

بررسی تاثیر TiO_2 بر استحکام الکتریکی مقره‌های پرسیلانی سیلیسی

سمیه نوبری^۱، سعید کاویانی^۲

^۱ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه، ^۲ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

Somayeh.nobari@yahoo.com

چکیده: پرسیلان‌ها به علت استحکام الکتریکی بالا، خواص مکانیکی خوب و پایداری حرارتی و شیمیایی مناسب به عنوان مقره کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند. از بین خواص ذکر شده استحکام الکتریکی بالا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از عوامل موثر روی خواص ذکر شده می‌توان به مقدار و مورفولوژی فاز مولایت در بدنه، مقدار و ویسکوزیته‌ی فاز شیشه و مقدار کوارتز در بدنه اشاره کرد. در این تحقیق به منظور بررسی تاثیر تیتانیا بر استحکام الکتریکی مقره‌های پرسیلانی سیلیسی مقادیر ۱ تا ۷ درصد وزنی دی‌اکسید تیتانیم به بدنه اضافه شد. خواص الکتریکی نمونه‌ها طبق استاندارد IEC 672 اندازه‌گیری گردید. نمونه‌ها از لحاظ ساختاری و فازهای موجود با استفاده از پراش اشعه ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی (SEM) مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین درصد انقباض طولی، دانسیته و جذب آب نمونه‌ها محاسبه گردید. نتایج نشان داد که افزودن تیتانیا تا ۳ درصد وزنی باعث کاهش استحکام الکتریکی از ۲۶/۲۶۵ به ۲۱/۰۱۵ کیلو ولت بر میلی‌متر می‌شود. بررسی نتایج پراش اشعه X و میکروسکوپ الکترونی نمونه‌ها نشان داد که کاهش استحکام الکتریکی تا ۳ درصد وزنی تیتانیا مربوط به تشکیل بیش از حد فاز شیشه در بدنه است. پس از آن تا ۷ درصد وزنی تیتانیا در بدنه، استحکام الکتریکی به ۳۱/۳۶۱ کیلو ولت بر میلی‌متر افزایش می‌یابد. علت افزایش استحکام الکتریکی در مقادیر بالاتر تیتانیا، وجود روتایل حل نشده و همچنین افزایش دانسیته‌ی بدنه است. افزایش فاز شیشه در بدنه و حرکت راحت تر مواد در داخل فاز شیشه علت افزایش دانسیته تا $2/393(g/cm^3)$ در بدنه‌ی حاوی ۷ درصد وزنی تیتانیا و همچنین افزایش انقباض از ۷/۸۲٪ برای بدنه‌ی بدون تیتانیا به ۸/۷۹٪ برای بدنه‌ی حاوی ۷ درصد وزنی تیتانیا بود. نتایج آزمایش جذب آب نمونه‌ها نیز نشان دهنده‌ی درصد جذب آب صفر برای بدنه‌ها بود.

کلید واژه: مقره‌های پرسیلانی سیلیسی، دی‌اکسید تیتانیم، استحکام الکتریکی، دانسیته، انقباض طولی، مولایت.

۱- مقدمه

پرسیلان‌ها عایق‌های الکتریکی بسیار خوبی هستند. مقاومت زیاد در مقابل عبور جریان الکتریکی از مهمترین ویژگی‌های پرسیلان‌ها می‌باشد، این ویژگی سبب شده که از آنها به طور گسترده به عنوان مقره^۱ استفاده شود [۱ و ۲]. جنس مقره‌ها معمولاً از پرسیلان، شیشه یا کامپوزیت است. مقره‌های شیشه‌ای در مقابل ضربات مکانیکی شکننده بوده و در محیط آلوده جذب آلودگی بالایی دارند. مقره‌های کامپوزیتی نیز به علت فاصله‌ی جرقه زنی پایین و تنزل خواص با گذشت زمان چندان مناسب نیستند [۳]. در این میان پرسیلان‌ها به علت استحکام الکتریکی^۲ بالا، خواص مکانیکی خوب و پایداری حرارتی و شیمیایی مناسب به عنوان مقره کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند [۴ و ۵]. از بین خواص ذکر شده استحکام الکتریکی بالا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۵]. ریزساختار پرسیلان

¹ Insulator

² Electric strength

بیشترین تاثیر را بر روی استحکام مکانیکی و الکتریکی مفرها دارد. در ریزساختار پرسلان مقدار و مورفولوژی فاز مولایت، مقدار و ویسکوزیته‌ی فاز شیشه و مقدار کوارتز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۴]. در پرسلان‌ها میزان تخلخل، میزان فاز شیشه در بدنه از جمله عوامل موثر بر دانسیته هستند [۶]. تیتانیا باعث ایجاد فاز مایع در دمای زینتر می‌شود که این فاز نفوذ را افزایش داده و انتقال جرم واکنش‌کننده‌ها از میان آن راحت‌تر می‌شود و از این طریق دانسیته افزایش می‌یابد [۷].

در این تحقیق تاثیر دی‌اکسیدتیتانیم روی استحکام الکتریکی مفره‌های پرسلانی سیلیسی مورد بررسی قرار گرفت و تاثیر فاز مولایت، مقدار فاز شیشه و مقدار کوارتز در بدنه مورد تحلیل قرار گرفت.

۲- فعالیت‌های تجربی

در این تحقیق فرمولاسیون یک بدنه‌ی سیلیسی با کد ST0 به عنوان بدنه‌ی اولیه و اصلی در نظر گرفته شد و دی‌اکسیدتیتانیم با درصدهای مختلف جایگزین سیلیس در فرمولاسیون پایه شد. فرمولاسیون همه‌ی بدنه‌ها شامل ۱۵٪ فلدسپات پتاسیک، ۲۰٪ بالکلی آباده، ۱۰٪ بالکلی کرمان، ۱۸٪ کائولن زنون سوپر و ۱۷٪ کائولن زنون معمولی است. مقادیر سیلیس و دی‌اکسیدتیتانیم نیز برای هر بدنه طبق جدول ۱ تغییر می‌کند.

جدول ۱- فرمولاسیون بدنه‌ها (درصد وزنی)

ماده	کد بدنه	ST0	ST1	ST2	ST3	ST4	ST5	ST6	ST7
سیلیس ستیران	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	
دی‌اکسید تیتانیم	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	

آنالیز شیمیایی مواد اولیه مصرفی در جدول ۲ آورده شده است. جدول ۳ نیز آنالیز شیمیایی دی‌اکسیدتیتانیم مصرفی را نشان می‌دهد.

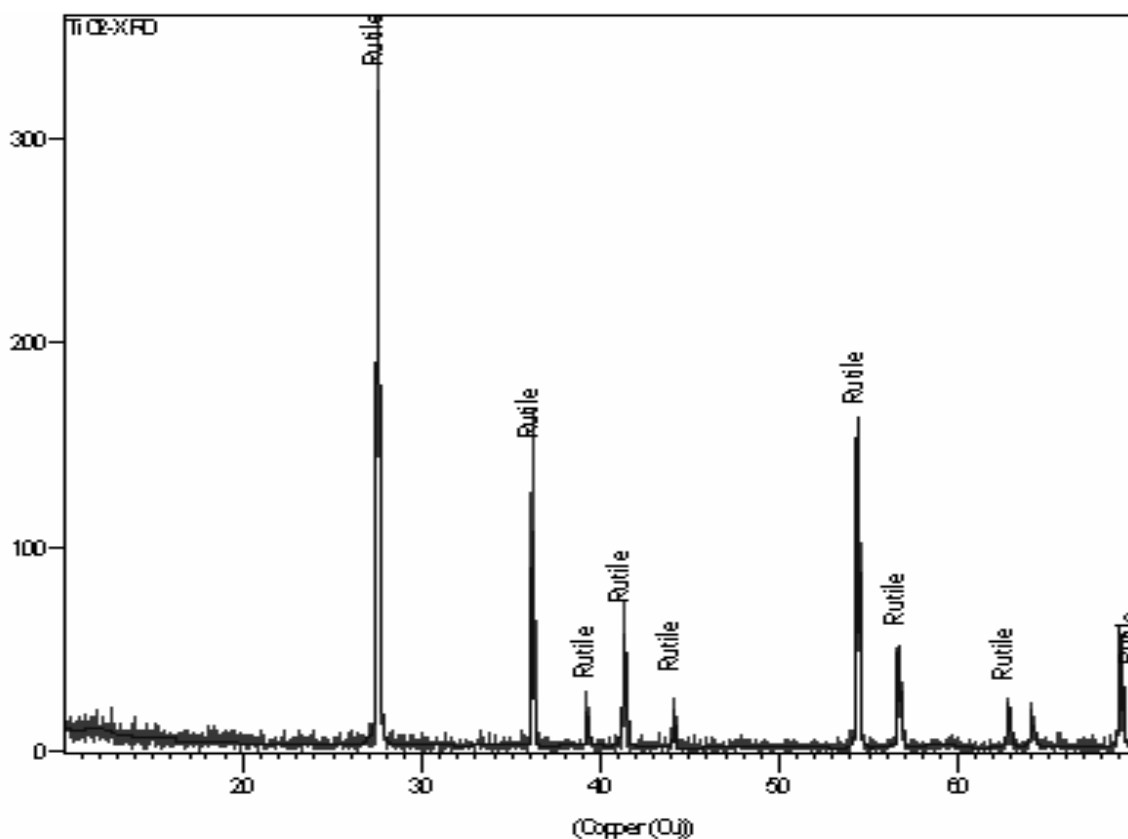
جدول ۲- آنالیز شیمیایی مواد اولیه مصرفی

ماده	درصد اکسید	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	L.O.I	Sum	مشخصه پخت
کائولن زنون سوپر	۶۰/۸۲	۲۶/۸۰	۰/۳۸	۰/۴۱	۰/۱۳	۰/۴۷	۰/۹	۰	۹/۱۱	۹۹/۶۴	کاملاً سفید	
کائولن زنون معمولی	۶۲/۸۴	۲۶/۱۷	۰/۳۸	۰/۵۶	۰/۱۷	۰/۴۷	۰/۹	۰	۹/۱۱	۹۹/۶۴	کاملاً سفید	
بالکلی آباده SPV1	۵۸/۴۶	۳۳/۲۲	۰	۰/۴۲	۰/۱۰	۰/۲۱	۱/۱	۰	۵/۵۷	۹۹/۰۸	سفید شیری	
خاک نسوز کرمان	۴۵/۲۷	۳۶/۶۲	۰	۲	۰/۱	۰/۲۸	۰/۶۱	۰/۷۷	۱۴	۹۹/۶۵	آجری	
سیلیس	۹۸/۸۸	۰	۰	۰/۱	۰	۰	۰/۲۸	۰	۰/۱	۹۹/۲۵	سفید	
فلدسپات پتاسیک	۷۲/۴۸	۱۹/۲۲	۰	۰/۳۴	۰/۱	۰/۲۸	۳/۰۶	۳/۰۶	۱/۱۱	۹۹/۶۶	کاملاً سفید	

جدول ۳- آنالیز شیمیایی دی‌اکسید تیتانیم

مشخصه پخت	Sum	Ag ₂ O	Nb ₂ O	ZrO ₂	TiO ₂	درصد اکسید
						ماده
کاملاً سفید	۱۰۰	۰/۲۵	۰/۲۰	۰/۰۷	۹۹/۴۸	دی اکسید تیتانیم

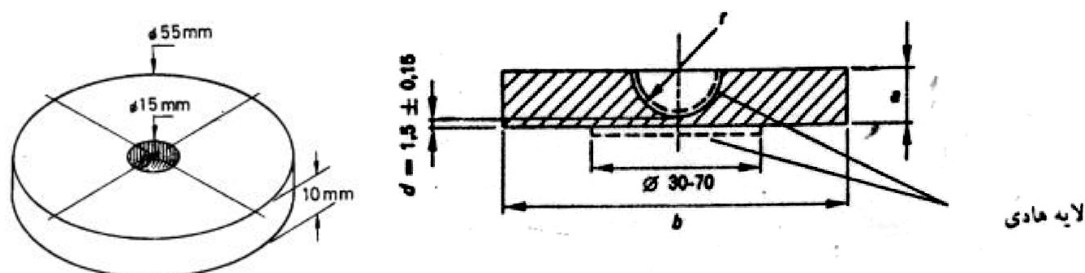
برای تشخیص ساختار کریستالی پودر دی‌اکسید تیتانیم مصرفی از آنالیز XRD استفاده شد. در شکل ۱ الگوی پراش پرتوی X پودر دی‌اکسید تیتانیم مصرفی آورده شده است که با توجه به این الگو ساختار کریستالی روتایل تشخیص داده شد.



شکل ۱- الگوی پراش پرتوی X پودر دی‌اکسید تیتانیم مصرفی

برای ساخت نمونه‌ها ابتدا مواد اولیه به صورت خشک توزین شده و طی دو مرحله در آسیاب شارژ گردید، که در مرحله اول مواد غیرپلاستیک با مقدار آب ۱/۱۵ برابر مقدار ماده خشک و زمان کارکرد ۶ ساعت و در مرحله دوم مواد پلاستیک با مقدار آب ۱/۲ برابر مقدار ماده خشک و زمان کارکرد ۱/۵ ساعت شارژ گردیدند. خواص دوغاب (وزن لیتری، دانسیته، ویسکوزیته، دما) اندازه‌گیری شد. پس از اندازه‌گیری خواص دوغاب، دوغاب جهت کاهش رطوبت به مدت حدود ۴۸ ساعت داخل قالب‌های گچی ریخته شد، سپس گل حاصل توسط چکش لاستیکی هواگیری شده و برای همگنی مناسب آن، داخل نایلون به مدت ۴۸ ساعت نگهداری شد. نمونه‌های میله‌ای با طول حدود ۱۲ سانتیمتر برای اندازه‌گیری دانسیته و درصد انقباض طولی و آزمایش جذب آب توسط اکسترودر ساخته شد. جهت تهیه نمونه‌های آزمایش استحکام الکتریکی طبق استاندارد IEC 672 ابتدا استوانه‌ای به قطر

۳۰ میلیمتر و طول ۵۰ میلیمتر توسط اکسترودر تهیه شد و این استوانه در قالب گچی پرس گردید و پس از قرارگیری در هوای آزاد به مدت ۴۸ ساعت، در خشک کن الکتریکی با دمای 110°C به مدت ۵ ساعت قرار گرفت. سطح زیرین نمونه‌ها توسط سنباده صاف شده و ضخامت گودی پولک توسط ریزسنج کنترل گردید. این ضخامت مطابق با استاندارد IEC 672 می‌تواند بین $1/75 - 1/65$ میلیمتر باشد. این ضخامت بعد از پخت نمونه‌ها به $1/65 - 1/35$ میلیمتر می‌رسد [۸]. ابعاد بعد از پخت این پولک‌ها به شرح ذیل می‌باشد [۸]:



شکل ۲- مشخصات ابعادی پولک آزمایش استحکام الکتریکی بعد از پخت [۲ و ۸]

نمونه‌ها پس از خشک شدن در خشک کن الکتریکی، به صورت یکسان در کوره تونلی طی یک سیکل $66/5$ ساعته پخت گردیدند [۸]. سپس نمونه‌ها طبق استاندارد IEC 672 داخل محفظه‌ای با مایع دی‌الکتریک با مقاومت $10^{10} - 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ بین یک الکتروود کروی برنجی و یک الکتروود تخت، تحت نیروی ۲-۴ نیوتن قرار گرفت. سپس ولتاژ اعمال و افزایش داده شد تا سوراخ شدگی یا پانچ پولک صورت گیرد و این ولتاژ یادداشت گردید. مقدار E یا استحکام الکتریکی مطابق با استاندارد IEC 672 توسط رابطه‌ی زیر محاسبه گردید [۸]:

$$E=K \times U$$

E = استحکام الکتریکی (کیلو ولت بر میلیمتر)

$$U = \text{ولتاژ پانچ}^1 \text{ (KV)}$$

$$K = \text{فاکتور تصحیح (mm}^{-1}\text{)}$$

مقدار ولتاژ پانچ باید با ضریب تصحیح K که مربوط به کمترین ضخامت از نمونه است تصحیح گردد.

برای اندازه‌گیری جذب آب بدنه از نمونه‌های میله‌ای ساخته شده استفاده شد. در ابتدا نمونه‌ها در هوای آزاد وزن شد و وزن خشک آنها یادداشت گردید، سپس نمونه‌ها به مدت ۵ ساعت در آب در حال جوش قرار داده شد. پس از ۵ ساعت نمونه‌ها از روی شعله برداشته و در هوای آزاد قرار داده شد تا سرد شود زیرا اگر نمونه‌ها داغ باشند هنگام انتقال آنها به ترازو برای توزین، آب آن بخار شده و تخلخل‌ها دوباره خالی از آب می‌شوند. پس از سرد شدن، نمونه‌ها را از آب خارج کرده و با یک ابر خیس، آب‌های اضافی سطح نمونه‌ها گرفته شد تا آب از آن نچکد؛ حال وزن اشباع آنها اندازه‌گیری و یادداشت گردید و با استفاده از رابطه‌ی زیر درصد تخلخل ظاهری بدنه‌ها محاسبه گردید.

¹ Puncture voltage

برای اندازه‌گیری وزن غوطه‌وری، نمونه به صورت آویزان و غوطه‌ور در داخل ظرف آبی که بر روی ترازو قرار داشت نگه داشته شد.

$$\%P_a = \frac{M_c - M_d}{M_c - M_w} \times 100$$

M_d = وزن قطعه در هوای آزاد

M_w = وزن قطعه غوطه‌ور در آب

M_c = وزن قطعه در حالت اشباع

سپس ریز ساختار نمونه‌ها پس از شکست نمونه، مانت و پولیش آنها و اچ نمونه‌ها در محلول ۵ درصد HF به مدت ۵۰ ثانیه مورد بررسی با SEM+EDX قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- خواص دوغاب بدنه

خواص دوغاب بدنه‌ها با مقادیر مختلف دی‌اکسیدتیتانیم اندازه‌گیری شد که نتایج آن در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴- خواص دوغاب بدنه‌ها

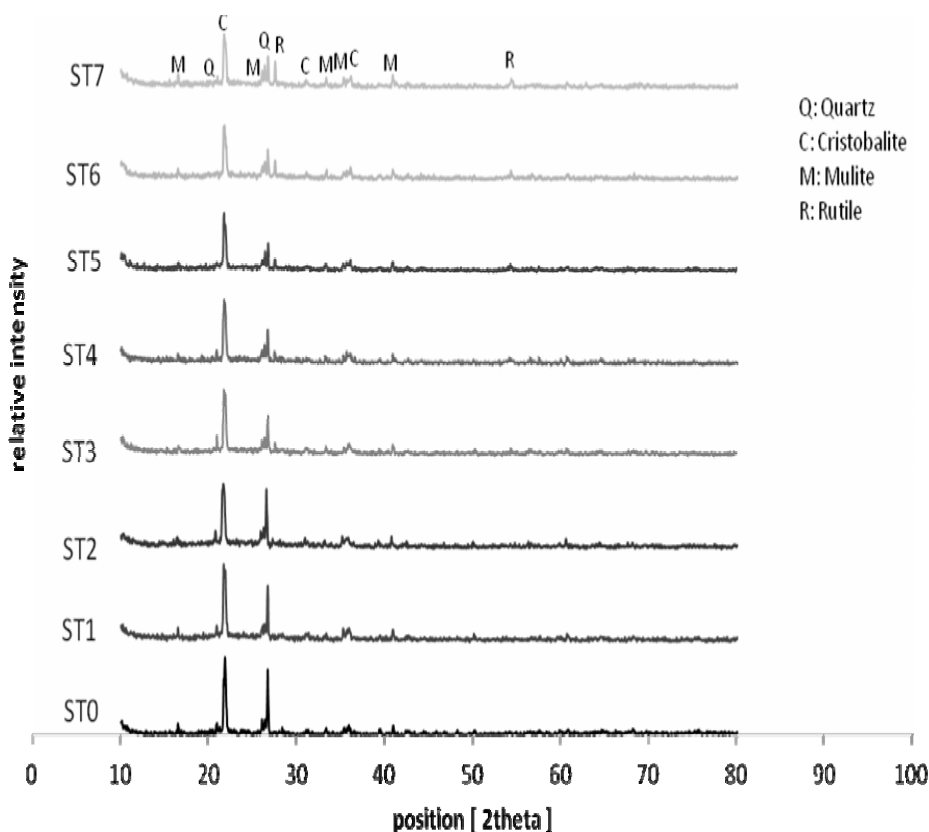
ST7	ST6	ST5	ST4	ST3	ST2	ST1	ST0	کد بدنه خواص دوغاب
۱۴۱۰	۱۴۱۰	۱۴۱۰	۱۴۱۰	۱۴۰۰	۱۴۰۰	۱۴۰۰	۱۴۰۰	وزن لیتری (Kg/Cm ³)
۱/۶۴	۱/۶۴	۱/۶۷	۱/۶۱	۱/۶۰	۱/۶۰	۱/۶۰	۱/۶۰	چگالی (g/cm ³)
-	-	-	۴۰/۰۱	۳۰/۲۵	۳۰/۱۰	۲۵/۵۰	۲۹/۵۳	ویسکوزیته (Sec)
۲۹	۲۹	۲۸	۲۸	۲۵	۲۵	۲۴	۲۴	دما (°C)

اگر چه افزایش در خواص دوغاب بدنه‌ها چشمگیر نیست اما با توجه به جدول ۴، با افزودن بیش از ۳ درصد وزنی تیتانیا، وزن لیتر اندکی افزایش یافته است. با افزایش تیتانیا ویسکوزیته نیز افزایش یافته تا جایی که در بالای ۴ درصد وزنی تیتانیا، روانی در دوغاب بدنه برای اندازه‌گیری ویسکوزیته وجود نداشت. با توجه به این که تیتانیا جایگزین سیلیس شده است و جرم مولی سیلیس ۶۰/۰۸ g/mol و جرم مولی تیتانیا ۷۹/۸۶ g/mol است، افزایش وزن لیتر و ویسکوزیته مربوط به جرم مولی بالاتر تیتانیا است. افزایش چگالی نیز با افزایش درصد تیتانیا مشاهده شد که علت آن چگالی بالاتر تیتانیا (۳/۸۴ g/cm³) در مقایسه با سیلیس (۲/۶۵ g/cm³) است.

۳-۲- بررسی‌های فازی

نتایج پراش پرتوی X بدنه‌ها در شکل ۳ آورده شده است. همان طور که از پیک‌ها قابل مشاهده است با افزودن دی‌اکسیدتیتانیم تا ۷ درصد وزنی شدت پیک کریستوبالیت و کوارتز کاهش یافته است. در کنار پیک بلند کوارتز در زاویه ۲θ نزدیک به ۳۰ درجه،

پیک مولایت نیز مشاهده می‌شود که با افزایش درصد تیتانیا شدت پیک کوارتز کاهش می‌یابد. مشاهده می‌شود که در مقادیر بالاتر از ۲ درصد وزنی دی‌اکسیدتیتانیم مقداری روتایل حل نشده در بدنه باقی مانده است که پیک آن در کنار پیک کوارتز قابل مشاهده است.

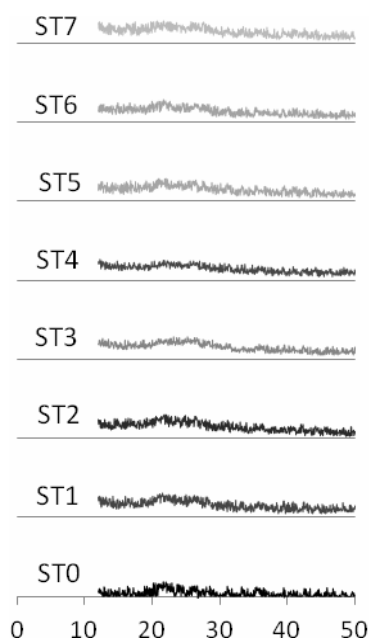


شکل ۳- مقایسه‌ی پراش پرتوی X بدنه‌های مختلف

Kimura و همکارانش نیز در بررسی خود روی تاثیر دی‌اکسیدتیتانیم بر بدنه‌ی پرسلانی، با بررسی پراش پرتوی X بدنه‌ها کاهش شدت پیک کوارتز و افزایش شدت پیک مولایت را گزارش کرده‌اند. همچنین بیان نموده‌اند که با افزایش درصد تیتانیا در بدنه‌ی پرسلانی مقداری روتایل به صورت حل نشده در بدنه باقی می‌ماند که باقی ماندن روتایل در مقادیر بالای تیتانیا توسط Montoya و همکارانش نیز گزارش شده است [۱۰۹].

۳-۳- مقایسه فاز شیشه بدنه‌ها

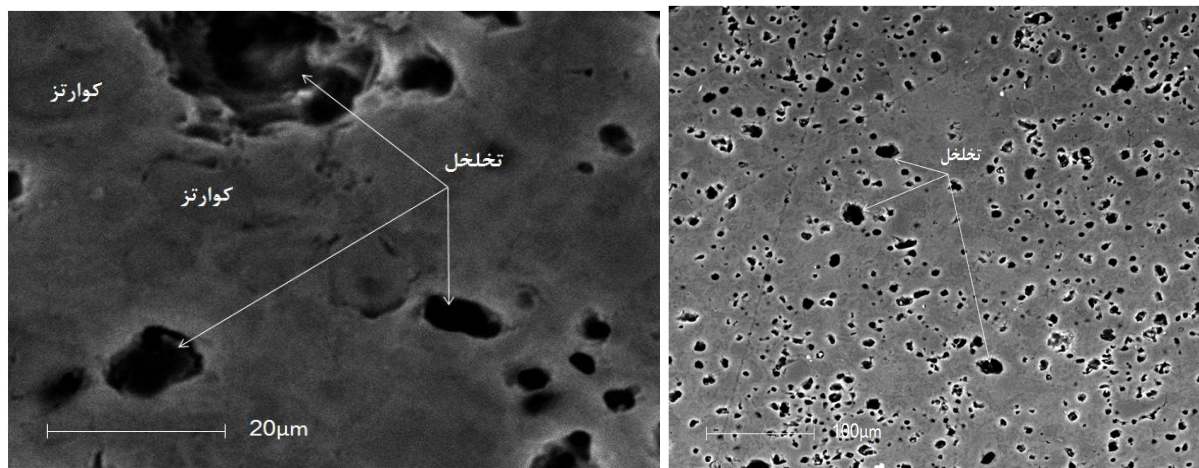
اگر چه تعیین مقدار فاز شیشه در این حد توسط پراش پرتوی X مشکل است ولی مقایسه‌ی زمینه‌ی الگوهای پراش پرتوی X که در شکل ۴ نشان داده شده است به صورت کلی بیانگر این است که: میزان فاز شیشه در بدنه‌ی ST0 (بدنه‌ی بدون دی‌اکسیدتیتانیم) در کمترین حد ممکن قرار دارد. با افزایش دی‌اکسیدتیتانیم در بدنه تا ۳ درصد وزنی، فاز شیشه در حال افزایش است و بیشترین مقدار فاز شیشه در ۳ درصد وزنی دی‌اکسیدتیتانیم به وجود آمده است. بعد از آن تا ۷ درصد وزنی دی‌اکسیدتیتانیم فاز شیشه در بدنه اندکی کاهش یافته است.



شکل ۴- مقایسه‌ی فاز شیشه‌ی بدنه‌ها

۳-۴- بررسی‌های ریزساختاری

شکل ۵ ریزساختار بدنه‌ی پرسلانی سیلیسی بدون تیتانیا را نشان می‌دهد که در این تصویر پراکندگی تخلخل‌های بسته در بستر زمینه مشاهده می‌شود. شکل ۶ با بزرگنمایی ۳۰۰۰ برابر تخلخل‌ها و همچنین ذرات حل نشده‌ی کوارتز با مساحت سطحی ۱۵/۸ میکرو متر را در زمینه نشان می‌دهد.

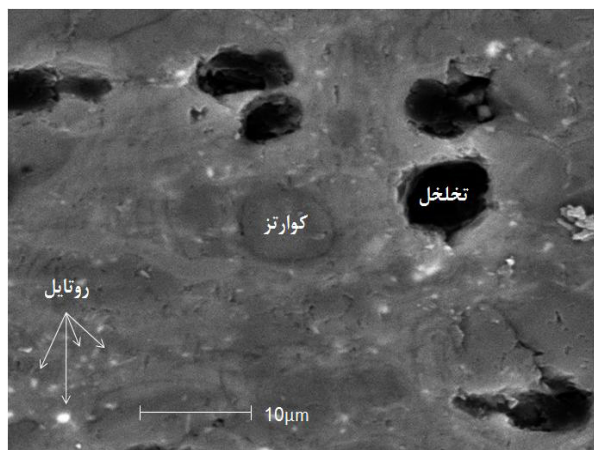


شکل ۵- تصویر SEM بدنه‌ی ST0 اچ شده به مدت ۵۰ ثانیه در محلول ۵ درصد HF با بزرگنمایی ۵۰۰ برابر
 شکل ۶- تصویر SEM بدنه‌ی ST0 اچ شده به مدت ۵۰ ثانیه در محلول ۵ درصد HF با بزرگنمایی ۳۰۰۰ برابر

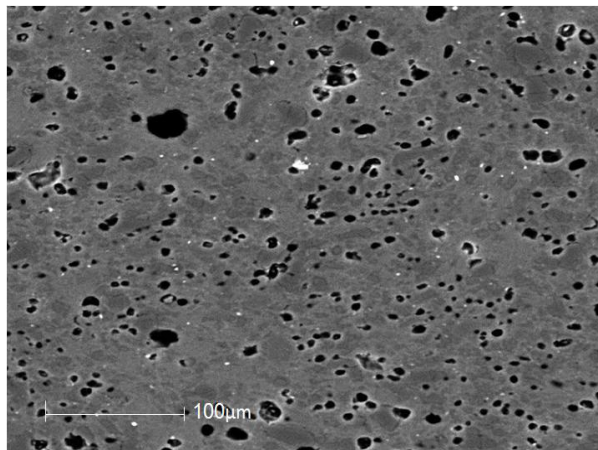
شکل ۷ و ۸ تصویر SEM بدنه حاوی ۳ درصد وزنی تیتانیا با بزرگنمایی‌های ۵۰۰ و ۵۰۰۰ برابر است. در تصویر این بدنه دانه‌های سفید رنگ روتایل حل نشده دیده می‌شود که گواهِ این ادعا آنالیز نقطه‌ای از دانه‌های سفید رنگ از بدنه ST7 و

همچنین الگوی پراش پرتوی X همین بدنه (شکل ۳) است. این الگو بیانگر وجود روتایل در بدنه‌ی حاوی ۳ درصد وزنی تیتانیا است.

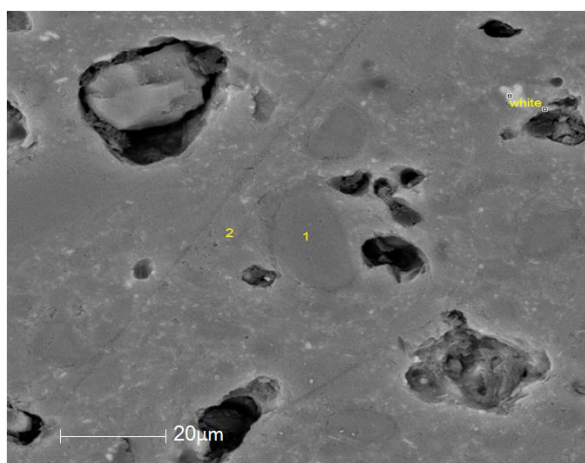
شکل ۹ ریزساختار بدنه ST7 با بزرگنمایی ۱۷۰۰۰ برابر است که در این تصویر دانه‌های سفید رنگ حل نشده‌ی روتایل به صورت وسیعی وجود دارند. فاز کریستالی مولایت تشکیل شده نیز در این شکل دیده می‌شود. شکل ۱۰ تصویر SEM بدنه حاوی ۷ درصد وزنی تیتانیا است. نقاط 1، 2 و White از این بدنه مورد بررسی نقطه‌ای قرار گرفت.



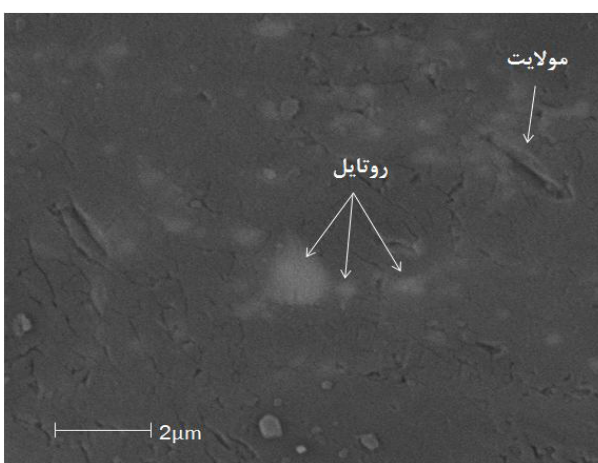
شکل ۸- تصویر SEM بدنه‌ی ST3 اچ شده به مدت ۵۰ ثانیه در محلول ۵ درصد HF با بزرگنمایی ۵۰۰۰ برابر



شکل ۷- تصویر SEM بدنه‌ی ST3 اچ شده به مدت ۵۰ ثانیه در محلول ۵ درصد HF با بزرگنمایی ۵۰۰ برابر



شکل ۱۰- تصویر SEM بدنه‌ی ST7 اچ شده به مدت ۵۰ ثانیه در محلول ۵ درصد HF با بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر



شکل ۹- تصویر SEM بدنه‌ی ST7 اچ شده به مدت ۵۰ ثانیه در محلول ۵ درصد HF با بزرگنمایی ۱۷۰۰۰ برابر

نقطه‌ی ۱، ۵۰/۲۰ درصد وزنی عنصر Si و ۴۵/۴۹ درصد وزنی عنصر O را نشان می‌دهد که آن نشان دهنده‌ی دانه‌های کوارتز در بدنه است که پیک آن در نتایج پراش پرتوی X بدنه‌ها نیز مشاهده شد. Islam و Bhattacharyya نیز به وجود کوارتز و نقش مهم آن در بدنه‌های پرسلائی سه جزئی اشاره کرده‌اند [۱۱ و ۱۲].

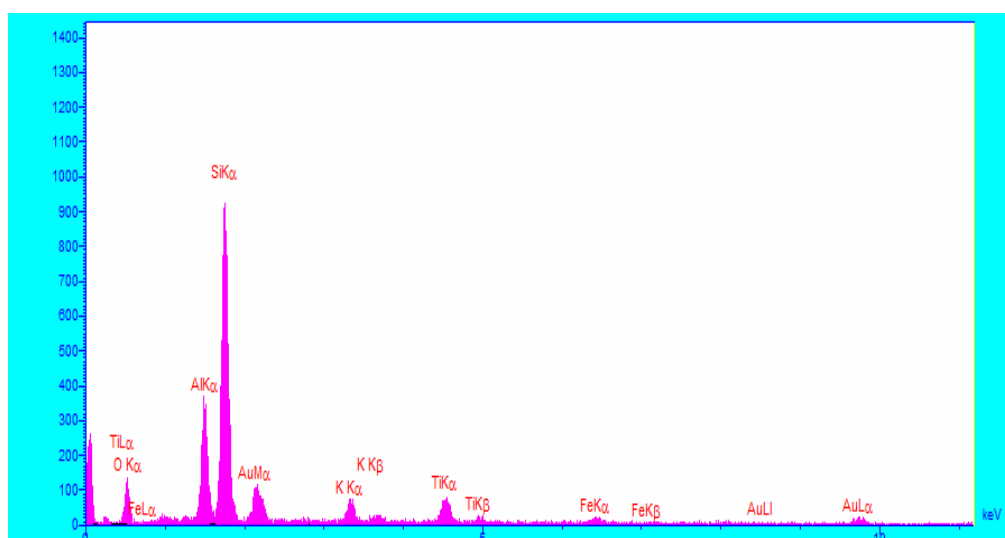


شکل ۱۱- آنالیز نقطه‌ای از بدنه‌ی ST7 (نقطه‌ی ۱)

جدول ۵- آنالیز نقطه‌ای از بدنه‌ی ST7 (نقطه‌ی ۱)

عنصر	درصد وزنی (Wt%)	درصد اتمی (At%)
O	۴۵/۴۹	۶۱/۱۱
Si	۵۰/۲۰	۳۸/۴۲
Au	۴/۳۱	۰/۴۷
جمع	۱۰۰	۱۰۰

در آنالیز نقطه‌ی ۲ بالاترین عناصر موجود Si (۶۱/۶۱ درصد وزنی) و Al (۱۷/۴۲ درصد وزنی) هستند. آنالیز نقطه‌ی ۲ نشان می‌دهد که نقاط تیره و روشن موجود در زمینه تصاویر SEM بدنه‌ها، فاز شیشه‌ی آلومینوسیلیکاتی است که در تشکیل آن گذارآورهایی مانند پتاسیم و تا حدی تیتانیوم موثر بوده‌اند.

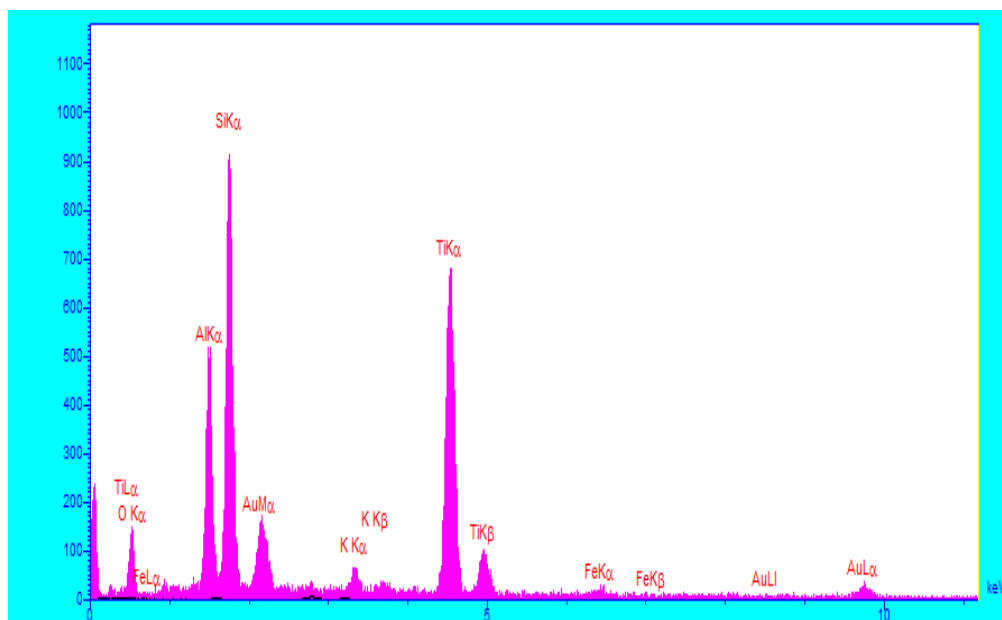


شکل ۱۲- آنالیز نقطه‌ای از بدنه‌ی ST7 (نقطه‌ی ۲)

جدول ۶- آنالیز نقطه‌ای از بدنه‌ی ST7 (نقطه‌ی ۲)

عنصر	درصد اتمی (At%)	درصد وزنی (Wt%)
Al	۲۰/۱۳	۱۷/۴۲
Si	۶۸/۴۰	۶۱/۶۱
K	۵/۱۰	۶/۴۰
Ti	۴/۵۹	۷/۰۵
Fe	۰/۸۳	۱/۴۹
Au	۰/۹۶	۶/۰۵
جمع	۱۰۰	۱۰۰

در آنالیز نقطه‌ی سفید (شکل ۱۰) بعد از Si و Al، شدیدترین پیک مربوط به Ti (۳۳/۷۹ درصد وزنی) است. بنابراین روتایل‌های حل نشده در بدنه به صورت نقاط سفید رنگ دیده می‌شوند. در مقادیر بالای تیتانیا در نتایج پراش پرتو X بدنه‌ها نیز تشکیل پیک روتایل در کنار پیک کوارتز مشاهده شد. Montoya و همکارانش نیز در بررسی‌های خود بر روی بدنه‌های پرسلائی باقی ماندن روتایل حل نشده در بدنه را با افزودن مقادیر بالای تیتانیا به بدنه گزارش کرده‌اند [۱۰].



شکل ۱۳- آنالیز نقطه‌ای از بدنه‌ی ST7 (نقطه‌ی سفید در شکل ۱۰)

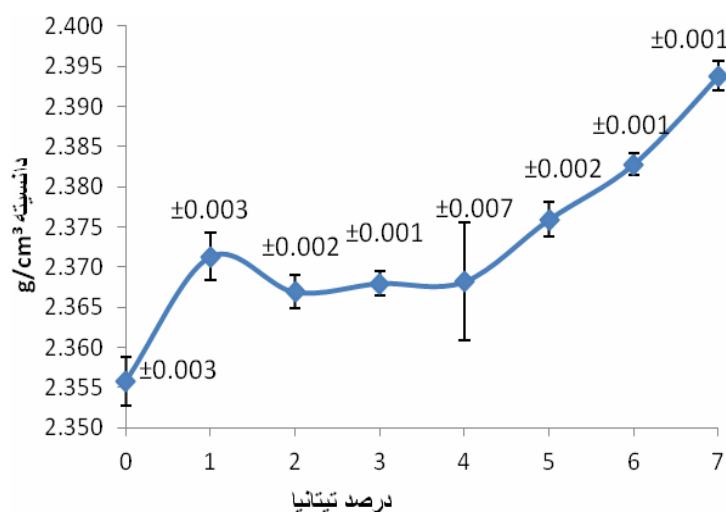
جدول ۷- آنالیز نقطه ای از بدنه‌ی ST7 (نقطه‌ی سفید در شکل ۱۰)

عنصر	درصد وزنی (Wt%)	درصد اتمی (At%)
Al	۱۸/۱۵	۲۳/۵۹
Si	۳۸/۵۰	۴۸/۰۷
K	۲/۲۰	۱/۹۷
Ti	۳۳/۷۹	۲۴/۷۴
Fe	۰/۷۰	۰/۴۴
Au	۶/۶۶	۱/۱۹
جمع	۱۰۰	۱۰۰

۳-۵- خواص بدنه‌ها

۳-۵-۱- دانسیته

افزایش تیتانیا تا ۷٪ وزنی در بدنه‌ی پرسلانی سیلیسی باعث افزایش دانسیته می‌شود. شکل ۱۴ روند افزایش دانسیته را در بدنه‌ی پرسلانی سیلیسی نشان می‌دهد.



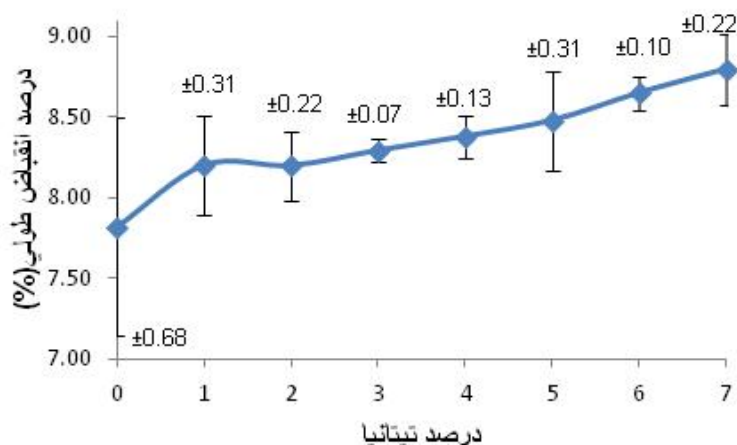
شکل ۱۴- نمودار میانگین دانسیته

همان طور که پیش‌تر نیز بیان شد در این تحقیق تیتانیا جایگزین سیلیس در بدنه شده است و با توجه به دانسیته‌ی بالاتر تیتانیا نسبت به سیلیس یکی دیگر از عوامل موثر در افزایش دانسیته‌ی بدنه، دانسیته‌ی بالاتر تیتانیا است. افزایش فاز مایع و انتقال راحت‌تر واکنش‌کننده‌ها و کاتیون‌ها از میان آن سبب افزایش دانسیته می‌شود [۹۶]. همان‌طور که در بررسی‌های فازی قابل مشاهده است در ۱٪ وزنی تمام تیتانیای اضافه شده به بدنه در فاز شیشه حل شده و پیک روتایل مشاهده نمی‌شود، این حل شدن کامل تیتانیا سبب افزایش دانسیته در ۱٪ وزنی شده است ولی با افزودن مقادیر بالاتر تیتانیا مقداری

روتایل به صورت حل نشده در بدنه باقی مانده که پیک آن در شکل ۳ قابل مشاهده است. در حضور تیتانیا واکنش‌های حین حرارت‌دهی بدنه‌های پرسلانی با سرعت بیشتری انجام می‌شود و این امر باعث افزایش دانسیته بالک می‌شود [۱۲ و ۱۳]. وقتی تیتانیا به میزان ۷ درصد وزنی جایگزین سیلیس در بدنه می‌شود اختلاف دانسیته‌ی تیتانیا و سیلیس در بدنه به صورت واضح‌تری دیده شده و تاثیر آن در افزایش دانسیته‌ی بدنه در شکل ۱۴ قابل مشاهده است.

۳-۵-۲- انقباض طولی

افزودن تیتانیا تا ۷ درصد وزنی باعث افزایش انقباض طولی می‌شود. شکل ۱۵ روند افزایش انقباض طولی بدنه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱۵- نمودار میانگین درصد انقباض طولی بدنه‌ها

انقباض در سیستم‌های سه جزئی پرسلانی به علت جدا شدن آب از رس، تشکیل فاز شیشه از گداز‌آورها و همچنین تشکیل فازهای کریستالی از مواد آمورف می‌باشد. علت افزایش انقباض با افزایش TiO_2 افزایش سرعت واکنش‌های انجام گرفته حین حرارت‌دهی بدنه‌های پرسلانی ذکر گردیده است [۱۱].

همان طور که در بررسی دانسیته بیان شد در ۱٪ وزنی تمام تیتانیا در فاز شیشه حل شده که در این درصد افزایش انقباض نیز مشاهده می‌شود. همچنین در حضور تیتانیا انقباض به طور عمده افزایش یافته که علت آن تشکیل بیشتر فاز شیشه است. که این افزایش فاز شیشه با مقایسه زمینه‌ی الگوی پراش پرتو x نمونه‌ها مشاهده شد (شکل ۴). با افزودن دی‌اکسید تیتانیم فاز کریستالی مولایت نیز در بدنه‌ها ایجاد شده که تشکیل این فاز کریستالی می‌تواند باعث افزایش انقباض در بدنه شود [۷ و ۶]. تشکیل فاز کریستالی مولایت در کنار پیک کوارتز نیز در تصویر پراش پرتو x (شکل ۳) بدنه‌ها دیده شد که این فاز کریستالی به افزایش انقباض در بدنه کمک کرده است. همچنین افزایش انقباض و دانسیته با هم در ارتباط بوده که روند افزایشی در هر دو قابل مشاهده است.

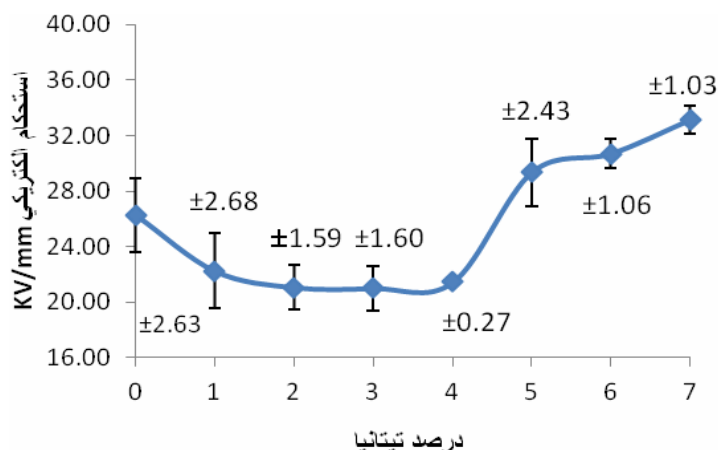
۳-۵-۳- آزمایش جذب آب

برای تمامی نمونه‌ها وزن قطعه در هوای آزاد (وزن خشک) و وزن قطعه در حالت اشباع با هم برابر بود، لذا جذب آب نمونه‌ها صفر است و بیانگر این است که تخلخل باز نمونه‌ها صفر می‌باشد. در واقع تخلخل مشاهده شده در تصاویر SEM نمونه‌ها

تخلخل بسته است.

۳-۵-۴- استحکام الکتریکی

افزودن تیتانیا تا ۳ درصد وزنی به بدنه‌ی پرسلانی سیلیسی باعث کاهش استحکام الکتریکی می‌شود. پس از آن با افزودن مقادیر بالاتر تیتانیا تا ۷ درصد وزنی، افزایش در استحکام الکتریکی مشاهده می‌شود. شکل ۱۶ روند تغییر استحکام الکتریکی را با افزودن مقادیر مختلف تیتانیا نشان می‌دهد.



شکل ۱۶- نمودار استحکام الکتریکی بدنه‌ها

استحکام الکتریکی به معنی استقامت در مقابل بالاترین شدت میدان الکتریکی ایجاد شده در اثر اعمال ولتاژ قبل از تخلیه الکتریکی است به طوری که عایق دچار شکست نشود و آن را بر حسب KV/mm یا KV/cm می‌سنجند. در این بررسی به منظور اندازه‌گیری استحکام الکتریکی طبق استاندارد IEC 672، بالاترین ولتاژی که تحت شرایط مشخص، موجب سوراخ شدن مقره می‌گردد که در این وضعیت جریان الکتریکی از داخل مقره عبور می‌نماید، اندازه‌گیری شد [۱۳و۸]. عاملی که سبب سوراخ شدن مقره در اثر اعمال ولتاژ بالا می‌شود پدیده کرونا است. میدان الکتریکی در نزدیکی ماده‌ی رسانا می‌تواند به حدی متمرکز شود که هوای مجاور خود را یونیزه نماید. این مسئله می‌تواند منجر به تخلیه‌ی جزئی انرژی الکتریکی شود، که به آن کرونا می‌گویند. عوامل مختلفی از جمله ولتاژ، شکل و قطر رسانا، ناهمواری سطح رسانا، گرد و خاک یا قطرات آب، می‌تواند باعث ایجاد گرادیان سطحی هادی شود که در نهایت باعث تشکیل کرونا خواهد شد. در حالتی که فاصله‌ی بین هادی‌ها کم باشد، کرونا ممکن است باعث جرقه زدن و اتصال کوتاه گردد. بدیهی است که کرونا سبب اتلاف انرژی الکتریکی و کاهش راندمان الکتریکی خطوط انتقال می‌گردد [۱۴]. از این رو بررسی ریزساختار بدنه به منظور جلوگیری از وقوع پدیده‌ی کرونا و اتلاف انرژی الکتریکی ضروری است.

کاهش تخلخل، افزایش فازهای کریستالی، ایجاد فاز شیشه با مقدار مناسب، کاهش یون‌های با قابلیت حرکت بالا مثل Na^+ و Li^+ ، کاهش عیوب بدنه بویژه ترک‌های مویی باعث افزایش استحکام الکتریکی می‌شود [۱۵و۲]. در بدنه‌ی پرسلانی وجود فاز مولایت و کاهش ترک‌های مویی پیرامون ذرات کوارتز باقیمانده‌ی حاصل از تغییرات فازی β به α

موجب افزایش استحکام الکتریکی می‌گردد [۱۵ و ۳]. Islam و Demirkiran نیز گزارش کرده‌اند که ریزترک‌های اطراف ذرات کوارتز باعث کاهش استحکام الکتریکی می‌شود [۱۵ و ۲]. وجود فاز کوارتز حل نشده در ریز ساختار سبب ایجاد ریزترک‌هایی در پیرامون ذرات کوارتز می‌شود. این ریزترک‌ها باعث کاهش خواص دی‌الکتریک در مقره‌های پرسلانی می‌شوند. در واقع ریز ترک نوعی عیب ساختاری است و از آنجایی که برای داشتن استحکام الکتریکی بالا نیاز به بدنه‌ی بدون عیب و مقاوم در برابر ولتاژ بالا برای جلوگیری از پانچ (سوراخ شدگی) است بنابراین عیب ریزترک باعث کاهش استحکام الکتریکی می‌شود. همان‌طور که در بررسی‌های فازی قابل مشاهده است افزایش دی‌اکسیدتیتانیم سبب کوتاه شدن پیک کوارتز در بدنه شده و کم شدن کوارتز در بدنه به معنی کاهش ریز ترک‌های اطراف ذرات کوارتز است، همچنین افزایش جوانه زنی و رشد مولایت‌ها در کنار کاهش پیک کوارتز نیز در تصویر پراش پرتو X بدنه‌ها (شکل ۲) مشاهده شد که هر دو این عوامل در افزایش استحکام الکتریکی موثر هستند. همان‌طور که در نتایج دیده شد افزودن تیتانیا باعث افزایش انقباض و دانسیته می‌شود که هر این افزایش در افزایش استحکام الکتریکی بدنه نیز موثر است.

لازم به ذکر است که تشکیل مقدار زیاد فاز شیشه در بدنه باعث زوال خواص الکتریکی می‌شود [۱۶]. Islam و همکارانش نیز در بررسی‌های خود بر روی بدنه‌های پرسلانی الکتریکی مقدار بالای فاز شیشه را در بدنه‌های پرسلانی الکتریکی مضر دانسته‌اند [۲]. در ۳ درصد وزنی تیتانیا افت استحکام الکتریکی مشاهده می‌شود که در این درصد وزنی تیتانیا، بیشترین مقدار فاز شیشه در بدنه تشکیل شده است (شکل ۴). بعد از ۳ درصد وزنی روتایل‌های حل نشده در بدنه وجود دارد که در نتایج پراش پرتو X بدنه‌ها پیک آن مشاهده شد (شکل ۳) و در تصاویر میکروسکوپ الکترونی بدنه‌ها نیز دانه‌های سفید رنگ روتایل دیده شد که در ۷٪ وزنی مقدار و پراکندگی آن در بدنه بیشتر بود (شکل ۹). افزایش انقباض و همچنین افزایش دانسیته بدنه در کنار کاهش کوارتز و افزایش روتایل‌های حل نشده در بدنه سبب بهبود و افزایش استحکام الکتریکی بدنه شده است.

۴ - نتیجه‌گیری

- نتایج آنالیز فازی نمونه‌ها کوتاه شدن پیک کوارتز و کریستوبالیت را در حضور تیتانیا نشان می‌دهد.
- نتایج آنالیز فازی و ریزساختار نمونه‌ها نشان می‌دهد که افزودن بیش از ۲ درصد وزنی تیتانیا به بدنه‌های پرسلانی و پخت در دمای ۱۳۰۰ درجه باعث حل نشدن کامل تیتانیا شده و دانه‌های سفید رنگ روتایل در بدنه دیده می‌شود.
- دانه‌های حل نشده‌ی روتایل در پرسلان‌های الکتریکی باعث بهبود خواص دی‌الکتریک می‌شود.
- افزودن تیتانیا به پرسلان سیلیسی به میزان ۱ تا ۷ درصد وزنی و پخت در دمای ۱۳۰۰°C به مدت ۶۶/۵ ساعت نشان داد که تیتانیا به میزان ۳ درصد وزنی در بدنه‌های پرسلانی سیلیسی بیشترین مقدار فاز شیشه را به وجود می‌آورد که باعث افت استحکام الکتریکی می‌شود.
- دانسیته در حضور تیتانیا از $2/355 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ در بدنه بدون تیتانیا به $2/393 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ در بدنه حاوی ۷ درصد وزنی تیتانیا افزایش می‌یابد. درصد انقباض طولی نیز از $7/82$ درصد برای بدنه بدون تیتانیا به $8/79$ درصد در بدنه حاوی ۷ درصد وزنی تیتانیا افزایش می‌یابد.

- محاسبه‌ی درصد تخلخل باز بدنه‌ها نشان داد که بدنه فاقد تخلخل باز بوده و تخلخل‌های مشاهده شده در تصاویر SEM تخلخل بسته است. بنابراین میزان جذب آب بدنه صفر می‌باشد.

مراجع

- [1] P. W. Olupot, S. Jonsson, J. K. Byaruhanga, 2010, “Electroporcelains from raw materials in Uganda”, International Conference on Advances in Engineering and Technology, pp. 454-464.
- [2] R. A. Islam, Y. C. Chan and Md. Fakhurul Islam, 2004, “Structure-Property Relationship in High-Tension Ceramic Insulator Fired at High Temperature” Materials Science and Engineering Bull, No. 106, pp. 132-140.
- [3] Cho, Y. S. and Yoon, K. H., 2001 “Handbook of Advanced Electronic and Photonic Materials and Devices” (H.S. Nalwa, Ed.) vol. 4, Chap. 5. Academic Press. New York.
- [4] A. S, u˘kran Demirkiran, Recep Artir, Es,ref Avci, 2010, “Electrical resistivity of porcelain bodies with natural zeolite addition” Ceramics International No. 36, pp. 917–921.
- [5] JP Holtzhausen, 1992, “High voltage insulator”, USA, pp. 125-170.
- [6] gauckler, 2006, “Technical Ceramics”, pp.1-215.
- [7] Sunipa bhattacharyya, Swapan kumar das, Kausik dana and Nirendra Krishna mitra, 2007 “Titania doped triaxial porcelain: Enhancement of strength by controlled heat treatment”, Bull. Mater. Sci, Vol. 30, No. 3, pp. 231–234.
- [8] IEC 672-2, 1999, “Ceramic and glass insulating materials –Part 2:Methods of test”, First Edition.
- [9] Isao Kimura, Noriyasu Hotta, Kunihiko Sato, Natsakaze Saito, Saburo Yasukawa, 1988, “Effect of Alumina and Titania Additions on Properties of Porcelain Bodies from Murakami Sericite”, Ceramics International, No.14, pp. 217-222.
- [10] Noemı Montoya, Francisco Javier Serrano, María Mercedes Reventós, José María Amigo, Javier Alarcón, 2010, “Effect of TiO₂ on the mullite formation and mechanical properties of alumina porcelain” Journal of the European Ceramic Society, NO.30, pp. 839–846.
- [11] Sunipa bhattacharyya, Swapan kumar das, Kausik dana, Nirendra Krishna mitra, 2005, “Effect of titania on fired characteristics of triaxial porcelain”, Indian Academy Of Sciences , Vol. 28, No. 5, August 2005, pp. 445–452.

[۱۲] "مقره‌ها و تاثیرات شرایط محیطی بر آنها در مناطق خاص"، گروه پژوهشی فشار قوی، پژوهشکده انتقال و توزیع نیرو، آبان ماه ۱۳۸۲.

[۱۳] "مشخصات فنی عمومی و اجرایی پست‌ها، خطوط فوق توزیع و انتقال مقره‌های خطوط انتقال نیرو (جلد دوم)"، نشریه شماره ۲-۴۲۶، اردیبهشت ۱۳۸۷.

[۱۴] خالوزاده، ح. صدر بزاز، ث. "بررسی روش‌های تشخیص مقره‌های پانچ شده توسط دوربین‌های کرونا". شرکت توزیع برق شهرستان مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، اردیبهشت ۱۳۸۳.

[15] A. S, Ukran Demirkiran, Recep Artir, Es, ref Avci, 2010, "Electrical resistivity of porcelain bodies with natural zeolite addition", Ceramics International No.36, pp. 917-921.

[16] H. S. Tripathi and G. Banerjee, 1998 "Synthesis and Mechanical Properties of Mullite from Beach Sand Sillimanite: Effect of TiO₂", Central Glass and Ceramic Research Institute, Refractories Division, Calcutta-700 032, India, pp. 2081-2087.