فصلنامه‌ی علمی پژوهشی

علم و مهندسی سرامیک

دوره‌ی ۵، شماره‌ی ۱، بهار ۱۳۹۵

بررسی تاثیر زمان و دمای زینتر بر رفتار تبلور و ریزساختار قطعات سیلیس ذوبی شکل داده شده به روش ریخته‌گری ژلی

مریم صفیاری، حسین سرپولکی*، حسین قصاعی، 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

کلید واژه:

سیلیس ذوبی، ریخته گری ژلی، بلورینگی

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 ریزساختار، 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 به‌مدت ۵ ساعت به‌دست آمد. در این دما چگالی، تخلخل و جذب آب قطعات به ترتیب برابر ۱/۹۵ g/cm^3، ۱۰/۴۷ ٪ و ۵/۸۳ ٪ است.

۱- مقدمه

سیلیس ذوبی ماده‌ی آمورف است که به دلیل دارا بودن خواص و کاربرد ویژه خود در زمره محصولاتی 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 بی‌همتاست[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 (۰/۲-۰/۵٪) این امکان را فراهم

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-11-02]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1395.5.1.1.1]

می‌آورد که بتوان قطعات بزرگی را بدون تاب برداشتگی 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 [۴-۳].

ریخته‌گری ژلی سیلیس ذوبی روشی جدید برای ساخت قطعات است که در چند دهه‌ی اخیر بسیار مورد توجه بوده است[۱۶-۵] 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 طریق 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.

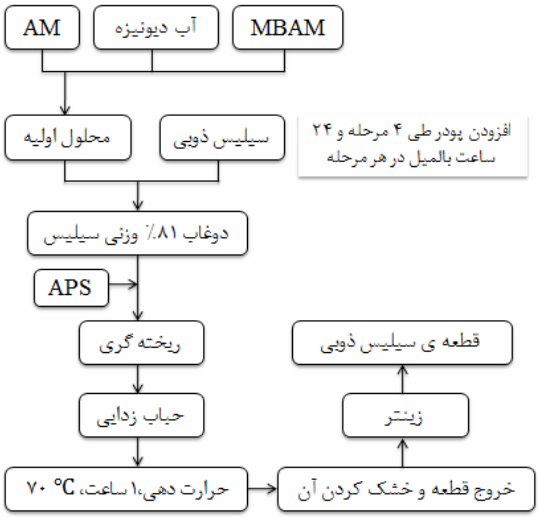
۲-۲- آماده‌سازی دوغاب و ساخت قطعات

مطابق با آنچه که در فلوچارت شکل ۱ مشاهده می‌شود ابتدا pH در محدوده‌ی ۴-۳ 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 کاملا یکنواخت در دوغاب پخش شود. سپس دوغاب درون قالب آلومینیومی آندایز

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-11-02]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1395.5.1.1.1]

شده، ریخته‌گری می‌شود. برای حباب‌زدایی، قالب حاوی دوغاب به مدت ۱۰ دقیقه تحت خلا قرار می‌گیرد. سپس درون آون با دمای ۷۰ 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 کاملا خشک شوند.



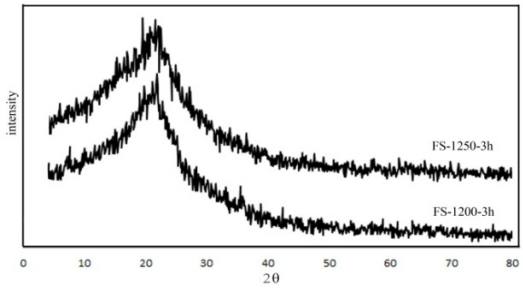
شکل ۱- مراحل ساخت قطعات سیلیس ذوبی به‌روش ریخته‌گری ژلی

زینتر قطعات در کوره‌ی آذر Azar k2L۱۵۰۰ صورت می‌گیرد. ابتدا قطعات با سرعت ۵ درجه بر دقیقه به دمای ۶۵۰°C برده شده و نیم ساعت در این دما نگه داشته می‌شوند تا تمام مواد آلی از بدنه خارج شوند. سپس با سرعت ۱۰ 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.

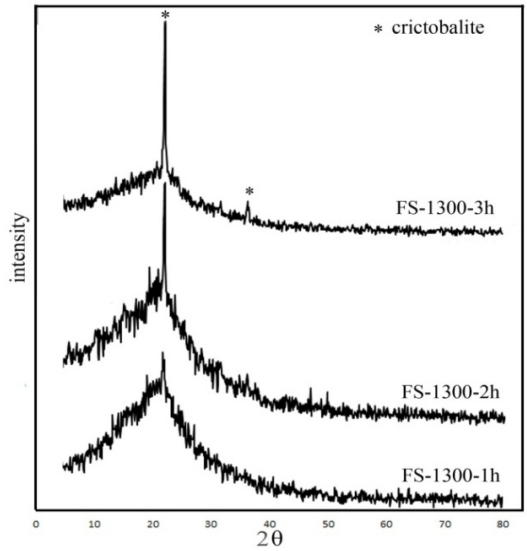
برای بهینه کردن زینتر دماهای ۱۲۰۰، ۱۲۵۰، ۱۲۷۵، ۱۳۰۰ و ۱۳۵۰°C در مدت زمان ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ ساعت انتخاب شدند. کلیه نمونه‌ها بر اساس دما و زمان نام‌گذاری شدند.

۳- نتایج و بحث

در اولین گام، قطعات زینتر شده در دماها و زمان‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. بر اساس نتایج موجود در شکل۲ هیچ فاز بلورینی در نمونه‌های FS-1200-3h و FS-1250-3h مشاهده نمی‌شود، اما شکل‌های ۳ نشان می‌دهد که با افزایش دما به ۱۳۰۰°C فاز بلورین کریستوبالیت پدیدار می‌شود. همچنین با افزایش زمان زینتر از یک تا سه ساعت شدت پیک فاز بلورین افزایش چشمگیری دارد.



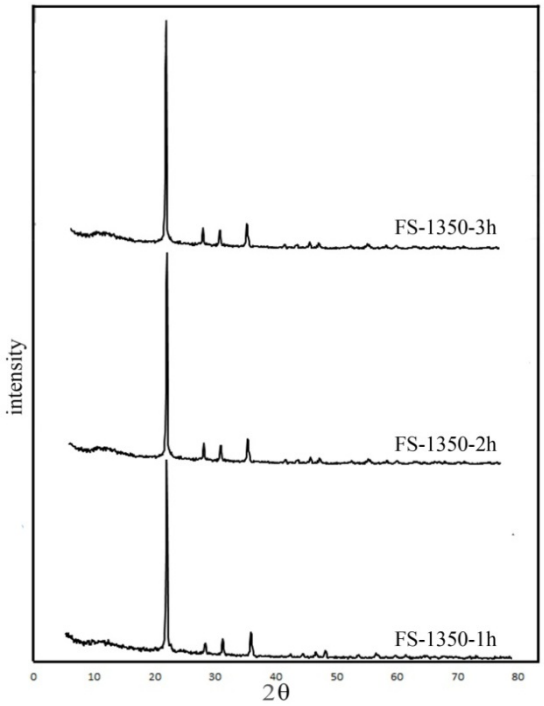
شکل ۲- الگوی پراش اشعه ایکس نمونه‌های FS-1200-3h و FS-1250-3h



شکل ۳- الگوی پراش اشعه ایکس نمونه‌های زینتر شده در دمای ۱۳۰۰°C

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-11-02]
[DOR: 20.1001.1.23222352.1395.5.1.1.1]

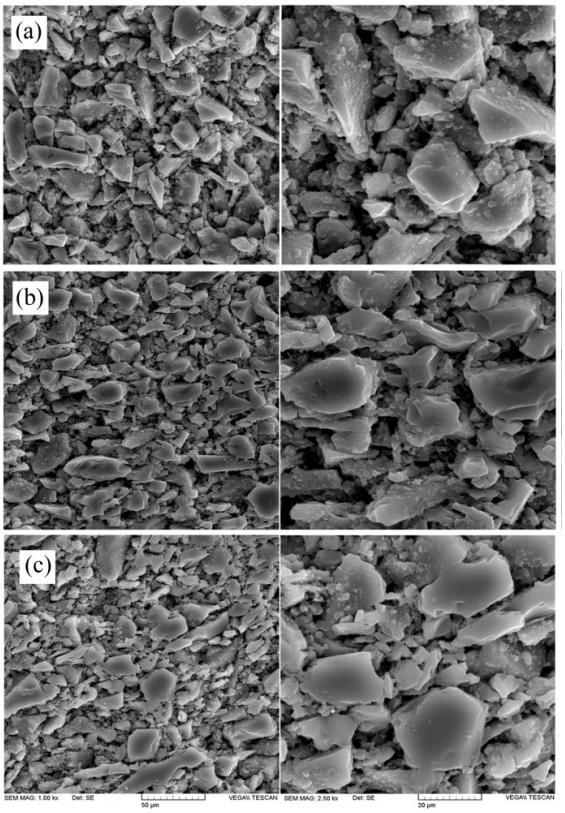
با فزایش دمای زینتر بـه ۱۳۵۰°C فـاز بلـورین در قطعـات مشاهده می‌شود (شکل ۴) و با افزایش دما، بر شـدت تبلـور افزوده شده است. هم‌چنین در این دما با افزایش زمان شدت تبلور نیـز افـزایش مـی‌یابـد بـه‌گونـه‌ای کـه پدیـدار شـدن پیک‌های کم شـدت کریـستوبالیت در الگـوی پـراش اشـعه ایکس نشانگر افزایش شدیدتر مقدار فاز بلورین است.



شکل ۴- الگوی پراش اشعه ایکس نمونه‌های زینتر شده در دمای ۱۳۵۰°C

تصاویر ریزساختاری نمونه‌هـای زینتـر شـده در ۱۲۰۰°C در زمان‌های یک تا سـه سـاعت در شـکل ۵ نـشان داده شـده است. نتایج نشان می‌دهد که بعد از گذشـت سـه سـاعت در دمای ۱۲۰۰°C، ذرات کاملا جدا از هم بوده و اتـصالی بـین آن‌ها رخ نداده است. دما به‌گونه‌ای پایین است کـه از ایجـاد یک شبکه‌ی به‌هم پیوسته، جلوگیری کرده است.

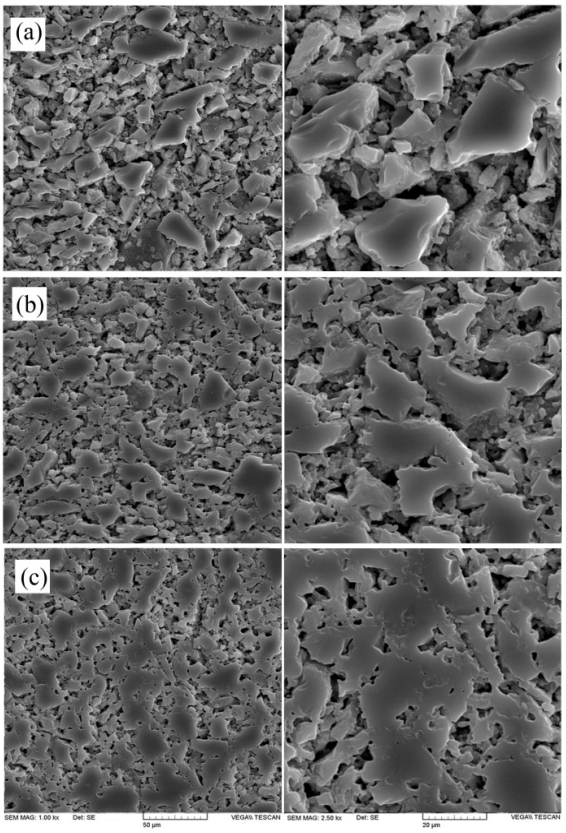
سوزدالتسف[۱۹] ضمن بررسی فرایند زینتـر سـیلیس ذوبـی بیان می‌کند که در دماهـای کـم‌تـر از ۱۱۷۵°C اکتیویتـه‌ی زینتر بسیار کم است و با افزایش دما، صـرف‌نظـر از میـزان تخلخل اولیه در نمونه، زینتـر بـه طـور محـسوسی افـزایش می‌یابد. به همین علت است که در دمای ۱۲۰۰°C پیشرفتی قابل توجهی در زینتر نمونه‌ها مشاهده نشده است. اما انتظار می‌رود با افزایش دما و زمان، زینتر بهبود می‌یابد.



شکل ۵- تصاویر SEM نمونه‌های زینتر شده در دمای ۱۲۰۰°C (a) ۱، (b) ۲ و (c) ۳ ساعت

با افزایش دما به ۱۲۵۰°C شرایط کمی بهتر می‌شود. چنانچـه در شکل۶ مشاهده می‌شود که با افزایش دما سیلان ناروان بیش‌تـر شده و اتصال بین ذرات بعد از ۳ساعت کاملا برقرار شـده اسـت. ولی با این وجود هنوز تخلخل‌های قابل توجهی در نمونـه وجـود داشته و فرصتی برای بسته شدن آن‌ها فراهم نشده است.

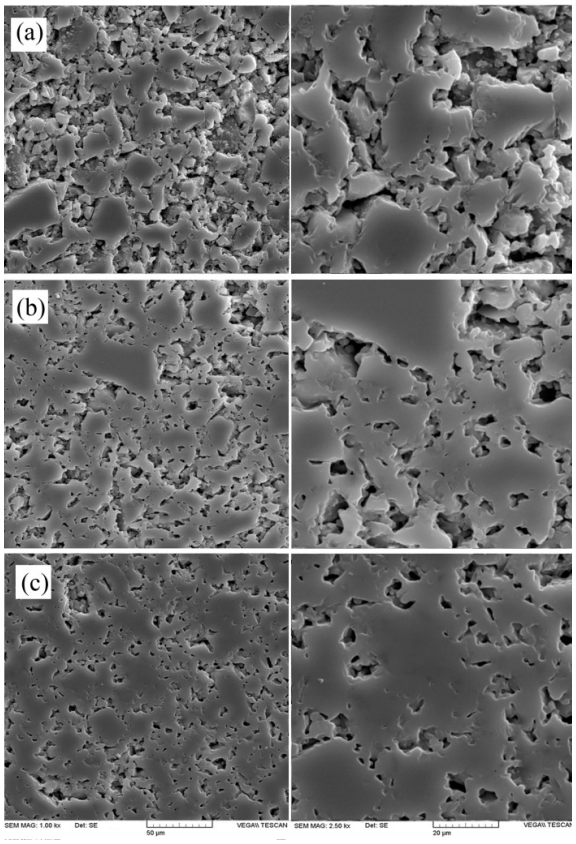
[Downloaded from ijcse.ir on 2025-11-02]
[DOR: 20.1001.1.23222352.1395.5.1.1.1]



شکل ۶- تصاویر SEM نمونه‌های زینتر شده در دمای ۱۲۵۰°C (a)۱، (b)۲ و (c)۳ ساعت

با افزایش دما به ۱۳۰۰°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 ۱۳۰۰°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 ۱۳۵۰°C (شکل۴) به خوبی تقابل بین متراکم شدن[1] و تبلور را در نمونه‌های سیلیس ذوبی نشان می‌دهد. به نحوی که برای دستیابی به بدنه‌ی کاملا 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 [۱۸و۱۹]



شکل ۷- تصاویر SEM نمونه‌های زینتر شده در دمای ۱۳۰۰°C (a)۱، (b)۲ و (c)۳ ساعت

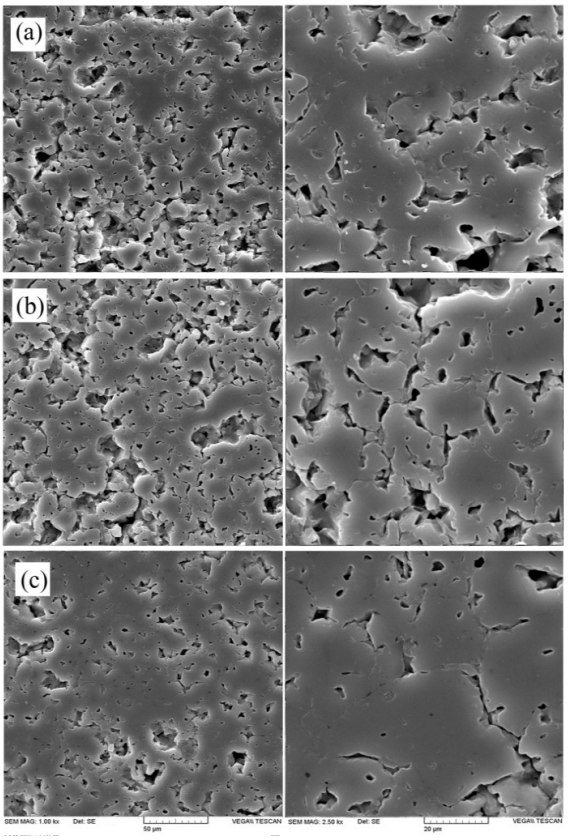
در جدول ۱ چگالی، تخلخل و جذب آب نمونه های زینتر شده در دماهای ۱۲۰۰، ۱۲۵۰، ۱۳۰۰ و ۱۳۵۰°C ارائه شده است. چگالی کلی نمونه‌ها با افزایش دما و زمان زینتر، پیوسته افزایش می‌یابد به‌گونه‌ای که مقدار آن از ۱/۶۴ به

[1] densification

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-11-02]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1395.5.1.1.1]

۲/۰۵ گرم بر سانتیمتر مکعب در نمونه‌هایی که به ترتیب در ۱۲۰۰°C درجه سانتیگراد به مدت یک‌ساعت و ۱۳۵۰°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 ۱۳۵۰°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، 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.

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

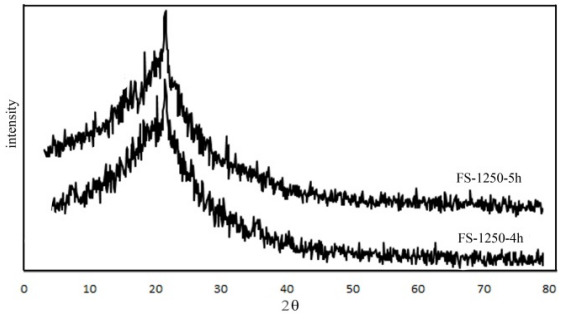
نام نمونه	خواص		
	جذب آب	تخلخل	چگالی
FS-1200-1h	۱۶/۹۴	۲۷/۷۸	۱/۶۴
FS-1200-2h	۱۵/۶۲	۲۵/۶۴	۱/۷۰
FS-1200-3h	۱۲/۵	۲۲/۲۲	۱/۷۷
FS-1250-1h	۱۳/۵۸	۲۲/۹۲	۱/۶۹
FS-1250-2h	۱۱/۱۴	۱۹/۱۸	۱/۷۸
FS-1250-3h	۱۰/۷	۱۷/۹۴	۱/۸۶
FS-1300-1h	۹/۵۹	۱۷/۵۲	۱/۸۲
FS-1300-2h	۸/۵۳	۱۴/۳۸	۱/۹۱
FS-1300-3h	۵/۳۴	۱۰/۵۳	۱/۹۴
FS-1350-1h	۴/۹۳	۱۱/۱۱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

از آن‌جایی که در دمای ۱۲۵۰°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 ۱۲۵۰ و ۱۳۰۰°C، امکان رسیدن به نمونه‌ی بهینه سنجیده شود. همان‌طور که انتظار می‌رفت نتایج الگوی پراش اشعه‌ی ایکس نمونه‌های زینتر شده در دمای ۱۲۵۰°C (شکل۹) 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].

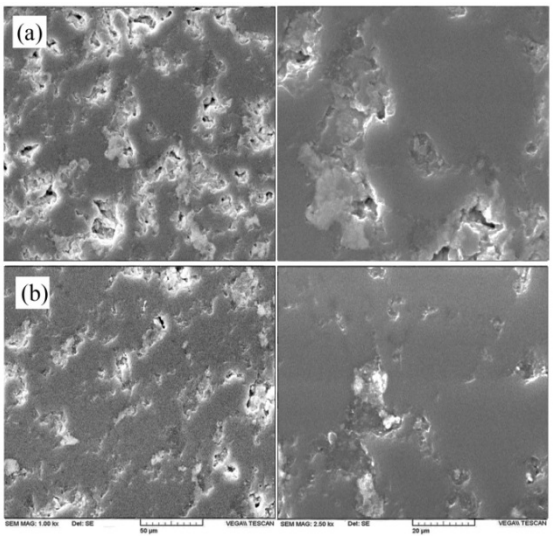
به‌منظور بررسی تاثیر مقادیر کم افزایش دما بر کیفیت محصول ساخته شده، الگوی پراش اشعه‌ی ایکس

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-11-02]
[DOR: 20.1001.1.23222352.1395.5.1.1.1]

نمونه‌های زینتر شده در دمای ۱۲۷۵°C (شکل۱۱) 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.

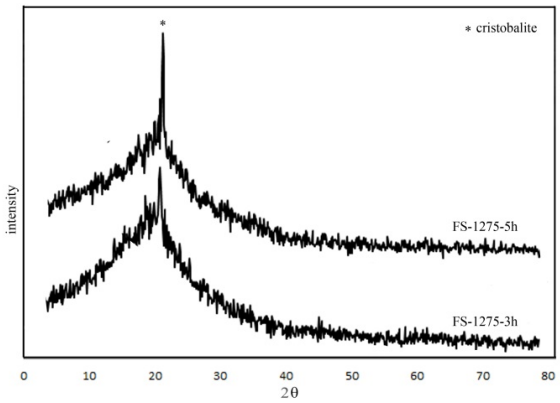


شکل ۹- الگوی پراش اشعه ایکس نمونه‌های زینتر شده در دمای ۱۲۵۰°C به مدت ۴ و ۵

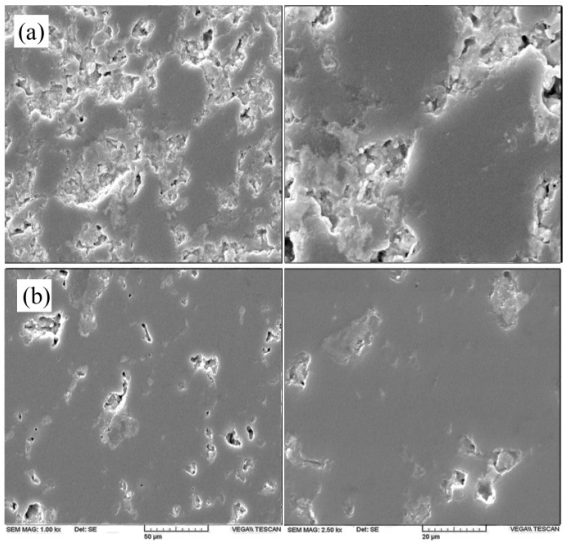


شکل ۱۰- تصاویر SEM نمونه‌های زینتر شده در دمای ۱۲۵۰°C (a)۴، (b)۵ ساعت

از مقایسه‌ی تصاویر ریزساختاری مربوط به نمونه‌های FS-1250-4h و FS-1275-3h 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 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 ۱۲۷۵°C به مدت ۳ و ۵ ساعت



شکل ۱۲- تصاویر SEM نمونه‌های زینتر شده در دمای ۱۲۷۵°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

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-11-02]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1395.5.1.1.1]

مربوط به نمونه‌ها را توجیه می‌کند. زمان ۵ ساعت برای زینتر باعث دستیابی به چگالی بالای ۱/۹۵ g/cm^3 و تخلخل ۱۰ درصدی می‌شود.

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

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

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 ۱۲۵۰°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 ۱۲۷۵ درجه سانتیگراد و زمان زینتر ۵ ساعت بیشتریم چگالی نمونه‌ها ۱/۷۵ گرم بر سانتیمتر مکعب به‌دست 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 نمونه ها در در دمای ۱۲۰۰°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 تاثیری مشابه با دما دارد اما در دماهای کمتر از ۱۲۷۵°C این تاثیر مشهود نیست. در صورتی که با افزایش دما به ۱۳۰۰ و ۱۳۵۰°C، افزایش زمان به طور محسوسی باعث تشدید تبلور می‌شود.

۴- نمونه‌های زینتر شده در دمای ۱۲۵۰°C به مدت ۵ ساعت دارای کم‌ترین فاز کریستوبالیت و بیش‌ترین چگالی هستند. به‌طوری که چگالی، تخلخل و جذب آب آن‌ها به ترتیب برابر ۱/۹۵g/cm^3، ۱۰/۴۷٪ و ۵/۸۳٪ 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,"

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-11-02]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1395.5.1.1.1]

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. 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. andS. Y. L. J. Y. Ding, C.K. Yin, "preparation of quartz crucible via gel-casting proscess," 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.

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-11-02]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1395.5.1.1.1]