

بکارگیری طراحی تاگوچی جهت تعیین شرایط بهینه سنتز نانوذرات $YAlO_3$ به روش سل-ژل احتراقی

یاسمن غفاری^۱، رسول صراف ماموری^۱، نسترن ریاحی نوری^۲

^۱ گروه مهندسی مواد-سرامیک، دانشگاه تربیت مدرس، ^۲ گروه پژوهشی مواد غیرفلزی، پژوهشگاه نیرو

rsarrafm@modares.ac.ir

چکیده: در این پژوهش، سنتز نانوذرات آلومینا-ایتريا ($YAlO_3$) به روش احتراقی انجام گرفت. مواد اولیه مورد استفاده در این تحقیق شامل نیترات آلومینیم آبدار $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ به عنوان منبع یون‌های Al^{3+} ، اکسید ایتريا (Y_2O_3) برای تولید نیترات ایتريم ($Y(NO_3)_3$) به عنوان منبع یون‌های Y^{3+} ، نیتريك اسید ۶۵٪ (HNO_3) به منظور انحلال پودر ایتريا و تهیه نیترات ایتريم و گلايسين ($C_2H_5NO_2$) به عنوان سوخت بود. به منظور بررسی و بهینه‌سازی پارامترها از طراحی تاگوچی با ماتریس ترکیبی و استفاده و پاسخ مورد اندازه‌گیری، متوسط اندازه ذرات تولید شده تعیین شد. سه پارامتر تاثیرگذار در واکنش به صورت غلظت یون‌های فلزی، نسبت سوخت به اکسید کننده و مقدار pH واکنش تعیین گردیدند که در سه سطح در نظر گرفته شدند. از آنالیز واریانس نیز برای دست‌یابی به کمترین متوسط اندازه ذرات استفاده شد. آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان (FESEM) و آزمایش تعیین سطح ویژه (BET) به منظور فازشناسی، ریخت شناسی و تعیین سطح ویژه پودر حاصل انجام شد. شرایط بهینه برای واکنش به صورت غلظت 0.2 mol/L برای یون‌های فلزی، نسبت سوخت به اکسید کننده $1/25$ برابر استوکیومتری و pH برابر ۴ معرفی شد. در این شرایط متوسط اندازه ذرات حدود ۴۵ نانومتر اندازه‌گیری شد.

کلید واژه: نانوذرات، آلومینا-ایتريا، سل-ژل احتراقی، طراحی تاگوچی.

۱- مقدمه

اهمیت نمودار فاز آلومینا-ایتريا از کاربرد آلومینا و ایتريا به عنوان افزودنی در فرایند سینتر فاز مایع سرامیک‌های دارای بانده کوالانت سررشته می‌گیرد. با توجه به نمودار فاز آلومینا-ایتريا، در نسبت‌های مختلف این دو ماده، سه ترکیب اصلی $(Y_4Al_2O_9Al)_2O_3 \cdot 2Y_2O_3$ ، $(YAlO_3)Al_2O_3 \cdot Y_2O_3$ و $(Y_3Al_5O_{12})_5Al_2O_3 \cdot 3Y_2O_3$ تشکیل می‌شوند [۱]. در بسیاری از موارد از ایتريا، یا مخلوطی از آلومینا و ایتريا به عنوان کمک سینتر استفاده شده است [۲]. افزودن آلومینا به مخلوط نیتريد سیلیسیم-ایتريا، با افزایش سیالیت و کاهش دمای ذوب فاز شیشه، موجب افزایش چگالی می‌شود. در بیشتر موارد این دو ماده به صورت مجزا به سیستم افزوده می‌شوند، که در این صورت مشکل ناهمگنی توزیع آلومینا و ایتريا بر روی سطح نیتريد سیلیسیم به وجود می‌آید یعنی ممکن است در یک نقطه از قطعه از قطعه مذاب غنی از آلومینا و در نقطه‌ی دیگر مذاب غنی از ایتريا ایجاد شود [۳].

علاوه بر کاربرد به عنوان کمک‌سینتر، از کاربردهای مهم این ترکیبات استفاده‌ی آنها به عنوان مواد نورتاب است که اخیراً

توجهات زیادی را به ایتیریم آلومینات‌های بر پایه‌ی سیستم $Al_2O_3.Y_2O_3$ ، مانند $(YAP)Y_3Al_5O_{12}$ ، $(YAP)YAlO_3$ و $(YAM)Y_4Al_2O_9$ نموده است [۴]. همچنین کریستال‌های ایتیریم آلومینیوم با ساختار پروسکایت $(YAlO_3-YAP)$ فعال شده با عناصر خاکی نادر، یکی از مهمترین مواد مورد استفاده در صنعت لیزر هستند. از نکات جالب این ماده این است که در ساختار $YAlO_3$ می‌توان با جایگزینی عناصر خاکی نادر به مواد لیزری جدیدی دست یافت [۵]. از دیگر کاربردهای این ترکیبات می‌توان به استفاده‌ی آنها در صنعت رنگدانه اشاره کرد. امروزه استفاده از مواد سرامیکی جدید در ساخت رنگدانه‌هایی با دمای $1200^\circ C$ و مقاومت شیمیایی مناسب گسترش زیادی یافته است. رنگدانه قرمز با ساختار پروسکایت $YAlO_3$ که به وسیله‌ی مقدار کمی Cr^{3+} دوپ شده است به عنوان عامل رنگ کننده دارای پایداری دمایی و شیمیایی مناسب می‌باشد و مسأله آلودگی محیط زیست را نیز ندارد [۶].

روش‌های زیادی برای سنتز این نوع ترکیبات نانویی در سیستم آلومینا-ایتیریا از جمله روش حالت جامد [۷]، سل ژل [۸]، هم‌رسوبی [۹] و غیره وجود دارد. در فرایند تولید سرامیک‌های پیشرفته، احتیاج بسیاری به توسعه‌ی روش‌های سنتزی است که توانایی تولید پودرهای زیرمیکرونی با خلوص شیمیایی و توزیع اندازه دانه‌ی وسیع داشته باشند [۱۰]. از آنجا که روش‌های سنتز جدید در مقایسه با روش‌های مرسوم گران‌تر هستند، قیمت نیز می‌تواند عامل تعیین کننده باشد. از این روروش سنتز سل-ژل احتراقی به علت کاهش نیاز به منابع انرژی خارجی، بازده بالا، سهولت روش و ارزان بودن تجهیزات و کیفیت بالای محصول در مقایسه با دیگر روش‌های سنتز، بسیار مورد توجه است. فرایند سنتز سل-ژل احتراقی یک روش مناسب برای تولید نانوذرات در هزینه‌ی نسبتاً کم و با همگنی ترکیب شیمیایی زیاد است که می‌توان ذرات ریزی با توزیع یکنواخت را تولید نمود [۱۱]. از پارامترهای تاثیر گذار در این روش می‌توان به نوع سوخت، نسبت سوخت به اکسید کننده، دمای کلسیناسیون، pH محلول، نوع و درصد سوخت کمکی و ... اشاره نمود. در این پژوهش سنتز نانوذرات $Al_2O_3.Y_2O_3$ یا $(YAlO_3)$ به روش سل-ژل احتراقی و به منظور کمک به فرایند سینتر نیتريد سیلیسیم انتخاب شده است. این انتخاب می‌تواند شرایط اصلی همگن بودن ترکیب آلومینا-ایتیریا را در فرایند سینتر نیتريد سیلیسیم به میزان کافی بوجود آورد.

۲- فعالیت‌های تجربی

در این پژوهش، سنتز نانوذرات آلومینا-ایتیریا $(YAlO_3)$ به روش احتراقی انجام گرفت. مواد اولیه مورد استفاده در این تحقیق شامل نیترات آلومینیم آبدار $(Al(NO_3)_3.9H_2O)$ (Merck-%۹۵) به عنوان منبع یون های Al^{3+} ، اکسید ایتیریا (Y_2O_3) (Merck-%۹۵) برای تولید نیترات ایتیریم، $(Y(NO_3)_3)$ به عنوان منبع یون های Y^{3+} ، نیتريك اسید (HNO_3) (Merck-%۶۵) به منظور انحلال پودر ایتیریا و تهیه‌ی نیترات ایتیریم و گلايسين $(C_2H_5NO_2)$ (Merck-%۹۹) به عنوان سوخت بود. در این پژوهش، پارامترهای گوناگونی که در تحقیقات گذشته بررسی نشده و یا به صورت جداگانه بررسی شده است، در کنار هم مورد مطالعه قرار گرفت. مسلماً نقش متقابل پارامترهای واکنش در کنار یکدیگر متفاوت از نقش جداگانه هر یک از پارامترها می‌باشد. سه پارامتر نسبت سوخت به اکسید کننده، اسیدپته‌ی محلول اولیه و غلظت واکنش دهنده‌ها، به عنوان پارامترهای اصلی تاثیرگذار در انجام واکنش تعیین شدند. پارامترهای مورد بررسی و سطوح آنها که در طراحی با روش تاگوچی به کار گرفته شد در جدول

۱ نشان داده شده است. در این واکنش به منظور محاسبه‌ی مقدار استوکیومتری سوخت مورد نیاز، از مجموع ظرفیت اکسنده-کاهنده و مفهوم شیمی محرکه^۱ استفاده شد [۱۲ و ۱۳]. کربن، هیدروژن و آلومینیوم به عنوان عناصر کاهنده با ظرفیت‌های به ترتیب +۴، +۱ و +۳ می‌باشند. اکسیژن نیز به عنوان عنصر اکسنده با ظرفیت ۲- و نیتروژن با ظرفیت صفر در نظر گرفته شده‌اند. با جمع ظرفیت هر ماده‌ی واکنش دهنده، مجموع ظرفیت $Al(NO_3)_3$ ، $Y(NO_3)_3$ و $C_2H_5NO_2$ (گلايسين) به ترتیب ۱۵- و ۱۵- و ۹+ محاسبه شد.

جدول ۱- پارامترهای انتخابی برای این پژوهش به همراه سطوح آنها.

پارامترها	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
A: غلظت واکنش دهنده‌ها	۰/۰۵	۰/۱	۰/۲
B: نسبت سوخت به اکسید کننده	۰/۷ St	St	۱/۲۵ St
C: اسیدیته	۲	۳	۴

*st=stoichiometric

در این طراحی، از آنجا که سه پارامتر سه سطحی وجود دارد، پس یک ماتریس متعامد L_9 مناسب خواهد بود، که بر اساس روش‌های استاندارد ماتریس متعامد استاندارد L_9 در جدول ۲ ارائه گردید. در این پژوهش برای بررسی کامل تمامی پارامترها و سطوح آن‌ها به 3^3 (سطوح به توان پارامتر) یعنی ۲۷ آزمایش نیاز است در حالی که روش تاگوچی این تعداد را به ۹ آزمایش کاهش می‌دهد.

جدول ۲- ماتریس متعامد L_9 مورد استفاده در آزمایش.

آزمایش	غلظت واکنش دهنده‌ها Mol/L	نسبت سوخت به اکسید کننده	pH واکنش
۱	۰/۰۵	۰/۷ St	۲
۲	۰/۰۵	St	۳
۳	۰/۰۵	۱/۲۵ St	۴
۴	۰/۱	۰/۷ St	۳
۵	۰/۱	St	۴
۶	۰/۱	۱/۲۵ St	۲
۷	۰/۲	۰/۷ St	۴
۸	۰/۲	St	۲
۹	۰/۲	۱/۲۵ St	۳

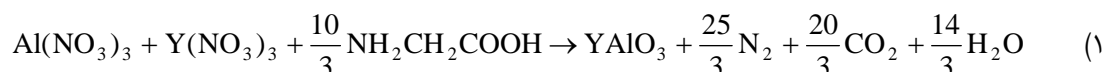
*st=stoichiometric

¹ Propellant Chemistry

جهت سنتز نانوپودر $YAlO_3$ به روش سل-ژل احتراقی، ابتدا مطابق با جدول ۲، مقدار مورد نظر پودر ایتریا در مقدار مناسب آب دیونیزه و نیتریک اسید ریخته و حرارت داده شد تا محلول نیترات ایتریم حاصل شود. همچنین در یک بشر جداگانه مقدار مورد نظر $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ در مقداری آب دیونیزه حل گردید. این دو محلول نیترات حاصل به هم اضافه شده و به مقدار نسبت استوکیومتری سوخت به اکسید کننده‌ی مورد نظر از سوخت گلايسين به آن افزوده شد. سپس به منظور خروج ناخالصی‌های احتمالی موجود در محلول، عملیات سانتریفیوژ انجام شد. در نهایت اسیدیتته‌ی محلول با افزودن مقدار مناسب آمونیاک و نیتریک اسید به طور تدریجی به محلول داخل بشر، به مقدار مورد نظر رسانده شد. محلول حاصل درون بشر، روی هیتر مغناطیسی قرار گرفته و همزمان با هم خوردن توسط همزن مغناطیسی تحت حرارت قرار گرفت. در ادامه‌ی پروسه، سل موجود به یک ساختار ژلی تبدیل شد. با ادامه‌ی حرارت دهی ژل حاصل محترق شد و یک ساختار حجیم متخلخل ایجاد گشت.

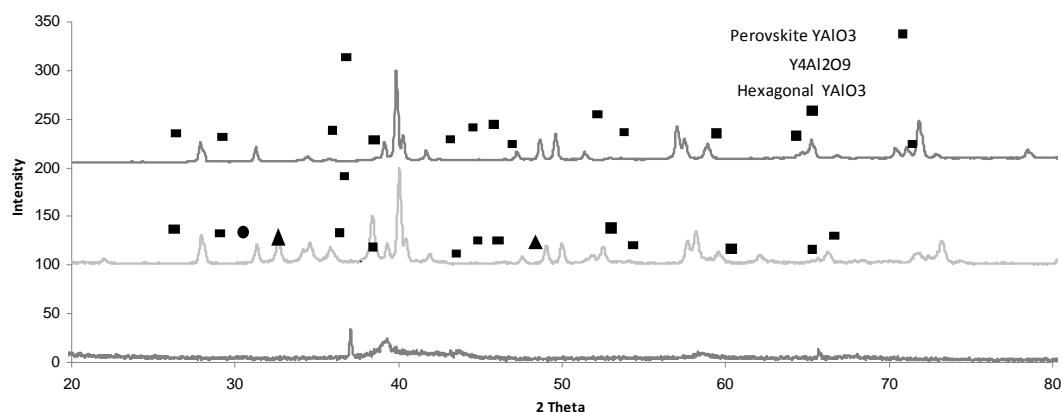
۳- نتایج و بحث

واکنش احتراق در حالتی که از سوخت گلايسين و در نسبت استوکیومتری استفاده شود، به ازای هر مول اکسید به صورت زیر خواهد بود:



این واکنش یک واکنش گرمازا است که گرمای حاصل از آن باعث پیش‌رونده بودن احتراق می‌شود. در این معادله H_2O ، CO_2 و N_2 محصولات گازی واکنش هستند. مکانیزم واکنش احتراق به این صورت است که یون‌های نیترات به عنوان عوامل اکسند و سوخت به عنوان عامل کاهنده عمل می‌کند و در یک واکنش اکسایش-کاهش احتراق رخ می‌دهد. هنگامی که ماده به نقطه‌ی احتراق می‌رسد، دچار واکنش سوختن می‌شود. پس از اینکه کلیه‌ی مواد قابل احتراق سوخته و به صورت گاز از سیستم خارج شدند، یک جرم متخلخل و ترد باقی مانده و احتراق پایان می‌یابد [۱۴]. با توجه به واکنش مشاهده می‌شود که حجم زیادی گاز در فرایند احتراق به وجود آمده است. خروج گازها از سیستم، موجب سست شدن اتصال ذرات و جلوگیری از کلوخه‌ای شدن آنها می‌شود. البته باید ذکر نمود که حرارت حاصل از احتراق در بسیاری از موارد برای تشکیل اکسیدهای فلزی پایدار کافی نبوده و انجام عملیات کلسیناسیون در دما و زمان مناسب به منظور حصول پودر کاملاً بلوری شده لازم می‌باشد [۱۴، ۱۵]. به منظور تعیین دمای کلسیناسیون، از آزمایش XRD استفاده شد. پس از انجام عملیات کلسیناسیون در دو دمای مختلف، دمای $1100^\circ C$ و مدت زمان ۲ ساعت به عنوان دما و زمان نهایی تعیین شد و کلیه‌ی نمونه‌ها در این دما و زمان کلسینه شدند.

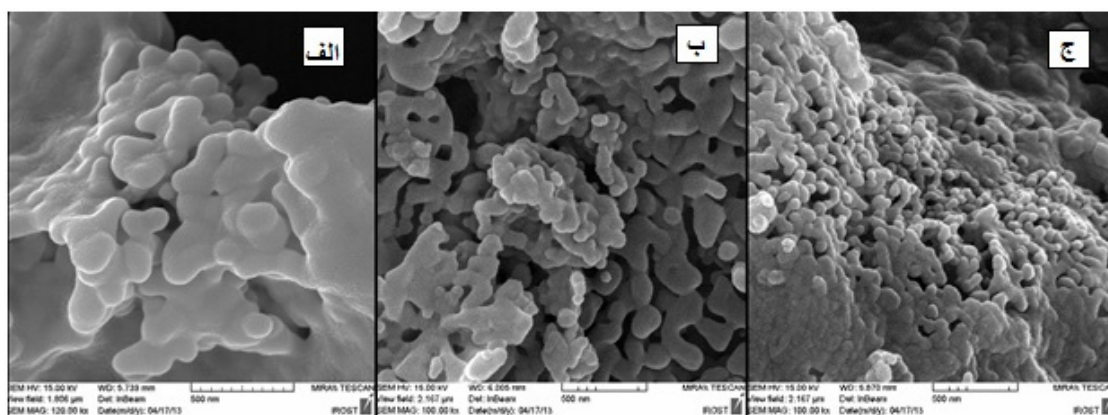
پس از انجام عملیات خردایش نمونه‌های کلسینه شده، به منظور تعیین متوسط اندازه ذرات حاصل از هر آزمایش، از آنالیز FESEM استفاده شد. بدین منظور برای بدست آوردن اندازه متوسط ذرات از نرم افزار "Image J" استفاده شد و برای دقت در اندازه‌گیری برای هر نمونه بیش از ۵۰ تصویر مورد مطالعه قرار گرفت. اگر چه ظاهراً دقت این روش نسبت به روش‌های دیگر کمتر است، اما بررسی تعداد زیاد تصویر در هر نمونه به مقدار قابل توجهی دقت اندازه‌گیری را افزایش می‌دهد. مقادیر به دست آمده برای نمونه‌ها در جدول ۳ آمده است. همچنین تصاویر FESEM حاصل از نمونه‌های ۲ و ۵ و ۹ به عنوان مثال در شکل ۲ آمده است.



شکل ۱- تصویر اثر دما در الگوی پراش اشعه‌ی ایکس نمونه‌ی حاصل از آزمایش تاگوچی، الف. پس از احتراق، ب. کلسینه در ۸۰۰ °C، ج. کلسینه در ۱۱۰۰ °C

جدول ۳- متوسط اندازه‌ی ذرات محاسبه شده با آنالیز FESEM در نمونه‌های تاگوچی

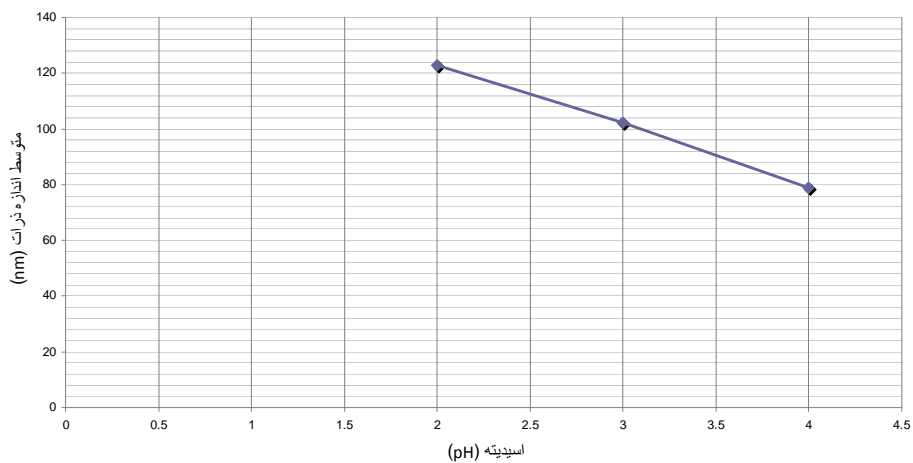
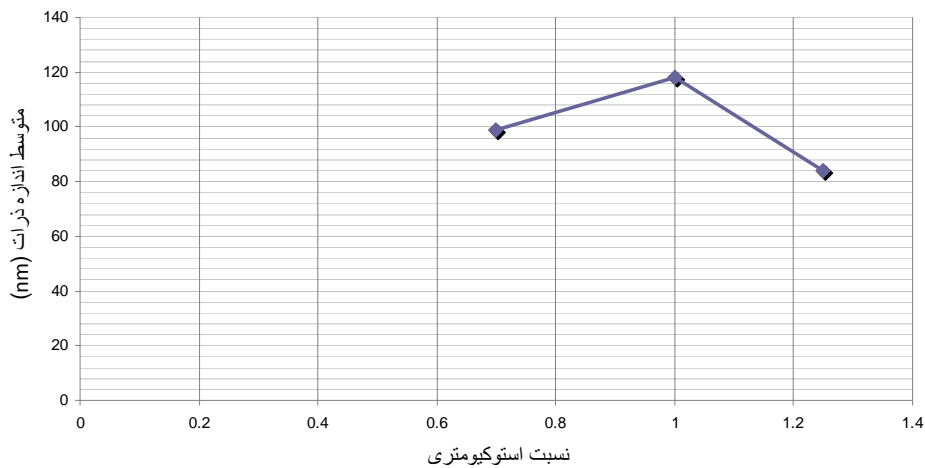
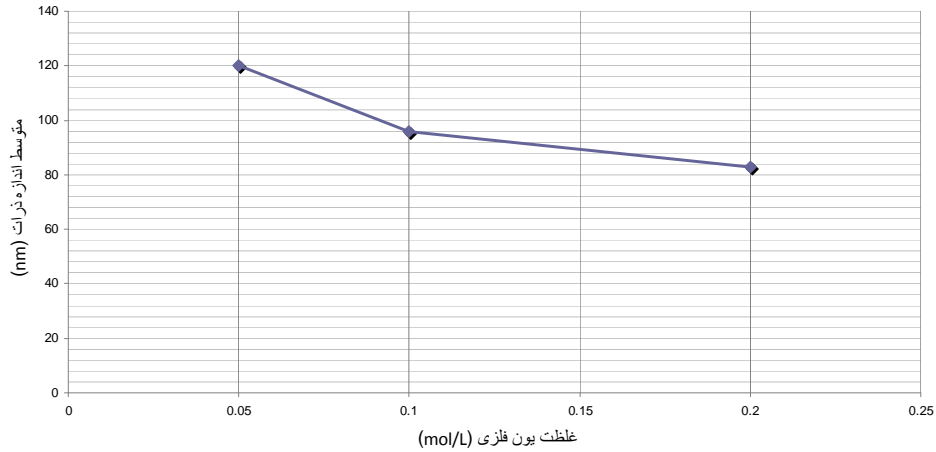
شماره‌ی آزمایش	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
متوسط اندازه ذرات (nm)	۱۲۲	۱۵۴	۵۶	۶۴	۷۷	۱۱۹	۷۸	۹۸	۶۱



شکل ۲- تصویر میکروسکوب الکترونی روبشی گسیل میدان برای نمونه‌های کلسینه شده الف. ۲، ب. ۵ و ج. ۹.

در ادامه به منظور تعیین شرایط بهینه‌ی پارامترها از محاسبات تاگوچی استفاده و برای هر پارامتر یک مقدار بهینه تعیین شد [۱۶]. با توجه به نمودارهای موجود در شکل ۳، مشخص است که کمترین اندازه ذرات در غلظت ۰/۲ مول بر لیتر، نسبت سوخت به اکسید کننده‌ی ۱/۲۵ برابر استوکیومتری و pH برابر ۴ به دست آمده است. با توجه به نمودارهای شکل ۳ می‌توان گفت که افزایش غلظت واکنش دهنده‌ها موجب کاهش متوسط اندازه ذرات شده است. این رفتار می‌تواند به مقدار و شدت گازهای خروجی مربوط باشد. همان‌طور که از شکل ۴ مشخص است، در حالتی که غلظت یون‌های فلزی کمتر بوده است، تخلخل ساختار ایجاد شده پس از فرایند احتراق نیز کمتر بوده است. این امر به معنای حبس گاز و خروج سختتر گازها در این ساختار می‌باشد. در حالیکه در غلظت‌های بالاتر، پس از فرایند احتراق ساختاری با درصد تخلخل بالاتر تولید می‌شود و این نشان دهنده‌ی خروج بیشتر گازهای تولیدی است. خروج گاز یکی از عوامل اصلی در جلوگیری از

کلوخه‌ای شدن ذرات است. همچنین از آنجا که گازها به همراه خود گرما را از سیستم خارج می‌کنند، مانع رشد اندازه‌ی ذرات می‌شوند. حضور تخلخل بالاتر به معنی سطح بیشتر و انتقال حرارت بیشتر است و در نتیجه حرارت کمتری در سیستم باقی می‌ماند. از این رو ذرات در زمان کمتری در دمای بالا قرار گرفته‌اند و بنابراین اندازه‌ی ذرات ریزتر خواهد شد.



شکل ۳- نمودار تغییرات متوسط اندازه ذرات نمونه‌های کلسینه شده با
الف) غلظت کاتیونی، ب) نسبت سوخت به اکسید کننده، و ج) اسیدیته



شکل ۴- تصویر پودر حاصل پس از فرایند احتراق برای نمونه الف) غلظت پایین و ب) غلظت بالا

همان طور که از نمودار شکل ۳ مشخص است، مقدار مناسب برای داشتن ذراتی با کمترین میانگین اندازه، در نسبت سوخت به اکسید کننده‌ی ۱/۲۵ و در واقع سطح ۳ از سطوح پارامتر قابل رویت می‌باشد. این امر می‌تواند به دلیل حضور مقدار زیاد ترکیبات آلی ناشی از سوخت باقیمانده در سیستم باشد. این ترکیبات به علت ظرفیت حرارتی بالایشان مقداری از گرمای سیستم را جذب می‌کنند. همچنین در طی فرایند کلسیناسیون مقداری از حرارت اعمال شده به ماده، صرف خروج این ترکیبات آلی از سیستم می‌شود که ریزتر بودن اندازه ذرات در این حالت می‌تواند مربوط به این مسئله باشد. در نسبت سوخت به اکسید کننده‌ی ۰/۷ برابر استوکیومتری، به علت حضور سوخت کمتر و در نتیجه تولید گرمای کمتر در سیستم به نسبت حالت استوکیومتری، اندازه‌ی متوسط ذرات کمتر می‌باشد. در واقع در این حالت، مقدار سوخت مورد استفاده، کمتر از سوخت مورد نیاز برای سوختن کل واکنش دهنده‌ها می‌باشد. اما به دلیل خودپیش‌رونده بودن واکنش، کلیه‌ی واکنش دهنده‌ها مصرف می‌شوند. در نتیجه مقداری از گرمای ناشی از سوختن گلاسیسین، صرف سوختن مقدار اضافی واکنش دهنده‌های نیتراتی اضافی شده است و این می‌تواند دلیلی برای کمتر بودن متوسط اندازه‌ی ذرات نسبت به حالت استوکیومتری باشد.

از نمودار موجود در شکل ۳ مشخص است که مقدار مناسب برای داشتن ذراتی با کمترین میانگین اندازه، در pH بالاتر و در واقع سطح ۳ از سطوح پارامتر قابل رویت می‌باشد. گلاسیسین علاوه بر نقش سوخت، نقش کمپلکس دهنده‌گی را نیز دارا می‌باشد که با حل شدن در آب، با در بر گرفتن یون‌های فلزی و تشکیل کمپلکس پایدار، موجب قرار گرفتن این یون‌ها در کنار یکدیگر شده و مانع رسوب آنها می‌شود. به این ترتیب محلولی با ترکیب همگن به دست می‌آید. این اسید به دلیل دارا بودن گروه کربوکسیل (COOH)، با حل شدن در آب یونیزه شده و H^+ مربوط به OH که عامل اسیدی گروه کربوکسیل است از آن جدا شده و یک جفت الکترون غیر پیوندی بر روی اکسیژن باقی می‌ماند. حال کاتیون‌های فلزی با این جفت الکترون پیوند داتیو تشکیل داده و نهایتاً کمپلکس تشکیل می‌دهند [۱۷]. افزایش pH، نرخ هیدرولیز شدن گلاسیسین را بیشتر می‌کند و یون‌های فلزی کمپلکس موثرتری با سوخت تشکیل می‌دهند. این امر همچنین نرخ تشکیل ژل را نیز افزایش می‌دهد [۱۸].

در ادامه به منظور تعیین مقدار پاسخ در شرایط بهینه از معادله‌ی پاسخ بهینه در طراحی تاگوچی استفاده شد [۱۶]. بر اساس این

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش سنتز نانوذرات $YAlO_3$ به روش سل-ژل احتراقی از مواد اولیه نیترات آلومینیوم و پودر ایتریا انجام شد. با استفاده از طراحی تاگوچی که ترکیبی از شیوه های ریاضی و آماری برای استفاده در تحقیقات تجربی است، امکان بررسی و بهینه سازی پارامترهای موثر بر واکنش در تعداد آزمایش و هزینه ی کمتر فراهم گردید. با در نظر گرفتن مشخصه ی کیفی "هرچه کوچکتر، بهتر" سطوح بهینه ی پارامترها به صورت غلظت 0.2 mol/L ، نسبت سوخت به اکسید کننده ی $1/25$ و pH برابر ۴ تعیین شد. در حالت بهینه، نتیجه ی مورد انتظار محاسبه شده از روش تاگوچی برابر متوسط اندازه ذرات برابر $41/6$ نانومتر حکایت داشت که مقدار محاسبه شده توسط آزمایش عملی برابر 45 نانومتر بوده است و این امر نشان دهنده ی کارایی پیش بینی با روش تاگوچی می باشد.

مراجع

- [1] M. Medraj, "High temperature neutron diffraction study of the Al_2O_3 - Y_2O_3 system". Journal of the European Ceramic Society, 2006. 26(16): p. 3515-3524.
 - [2] T. Nishimura, "Fabrication of silicon nitride nanoceramics—Powder preparation and sintering: A review". Science and Technology of Advanced Materials, 2007. 8(7-8): p. 635-643.
 - [3] A. Kuzjukēvičs, and K. Ishizaki, "Sintering of Silicon Nitride with $YAlO_3$ Additive". Journal of the American Ceramic Society, 1993. 76(9): p. 2373-2375.
 - [4] H. Gao, and Y. Wang, "Photoluminescence of Eu^{3+} activated $YAlO_3$ under UV-VUV excitation". Materials Research Bulletin, 2007. 42(5): p. 921-927.
 - [5] H. P. Weber, and W. Lüthy, "The $YAlO_3:Er$ Laser, in Tunable Solid-State Lasers II". Springer Berlin Heidelberg. 1986, p. 308-316.
 - [6] Y. Marinova, "Study of solid solutions, with perovskite structure, for application in the field of the ceramic pigments". Journal of the European Ceramic Society, 2003. 23(2): p. 213-220.
 - [7] Y. Pan, M. Wu, and Q. Su, "Tailored photoluminescence of YAG:Ce phosphor through various methods". Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2004. 65(5): p. 845-850.
 - [8] E. Talik, " $YAlO_3:Mn$ nanocrystals obtained in sol-gel and their properties". Crystal Research and Technology, 2010. 45(12): p. 1258-1264.
 - [9] H. Wang, L. Gao, and K. Niihara, "Synthesis of nanoscaled yttrium aluminum garnet powder by the co-precipitation method". Materials Science and Engineering: A, 2000. 288(1): p. 1-4.
- [۱۰] م. زبرجد، مقدمه ای بر مواد پیشرفته، یوکابد، مشهد، ۱۳۸۸، ۳۱۷-۳۵۳.
- [۱۱] ع. سیمچی، "آشنایی با نانوذرات (خواص، روش های تولید، کاربرد)"، انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۷، ۳۷-۱۴۰.
- [12] R. Norouzbeigi, and M. Edrissi, "Preparation of Nano Alumina Powder via Combustion Synthesis: Porous Structure Optimization via Taguchi L16 Design". Journal of the American Ceramic Society, 2011. 94(11): p. 4052-4058.
 - [13] J. C. Toniolo, "Synthesis of alumina powders by the glycine-nitrate combustion process". Materials Research Bulletin, 2005. 40(3): p. 561-571.
 - [14] A. Sutka, and G. Mezinskis, "Sol-gel auto-combustion synthesis of spinel-type ferrite nanomaterials". Frontiers of Materials Science, 2019. 5(9): p. 198-141.
 - [15] S. Roy, "Synthesis of YAG phase by a citrate-nitrate combustion technique". Materials Letters, 1999. 39(3): p. 138-141.
 - [16] Ross, P., "Taguchi techniques for quality engineering", McGraw-Hill, 1998, pp. 10-150
 - [17] Mondelaers D., Vanhoyland G., Van Den Rul H., D'Haen J. Van Bael M. K., Mullens J.; Van

- Poucke L. C., "Synthesis of ZnO Nanopowder Via an Aqueous Acetate– Citrate Gelation Method", Materials Research Bulletin, 37: 901-914 (2002).
- [18] L. Zhou, "A novel green emitting phosphor Ca₁. 5Y₁. 5Al₃. 5Si₁. 5O₁₂: Tb³⁺". Materials chemistry and physics, 2006. 100(2): p. 372-374.