



Original Paper



Investigation and Study of Glass Artifacts of the Sassanid Period; Case Study: Jahangir Dome and GouriyeH Glasses in Ilam Province using Micro-PIXE Technique

Davoud Agha-Aligol¹, Bita Sodaei^{2*}, Leyla Khosravi³, Mina Karimi⁴

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

²Assistant Professor, Department of Archaeology, Faculty of Humanities, Islamic Azad University Varamin Pishva Branch, Tehran, IRAN

³Assistant Professor, Institute of Archeology, Institute for Cultural Heritage and Tourism, Tehran, IRAN

⁴Ph.D Candidate of Archaeology, Faculty of Humanities, Islamic Azad University, Varamin Pishva Branch, Tehran, IRAN

Received: 31/08/2019

Accepted: 06/12/2019

Abstract

Studying the elemental composition of glass objects provide a lot of information about the manufacturing technique, the determination of the raw materials and the pigments were used to create different colors. In this study, 19 samples of glass objects obtained from the archaeological site of Jahangir Dome and GouriyeH hill were analyzed by the micro-PIXE technique to measure the constituent elements. The Jahangir Dome and GouriyeH hill are located 50 km northwest of Ilam on either side of the Kangir River. These sites excavated in three seasons by Leyla Khosravi from 2015 to 2017 and layers related to the Sassanid and the Early Islamic periods have been identified. In the layers of the Sassanid period a considerable amount of glass has been recovered that no comprehensive research has been done on them so far. The main purpose of this article is to study the glass industry of the Sassanid period and evaluate the raw materials were used in the manufacture of glass artifacts by micro-PIXE technique that followed by questions about the elemental composition of the glasses, identifying and examining sources of silica and flux raw materials, colorant and decolorant agent. The most important questions raised in this reach are: 1- What kind of flux materials have been used in the glassware manufacturing process? 2- The colorant and decolorant materials used in the manufacturing process are deliberately added to the bath or are due to the iron oxide and manganese oxide existing in silica raw materials? The micro-PIXE 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 (NSTRI) in 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 . The results of elemental composition show, the weight percentages of SiO₂ (60-71wt.%), Na₂O (11-20wt.%) and CaO (4-8wt.%) have the highest proportion of elemental composition in the samples. Also, the weight percentage of MgO (3-6 wt.%) and K₂O (2-5 wt.%) in the analyzed glasses are greater than 1.5wt.%. Therefore, it can be concluded that the glass artifacts of these sites are silica-soda-lime glasses type, which is used the plant ashes as a flux. Furthermore, wide variations in the weight percentage of SiO₂, Na₂O, K₂O and MgO indicate that silica and flux raw materials obtained from various sources. The comparison of these data by the literature data shows the raw materials used in these sites are different

* Corresponding author: bita.sodaei@gmail.com

from those were used in glasses excavated in Sassanid sites in Iraq. In addition, the elemental composition of these samples show that Fe_2O_3 and Cu_2O are the colorant agents and MnO has been used as a decolorant element in the samples. However, in Jahangir Dome, these oxides were used unintentionally, but in the Gouriyeh, MnO is added deliberately to the bath.

Keywords: Ancient glass, Sassanid Period, Jahangir Dome, Tape Gouriyeh, Micro-PIXE



CrossMark

بررسی و مطالعه مصنوعات شیشه‌ای دوره ساسانی؛ نمونه

مطالعاتی: شیشه‌های محوطه گنبد جهانگیر و (تپه) گوریه در استان ایلام

با استفاده از روش میکروپیکسی

داود آقا علی گل^۱، بیتا سودایی^{۲*}، لیلا خسروی^۳، مینا کریمی^۴

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

۲. استادیار گروه باستان‌شناسی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ورامین پیشوا، ورامین، تهران، ایران

۳. استادیار پژوهشکده باستان‌شناسی، پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری، تهران، ایران

۴. دانشجوی دکتری باستان‌شناسی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ورامین پیشوا، ورامین، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۰۹

چکیده

مطالعه ترکیبات عنصری اشیاء شیشه‌ای اطلاعات سودمندی درباره بررسی فن ساخت، تعیین مواد اولیه و رنگ‌دانه‌های استفاده‌شده در فرایند ساخت را در اختیار پژوهشگر قرار می‌دهد. در این پژوهش ۱۹ نمونه از اشیاء شیشه‌ای به‌دست‌آمده از محوطه گنبد جهانگیر و گوریه با استفاده از روش میکروپیکسی باهدف اندازه‌گیری عناصر تشکیل‌دهنده این نمونه‌ها آنالیز شده‌اند. این محوطه در ۵۰ کیلومتری شمال غرب ایلام در دو سوی رودخانه کنگیر واقع شده، در کاوش‌های باستانی لایه‌های دوره ساسانی و اوایل اسلام شناسایی شده است. هدف اصلی این مقاله بررسی صنعت شیشه‌گری دوره ساسانی و ارزیابی مواد اولیه مورد استفاده در ساخت مصنوعات شیشه‌ای با استفاده از روش میکروپیکسی است که با پرسش‌هایی در زمینه ترکیبات عنصری نمونه‌ها، شناسایی و بررسی منابع سیلیس مورد استفاده جهت تهیه خمیره شیشه، نوع ماده گدازآور و عناصر رنگزا و بی‌رنگ‌کننده دنبال شده است. نتایج نشان می‌دهد اکسید سیلیسیم (۶۰-۷۱٪)، اکسید سدیم (۲۰-۱۱٪) و اکسید کلسیم (۸-۴٪) بیشترین سهم را در ترکیب عنصری نمونه‌ها دارند. با توجه به درصد وزنی اکسید منیزیم (۳-۶٪) و اکسید پتاسیم (۲-۵٪) در نمونه‌ها بیشتر از ۱/۵٪ است، می‌توان نتیجه گرفت که مصنوعات شیشه‌ای این محوطه از نوع شیشه‌های سیلیکا-سودا-آهک است و از خاکستر گیاهان به‌عنوان مواد اولیه سودا که نقش مواد گدازآور را در ترکیبات شیشه دارد، استفاده شده است. همچنین بازه تغییرات گسترده در درصد وزنی اکسید سیلیسیم، اکسید سدیم، اکسید پتاسیم و اکسید منیزیم نشان می‌دهد که برای تأمین ماده اولیه سیلیس و گدازآور سودا در این نمونه‌ها از منابع اولیه مختلفی در دو محوطه مورد بررسی استفاده شده و این مواد اولیه با مواد استفاده‌شده در نمونه‌های ساسانی به‌دست‌آمده در عراق متفاوت هستند. از دیگر نتایج به‌دست‌آمده می‌توان گفت که تنها عناصر آهن و مس به‌عنوان عامل رنگزا و اکسید منگنز به‌عنوان عنصر رنگبر در نمونه‌ها استفاده شده است که در نمونه‌های گنبد جهانگیر این اکسیدها به‌صورت غیر عمد استفاده شده‌اند، درحالی‌که در نمونه‌های گوریه اکسید منگنز به‌صورت عمدی به خمیره شیشه اضافه شده است.

واژگان کلیدی: شیشه‌های باستانی، دوره ساسانی، گنبد جهانگیر، تپه گوریه، میکروپیکسی

*مسئول مکاتبات: خیابان حکیم نظامی، روبروی خیابان خاقانی، دانشگاه هنر اصفهان

آدرس الکترونیکی: bita.sodaeci@gmail.com

حق نشر متعلق به نویسنده(گان) است و نویسنده تحت مجوز Creative Commons Attribution License به مجله اجازه می‌دهد مقاله چاپ شده ب

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

شیشه به‌عنوان یکی از اولین مواد مورد استفاده بشر، یک شی شفاف، کدر و رنگی است که از دیرزمان در صنایع و علوم مختلف مورد توجه بوده است. صنعت شیشه‌گری از سابقه و قدمت دیرینه‌ای در ایران برخوردار بوده [1] و از این رو مورد توجه بسیاری از کاوشگران و پژوهشگران قرار گرفته است. این صنعت در دوره ساسانی همراه با سایر صنایع پیشرفت‌های شایانی در فن ساخت و شیوه تزئین داشته است [2] قدیمی‌ترین نشانه‌های استفاده از شیشه به هزاره سوم ق.م در منطقه خاور نزدیک، در مناطق سوریه، بین‌النهرین و مصر برمی‌گردد که بشر از ترکیبات شیشه در ساخت لعاب استفاده کرده است [3]. بر اساس کشفیات باستان‌شناسی، شمال و شمال غرب سوریه خاستگاه تولید شیشه بوده که این ماده را به‌عنوان محصولی جانبی از تولید لعاب معرفی کرده‌اند [4]. همچنین استفاده از شیشه در شمال سوریه به مردمان هوری و میثانی نسبت داده شده است [3]. شواهد تاریخی گواه بر این است که بین‌النهرین اولین تمدنی است که تجربه ذوب شیشه را داشته است [5]. در هزاره دوم ق.م در ایران، از محوطه چغازنبیل در خوزستان و قلعه کوتی در گیلان مقدار زیادی مهره استوانه‌ای و مفتول‌های شیشه‌ای به‌دست آمده که مفتول‌های شیشه‌ای به‌دست آمده از چغازنبیل را می‌توان به‌عنوان اولین شیشه‌های ساخته شده در هزاره دوم ق.م در ایران معرفی کرد [6]. در دوره هخامنشی با تسلط یافتن این امپراتوری بر مناطق بین‌النهرین، سوریه و آشنا شدن آن‌ها با مراکز مختلف شیشه‌گری، این صنعت وارد مرحله جدیدی شد [7] که ظروف شیشه‌ای این دوران بیشتر در کاوش‌های تخت جمشید به‌دست آمده است [1]. بررسی‌های انجام شده بر روی این آثار نشان می‌دهد که ظروف شیشه‌ای در این دوره به‌صورت تراش یا قالبی ساخته می‌شدند [8]. در دوره اشکانی با توسعه راه‌ها و گسترش تجارت بین ایران و خاور دور پیشرفت چشمگیری در صنعت شیشه‌گری ایران به وجود آمد، به نحوی که می‌توان تأثیر هنر و صنعت شیشه‌گری ایرانی را بر روی آثار مشابه خاور دور بررسی و مقایسه

کرد [8]. کاوش‌های باستان‌شناسی نشان‌دهنده این نکته است که صنعت شیشه‌گری در دوره ساسانی از نظر کمی و کیفی در اکثر نقاط فلات ایران رشد یافته است [8,9]. در این دوره علاوه بر استفاده از شیوه‌های متنوع در ساخت اشیاء شیشه‌ای مانند تراش، پرداخت، و سیقل، برای ساخت شیشه‌های نازک از روش دم‌آزاد و برای شیشه‌های ضخیم از دم قالبی استفاده می‌کردند. این روش (دم‌آزاد) در صنعت شیشه‌گری باعث افزایش تولید و تنوع در شکل اشیاء می‌شود [8].

از نظر ساختار شیمیایی، شیشه یک جامد غیر بلوری (آمورف) است که برخلاف دیگر مواد مانند فلزات، فاقد نظم مشخص در چیدمان اجزاء مولکولی‌اش در مقیاس بزرگ است. این بدان معنی است که اجزاء شیشه فقط در مناطق کوچکی دارای چیدمان منظم هستند [10]. همچنین شیشه از نظر ترکیب مواد اولیه از مخلوط شدن تعدادی از اکسیدها تهیه می‌گردد و خواص فیزیکی و شیمیایی هر شیشه بستگی به درصد وزنی اکسیدهای سازنده آن دارد [11].

به‌طور کلی مواد تشکیل‌دهنده شیشه و مصنوعات شیشه‌ای به چهار دسته مختلف تقسیم می‌شوند [12].
 ۱- مواد پایه که ماده اصلی اشیاء شیشه‌ای است که غالباً شامل سیلیس یا اکسید سیلیسیم است که منبع اصلی تهیه این مواد شن، سنگ چخماق یا سنگ چینی بوده است. ۲- مواد گدازآور که باعث می‌شود نقطه ذوب سیلیس کمتر شود. این مواد غالباً شامل اکسید سدیم، اکسید پتاسیم و اکسید سرب است. ۳- مواد تثبیت‌کننده مانند کربنات کلسیم که به‌منظور مخلوط شدن بهتر مواد پایه و ذوب‌کننده و افزایش استحکام و جلوگیری از حل شدن شیشه در مواد مختلف استفاده می‌شده است. ۴- مواد رنگبر و رنگزا که به‌منظور خنثی کردن رنگ در خمیره شیشه و همچنین ایجاد شیشه‌های رنگی به کار می‌رفته است. این مواد غالباً شامل اکسیدهای فلزی مانند اکسید منگنز، آهن، مس و کبالت هستند که به خمیره شیشه اضافه می‌شده‌اند [13]. اندازه‌گیری و تعیین درصد وزنی هر کدام از این چهار گروه با استفاده از روش‌های آنالیز دستگاهی به پرسش‌هایی در زمینه فن

است [15] سپس مطالعات فراوانی بر روی آثار شیشه‌ای مصری و رومی باهدف بررسی محل پیدایش و تعیین منشأ مواد خام به‌کاررفته در این اشیاء و چگونگی ایجاد رنگ در آن‌ها انجام شده است [21-17] تحقیق بر روی شیشه‌های باستانی ایرانی نیز موردتوجه گروه زیادی از محققین در داخل و خارج از کشور قرار گرفته است که منجر به تنوع رویکردهای تحلیلی در این زمینه شده است. از جمله این موارد می‌توان به کارهای مطالعاتی بریل و همکارانش بر روی شیشه‌های قدیمی شهر نیش‌ابور که متعلق به اوایل دوران اسلامی هستند اشاره کرد. نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد که شیشه‌های تاریخی علیرغم رنگی یا بی‌رنگ بودنشان، از نظر ترکیب عنصری نیز کاملاً متفاوت هستند و احتمالاً محل تولیدشان نیز می‌تواند متفاوت باشد [22,23]. همچنین نمونه‌هایی از گرگان، ری، همدان و تخت سلیمان که قدمت آن‌ها به دوران اسلامی برمی‌گردد، مورد آنالیز و پژوهش قرار گرفتند ولی به‌صورت مبسوط تجزیه و تحلیل نشده‌اند [13]. نتایج به‌دست‌آمده از مجموع نمونه‌های مطالعه شده از ایران که قدمت آن به دوران اسلامی برمی‌گردد نشان می‌دهد که شیشه‌های به‌دست‌آمده در مناطق مختلف ایران همگی از نوع شیشه‌های سیلیکا-سودا-آهک است که از خاکستر گیاه به‌عنوان ماده‌گذار آور استفاده می‌کردند. مقایسه ترکیبات عنصری این مناطق با مناطق دیگر جهان نشان می‌دهد میزان پتاسیم و اکسید منیزیم در نمونه‌های ایرانی نسبت به نمونه‌های سوریه، فلسطین و عراق بیشتر است [13]. از دیگر پژوهش‌های انجام شده می‌توان به مقاله امامی تحت عنوان مفتول‌های شیشه‌ای چغازنبیل، اولین نشانه‌های شیشه‌گری ایران در هزاره دوم پیش از میلاد، اشاره کرد که با هدف تعیین ترکیب شیمیایی و بلورین شیشه‌های چغازنبیل و فن‌آوری ساخت آن‌ها پرداخته است [2]. همچنین رضایی به بررسی صنعت شیشه‌گری ساسانی در تل‌ملیان بر اساس آنالیز پیکسی با هدف بررسی ساختار و شیوه تولید شیشه‌ها پرداخته است [24]. صالح‌وند و همکاران نیز پژوهشی پیرامون لوله‌های شیشه‌ای دره‌های چغازنبیل با روش XRF با هدف آشنایی با هنر شیشه‌گری دوره عیلام میانه انجام

شناسی، فن ساخت، نوع شیشه و مواد اولیه مورد استفاده در ساخت شیشه پاسخ می‌دهد.

در این پژوهش برای اولین بار نمونه‌های شیشه‌ای به‌دست‌آمده از بناهای گنبد جهانگیر و گوریه معرفی و به‌منظور بررسی و شناسایی ترکیبات شیمیایی بکار رفته در این شیشه‌ها برای پاسخ به پرسش‌هایی در خصوص مواد اولیه مورد استفاده در فرایند ساخت و نحوه ایجاد رنگ در شیشه‌های دوره ساسانی مورد آنالیز قرار گرفته است. بر اساس نتایج آزمایش‌های سالیابی با روش ترمولومینسانس که بر روی اشیاء سفالینه‌ای و آجرهایی که همراه نمونه‌های شیشه‌ای در این محوطه یافت شده‌اند، قدمت این نمونه‌های شیشه‌ای به ۲۵۰-۶۵۰ بعد از میلاد برمی‌گردد [14]. مهم‌ترین سؤالاتی که در این پژوهش به آن‌ها پاسخ داده خواهد شد عبارت است از:

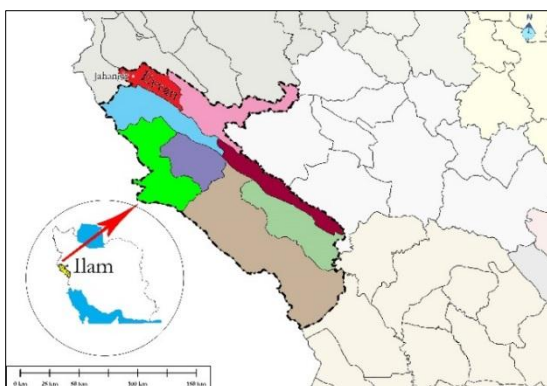
- ۱- فرایند ساخت آثار شیشه‌ای محوطه جهانگیر آیا بر اساس مواد اولیه بومی استوار بوده است یا نمونه‌های به‌دست‌آمده از مواد اولیه غیربومی ساخته شده‌اند؟ آیا در این نمونه‌ها از مواد ذوب‌کننده (گدازآور) معدنی (ناترونی) استفاده شده یا از خاکستر به‌دست‌آمده از گیاهان استفاده می‌کردند؟
- ۲- برای ایجاد رنگ‌های مختلف از چه مواد و عناصری استفاده شده است؟ آیا این مواد رنگزا و رنگبر به‌صورت عمدی اضافه شده است یا ناشی از ناخالصی‌های موجود در سیلیس است؟
- ۳- آیا از منابع و مواد اولیه یکسانی در ساخت نمونه‌ها در این محوطه‌ها استفاده شده است و یا از مواد اولیه متفاوتی در ساخت این شیشه‌ها در هر یک از این دو محوطه استفاده شده است؟

۲. پیشینه پژوهش

تجزیه و تحلیل شیمیایی شیشه‌ها به اواخر قرن هجدهم برمی‌گردد [15]. اولین آنالیزهای معنادار در سال ۱۹۵۰ میلادی توسط تورنر در خصوص فناوری شیشه به چاپ رسیده است [16] و سپس در سال ۱۹۶۰ میلادی توسط ادوارد سیر و رابرت بریل بر روی شیشه‌های موجود در موزه کورنینگ تحقیقات علمی وسیعی انجام شده

روستای سرتنگ در دو سوی رودخانه کنگیر تقریباً روبروی هم قرار داشتند. در شمال کوه بانکول و قلابه و در شرق کوه مانشت این منطقه را محصور کرده است. گوریه پس از آبگیری سد کنگیر در سال ۱۳۹۴ غرقاب شد و جهانگیر در فاصله ۳۰۰ متری کنگیر باقی ماند [14] (شکل‌های ۱ و ۲).

نخستین مطالعات باستان‌شناسی در منطقه در سال ۱۹۷۰ توسط لویی واندنبرگ با کاوش در گورستان جوب گوهر، در ۵ کیلومتری شرق رود کنگیر انجام شد و در گزارشات خود به شرح مختصری از آثار دوره ساسانی اکتفا کرد [28]. پس از او فریا استارک از محدوده رودخانه کنگیر و آثار آن دیدن کرد و سپس راهی عراق شد [29]. بعد از انقلاب در سال ۱۳۸۰ بیان پیرانی به بررسی اجمالی منطقه پرداخت و بناهای کوریا، قلعه شمیران، گنبد جهانگیر و گوریه را شناسایی نمود. سپس در سال ۱۳۸۲ گوریه و جهانگیر با شماره ۸۴۶۳ و ۸۴۶۴ در فهرست آثار ملی به ثبت رسید. پس از آن در سال ۱۳۸۶ ابراهیم مرادی بررسی حوضه آبیگر سد کنگیر را انجام داد و سرانجام در سال ۱۳۹۴ با سرپرستی خانم خسروی کاوش نجات بخشی در محوطه جهانگیر انجام شد که تا سه فصل ادامه داشت. نتایج این کاوش‌ها عبارت‌اند از یافته‌های معماری و اشیاء منقول ارزشمندی که برای نخستین بار از دوره ساسانی در این محوطه گزارش شده است [14]. اگرچه برخی از منابع تاریخی

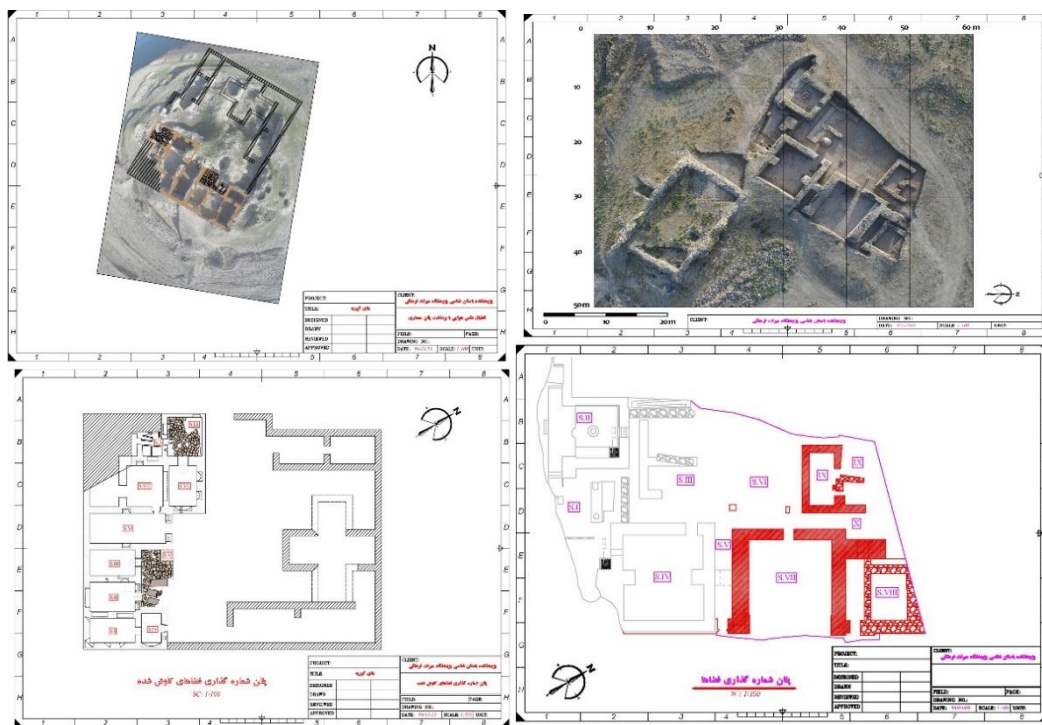


شکل ۱: موقعیت جغرافیای بناهای گنبد جهانگیر و گوریه [14]
Fig. 1: A map of Iran showing the geographical location of Jahangir dome and Gouriye

داده‌اند [25]. آقا علی گل و همکاران نیز به بررسی و تعیین مواد اولیه مصنوعات شیشه‌ای دوره اشکانی در کاخ شاتور [13] و همچنین آنالیز مهره‌ها و ظروف شیشه از محوطه صالح داود در شوش پرداخته‌اند [26]. بر اساس نتایج آنالیزها مشخص شد که شیشه‌های کاخ شاتور همگی از نوع شیشه‌های سیلیکا-سودا-آهک هستند که از خاکستر گیاهان به‌عنوان گدازآور استفاده شده است و احتمالاً این شیشه‌ها تولید بومی هستند [13]. اما آنالیز نمونه‌های به‌دست‌آمده از صالح داود نشان داد که در مهره‌های شیشه‌ای صالح داود از ماده معدنی ناترون و در ظروف به‌دست‌آمده از صالح داود از خاکستر گیاهان به‌عنوان ماده گدازآور استفاده شده است [26]. اما بررسی کتب و مقالات چاپ‌شده نشان می‌دهد که پژوهش‌های مرتبط با شیشه‌های دوره ساسانی بسیار محدود است. اولین آنالیزهایی که از شیشه‌های دوره ساسانی گزارش شده است مربوط به تحقیقات بریل است که در آن تعدادی از نمونه‌های به‌دست‌آمده در چند محوطه باستانی در عراق را گزارش کرده است [22]. همچنین میرتی و همکارانش ۸۹ نمونه از قطعات شیشه‌ای به‌دست‌آمده از کاوش‌های باستان‌شناسی در محوطه سلوکیه و وه اردشیر در عراق امروزی را با آزمایش ICP-MS مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند که قدمت این نمونه‌ها به دوره اشکانی و ساسانی برمی‌گردد [21]. نتایج آزمایش‌ها نشان داده که غالب نمونه‌های دوره ساسانی از نوع سیلیس-سودا-آهک هستند و از خاکستر گیاهان به‌عنوان مواد گدازنده استفاده می‌کردند [21-23]. همچنین سیمپسون در سال ۲۰۱۴ در مقاله‌ای به‌طور مبسوط به تولید و گردش شیشه در دوره ساسانی پرداخته است [19].

۳. موقعیت جغرافیایی گنبد جهانگیر و گوریه و پیشینه کاوش‌ها

بناهای گوریه و جهانگیر در مختصات جغرافیایی 38s:X:605380 و y:3752210 و 38s:X:606595 و y:3752695 در ۵۰ کیلومتری شمال غرب ایلام، بخش زرنه شهرستان ایوان، در فاصله حدود ۸۰۰ متری



شکل ۲: پلان بناهای گنبد جهانگیر (پلان سمت چپ) و گوریه (پلان سمت راست) [27]
 Fig. 2: Plan of the Dome of Jahangir (left plan) and Gouriych (right plan)

سالیابی روی مواد و آثار به‌دست‌آمده از این محوطه می‌توان نتیجه‌گیری کرد که قدمت این محوطه تاریخی به اواخر دوره ساسانی برمی‌گردد که تا قرن چهارم هجری حیات در آن ادامه داشته است. از کاوش‌های باستان‌شناسی در این دو بنا در ترانشه‌ها تعداد قابل توجهی شیشه به‌دست‌آمده است که تمامی آن‌ها طبقه‌بندی و پشت‌نویسی شده‌اند [14]. از میان قطعات فراوان شیشه‌ای یافت شده در این بناها، تعداد ۱۹ قطعه شاخص جهت مستندنگاری و انجام مطالعات آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است که مشخصات کامل این نمونه‌ها به همراه تصاویر و طرح نمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

آثار شیشه‌ای به‌دست‌آمده شامل عطر دان، پایه و بدنه ظروف، ظروف آرایشی و زیورآلات هستند. فرم بدنه ظروف به‌دست‌آمده غالباً استوانه‌ای و مدور بوده و اغلب بدون تزئین هستند. طیف رنگی این آثار شامل رنگ‌های سبز، شیری، زرد و رگه‌های قرمز و قهوه‌ای است. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود زیورآلات (النگوهای شیشه‌ای) همگی دارای پوشش صدفی

شکل‌گیری این بناها را به قرون اول و دوم هجری نسبت داده‌اند ولی یافته‌های اخیر باستان‌شناسی، ساسانی بودن این سازه‌های معماری را تأیید می‌نماید [14]. بنای جهانگیر مشتمل بر تالار، ایوان و اتاق‌ها و غیره است که با مصالح لاشه‌سنگ و ملات گچ نیم‌پخت نیم‌کوب به روش غوطه‌ور در ملات ساخته شده است. استفاده گسترده از گچ، آجر و شیوه‌های طاق‌زنی نشان‌دهنده میراث دوره ساسانی است [30]. از آثار به‌دست‌آمده از این محوطه علاوه بر گچ‌بری‌های تزئینی می‌توان به شیشه‌ها اشاره کرد.

۴. مواد و روش‌ها

۴-۱. معرفی نمونه‌های شیشه‌ای گنبد جهانگیر

و گوریه

نمونه‌های مورد مطالعه در پژوهش حاضر از کاوش‌های باستان‌شناسی سال ۱۳۹۶-۱۳۹۴ بناهای گنبد جهانگیر و گوریه به سرپرستی خانم لیلا خسروی به‌دست‌آمده است. این داده‌ها در میان آوارهای فروریخته در فضاهای مختلف این دو بنا به‌دست‌آمده است. بر اساس نتایج

جدول ۱: مشخصات فنی و ظاهری شیشه‌های ساسانی محوطه گنبد جهانگیر و گوریه
Table 1. Characteristics and optical photo of Sassanid glass in the Dome of Jahangir and Gourieh

شماره Number	اندازه (میلی‌متر) Size(mm)	رنگ Color	شکل - تزئینات Form-Decoration	طرح Drawing	تصاویر Optical photo
E.1 گوریه GOURYEH	بلندا: ۲۲-۲۲ پهنا: ۷/۱-۷/۱ قطر: ۲/۲-۲/۲	سبز Green	بدنه ظرف Container body فاقد تزئین No decorating		
E.2 گوریه GOURYEH	بلندا: ۲۹-۲۹ پهنا: ۱۹-۱۹ قطر: ۱/۱-۱/۱	سبز Green	بدنه ظرف، Container body فاقد تزئین No decorating		
E.3 گوریه GOURYEH	بلندا: ۳۹-۳۹ پهنا: ۱۴-۱۴ قطر: ۲/۲-۲/۲	سبز Green	کف گرد، Round floor فاقد تزئین No decorating		
E.4 گوریه GOURYEH	بلندا: ۴۶-۴۶ پهنا: ۴۱-۴۱ قطر: ۳-۳	سبز Green	کف ظرف مسطح، Flat bottom of the container فاقد تزئین No decorating		
E.5 گوریه GOURYEH	بلندا: ۲۵-۲۵ پهنا: ۶/۱-۶/۱ قطر: ۸/۱-۸/۱	آبی - سبز Blue- Green	بدنه استوانه‌ای شکل، Cylindrical body فاقد تزئین No decorating		
E.6 گنبد جهانگیر Jahangir Dome	بلندا: ۳۵-۳۵ پهنا: ۲۹-۲۹ قطر: ۱-۴	سبز Green	کف ظرف استوانه‌ای کف گرد Round bottom of cylindrical body		
E.7 گوریه GOURYEH	بلندا: ۳۱-۳۱ پهنا: ۱۹-۱۹ قطر: ۵-۵	آبی Blue	قسمتی از بدنه Part of the container body فاقد تزئین No decorating		
E.8-1 گوریه GOURYEH	بلندا: ۴۵-۴۵ پهنا: ۲۳-۲۳ قطر: ۴-۴	سبز Green	قسمتی از بدنه ظرف Part of the container body فاقد تزئین No decorating		
E.8-2 گوریه GOURYEH	بلندا: ۱۴-۱۴ پهنا: ۱۰-۱۰ قطر: ۲-۲	سبز Green	قسمتی از لبه ظرف Part of the container body		
E.9 گوریه GOURYEH	پهنا: ۳۰-۳۰ قطر: ۳-۳	سبز Green	النگو Bangle تزئینات مارپیچ Spiral ornament		

شماره Number	اندازه (میلی‌متر) Size (mm)	رنگ Color	شکل - تزیینات Form-Decoration	طرح Drawing	تصاویر Optical photo
E.10 گنبد جهانگیر Jahangir Dome	بلندا: 70-70 پهنا: 7-7 قطر: 5-5	سبز Green	النگو تخت، Flat Bangle فاقد تزیینات No decorating		
E.11 گوریه GOURYEH	بلندا: 31-31 پهنا: 21-21 قطر: 1-1	شیری رنگ Opaline	قسمتی از بدنه و کف استوانه‌ای، Part of cylindrical body and floor فاقد تزیینات No decorating		
E.12 گوریه GOURYEH	بلندا: 30-30 پهنا: 24-24 قطر: 3-3	شفاف دارای رگه‌های رنگی قرمز Transparent with red vein سبز-سبز Green	قسمتی از بدنه Part of the container body فاقد تزیینات No decorating		
E.13 گنبد جهانگیر Jahangir Dome	بلندا: 50-50 قطر: 7-7	سبز Green	النگو گرد Bangle		
E.14 گنبد جهانگیر Jahangir Dome	بلندا: 72-72 پهنا: 7-7 قطر: 5-5	سبز Green	النگو تخت، Flat bangle فاقد تزیینات No decorating		
E.15 گنبد جهانگیر Jahangir Dome	بلندا: 38-38 پهنا: 24-24 قطر: 2-2	سبز Green	قسمتی از بدنه ظرف، Part of the container body تزیینات کندوی Beehive decoration		
E.17 گوریه GOURYEH	بلندا: 79-79 پهنا: 40-40 قطر: 5-5	پوشش شنی Sand Cover	کف ظرف Bottom of the container دارای تزیینات دایره‌ای Circular decorations		
E.18 گوریه GOURYEH	بلندا: 47-47 پهنا: 36-36 قطر: 5-5	شفاف دارای رگه‌های رنگی، سبز، قرمز، قهوه‌ای Transparent with green, red ,brown veins	کف مسطح Flat floor		
E.19 گنبد جهانگیر Jahangir Dome	بلندا: 47-47 پهنا: 30-30 قطر: 2-2	پوشش شنی Sand cover	قسمتی از کف ظرف، Part of the bottom of the container فاقد تزیینات No decorating		



شکل ۳: تصویر سمت راست قسمتی از بدنه ظرف محوطه گنبد جهانگیر و گوریه، تصویر سمت چپ پیاله با تراش لوزی استان گیلان، قرن ۵ تا ۷ میلادی [1]

Fig. 3: Right: The image of a fragment of the body of the container in the Jahangir Dome and Gouriye, Left: the image of a cup with a rhinestone in Gilan Province, 5th to 7th century



شکل ۴: تصویر سمت راست متعلق به محوطه گنبد جهانگیر و گوریه است، تصویر سمت چپ پیاله با تراش دایره‌های متحدالمرکز، گیلان، قرن ششم میلادی [1]

Fig. 4: Right: The image of a fragment of glass belongs to the Jahangir Dome and Gouriye, Left: image of the cupola with concentric circles, Gilan, 6th century AD

میلادی برمی‌گردد [1] (شکل ۴). دو مورد از الگوها نیز دارای تزئینات شیاری (نمونه‌های ۱۰ و ۱۴) و دو نمونه نیز دارای تزئینات ماریچی هستند (نمونه‌های ۹ و ۱۳).

۴-۲. گاهنگاری مطلق بناهای گنبد جهانگیر و

گوریه

برای گاهنگاری مطلق این بنا سه نمونه از سفال موسوم به سفال ساسانی که در فضاهای مختلف گنبد جهانگیر به‌دست‌آمده همراه با دو نمونه از آجرهای به‌دست‌آمده از بنای گنبد جهانگیر به روش گرمالیان (ترمولومینسانس) مورد آزمایش قرار گرفتند که نتایج آن تاریخ بین ۵۴۹ تا ۶۵۰ بعد از میلاد (± 60) را نشان داده است (جدول ۲) با توجه به اینکه حکومت ساسانیان در ۲۲۴ میلادی تأسیس شد و قدرت آن‌ها تا ۶۵۱ میلادی ادامه داشت [31]، نتایج آزمایش‌های سالیابی نشان می‌دهد که حیات

هستند (نمونه‌های ۹، ۱۰، ۱۳، و ۱۴).

همچنین در برخی از قطعات بدنه نیز آثار صدفی مشاهده می‌شود (نمونه‌های ۱ و ۲ و ۳ و ۴ و ۷ و ۸). همچنین در دو نمونه که کف عطردان هستند نیز آثار صدفی دیده می‌شود (نمونه ۶ و ۱۱). اما در دو نمونه از کف ظروف به‌دست‌آمده، سطح آن‌ها پوشیده از شن است (نمونه‌های ۱۷ و ۱۸). همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود اغلب این اشیاء ساده و بدون تزئین هستند. اما در دو نمونه تزئینات کندویی شکل و دایره‌های متحدالمرکز مشاهده می‌شود (نمونه‌های ۱۵ و ۱۷). تزئینات ظرف نمونه ۱۵ شبیه تزئینات ساغر ساقه‌دار تراش‌دار به‌دست‌آمده از گیلان است که قدمت آن به قرن پنجم تا هفتم میلادی برمی‌گردد [1] (شکل ۳). تزئینات ظرف نمونه ۱۷ شبیه پیاله‌های به‌دست‌آمده از گیلان با تراش دایره‌های متحدالمرکز است که قدمت آن به قرن ششم

جدول ۲: جدول گاهنگاری سفال‌ها و آجرهای محوطه گوریه و گنبد جهانگیر [14]
Table 2: Chronology of the potteries and bricks of the Gouriye and Jahangir Dome

شماره No.	نوع نمونه Sample Type	عمق (سانتیمتر) (Depth(cm)	محوطه Site	درصد اکسید پتاسیم K ₂ O(wt.%)	غلظت توریم (ppm) Thorium concentration(ppm)	غلظت اورانیوم Uranium (ppm) concentration	گاهنگاری (میلادی) Chronology
1	سفال Pottery	۱۸۰- تا -۲۵۰	فضای ۹ جهانگیر Jahnagir Space	2.07	3.21	40.04	551 ± 606 496
2	سفال Pottery	۲۵- از سطح گمانه From the borehole surface	گور شماره ۱ جهانگیر Grave Jahangir	50.77	3.52	5.97	549 ± 689 489
3	سفال Pottery	مربوط به استقرار کوچ‌نشینی در سال‌های اخیر Settlements of recent years	آوارهای فضای ۲ جهانگیر Space debris of Jahabgir	5.22	5.22	3.81	1792 ± 1615 1769
4	آجر Brick	-	آوارهای سقف فضای ۴ جهانگیر Roof debris of Jahangir	1.96	2.27	4.94	557 ± 631 483
5	آجر Brick	-	آوارهای سقف فضای ۵ جهانگیر Rood debris of Jahangir	1.75	2.88	4.66	569 ± 612 526

و در حد چند میلی‌متر از نمونه‌های مورد بررسی جدا کرده و از سطح مقطع با استفاده از روش میکروپیکسی آنالیز شدند. سپس با استفاده از توزیع عنصری عناصر موجود در نمونه، طیف به‌دست‌آمده از قسمتی که عاری از هرگونه خوردگی است برای محاسبه غلظت وزنی عناصر استخراج شده است. آنالیز میکروپیکسی یکی از دقیق‌ترین روش‌های آنالیز برای اندازه‌گیری ترکیبات عنصری نمونه‌های مورد مطالعه برای عناصر با $z > 10$ با دقت ppm است. روش آنالیز میکروپیکسی بر مبنای تحریک اتم‌های تشکیل‌دهنده نمونه مورد مطالعه توسط باریکه پروتون‌های پرانرژی که توسط شتاب‌دهنده واندوگراف تولید می‌شود استوار است. میکروپیکسی یا «گسیل پرتو X در اثر برانگیختگی با باریکه پروتونی با ابعاد میکرون» روش بسیار توانمندی برای آنالیز بس عنصری عناصر از سدیم تا اورانیوم است. در این روش آنالیز، نمونه مورد بررسی تحت تابش باریکه پروتون قرار

این دو بنا از اواخر دوره ساسانی شروع شده و تا قرن چهارم هجری ادامه داشته و پس از آن مورد استفاده عشایر کوچ‌روها بوده است. طبق متون تاریخی و مطالعات سائزموکتونیکی و مورفوتکتونیکی انجام شده، علاوه بر عوامل سیاسی- اجتماعی و محیطی، وقوع زلزله در منطقه نیز می‌تواند از دلایل افول حیات در آن‌ها باشد [27].

۳-۴. شرایط و روش آنالیز میکروپیکسی

به منظور مطالعه و شناسایی ترکیبات عنصری اشیاء شیشه‌ای به‌دست‌آمده از محوطه ساسانی گنبد جهانگیر و گوریه، ۱۹ نمونه از شیشه‌های به‌دست‌آمده در کاوش‌های باستان‌شناسی این محوطه با استفاده از روش میکروپیکسی در آزمایشگاه واندوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای آنالیز شده است. به دلیل خوردگی سطحی شدید نمونه‌ها و با توجه به اینکه نمونه‌ها مورد بررسی مطالعاتی بودند، نمونه‌هایی در ابعاد کوچک

۵. تحلیل و تشریح داده‌ها

تعداد ۱۹ قطعه از شیشه‌های به‌دست‌آمده از محوطه گنبد جهانگیر، با استفاده از روش میکروپیکسی مورد آزمایش قرار گرفت. عناصر شناسایی شده در این نمونه‌ها شامل: اکسید سدیم (Na_2O)، اکسید منیزیم (MgO)، اکسید آلومینیوم (Al_2O_3)، اکسید سیلیسیم (SiO_2)، اکسید فسفر (P_2O_5)، اکسید گوگرد (SO_3)، کلر (Cl)، اکسید پتاسیم (K_2O)، اکسید کلسیم (CaO)، اکسید تیتانیوم (TiO_2)، اکسید منگنز (MnO)، اکسید آهن (Fe_2O_3) و اکسید مس (Cu_2O) است که درصد وزنی این عناصر برای نمونه‌های مختلف به‌صورت اکسید در جدول ۳ ارائه شده است.

با توجه به جدول ۳ مشاهده می‌شود که ترکیبات عمده تشکیل‌دهنده شیشه‌های این دو محوطه، اکسید سیلیسیم با درصد وزنی ۷۱/۰۷-۶۰/۴۱، اکسید سدیم با درصد وزنی ۱۹/۶۳-۱۱/۴۸ و اکسید کلسیم با درصد وزنی ۸/۱۲-۳/۶۸ است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تمام شیشه‌های آنالیز شده از این محوطه‌ها از نوع شیشه‌های سیلیکا-سودا-آهک هستند. از طرفی همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود در این نمونه‌ها درصد وزنی اکسید منیزیم بین ۶/۳۸-۰۴/۳ و درصد وزنی اکسید پتاسیم بین ۵/۱۳-۱/۷۷ متغیر است. بنابراین با توجه به اینکه درصد وزنی این دو عنصر در نمونه‌های آنالیز شده بیشتر از ۱/۵ درصد است، این شیشه‌ها از نوع شیشه‌های سیلیکا-سودا-آهک هستند که منبع تأمین اکسید سدیم آن‌ها که نقش‌گذار آور را ایفا می‌کند خاکستر حاصل از گیاهان رشد یافته در خاک‌های شور بوده است [35]. نکته مهمی که در مورد این شیشه‌ها باید اشاره کرد و در جدول ۳ نیز مشاهده می‌شود، درصد وزنی اکسید منیزیم موجود در این نمونه‌ها است. پژوهشگران بر اساس مطالعات آزمایشگاهی و اندازه‌گیری ترکیبات عنصری که تاکنون بر روی شیشه‌های دوره ساسانی انجام داده‌اند به این نتیجه رسیده‌اند، یکی از مهم‌ترین شاخص‌های شیشه‌های دوره ساسانی بالا بودن درصد وزنی اکسید منیزیم در این شیشه‌ها است. بررسی‌ها نشان می‌دهد میزان اکسید منیزیم در این نمونه‌ها غالباً بیشتر از ۳/۵

می‌گیرد. در اثر برخورد باریکه پروتون با اتم‌های نمونه مورد آنالیز، پرتو Xهای مشخصی از نمونه گسیل می‌شود که انرژی این پرتوهای X، نوع عنصر موجود در نمونه و تعداد پرتوهای X با انرژی معین غلظت عناصر موجود در نمونه را مشخص می‌کند [32]. علاوه بر بس عنصری بودن، به دلیل غیر مخرب بودن و همچنین سریع و حساس بودن، روش میکروپیکسی در آنالیز نمونه‌های باستانی کمک بسیار زیادی به باستان‌شناسان می‌نماید [33,34]. در این پژوهش آزمایش میکروپیکسی با باریکه میکرونی پروتون با انرژی ۵/۲ MeV و شدت‌جریمانی در حدود ۵۰-۱۰۰ pA که توسط شتاب‌دهنده واندوگراف ۳ MV در پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای تولید می‌شود، انجام شده است. همچنین قطر باریکه‌ی پروتون در این آزمایش کمتر از ۱۰ میکرون بوده است. برای انجام میکروپیکسی نیز از آشکارساز Si(Li) با قدرت تفکیک ۱۵۰ eV که در زاویه‌ی ۱۳۵ درجه نسبت به پرتوهای پروتون فرودی قرار گرفته، استفاده شده است. اصول فیزیکی و نحوه انجام این روش آنالیز به‌طور کامل، در مقاله‌ای در مجله پژوهش باستان‌سنجی، بررسی و ارائه شده است [13]. همچنین برای اندازه‌گیری مقدار خطا و عدم دقت در اندازه‌گیری درصد وزنی عناصر تشکیل‌دهنده نمونه‌های مورد بررسی در این پژوهش، نمونه‌های استاندارد مربوط به شیشه از موزه کورنینگ نیویورک تهیه شده و هم‌زمان و تحت شرایط یکسان با نمونه‌ها، مورد آنالیز قرار گرفتند. مقادیر خطا نسبی و انحراف معیار (standard deviation) هر عنصر برای عناصر اندازه‌گیری شده در نمونه‌های استاندارد در مقاله دیگری در مجله پژوهش باستان‌سنجی، بررسی و ارائه شده است [26]. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که با روش میکروپیکسی قادر هستیم ترکیبات عناصر اصلی مانند اکسید سیلیسیم، اکسید سدیم و اکسید کلسیم را با خطایی کمتر از ۵ درصد 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 و با خطایی کمتر از ۱۰ درصد اندازه‌گیری کنیم.

جدول ۳: مقادیر عناصر موجود در نمونه‌های آنالیز شده به صورت اکسید و برحسب درصد وزنی (nd=not detected)
Table 3: The elemental composition of analyzed samples in weight percent (wt.%) in the oxide form

نمونه‌ها Samples	رنگ اصلی Main color	محوطه Site	اکسید سدیم Na ₂ O	اکسید منیزیم MgO	اکسید آلومینیم Al ₂ O ₃	اکسید سیلیسیم SiO ₂	اکسید فسفر P ₂ O ₅	اکسید گوگرد SO ₃	کلر Cl	اکسید پتاسیم K ₂ O	اکسید کلسیم CaO	اکسید تیتانیوم TiO ₂	اکسید منگنز MnO	اکسید آهن Fe ₂ O ₃	اکسید مس Cu ₂ O
E1	سبز تیره Dark Green	تپه گوریه Gouryeh	12.85	3.04	3.40	71.07	1.00	0.23	0.38	2.43	4.49	0.09	0.04	0.97	nd
E2	سبز Green	تپه گوریه Gouryeh	13.82	4.63	2.57	70.36	1.20	0.23	0.47	2.20	4.08	nd	0.03	0.40	nd
E3	سبز Green	تپه گوریه Gouryeh	13.50	3.37	2.29	69.21	0.81	0.31	0.72	3.43	5.47	0.08	0.08	0.71	nd
E4	سبز Green	تپه گوریه Gouryeh	11.97	5.74	2.40	71.01	1.11	0.30	0.52	1.77	4.56	0.03	0.33	0.25	nd
E5	آبی - سبز Blue- Green	تپه گوریه Gouryeh	12.25	5.74	2.85	68.90	1.04	0.21	0.44	1.99	5.42	0.06	0.53	0.53	nd
E6	سبز Green	گنبد جهانگیر Jahangir Dome	13.96	4.64	4.00	66.71	0.88	0.30	0.77	2.06	5.45	0.12	0.04	1.07	nd
E7	آبی Blue	تپه گوریه Gouryeh	12.17	4.20	3.48	69.19	1.26	0.31	0.53	4.15	3.68	0.07	0.16	0.72	0.04
E8-1	سبز Green	تپه گوریه Gouryeh	14.23	4.46	3.66	64.06	1.09	0.36	0.55	2.23	8.12	0.16	0.04	0.98	nd
E8-2	سبز Green	تپه گوریه Gouryeh	14.42	4.23	3.58	63.97	1.14	0.45	0.56	2.28	7.96	0.13	0.32	0.90	0.03
E9	سبز Green	تپه گوریه Gouryeh	16.21	3.93	2.37	62.81	1.05	0.68	0.94	3.54	7.61	0.08	0.03	0.72	nd
E10	سبز Green	گنبد جهانگیر Jahangir Dome	18.20	5.12	2.67	62.25	1.14	0.62	0.47	4.01	4.86	0.06	0.02	0.57	nd
E11	بدون رنگ Without color	تپه گوریه Gouryeh	13.11	6.34	2.76	68.50	0.86	0.35	0.52	2.23	4.68	0.06	0.32	0.25	nd
E12	بدون رنگ Without color	تپه گوریه Gouryeh	12.44	6.00	2.76	69.18	1.06	0.39	0.53	2.14	4.98	0.02	0.27	0.22	nd
E13	سبز Green	گنبد جهانگیر Jahangir Dome	16.62	4.52	3.34	62.96	1.10	0.60	0.54	3.61	4.87	0.08	nd	0.86	nd
E14	سبز Green	گنبد جهانگیر Jahangir Dome	19.63	4.88	2.74	60.41	1.08	0.48	0.66	4.19	4.78	0.11	0.02	0.66	0.03
E15	سبز Green	گنبد جهانگیر Jahangir Dome	15.26	4.74	4.64	64.22	0.89	0.38	0.64	2.53	5.33	0.16	0.03	1.09	nd
E17	سبز Green	گنبد جهانگیر Jahangir Dome	16.57	6.38	2.85	64.22	0.44	0.13	0.79	2.19	5.88	0.02	0.22	0.31	nd
E18	بدون رنگ Colorless	تپه گوریه Gouryeh	11.48	5.01	2.72	71.02	0.43	0.16	0.62	1.83	5.58	0.06	0.68	0.34	nd
E19	بدون رنگ Colorless	گنبد جهانگیر Jahangir Dome	15.73	5.18	3.59	60.71	0.59	0.37	0.68	5.13	6.20	0.06	0.33	0.90	nd

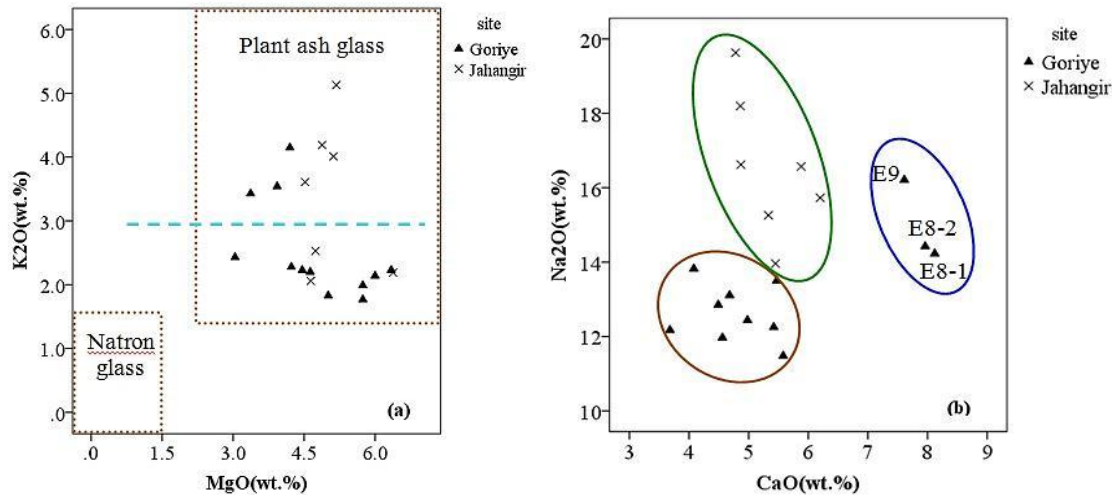
ماده گداز‌آور و سیلیس می‌توان از نمودارهای ترکیبی که یک محور آن معرف تغییرات در ترکیبات موجود در گداز‌آور و محور دیگر معرف تغییرات در ترکیبات موجود در سیلیس است، استفاده کرد.

۵-۱. تعیین نوع شیشه‌ها و ترکیبات سودا

شیشه‌های سیلیکا-سودا-آهک بر اساس طبقه‌بندی Sayre و Smith به دو گروه عمده تقسیم می‌شوند که مبنای این طبقه‌بندی درصد وزنی اکسید منیزیم و اکسید پتاسیم موجود در شیشه‌های آنالیز شده است [35]. این دو اکسید در ترکیب شیشه‌های تاریخی از اکسید سدیمی که به‌عنوان ماده گداز‌آور در فرایند ساخت شیشه استفاده می‌شود، نشأت می‌گیرد [37]. در صورتی که برای تأمین سودا در شیشه‌های تاریخی از ماده معدنی بی‌کربنات سدیم (ناترون) استفاده شده باشد، درصد وزنی این دو اکسید در شیشه‌های تولیدشده بسیار کم (کمتر از ۱/۵٪) خواهد بود، که به این شیشه‌ها شیشه‌های ناترونی (LMG=low magnesium glass) گفته می‌شود [35-38]. از طرفی اگر از خاکستر گیاهان برای تأمین سودای موردنیاز استفاده شده باشد درصد وزنی این دو اکسید بیشتر از ۲/۵٪ خواهد بود که به این نوع شیشه‌ها، شیشه‌های به‌دست‌آمده از خاکستر گیاهان (HMG=high magnesium glass) و یا plant-ash-silica-soda-lime گفته می‌شود [35]. بنابراین لازم است برای بررسی و مشخص نمودن نوع شیشه‌های به‌دست‌آمده در محوطه‌های باستانی گنبد جهانگیر و گوریه از تغییرات درصد وزنی اکسید منیزیم برحسب اکسید پتاسیم اندازه‌گیری شده در نمونه‌ها استفاده نماییم. با توجه به شکل ۵a می‌توان مشاهده کرد که میزان اکسید منیزیم تمام نمونه‌های آنالیز شده بیشتر از ۲/۵٪ و به جزء دو نمونه بیشتر از ۳/۵٪ است و بین ۳۸-۶۰٪ درصد تغییر می‌کند. بنابراین همان‌طور که در شکل ۵a مشخص شده است تمام شیشه‌های آنالیز شده از این دو محوطه، در گروه شیشه‌های سیلیکا-سودا-آهک ساخته‌شده با استفاده از خاکستر گیاهان قرار می‌گیرند. اما بر اساس میزان اکسید پتاسیم موجود در

درصد است. همچنین مشخص شده است که درصد وزنی منیزیم در این نمونه‌ها غالباً از درصد وزنی اکسید پتاسیم بیشتر است [22,23,32-36,24-31] با نگاهی به جدول ۳ کاملاً مشخص است که هر دوی این مشخصه‌ها در نمونه‌های آنالیز شده مشاهده می‌شود. بنابراین نتیجه اندازه‌گیری ترکیبات عنصری این نمونه‌ها با نتایج به‌دست‌آمده از سالیابی نمونه‌ها که دوره تاریخی نمونه‌ها را دوره ساسانی تخمین زده بود کاملاً سازگار است.

تغییرات گسترده در درصد وزنی اکسید سیلیسیم، اکسید سدیم، اکسید پتاسیم و اکسید منیزیم نشان می‌دهد که برای تأمین مواد اولیه مورد استفاده در ساخت این شیشه‌ها از منابع مختلف سیلیس و سودا که دو ترکیب عمده شیشه را تشکیل می‌دهند، استفاده شده است. البته لازم به ذکر است که در شیشه‌های سیلیکا-سودا-آهک منبع اصلی تأمین اکسید کلسیم (آهک) نیز همان ماده گداز‌آور (خاکستر) است. اما برای بررسی این تنوع و تعدد منابع اولیه از نمودارهای پراکندگی دوبعدی عناصری که به‌عنوان شاخص تعیین‌کننده هر ماده اولیه هستند استفاده می‌کنیم. این شاخص‌ها با توجه به ترکیبات عنصری مواد اولیه تعیین می‌شوند. با توجه به اینکه ماده اولیه مورد استفاده به‌عنوان گداز‌آور که از خاکستر گیاهان به دست می‌آید، به‌طور عمده از اکسیدهای سدیم، منیزیم، پتاسیم و کلسیم تشکیل شده است، بررسی روند تغییرات هر یک از این عناصر در نمونه‌های مورد مطالعه می‌تواند اطلاعات مهمی از تنوع ماده اولیه و همچنین فرمولاسیون‌های مختلف مورد استفاده در ساخت شیشه را فراهم کند. همچنین به علت اینکه سیلیس مورد استفاده در ساخت به‌طور عمده از اکسید سیلیسیم تشکیل شده است و عناصری مانند اکسید آلومینیم، اکسید آهن، اکسید تیتانیم و اکسید منگنز به‌عنوان ناخالصی در آن یافت می‌شوند، برای بررسی تنوع و تفاوت موجود در منابع سیلیس استفاده‌شده در فرایند ساخت یکی از بهترین فاکتورها استفاده از نمودار تغییرات مقدار اکسید سیلیسیم برحسب اکسید آلومینیم یا اکسید آهن و یا اکسید تیتانیم است. همچنین برای بررسی هم‌زمان تفاوت‌های موجود در



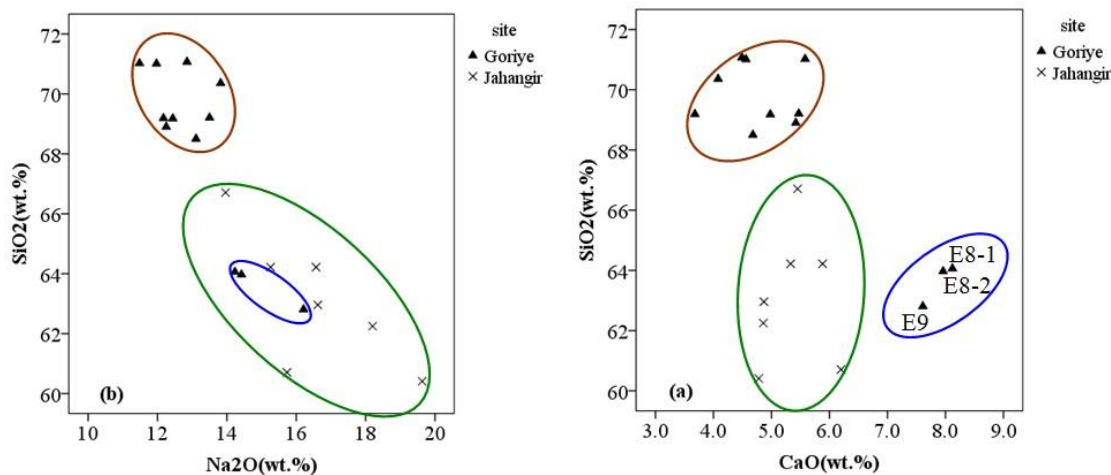
شکل ۵: a- تغییرات درصدوزنی اکسید منیزیم برحسب اکسید پتاسیم، b- تغییرات مقدار اکسید کلسیم برحسب اکسید سدیم در نمونه‌های آنالیز شده از محوطه‌های گنبد جهانگیر و گوریه

Fig 5: Scatter plot in wt.% of (a): magnesium oxide(MgO) versus potassium oxide(K₂O), (b): calcium oxide(CaO) versus sodium oxide (Na₂O) in analyzed samples from Jahangir Dome and Gouriye

نمونه‌ها همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، نمونه‌های آنالیز شده به دو گروه جدا از هم تقسیم شده‌اند. در یک گروه تغییرات میزان اکسید پتاسیم بین ۱/۷۷-۲/۵۳ درصد است و بیشتر نمونه‌های آنالیز شده از گوریه در این گروه قرار گرفته‌اند. در گروه دیگر تغییرات این اکسید بین ۳/۴۳-۵/۱۳ درصد است و با توجه به شکل مشخص است که غالب نمونه‌های گنبد جهانگیر در این گروه جای گرفته‌اند. بنابراین این جدا شدن نمونه‌ها بر اساس اکسید پتاسیم نشان‌دهنده استفاده از گداز‌آوره‌های متفاوت در فرایند تولید شیشه در این دو محوطه است [39]. البته باید به این نکته اشاره شود که ترکیبات عنصری مختلف گداز‌آورها به نوع گیاه و همچنین خاکی که گیاه در آن رشد کرده بستگی دارد [40].

همچنین برای به دست آوردن اطلاعات بیشتر در مورد ترکیبات تشکیل‌دهنده و خصوصیات گداز‌آورهای استفاده شده در این نمونه‌ها تغییرات درصد وزنی اکسید کلسیم برحسب اکسید سدیم اندازه‌گیری شده در نمونه‌ها، بررسی شد [16]. همان‌طور که در شکل ۵b مشخص شده است بر اساس تغییرات این دو اکسید نمونه‌های آنالیز شده به سه گروه کاملاً متمایز و جدا تقسیم می‌شوند. غالب نمونه‌های به دست آمده از گوریه

(به جزء سه نمونه) در گروه اول قرار می‌گیرند که با بیضی قرمز رنگ نشان داده شده است. در نمونه‌های این گروه درصد وزنی اکسید سدیم و اکسید کلسیم تغییر زیادی ندارند. اکسید سدیم دارای مقدار میانگین ۱۲/۶۲٪ است که بین ۱۳/۸۲-۱۱/۴۸٪ تغییر می‌کند و اکسید کلسیم دارای میانگین وزنی ۴/۷۷٪ است که مقدار آن در بازه ۳/۶۸-۵/۵۸ متغیر است. اما تمام نمونه‌های گنبد جهانگیر در گروه دوم قرار می‌گیرند که با بیضی سبز رنگ نشان داده شده است. در نمونه‌های این گروه اگرچه درصد وزنی اکسید کلسیم تغییرات زیادی ندارد اما تغییرات اکسید سدیم بسیار زیاد است. اکسید سدیم دارای مقدار میانگین ۱۶/۵۷ درصد است که بین ۱۳/۹۶-۶۳/۱۹٪ تغییر می‌کند و اکسید کلسیم دارای میانگین وزنی ۵/۳۴٪ است که مقدار آن در بازه ۶/۲۰-۴/۷۸ متغیر است. بنابراین کاملاً مشخص است که نمونه‌های گوریه با گداز‌آوری که در ترکیب آن اکسید سدیم به مراتب کمتر از نمونه‌های گنبد جهانگیر است ساخته شده‌اند. همچنین گروه سوم که سه نمونه از نمونه‌های گوریه را شامل می‌شود، با بیضی آبی مشخص شده است. در این گروه نمونه‌ها دارای اکسید کلسیم بیشتری نسبت به دو گروه ۱ و ۲ هستند و مقدار اکسید سدیم این گروه نیز از گروه اول بیشتر و از گروه



شکل ۶: a- تغییرات درصد وزنی اکسید کلسیم برحسب اکسید سیلیسیم، b- تغییرات مقدار اکسید سدیم برحسب اکسید سیلیسیم در نمونه‌های آنالیز شده از محوطه‌های گنبد جهانگیر و گوریه

Fig 6: Scatter plot in wt.% of (a): calcium oxide (CaO) versus silicon oxide (SiO₂), (b): sodium oxide (Na₂O) versus silicon oxide (SiO₂) in analyzed samples from Jahangir Dome and Gouriye

سیلیسیم در گروه یک که شامل اکثر نمونه‌های گوریه بود بیشتر از دو گروه دیگر است. همان‌طور که در این شکل مشخص است درصد وزنی اکسید سیلیسیم در گروه یک بین ۷۰/۰۷-۶۸/۵۰٪ تغییر می‌کند که میانگین این اکسید در این گروه ۶۹/۸۳٪ است. در گروه دوم اکسید سیلیسیم بین ۶۶/۷۱-۶۰/۴۱٪ تغییر می‌کند که میانگین آن حدود ۶۳٪ است. در گروه سوم نیز اکسید سیلیسیم دارای میانگین ۶۳/۶۱٪ است. بنابراین بر اساس شکل‌های ۵ و ۶ می‌توان مشخصه اصلی شیشه‌های محوطه جهانگیر را اکسید سیلیسیم بالا و اکسید سدیم پایین و شیشه‌های گوریه را اکسید سیلیسیم پایین و اکسید سدیم بالا ذکر کرد. در جدول ۴ میانگین درصد وزنی این سه گروه برای مقایسه آسان‌تر ارائه شده است و عناصری که نشان‌دهنده ویژگی‌های شاخص هر گروه است پررنگ‌تر نشان داده است.

۵-۲. ترکیبات منابع سیلیس در نمونه‌ها

اکسید سیلیسیم (سیلیس) عمده‌ترین ماده تشکیل‌دهنده شیشه‌های نوع سیلیکا-سودا-آهک است که معمولاً بین ۷۵-۶۰ درصد وزنی شیشه‌های تاریخی و قدیمی را تشکیل می‌دهد و برای تهیه آن از شن و ماسه یا کوارتز استفاده می‌شده است [16]. برای بررسی ترکیبات و

دوم کمتر است. بنابراین بر اساس این نمودار کاملاً مشخص است اگرچه این دو محوطه در نزدیکی هم قرار دارند اما در ساخت شیشه از مواد اولیه کاملاً متفاوتی استفاده کرده‌اند. علت این تغییرات و تفاوت‌ها شاید به بازه زمانی نسبتاً طولانی که در قدمت نمونه‌ها مشاهده می‌شود وابسته باشد. زیرا بر اساس سالیابی نمونه‌ها اختلاف بین این نمونه‌ها حدود ۴۰۰ سال است و در این دوره نسبتاً طولانی کاملاً منطقی به نظر می‌رسد که مواد اولیه مورد استفاده دچار تغییرات شده باشد. مشابه چنین تغییراتی در مواد مورد استفاده در شیشه‌های ساسانی آنالیز شده از محوطه تاریخی وه اردشیر در عراق نیز گزارش شده است [21,36]. در شکل ۶ برای بررسی بیشتر ترکیبات شیشه‌های ساخته شده در دو محوطه مورد مطالعه، از تغییرات درصد وزنی اکسید کلسیم برحسب اکسید سیلیسیم، و تغییرات اکسید سدیم برحسب اکسید سیلیسیم در نمونه‌های آنالیز شده از محوطه‌های گنبد جهانگیر و گوریه استفاده می‌کنیم [41].

همان‌طور که در شکل ۶ به‌طور کاملاً واضح دیده می‌شود طبقه‌بندی و گروه‌بندی که در بالا انجام شد، بر اساس تغییرات اکسید سیلیسیم برحسب اکسید سدیم و اکسید کلسیم دوباره تأیید می‌شوند. بر اساس شکل‌های ۶a و ۶b مشخص شده است که درصد وزنی اکسید

جدول ۴: مقادیر میانگین عناصر موجود در سه گروهی که در نمونه‌های آنالیز شده مشخص شده اند به صورت اکسید و بر حسب درصد وزنی
Table 4: The mean elemental composition in three identified groups in weight percent (wt.%) in the oxide form

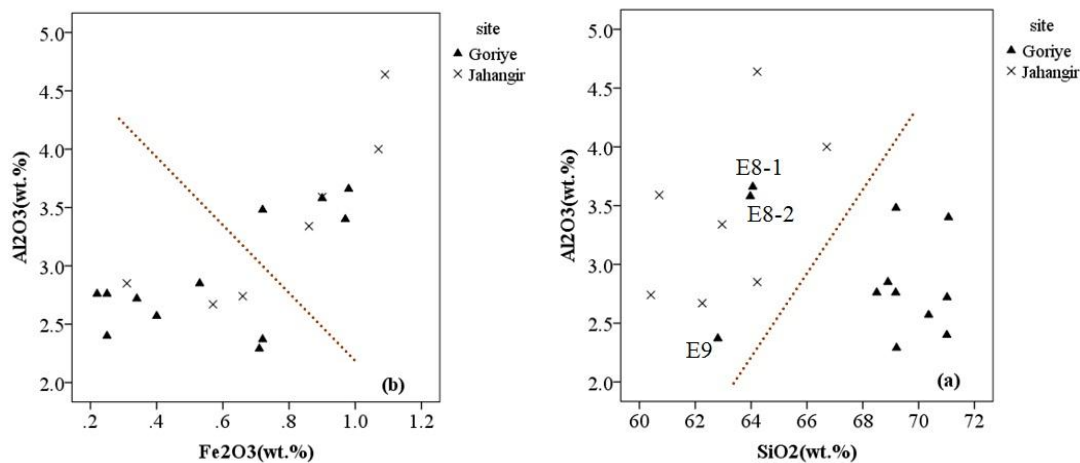
Group	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	Cu ₂ O
G1: Gouriye-main group	12.62	4.90	2.80	69.83	0.97	0.28	0.53	2.46	4.77	0.05	0.27	0.49	-
G2: Jahangir	16.57	5.07	3.40	63.07	0.87	0.41	0.65	3.39	5.34	0.09	0.09	0.78	-
G3: Gouriye-outliers	14.95	4.21	3.20	63.61	1.09	0.50	0.68	2.68	7.90	0.12	0.13	0.87	0.01

آهن بین ۲۰ تا ۷۰٪ است و در گروه دیگر این تغییرات بین ۰/۷۰ تا ۱/۱٪ است. اما نکته‌ای که باید اشاره شود این است که بر اساس میزان اکسید آهن نمونه‌های دو محوطه به خوبی از هم جدا نمی‌شوند. بنابراین بر اساس تغییرات ترکیبات سودا و سیلیس به طور خلاصه می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که نمونه‌های گروه یک که غالباً نمونه‌های گوریه را در بر می‌گیرد از نظر ترکیب عنصری دارای اکسید سیلیسیم بیشتر نسبت به نمونه‌های گنبد جهانگیر هستند ولی درصد سودای این نمونه‌ها کمتر است. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که خلوص منبع سیلیس و سودای استفاده شده در نمونه‌های گروه یک نسبت به گروه دوم بالاتر است. بنابراین نتیجه دیگری که می‌توان گرفت این است که در فرایند ساخت شیشه‌های مربوط به دو محوطه از منابع تأمین کننده سیلیسی 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 [44].

۳-۵. تعیین عناصر رنگزا و رنگبر در نمونه‌ها

در گذشته در صنعت شیشه‌گری، برای ایجاد رنگ‌های متنوع از عناصر رنگزا که غالباً شامل اکسیدهای فلزی مانند اکسیدهای آهن، مس و کبالت بوده است، استفاده می‌شده است و هم‌اکنون نیز در ساخت شیشه‌های مدرن این رهیافت ادامه دارد [45]. همچنین در صورتی که شیشه گران خواهان از بین بردن رنگ‌های ناخواسته ایجاد شده در شیشه که معمولاً از ناخالصی‌های موجود در سیلیس ناشی می‌شده است، بودند از عناصر رنگبر و بی‌رنگ کننده مانند اکسید منگنز یا اکسید آنتیموان و یا ترکیب این دو اکسید استفاده می‌کردند [46]. این عناصر

تفاوت‌های موجود در منابع سیلیس استفاده شده در نمونه‌های گنبد جهانگیر و گوریه و همچنین مشخص کردن منابع مختلف تأمین سیلیس، یکی از بهترین شاخص‌ها بررسی تغییرات وزنی اکسید سیلیسیم بر حسب مقدار اکسید آلومینیم در نمونه‌های آنالیز شده است. این شاخص بر اساس این فرض اساسی استوار است که نمونه‌هایی تولید شده از یک منبع مشخص سیلیس، معمولاً در عناصری که وجود آن‌ها در شیشه ناشی از سیلیس است، دارای ترکیبات عنصری تقریباً مشابهی هستند [42]. بر این اساس همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است بر پایه تغییرات درصد وزنی اکسید سیلیسیم بر حسب اکسید آلومینیم و همچنین تغییرات اکسید آهن بر حسب اکسید آلومینیم مشخص است که حداقل از دو منبع متفاوت سیلیس در ساخت نمونه‌های گنبد جهانگیر و گوریه استفاده شده است. همان‌گونه که در شکل ۷a دیده می‌شود در نمونه‌های به دست آمده از گوریه که در گروه ۱ قرار می‌گیرند تغییرات میزان سیلیس نسبت به گروه دوم کمتر و مقدار میانگین اکسید سیلیسیم نسبت به گروه دوم حدود ۷٪ بیشتر است. همچنین تغییرات ناخالصی اکسید آلومینیم در این نمونه‌ها در گستره بسیار کم و بین ۲/۲۹ تا ۴/۴۸٪ تغییر می‌کند. این در حالی است که در نمونه‌های گنبد جهانگیر مقدار اکسید سیلیسیم نسبت به گروه یک پایین‌تر ولی بازه تغییرات اکسید آلومینیم نسبت به گروه یک بیشتر است به طوری که این اکسید بین ۴/۴۶-۲/۶۷٪ متغیر است. همچنین بر اساس تغییرات درصد وزنی اکسید آهن بر حسب اکسید آلومینیم که در شکل ۷b نشان داده شده است، نیز می‌توان دو منبع متفاوت سیلیس را که در ساخت این نمونه‌ها استفاده شده است را مشخص کرد [41, 43] که در یک گروه تغییرات اکسید

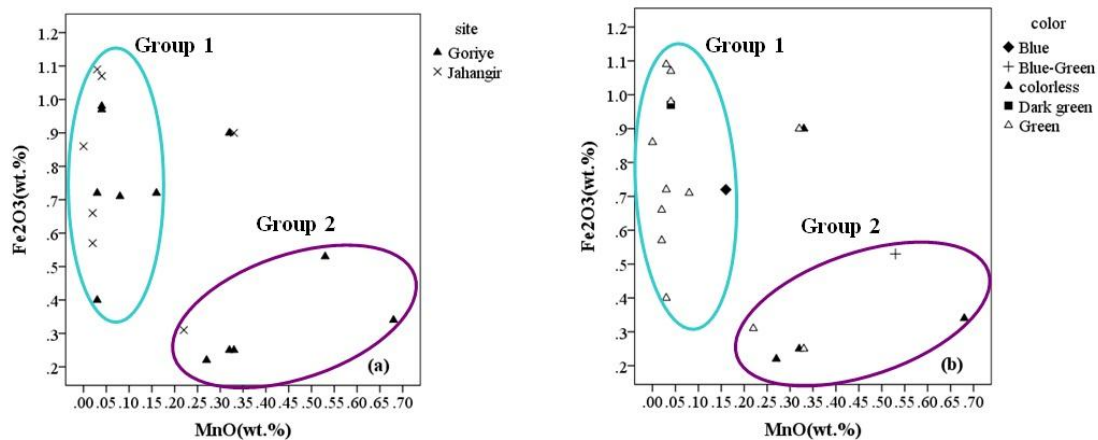


شکل ۷: a- تغییرات درصد وزنی اکسید سیلیسیم برحسب اکسید آلومینیم، b- تغییرات مقدار اکسید آهن برحسب اکسید آلومینیم در نمونه‌های آنالیز شده از محوطه‌های گنبد جهانگیر و گوریه

Fig 7. Scatter plot in wt. % of (a): silicon oxide (SiO₂) versus aluminum oxide (Al₂O₃), (b): iron oxide(Fe₂O₃) versus aluminum oxide(Al₂O₃)in analyzed samples from Jahangir Dome and Gouriye

منگنز در نمونه‌ها استفاده کرد. همان‌طور که در شکل ۸a مشاهده می‌شود، بر اساس تغییرات میزان اکسید آهن برحسب اکسید منگنز نمونه‌های آنالیز شده از دو محوطه به دو گروه عمده تقسیم می‌شوند: گروه اول که شامل اکثر نمونه‌های گنبد جهانگیر و تعدادی از نمونه‌های گوریه است، مقدار اکسید آهن در این نمونه‌ها بین ۱/۰۹-۴۰٪ تغییر می‌کند و اکسید منگنز این نمونه‌ها نیز کمتر از ۱۵٪ است. گروه دوم که غالباً شامل نمونه‌های گوریه است، تغییرات اکسید منگنز این نمونه‌ها بین ۶۸-۲۰٪ و اکسید آهن نیز بین ۵۷-۲۲٪ تغییر می‌کند. اما با توجه به شکل ۸b که تغییرات درصد وزنی اکسید آهن بر حسب اکسید منگنز در نمونه‌های آنالیز شده را بر اساس نوع رنگ نمونه‌های آنالیز شده نشان می‌دهد، می‌توان مشاهده کرد که اکثر نمونه‌هایی که از دو محوطه دارای طیف رنگی سبز و آبی هستند در گروه یک قرار گرفته‌اند و همچنین نمونه‌های بدون رنگ (سفید) در گروه دوم جای دارند [41] از طرفی برای اکسید آهن با توجه به منابع مختلف سیلیس حد آستانه مشخصی برای اضافه شدن آن به صورت عمدی ذکر نشده، اما معمولاً مقدار ۲۰٪ برای اکسید منگنز را به عنوان حد آستانه در نظر می‌گیرند [48] به این معنی که در نمونه‌هایی که مقدار اکسید منگنز بیشتر از ۲۰٪ باشد

و مواد رنگزا و رنگبر در صورتی که قرار بود به صورت عمدی و کنترل شده وارد شیشه شود در حین ساخت به خمیره شیشه اضافه می‌شدند. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود غالب نمونه‌های آنالیز شده به جزء چهار نمونه همگی رنگی هستند و رنگ آن‌ها از سبز تا آبی تغییر می‌کند. اما با توجه به جدول ۳ می‌توان فهمید که اکسیدهای آهن و مس تنها عناصری هستند که می‌توانند نقش رنگزا را در این نمونه‌ها ایفا کنند و همان‌طور که در این جدول مشخص است درصد وزنی اکسید آهن در این نمونه‌ها بین ۱/۰۹-۲۲٪ درصد تغییر می‌کند که می‌تواند عامل ایجاد رنگ سبز باشد [41]. اما تنها در سه نمونه اکسید مس وجود دارد که درصد وزنی آن نیز در حدود ۳۰٪ درصد است و این عنصر به همراه اکسید آهن می‌تواند عامل رنگ آبی باشد [47]. همچنین اکسید منگنز تنها عنصری است که در این نمونه‌ها می‌تواند نقش بی‌رنگ‌کننده و رنگبر را ایفا کند [41] و درصد وزنی آن در این نمونه‌ها بین ۶۸-۲۰٪ تغییر می‌کند. برای پاسخ به این موضوع که آیا اکسید آهن و اکسید منگنز به صورت عمدی به عنوان عامل رنگزا و یا رنگبر در حین ساخت نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفته و یا اینکه از ناخالصی‌های موجود در سیلیس ناشی شده است، می‌توان از تغییرات اکسید آهن برحسب اکسید



شکل ۸: a- تغییرات درصد وزنی اکسید آهن برحسب اکسید منگنز در نمونه‌های آنالیز شده بر اساس محوطه‌ای که نمونه‌ها در آن به‌دست آمده‌اند. b- تغییرات درصد وزنی اکسید آهن برحسب اکسید منگنز در نمونه‌های آنالیز شده بر اساس نوع رنگ نمونه‌های آنالیز شده است.

Fig. 8: Scatter plot in wt. % of (a): manganese oxide (MnO) versus iron oxide (Fe₂O₃) based on excavated sites, (b): manganese oxide (MnO) versus iron oxide (Fe₂O₃) based on the main color of analyzed samples

مشخص شد که در ساخت شیشه‌های گنبد جهانگیر و تپه گوریه از مواد اولیه متفاوتی استفاده شده است. اما برای بررسی بیشتر ارتباط بین محل ساخت (یا محل به دست آمدن نمونه‌ها) و نوع ماده اولیه استفاده شده در آن‌ها و یا به عبارت دیگر، تعیین منشأ ساخت یا طبقه‌بندی نمونه‌های مورد بررسی بر اساس محل ساخت یا محل اکتشاف، می‌توان ترکیبات عنصری نمونه‌های آنالیز شده را که با روش میکروپیکسی به دست آمده است را با استفاده از روش‌های آماری مناسب تحلیل و بررسی کرد [50,51]. این بررسی بر اساس این فرض اساسی استوار است که در هر کارگاه یا محل ساختی، منابع و مواد اولیه (مانند سیلیس یا گداز‌آورها) مورد استفاده در ساخت، دارای ترکیب عنصری تقریباً یکسان و منحصر به خود است که می‌تواند به عنوان اثر انگشت یا شاخصی برای آن مواد اولیه باشد و نمونه‌های هر محوطه را می‌توان بر اساس مواد اولیه استفاده شده در ساخت به گروه‌های مشخص و متمایز تفکیک کرد. مهم‌ترین روش‌های آماری که در بررسی‌های منشأ و محل تولید اشیاء تاریخی مانند شیشه‌های تاریخی و سفال‌ها از آن‌ها استفاده می‌شود آنالیز فاکتوری و آنالیز خوشه‌ای هستند. در آنالیز فاکتوری که به آن روش PCA (Principal Component Analysis) نیز گفته می‌شود، بر

گفته شده است این عنصر به صورت عمدی و آگاهانه در فرایند ساخت به خمیره شیشه اضافه شده است.

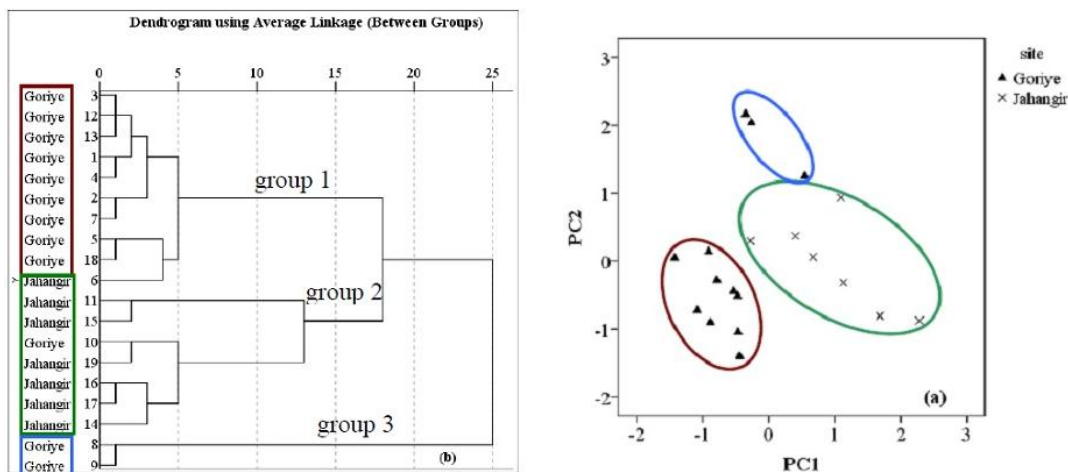
بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در نمونه‌های گروه اول که غالباً شامل نمونه‌هایی هستند که طیف رنگی سبز و آبی دارند و با بیضی سبزرنگ در شکل ۸a مشخص شده‌اند، اکسید آهن و اکسید منگنز به صورت عمدی اضافه نشده و از ناخالصی‌های موجود در سیلیس ناشی می‌شود. در صورتی که در نمونه‌های گروه دوم که در شکل ۸a با بیضی بنفش‌رنگ متمایز شده‌اند و غالب نمونه‌های سفیدرنگ نیز در این گروه قرار دارند، اکسید منگنز به صورت آگاهانه به این نمونه‌ها اضافه شده است. اما در برخی از نمونه‌های این گروه اگرچه میزان اکسید منگنز تا حدود ۵۰٪ نیز می‌رسد اما هنوز هم می‌توان طیف رنگی سبز و آبی را در آن‌ها مشاهده کرد که دلیل اصلی مشاهده این طیف رنگی، احیا نشدن مناسب اکسید منگنز و حذف نشدن اثر اکسید آهن ناشی از ناخالصی‌ها در این نمونه‌ها است [49].

۴-۵. آنالیز آماری نمونه‌های آنالیز شده

همان‌طور که در بخش‌های قبل به‌طور مبسوط تشریح شد، بر اساس ترسیم نمودارهای دوبعدی تغییرات برخی از ترکیبات اصلی شیشه‌های آنالیز شده از دو محوطه،

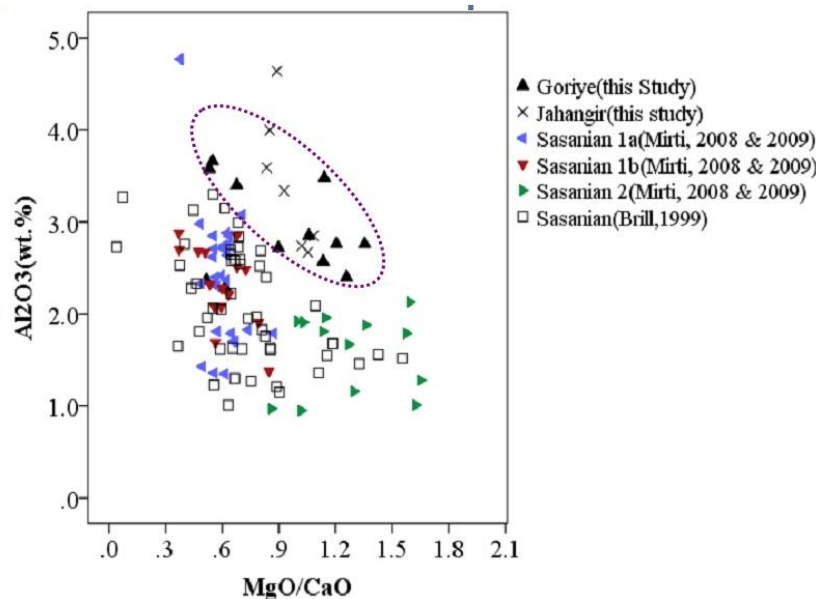
اساس ترکیبات عنصری و درصد وزنی به‌دست آمده از آنالیز شیمیایی نمونه‌ها، تعدادی پارامترهای پنهان (مؤلفه‌های اجزای اصلی) استخراج می‌شود که این مؤلفه‌ها به‌صورت ترکیب خطی از عناصر اندازه‌گیری شده در نمونه‌ها هستند [52] در این روش نتایج حاصل از تحلیل آماری نمونه‌ها معمولاً در یک دستگاه مختصات دو رسم می‌شوند که هر محور یکی از اجزای اصلی (PC) است که در آنالیز فاکتوری به‌دست آمده است. همچنین هر نقطه در این دستگاه مختصات متناظر با یک نمونه است که در تحلیل آماری شرکت داده شده است. میزان دوری و نزدیکی این نقاط نسبت به یکدیگر، شاخصی از شباهت یا عدم شباهت نمونه‌های موردبررسی با یکدیگر تلقی می‌شود. روش دیگری که کاربرد فراوانی در طبقه‌بندی و گروه‌بندی نمونه‌های باستانی و تاریخی دارد، آنالیز آماری به روش خوشه‌ای (Hierarchical Cluster Analysis=HCA) است. در این روش آماری بر اساس شباهت‌ها و عدم شباهت‌های موجود در نمونه‌های موردبررسی، نمونه‌ها در گروه‌های مختلفی در یک نمودار درختی نمایش داده می‌شوند که نمونه‌های مشابه در یک گروه و نزدیک به یکدیگر قرار می‌گیرند [52]. تحلیل‌های آماری معمولاً با نرم‌افزارهای مختلفی قابل انجام است و در این پژوهش

از نرم‌افزار SPSS استفاده شده است [53]. در شکل ۹a، دو مؤلفه اصلی ۱ و ۲ (PC1 & PC2) که بیشترین اطلاعات آماری نمونه‌های شرکت داده شده در تحلیل آماری را در بردارند، رسم شده است. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، نمونه‌های گنبد جهانگیر و تپه گوریه به‌طور کامل از یکدیگر جدا شده‌اند و هر یک در گروه جداگانه‌ای قرار گرفته‌اند که این گروه‌ها با بیضی‌های قهوه‌ای و سبز نشان داده شده‌اند. همچنین سه نمونه از تپه گوریه نیز در گروه مجزایی قرار گرفته که با بیضی آبی‌رنگ نشان داده شده است. وجود این گروه‌های مجزا برای شیشه‌های به‌دست آمده در گنبد جهانگیر و گوریه ناشی از تفاوت موجود در ترکیب عنصری مواد اولیه استفاده شده در ساخت این شیشه‌ها است و نشان‌دهنده متفاوت بودن منابع اولیه استفاده شده (گدازآور و سیلیس) در ساخت آن‌ها است. همچنین نتایج نشان داده شده در شکل ۹b نیز وجود سه گروه مختلف در نمونه‌های آنالیز شده را کاملاً و به شکل واضح تأیید می‌کند. نتایج به‌دست آمده بر اساس تحلیل آماری که بر پایه تحلیل تمام عناصر ارائه شده در جدول ۳ است با نتایج ارائه شده در نمودارهای دوبعدی که نشان می‌دهند که در هر محوطه از مواد اولیه مختلفی برای ساخت شیشه استفاده شده



شکل ۹: a- طبقه‌بندی و جدا شدن نمونه‌های آنالیز شده از دو محوطه بر اساس دو مؤلفه اصلی ۱ و ۲ به‌دست آمده از آنالیز فاکتوری. b- گروه‌بندی و جدا شدن نمونه‌های آنالیز شده از دو محوطه بر اساس آنالیز خوشه‌ای در نمودار درختی

Fig.9: (a): Classification of analyzed samples from two sites based on the two principal components 1 and 2 scores (PC1 & PC2) obtained from Factor Analysis, (b): Grouping and clustering the analyzed samples from two sites based on dendrogram obtained from Hierarchical Cluster Analysis



شکل ۱۰: نمونه آنالیز شده در این پژوهش و نمونه‌های آنالیز شده از دوره ساسانی که تاکنون از محوطه‌های مختلفی در عراق گزارش شده‌اند، مقایسه شده است [21-22,36].

Fig. 10: Comparison of the analyzed samples in this study and the analyzed samples from Iraqi Sassanid sites

مهمی در مورد منابع سیلیس مورد استفاده در فرایند ساخت را نشان می‌دهد. همچنین مقدار اکسید منیزیم و اکسید کلسیم و نسبت این دو اکسید موجود در شیشه‌ها که از ناخالصی‌های موجود در خاکستر ناشی می‌شود، نشان‌دهنده ویژگی‌های منابع سودا مورد استفاده در فرایند ساخت است. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشخص است نمونه آنالیز شده در این پژوهش و نمونه‌های آنالیز شده از دوره ساسانی که تاکنون از محوطه‌های مختلفی در عراق گزارش شده‌اند، مقایسه شده است [21,22,36]. همان‌طور که در این شکل مشخص است نمونه‌های آنالیز شده در این پژوهش به‌طور کامل از نمونه‌های عراق جدا هستند به جزء دو نمونه E9 و E3. بنابراین این شکل نشان می‌دهد که در فرایند ساخت شیشه‌های مربوط به محوطه‌های گنبد جهانگیر و گوریه در ایران و نمونه‌های به‌دست‌آمده در عراق از منابع تأمین‌کننده خاکستر و سیلیس متفاوتی استفاده شده است، به‌طوری‌که سیلیس به‌کاررفته در ایران میزان آلومینیم بیشتری دارد و همچنین در سودای استفاده‌شده در نمونه‌های ایران نسبت اکسید منیزیم به اکسید کلسیم از اغلب نمونه‌های عراق (به جزء نمونه‌های موسوم به

است کاملاً مطابقت و سازگاری دارد.

۵-۵. مقایسه و بررسی محل تولید شیشه‌ها

بر اساس بررسی نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز عنصری نمونه‌های آنالیز شده از دو محوطه تاکنون مشخص شد که منابع و مواد اولیه متفاوتی در هر محوطه برای ساخت شیشه‌های آن محوطه استفاده شده است. در ادامه برای بررسی این موضوع که آیا شباهتی بین مواد اولیه استفاده‌شده در این نمونه‌ها و نمونه‌هایی که تاکنون از محوطه‌های هم‌جوار و همسایه مانند تیسفون و وه اردشیر که دوره تاریخی آن‌ها به دوره ساسانی برمی‌گردد، انجام داده‌ایم. برای اینکه در مورد محل تولید و تفاوت در مواد اولیه استفاده‌شده در نمونه‌های کشف‌شده در هر یک از محوطه‌های تاریخی بتوان اظهار نظر کرد یکی از فاکتورها و راهکارهای مهم بررسی تغییرات درصد وزنی اکسید آلومینیم برحسب نسبت اکسید منیزیم به اکسید کلسیم در نمونه‌های مختلف است [54].

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد مقدار اکسید آلومینیم موجود در شیشه‌ها که یکی از ناخالصی‌های موجود در سیلیس است، نشان‌دهنده و شاخص بسیار

بررسی نتایج نشان می‌دهد که بر اساس تغییرات میزان اکسید آهن برحسب اکسید منگنز نمونه‌های آنالیز شده از دو محوطه به دو گروه عمده تقسیم می‌شوند که نمونه‌های گروه اول که غالباً شامل نمونه‌هایی هستند که طیف رنگی سبز و آبی دارند اکسید آهن و اکسید منگنز به صورت عمدی اضافه نشده و از ناخالصی‌های موجود در سیلیس ناشی می‌شود. در صورتی که در نمونه‌های گروه دوم که غالب نمونه‌های سفیدرنگ نیز در این گروه قرار دارند، اکسید منگنز به صورت آگاهانه به این نمونه‌ها اضافه شده است. علاوه بر این مقایسه شیشه‌های به دست آمده در گنبد جهانگیر و گوریه با نمونه‌های دوره ساسانی در عراق نشان می‌دهد که در فرایند ساخت شیشه‌های مربوط به محوطه‌های گنبد جهانگیر و گوریه در ایران و نمونه‌های به دست آمده در عراق از منابع تأمین کننده خاکستر و سیلیس متفاوتی استفاده شده است، به طوری که سیلیس به کاررفته در ایران میزان آلومینیم بیشتری دارد و همچنین در سودای استفاده شده در نمونه‌های ایران نسبت اکسید منیزیم به اکسید کلسیم از اغلب نمونه‌های عراق (به جزء نمونه‌های موسوم به ساسانی ۲) بیشتر است. می‌توان نتیجه‌گیری کرد که نمونه‌های کشف شده در این محوطه‌های تاریخی مورد بررسی در ایران از منابع تأمین کننده سودا و سیلیس متفاوتی و اساساً بومی این منطقه تأمین شده است.

سپاسگزاری

این مقاله برگرفته از پایان‌نامه دکتری مینا کریمی تحت عنوان «بررسی صنعت شیشه‌گری دوره ساسانی نمونه مطالعاتی شیشه‌های گنبد جهانگیر و گوریه با روش میکروویکسی» با راهنمایی دکتر بیتا سودائی و دکتر لیلا خسروی در دانشگاه آزاد ورامین است.

References

- [1] Shishegar A. Iranian glass. Tehran: Cultural Heritage of Tehran province, 1992. [in Persian]
[شیشه‌گر آرمان. شیشه ایرانی. چاپ اول، تهران: میراث فرهنگی استان تهران، ۱۳۷۱.]

ساسانی ۲) بیشتر است. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که نمونه‌های کشف شده در هر یک از این محوطه‌های تاریخی مورد بررسی در ایران از منابع تأمین کننده سودا و سیلیس متفاوتی نسبت به عراق استفاده کرده‌اند.

۶. نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده از آنالیز میکروویکسی نشان می‌دهد شیشه‌های گنبد جهانگیر و گوریه از نوع سیلکا-سودا-آهک است که با توجه به میزان اکسید منیزیم و اکسید پتاسیم موجود در نمونه‌های آنالیز شده که بیشتر از ۱/۵٪ است، این شیشه‌ها از نوع شیشه‌هایی است که منبع تأمین اکسید سدیم آن خاکستر حاصل از رشد گیاهان رشد یافته در خاک‌های شور بوده است. همچنین نتایج این آنالیزها نشان می‌دهد که درصد وزنی اکسید منیزیم در نمونه‌های این دو محوطه حدود ۵ درصد است که یکی از مشخصه‌های اصلی شیشه‌های دوره ساسانی اکسید منیزیم بالاتر از ۳/۵٪ است. از دیگر نتایج مهم به دست آمده از آنالیز نمونه‌های این دو محوطه این است که مشخص شد در فرایند ساخت شیشه‌های مربوط به محوطه گنبد جهانگیر و گوریه از منابع تأمین کننده سیلیس و خاکستر متفاوتی استفاده شده است، اگرچه این دو محوطه در همسایگی هم هستند. البته این اختلاف در مواد استفاده شده در ساخت می‌تواند به دوره تاریخی طولانی که نمونه‌های این دو محوطه دارند مربوط باشند که ممکن است با گذشت زمان، نوع گیاه مورد استفاده برای تولید خاکستر و یا محل تأمین سیلیس تغییر کرده باشد. بر اساس بررسی‌های انجام شده می‌توان مشخصه اصلی شیشه‌های محوطه جهانگیر را اکسید سیلیسیم بالا و اکسید سدیم پایین و شیشه‌های گوریه را اکسید سیلیسیم پایین و اکسید سدیم بالا ذکر کرد. همچنین

- [2] Emami M, Pakgozar S. Glass Wires from Chogha Zabnbil Preliminary Glass Making Evidence in Iran in the Early 2nd Millennium BC. J Resear Archaeom 2017; 3: 1-15. [in Persian]
[doi.org/10.29252/jra.3.1.1]

- [امامی محمدامین، پاک‌گوهر سجاد. مفتول‌های شیشه‌ای چغازنبیل، اولین نشانه‌های شیشه‌گری ایران در هزاره دوم پیش از میلاد. پژوهش باستان‌سنجی ۱۳۹۶؛ ۳: ۱-۱۵.]
- [3] Rasmussen SC. Origins of glass: myth and known history. In: *How Glass Changed the World*. Springer, 2012, pp. 11–19. [doi.org/10.1007/978-3-642-28183-9_2]
- [4] Lauwers V, Degryse P, Waelkens M. Evidence for Anatolian glassworking in Antiquity: the case of Sagalassos (Southwestern Turkey). *J Glass Stud* 2007; 39–46.
- [5] Deghat A. Scientific Analysis of the Damages of the Choghazanbil temple glass and protective design. Art University of Isfahan, 2000. [in Persian] [دقت اشرف. تحلیل علمی آسیب‌های شیشه‌ی معبد چغازنبیل و طرح حفاظتی آن. پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد مرمت اشیاء فرهنگی و تاریخی، دانشکده مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، ۱۳۷۸.]
- [6] Heinrich E. Tchoga Zanbil (Dur-Untash). Volume II. Temenos, Temples, Palais, Tombes. (Mémoires de la Délégation Archéologique en Iran, Tome XL, Mission de Susiane).
- [7] Porzarghan V. Conservation and Restoration of historical glasses. *J Spec Knowl Restor Cult Herit* 2010; 5: 32–42. [in Persian] [پورزرگان وحید. حفاظت و مرمت شیشه‌های تاریخی. دو فصلنامه تخصصی دانش مرمت و میراث فرهنگی ۱۳۸۸؛ ۵: ۳۲–۴۲.]
- [8] Fukai S. *Persian glass*. Weatherhill, 1977.
- [9] Ghaeini F. *The glassware and ceramic museum of Iran*. Tehran: Cultural Heritage, Handicrafts and Tourism Organization of Iran, 2004. [in Persian] [قائینی فرزانه. موزه آبگینه و سفال‌های ایرانی. تهران: سازمان میراث فرهنگی، پژوهشگاه معاونت فرهنگی و آموزش، ۱۳۸۳.]
- [10] Henderson J. *The glass*. *Sci Archaeol Mater An Investig Inorg Mater* 2000; 60.
- [11] Abasian M. *Fundamentals of physical Chemistry of non-metal minerals: production of ceramics, refractory materials, glass, plaster*. Tehran: Javdan kherad, 1991. [in Persian] [عباسیان میر محمد. مبانی شیمی فیزیک مواد کانی غیرفلزی: تهیه و تولید سرامیک‌ها، مواد نسوز، شیشه، گچ، آهک. تهران: جاودان خرد، ۱۳۷۰.]
- [12] Henderson J. *Ancient glass: an interdisciplinary exploration*. Cambridge University Press, 2013. [doi.org/10.1017/CBO9781139021883]
- [13] Agha-Aligol D, Jafarizadeh 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. [in Persian] [doi.org/10.29252/jra.4.1.47] [آقاعلی‌گل داود، جعفری‌زاده مسلم، مرادی محمود. میکروویکسی: روشی توانمند در بررسی و تعیین مواد اولیه مصنوعات شیشه‌ای دوره اشکانی کاخ شاور (شوش). پژوهش باستان‌سنجی ۱۳۹۷؛ ۴: ۴۷–۶۵.]
- [14] Khosravi L. *Archaeological excavation report of Gonbad Jahangir and Goriyeh*. Tehran, 2016. [in Persian] [خسروی لیلا. گزارش کاوش‌های باستان‌شناسی محوطه باستانی گنبد جهانگیر و گوریه. تهران: آرشیو پژوهشکده باستان‌شناسی، منتشر نشده، ۱۳۹۵.]
- [15] Caley ER. Analysis of ancient glasses 1790-1957; A comprehensive and critical survey.
- [16] Rehren T, Connolly P, Schibille N, et al. Changes in glass consumption in Pergamon (Turkey) from Hellenistic to late Byzantine and Islamic times. *J Archaeol Sci* 2015; 55: 266–279. [doi.org/10.1016/j.jas.2014.12.025]
- [17] Rehren T. Aspects of the production of cobalt-blue glass in Egypt. *Archaeometry* 2001; 43: 483–489. [doi.org/10.1111/1475-4754.00031]
- [18] Davison S. *Conservation and restoration of glass*, Butterworth.
- [19] Simpson SJ. Sasanian glass: an overview. Neighb successors Rome Tradit Glas Prod use Eur Middle East later 1st Millenn AD 2014; 200–231. [doi.org/10.2307/j.ctvh1dq24.24]
- [20] Shortland AJ, Tite MS, Ewart I. Ancient exploitation and use of cobalt alums from the Western Oases of Egypt. *Archaeometry* 2006; 48: 153–168. [doi.org/10.1111/j.1475-4754.2006.00248.x]
- [21] Mirti P, Pace M, Negro Ponzi M, et al. ICP–MS Analysis of Glass Fragments of

- Parthian And Sasanian Epoch from Seleucia and Veh Ardaš?R (Central Iraq)*. *Archaeometry* 2008; 50: 429–450. [doi.org/10.1111/j.1475-4754.2007.00344.x]
- [22] Brill RH, Stapleton CP. Chemical analyses of early glasses: volume 3: the years 2000 2011, reports, and essays. 1999.
- [23] Koob SP, Van Giffen NAR, Kunicki-Goldfinger JJ, et al. Caring for glass collections: the importance of maintaining environmental controls. *Stud Conserv* 2018; 63: 146–150. [doi.org/10.1080/00393630.2018.1492252]
- [24] Rezaei Farimani Z, Mousavi Kuhpar SM. An Investigation of Glassmaking Industry at Tal-I Malyan Based on PIXE analysis. *J Resarch Archaeom* 2017; 3: 47–63. [in Persian] [doi.org/10.29252/jra.3.1.47]
- [رضایی فریمانی زهرا، موسوی کوهر سید مهدی. بررسی صنعت شیشه‌گری در تل ملیان استان فارس بر اساس آنالیز PIXE. پژوهش‌های باستان‌سنجی ۱۳۹۶؛ ۳: ۴۷–۶۳]
- [25] Salehvand N, Shishegar A, Jafarizadeh M, et al. Resarch on glass Tubes of L-Oventish-Nppirish Experimental and Studying by X-Ray fluorescence method. *J Archaeol Res Iran* 2017; 81: 87–104. [in Persian]
- [صالح‌وند نوید، شیشه‌گر آرمان، جعفری زاده مسلم، فیروزمندی شیره جینی بهمن. پژوهشی پیرامون لوله‌های شیشه‌ای درهای ال-اونتش-نپیپیش آزمایش و مطالعه‌ی آن‌ها با روش فلورسانس پرتو مجهول. پژوهش‌های باستان‌شناسی ایران ۱۳۹۶؛ ۸۷: ۸۷–۱۰۴]
- [26] Agha-Aligo D, Jafariezadeh M, Rahbar M, et al. Application of micro-PIXE method for elemental analysis of discovered glass beads from Saleh Davood tombs of Khuzestan: Evidence of trade of glass artifacts in the Parthian period. *J Res Archaeom* 2019; 5(1):143-166. [in Persian] [doi.org/10.29252/jra.5.1.143]
- [آقاعلی‌گل داود، جعفری‌زاده مسلم، رهبر مهدی، مرادی محمود. کاربرد روش میکروپیکسی جهت آنالیز
- عصری مهره‌های شیشه‌ای. مکشوفه از آرامگاه‌های صالح داود خوزستان: شواهدی از تجارت مصنوعات در دوره اشکانی. پژوهش‌های باستان‌سنجی ۱۳۹۸، ۵(۱): ۱۴۳–۱۶۶]
- [27] Khosravi L, Ghorbani E. Investigation of geology, hydrology, geomorphology, motorcycles and morphotfections Jahangir site on the edge of kangar river in Ivan city of Ilam Province. *J Iran Quat* 2019; 3(1): 75-93. [in Persian]
- [خسروی لیلا، قربانی الهام. بررسی زمین‌شناسی، هیدرولوژی، ژئومورفولوژی و سایر موتکنیک و مورفوتکتونیک پهنه باستانی جهانگیر در حاشیه رود کنگیر شهرستان ایوان استان ایلام. فصلنامه کوآترنری ایران ۱۳۹۷؛ ۳(۱): ۷۵–۹۳]
- [28] Vandenberg L. Archeological excavation in Poshtkuh Lorestan. Tehran: Ministry of Culture and Art Publications, 1971. [in Persian]
- [واندنبگ لویی. کاوش‌های باستان‌شناسی در پشتکوه لرستان، باستان‌شناسی و هنر ایران. تهران: انتشارات وزارت فرهنگ و هنر، ۱۳۵۰.]
- [29] Astark F. A Trip to Alamut, Lorestan and Ilam. (Translated by: Saki A.M.), Tehran: Scientific- Culture, 1980. [in Persian]
- [استارک مادلین فریا. سفری به دیار الموت، لرستان و ایلام. ترجمه: ساکی علی محمد، تهران، علمی/فرهنگی، ۱۳۵۸.]
- [30] Afshar Sistani A. Ilam and Ancient Civilization. Tehran: Ministry of Culture and Islamic Guidance Publications, 1994. [in Persian]
- [افشار سیستانی ایرج. ایلام و تمدن دیرینه آن. تهران: انتشارات وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی، ۱۳۷۲.]
- [31] Cristensen A. Iran in the Sassanid period. (Translated by: Yasami Gh.R.). Tehran: Amirkabir publications, 1988. [in Persian]
- [کریستن سن آرتور. ایران در زمان ساسانیان. ترجمه: یاسمی غلامرضا رشید، انتشارات امیرکبیر، تهران، ۱۳۶۷.]
- [32] Johansson SAE, Campbell JL, Malmqvist KG. Particle-induced X-ray emission spectrometry (PIXE). John Wiley & Sons, 1995.
- [33] Farshi Jalali F. Characterization of obsidian artifacts of Nader Tepe of Aslanduz by PIXE. Tehran University,

2005. [in Persian]
[فرشی جلالی فاطمه. منشایابی دست‌ساخته‌های
ابسیدینی نادر تپه اصلاندوز بر اساس روش PIXE.
پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد دانشگاه تهران، دانشکده
ادبیات و علوم انسانی، ۱۳۸۴.]
- [34] Laméhi-Rashti M, Farshi Jalali F, Agha-
aligol D, et al. Characterization of Iranian
obsidian artifacts by PIXE and
multivariate statistical analysis. *J Archaeol*
2015; 3: 25–32. [in Persian]
[لامعی رشتی محمد، فرشی جلالی فاطمه، آقا علی
گل داود، اولیائی پروین، بحرالعلومی فرانک، شکوهی
فرح. تعیین منشأ افسیدین‌های به‌دست‌آمده از نادر تپه
اصلاندوز با استفاده از روش پیکسی، دو فصلنامه
تخصصی باستان‌شناسی و مطالعات میان‌رشته‌ای
۱۳۸۵؛ ۳: ۲۵–۳۲.]
- [35] Sayre E V, Smith RW. Compositional
categories of ancient glass. *Science* (80-)
1961; 133: 1824–1826.
[doi.org/10.1126/science.133.3467.1824]
- [36] Mirti P, Pace M, Malandrino M, et al.
Sasanian glass from Veh Ardašīr: new
evidences by ICP-MS analysis. *J Archaeol*
Sci 2009; 36: 1061–1069.
[doi.org/10.1016/j.jas.2008.12.008]
- [37] Rehren T, Freestone IC. Ancient glass:
from kaleidoscope to crystal ball. *J*
Archaeol Sci 2015; 56: 233–241.
[doi.org/10.1016/j.jas.2015.02.021]
- [38] Bugoi R, Alexandrescu C-G, Panaite A.
Chemical composition characterization of
ancient glass finds from Troesmis—
Turcoaia, Romania. *Archaeol Anthropol*
Sci 2018; 10: 571–586.
[doi.org/10.1007/s12520-016-0372-6]
- [39] Ares JDJ, Calderón NF, López IM, et al.
Islamic soda-ash glasses in the Christian
kingdoms of Asturias and León (Spain). *J*
Archaeol Sci Reports 2018; 22: 257–263.
[doi.org/10.1016/j.jasrep.2018.09.026]
- [40] Neri E, Schibille N, Pellegrino M, et al. A
Byzantine connection: Eastern
Mediterranean glasses in medieval Bari. *J*
Cult Herit 2019; 38: 253–260.
[doi.org/10.1016/j.culher.2018.11.009]
- [41] Henderson J, McLoughlin SD, McPhail
DS. Radical changes in Islamic glass
technology: evidence for conservatism
and experimentation with new glass
recipes from early and middle Islamic
Raqqa, Syria*. *Archaeometry* 2004; 46:
439–468. [doi.org/10.1111/j.1475-
4754.2004.00167.x]
- [42] Siu I, Henderson J, Canav-Özgümüş Ü, et
al. An archaeological and chemical
investigation of 11th–12th centuries AD
glasses from Zeyrek Camii (the
Pantokrator church) in Byzantine
Constantinople. *Archaeol Anthropol Sci*
2019; 11: 2637–2647.
[doi.org/10.1007/s12520-018-0700-0]
- [43] Freestone IC, Ponting M, Hughes MJ.
The origins of Byzantine glass from
Maroni Petrera, Cyprus. *Archaeometry*
2002; 44: 257–272.
[doi.org/10.1111/1475-4754.t01-1-
00058]
- [44] Freestone IC, Jackson-Tal RE, Taxel I, et
al. Glass production at an early Islamic
workshop in Tel Aviv. *J Archaeol Sci*
2015; 62: 45–54.
[doi.org/10.1016/j.jas.2015.07.003]
- [45] Vataj E, Hobdari E, Röhrs S, et al.
Analytical characterization of glass
tesserae from mosaics of early Christian
basilicas in Albania. *Appl Phys A* 2017;
123: 76. [doi.org/10.1007/s00339-016-
0661-z]
- [46] Schibille N, Sterrett-Krause A, Freestone
IC. Glass groups, glass supply and
recycling in late Roman Carthage.
Archaeol Anthropol Sci 2017; 9: 1223–
1241. [doi.org/10.1007/s12520-016-
0316-1]
- [47] Jackson CM, Cottam S. ‘A green thought
in a green shade’; Compositional and
typological observations concerning the
production of emerald green glass vessels
in the 1st century AD. *J Archaeol Sci*
2015; 61: 139–148.
[doi.org/10.1016/j.jas.2015.05.004]
- [48] Gliozzo E, Lepri B, Saguì L, et al.
Colourless glass from the Palatine and
Esquiline hills in Rome (Italy). New data
on antimony-and manganese-decoloured
glass in the Roman period. *Archaeol*
Anthropol Sci 2017; 9: 165–180.
[doi.org/10.1007/s12520-015-0264-1]
- [49] Babalola AB, Dussubieux L, McIntosh
SK, et al. Chemical analysis of glass beads
from Igbo Olokun, Ile-Ife (SW Nigeria):
New light on raw materials, production,
and interregional interactions. *J Archaeol*
Sci 2018; 90: 92–105.
[doi.org/10.1016/j.jas.2017.12.005]

- [50] Agha-Aligol D, Oliayi P, Mohsenian M, et al. Provenance study of ancient Iranian luster pottery using PIXE multivariate statistical analysis. *J Cult Herit* 2009; 10: 487–492.
[doi.org/10.1016/j.culher.2009.01.003]
- [51] Agha-Aligol D, Lamehi-Rachti M, Oliayi P, et al. Characterization of Iranian obsidian artifacts by PIXE and multivariate statistical analysis. *Geoarchaeology* 2015; 30: 261–270.
[doi.org/10.1002/gea.21509]
- [52] Renda V, Nardo VM, Anastasio G, et al. A multivariate statistical approach of X-ray fluorescence characterization of a large collection of reverse glass paintings. *Spectrochim Acta Part B At Spectrosc* 2019; 159: 105655.
[doi.org/10.1016/j.sab.2019.105655]
- [53] Statistics IBMS. 22. SPSS for Windows, release 22.0.
- [54] Freestone IC, Degryse P, Lankton J, et al. HIMT, glass composition and commodity branding in the primary glass industry. *Things that Travel Mediterr Glas first Millenn CE* UCL Press London 2018; 159–190.
[doi.org/10.2307/j.ctt21c4tb3.14]