

مطالعات باستان‌شناسی، دوره ۱۲، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۹
(از ص ۲۰۵ تا ص ۲۲۴)



[10.22059/jars.2020.288850.142778](https://doi.org/10.22059/jars.2020.288850.142778)
Print ISSN: 2676-4288- Online ISSN: 2251-9297
<https://jars.ut.ac.ir>

An Archaeological Study on the Provenance and Production of the Lusterware from the Underground Complex of Tappeh Ghaleh, Khomein, Iran Using PIXE

Majid Montazerzohouri

assistant professor, Department of Archaeology, University of Tehran

Mohamad Torkiha

Assistant Professor, Department of Physics, University of Kashan

Hesam Taheri

Master's Graduate of Physics, University of Kashan

Received: 13 September, 2019; Accepted: 21 September, 2020

Abstract

Archaeologically, analytical research of chemical elements on ancient objects gives important information on the raw materials and the production techniques. PIXE analysis is one of the non-destructive methods which is common for analytical researches on archaeological objects, especially on ceramics. Archaeological investigation at the ancient underground complex of Tappeh Ghaleh Aghaj in the Khomein county led to discovering some pieces of so-called luster ware. In the present study, a collection of luster potteries were selected to be analyzed to identify the nature, components and especially their provenance. To achieve our aims, a total number of twenty-five pieces of luster ware recovered from the site were analyzed by using PIXE method. Van De Graaf accelerator with 2MeV proton beam used to sample bombardment and High precision Si(Li) detector with 170KeV energy resolution chose to collected proton back scattered in 135 degree form incident beam. The sample, proton beam and detector were placed in 10^{-5} Torr vacuum chamber. The analysis results were compared with the studied samples from other regions such as Kashan, Rey in central Iran and Takht-e Soleyman in North-West of Iran. The study showed that our samples present most similarity with the Kashan wares so it is evident that they were produced locally.

Keywords: Tappeh Ghaleh, underground complex, luster ware, PIXE analysis

مطالعه‌ی باستان شناختی منشاء تولید سفال‌های زرین‌فام مجموعه دست‌کند زیرزمینی تپه قلعه خمین با استفاده از روش آنالیز پیکسی

مجید منتظر ظهوری*

استادیار گروه باستان شناسی، دانشگاه تهران

محمد ترکیه‌های اصفهانی

استادیار گروه فیزیک، دانشگاه کاشان

حسام ظاهری

دانش آموخته کارشناسی ارشد فیزیک، دانشگاه کاشان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۳۱

چکیده

تحلیل عنصری مواد تشکیل دهنده اشیاء باستانی اطلاعات بسیار ارزشمندی در مورد مواد اولیه و تکنیک ساخت آن‌ها به دست می‌دهد. آنالیز با باریکه یونی یک روش غیرمخرب، سریع و بس عنصری می‌باشد که برای شناخت هویت و ماهیت اشیاء باستانی همانند سفال در کنار سایر روش‌های باستان‌سنجی توصیه می‌شود. فعالیت‌های باستان‌شناسی در مجموعه دست‌کند زیرزمینی تپه قلعه رباط آجاج در شهرستان خمین، منجر به شناسایی تعداد زیادی قطعات سفال زرین‌فام گردید که شناخت پیرامون چیرستی ماهیت و تجزیه عنصری آن‌ها و همچنین تشخیص منشأ تولید این سفال‌ها از سوالات این پروژه پژوهشی است. در راستای پاسخگویی به این سوالات، در این تحقیق آنالیز پیکسی (PIXE) تعداد ۲۵ نمونه سفال زرین‌فام یافت شده در این مجموعه دست‌کند زیرزمینی انجام گردید. از شتاب دهنده واندوگراف با باریکه پروتون 2MeV برای بمباران نمونه‌ها استفاده شد. آشکارساز دقت بالای Si(Li) با قدرت تفکیک 170KeV برای جمع‌آوری پروتون‌های پس‌پراکنده شده در زاویه 135° درجه نسبت به باریکه فرودی به کار برده شد. نمونه‌ها، باریکه پروتون و آشکارساز در محفظه برهم‌کنش با خلا 10^{-5}Torr قرار گرفتند. در ابتدا با مقایسه با کاشی‌های زرین‌فام مناطق دیگر ماهیت عنصری نمونه‌ها بررسی و سپس نتایج بدست آمده با مقادیر عنصری کاشی‌های مناطق کاشان، ری و تخت‌سلیمان مقایسه شدند که بیشترین تطابق با نمونه‌های تولیدی کاشان مشاهده گردید.

واژه‌های کلیدی: دست‌کند زیرزمینی، تپه قلعه خمین، سفال زرین‌فام، آنالیز پیکسی، کاشان.

۱. مقدمه

آنالیز با باریکه یونی به مجموعه آزمایش‌هایی گفته می‌شود که با برخورد باریکه‌ای از ذرات یونیزه پرنرژی با نمونه و تولید پرتوهای ثانویه انجام می‌شود. یون‌های پرنرژی توسط شتاب‌دهنده ذرات تولید می‌گردد و پرتوهایی که از برهم‌کنش یون‌ها با نمونه ایجاد می‌شوند، توسط آشکارسازها جمع‌آوری و با یک سیستم الکترونیکی به داده‌های قابل استفاده تبدیل می‌شوند. از آنالیزهای باریکه یونی به آنالیز پس‌پراکندگی رادرفورد، آنالیز برهم‌کنش هسته‌ای، آنالیز پیچی، آنالیز یون پس‌زده کشسان و آنالیز پیکسی می‌توان اشاره کرد. استفاده از این روش آنالیز هسته‌ای برای تعیین نوع و مقادیر عناصر تشکیل‌دهنده در فعالیت‌های باستان‌سنجی در دهه‌ی ۱۹۸۰ میلادی رواج پیدا کرد (Demortier, 1991: 334).

در این روش باریکه‌ای از یون‌های پرنرژی (چند مگا الکترون ولتی MeV) به ماده برخورد می‌کند و در اثر برخورد با الکترون‌های عناصر هدف، آن‌ها را به ترازهای انرژی بالاتر انتقال می‌دهد. بازگشت الکترون‌های برانگیخته به ترازهای اولیه منجر به تولید پرتو ایکس مشخصه عناصر هدف می‌گردد. با اندازه‌گیری انرژی و تعداد پرتو ایکس با انرژی مشخص، نوع و غلظت عناصر تشکیل‌دهنده نمونه مشخص می‌شود (لامعی و دیگران، ۱۳۷۶: ۱۱۰-۱۰۸). از آنجا که تعداد ذرات برخورد کننده با نمونه هدف در مقایسه با تعداد اتم‌های ناحیه برخورد بسیار ناچیز است، این نوع آنالیزها غیرمخرب می‌باشند و به نمونه مورد بررسی آسیبی وارد نمی‌کنند که این یکی از دلایل استقبال از این روش بروی نمونه‌های سالم و ارزشمند است. از خواص دیگر آنالیز با باریکه یونی عدم نیاز به نمونه‌سازی و آنالیز هم‌زمان روش‌های مختلف را می‌توان نام برد. آنالیز پیکسی از دسته‌ی آنالیزهای با باریکه یونی می‌باشد. در آنالیز پیکسی تعداد بیش از ۲۵ عنصر را هم‌زمان می‌توان اندازه‌گیری کرد که به اصطلاح آنالیز بس‌عنصری نامیده می‌شود ولی اندازه‌گیری عناصر سبک‌تر از سدیم به سختی انجام می‌پذیرد. در آزمایشگاه واندوگراف سازمان انرژی اتمی ایران پژوهش‌های بسیاری برای پیش‌برد آنالیز اشیاء باستانی انجام شده است. این شتاب‌دهنده در سال ۱۳۵۱ نصب و اولین آنالیز عنصری به روش پیکسی در سال ۱۳۵۷-۱۳۵۵ انجام شد. در این راستا تجهیزات بهینه برای آنالیز خارجی اشیاء باستانی و یک محفظه خلا برای اشیاء بزرگ در سال‌های ۱۳۸۰ و ۱۳۸۷ ساخته شد (Kakuee et al, 2008, Torkiha et al, 2010). هم‌سو با این روند رشد علمی، نمونه‌های سفال دوره پیش از تاریخ در کشور از جمله استان اصفهان در سال ۱۳۸۹ به روش پیکسی آنالیز گردید (قدیری و دیگران، ۱۳۹۰). آنالیزهای ترکیبی پیکسی و پیچی برای مقایسه نمونه زرین‌فام و نمونه‌های شبیه زرین‌فام برای اصالت‌یابی اشیاء در سال ۱۳۹۱ انجام گرفت (Ghadiri et al, 2015).

از مطالعات صورت گرفته جدید در این حوزه پژوهشی، آنالیز پیکسی نمونه‌های کاشی زرین‌فام یافت‌شده در مجموعه دستکند زیرزمینی تپه قلعه روستای رباط آجاج خمین است که نتایج باستان‌شناختی ارزشمندی در پی داشت. نگارندگان در این تحقیق برآنند تا با تکیه بر نتایج آنالیزهای پیکسی صورت گرفته بر روی ۲۵ نمونه سفالی زرین‌فام یاد شده، به پرسش‌های باستان‌شناختی مطرح شده پیرامون این نمونه‌ها اعم از ماهیت عنصری، مقایسه تطبیقی با سایر نمونه‌های مشابه به جهت شناخت محل احتمالی تولد آن‌ها، پاسخ دهند. در این روند مطالعاتی استخراج نتایج آنالیز پیکسی با استفاده از نرم افزارهای موجود مرتبط انجام می‌پذیرد. سپس اطلاعات به‌دست آمده، دسته‌بندی و از لحاظ آماری طبقه‌بندی می‌شوند. سپس با توجه به تشابهات و

تمایزهای موجود آن‌ها را بر روی نمودار توزیع کرده و منشأیابی نمونه‌های کشف شده و بررسی تکنولوژی ساخت و مقایسه با نمونه‌های آزمایش شده پیشین مقدور می‌گردد. همچنین با مشاهده جداول و نمودارهای به دست آمده از آنالیز، تحلیل میزان درصد عناصر موجود در سفال‌های یافت‌شده امکان‌پذیر می‌باشد.

۲. کاوش باستان‌شناسی در دستکندهای زیرزمینی تپه قلعه

کاوش باستان‌شناختی در مجموعه دستکند زیرزمینی تپه قلعه روستای رباط آجاج خمین با هدف بازشناسی چپستی و چرایی هویت تاریخی و خواناسازی فضاهای معماری این مجموعه دستکند بعد اخذ مجوز از پژوهشکده باستان‌شناسی از تاریخ ۹۵/۰۹/۲۷ تا ۹۵/۱۱/۱۲ انجام شد که منجر به شناسایی فضاهای این محوطه باستانی گردید (منتظرظهوری، ۱۳۹۵).

مجموعه دستکند زیرزمینی تپه قلعه در شمال روستای رباط آجاج در شرق دهستان حمزه‌لو و ۷۰ متری شرق جاده آسفالت‌گلدشت به آشیانه واقع گردیده که یکی از نمونه‌های بارز معماری دستکند در شهرستان خمین در استان مرکزی است (نقشه ۱) (سالنامه آماری، ۱۳۸۹-۱۳۹۰: ۷۴؛ ودیعی، ۱۳۴۸: ۲۴۷).

این مجموعه دستکند در دل تپه‌ای شنی به ارتفاع ۵۰ متر ایجاد گردیده است که گاه قسمت‌های از بافت این تپه شنی در مرحله کنگلومرایی شدن بوده‌است. بر فراز این تپه که مجموعه دستکند در دل آن ایجاد شده، یک قلعه دفاعی (رباط) قرار داشته که بقایای این قلعه با پلان مستطیل شکل به وسعت ۱۰۰ در ۱۵۰ متر هنوز از عکس‌های هوایی مشهود است (تصویر ۱).

با توجه به مقایسه تطبیقی سفال‌های مجموعه دستکند با یافته‌های سفالی پراکنده در سطح تپه که به بازه زمانی قرن ۶ و ۷ ه.ق تعلق دارند، می‌توان اذعان داشت که مجموعه دستکند و قلعه واقع روی سطح تپه احتمالاً هم‌زمان ایجاد شده‌اند. به گمان دیگر بعد از ایجاد قلعه با توجه به مناسبات اقلیمی، سیاسی و استراتژیکی منطقه، مجموعه دستکند نیز ایجاد شده‌است؛ یکی از راه‌های دسترسی به این مجموعه نیز از داخل قلعه بوده‌است. کاوش در معماری دستکند زیرزمینی تپه قلعه مشخص ساخت که این مجموعه شامل دو راهرو اصلی شمالی-جنوبی و شرقی-غربی است. راهرو اصلی شمالی-جنوبی طول تقریبی ۹۰، عرض ۱/۵ متر و ارتفاع متغیر ۲۳۰-۱۷۰ سانتی‌متر و راهرو شرقی-غربی ۲۰ متر طول، ۲/۸۰ متر عرض و ۲۵۰-۱۹۰ سانتی‌متر ارتفاع دارد که هر دو بخش در قسمت‌هایی به علت آسیب‌های انسانی و طبیعی دچار تخریب و ریزش شده‌اند. این دو راهرو در بخش انتهایی خود هر دو به وسیله راهروی فرعی قوسدار و کم‌عرض به طول ۳ متر، عرض ۶۰-۹۰ و ارتفاع ۱۲۰ سانتی‌متر، به هم متصل می‌گردند (نقشه ۲).

صاحبان نخستین این فضاهای دستکند زیرزمینی برای اسکان خود در این مجموعه در هر دو طرف این راهروها اقدام به ایجاد اتاق‌هایی با ابعاد مختلف نموده‌اند. تاکنون هشت اتاق در راهرو شمالی-جنوبی و سه اتاق در راهرو شرقی-غربی کاوش شده که به غیر از یک اتاق که دارای پلانی چلیپایی است، بقیه اتاق‌ها پلان مربع - مستطیل شکل با ابعاد مختلف دارند. علاوه بر این غیر از اتاق‌های ۵ و ۶ که به خاطر ابعاد کوچکشان احتمالاً انبارک بوده‌اند، مابقی کاربردی مسکونی داشته و هر کدام از آن‌ها احتمالاً به یک خانواده تعلق داشته‌اند. از یافته‌های درون این اتاق‌ها می‌توان به انواع سفال، مهره، قطعات شیشه، الگو و فلز اشاره کرد. همچنین در اتاق شماره یک در راهرو شمالی - جنوبی بقایای جمجمه زنی بالغ یافت شد (جهت آگاهی بیشتر در مورد

استخوان یافت‌شده در این دستکند ر.ک: (Soltysiak et al, 2017). در مجموع بر اساس مطالعات تاریخی و جغرافیایی و همچنین یافته‌های سفالی و سایر اشیاء و شواهد باستان‌شناختی می‌توان اذعان داشت که این مجموعه احتمالاً با توجه مناسبات اقلیمی و تحولات تاریخی و سیاسی منطقه هم‌چون هجوم مغولان، در فاصله قرن ۶ تا ۷ ه.ق ایجاد گردیده و کاربردی پناهگاهی و مسکونی داشت. حجم زیاد یافته‌های سفالی و تنوع گونه‌های مختلف آن و به‌ویژه ظروف مصرفی و آشپزخانه‌ای و همچنین سایر اشیاء باستان‌شناختی هم‌چون اشیاء زینتی مربوط به زنان همانند مهره‌ها و آویزها و سرمه‌کش‌ها نشان از زندگی مستمر در این مجموعه دستکند می‌باشد. لازم به ذکر است از یافته‌های سفالی آن می‌توان به قطعات سفال‌های نقاشی زیر لعاب، قطعات سفال زرین‌فام و مینایی، سفال‌های با لعاب تک‌رنگ لاجوردی و فیروزه‌ای، پیه‌سوزها و سفال‌های منقوش و ساده نخودی و قرمز، اشاره کرد. شکل عمده شناسایی شده این سفال‌ها نیز شامل کوزه، کاسه، سبوه‌های دسته‌دار، آبخوری، ظروف دیسی شکل و قمقمه است. با توجه به گاه‌نگاری‌های مقایسه‌ای صورت گرفته احتمالاً این سفال‌ها در فاصله قرون ۶-۷ ه.ق تولید شده و مورد استفاده قرار گرفته‌اند (جهت آگاهی بیشتر ر.ک: منتظر ظهوری، ۱۳۹۵).

۳. سفال زرین‌فام و پیشینه پژوهشی

سفال زرین‌فام و به ویژه لعاب زرین‌فام آن همواره از موضوعات با اهمیت به لحاظ تاریخی و تکنیکی در میان پژوهشگران و محققان بوده است. زرین‌فام دارای متغیرهای گوناگونی است اعم از لعاب پایه، ترکیبات مینایی زرین‌فام و احیاء. شرایط احیاء نیز شامل دما، مدت و شدت احیاء است. در واقع ساخت سفال زرین‌فام بستگی به شناخت بهتر و به‌کارگیری صحیح عوامل ذکر شده است (میرشفیعی و مهدی زاده، ۱۳۹۴: ۶۳). محققان بر این باورند ساخت لعاب زرین‌فام نخست در قرن دوم هجری در مصر انجام‌شده و سپس یا هم‌زمان به بین‌النهرین انتقال یافته‌است (Porter, 1995: pp.25-29; Watson, 1985: p.25). این شیوه ساخت سفال و لعاب در دوران اسلامی در ایران با توجه به گفته برخی منابع، در اختیار افراد معدودی بوده و تا حدودی نسل به نسل در برخی خانواده‌ها هم‌چون خاندان ابوطاهر انتقال یافته‌است (Watson, 1985: p.178). به‌همین جهت شیوه ساخت آن‌ها در آن روزگار تا حدی اسرارگونه و کمتر شناخته شده بود. بیشتر نظرات پیرامون چگونگی ساخت زرین‌فام در طول تاریخ معطوف به کتاب‌های "عرایس الجواهر و نفایس الاطایب" و "سه کتاب درباره هنر سفالگران"^۱ و "جواهرنامه نظامی" می‌گردد (کاشانی، ۱۳۸۶: ۳۳۸-۳۴۴؛ میر شفیعی و محمدزاده، ۱۳۹۴: ۶۶؛ جوهری نیشابوری، ۱۳۸۳: ۳۴۳-۳۵۲). در همین ارتباط جیمز آلن نیز در مقاله‌ای تحت عنوان "Treatise on Ceramics Iran Abul Qasims" قسمت‌های مختص به لعاب زرین‌فام در کتاب "عرایس الجواهر" را به انگلیسی ترجمه نموده و تحلیلی اندک پیرامون آن ارائه می‌دهد (Allan, 1973). کتاب "زرین‌فام ایرانی" نوشته الیور واتسون یکی دیگر از منابع در مورد مطالعات روی زرین‌فام است که در این اثر به تاریخچه اولیه زرین‌فام، مراکز تولید و سبک‌های تزیین و ظروف و کاشی و مجسمه‌های دوره ایلخانی و آثار زرین‌فام صفوی و دوران متأخر اسلامی می‌پردازد (Watson, 1985). کایگر اسمیت از دیگر پژوهشگران این حوزه تحقیقاتی است که راه‌کارها و فرمول‌های پیرامون تولید این لعاب بر اساس تجربیات خود ارائه داده است (Caiger-Smith,)

1985). پژوهش مهم دیگر کتاب "Shine like the Sun" نوشته میسن است که بخشی از آن به بررسی سفال زرین‌فام ایران پرداخته و مناطق تولید، منشأ تولید آن‌ها را با آنالیز بدنه و لعاب، مورد بررسی قرار داده است (Mason, 2004: 123-130). زهره روح‌فر و جواد نیستانی در کتاب "ساخت لعاب زرین‌فام در ایران" نیز اطلاعات ارزشمندی بر پایه مطالعات آزمایشگاهی به روش آنالیز پیکسی در اختیار قرار داده‌اند که منبعی مناسب جهت مطالعات تطبیقی است که در این پژوهش از نتایج این آنالیزهای پیکسی جهت مقایسه تطبیقی سود جست‌هایم (نیستانی و روح‌فر، ۱۳۸۹). محمد محسنیان نیز در پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد خود تحت عنوان "بررسی سفال‌های زرین‌فام قرون ۶-۷ ه.ق ایران به کمک روش‌های تجزیه دستگاهی" به بررسی آزمایشگاهی برخی زرین‌فام‌های قرون میانی منسوب به جیرفت، جرجان، کاشان، ری و تخت‌سلیمان پرداخته‌است (محسنیان، ۱۳۸۳). از دیگر پژوهش‌های تجربی و آزمایشگاهی صورت گرفته پیرامون سفال زرین‌فام می‌توان به این موارد اشاره کرد: "بررسی و احیاء لعاب زرین‌فام خاندان ابوطاهر کاشانی" (میرشفیعی، ۱۳۹۰)، "بررسی عملی تکنیک ایجاد تزیینات زرین‌فام روی لعاب‌های دوران اسلامی" (عابد اصفهانی و هولاکویی، ۱۳۸۵)، "ساخت و بررسی تأثیر دما و اتمسفر بر لعاب زرین‌فام با هدف یافتن دمای بهینه و شرایط احیای مناسب" (قصایی و دیگران، ۱۳۸۶)، "مطالعه منشاء تولید سفالینه‌های زرین‌فام ایرانی با استفاده از روش آنالیز پیکسی" (آقا علی‌گل و دیگران، ۱۳۸۵) و "Ionoluminescence investigation of medieval Iranian luster glazed ceramics" (Nikbakht et al, 2019). لازم به ذکر است که در دو مقاله آخر آنالیز پیکسی روی نمونه‌های زرین‌فام انجام پذیرفته است.

بر اساس مطالعات باستان‌شناسی و تاریخی صورت گرفته، ساخت سفال و کاشی زرین‌فام در ایران به سه دوره تقسیم می‌شود (کیانی و کریمی، ۱۳۶۴: ۴۴). دوره نخست مربوط به قرون اولیه اسلامی (قرون سوم و چهارم هجری) که در مراکز نیشابور، شوش و ری تولید می‌شدند. باید یادآور شد بیشتر تحقیقات پیرامون زرین‌فام‌های قرون نخستین اسلامی توسط پرتر انجام شده‌است (Porter, 1995). دوره دوم مربوط به قرون میانی اسلامی (قرون ۶ و ۷ هجری) که مربوط به مراکز کاشان، ری، ساوه، جرجان و تخت سلیمان است (نیستانی و روح‌فر، ۱۳۸۹: ۶؛ Mason, 2004). و قرون متأخر (قرن دهم تا سیزدهم هجری) که در مراکز چون کاشان، اصفهان، کرمان، یزد و شیراز تولید می‌شدند (Watson, 1985: p.163). در این مقاله ما برآنیم منشأ سفال‌های زرین‌فام‌های قرون میانی دستکند‌های زیرزمینی تپه قلعه را مشخص نماییم.

۴. سفال‌های زرین‌فام دستکند زیرزمینی تپه قلعه

چنانچه یادشد، سفال‌های زرین‌فام بخشی از یافته‌های کاوش باستان‌شناسی در مجموعه دستکند زیرزمینی تپه قلعه روستای رباط آجاج خمین بودند که در مجموع نزدیک به ۳۰ قطعه از این گونه سفالی به‌دست آمد (منتظرظهوری، ۱۳۹۵). اکثر این قطعات زرین‌فام از نهشته‌های فرهنگی راهرو شرقی-غربی (کانکستهای ۳۰۰۴ و ۳۰۰۵) در بخش شمالی دستکند یافت شدند (نقشه ۲) (تصویر ۲ و ۳) که کمک شایانی در تاریخ‌گذاری مجموعه دستکند به لحاظ مقایسه تطبیقی نمودند. اکثر این سفالینه‌ها خمیر بدل‌چینی داشته و دارای زمینه‌ای با لعاب پایه سفید و نقوش طلائی، قهوه‌ای، زیتونی و لاجوردی رنگ بوده و نقوش تزیینی آن‌ها شامل نقوش هندسی، گیاهی و انسانی هستند (منتظرظهوری، ۱۳۹۵: ۱۸۱). به‌منظور مطالعه مقادیر عنصری و تحلیل آنالیز

پیکسی تعداد ۲۵ قطعه سفال زرین فام از میان قطعات موجود انتخاب گردید که آزمایشات تجزیه عنصری بروی آن‌ها صورت پذیرفت (تصویر ۴). در ادامه مطالعات آزمایشگاهی بعد از حصول نتایج آنالیز پیکسی، به جهت مشخص نمودن منشاء تولید آن‌ها، اقدام به تطبیق و مقایسه این نتایج با مقادیر عنصری سفالینه‌های زرین فام کاشان، ری و تخت‌سلیمان گردید؛ که پژوهش‌های پیشین امکان این سنجش و تطبیق را فراهم آورده‌است (نیستانی و روح‌فر، ۱۳۸۶: ۸۴-۹۷).

۵. آزمایش و آنالیز پیکسی

پس از انتخاب نمونه‌های مناسب، نمونه‌ها با استن شسته شدند تا آلاینده‌های محیطی از روی نمونه پاک گردد و در محفظه آزمایش قرار گرفتند. برای آنالیز نمونه‌ها با روش پیکسی متداول از باریکه‌ی پروتون با انرژی 2MeV و جریان باریکه‌ی حدود چند نانوآمپر و ابعاد باریکه در حدود 1×1 میلی‌متر مربع استفاده شده‌است. باریکه‌ی پروتون مورد نیاز برای آنالیز عنصری توسط شتاب دهنده‌ی واندوگراف 3MeV بخش فیزیک هسته‌ای تولید می‌شود (مولکول‌های هیدروژن در ابتدا یونیزه شده و هسته‌های آن جداسازی و شتاب داده می‌شوند). باریکه‌ای از پروتون‌ها از داخل اتاقک واکنش عبور می‌کند. شدت و اندازه باریکه‌ی ورودی توسط موازی‌ساز تنظیم می‌شود. نمونه‌ای که باید آنالیز شود باید به صورت مستقیم در مقابل باریکه قرار بگیرد. نمونه‌ها روی پایه طراحی شده (قابلیت نصب ۱۶ نمونه هم‌زمان) نصب می‌گردند. اتاقک برهم‌کنش دارای دریچه شفاف می‌باشد تا امکان تنظیم محل برخورد باریکه با نمونه وجود داشته باشد (مخصوصاً برای نمونه‌های ما که نیاز به آنالیز یک رنگ خاص نمونه می‌باشد). انرژی پرتو ایکس گسیل شده از نمونه در اثر برخورد پروتون، توسط آشکارساز نیمه‌رسانا از نوع $Si(Li)$ که در زاویه‌ی 135° درجه نسبت به پرتوهای پروتون فرودی قرار گرفته است، اندازه‌گیری شده و توسط یک تقویت‌کننده و یک سیستم آنالیز چند کانالی بر روی کامپیوتر نمایش داده می‌شود. آشکارساز $Si(Li)$ استفاده شده برای آزمایش، دارای قدرت تفکیک 170 eV برای $Fe(K\alpha)$ است. در آرایش آزمایشی، باریکه‌ی پروتون، نمونه تحت بررسی و آشکارگر، همگی در محیط خلاء 10^{-5} Torr قرار دارند. برای ایجاد خلاء در اتاقک آزمایش از یک پمپ مکانیکی و یک پمپ دیفیوژن استفاده می‌شود. ابتدا پمپ مکانیکی خلاء را به حدود 10^{-2} Torr می‌رساند، بعد پمپ دیفیوژن وارد عمل می‌شود. این پمپ خلا را تا مقدار نهایی می‌رساند. برای محاسبه غلظت عناصر تشکیل‌دهنده نمونه‌های آنالیز شده از نرم‌افزار $GUPIX$ استفاده شده‌است. برای کاهش تعداد پرتوهای ایکس کم‌انرژی حاصل از عناصر سبک، به منظور آشکار شدن بهتر عناصر سنگین، از یک فانی فیلتر از جنس مایلار با ضخامت 175 میکرون استفاده شد. نتایج در جدول ۱ نمایش داده شده‌است.

جدول ۱: غلظت عناصر رنگ‌های مختلف نمونه‌های مطالعاتی زرین‌فام

Sample	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Cl	K ₂ O	CaO	Ti ₂ O ₃	MnO
A1(Cream)	2.97	1.63	1.99	84.69	0.37	1.86	4.85	0.07	0.06
A2-1(Brown)	3.99	1.57	3.40	60.78	0.25	2.06	3.75	0.22	0.04
A2-2(Olive)	1.65	1.42	1.48	52.35	0.36	2.14	4.15	0.16	0.04
A3(Azure-Back)	8.65	2.78	2.13	76.44	0.42	2.32	3.72	0.14	0.04
B1-1(Gray)	2.43	1.35	1.37	60.82	0.41	2.76	2.59	0.08	0.04
B1-2(Brown)	0.70	0.83	0.93	52.91	0.46	1.83	2.68	0.06	0.06
B1-3(Blue-Back)	1.79	0.61	2.53	83.33	0.67	2.02	4.28	0.14	0.06
B2-1(Cream)	3.69	1.29	2.53	59.90	0.57	1.39	3.72	0.10	0.03
B2-2(Olive)	1.91	1.54	1.70	58.56	0.40	1.43	3.86	0.11	0.05
B2-3(Azure)	1.09	0.50	4.33	69.78	0.56	1.93	4.80	0.19	0.06
C1-1(Azure)	4.56	1.17	1.16	66.59	0.31	1.63	5.86	0.19	0.07
C1-2(Brown)	1.87	0.84	2.17	68.77	0.29	1.81	3.85	0.31	0.05
C2-1(Cream)	4.25	1.26	1.59	59.28	0.39	1.46	4.02	0.12	0.04
C2-2(Olive)	1.74	1.31	1.52	58.70	0.35	1.52	3.97	0.12	0.04
C3(Azure-Back)	4.78	1.26	2.48	71.41	0.55	1.84	5.75	0.18	0.07
D1-1(Cream)	4.93	1.25	1.02	59.33	0.57	1.19	3.33	0.08	0.03
D1-2(Brown)	1.46	1.17	1.49	59.28	0.53	1.61	4.65	0.14	0.05
D1-3(Azure-Back)	4.75	1.27	1.47	67.27	0.27	1.81	6.13	0.18	0.07
D2-1(Cream)	2.49	0.88	1.52	59.39	0.59	1.35	3.19	0.11	0.03
D2-2(Olive)	1.33	1.19	1.53	56.04	0.56	1.43	2.92	0.11	0.03
E1-1(Brown)	3.63	1.37	1.97	76.49	0.31	2.23	4.56	0.18	0.06
E1-2(turquoise)	6.13	1.87	2.46	76.02	0.31	1.97	4.72	0.14	0.05
E2(Azure-Back)	5.25	1.22	1.45	79.01	0.16	2.03	4.01	0.11	0.05
E3-1(Brown)	1.65	-	1.11	75.24	0.31	2.51	5.14	0.18	0.06
E3-2(Azure)	5.37	1.51	1.62	75.28	0.27	2.18	4.79	0.15	0.06
E4-1(Olive)	2.34	0.62	1.16	76.71	0.84	1.56	3.29	0.11	0.04
E4-2(turquoise)	4.02	0.98	1.29	77.53	0.54	1.73	3.19	0.08	0.04
E5(Olive-edge)	3.52	1.33	1.16	73.1	0.51	1.99	3.57	0.11	0.04

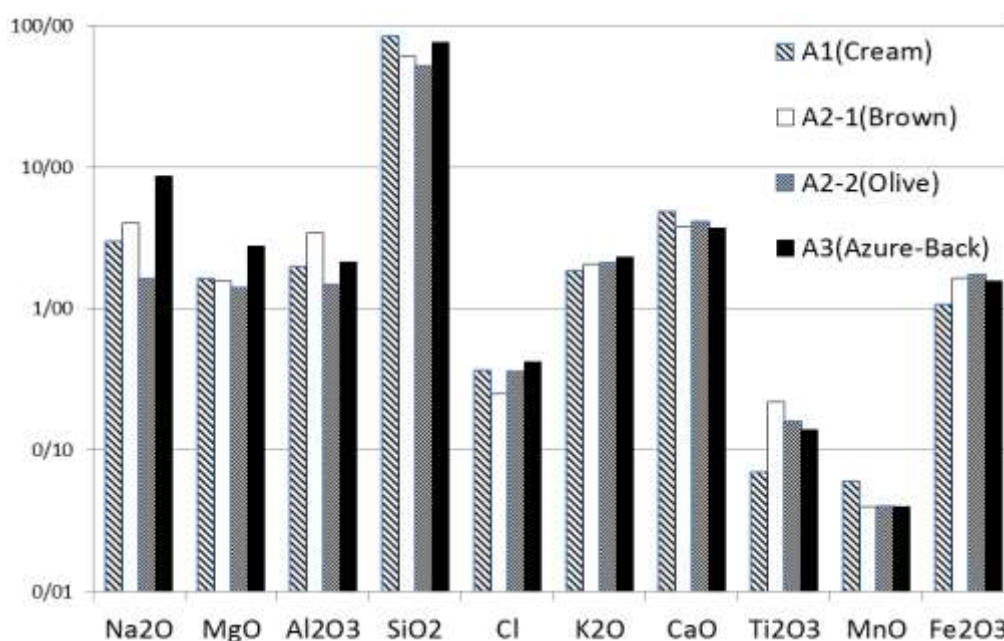
جدول ۱ (ادامه)

Sample	Fe2O3	CoO	Cu2O	ZnO	SrO	Ag2O	SnO	PbO	Other
A1(Cream)	1.08	-	0.04	-	0.17	-	-	-	SO3: 0.22
A2-1(Brown)	1.65	-	0.53	-	-	-	3.61	18.15	-
A2-2(Olive)	1.74	-	2.37	0.04	-	1.98	5.18	24.94	-
A3(Azure-Back)	1.57	0.08	0.14	-	-	-	-	1.57	-
B1-1(Gray)	0.76	-	0.27	-	-	-	3.74	23.38	-
B1-2(Brown)	0.87	-	1.72	-	-	1.38	3.17	32.39	V2O3: 0.01
B1-3(Blue-Back)	2.08	0.09	0.47	-	0.22	-	0.49	1.22	-
B2-1(Cream)	0.91	-	0.26	-	-	-	4.47	21.14	-
B2-2(Olive)	1.02	- 2.32	-	0.13	1.28	4.52	21.17	-	-
B2-3(Azure)	2.92	0.15	0.11	0.04	-	-	1.74	11.80	-
C1-1(Azure)	2.71	0.22	0.47	0.02	-	-	1.34	13.72	-
C1-2(Brown)	1.01	0.03	2.98	0.03	-	0.39	3.73	11.89	V2O3: 0.01
C2-1(Cream)	0.99	-	0.31	-	-	-	4.38	21.92	-
C2-2(Olive)	0.95	-	2.56	0.03	-	1.47	4.17	21.55	-
C3(Azure-Back)	2.63	0.20	0.21	0.03	-	-	1.14	7.48	-
D1-1(Cream)	0.81	-	0.3	-	-	-	4.33	22.84	-
D1-2(Brown)	1.08	-	3.37	-	-	0.71	4.01	20.47	-
D1-3(Azure-Back)	3.05	0.23	0.26	0.02	-	-	1.27	11.95	-
D2-1(Cream)	0.77	-	0.34	0.01	-	-	3.79	25.54	-
D2-2(Olive)	0.74	-	2.99	-	-	0.72	3.14	27.27	-
E1-1(Brown)	1.65	-	5.05	-	0.15	-	-	2.35	-
E1-2(turquoise)	1.82	-	1.92	0.04	-	-	-	2.56	-
E2(Azure-Back)	2.91	0.35	1.11	-	0.16	-	-	2.22	-
E3-1(Brown)	2.34	-	7.11	0.05	-	0.21	0.69	3.41	-
E3-2(Azure)	2.31	0.21	3.28	-	-	-	0.41	2.57	-
E4-1(Olive)	0.96	-	2.98	0.03	-	0.34	0.71	7.81	SO3: 0.5
E4-2(turquoise)	0.81	-	1.72	0.02	-	-	0.73	7.32	-
E5(Olive-edge)	0.89	-	2.01	0.03	-	0.43	0.98	10.36	-

نتایج ارائه شده در جدول به صورت درصد نسبی عناصر موجود در نمونه و با فرض اکسید بودن تمامی عناصر محاسبه شده است که برای نمونه‌های سفال فرض صحیحی می‌باشد. عناصر سبک به این روش قابل مشاهده نیستند و غلظت عناصر قابل شناسایی به صد نرمال شده است. مقادیر ارائه نشده در جدول نشان‌دهنده نبودن عنصر مورد نظر و یا غلظت بسیار پایین آن می‌باشد.

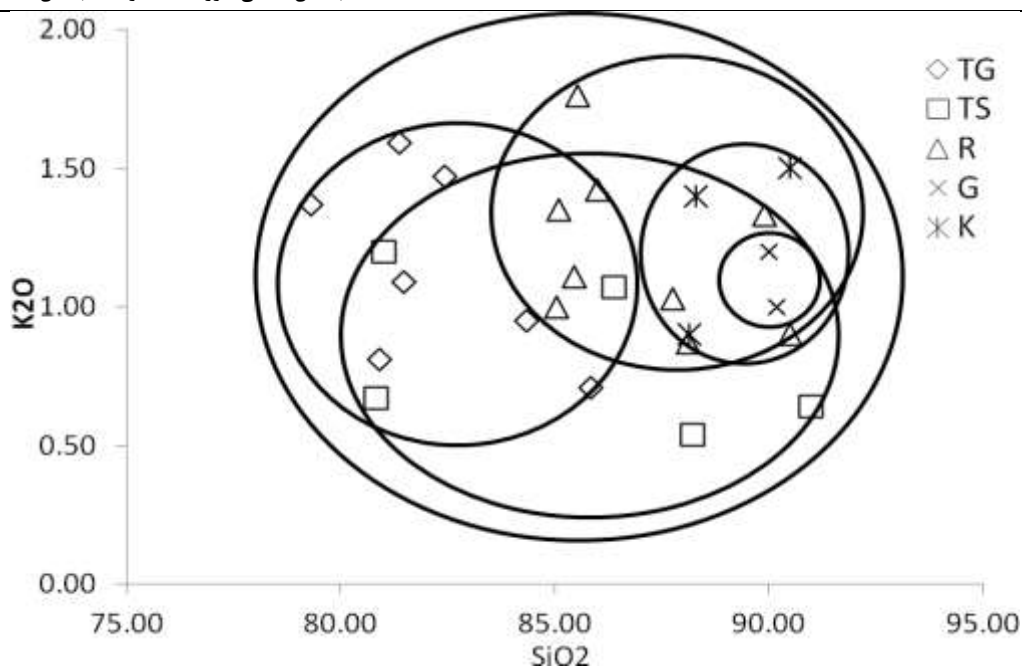
۶. تجزیه و تحلیل داده‌های پیکسی

در نمودار شکل ۱ میزان عناصر رنگ‌های مختلف نمونه A مقایسه شده‌اند. همانطور که مشخص است عمده ماده تشکیل‌دهنده لعاب اکسید سیلیسیم می‌باشد و اکسیدهای سدیم، منیزیم، پتاسیم، آهن و کلسیم نیز به عنوان عناصر تشکیل‌دهنده لعاب با مقادیر کمتر از ده درصد و بیش از یک درصد یافت می‌شوند. اکسیدهای کم‌مقدار تیتانیوم و منگنز و همچنین کلر نیز در لعاب مشاهده شده‌است. تغییرات اکسید تیتانیوم تقریباً با میزان کدر بودن رنگ متناظر است. نمودارهای مشابه برای تمام نمونه‌ها می‌توان رسم کرد و با مقایسه درصد عناصر اطلاعات مفیدی استخراج کرد.



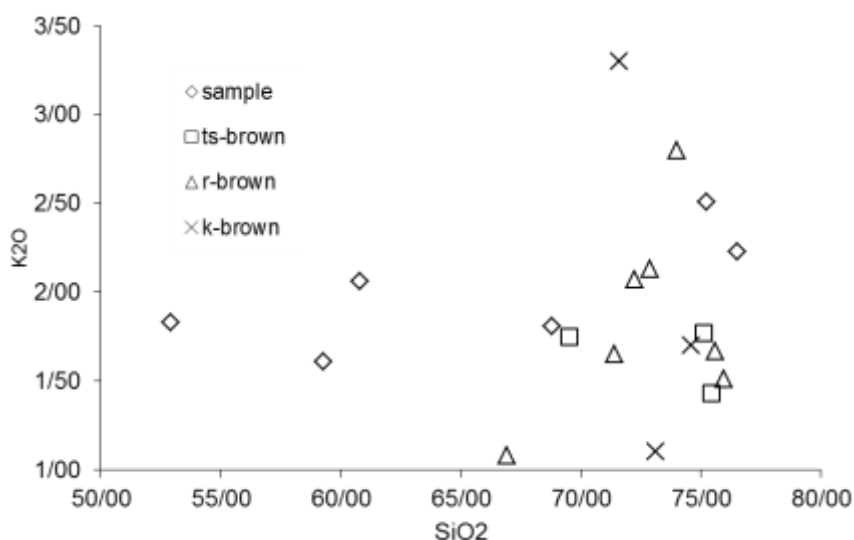
شکل ۱: نمودار عناصر دسته A برای رنگ‌های کرم، قهوه‌ای زیتونی و لاجوردی

برای برآورد اصالت نمونه‌ها با اطلاعات پیکسی معمولاً از نسبت غلظت عناصر استفاده می‌کنند و با سفال‌های غیرباستانی و یا سفال‌های مشابه مقایسه می‌کنند. در نمودار شکل ۲ خمیره سفال‌های تپه قلعه با نمونه‌های کشف‌شده در مناطق تخت سلیمان، ری، گرگان و کاشان مقایسه شده‌است (نیستانی و روح‌فر، ۱۳۸۹: ۸۶ و ۸۹). با توجه به استفاده از آشکارساز بهتر در آنالیز اخیر و امکان اندازه‌گیری عناصر سبکتر درصد عناصر نسبت به آنالیزهای قدیمی‌تر کمتر گزارش شده‌اند که باعث انتقال محدوده آنالیز به درصدهای کمتر اکسید سیلیسیم شده‌است. برای بررسی دقیق‌تر یک رنگ نمونه را انتخاب و نمودار مشابه شکل یک را استخراج کردیم.



شکل ۲: نسبت عناصر اکسید پتاسیم و اکسید سیلیسیم در خمیره سفال‌های مناطق تپه قلعه (TG)، تخت سلیمان (TS)، ری (R) و گرگان (G) و کاشان (K).

همانطور که در نمودار شکل ۳ مشاهده می‌شود، بازه تغییرات نسبت عناصر اکسید پتاسیم به اکسید سیلیسیم برای نمونه‌های متفاوت تقریباً پخش‌شدگی یکسانی دارند که نشان‌دهنده اصول یکسان در تولید دارد و در نهایت می‌توان به عنوان پارامتر تایید اصالت نمونه مورد توجه قرار داد. هرچند انتقال غلظت اکسید سیلیسیم به مقادیر کمتر باز هم دیده می‌شود.



شکل ۳: نمودار نسبت غلظت اکسید پتاسیم به اکسید سیلیسیم برای رنگ قهوه‌ای برای نمونه‌های اکتشافی تپه قلعه (sample)، تخته سلیمان (ts-brown)، ری (r-brown) و کاشان (k-brown)

برای پاسخ به این سوال که نمونه‌های کشف شده با نمونه‌های مکشوفه کدام منطقه ارتباط نزدیک‌تری دارد، غلظت عناصر مختلف موجود در رنگ‌های مختلف نمونه‌های سایر مناطق را با هم مقایسه کردیم. برای این منظور برای هر عنصر دامنه تغییرات (واریانس) و متوسط غلظت را استخراج کردیم که در جدول ۲ نشان داده شده‌است.

جدول ۲: مقادیر انحراف معیار و متوسط عناصر تشکیل دهنده نمونه‌های اکتشافی

<i>ELEMENTS</i>	<i>VARIANCE</i>	<i>AVERAGE</i>
<i>Na2O</i>	3/37	3/32
<i>MgO</i>	0/25	1/22
<i>Al2O3</i>	0/57	1/81
<i>SiO2</i>	89/54	67/68
<i>Cl</i>	0/02	0/43
<i>K2O</i>	0/14	1/84
<i>CaO</i>	0/85	4/12
<i>Ti2O3</i>	0/00	0/14
<i>MnO</i>	0/00	0/05
<i>Fe2O3</i>	0/61	1/54
<i>CoO</i>	0/19	0/14
<i>Cu2O</i>	3/01	1/60
<i>ZnO</i>	0/00	0/02
<i>SrO</i>	0/06	0/07
<i>Ag2O</i>	0/91	0/43
<i>SnO</i>	16/03	2/80
<i>PbO</i>	97/47	12/78

برای مقایسه با نمونه‌های مناطق دیگر، دامنه تغییرات و متوسط غلظت عناصر برای آن نمونه‌ها را نیز محاسبه کردیم و به صورت نمودار در شکل ۴ آورده شده‌است. برای برآورد کمی میزان تطابق غلظت عناصر، مقدار قدرمطلق انحراف داده‌های مربوط به مناطق مختلف نسبت به داده‌های اکتشافی طبق فرمول زیر را به عنوان پارامتر سنجش محاسبه کردیم که در جدول ۳ آورده شده است.

$$A = \sum |X(i) - X0(i)|$$

که در آن X مقدار غلظت عناصر مناطق مختلف و $X0$ غلظت عناصر اکتشافی می‌باشد.

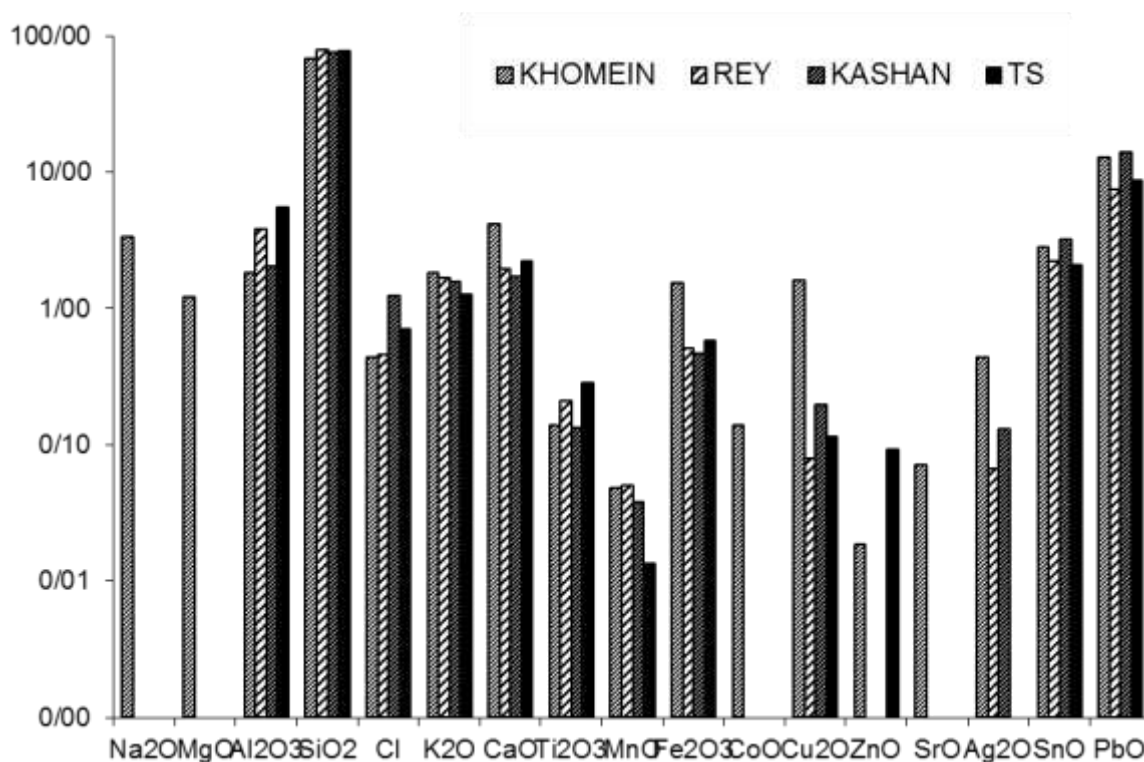
جدول ۳: میزان انحراف غلظت عناصر اکتشافی با عناصر نمونه‌های مناطق تخت سلیمان، کاشان و ری

	<i>TS</i>	<i>KASHAN</i>	<i>REY</i>
<i>A</i>	24.40344	15.37285	24.16239

در به دست آوردن نتایج جدول ۳ تمام آنالیزهای خمیره و لعاب در نظر گرفته شده است ولی اگر خمیره سفال‌ها را به صورت مجزا مورد توجه قرار دهیم نتایج به صورت جدول ۴ دیده خواهد شد. با توجه به نتایج جدول‌های ۳ و ۴ می‌توان گفت که تکنیک ساخت نمونه‌های اکتشافی بیشتر به نمونه‌های کاشان نزدیک است. هرچند از نظر خمیره نتایج تفاوت زیادی با نمونه‌های مناطق دیگر ندارد. لازم به ذکر است که در تحلیل کمی این کار پژوهشی علاوه بر حذف داده‌های پرت (داده‌هایی که بیشتر از ۵۰ درصد از میانگین داده‌های مشابه خود دور باشند) بیشترین تعداد نمونه آنالیز شده در دسترس استفاده شده است. در برآورد قبلی که به صورت کیفی و بدون لحاظ موارد اشاره شده انجام پذیرفت، مشابهت نمونه‌ها با نمونه‌های ری به نظر می‌رسید که با کار دقیق‌تر این پژوهش نتایج به مشابهت بیشتر نمونه‌ها با نمونه‌های کاشان رسیدیم؛ هرچند اعداد محاسبه شده با توجه به تعداد آنالیزها باز هم با قطعیت کامل نمی‌توانند بیان‌کننده این شباهت باشند. هرچه تعداد آنالیز بیشتری در اختیار باشد، مسلماً نتایج قابل قبول‌تری خواهیم داشت.

جدول ۴: میزان انحراف غلظت عناصر بدنه نمونه‌های اکتشافی با عناصر نمونه‌های تخت سلیمان، کاشان و ری

	<i>TS</i>	<i>KASHAN</i>	<i>REY</i>
<i>A</i>	7.441214	8.435238	7.237956



شکل ۴: نمودار متوسط غلظت عناصر برای نمونه‌های اکتشافی تپه قلعه (*khomein*)، تخت سلیمان (*ts*)، ری (*rey*) و کاشان (*kashan*)

۷. نتیجه‌گیری

تاکنون مطالعات زیادی پیرامون سفال زرین‌فام صورت پذیرفته که در اکثر کتاب‌ها و مقالات، لعاب زرین‌فام از جنبه‌ای تاریخی و تکنیکی مورد بررسی واقع شده‌است و محدود پژوهشی به آنالیز و تجزیه عنصری این گونه سفالی پرداخته و متعاقباً اکثر این سفالینه‌ها منشاء‌یابی نشده‌اند. در پژوهش حاضر سعی شد با اتکا به نتایج آنالیز با باریکه یونی و روش پیکسی، سفال‌های مجموعه دست‌کند زیرزمینی تپه قلعه روستای رباط آجاج خمین مورد تحلیل و تجزیه مقادیر عنصری قرار گرفته و تا حدودی منشاء تولید آن‌ها مشخص گردد. در راستای پاسخگویی به سوالات تحقیق، نتایج آنالیز پیکسی نمونه‌های مدنظر را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

طبق نتایج آزمایش نمونه‌ها، چنانکه مشاهده می‌شود، بیشترین درصد متعلق به عناصر سیلیس، سرب و قلع است. به این ترتیب می‌توان گفت که لعاب پایه نمونه‌ها از نوع لعاب سربی است. لعاب‌های سربی مخلوطی از اکسید سرب و جوهر آبگینه و سیلیس خام خرده شده هستند. در این نوع لعاب‌ها اکسیدهای اصلی شبکه‌ساز، سیلیس و سرب هستند و اکسیدهای پتاسیم و کلسیم به عنوان اصلاح‌کنندگان لعاب به کار می‌روند و اکسید آلومینیوم نیز نوعی کمک شبکه‌ساز است که می‌تواند باشد یا نباشد.

عنصر تیتانیوم برای ایجاد کدری (قطعات با رنگ قهوه‌ای دارای بیشترین مقدار تیتانیوم و قطعات با رنگ کرم دارای کمترین میزان تیتانیوم هستند) و عنصر کبالت عامل رنگ لاجوردی بوده و رنگ سبز در لعاب‌های سربی توسط اکسید مس بوجود می‌آید. در تمام نمونه‌ها این اکسید وجود دارد اما در نمونه‌های به رنگ زیتونی دارای بیشترین مقدار هستند و این سبزی ناشی از اکسید مس است.

اکثر نمونه‌های قهوه‌ای رنگ دارای اکسید نقره هستند و رنگ قهوه‌ای خود را از این اکسید گرفته‌اند. اکسید سدیم با اضافه نمودن اکسید مس رنگ فیروزه‌ای و لاجوردی به لعاب می‌دهد. این موضوع در لعاب‌های نمونه‌های به رنگ لاجوردی و فیروزه‌ای به وضوح پیدا است. در نمونه‌های به رنگ لاجوردی و فیروزه‌ای اکسید سدیم بیشترین مقدار است (در نمونه‌ی A_3 این اکسید بیشترین مقدار است).

اکسیدهای عناصر در خمیره و لعاب هر نمونه تفاوت چندانی ندارد. عناصر به‌کار رفته در نمونه‌ی خاک خمیره هر سفال با درصد تغییر جزئی در لعاب همان نمونه به‌کار رفته است. در نمونه‌های خمیره میزان سیلیس به‌کار رفته بیشتر است و اکسیدهای رنگ دهنده به میزان کمتری استفاده شده‌است. اکسید آلومینیوم در نمونه‌ی خمیره سفال‌ها بیشتر از درصد این اکسید در نمونه‌های لعاب است. این اکسید، غلظت لعاب را افزایش می‌دهد و از روان شدن آن جلوگیری می‌کند.

با توجه به مقایسه تطبیقی تحلیل‌های عنصری صورت گرفته، نمونه‌ها اصالت عنصری زرین‌فام‌های شناخته شده قرون ۶ و ۷ هجری را دارا هستند و به نمونه‌های کاشان نزدیک‌ترند. لازم به ذکر است که در تحلیل کمی این کار پژوهشی علاوه بر حذف داده‌های پرت (داده‌هایی که بیشتر از ۵۰ درصد از میانگین داده‌های مشابه خود دور باشند) بیشترین تعداد نمونه آنالیز شده در دسترس استفاده شده‌است. در برآورد اولیه که به صورت کیفی و بدون لحاظ موارد اشاره شده انجام پذیرفت، مشابهت نمونه‌ها با نمونه‌های ری امکان‌سنجی می‌شد که با مطالعات دقیق‌تر این پژوهش نتایج به مشابهت بیشتر نمونه‌ها با نمونه‌های کاشان منجر گردید؛

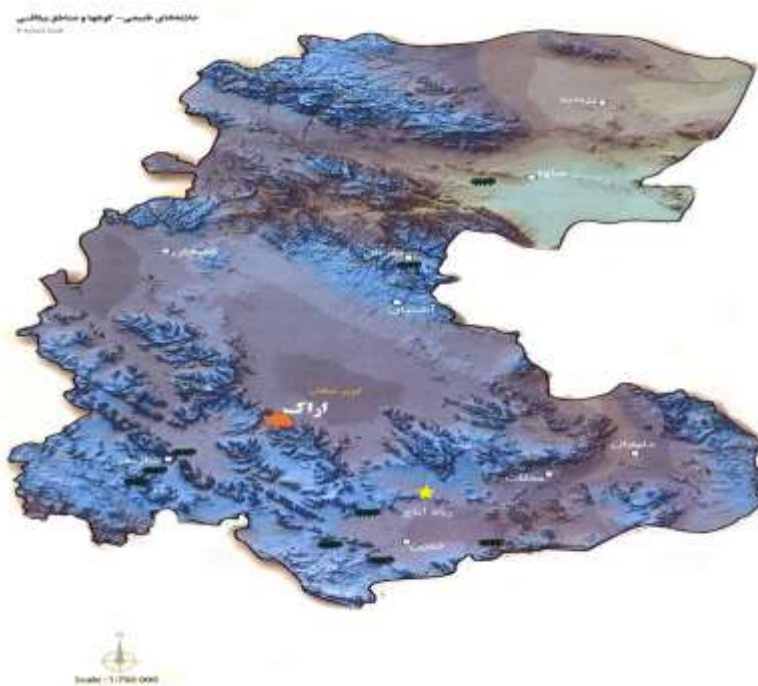
هرچند اعداد محاسبه شده با توجه به تعداد آنالیزها باز هم با قطعیت کامل نمی‌توانند بیان‌کننده این شباهت باشند. هرچه تعداد آنالیز بیشتری در اختیار باشد مسلماً نتایج قابل قبول‌تری خواهیم داشت.

سپاسگزاری

از پژوهشکده باستان‌شناسی، میراث فرهنگی استان مرکزی و دانشگاه کاشان برای ایجاد بستر پژوهشی این کار سپاسگزاریم. از سازمان انرژی اتمی، بخش آزمایشگاه واندوگراف برای آنالیز نمونه‌ها تشکر و قدردانی می‌نماییم. همچنین از آقای اسماعیل شراهی که نمونه سفالهای مورد نیاز را در اختیار ما قرار دادند، بی‌نهایت سپاسگزاریم.

پی‌نوشت‌ها

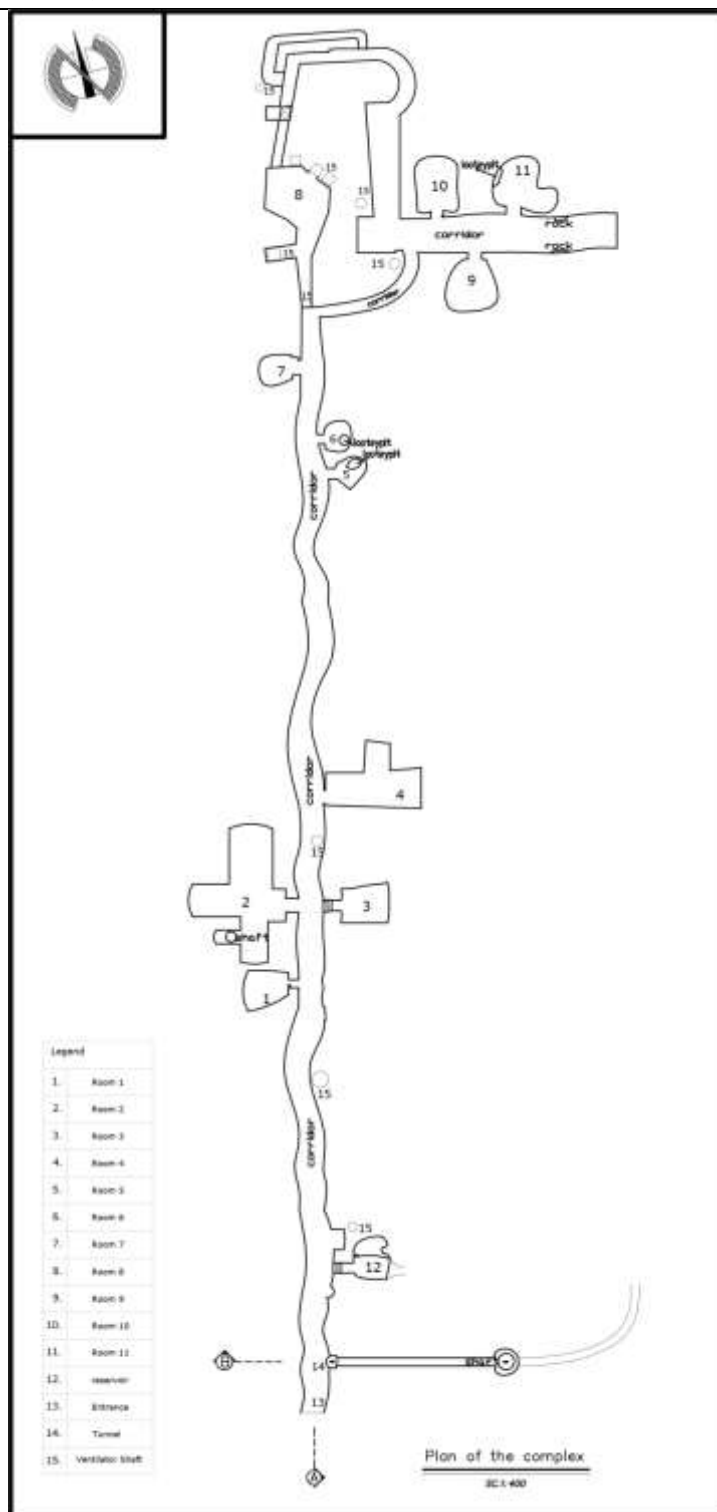
^۱ - مولف کتاب «سه مکتوب درباره هنر سفالگران» چیپریانو پیکولپاسو است که در سه جلد بوده و در یک مجلد در سال ۹۶۶ هجری / ۱۵۵۸ میلادی به رشته تحریر در آمده است و نسخه اصلی در انگلستان در کتابخانه موزه ویکتوریا و کتابخانه آلبرت نگهداری می‌شود (میر شفیعی و محمدزاده، ۱۳۹۴: ۶۶).



نقشه ۱: موقعیت روستای رباط آجاج در استان مرکزی (آرشیو میراث فرهنگی استان مرکزی)



تصویر ۱: موقعیت تپه قلعه نسبت روستای رباط آجاج و بقایای قلعه روی مجموعه دست‌کند زیرزمینی



نقشه ۲: پلان مجموعه دستکند زیرزمینی تپه قلعه روستای رباط آجاج (منتظرظهوری، ۱۳۹۵: ۱۷۹)



تصویر ۲: راهرو شرقی-غربی مجموعه دست‌کند زیرزمینی و نهشته‌های فرهنگی داخل آن که سفالهای زرین‌فام از میان آنها یافت شد (منتظرظهوری، ۱۳۹۵: ۱۴۹)



تصویر ۳: راهرو شرقی-غربی در پایان کاوش (منتظرظهوری، ۱۳۹۵: ۱۸۱)



تصویر ۴: نمونه سفال‌های آنالیز شده (منتظر ظهوری، ۱۳۹۵: ۱۸۱)

منابع

آقاعلی گل، داود؛ محمد محسنیان؛ پروین اولیائی و علی باقی زاده، (۱۳۸۵)، مطالعه منشأ تولید سفالینه‌های زرین فام ایرانی با استفاده از روش آنالیز پیکسی، کنفرانس فیزیک ایران، شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود.

جیمز ویلسن، آلن، (۱۳۸۳)، موسسه سفالگری اسلامی، ترجمه: مهناز شایسته فر، مطالعات هنر اسلامی، تهران.

جوهری نیشابوری، محمد بن ابی البرکات، (۱۳۸۳)، جواهرنامه نظامی، به کوشش ایرج افشار، میراث مکتوب، تهران.

سالنامه آماری استان مرکزی سال (۱۳۸۹-۱۳۹۰)، استانداری مرکزی (معاونت برنامه ریزی و دفتر آمار و اطلاعات).

عبداصفهان‌ی عباس، هلاکویی پرویز، (۱۳۸۵)، بررسی عملی تکنیک ایجاد تزیینات زرین فام بر روی لعاب‌های دوران اسلامی، مطالعات هنر اسلامی، دوره ۳، شماره ۵، صفحه ۱۵۵-۱۶۹.

قصابی، حسین و حمیدرضا رضایی و آزاده شمس، (۱۳۸۶)، ساخت و بررسی تاثیر دما و اتمسفر بر لعاب زرین فام با هدف یافتن دمای بهینه و شرایط احیای مناسب، ششمین کنگره سرامیک ایران، تهران، پژوهشگاه مواد و انرژی، انجمن سرامیک ایران.

قدیری، مرجان، مرضیه غلامی، سعیده وطن‌خواه، محمد ترکیهای اصفهانی، محسن جاوری، وحید فتح‌اللهی، امید رضا کاکویی، (۱۳۹۰)، «آنالیز عنصری نمونه‌هایی از سفال‌های دوره پیش از تاریخ استان اصفهان»، نخستین همایش علم مواد و حفاظت آثار فرهنگی-تاریخی، پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی-فرهنگی و پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران.

کاشانی، ابوالقاسم عبدالله، (۱۳۸۶)، عریس الجواهر و نفایس الاطایب، به کوشش ایرج افشار، انتشارات المعی، تهران.

لامعی، محمد؛ پروین اولیایی؛ فرح شکوهی؛ جواد رحیقی، (۱۳۷۶)، «مروری بر فعالیتهای باستان سنجی در آزمایشگاه و اندوگراف»، مجموعه مقالات دومین همایش سالانه حفاظت و مرمت اشیاء تاریخی-فرهنگی و تزیینات وابسته به معماری، تهران.

محسنیان، محمد، ۱۳۸۳، بررسی سفال‌های زرین‌فام قرون ۶-۷ ه.ق ایران به کمک روش‌های تجزیه دستگاهی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد باستان‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس، منتشر نشده.

منتظر ظهوری، مجید، (۱۳۹۵)، گزارش فصل اول کاوش دستکندهای زیر زمینی تپه قلعه (رباط آغاج)، پژوهشکده باستان شناسی، چاپ نشده.

میرشفیعی، سید محمد، (۱۳۹۰)، بررسی و احیاء لعاب زرین فام خاندان ابو طاهر کاشانی، پایان نامه چاپ نشده، دانشگاه هنر اسلامی، تبریز.

میرشفیعی، سید محمد، محمد مهدی زاده، (۱۳۹۴)، ساخت لعاب زرین فام ایرانی بر اساس کتاب «جواهرنامه نظامی»، نشریه هنرهای زیبا - هنرهای تجسمی دوره ۲۰، شماره ۱، صفحه ۵۹-۶۶.

نیستانی، جواد؛ روح‌فر، زهره، (۱۳۸۹)، ساخت لعاب زرین فام در ایران بر اساس مطالعات تاریخی و پژوهشهای آزمایشگاهی، تهران: آرمان‌شهر.

ودیدی، کاظم، (۱۳۴۸)، اداره و تقسیمات کشوری ایران، مجله بررسی‌های تاریخی، ش ۲۰-۲۱، صص ۲۳۳ - ۲۵۴.

Allan, J.W., 1991. *Islamic Ceramic, Oxford*.

Allan, J.W., 1973. *Abul-Qasims Treatise on Ceramics Iran, The British Institute of Persian Studies, London*.

Arkadiusz, Soltysiak., Majid, Montazerzohouri., Javad, Hosseinzadeh., 2017. *Human remains from Robat Aghaj, Iran, 2017, Bioarchaeology of the Near East, 11:96-100 (2017)*.

Caiger-Smith, Alan., 1985. *lustre pottery, The Herbert press*.

Demortier, G., 1991. *Review of the recent applications of high energy microprobes in arts and archaeology, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Volume 54, Issues 1-3, Pages 334-345*.

Ghadiri, M., M. Torkiha, O. R. Kakuee, V. Fathollahi., 2015. *Combination Of Particle-Induced X-Ray Emission (PIXE) Spectrometry And Proton-Induced Gamma-Ray Emission (PIGE) Spectrometry For Analysis Of Azure Color In Tile. Journal Of Nuclear Science And Technology, (70), 19-24*.

Kakuee, O.R., V. Fathollahi., D. Agha-Aligol., M. Farmahini-Farahani., P. Oliayi., M. Lamehi-Rachti., 2008. *Development of a novel reaction chamber for ion beam analysis of large samples, Nucl. Instr. and Meth. B 266, 1132-1136*.

Mason, Robert., 2004. *Shine Like the Sun : Lustre Painted and Associated Pottery from the Meval Middle East, Mazda Publisher, London*.

Nikbakht, T., O. Kakuee., M. Montazerzohouri., M. Lamehi-Rachti., M. Torkiha., 2019. *Ionoluminescence investigation of medieval Iranian luster glazed ceramics, Journal of Luminescence. 215 (2019) 116592*.

Porter, V., 1995. *Islamic Ceramic, Oxford*.

Torkiha, M., M. Lamehi-Rachti., O.R. Kakuee., V. Fathollahi., 2010. *An external sub-milliprobe optimized for PIXE analysis of archaeological samples, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B 2689, 1517-1522*.

Watson, O., 1985. *Persian Luster, London, Boston*.