

بررسی عوامل مؤثر بر سنتز و خواص کامپوزیت‌های آلومینا-آلومینیم

نعمت‌اله صحرانژاد^۱، حسین سرپولکی^۱، حمیدرضا رضایی^۱، سعید کاویانی^۲

^۱ دانشکده مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

^۲ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه امام حسین (ع)

hsarpoolaki@gmail.com

چکیده: در این تحقیق اثر دما و زمان عملیات حرارتی بر روی خواص کامپوزیت‌های آلومینا-آلومینیم، ریزساختار تشکیل شده و مرز مشترک آلومینا با آلومینیم مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور ابتدا پودر آلومینا همراه با مقادیر مختلفی پودر آلومینیم در درصدهای ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۵ درصد رطوبت مخلوط شده و توسط پرس شکل داده شد. برای بررسی اثر دما بدنه‌های شکل داده شده در دماهای ۱۰۰، ۱۱۰، ۱۲۰، ۱۳۰، ۱۴۰، ۱۴۵ و ۱۵۰ درجه سانتیگراد تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند. همچنین به منظور بررسی اثر زمان در دمای ۱۳۰ درجه سانتیگراد نمونه‌ها در زمان‌های ۱، ۳، ۴، ۵ و ۶ ساعت پخت شدند. بررسی ریزساختاری توسط میکروسکوپ الکترونی روشی (SEM) در مرز مشترک و همچنین میزان اکسیداسیون آلومینیم مورد بررسی قرار گرفت. اثر دما و زمان بر خواص فیزیکی، مکانیکی و آنالیز فازی توسط پراش اشعه ایکس (XRD) نیز بررسی شد.

۱- مقدمه

امروزه کامپوزیت‌ها در تمام دنیا به عنوان مواد مهندسی کاربرد سازه‌ای پیدا کرده‌اند [۱]. کامپوزیت‌ها در نوعی تقسیم‌بندی از نظر زمینه به سه گونه زمینه فلزی، پلیمری و سرامیکی تقسیم بندی می‌شوند [۲]. کامپوزیت‌های زمینه فلزی دارای پتانسیل زیادی برای استفاده در کاربردهای سازه‌ای می‌باشند [۳]. اما به دلیل هزینه بالاتر در مقایسه با آلیاژهای فلزی، استفاده از آنها به کاربردهای با هزینه مناسب و موثر محدود شده است [۴]. از کامپوزیت‌های زمینه پلیمری هم در صنایع هواپیمائی، اتومبیل سازی، پزشکی و الکترونیک استفاده می‌شود [۵].

اما در مورد کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی باید اشاره کرد، نقطه ذوب بالا، استحکام فشاری فوق العاده، حفظ ویژگی‌های رفتاری و ذاتی در دماهای بالا و همچنین مقاومت به خوردگی عالی، از خصوصیات برجسته مواد سرامیکی می‌باشند. اما چنانچه مشخص شده است امروزه موادی در صنعت استفاده می‌شوند که خصوصیات چگون استحکام کششی، مقاومت به ضربه، مقاومت به ارتعاش و شوک حرارتی آنها نیز بالا می‌باشد که عدم وجود اینگونه خواص از نقاط ضعف آنها است که می‌بایست در صورت امکان اصلاح گردند [۶]. لذا برای رسیدن به این خواص کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی که از مواد مختلف با پایه سرامیک شکل گرفته‌اند، از جمله آلومینا-سیلیکون کارباید، آلومینا-پیرکس، آلومینا و انواع فلزات، مو لایت-سیلیکون کارباید و غیره ساخته شده و مورد استفاده قرار می‌گیرند. از کاربردهای این نوع کامپوزیت‌ها می‌توان به صنایع هوا فضا، قطعاتی چون مشعل‌ها، عایق‌ها و سپرهای حرارتی، صنایع پزشکی در ساخت اعضای مصنوعی بدن و تولید ابزار آلات، در عایق‌های حرارتی ابزار برش و قالب‌های کشش سیم اشاره نمود [۷، ۸].

روش‌های مختلف ساخت کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی عبارتند از: ساخت بدنه سرامیکی و تزریق به درون آن، روش اکسیداسیون مستقیم، روش اکسیداسیون درجا (In-situ) و... [۷]. در این تحقیق از روش

اکسیداسیون درجا با اختلاط پودر آلومینا و آلومینیوم استفاده شد و اثر دما و زمان بر روی خواص کامپوزیت ساخته شده بررسی گردید.

۲- فعالیت‌های تجربی

مواد اولیه مصرفی و خواص آنها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- مواد اولیه مصرفی و خواص آنها

ردیف	مواد اولیه	خلوص (درصد)	دانه بندی
۱	پودر ریز آلومینای راکتیو Alcan Ra36	۹۹	زیر ۳۰ میکرون
۲	پودر ریز آلومینیوم	۹۹	زیر ۵۰ میکرون
۳	پودر چسب CMC	-	-

به منظور ساخت کامپوزیت Al_2O_3/Al در ابتدا پودر آلومینا و آلومینیوم به صورت خشک با سه ترکیب مختلف ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد Al مخلوط شدند. پس از اختلاط پودرهای آلومینا و آلومینیوم، محلول حاوی چسب CMC ۱۰ درصد، به میزان ۵ درصد در هر ترکیب اضافه شد. برای جلوگیری از گرانول شدن نا منظم ذرات، بعد از پخش کردن دستی پودرها، الک در چند مرتبه متوالی انجام شد. در غیر این صورت ذرات پودر در اطراف قطره‌های چسب جمع شده و پخش ذرات به صورت غیر همگن در هنگام پرس مشکل ساز خواهد شد. ترکیب حاصل شده، به مدت ۲۴ ساعت جهت عمل aging نگهداری گردید. پس از این مرحله پودر حاصل در اندازه‌های یکسان (حدود ۱ یا ۲ گرمی) وزن شده و در داخل قالب استوانه‌ای شکل به قطر ۱ سانتیمتر ریخته و پرس با فشار ۱۰۰ bar انجام شد. نمونه‌های قرصی شکل تهیه شده از ترکیبات مختلف جهت بررسی اثر دما در دماهای مختلف ۱۰۰۰، ۱۱۰۰، ۱۲۰۰، ۱۳۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد در کوره پخت شدند. سرعت پخت ۱۰ درجه سانتیگراد بر دقیقه و زمان ماندن در بالاترین دما ۳ ساعت بود. همچنین به منظور بررسی اثر زمان بر روی خواص کامپوزیت چند نمونه در دمای ۱۳۰۰ درجه سانتیگراد در زمان‌های مختلف ۱/۵، ۳، ۴/۵ و ۶ ساعت با همان سرعت پخت ۱۰ درجه سانتیگراد بر دقیقه پخت شدند. برای بررسی استحکام کامپوزیت هم مقداری پودر بیج اولیه آماده شده در داخل قالب مکعبی با ابعاد داخلی $8 \times 8 \times 2$ سانتیمتر ریخته شد و بعد از پرس با فشار ۱۰۰ bar مانند سیکل‌های ذکر شده برای نمونه‌های قرصی شکل پخت شدند. بعد از پخت، چند نمونه قرصی شکل تهیه شده از ترکیب‌های مختلف، مانع سرد شده و آنالیز ریز ساختاری توسط (SEM) با دستگاه مدل Cambridge 360 انجام گردید. همچنین به منظور بررسی آنالیز فازی از ترکیبات مختلف پخت شده در دماها و زمان‌های مختلف پودر ریز تهیه شده و مطالعه فازی توسط دستگاه XRD مدل JEOL-JDX-8030 انجام گردید.

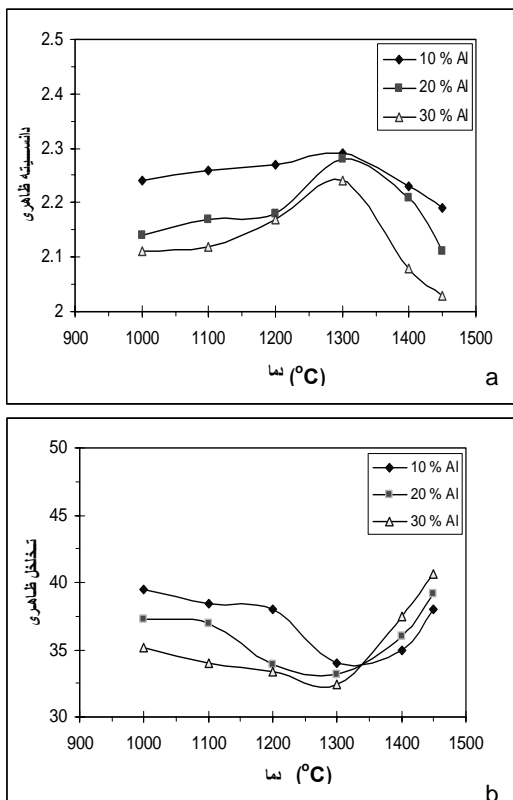
۳- نتایج و بحث

۳-۱- اثر دما و زمان بر چگالی و تخلخل

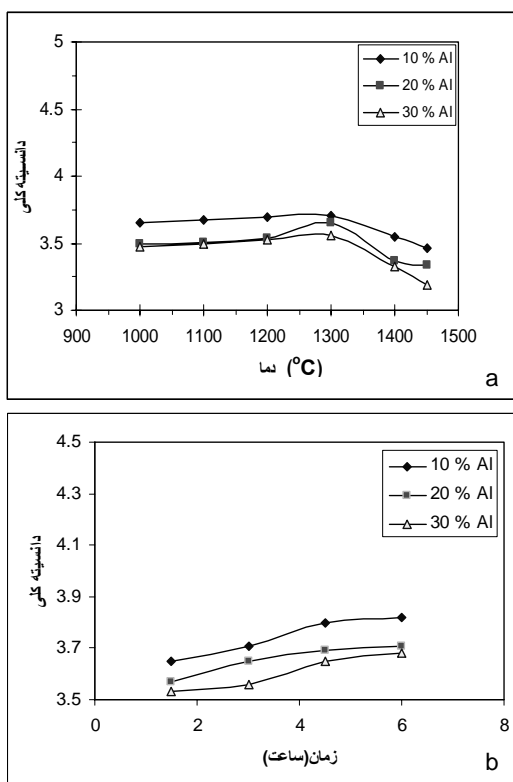
به منظور بررسی اثر دما بر روی چگالی ظاهری، چگالی کلی و تخلخل ظاهری، نتایج حاصل برای نمونه‌های با درصد‌های مختلف Al و زینتر شده در دماهای ۱۰۰۰، ۱۱۰۰، ۱۲۰۰، ۱۳۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد در شکل‌های ۱، ۲ و ۳ (a) نشان داده شده است.

همانطوریکه در این شکل‌ها ملاحظه می‌شود در درصد ثابت Al با افزایش دما چگالی ظاهری و کلی تا $1300^{\circ}C$ افزایش یافته و سپس شروع به کاهش می‌نماید. از طرفی در شکل ۱ (b) با افزایش دمای پخت تخلخل ظاهری تا دمای ۱۳۰۰ درجه سانتیگراد کم شده و سپس شروع به افزایش می‌نماید. همچنین از شکل‌های ۱، ۲ و ۳ ملاحظه می‌شود در دماهای ثابت پخت با افزایش درصد آلومینیوم چگالی و تخلخل کاهش می‌یابند.





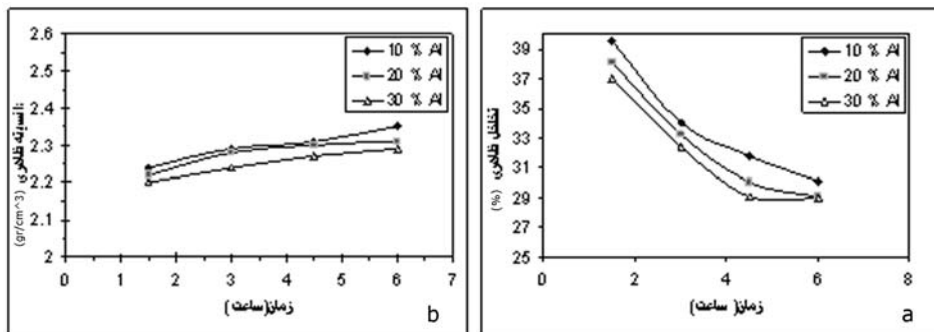
شکل ۱- اثر دما بر روی (a) چگالی ظاهری و (b) تخلخل ظاهری در کامپوزیت Al_2O_3/Al با ترکیب ۱۰، ۲۰، و ۳۰ درصد Al



شکل ۲- اثر دما و (a) اثر زمان بر روی چگالی کلی در کامپوزیت Al_2O_3/Al با ترکیب ۱۰، ۲۰، و ۳۰ درصد Al برای بررسی اثر زمان نتایج حاصل مربوط به نمونه‌های پخته شده در دمای ۱۳۰۰ درجه سانتیگراد با زمان‌های پخت ۱/۵، ۳، ۴/۵ و ۶ ساعت در این دما در شکل‌های (b) و (c) آورده شده است.



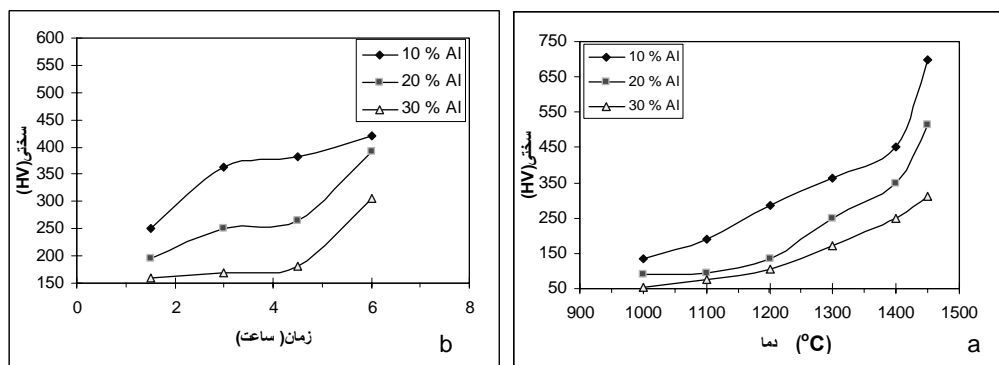
در این شکل‌ها ملاحظه می‌شود که با افزایش زمان پخت در درصدهای ثابت آلومینیوم چگالی ظاهری و کلی افزایش یافته و تخلخل کاهش می‌یابد.



شکل ۳- (a) اثر زمان بر روی چگالی ظاهری و (b) اثر زمان بر روی تخلخل ظاهری در کامپوزیت Al_2O_3/Al با ترکیب ۱۰، ۲۰، ۳۰ درصد Al

۳-۲- اثر دما و زمان بر سختی

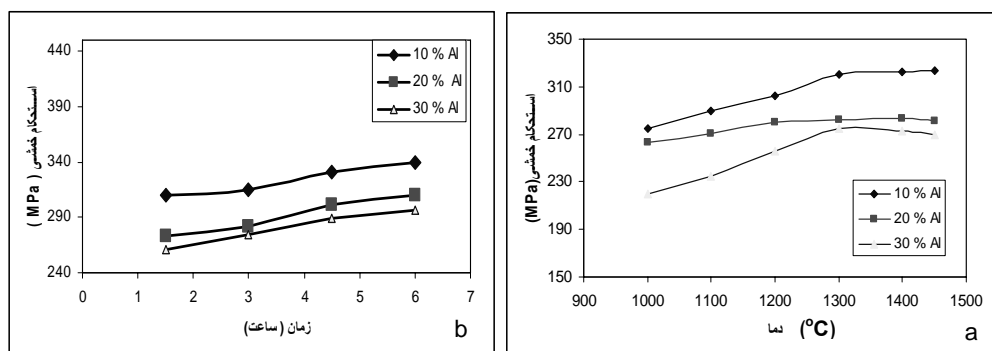
در ادامه نتایج مربوط به نمونه‌های با ترکیب‌های مختلف پخته شده در دماها و زمان‌های مختلف آورده شده است. در شکل ۴ ملاحظه می‌شود با افزایش دما و زمان در ترکیب‌های یکسان سختی افزایش یافته است. از طرفی در دما و زمان پخت یکسان با افزایش درصد آلومینیوم سختی کاهش یافته است.



شکل ۴- (a) اثر دما و (b) اثر زمان بر روی سختی در کامپوزیت Al_2O_3/Al با ترکیب ۱۰، ۲۰، ۳۰ درصد Al

۳-۳- اثر دما و زمان بر استحکام خمشی

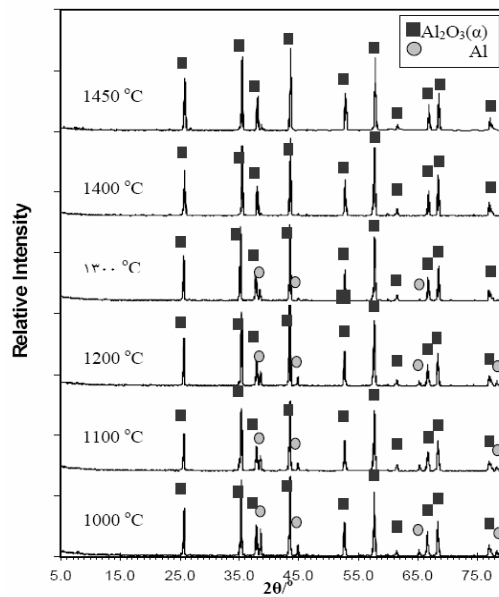
نتایج مربوط به استحکام خمشی نمونه‌های با ترکیب‌های مختلف و اثر دما و زمان پخت بر روی استحکام خمشی آنها در شکل ۵ آورده شده است. ملاحظه می‌شود با افزایش دما و زمان پخت در درصدهای ثابت آلومینیوم استحکام افزایش یافته است. همچنین در دما و زمان پخت یکسان با افزایش درصد آلومینیوم استحکام خمشی کامپوزیت کاهش یافته است.



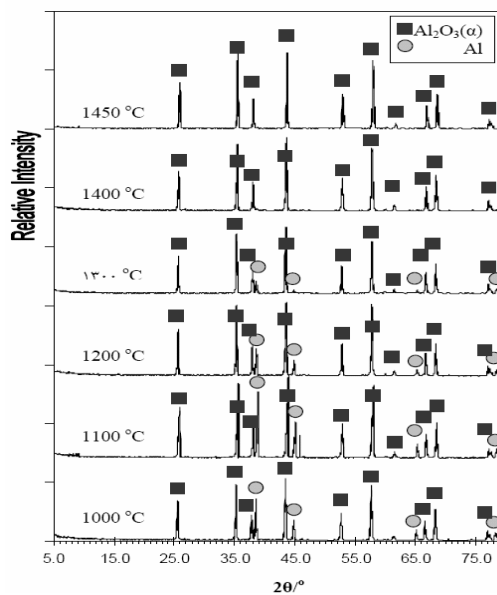
شکل ۵- (a) اثر دما و (b) اثر زمان بر استحکام خمشی در کامپوزیت Al_2O_3/Al با ترکیب ۱۰، ۲۰، ۳۰ درصد Al

۳-۴- بررسی‌های فازی

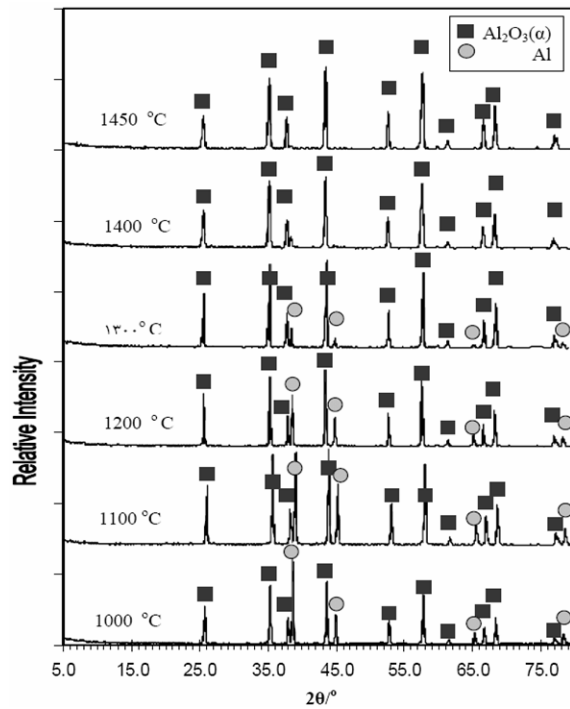
مطالعه ترکیب کامپوزیت Al_2O_3/Al توسط الگوی پراش اشعه ایکس انجام گرفت. همانگونه که در شکل‌های ۶ و ۷ و ۸ ملاحظه می‌گردد، فازهای نهایی موجود در بدنه Al و Al_2O_3 می‌باشند. که البته با بررسی شدت این پیک‌ها ملاحظه می‌شود، نوع فاز آلومینا در دماهای ۱۰۰۰ تا ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد (α) بوده و Al_2O_3 در این دماها تغییرات فازی نداشته است که این مورد در ادامه بحث در شکل ۱۲ هم ملاحظه می‌شود. همچنین در اشکال ۶، ۷ و ۸ ملاحظه می‌شود که در هر سه ترکیب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد Al با افزایش دما شدت پیک‌های Al کم شده و شدت پیک‌های Al_2O_3 افزایش می‌یابند. همچنین در شکل ۹ هم ملاحظه می‌شود در دمای ثابت، با افزایش زمان زینتری به عنوان پارامتر متغیر میزان اکسیداسیون افزایش یافته و با کاهش شدت پیک‌های Al بر شدت پیک‌های Al_2O_3 افزوده می‌شود.



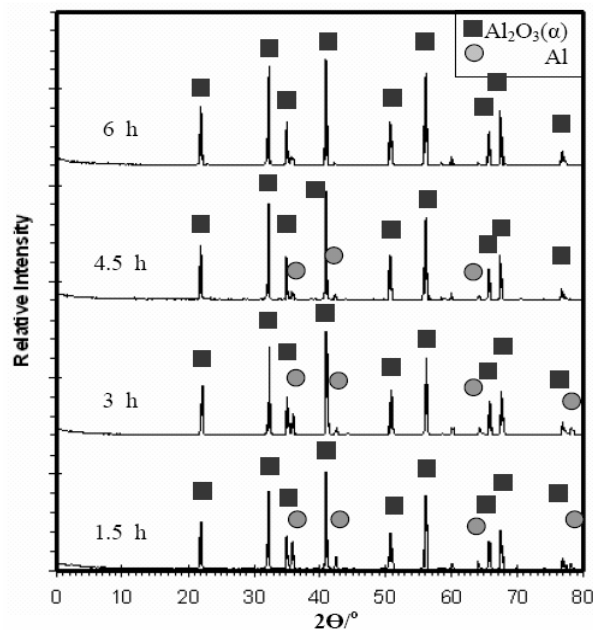
شکل ۶- الگوی پراش اشعه ایکس کامپوزیت Al_2O_3/Al با ترکیب ۱۰٪ Al زینتر شده در دماهای ۱۰۰۰، ۱۱۰۰، ۱۲۰۰، ۱۳۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد و زمان ماندن ۳ ساعت در دمای ماکزیمم



شکل ۷- الگوی پراش اشعه ایکس کامپوزیت Al_2O_3/Al با ترکیب ۲۰٪ Al زینتر شده در دماهای ۱۰۰۰، ۱۱۰۰، ۱۲۰۰، ۱۳۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد و زمان ماندن ۳ ساعت در دمای ماکزیمم



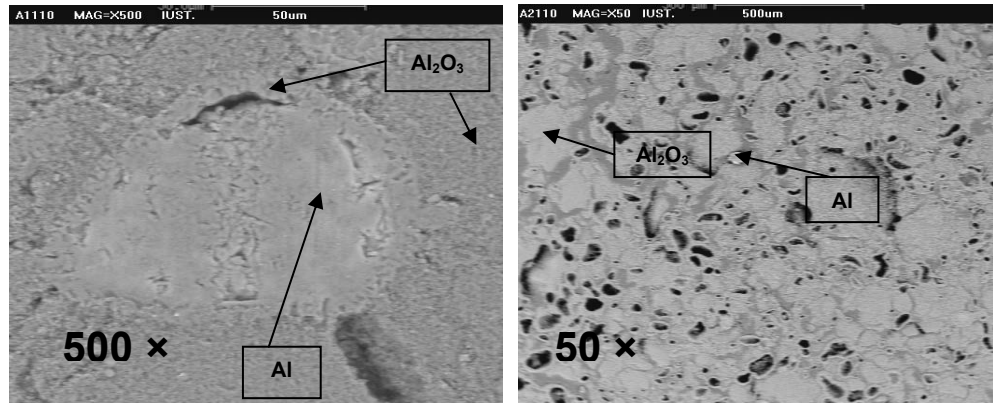
شکل ۸- الگوی پراش اشعه ایکس کامپوزیت Al_2O_3/Al با ترکیب $Al/30\%$ زینتر شده در دماهای ۱۰۰۰، ۱۱۰۰، ۱۲۰۰، ۱۳۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد و زمان ماندن ۳ ساعت در دمای ماکزیمم



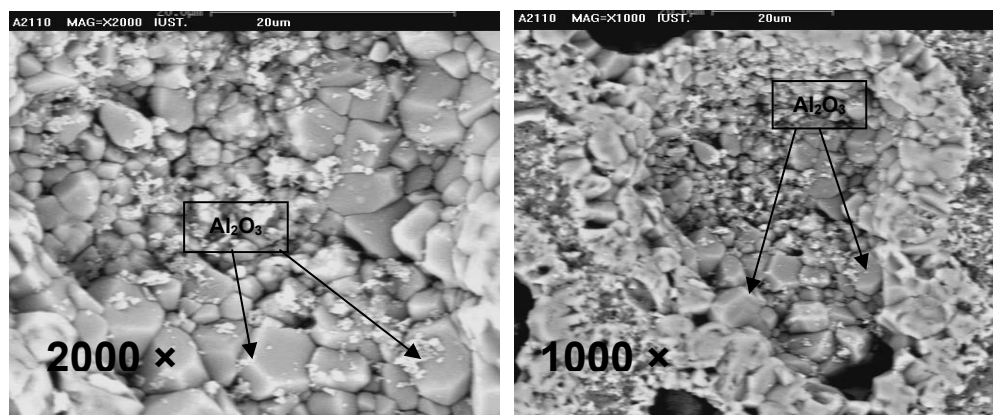
شکل ۹- الگوی پراش اشعه ایکس کامپوزیت Al_2O_3/Al با ترکیب $Al/20\%$ زینتر شده در دمای ۱۳۰۰ درجه سانتیگراد و زمان‌های ماندن ۱/۵، ۳، ۴/۵ و ۶ ساعت در دمای ماکزیمم

۳-۵- بررسی‌های ریزساختاری

جهت بررسی ریز ساختار کامپوزیت Al_2O_3/Al تصاویر SEM چند نمونه در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ (a, b) مشاهده می‌گردد. شکل ۱۰ توزیع ذرات آلومینیومی در بین ذرات آلومینایی، قرار گرفتن ذرات فلزی در زمینه آلومینایی و اکسیداسیون این ذرات از سطح را نشان می‌دهد. شکل ۱۱ هم اکسیداسیون ذره فلزی آلومینیوم و ساختار اکسید آلومینیوم تشکیل شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- (a,b) تصویر SEM کامپوزیت $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ (۱۰٪ Al) زینتر شده در دمای 1400°C و ۳ ساعت زمان ماندن در دمای ماکزیمم



شکل ۱۱- (a,b) تصویر SEM کامپوزیت $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ (۱۰٪ Al) زینتر شده در دمای 1450°C و ۳ ساعت زمان ماندن در دمای ماکزیمم

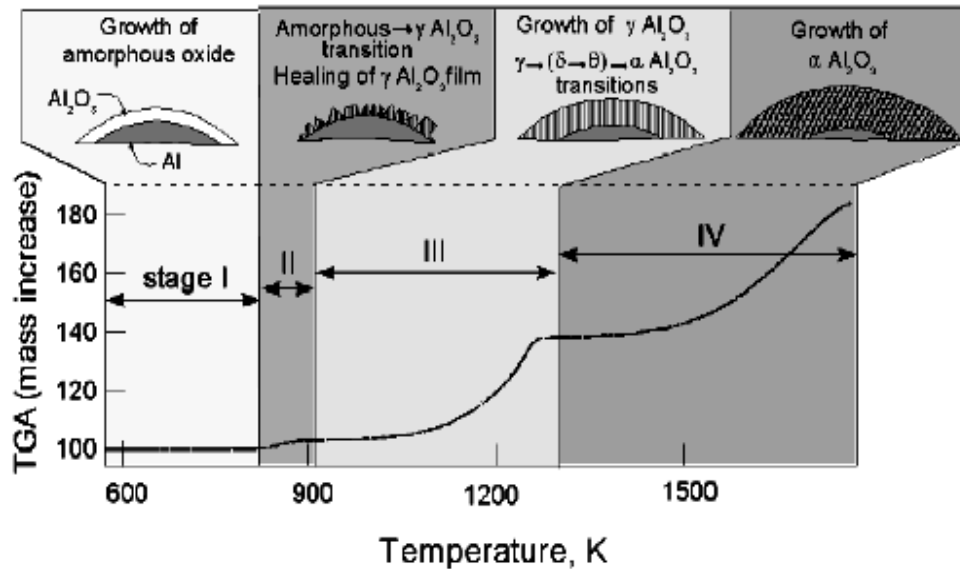
همانطوریکه از نتایج حاصل در شکل‌های بالا ملاحظه می‌شود، دما و زمان تاثیرات متفاوتی بر خواص کامپوزیت دارند. اثر این دو پارامتر را می‌توان از طریق تاثیر بر عوامل مختلف مانند ترشوندگی ذرات جامد توسط مذاب، اکسیداسیون ذرات آلومینیومی موجود در زمینه آلومینایی، اختلاف ضریب انبساط حرارتی زمینه و تقویت کننده، اختلاف چگالی دو فاز، تغییرات فازی آلومینا در دماهای مختلف و بویژه فصل مشترک دو فاز زمینه و تقویت کننده دانست.

تغییرات فازی آلومینا در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همانطوریکه مشاهده می‌شود فاز ۷ تا دمای زیر 1000°C پایدار بوده و پس از این دما به فاز α تبدیل می‌شود. صحت این گفته در نتایج حاصل از الگوی پراش اشعه ایکس کامپوزیت‌ها در شکل‌های ۶، ۷، ۸ و ۹ و منابع مختلف مورد تایید می‌باشد [۹].

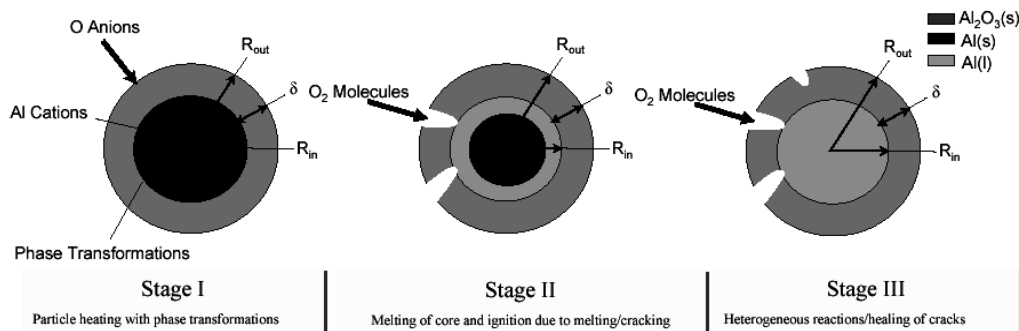
همچنین در شکل ۱۳ نحوه تشکیل لایه اکسیدی، نفوذ مولکول‌های اکسیژن در این لایه و افزایش میزان اکسیداسیون با تغییر دما و زمان نشان داده شده است.

در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ لایه اکسیدی در اطراف ذره آلومینیومی طبق شکل شماتیک ۱۳ مشاهده می‌شود. با ایجاد این لایه اکسیدی عامل موثر بر اکسیداسیون میزان نفوذ مولکول‌های اکسیژن در این لایه می‌باشد. دو پارامتر دما و زمان عوامل موثر بر میزان نفوذ و در نتیجه اکسیداسیون می‌باشند.

در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ لایه اکسیدی در اطراف ذره آلومینیومی طبق شکل شماتیک ۱۳ مشاهده می‌شود. با ایجاد این لایه اکسیدی عامل موثر بر اکسیداسیون میزان نفوذ مولکول‌های اکسیژن در این لایه می‌باشد. دو پارامتر دما و زمان عوامل موثر بر میزان نفوذ و در نتیجه اکسیداسیون می‌باشند.



شکل ۱۲- تغییرات فازی آلومینا در اثر افزایش دما [۶]



شکل ۱۳- مراحل اکسیداسیون ذره آلومینیومی و نحوه نفوذ اکسیژن در لایه اکسیدی [۶]

در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ لایه اکسیدی در اطراف ذره آلومینیومی طبق شکل شماتیک ۱۳ مشاهده می‌شود. با ایجاد این لایه اکسیدی عامل موثر بر اکسیداسیون میزان نفوذ مولکول‌های اکسیژن در این لایه می‌باشد. دو پارامتر دما و زمان عامل موثر بر میزان نفوذ و در نتیجه اکسیداسیون می‌باشند.

در شکل‌های ۱ و ۲ با افزایش دما تا 1300°C اکسیداسیون افزایش یافته و با افزایش جرم کامپوزیت چگالی افزایش یافته است. از طرفی با افزایش میزان نفوذ و قویتر شدن پیوند میان ذرات تقویت کننده و زمینه تخلخل کاهش می‌یابد. اما به نظر می‌آید با بالاتر رفتن دما و پیشرفت اکسیداسیون به علت کاهش فاز مذاب میزان تخلخل‌ها افزایش یافته و چگالی کاهش می‌یابد. البته می‌توان به ترک‌های حاصل در اثر افزایش دما و ناشی از اختلاف ضریب انبساط حرارتی Al و Al_2O_3 و در همین راستا همانطوریکه در شکل ۵ ملاحظه می‌شود با افزایش جرم کامپوزیت در اثر اکسیداسیون، استحکام با افزایش دما تا دمای 1300°C افزایش یافته و در ادامه با زیاد شدن تخلخل و افزایش ترک‌های حاصل استحکام کاهش می‌یابد.

در شکل‌های اشاره شده ملاحظه می‌شود در دماها و زمان‌های یکسان پخت، با افزایش درصد فاز آلومینیوم با اینکه در اثر افزایش فاز مذاب تخلخل کاهش می‌یابد، اما به علت افزایش نسبت فاز با چگالی پایین‌تر (آلومینیوم) به فاز با چگالی بالاتر (آلومینا) چگالی هم کاهش می‌یابد.

در شکل ۳ ملاحظه می‌شود با افزایش زمان، چگالی افزایش یافته و تخلخل کاهش می‌یابد. در حقیقت گام کنترل کننده نفوذ و میزان واکنش اکسیداسیون، زمان می‌باشد. در بررسی اثر زمان هم مشاهده می‌شود با این افزایش چگالی و کاهش تخلخل استحکام افزایش یافته است.

در بررسی اثر دما و زمان بر روی سختی در شکل ۴ ملاحظه می‌شود که با افزایش دما و زمان و پیشرفت واکنش اکسیداسیون، میزان فاز سخت اکسید آلومینیوم در کامپوزیت افزایش یافته و دما و زمان به عنوان عوامل موثر بر اکسیداسیون سختی را افزایش می‌دهند. در شکل‌های فوق ملاحظه می‌شود در دماها و زمان‌های یکسان، با افزایش میزان فاز نرم آلومینیوم سختی کاهش یافته است. در تمامی خواص فوق تاثیر فصل مشترک و واکنش اکسیداسیون کاملاً مشهود می‌باشد. البته می‌توان در الگوی پراش اشعه ایکس کامپوزیت تولید شده سیکل واکنش اکسیداسیون و اثر دما و زمان را در شکل‌های ۶، ۷، ۸ و ۹ مشاهده نمود که با توضیحات داده شده مطابقت می‌نماید. لازم به ذکر است نتایج بدست آمده در تحقیقات مشابه دیگر مقادیر بدست آمده برای چگالی، تخلخل، سختی و استحکام کششی در تحقیق حاضر را تایید می‌کند [۱۰، ۱۱ و ۱۲].

۴- نتیجه گیری

با بررسی نتایج مربوط به الگوی پراش اشعه ایکس (XRD) نمونه‌های گرفته شده در دماهای ۱۰۰۰ تا 1450°C درجه سانتیگراد، مشاهده می‌شود که با افزایش دما عمل اکسیداسیون افزایش یافته و در دمای 1300°C به بالا تقریباً همه Al ها به Al_2O_3 تبدیل شده و پیکی از Al در دمای 1400°C مشاهده نمی‌شود. همچنین طی عمل زینتر در دماهای ۱۰۰۰ تا 1450°C درجه سانتیگراد همه پیک‌ها نشان دهنده فاز (α) بوده و پایداری فاز فوق را در این دماها نشان می‌دهد. همچنین توزیع ذرات Al در زمینه Al_2O_3 و تخلخل‌های حاصل از اختلاف ضریب انبساط حرارتی این دو ماده در تصاویر SEM کاملاً قابل مشاهده می‌باشند. نتایج حاصل از بررسی چگالی و تخلخل نشان می‌دهد به علت تاثیر پارامترهای مختلف، اختلاف چگالی Al و Al_2O_3 ، تفاوت ضریب انبساط حرارتی این دو ماده، دما، ترکیب و وابستگی آنها به هم نمی‌توان ترکیب و دمای خاصی را به عنوان بهینه انتخاب نمود. اما نتیجه‌ای که از این تحقیق حاصل شده است نشان می‌دهد که در دمای 1300°C پایین‌ترین میزان تخلخل حاصل می‌شود.

منابع

1. Derek hull, "An Introduction to Composite Materials", Cambridge University, (1981).
2. Tongxiang Fan and Di Zhang, "Fabrication of in situ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ composite via remelting", Journal of Materials Processing Technology, Volume 142, Issue 2, PP 556-561(2003).
3. J. Fridlyander, "Metal matrix composites", London, Chapman & Hall, (1995).
4. Minoru taya, "Metal matrix composites", Oxford pergamon, (1989).
5. M.O. Richardson, "Polymer engineering composite", (1997).
6. S. Banerjee, S. K. Roy, "Net-shape forming of bi-continuous $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ composite by displacement reaction", (2001).
7. K. Engi. K. Cha Wia, "Ceramic matrix composite", Chapman & Hall, (1993).
8. Dickon H. L. Ng, Qing Zhao, "Formation of aluminum/alumina ceramic matrix composite by oxidizing an Al-Si-Mg alloy", Journal of the European Ceramic Society, Volume 21, Issue 8, PP 1049-1053 (2001).
9. P. Puri and V. Yang, "Multi-Scale Modeling of Nano Aluminum Particle Ignition and Combustion, The Pennsylvania State University, (2006).
10. J. Zhang, "Wear behavior of Lanxide $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ composite", Wear, Volume 215, Issues 1-2, PP 34-39(1998).
11. A. Muntiz, M. Metzeger and R. Mehrabian, "The Interface Phase in Al-Mg/ Al_2O_3 Composites", Metal Trans. A, Vol.10A, p.1491(1979).
12. T. Das & P. Munroe, "Interfacial Behavior of 6061/ Al_2O_3 Metal Matrix Composites", Material Science and Technology, Vol.13, PP.778-784(1997).

تعیین زمان و دمای بهینه عملیات حرارتی شیشه فتوکروم آلومینوبوروسیلیکاتی

مهندس احمد صبوری

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران

sabourya@metaleng.iust.ac.ir

چکیده: در این پژوهش یک ترکیب بسیار پر کاربرد از شیشه‌های فتوکرومیک آلومینوبوروسیلیکاتی انتخاب شد. بعد از انجام عمل ذوب و آنیل و بدست آوردن شیشه در مرحله عملیات حرارتی تغییراتی در زمان‌ها و دماهای عملیات حرارتی اعمال شد. سپس نتایج حاصل از این تغییرات به کمک آنالیز اسپکتروفوتومتر و نیز مشاهدات نظری مورد بررسی قرار گرفت. سپس تلاش شد با تحلیل این نتایج زمان و دمای بهینه عملیات حرارتی تعیین گردد. نتایج حاصله نشان داد که افزایش زمان و دمای عملیات حرارتی سبب افزایش میزان بلورک‌های AgCl و در نتیجه بهبود خاصیت فتوکرومیسم در نمونه‌ها می‌شود. بر این اساس بهترین دمای عملیات حرارتی برای ایجاد خاصیت فتوکرومیسم در ترکیب شیشه انتخابی برابر 680°C و مدت زمان عملیات حرارتی در این دما ۵۰ دقیقه می‌باشد.

کلمات کلیدی: شیشه؛ فتوکرومیک؛ عملیات حرارتی

۱- مقدمه

شیشه‌های فتوکرومیک پس از ذوب و آنیلینگ بی‌رنگ هستند ولی پس از تنش زدایی و با انجام عملیات حرارتی مخصوص، ذرات یا جوانه‌های بلوری هالیدها در آنها بوجود می‌آیند که ویژگی‌هایی از قبیل ضریب جذب شیشه را تغییر می‌دهند. [۱] طی این عملیات حرارتی زمان و دمای لازم برای رشد کریستال‌های AgX در شبکه شیشه فراهم می‌شود. بنابر این اعمال هرگونه تغییر در این مرحله می‌تواند از طریق ایجاد تغییر در اندازه یا میزان تبلور بلورک‌های AgX، شرایط نهایی محصول شیشه‌ای را تحت تأثیر قرار دهد. [۲]

در این پروژه تلاش بر این بوده که با بررسی تأثیر تغییر شرایط عملیات حرارتی بعنوان بخشی مهم از فرآیند تولید و ساخت این شیشه‌ها، تصویری بر مبنای مشاهدات علمی و نتایج حاصله از شرایط کاری و چگونگی عملکرد این دسته از شیشه‌ها ارائه شود. به همین منظور نتایج حاصل از اعمال این تغییرات به کمک آنالیزهای اسپکتروفوتومتر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

۲- فعالیت‌های آزمایشگاهی

مواد اولیه شیشه فتوکروم آلومینو برو سیلیکاتی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت مطابق جدول ۱ می‌باشد [۳].

جدول ۱- ترکیب شیشه فتوکروم (درصد مولی)

B ₂ O ₃	CuO	AgCl	P ₂ O ₅	Li ₂ O	K ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	اکسید
۲۰/۳۳	۰/۰۱۸	۰/۵۸	۱/۲۱	۳/۳۹	۹/۳۴	۸/۷۴	۵۶/۳۶	درصد

برای بالا بردن خلوص سیلیس به بیش از ۹۹٪ از فرآیند اسید شویی بهره گرفته شد. مواد اولیه توزین و مخلوط شده در بوتله پلاتینی در دمای 1450°C ذوب و به مدت ۲ ساعت و ۳۰ دقیقه در دمای ذوب نگهداری شد. سپس مذاب در آب تخلیه شد تا از آن فریت تهیه شود. این عمل به منظور همگن سازی بیشتر شیشه‌های نهایی انجام گرفت.

آنگاه فریت‌های حاصل از دو ذوب متوالی در یک بوتله آلومینایی با ظرفیت 50 cm^3 مجدداً در دمای 1450°C ذوب و به مدت یک ساعت در دمای ذوب نگهداری شدند و یک مذاب کاملاً همگن با ویسکوزیته مناسب به منظور ریختن بدست آمد. [۴]

این مذاب در داخل قالب استوانه‌ای فلزی پیش گرم شده شکل داده شد و نمونه‌های آماده شده در کوره عملیات حرارتی با دمای 450°C و به مدت ۴۰ دقیقه آنیل شدند. [۳]

سپس به منظور بررسی خواص نوری و قابلیت فتوکروم شدن نمونه‌هایی استوانه‌ای شکل به قطر 16 mm و ضخامت $1/6\text{ mm}$ بریده شدند.

اثر زمان و دمای عملیات حرارتی بر خاصیت فتوکرومیسم شیشه‌ها توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر بررسی و اندازه‌گیری شد. نمونه شاهد در این آزمایش شیشه پایه‌ای بود که عملیات حرارتی نشده بود و در نتیجه هیچ رسوبی از بلورک‌های AgCl نداشت. بررسی خواص نوری در محدوده طول موجی 190 تا 1100 نانومتر صورت گرفت. همچنین در این آزمایش به منظور بررسی خواص نوری نمونه‌ها در حالت تیره و به منظور استاندارد کردن شرایط از یک نمونه لامپ UV با توان 50 وات که طول موجی در محدوده 360 نانومتر داشت استفاده شد. بدین منظور نمونه‌ها به مدت ۳ دقیقه در معرض تابش این لامپ قرار می‌گرفتند و بعد بلافاصله مورد آزمایش اسپکتروفوتومتر قرار می‌گرفتند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تعیین دمای بهینه عملیات حرارتی

محدوده مناسب برای عملیات حرارتی در مورد ترکیب مورد آزمایش بین دمای انتقال به شیشه (T_g) و دمایی که جدایش فازی مایع-مایع به وقوع می‌پیوندد می‌باشد. در پایین‌تر از این محدوده خاصیت فتوکرومیسم مشاهده نمی‌شود و در بالاتر از آن اپالسنس در نمونه‌ها به وقوع می‌پیوندد. [۵] بنابر این دما و زمان دقیق مناسب عملیات حرارتی برای ترکیب مذکور عملاً باید از طریق آزمایش تعیین گردد.

برای بررسی نقش دمای عملیات حرارتی بر تبلور بلورک‌های AgCl و در نتیجه شرایط فتوکرومیسم نمونه‌ها، دماهای متفاوتی در مورد این ترکیب مورد بررسی قرار گرفت.

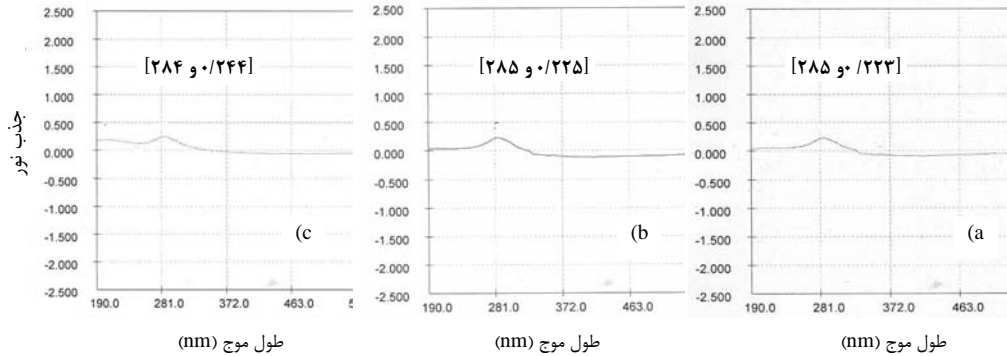
بررسی‌های انجام شده نشان داد که نمونه‌ای که در دمای 570°C و به مدت ۳۰ دقیقه حرارت داده شده بود اصلاً حساسیتی در مقابل تابش پرتوهای UV از خود نشان نداد و به عبارت دیگر مشخصات فتوکرومیسم را دارا نبود. اما نمونه‌ای که در دمای 580°C و به مدت ۳۰ دقیقه حرارت داده شده بود تغییرات بسیار اندکی در مقابل تابش پرتوهای UV از خود به نمایش گذاشت. از این رو این دما بعنوان پایین‌ترین حد دمای عملیات حرارتی در ترکیب مورد نظر معرفی شد.

با افزایش دمای عملیات حرارتی شرایط تیره و روشن شدن نمونه‌ها بهتر شد تا جایی که به تدریج در مورد نمونه‌ای که در دمای 690°C و به مدت ۳۰ دقیقه حرارت داده شده بود تغییرات بسیار اندکی در شفافیت نمونه و به شکل رگه‌های سفید بسیار جزیی در ترکیب شیشه ظاهر شد. این اتفاق در مورد نمونه‌ای که در دمای 700°C و به مدت ۳۰ دقیقه حرارت داده شده بود با وضوح بیشتری قابل رؤیت بود تا جایی که ظاهر این نمونه حتی تا حدودی شیری رنگ به نظر می‌رسید. این رفتار می‌تواند ناشی از رشد افراطی بلورک‌های AgCl یا جدایش فازی مایع-مایع در شیشه‌های مذکور باشد. اما در مورد نمونه‌ای که در 680°C عملیات حرارتی شده بود چنین شرایطی مشاهده نشد، از این رو این دما بعنوان بالاترین حد دمای عملیات حرارتی معرفی شد.

به منظور محسوس‌تر شدن تأثیر دماهای مختلف عملیات حرارتی بر روی خواص نوری این شیشه‌ها، نمونه‌ها با استفاده از اسپکتروفوتومتر آنالیز شدند. نتایج این آنالیز در مورد بالاترین و پایین‌ترین حد دمای عملیات

حرارتی و همچنین دمای بینابین، در شکل ۱ آورده شده است. لازم به ذکر است که اعداد قید شده در بالای هر پیک به ترتیب معرف طول موج جذب و جذب می‌باشند.

لازم به ذکر است که نمونه‌های مذکور بدون آنکه در معرض تابش نور قبلی قرار گیرند مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. به عبارت دیگر این نمونه‌ها قبلاً کاملاً روشن^۱ بوده‌اند.

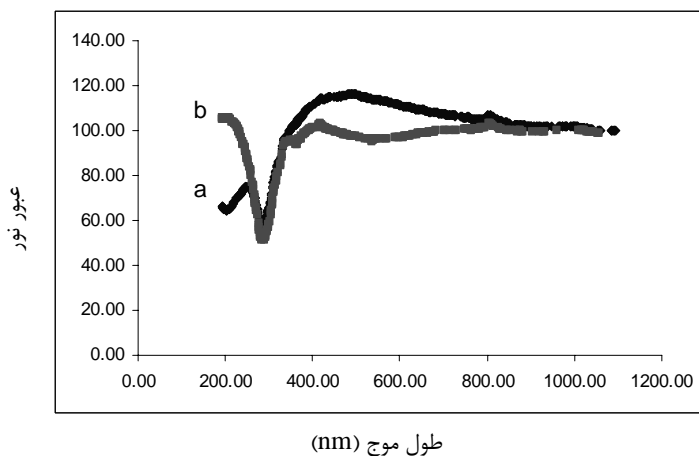


شکل ۱- نمودارهای جذب بر اساس طول موج نمونه‌های عملیات حرارتی شده در 45°C (a) و 58°C (b) و 65°C (c) و از قبل روشن (زمان نگهداری در هر دما ۳۰ دقیقه می‌باشد)

همانگونه که مشاهده می‌شود افزایش دمای عملیات حرارتی باعث افزایش جذب نور در مورد نمونه‌ها شده است. این افزایش در مورد پایین‌ترین و بالاترین حد دمای عملیات حرارتی از $223/0$ تا $244/0$ بوده است. علت این امر را می‌توان با افزایش تعداد بلورک‌های AgCl در دماهای بالاتر مرتبط دانست.

به منظور نمایان شدن قابلیت فتوکرومیسم این نمونه‌ها، نتایج آنالیز اسپکتروفوتومتر نمونه‌ای که در دمای 45°C و 68°C عملیات حرارتی شده در شرایطی که قبلاً به مدت ۳ دقیقه تحت تابش پرتوهای UV قرار گرفته و تقریباً به حداکثر میزان تیرگی خود رسیده در شکل ۲ آورده شده است. (حداکثر میزان تیرگی به این معنی است که با افزایش زمان تابش میزان تیرگی افزایش نیابد)

همانگونه که در شکل مشهود است در محدوده قابل رؤیت برای چشم انسان ($400-700\text{nm}$)، کاهش میزان عبور نور در مورد شکل b بعلت تیره شدن این نمونه تحت تابش پرتوهای UV می‌باشد. در واقع علت این امر بوجود آمدن کلاسترهای نقره در اثر تابش پرتوهای UV می‌باشد که سبب پراکندگی بیشتر نور مرئی، تیرگی این شیشه‌ها و در نتیجه کاهش درصد عبور نور شده است.

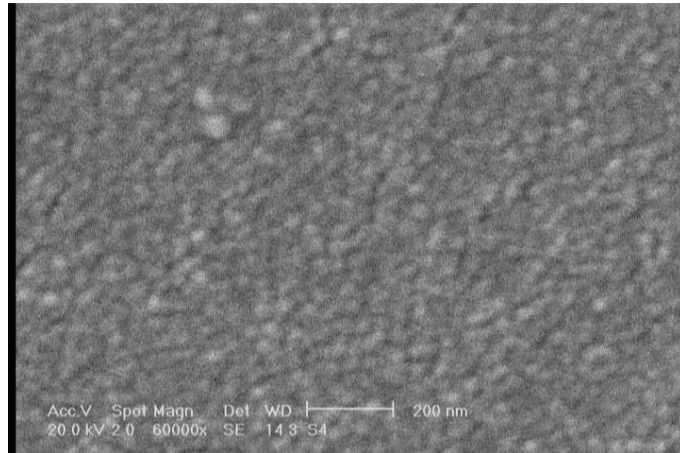


شکل ۲- نمودارهای درصد عبور نور بر اساس طول موج نمونه‌های عملیات حرارتی شده در دمای 45°C و 68°C (a) از قبل روشن (b) بعد از ۳ دقیقه تابش پرتوهای UV

¹ fade

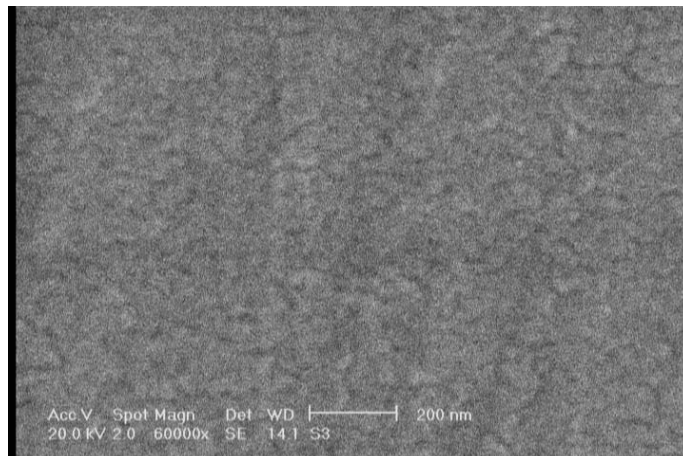
در ادامه برخی از نتایج بررسی‌های ریز ساختاری (تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی) نیز به منظور تایید نتایج دیگر آورده شده است.

همانطور که می‌دانیم دمای 580°C بعنوان پایین‌ترین دمای عملیات حرارتی برای مشاهده خواص فتوکرومیک معرفی شده بود. با توجه به شکل ۳ و معرفی ذرات سفید رنگ موجود در آن بعنوان ذرات AgCl تبلور یافته، تأثیر عملیات حرارتی در تبلور بلورک‌ها بخوبی نمایان است.



شکل ۳- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه‌ای که به مدت ۳۰ دقیقه در 450°C و سپس ۳۰ دقیقه در دمای 580°C تحت عملیات حرارتی قرار گرفته

از طرفی دیگر همانطور که پیش از این اشاره شده بود نمونه‌هایی که در دمای 700°C عملیات حرارتی می‌شدند اندکی دچار جدایش فاز و در نتیجه شیری رنگ می‌شدند. با دقت در شکل ۴ نیز می‌توان مناطقی را که دچار جدایش فاز شده‌اند تشخیص داد.



شکل ۴- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه‌ای که به مدت ۳۰ دقیقه در دمای 450°C و سپس ۳۰ دقیقه در دمای 700°C تحت عملیات حرارتی قرار گرفته

در واقع بنا بر این نتایج دمای 680°C را می‌توان بهترین دمای عملیات حرارتی برای ساخت شیشه فتوکروم مذکور معرفی کرد زیرا در این دما از طرفی سرعت و قدرت تیره شدن نسبت به نمونه‌های دیگر بالاتر است و از طرفی دیگر شفافیت این شیشه‌ها همچنان حفظ شده است.

۳-۲- تعیین زمان بهینه عملیات حرارتی

بعد از بررسی اثر دماهای مختلف عملیات حرارتی بر قابلیت فتوکرومیسم نمونه‌ها، با توجه به اینکه فاکتور زمان نیز بر میزان و ابعاد بلورک‌های حساس به نور تأثیر بسزایی دارد، تغییر زمان عملیات حرارتی و بررسی

خواص اپتیکی شیشه مد نظر قرار گرفت.

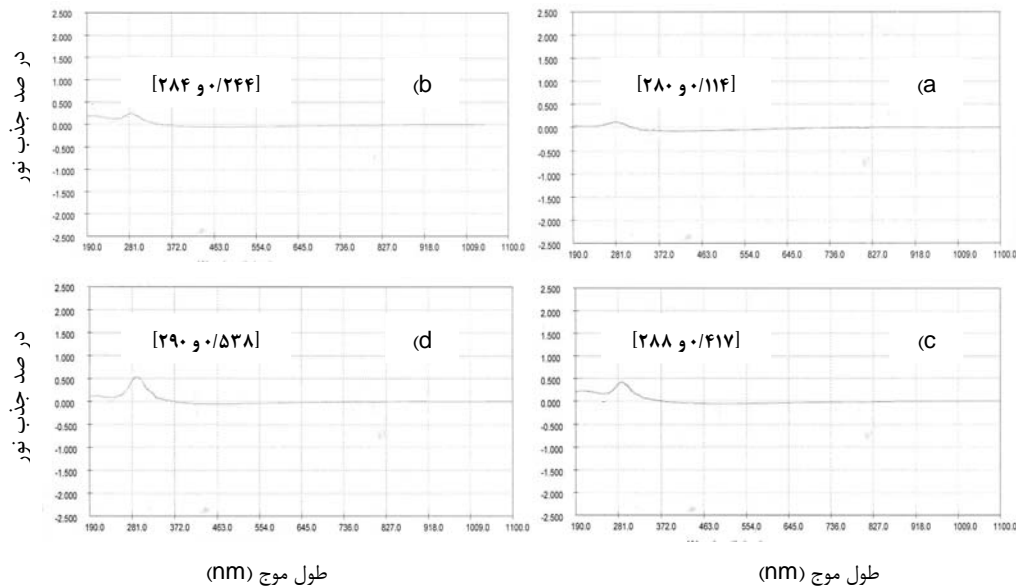
برای بررسی این نظر و مشاهده نقش زمان عملیات حرارتی بر تبلور بلورک‌های AgCl سه نمونه را که هر یک به مدت ۳۰ دقیقه در دمای 450°C حرارت داده شده بودند مطابق جدول ۲ با سه زمان متفاوت در دمای 680°C نگهداری کردیم.

جدول ۲- قابلیت فتوکروم شدن نمونه‌هایی که در درجه حرارت بهینه با زمان‌های متفاوت عملیات حرارتی شده‌اند.

نام ترکیب	مدت زمان (دقیقه) ماندگاری شیشه در دمای 680°C	قابلیت فتوکروم شدن	تغییرات ظاهری (بر اساس مشاهدات نظری)
Z6T ₁	۲۰	دارد	شرایط خوب تیره و روشن شدن
Z6T ₂	۵۰	دارد	افزایش تیرگی + سرعت مطلوب تیره شدن
Z6T ₃	۶۵	دارد	ظهور رگه‌های شیری در ظاهر نمونه بعلت رشد افراطی بلورک‌ها

همانگونه که در جدول نیز مشاهده می‌شود افزایش زمان عملیات حرارتی شرایط فتوکروم را از لحاظ سرعت و مقدار تیرگی بهبود می‌بخشد و میزان جذب نور در مورد نمونه‌هایی که مدت زمان بیشتری در دمای 680°C حرارت دیده‌اند افزایش یافته است. به نظر می‌رسد این رفتار بعلت افزایش میزان بلورک‌های AgCl می‌باشد. در این مورد نیز باید به این مطلب توجه داشت که نگهداری در مدت زمان بیشتر می‌تواند آنچنان سبب رشد بلورک‌ها گردد که بر شرایط ظاهری نمونه تأثیر منفی بگذارد و شفافیت آن را تحت تأثیر قرار دهد.

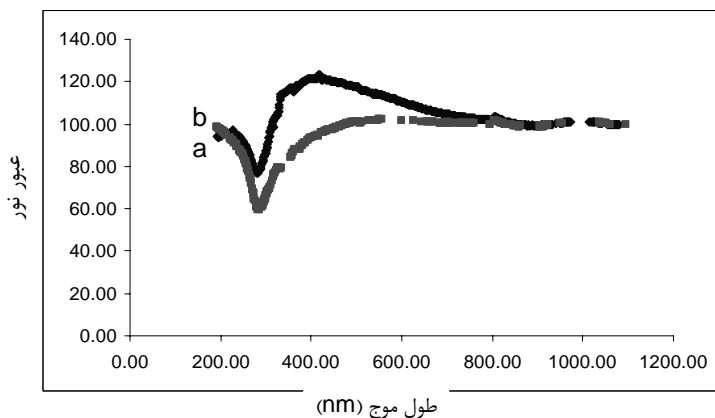
به منظور کمی کردن تأثیر زمان عملیات حرارتی بر خواص نوری نمونه‌ها، آنالیز اسپکتروفوتومتر انجام گرفت. نتایج این آنالیز در شکل ۵ آمده است.



شکل ۵- نمودارهای جذب براساس طول موج نمونه‌های عملیات حرارتی شده در دمای 680°C و به مدت زمان (a) ۲۰، (b) ۳۰، (c) ۵۰ و (d) ۶۵ دقیقه. (قبل از تابش نور)

همانگونه که مشاهده می‌شود افزایش زمان عملیات حرارتی باعث افزایش جذب نمونه‌ها از طریق افزایش جزء حجمی بلورک‌های AgCl شده است.

به منظور آشکارشدن خاصیت فتوکرومیسم نمونه‌ها، نمودار میزان عبور نور در مقابل طول موج مربوط به نمونه‌ای که به مدت ۲۰ دقیقه در دمای 680°C عملیات حرارتی شده است در شکل ۶ آورده شده است.



شکل ۶- نمودار درصد عبور نور براساس طول موج نمونه‌ای که به مدت ۲۰ دقیقه در دمای 680°C عملیات حرارتی شده است. (a) از قبل روشن (b) بعد از ۳ دقیقه تابش پرتوهای UV

همانگونه که مشاهده می‌شود کاهش درصد عبور نور در محدوده قابل رؤیت برای چشم انسان ($400\text{--}700\text{nm}$) در مورد شکل b بعلت تیره شدن این نمونه تحت تابش پرتوهای UV می‌باشد. با در نظر گرفتن این نتایج می‌توان چنین گفت که افزایش زمان عملیات حرارتی باعث افزایش جذب نمونه‌ها از طریق افزایش جزء حجمی بلورک‌های AgCl شده است، اما باید توجه داشت که از آنجایی که در مورد نمونه‌ای که به مدت ۶۵ دقیقه در دمای 680°C نگهداری شده بود تغییرات بسیار جزئی در شرایط رنگی شیشه به سمت شیری شدن پیش آمد بنابر این مدت زمان ۵۰ دقیقه بعنوان بهترین زمان برای عملیات حرارتی معرفی شد.

۴- نتیجه گیری

- افزایش دمای عملیات حرارتی سبب افزایش میزان بلورک‌های AgCl و در نتیجه بهبود خاصیت فتوکرومیزم در نمونه‌ها می‌شود. اما با توجه به ظاهر شیری رنگ نمونه‌ها در مورد نمونه‌هایی که در دماهای بالاتر عملیات حرارتی شده‌اند، می‌توان گفت که رشد افراطی بلورک‌های AgCl و یا وقوع جدایش فاز مایع-مایع در این شیشه‌ها موجب ظهور رگه‌های شیری در آنها گشته و بدین ترتیب شرایط ظاهری آنها تحت تأثیر قرار گرفته است. بدیهی است که علی‌رغم آنکه میزان تیرگی شیشه‌های آخر نسبت به نمونه‌های عملیات حرارتی شده در دماهای پایین‌تر بیشتر است اما ظاهر اپال گونه آنها مانع از انتخاب آنها به عنوان شیشه‌ای مناسب خواهد بود.
- افزایش زمان عملیات حرارتی سبب افزایش تبلور بلورک‌های AgCl و در نتیجه بهبود شرایط فتوکرومیک در نمونه‌ها می‌شود تا جایی که این افزایش زمان سبب جدایش فاز در شیشه می‌گردد که بدین ترتیب شرایط ظاهری نمونه را تحت تأثیر منفی قرار می‌دهد.
- بررسی‌های انجام شده نشان داد که بهترین دمای عملیات حرارتی برای ایجاد خاصیت فتوکرومیزم در ترکیب شیشه انتخابی برابر 680°C و مدت زمان عملیات حرارتی در این دما ۵۰ دقیقه می‌باشد.

مراجع

۱. واهاک مارکوسیان، "شیشه ساختار، خواص و کاربرد آن‌ها"، انتشارات علم و صنعت، چاپ اول، ۱۳۸۱.
2. Romesh, C., Sharma, Phase Transformations in Materials, CBS Publisher, 138-140, 2002.
۳. بیژن افتخاری یکتا، "پروژه ملی بررسی و ساخت شیشه فتوکروم"، پژوهشگاه مواد و انرژی.
4. Dotsenko, A.V., Glebov, L.B., and Tseknomy, V.A., in physics and chemistry of photochromic glasses, CRC Press, New York, 1998.
5. Araujo, R.J., Borrelli, N.F., Photochromic glasses, Optical Properties of Glasses.
6. Uhlman, D.R., Kreidel, N.J., Eds., Westerville, OH, 1991, 25.

معرفی، مزایا، کاربرد و روش ساخت مقره‌های یکپارچه سرامیکی - پلیمری

مهرنوش هور، داود محمدی، مریم امامی راد، بهنام علم‌دوست

پژوهشگاه نیرو

mhoor@nri.ac.ir

چکیده: با توجه به توسعه شبکه‌های انتقال و توزیع نیرو و لزوم حفظ کیفیت برق، استفاده از تجهیزات فشارقوی مناسب و با کیفیت بالا امری ضروری و غیر قابل اجتناب می‌باشد. در میان این تجهیزات، مقره‌ها از بیشترین کاربرد در خطوط برخوردارند و لازم است در راستای کاهش خسارات ناشی از شکست و استهلاک آنها، متناسب با شرایط محیطی از نوع مناسب استفاده شود. در راستای حذف نقاط ضعف مقره‌های سرامیکی و کامپوزیتی و تقویت نقاط قوت هر یک از این مقره‌ها، توسعه طرح‌های تلفیقی سرلوحه انجام کارهای پژوهشی و تحقیقاتی متخصصان این رشته قرار گرفته است که تولید مقره‌های یکپارچه سرامیکی- پلیمری از جمله این طرح‌ها می‌باشد. از جمله مزایای این مقره‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

کاهش وزن تا حدود ۵۰٪ مقره‌های سرامیکی، افزایش خواص عایقی و خودپالایندگی، افزایش فاصله خزشی مقره در حجمی نسبتاً کم نسبت به مقره‌های سرامیکی، کاهش تاثیر آلودگی محیط بر روی عملکرد مقره.

در این مقاله سعی بر آن است ضمن معرفی و ذکر مزایا و کاربرد این مقره‌ها به روش ساخت آنها شامل هسته سرامیکی و روکش پلیمری و نتایج اندازه‌گیری‌های الکتریکی و مکانیکی مقره‌های ساخته شده اشاره گردد.

کلمات کلیدی: مقره، سرامیکی، پلیمری

۱- مقدمه

با توجه به گستردگی شبکه‌های انتقال و توزیع، لزوم حفظ پایداری و کیفیت برق رسانی به مشترکان، مستلزم استفاده از تجهیزات کارآمد و برنامه‌ریزی و تحقیقات پایه و کاربردی در جهت ارتقاء دانش فنی ساخت این تجهیزات می‌باشد.

در این میان مقره‌ها از جمله مهمترین اجزاء شبکه خصوصاً در مناطق دارای شرایط محیطی حاد و آلوده محسوب می‌گردند که جهت ایجاد اتصال مکانیکی مابین خط انتقال و یا توزیع نیروی الکتریسیته و دکل بکار می‌روند و وظیفه آنها علاوه برداشتن ویژگی‌های عایق الکتریکی دارا بودن استحکام مکانیکی کافی می‌باشد.

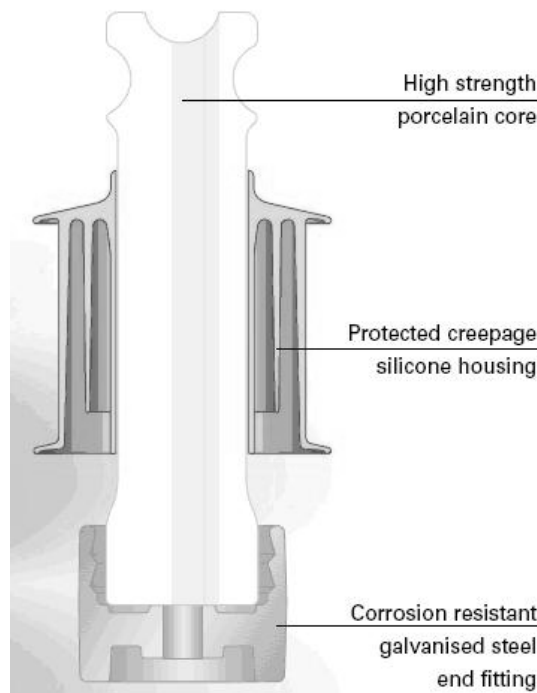
نوع مقره‌های بکار رفته در خطوط مختلف، متفاوت می‌باشد و نظر به اهمیت مقره‌ها هم از دیدگاه جنبه‌های فنی و هم به جهت گستردگی و حجم مصرف این تجهیزات در صنعت برق، در طی سال‌های اخیر، فعالیت‌های تحقیقاتی وسیعی در راستای دستیابی به فن‌آوری‌های مرتبط با نسل جدید مقره‌ها و بهینه سازی انواع مرسوم، به انجام رسیده است. در حال حاضر مقره‌ای که تمامی خصوصیات عالی مکانیکی و الکتریکی یک عایق ایده‌آل را دارا باشد وجود ندارد. در این میان هر کارخانه سازنده مقره سعی دارد با توجه به تکنولوژی‌های جدیدتر و همچنین استفاده از مواد اولیه مرغوب‌تر، بهترین مقره‌ها را با مشخصات فنی الکتریکی و مکانیکی برتر بسازد [۱].

بطور کلی مقره‌ها از نظر ساختمان و نوع ماده یا مواد تشکیل دهنده، به روش‌های مختلفی طبقه بندی



می‌شوند. از این میان می‌توان به طبقه بندی بر اساس نوع ماده سازنده مقره اعم از پرسلانی، شیشه‌ای و پلیمری و طبقه بندی بر اساس ساختمان مقره و روش نصب اعم از انواع آویزی، اتکایی خط، اتکایی پست، سوزنی و... اشاره نمود. بسته به محل بکارگیری مقره‌ها و شرایط آب و هوایی و محیطی از نظر میزان آلودگی می‌توان از هر یک از مقره‌های مذکور استفاده کرد. در واقع عوامل موثر در گزینش مقره‌ها را می‌توان به شکل فیزیکی لحاظ شده در طراحی، جنس مقره، و ویژگی‌های خاص قابل عرضه توسط هر مقره مرتبط دانست. طی تحقیقات انجام گرفته در سال‌های اخیر نوع جدیدی مقره با عنوان مقره‌های یکپارچه پلیمری-سرامیکی^۱ مطرح شده‌اند که با تلفیقی از مزایای مقره‌های پرسلانی و پلیمری در یک طرح واحد با حذف نقاط ضعف خاص هر یک از انواع ذکر شده (بطور نسبی) جای خود را برای مناطق مختلف بخصوص مناطق آلوده و مرطوب باز نموده است.

این مقره‌ها بطور کلی شامل یک هسته پرسلانی لعاب‌دار با استحکام مکانیکی بالا و یک روکش پلیمری می‌باشند که دور تا دور هسته مرکزی را در بر گرفته است. مزایای مقره مورد نظر را بطور خلاصه می‌توان چنین برشمرد: خواص مکانیکی مقره تحت تاثیر پیرشدگی قرار نمی‌گیرد و حساسیت‌های اتصال اجزاء ساختمانی و اثر آن بر مشخصات مکانیکی مقره که در مقره‌های کامپوزیتی وجود دارد، منتفی می‌گردد. در عین حال چنین مقره‌ای بخشی از مزایای مقره‌های کامپوزیتی همچون سبکی، انعطاف پذیری و عملکرد آلودگی مناسب را بطور نسبی دارا است. در هر حال باید در نظر داشت چنین طرحی نیز همچون هر طرح دیگر، فاقد نقطه ضعف خاص خود نمی‌باشد. در شکل (۱) یک طرح کلی از مقره‌های سرامیکی - پلیمری نشان داده شده است که از لحاظ روش نصب در گروه مقره‌های سوزنی یا line post توزیع قرار دارند.



شکل ۱- طرح کلی از مقره‌های یکپارچه سرامیکی - پلیمری [۲]

۲- مزایای مقره‌های یکپارچه پلیمری - سرامیکی

بطور کلی مزایای اصلی مقره‌های سرامیکی (پرسلانی) شامل مقاومت بالای عایق در برابر عوامل محیطی و پیرشدگی، خواص خوب عایقی، قیمت نسبتاً پایین و سوابق طولانی بهره برداری بوده و از معایب اصلی آن

^۱ Hybrid Insulator

می‌توان به شکننده بودن، وزن زیاد و نیاز به شستشوی دوره‌ای در مناطق آلوده اشاره نمود. در مقابل، مقره‌های کامپوزیتی (سیلیکونی) بسیار سبک، انعطاف‌پذیر و دارای عملکرد آلودگی عالی بوده ولی در معرض پیر شدگی قرار می‌گیرند و سابقه کوتاهتری دارند.

هدف از استفاده از طرحی مرکب از سرامیک و پلیمر در مقره‌های پلیمری-سرامیکی، دستیابی به مزایا و حذف معایب دو نوع مقره ذکر شده بطور نسبی بوده است. بنابراین دلیل استفاده از عایق پلیمری کارکرد و عملکرد خوب آنها ناشی از ایستادگی آنها در برابر آلودگی ناشی می‌شود. از طرفی عایق‌های سرامیکی نیز که در طول صد سال اخیر در صنعت مورد استفاده قرار گرفته‌اند، به خاطر استحکام مکانیکی و طول عمر زیادشان مشهور هستند.

هسته سرامیکی با استحکام بالا به عنوان یک عضو بنیادی برای ارایه استحکام مکانیکی لازم و روکش سیلیکونی، مقاومت و ایستادگی لازم را در برابر فرسایش و tracking فراهم می‌کند. خواص آب‌گریزی مربوط به سیلیکون، جریان نشستی و در نتیجه تلفات توان را کاهش داده و قابلیت اطمینان سیستم را افزایش می‌دهد. بدین ترتیب استفاده از این مقره‌ها به‌ویژه در مناطق مرطوب و آلوده به همراه هزینه‌های کمتر مربوط به تعمیر و نگهداری، مزیت اقتصادی را برای کاربر فراهم می‌آورد. ضمن آنکه این مقره‌ها علاوه بر حفظ و نگهداری خواص مکانیکی مورد نیاز به دلیل استفاده از روکش انعطاف‌پذیر پلیمری، از وزن کمتری برخوردار می‌باشند و در برابر خسارت‌های ناشی از جابجایی، نصب و پرتاب سنگ مقاوم هستند. هسته سرامیکی به خاطر پایداری شیمیایی ذاتی‌اش می‌تواند در برابر عوامل جوی، هجوم شیمیایی و فعالیت‌های سطحی بدون آسیب مقاومت و ایستادگی کند. اگر چه این پایداری شیمیایی به انرژی سطحی زیاد هم منتج می‌شود که به سطح فاصله خزشی اجازه می‌دهد که به راحتی مرطوب شود. برای غلبه بر محدودیت‌های مربوط به خواص ذاتی سطحی مواد یک پوشش الاستومری منحصر به فرد بر روی هسته نصب می‌شود که استقامت دی‌الکتریکی را حفظ می‌کند.

۳- روش‌های طراحی الکتریکی

از آنجایی که پایداری عایق‌ها و ایزولاسیون در برابر ولتاژ فرکانس قدرت و شرایط سخت محیطی از فاکتورهای مهم و اساسی در شبکه‌های انرژی الکتریکی است از این‌رو در شبکه توزیع، فوق توزیع و انتقال برق، طراحی مطلوب و مناسب ایزولاسیون ضرورت دارد بگونه‌ای که هر سه انگاری در طراحی ایزولاسیون، ممکن است منجر به بهره‌برداری نامطلوب از شبکه و بروز خسارت پرهزینه گردد. کاهش کیفیت برق و خسارت‌های ناشی از آن، استهلاک تجهیزات فشار قوی (به خصوص ایزولاسیون)، هزینه بالای تعمیر و نگهداری (مانند شستشوی مقره‌های فشار قوی، بکارگیری پوشش‌های مختلف بر روی سطوح مقره، تعویض مقره‌های آسیب دیده) از جمله مشکلات بهره‌برداری هستند که در صورت صحیح نبودن انتخاب و طراحی ایزولاسیون، ممکن است ایجاد شوند [۳].

برای طراحی و انتخاب ایزولاسیون مناسب به منظور عملکرد کارآمد شبکه برق، روش‌ها و تکنیک‌های مختلفی ارائه شده است و در استانداردهای مختلف روش‌های متفاوت و پیشنهاداتی برای انتخاب مقره در شرایط بهره‌برداری مختلف ارائه گردیده است. پارامترهای موثری که در طراحی مورد بررسی قرار می‌گیرند شامل الزامات استاندارد IEC60815، ملاحظات ساخت، بررسی تاثیرات طرح پروفیل روی شکل میدان الکتریکی و ملاحظات میدانی می‌باشند.

بعد از طراحی از طریق نرم‌افزارهای مصطلح، کار تحلیل میدان الکتریکی طرح بمنظور جلوگیری از تمرکز بیش از حد میدان در قسمتی از طرح صورت می‌پذیرد [۴ و ۵]. در ادامه مقره طراحی شده و نمونه ساخته شده آن، مدتی بصورت آزمایشی در منطقه مورد نظر نصب گردیده و کارایی آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۴- روش ساخت مقره‌های یکپارچه پلیمری - سرامیکی

ساخت مقره‌های یکپارچه پلیمری - سرامیکی در سه مرحله ساخت هسته پرسیلانی، ساخت روکش سیلیکونی و نصب یراق آلات و مونتاژ نهایی مقره خلاصه می‌شود.

بطور کلی ساخت این مقره‌ها شامل مراحل ذیل می‌شود:

- انتخاب مواد اولیه مناسب و فرمولاسیون ترکیب برای ساخت هسته سرامیکی
- طراحی پروفیل هسته سرامیکی و شکل‌دهی آن
- تعقیب مراحل ساخت هسته بر اساس روش‌های مرسوم ساخت مقره‌های پرسیلانی
- فرمولاسیون ترکیب لعاب و اعمال بر روی هسته
- پخت هسته و لعاب اعمالی در یک مرحله
- فرمولاسیون روکش سیلیکونی مورد نظر
- اختلاط مواد اولیه پلیمری مورد نیاز
- پخت نمونه‌های مربوط به روکش سیلیکونی
- نصب روکش سیلیکونی بر روی هسته شکل داده شده به کمک چسب مخصوص
- طراحی، فرمولاسیون و ساخت سیمان به کار رفته در مقره مورد نظر
- نصب یراق‌آلات مورد نظر به مقره به کمک سیمان فرموله شده و مونتاژ نهایی
- انجام آزمون‌های مکانیکی و الکتریکی بر روی مقره بر اساس استاندارد

بر اساس تحقیقات انجام گرفته در رابطه با سیستم موادی هسته سرامیکی مقره‌های مورد نظر [۶] و با توجه به لزوم قابلیت تحمل هسته مرکزی در برابر تنش‌های وارده و دارا بودن استحکام مکانیکی مناسب، سیستم پرسیلانی - آلومینایی برای این مقره‌ها مطرح می‌باشد. این سیستم ضمن برقراری استحکام مکانیکی مورد نظر، از طول عمر بیشتری نیز برخوردار بوده و همچنین قابلیت انطباق بیشتری را با روکش سیلیکونی خواهد داشت.

تعیین مقدار دقیق آلومینا در این سیستم نیازمند تحقیق بیشتر و مطالعه دقیق دیاگرام‌های فاز دوتایی و سه‌تایی سیستم‌های آنورتیت - مولایت - کورانوم - کوارتز می‌باشد. زیرا با توجه به دمای ذوب بالای آلومینا نیاز به استفاده از یکسری مواد بمنظور کاهش و تعدیل دمای زینترینگ قطعات مورد نظر می‌باشد. در این صورت می‌توان از روش‌های شکل‌دهی مرسوم که برای مقره‌های پرسیلانی معمولی مطرح می‌باشد، شامل اکستروژن، خراطی و پرداخت نهایی در مورد قطعات مورد نظر استفاده کرد. اما در این مورد نیز قطر و ارتفاع قطعه، از جمله پارامترهای محدود کننده می‌باشند که لازم است با طراحی دقیق و با در نظر گرفتن ویژگی‌های مکانیکی تعیین شوند.

علاوه بر اینها در انتخاب ترکیب مناسبی از لعاب به منظور اعمال بر روی هسته به لحاظ ارایه نقش مهم در تعیین خواص عایقی نهایی مقره، افزایش خواص مکانیکی و مقاومت شیمیایی، کاهش خوردگی و عوامل نامساعد دیگر بر بدنه مقره‌های پرسیلانی بایستی دقت کافی اعمال گردد تا هدف مورد نظر تامین شود.

لذا با انتخاب مجموعه سیستم موادی، شکل‌دهی، طراحی و زینترینگ مناسب می‌توان مراحل ساخت هسته سرامیکی این مقره‌ها را طی نمود.

در ارتباط با بخش پلیمری این مقره‌ها، سیلیکون‌ها به لحاظ دارا بودن فوایدی مانند آب‌گریزی، مقاومت در برابر حمله شیمیایی و خواص الکتریکی مناسب، کاندید مناسبی به عنوان روکش برای این مقره‌ها در شرایط آلوده محسوب می‌شوند. مقره‌های فشار قوی با توجه به نقشی که در شبکه‌های قدرت بر عهده دارند، باید دارای یکسری مشخصه‌های نهایی مکانیکی و الکتریکی بوده و در ضمن، باید بتوانند این مشخصه‌ها را در طول مدت بهره برداری در شرایط محیطی کارکردشان، حفظ کنند. لذا می‌توان خواص مورد انتظار از مقره‌ها

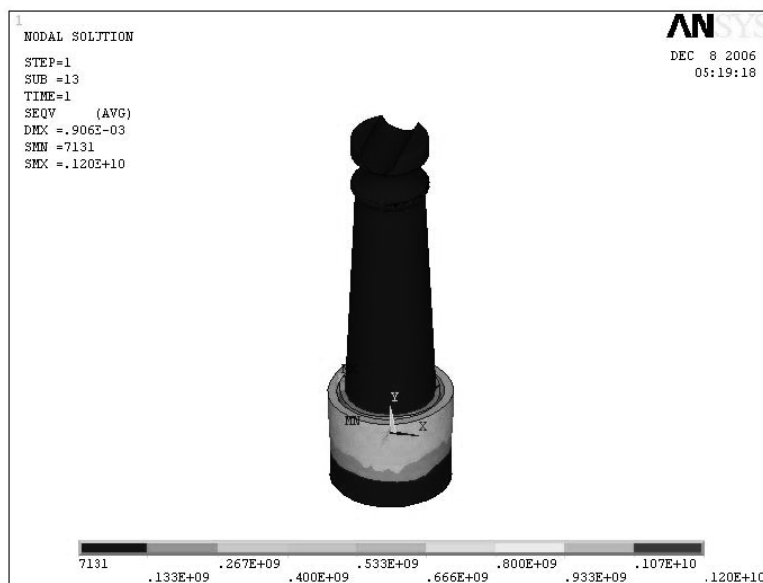
را به سه بخش خواص مکانیکی، الکتریکی و پیر شدگی تقسیم نمود. بخش پلیمری مقره پلیمری - سرامیکی، بطور مستقیم نقشی در مشخصه مکانیکی مقره ندارد و آنچه در مورد آن اهمیت دارد تاثیر آن بر مشخصات الکتریکی و پیر شدگی مقره می‌باشد. بر اساس تحقیقات انجام شده در ارتباط با انتخاب پلیمر مناسب مقره‌های یکپارچه پلیمری - سرامیکی [۷ و ۸] مشخص شده است سیلیکون رابر (Silicon Rubber) بهترین کارایی را از نظر آبگریزی و هم‌چنین پیرشدگی از خود نشان می‌دهد. البته طراحی ژئومتری نیز نقش مهمی را در کارایی مقره‌ها بازی می‌کند، زیرا می‌تواند بر خود پالایی (توسط باد و باران) مسیرهای جریان نشستی و توزیع تنش‌های الکتریکی اثر بگذارد. همانطور که می‌دانیم یک سیلیکون به تنهایی دارای همه خواص مورد نیاز نیست. به همین دلیل برای رسیدن به اهداف مورد نظر، از مواد افزودنی دیگر هم استفاده می‌شود تا مخلوط دلخواهی بدست آید و خواص فیزیکی و شیمیایی مورد نیاز را برای یک محصول نهایی فراهم آورد.

به طور کلی می‌توان موادی که در یک آمیزه سیلیکونی به کار می‌روند را به صورت زیر دسته‌بندی نمود: الاستومر پایه، عوامل ولکانش (پخت کننده‌ها)، شتابنده‌ها، فعال کننده و تاخیر اندازه‌دهنده‌ها، ضد تخریب‌ها (ضد اکسندنده‌ها، موم‌های حفاظتی ...)، تسهیل کننده‌های فرآیند، پر کننده‌ها (فیلرها)، نرم کننده‌ها و چسب‌ها، رنگدانه‌ها و موادی که برای اهداف ویژه‌ای به کار می‌روند (عوامل پف کننده، ...)[۹].

پس از انتخاب ترکیب و فرمولاسیون آمیزه پلیمری مناسب، اختلاط، قالب‌گیری و پخت انجام می‌گیرد و پس از آن آزمون‌های مورد نیاز بر اساس استاندارد به منظور اطمینان از حصول نتایج مطلوب انجام می‌شود. پس از ساخت روکش سیلیکونی اتصال آن با هسته پرسیلانی توسط چسب مخصوص و همچنین نصب یراق‌آلات و مونتاژ نهایی مقره صورت پذیرفته و در انتها مقره ساخته شده تحت آزمون‌های مکانیکی و الکتریکی بر اساس استانداردهای مربوطه قرار می‌گیرد.

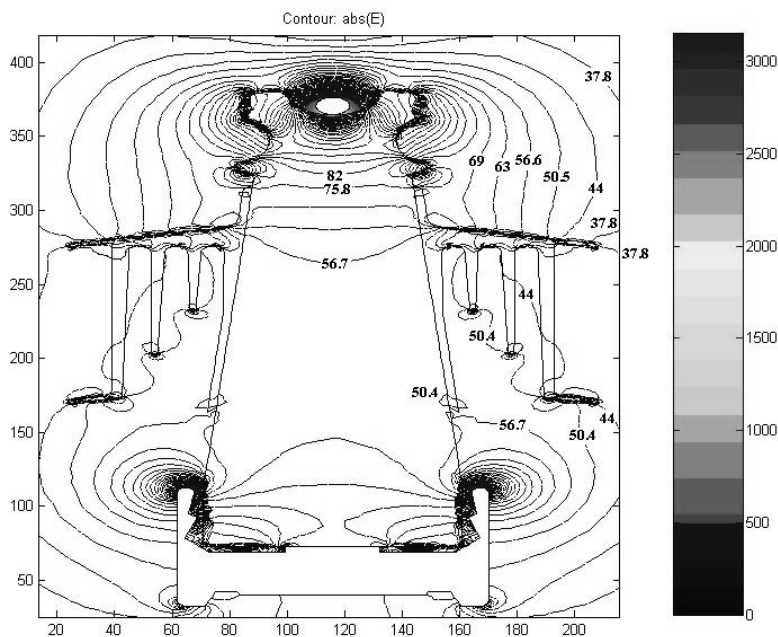
۵- فعالیت‌های تجربی

در تحقیق حاضر با در نظر گرفتن تمهیدات طراحی لازم بلحاظ دستیابی به خواص الکتریکی و مکانیکی مطلوب، ابتدا نقشه CAD مقره سرامیکی با ابعاد دقیق تهیه و سپس در نرم‌افزار ANSYS به عنوان ابزاری بر پایه تئوری المان محدود مدل شده و تحلیل گردید. در شکل (۲) توزیع تنش در مجموعه مقره با المان تماسی به تصویر کشیده شده است.



شکل ۲- توزیع تنش در مجموعه مقره

به موازات این کار طراحی پروفیل مقره از دیدگاه تحلیل میدان الکتریکی با استفاده از روش FEM صورت پذیرفت که در شکل (۳) نمایی از خطوط هم میدان و مقدار میدان الکتریکی را در مقره طراحی شده نشان می‌دهد.



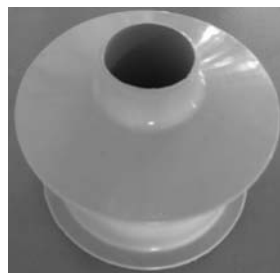
شکل ۳- نمایی از خطوط هم میدان و مقادیر محاسبه شده از طرح مقره

پس از آن طراحی موادی هسته شامل انتخاب مواد اولیه داخلی و فرمولاسیون بدنه و لعاب پرسلانی بگونه‌ای صورت گرفت که بتواند هم پاسخگوی ملزومات استحکامی مقره باشد و هم قدرت عایقی لازم را فراهم سازد. در جدول (۱) فرمولاسیون پیشنهادی برای طراحی موادی بدنه و لعاب این مقره‌ها ارائه شده است. لازم بذکر است مخلوط سازی مواد به روش ترسب انتخاب گردید.

جدول ۱- فرمولاسیون پیشنهادی در تهیه بدنه و لعاب مقره سرامیکی- پلیمری ساخته شده

ماده (درصد وزنی)	کائولن	فلدسپات	سیلیس	بال کلی	آلومینا	دولومیت	اکسید رنگی
بدنه	۴۰	۲۰	۱۰	۲۵	۵	-	-
لعاب	۱۵	۴۵	۲۰	-	-	۱۰	۱۰

شکل دهی هسته مقره با استفاده از روش‌های مرسوم شکل‌دهی مقره‌های پرسلانی شامل اکسترود و خراطی و اعمال لعاب به صورت غوطه‌وری بر روی هسته مقره انجام شد. برای دستیابی به طرح بکار رفته برای روکش هسته که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، ابتدا قالب مناسبی ساخته شد و سپس با استفاده از سیلیکون HTV، با فرمولاسیون طراحی شده در این پروژه نمونه‌هایی ساخته شد.



شکل ۴- روکش مقره سرامیکی- پلیمری

یراق آلات فلزی بکار رفته از جنس چدن داکتیل بود که به کمک روش ریخته‌گری و اعمال یک لایه گالوانیزه با ضخامت ۷۰ میکرون به عنوان روکش تهیه شدند. در مرحله مونتاژ یراق آلات از بتن سیلیسی استفاده شد که فرمولاسیون آن طی پروژه به دست آمد [۱۰]. در مرحله آخر از چسب مناسبی که برای مونتاژ قسمت روکش به هسته فرموله شده بود [۱۱]، استفاده گردید. در شکل (۵) نمونه مقره ساخته شده در مقیاس نیمه صنعتی و در جدول (۲) مشخصات مقره ساخته شده ارایه شده‌اند.



شکل ۵- نمونه مقره سرامیکی- پلیمری ساخته شده

جدول ۲- مشخصات مقره سرامیکی- پلیمری ساخته شده

ولتاژ نامی (kV)	فاصله خزشی (mm)	فاصله جرقه (mm)	ولتاژ پایداری فرکانس قدرت مرطوب (kV)	ولتاژ پایداری ضربه صاعقه (kV)	ولتاژ شکست فرکانس قدرت (kV)	ولتاژ پایداری فرکانس قدرت (kV)	ولتاژ پانچ (kV)	استحکام خمشی (kN)	وزن (kg)	نوع مقره
۳۳	۷۹۰	۲۳۲/۵	۷۸	۱۸۷	۱۸۷	۱۳۹	۱۹۰	۱۰/۶	۱/۹	اتکا ئی
۳۳	۸۸۰	۳۱۵	۱۰۵	۱۹۵	۲۲۲	۱۴۸	۲۱۲	۱۰/۶	۱/۲	سوز نی

۶- نتیجه گیری

با توجه به مطالب ارایه شده می‌توان بطور خلاصه نتایج ذیل را عنوان نمود:

- ۱- مقره‌های یکپارچه پلیمری - سرامیکی با تلفیقی از مزایای مقره‌های پرسیلانی و پلیمری در یک طرح واحد، کاندید مناسبی برای مناطق آلوده و مرطوب محسوب می‌شوند.
- ۲- این مقره‌ها شامل یک هسته پرسیلانی لعاب‌دار با استحکام مکانیکی بالا و یک روکش سیلیکونی با

- مقاومت و ایستادگی لازم در برابر فرسایش و tracking می‌باشند. خواص آب‌گریزی مربوط به سیلیکون، جریان نشستی و در نتیجه تلفات توان را کاهش داده و قابلیت اطمینان سیستم را افزایش می‌دهد.
- ۳- این مقره‌ها علاوه بر حفظ و نگهداری خواص مکانیکی مورد نیاز به دلیل استفاده از روکش معطاف‌پذیر پلیمری، از وزن کمتری برخوردار می‌باشند.
- ۴- وجود روکش سیلیکونی، هسته را در برابر آسیب‌های مکانیکی در زمان جابجایی، نصب و تخریب محافظت می‌کند.
- ۵- این مقره‌ها ایستادگی بیشتر در برابر شکست (Flashover)، مقاومت خوب در برابر رسوب آلودگی‌هایی که در اثر باد حاصل می‌شوند و همچنین مرطوب شدن را دارا می‌باشند.
- ۶- ساخت مقره‌های یکپارچه پلیمری-سرامیکی در سه مرحله ساخت هسته پرسیلانی، ساخت روکش سیلیکونی و نصب یراق آلات و مونتاژ نهایی مقره خلاصه می‌شود.
- ۷- سیستم موادی هسته سرامیکی این مقره‌ها، سیستم پرسیلانی-آلومینایی و روکش پلیمری مورد نظر شامل سیلیکون رابر می‌باشد.
- ۸- با انتخاب مجموعه سیستم موادی، شکل‌دهی، طراحی و زینترینگ مناسب می‌توان مراحل ساخت هسته سرامیکی و با انتخاب ترکیب و فرمولاسیون آمیزه پلیمری، اختلاط، قالب‌گیری و پخت مناسب آن می‌توان روند ساخت روکش سیلیکونی این مقره‌ها را طی نمود.

مراجع

1. Mick Scott, "A Brief History of Insulators", Floyed Farrar, Drum Volunteer, June 2001.
2. Raychem Hybrid Insulators Catalogue, www.Raychem.com
3. "طراحی الکتریکی و ساخت مقره کامپوزیتی رده ۲۳۰ کیلو ولت"، محمد رضا شریعتی، محمد سعید وفاکیش، داود محمدی، محمد اسکویی، میرجواد گرامیان، نشریه علمی برق، سال پانزدهم، شماره ۳۶، ۱۳۸۱.
4. G.H.Vaillancourt, S.Carignan and C.Jean, "Experience with the Detection of Faulty Composite Insulators on High-Voltage Power Lines by the Electric Field Measurement Method," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 13, No. 2, pp 661-666, April 1998.
5. A.J.Philips, D.J.Chlds and H.M.Schneider, "Water Drop Corona Effect on Full-Scale 500KV non-ceramic Insulators," IEEE Trans.on Power Delivery, Vol. 14, No. 1, pp 258-265, 1999.
6. Funk et.al. "High Strength Alumina Ceramic Product & Method of Forming", U.S.Patent No. 4,183,760, 1980.
7. R. Allen Bernstorf et al., "Polymer Compounds used in high voltage insulators", Ohio Brass, Power System, Inc. 2000.
8. Hofmann, "Rubber Technology Handbook", Vol 1. 1999.
9. I.Franta, "Elastomers and rubber compounding materials", Elsevier, 1996.
10. INMR, Source of Information on International Developments in Transmission & Distribution, Issue 73, Vol.14, No.3, 2006.
11. "ارایه فرمولاسیون جدید سیمان جهت استفاده در مقره‌های فشارقوی با استحکام مکانیکی بالا"، داود محمدی، بهزاد ارژنگ، مریم امامی راد، ششمین سمینار و نمایشگاه تخصصی مقره‌ها، کمیته مطالعات عایقه‌ها، ۹ و ۱۰ بهمن ۱۳۸۶، تهران.
12. ۱۱-گزارش نهایی پروژه "تحقیق و بررسی راجع به ساخت مقره‌های سوزنی سرامیکی- پلیمری رده توزیع به همراه ساخت نمونه" داود محمدی، گروه پژوهشی فشار قوی، پژوهشگاه نیرو، ۱۳۸۶.