



## Synthesis of Titanium Nano-particles and Studying Surface Resistance of Cyrus Tomb's Carbonated Stones

Morteza Heidari<sup>\*1</sup>, Ali Asghar Fahimifar<sup>2</sup>, Mohammadzaman Kasaei<sup>3</sup>

1. Master of Arts Research, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
2. Associate Professor, Department of Art Research, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
3. Professor, Department of Organic Chemistry, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Vol. 3, No. 1, Spring 2020

**Received:** 2020/04/28

**Accepted:** 2020/06/30

DOI:

Corresponding Author:  
Morteza Heidari, Master  
of Arts Research, Tarbiat  
Modares University, Teh-  
ran, Iran, Email: Morteza-  
heidari2013@gmail.com



### Abstract

In this study, cheap nanoparticles with the highest hybrid similarity were introduced to increase the surface resistance of ancient Pasargadae (Cyrus Tomb) rocks. As result, the kind of mineral of thin section of sample was detected as calcite and grainstone texture. The physical features of the sample indicated a high porosity. In order to achieve a high compatibility of the intended Nano materials, some powder of the sample was used as pre-material through Mechanical Grinder. After preparation of the powder, Nano material was prepared due to sol-gel method. Calcium Titanate blurs with the phase of Perovskite and Titanium dioxide with the phase of Anatase have been detected as XRD. These compounds were confirmed by FT-IR. The size of spherical and oval blurs prepared in the scale of Nano was confirmed by SEM. The existence of common elements such as Calcium, Titanium, Oxygen and Carbon was detected as EDX spectrometer. In this experience, Ethanol was used as solvent. In 4 hours, the gained Colloidal dissolved was added on the surface of the stone by the capillary specific. So as to module the resistance of the sample, the coated surface was examined under the abrasion test. Along with these experiments, all the levels for pre-material lime were done. The results show a relative improvement in the surface resistance of the sample rock. Meanwhile, there wasn't any remarkable change in the case of the color of the sample.

**Keywords:** Consolidation, Cyrus tomb, Nano-TiO<sub>2</sub>, Nano-CaTiO<sub>3</sub>, Surface Abrasion



## تهیه نانوذرات تیتانیوم و بررسی مقاومت سطحی سنگ‌های کربناته آرامگاه کوروش

مرتضی حیدری<sup>۱\*</sup>، علی اصغر فهیمی فر<sup>۲</sup>، محمدزمان کسائی<sup>۳</sup>

۱. کارشناس ارشد پژوهش هنر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۲. دانشیار، گروه پژوهش هنر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران ایران
۳. استاد، گروه شیمی آلی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

### چکیده

در این پژوهش نانو ذراتی ارزان و دارای بیشترین تشابه ترکیبی، برای افزایش نسبی مقاومت سطحی سنگ‌های باستانی پاسارگاد معرفی شد. با بررسی مقطع نازک نمونه مشخص شد که نوع کانی، کلسیت و از بافت گریناستون است. مشخصات فیزیکی سنگ نمونه، نشان از تخلخل بالای آن داشت. برای به دست آوردن بیشترین شباهت ترکیبی قسمتی از سنگ نمونه به کمک آسیاب مکانیکی به صورت پودر درآمد. پس از تهیه پودر سنگ نمونه، نانو مواد به روش سل-ژل تهیه شد. بلورهای کلسیم تیتانات با فاز پرووسکیت و تیتانیوم دی‌اکسید با فاز آاناتاز به کمک دستگاه پراش پرتو ایکس تشخیص داده شد. این ترکیبات با طیف‌سنج فرورسرخ نیز تأیید شد. اندازه بلورهای کروی و بیضوی تهیه شده در مقیاس نانو، به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی تأیید شد. وجود عناصر غالب کلسیم، تیتانیوم، اکسیژن و کربن به کمک طیف‌سنج انرژی پرتو ایکس مشخص شد. در این آزمون از اتانول خشک به عنوان حلال استفاده شد. محلول کلونیدی حاصل، در چهار ساعت بر سطح سنگ افزوده و نمونه به دلیل خاصیت موئینگی وارد منافذ سنگ شد. سپس سطح پوشش داده شده تحت آزمون سایش سطحی سرشار قرار گرفت. همه مراحل برای پیش‌ماده آهک خالص نیز انجام شد. نتایج حاصل نشان‌دهنده بهبود نسبی مقاومت سطحی سنگ نمونه است. براساس مشاهده و مقایسه عینی، تغییر رنگ محسوسی در سطح سنگ نمونه رؤیت نشد.

**واژه‌های کلیدی:** استحکام‌بخشی، آرامگاه کوروش، نانو تیتانیوم دی‌اکسید، نانو کلسیم تیتانات، سایش سطحی

سال دوم، شماره سوم، بهار ۱۳۹۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۱۰

DOI:

نویسنده مسئول:

مرتضی حیدری، کارشناس ارشد

پژوهش هنر، دانشگاه تربیت

مدرس، تهران، ایران

پست الکترونیک:

Mortezaheidari2013@

gmail.com



## مقدمه

سنگ‌های کربناته مواد اصلی و سازندهٔ ابنیهٔ باستانی مجموعهٔ پاسارگاد است (شکل ۱). عوامل آسیب‌زای متنوع فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی، صدمات جبران‌ناپذیری بر سنگ‌های این مجموعه دارند. امروزه هریک از انواع آسیب‌های ذکر شده، با مواد و روش‌های مختلفی از بین می‌روند. انتخاب و سنتز نانو ذراتی با چند کاربرد هم‌زمان حفاظتی و سازگار، مسئله‌ای است که در این پژوهش به آن پاسخ داده شد. هدف از این پژوهش، تلاشی برای یافتن موادی با کارایی چندگانه از جنس سنگ میزبان برای امر حفاظت است. عوامل آسیب‌زایی مانند تخریب شیمیایی و فیزیکی به‌وسیلهٔ باران، باد، گرد و غبار، مواد آلاینده، میکروارگانیسم‌ها و عوامل محیطی دیگر سبب ضعیف‌شدن ساختار متخلخل و لایه‌های سطحی سنگ‌های کربناته می‌شود. این امر به‌واسطهٔ تجزیهٔ شیمیایی ترکیبات پیونددهنده که معمولاً کربنات کلسیم است و از بین رفتن چسبندگی بین دانه‌ها و سطح سنگ ایجاد می‌شود. آثار تاریخی و هنری در برابر هیدرولیز اسیدی و فرایندهای اکسیداسیون ناشی از شرایط آب و هوایی، کاملاً شکننده می‌شوند (Dohene, 2010). هدف اصلی مرمت به‌کمک استحکام‌بخش‌ها، افزایش و بهبود پیوستگی و مقاومت مکانیکی سنگ فرسوده است (Pinto and Rodrigues, 2012).

تا چندی پیش در بیشتر روش‌های مرمت یا حفاظت از آثار تاریخی از محصولات آلی استفاده می‌شد که عموماً پلیمرهای سنتزی بودند و برای کاربردهای خاص و ویژه طراحی نشده بودند؛ به همین دلیل پس از مدتی به‌صورت چشمگیری تأثیرات نامطلوب خود را روی آثار سنگی به‌صورت پوسته‌پوسته‌شدن، جداشدن سطوح، تسریع واکنش‌های شیمیایی تخریب‌کننده نشان می‌دادند. خروج از عمق سنگ همراه با حلال، مهیاکردن مواد غذایی برای میکروارگانیسم‌های موجود در سطح سنگ، تغییر رنگ سنگ به‌مرور زمان، تجزیهٔ آنها از سوی باران اسیدی و نمک‌های موجود در سطح سنگ از معایب شناخته شده این دسته از مواد استحکام‌بخش است (Dohene, 2010; Koestler and Santoro 1988;)

(Warscheid and Braams, 2000).

به‌دلیل وجود مشکلاتی در کاربرد استحکام‌بخش‌های آلی، امروزه استحکام‌بخش‌های معدنی جایگاه ویژه‌ای یافته‌اند. از جملهٔ این مواد می‌توان به استحکام‌بخش‌های زیر اشاره کرد؛ نانوذرات کلسیم، نانوذرات باریوم و منیزیم هیدروکسید (Baglioni and Giorgi, 2006; Hansen et al. 2003) نانوذرات کلسیم فسفات (Sassoni, Naidu and Scherer, 2011) نانوذرات کلسیم سیلیکات (Hansen et al. 2003)، نانوذرات کلسیم آلکوکسید (Favaro et al. 2013)، نانوکامپوزیت‌های اکسید روی (Van der Werf et al. 2015)، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم (Kapridaki and Maravelaki- Kalaitzaki 2013)؛ البته این موارد استحکام بخش‌های تخصصی سنگ‌های کربناته هستند. چند قاعده ساده باید برای تعیین یک روش مناسب مورد توجه قرار گیرد:

۱. عملیات بازسازی و استحکام‌بخشی باید برگشت‌پذیر باشد؛ به‌گونه‌ای که هر وقت بخواهیم بتوانیم به حالت اولیه برگردیم.
۲. باید اطمینان حاصل کرد که مواد شیمیایی به‌کاررفته بیشترین دوام و کمترین تأثیر شیمیایی را دارند.
۳. مواد شیمیایی به‌کاررفته باید بدون تغییر ترکیب شیمیایی، اثر مورد عمل و خواص شیمیایی- فیزیکی و مکانیکی آن، فرایند تخریب را معکوس کنند؛ یعنی مواد اولیه باید تا حد ممکن با جنس و مادهٔ اثر هنری سازگاری داشته باشد (Bonini et al. 2007). قاعدهٔ سوم امکان بهره‌گیری از خود سنگ به‌عنوان پیش‌ماده برای تهیهٔ نانوذرات مورد نظر را فراهم می‌کند. برای این منظور از پودر سنگ لایه محوطهٔ باستانی پاسارگاد، پس از اخذ مجوز لازم نمونه‌برداری، به‌عنوان پیش‌مادهٔ تحقیق آزمایشگاهی استفاده شد. مزیت نانوذرات به سایر مقیاس مواد، سطح بیشتر و بستر واکنش‌پذیری بالاتر آنهاست؛ البته مقیاس نانو دلیلی بر بسیار کوچک‌بودن ذرات و امکان عبور از منافذ و تخلخل‌های سنگ میزبان نیز است.





شکل ۱. آرامگاه کوروش

## روش پژوهش دستگاه‌ها

طیف‌های طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه<sup>۱</sup> ترکیبات سنتز شده به وسیله دستگاه اسپکترومتر<sup>۲</sup> و در ناحیه<sup>۱</sup>  $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$  ثبت شد. ساختار به کمک طیف پراش پرتو ایکس<sup>۳</sup> با دستگاه اشعه ایکس فیلیپس ساخت هلند، با منوکروماتیک  $\text{CuK}$  شدت بالای تابش با  $\lambda = 0.15406 \text{ nm}$  و سرعت روبش ۲ درجه در دقیقه از ۲۰ تا ۸۰ ( $2\theta$ ) شناسایی شد. اندازه ذرات و شکل و مورفولوژی آنها به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۴</sup> مدل فیلیپس ایکس آل ۳۰، ساخت هلند با ولتاژ ۲۵ کیلو ولت بررسی شد. هم‌زن مغناطیسی

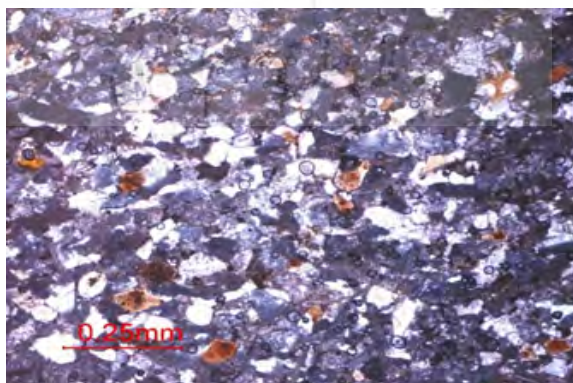
به کاررفته در انجام واکنش‌ها از نوع هایدولف ام آر ۳۰۰۱ بود که سرعت دوران آن در محدوده ۱۰۰ تا ۱۲۵۰ دور بر دقیقه تنظیم می‌شود. همه حلال‌ها و مواد استفاده شده در این تحقیق از شرکت مرک تهیه و بدون خالص‌سازی بیشتر استفاده شد.

## مشخصات سنگ نمونه

نمونه سنگ مطالعه شده سنگ آهک با کانی کلسیتی و تخلخل بالاست. سنگ مورد نظر از نوع ماسه‌سنگی گرینستون<sup>۵</sup> است. این کانی رسوبی کربناته است و در محیط گل‌آلود و اشباع از رسوبات آلی تشکیل شده است (Tucker, 2001). مشخصات فیزیکی نمونه سنگ در جدول ۱ و تصویر مقطع نازک آن در شکل ۲ آمده است.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی سنگ نمونه

Saturated Density ( $\text{gr/cm}^3$ )	Water Absorption(%)	=Porosity(%)
۲/۳۲	۹/۹۴	۲۰/۹۵



شکل ۲. تصویر میکروسکوپ نوری نمونه سنگ گرینستون

5. Sandy Grainstone

1. FT-IR  
2. NICOLET IR100 FT-IR  
3. XRD  
4. SEM

## مواد استحکامبخش

«هیچ ماده‌ای برای استحکامبخشی سنگ‌آهک، از خود آهک سازگارتر نخواهد بود» (Baglioni, 2015). این اصل، مبنای نظری این پژوهش است. استفاده از نانوذرات کلسیم هیدروکسید به‌عنوان روشی سبز و کم‌هزینه، سبب افزایش سرعت فرایند ترمیم آثار تاریخی است. افزایش کارآمدی و تأثیرگذاری این نانوذرات، توان مقابله با آسیب‌های محیطی بر آثار سنگی را افزایش خواهد داد. علاوه بر نانوذرات کلسیم هیدروکسید، در این پژوهش نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید و نانو ذرات کلسیم تیتانات نیز هم‌زمان و به روش سل-ژل تهیه شد. همچنین در آزمایش دوم، از پیش‌ماده آهک خالص به‌عنوان منبع کلسیم استفاده شد.

## روش تهیه نانو مواد استحکامبخش

برای تهیه نانو پودرهای مورد نظر از روش سل-ژل (Baorang, 2003Li) استفاده شد. غلظت و دمای بهینه برای تشکیل فازهای مطلوب از مقاله فوق به دست آمد.

### آزمایش اول

ابتدا ۱ گرم نمونه سنگ را با استفاده از دستگاه آسیاب مکانیکی<sup>۱</sup> به‌صورت پودر درآورده و ذرات به‌دست‌آمده با استفاده از دستگاه اولتراسونیک در آب دیونیزه، پراکنده شد. سپس هم‌زمان با استفاده از هم‌زن مغناطیسی، قطره قطره از تیتانیوم ایزوپروپوکساید<sup>۲</sup> به آن اضافه شد. هم‌زدن سوسپانسیون تشکیل‌شده به مدت ۲۴ ساعت ادامه یافت. ژل تهیه شده به مدت ۲ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. پودر حاصل با استفاده از هاون چینی به‌صورت یکنواخت درآمد و به مدت ۲ ساعت در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد در کوره کلسینه شد.

### آزمایش دوم

یک گرم از کلسیم هیدروکسید (آهک خالص) در ۱۰ میلی‌لیتر آب دیونیزه پخش شد. با استفاده از هم‌زن مغناطیسی محلول تیتانیوم ایزوپروپوکساید به‌کمک قطره‌چکان به‌آرامی به نمونه اضافه شد. پس از ۲۴ ساعت هم‌زدن، ژل حاصله به مدت ۲ ساعت و در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد خشک می‌شود. پودر حاصل توسط هاون چینی به‌صورت ذرات پودری یکنواخت درمی‌آید و به مدت ۲ ساعت و در دمای

۵۵۰ درجه سانتی‌گراد کلسینه می‌شود. از نمونه به‌دست‌آمده آنالیزهای مشابه آزمایش اول گرفته شد. مکانیسم تشکیل ذرات کلسیم تیتانات در روش هیدروترومال این چنین است که در ابتدا در اثر انحلال تیتانیوم ایزوپروپوکساید در آب مقطر، تیتانیوم هیدروکسید تولید می‌شود. به همین ترتیب پس از انحلال هیدروکسید کلسیم در آب مقطر، دو محلول حاوی یون‌های تیتانیوم با ظرفیت مثبت ۴ و کلسیم با ظرفیت مثبت ۲ با یکدیگر مخلوط شده و سل پایدار تشکیل می‌شود. سپس با استفاده از کلسینه‌کردن در دمای بالا فاز کریستالی به دست می‌آید.

## شناسایی نانو مواد تهیه‌شده

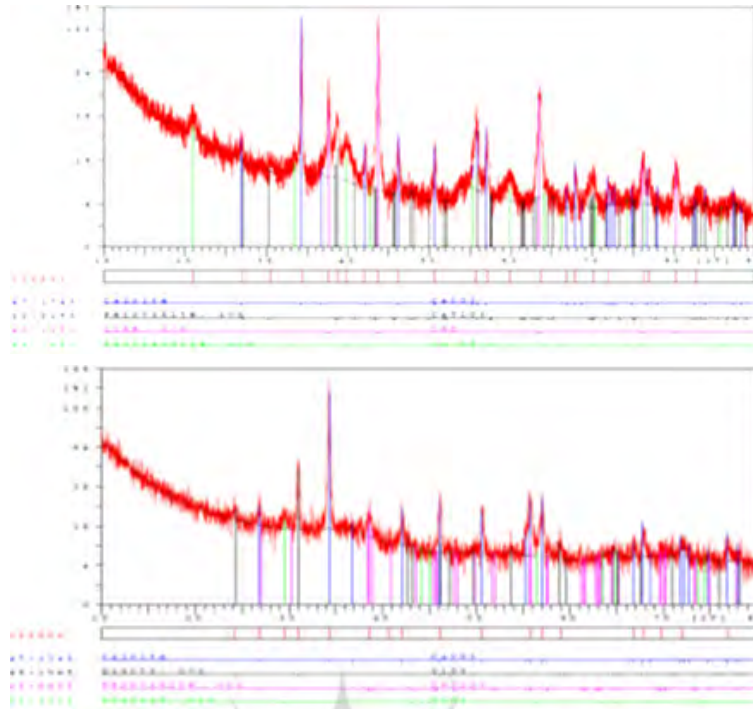
از نمونه به‌دست‌آمده آنالیزهای طیف‌سنج فرسرخ، طیف‌سنج پراش انرژی پرتو ایکس، میکروسکوپ الکترونی روبشی و پراش اشعه ایکس به عمل می‌آید.

### پراش پرتو ایکس

شکل ۳ a, b، الگوی پراش پرتو ایکس به‌دست‌آمده از فاز پروسکیت تیتانات کلسیم و فاز آناتاز تیتانیوم دی‌اکسید را پس از عملیات تکلیس در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. همان‌طور که در این الگو مشاهده می‌شود، انجام عملیات حرارتی در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد به تشکیل ساختار بلورین در پوشش منجر شده است. مقایسه الگوی پراش پرتو ایکس با الگوی استاندارد ۰۴۲۳-۲۴۲ نشان می‌دهد انطباق میان پیک‌های نمونه به‌دست‌آمده با نمونه استاندارد وجود داشته و تیتانات کلسیم با ساختار کریستالی پروکسیت و تیتانیوم دی‌اکسید با ساختار آناتاز تشکیل شده است. شدت‌های نسبی به‌دست‌آمده از الگوی پراش نیز به‌خوبی با نمونه استاندارد هم‌خوانی دارند. شدت بالای قله‌ها در الگوی پراش پرتو ایکس از پوشش تیتانات کلسیم نشان‌دهنده تشکیل ساختار سرامیکی با بلورینگی بالاست. مطالعات انجام‌شده روی پودر تیتانات کلسیم تهیه‌شده در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد با پیش‌سازهای مشابه و متفاوت با پژوهش حاضر حاکی از آن است که انجام عملیات حرارتی در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد برای تولید تیتانات کلسیم خالص با ساختار پروکسیت مناسب است.





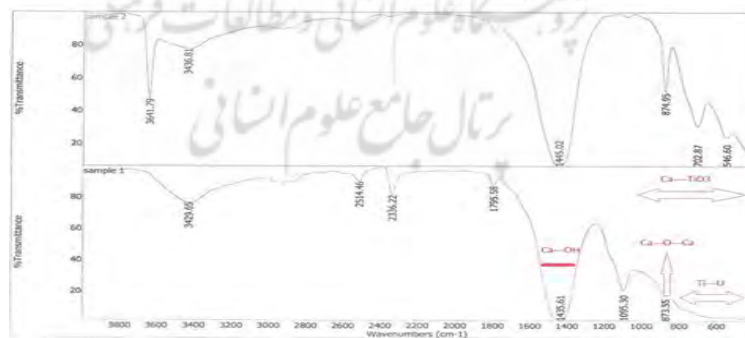


شکل ۳ a و b: طیف‌سنجی پرتو ایکس (پودر سنگ) شکل بالا - b تصویر پایین (آهک خالص)

### طیف‌سنجی مادون‌قرمز تبدیل فوریه (FT-IR)

برای شناسایی نمونه تیتانات کلسیم سنتز شده از آنالیز طیف‌سنجی مادون‌قرمز استفاده شد. در طیف مربوط، باندهای مربوط به تشکیل تیتانات کلسیم حاصل از ترکیب در محدوده بین  $1000-400 \text{ cm}^{-1}$  قرار دارند. پیک پهن در  $3429 \text{ cm}^{-1}$  مربوط به ارتعاشات کششی گروه هیدروکسیل

آب جذب شده روی نمونه نسبت داده شد. پیک موجود در  $873 \text{ cm}^{-1}$  مربوط به ارتعاشات کششی متقارن کلسیم-اکسیژن-کلسیم است. قله مشاهده شده در  $435 \text{ cm}^{-1}$  را می‌توان به ارتعاشات کششی نامتقارن کلسیم-هیدروکسی نسبت داد. پیک پهن موجود در ناحیه بین  $600-400 \text{ cm}^{-1}$  مربوط به ارتعاشات کششی پیوند تیتانیوم-اکسیژن در شبکه نمونه است (شکل ۴ a, b).



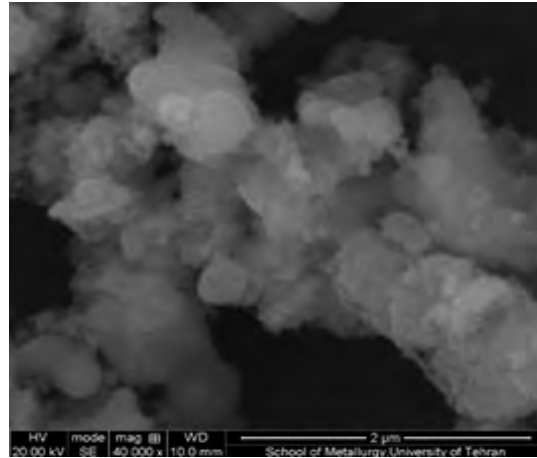
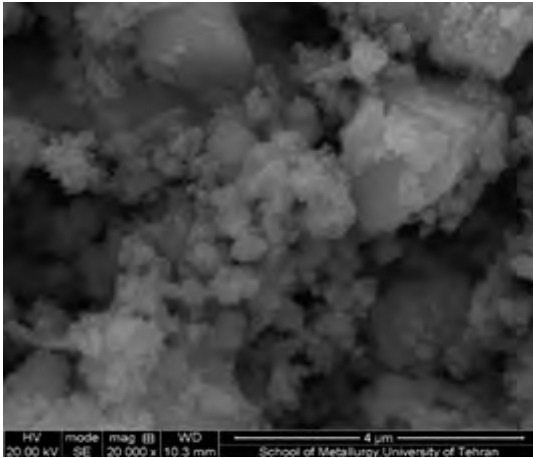
شکل ۴ a و b. (a تصویر بالا - b تصویر پایین) طیف FT-IR

### میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

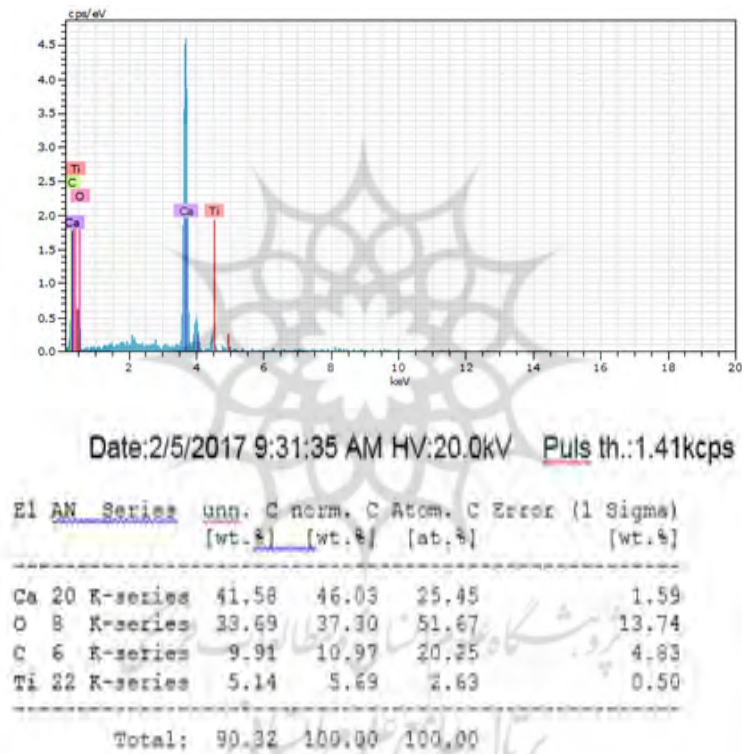
شکل ۵ تصویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح کلی پوشش تیتانات کلسیم و تیتانیوم دی‌اکسید را نشان می‌دهد. بررسی تصاویر در بزرگنمایی‌های کمتر نشان می‌دهد که در مورفولوژی حاصل ذرات کروی و

بیضی شکل به چشم می‌خورد.

از نمونه موردنظر آنالیز EDX به عمل آمد. نتایج حاصل نشان‌دهنده تأیید عناصر موجود در ساختار تیتانات کلسیم و تیتانیوم دی‌اکسید است. براساس انتظار عناصر کلسیم، اکسیژن، کربن و تیتانیوم در نمونه مشاهده می‌شوند (شکل ۶).



شکل ۵ a,b. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی؛ راست: نمونه a (پودر سنگ) و چپ: نمونه b (آهک خالص)



شکل ۶. انرژی اشعه ایکس (EDX) و مشاهده عناصر تیتانیوم و کلسیم به عنوان عناصر اصلی

### کاربرد مواد تهیه شده

**اعمال نانو پوشش تهیه شده روی سنگ میزبان**  
نمونه به دست آمده در ۵ میلی لیتر اتانول به صورت کامل با استفاده از حمام التراسونیک و هم‌وزن مغناطیسی یکنواخت شد و به صورت قطره قطره<sup>۱</sup> و با استراحت ۳ دقیقه‌ای بر سطح سنگ اعمال شد. این عمل در چندین مرتبه انجام گرفت. پس از اعمال ماده مورد نظر، سنگ به

### نتایج آنالیزها

در آزمایش نخست، کلسیت (کربنات کلسیم) به عنوان پیش‌ساز و فاز پروسکیت (کلسیم تیتانات) به همراه آهک (کلسیم اکسید) و آهک آبدار (کلسیم هیدروکسید) در مقیاس نانو تهیه و شناسایی شد. در آزمایش دوم نیز کلسیت (کربنات کلسیم)، فاز پروسکیت (کلسیم تیتانات)، فاز آاناتاز (تیتانیوم دی‌اکسید) تهیه و شناسایی شد.

۱. در مقیاس بزرگ به دلیل ارزان بودن این محصول می‌توان از روش‌های مناسب برای افزودن نانو مواد بهره گرفت.



مدت ۲ هفته در دسیکاتور<sup>۱</sup> قرار داده شد. پس از گذشت زمان مورد نظر، ارزیابی نمونه توسط دستگاه سرشار<sup>۲</sup> برای انجام آزمون سایش سطحی صورت گرفت.

### آزمون سایش سطحی (سرشار)

اندیس سایش سرشار یکی از عمومی‌ترین آزمون‌های آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری سایش است. این اندیس را نخستین بار انستیتو سرشار فرانسه در سال ۱۹۷۰ میلادی معرفی کرد. در سال ۱۹۸۰ نیز اولین مقالات آن منتشر شد. استاندارد انجام این آزمایش در فرانسه با شماره ۱-۴۳۰-۹۴ و در استاندارد سازمان بین‌المللی استاندارد<sup>۳</sup> با شماره دی-۷۶۲۵-۱۰ ارائه شد. شکل‌های زیادی از این آزمایش وجود دارد که همگی بر این اساس کار می‌کنند که پس از محکم کردن نمونه در دستگاه، یک پین فولادی با نوک مخروطی با زاویه نوک (رأس) ۹۰ درجه و تحت بار ۷۰ نیوتن به اندازه ۱۰ میلی‌متر و به مدت زمان ۱ ثانیه روی سطح سنگ کشیده می‌شود. با این کار نوک پین در سنگ فرو رفته و خراش (شیاری)

ایجاد می‌کند. همچنین در اثر سایش، حالت تیزی نوک خود را از دست داده و مقداری پهن می‌شود که باید مقدار آن با میکروسکوپ نوری با بزرگ‌نمایی بیشتر از ۲۴ برابر اندازه‌گیری شود.

### نتایج آزمون سایش سطحی (سرشار)

بعد از قراردادن نمونه سنگ بین فک‌های دستگاه، با ایجاد خراش به طول ۱۰ میلی‌متر در مدت ۱ ثانیه، مقدار پهن‌شدگی نوک پین با میکروسکوپ دینولایت با بزرگ‌نمایی X220 اندازه‌گیری شد. با انجام این آزمایش و تعیین مقدار پهن‌شدگی نوک پین اندیس سایش سرشار طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$CAI = 10 d$$

که در آن:

CAI اندیس سایش سرشار

d قطر پهن‌شدگی نوک پین برحسب میلی‌متر.

براساس مقدار CAI به دست آمده از رابطه فوق می‌توان ساینده‌گی سنگ‌ها را طبق جدول ۲ به دست آورد.

جدول ۲. توصیف ساینده‌گی سنگ‌ها براساس مقدار CAI

توصیف ساینده‌گی سنگ	اندیس سایش سرشار
غیرساینده	۰/۳-۰/۵
کم ساینده	۰/۵-۱
نیمه‌ساینده	۱-۲
ساینده	۲-۴
خیلی ساینده	۴-۶

جدول ۳. نتایج آزمون سایش سطحی از نمونه شاهد

شماره آزمون	سختی پین	قطر پهن‌شده میلی‌متر	وضعیت سطح نمونه	میانگین سایش پین میلی‌متر	اندیس سایش سرشار
۱	۵۵	۰/۰۸۸			
۲	۵۵	۰/۰۶۱	ناهموار	۰/۰۵۴	۰/۵۴
۳	۵۵	۰/۰۱۳			

جدول ۴. نتایج آزمون سایش سطحی از نمونه a (پودر سنگ)

شماره آزمون	سختی پین	قطر پهن‌شده میلی‌متر	وضعیت سطح نمونه	میانگین سایش پین میلی‌متر	اندیس سایش سرشار
۱	۵۵	۰/۰۷۹			
۲	۵۵	۰/۰۸۳	ناهموار	۰/۰۷۷	۰/۷۷
۳	۵۵	۰/۰۶۹			

1. Desiccator
2. Cerchar
3. ASTM



جدول ۵. نتایج آزمون سایش سطحی از نمونه b (آهک خالص)

شماره آزمون	سختی پین	d قطر پهن شده (mm)	وضعیت سطح نمونه	میانگین سایش پین (mm)	اندیس سایش سرشار (CAI)
۱	۵۵	۰/۰۲۹	ناهموار	۰/۰۶۵	۰/۶۵
۲	۵۵	۰/۰۶۹			
۳	۵۵	۰/۰۹۸			

رنگ مشاهده شده به صورت عینی می تواند از مزایای استفاده از پودر سنگ میزبان به عنوان منبع استخراج مواد اولیه برای تهیه نانو مواد به شمار بیاید؛ البته این نانومواد ویژگی های دیگری هم دارند که در تحقیقات آتی می توان با مطالعه گسترده تر به نتایج آن دست یافت.

### تقدیر و تشکر

نویسندگان از تمامی کسانی که آنها را در نوشتن این مقاله یاری رساندند، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

### تعارض در منافع

میان نویسندگان هیچ گونه تعارض در منافع گزارش نشده است.

### فهرست منابع

- Price, C. A., & Doehne, E. (2011). *Stone conservation: an overview of current research*. Getty publications.
- Pinto, A. P. F., & Rodrigues, J. D. (2012). Consolidation of carbonate stones: Influence of treatment procedures on the strengthening action of consolidants. *Journal of Cultural Heritage*, 13(2), 154- 166.
- Warscheid, T., & Braams, J. (2000). Biodeterioration of stone: a review. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 46(4), 343-368.
- Koestler, R. J., & Santoro, E. D. (1988). Assessment of the Susceptibility to Biodeterioration of Selected Polymers and Resins: Final Report Submitted to the Getty Conservation Institute.
- Hansen, E., Doehne, E., Fidler, J., Larson, J., Martin, B., Matteini, M., ... & Teutonico, J. M. (2003). A review of selected inorganic

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش روی هر سه سطح بدون پوشش، سطح پوششی a و سطح پوششی b و جدول ۳ در دسته بندی سنگ کم ساینده قرار می گیرند. همچنین با توجه به نتایج حاصل از سایش سطحی می توان دریافت که میزان مقاومت سطح پوشش داده شده با استفاده از نانو ذرات حاصل از پودر سنگ نمونه نتایج قابل قبول تری نسبت به نانو ذرات ایجاد شده از منبع آهکی دارد.

### نتیجه گیری

بهره گیری از ماده اصلی تشکیل دهنده آثار سنگی باستانی در تهیه نانومواد سازگار و کارآمد با تحقیقات گسترده در آینده به نتایج مثبتی می تواند بینجامد. با این هدف، نانو تیتانیوم دی اکسید با فاز آناتاز و کلسیم تیتانات با فاز پروسکیت از منبع پودر سنگ لاشه محوطه پاسارگاد سنتز شد. نانوذرات به دست آمده شناسایی، ارزیابی و بررسی شدند. با اعمال نانو مواد تهیه روی سنگ نمونه، با وجود ناهمواری های طبیعی روی سطح نمونه های سنگی، میزان گستردگی از تصاویر SEM مشاهده شد. آزمون سایش سطحی انجام شده روی نمونه، مقاومت سطحی دو نمونه مختلف را به دست داد. افزایش مقاومت سطحی در برابر سایش با این روش، در کنار خواص اثبات شده نانو مواد دارای تیتانیوم می تواند برخی آسیب های وارد شده به سنگ های کربناته را کاهش دهند. افزایش مقاومت سطح سنگ پوشیده شده با نانو مواد در برابر سایش به میزان ۰/۲۳ میلی متر می تواند تأثیر نانو مواد را نشان دهد.

همچنین مقایسه میزان مقاومت سطحی نمونه پوشش داده شده با نانو مواد استخراجی از نمونه سنگ لاشه با نمونه پوشش داده شده با نانو مواد استخراجی از آهک خالص تجاری، تفاوت ۰/۱۱ میلی متری را نشان می دهد. این تفاوت اندک به همراه تغییر نکردن



- consolidants and protective treatments for porous calcareous materials. *Studies in Conservation*, 48(sup1), 13- 25.
- Baglioni, P., & Giorgi, R. (2006). Soft and hard nanomaterials for restoration and conservation of cultural heritage. *Soft Matter*, 2(4), 293- 303.
- Sassoni, E., Naidu, S., & Scherer, G. W. (2011). The use of hydroxyapatite as a new inorganic consolidant for damaged carbonate stones. *Journal of Cultural Heritage*, 12(4), 346- 355.
- Favaro, M., Chiurato, M., Tomasin, P., Ossola, F., El Habra, N., Brianese, N., ... & Oriol, G. (2013, September). Alkaline earth alkoxides for conservation treatment of stone and wood in built heritage. In *Proceedings of 3rd European Workshop on Cultural Heritage Preservation (EWCHP) Bolzano, Italy*.
- van der Werf, I. D., Ditaranto, N., Picca, R. A., Sportelli, M. C., & Sabbatini, L. (2015). Development of a novel conservation treatment of stone monuments with bioactive nanocomposites. *Heritage Science*, 3(1), 19-.
- Kapridaki, C., & Maravelaki- Kalaitzaki, P. (2013). TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>-PDMS nano-composite hydrophobic coating with self-cleaning properties for marble protection. *Progress in Organic Coatings*, 76(3- 2), 400- 410.
- Bonini, M., Lenz, S., Giorgi, R., & Baglioni, P. (2007). Nanomagnetic sponges for the cleaning of works of art. *Langmuir*, 23(17), 8681- 8685.
- Li, B., Wang, X., Yan, M., & Li, L. (2003). Preparation and characterization of nano-TiO<sub>2</sub> powder. *Materials Chemistry and Physics*, 78(1), 184- 188.

