

## مطالعه نانوذرات آلومینات استرانسیوم و آلیش با دیسپروزیوم

سمیه باهام بختیاری<sup>1</sup>، مرتضی زرگر شوشتری<sup>1،\*</sup>، محمد صبائیان<sup>1،2</sup>

<sup>1</sup> گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

<sup>2</sup> مرکز تحقیقات لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

دریافت: 1396/06/27 ویرایش نهایی: 1397/07/25 پذیرش: 1397/09/07

### چکیده

در این پژوهش، ساخت نانوذرات آلومینات استرانسیوم ( $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ ) به روش احتراقی به کمک مایکروویو و آلیش آنها با دیسپروزیوم ( $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Dy}$ ) مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصه‌یابی نانوذرات با روش‌های UV-Vis، FESEM، EDS، FT-IR، XRD و PL انجام شد. در مرحله ساخت، الگوهای پراش پرتوی ایکس تشکیل آلومینات استرانسیوم با تقارن تک‌میلی و گروه فضایی  $P1211$  را در نمونه با نسبت سوخت به نیترات 3 به 1، مقدار pH برابر با 5/5، زمان 5 دقیقه تابش‌دهی در مایکروویو، زمان پخت 1 ساعت و دمای پخت 600 درجه سانتی‌گراد تأیید کرد. با استفاده از داده‌های حاصل از پراش پودری پرتوی ایکس و فرمول شری، متوسط اندازه نانوبلورک‌ها حدود 26 نانومتر به دست آمد. در مرحله جانشینی، درصد‌های مختلف آلیش با دیسپروزیوم، به منظور بهینه‌سازی فوتولومینسانس نانوذرات  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  بررسی شد. در میان نانوذرات ساخته شده، نانوذرات  $\text{Sr}_{0.9}\text{Al}_2\text{O}_4:\text{Dy}_{0.1}$  با متوسط اندازه نانوذرات  $34 \pm 3$  نانومتر، پهنای توزیع فراوانی 30 تا 35 نانومتر، گاف اپتیکی  $4.21 \pm 0.01$  الکترون‌ولت و دارا بودن بیشترین شدت نشر در طیف فوتولومینسانس، به عنوان نمونه بهینه از لحاظ خواص ساختاری و نوری شناخته شدند.

**کلیدواژگان:** نانوفسفرسان، آلومینات استرانسیوم، روش مایکروویو احتراقی، دیسپروزیوم.

### مقدمه

دارای چنین خاصیتی هستند، مواد فسفرسان<sup>3</sup> نامیده می‌شوند [3]. در برخی موارد نشر در ناحیه‌های فرابنفش و مادون‌قرمز نیز رخ می‌دهد [4]. اغلب مواد فسفرسان، مواد جامد معدنی می‌باشند؛ که شامل یک شبکه میزبان هستند که با مقادیر اندکی از ناخالصی‌های معین (مانند عناصر قلیایی خاکی) آلاینده شده‌اند. این

لومینسانس پایدار<sup>1</sup> پدیده‌ای است که به موجب آن، با تابش نوری با انرژی بالا (معمولاً نور فرابنفش و گاهی پرتوی بتا) به یک ماده معین، باعث برانگیختگی آن شده و بعد از توقف برانگیختگی، نشر نور مرئی از حالت-های برانگیخته الکترونی ماده برای مدت زمان قابل-ارزیابی از ثانیه تا به چندین ساعت، باقی خواهد ماند [1]. لومینسانس پایدار اغلب به فسفرسانس طولانی-مدت<sup>2</sup> و یا فسفرسانس معروف است [2]. موادی که

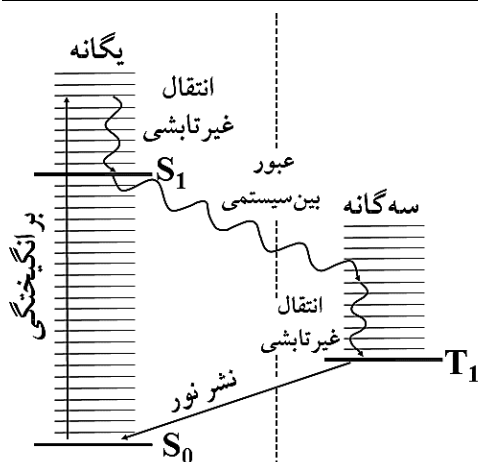
\* نویسنده مسئول: zargar@scu.ac.ir

<sup>1</sup> persistent luminescence

<sup>2</sup> long lasting phosphorescence (LLP)

<sup>3</sup> phosphor materials

باز نشر این مقاله با ذکر منبع آزاد است.



شکل 1. سازوکار انتقال انرژی در فسفرسانس [5].

سولفید روی آلاینده با مس ( $ZnS:Cu$ )، پرکاربردترین ماده سولفیدی فسفرسان بوده است [7]؛ اما مواد سولفیدی فسفرسان به طور شیمیایی ناپایدار هستند و هنگامی که در معرض نور فرابنفش و یا رطوبت قرار می گیرند، خاصیت فسفرسانس آنها کاهش می یابد [8,9]. به منظور رفع این مشکل و بهبود زمان تداوم و افزایش روشنایی در این مواد، از ایزوتوپ های رادیواکتیو معین مانند تریتیوم<sup>5</sup> ( $H-3$ ) و پرومتیوم<sup>6</sup> ( $Pm-147$ ) استفاده شد [2,7]. اگرچه این امر منجر به افزایش خاصیت فسفرسانس در این مواد گردید، اما استفاده از آنها به دلیل نگرانی های ایمنی و زیست-محیطی محدود شد [8]. در سال 1996، ماتسوزاوا و همکاران<sup>7</sup> در مقاله ای آلیش هم زمان ماده فسفرسان به عنوان ماده ای با پستاب طولانی مدت گزارش دادند [10]. آلومینات استرانسیوم ( $SrAl_2O_4$ ) با فاز تک میلی به علت دارا بودن پستاب طولانی مدت و بازدهی کوانتومی بالا، به عنوان یک ماده میزبان عالی شناخته

ناخالصی های به عمد اضافه شده، به اصطلاح «فعال-کننده»<sup>1</sup> و «کمک-فعال کننده»<sup>2</sup> نامیده می شوند [5,6]. به طور کلی، فعال کننده ها پاسخی برای توضیح سازوکار لومینسانس می باشند. کمک-فعال کننده ها نقش تله اندازی الکترون ها یا حفره های آزاد شده را ایفا می کنند [5,6]. هنگامی که نور با منبع خارجی به یک ماده فسفرسان تابیده می شود؛ انرژی فوتون های تابیده شده توسط ماده میزبان به طور مستقیم توسط اتم های فعال-کننده جذب می شوند. برای مثال، طبق شکل 1، با برانگیختگی الکترون ها توسط تابش فرودی، الکترون واقع در تراز انرژی فعال کننده، از حالت پایه یگانه  $S_0$  به حالت یگانه برانگیخته  $S_1$  بالا می رود. سپس، از طریق انتقال های غیرتابشی (نشر فونون ها یا ارتعاشات شبکه) به تراز پایه  $S_1$  برمی گردد. پس از آن، فرآیند عبور بین-سیستمی<sup>3</sup>، از حالت پایه یگانه  $S_1$  به یک حالت سه گانه (بالا تر از  $T_1$ ) همراه با جفت شدگی اسپین-مدار<sup>4</sup> رخ می دهد. سپس، الکترون با رفتن به پایین ترین حالت سه گانه  $T_1$ ، برای مدتی می ماند و با بازگشت به حالت پایه  $S_0$  و نشر فوتون، تابش فسفرسانس رخ می دهد. بنابراین، فعال کننده ها با بازگشت الکترون برانگیخته به تراز انرژی حالت پایه، منجر به نشر نور مرئی می شوند [5].

<sup>5</sup> tritium

<sup>6</sup> promethium

<sup>7</sup> Matsuzawa et al.

<sup>8</sup> dysprosium

<sup>4</sup> activator

<sup>2</sup> co-activator

<sup>1</sup> intersystem crossing

<sup>2</sup> spin-orbit coupling

در این تحقیق از ترازوی دیجیتالی مدل PW 124 با دقت  $10^{-4}$  گرم، دستگاه pH متر مدل AZ 86p3 ساخت ایران برای تنظیم pH محلول اولیه، دستگاه مایکروویو مدل BC320NS ساخت شرکت بوتان ایران با توان خروجی 900 وات و بیشینه توان مصرفی 1400 وات برای انجام واکنش احتراقی، کوره مافل<sup>15</sup> مدل PX-9 ساخت شرکت آذر کوره ایران برای انجام عملیات حرارت‌دهی استفاده شد. همچنین، از دستگاه پراش‌سنج پرتوی ایکس (XRD) مدل PW-1840 با آند مس با طول‌موج 1/54056 آنگستروم به‌منظور شناسایی فاز و ساختار بلوری نمونه‌ها، میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) مدل SIGMA VP-500 ساخت شرکت زیس<sup>16</sup> آلمان به‌منظور شناسایی نانو ساختار، ریخت‌شناسی و متوسط اندازه نانو ذرات استفاده شد. از دستگاه FT-IR مدل BOMEN/MB 10 ساخت شرکت ABB برای تعیین گروه‌های عاملی و پیوندهای تشکیل‌دهنده ترکیب نمونه‌ها استفاده شد. از دستگاه طیف‌سنج پراکندگی انرژی پرتوی ایکس (EDS) ساخت شرکت آکسفورد اینسترومنت<sup>17</sup> انگلستان برای شناسایی عناصر تشکیل‌دهنده ترکیب نمونه‌ها استفاده شد. به‌منظور بررسی خواص نوری نمونه‌ها و تعیین اندازه انرژی گاف اپتیکی از دستگاه طیف‌سنج مرئی-فرابنفش (UV-Vis) مدل Photonix Ar 2015 ساخت شرکت طیف‌سنج پیشرو پژوهش ایران استفاده شد. همچنین، از دستگاه اسپکتروفلورومتر<sup>18</sup> با منبع لامپ زنون<sup>19</sup>، مدل لامنا<sup>20</sup>

شده است. آلومینات استرانسیوم به‌طور شیمیایی پایدارتر از فسفرهای سولفیدی است و به‌علت عدم تابش رادیواکتیو، به‌عنوان یک ماده سبز زیست‌محیطی شناخته شده است [11، 12]. مواد فسفرسان به‌واسطه کاربردهای شان در زمینه‌های مختلف از قبیل LEDها<sup>1</sup>، نمایشگرهای گسیل میدانی<sup>2</sup>، سیستم‌های آشکارساز پرتوی ایکس، سلول‌های خورشیدی<sup>3</sup> و نانوفیبرها<sup>4</sup> مورد علاقه هستند [1، 8]. از دیگر کاربردهای مواد فسفرسان می‌توان به استفاده در عقربه‌های ساعت‌های مدرج و نشانه‌های اضطراری مانند نشانه‌های خروج در ساختمان‌ها اشاره نمود.

برخی از روش‌های ساخت نانو ذرات، شامل روش واکنش حالت جامد<sup>5</sup>، احتراقی، سل‌ژل<sup>6</sup>، هم‌رسوبی<sup>7</sup> و پخت مایکروویو<sup>8</sup> می‌باشند [10]. در این مقاله، برای ساخت نانو ذرات آلومینات استرانسیوم و آلیش با دیسپروزیوم از روش احتراقی به‌کمک مایکروویو، به‌دلیل ویژگی‌های منحصر به‌فرد آن از جمله توزیع گرمای یکنواخت و زمان فرآیند کوتاه استفاده شده است. مشخصه‌یابی نانو ذرات با روش‌های XRD<sup>9</sup>، EDS<sup>10</sup>، FT-IR<sup>11</sup>، FESEM<sup>12</sup>، UV-Vis<sup>13</sup> و PL<sup>14</sup> انجام شد. در مرحله جانمایی، درصد‌های مختلف آلیش با دیسپروزیوم، به‌منظور بهینه‌سازی فوتولومینسانس نانو ذرات  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  بررسی شد.

### مشخصات دستگاه‌های مورد استفاده

<sup>11</sup> fourier transform-infrared spectroscopy

<sup>12</sup> field emission scanning electron microscopy

<sup>13</sup> ultra violet-visible

<sup>14</sup> photoluminescence

<sup>15</sup> muffle

<sup>16</sup> ZEISS

<sup>17</sup> oxford instrument

<sup>18</sup> spectrofluorometer

<sup>19</sup> xenon lamp

<sup>20</sup> lumna

<sup>1</sup> light emitted diode

<sup>2</sup> field emission displays (FEDs)

<sup>3</sup> solar cells

<sup>4</sup> nanofibers

<sup>5</sup> solid state reaction method

<sup>6</sup> sol-gel

<sup>7</sup> co-precipitation

<sup>8</sup> microwave

<sup>9</sup> x-ray diffraction

<sup>10</sup> energy dispersive x-ray spectroscopy

گرمایش به مدت 30 دقیقه حل شدند. با استفاده از دستگاه pH متر مقدار pH محلول حدود 2/3 اندازه گیری شد. با افزایش تدریجی کربنات آمونیوم<sup>2</sup> مولار به محلول مقدار pH با گذشت زمان افزایش یافت. تقریباً با رسیدن به pH=4 رفته رفته در محلول رسوبات سفیدرنگ تولید شدند. با رسیدن به pH=5/5 محلول به ژل شفاف تبدیل شد. به منظور انجام فرآیند احتراقی، محلول به همراه بوتله آلومینا درون مایکروویو با توان 900 وات به مدت 5 دقیقه تابش دهی شد. با گذشت زمان، محلول پیش ماده شروع به جوشیدن کرد و هم-زمان با آن آب و گازهای دی اکسید کربن و ازت آزاد شدند؛ به طوری که، حجم ماده درون بوتله در مرحله احتراق به بیشینه مقدار خود رسید. در زمان کمتر از 3 دقیقه بعد از شروع تابش دهی، ناگهان واکنش احتراقی به شدت گرمازا رخ داد. شعله احتراق به رنگ زرد و تقریباً 30 ثانیه ادامه داشت. با اتمام زمان انجام واکنش احتراقی، ماده سفیدرنگی حاصل شد. پس از پایان زمان تابش دهی مایکروویو، ماده سفیدرنگ و متخلخل حاصل از احتراق، خنک و آسیا گردید. پس از آن، به مدت 1 ساعت در دمای 600 درجه سانتی گراد و با سرعت گرمایشی 3 درجه سانتی گراد بر دقیقه، درون کوره مافل حرارت دهی شد. نمونه ساخته شده S<sub>1</sub> نام گذاری شد.

### ب) آرایش نانوذرات آلومینات استرانسیوم با دیسپروزیوم (SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:Dy)

با توجه به قواعد هیوم-رادری، نظر به اینکه شعاع یون<sup>3+</sup> Dy (0,99 آنگستروم) نسبت به یون<sup>3+</sup> Al (0,57 آنگستروم) نزدیک تر به شعاع یون<sup>2+</sup> Sr (حدود 1,12 آنگستروم) است؛ بنابراین، انتظار می رود یونهای<sup>3+</sup> Dy

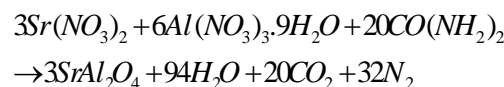
ساخت شرکت ترم<sup>1</sup> برای انجام طیف سنجی فوتولومینسانس (PL) استفاده شد.

### کارهای آزمایشگاهی

فعالیت های آزمایشگاهی در دو بخش ارائه شده اند: در بخش (الف)، ساخت نانوذرات آلومینات استرانسیوم و در بخش (ب)، آرایش نانوذرات آلومینات استرانسیوم با دیسپروزیوم (SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:Dy) با درصدهای مختلف آرایش توضیح داده شده است.

### الف) ساخت نانوذرات آلومینات استرانسیوم

برای ساخت نانوذرات SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> به روش احتراقی به کمک مایکروویو، پارامترهای مختلف از جمله تأثیر نسبت سوخت به نیترات ها، مقدار pH اولیه محلول، زمان تابش دهی مایکروویو، زمان و دمای پخت بررسی شدند [13]. با توجه به آزمایش هایی که انجام شد؛ روش ساخت بهترین نمونه ما به شرح زیر است: ابتدا با استفاده از واکنش شیمیایی رابطه<sup>1</sup>، مقادیر استوکیومتری مواد اولیه شامل نیترات آلومینیوم 9 آبه (375/13g/mol)، نیترات استرانسیوم (211/63 g/mol) و اوره (60/06 g/mol) محاسبه و وزن شدند.



1

پس از آن، مواد اولیه شامل نیترات های فلزی و سوخت اوره (با نسبت سوخت به نیترات 3 به 1) با مقدار 10 میلی لیتر آب یون زدایی شده در یک بوتله آلومینا مخلوط شدند. سپس، بر روی هم زن مغناطیسی و بدون

<sup>1</sup> therm

<sup>2</sup> ammonium carbonate

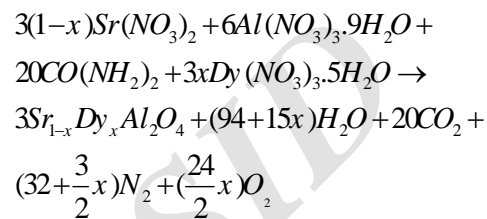
همچنین، با مقایسه الگوی XRD حاصل از یک نمونه با کارت مرجع<sup>1</sup> JCPD، ساختار بلوری قابل بررسی است. میزان عدم انطباق مکان زاویه‌های قله‌های نمونه با کارت JCPD مورد نظر، باعث انحراف از میزان بلورینگی می‌شود. اگر علاوه بر قله‌های منطبق با کارت قله یا قله‌های دیگری در الگوی XRD نمونه ظاهر شود نشان از وجود فاز یا فازهای دیگر در ترکیب است. در این کار، درصد نسبی فاز نمونه‌ها با استفاده از داده‌های حاصل از الگوی XRD و مقایسه با کارت JCPD به شماره 98-000-9563، طبق رابطه (3) تعیین شد:

$$X(\%) \cong \frac{\sum I_{[X_{\text{phase}}]}(\%)}{A} \quad 3$$

که در آن پارامتر X درصد نسبی فاز ترکیب مورد نظر، شدت قله‌های ترکیب مورد نظر است و A مجموع کل شدت قله‌های موجود در الگوی XRD ترکیب است [15].

شکل 2 الگوی XRD آلومینات استرانسیوم با تقارن تک‌محوری<sup>2</sup> (نمونه S1) را با درصد نسبی فاز 81% نشان می‌دهد، در این شکل، الگوی XRD نشان می‌دهد که عملیات حرارت‌دهی به‌طور کامل منجر به تشکیل  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  تک‌فاز نشده است و حضور جزئی از ترکیب کربنات استرانسیوم ( $\text{SrCO}_3$ ) با کارت مرجع JCPDS به شماره 98-004-6242 در این نمونه آشکار است.

در برخی از مکان‌های  $\text{Sr}^{2+}$  در ماده فسفرسان  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  جانشین شوند [12]. مطابق رابطه 2، به‌منظور آرایش نانوذرآت آلومینات استرانسیوم با دیسپروزیوم، نمونه‌های S2، S3، S4، S5 و S6 به‌ترتیب با مقادیر x برابر با 0/01، 0/05، 0/1، 0/2، 0/3 و مشابه شرایط ساخت نمونه S1، تهیه شدند.



1

## نتایج و بحث

### نتایج XRD

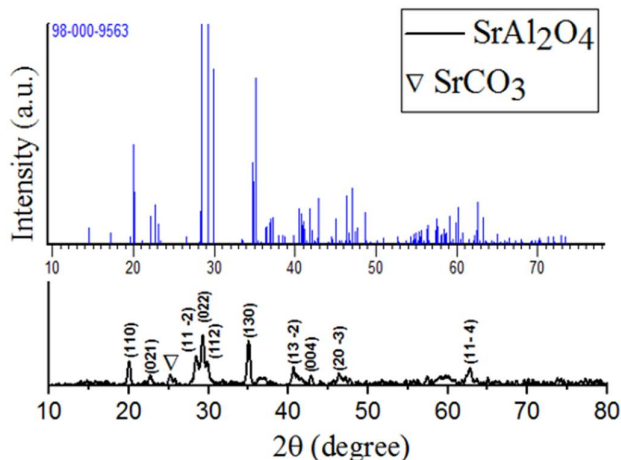
#### الف) نتایج XRD نانوذرآت $\text{SrAl}_2\text{O}_4$

الگوهای پراش پرتوی ایکس نمونه‌های ساخته شده در این مقاله تحت شرایط جریان 30 میلی‌آمپر و ولتاژ 40 کیلوولت و در محدوده زاویه 10 تا 75 درجه اندازه‌گیری شده‌اند.

در مواد، ممکن است نظم بلوری به‌طور کامل در ماده وجود نداشته باشد و مواد به‌صورت ترکیبی از حالت‌های آمورف (بی‌نظم) و بلوری باشند. براساس تفاوت پراکندگی پرتوی ایکس در مناطق بلورین و آمورف، می‌توان بلورینگی یک نمونه را تعیین نمود [14].

<sup>2</sup> monoclinic

<sup>1</sup> Joint Committee on Powder Diffraction Standards



شکل 2. الگوی XRD نانوذرات  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  (نمونه S1).

لازم به ذکر است که اندازه نانوبلورکها<sup>2</sup> با اندازه نانو-ذرات<sup>3</sup> متفاوت است. همچنین، پراش پرتوی ایکس به اندازه بلورکهای درون ذرات حساس است. از این رو، در سال 1981 پاؤل شرر<sup>4</sup> فرمولی برای متوسط اندازه بلورکها (رابطه 6) ارائه نمود [16].

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad 6$$

در فرمول شرر،  $D$  متوسط اندازه نانوبلورکها برحسب نانومتر؛  $\lambda$  طول موج پرتوی ایکس برحسب نانومتر؛  $\theta$  زاویه براگ برحسب درجه؛  $k$  فاکتور شکل<sup>5</sup> و عددی ثابت معمولاً 0/89 یا 0/9؛ و  $\beta$  پهنای کامل در نیمه بیشینه قله حاصل از پراش پرتوی ایکس در زاویه  $2\theta$  است. مقدار  $\beta$ ی شرر معادل با مقدار FWHM و برحسب درجه است؛ که در فرمول شرر باید به رادیان تبدیل شود [۸،۱۶]. با استفاده از فرمول شرر، با در نظر گرفتن  $k$  برابر 0/9 و برای پنج قله اصلی با اندیسهای میلر (110)، (11-2)، (022)، (112) و (130) به ترتیب مربوط به زاویههای  $29/83^\circ$ ،  $29/26^\circ$ ،  $28/48^\circ$ ،  $20/03^\circ$

ثابت‌های شبکه  $a$ ،  $b$ ،  $c$  برای بلورهای تک‌میلی  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  با اندیسهای میلر  $h$ ،  $k$ ،  $l$  حاصل از الگوی XRD و زاویه مشخصه بلور  $\gamma$ ، با رابطه 4 محاسبه شدند؛ که در آن  $d_{hkl}$  فاصله بین صفحه‌های بلور با اندیسهای  $hkl$  یکسان است.

$$d_{hkl} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\sin^2 \gamma}{h^2 + \frac{l^2}{c^2} - \frac{2hl \cos \gamma}{ac}} + \frac{b^2}{k^2}}} \quad 4$$

حجم سلول واحد بلورهای تک‌میلی  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  از رابطه 5 به دست می‌آید.

$$V = abc \sin \gamma \quad 5$$

با استفاده از نرم‌افزار اکسپرت<sup>1</sup> و اطلاعات حاصل از الگوی XRD آلومینات استرانسیوم با تقارن تک‌میلی (نمونه S1)، مقادیر ثابت‌های شبکه  $a$  (Å)،  $b$  (Å)،  $c$  (Å) به ترتیب 8/482، 8/794، 5/163 آنگستروم و زاویه مشخصه  $\gamma$  آن برابر 93/08 درجه تعیین شد.

<sup>4</sup> Paul Scherrer

<sup>5</sup> shape factor

<sup>1</sup> expert

<sup>2</sup> nanocrystallites size

<sup>3</sup> nanoparticles size

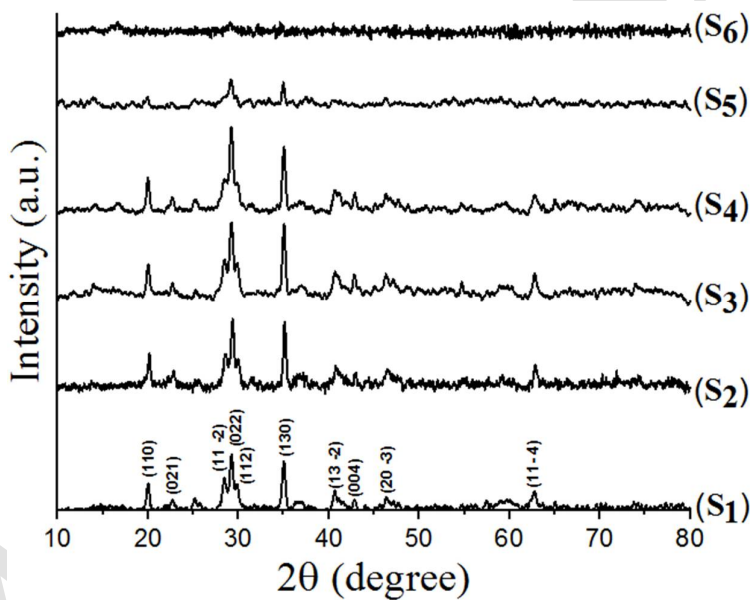
در آرایش نانوذرات  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  با Dy و استفاده از نیترا دیسپروزیوم 5 آبه به دلیل آبدار بودن آن، وجود اکسیژن در محیط واکنش بیشتر شده و در نتیجه باعث افزایش درصد فاز نمونه  $\text{S}_4$  نسبت به نمونه  $\text{S}_1$  شده است.

در نمونه  $\text{S}_5$  ( $x=0/2$ ) درصد نسبی فاز ترکیب بسیار کاهش یافته است و در نمونه  $\text{S}_6$  ( $x=0/3$ ) ساختار بلوری  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  فروپاشیده است. از این‌رو، در ادامه تحقیق بنا بر نیاز، اندازه‌گیری‌های FT-IR، FESEM، UV-Vis و EDS، PL برای نمونه‌های  $\text{S}_1$  تا  $\text{S}_4$  انجام شده است.

و  $35/07^\circ$  متوسط اندازه نانوبلورک‌ها برای نمونه  $\text{S}_1$ ، 26 نانومتر محاسبه شد.

### ب) نتایج XRD نانوذرات $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Dy}$

شکل 3 الگوهای XRD نانوذرات  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  آلائیده با دیسپروزیوم را در مقایسه با نانوذرات  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  (نمونه  $\text{S}_1$ ) نشان می‌دهد. مقادیر درصد نسبی فاز (با تقارن تک‌میلی) برای نمونه‌های  $\text{S}_2$ ،  $\text{S}_3$ ،  $\text{S}_4$ ،  $\text{S}_5$  به ترتیب 90%، 86%، 85% و 22% محاسبه شد. روند کاهشی مقادیر درصد نسبی فاز به افزایش غلظت یون دیسپروزیوم در ترکیب نمونه‌ها نسبت داده می‌شود. احتمال می‌رود که



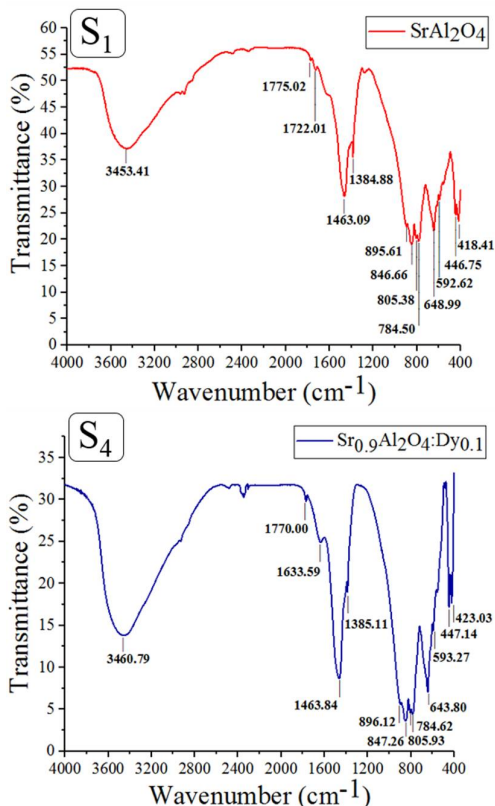
شکل 3. الگوهای XRD نمونه‌های  $\text{S}_2$ ،  $\text{S}_3$ ،  $\text{S}_4$ ،  $\text{S}_5$  و  $\text{S}_6$  در مقایسه با نمونه  $\text{S}_1$ .

شکل 4 طیف‌های FT-IR برای نمونه‌های  $\text{S}_1$  و  $\text{S}_4$  در محدوده عدد موج  $400-4000 \text{ cm}^{-1}$  را نشان می‌دهد. در طیف نمونه  $\text{S}_1$ ، قله واقع در  $3453/41 \text{ cm}^{-1}$  و شانه‌های ضعیف در محدوده  $1600 \text{ cm}^{-1}$  تا  $1800 \text{ cm}^{-1}$  متناظر با گروه هیدروکسیل<sup>1</sup> می‌باشند که

همچنین، با استفاده از فرمول شرر متوسط اندازه نانوبلورک‌ها ( $D(\text{nm})$ ) برای نمونه‌های  $\text{S}_2$ ،  $\text{S}_3$ ،  $\text{S}_4$  به ترتیب برابر با 28، 34 و 25 نانومتر محاسبه شد.

### نتایج FT-IR

<sup>1</sup> hydroxyl



شکل 4. طیف‌های عبوری FT-IR برای نمونه‌های S<sub>1</sub> و S<sub>4</sub>.

### نتایج EDS

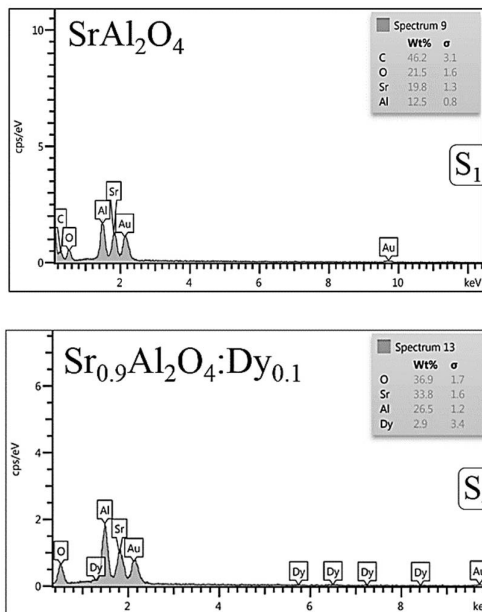
در طیف EDS نمونه‌های S<sub>1</sub> و S<sub>4</sub> طبق شکل 5، عناصر استرانسیوم (Sr)، آلومینیوم (Al) و اکسیژن (O) با درصدهای وزنی معین شناسایی شدند. در طیف EDS نمونه S<sub>1</sub>، حضور عنصر کربن (C) تأییدی بر وجود کربنات استرانسیوم در الگوی XRD آن است. در طیف EDS نمونه S<sub>4</sub> حضور عنصر دیسپروزیوم (Dy) تأیید شد و قله گسیل مربوط به عنصر کربن گزارش نشد. وجود عنصر طلا (Au) در طیف‌های EDS مربوط به پوشش نانوذرات با لایه نازکی از طلا است که در فرآیند آماده‌سازی نمونه‌ها برای آزمون EDS داده شده است.

ارتعاشات کششی و خمشی گروه O-H را نشان می‌دهند. وجود گروه هیدروکسیل در نانوذرات SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> مربوط به مولکول‌های آب و به علت جذب رطوبت محیط است. ارتعاشات پیوند نامتقارن C-O در 1463/09 cm<sup>-1</sup> ظاهر شده است؛ این ارتعاشات به علت وجود کربنات استرانسیوم در نمونه S<sub>1</sub> می‌باشند. قله ضعیف در 1384/88 cm<sup>-1</sup> به ارتعاشات کششی گروه N-O مربوط به نیترات‌های مواد اولیه نسبت داده می‌شود. قله‌های واقع در محدوده 400-1000 cm<sup>-1</sup> به مدهای ارتعاشی فعال مادون‌قرمز نانوذرات SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> اختصاص دارند. پیوند متقارن O-Al-O در قله‌های 846/66 cm<sup>-1</sup> و 446/75 cm<sup>-1</sup> مشاهده می‌شود. قله‌های کششی نامتقارن در 784/50 cm<sup>-1</sup>، 592/62 cm<sup>-1</sup> و 648/99 cm<sup>-1</sup> مربوط به ارتعاشات Sr-O می‌باشند. طیف نمونه S<sub>1</sub> ضمن تأیید تشکیل نانوذرات SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>، در توافق با نتایج FT-IR به دست آمده در مرجع [12] است.

مقایسه طیف FT-IR نمونه S<sub>4</sub> با نمونه S<sub>1</sub> نشان می‌دهد که در طیف عبوری نمونه S<sub>4</sub> قله‌های متناظر، با اندکی جابه‌جایی در عدد موج و کاهش درصد عبور ظاهر شده‌اند. جابه‌جایی در عدد موج به ورود دیسپروزیوم در شبکه آلومینات استرانسیوم و در نتیجه تغییر نیروهای برهم‌کنش بین اتم‌های نانوذرات SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> نسبت داده می‌شود.



مختلفی از جمله ثابت‌های شبکه، اندازه نانوذرات و اندازه انرژی گاف اپتیکی نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرند. برای هر نمونه از مقایسه متوسط اندازه نانوذرات حاصل از FESEM با متوسط اندازه نانوبلورک‌های محاسبه شده با فرمول شرر، آشکار است که اندازه نانوذرات لزوماً همان اندازه نانوبلورک‌ها نمی‌باشند. با رسم نمودار توزیع فراوانی این نانوذرات برحسب اندازه آنها، پهنای توزیع فراوانی آنها مطابق شکل 7 مشخص شد.



شکل 5. طیف‌های EDS نمونه‌های S<sub>1</sub> و S<sub>4</sub>.

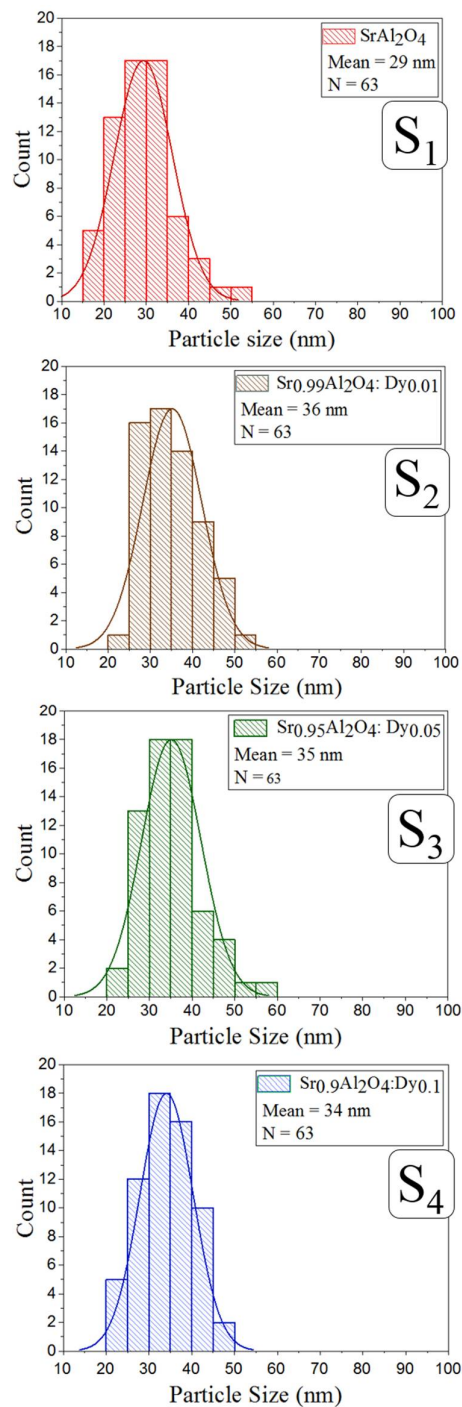
## نتایج FESEM

مطابق شکل 6، تصاویر FESEM پودرهای خشک نانوذرات SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (نمونه S<sub>1</sub>) و نانوذرات SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> آلاینده با دیسپروزیوم (نمونه‌های S<sub>2</sub>، S<sub>3</sub> و S<sub>4</sub>) در مقیاس 100 نانومتر، نشان می‌دهند که نانوذرات دارای شکل تقریباً کروی هستند. متوسط اندازه نانوذرات نمونه‌های S<sub>1</sub>، S<sub>2</sub>، S<sub>3</sub> و S<sub>4</sub> با مقدار خطای  $\pm 3$  نانومتر، محاسبه و در جدول 1 آورده شد.

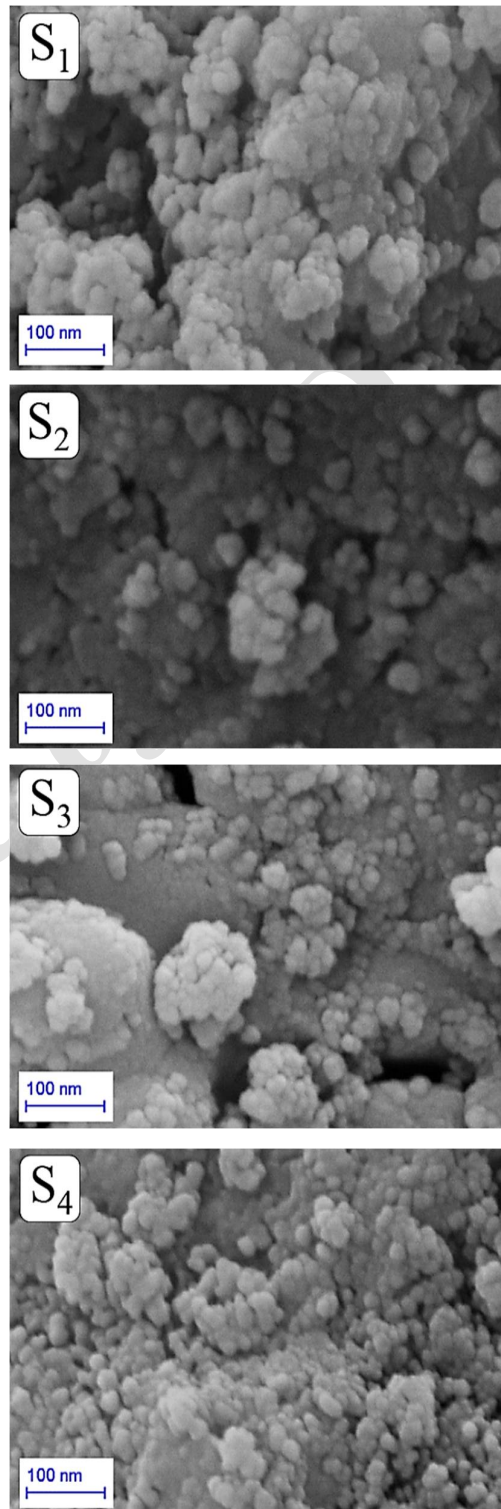
جدول 1. متوسط اندازه نانوذرات نمونه‌ها با خطای  $\pm 3$  نانومتر.

| نام نمونه      | متوسط اندازه نانوذرات (نانومتر) |
|----------------|---------------------------------|
| S <sub>1</sub> | 29                              |
| S <sub>2</sub> | 36                              |
| S <sub>3</sub> | 35                              |
| S <sub>4</sub> | 34                              |

نتایج اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهند که افزودن یون دیسپروزیوم باعث تغییر شرایط رشد نانوذرات SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> شده است و اندازه نانوذرات آلاینده (نمونه‌های S<sub>2</sub>، S<sub>3</sub> و S<sub>4</sub>) نسبت به نانوذرات بدون آلاینش (نمونه S<sub>1</sub>) بزرگ شده است. به عبارتی، با ورود دیسپروزیوم به شبکه SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>، پتانسیل شبکه میزبان و نیروهای برهم‌کنش اتم‌ها در شبکه تحت تأثیر قرار می‌گیرند، در نتیجه با تغییر نیروهای برهم‌کنش عوامل



شکل 7. نمودار توزیع فراوانی اندازه نانوذرات نمونه‌های S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub> و S<sub>4</sub>.



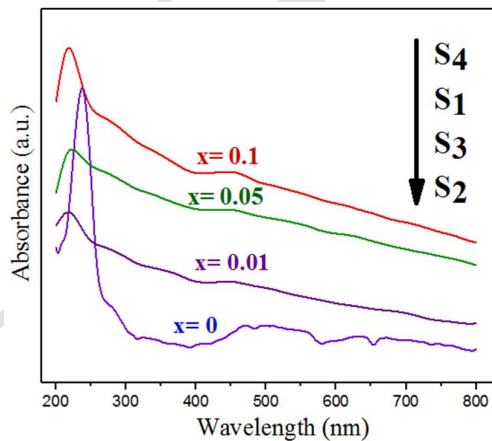
شکل 6. نتایج تصاویر FESEM نمونه‌های S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub> و S<sub>4</sub>.

### نتایج UV-Vis

که در آن  $\alpha$  ضریب جذب<sup>2</sup>،  $h$  ثابت پلانک<sup>3</sup>،  $A$  ثابت تناسب<sup>4</sup> و  $E_g$  انرژی گاف اپتیکی است [18]. مقدار  $n$  در گاف مستقیم<sup>5</sup> برابر با  $\frac{1}{2}$  و در گاف غیرمستقیم<sup>6</sup> برابر با 2 می‌باشد [18]. طبق محاسبات نظری آلومینات استرانسیوم دارای گاف مستقیم است؛ زیرا کمینه نوار رسانش و بیشینه نوار ظرفیت در نقطه یکسانی در بردار تکانه موج ( $k$ ) قرار گرفته‌اند [19]. از این‌رو، با در نظر گرفتن مقدار  $n = \frac{1}{2}$  در فرمول تاک، نمودار  $(\alpha hv)^2$  برحسب  $(hv)$  رسم شد (شکل (9)). سپس، از برون-یابی ناحیه خطی این منحنی، اندازه انرژی گاف اپتیکی ( $E_g$ ) برای هر نمونه مطابق جدول (2) به دست آمد. با تغییر ناحیه خطی منحنی‌ها، اختلاف  $E_g$  حدود  $0.01 \pm$  الکترون‌ولت تعیین شد. طبق جدول (2)، مشخص شد که با افزایش غلظت  $Dy$  به ترتیب در نمونه‌های  $S_2$ ،  $S_3$  و  $S_4$  اندازه انرژی گاف اپتیکی افزایش یافته است، اما انرژی گاف اپتیکی نانوذرات  $SrAl_2O_4$  آلاینده با  $Dy$  در مقایسه با نانوذرات  $SrAl_2O_4$  (نمونه  $S_1$ ) رفتار کاهشی دارد (شکل (10)). می‌توان گفت که وجود یون  $Dy$  در شبکه  $SrAl_2O_4$  با ایجاد تغییر در اندازه ثابت-های شبکه نانوذرات باعث تغییر در اندازه انرژی گاف اپتیکی نمونه‌ها شده است. همچنین، بزرگ شدن متوسط اندازه نانوذرات آلاینده با  $Dy$  (نمونه‌های  $S_2$ ،  $S_3$  و  $S_4$ ) نسبت به نانوذرات بدون آلاینش (نمونه  $S_1$ )، می‌تواند دلیلی بر رفتار کاهشی گاف اپتیکی آنها باشد.

جدول 2. طول‌موج جذب بیشینه و اندازه انرژی گاف اپتیکی.

شکل 8 طیف جذبی مرئی-فرابنفش نمونه‌های  $S_1$ ،  $S_2$ ،  $S_3$  و  $S_4$  را در محدوده طول‌موج 200 تا 800 نانومتر نشان می‌دهد. چگونگی تغییرات طیف جذبی مرئی-فرابنفش نمونه‌ها به میزان آلاینش آنها با  $Dy$  و تغییرات ایجاد شده در ساختار شبکه نانوذرات  $SrAl_2O_4$  وابسته است. با توجه به شکل 8 و جدول 2 مشخص شد با افزایش میزان آلاینش  $Dy$ ، طول‌موج جذب بیشینه ( $\lambda_{max}$  (nm)) رفتار کاهشی دارد. نمونه  $S_4$  با میزان آلاینش  $x$  برابر 0.1، دارای بیشینه قله جذب است.



شکل 8. طیف جذبی مرئی-فرابنفش نمونه‌های  $S_1$ ،  $S_2$ ،  $S_3$  و  $S_4$ .

آلومینات استرانسیوم ماده‌ای نیم‌رسانا است [17]؛ از این‌رو، اندازه انرژی گاف اپتیکی برای نمونه‌های  $S_1$

| نام نمونه | $\lambda_{max}$ (nm) | $E_g$ (eV) |
|-----------|----------------------|------------|
| $S_1$     | 237                  | 4.71       |
| $S_2$     | 223                  | 3.53       |
| $S_3$     | 218                  | 3.98       |
| $S_4$     | 219                  | 4.21       |

$S_2$ ،  $S_3$  و  $S_4$  با فرمول تاک<sup>1</sup> تعیین شد (رابطه 7).

$$\alpha hv = A(hv - E_g)^n \quad 7$$

<sup>4</sup> proportionality constant

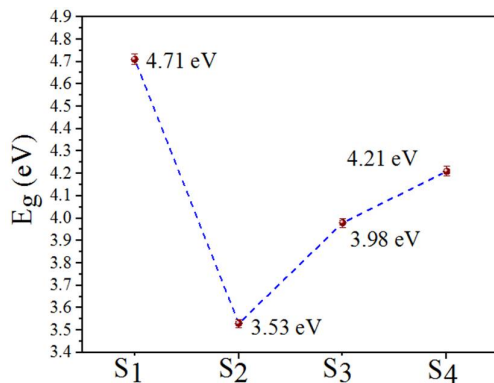
<sup>5</sup> direct band gap

<sup>6</sup> indirect band gap

<sup>1</sup> Tauc formula

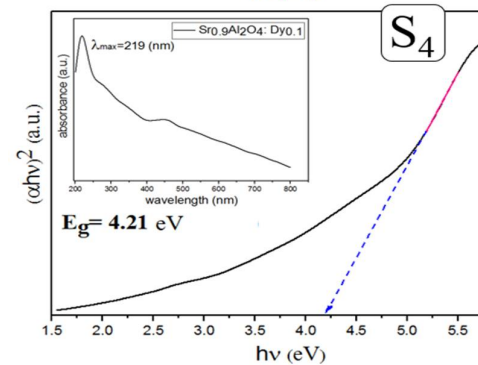
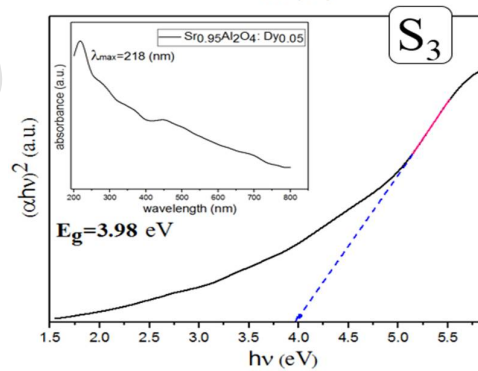
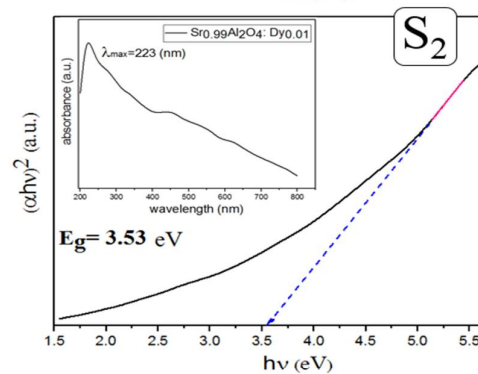
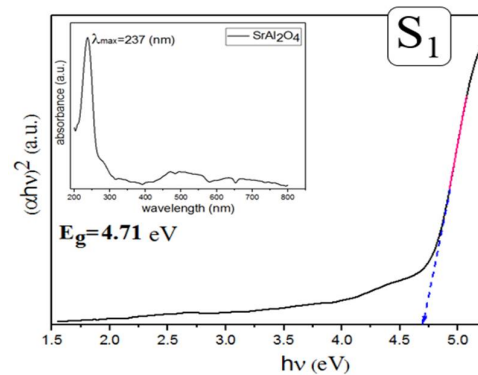
<sup>2</sup> absorption coefficient

<sup>3</sup> Planck's constant



شکل 10. نمودار تغییرات اندازه انرژی گاف اپتیکی نانوذرات نمونه‌های S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub> و S<sub>4</sub>.

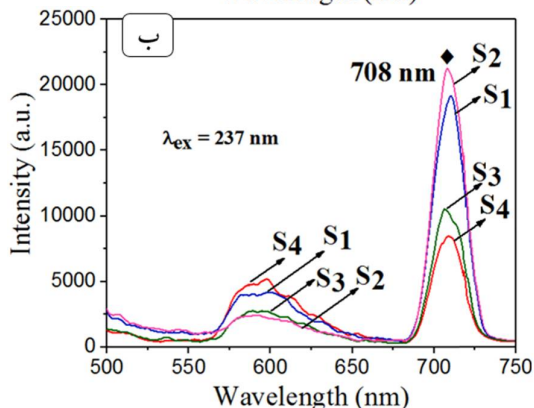
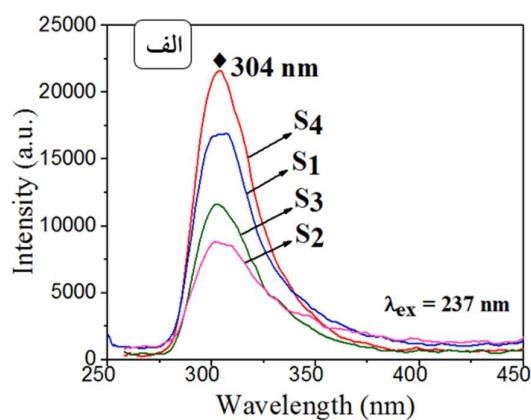
در جدول 3، مقدار انرژی گاف اپتیکی ( $E_g$ (eV)) نانوذرات آلومینات استرانسیوم (نمونه S<sub>1</sub>) با برخی از کارهای تجربی و نظری مقایسه شده است. با توجه به



شکل 9. منحنی تاک برای نمونه‌های S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub> و S<sub>4</sub>.

Archive

از مراکز نشر و در نتیجه افزایش شدت فوتولومینسانس در ناحیه‌های فرابنفش و مرئی شده است. از آنجا که با انجام عمل جانشینی تعداد مراکز نشر تغییر نکرده‌اند، ماهیت تله‌ها صرفاً تحت تأثیر آرایش با دیسپروزیوم نیست و مراکز نشر موجود در طیف فوتولومینسانس می‌توانند مربوط به نقائص شبکه نانوذرات  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  و یا مکان‌های خالی کاتیونی باشند. این موضوع در توافق با نظریه کلابائو<sup>7</sup> و همکاران است [24]. آنها با مقایسه منحنی‌های تابش  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$  و  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+},\text{Dy}^{3+}$  گزارش داده‌اند که ماهیت شیمیایی تله تحت تأثیر آرایش‌های هم‌زمان نیست و نقائص شبکه می‌توانند به‌عنوان تله‌های حامل‌های بار عمل کنند [10].



داده‌های این جدول، نتیجه ما به نتایج نظری (نسبت به کار تجربی) انطباق بیشتری دارد.

جدول 3. مقایسه اندازه انرژی گاف اپتیکی ( $E_g$  (eV)) نانوذرات  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  (نمونه  $S_1$ ) با برخی کارهای تجربی و نظری.

| نظری       |           | تجربی     |           |             |
|------------|-----------|-----------|-----------|-------------|
| مرجع [23]  | مرجع [21] | مرجع [22] | مرجع [20] | نمونه $S_1$ |
| 4,63       | 4,52      | 6,52      | 5,18      | 4,71        |
| $E_g$ (eV) |           |           |           |             |

## نتایج PL

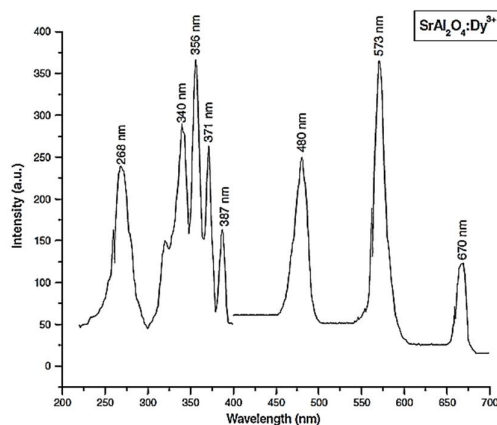
شکل (11- الف و ب) طیف‌های فوتولومینسانس (PL) نمونه‌های  $S_1$ ،  $S_2$ ،  $S_3$  و  $S_4$  با استفاده از حلال متانول، با غلظت محلول 0,03 گرم در 15 میلی‌لیتر حلال و تحت طول‌موج برانگیختگی 237 نانومتر را نشان می‌دهد. وجود سه قله نشر در ناحیه فرابنفش (با طول‌موج 304 نانومتر)، ناحیه مرئی (قله نسبتاً پهن با طول‌موج بین 550 تا 650 نانومتر) و ناحیه مادون‌قرمز (708 نانومتر) را نشان می‌دهد. از مقایسه طیف‌های PL نمونه‌های آلییده با دیسپروزیوم، با نمونه بدون آرایش ( $S_1$ ) مشخص شد که با آرایش نانوذرات  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  با دیسپروزیوم، تغییری در تعداد مراکز نشر نانوذرات  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  ایجاد نشده است. تفاوت آشکار در طیف PL نمونه‌ها مربوط به تغییر میزان شدت فوتولومینسانس (I<sub>PL</sub>) آنها است. در بین نمونه‌ها، نمونه  $S_4$  بیشترین شدت نشر را در ناحیه‌های فرابنفش و مرئی دارد. با توجه به این‌که، مراکز نشر ثابت مانده‌اند و شدت فوتولومینسانس تغییر کرده است، می‌توان گفت که در نمونه  $S_4$  یون Dy به‌عنوان کمک-فعال‌کننده عمل کرده و با به‌دام انداختن تعداد حامل‌های بار بیشتر و افزایش طول‌عمر آنها در یک تراز خاص (برای مثال تراز ناخالصی) باعث افزایش تعداد فوتون‌های گسیلی

<sup>1</sup> Clabau

شکل 11. طیف فوتولومینسانس نمونه‌های S1، S2، S3، S4 در محدوده طول موج الف (250 تا 450 نانومتر، ب) 500 تا 750 نانومتر؛ با حلال متانول و طول موج برانگیختگی 237 نانومتر.

شکل 12. طیف‌های برانگیختگی و نشر ماده فسفرسانی  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Dy}^{3+}$  با طول موج برانگیختگی 356 نانومتر مربوط به مقاله ایشوار پراساد ساهو و همکاران<sup>8</sup> [12]؛ (مقاله مشابه با کار حاضر) است که برای مقایسه با طیف PL نمونه‌ها آورده شده است. در مقاله ذکر شده، آنها قله‌های نشر در طول موج‌های 480 نانومتر (آبی)، 573 نانومتر (زرد) و 670 نانومتر (قرمز) را گزارش داده‌اند؛ این قله‌ها یا نوارهای نشر را به ترتیب مربوط به گذارهای  $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^4\text{F}_{15/2}$  (آبی)،  $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^4\text{F}_{13/2}$  (زرد) و  $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^4\text{F}_{11/2}$  (قرمز) در آرایش فضایی  $4f^9$  از یون‌های  $\text{Dy}^{3+}$  می‌باشند. ترکیب این نشرها تشکیل‌دهنده نور سفید است [12]. تفاوت میزان شدت فوتولومینسانس (I<sub>PL</sub>) در طیف فوتولومینسانس شکل 11 نسبت به شکل 12 بسیار قابل توجه است.

لازم به ذکر است که، در مقاله مربوط به مرجع [12] میزان آرایش دیسپروزیوم و نوع حلال بیان نشده است. نوع حلال و غلظت محلول در تعیین انرژی برانگیختگی نانوذرات و قله‌های نشر طیف PL اهمیت به‌سزایی دارد و مقایسه طیف PL در شرایط یکسان نمی‌باشد. در کار حاضر طیف‌سنجی PL برای نمونه‌های S1، S2، S3 و S4 با غلظت محلول 0/03 گرم در 15 میلی‌لیتر آب یون‌زدایی‌شده نیز انجام شد که تحت طول موج برانگیختگی 380 نانومتر، در ناحیه مرئی قله‌های نشر در طول موج‌های 480 نانومتر (آبی)، 538 نانومتر (سبز) و 691 نانومتر (قرمز) نمایان شدند (شکل (13)). این نتیجه در توافق نزدیک با نتایج طیف PL مربوط به مرجع [12] است. اهمیت نیم‌رساناهای با گاف نواری پهن آن‌جایی پررنگ‌تر می‌شود که نانو ساختارهای چنین نیم‌رساناهایی، خواص نور گسیل مناسب فوتولومینسانس (PL) را در طول موج‌های سبز، آبی و فرابنفش از خود نشان می‌دهند. بنابراین، می‌توان با بهینه‌سازی و به‌کارگیری چنین نیم‌رساناهایی گام‌های امیدوارکننده‌ای در جهت ساخت ادوات نورگسیل با این طول موج‌ها برداشت [25].

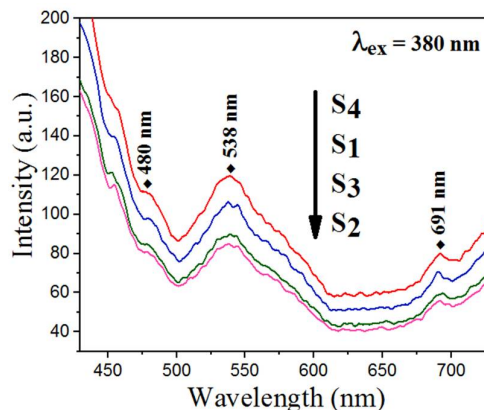


شکل 12. طیف‌های نشر و برانگیختگی ماده فسفرسانی  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  [12].

آلایش با دیسپروزیوم نیست و مراکز نشر موجود در طیف فوتولومینسانس می‌توانند مربوط به نقائص شبکه نانوذرات  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  و یا مکان‌های خالی کاتیونی باشند. در میان نانوذرات ساخته شده، نانوذرات  $\text{Sr}_{0.9}\text{Al}_2\text{O}_4:\text{Dy}_{0.1}$  (نمونه  $S_4$ ) با مقدار درصد نسبی فاز 85%؛ متوسط اندازه نانوبلورک‌های 25 نانومتر؛ متوسط اندازه نانوذرات  $34 \pm 3$  نانومتر؛ پهنای توزیع فراوانی نانوذرات برحسب اندازه آنها بین 30 تا 35 نانومتر؛ اندازه انرژی گاف اپتیکی  $4/21 \pm 0/01$  الکترون‌ولت و با داشتن بیشترین شدت نشر در طیف فوتولومینسانس، به‌عنوان نمونه بهینه از لحاظ خواص ساختاری و نوری شناخته شد.

#### مرجع‌ها

- [1] W. Shan, L. Wu, N. Tao, Y. Chen, D. Guo, Optimization method for green  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{+2}, \text{Dy}^{3+}$  phosphors synthesized via co-precipitation route assisted by microwave irradiation using orthogonal experimental design, *Ceramics International* **41** (2015) 15034–15040.
- [2] J.B. Montes-Frausto, K. Juarez-Moreno, B. Can-Uc and G.A. Hirata-Flores, Synthesis and cytotoxic effects of  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  persistent luminescence nanoparticles co-doped with  $\text{Eu}^{2+}/\text{Dy}^{3+}$ , *Optical Materials Exp.* **6** (2016) 1488.
- [3] Y.F. Xu, D.K. Ma, M.L. Guan, X.A. Chen, Q.Q. Pan, S.M. Huang, Controlled synthesis of single-crystal  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  nanosheets with long-lasting phosphorescence, *Journal of Alloys and Compounds* **502** (2010) 38–42.
- [4] T. Laamanen, Defects in persistent luminescence materials, the Degree of Doctor of Philosophy, University of Turku, (2011).
- [5] J.S. LEE, Synthesis and characterization of nanophosphors by flame spray pyrolysis,



شکل 13. طیف فوتولومینسانس نمونه‌های  $S_1$ ،  $S_2$ ،  $S_3$ ،  $S_4$ ؛ در محدوده طول‌موج 450 تا 750 نانومتر؛ با حلال آب یون‌زدایی شده و طول‌موج برانگیختگی 380 نانومتر.

#### بحث و نتیجه‌گیری

نانوذرات  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  به‌روش احتراقی به‌کمک مایکروویو ساخته شد. الگوی XRD تشکیل نانوذرات  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  با تقارن تک‌میلی و گروه فضایی  $P_{1211}$  را با نسبت سوخت به نیترات 3 به 1، زمان 5 دقیقه تابش‌دهی در مایکروویو با توان 900 وات، زمان پخت 1 ساعت، دمای پخت 600 درجه سانتی‌گراد و مقدار pH برابر با 5/5 (با افزودن کربنات آمونیوم) تأیید کرد. متوسط اندازه نانوبلورک‌های  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  برای پنج قله اصلی از الگوی XRD آن حدود 26 نانومتر محاسبه شد. با انجام طیف‌سنجی FT-IR پیوندهای بین عناصر تشکیل‌دهنده  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  تأیید شدند. تصاویر FESEM نشان داد نانوذرات  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  دارای شکل تقریباً کروی با متوسط اندازه نانوذرات  $29 \pm 3$  نانومتر می‌باشند. با استفاده از داده‌های حاصل از UV-Vis و فرمول تاک، مقدار انرژی گاف اپتیکی نانوذرات  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  حدود  $4/71 \pm 0/01$  الکترون‌ولت محاسبه شد. با مقایسه طیف‌های فوتولومینسانس نانوذرات  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  (نمونه  $S_1$ ) و نانوذرات  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Dy}$  (نمونه‌های  $S_2$ ،  $S_3$  و  $S_4$ ) مشخص شد که ماهیت تله‌ها صرفاً تحت تأثیر

- [13] S. Baham Bakhtiari, Synthesis of strontium aluminate nanoparticles and co-doping of them with dysprosium and samarium and the study of their structural and optical properties MSc. Thesis, Shahid Chamran University of Ahvaz, I. R. Iran (2017).
- [14] Y. Sun, Z. Wu, B. Hu, W. Wang, H. Ye, Y. Sun, X. Wang, X. Zeng, A new method for determining the relative crystallinity of chickpeastarch by Fourier-transform infrared spectroscopy, *Carbohydrate Polymers* **108** (2014) 153–158.
- [15] M. Farbod, Al. Mohammadian, Single phase synthesis of g-brass ( $\text{Cu}_5\text{Zn}_8$ ) nanoparticles by electric arc discharge method and investigation of their orderedisorder transition temperature, *Intermetallics* **45** (2014) 1-4.
- [16] A. Monshi, M.R. Foroughi, M.R. Monshi, Modified Scherrer equation to estimate more accurately nano-crystallite size using XRD, *World Journal of Nano Science and Engineering* **2** (2012) 154-160.
- [17] K.V. Zakharchuk, A.A. Yaremchenk, D.P. Fagg, Electrical properties and thermal expansion of strontium aluminates, *Journal of Alloys and Compounds* **613** (2014) 232-237.
- [18] A. Azam, A.S. Ahmed, S.S. Habib, A.H. Naqvi, Effect of Mn doping on the structural and optical properties of  $\text{SnO}_2$  nanoparticles, *Journal of Alloys and Compounds* **523** (2012) 83– 87.
- [19] B. Zhai, Ch. Tang, Y.M. Huang, First-principles density functional calculations of the band structures of  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ , *Optoelectronic Materials* **1** (2016) 18–21.
- [20] A.K. Choubey, N. Brahme, D.P. Bisen and R. Sharma, Mechanoluminescence & Thermoluminescence of  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}$  nanophosphors, *The Open Nanoscience Journal* **5** (2011) 41-44.
- the Degree of Doctor of Philosophy, University of Florida, (2009).
- [6] M. Ghahari, A.M. Arabi, Preparation of persisted luminescence pigment and investigation in glaze compatibility, *Prog. Color Colorants coat* **5** (2012) 55-63.
- [7] M.E. Hannah, Mechanism for long persistent phosphorescence in  $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:\text{Eu}^{2+}$ , the Degree Masters of Science, University of Georgia, (2008).
- [8] N. Thompson, An approach to the synthesis of strontium aluminate based nanophosphors, the Degree of Doctor of Philosophy, RMIT University, (2012).
- [9] D.S. Kshatri, A. Khare, Characterization and optical properties of  $\text{Dy}^{3+}$  doped nanocrystalline  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$  phosphor, *Journal of Alloys and Compounds* **558** (2014) 488–495.
- [10] K.V.d. Eeckhout, P.F. Smet, D. Poelman, Persistent luminescence in  $\text{Eu}^{2+}$  doped compounds: A review, *Materials* **3** (2010) 2536-2566.
- [11] E. Shafia, M. Bodaghi, S. Esposito, A. Aghaei, A critical role of pH in the combustion synthesis of nano-sized  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  phosphor, *Ceramics International* **40** (2014) 4697–4706.
- [12] I.P. Sahu, D.P. Bisen, N. Brahme, R.K. Tamrakar, R. Shrivastava, Luminescence studies of dysprosium doped strontium aluminate white light emitting phosphor by combustion route, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* **26** (2015) 8824–8839.
- [13] س. باهام بختیاری، ساخت نانوذرات آلومینات استرانسیوم و آلایش همزمان آنها با دیسپروزیوم و ساماریوم و بررسی خواص ساختاری و نوری آنها، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز (1396).



[21] M. Nazarov, M.G. Brik, D. Spassky, B. Tsukerblat, A.N. Nazida, M.N. Ahmad-Fauzi, Structural and electronic properties of  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$  from density functional theory calculations, *Journal of Alloys and Compounds* **573** (2013) 6–10.

[22] T. Matsuzawa, Y. Aoki, N. Takeuchi, Y. Murayama, J. Electrochem, A new long phosphorescent phosphor with high brightness,  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ , *J. Electrochem Soc.* **143** (1996) 2670-2673.

[23] M. Shigenori, N. Hiroyuki, A. Masao, X. Chao-Nan, First-Principles Energy Band Calculation for  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  with Monoclinic Structure, *Chemistry Letters* **3** (2002) 700-701.

[24] F. Clabau, X. Rocquefelte, S. Jobic, P. Deniard, M.H. Whangbo, A. Garcia, T. Le Mercier, On the phosphorescence mechanism in  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$  and its codoped derivatives, *Solid State Sci.* **9** (2007) 608–612.

[25] ه. موسوی، سنتز شیمیایی و بررسی خواص اپتیکی نانوساختارهای نیم‌رسانا با گاف نواری پهن، پایان نامه دکتری تخصصی، دانشگاه صنعتی شاهرود (1391).

[25] H. Mousavi, Chemical synthesis and optical properties of semiconductor nanostructures with broadband gap Ph.D. Thesis, Shahroud University of Technology, I. R. Iran (2012).