

بررسی تاثیر زمان و دمای زینتر بر رفتار تبلور و ریز ساختار قطعات سیلیس

ذوبی شکل داده شده به روش ریخته‌گری ژلی

مریم صفیاری، حسین سربولکی*، حسین قصابی، احسان رزم

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

*hsarpoolaky@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله:

دریافت: ۱۳۹۵/۱/۲۹

پذیرش: ۱۳۹۵/۸/۲۶

چکیده:

در تحقیق حاضر قطعات سیلیس ذوبی با روش ریخته‌گری ژلی شکل داده شده و پس از خشک شدن، نمونه‌ها در دماهای ۱۲۰۰، ۱۲۵۰، ۱۲۷۵، ۱۳۰۰ و ۱۳۵۰ °C و زمان‌های ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ ساعت پخت شدند. در این نمونه‌ها تاثیر هم‌زمان دما و زمان بر رفتار تبلور و ریز ساختار، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد برای زینتر ناشی از سیلان ناروان قطعات، دما باید بالاتر از ۱۲۰۰ °C باشد و برای اجتناب از تشکیل فاز بلورین، زینتر این قطعات باید در دمایی کمتر از ۱۳۰۰ °C صورت گیرد. بهترین شرایط برای زینتر این قطعات در دمای ۱۲۵۰ °C و به مدت ۵ ساعت به دست آمد. در این دما چگالی، تخلخل و جذب آب قطعات به ترتیب برابر $1/95 \text{ g/cm}^3$ ، $10/47\%$ و $5/83\%$ است.

کلید واژه:

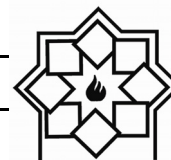
سیلیس ذوبی، ریخته‌گری ژلی، بلورینگی

۱- مقدمه

سیلیس ذوبی ماده‌ی آمورف است که به دلیل دارا بودن خواص و کاربرد ویژه خود در زمره محصولات است که در سال‌های اخیر به شدت مورد توجه پژوهشگران و صنعتگران سرامیک قرار گرفته است. سیلیس ذوبی دارای مجموعه خواص بی‌نظیری چون خواص دی الکتریکی، خواص ترموفیزیکی و خواص شیمیایی است. از جمله پارامترهای مرتبط به این خواص می‌توان به پایداری شیمیایی، شفافیت در برابر امواج رادیویی در محدوده وسیعی از دما و فرکانس

و خواص حفاظت حرارتی اشاره کرد. این ماده مشابهی ندارد، به همین دلیل در عرصه‌ی علم و فن‌آوری بی‌همتا است [۱].

سهولت ساخت این سرامیک، ذخایر بزرگ مواد اولیه در بسیاری از کشورهای سراسر جهان، دسترسی آسان و تجهیزات تکنولوژیکی ساده از جمله مزیت‌های استفاده از سیلیس ذوبی است. در واقع هر روش موجودی در مهندسی سرامیک را می‌توان برای ساخت سرامیک‌های سیلیسی مورد استفاده قرار داد. انقباض کم در حین خشک کردن و پخت این سرامیک‌ها (۲-۵٪) این امکان را فراهم



می‌آورد که بتوان قطعات بزرگی را بدون تاب برداشتنی و کرنش ساخت [۲].

زمینه‌ی زیادی برای به روز رسانی و اصلاح بیشتر این ماده جهت ساخت قطعاتی با قابلیت اعتماد زیاد و خواص طراحی شده وجود دارد [۳-۴].

ریخته‌گری ژلی سیلیس ذوبی روشی جدید برای ساخت قطعات است که در چند دهه‌ی اخیر بسیار مورد توجه بوده است [۵-۱۶] که امکان ساخت قطعاتی با شکل پیچیده را فراهم می‌سازد. از مزایای این روش می‌توان به بالا بودن استحکام خام قطعه و قابلیت ماشین کاری آن قبل از پخت اشاره کرد [۱۷].

زینتر سیلیس ذوبی فرآیندی زمان گیر است که انجام آن به دمای بالایی نیاز دارد. وجود تخلخل‌ها و هم چنین حفرات موجود در ساختار باز سیلیس ذوبی از نفوذ اجزای سیستم که قادر هستند در دمای بالا جنبش زیادی داشته باشند، جلوگیری می‌کند. از جمله پیچیدگی‌های زینتر سیلیس ذوبی تشکیل فاز کریستوبالیت در حین زینتر است. به‌طور کلی شدت تبلور سرامیک‌ها به دما و زمان زینتر وابسته است. اگر مقدار قابل توجهی کریستوبالیت در سرامیک سیلیس ذوبی ایجاد شود، خواص ترمومکانیکی آن به خصوص مقاومت به شوک حرارتی را کاهش داده و سرانجام استحکام آن را به کلی از بین می‌برد [۱۸].

اصلی‌ترین مشکلی که در زینتر سرامیک‌های سیلیسی وجود دارد این است که حین زینتر، خطر تشکیل بلور و در نتیجه کاهش خواص منحصر به فرد آن از جمله افزایش شدید ضریب انبساط وجود دارد. بنابراین هدف پژوهشگران، دستیابی به تراکم کافی، بدون تبلور منجر به تشکیل

کریستوبالیت در خلال زینتر است.

از سوی دیگر دمای بهینه زینتر سیلیس ذوبی به کیفیت ماده اولیه و حضور ناخالصی‌های آن نیز بستگی دارد، در پژوهش حاضر سعی بر آن است که با بهینه کردن عوامل موثر بر زینتر نوعی پودر سیلیس ذوبی با خلوص بالا، از طریقی بهینه سازی دما و زمان بتوان به بیشترین چگالی با کمترین مقدار کریستوبالیت دست یافت.

۲- فعالیت‌های تجربی

۲-۱- مواد اولیه

مواد اولیه مورد استفاده در این پژوهش عبارتند از: سیلیس ذوبی تجاری با خلوص ۹۹/۹٪، اکریلامید (AM, Merck, 8.00830.1000) به عنوان تکپار، متیلن بیس آکریلامید (MBAM, Merck, 1.06062.1000) به عنوان اتصال دهنده‌ی عرضی، آمونیوم پرسولفات (APS, Merck, 1.01201.500) به عنوان آغازگر واکنش و محلول اسیدکلریدریک و هیدروکسید آمونیوم برای تنظیم pH.

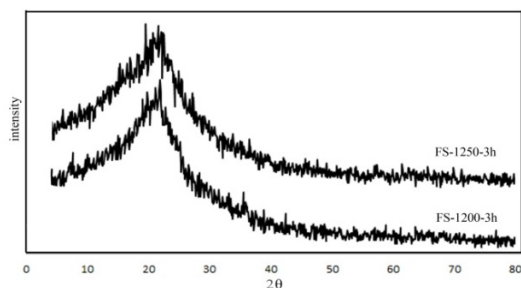
۲-۲- آماده‌سازی دوغاب و ساخت قطعات

مطابق با آنچه که در فلوچارت شکل ۱ مشاهده می‌شود ابتدا pH در محدوده‌ی ۳-۴ تنظیم می‌شود. سپس محلول ۱۰٪ وزنی از مونومرها که در آن نسبت AM به MBAM ۱ به ۷۰ است، آماده می‌شود. برای دستیابی به بار جامد بالا، برحسب ماهیت پودر سرامیکی، باید آن را مرحله به مرحله به محلول اولیه اضافه کرد. پس از آماده سازی دوغاب با ۸۱٪ وزنی بار جامد، محلول ۵ درصد وزنی از APS به آن اضافه شده و هم زده می‌شود تا کاملاً یکنواخت در دوغاب پخش شود. سپس دوغاب درون قالب آلومینیومی آندایز

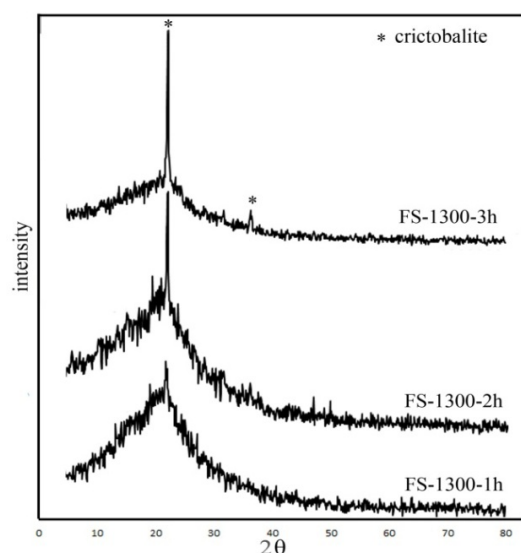


۳- نتایج و بحث

در اولین گام، قطعات زینتر شده در دماها و زمان‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. بر اساس نتایج موجود در شکل ۲ هیچ فاز بلورینی در نمونه‌های FS-1200-3h و FS-1250-3h مشاهده نمی‌شود، اما شکل‌های ۳ نشان می‌دهد که با افزایش دما به 1300°C فاز بلورین کریستوبالیت پدیدار می‌شود. همچنین با افزایش زمان زینتر از یک تا سه ساعت شدت پیک فاز بلورین افزایش چشمگیری دارد.

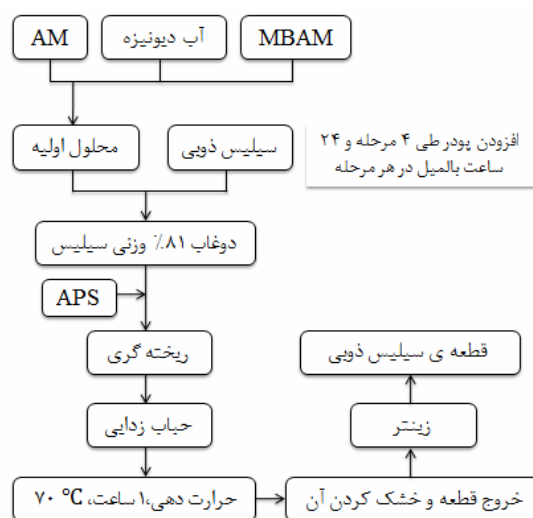


شکل ۲- الگوی پراش اشعه ایکس نمونه‌های FS-1200-3h و FS-1250-3h



شکل ۳- الگوی پراش اشعه ایکس نمونه‌های زینتر شده در دمای 1300°C

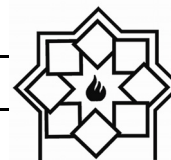
شده، ریخته‌گری می‌شود. برای حباب‌زدایی، قالب حاوی دوغاب به مدت ۱۰ دقیقه تحت خلا قرار می‌گیرد. سپس درون آن با دمای 70°C درجه سانتیگراد به مدت ۱ ساعت قرار می‌گیرد تا فرآیند بسپارش صورت گیرد. سپس نمونه‌ها از قالب خارج شده و ۲۴ ساعت در دمای محیط رها می‌شوند تا کاملاً خشک شوند.



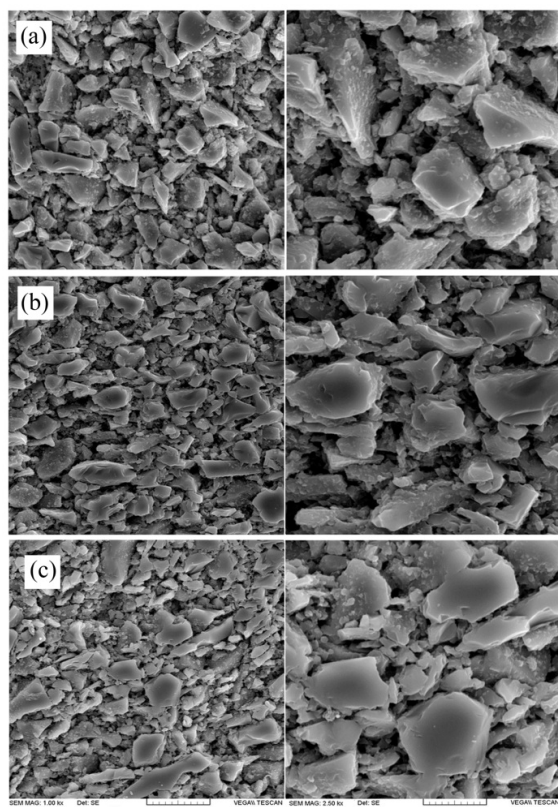
شکل ۱- مراحل ساخت قطعات سیلیس ذوبی به روش ریخته‌گری ژلی

زینتر قطعات در کوره‌ی آذر $k2L1500$ Azar صورت می‌گیرد. ابتدا قطعات با سرعت 5°C درجه بر دقیقه به دمای 650°C برده شده و نیم ساعت در این دما نگه داشته می‌شوند تا تمام مواد آلی از بدنه خارج شوند. سپس با سرعت 10°C درجه بر دقیقه به دمای زینتر برده شده و پس از طی مدت زمان معین، از کوره خارج می‌شوند تا فرآیند سرمایش در بیرون کوره انجام گیرد.

برای بهینه کردن زینتر دماهای 1200°C ، 1250°C ، 1275°C ، 1300°C و 1350°C در مدت زمان ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ ساعت انتخاب شدند. کلیه نمونه‌ها بر اساس دما و زمان نام‌گذاری شدند.



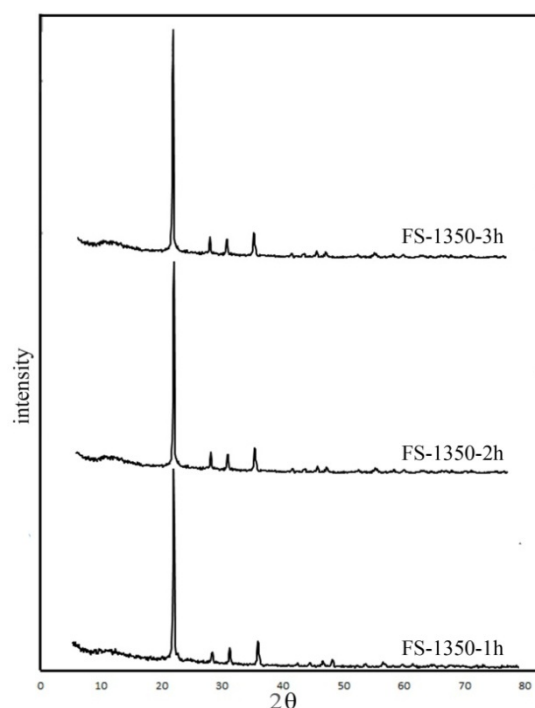
بیان می‌کند که در دماهای کم‌تر از 1175°C اکتیویته‌ی زینتر بسیار کم است و با افزایش دما، صرف‌نظر از میزان تخلخل اولیه در نمونه، زینتر به طور محسوسی افزایش می‌یابد. به همین علت است که در دمای 1200°C پیشرفتی قابل توجهی در زینتر نمونه‌ها مشاهده نشده است. اما انتظار می‌رود با افزایش دما و زمان، زینتر بهبود می‌یابد.



شکل ۵- تصاویر SEM نمونه‌های زینتر شده در دمای 1200°C (a) ۱، (b) ۲ و (c) ۳ ساعت

با افزایش دما به 1250°C شرایط کمی بهتر می‌شود. چنانچه در شکل ۶ مشاهده می‌شود که با افزایش دما سیلان ناروان بیش‌تر شده و اتصال بین ذرات بعد از ۳ ساعت کاملاً برقرار شده است. ولی با این وجود هنوز تخلخل‌های قابل توجهی در نمونه وجود داشته و فرصتی برای بسته شدن آن‌ها فراهم نشده است.

با افزایش دمای زینتر به 1350°C فاز بلورین در قطعات مشاهده می‌شود (شکل ۴) و با افزایش دما، بر شدت تبلور افزوده شده است. همچنین در این دما با افزایش زمان شدت تبلور نیز افزایش می‌یابد به گونه‌ای که پدیدار شدن پیک‌های کم شدت کریستوبالیت در الگوی پراش اشعه ایکس نشانگر افزایش شدیدتر مقدار فاز بلورین است.

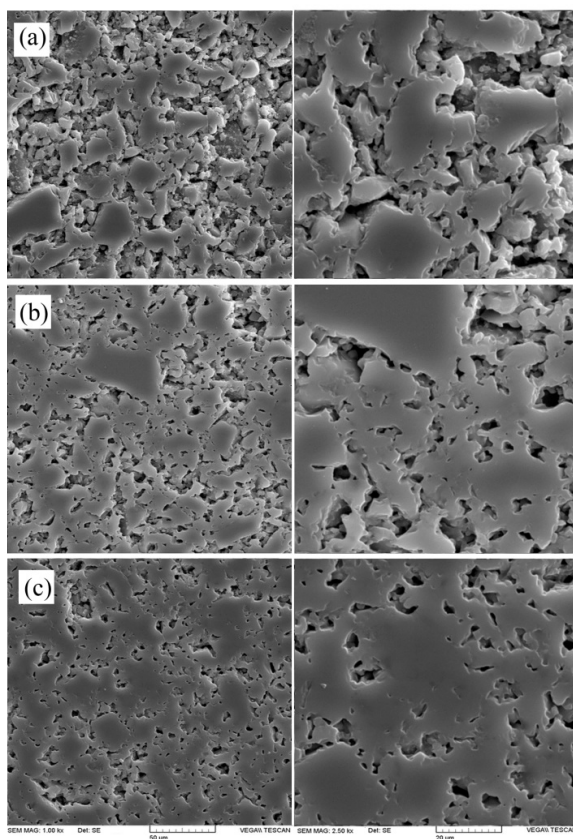


شکل ۴- الگوی پراش اشعه ایکس نمونه‌های زینتر شده در دمای 1350°C

تصاویر ریزساختاری نمونه‌های زینتر شده در 1200°C در زمان‌های یک تا سه ساعت در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بعد از گذشت سه ساعت در دمای 1200°C ، ذرات کاملاً جدا از هم بوده و اتصالی بین آن‌ها رخ نداده است. دما به گونه‌ای پایین است که از ایجاد یک شبکه‌ی به هم پیوسته، جلوگیری کرده است. سوزدالتسلف [۱۹] ضمن بررسی فرایند زینتر سیلیس ذوبی

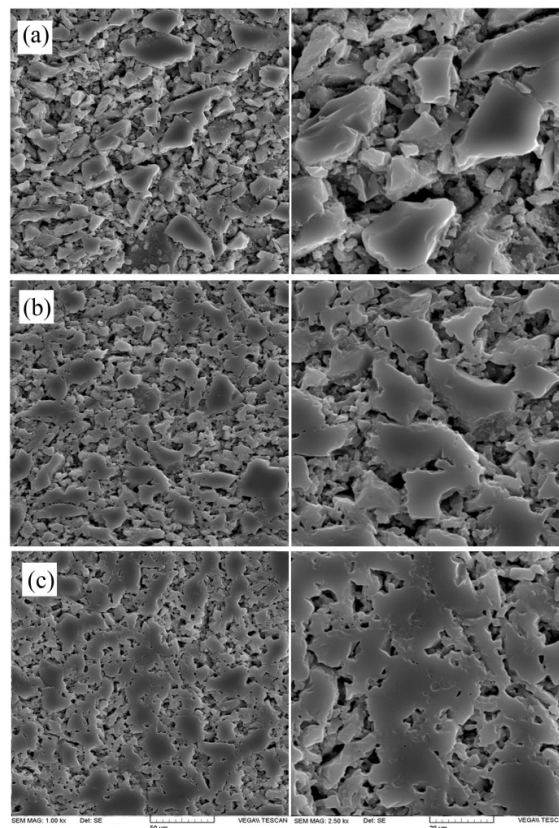


نمونه‌های سیلیس ذوبی نشان می‌دهد. به نحوی که برای دستیابی به بدنه‌ی کاملاً متراکم از تبلور نمی‌توان اجتناب کرد و هم‌چنین با جلوگیری از تبلور، نمی‌توان انتظار دستیابی به بدنه‌ی متراکم داشت. بنابراین بنظر می‌رسد که دما و زمان هر دو برای متراکم شدن قطعه‌ی سیلیس ذوبی محدودیت ایجاد می‌کنند [۱۸ و ۱۹]



شکل ۷- تصاویر SEM نمونه‌های زینتر شده در دمای 1300°C (a) ۱، (b) ۲ و (c) ۳ ساعت

در جدول ۱ چگالی، تخلخل و جذب آب نمونه‌های زینتر شده در دماهای 1200°C ، 1250°C و 1300°C ارائه شده است. چگالی کلی نمونه‌ها با افزایش دما و زمان زینتر، پیوسته افزایش می‌یابد به گونه‌ای که مقدار آن از $1/64$ به

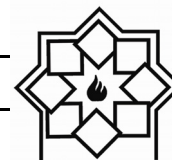


شکل ۶- تصاویر SEM نمونه‌های زینتر شده در دمای 1250°C (a) ۱، (b) ۲ و (c) ۳ ساعت

با افزایش دما به 1300°C شرایط بهتری برای سیلان ناروان فراهم شده است (شکل ۷)، اما با توجه به نتایج الگوی پراش اشعه‌ی ایکس که در شکل ۳ نشان داده شد، کوتاه‌ترین زمان برای زینتر هم باعث تبلور نمونه‌ها شده و دمای 1300°C و بالاتر از آن، برای بهینه زینتر قطعات سیلیس آمورف به هیچ وجه توصیه نمی‌شود.

تصاویر موجود در شکل‌های ۵، ۶، ۷ و ۸ و نتایج الگوی پراش اشعه ایکس نمونه‌های زینتر شده در دمای 1350°C (شکل ۴) به خوبی تقابل بین متراکم شدن^۱ و تبلور را در

¹ densification

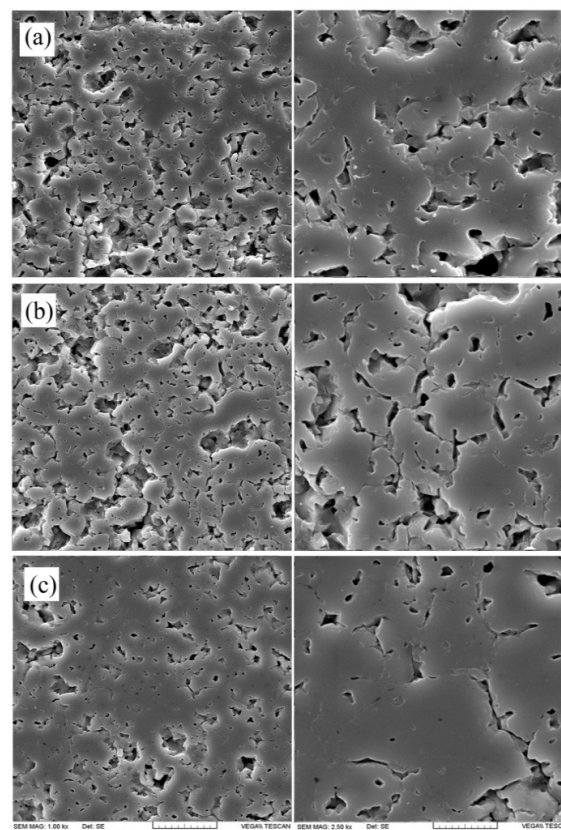


جدول ۱- چگالی، تخلخل و جذب آب نمونه‌های زینتر شده در گام اول

نام نمونه	خواص		
	چگالی	تخلخل	جذب آب
FS-1200-1h	۱/۶۴	۲۷/۷۸	۱۶/۹۴
FS-1200-2h	۱/۷۰	۲۵/۶۴	۱۵/۶۲
FS-1200-3h	۱/۷۷	۲۲/۲۲	۱۲/۵
FS-1250-1h	۱/۶۹	۲۲/۹۲	۱۳/۵۸
FS-1250-2h	۱/۷۸	۱۹/۱۸	۱۱/۱۴
FS-1250-3h	۱/۸۶	۱۷/۹۴	۱۰/۷
FS-1300-1h	۱/۸۲	۱۷/۵۲	۹/۵۹
FS-1300-2h	۱/۹۱	۱۴/۳۸	۸/۵۳
FS-1300-3h	۱/۹۴	۱۰/۵۳	۵/۳۴
FS-1350-1h	۱/۹۲	۱۱/۱۱	۴/۹۳
FS-1350-2h	۱/۹۷	۱۰/۷۱	۴/۶۸
FS-1350-3h	۲/۰۵	۱۰/۰۲	۴/۰۲

از آنجایی که در دمای 1250°C ، بعد از ۳ ساعت، هیچ فاز بلورینی مشاهده نشد، در گام دوم سعی شد تا با افزایش زمان زینتر در این دما و همچنین بررسی دمایی بین 1250°C و 1300°C ، امکان رسیدن به نمونه‌ی بهینه سنجیده شود. همان‌طور که انتظار می‌رفت نتایج الگوی پراش اشعه‌ی ایکس نمونه‌های زینتر شده در دمای 1250°C (شکل ۹) نشان می‌دهد که با افزایش زمان زینتر به ۴ و ۵ ساعت نیز، تبلور قطعات زینتر شده بسیار ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن است. همچنین تصاویر SEM موجود در شکل ۱۰ نشان می‌دهد که افزایش زمان زینتر، باعث پیشرفت فرایند متراکم شدن همزمان با کاهش تخلخل‌ها شده است [۵، ۱۶]. به‌منظور بررسی تاثیر مقادیر کم افزایش دما بر کیفیت محصول ساخته شده، الگوی پراش اشعه‌ی ایکس

$2/05$ گرم بر سانتیمتر مکعب در نمونه‌هایی که به ترتیب در 1200°C ، 1250°C و 1300°C درجه سانتیگراد به مدت یک ساعت و 1350°C به مدت سه ساعت پخت شده‌اند افزایش داشته است. همان‌طور که در تصاویر ریزساختاری هم به خوبی مشاهده می‌شد، افزایش دما و زمان هر دو باعث افزایش چگالی نمونه‌ها می‌شوند (شکل‌های ۵ تا ۸).

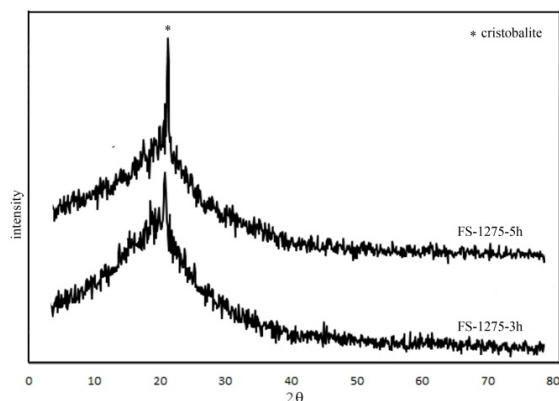


شکل ۸- تصاویر SEM نمونه‌های زینتر شده در دمای 1350°C (a) ۱، (b) ۲ و (c) ۳ ساعت

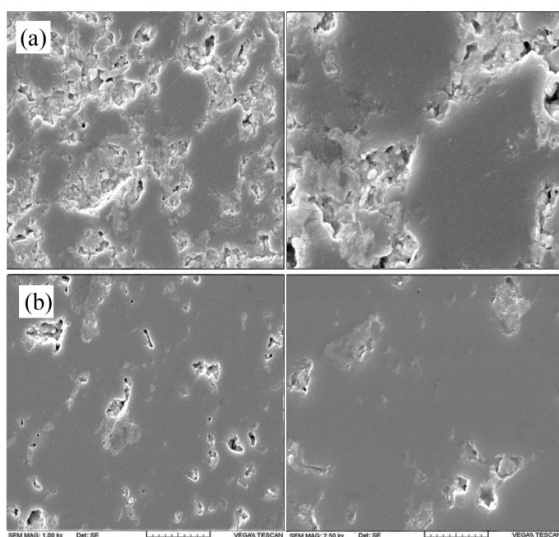
برای انتخاب نمونه‌ی بهینه که بیشترین چگالی و در عین حال کم‌ترین بلورینگی را داشته باشد، دو نمونه‌ی FS-1300-1h و FS-1250-3h مد نظر قرار گرفتند. اما با توجه به این‌که نمونه‌ی FS-1250-3h متبلور نشده و همچنین چگالی بیش‌تری دارد، بهترین شرایط برای زینتر سیلیس ذوبی است.



دمای کمتری زینتر شده است، نسبت به نمونه‌ی FS-1275-3h ساختار متراکم‌تری دارد که می‌تواند به پیشرفت سیلان نارون و بهبود زینتر در زمان‌های طولانی‌تر نسبت داده شود [۵، ۱۲ و ۱۹].



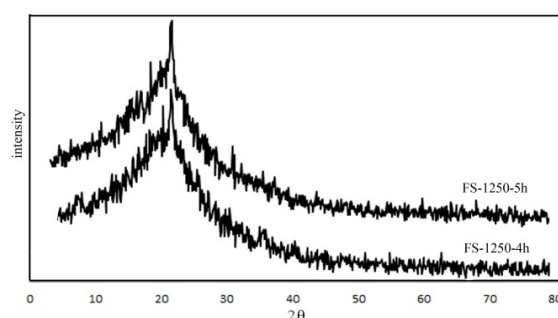
شکل ۱۱- الگوی پراش اشعه ایکس نمونه‌های زینتر شده در دمای 1275°C به مدت ۳ و ۵ ساعت



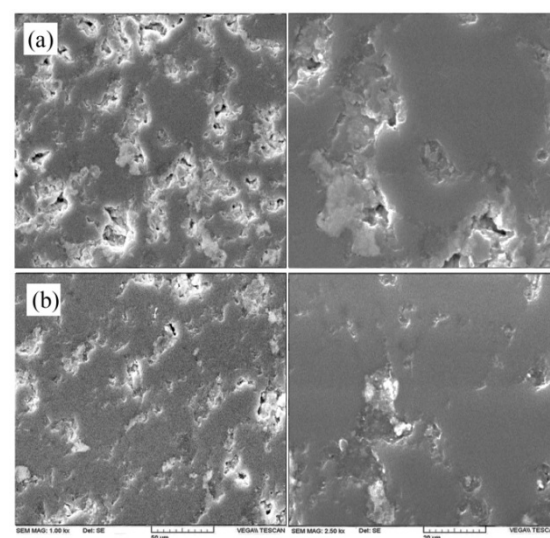
شکل ۱۲- تصاویر SEM نمونه‌های زینتر شده در دمای 1275°C (a) ۳، (b) ۵ ساعت

تصاویر مربوط به نمونه‌ی FS-1275-5h موجود در شکل ۱۲ نشان می‌دهد که ساختار بسیار متراکم شده و تخلخل کمی برجای مانده است. نتایج جدول ۲، تصاویر SEM

نمونه‌های زینتر شده در دمای 1275°C (شکل ۱۱) نشان می‌دهد افزایش ۲۵ درجه‌ای دما با زمان زینتر ۳ ساعت، باز هم سبب تبلور نمونه نشده است. اما انتخاب زمان ۵ ساعت برای زینتر در این دما، تبلور را به همراه داشته است.

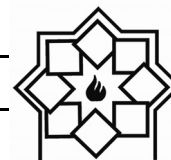


شکل ۹- الگوی پراش اشعه ایکس نمونه‌های زینتر شده در دمای 1250°C به مدت ۴ و ۵



شکل ۱۰- تصاویر SEM نمونه‌های زینتر شده در دمای 1250°C (a) ۴، (b) ۵ ساعت

از مقایسه‌ی تصاویر ریزساختاری مربوط به نمونه‌های FS-1275-3h و FS-1250-4h می‌توان تاثیر زمان بر زینتر سیلیس ذوبی را به خوبی درک کرد. چنانچه در شکل‌های ۱۰ و ۱۲ دیده می‌شود، نمونه‌ی FS-1250-4h با اینکه در



مربوط به نمونه‌ها را توجیه می‌کند. زمان ۵ ساعت برای زینتر باعث دستیابی به چگالی بالای $1/95 \text{ g/cm}^3$ و تخلخل ۱۰ درصدی می‌شود.

جدول ۲- چگالی، تخلخل و جذب آب نمونه‌های زینتر شده در گام اول

نام نمونه	خواص		
	چگالی	تخلخل	جذب آب
FS-1250-4h	۱/۹۱	۱۲/۰۸	۶/۲۷
FS-1250-5h	۱/۹۵	۱۰/۴۷	۵/۸۳
FS-1275-3h	۱/۸۵	۱۵/۴۲	۸/۳۲
FS-1275-5h	۱/۹۷	۹/۶۱	۵/۳۱

بنابر آنچه تاکنون گفته شد، اختلاف کم در چگالی و تخلخل نمونه‌های FS-1250-5h و FS-1275-5h و نیز عدم مشاهده‌ی فاز بلورین در نمونه‌ی FS-1250-5h، دمای 1250°C و زمان ۵ ساعت به عنوان بهترین شرایط برای زینتر سیلیس ذوبی مورد استفاده در این پژوهش انتخاب شدند.

جدول دو نشان می‌دهد که با افزایش دما و زمان زینتر، تخلخل و چگالی نمونه‌ها کاهش یافته و چگالی افزایش می‌یابد. در دمای 1275°C درجه ساتیگراد و زمان زینتر ۵ ساعت بیشترین چگالی نمونه‌ها $1/75$ گرم بر سانتیمتر مکعب به دست آمده است.

۴- نتیجه گیری

قطعات سیلیس ذوبی با استفاده از روش ریخته‌گری ژلی و با استفاده از دوغابی با ۸۱٪ بار جامد به دست آمد. زمان و دمای زینتر تاثیر مهمی بر رفتار تبلور و تراکم پذیری این قطعات دارد. تفسیر نتایج به دست آمده از فعالیت‌های

تجربی نشان می‌دهد که:

- ۱- در پخت نمونه‌ها در در دمای 1200°C زینتر ناشی از سیلان ناروان صورت نمی‌گیرد.
- ۲- افزایش دمای زینتر سبب بهبود تراکم پذیری و به تبع آن سهولت در فرآیند بلورینگی بلورینگی می‌شود که خواص ویژه‌ی سیلیس ذوبی را از بین می‌برد.
- ۳- افزایش زمان زینتر هم تاثیر مشابه با دما دارد اما در دماهای کمتر از 1275°C این تاثیر مشهود نیست. در صورتی که با افزایش دما به 1300°C و 1350°C ، افزایش زمان به طور محسوسی باعث تشدید تبلور می‌شود.
- ۴- نمونه‌های زینتر شده در دمای 1250°C به مدت ۵ ساعت دارای کمترین فاز کریستوبالیت و بیشترین چگالی هستند. به طوری که چگالی، تخلخل و جذب آب آن‌ها به ترتیب برابر $1/95 \text{ g/cm}^3$ ، $10/47\%$ و $5/83\%$ است.

مراجع

- [1] F. Borodai, "Ceramic materials based on amorphous silicon oxide," Glas. Ceram., no. 4, pp. 193–196, 1992.
- [2] P. P. Budnikov and Yu. E. Pivinskii, "QUARTZ CERAMICS," Russ. Chem. Rev., vol. 111, no. 3, 1967.
- [3] E. V. M. E. I. Suzdal'tsev, "USE OF ORGANOSILICON RESIN FOR MODIFYING RADIO ENGINEERING CERAMICS," Refract. Ind. Ceram., vol. 54, no. 4, pp. 324–326, 2013.
- [4] E. V. G. E. I. Suzdal'tsev, "SCIENTIFIC RESEARCH AND DEVELOPMENT QUARTZ CERAMIC BULK-IMPREGNATED WITH AN ORGANOSILICON BINDER HAVING A SPIRAL-CYCLIC STRUCTURE,"



- Subrahmanyam, "Aqueous gelcasting of fused silica using colloidal silica binder," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 96, no. 8, pp. 2432–2436, 2013.
- [15] S. W. Y. and S. Y. L. J. Y. Ding, C.K. Yin, "preparation of quartz crucible via gel-casting process," in *Innovative Processing and Synthesis of Ceramics, Glasses, and Composites VI*, 2002.
- [16] Y. Hu, Z. Wang, and J. Lu, "Study on the gel casting of fused silica glass," *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 354, no. 12–13, pp. 1285–1289, 2008.
- [17] O. Omatete, M. A. Janney, and S. D. Nunn, "Gelcasting: From Laboratory Development Toward Industrial Production," *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 17, pp. 407–413, 1997.
- [18] E. I. Suzdal'tsev, "Fabrication of high-density quartz ceramics: Research and practical aspects. Part 3. Sintering of quartz ceramics," *Refract. Ind. Ceram.*, vol. 46, no. 6, pp. 384–390, 2005.
- [19] E. I. Suzdal'tsev, "The sintering process of quartz ceramics," *Refract. Ind. Ceram.*, vol. 44, no. 4, pp. 236–241, 2003.
- Refract. Ind. Ceram.*, vol. 54, no. 4, pp. 285–287, 2013.
- [5] G. Yan, X. Zhipeng, H. Yong, and M. Science, "Gel-Casting of Fused Silica Ceramic and its Sintering Process," vol. c.
- [6] H. Xu, J. Liu, H. Du, A. Guo, and Z. Hou, "Preparation of porous silica ceramics with relatively high strength by a TBA-based gel-casting method," *Chem. Eng. J.*, vol. 183, pp. 504–509, 2012.
- [7] F. Wang, F. Li, B. He, D. Wang, and B. Sun, "Gel-casting of fused silica based core packing for investment casting using silica sol as a binder," *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 33, no. 13–14, pp. 2745–2749, 2013.
- [8] W. Wan, J. Yang, J. Zeng, L. Yao, and T. Qiu, "Effect of solid loading on gelcasting of silica ceramics using DMAA," *Ceram. Int.*, vol. 40, no. 1 PART B, pp. 1735–1740, 2014.
- [9] W. Wan, J. Yang, J. Zeng, L. Yao, and T. Qiu, "Aqueous gelcasting of silica ceramics using DMAA," *Ceram. Int.*, pp. 1–6, 2013.
- [10] W. Wan, J. Yang, J. Zeng, and T. Qiu, "Gelcasting of fused silica glass using a low-toxicity monomer DMAA," *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 379, pp. 229–234, 2013.
- [11] W. Wan, J. Yang, and T. Qiu, "Study on Gelcasting of Fused Silica Glass Using Glutinous Rice Flour as Binder," *Appl. Glas. Sci.*, vol. 9, pp. 1–9, 2014.
- [12] W. E. I. Wan, C. Huang, J. Yang, and J. Zeng, "Effect of Sintering Temperature on the Properties of Fused Silica Ceramics Prepared by Gelcasting," *Electron. Mater.*, vol. 43, no. 7, pp. 2566–2572, 2014.
- [13] C. G. Sun, J. Y. Niu, H. J. Li, Q. Lian, H. J. Yu, and F. F. Zhang, "Gelcasting of Fused Quartz Crucible with Large Scale," *Key Engineering Materials*, vol. 512–515, pp. 399–402, 2012.
- [14] R. Manivannan, A. Kumar, and C.