Research Paper

# Charactrization and Elemental Analysis of Mina'i Pottery from Alamut Castle Using Scanning Proton Microscope

**Davoud Agha-Aligol [1*], Melika Yazdani [2], Mahmoud Moradi [1], Mohammad Lamei Rashti [1], Seyed Mohammad Amin Emami [3]**

1. Nuclear Science and Technology Research Institute, Physics and Accelerators Research School, Nuclear and Experimental Physics Group, Van de Graaff Laboratory, Tehran, Iran.

2. Art University of Isfahan, Faculty of Handicrafts, Department of Islamic Art, Isfahan, Iran.

3. Art University of Isfahan, Faculty of Conservation and Restoration of Historical Objects, Isfahan, Iran.

## Abstract

The measurement of the elemental composition of historical pottery is of particular importance. By examining the elemental composition of the body and glaze of historical pottery, one can obtain valuable information regarding the determination of raw materials and their diversity, as well as techniques employed in the manufacturing of these historical objects. In this research, 12 samples of the mina'i pottery from Alamut Castle, dating back to the 11$^{th}$ to 13$^{th}$ centuries AD, have been studied using ion beam analysis techniques. In this study, the elemental composition of the body, various pigments used in the paintings, and also the baseglaze have been measured using the micro-PIXE. Additionally, the thickness of the gold layer applied on the surfaces of some of these potteries has also been studied using the micro-RBS method. The purpose of conducting this research is to provide appropriate answers to the following questions: What raw materials have been used in the manufacturing of the body and glaze of these objects? What sources have supplied the raw materials used as fluxes? Also, what coloring agents and elements have been used to create different colors in the baseglaze and decorative paintings? Measuring the thickness of the gold layer used in these decorations is also one of the goals of this research work. Based on the results obtained from the elemental composition of the body and glaze of these potteries, it can be concluded that different sources of silica and fluxes have been used in the manufacturing of Alamut Castle mina'i potteries. Also, the coloring agents in producing red, white, blue, and turquoise pigments have been identified as Fe, Sn, Co and Cu elements, respectively. Moreover, the micro-RBS shows that the thickness of the gold layer used in decorations varies from 300 to 800 nanometers in the samples.

**Keywords:** Mina'i; Alamut Castle; Elemental composition; Micro-PIXE; Gilding layer.

**Knowledge of Conservation and Restoration**

Vol. 7(1) No.19
May 2024

https://kcr.richt.ir

Pages: 55 to 74

Corresponding Author

**Davoud Agha-Aligol**

Nuclear Science and Technology Research Institute, Physics and Accelerators Research School, Nuclear and Experimental Physics Group, Van de Graaff Laboratory, Tehran, Iran.

Email

daghaaligol@aeoi.org.ir.

Copyright © 2020,Knowledge of Conservation and Restoration. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-noncommercial 4.0. International License which permits copy and redistribute the material just in noncommercial usages, provided the original work is properly cited.

مقاله پژوهشی

# مشخصه‌یابی و آنالیز عنصری سفال‌های مینایی دژ الموت با استفاده از میکروسکوپ روبشی پروتون

**داود آقاعلی گل[1*]، ملیکا یزدانی[2]، محمود مرادی[1]، محمد لامعی رشتی[1]، سید محمد امین امامی[3]**

۱. پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، گروه فیزیک هسته‌ای و تجربی، آزمایشگاه واندوگراف، تهران، ایران.

۲. دانشگاه هنر اصفهان، دانشکده صنایع دستی، گروه هنر اسلامی، اصفهان، ایران.

۳. دانشگاه هنر اصفهان، دانشکده حفاظت و مرمت، گروه مرمت اشیا تاریخی و فرهنگی، اصفهان، ایران.

## چکیده

شناسایی و اندازه‌گیری عناصر سازنده ترکیبات سفالینه‌های تاریخی از اهمیت خاصی برخوردار است. با بررسی ترکیبات عنصری بدنه و لعاب زمینه سفالینه‌های تاریخی می‌توان اطلاعات بسیار ارزنده‌ای در زمینه تعیین مواد اولیه مورد استفاده در ساخت و تنوع آن‌ها و همچنین فن‌شناسی این اشیاء تاریخی به دست آورد. در این پژوهش ۱۲ نمونه از سفال‌های مینایی و لاجوردینه دژ الموت که قدمت آن‌ها به سده ۶-۷ هجری قمری برمی‌گردد، با استفاده از روش‌های آنالیز با باریکه‌ی یونی مطالعه شده است. در این مطالعه ترکیبات عنصری بدنه، رنگدانه‌های مختلف استفاده شده در نقاشی‌ها و همچنین لعاب زمینه با استفاده از روش میکروپیکسی اندازه‌گیری شده‌اند. همچنین ضخامت لایه زراندود به کار رفته بر روی سطوح تعدادی از این سفال‌ها نیز با استفاده از روش Micro-RBS مطالعه شده‌اند. مهم‌ترین اهداف پژوهش پیش رو، دستیابی به عناصر تشکیل‌دهنده و مواد اولیه استفاده‌شده در ساخت بدنه، لعاب زمینه و نوع رنگدانه‌ها در ترسیم نقوش سفال‌های مینایی و لاجوردینه است. اندازه‌گیری ضخامت لایه زراندود به‌کار رفته در این تزیینات نیز یکی دیگر از اهداف پژوهش است. براساس نتایج به‌دست آمده از بررسی ترکیبات عنصری بدنه و لعاب زمینه این سفال‌ها می‌توان دریافت که در ساخت نمونه‌های دژ الموت از منابع مختلف سیلیس و گدازآورها استفاده شده است. همچنین با بهره‌گیری از نقشه توزیع عنصری به‌دست آمده از روش میکروپیکسی، عامل عنصری ایجاد و تولید رنگدانه‌های قرمز، سفید، لاجوردی و فیروزه‌ای به ترتیب؛ آهن، قلع، کبالت و مس مشخص شده‌اند. ضخامت لایه زراندود استفاده شده در تزیینات نیز از ۳۰۰ تا ۸۰۰ نانومتر در نمونه‌ها متغیر است.

**واژگان کلیدی:** سفال مینایی، لاجوردینه، دژ الموت، ترکیبات عنصری، میکروپیکسی، لایه زراندود.

فصل‌نامه دانش حفاظت و مرمت

سال هفتم، شماره ۱
شماره پیاپی ۱۹، بهار ۱۴۰۳

https://kcr.richt.ir

صفحات: ۵۵ تا ۷۴

نویسنده مسئول

**داود آقاعلی گل**

پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، گروه فیزیک هسته‌ای و تجربی، آزمایشگاه واندوگراف، تهران، ایران.

رایانامه

daghaaligol@aeoi.org.ir.

دسترسی به این مقاله برای همگان آزاد است. هرگونه استفاده غیرتجاری از آن در صورت ارجاع مناسب، مجاز شناخته می‌شود.

## مقدمه

سفال مینایی جزء گروهی از سرامیک‌های لعاب‌دار دوره اسلامی است که برای تزیینات آن از ترسیم نقوش بر روی لعاب زمینه سفید یا فیروزه‌ای استفاده شده است. این نقوش شامل تصاویر متنوعی از گیاهان، جانوران و انسان‌ها است. این نوع از سفال‌ها مدت کوتاهی در دوران میانی اسلامی (نیمه دوم قرن دوازدهم میلادی) به‌طور گسترده در ایران و با اقبال کمتری در کشورهای دیگری مانند سوریه و ترکیه رواج داشته است (Mason et al., 2001). درباره‌ی مراکز ساخت سفال مینایی و همچنین دوره‌ی زمانی این نوع از سفال‌ها نظرات مختلفی توسط پژوهشگران اظهار شده است، ولی به‌طور قطع خاستگاه اصلی آن در ایران و کاشان به ثبت رسیده است (Aga-Oglu,1946; Lane,1958,pp.41-42). اخیراً در مقاله گاه‌نگاری سفال‌های مینایی براساس نمونه‌های کتیبه‌دار، به‌طور مفصل توسط یزدانی و همکاران مورد بررسی قرار گرفته است که براساس نتایج به دست آمده می‌توان محدوده زمانی و نیز مکان‌های ساخت این نوع سفال‌ها را بهتر تخمین زد (Yazdani et al., 2017). از نظر پژوهشگران، در ایران، مکان‌های مختلفی به‌عنوان محل تولید سفال مینایی به‌شمار می‌روند که در بین آن‌ها سه شهر کاشان، ری و ساوه بیشتر مورد تأیید پژوهشگران است (Kambakhshfard, 2000,pp.449-470). براساس سفال‌های مینایی کتیبه‌دار، شکوه نقوش پرکار در این سفال تقریباً شصت سال ادامه یافت و پس از آن، سفال‌های مینایی با نقوش ساده‌تر و لعاب زمینه‌ی آبی و لاجوردی شکل‌گرفت که این‌گونه سفال لاجوردینه نامیده‌شده و به‌عنوان تداومی از شیوه مینایی معرفی شده است (Yazdani et al., 2015). کاس و همکارانش با بررسی چند سفال لاجوردینه بر این نظر هستند که گستره‌ی رنگی لعاب زمینه این آثار را آبی تیره تا لاجوردی تشکیل می‌دهد که دارای یک فرایند پخت دو مرحله‌ای تکمیلی مشابه مراحل پخت مینایی هستند (Koss et al., 2009).

ویلسن در مورد شکل‌گیری سفال لاجوردینه در ایران می‌نویسد: پس از آنکه محصولات مینایی کاشان شهرت زیاد یافت، هنرمندان دست به تولید انبوه زدند و به‌تدریج سفال مینایی از نظر جنس، کیفیت پخت، طراحی نقوش و غیره رو به افول نهاد- و گونه‌ای دیگر از رو لعابی با نام لاجوردینه و با تزیینات ساده‌تر جایگزین آن شد (Wilson, 1992,pp.144). همچنین می‌توان گفت که فرآیند گذر مینایی به لاجوردینه، آزادی اجتماعی هنرمند برای بهره‌مندی از خلاقیت هنرمندان، تنوع مخاطبان و تولیدات، پیشرفت و همگام شدن با جامعه برای پاسخ‌گویی به سلیقه و تقاضا در بازار بوده است (Koss et al., 2009).

در پژوهش پیش‌رو ۱۲ نمونه سفال مینایی و لاجوردینه، شامل ۸ نمونه سفال مینایی با شناسه A1, A2, A3, A4, A5, A8, A10 و A11 و ۴ نمونه سفال لاجوردینه با شناسه A6، A7، A9 و A12 بررسی شده‌اند. آنالیز و شناسایی ترکیب عنصری نمونه‌های باستانی و تاریخی با انجام آنالیزهای دستگاهی مختلفی مانند: Micro-PIXE،XRF و SEM-EDX امکان پذیراست (Henderson, 2000,pp. 14-21). در این بین، آنالیز عنصری سفالینه‌های تاریخی با استفاده از میکروپیکسی به‌دلیل برخی از مزایای این روش مانند دقت اندازه‌گیری بالا و شناسایی هم‌زمان تمام عناصر بالاتر از سدیم با دقت ppm، یکی از بهترین و پرکاربردترین روش‌ها در شناسایی ترکیبات عنصری این نمونه‌ها است (Nastasi et al., 2014, pp.157-160 12).

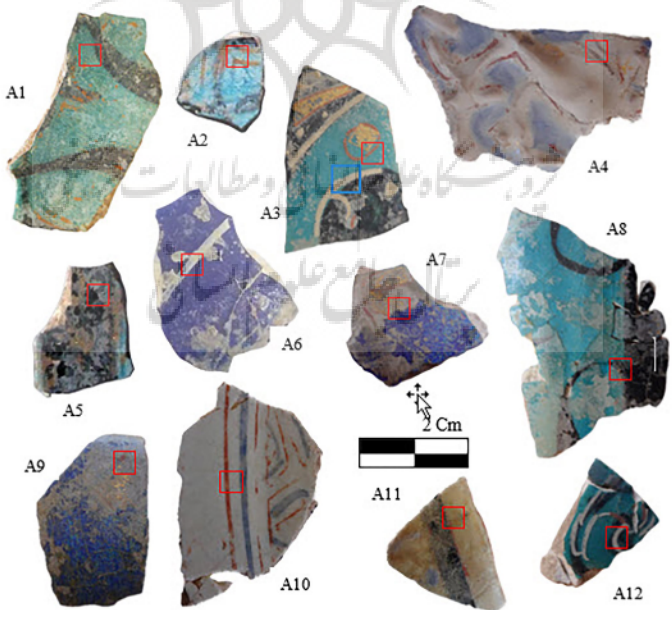
نمونه‌های موردنظر، در این پژوهش که از کاوش‌های علمی فصل هفتم در دژ الموت و زیر نظر دکتر حمیده چوبک به دست آمده، با استفاده از میکروسکوپ روبشی پروتون مطالعه شده است. توجه به نتایج آنالیزهای عنصری و ویژگی‌های منطقه‌ی الموت می‌تواند، نتایج منحصربه‌فردی را در مورد تولید این آثار در اختیار قرار دهد. الموت نام یکی از بخش‌های کوهستانی شمال قزوین است که از سمت شمال به کوهستان مازندران، از جنوب به طالقان، از شرق به گردنه معروف به شیربشم و از غرب به رودبار محمد زمان‌خانی یا خشکه رودبار مرتبط است. دژ الموت نیز بر سر کوهی در شمال شرقی گازرخان واقع شده است (Sotūdeh,1955).

دژ الموت در دیلم در حدود ۳۵ کیلومتری شمال شرقی قزوین در منطقه رودبار قرار دارد. این دژ بر فراز صخره‌ای بلند و دره‌ای حاصلخیز در دامنه‌ی جنوبی کوه‌های البرز مرکزی ساخته شده است. دسترسی به قلعه ظاهراً تنها از طریق مسیری باریک، شیب‌دار و پر پیچ‌وخم در جبهه شمالی صخره الموت امکان‌پذیر بوده است (Daftary, 2007, pp.317-318). این دژ با شماره ۷۲۵۲ در فهرست آثار ملی ایران به ثبت رسیده است. از دید چوبک، از کاوش‌های فصل هفتم در این محوطه باستان‌شناسی علاوه بر سازه‌ها و آرایه‌های معماری، سفال‌های بی‌شماری همانند زرین‌فام، مینایی، لاجوردی، قلم‌مشکی و نقاشی زیر لعابی به دست آمده که متعلق به سده پنجم تا سده هفتم هجری قمری است که تاکنون مورد پژوهش قرار نگرفته است. به گفته ایشان، جدیدترین یافته‌ها در زمینه سرامیک مینایی از کاوش‌های اخیر در دژ الموت به دست آمده است. از دیدگاه وی تاکنون شواهدی که نشان‌دهنده تولید آثار در این دژ باشد، یافت نشده است و به‌دلیل موقعیت سیاسی دژ الموت، احتمال وارداتی بودن این آثار وجود دارد(Choubak, 2009).

هدف از بررسی و مطالعه‌ی این نمونه‌ها، اندازه‌گیری ترکیبات عنصری بدنه، لعاب زمینه و رنگدانه‌های مختلف استفاده‌شده در تزیینات سطحی این نمونه‌ها است. در اغلب این نمونه‌ها علاوه‌بر نقاشی‌ها و رنگ‌های مختلف، از لایه‌های نازک طلا نیز برای تزیینات سطحی استفاده شده است که اندازه‌گیری ضخامت لایه‌های طلا بر روی سطوح این نمونه‌ها نیز مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

## مشخصات نمونه‌های مورد بررسی

در این پژوهش با توجه به ریخت‌شناسی، شکل ظاهری و تزیینات سطحی سفالینه‌ها، ۱۲ نمونه در دسترس مینایی و لاجوردینه با توجه به حداکثر تنوع، جهت انجام مطالعات آزمایشگاهی انتخاب و مورد بررسی قرار گرفته است. در اغلب این نمونه‌ها علاوه‌بر نقاشی‌های مختلفی که بر سطح نمونه‌ها ترسیم‌شده، از لایه‌ی زراندود و برجسته نیز برای تزیین استفاده شده است. تصاویر نمونه‌های مطالعاتی این پژوهش در شکل ۱ مشاهده می‌شود که نواحی مختلف مورد آنالیز با استفاده از مربع قرمز رنگ نشان داده شده است.




شکل ۱. تصاویر نمونه‌های مورد بررسی و نواحی مختلف آنالیز که با استفاده از مربع در تصاویر نشان داده شده است.

Figure 1. Images of the samples under investigation and the various analysis areas, which are indicated using squares in the sample images.

## روش پژوهش

با استفاده از باریکه‌ی میکرونی از ذرات پرانرژی می‌توان توانایی‌ها و قابلیت‌های آنالیز با استفاده از باریکه‌ی یونی متداول را به میزان زیادی افزایش داد. در این حالت با استفاده از باریکه میکرونی می‌توان سطح نمونه مورد بررسی را جاروب (اسکن) کرد و تصویری دو بعدی از توزیع عنصری موجود در نمونه را با استفاده از روش‌های مختلف آنالیز با باریکه‌ی یونی به دست آورد (Nastasi et al., 2014, pp.157-160). در این پژوهش از روش‌های micro-PIXE و micro-RBS برای مطالعه سفالینه‌های مینایی و لاجوردینه دژ الموت استفاده شده است. آنالیز عنصری به روش میکروپیکسی یکی از روش‌های متداول در آنالیز عنصری مواد است. میکروپیکسی یا "گسیل پرتو X در اثر برانگیختگی با باریکه‌ی میکرونی پروتون" روش توانمندی برای آنالیز بس‌عنصری (از سدیم تا اورانیم) نمونه‌های مختلف است. در روش میکروپیکسی، نمونهٔ مورد بررسی تحت تابش باریکه‌ی میکرونی پروتون قرار می‌گیرد. در اثر برخورد پروتون با اتم هدف، پرتو X مشخصه‌ای گسیل می‌شود که انرژی این پرتو X، نوع عنصر موجود در نمونه و تعداد پرتوهای X با انرژی معین، غلظت عنصر در نمونه را مشخص می‌کند (Johansson & Campbell, 1989, pp.101-104). همچنین با استفاده از باریکه‌ی میکرونی می‌توان برای لایه‌های نازکی که باریکه‌ی یونی قادر به عبور از آن لایه هستند، اطلاعات مفیدی در مورد ضخامت لایه‌های نازک و همچنین توزیع عمقی عناصر تشکیل‌دهنده این لایه‌ها به‌دست آورد که به این روش، micro-RBS یا "طیف‌نگاری با استفاده از پراکندگی ذرات برگشتی" گفته می‌شود. این روش آنالیز، بر پایه آشکارسازی ذرات یونی که به طور کشسان به‌وسیله هسته‌های اتم‌های موجود در نمونه مورد آنالیز پراکنده می‌شوند استوار است (Jeynes & Colaux, 2016). در این روش باریکه‌ای از یون‌ها، با انرژی مشخص به نمونه مورد آنالیز برخورد کرده و در عمق نمونه حرکت می‌کنند و این یون‌های فرودی در اثر برخورد با اتم‌های نمونه هدف، انرژی خود را به‌تدریج در طول مسیرشان از دست داده و پراکنده می‌شوند. یون‌های پراکنده شده در جهت عقب توسط آشکارساز حساس به ذره که به آن آشکارساز سد سطحی گفته می‌شود، آشکار شده و از طیف به‌دست آمده اطلاعات مفیدی در مورد جنبه‌های مختلف نمونه هدف به دست می‌آید (Beck et al., 2011).

در این پژوهش باریکه‌ی پروتون با انرژی 2MeV و با شدتی در حدود 50pA که توسط شتاب‌دهنده واندوگراف 3MV آزمایشگاه واندوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای تولید می‌شود، استفاده شده است. قطر باریکه‌ی پروتون با استفاده از دستگاه میکروباریکه‌ی یونی ساخته شده توسط شرکت آکسفورد در این آزمایش در حدود ۱۰ میکرومتر تنظیم می‌شود. برای آشکارسازی اشعه X از آشکارساز(Si Li) که در زاویه ۱۳۵ درجه نسبت به پرتوهای پروتون فرودی قرارگرفته و دارای قدرت تفکیک 150eV است، استفاده شده است. همچنین از آشکارساز سد سطحی سیلیکون که در زاویه ۱۶۰ درجه نسبت به امتداد باریکه‌ی فرودی قرار می‌گیرد برای آشکارسازی پروتون‌هایی که به عقب پراکنده می‌شود استفاده شده است. برای محاسبه میزان غلظت و درصد وزنی عناصر تشکیل‌دهنده بدنه و رنگدانه‌های مختلف استفاده‌شده در نقاشی‌ها و همچنین لعاب‌های به‌کار رفته روی بدنه سفال‌ها طیف‌های به دست آمده، وارد کد GUPIXWIN می‌شود. این کد با پردازش غیرخطی طیف به دست آمده و با استفاده از پارامترهای فیزیکی معلوم مانند شرایط آزمایش، نوع آشکارساز، اتاقک آزمایش، سطح مقطع یونیزاسیون عناصر مختلف و با انجام اصلاحات لازم، میزان غلظت وزنی عناصر تشکیل‌دهنده نمونه مورد بررسی را محاسبه می‌کند (Fernandes et al., 2018).

## یافته‌ها و بحث

### نتایج آنالیز عنصری بدنه

نتایج آنالیز عنصری بدنه سفال‌های آنالیزشده از دژ الموت با استفاده از روش میکروپیکسی بر حسب درصد وزنی و به‌صورت اکسید در جدول ۱ ارائه شده است. عناصری که در همه نمونه‌های آنالیز شده اندازه‌گیری شده است، شامل: اکسید سدیم ($Na_2O$)، اکسید منیزیم ($MgO$)، اکسید آلومنیوم ($Al_2O_3$)،

اکسید سیلیسیم ($SiO_2$)، اکسید پتاسیم ($K_2O$)، اکسید کلسیم ($CaO$)، اکسید تیتانیم ($TiO_2$)، اکسید منگنز ($MnO$) و اکسید آهن ($Fe_2O_3$) است. همچنین اکسید فسفر ($P_2O_5$)، اکسید گوگرد ($SO_3$)، کلر ($Cl$)، اکسید مس ($Cu_2O$)، اکسید استرانسیم ($SrO$) و اکسید سرب ($PbO$) نیز در برخی از نمونه‌ها اندازه‌گیری شده است. بر پایه نتایج ترکیبات عنصری بدنه، مشخص است که در نمونه‌های آنالیز شده به‌غیراز ۳ نمونه، بقیه نمونه‌ها دارای ترکیبات عنصری تقریباً یکسانی هستند و بدنه این نمونه‌ها در گروه ترکیبات غیر آهکی قرار می‌گیرند. برای بررسی تنوع و نوع مواد اولیه استفاده شده در بدنه اصلی سفالینه‌ها براساس عناصر شاخص و تعیین‌کننده، از نمودارهای پراکندگی دو بعدی براساس نتایج ترکیبات عنصری ارائه‌شده در جدول ۳ استفاده می‌شود.

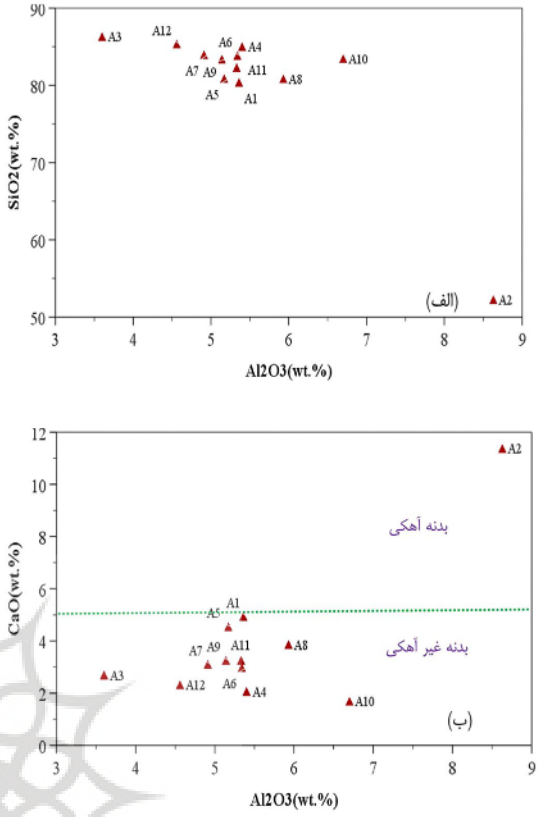
همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، اکسید سیلیسیم (سیلیس) عمده‌ترین ماده‌ی تشکیل‌دهنده بدنه سفال‌های مینایی و لاجوردینه دژ الموت است. برای تهیه ماده‌ی اولیه سیلیس در سفالینه‌های تاریخی معمولاً از خاک رس و یا خمیر سنگ[1] استفاده می‌شده است (Mason, 2004,pp.5-17). برای بررسی تفاوت‌های موجود در ترکیبات تشکیل‌دهنده و منابع سیلیس استفاده‌شده در سفالینه‌های آنالیز شده از محوطه‌ی تاریخی دژ الموت، تغییرات درصد وزنی عناصر اصلی تشکیل‌دهنده بدنه این سفالینه‌ها بررسی شده است. مبنا و فرض اصلی این ره‌یافت به این‌صورت است که در نمونه‌های تولید شده از یک نوع ماده اولیه سیلیس، درصد وزنی عناصری که وجود آن‌ها از سیلیس ناشی می‌شود، دارای ترکیبات عنصری تقریباً مشابهی خواهند بود (Pincé et al., 2019). بر این اساس، در شکل۲-الف تغییرات درصد وزنی اکسید سیلیسیم برحسب اکسید آلومینیم و در شکل۲-ب تغییرات درصد وزنی اکسید آلومینیم برحسب اکسید کلسیم رسم شده است.

با توجه به شکل۲-الف مشخص است که میزان درصد وزنی سیلیس در تمام نمونه‌ها به‌جز نمونه A2 بین ۸۰-۸۶ درصد و میزان اکسید آلومینیم در این نمونه‌ها بین ۳-۷ درصد تغییر می‌کند. در نمونه A2 نیز میزان سیلیس ۵۲ درصد و میزان اکسید آلومینیم حدود ۹ درصد است که در این نمونه از

جدول ۱. ترکیبات عنصری بدنه سفالینه‌های مینایی و لاجوردینه دژ الموت به‌صورت اکسید و بر حسب درصد وزنی (wt%) با استفاده از روش میکروپیکسی.

Table 1. Elemental compositions of the body of Mina'i and Lajvardina pottery from Alamut Castle in the form of oxides and in terms of weight percentage (wt%) using the micro-PIXE method.

| PbO | SrO | $Cu_2O$ | $Fe_2O_3$ | MnO | $TiO_2$ | CaO | $K_2O$ | Cl | $SO_3$ | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | MgO | $Na_2O$ | Sample |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| - | - | 0.13 | 2.8 | 0.09 | 0.37 | 4.88 | 0.74 | - | - | 80.2 | 5.36 | 3.28 | 2.15 | A1 |
| - | 0.06 | 0.09 | 4.11 | 0.06 | 0.42 | 11.32 | 1.39 | 0.16 | 18.4 | 52.06 | 8.63 | 2.5 | 0.76 | A2 |
| - | - | 0.09 | 1.17 | 0.03 | 0.18 | 2.64 | 1.05 | - | - | 86.13 | 3.6 | 3.1 | 2.01 | A3 |
| 0.79 | 0.17 | 0.02 | 1.26 | 0.02 | 0.81 | 2.01 | 0.95 | 0.23 | - | 84.83 | 5.4 | 0.72 | 2.79 | A4 |
| - | 0.16 | 0.08 | 2.29 | 0.05 | 0.3 | 4.49 | 0.69 | 0.11 | - | 80.69 | 5.17 | 3.4 | 2.51 | A5 |
| - | - | 0.02 | 1.31 | 0.03 | 0.2 | 2.92 | 0.94 | 0.07 | - | 83.67 | 5.34 | 2.91 | 2.59 | A6 |
| - | - | 0.03 | 1.74 | 0.05 | 0.17 | 3.05 | 1.11 | - | - | 83.8 | 4.91 | 2.95 | 2.19 | A7 |
| - | 0.11 | 0.07 | 1.55 | 0.03 | 0.17 | 3.81 | 0.75 | 0.11 | 0.72 | 80.66 | 5.93 | 3.34 | 2.75 | A8 |
| - | - | 0.03 | 1.19 | 0.03 | 0.12 | 3.2 | 1.39 | 0.14 | - | 83.21 | 5.14 | 3.15 | 2.4 | A9 |
| 0.31 | - | - | 1.38 | 0.02 | 1.04 | 1.63 | 1.47 | 0.33 | - | 83.27 | 6.7 | 0.9 | 2.95 | A10 |
| - | - | - | 1.57 | 0.02 | 0.17 | 3.2 | 1.37 | - | 0.27 | 82.1 | 5.33 | 3.67 | 2.3 | A11 |
| - | - | 0.04 | 1.09 | 0.02 | 0.12 | 2.26 | 0.75 | 0.09 | - | 85.17 | 4.56 | 3.42 | 2.48 | A12 |

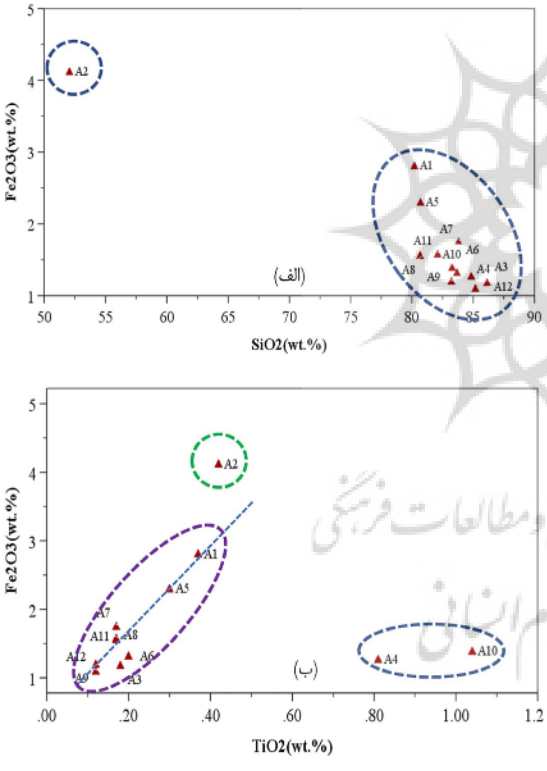



شکل۲. الف) تغییرات درصد وزنی اکسید سیلیسیم بر حسب اکسید آلومینیم ، ب) تغییرات درصد وزنی اکسید آلومینیم بر حسب اکسید کلسیم، در بدنه اصلی نمونه‌های آنالیز شده از دژ الموت.

Figure 2. a) Variations in the weight percentage of silicon oxide based on aluminum oxide, b) Variations in the weight percentage of aluminum oxide based on calcium oxide, in the main body of the analyzed samples from Alamut Castle.

منابع خاک رس با درصد وزنی بالایی از آلومینا استفاده شده است (Tite, Wolf, & Mason, 2011). همچنین در شکل۲-ب مشخص است که در تمام نمونه‌های آنالیز شده به‌جز نمونهA2 میزان اکسید کلسیم بین ۲-۵ درصد متغیر است. اما در نمونهA2 میزان اکسید کلسیم حدود ۱۲ درصد وزنی است. بنابراین، مشاهده می‌شود که درصد وزنی اکسید کلسیم در اکثر این نمونه‌ها بسیار پایین و کمتر از ۵ درصد وزنی است که این نشان‌دهنده این است که از منابع سیلیس غیر آهکی در ساخت بدنه این نمونه‌ها استفاده شده است. (Holakooei et al., 2013). اما مقدار بالای اکسید کلسیم در بدنه نمونهA2 نشان می‌دهد که در ساخت بدنه این نمونه از منابع آهکی استفاده شده است (De Bonis et al., 2017).

در شکل۳-الف نیز مشخص است که براساس تغییرات اکسید آهن برحسب اکسید سیلیسیم ترکیبات بدنه نمونه‌های آنالیزشده یکسان هستند. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود به‌جز نمونه A2 در غالب نمونه‌های آنالیزشده میزان اکسید آهن کمتر از ۱/۵ درصد و در برخی از نمونه‌ها بین ۱-۳ درصد متغیر است. اما در نمونه A2 اکسید آهن بیشتر از ۴ درصد وزنی است. از طرف دیگر همان‌گونه که در شکل۳-ب براساس تغییرات درصد وزنی اکسید تیتانیم بر حسب




شکل۳. الف) تغییرات درصد وزنی اکسید سیلیسیم بر حسب اکسید آهن ، ب) تغییرات درصد وزنی اکسید تیتانیم بر حسب اکسید آهن، در بدنه اصلی نمونه‌های آنالیز شده از دژ الموت.

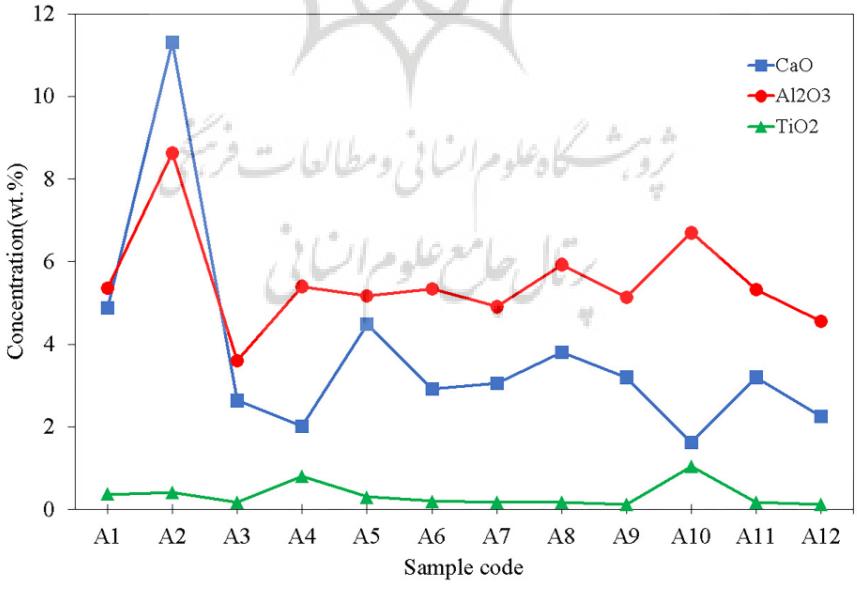
Figure 3. a) Variations in the weight percentage of silicon oxide based on iron oxide, b) Variations in the weight percentage of titanium oxide based on iron oxide, in the main body of the analyzed samples from Alamut Castle.

اکسید آهن مشاهده می‌شود، به‌نظر می‌رسد که دو نمونه A4 وA10 نیز با بقیه نمونه‌های آنالیز شده متفاوت باشند و این دو نمونه براساس تغییرات این دو اکسید در گروه جداگانه‌ای قرار گرفته‌اند. همچنین همان‌طور که در شکل ۳ –ب نشان داده شده است. براساس تغییرات درصد وزنی اکسید آهن برحسب اکسید تیتانیم ۹ نمونه از مجموع نمونه‌های آنالیزشده، تقریباً حول یک خط قرار گرفته‌اند و همبستگی بسیار قوی بین این دو اکسید در ترکیبات بدنه مشاهده می‌شود که این همبستگی قوی نشان می‌دهد که ماده اولیه سیلیس استفاده‌شده در این نمونه‌ها یکسان هستند و با احتمال بسیار زیاد این ۹ نمونه با استفاده از ماده اولیه یکسانی تولید شده‌اند (Hamdan et al., 2014).

در شکل ۴، تغییرات درصد وزنی اکسید کلسیم، اکسید آلومینیم و اکسید تیتانیم بدنه نمونه‌های آنالیزشده از دژ الموت در یک نمودار خطی نشان داده شده است. در این نمودار، در صورتی‌که درصد وزنی عناصر در نمونه‌های آنالیزشده یکسان باشند، تغییرات هر عنصر برای تمام نمونه‌های آنالیزشده باید به‌صورت یک خط تقریباً افقی باشد، اما همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود برای نمونه‌های A4 ، A2و A10 در این نمودارها انحراف از خط راست مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده متفاوت بودن این ۳ نمونه از بقیه نمونه‌ها است.

## نتایج آنالیز عنصری لعاب زمینه و رولعابی‌ها

همان‌طور که در تصاویر نمونه‌های آنالیزشده مشاهده می‌شود، در سفال‌های مینایی، نقوش مختلفی بر روی لعاب‌های سفید (کِرم)، فیروزه‌ای یا لاجوردی در سفال لاجوردینه ترسیم شده است و همچنین برخی از نواحی نقوش با رنگ‌دانه‌های قرمز یا مشکی قلم‌گیری شده‌اند. علاوه‌بر این، در برخی از این نمونه‌ها نیز از لایه‌ی طلا به‌عنوان تزیین سطحی استفاده شده است. نتایج آنالیز عنصری لعاب زمینه‌ی این نمونه‌ها که با استفاده از میکروپیکسی به دست آمده است، در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌طورکه مشخص است، از نظر ماده گدازآور استفاده‌شده در لعاب زمینه در این نمونه‌ها، اکسید سدیم و اکسید سرب با درصد وزنی متفاوتی مشاهده می‌شود. بر پایه‌ی اندازه‌گیری ترکیبات عنصری لعاب‌ها احتمالاً




شکل۴. تغییرات درصد وزنی اکسید کلسیم، اکسید آلومینیم و اکسید تیتانیم بر حسب درصد وزنی در بدنه نمونه‌های آنالیز شده از دژ الموت.

Figure 4. Variations in the weight percentage of calcium oxide, aluminum oxide, and titanium oxide based on weight percentage in the body of the analyzed samples from Alamut Castle.

غالب لعاب‌های زمینه در این سفالینه‌ها از نوع لعاب‌های قلیایی هستند، اما میزان اکسید سدیم موجود در این نمونه‌ها، به‌دلیل تدفین طولانی‌مدت در زمین از سطح نمونه‌ها تهی شده است و میزان اکسید سدیم اندازه‌گیری‌شده در لعاب‌ها کمتر از مقدار واقعی است (Weber et al., 2002). همچنین تعدادی از این نمونه‌ها از نوع لعاب‌های سرب و قلع هستند که این نمونه‌ها شامل نمونه‌های A4، A10 وA12 است (Mason et al., 2001). در دو نمونه از این گروه، اکسید سرب بین ۱۰-۲۸ درصد متغییر است. همچنین در این نمونه‌ها اکسید قلع بین ۵-۲۲ درصد وزنی تغییر می‌کند. علاوه‌بر این همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود سیلیس عنصر عمده تشکیل‌دهنده این لعاب‌ها است که برای تهیه آن از شن و ماسه کف رودخانه‌ها و یا سنگ چخماق (رگه‌های کوارتز خالص) استفاده می‌شده است. همچنین ترکیباتی مانند اکسید کلسیم نیز ممکن است از طریق مواد گدازآور مانند اکسید سدیم و یا از طریق موادی مانند پودر استخوان یا سنگ آهک وارد لعاب‌ها شده باشد. اکسید آلومینیم نیز ممکن است از طریق ناخالصی موجود در سیلیس وارد ترکیبات لعاب شده باشد. عناصر دیگری نیز در ترکیبات لعاب وجود دارند که برخی از آن‌ها مانند اکسید فلزات واسطه مانند اکسید مس، اکسید آهن و اکسید کبالت به‌طور آگاهانه و به‌منظور ایجاد رنگ دلخواه و به‌عنوان رنگ‌دانه به لعاب زمینه اضافه شده‌اند (Mason, 2004, pp130-136). همچنین ترکیبات $SO_3$، $P_2O_5$ و Cl از جمله ترکیبات شیمیایی هستند که موجودیت این عناصر به‌دلیل ترکیب شیمیایی محیط خاکی نیز می‌تواند باشد. سولفات‌ها و کلریدها بیشتر به‌صورت ترکیبات با منشأ شوره و یا محیط‌های مرطوب ایجاد می‌شوند که علت این امر به‌دلیل تدفین طولانی مدت نمونه‌ها در درون بستر خاکی است. در لعاب زمینه دو نمونه لاجوردینه A6 و A7 نیز حدود ۱ درصد اکسید کبالت مشاهده می‌شود و در خطوط رولعابی لاجوردی در نمونه A10 نیز ۲/۷۹ درصد اکسید کبالت مشاهده می‌شود که عامل ایجاد رنگ لاجوردی بوده است. به‌طورکلی در صنعت لعاب‌سازی، کاربرد ۰/۵ تا ۵ درصد مشتقات کبالت، رنگ آبی تا لاجوردی تیره را به‌وجود می‌آورد. بدین‌صورت که کبالت در فاز مذاب لعاب حل‌شده و رنگ‌دهی قابل‌توجهی حتی در غلظت‌های بسیار کم را دارا است. علاوه‌بر خاصیت رنگ‌دهی بسیار بالای اکسید کبالت، مونواکسید کبالت(CoO) نیز به‌عنوان یک گدازآور قوی در لعاب مطرح است که شدت آن با گدازآورهای قلیایی برابری می‌کند. اکسید کبالت در همه پایه‌های لعاب‌های قلیایی- سربی، قلیایی و سربی لاجوردی و آبی تیره و درخشان را به‌وجود می‌آورد (Hamer and Hamer, 2003, pp.70). در شکل ۵ طیف‌های میکروپیکسی به دست آمده از آنالیز دو ناحیه مختلف در نمونهA3 که در شکل ۱ تصویر اپتیکی آن مشاهده می‌شود، ارائه شده است. در این شکل، کلیه عناصر موجود در این نمونه برای دو ناحیه‌ی مختلف، نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود اختلاف زیادی بین عناصر موجود در این دو ناحیه وجود دارد. به‌عنوان نمونه در ناحیه ۱ که با مربع قرمز مشخص شده، قله‌های مربوط به عنصر طلا دیده می‌شود درحالی‌که در ناحیه ۲ که با مربع آبی مشخص‌شده، قله‌های مربوط به عنصر قلع وجود دارد. برای اینکه به‌طور کامل و دقیق علت اختلاف موجود در این دو طیف به دست آمده را بررسی کنیم، نقشه توزیع عنصری عناصر موجود در دو ناحیه مختلف در نمونهA3 که با استفاده از میکروپیکسی به دست آمده، را بررسی خواهیم کرد.

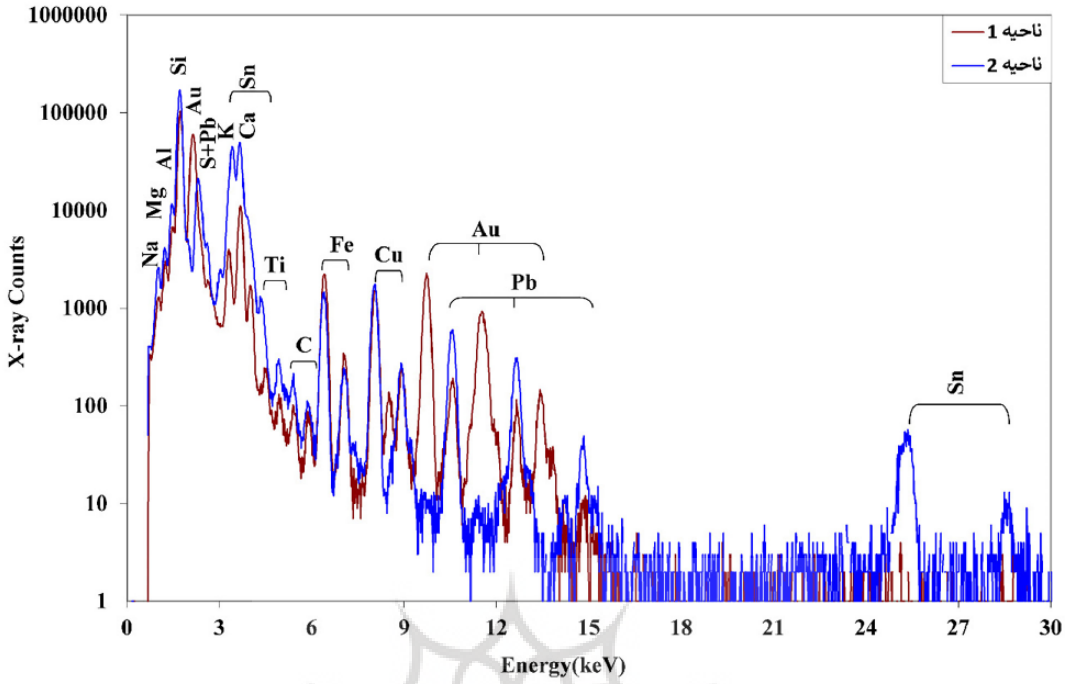
نتایج نقشه توزیع عنصری برخی از عناصر موجود در این دو ناحیه در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود تفاوت توزیع عنصری بین این دو ناحیه به رنگ‌دانه‌های مختلف استفاده‌شده در این دو ناحیه برمی‌گردد. نقشه توزیع عنصری به دست آمده از آنالیز ناحیه ۱ نشان می‌دهد که در ناحیه زرانود، به‌طور عمده همان‌طور که انتظار می‌رفت عنصر طلا وجود دارد، زیرا با مقایسه تصویر اپتیکی ناحیه ۱ و توزیع نقشه عنصر طلا مشاهده می‌شود که تنها در ناحیه‌ای که در تصویر اپتیکی، لایه‌ی طلا وجود دارد. در تصویر نقشه توزیع عنصری مربوط به طلا، عنصر طلا قابل‌توجه است. همچنین رنگ‌دانه قرمز که برای دورگیری ناحیه زرانود استفاده شده است، به‌طور

جدول ۲. ترکیبات عنصری لعاب زمینه سفالینه‌های مینایی و لاجوردینه دژ الموت به‌صورت اکسید و بر حسب درصد وزنی (%wt) با استفاده از روش میکروپیکسی(nd= not detected, f= front, b=back).

Table 2. Elemental compositions of the glaze of Mina'i and Lajvardina pottery from Alamut Castle in the form of oxides and in terms of weight percentage (wt%) using the micro-PIXE method (nd= not detected, f= front, b= back).

| $K_2O$ | Cl | $SO_3$ | $P_2O_5$ | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | MgO | $Na_2O$ | Color glaze | Sample |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2.06 | 1.47 | 0.56 | nd | 74.64 | 5.85 | 1.57 | nd | Green | A1f |
| 1.71 | 0.31 | nd | nd | 76.59 | 7.69 | 0.94 | nd | Turquoise | A2f |
| 2.89 | 0.30 | nd | nd | 71.80 | 4.02 | 1.43 | 1.34 | Green | A3f |
| 1.85 | 0.18 | nd | nd | 77.70 | 5.92 | 0.47 | 0.40 | Green | A3b |
| 1.61 | 0.26 | 5.55 | nd | 43.26 | 5.28 | 0.76 | nd | Cream | A4f |
| 1.98 | 0.45 | 0.28 | nd | 47.73 | 3.41 | nd | 0.32 | Blue | A4b |
| 2.40 | 0.37 | 0.32 | nd | 73.14 | 5.76 | 1.02 | 1.74 | Green | A5f |
| 2.92 | 0.19 | nd | nd | 74.47 | 1.40 | 1.13 | 2.11 | Azure | A6f |
| 2.37 | 0.65 | 3.80 | nd | 71.04 | 4.82 | 1.20 | 1.42 | Green | A6b |
| 2.00 | 0.70 | 4.73 | nd | 61.63 | 6.54 | 1.81 | nd | Azure | A7f |
| 2.36 | 0.51 | 0.66 | nd | 73.48 | 4.27 | 1.78 | 3.81 | Green | A8f |
| 2.17 | 0.33 | nd | nd | 54.12 | 1.41 | 1.28 | 2.93 | Cream | A10f |
| 2.34 | 1.32 | nd | nd | 42.71 | 1.79 | 1.24 | 2.43 | Azure (overglaze) | A10b |
| 2.52 | 0.36 | nd | nd | 60.05 | 1.17 | 1.50 | 3.26 | Cream | A10b |
| 1.79 | 0.15 | 0.49 | nd | 82.18 | 6.69 | 0.33 | nd | Cream | A11f |
| 3.72 | 0.54 | 0.89 | nd | 59.44 | 5.02 | 0.89 | 0.94 | Blue | A12f |

| PbO | $SnO_2$ | CoO | ZnO | $Cu_2O$ | $Fe_2O_3$ | MnO | $TiO_2$ | CaO | Color glaze | Sample |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.66 | nd | nd | nd | 2.07 | 2.41 | nd | 0.16 | 8.58 | Green | A1f |
| 0.65 | nd | nd | nd | 2.43 | 1.75 | 0.05 | 0.11 | 7.80 | Turquoise | A2f |
| 4.33 | nd | nd | nd | 4.62 | 1.57 | 0.09 | 0.13 | 7.51 | Green | A3f |
| 2.63 | nd | nd | nd | 1.77 | 2.74 | 0.05 | 0.23 | 6.10 | Green | A3b |
| 10.48 | 22.48 | nd | nd | nd | 1.57 | nd | 0.19 | 8.56 | Cream | A4f |
| 28.41 | 10.77 | 0.22 | nd | 0.19 | 2.00 | 0.03 | 0.12 | 4.09 | Blue | A4b |
| 2.42 | nd | nd | 0.14 | 3.20 | 1.41 | nd | 0.10 | 7.34 | Green | A5f |
| 4.04 | nd | 1.04 | nd | 1.44 | 3.31 | 0.09 | nd | 7.65 | Azure | A6f |
| 0.36 | nd | nd | nd | 1.06 | 2.35 | 0.07 | 0.19 | 10.68 | Green | A6b |
| 1.10 | nd | 1.33 | nd | 0.28 | 9.56 | 1.00 | 0.39 | 10.85 | Azure | A7f |
| 1.74 | nd | nd | nd | 3.04 | 1.40 | 0.05 | 0.11 | 6.70 | Green | A8f |
| 24.26 | 8.09 | nd | nd | 0.10 | 0.92 | 0.05 | 0.12 | 4.11 | Cream | A10f |
| 22.87 | 10.40 | 2.79 | 0.05 | 0.43 | 2.08 | 0.07 | 0.17 | 5.89 | Azure (overglaze) | A10b |
| 19.89 | 5.68 | nd | nd | 0.13 | 0.79 | 0.04 | 0.12 | 4.47 | Cream | A10b |
| nd | nd | nd | nd | nd | 2.53 | nd | 0.17 | 5.68 | Cream | A11f |
| 2.12 | 1.23 | nd | 0.16 | 7.79 | 3.42 | 0.12 | 0.20 | 8.69 | Blue | A12f |



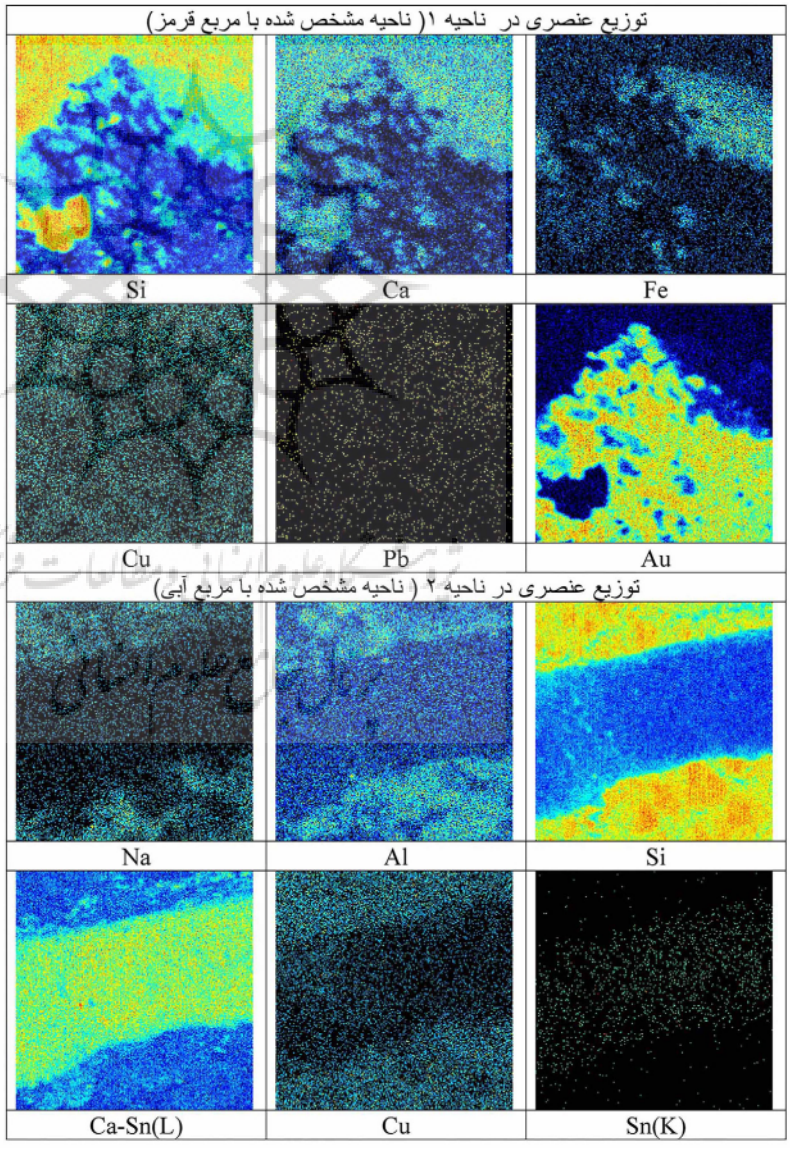

شکل۵ . طیف‌های میکروپیکسی به‌دست آمده از آنالیز دو ناحیه مختلف در نمونه A3 که در شکل۱ نشان داده شده است. ناحیه۱خارج از لایه زراندود و ناحیه۲ شامل لایه زراندود است.

Figure 5. Micro-PIXE spectra obtained from the analysis of two different areas in sample A3, as shown in Figure 1. Area 1 is outside the gilded layer, and Area 2 includes the gilded layer.

عمده از عنصر آهن تشکیل‌شده که با توجه به رنگ‌دانه‌های مورد استفاده در ایجاد رنگ قرمز، منبع این رنگ‌دانه می‌تواند، اُخرا ($Fe_2O_3$) باشد (Eastaugh et al., 2004; Holakooei et al., 2019; Innocenti et al., 2024). همچنین در ناحیه ۱ مشاهده می‌شود که لعاب فیروزه‌ای استفاده‌شده در روی بدنه‌ی سفال از عنصر مس تشکیل‌شده و عنصر مس عامل ایجاد رنگ فیروزه‌ای است (Coccato, Moens, & Vandenabeele, 2017). علاوه‌بر این در تمام ناحیه ۱ عنصر سرب که به‌طور یکنواخت توزیع شده است دیده می‌شود که در اصل از این عنصر به‌عنوان گدازآور استفاده شده است.

دیگر عناصر مشاهده‌شده در این ناحیه که عناصری مانند سیلیسیم، کلسیم و پتاسیم هستند نیز مربوط به لعاب زمینه هستند. همچنین توزیع عنصری به دست آمده از آنالیز ناحیه ۲ نشان می‌دهد که در رنگ‌دانه سفید استفاده‌شده در تزیین این نمونه به‌طور عمده از عنصر قلع تشکیل شده است. بنابراین می‌توان نوع ماده مورد استفاده در ایجاد رنگ‌دانه سفید را اکسید قلع ($SnO_2$) تعیین کرد (Eastaugh et al., 2004). پژوهشگران عقیده دارند که رایج‌ترین ماده اپک‌کننده[۲] لعاب در دوره اسلامی اکسید قلع است (Mason and Tite, 1997; Tite et al., 2015). اکسید قلع علاوه‌بر اینکه، سبب تولید لعاب اپک سفیدرنگ است، خاصیت الاستیکی لعاب را نیز افزایش داده و مانع تولید ترک‌های موبین در سطح لعاب می‌شود. همچنین، مقاومت شیمیایی لعاب را نیز افزایش می‌دهد. اکسید قلع دمای ذوب و گرانروی لعاب را افزایش داده و سبب تولید رنگ فیروزه‌ای در لعاب‌های دارای اکسید مس می‌شود (Mason and Tite, 1997). قدرت اپک‌کنندگی اکسید قلع را می‌توان به‌سبب میزان حلالیت پایین اکسید قلع در لعاب دانست که باعث ایجاد سطح نامنظم و ناهموار در لعاب می‌شود.

ذرات ریـز اکسیـد قلـع درون لعـاب، بـا میکروسـکوپ نیـز قابـل مشـاهده اسـت. علاوه‌بـر اکسیـد قلـع، عوامـل دیگـری نیـز سـبب ایجـاد سـطح اپـک می‌شـوند کـه عبارتنـد از: حباب‌هـای هـوای موجـود در لعـاب، کوارتـز و اجـزاء فلدسـپار نامحلـول در لعـاب، و سیلیکات‌هـای نامحلـول ماننـد سیلیـکات منیزیـم- کلسیـم[3] و سیلیـکات کلسیـم[4] کـه در طـول حـرارت ایجـاد می‌شـوند. ایـن مـوارد، در مقایسـه بـا اکسیـد قلـع از قـدرت اپک‌کننـدگی پایین‌تـری برخـوردار هسـتند (Mason and Tite, 1997; Iñañez et al., ۲۰۱۰). در ایـن ناحیـه نیـز عناصـری دیگـری ماننـد سـدیم، آلومینیـم، سیلیسیـم، کلسیـم و پتاسیـم مشـاهده می‌شـود کـه مربـوط بـه لعـاب زمینـه هسـتند. همچنیـن در توزیـع عنصـری بـه دسـت آمـده از آنالیـز ناحیـه ۲ مشـاهده می‌شـود در ناحیـه‌ای کـه عنصـر قلـع وجـود دارد، عناصـر سـدیم، آلومینیـم، سیلیسیـم و مس کمتـر شـده اسـت. ایـن کاهـش به‌دلیـل جـذب Xهـای مشـخصه توسـط عنصـر قلـع اسـت. در توزیـع عنصـری نشـان داده شـده در شـکل ۶، هـر چـه فـراوانی تعـداد Xهـای مشـخصه بیشـتر باشـد تصویـر ایجادشـده دارای رنـگ روشـن‌تری اسـت و هـر چـه فـراوانی تعـداد Xهـای مشـخصه کمتـر باشـد، تصویـر ایجادشـده تیره‌تـر اسـت.




شـکل۶. توزیـع عنصـری بـرخی از عناصـر موجـود در دو ناحیـه مختلـف از نمونـهA۳ : (الـف) ناحیـه اول کـه در شـکل ۱ بـا مربـع قرمـز نشـان داده شـده اسـت، (ب) ناحیـه ۲ کـه در شـکل ۱ بـا مربـع آبی نشـان داده شـده اسـت. ابعـاد نـواحی آنالیـز شـده در روی نمونـه حـدود ۲/۵×۲/۵ میلی‌متـر اسـت.

Figure 6. Elemental distribution of some elements in two different areas of sample A3, shown in the optical image with Area 1 marked by a red square and Area 2 marked by a blue square. The dimensions of the analyzed areas in the sample are approximately 2.5×2.5 mm.

جدول ۳. درصد وزنی عناصر موجود در رنگ‌دانه‌های قرمز، سفید و ناحیه زراندود در نواحی ۱و ۲ نمونه A3. همچنین ترکیبات عنصری لعاب زمینه روی نمونه، پشت نمونه و بدنه نمونه ۳ برحسب درصد وزنی برای مقایسه در این جدول ارائه شده است.

Table 3. Weight percentage of elements present in the red, white, and gilded areas in Areas 1 and 2 of sample A3. Additionally, the elemental compositions of the glaze on the front, back, and body of sample 3 are presented in this table for comparison.

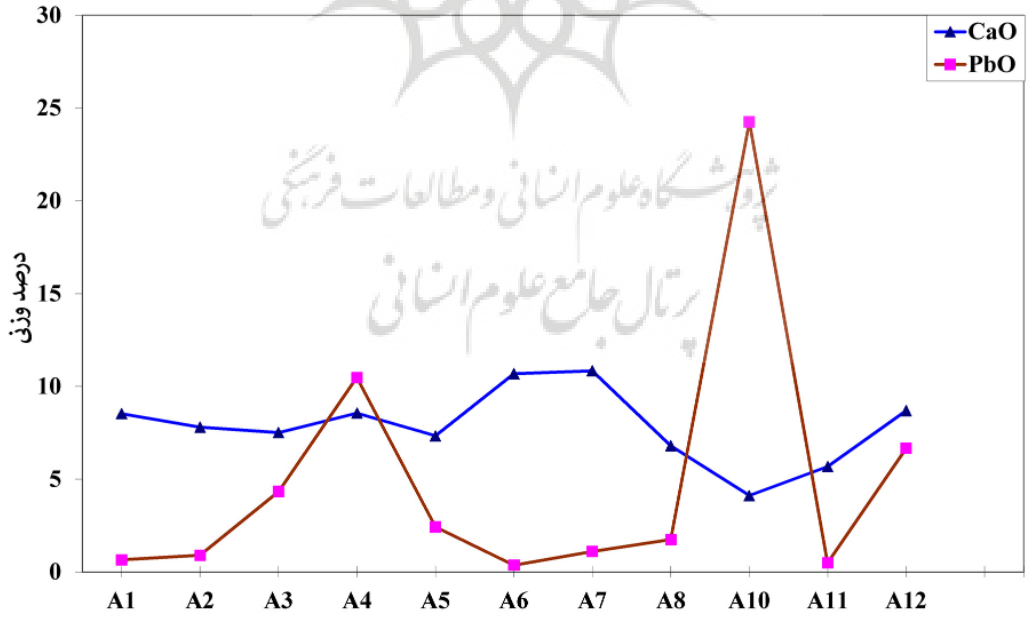
| Elements (wt%) | ناحیه زراندود Gilded area | رنگ‌دانه قرمز Red pigment | رنگ‌دانه سفید White pigment | لعاب فیروزه‌ای (رو) Turquoise glaze (front) | لعاب سبز( پشت) Green glaze (back) | بدنه سفال body |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $Na_2O$ | - | 0.56 | - | 1.34 | 0.37 | 2.01 |
| MgO | 0.96 | 1.63 | - | 1.43 | 0.47 | 3.1 |
| $Al_2O_3$ | 1.2 | 3.53 | 1.55 | 4.01 | 5.92 | 3.6 |
| $SiO_2$ | 39.99 | 65.76 | 15.57 | 71.80 | 77.69 | 86.13 |
| $SO_3$ | - | 0.62 | 2.32 | - | - | - |
| Cl | 0.38 | 0.51 | 0.54 | 0.30 | 0.18 | - |
| $K_2O$ | 2.13 | 1.69 | - | 2.90 | 1.84 | 1.05 |
| CaO | 8.03 | 9.67 | 4.72 | 7.51 | 6.11 | 2.64 |
| $TiO_2$ | 0.15 | 0.20 | 0.19 | 0.13 | 0.23 | 0.18 |
| MnO | 0.079 | 0.07 | - | 0.09 | 0.05 | 0.03 |
| $Fe_2O_3$ | 1.63 | 7.56 | 0.97 | 1.55 | 2.76 | 1.17 |
| $Cu_2O$ | 4.88 | 3.78 | 1.05 | 4.62 | 1.77 | 0.09 |
| $SnO_2$ | - | - | 61.13 | - | - | - |
| $Au_2O_3$ | 36.53 | - | - | - | - | - |
| PbO | 4.00 | 4.41 | 10.21 | 4.33 | 2.63 | - |

مقدار درصد وزنی عناصر موجود در رنگ‌دانه‌های قرمز، سفید و ناحیه زراندود در نواحی ۱و ۲، همچنین ترکیبات عنصری لعاب‌های سطح داخلی، سطح بیرونی و بدنه نمونه A3 برحسب درصد وزنی در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود، ناحیه زراندود با درصد وزنی بالایی از طلا تشکیل شده است. همچنین در رنگ‌دانه قرمز حدود ۸ درصد اکسید آهن و در رنگ‌دانه سفید حدود ۶۰ درصد، اکسید قلع وجود دارد. علاوه‌بر این مشخص است که عامل رنگ لعاب فیروزه‌ای روی نمونه A3، اکسید مس است که درصد وزنی آن در این نمونه حدود ۵ درصد و عامل لعاب سبز رنگ پشت نمونه‌ی اکسید آهن و اکسید مس هستند. همچنین همان‌گونه که در این جدول مشاهده می‌شود، بدنه این نمونه به‌طور عمده از اکسید سیلیسیم تشکیل شده است. که در آن عناصری مانند اکسید آلومینیم، اکسید سدیم و منیزیم نیز وجود دارد. همچنین در بدنه‌ی این سفالینه مقدار کمی نیز اکسیدهای آهن، تیتاتیم، مس و منگنز وجود دارد که از ناخالصی‌های موجود در کانی سیلیس وارد ترکیبات عنصری بدنه شده است.

با بررسی نتایج مربوط به ترکیبات عنصری لعاب زمینه نمونه‌های آنالیزشده در این پژوهش که در جدول ۲ ارائه شده است، مشخص است که در همه نمونه‌های مورد بررسی، اکسید کلسیم و اکسید سرب به‌عنوان استحکام‌بخش و گدازآور استفاده شده است. در شکل ۷ تغییرات درصد وزنی اکسید کلسیم و اکسید سرب در این نمونه‌ها رسم شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، در همه این نمونه‌ها (به‌جز دو نمونه لاجوردینه A4 و A12) درصد وزنی اکسید کلسیم همواره بسیار بیشتر از درصد وزنی اکسید سرب است. اما با بررسی دو نمونه ۴ و ۱۲ مشخص است که درصد

وزنی اکسید سرب این دو نمونه بیشتر از درصد وزنی اکسید کلسیم است. همچنین همان‌طورکه در جدول ۲ مشخص است در این دو نمونه از اکسید قلع به‌عنوان ماده اپک‌کننده در ترکیبات لعاب زمینه استفاده شده است. آنالیز عنصری این دو نمونه نشان می‌دهد که در نمونه ۴ و ۱۲ مقدار اکسید قلع به ترتیب ۲۲/۵ و ۸ درصد است. بنابراین نوع لعاب‌های به‌کار رفته در این دو نمونه با بقیه نمونه‌ها متفاوت است (Matin, Tite, & Watson, 2018). از طرفی، همان‌گونه که در بالا ارائه شد دو نمونه ۴ و ۱۲ و همچنین نمونه ۲ از نظر ترکیبات بدنه نیز با دیگر نمونه‌های آنالیز شده تفاوت داشتند. بنابراین با توجه به نوع لعاب زمینه و همچنین ترکیبات عنصری بدنه می‌توان به این نتیجه رسید که سفال‌های کشف شده در دژ الموت وارداتی بوده و شاید در مراکز مختلف و با دستور ساخت‌های متفاوت در کارگاه‌های پراکننده تولید شده باشند.

علاوه‌بر مشخص‌کردن ترکیبات عنصری بدنه، لعاب زمینه و تعیین رنگ‌دانه‌های استفاده‌شده در نقاشی‌ها با روش میکروپیکسی، اطلاعات مهم دیگری نیز از این نمونه‌ها می‌توان به دست آورد. با استفاده از آنالیز نمونه‌ها از سطح مقطع، اندازه‌گیری ضخامت لعاب‌های زمینه در این نمونه‌ها امکان‌پذیر خواهد بود. در شکل ۸ توزیع عنصری برخی از عناصر موجود در بدنه و لعاب زمینه نمونه A12 که از سطح مقطع آنالیز شده است، نشان داده شده است. همان‌طورکه در این شکل با پیکان‌های قرمزرنگ مشاهده می‌شود، با توجه به نقشه توزیع عنصری عناصر سرب و مس متوجه خواهیم شد که این عناصر به‌طور عمده و غالب در لعاب زمینه وجود دارند. از طرف دیگر، با توجه به اینکه ابعاد آنالیز در راستای افقی (X) و عمودی (Y) در حدود ۲۵۰۰ میکرومتر است، ضخامت لعاب زمینه در این نمونه حدود ۶۰۰ میکرومتر تخمین زده می‌شود. آنالیز نمونه مختلف از سطح مقطع در این پژوهش نشان داد که ضخامت لعاب‌های زمینه در این نمونه از ۱۰۰ تا ۶۰۰ میکرومتر متغیر است. همچنین با توجه به توزیع عنصری کروم در شکل ۸، می‌توان ضخامت لایه‌های نقاشی‌شده در زیر لعاب را نیز مشاهده و محاسبه کرد. با توجه به ابعاد اسکن،



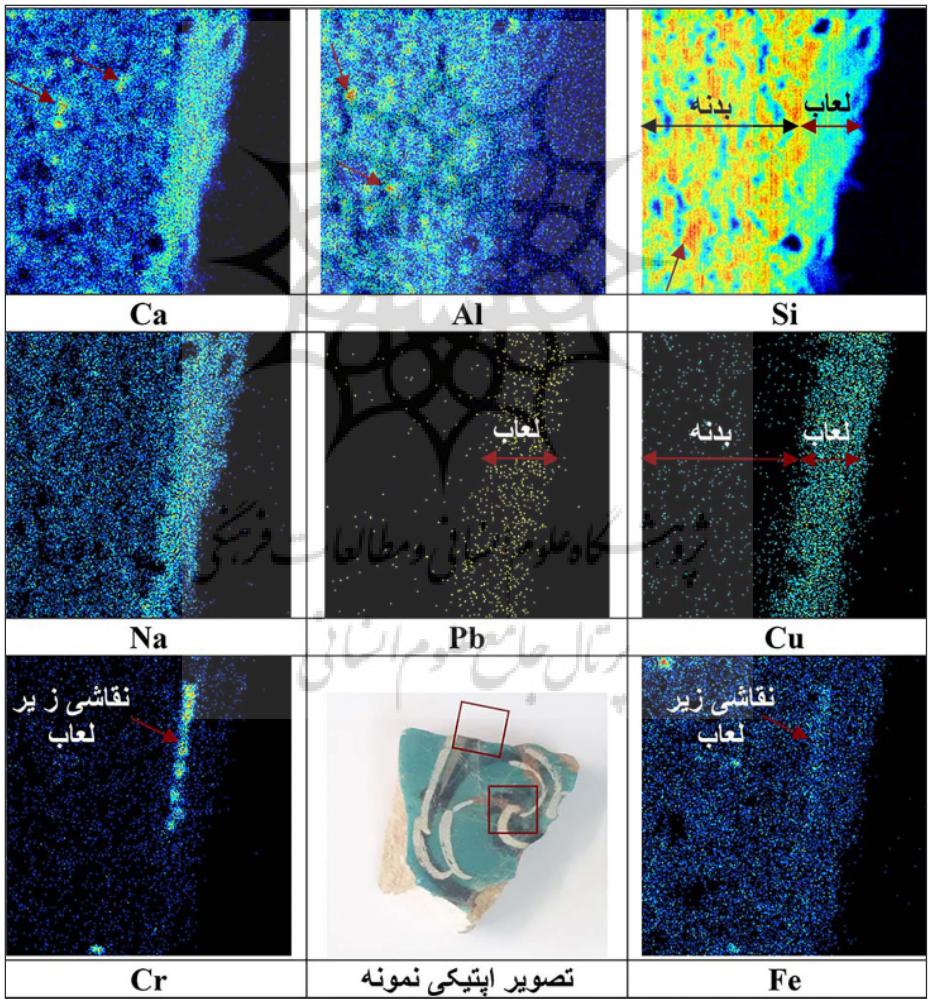

شکل ۷. تغییرات درصد وزنی اکسید کلسیم و اکسید سرب موجود در لعاب زمینه در نمونه‌های آنالیز شده.

Figure 7. Variations in the weight percentage of calcium oxide and lead oxide present in the glaze of the analyzed samples.

ضخامت لایه‌ی نقاشی در ناحیه‌ای که دارای رنگ‌دانه مشکی و کرومیت است، حدود ۱۰۰ میکرومتر است. نکته حائز اهمیت که باید در اینجا به آن اشاره شود، این است که همان‌طورکه در شکل ۸ نیز در توزیع مربوط به عنصر کروم دیده می‌شود، این عنصر در نمونه‌ی نقاشی با رنگ مشکی، زیر لعاب و روی بدنه قرار گرفته است (Holakooei et al., 2019). فنّاوری منحصربه‌فردی که در برخی از سفال‌های مینایی دژ الموت به کار رفته است حضور نقاشی زیرلعابی (نقاشی با رنگ مشکی) در کنار نقاشی رولعابی (نقاشی با رنگ سفید و قرمز) در یک نمونه است.

## اندازه‌گیری ضخامت لایه زراندود

در سفال‌های مینایی زراندود در دژ الموت، نقوش مختلف با شیوه‌ی نقاشی بر روی لعاب سفید یا فیروزه‌ای ترسیم‌شده و سپس برخی از نواحی این نقوش با لایه‌ی طلا تزیین شده‌اند. بنابراین، از نظر فن‌شناسی لایه‌ی طلاکاری‌شده خارجی‌ترین و سطحی‌ترین لایه است که بر روی لعاب فیروزه‌ای یا سفید و همچنین گاهی اوقات بر روی لایه‌های نقاشی‌شده قرار گرفته است. همان‌طورکه قبلاً نیز اشاره شد، با استفاده از روش micro-RBS ما قادر هستیم تا ضخامت لایه‌های طلای به کار رفته در

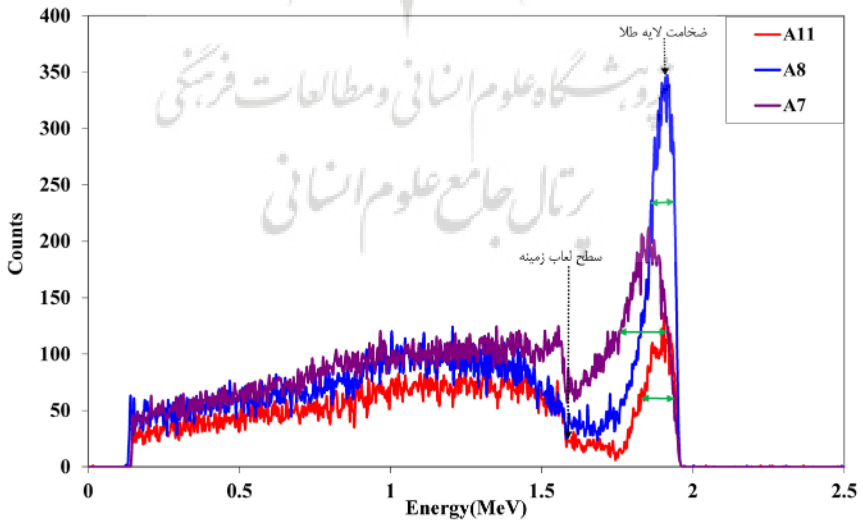



شکل۸. توزیع عنصری برخی از عناصر موجود در بدنه و لعاب زمینه نمونه A12 از سطح مقطع .

Figure 8. Elemental distribution of some elements in the body and glaze of sample A12 from the cross-section.

ناحیه زراندود را اندازه‌گیری نمایی (Albéric et al., 2015; Fourdrin et al., 2016). در شکل ۹ طیف‌های micro-RBS به دست آمده از سه نمونه‌ی مختلف از نمونه‌های آنالیزشده از دژ الموت با یکدیگر مقایسه شده است. در این شکل مشخص است که ضخامت لایه طلا متناسب با پهنای قله نشان‌دهنده لایه‌ی طلا، تغییر می‌کند و هر چه ضخامت لایه‌ی طلا بیشتر باشد، پهنای قله‌ی مربوط به طلا که با پیکان سبزرنگ نشان داده شده نیز افزایش می‌یابد. همان‌طورکه در شکل ۹ مشخص است، ضخامت لایه‌ی طلا در هر سه نمونه متفاوت است زیرا پهنای قله در این سه نمونه کاملاً با یکدیگر تفاوت دارند. همچنین این شکل نشان می‌دهد که هرچه ضخامت لایه‌ی طلا بیشتر باشد، طلای به کار رفته در سطح، در اثر فرایندهای حرارتی تا عمق بیشتری در لعاب نفوذ می‌کند.

نتایج اندازه‌گیری و محاسبه‌ی ضخامت لایه‌ی طلا و میزان نفوذ آن در لعاب زمینه برای دو نمونه در جدول ۴ ارائه شده است. نتایج این محاسبات برای نمونه A8، نشان می‌دهد که لایه‌ی اول که مربوط به لایه‌ی طلا است، ضخامتی در حدود ۳۲۰ نانومتر دارد. لایه دوم و سوم که مربوط به ناحیه‌ی مشترک لعاب و لایه‌ی طلاکاری‌شده است، نشان می‌دهد که طلای استفاده‌شده حدود ۱/۵ میکرومتر در داخل لعاب نفوذ کرده است که علت این نفوذ را می‌توان به گرم کردن نمونه‌ها نسبت داد. در جدول ۴ همچنین ترکیبات اصلی تشکیل‌دهنده این دو لایه بر حسب درصد اتمی نشان داده شده است. ترکیب اصلی لعاب مورد استفاده در صنعت سرامیک سیلیس ($SiO_2$) است. همچنین همان‌طورکه در تصویر اپتیکی نمونه A8 دیده می‌شود، رنگ لعاب زمینه‌ی این نمونه فیروزه‌ای است و عامل رنگ این لعاب، عنصر مس است. همچنین برای کاهش نقطه‌ی ذوب لعاب یکی از عناصری که در این نمونه استفاده شده است، عنصر سرب است. بنابراین ترکیب به دست آمده برای این دو لایه کاملاً با فرمول شیمیایی مورد استفاده برای ایجاد لعاب مورد استفاده، تطابق دارد. لایه چهارم نیز که لایه کاملاً ضخیم است، ترکیب لعاب زمینه است. همچنین نتایج محاسبات برای نمونه A2 نیز در جدول ۴ ارائه شده است. محاسبات نشان می‌دهد که لایه‌ی اول که مربوط به لایه‌ی طلا است، ضخامتی در حدود ۵۶۰ نانومتر دارد. همچنین ضخامتی که طلای ناشی از لایه‌ی زراندود در آن نفوذ کرده حدود ۰/۷ میکرومتر است.




شکل ۹. مقایسه طیف‌های micro-RBS به دست آمده از لایه زراندود در سه نمونه مختلف.

Figure 9. Comparison of micro-RBS spectra obtained from the gilded layer in three different samples.

جدول ۴. نتایج اندازه‌گیری و محاسبه ضخامت لایه طلا و میزان نفوذ آن در لعاب زمینه برای دو نمونه A8 و A2.

Table. Measurement results and calculation of the thickness of the gold layer and its penetration into the glaze for two samples, A8 and A2.

| کد نمونه. Sample Code. | ترتیب لایه. Layer Order. | ضخامت لایه. ($\times 10^{15}$ atom/cm$^2$) Layer Thickness ($\times 10^{15}$ atom/cm$^2$). | ضخامت لایه طلا (نانومتر). Gold Layer Thickness (nanometers). | عناصر تشکیل دهنده لایه (درصد اتمی). Elements forming the layer (atomic percentage). | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Au | Cu | Pb | Si | O |
| A8 | لایه اول (لایه خالص طلا). First Layer (Pure Gold Layer). | 1900 | 320 | 100 | - | - | - | - |
| | لایه دوم (لعاب زمینه با ناخالصی طلا). Second Layer (Base Glaze with Gold Impurities). | 3200 | - | 16 | 24 | 2 | 18 | 40 |
| | لایه سوم (لعاب زمینه با ناخالصی طلا). Third Layer (Base Glaze with Gold Impurities). | 2500 | - | 10 | 11 | 2 | 13 | 64 |
| | لایه چهارم (لعاب زمینه). Fourth Layer (Base Glaze). | 130000 | - | 0 | 2 | 2.5 | 36 | 64 |
| A2 | لایه اول ( لایه خالص طلا). First Layer (Pure Gold Layer). | 3000 | 560 | 100 | - | - | - | - |
| | لایه دوم (لعاب زمینه با ناخالصی طلا). Second Layer (Base Glaze with Gold Impurities). | 3300 | - | 30 | 30 | 2 | 18 | 20 |
| | لایه سوم (لعاب زمینه). Third Layer (Base Glaze). | 130000 | - | 0 | 1 | 4 | 35 | 60 |

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

## نتیجه‌گیری

همان‌طورکه در جدول ۱ مشاهده می‌شود، بدنه نمونه‌های مورد بررسی از نظر ترکیبات تفاوت‌هایی با یکدیگر دارند. این تفاوت در ترکیبات بدنه نشان‌دهنده این است که در ساخت سفال‌های مینایی از مواد اولیه متفاوتی استفاده شده است. همچنین، این احتمال نیز وجود دارد که نمونه‌های به دست آمده در این منطقه از مکان‌های مختلفی به این محوطه وارد شده باشند. بر پایه‌ی نتایج به دست آمده در این پژوهش و مقایسه آن با نتایج گزارش شده از سفال‌های مینایی مورد توجه پژوهشگران ایرانی و خارجی مورد مطالعه که نتایج آن منتشر شده، می‌توان به این نتیجه رسید که در ساخت سفال‌های این محوطه به‌جز نمونه A2، در بقیه نمونه‌ها از خمیرسنگ و خاک رس غنی از آلومینا استفاده شده است. درصد وزنی اکسید کلسیم نمونه‌های آنالیزشده بسیار پایین است که این نشان‌دهنده‌ی این است که از سیلیس غیرآهکی در این نمونه‌ها استفاده شده است. اما در نمونه A2از منابع خاک رس آهکی استفاده شده است. نتایج آنالیز رنگ‌دانه‌های به کار رفته در نقاشی‌های تزیینی نشان می‌دهد که عامل رنگ قرمز، عنصر

آهـن و عامـل رنـگ سـفید، عنصـر قلـع اسـت. همچنیـن بـرای رنگ‌دانـه مشـکی در بـرخی از ایـن نمونه‌هـا عنصـر کـروم و آهـن به‌عنـوان عامـل رنـگ شناسـایی شـد کـه نشـان‌دهنده اسـتفاده از ترکیـب معـدنی کرومیـت اسـت. علاوه بـر ایـن، عامـل رنـگ لاجـوردی در لعاب‌هـای زمینـه سـفال‌های لاجوردینـه و رولعابی‌هـای مینـایی عنصـر کبالـت تشـخیص داده شـد. همچنیـن مشـخص شـد کـه عامـل رنـگ لعاب‌هـای فیـروزه‌ای مـورد اسـتفاده در نمونه‌هـا، عنصـر مـس و عامـل رنـگ لعـاب سـبزرنگ، ترکیـب عنصـر آهـن و مـس اسـت. نتایـج بـه دسـت آمـده از لایـه‌ی زرانـدود در نمونه‌هـای دژ الـموت نشـان می‌دهـد کـه ضخامـت لایـه‌ی زرانـدود در نمونه‌هـا متفاوت هسـتند و ضخامـت آن‌هـا بیـن ۳۲۰ تـا ۸۴۰ نانومتـر متغیـر اسـت.

## سپاسگزاری

نویسـندگان مقالـه از همـراهی خانـم دکتـر حمیـده چوبـک (سرپرسـت کاوش‌هـای باستان‌شـناسی دژ المـوت قزویـن) بـه دلیـل تحویـل نمونه‌هـای مـورد نیـاز در انجـام ایـن پژوهـش، کمـال تشـکر و قـدردانی را دارنـد. همچنیـن لازم اسـت از پژوهشـگاه علوم و فنون هسـته‌ای و کلیه همکاران آزمایشـگاه واندوگـراف کـه شـرایط مناسـب بـرای آنالیـز ایـن نمونه‌هـا را فراهـم کردنـد، تشـکر و قـدردانی شـود.

## حامیان مالی و معنوی

آنالیـز بـا باریکـه‌ی یـونی در ایـن پژوهـش بـا حمایـت پژوهشـگاه علـوم و فنـون هسـته‌ای در آزمایشـگاه واندوگـراف انجـام شـده اسـت.

## پی‌نوشت‌ها

1. Stonepaste .
2. Opacifier .
3. Diopside .
4. Wollastonite .

## منابع

Aga-Oglu, M. (1946). The Origin of the Term Mina; and Its Meanings. Journal of Near Eastern Studies, 5(4), 241-256.

Albéric, M., Müller, K., Pichon, L., Lemasson, Q., Moignard, B., Pacheco, C., Reiche, I. (2015). Non-invasive quantitative micro-PIXE–RBS/EBS/EBS imaging reveals the lost polychromy and gilding of the Neo-Assyrian ivories from the Louvre collection. Talanta, 137, 100-108. doi:https://doi.org/10.1016/j.talanta.2015.01.029.

Beck, L., Pichon, L., Moignard, B., Guillou, T., & Walter, P. (2011). IBA techniques: Examples of useful combinations for the characterisation of cultural heritage materials. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: 269(24), 2999-3005.

Coccato, A., Moens, L., & Vandenabeele, P. (2017). On the stability of mediaeval inorganic pigments: a literature review of the effect of climate, material selection, biological activity, analysis and conservation treatments. Heritage Science, 5(1), 12. doi:10.1186/s40494-017-0125-6.

Choubak, H., (2009). Alamut Castle (Eagle's Nest), http://www.chn.ir/NSite/FullStory/News/?Id=68476&Serv=0&SGr=0 .

Daftary, F., (2007). The Ismā'īlīs: Their History and Doctrines (Second ed.). Cambridge: Cambridge University Press.

De Bonis, A., D'Angelo, M., Guarino, V., Massa, S., Anaraki, F. S., Genito, B., & Morra, V. (2017). Unglazed pottery from the masjed-i jom'e of Isfahan (Iran): technology and provenance. Archaeological and Anthropological Sciences, 9(4), 617-635. doi:10.1007/s12520-016-0407-z.

Eastaugh, N., Walsh, V., Chaplin, T., & Siddall, R. (2004). The Pigment Compedium: A Dictionary of Historical Pigments, Taylor & Francis.

Fernandes, F., Niekraszewicz, L. A. B., Amaral, L., & Dias, J. F. (2018). Evaluation of detector efficiency through GUPIXWIN H value. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: 417, 56-59.

Fourdrin, C., Pagès Camagna, S., Pacheco, C., Radepont, M., Lemasson, Q., Moignard, B., . . .

Jeammet, V. (2016). Characterization of gold leaves on Greek terracotta figurines: A PIXE-RBS study. Microchemical Journal, 126, 446-453. doi:https://doi.org/10.1016/j.microc.2015.12.030.

Hamdan, M. A., Martinez, S. M., Garcia Vallès, M. T., Nogués, J. M., Hassan, F. A., Flower, R. J., Ebrahim, E. S. (2014). Ancient Egyptian Pottery from the Subsurface Floodplain of the Saqqara–Memphis Area: Its Mineralogical and Geochemical Implications. Archaeometry, 56(6), 987-1008. doi:doi:10.1111/arcm.12075.

Hamer, F., & Hamer, J. (2003). The potter's dictionary of materials and techniques, London: A. & C.

Henderson, J. (2000). The Science and Archaeology of Materials: An Investigation of Inorganic Materials: Routledge.

Holakooei, P., de Lapérouse, J.-F., Carò, F., Röhrs, S., Franke, U., Müller-Wiener, M., & Reiche, I. (2019). Non-invasive scientific studies on the provenance and technology of early Islamic ceramics from Afrasiyab and Nishapur. Journal of Archaeological Science: Reports, 24, 759-772. doi:https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2019.02.029.

Holakooei, P., Petrucci, F. C., Tassinari, R., & Vaccaro, C. (2013). Application of WDXRF in the provenance studies of Persian haft rang tiles: a statistical approach. X-Ray Spectrometry, 42(2), 105-115. doi:10.1002/xrs.2441.

Innocenti, S., Quintero Balbás, D., Galeotti, M., Cagnini, A., Porcinai, S., & Striova, J. (2024). Historical Pigments and Paint Layers: Raman Spectral Library with 852 nm Excitation Laser. Minerals, 14, 557. doi:10.3390/min14060557.

Iñañez, Javier G., Bellucci, Jeremy J., Enrique Rodríguez-Alegría, Richard A., William McDonough, Speakman, Robert J.,(2010). Romita pottery revisited: a reassessment of the provenance of ceramics from Colonial Mexico by LA-MC-ICP-MS, Journal of Archaeological Science,37(11), 2698-2704.

Jeynes, C., & Colaux, J. L. (2016). Thin film depth profiling by ion beam analysis. Analyst, 141(21), 5944-5985. doi:10.1039/c6an01167e .

Johansson, S. A. E., & Campbell, J. L. (1989). PIXE: A novel technique for elemental analysis, New York ,John Wiley & Sons.

Kambakhshfard, S. ( 2000). The Pottery in Iran from the beginning of Neolithic to contemporary, Tehran, Iran: Ghoghnoos(In Persian).

[کامبخش‌فرد، سیف الله (۱۳۷۹). سفال و سفال‌گری در ایران از ابتدای نوسنگی تا دوران معاصر، تهران، انتشارات ققنوس.].

Koss, K., Blythe, M.C., Chase, E.S., Smith, D. (2009), Analysis of Persian Painted Minai Ware, in Scientific Research on Historic Asian Ceramics, Proceedings of the Fourth Forbes Symposium at the Freer Gallery of Art, Washington D.C.

Lane, A. (1958). Early Islamic Pottery: Mesopotamia, Egypt and Persia: Faber & Faber.

Mason, R. B. (1997). Shine Like the Sun: Lustre-painted and Associated Pottery from the Medieval Middle East: Mazda Publishers.

Mason, R. B., Tite, M. S., Paynter, S., & Salter, C. (2001). Advances in Polychrome Ceramics in the Islamic World of the 12th Century AD. Archaeometry, 43(2), 191-209. doi:10.1111/1475-4754.00014.

Mason, R. B., Tite, M. S. (2017). The beginnings of tin-opacification of pottery glazes, Archaeometry, 39(1), 41-58.

Matin, M., Tite, M., & Watson, O. (2018). On the origins of tin-opacified ceramic glazes: New evidence from early Islamic Egypt, the Levant, Mesopotamia, Iran, and Central Asia. Journal of Archaeological Science, 97, 42-66. doi:https://doi.org/10.1016/j.jas.2018.06.011.

Nastasi, M., Mayer, J., & Wang, Y. (2014). Ion Beam Analysis: Fundamentals and Applications. Boca Raton: CRC Press.

تزیینـات برجسـته و زرانـدود در سـفال مینـایی دوران میـانی اسلامی در ایـران، هنرهـای صنـاعی ایـران، شـماره۱، ۵-۵.].

Yazdani, M., Ahmadi, H., Emami, S. M. A. and Abdollahkhan Gorji, M. (2015). Chronology of Mina'i Ware based on in Scripted Samples. Journal of Fine Arts: Visual Arts, 20(3), 45-56. doi: 10.22059/jfava.2015.56380[In Persian].

[یـزدانی، ملیـکا؛ احمـدی، حسیـن؛ امـامی، سیـد محمـد امیـن؛ عبـدالله خـان گـرجی، مهنـاز (۱۳۹۴). گاهنـگاری سفال مینـایی براساس نمونه‌هـای کتیبـه‌دار، نشـریه هنرهـای زیبـا- هنرهـای تجسـمی، دوره۲۰، شـماره ۳، ۵۶-۴۵.].

Pincé, P., Braekmans, D., Lycke, S., & Vandenabeele, P. (2019). Ceramic Production in the Kur River Basin (Fars, Iran) During the Middle to Late Second Millennium bce: A Geochemical and Technological Characterization. Archaeometry, 61(3), 556-573. doi:10.1111/arcm.12451.

Sotūdeh, M., (1955). Alamut Castle, Farhang e Iran Zamin. No. 3, 5-21. [In Persian].

[سـتوده، منوچهـر (۱۳۳۴). قلعـه المـوت - بلـدۀ الاقبـال، نشـریه فرهنـگ ایـران زمیـن، شـماره ۳، ۲۱-۵.].

Tite, M., Watson, O., Pradell, T., Matin, M., Molina, G., Domoney, K., Bouquillon, A., (2015). Revisiting the beginnings of tin-opacified Islamic glazes, Journal of Archaeological Science,57, 80-91.

Tite, M. S., Wolf, S., & Mason, R. B. (2011). The technological development of stonepaste ceramics from the Islamic Middle East. Journal of Archaeological Science, 38(3), 570-580.

Weber, G., Strivay, D., Martinot, L., & Garnir, H. P. (2002). Use of PIXE–PIGE under variable incident angle for ancient glass corrosion measurements. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B:189(1), 350-357. doi:https://doi.org/10.1016/S0168-583X(01)01085-0.

Wilson J. Christy (1992) A History of Iranian Art, Translated by Abdullah Faryar, Tehran: Yasavoli [In Persian].

[ویلسـن، ج. کریسـتی (۱۳۷۰). تاریـخ صنایـع ایـران، ترجمـه: عبـدالله فریـار، انتشـارات یسـاولی، تهـران.].

Yazdani, M., Emami, S. M. A., Ahmadi, H., Lamehi-Rachti, M., Abdollah Khan Gorji, M., & Agha-Aligol, D. (2017). A Technological Study of Making and Executing Raised and Gilded Ornaments on Mina'i Wares from the Medieval Islamic Period in Iran. Journal of Iranian Handicrafts, 1(1), 5-20. (In Persian).

[یـزدانی، ملیـکا؛ امـامی، سیـد محمـد امیـن؛ احمـدی، حسیـن؛ لامـعی رشـتی، محمـد؛ عبـدالله خـان گـرجی، مهنـاز؛ آقاعـلی‌گل، داود (۱۳۹۶). مطالعـۀ شیـوۀ سـاخت و اجـرای