 $\xi_{rr} + \epsilon_{\theta\theta} + \epsilon_{zz} = 0$ (6)
 η قار داد: کرنش ها از رابطه ی 5 در رابطه ی 6 معادله ی 7 حاصل خواهد شد.

 $\frac{\partial V_r}{\partial V_r} + \frac{V_r}{\partial V_z} + \frac{\partial V_z}{\partial V_z}$ (7) = 0 дr дz

رابطه 7 نشان میدهد که سرعتهای V_r و V_z به هم وابستهاند و با دستیابی به یکی دیگری قابل حصول خواهد بود. واضح است که محاسبهی سرعتها در نواحی تغییر شکل اساس تحلیل حد بالا خواهد بود.

برای محاسبهی میدان سرعت در منطقهی تغییر شکل این منطقه به چهار زیر ناحیه تقسیم شده است. شکل 2 قطعه کار اکسترود شده را در حین فرايند با تفكيك نواحى تغيير نشان مىدهد. همان طور كه مشاهده مىشود کل ناحیهی تغییر شکل به چهار زیر ناحیه تقسیم بندی شده تا سرعتها و متقابلا توانها در هر زیر ناحیه به تفکیک محاسبه شده و در نهایت با محاسبهی کل توان، نیروی اکستروژن محاسبه شود. به دلیل تقارن محوری قطعه کار تولید شده از دستگاه مختصات قطبی برای تحلیل این فرایند استفاده شده است.

همانطور که در شکل 2 مشاهده می شود، متغیرهای ابعادی در این فرایند ارتفاع شمشال اوليه، $R_{
m o}$ شعاع شمشال اوليه، $R_{
m 1}$ شعاع داخلی قطعه کار $H_{
m o}$ اکسترود شده، t_o فخامت ابتدای ناحیهی تغییر شکل 2 و t_1 ضخامت دیوارهی قطعه کار اکسترود شده می باشند. با انتخاب این نواحی واضح است که در ناحیهی 1 هیچ تغییر شکلی اتفاق نیفتاده و فقط توان اصطکاکی در این ناحیه وجود خواهد داشت. ولی سایر نواحی علاوه بر تغییر شکل داخلی در معرض انفصال سرعت در مرز بین نواحی و اصطکاک قرار دارند.

همان طور که بیان شد بی شمار میدان سرعت وجود دارد که در شرایط تراکم ناپذیری صدق میکنند ولی فقط یکی از آن هاست که جواب دقیق مسئله است. بهدست آوردن دقیق میدان سرعت اصلی کاری طاقت فرساست از اینرو یک تقریب ساده ولی کارامد در بهدست آوردن میدان سرعت در ناحیهی 2 تقریب خطی است. از این رو فرض شده سرعت در راستای عدر ناحیهی 2 خطی است.

شبیهسازی فرایندهایی با تغییر شکل زیاد مناسب ساخته سیستم مش مجدد خودکار این نرمافزار میباشد[13]. بدین منظور برای هر شبیهسازی سه قطعهی مجزا مدل شده است. قالب، سنبهی متحرک و شمشال اولیه. بدین صورت که قالب و سنبهی متحرک به صورت صلب و شمشال اولیه به صورت مادهی شکل پذیر در نظر گرفته شده است. برای کاهش حجم محاسبات قطاعی از نمونهی کامل به اندازهی 1/36 انتخاب شده و المان مورد استفاده در این شبیهسازی المان هرمی با چهار نود و تابع شکل خطی انتخاب شده است. شکل 3 نحوهی المانبندی و تغییر شکل قطعه را در طول فرایند اکستروژن معکوس جدید نشان میدهد. همچنین قالب صلب به صورت کاملا مقید و فرایند اکستروژن با حرکت سنبه متحرک با سرعت 10mm/min انجام شده است. برای تعیین تعداد بهینهی المان در شبیهسازیهای اجزای محدود همان طور که در شکل 4 مشاهده می شود، آنالیز حساسیت به مش به صورت تاثير تعداد المان روى ماكزيمم نيروى اكستروژن انجام گرفته و با توجه به اندازههای ابعادی مختلف در هر شبیهسازی، تعداد المانها بین 5000 تا 7000 (برای 1/36 نمونهی کامل) در نظر گرفته شده است. شرایط اصطکاکی در این شبیهسازی به صورت ثابت برشی انتخاب شده است. این فرایند به صورت همدما در دمای اتاق شبیهسازی شده و از افزایش دما در طی فرایند بر اثر توان زائد شکلدهی صرف نظر شده است.

همانطور که میدانید رفتار و مشخصههای مکانیکی مواد اولیه و شرایط مرزی از ورودیهای اولیه برای شبیهسازی به شمار میروند. مدل هولومنلودویک یکی از سادهترین مدلها برای بیان رفتار مواد میباشد که برای شبیهسازی از آن استفاده شده است[14]. برای بدست آوردن ثابتهای رابطهی هولومن-لودویک آزمایش فشار روی نمونهی استوانهای از جنس آلومینیوم خالص تجاری با قطر 15mm و ارتفاع 23mm با نرخ کرنش 0.0001 بر ثانیه انجام شده است.



شکل 3 نمایش نحوهی المان بندی و تغییر شکل نمونه در طول فرایند اکستروژن معکوس جدید با استفاده از شبیهسازی اجزای محدود



شكل 4 حساسيت سنجى به مش برمبناى اثر تعداد مش روى نيروى اكستروژن



شکل 5 (الف) نحوهی انجام آزمون فشار و (ب) نمونهی آزمایشی قبل و بعد از آزمایش فشار



شکل 6 نمودار نیرو- جابجایی حاصل از تست فشار برای آلومینیوم خالص تجاری

شکل 5 دستگاه تست فشار و نحوه انجام آزمایش و نمونه آن را قبل و بعد از آزمایش نشان میدهد. به علاوه آزمایش فشار با پرس اینسترون با ظرفیت ton 30 انجام شده و همچنین روانکاری مناسب و سرعت بارگذاری پایین اثرات بشکهای شدن و نرخ کرنش را به حداقل رسانده است. در نتیجه نمودار نیرو-جابجایی حاصل از تست قشار به صورت شکل 6 بدست آمده است.

بدین ترتیب رابطهی هولومن- لودویک برای آلومینیوم خالص تجاری به صورت معادلهی 13بدست آمده است.

 $\sigma = 111.14\varepsilon^{0.3958}$

4- نتایج و بحث و بررسی ♥ 4-1- نتایج تحلیل حد بالا

(13)

پس از انجام تحلیل کران بالا نتایج این تحلیل با تغییر متغیرهای هندسی و فرایندی بررسی میشود. بدین منظور تاثیر متغیرهای ورودی روی نیروی اکستروژن، توانهای تغییر شکل، توان انفصال سرعت و توان اصطکاک به تفکیک ارائه خواهد شد.

شکل7 تاثیر شعاع شمشال اولیه روی نیروی اکستروژن معکوس جدید با ضرایب اصطکاک 0.10 و 0/4 را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود با افزایش شعاع شمشال اولیه نیروی اکستروژن به صورت غیر خطی افزایش می یابد. آنچه ابتدا به نظر می رسد این است که تا آنجا که می توان شعاع شمشال را باید کاهش داد، ولی کاهش شعاع شمشال باعث افزایش کورس فرایند و کاهش قطر سنبه و خطر کمانش می شود، در نتیجه این امر تا حد زیادی مقدور نیست. در مقابل با افزایش شعاع شمشال اولیه فرایند اکستروژن معکوس جدید به اکستروژن معکوس متداول نزدیکتر می شود.

این خود گواه بر کمتر بودن نیروی اکستروژن در روش جدید ارائه شده[4].





در نتیجه باید حد بهینه برای آن در نظر گرفت. این حد بهینه به پارامترهایی چون ظرفیت پرس، کورس آن و پارامترهای دیگر بستگی دارد. شکل 8 تاثیر شعاع قطعه کار اکسترود شده روی نیروی اکستروژن با ضرایب اصطکاک 0/1، 0/2و 0/4 را نشان میدهد.

مشاهده می شود که با افزایش شعاع قطعهی کار نیروی اکستروژن به صورت خطی افزایش می یابد. به علاوه در مواقعی که ضریب اصطکاک بالا است این پارامتر بیشتر خودنمایی میکند. یعنی زمانی که شعاع قطعهکار بزرگ است با روانکاری مناسب می توان نیروی اکستروژن را تا حد قابل توجهی کاهش داد.

شکل 9 تاثیر ضخامت دیوارهی قطعه اکسترود شده روی نیروی اكستروژن با ضرايب اصطكاك 1/0، 2/2 و 0/4 را نشان مىدهد. ملاحظه مى-شود که با کاهش ضخامت دیوارهی قطعهی کار اکسترود شده نیروی اکستروژن به شدت افزایش می یابد و با افزایش آن به سمت مقادیر ثابتی میل می کند. به علاوه ضریب اصطکاک در ضخامتهای کم تاثیر کمی بیشتری روی نیروی اکستروژن معکوس جدید، نسبت به ضخامتهای بیشتر دارد.

شكل10 تاثير استحكام تسليم متوسط شمشال اوليه بر نيروى اكستروژن را نشان میدهد. همان طور که مشاهده می شود با افزایش تنش تسلیم مادهی اولیه نیروی اکستروژن معکوس جدید به صورت خطی افزایش مییابد. در مورد اثر پارامترهایی چون ضریب اصطکاک و ارتفاع شمشال اولیه باید گفت که تاثیر این پارامترها مشابه تنش سیلان متوسط است و از آوردن آنها صرف نظر شده است.

همان طور که بیان شد توان برایند تغییر شکل را می توان به توان خالص تغییر شکل، توان اصطکاک و توان انفصال سرعت یا برش داخلی تقسیم کرد. برای بررسی راندمان تغییر شکل در فرایند اکستروژن معکوس جدید بهتر ست اثر پارامترهای تغییر شکل را روی هرکدام از این توانها بررسی کرد تا نصویری واضح از فرایند بدست آید. لازم به ذکر است که با توجه به نوع كاربرد و نتايج مورد انتظار ميتوان از نتايج ارائه شده استفاده كرد. مثلا برخي اوقات راندمان بیشینه مورد نظر است. در این مواقع باید بیشترین میزان توان تغییر شکل بدست آمده و سایر توانها کمینه شوند. ممکن است بهبود ریز ساختار، بیشتر مد نظر باشد و محدودیتی از نظر توان کلی فرآیند وجود نداشته باشد اینجاست که باید توان انفصال سرعت بیشینه شود تا برشهای شدید مرزدانههای جدید و دانههای کوچکتری ایجاد کند و خواص مکانیکی بهتري حاصل شود[15].

شكل 11 تاثير شعاع شمشال اوليه روى توان تغيير شكل، انفصال سرعت، اصطکاک و توان برایند را نشان میدهد. همان طور که مشاهده می شود، با افزایش شعاع شمشال اولیه تا مقدار **19**mm کار انفصال سرعت از کار خالص تغییر شکل بیشتر است و با گذر از این مقدار میزان کار انفصال سرعت بیشتر یعنی بازدهی کمتر خواهد شد. همانطور که بیان شد در مواقعی مانند تغییر شكل پلاستيك شديد بهدنبال انفصال سرعت بيشتر براى بهبود ريز ساختار هستیم یعنی بسته به نوع محدودیتها و انتظارات می توان مقدار مطلوب را بەدست آورد.

شکل12 اثر ضخامت دیوارهی قطعه کار اکسترود شده روی *w*f,*w*s*w*tot را نشان میدهد همان طور که مشاهده می شود با افزایش ضخامت قطعهی کار wi تقریبا ثابت مانده و wi,ws ,wtot کاهش یافته و به میزان مشخصی میل می کنند. یعنی با افزایش ضخامت قطعه کار می توان راندمان فرایند را افزایش داد ولی در یک محدودهی مشخص این عمل تاثیری در فرایند ندارد.

شکل13تاثیر شعاع قطعهکار اکسترود شده را روی wrwi, ws , wtot, نشان میدهد.





شکل 14 تاثیر ضریب اصطکاک بر Wtot،Ws،Wf،Wi

جدول 1 مقایسه ی نتایج تحلیل کران بالا و نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود برای

السترورن معدوس جديد								
شماره	<i>R</i> ₀ mm	<i>R</i> 2 mm	to mm	tı mm	<i>H</i> ₀ mm	т	نيرو (اجزا محدود) (Ton)	نيرو (حد بالا) (Ton)
1	12/5	33	3	2	60	0/1	32/4	36/1
2	12/5	33	3	2	60	0/2	40/68	45/5
3	12/5	33	3	2	60	0/4	56	61/9
4	20	33	3	2	60	0/1	78/12	93/3
5	12/5	33	4	3	60	0/1	30/53	33/8
6	12/5	66	3	2	60	0/1	42/84	46/2
7	12/5	22	3	2	60	0/1	24	31/5
8	12/5	33	6	4	60	0/1	26/35	29
9	10	33	3	2	60	0/1	21/6	22/4

همان طور که مشاهده می شود با افزایش شعاع قطعهی اکسترود شده در شکل تمامی توان ها افزایش مییابند در ضمن در مقدار مشخص 44mm کار اصطکاک بر کار انفصال سرعت غلبه می کند. این بدین معنی است که با افزایش شعاع قطعه کار با ثابت نگهداشتن شعاع شمشال اولیه راندمان فرایند به شدت کاهش مییابد.

شکل14 تاثیر ضریب اصطکاک روی wiwi ، ws،witi ، را نشان میدهد. با افزایش ضریب اصطکاک، کار اصطکاکی wi افزایش یافته و بخش عمدهای از توان تغییر شکل را به خود اختصاص میدهد. علاوه بر این مشاهده میشود ضریب اصطکاک روی سایر توانها تاثیری ندارد.

4-2- مقایسهی نتایج حد بالا و شبیه سازی اجزای محدود

برای بررسی میزان کارامدی و تایید صحت تحلیل کران بالا، نتایج آن با نتایج حاصل از تجلیل اجزای محدود مقایسه شده است. جدول 1 مقایسهی نتایج این مقایسه را به همراه مشخصات فرایندی آنها نشان میدهد. همان طور که مشاهده می شود شبیه سازی های انجام شده اختلاف ناچیزی با نتایج تحلیل کران بالا دارند و این صحت نتایج حاصل از تحلیل کران بالا را برای اکستروژن معکوس جدید نشان می دهد. مقدار متوسط خطا در این تحلیل ها 13% بوده و این نشان دهنده ی دقت تحلیل کران بالای ارائه شده می باشد.

شکل 15 اختلاف نتایج حاصل از تحلیل کران بالا و اجزای محدود را برای ضرایب اصطکاک متغیر نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، با افزایش ضریب اصطکاک در یک هندسه ی ثابت اختلاف نتایج تحلیل کران بالا و تحلیل اجزای محدود تغییر چندانی ندارند.

شکل 16 اختلاف نتایج حاصل از تحلیل کران بالاو تحلیل اجزای محدود را برای اندازهی شمشال اولیهی مختلف نشان میدهد. مشاهده میشود که با افزایش شعاع شمشال اولیه و بزرگتر شدن منطقهی تغییر شکل 2 اختلاف نتایج حاصل از تحلیل کران بالا و تحلیل اجزای محدود بیشتر میشود. به علاوه همان طور که قبلا بیان شد با افزایش شعاع شمشال اولیه نیروی اکستروژن به صورت غیر خطی افزایش میابد.

شکل 17 اختلاف نتایج تحلیل کران بالا و اجزای محدود را برای شعاع قطعهکار متغیر نشان میدهد. همان طور که مشاهده می شود با افزایش شعاع شمشال اولیه اختلاف بین نتایج تحلیل کران بالا و تحلیل اجزای محدود بیشتر می شود.

شکل 18 اختلاف نتایج حاصل از تحلیل کران بالا و اجزای محدود را برای اکستروژن معکوس جدید با ضخامت دیوارهی مختلف نشان میدهد.







شکل 17 نمودار نیرو- شعاع قطعه، مقایسهی تحلیل کران بالا و تحلیل اجزا ی محدود برای قطر قطعهی متغیر



شکل18 نمودار نیرو- ضخامت، مقایسهی تحلیل کران بالا و تحلیل اجزا ی محدود برای ضخامت متغیر

مشاهده می شود که با افزایش ضخامت قطعه کار در اختلاف نتایج تحلیل اجزای محدود و کران بالا تغییر محسوسی مشاهده نمی شود. به علاوه با افزایش ضخامت قطعه کار نیروی اکستروژن کاهش می یابد.

5- نتیجه گیری

با توجه به تحلیل حد بالای انجام شده می توان دریافت که:

 با افزایش قطر شمشال اولیه نیروی اکستروژن به صورت غیرخطی افزایش مییابد به علاوه نمیتوان آن را خیلی کاهش داد چون حجم مادهی لازم کاهش یافته و باید ارتفاع شمشال را افزایش داد که خود این امر سبب افزایش توان اصطکاکی و کاهش راندمان فرآیند میشود. برای همین باید مقدار بهینهای برای آن در نظر گرفت که این مقدار بهینه میتواند به عواملی چون محدودیت تناژ پرس، طول کورس آن و پارامترهای هندسی و فرایندی وابسته باشد.

 با افزایش پارامترهایی چون ضریب اصطکاک، قطر قطعهی کار و ارتفاع شمشال راندمان شکل دهی به شدت کاهش مییابد.

رابطه ضخامت قطعه یکار با نیروی اکستروژن به صورت نمایی است.
 علاوه براین با افزایش ضخامت قطعه یکار نیروی اکستروژن به صورت نمایی
 کاهش می یابد و بعد از رسیدن به حد مشخصی نیروی اکستروژن ثابت می ماند.

 با افزایش قطر شمشال اولیه اختلاف نتایج تحلیل کران بالا و اجزای محدود بیشتر می شود. دلیل این امر واگرایی میدان سرعت پیشنهادی از میدان سرعت واقعی است.

با مقایسه ی تحلیل کران بالا و شبیه سازی های المان محدود می توان
 صحت تحلیل حد بالای انجام شده را تایید کرد. به علاوه مقدار متوسط

خطای تحلیل کران بالای انجام شده با تحلیل اجزای محدود 13% میباشد.

6- مراجع

- K. Abrinia, S. Orangi, Investigation of Process Parameters for the Backward Extrusion of Arbitrary-Shaped Tubes from Round Billets Using Finite Element Analysis, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 18, No. 9, pp. 1201-1208, 2009.
- [2] A. Farhoumand, R. Ebrahimi, Analysis of forward-backward-radial extrusion process, *Materials & Design*, Vol. 30, No. 6, pp. 2152-2157, 2009.
- [3] W. B. Bae, D. Y. Yang, An upper-bound analysis of the backward extrusion of tubes of complicated internal shapes from round billets, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 36, No. 2, pp. 157-173, 1//, 1993.
- [4] V. Shatermashhadi, B. Manafi, K. Abrinia, G. Faraji, M. Sanei, Development of a novel method for the backward extrusion, *Materials & Design*, Vol. 62, pp. 361-366, 2014.
- [5] P. Karami, K. Abrinia, Development of a more realistic upper bound solution for the three-dimensional problems in the forward extrusion process, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 74, No. 0, pp. 112-119, 9//, 2013.
- [6] A. S. Wifi, Z. S. Abduljabbar, M. T. Sakr, A combined UBET/FEM investigation of metal flow and stress analysis of dies in extrusion processes, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 24, No. 0, pp. 431-440, 12//, 1990.
- [7] W. B. Bae, D. Y. Yang, An upper-bound analysis of the backward extrusion of internally elliptic-shaped tubes from round billets, *Journal* of Materials Processing Technology, Vol. 30, No. 1, pp. 13-30, 2//, 1992.
- [8] W. B. Bae, D. Y. Yang, An analysis of backward extrusion of internally circular-shaped tubes from arbitrarily-shaped billets by the upperbound method, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 36, No. 2, pp. 175-185, 1//, 1993.
- [9] M. M. Moshksar, R. Ebrahimi, An Analytical Approach for Backward-Extrusion Forging of Regular Polygonal Hollow Components, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 40, No. 12, pp. 1247-1263, 12/1/, 1998.

مهندسی مکانیک مدرس، فوقالعاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 15

سید هادی حسینی و همکا*ر*ان

- [14] R. K. Uyyuru, H. Valberg, Physical and numerical analysis of the metal flow over the punch head in backward cup extrusion of aluminium, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 172, No. 2, pp. 312-318, 2006.
- [15] G. Faraji, H. Jafarzadeh, H. J. Jeong, M. M. Mashhadi, H. S. Kim, Numerical and experimental investigation of the deformation behavior during the accumulative back extrusion of an AZ91 magnesium alloy, *Materials & Design*, Vol. 35, pp. 251-258, 2012.
- [10] Y. H. Kim, J. H. Park, Upper bound analysis of torsional backward extrusion process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 143-144, pp. 735-740, 2003.
- [11] K. Abrinia, K. Gharibi, An investigation into the backward extrusion of thin walled cans, *International Journal of Material Forming*, Vol. 1, No. S1, pp. 411-414, 2008.
- [12] H. Haghighat, P. Amjadian, A generalized velocity field for plane strain backward extrusion through punches of any shape, *Meccanica*, Vol. 48, No. 9, pp. 2099-2106, 2013.
- [13] C. SFT, DEFORMTM 3D Version 6.1 (sp1) User's Manual Oct 10th 2007: Corporation SFT, 2007.