



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

سید هادی حسینی¹، کارن ابری نیا²، قادر فرجی^{3*}

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

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

۳- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

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

چکیده

در این مقاله، یک تحلیل کران بالا برای اکستروژن معکوس جدید ارائه شده است. ابتدا منطقه تعییر شکل به چند ناحیه تقسیم شده و میدان سرعت قابل قبولی برای هر ناحیه پیشنهاد شده است. با محاسبه‌ی توان در هر ناحیه توان مصرفی و نیروی اکستروژن محاسبه شده و ارتباط بین متغیرهای هندسی و فرایندی با نیروی اکستروژن مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. علاوه بر این با بررسی رابطه‌ی بین متغیرهای هندسی با توان‌های تغییر شکل، انفال سرعت و اصطکاک میزان کارایی فرایند در شرایط کاری مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای بررسی صحت تحلیل کران بالای ارائه شده تحلیل اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار دفرم سه بعدی انجام شده است. بررسی تحلیل کران بالا روی نیروی اکستروژن نشان می‌دهد که با افزایش شعاع شمشال اولیه نیروی اکستروژن به صورت غیرخطی افزایش یافته و در این شرایط این فرایند به اکستروژن معکوس متناول نزدیک می‌شود و این دلیلی بر کاهش نیروی لازم در این فرایند است. از طرفی با افزایش ضخامت، ابتدا منطقه‌ی تعییر شکل نیرو به صورت نمایی کاهش می‌یابد و در یک محدوده‌ی مشخص با تغییر ضخامت تعییر محسوسی در نیروی اکستروژن مشاهده نمی‌شود. بررسی اثر پارامترهای هندسی روی توان تغییر شکل، توان انفال سرعت و توان اصطکاکی نشان می‌دهد که با افزایش شعاع قطعه‌کار اکستروژ شده راندمان فرایند به شدت کاهش یافته و در مقابل با افزایش ضخامت قطعه‌کار راندمان فرایند افزایش می‌یابد. مقایسه‌ی تحلیل کران بالای انجام شده با شبیه‌سازی اجزای محدود مطابقت خوبی بین نتایج نشان می‌دهد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دربافت: ۰۳ مرداد ۱۳۹۳

پذیرش: ۰۴ شهریور ۱۳۹۳

ارائه در سایت: ۰۴ آبان ۱۳۹۳

کلید واژگان:

اکستروژن معکوس جدید

تحلیل کران بالا

شبیه‌سازی اجزای محدود

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, ghfarij@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 the extruded part's diameter created a critical condition in process efficiency because of high friction power. But increasing the thickness enhances power efficiency. Finally, upper bound analysis results had good agreement with FEA.

1- مقدمه

اکستروژن معکوس یکی از فرایندهای رایج و کاربردی شکل دهنده حجمی فلزات است. این فرایند برای ساخت قطعاتی با سطح مقطع ثابت و انتهای بسته، که تولید آن‌ها با سایر فرایندها مقرن به صرفه نیست به کار می‌رود [1]. این فرایند در مقایسه با سایر روش‌های تولید مزایای بسیاری دارد. کمترین میزان ماده‌ی خواهد شد. به همین علت خواص مکانیکی و ریز ساختار از مزایای این روش تولید می‌باشد [2]. با وجود مزایای ذکر شده این روش معمایی هم دارد. در طول فرایند اکستروژن معکوس منطقه‌ی تعییر شکل به طور پیوسته تعییر کرده و همین امر سبب تعییر میزان کرنش‌های اعمالی در طول قطعه‌ی اکستروژ شده خواهد شد. به همین علت

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

S.H. Hosseini, K. Abrinia, Gh. Faraji, Upper bound analyses of novel backward extrusion, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 369-376, 2015 (In Persian)

آنها در این تحلیل برای مرحله شروع فرآیند یک میدان سرعت کروی در نظر گرفته‌ند [9]. همچنین در همین سال کیم و پارک با استفاده از تئوری کران بالا به تحلیل فرایند اکستروژن معکوس پیچشی پرداختند. آنها دریافتند که فرایند اکستروژن معکوس به همراه چرخش قالب منجر به بهبود مشکلات رایج اکستروژن می‌شود [10]. در سال 2008 ابری نیا و غربی به برسی فرآیند اکستروژن معکوس برای تولید قوطی‌های جداره نازک پرداختند. آنها در این مطالعه از روش اجزای محدود و کران بالا برای تحلیل این فرایند استفاده کردند [11].

با وجود تحقیقات گسترده در زمینه‌ی 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 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 شیوه‌سازی اجزای محدود با نرم افزار دفرم سه‌بعدی در شرایط مختلف انجام شده است. در انتها نتایج بدست آمده از هر دو روش مقایسه شده اند.

2- تحلیل کران 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 دقیقاً 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 نمایش دهیم رابطه‌ی آن به صورت زیر خواهد بود.

$$J^* = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{av} \int_V^V \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\varepsilon}_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}} dV + \frac{\sigma_{av}}{\sqrt{3}} \oint_{S_V}^S |\Delta v| ds + m \frac{\sigma_{av}}{\sqrt{3}} \oint_{S_f}^S |\Delta v| ds - \oint_{S_t}^S T_i V_i ds \quad (1)$$

که در رابطه‌ی فوق σ_{av} تنش سیلان متوسط، $\dot{\varepsilon}_{ij}$ مولفه‌های تانسور نرخ کرنش، Δv انصاف سرعت در مرز بین نواحی تغییر شکل روی سطوح انفصال سرعت S_f و S_t سطوح تماس قالب با ماده‌ی شکل‌پذیر، m ضریب اصطکاک برشی، V_i و T_i بهتر تیب سرعت و نیروهای وارد شده روی سطح S_f می‌باشند.

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.

$$\begin{aligned} \dot{W}_i &= \frac{2\sigma_{av}}{\sqrt{3}} \int_V^V \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\varepsilon}_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}} dV \\ \dot{W}_s &= \frac{\sigma_{av}}{\sqrt{3}} \oint_{S_V}^S |\Delta v| ds \\ \dot{W}_f &= m \frac{\sigma_{av}}{\sqrt{3}} \oint_{S_f}^S |\Delta v| ds \end{aligned} \quad (2)$$

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

$$\sigma_{av} = \frac{\int_0^{e_0} \sigma d\varepsilon}{e_0} \quad (3)$$

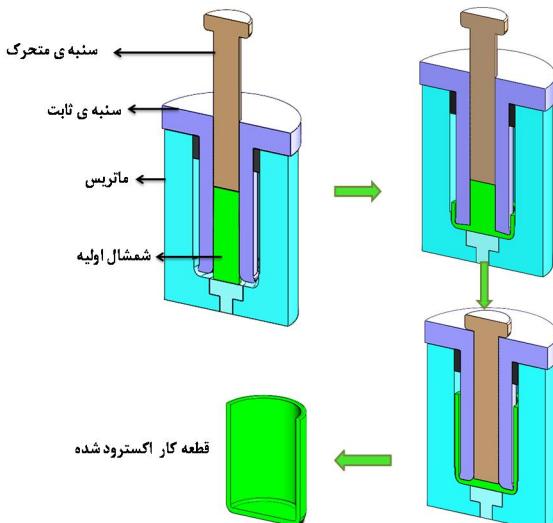
که در رابطه‌ی 3 e_0 کرنش متوسط وارد شده به قطعه می‌باشد. نرخ کرنش‌ها در دستگاه مختصات استوانه‌ی بهصورت رابطه‌ی 4 بیان می‌شود.

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

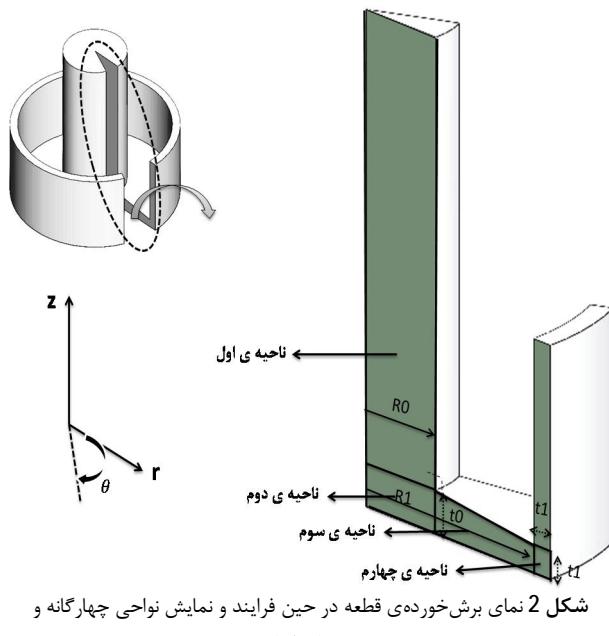
اکستروژن معکوس جدید فرایندی است که در آن با طراحی قالب جدید سعی شده با محدود کردن و ثابت نگه داشتن منطقه‌ی تغییر شکل، معایب اکستروژن معکوس متداول مانند مانند غیر یکنواختی خواص مکانیکی بر طرف شود. نمای شماتیک فرایند اکستروژن معکوس جدید در شکل 1 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در فرایند اکستروژن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

در بین روش‌های مختلف تحلیل فرایندهای شکل‌دهی، روش تحلیل کران بالا و تحلیل اجزای محدود بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. اگرچه تحلیل اجزای محدود اطلاعات جامعی در مورد مسائل مورد بررسی ارائه می‌دهد، زمان محاسباتی زیادی صرف تحلیل مسئله می‌کند. به همین دلیل استفاده از تحلیل کران بالا راه حل بسیار مناسبی برای کاهش زمان محاسبات در تحلیل مسائلی است که هدف از انجام آنها دست‌یابی به متغیرهای خروجی محدود مانند پیش‌بینی نیرو و نحوه جریان مواد در قالب می‌باشد [5]. تحلیل کران بالا اکستروژن معکوس متداول توسط تعدادی از محققین مورد توجه قرار گرفته است که در ادامه به برخی از آن‌ها پرداخته می‌شود.

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 باهه و یانگ با استفاده از تئوری کران بالا نیروی لازم برای اکستروژن سه بعدی با شمال‌شمال دایروی به قطعه کار 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 1993 همین 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 دوراً توخالی غیرمتقارن به کار برندند [8]. در سال 1998 مشکسوار و ابراهیمی فرایند اکستروژن معکوس قطعات توخالی با شکل داخلی و خارجی چند ضلعی منتظم را با استفاده از روش کران بالا تحلیل کردند.



شکل 1 نمای شماتیک اکستروژن معکوس جدید و مراحل شکل‌گیری قطعه



شکل 2 نمای پرش خورده قطعه در حین فرایند و نمایش نواحی چهارگانه و متغیرهای ابعادی

با اعمال شرایط مرزی، سرعت در راستای z به صورت رابطه 8 حاصل خواهد شد.

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

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

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

با ادامه این روند از طرق مشابه توزیع سرعت در نواحی 3 و 4 حاصل خواهد شد. رابطه 10 و 11 توزیع سرعت در راستای z و r در نواحی 3 و 4 را نشان می‌دهد.

$$\begin{aligned} V_{r3} &= \frac{V_0 R_0^2}{2r(A + Br)} \\ V_{z3} &= -\frac{V_0 R_0^2}{2} \left(\frac{Bz}{r(A + Br)^2} \right) \\ A &= t_0 + R_0 \tan \alpha, B = -\tan \alpha, \tan \alpha = \frac{t_0 - t_1}{R_1 - R_0} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} V_{r4} &= -\frac{V_0 R_0^2 Z}{2R_1 t_1} \\ V_{z4} &= \frac{C r}{2R_1 t_1} + \frac{D}{r} \\ C &= \frac{V_0 R_0^2}{2t_1}, D = -C \left(1 + \frac{R_1^2}{2R_1 t_1} \right), R_1 = R_1 + \frac{t_1}{2} \end{aligned} \quad (11)$$

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

$$F_E = \frac{\dot{W}_{tot}}{V_0} \quad (12)$$

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

3- شبیه سازی اجزای محدود

برای شبیه سازی فرایند اکستروژن معکوس جدید از نرمافزار تجاری دفتر سه بعدی استفاده شده است. مشخصه‌ی کلیدی این نرمافزار که آن را برای

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

که در رابطه‌ی بالا $\dot{\epsilon}_{rr}$, $\dot{\epsilon}_{\theta\theta}$, $\dot{\epsilon}_{zz}$, $\dot{\epsilon}_{rz}$, $\dot{\epsilon}_{\theta z}$ و $\dot{\epsilon}_{\theta r}$ نرخ کرنش‌ها در دستگاه مختصات استوانه‌ای و V_r , V_θ و V_z به ترتیب سرعت‌ها در راستای r , θ , z می‌باشند. چون قطعه کار دارای شرایط تقارن محوری است و چرخشی در سیلان ماده وجود ندارد، سرعت در راستای θ و مشتقه‌ی جزئی نسبت به این متغیر صفر خواهد شد. بعد از ساده‌سازی نرخ کرنش‌ها به شکل ساده شده معادله 5 نشان داده می‌شوند.

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{rr} &= \frac{\partial V_r}{\partial r} \\ \dot{\epsilon}_{\theta\theta} &= \frac{V_r}{r} \\ \dot{\epsilon}_{zz} &= \frac{\partial V_z}{\partial z} \\ \dot{\epsilon}_{rz} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial V_r}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

مهمنترین اصلی که در شکل دهنده فلزات به حل معادلات کمک می‌کند اصل تراکم ناپذیری است که در رابطه 6 نشان داده شده است.

$$\dot{\epsilon}_{rr} + \dot{\epsilon}_{\theta\theta} + \dot{\epsilon}_{zz} = 0 \quad (6)$$

با قرار دادن کرنش‌ها از رابطه 5 در رابطه 6 معادله 7 حاصل خواهد شد.

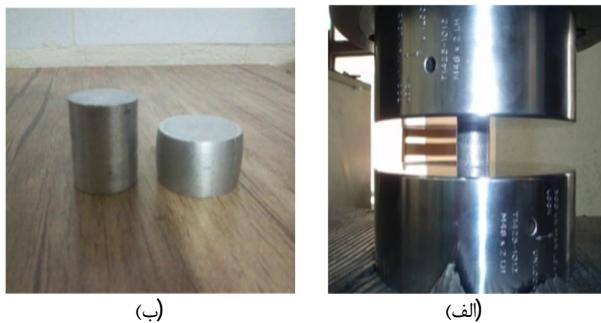
$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_r}{r} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

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.

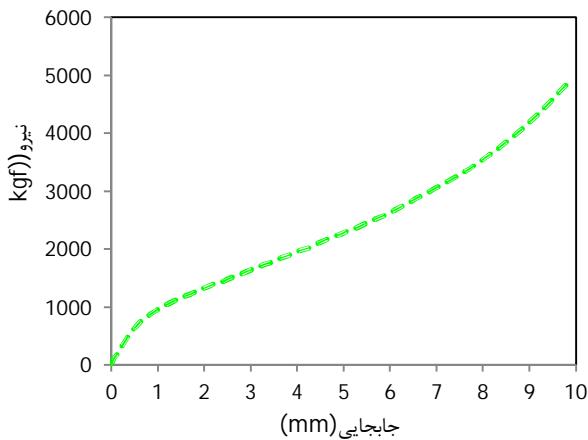
برای محاسبه‌ی میدان سرعت در منطقه‌ی تغییر شکل این منطقه به چهار زیر ناحیه تقسیم شده است. شکل 2 قطعه کار اکسترود شده را در حین فرایند با تفکیک نواحی تغییر نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود کل ناحیه‌ی تغییر شکل به چهار زیر ناحیه تقسیم‌بندی شده تا سرعت‌ها و متقابلاً توان‌ها در هر زیر ناحیه به تفکیک 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 می‌شود، متغیرهای ابعادی در این فرایند ارتفاع شمال اولیه، R_0 شعاع شمال اولیه، R_1 شعاع داخلی قطعه کار اکسترود شده، t_0 ضخامت ابتدای ناحیه‌ی تغییر شکل 2 و t_1 ضخامت دیواره‌ی قطعه کار اکسترود شده می‌باشند. 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 افقان سرعت در میان نواحی و اصطکاک قرار دارند.

همان‌طور که بیان شد بی‌شمار میدان سرعت وجود دارد که در شرایط تراکم ناپذیری صدق می‌کنند ولی فقط یکی از آن هاست که جواب دقیق مسئله است. به دست آوردن دقیق میدان سرعت اصلی کاری طاقت فرساست از این‌رو یک تقریب ساده ولی کارآمد در به دست آوردن میدان سرعت در ناحیه‌ی 2 تقریب خطی است. از این‌رو فرض شده سرعت در راستای z در ناحیه‌ی 2 خطی است.



شکل 5 (الف) نحوه انجام آزمون فشار و (ب) نمونه 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 اینسٹرونون 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 فشار به صورت شکل 6 بدست آمده است.

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

$$\sigma = 111.14e^{0.3958} \quad (13)$$

4- نتایج و بحث و بررسی

4-1- نتایج تحلیل حد بالا

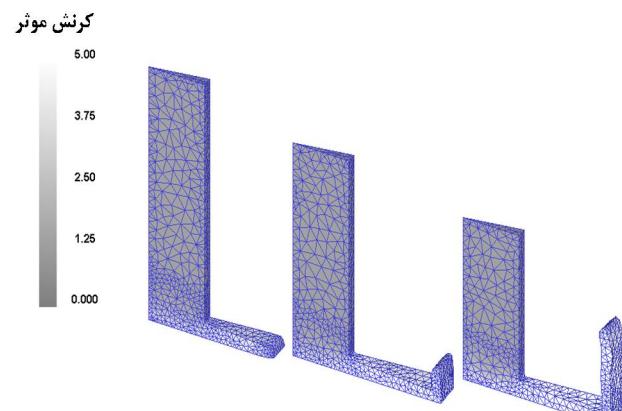
پس از انجام تحلیل کران بالا نتایج این تحلیل با تغییر متغیرهای هندسی و فرایندی بررسی می‌شود. بدین منظور تاثیر متغیرهای ورودی روی نیروی اکستروژن، توان‌های تغییر شکل، توان انفصال سرعت و توان اصطکاک به تفکیک ارائه خواهد شد.

شکل 7 تاثیر شعاع شمشال اولیه روی نیروی اکستروژن معکوس جدید با ضرایب اصطکاک 0/01 و 0/4 را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش شعاع شمشال اولیه نیروی اکستروژن به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد. آنچه ابتدا به نظر می‌رسد این است که تا آنجا که می‌توان شعاع شمشال را باید کاهش داد، ولی کاهش شعاع شمشال باعث افزایش کورس فرایند و کاهش قطر سنبه و خطر کمانش می‌شود، درنتیجه این امر تا حد زیادی مقدور نیست. در مقابل با افزایش شعاع شمشال اولیه فرایند اکستروژن معکوس جدید به اکستروژن معکوس متداول نزدیکتر می‌شود.

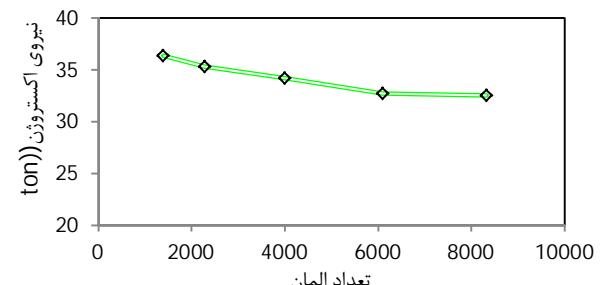
این خود گواه بر کمتر بودن نیروی اکستروژن در روش جدید ارائه شده [4].

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 شمال اولیه. بدین صورت که قالب و سنبه‌ی متحرک به صورت صلب و شمال اولیه به صورت ماده‌ی شکل‌پذیر 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 کاملاً مقید و فرایند اکستروژن با حرکت سنبه متحرک با سرعت 10mm/min انجام شده است. برای تعیین تعداد بهینه‌ی المان در شبیه‌سازی‌های اجزای محدود همان‌طور که در شکل 4 مشاهده می‌شود، آنالیز حساسیت به مش به صورت تاثیر تعداد المان روی ماکریزم نیروی اکستروژن انجام گرفته و با توجه به اندازه‌های ابعادی مختلف در هر شبیه‌سازی، تعداد المان‌ها بین 7000 تا 5000 (برای 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 طول 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 هولومن-لودویک 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 کرش 0.0001 بر ثانیه انجام شده است.



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



شکل 4 حساسیت سنجی به مش بر مبنای اثر تعداد مش روی نیروی اکستروژن

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 اکستروژن شده روی نیروی اکستروژن با ضرایب اصطکاک 0.1/0.2/0.4 را نشان می‌دهد.

مشاهده می‌شود که با افزایش شعاع قطعه کار نیروی اکستروژن به صورت خطی افزایش می‌یابد. به علاوه در موقعی که ضریب اصطکاک بالا است این پارامتر بیشتر خودنمایی می‌کند. یعنی زمانی که شعاع قطعه کار بزرگ است با روانکاری مناسب می‌توان نیروی اکستروژن را تا حد قابل توجهی کاهش داد.

شکل 9 تاثیر ضخامت دیواره قطعه اکستروژن شده روی نیروی اکستروژن با ضرایب اصطکاک 0.1/0.2/0.4 را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که با کاهش ضخامت دیواره قطعه کار اکستروژن شده نیروی اکستروژن به شدت افزایش می‌یابد و با افزایش آن به سمت مقادیر ثابتی می‌کند. به علاوه ضریب اصطکاک در ضخامت‌های کم تاثیر کمی بیشتری روی نیروی اکستروژن معکوس جدید، نسبت به ضخامت‌های بیشتر دارد.

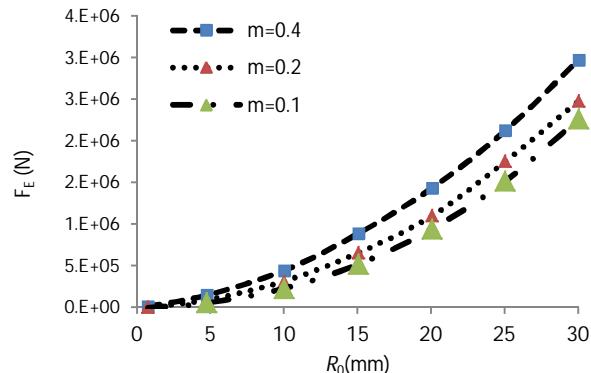
شکل 10 تاثیر استحکام تسلیم متوسط شمال اولیه بر نیروی اکستروژن را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش تنش تسلیم ماده‌ی اولیه نیروی اکستروژن معکوس جدید به صورت خطی افزایش می‌یابد. در مورد اثر پارامترهایی چون ضریب اصطکاک و ارتفاع شمال اولیه باید گفت که تاثیر این پارامترها مشابه تنش سیلان متوسط است و از آوردن آن‌ها صرف نظر شده است.

همان‌طور که بیان شد توان برایند تغییر شکل را می‌توان 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 است اثر پارامترهای تغییر شکل را روی هرکدام از این توان‌ها بررسی کرد تا تصویری واضح از فرایند بدست آید. لازم به ذکر است که با توجه به نوع کاربرد و نتایج مورد انتظار می‌توان از نتایج ارائه شده استفاده کرد. مثلاً برخی اوقات راندمان بیشینه مورد نظر است. در این موقعی باید بیشترین میزان توان تغییر شکل بدست آمده و سایر توان‌ها کمینه شوند. ممکن است بهمود ریز ساختار، بیشتر مدد نظر باشد و محدودیتی از نظر توان کلی فرایند وجود نداشته باشد اینجاست که باید توان انفصال سرعت بیشینه شود تا برش‌های شدید مرزدانه‌های جدید و دانه‌های کوچکتری ایجاد کند و خواص مکانیکی بهتری حاصل شود [15].

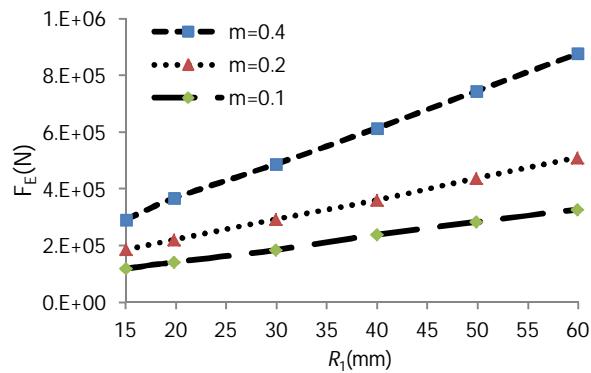
شکل 11 تاثیر شعاع شمال اولیه روی توان تغییر شکل، انفصال سرعت، اصطکاک و توان برایند را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش شعاع شمال اولیه تا مقدار 19mm کار انفصال سرعت از کار خالص تغییر شکل بیشتر است و با گذر از این مقدار میزان کار انفصال سرعت بیشتر یعنی بازدهی کمتر خواهد شد. همان‌طور که بیان شد در موقعی مانند تغییر شکل پلاستیک شدید به دنبال انفصال سرعت بیشتر برای بهبود ریز ساختار هستیم یعنی بسته به نوع محدودیتها و انتظارات می‌توان مقدار مطلوب را به دست آورد.

شکل 12 اثر ضخامت دیواره قطعه کار اکستروژن شده روی $\dot{W}_f, \dot{W}_s, \dot{W}_{tot}$ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت قطعه کار $\dot{W}_f, \dot{W}_s, \dot{W}_{tot}$ کاهش یافته و به میزان مشخصی می‌کنند. یعنی با افزایش ضخامت قطعه کار می‌توان راندمان فرایند را افزایش داد ولی در یک محدوده مشخص این عمل تاثیری در فرایند ندارد.

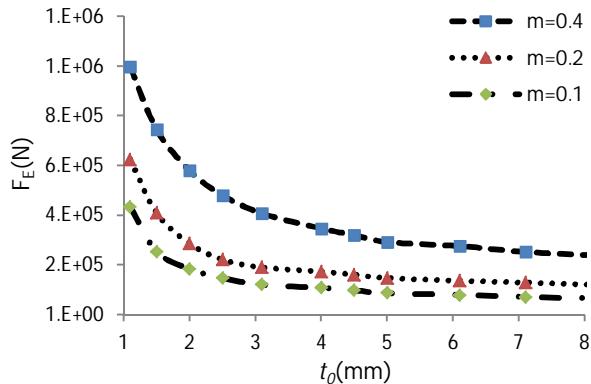
شکل 13 تاثیر شعاع قطعه کار اکستروژن شده را روی $\dot{W}_f, \dot{W}_s, \dot{W}_{tot}$ نشان می‌دهد.



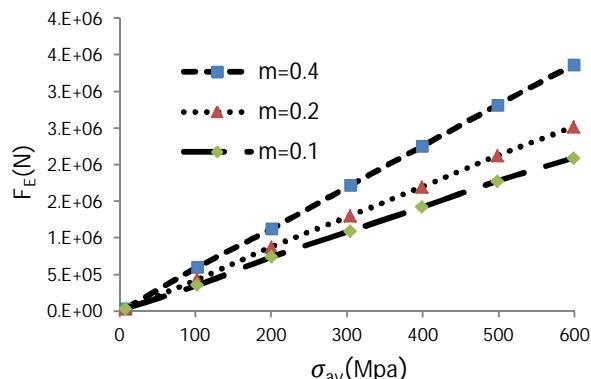
شکل 7 تاثیر شعاع شمال اولیه روی نیروی اکستروژن با ضرایب اصطکاک مختلف (برای آلمینیوم 1085) ($m=0.1, 0.2, 0.4$)



شکل 8 تاثیر شعاع قطعه کار اکستروژن شده روی نیروی اکستروژن با ضرایب اصطکاک مختلف برای آلمینیوم خالص تجاری



شکل 9 تاثیر ضخامت قطعه اکستروژن شده روی نیروی اکستروژن با ضرایب اصطکاک مختلف برای آلمینیوم خالص تجاری



شکل 10 تاثیر استحکام تسلیم متوسط قطعه کار روی نیروی اکستروژن با ضرایب اصطکاک مختلف

جدول 1 مقایسه نتایج تحلیل کران بالا و نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود برای اکستروژن معکوس جدید

شماره	R_0 mm	R_2 mm	t_0 mm	t_1 mm	H_0 mm	m	نیرو (حد بالا) (Ton)	نیرو (اجزای محدود) (Ton)
							(حد بالا) (Ton)	(اجزای محدود) (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 قطعه ای اکستروڈ شده در شکل تمامی توان ها افزایش می باند 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 نگهداشت شعاع شمشال اولیه راندمان فرایند به شدت کاهش می یابد.

شکل 14 تأثیر ضریب اصطکاک روى \dot{W}_{tot} , \dot{W}_s , \dot{W}_i , \dot{W}_f , را نشان می دهد. با افزایش ضریب اصطکاک، کار اصطکاکی \dot{W} افزایش یافته و بخش عملهای از توان تغییر شکل را به خود اختصاص می دهد. علاوه بر این مشاهده می شود ضریب اصطکاک روى سایر توان ها تاثیری ندارد.

4- مقایسه نتایج حد بالا و شبیه سازی اجزای محدود

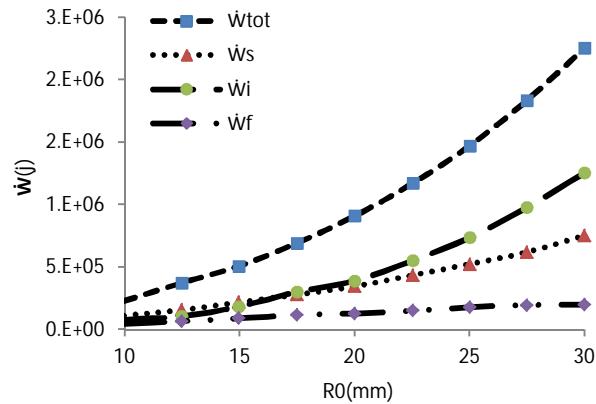
برای بررسی میزان کارامدی و تایید صحت تحلیل کران بالا نتایج آن با نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود مقایسه شده است. جدول 1 مقایسه نتایج این مقایسه را به همراه مشخصات فرایندی آنها نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود شبیه سازی های انجام شده اختلاف ناچیزی با نتایج تحلیل کران بالا دارند و این صحت نتایج حاصل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

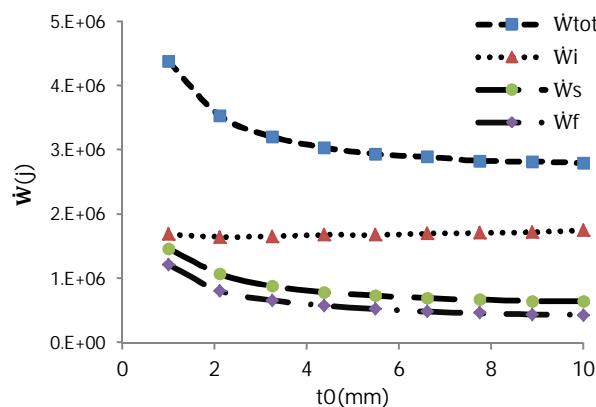
شکل 16 اختلاف نتایج حاصل از تحلیل کران بالا و تحلیل اجزای محدود را برای اندازه شمشال اولیه مختلف نشان می دهد. مشاهده می شود که با افزایش شعاع شمشال اولیه و بزرگتر شدن منطقه تغییر شکل 2 اختلاف نتایج حاصل از تحلیل کران بالا و تحلیل اجزای محدود بیشتر می شود. علاوه همان طور که قبله بیان شد با افزایش شعاع شمشال اولیه نیروی اکستروژن به صورت غیر خطی افزایش می یابد.

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

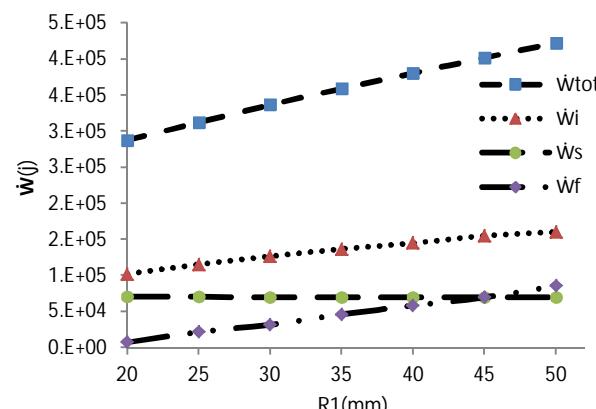
شکل 18 اختلاف نتایج حاصل از تحلیل کران بالا و اجزای محدود را برای اکستروژن معکوس جدید با ضخامت دیواره مختلف نشان می دهد.



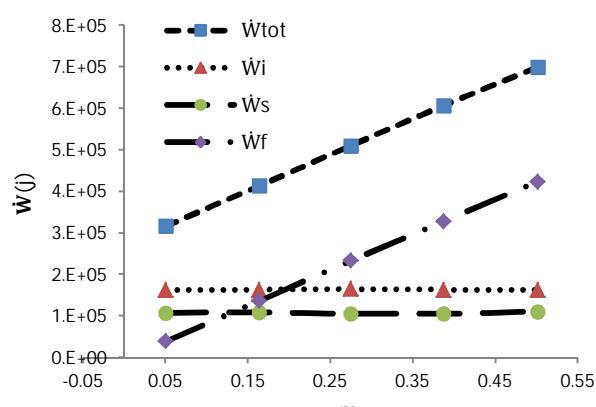
شکل 11 تأثیر شعاع شمشال اولیه روی W_{tot} , W_s , W_i , W_f



شکل 12 تأثیر ضخامت دیواره قطعه ای کار اکستروڈ شده روی W_{tot} , W_s , W_i , W_f



شکل 13 شعاع قطعه اکستروڈ شده روی W_{tot} , W_s , W_i , W_f



شکل 14 تأثیر ضریب اصطکاک بر W_{tot} , W_s , W_i , W_f

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.

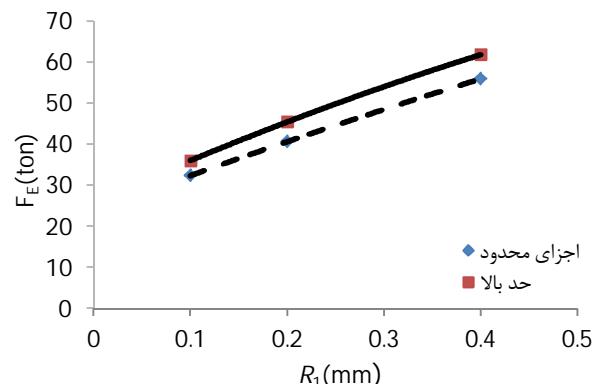
5- نتیجه گیری

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

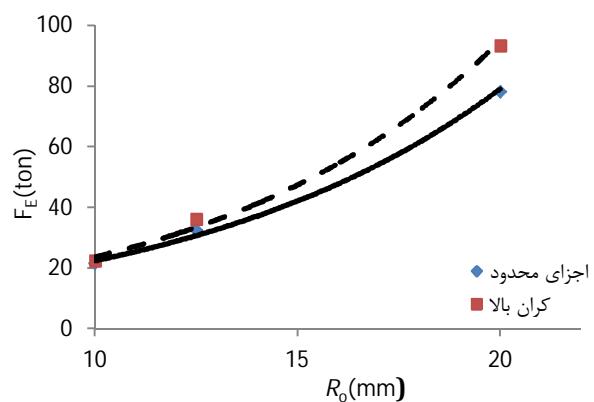
- با افزایش قطر شمال اولیه نیروی اکستروژن به صورت غیرخطی افزایش می یابد به علاوه نمی توان آن را خیلی کاهش داد چون حجم ماده لازم کاهش یافته و باید ارتفاع شمال را افزایش داد که خود این امر سبب افزایش توان اصطکاکی و کاهش راندمان فرآیند می شود. برای همین باید مقدار بهینه ای برای آن در نظر گرفت که این مقدار بهینه می تواند به عواملی چون محدودیت تنفس پرس، طول کورس آن و پارامترهای هندسی و فرایندی وابسته باشد.
- با افزایش پارامترهایی چون ضرب اصطکاک، قطر قطعه کار و ارتفاع شمال راندمان شکل دهنده به شدت کاهش می یابد.
- رابطه ضخامت قطعه کار با نیروی اکستروژن به صورت نمایی است. علاوه بر این با افزایش ضخامت قطعه کار نیروی اکستروژن به صورت نمایی کاهش می یابد و بعد از رسیدن به حد مشخصی نیروی اکستروژن ثابت می ماند.
- با افزایش قطر شمال 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 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 ۱۳٪ می باشد.

6- مراجع

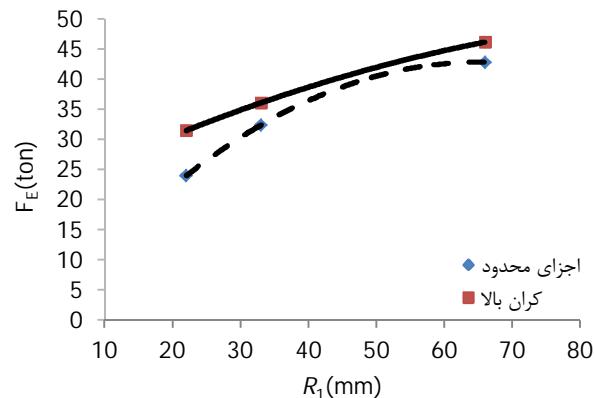
- [1] K. Abrinia, S. Orangi, Investigation of Process Parameters for the Backward Extrusion of Arbitrary-Shaped Tubes from Round Billets Using Finite Element Analysis, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 18, No. 9, pp. 1201-1208, 2009.
- [2] A. Farhoudmand, R. Ebrahimi, Analysis 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 upper-bound 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//, 1998.



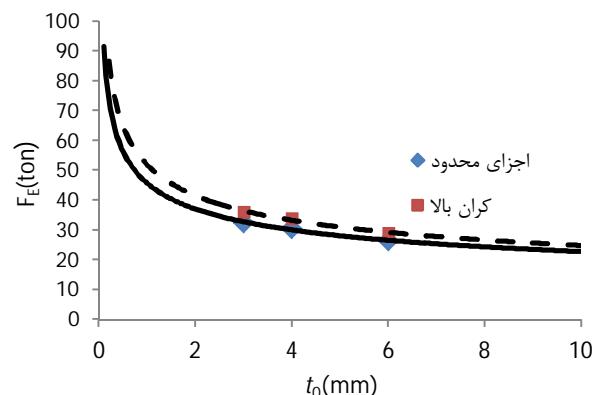
شکل 15 مقایسه تحلیل کران بالا و تحلیل اجزای محدود برای ضرایب اصطکاک متغیر



شکل 16 مقایسه تحلیل کران بالا و اجزای محدود با شعاع شمال متغیر



شکل 17 نمودار نیرو-شعاع قطعه، مقایسه تحلیل کران بالا و تحلیل اجزای محدود برای قطر قطعه متغیر



شکل 18 نمودار نیرو-ضخامت، مقایسه تحلیل کران بالا و تحلیل اجزای محدود برای ضخامت متغیر

- [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. Haghigat, 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.