

استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی در شبیه‌سازی فرایند تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای نمونه کامپوزیتی $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$

محمد رضازاده^{۱*}، رحمت اله عمادی^۱، احمد ساعتچی^۱، علی قاسمی^۲ و مسعود رضایی نیا^۳

۱- دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

۳- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد

(دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۹/۲۱ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۴/۰۹/۲۲)

چکیده - در فرایند تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای، اعمال هم‌زمان فشار مکانیکی و بار الکتریکی روی نمونه پودری، موجب حصول نمونه‌ای با چگالی نزدیک به مقدار نظری می‌شود. در این پژوهش به شبیه‌سازی اجزای محدود کوپل الکتریکی - حرارتی - مکانیکی سیستم تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای و استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه برای بهینه‌سازی متغیرهای قالب، پرداخته شده است. شبیه‌سازی صورت گرفته برای نمونه کامپوزیتی $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ با نسبت مولی 1:1 مطابقت خوبی با آزمون‌های تجربی داشت. به کمک الگوریتم ژنتیک چند هدفه، بهینه‌سازی ابعاد قالب به منظور حداکثر نمودن دمای مرکز نمونه و حداقل کردن "تنش فون میسز" در قالب صورت گرفت. نتایج نشان می‌دهد پس از بهینه‌سازی ابعاد قالب، دمای مرکز نمونه حدود ۸ درصد افزایش و اختلاف دمای مرکز نمونه و سطح قالب در حدود ۱۸ درصد کاهش یافت. این موضوع موجب یکنواختی بهتر در توزیع تخلخل نمونه نهایی گردید.

واژگان کلیدی: تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای، روش اجزاء محدود، بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک چندهدفه

Use of Optimization Algorithm for Simulation of Spark Plasma Sintering Process in $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ Composite

M. Reza zadeh^{1*}, R. Emadi¹, A. Saatchi¹, A. Ghasemi² and M. Reza inia³

1- Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan

2- Department of Materials Engineering, Malek-Ashtar University of Technology, Isfahan

3- Department of Mechanical Engineering, University of Yazd, Yazd

* مسئول مکاتبات پست الکترونیکی: m.reza zadeh@ma.iut.ac.ir

Abstract: Simultaneous application of mechanical pressure and electrical charge on powder samples in spark plasma sintering process, has resulted in a sample with a density close to the theory. In the present study, a thermal-electrical-mechanical coupled finite element model of spark plasma sintering system using multi-objective optimization algorithm is proposed to optimize the mold variable. The simulation performed for $Si_3N_4-SiO_2$ (1:1 mol) specimen has good agreement with the experimental results. Multi-objective genetic algorithms was used for optimization of mold design in order to maximize the temperature of sample core and minimize the mises stress in the mold. The results show that the optimized dimensions cause 8% increase in sample temperature and about 18% decrease in temperature difference between mold surface and sample core. This leads to better uniformity in the porosity distribution of final sample.

Keywords: Spark plasma sintering, Finite element method, Optimization, Multi-objective genetic algorithm

فهرست علائم

چگالی جریان	\vec{J}	هدایت حرارتی	\dot{q}_c
میدان الکتریکی	E	مقاومت تماسی حرارتی	R_c^{th}
ضریب رسانایی الکتریکی	σ_e	مقاومت تماسی الکتریکی	R_c^{el}
پتانسیل الکتریکی	U	بردار نرمال سطح	\vec{n}
حجم	V	ثابت استفان بولتزمن $5/6704 \times 10^{-8}$	σ_B
سطح	S	ضریب انتشار	ϵ_r
چگالی	ρ	انتقال حرارت جابه‌جایی	\dot{q}_{conv}
گرمای ویژه	C_p	انتقال حرارت تشعشی	\dot{q}_r
دما	T	اثر حرارت تماسی	\dot{q}_{ec}
ضریب هدایت حرارتی	K	فاصله هدایت حرارتی	h_g
زمان	t	فاصله هدایت الکتریکی	σ_g

۱- مقدمه

در روش‌های معمول تف‌جوشی مشکلات مهمی از قبیل تغییر ریزساختار ماده به دلیل رشد دانه‌ها در زمان‌ها و دماهای بالای تف‌جوشی، بالا بودن درصد تخلخل در قطعات تولید شده و غیرهمگن بودن ریزساختار آن‌ها، زمان طولانی عملیات تف‌جوشی و در نتیجه کم بودن سرعت و بالا بودن هزینه تولید قطعات وجود دارد که باعث محدودیت در استفاده از این روش‌ها شده است [۱].

تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای^۱ (SPS) در واقع یک نام تجاری برای روش‌هایی است که در آن‌ها از جریان الکتریکی (اعمال میدان الکتریکی) و فشار به‌صورت توامان در تف‌جوشی کمک گرفته می‌شود. ایجاد پلاسمای در اثر اعمال جریان مستقیم پالسی با فرکانس و آمپراژ بالا هم‌زمان با اعمال فشار و ذوب

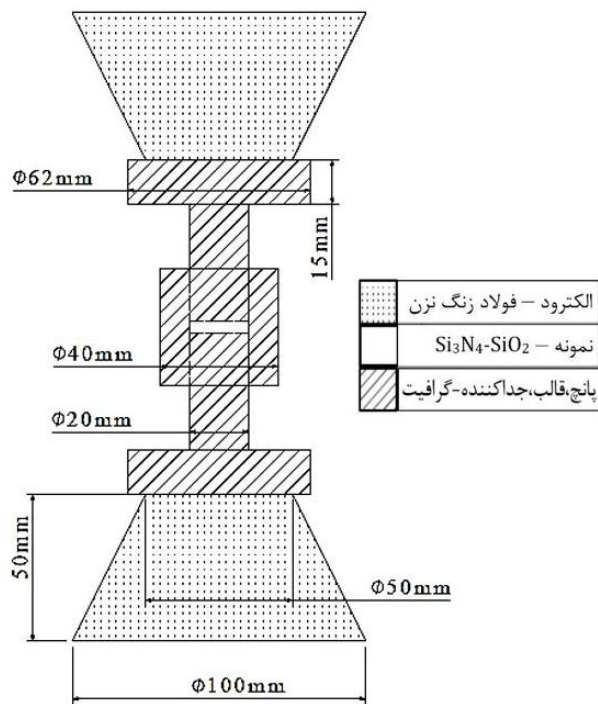
موضعی سطح ذرات پودر در اثر عبور جریان الکتریکی (با چگالی بالا) از مهم‌ترین مکانیزم‌هایی است که برای فرایند SPS ذکر شده است [۱ و ۲]. در این فرایند، اعمال جریان پالسی باعث ایجاد پلاسمای در محفظه قالب می‌شود و حضور پلاسمای در حین عملیات تف‌جوشی نیز باعث افزایش سرعت تف‌جوشی و کاهش قابل ملاحظه‌ی زمان تولید و افزایش کیفیت قطعات تولید شده به روش SPS می‌شود [۵-۱].

نمایی از فرایند SPS به‌طور شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است. میزان فشار مکانیکی یا جریان الکتریکی می‌تواند در طول فرایند ثابت یا در مراحل مختلف متغیر باشد. به‌ویژه، جریان الکتریکی می‌تواند به‌وسیله یک کنترل کننده خودکار کنترل شود تا فرایند در دمای ثابت انجام شود [۲]. با توجه به عدم امکان اندازه‌گیری دما در نواحی داخلی و

محاسبات از بسته نرم‌افزاری CFD-ACE+ استفاده شد. در پژوهش‌های دیگری نیز توزیع دما در قالب برای مواد مختلف و تأثیر متغیرهای مختلف بر آن محاسبه شده است [۵ و ۹]. هم‌چنین وانگ و همکارانش [۷] در سال ۲۰۰۷ میلادی با استفاده از روش‌های اجزاء محدود و کوپل سه‌گانه گرما، الکتریسیته و فشار مکانیکی، شبیه‌سازی مورد نظر را برای به‌دست آوردن توزیع تنش انجام دادند. مدل‌سازی با یک مدل ترکیبی موجب شد تا وانمسل و همکارانش [۸] یک نقطه استراتژیک را برای اندازه‌گیری دما، پیشنهاد دهند که به موجب آن دقت اندازه‌گیری دما افزایش یابد. میزان مصرف انرژی در فرایند تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای یکی از متغیرهای مهم در عملکرد سیستم است. بدین منظور کاهش اتلاف انرژی و افزایش راندمان در فرایند اجتناب ناپذیر است [۱۰]. در سال‌های اخیر پژوهشگران با استفاده از الگوریتم‌های مختلف سعی نمودند تا توزیع دما در قالب با دقت بالا محاسبه و تخمین زده شود [۱۱-۱۳].

SiO_2 و Si_3N_4 دو ماده مناسب برای ساخت قطعات عبور دهنده امواج الکترومغناطیسی هستند. این ترکیب گزینه مناسبی برای استفاده در پنجره آنتن‌های راداری است. استحکام پایین SiO_2 و ثابت دی‌الکتریک بالای Si_3N_4 از محدودیت‌های این دو ماده برای کاربردهای گفته شده است. به همین خاطر خواص کامپوزیت $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ می‌تواند محدودیت‌های دو ترکیب فوق را بهبود بخشد [۱۴].

همان‌طور که دیده می‌شود پژوهش‌های زیادی در سال‌های اخیر بر روی تخمین توزیع دما در قالب و نمونه متمرکز شده‌اند. در این پژوهش‌ها [۱۳-۳]، شیب دمایی زیادی در قالب و نمونه‌های مختلف، به علت تفاوت در رسانایی الکتریکی و شکل و اندازه قالب مشاهده می‌شود. این پدیده می‌تواند تأثیرات فراوانی بر فرایند تف‌جوشی، داشته باشد. هم‌چنین در فرایند تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای کنترل متغیرهایی هم‌چون حداکثر دمای مرکز نمونه، اختلاف دما بین نقاط مختلف نمونه و اختلاف دمای اندازه‌گیری شده توسط پیرومتر از سطح قالب



شکل ۱- طرح سیستم تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای با قالب معمولی

هم‌چنین نیاز به کنترل دمایی فرایند بر اساس دمای داخلی قالبی که نمونه در حال تف‌جوشی درون آن قرار دارد شبیه‌سازی فرایند، امری ضروری و مورد نیاز پژوهشگران خواهد بود [۸-۳]. علاوه بر آن این شبیه‌سازی می‌تواند برای بهینه‌سازی فرایند به‌کار گرفته شود. شبیه‌سازی فرایند تف‌جوشی برای به‌دست آوردن دما در نقاط مختلف در یک دهه گذشته مورد توجه قرار گرفته است. ماتسوگی و همکاران [۳] برای اولین بار در سال ۲۰۰۲ میلادی با توجه به اهمیت توزیع دما و ولتاژ، طی فرایند و هم‌چنین کنترل سیستم، اقدام به شبیه‌سازی فرایند تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای در قالب و پانچ تحت فشار نمودند. این مطالعات نشان داد که توزیع دما و ولتاژ با روش محاسباتی صرف نظر از نوع شکل، پانچ و میزان فشردگی قابل تخمین است. تامبورینی و همکارانش [۴] در سال ۲۰۰۴ میلادی مدل‌سازی دیگری از دو ماده با رسانایی کاملاً متفاوت انجام دادند و شیب حرارت و جریان در برای شعاعی و محوری را برای هر دو مورد بررسی نمودند. در این پژوهش برای

و دمای واقعی، بر خواص نمونه نهایی موثر است. هر چه توزیع دما در نمونه یکنواخت‌تر باشد، نمونه‌ای همگن‌تر به دست می‌آید. از طرفی کنترل فرایند در دستگاه توسط سیستم کنترل حلقه بسته‌ای صورت می‌گیرد که دمای اندازه‌گیری شده توسط پیرومتر از سطح قالب گرافیتی معیار کنترل دمای فرایند خواهد بود. هر چه این دما با دمای مرکز نمونه اختلاف کم‌تری داشته باشد، دستگاه از دقت مطلوب‌تری در سیستم کنترل برخوردار خواهد بود و عملکرد حرارتی و کیفیت نمونه بهبود خواهد یافت.

به‌همین خاطر در این پژوهش سعی شده است با شناسایی و ارائه یک مدل اجزاء محدود الکتریکی-حرارتی-مکانیکی مناسب توزیع جریان، دما و تنش محاسبه شود و سپس به کمک این مدل اجزاء محدود، ابعاد قالب با استفاده از الگوریتم ژنتیک چند هدفه^۲ برای حداکثر نمودن دمای مرکز نمونه و حداقل نمودن "تنش فون میسز" در قالب بهینه شود. نتایج حاصل از این پژوهش برای شناخت شرایط دمایی نمونه در حین تف‌جوشی استفاده شده است و می‌تواند برای بهبود کنترل شرایط حاکم بر تف‌جوشی در دستگاه تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

نمونه پودری مورد استفاده ترکیب کامپوزیتی (1:1 mol) $Si_3N_4-SiO_2$ است. خواص این ماده ترکیبی به کمک قانون اختلاط در کامپوزیت‌ها، استخراج و در شبیه‌سازی به کار گرفته شد.

۲- روابط حاکم

۲-۱- پتانسیل الکترواستاتیکی

همان‌طور که گفته شد جریان الکتریکی داخل قطعات، حرارت تولید می‌کند که مقدار آن وابسته به میزان رسانایی الکتریکی آن‌هاست. مدل‌سازی الکتریکی مسئله در طی فرایند تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای از قانون بقای جریان^۳ نتیجه گرفته می‌شود که به صورت رابطه ۱ است:

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (1)$$

که در اینجا J نشان‌دهنده چگالی جریان است. J را می‌توان با استفاده از قانون اهم^۴ به صورت رابطه ۲ نوشت:

$$\vec{J} = \sigma_e \vec{E} = -\sigma_e \nabla U \quad (2)$$

که E میدان الکتریکی، σ_e ضریب رسانایی الکتریکی^۵ و U پتانسیل الکتریکی^۶ است. در نتیجه برای حل مسائل الکتریک رابطه ۳ معروف به پواسون تشکیل شده است:

$$\nabla \cdot (-\sigma_e \nabla U) = 0 \quad (3)$$

۲-۲- روابط حرارتی

فرایندهای حرارتی به‌وسیله رابطه بقای انرژی توصیف می‌شوند که در فرم کلی برای حجم کنترل V طبق رابطه ۴ خواهد بود:

$$\int_V \rho C_p \frac{\partial \theta}{\partial t} dV = \int_V (k \nabla \theta) dV + \int_V q_e dV + \int_S (q_v + q_{conv} + q_r + q_{ec}) dS \quad (4)$$

در این رابطه V حجم کنترل محدود شده به‌وسیله سطح S ، ρ چگالی، C_p گرمای ویژه، T دما، K ضریب هدایت حرارتی و t زمان را نشان می‌دهند. قسمت چپ رابطه و اولین جمله سمت راست در منابع مختلف آورده شده است و دو جمله دیگر مربوط به منابع حرارتی است که در داخل حجم کنترل تولید و یا از طریق سطوح مرزی حجم کنترل وارد می‌شوند [۷].

در مدل‌سازی فرایند تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای، حرارت تولید شده در حجم کنترل همان گرمای ژول است، بنابراین q_e نشان‌دهنده نرخ تولید گرمای ژول در حجم کنترل است.

شارهای حرارت سطحی که در سطوح حجم کنترل قرار دارند شامل q_c ، q_{conv} ، q_r و q_{ec} هستند که به ترتیب هدایت حرارتی، انتقال حرارت جابه‌جایی، انتقال حرارت تشعشعی و اثر حرارت تماسی خواهند بود. با توجه به شرایط فرایند سیتتریگ پلاسمای جرقه‌ای که در شکل ۱ مشاهده شد و با توجه به محیط خلأ انجام فرایند و عدم ایجاد یا محدود بودن انتقال حرارت جابه‌جایی و هدایتی با محیط، از متغیر q_{conv} و q_c در اینجا صرف نظر می‌شود.

تمامی سطوح داغ قالب، پانچ‌ها و جداکننده‌ها از طریق تشعشع، انرژی خود را از دست می‌دهند. شار حرارتی منتشر شده از اجسام داغ به وسیله رابطه ۱۱ توصیف می‌شود:

$$q_r = -k\nabla T \cdot \vec{n} = \sigma_B \epsilon_r (T^4 - T_{wall}^4) \quad (11)$$

که در این رابطه σ_B ثابت استفان-بولتزمن ϵ_r ضریب انتشار قطعات و T_{wall} دمای دیواره محفظه است.

منبع انرژی در رابطه تعادل انرژی از طریق جریان الکتریکی تأمین می‌شود و از طرف دیگر وابستگی ویژگی‌های مواد به دما باعث ایجاد کوپل می‌شود. جمله منبع انرژی در رابطه تعادل انرژی از طریق اثر ژول به صورت رابطه ۱۲ و ۱۳ بیان می‌شود:

$$q_e = \vec{J} \cdot \vec{E} = \left| \vec{J} \right| \left| \vec{E} \right| = JE \quad (12)$$

$$Q_e = \int_V q_e dV = \sigma_e \|\nabla U\|^2 \quad (13)$$

میزان حرارت تولید شده و گرمایش نمونه وابسته به رسانایی الکتریکی و هم‌چنین گرادیان پتانسیل الکتریکی است.

۳- روش تحقیق

۳-۱- شبیه‌سازی فرایند

شبیه‌سازی در نرم افزار انسیس ورک بنچ^۹ انجام شده است که بر مبنای روش اجزای محدود، به حل مسائل می‌پردازد. مدل مورد استفاده یک مدل سه بعدی در اندازه‌های حقیقی از تجهیزات مورد استفاده در تولید نمونه آزمایشگاهی است. حل مسئله کوپله از روش مستقیم^{۱۰} است که به صورت هم‌زمان کلیه شرایط و متغیرهای مکانیکی-الکتریکی-حرارتی را بر مدل اعمال نموده است. اعمال هم‌زمان شرایط مکانیکی-الکتریکی-حرارتی این امکان را ایجاد می‌نماید تا در هر گام زمانی از حل مسئله، متغیرهای مؤثر به روزرسانی شده و حل مسئله از دقت مطلوب‌تری برخوردار شود. در این شبیه‌سازی اختلاف پتانسیل

دما و پتانسیل الکتریکی در محل تماس ناپیوسته‌اند و افت دما و اختلاف پتانسیل در محل تماس اتفاق خواهد افتاد. در این پژوهش برای شبیه‌سازی ناپیوستگی دما و ولتاژ، از مقاومت الکتریکی و حرارتی استفاده شده است. شار جریان الکتریکی و حرارتی در محل سطوح به صورت زیر است:

$$q_c = h_g (T_1 - T_2) \quad (5)$$

$$J = \sigma_g (U_1 - U_2) \quad (6)$$

که h_g و σ_g به ترتیب فاصله هدایت حرارتی و الکتریکی^۷ است. T و U نیز به ترتیب دما و پتانسیل الکتریکی است که به وسیله اندیس‌های ۱ و ۲ به دو جزء تماسی نسبت داده شده‌اند.

مقاومت تماسی حرارتی R_c^{th} و الکتریکی R_c^{el} در رابطه ۷ تعریف می‌شود:

$$R_c^{th} = \frac{1}{S_A \sigma_g} \quad (7)$$

$$R_c^{el} = \frac{1}{S_A h_g} \quad (8)$$

که در اینجا S_A بیانگر سطح تماس است. علاوه بر دما و پتانسیل الکتریکی، شار حرارتی نیز ناپیوسته است که گرمای ژول تولید شده به دلیل مقاومت الکتریکی عامل این ناپیوستگی است. رابطه ۹ بیانگر گرمای ژول در محل تماس است:

$$q_{ec} = J(U_1 - U_2) = \sigma_g (U_1 - U_2)^2 \quad (9)$$

در این جا سطوح بالایی و پایینی الکتروود که با سطوح دما ثابت در تماس اند انتقال حرارت هدایتی خواهند داشت. دمای ثابت T_{water} دمای تنظیم شده سیستم خنک‌کننده برای آب خروجی از سیستم است. شار هدایت حرارتی اشاره شده در رابطه ۱۰ بیان می‌شود:

$$q_{conv} = -k\nabla T \cdot \vec{n} = h_{conv} (T - T_{water}) \quad (10)$$

که در این جا \vec{n} بردار نرمال سطح و h_{conv} ضریب انتقال حرارت که ثابت در نظر گرفته شده است و T دمای سطح تماس با الکتروود بالایی و پایینی طی فرایند است.

و فشار مکانیکی در دو سمت الکترودها به عنوان ورودی شناخته می‌شوند که به ترتیب ۳ ولت و ۱۰ مگاپاسگال در نظر گرفته شده است. توزیع دما، تنش و پتانسیل الکتریکی، متغیرهای خروجی هستند که با توجه به اهداف بهینه‌سازی از توزیع دما و تنش به عنوان عوامل مؤثر در بهینه‌سازی استفاده شده است. نمایی از مدل تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است در شکل ۱ نشان داده شده است. ارتفاع نمونه، بسته به مقدار ماده پودری مورد استفاده متغیر است. در این پژوهش، نمونه‌ای با ارتفاع ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شد. تمامی سطوح خارجی با محیط داخلی محفظه تبادل گرمایی خارجی خواهد داشت و به دلیل تخلیه هوای داخل محفظه خلأ، از انتقال حرارت هدایتی و جابجایی صرف نظر شد. دو سطح بالایی و پایینی الکترودها توسط سیستم آب‌گرد در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد ثابت نگه داشته شد. در فرایند شبیه‌سازی از مش‌بندی به روش چندناحیه‌ای، ۶۳۶۴۹ گره و ۱۳۳۰۶ المان استفاده شد.

کوپل بین پتانسیل الکتریکی و دما یک کوپل بسیار قوی است، چرا که وابستگی شدیدی بین ثابت‌های حرارتی و الکتریکی با دما وجود دارد. در حالی که این ثابت‌ها کمترین تأثیر را از تغییرات تنشی که به وسیله نیروی خارجی و انبساط حرارتی ایجاد شده است، خواهند گرفت؛ بنابراین از تأثیر تنش بر متغیرهای الکتریکی و حرارتی صرف نظر شد. خواص مواد به کار رفته به صورت متغیر با دما در نظر گرفته شد و پودر درون قالب که به صورت سرد تحت پرس قرار گرفته نیز جامد همسان‌گرد در نظر گرفته شد.

۳-۲- بهینه‌سازی چند هدفه قالب

طراحی قالب برای فرایند تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای مسئله‌ای چندهدفه خواهد بود. دمای حداکثر در مرکز نمونه و هم‌چنین تنش حداکثر در قالب متغیرهای هدف مورد اهمیت‌اند. در این موارد، کمینه یا بیشینه کردن هم زمان تمامی توابع هدف، هنگامی که این توابع در یک رابطه ناسازگارند، مشکل است.

در این پژوهش، مدل پاسخ سطح برای طراحی آزمایش استفاده شده است.

در الگوریتم ژنتیک معمولی یک جمعیت تصادفی از داده‌ها (نمونه اولیه) در فضای حالت، توزیع و نتایج شایستگی آن‌ها ارزیابی می‌شود. سپس بهترین داده‌ها باقی می‌مانند و یک جمعیت جدید تولید می‌شود، با ترکیب عملگرهای جهش و تقاطع، دسته جدیدی از ممکن‌ها به دست می‌آید. با انجام تکثیرهای متعدد، جمعیت، فضای حالت را جستجو خواهد کرد و به صورت صعودی به سمت بهترین راه حل که بهینه کلی است، همگرا خواهد شد.

در الگوریتم ژنتیک چندهدفه تقریباً همین کار انجام می‌شود، به جز این که در اینجا تلاش در برای بهینه کردن تنها یک متغیر شایستگی نیست، بلکه تعدادی از این متغیرها بهینه می‌شوند.

روند مسئله بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک چندهدفه را می‌توان به صورت زیر شرح داد:

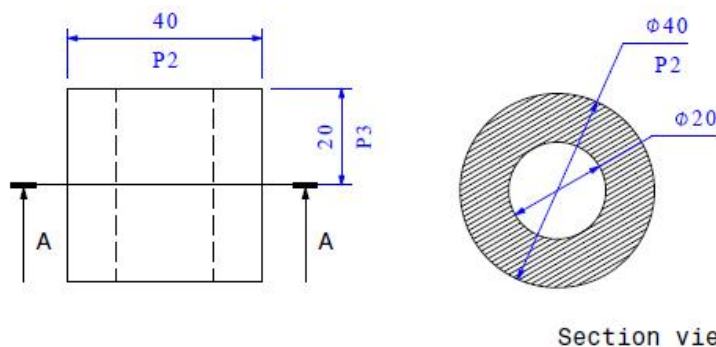
گام ۱: انتخاب یک استراتژی تبدیل، جمعیت اولیه و تعیین متغیرها
گام ۲: ترکیب جمعیت حاضر با جمعیت والد و رتبه‌بندی جمعیت ترکیب شده

گام ۳: به‌روزرسانی جبهه پارتو

گام ۴: محاسبه مقادیر شایستگی بر طبق نتایج رتبه‌بندی

گام ۵: مشخص نمودن اتمام کار بر اساس معیار توقف [۱۵]

برای بهینه‌سازی از ماژول بهینه‌سازی هدف^{۱۱} در نرم افزار انسیس ورک بنچ استفاده شد. برای ساخت نمونه به قطر ۲۰ میلی‌متر، استفاده از قالب استوانه‌ای با قطر داخلی ۲۰ میلی‌متر اجتناب ناپذیر است. به همین منظور تنها قطر خارجی و ارتفاع قالب که متناسب با پانچ‌های ۴۰ میلی‌متری است قابل تغییرند. متغیرهای ورودی بهینه‌سازی در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل، مشخص است، مقادیر اولیه برای متغیرهای P2 و P3 به ترتیب ۴۰ و ۲۰ میلی‌متر است. روند بهینه‌سازی در شکل ۳ نشان داده شده است. مدل پاسخ سطحی در محدوده مدنظر برای متغیرهای ورودی محاسبه شد. اطلاعات فرایند بهینه‌سازی، شامل متغیرهای ورودی و خروجی

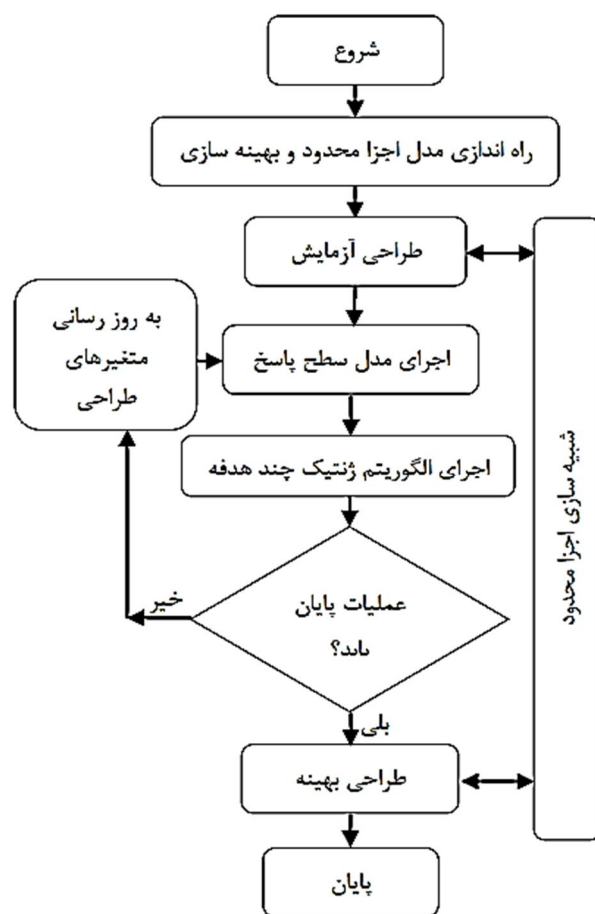


شکل ۲- متغیرهای طراحی در نمایی از قالب

بهینه‌سازی چند هدفه با مجموعه‌ای از پاسخ‌ها که به‌عنوان جبهه پارتو شناخته می‌شود روبه‌رو خواهیم بود. با توجه به اینکه در بخش بهینه‌سازی انسیس به هنگام تعریف متغیرها برای نرم افزار، امکان تعیین تعداد پاسخ‌های جبهه پارتو وجود داشته است، این مقدار برابر نصف جمعیت اولیه در نظر گرفته شده است. از این مجموعه پاسخ با در نظر گرفتن دو رقم اعشار به پاسخ ارائه شده در جدول ۳ خواهیم رسید.

۳-۳- مواد اولیه و روش آماده‌سازی

در این پژوهش از پودر نانومتری Si_3N_4 (خلوص ۹۸/۵٪، ۵۰ نانومتر، Sigma-Aldrich) و SiO_2 (خلوص ۹۹/۵٪، ۲۰-۱۰ نانومتر، Sigma-Aldrich) به‌عنوان پودر اولیه استفاده شد. مخلوط پودری با نسبت مولی مساوی در اتانول به مدت ۲۴ ساعت به‌وسیله جار میل به هم آمیخته شد. سپس ترکیب مورد نظر به مدت ۲ ساعت در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد در هوا خشک شد. نمونه پودری آماده شده درون قالب با قطر داخلی ۲۰ میلی‌متر ریخته شد و تحت فشار ثابت ۱۰ مگاپاسکال و ولتاژ اعمالی ۳ ولت تحت تف‌جوشی پلاسمایی جرقه قرار گرفت. دما در میانه قالب گرافیتی پس از دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد (محدوده اندازه‌گیری پیرومتر) اندازه‌گیری و مقادیر آن بر اساس زمان ثبت شد. فرایند تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای در دو قالب با ابعاد معمولی و بهینه شده انجام شد. پس از فرایند تف‌جوشی سطح مقطع شکست نمونه‌ها، برای



شکل ۳- روندنمای بهینه‌سازی [۱۶]

و هم‌چنین مشخصات الگوریتم ژنتیک مورد استفاده به‌ترتیب در جدول ۱ و ۲ آورده شده است. در این پژوهش سعی شده است که ابعاد قالب به‌منظور کمینه شدن تنش درون قالب و هم‌چنین بیشینه شدت دمای مرکز نمونه بهینه شوند. در عملیات

جدول ۱- متغیرهای ورودی و هدف در طراحی بهینه قالب

شماره	متغیر	نماد	حد پایین (mm)	حد بالا (mm)
متغیرهای ورودی	۱ قطر خارجی قالب	P2	۳۰	۵۰
	۲ نصف ارتفاع قالب	P3	۱۵	۳۵
متغیرهای خروجی	۳ حداکثر تنش قالب	P4	محاسبه در شبیه‌سازی	
	۴ دمای مرکز نمونه	P6	محاسبه در شبیه‌سازی	

جدول ۲- مشخصات الگوریتم ژنتیک چند هدفه

فاکتور	تعداد
تعداد نمونه اولیه (جمعیت)	۱۰۰
تعداد نمونه در هر تکرار (فرزندان)	۱۰۰
تعداد تولید نسل	۷۰

جدول ۳- متغیرهای بهینه شده

دمای مرکز نمونه (°C)	حداکثر تنش در قالب (pa)	ارتفاع (mm)	قطر (mm)
P6	P4	P3	P2
۱۲۰۵/۹	۱۰ ^۷ ×۳/۶۲۹۷	۳۰/۰۱	۳۴/۹۹

۴- نتایج و بحث

۴-۱- شبیه‌سازی فرایند

شکل (۴) تغییرات دمایی سطح قالب (نقطه دید پیرومتر) را برای ولتاژ ثابت ۳ ولت، در دو حالت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی، بر حسب زمان نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود تطابق زیادی بین دو منحنی حاصل از آزمون و شبیه‌سازی وجود دارد. به همین خاطر شبیه‌سازی صورت گرفته اعتبارسنجی شده و برای بهینه‌سازی به کار گرفته شد.

۴-۲- بهینه‌سازی قالب

دو متغیر P₄ و P₆ متغیرهای خروجی هستند که اثر تغییرات متغیرهای ورودی P₂ و P₃ بر آنها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. متغیر P₁

بررسی میزان تأثیر طراحی قالب بر ریز ساختار و توزیع تخلخل نمونه‌ها، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی MIRA 3 TESCAN بررسی شد.

۴-۳- شبیه‌سازی با قالب بهینه شده و مقایسه با نتایج

آزمایشگاهی

ابعاد بهینه شده در فرایند بهینه‌سازی، برای شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. برای این منظور ابعاد بهینه در شبیه‌سازی اعمال و تنش، ضریب اطمینان و هم‌چنین توزیع دما محاسبه شد. فرایند شبیه‌سازی همانند آنچه در بخش ۳-۱ آمده است انجام شد و نتایج آن با نتایج به‌دست آمده از تفجوشی در قالب معمولی مقایسه شد.

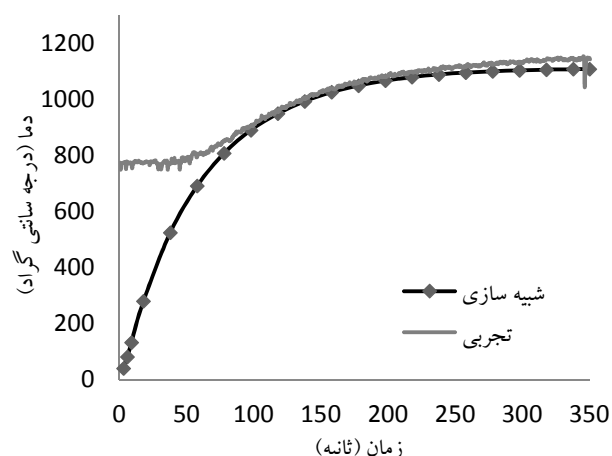
ارتفاع بر تنش و دمای مرکز نمونه اثرگذار است. قطر خارجی و ارتفاع بر روی دمای مرکز نمونه به ترتیب ۶۱ و ۳۹ درصد (درصدها گرد شده است) و بر روی تنش حداکثر به ترتیب ۷۷ و ۲۳ درصد اثرگذارند. مشخص است که تغییر سطح مقطع قالب به طور مستقیم روی تنش وارده و هم چنین میزان جریان عبوری از قالب که عامل اصلی ایجاد حرارت است، موثر است. به همین خاطر اثر تغییر قطر خارجی بر متغیرهای خروجی بسیار بیش تر از تغییر ارتفاع است.

هدف اصلی، حداقل کردن تنش در قالب و حداکثر نمودن دمای مرکز نمونه است. مشخصات الگوریتم ژنتیک مورد استفاده در این مورد به صورت جدول ۲ است. پس از ۷۰ مرتبه تولید نسل الگوریتم ژنتیک چندهدفه، مطابق روند شکل ۳، مقادیر بهینه جدول ۳ برای قالب به دست آمد.

۳-۴- شبیه سازی مدل بهینه شده

یکی از اهداف تغییر در ابعاد قالب بهینه، بیشینه نمودن دمای فرایند در مرکز نمونه است. در شکل ۸، تغییرات دمای مرکز نمونه برای دو قالب اولیه و بهینه شده در طی فرایند مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می شود دمای مرکز نمونه در انتهای فرایند که تقریباً سیستم به حالت پایدار می رسد، برای قالب اولیه ۱۱۱۵/۵ و برای قالب بهینه ۱۲۰۵/۹ درجه سانتی گراد است. این مقدار تغییرات بهبود ۸/۱ درصدی دما را در مرکز نمونه در پی خواهد داشت.

اختلاف دما در قالب بهینه شده در ولتاژ ۳ ولت پس از رسیدن به حالت پایدار کم تر از قالب اولیه است (شکل ۹). کاهش اختلاف دما در نمونه که از محاسبه تفاضل دمای بیشینه و کمینه، محاسبه شده است، موجب بهبود در کیفیت نمونه شده و همگنی بیش تری را ایجاد می کند. در ابتدای فرایند و قبل از رسیدن به حالت پایدار، اختلاف دما در نمونه با قالب اولیه مقدار کم تری را خواهد داشت و پس از رسیدن به زمان حدود ۲۲۵ ثانیه که تغییرات دمایی در کل سیستم کاهش و به حالت پایدار نزدیک می شود (شکل ۹) اختلاف دما در نمونه قالب



شکل ۴- مقایسه نتایج برای آزمایش نمونه $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$

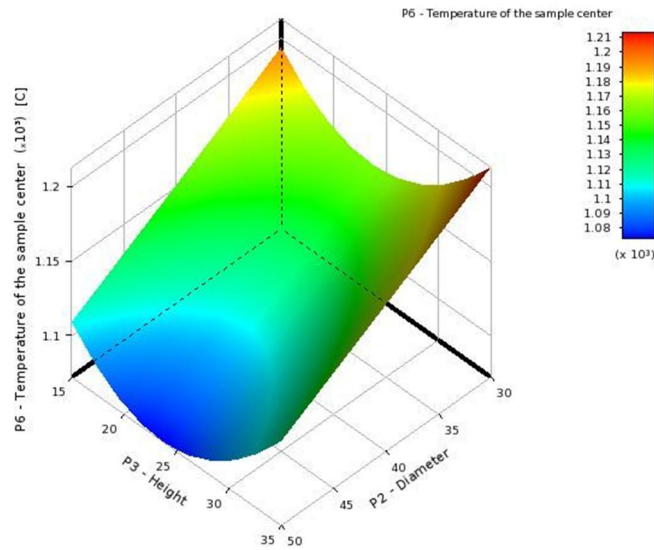
اختلاف پتانسیل اعمالی طی فرایند تفجوشی پلاسمایی جرقه است که در این پژوهش، در مقدار ۳ ولت ثابت نگه داشته شده است. بررسی اثر دو متغیر ورودی بر خروجی ها به صورت صفحات پاسخ در یک فضای سه بعدی قابل ترسیم است.

همان طور که در شکل ۵ مشخص شده است به ازای تغییر در متغیرهای ورودی، دمای مرکز نمونه نیز تغییر می کند. هر نقطه از صفحه نشان دهنده یک هندسه خاص برای قالب است. دلیل این تغییرات با تغییر هندسه قالب، تفاوت در میزان اتلاف گرما از طریق تشعشع و هم چنین تغییر در میزان گرمای تولیدی در قالب با توجه به تغییر چگالی جریان درون آن است.

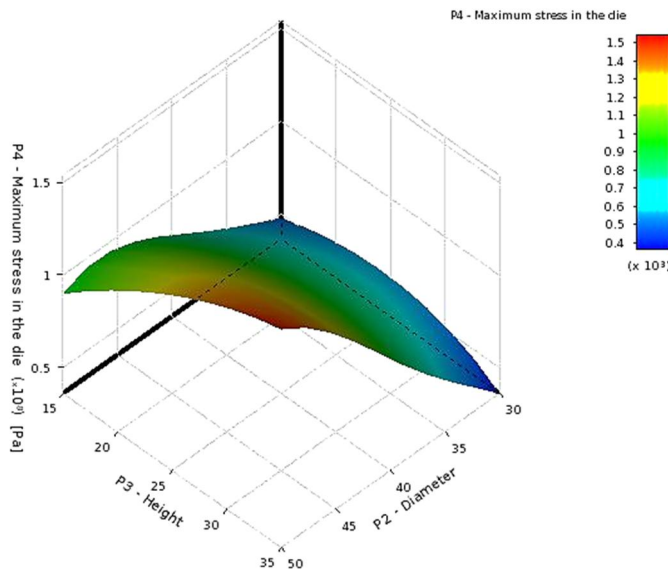
شکل ۶ سطح پاسخ تأثیر ابعاد قالب بر تنش حداکثر قالب را نشان می دهد که در جهات مختلف دارای انحنا است. میزان تغییرات تنش وابسته به کرنش های حرارتی و الاستیک است.

تحلیل حساسیت^{۱۲} مطالعه تأثیرپذیری متغیرهای خروجی از متغیرهای ورودی یک سیستم است. حساسیت پاسخ های هر سیستم به تغییر هر یک از متغیرها یکی از مباحث مهم در طراحی کاربردی است.

مطابق با شکل ۷ که از تحلیل های متغیری صورت گرفته در محیط بهینه سازی هدف از نرم افزار انسیس ورکبنچ به دست آمده است، همان طور که انتظار می رود، قطر خارجی قالب بیش تر از



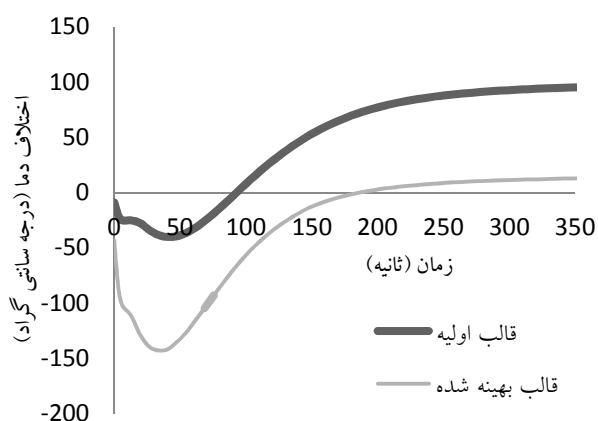
شکل ۵- (رنگی در نسخه الکترونیکی) صفحه پاسخ تأثیر متغیرهای ورودی بر روی دمای مرکز نمونه



شکل ۶- (رنگی در نسخه الکترونیکی) صفحه پاسخ تأثیر متغیرهای ورودی بر روی تنش حداکثر قالب نمونه

تحلیل‌های گذشته، توزیع دما همگن تر شده که این عوامل در مجموع، باعث کاهش اختلاف دما در قالب بهینه شده خواهند شد. همان طور که در شکل ۱۰ دیده می‌شود، اختلاف دمای مرکز نمونه و سطح قالب (محل خواندن پیرومتر) در قالب اولیه پس از گذشت ۲۰۰ ثانیه به حدود ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. در حالی که این مقدار برای قالب بهینه شده در حدود ۱۰ درجه سانتی‌گراد است. در نتیجه، در حالت اولیه،

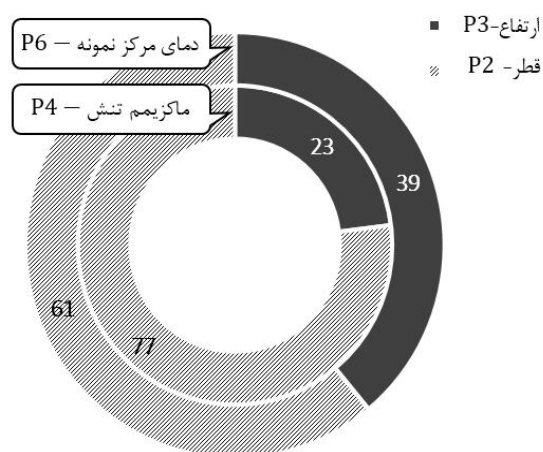
بهینه شده کم‌تر است. دمای محل خواندن پیرومتر و مرکز نمونه برای دو نمونه قالب بهینه شده و اولیه در ولتاژ ثابت ۳ ولت، در شکل ۱۰ مورد مقایسه قرار گرفته است. بر اساس نتایج به‌دست آمده، قالب بهینه شده دارای اختلاف دمای کم‌تری بین مرکز نمونه و سطح قالب است. به دلیل کاهش ضخامت قالب، شیب افت دما، در قالب افت کم‌تری را ایجاد کرده است. از طرفی بنا بر



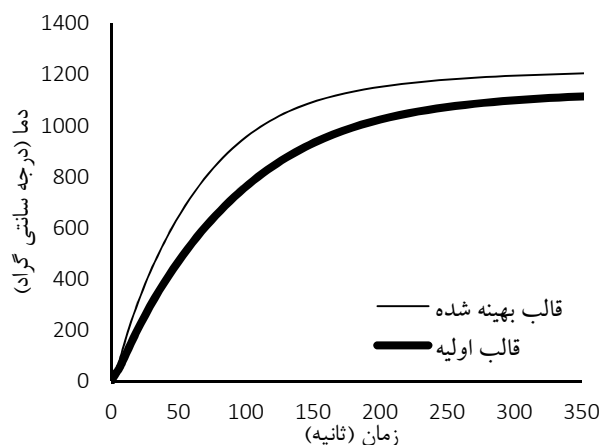
شکل ۱۰- تغییرات دمای محل قرائت پیرومتر و مرکز نمونه در ولتاژ ۳ ولت بر حسب زمان

همواره دما در برنامه تفجوشی اعمالی، با شرایط دمایی واقعی در نمونه دارای اختلاف زیادی است که می‌تواند نتایج به‌دست آمده را تحت تأثیر قرار دهد.

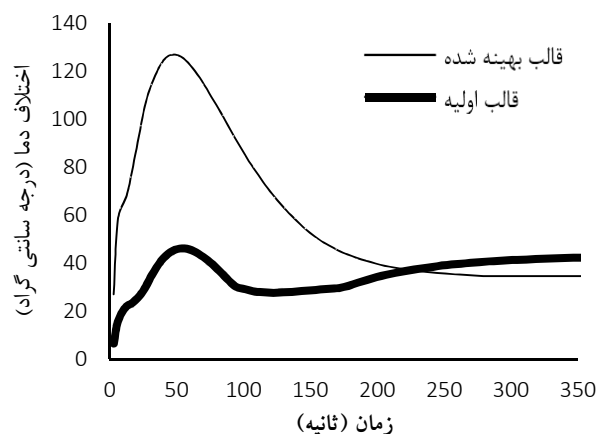
همان‌طور که از نتایج به‌دست آمده مشخص است، طراحی قالب اثر زیادی بر کاهش شیب حرارتی در نمونه در حین فرایند تفجوشی به روش تفجوشی پلاسمایی جرقه دارد. این گرادیان‌های حرارتی می‌تواند موجب غیریکنواختی ریز ساختار نهایی و همچنین توزیع غیر همگن تخلخل در نقاط مختلف ماده شود. همان‌طور که بیان شد، ترکیب کامپوزیتی $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ برای کاربرد در پنجره‌های امواج راداری مورد استفاده قرار می‌گیرد. به همین خاطر غیر همگنی ریز ساختار و توزیع تخلخل در ماده می‌تواند موجب کاهش عبور پذیری پنجره و افزایش بازتاب و جذب امواج در طیف مورد نظر شود. شکل ۱۱ نشان‌دهنده تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح مقطع شکست نمونه تفجوشی شده در قالب معمولی است. همان‌طور که دیده می‌شود، درصد تخلخل و توزیع اندازه آن در سطح نمونه و مرکز آن کاملاً متفاوت است. نمونه کامپوزیتی $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ دارای هدایت الکتریکی پایینی است. به همین خاطر در فرایند SPS، همواره مرکز نمونه دارای دمای کم‌تری از سطح آن است. با توجه به آن که دما تأثیر زیادی بر نرخ تفجوشی و



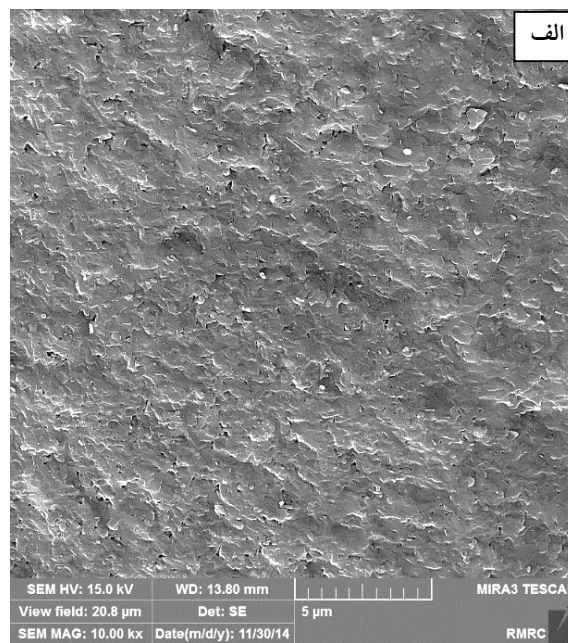
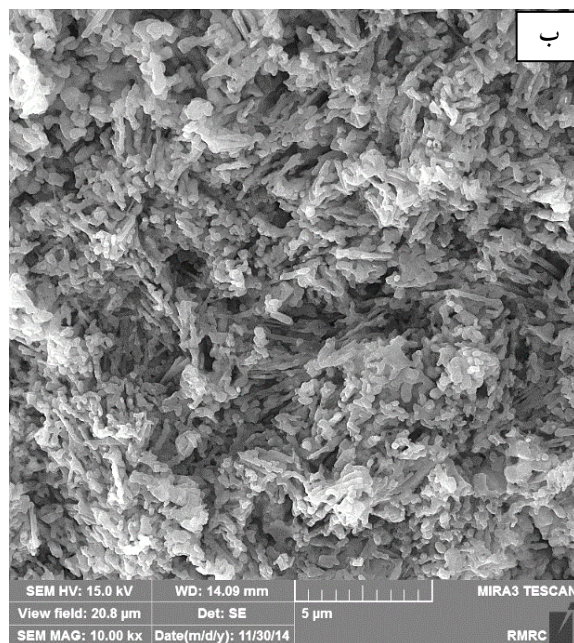
شکل ۷- نمودار دایره‌ای تحلیل حساسیت متغیرهای ورودی



شکل ۸- تغییرات دما در مرکز نمونه بر حسب زمان



شکل ۹- تغییرات اختلاف دما در دو نمونه تولید شده توسط قالب اولیه و قالب بهینه‌سازی شده در ولتاژ ۳ ولت بر حسب زمان



شکل ۱۱- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح شکست نمونه تفجوشی شده به روش SPS در قالب معمولی، (الف) نزدیک سطح نمونه و (ب) مرکز نمونه

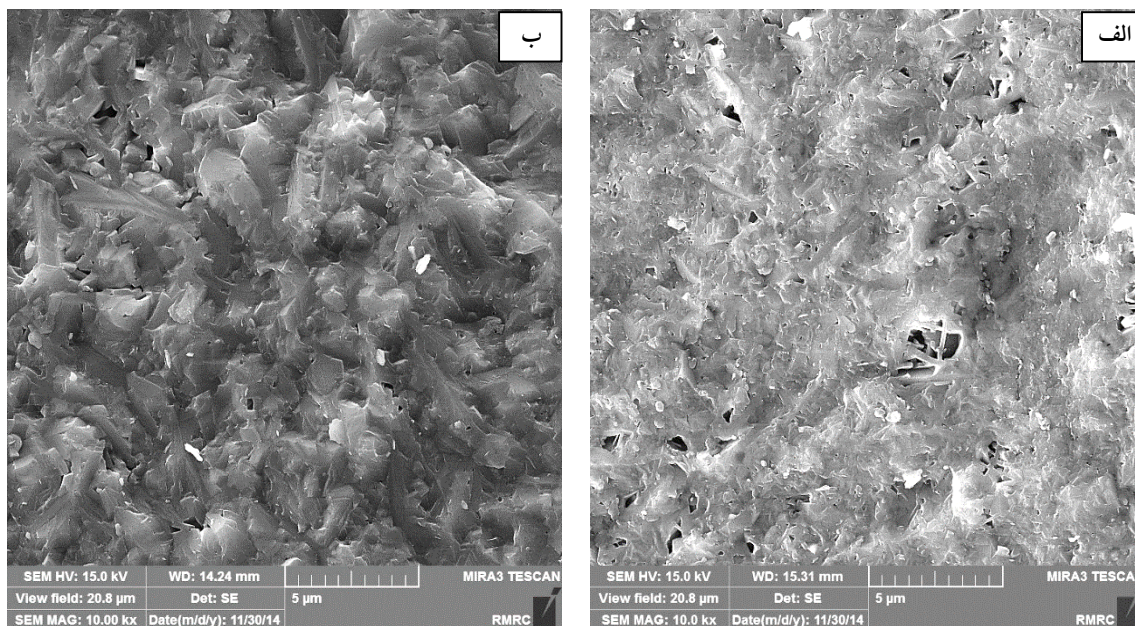
از سطح شکست نمونه (شکل ۱۱) مشاهده می‌شود. نکته قابل توجه آن است که، بر اساس آن چه در منحنی شکل ۱۰ دیده می‌شود، افزایش زمان، تأثیری بر کاهش اختلاف دمای دو نقطه اشاره شده ندارد. این نکته به مکانیزم حرارت‌دهی در سیستم‌های تفجوشی پلاسمایی جرقه‌ای مربوط می‌شود. در این سیستم‌ها، عامل ایجاد کننده حرارت، مقاومت قالب و نمونه در برابر عبور جریان الکتریکی با آمپراژ بالاست. به همین خاطر منبع حرارتی، خود قالب و نمونه است، در نتیجه، پس از گذشت زمان و رسیدن به حالت پایداری، هیچگاه اختلاف دمای نقاط مختلف در سیستم، تغییر نمی‌کند. به همین خاطر تغییر زمان تفجوشی نمی‌تواند به یکنواختی ساختار کمک کند.

بر اساس آن چه که در بالا آمد، بهینه‌سازی قالب در فرایند تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای کامپوزیت SiO_2 - Si_3N_4 ، تأثیر زیادی بر یکنواختی نمونه حاصل شده، دارد. یکنواختی ساختار پس از تفجوشی موجب کاهش میزان جذب ماده در برابر امواج الکترومغناطیس در طیف مورد نظر می‌شود.

کاهش میزان تخلخل دارد، مرکز نمونه دارای درصد تخلخل‌های بیشتر و بزرگ‌تری نسبت به سطح نمونه است.

شکل ۱۲ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح مقطع شکست نمونه تفجوشی شده در قالب بهینه را نشان می‌دهد. مقایسه توزیع تخلخل و میزان تفجوشی، با آن چه در شکل ۱۱ دیده می‌شود، نشان‌دهنده بهبود فرایند تفجوشی و افزایش کیفیت نمونه به دست آمده است.

همان‌طور که از نتایج مقایسه اختلاف دما در نمونه‌های ساخته شده با قالب معمولی و بهینه شده (شکل ۱۰) مشخص است، بهینه‌سازی ابعاد قالب موجب کاهش اختلاف دما، بین سطح و مرکز نمونه شده است. در حالی که اختلاف دما بین سطح و مرکز نمونه تفجوشی شده در قالب اولیه در حدود ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد است. دما مهم‌ترین عامل، در تفجوشی سرامیک‌ها است. به همین خاطر اختلاف دمای محاسبه شده در نمونه تهیه شده با قالب معمولی، می‌تواند تأثیرات زیادی بر نرخ تفجوشی و همچنین تغییرات ریز ساختاری ماده داشته باشد. این نکته به وضوح در تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی



شکل ۱۲- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح شکست نمونه تفجوشی شده به روش SPS در قالب با ابعاد بهینه، (الف) نزدیک سطح نمونه و (ب) مرکز نمونه

۵- نتیجه گیری

شبیه سازی در مدل کوپل برای اختلاف پتانسیل ۳ ولت با نتایج آزمایش تجربی نمونه کامپوزیتی $Si_3N_4-SiO_2$ تطابق مناسبی داشت. الگوریتم ژنتیک چند هدفه برای بهینه سازی قالب با هدف حداقل نمودن تنش در قالب و حداکثر نمودن دمای مرکز نمونه به کار گرفته شد که نهایتاً ارتفاع ۶۹/۹۸ میلی متر و قطر خارجی ۳۰/۰۱ میلی متر به عنوان ابعاد بهینه قالب به دست آمد. شبیه سازی قالب با ابعاد بهینه به دست آمده نشان دهنده توزیع بهتر دما در نمونه و قالب است، به طوری که دمای مرکز نمونه ۸/۱ درصد افزایش یافته است.

واژه نامه

1. spark plasma sintering
2. multi objective genetic algorithm(MOGA)
3. charge conservation law
4. Ohm's law
5. electric conductivity
6. electric potential
7. gap conductance
8. Stefan-Boltzmann's
9. ansys workbench
10. direct method
11. goal driven optimization
12. sensitivity analysis (sa)

پیوست
خواص گرافیت:

$$\rho(\text{kgm}^{-3}) = 1900 \neq$$

$$E(\text{Pa}) = 103 \times 10^9$$

$$\nu = 0.32$$

$$\alpha_T = 8 \times 10^{-6}$$

$$C_p(\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}) = -398.1737 + 4.5879T - 3.5288 \times 10^{-3}T^2 + 1.2869 \times 10^{-6}T^3 - 1.8215 \times 10^{-10}T^4$$

$$k(\text{Wm}^{-1}\text{k}^{-1}) = 90 - 9.5411 \times 10^{-2}T + 8.1687 \times 10^{-5}T^2 - 3.2096 \times 10^{-8}T^3 + 4.7799 \times 10^{-12}T^4$$

$$\rho_c(\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}) = \sigma^{-1} = 2.3982 \times 10^{-5} - 2.5707 \times 10^{-8}T + 2.1464 \times 10^{-11}T^2 - 8.2881 \times 10^{-15}T^3 + 1.2197 \times 10^{-18}T^4 \text{ Compressive}$$

Strength = 137 MPa

Tensile Strength = 47 MPa

خواص فولاد زنگ نزن (AISI 304):

$$\rho(\text{kgm}^{-3}) = 7900$$

$$E(\text{Pa}) = 200 \times 10^9$$

$$\nu = 0.33$$

$$\alpha_T = 18 \times 10^{-6}$$

$$C_p(\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}) = 446.5 + 0.162T$$

$$k(\text{Wm}^{-1}\text{k}^{-1}) = 9.988 + 0.01746T$$

$$\rho_c(\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}) = \sigma^{-1} = 10^{-8} [50.1685 + 0.0838T - 1.7453 \times 10^{-5}T^2]$$

خواص SiO_2 :

$$\rho(\text{kgm}^{-3}) = 2650$$

$$\nu = 0.32$$

$$\alpha_T = 8 \times 10^{-6}$$

$$C_p(\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}) = 700$$

$$k(\text{Wm}^{-1}\text{k}^{-1}) = 1.4$$

$$\rho_c(\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}) = \sigma^{-1} = 10^{-8}$$

خواص Si_3N_4 :

$$\rho(\text{kgm}^{-3}) = 3440$$

$$\nu = 0.33$$

$$\alpha_T = 15 \times 10^{-6}$$

$$C_p(\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}) = 710.6$$

$$k(\text{Wm}^{-1}\text{k}^{-1}) = 26.5$$

$$\rho_c(\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}) = \sigma^{-1} = 2 \times 10^{-13}$$

- Garay, J., "Current-Activated, Pressure-Assisted Densification of Materials", *Annual Review of Materials Research*, Vol. 40, pp. 445-468, 2010.
- Orru, R., Licheri, R., Locci, A. M., Cincotti, A. and Cao, G., "Consolidation/Synthesis of Materials by Electric Current Activated/Assisted Sintering", *Materials Science and Engineering: R: Reports*, Vol. 63, No. 4, pp. 127-287, 2009.
- Matsugi, K., Kuramoto, H., Hatayama, T. and Yanagisawa, O., "Temperature Distribution at Steady State under Constant Current Discharge in Spark Sintering Process of Ti and Al₂O₃ Powders", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 134, No. 2, pp. 225-232, 2003.
- Anselmi-Tamburini, U., Gennari, S., Garay, J. and Munir, Z. A., "Fundamental Investigations on the Spark Plasma Sintering/Synthesis Process: II. Modeling of Current and Temperature Distributions", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 394, No. 1, pp. 139-148, 2005.
- Vanmeensel, K., Laptev, A., Hennicke, J., Vleugels, J. and Van der Biest, O., "Modelling of the Temperature Distribution during Field Assisted Sintering", *Acta Materialia*, Vol. 53, No. 16, pp. 4379-4388, 2005.
- Wang, Y. C., Fu, Z. Y. and Wang, W. M., "Numerical Simulation of the Temperature Field in Sintering of BN by SPS", *Key Engineering Materials*, Vol. 249, pp. 471-476, 2003.
- Wang, X., Casolco, S., Xu, G. and Garay, J., "Finite Element Modeling of Electric Current-Activated Sintering: The Effect of Coupled Electrical Potential, Temperature and Stress", *Acta Materialia*, Vol. 55, No. 10, pp. 3611-3622, 2007.
- Vanmeensel, K., Huang, S., Laptev, A., Vleugels, J. and Van der Biest, O., "Modeling of Field Assisted Sintering Technology (FAST) and its Application to Electro-Conductive Systems", *Advanced Processing and Manufacturing Technologies for Structural and Multifunctional Materials II: Ceramic Engineering and Science Proceedings*, Vol 29, No. 9, pp. 109-122, 2008.
- Grasso, S., Sakka, Y. and Maizza, G., "Pressure Effects on Temperature Distribution during Spark Plasma Sintering with Graphite Sample", *Materials Transactions*, Vol. 50, No. 8, pp. 2111-2114, 2009.
- Chennoufi, N., Majkic, G., Chen, Y. and Salama, K., "Temperature, Current, and Heat Loss Distributions in Reduced Electrothermal Loss Spark Plasma Sintering", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 40, No. 10, pp. 2401-2409, 2009.
- Mondalek, P., Silva, L., Durand, L. and Bellet, M., "Numerical Modelling of Thermal-Electrical Phenomena in Spark Plasma Sintering", *American Institute of Physics Conference Series*, Vol. 1252, pp. 697-704, 2010.
- Munoz, S. and Anselmi-Tamburini, U., "Temperature and Stress Fields Evolution during Spark Plasma Sintering Processes", *Journal of Materials Science*, Vol. 45, No. 23, pp. 6528-6539, 2010.
- Zhang, J. and Zavalangos, A., "Discrete Finite-Element Simulation of Thermoelectric Phenomena in Spark Plasma Sintering", *Journal of electronic materials*, Vol. 40, No. 5, pp. 873-878, 2011.
- Li, X., Wu, P. and Zhu, D., "Fabrication and Properties of Porous Si₃N₄-SiO₂ Ceramics with Dense Surface and Gradient Pore Distribution", *Ceramic International*, Vol. 40, No. 3, pp. 5079-5084, Apr. 2014.
- مطیع قادر، ح.، لطفی، ش. و سیداسفهان، م.، "مروری بر برخی روش‌های بهینه‌سازی هوشمند"، انتشارات دانشگاه آزاد شبستر، ۱۳۸۹.
- کحال، پ.، احمدی، ی. و دیلمی عضدی، ح.، "بهینه‌سازی چندهدفه قالب شکل‌دهی ورق با استفاده از تحلیل اجزا محدود همراه با مدل سطح پاسخ"، *مجله علمی پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس*، سال ۱۳، شماره ۹، ص ۴۷-۵۷، ۱۳۹۲.