



Original Paper

Micro-PIXE: A Powerful Technique in Measurement and Determination of Raw Materials of Glass Artifacts of Parthian period From Shaur (Susa)



Davoud Agha-Aligol¹, Moslem Jafarizadeh^{*2}, Mahmoud Moradi³

^{1,3} Nuclear Science and Technology Research Institute, Physics and Accelerators Research School, Van de Graaff Laboratory, Tehran, IRAN

² Ph.D. in Archaeology, Tarbiat Modares University, Tehran, IRAN

Received: 28/05/2018

Accepted: 27/06/2018

Abstract

Investigation of scientific archaeological excavation reports in Iran indicated that these excavations yielded a large number of fragments of glass objects from many archaeological sites, but a very limited number of preliminary studies on elemental analysis of a few Iranian glass objects have been published. Also, a literature survey on pre-Islamic glass objects (especially from Parthian and Sasanian epoch) indicates that there are only a few studies on a limited number of Sasanian and Parthian glasses from Iraq, too. However, a systematic analysis of the Parthian glasses artifacts from Iran is still missing and until now, no reports has been reported about the chemical composition of Parthian glasses from Iran. Therefore, for the first time, the chemical composition of Parthian glass objects from the Shaur Palace at Susa in Khuzistan Plain have been considered. Shaur Palace locates at the west of the ancient site of Susa, next to Shaur River, Khuzestan province, south-west of Iran. It has been excavated by a joint French-Iranian team since 1970 to 1976. There were recognized three Islamic, Parthian, and Achaemenid strata. In this work, 21 glass objects date back the Parthian period were analyzed by Micro-PIXE technique in order to measure the constituent elements and to investigate the types of glass and raw materials used in the manufacturing recipe. The micro-PIXE measurement was performed with scanning proton 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 mm² positioned at an angle of 135° relative to the incident beam direction and with an energy resolution of 150 eV for Fe-K α . Analyzed samples were fragments of the body, rim, bottom, and handle of vessels such as bowls, bottles and beakers. They were generally green with a nacreous coating, resulted from surface corrosion due to long-term burial in the soil. Also, 90% of glass objects manufactured at Shaur Palace were manufactured on free blowing method and most of them were plain and undecorated. Elemental analysis of the glass artifacts by micro-PIXE indicated that the constituent elements of the samples are sodium, magnesium, aluminum, silicon, phosphor, sulfur, chlorine, potassium, calcium, titanium, manganese, and iron, with different concentration and weight percent percentage (wt%). Determination and measurement of each of these elements respond to questions raised about the technology, type of the glass and raw materials of manufacturing recipe. The micro-PIXE analysis showed that these samples are mainly composed of SiO₂ (63-65 wt %),

* Corresponding author: moslem.archaeology@gmail.com

Na₂O (13-18 wt %) and CaO (6-8 wt %). Consequently, all these samples are Silica- Soda- Lime glass type. However, the amounts of magnesium oxide (MgO) and potassium oxide (K₂O) in all analyzed samples were more than 2.5wt%, where their contents vary between 2.5 to 5wt%, and 2.5 to 4.5wt%, respectively. Therefore, it is clear that the ashes obtained from halophytic plants are considered as supplying source for soda in these glasses, so these glasses are Plant ash Silica- Soda- Lime type. Moreover, the micro-PIXE results clearly revealed that in the manufacturing of all shaur glass objects the same sources of silica and plant ashes have been used. In addition, the strong linear correlation of minor elements in the samples indicated that colorants and decolorizing agents have not been intentionally added in the manufacturing process.

Keywords: Glass, Shaour, Parthian, Elemental Analysis, Micro-PIXE.





میکروپیکسی: روشی توانمند در بررسی و تعیین مواد اولیه مصنوعات شیشه‌ای دوره اشکانی کاخ شائور (شوش)

داود آقا علی گل^۱، مسلم جعفری زاده^{۲*}، محمود مرادی^۳

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

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

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۴/۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۳/۷

چکیده

آگاهی از ترکیب عنصری مصنوعات شیشه‌ای تاریخی کاربرد بسیار زیادی در بررسی فن ساخت، تعیین مواد اولیه مورد استفاده در ساخت، بررسی تجارت و نقل و انتقالات مواد اولیه و حتی تعیین زمان ساخت آن‌ها دارد. در این پژوهش ۲۱ نمونه از اشیاء شیشه‌ای به‌دست‌آمده در کاخ شائور با استفاده از روش میکروپیکسی باهدف اندازه‌گیری عناصر تشکیل‌دهنده این نمونه‌ها آنالیز شده است. کاخ شائور در غرب محوطه باستانی شوش و در مجاورت رود شائور در استان خوزستان قرار دارد. کاوش‌های این محوطه تاریخی بین سال‌های ۱۹۷۰ تا ۱۹۷۶م. با همکاری مشترک هیئت فرانسوی و گروه ایرانی انجام شده است. در این محوطه سه لایه باستانی مربوط به دوره اسلامی، اشکانی و هخامنشی شناسایی شده است که نمونه‌های آنالیز شده در این پژوهش مربوط به دوره اشکانیان است. با استفاده از آنالیز عنصری امکان پاسخگویی به سؤالات مطرح شده در این پژوهش وجود دارد؛ از قبیل اینکه در فرایند ساخت ظروف شیشه‌ای شائور از چه مواد اولیه‌ای به‌عنوان مواد ذوب‌کننده (گدازآور) استفاده شده است؛ زیرا مشخص شدن اینکه این مواد گدازآور، معدنی (ناترون) هستند یا خاکستر به‌دست‌آمده از گیاهان، می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در بررسی فرایند تجارت مواد اولیه شیشه داشته باشد. همچنین بررسی مواد رنگزا یا رنگبر استفاده‌شده در فرایند ساخت و مشخص کردن ناخواسته بودن این مواد (ضعف در فن ساخت) یا اضافه‌شده به‌صورت عمدی در طول فرایند ساخت، تنها برخی از پرسش‌هایی است که می‌تواند به‌عنوان هدف این کار پژوهشی در نظر گرفته شود. نمونه‌های آنالیز شده شامل نمونه‌برداری از قسمت‌هایی مانند بدنه، لبه، کف و دسته ظروفی با اشکال بطری و عطردان، پیاله (کاسه) و لیوان که غالباً کاربرد آرایشی و دارویی داشته‌اند، بوده است. این نمونه‌ها تقریباً همگی دارای رنگ سبز هستند که با یک لایه صدفی‌رنگ که ناشی از تدفین طولانی‌مدت در خاک است پوشانیده شده است. نتایج آنالیز عنصری این نمونه‌ها نشان می‌دهد نوع شیشه‌های به‌دست‌آمده از این دوره تاریخی با توجه به درصد وزنی اکسید منیزیم و اکسید پتاسیم موجود در نمونه‌ها که بیشتر از ۲/۵ درصد وزنی است نوع سودا به‌دست‌آمده از گیاهان است. همچنین در تهیه این نمونه‌ها از منابع سیلیس و خاکستر گیاهی یکسانی استفاده شده است. این نتایج نشان داد که عامل رنگزا و بی‌رنگ‌کننده‌ای به‌صورت عمدی در طی فرایند ساخت این نمونه‌ها به آن اضافه نشده است. همچنین با استفاده از آنالیز نمونه‌ها از سطح مقطع و به‌دست آوردن توزیع عنصری عناصر تشکیل‌دهنده نمونه‌ها مشخص شده است که در این نمونه‌ها به دلیل خوردگی سطحی ایجادشده، سطح این نمونه‌ها تا عمق قابل توجهی از سدیم تهی شده است.

واژگان کلیدی: شیشه، شائور، اشکانی، آنالیز عنصری، میکروپیکسی.

*مسئول مکاتبات: تهران، خیابان امام خمینی، موزه مقدم دانشگاه تهران. کد پستی: ۱۱۳۷۶۱۶۶۸۷

پست الکترونیکی: moslem.archaeology@gmail.com

© 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.

۱. مقدمه

اگرچه در حال حاضر هم، جوابی قطعی به این سؤال که فناوری ساخت شیشه در کجا و چه زمانی برای اولین بار اختراع شد و مورد استفاده قرار گرفت، وجود ندارد، ولی مشخص است که اشیاء شیشه‌ای شناخته شده از مصر باستان، قدمتی در حدود ۴۵۰۰ سال دارند [1]. با پیشرفت فناوری و ظهور شیوه‌های آنالیز پیشرفته‌تر، از اوایل ۱۹۶۰م، مطالعه و بررسی اشیاء شیشه‌ای مورد توجه محققان و باستان شناسان قرار گرفت و با استفاده از ابزارهای علمی نوظهور به بررسی و آنالیز شیمیایی تعداد زیادی از نمونه‌های شیشه‌ای که از تمدن‌های مختلف تاریخی و محوطه‌های مختلف باستانی کشف شده بودند، پرداختند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در دهه گذشته در کشورهای مختلف در جهان پژوهش‌های گوناگونی برای اندازه‌گیری غلظت عناصر موجود در مصنوعات شیشه‌ای انجام شده است. در این پژوهش‌ها از فنون مختلفی استفاده شده است که برخی از مهم‌ترین این فنون عبارت است از: ICP-MS [3]، XRF [2]، SEM [4] و PIXE [5]. بر اساس این مطالعات مشخص گردید که مواد تشکیل دهنده شیشه و مصنوعات شیشه‌ای به چهار دسته عمده تقسیم می‌شوند [6]. ۱) مواد پایه که ماده اصلی تمام اشیاء شیشه‌ای است. این مواد شامل سیلیس یا اکسید سیلیسیم است که برای تهیه آن از شن، سنگ چخماق یا سنگ چینی استفاده می‌شود، ۲) مواد ذوب‌کننده (گدازآور) که باعث می‌شود نقطه ذوب سیلیس کمتر شود. این مواد غالباً شامل اکسید سدیم است که به صورت کربنات سدیم، سولفات سدیم، استات سدیم مورد استفاده قرار می‌گرفته است. همچنین در برخی موارد هم از اکسید پتاس و اکسید سرب استفاده می‌شده است. ۳) مواد تثبیت‌کننده همچون کربنات کلسیم به منظور مخلوط شدن بهتر مواد پایه و ذوب‌کننده و همچنین افزایش استحکام و جلوگیری از حل شدن شیشه در مواد مختلف استفاده می‌شده است. ۴) مواد رنگبر (سفیدکننده) و رنگزا نیز به منظور خنثی کردن رنگ در خمیره شیشه و همچنین ایجاد شیشه‌های رنگی به کار می‌رفته‌اند. این مواد غالباً شامل اکسیدهای فلزی مانند اکسیدهای منگنز، آهن، مس و کبالت هستند که به خمیره شیشه اضافه می‌شده‌اند. تعیین و اندازه‌گیری

هر یک از این چهار دسته از مواد به برخی از پرسش‌های مطرح در زمینه فن‌شناسی و فن ساخت، نوع شیشه و مواد خام مورد استفاده در ساخت و همچنین آسیب‌شناسی و بررسی محصولات خوردگی پاسخ می‌دهد. از طرف دیگر، فعالیت‌ها و حفاری‌های باستان‌شناسی انجام شده در محوطه‌های تاریخی ایران نشان می‌دهد که تعداد قابل توجهی اشیاء و مصنوعات شیشه‌ای به دست آمده و در موزه‌های مختلف در کشور نگهداری می‌شوند، اما مرور و بررسی تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که در سال‌های گذشته، به صورت بسیار محدود، تنها بر روی تعداد اندکی از اشیاء شیشه‌ای ایرانی مطالعاتی بر پایه آنالیزهای شیمیایی و عنصری انجام شده است. دشت خوزستان نیز به‌عنوان بزرگ‌ترین و غنی‌ترین مناطق تاریخی و فرهنگی کشور، از این امر مستثنی نبوده است. با توجه به کشف نمونه‌های متعدد مصنوعات شیشه‌ای در محوطه‌های باستانی دشت خوزستان مثل شوش، شائور، صالح داوود، گالاک شوشتر و غیره که قدمت آن‌ها بر اساس لایه‌نگاری کاوش‌های باستان‌شناسی به دوره اشکانی برمی‌گردد، طرح بررسی و آنالیز عنصری شیشه‌های این دوره تاریخی در دشت خوزستان در سال‌های اخیر توسط نگارندگان آغاز شده است. در این بررسی‌ها شیشه‌های به دست آمده در محوطه‌های باستانی مختلف دشت خوزستان که قدمت آن‌ها به دوره اشکانی برمی‌گردد به مرور بررسی خواهد شد. بنابراین در این پژوهش برای پاسخ به این گونه سؤالات از تجزیه عنصری استفاده شده است. بر اساس آنالیز عنصری می‌توان به نوع مواد اولیه به کاررفته در ساخت نمونه‌های شیشه‌ای پی برد و پاسخ مناسبی برای سؤالات زیر یافت: آیا در فرایند ساخت ظروف شیشه‌ای شائور از مواد ذوب‌کننده (گدازآور) معدنی (ناترون) استفاده شده یا خاکستر به دست آمده از گیاهان؟ برای ایجاد رنگ‌های مختلف از چه مواد و عناصری استفاده می‌شده است؟ آیا این مواد رنگزا و رنگبر به صورت عمدی اضافه شده است یا اینکه به دلیل ناخالصی‌های موجود در سیلیس است؟ اگر عمدی بوده از چه ترکیباتی برای این کار استفاده شده است؟ بر اساس اینکه در فرایند ساخت ظروف شیشه‌ای شائور، چه نوع موادی به‌عنوان مواد ذوب‌کننده به کار

گیاهان بوده و مقایسه نمونه‌های این مناطق با مناطق دیگر نشان‌دهنده تفاوت عنصری ترکیبات است و میزان اکسید پتاسیم و اکسید منیزیم در غالب نمونه‌های آنالیز شده ایران نسبت به نمونه‌های آنالیز شده از سوریه، فلسطین و عراق بیشتر است. همچنین با بررسی تحقیقات انجام شده بر روی شیشه‌های دوره‌های اشکانی و ساسانی در آسیای غربی و میان‌رودان می‌توان مشاهده کرد که به جزء نمونه‌هایی که توسط «بریل» از چند محوطه‌های باستانی مربوط به دوره ساسانی انجام شده است [7]، اخیراً نیز تعداد اندکی از شیشه‌های دوره اشکانی یافت شده در عراق بررسی و آنالیز شده‌اند. نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد که از ۹ نمونه آنالیز شده محوطه باستانی سلوکیه در عراق که مربوط به دوره اشکانی است، در ساخت ۸ نمونه از ماده معدنی ناترون به‌عنوان گداز‌آور استفاده شده است و تنها در یک نمونه از شیشه‌های اشکانی این محوطه شیشه‌گران از خاکستر گیاهی به‌عنوان ماده گداز‌آور استفاده کرده‌اند [10].

۳. موقعیت جغرافیایی و پیشینه کاوش‌های

شائور

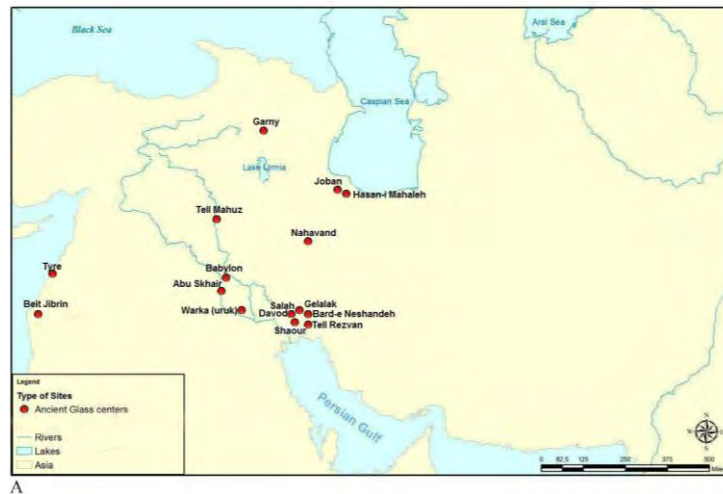
محوطه باستانی کاخ شائور در شهر شوش در جنوب غربی ایران در موقعیت جغرافیایی N:321137.4631 و E:481434.8870 قرار دارد. نقشه ارائه شده در شکل ۱ موقعیت این محوطه را در ایران و میان‌رودان و کشورهای همسایه غربی ایران، و نیز در شوش نشان می‌دهد. تپه‌ای که کاخ هخامنشی شائور را در بر گرفته، بین رودخانه کرخه و شائور و در ۳۵۰ متری غرب آپادانا واقع است. آثار کاخ، تپه کوچکی را به طول ۱۷۵ و عرض ۱۰۰ و ارتفاع ۲m تشکیل داده و روی هم‌رفته ۵/۵۵m از سطح رودخانه شائور بلندتر است [11,12]. این کاخ تنها بنای سلطنتی از دوره هخامنشی است که خارج از محدوده تپه‌های چهارگانه شوش واقع شده است و به جهت مجاورت و نزدیکی به رودخانه شائور، به کاخ شائور نیز معروف است. این مجموعه کاخ به ابعاد ۲۲۰m طول و ۱۵۰m عرض و مساحت بیش از ۳ هکتار دارای بخش‌های مختلفی است [13].

رفته است، می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در بررسی فرایند تجارت مواد اولیه شیشه و یا حتی نمونه‌های ساخته‌شده بین ایران و کشورهایی مانند سوریه، عراق و فلسطین داشته باشد.

در گام نخست در این پژوهش نتایج به‌دست‌آمده از نمونه‌های کاخ شائور ارائه شده است. از میان نمونه‌های قابل دسترس و قابل نمونه‌برداری به‌دست‌آمده در کاخ شائور، ۲۱ نمونه برای مطالعه و آنالیز آزمایشگاهی انتخاب و از آن‌ها نمونه‌برداری به عمل آمد. آنالیز عنصری این نمونه‌ها با روش میکروپیکسی و با استفاده از شتاب‌دهنده و اندوگراف پژوهشکده فیزیک و شتابگرها در پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای انجام گردید.

۲. پیشینه تحقیق

مطالعاتی توسط «روبرت. اچ. بریل» و همکاران او بر روی شیشه‌های قدیمی به‌دست‌آمده از شهر نیشابور متعلق به قرن ۹ و ۱۰م. (اوایل دوران اسلامی) صورت گرفته است. نتایج این بررسی‌ها نشان داد که شیشه‌ها علیرغم رنگی یا بی‌رنگ بودنشان، از نظر ترکیب عنصری کاملاً متفاوت هستند و احتمالاً محل تولیدشان نیز می‌تواند متفاوت باشد [7]. همچنین در این بررسی‌ها نمونه‌هایی از گرگان، ری، همدان و تخت‌سلیمان که غالباً قدمت آن‌ها به اوایل دوران اسلامی برمی‌گردد، مورد آنالیز و پژوهش قرار گرفته‌اند اما این نتایج صرفاً گزارش شده‌اند ولی به‌صورت مبسوط بررسی و تحلیل نشده‌اند. در پژوهش دیگری که اخیراً به چاپ رسیده است، نمونه‌هایی از سیراف مربوط به اوایل دوران اسلامی، از نظر مواد اولیه استفاده شده در ساخت آن‌ها و همچنین تعیین محل ساخت مورد بررسی قرار گرفته‌اند [8]. همچنین در مطالعه دیگری تعدادی از شیشه‌های یافت شده از لایه IV تپه حسنلو با تاریخ ۹۰۰ق.م بررسی شده است [9]. نتایج به‌دست‌آمده از مجموع نمونه‌های مطالعه شده از ایران که قدمت آن‌ها به اوایل دوره اسلامی و حتی قبل از اسلام برمی‌گردد، نشان می‌دهد که شیشه‌های به‌دست‌آمده در مناطق مختلف ایران همگی از نوع شیشه‌های سیلیکا-سودا ° آهک است که گداز‌آور استفاده شده در آن‌ها از خاکستر

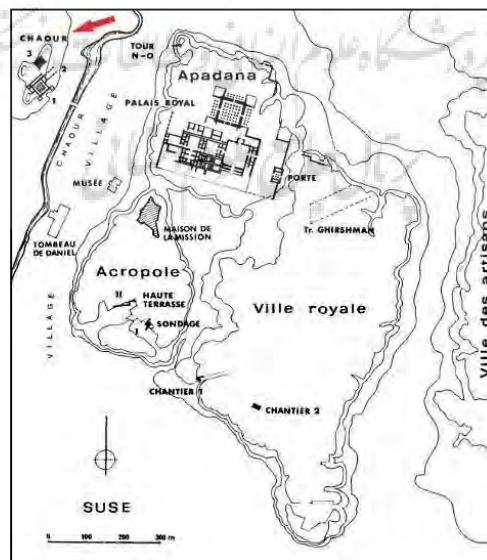


شکل ۱ الف: موقعیت محوطه شاتور در ایران، میان‌رودان و کشورهای همسایه غربی)

Fig. 1a: Map showing the location of the historical sites in Iran, Mesopotamia, and western territories

محوطه ممکن است آثار کهن‌تری وجود داشته باشد. باستان‌شناسانی که پس از وی مأمور کاوش در شوش شدند، جملگی مجذوب آکروپل، آپادانا، شهر شاهی و سایر بخش‌های شرقی شوش بودند [11]. در سال‌های ۱۹۷۰ تا ۱۹۷۶ م. طی کاوش‌هایی که یک گروه از باستان‌شناسان هیئت فرانسوی مستقر در شوش به سرپرستی رمی بوشارلا و آدران لابروس با همکاری محمود کردوانی از ایران انجام دادند، بقایای یک کاخ هخامنشی مربوط به اردشیر دوم (بنا بر متن کتیبه به دست‌آمده) پدیدار گشت [13] (شکل ۱ الف-ج).

رودخانه شاتور، شهر شوش را به دو قسمت شرقی و غربی تقسیم می‌کند. تپه‌های باستانی به‌طور کلی در شرق شوش قرار گرفته‌اند. پیش از کشف کاخ در سمت غرب شاتور که به کاخ هخامنشی شاتور نام‌گذاری شده، گمان می‌رفت که گذشته شوش، در تپه‌های بخش شرقی خلاصه می‌گشته است. اکثر باستان‌شناسانی که از شوش و تپه‌های آن بازدید کرده و یا در این محل به کاوش دست‌زده‌اند، تصور می‌کردند تپه‌های کوچکی که در قسمت غربی شوش وجود دارد، حاوی آثار اسلامی است. تنها دیولافوا حدس زده بود که در طبقات تحتانی این



شکل ۱ ب: نقشه و موقعیت محوطه کاخ شاتور در شوش [14].

Fig. 1b: Location of Shaur Palace at Susa with more details [14]



شکل ۱ ج: نمایی از محوطه و کاخ شاور
Fig. 1c: View of Shaur palace after excavation

است که در سال ۱۹۷۱م. مساحتی به وسعت ۲۱۰۰m^۲ خاک برداری گردید و تالار ستون‌دار و بخش کوچکی از ملحقات آن شناسایی شد. تالار تقریباً مربع شکل و دارای ۸×۸ ردیف ستون است [12]. پایه ستون‌ها، مدور یا چهارگوش‌اند. سنگ‌های به‌کاررفته از جنس سنگ‌های آهکی خاکستری رنگ بوده و شبیه سنگ‌های آپادانا است [11]. پایه ستون‌های مربع، پلکانی بوده و یک شالی از نوع شالی‌های ته ستون مدور روی آن کار گذاشته شده است. نوع مدور پایه ستون‌های شاور به اندازه‌های مختلف در مدخل شمالی و غربی آپادانا، تالار صد ستون، کاخ خشایارشا، حرم و صفه پایین تخت جمشید وجود دارد [11].

۴. معرفی دست‌ساخته‌های شیشه‌ای کاخ

شاور

همان‌گونه که اشاره شد با توجه به داده‌های باستان‌شناسی، طبقه دوم این محوطه مربوط به دوره اشکانی است. ذکر این نکته ضروری است که بر اساس گزارش کاوشگران از کف تالار ستون‌دار و به‌ویژه ترانشه (G-H 41) در طبقه دوم تعداد قابل‌توجهی قطعات شیشه‌ای به‌ویژه سبزرنگ به دست آمد [12]. از بررسی مجموعه اشیاء و یافته‌ها، مشخص شد که حدود ۱۰۰ قطعه شی شیشه‌ای از کاوش‌های محوطه شاور یافت شده است. خوشبختانه کاوشگران این محوطه تمامی یافته‌های شیشه‌ای را طبقه‌بندی، پشت‌نویسی و در

کاوش‌های باستان‌شناسی شاور از شرق تپه آغاز و منجر به پیدایش سه طبقه باستانی گردید. لایه I این محوطه با توجه به نوع سفال و تدفین یافت شده مربوط به اوایل دوران اسلامی است [12]. در لایه II آثار ساختمانی با دیوارهای خشتی به دست آمده است و شواهد موجود نشان می‌دهد که این طبقه پس از عهد هخامنشیان به وجود آمده است [11]. علاوه بر آن در این طبقه ۳ اجاق و تعداد ۱۲ قبر با دو نوع تدفین کشف گردید که ۵ قبر نزدیک همدیگر بودند [12]. در نوع اول مرده را در قبر معمولی رو به آفتاب خوابانده‌اند و بالای سر و زیر پای آن دو کوزه قرار داده‌اند. نوع دوم، قبرهای خمره‌ای بود که مرده را به حالت جمع شده (چمباتمه) در خمره‌های بزرگی گذاشته و سپس دفن کرده‌اند [11]. با توجه به داده‌های باستان‌شناسی، تاریخ سکونت طبقه دوم به اندکی قبل از قرن اول ق.م بازمی‌گردد [12]. از یکی از این قبور سکه‌ای مفرغی با قطر ۱/۲ cm در حدقه چشم یکی از اسکلت‌ها به دست آمد. در سمت راست روی سکه پادشاه با ریشی انبوه از روبرو نشان داده شده، دنباله کلاه عمامه مانند وی از پشت سر دیده می‌شود. روبروی پادشاه در سمت چپ سه کنگره وجود دارد و بالای این کنگره‌ها، هلال ماه دیده می‌شود. طرف دیگر سکه، نقوش هندسی لوزی‌مانندی پراکنده است. این سکه مربوط به ارد، پادشاه اشکانی است که در قرن اول میلادی می‌زیسته است [11].

لایه III این محوطه مربوط به کاخ هخامنشی شاور

انبارهای موزه شوش نگهداری می‌کنند. آثار شیشه‌ای این محوطه شامل بطری ۲۶٪، عطردان ۱۱٪، کاسه ۵٪، پیاله ۳۷٪، لیوان ۸٪، پایه ۵٪ و زیورآلات ۸٪ هستند. این پژوهش شامل نمونه برداری از قسمت‌هایی مانند بدنه، لبه، کف و دسته ظروفی با اشکال بطری و عطردان، پیاله (کاسه) و لیوان که غالباً کاربرد آرایشی و دارویی داشته‌اند، بوده است. فراوانی بخش‌های مختلف اشیاء مورد مطالعه شامل ۹٪ ظروف کامل، ۴۰٪ لبه، ۲۰٪ بدنه، ۴٪ گردن، ۱۱٪ کف، ۷٪ پایه، ۲٪ دسته هستند. این آثار در طیفی از رنگ‌های مختلف ساخته شده‌اند ولی بیشتر به رنگ سبز بوده که در مجموع ۸۲٪ رنگ سبز، ۵٪ لاجوردی، ۸٪ نباتی، ۳٪ قهوه ای و ۳٪ نامشخص که کاملاً صدفی شده هستند. فن ساخت اشیاء شیشه‌ای در دوره اشکانی بیشتر به روش دمیده آزاد بوده ولی از روش‌های سنتی گذشته نیز تا حدودی بهره می‌بردند. بر این اساس ۹۰٪ از آثار شیشه‌ای شاتور نیز به همین روش ساخته شده‌اند. اغلب این اشیاء ساده و بدون تزئین، و برخی نیز دارای رشته‌های افزوده حلقوی و تزئین نیشگونی هستند. جزئیات مشخصات فنی و ظاهری این اشیاء در جدول ۱ آمده است. از میان ۲۱ ظرف و قطعات شکسته شیشه از کاوش‌های شاتور که در این پژوهش به آن پرداخته شده است، تعدادی از نمونه‌ها را کاوشگران در گزارش‌های خود منتشر کرده‌اند. بقیه آثار در انبار قلعه و موزه شوش نگهداری می‌شوند که از نزدیک مشاهده و مطالعه شده و نمونه‌هایی برای انجام آزمایش آماده شدند. در انتخاب نمونه‌ها غیر مخرب بودن و صدمه نزدن به نمونه‌ها در اولویت بود؛ یعنی سعی گردید که نمونه برداری از قطعات شکسته شده لبه، بدنه، کف و پایه بر اساس نوع رنگ‌های ظروف انجام شود. تصویر اپتیکی و طرحواره نمونه‌های مورد بررسی در شکل ۲ ارائه شده است.

۵. روش و شرایط آنالیز میکروپیکسی

آنالیز عنصری به روش پیکسی به دلیل غیر مخرب، سریع و بس عنصری بودن، یکی از روش‌های متداول در آنالیز عنصری نمونه‌های تاریخی است. پیکسی یا «گسیل پرتو X» در اثر برانگیختگی با پروتون «روش بسیار توانمندی برای آنالیز بس عنصری عناصر از سدیم تا اورانیوم است.

در این روش آنالیز، نمونه مورد بررسی تحت تابش پروتون قرار می‌گیرد. در اثر برخورد پروتون با اتم هدف، پرتو X مشخصی گسیل می‌شود که انرژی این پرتو X، نوع عنصر موجود در نمونه و تعداد پرتوهای X با انرژی معین غلظت عنصر در نمونه را مشخص می‌کند [15]. با استفاده از باریکه میکرونی پروتون می‌توان توانایی‌ها و قابلیت‌های آنالیز عنصری روش پیکسی را به میزان زیادی افزایش داد. آنالیز عنصری مواد با استفاده از باریکه یونی میکرونی روش میکروپیکسی نامیده می‌شود [16]. با استفاده از باریکه میکرونی پروتون می‌توان سطح نمونه مورد بررسی را جاروب (اسکن) کرد و تصویری دوبعدی از توزیع عنصری عناصر موجود در نمونه در ابعاد میکرون به دست آورد [17]. در این پژوهش نیز به دلیل محدودیت در نمونه برداری و ابعادی کوچک و در حد چند میلی متری نمونه‌ها، از روش میکروپیکسی استفاده گردید. همچنین برای کاهش میزان خطا در اندازه گیری عناصر به دلیل خوردگی سطحی شدید نمونه‌ها، سطحی کاملاً صاف از مقطع نمونه‌ها تهیه شد و آنالیزهای میکروپیکسی بر روی آن‌ها انجام گرفت. سپس با استفاده از توزیع عنصری عناصر موجود در نمونه، طیف به دست آمده از قسمت دست نخورده و سالم نمونه که عاری از هرگونه خوردگی است، برای محاسبه غلظت وزنی عناصر استخراج و برای محاسبه میزان غلظت عناصر تشکیل دهنده نمونه‌ها، طیف‌های به دست آمده در آزمایش میکروپیکسی، از نرم افزار GUPIXWIN استفاده گردید [18]. این نرم افزار با برازش غیرخطی طیف حاصله با استفاده از پارامترهای فیزیکی استفاده شده در آزمایش، میزان غلظت وزنی عناصر تشکیل دهنده نمونه را محاسبه می‌کند. در این پژوهش برای انجام آنالیز میکروپیکسی از باریکه پروتون با انرژی ۲/۵ MeV و با شدتی در حدود ۵۰ pA که توسط شتاب‌دهنده واندوگراف ۳ MV آزمایشگاه واندوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای تولید می‌شود، استفاده شده است. قطر باریکه پروتون در این آزمایش‌ها کمتر از ۱۰ میکرون تنظیم شده است. برای آشکارسازی اشعه X از آشکارساز Si(Li) که در زاویه ۱۳۵ درجه نسبت به پرتوهای پروتون فرودی قرار گرفته و دارای قدرت تفکیک ۱۵۰ eV است، استفاده شده است. همچنین

جدول ۱: مشخصات فنی و ظاهری شیشه‌های اشکانی کاخ شاور
Table 1: Technical features of Parthian glasses of Shaur Palace

تزیین Decoration	روش ساخت Manufacturing method	اندازه Size (cm)	رنگ Color	شکل Form	شماره نمونه Samples Number	No
ساده Plain	دمیده آزاد Free Blowing	بلندا: ۹، قطر دهانه: ۲/۵ قطر کف: ۳ Length: 9, Opening Dimension: 2.5 Based Dimension: 3	سبز Green	بطری، لبه به درون تاخورد، بدنه گلابی شکل Bottle, outward beveled rim, pearl-like body	CH.71-897.9	1
نوارهای افزوده دور گردن Augmented strips around neck	دمیده آزاد Free Blowing	بلندای موجود: ۲/۴ قطر دهانه: ۷ Length: 2.4 Opening Diameter: 7	سبز Green	بطری، لبه به بیرون برگشته، آثار دسته Bottle, beveled rim, traces of handles	CH.71-782.1	2
ساده Plain	دمیده آزاد Free Blowing	بلندای موجود: ۴/۳ قطر دهانه: ۳/۲ Length: 4.3 Opening Diameter: 3.2	سبز Green	بطری، لبه به بیرون و سپس به درون برگشته، بدنه گلابی شکل؟، آثار دسته Bottle, outward then inward rim, pearl-like body, traces of handle	CH.74-2081-6	3
ساده Plain	دمیده آزاد Free Blowing	بلندای موجود: ۳/۳ Length: 3.3	سبز Green	بطری، گردن، عمودی Bottle, neck, vertical	CH.76-2902.18	4
ساده Plain	دمیده آزاد Free Blowing	بلندای موجود: ۲/۸ قطر کف: ۳/۵ Length: 2.8 Based Dimension: 3.5	سبز Green	کف بطری، فرورفته، جای واگیره، بدنه گلابی شکل Base, deep, trace of clamp, pearl-like body	CH.76-2902.14	5
ساده Plain	دمیده آزاد Free Blowing	بلندای موجود: ۱/۴ قطر کف: ۳/۵ Length: 1.4 Based Dimension: 3.5	سبز Green	کف بطری، فرورفته، جای واگیره، بدنه گلابی شکل Base, deep, trace of clamp, pearl-like body	CH.76-2883.1	6
نوارهای افزوده حلقوی Augmented circular strips	دمیده آزاد Free Blowing	بلندای موجود: ۱/۴ قطر کف: ۳/۵ Length: 1.4 Based Dimension: 3.5	سبز Green	کف بطری، دارای جای واگیره، نوار افزوده به جای پایه Base, deep, trace of clamp, augmented strip as leg	CH.73-1142.2	7
نوارهای افزوده حلقوی روی بدنه و کف Augmented circular strips on body and base	دمیده آزاد Free Blowing	بلندای موجود: ۱/۴ قطر کف: ۴/۵ Length: 1.4 Based Dimension: 4.5	سبز Green	کف بطری، دارای جای واگیره، نوار افزوده به جای پایه Base, trace of clamp, augmented strip as leg	CH.70-273.1	8
نوار افزوده به جای پایه Augmented strip as leg	دمیده آزاد Free Blowing	بلندای موجود: ۱، قطر کف: ۴ Length: 1 Based Dimension: 4	سبز Green	کف بطری، دارای جای واگیره، نوار افزوده به جای پایه Base, trace of clamp, augmented strip as leg	CH.70-187.1	9
نوار افزوده به جای پایه Augmented strip as leg	دمیده آزاد Free Blowing	بلندای موجود: ۱/۶ قطر کف: ۳/۳ Length: 1.6 Based Dimension: 3.3	سبز Green	کف بطری، دارای جای واگیره، نوار افزوده به جای پایه Base, trace of clamp, augmented strip as leg	CH.73-1189.1	10
ساده Plain	دمیده آزاد Free Blowing	بلندای موجود: ۶/۸ قطر دهانه: ۱۰/۵ Length: 6.8 Opening Dimension: 10.5	نباتی light buff	کاسه، لبه اندکی به درون برگشته، بدنه نیمکروی کشیده Bowl, semi internally curved rim, semi round tall body	CH.71-820.1	11

ادامه جدول در صفحه بعد

No	شماره نمونه Samples Number	شکل Form	رنگ Color	اندازه Size (cm)	روش ساخت Manufacturing method	تزئین Decoration
12	CH.76-2902.4	کاسه، لبه تا خورده به بیرون، بدنه مایل Bowl, outwardly curved rim, oblique body	سبز Green	بلندای موجود: ۴/۳ قطردهانه: ۱۱/۵ Length: 4.3 Opening Dimension: 11.5	دمیده آزاد Free Blowing	ساده Plain
13	بدون کد	پیاله، لبه تا خورده به بیرون، بدنه مایل Bowl, outwardly curved rim, oblique body	سبز Green	بلندای موجود: ۴/۵ قطردهانه: ۱۰/۵ Length: 4.5 Opening Dimension: 10.5	دمیده آزاد Free Blowing	نوارافزوده حلقوی زیر لبه Augmented circular strip under rim
14	CH.76-2905	پیاله، لبه تا خورده به بیرون، بدنه مایل Bowl, outwardly curved rim, oblique body	سبز Green	بلندای موجود: ۵ قطردهانه: ۱۰ Length: 5 Opening Dimension: 10	دمیده آزاد Free Blowing	نوارافزوده حلقوی زیر لبه Augmented circular strip under rim
15	CH.76-2902.9	پیاله، لبه تا خورده به بیرون، بدنه مایل Bowl, outwardly curved rim, oblique body	سبز Green	بلندای موجود: ۴/۷ قطردهانه: ۱۶ Length: 4.7 Opening Dimension: 16	دمیده آزاد Free Blowing	نوارافزوده حلقوی زیر لبه Augmented circular strip under rim
16	CH.76-2902.2	کاسه، لبه اندکی به درون برگشته، بدنه مایل Bowl, inwardly curved rim, oblique body	سبز Green	بلندای موجود: ۵/۲ قطردهانه: ۱۱ Length: 5.2 Opening Dimension: 11	دمیده آزاد Free Blowing	نوارافزوده حلقوی زیر لبه Augmented circular strip under rim
17	CH.71-781.1	کاسه، لبه بیرون، بدنه زنگی شکل Bowl, outwardly curved rim, bell-like body	سبز Green	بلندا: ۸/۳ قطر دهانه: ۱۱/۵ قطر کف: ۳/۵ Length: 8.3 Opening Dimension: 11.5 Based Dimension: 3.5	دمیده آزاد Free Blowing	برآمدگی‌های افزوده به دور بدنه و آژخ مانند نیشگونی دور کف، تراش خطی حلقوی زیر لبه Augmented knobs around the body, and pinched hachures around base, linear cuts under rim
18	CH.76-2902.17	پیاله، بدنه مایل و خمیده Bowl, oblique and curved body	سبز Green	بلندای موجود: ۸/۲ Length: 8.2	دمیده آزاد Free Blowing	ساده Plain
19	CH.70-345.1	پیاله؟، بدنه نیم‌کروی Bowl?, semicircular body	سبز Green	بلندای موجود: ۵/۵ Length: 5.5	دمیده آزاد Free Blowing	نوارهای افزوده نامنظم Irregular augmented strips
20	CH.71-812.1	لیوان، لبه اندکی به بیرون برگشته، بدنه عمودی Beaker, little outwardly curved rim, vertical body	سبز Green	بلندای موجود: ۵؛ قطردهانه: ۱۰/۵ Length: 5 Opening Dimension: 10.5	دمیده آزاد Free Blowing	ساده Plain
21	CH.71-817.1	لیوان، لبه اندکی به بیرون برگشته، بدنه برآمده Beaker, little outwardly curved rim, knob body	نباتی light buff	بلندای موجود: ۵/۶ قطردهانه: ۱۰/۵ Length: 5.6 Opening Dimension: 10.5	دمیده آزاد Free Blowing	نوار افزوده حلقوی تخت زیر لبه Circular augmented strips under rim

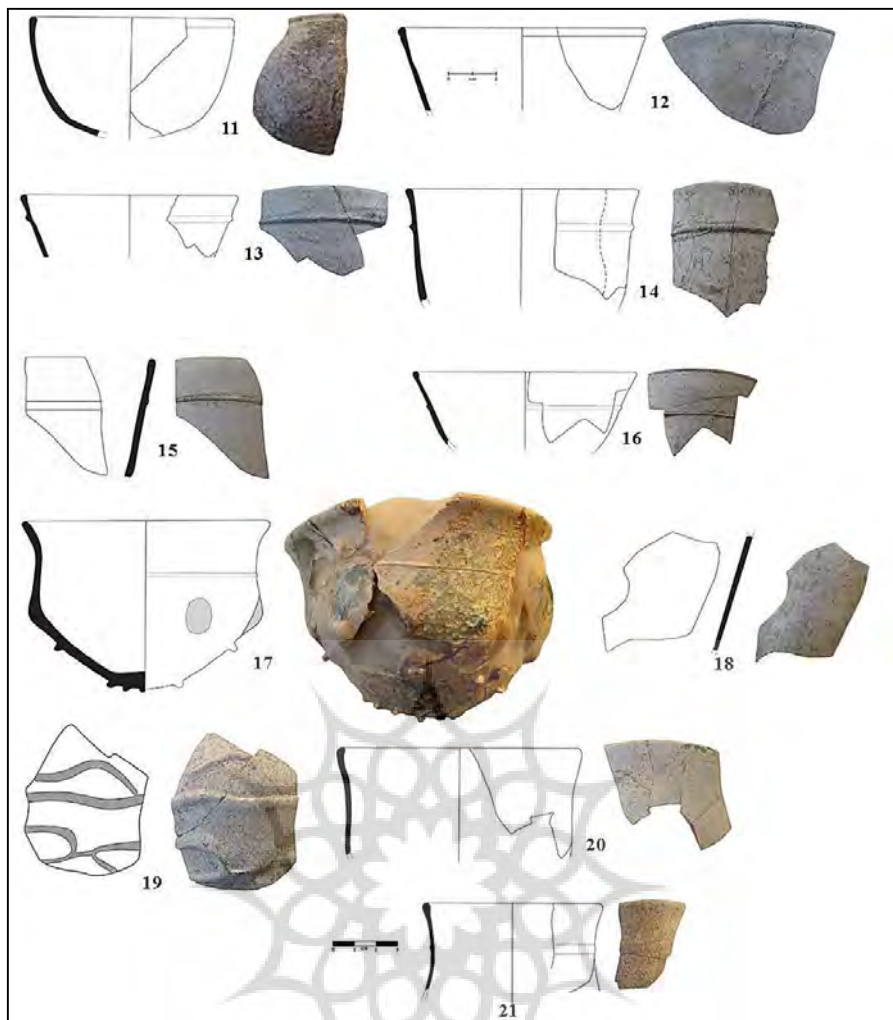


شکل ۲: تصاویر و طرح‌های نمونه‌های آنالیز شده

Fig. 2: Photos and drawing of analyzed samples (continued)

دقت اندازه‌گیری عناصر اصلی کمتر از ۰.۵٪ و برای عناصر کم‌مقدار بین ۱۰-۵٪ است. بنابراین با توجه به میزان خطای موجود در اندازه‌گیری‌ها، انحراف معیار (standard deviation) برای عناصر اندازه‌گیری شده در شیشه‌های شاتور با استفاده از آزمایش‌های میکروپیکسی به صورت زیر است: $\text{Al}_2\text{O}_3: 0.25\%$, $\text{MgO}: 0.18\%$, $\text{Na}_2\text{O}: 0.22\%$, $\text{TiO}_2: 0.003\%$, $\text{CaO}: 0.04\%$, $\text{K}_2\text{O}: 0.02\%$, $\text{SiO}_2: 0.15\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3: 0.016\%$ و $\text{MnO}: 0.006\%$

در این آزمایش‌ها از سیستم میکرو باریکه و جمع‌آوری داده که توسط شرکت اکسفورد ساخته شده است استفاده شده است [19]. همچنین برای برآورد مقدار خطا و عدم دقت در اندازه‌گیری‌ها، در هنگام آنالیز چندین نمونه استاندارد که شامل شیشه استاندارد BK7 و همچنین مواد خالصی مانند NaCl و MgCl_2 از شرکت مرک آلمان نیز آنالیز شده و نتایج به دست آمده با مقدار گزارش شده مقایسه گردید. نتایج نشان می‌دهد میزان خطا و عدم



ادامه شکل ۲: تصاویر و طرح‌های نمونه‌های آنالیز شده
Fig. 2: Photos and drawing of analyzed samples (continue)

۶. نتایج و بحث یافته‌ها

سودا- آهک است. همچنین همان طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود درصد وزنی اکسید پتاسیم و اکسید منیزیم در تمام این شیشه‌ها بالاتر از ۲/۵٪ است. بنابراین بر اساس آنچه در مطالعات و بررسی شیشه‌های تاریخی توسط پژوهشگران متداول است [20] در صورتی که میزان درصد وزنی اکسید منیزیم و اکسید پتاسیم موجود در نمونه‌های شیشه کمتر از ۱/۵٪ باشد، آن شیشه‌ها از نوع شیشه‌های ناترونی محسوب می‌شود. اما اگر میزان اکسید منیزیم و اکسید پتاسیم موجود در نمونه‌ها بین ۲/۵-۱/۵٪ باشد منبع تأمین سودا در این نوع شیشه‌ها از نوع ترکیب ناترون و خاکستر گیاهان خواهد بود. اما اگر میزان اکسید منیزیم و اکسید پتاسیم موجود در نمونه‌های شیشه بیشتر از ۲/۵٪ باشد این شیشه‌ها از نوع شیشه‌هایی خواهد بود

آنالیز عنصری نمونه‌های مورد بررسی با روش میکروپیکسی مشخص کرد که عناصر سدیم، منیزیم، آلومینیم، سیلیسیم، فسفر، گوگرد، کلر، پتاسیم، کلسیم، تیتانیم، منگنز و آهن تقریباً در تمام نمونه‌های آنالیز شده وجود دارد اما مقدار و درصد وزنی این عناصر در نمونه‌های مختلف با یکدیگر متفاوت است. در جدول ۲ مقادیر ترکیبات عنصری نمونه‌های آنالیز شده به صورت اکسید (به جزء کلر) و برحسب درصد وزنی ارائه شده است. با نگاهی به جدول ۲ مشاهده می‌شود ترکیبات عمده تشکیل دهنده این شیشه‌ها، اکسید سیلیسیم، اکسید سدیم و اکسید کلسیم است. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که تمامی این شیشه‌ها از نوع شیشه‌های سیلیکا -

جدول ۲: مقادیر عناصر موجود در نمونه‌های آنالیز شده به صورت اکسید و برحسب درصد وزنی

Table 2: The results of elemental composition in analyzed samples in weight percent (wt. %) as oxides form

Samples	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	Fe ₂ O ₃
S1	17.12	2.54	3.22	69.17	0.53	0.30	0.75	2.49	2.80	0.14	n.d	0.04	0.91
S2	16.27	3.77	3.32	63.00	0.37	0.26	0.78	3.97	6.97	0.17	n.d	0.05	1.01
S3	15.54	3.86	3.59	62.99	0.40	0.16	0.88	3.56	7.58	0.17	0.03	0.04	1.11
S4	16.06	4.98	2.07	63.68	0.41	0.18	0.92	3.61	6.97	0.06	0.04	0.04	0.64
S5	14.88	4.38	3.2	64.41	0.42	0.24	0.87	3.94	6.73	0.07	0.02	0.03	0.68
S6	16.03	4.98	2.89	63.37	0.50	0.28	0.88	3.60	6.46	0.10	n.d	0.04	0.83
S7	17.31	4.10	2.65	63.46	0.62	0.23	1.10	3.02	6.64	0.13	n.d	0.03	0.65
S8	15.74	4.50	2.78	63.45	0.40	0.30	0.86	3.43	7.15	0.1	n.d	0.06	0.74
S9	13.79	2.60	6.01	64.20	0.38	0.32	0.91	3.50	6.46	0.11	0.14	0.05	1.34
S10	15.31	3.27	3.25	64.45	0.42	0.23	0.93	4.04	6.87	0.16	n.d	0.04	0.93
S11	15.65	4.50	3.43	63.66	0.48	0.23	0.76	2.23	7.38	0.13	n.d	0.65	0.83
S12	16.49	4.88	2.58	63.42	0.51	0.21	0.82	3.80	6.53	0.05	0.04	0.03	0.61
S13	15.83	4.62	3.44	62.92	0.26	0.25	0.89	3.63	7.03	0.07	n.d	0.06	0.79
S14	14.85	4.96	2.51	64.81	0.72	0.28	0.85	3.90	6.44	0.07	n.d	0.03	0.57
S15	16.57	4.82	2.95	63.13	0.45	0.31	0.77	3.59	6.57	0.07	0.04	0.03	0.63
S16	15.77	4.64	2.87	64.52	0.48	0.28	0.83	3.74	6.12	0.06	0.02	0.02	0.54
S17	13.77	3.86	6.90	64.09	n.d	0.24	0.68	2.85	5.21	0.18	n.d	0.06	1.52
S18	15.80	4.83	2.18	64.20	0.36	0.26	0.87	3.92	6.82	0.07	n.d	0.03	0.66
S19	15.66	3.27	3.36	65.08	0.38	0.22	0.82	3.62	6.46	0.16	0.03	0.03	0.86
S20	15.41	3.33	3.45	63.74	0.51	0.27	0.87	3.51	7.59	0.18	n.d	0.04	1.05
S21	n.d	0.96	6.37	81.55	0.76	0.72	0.76	4.78	0.77	0.38	n.d	0.09	2.19

تشکیل دهنده تمام اشیاء شیشه‌ای نوع سیلیکا-سودا-آهک، است که معمولاً برای تهیه آن از شن و ماسه یا سنگ چخماق (کوارتز) استفاده می‌شده است [6]. برای بررسی خلوص منابع سیلیس استفاده شده در فرایند ساخت نمونه‌های شاتور و همچنین بررسی تنوع و تعدد منابع تأمین‌کننده سیلیس، یکی از بهترین فاکتورها استفاده از نمودار دوبعدی تغییرات مقدار سیلیس برحسب مقدار آلومینا است و بر اساس این فرض اساسی که هر منبع تأمین‌کننده مواد اولیه (مانند سیلیس) دارای ترکیب عنصری تقریباً یکسانی است که می‌تواند به‌عنوان اثر انگشت و نشان‌دهنده خصوصیات منابع اولیه باشد، استوار است. بنابراین در شکل ۳ تغییرات درصد وزنی اکسید سیلیسیم (SiO₂) برحسب اکسید آلومینیم (Al₂O₃) در ۲۱ نمونه آنالیز شده از این محوطه به صورت دوبعدی رسم و نشان داده شده است.

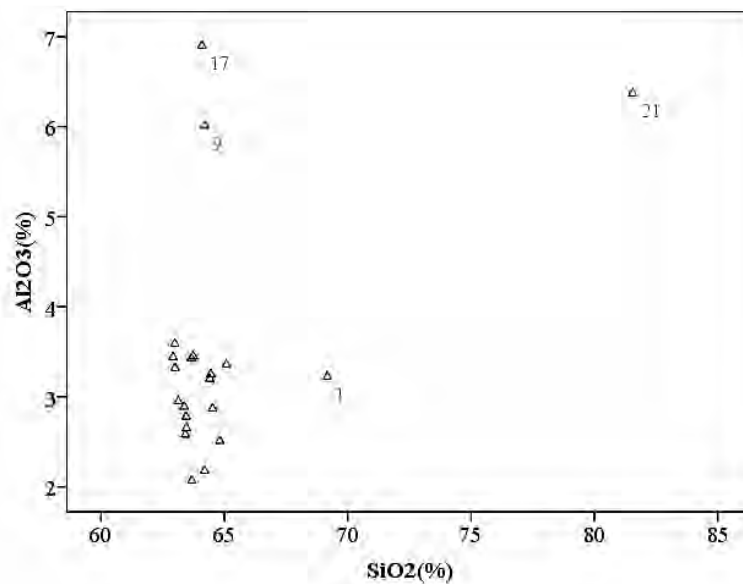
همان‌گونه که در شکل ۳ دیده می‌شود به جز نمونه‌های ۹، ۱۷، ۲۱ و ۱ تقریباً در بقیه نمونه‌ها تغییرات میزان سیلیس و آلومینا بسیار کم است به طوری که تغییرات سیلیس بین ۶۳ تا ۶۵٪ و تغییرات آلومینا بین ۲ تا ۴٪ است. با توجه به اینکه اکسید آلومینیم یکی از ناخالصی‌های موجود در سیلیس مورداستفاده در ساخت

که منبع تأمین اکسید سدیم آن خاکستر حاصل از گیاهان رشد یافته در خاک‌های شور بوده است. بنابراین تمام شیشه‌های آنالیز شده از شاتور از نوع شیشه‌های سیلیکا-سودا-آهک است که در آن‌ها خاکستر گیاهان به‌عنوان ماده اولیه سودا به‌کار رفته است. همچنین نتایج این آنالیزها نشان می‌دهد در برخی از نمونه‌ها (S3, S5, S11, S16) عنصر استرانسیم در محدوده ۰/۱۰-۰/۰۸٪ و در برخی دیگر از نمونه‌ها (S5, S16, S20, S21) وانادیم در محدوده ۰/۰۴-۰/۰۲٪ وجود دارد که در جدول ۲ گزارش نشده است.

همان‌طور که جدول ۲ نشان می‌دهد ترکیبات تشکیل دهنده نمونه‌های آنالیز شده با یکدیگر متفاوت است. برای بررسی بهتر و آسان‌تر این تغییرات در نمونه‌های مختلف و به‌دست آوردن اطلاعات کامل در مورد مواد اولیه و خام مورداستفاده در ساخت این شیشه‌ها که از نوع سیلیکا-سودا-آهک هستند، استفاده از تصاویر پراکندگی دوبعدی که بر اساس ترکیبات تشکیل دهنده نمونه‌ها رسم می‌شوند، بسیار مفید و کارآمد هستند.

۶-۱. بررسی منابع تأمین سیلیس

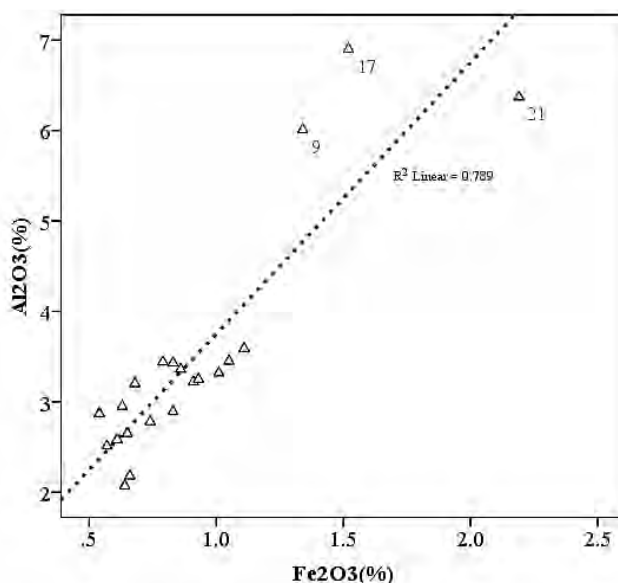
همان‌طور که در مقدمه اشاره شد ماده اصلی



شکل ۳: تغییرات درصد وزنی اکسید سیلیسیم (سیلیس) برحسب اکسید آلومینیم (آلومینا) در نمونه‌های آنالیز شده محوطه شاور
Fig. 3: Scatter plot of wt. % of SiO₂ versus Al₂O₃ in analyzed sample from shaur

با بقیه نمونه‌ها به مقدار قابل توجهی تفاوت دارد، مشخص شد که این نمونه از نظر فیزیکی دچار خوردگی شدید شده است و تقریباً در این نمونه بافت شیشه‌ای شفاف وجود ندارد و بنابراین عامل عدم مشاهده اکسید سدیم و افزایش قابل توجه مقدار سیلیس در آن ناشی از خوردگی شدید مشاهده شده در این نمونه است که منجر به تهی شدن اکسید سدیم در نمونه و افزایش اکسید سیلیسیم شده است [23]. همچنین نمونه ۱ که درصد وزنی آلومینا در آن مشابه بقیه نمونه‌ها است به دلیل اینکه درصد وزنی سیلیس در آن مقداری بالاتر است، از دیگر نمونه‌ها متمایز است و احتمالاً علت این تمایز مربوط به مواد اولیه دیگر به جز سیلیس باشد که در ادامه بیشتر بررسی خواهد شد. اکسید آهن یکی دیگر از ترکیباتی است که به‌طور عمده می‌تواند از ناخالصی‌های موجود در سیلیس وارد ترکیبات شیشه شود. بر این اساس، یکی دیگر از ترکیباتی که می‌توان به‌عنوان یک معیار دیگر در تعیین و مشخص کردن تعدد و تنوع منابع سیلیس مورد استفاده در ساخت شیشه از آن کمک گرفت، اکسید آهن است. همچنین برای پاسخ به این موضوع که آیا اکسید آهن به‌صورت عمدی به‌عنوان عامل رنگزا در حین ساخت نمونه‌ها به کار رفته یا خیر، می‌توان از تغییرات اکسید آهن در نمونه‌ها استفاده کرد. زیرا در برخی موارد هم از اکسید آهن

شیشه است، تغییرات گسترده آن می‌تواند نشان دهنده تنوع و تغییر در منابع سیلیس استفاده شده در فرایند ساخت باشد [21]. بنابراین بر اساس تغییرات مقدار سیلیس برحسب مقدار آلومینا می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در فرایند ساخت غالب شیشه‌های مربوط به محوطه شاور از یک منبع تأمین کننده سیلیس استفاده شده است که می‌تواند مواد تأمین کننده آن شن یا ماسه باشد، زیرا در صورتی که منابع تأمین سیلیس کانی‌های معدنی کوارتز باشد میزان ناخالصی آلومینیم باید کمتر از ۲٪ باشد [22]. در مورد نمونه‌های ۱۷ و ۹ که درصد ناخالصی آلومینا در آن بیشتر از ۶٪ است می‌توان نتیجه‌گیری کرد که از منابع سیلیس متفاوتی در ساخت آن‌ها استفاده شده است. در مورد اینکه آیا استخراج سیلیس از منابع محلی بوده است یا خیر، با توجه به اینکه منابع تأمین کننده سیلیس در هر منطقه و محلی می‌تواند بسیار متنوع باشد، برای بررسی این موضوع نیازمند نمونه‌برداری از منابع متعدد سیلیس در حوالی محل اکتشاف نمونه‌هایی است که در این پژوهش نمونه‌برداری خاصی از حوالی و محل کشف نمونه‌ها انجام نشده است، ولی این گونه از بررسی‌ها نیز می‌تواند یکی از اهداف آینده بررسی صنعت شیشه‌گری در دشت خوزستان در دوران قبل و بعد از اسلام در نظر گرفته شود. در مورد نمونه ۲۱ که مقدار درصد سیلیس آن



شکل ۴: تغییرات درصد وزنی اکسید آهن برحسب اکسید آلومینیم (آلمینا) در نمونه‌های آنالیز شده محوطه شاتور

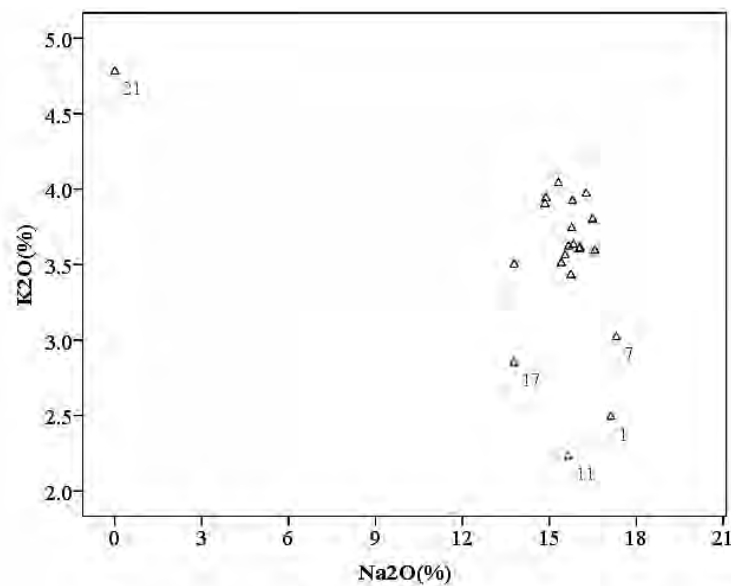
Fig. 4: Scatter plot of wt. % of Fe₂O₃ versus Al₂O₃ in analyzed sample from shaur

اساس شکل‌های ۳ و ۴ به نظر می‌رسد در فرایند ساخت شیشه‌های شاتور از منبع سیلیس کاملاً ناخالص مانند ماسه یا شن که می‌توانسته به صورت محلی تهیه شود، استفاده شده است.

۶-۲. بررسی منابع تأمین سودا

برای بررسی و تعیین نوع مواد گدازآور و همچنین بررسی منابعی که به عنوان تأمین کننده این مواد گدازآور در ساخت شیشه‌های شاتور از آن استفاده شده است می‌توان از تغییرات درصد وزنی اکسید سدیم برحسب اکسید پتاسیم در نمونه‌های آنالیز شده به صورت دوجدی استفاده کرد. همان‌گونه که در شکل ۵ دیده می‌شود به استثنای نمونه ۲۱ و نمونه‌های ۱، ۱۱، ۷ و ۱۷ در بقیه نمونه‌های آنالیز شده میزان اکسید سدیم بین ۱۵ تا ۱۷٪ و میزان اکسید پتاسیم به جزء نمونه‌های ۱، ۱۱، ۷ و ۱۷ بین ۳/۵ تا ۴/۵٪ تغییر می‌کند. بنابراین با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده، مشخص است که نوع ماده گدازآوری که در شیشه‌های به دست آمده در محوطه شاتور استفاده شده است اکسید سدیم (سودا) است. همچنین با توجه به اینکه میزان تغییرات اکسید سدیم و اکسید پتاسیم در اکثر شیشه‌ها بسیار کم است می‌توان نتیجه‌گیری کرد که از ماده اولیه و گدازآور یکسانی به جزء نمونه‌های ۱، ۱۱، ۷

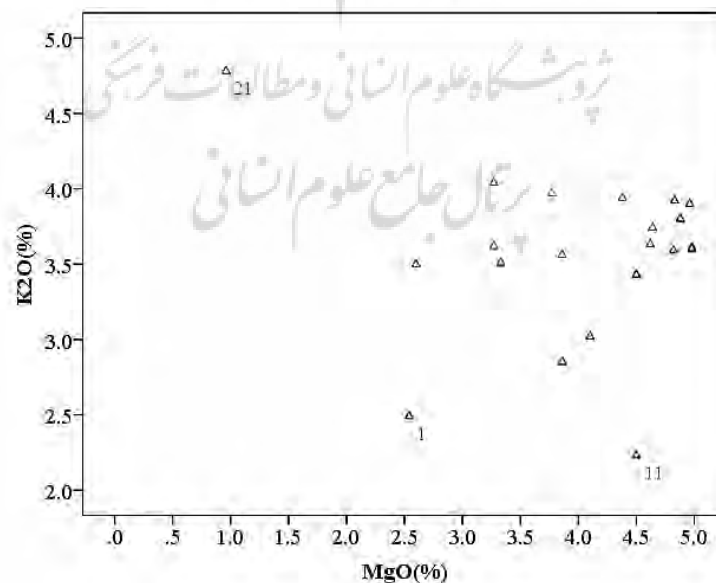
به عنوان عامل رنگزا و ایجاد طیف رنگی سبز استفاده می‌شده است [24]. در شکل ۴ تغییرات درصد وزنی اکسید آهن برحسب اکسید آلومینیم در ۲۱ نمونه آنالیز شده از محوطه شاتور نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود در این نمونه‌ها مقدار اکسید آهن بین ۱/۲ - ۰/۵٪ تغییر می‌کند و مشاهده می‌شود یک همبستگی خطی قوی بین اکسید آلومینیم و اکسید آهن با ضریب همبستگی $R^2=0.79$ وجود دارد. وجود این رابطه خطی اثبات می‌کند که اکسید آهن موجود در نمونه‌ها ناشی از ناخالصی موجود در سیلیس استفاده شده است و کاملاً به صورت ناخواسته وارد نمونه‌ها شده است. مطالعات انجام شده بر روی شیشه‌های مناطق دیگر و همچنین برخی از نمونه‌هایی که در دوران اسلامی در ایران ساخته شده‌اند نیز وجود چنین رابطه خطی بین اکسید آلومینیم و اکسید آهن که ناشی از ناخالصی‌های موجود در سیلیس مورداستفاده در فرایند ساخت است را گزارش می‌کنند [6]. بر اساس شکل ۴ می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در فرایند ساخت غالب شیشه‌های مربوط به محوطه شاتور از یک منبع تأمین کننده سیلیس استفاده شده است. همچنین در مورد نمونه‌های ۱۷ و ۹ که درصد ناخالصی آلومینا در آن بیشتر از ۶٪ است مشاهده می‌شود که ناخالصی آهن موجود در این نمونه‌ها نیز از ۱٪ بیشتر است. بنابراین بر



شکل ۵: تغییرات درصد وزنی اکسید سدیم برحسب اکسید پتاسیم در نمونه‌های آنالیز شده از محوطه شاتور
Fig. 5: Scatter plot of wt% of Na₂O versus K₂O in analyzed sample from shaur

مورد استفاده در این نمونه‌ها از منابع معدنی (ناترون) تأمین شده و یا خاکستر به دست آمده از گیاهانی که در خاک‌های شور رشد یافته است، از بررسی تغییرات درصد وزنی اکسید منیزیم برحسب اکسید پتاسیم استفاده می‌نماییم. با توجه به شکل ۶ می‌توان مشاهده کرد که میزان اکسید منیزیم تمام نمونه‌های آنالیز شده به جز نمونه ۲۱ بیشتر از ۲/۵٪ بوده و بین ۵-۲/۵٪ تغییر

و ۱۷ در تأمین سودای مورد نیاز در این نمونه‌ها استفاده شده است. اما با توجه به اینکه درصد وزنی اکسید پتاسیم موجود در خاکستر گیاهان به پارامترهایی مانند نوع گیاه و یا خاکی که گیاه در آن رشد کرده است، بنابراین برای نمونه‌های ۱، ۱۱، ۷ و ۱۷ می‌توان احتمال داد که از گیاهان متفاوتی برای تهیه خاکستر استفاده شده است. به منظور مشخص نمودن اینکه آیا اکسید سدیم



شکل ۶: تغییرات درصد وزنی اکسید منیزیم برحسب اکسید پتاسیم در نمونه‌های آنالیز شده از محوطه شاتور
Fig. 6: Scatter plot of wt% of MgO versus K₂O in analyzed sample from shaur

و به نوع گیاه و همچنین خاکی که در آن رشد کرده بستگی دارند [27]. در شکل ۷ تغییرات درصد وزنی اکسید منیزیم برحسب اکسید کلسیم در نمونه‌های آنالیز شده از محوطه شائور نشان داده شده است. نتایج این آنالیزها نشان می‌دهد که در فرایند ساخت شیشه‌های مربوط به محوطه شائور، از منابع تأمین‌کننده خاکستر یکسانی استفاده شده است، زیرا یکی از ترکیباتی که نوع خاکستر مورد استفاده را در ساخت شیشه نشان می‌دهد اکسید کلسیم موجود در آن است و مشاهده می‌شود که درصد تغییرات این اکسید در این نمونه‌ها بسیار کم و بین ۸-۶٪ است. البته دو نمونه ۲۱ و ۱ در این بازه تغییرات قرار نمی‌گیرند. در مورد نمونه ۲۱ که قبلاً نیز اشاره شد با توجه به خوردگی شدیدی که در نمونه رخ داده است، می‌تواند ترکیبات اصلی نمونه را بر هم زده باشد و مقدار اکسید کلسیم اندازه‌گیری شده نشان‌دهنده مقدار واقعی آن نباشد. اما در مورد نمونه ۱ همان طور که قبلاً نیز اشاره شد میزان اکسید سیلیسیم این نمونه حدود ۵٪ از بقیه نمونه‌ها بیشتر بوده و از طرفی مشاهده می‌شود که میزان اکسید کلسیم این نمونه نیز از بقیه نمونه‌ها حدود ۵٪ کمتر است. بنابراین کاملاً مشخص است که این نمونه از لحاظ ترکیبات تشکیل‌دهنده با بقیه نمونه‌ها کاملاً متفاوت بوده و در ساخت آن هم از منبع سیلیس جداگانه و هم از منبع سودای جداگانه استفاده شده است. می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که اگر شیشه‌های شائور از منابع محلی و در محل تولید شده باشند، در بین این شیشه‌ها نمونه‌هایی نیز (نمونه ۱) احتمالاً از جاهای دیگر به این محل وارد شده‌اند.

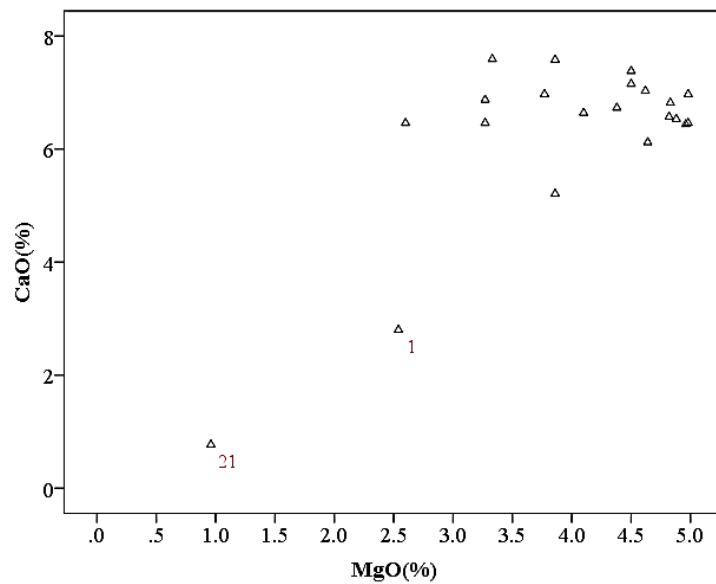
۳-۶. بررسی مواد رنگزا و رنگبر

یکی دیگر از موادی که در ساخت شیشه ممکن است از آن استفاده شود مواد رنگزا و همچنین رنگبر هستند. مواد رنگزا غالباً شامل اکسیدهای فلزی مانند آهن، مس و کبالت بوده‌اند و از اکسید منگنز نیز غالباً به‌عنوان رنگبر استفاده می‌شده است که این مواد در حین ساخت شیشه به خمیره شیشه اضافه می‌شده‌اند. در بین نمونه‌های مورد مطالعه دو نمونه ۱۱ و ۲۱ به رنگ نباتی و بقیه سبزرنگ هستند. از طرفی بر اساس مراجع مختلف یکی

می‌کند. همچنین میزان اکسید پتاسیم تمام نمونه‌های آنالیز شده به‌جز نمونه ۱۱ بیشتر از ۲/۵٪ بوده و بین ۴/۵-۲/۵٪ تغییر می‌کند. بنابراین بر اساس اینکه میزان اکسید منیزیم و اکسید پتاسیم موجود در این نمونه‌ها بیشتر از ۲/۵٪ است شیشه‌های شائور از نوع شیشه‌هایی خواهد بود که منبع تأمین اکسید سدیم آن‌ها خاکستر حاصل از گیاهان رشد یافته در خاک‌های شور بوده است [20].

همان طور که قبلاً نیز اشاره کردیم تقریباً تاکنون هیچ مقاله‌ای که به آنالیز عنصری شیشه‌های دوره اشکانی پرداخته باشد چاپ نشده است تا بتوان نتایج به دست آمده از این پژوهش را با آن مقایسه نمود. اما این نتایج با نمونه‌های آنالیز شده از شیشه‌های دوران ساسانی و اوایل دوران اسلامی که توسط بریل و همکاران او در موزه کورنینگ از چندین محوطه تاریخی ایران و عراق آنالیز شده است و همگی دارای درصد بالا اکسید منیزیم و اکسید پتاسیم بوده اند [7] مطابقت دارد، زیرا با توجه به اینکه شیشه‌گران دوره‌های بعدی معمولاً روش پیشینیان خود را ادامه می‌دهند استفاده از چنین مواد اولیه‌ای می‌تواند مورد انتظار باشد. البته در پژوهشی که اخیراً چاپ شده آنالیز عنصری تعداد محدودی از نمونه‌های دوران اشکانی به دست آمده در سلوکیه عراق در آن گزارش شده است [10, 25]. این بررسی نشان می‌دهد که نمونه‌ها از نوع شیشه‌های ناترونی هستند و از نظر مواد اولیه کاملاً با شیشه‌های شائور اختلاف دارند.

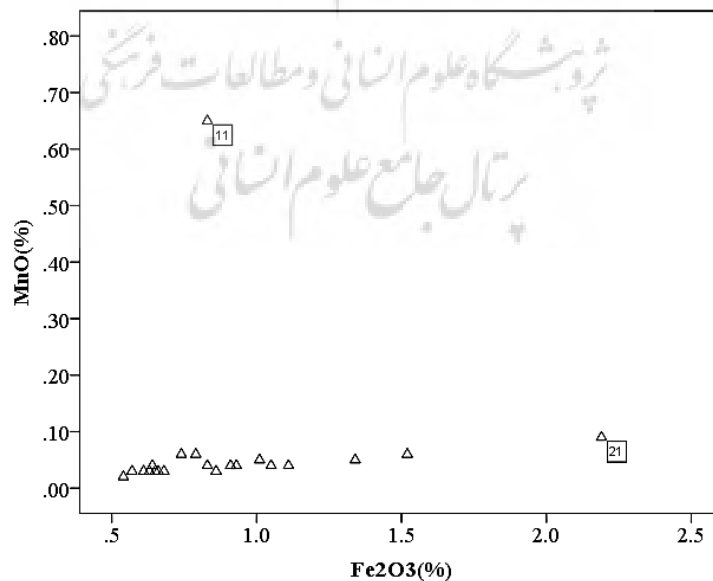
البته با توجه به اینکه خاکستر حاصل از گیاهان دارای مقدار قابل‌توجهی اکسید کلسیم است در شیشه‌هایی که از خاکستر به‌عنوان تأمین‌کننده سودا استفاده می‌شود، دیگر نیازی به استفاده از ماده دیگری به‌عنوان تثبیت‌کننده نبوده و خاکستر می‌تواند این نقش را ایفا کند [6, 26]. در مورد اینکه آیا خاکستر استفاده‌شده به‌عنوان تأمین‌کننده اکسید سدیم، از یک نوع گیاه خاص یا از گیاهان مختلفی تأمین شده است و یا اینکه گیاهانی که از خاکستر آن‌ها استفاده شده است در یک مکان رشد پیدا کرده‌اند یا خیر، بهترین فاکتور بررسی تغییرات وزنی اکسید منیزیم برحسب اکسید کلسیم در نمونه‌های مورد بررسی است؛ زیرا ترکیبات عنصری خاکسترهای به دست آمده از گیاهان مختلف با یکدیگر متفاوت هستند،



شکل ۷: تغییرات درصد وزنی اکسید منیزیم برحسب اکسید کلسیم در نمونه‌های آنالیز شده از محوطه شاور
Fig. 7: Scatter plot of wt. % of MgO versus CaO in analyzed sample from shaur

شاور به صورت دوبعدی رسم شده است. در این شکل تنها نمونه ۱۱ درصد وزنی اکسید منگنز در آن تفاوت قابل توجهی با بقیه نمونه‌ها دارد. همان طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود تقریباً در اکثر نمونه‌های مورد مطالعه از شاور درصد وزنی اکسید آهن بین ۱/۳-۰/۵٪ تغییر می‌کند. همچنین مشاهده می‌شود که مقدار اکسید منگنز موجود در این نمونه‌ها بسیار کم و زیر ۰/۱۰٪ است و

از ترکیباتی عامل ایجاد رنگ سبز، اکسید آهن است [28]. حال برای بررسی اینکه آیا این مواد رنگزا و رنگبر به صورت عمدی اضافه شده یا اینکه به دلیل ناخالصی‌های موجود در سیلیس بوده است، می‌توان از تغییرات اکسید آهن برحسب اکسید منگنز در نمونه‌ها استفاده نمود. در شکل ۸ تغییرات درصد وزنی اکسید آهن برحسب اکسید منگنز در نمونه‌های آنالیز شده از محوطه



شکل ۸: تغییرات درصد وزنی اکسید آهن برحسب اکسید منگنز در نمونه‌های آنالیز شده از محوطه شاور
Fig. 8: Scatter plot of wt. % of Fe₂O₃ versus MnO in analyzed sample from shaur

حاصل از خاکستر گیاهان هستند. (۲) ۸۰۰ ق.م تا ۸۰۰ ب.م در اروپا و آسیای غربی و میان‌رودان از نوع گداز‌آور ناترون و در ایران و برخی کشورها همان سودای حاصل از خاکستر گیاهان استفاده می‌شده است. (۳) بعد از ۸۰۰ م. در اروپا شیشه‌های نوع پتاسی جایگزین می‌شود و در کشورهایی مانند عراق و سوریه و ترکیه به سمت سودای حاصل از خاکستر گیاهان برمی‌گردند. بنابراین از نظر ترکیبات عنصری و مواد سازنده اختلاف فاحشی بین شیشه‌های اشکانی ایران و کشورهای مجاور هم‌دوره وجود دارد و در صورتی که نمونه‌ها از سوریه، عراق یا فلسطین وارد شده باشند، این اختلاف در نوع گداز‌آورها غالباً خود را نشان می‌دهد. از دیگر نتایج حاصل از آنالیزها نمونه‌ها این است که در فرایند ساخت شیشه‌های مربوط به محوطه شائور، از منابع تأمین‌کننده سیلیس و خاکستر یکسانی استفاده شده است، زیرا ترکیباتی مانند اکسید آلومینیم و اکسید کلسیم که فاکتورهای مناسبی برای تعیین منابع مورد استفاده به عنوان سیلیس و سودا هستند، تقریباً در تمام نمونه‌ها تغییرات نسبتاً کمی دارند. همچنین بر اساس برخی دیگر از ناخالصی‌هایی مانند اکسید آهن و اکسید تیتانیم نیز می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در فرایند ساخت شیشه‌های مربوط به محوطه شائور از منابع سیلیکایی کاملاً یکسانی استفاده شده است که این منابع تقریباً ناخالص بوده‌اند. علاوه بر این وجود رابطه همبستگی بین اکسید آهن و اکسیدهای آلومینیم و تیتانیم اثبات می‌کند که وجود این ناخالصی موجود در نمونه‌ها ناشی از ناخالصی موجود در سیلیس است و کاملاً به صورت ناخواسته وارد نمونه‌ها شده است. همچنین بررسی مقادیر اکسید آهن و اکسید منگنز در این شیشه‌ها اثبات می‌کند که عامل رنگ‌زا و بی‌رنگ‌کننده به صورت آگاهانه در طی فرایند ساخت به آن‌ها اضافه نشده است و علت ایجاد رنگ سبز در اکثر نمونه‌ها به دلیل وجود اکسید آهن موجود در سیلیس است که در حین فرایند حرارت‌دهی و ساخت طیف رنگی سبز به نمونه داده است. اگرچه این نتایج نشان می‌دهد که تقریباً در تمام شیشه‌های محوطه شائور از مواد اولیه یکسانی هم برای تهیه سیلیس و هم برای تهیه سودا استفاده شده است اما در مورد اینکه این منابع محلی بوده یا نمونه‌های

بین ۰/۰۶ °/۰۲٪ تغییر می‌کند. البته بین اکسید آهن و اکسید منگنز یک رابطه خطی مثبت وجود دارد و با افزایش مقدار اکسید آهن، اکسید منگنز نیز افزایش می‌یابد. وجود این رابطه خطی اثبات می‌کند که اکسید آهن و اکسید منگنز موجود در نمونه‌ها ناشی از ناخالصی موجود در سیلیس است و کاملاً به صورت ناخواسته و کنترل نشده وارد نمونه‌ها شده است [29]. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که برای ایجاد رنگ سبز در این نمونه‌ها ترکیباتی که شامل اکسید آهن باشد به صورت عمدی در حین فرایند ساخت اضافه نشده است. همچنین با توجه به جدول ۲ نیز مشاهده می‌شود که جز اکسید آهن، ترکیبات رنگزای عمده‌ای در نمونه‌ها مشاهده نشده است. همچنین لازم است که اشاره شود که اکسید منگنز موجود در نمونه ۱۱ می‌تواند به عنوان عامل رنگ‌نمایی در نظر گرفته شود.

۷. نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست‌آمده از بررسی نمونه‌های محوطه شائور نشان می‌دهد که آنالیز میکروپیکسی روشی بسیار توانمند و دقیق برای بررسی و اندازه‌گیری ترکیبات سازنده و تعیین مواد اولیه و خام به‌کاررفته در فرایند ساخت شیشه‌های تاریخی هستند. حتی در مورد نمونه‌هایی که دارای ابعاد کوچک بوده و دچار خوردگی شدید سطحی هستند، این فن آنالیز در مقایسه با فنون آنالیز مرسوم بسیار مفیدتر و کارآمدتر خواهد بود. نتایج به‌دست‌آمده برای میزان سیلیس، اکسید سدیم و اکسید کلسیم نشان می‌دهد نوع تمام شیشه‌های به‌دست‌آمده در محوطه شائور از نوع سیلیکا-سودا-آهک هستند. همچنین با توجه به اینکه میزان اکسید منیزیم و اکسید پتاسیم موجود در نمونه‌های شیشه بیشتر از ۲/۵٪ است. این شیشه‌ها از نوع شیشه‌هایی خواهد بود که منبع تأمین اکسید سدیم آن خاکستر حاصل از گیاهان رشد یافته در خاک‌های شور بوده است. در تاریخچه شیشه‌گری مشاهده می‌شود که سه دوره تاریخی از نظر فرمولاسیون و مواد اولیه مورد استفاده برای شیشه‌های سیلیکا-آهک-سودا استفاده شده است: (۱) از ابتدای پیدایش تا ۸۰۰ ق.م معمولاً تمام شیشه‌ها در ایران و جهان از نوع سیلیکا-آهک-سودا

از نظر مواد اولیه اختلاف دارند.

سپاسگزاری

لازم به ذکر است که این مقاله از نتایج یک کار پژوهشی بر روی یافته‌های شیشه‌ای دوره اشکانی در قلعه شوش به شماره نامه ۹۴۲/۱۱۸/۲۱۴۵ در اداره میراث فرهنگی استان خوزستان بوده است. نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از مدیریت محترم ثبت جهانی قلعه شوش جناب آقای مهندس ارسطوزاده و همکارانشان، بلاخص جناب آقای مهدی امیدفر (کارشناس باستان‌شناسی) و آقای حمید سرخه (امین اموال) و همچنین از مدیریت محترم بخش واندوگراف سازمان انرژی اتمی جناب آقای دکتر محمد لامعی رشتی و همکاران گرامی‌شان کمال تقدیر و تشکر را به جا آورند.

ساخته شده در مکان دیگری ساخته شده و به شاتور منتقل شده‌اند نمی‌توان اظهار نظر قطعی کرد، زیرا هنوز داده‌هایی که بتوان این نتایج را با آن‌ها مقایسه کرد وجود ندارد و این مقایسه‌ها نیازمند بررسی نمونه‌های دیگر از این دوره تاریخی در ایران و دیگر کشورهای همجوار مانند عراق است. از طرفی مطالعه نمونه‌های مربوط به مناطق دیگر در دشت خوزستان در حال انجام است و در آینده می‌توان نتایج محوطه‌های دیگر مانند گالاک یا دشت رامهرمز را با نتایج نمونه‌های شاتور مقایسه نمود و اطلاعاتی در مورد محلی بودن تولیدات شیشه در دشت خوزستان به دست آورد. اگرچه در نمونه‌های کشف شده در سلوکیه عراق که دوره تاریخی آن‌ها به عصر اشکانیان برمی‌گردد مشخص شده که شیشه‌های این محوطه از نوع شیشه‌های نائرونی هستند و با شیشه‌های شاتور کاملاً

References

- [1] Moorey PRS. Ancient mesopotamian materials and industries: the archaeological evidence. Clarendon. Oxford; 1994.
 - [2] Celik S, Akyuz T, Akyuz S, Ozel A, Kecel-Gunduz S, S B. Investigations of Archaeological Glass Bracelets and Perfume Bottles Excavated in Ancient Ainos (Enez) by Multiple Analytical Techniques. *J Appl Spectrosc.* 2018;(85):178–83.
 - [3] Oikonomou A, Henderson J, Gnade M, Chenery S, Zacharias N. An archaeometric study of Hellenistic glass vessels: evidence for multiple sources. *Archaeol Anthropol Sci.* Springer; 2018;10(1):97–110.
 - [4] Henderson J, Chenery S, Faber E, Kröger J. The use of electron probe microanalysis and laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry for the investigation of 8th–14th century plant ash glasses from the Middle East. *Microchem J.* Elsevier; 2016;128:134–52.
 - [5] Bugoi R, Alexandrescu C-G, Panaite A. Chemical composition characterization of ancient glass finds from Troesmis—Turcoaia, Romania. *Archaeol Anthropol Sci.* Springer; 2018;10(3):571–86.
 - [6] Henderson J. Ancient glass: an interdisciplinary exploration. Cambridge University Press; 2013.
 - [7] Brill RH, Stapleton CP. Chemical analyses of early glasses: volume 3: the years 2000–2011, reports, and essays. Corning Museum of Glass; 2012.
 - [8] Swan CM, Rehren T, Lankton J, Gratuze B, Brill RH. Compositional observations for Islamic Glass from Sīrāf, Iran, in the Corning Museum of Glass collection. *J Archaeol Sci Reports.* Elsevier; 2017;16:102–16.
 - [9] De Schauensee M. Peoples and Crafts in Period IVB at Hasanlu, Iran. Vol. 132. University of Pennsylvania Press; 2012.
 - [10] Mirti P, Pace M, Negro Ponzi M, Aceto M. ICP-MS Analysis of Glass Fragments of Parthian And Sasanian Epoch from Seleucia and Veh Ardaš?R (Central Iraq). *Archaeometry.* Blackwell Publishing Ltd; 2008 Jun;50(3):429–50. Available from: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-4754.2007.00344.x>
 - [11] Kordavani M. Achaemenid Palace of Shaur, excavations at Susa during 1971-1972. Bitā; 1977. [in Persian]
- [کردوانی محمود. کاخ هخامنشی شاهر. کاوش‌های سال ۷۲° ۱۹۷۱ در شوش. نشر بی تا؛ ۱۳۵۶]
- [12] Boucharlat R, Labrousse A. Le palais d'ArtaxerxèsII sur la rive droite du Chaour à Suse. *Cah la Délégation Archéologique Française en Iran Paris.* 1979;10:19–136.
 - [13] Sheikh M. Achaemenid period at Susa ancient site according to archaeological excavations [Unpublished M.A thesis]. Islamic Azad University of Tehran; 2007. [in Persian]
- [شیخ محمد. دوران هخامنشی در محوطه باستانی شوش بر اساس کاوش‌های باستان‌شناسی [منتشر نشده]. پایان‌نامه کارشناسی ارشد باستان‌شناسی. دانشگاه آزاد اسلامی. واحد تهران مرکزی؛ ۱۳۸۶]
- [14] Yoyotte J. Les inscriptions hiéroglyphiques de la statue de Darius à Suse. *Délégation*

- archéologique française en Iran; 1974.
- [15] Johansson SAE, Campbell JL. PIXE: A novel technique for elemental analysis. 1988;
- [16] Schmidt B, Wetzig K. Ion beams in materials processing and analysis. Springer Science & Business Media; 2012.
- [17] Adams F, Barbante C. Particle-Based Imaging Techniques. In: Comprehensive Analytical Chemistry. Elsevier; 2015. p. 315–37.
- [18] 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. Elsevier; 2010;268(20):3356–63.
- [19] Agha-Aligol D, Oliyai P, Mohsenian M, Lamehi-Rachti M, Shokouhi F. Provenance study of ancient Iranian luster pottery using PIXE multivariate statistical analysis. J Cult Herit. Elsevier; 2009;10(4):487–92.
- [20] Sayre E V, Smith RW. Compositional categories of ancient glass. Science. American Association for the Advancement of Science; 1961;133(3467):1824–6.
- [21] Lima A, Medici T, de Matos AP, Verità M. Chemical analysis of 17th century Millefiori glasses excavated in the Monastery of Sta. Clara-a-Velha, Portugal: comparison with Venetian and façon-de-Venise production. J Archaeol Sci. Elsevier; 2012;39(5):1238–48.
- [22] Freestone IC, Jackson-Tal RE, Tixel I, Tal O. Glass production at an early Islamic workshop in Tel Aviv. J Archaeol Sci. Elsevier; 2015;62:45–54.
- [23] 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. Elsevier; 2002;189(1–4):350–7.
- [24] Van der linden V, Cosyns P, Schalm O, Cagno S, Nys K, Janssens K, et al. Deeply coloured and black glass in the Northern provinces of the Roman empire: Differences and similarities in chemical composition before and after AD 150. Archaeometry. Blackwell Publishing Ltd; 2009 Oct;51(5):822–44. Available from: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-4754.2008.00434.x>
- [25] Ganio M, Gulmini M, Latruwe K, Vanhaecke F, Degryse P. Sasanian glass from Veh Ardašir investigated by strontium and neodymium isotopic analysis. J Archaeol Sci. Elsevier; 2013;40(12):4264–70.
- [26] Kato N, Nakai I, Shindo Y. Change in chemical composition of early Islamic glass excavated in Raya, Sinai Peninsula, Egypt: on-site analyses using a portable X-ray fluorescence spectrometer. J Archaeol Sci. Elsevier; 2009;36(8):1698–707.
- [27] Freestone IC, Jackson-Tal RE, Tal O. Raw glass and the production of glass vessels at late Byzantine Apollonia-Arsuf, Israel. J Glass Stud. JSTOR; 2008;67–80.
- [28] Vataj E, Hobdari E, Röhrs S, Vandenamele P, Civici N. Analytical characterization of glass tesserae from mosaics of early Christian basilicas in Albania. Appl Phys A. Springer; 2017;123(1):76.
- [29] Alberta S, Gianmario M, Valentina P. The stained glass window of the southern transept of St. Anthony's Basilica (Padova, Italy): study of glasses and grisaille paint layers. Spectrochim Acta Part B At Spectrosc. Elsevier; 2011;66(1):81–7.

پژوهه باستان‌سنجی
فصلنامه
پژوهه باستان‌سنجی
فصلنامه