

بررسی پارامترهای موثر در فرایند تغییر فرم پلاستیک شدید قطعات تسمه ای شکل

پیمان مشهدی کشتیبان*

استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده

در این مطالعه پرس در کانالهای زاویه دار مساوی مکرر، به عنوان یکی از موثرترین روش های تغییر شکل پلاستیک شدید در تولید مواد فوق ریزدانه از جنس AL5754 با استفاده از روش ترکیبی تاگوچی-گری مورد بررسی قرار گرفته است. برای بدست آوردن پارامترهای پاسخ تاگوچی از نرم-افزار Deform2D استفاده گردید. با توجه به تعداد عوامل مورد بررسی، آرایه متعامد L27 تاگوچی انتخاب شد. پارامترهای پروسه و پارامترهای هندسی قالب به عنوان متغیرهای ورودی و کرنش پلاستیک تسمه خروجی، ناهمگنی کرنش تسمه خروجی و نیروی فرایند به عنوان پارامترهای هدف در نظر گرفته شدند. سپس، مقادیر پارامترهای ورودی مربوط به شرایط بهینه استخراج شدند که هدف این بهینه سازی مینیم کردن دو متغیر نیروی پروسه و ناهمگنی کرنش و ماکزیمم سازی کرنش پلاستیک بود. همچنین با استفاده از آنالیز رگرسیون، رابطه مرتبه اول بین پارامترهای ورودی و هدف بدست آمد. سپس، آنالیز واریانس جهت تعیین تاثیرگذاری هر متغیر ورودی روی پارامترهای هدف استفاده شد. نتایج نشان می دهد که به ترتیب سه پارامتر ضریب اصطکاک، زاویه کانال قالب Φ_1 ، زاویه انحنای گوشه قالب Ψ_2 بیشترین اثرگذاری را بر پارامترهای هدف دارند.

واژه های کلیدی: تغییر فرم پلاستیک شدید، کانالهای زاویه دار مساوی مکرر، تسمه، تاگوچی، آنالیز واریانس.

Investigation of the effective parameters in severe plastic deformation of strip type samples

P. Mashhadi Keshtiban

Faculty of Mechanical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran

Abstract

In this study equal channel multi angular pressing (ECMAP) process as one of the most effective severe plastic deformation (SPD) techniques in producing ultrafine grained AL5754 alloy has investigated using combined Taguchi-Grey method. Response parameters of Taguchi were obtained using Deform2D software. Due to the number of investigated factors, Taguchi L27 orthogonal array were selected. Process parameters and die geometrical parameters considered as input parameters and the plastic strain of final strip, the strain inhomogeneity of the final strip and the process force were selected as objective parameters. Then, input parameters values of optimum condition were extracted which the objective of the optimization was minimizing both process force and strain inhomogeneity and maximizing the equivalent plastic strain. Moreover, using the regression analysis, first order relation among input parameters and objectives were obtained. Then, with the aim of specifying the effectiveness of each input variable on objective parameters, analysis of variance (ANOVA) was employed. The results revealed that, three parameters namely friction coefficient (F_c), die channel angle (Φ_1) and die corner curvature angle (Ψ_2) are the most effective parameters, respectively.

Keywords: SPD, ECMAP, Strip, Taguchi, ANOVA.

۱- مقدمه

مواد فوق ریز دانه (UFG) به عنوان نسل جدید از مواد با خواص مکانیکی و فیزیکی منحصر به فرد مورد توجه پژوهشگران و محققین قرار گرفته اند [۱]. از طرفی یکی از موثرترین روشهای تولید مواد ریز دانه اعمال تغییر فرم پلاستیک شدید می باشد [۲]. فرایند پرس در کانالهای زاویه دار مساوی (ECAP) یکی از روش های مرسوم در میان روشهای تغییر فرم پلاستیک شدید (SPD) است، از این رو مطالعات زیادی در این حوزه انجام گرفته است [۳-۵].

امروزه روش طراحی آزمایشها برای بدست آوردن شرایط بهینه در مطالعات گوناگون بسیار رایج است [۶]. از سال ۱۹۸۰ روش تاگوچی در صنایع مکانیک کاربردهای گسترده ای داشته و به عنوان یک ابزار قدرتمند در زمینه بهینه سازی مورد استفاده قرار گرفته است [۷]. در روش تاگوچی، آزمایش ها به منظور دستیابی به اهداف، تعیین شرایط بهینه و بررسی تاثیر هر یک از عوامل موثر بر روی پاسخ و تخمین پاسخ تحت شرایط بهینه، تجزیه و تحلیل می شوند. در این روش نتایج

ارائه شده به روش تحلیل نسبت سیگنال به نویز (S/N) ارزیابی می شود. همچنین روش تاگوچی از آنوا^۱ جهت تحلیل نتایج استفاده می نماید. به عبارت دیگر در این روش می توان از تحلیل واریانس نیز به منظور بدست آوردن اهمیت نسبی هر یک از عوامل موثر استفاده نمود [۸].

در این کار به عنوان یک مطالعه جدید، پروسه پرس در کانالهای زاویه دار مساوی مکرر (ECMAP) به عنوان یکی از روش های موثر ECAP در تولید تسمه های UFG از جنس AL5754 مطالعه شده است. بدین منظور مسیر C به عنوان یک مسیر مناسب برای ECMAP در نظر گرفته شد و بهینه سازی با آنالیز تاگوچی-گری انجام گرفت [۹]. پارامترهای هندسی به عنوان متغیرهای ورودی بهینه سازی و ضریب ناهمگنی کرنش، کرنش پلاستیک معادل و نیروی لازم برای انجام فرایند، به عنوان متغیرهای هدف در بهینه سازی در نظر گرفته شدند. ضریب ناهمگنی کرنش نشان دهنده میزان همگن بودن کرنش در

¹ ANOVA

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: pmkmech@gmail.com

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۴/۱۱

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۳/۰۷

سطح مقطع قطعه کار نهایی بوده که نشان دهنده میزان همگنی بودن سختی در سطح مقطع قطعه کار است. بنابراین فاکتور تاثیرگذاری در کیفیت نمونه تولیدی است. کرنش پلاستیک معادل نشان دهنده میزان کرنش اعمالی به نمونه است که هر چقدر بیشتر باشد استحکام نمونه بالا می رود و از اینرو به عنوان متغیر هدف مهم در بهینه سازی در نظر گرفته شد. در فرایندهای معمول تغییر فرم پلاستیک شدید، نیروی لازم برای انجام فرایند زیاد است از اینرو یافتن شرایطی که نیروی لازم برای انجام فرایند را کم می کند از ارزش بالایی برخوردار است. بنابراین، نیرو نیز به عنوان پارامتر خروجی در بهینه سازی در نظر گرفته شد. سپس، تست های پیشنهادی روش تاگوچی با روش آلمان محدود شبیه سازی شدند. شبیه سازی آلمان محدود با نرم افزار دفورم انجام شد و نتایج بدست آمده جهت ورودی های آنالیز تاگوچی- گری مورد استفاده قرار گرفت. درصد تاثیرگذاری هر پارامتر، روی پارامترهای هدف ارزیابی شد و برای تمام پارامترهای ورودی و خروجی بهینه سازی بر اساس آنالیز گری انجام شد.

۲- شبیه سازی

برای صحت گذاری شبیه سازی آلمان محدود، قالب مورد نظر با هندسه مشخص ساخته شده و در کارهای قبلی نتایج شبیه سازی با کار عملی مقایسه شده است [۱۰-۱۳].

شماتیک مسیر C مورد استفاده در فرایند شبیه سازی عددی مطابق شکل ۱ الف می باشد. بطوریکه پارامترهای موثر هندسی قالب، زاویه انحنای گوشه های قالب (Ψ_1, Ψ_2, Ψ_3) و زاویه کانال قالب (Φ_1) می باشند. نمونه نتیجه بدست آمده برای یکی از آزمایشهای پیشنهادی تاگوچی در شکل ۱ ب نشان داده شده است.

شبیه سازی اجزای محدود با استفاده از نرم افزار دفورم که در تحلیل فرایندهای شکل دهی کاربرد دارد، انجام شده است. به دلیل هندسه قطعه کار و قالب، شبیه سازی در حالت کرنش صفحه ای دو بعدی و با فرض شرایط هم دما به خاطر پایین بودن نرخ کرنش انجام گرفت. قطعه کار با ابعاد $60\text{mm} \times 20\text{mm} \times 3\text{mm}$ در نظر گرفته شد و جنس آن آلومینیم آلیاژی AL5754 می باشد که خواص مکانیکی و شیمیایی آن در جدول های ۱ و ۲ آورده شده است که از رابطه کار سختی $\sigma = ke^n + y$ با ثوابت $n=0.3506, k=432.46$ و $y=100$ پیروی می کند. تعداد مش اولیه برابر ۵۰۳ و تعداد نودهای قطعه کار ۶۰۹ عدد است. قالب و سنبه به صورت صلب مدلسازی شدند. همچنین سرعت حرکت سنبه در داخل کانال ۵/۰ میلیمتر بر ثانیه تعیین گردید.

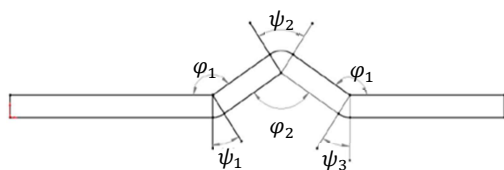
۳- طراحی آزمایش تاگوچی

هدف از بهینه سازی در این بخش به دست آوردن مطلوب ترین شرایط جهت ساخت قالب مناسب برای انجام آزمایش ECMAP می- باشد و منظور از طراحی آزمایش ها تعیین تعداد و نحوه اجرای آزمایش ها در یک فرایند بهینه سازی است که شامل تعداد زیادی پارامتر می باشد. به منظور افزایش راندمان، دقت در تحلیل ها و صرفه جویی در هزینه، باید طراحی آزمایش مناسب صورت گیرد. روش تاگوچی یکی از پرکاربردترین و اقتصادی ترین روشهای طراحی آزمایش است که هدف، تعیین اطلاعات مورد نیاز با استفاده از حداقل تعداد آزمایش و بر پایه

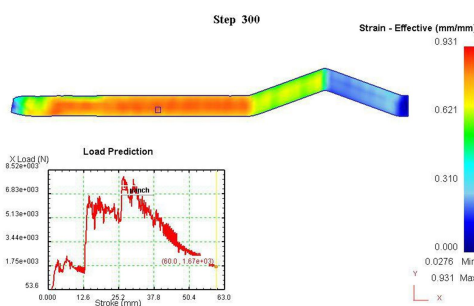
روشهای آماری می باشد، که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است.

روش تاگوچی با استفاده از جداول خاص به نام "آرایه متعامد" به طراحی آزمون پرداخته و با استفاده از این آرایه های متعامد تعداد آزمایش را کاهش می دهد [۱۴]. آرایه متعامد L27 تاگوچی برای طراحی تجربی به منظور دستیابی به تاثیر پارامترهای مستقل که ضریب اصطکاک^۱ (FC) و زوایای قالب Φ_1, Ψ_1, Ψ_2 و Ψ_3 می باشند بر عوامل خروجی که نیروی لازم سنبه^۲ (RPL)، ضریب ناهمگنی کرنش^۳ (SII) و کرنش پلاستیک معادل^۴ (PEEQ) می باشند مورد استفاده قرار گرفت. سطوح تغییرات هر پارامتر و ماتریس طراحی آزمایشها در روش تاگوچی به ترتیب در جداول ۳ و ۴ ارائه شده است.

الف



ب



شکل ۱- (الف) پارامترهای هندسی قالب و (ب) نتایج نیرو و کرنش پلاستیک معادل برای آزمایش شماره ۱۲

جدول ۱- خواص مکانیکی تسمه AL5754 [۱۱]

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

جدول ۲- خواص شیمیایی تسمه AL5754 [۱۱]

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	0.0	0.007	96.656

¹ Friction Coefficient

² Required Punch Load

³ Strain Inhomogeneity Index

⁴ Equivalent Plastic Strain

که β ضریب هر ترم و k تعداد متغیر مستقل و ϵ خطا می باشند. برای توجیه صحت مدل مرتبه اول مقدار R^2 استفاده می شود. که به صورت روابط ۲ و ۳ تعریف می شود. در این روابط SSR بیان کننده مجموع مربعات باقیمانده، SST نشان دهنده مجموع مربعات کل و SSE مجموع مربعات خطا است.

$$R^2 = \frac{\text{Sum squared residual (SSR)}}{\text{Sum squared total (SST)}} \quad (2)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\text{Sum squared error (SSE)}}{\text{Sum squared total (SST)}} \quad (3)$$

در مطالعه حاضر، نیرو، ناهمگنی توزیع کرنش و کرنش معادل به عنوان پاسخ (خروجی) و ضریب اصطکاک و زوایای قالب Ψ_1, Ψ_2 و Ψ_3 به عنوان متغیرهای مستقل (ورودی) در نظر گرفته شدند. معادلات مرتبه اول بدست آمده از آنالیز رگرسیون به صورت روابط ۴-۶ می باشند.

$$\begin{aligned} RPL = 52404.5 + 138423 \cdot FC - 3.17359\psi_1 \\ - 8.37703\psi_2 + 0.334633\psi_3 - 342.464\phi_1 \end{aligned} \quad (4)$$

$$S = 467.839 \quad R^2 = 98.32\% \quad R^2(\text{adj}) = 97.92\%$$

$$\begin{aligned} PEEQ = 9.94404 + 1.65556 \cdot FC + 0.000355556\psi_1 \\ - 0.00285\psi_2 + 0.00224444\psi_3 - 0.0569778\phi_1 \end{aligned} \quad (5)$$

$$S = 0.0555821 \quad R^2 = 95.90\% \quad R^2(\text{adj}) = 94.92\%$$

$$\begin{aligned} SII = 1.29123 - 0.481611 \cdot FC + 0.000830433\psi_1 + \\ 0.00480684\psi_2 - 0.000524026\psi_3 - 0.00708468\phi_1 \end{aligned} \quad (6)$$

$$S = 0.0465933 \quad R^2 = 60.05\% \quad R^2(\text{adj}) = 50.54$$

برای تخمین مقادیر R^2 برای پاسخ ها، مقادیر SSE و SST استفاده شد. مقادیر SSE برای نیرو، ناهمگنی توزیع کرنش و کرنش معادل به ترتیب برابر ۴۵۹۶۳۲۷، ۴۵۵۹۰ و ۰/۰۴۸۸ بدست آمد. همچنین مقادیر SST برای نیرو، ناهمگنی توزیع کرنش و کرنش معادل به ترتیب ۲۷۳۰۷۸۷۹۴، ۱۱۴۱۱۲ و ۱/۵۸۰۵۴ تعیین شد. مقادیر R^2 با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شدند. با توجه به مقادیر بدست آمده برای R^2 دو پارامتر نیرو و کرنش معادل از پیش بینی خوبی برخوردار هستند در حالی که ناهمگنی توزیع کرنش پیش بینی خوبی را انجام نمی دهد. در شکل ۲، مقادیر تعیین شده از مدل مرتبه اول با مقادیر شبیه سازی شده مقایسه شده است. همانطور که دیده می شود برای نمودار نیرو و کرنش معادل، اختلاف کمی بین مقادیر شبیه سازی و مدل پیش بینی وجود دارد.

جدول ۳- پارامترهای کنترل و سطوح آنها

ردیف	پارامترهای کنترل	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
1	FC	0.05	0.075	0.1
2	Ψ_1	0	10	20
3	Ψ_2	0	10	20
4	Ψ_3	0	10	20
5	Φ_1	150	155	160

جدول ۴- طراحی آزمایش تاگوچی با آرایه های متعامد L27

تعداد آزمایش	FC	Ψ_1	Ψ_2	Ψ_3	Φ_1
1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2
3	1	1	1	1	3
4	1	2	2	2	1
5	1	2	2	2	2
6	1	2	2	2	3
7	1	3	3	3	1
8	1	3	3	3	2
9	1	3	3	3	3
10	2	1	2	3	1
11	2	1	2	3	2
12	2	1	2	3	3
13	2	2	3	1	1
14	2	2	3	1	2
15	2	2	3	1	3
16	2	3	1	2	1
17	2	3	1	2	2
18	2	3	1	2	3
19	3	1	3	2	1
20	3	1	3	2	2
21	3	1	3	2	3
22	3	2	1	3	1
23	3	2	1	3	2
24	3	2	1	3	3
25	3	3	2	1	1
26	3	3	2	1	2
27	3	3	2	1	3

۴- نتایج و بحث

۴-۱- آنالیز رگرسیون

رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته از تجزیه و تحلیل رگرسیون تعیین می شود. تجزیه و تحلیل رگرسیون برای پیش بینی متغیر وابسته به عنوان تابعی از متغیر مستقل است. شکل کلی مدل مرتبه اول در رابطه ۱ داده شده است.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \epsilon \quad (1)$$

$$S/N = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \right] \quad (7)$$

$$S/N = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \right] \quad (8)$$

y_i مقدار پاسخ اندازه‌گیری شده در تأمین آزمایش و n تعداد تکرارهای هر آزمایش است.

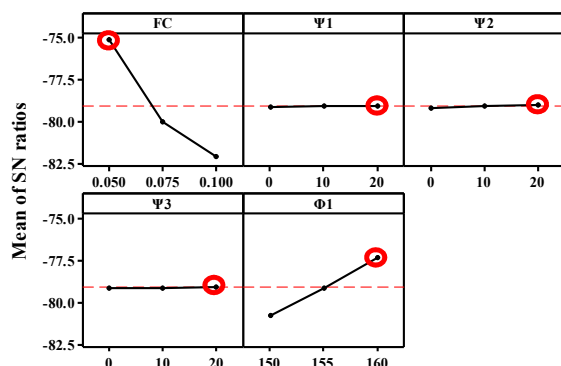
نتایج شبیه‌سازی و مقادیر نسبت S/N محاسبه شده از روابط ۷ و ۸ در جدول ۵ ارائه شده است. سطحی از یک پارامتر که بالاترین نسبت S/N را دارد، سطح مطلوب می‌باشد. در شکل‌های ۳ تا ۵، همه پارامترهای مطلوب با دایره مشخص شده‌اند. در نمودار اصلی، میزان انحراف از خط افقی، تأثیر بیشتر پارامتر فرایند روی متغیر پاسخ را نشان می‌دهد.

شکل ۳ نشان می‌دهد پارامتر فرایند بهینه برای نیرو، سطوح ۱، ۳ و ۳ می‌باشد. بنابراین مقادیر بهترین ترکیب برای به حداقل رساندن نیرو، ضریب اصطکاک Ψ_1 ، Ψ_2 و Ψ_3 برابر ۲۰ درجه و Φ_1 ، ۱۶۰ درجه می‌باشند. همچنین از شکل ۳ دیده می‌شود که فاکتورهای اصطکاک Φ_1 بیشترین تأثیر را بر نیرو دارند.

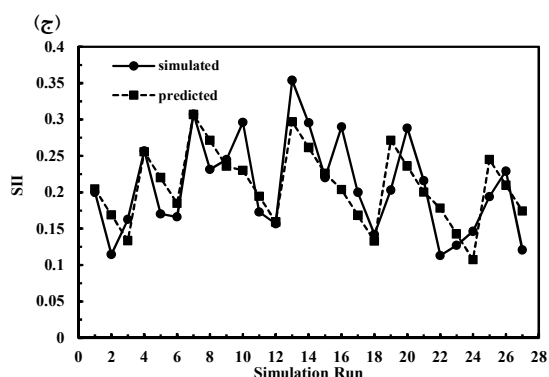
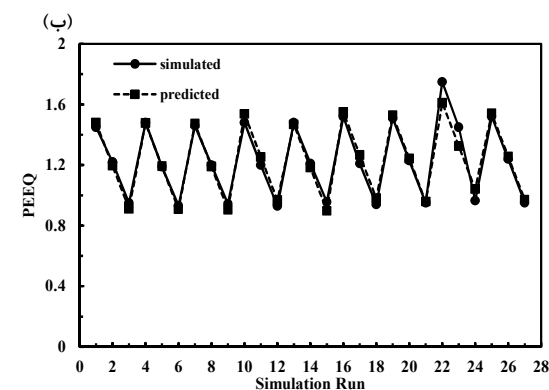
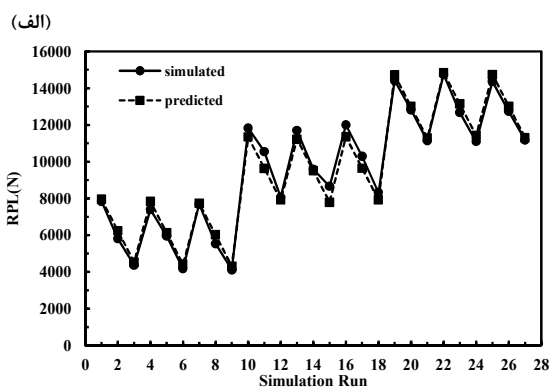
آنالیز نتایج شکل ۴ نشان می‌دهد که ترکیب بهینه برای ناهمگنی توزیع کرنش ۱، ۳ و ۳ می‌باشند. یعنی زمانیکه ضریب اصطکاک ۰/۱ و Ψ_1 و Ψ_2 صفر درجه، Ψ_3 ، ۲۰ درجه و Φ_1 ، ۱۶۰ درجه است. در شکل ۴ بیشترین اثرگذاری بر پارامتر ناهمگنی توزیع کرنش، دو فاکتور Ψ_2 و Φ_1 می‌باشند.

شکل ۵ نشان می‌دهد ترکیب بهینه از پارامترهای فرایند برای کرنش معادل به صورت ۱، ۳ و ۳ می‌باشد. مقادیر پارامتر برای ضریب اصطکاک ۰/۱، Ψ_1 ، ۱۰ درجه، Ψ_2 صفر درجه، Ψ_3 ، ۲۰ درجه و Φ_1 ، ۱۵۰ درجه است. همچنین شکل ۵ نشان می‌دهد فاکتور Φ_1 بر پارامتر کرنش معادل تأثیر بیشتری می‌گذارد.

ارزیابی دیگری که بر تأثیر پارامترهای فرایند در پارامترهای خروجی می‌توان انجام داد استفاده از نمودارهای سطوح سه بعدی می‌باشد [16]. در سطوح ترسیم شده، دو پارامتر تغییر می‌کند و پارامتر دیگر ثابت نگه داشته شده است. سطوح سه بعدی برای نیرو، ناهمگنی توزیع کرنش و کرنش معادل در شکل‌های ۶ تا ۸ نشان داده شده است.



شکل ۳- نمودار میانگین نسبت سیگنال به نویز برای نیرو



شکل ۴- مقایسه نتایج اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده برای (الف): نیرو و (ب): کرنش معادل (ج): ناهمگنی توزیع کرنش

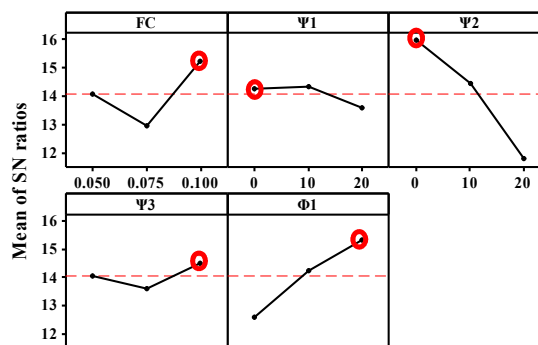
۴-۲- آنالیز نسبت S/N

تاگوجی، فاکتورها را به فاکتورهای قابل کنترل و غیر قابل کنترل تقسیم کرده است. جهت بهینه کردن و تعیین اثر فاکتورهای غیر قابل کنترل بر پارامترهای بهینه، از نسبت سیگنال به نویز استفاده می‌شود. این نسبت نشان دهنده حساسیت مشخصه کیفی مورد بررسی به فاکتورهای خارجی اثرگذار و غیر قابل کنترل در یک فرایند کنترل شده می‌باشد. نسبت سیگنال به نویز هر چه بیشتر باشد اثر فاکتورهای قابل کنترل در فرایند بیشتر خواهد بود.

از آنجا که هدف در این مقاله دستیابی به نیرو و ناهمگنی توزیع کرنش کمتر مدنظر است، از نسبت S/N "هر چه کوچکتر، بهتر است" یعنی رابطه ۷ استفاده گردید. همچنین برای دستیابی به بیشترین کرنش معادل از نسبت S/N "هر چه بزرگتر، بهتر است" یا رابطه ۸ استفاده شد [15].

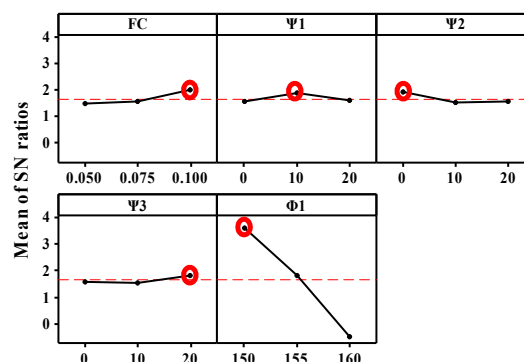
در شکل ۶، الف با افزایش اصطکاک، نیرو افزایش می‌یابد و همچنین افزایش Φ_1 باعث کاهش پارامتر نیرو می‌شود. در شکل ۶، ب با افزایش زاویه گوشه قالب (Ψ_2)، نیرو افزایش می‌یابد، در حالی که با افزایش زاویه دیگر گوشه قالب (Ψ_1)، کاهش در پارامتر نیرو رخ می‌دهد. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، ضریب اصطکاک تأثیر چندانی روی کرنش معادل ندارد که این در آنالیز نسبت S/N نیز مشاهده شد. همچنین با افزایش Φ_1 پارامتر کرنش معادل به شدت کاهش می‌یابد.

در شکل ۸، الف و ج افزایش Φ_1 باعث کاهش در ناهمگنی توزیع کرنش می‌شود. شکل‌های ۸، ب و ۸، ج نشان می‌دهند که افزایش ناهمگنی توزیع کرنش همراه با افزایش Ψ_2 خواهد بود. همچنین در شکل ۸، ب ناهمگنی توزیع کرنش در ابتدا با افزایش ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد اما در ضریب اصطکاک زیاد، ناهمگنی توزیع کرنش کاهش می‌یابد.



شکل ۴- نمودار میانگین نسبت سیگنال به نویز برای ناهمگنی

توزیع کرنش

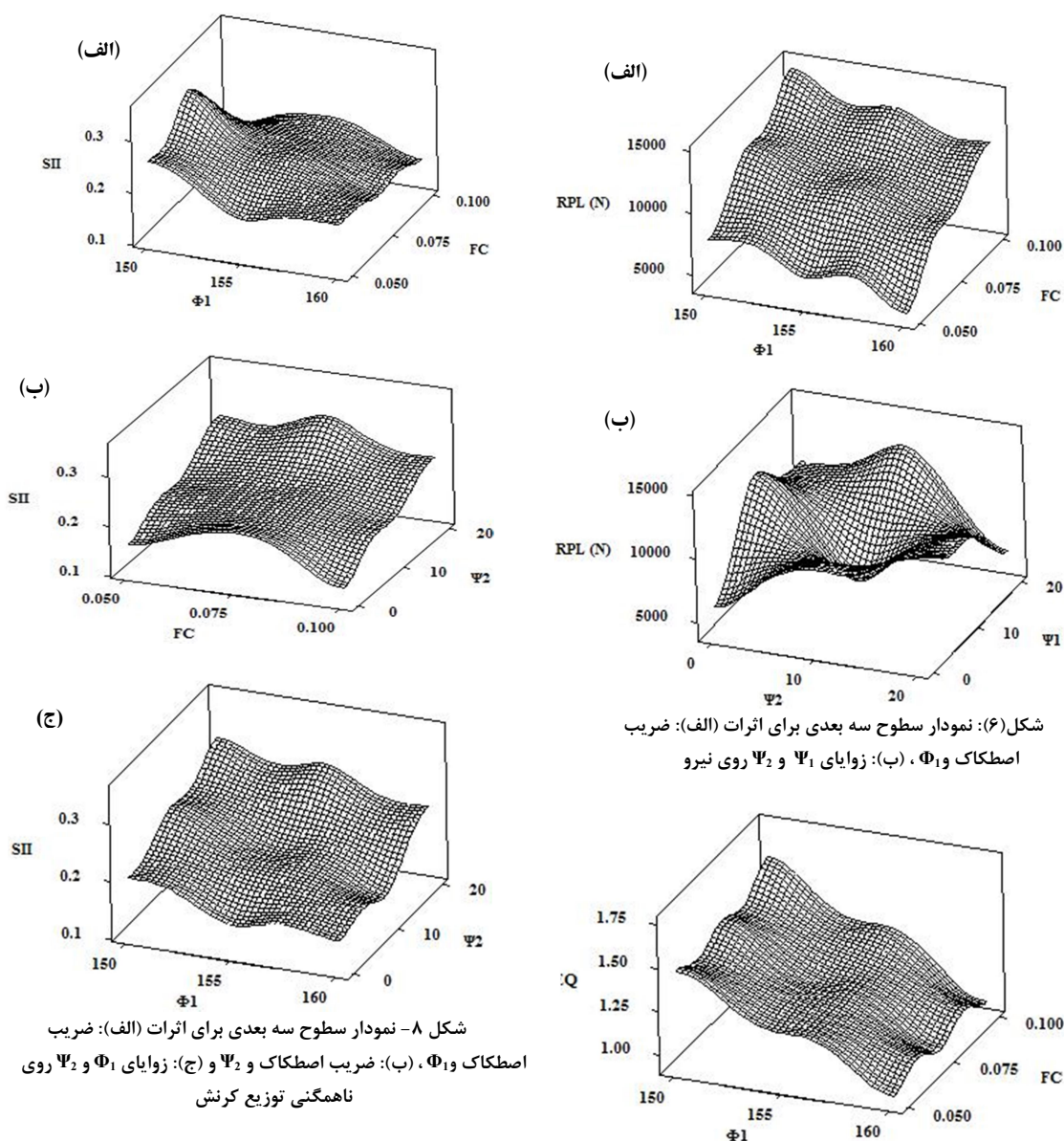


شکل ۵- نمودار میانگین نسبت سیگنال به نویز برای کرنش معادل

جدول ۵- نتایج شبیه‌سازی و S/N

ناهمگنی توزیع کرنش		کرنش معادل		نیرو		تعداد آزمایش
S/N (db)	نتایج	S/N (db)	نتایج	S/N (db)	نتایج	
13.995	0.199	3.227	1.45	-77.871	7825.793	1
18.813	0.115	1.727	1.22	-75.284	5810.331	2
15.775	0.163	-0.455	0.949	-72.787	4358.493	3
11.801	0.257	3.405	1.48	-77.384	7399.765	4
15.376	0.170	1.511	1.19	-75.505	5960.072	5
15.587	0.166	-0.612	0.932	-72.412	4174.667	6
10.247	0.307	3.287	1.46	-77.705	7678.248	7
12.711	0.231	1.584	1.2	-74.865	5536.35	8
12.219	0.245	-0.501	0.944	-72.271	4107.06	9
10.570	0.296	3.405	1.48	-81.456	11825.18	10
15.245	0.173	1.584	1.2	-80.460	10543.63	11
16.089	0.157	-0.621	0.931	-78.133	8065.357	12
9.026	0.354	3.405	1.48	-81.357	11690.96	13
10.589	0.295	1.656	1.21	-79.637	9590.646	14
13.138	0.220	-0.391	0.956	-78.750	8659.878	15
10.755	0.290	3.637	1.52	-81.589	12006.93	16
13.980	0.199	1.656	1.21	-80.246	10287.73	17

16.948	0.142	-0.537	0.94	-78.409	8326.56	18
13.849	0.203	3.580	1.51	-83.168	14400.81	19
10.808	0.288	1.798	1.23	-82.156	12816.98	20
13.307	0.216	-0.427	0.952	-80.937	11139.34	21
18.934	0.113	4.861	1.75	-83.370	14739.52	22
17.922	0.127	3.227	1.45	-82.059	12674.39	23
16.695	0.146	-0.300	0.966	-80.905	11098.39	24
14.243	0.194	3.637	1.52	-83.143	14360.24	25
12.802	0.229	1.868	1.24	-82.100	12735.62	26
18.360	0.121	-0.427	0.952	-80.966	11175.93	27



۳-۴- آنالیز واریانس

تجزیه و تحلیل واریانس ANOVA یک روش مهم برای تجزیه و تحلیل اثر عوامل قطعی بر روی یک پاسخ است [17]. آنالیز آماری

جدول ۸- آنالیز واریانس برای ناهمگنی توزیع کرنش

پارامتر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P	سهم تأثیر (%)
FC	2	0.013397	0.006699	3.37	0.06	11.74
Ψ_1	2	0.001334	0.000667	0.34	0.72	1.17
Ψ_2	2	0.043599	0.0218	10.97	0.001	38.21
Ψ_3	2	0.001088	0.000544	0.27	0.764	0.95
Φ_1	2	0.02291	0.011455	5.77	0.013	20.08
خطا	16	0.031783	0.001986			27.85
کل	26	0.114112				100

۴-۴- آنالیز گری

در این تحقیق از روش آنالیز نسبت گری در محیط نرم افزار متلب برای بهینه‌سازی پارامترهای فرایند ECGMAP جهت دستیابی به ساخت قالب بهینه استفاده شده است. این تحلیل درجه‌ای از همبستگی یا ارتباط را بین دوتوالی نشان می‌دهد. روش آنالیز گری روش مناسبی جهت بهینه‌سازی و جبران نقص‌های تحلیل‌های آماری مانند رگرسیون می‌باشد.

۴-۴-۱- پیش پردازش داده‌ها

پیش پردازش داده‌ها فرایندی است که توالی‌های اصلی را به توالی‌های قابل تبدیل می‌کند. برای این منظور نتایج آزمایشات در بین مقدار صفر تا یک نرماله می‌شود [18,19]. در جدول ۹ مقادیر نرمالیزه ارائه شده است.

اگر هدف رسیدن به بیشترین مقدار خروجی یعنی کرنش ماکزیمم باشد، توالی اصلی توسط معادله ۹ نرمالیزه می‌شود.

$$x_i(k) = \frac{x_i^{(0)}(k) - \min x_i^{(0)}(k)}{\max x_i^{(0)}(k) - \min x_i^{(0)}(k)} \quad (9)$$

اگر هدف رسیدن به کمترین مقدار خروجی یعنی نیرو و ناهمگنی توزیع کرنش باشد، توالی اصلی توسط معادله ۱۰ نرمالیزه می‌شود.

$$x_i(k) = \frac{\max x_i^{(0)}(k) - x_i^{(0)}(k)}{\max x_i^{(0)}(k) - \min x_i^{(0)}(k)} \quad (10)$$

x خروجی مورد نظر است که در این تحقیق مقدار نیرو، ناهمگنی توزیع کرنش و کرنش ماکزیمم می‌باشد. $x_i^{(0)}(k)$ توالی اصلی، $x_i^{(0)}(k)$ توالی بعد از پیش پردازش داده، $\max x_i^{(0)}(k)$ بیشترین مقدار $x_i^{(0)}(k)$ و $\min x_i^{(0)}(k)$ کمترین مقدار $x_i^{(0)}(k)$ می‌باشند.

۴-۴-۲- بدست آوردن نسبت رتبه گری

ابتدا ضریب نسبت گری توسط معادله ۱۱ بدست می‌آید [20-22].

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \xi \cdot \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \xi \cdot \Delta_{\max}} \quad (11)$$

در معادله ۱۱، $\xi_i(k)$ ضریب نسبت گری و ξ ضریب شناسایی یا ضریب مجزا می‌باشد و مقدار آن بصورت رایج در تحقیقات انجام شده، ۰/۵ فرض می‌شود. $\Delta_{0i}(k) = |x_0(k) - x_i(k)|$ توالی انحراف مربوط به $x_0(k)$ و $x_i(k)$ می‌باشد. $\Delta_{\min}$ کمترین مقدار و $\Delta_{\max}$ بیشترین مقدار $\Delta_{0i}(k)$ می‌باشند و در نهایت با توجه به معادله ۱۲، رتبه نسبت گری از میانگین ضریب نسبت گری خروجی‌ها حاصل می‌گردد. γ_i رتبه نسبت گری می‌باشد [23].

واریانس ANOVA برای بررسی اینکه آیا پارامترهای فرایند تأثیر عمده و معنی داری از نظر آماری بر روی نیرو، ناهمگنی توزیع کرنش و کرنش معادل دارند یا نه، انجام می‌شود. مقدار F (نسبت واریانس) و سهم درصد برای هر پارامتر نشان می‌دهد که کدام پارامترهای ورودی و به چه اندازه‌ای در پاسخ‌ها سهم دارند. نتایج آنالیز در جداول ۶ تا ۸ آورده شده است. تجزیه و تحلیل برای سطح اطمینان ۹۵٪ صورت گرفته است (اهمیت سطح ۵٪ است).

تأثیر اصطکاک و زوایای قالب بر نیرو و مقادیر آنها در جدول ۶ آورده شده است که بیشترین تأثیر را اصطکاک با سهم تأثیر ۸۰/۲۷٪ و سپس Φ_1 با سهم ۱۹/۳۴٪ دارند. دیگر پارامترها تأثیر ناچیزی دارند و می‌توان آنها را نادیده گرفت. از آنالیز جدول ۶ می‌توان دید که ضریب اصطکاک و Φ_1 اهمیت آماری و فیزیکی روی نیرو دارند زیرا مقدار P کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد.

در جدول ۷ بیشترین فاکتور تأثیرگذار بر کرنش معادل، فاکتور Φ_1 با سهم تأثیر ۹۲/۴۵٪ می‌باشد. دیگر پارامترها تأثیر چندانی ندارند. البته ضریب اصطکاک، Ψ_2 و Φ_1 اهمیت آماری و فیزیکی روی کرنش دارند.

جدول ۸ نشان می‌دهد برای ناهمگنی توزیع کرنش بیشترین تأثیر را Ψ_2 با سهم تأثیر ۳۸/۲۱٪ و Φ_1 با ۲۰/۰۸٪ دارند همچنین سهم تأثیر اصطکاک ۱۱/۷۴٪ می‌باشد. Ψ_2 و Φ_1 اهمیت آماری و فیزیکی روی ناهمگنی توزیع کرنش دارند.

جدول ۶- آنالیز واریانس برای نیرو

پارامتر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P	سهم تأثیر (%)
FC	2	219191591	109595796	1913.99	0	80.27
Ψ_1	2	37547	18774	0.33	0.725	0.01
Ψ_2	2	127639	63820	1.11	0.352	0.05
Ψ_3	2	5797	2899	0.05	0.951	0.00
Φ_1	2	52800051	26400025	461.05	0	19.34
خطا	16	916168	57260			0.34
کل	26	273078794				100

جدول ۷- آنالیز واریانس برای کرنش معادل

پارامتر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P	سهم تأثیر (%)
FC	2	0.03625	0.01813	8.4	0.003	2.29
Ψ_1	2	0.0159	0.00795	3.69	0.048	1.01
Ψ_2	2	0.02016	0.01008	4.67	0.025	1.28
Ψ_3	2	0.01249	0.00625	2.9	0.084	0.79
Φ_1	2	1.46121	0.73061	338.69	0	92.45
خطا	16	0.03451	0.00216			2.18
کل	26	1.58054				100

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (12)$$

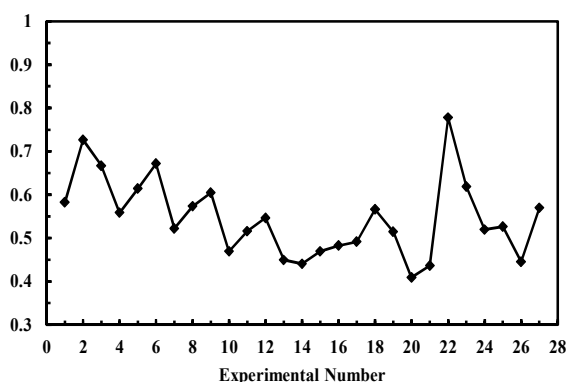
با توجه به جدول ۱۰ و رابطه ۱۲، رتبه گری بدست می‌آید. همچنین با توجه به شکل ۹ و نتایج جدول ۱۰، حالت بهینه آزمایش ۲۲ می‌باشد. پس می‌توان نتیجه گرفت که آزمایش ۲۲ نسبت به آزمایش‌های دیگر مینیمم مقدار نیرو و ناهمگنی توزیع کرنش و ماکزیمم مقدار کرنش معادل را می‌دهد.

جدول ۹- نتایج آزمایشات نرمالیزه شده

تعداد آزمایش	نیرو	کرنش معادل	ناهمگنی توزیع کرنش
1	0.349753	0.3663	0.359785
2	0.160195	0.647131	0.006613
3	0.023648	0.978022	0.206089
4	0.309684	0.32967	0.59815
5	0.174279	0.683761	0.237791
6	0.006359	0.998779	0.220814
7	0.335876	0.35409	0.807266
8	0.134427	0.671551	0.491942
9	0	0.984127	0.547939
10	0.725902	0.32967	0.760729
11	0.60537	0.671551	0.248534
12	0.372284	1	0.182093
13	0.713278	0.32967	1
14	0.51574	0.659341	0.757986
15	0.4282	0.969475	0.445726
16	0.742996	0.28083	0.734711
17	0.581302	0.659341	0.361231
18	0.396851	0.989011	0.120693
19	0.968144	0.29304	0.37379
20	0.819182	0.634921	0.727441
21	0.661397	0.974359	0.428079
22	1	0	0
23	0.805771	0.3663	0.058081
24	0.657546	0.957265	0.138138
25	0.964328	0.28083	0.336398
26	0.81153	0.622711	0.481925
27	0.664839	0.974359	0.032095

جدول ۱۰- درجه گری و رتبه آن

رتبه	تعداد آزمایش	نیرو	کرنش معادل	ناهمگنی توزیع کرنش	درجه گری
1	0.588406	0.577167	0.581541	0.582371	8
2	0.757352	0.43587	0.986946	0.726723	2
3	0.95484	0.33829	0.708126	0.667085	4
4	0.617525	0.602649	0.455311	0.558495	12
5	0.741533	0.422383	0.677698	0.613871	6
6	0.987443	0.333605	0.69366	0.671569	3
7	0.598175	0.585418	0.382478	0.522024	15
8	0.788113	0.426785	0.504062	0.572986	9
9	1	0.336898	0.477127	0.604675	7
10	0.407863	0.602649	0.396596	0.469036	22
11	0.452337	0.426785	0.667972	0.515698	17
12	0.573208	0.333333	0.733038	0.546526	13
13	0.412107	0.602649	0.333333	0.449363	23
14	0.492252	0.43128	0.397461	0.440331	25
15	0.538677	0.340258	0.528694	0.46921	21
16	0.402254	0.640344	0.404953	0.482517	20
17	0.462406	0.43128	0.580565	0.491417	19
18	0.557506	0.335793	0.805552	0.566284	11
19	0.340566	0.630485	0.57222	0.514424	18
20	0.379023	0.440559	0.407351	0.408978	27
21	0.430516	0.33913	0.538747	0.436131	26
22	0.333333	1	1	0.777778	1
23	0.382915	0.577167	0.895927	0.61867	5
24	0.431948	0.343109	0.783529	0.519529	16
25	0.341454	0.640344	0.597801	0.526533	14
26	0.381234	0.445351	0.509204	0.445263	24
27	0.429244	0.33913	0.939683	0.569352	10



شکل ۹- نمودار درجه گری

از آنجا که برای عملکرد ویژگی‌های متعدد بالاترین مقدار مورد نظر است از نسبت S/N هر چه بزرگتر بهتر است، رابطه ۸ استفاده شده است. سطحی از پارامتر که بالاترین نسبت S/N را دارد سطح بهینه می‌باشد. شکل ۱۰ سطح بهینه که با دایره مشخص شده است را نشان می‌دهد. بنابراین پارامتر بهینه فرایند برای عملکرد مشخصه‌های متعدد، ۱ ۲ ۳ ۳ می‌باشد. در نتیجه بهترین ترکیب برای عملکرد

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق روش پرس در کانال‌های زاویه‌دار مساوی مکرر، در تولید مواد فوق ریزدانه مورد بررسی قرار گرفت. روش ترکیبی تاگوچی-گری جهت بدست آوردن تاثیر پارامترهای ورودی بر پارامترهای هدف بکار گرفته شد و نتایج زیر حاصل گردید:

۱- با توجه به آنالیز رگرسیون، دو پارامتر نیرو و کرنش معادل از پیش بینی خوبی برخوردار هستند در حالی که ناهمگنی توزیع کرنش پیش بینی خوبی را انجام نمی‌دهد. یعنی می‌توان گفت که روابط خطی بدست آمده با آنالیز رگرسیون می‌توانند بخوبی تغییرات کرنش معادل و نیرو را بر حسب پارامترهای هندسی ورودی بیان کنند.

۲- با توجه به آنالیز S/N، فاکتورهای اصطکاک و Φ_1 بیشترین تاثیر را بر نیرو دارند و بیشترین اثرگذاری بر پارامتر ناهمگنی توزیع کرنش، دو فاکتور Ψ_2 و Φ_1 می‌باشند و همچنین فاکتور Φ_1 بر پارامتر کرنش معادل تاثیر بیشتری می‌گذارد. می‌توان اینگونه بیان کرد که کاهش پارامتر Φ_1 موجب افزایش کرنش معادل شده و برای ایجاد کرنش معادل بالا نیاز به اعمال نیروی بالایی است ولی فاکتور اصطکاک فقط موجب تغییر در نیروی لازم می‌شود و تاثیر بالایی روی کرنش معادل ندارد.

۳- تجزیه و تحلیل واریانس نشان داد که ضریب اصطکاک بیشترین تاثیر را بر پارامترهای هدف دارد. پس با استفاده از روانکار مناسب می‌توان تا حد بالایی فرایند تغییر فرم شدید را بهبود بخشید و سه پارامتر هدف بررسی شده را در جهت مناسب تغییر داد.

۴- نتایج آنالیز گری نشان داد که آزمایش ۲۲ نسبت به آزمایش‌های دیگر مینیمم مقدار نیرو و ناهمگنی توزیع کرنش و ماکزیمم مقدار کرنش معادل را می‌دهد. این آنالیز اثر هر سه فاکتور را همزمان در نظر می‌گیرد و بهترین وضعیت را در بازه داده شده برای متغیرها مشخص می‌کند.

۶- مراجع

- [1] Huang, Y. and T.G. Langdon, Advances in ultrafine-grained materials. *Materials today*,. 16(3): pp. 85-93, 2013.
- [2] Bergwerf P., Equall Channel Angular Pressing of High Carbon Steel. 12 March 2007, Delf University of Technology.
- [3] Arab S. and Akbarzadeh A., The effect of equal channel angular pressing process on the microstructure of AZ31 Mg alloy strip shaped specimens. *Journal of Magnesium and Alloys*,. 1(2): pp. 145-149, 2013.
- [4] Park J.Y. and Lee D.N., Deformation and annealing textures of equal-channel angular pressed 1050 Al alloy strips. *Materials Science and Engineering: A*, 497(1): pp. 395-407, 2008.
- [5] Sabirov I., et al. Ultra-fine grained Al-Mg alloys with superior strength via physical simulation. in IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2014.
- [6] Ngo L., Bello-Ochende T. and Meyer J.P., Numerical modelling and optimisation of natural convection heat loss suppression in a solar cavity receiver with plate fins. *Renewable Energy*, 74: pp. 95-105, 2015.
- [7] Um J.-M., et al., Determination of an optimal configuration of operating policies for direct-input-output manufacturing systems using the Taguchi

مشخصه‌های متعدد ضریب اصطکاک Ψ_1 ، Ψ_2 ، Ψ_3 ، Φ_1 ، Φ_2 ، Φ_3 ، Φ_4 ، Φ_5 ، Φ_6 ، Φ_7 ، Φ_8 ، Φ_9 ، Φ_{10} ، Φ_{11} ، Φ_{12} ، Φ_{13} ، Φ_{14} ، Φ_{15} ، Φ_{16} ، Φ_{17} ، Φ_{18} ، Φ_{19} ، Φ_{20} ، Φ_{21} ، Φ_{22} ، Φ_{23} ، Φ_{24} ، Φ_{25} ، Φ_{26} ، Φ_{27} ، Φ_{28} ، Φ_{29} ، Φ_{30} ، Φ_{31} ، Φ_{32} ، Φ_{33} ، Φ_{34} ، Φ_{35} ، Φ_{36} ، Φ_{37} ، Φ_{38} ، Φ_{39} ، Φ_{40} ، Φ_{41} ، Φ_{42} ، Φ_{43} ، Φ_{44} ، Φ_{45} ، Φ_{46} ، Φ_{47} ، Φ_{48} ، Φ_{49} ، Φ_{50} ، Φ_{51} ، Φ_{52} ، Φ_{53} ، Φ_{54} ، Φ_{55} ، Φ_{56} ، Φ_{57} ، Φ_{58} ، Φ_{59} ، Φ_{60} ، Φ_{61} ، Φ_{62} ، Φ_{63} ، Φ_{64} ، Φ_{65} ، Φ_{66} ، Φ_{67} ، Φ_{68} ، Φ_{69} ، Φ_{70} ، Φ_{71} ، Φ_{72} ، Φ_{73} ، Φ_{74} ، Φ_{75} ، Φ_{76} ، Φ_{77} ، Φ_{78} ، Φ_{79} ، Φ_{80} ، Φ_{81} ، Φ_{82} ، Φ_{83} ، Φ_{84} ، Φ_{85} ، Φ_{86} ، Φ_{87} ، Φ_{88} ، Φ_{89} ، Φ_{90} ، Φ_{91} ، Φ_{92} ، Φ_{93} ، Φ_{94} ، Φ_{95} ، Φ_{96} ، Φ_{97} ، Φ_{98} ، Φ_{99} ، Φ_{100} ، Φ_{101} ، Φ_{102} ، Φ_{103} ، Φ_{104} ، Φ_{105} ، Φ_{106} ، Φ_{107} ، Φ_{108} ، Φ_{109} ، Φ_{110} ، Φ_{111} ، Φ_{112} ، Φ_{113} ، Φ_{114} ، Φ_{115} ، Φ_{116} ، Φ_{117} ، Φ_{118} ، Φ_{119} ، Φ_{120} ، Φ_{121} ، Φ_{122} ، Φ_{123} ، Φ_{124} ، Φ_{125} ، Φ_{126} ، Φ_{127} ، Φ_{128} ، Φ_{129} ، Φ_{130} ، Φ_{131} ، Φ_{132} ، Φ_{133} ، Φ_{134} ، Φ_{135} ، Φ_{136} ، Φ_{137} ، Φ_{138} ، Φ_{139} ، Φ_{140} ، Φ_{141} ، Φ_{142} ، Φ_{143} ، Φ_{144} ، Φ_{145} ، Φ_{146} ، Φ_{147} ، Φ_{148} ، Φ_{149} ، Φ_{150} ، Φ_{151} ، Φ_{152} ، Φ_{153} ، Φ_{154} ، Φ_{155} ، Φ_{156} ، Φ_{157} ، Φ_{158} ، Φ_{159} ، Φ_{160} ، Φ_{161} ، Φ_{162} ، Φ_{163} ، Φ_{164} ، Φ_{165} ، Φ_{166} ، Φ_{167} ، Φ_{168} ، Φ_{169} ، Φ_{170} ، Φ_{171} ، Φ_{172} ، Φ_{173} ، Φ_{174} ، Φ_{175} ، Φ_{176} ، Φ_{177} ، Φ_{178} ، Φ_{179} ، Φ_{180} ، Φ_{181} ، Φ_{182} ، Φ_{183} ، Φ_{184} ، Φ_{185} ، Φ_{186} ، Φ_{187} ، Φ_{188} ، Φ_{189} ، Φ_{190} ، Φ_{191} ، Φ_{192} ، Φ_{193} ، Φ_{194} ، Φ_{195} ، Φ_{196} ، Φ_{197} ، Φ_{198} ، Φ_{199} ، Φ_{200} ، Φ_{201} ، Φ_{202} ، Φ_{203} ، Φ_{204} ، Φ_{205} ، Φ_{206} ، Φ_{207} ، Φ_{208} ، Φ_{209} ، Φ_{210} ، Φ_{211} ، Φ_{212} ، Φ_{213} ، Φ_{214} ، Φ_{215} ، Φ_{216} ، Φ_{217} ، Φ_{218} ، Φ_{219} ، Φ_{220} ، Φ_{221} ، Φ_{222} ، Φ_{223} ، Φ_{224} ، Φ_{225} ، Φ_{226} ، Φ_{227} ، Φ_{228} ، Φ_{229} ، Φ_{230} ، Φ_{231} ، Φ_{232} ، Φ_{233} ، Φ_{234} ، Φ_{235} ، Φ_{236} ، Φ_{237} ، Φ_{238} ، Φ_{239} ، Φ_{240} ، Φ_{241} ، Φ_{242} ، Φ_{243} ، Φ_{244} ، Φ_{245} ، Φ_{246} ، Φ_{247} ، Φ_{248} ، Φ_{249} ، Φ_{250} ، Φ_{251} ، Φ_{252} ، Φ_{253} ، Φ_{254} ، Φ_{255} ، Φ_{256} ، Φ_{257} ، Φ_{258} ، Φ_{259} ، Φ_{260} ، Φ_{261} ، Φ_{262} ، Φ_{263} ، Φ_{264} ، Φ_{265} ، Φ_{266} ، Φ_{267} ، Φ_{268} ، Φ_{269} ، Φ_{270} ، Φ_{271} ، Φ_{272} ، Φ_{273} ، Φ_{274} ، Φ_{275} ، Φ_{276} ، Φ_{277} ، Φ_{278} ، Φ_{279} ، Φ_{280} ، Φ_{281} ، Φ_{282} ، Φ_{283} ، Φ_{284} ، Φ_{285} ، Φ_{286} ، Φ_{287} ، Φ_{288} ، Φ_{289} ، Φ_{290} ، Φ_{291} ، Φ_{292} ، Φ_{293} ، Φ_{294} ، Φ_{295} ، Φ_{296} ، Φ_{297} ، Φ_{298} ، Φ_{299} ، Φ_{300} ، Φ_{301} ، Φ_{302} ، Φ_{303} ، Φ_{304} ، Φ_{305} ، Φ_{306} ، Φ_{307} ، Φ_{308} ، Φ_{309} ، Φ_{310} ، Φ_{311} ، Φ_{312} ، Φ_{313} ، Φ_{314} ، Φ_{315} ، Φ_{316} ، Φ_{317} ، Φ_{318} ، Φ_{319} ، Φ_{320} ، Φ_{321} ، Φ_{322} ، Φ_{323} ، Φ_{324} ، Φ_{325} ، Φ_{326} ، Φ_{327} ، Φ_{328} ، Φ_{329} ، Φ_{330} ، Φ_{331} ، Φ_{332} ، Φ_{333} ، Φ_{334} ، Φ_{335} ، Φ_{336} ، Φ_{337} ، Φ_{338} ، Φ_{339} ، Φ_{340} ، Φ_{341} ، Φ_{342} ، Φ_{343} ، Φ_{344} ، Φ_{345} ، Φ_{346} ، Φ_{347} ، Φ_{348} ، Φ_{349} ، Φ_{350} ، Φ_{351} ، Φ_{352} ، Φ_{353} ، Φ_{354} ، Φ_{355} ، Φ_{356} ، Φ_{357} ، Φ_{358} ، Φ_{359} ، Φ_{360} ، Φ_{361} ، Φ_{362} ، Φ_{363} ، Φ_{364} ، Φ_{365} ، Φ_{366} ، Φ_{367} ، Φ_{368} ، Φ_{369} ، Φ_{370} ، Φ_{371} ، Φ_{372} ، Φ_{373} ، Φ_{374} ، Φ_{375} ، Φ_{376} ، Φ_{377} ، Φ_{378} ، Φ_{379} ، Φ_{380} ، Φ_{381} ، Φ_{382} ، Φ_{383} ، Φ_{384} ، Φ_{385} ، Φ_{386} ، Φ_{387} ، Φ_{388} ، Φ_{389} ، Φ_{390} ، Φ_{391} ، Φ_{392} ، Φ_{393} ، Φ_{394} ، Φ_{395} ، Φ_{396} ، Φ_{397} ، Φ_{398} ، Φ_{399} ، Φ_{400} ، Φ_{401} ، Φ_{402} ، Φ_{403} ، Φ_{404} ، Φ_{405} ، Φ_{406} ، Φ_{407} ، Φ_{408} ، Φ_{409} ، Φ_{410} ، Φ_{411} ، Φ_{412} ، Φ_{413} ، Φ_{414} ، Φ_{415} ، Φ_{416} ، Φ_{417} ، Φ_{418} ، Φ_{419} ، Φ_{420} ، Φ_{421} ، Φ_{422} ، Φ_{423} ، Φ_{424} ، Φ_{425} ، Φ_{426} ، Φ_{427} ، Φ_{428} ، Φ_{429} ، Φ_{430} ، Φ_{431} ، Φ_{432} ، Φ_{433} ، Φ_{434} ، Φ_{435} ، Φ_{436} ، Φ_{437} ، Φ_{438} ، Φ_{439} ، Φ_{440} ، Φ_{441} ، Φ_{442} ، Φ_{443} ، Φ_{444} ، Φ_{445} ، Φ_{446} ، Φ_{447} ، Φ_{448} ، Φ_{449} ، Φ_{450} ، Φ_{451} ، Φ_{452} ، Φ_{453} ، Φ_{454} ، Φ_{455} ، Φ_{456} ، Φ_{457} ، Φ_{458} ، Φ_{459} ، Φ_{460} ، Φ_{461} ، Φ_{462} ، Φ_{463} ، Φ_{464} ، Φ_{465} ، Φ_{466} ، Φ_{467} ، Φ_{468} ، Φ_{469} ، Φ_{470} ، Φ_{471} ، Φ_{472} ، Φ_{473} ، Φ_{474} ، Φ_{475} ، Φ_{476} ، Φ_{477} ، Φ_{478} ، Φ_{479} ، Φ_{480} ، Φ_{481} ، Φ_{482} ، Φ_{483} ، Φ_{484} ، Φ_{485} ، Φ_{486} ، Φ_{487} ، Φ_{488} ، Φ_{489} ، Φ_{490} ، Φ_{491} ، Φ_{492} ، Φ_{493} ، Φ_{494} ، Φ_{495} ، Φ_{496} ، Φ_{497} ، Φ_{498} ، Φ_{499} ، Φ_{500} ، Φ_{501} ، Φ_{502} ، Φ_{503} ، Φ_{504} ، Φ_{505} ، Φ_{506} ، Φ_{507} ، Φ_{508} ، Φ_{509} ، Φ_{510} ، Φ_{511} ، Φ_{512} ، Φ_{513} ، Φ_{514} ، Φ_{515} ، Φ_{516} ، Φ_{517} ، Φ_{518} ، Φ_{519} ، Φ_{520} ، Φ_{521} ، Φ_{522} ، Φ_{523} ، Φ_{524} ، Φ_{525} ، Φ_{526} ، Φ_{527} ، Φ_{528} ، Φ_{529} ، Φ_{530} ، Φ_{531} ، Φ_{532} ، Φ_{533} ، Φ_{534} ، Φ_{535} ، Φ_{536} ، Φ_{537} ، Φ_{538} ، Φ_{539} ، Φ_{540} ، Φ_{541} ، Φ_{542} ، Φ_{543} ، Φ_{544} ، Φ_{545} ، Φ_{546} ، Φ_{547} ، Φ_{548} ، Φ_{549} ، Φ_{550} ، Φ_{551} ، Φ_{552} ، Φ_{553} ، Φ_{554} ، Φ_{555} ، Φ_{556} ، Φ_{557} ، Φ_{558} ، Φ_{559} ، Φ_{560} ، Φ_{561} ، Φ_{562} ، Φ_{563} ، Φ_{564} ، Φ_{565} ، Φ_{566} ، Φ_{567} ، Φ_{568} ، Φ_{569} ، Φ_{570} ، Φ_{571} ، Φ_{572} ، Φ_{573} ، Φ_{574} ، Φ_{575} ، Φ_{576} ، Φ_{577} ، Φ_{578} ، Φ_{579} ، Φ_{580} ، Φ_{581} ، Φ_{582} ، Φ_{583} ، Φ_{584} ، Φ_{585} ، Φ_{586} ، Φ_{587} ، Φ_{588} ، Φ_{589} ، Φ_{590} ، Φ_{591} ، Φ_{592} ، Φ_{593} ، Φ_{594} ، Φ_{595} ، Φ_{596} ، Φ_{597} ، Φ_{598} ، Φ_{599} ، Φ_{600} ، Φ_{601} ، Φ_{602} ، Φ_{603} ، Φ_{604} ، Φ_{605} ، Φ_{606} ، Φ_{607} ، Φ_{608} ، Φ_{609} ، Φ_{610} ، Φ_{611} ، Φ_{612} ، Φ_{613} ، Φ_{614} ، Φ_{615} ، Φ_{616} ، Φ_{617} ، Φ_{618} ، Φ_{619} ، Φ_{620} ، Φ_{621} ، Φ_{622} ، Φ_{623} ، Φ_{624} ، Φ_{625} ، Φ_{626} ، Φ_{627} ، Φ_{628} ، Φ_{629} ، Φ_{630} ، Φ_{631} ، Φ_{632} ، Φ_{633} ، Φ_{634} ، Φ_{635} ، Φ_{636} ، Φ_{637} ، Φ_{638} ، Φ_{639} ، Φ_{640} ، Φ_{641} ، Φ_{642} ، Φ_{643} ، Φ_{644} ، Φ_{645} ، Φ_{646} ، Φ_{647} ، Φ_{648} ، Φ_{649} ، Φ_{650} ، Φ_{651} ، Φ_{652} ، Φ_{653} ، Φ_{654} ، Φ_{655} ، Φ_{656} ، Φ_{657} ، Φ_{658} ، Φ_{659} ، Φ_{660} ، Φ_{661} ، Φ_{662} ، Φ_{663} ، Φ_{664} ، Φ_{665} ، Φ_{666} ، Φ_{667} ، Φ_{668} ، Φ_{669} ، Φ_{670} ، Φ_{671} ، Φ_{672} ، Φ_{673} ، Φ_{674} ، Φ_{675} ، Φ_{676} ، Φ_{677} ، Φ_{678} ، Φ_{679} ، Φ_{680} ، Φ_{681} ، Φ_{682} ، Φ_{683} ، Φ_{684} ، Φ_{685} ، Φ_{686} ، Φ_{687} ، Φ_{688} ، Φ_{689} ، Φ_{690} ، Φ_{691} ، Φ_{692} ، Φ_{693} ، Φ_{694} ، Φ_{695} ، Φ_{696} ، Φ_{697} ، Φ_{698} ، Φ_{699} ، Φ_{700} ، Φ_{701} ، Φ_{702} ، Φ_{703} ، Φ_{704} ، Φ_{705} ، Φ_{706} ، Φ_{707} ، Φ_{708} ، Φ_{709} ، Φ_{710} ، Φ_{711} ، Φ_{712} ، Φ_{713} ، Φ_{714} ، Φ_{715} ، Φ_{716} ، Φ_{717} ، Φ_{718} ، Φ_{719} ، Φ_{720} ، Φ_{721} ، Φ_{722} ، Φ_{723} ، Φ_{724} ، Φ_{725} ، Φ_{726} ، Φ_{727} ، Φ_{728} ، Φ_{729} ، Φ_{730} ، Φ_{731} ، Φ_{732} ، Φ_{733} ، Φ_{734} ، Φ_{735} ، Φ_{736} ، Φ_{737} ، Φ_{738} ، Φ_{739} ، Φ_{740} ، Φ_{741} ، Φ_{742} ، Φ_{743} ، Φ_{744} ، Φ_{745} ، Φ_{746} ، Φ_{747} ، Φ_{748} ، Φ_{749} ، Φ_{750} ، Φ_{751} ، Φ_{752} ، Φ_{753} ، Φ_{754} ، Φ_{755} ، Φ_{756} ، Φ_{757} ، Φ_{758} ، Φ_{759} ، Φ_{760} ، Φ_{761} ، Φ_{762} ، Φ_{763} ، Φ_{764} ، Φ_{765} ، Φ_{766} ، Φ_{767} ، Φ_{768} ، Φ_{769} ، Φ_{770} ، Φ_{771} ، Φ_{772} ، Φ_{773} ، Φ_{774} ، Φ_{775} ، Φ_{776} ، Φ_{777} ، Φ_{778} ، Φ_{779} ، Φ_{780} ، Φ_{781} ، Φ_{782} ، Φ_{783} ، Φ_{784} ، Φ_{785} ، Φ_{786} ، Φ_{787} ، Φ_{788} ، Φ_{789} ، Φ_{790} ، Φ_{791} ، Φ_{792} ، Φ_{793} ، Φ_{794} ، Φ_{795} ، Φ_{796} ، Φ_{797} ، Φ_{798} ، Φ_{799} ، Φ_{800} ، Φ_{801} ، Φ_{802} ، Φ_{803} ، Φ_{804} ، Φ_{805} ، Φ_{806} ، Φ_{807} ، Φ_{808} ، Φ_{809} ، Φ_{810} ، Φ_{811} ، Φ_{812} ، Φ_{813} ، Φ_{814} ، Φ_{815} ، Φ_{816} ، Φ_{817} ، Φ_{818} ، Φ_{819} ، Φ_{820} ، Φ_{821} ، Φ_{822} ، Φ_{823} ، Φ_{824} ، Φ_{825} ، Φ_{826} ، Φ_{827} ، Φ_{828} ، Φ_{829} ، Φ_{830} ، Φ_{831} ، Φ_{832} ، Φ_{833} ، Φ_{834} ، Φ_{835} ، Φ_{836} ، Φ_{837} ، Φ_{838} ، Φ_{839} ، Φ_{840} ، Φ_{841} ، Φ_{842} ، Φ_{843} ، Φ_{844} ، Φ_{845} ، Φ_{846} ، Φ_{847} ، Φ_{848} ، Φ_{849} ، Φ_{850} ، Φ_{851} ، Φ_{852} ، Φ_{853} ، Φ_{854} ، Φ_{855} ، Φ_{856} ، Φ_{857} ، Φ_{858} ، Φ_{859} ، Φ_{860} ، Φ_{861} ، Φ_{862} ، Φ_{863} ، Φ_{864} ، Φ_{865} ، Φ_{866} ، Φ_{867} ، Φ_{868} ، Φ_{869} ، Φ_{870} ، Φ_{871} ، Φ_{872} ، Φ_{873} ، Φ_{874} ، Φ_{875} ، Φ_{876} ، Φ_{877} ، Φ_{878} ، Φ_{879} ، Φ_{880} ، Φ_{881} ، Φ_{882} ، Φ_{883} ، Φ_{884} ، Φ_{885} ، Φ_{886} ، Φ_{887} ، Φ_{888} ، Φ_{889} ، Φ_{890} ، Φ_{891} ، Φ_{892} ، Φ_{893} ، Φ_{894} ، Φ_{895} ، Φ_{896} ، Φ_{897} ، Φ_{898} ، Φ_{899} ، Φ_{900} ، Φ_{901} ، Φ_{902} ، Φ_{903} ، Φ_{904} ، Φ_{905} ، Φ_{906} ، Φ_{907} ، Φ_{908} ، Φ_{909} ، Φ_{910} ، Φ_{911} ، Φ_{912} ، Φ_{913} ، Φ_{914} ، Φ_{915} ، Φ_{916} ، Φ_{917} ، Φ_{918} ، Φ_{919} ، Φ_{920} ، Φ_{921} ، Φ_{922} ، Φ_{923} ، Φ_{924} ، Φ_{925} ، Φ_{926} ، Φ_{927} ، Φ_{92

- [23] Barrios J.A., et al., Fuzzy and fuzzy grey-box modelling for entry temperature prediction in a hot strip mill. *Materials and Manufacturing Processes*, 26(1): pp. 66-77, 2011.
- [8] Roy R., A primer on the Taguchi method, *competitive manufacturing series*. New York, pp. 7-80, 1990.
- [9] Keshtiban, P.M., Zadshakouyan M. and Faraji G., Optimization of ECGAP Parameters in the Production of Ultra-Fine Grained Al1050 Strips Using Grey Relational Analysis.
- [10] Keshtiban M., Zadshakouyan P., M. and Faraji G., Optimization of ECGAP Parameters in the Production of Ultra-fine Grained Al1050 Strips Using Grey Relational Analysis. *Journal of Advanced Materials and Processing*, 3(4): pp. 34-50, 2016.
- [11] Mashhadi Keshtiban, P., M. Zadshakouyan, and Faraji G., Modeling and Production of High Strength Al Strips by Equal Channel Multi Angular Pressing Method. *Journal of Advanced Materials and Processing*, 3(4): pp. 3-102016.
- [12] Keshtiban, P.M., M. Zadshakouyan, and G. Faraji, Optimization of Geometrical Parameters of Equal Channel Multi-Angular Pressing Process. *Modares Mechanical Engineering*, 16(2): pp. 282-275, 2016.
- [13] Keshtiban P., Zadshakouyan M. and Faraji G., Friction Study in Equal Channel Multi Angular Pressing: Load Curve and Ring Compression tests. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 69(9): pp. 1793-1800, 2016.
- [14] Kuram E. and Ozcelik B., Multi-objective optimization using Taguchi based grey relational analysis for micro-milling of Al 7075 material with ball nose end mill. *Measurement*, 46(6): pp. 1849-1864, 2013.
- [15] Muthuramalingam, T. and B. Mohan, Application of Taguchi-grey multi responses optimization on process parameters in electro erosion. *Measurement*, 2014. 58: p. 495-502.
- [16] Patil B.V., Chakkingal U. and Kumar T.P., Effect of geometric parameters on strain, strain inhomogeneity and peak pressure in equal channel angular pressing—A study based on 3D finite element analysis. *Journal of Manufacturing Processes*, 17: pp. 88-97, 2015.
- [17] Prasanna J., et al., Optimization of process parameters of small hole dry drilling in Ti-6Al-4V using Taguchi and grey relational analysis. *Measurement*, 2014. 48: p. 346-354.
- [18] Çaydaş, U. and A. Haşçalık, Use of the grey relational analysis to determine optimum laser cutting parameters with multi-performance characteristics. *Optics & laser technology*, 40(7): pp. 987-994, 2008.
- [19] Panda D.K., 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*, 25(6): pp. 450-461, 2010.
- [20] Khalilpourazary, S., P. Kashtiban, and N. Payam, Optimization of Turning Operation of St37 Steel Using Grey Relational Analysis. 2014.
- [21] Palanikumar K., et al., Analysis on drilling of glass fiber-reinforced polymer (GFRP) composites using grey relational analysis. *Materials and Manufacturing Processes*, 27(3): pp. 297-305, 2012.
- [22] Tzeng C.-J., et al., Optimization of turning operations with multiple performance characteristics using the Taguchi method and Grey relational analysis. *Journal of materials processing technology*, 209(6): pp. 2753-2759, 2009.