

Optimization Challenges in Manufacturing SiC-Al₂O₃-YSZ Composite Green Parts via Ceramic-Feedstock Warm-Pressing Process

Mohammad Keshavarzi, Asal Hosseini Monazzah* 

Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Article History

Received: April 30, 2026

Revised: July 21, 2026

Accepted: August 27, 2026

ePublished: October 19, 2026

ABSTRACT

This research presents an investigation into the optimization of ceramic-feedstock warm-pressing for the fabrication of SiC-based composites. The process integrates uniaxial warm-pressing with injection molding, employing SiC, Al₂O₃, YSZ, and a polymer binder. Critical challenges encountered during green body production were meticulously identified, leading to the proposal of effective solutions. Significant process advancements involved designing a mold with guide screws, implementing a dual-stage coating technique, and utilizing a pulverizer for feedstock powder preparation. Through Design of Experiments (DOE), the optimal warm-pressing parameters were determined, revealing that temperature is the primary factor controlling the binder's rheological behavior and facilitating particle rearrangement. Hardness test data indicated that the optimal conditions for warm-pressing were 120°C, 185 bar, and 27 minutes. Microstructural examination corroborated the uniform distribution of reinforcements and the cohesive strength imparted by the binder. Furthermore, particle size analysis (distribution range: 1.37 µm; distribution slope: 3.96) indicates the suitability of this powder for the molding process.

Keywords: Silicon Carbide Feedstock, Ceramic Composite, Uniaxial Warm-Pressing, Moulding, Design of Experiments (DOE).

How to cite this article

Keshavarzi M, Hosseini Monazzah A, Optimization Challenges in Manufacturing SiC-Al₂O₃-YSZ Composite Green Parts via Ceramic-Feedstock Warm-Pressing Process. Modares Mechanical Engineering; 2027;27(01):29-47.

*Corresponding author's email: a_hosseini_monazzah@sbu.ac.ir

*Corresponding ORCID ID: 0000-0003-2267-5976



Copyright© 2027, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.



بهینه‌سازی چالش‌های ساخت قطعات خام کامپوزیت SiC-Al₂O₃-YSZ در فرآیند پرس گرم خوراک سرامیکی

محمد کشاورزی، عسل حسینی منزه*

دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، تهران

چکیده

کاربید سیلیسیوم به دلیل ویژگی‌های استثنایی خود در اشکال خالص و کامپوزیتی اهمیت حیاتی دارد، اما ساخت قطعات سرامیکی مبتنی بر آن همچنان با چالش‌هایی روبه‌رو است. این پژوهش با هدف غلبه بر این موانع، به بررسی و بهینه‌سازی فرآیند ترکیبی «قالب‌گیری پرس گرم خوراک سرامیکی» که تلفیقی از پرس گرم تک‌جهته و قالب‌گیری تزریقی است، می‌پردازد. با ترکیب دو روش فوق، استفاده از مواد اولیه SiC، Al₂O₃ و YSZ و چسب پلیمری، چالش‌های ساخت قطعه خام کامپوزیتی شناسایی و راهکارهای مؤثر ارائه شده است. طراحی قالب دارای پیچ‌های هدایت‌شونده، پوشش‌دهی دو مرحله‌ای و آماده‌سازی پودر خوراک با دستگاه خردکن، مراحل کلیدی بودند. با بهره‌گیری از روش طراحی آزمایش، شرایط بهینه فرآیند بر مبنای متغیرهای دما، فشار و زمان پرس تعیین گردید. نتایج نشان داد که دما به عنوان عامل اصلی، با کنترل رفتار رئولوژیکی چسب و تسهیل بازآرایی ذرات، بیشترین تأثیر را بر تراکم و سختی قطعه دارد. داده‌های آزمون سختی نشان داد بهترین شرایط برای انجام پرس گرم، اعمال دمای ۱۲۰ °C، فشار ۱۸۵ bar و زمان ۲۷ min است. بررسی ریزساختار نیز یکنواختی توزیع تقویت‌کننده و انسجام ناشی از چسب را در شرایط بهینه تأیید می‌کند. همچنین تحلیل اندازه ذرات (دامنه توزیع: ۱/۳۷ میکرومتر؛ شیب توزیع: ۳/۹۶) حاکی از مناسب بودن این پودر برای فرآیند قالب‌گیری است.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۰

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۳۰

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۰۵

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۷/۲۷

کلیدواژه‌ها: خوراک کاربید سیلیسیوم، کامپوزیت سرامیکی، پرس گرم تک‌جهته، قالب‌گیری، طراحی آزمایش.

نحوه ارجاع به این مقاله

کشاورزی محمد، حسینی منزه عسل، بهینه‌سازی چالش‌های ساخت قطعات خام کامپوزیت SiC-Al₂O₃-YSZ در فرآیند پرس گرم خوراک سرامیکی، مهندسی مکانیک مدرس. ۴۷-۲۹-۲۷(۰۱): ۱۴۰۵.

*پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: a_hosseini@sbu.ac.ir

*شناسه اراکید نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ۵۹۷۶-۲۲۶۷-۰۰۰۰-۰۰۰۰



۱- مقدمه

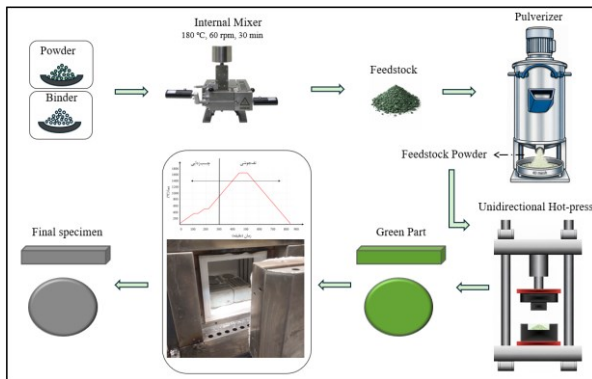
در سال‌های اخیر، کاربرد سرامیک‌ها در حوزه‌های مختلف مهندسی، به دلیل برخورداری از خواص منحصربه‌فردی نظیر استحکام فشاری و سختی بالا، مقاومت در برابر سایش، نقطه ذوب بالا، پایداری شیمیایی و هدایت حرارتی پایین، رشد قابل‌توجهی داشته است [۱،۲]. صنایع بزرگی همچون معدن، ریخته‌گری و هوافضا از مصرف‌کنندگان اصلی این گروه از مواد محسوب می‌شوند [۳].

در میان انواع سرامیک‌ها، کاربید سیلیسیوم (SiC) که با نام تجاری کاربوراندوم (Carborundum) نیز شناخته می‌شود، یکی از مهم‌ترین اعضای خانواده‌ی سرامیک‌های غیراکسیدی به‌شمار می‌رود. این سرامیک به دلیل دارا بودن پایداری حرارتی بالا، مقاومت چشمگیر در برابر سایش، خوردگی و اکسیداسیون [۴]، قابلیت تنظیم خواص حرارتی و الکتریکی [۵]، و مقاومت مطلوب در برابر شوک حرارتی و سختی [۶] جایگاه ویژه‌ای در میان مواد پیشرفته پیدا کرده است. با وجود مزایای ذکرشده، پیچیدگی فرآیندهای ساخت و ماشین‌کاری قطعات نهایی، استفاده گسترده از این دسته از سرامیک‌ها را با محدودیت مواجه ساخته است [۷،۸]. فرآیند تولید قطعات سرامیکی معمولاً با مخلوط‌سازی پودر آغاز شده و پس از طی مجموعه‌ای از عملیات شکل‌دهی و چگال شدن (Densification)، به مرحله تفجوشی (Sintering) ختم می‌شود [۴]. بسته به کاربرد نهایی و ترکیب شیمیایی مواد، امکان تولید محصولی کاملاً متراکم یا دارای تخلخل کنترل‌شده وجود دارد [۹]. تنوع کاربردها و موانع موجود در فرآیند ساخت، موجب ابداع و توسعه فنون گوناگونی در زمینه فشردن‌سازی پودر گردیده است، که از آن جمله می‌توان به روش‌های فشردن در قالب (Die-Compaction) [۱۰]، پرس داغ (Hot Pressing)، فشردن سرد ایزواستاتیک (Cold Isostatic Pressing (CIP)) [۱۱]، فشردن داغ ایزواستاتیک (Hot Isostatic Pressing (HIP)) [۱۲]، ریخته‌گری لغزشی (Slip Casting) [۱۳]، فشردن و تفجوشی دو مرحله‌ای (Double Press-Sintering) [۱۱]، اکستروژن خوراک سرامیکی (Feedstock Extrusion) [۱۳]، ریخته‌گری نواری (Strip Casting) [۱۱]، تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای (Spark Plasma Sintering (SPS)) [۱۴]، تفجوشی لیزری انتخابی (selective laser sintering) [۱۵] و قالب‌گیری تزریقی سرامیک (Ceramic Injection Molding (CIM)) [۱۶] اشاره کرد.

براساس پژوهش‌های لی و همکاران [۱۷] در سال ۱۹۹۵، به‌کارگیری روش پرس گرم با اعمال فشارهایی در بازه‌ی ۳۰ تا ۵۰ MPa و دماهای ۱۹۰۰ تا ۲۱۰۰ °C تحت اتمسفر آرگون، همراه با افزودن کاربید بور و کربن، منجر به تولید قطعاتی با چگالی نسبی بالای ۹۸٪ می‌گردد. کیم و همکاران [۱۸]، با به‌کارگیری چندین مرحله فرآیند پرس و افزودن گرافن و نانولوله‌های کربنی، موفق به افزایش چقرمگی شکست SiC از طریق تفجوشی در هوا و بدون اعمال فشار خارجی شدند. با این وجود، این روش به دلیل چگالی کمتر از ۹۸٪، بروز اکسیداسیون شدید در تقویت‌کننده‌های کربنی، تشکیل

فازهای شیشه‌ای شکننده در مرزخانه‌ها و افت خواص در دماهای بالا، همچنان برای کاربردهای ساختاری در محیط‌های اکسیدکننده و دمای بالا فاقد کارایی لازم است. به‌طور کلی، فرآیند پرس با محدودیت‌های اساسی از جمله نیاز به دماهای عملیاتی بالا، دشواری در تولید قطعات با هندسه بسیار پیچیده و هزینه‌ی بالای تجهیزات مرتبط، همراه است. در ادامه، ژانگ و همکاران [۱۹]، با استفاده از روش تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای، کامپوزیت‌های SiC را در دمای ۱۷۰۰ تا ۱۸۵۰ °C و زمان فشردن‌سازی کمتر از ۱۵ min، تحت اتمسفر خلا متراکم نموده و به چگالی نسبی بیش از ۹۸٪ دست یافتند. علاوه بر تولید سرامیک‌های متراکم، ژائو و همکاران [۱۹]، موفق به سنتز نوعی کاربید سیلیسیوم متخلخل با استفاده از این روش شدند. این امر با به‌کارگیری فناوری تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای در دمای ۱۸۰۰ °C و فشار ۵۰ MPa، به مدت ۵ دقیقه انجام شد. نکته قابل توجه آن است که این نمونه‌ها بدون افزودن عامل تخلخل‌زا و صرفاً با کاهش فشار و زمان تفجوشی تهیه شدند. یافته‌های آن‌ها حاکی از آن بود که نمونه‌های نهایی دارای میزان تخلخل حدود ۳۸٪ بودند. با این حال، روش SPS نیز دارای محدودیت‌های جدی است که کاربرد آن را در مقیاس صنعتی محدود می‌سازد. این محدودیت‌ها شامل هزینه‌ی بسیار بالای تجهیزات، محدودیت در ابعاد قطعه (معمولاً قطر کمتر از ۱۵۰ میلی‌متر)، ایجاد گرادیان حرارتی و تنش‌های باقی‌مانده در قطعات بزرگ‌تر، تکرارپذیری پایین در مقیاس صنعتی و ناتوانی در تولید انبوه اقتصادی است. در تلاشی برای غلبه بر نیاز به اتمسفرهای خنثی و اعمال فشار، مگنانی و همکاران [۲۰]، برای نخستین بار نشان دادند که می‌توان با پیش‌اکسیداسیون کنترل‌شده‌ی پودر SiC و استفاده از سیستم افزودنی سه جزئی مشتمل بر Al₂O₃-Y₂O₃-CaO، لایه نازک SiO₂ را به‌عنوان فاز مایع موقت به کار گرفته و قطعات SiC را در اتمسفر هوا و بدون اعمال فشار خارجی، در دمای ۱۸۵۰ تا ۱۹۵۰ °C تفجوشی نمود. چگالی نهایی گزارش‌شده برای این روش در محدوده‌ی ۹۵ تا ۹۷٪ بود. هم‌زمان با توسعه فرآیندهایی که صرفاً بر تفجوشی پودرهای سرامیکی مبتنی بودند، تولید خوراک (Feedstock) سرامیکی و بهره‌گیری از جزء پلیمری در ساخت قطعات کاربید سیلیسیوم نیز گسترش یافته است. دوراک و همکاران [۲۱]، با به‌کارگیری فشار در فرآیند ساخت و استفاده از روش قالب‌گیری تزریقی مواد سرامیکی، با پایش مستقیم پر شدن حفره قالب به‌وسیله پرتو ایکس، نشان دادند که گرانشی خوراک، سرعت تزریق و دمای قالب، نقشی حیاتی در ممانعت از تشکیل حباب‌های هوا و نقص‌های سطحی در تولید قطعات کاربید سیلیسیوم ایفا می‌کنند.

ژائو ژانگ و همکاران [۲۲]، با به‌کارگیری این روش، کاربید سیلیسیوم پیوندخورده با واکنش (Reaction-Bonded Silicon Carbide) را سنتز نمودند. خوراک قالب‌گیری مورد استفاده شامل SiC، یک سیستم ارگانیک پایه واکس و مقادیر متغیری از کربن



شکل ۱ طرحواره ساخت نمونه سرامیکی از طریق روش قالب‌گیری پرس گرم خوراک سرامیکی.

Fig. 1 Schematic diagram of the ceramic sample fabrication via the warm press molding of ceramic feedstock.

شکل‌دهی خوراک‌محور و قابلیت تراکم‌پذیری بالای پرس گرم، برای نخستین بار امکان مدیریت تخلخل و دستیابی به دقت ابعادی مطلوب در کامپوزیت‌های SiC را فراهم می‌سازد، مشروط بر آنکه دما، زمان و فشار پرس در محدوده بهینه قرار گیرند. افزون بر این، این رویکرد نه تنها امکان پیش‌بینی رفتار ماده در مرحله حساس شکل‌دهی را فراهم می‌کند، بلکه با کنترل دقیق قطعه خام، راهکاری مؤثر برای کاهش چالش‌های چسب‌زدایی در مراحل بعدی ارائه می‌دهد. افزون بر این، استفاده از طراحی مرکب مرکزی (Central Composite Design) یا CCD امکان ارزیابی نظام‌مند اثرات فردی، متقابل و درجه دوم سه پارامتر اصلی دما، زمان و فشار را بر سختی قطعه خام فراهم می‌سازد. این روش، از طریق شناسایی برهم‌کنش‌های دوبه‌دو و روابط غیرخطی میان متغیرهای فرآیند، بستر لازم را برای توسعه یک مدل آماری پیش‌بینی‌پذیر و تعیین پنجره بهینه فرآیند فراهم می‌کند.

۲- مواد و روش تحقیق

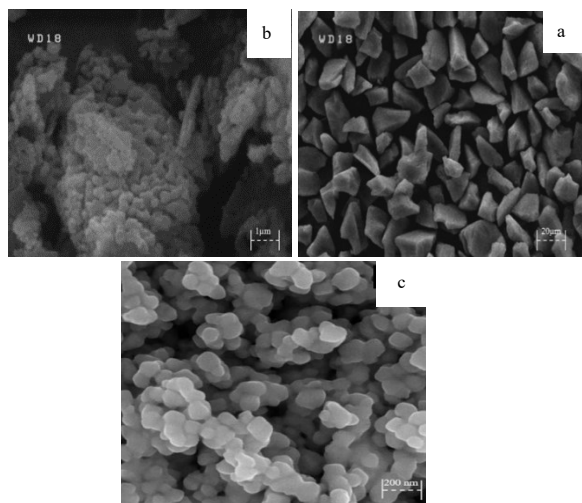
در این بخش، پس از انتخاب و آماده‌سازی مواد اولیه برای ساخت خوراک سرامیکی، شامل سیستم چسب و سیستم پودر، مراحل تولید و قالب‌گیری قطعه خام متشکل از خوراک سرامیکی بررسی می‌شود. این مراحل شامل طراحی قالب، تهیه خوراک و پودر سرامیکی، انجام فرآیند پرس گرم تک‌جهته و در نهایت ارزیابی رفتار ریزساختاری قطعه خام با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (مدل MIRA3 ساخت شرکت TESCAN) می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، نمونه‌های خام برای انجام چسب‌زدایی حرارتی در یک کوره الکتریکی تحت اتمسفر هوا قرار گرفتند. چسب‌زدایی به‌صورت دومرحله‌ای و در دماهای ۳۵۰ °C و ۵۰۰ °C انجام شد، به‌طوری‌که زمان ماند در هر مرحله ۳۰ دقیقه بود. سپس، نمونه‌ها در دمای ۱۶۵۰ °C به مدت ۶۰ دقیقه در اتمسفر هوا تف‌جوشی شدند و بدین‌ترتیب نمونه‌های نهایی به‌دست آمدند.

سیاه بود؛ به‌نحوی که کربن مورد نیاز برای تف‌جوشی واکنشی هم از کربن سیاه و هم از محصولات تجزیه پلیمرهای آلی تأمین شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که بهترین فرآیند چسب‌زدایی در اتمسفر نیتروژن حاصل شده و عملکرد بهینه، با دستیابی به چگالی $2/98 \text{ g/cm}^3$ در نمونه‌های حاوی ۷ درصد وزنی کربن سیاه، محقق گردید.

ایوم و همکارانش [۲۳] در پژوهشی در سال ۲۰۱۲، تأثیر سه روش شکل‌دهی مختلف شامل، پرس گرم، قالب‌گیری تزریقی و اکستروژن، را بر ریزساختار و خواص مکانیکی فوم‌های کاربید سیلیکون مشتق‌شده از پلی‌سیلوکسان پر شده از کربن (Carbon-filled Polysiloxane) بررسی نمودند. نتایج نشان دادند که روش پرس گرم با ایجاد توزیعی یکنواخت‌تر از ریزحفره‌های منبسط‌شونده (Expanded Microspheres)، بالاترین استحکام فشاری معادل (۲۰/۶ MPa در ۷۲٪ تخلخل) را ارائه می‌دهد. در مقابل، اکستروژن بیشترین میزان تخلخل (حدود ۸۴٪) را ایجاد کرده، که این امر منجر به کاهش استحکام می‌شود. روش تزریق نیز به‌دلیل بروز جدایش نسبی در ریزحفره‌های منبسط‌شونده، ریزساختاری ناهمگن و استحکامی متوسط (معادل ۹/۱ MPa به‌ازای ۷۴٪ تخلخل) را به دنبال دارد. در مجموع، این یافته‌ها تأکید می‌کنند که روش شکل‌دهی نقش تعیین‌کننده‌ای در تنظیم تخلخل و خواص مکانیکی فوم‌های SiC ایفا می‌کند. بنابراین با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در حوزه فرآوری قطعات پایه SiC، دستیابی همزمان به چهار هدف کلیدی، چگالی مورد انتظار، هزینه پایین، قابلیت شکل‌دهی پیچیده و خواص مکانیکی مطلوب، همچنان از چالش‌های اصلی در تولید صنعتی قطعات پایه کاربید سیلیسیوم محسوب می‌شود. به همین دلیل، تحقیقات جاری عمدتاً بر توسعه روش‌های ترکیبی مانند (CIM+SPS) و همچنین فرآیند پیش‌اکسیداسیون به همراه تف‌جوشی بدون فشار متمرکز شده است [۲۴]، تا بتوان از مزایای ذاتی هر دو روش بهره‌برده و معایب هر یک را به حداقل رساند [۲۵].

یکی از روش‌های ترکیبی مطرح، استفاده از قالب‌گیری تزریقی است که مزایای قابل‌توجهی از جمله امکان تولید انبوه قطعات پیچیده با دقت ابعادی بالا، کنترل مناسب فرآیند و حداقل اتلاف ماده را فراهم می‌آورد [۲۴]، با این حال، این روش با محدودیت‌هایی نظیر هزینه‌های بالا، نیاز به ابزارآلات سنگین و عدم صرفه اقتصادی در تیراژ پایین مواجه است [۲۶]. در مقابل، روش پرس گرم تک‌محوره، اگرچه برای تولید در تیراژ پایین مقرون‌به‌صرفه است [۲۷]، اما در ساخت قطعات با هندسه پیچیده و دقت بالا ناتوان بوده و در کنترل میزان تخلخل قطعات متخلخل نیز محدودیت‌هایی دارد [۲۸].

نوآوری اصلی این پژوهش در معرفی و توسعه رویکرد هیبریدی "قالب‌گیری پرس گرم خوراک سرامیکی" (Warm-Pressing of Ceramic Feedstock) نهفته است؛ رویکردی که با تلفیق مزایای



شکل ۲ تصاویر SEM از پودرهای سرامیکی مورد استفاده در این پژوهش: **الف)** کاربید سیلیسیوم، **ب)** آلومینا و **ج)** زیرکونیای پایدارشده با ایتریا.
Fig. 2 SEM micrographs of the ceramic powders used in this study: **a)** silicon carbide, **b)** alumina, and **c)** yttria-stabilized zirconia.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی خوراک سرامیکی تولید شده در این پژوهش

Table 1 Chemical composition of the ceramic feedstock produced in this study

ترکیب	SiC	Al ₂ O ₃	YSZ	PP	PW	SA
(%wt.)	(%wt.)	(%wt.)	(%wt.)	(%wt.)	(%wt.)	(%wt.)
S-A-Y	60	3	8	9	10	1

ناشی از فرآیند اتصال ذرات در طول تف‌جوشی) سرچشمه می‌گیرد. شایان ذکر است حفره قالب به شکل استوانه با قطر داخلی ۵mm و زاویه خروج (Draft Angle) برابر با ۰/۵ درجه طراحی شد. در طراحی قالب تخصصی، به منظور کاهش اصطکاک دیواره‌ای در هنگام خروج قطعه خام و جلوگیری از ایجاد تنش‌های کششی که منجر به ترک‌خوردگی یا "تورق" (Delamination) در قطعات سرامیکی می‌شود، زاویه خروجی معادل ۰/۵ درجه در نظر گرفته شد. این زاویه با توجه به ویسکوزیته خوراک در دمای شکل‌دهی و ماهیت نیمه‌صلب قطعه خام پس از سرد شدن انتخاب شده است تا جدایش قطعه از قالب استوانه‌ای با کمترین نیروی پسا (Drag force) انجام شود. تصاویر قالب‌های ساخته شده در شکل ۴ قابل مشاهده است.

۳-۲- ساخت خوراک سرامیکی

جهت ساخت خوراک سرامیکی از دستگاه مخلوط‌کن داخلی (Internal Mixer) مدل Plastograph Brabender با محفظه اختلاط ۵۰cc استفاده شد. کل فرآیند اختلاط، که شامل ۲۰٪ حجمی سیستم چسب و ۸۰٪ حجمی پودرهای سرامیکی است، در دمای ۱۸۰°C اجرا شد. عملیات پیش‌اختلاط (Premixing) با استفاده از دستگاه مخلوط‌کن داخلی به مدت ۱۵ min و با سرعت ۴۵ rpm انجام گرفت؛ این مرحله به صورت متوالی و زمان‌بندی شده طراحی شد: ابتدا پلی‌پروپیلن به مدت ۵ min مخلوط شد، سپس پارافین وکس به آن افزوده گردید و به مدت ۵ min اختلاط ادامه یافت، و در نهایت اسید استئاریک به سیستم چسب اضافه شد و برای ۵ min دیگر

۲-۱- مواد اولیه

جهت ساخت قطعات سرامیکی بر پایه کامپوزیت‌های کاربید سیلیسیوم به روش قالب‌گیری و پرس گرم، دو سیستم مجزای پودر و چسب مورد استفاده قرار گرفت. سیستم پودری شامل کاربید سیلیسیوم، آلومینا و زیرکونیای پایدارشده با ایتریا است. هدف از افزودن سیستم چسب، افزایش جریان‌پذیری مخلوط پودری در فرآیند قالب‌گیری است، تا ضمن تسهیل پر شدن کامل فضاها، اصطکاک بین ذرات در حین حرکت و جاری شدن کاهش یابد [۲۹،۳۰]. سیستم چسب از پلی‌پروپیلن به عنوان جزء پشتیبان (Backbone)، پارافین وکس به عنوان پرکننده [۳۱] و استئاریک اسید به عنوان سورفکتانت [۳۲] تشکیل شده است. پودر کاربید سیلیسیوم ساخت ژاپن با خلوص ۹۹/۸٪، اندازه متوسط ذرات ۹/۷ میکرون و مورفولوژی گوشه‌دار، به عنوان فاز اصلی کامپوزیت به کار رفت. همچنین، پودر آلومینا ساخت آلمان با خلوص ۹۹٪ و اندازه متوسط ذرات ۴/۶ میکرون، و نیز پودر زیرکونیای پایدارشده با ۶/۵ wt.% ایتریا، تولید شرکت بیس‌مواد ایران، با اندازه متوسط ذرات ۹۸/۲ نانومتر، به عنوان افزودنی‌های تقویت‌کننده در ترکیب مورد استفاده قرار گرفتند (شکل ۲). در جدول ۱ درصد وزنی هر یک از ترکیبات گزارش شده است.

۲-۲- طراحی قالب

قالب‌های ساخته شده، مطابق با شکل استاندارد آزمون‌های مورد نیاز برای ارزیابی رفتار نمونه‌ها طراحی شدند. با توجه به کاربردهای کامپوزیت‌های پایه کاربید سیلیسیوم در حوزه‌هایی که مقاومت به سایش و استحکام مکانیکی مد نظر است، قالب‌هایی با شکل دیسکی (برای سایش) و مکعب‌مستطیل (برای خمش) بر مبنای ابعاد استاندارد و با استفاده از نرم‌افزار SolidWorks 2019 طراحی گردید. در فرآیند طراحی قالب، دو رویکرد چندگانه و مجزا قابل انتخاب است. اگرچه طراحی قالب چندگانه (مطابق شکل ۳الف) می‌تواند با تولید همزمان چند نمونه، صرفه‌جویی زمانی ایجاد کند، اما به دلیل ریسک ایجاد نقص‌های ساختاری مانند گرم نشدن ناهمگون پودر، فعال نشدن یکپارچه سیستم چسب، نقص در پر شدن کامل حفره‌ها و نیاز به کنترل دقیق‌تر گرادیان حرارتی، رویکرد قالب‌های مجزا انتخاب شد (شکل ۳ب).

روش قالب‌گیری مجزا اگرچه سرعت کمتری نسبت به روش قالب‌گیری چندگانه دارد، اما به دلیل اعمال فشار و حرارت متمرکز بر یک قطعه، کنترل فرآیند بسیار دقیق‌تری را نسبت به سطح گسترده قالب‌گیری چندگانه میسر می‌سازد. لازم به ذکر است که ابعاد قالب‌های مجزا ۲۵٪ بزرگ‌تر از حالت استاندارد طراحی شدند تا انقباض کلی حین فرآیند لحاظ شود. این انقباض از دو منبع (حذف ۲۰٪ از حجم خوراک سرامیکی مربوط به سیستم چسب در مرحله چسب‌زدایی، و کاهش حدود ۵٪ از حجم پودر سرامیکی

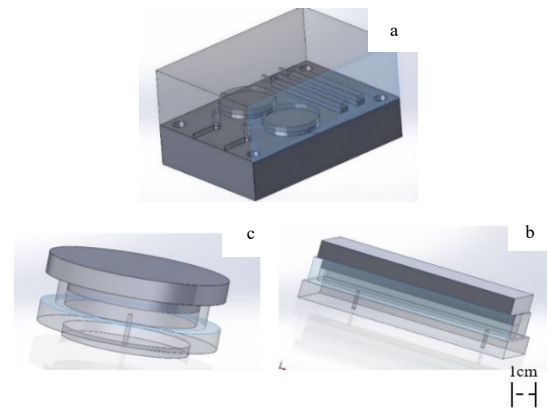
پس از ساخت خوراک سرامیکی کلوخه‌ای شکل، فرآیند قالب‌گیری مستقیم از کلوخه‌ها به دلیل مشکلاتی نظیر تخلخل کنترل نشده، عدم پرشدگی کامل قالب یا توزیع ناهمگون حرارتی ممکن نیست. بنابراین، گام ضروری بعدی، تبدیل خوراک کلوخه‌ای به مخلوط پودر سرامیکی است (شکل ۶).

۲-۴- تولید پودر خوراک سرامیکی

بر اساس بررسی منابع، اغلب پژوهش‌های مرتبط با خوراک‌های سرامیکی بر سامانه‌های قالب‌گیری تزریقی متمرکز بوده‌اند؛ در این سامانه‌ها معمولاً خوراک به صورت گرانول و از طریق مراحل نظیر اکستروژن، نورد و برش آماده‌سازی می‌شود [۳۳]. با این حال، این مسیر علاوه بر مصرف انرژی و هزینه نسبتاً بالا، گرانول‌هایی با ابعاد نسبتاً درشت (در حدود ۰/۵ تا ۳ میلی‌متر) تولید می‌کند که استفاده مستقیم از آن‌ها در فرآیند پرس گرم را محدود می‌سازد. این محدودیت عمدتاً به دلیل افزایش احتمال فعال شدن فاز چسب و بروز عیوبی نظیر پر نشدن کامل قالب و ایجاد تخلخل ناخواسته است. از این رو، در پژوهش حاضر، رویکرد پودر سازی خوراک سرامیکی به منظور کاهش اندازه ذرات، بهبود یکنواختی پر شدن قالب و افزایش امکان‌پذیری فرآیند پرس گرم مورد توجه قرار گرفت. به منظور انتخاب روش مناسب برای پودر کردن خوراک، پنج روش مختلف شامل خردایش دستی، آسیاب گلوله‌ای، آسیاب میله‌ای، آسیاب گلوله‌ای کالیبره و خردکن (Pulverizer) بر اساس معیارهایی نظیر سهولت اجرا، صرفه اقتصادی، تکرارپذیری، قابلیت مقیاس‌پذیری و در دسترس بودن تجهیزات مورد ارزیابی قرار گرفتند. خردایش دستی به دلیل زمان‌بر بودن، مقیاس‌پذیر نبودن و عدم تکرارپذیری مناسب در کنترل اندازه ذرات، برای این کاربرد مناسب تشخیص داده نشد.

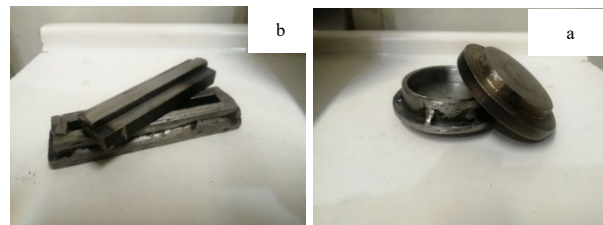
در ادامه، دو روش آسیاب‌کاری متداول شامل آسیاب گلوله‌ای و آسیاب میله‌ای بررسی شدند. در فرآیند آسیاب گلوله‌ای، از محفظه فلزی و گلوله‌هایی با قطر متوسط ۲۶/۰۳ میلی‌متر در سرعت ۷۰ دور بر دقیقه استفاده شد. در این روش، حرارت ایجاد شده ناشی از حرکت گلوله‌ها موجب نرم شدن و چسبندگی خوراک به دیواره محفظه و سطح گلوله‌ها شد و در نتیجه، تولید پودر مناسب را با مشکل مواجه کرد. شرایط مشابهی در آسیاب میله‌ای نیز مشاهده شد؛ به طوری که استفاده از میله‌هایی با قطر متوسط ۱۲ میلی‌متر و طول میانگین ۱۰۰ میلی‌متر در سرعت ۵۶ دور بر دقیقه نیز به افزایش چسبندگی خوراک به اجزای آسیاب و کاهش کارایی فرآیند انجامید.

به منظور کاهش آثار حرارتی و اصطکاکی، آسیاب گلوله‌ای کالیبره با محفظه و گلوله‌های آلومینایی مورد استفاده قرار گرفت. در این روش، از گلوله‌هایی با قطر متوسط ۲۵ میلی‌متر و سرعت ۸۶ دور بر دقیقه استفاده شد. نتایج نشان داد که این سامانه در مقایسه با



شکل ۳ الف) طراحی قالب چندگانه، ب) طراحی قالب آزمون خمش سه نقطه مجزا و ج) طراحی قالب آزمون سایش مجزا.

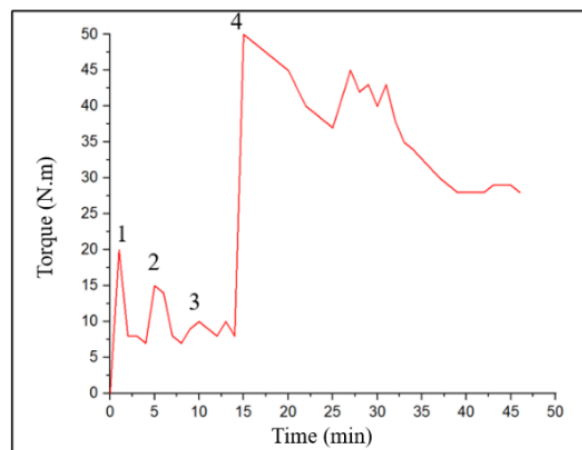
Fig. 3 a) Multi-cavity mold design, b) individual 3-point bending test design, and c) individual wear test mold design.



شکل ۴ ساخت قالب مجزا: الف) قالب آزمون سایش، ب) قالب آزمون خمش.

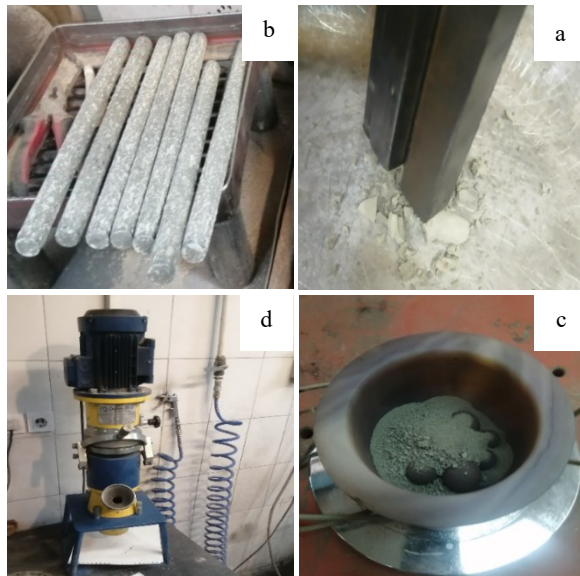
Fig. 4 Fabrication of individual molds: a) wear test mold, and b) 3-point bending test mold.

ترکیب گردید، تا سیستم چسب یکنواخت حاصل شود. در مرحله اختلاط اصلی، پودر سرامیکی به سیستم چسب در دمای 180°C ، با سرعت ۶۰ rpm و به مدت ۳۰ min افزوده شد تا خوراک نهایی سرامیکی حاصل شود. پایش نیروی چرخشی مورد نیاز در طول فرآیند از طریق ثبت نمودار گشتاور بر حسب زمان (شکل ۵) انجام شد؛ این نمودار، تغییرات گشتاور را نسبت به زمان افزودن هریک از اجزا (پودر و اجزای چسب) نشان می‌دهد و مبین تغییرات احتمالی در گرانیوی ماده یا بروز مشکلات فرآیندی است.



شکل ۵ نمودار خروجی دستگاه مخلوط‌کن داخلی.

Fig. 5 Output curve of the internal mixer.



شکل ۶ روش‌های پودرسازی خوراک سرامیکی؛ الف) خردکردن مکانیکی با دست، ب) آسیاب میله‌ای، ج) آسیاب گلوله‌ای کالیبره و د) خردکن.

Fig. 6 Ceramic feedstock powder preparation methods: a) manual grinding, b) rod milling, c) calibrated ball milling, and d) pulverizer.

همراه دارد [۳۴]. محدوده فشار انتخابی ۱۰۰ تا ۲۰۰ bar در نظر گرفته شد. برخلاف هدف مرسوم در متالورژی پودر که اعمال فشار، جهت پیش‌تف‌جوشی صورت می‌گیرد، در این روش هدف اصلی اعمال فشار، ثابت نگه داشتن قالب تحت حرارت برای فعال‌سازی کامل سیستم چسب و فراگیری تمامی سطح قالب است [۲۳]. اعمال فشار، امکان توزیع یکنواخت چسب در فضای بین‌ذره‌ای را فراهم آورده و با تسهیل جریان ماده، تماس مستقیم ذرات سرامیکی با یکدیگر را بهبود می‌بخشد. به دلیل نشت ماده از لبه‌های قالب در حین فعال‌شدن سیستم چسب، ناشی از اثر گرانش و وزن سنبه، فشارهای کمتر از ۱۰۰ bar در این مطالعه مورد بررسی قرار نگرفتند. فشار بیش از ۲۰۰ bar می‌تواند سبب خروج سیستم چسب از لبه‌ها، ایجاد تنش‌های اضافی در قالب، یا ترک‌خوردگی نمونه شود. فرآیند تعیین پارامترهای قالب‌گیری (زمان و فشار) با روش ثابت‌سازی یک متغیر آغاز شد. ابتدا، زمان لازم برای رسیدن خوراک به فاز خمیری پس از گرم شدن کامل قالب اندازه‌گیری گردید. این شرایط با پر کردن حفره مادگی و تنظیم فک‌ها در وضعیت تماس حرارتی (بدون اعمال فشار اولیه) برقرار شد. در این حالت، حدود ۳۰ min زمان لازم بود تا سنبه، با جابه‌جایی خوراک اضافی، به وضعیت تماس برسد. در نهایت، زمان ۲۰ تا ۳۰ min، به عنوان بازه در نظر گرفته شده جهت تضمین تراکم کامل ذرات سرامیکی و کاهش تخلخل در نظر گرفته شد. زمان کمتر منجر به نقص شده و زمان بیشتر سبب اتلاف انرژی یا تخریب چسب می‌گردد. تنظیم دما، فشار و زمان قالب‌گیری، تعادل لازم بین تراکم‌دهی مؤثر و جلوگیری از نشت یا آسیب حرارتی را فراهم می‌آورد.

آسیاب‌های فلزی عملکرد بهتری در کنترل حرارت و جلوگیری از چسبندگی خوراک دارد. با این وجود، یکنواختی اندازه ذرات حاصل همچنان رضایت‌بخش نبود و حتی با افزایش زمان آسیاب، ذرات درشت در محصول نهایی مشاهده شد؛ به گونه‌ای که دستیابی به پودری با اندازه ذرات کمتر از ۵۰۰ میکرومتر به صورت یکنواخت امکان‌پذیر نشد.

بر این اساس، در نهایت از خردکن به عنوان روش منتخب استفاده شد. در این دستگاه، کاهش اندازه خوراک عمدتاً تحت اثر تنش فشاری اعمال‌شده توسط دو شفت داخلی انجام می‌گیرد. تخلیه پیوسته پودر از بخش زیرین دستگاه و جلوگیری از تجمع ماده در محفظه، موجب کاهش افزایش دما و محدود شدن چسبندگی خوراک در حین فرآیند شد. در نتیجه، پودر حاصل از این روش از توزیع اندازه ذرات یکنواخت‌تری برخوردار بود و برای مرحله شکل‌دهی مناسب‌تر تشخیص داده شد.

به منظور استفاده از پودر در فرآیند پرس گرم، محصول نهایی از الک با مش ۴۰ عبور داده شد و کسر عبوری با اندازه ذرات کمتر از ۴۲۵ میکرومتر برای مراحل بعدی مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۵- پرس گرم پودر خوراک سرامیکی

پس از تولید پودر، پرس گرم با استفاده از دستگاهی مجهز به دو فک فولادی گرم شده به وسیله المنت‌ها انجام شد. انتقال حرارت به قالب موجب فعال‌سازی سیستم چسب شده و با تسهیل جریان ماده، پرشدن کامل حفره قالب، تضمین دقت ابعادی و ایجاد استحکام کافی برای خروج نمونه و انجام مرحله چسب‌زدایی را فراهم می‌کند. در این مرحله، سه پارامتر اصلی فرآیند شامل دما، فشار و زمان قالب‌گیری هستند. عدم تنظیم مناسب این پارامترها می‌تواند به بروز عیوبی مانند پر نشدن کامل قالب (در اثر دمای پایین) یا ایجاد تخلخل ناخواسته، ریزترک و تاول ناشی از اعمال فشار یا زمان نامناسب منجر شود. از آنجا که داده‌های مرجع دقیقی برای تعیین شرایط قالب‌گیری تک‌جهته پودر خوراک در دسترس نبود، ابتدا بازه‌های اولیه هر سه پارامتر تعیین شد؛ سپس با بهره‌گیری از روش طراحی آزمایش‌ها (Design of Experiments; DOE)، شرایط بهینه قالب‌گیری تک‌جهته خوراک سرامیکی استخراج گردید.

محدوده دمایی انتخابی برای قالب‌گیری °C ۱۲۰-۲۰۰ تعیین شد. دمای °C ۱۲۰ برای فعال‌سازی سیستم چسب (ذوب پلی‌پروپیلن که جزء پشتیبان چسب است) کفایت می‌کند. دمای حداکثر °C ۲۰۰ نیز تضمین‌کننده ذوب تمام اجزای سیستم چسب و تبدیل آنها به حالت نیمه‌مایع است، که سبب بهبود جریان‌پذیری خوراک سرامیکی گشته و امکان تراکم بهتر ذرات را فراهم می‌کند [۲۷]. شایان ذکر است، دمای کمتر از °C ۱۲۰ منجر به تراکم ضعیف و تخلخل بالا می‌شود. دمای بیش از °C ۲۰۰ نیز خطر تخریب حرارتی چسب، تولید گاز، یا ایجاد نقص‌هایی مانند حباب یا ترک را به

به منظور تضمین فعال سازی مؤثر پلیمر و پیشبرد واکنش های مرتبط بود. این مفهوم با "دمای روانی" متداول در صنعت، که عمدتاً به قابلیت جریان یابی و پر شدن قالب مربوط می شود، تفاوت دارد. در این رویکرد، ایجاد حالتی خمیری مانند (Paste-like Consistency) مدنظر قرار گرفته که تنها برای اطمینان از فعال سازی مطلوب پلیمر و وقوع واکنش های مورد انتظار طراحی شده است. پس از پایان قالب گیری، انتظار می رفت که با اعمال نیروی اندک و از طریق هواکش های تعبیه شده در کف قالب (که برای خروج دود ناشی از ذوب چسب و هوای محبوس بین پودرها طراحی شده اند)، خروج نمونه های سرد شده به راحتی میسر گردد. با این حال، خروج نمونه از قالب امکان پذیر نبود. با توجه به اینکه قالب ها بر اساس استانداردهای موجود طراحی شده بودند و امکان اعمال تغییر در شکل یا ابعاد داخلی آن ها فراهم نبود، ضروری بود تدبیری اتخاذ شود تا فرآیند خروج نمونه بدون بروز اختلال انجام پذیرد. بدین منظور، با الهام از مکانیسم پُران (Ejector) در قالب های تزریق پلاستیک، یک صفحه هدایت گر در کف قالب ها تعبیه شد. این صفحه با استفاده از پیچ ها از کف قالب فاصله گرفته و خروج نمونه را تسهیل می کند. جهت تضمین خروج یکنواخت و حفظ تعادل نیرو، در پشت قالب آزمون خمش دو پیچ و در پشت قالب آزمون سایش سه پیچ در نظر گرفته شد. با وجود طراحی صفحه هدایت گر فوق، خروج نمونه همچنان با مشکل مواجه بود. این موضوع نشان داد که مقاومت ایجاد شده صرفاً ناشی از نبود مکانیزم خروج نبود، بلکه عمدتاً از برهم کنش خوراک سرامیکی با دیواره های قالب ناشی می شد. در دمای فعال سازی، نرم شدن چسب موجب افزایش سطح تماس واقعی با دیواره فولادی قالب و در نتیجه افزایش نیروهای چسبندگی و اصطکاک شد. از سوی دیگر، اعمال فشار پرس سبب کاهش گرانی چسب و جریان آن به سمت فواصل بسیار کوچک میان اجزای قالب گردید؛ بنابراین، حتی با اعمال نیروی خروج، مقاومت اصطکاکی و چسبندگی جانبی، مانع جدایش آسان نمونه از قالب شد. بررسی نمونه ها نشان داد که این رفتار عمدتاً ناشی از دو پدیده هم زمان بود: (۱) افزایش چسبندگی و اصطکاک بین خوراک سرامیکی و دیواره داخلی قالب و (۲) نشت بخشی از خوراک از درزهای موجود میان اجزای قالب که به ایجاد تخلخل و حفرات در نمونه منجر شد (شکل ۷).

برای رفع دو محدودیت اصلی فرآیند (چسبندگی خوراک به قالب و نشت ماده)، ابتدا چسبندگی در اولویت قرار گرفت. چهار راهکار ضد چسبندگی ارزیابی شد. در رویکرد نخست، دیواره های داخلی قالب با تفلون به ضخامت ۰/۱ mm پوشش داده شد و قالب گیری مطابق سری اول جدول ۲ تکرار گردید. هرچند این پوشش چسبندگی را کاهش داد، اما آن را به طور کامل از بین نبرده، باقی ماندن خوراک بر دیواره قالب و صفحه هدایت گر مشاهده شد. این نتیجه نشان می دهد که اگرچه تفلون به دلیل انرژی سطحی پایین، نیروی چسبندگی میان خوراک و قالب را کاهش می دهد،

جهت دستیابی به نمونه های خام با دقت ابعادی بالا، از طراحی آزمایش استفاده شد. نرم افزار Design-Expert 12 برای پیاده سازی این طراحی به کار گرفته شد. از آنجایی که هدف اصلی از این طراحی، بهینه سازی چندمتغیره پارامترهای مؤثر بر خواص نهایی است، روش مدل سازی سطح پاسخ (Response Surface Methodology (RSM)) به عنوان رویکردی بسیار مناسب انتخاب گردید [۳۵]. روش سطح پاسخ، یک تکنیک پیشرفته آماری و ریاضی است که به طور خاص برای مدل سازی و تحلیل سیستم هایی طراحی شده که در آن ها چندین متغیر ورودی مستقل (پارامترهای فرآیندی) بر یک یا چند متغیر خروجی وابسته (پاسخ ها) تأثیر می گذارند. در این متدولوژی، گام محوری، شناسایی دقیق رابطه بین پارامترهای کنترلی فرآیند و نتایج مورد انتظار (پاسخ ها) است، که شرایط بهینه را برای دستیابی به بیشینه یا کمینه کردن خروجی مورد نظر، تعیین می نماید. جهت پیاده سازی مدل سازی سطح پاسخ، از میان طرح های رایج شامل فاکتوریل کامل (Full Factorial)، باکس-بنکن (Box-Behnken Design) و مرکب مرکزی، طرح مرکب مرکزی به دلیل کارایی بالاتر (تعداد آزمایش کمتر) و توانایی بهتر در مدل سازی رفتار غیرخطی و پوشش دقیق تر محدوده های مرزی [۳۶]، انتخاب شد. طراحی آزمایش نهایی برای بهینه سازی پرس گرم خوراک سرامیکی، مبتنی بر CCD با ۱۹ آزمایش، شامل ۵ نقطه مرکزی (برای برآورد خطا)، مقدار $\alpha=1$ و تکرار در نقاط فاکتوریلی و مرزی است (جدول ۲). پس از انجام عملیات پرس گرم روی پودرهای خوراک سرامیکی طبق جدول فوق، نمونه های تولید شده از نظر استحکام موضعی نمونه خام ارزیابی شدند. به دلیل رابطه مستقیم بین تخلخل و کاهش استحکام، معیار ارزیابی به طور خاص بر سختی و پیکر متمرکز شد. سختی سنجی با دستگاه Mitutoyo MVK H1 ژاپن و تحت شرایط بارگذاری ثابت ۳۰۰ gr.f به مدت ۳۰ s روی تمامی ۱۹ نمونه و با تکرار ۳ مرتبه به ازای هر نمونه، انجام گرفت. تا نتایج قابل مقایسه و دقیقی با توجه به رابطه (۱) حاصل شود. در رابطه مذکور، سختی HV، p نیرو (بر حسب کیلوگرم نیرو) و d میانگین قطر فرورفتگی (بر حسب میلی متر) می باشد.

$$HV = 1.854 \frac{P}{d^2} \quad (1)$$

۳- نتایج و بحث

در این بخش، بهینه سازی شرایط ساخت قطعه خام خوراک سرامیکی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، پارامترهای پرس گرم شامل فشار، دما و زمان قالب گیری، با استفاده از طراحی آزمایش ها بهینه شده و سپس نتایج به دست آمده بر اساس آزمون سختی تحلیل و ارزیابی شده اند.

۳-۱- قالب گیری پودر خوراک سرامیکی

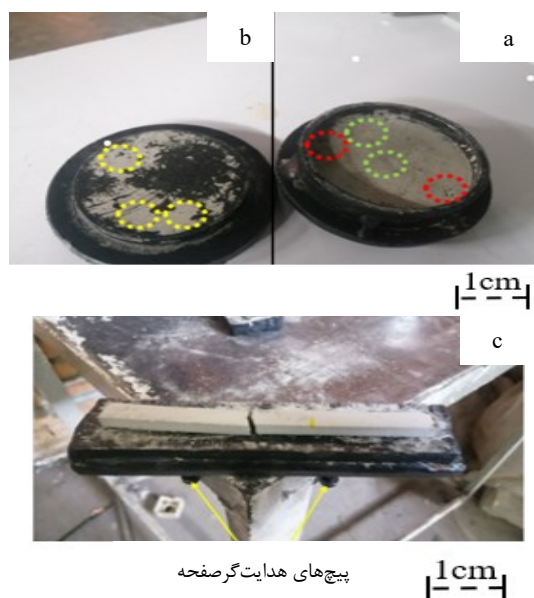
عملیات پرس گرم مطابق شرایط ارائه شده در ردیف نخست جدول ۲ انجام شد. هدف اصلی این پژوهش، تعیین دمای فعال سازی

مسیرهای نشت خوراک را نیز محدود کرد و در نتیجه علاوه بر تسهیل خروج نمونه، یکنواختی ساختاری و دقت ابعادی قطعات بهبود یافت. این اثر به نقش چسب تفلون به عنوان سد در کف قالب نسبت داده شد. تکرارپذیری موفق تولید ۱۹ نمونه نشان داد که راهکار انتخاب شده علاوه بر رفع مشکل خروج نمونه، پایداری فرآیند قالب‌گیری را نیز تأمین کرده و شرایط لازم برای انجام آزمون‌های مکانیکی بعدی را فراهم ساخته است (جدول ۲).

جدول ۲ متغیرهای طراحی آزمایش و نتایج سختی

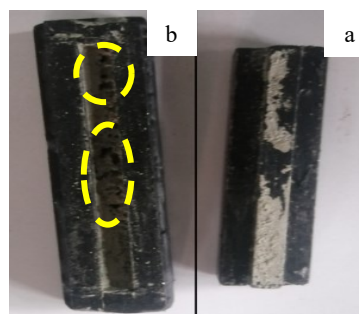
Table 2 Design of Experiments (DOE) variables and hardness results

شماره آزمایش	زمان (min)	فشار (bar)	دما (°C)	نتایج سختی (HV)
۱	۳۰	۲۰۰	۱۲۰	۲۴۲/۳ ± ۴/۵
۲	۳۰	۱۰۰	۲۰۰	۱۴۷/۲ ± ۵/۱
۳	۲۰	۱۵۰	۱۶۰	۹۲/۸ ± ۶/۳
۴	۲۰	۲۰۰	۱۲۰	۱۵۵/۹ ± ۵/۷
۵	۲۵	۱۰۰	۱۶۰	۱۰۲/۸ ± ۳/۸
۶	۲۰	۲۰۰	۲۰۰	۱۰۶/۰ ± ۴/۲
۷	۲۰	۱۰۰	۲۰۰	۹۱/۴ ± ۸/۴
۸	۳۰	۱۵۰	۱۶۰	۱۲۸/۵ ± ۶/۵
۹	۲۵	۱۵۰	۱۶۰	۶۴/۶ ± ۵/۳
۱۰	۲۰	۱۰۰	۱۲۰	۷۷/۵ ± ۶/۳
۱۱	۲۵	۲۰۰	۱۶۰	۱۳۸/۴ ± ۷/۹
۱۲	۳۰	۱۰۰	۱۲۰	۱۹/۶ ± ۵/۶
۱۳	۳۰	۲۰۰	۲۰۰	۴۳/۱ ± ۳/۶
۱۴	۲۵	۱۵۰	۲۰۰	۸۱/۳ ± ۲/۲
۱۵	۲۵	۱۵۰	۱۶۰	۶۴/۸ ± ۴/۵
۱۶	۲۵	۱۵۰	۱۲۰	۲۳۰/۰ ± ۳/۶
۱۷	۲۵	۱۵۰	۱۶۰	۶۴/۶ ± ۴/۲
۱۸	۲۵	۱۵۰	۱۶۰	۶۴/۶ ± ۶/۲
۱۹	۲۵	۱۵۰	۱۶۰	۶۴/۶ ± ۳/۲



شکل ۸ تصویر قالب تفلون شده پس از قالب‌گیری، (الف) ترک و تخلخل‌های سطحی، (ب) چسبندگی خوراک به قالب و (ج) شکستن نمونه حین بالا آمدن نمونه به وسیله پیچ‌های هدایت‌گر.

Fig. 8 Images of the PTFE-coated mold after the molding process: a) surface cracks and porosity, b) feedstock adhesion to the mold, and c) sample fracture during ejection via guide screws.



شکل ۷ عیوب چسبندگی و خروج غیر کنترل‌شده خوراک سرامیکی: (الف) چسبندگی خوراک سرامیکی به دیواره و (ب) حفره و تخلخل ناشی از خروج مواد خوراک سرامیکی از کف قالب.

Fig. 7 Adhesion and uncontrolled leakage defects of ceramic feedstock: a) adhesion of the feedstock to the mold wall, and b) voids and porosity due to feedstock leakage from the mold base.

اما تحت فشار بالای پرس و در حضور چسب نرم شده، تماس واقعی بین خوراک و قالب همچنان برقرار می‌ماند. علاوه بر این، تغییر شکل موضعی پوشش نازک تفلون می‌تواند موجب ایجاد نواحی قفل‌شدگی مکانیکی و باقی‌ماندن بخشی از خوراک روی سطح قالب شود. این پدیده به ترک و تخلخل سطحی منجر گردید و در برخی آزمون‌ها به دلیل نیروی مقاوم هنگام خروج نمونه، شکست قطعه رخ داد (شکل ۸). این شکست بیانگر آن است که نیروی اصطکاک و چسبندگی بین نمونه و قالب از استحکام سبز (Green Strength) نمونه بیشتر بوده است؛ بنابراین، در هنگام اعمال نیروی خروج، تنش‌های کششی موضعی ایجاد شده و به ترک و شکست نمونه منجر شده‌اند. در ادامه، سه راهکار تکمیلی بررسی شد: ۱) افزودن پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان (PDMS) در کنار پوشش تفلون، ۲) استفاده از اسپری سیلیکون در کنار پوشش تفلون، و ۳) استفاده هم‌زمان از چسب تفلون و اسپری سیلیکون. ترکیب تفلون + PDMS کاهش معنی‌داری در چسبندگی ایجاد نکرد. احتمالاً گرانشی نسبتاً بالای PDMS و تشکیل لایه‌ای با ضخامت غیریکنواخت، مانع از تشکیل یک فیلم روانکار پایدار در سطح تماس شده است؛ در نتیجه، کاهش محسوس در اصطکاک و چسبندگی مشاهده نشد. اعمال اسپری سیلیکون روی قالب از پیش تفلون‌کاری شده، خروج اولیه نمونه را بدون چسبندگی ممکن ساخت؛ این رفتار را می‌توان به تشکیل یک لایه نازک با انرژی سطحی پایین نسبت داد که تماس مستقیم بین خوراک و سطح فلزی قالب را کاهش داد. با این حال، به دلیل سایش تدریجی این لایه در سیکل‌های متوالی پرس، اثر روانکاری آن کاهش یافت. (شکل ۹). بهترین عملکرد با راهکار ترکیبی چسب تفلون + اسپری سیلیکون به دست آمد. برتری این روش را می‌توان به عملکرد مکمل دو ماده نسبت داد؛ به گونه‌ای که پوشش تفلون نقش یک لایه دائمی با انرژی سطحی پایین را ایفا کرد، در حالی که اسپری سیلیکون با ایجاد یک فیلم روانکار موقت، ضریب اصطکاک را در حین خروج نمونه کاهش داد. علاوه بر این، چسب تفلون با پر کردن فواصل ریز میان اجزای قالب،

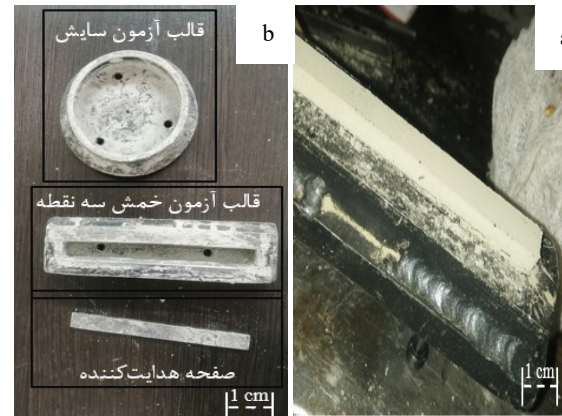
تغییرات شدید و غیرقابل پیش‌بینی در مقادیر سختی منجر نشده است. این ویژگی، که در ادبیات علمی با عنوان "حساسیت پایین سیستم به اغتشاشات جزئی" (Low sensitivity to small perturbations) شناخته می‌شود، خود یک یافته علمی شایان توجه است. چرا که در عمل، این پایداری به معنای امکان دستیابی به نتایج مطلوب با اطمینان خاطر بیشتر بوده و از لزوم برآورده کردن شرایط بسیار سخت‌گیرانه و کنترل‌های فوق‌العاده دقیق در مقیاس صنعتی می‌کاهد.

مطابق با جدول ۲، اگرچه در برخی شرایط فرآیندی مقادیر سختی نزدیک به یکدیگر مشاهده شد، اما روند کلی نتایج نشان می‌دهد که دمای فرآیند نسبت به زمان و فشار، تأثیر بارزتری بر سختی قطعه خام و ویژگی‌های تخلخل دارد. این رفتار را می‌توان با توجه به مکانیزم‌های حاکم بر مرحله پرس گرم و ماهیت رئولوژیکی خوراک تبیین کرد. در این مرحله، هنوز فرآیند تفجوشی آغاز نشده و هیچ‌گونه پیوند متالورژیکی بین ذرات تشکیل نشده است؛ بنابراین، استحکام قطعه خام عمدتاً به نحوه آرایش ذرات، توزیع چسب، میزان تراکم اولیه و توزیع تخلخل وابسته است.

در میان پارامترهای فرآیند، دما نقش اصلی را در کنترل رفتار جریان خوراک ایفا می‌کند. افزایش دما تا محدوده بهینه، گرانروی چسب را کاهش داده و در نتیجه جریان‌پذیری خوراک، قابلیت بازآرایی ذرات و توزیع یکنواخت‌تر چسب در میان ذرات را بهبود می‌بخشد. این شرایط ضمن تسهیل خروج هوای محبوس و افزایش پخش‌پذیری فضاهای بین‌ذره‌ای، احتمال تشکیل نواحی با تراکم پایین و حفرات ماکروسکوپی را کاهش می‌دهد. در نتیجه، تعداد تماس‌های مؤثر بین ذرات افزایش یافته، شبکه‌ای یکنواخت‌تر از اتصالات مکانیکی در قطعه خام ایجاد می‌شود و انتقال تنش در ساختار بهبود می‌یابد؛ پدیده‌ای که به‌صورت افزایش سختی اندازه‌گیری شده ظاهر می‌شود.

در مقابل، فشار به‌تنهایی عامل تعیین‌کننده کیفیت قطعه خام نیست، بلکه اثربخشی آن به وضعیت حرارتی و رفتار رئولوژیکی خوراک وابسته است. فشار، ذرات را به یکدیگر نزدیک کرده و چسب را به سمت فضاهای خالی هدایت می‌کند، اما زمانی که دما پایین‌تر از مقدار بهینه باشد، گرانروی زیاد چسب و اصطکاک داخلی بالا مانع انتقال یکنواخت فشار در سراسر قطعه می‌شود. در چنین شرایطی، بخشی از انرژی اعمالی صرف غلبه بر مقاومت جریان شده و تراکم به‌صورت موضعی رخ می‌دهد؛ در نتیجه، ناهمگنی چگالی، تنش‌های پسماند و حفرات محبوس در ساختار باقی می‌مانند. ازاین‌رو، فشار تنها در صورتی می‌تواند کاهش مؤثر تخلخل و افزایش سختی را به همراه داشته باشد که دمای فرآیند، شرایط لازم برای جریان مناسب چسب و بازآرایی ذرات را فراهم کرده باشد.

اثر زمان نیز در مقایسه با دما محدودتر است. زمان پرس عمدتاً فرصت لازم برای انتقال حرارت، یکنواخت شدن دمای قطعه و تکمیل جریان گرانو چسب را فراهم می‌کند. با این حال، برخلاف



شکل ۹ میزان چسبندگی نمونه به سطح قالب تفلون شده و آغشته شده با سیلیکون اسپری در الف) اولین و ب) چهارمین سری از نمونه‌ها.

Fig. 9 Degree of sample adhesion to the PTFE-coated mold surface sprayed with silicone: a) first series of samples, and b) fourth series of samples.

با توجه به اینکه در طراحی این پژوهش از روش طراحی آزمایش‌ها (DOE) استفاده شده است، در طرح‌های فاکتوریل و سطح پاسخ، وجود چند آزمایش تکراری با شرایط ورودی یکسان ضروری است. این تکرارها دو هدف اصلی را دنبال می‌کنند: نخست، برآورد خطای خالص (Pure Error) و تأمین درجه آزادی لازم برای انجام تحلیل آماری دقیق‌تر؛ و دوم، ارزیابی احتمال وجود انحنا (Curvature) در رفتار پاسخ نسبت به عوامل ورودی. بر این اساس، آزمایش‌های شماره ۱۷، ۱۸ و ۱۹ به‌عنوان نقاط مرکزی تکراری در ماتریس DOE منظور شدند. تکرار نقطه مرکزی این امکان را فراهم می‌کند که خطای آزمایشگاهی و میزان پایداری فرآیند ارزیابی شود، خطی یا غیرخطی بودن رفتار پاسخ در مدل آماری بررسی گردد و تحلیل واریانس (ANOVA) با دقت بیشتری انجام شود. از آنجا که برای این طرح تنها یک نقطه مرکزی مورد نیاز است، تکرارها صرفاً در یک ترکیب از سطوح عوامل انجام گردید و سایر آزمایش‌ها بدون تکرار اجرا شدند. این رویکرد با اصول و استانداردهای متداول در طراحی آزمایش‌ها سازگار بوده و از نظر آماری و اجرایی کاملاً قابل‌توجه است. مطابق جدول ۲، نزدیکی مقادیر سختی در آزمایش‌های تکراری نقطه مرکزی، نشان‌دهنده پراکندگی محدود داده‌ها و تکرارپذیری مناسب فرآیند است. این نتایج بیانگر آن است که در شرایط نقطه مرکزی، فعال‌سازی چسب و تراکم ذرات با پایداری مناسبی انجام شده و تغییرات تصادفی فرآیند تأثیر محدودی بر پاسخ سختی داشته است. این رفتار را می‌توان ناشی از یکنواختی نسبی انتقال حرارت، نرم‌شدن چسب و بازآرایی ذرات در شرایط منتخب دانست. در نتیجه، انتظار می‌رود بخش عمده تغییرات مشاهده‌شده در پاسخ‌ها ناشی از اثر عوامل طراحی‌شده (دما، فشار و زمان) باشد، نه نوسانات تصادفی فرآیند. این نتایج همچنین نشان می‌دهد که فرآیند در محدوده عوامل بررسی‌شده از پایداری مناسبی برخوردار بوده و تغییرات جزئی در شرایط آزمون، به

اعمال فشار می‌شود. این پدیده به تشکیل نواحی غنی از چسب و نواحی فقیر از چسب منجر شده و یکنواختی شبکه ذرات را برهم می‌زند. در نواحی فقیر از چسب، پیوستگی مکانیکی بین ذرات کاهش یافته و پس از آزادسازی فشار یا سرد شدن قطعه، احتمال تشکیل حفرات ماکروسکوپی و ناپیوستگی‌های ساختاری افزایش می‌یابد. علاوه بر این، جریان بیش از حد خوراک می‌تواند موجب ایجاد گرادیان‌های موضعی چگالی در قطعه خام شود که به‌عنوان نواحی مستعد تمرکز تنش عمل کرده و استحکام مکانیکی را کاهش می‌دهند.

در مجموع، مشاهدات ریزساختاری نشان می‌دهد که رابطه بین دما و کیفیت قطعه خام ماهیتی غیرخطی دارد؛ به‌گونه‌ای که افزایش دما تا محدوده پهینه موجب بهبود جریان‌پذیری خوراک، کاهش تخلخل و افزایش یکنواختی ساختار می‌شود، اما افزایش بیشتر آن به دلیل برهم خوردن تعادل میان روانی چسب و پایداری آرایش ذرات، به مهاجرت چسب، ناهمگنی چگالی و تشکیل مجدد تخلخل‌ها منجر می‌شود. این یافته‌ها به‌خوبی با روند تغییرات سختی اندازه‌گیری‌شده همخوانی داشته و نشان می‌دهد که دستیابی به بیشترین استحکام قطعه خام، مستلزم ایجاد تعادل میان قابلیت جریان خوراک و حفظ انسجام شبکه ذرات در طول فرآیند پرس گرم است.

کفایت مدل توسعه‌یافته بر اساس شاخص‌های آماری شامل ضریب تعیین (R^2)، دقت کافی (Adequate Precision)، مقدار p-value و تحلیل باقی‌مانده‌ها ارزیابی شد. همان‌گونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، مقادیر R^2 ، Adequate Precision و p-value در کنار نتایج تحلیل باقی‌مانده‌ها، همگی نشان‌دهنده برازش مناسب، معنی‌داری آماری و قابلیت پیش‌بینی مطلوب مدل هستند. مقدار بالای ضریب تعیین بیانگر آن است که مدل قادر است بخش عمده تغییرات سختی قطعه خام را به‌وسیله متغیرهای فرآیند تبیین کند و سهم خطاهای تصادفی در تغییرات پاسخ محدود است. همچنین، مقدار Adequate Precision برابر با ۸/۱۹۰۵، که به‌مراتب بزرگ‌تر از مقدار مرجع (۴) است، نسبت مناسب سیگنال به نویز و توانایی مدل در پیش‌بینی پاسخ در فضای طراحی را نشان می‌دهد. افزون بر این، مقدار p-value برابر با ۰/۱۱۲، معنی‌داری آماری مدل را تأیید کرده و بیانگر آن است که تغییرات مشاهده‌شده در سختی عمدتاً ناشی از اثر واقعی پارامترهای فرآیند بوده و نمی‌توان آن‌ها را به نوسانات تصادفی نسبت داد.

اعتبار مدل با تحلیل باقی‌مانده‌ها نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. نمودار احتمال نرمال (شکل ۱۱الف) نشان داد که باقی‌مانده‌ها از توزیع نرمال مناسبی تبعیت می‌کنند و انحراف قابل توجهی از رفتار مورد انتظار مشاهده نمی‌شود.

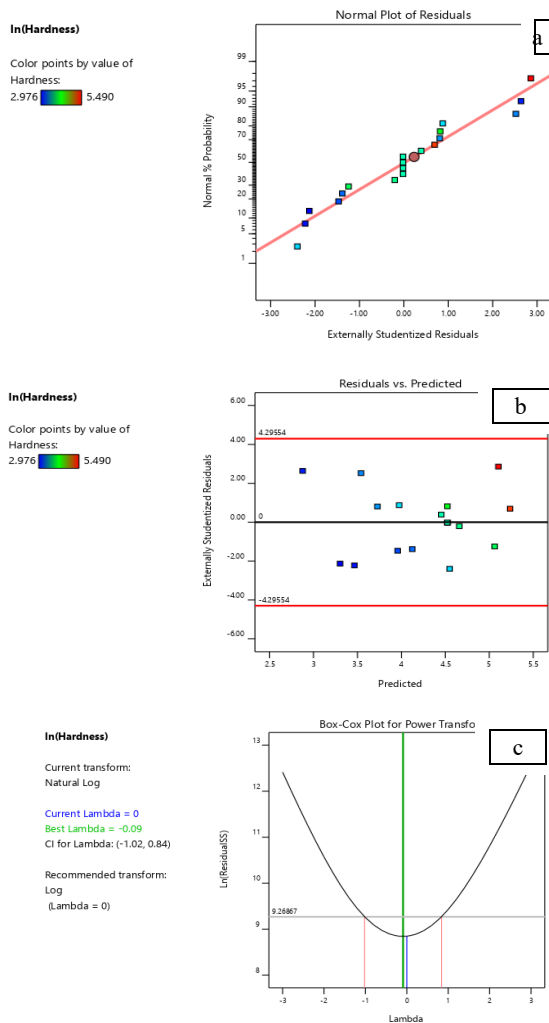
مرحله تف‌جوشی که مکانیزم‌هایی نظیر نفوذ اتمی و رشد گلولی‌ها به‌شدت تابع زمان هستند، در مرحله پرس گرم، تحکیم عمدتاً از طریق جریان گرانش چسب و جابه‌جایی فیزیکی ذرات انجام می‌شود. این فرآیندها پس از رسیدن نمونه به تعادل حرارتی، در مدت نسبتاً کوتاهی به شرایط نزدیک به پایدار می‌رسند؛ بنابراین، افزایش زمان فراتر از مقدار پهینه، تأثیر قابل توجهی بر کاهش بیشتر تخلخل یا افزایش سختی نخواهد داشت.

این نتایج نشان می‌دهد که دما در فرآیند پرس گرم نقش یک پارامتر فعال‌ساز را ایفا می‌کند؛ به این معنا که فراهم شدن شرایط حرارتی مناسب، پیش‌نیاز بهره‌گیری مؤثر از فشار و زمان است. در غیاب دمای کافی، افزایش فشار یا طولانی‌تر شدن زمان پرس قادر به غلبه بر مقاومت جریان خوراک، اصطکاک بین ذرات و هوای محبوس نبوده و در نتیجه بخشی از حفرات ماکروسکوپی در ساختار باقی می‌ماند. این حفرات به‌عنوان نواحی تمرکز تنش عمل کرده، پیوستگی مکانیکی شبکه ذرات را کاهش داده و موجب افت سختی قطعه خام می‌شوند.

تحلیل ارائه‌شده با شواهد ریزساختاری حاصل از تصاویر FESEM (شکل ۱۰) نیز همخوانی دارد و نشان می‌دهد که تغییرات سختی و تخلخل، مستقیماً با نحوه توزیع ذرات و چسب در مرحله پرس گرم مرتبط است. در نمونه‌های تولیدشده تحت شرایط غیرپهینه، به‌ویژه آزمون شماره ۱۳ (دمای °C ۲۰۰)، حفرات ماکروسکوپی بزرگ، توزیع غیریکنواخت تخلخل و نواحی با چگالی متفاوت به‌وضوح مشاهده می‌شود. این ویژگی‌ها نشان می‌دهد که در این شرایط، جریان خوراک و بازآرایی ذرات به‌طور کامل انجام نشده و هوای محبوس و نواحی کم‌تراکم در ساختار باقی مانده‌اند. چنین ناپیوستگی‌هایی مسیر انتقال تنش را مختل کرده و با ایجاد نواحی تمرکز تنش، موجب کاهش انسجام مکانیکی و سختی قطعه خام می‌شوند.

با نزدیک شدن پارامترهای فرآیند به شرایط پهینه (آزمون شماره ۱)، تصاویر FESEM کاهش قابل‌توجه تعداد و ابعاد حفرات، توزیع یکنواخت‌تر ذرات و همگن‌تر شدن ساختار را نشان می‌دهند. این تغییرات بیانگر آن است که در محدوده پهینه، تعادل مناسبی میان گرانش چسب، قابلیت جریان خوراک و بازآرایی ذرات برقرار شده است؛ در نتیجه، چسب به‌طور یکنواخت در فضاهای بین‌ذره‌ای توزیع شده و تراکم اولیه با یکنواختی بیشتری حاصل می‌شود. این شرایط علاوه بر کاهش تخلخل، تعداد تماس‌های مؤثر بین ذرات را افزایش داده و زمینه تشکیل قطعه خامی با استحکام و سختی بیشتر را فراهم می‌کند.

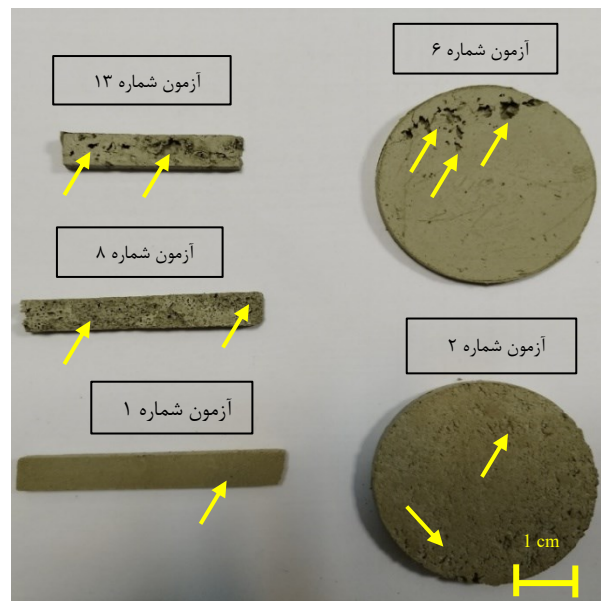
با این حال، نتایج نشان می‌دهد که افزایش دما فراتر از مقدار پهینه نیز می‌تواند اثر معکوس بر کیفیت قطعه خام داشته باشد. همان‌گونه که در تصاویر مربوط به آزمون شماره ۸ در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، کاهش بیش از حد گرانش چسب موجب افزایش تحرک آن و در نتیجه مهاجرت موضعی چسب در حین



شکل ۱۱ نمودار باقی‌مانده‌ها شامل: (الف) نمودار احتمال نرمال، (ب) باقیمانده مقیاس‌بندی‌شده برحسب مقدار پیش‌بینی‌شده و (ج) Box-Cox.

تمامی سطوح پاسخ یکنواخت نبوده و برای برقراری فرض آماری مدل، اعمال تبدیل ضروری است. پس از اعمال تبدیل لگاریتمی، مقدار λ در محدوده قابل قبول قرار گرفت (شکل ۱۱ج) که نشان‌دهنده پایدار شدن واریانس، بهبود نرمال بودن باقی‌مانده‌ها و افزایش قابلیت پیش‌بینی مدل است. بنابراین، نتایج آماری ارائه‌شده در جدول ۳، در کنار تحلیل باقی‌مانده‌ها، اعتبار، کفایت و قابلیت تعمیم مدل را برای تحلیل اثر متغیرهای فرآیند بر سختی قطعه خام تأیید می‌کنند.

پس از تأیید اعتبار مدل، اثر پارامترهای فرآیند بر سختی قطعه خام مورد بررسی قرار گرفت. مطابق شکل ۱۲الف، بیشترین سختی در کمترین دمای بررسی‌شده (120°C) حاصل شد و با افزایش دما، سختی ابتدا کاهش یافت و سپس از حدود 165°C روندی افزایشی، اما با شیب ملایم‌تر، نشان داد؛ به‌گونه‌ای که مقدار اولیه سختی در 120°C مجدداً حاصل نشد. این رفتار را می‌توان ناشی از برهم‌کنش میان سیالیت سیستم چسب و توان آن در حفظ انسجام



شکل ۱۰ تصاویر سطحی پنج نمونه منتخب از میان ۱۹ آزمون، جهت مقایسه تغییرات تخلخل در نمونه‌های خام آزمون‌های سایش و خمش سه‌نقطه (حفرات و تخلخل‌ها با پیکان زرد نشان داده شده است).

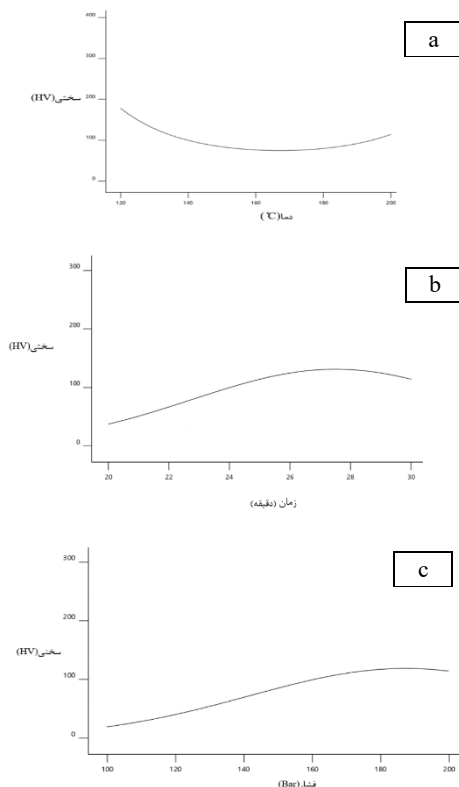
Fig. 10 Surface micrographs of five selected green specimens out of 19 experimental runs to compare porosity variations in the wear and 3-point bending test samples (pores and voids are indicated by yellow arrows).

جدول ۳ جدول ANOVA برای مدل درجه دو

Table 3 ANOVA table for the quadratic model

وضعیت	جمع مربعات	df	میانگین مربعات	F-value	p-value
مدل	۷/۳۹	۹	۰/۸۲۰۶	۵/۱۷	۰/۰۱۱۲
A-دما	۰/۰۷۶۸	۱	۰/۰۷۶۸	۰/۴۸۳۷	۰/۵۰۴۳
B-زمان	۰/۰۰۰۷	۱	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۴۵	۰/۹۴۷۸
C-فشار	۰/۳۹۳۴	۱	۰/۳۹۳۴	۲/۴۸	۰/۱۴۸۹
AB	۰/۱۳۵۳	۱	۰/۱۳۵۳	۰/۸۵۲۶	۰/۳۷۹۹
AC	۰/۰۰۰۲	۱	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۱۳	۰/۹۷۲۱
BC	۳/۸۹	۱	۳/۸۹	۲۴/۵۳	۰/۰۰۰۸
A ²	۱/۰۷	۱	۱/۰۷	۶/۷۳	۰/۰۲۹۰
B ²	۰/۸۴۸۸	۱	۰/۸۴۸۸	۵/۳۵	۰/۰۴۶۰
C ²	۰/۹۷۶۲	۱	۰/۹۷۶۲	۶/۱۵	۰/۰۳۵۰
باقی‌مانده	۱/۴۳	۹	۰/۱۵۸۷		
Lack of Fit	۱/۳۵	۵	۰/۲۶۹۶	۱۳/۴۷	۰/۰۱۳۰
خطای خالص (Pure Error)	۰/۰۸۰۱	۴	۰/۰۲۰۰		
کل (Cor Total)	۸/۸۱	۱۸			

همچنین، نمودار باقی‌مانده‌های Studentized در برابر مقادیر پیش‌بینی‌شده (شکل ۱۱ب) پراکندگی تصادفی نقاط در اطراف مقدار صفر را نشان می‌دهد که بیانگر همگنی واریانس و نبود هرگونه روند سیستماتیک در خطاهای مدل است. بررسی نمودار Box-Cox نیز نشان داد که در مقیاس اولیه، پراکندگی خطاها در



شکل ۱۲ الف) اثر فاکتور دما، ب) زمان و ج) فشار قالب‌گیری، بر نتایج سختی.

Fig. 12 Effects of molding parameters on hardness results: a) temperature, b) time, and c) pressure.

در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که سختی قطعه خام حاصل برهم‌کنش دو مکانیزم رقیب است. افزایش دما، زمان و فشار تا محدوده بهینه، با بهبود جریان خوراک، افزایش بازآرایی ذرات، کاهش تخلخل و افزایش تعداد تماس‌های بین‌ذره‌ای، موجب بهبود تراکم اولیه و استحکام قطعه خام می‌شود. در مقابل، افزایش بیش از حد هر یک از این پارامترها تعادل میان سیالیت چسب و پایداری شبکه ذرات را برهم زده و از طریق مهاجرت چسب، ایجاد گرادیان‌های چگالی، تشکیل نواحی فقیر از چسب و افزایش تمرکز تنش، کیفیت ساختار را کاهش می‌دهد. بنابراین، وجود مقادیر بهینه برای دما، زمان و فشار بیانگر آن است که دستیابی به بیشترین سختی، نه با بیشینه کردن هر پارامتر، بلکه با ایجاد تعادل میان قابلیت جریان خوراک، تراکم اولیه و حفظ انسجام مکانیکی شبکه ذرات امکان‌پذیر است؛ نتیجه‌ای که با روند تغییرات سختی، تحلیل آماری مدل (جدول ۳) و مشاهدات ریزساختاری نیز همخوانی کامل دارد.

به‌منظور بررسی اثر هم‌زمان زمان و فشار قالب‌گیری و تعیین ناحیه بهینه فرآیند، سطح پاسخ سه‌بعدی حاصل از مدل آماری توسعه‌یافته مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱۳). در این نمودار، محورهای افقی نشان‌دهنده زمان و فشار قالب‌گیری بوده و محور عمودی مقدار سختی پیش‌بینی‌شده قطعه خام را نمایش می‌دهد.

مکانیکی ساختار خام دانست. در دمای ۱۲۰ °C، اجزای سیستم چسب شامل پلی‌پروپیلن، پارافین واکس و استئاریک اسید، ضمن برخورداری از قابلیت جریان کافی، هنوز استحکام لازم برای تثبیت آرایش ذرات و انتقال مؤثر تنش در ساختار خام را حفظ می‌کنند. با افزایش دما، کاهش بیشتر گرانشی چسب اگرچه جریان خوراک و بازآرایی ذرات را تسهیل می‌کند، اما هم‌زمان توان چسب در تثبیت شبکه ذرات را کاهش می‌دهد. در نتیجه، احتمال مهاجرت موضعی چسب، تشکیل نواحی غنی و فقیر از چسب و ایجاد ناهمگنی چگالی افزایش یافته و این ناپیوستگی‌ها به‌صورت کاهش انسجام ساختاری و افت سختی ظاهر می‌شوند. در دماهای بالاتر، اگرچه افزایش سیالیت می‌تواند بخشی از تخلخل‌های ریز را کاهش داده و بازآرایی ذرات را بهبود بخشد، اما اثرات منفی ناشی از کاهش پایداری شبکه ذرات مانع از بازیابی کامل سختی می‌شود. بنابراین، رفتار مشاهده‌شده حاصل رقابت میان دو مکانیزم هم‌زمان، یعنی بهبود قابلیت جریان خوراک و کاهش توان چسب در حفظ آرایش ذرات است.

اثر زمان قالب‌گیری نیز روند مشابهی را نشان داد (شکل ۱۲ب). افزایش زمان تا حدود ۲۷ دقیقه موجب افزایش سختی شد که می‌توان آن را ناشی از یکنواخت شدن توزیع دما، تکمیل جریان گرانو چسب و فراهم شدن فرصت کافی برای بازآرایی ذرات دانست. با این حال، پس از دستیابی به تعادل حرارتی، ادامه زمان نگهداری مزیت قابل توجهی برای افزایش تراکم ایجاد نکرده و فرآیند به شرایط نزدیک به اشباع رسید. در این مرحله، افزایش زمان احتمال مهاجرت چسب، کاهش پایداری آرایش ذرات و ایجاد ناهمگنی‌های موضعی را افزایش داده و در نتیجه سختی روندی کاهشی پیدا کرد. این نتایج نشان می‌دهد که برخلاف مرحله تف‌جوشی، که تحکیم ساختار به نفوذ اتمی وابسته است، در مرحله پرس گرم پس از تکمیل جریان چسب و تثبیت اولیه ساختار، اثر زمان به‌طور محسوسی کاهش یافته و ادامه نگهداری تنها احتمال بروز ناپایداری‌های موضعی را افزایش می‌دهد.

رفتار فشار نیز (شکل ۱۲ج) وجود یک مقدار بهینه را نشان داد. در فشارهای پایین، تماس ناکافی بین ذرات و تراکم اولیه محدود، مانع تشکیل ساختاری متراکم و یکنواخت شده و سختی پایینی ایجاد کرد. افزایش فشار تا حدود ۱۸۵ bar موجب افزایش تماس‌های بین‌ذره‌ای، کاهش فضای خالی و بهبود انتقال تنش در ساختار خام شد و در نتیجه سختی افزایش یافت. با این حال، اعمال فشارهای بالاتر موجب افزایش گرادیان‌های تنش و جریان ترجیحی چسب در نواحی تحت فشار شد که احتمال خروج موضعی چسب، تشکیل نواحی فقیر از چسب و ایجاد ناهمگنی چگالی را افزایش داد. این ناهمگنی‌ها به‌عنوان نواحی تمرکز تنش عمل کرده و با کاهش پیوستگی مکانیکی شبکه ذرات، افت نسبی سختی را به همراه داشتند.

۳-۲- چگالی نمونه‌های خام

در میان روش‌های متداول اندازه‌گیری چگالی و ارزیابی تخلخل، روش ارشمیدس یکی از روش‌های استاندارد برای تعیین چگالی ظاهری مواد جامد غیرمحلول است که بر اساس استاندارد ASTM C373 [۳۷] و با استفاده از اختلاف وزن نمونه در هوا و محیط غوطه‌وری انجام می‌شود. اساس این روش بر فرض ثابت بودن حجم نمونه، عدم واکنش ماده با مایع اندازه‌گیری و عدم تغییر ساختار داخلی در طول آزمون استوار است. با این حال، این پیش‌فرض‌ها در مورد قطعات خام حاصل از فرآیندهای شکل‌دهی پودر که حاوی مقدار قابل‌توجهی فاز آلی هستند، برقرار نیستند.

در قطعات خام، سیستم ماده‌ای شامل شبکه‌ای از ذرات جامد و فاز چسب پلیمری است که نقش اصلی را در حفظ انسجام اولیه ساختار ایفا می‌کند. تماس این ساختار با مایعاتی نظیر آب می‌تواند موجب نفوذ مایع به درون فاز آلی، تورم اجزای چسب، تغییر ابعاد نمونه و کاهش استحکام مکانیکی آن شود. این تغییرات، فرض ثابت بودن حجم نمونه در روش ارشمیدس را نقض کرده و سبب می‌شود اختلاف وزن اندازه‌گیری شده دیگر تنها ناشی از حجم واقعی جامد نباشد. در نتیجه، چگالی محاسبه شده می‌تواند تحت تأثیر تغییرات ناشی از جذب مایع، تخریب موضعی ساختار و جابه‌جایی فاز چسب قرار گیرد.

علاوه بر اثر مستقیم مایع بر فاز آلی، وجود تخلخل‌های باز در قطعات خام نیز یکی از منابع اصلی خطای اندازه‌گیری محسوب می‌شود. نفوذ مایع به این حفرات باعث می‌شود حجم جابه‌جا شده در آزمون تنها بیانگر حجم واقعی اسکلت جامد نباشد، بلکه ترکیبی از حجم ماده جامد، چسب و فضای متخلخل اشباع شده با مایع را شامل شود. از سوی دیگر، توزیع غیریکنواخت چسب و تفاوت در میزان تراکم موضعی قطعه خام موجب می‌شود مقدار چگالی اندازه‌گیری شده نمایانگر یک چگالی مؤثر از یک ساختار چندفازی باشد و نتواند به‌طور دقیق چگالی واقعی ذرات سرامیکی یا فلزی را نشان دهد.

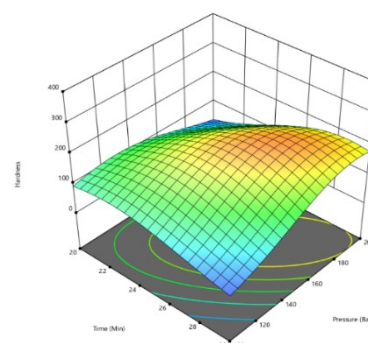
با توجه به این محدودیت‌ها، پیش از انجام آزمون ارشمیدس، حساسیت قطعات خام نسبت به محیط آبی مورد بررسی قرار گرفت. همان‌گونه که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، تماس نمونه‌ها با آب موجب تخریب موضعی و کاهش یکپارچگی ساختار شد؛ بنابراین، استفاده از روش ارشمیدس برای قطعات خام از نظر فنی قابل اعتماد نبوده و نتایج حاصل از آن دارای عدم قطعیت بالا خواهد بود. از این‌رو، اندازه‌گیری چگالی به روش ارشمیدس به مرحله پس از تفجوشی و حذف کامل اجزای آلی محدود شد؛ زیرا در این شرایط، ساختار نمونه پایدار بوده، واکنش بین ماده و محیط اندازه‌گیری رخ نمی‌دهد و مقدار چگالی به‌دست‌آمده ارتباط مستقیم‌تری با میزان تراکم واقعی و تخلخل باقی‌مانده ماده دارد.

تغییرات رنگ سطح نیز بیانگر تغییرات مقدار سختی است؛ به‌طوری‌که نواحی آبی نشان‌دهنده مقادیر پایین‌تر و نواحی قرمز نشان‌دهنده مقادیر بالاتر سختی هستند. در این تحلیل، اثر متغیر دما در مقدار بهینه خود ثابت نگه داشته شده است.

مطابق شکل ۱۳، سطح پاسخ دارای رفتار غیرخطی بوده و نشان می‌دهد که اثر زمان و فشار بر سختی مستقل از یکدیگر نیست، بلکه برهم‌کنش میان این دو پارامتر نقش مهمی در تعیین کیفیت قطعه خام دارد. در محدوده پایین فشار و زمان، سختی کمتر مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از تراکم ناکافی خوراک، تماس محدود بین ذرات و باقی‌ماندن فضاهای خالی در ساختار باشد. با افزایش هم‌زمان زمان و فشار تا محدوده بهینه، فرصت کافی برای انتقال حرارت، کاهش مقاومت جریان چسب، بازآرایی ذرات و افزایش تماس‌های بین‌ذره‌ای فراهم شده و در نتیجه سختی افزایش می‌یابد.

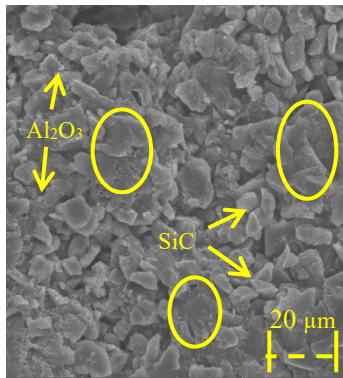
با این حال، افزایش بیش از حد این پارامترها موجب بهبود بیشتر سختی نمی‌شود. در فشارهای بالا و زمان‌های طولانی‌تر، احتمال جریان بیش از حد چسب، جابه‌جایی موضعی فاز آلی و ایجاد ناهمگنی در توزیع چسب افزایش می‌یابد. این پدیده می‌تواند موجب تشکیل نواحی فقیر از چسب و افزایش تمرکز تنش در ساختار خام شده و در نهایت کاهش سختی را به دنبال داشته باشد. بنابراین، رفتار سطح پاسخ نشان‌دهنده وجود یک ناحیه بهینه است که در آن تعادل مناسبی میان تراکم ذرات، جریان‌پذیری چسب و حفظ انسجام ساختار خام برقرار می‌شود.

بررسی سطح پاسخ نشان می‌دهد که ناحیه بیشینه سختی در محدوده‌ای از ترکیب هم‌زمان زمان و فشار قرار دارد و این امر بیانگر وجود یک تعامل متقابل میان این دو پارامتر است. به عبارت دیگر، تأثیر هر یک از متغیرهای فرآیند به‌تنهایی قابل ارزیابی نیست، بلکه پاسخ نهایی تابعی از شرایط هم‌زمان فرآیند است. این رفتار تأکید می‌کند که بهبود سختی قطعه خام حاصل ایجاد تعادل میان تراکم کافی ذرات، جریان مناسب فاز چسب و جلوگیری از ایجاد ناپیوستگی‌های ساختاری است.



شکل ۱۳ اثر همپوشانی سه فاکتور، دما، زمان و فشار قالب‌گیری بر نتایج سختی‌سنجی.

Fig. 13 Interaction effects of temperature, time, and molding pressure on hardness measurements.



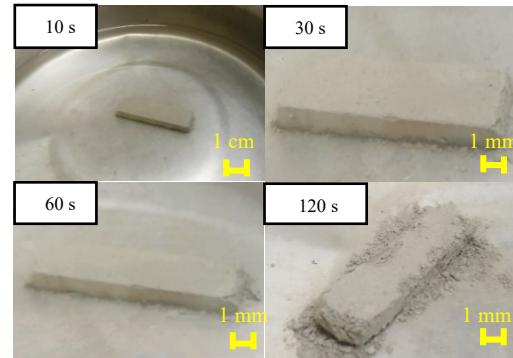
شکل ۱۶ ریزساختار نمونه کامپوزیت خام $\text{SiC-Al}_2\text{O}_3\text{-YSZ}$.

Fig. 16 Microstructure of the green $\text{SiC-Al}_2\text{O}_3\text{-YSZ}$ composite specimen.

تعیین‌کننده در جلوگیری از ایجاد نواحی ضعیف و حفظ یکپارچگی قطعه پیش از عملیات چسب‌زدایی و تفجوشی است. برای بررسی دقیق‌تر مورفولوژی ذرات و نحوه برهم‌کنش آن‌ها با سیستم چسب، تصاویر FESEM در شکل ۱۶ ارائه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ذرات کاربید سیلیسیوم دارای مورفولوژی زاویه‌دار و نامنظم هستند که می‌تواند موجب ایجاد قفل‌شدگی مکانیکی بین ذرات و افزایش مقاومت در برابر جابه‌جایی آن‌ها در ساختار خام شود. این ویژگی در کنار حضور چسب پلیمری، به حفظ آرایش ذرات و افزایش استحکام قطعه خام کمک می‌کند. نواحی مشخص شده با دایره در شکل ۱۶، مناطقی را نشان می‌دهند که ذرات پودر توسط فاز چسب احاطه شده‌اند؛ این پدیده بیانگر توانایی سیستم چسب در ترشوندگی سطح ذرات و ایجاد پیوستگی بین فاز آلی و فاز سرامیکی است.

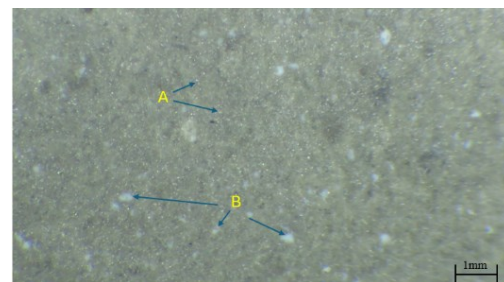
همچنین، ذرات آلومینا با مورفولوژی غیرگوشه‌دار در ساختار قابل تشخیص هستند. حضور این ذرات با شکل متفاوت نسبت به ذرات زاویه‌دار SiC می‌تواند بر نحوه بسته‌بندی ذرات (Particle Packing)، میزان فضای بین‌ذره‌ای و مسیر جریان چسب در طول فرآیند قالب‌گیری اثرگذار باشد. با این حال، به دلیل اندازه بسیار کوچک ذرات YSZ ، این فاز در تصاویر FESEM ارائه شده به‌صورت مجزا قابل تفکیک نیست. در مجموع، تصاویر ریزساختاری نشان می‌دهند که تشکیل یک شبکه یکنواخت از چسب در اطراف ذرات، همراه با توزیع مناسب فازهای جامد، عامل اصلی ایجاد انسجام ساختاری در قطعه خام بوده و نقش مهمی در موفقیت مراحل بعدی چسب‌زدایی و تفجوشی ایفا می‌کند.

به‌منظور بررسی ویژگی‌های مورفولوژیکی خوراک و ارزیابی قابلیت آن برای فرآیند قالب‌گیری، توزیع اندازه ذرات نمونه کامپوزیتی خام به‌صورت هیستوگرام ارائه شد (شکل ۱۷). داده‌های مربوط به این تحلیل از میانگین اندازه‌گیری‌های انجام شده روی ۷ تصویر SEM استخراج شده است. تحلیل توزیع اندازه ذرات با استفاده از دو پارامتر اصلی شامل دامنه توزیع (Span) و شیب توزیع (Sw) انجام گرفت. پارامتر Span که بر اساس رابطه $(D90-D10)/D50$ محاسبه می‌شود، میزان پراکندگی اندازه ذرات را بیان می‌کند؛ به‌گونه‌ای که



شکل ۱۴ روند تخریب نمونه‌های خام، پس از قرار گرفتن در محیط آب به‌ازای زمان‌های متفاوت.

Fig. 14 Degradation behavior of green specimens after water immersion for different periods of time.



شکل ۱۵ تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه خام. A) پخش شدن ذرات آلومینا در زمینه، B) پر کردن فضاهای بین ذره‌ای توسط سیستم چسب.

Fig. 15 Optical micrograph of the green specimen. A) dispersion of alumina particles within the matrix, and B) filling of interparticle voids by the binder system.

۳-۳- آنالیز ریزساختاری نمونه خام

به‌منظور بررسی نحوه توزیع فازهای تشکیل‌دهنده و ارزیابی کیفیت ساختار خام پس از فرآیند قالب‌گیری، مطالعات ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری و FESEM انجام شد. مطابق شکل ۱۵، ذرات آلومینا با کنتراست روشن در زمینه شامل کاربید سیلیسیوم و سیستم چسب قابل مشاهده هستند. توزیع نسبتاً یکنواخت ذرات آلومینا در زمینه SiC نشان می‌دهد که فرآیند اختلاط و شکل‌دهی خوراک توانسته است پراکندگی مناسبی از اجزای جامد ایجاد کند. از آنجا که ذرات YSZ دارای ابعاد نانومتری هستند، اندازه آن‌ها پایین‌تر از قدرت تفکیک میکروسکوپ نوری بوده و به‌صورت مجزا در تصاویر قابل تشخیص نیستند.

مشاهدات ریزساختاری نشان می‌دهد که سیستم چسب پلیمری به‌صورت پیوسته در میان ذرات جامد توزیع شده و فضاهای بین‌ذره‌ای را اشغال کرده است. این توزیع مناسب چسب نقش اساسی در ایجاد پیوستگی مکانیکی اولیه، انتقال تنش بین ذرات و حفظ شکل هندسی قطعه پس از خروج از قالب دارد. در واقع، در مرحله قطعه خام، استحکام ناشی از پیوندهای نفوذی بین ذرات نیست، بلکه عمدتاً از طریق اتصال مکانیکی ذرات، اصطکاک بین‌ذره‌ای و توانایی سیستم چسب در ایجاد یک شبکه پیوسته حاصل می‌شود. بنابراین، یکنواختی توزیع چسب یکی از عوامل

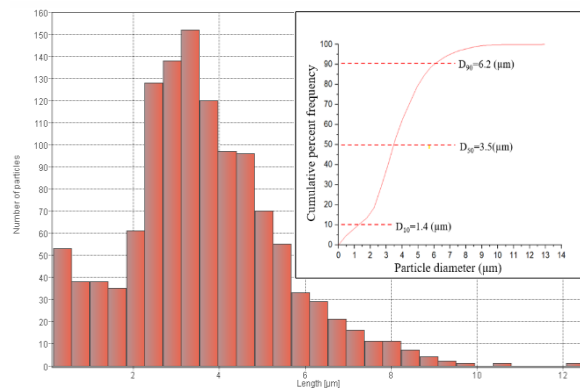
بین‌ذره‌ای و بهبود انتقال تنش در هنگام اعمال فشار می‌شود. همچنین، توزیع مناسب اندازه ذرات امکان توزیع یکنواخت‌تر سیستم چسب در میان ذرات را فراهم کرده و از تشکیل نواحی موضعی با کمبود یا تجمع چسب جلوگیری می‌کند. بنابراین، ویژگی‌های اندازه ذرات به‌دست‌آمده، در کنار نتایج رئولوژی و مشاهدات ریزساختاری، نشان می‌دهد که خوراک تهیه‌شده از قابلیت مناسبی برای فرآیند قالب‌گیری گرم و تشکیل قطعه خام با انسجام کافی برخوردار است.

۴- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به توسعه و بهینه‌سازی فرآیند "قالب‌گیری پرس‌گرم خوراک سرامیکی" به‌عنوان یک رهیافت هیبریدی جهت تولید سرامیک‌های متخلخل کاربرد سیلیسیوم اختصاص یافت. این متدولوژی با تلفیق قابلیت شکل‌دهی پیچیده در فرآیند تزریق و مزیت تراکم‌یافتگی بالا در پرس‌گرم تک‌جهته، مسیری بهینه برای تولید قطعات با ساختار تخلخل کنترل‌شده ارائه می‌دهد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که پایداری فرآیندی و دستیابی به قطعات خام با انسجام مطلوب، مشروط به مدیریت دقیق چهار محور عملیاتی شامل: (۱) طراحی مهندسی قالب تخصصی مجهز به سیستم هدایت‌کننده پیشرفته؛ (۲) به‌کارگیری پوشش‌های تفلون و سیلیکون جهت کاهش اصطکاک سطحی و تسهیل جدایش؛ (۳) فرآوری دقیق خوراک سرامیکی و تبدیل آن به پودر گرانول با مورفولوژی مناسب و (۴) اعمال شرایط پرس‌گرم در پنجره فرآیندی کنترل‌شده، است.

تحلیل‌های آماری مبتنی بر روش طراحی مرکب مرکزی (CCD)، مدل‌سازی دقیق اثرات متقابل پارامترهای عملیاتی بر شاخص سختی قطعه خام را میسر ساخت. یافته‌ها حاکی از آن است که دما به عنوان پارامتر حاکم، بیشترین تأثیر را بر رفتار رئولوژیکی خوراک و سختی نهایی ایفا می‌کند. بر اساس نتایج بهینه‌سازی، شرایط عملیاتی ایده‌آل در دمای ۱۲۰ °C، فشار ۱۸۵ bar و زمان ماندگاری ۲۷ min تثبیت گردید. این مدل‌سازی نه تنها اتکا به آزمون‌های تجربی تکرارپذیر را کاهش داد، بلکه قابلیت پیش‌بینی رفتار شکل‌دهی را به میزان قابل‌توجهی ارتقا بخشید. همچنین، ارزیابی توزیع اندازه ذرات (با میانگین ۳/۵ و شیب توزیع ۳/۹۶) و تحلیل‌های ریزساختاری، مؤید توزیع همگن ذرات و پرشدگی بهینه فضاهای بین‌ذره‌ای در شرایط بهینه است.

در کنار نتایج حاصل، توجه به محدودیت‌های ذاتی این فرآیند برای ارزیابی واقع‌بینانه عملکرد آن حائز اهمیت است. نخست، کارایی این روش به‌شدت تحت تأثیر پهنای توزیع اندازه ذرات قرار دارد؛ به‌طوری‌که افزایش گستره توزیع می‌تواند منجر به ناهمگنی در آرایش فضایی ذرات و توزیع غیریک‌نواخت تخلخل گردد. دوم، سینتیک خروج سیستم چسب در قطعات با ضخامت بالا، به‌دلیل بارگذاری بالای پودر، همچنان یک چالش فنی محسوب شده و



شکل ۱۷ هیستوگرام توزیع اندازه ذرات و منحنی تجمع برای نمونه کامپوزیت خام SiC-Al₂O₃-YSZ.

Fig. 17 Particle size distribution histogram and cumulative curve for the green SiC-Al₂O₃-YSZ composite specimen.

مقادیر پایین‌تر آن نشان‌دهنده توزیع یکنواخت‌تر ذرات است [۱۳]. با این حال، در فرآیندهای قالب‌گیری پودر، توزیع اندازه ذرات بسیار باریک الزاماً مطلوب نیست، زیرا حضور کنترل‌شده ذرات با اندازه‌های متفاوت می‌تواند موجب پر شدن فضاهای بین‌ذره‌ای، افزایش تراکم اولیه و بهبود جریان‌پذیری خوراک شود. پارامتر دیگر، شیب توزیع (Sw)، به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی گستره توزیع اندازه ذرات مطابق رابطه (۲) تعریف می‌شود [۳۸].

$$S_w = \frac{2.56}{\log\left(\frac{D_{90}}{D_{10}}\right)} \quad (2)$$

مقادیر پایین Sw نشان‌دهنده توزیع گسترده‌تر و مقادیر بالاتر آن بیانگر توزیع محدودتر اندازه ذرات است. در فرآیندهای قالب‌گیری پودر، توزیع اندازه ذرات باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که ضمن جلوگیری از تجمع ذرات و افزایش گرانروی خوراک، امکان پر شدن مناسب فضاهای خالی و دستیابی به تراکم اولیه مطلوب را فراهم کند. بر اساس گزارش‌های موجود، پودرهایی با Sw در بازه حدود ۴ تا ۵ معمولاً قابلیت قالب‌گیری مناسبی دارند، در حالی که توزیع‌های بسیار باریک یا بسیار گسترده می‌توانند موجب کاهش کارایی فرآیند شوند [۳۹].

مطابق شکل ۱۷، اندازه ذرات نمونه خام در محدوده ۰/۵ تا ۱۲/۵ میکرومتر قرار دارد. میانگین اندازه ذرات برابر با ۳/۵ میکرومتر و مقدار مد توزیع برابر با ۳/۲۵ میکرومتر به‌دست آمد که نشان‌دهنده غالب بودن ذرات با اندازه نزدیک به چند میکرومتر در ساختار خوراک است. مقدار Span برابر با ۱/۳۷ نشان می‌دهد که پراکندگی اندازه ذرات محدود بوده و توزیع نسبتاً یکنواختی در نمونه وجود دارد. از سوی دیگر، مقدار Sw برابر با ۳/۹۶ بیانگر آن است که خوراک دارای توزیع اندازه ذرات کنترل‌شده و مناسب برای فرآیند قالب‌گیری است.

توزیع اندازه ذرات می‌تواند نقش مهمی در رفتار جریان خوراک و کیفیت قطعه خام ایفا کند؛ زیرا حضور ذرات ریزتر در کنار ذرات بزرگ‌تر موجب کاهش فضای خالی اولیه، افزایش تماس‌های

۵) بررسی قابلیت به‌کارگیری فرآیند برای سایر ترکیب‌های سرامیکی مبتنی بر SiC یا سایر سرامیک‌های مهندسی و ارزیابی محدودیت‌ها و قابلیت تعمیم آن؛

۶) ارزیابی رفتار قطعات پس از چسب‌زدایی و تفجوشی و بررسی ارتباط میان ویژگی‌های قطعه خام و خواص نهایی شامل چگالی، استحکام مکانیکی، تخلخل و پایداری ابعادی.

بیانیه استفاده از هوش مصنوعی: در جریان آماده‌سازی این اثر، نویسندگان از GapGPT به منظور اصلاح برخی نکات نگارشی استفاده کرده‌اند. پس از استفاده از این سرویس، نویسندگان محتوا را بررسی و ویرایش کرده و مسئولیت کامل محتوای مقاله منتشرشده را بر عهده می‌گیرند.

تقدیر و تشکر: نویسندگان مایلند از داوران ناشناس برای نظرات و پیشنهادهای ارزشمندشان که به بهبود کیفیت این مقاله کمک کرد، تشکر کنند.

حامی مالی: این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی خاصی از سازمان‌های دولتی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

نقش و مسئولیت نویسندگان:

محمد کشاورزی: جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل و تفسیر داده‌ها، اعتبارسنجی نتایج، نوشتن نسخه اولیه مقاله.
عسل حسینی منزه: طراحی و ایده‌پردازی مطالعه، مدیریت منابع، راهنمایی پروژه، ویرایش متن مقاله.

تعارض منافع: در این مقاله از برخی نتایج حاصل از پایان‌نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول استفاده شده است. هیچ تعارض منافع دیگری برای اظهار وجود ندارد.

نیازمند طراحی سیکل‌های حرارتی طولانی‌مدت جهت اجتناب از ایجاد ریزترک‌هاست. در نهایت، علی‌رغم دقت بالای مدل CCD در محدوده طراحی، تعمیم نتایج به خارج از بازه پارامترهای آزمایش‌شده (Extrapolation) با محدودیت همراه است. بر این مبنا، توسعه این فناوری در مقیاس‌های صنعتی و قطعات حجیم، نیازمند مطالعات تکمیلی در حوزه انتقال حرارت و جرم در محیط‌های متخلخل خواهد بود.

پیشنهادهای:

نتایج این پژوهش نشان داد که فرآیند قالب‌گیری پرس گرم قابلیت تولید موفق قطعات خام کامپوزیت‌های سرامیکی را دارد. با این حال، با توجه به دامنه این مطالعه، بررسی برخی جنبه‌های فرآیند می‌تواند به درک بهتر مکانیزم‌های حاکم و بهینه‌سازی بیشتر شرایط تولید منجر شود. بر این اساس، پیشنهادهای زیر برای تحقیقات آینده ارائه می‌شود:

۱) بررسی تأثیر ترکیب و درصد اجزای سیستم چسب بر رفتار رئولوژیکی خوراک، کیفیت قطعه خام و فرآیند چسب‌زدایی، با هدف تعیین ترکیب بهینه و کاهش عیوب؛

۲) مطالعه اثر توزیع اندازه ذرات و نسبت ذرات ریز به درشت بر تراکم‌پذیری، تخلخل و خواص مکانیکی قطعات خام و تفجوشی‌شده؛

۳) توسعه و بهینه‌سازی هندسه قالب برای تولید قطعات با اشکال پیچیده‌تر و ارزیابی عملکرد فرآیند در نسبت‌های ابعادی و ضخامت‌های مختلف؛

۴) مدل‌سازی و شبیه‌سازی توزیع دما، فشار و جریان خوراک در حین قالب‌گیری پرس گرم به‌منظور پیش‌بینی عیوب و بهینه‌سازی شرایط فرآیند؛

منابع

- Journal of Materials Research and Technology, vol. 25, pp. 5184–5195, 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.06.260.
[4] Y. W. Kim, and R. Malik, "SiC ceramics, structure, processing and properties," in Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics And Glasses, vol. 2, , pp. V2-150–V2-164, 2021, doi: 10.1016/B978-0-12-818542-1.00022-9.
[5] R. Singh, "Reliability and performance limitations in SiC power devices," Microelectronics Reliability, vol. 46, no. 5–6, pp. 713–730, 2006, doi: 10.1016/j.microrel.2005.10.013.
[6] R. Vaßen, A. Kaiser, J. Förster, H. P. Buchkremer, and D. Stöver, "Densification of ultrafine SiC powders," Journal of Materials Science, vol. 31, pp. 3623–3637, 1996, doi: 10.1007/BF00352770.
[7] M. Chen, H. Xiong, L. Zhang, X. Kang, Z. Li, and K. Zhou, "Complex-shaped TiC/Ti(C,N)-based cermet prepared via rheological press molding using highly-filled granular feedstock," International Journal of

- [1] M. Moghadasi, W. Du, M. Li, Z. Pei, and C. Ma, "Ceramic binder jetting additive manufacturing: Effects of particle size on feedstock powder and final part properties," Ceramics International, vol. 46, no. 10, pp. 16966–16972, 2020, doi: 10.1016/j.ceramint.2020.03.280.
[2] H. Esmaeili, H. Adibi, and S. M. Rezaei, "Experimental study on grinding forces and specific energy in three different environments of grinding carbon fiber reinforced silicon carbide composite," Modares Mechanical Engineering, vol. 18, No. 01, pp. 379–387, 2018. (in Persian)
[3] T. Liu, L. Yang, Z. Chen, M. Yang, and L. Lu, "Effects of SiC content on the microstructure and mechanical performance of stereolithography-based SiC ceramics,"

- [20] G. Magnani, A. Brentari, E. Burrelli, and G. Raiteri, "Pressureless sintered silicon carbide with enhanced mechanical properties obtained by the two-step sintering method," *Ceramics International*, vol. 40, no. 1, pp. 1759–1763, 2014, doi: [10.1016/j.ceramint.2013.07.075](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.07.075).
- [21] P. Dvorak, T. Barriere, and J. C. Gelin, "Direct observation of mould cavity filling in ceramic injection moulding," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 28, pp. 1923–1929, 2008, doi: [10.1016/j.jeurceramsoc.2008.02.001](https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2008.02.001).
- [22] Z. Zhang, Y. Zhang, H. Gong, X. Guo, Y. Zhang, X. Wang, and J. Yu, "Influence of carbon content on ceramic injection molding of reaction-bonded silicon carbide," *International Journal of Applied Ceramic Technology*, vol. 13, no. 5, pp. 838–843, 2016, doi: [10.1111/ijac.12570](https://doi.org/10.1111/ijac.12570).
- [23] J. H. Eom, Y. W. Kim, and C. B. Park, "Effect of forming methods on porosity and compressive strength of polysiloxane-derived porous silicon carbide ceramics," *Journal of the Ceramic Society of Japan*, vol. 120, no. 1401, pp. 199–203, 2012, doi: [10.2109/jcersj2.120.199](https://doi.org/10.2109/jcersj2.120.199).
- [24] J. H. Eom, Y. K. Seo, and Y. W. Kim, "Mechanical and thermal properties of pressureless sintered silicon carbide ceramics with alumina-yttria-calcia," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 99, no. 5, pp. 1735–1741, 2016, doi: [10.1111/jace.14114](https://doi.org/10.1111/jace.14114).
- [25] W. K. You, J. P. Choi, S. M. Yoon, and J. S. Lee, "Low temperature powder injection molding of iron micro-nano powder mixture," *Powder Technology*, vol. 228, pp. 199–205, 2012, doi: [10.1016/j.powtec.2012.05.016](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.05.016).
- [26] H. Khorsand, A. A. Yousefi, and H. Abdous, "Injection molding of powder-polymer mixture: advanced method for production of complex and precise engineering parts," *Basparesh*, vol. 3, no. 2, pp. 4–20, 2013, doi: [10.22063/basparesh.2013.975](https://doi.org/10.22063/basparesh.2013.975). (In Persian)
- [27] J. Jaafar, J. P. Siregar, C. Tezara, M. H. M. Hamdan, and T. Rihayat, "A review of important considerations in the compression molding process of short natural fiber composites," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 105, no. 7–8, pp. 3437–3450, 2019, doi: [10.1007/s00170-019-04466-8](https://doi.org/10.1007/s00170-019-04466-8).
- [28] A. R. Studart, U. T. Gonzenbach, E. Tervoort, and L. J. Gauckler, "Processing routes to macroporous ceramics: a review," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 89, no. 6, pp. 1771–1789, 2006, doi: [10.1111/j.1551-2916.2006.01044.x](https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2006.01044.x).
- [29] G. Wen, P. Cao, B. Gabbitas, D. Zhang, and N. Edmonds, "Development and design of binder systems for titanium metal injection molding: an overview," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 44, no. 3, pp. 1530–1547, 2013, doi: [10.1007/s11661-012-1485-x](https://doi.org/10.1007/s11661-012-1485-x).
- [30] F. Mohd Foudzi, N. Muhamad, A. B. Sulong, and H. Zakaria, "Yttria stabilized zirconia formed by micro ceramic injection molding: rheological properties and debinding effects on the sintered part," *Ceramics Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 115, pp. 106281, 2023, doi: [10.1016/j.jirmhm.2023.106281](https://doi.org/10.1016/j.jirmhm.2023.106281).
- [8] V. Onbattuvelli, S. Laddha, S. J. Park, J. P. de Souza, and S. V. Atre, "Powder injection molding of SiC for thermal management," *Technology in Metallurgy, Materials and Mining*, vol. 9, no. 2, pp. 123–131, 2012, doi: [10.4322/tmm.2012.019](https://doi.org/10.4322/tmm.2012.019).
- [9] U. Scheithauer, F. Kerber, A. Füssel, S. Holtzhausen, W. Beckert, E. Schwarzer, S. Weingarten, and A. Michaelis, "Alternative process routes to manufacture porous ceramics: opportunities and challenges," *Materials*, vol. 12, no. 4, pp. 663, 2019, doi: [10.3390/ma12040663](https://doi.org/10.3390/ma12040663).
- [10] T. O. Psiarnetska, O. G. Kirkova, O. O. Leshchuk, M. B. Shtern, and V. V. Ivzhenko, "Development of ceramic items injection moulding technology using computer modeling," *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, vol. 60, no. 3–4, pp. 150–163, 2021, doi: [10.1007/s11106-021-00223-3](https://doi.org/10.1007/s11106-021-00223-3).
- [11] C. A. Costa, A. F. Michels, and M. E. Kipper, "Welding lines formation in holes obtained by low pressure injection molding of ceramic parts," *Ceramica*, vol. 64, no. 369, pp. 97–103, 2018, doi: [10.1590/0366-69132018643692260](https://doi.org/10.1590/0366-69132018643692260).
- [12] Y. Shinoda, T. Nagano, and F. Wakai, "Fabrication of nanograined silicon carbide by ultrahigh-pressure hot isostatic pressing," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 82, pp. 771–773, 1999, doi: [10.1111/j.1151-2916.1999.tb01833.x](https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1999.tb01833.x).
- [13] R. Yavari and H. Khorsand, "Numerical and experimental study of injection step, separation, and imbalance filling in low pressure injection molding of ceramic components," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 41, no. 14, pp. 6915–6924, 2021, doi: [10.1016/j.jeurceramsoc.2021.07.050](https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.07.050).
- [14] Z. H. Zhang, F. C. Wang, J. Luo, S. K. Lee, and L. Wang, "Microstructures and mechanical properties of spark plasma sintered Al-SiC composites containing high volume fraction of SiC," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 527, no. 27–28, pp. 7235–7240, 2010, doi: [10.1016/j.msea.2010.07.043](https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.07.043).
- [15] M. AbdolAlizade, and H. Parva, "Design and fabrication of a 3D printer based on the selective laser sintering (SLS) technology," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 22, no. 10, pp. 219–226, 2022.
- [16] N. H. Loh and R. M. German, "Statistical analysis of shrinkage variation for powder injection molding," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 59, no. 3, pp. 278–284, 1996.
- [17] C. H. K. S. Lee, "Liquid-phase sintering of SiC with Al₂O₃ additives," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 78, no. 9, pp. 2471–2477, 1995.
- [18] H. M. Kim and Y. W. Kim, "Low temperature pressureless sintering of silicon carbide ceramics with alumina-yttria-magnesia-calcia," *Journal of the Ceramic Society of Japan*, vol. 127, no. 4, pp. 207–214, 2019, doi: [10.2109/jcersj2.19024](https://doi.org/10.2109/jcersj2.19024).
- [19] P. Zhao, Q. Li, R. Yi, Z. Wang, L. Lu, X. Cheng, and S. Dong, "Fabrication and microstructure of liquid sintered porous SiC ceramics through spark plasma sintering," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 748, pp. 36–43, 2018, doi: [10.1016/j.jallcom.2018.03.122](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.03.122).

- investigation on process parameters during laser-assisted turning of SiC ceramics based on orthogonal method and response surface methodology," *Materials*, vol. 15, no. 14, pp. 4889, 2022, doi: [10.3390/ma15144889](https://doi.org/10.3390/ma15144889).
- [36] D.N. Sri, R. Kottapalli, A. Pavani, C. Ganteda, E. Gouthami, A. Abd-Elmonem, S.A. Haroun, S.M. Hussain, M. Bayram, and A.H. Almaliki, "Comparison between response surface methodology and Taguchi method for dyeing process parameters optimization in fabric manufacturing by empirical planning," *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1, pp. 94919, 2025, doi: [10.1038/s41598-025-94919-w](https://doi.org/10.1038/s41598-025-94919-w).
- [37] ASTM International. Standard test method for water absorption, bulk density, apparent porosity, and apparent specific gravity of fired whiteware products: ASTM C373. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2020.
- [38] H. Abdoos, H. Khorsand, and A.A. Yousefi, "Torque rheometry and rheological analysis of powder-polymer mixture for aluminum powder injection molding", *Iranian Polymer Journal*, vol. 23, no. 10, pp. 745–755, 2014, doi: [10.1007/s13726-014-0268-1](https://doi.org/10.1007/s13726-014-0268-1).
- [39] M.E. Sotomayor, A. Várez, and B. Levenfeld, "Influence of powder particle size distribution on rheological properties of 316L powder injection moulding feedstocks", *Powder Technology*, vol. 200, no. 1-2, pp. 30–36, 2010, doi: [10.1016/j.powtec.2010.02.003](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.02.003).
- International, vol. 39, no. 3, pp. 2665–2674, 2013, doi: [10.1016/j.ceramint.2012.09.033](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.09.033).
- [31] H. Soleymani, A. Fereidoon, A. Albooyeh, and M. R. Nakhaei, "Optimization of mechanical and morphological properties of polypropylene reinforced with natural rubber-perlite nanoparticles using response surface method," *International Journal of Metallurgical and Materials Engineering*, vol. 34, no. 2, pp. 2023–2024, 2023, doi: [10.22067/jmme.2023.80165.1092](https://doi.org/10.22067/jmme.2023.80165.1092).
- [32] V. Momeni, A. Askari, M. H. Allaei, and H. Zangi, "Investigating the effect of stearic acid on the mechanical, rheological, and microstructural properties of AISI 4605 feedstock for metal injection molding process," *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 74, no. 9, pp. 2161–2170, 2021, doi: [10.1007/s12666-021-02282-x](https://doi.org/10.1007/s12666-021-02282-x).
- [33] J. Radulovic "Powder injection moulding technology: properties, possibilities and starting activities," *Scientific and Technical Review*, vol. 65, no. 2, pp. 20–28, 2015, doi: [10.5937/STR1502020R](https://doi.org/10.5937/STR1502020R).
- [34] M.R. Ismael, F. Clemens, T. Graule, and M.J. Hoffmann, "Effects of different thermoplastic binders on the processability of feedstocks for ceramic co-extrusion process," *Ceramics International*, vol. 37, no. 8, pp. 3173–3182, 2011, doi: [10.1016/j.ceramint.2011.05.084](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.05.084).
- [35] D. Dai, Y. Zhao, C. Cao, R. Dong, H. Zhang, Q. Liu, Z. Song, X. Zhang, Z. Zheng, and C. Zhao, "Experimental