

# مقایسه اثر دما و میزان سیلیکون کاربید بر خواص و ریزساختار شیشه‌های اسفنجی حاصل از ضایعات شیشه سودالایم و شیشه پانل تلویزیون

مینا سعیدی حیدری<sup>۱</sup>، سکینه عباسی<sup>۲</sup>، سید محمد میر کاظمی<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران،

۲- دانشجوی دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران،

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

\* mirkazemi@iust.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۰/۱۴، تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۳/۲۷

## چکیده

در این مقاله، تأثیر دما و میزان عامل اسفنجی کننده (سیلیکون کاربید) بر خواص و ریزساختار شیشه‌های اسفنجی حاصل از ضایعات پانل نمایشگر لوله اشعه کاتدی و ضایعات شیشه‌های سودالایم مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور، ابتدا پودر هر یک از دو شیشه ذکر شده با اندازه ذرات کمتر از ۶۳ میکرومتر تهیه شده و سپس پودر سیلیکون کاربید با مقادیر مختلف (۲، ۴، ۶ و ۸ درصد وزنی) به آن‌ها افزوده شد. پودرهای حاصل تحت فشار پرس تک محوره قرار گرفته و سپس در محدوده دمایی ۱۰۵۰-۷۵۰ درجه سانتی گراد با برنامه پخت ثابت، سینتر گردیدند. برای بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها، آزمون‌های تعیین دانسیته، تخلخل سنجی و استحکام خمشی انجام گرفت. همچنین برای مطالعه ریزساختار نمونه‌ها، تصاویر میکروسکوپی آن‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه شد. نتایج حاصل از نمونه‌ها نشان داد که سیلیکون کاربید، امکان کنترل ریزساختار شیشه‌های اسفنجی در رسیدن به اندازه حفرات ریز با توزیع نسبتاً باریک را می‌دهد. نمونه حاوی شیشه سودالایم و ۴ درصد وزنی سیلیکون کاربید که در دمای ۸۵۰ درجه سانتی گراد فوم شده بود، دارای بیشترین میزان تخلخل (۹۰٪) و استحکام خمشی معادل ۰/۵۷ مگاپاسکال بود اما ریزساختار درشت و نامتقارن داشت. در مورد شیشه پانل و ۶ درصد وزنی سیلیکون کاربید که در دمای ۹۵۰ درجه سانتی گراد سینتر شده بود، بیشترین میزان تخلخل حدود ۵۵ درصد و استحکام خمشی ۱۲ مگاپاسکال بود که ریزساختار نسبتاً یکنواختی داشت. این خواص نسبت به خواص نمونه‌های تجاری، بهبود قابل ملاحظه‌ای یافته است.

## واژه‌های کلیدی:

شیشه‌ی اسفنجی، ضایعات شیشه سودالایم و پانل، سیلیکون کاربید (SiC)، تخلخل

## ۱- مقدمه

خام را کاهش داده و منجر به حفظ زیبایی مناطق اطراف شهرها می‌گردد [۱]. یکی از راهکارهای استفاده‌ی مجدد از این شیشه‌ها، تولید شیشه‌های اسفنجی است. شیشه‌های اسفنجی به

سالانه ده‌ها میلیون تن شیشه‌های ضایعاتی در سراسر دنیا تولید می‌شود. استفاده از این شیشه‌ها سبب ذخیره صدها هزار تن ماده خام اولیه در هر سال می‌شود که این کار نیاز به استخراج ماده

کننده، اندازه ذرات شیشه اولیه و عامل اسفنجی کننده، دمای فرایند، سرعت گرمایش و سرمایش می‌باشد [۱۲]. در تحقیق حاضر، با استفاده از عامل اسفنجی کننده سیلیکون کاربید و با در نظر گرفتن اندازه ذرات ثابت شیشه اولیه و سیلیکون کاربید و سرعت گرمایش و سرمایش ثابت، اثر تغییر دمای فرایند در ساخت شیشه اسفنجی با استفاده از دو ترکیب متفاوت شیشه، شیشه سودالایم و شیشه پانل تلویزیون‌های CRT، بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی انجام شد.

## ۲- مواد و روش تحقیق

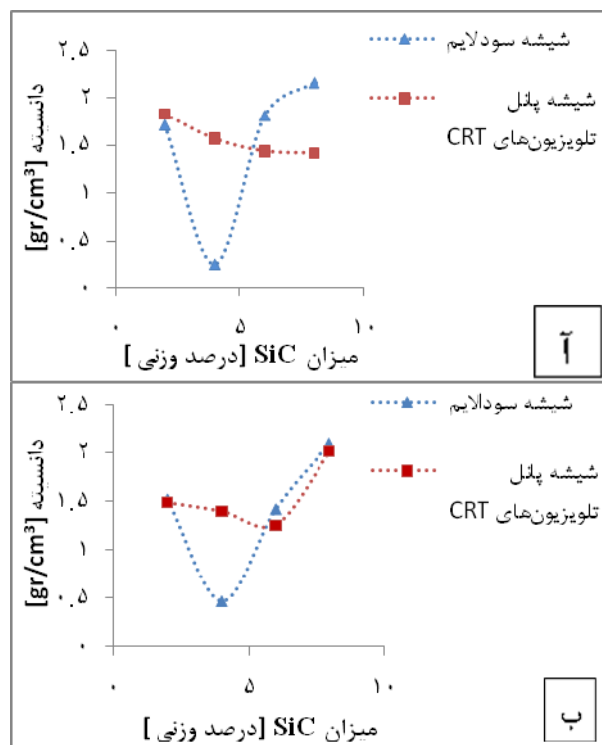
برای تهیه نمونه‌ها از شیشه‌های پانل تلویزیون رنگی و سودالایم استفاده شد. اندازه دانه شیشه‌های مورد استفاده بین ۶۳ - ۵۳ میکرومتر بود. ترکیب این دو شیشه در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی شیشه‌های استفاده شده در تحقیق (درصد وزنی)

ترکیب	سودالایم	پانل
SiO <sub>2</sub>	۷۱/۹۳	۶۰/۷
Na <sub>2</sub> O	۱۱/۴۴	۷/۵۰
K <sub>2</sub> O	۰/۴۱۴	۶/۹۰
CaO	۱۰/۲۱	۰/۱
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱/۵۱	۱/۷۰
ZrO <sub>2</sub>	۰/۰۰۸	۵/۵۰
TiO <sub>2</sub>	۰/۱۶۱	۰/۵۵
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۲۴۸	۰/۰۵
ZnO	-	۰/۲۰
SrO	-	۸/۶۰
BaO	-	۹/۹۰
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	۰/۴۵
PbO	-	۰/۰۱
SO <sub>3</sub>	۰/۱۵	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۰/۰۷	-
Cl	۰/۰۶	-
MgO	۷۴/۳	-

علت ساختمان اسفنجی خود، در میان انواع شیشه‌ها خواص منحصر به فردی دارند. سبکی، سختی و صلبی<sup>۱</sup>، مقاومت فشاری بالا، مقاومت در برابر آب و بخار آب، عایق حرارتی و صوتی بودن، غیر قابل اشتعال، غیر سمی و از نظر شیمیایی خنثی بودن از جمله این خواص هستند. مهم‌ترین این خواص، عایق حرارتی و صوتی بودن می‌باشد. خاصیت فوق در یک لایه با ضخامت ۵ سانتی‌متر از شیشه اسفنجی با یک آجر عایق به ضخامت ۴۵-۵۰ سانتی‌متر برابری می‌کند [۲-۳]. از انواع شیشه‌های ضایعاتی، مخصوصاً شیشه‌های پنجره و بطری (سودالایم)، شیشه‌های لوله‌های اشعه کاتدی<sup>۲</sup> (مانند صفحه نمایش تلویزیون و کامپیوتر)، شیشه‌های بوروسیلیکاتی صنایع شیمیایی و شیشه لامپ‌های فلورسنت می‌توان جهت ساخت شیشه اسفنجی استفاده نمود. در این بین استفاده مجدد از ضایعات شیشه‌های سودالایم به علت درصد بالای آن‌ها در ایران و شیشه‌های تلویزیون لوله‌های اشعه کاتدی به علت درصد بالای سرب، اکسیدهای باریوم و استرانسیم در آن‌ها بسیار مورد توجه است [۳-۷]. مؤثرترین روش جهت ساخت شیشه اسفنجی، مخلوط نمودن ضایعات شیشه‌ای آسیاب شده به همراه یک عامل اسفنجی کننده است. عوامل اسفنجی کننده رایج شامل کربن یا مواد کربناتی می‌باشد. طبق نتایج سایر محققان معمولاً افزودن عوامل اسفنجی کننده پایه کربناتی مانند دولومیت، کربنات سدیم و کربنات کلسیم و یا پایه کربنی مانند کربن آمورف و گرافیت باعث ایجاد تخلخل‌های درشت و ناهمگن، و توزیع نامناسب تخلخل‌ها و در نهایت افت شدید استحکام مکانیکی شیشه‌های اسفنجی می‌شود [۸]. در مقابل، افزودن عوامل اسفنجی کننده‌ی دیگر مانند TiN، Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>، AlN و SiC (سیلیکون کاربید) باعث ایجاد تخلخل‌های نسبتاً همگن با اندازه حفرات کوچک و توزیع اندازه ذرات نسبتاً باریک شده و در نهایت خواص مکانیکی بهبود می‌یابد [۹-۱۱]. خواص نهایی شیشه‌های اسفنجی، همچون استحکام مکانیکی و هدایت حرارتی، شدیداً وابسته به ریزساختار آن‌ها می‌باشد. در ضمن ریزساختار این شیشه‌ها نیز وابسته به نوع و ترکیب شیشه استفاده شده، نوع عامل اسفنجی

حاصل از شیشه‌های پانل نمایشگر لوله اشعه کاتدی (CRT) و شیشه‌های سودالایم بر حسب مقادیر مختلف سیلیکون کاربرد در دماهای ۸۵۰ و ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد آورده شده است. لازم به ذکر است که در نمونه‌های سینتر شده حاصل از هر دو نوع شیشه، در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد، میزان تخلخل کمتر از ۵ درصد بود و به عبارتی این سری از نمونه‌ها کاملاً سینتر شده بودند. به نظر می‌رسد که دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد برای تجزیه سیلیکون کاربرد و تبدیل آن به CO یا CO<sub>2</sub> کافی نمی‌باشد. زیرا در اتمسفر اکسیدی سیلیکون کاربرد در حدود ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد شروع به اکسید شدن می‌کند که سرعت اکسیداسیون با افزایش دما افزایش می‌یابد. نمونه‌های سینتر شده در ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد نیز بسیار ترد بودند.



شکل (۱): نمودار تغییرات دانسیته نمونه‌های شیشه‌ی اسفنجی حاصل از شیشه‌های پانل تلویزیون‌های CRT و شیشه‌های سودالایم بر حسب مقادیر مختلف سیلیکون کاربرد در دماهای: (آ) ۸۵۰ و (ب) ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد.

دلیل غیر قابل قبول بودن این دو دما این است که در صورتی که دمای فوم شدن شیشه خیلی بالا انتخاب شود، ویسکوزیته مذاب

به هر یک از این پودرها درصدهای متفاوتی از پودر تجاری سیلیکون کاربرد (۲، ۴، ۶ و ۸ درصد وزنی) با اندازه ذرات ۴۵ میکرومتر اضافه شد. سپس به مخلوط این پودرها، به میزان ۳ درصد وزنی چسب (PVA) و ۵ درصد وزنی آب اضافه شده و پس از نگهداری به مدت ۲۴ ساعت، تحت فشار پرس تک محوره به میزان ۷۵ bar قرار گرفت. ابعاد نمونه‌های اولیه طبق استاندارد ASTM D790، با ابعاد ۱۲×۲/۵×۱ cm<sup>3</sup> ساخته شدند. در هر یک از دماهای ۷۵۰، ۸۵۰، ۹۵۰ و ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد، چهار نمونه به مدت یک ساعت و با سرعت حرارت دهی ۱۰ °C/min در کوره‌ی آترا سینتر شدند. سرمایش نمونه‌ها در کوره بسیار کمتر از سرعت گرمایش پودر اولیه در نظر گرفته شد که به علت استحکام کمتر فوم نسبت به شیشه می‌باشد. برای تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها، آزمایش‌های دانسیته (نسبت جرم به واحد حجم)، تخلخل سنجی و استحکام خمشی صورت گرفت. به منظور اندازه‌گیری درصد تخلخل، از رابطه‌ی (۱) استفاده شد که در آن دانسیته‌ی پیکنومتری با استفاده از رابطه‌ی (۲) به دست می‌آید. در این رابطه دانسیته‌ی پیکنومتری، a وزن پیکنومتر، b وزن پیکنومتر و پودر شیشه، c وزن پیکنومتر و پودر شیشه و آب و d وزن پیکنومتر و آب می‌باشد.

$$(1) \times 100 = ((\text{دانسیته پیکنومتری} / \text{دانسیته بالک}) - 1) \times \text{درصد تخلخل}$$

$$d_p = (b-a) / [(d-a) - (c-b)] \quad (2)$$

استحکام خمشی سه نقطه‌ای نمونه‌ها با استفاده از دستگاه صنعتی سرام (ساخت ایران) اندازه‌گیری شد. سرعت اعمال نیرو ۲۰ cm/min و فاصله‌ی فک‌های دستگاه ۱۰ سانتی‌متر بود. به منظور بررسی ریزساختار نمونه‌ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۳</sup> با قابلیت بزرگنمایی ۳۰۰۰۰ برابر (TESCAN model VEGA, 30KV) بهره گرفته شد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- خواص فیزیکی و مکانیکی

در شکل (۱)، نمودار تغییرات دانسیته نمونه‌های شیشه‌ی اسفنجی

می باشد. در این پدیده، حفره‌های کوچک به نفع حفره‌های بزرگ‌تر از بین می‌روند و انرژی سطحی سیستم کاهش می‌یابد، دیواره‌ی حفرات ضخیم‌تر شده و دانسیته افزایش می‌یابد [۱۶].

به بیان دیگر در حین خروج گاز، دانسیته به طور مداوم تا کمترین مقدار کاهش می‌یابد. پس از پایان این مرحله، یک فرایند تدریجی تخریب و در هم ریختگی اسفنج به سبب پیوستن حفرات به یکدیگر آغاز می‌شود. بنابراین سطح انرژی سیستم با کاهش سطح ویژه‌ی دیواره‌ی حفرات کاهش می‌یابد. این فرایند منجر به افزایش دانسیته و کاهش درصد تخلخل می‌شود [۱۷]. می‌توان گفت، علت افزایش دانسیته در نمونه حاصل از شیشه پانل به اضافه ۸ درصد وزنی سیلیکون کاربید و در دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد، همین پدیده درشت شدن می‌باشد.

همچنین براساس شکل (۱-آ و ب)، مشاهده می‌شود که با افزایش دما از ۸۵۰ به ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد، روند مشابهی در منحنی‌های دانسیته مربوط به شیشه اسفنجی سودالایم صورت گرفته است، عبارتی در هر دو دمای مذکور، با افزایش درصد سیلیکون کاربید تا ۴ درصد وزنی دانسیته کاهش یافته ولی با افزایش بیشتر سیلیکون کاربید افزایش دانسیته رخ داده است. با این حال برای نمونه‌های حاصل از شیشه‌های پانل رفتاری متفاوت مشاهده می‌شود، به طوری که با افزایش دما به ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد، با افزودن تا ۶ درصد وزنی سیلیکون کاربید، دانسیته به طور پیوسته کاهش می‌یابد اما در مقادیر بیشتر افزایش ناگهانی رخ می‌دهد. به علاوه، براساس شکل (۱-ب)، در دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد دو شیشه‌ی پانل و سودالایم، به جز در ترکیب حاوی ۴ درصد وزنی سیلیکون کاربید، رفتار مشابهی داشته‌اند، که این موضوع در نمونه‌های تهیه شده در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد دیده نمی‌شود.

شکل (۲)، درصد تخلخل نمونه‌های شیشه‌ی اسفنجی حاصل از شیشه‌های پانل نمایشگر لوله اشعه کاتدی (CRT) و شیشه‌های سودالایم بر حسب مقادیر مختلف سیلیکون کاربید را در دماهای ۸۵۰ و ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد.

خیلی کم شده و کنترل ریزساختار مشکل می‌شود، زیرا حباب‌ها به بالای قالب صعود می‌کنند و در نتیجه میزان تخلخل‌ها زیاد و توزیع آن‌ها در شیشه اسفنجی نهایی غیریکنواخت خواهد شد. در مقابل، اگر دما خیلی پایین باشد، ویسکوزیته مذاب خیلی زیاد شده، انبساط گاز مشکل می‌شود و افزایش اندکی در حجم رخ می‌دهد که منجر به ایجاد تخلخل‌های کمتر در ریزساختار می‌شود [۱۳]. به این ترتیب نمونه‌های مربوط به این دو دما مورد بحث قرار نگرفتند.

دماهای سینتر نمونه‌ها، بالاتر از دمای نرم شوندگی شیشه‌های CRT و سودالایم انتخاب شدند، به این دلیل که اکسیژن بتواند به آسانی وارد سیستم شده و در نتیجه سیلیکون کاربید به راحتی قادر به اکسید شدن باشد. به علاوه اگر تولید گاز در دماهای زیر نقطه نرم شوندگی رخ دهد، شیشه سینتر نشده، تخلخل‌ها بسته نمی‌شوند و شیشه نرم شده نمی‌تواند محصولات گازی را داخل خود نگه دارد.

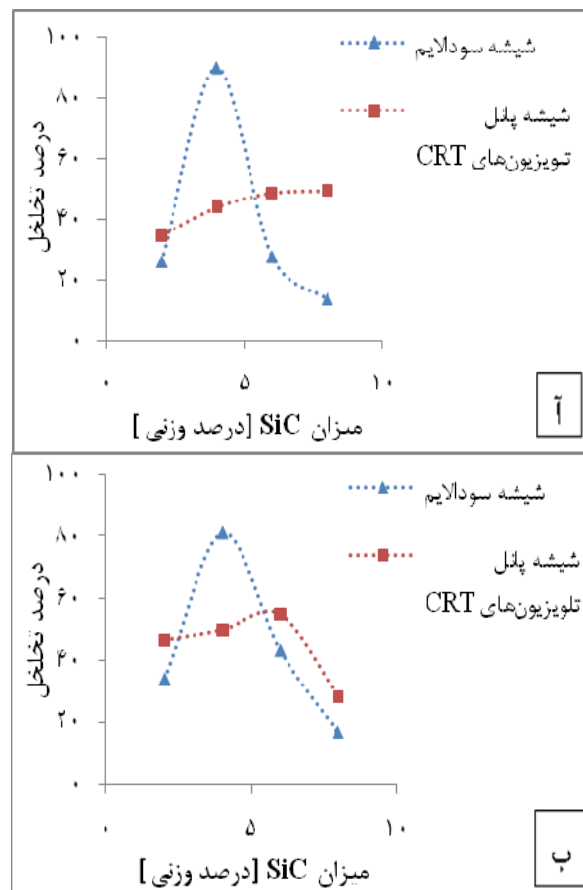
همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، نمودار تغییرات دانسیته دو شیشه‌ی پانل و سودالایم بسیار متفاوت است. در شیشه‌های اسفنجی حاوی شیشه پانل که در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد سینتر شده‌اند، با افزایش میزان سیلیکون کاربید، دانسیته به طور پیوسته کاهش یافته است، ولی در نمونه‌های حاوی شیشه سودالایم ابتدا دانسیته به مقدار زیاد کاهش یافته و سپس به شدت افزایش یافته است. تفاوت موجود در ترکیب شیمیایی دو شیشه‌ی پانل و سودالایم موجب می‌گردد که رفتار سینترینگ این دو شیشه متفاوت باشد. زیرا، دمای انتقال به شیشه و دمای نرم شوندگی شیشه‌های پانل و سودالایم برای شیشه پانل به ترتیب حدود ۵۲۰ و ۵۹۰ درجه سانتی‌گراد و برای شیشه‌های سودالایم نیز به ترتیب حدود ۵۶۴ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد است [۱۴ - ۱۵]. به این ترتیب ویسکوزیته شیشه‌ی پانل در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد کمتر از شیشه سودالایم بوده و در نتیجه خروج حجم بیشتری از گاز، منجر به کاهش پیوسته دانسیته شده است. از طرفی، عدم کاهش پیوسته دانسیته در نمونه‌های حاوی شیشه سودالایم به دلیل پدیده‌ی درشت شدن ساختار اسفنجی

نمونه‌های حاصل از ۶ درصد وزنی سیلیکون کاربرد حاصل شده است.

بنابراین با افزایش دمای سینتر، میزان سیلیکون کاربرد مورد نیاز برای رسیدن به حداقل دانسیته و در نتیجه حداکثر میزان تخلخل کاهش می‌یابد و افزودن مقادیر بیشتر سیلیکون کاربرد منجر به کاهش دانسیته‌ی نمونه‌ی شیشه‌ی اسفنجی نمی‌شود. این تغییرات را می‌توان اینگونه توضیح داد که با افزایش دما، سرعت و میزان اکسیداسیون سیلیکون کاربرد افزایش یافته و مقدار اکسیژن مورد نیاز برای تشکیل تخلخل‌ها افزایش می‌یابد، در این صورت با مقدار کمتری از سیلیکون کاربرد، افزایش تخلخل‌ها و کاهش دانسیته صورت می‌گیرد. به علاوه می‌توان گفت، در دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد سرعت اکسیداسیون سیلیکون کاربرد بیشتر از سرعت سینتر شیشه بوده و منجر به افزایش تخلخل و کاهش دانسیته شده است.

همچنین مشاهده می‌شود که در هر دو دمای ۸۵۰ و ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد، نمونه‌های حاصل از شیشه‌های پانل به جز نمونه حاصل از ۴ درصد وزنی سیلیکون کاربرد، رفتار بهتری داشته‌اند و دارای درصد تخلخل بیشتری نسبت به نمونه‌های حاصل از شیشه سودالایم می‌باشند. با این حال در نمونه حاصل از شیشه‌های سودالایم و ۴ درصد وزنی سیلیکون کاربرد، بیشترین میزان تخلخل به دست آمده است، که این میزان تخلخل قابل مقایسه با نمونه‌های تجاری شیشه‌های اسفنجی است.

در جدول (۲)، استحکام خمشی نمونه‌های شیشه‌ی اسفنجی حاصل از شیشه‌های پانل تلویزیون‌های CRT و شیشه‌های سودالایم بر حسب مقادیر مختلف سیلیکون کاربرد و دماهای آزمایش (آ) ۸۵۰ و (ب) ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد آورده شده است. معمولاً استحکام خمشی با دانسیته رابطه‌ای مستقیم و با درصد تخلخل رابطه‌ای معکوس دارد. در اینجا نیز، مشاهده می‌شود که استحکام نمونه‌های حاصل از شیشه‌های پانل خیلی بیشتر از نمونه‌های حاصل از شیشه سودالایم است که به علت درصد تخلخل کمتر این نمونه‌ها می‌باشد.



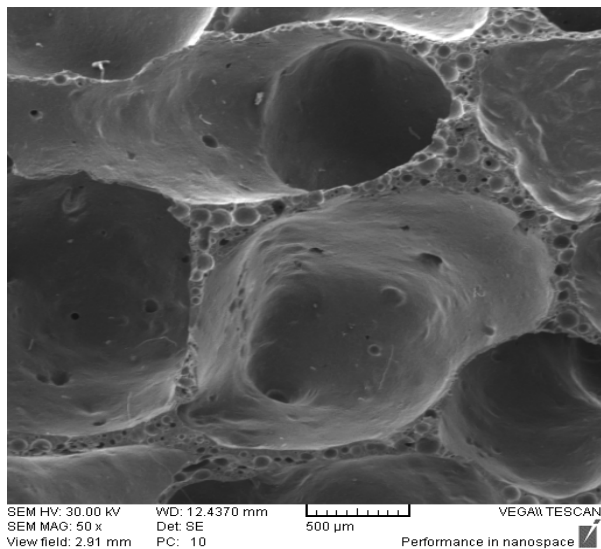
شکل (۲): نمودار درصد تخلخل نمونه‌های شیشه‌ی اسفنجی حاصل از شیشه‌های پانل تلویزیون‌های CRT و شیشه‌های سودالایم بر حسب مقادیر مختلف سیلیکون کاربرد در دماهای (آ) ۸۵۰ و (ب) ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد.

معمولاً درصد تخلخل با دانسیته رابطه‌ی معکوس دارد. در نمونه‌های حاصل از شیشه‌های پانل در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد، با افزایش سیلیکون کاربرد، دانسیته به طور پیوسته کاهش و تخلخل افزایش یافته است و به این معنی است که در این دما، با افزایش سیلیکون کاربرد پدیده‌ی درشت شدن صورت نگرفته، ولی احتمال دارد در مقادیر بیشتر سیلیکون کاربرد صورت گیرد. با این حال همانطور که ذکر شد در نمونه‌های حاوی شیشه سودالایم این پدیده رخ داده و منجر به کاهش شدید میزان تخلخل پس از افزایش بسیار آن شده است. در نمونه‌های حاصل از شیشه‌های پانل در دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد، کمترین دانسیته و بیشترین درصد تخلخل برای

در ادامه نتایج مطالعات ریزساختاری و ارتباط آن با استحکام مکانیکی نمونه‌ها مورد بحث قرار گرفته است.

### ۳-۲- تصاویر ریزساختار

در تحقیق حاضر تصاویر ریزساختاری نمونه‌هایی با تخلخل بالای ۵۰ درصد در دماهای ۸۵۰ و ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد تهیه شده است. شکل (۳)، تصویر ریزساختاری نمونه حاصل از شیشه سودالایم و ۴ درصد وزنی سیلیکون کاربرد که در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد سینتر شده است، را نشان می‌دهد. در نمونه‌ی حاصل از شیشه‌ی پانل و ۴ درصد وزنی سیلیکون کاربرد که در این دما سینتر شده است، تخلخلی کمتر از ۵۰ درصد به دست آمده و به همین علت تصویر آن آورده نشده است.



شکل (۳): تصویر SEM شیشه‌ی اسفنجی حاصل از شیشه‌های سودالایم به همراه ۴ درصد وزنی سیلیکون کاربرد و سینتر شده در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد.

شکل (۴)، تصاویر ریزساختاری نمونه‌های حاصل از شیشه‌های پانل و سودالایم به همراه ۶ درصد وزنی سیلیکون کاربرد را نشان می‌دهد که در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد سینتر شده‌اند.

جدول (۲): استحکام خمشی نمونه‌های شیشه‌ی اسفنجی حاصل از شیشه‌های پانل تلویزیون‌های CRT و شیشه‌های سودالایم بر حسب مقادیر مختلف سیلیکون کاربرد در دماهای (آ: ۸۵۰ و ب) ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد.

آ. استحکام [مگاپاسکال]		
درصد سیلیکون کاربرد	شیشه پانل تلویزیون‌های CRT	شیشه سودالایم
۴	$18.06 \pm 0.04$	$0.57 \pm 0.04$
۶	$20.42 \pm 0.04$	$2.35 \pm 0.04$

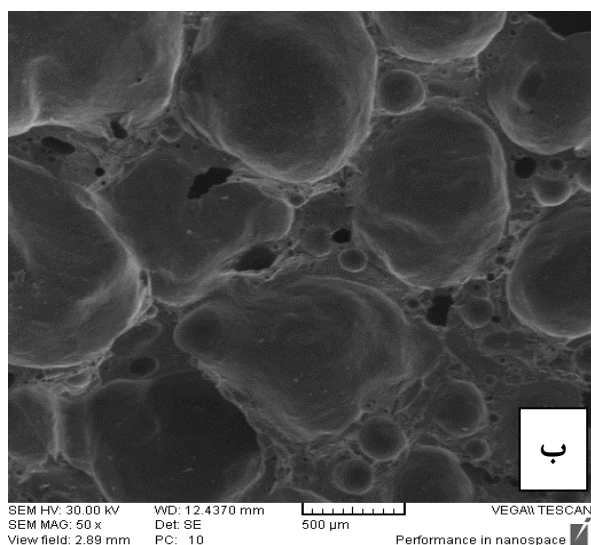
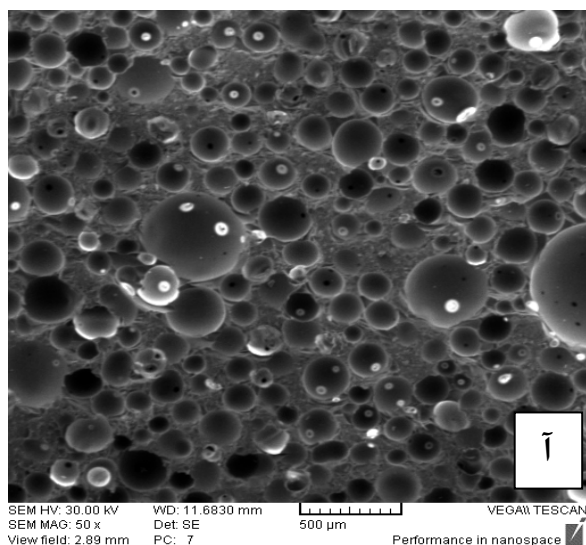
  

ب. استحکام [مگاپاسکال]		
درصد سیلیکون کاربرد	شیشه پانل تلویزیون‌های CRT	شیشه سودالایم
۴	$13.05 \pm 0.04$	$1.85 \pm 0.04$
۶	$12.16 \pm 0.04$	$1.55 \pm 0.04$

این امر به خوبی شناخته شده است که؛ مقدار تخلخل و شکل تخلخل‌ها، استحکام مکانیکی شیشه و سرامیک‌های اسفنجی را تعیین می‌کند. اندازه‌ی تخلخل‌ها و ضخامت دیواره‌های آن‌ها نیز نقش مهمی را در نتایج استحکام مکانیکی بر عهده دارد [۸]، به این علت که افزایش ضخامت دیواره‌ها سبب افزایش نقص‌های خطرناک در نمونه می‌شود [۱۸]. با درصد‌های تخلخل بالا، کاهش ضخامت دیواره‌های حفرات منجر به افزایش استحکام مکانیکی نمونه خواهد شد.

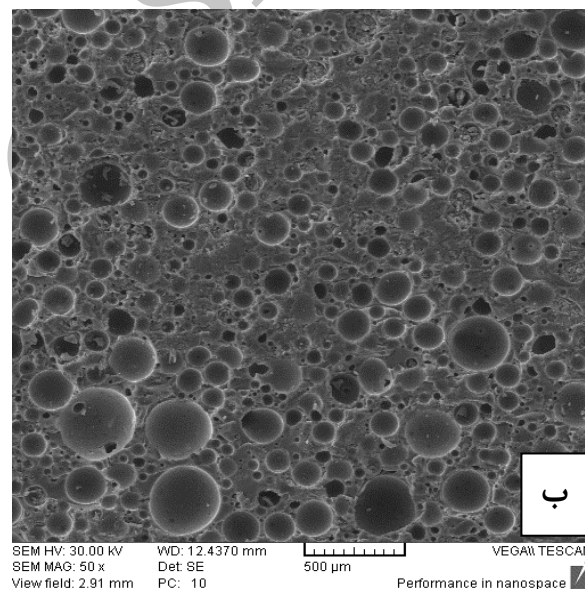
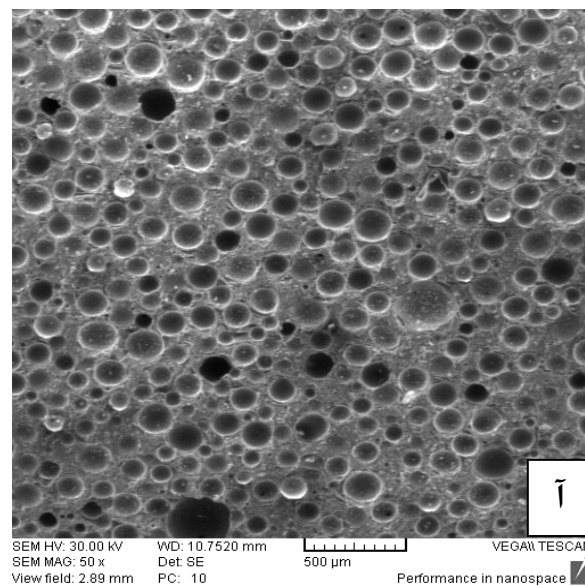
به این علت که از هم گسیختگی اسفنج‌ها در پی خمیده شدن دیواره‌ی حفرات و لبه‌ها صورت می‌گیرد و در نتیجه دیواره‌ها و لبه‌های باریک‌تر به سبب کاهش ترک‌های بحرانی احتمالی، مطلوب‌تر هستند [۱۰].

علاوه بر افزایش میزان تخلخل‌ها، به علت توزیع یکنواخت آن‌ها، نمونه حاصل دارای استحکام بسیار بالاتری است.



شکل (۵): تصویر SEM نمونه‌های شیشه‌ی اسفنجی سینتر شده در دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد و حاصل از ۴ درصد وزنی سیلیکون کاربرد به همراه: (آ) شیشه‌های پانل تلویزیون‌های CRT و (ب) شیشه‌های سودالایم.

تصاویر ۵ و ۶، ریزساختار نمونه‌های شیشه‌ی اسفنجی شامل شیشه‌های پانل و شیشه‌های سودالایم به همراه ۴ و ۶ درصد وزنی سیلیکون کاربرد را نشان می‌دهند. این نمونه‌ها در دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد سینتر شده‌اند.



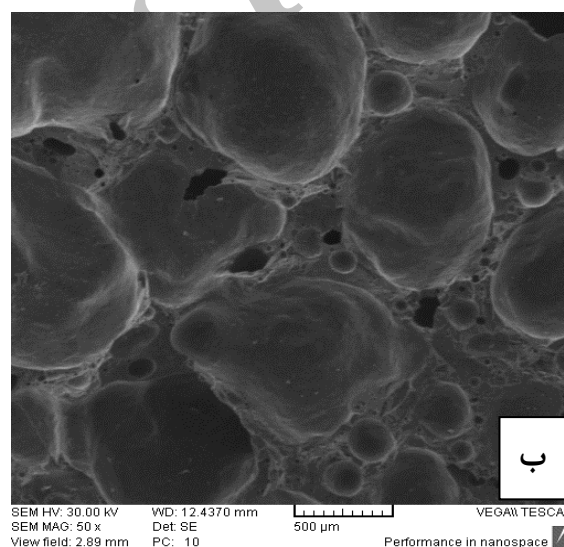
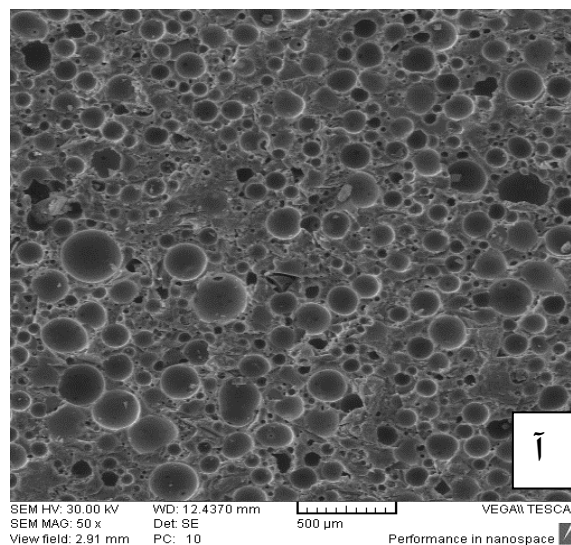
شکل (۴): تصویر SEM نمونه‌های شیشه‌ی اسفنجی سینتر شده در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد و حاصل از ۶ درصد سیلیکون کاربرد به همراه (آ) شیشه‌های پانل تلویزیون‌های CRT و (ب) شیشه‌های سودالایم.

همان‌طور که مشاهده می‌شود نمونه‌های حاصل از شیشه سودالایم رفتاری متفاوت دارند، به این معنی که با افزایش میزان سیلیکون کاربرد در این شیشه، میزان تخلخل‌ها و ابعادشان بسیار کاهش یافته است و منجر به کاهش درصد تخلخل و افزایش استحکام شده است. با این حال در نمونه حاصل از شیشه پانل

زمان ۸۵ دقیقه به دمای نهایی رسانده می‌شوند، پس زمان خروج گاز به میزان ۱۰ دقیقه بیشتر شده و درصد تخلخل افزایش می‌یابد. با این حال با افزایش دما در نمونه‌ی حاصل از شیشه سودالایم و ۴ درصد وزنی سیلیکون کاربید، میزان و ابعاد تخلخل‌ها کاهش یافته است که منجر به افزایش استحکام این نمونه نیز شده است. علت این امر سرعت بالای اکسیداسیون سیلیکون کاربید، سرعت کمتر خروج گاز و در نتیجه فرصت بیشتر برای خروج گازها در دمای بالاتر است. خروج آهسته گازها باعث ایجاد تخلخل‌های ریزتر و یکنواخت‌تر می‌شود، ولی در نمونه‌ای که در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد سینتر شده است، توزیع غیریکنواختی از تخلخل‌ها مشاهده می‌شود که به دلیل سرعت بیشتر خروج گازها نسبت به سرعت اکسیداسیون سیلیکون کاربید می‌باشد و منجر به افزایش کمی در میزان تخلخل این نمونه نسبت به نمونه سینتر شده در دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد شده است. همچنین در این نمونه حفرات ریزی در درون دیواره‌ها مشاهده می‌شود که موجب تقویت خاصیت عایق بودن شیشه اسفنجی می‌گردند. قابل ذکر است، حفرات بسته نسبت به حفرات باز در میزان خاصیت عایق بودن شیشه بسیار مؤثرتر هستند. همانطور که دیده می‌شود حفرات بسته در این نمونه بسیار زیاد می‌باشند، بنابراین شیشه اسفنجی ساخته شده با ترکیب مذکور و سینتر شده در شرایط بیان شده، عایق خوبی در برابر گرما و صوت خواهد بود.

طبق شکل ۵ و ۶، در نمونه‌های سینتر شده در دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد که حاصل از شیشه پانل و ۴ و ۶ درصد وزنی سیلیکون کاربید می‌باشند، توزیع اندازه تخلخل‌ها تقریباً یکسان بوده و در نتیجه در داده‌های استحکام خمشی تفاوت زیادی دیده نمی‌شود (تقریباً ۲ مگاپاسکال). به علاوه با افزایش درصد سیلیکون کاربید، تغییر قابل ملاحظه‌ای در میزان و اندازه‌ی تخلخل‌ها رخ نداده و در نتیجه اختلاف ناچیزی در درصد تخلخل مشاهده می‌شود (۵٪).

در مجموع ابعاد تخلخل‌ها در نمونه‌ی شیشه اسفنجی حاصل از شیشه پانل بسیار کوچکتر از نمونه‌های حاصل از شیشه سودالایم



شکل (۶): تصویر SEM نمونه‌های شیشه‌ی اسفنجی سینتر شده در دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد و حاصل از ۶ درصد وزنی سیلیکون کاربید به همراه شیشه‌های پانل تلویزیون‌های CRT و (ب) شیشه‌های سودالایم.

همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش دمای سینتر به ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد، در هر دو شیشه‌ی پانل و سودالایم، میزان تخلخل افزایش یافته است، چنین تفاوتی در مقایسه با نمونه‌های سینتر شده در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد، به این علت است که چون سرعت گرمایش نمونه‌ها در هر دو دما یکسان است، نمونه‌های سینتر شده در ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد، در مدت زمان ۹۵ دقیقه و نمونه‌های سینتر شده در ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد، مدت



- [4] K. Ravindra, C. L. Mukesh, D. Thomas, "Recycling and Reuse Of Glass Cullet", pp. 124-130, Thomas. Telford Publishing, London, 2001.
- [5] G. Jeremy, A. Elisa, K. Randolph, "Characterizing Sustainable Material Recovery System: a Case Study of E-Waste Materials", *J. Miner. Met. Mater. Soc.*, 2007.
- [6] S. Roy, M. Junk, S. Sundar, "Understanding the Porosity Dependence of Heat Flux Through Glass Fiber Insulation", *Math. Comput. Model*, Vol. 43, pp. 485-492, 2006.
- [7] M. Wiśniewska, S. Chibowski, T. Urban, "The Temperature Influence on the Adsorption and Electrokinetical Properties in the Nonionic Polymer/Controlled Porosity Glass (CPG) System", *Mater. Chem. Phys.*, Vol. 103, pp. 216-221, 2007.
- [8] H.R. Fernandes, D.U. Tulyaganov, J.M.F. Ferreira, "Preparation and Characterization of Foams from Sheet Glass and Fly Ash using Carbonates as Foaming Agents", *Ceram. Int.*, Vol. 35, pp. 229-235, 2009.
- [9] P.G. Yot, F.O. Méar, "Lead Extraction from Waste Funnel Cathode-Ray Tubes Glasses by Reaction with Silicon Carbide and Titanium Nitride", *Hazard. Mater*, Vol. 172, pp. 117-123, 2009.
- [10] P.G. Yot, F.O. Méar, "Characterization of Lead, Barium and Strontium Leachability from Foam Glasses Elaborated using Waste Cathode Ray-Tube Glasses", *Hazard. Mater*, Vol. 185, pp. 236-241, 2011.
- [11] A.S. Llaudis, M.J.O. Tari, F.J.G. Ten, E. Bernardo, P. Colombo, "Foaming of Flat Glass Cullet using  $Si_3N_4$  and  $MnO_2$  Powders", *Ceram. Int.*, Vol. 35, pp. 1953-1959, 2009.
- [12] S.A. Christian, "Foam Glass Production from Vitrified Municipal Waste Fly Ashes", Ph.D Thesis, pp. 91-169, 2006.
- [13] M.C. Limbachiya, J.J. Roberts, "Sustainable Waste Management and Recycling: Glass Waste", Thomas. Telford Publishing, London, 2004.
- [14] J.T. Littleton, "The Effect of Temperature Treatment on Glass to Metal Seals", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 18, pp. 239, 1935.
- [15] E. Bernardo, F. Albertini, "Glass Foams from Dismantled Cathode Ray Tubes", *Ceram. Int.*, Vol. 32, pp. 603-608, 2006.
- [16] F. Méar, P. Yot, R. Viennois, M. Ribes, "Mechanical Behaviour and Thermal and Electrical Properties of Foam Glass", *Ceram. Int.*, Vol. 33, pp. 543-550, 2007.
- [17] M. Scheffler, P. Colombo, "Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications", Wiley-VCH, Weinheim, Germany, pp. 161-174, 2005.
- [18] E. Bernardo, R. Cedro, M. Florean, S.Hreglich, "Reutilization and Stabilization of Wastes by the Production of Glass Foams", *Ceram. Int.*, Vol. 33, pp. 963-968, 2007.

بوده که این امر افزایش بیش از اندازه استحکام را در نمونه‌های حاصل از شیشه پانل تأیید می‌کند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

۱- امکان ساخت شیشه‌های اسفنجی با ریزساختار و خواص فیزیکی و مکانیکی مناسب و قابل مقایسه با نمونه‌های تجاری وجود دارد.

۲- سیلیکون کاربرد عامل اسفنجی‌کننده‌ی بسیار مناسبی برای ساخت شیشه‌های اسفنجی حاصل از ضایعات پانل CRT و شیشه‌های سودالایم است.

۳- ابعاد تخلخل‌ها در نمونه‌های شیشه اسفنجی پانل بسیار کوچکتر از نمونه‌های شیشه اسفنجی سودالایم بوده که این امر منجر به افزایش بیش از اندازه استحکام در نمونه‌های حاصل از شیشه پانل شده است.

۴- با افزودن ۴ درصد وزنی سیلیکون کاربرد به پودر شیشه سودالایم، شیشه متخلخل با توزیع یکنواختی از اندازه تخلخل‌ها و درصد تخلخلی در حدود ۹۰ درصد حاصل شد که در حد نمونه‌های تجاری است.

۵- با افزایش دما از ۸۵۰ به ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد، روند مشابهی در منحنی‌های دانسیته و درصد تخلخل مربوط به شیشه اسفنجی سودالایم صورت گرفته است، در حالی که در شیشه‌های اسفنجی پانل رفتاری متفاوت مشاهده می‌شود، که به علت تفاوت موجود در ترکیب شیمیایی این دو شیشه است.

#### ۵- مراجع

- [1] R. Lebullenger, S. Chenu, J. Rocherullé, O. Merdignac-Conanec, F. Chevire, F. Tessier, A. Bouzaza, S. Brosillon, "Glass Foams for Environmental Applications", *Non-Crystal. Solids*, Vol. 356, pp. 2562-2568, 2010.
- [2] M. Chen, F.S. Khang, J. Zhu, "Effective Utilization of Waste Cathode Ray Tube Glass-Crystalline Silicotitanate Synthesis", *Hazard. Mater*, Vol. 182, pp. 45-49, 2010.
- [3] N. Gupta, R. Ye, M. Porfiri, "Comparison of Tensile and Compressive Characteristics of Vinyl Ester/Glass Microballoon Syntactic Foams", *Composites Part B*, Vol. 41, pp. 236-245, 2010.

۶- پی نوشت

- 1- Rigid
- 2- Cathode Ray Tube (CRT)
- 3- Scanning Electron Microscopy (SEM)

Archive of SID