

فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

بررسی و تعیین اثر رطوبت، فشار پرس و زمان آسیاب، بر بهبود چگالی و خواص مکانیکی کاربید سیلیسیم

مقاله پژوهشی

حسین کیا^۱، پویا پیرعلی^{۲*}، حمیدرضا بهاروندی

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

۲- استادیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

۳- استاد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

*ppirali@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۱	کاربید سیلیسیم به دلیل استحکام فشاری بالا، قیمت مناسب و دسترسی آسان، از سرامیک‌های پرکاربرد خصوصاً در ساخت زره‌ها می‌باشد؛ اما تردی زیاد، یکی از مهم‌ترین مشکلات این سرامیک‌ها است که از طریق اضافه کردن افزودنی و یا اصلاح و بهبود فرایند ساخت، می‌توان آن را کنترل نمود. در این مقاله به بررسی و تعیین روش ساخت و فرآوری سرامیک کاربید سیلیسیم با هدف بهبود خواص مکانیکی و کاهش تردی از طریق پارامترهایی همچون فشار پرس، رطوبت و زمان آسیاب پرداخته شده است. مراحل کار شامل؛ طراحی آزمایش، ساخت نمونه و تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی و تعیین بهترین حالت با توجه به متغیرهای پاسخ شامل چگالی خام، استحکام خمشی و استحکام فشاری است. نهایتاً پس از ساخت نمونه با مقادیر مختلفی از فشار پرس از ۳۰ تا ۱۲۰ بار، زمان آسیاب از ۱ تا ۳ ساعت و رطوبت از ۴ تا ۱۳ درصد و تعیین چگالی، مقاومت خمشی و مقاومت فشاری آن‌ها، بهترین مقادیر خواص مکانیکی و چگالی در رطوبت ۷ درصد، زمان آسیاب ۱ ساعت و فشار پرس ۱۲۰ بار، به دست آمده است. بعد از این مراحل با استفاده از این مقادیر رطوبت، زمان آسیاب و فشار پرس، نمونه اصلی تهیه و در دمای حدود ۲۰۰۰ درجه سانتی گراد پخت می‌گردد. با تعیین خواص مکانیکی شامل سختی، مدول ینگ، چقرمگی شکست و همچنین چگالی نمونه نهایی بعد از پخت، مشخص می‌شود که نمونه ساخته شده با شرایط کاری رطوبت، فشار پرس و زمان آسیاب تعیین شده، بیشترین انطباق را با خواص نامی کاربید سیلیسیم دارد.
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۰	
کلید واژگان:	
درصد رطوبت	
فشار پرس	
زمان آسیاب	
خواص مکانیکی	
کاربید سیلیسیم	

Investigation and Determination of Humidity, Pressure and Grinding Time on Improvement of Silicon Carbide Density and Mechanical Properties

Hossein Kiaa¹, Pouya Pirali^{2*}, Hamid Reza Baharvandi³

1- Phd of mechanical engineering student, Faculty of Materials and Manufacturing Technology, Malek ashtar university of technology, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Faculty of Materials and Manufacturing Technology, Malek ashtar university of technology, Tehran, Iran.

3- Professor, Faculty of Materials and Manufacturing Technology, Malek ashtar university of technology, Tehran, Iran

*ppirali@gmail.com

Article Information

Original Research Paper

Doi: 10.17153/ma.2025.1121330

Keywords:

Humidity Percentage

Press Pressure

Grinding Time

Mechanical Properties

Silicon Carbide.

Abstract

Due to its high compressive strength, reasonable price and easy access, silicon carbide is one of the most widely used ceramics, especially in the manufacture of armor. However, high brittleness is one of the most important problems of these ceramics, which can be controlled by adding additives or modifying and improving the manufacturing process. In this paper, the method of manufacturing and processing silicon carbide ceramics has been investigated with the aim of improving properties through lines such as press pressure, humidity and grinding time. The work steps include; determining the experiment strategy, manufacturing the sample and determining the physical and mechanical properties and the best condition according to the response variables including raw density, bending and compressive strength. Finally, after manufacturing samples with different amounts of press pressure from 30 to 120 bar, grinding time from 1 to 3 hours and moisture percentage from 4 to 13% and determining their density, bending and compressive strength, the improved values of mechanical properties and The density was obtained at 7% humidity, 1 hour milling time, and 120 times press pressure. After these steps and using the determined working conditions, the main sample is finished and baked at 2000 degrees Celsius. By determining the mechanical properties including hardness, Young's modulus, fracture toughness and also the density of the final sample after baking, it is determined that the sample made with the working conditions of humidity, pressing pressure and grinding time is the most consistent with the nominal properties of the silicon carbide.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Hossein Kiaa, Pouya Pirali, Hamid Reza Baharvandi, Investigation and Determination of Humidity, Pressure and Grinding Time on Improvement of Silicon Carbide Density and Mechanical Properties, New Process in Material Engineering, 2025, 19(1), 19-31.

۱- مقدمه

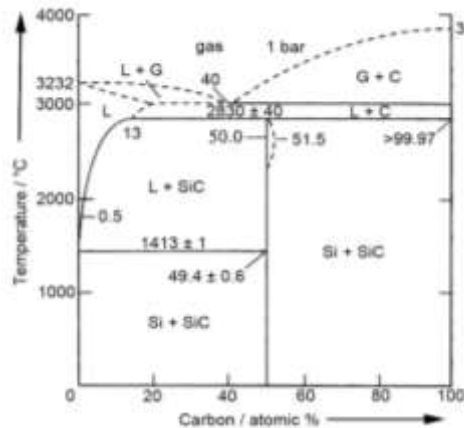
کاربید سیلیسیم دارای خواصی از جمله مدول الاستیک بالا، استحکام شکست بالا، سختی بالا و پایداری شیمیایی و حرارتی مناسب بوده و در صورتی که تدابیر لازم حین تولید آن اندیشیده شود می تواند دارای چقرمگی مطلوبی نیز باشد. دلیل خواص عالی این سرامیک نوع پیوندهای آن است. کاربید سیلیسیم دارای پیوندهای کوالانسی بوده و ضریب نفوذ در خود آن کم است؛ به همین علت به تنهایی قابلیت پخت پذیری خوبی نداشته و جهت پخت آن بایستی از افزودنی ها بهره برد. پخت کاربید سیلیسیم می تواند در دو حالت جامد و یا مایع^۱ صورت گیرد. پخت در حالت جامد با مکانیزم نفوذ در حالت جامد انجام می گیرد. این فرآیند پخت معمولاً به دمایی بالاتر از ۲۱۰۰ درجه سانتی گراد نیاز دارد و دمای بالا می تواند باعث رشد افراطی دانه ها نیز گردد. از جمله دیگر معضلات موجود در پخت فاز جامد، چقرمگی پایین آن به علت شکست درون دانه ای^۲ می باشد. در مقابل فرآیند پخت فاز مایع می تواند در دمایی کمتر از ۲۰۰۰ درجه سانتی گراد صورت پذیرد و مسئله چقرمگی پایین نیز توسط پخت فاز مایع و ایجاد فاز مرزدانه ای قابل حل است [۱-۲].

از لحاظ نظری، کاربید سیلیسیم نیز همانند دیگر سرامیک های غیر اکسیدی، دارای مقاومت به اکسیداسیون پایینی می باشد؛ اما آنچه که باعث می شود کاربید سیلیسیم در دمای بالا و در اتمسفر غنی از اکسیژن مقاومت اکسیداسیون خوبی داشته باشد، واکنش آن با اکسیژن و تشکیل لایه ای چسبنده از سیلیکا (SiO_2)، بر روی سطح ذرات آن است که به این ترتیب در مقابل اکسیداسیون بیشتر مقاومت پیدا می کند. جدول (۱) خواص کاربید سیلیسیم را نشان می دهد [۱-۲].

جدول (۱): خواص کاربید سیلیسیم [۱].

مقدار	خواص
190 pm	فاصله بین اتمی
3125 kg/m ³	چگالی نامی
2000 °C	پایداری حرارتی

نمودار فازی کاربید سیلیسیم در شکل (۱) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود با افزایش درصد کربن، دمای ذوب افزایش می یابد.



شکل (۱): نمودار فازی دوتایی کاربید سیلیسیم [۱].

همچنین این سرامیک دارای دو ساختار کریستالی شش گوشه^۳ و مکعبی است [۱]. به علت سختی بالا و ضریب سایش کم، از کاربید سیلیسیم برای آب بندی مکانیکی استفاده می شود. هم چنین لیانگ و همکاران دریافتند که این سرامیک می تواند تحت دماهای بالا و نوسانات دمایی بالا قرار گیرد چون مقدار زیادی گرما حین سایش ایجاد می شود که کاربید سیلیسیم تحمل مقاومت در دمای بالا را دارد [۳]. ایوم و همکاران^۴ از کاربید سیلیسیم متخلخل نیز به علت چگالی پایین، نفوذپذیری قابل کنترل، مقاومت به شوک حرارتی بالا، استحکام ویژه بالا، استحکام در دمای بالا و مقاومت در برابر خوردگی بالا، استفاده نمودند. کاربرد کاربید سیلیسیم متخلخل در فیلترهای فلز مذاب، سنسورهای گازی، فیلترهای مخصوص موتور دیزل، پیش شکل دهنده^۵ کامپوزیت های زمینه فلزی و دیگر مواد ساختاری سبک وزن استفاده می شود [۴].

پخت بدون فشار^۶ از جمله روش های پخت کاربید سیلیسیم می باشد. آنچه که امروزه در صنعت مورد توجه بیشتری است، پخت بدون فشار بوده که علت آن هزینه کمتر و ساده تر بودن تجهیزات می باشد. پخت بدون فشار خود در دو حالت پخت فاز مایع و پخت فاز جامد صورت می گیرد.

قطعات تولیدی از روش پخت فاز جامد دارای دانه‌های ریز هم‌محور (اندازه دانه بین ۱ تا ۴ μm)، مقاومت در برابر خزش دما بالا و مقاومت بالا در برابر اکسیداسیون می‌باشند؛ اما چقرمگی شکست آن توسط این روش پایین بوده و (بین ۳ تا ۴ MPa.m^{1/2}) و استحکام آن نیز بسیار حساس به اندازه عیوب می‌باشد. در نتیجه استفاده از کاربید سیلیسیم در دمای اتاق محدود می‌شود.

به‌طور کلی راه افزایش چقرمگی در کامپوزیت‌های سرامیکی، استفاده از رشته‌ها^۷، صفحات و ذرات تقویت‌کننده در زمینه سرامیکی می‌باشد؛ اما با روش‌های ساده‌تری مانند تشکیل درجای فاز YAG^۸ در مرز دانه‌های کامپوزیت زمینه کاربید سیلیسیم نیز امکان افزایش چقرمگی وجود دارد که مزیت این روش، عدم آسیب به سلامتی توسط کار با رشته‌ها، امکان تولید شکل‌های پیچیده با اندازه بزرگ و همچنین پخت در فشار اتمسفر می‌باشد. پادچر دریافت که دانه‌بندی کشیده با فاز مرزدانه‌ای ضعیف و هم چنین استفاده از افزودنی‌هایی که دارای اختلاف در ضریب انبساط حرارتی با زمینه باشند، می‌توانند از طریق مکانیزم انحراف ترک و پل زدن بر روی ترک، به چقرمگی خوبی منجر شوند [۵]. از نظر گومز و همکاران^۹، یکی از محدودیت‌های اصلی پخت فاز جامد، چقرمگی پایین نمونه‌های تولیدی به این روش می‌باشد که با ایجاد فاز مرزدانه‌ای^{۱۰} می‌توان چقرمگی را به مقدار قابل‌توجهی افزایش داد که این موضوع بیانگر این است که چنانچه هدف، رسیدن به چقرمگی بالا باشد بایستی از پخت فاز مایع کمک گرفت [۶]. ماگنانی و همکاران^{۱۱} در پخت فاز جامد، با افزودنی‌ها باعث کاهش انرژی سطحی دانه‌ها شده و واکنش با سیلیکا و کربن اضافی انجام شدند [۷].

شرایط ساخت نمونه قبل از پخت، شامل میزان رطوبت، زمان آسیاب و فشار پرس بر روی خواص نهایی کاربید سیلیسیم مؤثر خواهد بود که البته تحقیقات کمی در این خصوص انجام شده است. به‌منظور افزایش چگالی بعد از پخت، لی و همکاران تحقیقاتی در خصوص اعمال فشار پرس، قبل و حین پخت انجام دادند که نشان از بهبود

چگالی و متراکم‌تر شدن آن دارد. هرچند در این تحقیقات، مطالعه‌ای در خصوص خواص مکانیکی نشده است [۸]. بر اساس تحقیقات ساروا و نعمت - نصیر^{۱۲}، نحوه بارگذاری فشاری نرخ کرنش نیز می‌تواند بر مقاومت کاربید سیلیسیم اثرگذار باشد. نتایج حاکی از آن است که افزایش نرخ کرنش از طریق بارگذاری دینامیکی موجب می‌شود مقاومت مکانیکی سرامیک بیشتر از حالت بارگذاری استاتیکی شود. البته این مقاومت مکانیکی برای سرامیک با چگالی و زمان آسیاب ثابت به‌دست آمده است [۹]. از نظر گائو و همکاران^{۱۳} اندازه تخلخل‌ها نیز می‌تواند موجب اثرگذاری بر روی خواص مکانیکی گردد. با افزایش اندازه حفره‌ها، مدول و استحکام در حالت سرد (قبل از پخت) کاهش می‌یابد [۱۰]. چارونسوک و همکاران^{۱۴} با پخت دمای سرد هم دمای پخت اصلی را کاهش داد و هم چگالی و دانه‌بندی نهایی کاربید سیلیسیم را بهبود بخشید [۱۱]. دهقانی و همکاران با اضافه کردن افزودنی‌ها خاصیت پخت پذیری و چقرمگی شکست کاربید سیلیسیم را بهبود دادند [۱۲]. موتون و همکاران^{۱۵} با اصلاح شکل دانه‌های کاربید سیلیسیم نیز موجب افزایش چگالی نهایی بعد از پخت شدند [۱۳]. بیساک و همکاران^{۱۶} با استفاده از افزودنی هیدروکسید سدیم علاوه بر کاهش دمای پخت و فشار کاری، موجب بهبود چگالی و خواص نهایی نیز شدند [۱۴]. رحمان و همکاران^{۱۷} دریافتند، کاربید سیلیسیم حاصل از الکترولیز پلیمرهای حاوی کربن و سیلیسیم نیز با پخت در دمای ۱۶۰۰ تا ۲۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، خواص مکانیکی بهتری نسبت به نمونه‌های تجاری کاربید سیلیسیم دارد [۱۵]. تحقیقات بارک و همکاران^{۱۸} دریافتند، دما و فشار پرس هر دو بر روی خواص مکانیکی، چگالی و میکروساختار مؤثر است. افزایش دمای پخت منجر به افزایش چگالی و اندازه دانه‌ها می‌شود. همچنین در یک دمای پخت ثابت، افزایش فشار پرس منجر به افزایش چگالی و کاهش اندازه دانه‌ها می‌شود. با افزایش چگالی، مدول ینگ و سختی هر دو افزایش می‌یابد و وجود هم‌زمان فازهای α و β کاربید سیلیسیم، موجب افزایش چقرمگی شکست می‌گردد [۱۶].

گرفته و به مطالعه اثر هم‌زمان سه عامل رطوبت، فشار پرس و زمان آسیاب پودر کاربید سیلیسیم قبل از فرایند پخت به‌عنوان سه عامل تأثیرگذار بر خواص نمونه نهایی بعد از پخت، پرداخته نشده که هدف این مقاله، مطالعه این موضوع با استفاده از روش تجربی و آزمون‌های خواص مکانیکی می‌باشد.

۲- روش تحقیق

رویکرد کلی در آزمایش به صورتی تعریف می‌شود که بتوان با دیدگاهی جامع از همه عوامل مؤثر بر متغیر پاسخ، نسبت به حالت بهینه خواص اقدام نمود. در اینجا چند عامل جهت تغییر خواص مکانیکی مطرح است که عبارت‌اند از: رطوبت، زمان اختلاط در آسیاب و فشار پرس. در اینجا سه عامل مطرح بوده که هرکدام دارای سطوح مختلف مطابق با جدول (۳) می‌باشند.

جدول (۳): عوامل مؤثر و سطوح آن‌ها.

نوع عامل	رطوبت (درصد)	فشار (بار)	زمان آسیاب (ساعت)
سطوح هر عامل	۴	۳۰	۱
	۷	۶۰	۲
	۱۰	۹۰	۳
	۱۳	۱۲۰	

شایان ذکر است که سطوح مربوط به هر عامل در محدوده استاندارد آن در نظر گرفته شده است. لذا در هر حالت لازم است سه نمونه ساخته و خواص مکانیکی آن ارزیابی گردد. در نهایت پخت نمونه‌های منتخب در دمای ۲۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان دو ساعت انجام می‌شود. خواص مورد ارزیابی شامل؛ چگالی، استحکام فشاری و استحکام خمشی می‌باشد.

۲-۱- ساخت نمونه‌ها

مش بندی کاربید سیلیسیم مورد استفاده در این تحقیق، ۲ الی ۳ میکرون می‌باشد. ابتدا ۲۴۰ گرم کاربید سیلیسیم را به‌صورت دو بسته ۱۲۰ گرمی مطابق شکل (۲) توزین نموده و هرکدام از این دو بسته مطابق شکل (۲) داخل کاپ‌های مخصوص به همراه الکل ریخته و در هر کاپ ۶ عدد گوی

موسکویسکی و همکاران^{۱۹} با استفاده از تلفیق روش پخت گرم و روش پخت قوس پلاسما^{۲۰} به خواص مطلوبی رسیدند؛ به‌طوری‌که با تلفیق این دو روش، چگالی‌ای در حدود ۳٫۱ gr/cm^۳ سختی ۲۴۰۰HV و چقرمگی شکست ۵ Mpa m^{۱/۲} به دست می‌آید [۱۷]. پتروس و همکاران^{۲۱} دریافتند، شکل و ریخت شناسی^{۲۲} کربن و سایر افزودنی‌ها نیز می‌تواند بر روی پخت پذیری، خواص مکانیکی، چگالی و میکروساختار نهایی کاربید سیلیسیم اثرگذار باشد [۱۸]. بر اساس نظرات ژانگ و همکاران^{۲۳}، در صورتی که در تولید کاربید سیلیسیم از واکنش دو مرحله‌ای منابع کربن دار شامل کربن سیاه ریز و آمورف و کربن کروی درشت استفاده شود، سختی و چگالی افزایش می‌یابد. ضمناً سختی ۲۵۳۰HV و مدول یانگ، ۴۴۳Gpa خواهد شد [۱۹]. دمی‌رسکی و همکاران^{۲۴} با استفاده از روش FSPS^{۲۵} چگالی را نسبت به حالت پخت عادی، بهبود دادند [۲۰]. گابرنات و همکاران^{۲۶} با استفاده از افزودنی‌های اکسیدی شامل Al₂O₃ + Y₂O₃ + MgO در حین فرآیند پخت توانستند موجب بهبود خواص مکانیکی کاربید سیلیسیم شوند [۲۱]. مالینج و همکاران^{۲۷} با استفاده از بایندها و افزودنی‌های دیگر نظیر B₄C جهت انجام فرایند پخت بدون فشار توانستند چگالی نهایی را به ۹۸٪ میزان تئوریک آن برسانند [۲۲]. در مجموع با توجه به نظر وانگ و همکاران^{۲۸}، می‌توان چنین بیان نمود که خواص مکانیکی مناسب خصوصاً در دمای بالا موجب کاربرد فراوان کاربید سیلیسیم در صنایع پیشرفته‌ای نظیر صنایع هوافضا شده است [۲۳]. بنا به نظر ژانگ و همکاران^{۲۹}، درصد افزودنی کربن برای پخت کاربید سیلیسیم و به‌منظور رسیدن به بیشترین چگالی باید حدود ۱%wt باشد [۲۴] که این میزان را می‌توان مطابق نظر راسکا و همکاران^{۳۰} تا حدود ۳%wt نیز افزایش یابد اما در درصدهای بالاتر از ۳، هم چگالی و هم خواص مکانیکی (سختی، استحکام و چقرمگی شکست) افت می‌نماید [۲۵].

همان‌طور که مشاهده می‌شود در بیشتر تحقیقات انجام شده، اثر افزودنی‌ها بر روی خواص مکانیکی مورد ارزیابی قرار

در قالب مخصوص ایجاد می‌شود (فشار پرس ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ بار). برای هر شرایط کاری (فشار، زمان آسیاب و فشار پرس) یکسان، سه نمونه تولید می‌گردد. در نهایت قرص‌هایی با زمان آسیاب، رطوبت و فشارهای متفاوت حاصل می‌شوند. سپس نسبت به کدگذاری نمونه‌ها (مطابق شکل ۴)، ابعاد برداری و تعیین چگالی آنها اقدام می‌شود. شایان‌ذکر است که با ۱۳ درصد رطوبت، امکان پرس در هیچ‌کدام از فشارهای کاری فراهم نشد که نشان از این دارد که در این درصد رطوبت و بالاتر، امکان پرس نمونه فراهم نخواهد شد و نمی‌توان نمونه تولید نمود. لذا تعداد کل نمونه‌ها ۹۹ می‌باشد.



شکل (۴): بخشی از نمونه‌های پرس شده و کدگذاری آنها.

۲-۲- تعیین خواص مکانیکی و چگالی

بعد از ساخت نمونه‌ها نسبت به اندازه‌گیری ابعادی (قطر و ضخامت) و وزنی آنها اقدام شده و چگالی خام آنها محاسبه می‌گردد. همچنین برای هر حالت یکتا از فشار، زمان آسیاب و درصد رطوبت، یک نمونه تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای و یک نمونه تحت آزمایش فشار قرار می‌گیرد و نرم‌افزار به‌گونه‌ای تنظیم می‌شود که نیرو برحسب جابجایی برای نمونه‌ها ثبت گردد.

شکل (۵)، نمودار نیرو برحسب جابجایی برای حالت زمان آسیاب یک ساعت و رطوبت چهار درصد و فشار پرس سی بار را نشان می‌دهد. در کلیه آزمون‌های خمش سه نقطه‌ای، ضمن وارد نمودن مشخصات ابعادی نمونه‌ها در نرم‌افزار، نرخ بارگذاری نیز 0.08 mm/min تنظیم می‌گردد.

از جنس کاربید تنگستن با وزن ۲۰ گرم قرار داده می‌شود که بتواند به آسیاب نمودن کمک نماید. سپس دو کاپ داخل میکسر قرار داده شده و به مدت ۱ ساعت و با سرعت ۱۹۰ دور بر دقیقه آسیاب می‌شوند.



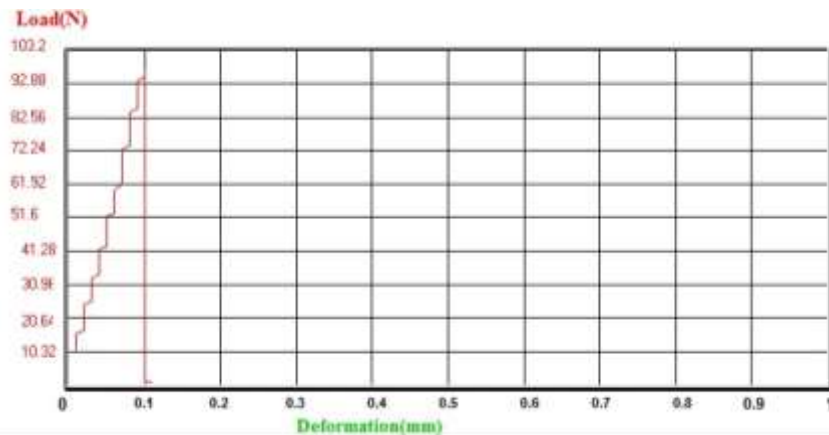
شکل (۲): قرارگیری گوی تنگستنی داخل کاپ.

بعد از اتمام این مرحله، هرکدام از ۱۲۰ گرم کاربید سیلیسیم‌ها را مطابق شکل (۳) روی فویل آلومینیومی پخش نموده و داخل آون قرار داده تا الکل آن خارج شود. در حین فرایند گرمایش، هر ۲۰ دقیقه یک‌بار کلوخه‌های ایجاد شده در آون خرد شده تا در نهایت پودر آسیاب شده حاصل شود در نهایت، با الک کردن می‌توان کلوخه‌های باقی مانده را خارج نمود. به همین ترتیب پودر کاربید سیلیسیم با زمان آسیاب ۲ ساعت و ۳ ساعت نیز تهیه می‌گردد.



شکل ۳: خرد کردن کاربید سیلیسیم کلوخه شده روی فویل آلومینیومی.

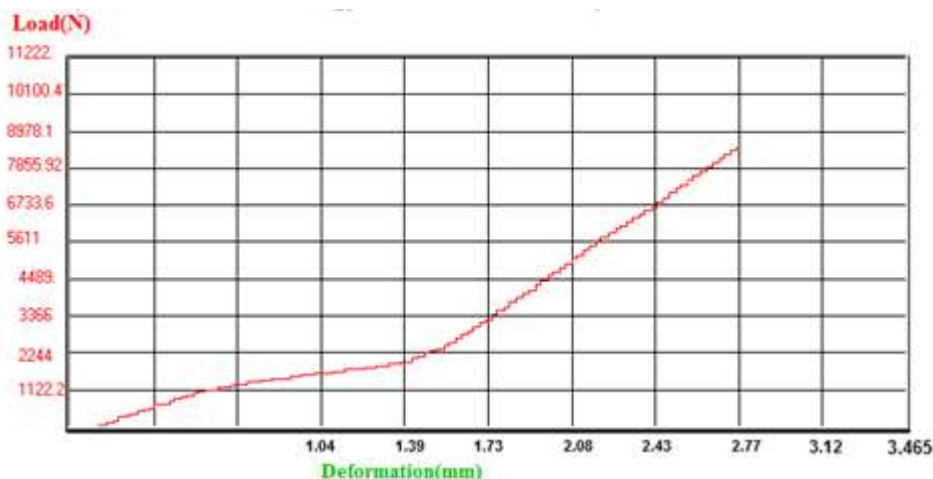
بعد از آن با اختلاط پودر با مقادیر تعریف شده رطوبت (۴، ۷، ۱۰ و ۱۳ درصد)، نمونه‌های قرص شکل از طریق پرس



شکل (۵): نمودار نیرو - جابجایی برای آزمون خمش سه نقطه‌ای نمونه با زمان آسیاب ۱ ساعت و رطوبت ۴ درصد و فشار پرس ۳۰ بار.

مشهود است. با توجه به این که سرامیک‌ها مقاومت فشاری بسیار بالایی دارند، میزان نیروی لازم جهت کاهش ضخامت نمونه‌ها به میزان نصف حالت اولیه، به عنوان نقطه پایان در نظر گرفته می‌شود.

همچنین در هر حالت کاری، یکی از نمونه‌ها نیز مورد آزمون فشار قرار می‌گیرند. در این آزمون نرخ بارگذاری ۰/۵ mm/min تعریف می‌گردد. در شکل (۶)، گراف حاصل از آزمون فشار، اثر بشک‌ای شدن (افزایش شیب نمودار) کاملاً



شکل (۶): نمودار نیرو - جابجایی برای آزمون فشار تک محوره نمونه با زمان آسیاب ۱ ساعت و رطوبت ۴ درصد و فشار پرس ۳۰ بار.

می‌دهد. همچنین جدول (۵)، چگالی، مقاومت خمشی و مقاومت فشاری را برای حالتی که نمونه‌ها با رطوبت ۷ درصد، فشار پرس ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ بار و همچنین زمان آسیاب ۱، ۲ و ۳ ساعت نشان می‌دهد.

۳- نتایج و بحث

مطابق با آنچه در بخش قبل گفته شد، نمونه‌ها ساخته شده و داده‌برداری‌ها بر روی آنها انجام می‌شود. جدول (۴)، چگالی، مقاومت خمشی و مقاومت فشاری را برای حالتی که نمونه‌ها با رطوبت چهار درصد، فشار پرس ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ بار و همچنین زمان آسیاب ۱، ۲ و ۳ ساعت نشان

جدول (۴): نتایج برای نمونه‌های با رطوبت ۴ درصد.

فشار پرس (bar)	زمان آسیاب (hr)	کد نمونه	وزن (gr)	چگالی (gr/cm ²)	نیروی خمشی شکست (N)	مقاومت فشاری (N)
30	1	A1	2.99	1.65	--	--
		A2	3.02	1.64	95	--
		A3	2.97	1.67	--	8671
		A4	3.00	1.75	167	--
		A5	2.99	1.75	--	8437
		A6	3.02	1.76	--	--
		A7	2.97	1.84	209	--
		A8	3.05	1.85	--	9404
		A9	3.11	1.85	--	--
		A10	2.99	1.85	194	--
		A11	3.06	1.89	--	10396
		A12	3.06	1.89	--	--
60	2	B1	3.01	1.69	174	--
		B2	2.92	1.74	--	11165
		B3	3.01	1.73	--	--
		B4	2.91	1.80	175	--
		B5	2.94	1.82	--	10412
		B6	2.88	1.82	--	--
		B7	2.98	1.81	177	--
		B8	2.91	1.84	--	10555
		B9	3.02	1.83	--	--
		B10	3.05	1.81	95	--
		B11	3.03	1.80	--	9916
		B12	2.98	1.81	--	--
90	3	C1	2.99	1.57	63	--
		C2	3.02	1.64	--	9851
		C3	2.97	1.67	--	--
		C4	3.00	1.82	--	--
		C5	2.99	1.75	138	--
		C6	3.02	1.83	--	10180
		C7	2.97	1.91	153	--
		C8	3.05	1.92	--	13436
		C9	3.11	2.00	--	--
		C10	2.99	1.96	178	--
		C11	3.06	2.01	--	9363
		C12	3.06	2.05	--	--

جدول (۵): نتایج برای نمونه‌های با رطوبت ۷ درصد.

فشار پرس (bar)	زمان آسیاب (hr)	کد نمونه	وزن (gr)	چگالی (gr/cm ²)	نیروی خمشی شکست (N)	مقاومت فشاری (N)
30	1	D1	3.01	1.94	170	--
		D2	2.77	1.94	--	11122
		D3	2.76	1.98	--	--
		D4	2.43	1.96	--	8481
		D5	2.88	2.02	219	--
		D6	2.80	1.84	--	--
		D7	2.85	2.09	215	--
		D8	2.68	2.06	--	10104
		D9	2.71	2.03	--	--
		D10	2.87	2.06	225	--
		D11	2.79	2.05	--	13467
		D12	2.84	2.04	--	--
60	2	E1	2.92	1.88	200	--
		E2	2.91	1.84	--	11780
		E3	2.88	1.89	--	--
		E4	2.81	2.01	179	--
		E5	2.82	2.02	--	10569
		E6	2.92	2.09	--	--
		E7	2.74	2.06	210	--
		E8	2.73	2.10	--	10029
		E9	2.68	2.06	--	--
		E10	2.29	2.01	114	--
		E11	2.12	2.09	--	8731
		E12	2.14	2.04	--	--
90	3	F1	2.91	1.91	102	--
		F2	2.84	1.87	--	8268
		F3	3.00	1.93	--	--
		F4	2.90	1.99	119	--
		F5	2.83	1.98	--	11083
		F6	2.76	1.93	--	--
		F7	2.95	2.02	135	--
		F8	2.80	2.01	--	12207
		F9	2.91	2.04	--	--
		F10	2.94	2.11	143	--
		F11	2.94	2.11	--	11095
		F12	2.92	2.05	--	--

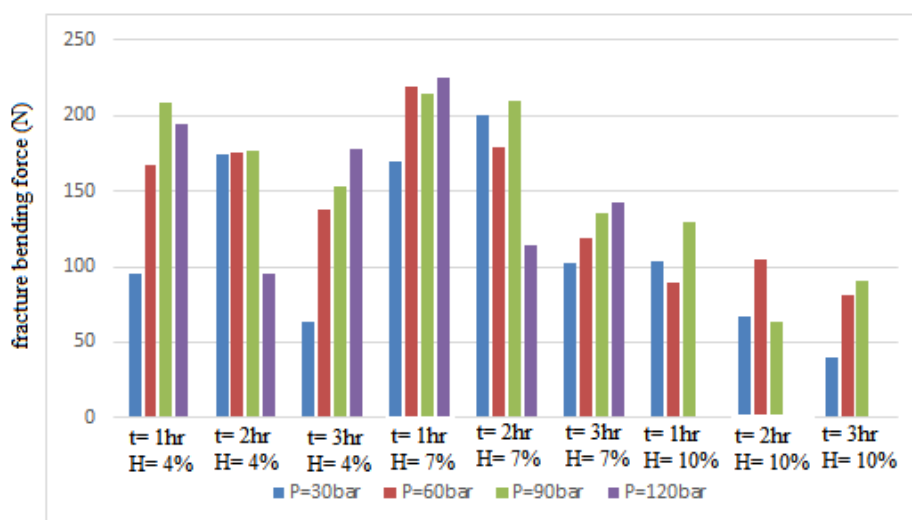
جدول (۶)، چگالی، مقاومت خمشی و مقاومت فشاری را ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ بار و همچنین زمان آسیاب ۱، ۲ و ۳ ساعت برای حالتی که نمونه‌ها با رطوبت ۱۰ درصد، فشار پرس ۳۰، نشان می‌دهد.

جدول (۶): نتایج برای نمونه‌های با رطوبت ۱۰ درصد.

فشار پرس (bar)	زمان آسیاب (hr)	کد نمونه	وزن (gr)	چگالی (gr/cm ²)	نیروی خمشی شکست (N)	مقاومت فشاری (N)
30	1	G1	2.62	1.97	104	--
		G2	2.57	1.93	--	9738
		G3	2.67	1.91	--	--
		G4	2.49	2.01	90	--
		G5	2.48	1.91	--	--
		G6	2.28	2.05	--	10015
		G7	1.45	2.08	129	--
		G8	1.31	2.07	--	--
		G9	1.78	1.87	--	13080
60	2	H1	2.69	1.97	67	--
		H2	2.64	1.89	--	9150
		H3	2.74	2.01	--	--
		H4	2.47	2.05	105	--
		H5	2.25	1.92	--	10765
		H6	2.42	2.06	--	--
		H7	2.09	2.00	64	--
		H8	2.10	1.95	--	9970
		H9	1.99	2.09	--	--
90	3	I1	2.87	1.89	40	--
		I2	2.83	1.94	--	10100
		I3	2.77	1.86	--	--
		I4	2.44	1.97	81	--
		I5	2.52	1.99	--	8320
		I6	2.52	1.99	--	--
		I7	2.38	2.03	91	--
		I8	2.41	2.05	--	10600
		I9	2.44	2.08	--	--

که بهترین خواص قبل از پخت را ایجاد می‌نماید، تعیین نمود. شکل (۷)، نمودار میله‌ای اثر هم‌زمان متغیرهای مورد بحث را بر روی نیروی لازم جهت شکست خمشی نمونه‌ها نشان می‌دهد.

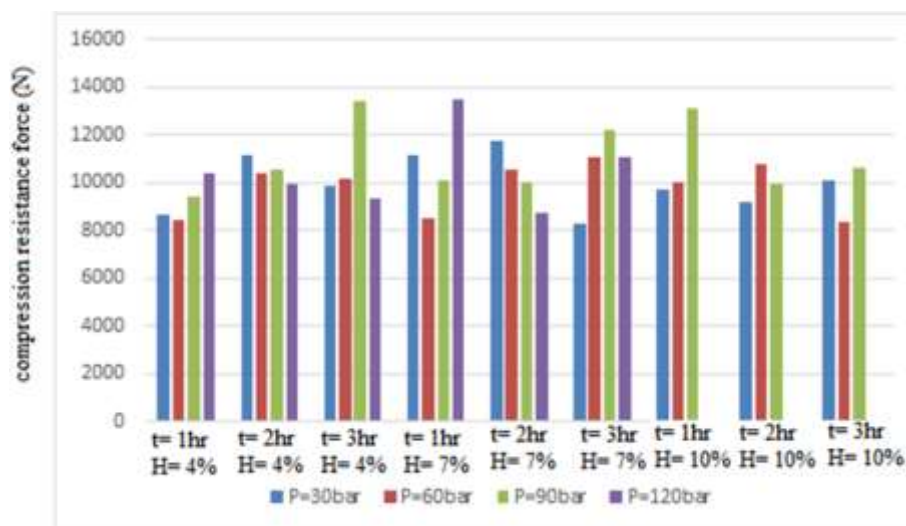
همان‌طور که در جدول فوق مشخص است، در فشار ۱۲۰ بار و رطوبت ۱۰ درصد، نمونه‌ها قابل تولید نبود و از بین می‌رود. حال با بررسی اثر سه متغیر زمان آسیاب، درصد رطوبت و فشار پرس بر روی متغیر پاسخ، می‌توان حالتی را



شکل (۷): اثر زمان آسیاب، درصد رطوبت و فشار پرس بر مقاومت خمشی نمونه کاربید سیلیسیم.

تا ۱۲۰ بار انتخاب شود. همچنین افزایش رطوبت به بیش از ۷ درصد، موجب افت شدید مقاومت خمشی می‌شود. شکل (۸)، نمودار میله‌ای اثر هم‌زمان متغیرهای مورد بحث را بر روی نیروی فشاری لازم جهت تغییر ضخامت نمونه‌ها به نصف حالت اولیه را نشان می‌دهد.

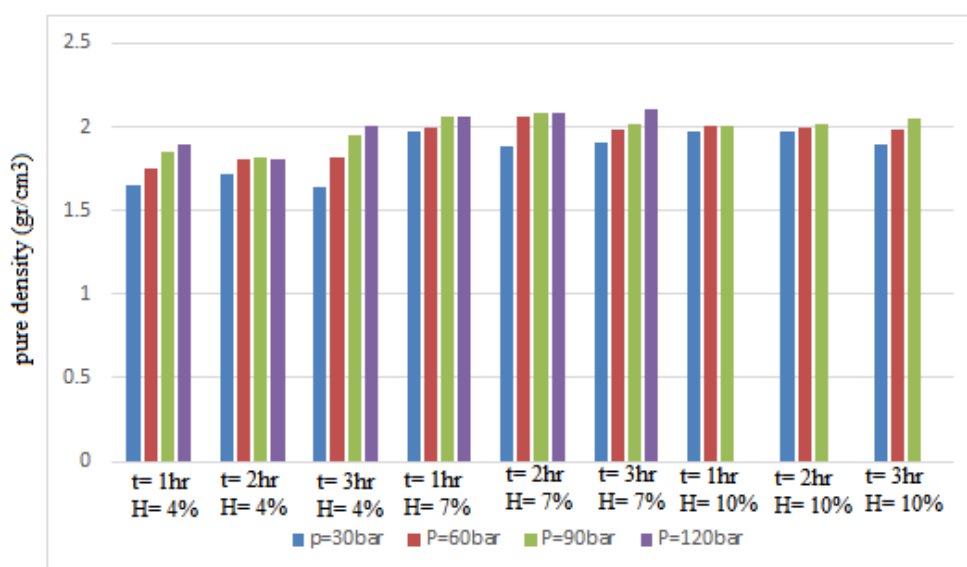
همان‌طور که در تصویر فوق قابل مشاهده است، در زمان آسیاب ۱ ساعت، رطوبت ۷ درصد و فشار پرس ۱۲۰ بار، مقاومت خمشی بیشتر از سایر حالت‌ها است. در این حالت حتی در فشار پرس ۶۰ بار و ۹۰ بار هم مقاومت خمشی در حالت بیشینه است و لذا چنین می‌توان گفت که در رطوبت ۷ درصد و زمان آسیاب ۱ ساعت، فشار پرس بهینه باید ۶۰



شکل (۸): اثر زمان آسیاب، درصد رطوبت و فشار پرس بر مقاومت فشاری نمونه کاربید سیلیسیم.

آسیاب ۱ ساعت و فشار پرس ۱۲۰ بار، مقاومت فشاری در بیشینه حالت خود قرار دارد. شکل (۹) نیز اثر متغیرهای مورد اشاره را بر روی چگالی خام نشان می‌دهد.

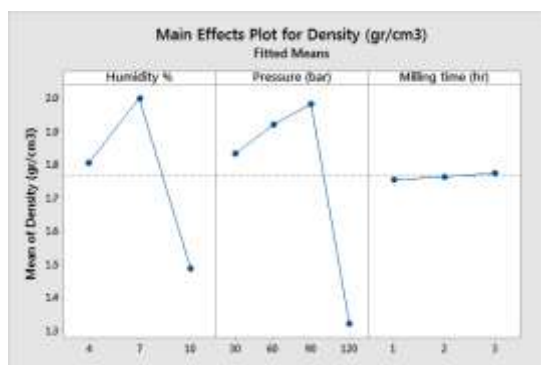
در این حالت نیز با اینکه در حالت‌ها و شرایط مختلف میزان تغییرات نسبت به مقاومت خمشی کمتر است، اما باز هم همچون مقاومت خمشی، در رطوبت ۷ درصد و زمان



شکل (۹): اثر زمان آسیاب، درصد رطوبت و فشار پرس بر چگالی خام نمونه کاربید سیلیسیم.

همان گونه که از شکل (۱۱) مشخص است، فشار و رطوبت هر دو تا یک حدی موجب افزایش استحکام فشاری شده و سپس اثر کاهشی دارند؛ اما افزایش زمان آسیاب تأثیر قابل توجهی بر استحکام فشاری ندارد.

در شکل (۱۲) اثر عوامل اصلی بر روی متغیر چگالی نشان داده شده است.

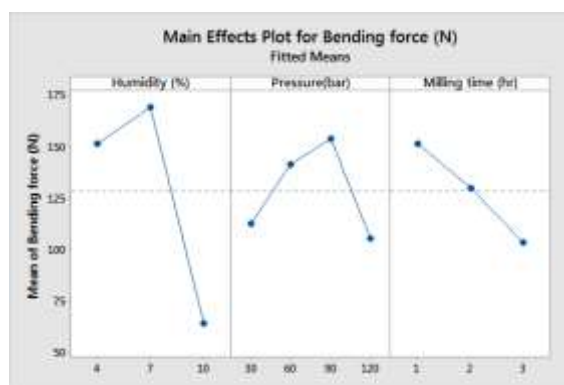


شکل (۱۲): اثر عوامل اصلی بر روی متغیر چگالی.

همان گونه که از شکل (۱۲) مشخص است، فشار و رطوبت هر دو تا یک حدی موجب افزایش استحکام فشاری شده و سپس اثر کاهشی دارند؛ اما افزایش زمان آسیاب تأثیر قابل توجهی بر استحکام فشاری ندارد.

در حقیقت، از شکل (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) چنین برمی آید که با افزایش فشار پرس، خواص مکانیکی (مقاومت خمشی و مقاومت فشاری) و همچنین چگالی، با توجه به متراکم تر شدن و فشرده شدن پودر در حالت خام (قبل از پخت)، بهتر می شود؛ اما اگر فشار پرس از یک حدی فراتر رود، ایجاد ریزترک های ناشی از افزایش بیش از حد فشار، می تواند موجب افت خواص مکانیکی و همچنین افت چگالی را به دنبال خواهد داشت. این حد فشار مطابق با نتایج ارائه شده، در حدود ۹۰ الی ۱۲۰ بار می باشد. افزایش رطوبت نیز تا یک حدی موجب بهبود خواص مکانیکی و پرس پذیری می شود. علت این مسئله، افزایش قابلیت حرکت و سیلان ذرات در هنگام پرس می باشد؛ اما از یک حدی به بعد، با خشک شدن نمونه ها، رطوبت در فضای داخلی نمونه به صورت موک و حفره نمایان شده و از آنجایی که موک و حفره در داخل قطعات به عنوان عیب محسوب می شود

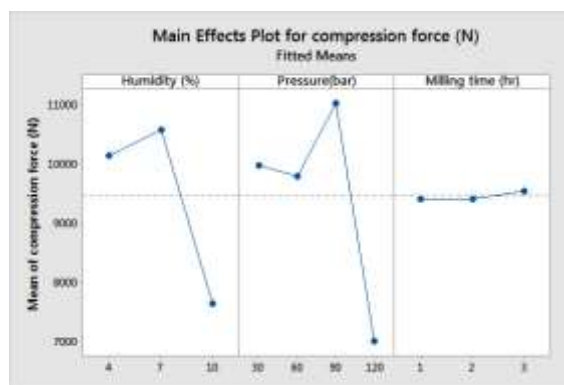
در این نمودار نیز مشاهده می شود که در رطوبت ۷ درصد و فشار پرس بالای ۶۰ بار، بیشینه چگالی خام به دست می آید. به منظور ارزیابی دقیق تر اثر پارامترهای رطوبت، زمان اختلاط در آسیاب و فشار پرس بر روی متغیرهای پاسخ شامل چگالی خام، مقاومت فشاری و مقاومت خمشی، از طرح آزمون عاملی^{۳۱} استفاده می شود. با استفاده از نرم افزار مینی تب^{۳۲} و بر مبنای اصل تصادفی سازی تولید نمونه ها با روش طرح آزمون عاملی، مطابق با شکل ۱۰ اثر عوامل اصلی بر روی متغیر استحکام خمشی نشان داده شده است.



شکل (۱۰): اثر عوامل اصلی بر روی متغیر استحکام خمشی.

همان گونه که از شکل (۱۰) مشخص است، فشار و رطوبت هر دو تا یک حدی موجب افزایش استحکام خمشی شده و سپس اثر کاهشی دارند؛ اما افزایش زمان آسیاب موجب کاهش استحکام خمشی می شود.

با در نظر گرفتن استحکام فشاری به عنوان متغیر پاسخ در طرح آزمون عاملی، در شکل (۱۱) اثر عوامل اصلی بر روی آن نشان داده شده است.



شکل (۱۱): اثر عوامل اصلی بر روی متغیر استحکام فشاری.

حال از این نمونه پخت شده، نمونه‌های استاندارد سختی، چقرمگی استحکام خمشی و ...، استخراج و خواص مربوطه تعیین می‌گردد. خواص نمونه نهایی پخت شده به شرح جدول (۷) می‌باشد. شایان ذکر است که تعیین دانسیته به روش ارشمیدس و سختی بر اساس استاندارد ASTM C1327 به دست آمد. مدول یانگ نیز بر پایه استاندارد ASTM C769 و بر اساس سرعت صوت که توسط ضخامت سنج TC600 به دست آمده، محاسبه و تعیین شده است.

جدول (۷): خواص نهایی کاربید سیلیسیم پخت شده با شرایط کاری رطوبت ۷ درصد، زمان آسیاب ۱ ساعت و فشار پرس ۱۲۰ بار، پخت شده در دمای ۲۲۰۰ درجه سانتی گراد.

خواص	مقدار
چگالی	3.04 gr/cm ³
مدول یانگ	423.86 GPa
سختی	2568HV
چقرمگی	4.35 MPa m ^{1/2}
سرعت صوت	11808 m/sec
استحکام خمشی	356 MPa

همان‌طور که مشاهده می‌شود، چگالی‌ای در حدود ۹۷٪ مقدار نامی به دست آمده که به صورت تجربی می‌توان گفت نشانه‌ای از صحت میزان رطوبت، فشار پرس و زمان آسیاب حین فراوری قطعه و همچنین صحت فرایند پخت دارد و سایر خواص مکانیکی نمونه پخت شده (مطابق جدول ۷) نیز دارای انطباق بالا با مقادیر نامی آن‌ها می‌باشد.

۴- نتیجه گیری

از مجموع نتایج و داده‌های به دست آمده از آزمون‌های تجربی می‌توان نتایج زیر را استخراج نمود:

* با استفاده از طرح آزمون عاملی می‌توان اثرات سه عامل رطوبت، فشار پرس و زمان آسیاب را با دقت مناسبی بر روی متغیرهای پاسخ (مقاومت خمشی، مقاومت فشاری و چگالی) بررسی نمود.

* در رطوبت‌های بالای ۱۰ درصد مطابق نتایج تجربی، نمونه فاقد ساخت پذیری بوده و یا نمونه‌های ترک دار ایجاد می‌شود.

موجب افت خواص مکانیکی و چگالی می‌گردند. با توجه به نتایج طرح آزمون عاملی، میزان رطوبت بهینه مطابق با نتایج مندرج در نمودارهای شکل (۱۰) الی (۱۲)، در حدود ۷٪ برآورد می‌گردد. در خصوص زمان آسیاب نیز با مشاهده نتایج طرح آزمون عاملی در شکل‌های فوق‌الذکر، چنین برمی‌آید که اثر آن کمتر از رطوبت و فشار پرس است. هرچند افزایش بیش از حد زمان آسیاب نیز می‌تواند با برهم زدن دانه‌بندی و ریخت شناسی ذرات و همچنین غیر همگن نمودن ریزساختار قطعه بعد از پرس، منجر به افت خواص مکانیکی گردد (مطابق شکل ۱۰).

لذا از مجموع بحث‌های مطرح شده و نتایج تغییرات پارامترهای رطوبت، فشار پرس و زمان آسیاب بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه قرص‌های کاربید سیلیسیم که هم به صورت مجزا این عوامل بررسی شد (شکل ۷ الی ۹) و هم با طرح آزمون عاملی اثرات هم‌زمان و متقابل این عوامل بر روی متغیرهای پاسخ تحلیل شد (شکل ۱۰ الی ۱۲)، مشخص می‌شود که با شرایط کاری فشار ۱۲۰ بار، زمان آسیاب ۱ ساعت و رطوبت ۷ درصد، نمونه با بهترین چگالی و خواص مکانیکی حاصل می‌شود، لذا به منظور صحت‌گذاری این موضوع، نمونه‌ای با شرایط کاری فوق‌الذکر به ابعاد 5*2*0.5cm ساخته شده و به مدت ۲ ساعت تحت فرایند پخت در دمای ۲۲۰۰ درجه سانتی گراد قرار می‌گیرد. شکل (۱۳)، این نمونه را نشان می‌دهد. تعیین خواص مکانیکی و فیزیکی نمونه پخت شده و بررسی میزان انطباق آن با مقادیر نامی، می‌تواند به عنوان روشی جهت صحت‌گذاری بر روی شرایط کاری احصاء شده، محسوب گردد.



شکل (۱۳): نمونه کاربید سیلیسیم پخت شده.

[4] J. H. Eom, Y. W. Kim & I. H. Song, "Effects of the initial α -SiC content on the microstructure, mechanical properties, and permeability of macroporous silicon carbide ceramics", *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 32, no. 6, pp. 1283-1290, 2012.

[5] N. P. Padture, "In situ-toughened silicon carbide", *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 77, no. 2, pp. 519-523, 1994.

[6] E. Gomez, J. Echeberria, I. Iturriza & F. Castro, "Liquid phase sintering of SiC with additions of Y₂O₃, Al₂O₃ and SiO₂", *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 24, no. 9, pp. 2895-2903, 2004.

[7] G. Magnani, L. Beaulardi & L. Pilotti, "Properties of liquid phase pressureless sintered silicon carbide obtained without sintering bed", *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 25, no. 9, pp. 1619-1627, 2005.

[8] J. Y. Lee & T. Hinoki, "Densification behavior of monolithic SiC fabricated by pressureless liquid phase sintering method", *Open Ceramics*, vol. 11 p. 100289, 2022.

[9] S. Sarva & S. Nemat-Nasser, "Dynamic compressive strength of silicon carbide under uniaxial compression", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 317, no. 1-2, pp. 140-144, 2001.

[10] T. Guo, Z. Liu, C. Yu, J. Ding, P. Yu & C. Deng, "Effect of pore structure evolution on mechanical properties and thermal conductivity of porous SiC-Mullite ceramics", *Ceramics International*, 2023.

[11] T. Charoonsuk, U. Sukkha, T. Kolodiaznyh & N. Vittayakorn, "Enhancing the densification of ceria ceramic at low temperature via the cold sintering assisted two-step sintering process", *Ceramics International*, vol. 44, pp. S54-S57, 2018.

[12] H. Dehghani, M. Khodaei, O. Yaghobizadeh, N. Ehsani, H. R. Baharvandi, S. H. N. Alhosseini & H. Javi, "The effect of AlN-Y₂O₃ compound on properties of pressureless sintered SiC ceramics-A review", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 95, p. 105420, 2021.

[13] A. Montón, F. Maury, G. Chevallier, C. Estournès, M. Ferrato & D. Grossin, "Densification of surface-modified silicon carbide powder by spark-plasma-sintering", *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 41, no. 15, pp. 7543-7551, 2021.

* در رطوبت ۷ درصد و فشار پرس بالای ۶۰ بار، بیشینه چگالی خام به دست می‌آید.

* در رطوبت ۷ درصد و زمان آسیاب ۱ ساعت و فشار پرس ۱۲۰ بار، مقاومت فشاری و هم چنین مقاومت خمشی در بیشینه حالت خود قرار دارد.

* با افزایش فشار پرس، خواص مکانیکی با توجه به متراکم‌تر شدن پودر، بهتر می‌شود؛ اما از یک حدی به بعد، ایجاد ریزترک‌های ناشی از افزایش بیش از حد فشار، می‌تواند موجب افت خواص مکانیکی شود.

* افزایش رطوبت نیز تا یک حدی موجب بهبود خواص مکانیکی و پرس پذیری می‌شود اما از یک حدی به بعد، با خشک شدن نمونه‌ها، رطوبت در فضای داخلی نمونه به صورت موک و حفره نمایان شده و موجب افت خواص می‌گردد.

* در خصوص زمان آسیاب نیز چنین برمی‌آید که اثر آن کمتر از رطوبت و فشار پرس است. هرچند افزایش بیش از حد زمان آسیاب نیز می‌تواند با برهم زدن دانه‌بندی و ریخت شناسی ذرات، منجر به افت خواص گردد

* با توجه به شرایط ساخت بهینه مورد اشاره در بند قبل، می‌توان نسبت به ساخت قطعات با ابعاد و کاربری‌های مختلف اقدام نموده و سپس جهت فراوری نهایی، قطعات به مرحله پخت گرم منتقل گردند. چنین نمونه‌ای بعد از پخت در دمای ۲۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، دارای خواص مکانیکی مناسب (سختی ۲۵۶۸ HV، مدول ۴۲۳.۸۶ GPa، چقرمگی ۴.۳۵ MPa m^{1/2} و استحکام خمشی ۳۵۶ GPa) و چگالی‌ای در حدود ۹۷٪ مقدار نامی خواهد بود.

۵- مراجع

[1] J. Kriegesmann, "Processing of silicon carbide-based ceramics", 2014.

[2] S. Das, W. Ronan, H. Wadley & V. Deshpande, "Penetration of confined ceramics targets", *Extreme Mechanics Letters*, vol. 18, pp. 45-57, 2018.

[3] H. Liang, X. Yao, Z. Huang, Y. Zeng & B. Su, "Thermal shock behavior of pressureless liquid phase sintered SiC ceramics", *Ceramics International*, vol. 42, no. 7, pp. 8677-8683, 2016.

ceramic society, vol. 32, no. 16, pp. 4393-4400, 2012.

[23] X. Wang, X. Gao, Z. Zhang, L. Cheng, H. Ma & W. Yang, "Advances in modifications and high-temperature applications of silicon carbide ceramic matrix composites in aerospace: a focused review", Journal of the European Ceramic Society, vol. 41, no. 9, pp. 4671-4688, 2021.

[24] J. Zhang, D. Jiang, Q. Lin, Z. Chen & Z. Huang, "Properties of silicon carbide ceramics from gelcasting and pressureless sintering", Materials & Design (1980-2015), vol. 65, 12-16, 2015.

[25] M. Rączka, G. Górny, L. Stobierski & K. Roźniatowski, "Effect of carbon content on the microstructure and properties of silicon carbide-based sinters", Materials characterization, vol. 46, no. 2-3, pp. 245-249, 2001.

۶- پی‌نوشت

[1] Solid or Liquid State Sintering

[2] Trans Granular Fracture

[3] Hexagonal

[4] Eom et al

[5] Pre Form

[6] Pressureless Sintering

[7] Whiskers

[8] Yttrium Aluminum Garnet

[9] Gomez et al

[10] Inter Granular Phase

[11] Magnani et al

[12] Sarva & Nemat-Nasser

[13] Guo et al

[14] Charoonsuk et al

[15] Montón et al

[16] Beasock et al

[17] Rahman et al

[18] Barick et al

[19] Moskovskikh et al

[20] Spark Plasma Sintering

[21] Petrus et al

[22] Morphology

[23] Zhang et al

[24] Demirskyi et al

[25] Flash Spark Plasma Sintering

[26] Gubernat et al

[27] Malinge et al

[28] Wang et al

[29] Zhang et al

[30] Rączka et al

[31] Fractional Design

[32] Minitab

[14] D. Beasock, T. M. Stokes, A. El-Ghannam & T. Schmitz, "Effect of processing parameters on the microstructure and mechanical behavior of a silicon carbide-silica composite", Procedia Manufacturing, vol. 34, pp. 747-753, 2019.

[15] A. Rahman, A. Singh, S. P. Harimkar & R. P. Singh, "Mechanical characterization of fine grained silicon carbide consolidated using polymer pyrolysis and spark plasma sintering", Ceramics International, vol. 40, no. 8, pp.12081-12091, 2014.

[16] P. Barick, D. Chakravarty, B. P. Saha, R. Mitra & S. V. Joshi, "Effect of pressure and temperature on densification, microstructure and mechanical properties of spark plasma sintered silicon carbide processed with β -silicon carbide nanopowder and sintering additives", Ceramics International, vol. 42, no. 3, pp. 3836-3848, 2016.

[17] D. Moskovskikh, Y. Song, S. Rouvimov, A. Rogachev & A. Mukasyan, "Silicon carbide ceramics: Mechanical activation, combustion and spark plasma sintering", Ceramics International, vol. 42, no. 11, pp. 12686-12693, 2016.

[18] M. Petrus, J. Wozniak, A. Jastrzębska, M. Kostecki, T. Cygan & A. Olszyna, "The effect of the morphology of carbon used as a sintering aid on the sinterability of silicon carbide", Ceramics International, vol. 44, no. 6, pp. 7020-7025, 2018.

[19] N. L. Zhang, J. F. Yang, Y. C. Deng, B. Wang & P. Yin, "Preparation and properties of reaction bonded silicon carbide (RB-SiC) ceramics with high SiC percentage by two-step sintering using compound carbon sources", Ceramics International, vol. 45, no. 12, pp. 15715-15719, 2019.

[20] D. Demirskyi & O. Vasylykiv, "Hot-spots generation, exaggerated grain growth and mechanical performance of silicon carbide bulks consolidated by flash spark plasma sintering", Journal of Alloys and Compounds, vol. 691, pp. 466-473, 2017.

[21] A. Gubernat, L. Stobierski & P. Łabaj, "Microstructure and mechanical properties of silicon carbide pressureless sintered with oxide additives", Journal of the European Ceramic Society, vol. 27, no. 2-3, pp. 781-789, 2007.

[22] A. Malinge, A. Coupé, Y. Le Petitcorps & R. Pailler, "Pressureless sintering of beta silicon carbide nanoparticles", Journal of the European