

## بررسی چگالش و تغییرات ابعادی در تفجوشی فاز مایع سوپرسالیدوس آلیاژ برنجی Cu-28Zn

احد محمدزاده	دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز
مازیار آزادبه	دانشیار دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز
امیرعطا آزادبه	کارشناس مهندسی برق، دانشگاه شاهد تهران
عباس صباحی‌نمین	کارشناس ارشد مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

### چکیده

در این پژوهش از روش رویه پاسخ، جهت بررسی تأثیر پارامترهای موثر نظیر دما و زمان بر تفجوشی پودر آلیاژی برنجی با ترکیب Cu-28%Zn، استفاده شد. بمنظور گسترش مدل، چگالی تفجوشی و ابعاد نمونه‌ها اندازه‌گیری و پارامتر چگالش، درصد تخلخل و میزان انقباض حجمی برای بدست آوردن روابط ریاضی بین متغیرهای تفجوشی محاسبه شدند. برای ارزیابی روابط ریاضی از آنالیز واریانس در سطح اطمینان ۹۵٪ استفاده شد. بطور کلی نتایج حاصل از آزمایشات تأیید کننده صحت مدل‌های ریاضی ارائه شده و امکان بکارگیری این مدل‌ها برای پیش بینی چگالش حین تفجوشی فاز مایع سوپرسالیدوس آلیاژ برنجی با ترکیب Cu-28Zn می‌باشد.

کلمات کلیدی: آلیاژ برنجی Cu-28Zn، تفجوشی فاز مایع سوپرسالیدوس، روش رویه پاسخ.

## Evaluation of Densification and Shape Distortion during Supersolidus Liquid Phase Sintering of Brass Cu-28Zn Prealloyed Powder

A. Mohammadzadeh	M.Sc. Student, Materials Engineering Faculty, Sahand University of Technology
M. Azadbeh	Associate Professor, Materials Engineering Faculty, Sahand University of Technology
A. A. Azadbeh	B.Sc., Department of Electrical Engineering Faculty, Shahed University of Tehran
A. SabahiNamin	M.Sc., Materials Engineering Faculty, Sahand University of Technology

### Abstract

This paper studies the effect of sintering variables such as sintering temperature and time on densification and shape distortion of Cu-28Zn prealloyed powder using response surface methodology. Sintered density and dimensional change was measured to calculate densification parameter, porosity percentage, and volumetric shrinkage and develop mathematical models, consequently. Adequacy of models was evaluated by analysis of variance, which corresponding to a 95% confidence interval. Obtained mathematical models are useful not only for high accuracy predicting of densification and shape distortion but also for selecting optimum sintering variables to achieve the desired properties.

**Keywords:** Cu-28Zn Brass Alloy, SuperSolidus Liquid Phase Sintering (SSLPS), Response Surface Methodology (RSM).

## ۱- مقدمه

پودرهای آلیاژی بطور گسترده با استفاده از فناوری افشانش تولید می‌شوند، چگالش پودرهای حاصل بدلیل درشت بودن اندازه ذرات از طریق تف‌جوشی فاز مایع سوپر سالییدوس<sup>۱</sup> در محدوده دمایی بین سالییدوس و لیکوئیدوس انجام می‌شود. در این نوع تف‌جوشی، فاز مایع در مرز بین ذرات پودری و مرز دانه‌ها تشکیل و فیلم مایع در مرز دانه‌ها باعث نرم شدن ذرات شده و شرایط را برای چگالش فراهم می‌کند. چگالش در اثر نیروی موئینگی که حاصل از فاز مایع تشکیل شده در مرز بین ذرات است، اتفاق می‌افتد [۷-۱]. راندال جرم [۸] رابطه (۱) را برای پیش بینی فشار حاصل از نیروی موئینگی معرفی کرده است.

$$\sigma_{cap} = \frac{5.2\gamma_{LV} \cos \theta}{D \left(\frac{\Delta L}{L_0}\right)} \quad (1)$$

در رابطه فوق D قطر ذره،  $\gamma_{LV}$  انرژی فصل مشترک مایع-بخار،  $\theta$  زاویه ترشوندگی و  $\frac{\Delta L}{L_0}$  انقباض ناشی از تف‌جوشی می‌باشد، که میزان انقباض ناشی از تف‌جوشی با استفاده از رابطه ۲ تعریف می‌شود:

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_{After\ sinter} - L_{Befor\ sinter}}{L_{Befor\ sinter}} \quad (2)$$

مطابق رابطه ۱ با کمتر شدن تغییرات ابعادی میزان نیروی موئینگی افزایش می‌یابد که باعث افزایش چگالش می‌شود. با افزایش فاز مایع تشکیل شده چگالش تسریع می‌شود ولی قطعه صلبیت خود را از دست داده و دقت ابعادی کاهش می‌یابد [۹] و سرانجام بعد از حد معینی بین نیروی موئینگی و نیروی جاذبه زمین تقابل بوجود می‌آید که در کسرهای حجمی زیاد فاز مایع، در اثر نیروی جاذبه زمین قطعه شکل اولیه خود را از دست می‌دهد، و به شکلی که بنام پاشنه فیل<sup>۲</sup> معروف است در می‌آید. بطور کلی در SSLPS، چگالش و تغییر شکل توأمآ اتفاق می‌افتد. لیو و همکارانش [۱] در سال ۱۹۹۹ برای اولین بار به بررسی چگالش و تغییر شکل در حین SSLPS پرداخته‌اند و در نهایت با معرفی پارامتر نرم شونده<sup>۳</sup> مطابق رابطه ۳، شرایط بهینه را جهت کنترل تغییر شکل پیش بینی و مدل پیشنهادی را در سیستم آلیاژی Cu-Sn بررسی کردند.

$$\xi = \frac{G^{1/3} V_L}{3 V_S} \quad (3)$$

در رابطه فوق G اندازه دانه،  $V_L$  کسر حجمی فاز مایع تشکیل شده و  $V_S$  کسر حجمی فاز جامد می‌باشد. حالتی که پارامتر نرم شونده<sup>۳</sup> در محدوده شکل تغییر  $\xi < \xi < \xi$  چگالش<sup>۳</sup> باشد،

وضعیت بهینه است. بنابراین مشاهده می‌شود که با تغییر اندازه دانه‌ها و کسر حجمی فاز مایع، پارامتر نرم شونده<sup>۳</sup> نیز تغییر خواهد کرد.

برای بدست آوردن خواص مطلوب همانطور که در بالا اشاره شد نیاز است تا متغیرهایی که بر روی فاز مایع و اندازه دانه تاثیر گذار هستند شناسایی و کنترل شوند. روش رویه پاسخ<sup>۴</sup> از روش‌های آماری و ریاضی است که برای مدل کردن و بهینه‌سازی پارامترها بکار می‌رود [۱۰]. همچنین بصورت کمی رابطه‌ای بین پارامترهای ورودی قابل کنترل و متغیر پاسخ به دست آمده ایجاد می‌کند. مراحل این روش را می‌توان به این ترتیب بیان کرد [۱۱-۱۳]:

۱. طراحی آزمایشاتی برای بدست آوردن مقدار واقعی و دقیق متغیر پاسخ مورد نظر؛
  ۲. بدست آوردن مدل ریاضی چند جمله‌ای مناسب بین متغیرها برای پیش‌بینی متغیر پاسخ؛
  ۳. تعیین شرایط بهینه متغیرهای آزمایش جهت بیشینه یا کمینه کردن مقدار متغیر پاسخ؛
  ۴. تجزیه و تحلیل اثرات مستقیم و تداخل بین پارامترها از طریق نمودارهای دو بعدی و سه بعدی.
- محققین زیادی از روش‌های طراحی آزمایش برای آنالیز و مدل کردن متغیرهای مختلف متالورژی پودر استفاده کرده‌اند [۱۱-۱۵]. در این پژوهش بوسیله روش رویه پاسخ براساس طراحی آزمایش مرکب مرکزی<sup>۵</sup> چگالش و تغییرات ابعادی در حین تف‌جوشی پودرهای آلیاژی برنجی بررسی شده است. همچنین شرایط بهینه جهت کنترل متغیرهای فرآیند تعیین گردید.

## ۲- مواد و روش تحقیق

## ۲-۱- ساخت نمونه‌ها و آزمایشات بررسی خواص

پودر آلیاژی برنجی با ترکیب شیمیایی Cu-28Zn به روش افشانش آبی در شرکت متالورژی پودر تبریز تولید شد. ترکیب شیمیایی پودر با آنالیز XRF و اندازه ذرات آن با استفاده از تست الک مطابق استاندارد ASTM E11 تعیین گردید. سپس برای تعیین پنجره دمایی تف‌جوشی، آنالیز حرارتی DSC تحت اتمسفر گاز خنثی (آرگون) با سرعت گرمایش ۲۰ درجه سانتی-گراد در دقیقه انجام شد. سپس پودر برنجی با ۰/۷۵ درصد وزنی استئارات لیتیم به مدت ۲۰ دقیقه در همزنی با سرعت ۶۵ دور در دقیقه مخلوط شد. نمونه‌های مکعبی به ابعاد

4. Response Surface Methodology (RSM)

5. Design Of Experiments (DOE)

6. Central Composite Rotational Design (CCRD)

1. Supersolidus Liquid Phase Sintering (SSLPS)

2. Elephant foot

3. Softening Parameter

$$\% \text{Volumetric shrinkage} = \frac{V_{\text{Sinter}} - V_{\text{Green}}}{V_{\text{Green}}} \quad (4)$$

در رابطه فوق  $V_{\text{Sinter}}$  حجم نمونه تفجوشی شده ( $\text{cm}^3$ )، و  $V_{\text{Green}}$  حجم نمونه خام ( $\text{cm}^3$ ) می‌باشد. همچنین درصد تخلخل نمونه‌ها نیز از طریق رابطه ۵ تعیین شد.

$$\% \text{Porosity} = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_T}\right) \times 100 \quad (5)$$

در رابطه فوق  $\rho_s$  چگالی تفجوشی و  $\rho_T$  چگالی تئوری ( $\text{g.cm}^{-3}$ ) می‌باشد، که صورت زیر قابل محاسبه است [۱۶]:

$$\frac{1}{\rho_T} = \sum_{i=1}^N \frac{\%wt_i}{\rho_i} \quad (6)$$

در رابطه فوق  $\%wt_i$  درصد وزنی و  $\rho_i$  چگالی تئوری عناصر می‌باشد.

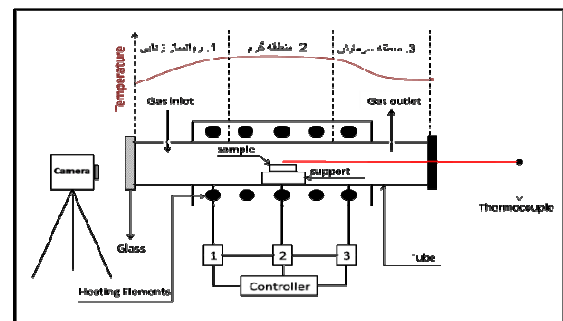
برای طراحی آزمایشات، مدلسازی و تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم افزار 8 Design Expert version استفاده شده است.

## ۲-۲- طراحی و پیاده‌سازی آزمایشات

طراحی آزمایشات با استفاده از روش CCRD انجام شد. دما و زمان تفجوشی بعنوان متغیرهای SSLPS در نظر گرفته شدند. مطابق جدول ۱ هر کدام از متغیرها در ۵ سطح توسط نرم افزار طراحی گردید. تعداد ۱۰ آزمایش بطور تصادفی که توسط نرم افزار مشخص شده بود مطابق جداول ۲ و ۳ انجام شد. لازم به توضیح است که آزمایش در شرایط نقطه مرکزی (نقطه صفر در جدول ۱) دو بار تکرار شد. چگالی تفجوشی ( $\text{g.cm}^{-3}$ )، پارامتر چگالش (%)، درصد تخلخل و درصد انقباض حجمی بعنوان متغیرهای پاسخ در نظر گرفته شدند. که نتایج حاصل از آزمایشات و پیش بینی در جدول ۲ آورده شده است.

$55 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$  توسط پرس هیدرولیکی یک محوره با قالب متحرک تحت فشار  $600 \text{ MPa}$  ساخته شدند. بعد از اندازه گیری جرم و ابعاد نمونه‌های خام در کوره کوچک آزمایشگاهی نوع TFS/25-1250 که طرحواره آن در شکل ۱ نشان داده شده است، ابتدا در دمای  $540^\circ\text{C}$  به مدت ۳۰ دقیقه روانساز زدایی و سپس  $60-15$  دقیقه در منطقه گرم کوره در محدوده دمایی  $850-900^\circ\text{C}$  در اتمسفر نیتروژن با خلوص  $99.99\%$  و دبی ۲ لیتر در دقیقه تفجوشی و در قسمت انتهای کوره (منطقه سوم) سرد شدند. سپس جرم نمونه‌های تفجوشی شده اندازه‌گیری شد.

چگالی خام نمونه‌ها به روش هندسی و چگالی تفجوشی نیز با استفاده از روش ارشمیدس و طبق استاندارد DIN ISO 3369 تعیین شد. طول، عرض و ارتفاع نمونه‌ها توسط کولیس با دقت  $0.02$  میلی‌متر قبل و بعد از تفجوشی با سه بار تکرار برای هر نمونه اندازه‌گیری شد و میزان انقباض حجمی از رابطه ۴ محاسبه شد.



شکل ۱- طرحواره کوره تیوبی، کنترل دما و فرآیند تفجوشی

جدول ۱- پارامترهای تفجوشی و محدوده تغییرات هر پارامتر

سطوح متغیرها براساس کد گذاری					واحد	پارامتر	نماد متغیرها
-1.44	-1	0	1	1.44			
910	900	875	850	840	$^\circ\text{C}$	دمای تفجوشی	A
70	60	38	15	6	Min	زمان تفجوشی	B

جدول ۲- مقادیر تجربی و پیش بینی شده چگالی تفجوشی، پارامتر چگالش، درصد تخلخل و انقباض حجمی

No.	Run	مقادیر کد گذاری شده		چگالی تفجوشی ( $\text{g.cm}^{-3}$ )		پارامتر چگالش (%)		درصد تخلخل		انقباض حجمی (%)	
		A	B	مقدار واقعی	پیش بینی شده	واقعی	پیش بینی شده	واقعی	پیش بینی شده	واقعی	پیش بینی شده
1	3	-1	-1	6.87	6.76	12.44	5.58	17.11	18.40	-6.21	-4.61
2	5	1	-1	7.30	7.18	36.82	29.57	11.89	13.35	-10.24	-8.63
3	2	-1	1	7.18	7.22	32.54	34.39	13.35	12.95	-12.19	-12.59
4	7	1	1	7.29	7.31	39.31	40.76	12.01	11.79	-11.81	-12.2
5	8	-1.44	0	6.79	6.83	8.58	11.05	18.09	17.66	-7.02	-7.63
6	6	1.44	0	7.13	7.18	28.98	32.02	14.05	13.38	-9.47	-10.1
7	9	0	1.44	6.90	7.04	11.56	20.63	16.75	14.99	-4.24	-6.31
8	10	0	1.44	7.50	7.45	51.58	48.24	9.52	10.15	-15.13	-14.35
9	4	0	0	7.42	7.44	46.73	47.79	10.48	10.30	-12.78	-13.2
10	1	0	0	7.46	7.44	49.29	47.79	10.03	10.30	-13.51	-13.2

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مطالعه پودر مصرفی

آنالیز شیمیایی و مشخصات پودر برنجی در جدول ۳ گزارش شده است. همچنین با استفاده از نتایج آنالیز شیمیایی، چگالی تئوری پودر مورد نظر مطابق رابطه ۵ برابر با  $g.cm^{-3}$  ۸,۲۹ بدست آمد.

جدول ۳- مشخصات پودر آلیاژی برنجی

آنالیز شیمیایی پودر آلیاژی برنجی (wt%)	
Cu	Balance
Zn	28.6
Al	0.14
Fe	0.085
S	0.062
Si	0.054
P	0.0084
خواص پودر برنجی	
سیالیت	21 sec/50g
چگالی ظاهری	$3.2 g.cm^{-3}$
شکل ذرات	نامنظم
نتایج تست الک	
<180 $\mu m$	9.75 % wt
<125 $\mu m$	24.63 % wt
<90 $\mu m$	23.53 % wt
<63 $\mu m$	39.77 % wt

۳-۲- ارائه مدل های ریاضی

مدل های ریاضی درجه دوم پیشنهادی توسط نرم افزار Design Expert-8 برای متغیرهای پاسخ در روابط ۷ تا ۱۰ آورده شده است.

$$\begin{aligned} \text{Sintered density}(g.cm^{-3}) &= 7.43 + 0.13A + 0.15B \\ &- 0.08AB - 0.22A^2 \\ &- 0.094B^2 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{Densification parameter}(\%) &= 47.57 + 7.59A + 10B \\ &- 4.41AB - 13.4A^2 - 6.6B^2 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \%Porosity &= 10.33 - 1.55A - 1.75B \\ &+ 0.97AB + 2.67A^2 \\ &+ 1.12B^2 \end{aligned} \quad (9)$$

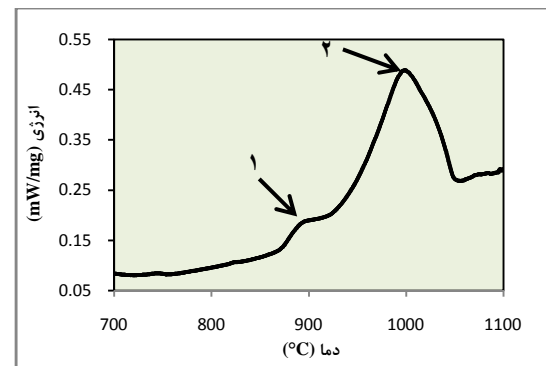
$$\begin{aligned} \%Volumetric shrinkage &= -20.92 + 0.42A - 0.44B \\ &+ 0.37AB + 0.27A^2 \\ &- 0.23B^2 \end{aligned} \quad (10)$$

مدل های ارائه شده بر اساس مقادیر کدگذاری شده متغیرها می باشند. نمادهای A و B به ترتیب نشان دهنده دما و زمان تفجوشی هستند. جهت بررسی دقت و اعتبار روابط پیشنهادی از آنالیز واریانس و نمودار نرمالایته مانده ها استفاده شده است. جدول ۴ آنالیز واریانس را برای متغیرهای پاسخ در سطح اطمینان ۹۵٪ نشان می دهد. با توجه به مقادیر F-value و  $R^2$  می توان نتیجه گیری کرد که معادلات ۷، ۸، ۹ و ۱۰ دارای اعتبار بالایی هستند و برای پیش بینی و تخمین نتایج می توانند مورد استفاده قرار گیرند. مقادیر  $R^2$  و Adj.  $R^2$  برای تمامی پاسخ ها به ترتیب ۰,۷۹ و ۰,۹۱ محاسبه شده که نشان دهنده دقت بالای تخمین داده های پیش بینی شده در مقایسه با مقادیر تجربی می باشد. نمودار نرمالایته مانده ها (شکل ۳) نیز نشان دهنده پیروی نقاط از یک رفتار تقریباً خطی است. توزیع یکنواخت و خطی بودن نشان دهنده توزیع خطاها بصورت نرمال است، که حاکی از کمتر بودن خطا و اعتبار مدل هاست.

۳-۳- بررسی تأثیر دما و زمان فرآیند

برای نشان دادن نحوه تأثیر دما و زمان تفجوشی بر چگالش و انقباض حجمی از نمودارهای Perturbation استفاده شده است.

در شکل ۴-a نحوه تأثیر دما و زمان بر چگالی تفجوشی نشان داده شده است. مشاهده می شود که وقتی زمان ثابت و برابر ۳۷,۵ دقیقه فرض شود، نمودار از یک رفتار سهمی وار پیروی می کند و تقریباً در اطراف نقطه مرکزی ( $875^{\circ}C$ ) بیشینه مقدار را برای چگالی نشان می دهد (منحنی A).

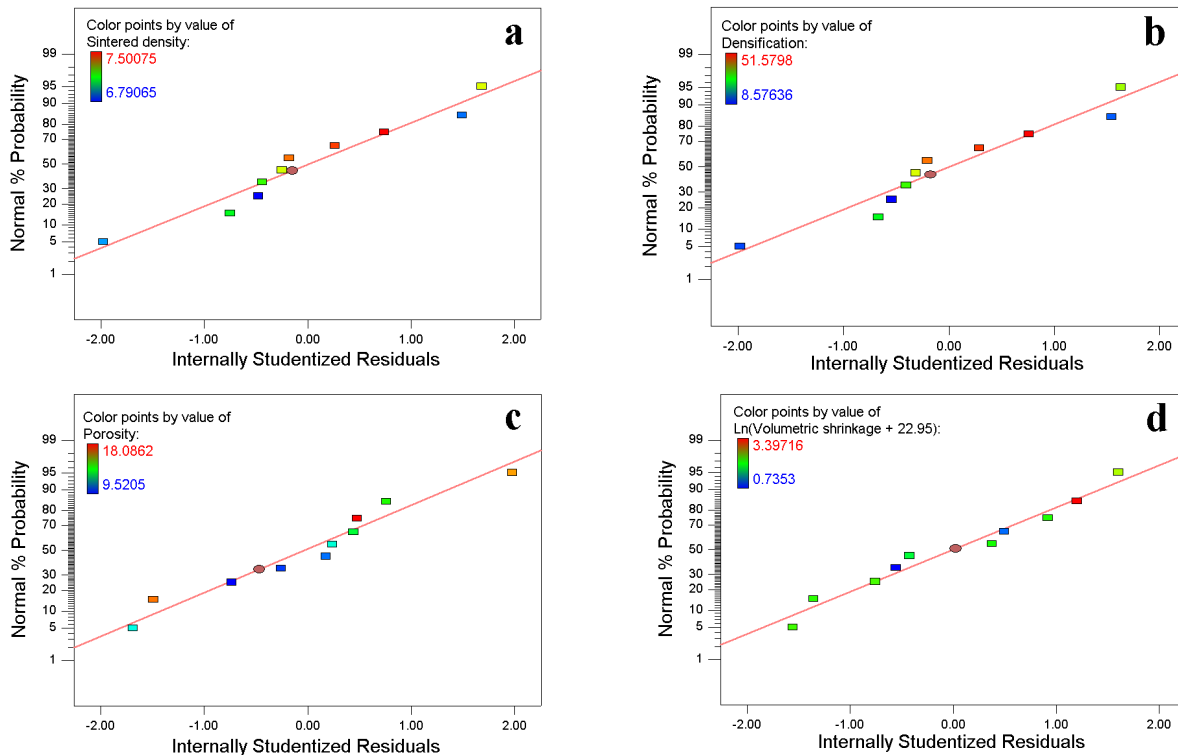


شکل ۲- منحنی آنالیز حرارتی DSC پودر Cu-28Zn.

در شکل ۲ منحنی DSC پودر مصرفی نشان داده شده است. در محدوده دمایی  $700^{\circ}C$  تا  $1200^{\circ}C$  دو واکنش گرماگیر اتفاق افتاده است. با مقایسه شدت پیک ها نتیجه می شود که قله اول مربوط به واکنش تبدیل جامد به مایع می باشد که در دمایی بالاتر از  $850^{\circ}C$  اتفاق افتاده است. قله دوم در منحنی DSC بدلیل اینکه دارای شدت بیشتری می باشد واکنش تبدیل فاز مایع به بخار را نشان می دهد، که با توجه به دمای تبخیر روی ( $907^{\circ}C$ ) و دمای شروع واکنش دوم ( $918^{\circ}C$ ) می توان نتیجه گرفت که تبخیر روی اتفاق افتاده است. بنابراین پنجره دمایی  $850^{\circ}C$  تا  $900^{\circ}C$  محدوده مناسبی برای طراحی آزمایشات می باشد.

جدول ۴- آنالیز واریانس (ANOVA) برای هر کدام از پاسخها

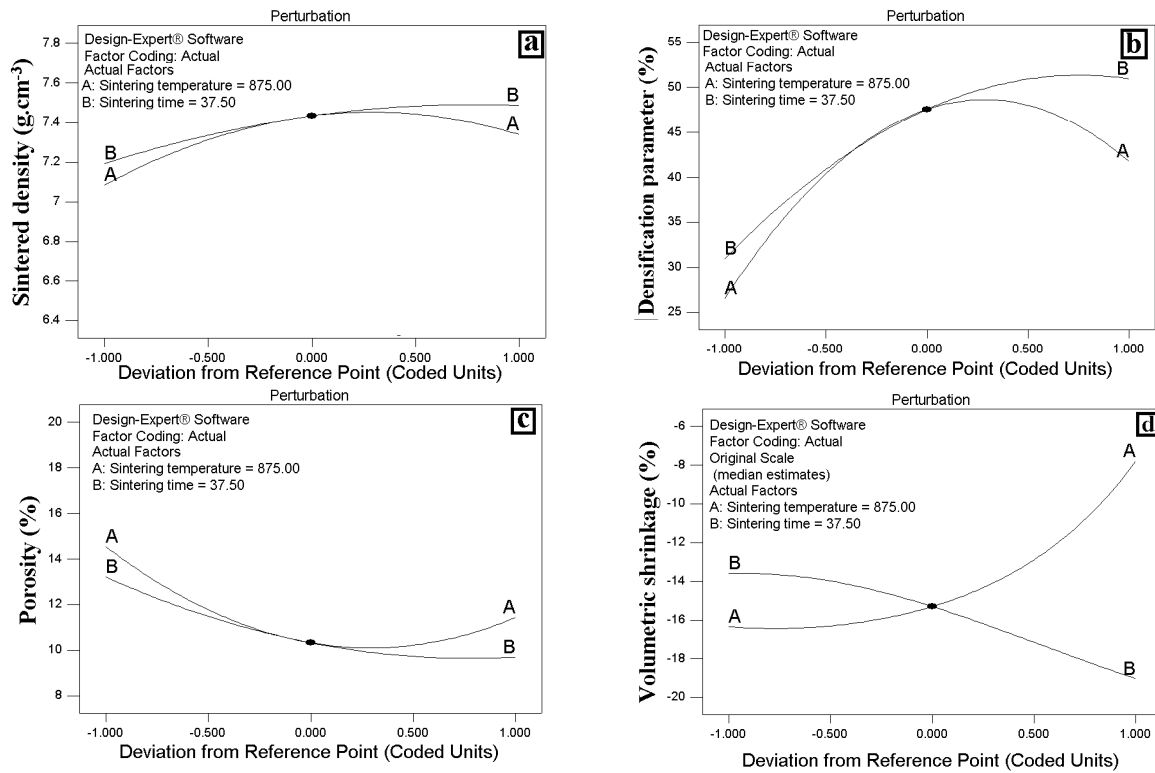
	Sum of squares		Means squares		Degrees of freedom		F-value	R <sup>2</sup>	Adj. R <sup>2</sup>	Remark
	رگرسیون	مانده	رگرسیون	مانده	رگرسیون	مانده				
چگالی تفجوشی	0.54	0.056	0.11	0.014	5	4	7.77	0.91	0.79	Adequate
پارامتر چگالش	2116.26	217.44	423.25	54.36	5	4	7.79	0.91	0.79	Adequate
درصد تخلخل	78.26	8.23	15.65	2.06	5	4	7.61	0.91	0.79	Adequate
درصد انقباض حجمی	4.99	0.46	0.9	0.12	5	4	7.78	0.91	0.79	Adequate



شکل ۳- نمودار نرمالیت ماندهها

در شکل ۴-d منحنی A، تأثیر دما بر درصد انقباض حجمی را در زمان ثابت ۳۷/۵ دقیقه نشان می‌دهد. با افزایش دما میزان انقباض حجمی نیز به سمت صفر میل می‌کند و می‌توان از شیب تند منحنی نتیجه گرفت که در دماهای بالاتر میزان انقباض کمتری حاصل می‌شود. طبق منحنی B شکل ۴-c، در دمای ثابت (۸۷۵°C) نحوه تأثیر زمان تفجوشی بر انقباض حجمی عکس تأثیر دمای تفجوشی است و با افزایش زمان میزان انقباض حجمی نیز بیشتر می‌شود.

می‌توان با فرض اینکه دما در نقطه مرکز ثابت باشد، تأثیر تغییرات زمان را بر چگالی مشاهده کرد (منحنی B). نحوه تأثیر زمان بر چگالی نیز تقریباً شبیه دما می‌باشد. انتظار می‌رود پارامتر چگالش هم رفتاری مشابه چگالی تفجوشی داشته باشد که شکل ۴-b مویید این موضوع است. شکل ۴-c تغییرات درصد تخلخل را با دما و زمان نشان می‌دهد. می‌توان نتیجه گرفت که در اطراف نقطه مرکزی کمترین مقدار تخلخل بدست می‌آید که این نتیجه با بیشینه بودن چگالی و پارامتر چگالش در این نقطه انطباق خوبی دارد.



شکل ۴- نمودارهای نحوه تاثیر متغیرها بر پاسخها

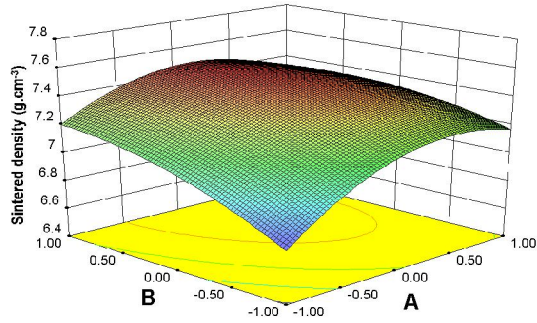
بنابراین با توجه به رفتار پیچیده‌ای که در شکل ۵-d برای انقباض حجمی دیده می‌شود باید جهت مشخص کردن دقیق نقطه بهینه از قسمت بهینه سازی نرم افزار Design Expert-8 استفاده شود تا نقطه مورد نظر تعیین گردد.

#### ۳-۵- بهینه‌سازی فرآیند SSLPS

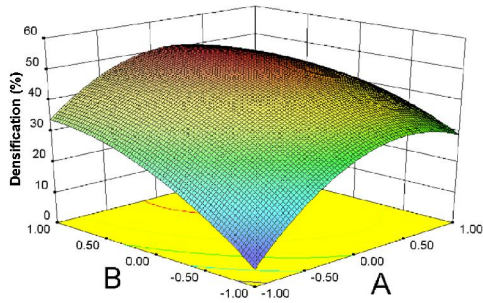
در جدول ۵ شرایط بهینه برای هر یک از متغیرهای پاسخ آورده شده است. مشاهده می‌شود که انتخاب شرایط بهینه به حصول خواص مورد نظر از فرآیند بستگی دارد، بدین ترتیب که اگر چگالش اهمیت بالایی داشته باشد، دمای ۸۸۰°C و زمان ۵۴ دقیقه شرایط بهینه پیشنهادی است. برای دستیابی به کمترین درصد انقباض حجمی به نظر می‌رسد که دمای پیشنهادی زیاد باشد و بدلیل نزدیک بودن به دمای تبخیر عنصر روی (۹۰۷°C)، دمای مناسبی برای تفجوشی آلیاژ برنجی Cu-28Zn نباشد. بنابراین در ساخت قطعات حاصل از پودرهای آلیاژی برنجی باید میزان انقباض ناشی از تفجوشی فاز مایع سوپرسالیدوس در طراحی‌ها در نظر گرفته شود.

#### ۳-۴- بررسی تأثیر دما و زمان تفجوشی بر چگالش و تغییرات ابعادی

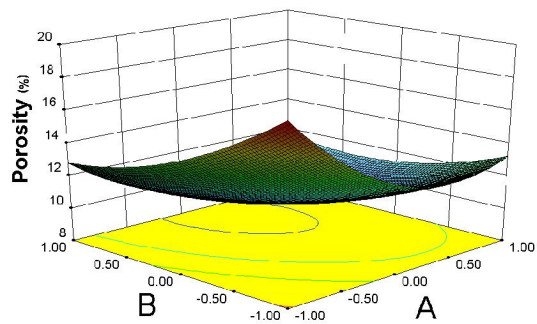
مطابق شکل ۵ با استفاده از نمودارهای کانتوردو بعدی و رویه سه بعدی تأثیر همزمان دما و زمان تفجوشی بررسی شد. در شکل‌های ۵-a، b و c مشاهده می‌شود که بیشینه مقدار چگالی و پارامتر چگالش و کمینه مقدار درصد تخلخل در نقطه‌ای بالاتر از نقطه مرکزی (۳۷/۵, min۸۷۵°C) بدست می‌آید. منحنی‌های رویه سه بعدی نیز موید رفتار سهمی‌وار چگالی، پارامتر چگالش و درصد تخلخل با دما و زمان هستند. بنابراین استفاده از محدوده سرخ رنگ نمودارهای کانتور برای دستیابی به چگالی تفجوشی و پارامتر چگالش بیشینه و محدوده آبی رنگ برای کمترین درصد تخلخل توصیه می‌شود. انقباض حجمی نسبت به چگالش رفتاری متفاوت دارد، میزان انقباض حجمی هر چقدر به صفر نزدیک باشد بهتر است ولی با توجه به اینکه همواره در طول فرآیند SSLPS انقباض رخ می‌دهد، بنابراین باید نقطه‌ای انتخاب گردد که در آن نقطه میزان انقباض حجمی نزدیکترین مقدار به صفر داشته باشد.



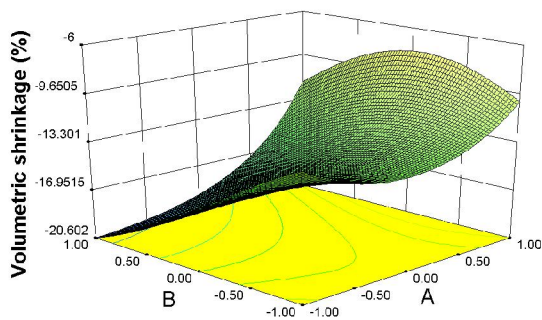
ب) رویه سه بعدی چگالی تفجوشی



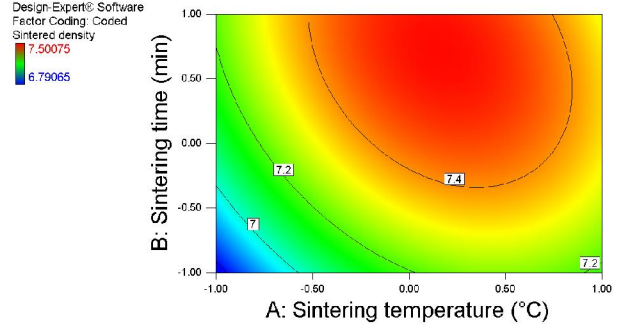
ت) رویه سه بعدی پارامتر چگالش



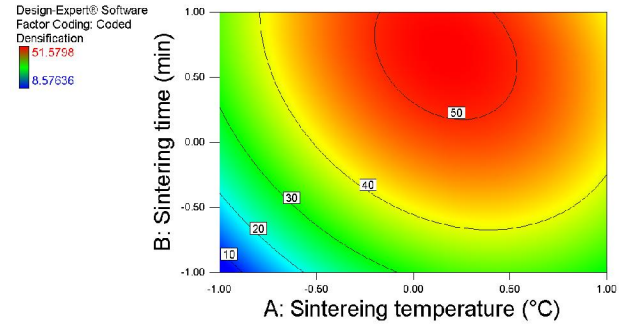
ج) نمودار رویه سه بعدی درصد تخلخل



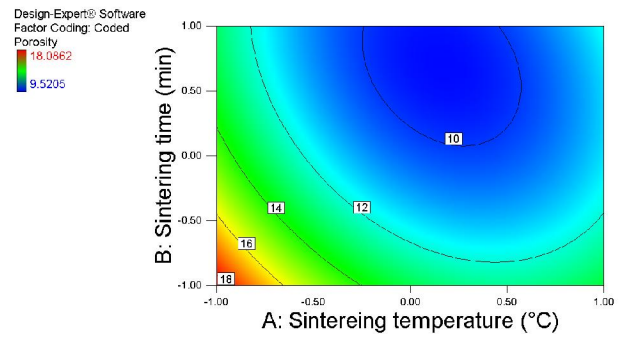
ح) نمودار رویه سه بعدی درصد انقباض حجمی



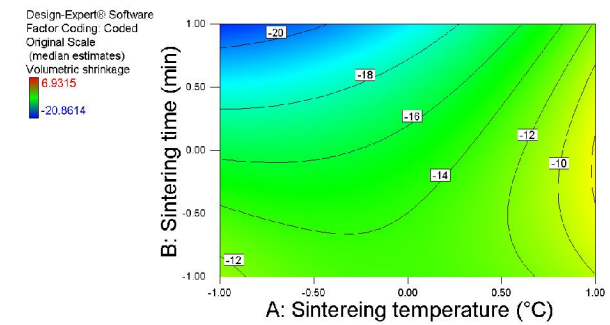
الف) نمودار کانتور چگالی تفجوشی



ب) نمودار کانتور پارامتر چگالش



ث) نمودار کانتور درصد تخلخل



چ) نمودار کانتور درصد انقباض حجمی

شکل ۵- نمودارهای دو بعدی و سه بعدی تأثیر دما و زمان تفجوشی بر پاسخها

جدول ۵- شرایط بهینه برای پاسخ‌ها

مقدار پیش بینی شده	زمان تفجوشی (دقیقه)	دمای تفجوشی (°C)	هدف	متغیر پاسخ
7.50	54	879	Max	چگالی تفجوشی (g.cm <sup>-3</sup> )
51.69	54	880	Max	پارامتر چگالش (%)
9.59	54	879	Min	درصد تخلخل
-7.71	34	900	0	درصد انقباض حجمی

### ۳-۶- آنالیز ریزساختاری

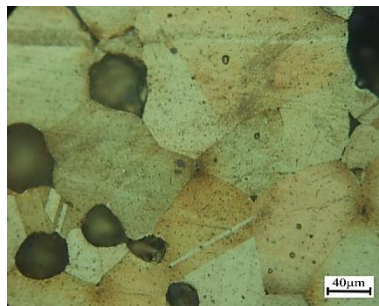
در شکل ۶ با افزایش دما دانه‌ها رشد کرده و همچنین تعداد حفرات کمتر شده است، به طوری که با افزایش فاز مذاب حفرات بیشتری به هم پیوسته و تعدادشان کمتر شده و از نظر اندازه رشد کرده‌اند. این امر تا دمای ۸۷۵°C باعث تشکیل ساختاری کامل با خواص مطلوب شده است، در حالی که با افزایش بیشتر دما پدیده‌ی استوالد-رایپنینگ سبب حذف حفرات و دانه‌های ریز، و رشد دانه‌های درشت‌تر شده است. با توجه به ریزساختار نمونه‌های تفجوشی شده به نظر می‌رسد در دمای ۸۵۰°C با شروع فرآیند تفجوشی پیوندهای اولیه بین ذرات در طول گرمایش، در نتیجه‌ی نفوذ ذرات در یکدیگر تشکیل شده و این فرآیند موجب چگالش نسبی نمونه‌ها شده است. با افزایش دما و آغاز فرآیند SSLPS، فاز مذاب در داخل دانه‌ها و مرزدانه‌ها تشکیل شده و در اثر نیروی موئینگی ناشی از فاز مایع، ذرات به صورت منظم در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند و مذاب تشکیل شده باعث خرد شدن ذرات و شکل‌گیری دانه‌های کوچکتری شده است. با بالاتر رفتن دما تا ۸۷۵°C، دانه‌ها در کنار یکدیگر آرایش مجدد یافته و چگالش افزایش چشم‌گیری داشته است. در دماهای بالاتر از ۸۷۵°C، دانه‌ها رشد کرده و به دنبال آن یکسری حفرات بین دانه‌ها باقی مانده‌اند که این افزایش در اندازه دانه‌ها می‌تواند دلیل مناسبی برای کاهش چگالی تفجوشی و چگالش باشد.

### ۴- نتیجه‌گیری

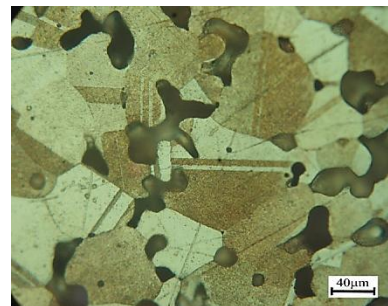
- با استفاده از روش رویه پاسخ (RSM) بر پایه طراحی آزمایش مرکب مرکزی (CCRD) مدل‌های ریاضی در سطح اطمینان ۹۵٪ برای چگالی تفجوشی، پارامتر چگالش، درصد تخلخل و درصد انقباض حجمی در حین تفجوشی فاز مایع سوپرسالیدوس آلیاژ Cu28Zn بدست آمد و نتایج حاصل از آنالیز واریانس تأیید کننده صحت روابط پیشنهادی بود.
- نمودارهای دو بعدی و رویه سه بعدی نشان دهنده رفتار سهمی‌وار برای چگالی تفجوشی، پارامتر چگالش و درصد تخلخل با دما و زمان تفجوشی در حین پدیده SSLPS بودند.
- می‌توان با انجام آزمایشات کمتر شرایط بهینه را برای حصول حداکثر چگالش آلیاژ Cu28Zn در حین SSLPS در دمای ۸۸۰°C و زمان ۵۴ دقیقه پیش بینی کرد.
- انقباض حجمی یا عبارتی تغییرات ابعادی حین SSLPS در پودرهای آلیاژی برنجی اجتناب ناپذیر است که باید در طراحی فرآیندهای ساخت قطعات برنجی در نظر گرفته شود.
- نتایج ریزساختاری نشان دهنده وقوع مکانیزم SSLPS با افزایش دمای تفجوشی می‌باشد، و مطابقت خوبی با نتایج حاصل از آزمایشات انجام شده دارند. بطوریکه با افزایش بیشتر دما میزان درشت شدن حفرات و دانه‌ها نیز بیشتر شده و در نتیجه میزان چگالش کاهش پیدا کرده است.



ج) دمای ۹۱۰ درجه سانتی‌گراد



ب) دمای ۸۷۵ درجه سانتی‌گراد



الف) دمای ۸۴۰ درجه سانتی‌گراد

شکل ۶- ریزساختار نمونه‌های تفجوشی شده در دماهای مختلف و در زمان ثابت ۳۸ دقیقه



## مراجع

- [15] M. Joseph Davidson, N. Selvakumar, "A neural network (NN) and response surface methodology (RSM) based prediction model for sintered aluminium performs", In Proceedings of the 11th WSEAS international conference on Artificial Intelligence, 2012, ISBN: 978-1-61804-068-8.
- [16] R. Bollina, "In Situ Evaluation Supersolidus Liquid Phase Sintering Phenomena of Stainless Steel 316L: Densification and Distortion", PhD Thesis in Engineering Science and Mechanics. The Pennsylvania State University, 2005.
- [1] J. Liu, A. Lal, R. M. German, "Densification and shape retention in supersolidus liquid phase sintering. Elsevier", Acta mater., Vol. 47, pp. 4615-4626. 18, 1999.
- [2] R. M. German, "Liquid Phase Sintering", New York: Plenum Press, 1985.
- [3] D.C. Blaine, R. Bollina, S. J. Park, R.M. German, "Critical use of video-imaging to rationalize computer sintering simulation models", Elsevier, Computers in Industry, Vol. 56, pp. 867-875, 2005.
- [4] R. M. German, "Supersolidus Liquid-Phase Sintering of Prealloyed Powders", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 28A, pp. 1553-1567. 7, JULY 1997.
- [5] Y. Liu, R. Tandon, R. M. German, "Modeling of Supersolidus Liquid Phase Sintering: I. Capillary Force", Metallurgical and Materials Transactions, Vol. 26A, pp. 2415-2422, 1995.
- [6] Y. Liu, R. Tandon, and R. M. German, "Modeling of Supersolidus Liquid Phase Sintering: II. Densification", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 26A, pp. 2423-2436, 1995.
- [7] R. M. German, "An Update on the Theory of Supersolidus Liquid Phase Sintering", Proceedings Sintering 2003, no pages, 2003.
- [8] R. M. German, Metall. Mater. Trans., Vol. 28A, pp. 1553, 1997.
- [9] Zoran S. Nikolic, "Computer Simulation of Liquid Phase Sintering: Gravity Induced Skeletal Structure Evolution – A Review", Trans Tech Publications, Materials Science Forum, Vol. 624, pp. 19-42, Jun 2009.
- [10] Box GEP, Wilson KB, "On the experimental attainment of optimal conditions", J Roy Stat, No. 18, pp. 1-45, 1951.
- [11] C.H. Ji, N.H. Loh, K.A. Khor, S.B. Tor, "Sintering study of 316L stainless steel metal injection molding parts using Taguchi method: final density", pp. 74-82, 2000.
- [12] P.K. Bardhan, R. Behera, S. Patra, G. Sutradhar, "Analysis of Surface Roughness of Machined Surface of Powder Metallurgy Components", International Journal of Scientific & Engineering Research, Vol. 2, 2011.
- [13] R.M. Myers, D.C. Montgomery, "Response Surface Methodology", 2nd edition. New York: John Wiley, 2002.
- [14] P. K. Bardhan, S. Patra, G. Sutradhar, "Analysis of Density of Sintered Iron Powder Component Using the Response Surface Method", Materials Sciences and Applications, pp. 152-157, 2010.