



بهینه‌سازی پارامترهای هندسی موثر بر فرایند پرس در کانالهای زاویه‌دار مساوی مکرر

پیمان مشهدی کشتیبان¹، محمد زادشکویان²، قادر فرجی^{3*}

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

* تهران، صندوق پستی 11155-4563، ghfaraji@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 21 آبان 1394

پذیرش: 06 دی 1394

ارائه در سایت: 26 بهمن 1394

کلید واژگان:

پرس در کانالهای زاویه‌دار مساوی مکرر

بهینه‌سازی

المان محدود

روش گری

چکیده

در بین فرایندهای مختلف تغییر فرم پلاستیک شدید (SPD)، فرایند پرس در کانالهای زاویه‌دار مساوی (ECAP) یکی از موثرترین روش‌ها بوده که با ریز دانه کردن فلزات چند کریستالی خواص مکانیکی فلز را بالا می‌برد. در این مقاله پرس در کانالهای زاویه‌دار مساوی مکرر (ECMAP) بعنوان یکی از روش‌های موثر ECAP در تولید تسمه‌های فوق ریز دانه از جنس Al5754 مطالعه شد. مسیر C بعنوان مسیر چند پاسه در نظر گرفته شد و از آنالیز گری بعنوان روش بهینه‌سازی استفاده شد. پارامترهای هندسی بعنوان متغیرهای ورودی و ضریب ناهمگنی کرنش، کرنش پلاستیک معادل و نیروی لازم برای فرایند، بعنوان متغیرهای هدف در نظر گرفته شدند. تست‌های پیشنهادی با روش فاکتوریل بوسیله المان محدود شبیه‌سازی شدند. شبیه‌سازی‌های المان محدود با نرم‌افزار تجاری آباکوس انجام شد و نتایج بدست آمده با روشهای تئوری و تست‌های عملی صحت‌گذاری شدند. سپس با در نظر گرفتن پارامترهای ورودی و خروجی بهینه‌سازی انجام شد و نتایج بهینه برای پارامترهای ورودی مسیر C استخراج شدند. همچنین درصد تاثیرگذاری هر پارامتر، روی پارامترهای هدف بدست آمد. این نتیجه حاصل شد که در میان پارامترهای هندسی مسیر C، زاویه کانال قالب (ϕ_2) و زوایای انحنای گوشه قالب (ψ_1) بترتیب بیشترین و کمترین تاثیر را روی پارامترهای هدف دارند.

Optimization of geometrical parameters of equal channel multi-angular pressing process

Peyman Mashhadi Keshtiban¹, Mohammad Zadshakouyan¹, Ghader Faraji^{2*}

1- Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

2- 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 12 November 2015

Accepted 27 December 2015

Available Online 15 February 2016

Keywords:

ECMAP

Optimization

FEM

grey method

ABSTRACT

Equal channel angular pressing (ECAP) is one of the most efficient techniques among severe plastic deformation (SPD) methods that enhance the mechanical properties of polycrystalline metals by refining subjected grains. In this article, equal channel multi angular pressing (ECMAP) process as one of the effective ECAP methods on production of ultra-fine grained (UFG) Al5754 strips is studied. Route C is considered as a multi pressing route and grey relational analysis is used as the optimization method. Geometrical parameters were taken as input variables and strain inhomogeneity index, equivalent plastic strain and required process load were taken as the objectives. The suggested tests by full factorial method were simulated by FEM. Finite element simulations were done by ABAQUS commercial software and obtained results were validated by analytical methods and experimental tests. Then considering all input and output parameters, optimization was done and optimum values of input parameters were elicited. Also, the effectiveness of each parameter on the objective parameters was obtained. It is concluded that, among geometrical parameters of route C, die channel angle (ϕ_2) and die corner angle (ψ_1) have the maximum and minimum effectiveness respectively..

1- مقدمه

مواد فوق ریز دانه¹ (UFG) بعنوان نسل جدید از مواد با خواص مکانیکی و فیزیکی منحصر به فرد مورد توجه پژوهشگران و محققین قرار گرفته‌اند [1]. از طرفی یکی از موثرترین روش‌های تولید مواد ریز دانه اعمال تغییر فرم

پلاستیک شدید می‌باشد [2]. فرایند پرس در کانالهای زاویه‌دار مساوی² (ECAP) یکی از روش‌های مرسوم در میان روش‌های تغییر فرم پلاستیک شدید³ (SPD) است از این رو مطالعات زیادی در این حوزه انجام گرفته است. در این کار بعنوان یک مطالعه جدید و با هدف بالا بردن کارایی عملیات

2- Equal Channel Angular Pressing

3- Severe Plastic Deformation

1- Ultra Fine Grain

Please cite this article using:

P. Mashhadi Keshtiban, M. Zadshakouyan, Gh. Faraji, Optimization of geometrical parameters of equal channel multi-angular pressing process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 275-282, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

تشکیل شده رابطه 1 در مسیر C و روابط و محدودیت‌های هندسی موجود در مقالات برای روش ECAP رابطه 2 [2]، تعداد پارامترهای مستقل به سه عدد کاهش می‌یابد. رابطه بین ϕ_1 و ϕ_2 که از هندسه مثلث حاصل می‌شود در فرمول 1 آورده شده است.

$$\phi_2 = 2\phi_1 - \pi \quad (1)$$

رابطه بین ψ_1 و ψ_2 که روابط موجود بین پارامترهای هندسی در فرایند ECAP هستند در فرمول 2 آورده شده است.

$$0 < \psi_1 < \pi - \phi_1, \quad 0 < \psi_2 < \pi - \phi_2 \quad (2)$$

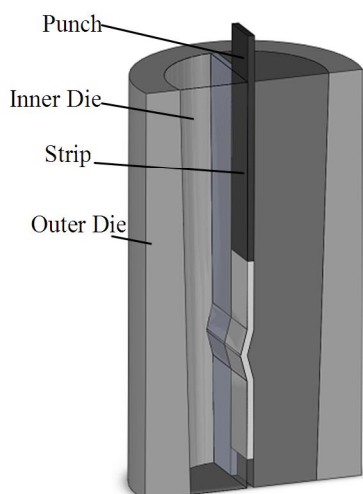


Fig 1 schematic of Die

شکل 1 شماتیک قالب

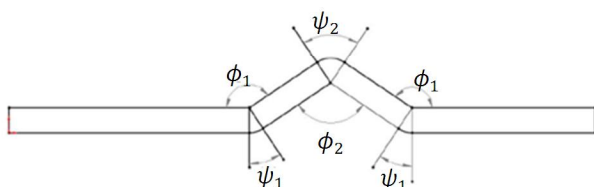


Fig 2 Die geometrical parameters

شکل 2 پارامترهای هندسی قالب

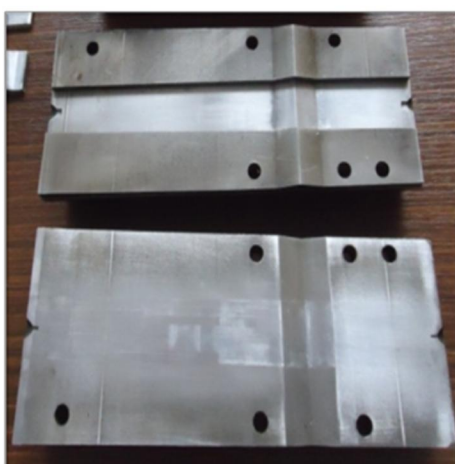


Fig 3 Manufactured die components

شکل 3 اجزاء قالب ساخته شده

ECAP و نیز بالا بردن کیفیت قطعات نهایی تسمه‌ای شکل، پرس در کانالهای زاویه‌دار مساوی مکرر¹ (ECMAP) بطور دقیق بررسی شده است. کارهای قبلی پروسه ECAP بر روی مواد مختلف و هندسه‌های مختلف سطح مقطع انجام شده است ولی سطح مقطع مستطیلی یا ورقی شکل کمتر بررسی شده است [4,3]. همچنین، بعنوان یک ماده کار سخت خوب و پرکاربرد در صنایع خودروسازی، آلایژ Al5754 به ندرت توسط پژوهشگران و متخصصین روش‌های SPD مورد مطالعه قرار گرفته است [5]. علاوه بر این پروسه ECMAP در چند نمونه از سطح مقطع‌های مختلف انجام شده است ولی برای مقاطع مستطیلی مثل ورق و تسمه مطالعه دقیقی انجام نشده است. بعضی از محققین سطح مقطع گرد و مربعی را بررسی کرده‌اند [7,6] و برخی دیگر پروسه ECMAP قطعات لوله‌ای شکل را مورد مطالعه قرار داده‌اند [9,8].

بررسی نشان می‌دهد که تاکنون پروسه ECMAP قطعات با نسبت بالای سطح جانبی به سطح مقطع، انجام نشده است. دلیل این امر بالا رفتن شدید سطح تماس قطعه کار با قالب است که موجب بالا رفتن نیروی اصطکاک شده و نیروی لازم برای انجام فرایند را بشدت بالا می‌برد.

از طرف دیگر بهینه‌سازی‌های انجام شده بر روی روش‌های مختلف SPD نشان می‌دهد که در اکثر کارهای بهینه‌سازی، پژوهشگران بیشتر روی مقایسه نتایج حاصل از مسیرهای موجود پرداخته‌اند و بررسی پارامترهای مسیرها و اثرگذاری آنها انجام نشده است [10-12]. از اینرو در این کار، پروسه ECMAP بعنوان یکی از روش‌های موثر ECAP در تولید تسمه‌های UFG از جنس Al5754 مطالعه شده است. بدین منظور مسیر C بعنوان یک مسیر مناسب برای ECMAP در نظر گرفته شد و بهینه‌سازی با آنالیز گری انجام گرفت. پارامترهای هندسی بعنوان متغیرهای ورودی بهینه‌سازی و ضریب ناهمگنی کرنش، کرنش پلاستیک معادل و نیروی لازم برای انجام فرایند، بعنوان متغیرهای هدف در بهینه‌سازی در نظر گرفته شدند. سپس تست‌های پیشنهادی با روش فاکتوریل بوسیله المان محدود شبیه‌سازی شدند. شبیه‌سازی المان محدود با نرم‌افزار آباکوس² انجام شد و نتایج بدست آمده با نتایج تئوری و تست‌های عملی مقایسه شدند؛ سپس برای تمام پارامترهای ورودی و خروجی بهینه‌سازی انجام شد و نتایج بهینه برای پارامترها استخراج شدند. همچنین درصد تاثیرگذاری هر پارامتر، روی پارامترهای هدف بدست آمد.

2- شبیه‌سازی المان محدود و کار عملی

شماتیک قالب مورد استفاده در فرایند شبیه‌سازی عددی برای مسیر C مطابق شکل 1 می‌باشد؛ بطوریکه پارامترهای موثر هندسی قالب، زاویه انحنای گوشه‌های قالب (ψ_1 و ψ_2) و زاویه کانال قالب (ϕ_1) است (شکل 2). اجزاء قالب ساخته شده در شکل 3 نشان داده شده است. قطعه کار تسمه‌ای شکل با ابعاد $3 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ بعد از عبور از اولین کانال (پاس اول) وارد کانالهای دوم (پاس دوم) و سوم (پاس سوم) می‌شود. هندسه قالب بگونه‌ای طراحی شده است که تمام نقاطی از قطعه کار که به هنگام عبور از اولین کانال، در شرایط با تنش کششی هستند، به هنگام عبور از کانال بعدی در شرایط با تنش فشاری قرار می‌گیرند.

تعداد پارامترهای هندسی در قالب شش عدد بوده ولی با توجه به تقارن در کانالهای ورودی و خروجی می‌توان به این نتیجه رسید که تعداد پارامترهای مستقل کمتر است. از طرفی با توجه به روابط موجود در مثلث

1- Equal Channel Multi Angular Pressing
2- ABAQUS

برای قطعه ECMAP شده مقادیر سختی میکرو ویکرز در پنج نقطه با فاصله مساوی در سطح مقطع قطعه کار اندازه‌گیری شد (شکل 6). برای قطعات آنیل شده قبل از تغییر فرم، سختی در سه نقطه متفاوت اندازه‌گیری شده و میانگین آن محاسبه و در نظر گرفته شد (شکل 6). از شکل 6 این نتیجه بدست می‌آید که منحنی سختی رفتار مشابهی با منحنی کرنش معادل دارد، یعنی در نزدیکی سطوح قطعه کار کمتر از نواحی میانی آن است. برای صحت‌گذاری بیشتر نتایج المان محدود از منحنی نیرو-جابجایی استفاده شد (شکل 7). بدلیل وجود سه کانال تغییر فرم، منحنی نیرو در سه نقطه افزایش شدید از خود نشان می‌دهد. بدلیل کاهش سطح مقطع اصطکاک بعد از ورود به هر کانال، منحنی ثابت مانده و بعد از کانال سوم نیرو کاهش می‌یابد. مشاهده می‌شود رفتار منحنی در هر دو حالت شبیه‌سازی و عملی مشابه است و المان محدود مطابقت خوبی با نتایج آزمایش دارد [19,17].

4- بهینه‌سازی

پس از صحت‌گذاری مدل المان محدود و در بخش بعدی تحقیق، بهینه‌سازی فرایند با در نظر گرفتن پارامترهای هندسی موثر قالب شامل: زاویه کانال قالب ϕ_1 و زاویه انحنا گوشه‌ها (ψ_1, ψ_2) بعنوان ورودی‌های فرایند و نیروی لازم، ضریب ناهمگنی کرنش و کرنش پلاستیک معادل بعنوان خروجی‌های فرایند، انجام شد. در فرایند بهینه‌سازی از روش گری برای یافتن مینیمم نیروی لازم فرایند و مینیمم ضریب ناهمگنی کرنش و همچنین ماکزیمم کرنش پلاستیک معادل استفاده شد.

4-1- پارامترهای ورودی و خروجی و سطوح آنها

هر کدام از پارامترهای هندسی (ϕ_1, ψ_2, ψ_1) که بعنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شدند به سه سطح تقسیم شدند. بدلیل اینکه مقادیر ψ_1 و ψ_2



Fig 4 Deformed strips and equivalent plastic strain contour

شکل 4 هندسه تغییر فرم تسمه‌ها و همچنین پخش کرنش پلاستیک معادل

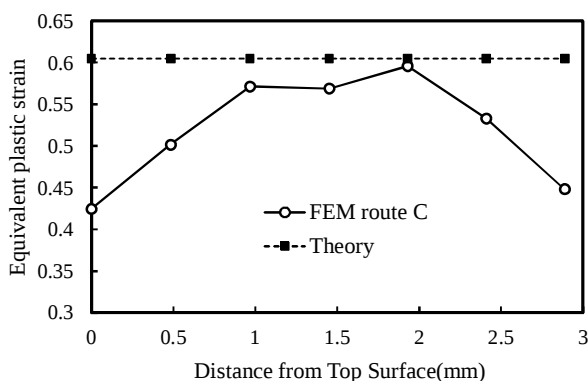


Fig 5 Equivalent plastic strain values via FEM and theory

شکل 5 مقادیر کرنش پلاستیک معادل با استفاده از المان محدود و روش تحلیلی

مقادیر پارامترهای ϕ_1, ψ_1 و ψ_2 برای شبیه‌سازی و ساخت قالب بترتیب برابر 165، 15 و 30 درجه در نظر گرفته شدند.

خواص مکانیکی و خواص شیمیایی تسمه AL5754 بعد از تست‌های کشش و کوانتومتری بترتیب در جدول 1 و جدول 2 آورده شده است. شبیه‌سازی عددی با کد المان محدود صریح آباکوس¹ انجام شد. مدل شبیه‌سازی کرنش صفحه‌ای بوده و نوع المان CPE4R در نظر گرفته شد. جهت اعمال کرنش‌های بالا در شبیه‌سازی، مش تطبیقی لاگرانژی-اولری² (ALE) استفاده شد [13]. روش پنالتی برای سطوح در تماس در نظر گرفته شد، نوع اصطکاک کولمب بوده ضریب اصطکاک 0.095 می‌باشد [15,14]. قالب و سنبه بعنوان اجزاء صلب در نظر گرفته شدند.

3- نتایج شبیه‌سازی و کار عملی

هندسه تغییر فرم تسمه‌ها و همچنین پخش کرنش پلاستیک معادل برای تسمه در شکل 4 نشان داده شده است. این نتیجه حاصل شد که ماکزیمم کرنش پلاستیک معادل برای مسیر C برابر 0.637 می‌باشد. علاوه بر این می‌توان به این نتیجه رسید که کرنش در قسمت میانی تسمه‌ها بالا بوده و با حرکت به سمت دیواره‌ها کمتر می‌شود.

برای بررسی صحت نتایج المان محدود، مقدار کرنش پلاستیک معادل از روابط تحلیلی رابطه 3 نیز محاسبه شد [16].

$$\bar{\epsilon}_T = \sum_{i=1}^3 \left[\frac{2 \cot(\phi_i/2 + \psi_i/2) + \psi_i \operatorname{cosec}(\phi_i/2 + \psi_i/2)}{\sqrt{3}} \right] \quad (3)$$

شکل 5 مقادیر کرنش پلاستیک معادل را با استفاده از المان محدود و روش تحلیلی نشان می‌دهد. از این شکل نتیجه می‌شود که: 1) در نتایج المان محدود، مقادیر کرنش پلاستیک بدست آمده در قسمت میانی تسمه، به مقادیر محاسبه شده تئوری نزدیک است و مقدار اختلاف 12% می‌باشد 2) در نتایج المان محدود مقادیر کرنش پلاستیک در نزدیک سطوح خارجی کمتر از سطوح میانی است و اختلاف بیشتری با نتایج تئوری دارد (29%). دلیل این امر این است که رابطه تئوری ارائه شده (رابطه 3)، دو فاکتور مهم خواص ماده و ضریب اصطکاک را در نظر نمی‌گیرد [17]؛ بنابراین در محل‌هایی که اثر ضریب اصطکاک بالاست (سطوح تماس تسمه با قالب) نتایج فاصله بیشتری از هم می‌گیرند. در کارهای پیشین نیز پژوهشگران برای بدست آوردن کرنش پلاستیک معادل از فرمول تئوری استفاده نموده‌اند و مشابه نتایج بدست آمده در شکل 5، بیشترین مقادیر اختلاف بین نتایج المان محدود و تئوری در نزدیکی سطوح گزارش شده است. مقادیر این اختلاف در منابع مختلف از 21% تا 60% می‌باشد [19-17].

جدول 1 خواص فیزیکی و مکانیکی تسمه AL5754

Table 1 Mechanical and physical properties of Al5754 strip

پارامترهای ماده	مدول یانگ (E)	ضریب پواسون (ν)	چگالی (ρ)
مقادیر	69 GPa	0.33	2690 kg/m ³

جدول 2 خواص شیمیایی تسمه AL5754

Table 2 Chemical composition of Al5754 strip

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
0.085	0.247	0.011	0.138	2.828	0.004
Cr	Ni	Pb	Sn	Ti	Al
0.014	0.006	0.003	0.000	0.007	Bal

1- ABAQUS/Explicit

2- Arbitrary Lagrangian Eulerian

جدول 3 پارامترهای ورودی، مقادیر سطوح مربوطه و پارامترهای هدف

Table 3 Input parameters, levels and output parameters

پارامترهای ورودی	سطوح	هدف
ϕ_1	145 155 165	حداقل نیروی لازم
ψ_1	0 17.5 35	حداقل ضریب ناهمگنی کرنش
ψ_2	0 35 70	حداکثر کرنش معادل

جدول 4 آزمایشات پیشنهادی روش فاکتوریل و نتایج شبیه سازی المان محدود برای پارامترهای خروجی

Table 4 Factorial experiments and FE simulation results for output parameters

شماره	ϕ_1	ψ_1	ψ_2	نیروی لازم (نیوتن)	ضریب ناهمگنی کرنش	کرنش معادل پلاستیک
1	0	0	0	25036.000	0.200	2.052
2	0	35	35	22593.300	0.149	1.685
3	0	70	70	23365.600	0.066	1.548
4	17.5	0	0	24941.402	0.226	2.012
5	145	17.5	35	22736.281	0.170	1.736
6	17.5	70	70	10979.800	0.069	1.656
7	35	0	0	25469.660	0.174	2.018
8	35	35	35	22966.170	0.115	1.546
9	35	70	70	22830.123	0.023	1.438
10	0	0	0	19314.957	0.113	1.159
11	0	0	25	17214.830	0.067	1.032
12	0	0	50	18527.752	0.093	1.012
13	12.5	0	0	17101.936	0.112	1.153
14	155	12.5	25	17323.801	0.091	1.028
15	12.5	50	50	18468.836	0.099	1.018
16	25	0	0	17036.201	0.141	1.217
17	25	25	25	17778.707	0.076	1.027
18	25	50	50	18252.994	0.150	1.010
19	0	0	0	8599.680	0.280	0.637
20	0	15	15	8715.956	0.345	0.639
21	0	30	30	8800.033	0.393	0.645
22	7.5	0	0	8732.609	0.282	0.632
23	165	7.5	15	8411.938	0.358	0.634
24	7.5	30	30	8660.020	0.363	0.647
25	15	0	0	8383.226	0.292	0.633
26	15	15	15	8586.690	0.327	0.636
27	15	30	30	9154.454	0.398	0.637

2-2-4- تولید نسبت گری²

با توجه به این که پارامترهای دخیل در بهینه‌سازی، هر کدام دارای واحدهای متفاوتی بوده و از یک جنس نمی‌باشند، لذا مقایسه آنها با یکدیگر صحیح نیست، بنابراین به منظور ایجاد امکان مقایسه، ابتدا باید پارامترها را نرماله نمود تا مقایسه آنها درست و معنی‌دار گردد. بر همین اساس برای نرماله کردن داده‌ها یکی از روابط 4، 5 و 6 به ترتیب زیر استفاده می‌شود [20].

در حالتی که کمترین اندازه برای پارامترها بهترین پاسخ باشد از رابطه 4:

$$X_i^*(k) = 1 - \frac{\max X_i^0(k) - X_i^0(k)}{\max X_i^0(k) - \min X_i^0(k)} \quad (4)$$

2- Grey Relational Generating

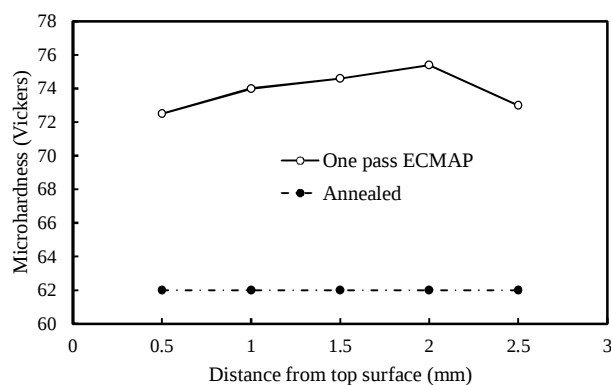


Fig 6 Hardness values for ECMAPed and annealed strips

شکل 6 مقادیر سختی برای تسمه ECMAP شده و آنیل شده

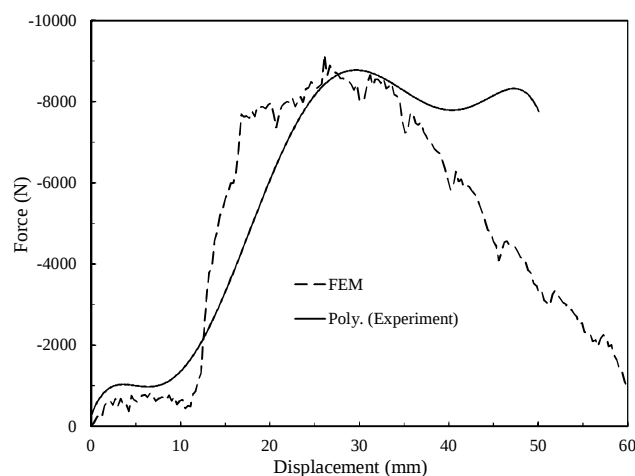


Fig 7 Force-displacement curve obtained by FEM and experimental

شکل 7 منحنی نیرو- جابجایی حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش

وابسته به مقادیر ϕ_1 و ϕ_2 است، به ازای هر مقدار از ϕ_1 و به تبع آن ϕ_2 ، محدوده مربوط به ψ_1 و ψ_2 تغییر می‌کند. به همین دلیل سطوح تخصیص یافته برای ψ_1 و ψ_2 مشابه هم نیستند.

جدول 3 سطوح انتخاب شده برای پارامترهای ورودی و مقادیر مربوط به هر سطح را نشان می‌دهد. همچنین در جدول 3 پارامترهای خروجی یا هدف نشان داده شده‌اند. جدول 4 آزمایشات پیشنهادی روش فاکتوریل را نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی المان محدود برای سه پارامتر خروجی نیروی لازم فرایند، ضریب ناهمگنی کرنش و ماکزیمم کرنش معادل در این جدول نشان داده شده است.

2-2-4- الگوریتم بهینه سازی با روش گری

2-2-4-1- آنالیز گری¹

در آنالیز گری، داده‌های با چند هدف به داده‌های تک هدف تبدیل می‌شوند تا نتیجه‌گیری و تحلیل داده‌ها پس از نرماله کردن آنها توسط نسبت گری و بدست آوردن ضریب و درجه گری آسانتر شود و بتوان تصمیم نهایی را بر اساس گراف گری رسم شده بر مبنای آنها اتخاذ نمود. بنابراین در ابتدا باید مقادیر مربوط به پارامترهای خروجی در جدول 4 نرماله شوند.

1- Grey Relational Analysis

یک نزدیکتر باشد، پارامترهای ورودی آن آزمایش به شرایط بهینه نزدیکترند. جدول 5 نشان می‌دهد که آزمایش شماره 16 بالاترین ضریب گری را دارد، بنابراین بعنوان شرایط بهینه انتخاب می‌شود.

4-2-5- درجه گری برای هر سطح³

در این مرحله درجه گری برای هر سطح توسط روابط 12 و 13 محاسبه می‌گردد. درجه گری برای هر سطح همان میانگین درجات گری می‌باشد [28-26].

$$\bar{A} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \gamma_i \quad (12)$$

$$k = \frac{m}{n} \quad (13)$$

جدول 5 مقادیر ضریب گری برای پارامترهای هدف، درجه گری و مرتبه هر شبیه‌سازی

Table 5 Grey relational coefficient for objective parameters, grey relational grade and simulation order

مرتبه	درجه گری	ضریب گری			شماره
		ماکزیمم کرنش	ضریب ناهمگنی	ماکزیمم نیروی لازم	
13	0.568	1.000	0.365	0.340	1
23	0.429	0.456	0.447	0.384	2
19	0.484	0.378	0.704	0.369	3
17	0.520	0.885	0.333	0.342	4
24	0.428	0.493	0.409	0.381	5
4	0.708	0.437	0.686	1.000	6
14	0.545	0.899	0.403	0.333	7
25	0.426	0.378	0.524	0.377	8
12	0.571	0.333	1.000	0.379	9
20	0.484	0.641	0.476	0.333	10
2	0.741	0.359	1.000	0.864	11
21	0.461	0.336	0.613	0.433	12
6	0.681	0.616	0.481	0.945	13
9	0.597	0.354	0.639	0.798	14
22	0.449	0.342	0.562	0.443	15
1	0.786	1.000	0.359	1.000	16
10	0.594	0.353	0.824	0.605	17
26	0.383	0.333	0.333	0.484	18
5	0.690	0.429	1.000	0.640	19
18	0.490	0.461	0.473	0.537	20
15	0.540	0.798	0.342	0.481	21
8	0.606	0.333	0.960	0.525	22
11	0.572	0.356	0.431	0.931	23
7	0.665	1.000	0.414	0.582	24
3	0.722	0.336	0.829	1.000	25
16	0.532	0.387	0.553	0.655	26
27	0.364	0.424	0.333	0.333	27

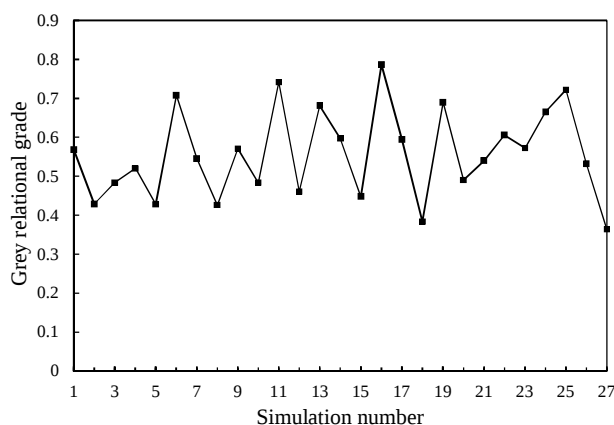


Fig 8 Graph of grey relational grade

شکل 8 درجه گری برای تمام شبیه‌سازی‌ها

و زمانی که میانگین اندازه برای پارامترها بهترین پاسخ است از رابطه 5:

$$X_i^*(k) = 1 - \frac{|X_i^0(k) - X_{ob}(k)|}{\max X_i^0(k) - \min X_i^0(k)} \quad (5)$$

و هنگامی که بیشترین اندازه برای پارامترها بهترین پاسخ است از رابطه

6:

$$X_i^*(k) = 1 - \frac{X_i^0(k) - \min X_i^0(k)}{\max X_i^0(k) - \min X_i^0(k)} \quad (6)$$

استفاده می‌شود که در این روابط پارامترهای $X_i^*(k)$ مقدار داده آنالیز گری برای i امین پاسخ در k امین آزمایش و $X_i^0(k)$ مقدار داده قبل از آنالیز و به صورت خام می‌باشد. در این کار، از آنجایی که دو پارامتر نیروی لازم و ضریب ناهمگنی کرنش هرچه کمتر باشد بهتر است، از رابطه 4 استفاده شد و همچنین در تمام فرایندهای SPD، کرنش پلاستیک معادل بهتر است که بیشترین مقدار را داشته باشد، بنابراین برای بهینه‌سازی این پارامتر از رابطه 6 استفاده شد [21].

4-2-3- تعیین ضریب گری¹

ضریب گری عددی بین صفر و یک بوده و نشانگر دوری و یا نزدیکی یک پارامتر به مقدار بهینه آن است. یعنی نزدیکترین ضریب گری بدست آمده به عدد یک، بهترین شرایط را نشان می‌دهد. برای تعیین ضریب گری از فرمول 7 استفاده می‌شود [23,22].

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \xi \Delta_{\max}}{\Delta_{oi}(k) + \xi \Delta_{\max}} \quad (7)$$

که در آن پارامترهای $\Delta_{\min}$ مینیمم تقاضا ارزش داده‌ها پس از آنالیز گری، $\Delta_{\max}$ ماکزیمم تقاضا ارزش داده‌ها پس از آنالیز گری، $\Delta_{oi}(k)$ ارزش داده پس از آنالیز گری برای i امین پاسخ در k امین آزمایش و $\xi_i(k)$ ضریب گری می‌باشند. هر یک از پارامترهای رابطه 7 به صورت جداگانه از روابط 8 تا 10 بدست می‌آید.

$$\Delta_{oi}(k) = \|X_i^*(k) - X_i^0(k)\| \quad (8)$$

$$\Delta_{\max} = \max \max \|X_i^*(k) - X_i^0(k)\| \quad (9)$$

$$\Delta_{\min} = \min \min \|X_i^*(k) - X_i^0(k)\| \quad (10)$$

لازم به ذکر است که ضریب گری همواره عددی در بازه (0 و 1) خواهد بود و باید در فرمول 7 به جای ξ جاگذاری شود. بر طبق منابع بررسی شده در این حالت مقدار بهینه ضریب گری عدد میانگین بین صفر و یک یعنی 0.33 انتخاب می‌شود [24].

4-2-4- درجه گری²

درجه گری پارامتری است که در کنار ضریب گری به آشکار شدن بهتر موقعیت داده‌ها برای دستیابی به یک جواب بهینه کمک می‌نماید. این پارامتر توسط رابطه 11 حاصل می‌گردد [25].

$$\gamma_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \xi_{ij} \quad (11)$$

که در آن γ_i درجه گری می‌باشد. جدول 5 مقادیر درجه گری را با توجه به ضرایب گری انتخاب شده نشان می‌دهد و شکل 8 شماتیک درجه گری را نشان می‌دهد.

ضریب گری بدست آمده برای هر پارامتر خروجی نشان دهنده میزان نزدیکی شرایط ورودی به حالت بهینه است. میانگین ضرایب گری در ستون درجه گری نشان داده شده است. هر چه ضریب گری در یک آزمایش به عدد

1- Grey Relational Coefficient

2- Grey Relational Grade

3- Grey relational grade for each level

تاثیرگذاری را از روابط 16 تا 19 بدست آورد. این مقدار نشان دهنده مقدار وابستگی پارامتر هدف را نشان می‌دهد. هر چه این مقدار بیشتر باشد پارامتر خروجی مربوطه وابستگی بیشتری به پارامتر ورودی دارد.

$$\bar{B} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \zeta_i \quad (16)$$

$$k = \frac{m}{n} \quad (17)$$

$$B_i = \left[\frac{N\bar{B}_{ij}}{\sum_{i=1}^m N\bar{B}_{ij}} \right] \times 100 \quad (18)$$

$$N\bar{B}_{ij} = (\text{Max}_{ij} - \text{Min}_{ij}) \quad (19)$$

که $\bar{B}$ درجه گری برای هر پارامتر، K ضریب ثابت، m تعداد شبیه سازیها و n تعداد سطوح است.

B_i درصد تاثیرگذاری پارامتر i برای سطح j و $N\bar{B}_{ij}$ مقدار ماکزیمم - مینیمم ضریب گری برای هر سطح است. جدول 8 مقادیر تاثیرگذاری هر پارامتر ورودی را روی پارامتر خروجی نشان می‌دهد.

شکل 11 تاثیرگذاری هر پارامتر ورودی را روی سه پارامتر خروجی بصورت گراف نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل نتیجه می‌شود تاثیر پارامتر ψ_2 در تمام زوایای ϕ_1 بیشتر از ψ_1 است.

4-3- نتایج و بحث

با توجه به اینکه شعاع انحنای موجود در گوشه‌های کانال قالب مقادیر متفاوتی را می‌توانند داشته باشند در این کار برای هر زاویه کانال قالب شعاع‌های مختلف در نظر گرفته شد. بررسی اثرات شعاع‌های مختلف در جدول 6 و همچنین شکل 9(a-c) نشان داد که تاثیر پارامتر ψ_2 در هر سه حالت ϕ_1 ، بیشتر از پارامتر ψ_1 است. همچنین از شکل 9(d) این نتیجه حاصل شد که در صورت بررسی اثرات هر سه فاکتور ϕ_1 ، ψ_1 و ψ_2 روی متغیرهای خروجی تاثیرگذاری ϕ_1 از بقیه بیشتر است. دلیل این امر بیشتر بودن فاصله ماکزیمم و مینیمم ضریب گری نسبت به دو متغیر دیگر است. در شکل 10 و همچنین در جدول 7 تاثیر دو پارامتر ψ_1 و ψ_2 روی تمام پارامترهای هدف بررسی شد. این نتیجه بدست آمد که بیشترین تاثیرگذاری زاویه ψ_2 روی پارامترهای هدف مربوط به زاویه 155 برای ϕ_1 می‌باشد که 89.310% می‌باشد و بیشترین تاثیرگذاری پارامتر ψ_1 روی پارامترهای هدف، زاویه 165 می‌باشد که مقدار آن 33.580% است.

تاثیرگذاری پارامترهای ورودی روی تک تک پارامتر خروجی در جدول 8

جدول 7 تاثیرگذاری هر پارامتر در شرایط بهینه

Table 7 Effectiveness of each parameter in optimum condition

تاثیرگذاری هر پارامتر	ψ_i	ϕ_1
26.656	ψ_1	145
73.344	ψ_2	
10.694	ψ_1	155
89.306	ψ_2	
33.583	ψ_1	165
66.417	ψ_2	

جدول 8 تاثیرگذاری پارامتر ورودی روی هر پارامتر خروجی

Table 8 Parameter effectiveness on each objective

ϕ_1	ψ_i	ماکزیمم نیروی لازم	ضریب ناهمگنی کرنش	ماکزیمم کرنش
145	ψ_1	12.047	27.855	46.344
	ψ_2	87.953	72.145	53.656
155	ψ_1	23.100	33.269	37.692
	ψ_2	76.900	66.731	62.308
165	ψ_1	32.523	5.521	33.048
	ψ_2	67.477	94.479	66.952

در روابط فوق $\bar{A}$ درجه گری برای هر سطح، k ضریب معادله، m تعداد آزمایشات و n تعداد سطوح می‌باشند. در جدول 6 مقدار شاخصی به عنوان "ماکزیمم - مینیمم" برای داده‌های درجه گری ذکر شده است که همان تفاضل مقادیر بیشینه و کمینه درجه گری برای هر سطح می‌باشد. این مقدار نشانگر پایداری هر پارامتر است به این معنی که بالا بودن آن برای هر پارامتر نشانه ناپایداری و پایین بودن آن نشانگر پایداری آن پارامتر در سیستم می‌باشد [28]. جدول 6 نشان می‌دهد که مقادیر ماکزیمم - مینیمم برای متغیر ψ_2 در تمام مقادیر ϕ_1 ، بیشتر از ψ_1 است. پس می‌توان نتیجه گرفت که تاثیرگذاری ψ_2 بیشتر است. از طرفی با افزایش ϕ_1 روند مشخصی در افزایش مقادیر دو پارامتر ψ_1 و ψ_2 مشاهده نمی‌شود.

4-2-6- گراف گری¹

گراف گری در حقیقت نمودار جدول مربوط به سطوح و درجه گری برای هر سطح می‌باشد که به صورت نقطه به نقطه تعیین و سپس خط گذرنده از نقاط رسم می‌گردد. گراف گری به دست آمده برای هر سه سطح به تفکیک در شکل 9 نشان داده شده است. شیب تند این نمودار نشانگر حساسیت بالا بوده که با کاهش میزان شیب مقدار آن کاهش می‌یابد و اثر پارامتر در نتیجه آزمایشات کم رنگ‌تر می‌گردد. گرافهای شکل 9 نشان می‌دهند که رفتار متغیرهای هندسی ورودی با تغییر در سطوح مختلف، بطور خطی تغییر نمی‌کند و همچنین از بررسی گرافها می‌توان به این نتیجه رسید که تاثیرگذاری پارامترهای هندسی روی هر سه پارامتر خروجی بترتیب ϕ_1 ، ψ_2 و ψ_1 می‌باشد.

4-2-7- تاثیرگذاری هر پارامتر در شرایط بهینه²

میزان تاثیرگذاری هر پارامتر در شرایط بهینه با استفاده از رابطه 14 بدست می‌آید. که در آن $N\bar{A}_{ij}$ تفاضل بین ماکزیمم مقدار و مینیمم مقدار ضریب گری برای هر سطح است (رابطه 15) و α_i نشان دهنده تاثیرگذاری هر پارامتر در شرایط بهینه است. نتایج محاسبه شده تاثیرگذاری پارامترها در جدول 7 آورده شده است. گراف تاثیرگذاری پارامترها در شکل 10 نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند اگر چه بازه تغییرات مربوط به ψ_2 دو برابر بازه تغییرات مربوط به ψ_1 است، تاثیرگذاری پارامتر ψ_2 خیلی بیشتر از پارامتر ψ_1 است.

$$\alpha_i = \left[\frac{N\bar{A}_{ij}}{\sum_{i=1}^m N\bar{A}_{ij}} \right] \times 100 \quad (14)$$

$$N\bar{A}_{ij} = (\text{Max}_{ij} - \text{Min}_{ij}) \quad (15)$$

4-2-8- تاثیرگذاری پارامتر ورودی روی هر پارامتر خروجی³

هر پارامتر ورودی روی پارامترهای هدف تاثیر می‌گذارد که می‌توان این

جدول 6 درجه گری برای هر سطح

Table 6 Grey relational grade for each level

ϕ_1	ψ_i	سطوح			متوسط درجه گری برای هر سطح
		سطح 1	سطح 2	سطح 3	
145	ψ_1	0.494	0.552	0.514	0.058
	ψ_2	0.544	0.428	0.588	0.160
155	ψ_1	0.562	0.576	0.588	0.026
	ψ_2	0.650	0.644	0.431	0.219
165	ψ_1	0.573	0.615	0.539	0.076
	ψ_2	0.673	0.531	0.523	0.150

1- Grey Relational Graph

2- Parameter effectiveness in optimum condition

3- Parameter effectiveness on each objectives

کرنش بیشترین تاثیر را از زاویه ψ_2 و زمانی که مقدار ϕ_1 برابر 165 باشد، می‌گیرد. همچنین زمانی که ϕ_1 برابر 165 درجه است، باز هم زاویه ψ_2 بیشترین تاثیرگذاری را روی دومین پارامتر هدف یعنی نیروی لازم برای انجام فرایند، می‌گذارد. ماکزیمم کرنش معادل خروجی بیشترین وابستگی را به زاویه ψ_2 و در زاویه کانال قالب (ϕ_1) برابر 145 درجه نشان می‌دهد. بهترین و بدترین شرایط آزمایش در شرایطی که مقدار ϕ_1 ثابت است در جدول 9 ارائه شده است.

5- نتیجه‌گیری

بهینه‌سازی فرایند ECGAP در تولید تسمه‌های فوق ریز دانه با استفاده از مسیر C و بر روی آلیاژ Al5754 انجام شد. برای بهینه‌سازی از روش گری که امکان پیدا کردن مقادیر بهینه و همچنین میزان تاثیرگذاری پارامترها را دارد، استفاده شد. پارامترهای هندسی قالب (زوایای انحنای قالب و زوایای

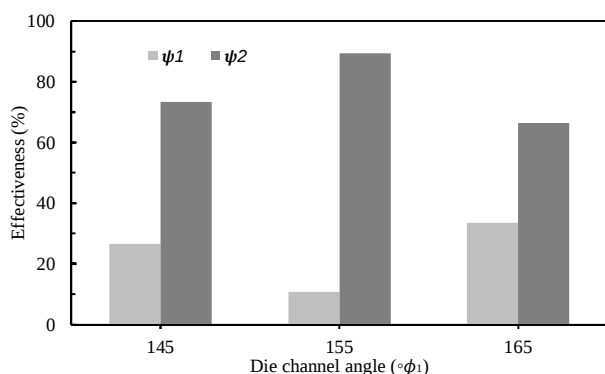


Fig 10 Parameters effectiveness in optimum condition

شکل 10 تاثیرگذاری هر پارامتر در شرایط بهینه

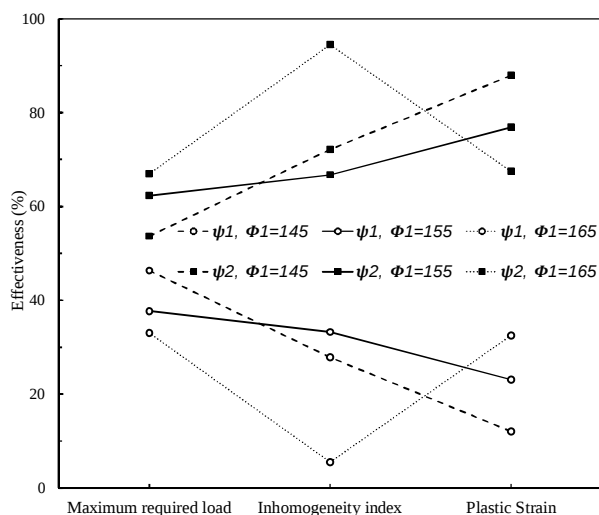


Fig 11 Graph of parameter effectiveness on each objective

شکل 11 تاثیرگذاری پارامتر ورودی روی هر پارامتر خروجی

جدول 9 بهترین و بدترین شرایط

Table 9 best and weakest conditions

ϕ_1	بهترین شرایط		بدترین شرایط	
	ψ_1	ψ_2	ψ_1	ψ_2
145	17.5	70	35	35
155	25	0	25	50
165	15	0	15	30

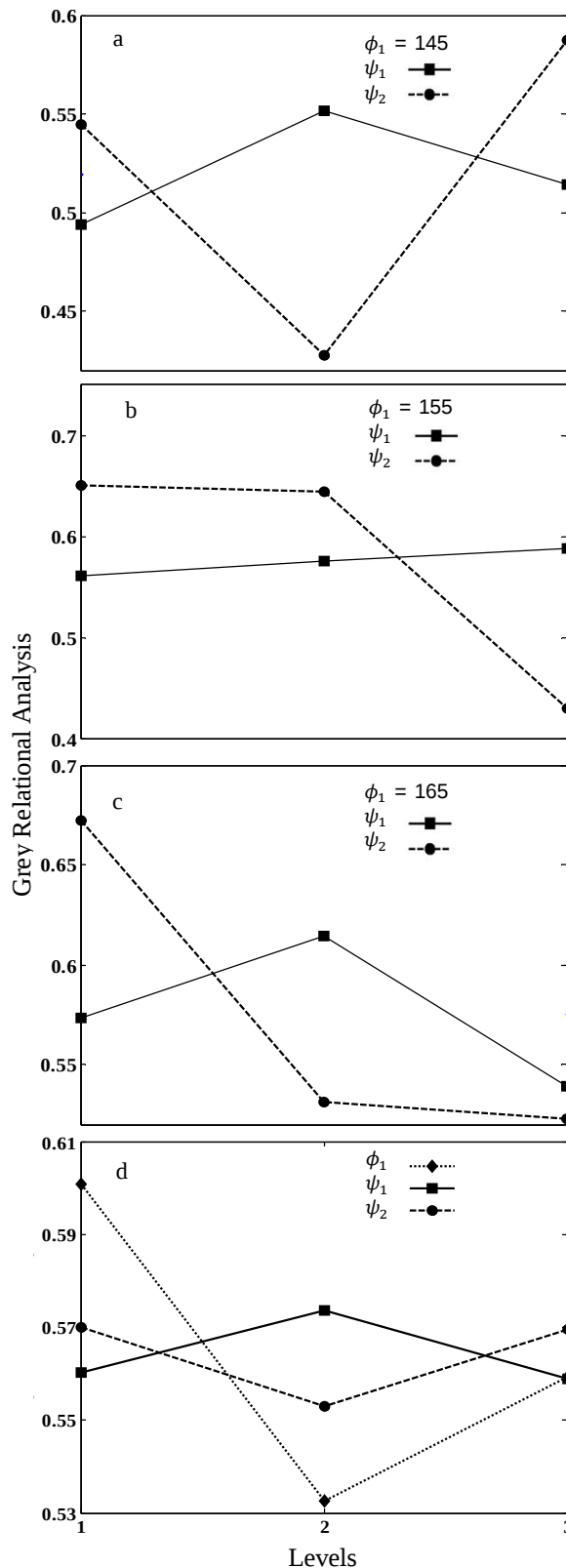


Fig 9 Grey relational graph: (a) $\phi_1=145^\circ$, ψ_1 and ψ_2 are variables, (b) $\phi_1=155^\circ$, ψ_1 and ψ_2 are variables, (c) $\phi_1=165^\circ$, ψ_1 and ψ_2 are variables and (d) ϕ_1 , ψ_1 and ψ_2 are variables

شکل 9 گراف گری: (a) $\phi_1=145^\circ$ ، ψ_1 و ψ_2 متغیر، (b) $\phi_1=155^\circ$ ، ψ_1 و ψ_2 متغیر، (c) $\phi_1=165^\circ$ ، ψ_1 و ψ_2 متغیر، (d) ϕ_1 ، ψ_1 و ψ_2 متغیر

و شکل 11 نشان داده شده است. این نتیجه حاصل شد که ضریب ناهمگنی

- [13] F. Fereshteh-Saniee, M. Asgari, M. Barati, S. M. Pezeshki, Effects of die geometry on non-equal channel lateral extrusion (NECLE) of AZ80 magnesium alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 24, No. 10, pp. 3274-3284, 2014 .
- [14] J. Jung, S. C. Yoon, H.-J. Jun, H. S. Kim, Finite element analysis of deformation homogeneity during continuous and batch type equal channel angular pressing, *Journal of materials engineering and performance*, Vol. 22, No. 11, pp. 3222-3227, 2013 .
- [15] A. Shokuhfar, O. Nejadseyfi, The influence of friction on the processing of ultrafine-grained/nanostructured materials by equal-channel angular pressing, *Journal of materials engineering and performance*, Vol. 23, No. 3, pp. 1038-1048, 2014 .
- [16] Y. Iwahashi, Z. Horita, M. Nemoto, T. G. Langdon, An investigation of microstructural evolution during equal-channel angular pressing, *Acta Materialia*, Vol. 45, No. 11, pp. 4733-4741, 1997 .
- [17] A. Nagasekhar, S. Yoon, Y. Tick-Hon, H. Kim, An experimental verification of the finite element modelling of equal channel angular pressing, *Computational Materials Science*, Vol. 46, No. 2, pp. 347-351, 2009.
- [18] H. S. Kim, Finite element analysis of equal channel angular pressing using a round corner die, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 315, No. 1, pp. 122-128, 2001 .
- [19] G. Faraji, M. Mashhadi, K. Abrinia, H. Kim, Deformation behavior in the tubular channel angular pressing (TCAP) as a noble SPD method for cylindrical tubes, *Applied Physics A*, Vol. 107, No. 4, pp. 819-827, 2012 .
- [20] U. Çaydaş, A. Haşçılık, Use of the grey relational analysis to determine optimum laser cutting parameters with multi-performance characteristics, *Optics & laser technology*, Vol. 40, No. 7, pp. 987-994, 2008 .
- [21] D. K. Panda, Modelling and optimization of multiple process attributes of electrodischarge machining process by using a new hybrid approach of neuro-grey modeling, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 25, No. 6, pp. 450-461, 2010 .
- [22] S. Khalilpourazary, P. Kashtiban, N. Payam, Optimization of Turning Operation of St37 Steel Using Grey Relational Analysis, *Journal of computational and applied research in mechanical engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 135-144, 2014 .
- [23] C.-J. Tzeng, Y.-H. Lin, Y.-K. Yang, M.-C. Jeng, Optimization of turning operations with multiple performance characteristics using the Taguchi method and Grey relational analysis, *Journal of materials processing technology*, Vol. 209, No. 6, pp. 2753-2759, 2009 .
- [24] K. Palanikumar, B. Latha, V. Senthilkumar, J. P. Davim, Analysis on drilling of glass fiber-reinforced polymer (GFRP) composites using grey relational analysis, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 27, No. 3, pp. 297-305, 2012 .
- [25] J. A. Barrios, A. Cavazos, L. Leduc, J. Ramirez, Fuzzy and fuzzy grey-box modelling for entry temperature prediction in a hot strip mill, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 26, No. 1, pp. 66-77, 2011 .
- [26] H. Lu, C. Chang, N. Hwang, C. Chung, Grey relational analysis coupled with principal component analysis for optimization design of the cutting parameters in high-speed end milling, *Journal of materials processing technology*, Vol. 209, No. 8, pp. 3808-3817, 2009 .
- [27] L. K. Pan, C. C. Wang, S. L. Wei, H. F. Sher, Optimizing multiple quality characteristics via Taguchi method-based Grey analysis, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 182, No. 1, pp. 107-116, 2007.
- [28] J. Kopac, P. Krajnc, Robust design of flank milling parameters based on grey-Taguchi method, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 191, No. 1, pp. 400-403, 2007 .

انحنای گوشه‌ها) بعنوان پارامترهای ورودی در بهینه‌سازی در نظر گرفته شدند. با توجه به تقارن موجود در قالب تعداد پارامترها از شش عدد به سه عدد کاهش پیدا کرد. سه پارامتر مهم کرنش پلاستیک معادل ایجاد شده، نیروی لازم برای فرایند و ضریب ناهمگنی کرنش بعنوان پارامترهای خروجی در فرایند بهینه‌سازی لحاظ شدند. بهینه‌سازی نشان داد که عوامل تاثیرگذار روی هر سه پارامتر خروجی بترتیب ϕ_1 ، ψ_2 و ψ_1 می‌باشند. از مقایسه تاثیرات دو پارامتر گوشه‌های انحنای $(\psi_1$ و $\psi_2)$ این نتیجه حاصل شد که پارامتر ψ_2 روی تک تک پارامترهای خروجی تاثیر بیشتری دارد. همچنین بهترین شرایط با مقادیر ورودی‌های هندسی آزمایش شماره 16 بدست آمد که در آن مقادیر ϕ_1 ، ψ_1 و ψ_2 بترتیب برابر 155، 25 و 0 درجه می‌باشد.

6- مراجع

- [1] Y. Huang, T. G. Langdon, Advances in ultrafine-grained materials, *Materials today*, Vol. 16, No. 3, pp. 85-93, 2013 .
- [2] 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 .
- [3] S. Arab, A. Akbarzadeh, The effect of equal channel angular pressing process on the microstructure of AZ31 Mg alloy strip shaped specimens, *Journal of Magnesium and Alloys*, Vol. 1, No. 2, pp. 145-149, 2013.
- [4] J. Y. Park, D. N. Lee, Deformation and annealing textures of equal-channel angular pressed 1050 Al alloy strips, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 497, No. 1, pp. 395-407, 2008 .
- [5] I. Sabirov, N. Enikeev, V. Kazykhanov, R. Valiev, M. Murashkin, Ultra-fine grained Al-Mg alloys with superior strength via physical simulation, in *Proceeding of, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, pp. 012042 .
- [6] K. Nakashima, Z. Horita, M. Nemoto, T. G. Langdon, Development of a multi-pass facility for equal-channel angular pressing to high total strains, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 281, No. 1, pp. 82-87, 2000 .
- [7] H. S. Kim, Finite element analysis of deformation behaviour of metals during equal channel multi-angular pressing, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 328, No. 1, pp. 317-323, 2002 .
- [8] G. Faraji, M. Mousavi Mashhadia, Plastic deformation analysis in parallel tubular channel angular pressing (PTCAP), *Journal of Advanced Materials and Processing*, Vol. 1, No. 4, pp. 23-32, 2013 .
- [9] G. Faraji, M. M. Mashhadi, S.-H. Joo, H. S. Kim, The role of friction in tubular channel angular pressing, *Reviews on advanced materials science*, Vol. 31, No. 1, pp. 12-18, 2012 .
- [10] H.-j. Hu, D.-f. Zhang, F.-s. Pan, Die structure optimization of equal channel angular extrusion for AZ31 magnesium alloy based on finite element method, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 20, No. 2, pp. 259-266, 2010 .
- [11] T. Suo, Y. Li, Q. Deng, Y. Liu, Optimal pressing route for continued equal channel angular pressing by finite element analysis, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 466, No. 1, pp. 166-171, 2007 .
- [12] A. Nagasekhar, Y. Tick-Hon, Optimal tool angles for equal channel angular extrusion of strain hardening materials by finite element analysis, *Computational Materials Science*, Vol. 30, No. 3, pp. 489-495, 2004 .