



استفاده از پوشش‌های هوشمند،

روشی نو به سوی ساخت‌وساز پایدار و دوست‌دار محیط زیست

آزاده عسکری‌نژاد^{۱*}، زهره شهرستانی^۲، سهراب ویسه^۱

۱. عضو هیأت علمی، بخش مصالح و فرآورده‌های راه و ساختمان، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران

۲. دانشجوی دکتری، دانشکده شیمی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

* azadaskarinejad@gmail.com

چکیده

عایق‌کاری ساختمان‌ها مقدار انرژی مورد نیاز برای ایجاد یک محیط راحت را کاهش می‌دهد. کاهش مصرف انرژی به معنای کاهش انتشار کربن از طریق تولید انرژی است. در واقع، عایق‌کاری مقرون به صرفه‌ترین راه کاهش انتشار کربن به شمار می‌آید. در این راستا، استفاده از پوشش‌های هوشمند بر روی سطوح خارجی ساختمان‌ها مصرف انرژی و هزینه‌های مربوط به سرمایش و گرمایش داخل ساختمان‌ها را به حداقل می‌رساند. در تولید این پوشش‌ها، از رنگدانه‌هایی با خواص بازتابندگی پرتو مادون قرمز نزدیک خورشید و نیز ترموکرومیک استفاده می‌شود. همچنین، می‌توان به منظور بهبود خواص و عملکرد این پوشش‌ها از فناوری نانو بهره برد. در این تحقیق، رنگدانه ترموکرومیک وانادیم دی‌اکسید دوپ شده با تنگستن در ابعاد نانومتری با روش هیدروترمال سنتز شد و خواص آن با روش‌های شناسایی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. محصول پس از بهینه‌سازی، به عنوان رنگدانه در فرمولاسیون پوشش قرار خواهد گرفت و یا ممکن است با روش‌های پاششی مختلف بر روی سطوح بام ساختمان‌ها اجرا شود.

کلیدواژگان

پوشش‌های هوشمند، بازتابندگی، ترموکرومیک، فناوری نانو، بهره‌وری انرژی

Using Smart Coatings, a New Way for Sustainable and Green Construction

Azadeh Askarinejad^{1*}, Zohreh Shahrestani², Sohrab Veisheh¹

1. Department of Construction Materials, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran

2. Department of Chemistry, Zanjan University, Zanjan, Iran

*E-mail: azadaskarinejad@gmail.com

Abstract

Insulation of buildings reduces the amount of energy needed to create a comfortable environment. Reducing energy consumption means reducing carbon emissions through energy production. In fact, insulation is the most cost-effective way to reduce carbon emissions. In this regard, the use of smart coatings on external surfaces of buildings minimizes the energy consumption and costs associated with indoor cooling and heating. In the production of these coatings, pigments with near infrared reflectance and thermochromic properties are used. Nano technology can be also used to improve the properties and performance of these coatings. In this study, thermochromic pigments of tungsten doped vanadium dioxide were synthesized in nanometer scale by hydrothermal method and their properties were investigated by various methods of characterization. After optimization, the product will be treated as a pigment in the coating formulation, or may be applied to different roof surfaces using different spraying methods.

Keywords

Smart coatings, reflection, thermochromic, nano technology, energy efficiency

۱- مقدمه

صنعت ساختمان نسبت به هر فعالیت اقتصادی دیگری، مواد خام بیشتری (حدود ۳۰۰۰ تن در سال، تقریباً ۵۰٪ وزنی) مصرف می‌کند که به وضوح نشان می‌دهد این صنعت غیر پایدار است.

ساخت‌وساز سبز یکی از ضروری‌ترین موارد زیست محیطی زمان ما به شمار می‌رود. خدمات انرژی مورد نیاز ساختمان‌های مسکونی، تجاری و صنعتی مسؤول درصد بالایی از انتشار دی‌اکسید کربن است. در سراسر جهان، ساختمان‌ها بین ۳۰ تا ۴۰ درصد برق جهان را مصرف می‌کنند و ضایعات ناشی از ساخت ساختمان‌ها درصد بالایی از زباله دفن‌شده را تشکیل می‌دهند. جنگل‌زدایی، فرسایش خاک، آلودگی محیط زیست، اسیدی شدن،

توسعه پایدار در صنعت ساخت‌وساز توسعه‌ای است که نیازهای زمان حال را در نظر می‌گیرد، بدون اینکه توانایی‌های نسل‌های آینده را برای رفع نیازهای خود در طراحی، ساخت و بهره‌برداری از ساختمان‌ها به مخاطره اندازد. یکی از جنبه‌های کلیدی پایداری، حفاظت از محیط زیست از طریق استفاده مؤثر از منابعی است که در صنعت ساختمان مورد استفاده قرار می‌گیرند. جنبه کلیدی دیگر پایداری استفاده کارآمد از انرژی است. برای مثال، عایق‌کاری راه‌حلی آشکار برای کاهش مصرف انرژی توسط ساختمان‌هاست.

دمای بحرانی ایجاد می‌شود. از آنجایی که دمای انتقال فاز VO_2 بالاست، دوپ کردن آن با فلزات دیگر جهت کاهش دمای انتقال ضروری است. دمای انتقال از طریق دوپ کردن وانادیم دی اکسید با تنگستن، آلومینیم، مولیبدن و تیتانیوم که در ساختار بلوری جایگزین بخشی از اتم‌های وانادیم می‌شوند، پایین می‌آید [۵].

۱-۲- پیشینه تحقیقات

پدیده ترموکرومیسم نخستین بار در سال ۱۹۵۹ در وانادیم دی اکسید (VO_2) مشاهده شد. پس از مطالعات بیشتر، این ماده در دهه ۸۰ میلادی در پنجره‌ها مورد استفاده قرار گرفت و به‌تازگی توانایی‌هایش در پنجره‌ها و نماهای ذخیره‌کننده انرژی و بام‌ها و نمای خارجی ساختمان به صورت پوشش‌های نسبتاً ساده مورد توجه قرار گرفته است [۶]. پوشش‌های هوشمند با ترکیبات شیمیایی و روش‌های مختلف تاکنون تولید شده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای مثال، در یک کار تحقیقاتی رنگدانه‌های ترموکرومیک در فرمولاسیون الاستومری شامل پلیمر آکریلیک بررسی شده‌اند [۷].

در پژوهش دیگری نانو ساختارهای VO_2 با روش‌های تولید نانو مواد سنتز شده و روی سطح سرامیک لایه نشانی شده‌اند و به منظور کاربرد در بام ساختمان‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۶].

همچنین در سال‌های اخیر گزارش‌های مروری در خصوص روش‌های گوناگون ایجاد سطوح هوشمند با استفاده از وانادیم دی اکسید منتشر شده‌اند [۸].

۱-۳- فناوری نانو در تولید پوشش‌های هوشمند

علم و فناوری نانو فهم و کنترل مواد در مقیاس نانو (یک میلیارد متر 10^{-9}) است. اهمیت مقیاس نانو تنها مربوط به مقیاس کوچک نیست، بلکه مربوط به این واقعیت است که مواد با این اندازه ذرات خواص جدیدی به دست می‌آورند. فناوری نانو در جهت ساخت‌وساز سبز، مواد زاید و سمیت و همچنین مصرف انرژی و مواد خام را در صنعت ساخت‌وساز کاهش می‌دهد و در نتیجه، ساختمان‌های پاک‌تر و سالم‌تری را ایجاد می‌کند. علاوه بر مزایای زیست محیطی و بهداشتی، فناوری نانو در ساختمان‌سازی سبز تأثیر قابل‌توجهی در ایجاد منافع اقتصادی برای هر دو صنعت ساخت‌وساز و نانومواد خواهد داشت [۱].

نانوپوشش‌ها پوشش‌هایی هستند که در آن‌ها حداقل یکی از اجزای تشکیل‌دهنده دارای ساختار نانومتری باشد که به موجب آن، خواص ویژه‌ای را به پوشش بدهد. در تولید نانوپوشش‌های هوشمند رنگدانه دارای خاصیت ترموکرومیک با روش‌های مختلف در ابعاد نانومتر سنتز می‌شود و در فرمولاسیون پوشش قرار می‌گیرد.

باتوجه به اینکه با کاهش اندازه ذرات پودر وانادیم دی اکسید دمای استحاله یا تغییر فاز بلوری آن کاهش می‌یابد، استفاده از نانو ساختارهای این رنگدانه در پوشش هوشمند مؤثرتر خواهد بود [۸].

۱-۴- معرفی روش‌های مختلف سنتز نانو ساختارهای وانادیم دی اکسید (VO_2)

تاکنون روش‌های زیادی برای سنتز نانوذرات وانادیم دی اکسید به عنوان رنگدانه ترموکرومیک به کار برده شده‌اند که از آن جمله می‌توان به روش‌های

تخریب لایه ازن، کاهش سوخت‌های فسیلی، تغییرات اقلیم جهانی و خطرهای سلامتی انسان همگی می‌توانند تا اندازه‌ای به ساخت و ساز ساختمان‌ها نسبت داده شوند. ساخت و ساز سبز عبارتی است که شامل تلاش برای کاهش ضایعات، سمیت و مصرف انرژی و منابع در ساختمان‌ها است. در صورتی که مالکان، معماران و سازندگان در سراسر جهان اقدام به ساختمان سازی سبز کنند، ساختمان به عنوان یکی از علل اصلی آسیب‌های زیست محیطی و تغییرات آب و هوایی جهانی به صنعتی با بیشترین پتانسیل برای کاهش انتشار کربن، ضایعات و مصرف انرژی تبدیل خواهد شد. تلاش برای به حداقل رساندن استفاده از منابع غیر قابل تجدید مانند زغال سنگ، نفت، گاز طبیعی و مواد معدنی، و به حداقل رساندن ضایعات و آلاینده‌ها از اهداف ساخت و ساز سبز به‌شمار می‌آید. حفاظت از انرژی در ساخت و ساز سبز دارای اهمیت بالایی است زیرا هم در حفظ منابع و هم کاهش زباله و آلودگی تأثیر دارد [۱ و ۲].

یکی از مؤثرترین روش‌ها جهت کاهش انرژی و هزینه‌های مربوط به تهیه مطبوع داخل ساختمان‌ها توسعه پوشش‌های هوشمند بر روی سطوح خارجی آن‌هاست. پوشش‌های هوشمند با خاصیت بهره‌وری انرژی که در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرند، پوشش‌هایی هستند که دارای خاصیت بازتابندگی پرتو مادون قرمز نزدیک^۱ (NIR) و همچنین خاصیت ترموکرومیک هستند و تأثیر مثبتی در بهره‌وری انرژی در فصل گرم و فصل سرد خواهند داشت.

۱-۱- معرفی خاصیت بازتابندگی و خاصیت ترموکرومیک مواد

با توجه به اینکه گرمای ایجاد شده از نور خورشید مربوط به پرتوهای مادون قرمز نزدیک است، وجود این پرتوها موجب گرم شدن سطح خواهد شد. ایجاد امکان بازتابش بخش زیادی از پرتو مادون قرمز خورشید، مقدار انرژی لازم برای خنک کردن ساختمان‌ها را به حداقل می‌رساند. در صورتی که رنگدانه‌های خنک‌کننده دارای اثر ترموکرومیک هم باشند، در فصل سرد از بازتابش نور جلوگیری می‌شود و بهره‌وری انرژی از طریق کاهش هزینه گرمایش ساختمان‌ها صورت می‌گیرد.

مواد معدنی بازتابنده NIR به‌طور عمده، سولفیدها و اکسیدهای فلزات هستند که در سال‌های اخیر، از آن‌ها به عنوان رنگدانه‌ها در پوشش بازتابنده NIR برای ساختمان‌های مسکونی و تجاری استفاده می‌شود. پرکاربردترین اکسید/ سولفیدهای فلزی مورد استفاده TiO_2 ، Fe_2O_3 ، CrO_3 ، MnO_x و CdS دوپ‌شده^۱ هستند. فلزات دیگر مانند: Ni ، Sb ، Fe ، Mn ، Zn ، Cr ، Bi ، Sr ، Y ، Cu و غیره به عنوان دوپانت‌ها^۲ برای تنظیم رنگ رنگدانه‌ها به کار برده می‌شوند [۳ و ۴].

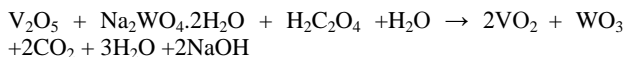
خاصیت ترموکرومیک نوعی تغییر رنگ شدید در مواد است هنگامی که در یک محدوده‌ی مشخص دمایی قرار گیرند. این تغییر در نتیجه تغییر در ساختار بلوری ماده رخ می‌دهد. گونه‌های بسیاری از مواد از جمله مواد آلی، معدنی، آلی فلزی، ماکرومولکول‌ها و سامانه‌های پلیمری دارای این خاصیت هستند. وانادیم دی اکسید (VO_2) شناخته‌شده‌ترین ترکیب دارای خاصیت ترموکرومیک است. VO_2 در دماهای پایین‌تر از ۶۸ درجه بیشتر پرتوهای ناحیه مادون قرمز را عبور می‌دهد و در دماهای بالاتر از آن، بخش زیادی از تابش NIR را بازتابش می‌کند. این تغییر به موجب استحاله ساختاری برگشت‌پذیر از حالت نیمه‌رسانا و ساختار مونوکلینیک (M) در زیر دمای بحرانی ($68^\circ C$)، به حالت فلزی و ساختار تتراگونال (روتایل (R)) در بالای

¹ Doped

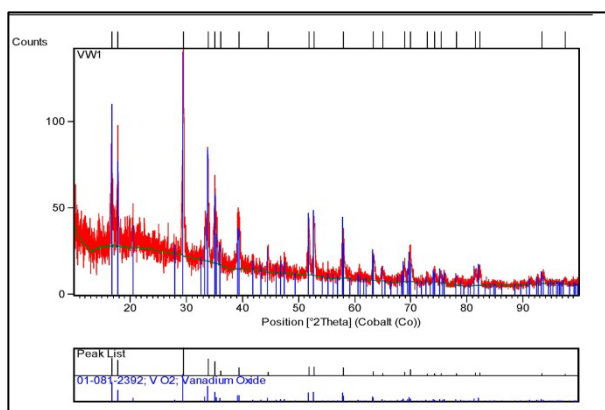
² Dopants

۳- نتایج و بحث

نانوساختارهای وانادیم دی اکسید دوپ شده با تنگستن ($VO_{1-x}W_x$) به عنوان رنگدانه ترموکرومیک در تولید نانوپوشش‌های هوشمند از طریق واکنش زیر سنتز شدند:

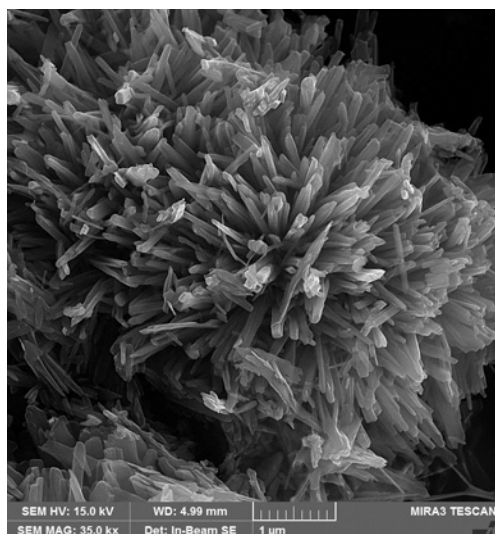


تعیین ترکیب شیمیایی و ساختار بلوری محصول با استفاده از روش پراش پرتو ایکس پودر (XRD) صورت گرفت. شکل ۱ طرح پراش پرتو X نانوپودر سنتز شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود طرح XRD محصول کاملاً با طرح استاندارد VO_2 مطابقت می‌کند. بنابراین، سنتز ترکیب شیمیایی موردنظر مورد تأیید است.



شکل ۱ طرح XRD نانوساختارهای $VO_{1-x}W_x$

بررسی اندازه ذرات و مورفولوژی نانوپودر به‌دست‌آمده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی صورت گرفت. شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به نانوساختارهای $VO_{1-x}W_x$ را نشان می‌دهد. در تصاویر SEM، نانوساختارهای یک‌بعدی با ضخامت کمتر از ۱۰۰ نانومتر و پراکندگی یکنواخت قابل مشاهده هستند و مورفولوژی قندیل مانند را نشان می‌دهند.



الف

شیمیایی نظیر سل-زل، هیدروترمال^۱، سنتز احتراقی، پیرولیز، رسوب‌گذاری شیمیایی از فاز بخار و روش‌های تحت خلأ، نظیر لایه نشانی از طریق لیزر پالسی، لایه نشانی از طریق پرتو الکترونی و لایه نشانی به روش کندوپاش مغناطیسی اشاره کرد. از میان این روش‌ها، براساس نتایج تحقیقات انجام شده، روش هیدروترمال یکی از مناسب‌ترین و ارزان‌ترین روش‌ها به منظور تولید نانوذرات وانادیم دی اکسید به‌شمار می‌رود. به دلیل استفاده از حلال آب و عدم استفاده از حرارت‌های خیلی بالا می‌توان این روش را به عنوان روشی سبز در نظر گرفت.

۱-۵- معرفی روش هیدروترمال

این روش به‌طور عمده، به هر نوع واکنش ناهمگن در حضور حلال آبی در دماهایی بالاتر از دمای بحرانی (در مورد آب دمای بالاتر از $100^\circ C$) و در نتیجه در فشارهای بالا گفته می‌شود.

در پژوهشی که های هانگ بین و همکارانش انجام دادند، موفق به سنتز VO_2 از متاوانادات شدند. آن‌ها متاوانادات را به اگزالیک اسید در یک محلول آبی افزودند و بعد از بیست دقیقه هم‌زدن، محلول حاصل را به اتوکلاو منتقل کردند. اتوکلاو را به مدت ۲۴ ساعت در دمای $180^\circ C$ نگهداری نمودند و تا دمای اتاق خنک کردند. سپس محلول حاصل را فیلتر نمودند و در محیط خلأ خشک کردند. در نهایت، برای تهیه VO_2 پودرهای به‌دست‌آمده را در دمای $650^\circ C$ به مدت یک ساعت کلسینه کردند [۹].

در این تحقیق نانوساختارهای وانادیم دی اکسید دوپ شده با تنگستن ($VO_{1-x}W_x$) با روش هیدروترمال سنتز شدند و با روش‌های مختلف مورد شناسایی قرار گرفتند و به منظور استفاده به عنوان رنگدانه در پوشش‌های هوشمند بررسی و سپس بهینه‌سازی گردیدند. تاکنون روش‌های مختلفی از جمله روش هیدروترمال به‌منظور تولید وانادیم دی اکسید دوپ شده با تنگستن مورد استفاده قرار گرفته‌اند. باوجود این، به‌کارگیری ترکیب سنتز شده به‌عنوان رنگدانه در پوشش هوشمند مناسب برای بام ساختمان‌ها تاکنون گزارش نشده است.

۲- مواد و روش‌ها

به‌منظور سنتز نانوساختارهای $VO_{1-x}W_x$ با روش هیدروترمال، مقادیر مشخصی از وانادیم پنتا اکسید (V_2O_5) و اگزالیک اسید ($H_2C_2O_4$) با نسبت مولی یک به یک در یک بشر حاوی آب مقطر با مقدار مشخصی از نمک تنگستن به مدت ۱ ساعت به هم زده شدند.

سپس مخلوط واکنش در یک راکتور اتوکلاو کاملاً بسته در دمای $180^\circ C$ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت در آون حرارت داده شد.

پس از اتمام، محصول توسط دستگاه سانتریفیوژ جداسازی و در آون $100^\circ C$ درجه خشک شد. محصول سپس مورد آنالیز XRD^2 ، SEM^3 و EDS^4 قرار گرفت.

¹ Hydrothermal

² X Ray Diffraction

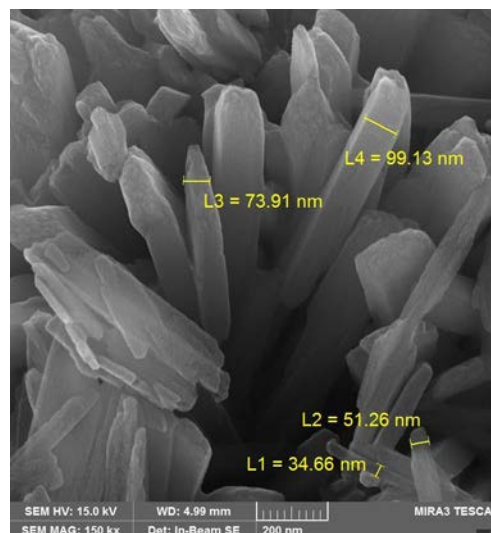
³ Scanning Electron Microscopy

⁴ Energy Dispersive Spectroscopy

میکروسکوپی الکترونی روبشی و پراش انرژی پرتو ایکس جهت تأیید محصول تولید شده مورد استفاده قرار گرفتند. عملکرد ترموکرومیک VO_2 بستگی به روش سنتز و اندازه ذرات آن دارد. روش‌هایی مانند دوپ کردن VO_2 با عناصر دیگر و اصلاح ساختاری می‌توانند در بهبود خواص آن مؤثر باشند. ذرات VO_2 می‌توانند از طریق روش‌های پاششی بر روی سطح پوشش داده شوند و یا به صورت پوشش مایع در بستر پلیمری فرموله شوند. با توجه به اینکه تقریباً ۶۰ درصد انرژی استفاده شده در ساختمان‌ها صرف گرمایش، سرمایش، روشنایی و تهویه می‌شود، تلاش برای ذخیره‌سازی انرژی در ساختمان موجب صرفه‌جویی هم‌زمان در انرژی و هزینه می‌شود. بخش زیادی از انرژی که در طول سال صرف گرم کردن یا سرد کردن ساختمان می‌شود، از طریق دیوارها، سقف، پنجره‌ها و غیره، به فضای بیرون منتقل می‌شود. جلوگیری از این اتلاف به‌وسیله بهبود عملکرد حرارتی سطوح خارجی ساختمان‌ها منتج به کاهش هزینه‌های برق مصرفی و انتشار کمتر گازهای گلخانه‌ای می‌شود. با توجه به نتایج تحقیقات انجام شده در خصوص پوشش‌های هوشمند با عملکرد بهره‌وری انرژی، و نادیدم دی اکسید به دلیل دارا بودن خواص ترموکرومیک مورد انتظار، بیشتر از ترکیبات دیگر مورد توجه قرار گرفته است [۸].

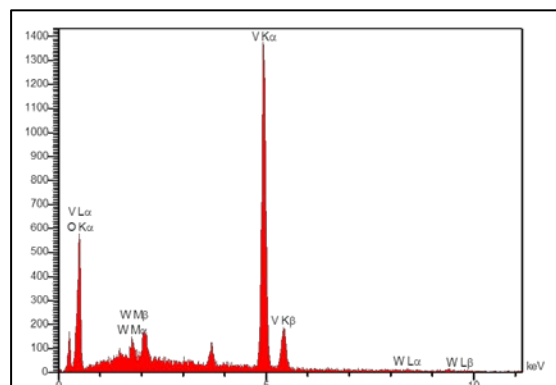
۵- مراجع

- [1] J. M. Khatib, Sustainability of construction materials, Wood head Publishing Limited and CRC Press LLC, 2009.
- [2] G. Elvin, Nanotechnology for Green Building, Green Technology Forum, 2007.
- [3] G. Qiang, et al., Effect of Sn^{4+} doping on the photoactivity inhibition and near infrared reflectance property of mica-titania pigments for a solar reflective coating, *Ceramics International*, 42, pp. 17148–17153, 2016.
- [4] C. G. Granqvist, Transparent conductors as solar energy materials: A panoramic review, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 91, No. 17, pp. 1529–1598, 2007.
- [5] W. Shancheng, Vanadium dioxide for energy conservation and energy storage applications: Synthesis and performance improvement, *Applied Energy*, 211, 200–217, 2018.
- [6] K. Tong, Preparation of $\text{VO}_2/\text{Al-O}$ core-shell structure with enhanced weathering resistance for smart window, *Ceramics International*, 43, 4055–4061, 2017.
- [7] A. Gonçalves, Smart optically active VO_2 nanostructured layers applied in roof-type ceramic tiles for energy efficiency, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 150, 1–9, 2016.
- [8] Sh. Wang, Recent Progress in VO_2 Smart Coatings: Strategies to Improve the Thermochromic Properties, *Progress in Materials Science*, 81, 1–54, 2016.
- [9] H. O. Pierson, "Handbook of chemical vapor deposition (CVD) Principles, Technology, and Applications", 2th Ed., NOYES publications Park Ridge, New Jersey, U.S.A., 2001.



شکل ۲ تصاویر SEM نانو ساختارهای $\text{VO}_{1-x}\text{W}_x$

شکل ۳ نتایج آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) را نشان می‌دهد. در این روش، مقادیر عناصر موجود در نقطه‌ای از نمونه که توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی در حال مشاهده است، معین می‌گردد. با توجه به نتایج، حضور مقداری عنصر تنگستن به عنوان دوپنت در ساختار محصول مورد تأیید قرار می‌گیرد.



Elt	Int	W%	A%
O	12.3	14.15	35.57
V	585.6	80.01	63.16
W	2.2	5.83	1.28

شکل ۳ نتایج EDS نانو ساختارهای $\text{VO}_{1-x}\text{W}_x$

۴- جمع‌بندی

در این تحقیق، روش هیدروترمال به‌منظور تهیه نانو رنگدانه‌های ترموکرومیک و نادیدم دی اکسید دوپ شده با تنگستن به منظور استفاده در نانو پوشش‌های هوشمند جهت استفاده در بام ساختمان‌ها، به‌کار گرفته شد. روش‌های شناسایی شامل پراش انرژی پرتو ایکس،