

سنتز نانو ذرات منیزیا به روش شیمیایی و تاثیر آن بر خواص فیزیکی آلومینای زینتر شده

مهران دادخواه^{۱*}، مجید جعفری^۲، عبدالله صبوری^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

۲- استادیار، عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

۳- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

*dadkhah.mehran@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۹۲/۰۲/۰۳، تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۵/۲۲)

چکیده

پودر نانو اکسید منیزیم با استفاده از نترات منیزیم شش آبه و اسید اگزالیک بعنوان مواد اولیه و اتانول بعنوان حلال سنتز شده است. این فرایند شامل تشکیل ژل و خشک کردن آن در 100°C به مدت ۲۴ ساعت برای تشکیل آگرالات منیزیم دو آبه و تجزیه شدن آن در دمای 600°C به مدت ۲ ساعت برای تشکیل نانو پودر منیزیا می باشد. جهت بررسی اثر نانو پودر سنتز شده بر خواص آلومینا مقدار ۰/۵، ۰/۳، ۰/۱ درصد وزنی از آن به آلومینا اضافه گردید. نمونه های تهیه شده در دمای 1570°C به مدت چهار ساعت تحت اتمسفر آرگون زینتر گردیدند. جهت بررسی اثر دما بر خواص فیزیکی آلومینا، ترکیب آلومینا حاوی ۰/۱ درصد منیزیا در محدوده دمایی $1650-1500^{\circ}\text{C}$ تحت اتمسفر آرگون به مدت ۴ ساعت زینتر گردید. مشاهدات ریزساختاری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی و عبوری ارزیابی و دانسیته نمونه ها توسط روش ارشمیدس محاسبه گردید. مشخص گردید که با افزایش درصد منیزیا فاز اسپینل در ساختار آلومینا تشکیل شده و در طی فرایند زینترینگ به مرز دانه ها نفوذ کرده و باعث قفل شدن مرز دانه ها و در نتیجه کاهش اندازه دانه می شود. این کاهش اندازه دانه باعث بهبود خواص فیزیکی آلومینای زینتر شده میگردد.

کلمات کلیدی:

اکسید منیزیم، آلومینای زینتر شده، زینترینگ، میکروسکوپ الکترونی روبشی، میکروسکوپ الکترونی عبوری.

۱- مقدمه

مکانیکی، الکتریکی و نوری فوق العاده دارد و به طور گسترده ای در ساینده ها، پلازما اسپری، مواد نوری و مورد استفاده قرار می گیرد [۱]. آلفا آلومینا سخت ترین و چگال ترین شکل اکسید آلومینیوم است و از حرارت پلی مرف های دیگر آلومینا

در بین مواد سرامیکی آلومینا گستره کاربردی وسیعی در صنایع دما بالا دارد. از طرفی بدنه های سرامیکی متعدد و متنوعی از اکسید آلومینیوم ساخته می شوند که خواصشان به شدت بستگی به اندازه ذرات و شرایط فرآیند دارد. آلفا آلومینا خواص

اندازه ذره کوچک و...) در دماهای نسبتاً پایین را دارد [۹]. در میان ترکیبات اکسیدی، اکسید منیزیم (MgO) به دلیل آن که موقعیت های ویژه ای را اشغال می کند دارای ویژگی های جالب و کاربرد های صنعتی در داروسازی، نیمه هادی ها، نمایشگرهای مایع کریستالی / لومینسانس / پلاسما / فلورسنت، فیلم های نازک فروالکترونیک و ابر رسانا به عنوان زیر لایه، پوشش های منعکس کننده و غیر منعکس کننده، کاتالیست، باتری های یونی لیتیم و ... می باشد [۱۰-۱۱]. در سال ۱۹۶۱ کوبل و همکارانش برای اولین بار اثر افزودن مقدار کمی منیزیا را بر روی زینترنگ آلومینا بررسی کردند و گزارش شد که افزودن کمتر از ۰/۲۵ درصد وزنی منیزیا باعث حصول دانسیته ای نزدیک مقدار تئوری آن می شود [۱۲].

بنابراین هدف از تحقیق حاضر تولید پودر نانو منیزیا به روش سل-ژل با استفاده از پیش ماده های نیترا منیزیم و اسید اگزالیک و بررسی اثر این ذرات نانو بر خواص سایشی آلومینا مورد نظر است.

۲- مواد و روش ها

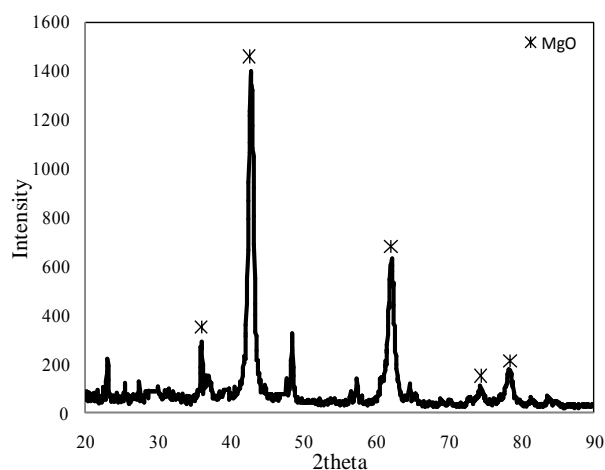
جهت سنتز پودر نانو منیزیا، نیترا منیزیم شش آب $(\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$ (مرک^۱) و اسید اگزالیک $[(\text{COOH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$ (مرک^۲) به عنوان مواد اولیه با نسبت مولی ۱:۱ بکار می روند که در ابتدا هر کدام از آنها بطور مجزا در مقادیر مختلف اتانول حل شده و تا بدست آمدن دو محلول شفاف هم زده می شود. سپس جهت بدست آوردن یک ژل توده ای سفید رنگ، آنها به یکدیگر اضافه می شوند. ژل حاصله به مدت ۱۲ ساعت در محیط نگه داشته شد و در ادامه در ۱۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت خشک گردید. ژل خشک شده پس از عبور از مش ۲۴۰ در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد کلسینه شده و با سرعت ۱۰ درجه سانتیگراد بر دقیقه سرد گردید. الگوی پراش اشعه ایکس پودر حاصله برای شناسایی فاز و تعیین اندازه کریستالی توسط دستگاه پراش پرتو ایکس مدل فیلیپس^۲ با طول موج $(\lambda = 1.5404 \text{ \AA})$ در دانشگاه آزاد

یا هیدرات آلومینا در دمای بالا به دست می آید. آلفا آلومینا همچنین از فرآیند ذوب حاصل می شود که در آن هیدرات آلومینا تا بیش از ۲۰۰۰°C حرارت داده می شود، سپس سرد و خرد می شود [۱].

آلومینا ضمن داشتن خواص بسیار منحصر به فرد، نسبتاً فراوان و ارزان است. دلیل دیگر اهمیت آلومینا ناشی از پایین بودن دمای سینترنگ آن نسبت به سایر سرامیک های مهندسی اکسیدی است که کاربرد صنعتی آن را بیشتر مقرون به صرفه می سازد. مواد نانو در سالهای اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته اند. این مواد به علت داشتن سطح ویژه بالا دارای خواص ویژه ای می باشند که در حالت میکرونی این قابلیت ها را ندارند. به طور مثال ذرات در ابعاد نانو می توانند باعث افزایش استحکام، داکتیلیته و شکل پذیری سرامیکها شوند. همچنین از نانوذرات می توان برای ایجاد پوشش های شفاف نیز استفاده نمود. نانوپودر آلومینا در سالهای اخیر برای ساخت قطعاتی با سختی و مقاومت به سایش بالا و همچنین به عنوان ماده اولیه در صنعت کاتالیست مورد استفاده قرار گرفته است [۲-۳]. علاوه بر این با توجه به اینکه دمای سینتر با استفاده از نانوپودرها کاهش می یابد، می توان از نانوپودر آلومینا به عنوان ماده اولیه در ساخت قطعات آلومینایی استفاده کرد به طوری که این قطعات در دمایی پایینتر از پودرهای معمول میکرونی به دانسیته بالا می رسند.

روشهای مختلفی برای ساختن مواد نانو وجود دارد. به طور مثال می توان به روش هایی چون آسیاب کاری مکانیکی [۴]، روشهای واکنش فاز بخار [۵]، روش رسوبی [۶]، سل-ژل [۷] و روش احتراقی [۸] اشاره کرد. روش آسیاب کاری معمولاً به زمانهای طولانی نیاز دارد و این فرآیند سبب ورود ناخالصی ها به محصول نهایی می شود. روشهای سنتز از فاز بخار معمولاً نیاز به تجهیزات گران قیمت دارد و همچنین نرخ تولید در این روشها بالا نمی باشد. از میان روشهای موجود، روش سل-ژل روشی ساده و مقرون به صرفه است و توانایی تولید محصول با ویژگی های خاص (سطح ویژه بزرگ در نسبت حجمی، توزیع

بیشتر باشد، اندازه ذره کوچک تر خواهد بود. البته با توجه به اینکه رابطه شرر برای تمامی پیک های یک فاز، اندازه کریستال ثابتی را نمی دهد، از روش نوین در اندازه گیری نانو ذرات که توسط منشی در سال ۱۳۸۷ ارائه شده است، استفاده گردید [۱۲]. البته در بسیاری از مقالات تا کنون جهت گزارش اندازه کریستال که به اصطلاح عمومی اندازه دانه نامیده می شود، از میانگین اندازه های بدست آمده از چند پیک شاخص استفاده می گردید که در روش نوین می توان با استفاده از رسم نمودار $\ln\beta$ در مقابل $\ln(1/\cos\theta)$ به روش کمترین مربعات خطا و استفاده از عرض از مبدا این نمودار (بر اساس معادله شرر) اندازه دانه دقیق تری را گزارش کرد [۱۲]. الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) نمونه کلسینه شده در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل (۱): الگوی پراش پرتو ایکس نمونه کلسینه شده در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد

همانطور که در این الگو نشان داده شده است بیشتر پیک های این الگو طبق اطلاعات مستخرج شده از نرم افزار دستگاه پراش پرتو ایکس، متعلق به یک ماده معدنی به نام اکسید منیزیم یا فرمول شیمیایی MgO با ساختار کریستالوگرافی مکعبی و گروه فضایی F23 با عدد گروه فضایی ۱۹۶ و پارامتر شبکه $a = 4.22 \text{ \AA}$ و زوایای $\beta = \alpha = \gamma = 90^\circ$ می باشد. جهت محاسبه اندازه نانو کریستال های منیزیا ابتدا FWHM برای سه پیک اصلی منیزیا اندازه گیری شد و سپس طبق روش نوین اندازه گیری ذرات

نجف آباد بدست آمد. میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل سرون^۳ متعلق به دانشگاه آزاد اسلامی مجلسی و میکروسکوپ الکترونی عبوری مدل فیلپس CM10 متعلق به دانشگاه شیراز به منظور مشاهده مورفولوژی پودر بکار گرفته شده است. جهت بررسی اثر نانو ذرات سنتز شده بر خواص سایشی آلومینا پودر منیزیا با درصد های متفاوت ۰/۵، ۰/۳، ۰/۱ درصد وزنی به نمونه های آلومینایی اضافه گردید و توسط دستگاه پرس ایزواستاتیک^۴ به صورت گلوله شکل دهی شد. گلوله های آلومینایی در دمای ۱۵۷۰ درجه سانتیگراد به مدت چهار ساعت تحت اتمسفر گاز خنثی زینتر گردید. جهت افزایش نرخ زینترینگ اتمسفر گاز خنثی انتخاب شد. بررسی اثر نانو ذرات منیزیا بر خواص آلومینا توسط اندازه گیری سایش و دانسیته نمونه ها پس از زینترینگ انجام گردید. ریزساختار نمونه ها پس از زینترینگ توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل وگا^۵ متعلق به مرکز پژوهش های رازی مورد بررسی قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱-۳- سنتز نانو ذرات منیزیا

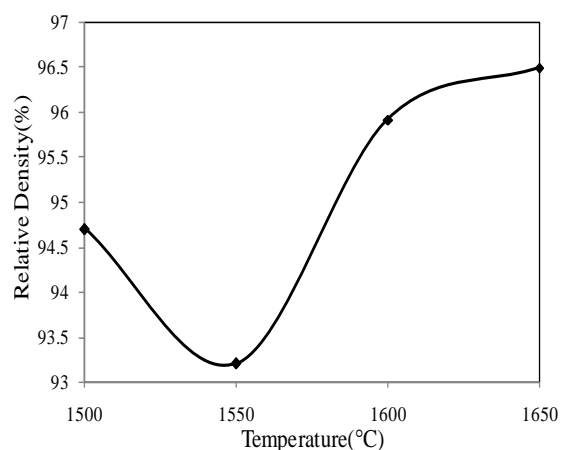
۳-۱-۱-۳- شناسایی فاز و بررسی ریز ساختار

از طیف پراش پرتو ایکس، به منظور آنالیز فازی و نیز بررسی اندازه ذرات مواد نانو استفاده گردید. با استفاده از دستگاه پراش اشعه ایکس از نمونه ای که انتظار می رود اکسید منیزیم باشد طیف XRD گرفته شد و طبق شکل ۱ در طیف پیک هایی در محدوده ۱۰ تا ۸۰ درجه (بر حسب 2θ) داده است که همگی اینها با توجه به ساختار مرجع ثبت شده در نرم افزار مربوط به دستگاه ارائه دهنده طیف های XRD و نیز کارت های استاندارد مطابقت دارند. به طور کلی، در طیف های XRD، اندازه ذرات به شدت پیک، ارتفاع پیک و زاویه ای که پیک ماکزیمم در آن ظاهر می شود، بستگی دارد. هرچه ارتفاع پیک کمتر باشد، ذرات کوچکتر خواهند بود. همچنین بر اساس رابطه شرر، اندازه ذره به مقدار θ و β بستگی دارد. بر این اساس، هر چه محل ظاهر شدن پیک بر حسب 2θ در زاویه کمتر و پهنای پیک

شکل ۳ تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری پودر منیزیای کلسینه شده در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد را نشان می دهد که در الکل دیسپرس شده و سپس تصویر آنها تهیه شده است. همانگونه که مشاهده می شود ذرات نانو منیزیا با اندازه کمتر از ۴۰ نانومتر بصورت یک توده ای از ذرات بهم چسبیده قرار دارند.

۳-۲- بررسی خواص پس از زینترینگ

همانگونه که در نمودار مربوط به شکل ۴ مشاهده می شود درصد دانسیته میانگین در محدوده دمایی ۱۶۵۰-۱۵۰۰ درجه سانتیگراد دارای یک تغییرات غیر خطی است. این میزان از دمای ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد با مقدار ۹۴/۷ درصد تا دمای ۱۵۵۰ درجه سانتیگراد به صورت نزولی تغییر می کند و به حدود ۹۳/۲ درصد می رسد. با افزایش دما از ۱۵۵۰ درجه سانتیگراد تا ۱۶۵۰ درجه سانتیگراد روند این تغییرات صعودی است و با افزایش دما درصد دانسیته میانگین نیز افزایش می یابد و به تبع آن از میزان تخلخل موجود در ساختار کاسته شده و می توان به بدنه چگال تری دست یافت. البته این نحوه تغییرات درصد دانسیته نسبی را می توان به درصد تخلخل نسبت داد.

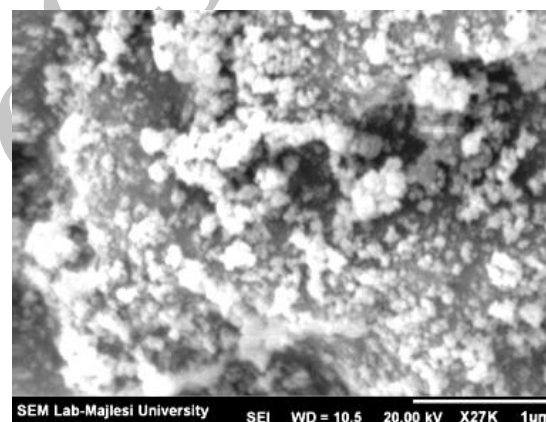


شکل (۴): تغییرات درصد دانسیته میانگین نمونه آلومینای زینتر شده

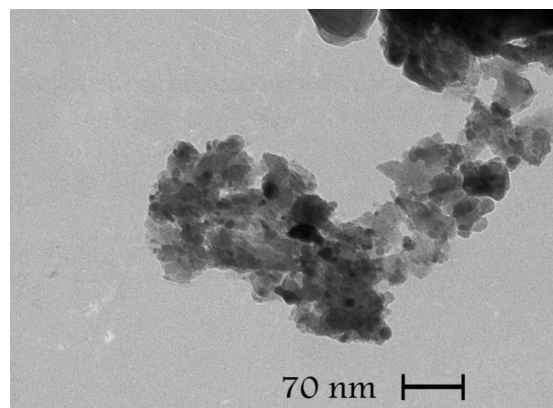
حاوی ۰/۱ درصد منیزیا در محدوده دمایی ۱۶۵۰-۱۵۰۰°C

جهت بررسی اثر میزان ذرات نانو منیزیای سنتز شده به روش سل-ژل بر خواص فیزیکی آلومینا، نمونه هایی با ترکیب های

نانو [۱۲]، نمودار $\ln\beta$ در مقابل $\ln(1/\cos\theta)$ رسم گردیده است. طبق این نمودار اندازه نانو کریستالهای منیزیا ۱۵ نانومتر محاسبه گردید. جهت بررسی مورفولوژی و اندازه گیری دقیق تر ذرات نانو منیزیای بدست آمده از این فرایند از میکروسکوپ الکترونی روبشی و عبوری استفاده گردید. شکل ۲ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نمونه کلسینه شده در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد را نشان می دهد. همانطور که در این تصویر نشان داده شده است مورفولوژی ذرات بدست آمده به صورت ذرات کروی با قطری کمتر از ۱۰۰ نانومتر است که این ابعاد تا حدودی تایید کننده محاسبات انجام گرفته بر اساس الگوی پراش پرتو ایکس می باشد.



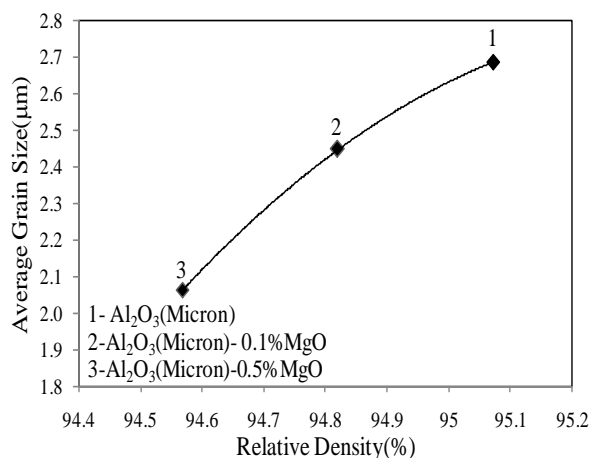
شکل (۲): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پودر منیزیای کلسینه شده در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد



شکل (۳): تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری پودر منیزیای کلسینه شده در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد

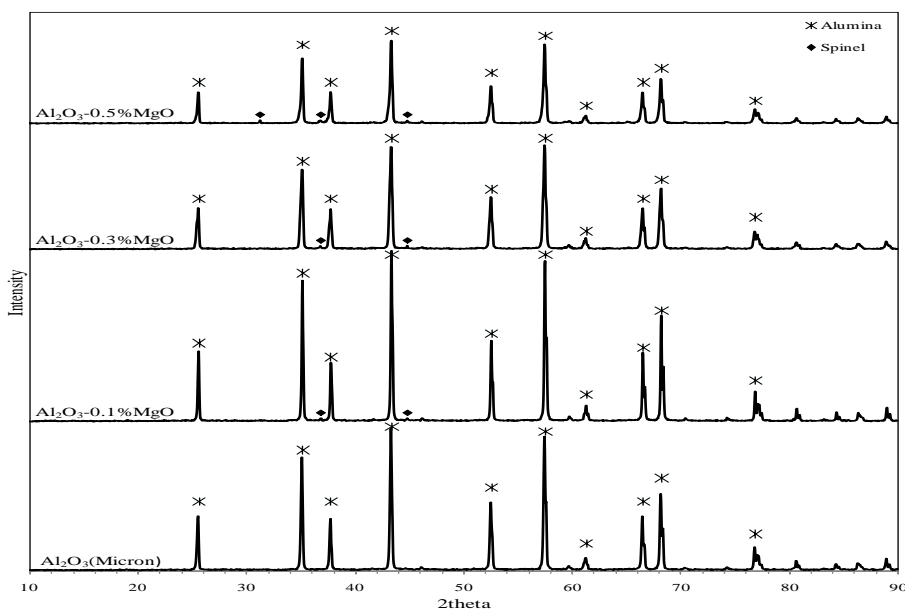
کم می شود و در نتیجه دانسیته نمونه ها افزایش می یابد. این افزایش دانسیته را می توان به ایجاد یک فاز ثانویه به نام اسپینل بین آلومینا و منیزیا نسبت داد که این فاز با نفوذ در مرز دانه ها از رشد آنها جلوگیری می کند و هرچه درصد منیزیا بیشتر باشد میزان جلوگیری از رشد دانه ها و در نتیجه ریز شدن آنها بیشتر است. شکل ۶ الگوی پراش پرتو ایکس نمونه ها پس از زینترینگ را نشان می دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می شود با افزایش درصد منیزیا از شدت پیک ها کاسته شده است. در این شکل نیز کاملاً مشهود است که با افزایش درصد نانو منیزیا پیک های مربوط به فاز اسپینل بیشتر مشهود هستند. در نمونه متعلق به آلومینای حاوی ۰/۱ درصد وزنی ذرات نانو منیزیا دو پیک کوچک که تایید کننده تشکیل فاز اسپینل است، دیده می شود. در نمونه آلومینای حاوی ۰/۵ درصد وزنی ذرات نانو منیزیا سه پیک مربوط به تشکیل فاز اسپینل موجود است که در این شکل مشخص شده است.

مختلف $Al_2O_3 - xMgO$ ($x=0,0.1,0.3,0.5$) تهیه شد و سپس در دمای ۱۵۷۰ درجه سانتیگراد که به شرایط صنعتی زینترینگ آلومینا نزدیک است، زینتر گردیدند.



شکل (۵): تغییرات درصد دانسیته نسبی آلومینای زینتر شده با اندازه دانه

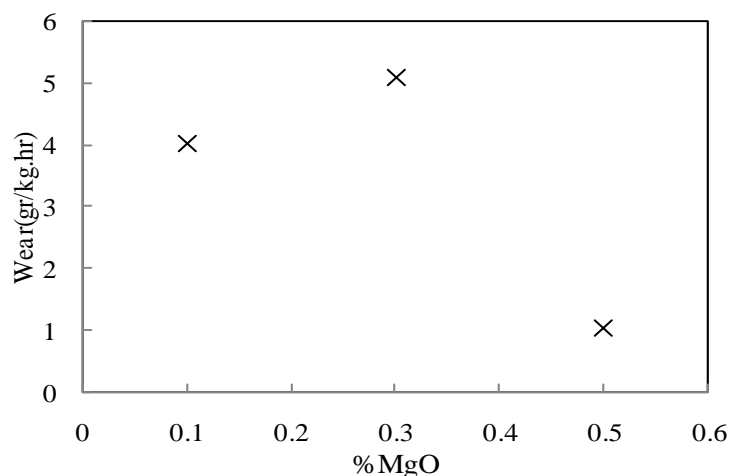
شکل ۵ تغییرات درصد دانسیته نسبی (تقسیم دانسیته اندازه گیری شده به دانسیته تئوری (۳/۹۷ گرم بر سانتیمتر مکعب) ضرب در ۱۰۰) را برای نمونه های مختلف با اندازه دانه را نشان می دهد همانطور که در این نمودار مشاهده می شود با افزایش اندازه دانه، میزان درصد دانسیته نسبی کاهش می یابد و با مقایسه نمودار ۴ و ۵ می توان دریافت که با افزایش درصد منیزیا، اندازه دانه ها



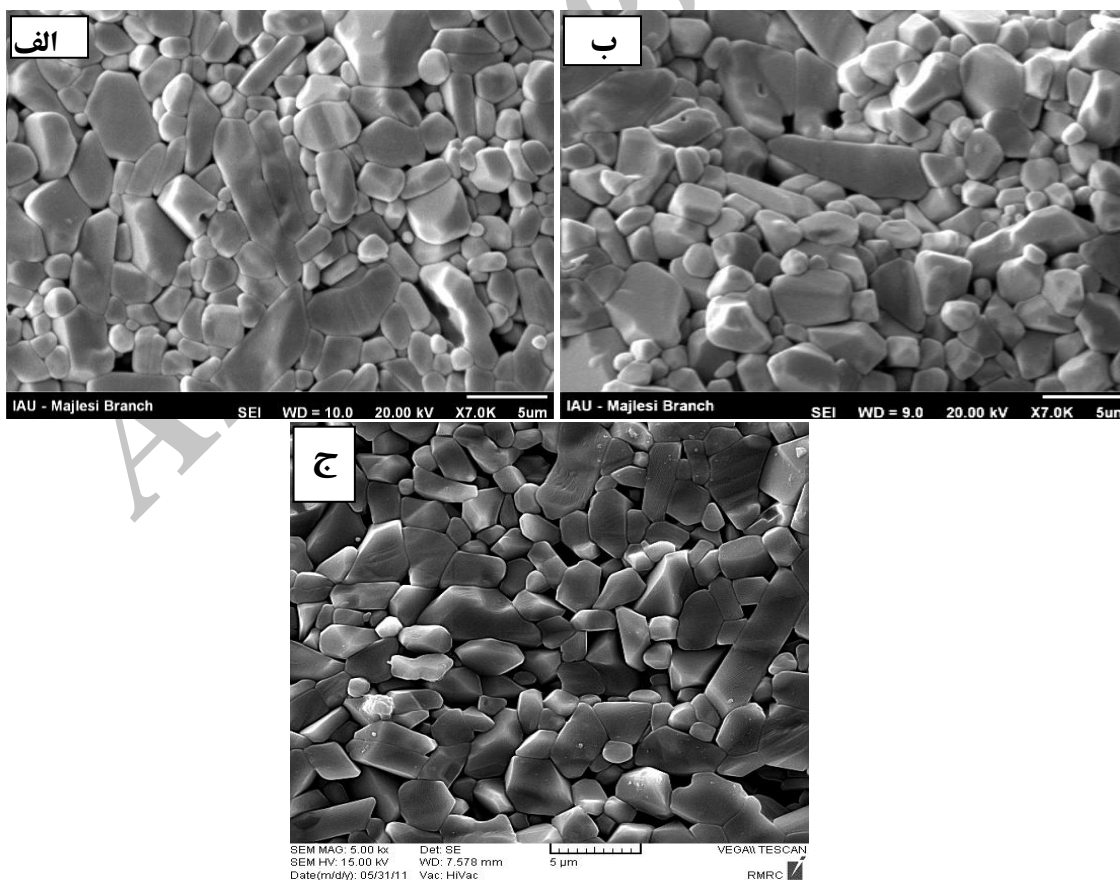
شکل (۶): الگوی پراش پرتو ایکس نمونه های آلومینای زینتر شده با درصد های مختلف منیزیا

می دهد که بطور کلی با افزایش درصد منیزیا، میزان سایش نمونه های آلومینایی کاهش می یابد .

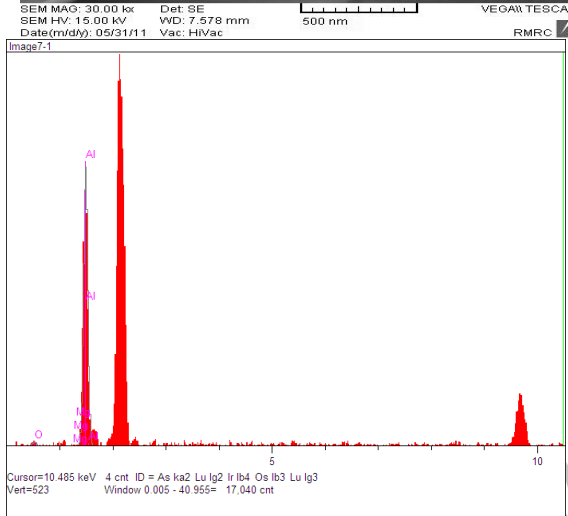
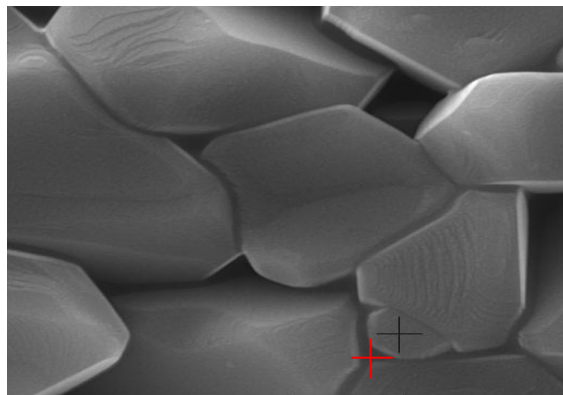
شکل ۷ نمودار تغییرات سایش نمونه های آلومینایی زینتر شده با درصد منیزیا می باشد. همانگونه که در این شکل مشهود است با افزایش درصد منیزیا میزان سایش تا مقدار مشخصی افزایش می یابد و سپس روند آن نزولی است. این نمودار نشان



شکل (۷): نمودار تغییرات سایش نمونه های آلومینایی زینتر شده با درصد منیزیا



شکل (۸): ریز ساختار میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه های آلومینایی سینتر شده در دمای 1570°C حاوی (الف): ۰/۱، (ب): ۰/۳، (ج): ۰/۵ درصد منیزیا



شکل (۹): آنالیز EDAX نمونه آلومینای زینتر شده حاوی ۰/۱ درصد منیزیا

۴- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر نانو پودر منیزیا با استفاده از روش سل-ژل تولید گردید و جهت بررسی تاثیر آن بر خواص فیزیکی آلومینای زینتر شده نمونه هایی حاوی ۰/۵، ۰/۳، ۰/۱ درصد منیزیا به روش ایزواستاتیک شکل دهی گردید و زینترینگ آلومینا حاوی ۰/۵، ۰/۳، ۰/۱ درصد منیزیا در دمای ۱۵۷۰ درجه سانتیگراد به مدت چهار ساعت تحت اتمسفر گاز خنثی انجام شد. سپس اثر درصد منیزیا بر دانسیته، رفتار سایشی و ریزساختار آلومینا مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق بشرح زیر است:

۱- پودر نانو منیزیا (با میانگین سایز کریستالی کمتر از ۵۰ نانومتر) را می توان با فرایند سل-ژل با استفاده از اسید اگزالیک و نترات منیزیم شش آبه بعنوان ماده اولیه و اتانول به

شکل ۸ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نمونه های آلومینای سینتر شده در دمای ۱۵۷۰ درجه سانتیگراد به مدت چهار ساعت تحت اتمسفر آرگون را نشان می دهد. در این تصاویر مشاهده می شود که اندازه دانه های نمونه آلومینایی حاوی ۰/۱ درصد نانو منیزیا نسبت به سایر درصدها کمتر (در حدود ۲/۶ میکرون) است (شکل الف ۸) و این اندازه دانه با افزایش درصد منیزیا کاهش می یابد و به مقداری در حدود ۹۰۰ نانومتر می رسد (شکل ب ۸). اندازه دانه های نمونه حاوی ۰/۵ درصد منیزیا در حدود ۲ میکرون می باشد (شکل ج ۸). با بررسی مکانیزم زینترینگ موجود در گزارش های علمی منتشر شده در نمونه های آلومینایی و تاثیر افزودنی ها بر این فرایند این نتیجه حاصل می شود که ساده ترین راه برای کنترل رشد دانه ها، استفاده از اثر قفل کنندگی مرز دانه ها است. این به این معنی که حضور حفرات در ساختار به واسطه چگالی ۹۰ درصدی از رشد دانه ها ممانعت می کند و بطور کلی می توان گفت که سینتیک رشد دانه ها از طریق کاهش تحرک مرز دانه ها با استفاده از نیروی قفل شوندگی ناشی از ذرات قابل کنترل است. ذرات ریز و یا رسوبات که در ساختار حل نشده اند و یا رشد نکنند براحتی ساختار را تا دمای بالا پایدار نگه می دارند. در این راستا از انحلال عناصر آلیاژی برای به تاخیر انداختن رشد دانه ها استفاده می شود. این عناصر با تجمع در مرز دانه ها و یا با تشکیل فاز دوم از تحرک مرز دانه ها می کاهد. در اینجا اکسید منیزیم در ساختار آلومینا قرار می گیرد و در دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد فاز اسپینل تشکیل می دهد و به صورت رسوب در بدنه آلومینا باقی می ماند. این فاز اسپینل رسوب کرده درون ساختار در ادامه زینترینگ با حضور در مرز دانه ها باعث قفل شدن مرز دانه ها می گردد. این فرایند باعث جلوگیری از رشد دانه ها و در نتیجه ریز دانه شدن آلومینای زینتر شده می شود که نهایتاً باعث بهبود خواص فیزیکی آن می گردد. شکل ۹ با استفاده از آنالیز EDAX وجود پیک های مربوط به منیزیم و آلومینیوم و اکسیژن را نشان می دهد که حضور فاز اسپینل ($MgAl_2O_4$) در مرز دانه ها را تایید می کند.

- عنوان حلال که بسیار ساده و مقرون به صرفه است، سنتز نمود.
- ۲- توسط روش نوین اندازه گیری نانو ذرات، اندازه ذرات حاصله برابر ۲۰ نانومتر بدست آمد که این عدد با تقریب بسیار کمی توسط تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و عبوری تأیید گردید.
- ۳- در یک دمای ثابت با افزایش درصد منیزیا اندازه متوسط دانه ها کمتر می شود.
- ۴- با کاهش اندازه دانه، درصد دانسیته نسبی افزایش می یابد.
- ۵- در دمای بالا منیزیا و آلومینا تشکیل فاز اسپینل داده و با نفوذ در مرز دانه های آلومینا باعث قفل شدن مرز دانه ها شده و نهایتاً ساختاری ریز دانه حاصل می شود.
- ۵- تقدیر و تشکر**
- نویسندگان از ستاد توسعه فناوری نانو بخاطر حمایت مالی از این تحقیق کمال تشکر و امتنان را دارند.
- ۶- مراجع**
- [1] I. Ganesh, P. M. C. Torres & J. M. F. Ferreira, "Densification Ability of Combustion-Derived Al_2O_3 Powders, *Ceramics International*", Vol. 35, pp. 179-1173, 2009.
- [2] J. Li, Y. Wu, Y. Pan, W. Liu, Y. Zhu & J. Guo, "Agglomeration of $\alpha-Al_2O_3$ Powders Prepared by Gel Combustion, *Ceramics International*", Vol. 34, pp.1539-1542, 2008.
- [3] H. Gleiter, "Nanocrystalline Materials", *Progress Material Science*, Vol. 33, pp. 223-315, 1989.
- [4] M. L. Panchula, J. Y. Ying, "Mechanical Synthesis of Nanocrystalline $\alpha-Al_2O_3$ Seeds for Enhanced Transformation Kinetics", *Nanostructured Material*, Vol. 9, pp. 161-164, 1997.
- ۲- پی نوشت
- [5] K. Kamata, T. Mochizuki, S. Matsumoto, A. Yamada & K. Miyokawa, "Preparation of Submicrometer Al_2O_3 Powder by Gas-Phase Oxidation of Tris (Acetylacetonato) Alumina (III)", *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 68, pp. C-193-C-194, 1985.
- [6] J. G. Li, X. D. Sun, "Synthesis and Sintering Behavior of a Nanocrystalline α -Alumina Powder", *Acta Material*, Vol. 48, pp. 3103-3112, 2000.
- [7] W. M. Zeng, L. Gao & J. K. Guo, "A New Sol-Gel Route Using Inorganic Salt for Synthesizing Al_2O_3 Nanopowders", *Nanostructured Material*, Vol. 10, pp. 543-550, 1998.
- [8] J. J. Kingsley, K. C. Patil, "A Novel Combustion Process for the Synthesis of Fine Particle α -Alumina and Related Oxide Materials", *Materials Letters*, Vol. 6, pp. 427-432, 1988.
- [9] S. A. Hassanzadeh-Tabrizi, E. Taheri-Nassaj, "Sol-Gel Synthesis and Characterization of Al_2O_3 - CeO_2 Composite Nanopowder", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol.494, pp. 289-294, 2010.
- [10] S. Shen, P.S. Chow, F. Chen, R.B. Tan, "Submicron particles of SBA-15 modified with MgO as carriers for controlled drug delivery" , *Chem. Pharm. Bull.* Vol. 55, PP. 985-991, 2007.
- [11] Z. Zhou, S. Xie, D. Wan, D. Liu, Y. Gao, X. Yan, H. Yuan, J. Wang, L. Liu, W. Zhou, Y. Wang, H. Chen & J. Li, "Multidimensional magnesium oxide nanostructures with cone-shaped branching, *Solid State Commun*", Vol. 131, PP. 485-488, 2004, R.L. Coble, *J. Appl. Phys.*, Vol. 32, PP. 793-799, 1961.
- [۱۲] ا. منشی، س. سلطان عطار، "بکارگیری روشی نوین در اندازه گیری نانو ذرات با استفاده از رابطه شرر و پراش پرتو ایکس"، فصلنامه علمی تخصصی مهندسی مواد مجلسی، سال دوم، شماره ششم، پاییز ۱۳۸۷.