

# بررسی تأثیر آلومینای نانو سایز بر استحکام خمشی و دی الکتریکی پرسلان آلومینایی

مریم اسمعیلی<sup>۱</sup>، رحیم نقی زاده<sup>۲</sup>، علی نعمتی<sup>۳</sup>، سعید باغشاهی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران،

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت،

<sup>۳</sup> دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی شریف،

<sup>۴</sup> دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه امام خمینی

rnaghizadeh@iust.ac.ir

**چکیده:** در پژوهش حاضر تأثیر افزودن آلومینای نانو اندازه به پرسلان آلومینایی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصله نشان داد که افزودن نانو آلومینا سبب افزایش استحکام خمشی و نیز افزایش استحکام دی الکتریک در پرسلان آلومینایی می گردد. به طوریکه افزایش ۲۳٪ نانو آلومینا به بدنه پرسلان آلومینایی پایه، استحکام مکانیکی را ۹٪ و استحکام دی الکتریکی را ۱۵٪ افزایش می دهد. حضور فازهای کورانوم و مولایت سوزنی و نیز کاهش میکروتکرک های پیرامون ذرات کوارتز می تواند دلیلی بر این افزایش باشد. افزایش پراکندگی نانوذرات آلومینا در زمینه مانند سدی در مسیر آزاد حرکت یون ها در فاز شیشه عمل نموده و سبب افزایش استحکام دی الکتریک پرسلان آلومینایی می گردد.

**کلمات کلیدی:** نانو آلومینا، استحکام خمشی، استحکام دی الکتریکی، مولایت.

## ۱- مقدمه

مقره ها بوسیله قرار گرفتن مانند یک سد میان هادی ها مسئول جلوگیری یا تنظیم گردش جریان در مدارهای الکتریکی هستند. یک مقره جهت کارایی مناسب نیازمند خواصی چون مقاومت الکتریکی بالا ( $10^{12} - 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ )، استحکام دی الکتریک بالا، فاکتور اتلاف پایین، خواص مکانیکی خوب، پخش خوب گرما و همچنین محافظت هادی ها از شرایط محیطی سخت نظیر رطوبت و عوامل خوردنده می باشد [۱].

مقره ها از موادی چون پرسلان، شیشه و کامپوزیت ساخته می شوند که از این میان مقره های پرسلانی دارای سابقه ای بیش از ۱۵۰ سال دارند. پرسلان ها بدنه های سرامیکی پلی کریستال هستند که نوعاً حاوی بیش از حدود ۱۰٪ حجمی فاز شیشه به همراه فازهای مولایت و کوارتز می باشند. مقره های فشار قوی بایستی از خواص الکتریکی خوب به همراه استحکام مکانیکی بالا برخوردار باشند. میزان فاز شیشه، دانسیته، تخلخل و توزیع فازها در داخل پرسلان تا حدود زیادی خواص مکانیکی و دی الکتریکی آن را کنترل می کند [۲].

دو نوع از پرسلان های الکتریکی سیلیکاتی و آلومینایی، که طبق استاندارد IEC672-3 به ترتیب در گروه های C-110 و C-120 قرار گرفته اند، بیشترین کاربرد را به عنوان مقره دارند. در چینی الکتریکی سیلیکاتی مقاومت الکتریکی مولایت و کوارتز در دمای محیط حدود  $10^{13} - 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$  است و بالا می باشد. برای اینکه مقاومت الکتریکی فاز شیشه مناسب گردد بایستی از حرکت یون های قلیایی  $\text{Na}^+$  و  $\text{K}^+$  موجود در آن با ایجاد باندهای نسبتاً قوی جلوگیری گردد. بنابراین هر چقدر فاز شیشه کاهش یابد استحکام دی الکتریکی عایق افزوده می شود. از طرف دیگر وجود میزان مناسبی از فاز شیشه برای پرکردن تخلخل ها و همچنین سرعت بخشیدن به تشکیل مولایت ضروری است. البته در ریزساختار این پرسلان ها پیرامون ذرات کوارتز میکروتکرک های محیطی حاصل از تبدیلات کوارتز نیز دیده می شود که استحکام دی الکتریکی و مکانیکی عایق را کاهش می دهد [۳]. با افزودن آلومینا، کنترل اندازه ذرات کوارتز، کنترل ترکیب و میزان فاز شیشه،

ایجاد فاز کوردیریت و تشویق تشکیل مولایت سوزنی می‌توان برخی از خواص پسران‌های سیلیکاتی مثل استحکام مکانیکی و دی‌الکتیکی را بهبود داد. [۵، ۶].

ریز ساختار پسران آلومینایی شامل کوراندوم، مولایت و کوارتز باقیمانده در زمینه شیشه‌ای است. براساس نتایج حاصل از مطالعات، خواص مکانیکی مواد پسرانی استفاده شده برای مقره‌های ولتاژ بالا احتمالاً به‌وسیله ترکیب کوراندوم بالا و مقدار کوارتز باقیمانده کم بهبود می‌یابد [۷].

مولایت تنها فاز دوتایی پایدار در سیستم  $Al_2O_3-SiO_2$  است. مولایت خالص یک محلول جامد با ترکیب  $Al_2[Al_{2+2x}Si_{2-2x}]O_{10-x}$  با  $0.17 \leq X \leq 0.5$  می‌باشد. ترکیبات پایدار مولایت  $(X=0.25)$   $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$  و  $(X=0.4)$   $2Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$  می‌باشند که به ترتیب به مولایت 3:2 و 2:1 معروف هستند و دو نوع اصلی از مولایت تشکیل شده در مراحل مختلف پخت پسران‌ها می‌باشند [۸]. از نظر شکل ظاهری همچنین سه نوع مولایت در بدنه‌های سه جزئی مثل پسران قابل تشخیص است. مولایت اولیه از تبدیلات کاتولینیت حاصل می‌شود و فلسی شکل است و مولایت ثانویه از کریستالیزاسیون مذاب حاصل از ذوب فلدسپات و سایر اجزاء حاصل می‌گردد که ساختاری سوزنی دارد [۹]. در پسران‌های آلومینایی نوع سوم از مولایت وجود دارد که موسوم به مولایت نوع سوم است و تنها در صورت وجود آلومینای آزاد و در درجه حرارت بالا ایجاد می‌گردد [۹ و ۱۰]. بررسی‌های محدود انجام شده نشان می‌دهد با کاهش اندازه ذرات آلومینا می‌توان در پسران‌های آلومینایی به درصد‌های بالاتری از مولایت و به‌خصوص مولایت نوع سوم دست یافت [۱۱].

تلاش‌هایی در جهت افزایش خواص مکانیکی و دی‌الکتیکی در پسران‌های الکتریکی توسط کاهش اندازه پودرهای مواد اولیه مصرفی در مقیاس میکرونی بخصوص در کشور ژاپن انجام گرفته است که نتایج مثبتی نیز حاصل شده است [۱۲]. استفاده از نانو ذرات و بررسی تأثیر آنها بر استحکام مکانیکی و مقاومت دی‌الکتریک پسران‌های الکتریکی به‌طور دقیق ارزیابی نشده است بدین منظور در این تحقیق تأثیر افزودن نانو آلومینا بر روی خواص مهم پسران آلومینایی مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- فعالیت‌های تجربی

پسران‌های آلومینایی در استاندارد IEC، با توجه به میزان آلومینا تأمین شده توسط اجزاء تشکیل دهنده اولیه، در کلاس C-120 (حاوی ۳۰ تا ۵۰ درصد آلومینا)، و C-130 (حاوی بیش از ۵۰ درصد آلومینا) طبقه‌بندی می‌گردند [۱۳]. در تحقیق حاضر از یک فرمولاسیون با ۲۷٪ آلومینای آزاد استفاده شده است که با توجه به ترکیب شیمیایی نهایی، این فرمولاسیون در کلاس C-120 قرار می‌گیرد. مواد اولیه مورد استفاده در این پسران آلومینایی، کاتولن، فلدسپات، آلومینا و بالکلی بوده است. آنالیز شیمیایی این مواد اولیه در جدول ۱ آورده شده است. آلومینای میکرونی مصرفی، آلومینای آلفای با اندازه ذرات  $45 \mu m <$  بوده است.

جدول ۱- آنالیز شیمیایی مواد اولیه مصرفی (درصد وزنی)

اجزا	آلومینای آلفا	فلدسپات پتاسیک ازنا	کاتولن زنونز کد SI	بالکلی هایمود
SiO <sub>2</sub>	۰	۷۲/۴۸	۶۰/۰۷	۵۱/۸۰
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۹۹/۵	۱۹/۲۲	۲۸/۱۲	۳۴/۸۰
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰	۰/۳۴	۰/۵	۱/۴
Mgo	۰	۰/۱	۰/۲	۰/۱
CaO	۰	۰/۲۸	۰/۵۶	۰/۲۱
Na <sub>2</sub> O	۰	۳/۰۶	۰	۰/۱۵
K <sub>2</sub> O	۰	۳/۰۷	۰/۸۹	۲/۴
TiO <sub>2</sub>	۰	۰	۰	۰
L.O.I	۰/۳۴	۱/۱۱	۹/۵۵	۹/۱



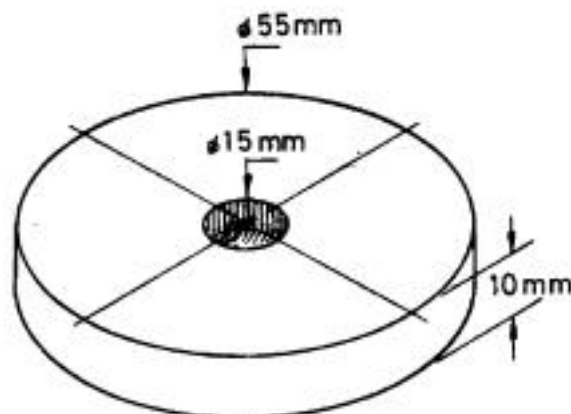
این مواد به روش آسیاب تر مخلوط شد و پس از عبور از الک  $45 \mu\text{m}$  به آن آلومینای نانو سایز در درصدهای ۱،۳، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ اضافه گردید. مشخصات آلومینای نانوی مصرفی در جدول ۲ آورده شده است. این بدنه‌ها به ترتیب با کدهای MA0, MA1, MA3, MA5 مشخص گردیدند که اعداد مربوطه نمایانگر میزان آلومینای نانو افزوده شده می‌باشد. فرمولاسیون این بدنه‌ها در جدول ۳ آورده شده است. آبیگری از دوغاب به روش سنتی و به وسیله قالب گچی انجام شد. نمونه‌ها به صورت میله‌هایی با قطر ۱۱ میلی‌متر و طول ۱۲۰ میلی‌متر برای تست استحکام خمشی بوسیله اکسترودر آزمایشگاهی مدل D-8672SELB ساخت شرکت NETZSH آلمان اکسترودر شد. جهت تهیه نمونه‌های استحکام دی‌الکتریکی ابتدا استوانه‌ای به قطر ۳۰ میلی‌متر و طول ۵۰ میلی‌متر توسط اکسترودر تهیه شد سپس این استوانه در قالب گچی به صورتی که در شکل ۱ نشان داده شده پرس گردید.

جدول ۲- خصوصیات آلومینای نانو مصرفی شرکت نوتیرون

خلوص $\text{Al}_2\text{O}_3$	%99
سطح ویژه	$10 \text{ m}^2/\text{g}$
اندازه دانه	۸۰nm
ساختار کریستالی	$\alpha$

جدول ۳- فرمولاسیون پرسلان آلومینایی حاوی آلومینای نانو

کد بدنه / مواد اولیه	MA0	MA1	MA3	MA5
اکسید آلومینیوم	۲۷	۲۶/۷	۲۶/۲	۲۵/۶
فلدسپات	۲۵	۲۴/۷	۲۴/۲	۲۳/۸
بالکلی هایمود	۱۵	۱۴/۹	۱۴/۶	۱۴/۲
کائولن زنون SI	۳۳	۳۲/۷	۳۲	۳۱/۴
نانو آلومینا	۰	۱	۳	۵



شکل ۱- مشخصات ابعادی نمونه تست استحکام دی‌الکتریکی بعد از پخت

سپس نمونه‌ها در خشک‌کن الکتریکی و در دمای  $110^\circ\text{C}$  خشک گردید و در کوره تونلی در دمای  $1300^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۶/۵ ساعت کل با زمان ماندگاری در دمای ماکزیمم به مدت یک ساعت پخت گردید. برای اندازه‌گیری دانسیته بالک از روش آب جوش طبق استاندارد ASTM استفاده شد. انقباض نمونه‌ها



از تفاوت قطر نمونه‌های خشک شده و پخت شده به دست آمد. جهت انجام تست استحکام خمشی از دستگاه استحکام خمشی سه نقطه‌ای مدل B167 ساخت شرکت STAVEBI کشور چکسلواکی استفاده گردید و میانگین هفت نمونه برای هر فرمول به دست آمد. استحکام خمشی از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۴]:

$$R_f = \frac{8FL}{\pi D^3}$$

$R_f$  = استحکام خمشی ( $\text{Kg f/cm}^2$ )

$F$  = نیروی کل اعمال شده جهت شکستن نمونه ( $\text{Kg f}$ )

$L$  = فاصله تکیه گاهها ( $\text{cm}$ )

$D$  = قطر نمونه آزمایش ( $\text{cm}$ )

برای اندازه‌گیری استحکام دی‌الکتریک از دستگاه High Voltage Dielectric Tester در  $50\text{ Hz}$  با ماکزیمم ولتاژ  $80\text{ KV}$  در محیط روغن خالص (مایع دی‌الکتریک) دارای مقاومت مابین  $10^{11}$ – $10^{12}\ \Omega\cdot\text{cm}$  و یک محفظه عایق با یک الکتروود کروی برنجی و یک الکتروود تخت استفاده گردید. سرعت بالا رفتن ولتاژ  $2\text{KV/S}$  بوده است. ولتاژ شکست ماکزیمم ( $V_{br}$ ) یا ولتاژ پانچ ( $\text{KV}$ ) به دست می‌آید که برای محاسبه استحکام دی‌الکتریک ( $E_{br}$ ) از رابطه زیر استفاد می‌شود. [۱۴] اعداد به دست آمده میانگین ۵ نمونه می‌باشد.

$$E_{br} = \frac{V_{br}}{h}$$

$$E_{br} = V_{br} \cdot K$$

در روابط فوق  $h$  ضخامت نمونه برحسب  $\text{mm}$  و  $K$  فاکتور تصحیح ( $\text{mm}^{-1}$ ) می‌باشد. تأثیر تغییر شکل میدان الکتریکی در شکل انتخابی برای الکتروودها با ضریب تصحیح  $K$  بیان می‌شود که تغییرات آن با ضخامت نسبت عکس دارد.

میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد استفاده در تحقیق حاضر جهت بررسی ریز ساختاری از نوع SEM و مدل XL30 ساخت شرکت فیلیپس از کشور هلند می‌باشد. نمونه‌ها جهت بررسی با SEM ابتدا با محلول HF رقیق  $10\%$  به مدت ۳ دقیقه اچ گردید. به منظور شناسایی فاز، نمونه‌ها به صورت پودر در آمده و از دستگاه XRD مدل D8-Advanced ساخت شرکت BRUKER کشور آلمان با طول موج اشعه  $\lambda = 1.54\ \text{Å}$  با نوع کاتد Cu-K $\alpha$  استفاده گردید.

### ۳- نتایج و بحث

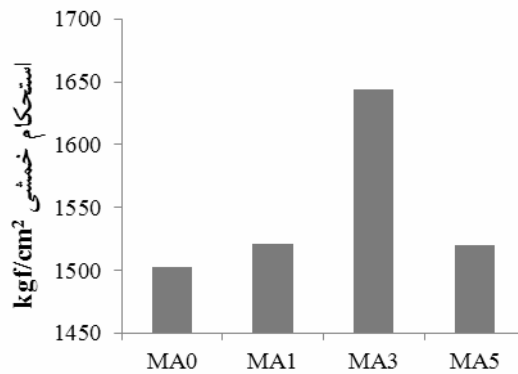
#### ۳-۱- استحکام خمشی

با افزایش درصد آلومینای نانو استحکام خمشی نمونه‌های پخت شده در  $1300^\circ\text{C}$  افزایش می‌یابد. نتایج حاصله در شکل ۲ آورده شده است. حداکثر استحکام خمشی در ۳ درصد افزودنی نانو آلومینا به دست می‌آید. میزان افزایش آن نسبت به نمونه MAO یعنی نمونه بدون نانو آلومینا حدود ۹٪ است و به استحکام  $1644\text{ Kg/cm}^2$  رسیده است. Kimura و همکارانش [۱۵] با افزودن آلومینای با اندازه متوسط  $5\ \mu\text{m}$  برای نمونه‌های پرس شده در دمای پخت  $1300^\circ\text{C}$  به استحکام خمشی حوالی  $1400\text{ Kg/cm}^2$  در ۳۰ درصد افزودنی و  $1650\text{ Kg/cm}^2$  در ۴۰ درصدوزنی رسیده‌اند. البته آنها در دماهای پخت دیگر استحکام‌های بهتری از اعداد این تحقیق به دست آوردند که عمده دلیل آن تهیه قطعات به روش پرس بوده است. اما آن‌ها موفق به افزایش مقاومت الکتریکی نمونه‌ها نشدند.

افزودن نانوآلومینا موجب افزایش استحکام بدنه‌های پرس‌لانی تا جایی می‌گردد که زینتر بدنه با افت شدیدی مواجه نگردد. دلیل افزایش استحکام مکانیکی با افزایش نانو آلومینا به سه پدیده استحکام بخشی خود



آلومینا، افزایش مقدار فاز مولایت نوع سوم و کاهش میزان میکروتترکها بر می‌گردد. رشد ترک به دلیل استحکام بالای ذرات آلومینا نسبت به زمینه کند می‌گردد و این همان استحکام بخشی به دلیل اثر پخش‌شدگی<sup>۱</sup> می‌باشد که هنگام اعمال نیرو، توسعه و رشد ترک به وسیله دانه‌های آلومینا که استحکام بالاتری از زمینه دارند متوقف می‌گردد که این اثر به دلیل استفاده از نانوالومینا که تعداد ذره بیشتری در درصد وزنی معین در زمینه پخش می‌کند تشدید می‌گردد.



شکل ۲- نمودار استحکام خمشی

ضریب انبساط حرارتی آلومینا به موازات و عمود بر محور C به ترتیب  $6/19 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  و  $5/43 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  می‌باشد. ضریب انبساط حرارتی زمینه چینی الکتریکی در حدود  $7/7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  می‌باشد. با توجه به این موضوع احتمال جدایش ذرات آلومینا از زمینه حین پخت و هنگام سرمایش قطعات وجود ندارد. با افزودن نانو آلومینا، مقداری از آن در فاز آمورف حل می‌شود و پس از آن به صورت مولایت نوع سوم رسوب می‌کند. این مولایت‌های سوزنی درهم قفل شده می‌توانند تأثیر استحکام بخشی به نمونه‌ها به دلیل رفتار الیافی<sup>۲</sup> داشته باشند [۸ و ۹]. بدیهی است کاهش ذرات آلومینا به حد نانو می‌تواند تعداد زیادی مانع مؤثر در برابر رشد ترک ایجاد کند و با انحلال بیشتر در فاز زمینه موجب افزایش مولایت سوزنی گردد. هنگامی که ۵٪ نانو آلومینا به بدنه پرسیلان آلومینایی پایه اضافه می‌گردد به دلیل افزایش دیرگدازی بدنه و کاهش مقدار فاز شیشه و در نتیجه کاهش زینترپذیری موجب کاهش استحکام خمشی می‌گردد.

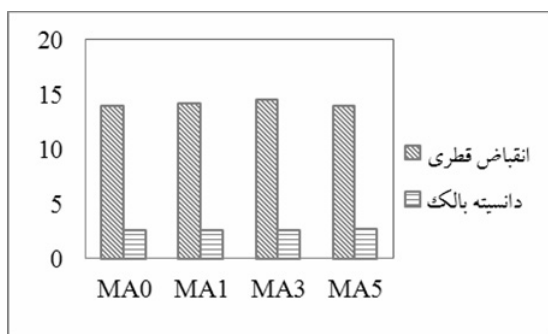
#### ۴- دانسیته بالک و انقباض قطری

دانسیته بالک نمونه‌ها بستگی به دانسیته فازهای تشکیل دهنده بدنه و میزان تخلخل‌های باز و بسته دارد. حذف میکروتترک‌ها موجب افزایش دانسیته بالک می‌گردد. مطابق شکل ۳ با افزایش میزان افزودنی نانوالومینا تغییرات دانسیته بالک و میزان انقباض جزئی است به طوری که مطابق با اعداد حاصله میزان تغییرات در انقباض حدود ۰/۵٪ و در دانسیته بالک حدود ۰/۰۳ می‌باشد. انقباض پخت نمونه‌ها بستگی به پدیده زینتر، تشکیل فازهای مختلف و احتمال ایجاد عیوب پخت مثل ایجاد میکروتترک دارد. افزودن آلومینا موجب بالا رفتن دیرگدازی فاز زمینه می‌گردد که خود مانع زینتر می‌باشد و انقباض را کاهش می‌دهد. از طرف دیگر افزایش آلومینا می‌تواند موجب تشکیل مولایت نوع سوم گردد که به دلیل اختلاف دانسیته‌های آلومینا ( $3/9 \text{ g/cm}^3$ ) و فاز آمورف یا کوارتز ( $2/6 \text{ g/cm}^3$ ) با مولایت ( $3/2 \text{ g/cm}^3$ ) همراه با انبساط است. کاهش و حذف میکروتترک‌ها می‌تواند موجب افزایش انقباض گردد. به نظر می‌رسد که مجموع عوامل فوق مسئول رفتار انقباضی مشاهده شده می‌باشد.

<sup>1</sup> dispersion strengthening

<sup>2</sup> fiber reinforcing

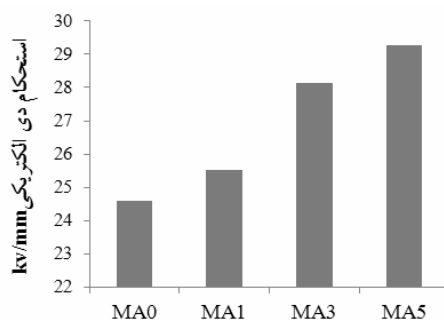




شکل ۳- نمودار دانسیته بالک و درصد انقباض قطری

## ۵- استحکام دی الکتریکی

نتایج استحکام دی الکتریک در شکل ۴ آورده شده است. این نمودار نشان می‌دهد با افزایش نانو آلومینا از ۰ تا ۵ درصد استحکام دی الکتریکی افزایش می‌یابد. بیشترین میزان استحکام دی الکتریکی مربوط به نمونه حاوی ۵٪ نانو آلومینا است. استحکام دی الکتریک در ۳٪ افزودنی نانو آلومینا ۲۸ KV/mm و در ۵ درصد افزودنی ۲۹ KV/mm بوده است. هدف از افزودن نانو آلومینا رسیدن به استحکام‌های مکانیکی و دی الکتریکی مناسب بوده است. برای عایق‌های کششی بالا<sup>۱</sup> میزان استحکام دی الکتریکی بایستی بالای ۳۰ KV/mm باشد. عوامل مهم در استحکام الکتریکی میزان تخلخل، نوع و میزان فاز شیشه، میزان و نوع و نحوه پخش فازهای کریستالین و وجود و عدم وجود ترک‌های مویی است. وجود یون‌های متحرک  $Na^+$ ،  $K^+$  و  $Fe^{3+}$  در فاز شیشه موجب کاهش استحکام دی الکتریک آن می‌گردد. وجود ذرات کوارتز و مولایت در مسیر این یون‌ها، حرکت آن‌ها را متوقف می‌کند و موجب افزایش استحکام دی الکتریک می‌گردد. با افزودن نانو آلومینا، بخشی از آن در فاز مذاب سیلیکاتی حل شده و به صورت فاز مولایت نوع سوم در می‌آید که دارای مقاومت الکتریکی بالا ( $10^{13} \Omega \cdot cm$ ) می‌باشد [۱۵]. آلومینای باقیمانده نیز می‌تواند سد مشابهی را در برابر حرکت یون‌های متحرک ایجاد کند که با توجه به نانو بودن آن می‌تواند تعداد موانع مؤثر در مسیر را بسیار افزایش دهد. وجود نانو ذرات آلومینا به دلیل کاهش ذرات کوارتز موجب کاهش میکروتورک‌ها می‌گردد که خود آن موجب بهبود قابل توجه استحکام دی الکتریک می‌گردد.



شکل ۴- نمودار استحکام دی الکتریکی نمونه‌های مورد مطالعه پس از پخت در  $1300^\circ C$

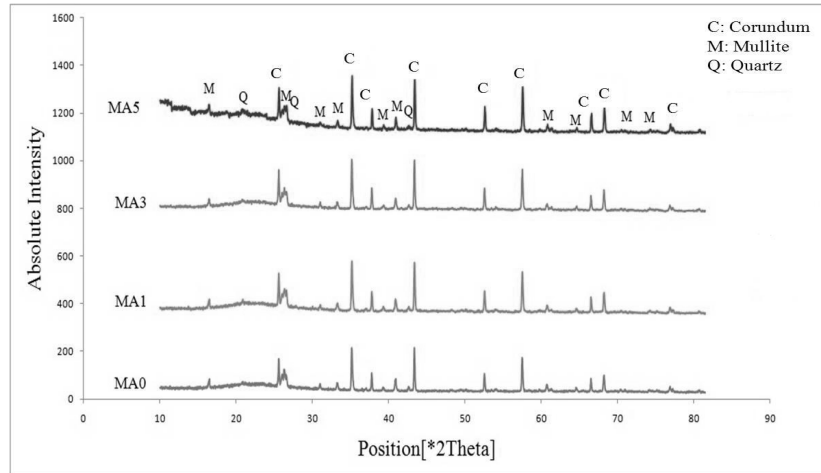
## ۶- بررسی فازی و ریزساختاری

الگوی پراش اشعه X نمونه‌های مختلف مورد مطالعه پس از پخت در دمای  $1300^\circ C$  در شکل ۵ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در پسران آلومینایی بدون افزودنی نانو آلومینا، فازهای کوراندوم، مولایت و کوارتز وجود دارد. برآمدگی الگوها در حوالی  $2\theta$  مابین ۲۰-۳۰ درجه را می‌توان به وجود فاز

<sup>1</sup> high-tension electrical insulator

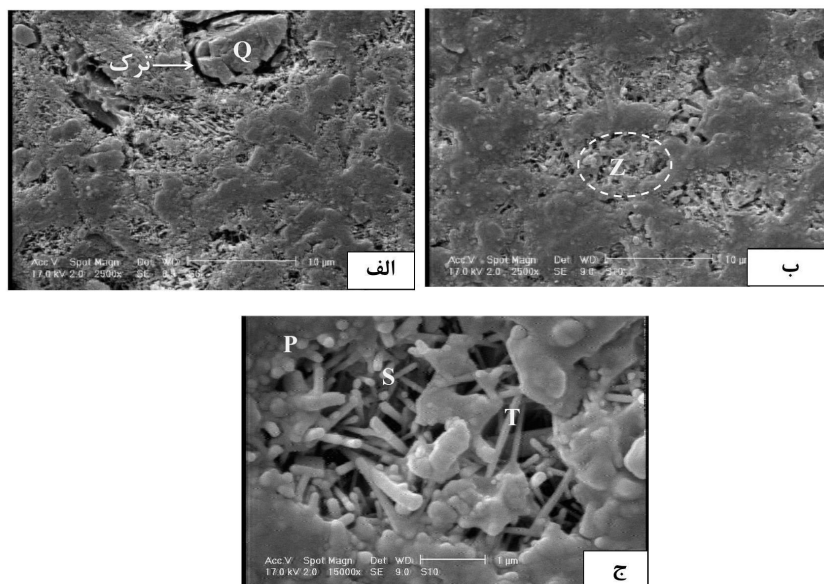


آمورف نسبت داد. فاز کوارتز مورد مشاهده می‌تواند از ناخالصی‌های کوارتز کائولن زنوز باشد که کائولنی با ذرات کوارتز آزاد بالا می‌باشد. با افزایش نانو آلومینا به نظر می‌رسد که تغییری در آرایش فازی رخ نمی‌دهد و میزان فاز کوراندوم و تا حدودی فاز مولایت افزوده می‌شود. افزایش جزئی این فازها با توجه به تأثیر حجم و پخش ذرات نانو آلومینا می‌تواند تأثیر مهمی در خواص مکانیکی و الکتریکی عایق‌های مورد مطالعه داشته باشد که با نتایج مشاهده شده برای استحکام خمشی سه نقطه ای و استحکام دی الکتریکی سازگار می‌باشد.



شکل ۵- الگوی پراش اشعه X پرسیلان‌های آلومینایی مورد مطالعه حاوی درصد‌های مختلف افزودنی نانو آلومینا

در شکل ۶ ریزساختار نمونه‌های پرسیلان آلومینایی بدون افزودنی و با افزودنی حدود ۳ درصد وزنی و همچنین منطقه بزرگنمایی شده مشاهده می‌گردد. همان طور که مشاهده می‌گردد با افزودن نانو آلومینا ذرات درشت Q (شکل ۶-الف) که احتمالاً کوارتز می‌باشد و پیرامون آن جدایش و ترک‌های محیطی دیده می‌شود حذف شده یا اندازه آن کاهش یافته است که این موضوع خود می‌تواند تأثیر بسیار مهمی در استحکام مکانیکی و دی الکتریکی داشته باشد. شکل ۷-ج نشان می‌دهد که در ریزساختار نمونه‌های حاوی افزودنی نانو آلومینا هر سه نوع مولایت قابل مشاهده است. مولایت اولیه (نقاط P) با ابعاد زیر یک میکرون به صورت تکه‌های فلس شکل، مولایت ثانویه (نقاط S) سوزنی با نسبت طول به قطر حدود ۵ و مولایت‌ها احتمالاً نوع سوم با نسبت‌های بالاتر طول به قطر (نقاط T) قابل مشاهده است.



شکل ۶- ریزساختار دو نمونه مورد مطالعه پس از پخت در دمای ۱۳۰۰°C

الف) نمونه بدون افزودنی نانو آلومینا (ب) نمونه حاوی ۳ درصد نانو آلومینا (ج) ناحیه Z شکل ب (بزرگنمایی  $\times 15000$ )

## ۷- نتیجه گیری

افزودن نانو آلومینا به پرسیلان آلومینایی به میزان ۵-۱ درصدوزنی و پخت در دمای  $1300^{\circ}\text{C}$  به مدت یک ساعت نشان داد که نانو آلومینا به دلیل تشویق تشکیل مولایت‌های سوزنی، افزایش مقاومت زمینه در برابر رشد ترک و همچنین کاهش ترک‌های مویی موجب افزایش استحکام خمشی و استحکام دی‌الکتریکی می‌گردد. به‌طوریکه در ۳ درصد وزنی نانو آلومینا یعنی در بدنه MA3 استحکام خمشی با افزایش ۹٪ نسبت به پرسیلان آلومینایی به  $1644\text{Kgf/cm}^2$  و استحکام دی‌الکتریک با افزایش ۱۵٪ به  $28\text{ kv/mm}$  می‌رسد. نتایج ریز ساختار نمونه‌های پرسیلان آلومینایی حاوی ۳ درصدوزنی نانو اکسید آلومینیوم پس از پخت در  $1300^{\circ}\text{C}$  نشانگر توزیع مناسب مولایت‌های سوزنی و کاهش ترک‌های مویی می‌باشد. با افزایش نانو آلومینا به ۵ درصد وزنی استحکام خمشی و نیز انقباض قطری کاهش می‌یابد که می‌تواند به علت افزایش دیرگدازی بدنه با توجه به مقدار زیاد آلومینا باشد. اما روند افزایشی دانسیته و استحکام دی‌الکتریک همچنان ادامه می‌یابد که دلیل آن را می‌توان در دانسیته بالای ذرات آلومینا و تأثیر دانه‌های پخش شده نانو آلومینا در برابر عبور جریان الکتریکی دانست.

## تقدیر و تشکر

از مدیریت محترم شرکت مقره سازی ایران (مانه) که در استفاده از امکانات آن شرکت برای انجام پروژه همکاری نموده‌اند تقدیر و تشکر می‌گردد.

## مراجع

1. R. Adnan Islam, Y. C. Chan, M. Fakhru Islam, "Structure-property relationship in high-tension ceramic insulator fired at high temperature", *Materials Science & Engineering B*, 106, 132-140, (2004).
2. Y. S. Cho, and K. H. Yoon, "Handbook of Advanced Electronic and Photonic Materials and Devices" (H.S. Nalwa, Ed.) vol. 4, Chap. 5. Academic Press., New York, (2001).
3. A. S. Demirkiran, R. Artir, E. Avci, "Electrical resistivity of porcelain bodies with natural zeolite addition", *Ceramics International*, No.36, pp. 917-921, (2010).
4. Jos'e M. Amig', Francisco J. Serrano, "X-ray diffraction microstructure analysis of Mullite, quartz and corundum in porcelain insulators" *Journal of the European Ceramic Society*, No. 25, pp. 1479-1486, (2005).
5. J. Liebermann, and W. Schulle, "Bauxite Porcelain, A New High-Tech Products for High-Voltage Insulators", *American Ceram. Soc. Bulletin*, Vol.81, No.2, (2002).
6. M. E. Ebrahimi, "Crack Propagation Behavior in Alumina Ceramics", *J. of. Material Research*, Vol. 15, No. 1, (2000).
7. J. Liebermann, "Avoiding Quartz in Alumina Porcelain for High-Voltage Insulators-Part II", *American Ceram. Soc. Bulletin*, Vol. 80, No. 6, (2001).
8. N. Montoya, F. J. Serrano, M. M. Reventós, J. M. Amigo, J. Alarcón, "Effect of  $\text{TiO}_2$  on the mullite formation and mechanical properties of alumina porcelain" *Journal of the European Ceramic Society*, NO.30, pp 839-846, (2010).
9. Y. Iqbal, and W. E. Lee, "Microstructural evolution in Triaxial porcelain" *J. Am. Ceram. Soc.* 83[12] pp 3121-27, (2000).
10. W. M. Carty and U. Senapati, "Porcelain - Raw Material, Processing, Phase Evolution, and Mechanical Behavior", *J. Am. Ceram. Soc.*, No. 81, (1998).
11. F. Belnou, D. Goeriot, P. Goeriot, F. Valdivieso, "Nanosized alumina from boehmite additions in alumina porcelain, 1. Effect on reactivity and mullitisation" *Ceramics International*, No. 30, pp. 883-892, (2004).
12. W. Tillar Shugg, "Handbook of Electrical and Electronic Insulating Materials",. IEEE, pp. 450-465, (1995).
13. R. Morrell, "Handbook of Properties of Technical & Engineering Ceramics", Part I, National Physical Laboratory, pp. 305-335, (1985).
14. IEC 672-2, "Specification for ceramic and glass insulating material", First Edition, (1980).
15. I. Kimura, N. Hotta, K. Sato, N. Saito, S. Yasukawa "Effect of alumina and titania additives properties of porcelain bodies from Murakani sericite" *ceramic international* 14, 1988, 217-222.

