Journal of Research on Archaeometry, 2019; 5 (1):143–166

Journal of Research on Archaeometry

DOI: 10.29252/jra.5.1.143

URL: http://jra-tabriziau.ir/

Original Paper

# Elemental Composition of Glass Beads Excavated From Saleh Davoud Tombs in Susa by Micro-PIXE: Evidences of Trade of Glass Artifacts during the Parthian Period

**Davoud Agha-Aligol[1]*, Moslem Jafarizadeh[2], Mehdi Rahbar[3], Mahmoud Moradi[4]**

[1] *Nuclear Science and Technology Research Institute, Physics and Accelerators Research School, Van de Graaff Laboratory, Tehran, IRAN*

[2] *Ph.D. of Archaeology, Tarbiat Modares University, Tehran, IRAN*

[3] *Former member of ICHTO Archaeological Research Center, Tehran, IRAN*

[4] *Nuclear Science and Technology Research Institute, Physics and Accelerators Research School, Van de Graaff Laboratory, Tehran, IRAN*

**Received: 19/04/2019** **Accepted: 19/06/2019**

**Abstract**

Glass beads are unique objects to investigate the trade and exchange of these artifacts between different regions and cultures in the past. The site of Saleh Davoud and its ancient tombs in Susa were excavated in two seasons in 2000 and 2004, under the supervising of Mehdi Rahbar. From these excavations, a significant number of colored glass beads and a number of pieces of glass vessels have been unearthed. In regard to the other objects such as coins, potteries, etc., the period of these glass artifacts dated back to the Parthian-Elymae period. The majority of glass vessels found in Saleh Davoud are simple in shape (undecorated) with green hue in contrast to the glass beads which were considered in much diversity of color. Meanwhile, the different color lines and the gilded layer were used to decorate on the external surface of beads. In this study, totally 13 samples of glass objects from Saleh Davoud, including five samples from glass vessels and eight samples from colored beads have been selected to analyze by micro-ion beam techniques. The aims of the analysis of these objects by micro-PIXE were to focuse on the elemental composition of the main body (bulk glass composition) of the artifacts as well as the decorations which were applied in order to identify the raw materials and get information about the mineral pigments. The thickness and purity of the gold in the gilded layer that was used in a few glass beads were also measured by micro-RBS. The most important questions and hypotheses in this research are: 1- Whether glass beads and glass vessels are locally produced or are imported from other areas; 2- Determination of the pigments and the elements that are responsible for different surface decoration of beads; and 3- Measurement of thickness and the purity of the gold layer using Rutherford Back Scattering (RBS) technique to obtain information about the gilding process. The micro-Ion Beam analysis was performed with microprobe system manufactured by Oxford Instruments using the 3 MV Van de Graaff accelerators at the Nuclear Science & Technology Research Institute in Atomic Energy Organization of Iran. The samples were analyzed in a vacuum chamber using a beam of 2.5MeV protons focused to a diameter less than 10 µm. The beam current was in the range of 30 to 50 pA. Characteristic X-rays were detected using a Si(Li) detector with an active area of 60 mm$^2$ positioned

* Corresponding author: daghaaligol@aeoi.org.ir

[ Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2026-10-31 ]

[ DOR: 20.1001.1.24764647.1398.5.1.10.7 ]

[ DOI: 10.29252/jra.5.1.143 ]

at an angle of 135◦ relative to the incident beam direction and with an energy resolution of 150 eV for Fe-$K_\alpha$. Elemental analysis and measurement of the constituents of these samples show that all analyzed glasses from the Saleh Davoud are Soda-lime-silica glass type. However, the weight percentages of magnesium oxide (MgO) and potassium oxide ($K_2O$) in the analyzed samples suggest that the glass beads are manufactured by the mineral soda (natron) flux, and glass vessels were used the plant ashes as a flux. The amount of MgO and $K_2O$ are the main reason for this identification. These two oxides in the glass beads are less than 1.5wt. %, while in the glass vessels are more than 2.5wt. %. Therefore, the glass beads were most likely imported from other areas such as Egypt or the eastern Mediterranean Sea through the trade and exchange of glass products to the Saleh Davoud. Moreover, based on the elemental maps from the micro-PIXE analysis, the elements which are responsible for, red, green, yellow and white colors might be identified as Fe, Cu and Pb.
**Keywords:** Glass bead, Elemental Analysis, micro-PIXE, Trade and Exchange, Parthian Era

[ Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2026-10-31 ]

[ DOR: 20.1001.1.24764647.1398.5.1.10.7 ]

[ DOI: 10.29252/jra.5.1.143 ]

پژوهه باستان‌سنجی ۱۳۹۸؛ ۵(۱): ۱۴۳-۱۶۶

پژوهه باستان‌سنجی

DOI: 10.29252/jra.5.1.143

URL: http://jra-tabriziau.ir/

دانشگاه هنر اسلامی تبریز ۱۳۷۸

مقاله پژوهشی

# کاربرد روش میکروپیکسی جهت آنالیز عنصری مهره‌های شیشه‌ای مکشوفه از آرامگاه‌های صالح‌داود خوزستان: شواهدی از تجارت مصنوعات شیشه‌ای در دوره اشکانی

داود آقا علی گل*[۱]، مسلم جعفری‌زاده[۲]، مهدی رهبر[۳]، محمود مرادی[۴]

۱. پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده‌ی فیزیک و شتابگرها، گروه فیزیک، تهران، ایران

۲. دانش‌آموخته دکتری باستان‌شناسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳. عضو سابق هیئت‌علمی پژوهشکده باستان‌شناسی، تهران، ایران

۴. پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده‌ی فیزیک و شتابگرها، گروه فیزیک، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۲۹

## چکیده

مهره‌های شیشه‌ای اشیاء بسیار مناسبی برای بررسی تجارت و مبادله مصنوعات شیشه ، بین مناطق و فرهنگ‌های مختلف در دوران گذشته است. محوطه و آرامگاه‌های باستانی صالح داود در شوش، در دو فصل در سال‌های ۱۳۷۸ و ۱۳۸۲ به سرپرستی مهدی رهبر مورد کاوش قرارگرفته است. از این کاوش‌ها تعداد قابل‌توجهی مهره‌های شیشه‌ای و تعدادی نیز ظروف شیشه‌ای یافت شده است که بر اساس شواهد به‌دست‌آمده مانند سکه و سفال دوره تاریخی مصنوعات شیشه‌ای این محوطه به دوره اشکانی- الیمایی برمی‌گردد. در این پژوهش ۱۳ نمونه از اشیاء شیشه‌ای به‌دست‌آمده در صالح داود شامل ۵ ظرف و ۸ مهره رنگی با استفاده از آنالیز با باریکه یونی میکرونی و با استفاده از روش‌های micro-PIXE و micro-RBS با هدف اندازه‌گیری عناصر تشکیل‌دهنده بدنه اصلی و تزیینات به‌کاررفته در سطح شیشه‌ها و همچنین اندازه‌گیری ضخامت و خلوص لایه طلاکوب استفاده‌شده در سطح نمونه‌ها آنالیز شده است. مهم‌ترین سؤالات مطرح‌شده در این پژوهش شامل: ۱- آیا مهره‌ها و ظروف شیشه‌ای، تولید محلی هستند یا از مناطق دیگری به این ناحیه وارد شده‌اند. ۲- تعیین نوع ماده رنگزای استفاده‌شده در تهیه رنگ‌های مختلف، به دلیل استفاده از رنگ‌های متنوع در تزئینات سطح و بدنه اصلی مهره‌ها. ۳- اندازه‌گیری ضخامت و بررسی لایه طلا با استفاده از روش پس‌پراکندگی رادرفورد جهت شناخت تکنیک ساخت و فن شناسی این آثار به‌کاررفته است. آنالیز عنصری این نمونه‌ها نشان می‌دهد که نمونه‌های آنالیز شده از این محوطه از نوع سیلیکا- سودا- آهک ($SiO_2$-$Na_2O$-CaO) هستند. نتایج کمی آنالیزها نشان می‌دهد میانگین درصد وزنی اکسید منیزیم و اکسید پتاسیم که دو عنصر شاخص و مهم در تعیین نوع سودای استفاده‌شده در نمونه‌ها هستند، در مهره‌های رنگی به ترتیب ۱/۱۲ و ۰/۹۲٪ و در ظروف آنالیز شده به ترتیب ۵/۲۰ و ۳/۵۲٪ است. بنابراین، با توجه به درصد وزنی این دو اکسید که برای مهره‌های رنگی کمتر از ۱/۵٪ و برای ظروف بیشتر از ۲/۵٪ است، می‌توان نتیجه گرفت که سودای استفاده‌شده در مهره‌های شیشه‌ای از ماده معدنی ناترون و سودای استفاده‌شده در ظروف از خاکستر گیاهان به‌دست‌آمده است. بنابراین این نتایج نشان می‌دهند که مهره‌های شیشه‌ای احتمالاً از مناطق دیگری مثل مصر و یا نواحی شرقی دریای مدیترانه از طریق تجارت محصولات شیشه‌ای و یا مواد اولیه مورداستفاده در ساخت شیشه به صالح داود آورده شده‌اند. همچنین نتایج آنالیز micro-PIXE نشان داد که در بدنه اصلی این مهره‌ها از اکسید مس ($Cu_2O$) و اکسید آهن ($Fe_2O_3$) با درصد وزنی متفاوت به‌عنوان عامل رنگزا در ایجاد رنگ سبز استفاده‌شده است. علاوه بر این، نتایج نشان داد که از اکسید سرب (PbO) برای ایجاد رنگ زرد و سفید و همچنین از اکسید مس ($Cu_2O$) برای ایجاد رنگ قرمز در تزئینات سطحی مهره‌ها استفاده‌شده است.

**واژگان کلیدی:** مهره‌های شیشه‌ای رنگی، آنالیز عنصری، میکروپیکسی، تجارت، دوره اشکانی

* مسئول مکاتبات: تهران، انتهای کارگر شمالی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده ی فیزیک و شتابگرها، آزمایشگاه واندوگراف

پست الکترونیکی: daghaaligol@aeoi.org.ir

حق نشر متعلق به نویسنده(گان) است و نویسنده تحت مجوز Creative Commons Attribution License به مجله اجازه می‌دهد مقاله چاپ شده را با دیگران به اشتراک بگذارد منوط بر اینکه حقوق مؤلف اثر حفظ و به انتشار اولیه مقاله در این مجله اشاره شود.

[ Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2026-10-31 ]

[ DOR: 20.1001.1.24764647.1398.5.1.10.7 ]

[ DOI: 10.29252/jra.5.1.143 ]

## ۱. مقدمه

با مطالعه مصنوعات و اشیاء شیشه‌ای که از برخی محوطه‌های باستانی یافت می‌شوند، می‌توان اطلاعاتی مانند نوع مواد، ترکیبات عنصری و تکنیک‌های مورداستفاده جهت ساخت این مصنوعات را با استفاده از روش‌ها و تکنیک‌های مختلف دستگاهی شناسایی کرد. مشخص شدن ترکیبات عنصری شیشه‌های باستانی و تاریخی اطلاعات مهم و ارزشمندی در زمینه مطالعه خاستگاه و محل ساخت اولیه مصنوعات شیشه‌ای [1,2]، بررسی تکنولوژی ساخت و مواد اولیه مورداستفاده در فرایند ساخت [3,4] و همچنین مبادله و تجارت مصنوعات شیشه‌ای[5–7] فراهم می‌کند که بدست آوردن این اطلاعات می‌تواند نقش مهمی در زمینه بررسی و مطالعه ارتباطات فرهنگی، اجتماعی و اقتصادی بین جوامع باستان داشته باشد.

در مطالعات انجام شده بر روی آثار شیشه‌ای با روش آنالیز دستگاهی مشخص شده است که بیشتر ماده تشکیل‌دهنده تمام شیشه‌های تاریخی سیلیس است که با یک ماده گدازآور ترکیب‌شده است[8]. علاوه بر این، بر اساس مطالعات انجام‌شده، مشخص‌شده است که اگرچه پارامترهای زیادی مانند نوع گیاه و یا کانی استفاده‌شده به‌عنوان منابع تأمین‌کننده سودا و سیلیس می‌توانند ترکیبات شیشه‌های تاریخی را ازلحاظ عنصری و کانی‌شناسی تغییر دهند، اما بر اساس اینکه چه نوع ماده گدازآوری در ساخت شیشه‌های تاریخی استفاده‌شده است، می‌توان شیشه‌های تاریخی و باستانی را به چهار گروه عمده طبقه‌بندی نمود که به هر یک از این نوع شیشه‌ها می‌توان تقریباً یک دوره زمانی مشخص و همچنین یک مرز جغرافیایی خاصی نیز نسبت داد. این طبقه‌بندی عبارت است از: ۱- شیشه‌هایی که درصد وزنی منیزیم در آن‌ها بالا است (معمولاً بیشتر از ۲/۵ درصد وزنی) که با عنوان شیشه‌های ساخته‌شده از خاکستر گیاهان (Plant Ash Glasses) شناخته می‌شوند[9,10]. ساخت این نوع شیشه‌ها در بازه زمانی ۲۵۰۰ ق.م تا ۸۰۰ ق.م در خاورمیانه و میان‌رودان در کشورهایی مانند مصر، سوریه، ایران و عراق و همچنین در غالب کشورهای اروپایی مانند ایتالیا، یونان و انگلیس رایج بوده است [9]. همچنین استفاده از خاکستر گیاهان در بازه زمانی ۸۰۰ م تا ۱۷۰۰ م یک بار دیگر به‌شدت رواج داشته است و در این دوره اکثر شیشه‌های دوره اسلامی از کشورهای آسیای مرکزی تا پرتغال را شامل می‌شود. ۲-شیشه‌هایی که درصد وزنی منیزیم در آن‌ها پایین است (کمتر از ۱/۵ درصد وزنی) که به آن‌ها، شیشه‌های ناترونی (Natron Glasses) نیز گفته می‌شود. ساخت این نوع شیشه‌ها در بازه زمانی ۸۰۰ ق.م تا ۸۰۰ م در مناطق وسیعی از کشورهای اروپای غربی تا کشورهای شرق دریای مدیترانه مانند مصر، فلسطین، سوریه و ایتالیا متداول بوده است. ۳- شیشه‌هایی که درصد وزنی سرب در آن‌ها بالا است که به آن‌ها شیشه‌های سربی گفته می‌شود. استفاده از سرب در مصنوعات شیشه‌ای و همچنین صنعت سفال‌گری مانند لعاب در بازه زمانی ۱۰۰۰ تا ۱۴۰۰م. در سرتاسر اروپا، میان‌رودان و خاورمیانه گزارش شده است. در بررسی‌ها، نوع ویژه‌ای از شیشه‌های سربی یافت شده که همراه با عنصر باریم است و به آن شیشه‌های سیلیکا- سرب- باریم می‌گویند که خاستگاه اصلی این شیشه‌ها چین است و غالباً در بازه زمانی ۷۰۰ ق.م تا ۲۰۰ م تولیدشده‌اند[11]. ۴- شیشه‌هایی که درصد وزنی اکسید پتاسیم در آن‌ها بالا است و به شیشه‌های پتاسی معروف‌اند. در تهیه گدازآور آن‌ها به‌جای استفاده از خاکستر گیاهان رشد یافته در بیابان یا شوره‌زار از خاکستر درختان جنگلی استفاده شده است. ساخت این نوع از شیشه‌ها در بازه زمانی ۸۰۰ تا ۱۷۰۰ م که منابع تولید سودا از ماده معدنی ناترون در مصر دچار چالش شده، در اروپا رایج بوده است. پس کاملاً مشخص است که تنها بر اساس اندازه‌گیری ترکیبات عنصری نمونه‌های شیشه‌ای اکتشاف شده در یک مکان می‌توان تا حدود زیادی از دوره تاریخی و همچنین مکان ساخت یا خاستگاه مصنوعات شیشه‌ای اطلاعات ارزشمندی را به دست آورد. اما در بازه زمانی که استفاده از ماده معدنی ناترون در خاورمیانه و کشورهایی مانند مصر، سوریه و فلسطین بسیار متداول بوده، یک استثنای بسیار



[ Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2026-10-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.24764647.1398.5.1.10.7 ]
[ DOI: 10.29252/jra.5.1.143 ]

مهم وجود دارد و آن مناطق شرق رود فرات، شامل کشورهای عراق و ایران است که تحت حکومت اشکانیان و ساسانیان بوده‌اند. بررسی‌های آزمایشگاهی اثبات نموده که در این منطقه به‌صورت بومی از ماده معدنی ناترون در صنعت شیشه‌سازی استفاده‌نشده است، بلکه در شیشه‌های این امپراتوری‌ها استفاده از خاکستر گیاهان به‌عنوان گدازآور مانند شیشه‌های نوع اول ادامه یافته است[12,13].

تعداد قابل‌توجهی مهره‌های شیشه‌ای در محوطه باستانی صالح داود یافت شده که می‌تواند نشان‌دهنده استفاده گسترده ساکنین این منطقه از آثار شیشه‌ای باشد. از طرفی در بین آثار شیشه‌ای، زیورآلاتی مانند مهره‌های رنگی، همواره اشیاء بسیار مناسبی برای بررسی تجارت و مبادله مصنوعات شیشه‌ای به‌صورت آماده، بین مناطق و فرهنگ‌های مختلف بوده است. بر این اساس یکی از اهداف اصلی این پژوهش پاسخ به این سؤال است که آیا مهره‌های یافت شده در محوطه صالح داود تولید بومی منطقه هستند یا از طریق تجارت و بازرگانی از مناطق دیگری از جهان واردشده‌اند. بنابراین در آنالیز عنصری این مهره‌ها بررسی و اندازه‌گیری دقیق دو عنصر منیزیم و پتاسیم بسیار بااهمیت است؛ زیرا مشخص می‌شود که مواد گدازآور استفاده‌شده در مهره‌ها از ماده معدنی بی‌کربنات سدیم (ناترون) و یا اینکه از خاکستر به‌دست‌آمده از گیاهان، تهیه‌شده است[14]. این موضوع می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در بررسی خاستگاه و تعیین محل ساخت مهره‌ها در بررسی فرایند تجارت اشیاء شیشه‌ای داشته باشد. بر این اساس می‌توان فرایند تجارت شیشه یا مواد اولیه مورداستفاده در ساخت آن را بین دو قدرت بزرگ آن دوره یعنی اشکانیان و رومیان بررسی کرد. همچنین با توجه به‌ظاهر برخی از نمونه‌ها که دارای لایه طلایی ضخیمی بودند، بررسی و تأیید استفاده از لایه طلا در تزئینات با استفاده از روش میکروپیکسی یکی دیگر از اهداف این پژوهش بود. علاوه بر این، به دلیل تنوع رنگی در بدنه اصلی مهره‌ها و همچنین استفاده از نوارهای رنگی متنوع در تزئینات سطح آن‌ها، تعیین عناصر فلزی رنگزا در رنگ‌های مختلف با استفاده از اندازه‌گیری ترکیبات عنصری این مهره‌ها با روش میکروپیکسی، یکی دیگر از جنبه‌های موردنظر در این پژوهش بوده است.

## ۲. پیشینه تحقیق

بررسی و مرور تحقیقات پیشین انجام‌شده بر روی اشیاء شیشه‌ای کشف‌شده از مناطق مختلف ایران و خارج از ایران (مانند عراق) که تحت حاکمیت اشکانیان بوده‌اند، نشان می‌دهد که در سال‌های گذشته، به‌صورت بسیار محدود، تنها بر روی تعداد اندکی از اشیاء شیشه‌ای که دوره تاریخی آن‌ها به دوره اشکانیان برمی‌گردد، تحقیقات و بررسی‌هایی با استفاده از آنالیز شیمیایی و عنصری در داخل و خارج از کشور انجام‌شده است. در یکی از این پژوهش‌ها که در سال ۲۰۰۸ به چاپ رسیده، آنالیز عنصری تعداد بسیار محدودی از نمونه‌های دوره اشکانی به‌دست‌آمده در سلوکیه عراق گزارش‌شده است[13]. نویسندگان آن پژوهش نشان دادند که در نمونه‌های آنالیز شده از شهر سلوکیه عراق (که تقریباً تمام آن‌ها تکه‌های باقیمانده از ظروف دوره اشکانیان هستند)، از ۹ نمونه آنالیز شده، ۸ نمونه از نوع شیشه‌های ناترونی و یک نمونه هم از نوع شیشه حاصل از خاکستر گیاهان است. آن‌ها اشاره نموده‌اند که شیشه‌های ناترونی کشف‌شده در شهر سلوکیه تولید بومی منطقه نبوده و به‌احتمال‌زیاد از کشورهای حوزه دریای مدیترانه به این منطقه وارد شده‌اند. همچنین در پژوهش دیگری که اخیراً نتایج آن به چاپ رسیده است، ۲۰ نمونه از ظروف شیشه‌ای دوره اشکانی که در محوطه کاخ شائور شوش در دشت خوزستان به‌دست‌آمده، با استفاده از روش میکروپیکسی آنالیز شده است[15]. نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که نمونه‌های آنالیز شده از محوطه شائور برخلاف نمونه‌های یافت شده در سلوکیه عراق همگی از نوع شیشه‌های سیلیکا- سودا- آهک است که سودای آن‌ها از خاکستر گیاهان است و می‌تواند تولید بومی منطقه باشد[15].

علاوه بر مطالعاتی که در بالا به آن‌ها اشاره شد، تحقیقات اندکی نیز بر روی مهره‌های شیشه‌ای که دوره تاریخی آن‌ها تقریباً نزدیک به دوره اشکانیان است، در



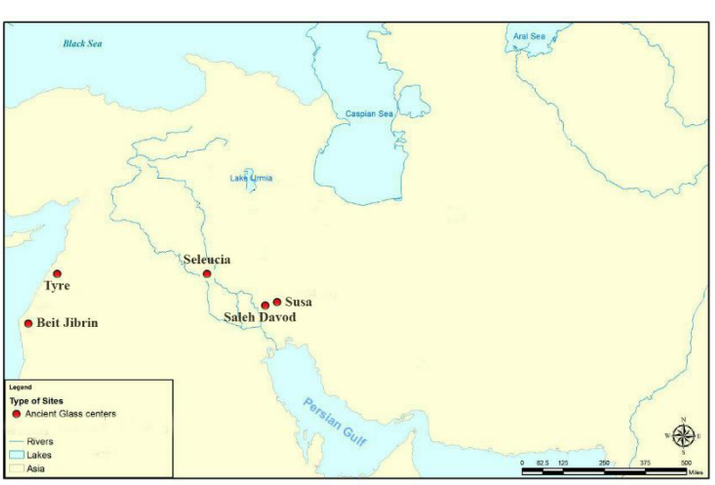
[ Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2026-10-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.24764647.1398.5.1.10.7 ]
[ DOI: 10.29252/jra.5.1.143 ]

داخل و خارج از کشور انجام‌شده است. به‌عنوان‌مثال باقرپور کاشانی تعدادی از مهره‌های رنگی از مجموعه زیورآلات به‌دست‌آمده از غار وشنوه در کاشان که متعلق به دوره ساسانی است را موردبررسی قرار داده است. نتایج این آنالیزها نشان می‌دهد که مهره‌ها از جنس شیشه هستند و از خاکستر گیاهان به‌عنوان ماده گدازآور استفاده‌شده است. همچنین در این پژوهش، برخی از رنگدانه‌های استفاده شده برای ایجاد این مهره‌های رنگی نیز شناسایی‌شده است[16]. یکی دیگر از پژوهش‌هایی که اخیراً بر روی تعدادی از مهره‌های رنگی به‌کاررفته در زیورآلات پیش‌ازتاریخ موزه ملی ایران با قدمت هزاره سوم تا اول ق.م انجام‌شده است، نشان می‌دهد در نمونه‌های آنالیز شده به جزء یک سری از مهره‌ها که از سنگ لاجورد ساخته‌شده‌اند، سایر مهره‌ها از جنس شیشه سیلیکا–سودا–آهک هستند که در ساخت آن‌ها از خاکستر گیاهان به‌عنوان ماده گدازآور استفاده‌شده است. همچنین نتایج آنالیز عنصری تعدادی از این مهره‌ها نشان می‌دهد که در آن‌ها عنصر آنتیموان به‌صورت عمدی برای مات کردن آن‌ها اضافه‌شده است[17]. این مقاله با توجه به آنچه در بالا ذکر شد در پی شناسایی ماده ناترون در ساخت شیشه‌های تاریخی در ناحیه ایران است که در این راستا به شناسایی و آنالیز نمونه‌های به‌دست‌آمده از صالح داود پرداخته‌شده است که احتمالاً جزء اولین شیشه‌های ناترونی به‌دست‌آمده از فلات ایران است.

## ۳. موقعیت جغرافیایی و پیشینه کاوش‌های تپه صالح داود

تپه صالح داود، در موقعیت جغرافیایی "N 32°21'08.31 و "E 48°08'19.33 و در نزدیکی روستایی به همین نام قرار دارد. این روستا در فاصله حدود ۴۰ کیلومتری غرب شوش، در فاصله‌ی حدود ۵۰۰ متری شمال شرقی ایوان کرخه و در حدود ۱۰۰ متری غرب رودخانه کرخه، در استان خوزستان قرار دارد. محل این محوطه باستانی در نقشه و شکل ۱– الف نشان داده‌شده است. در اطراف این تپه تاریخی شش تپه باستانی وجود دارد. تپه‌ای که آرامگاه الیمایی در آن کاوش شد، در جنوب غربی روستا واقع‌شده است و آن تپه‌ای با ارتفاع کم و وسیع است که حدود ۴ متر از سطح زمین‌های دشت مرتفع‌تر است و در حال حاضر به گورستان عمومی تبدیل‌شده است[18].

محوطه و تپه‌های صالح داود در دو فصل در سال‌های ۱۳۷۸ و ۱۳۸۲ به سرپرستی مهدی رهبر از پژوهشکده باستان‌شناسی ایران مورد کاوش و بررسی قرارگرفته است[19]. این محوطه باستانی، دارای چهار لایه باستانی است که حاوی اطلاعاتی مفیدی در زمینه باورهای مذهبی، شیوه‌های خاک‌سپاری و حتی میزان رشد اقتصادی اقوام الیمایی است. در فصل اول کاوش‌های این محوطه، آرامگاهی زیرزمینی با ابعاد




شکل ۱ – الف: موقعیت جغرافیایی محوطه صالح‌داود در ایران و میان‌رودان
Fig; 1a: Map showing the location of the Saleh Davoud site in Iran and Mesopotamia



[ Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2026-10-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.24764647.1398.5.1.10.7 ]
[ DOI: 10.29252/jra.5.1.143 ]



شکل۱–ب: نمای ورودی آرامگاه صالح داود [20]
Fig. 1b: Entrance view from the Tomb of Saleh Davoud

۲/۳۰ در ۴/۲۰ متر یافت شد. این آرامگاه که به‌صورت سردابه‌ای زیرزمینی است، مهم‌ترین اثر لایه چهارم صالح داود است. بر فراز این آرامگاه ساخت‌وسازهایی وجود داشته است که هم‌اکنون از این آثار فقط آثار دیوار خشتی و کف سازی جلو راه‌پله‌ها با قطعات آجری پاره باقی‌مانده است. به نظر کاوشگر این محوطه، این ساخت‌وساز بر فراز آرامگاه‌های الیمایی مانند سالن‌هایی بوده است که بر فراز آرامگاه‌های ایلامی چغازنبیل و یا هفت‌تپه برای اجرای آیین‌های مربوط به تدفین وجود داشته است[18]. مصالح آرامگاه کشف‌شده در صالح‌داود از آجر و ملاط گچ است و ظاهراً دیواره داخلی آن نیز دارای لایه نازکی از گچ است. در شکل ۱–ب و ۱–ج نمای ورودی و همچنین نمایی از داخل آرامگاه صالح داود نشان داده‌شده است. از بخش‌های مختلف این



شکل۱–ج: نمایی از داخل آرامگاه کشف شده در صالح داود [18]
Fig. 1c: A view from inside of the tomb discovered in Saleh Davoud



[ Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2026-10-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.24764647.1398.5.1.10.7 ]
[ DOI: 10.29252/jra.5.1.143 ]

آرامگاه اشیاء مختلفی به‌دست‌آمده که برخی از آن‌ها عبارت است از: یک عدد پیه‌سوز و تعدادی ظرف کوچک سفالی، قطعات مختلف اعضاء بدن انسان، ۴ سکه الیمایی، مهره‌های شیشه‌ای رنگی به‌صورت گردنبند، عطر دان از جنس خمیره شیشه، پارچ آب از جنس سفال، یک عدد پیه‌سوز سفالی، یک کاسه با خمیره نخودی رنگ، تعدادی سکه مسی و تعدادی مهره آویز از جنس خمیر شیشه، نگین انگشتر عقیق و صمغ گیاهی یا قیر طبیعی و شیء آهنی زاویه‌دار با کاربرد نامشخص. همچنین چند قطعه شیء شبیه پوست مچاله شده که احتمالاً چرم بوده نیز از این آرامگاه به‌دست‌آمده است[18].

## ۴. مواد و روش‌ها

### ۴-۱ . معرفی مصنوعات شیشه‌ای تپه صالح داود

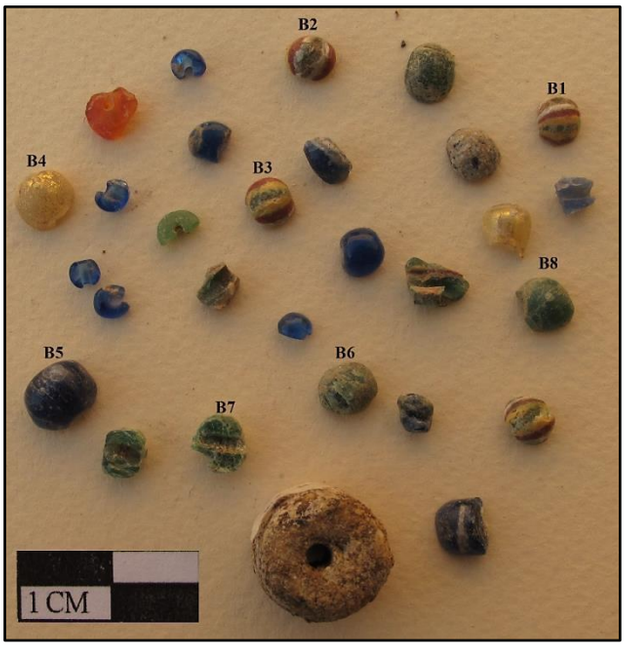
از کاوش‌های باستان‌شناسی هر دو فصل این محوطه باستانی، هم در داخل آرامگاه و هم در ترانشه‌های محوطه‌های اطراف آن، آثار و اشیای شیشه‌ای فراوانی از دوره‌های اشکانی – الیمایی به‌دست‌آمده است. اگرچه ظروف شیشه‌ای سالم از این کاوش‌ها کشف نشده اما قطعات اندکی از ظروف شیشه‌ای یافت شده که می‌توان آن‌ها را احتمالاً به ظروف یا بطری‌های ویژه مواد دارویی و آرایشی، پیاله، پایه و زیورآلات طبقه‌بندی نمود. اما وجود مهره‌های شیشه‌ای بی‌شماری که مخصوصاً از داخل آرامگاه سردابه‌ای این محوطه کشف‌شده، نشان‌دهنده استفاده گسترده ساکنین این منطقه از آثار شیشه‌ای است. شاید زیباترین و منحصربه‌فردترین یافته‌های کاوش‌های آرامگاه صالح داود، مهره‌های شیشه‌ای است که اکنون زینت‌بخش ویترین‌های موزه شوش و آبادان هستند. این مهره‌ها در رنگ‌های مختلف سبز، زرد، قرمز، لاجوردی و سیاه و همچنین مهره‌های دو رنگ و چندرنگ ساخته‌شده‌اند. فرم بیشتر آن‌ها دایره‌ای است که سوراخی جهت آویز دارد. در شکل ۲، گردن‌آویز شیشه‌ای دوره اشکانی که با مهره‌های شیشه‌ای یافت شده از محوطه باستانی صالح داود شوش بازآفرینی شده‌اند، نشان داده‌شده است. با توجه به برخی محدودیت‌ها مانند محدودیت در تعداد مهره‌های قابل‌دسترس و همچنین محدودیت در نمونه‌برداری از آن‌ها و همچنین اندک بودن نمونه‌های ظروف



شکل ۲: مهره‌های تزئینی گردنبند یافت شده از محوطه باستانی صالح داوود، شامل مهره‌های شیشه‌ای رنگین و مهره‌های عقیق قرمزرنگ[20]
Fig. 2: Necklace decorative beads found in the ancient area of Saleh Davoud, includes of the colored glass beads and red agate beads



[ Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2026-10-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.24764647.1398.5.1.10.7 ]
[ DOI: 10.29252/jra.5.1.143 ]

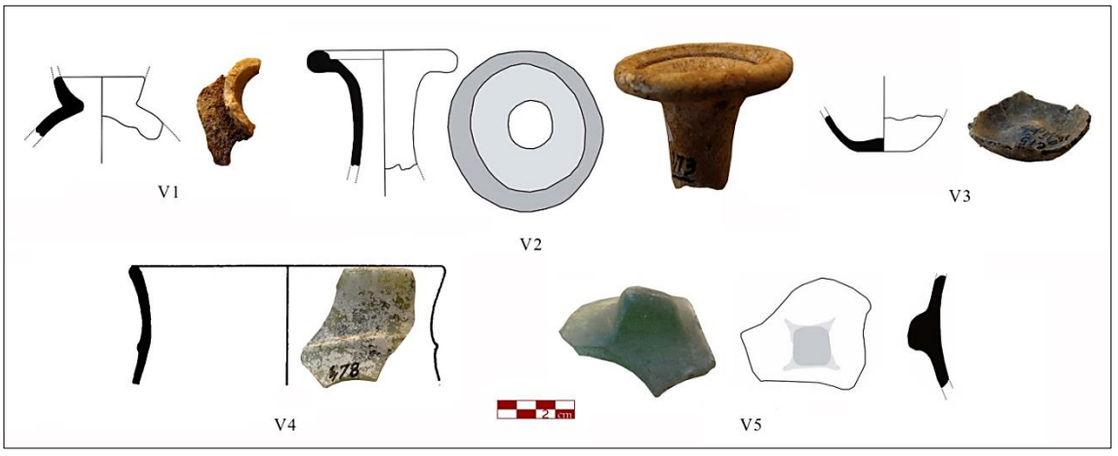



شکل ۳-الف: تعدادی از مهره‌های شیشه‌ای دوره اشکانی محوطه باستانی صالح داود که با کدهای B1 تا B8 مشخص‌شده‌اند و در این پژوهش با استفاده از روش میکرو پیکسی آنالیز شده‌اند.[20]

Fig. 3a: A number of glass beads of Saleh Davoud that marked by B1 to B8 in picture, analyzed in this study by micro-PIXE technique

کشف‌شده در صالح داود، در این پژوهش امکان نمونه‌برداری از ۸ نمونه مهره شیشه‌ای و ۵ ظرف شیشه‌ای از صالح داود فراهم شد. شکل ۳ -الف مهره‌های شیشه‌ای آنالیز شده از این محوطه را نشان می‌دهد که با کدهای B1 تا B8 مشخص‌شده‌اند. شکل ۳-ب نیز مربوط به قطعات شکسته ظروف شیشه‌ای آنالیز شده است که با کدهای V1 تا V5 نامگذاری شده‌اند.

مهره‌های شیشه‌ای چندرنگ (B1-B3) ازاین‌جهت که امکان بررسی رنگدانه‌های مختلف مورداستفاده در ایجاد رنگ‌های مختلف سفید، قرمز، سبز و زرد را امکان‌پذیر می‌سازد، بسیار مهم بودند و خوشبختانه




شکل ۳-ب: قطعات شکسته ظروف شیشه‌ای دوره اشکانی محوطه باستانی صالح داود که با کدهای V1 تا V5 مشخص‌شده و در این پژوهش با استفاده از روش میکرو پیکسی آنالیز شده‌اند.[20]

Fig. 3b: photo and drawing of analyzed glass vessels of Saleh Davoud that labeled by V1 to V5



[ Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2026-10-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.24764647.1398.5.1.10.7 ]
[ DOI: 10.29252/jra.5.1.143 ]

امکان نمونه‌برداری از چند نمونه از این مهره‌ها در این پژوهش فراهم شد. همچنین برخی از مهره‌های کشف‌شده، ظاهری طلایی‌رنگ داشتند. برای بررسی اینکه آیا این نمونه‌ها با لایه طلا تزئین شده‌اند یا خیر، امکان مطالعه یکی از این نمونه‌ها نیز فراهم شد (B4). بدنه اصلی مهره‌های آنالیز شده دارای تنوع رنگی متفاوتی بودند. شش نمونه از این مهره‌ها طیف رنگی سبز داشتند که سه مورد از آن‌ها شفاف (B1-B3) و سه مورد از آن‌ها نیز کدر (B6-B8) هستند. یک نمونه از این مهره‌ها شفاف و سفیدرنگ (B4) و مهره دیگر نیز کدر و آبی تیره بود (B5). شکل ظاهری تمام مهره‌های آنالیز شده دایره‌ای با قطری حدود ۵ میلی‌متر بودند. همچنین بدنه اصلی تمام ظروف آنالیز شده دارای طیف رنگی سبز که برخی از آن‌ها همان‌طور که در شکل ۳-ب مشخص است با یک لایه صدفی‌رنگ (که ناشی از تدفین طولانی‌مدت در خاک است)، پوشانیده شده است.

## ۴-۲. روش آنالیز با باریکه یونی میکرونی

با استفاده از باریکه یونی میکرونی که در آن باریکه یونی قطری کمتر از چند میکرومتر مربع دارد، می‌توان توانایی‌ها و قابلیت‌های آنالیز با باریکه یونی متداول را که در آن باریکه یونی ابعادی در حدود چند میلی‌متر دارد را به میزان زیادی افزایش داد؛ زیرا با استفاده از باریکه میکرونی و تجهیزات جانبی مورداستفاده می‌توان سطح نمونه موردبررسی را جاروب (اسکن) کرد و تصاویر دوبعدی از نقشه توزیع عناصر موجود در نمونه با استفاده از روش‌های مختلف آنالیز با باریکه یونی با قدرت تفکیک‌پذیری در مقیاس میکرون تهیه کرد[21]. هر یک از روش‌های مبتنی بر آنالیز با باریکه یونی میکرونی می‌تواند به برخی از سؤالاتی که در این پژوهش مطرح‌شده است پاسخ دهد. تعیین عناصر تشکیل‌دهنده نمونه‌های مورد آنالیز و همچنین اندازه‌گیری درصد وزنی عناصر تشکیل‌دهنده آن‌ها با استفاده از روش میکروپیکسی (micro-PIXE=micro-Proton Induced X-ray Emission)انجام می‌شود[22]. در این پژوهش آزمایش میکروپیکسی با باریکه میکرونی پروتون با انرژی ۲/۵-۲MeV و شدت جریانی در حدود ۱۰۰pA-۵۰ که توسط شتاب‌دهنده واندوگراف۳MV در پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای تولید می‌شود، انجام شد. همچنین قطر باریکه‌ی پروتون در این آزمایش حدود ۱۰میکرون بوده است. برای انجام میکروپیکسی نیز از آشکارساز Si(Li) با قدرت تفکیک۱۵۰eV که در زاویه‌ی ۱۳۵ درجه نسبت به پرتوهای پروتون فرودی قرار گرفته، استفاده شده است. اصول فیزیکی و نحوه انجام این روش آنالیز به‌طور مفصل، در مقاله‌ای در مجله پژوهه باستان‌سنجی، بررسی و ارائه شده است[15].

همچنین با استفاده از روش «طیف‌سنجی پس‌پراکندگی رادرفورد» (micro-RBS=micro-Rutherford Backscattering Spectroscopy) [23] می‌توان اطلاعات مفیدی از نحوه توزیع و تغییر عناصر در عمق نمونه موردبررسی به دست می‌آید. همان‌طور که اشاره شد برخی از مهره‌های شیشه‌ای دارای رنگ طلایی بودند. آنالیز با روش میکروپیکسی تأیید کرد که در این مهره‌ها از لایه طلا برای تزئین آن‌ها استفاده‌شده است. به‌منظور بررسی بیشتر این نمونه‌ها و به دست آوردن اطلاعاتی در مورد لایه طلای به‌کاررفته در تزئینات آن‌ها (که یکی دیگر از اهداف این پژوهش است) از طیف‌سنجی با روش پس‌پراکندگی رادرفورد استفاده‌شده است. طیف‌سنجی با روش micro-RBS بر پایه آشکارسازی ذرات بارداری که بعد از برخورد کشسان با اتم‌های موجود در نمونه مورد آنالیز پراکنده می‌شوند، استوار است[23]. در این روش آنالیز، باریکه‌ای از پروتون‌های فرودی با انرژی مشخص به نمونه موردبررسی برخورد کرده و در عمق نمونه حرکت می‌کنند و این پروتون‌های فرودی در اثر برخورد با اتم‌های نمونه هدف، انرژی خود را به‌تدریج در طول مسیرشان از دست داده و در زاویه‌های گوناگون پراکنده می‌شوند. پروتون‌های پراکنده‌شده در جهت عقب توسط آشکارساز حساس به ذره که به آن «آشکارساز سد سطحی» گفته می‌شود، در زاویه‌ای مشخص (معمولاً ۱۶۵ درجه نسبت به امتداد باریکه فرودی) آشکار می‌شوند. از طیف micro-RBS به‌دست‌آمده می‌توان اطلاعات مفیدی در مورد جنبه‌های مختلف نمونه‌های تاریخی ازجمله اندازه ضخامت و خلوص لایه‌های طلا



[ Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2026-10-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.24764647.1398.5.1.10.7 ]
[ DOI: 10.29252/jra.5.1.143 ]

جدول ۱: مقادیر عناصر اندازه‌گیری شده در نمونه‌های استاندارد A و B و مقایسه آن با مقادیر گزارش‌شده به‌صورت اکسید و برحسب درصد وزنی
Table. 1: The elemental composition of Corning Standard Galsses A and B and their comparison with the reported values in weight percent (wt. %) as oxides form

| Standard samples | | $Na_2O$ | MgO | $Al_2O_3$ | $SiO_2$ | $P_2O_5$ | $SO_3$ | Cl | $K_2O$ | CaO | $TiO_2$ | MnO | $Fe_2O_3$ | CoO | NiO | $Cu_2O$ | ZnO | SrO | $SnO_2$ | $Sb_2O_5$ | BaO | PbO |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Corning A | Measured | 14.21 | 2.69 | 1.12 | 67.52 | 0.16 | 0.12 | 0.13 | 2.69 | 4.71 | 0.77 | 1.02 | 1.12 | 0.19 | 0.03 | 1.19 | 0.07 | 0.12 | 0.51 | 1.20 | 0.49 | 0.09 |
| | Quoted | 14.30 | 2.66 | 1.00 | 66.56 | 0.13 | 0.10 | 0.10 | 2.87 | 5.03 | 0.79 | 1.00 | 1.09 | 0.17 | 0.02 | 1.17 | 0.04 | 0.10 | 0.19 | 1.75 | 0.56 | 0.12 |
| | St.dev. | 0.19 | 0.12 | 0.10 | 0.16 | 0.08 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.03 | 0.12 | 0.21 | 0.05 | 0.02 |
| | Relative Error | 1.2 | 1.1 | 12.0 | 1.4 | 23.0 | 20.0 | 30.0 | 6.2 | 6.3 | 2.5 | 2.0 | 2.7 | 12.0 | 50.0 | 1.7 | 50.0 | 20.0 | - | 31.4 | 12.5 | 25 |
| Corning B | Measured | 18.11 | 1.15 | 3.98 | 62.10 | 0.97 | 0.55 | 0.22 | 0.96 | 7.86 | 0.10 | 0.23 | 0.33 | 0.04 | 0.09 | 2.56 | 0.21 | 0.01 | n.d | n.d | n.d | 0.53 |
| | Quoted | 17.00 | 1.03 | 4.36 | 61.55 | 0.82 | 0.50 | 0.20 | 1.00 | 8.56 | 0.09 | 0.25 | 0.34 | 0.05 | 0.10 | 2.66 | 0.16 | 0.02 | 0.02 | 0.46 | 0.05 | 0.61 |
| | St.dev. | 0.21 | 0.13 | 0.11 | 0.16 | 0.07 | 0.03 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.02 | 0.01 | - | - | - | 0.04 |
| | Relative Error | 7.2 | 14.6 | 8.7 | 0.9 | 12.1 | 10.0 | 10.0 | 4.0 | 8.1 | 11.1 | 8.0 | 2.9 | 20.0 | 10.0 | 5.6 | 30.0 | 50.0 | - | - | - | 13.11 |

به دست آورد. در این پژوهش آزمایش micro-RBS با باریکه میکرونی پروتون با انرژی ۲MeV و شدت‌جریان در حدود ۱۰۰pA انجام شده و ذرات برگشتی در زاویه ۱۷۰ درجه نسبت به امتداد باریکه فرودی آشکارشده‌اند.

همچنین برای اندازه‌گیری مقدار خطا و عدم دقت در اندازه‌گیری درصد وزنی عناصر تشکیل‌دهنده نمونه‌های موردبررسی در این پژوهش، برای اولین بار در ایران ۴ نمونه استاندارد شیشه از موزه کورنینگ نیویورک تهیه شده و هم‌زمان و تحت شرایط یکسان با نمونه‌ها، مورد آنالیز قرار گرفتند. این ۴ نمونه استاندارد دارای کدهای A، B، C و D هستند[24]. نمونه‌های استاندارد A و B هر دو ترکیبی عنصری مشابه با شیشه‌های سیلیکا- سودا- آهک دارند که برای دو نوع سودای متفاوت حاصل از خاکستر گیاهان و ناترون تهیه شده‌اند. نمونه استاندارد A ترکیبی مشابه شیشه سیلیکایی حاصل از خاکستر گیاهان و نمونه استاندارد B ترکیبی مشابه با شیشه‌های سیلیکایی با گدازآور حاصل از ماده معدنی ناترون دارند. اما نمونه استاندارد C ازنظر ترکیب عنصری مانند شیشه‌های سیلیکا- سرب- باریم بوده و نمونه استاندارد D ترکیب عنصری مشابه شیشه‌های سیلیکا- پتاس- آهک دارند. با توجه به نوع شیشه‌هایی که در این پژوهش بررسی و آنالیز شده‌اند، نتایج اندازه‌گیری شده ترکیبات عنصری نمونه‌های استاندارد A و B در جدول ۱ ارائه‌شده و همچنین برای مقایسه، مقادیر ترکیبات عنصری گزارش‌شده این نمونه‌های استاندارد توسط آزمایشگاه‌های مرجع در این جدول آورده شده است. علاوه بر این مقادیر خطا نسبی و انحراف معیار (standard deviation) هر عنصر برای عناصر اندازه‌گیری شده در این نمونه‌های استاندارد در جدول ۱ ارائه‌شده است. همان‌طور که در این جدول به‌وضوح دیده می‌شود، با روش میکروپیکسی قادر هستیم ترکیبات عناصر اصلی مانند اکسید سیلیسیم، اکسید سدیم، اکسید کلسیم و همچنین ترکیبات کم‌مقدار مانند اکسید منیزیم و اکسید پتاسیم موجود در نمونه‌های شیشه که نقش مهمی در تعیین مواد اولیه و طبقه‌بندی آن‌ها دارند را با دقت بسیار خوبی اندازه‌گیری کنیم.

## ۵. بحث و بررسی نتایج

با توجه به آنچه در بخش مواد و روش‌ها به آن اشاره شد، مهره‌های موردبررسی در این پژوهش هم از سطح خارجی نمونه‌ها برای بررسی رنگدانه‌ها و تزئینات سطحی و هم با استفاده از نمونه‌برداری از عمق، برای اندازه‌گیری ترکیبات عنصری دقیق بدنه اصلی آن‌ها مورد آنالیز و بررسی قرارگرفته‌اند. اما در مورد ظروف، با توجه به اینکه تزیین خاصی در روی سطح آن‌ها استفاده‌نشده بود، آنالیزها تنها از عمق نمونه‌ها انجام‌شده است. در حالت اول برای اندازه‌گیری دقیق ترکیبات عنصری بدنه اصلی مهره‌ها و ظروف موردمطالعه، نمونه‌هایی بسیار کوچکی در ابعاد چند میلی‌متر از عمق اشیاء موردبررسی برداشته‌شده و نمونه‌های تهیه‌شده از سطح مقطع آنالیز شده‌اند. هدف اصلی این آنالیزها اندازه‌گیری ترکیبات اصلی و کم‌مقدار نمونه‌های موردمطالعه است که با استفاده از این اندازه‌گیری می‌توان نوع مواد اولیه استفاده‌شده در ساخت آن‌ها را مشخص و تکنیک ساخت آن‌ها را تعیین نمود. حالت دوم که فقط مهره‌ها را شامل می‌شود، به‌منظور به دست آوردن اطلاعاتی در مورد نوع رنگدانه‌های استفاده‌شده



[ Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2026-10-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.24764647.1398.5.1.10.7 ]
[ DOI: 10.29252/jra.5.1.143 ]

در رنگ‌های مختلف و همچنین بررسی لایه طلا، نمونه‌ها از سطح خارجی نیز آنالیز شده‌اند(شکل۳-الف). علاوه بر این به‌منظور بررسی خارج شدن سدیم در سطح نمونه‌ها و بررسی محصولات خوردگی ایجادشده در حین تدفین طولانی‌مدت در زمین و یا صدفی شدن سطح نمونه‌ها، با آنالیز سطح خارجی آن‌ها می‌توان اطلاعات مفیدی در این مورد نیز به دست آورد.

## ۵-۱. بررسی نتایج آنالیز بدنه اصلی

برای طبقه‌بندی شیشه‌های تاریخی ازنظر ترکیب عنصری و مواد اولیه مورداستفاده در ساخت، اندازه‌گیری دقیق عناصر تشکیل‌دهنده بدنه موردنیاز است. برای این منظور آنالیز بخشی از یک نمونه که نشان‌دهنده ترکیب اصلی باشد و ترکیبات آن در تماس با محیط بیرونی دچار تغییر و دگرگونی نشده باشد، ضروری است. بنابراین در این حالت نمونه‌برداری‌های بسیار کوچکی در ابعاد چند میلی‌متر از عمق نمونه‌ها موردبررسی قرار گرفت.

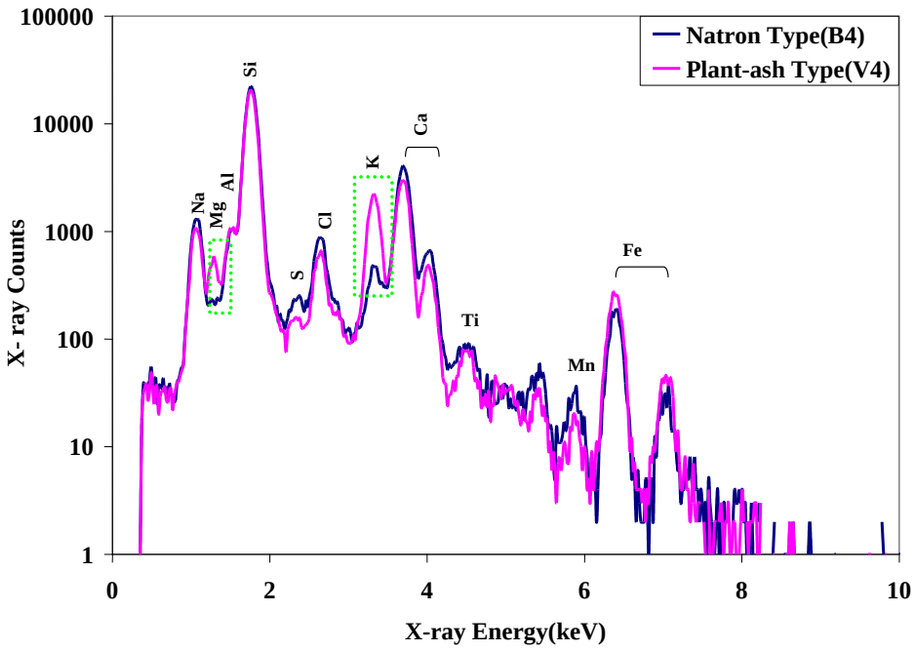
### ۵-۱-۱. بررسی نوع گدازآور و منابع سیلیس

ازنظر کیفی، طیف‌های به‌دست‌آمده از آنالیز بدنه اصلی نمونه‌های صالح داود با استفاده از روش میکروپیکسی نشان می‌دهد که تمام مهره‌ها و ظروف موردبررسی از این محوطه باستانی از شیشه‌های نوع سیلیکا($SiO_2$)- سودا($Na_2O$)- آهک($CaO$) هستند. اما نکته قابل‌توجه و بسیار مهم در مورد نمونه‌های این محوطه، تفاوت در نوع ماده اولیه‌ای است که به‌عنوان گدازآور و تأمین‌کننده سودا در مهره‌ها و ظروف، مورداستفاده قرارگرفته است. برای مثال، در شکل ۴ طیف‌های میکروپیکسی به‌دست‌آمده از مهره B4 با ظرف V4 با یکدیگر مقایسه شده است. در این طیف‌ها کلیه عناصر قابل‌اندازه‌گیری در این دو نمونه مشخص‌شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود ارتفاع قله سیلیسیم(که عمده‌ترین ماده تشکیل‌دهنده این دو نمونه است)، در هر دو نمونه یکسان است. اما اصلی‌ترین و واضح‌ترین تفاوت این دو طیف (همان‌طور که با مستطیل سبزرنگ متمایز شده‌اند)، اختلاف فاحش در ارتفاع قله‌های مربوط به عناصر منیزیم و پتاسیم است. بررسی‌های آزمایشگاهی نشان داده که منشأ اصلی این دو عنصر در ترکیبات شیشه، ناخالصی‌های موجود در ماده گدازآوری است که به‌عنوان منبع تأمین‌کننده سودا در حین ساخت شیشه، وارد خمیره شیشه شده است. درصورتی‌که گدازآور استفاده‌شده از ماده معدنی ناترون باشد، به دلیل خلوص بالای این ماده معدنی درصد منیزیم و پتاسیم در آن بسیار کم بوده و اگر خاکستر حاصل از گیاهان به‌عنوان منبع تأمین سودا باشد به دلیل ناخالصی‌های فراوان موجود در خاکستر و ازجمله منیزیم و پتاسیم، درصد فراوانی این دو عنصر در شیشه بسیار بالا می‌رود[25]. این در حالی است که در مقدار بقیه عناصر اصلی شیشه مانند سدیم، سیلیسیم و کلسیم درصورتی‌که منبع سودا متفاوت هم باشند، تفاوتی چشمگیری ایجاد نمی‌شود(شکل۴). بنابراین ازنظر کیفی تفاوت این دو گدازآور کاملاً از روی طیف میکروپیکسی به‌دست‌آمده از هر نمونه در حین آنالیز مشخص می‌شود.

اما برای بررسی کمّی تفاوت بین این دو منبع تأمین‌کننده سودا در شیشه‌های نوع سیلیکا- سودا- آهک، درصد وزنی عناصر تشکیل‌دهنده نمونه‌ها بر اساس طیف‌های به‌دست‌آمده در آزمایش میکروپیکسی، با استفاده از نرم‌افزار GUPIXWIN استخراج شد[26]. آنالیز کمّی نمونه‌ها برای تمامی عناصر تشکیل‌دهنده شیشه‌ها (به جزء عنصر کلر) به‌صورت اکسید و برحسب درصد وزنی در جدول ۲ ارائه‌شده است. جدول ۲ نشان می‌دهد که در مهره‌ها و ظروف شیشه‌ای موردبررسی در این پژوهش، عناصر سدیم، منیزیم، آلومینیم، سیلیسیم، فسفر، گوگرد، کلر، پتاسیم، کلسیم، تیتانیم، منگنز و آهن در تمام نمونه‌های آنالیز شده وجود دارد. اما مقدار و درصد وزنی برخی از این عناصر ازجمله منیزیم و پتاسیم در نمونه‌های مهره و نمونه‌های ظروف کاملاً با یکدیگر متفاوت است. با نگاهی به جدول ۲ مشاهده می‌شود که ترکیبات عمده تشکیل‌دهنده این شیشه‌ها، اکسید سیلیسیم، اکسید سدیم و اکسید کلسیم است. بنابراین با توجه به درصد وزنی این سه اکسید می‌توان نتیجه‌گیری



[ Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2026-10-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.24764647.1398.5.1.10.7 ]
[ DOI: 10.29252/jra.5.1.143 ]




شکل۴: مقایسه و تفاوت طیف میکروپیکسی به‌دست‌آمده از دو نوع شیشه سیلیکا- سودا- آهک که منبع تأمین سودای متفاوتی دارند: طیف آبی‌رنگ طیف به‌دست‌آمده از مهره B4 است که نشان‌دهنده شیشه با سودای حاصل از ماده معدنی ناترون و طیف صورتی‌رنگ طیف به‌دست‌آمده از ظرف V4 که نشان‌دهنده شیشه با سودای حاصل از خاکستر گیاهان است.

Fig. 4: Comparison of micro-PIXE spectra obtained from two types of silica-soda-lime glasses with two different sources of soda: the blue color specturm obtained from a glass bead (B4) which has used the mineral soda (natron) and the pink color specturm obtained from a glass vessel (V4) which has used the plant ash soda.

کرد که تمامی این شیشه‌ها از نوع شیشه‌های سیلیکا - سودا- آهک می‌باشند. اما همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود درصد وزنی اکسید پتاسیم و اکسید منیزیم در مهره‌های شیشه‌ای و ظروف آنالیز شده اختلاف فاحشی با یکدیگر دارند. میانگین درصد وزنی اکسید پتاسیم در مهره‌های رنگی ۰/۹۲٪ است، درحالی‌که که مقدار وزنی این عنصر بین ۰/۵۵ تا ۱/۰۶٪ در نمونه‌ها متغیر است. این در حالی است که میانگین این عنصر برای ظروف آنالیز شده ۳/۵۲٪ و مقدار وزنی آن بین ۲/۷۷ تا ۴/۲۷ ٪ در نمونه‌ها تغییر می‌کند. همچنین میانگین درصد وزنی اکسید منیزیم در این مهره‌ها ۱/۱۲٪ است که از۰/۶۰ تا ۱/۴۹٪ متغیر است. از طرفی میانگین این عنصر برای ظروف آنالیز شده ۵/۲۰٪ است که از ۳/۱۷ تا ۷/۳۳٪ تغییر می‌کند. بنابراین بر اساس آنچه در مطالعات و بررسی شیشه‌های تاریخی توسط پژوهشگران متداول است و اولین بار در سال ۱۹۶۱ توسط Sayre و Smith پیشنهادشده[14] و تاکنون نیز بدون هیچ‌گونه چالشی موردپذیرش قرارگرفته، برای تقسیم‌بندی شیشه‌ها، درصورتی‌که مقدار درصد وزنی اکسید منیزیم و اکسید پتاسیم موجود در نمونه‌های شیشه کمتر از ۱/۵٪ باشد؛ آن شیشه‌ها از نوع شیشه‌های ناترونی محسوب می‌شود و اگر مقدار این دو اکسید در نمونه‌های شیشه بیشتر از ۲/۵٪ باشد؛ این شیشه‌ها از نوع شیشه‌هایی خواهد بود که منبع تأمین اکسید سدیم آن خاکستر حاصل از گیاهان رشد یافته در خاک‌های شور بوده است.

بنابراین با استناد به این طبقه‌بندی و با توجه به جدول ۲ کاملاً مشخص است که مهره‌های یافت شده در صالح داود از نوع شیشه‌های ناترونی و ظروف یافت شده در این محوطه از نوع شیشه‌هایی است که سودای استفاده‌شده در آن از خاکستر گیاهان تهیه‌شده است. اما برای درک بهتر و کامل‌تر جدول ۲ و بررسی تغییرات موجود در نمونه‌های مختلف آنالیز شده و همچنین به



[ Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2026-10-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.24764647.1398.5.1.10.7 ]
[ DOI: 10.29252/jra.5.1.143 ]

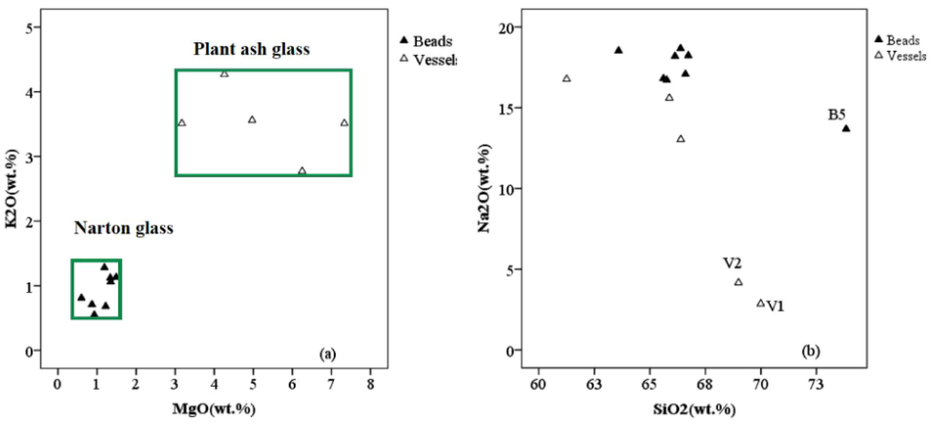
جدول ۲: مقادیر عناصر موجود در نمونه‌های آنالیز شده به‌صورت اکسید و برحسب درصد وزنی (مهره‌ها=B، ظروف=V،nd=not detected)
Table 2: The results of elemental composition in analyzed samples in weight percent (wt. %) as oxides form (nd=not detected, V=Vessels, B=Beads)

| sample | $Na_2O$ | MgO | $Al_2O_3$ | $SiO_2$ | $P_2O_5$ | $SO_3$ | Cl | $K_2O$ | CaO | $TiO_2$ | MnO | $Fe_2O_3$ | CoO | $Cu_2O$ | PbO |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| V1 | 2.86 | 6.25 | 2.94 | 69.99 | 0.31 | 0.30 | 0.33 | 2.77 | 13.33 | 0.05 | 0.06 | 0.79 | nd | nd | nd |
| V2 | 4.17 | 7.33 | 3.03 | 68.99 | 0.98 | 0.23 | 0.53 | 3.51 | 10.42 | 0.08 | 0.03 | 0.70 | nd | nd | nd |
| V3 | 13.04 | 4.26 | 2.83 | 66.39 | 0.57 | 0.42 | 0.93 | 4.27 | 6.36 | nd | nd | 0.81 | nd | nd | nd |
| V4 | 15.60 | 3.17 | 2.82 | 65.88 | 0.61 | 0.21 | 0.88 | 3.51 | 5.87 | 0.17 | 0.04 | 1.23 | nd | nd | nd |
| V5 | 16.77 | 4.97 | 4.19 | 61.25 | 0.83 | 0.20 | 0.86 | 3.56 | 6.17 | 0.18 | 0.04 | 0.95 | nd | nd | nd |
| B1 | 18.67 | 1.35 | 2.50 | 66.88 | 0.55 | 0.30 | 0.90 | 1.06 | 6.36 | 0.08 | 0.23 | 0.76 | nd | 0.08 | 0.26 |
| B2 | 18.19 | 1.49 | 2.67 | 66.63 | 0.24 | 0.30 | 0.88 | 1.13 | 6.98 | 0.09 | 0.28 | 0.88 | nd | 0.04 | 0.16 |
| B3 | 17.08 | 1.34 | 2.33 | 66.90 | 0.42 | 0.45 | 0.97 | 1.12 | 6.79 | 0.12 | 0.78 | .89 | nd | 0.09 | 0.19 |
| B4 | 18.23 | 0.93 | 2.12 | 66.73 | 0.69 | 0.39 | 1.25 | 0.55 | 7.28 | 0.15 | 0.09 | 0.91 | nd | nd | 0.33 |
| B5 | 13.68 | 0.60 | 3.03 | 73.84 | 0.84 | 0.24 | 0.89 | 0.81 | 3.79 | 0.21 | 1.12 | 0.76 | 0.12 | 0.05 | nd |
| B6 | 18.53 | 0.87 | 3.16 | 63.59 | 0.66 | 0.43 | 1.25 | 0.71 | 6.40 | 0.22 | 0.16 | 1.39 | nd | 2.50 | nd |
| B7 | 16.81 | 1.22 | 2.30 | 66.11 | 0.30 | 0.35 | 1.18 | 0.68 | 6.69 | 0.13 | 0.11 | 1.54 | nd | 2.05 | nd |
| B8 | 16.72 | 1.19 | 2.58 | 65.76 | 0.96 | 0.37 | 1.33 | 1.28 | 6.41 | 0.18 | 0.14 | 1.14 | nd | 1.79 | nd |

دست آوردن اطلاعاتی در مورد تنوع و گوناگونی مواد اولیه مورداستفاده در ساخت این شیشه‌ها، از نمودارهای دوبعدی پراکندگی نمونه‌های موردبررسی بر اساس درصد وزنی عناصر تشکیل‌دهنده آن‌ها استفاده گردید. برای بررسی و مشاهده بهتر تفاوت در نوع گدازآورها در نمونه‌های صالح داود، از نمودار پراکندگی نمونه‌ها برحسب درصد وزنی اکسید منیزیم و اکسید پتاسیم استفاده شد. در شکل ۵a تغییرات درصد وزنی اکسید منیزیم برحسب اکسید پتاسیم نشان داده‌شده است. با توجه به این شکل، به‌وضوح مشاهده می‌شود که نمونه‌های بررسی‌شده در این پژوهش به دو گروه کاملاً جدا از هم قابل‌تفکیک هستند. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، یک گروه، مهره‌های آنالیز شده را شامل می‌شود که از نوع شیشه‌های ناترونی هستند و گروه دیگر ظروف آنالیز شده را در برمی‌گیرد که در ساخت آن‌ها از ماده اولیه به‌دست‌آمده از خاکستر گیاهان به‌عنوان گدازآور استفاده‌شده است. اما برای بررسی تنوع و تعدد منابع تأمین‌کننده سیلیس و سودا در نحوه فرمولاسیون و ترکیب مواد اولیه در این نمونه‌ها، یکی از بهترین فاکتورها استفاده از نمودار دوبعدی تغییرات مقدار اکسید سیلیسیم برحسب اکسید سدیم است. همان‌گونه که در شکل ۵b دیده می‌شود تغییرات میزان سیلیس و سودا در تمام مهره‌ها به‌جز مهره B5 بسیار کم و به ترتیب بین ۶۴ تا ۶۷٪ و ۱۶/۵ تا ۱۸/۵٪ متغیر است. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در فرایند ساخت مهره‌های آنالیزشده از محوطه صالح داود (به جزء مهره B5) از یک منبع تأمین‌کننده سیلیس و سودا استفاده‌شده است. همچنین این تغییرات کم در درصد وزنی این دو عنصر می‌تواند نشان‌دهنده فرمولاسیون واحد در این نمونه‌ها باشد. اما با نگاهی به جدول ۲ و شکل ۵b دیده می‌شود که نمونه B5 از نظر ترکیبات عنصری تفاوت فاحشی با بقیه مهره‌ها دارد. این مهره هم اگرچه از نوع شیشه‌های ناترونی است اما درصد وزنی اکسید سدیم، اکسید سیلیسیم، اکسید کلسیم و همچنین اکسید منگنز موجود در آن با بقیه مهره‌های آنالیز شده کاملاً متفاوت است و می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در فرآیند ساخت این مهره، مواد اولیه‌ای که به‌عنوان تأمین‌کننده سیلیس، سودا و اکسید کلسیم استفاده‌شده است با بقیه نمونه‌ها تفاوت دارد[27]. اما در مورد ظروف آنالیز شده از این محوطه تغییرات میزان سیلیس و سودا در نمونه‌ها بسیار زیاد است و همان‌طور که در شکل ۵b مشاهده می‌شود مقدار سیلیس بین ۶۰ تا ۶۹٪ و میزان سودا بین ۳ تا ۱۶/۵٪ متغیر است. اما در مورد اینکه در دو نمونه V1 و V2 مقدار سودا بسیار کم است، باید گفت درصورتی‌که این شیشه‌ها از نوع شیشه‌های سیلیکا- سودا- آهک باشند، این درصد وزنی سودا، می‌تواند کاملاً غیرعادی باشد. یکی از علل کاهش سودا در نمونه‌های شیشه‌ای، خالی شدن اکسید سدیم به دلیل تدفین طولانی‌مدت در خاک است که در این حالت به دلیل خارج شدن سدیم در



[ Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2026-10-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.24764647.1398.5.1.10.7 ]
[ DOI: 10.29252/jra.5.1.143 ]




شکل۵: a- تغییرات درصد وزنی اکسید منیزیم برحسب اکسید پتاسیم، b- تغییرات مقدار اکسید سیلیسیم برحسب اکسید سدیم در نمونه‌های آنالیز شده از محوطه صالح داود

Fig. 5: Scatter plot of wt% of (a): MgO versus $K_2O$, (b): $SiO_2$ versus $Na_2O$ in analyzed sample from Saleh Davoud

سطح شیشه، افزایش قابل‌توجهی در مقدار سیلیس و آلومینا در سطح نمونه اتفاق می‌افتد[28]. اما در مورد دو نمونه V1 و V2 آنالیز از سطح مقطع و عمق نمونه‌ها انجام‌شده که خارج شدن سدیم در سطح نمی‌تواند علت کاهش سودا باشد، مگر اینکه این خالی شدن سدیم به دلیل تشدید فرآیند خوردگی به عمق نمونه‌ها نفوذ کرده باشد. از طرفی در حین خارج شدن اکسید سدیم در نمونه درصد وزنی سیلیس و آلومینا به مقدار قابل‌توجهی افزایش خواهد یافت، درحالی‌که در این دو نمونه مقدار درصد وزنی این دو اکسید افزایش چشمگیری نداشته و تقریباً مشابه بقیه نمونه‌های آنالیز شده است. از طرف دیگر در جدول ۲ مشاهده می‌شود که درصد وزنی اکسید کلسیم و اکسید منیزیم موجود در دو نمونه V1 و V2 در مقایسه با سه ظرف دیگر تقریباً دو برابر است. اما با توجه به اینکه منشأ این دو عنصر در شیشه‌ها معمولاً از خاکستری است که به‌عنوان گدازآور استفاده‌شده، بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که ممکن است در ساخت این دو نمونه از گیاهان متفاوتی برای تهیه خاکستر استفاده‌شده باشد که میزان سودای آن‌ها به‌مراتب کمتر از خاکستر گیاهان سه نمونه دیگر باشد. البته لازم به ذکر است در آنالیزهایی که اخیراً بر روی نمونه شیشه‌های مفتولی شکل چغازنبیل جهت بررسی ترکیبات عنصری آن‌ها انجام‌شده، ترکیب عنصری مشابه به این دو نمونه نیز گزارش‌شده است[29].

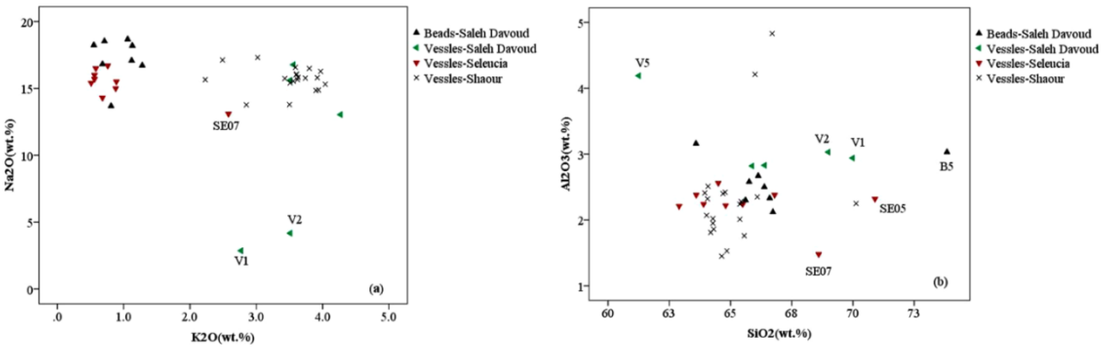
### ۵-۱-۲. بررسی محل تولید و تجارت شیشه در صالح داود

به‌منظور بررسی بیشتر در مورد مواد اولیه استفاده‌شده در ساخت شیشه‌های محوطه صالح داود برای به دست آوردن اطلاعاتی در ارتباط با خاستگاه یا محل تولید آن‌ها و بررسی وجود احتمال تجارت و مبادلات مصنوعات شیشه‌ای در دوره اشکانیان، مقایسه ترکیبات عنصری شیشه‌های اشکانی آنالیز شده از این محوطه با محوطه‌های دیگر (که تاکنون گزارش‌شده است)، می‌تواند مفید و کارآمد باشد. اما همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که تاکنون نمونه‌های بسیار کمی از شیشه‌های دوره اشکانی از ایران و دیگر نقاط جهان موردپژوهش و آنالیز عنصری قرارگرفته‌اند. در یکی از این پژوهش‌ها که در سال ۲۰۰۸ به چاپ رسیده است، آنالیز عنصری تعداد محدودی از نمونه‌های دوران اشکانی به‌دست‌آمده در سلوکیه عراق گزارش شده است.

این پژوهش نشان می‌دهد که شیشه‌های آنالیز شده از سلوکیه که تقریباً تمام آن‌ها تکه‌های باقیمانده از ظروف دوره اشکانی هستند، از نوع شیشه‌های سیلیکا-سودا-آهک هستند و از ۹ قطعه، شیشه آنالیز شده از این محوطه، ۸ نمونه از نوع شیشه‌های ناترونی هستند و یک نمونه هم از نوع شیشه حاصل از خاکستر گیاهان است. همچنین در پژوهش دیگری که اخیراً نتایج آن



[ Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2026-10-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.24764647.1398.5.1.10.7 ]
[ DOI: 10.29252/jra.5.1.143 ]




شکل۶: a– تغییرات درصد وزنی اکسید پتاسیم برحسب اکسید سدیم، b- تغییرات مقدار اکسید سیلیسیم برحسب اکسید آلومینیم در نمونه‌های آنالیز شده از محوطه صالح داود و مقایسه آن‌ها با نمونه‌های شائور در شوش[15] و سلوکیه در عراق[13]

Fig. 6: Scatter plot of wt% of (a): $K_2O$ versus $Na_2O$, (b): $SiO_2$ versus $Al_2O_3$ in analyzed sample from Saleh Davoud and their comparsion with Shaur glasses in Susa [15] and Seleucia in Iraq [13]

منتشرشده است تعداد ۲۰ نمونه از تکه‌های باقیمانده از ظروف شیشه‌های دوران اشکانی که در ایران و از محوطه کاخ شائور(شوش) در دشت خوزستان به‌دست‌آمده، موردبررسی قرارگرفته است[15]. نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد که نمونه‌های آنالیز شده از محوطه شائور همگی از نوع شیشه‌های سیلیکا–سودا–آهک هستند که سودای آن از خاکستر گیاهان به‌دست‌آمده است. بنابراین در شکل ۶ داده‌های این پژوهش و مجموعه شیشه‌های اشکانی مطالعه شده از محوطه کاخ شائور در شوش و نمونه‌های دوره اشکانی به‌دست‌آمده در سلوکیه عراق بر اساس برخی از ترکیبات اصلی مقایسه شده‌اند. در شکل۶a تغییرات و میزان پراکندگی نمونه‌ها بر اساس درصد وزنی اکسید پتاسیم برحسب اکسید سدیم ترسیم‌شده است. این دو عنصر می‌تواند برای مقایسه نوع مواد گدازآور استفاده‌شده و همچنین بررسی منابعی که به‌عنوان تأمین‌کننده این مواد گدازآور در این شیشه‌ها استفاده‌شده است، مفید باشد. با توجه به اینکه در ظروف آنالیز شده از صالح داود در دو نمونه V1 و V2 درصد وزنی اکسید سدیم که می‌تواند به‌عنوان گدازآور استفاده‌شده است غیرعادی است، برای بررسی اینکه آیا به‌جای اکسید سدیم از اکسید پتاسیم به‌عنوان گدازآور استفاده‌شده یا خیر، و از طرفی، چون درصد وزنی اکسید پتاسیم موجود در سوداهای به‌دست‌آمده از گیاهان مختلف نیز می‌تواند با یکدیگر متفاوت باشد، برای بررسی این دو موضوع، مقایسه این دو اکسید در شکل۶a انجام‌شده است. همان گونه که در شکل۶a دیده می‌شود نوع گدازآور مهره‌های صالح داود و سلوکیه عراق یکسان هستند و در هردوی آن‌ها از ماده معدنی ناترون استفاده‌شده است اما درصد وزنی سودا در مهره‌های صالح داود به جزء مهره B5 حدود ۳ درصد بیشتر از نمونه‌های سلوکیه است. همچنین در برخی از مهره‌های صالح داود اندکی درصد وزنی اکسید پتاسیم بیشتر است. اما ظروف آنالیز شده از صالح داود (اگرچه تعدادشان ازنظر آماری قابل‌توجه نیست) کاملاً ازنظر میزان سودا و پتاس با نمونه‌های شائور منطبق هستند. البته باید اشاره شود که دو نمونه V1 و V2 ازنظر ترکیب عنصری با ظروف دیگر صالح داود متفاوت هستند. همچنین یک نمونه آنالیز شده از سلوکیه که گدازآور آن از خاکستر گیاهان به‌دست‌آمده است ازنظر میزان پتاس و سودا از نمونه‌های صالح داود و اکثر نمونه‌های شائور متفاوت است و نشان می‌دهد که این سودا می‌تواند از منبع جداگانه‌ای تهیه‌شده باشد. همچنین برای مقایسه کیفیت منابع سیلیس استفاده‌شده در فرایند ساخت شیشه‌های صالح داود، سلوکیه و شائور یکی از بهترین فاکتورها استفاده از نمودار دوبعدی تغییرات مقدار سیلیس برحسب مقدار آلومینا است. در شکل۶b تغییرات درصد وزنی اکسید سیلیسیم ($SiO_2$) برحسب اکسید آلومینیم ($Al_2O_3$) در نمونه‌های موردبررسی به‌صورت دوبعدی رسم شده است. همان گونه که در شکل ۶b دیده می‌شود، تقریباً در تمام



[ Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2026-10-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.24764647.1398.5.1.10.7 ]
[ DOI: 10.29252/jra.5.1.143 ]

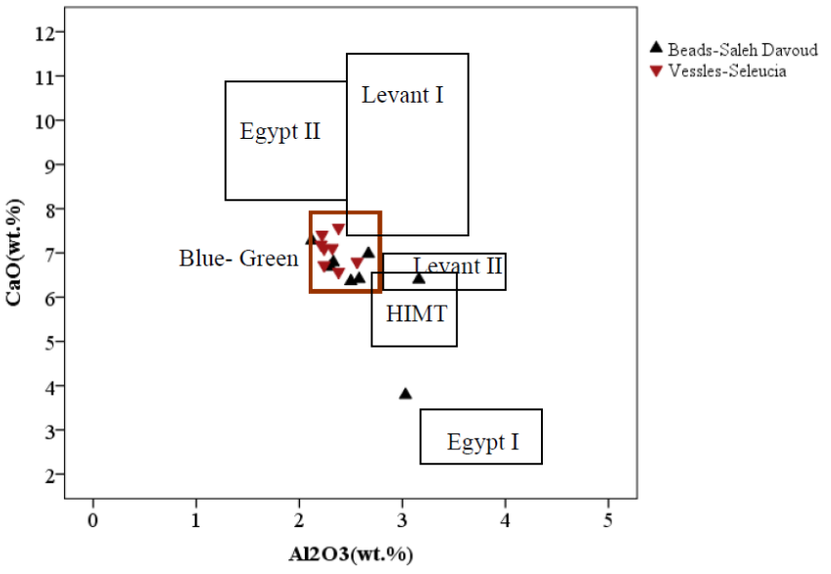
مهره‌های صالح داود تغییرات میزان سیلیس و آلومینا بسیار کم است به‌طوری‌که تغییرات سیلیس بین ۶۶ تا ۶۸٪ و تغییرات آلومینا بین۲ تا ۲/۵٪ است. اما در نمونه‌های سلوکیه اگرچه تغییرات میزان آلومینا کم است اما میزان سیلیس بین ۶۳ تا ۷۳٪ متغیر است. همچنین ظروف شیشه‌ای صالح داود بر اساس این دو عنصر نیز تقریباً منطبق با نمونه‌های شائور هستند. بنابراین بر اساس شکل‌های ۶a و ۶b شاید بتوان نتیجه‌گیری کرد که خاستگاه یا محل تولید مهره‌های صالح داود و ظروف سلوکیه عراق یکسان هستند. اگرچه بر اساس نمودارهای شکل ۶ تفاوت‌هایی بین مهره‌های صالح داود و سلوکیه وجود دارد که بیشتر این تفاوت‌ها ممکن است از فرمولاسیون متفاوت و استفاده از نسبت وزنی متفاوت مواد اولیه در حین ساخت ناشی شود تا ماده اولیه مختلف مورداستفاده در ساخت[30,31].

اما قبل از اینکه به بررسی خاستگاه و محل تولید اشیاء و مصنوعات شیشه‌ای صالح داود پرداخته شود، لازم است به نکته بسیار مهمی اشاره شود. در زمینه مطالعات شیشه‌های تاریخی که موضوع آن بررسی محل تولید اشیاء بود، در ابتدا فرض بر این بود که محل شکل‌دهی اشیاء شیشه‌ای به شکل‌های مختلف مانند انواع ظروف یا اشیاء تزئینی مانند مهره یا النگو با محلی که مواد اولیه شیشه مانند سیلیس و سودا در آنجا باهم مخلوط و ذوب می‌شده، یکسان بوده است. اما بر اساس یافته‌های اخیر باستان‌شناسی و همچنین اندازه‌گیری ترکیبات عنصری شیشه‌ها مشخص‌شده است که این دو محل، یعنی محل تولید مواد اولیه شیشه و محل شکل‌دهی شیشه، می‌توانند کاملاً از یکدیگر متمایز باشد[1,9]. بر اساس این یافته‌ها به محل فرآوری، ترکیب و ذوب مواد اولیه مورداستفاده در شیشه که معمولاً این تولیدات در مقیاس چندین تن در آنجا انجام می‌شده است «کارگاه‌های اولیه» (primary workshops) و به محلی که در آن شیشه شکل‌دهی و اشیاء موردنظر تولید شده، «کارگاه ثانویه» ( secondary workshops) گفته می‌شود. یافته‌های باستان‌شناسی و باستان‌سنجی اثبات کرده است که مبادلات و تجارت شیشه غالباً و در حجم گسترده، بیشتر به‌صورت مواد آماده شیشه بین این کارگاه‌ها انجام‌شده و این دو محل می‌توانند حتی کیلومترها از یکدیگر دور باشند[32]. همچنین این مبادلات در برخی موارد هم به‌صورت اشیاء آماده مانند مهره‌های شیشه‌ای، النگو و یا ظروف شیشه‌ای بین مناطق و فرهنگ‌های مختلف انجام‌شده است[33–35]. از طرف دیگر، با بررسی فرمولاسیون و مواد اولیه مورداستفاده در صنعت شیشه‌گری در دوره‌های مختلف تاریخی در جهان مشاهده‌شده است که در ایران هیچ‌گاه استفاده از ماده معدنی ناترون به‌عنوان گدازآور در صنعت شیشه‌گری کاربردی نداشته است[10]. بر این اساس، درصورتی‌که مشخص شود در ساخت مصنوعات شیشه‌ای یافت شده در محوطه‌های تاریخی و باستانی ایران (به‌عنوان‌مثال مهره‌های رنگی صالح داود) از ماده معدنی ناترون استفاده‌شده است، وجود این ماده معدنی به‌وضوح می‌تواند گواه بر غیربومی بودن این اشیاء و شاهدی برای تجارت شیشه و مصنوعات شیشه‌ای بین ایران و سایر نواحی (غالباً کشورهای حوزه مدیترانه) باشد که استفاده از این گدازآور در صنعت شیشه‌گری آن‌ها رایج بوده است. اما برای اینکه بتوانیم اطلاعات بیشتری در مورد محل تولید مهره‌های رنگی صالح داود به دست آوریم، مطابق آنچه مرسوم است ترکیبات عنصری این مهره‌های ناترونی با گروه‌های شناخته‌شده‌ای از شیشه‌های ناترونی که تاکنون گزارش‌شده‌اند مقایسه شده است[30].

بر اساس تحقیقات و مطالعات فراوانی که بر روی شیشه‌های ناترونی انجام‌شده، مشخص‌شده است که این نوع شیشه‌ها بر اساس محل منابع تأمین سیلیس و ناترون مورداستفاده در ساخت به تعداد محدودی زیرگروه طبقه‌بندی شده‌اند که برخی از مهم‌ترین آن‌ها عبارت است از: مصر ۱ (Egypt I)، مصر ۲ (Egypt II)، لوانت ۱(Levant I)، لوانت ۲(Levant II)،(High Iron- HIMT Manganese-Titanum) و شیشه‌های سبز– آبی (Blue-Green) که هرکدام از این گروه‌ها متناسب با محل جغرافیایی، محل تولید و عناصر کم‌مقدار موجود در ترکیبات آن‌ها نامگذاری شده و تولید آن‌ها در دوره تاریخی مشخصی رایج بوده است. همان‌طور که در



[ Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2026-10-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.24764647.1398.5.1.10.7 ]
[ DOI: 10.29252/jra.5.1.143 ]




شکل ۷: درصد وزنی اکسید کلسیم برحسب اکسید آلومینیم برای گروه‌های شناخته‌شده شیشه‌های ناترونی در نواحی مدیترانه در هزاره اول میلادی بر اساس مراجع[30,36,37]. همچنین درصد وزنی اکسید کلسیم برحسب اکسید آلومینیم مهره‌های آنالیز شده از صالح داود و ظروف سلوکیه عراق برای مقایسه در این شکل ارائه‌شده است.

Fig. 7: Scatter plot of wt% CaO and $Al_2O_3$ for groups of natron glass common in the Mediterranean region in the first millennium AD [28,33,34], compared to the glass beads data form Saleh Davoud in this study and glass vessels data from Seleucia in Iraq.

شکل ۷ کاملاً مشخص است با مقایسه ترکیبات عنصری مهره‌های صالح داود و نتایج گزارش‌شده می‌توان به این نتیجه رسید که غالب مهره‌های صالح داود در گروه شناخته‌شده شیشه‌های سبز- آبی قرار می‌گیرند که با رنگ بدنه این مهره‌ها مطابقت دارد. همچنین بررسی مراجع مختلف که این نوع شیشه‌ها را شناسایی کرده‌اند، رواج این نوع از شیشه‌ها را در بازه زمانی قرن ۳ ق.م تا حدود قرن ۶ م ذکر کرده‌اند که با دوره تاریخی مهره‌های صالح داود نیز هم‌خوانی دارد. همچنین این پژوهشگران، محل ساخت این نوع شیشه را سواحل فلسطین عنوان کرده‌اند[30]. اما در بین مهره‌های آنالیز شده از صالح داود (جدول ۲) ترکیبات عنصری یکی از مهره‌ها (B5)که دارای رنگ آبی لاجوردی است با بقیه مهره‌ها بخصوص در میزان اکسید کلسیم و اکسید سیلیسیم بسیار متفاوت است و از طرفی اکسید کلسیم پایین، مشخصه نوعی از شیشه‌های ناترونی است که با عنوان شیشه‌های مصر ۱ شناخته می‌شوند[38]. در شکل ۷ نیز کاملاً مشخص است این نمونه بسیار نزدیک به گروه مصر ۱ قرار می‌گیرد که محل تولید آن سواحل مصر بوده است. بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که مهره‌های صالح داود در مکان‌های مختلفی در حاشیه دریای مدیترانه ساخته‌شده‌اند و احتمالاً از طریق تجارت و بازرگانی به کشورهایی مانند ایران و عراق واردشده‌اند. لازم به ذکر است که دوره تاریخی شیشه‌های آنالیز شده از سلوکیه عراق که جزء نمونه‌های غیربومی شناخته‌شده است، نیز به دوره اشکانی می‌رسد. همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است آن‌ها از نوع شیشه‌های سبز –آبی می‌باشند که با دوره تاریخی‌شان نیز کاملاً مطابقت دارد[13].

اما با توجه به اینکه ظروف شیشه‌ای صالح داود از نوع شیشه‌های ساخته‌شده از خاکستر گیاهان می‌باشند و از طرف دیگر برعکس شیشه‌های ناترونی که دارای گروه‌های شناخته‌شده بسیار محدودی هستند، پارامترهای بسیار زیادی می‌تواند در ترکیبات عنصری این‌گونه از شیشه‌ها مؤثر باشند. بنابراین بررسی محل تولید ظروف شیشه‌ای صالح داود تعداد نمونه‌های بیشتری نیاز دارد. اما نکته‌ای که باید در مورد نمونه‌های



[ Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2026-10-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.24764647.1398.5.1.10.7 ]
[ DOI: 10.29252/jra.5.1.143 ]

ظروف آنالیز شده از صالح داود به آن توجه شود، درصد وزنی بالای (بیشتر از۳/۵٪) اکسید منیزیم و اکسید پتاسیم آن‌ها است که این درصدها مختص شیشه‌های تولیدشده در ایران و عراق است[10]. بنابراین بر این اساس می‌توان نتیجه‌گیری کرد که شیشه‌های تولیدشده با استفاده از خاکستر گیاهان که در صالح داود و دیگر نقاط دشت خوزستان مانند شائور یافت شده‌اند، احتمالاً می‌تواند تولید بومی منطقه باشد.

### ۵-۱-۳. تعیین مواد رنگزا در بدنه

نتایج ارائه‌شده در جدول ۲ نشان می‌دهد که اکسید مس در تمام مهره‌ها به جزء مهره B4 که بدنه اصلی آن سفیدرنگ است وجود دارد. با توجه به اینکه مهره‌هایی که این اکسید در آن‌ها وجود دارد سبزرنگ هستند، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در این مهره‌ها از اکسید مس با درصد وزنی متفاوت به‌عنوان عامل رنگزا استفاده‌شده است. همچنین در این نمونه‌ها درصد وزنی اکسید آهن نیز تقریباً بالا است. بنابراین این اکسید نیز می‌تواند در ایجاد رنگ سبز مؤثر باشد. همچنین در مهره B5 که بدنه آن آبی تیره است اکسید کبالت وجود دارد که نشان می‌دهد از این اکسید برای ایجاد آبی تیره استفاده‌شده است. اما در مورد مواد رنگزا استفاده‌شده در بدنه ظروف آنالیز شده از صالح داود می‌توان مشاهده کرد که تنها اکسید فلزی موجود در این نمونه‌ها اکسید آهن است که درصد وزنی آن قابل‌توجه است. بنابراین با توجه به رنگ سبز این نمونه‌ها می‌توان نتیجه‌گیری کرد که اکسید آهن عامل رنگی این ظروف باشند.

### ۵-۲. بررسی تزیینات سطحی مهره‌ها

همان‌طور که در شکل ۳- الف مشخص است در مهره‌های موردبررسی از صالح داود در برخی از مهره‌ها تزئیناتی مانند لایه زراندود و یا نوارهای رنگی با تنوع رنگی مختلف بر سطوح خارجی مهره‌ها به‌کاررفته است. جهت شناسایی این رنگدانه‌ها و به دست آوردن اطلاعات بیشتر در مورد عناصری که عامل ایجاد رنگ‌های مختلف شده و همچنین بررسی لایه طلایی‌رنگ و اندازه‌گیری ضخامت لایه طلاکاری شده، سطح خارجی این مهره‌ها نیز آنالیز شدند. برای این منظور در هر مهره، قسمت‌های مختلفی از نمونه با توجه به نوع رنگ‌های به‌کاررفته در آن ناحیه با روش میکروپیکسی آنالیز شده و با استفاده از نقشه توزیع عناصر به‌دست‌آمده از روش میکروپیکسی، عناصری که باعث ایجاد رنگ‌های مختلف در این نمونه‌ها شده، شناسایی شده‌اند.

### ۵-۲-۱. تعیین رنگدانه‌های به‌کاررفته در تزئینات

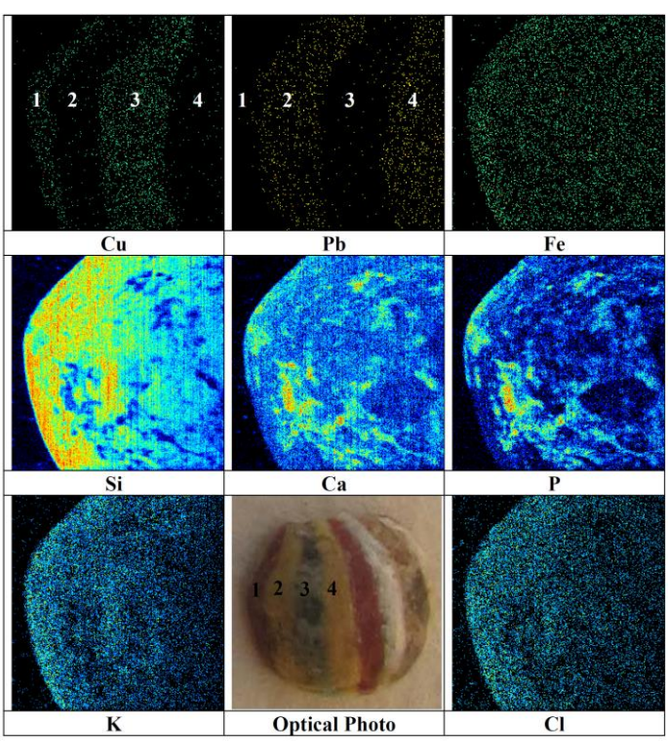
به‌عنوان نمونه در شکل ۷ نتایج به‌دست‌آمده از توزیع عنصری برخی از عناصر موجود در یکی از مهره‌های آنالیز شده(B1) برای ناحیه‌ای که به ترتیب دارای نوارهای رنگی قرمز- زرد- سبز و زرد است و در نقشه‌های توزیع عنصری و تصویر اپتیکی نیز این نوارهای رنگی با اعداد ۱تا ۴ مشخص‌شده‌اند، نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود تفاوت توزیع عنصری بین رنگدانه‌های مختلف در این نمونه کاملاً واضح است. نتایج به‌دست‌آمده از ناحیه آنالیز شده نشان می‌دهد که عامل ایجاد رنگ قرمز (ناحیه ۱) عنصر مس، رنگ زرد (ناحیه ۲و ۴) عنصر سرب و رنگ سبز (ناحیه ۳) نیز عنصر مس است، زیرا با مقایسه تصویر اپتیکی ناحیه آنالیز شده و نقشه توزیع عناصر مختلف نشان داده شده در شکل ۸ مشخص است که در نواحی که از نوارهای زرد و قرمز و سبز برای تزئین استفاده‌شده، فراوانی Xهای مشخصه گسیل‌شده از عناصر سرب و مس قابل‌توجه است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که عامل رنگدانه‌های قرمز و سبز اکسید مس است[39–41]. البته باید توجه داشت استفاده از اکسید مس به‌صورت مالاکیت برای ایجاد رنگدانه سبز در طول سالیان طولانی از دوران مصر باستان تا قرون اخیر در مصر و رم و جهان اسلام بسیار متداول بوده است. همچنین ایجاد رنگدانه قرمز با استفاده از مس معمولاً یا به‌صورت مس فلزی تهیه‌شده و یا به‌صورت اکسید مس که به‌صورت کوپریت بوده است[42,43]. این رنگدانه قدمت بسیار طولانی در صنعت شیشه‌گری دارد و از طرفی تهیه این رنگدانه نیازمند داشتن مهارت زیاد



[ Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2026-10-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.24764647.1398.5.1.10.7 ]
[ DOI: 10.29252/jra.5.1.143 ]

در کنترل دما در حین ساخت است، زیرا تهیه این رنگ نیازمند شرایط اکسیداسیون و احیاء ویژه‌ای است که در هنگام حرارت دادن مواد اولیه شکل می‌گیرد[44]. همچنین نوار زرد در این ناحیه به‌طور عمده از عنصر سرب تشکیل‌شده است و بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در تهیه این رنگدانه عنصر سرب نقش اساسی دارد. علاوه بر این، در تهیه رنگدانه سفیدی که در این مهره مشاهده می‌شود نیز از اکسید سرب استفاده‌شده است. بنابراین رنگدانه‌های سفید و زرد نیز با استفاده از اکسیداسیون‌های متفاوت عنصر سرب ایجادشده‌اند[45]. رنگدانه سفید که به سرب سفید (Lead white) نیز معروف است و ترکیبات اصلی آن شامل کربنات سرب و هیدروکربنات سرب است قدمتی بسیار طولانی دارد و از دوران مصر باستان تا قرن بیستم نیز استفاده‌شده است[46,47]. همچنین نقشه توزیع عناصر فسفر و کلسیم در شکل ۸ به‌طور واضح نشان می‌دهد که محصولات خوردگی از نوع فسفات کلسیم در این ناحیه وجود دارد و همچنین مشاهده می‌شود در نواحی که این خوردگی وجود دارد، عنصر سیلیس به‌عنوان عنصر اصلی تشکیل‌دهنده شیشه دچار تغییرات زیادی در سطح شده است. علاوه بر این در شکل ۸ به‌وضوح دیده می‌شود که توزیع عنصری عناصر آهن، کلر و پتاسیم تقریباً در این نمونه همگن هستند.

در جدول۳ مقدار کمّی عناصر موجود در رنگدانه‌های مختلف آنالیز شده در چند مهره که دارای تزئینات سطحی هستند به‌صورت اکسید و برحسب درصد وزنی ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود عامل رنگ‌های قرمز و سبز در هر دو مهره B1 و B3 اکسید مس است که در هر دو رنگدانه مقدار وزنی این اکسید حدود ۲ ٪ است. همچنین درصد فراوانی اکسید سرب در رنگدانه‌های زرد و سفید در مهره B1 به ترتیب حدود ۱۱٪ و ۴/۵٪ است. این در حالی است که مقدار این اکسید در مهره B3 برای هر دو رنگدانه حدود ۹٪ است. همچنین همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود در ناحیه زراندود درصد وزنی طلا حدود ۱۵٪ است.




شکل ۸: نقشه توزیع عنصری برخی از عناصر موجود در یک نمونه از مهره‌های تزئین شده با نوارهای رنگی مختلف به همراه تصویر اپتیکی آن
Fig. 8: Optical photo and elemental distribution maps of few elements in a glass bead decorated with different colored stripes



[ Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2026-10-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.24764647.1398.5.1.10.7 ]
[ DOI: 10.29252/jra.5.1.143 ]

جدول۳: عناصر موجود در رنگدانه‌های آنالیز شده در مهره‌های B3،B1 و B4 که دارای تزئینات سطحی هستند به‌صورت اکسید و برحسب درصد وزنی (nd=not detected)

Table.3: elemental composition of different pigments in few decorated glass beads (B1, B3 and B4) in weight percent (wt. %) as oxides form (nd= not detected)

| | B4 | B1 | | | | B3 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Elements | ناحیه زراندود | رنگدانه قرمز | رنگدانه سفید | رنگدانه زرد | رنگدانه سبز | رنگدانه سبز | رنگدانه قرمز | رنگدانه سفید | رنگدانه زرد |
| $Na_2O$ | 0.53 | 0.73 | nd | 0.46 | 0.83 | 0.96 | 2.40 | 2.06 | nd |
| MgO | 0.88 | 1.8 | 1.26 | 1.25 | 1.50 | 1.53 | 1.77 | 1.62 | 0.57 |
| $Al_2O_3$ | 2.94 | 3.21 | 2.82 | 2.60 | 3.07 | 2.96 | 3.94 | 4.09 | 3.22 |
| $SiO_2$ | 27.73 | 56.93 | 56.38 | 50.10 | 57.07 | 59.39 | 70.89 | 63.74 | 68.89 |
| $P_2O_5$ | 20.10 | 15.76 | 17.26 | 13.94 | 15.64 | 14.23 | 4.18 | 4.30 | 4.57 |
| $SO_3$ | 1.54 | 1.90 | 1.53 | 1.31 | 1.89 | 1.18 | 0.58 | 0.63 | 1.36 |
| Cl | 0.42 | 0.64 | 0.62 | 0.643 | 0.66 | 0.91 | 0.79 | 0.71 | 0.91 |
| $K_2O$ | 0.81 | 1.13 | .82 | 0.76 | 1.19 | 0.84 | 1.61 | 1.72 | 0.62 |
| CaO | 24.49 | 13.50 | 12.62 | 14.47 | 13.46 | 13.00 | 8.52 | 8.60 | 7.67 |
| $TiO_2$ | 0.15 | 0.12 | nd | nd | 0.12 | 0.13 | 0.19 | 0.13 | 0.12 |
| MnO | 0.07 | 0.15 | nd | nd | 0.15 | 0.21 | 0.27 | 0.27 | nd |
| $Fe_2O_3$ | 1.48 | 0.95 | 0.73 | 1.36 | 0.95 | 1.06 | 1.93 | 1.90 | 1.36 |
| $Cu_2O$ | 0.13 | 1.73 | 0.10 | 0.18 | 1.70 | 1.77 | 1.74 | 0.61 | 0.09 |
| $Ag_2O$ | 0.48 | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd |
| $Au_2O_3$ | 15.83 | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd |
| PbO | 0.71 | 0.62 | 4.37 | 10.87 | 0.55 | 0.76 | 0.34 | 8.78 | 8.93 |

یکی از نکات بااهمیتی که در جدول ۳ دیده می‌شود این است که در تمام این مهره‌ها محصولات خوردگی فسفاتی به‌صورت فسفات کلسیم مشاهده می‌شود که این خوردگی، علت کاهش چشمگیر مقدار اکسید سیلیسیم در مهره زراندود شده (شکل ۹) است. نکته مهم دیگر در این جدول کاهش چشمگیر مقدار اکسید سدیم در سطح نمونه‌ها است، که تا حدود ۱٪ کاهش یافته است. درحالی‌که که مقدار این اکسید در عمق نمونه‌ها حدود ۱۷٪ است که این امر همان خارج شدن عناصر قلیایی در نمونه‌های شیشه‌ای در اثر تدفین طولانی‌مدت در خاک است[48].

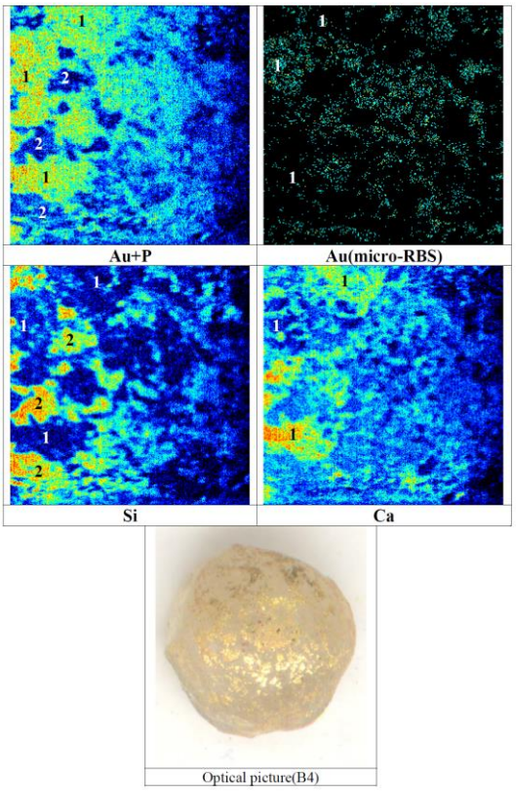
## ۵-۲-۲. بررسی لایه طلای به‌کاررفته در تزئینات

در ادامه این پژوهش، برای بررسی لایه زراندود شده از هر دو روش micro-PIXE و micro-RBS به‌طور هم‌زمان استفاده‌شده است. با استفاده از طیف میکروپیکسی و به دست آوردن نقشه توزیع عنصری عناصر مختلف موجود در نمونه، محل گسیل عنصر طلا در روی نمونه کاملاً مشخص می‌شود. در شکل ۹ نقشه توزیع عنصری عناصر طلا، فسفر، کلسیم و سیلیسیم موجود در مهره B4 با استفاده از روش micro-PIXE و همچنین نقشه توزیع طلا با استفاده از روش micro-RBS نشان داده‌شده است. با مقایسه این دو تکنیک مشخص می‌شود که عنصر طلا کاملاً در نواحی مشخصی از سطح نمونه وجود دارد و در آن توزیع شده است زیرا در نقشه توزیع مربوط به عنصر طلا که از روش micro-RBS به‌دست‌آمده است (عدد ۱ در نقشه توزیع طلا)، تعداد ذرات پس پراکنده از این عنصر در نواحی مشخصی قابل‌توجه است. از طرفی درجاهایی که عنصر طلا وجود دارد، میزان سیلیسیم آشکارشده به‌شدت کاهش‌یافته است. این مطلب نشان می‌دهد که لایه طلاکاری شده خارجی‌ترین لایه است. همچنین در شکل ۹ مشخص است که لایه طلا همراه با خوردگی فسفات کلسیم نیز همراه است که این ارتباط و همبستگی با اعداد نوشته‌شده بر روی نقشه‌های توزیع در میکروپیکسی نشان داده شده است.

بنابراین استفاده از لایه طلا بر روی این شیشه‌ها نشان از ارزش والای مهره‌های شیشه‌ای در دوران اشکانی می‌دهد. حال برای اینکه اطلاعاتی در مورد لایه طلا در مهره B4 به دست آوریم، در شکل ۱۰ طیف micro-RBS به‌دست‌آمده از آنالیز این نمونه نشان داده

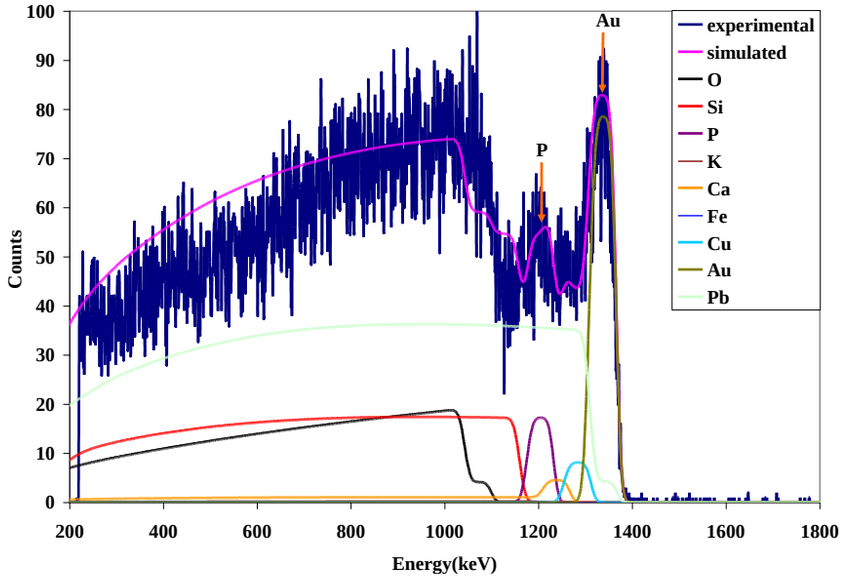


[ Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2026-10-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.24764647.1398.5.1.10.7 ]
[ DOI: 10.29252/jra.5.1.143 ]




شکل ۹: نقشه توزیع عنصری عناصر طلا، فسفر، کلسیم و سیلیسیم موجود در نمونه B4 با استفاده از روش micro-PIXE و مقایسه آن‌ها با نقشه توزیع عنصری به‌دست‌آمده از روش micro-RBS از لایه طلا به همراه تصویر اپتیکی نمونه آنالیز شده

Fig. 9: Optical photo and elemental distribution maps of gold (Au), phosphorus (P), calcium (Ca) and silicon (Si) in glass bead B4 by the micro-PIXE technique and elemental distribution map of gold layer obtained by the micro-RBS technique




شکل ۱۰: طیف تجربی micro-RBS به‌دست‌آمده از مهره B4 که در آن از لایه طلا برای تزئین سطح آن استفاده‌شده است. همچنین در این شکل طیف شبیه‌سازی‌شده کلی و پروفایل تغییرات هر عنصر در عمق نمونه آنالیز شده نشان داده‌شده است.

Fig. 10: Experimental micro-RBS spectrum obtained from glass bead B4 that a gilded layer was used as decoration. Also, the simulated spectrum and the depth profile of each elements are shown in the analyzed sample.



[ Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2026-10-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.24764647.1398.5.1.10.7 ]
[ DOI: 10.29252/jra.5.1.143 ]

شده است. در این تصویر محور افقی متناسب با انرژی اتم‌های پس پراکنده‌شده به عقب و محور عمودی تعداد این اتم‌ها است. آزمایش micro-RBS در این پژوهش با استفاده از باریکه ۲MeV پروتون انجام‌شده است. همچنین آشکارسازی ذرات پس پراکنده‌شده با استفاده از آشکارساز سد سطحی که در زاویه ۱۷۰ درجه نسبت به باریکه قرارگرفته، انجام‌شده است. در آزمایش‌های micro-RBS درصورتی‌که یک لایه نازک (به‌عنوان‌مثال لایه طلا) بر روی یک زیرلایه(به‌عنوان‌مثال شیشه) قرارگرفته باشد، این لایه نازک به‌صورت یک قله ظاهر خواهد شد که پهنای این قله نشان‌دهنده ضخامت لایه نازک خواهد بود. در طیف نشان داده‌شده در شکل ۱۰ یک قله بسیار واضح در بازه انرژی 1300keV تا 1400keV در طیف تجربی مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده لایه طلا است و با علامت پیکان در شکل نشان داده‌شده است. همچنین در بازه انرژی 1100keV تا 1300keV دو قله با ارتفاع کم دیده می‌شود که مربوط به عناصر فسفر و کلسیم است و همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده‌شده مربوط به لایه خوردگی ایجاده شده بر روی سطح است. اما برای به دست آوردن اطلاعاتی در مورد ضخامت لایه طلا، در آنالیز به روش RBS رویه کلی برای تعیین ضخامت لایه این است که با استفاده از کدهایی مانند SIMNRA [49] و در نظر گرفتن مشخصات باریکه و هندسه آزمایش و همچنین ساختار و ترکیب نمونه موردبررسی یک طیف شبیه‌سازی‌شده بر طیف تجربی فیت (برازش) می‌کنیم. با استفاده از این طیف برازش شده، می‌توان ضخامت و ساختار لایه‌های مختلف را مشخص کرد. بنابراین در شکل ۱۰ طیف شبیه‌سازی‌شده کلی و پروفایل تغییرات هر عنصر در عمق نمونه با رنگ‌های مختلف رسم شده است. همان‌طور که در این تصویر مشخص است عناصر اصلی تشکیل‌دهنده نمونه که لایه طلا بر روی آن قرارگرفته، سیلیسیم (Si)، اکسیژن (O)، کلسیم (Ca) و فسفر (P) است. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار SIMNRA نشان می‌دهد که ضخامت لایه طلا در این نمونه حدود ۱ میکرومتر است و نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد که خلوص لایه طلا با خوردگی فسفات کلسیم دچار تغییر شدیدی شده است.

## ۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله تلاش شده است برای اولین بار در ایران با استفاده از اندازه‌گیری دقیق ترکیبات عنصری شیشه‌های تاریخی به‌دست‌آمده در محوطه باستانی صالح‌داود مسائل مربوط به تجارت و نقل و انتقالات مصنوعات شیشه‌ای تاریخی بررسی شود. با توجه به ترکیبات عنصری به‌دست‌آمده از نمونه‌های آنالیز شده از صالح داود، به‌وضوح مشاهده می‌شود که نمونه‌های بررسی‌شده در این پژوهش به دو گروه جدا از هم قابل‌تفکیک هستند: یک گروه مهره‌های آنالیز شده را شامل می‌شود که از نوع شیشه‌های ناترونی هستند و گروه دیگر ظروف آنالیز شده را در بر می‌گیرد که در ساخت آن‌ها از ماده اولیه به‌دست‌آمده از خاکستر گیاهان به‌عنوان گدازآور استفاده‌شده است. از طرف دیگر، با بررسی فرمولاسیون و مواد اولیه مورداستفاده در صنعت شیشه‌گری در دوره‌های مختلف تاریخی در جهان مشاهده می‌شود که در ایران هیچ‌گاه استفاده از ماده معدنی ناترون به‌عنوان گدازآور در صنعت شیشه‌گری کاربردی نداشته است. بر این اساس، با توجه به اینکه مشخص شد که در ساخت مصنوعات شیشه‌ای یافت شده در محوطه‌های تاریخی و باستانی صالح‌داود از ماده معدنی ناترون استفاده‌شده است، بنابراین استفاده از این ماده معدنی به‌وضوح می‌تواند گواه بر غیربومی بودن این اشیاء و شاهدی برای تجارت شیشه و مصنوعات شیشه‌ای بین ایران و مناطق دیگری از جهان( غالباً کشورهای حوزه مدیترانه) باشد که استفاده از این گدازآور در صنعت شیشه‌گری آن‌ها رایج بوده است. اما با مقایسه نتایج آنالیز عنصری مهره‌های رنگی صالح داود با گروه‌های شناخته‌شده شیشه‌های ناترونی در نواحی مدیترانه در هزاره اول میلادی مشخص شد که غالب مهره‌های صالح داود در گروه شناخته‌شده شیشه‌های سبز- آبی قرار می‌گیرند که با رنگ بدنه این مهره‌ها مطابقت دارد. همچنین بررسی مراجع مختلف که این نوع شیشه‌ها را شناسایی کرده‌اند، رواج این شیشه‌ها را در بازه زمانی قرن ۳ ق.م تا حدود قرن ۶ م ذکر کرده‌اند



[ Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2026-10-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.24764647.1398.5.1.10.7 ]
[ DOI: 10.29252/jra.5.1.143 ]

که با دوره تاریخی مهره‌های صالح داود نیز هم‌خوانی دارد. همچنین بر اساس نظر پژوهشگرانی که این نوع شیشه‌ها را شناسایی کرده‌اند محل ساخت این نوع شیشه احتمالاً سواحل فلسطین باشد. علاوه بر بررسی خاستگاه این مهره‌ها، در نمونه‌های موردبررسی از صالح داود مشخص شد که در برخی از مهره‌ها تزئیناتی مانند لایه زراندود و یا نوارهای رنگی با تنوع رنگی مختلف بر سطوح خارجی مهره‌ها به‌کاررفته که جهت شناسایی ترکیبات عنصری این رنگدانه‌ها و عامل ایجاد این رنگ‌ها نمونه‌های مهره از سطح خارجی نیز آنالیز شدند. نتایج آنالیزها نشان داد که عامل ایجاد رنگ‌های قرمز و سبز، اکسید مس و عامل رنگ‌های سفید و زرد، اکسید سرب است. درنهایت با استفاده از پس‌پراکندگی رادرفورد مشخص شد که در برخی از این مهره‌ها از لایه طلا با ضخامت حدود یک میکرومتر برای تزئین این شیشه‌ها استفاده‌شده است که می‌تواند نشان از ارزش والای مهره‌های شیشه‌ای در دوران اشکانی باشد.

## سپاسگزاری

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند که از تمامی کارکنان مجموعه پایگاه میراث جهانی قلعه شوش بلاخص از آقای مهدی امیدفر و کارکنان اداره میراث فرهنگی، صنایع‌دستی و گردشگری شهرستان شوش مخصوصاً آقایان حمید سرخه و فرهاد تقدسی تقدیر و تشکر نمایند. همچنین از مدیریت محترم بخش واندوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، جناب آقای دکتر محمد لامعی رشتی و همکاران گرامی‌شان نیز بی‌نهایت سپاسگزاریم.

## References

[1] Degryse P, Braekmans D. Elemental and isotopic analysis of ancient ceramics and glass 2014.
[2] Blomme A, Degryse P, Dotsika E, Ignatiadou D, Longinelli A, Silvestri A. Provenance of polychrome and colourless 8th–4th century BC glass from Pieria, Greece: a chemical and isotopic approach. J Archaeol Sci 2017;78:134–46.
[3] Abd-Allah R. Chemical characterisation and manufacturing technology of late Roman to early Byzantine glass from Beit Ras/Capitolias, Northern Jordan. J Archaeol Sci 2010;37:1866–74.
[4] Lin Y, Liu T, Toumazou MK, Counts DB, Kakoulli I. Chemical analyses and production technology of archaeological glass from Athienou-Malloura, Cyprus. J Archaeol Sci Reports 2019;23:700–13.
[5] Freestone IC, Degryse P, Lankton J, Gratuze B, Schneider J. HIMT, glass composition and commodity branding in the primary glass industry. Things That Travel Mediterr Glas First Millenn Ce (Eds Rosenow D, Ed 2018:159–90.
[6] Walton MS, Shortland A, Kirk S, Degryse P. Evidence for the trade of Mesopotamian and Egyptian glass to Mycenaean Greece. J Archaeol Sci 2009;36:1496–503.
[7] Koleini F, Prinsloo LC, Biemond WM, Colomban P, Ngo A-T, Boeyens JCA, et al. Towards refining the classification of glass trade beads imported into Southern Africa from the 8th to the 16th century AD. J Cult Herit 2016;19:435–44.
[8] Freestone IC. Glass production in Late Antiquity and the Early Islamic period: a geochemical perspective. Geol Soc London, Spec Publ 2006;257:201–16.
[9] Rehren T, Freestone IC. Ancient glass: from kaleidoscope to crystal ball. J Archaeol Sci 2015;56:233–41.
[10] Henderson J. Ancient glass: an interdisciplinary exploration. Cambridge University Press; 2013.
[11] Cui J, Wu X, Huang B. Chemical and lead isotope analysis of some lead-barium glass wares from the Warring States Period, unearthed from Chu tombs in Changde City, Hunan Province, China. J Archaeol Sci 2011;38:1671–9.
[12] Mirti P, Pace M, Malandrino M, Ponzi MN. Sasanian glass from Veh Ardašīr: new evidences by ICP-MS analysis. J Archaeol Sci 2009;36:1061–9.
[13] Mirti P, Pace M, Negro Ponzi M, Aceto M. ICP–MS Analysis of Glass Fragments



[ Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2026-10-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.24764647.1398.5.1.10.7 ]
[ DOI: 10.29252/jra.5.1.143 ]

[ جعفری‌زاده مسلم. مطالعه و تحلیل هنر و صنعت شیشه‌گری دوره اشکانی (مطالعه موردی: داده‌های باستان‌شناختی محوطه‌های باستانی دشت خوزستان)، پایان‌نامه دکتری، باستان‌شناسی دوره تاریخی،۱۳۹۷]

[21] Adams F, Barbante C. Particle-Based Imaging Techniques. Compr. Anal. Chem., vol. 69, Elsevier; 2015, p. 315–37.

[22] Johansson SAE, Campbell JL. PIXE: A novel technique for elemental analysis 1988.

[23] Verma HR. Rutherford Backscattering Spectroscopy. At Nucl Anal Methods XRF, Mössbauer, XPS, NAA B63Ion-Beam Spectrosc Tech 2007:91–141.

[24] Vicenzi EP, Eggins S, Logan A, Wysoczanski R. Microbeam characterization of corning archeological reference glasses: new additions to the smithsonian microbeam standard collection. J Res Natl Inst Stand Technol 2002;107:719.

[25] Jackson CM, Paynter S, Nenna M-D, Degryse P. Glassmaking using natron from el-Barnugi (Egypt); Pliny and the Roman glass industry. Archaeol Anthropol Sci 2018;10:1179–91.

[26] Campbell JL, Boyd NI, Grassi N, Bonnick P, Maxwell JA. The Guelph PIXE software package IV. Nucl Instruments Methods Phys Res Sect B Beam Interact with Mater Atoms 2010;268:3356–63.

[27] Fiorentino S, Chinni T, Cirelli E, Arletti R, Conte S, Vandini M. Considering the effects of the Byzantine–Islamic transition: Umayyad glass tesserae and vessels from the qasr of Khirbet al-Mafjar (Jericho, Palestine). Archaeol Anthropol Sci 2018;10:223–45.

[28] Liu S, Li Q, Gan F, Zhang P. Characterization of some ancient glass vessels fragments found in Xinjiang, China, using a portable energy dispersive XRF spectrometer. X- Ray Spectrom 2011;40:364–75.

[29] Emami SMA, Pakgohar S. Glass Wires from Chogha Zanbil: Preliminary Glass Making Evidence in Iran in the Early 2rd Millennium BC 2017.

[30] Paynter S. Analyses of colourless Roman glass from Binchester, County Durham. J Archaeol Sci 2006;33:1037–57.

of Parthian And Sasanian Epoch from Seleucia and Veh Ardaš?R (Central Iraq)*. Archaeometry 2008;50:429–50. doi:https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2007.00344.x.

[14] Sayre E V, Smith RW. Compositional categories of ancient glass. Science (80- ) 1961;133:1824–6. doi:https://doi.org/10.1126/science.133.3467.1824.

[15] Agha-Aligol D, Jafarzadeh M, Moradi M. Micro-PIXE: A Powerful Technique in Measurement and Determination of Raw Materials of Glass Artifacts of Parthian Period From Shaur(Susa). J Res Archaeom 2018;4:47–65.
[آقا علی‌گل داود، جعفری زاده مسلم، مرادی محمود. میکروپیکسی: روشی توانمند در بررسی و تعیین مواد اولیه مصنوعات شیشه‌ای دوره اشکانی کاخ شائور (شوش)، پژوهه باستان‌سنجی،۱۳۹۷، ۴(۱)،۴۷-۶۵ ]

[16] Bagherpour Kashani N. Studies of ancient depositional practices and related jewellery finds, based on the discoveries at Veshnaveh 2015.

[17] Bahadori R, Agha-Aligol D. Labratorial Studies on the Blue and Green Beads Used in the Prehistoric Ornaments of National Museum of Iran. Pazhoheshha-Ye Bastan Shenasi Iran 2018;8:45–62.
[بهادری رؤیا، آقا علی گل داود. مطالعات آزمایشگاهی تعدادی از مهره‌های آبی و سبز به‌کاررفته در زیورآلات پیش‌ازتاریخ موزه ملی ایران، پژوهش‌های باستان‌شناسی ایران،۱۳۹۷، ۸: ،۴۵-۶۲]

[18] Rahbar M. Report of first season Archaeological Excavation in Saleh Davoud(Khuzistan). Tehran: 2000.
[رهبر مهدی. فصل اول کاوش‌های باستان‌شناسی صالح داود، معاونت پژوهشی پژوهشکده باستان‌شناسی، سازمان میراث فرهنگی، ۱۳۷۸]

[19] Rahbar M. Report of second season Archaeological Excavation in Saleh Davoud(Khuzistan). 2004.
[رهبر مهدی. فصل دوم کاوش‌های باستان‌شناسی صالح داود، معاونت پژوهشی پژوهشکده باستان‌شناسی، سازمان میراث فرهنگی،۱۳۸۲]

[20] Jafarizadeh M. Study and Interpretation of Parthian Art and Glass Industry(Case Study: Archaeological Data of Khuzestan Plain). Tarbiat Modares University, 2018.



[ Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2026-10-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.24764647.1398.5.1.10.7 ]
[ DOI: 10.29252/jra.5.1.143 ]

doi:https://doi.org/10.1016/j.jas.2005.10.024.
[31] Topić N, Radović IB, Fazinić S, Šmit Ž, Sijarić M, Gudelj L, et al. Compositional analysis of Late Medieval glass from the western Balkan and eastern Adriatic hinterland. Archaeol Anthropol Sci 2019;11:2347–65.
[32] Whitehouse D. 'Things that travelled': the surprising case of raw glass. Early Mediev Eur 2003;12:301–5.
[33] Then-Obluska J, Dussubieux L. Glass bead trade in the Early Roman and Mamluk Quseir ports—A view from the Oriental Institute Museum assemblage. Archaeol Res Asia 2016;6:81–103.
[34] Boulogne S, Henderson J. indian Glass in the Middle east? Medieval and Ottoman Glass Bangles from central Jordan. J Glass Stud 2009:53–75.
[35] Carter A, Dussubieux L, Polkinghorne M, Pottier C. Glass artifacts at Angkor: evidence for exchange. Archaeol Anthropol Sci 2019;11:1013–27.
[36] Freestone IC, Ponting M, Hughes MJ. The origins of Byzantine glass from Maroni Petrera, Cyprus. Archaeometry 2002;44:257–72. doi:10.1111/1475-4754.t01-1-00058.
[37] Mirti P, Casoli A, Appolonia L. Scientific Analysis of Roman Glass from Augusta Praetoria. Archaeometry 1993;35:225–40. doi:10.1111/j.1475-4754.1993.tb01037.x.
[38] Phelps M, Freestone IC, Gorin-Rosen Y, Gratuze B. Natron glass production and supply in the late antique and early medieval Near East: The effect of the Byzantine-Islamic transition. J Archaeol Sci 2016;75:57–71.
[39] Welter N, Schüssler U, Kiefer W. Characterisation of inorganic pigments in ancient glass beads by means of Raman microspectroscopy, microprobe analysis and X- ray diffractometry. J Raman Spectrosc An Int J Orig Work All Asp Raman Spectrosc Incl High Order Process Also Brillouin Rayleigh Scatt 2007;38:113–21.
[40] Clark RJH. Pigment identification by spectroscopic means: an arts/science interface. Comptes Rendus Chim 2002;5:7–20.
[41] Eastaugh N. Pigment Compendium: A Dictionary and Optical Microscopy of Historic 2008.
[42] Schibille N, Neri E, Ebanista C, Ammar MR, Bisconti F. Something old, something new: the late antique mosaics from the catacomb of San Gennaro (Naples). J Archaeol Sci Reports 2018;20:411–22.
[43] Drünert F, Blanz M, Pollok K, Pan Z, Wondraczek L, Möncke D. Copper-based opaque red glasses–Understanding the colouring mechanism of copper nanoparticles in archaeological glass samples. Opt Mater (Amst) 2018;76:375–81.
[44] Dussubieux L, Karklins K. Glass bead production in Europe during the 17th century: Elemental analysis of glass material found in London and Amsterdam. J Archaeol Sci Reports 2016;5:574–89.
[45] Garcia-Heras M, Rincón JM, Jimeno A, Villegas MA. Pre-Roman coloured glass beads from the Iberian Peninsula: a chemico-physical characterisation study. J Archaeol Sci 2005;32:727–38. doi:https://doi.org/10.1016/j.jas.2004.12.007.
[46] Gonzalez V, Wallez G, Calligaro T, Cotte M, De Nolf W, Eveno M, et al. Synchrotron-based high angle resolution and high lateral resolution X-ray diffraction: revealing lead white pigment qualities in old masters paintings. Anal Chem 2017;89:13203–11.
[47] Gonzalez V, Calligaro T, Pichon L, Wallez G, Mottin B. Leonardo da Vinci's drapery studies: characterization of lead white pigments by μ-XRD and 2D scanning XRF. Appl Phys A 2015;121:849–56.
[48] Weber G, Strivay D, Martinot L, Garnir H-P. Use of PIXE–PIGE under variable incident angle for ancient glass corrosion measurements. Nucl Instruments Methods Phys Res Sect B Beam Interact with Mater Atoms 2002;189:350–7.
[49] Mayer M. SIMNRA User's Guide (IPP 9/113 1997). Google Sch M Mayer, Http//Www Rzg Mpg 1997.



[ Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2026-10-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.24764647.1398.5.1.10.7 ]
[ DOI: 10.29252/jra.5.1.143 ]