



بهینه‌سازی عددی یک روش تغییر شکل پلاستیک شدید جدید تحت عنوان "اکستروژن در کانال‌های زاویه‌دار پیچشی صفحه‌ای" به روش طراحی آزمایش‌ها

محمود شمس‌برهان^{1*}، محمود مرادی²، علی شکوه‌فر³

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی - واحد مهاباد، مهاباد

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه ملایر، ملایر

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* مهاباد، کدپستی 59139-33137، m.shamsborhan@iau-mahabad.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 21 آذر 1394

پذیرش: 15 اسفند 1394

ارائه در سایت: 27 اردیبهشت 1395

کلید واژگان:

تغییر شکل پلاستیکی شدید

تحلیل اجزاء محدود

پرس در کانال‌های زاویه‌دار با مقاطع یکسان

طراحی آزمایش‌ها

مواد نانوساختار

چکیده

یکی از مناسب‌ترین روش‌های بالا به پایین برای ساخت ساختارهای نانومتری، اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید است. از پارامترهای اصلی در فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید رسیدن به میزان کرنش پلاستیکی بالا در یک سیکل است. در این تحقیق آزمایش‌های عددی بر روی روش ترکیبی فرایندهای پرس در کانال‌های زاویه‌دار با مقاطع یکسان و اکستروژن برشی ساده تحت عنوان فرایند "فرایند اکستروژن در کانال‌های زاویه‌دار پیچشی صفحه‌ای" بر اساس روش رویه پاسخ، به عنوان شیوه طراحی آزمایش‌های آماری، به منظور بررسی تأثیر پارامترها بر چگونگی تغییر پاسخ‌ها، بدست آوردن معادلات ریاضی، پیش‌بینی نتایج و بهینه‌سازی روش ترکیبی این فرایندها انجام گرفته‌اند، تا از این طریق کرنش پلاستیک بیشتری را اعمال نمود. چهار پارامتر زاویه α ، زاویه Φ ، شعاع و ضریب اصطکاک به عنوان متغیرهای ورودی فرایند در نظر گرفته شدند. درحالی که کرنش میانگین، کرنش کمینه، کرنش بیشینه و نیروی بیشینه وارد شده به سنبه به عنوان پاسخ‌های خروجی مساله لحاظ گردیدند. پس از تحلیل داده‌های شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار مینی-تب معادلات رگرسیون حاکم بر داده‌ها استخراج گردید. با انجام بهینه‌سازی شرایط بهینه بدست آمد که پارامترهای بهینه فرایند عبارتند از زاویه $\alpha=400$ ، زاویه $\Phi=450$ ، $r=2\text{mm}$ و $\mu=0.1$. صحت‌سنجی نتایج بهینه‌سازی در شرایط پارامترهای بدست‌آمده با انجام آزمایش شبیه‌سازی صورت پذیرفت. نتایج حاکی از تطابق خوب بهینه‌سازی با شبیه‌سازی و همچنین نتایج آزمایشگاهی دارد.

Numerical optimization of "Planar twist channel angular extrusion" as a novel severe plastic deformation method by DOE method

Mahmoud Shamsborhan^{1*}, Mahmoud Moradi², Ali Shokuhfar³

1- Department of Engineering, Mahabad Branch, Islamic Azad University, Mahabad, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Malayer University, Malayer, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

P.O.B. 59139-33137, Mahabad, Iran, m.shamsborhan@iau-mahabad.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 12 December 2015

Accepted 05 March 2016

Available Online 16 May 2016

Keywords:

Severe plastic deformation (SPD)

Finite element analysis (FEA)

Equal channel angular extrusion (ECAP)

Design of experiments

Nanostructured materials

ABSTRACT

The most successful "top-down" approach to produce bulk ultra-fine grained or nanostructured materials involves the use of severe plastic deformation (SPD) processing. The amount of higher effective plastic strain per pass plays a key role on the final microstructure of SPD processed samples. In the present study the numerical experiments of the combination of the equal channel angular pressing (ECAP) and simple shear extrusion (SSE) as a new process entitled "planar twist channel angular extrusion (PTCAE)" was performed based on the Response Surface Methodology (RSM), as a statistical design of experiment approach, in order to investigate the effect of parameters on the response variations, achieving the mathematical equations, predicting the results to impose higher effective plastic strain values. A and Φ angles, radius and friction coefficient was imposed as the input parameters while average, minimum and maximum effective strain and maximum load was imposed as the output parameters. Governing regression equations obtained after analysis of the simulation data by Minitab software. Optimum process parameters are: $\alpha=400$, $\Phi=450$, $r=2\text{ mm}$ and $\mu=0.1$. Verification of the optimum results using simulation experiment was done. Good agreement between simulation, experimental and optimization was occurred.

1- مقدمه

تعیین می‌شوند که اندازه دانه میانگین مهمترین نقش را دارد. استحکام

تمام مواد چندکریستالی با اندازه دانه از طریق رابطه معروف هال-پچ

خواص مکانیکی و فیزیکی تمام مواد کریستالی بر اساس چندین فاکتور

Please cite this article using:

M. Shamsborhan, M. Moradi, A. Shokuhfar, Numerical optimization of "Planar twist channel angular extrusion" as a novel severe plastic deformation method by DOE method, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 5, pp. 135-144, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

به ماده اعمال می‌شود؛ بنابراین در تحقیق حاضر دو واژه اکستروژن برشی ساده (SSE) و اکستروژن پیچشی صفحه‌ای (PTE) معادل یکدیگر هستند. از پارامترهای اصلی در فرایندهای SPD رسیدن به میزان کرنش پلاستیک مؤثر بالا در یک سیکل است. بیشترین نرخ ریزدانه‌شدن و افزایش استحکام در فرایندهای مختلف SPD در سیکل اول رخ می‌دهد و اهمیت بیشتر سیکل‌های بعدی مربوط به تشکیل ساختاری پایدارتر و یکنواختی بیشتر در ساختار می‌باشد [11-8,3]. بنابراین در سیکل اول این فرایندها هر چقدر میزان کرنش پلاستیک بالاتر باشد، میزان ریزدانه‌شدن و افزایش استحکام، بیشتر خواهد بود. از محدودیت‌های اصلی فرایندهای ECAP و SSE، محدودیت در میزان کرنش اعمالی به نمونه و نیاز به تکرار فرایند به منظور اعمال کرنش پلاستیک بیشتر به نمونه و در نتیجه افزایش زمان لازم برای ساخت یک ساختار فوق ریزدانه است.

با توجه به توضیحات فوق، یکی از راهکارها، اعمال کرنش پلاستیک در دو یا چند صفحه در یک سیکل فرایند و در نتیجه افزایش کرنش کل پلاستیک اعمالی به نمونه است. برای نیل به این هدف نیاز به تلفیق فرایندهای مختلف SPD با همدیگر است که در راستای نیل به این هدف فرایندهای SPD ترکیبی از جمله ترکیب ECAP با تغییر شکل چرخشی (ECAP⁷) [13,12]، اکستروژن در کانال‌های زاویه‌دار پیچشی (TCAP) [15,14] و برای ساخت نمونه‌های لوله‌ای ریزدانه فرایندهای فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای [16]، فرایند افزایش و کاهش تناوبی قطر [17]، فرایند اکستروژن مستقیم جدید [18] ابداع شده‌اند که از جمله مزایای آنها اعمال کرنش پلاستیک بیشتر و همچنین تغییر صفحه برشی در یک سیکل است ولی از معایب آنها می‌توان به پیچیده‌تر شدن فرایند و افزایش سطح تماس بین قالب و قطعه‌کار اشاره کرد. همچنین با دقت در این فرایندها می‌توان به این نکته پی برد که در واقع در آنها دو نوع فرایند SPD مرسوم بدنال

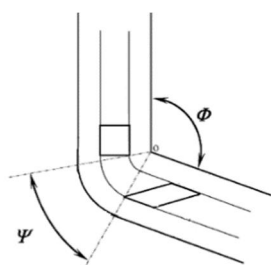


Fig. 1 Schematic of ECAP process with channel and corner angle of Φ and ψ

شکل 1 شماتیک فرایند ECAP با زاویه کانال Φ و زاویه گوشه ψ [4,3]

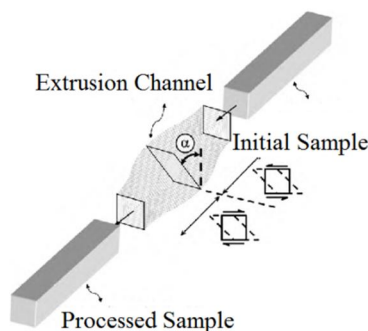


Fig. 2 Schematic of SSE process

شکل 2 شماتیک فرایند اکستروژن برشی ساده [6]

⁷Torsional-equal channel angular pressing

⁸Twist channel angular pressing

ارتباط دارد که بصورت معادله (1) بیان می‌شود:

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2} \quad (1)$$

که در آن σ_0 تنش اصطکاکی، k_y ثابت تسلیم، d اندازه دانه و σ_y تنش تسلیم می‌باشد. معادله (1) نشان می‌دهد که استحکام ماده چند کریستالی با کاهش اندازه دانه، افزایش می‌یابد که همین موضوع منجر به ایجاد علاقه شدید برای ساخت فلزات با ساختار فوق‌ریزدانه¹ شده است. استحکام به وزن فلزات فوق‌ریزدانه و نانوساختار بسیار بالاتر از استحکام به وزن همان فلز با اندازه دانه معمولی می‌باشد [1].

فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید² (SPD) روش‌هایی از شکل‌دهی فلزات هستند که با استفاده از آنها می‌توان کرنش بسیار بالایی را به یک قطعه بالک اعمال نمود بدون اینکه کاهش قابل‌ملاحظه‌ای در ابعاد کلی قطعه ایجاد شود [1]. اساس شیوه تغییر شکل پلاستیک شدید بر پایه افزایش شدید چگالی نابجایی‌ها، تشکیل دیوارهای متراکم از نابجایی‌ها و تبدیل این دیوارها به مرزدانه‌های جدید می‌باشد. مواد تولید شده با این روش معمولاً دارای اندازه دانه‌هایی در محدوده 100-1000 نانومتر می‌باشند، ولی دارای ساختارهایی ریزتر از دانه مانند دانه‌های فرعی³ می‌باشند که غالباً ابعادشان کوچکتر از 100 نانومتر می‌باشد و آنها را مواد نانوساختار می‌نامند [2].

از روش‌های مرسوم فرایندهای SPD، پرسکاری در کانال‌های زاویه‌دار با مقاطع یکسان⁴ (ECAP) است که شماتیک آن در شکل 1 نشان داده شده است. از فاکتورهای اصلی مؤثر در فرایند ECAP زاویه قالب و زاویه گوشه است. ایواهاشی و همکارانش با ارائه یک آنالیز هندسی با در نظر گرفتن یک المان مربعی قبل و بعد از تغییر شکل که به یک متوازی‌الاضلاع تبدیل می‌شود، مقدار کرنش را محاسبه نمودند و رابطه‌ای به صورت معادله (2) برای آن بیان نمودند [4,3]:

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{3}} \left\{ 2 \cot \left(\frac{\varphi + \psi}{2} \right) + \psi \operatorname{cosec} \left(\frac{\varphi + \psi}{2} \right) \right\} \quad (2)$$

از جمله مزایای اصلی فرایند ECAP، سادگی فرایند، یکنواختی در توزیع کرنش پلاستیک، قابلیت صنعتی فرایند و از جمله معایب آن عدم یکنواختی کرنش پلاستیک در سطح پایین نمونه، محدودیت در اعمال مقدار کرنش پلاستیک در هر پاس و نیاز به تکرار فرایند برای دستیابی به یک ساختار فوق‌ریزدانه است [5].

یکی از روش‌های جدید در فرایندهای SPD، روش اکستروژن برشی ساده (SSE) است که شماتیک آن در شکل 2 نشان داده شده است. در فرایند SSE با داشتن حداکثر زاویه اعوجاج برابر $\alpha = \pi/4$ ، مقدار کرنش از معادله (3) محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\gamma}{\sqrt{3}} = \frac{2 \tan(\alpha)}{\sqrt{3}} = 1.15 \quad (3)$$

که برابر مقدار محاسبه شده در قالب ECAP با مقادیر زاویه کانال، $\Phi = \pi/2$ و زاویه گوشه، $\psi = 0$ است. با توجه به معادله (3) می‌توان به مقادیر مختلفی از کرنش مؤثر بر حسب حداکثر زاویه اعوجاج (α) دست یافت [6]. در تحقیق دیگری فرایند اکستروژن برشی ساده⁵ (SSE) تحت عنوان فرایند اکستروژن پیچشی صفحه‌ای⁶ (PTE) نام‌گذاری شده است [7] که ناشی از این واقعیت است که در این فرایند، تغییر شکل پیچشی بصورت صفحه‌ای

¹ Ultra fine-grained

² Severe plastic deformation

³ Sub-grain

⁴ Equal channel angular pressing

⁵ Simple shear extrusion

⁶ Planar twist extrusion

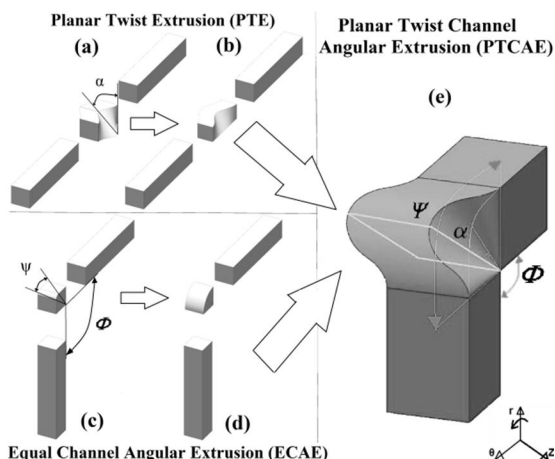


Fig. 3 Schematic of (a) bidirectional and (b) unidirectional planar twist extrusion processes, equal channel angular extrusion with (c) variable Φ and Ψ and (d) $-\pi=\psi\Phi$ and (e) planar twist channel angular extrusion

شکل 3 شماتیک فرایندهای اکستروژن پیچشی صفحه‌ای (الف) دو جهته و (ب) یک جهته، اکستروژن در کانال‌های زاویه‌دار هم‌مقطع با زوایای (پ) Ψ و Φ و (ت) $-\pi=\psi\Phi$ و (ث) اکستروژن در کانال‌های زاویه‌دار پیچشی صفحه‌ای

تابع زیر بیان می‌گردد:

$$Y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k) \quad (4)$$

در رابطه (4)، k تعداد متغیرهای مستقل است. پیدا کردن تابعی منطقی جهت ارتباط متغیرهای مستقل با پاسخ ضروری است. لذا معمولاً تابع چند جمله‌ای مرتبه دو ارائه شده در معادله (5) در روش رویه پاسخ به کار می‌رود [23]:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum_j \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (5)$$

در معادله (5) β_0 مقدار ثابت، β_i ضرایب خطی، β_{ii} ضرایب مرتبه دو، β_{ij} ضرایب تعامل اثر و ε مقدار خطای پارمترهای معادله رگرسیون بدست آمده می‌باشند.

در تحقیق حاضر زاویه α و Φ ، شعاع، و ضریب اصطکاک به عنوان متغیرهای مستقل ورودی در نظر گرفته شدند. جدول 1 چهار متغیر ورودی طرح، مقادیر کد شده و واقعی سطوح آنها را نشان می‌دهد.

برای انجام آزمایش‌ها در این تحقیق از طرح مرکب مرکزی رویه پاسخ با چهار پارامتر و هر کدام در پنج سطح استفاده گردید [23]. این طرح شامل شانزده نقطه آزمایش عاملی در رئوس مکعب و هشت نقطه آزمایش محوری به همراه یک آزمایش در مرکز مکعب می‌باشد که جمعاً 25 آزمایش طراحی شده است. جدول شماره 2 طرح ماتریسی آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

جدول 1 متغیرهای ورودی فرایند وسطوح مورد استفاده

Table 1 Input parameters of the process and their levels

سطوح					علامت	متغیر
-2	-1	0	1	2		
0	10	20	30	40	[°]	زاویه پیچش
0	0.5	1	1.5	2	[mm]	شعاع
45	67.5	90	112.5	135	[°]	زاویه کانال
0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	[-]	ضریب اصطکاک

هم انجام شده‌اند و عملاً فاقد نوآوری پایه‌ای در فرایند می‌باشند.

2- فرایند اکستروژن در کانال‌های زاویه‌دار پیچشی صفحه‌ای

اعمال کرنش پلاستیک بالاتر در یک سیکل فرایند تغییرشکل پلاستیک شدید در چند صفحه برشی بطور همزمان در یک منطقه تغییر شکل چندین هدف را می‌تواند دنبال کند که در قالب موارد زیر قابل بیان است:

- ریزدانه‌شدن بیشتر ساختار در یک سیکل ناشی از اعمال کرنش بالاتر
- کاهش تعداد سیکل‌ها و در نتیجه زمان لازم برای ساخت یک ساختار فوق‌ریزدانه یا نانوساختار
- پیچیدگی کمتر با توجه به ابعاد تنها یک منطقه تغییرشکل
- اعمال کرنش پلاستیک بطور همزمان در دو یا چند صفحه برشی و عدم نیاز به تکرار فرایند جهت تغییر صفحه برشی
- احتمال بیشتر حصول یک ساختار فوق‌ریزدانه همگن و ریزساختار یکنواخت با توجه به اعمال کرنش در دو یا چند صفحه برشی
- کاهش نیروی موردنیاز فرایند با توجه کاهش تعداد مناطق تغییر شکل و در نتیجه سطح تماس قالب و قطعه‌کار

فرایند ECAP بعنوان مؤثرترین و کاراترین فرایند SPD شناخته شده است و از طرف دیگر فرایند اکستروژن پیچشی صفحه‌ای (PTE) [7] (یا فرایند اکستروژن برشی ساده (SSE) [6, 19]) از ساده‌ترین فرایندهای ابداع شده اخیر می‌باشد. هدف از پژوهش حاضر بررسی عددی و بهینه‌سازی فرایند "اکستروژن در کانال‌های زاویه‌دار پیچشی صفحه‌ای (PTCAE)" به‌عنوان یک روش جدید تغییر شکل پلاستیک شدید از طریق ترکیب فرایندهای ECAP و PTE است که توسط شمس‌برهان و شکوه‌فر ارائه شده است [20-22]. شماتیک ترکیب این دو فرایند در شکل 3 نشان داده شده است.

با توجه به شکل 3 در فرایند SSE، کرنش برشی بصورت همزمان در اضلاع بالا و پایین سطح مقطع اعمال می‌شود (شکل 3- الف) ولی در فرایند PTCAE تنها در ضلع بالا اعمال می‌شود (شکل 3- ب). همچنین در فرایند ECAP معمولاً زاویه Ψ در حدود 12 درجه انتخاب می‌شود (شکل 3- پ) ولی در فرایند PTCAE، برابر $\Psi = \pi - \Phi$ نظر گرفته شده است (شکل 3- ت). بعبارت دیگر در فرایند PTCAE نمونه همان مسیر فرایند ECAE (مسیر $r\theta$) را طی می‌کند با این تفاوت که کرنش برشی ناشی از زاویه پیچش صفحه‌ای (α) در یک مسیر شعاعی اعمال می‌شود (در فرایند PTE این کرنش در یک مسیر مستقیم اعمال می‌شود) (شکل 4- ث). شکل هندسی فرایند PTCAE با سه پارامتر زاویه‌ای Ψ ، Φ و α مشخص می‌شود که زوایای Φ و Ψ مربوط به فرایند ECAP و زاویه α مربوط به فرایند SSE است. از نکات کلیدی در این فرایند افزایش ظرفیت تغییر شکل قطعه‌کار با اعمال کرنش پلاستیک برشی در جهات مختلف است.

3- طراحی آزمایش‌ها

روش رویه پاسخ یکی از تکنیک‌های بهینه‌سازی است که اخیراً به منظور توصیف فرایندهای مختلف و پیشنهاد پاسخ بهینه استفاده می‌شود [23]. روش رویه پاسخ چکیده‌ای از فرآیند آماری و ریاضی، جهت مدل‌سازی و پیش‌بینی نتایج متاثر از متغیرهای ورودی به کمک بهینه‌سازی پاسخ می‌باشد. روش رویه پاسخ همچنین روابط بین پاسخ‌ها و پارامترهای قابل کنترل ورودی را به خوبی بیان می‌کند [24-26]. وقتی تمام متغیرهای مستقل در حین آزمایش قابل اندازه‌گیری و کنترل باشند، رویه پاسخ با

4- شبیه‌سازی عددی فرایند PTCAE

برای بررسی عددی فرایند PTCAE از روش اجزاء محدود با استفاده از نرم‌افزار دی‌فرم 3 بعدی ویرایش پنجم استفاده شد. سرعت حرکت سنبه برابر 1 mm/s در نظر گرفته شد. قالب و سنبه بصورت صلب و نمونه بصورت تغییر شکل پذیر با مقطع مربعی و ابعاد 10×10×70 mm و از جنس مس خالص تجاری با منحنی تنش-کرنش حقیقی مطابق معادله (6) در نظر گرفته شدند [27]:

$$\sigma = 18.77 + 100.32 \left[1 - \exp\left(\frac{-\varepsilon^{0.58}}{0.7}\right) \right] \text{ MPa} \quad (6)$$

برای شبکه‌بندی نمونه از المان‌های چهاروجهی استفاده شد. با تغییر اندازه شبکه و بررسی نتایج نیرو و کرنش مشاهده شد که اندازه المان برابر 0.45 میلی‌متر و تعداد المان 20599 برای نمونه مناسب می‌باشد بطوریکه با ریزتر کردن اندازه شبکه تغییری در نتایج ایجاد نمی‌شود. نمونه‌ای از مدل شبکه‌بندی شده در حالت اولیه و تغییر شکل یافته در شکل 4 نشان داده شده است. در جدول 2 نتایج شبیه‌سازی فرایند PTCAE طبق ماتریس طراحی آزمایش‌ها ارائه شده است.

5- بحث در نتایج

هرچقدر میزان کرنش در یک سیکل فرایند SPD بالاتر باشد، سرعت ریزدانه‌شدن سریعتر و تعداد سیکل‌های مورد نیاز برای حصول یک ساختار فوق‌ریزدانه کمتر است. همچنین در صورت اعمال کرنش برشی در یک صفحه برشی (مشابه فرایند ECAP) برای رسیدن به یک ریزساختار همگن نیاز به تغییر صفحه برشی و تکرار فرایند با مسیرهای مختلف است [3]. بنابراین می‌توان گفت با اعمال کرنش برشی در صفحات برشی مختلف و به میزان بالاتر، نرخ ریزدانه‌شدن بسیار سریعتر است. از طرف دیگر برای کاهش سطح تماس قالب و قطعه‌کار و در نتیجه نیروی مورد نیاز فرایند، نیاز به کاهش تعداد مناطق تغییر شکل است. همان‌طور که در شکل 3 مشاهده می‌شود در فرایند PTCAE تنها یک منطقه تغییر شکل وجود دارد که در این منطقه کرنش پلاستیک با مقدار بالاتر و در جهات مختلف، به ماده اعمال می‌شود که همگی از مزایای فرایند جدید PTCAE است.

5-1- بررسی و تحلیل آماری کرنش میانگین نمونه‌ها

در این تحلیل از چندجمله‌ای مرتبه دو کامل استفاده گردیده است. جدول 3 آنالیز واریانس اصلاح‌شده کرنش میانگین را نشان می‌دهد. چنانچه در شکل 5 و در جدول 3 مشاهده می‌گردد، با احتساب $\alpha = 0.05$ ، فقط پارامترهای اصلی مؤثر به ترتیب زوایای α و ϕ شناخته می‌شوند. به عبارت دیگر ضریب اصطکاک و شعاع گوشه نمونه‌ها در کرنش میانگین تأثیر ندارند.

دیده می‌شود که معادله رگرسیون حاصله، مؤثر و آزمون عدم برازش¹، غیر مؤثر برآورد گردیده‌اند. در بهترین حالت تحلیل، می‌بایست رگرسیون مؤثر و عدم برازش غیر مؤثر باشند، که این مطلب در این مورد گویای مؤثر بودن جملات خطی، زاویه α و ϕ می‌باشد. رابطه (7) معادله رگرسیون کرنش میانگین را بر حسب مقادیر واقعی نشان می‌دهد.

$$U_{ave} = 1.32526 + 0.27862\alpha - 0.23757\phi \quad (7)$$

همان‌طور که در شکل 5 مشاهده می‌شود با افزایش زاویه α مقدار کرنش میانگین نیز افزایش پیدا می‌کند، هر چه زاویه α بیشتر شده است

کرنش میانگین نیز افزایش پیدا کرده است، با افزایش زاویه ϕ کرنش میانگین ابتدا افزایش پیدا کرده و سپس کاهش شدیدی پیدا می‌کند.

شکل 6 رویه پاسخ کرنش میانگین را بر اساس زوایای α و ϕ نشان می‌دهد، چنانچه در این شکل شکل دیده می‌شود هرچه زاویه α بزرگتر شده مقدار کرنش میانگین نیز بیشتر شده است، دلیل این امر اینست که نمونه در اثر برخورد با زاویه تند α دچار کرنش بیشتری خواهد شد همچنین هرچه زاویه ϕ بزرگتر شده است مقدار کرنش میانگین کمتر شده است، دلیل این امر نیز به خاطر زاویه زیاد بین قالب می‌باشد. ولی باید توجه کرد که مقادیر زیاد زاویه α باعث عدم پرشدگی قالب توسط ماده می‌شود.

5-2- بررسی و تحلیل آماری کرنش بیشینه نمونه‌ها

جدول 4 آنالیز واریانس اصلاح‌شده کرنش بیشینه را نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌گردد، با احتساب $\alpha = 0.05$ ، پارامترهای اصلی مؤثر به ترتیب زوایای α و ϕ و μ (اصطکاک) شناخته می‌شوند. همچنین اثر مرتبه دوم

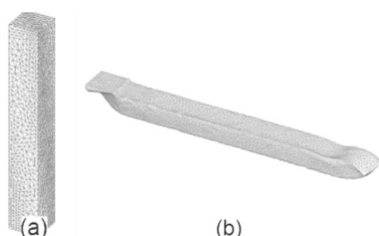


Fig. 4 (a) Initial and (b) deformed meshed sample

شکل 4 مدل شبکه‌بندی‌شده (الف) اولیه و (ب) تغییر شکل یافته

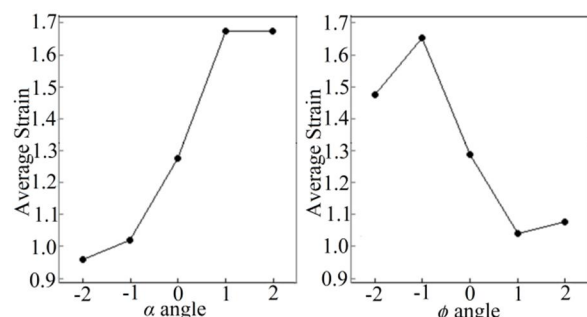


Fig. 5 The effect of α and ϕ angles on average strain

شکل 5 اثر پارامترهای زوایای α و ϕ بر کرنش میانگین

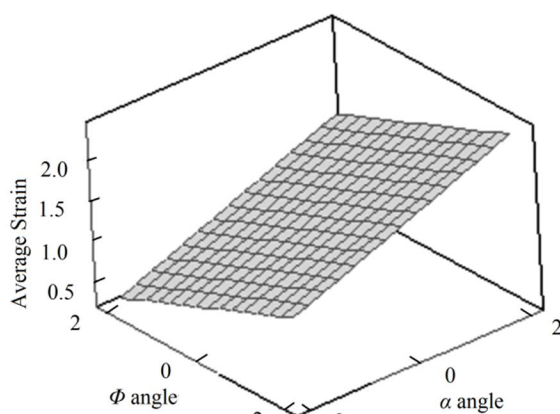


Fig. 6 Response graph of average strain in terms of α and ϕ angles

شکل 6 رویه پاسخ کرنش میانگین متأثر از زوایای α و ϕ

¹ Lack of fit

جدول 2 نتایج شبیه سازی فرایند PTCAE طبق ماتریس طراحی آزمایش ها

Table 2 Simulation results of PTCAE process according to design of experiments matrix

شماره آزمایش	پارامترهای ورودی			پارامترهای خروجی		
	ضریب اصطکاک	زاویه Φ (درجه)	شعاع (mm)	زاویه α (درجه)	نیروی بیشینه وارد شده به سنبه (N)	کرنش کرنش بیشینه میانگین
1	0.3	90	1	20	20575	1.313193
2	0.2	90	1	40	22749	1.675933
3	0.2	90	1	20	17098	1.279546
4	0.15	112.5	0.5	30	17438	1.330198
5	0.2	90	2	20	15677	1.158825
6	0.25	67.5	0.5	30	30690	2.327282
7	0.25	112.5	0.5	30	20600	1.350744
8	0.15	67.5	1.5	10	16104	1.175538
9	0.25	67.5	0.5	10	23011	1.240865
10	0.15	67.5	1.5	30	20360	1.604455
11	0.25	112.5	0.5	10	15298	0.865002
12	0.2	45	1	20	23312	1.474706
13	0.15	112.5	1.5	10	10087	0.794457
14	0.25	112.5	1.5	10	13647	0.808404
15	0.15	67.5	0.5	30	22375	1.714915
16	0.15	112.5	0.5	10	11316	0.82315
17	0.15	112.5	1.5	30	15185	1.170071
18	0.2	90	1	0	15400	0.958753
19	0.2	135	1	20	17387	1.07545
20	0.25	67.5	1.5	10	22208	1.195956
21	0.1	90	1	20	13475	1.242793
22	0.25	112.5	1.5	30	18233	1.189422
23	0.15	67.5	0.5	10	16970	1.253398
24	0.25	67.5	1.5	30	28052	2.722207
25	0.2	90	0	20	20019	1.386217

جدول 3 آنالیز واریانس اصلاح شده کرنش میانگین

Table 3 Modified analysis of variance of average strain

منبع تغییر	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	T مقدار	F مقدار	P مقدار
رگرسیون	3.2176	2	1.60882	-	24.28	0.000
زاویه α	1.8631	1	1.86310	5.303	28.12	0.000
زاویه Φ	1.3545	1	1.35455	-4.522	20.44	0.000
خطای باقیمانده	1.4576	22	0.06625	-	-	-
عدم برازش	0.8939	6	0.09396	-	1.68	0.190
مجموع	4.6753	24				
$R^2 = 68.82\%$		$R^2(\text{adj}) = 65.99\%$				

شکل 7 اثر زوایای α و Φ و اصطکاک بر کرنش بیشینه را نشان می دهد. مشاهده می شود که با افزایش زاویه α مقدار کرنش بیشینه نیز افزایش پیدا می کند. دلیل این امر این است که نمونه در اثر برخورد با زاویه تند α دچار کرنش بیشتری خواهد شد و با افزایش زاویه Φ کرنش بیشینه ابتدا افزایش پیدا کرده و سپس کاهش شدیدی پیدا می کند. همچنین در بررسی اصطکاک (μ) چنانچه مشاهده می شود با افزایش

ضریب اصطکاک و تعامل اثر زاویه α و Φ در تحلیل مؤثر شناخته شدند. شعاع گوشه نمونه ها بر کرنش بیشینه اثری ندارند. رابطه (8) معادله رگرسیون کرنش بیشینه را بر حسب مقادیر واقعی نشان می دهد.

$$U_{\max} = 1.74242 + 0.282936\alpha - 0.186018\varphi + 1.102466\mu - 0.106973\varphi^2 - (0.163493 \times \alpha \times \varphi) \quad (8)$$

جدول 4 آنالیز واریانس اصلاح شده کرنش بیشینه

Table 4 Modified analysis of variance of maximum strain

منبع تغییر	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	T مقدار	F مقدار	P مقدار
رگرسیون	3.7171	5	0.74343	-	9.55	0.00
زاویه α	1.9214	1	1.92140	4.968	24.68	0.00
زاویه Φ	0.8305	1	0.83046	-3.266	10.67	0.004
M	0.2520	1	0.25198	1.799	3.24	0.088
$\varphi \times \varphi$	0.2856	1	0.28563	-1.915	3.67	0.071
$\alpha \times \varphi$	0.4277	1	0.42768	-2.344	5.49	0.030
خطای باقیمانده	1.4793	19	0.07786	-	-	-
عدم برازش	1.0805	9	0.12006	-	3.01	0.151
مجموع	5.1965	24				
$R^2 = 71.53\%$		$R^2(\text{adj}) = 64.04\%$				

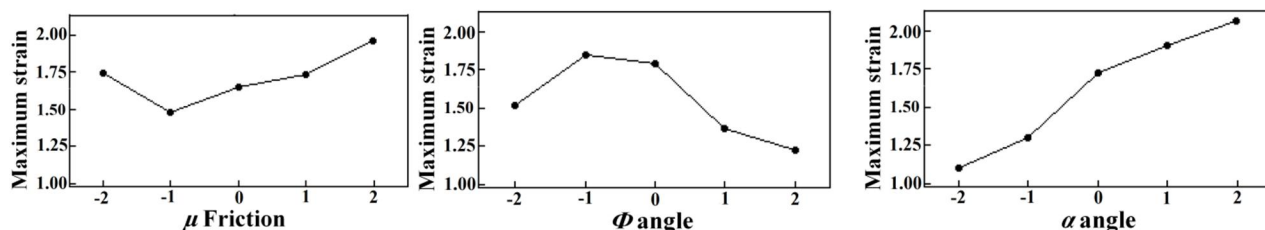


Fig. 7 The effect of α and Φ angles on the maximum strain

شکل 7 اثر زوایای α و Φ و اصطکاک بر کرنش بیشینه

شکل 10 منحنی تراز کرنش بیشینه نمونه‌ها را بر اساس زاویه α و Φ نشان می‌دهد، این شکل حاصل تصویرکردن رویه پاسخ شکل 9 بر صفحه کرنش بیشینه نمونه‌ها بر اثر تغییر زوایای α و Φ می‌باشد، معادلات حاکم بر این منحنی‌ها همان معادلات رگرسیون رابطه (8) می‌باشد، چنانچه در این دو شکل دیده می‌شود هرچه زاویه Φ بزرگتر شده مقدار کرنش بیشینه کمتر شده است، دلیل این امر اینست که نمونه در اثر برخورد با زوایای بزرگتر Φ دچار کرنش کمتری خواهد شد، همچنین هرچه زاویه α بزرگتر شده است، مقدار کرنش بیشینه نیز بزرگتر شده است. لازم بذکر است افزایش زاویه α و کاهش زاویه Φ بصورت هم‌زمان باعث عدم پرشدگی کامل قالب توسط ماده می‌شود.

شکل 11 توزیع باقی‌مانده کرنش بیشینه را نشان می‌دهد، مشاهده می‌گردد که باقی‌مانده‌ها در اطراف خط قطری پراکنده شده‌اند و توزیعی نرمال دارند، این شکل گویای این مطلب است که فرضیات اولیه استفاده شده در آنالیز واریانس و استفاده از آزمون T و F صحیح می‌باشد، لذا معادله ریاضی حاصله، مدل مناسبی برای پیش‌بینی و بررسی اثر پارامترها می‌باشد.

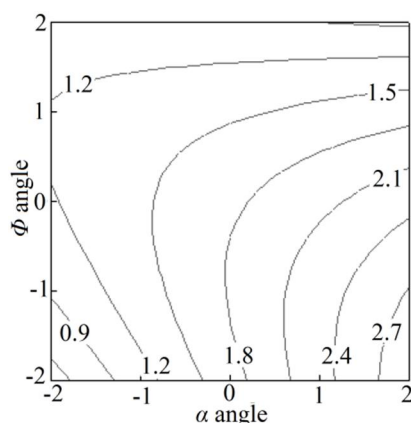


Fig. 10 Contour line of maximum strain in terms of α and Φ angles

شکل 10 منحنی تراز کرنش بیشینه بر اساس زوایای α و Φ

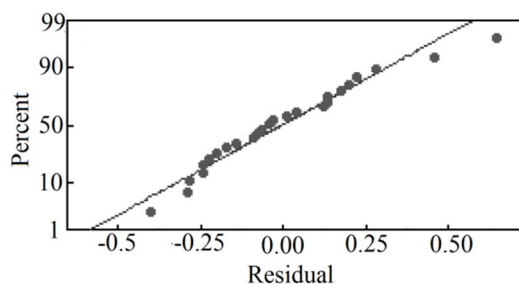


Fig. 11 The residual normal distribution of maximum strain

شکل 11 توزیع نرمال باقی‌مانده کرنش بیشینه

ضریب اصطکاک کرنش بیشینه نیز افزایش پیدا می‌کند. در حالت کلی ضریب اصطکاک بعنوان یک نیروی مقاومتی در مقابل جریان ماده، باعث افزایش کرنش در سطوح ماده که با قالب در تماس هستند، می‌شود. شکل 8 رویه پاسخ کرنش بیشینه را بر اساس تأثیر زاویه Φ و اصطکاک نشان می‌دهد، زاویه α در مقدار کد شده صفر ثابت در نظر گرفته شده است، این منحنی با توجه به معادله رگرسیون حاکم بر داده‌ها ترسیم شده است، چنانچه در شکل مشاهده می‌شود با افزایش زاویه Φ ، کرنش بیشینه کاهش می‌یابد و افزایش ضریب اصطکاک، افزایش کرنش بیشینه را در پی خواهد داشت.

شکل 9 رویه پاسخ کرنش بیشینه را بر اساس تأثیر زوایای α و Φ نشان می‌دهد، ضریب اصطکاک در مقدار کد شده صفر ثابت در نظر گرفته شده است، چنانچه در شکل دیده می‌شود با افزایش زاویه Φ ، کرنش بیشینه کاهش می‌یابد و با افزایش زاویه α ، افزایش کرنش بیشینه را در پی خواهد داشت، رفتار دوگانه زاویه Φ در سطوح کمینه و بیشینه زاویه α ناشی از تعامل اثر این دو پارامتر می‌باشد که در شکل هم دیده می‌شود.

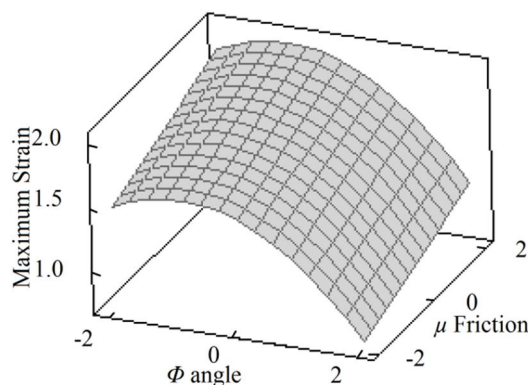


Fig. 8 Response graph of maximum strain in terms of Φ angle and friction

شکل 8 رویه پاسخ کرنش بیشینه متأثر از زاویه Φ و اصطکاک

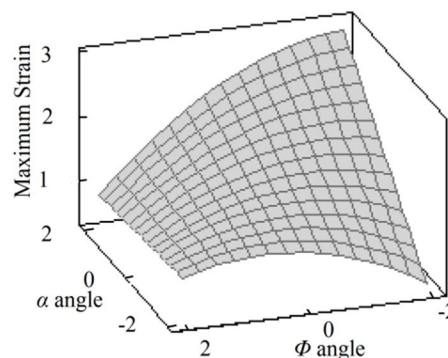


Fig. 9 Response graph of maximum strain in terms of α and Φ angles

شکل 9 رویه پاسخ کرنش بیشینه متأثر از زوایای α و Φ

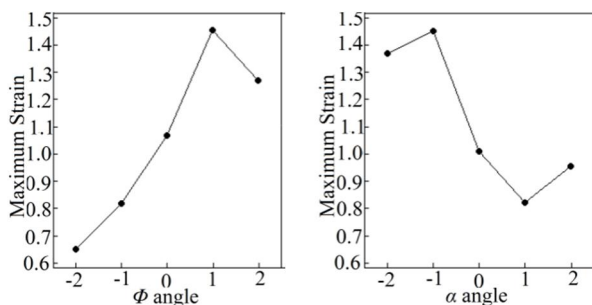
جدول 5 آنالیز واریانس اصلاح‌شده کرنش کمینه

Table 5 Modified analysis of variance of minimum strain

منبع تغییر	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	T مقدار	F مقدار	P مقدار
رگرسیون	3.1105	2	1.55526	-	20.58	0.00
زاویه α	1.6759	1	1.67590	4.709	22.17	0.00
زاویه Φ	1.4346	1	1.43462	-4.357	18.98	0.00
خطای باقیمانده	1.6629	22	0.07559	-	-	-
عدم برازش	0.6258	6	0.10430	-	1.61	0.209
مجموع	4.7734	24	-	-	-	-
$R^2 = 65.16\%$		$R^2 (adj) = 62.00\%$				

نیز افزایش پیدا می‌کند؛ دلیل این امر اینست که سنبه برای عبور نمونه از زاویه بزرگتر، می‌بایست نیروی بیشتری وارد کند. با افزایش زاویه Φ نیروی وارده به سنبه به صورت تدریجی کاهش پیدا می‌کند. همچنین در بررسی اصطکاک (μ) چنانچه مشاهده می‌شود با افزایش ضریب اصطکاک نیروی وارده به سنبه (در اثر افزایش کار اصطکاک) نیز افزایش پیدا می‌کند. در بررسی تأثیر شعاع لبه نمونه‌ها بر نیروی وارده به سنبه چنانچه مشاهده می‌شود افزایش شعاع، کاهش تدریجی نیروی سنبه را به دنبال دارد. دلیل این امر اینست که نمونه‌ها با شعاع لبه بزرگتر، تماس کمتری با گوشه‌های قالب دارد و سنبه، نیروی کمتری وارد می‌کند. در حالت کلی گوشه‌های تیز قطعه‌کار (و بدنبال آن در قالب)، باعث ایجاد تمرکز تنش در قالب و کاهش عمر مفید قالب می‌شود و در طراحی قالب باید مدنظر قرار گیرد.

شکل 14 رویه پاسخ نیروی بیشینه وارد شده به سنبه را بر اساس تأثیر زاویه Φ و اصطکاک نشان می‌دهد، چنانچه در شکل مشاهده می‌شود با افزایش ضریب اصطکاک، افزایش نیروی بیشینه وارد شده به سنبه را در پی خواهد داشت. همچنین هرچه زاویه فی بزرگتر شده مقدار نیروی

Fig. 12 The effect of α and Φ angles on minimum strainشکل 12 اثر زوایای α و Φ بر کرنش کمینه

3-5- بررسی و تحلیل آماری کرنش کمینه نمونه‌ها

در این تحلیل از چند جمله‌ای مرتبه دو کامل استفاده گردیده است. جدول 5 آنالیز واریانس کرنش کمینه را نشان می‌دهد. چنانچه در جدول 5 مشاهده می‌گردد، با احتساب $\alpha = 0.05$ ، تنها پارامترهای اصلی مؤثر به ترتیب زوایای α و Φ شناخته می‌شوند. ضریب اصطکاک و شعاع گوشه نمونه‌ها در کرنش کمینه تأثیری ندارند.

رابطه (9) معادله رگرسیون کرنش بیشینه را بر حسب مقادیر واقعی نشان می‌دهد.

$$U = 1.1051 + 0.264252\alpha - 0.244491\phi \quad (9)$$

همان‌طور که در شکل 12 مشاهده می‌شود با افزایش زاویه α مقدار کرنش کمینه نیز افزایش پیدا می‌کند، با افزایش زاویه Φ کرنش کمینه ابتدا افزایش پیدا کرده و سپس کاهش شدیدی پیدا می‌کند.

4-5- بررسی و تحلیل آماری نیروی بیشینه واردشده به سنبه

در این تحلیل نیز از چندجمله‌ای مرتبه دو کامل استفاده گردیده است. چنانچه در جدول 6 (آنالیز واریانس نیروی بیشینه سنبه) مشاهده می‌گردد، با احتساب $\alpha = 0.05$ ، پارامترهای اصلی مؤثر به ترتیب زوایای α و Φ و (μ اصطکاک) و r (شعاع لبه نمونه) هستند. همچنین تعامل اثر ضریب اصطکاک و زاویه Φ در تحلیل مؤثر شناخته شد. بعبارت دیگر تمامی پارامترهای مورد بررسی در نیروی موردنیاز فرایند تأثیر دارند. رابطه (10) معادله رگرسیون نیروی بیشینه را بر حسب مقادیر واقعی نشان می‌دهد.

$$F_{max} = 18691.1 + 2458\alpha - 937.695r - 2908.89\phi + 2337.72\mu - (900.047 \times \phi \times \mu) \quad (10)$$

شکل 13 اثر پارامترهای اصلی بر نیروی بیشینه سنبه را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، با افزایش زاویه α مقدار نیروی سنبه

جدول 6 آنالیز واریانس اصلاح‌شده نیروی بیشینه سنبه

Table 6 Modified analysis of variance of maximum load

منبع تغییر	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	T مقدار	F مقدار	P مقدار
رگرسیون	513303777	5	102660755	-	36.85	0.00
α	145002090	1	145002090	7.215	52.05	0.00
	21102507	1	21102507	-2.752	7.58	0.013
ϕ	203079908	1	203079908	-8.538	72.90	0.00
μ	131157921	1	131157921	6.862	47.08	0.00
$\phi \times \mu$	12961350	1	12961350	-2.157	4.65	0.044
خطای باقیمانده	52926661	19	2785614	-	-	-
مجموع	566230468	24	-	-	-	-
$R^2 = 90.65\%$		$R^2 (adj) = 88.19\%$				

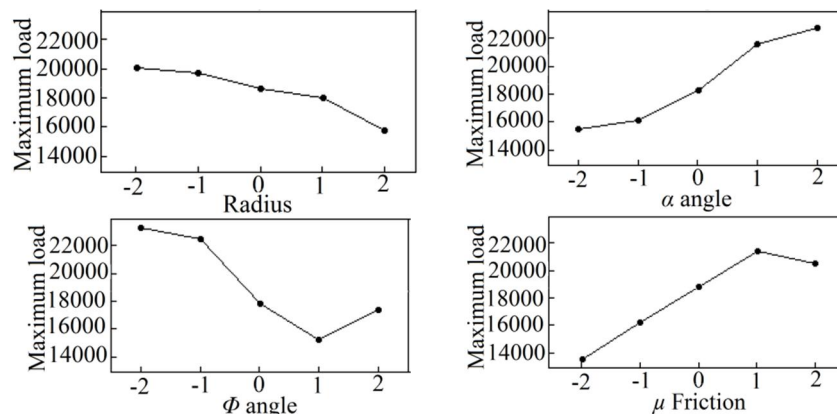
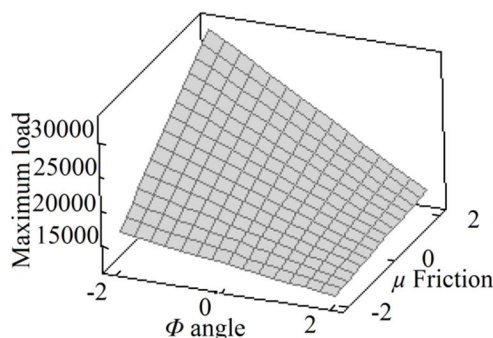


Fig. 13 The effect of main parameters on maximum load

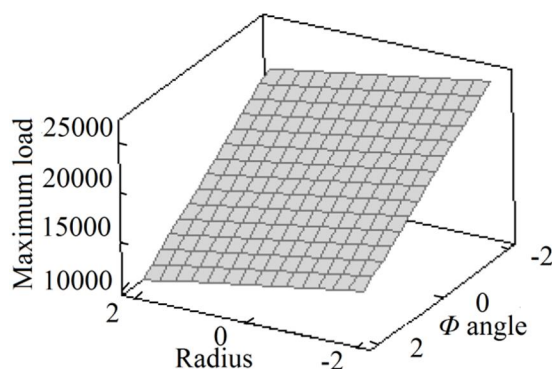
شکل 13 اثر پارامترهای اصلی بر نیروی بیشینه سنبه

6- بررسی آزمایشگاهی فرایند PTCAE

برای جلوگیری از تمرکز تنش و حذف لبه‌های تیز و افزایش استحکام،

Fig. 14 Response graph of maximum load in terms of Φ angle and friction

شکل 14 رویه پاسخ نیروی بیشینه سنبه متأثر از زاویه Φ و اصطکاک

Fig. 15 Response graph of maximum load in terms of Φ angle and the radius fillet

شکل 15 رویه پاسخ نیروی بیشینه سنبه متأثر از شعاع لبه نمونه و زاویه Φ

بیشینه کاهش پیدا کرده است، دلیل این امر این است که سنبه برای عبور نمونه از زاویه کوچکتر، نیروی کمتری وارد می‌کند، همچنین هرچه ضریب اصطکاک بزرگتر باشد مقدار نیروی بیشینه وارد شده به سنبه نیز بزرگتر است.

شکل 15 رویه پاسخ نیروی بیشینه وارد شده به سنبه بر اساس تأثیر شعاع لبه نمونه و زاویه Φ را نشان می‌دهد. در این شکل که از تغییر شعاع لبه نمونه و تغییر زاویه Φ حاصل شده است، رویه‌ای گذرانده شده و تأثیر تغییر شعاع و زاویه Φ بر نیروی بیشینه وارد شده به سنبه در فضای متغیرها را به خوبی نشان می‌دهد. چنانچه در شکل مشاهده می‌شود با افزایش شعاع، نیروی بیشینه کاهش می‌یابد و همچنین با افزایش زاویه Φ ، کاهش نیروی بیشینه وارد شده به سنبه را در پی خواهد داشت.

چنانچه در این شکل دیده می‌شود هرچه شعاع بزرگتر شده مقدار نیروی بیشینه کاهش پیدا کرده است؛ دلیل این امر اینست که نمونه‌ها با شعاع لبه بزرگتر، سطح برخورد و تماس کمتری با گوشه‌های قالب دارد، لذا سنبه، نیروی کمتری وارد می‌کند، همچنین هرچه زاویه Φ بزرگتر باشد مقدار نیروی بیشینه وارد شده به سنبه نیز کمتر خواهد شد.

5-5- بهینه‌سازی فرایند

در این بخش به بهینه‌سازی نتایج حاصله از تحلیل داده‌ها به کمک روش تابع مطلوبیت کل توسط نرم‌افزار مینی‌تب پرداخته شده است (جدول 7). پس از بهینه‌سازی شرایط بهینه بدست آمد که در جدول 8 آورده شده است. پارامترهای بهینه فرایند عبارتند از زاویه $\alpha = 40^\circ$ درجه، زاویه $\Phi = 45^\circ$ درجه، شعاع 2mm و ضریب اصطکاک 0.1 به منظور صحت‌سنجی نتیجه بهینه‌سازی در شرایط پارامترهای بدست آمده آزمایش شبیه‌سازی صورت پذیرفت. در جدول 8 این نتایج ارائه شده است که حاکی از مطلوب بودن بهینه‌سازی می‌باشد.

جدول 7 شرایط بهینه‌سازی فرایند

Table 7 Optimization criteria of the process

پارامتر	هدف	کمترین مقدار	مقدار موردنظر	بیشترین مقدار	وزن	اهمیت
کرنش میانگین	بیشینه	0.8	2.7	2.7	1	1
کرنش ماکزیمم	بیشینه	1.1	3.0	3.0	1	1
کرنش کمینه	بیشینه	0.6	2.5	2.5	1	1
نیروی ماکزیمم	کمینه	10087.5	10087.5	30690.7	1	1

جدول 8 صحنه‌سنجی نتیجه بهینه‌سازی

Table 8 Validation of the optimization results

شماره آزمایش	زاویه پیش α	زاویه کانال ϕ	شعاع r	ضریب اصطکاک μ	D	کرش میانگین	کرش ماکزیمم	کرش کمینه	نیروی ماکزیمم
1	40	45	2	0.1	0.81	پیش بینی	واقعی	2.33	17539.3
						درصد خطا		11%	9%

(نانوساختار) تأیید می‌کند، به‌طوری‌که بعد از یک پاس فرایند اندازه دانه 200-250 نانومتر بدست آمده است (شکل 18).

7- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این تحقیق یک فرایند تغییر شکل پلاستیک جدید تحت عنوان "اکستروژن در کانال‌های زاویه‌دار پیچشی صفحه‌ای" بررسی شد که در این فرایند به قطعه کار از طریق یک قالب ثابت و تنها در یک منطقه تغییر شکل، در سه صفحه برشی بطور همزمان کرش برشی و با مقدار بیشتری نسبت به فرایند ECAP اعمال می‌شود.

از روش عددی المان محدود برای بررسی این فرایند تحت زوایا، شعاع و ضرایب اصطکاک مختلف استفاده شد و با انجام بهینه‌سازی، پارامترهای بهینه فرایند بصورت زاویه $\alpha = 40^\circ$ درجه، زاویه $\phi = 45^\circ$ درجه، شعاع 2mm و ضریب اصطکاک 0.1 بدست آمدند.

قالب فرایند PTCAE با زوایای $\phi = 45^\circ$ و $\alpha = 40^\circ$ ساخته شد؛

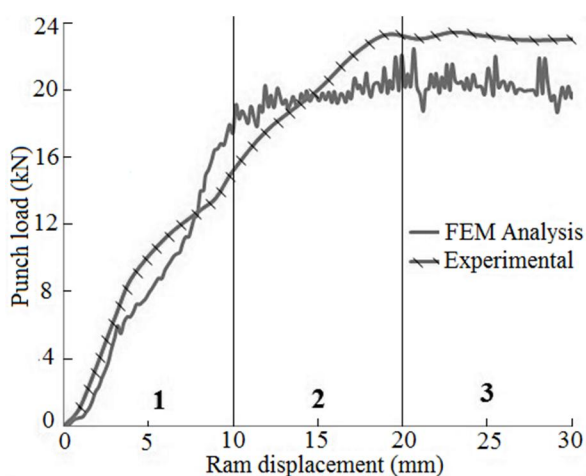


Fig. 16 Experimental and numerical results of required load of PTCAE process

شکل 16 نتایج آزمایشگاهی و عددی نیروی موردنیاز برای انجام فرایند PTCAE

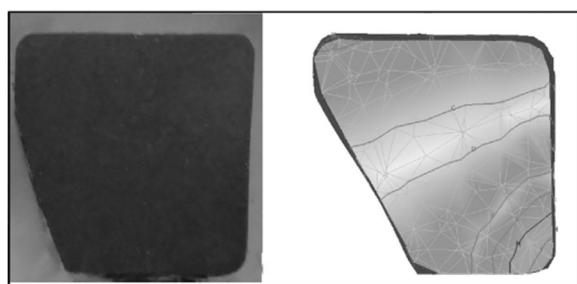


Fig. 17 Shape of sample's cross-section obtained numerically and experimentally (left) of PTCAE process

شکل 17 سطح مقطع بدست‌آمده از آزمایش و شبیه‌سازی عددی فرایند PTCAE

قالب فرایند PTCAE با زوایای $\phi = 45^\circ$ و $\alpha = 40^\circ$ ساخته شد؛ همچنین فیلت با شعاع $r=2\text{mm}$ در چهار لبه کانال در مسیر اکستروژن و بدنبال آن در قطعه کار ایجاد شد.

برای ساخت قالب و سنبه، با توجه به بحث مقاومت به سایش و استحکام قالب، از فولاد گرم‌کار (فولاد تجاری 2344) استفاده شد. از دو صفحه از جنس فولاد تجاری St37 ماشین‌کاری شده بعنوان دو فک نگهدارنده سنبه استفاده شد. نمونه‌های مورد استفاده مس خالص تجاری بود و نمونه‌ها با سطح مقطع $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ و اندازه 70mm در جهت طولی برش داده شدند و فیلت با شعاع $r=2\text{mm}$ در چهار گوشه قطعه‌کار بوجود آمد. برای انجام آزمایش از یک دستگاه پرس هیدرولیک با سرعت رام پرس برابر 1 mm/s استفاده شد.

6-1- اعتباربخشی نتایج شبیه‌سازی عددی

در این بخش نتایج عددی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و پارامتر نیروی موردنیاز فرایند اعتباربخشی شده‌اند. جزئیات بیشتر نیروی موردنیاز فرایند PTCAE در شکل 16 نشان داده شده است. نیروی مورد نیاز در فرایند PTCAE به سه مرحله تقسیم می‌شود که مرحله اول نشان‌دهنده نیروی مورد نیاز برای پرشدن نیمه اول کانال توسط ماده و به طریق مشابه مرحله دوم نشان‌دهنده نیروی مورد نیاز برای پرشدن نیمه دوم کانال توسط ماده است. در مرحله سوم نیروی مورد نیاز فرایند به حالت پایدار می‌رسد که در این مرحله تمامی کانال تغییر شکل توسط ماده پر شده است. همان‌طور که نشان داده شده است، سازگاری خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و عددی وجود دارد. نیروی بدست‌آمده از نتایج آزمایشگاهی کمی بیشتر از نیروی بدست آمده از نتایج عددی است که ناشی از این واقعیت است که در حالت آزمایشگاهی نمونه‌ها بدنبال یکدیگر فراوری شده‌اند و بدین ترتیب مقداری فشار پستی ایجاد می‌شود که باعث افزایش نیروی موردنیاز فرایند می‌شود؛ از طرف دیگر در شبیه‌سازی عددی فرض حالت پلاستیک برای ماده در نظر گرفته شده است که به نوبه خود باعث کاهش نیروی موردنیاز فرایند می‌شود. همچنین مقایسه نتایج بهینه‌سازی (جدول 8) و نتایج عددی و آزمایشگاهی (شکل 16) تطابق خوبی را نشان می‌دهد.

در شکل 17 نتایج شکل سطح مقطع نمونه بعد از یک پاس فرایند PTCAE به روش‌های آزمایشگاهی و عددی (به همراه کانتور کرش پلاستیک مؤثر) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سطح مقطع نمونه در نتایج آزمایشگاهی کمی بزرگ‌تر از نتایج عددی می‌باشد که دلیل آن ایجاد مقداری فشار پستی هنگام آزمایش به دلیل فراوری نمونه‌ها به دنبال یکدیگر است. همچنین دلیل دیگر این موضوع، شبیه‌سازی ماده در مطالعات عددی از جنس ماده پلاستیک سخت‌شونده است.

همچنین بررسی میکروساختار ماده فراوری شده با این فرایند، قابلیت بالای این فرایند را در ریزدانه کردن و بدست آوردن یک ساختار فوق‌ریزدانه

- [9] K. Peng, Y. Zhang, L. Shaw, K.W. Qian, Microstructure dependence of a Cu-38Zn alloy on processing conditions of constrained groove pressing, *Acta Materialia*, Vol. 57, No. 18, pp. 5543-5553, 2009.
- [10] E.Hosseini, M. Kazeminezhad, A hybrid model on severe plastic deformation of copper, *Computational Materials Science*. Vol. 44, No. 4, pp. 1107-1115, 2009.
- [11] K. Nakashima, Z. Horita, M. Nemoto, T.G. Langdon, Influence of channel angle on the development of ultrafine grains in equal-channel angular pressing, *Acta materialia*, Vol. 46, No. 5, pp. 1589-1599, 1998.
- [12] B. Mani, M. Jahedi, M.H. Paydar, Consolidation of commercial pure aluminum powder by torsional-equal channel angular pressing (T-ECAP) at room temperature, *Powder Technology*, Vol. 219, pp. 1-8, 2012.
- [13] B. Mani, M. Jahedi, M.H. Paydar, A modification on ECAP process by incorporating torsional deformation, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 12, pp. 4159-4165, 2011.
- [14] R. Kocich, M. Greger, M. Kurs, I. Szurman, A. Machackova, Twist channel angular pressing (TCAP) as a method for increasing the efficiency of SPD, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 23, pp. 6386-6392, 2010.
- [15] R. Kocich, J. Fiala, I. Szurman, A. Machackova, M. Mihola, Twist-channel angular pressing: effect of the strain path on grain refinement and mechanical properties of copper, *Journal of Materials Science*, Vol. 46, No. 24, pp. 7865-7876, 2011.
- [16] A. Soufi Mohammadi, M. Mosavi Mashhadi, Gh. Faraji, The effect of pass numbers over microstructure and mechanical properties of magnesium alloy of AZ31C in the tubular channel angular pressing (TCAP) at temperature of 300°C, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 126-130, 2014 (in Persian).
- [17] H. Torabzadeh kashi, Gh. Faraji, Cyclic flaring and sinking (CFS) as a new severe plastic deformation method for thin-walled cylindrical tubes, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 8, pp. 411-416, 2015 (in Persian).
- [18] A. Seyyed Nosrati, K.Abrinia, Gh. Faraji, Development of a novel forward extrusion process for producing large-diameter tubes from small billets, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 143-147, 2014 (in Persian).
- [19] N.Pardis, R. Ebrahimi, Different processing routes for deformation via simple shear extrusion (SSE), *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 23, pp. 6153-6156, 2010.
- [20] M. Shamsborhan, A. Shokuhfar, A planar twist channel angular extrusion (PTCAE) as a novel severe plastic deformation method based on equal channel angular extrusion (ECAE) method, *Proc. IMechE. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 228, No. 12, pp. 2246-2250, 2014.
- [21] A. Shokuhfar, M. Shamsborhan, Finite element analysis of planar twist channel angular extrusion (PTCAE) as a novel severe plastic deformation method, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 28, No. 5, pp. 1753-1757, 2014.
- [22] M. Shamsborhan, A. Shokuhfar, O. Nejadseyfi, J. Kakemam, M. Moradi, Experimental and numerical comparison of equal channel angular extrusion (ECAE) with planar twist channel angular extrusion (PTCAE), *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2014, DOI: 10.1177/0954406214566035.
- [23] Montgomery DC., *Design and analysis of experiments*, New York: Wiley, 2005.
- [24] Gh. Payganeh, I.Ghasemi., M. Rahmani, A. Kazemnejad, An investigation on the impact properties of nanocomposite based on polypropylene/graphene nanosheets/ nano clay using response surface methodology, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 9, pp. 271-279, 2015 (in Persian).
- [25] H. Abdollahi, R. Panahi Leavoli, R. Mahdavinnejad, V. Zal, Investigation of machinability of green and sintered iron-jet milled cast iron powder metallurgy parts, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 11, pp. 59-67, 2014 (in Persian).
- [26] M. Moradi, M. Ghoreishi, M.J. Torkamany, Modeling and optimization of Nd:YAG laser-TIG hybrid welding of stainless steel, *Lasers in Engineering*, Vol. 27, pp. 211-230, 2014.
- [27] Q. C. Nguyen, Zenji Horita, T.G. Langdon, A new constitutive relationship for the homogeneous deformation of metals over a wide range of strain. *Acta Materialia*. Vol. 52, No. 4, pp. 3555-3563, 2004.



Fig. 18 SEM picture of the processed sample after single pass of PTCAE method.

شکل 18 تصویر میکروسکوپ الکترونی روشی نمونه فرآوری شده بعد از یک پاس فرایند PTCAE

همچنین فیلت با شعاع $r=2\text{mm}$ در چهار لبه کانال در مسیر اکستروژن ایجاد شد و نتایج آزمایشگاهی سازگاری خوبی با نتایج عددی نشان داد. نتایج آزمایشگاهی قابلیت بالای این فرایند را در حصول یک ماده فوق‌ریزانه و نانوساختار را نشان داد.

8- تقدیر و تشکر

نویسندگان از حمایت مالی دانشگاه آزاد اسلامی - واحد مهاباد، مهاباد، ایران برای نوشتن این مقاله تشکر و قدردانی می‌نمایند.

9- مراجع

- [1] G. J. Raab, R.Z. Valiev, T. C. Lowe, Y.T. Zhu, Continuous processing of ultrafine grained Al by ECAPConfor, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 382, No. 2, pp. 30-34, 2004.
- [2] R. Z. Valiev, R.K. Islamgaliev, I.V. Alexandrov, Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation, *Progress in Materials Science*, Vol. 45, No. 2000, pp. 103-189, 2000.
- [3] R.Z. Valiev, T.G. Langdon, Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement, *Progress in Materials Science*, Vol. 51, No. 7, pp. 881-981, 2006.
- [4] T.G. Langdon, The principles of grain refinement in equal-channel angular pressing, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 462, No. 12, pp. 3-11, 2007.
- [5] M. A. Ranaei1, A. Afsari, S. Y. Ahmadi Brooghani, M. M. Moshksar, Microstructure, Mechanical and Electrical Properties of Commercially Pure Copper Deformed Severely by Equal Channel Angular Pressing, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 257-266, 2014 (in Persian).
- [6] N.Pardis, R. Ebrahimi, Deformation behavior in Simple Shear Extrusion (SSE) as a new severe plastic deformation technique, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 1-2, pp. 355-360, 2009.
- [7] Y. Beygelzimer, D. Prilepo, R. Kulagin, V. Grishaev, O. Abramova, V. Varyukhin, M. Kulakov, Planar twist extrusion versus twist extrusion, *Materials Processing Technology*, Vol. 211, No. 3, pp. 522-529, 2011.
- [8] F. Khodabakhshi, M. Kazeminezhad, A.H. Kokabi, Constrained groove pressing of low carbon steel: Nano-structure and mechanical properties, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 16-17, pp. 4043-4049, 2010.