

## Characterization of Red and Brown Color on Mina'i Ceramics from Sixth to Seventh Century AH in Iran Based on Instrumental Methods

Melika Yazdani<sup>\*1</sup>, Davoud Agha-Aligol<sup>2</sup>

1- Islamic Art Department, Handicrafts Faculty, Art University of Isfahan, P.O. Box: 1744, Isfahan, Iran

2- Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Physics and Accelerators Research School, Van de Graaff Laboratory, P.O. Box: 11365-3486, Tehran, Iran.

### ARTICLE INFO

Article history:

Received: 08-01-2025

Accepted: 14-03-2025

Available online: 24-05-2025

Print ISSN: 1735-8779

Online ISSN: 2383-2169

DOI: [10.30509/jcst.2025.167437.1248](https://doi.org/10.30509/jcst.2025.167437.1248)

### Keywords:

Mina'i Ceramic

Red pigment

Brown pigment

Iron Oxide

Lead-Tin glaze

Micro-PIXE analysis.

### ABSTRACT

*This study investigated the red and brown pigment colors of twelve Mina'i samples from sixth to seventh centuries AH from Alamut castle, Rayy and attributed to Rayy in National Museum of Iran by Micro-PIXI, optical microscopy and scanning electron microscopy. The main aim of the research was to explore various techniques for applying red and brown pigments on the base glaze and to analyse the elemental compositions and factors influencing the production of these pigments. This investigation revealed six distinct colors of red. By examining the distribution of elements, it was found that iron is the factor that produces red and brown colors in these potteries. Also, the results of elemental compositions demonstrate that the base glazes are divided into three groups: lead glaze, alkaline glaze, and lead-tin-soda glaze. Other results confirm that increasing the amount of iron oxide in the lead base glaze significantly impacted the production of the brown color. This paper's findings confirm the technique for producing red color as described in the Islamic medieval Iranian treatise.*

\*Corresponding author: [\\*m.yazdani@au.ac.ir](mailto:m.yazdani@au.ac.ir)





## مشخصه‌یابی فام قرمز و قهوه‌ای در سفال‌های مینایی سده‌های ششم تا هفتم هجری قمری در ایران با استفاده از روش‌های دستگاهی

ملیکا یزدانی<sup>۱\*</sup>، داود آقاعلی‌گل<sup>۲</sup>

۱- استادیار، گروه هنر اسلامی، دانشکده صنایع دستی، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران، صندوق پستی: ۱۷۴۴

۲- آزمایشگاه واندوگراف، پژوهشکده فیزیک و شتابرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۳۴۸۶

### چکیده

در این پژوهش، پوشش‌های قرمز و قهوه‌ای در سفالینه‌نگاری‌های دوازده اثر مینایی سده ۶-۷ هجری یافت شده از دژ الموت و همچنین نمونه‌های موجود در موزه ملی ایران که بخشی از آنها از محوطه تاریخی ری یافت شده‌اند، با استفاده از مطالعات میکروپیکسی، میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی مطالعه شده‌اند. مهم‌ترین اهداف پژوهش، دستیابی به شیوه‌های مختلف ایجاد فام‌های قرمز و قهوه‌ای بر روی لعاب زمینه و اندازه‌گیری ترکیبات عنصری و عناصر موثر در تولید این رنگدانه‌ها بوده است. در این پژوهش شش گونه رنگ قرمز شناسایی شد. با بررسی توزیع عناصر به دست آمده، مشخص شد که عامل تولید فام‌های قرمز و قهوه‌ای در این سفال‌ها آهن است. همچنین، نتایج آنالیز عنصری نشان می‌دهد، لعاب‌های زمینه این پوشش‌ها در سه گروه لعاب سربی، لعاب قلیایی و لعاب سرب-قلع-قلیا تقسیم‌بندی می‌شوند. دیگر نتایج پژوهش، نشان می‌دهد که افزایش میزان اکسید آهن مورد استفاده در لعاب سربی، در تولید فام قهوه‌ای موثر بوده است. نتایج این پژوهش، شیوه ساخت فام قرمز در مکتوبات کهن ایران را تایید می‌کند.

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۴/۳/۳

شاپا چاپی: ۱۷۳۵-۸۷۷۹

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۱۶۹

DOI: 10.30509/jcst.2025.167437.1248

### واژه‌های کلیدی:

سفال مینایی

رنگدانه قرمز

رنگدانه قهوه‌ای

اکسید آهن

لعاب سرب-قلع

آنالیز میکروپیکسی



## ۱- مقدمه

فام قرمز را می‌توان از نخستین رنگ‌هایی دانست که انسان از هزاران سال پیش آن را شناخت، از تنوع رنگی آن بهره برد و در دوران نئولیتیک برای ترسیم نقوش بر دیوار غارها از آن استفاده کرد (۱). یکی از قدیمی‌ترین رنگدانه‌های قرمز که از دوره ماقبل تاریخ توسط انسان‌ها استفاده شده، هماتیت ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) است (۲). این اکسید فلزی تنوع رنگی بالایی داشته و به دلیل شدت رنگی، پایداری حرارتی و شیمیایی بالا علاوه بر تزیین دیوارها، مقابر، مومیایی‌ها و غیره در صنعت سرامیک و لعاب‌سازی نیز ترجیح داده می‌شده است (۳). در سرامیک‌های سنتی، حضور طیف گسترده فام‌ها از زرد، قرمز تا قهوه‌ای تیره احتمال کاربرد اکسید آهن در محیط پخت اکسایش را بالا می‌برد.

فام قرمز، مورد توجه سفالگران دوره میانی اسلامی در ایران نیز قرار گرفته و به شیوه‌های متنوعی در سفالینه‌نگاری‌ها استفاده شده است. یکی از شیوه‌های تزیین سفال دوره میانی اسلامی (از اواسط سده ۶ هـ.ق تا اواسط سده ۷ هـ.ق) در ایران که فام قرمز در آن بسیار مشاهده می‌شود و اختراع سفالگران کاشان نیز بوده است، سفال مینیایی (هفت‌رنگ) نام دارد (۴، ۵). پس از رواج این شیوه در منطقه کاشان (۶-۸)، در دیگر نقاط ایران از جمله ری و ساوه (۵)، نطنز و سلطان‌آباد (۹)، تخت‌سلیمان (۱۰)، تبریز (۱۱) و دژ الموت به عنوان جدیدترین مکان (۱۲)، نیز این روش را برای تزیین ظروف و کاشی‌ها به کار بردند. برخی پژوهشگران بر این نظرند که در این سفال‌ها برای تکمیل فرایند تزیین، شی بین هنرمند و کوره مدام در رفت و آمد بوده است (۱۳) بنابراین مینیایی، علاوه بر اینکه شیوه‌ای پرهزینه بوده احتمالاً نیاز به سه مرحله پخت در کوره نیز داشته است. مرحله اول: پخت بدنه (بیسکویت)، مرحله دوم: اجرای لایه لعاب زمینه روی بدنه پشت پوش (سفید یا فیروزه‌ای) و یا شفاف (گاه اعمال رنگ‌های درون‌لعابی لاجوردی و فیروزه‌ای) و پخت دوم، مرحله سوم: نقاشی با لعاب چندرنگ (سیاه، قهوه‌ای، قرمز، سبز، زرد و سفید) رولعابی شامل تصویرسازی پیکره‌ها و داستان‌های کهن، خوشنویسی همراه با تزیینات گیاهی و هندسی و پخت سوم. مرحله چهارم: برای تکمیل فرایند، بخشی از قسمت‌ها نیز با برش‌هایی از ورق طلا، زرآراسته شده و برای چهارمین بار به کوره می‌رفته است<sup>۱</sup>

۱- باید توجه داشت که در برخی موارد تقدم و تاخر لایه‌ها در تزیین با شیوه مینیایی اتفاق می‌افتاده است. به‌ویژه قرارگیری لایه طلا روی سطح که گاهی در زیر بخش قلم‌گیری بوده و گاه نیز روی آن قرار می‌گرفته است. حضور ورق طلا زیر بخش قلم‌گیری، می‌تواند نشانی از انجام عملیات حرارتی تکمیلی روی طلا باشد؛ زیرا که بخش قرمز، سیاه، سفید و غیره در قلم‌گیری برای تثبیت نیاز به پخت داشته است. با این حال در برخی نمونه‌ها که ورق طلا سطحی‌ترین لایه است نیز، وجود فرورفتگی‌ها و

(۱۴). در نمونه‌های پرکار و پیچیده مینیایی می‌توان طیف وسیعی از فام‌ها و تزیینات ورق طلا را هم‌زمان مشاهده کرد که برای غنی‌تر کردن طرح‌ها به کار می‌رفته است (۴). بنابراین می‌توان گفت که مینیایی شامل ترکیبی از شیوه‌های درون‌لعابی، رولعابی و گاه زرین‌فام همراه با کاربرد گسترده طیف رنگی بوده است. در این شیوه، تنوع بالایی از نقوش مینیاتوری با جزئیات، کار شده و عمدتاً نقوش پیکره‌ای هستند. این ویژگی‌های منحصر به فرد در سایر انواع آثار سرامیکی دوره میانی اسلامی مشاهده نمی‌شود (۵). ابوالقاسم کاشانی در بخش "در معرفت صنعت کاشیگری" رساله خود با نام "عرایس الجواهر و نفایس الاطایب" (۷۰۰ هـ.ق) از مینیایی با عنوان "هفت‌رنگ" یاد می‌کند و ذکر می‌کند که این شیوه در دوران وی دیگر کار نمی‌شده و از یادها رفته است (۱۵). وی، در انتهای رساله، هنگامی که شیوه "مطلا کردن" یا زراندود را شرح می‌دهد می‌نویسد: "سرخ قمصری با قدری آبگینه مسحوق [اسپیده شده] آمیخته، تزویق کنند [ببارایند]" (۱۵). ترجمه امروزی این جمله، خواننده را به استفاده از فام قرمز موسوم به "سرخ قمصری" هدایت می‌کند که در ترکیب با پودر شیشه، برای تزیین بخش‌های زراندود کاربرد داشته است. علاوه بر این، فام قرمز در تزیین سفال مینیایی بسیار پرکاربرد بوده و در بسیاری از آثار برای قلم‌گیری و رنگ‌گذاری سطح از آن استفاده می‌شده است. همه موارد مزبور به اهمیت این رنگ در سفال مینیایی اشاره دارد. از این جهت، بررسی و شناسایی انواع فام قرمز در سرامیک‌ها و لعاب‌های دوره اسلامی مورد توجه پژوهشگران بسیاری بوده که در انجام روند این پژوهش نیز بسیار راهگشا بودند. به ویژه اینکه کاربرد هماتیت به‌عنوان عامل ایجاد فام قرمز برای تزیینات روی لعاب در آثار مینیایی و لاجوردینه توسط پژوهشگران متعددی از جمله آلن (۱۶)، میسون و همکارانش (۱۷)، کاس و همکارانش (۱۸)، یزدانی و همکارانش (۱۹)، ون و پلارد (۲۰)، هولاکویی و همکارانش (۲۱) و کلمبان و همکارانش (۲۲) بررسی و گزارش شده است. آلن (۱۶)، منشا و محل تولید سرخ قمصری را که کانی مخصوص تولید فام قرمز رولعابی دوره میانی است و برای تزیین زراندود استفاده می‌شده است، روستای قمصر کاشان می‌داند. میسون و همکارانش (۱۷)، با استفاده از روش پتروگرافی رنگدانه‌های سیاه، سفید، آبی، قرمز و قهوه‌ای را بررسی کرده و دریافتند، تمام رولعابی‌ها همچون قرمز، با مخلوط کردن رنگدانه معدنی و فریت پایه شیشه‌ای به‌دست آمده‌اند. در این لعاب‌ها عامل تولید فام قرمز، هماتیت شناخته شده است. کبلو برن‌استد (۱۴)، رنگدانه آبی، فیروزه‌ای و قرمز را به روش پتروگرافی مطالعه کرده است. وی همچنین پایه تمامی

حباب‌های سوزنی در سطح طلا می‌تواند نشان‌دهنده یک عملیات حرارتی باشد (۱۹).

۲- «...و اگر آلات هفت رنگ خواهند که در این زمان مندرس است.» (۱۵).

### محوطه تاریخی ری

شهر باستانی ری در ۳۶ کیلومتری جنوب شرقی تهران واقع شده و در دشت کویر و میان رشته کوه البرز قرار دارد. این منطقه در مختصات جغرافیایی "۲۰' ۲۶" ۵۱° طول شرقی و "۳۱' ۳۶" ۳۵° عرض شمالی واقع شده و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۰۶۲ متر است (۲۳). ری در گذر تاریخ از دوران کهن تا دوره اسلامی از نظر سیاسی، اقتصادی و فرهنگی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده است. متأسفانه این شهر پررونق نیز از هجوم ویرانگر مغول در امان نماند و در اوایل سده ۷ هـ ق با خاک یکسان شد. اشمیت، سرپرستی حفاری تپه‌های ری را از سال ۱۹۳۴ تا ۱۹۳۶ میلادی بر عهده داشت. کاوش‌های گسترده وی در ویرانه‌های این شهر، آنچه را که درباره شکوه بناها و رونق صنایع به ویژه سفالگری، فلزکاری و پارچه بافی آن در منابع کهن ذکر شده را به اثبات می‌رساند.

### ۲- بخش تجربی

#### ۲-۱- معرفی نمونه‌های مطالعاتی مورد پژوهش

در این پژوهش، ۱۲ نمونه مطالعاتی از سفالینه‌های مینایی دوره اسلامی که در آنها از فام‌های قرمز و قهوه‌ای برای بخشی از تزیینات سطحی آن استفاده شده، مطالعه و آنالیز شده‌اند. نمونه‌های مورد پژوهش بر اساس تنوع رنگ لعاب زمینه و همچنین حداکثر تنوع کاربرد قرمز و قهوه‌ای بر روی سطح، گزینش و انتخاب شد. بدین جهت، رنگ‌های رایج لعاب زمینه در سفال مینایی شامل سفید، فیروزه‌ای و آبی که دارای رنگ قرمز بودند در نظر گرفته شد. رنگ‌های قرمز نیز بر اساس تنوع کاربرد روی سطح، شامل قلم‌گیری دور نقوش رنگی و بخش زراندود، رنگ قرمز روی دیگر رنگ‌های رولعابی و یا در زیر دیگر رنگ‌ها، رنگ قرمز به عنوان پوشاننده سطح، رنگ قرمز با غلظت بالا و همچنین رقیق، انتخاب شدند. این نمونه‌ها شامل بخش‌هایی از لبه، بدنه و دسته ظروف مینایی هستند. نمونه‌های مورد بررسی عبارت‌اند از سه نمونه یافت شده از کاوش‌های علمی فصل هفتم در قلعه الموت، زیر نظر دکتر حمیده چوبک، با شناسه (A3, A10, A11)، دو نمونه یافت شده از ری با شناسه (RH2, RD2504) که بر اساس اطلاعات دریافتی از موزه ملی ایران، از کاوش‌های اشمیت بین سال‌های ۱۹۳۴-۱۹۳۶ میلادی به‌دست آمده و هفت نمونه مطالعاتی از سفال‌های مینایی موزه ملی ایران با شناسه (M12, M15, M26, M35, M42, M43, M110) که مکان کشف آنها ثبت نشده ولی منسوب به ری هستند. تصاویر نمونه‌های مینایی مطالعه شده در پژوهش حاضر در شکل ۱ ارائه شده است.

رولعابی‌ها در مینایی را لعاب‌های سربی می‌داند. کاس و همکارانش (۱۸)، با مطالعه سفال‌های مینایی موجود در گالری فریر، دو نوع فام قرمز آجری و قرمز تیره را شناسایی کردند. آنها هماتیت را عامل اصلی تولید هر دو نوع قرمز دانستند. یزدانی و همکارانش (۱۹)، لایه زراندود در سفال مینایی را بررسی کرده و حضور اکسید آهن را برای دورگیری بخش‌های آراسته به ورق طلا تایید می‌کنند.

با توجه به پژوهش‌های پیشین، به نظر می‌رسد که تمامی پژوهشگران نتایج نسبتاً مشابهی را در مورد ماده رنگ‌زای قرمز به‌دست آورده‌اند. با این وجود تاکنون پژوهشی که به صورت ویژه بر روی فام قرمز رولعابی در نمونه‌های ری موجود در موزه ملی ایران و قلعه الموت متمرکز باشد یافت نشد. بنابراین نیاز است تا این قطعات نیز مورد بررسی قرار گرفته و با شیوه‌های ترکیبی آنالیز ساختاری و تصویری، به آنها پرداخته شود. در این پژوهش به‌صورت ویژه به رنگدانه‌های قرمز و قهوه‌ای، پرداخته شده است. به‌منظور بررسی دقیق‌تر شیوه ایجاد فام قرمز و مشخص نمودن عناصر عامل ایجاد این رنگدانه، آنالیز عنصری پوشش‌های قرمز و قهوه‌ای در انواع سفالینه‌های مینایی به‌دست آمده از این محوطه‌های تاریخی (که امکان تهیه نمونه از آنها وجود داشته)، انجام شده‌است. همچنین، نتایج تجربی در این پژوهش با رساله "عرایس الجواهر و نغایس الاطایب"، مقایسه شده است.

### موقعیت جغرافیایی دژ الموت و ری

#### دژ الموت

دژ الموت یکی از قلعه‌های تاریخی در ایران است که برفراز صخره‌ای با شیب‌های تند و پرتگاه‌های عمیق در دامنه جنوبی کوه‌های البرز در شمال استان قزوین و در روستای گازرخان الموت واقع شده است. این محوطه تاریخی بر روی صخره‌ای که بلندی آن از زمین‌های پیرامون خود ۲۰۰ متر و گستره دژ ۲۰۰۰ متر مربع است، بنا شده است. الموت در مختصات جغرافیایی "36°26'58.0"E "13.0'35'50"N برفراز صخره‌ای به ارتفاع ۲۱۶۳ متر از سطح دریا قرار دارد. این دژ با شماره ۷۲۵۲ در فهرست آثار ملی ایران به ثبت رسیده‌است. از منظر چوبک، تازه‌ترین یافته‌ها در زمینه سفال‌های مینایی از کاوش‌های اخیر در دژ الموت به‌دست آمده، با این وجود شواهدی مبنی بر تولید آثار در این دژ یافت نشده است. به دلیل موقعیت سیاسی دژ الموت، احتمال وارداتی بودن آثار به این منطقه وجود دارد (۱۲).

2- Erich F. Schmidt:

۱- گزارش پشت نقشه قزوین ۱:۱۰۰۰۰، الموت، انتشارات سازمان زمین‌شناسی.

است. همچنین برای محاسبه درصد وزنی عناصر تشکیل دهنده نمونه‌ها، از نرم افزار گویکس تحت ویندوز (GUIPIXWIN) استفاده شده است (۲۶). این نرم‌افزار با برازش غیرخطی طیف‌های به‌دست آمده از آزمایش میکروپیکسی با استفاده از پارامترهای فیزیکی که آزمایشات در آن شرایط انجام شده است، میزان درصد وزنی عناصر تشکیل‌دهنده نمونه را محاسبه می‌کند.

در این پژوهش برای انجام آنالیز میکروپیکسی از باریکه پروتون با انرژی ۲،۵-۲،۲ MeV و با شدتی در حدود ۵۰pA-۲۰ که توسط شتاب‌دهنده واندوگراف ۳MV آزمایشگاه واندوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای تولید می‌شود، استفاده شده است. قطر باریکه پروتون در این آزمایش‌ها کمتر از ۱۰ میکرومتر بوده است. برای آشکارسازی اشعه X از آشکارساز Si(Li) که در زاویه ۱۳۵ درجه نسبت به باریکه پروتون فرودی قرار گرفته و دارای قدرت تفکیک ۱۵۰eV است، استفاده شد. همچنین در این آزمایش‌ها از سیستم میکرو باریکه و جمع‌آوری داده که توسط شرکت اکسفورد ساخته شده، استفاده شده است (۲۷). برای اندازه‌گیری میزان خطای آزمایشات در اندازه‌گیری درصد وزنی عناصر تشکیل دهنده نمونه‌های مورد پژوهش، نمونه‌های استاندارد تهیه‌شده از موزه کورنینگ نیویورک که دارای کدهای A تا D هستند، هم‌زمان و تحت شرایط یکسان با نمونه‌های اصلی مورد آنالیز قرار گرفتند (۲۸). نتایج آنالیز این نمونه‌های استاندارد در جدول ۱ ارائه شده است و در آن درصد وزنی عناصر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه واندوگراف با نتایج گزارش شده از این نمونه‌ها مقایسه شده است که نشان‌دهنده دقت بالای اندازه‌گیری‌ها در پژوهش حاضر است.

### ۲-۲-۲- میکروسکوپ الکترونی روبشی

در این پژوهش برای شناسایی عناصر موجود در ساختار رنگدانه قرمز، از میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به طیف‌سنج تفرق انرژی پرتو ایکس (EDS-SEM) استفاده شد. در این راستا از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل VEGA III، ساخت شرکت TESCAN، به همراه دستگاه اسپکتروفوتومتر تفرق اشعه ایکس (EDS) مدل RONTEC ساخت آلمان مرکز پژوهش متالورژی رازی تهران استفاده شده است.

### ۲-۲-۳- میکروسکوپ نوری دیجیتال

در این پژوهش از میکروسکوپ لوپ دیجیتال (Dino-Lite) موجود در آزمایشگاه حفاظت و مرمت موزه ملی ایران، مدل AM-4113T ساخت کشور تایوان، با گستره بزرگنمایی 20X-200X با قابلیت عکس‌برداری از نمونه‌ها استفاده شده است. با استفاده از میکروسکوپ Dino Lite بررسی دقیق‌تر پوشش سطح لعاب، امکان دریافت جزئیات بهتر و کیفیت بالاتر تصویر از لایه‌های لعاب و به ویژه مکان قرارگیری رنگ قرمز روی سطح فراهم شده است.



شکل ۱: نمونه‌های مینایی مطالعه‌شده در پژوهش حاضر. گروه ۱: سفال‌های مینایی محوطه باستانی ری، موجود در موزه ملی ایران با شناسه: RH2، RD2504، گروه ۲: نمونه‌های موجود در موزه ملی ایران منسوب به ری با شناسه: M12، M15، M26، M35، M42، M43، M110 و گروه ۳: نمونه‌های یافت شده از دژ الموت با شناسه: A3، A10، A11.

Figure 1: Sample of Mina'i sherds examined in this study. Group 1: Sample RH2, RD2504, National Museum of Iran, Tehran: Excavated from Rayy. Group 2: Sample M42, M43, M110 M35, M26, M12, M15 National Museum of Iran, Tehran: attributed to Rayy, and Group 3: Sample A3, A10, A11 Excavated from Alamut castle, Qazvin-Iran.

### ۲-۲-۲- شرایط و روش‌های آنالیز

#### ۲-۲-۲-۱- آنالیز میکروپیکسی

آنالیز عنصری مواد با استفاده از باریکه میکرونی از ذرات پرانرژی، روش میکروپیکسی نامیده می‌شود (۲۴). با استفاده از باریکه میکرونی از ذرات باردار، می‌توان سطح نمونه مورد بررسی را روبش و اسکن نمود و تصویری دو بعدی از توزیع عنصری عناصر موجود در نمونه را در ابعاد میکرون به‌دست آورد (۲۵). اگر چه این کار برای نمونه‌های همگن مزیت مهمی محسوب نمی‌شود اما در مورد نمونه‌هایی مانند سفالینه‌های مینایی که دارای رنگدانه‌های مختلفی در سطح نمونه هستند، بسیار مفید و دارای اهمیت است. بنابراین در این نمونه‌ها سطوح مختلفی در ابعاد چند میلیمتر مربع که با رنگ‌های مختلف نقاشی شده، آنالیز شده است. سپس با استفاده از توزیع عنصری عناصر موجود در نمونه، طیف میکروپیکسی مربوط به رنگدانه‌های مختلف که نمایانگر ترکیب اصلی نمونه مورد بررسی است، برای محاسبه و اندازه‌گیری درصد وزنی عناصر، استخراج شده

جدول ۱: نتایج آنالیز عنصری نمونه‌های استاندارد موزه کورنینگ و مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج گزارش شده.

Table 1: The recommended and measured elemental composition of Corning standard glass A to D as appropriate standard samples.

Standard Samples	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Cl	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CoO	NiO	Cu <sub>2</sub> O	ZnO	Sb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	BaO	PbO	
A	Measured(wt. %)	14.59	2.69	1.12	66.66	0.14	2.70	4.58	0.77	1.01	1.10	0.18	0.02	1.13	0.06	1.55	0.45	0.09
	Quoted(wt. %)	14.30	2.66	1.00	66.56	0.10	2.87	5.03	0.79	1.00	1.09	0.17	0.02	1.17	0.04	1.75	0.56	0.12
B	Measured (wt.%)	17.33	1.04	4.24	61.95	0.24	1.01	8.04	0.11	0.24	0.34	0.05	0.09	2.58	0.21	0.24	0.02	0.52
	Quoted(wt. %)	17.00	1.03	4.26	61.55	0.20	1.00	8.56	0.09	0.25	0.34	0.05	0.10	2.66	0.16	0.46	0.05	0.61
C	Measured (wt. %)	0.94	2.37	1.30	34.87	0.15	2.60	4.66	0.66	0.21	0.30	0.18	0.02	1.27	0.05	0.01	11.51	37.76
	Quoted(wt. %)	1.07	2.67	0.87	34.78	0.10	2.84	5.07	0.79	0.89	0.34	0.18	0.02	1.13	0.05	0.03	11.40	36.70
D	Measured (wt. %)	1.27	4.05	5.84	56.42	0.12	10.7	13.1	0.35	0.50	0.47	0.01	0.05	0.33	0.10	0.95	0.27	0.44
	Quoted(wt. %)	1.20	3.94	5.30	55.24	0.40	11.3	14.8	0.38	0.55	0.52	0.02	0.05	0.38	0.10	0.97	0.51	0.48

در زیر قلم‌گیری قرمز کارشده (جدول ۲: ردیف ۶)، در برخی از نمونه‌های مورد مطالعه نیز زیر بخش زرآراسته قرار گرفته (جدول ۲: ردیف ۴) و در چند نمونه نیز رنگ قرمز به عنوان قلم‌گیری روی بخش‌های زرآراسته مشاهده می‌شود (جدول ۲: ردیف ۵).

### ۲-۳- نتایج آنالیز عنصری نمونه‌ها به روش میکروپیکسی

#### ۱-۲-۳- نقشه توزیع عنصری طیف رنگی قرمز و قهوه‌ای

یکی از اهداف این مطالعه در بررسی سفال‌های مینایی، شناسایی عامل ایجاد رنگ‌های قرمز و قهوه‌ای به‌کار رفته در تزیینات این نمونه‌ها بوده است. با این هدف، قسمت‌های مختلفی از هر نمونه با روش میکروپیکسی آنالیز سطحی شده و با استفاده از توزیع عناصر به‌دست آمده از روش میکروپیکسی عامل رنگ‌های به‌کار رفته در این نمونه‌ها مشخص شده‌اند. در شکل‌های ۲ تا ۷ عکس‌ها و نواحی مختلف آنالیز شده در نمونه‌های مورد بررسی نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، رنگ قرمز و قهوه‌ای در لایه‌های گوناگونی برای تزیین روی نمونه‌ها استفاده شده است. همچنین، تفاوت توزیع عنصری بین رنگدانه قرمز و قهوه‌ای در این نمونه‌ها کاملاً واضح است.

۱- گاهی در سفال‌های مینایی پیش از قلم‌گیری جهت مرزبندی سطوح رنگی، از طراحی اولیه با خطوط کمرنگ استفاده شده است. این طراحی اصطلاحاً پیش‌طرح نامیده می‌شود.

### ۳- نتایج و بحث


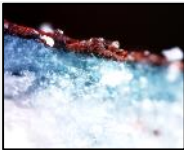
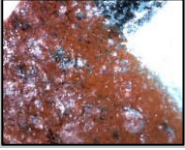

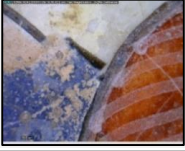



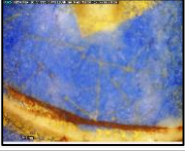


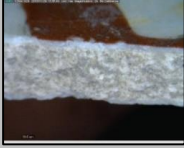
#### ۱-۳- نتایج میکروسکوپ نوری

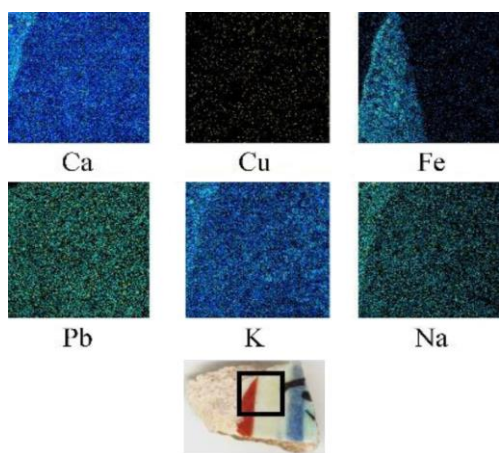
##### ۱-۱-۳- قرمز و قهوه‌ای

مطالعات دیداری تصاویر سفال‌های مینایی مورد مطالعه با استفاده از میکروسکوپ نوری نشان می‌دهد که تنوع بالایی از طیف رنگی قرمز در محدوده رنگی نارنجی روشن تا قرمز و قهوه‌ای تیره وجود دارد. این رنگ‌ها، در همه نمونه‌های مورد پژوهش به صورت رولعابی اجرا شده و به دلیل ضخامت و غلظتی که دارد خط جدایش رنگ قرمز و قهوه‌ای از لعاب زمینه کاملاً مشخص است. در میان نمونه‌ها، رنگ قهوه‌ای در نمونه‌های RD2504 و RH2, M42 مشاهده می‌شود. همان‌گونه که در جدول ۲، ردیف ۱ مشاهده می‌شود، رنگ قرمز و قهوه‌ای به صورت رولعابی روی نمونه اجرا شده است. بر این اساس می‌توان کاربرد طیف رنگی قرمز و قهوه‌ای را به عنوان رنگ‌گذاری سطح (جدول ۲: ردیف ۲، ۳، ۶)، پیش‌طرح<sup>۱</sup> (جدول ۲: ردیف ۶) و دورگیری (جدول ۲: ردیف ۱، ۴، ۵، ۶) تقسیم‌بندی نمود. همان‌گونه که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، شش‌گونه قرمز و قهوه‌ای از نظر مکان قرارگیری در سطح نمونه‌های مورد پژوهش وجود دارد. در برخی از نمونه‌ها، این رنگ، سطحی‌ترین لایه بوده و روی لعاب زمینه به صورت مستقل کار شده (جدول ۲: ردیف ۱)، گاهی روی دیگر رولعابی‌ها و قلم‌گیری‌ها اجرا شده (جدول ۲: ردیف ۲)، گاهی نیز به صورت رولعابی اما در زیر دیگر رولعابی‌ها و قلم‌گیری‌ها اجرا شده است (جدول ۲: ردیف ۳، ۴). در برخی نمونه‌ها به عنوان پیش‌طرح

جدول ۲: تصاویر میکروسکوپ نوری از تنوع به کارگیری انواع طیف رنگ قرمز و قهوه‌ای در سطح سفالینه‌های مینایی.

Table 2: Optical microscopic image of variety of overglaze red and brown color applicant on the surface of Mina'i pottery

No.	Sample	Red color/ on base glaze	Red color/ cross section	Discription
1	M42			Type 1: Red as an overglaze, directly on the base glaze
2	M43			Type 2: Red as an overglaze, over black outline drawing.
3	RD2504			Type 3: Brown as an overglaze, under black and white outline drawing.
4	A3			Type 4: Red as an outline drawing under leaf gilding.
5	RH2			Type 5: Red as an outline drawing over leaf gilding.
6	M110			Type 6: Red as an overglaze over drawing, under-drawing and painting.

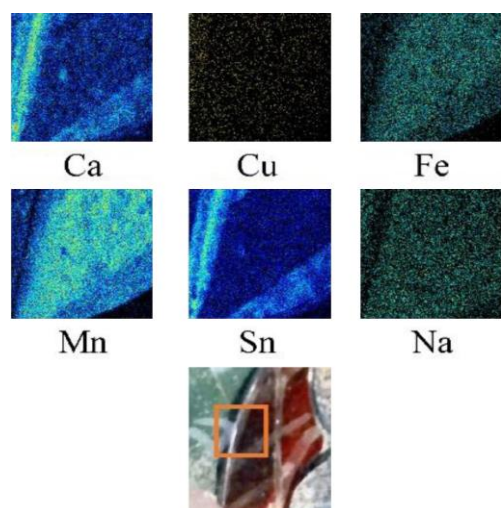


شکل ۲: توزیع عنصری برخی از عناصر موجود سطح نمونه M12، تزیین

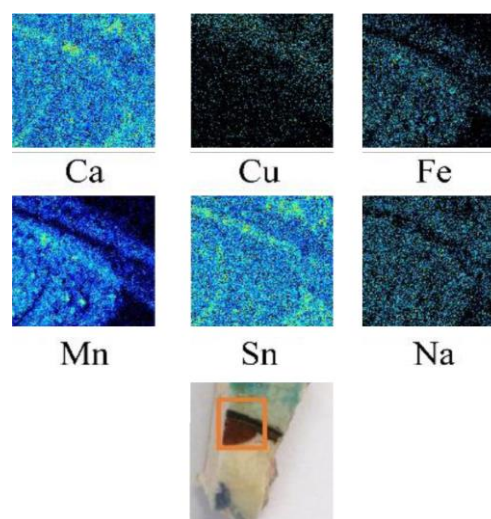
شده با رنگ قرمز، با استفاده از روش میکروپیکسی.

Figure 2: Optical photo and elemental distribution maps of few elements in surface of M12 with red color, obtained using a micro-PIXE.

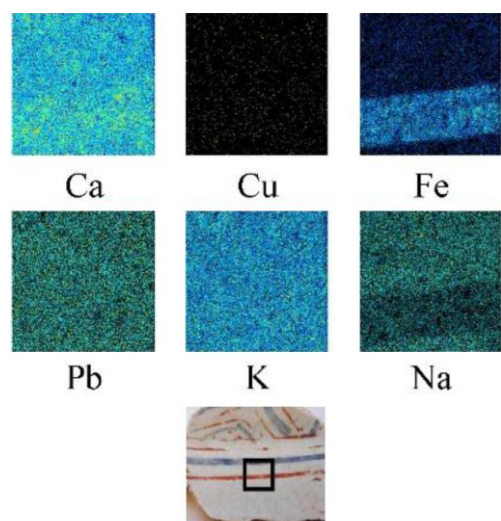
نتایج به‌دست آمده از آنالیز نشان می‌دهد که رنگ قرمز به عنصر آهن تعلق دارد. همچنین در شکل‌های ۲ تا ۷ با توجه به نقشه توزیع عنصری سرب مشخص است که اکسید سرب علاوه بر کاهش نقطه ذوب، برای ساخت لعاب پشت‌پوش نیز در کنار اکسید قلع استفاده شده (۲۹) که در تمام ناحیه آنالیز شده وجود دارد و تقریباً در تمام نمونه‌ها توزیع همگنی دارد. عناصر دیگری مانند کلسیم، پتاسیم و سدیم نیز در این نمونه‌ها تقریباً نقشه توزیع همگنی دارند.



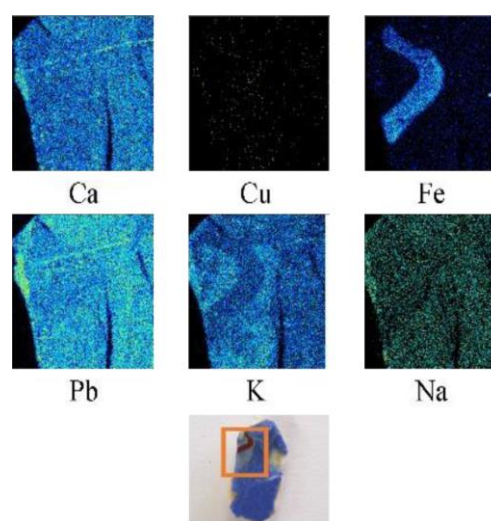
شکل ۵: توزیع عنصری برخی از عناصر موجود در ناحیه سطح نمونه RD2504، تزیین شده با رنگ قهوه‌ای با استفاده از روش میکروپیکسی، ری. **Figure 5:** Optical photo and elemental distribution maps of few elements in surface of RD2504 with brown color obtained using a micro-PIXE, Rayy.



شکل ۳: توزیع عنصری برخی از عناصر موجود سطح نمونه M42، تزیین شده با رنگ قهوه‌ای با استفاده از روش میکروپیکسی. **Figure 3:** Optical photo and elemental distribution maps of few elements in surface of M42 with brown color, obtained using a micro-PIXE.



شکل ۶: توزیع عنصری برخی از عناصر موجود در سطح نمونه A10، تزیین شده با رنگ قرمز-نارنجی با استفاده از روش میکروپیکسی، الموت. **Figure 6:** Optical photo and elemental distribution maps of few elements in surface of A10 with red-orange color obtained using a micro-PIXE, Alamut.



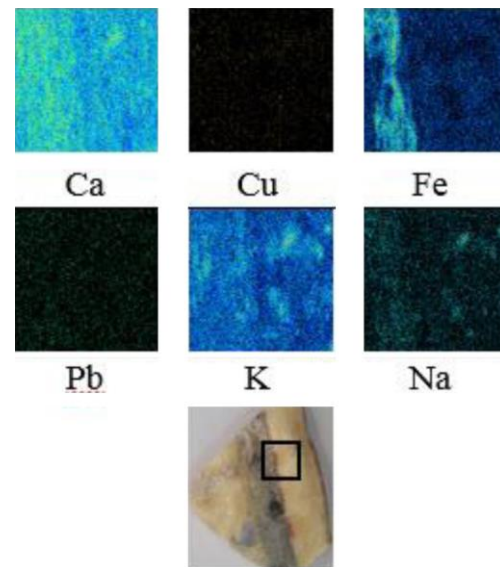
شکل ۴: توزیع عنصری برخی از عناصر موجود در سطح نمونه RH2، تزیین شده با رنگ قهوه‌ای با استفاده از روش میکروپیکسی، ری. **Figure 4:** Optical photo and elemental distribution maps of few elements in surface of RH2 with brown color obtained using a micro-PIXE, Rayy.



RH2. عامل ایجاد رنگ قرمز- قهوه‌ای اکسید آهن به میزان ۱۱,۵ درصد بوده است. در رنگ قهوه‌ای به کار رفته در نمونه RD2504، درصد عنصر آهن، ۲۲,۳۳ درصد است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در مقایسه با رنگ قرمز، میزان اکسید آهن در رنگ قهوه‌ای، بسیار بیشتر است. اگرچه در منابع کهن به ترکیبات رنگ قهوه‌ای اشاره نشده اما با توجه به داده‌های به دست آمده با استفاده از روش میکروپیکسی در نمونه RD2504، در تهیه رنگ قهوه‌ای، احتمالاً در دستورالعمل ساخت رنگ قهوه‌ای از اکسید آهن با درصد بالا استفاده شده است. در سفال‌های مطالعاتی موزه ملی، میزان اکسید آهن بین ۱۴,۷۳-۳,۷۱ درصد متغیر است. البته باید اشاره شود که علاوه بر اکسیدهای رنگدانه، عوامل دیگری نیز در تولید رنگ لعاب تاثیرگذار هستند که از آن جمله می‌توان به نوع فاز شیشه‌ای حاصل از عناصر سرب یا قلیا که یون‌ها در آن قرار می‌گیرند اشاره کرد که در ایجاد رنگ در لعاب تاثیر زیادی دارد (۳۱، ۳۰).

بر اساس نظر هم، میزان ۲۵-۱۲ درصد وزنی اکسید آهن در ترکیبات لعاب، رنگ قهوه‌ای تیره تولید می‌کند. با افزایش میزان اکسید آهن در لعاب‌های سربی، رنگ قرمز-قهوه‌ای تا قهوه‌ای تیره ایجاد می‌شود (۳۲). همچنین عواملی چون نوع و میزان اکسید آهن در ترکیبات لعاب، دانه‌بندی، همنشینی با دیگر اکسیدهای موجود در لعاب و اتمسفر و دمای کوره طیف رنگی زرد تا قهوه‌ای تیره و حتی سبز و خاکستری را ایجاد می‌کند. میزان ۴-۱ درصد وزنی اکسید آهن؛ رنگ زرد، ۶-۴ درصد وزنی اکسید آهن؛ قرمز مایل به نارنجی، ۱۲-۶ درصد وزنی قرمز-قهوه‌ای و ۲۵-۱۲ درصد وزنی قهوه‌ای تیره تولید می‌کند. بهبود کیفیت رنگی در این محدوده با حضور سیلیکای بالا و اکسید آلومینیوم پایین، ایجاد می‌شود. اکسید آهن، در لعاب‌های سربی، رنگ قرمز- قهوه‌ای روشن تا تیره را بر حسب میزان درصد وزنی آن در لعاب، به وجود می‌آورد (۳۲). همچنین ترکیب هماتیت با کرومیت و یا اکسید منگنز نیز در حضور اکسید سرب برای ایجاد رنگ قهوه‌ای گزارش شده است (۲۰).

در ادامه برای بررسی و تحلیل تنوع مواد اولیه استفاده شده در ساخت لعاب زمینه و رنگدانه‌های به کار رفته در تزیینات، بر اساس نتایج ترکیبات عنصری ارائه شده در جدول ۳ از نمودارهای پراکندگی دو بعدی استفاده شده است. لعاب مورد استفاده در سفالینه‌های تاریخی از ترکیب مواد پایه، ماده گدازآور، ماده پشت‌پوش کننده و ماده رنگ‌زا تشکیل شده است (۳۳): الف- مواد پایه که ماده اصلی تمام لعاب‌ها است شامل سیلیس یا اکسید سیلیسیم است که برای تهیه آن از شن و ماسه و یا سنگ چخماق (رگه‌های کوارتز خالص) استفاده می‌شده است. ب- مواد ذوب کننده یا گدازآور که باعث می‌شود نقطه ذوب سیلیس بسیار کم شود و غالباً



شکل ۷: توزیع عنصری برخی از عناصر موجود در سطح نمونه A11، تزیین شده با رنگ قرمز با استفاده از روش میکروپیکسی. الموت.

Figure 7: Optical photo and elemental distribution maps of few elements in surface of A11 with red color obtained using a micro-PIXE, Alamut.

### ۲-۲-۳- ترکیبات عنصری رنگ قرمز و قهوه‌ای

نتایج آنالیز عنصری نواحی دارای فام‌های قرمز و قهوه‌ای و همچنین ترکیبات عنصری لعاب زمینه مجاور این رنگدانه‌ها برای مقایسه با ناحیه دارای رنگدانه در سفال‌های مینایی دژ الموت، ری و نمونه‌های مطالعاتی موزه ملی، در جدول ۳ ارائه شده است. در آنالیز میکروپیکسی با توجه به مقدار انرژی باریکه فرودی و ترکیبات عنصری نمونه مورد آنالیز، عمق نفوذ باریکه در ناحیه مورد آنالیز تغییر می‌کند. با توجه به اینکه در این پژوهش انرژی باریکه مورد استفاده در بازه ۲/۵-۲/۲ MeV بوده است، عمق نفوذ باریکه در ناحیه آنالیز شده تقریباً ۳۰ تا ۴۰ میکرومتر خواهد بود. بنابراین در نواحی که رنگدانه وجود دارد با احتمال بسیار زیاد باریکه از رنگدانه عبور خواهد کرد و به لعاب زمینه زیر آن نیز خواهد رسید، زیرا ضخامت لایه رنگدانه قرمز همان‌طور که در بخش آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی اشاره شده است کمتر از ۳۰ میکرومتر است. بنابراین ترکیبات عنصری ناحیه رنگدانه شامل ترکیبات عنصری رنگدانه و لعاب زمینه خواهد بود و مقایسه ناحیه بدون رنگدانه با ناحیه دارای رنگدانه می‌تواند معیاری از عامل ایجاد رنگدانه باشد. بر اساس این جدول و مقایسه ترکیبات عنصری ناحیه دارای رنگدانه و ناحیه بدون رنگدانه، می‌توان مشاهده کرد که تنها عنصر آهن در این دو ناحیه با یکدیگر اختلاف زیادی دارد. بنابراین آهن به عنوان ماده اصلی رنگ‌زا در ایجاد رنگ قرمز کاملاً تایید می‌شود. در سفال‌های الموت میزان اکسید آهن از ۸,۴-۵,۴۳ درصد متغیر است. در نمونه

شامل اکسیدهای قلیایی همچون اکسید سدیم و اکسید سرب است و در برخی موارد هم از اکسید پتاسیم و اکسید باریم و یا ترکیب این مواد استفاده می‌شده است. ج- مواد پشت‌پوش کننده (کدرکننده) که به منظور کدر کردن سطح لعاب از آن استفاده می‌شده و غالباً

شامل اکسید قلع بوده است. د- مواد رنگ‌زا که برای ایجاد رنگدانه‌ها و یا لعاب‌های رنگی مختلف از آنها بهره می‌گرفته‌اند که غالباً شامل اکسیدهای فلزی مانند اکسیدهای منگنز، آهن، مس و کبالت بوده‌اند که در حین ساخت لعاب و رنگدانه‌ها به آن اضافه می‌شده‌اند.

جدول ۳: آنالیز عنصری رنگ قرمز و لعاب زمینه در سفال‌های مینایی دژ الموت، ری و موزه ملی ایران، به صورت اکسید، براساس درصد وزنی.

**Table 3:** Elemental composition of red pigment and baseglaze in Mina'i wares, Alamut castle, Rayy and National Museum of Iran in weight percent (wt. %) as oxides form.

Sample code	Site	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl	K <sub>2</sub> O
A3-brick red pigment	Alamut	0.56	1.63	3.53	65.76	0.62	0.51	1.68
A3-Turquoise base glaze	Alamut	1.34	1.43	4.01	71.8	0	0.29	2.89
A10-red orange pigment	Alamut	1.37	1.17	1.79	48.59	0	0.47	2.18
A10-white base glaze	Alamut	2.93	1.28	1.41	54.11	0	0.33	2.17
A11-brick red pigment	Alamut	0.4	1.1	6.59	73.17	0.72	0.3	1.8
A11-colorless base glaze	Alamut	0	0.32	6.69	82.17	0.49	0.14	1.79
RH2-red-brown pigment	Rayy	4.26	1.66	4.85	43.73	2.93	0.68	1.94
RH2-blue base glaze	Rayy	5.88	1.82	2.27	52.05	0.96	0.76	1.85
RD2504-brown pigment	Rayy	5.8	0.6	4.68	43.52	0	0.22	1.1
RD2504-white base glaze	Rayy	6.23	0.91	3.54	54.94	0	0	1.81
M12-red orange pigment	Rayy	6.07	0.95	1.89	49.91	0	0.29	1.22
M12-white base glaze	Rayy	4.92	1.23	1.34	48.14	0	0.56	1.67
M15-brick red pigment	Rayy	0	0	4.48	31.79	0	0	2.44
M15-colorless base glaze	Rayy	0.23	1.11	2.25	36.6	0	1.08	1.72
M26-brick red pigment	Rayy	2.38	0.47	2.03	47.97	0	0	1.6
M26-Turquoise base glaze	Rayy	1.25	2.69	1.83	44.86	0	0.39	1.43
M35-red orange pigment	Rayy	6.52	1.61	1.48	45.33	0	0	0.84
M35-white base glaze	Rayy	7.1	1.54	1.53	46.66	0	0.28	0.99
M42-red brown pigment	Rayy	2.62	0.62	1.85	48.86	0	0.19	2.46
M42-white base glaze	Rayy	1.02	0.6	2.5	51.29	0	0.39	3.19
M43-brick red pigment	Rayy	2.04	0.95	1.65	50.61	0	0.31	2.08
M43-white base glaze	Rayy	1.74	2	1.16	51.07	0	0.35	2.12
M110-red pigment	Rayy	3.11	1.05	3.19	33.44	4.65	6.78	2.37
M110-white base glaze	Rayy	1.22	0.91	2.62	43.25	1.41	1.26	2.2

جدول ۳: ادامه.

Table 3: Continue.

Sample code	Site	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CoO	Cu <sub>2</sub> O	PbO	SnO <sub>2</sub>	Pb/Sn
A3-brick red pigment	Alamut	9.67	0.19	7.56	0	3.78	4.41	0	-
A3-Turquoise base glaze	Alamut	7.51	0.12	1.54	0	4.62	4.33	0	-
A10-red orange pigment	Alamut	5.24	0.17	5.43	0	0.16	23.55	9.76	-
A10-white base glaze	Alamut	4.12	0.11	0.92	0	0.1	24.25	8.09	2.99
A11-brick red pigment	Alamut	6.69	0.22	8.4	0	0	0.49	0	-
A11-colorless base glaze	Alamut	5.68	0.16	2.53	0	0	0	0	-
RH2-red-brown pigment	Rayy	4.07	0.19	11.5	0	0.12	19.26	4.33	-
RH2-blue base glaze	Rayy	3.57	0	0.79	0.3	0	20.44	8.84	2.31
RD2504-brown pigment	Rayy	1.87	0	22.33	0	0.32	16.54	2.05	-
RD2504-white base glaze	Rayy	0.63	0	0.82	0	0	22.11	8.53	2.59
M12-red orange pigment	Rayy	1.83	0	5.44	0	0.24	27.42	3.76	-
M12-white base glaze	Rayy	2.85	0.11	0.64	0	0.33	34.21	3.39	10.09
M15-brick red pigment	Rayy	2.72	0.5	4.5	0	0	53.5	0	-
M15-colorless base glaze	Rayy	6.26	0.11	1.02	0	0	46.36	0	-
M26-brick red pigment	Rayy	5.36	0.16	6.68	0	2.87	24.88	4.72	-
M26-Turquoise base glaze	Rayy	9.01	0.2	0.64	0	2.66	26.11	7.99	3.26
M35-red orange pigment	Rayy	3.2	0	3.71	0	0	26.37	10.23	-
M35-white base glaze	Rayy	2.82	0	0.81	0	0	29.43	8.36	3.52
M42-red brown pigment	Rayy	3.31	0	14.73	0	0.26	16.51	8.25	-
M42-white base glaze	Rayy	5.27	0.13	1.39	0	0.23	20.22	13.54	1.49
M43-brick red pigment	Rayy	6.23	0.13	7.29	0	2.17	21.03	5.07	-
M43-white base glaze	Rayy	6.87	0.18	0.94	0	2.3	22.3	8.67	2.57
M110-red pigment	Rayy	8.22	0.17	6.65	0	0	21.39	8.71	-
M110-white base glaze	Rayy	4.72	0	0.9	0	0	31.4	9.75	3.22

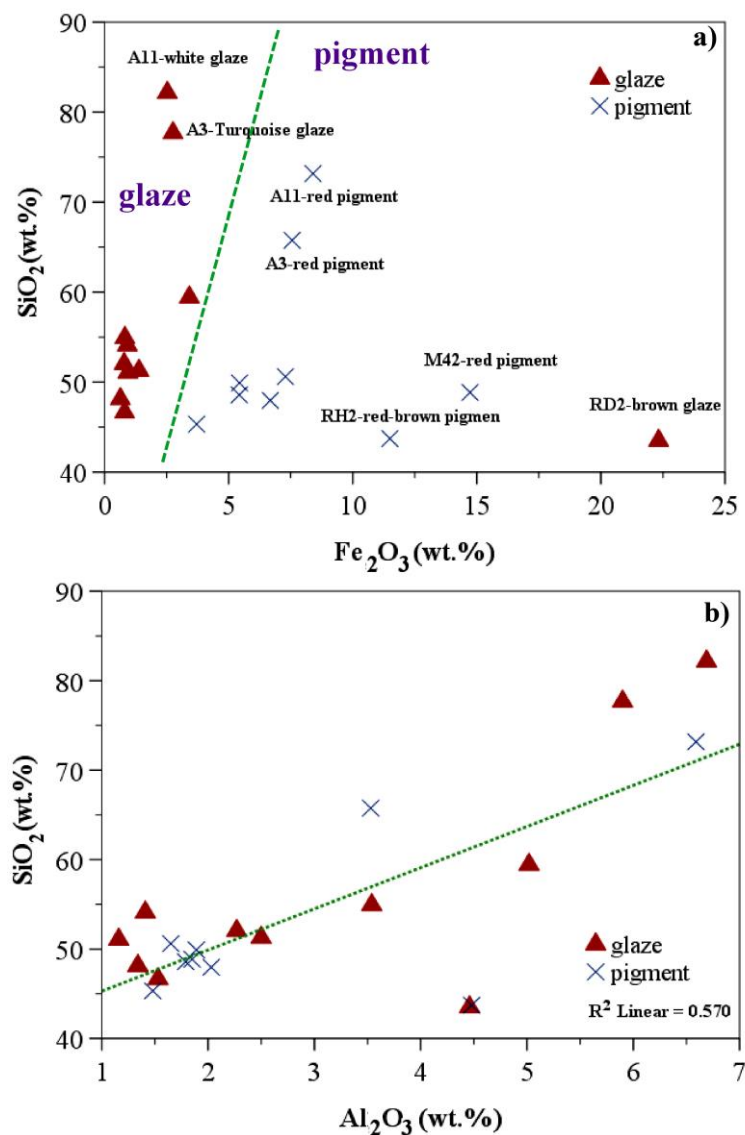
برحسب اکسید سیلیسیم در نمونه‌های آنالیز شده نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۸a مشخص است بر اساس درصد وزنی اکسید آهن، لعاب زمینه و نواحی دارای رنگدانه‌های مختلف، قابل تفکیک هستند که این مرز با خطچین سبز در این شکل نشان داده

همانگونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود به جزء سیلیس که عنصر عمده تشکیل دهنده لعاب است عنصر دیگری مانند اکسید آهن نیز یکی دیگر از عناصر تأثیرگذار در رنگدانه‌های قرمز مورد مطالعه است. در شکل ۸a تغییرات وزنی اکسید آهن برحسب اکسید سیلیسیم و در شکل ۸b تغییرات درصد وزنی اکسید آلومینیم

آنالیز شده رسم شده است، نشان می‌دهد که بین این دو اکسید در لعاب زمینه و ناحیه دارای رنگدانه‌های مختلف یک همبستگی خطی مثبت وجود دارد و ضریب همبستگی بین این دو اکسید، برای نمونه‌های دو گروه لعاب زمینه و ناحیه رنگدانه‌ها حدود ۰,۵۷ است. بنابراین نحوه تغییرات اکسید آلومینیم برحسب سیلیس است که می‌توان نتیجه‌گیری کرد علت اصلی حضور این اکسید در لعاب‌ها و ناحیه دارای رنگدانه‌های آنالیز شده می‌تواند از ناخالصی موجود در سیلیس موجود در لعاب زمینه باشد (۳۴، ۳۵).

شده است. این تفکیک به این معنی است که مقدار اکسید آهن بیش از ۲,۵ درصد وزنی، به طور آگاهانه و به عنوان عامل ایجاد رنگدانه دلخواه به لعاب زمینه و تزئینات رولعابی اضافه شده‌اند. همچنین مقدار اکسید آهن کمتر از ۲,۵ درصد موجود در لعاب زمینه به احتمال بسیار زیاد از ناخالصی موجود در سیلیس به‌کار رفته در تولید لعاب زمینه ناشی می‌شود (۳۳). این موضوع بر اساس وجود رابطه خطی بین اکسید سیلیسیم و اکسید آهن در لعاب زمینه تأیید می‌شود. تغییرات اکسید آلومینیم برحسب اکسید سیلیسیم که در شکل ۸b برای نمونه‌های



شکل ۸: (a) تغییرات درصد وزنی اکسید آهن برحسب اکسید سیلیسیم در نمونه‌های RD2, RH2, M42, A3, A11 و (b) تغییرات درصد وزنی اکسید آلومینیم برحسب اکسید سیلیسیم در نمونه‌های آنالیز شده.

Figure 8: Scatter plot of wt% of (a):  $Fe_2O_3$  versus  $SiO_2$  in analyzed samples, RD2, RH2, M42, A3, and A11, and (b)  $Al_2O_3$  versus  $SiO_2$  in analyzed samples RH2, A10, from Rayy and Alamut.

اینکه مقداری SnO، Pb و Sn واکنش نیافته باقی می‌مانند که این نوع قلع و سرب به عنوان پشت‌پوش کننده‌ها مورد استفاده قرار می‌گرفته‌اند. کالکس را می‌توان صرفاً با سیلیس، یا مخلوطی از سیلیس و قلیاها و یا یک فریت شیشه‌ای از قبل تهیه شده مخلوط کرد و برای تولید لعاب، مورد استفاده قرار داد (۲۹). در میان نمونه‌ها صرفاً نمونه MI2 با نسبت Pb/Sn ۱۰ با این محدوده فاصله بالایی دارد که بسیار بیشتر از استوکیومتری مورد نیاز برای تشکیل  $Pb_2SnO_4$  است که در روش نخست پژوهش متین بحث شده است.

در شکل ۱a مشاهده می‌شود، براساس تغییرات درصد وزنی اکسید آلومینیم برحسب اکسید کلسیم می‌توان دو گروه کاملاً مشخص در این نمونه‌ها شناسایی کرد که گروه اول شامل نمونه‌های ری و منسوب به ری هستند. گروه دوم نیز شامل نمونه‌های الموت است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در نمونه‌های گروه اول (گروه ری) میزان اکسید کلسیم بین ۷٫۵-۱ درصد و در گروه دوم بین ۱۲-۶ درصد متغیر است. بنابراین مشاهده می‌شود که درصد وزنی اکسید کلسیم در نمونه‌های ری بسیار پایین است که این نشان‌دهنده این است که از منابع سیلیس غیر آهکی در تولید آنها استفاده شده است (۳۸، ۳۹). این در حالی است که در تولید نمونه‌های الموت از سیلیس آهکی استفاده شده است. در شکل ۱۰b نیز مشاهده می‌شود، براساس تغییرات درصد وزنی اکسید کلسیم برحسب اکسید سیلیسیم می‌توان دو گروه را در این نمونه‌ها شناسایی کرد که گروه اول شامل نمونه‌های ری و همچنین منسوب به ری هستند. گروه دوم نیز شامل نمونه‌های الموت است. همان‌طور که در این شکل مشخص است در نمونه‌های گروه اول (گروه ری) میزان اکسید کلسیم بین ۷٫۵-۱ درصد و میزان اکسید سیلیسیم بین ۵۵-۴۰ درصد و در گروه دوم میزان اکسید کلسیم بین ۱۲-۶ و میزان اکسید سیلیسیم بین ۸۵-۶۰ درصد متغیر است. بنابراین مشاهده می‌شود که لعاب زمینه و رنگدانه‌های مختلف در سفال‌های الموت و ری با مواد اولیه کاملاً متفاوت ساخته شده است.

### ۳-۳- نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی

نتایج طیف‌های EDS و تصاویر میکروسکوپ الکترونی به‌دست آمده در یکی از نمونه‌های موزه ملی ایران با شناسه M43 که در شکل ۱۱ ارائه شده است نشان می‌دهد که رنگ قرمز، روی لایه‌ای از رنگ سیاه غنی از کروم و آهن اجرا شده است که با نتایج پژوهش‌های پیشین که کاربرد کرومیت را در تهیه رنگ سیاه در سفال مینایی تایید می‌کنند مطابقت دارد (۱۸، ۲۰). کاشانی نیز واژه مزرد را احتمالاً معادل کرومیت استفاده کرده که برای تولید رنگ سیاه در کاشی‌نگاری کاربرد داشته است (۱۵). هاله اطراف ذرات اکسید آهن (خاکستری تیره) در سطحی‌ترین لایه‌ها نشان می‌دهد که فرایند پخت رنگ قرمز تکمیل نشده است. ضخامت رنگ قرمز در این تصویر،

همان‌گونه که در تصاویر نمونه‌های آنالیز شده مشاهده می‌شود در این نمونه‌ها رنگ‌های مختلفی وجود دارد. با توجه به جدول ۳ مشاهده می‌شود که عناصر آهن و مس در اغلب نمونه‌ها به ترتیب می‌توانند نقش اصلی را به‌عنوان عامل رنگزا در رنگدانه قرمز و لعاب زمینه فیروزه‌ای ایفا کنند. البته ارایه نظر قطعی در زمینه نحوه تولید رنگ قرمز نیاز به نمونه‌برداری از ذخایر معدن اکسید آهن و تجزیه و تحلیل سنگ معدن موجود در مناطق مختلف دارد که به‌عنوان ادامه پژوهش مزبور، می‌توان بررسی نمود. پژوهش‌های پیشین عامل ایجاد رنگ قرمز در سفال‌های مینایی را هماتیت می‌دانند (۱۶، ۱۸، ۲۲). کاس و همکارانش در رنگ‌های طیف قرمز در کنار هماتیت، دیوپساید و اوژیت را نیز شناسایی کردند (۱۸).

با توجه به جدول ۳ کاملاً مشخص است که لعاب‌های استفاده شده در این نمونه‌ها از نظر ماده‌گذارآور دارای تنوع زیادی هستند و به‌طور کلی در سه گروه لعاب سربی، لعاب قلیایی (سودایی) و لعاب سرب - قلع - قلیایی تقسیم‌بندی می‌شوند (۳۶، ۳۷). همان‌طور که در شکل ۹a مشخص است براساس تغییرات درصد وزنی اکسید سرب برحسب اکسید سیلیسیم، نمونه‌های آنالیز شده براساس محل کشف آنها به دو گروه عمده تقسیم می‌شوند. نمونه‌های ری و منسوب به ری که با گروه "ری" در اینجا مشخص شده است، نمونه‌هایی هستند که در گروه لعاب قلع - سرب - قلیایی قرار می‌گیرند و میزان اکسید سرب در آنها بسیار بالا و مقدار این اکسید بین ۳۰-۱۵ درصد متغیر است و در این نمونه‌ها میزان اکسید سدیم بین ۷٫۱-۱٫۰۲ درصد است. همچنین در این نمونه‌ها اکسید سیلیسیم بین ۵۵-۴۰ درصد تغییر می‌کند. برعکس در نمونه‌های آنالیز شده از الموت یک مورد لعاب قلیایی (A11)، یک مورد سربی (A3)، و یک مورد سرب - قلع - قلیا (A10) مشاهده می‌شود. همچنین شکل ۹b نشان می‌دهد در بین نمونه‌های آنالیز شده که در گروه لعاب‌های سرب - قلع - قلیا قرار می‌گیرند، مقدار اکسید قلع بین ۱۳٫۵۴-۲٫۰۵ درصد تغییر می‌کند که تقریباً به‌جز یک نمونه از ری تمام نمونه‌های ری و منسوب به ری در این گروه قرار دارند.

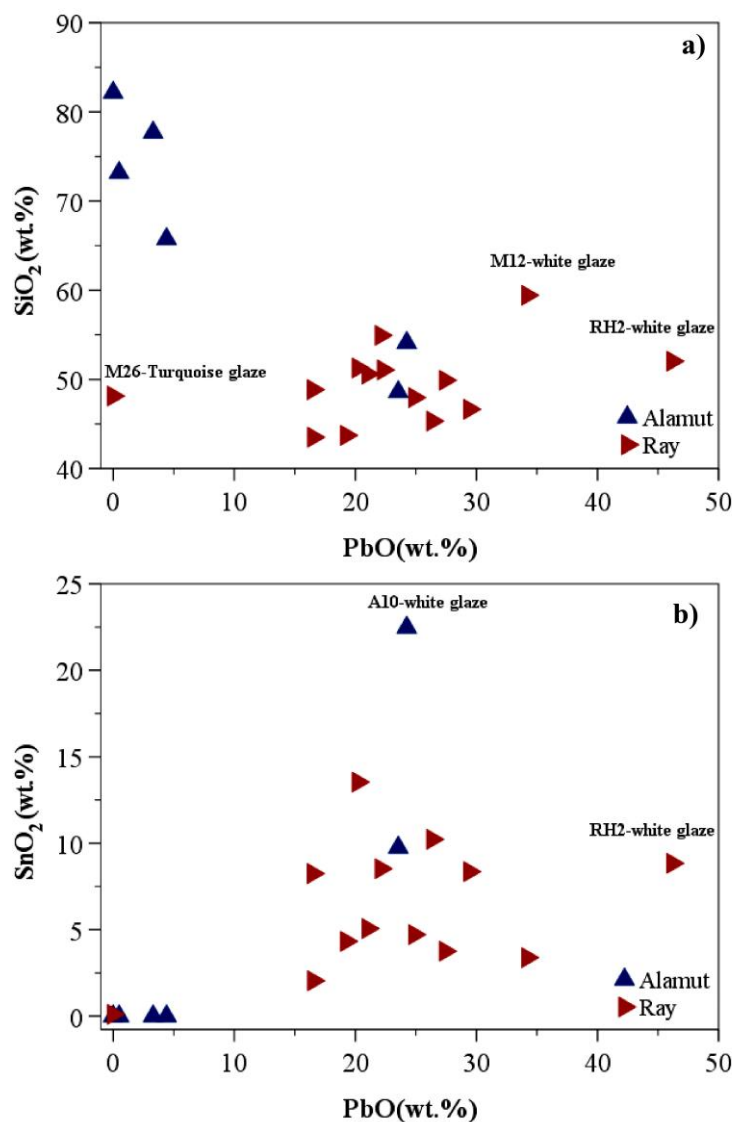
با توجه به نتایج پژوهش متین، نسبت Pb/Sn در اکثر لعاب‌های زمینه در سفال مینایی کمتر از ۳٫۵ است (۲۹) که تقریباً با داده‌های جدول ۳ پژوهش حاضر مطابقت دارد. از میان چهار روش پیشنهادی وی جهت ساخت لعاب پشت‌پوش در سرامیک‌ها می‌توان روش نخست تولید رنگ سفید لعاب‌های پشت‌پوش پیشنهادشده توسط وی را برای نمونه‌های مزبور در نظر گرفت. پژوهش وی نشان می‌دهد، در صورتی که نسبت Pb/Sn کمتر از نیاز استوکیومتری ۳٫۵ برای تشکیل  $Pb_2SnO_4$  باشد، فقط واکنش کلسینه کردن رخ می‌دهد و کالکس موجود حاوی ترکیبی از SnO و PbO خواهد بود. به‌ویژه

۱۳,۲۶-۱۵,۲۴  $\mu\text{m}$  است.

جدایش دو لایه رنگی سیاه و قرمز روی لعاب زمینه نشان می‌دهد که هر دو رنگ بر روی لعاب پخته شده اعمال شده‌اند. لعاب‌هایی هم که در لعاب زیرین منتشر شده‌اند، مطابق با نتایج حاصل از پژوهش‌های اسمیت و کاس و همکارانشان، بر روی لعاب

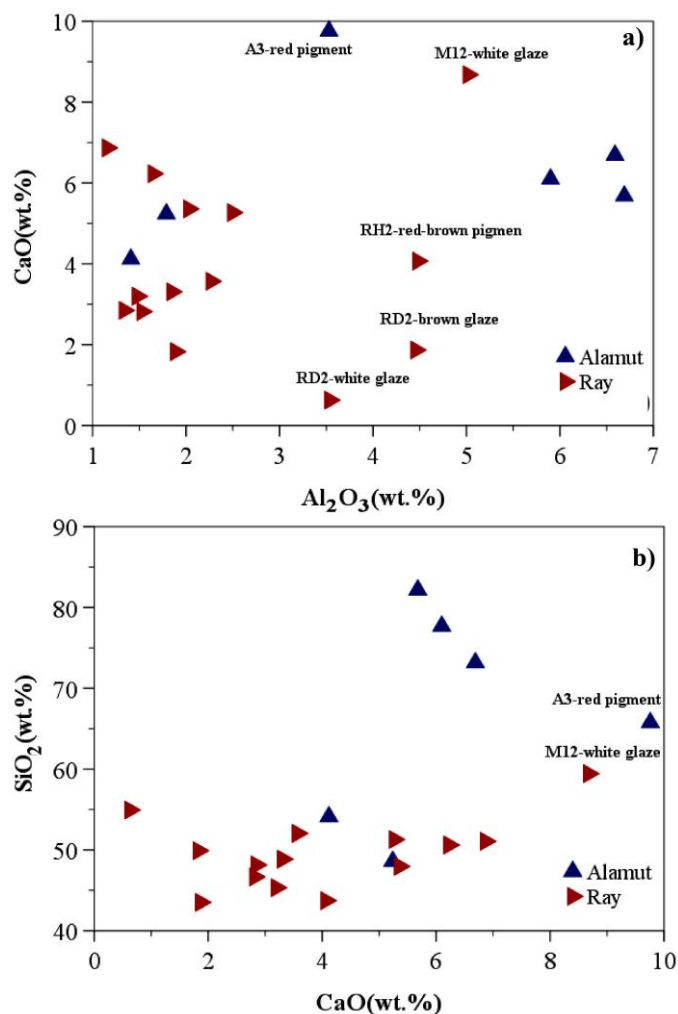
خام اعمال شده و به عنوان درون لعابی استفاده شده‌اند (۴۰، ۱۸).

نتایج طیف EDS و تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه A11 که در شکل ۱۲ نشان داده شده‌است، تایید می‌کند که رنگ قرمز، روی لایه لعاب زمینه و زیر لایه طلا اجرا شده است.



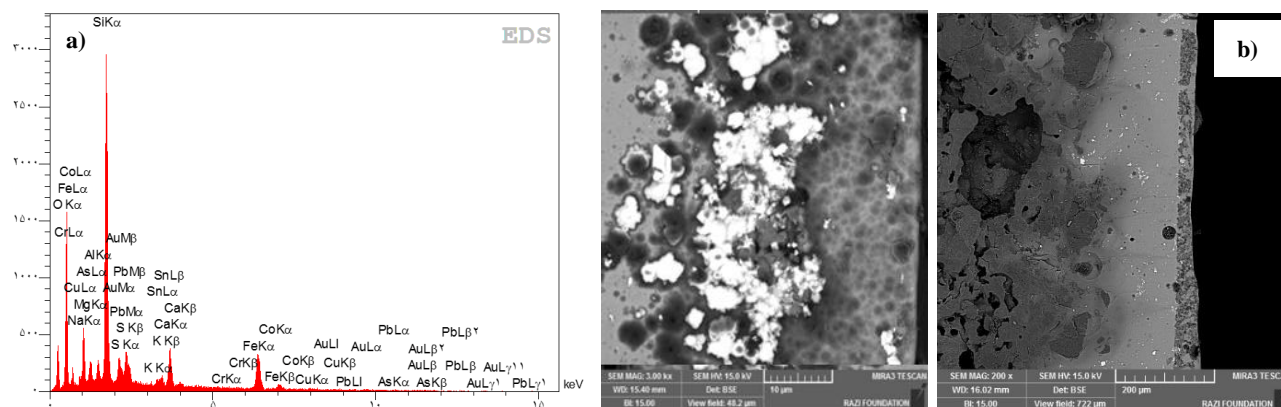
شکل ۹: (a) تغییرات درصد وزنی اکسید سرب برحسب اکسید سیلیسیم M26، M12، RH2 و (b) تغییرات درصد وزنی اکسید سرب برحسب اکسید قلع در نمونه‌های آنالیز شده A10، RH2، در نمونه‌های ری و الموت.

**Figure 9:** Scatter plot of wt% of (a): PbO versus SiO<sub>2</sub> in analyzed samples, RH2, M12, M26, and (b) PbO versus SnO<sub>2</sub> in analyzed samples RH2, A10, from Ray and Alamut.



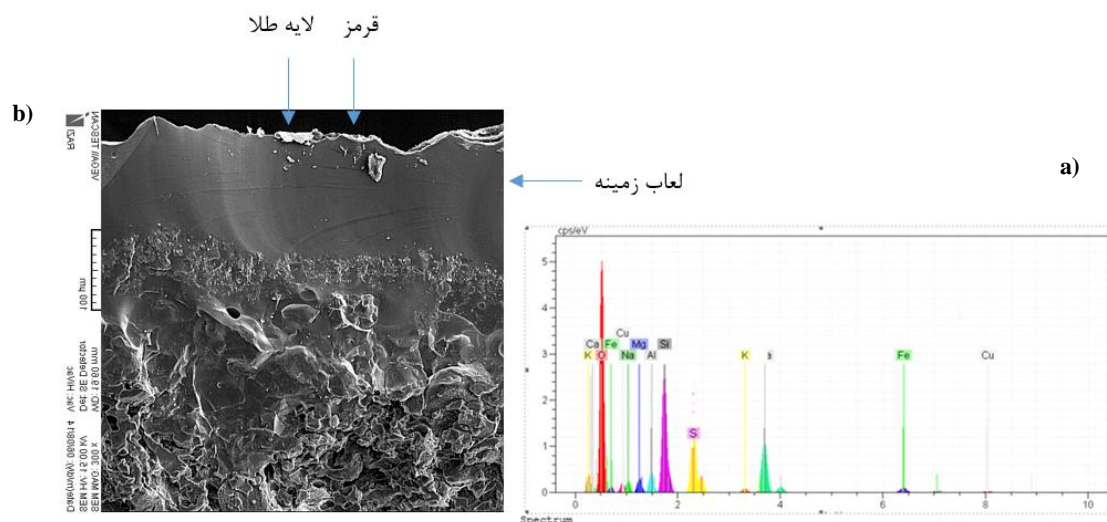
شکل ۱۰: (a) تغییرات درصد وزنی اکسید آلومینیم برحسب اکسید کلسیم در نمونه‌های A3, RH2, RD2 و (b) تغییرات درصد وزنی اکسید کلسیم برحسب اکسید سیلیسیم در نمونه‌های A3, M12, RD2, RH2.

Figure 10: Scatter plot of wt% of (a): Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> versus CaO in analyzed samples, RD2, RH2, M12, A3, and (b) CaO versus SiO<sub>2</sub> in analyzed samples M12, A3, from Ray and Alamut.



شکل ۱۱: (a) طیف EDS رنگ رولعابی قرمز نمونه M43، قرارگیری رنگ قرمز رولعابی سرشار از اکسید آهن به رنگ خاکستری همراه با سطوح دارای هاله و رنگ سیاه سرشار از اکسید کروم و آهن، با رنگ سفید مشاهده می‌شود.

Figure 11: Left: SEM-EDX (scanning electron microscope-energy-dispersive X-ray analyzer) shows high rich iron oxide.



شکل ۱۲: (a) طیف EDS رنگ رولعابی قرمز سرشار از اکسید آهن در نمونه A11 و (b) در تصویر SEM-BSE، قرارگیری رنگ قرمز، لایه ورق طلا و لعب زمینه مشاهده می‌شود.

**Figure 12:** Left: SEM-BSE micrographs from the red overglaze over white base glaze and gilding layer in sample A11, Right: SEM-EDX (scanning electron microscope-energy-dispersive X-ray analyzer) shows high rich iron oxide in red color.

استفاده شده در این نمونه‌ها از نظر ماده‌گذار آور دارای تنوع زیادی هستند و به طور کلی در سه گروه لعاب سربی، لعاب قلیایی و لعاب سرب - قلع - قلیایی تقسیم‌بندی می‌شوند که نمونه‌های گروه "ری" در گروه لعاب سرب - قلع - قلیا قرار می‌گیرند و میزان اکسید سرب در آنها بسیار بالا است. همچنین نمونه‌های آنالیز شده از الموت دارای سه گروه قلیایی، سربی و سرب - قلع - قلیا هستند.

#### تشکر و قدردانی

نویسندگان از خانم دکتر حمیده چوبک مدیر پایگاه میراث فرهنگی الموت، که نمونه‌های مورد نیاز در انجام این پژوهش را (که زیر نظر ایشان حفاری و کشف شده بود) ارسال کردند، کمال تشکر و قدردانی را دارند. همچنین لازم است از حمایت پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای ایران و کلیه همکاران در آزمایشگاه واندوگراف نیز که شرایط مناسب برای آنالیز و بررسی نمونه‌های مطالعاتی را فراهم کردند سپاسگزاری شود. نویسندگان همچنین قدردان موزه ملی ایران و به ویژه همکاران بخش حفاظت و مرمت و بخش مخزن دوره اسلامی این موزه نیز هستند.

#### تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

نتایج مشاهدات میکروسکوپی رنگ قرمز در نمونه‌های الموت، ری و نمونه‌های مطالعاتی موزه ملی ایران، کاربرد سه شیوه رنگ‌گذاری با طیف رنگی قرمز، برای ترسیم پیش‌طرح، نقوش و خطوط کناره را نشان می‌دهد. بررسی‌ها سبب شناسایی شش نوع لایه‌گذاری رنگ قرمز نیز بر روی سطوح سفال‌های مینایی شد. همچنین مشخص شد که رنگ قرمز در همه نمونه‌ها به صورت رولعابی به کار برده شده است. نتایج پژوهش‌ها در این بخش نشان می‌دهد، که اکسید آهن عامل اصلی ایجاد رنگ قرمز در نمونه‌های مناطق گوناگون بوده است. با توجه به نتایج این پژوهش، واژه سرخ قمصری که کاشانی برای ساخت رنگ قرمز به آن اشاره می‌کند، احتمالاً همان هماتیت بوده است و مطابق با نتایج این پژوهش و پژوهش‌های پیشین، کاربرد آن در میان صنعتگران دوره مینایی برای تولید رنگ قرمز و تزیین اطراف زراندوها رایج بوده است. همچنین نتایج آنالیز عنصری نمونه‌ها نشان دادند که بر اساس درصد وزنی، اکسید آهن لعاب زمینه و رنگدانه‌های مختلف قابل جداسازی و تفکیک هستند و مقدار اکسید آهن در رنگدانه‌ها بیش از ۲٫۵ درصد وزنی است که بیش از این مقدار از اکسید آهن به طور آگاهانه و به منظور ایجاد رنگ دلخواه به لعاب زمینه و تزیینات رولعابی افزوده شده است. در لعاب‌های طیف قهوه‌ای نیز کاربرد میزان بالای اکسید آهن در پایه لعاب غنی از سرب و قلع سبب ایجاد رنگ قهوه‌ای شده است. همچنین نتایج آنالیز عنصری نشان می‌دهند که لعاب‌های

#### ۵- مراجع

1. Phipps E. *Cochineal red: The art history of a color*, New York: Metropolitan Museum of Art; 2010.
2. Hashimoto H, Higuchi K, Inada H, Okazaki Y, Takaishi T, Asoh H. Well-dispersed  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles for lead-free red



- overglaze enamels through hydrothermal treatment, *ACS Omega*. 2016; 1(1):9-13. <https://doi.org/10.1021/acsomega.6b00040>.
3. Gol F, Gizem Saritas Z, Cıbuk S, Ture C, Kacar E, Yilmaz A, Arslan M, Sen F. Coloring effect of iron oxide content on ceramic glazes and their comparison with the similar waste containing materials, *Ceram Int*. 2022;48: 2241-2249. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.10.001>.
  4. Watson, O. *Ceramics of Iran: Islamic Pottery from the Sarikhani Collection*. 1th ed. New Haven and London: Yale University Press; 2020.
  5. McClary, R P. Rare and Complex Wares: A Study of Vessels and Sherds Decorated with Both Mīnā'ī and Lustre Techniques. *Mater Cult Muslim World*. 2022;3(2):235-266. <https://doi.org/10.1163/26666286-12340035>.
  6. Pope, A. U. *A survey of Persian art from prehistoric times to the present*. London and New York: Oxford University Press; 1938.
  7. Ferrier, R.W. *The Arts of Persia*, London: Yale University Press; 1989.
  8. Fehérvári, G. *Ceramics of the Islamic World: In the Tareq Rajab Museum*, I. B. Tauris; 2000.
  9. Ettinghausen, R. *Islamic art and archaeology*. Princeton: Princeton University Press; 1951.
  10. Masuya, T. Ilkhanid courtly life. In *The legacy of Genghis Khan: Courty art and culture in Western Asia*, ed. L. Komaroff and S. Carboni, 74-103. New York: Metropolitan Museum of Art; New Haven and London: Yale University Press; 2002. 1256-1353.
  11. Wilson A.J. *Islamic Pottery*, translated by Mahnaz Shayestehfar, Tehran: Islamic Art Studies; 2004 (In Persian).
  12. Choubak H. *Alamut Castle (Eagle's Nest)* 2009. [Cited 2016 Aug 23]. Available from: <http://www.chn.ir/NSite/FullStory/News/?Id=68476&Serv=0&SGr=0>.
  13. Lane, A. *Early Islamic Pottery: Mesopotamia, Egypt and Persia*, Faber & Faber; 1927.
  14. Kéblow-Bernsted A.M. *Early Islamic Pottery Materials And Techniques*, Archetype. 2003; 44-49.
  15. Abu al-Qasim Abdullah Kashani. *Arais al-Jawahir wa Nafais al-Atayyib*. Edited by Iraj Afshar, Tehran: Al-Moei; 2007. [In Persian]
  16. Allan, J. W. Abu 'I-Qasim's treatise on ceramics, Iran. 1973; 11:111-120. <https://doi.org/10.2307/4300488>.
  17. Mason RB, Tite MS, Paynter S, Salter C *Advances in polychrome ceramics in the Islamic world of the 12<sup>th</sup> century AD*. *Archaeometry*. 2001; 43:191-209. doi.org/10.1111/1475-4754.00014.
  18. Koss K, McCarthy B, Chase ES, Smith D *Analysis of Persian painted mina'i ware*. In: McCarthy B et al. (ed), *Scientific research on historic Asian ceramics*. Proceedings of the Fourth Forbes Symposium at the Freer Gallery of Art, Archetype. 2009; 33-50.
  19. Yazdani, M., Ahmadi, H., Emami, S. M. A., Lamehi Rashti, M. L. R., Agha-Aligol, D. A., Abdillan khan gorji, M., Choubak, H. *Technological Study of Gilded Mina'i Ware Based on Microscopic Investigation and Historical Documents*. *Pazhoheshha-ye Bastan shenasi Iran*. 2017; 7(14): 161-178. <https://doi.org/10.22084/nbsh.2017.10811.1471> [In Persian].
  20. Wen, R., Pollard A. *The pigments applied to Islamic Mina'i Wares and the correlation with Chinese Blue-and-White porcelain*. *Archaeom*. 2015; 58, 1-16.
  21. Holakoei P, Mishmastnehi M, Moloodi Arani A, Röhrs S, Franke U. *Materials and technique of lajvardina ceramics from the thirteenth to fourteenth century Iran*. *Archaeol Anthropol Sci*. 2023;15,33. <https://doi.org/10.1007/s12520-023-01738-z>.
  22. Colomban P, Simsek Franci G, Ngo A-T, Gallet X. *Non-Invasive Raman and XRF Study of Mīnā'ī Decoration, the First Sophisticated Painted Enamels*. *Mater*. 2025; 18(3): 575. <https://doi.org/10.3390/ma18030575>.
  23. Maleki Miyanagi A. *Geography of Rey, Qom: Dar-Alhadith; 2004 [In Persian]*.
  24. Schmidt B, Wetzig K. *Ion Beams in Materials Processing and Analysis*, Springer Vienna; 2012.
  25. Nastasi M, Mayer JW, Wang Y. *Ion beam analysis: fundamentals and applications*, Taylor & Francis; 2014.
  26. Campbell JL, Boyd NI, Grassi, N, Bonnick P, Maxwell JA. *The Guelph PIXE software package IV*, *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B*. 2010; (268): 3356-3363. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2010.07.012>.
  27. Grime G.W, Watt F. *Focusing protons and light ions to micron and submicron dimensions*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 1988; 30, 3:227-234. [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(88\)90002-X](https://doi.org/10.1016/0168-583X(88)90002-X).
  28. Vicenzi E.P, Eggins S, Logan A, Wysoczanski R. *Microbeam Characterization of Corning Archeological Reference Glasses: New Additions to the Smithsonian Microbeam Standard Collection*, *J Res Nat Inst Stand Technol*. 2002; (107): 719-727. <https://doi.org/10.6028/jres.107.058>.
  29. Matin M. *Tin-based opacifiers in archaeological glass and ceramic glazes: a review and new perspectives*. *Archaeol Anthropol Sci*. 2019; 11, 1155-1167. <https://doi.org/10.1007/s12520-018-0735-2>.
  30. Pradell T, Molera J, Salvadó N, Labrador A. *The use of micro-XRD for the study of glaze color decorations*, *Appl Phys A*. 2013; 111: 121-127. <https://doi.org/10.1007/s00339-012-7445-x>.
  31. Gómez M, Auxiliadora Á, Polvorinos del Río J, Castaing J, Pleguezuelo A. *Ceramics by Niculoso Pisano and quantitative analysis of glazes using portable XRF*, *Documento traducido gracias a la desinteresada colaboración de Morote Traducciones*. Artículo publicado inicialmente en español. 2016; 1-23. <https://hdl.handle.net/11532/300292>.
  32. Hamer F, Hamer J. *The potter's dictionary of materials and techniques*, London: A&C; 2003.
  33. Mason R.B. *Shine Like the Sun: Lustre-painted and Associated Pottery from the Medieval Middle East*, Mazda Publishers; 2004.
  34. Maltoni S, Silvestri A, Maritan L, Molin G. *The Medieval lead-glazed pottery from Nogara (north-east Italy): a multi-methodological study*, *J Archaeol Sci*. 2012; 39, 7: 2071-2078. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.03.016>.
  35. Seetha D, Velraj G. *FT-IR, XRD, SEM-EDS, EDXRF and chemometric analyses of archaeological artifacts recently excavated from Chandravalli in Karnataka State, South India*, *Radiation Phys Chem*.
  36. Salinas E, Pradell T. *The transition from lead transparent to tin-opacified glaze productions in the western Islamic lands: al-Andalus, c. 875-929 CE*, *J Archaeol Sci*. 2018; 94, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2018.03.010>.
  37. Özçatal M, Yaygınöl M, İssi A, Kara A, Turan S, Okyar F, et al. *Characterization of lead glazed potteries from Smyrna (Izmir/Turkey) using multiple analytical techniques; Part I: Glaze and engobe*, *Ceram Int* 40. 2014; 2143-2151. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.07.132>.
  38. De Bonis A, D'Angelo M, Guarino V, Massa S, Anaraki F.S,

- Genito B, Morra V.. Unglazed pottery from the masjid-i jom'e of Isfahan (Iran): technology and provenance, *Archaeol Anthropol Sci.* 2017; 9,617-635. <https://doi.org/10.1007/s12520-016-0407-z>.
39. Osete-Cortina L, Doménech-Carbó M.T, Doménech A, Yusá-Marco D.J, Ahmadi H. Multimethod analysis of Iranian Ilkhanate ceramics from the Takht-e Soleyman palace. *Anal Bioanal Chem.* 2010; 397, 319-329. <https://doi.org/10.1007/s00216-009-3413-5>.
40. Smith D. Considering the colors of mina'i ware. *MET Objectives.* 2001; 3:9-11.

**How to cite this article:**

Yazdani M, Agha Aligol D. Characterization of Red and Brown Color on Mina'i Ceramics from Sixth to Seventh Century AH in Iran Based on Instrumental Methods. *J Color Sci Tech.* 2025;18(4):253-270. <https://doi.org/10.30509/jcst.2025.167437.1248> [In Persian].