



Original Paper

Elemental Composition of Glass Artifacts excavated from Takht-e Suleiman World Heritage Site and Ardabil Ancient Sites in Northwestern Iran by Micro-PIXE



Davoud Agha-Aligol^{*1}, Hassan Yousefi², Mahmoud Moradi³

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

². PhD of Archeology, Expert of Ardabil Cultural Heritage Office, Ardabil, IRAN

³. Nuclear Science and Technology Research Institute, Physics and Accelerators Research School, Van de Graaff Laboratory, Tehran, IRAN

Received: 17/03/2021

Accepted: 22/06/2021

Abstract

This paper reports and discusses elemental composition results obtained from analysis of 36 glass fragments discovered from the Takht-e Suleiman World Heritage Site and Ardabil historical sites in northwestern Iran. The analyzed samples dating back to Sassanian /Islamic period. The glass objects in this study include decorative objects such as bracelet, pieces of vessels, and indefinites form such as chunk and raw materials, which are in different colors of light and dark green, emerald green, white, purple, turquoise, brown and black. Elemental analysis of these samples was performed using micro-PIXE technique in Van de Graaff Laboratory in the Nuclear Science & Technology Research Institute in Tehran, Iran. By micro-PIXE analysis, the major and minor elements of these glasses were measured. Elements measured in all 36 samples include: sodium oxide (Na₂O), magnesium oxide (MgO), aluminum oxide (Al₂O₃), silicon oxide (SiO₂), phosphorus oxide (P₂O₅), Sulfur oxide (SO₃), chlorine (Cl), potassium oxide (K₂O), calcium oxide (CaO), titanium oxide (TiO₂), manganese oxide (MnO) and iron oxide (Fe₂O₃). Chromium oxide (Cr₂O₃), cobalt oxide (CoO), copper oxide (Cu₂O), zinc oxide (ZnO), strontium oxide (SrO) and lead oxide (PbO) were also measured in a number of samples. In addition, one sample contains barium oxide (BaO) and two samples contain tin oxide (SnO₂) and arsenic oxide (As₂O₃). According to elemental analysis results, the important questions in technology and manufacturing technique, determining the raw materials used in manufacturing, determining the type of glass as well as investigation of trade and exchange of raw materials about analyzed glasses are answered. Furthermore, to investigate the provenance of artifacts and to determine the differences in the elemental compositions of glass excavated from Takht-e Suleiman World Heritage Site and Ardabil historical sites, our elemental composition results have been combined and compared with the reported results from other sites of the Eastern Mediterranean countries, such as Syria, Egypt, Palestine, Lebanon and neighboring countries of Iran such as Iraq.

Keywords: Micro-PIXE, Elemental analysis, Historical glass, Takht-e Suleiman World Heritage, Ardabil historical sites

*Corresponding Author:

Introduction

Literature survey on early Islamic and pre-Islamic glass objects especially sasanian glasses indicates

that there are only few studies on a limited number of early Islamic and sasanian glasses from Iran. However, researchers and archaeologists have always been interested in the elemental analysis of ancient glasses, because investigation of the elemental composition of glass objects provide a lot of information about the manufacturing technique, the determination of the raw materials and the colorant agents were used to create different colors. In this study, 36 samples of glass objects from the Takht-e Suleiman World Heritage Site and Ardabil historical sites have been selected to analyze by micro-PIXE techniques.

Materials and Methods

Glass fragments discovered from the Takht-e Suleiman World Heritage Site and Ardabil historical sites in northwestern Iran were analyzed. The analyzed samples dated to Sassanian /Islamic period. The glass objects in this study include decorative objects such as bracelet, pieces of vessels, and indefinites form such as chunk and raw materials, which are in different colors.

The general definition of micro-PIXE is "Particle Induced X-ray Emission in micron scale", although this is often used to "proton-induced X-ray emission". The micro-PIXE technique is carried out by bombarding the samples in a vacuum chamber using a beam of high-energy particles (2-3MeV). As a result of the particle bombardment, X-rays of a characteristic energy of the element are emitted. The energy of X-rays for each element is specific and it can be used to detect the elements that present in the sample. Also, the number of X-ray with specific energy can be used to determine the concentration of the elements within the sample. With this technique, one can measure the concentration of Na(sodium) to U(uranium) with an accuracy of parts per million (ppm). In the present paper, the micro-PIXE analysis was performed with Oxford Instruments microprobe system using the 3 MV Van de Graaff accelerators in the Nuclear Science & Technology Research Institute in Atomic Energy Organization of Iran. The samples were analyzed in a vacuum chamber using a beam of 2.2MeV 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} . Samples were scanned over a maximum area of 2.5 mm \times 2.5 mm and digitized signals were recorded in event by event mode (listmode) using the OM-DAQ data acquisition system and the X-ray spectra were processed using GUPIXWIN package to obtain the elemental composition of the samples. In order to check the validity of the micro-PIXE analysis and to evaluate the accuracy of our measurements, Corning glasses A, B, C and D as appropriate glass standard samples were analyzed in the same conditions and then the obtained results were compared to the reported results for these standard samples.

Results and discussions

The results obtained from this study show that the analyzed glass from these areas are classified into 6 different groups based on the raw materials used in manufacturing. These classifications include 2 different groups of plant ash-soda-lime-silica glass (29 samples), one group of natron glass type (3 samples), one group of soda-lead-lime-silica glass (2 samples), one group of lead- barium-silica glass (one sample) and a group of potash-lime-silica glass (one sample). The two plant ash-soda-lime-silica glass groups which was named Plant-ash A and Plant-ash B are completely separated based on the concentration of sodium oxide. In the Plant-ash A group, the weight percentage of sodium oxide varies between 17 to 20wt.%, while in the Plant-ash B group, the weight percentage of sodium oxide varies between 13% to 16wt.%. In addition, based on the concentrations of Al₂O₃, SiO₂, TiO₂ and Fe₂O₃ different sources of silica can be considered for two different groups of plant ash-soda-lime-silica glass analyzed from Takht-e Suleiman. Moreover, according to elemental composition of glass objects it can be concluded that to make various color glass, different transition elements such iron, copper, manganese and cobalt oxide are used.

Conclusion

The elemental composition of glasses shows that most glasses obtained in Takht-e Suleiman World Heritage Site and Ardabil historical sites are plant ash-silica-soda-lime glass type that the ashes obtained from halophytic plants are considered as supplying source of flux. Moreover, the results of elemental analysis of these glasses confirm that the origin and place of production of some glasses that are belong to natron group and Pb-Ba group is non-local and probably were imported from other areas such as Egypt or the eastern Mediterranean Sea regions and China through the trade and

exchange of glass products. In addition, the elemental composition of these samples show that Fe_2O_3 CoO and Cu_2O are the colorant agents and MnO has been used as a decolorant element in the samples.





CrossMark

آنالیز عنصری و اندازه‌گیری ترکیبات تشکیل‌دهنده مصنوعات شیشه‌ای به دست آمده از مجموعه میراث جهانی تخت سلیمان و محوطه‌های باستانی اردبیل در شمال غربی ایران با استفاده از روش میکروپیکسی

داود آقا علی گل^{۱*}، حسن یوسفی^۲، محمود مرادی^۳

۱. پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده فیزیک و شتابگرهای ذرات، آزمایشگاه ذرات باردار، تهران، ایران

۲. دکتری باستان‌شناسی، کارشناس اداره کل میراث فرهنگی اردبیل، اردبیل، ایران

۳. پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، آزمایشگاه واندوگراف، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۷

چکیده

در این مقاله، نتایج به‌دست آمده از آنالیز عنصری ۳۶ نمونه از قطعات شیشه‌ای مکشوفه از مجموعه میراث جهانی تخت سلیمان و محوطه‌های تاریخی اردبیل در شمال غرب ایران که قدمت آن‌ها از دوره ساسانی تا دوره اسلامی است، ارائه شده است. نمونه‌های شیشه‌ای آنالیز شده در این پژوهش شامل نمونه‌های مطالعاتی از اشیاء تزئینی، قطعات ظروف و اشیاء نامشخص از شیشه است که در رنگ‌های سبز روشن و تیره، سبز زمردی، سفید، ارغوانی، آبی فیروزه‌ای، قهوه‌ای و مشکی ساخته شده‌اند. آنالیز عنصری این نمونه‌ها با استفاده از روش میکروپیکسی در آزمایشگاه واندوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای در ایران انجام شده است. با استفاده از میکروپیکسی، عناصر اصلی و کم مقدار تشکیل‌دهنده این شیشه‌ها اندازه‌گیری شده و با استفاده از نتایج به‌دست آمده به سئوالات مهمی در زمینه فن‌شناسی و تکنیک ساخت، تعیین مواد اولیه مورد استفاده در ساخت و تعیین نوع شیشه‌ها و تجارت و نقل و انتقالات مواد اولیه پاسخ داده شده است. همچنین برای بررسی تفاوت‌های موجود در ترکیبات عنصری شیشه‌های به‌دست آمده از این محوطه‌ها با شیشه‌های به‌دست آمده از مناطق دیگر در ایران و جهان، اشیاء آنالیز شده در این پژوهش با نمونه‌های متعددی از محوطه‌هایی بسیار مهم از دیگر نقاط ایران و کشورهای حوزه شرق مدیترانه مانند سوریه، مصر، فلسطین، لبنان و کشورهای همسایه مانند عراق مقایسه شده است. نتایج به‌دست آمده از این پژوهش، نشان می‌دهد شیشه‌های آنالیز شده از این محوطه‌ها بر اساس ترکیبات عنصری و نوع ماده‌گذارآور استفاده شده در فرایند ساخت، به شش گروه مختلف و متفاوت تقسیم می‌شوند. بر اساس این تقسیم‌بندی مشخص شد که تعداد قابل توجهی از شیشه‌های آنالیز شده از این محوطه‌ها از نوع شیشه‌های سیلیکا-سودا-آهک محسوب می‌شوند که در آن‌ها از خاکستر گیاهان به عنوان ماده‌گذارآور استفاده شده است و به احتمال بسیار زیاد جزء تولیدات بومی و داخلی هستند. همچنین نتایج آنالیز، در نمونه‌های این محوطه‌ها، وجود برخی از اشیاء شیشه‌ای که منشأ و محل تولید آن‌ها کاملاً غیر بومی هستند و می‌توانند بر اساس تبادلات تجاری به این مناطق وارد شده باشند را کاملاً تأیید می‌کند. شیشه‌های گروه ناترون، گروه Pb-Ba و گروه Potash از جمله نمونه‌های غیر بومی محسوب می‌شوند.

واژگان کلیدی: میکروپیکسی، آنالیز عنصری، قطعات تاریخی شیشه، میراث جهانی تخت سلیمان، محوطه‌های تاریخی اردبیل

* نویسنده مسئول مکاتبات: تهران، انتهای خیابان کارگر شمالی، سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای.

پست الکترونیکی: daghaaligol@aeoi.org.ir

۱. مقدمه

یکی از اولین مواد مصنوعی ساخت بشر که قدمتی بیش از ۴۵۰۰ سال دارد، شیشه است [1]. این ماده مصنوعی با ترکیب و ذوب کردن هم‌زمان سیلیس با یک ماده‌گذارآور مانند سودا که به منظور کاهش دمای ذوب به آن افزوده می‌شود و هم‌چنین افزودن مواد استحکام بخش و شبکه‌ساز (network stabilizer) مانند کربنات کلسیم ساخته شده است. علاوه بر این، برای تغییر رنگ در این ماده مصنوعی به صورت آگاهانه و با اضافه کردن ناخالصی‌های طبیعی و اکسیدهای فلزی، شیشه‌های رنگی به تولید و کپی-برداری از رنگ‌هایی که در سنگ‌های قیمتی و تزیینی مانند لاجورد، زمرد و فیروزه مشاهده می‌شده، تولید شده است [2]. بررسی‌های آزمایشگاهی که تاکنون بر روی مصنوعات شیشه‌ای انجام شده است، نشان می‌دهد ترکیبات شیمیایی و عنصری شیشه‌های باستانی از نظر مواد اولیه مورد استفاده در ساخت آن‌ها با مکانی که در آن شیشه تولید شده است و همچنین با دوره تاریخی که در آن ساخته شده است، ارتباط مستقیم و معنی‌داری دارد [2,3]. از طرف دیگر، مطالعات آزمایشگاهی نشان داده است که ترکیب عنصری شیشه به طور مستقیم منعکس‌کننده مواد اولیه مورد استفاده در ساخت و همچنین تکنیک‌های فنی است که در ساخت آن به کار رفته است [4,5]. تجزیه و تحلیل و اندازه‌گیری ترکیبات عنصری در شیشه می‌تواند شواهدی در مورد نوع مواد اولیه مورد استفاده و منشأ عناصر مختلف در ترکیبات نهایی شیشه و بررسی علل وجود هر عنصر از نقطه نظر فنی مانند افزوده شدن ناخالصی‌ها به صورت آگاهانه و تصادفی و بررسی تکنیک ساخت ارائه دهد. همچنین با مقایسه ترکیبات عنصری به دست آمده از شیشه‌های محوطه‌های باستانی و تاریخی مختلف در جهان می‌توان وجود ارتباطات اقتصادی و فرهنگی و تجاری را بررسی کرد [6].

در این کار پژوهشی، آنالیز عنصری ۳۶ نمونه از قطعات شیشه که شامل نمونه‌های باقیمانده از اشیاء شیشه‌ای

مختلف از جمله شیشه‌های تزیینی مانند النگو، دیواره و بدنه ظروف و اشیاء شیشه‌ای با شکل نامشخص هستند و در رنگ‌های سبز، سفید، صورتی، مشکی و رنگ‌های دیگر ساخته شده‌اند، با روش میکروپیکسی و با استفاده از شتابدهنده واندوگراف پژوهش‌کننده فیزیک و شتابگرها در پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای در ایران، انجام شده است. اهداف اصلی و مهمترین سئوالاتی که در این مقاله به آن‌ها پاسخ داده خواهد عبارت هستند از بررسی و اندازه‌گیری ترکیبات اصلی شیشه‌ها، تعیین نوع گذارآور استفاده شده در آن‌ها و همچنین بررسی کیفیت مواد اولیه مورد استفاده در ساخت مصنوعات شیشه‌ای میراث جهانی تخت سلیمان و محوطه‌های تاریخی اردبیل که برای اولین بار برای این محوطه‌ها انجام شده است.

۲. پیشینه تحقیقاتی آنالیز عنصری شیشه‌های ایرانی

فعالیت‌ها و حفاری‌های باستان‌شناسی انجام شده در گذشته و سال‌های اخیر در محوطه‌های تاریخی در ایران نشان می‌دهد که در هر کاوش تعداد قابل توجهی اشیاء و مصنوعات شیشه‌ای به دست آمده که بیشتر آن‌ها در موزه‌های مختلف در کشور نگهداری می‌شوند. اما بررسی‌ها نشان می‌دهد که بر روی اشیاء شیشه‌ای به دست آمده از مناطق مختلف ایران جهت اندازه‌گیری ترکیبات عنصری با استفاده از روش‌های مختلف آزمایشگاهی، مطالعات جامع و گسترده‌ای صورت نگرفته است. مرور مقالات و کتب موجود در این زمینه، گویای این مطلب است که در بین اندک مطالعات انجام شده بر روی شیشه‌های ایرانی که توسط محققان در خارج از کشور انجام شده است، غالب پژوهش‌های انجام شده بر روی شیشه‌های به دست آمده از نیشابور تمرکز داشته‌اند [7-9]. همچنین در پژوهش دیگری در زمینه شیشه‌های ایرانی، شیشه‌های دوره اسلامی به دست آمده از بندر سیراف در جنوب ایران، مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [10].

در داخل کشور نیز آنالیز عنصری، بررسی و تحلیل ترکیبات تشکیل‌دهنده شیشه‌های تاریخی ایران در

با مواد استفاده شده در نمونه‌های ساسانی به‌دست آمده در عراق کاملاً متفاوت هستند. علاوه بر موارد اشاره شده، پژوهشی نیز بر روی تعدادی از مهره‌های رنگی به‌کاررفته در زیورآلات پیش از تاریخ موزه ملی ایران با قدمت هزاره سوم تا اول ق.م انجام شده است و نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد در نمونه‌های آنالیز شده به‌جز یک سری از مهره‌ها که از سنگ لاجورد ساخته شده‌اند، سایر مهره‌ها از جنس شیشه سیلیکا - سودا- آهک هستند که در ساخت آن‌ها از خاکستر گیاهان به‌عنوان ماده‌گذارآور استفاده شده است [15].

۳. موقعیت جغرافیایی و پیشینه کاوش‌های باستان‌شناسی در میراث جهانی تخت سلیمان و محوطه‌های اردبیل

مجموعه میراث جهانی تخت سلیمان که در تیرماه ۱۳۸۲ به‌عنوان چهارمین اثر تاریخی فرهنگی ایران در فهرست یونسکو به ثبت رسیده است، در ارتفاع ۲۱۵۰ متری از سطح دریا و در عرض ۱۷ ۳۶ ۳۶ و طول ۴ ۱۴ ۴۷ جغرافیایی در محدوده جغرافیایی شهر جدیدالتأسیس تازه کند نصرت آباد در مرکز بخش تخت سلیمان، و ۴۵ کیلومتری شمال شرقی شهر تکاب در جنوب غربی استان آذربایجان غربی قرار دارد. این مجموعه، متشکل از یک منظر وسیع فرهنگی-تاریخی است که آثار دوره‌های مختلف باستان را از پارینه سنگی میانی و تاریخی تا دوره اسلامی در بردارد [16]. قلعه شهر تخت سلیمان همراه با دریاچه سحرانگیز، زندان سلیمان مخوف، کوه طویل، کوه افسانه‌ای بلقیس و آب‌های گرم و معدنی شفافبخش از جمله مهم‌ترین آثار معماری این مجموعه جهانی است. همچنین کشف و شناسایی ابزارهای سنگی و آثار اعصار آهن I و II و III مخصوصاً کورگان‌های تپه مجید و احمدآباد [17] با گورستان عصر آهن و استقرارهای سده‌های هشتم و هفتم قبل از میلاد و بقایای عصر هخامنشی با خانه‌های برپا شده از خشت بر روی پی به ضخامت ۶۰ سانتیمتر از لاشه سنگ با تکنیک جناقی است. اتاق‌های کوچک این خانه‌ها با

سال ۱۳۹۶، با هدف مشخص شدن چالش‌های موجود در این زمینه و رفع موانع پیش رو با روش میکروپیکسی، در آزمایشگاه واندوگراف پژوهشکده فیزیک و شتابگرها در پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای در ایران آغاز شده است و تاکنون نیز چندین مقاله از نتایج به‌دست آمده در این آزمایشگاه به چاپ رسیده است. در اولین کار پژوهشی در آزمایشگاه واندوگراف در زمینه شیشه‌های تاریخی ایران، مجموعه‌ای از ظروف شیشه‌های تاریخ‌دار اوایل دوره اسلامی که در موزه ملی ایران نگهداری می‌شود مورد مطالعه و بررسی قرار گرفتند [11]. نتایج این آزمایشات نشان داد که از مجموع بیست ظرف آنالیز شده در این پژوهش، به‌جز یک نمونه که گزارآور استفاده شده در آن ناترون بود، ماده‌گذارآور به کار رفته در بقیه شیشه‌های مورد مطالعه از خاکستر گیاهان تهیه شده بود. همچنین در ادامه این پژوهش‌ها بررسی و تعیین مواد اولیه مصنوعات شیشه‌ای دوره اشکانی در کاخ شائور و همچنین آنالیز مهره‌ها و ظروف شیشه‌ای از محوطه صالح داود در شوش انجام شد که نتایج به‌دست آمده از این بررسی‌ها نیز به چاپ رسیده‌اند [12,13]. بر اساس نتایج آنالیزها مشخص شد که شیشه‌های کاخ شائور نیز همگی از نوع شیشه‌های سیلیکا - سودا- آهک هستند که از خاکستر گیاهان به‌عنوان گزارآور استفاده شده است و احتمالاً این شیشه‌ها تولید بومی محسوب می‌شوند. اما آنالیز نمونه‌های به‌دست آمده از صالح داود نشان داد که در مهره‌های شیشه‌ای صالح داود از ماده معدنی ناترون و در ظروف به‌دست آمده از صالح داود از خاکستر گیاهان به‌عنوان ماده گزارآور استفاده شده است. در ادامه روند مطالعات شیشه‌های تاریخی و باستانی ایران، مطالعه مصنوعات شیشه‌ای دوره ساسانی انجام شده است که در آن شیشه‌های محوطه گنبد جهانگیر و (تپه) گوریه در استان ایلام با استفاده از روش میکروپیکسی بررسی شده‌اند [14]. تغییرات گسترده عناصر اصلی تشکیل دهنده این شیشه‌ها نشان می‌دهد که برای تأمین ماده اولیه سیلیس و گزارآور سودا در این نمونه‌ها از منابع اولیه مختلفی در دو محوطه مورد بررسی استفاده شده است و این مواد اولیه

[26,28]. این شهر در اوایل دوره اسلامی به عنوان مهم‌ترین و بزرگ‌ترین شهر آذربایجان و مرکز آن اهمیت زیادی داشت [29,30]. شاید موقعیت خاص جغرافیایی اردبیل در تقاطع مواصلاتی جاده بزرگ خراسان به فلات مرکزی و ولایات فراسوی رودخانه ارس از مهم‌ترین دلایل توجه حاکمان وقت به این شهر و ناحیه در دوره‌های قبل از اسلام و عصر اسلامی است.

با توجه به موارد برشمرده در بالا، نمونه‌های آنالیز شده از محوطه‌های باستانی واقع در کناره‌های رودخانه قره سو دو شهرستان اردبیل و مشکین شهر انتخاب شده است. محوطه قلعه قوناخ قیران، معروف به قلعه شهر رویین دز (یا بهمن دژ) با ارتفاع ۱۳۹۵ متر از سطح دریا در ۷۰۰ متری شمال روستای رویین دزق و در مختصات ۷۴ ۴۰ ۲۴ شرقی و ۵ ۳۲ ۵۹ شمالی و ۲۸ کیلومتری شمال غربی شهر اردبیل، در بخش گندیشمن از توابع شهرستان اردبیل قرار دارد. محوطه باستانی شهریری پیر از میان معروف به قلعه ارجق نیز با وسعت تقریبی ۱۰۰ هکتار در ارتفاع ۱۱۶۶ متری از سطح دریا، در مختصات ۸۳ ۵۰ ۷۵ شرقی و ۷ ۳۲ ۷۱ شمالی در ۳۵ کیلومتری شرق مشکین شهر واقع است. محوطه باستانی دیگر شهرستان مشکین شهر، گلوچه-اردوخان کنده شهر جدیدالتأسیس مردالو است. این اثر با ارتفاع ۱۲۴۹ متر از سطح دریا در مختصات ۱۹ ۰۵ ۷۴ شرقی و ۶ ۹۳ ۸۶ شمالی در دره گلوچه در شمال دشت حاصلخیز مشکین شهر قرار دارد. این محوطه در دو کیلومتری غرب روستای اردوخان کنده و در ۱۰ کیلومتری شرق شهر جدیدالاحداث مرادلو و حدود ۶۰ کیلومتری مرکز شهرستان واقع است.

۴. مواد و روش‌ها

۴-۱. معرفی شیشه‌های مجموعه میراث جهانی تخت سلیمان و محوطه‌های باستانی اردبیل

زوایای مایل، طرح ساده داشتند و در گورهای انفرادی با تدفین جنینی در داخل اتاق‌ها، قطعات سفال‌های دوره اشکانی به دست آمده است. شاید به خاطر پیدایش همین آثار و دیگر شواهد تاریخی است که آرتور اپهام پوپ و بعضی از محققان، تخت سلیمان را منطبق با فراسپه پارتی که آنتونیوس، سردار رومی در ۳۶ م در لشکرکشی خود محاصره کرد ولی تسخیر نکرد، دانسته‌اند [18].

اما اوج عظمت و شکوه تخت سلیمان دوره‌های ساسانی و ایلخانی است. ساخت بزرگ‌ترین و مهم‌ترین اثر مذهبی ایران باستان؛ آتشکده آذرگشنسب و کاخ-های معظم عصر ساسانی در این نقطه جغرافیایی بر اهمیت آن در دوره تاریخی مخصوصاً عصر ساسانی دلالت دارد.

علاوه بر آنالیز شیشه‌های محوطه جهانی تخت سلیمان، نمونه‌های شیشه‌ای دیگری هم از محوطه-های باستانی شهر اردبیل و شهرستان مشکین شهر آنالیز شدند. این دو ناحیه با پیشینه تمدنی طولانی، در مباحث باستان‌شناختی با مفرغ‌های اردبیل [19]، کتیبه‌های اورارتویی دامنه سبلان و کتیبه ساسانی شاپور دوم ساسانی در مشکین شهر [20]، سفال سبک اردبیل [21]، محوطه قلعه قوناخ قیران شهرستان اردبیل [22] در کناره قره سو، قابل انطباق با محوطه رویین دز شاهنامه و محوطه باستانی مکتب اوشاقلاری شهریری [23] و سنگ‌افراشته‌های مرکز تدفینی-آیینی آن متعلق به عصر آهن و قدمت استقرار آن به دوره نوسنگی می‌رسد، شناخته می‌شود. همچنین برابر بررسی هیئت مشترک روس-ایران، اردبیل یکی از اولین نقاطی است که دوره‌های پارینه سنگی، فراپارینه سنگی، نوسنگی [24] و مس - سنگ تا عصر آهن در آن شناسایی و معرفی شده است [25].

تکرار نام اردبیل در شاهنامه، هم‌زمان با کیانیان و دوره پادشاهی کیکاووس بر اهمیت شهر اردبیل و پیشینه تمدنی آن دلالت دارد [26,27]. در بیش‌تر منابع سده‌های اولیه اسلامی، بنای شهر اردبیل به شهریاران ساسانی مخصوصاً فیروز اول (حک. ۴۸۴-۴۵۷ م) و انوشیروان (حک. ۵۷۹-۵۷۳ م) نسبت داده شده است

میراث جهانی تخت سلیمان و ۷ نمونه نیز مربوط به اشیاء شیشه‌ای به دست آمده از محوطه‌های تاریخی اردبیل است. ۷ نمونه آنالیز شده از اردبیل، شامل ۳ نمونه از قلعه قوناخ‌قیران در روستای روین دز، ۱ نمونه از بافت قدیم شهر اردبیل و ۳ نمونه نیز از محوطه باستانی مشکین شهر در اردبیل است.

موقعیت جغرافیایی محوطه‌های تاریخی تخت سلیمان و اردبیل که در بالا اشاره شد، در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین مشخصات اشیاء آنالیز شده شامل کد نمونه‌ها، فرم ظاهری، محل اکتشاف نمونه‌ها، دوره تاریخی و رنگ آن‌ها در جدول ۱ آمده است. در جدول ۱ دوره تاریخی برخی از نمونه‌ها که با شک و تردید همراه بوده است با علامت (?) نشان داده شده است. همچنین تصاویر اپتیکی تمام نمونه‌های آنالیز شده نیز در شکل ۲ ارائه شده است.

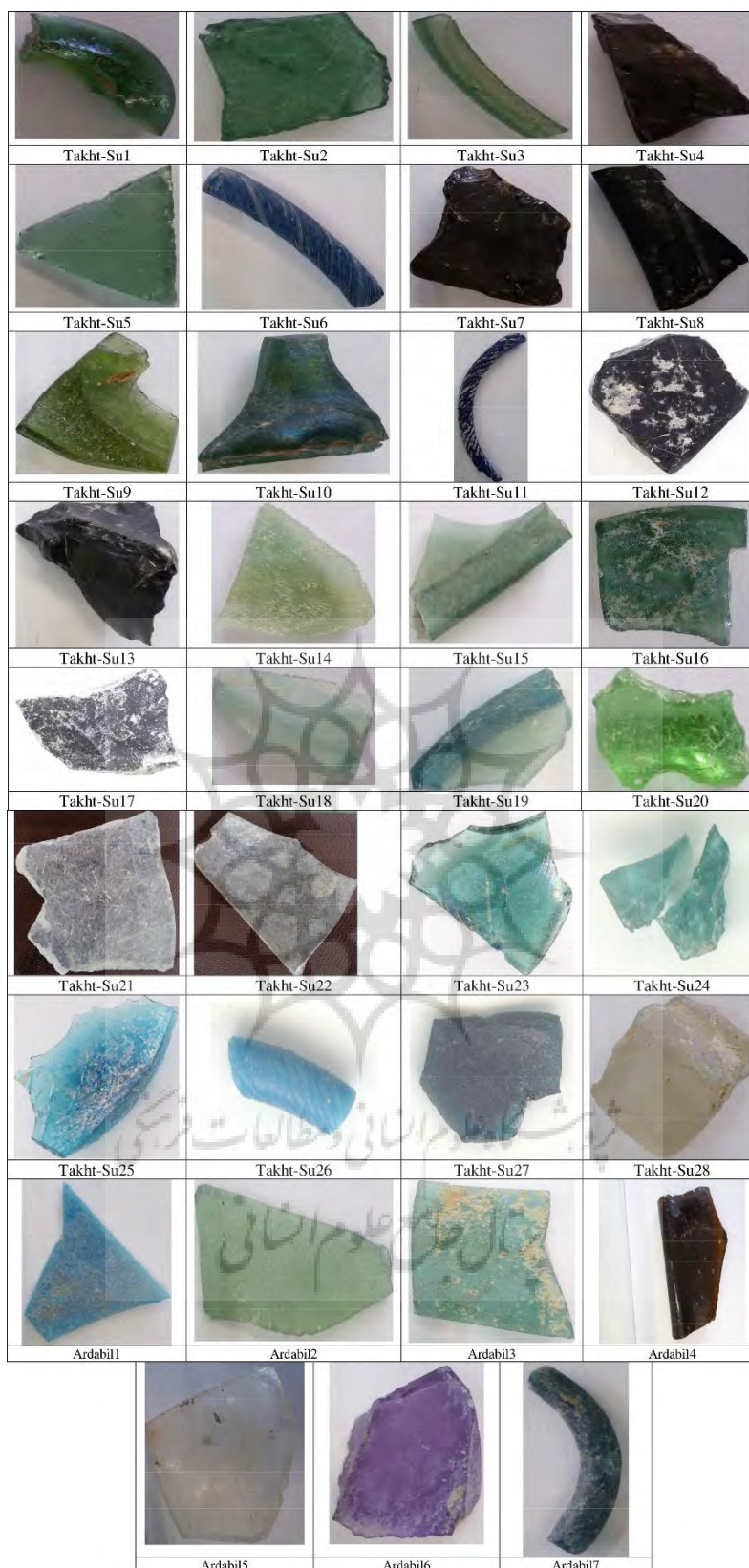
در این کار پژوهشی، آنالیز عنصری ۳۶ نمونه از ۳۵ شیء شیشه‌ای به دست آمده از مجموعه میراث جهانی تخت سلیمان و محوطه‌های باستانی اردبیل که شامل نمونه‌های تحقیقاتی باقیمانده از اشیاء مختلف مانند الگو، بدنه ظروف و اشیائی با اشکال نامشخص هستند، انجام شده است. با توجه به اینکه در نمونه ۹ تخت سلیمان دو طیف رنگی سبز روشن و سبز تیره در لبه و بدنه ظرف دیده می‌شدند، بنابراین از نمونه شماره ۹، دو نمونه برای آنالیز انتخاب شده است. نمونه‌های انتخاب شده از میراث جهانی تخت سلیمان، از خاک‌های کاوش انتقال یافته این اثر تاریخی به حدود یک کیلومتری جنوب قلعه شهر تخت سلیمان، به دست آمده است. این اشیاء در رنگ‌های سبز، سفید، صورتی، مشکی و آبی تولید شده‌اند. از مجموع ۳۶ نمونه آنالیز شده در این پژوهش، ۲۹ نمونه مربوط به مجموعه



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی میراث جهانی تخت سلیمان و محوطه‌های باستانی اردبیل با رنگ سبز مشخص است (Google earth)
 Fig. 1: A map of Iran showing the geographical location of Takht-e Suleyman World Heritage and Ardabil archaeological sites

جدول ۱: مشخصات ظاهری و باستان‌شناسی مصنوعات شیشه‌ای آنالیز شده از تخت سلیمان و اردبیل
Table 1: Characteristics of analyzed glass artifacts from Takht-e Suleiman and Ardabil

دوره تاریخی Historical period	رنگ Color	محل اکتشاف نمونه Excavation site	فرم شی Form	کد نمونه Sample code
Islamic	Dark green	Takht-e Suleiman World Heritage	Unknown	Takht-Su1
Islamic	Dark green	Takht-e Suleiman World Heritage	Unknown	Takht-Su2
Islamic	Light green	Takht-e Suleiman World Heritage	Vessel edge	Takht-Su3
Sassanid	Black	Takht-e Suleiman World Heritage	Unknown	Takht-Su4
Islamic	Light green	Takht-e Suleiman World Heritage	Unknown	Takht-Su5
Islamic	Violet	Takht-e Suleiman World Heritage	Bracelet	Takht-Su6
Sassanid	Black	Takht-e Suleiman World Heritage	Unknown	Takht-Su7
Sassanid	Black	Takht-e Suleiman World Heritage	Vessel edge	Takht-Su8
Sassanid?	Light green	Takht-e Suleiman World Heritage	Unknown	Takht-Su9
Sassanid?	Dark green	Takht-e Suleiman World Heritage	Vessel base	Takht-Su10
Islamic	Violet	Takht-e Suleiman World Heritage	Bracelet	Takht-Su11
Sassanid	Black	Takht-e Suleiman World Heritage	Unknown	Takht-Su12
Sassanid	Black	Takht-e Suleiman World Heritage	Unknown	Takht-Su13
Islamic	Light green	Takht-e Suleiman World Heritage	Unknown	Takht-Su14
Islamic	Light green	Takht-e Suleiman World Heritage	Vessel edge	Takht-Su15
Sassanid	Dark green	Takht-e Suleiman World Heritage	Vessel edge	Takht-Su16
Sassanid	Black	Takht-e Suleiman World Heritage	Unknown	Takht-Su17
Islamic	Light green	Takht-e Suleiman World Heritage	Unknown	Takht-Su18
Islamic	Dark green	Takht-e Suleiman World Heritage	Vessel edge	Takht-Su19
Sassanid	Emerald green	Takht-e Suleiman World Heritage	Unknown	Takht-Su20
Islamic	Colorless	Takht-e Suleiman World Heritage	Unknown	Takht-Su21
Islamic	Colorless	Takht-e Suleiman World Heritage	Unknown	Takht-Su22
Islamic	Light green	Takht-e Suleiman World Heritage	Unknown	Takht-Su23
Islamic	Light green	Takht-e Suleiman World Heritage	Unknown	Takht-Su24
Islamic	Turquoise blue	Takht-e Suleiman World Heritage	Unknown	Takht-Su25
Islamic	Turquoise blue	Takht-e Suleiman World Heritage	Bracelet	Takht-Su26
Sassanid	Dark green	Takht-e Suleiman World Heritage	Unknown	Takht-Su27
Sassanid	Colorless	Takht-e Suleiman World Heritage	Unknown	Takht-Su28
Sassanid?	Turquoise blue	Gonakh giran-Ardabil	Unknown	Ardabil 1
Sassanid	Light green	Shaharyeri-Meshkinshar	Unknown	Ardabil 2
Sassanid	Dark green	Gonakh giran-Ardabil	Vessel edge	Ardabil 3
Sassanid	Brown	Gonakh giran-Ardabil	Vessel edge	Ardabil 4
Islamic	Colorless	Ardabil	Unknown	Ardabil 5
Islamic	Purple	Gullujeh- Meshkinshar	Vessel edge	Ardabil 6
Islamic?	Dark green	Ilanni dagh- Meshkinshar	Bracelet	Ardabil 7



شکل ۲: تصاویر اپتیکی تمام نمونه‌های آنالیز شده از محوطه تاریخی تخت سلیمان و محوطه‌های باستانی اردبیل
 Fig. 2: Optical photo of all analyzed samples from Takht-e Suleiman historical site and Ardabil ancient sites.

۴-۲. آنالیز عنصری با روش میکروپیکسی

برای اندازه‌گیری ترکیبات عنصری ۳۶ نمونه از اشیاء شیشه‌ای محوطه تاریخی تخت سلیمان و اردبیل، از روش میکروپیکسی در آزمایشگاه واندوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای استفاده شده است. به دلیل وجود رسوبات سطحی و خوردگی ناشی از تدفین طولانی مدت نمونه‌ها در خاک و با توجه به اینکه تمام نمونه‌ها به صورت قطعات شکسته و مطالعاتی بودند، نمونه‌هایی در ابعاد کوچک و در حدود چند میلی‌متر از نمونه‌های مورد مطالعه جدا و از سطح مقطع آن‌ها آنالیز شدند. سپس با استفاده از توزیع عنصری به دست آمده از عناصر موجود در نمونه‌ها، طیف میکروپیکسی بخشی از نمونه که عاری از هر گونه خوردگی بود و می‌توانست نمایانگر ترکیب اصلی و واقعی باشد، برای محاسبه درصد وزنی عناصر موجود در هر نمونه استخراج شد. آنالیز میکروپیکسی یکی از بهترین و دقیق‌ترین روش‌های اندازه‌گیری ترکیبات اصلی و کم مقدار برای شیشه‌های تاریخی و لعاب است و در نمونه‌های مورد مطالعه می‌توان عناصر سدیم تا اورانیم را به طور هم‌زمان با دقتی در حدود ۵۰-۵۰۰ ppm اندازه‌گیری کرد. روش آنالیز میکروپیکسی بر مبنای تحریک اتم‌های تشکیل‌دهنده نمونه مورد مطالعه توسط باریکه پروتون‌های پرانرژی که توسط شتاب دهنده واندوگراف تولید می‌شود، استوار است. میکروپیکسی یا «گسیل پرتو X در اثر برانگیختگی با باریکه پروتون با ابعاد میکرون» روش بسیار توانمندی برای آنالیز عنصری نمونه‌های فرهنگی و تاریخی است. در این روش آنالیز، نمونه مورد بررسی تحت تابش باریکه پروتون قرار 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 مورد بررسی را مشخص می‌کند [31,32]. در این پژوهش، آزمایش میکروپیکسی با باریکه میکرونی پروتون با انرژی ۲/۲ MeV و شدت جریانی در حدود ۵۰-۱۰۰ pA که توسط شتابدهنده واندوگراف ۳ MV در پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای تولید می‌شود، انجام شده است. همچنین قطر باریکه پروتون در این آزمایش‌ها کمتر از ۱۰ میکرون بوده است. در این روش برای آشکارسازی پرتو Xهای گسیل شده از نمونه‌ها، از آشکارساز Si(Li) که دارای قدرت تفکیک ۱۵۰ eV است و در زاویه ۱۳۵ درجه نسبت به پرتوهای پروتون فرودی قرار گرفته، استفاده شده است. برای بررسی دقت آنالیزها و برآورد میزان خطا و عدم دقت در اندازه‌گیری عناصر تشکیل‌دهنده نمونه‌های مورد بررسی، نمونه‌های استاندارد مربوط به شیشه‌های تاریخی که از موزه کورنینگ نیویورک تهیه شده، هم‌زمان و تحت شرایط یکسان با نمونه‌ها، مورد آنالیز قرار گرفتند. با توجه به اینکه در آنالیز عنصری اشیاء شیشه‌ای مورد مطالعه از تخت سلیمان و اردبیل انواع مختلفی از ترکیبات شیشه مشاهده شد، بنابراین هر چهار نمونه استاندارد شیشه‌های تاریخی موزه کورنینگ که با کدهای A، B، C و D نام‌گذاری شده‌اند، آنالیز شدند. برای مقایسه نتایج اندازه‌گیری شده این چهار نمونه استاندارد در این پژوهش و مقادیر گزارش شده توسط آزمایشگاه مرجع در جدول ۲ گزارش شده است [33]. در این جدول، مقدار میانگین ۴ اندازه‌گیری مختلف برای هر نمونه استاندارد با مقدار گزارش شده توسط آزمایشگاه مرجع برای تمام عناصر اندازه‌گیری شده در این ۴ نمونه مقایسه شده است. بررسی این جدول نشان می‌دهد که روش میکروپیکسی قادر است با دقت بسیار خوبی ترکیبات عناصر تشکیل‌دهنده انواع مختلف شیشه‌های تاریخی را اندازه‌گیری کند.

جدول ۲: مقدار میانگین ۴ اندازه‌گیری مختلف در هر نمونه استاندارد و مقدار گزارش شده توسط آزمایشگاه مرجع برای تمام عناصر اندازه‌گیری شده در ۴ نمونه استاندارد شیشه موزه کورنینگ در این جدول ارائه شده است.

Table 2: The mean value of 4 different measurements in each glass standard and the quoted value for all elements measured in the 4 Corning glass standard.

Standard Samples	A		B		C		D	
	Measured (wt.%)	Quoted (wt.%)	Measured (wt.%)	Quoted (wt.%)	Measured (wt.%)	Quoted (wt.%)	Measured (wt.%)	Quoted (wt.%)
Na ₂ O	14.59	14.30	17.33	17.00	0.94	1.07	1.27	1.20
MgO	2.69	2.66	1.04	1.03	2.37	2.67	4.05	3.94
Al ₂ O ₃	1.12	1.00	4.24	4.26	1.30	0.87	5.84	5.30
SiO ₂	66.66	66.56	61.95	61.55	34.87	34.78	56.42	55.24
P ₂ O ₅	0.16	0.13	1.10	0.82	0.04	0.14	4.23	3.93
SO ₃	0.14	0.10	0.60	0.50	0.03	0.10	0.16	0.30
Cl	0.14	0.10	0.24	0.20	0.15	0.10	0.12	0.40
K ₂ O	2.70	2.87	1.01	1.00	2.60	2.84	10.7	11.3
CaO	4.58	5.03	8.04	8.56	4.66	5.07	13.1	14.8
TiO ₂	0.77	0.79	0.11	0.09	0.66	0.79	0.35	0.38
MnO	1.01	1.00	0.24	0.25	0.21	0.89	0.50	0.55
Fe ₂ O ₃	1.10	1.09	0.34	0.34	0.30	0.34	0.47	0.52
CoO	0.18	0.17	0.05	0.05	0.18	0.18	0.01	0.02
NiO	0.02	0.02	0.09	0.10	0.02	0.02	0.05	0.05
Cu ₂ O	1.13	1.17	2.58	2.66	1.27	1.13	0.33	0.38
ZnO	0.06	0.04	0.21	0.16	0.05	0.05	0.10	0.10
SrO	0.11	0.10	0.01	0.02	0.26	0.29	0.04	0.06
SnO ₂	0.60	0.19	0.00	0.02	0.09	0.19	0.00	0.10
Sb ₂ O ₅	1.55	1.75	0.24	0.46	0.01	0.03	0.95	0.97
BaO	0.45	0.56	0.02	0.05	11.51	11.40	0.27	0.51
PbO	0.09	0.12	0.52	0.61	37.76	36.70	0.44	0.48

جدول ۳: درصد وزنی عناصر موجود در نمونه‌های آنالیز شده از مجموعه تاریخی تخت سلیمان و محوطه‌های باستانی اردبیل به صورت اکسید و بر حسب درصد وزنی (nd=not detected)
Table 3: The elemental composition of analyzed samples in weight percent (wt.%) and oxide form in Takht-e Sulciman and Ardabil samples.

Samples	As ₂ O ₃	SnO ₂	BaO	PbO	SrO	ZnO	Cu ₂ O	CoO	Fe ₂ O ₃	MnO	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	K ₂ O	Cl	SO ₃	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O
Takht-Su1	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	1.07	0.03	0.14	0.14	10.2	1.85	0.72	0.15	0.55	62.83	3.23	4.17	14.63
Takht-Su2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	1.3	1.61	0.03	0.08	7.17	2.85	0.49	0.27	0.38	64.11	2.2	4.23	15.33
Takht-Su3	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.93	2.16	0.04	0.16	6.38	2.87	0.73	0.32	0.6	66.57	2.73	2.68	13.7
Takht-Su4	nd	nd	nd	nd	0.11	0.01	nd	nd	0.96	0.25	nd	0.14	6.24	4.42	0.68	0.39	0.49	61.7	5.23	1.9	17.49
Takht-Su5	nd	nd	nd	nd	nd	0.02	nd	nd	0.86	1.24	0.05	0.13	5.25	2.78	0.55	0.23	0.56	66.5	2.31	4.81	14.74
Takht-Su6	nd	nd	nd	nd	nd	0.15	0.18	0.04	1.55	0.02	nd	0.19	5.72	1.49	1.08	0.11	0.36	60.39	3.14	5.63	19.87
Takht-Su7	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	1.36	0.33	0.05	0.11	5.63	2.25	0.41	0.34	0.38	65.28	1.92	2.92	18.52
Takht-Su8	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.99	0.09	nd	0.17	3.93	3.38	0.86	0.34	0.52	67.02	2.49	1.73	18.2
Takht-Su9	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.02	nd	1.07	0.09	0.05	0.14	7.05	2.22	0.64	0.24	0.16	62.74	3.02	4.46	17.77
Takht-Su10	nd	nd	nd	0.05	nd	0.09	0.03	nd	1.08	0.46	0.05	0.15	7.97	2.3	0.53	0.35	0.37	64.45	2.95	3.6	15.28
Takht-Su11	nd	nd	nd	0.27	0.06	0.02	0.03	0.07	1.77	0.04	0.02	0.17	5.35	3.32	0.75	0.39	0.43	62.54	2.47	2.42	19.73
Takht-Su12	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	1.71	0.06	nd	0.22	7.28	3.53	0.72	0.16	0.35	61.78	4.62	3.55	15.69
Takht-Su13	nd	nd	2.15	25.79	nd	8.85	0.08	nd	10.01	0.64	nd	0.15	3.93	1.42	0.12	nd	0.44	37.69	3.89	nd	3.84
Takht-Su14	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.42	0.04	nd	0.05	3.81	2.8	1.02	0.22	0.28	64.97	2.09	4.36	19.69
Takht-Su15	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.94	0.24	nd	0.16	5.05	3	0.64	0.26	0.44	64.44	3.11	3.06	18.53
Takht-Su16	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	1.13	0.03	0.07	0.16	6.44	2.31	0.76	0.21	0.26	62.46	3.91	4.95	17.33
Takht-Su17	nd	nd	nd	nd	0.09	nd	nd	nd	0.85	0.03	nd	0.14	5.04	3.55	0.8	0.16	0.48	66.02	3.34	1.69	17.82
Takht-Su18	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	1.49	0.03	0.02	0.22	4.98	2.9	0.84	0.24	0.45	64.03	4.77	1.96	18.43
Takht-Su19a	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.01	nd	1.07	0.07	nd	0.14	5.8	2.46	0.78	0.19	0.33	63.83	2.81	3.26	18.86
Takht-Su19b	nd	nd	nd	0.66	nd	nd	1.81	nd	1.02	0.06	nd	0.13	5.63	2.4	0.78	0.26	0.41	62.07	2.82	2.87	18.95
Takht-Su20	nd	nd	nd	0.1	nd	nd	nd	nd	0.21	0.01	0.15	0.11	9.51	0.21	0.06	nd	0.24	71.16	2.27	0.62	15.04
Takht-Su21	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.02	nd	nd	nd	8.3	0.1	0.1	0.17	nd	72.04	1.3	1.88	15.65
Takht-Su22	nd	nd	nd	nd	0.06	0.03	nd	nd	0.28	0.98	nd	0.06	4.33	2.3	0.61	0.33	0.21	67.03	2.04	5.45	16.07
Takht-Su23	nd	nd	nd	nd	0.09	nd	nd	nd	1.07	0.03	nd	0.19	4.84	2.74	0.82	0.19	0.45	64.86	3.14	2.02	19.95
Takht-Su24	nd	nd	nd	nd	0.07	nd	0.01	nd	1.22	0.04	nd	0.2	5.69	3.12	0.69	0.17	0.38	68.1	3.77	1.91	14.26
Takht-Su25	nd	nd	nd	0.5	nd	nd	1.32	nd	0.64	0.1	nd	0.11	5.8	3.89	1.28	0.35	0.4	67.14	3.96	2.46	12.03
Takht-Su26	nd	8.24	nd	6.59	nd	0.02	1.04	nd	0.47	0.03	nd	nd	3.21	2.51	0.67	0.38	0.26	55.72	1.53	1.71	18.5
Takht-Su27	nd	nd	nd	0.08	nd	0.13	1.15	nd	0.64	0.56	0.02	0.07	7.19	2.14	0.73	0.47	0.3	65.46	1.98	3.42	15.64
Takht-Su28	nd	nd	nd	nd	nd	0.03	nd	nd	0.23	0.42	0.03	0.04	4.45	3.57	0.47	0.27	0.45	69.29	2.04	4.56	13.68
Ardabil1	nd	6.11	nd	14.39	nd	0.19	0.86	nd	0.27	nd	nd	nd	4.7	2.58	0.8	nd	nd	49.86	2.08	3.41	14.59
Ardabil2	nd	nd	nd	nd	nd	0.04	nd	nd	1.34	0.03	0.05	0.2	8.59	2.64	0.42	0.42	0.56	59.45	5.82	4.47	15.94
Ardabil3	nd	nd	nd	nd	0.08	nd	nd	nd	1.37	1.61	nd	0.08	6.65	3.19	0.77	0.24	0.54	64.6	2.05	4.43	15.85
Ardabil4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	1.08	0.08	nd	0.13	4.46	3.55	0.8	0.29	0.45	56.97	10.59	1.82	19.73
Ardabil5	0.2	nd	nd	nd	0.13	nd	nd	nd	0.06	0.03	nd	nd	10.7	0.06	0.05	0.65	nd	68.93	2.03	0.63	16.35
Ardabil6	0.6	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	1.01	0.4	nd	0.02	4.88	13.6	0.22	0.23	nd	74.02	1.81	0.58	3.15
Ardabil7	nd	nd	nd	nd	nd	nd	1.41	nd	0.79	0.83	nd	0.19	4.54	3.52	0.84	0.66	1	63.33	3.6	1.9	17.32

و اکسید سدیم به طور هم‌زمان استفاده شده است، دیده می‌شود [37]. علاوه بر این نمونه‌هایی از شیشه‌های نوع سرب-باریم [38] و شیشه‌های سیلیکا-پتاس-آهک [39] نیز در مجموعه آنالیز شده، دیده می‌شود. با توجه به تعداد زیاد نمونه‌های آنالیز شده و همچنین وجود گروه‌های مختلفی از انواع شیشه‌ها در این محوطه‌ها، برای بررسی و تحلیل آسانتر نتایج ترکیبات عنصری ارائه شده در جدول ۳ و پاسخگویی به سئوالات مطرح شده درباره تعیین نوع شیشه‌ها و نوع گداز‌آورها و همچنین بررسی تنوع و تعدد منابع اولیه مورد استفاده در ساخت آن‌ها، از نمودارهای پراکنده دو بُعدی نمونه‌های آنالیز شده بر اساس عنصری که به عنوان شاخص و تعیین‌کننده هر ماده اولیه هستند، استفاده می‌شود.

۱-۵. طبقه‌بندی شیشه‌های میراث جهانی تخت سلیمان و محوطه‌های باستانی اردبیل بر اساس ماده گداز‌آور

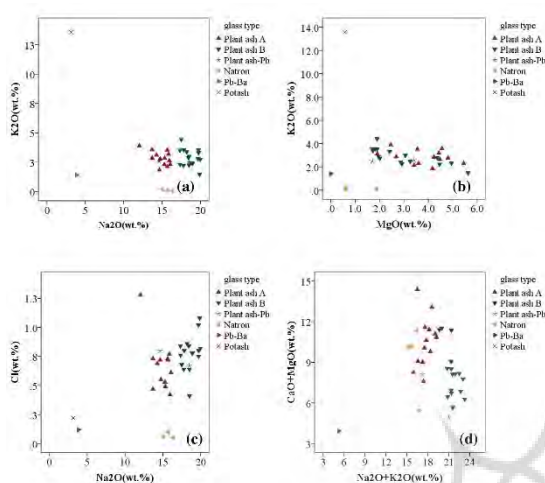
نتایج ارائه شده در جدول ۳ نشان می‌دهد که گداز‌آورهای متفاوت و گوناگونی در ساخت شیشه‌های به‌دست آمده از تخت سلیمان و اردبیل استفاده شده است. برای بررسی و طبقه‌بندی این شیشه‌ها بر اساس نوع گداز‌آور استفاده شده در آن‌ها، از نمودارهای دو بعدی که می‌توانند به عنوان شاخص و تعیین‌کننده نوع گداز‌آور باشد استفاده می‌شود که مجموع این نمودارها در شکل ۳ نشان داده شده است.

در شکل ۳a تغییرات درصد وزنی اکسید سدیم بر حسب اکسید پتاسیم برای تمام شیشه‌های آنالیز شده از این محوطه‌ها رسم شده است. تغییرات اکسید سدیم بر حسب اکسید پتاسیم، برای تقسیم‌بندی و تمایز انواع شیشه‌ها از نظر نوع گداز‌آور استفاده شده و به‌خصوص دو نوع شیشه سیلیکا-سودا-آهک و شیشه سیلیکا-پتاس-آهک بسیار مفید و قابل استفاده است. همان‌طور که در شکل ۳a مشاهده می‌شود، شیشه‌های آنالیز شده از این محوطه‌ها در شش گروه قابل طبقه‌بندی هستند. شکل ۳a نشان می‌دهد که غالب نمونه‌های آنالیز شده

همان‌طور که اشاره شد در این طرح پژوهشی، با استفاده از روش میکروویکیسی ۳۶ نمونه از اشیاء شیشه به‌دست آمده از مجموعه تاریخی تخت‌سلیمان و چند محوطه تاریخی در اردبیل مورد آزمایش قرار گرفت. عناصری که در تمام این ۳۶ نمونه اندازه‌گیری شده‌اند 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) و اکسید آهن (Fe_2O_3) است. همچنین در تعدادی از نمونه‌ها نیز اکسید کروم (Cr_2O_3)، اکسید کبالت (CoO)، اکسید مس (Cu_2O)، اکسید روی (ZnO)، اکسید استرانسیم (SrO) و اکسید سرب (PbO) اندازه‌گیری شده است. علاوه بر این در یکی از نمونه‌ها اکسید باریم (BaO) و در دو نمونه نیز اکسید قلع (SnO_2) و اکسید آرسنیک (As_2O_5) وجود دارد. درصد وزنی این عناصر برای تمام نمونه‌های آنالیز شده به صورت اکسید در جدول ۳ ارائه شده است.

با توجه به جدول ۳ مشاهده می‌شود که ترکیبات عمده تشکیل دهنده تعداد زیادی از شیشه‌های آنالیز شده از این محوطه‌ها اکسید سیلیسیم، اکسید سدیم و اکسید کلسیم است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تعداد قابل توجهی از شیشه‌های آنالیز شده از این محوطه‌ها از نوع شیشه‌های سیلیکا-سودا-آهک هستند. از طرفی همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود در تعداد قابل توجهی از شیشه‌های سیلیکا-سودا-آهک در این محوطه‌ها درصد وزنی اکسید منیزیم بیشتر از ۲ درصد و اکسید پتاسیم نیز بیشتر از ۲/۵ درصد است که نشان می‌دهد در این نمونه‌ها، منبع تأمین اکسید سدیم که به عنوان گداز‌آور در فرایند ساخت استفاده شده است، از خاکستر حاصل از گیاهان رشد یافته در خاک‌های شور بوده است [34]. اما در این جدول نمونه‌هایی مشاهده می‌شود که درصد وزنی اکسید منیزیم و اکسید پتاسیم کمتر از ۱/۵ درصد است که این نمونه‌ها، از نوع شیشه‌های ناترونی هستند [35,36]. همچنین در این جدول، شیشه‌هایی که در آن‌ها از دو نوع گداز‌آور اکسید سرب

آهک قرار می‌گیرد [39]. بنابراین این آنالیزها نشان می‌دهد که در نمونه‌های مورد مطالعه از این محوطه‌ها از هر چهار گروه شناخته شدهٔ اصلی شیشه [3] که هر کدام متعلق به جغرافیای مشخص و شناخته شده‌ای است حداقل یک نمونه یافت شده است.



شکل ۳: a- تغییرات درصد وزنی اکسید سدیم بر حسب اکسید پتاسیم، b- تغییرات درصد وزنی اکسید منیزیم بر حسب اکسید پتاسیم، c- تغییرات درصد وزنی اکسید سدیم بر حسب کلر d- تغییرات درصد وزنی مجموع اکسید سدیم و پتاسیم بر حسب مجموع اکسید منیزیم و کلسیم در نمونه‌های آنالیز شده از تخت سلیمان و اردبیل.

Fig 3: Scatter plot in wt.% of (a): sodium oxide (Na_2O) versus potassium oxide (K_2O), (b): magnesium oxide (MgO) versus potassium oxide (K_2O), (c): sodium oxide (Na_2O) versus chlorine, (d): total of sodium oxides and potassium oxides in terms of total of magnesium oxides and calcium oxides, in analyzed samples from Takht-e Suleiman and Ardabil.

برای مشخص شدن بهتر و دقیق‌تر شیشه‌های ناترونی و شیشه‌هایی که در تولید آن‌ها از خاکستر گیاهان استفاده شده است، در شکل ۳b تغییرات درصد وزنی اکسید منیزیم بر حسب اکسید پتاسیم در نمونه‌های آنالیز شده از این محوطه‌ها رسم شده است. با توجه به این نمودار، تفاوت بین دو گروه Plant-ash A و Plant-ash B بر اساس عناصر دیگر نیز واضح‌تر می‌شود. همان‌طور که در این شکل مشخص است در گروه Plant-ash A مقدار اکسید منیزیم تقریباً در تمام نمونه‌های این گروه بیشتر از ۲/۵ درصد و بین ۵/۵-

از نوع شیشه‌های سیلیکا-سودا-آهک است که این نوع از شیشه‌ها در این محوطه‌ها به سه گروه متفاوت تقسیم می‌شوند. دو گروه از این سه گروه که بیشترین نمونه‌ها به آن‌ها تعلق دارد از نوع شیشه‌های سیلیکا-سودا-آهک است که از خاکستر گیاهان به عنوان مادهٔ اولیه گدازآور در آن‌ها استفاده شده است. این دو گروه در این مقاله با Plant-ash A و Plant-ash B نام گذاری شده‌اند و بر اساس درصد وزنی اکسید سدیم کاملاً از یکدیگر جدا شده‌اند. در گروه Plant-ash A درصد وزنی اکسید سدیم تقریباً بین ۱۷ تا ۲۰ درصد تغییر می‌کند، در صورتی که در گروه Plant-ash B درصد وزنی اکسید سدیم بین ۱۳ تا ۱۶ درصد تغییر می‌کند. این در حالی است که درصد وزنی اکسید پتاسیم در این دو گروه تقریباً ثابت است و بین ۲/۷ تا ۴/۸ درصد تغییر می‌کند. اما گروه سوم از شیشه‌های سیلیکا-سودا-آهک به نام گروه Natron نام‌گذاری شده است و سه نمونه را در بر می‌گیرد. در این گروه همان‌طور که معمول است مقدار اکسید پتاسیم کمتر از ۱ درصد است. مقدار اکسید سدیم در این گروه نیز حدود ۱۵ درصد است. نمونه‌های مشابه این گروه که در غالب شیشه‌های ناترونی طبقه‌بندی می‌شوند، محل تولید آن‌ها غالباً کشورهای حوزهٔ شرق مدیترانه بوده است [35,36]. گروه چهارم که شامل دو نمونه است، گروه Plant ash-Pb نامیده شده است. در این دو نمونه از ترکیب هم‌زمان اکسید سدیم و اکسید سرب به عنوان گدازآور استفاده شده است [37]. این دو نمونه هر دو دارای رنگ آبی فیروزه‌ای هستند و در ترکیب هر دوی این نمونه‌ها بیش از ۶ درصد اکسید قلع نیز اندازه‌گیری شده است. دو گروه دیگر که در نمونه‌های آنالیز شده مشخص شده‌اند و هر کدام یک نمونه را شامل می‌شوند گروه Pb-Ba و گروه Potash نامیده شده است. در گروه Pb-Ba نمونه‌ای قرار دارد که در ترکیب عنصری آن ۲/۵ درصد اکسید باریوم و ۲۵ درصد اکسید سرب وجود دارد و جزء شیشه‌های باریوم-سرب قرار می‌گیرد [40]. نمونهٔ متعلق به گروه Potash که حدود ۱۴ درصد اکسید پتاسیم در ترکیب آن اندازه‌گیری شده است در گروه شیشه‌های سیلیکا-پتاس-

این مناطق تاریخی وارد شده باشد [42]. همچنین با احتمال بسیار زیاد شیشه‌های ترکیبی سودا-سرب و پتاس نیز منشأ اروپایی دارند و از کشورهای این مناطق وارد شده‌اند [3]. البته وجود چنین تعاملاتی دور از ذهن نیست و می‌توانسته از طریق جاده ابریشم که از حوزه مدیترانه و چین و اروپا به این مناطق می‌رسیده، این کار را تسهیل کند [43].

۲-۵. بررسی تغییرات و تنوع منابع سیلیس

برای بررسی تفاوت‌های موجود در منابع سیلیس استفاده شده در مصنوعات شیشه‌ای این محوطه‌ها، یکی از بهترین معیارهایی که تاکنون پیشنهاد شده و مورد استفاده قرار گرفته است، بررسی نحوه تغییرات درصد وزنی اکسید سیلیسیم بر حسب مقدار ناخالصی-هایی مانند اکسید آلومینیم، اکسید تیتانیوم و یا اکسید آهن است که منشأ این عناصر، ناخالصی‌های موجود در ماده اولیه سیلیس است [44,5].

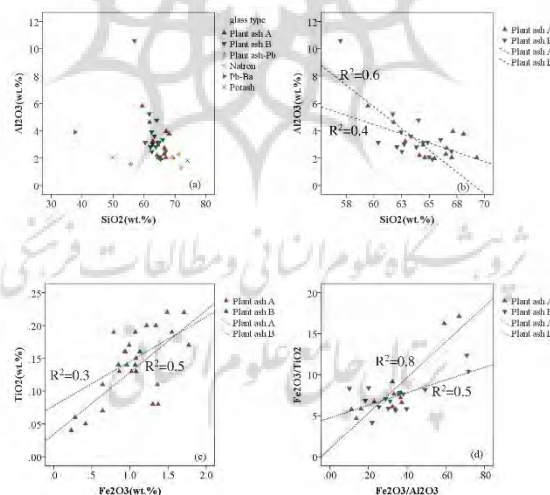
در شکل ۴a تغییرات درصد وزنی اکسید سیلیسیم بر-حسب اکسید آلومینیم در شش گروه مشخص شده در نمونه‌های آنالیز شده از تخت سلیمان و اردبیل نشان داده شده است. بر اساس این نمودار، روند کلی تغییرات این دو اکسید که وجود آن‌ها در شیشه ناشی از ماده اولیه سیلیس است، برای تمام نمونه‌های آنالیز شده که در سه گروه سیلیکا-سودا-آهک و همچنین یک نمونه متعلق به گروه سیلیکا-پتاس-آهک قرار دارند، یکسان است. تنها چهار نمونه از این روند کلی تغییرات پیروی نمی‌کنند که این نمونه‌ها عبارت هستند از: ۱- نمونه‌ای که در آن درصد وزنی اکسید آلومینیم بسیار زیاد است و از این نظر با تمام نمونه‌های سیلیکا-سودا-آهک متفاوت است. این نمونه از نظر ترکیبات عنصری به نمونه‌های آسیای میانه بسیار نزدیک است و چنین نمونه‌های شیشه با درصد آلومینیم بالا از مناطقی مانند ازبکستان و افغانستان تاکنون گزارش شده‌اند [45]. همچنین سه نمونه دیگر نیز متعلق به گروه‌های Plant ash-Pb و Pb-Ba هستند. اما در شکل ۴a مشخص است که خلوص سیلیس در نمونه‌های متعلق به گروه-

۲/۵ درصد تغییر می‌کند، در صورتی که در گروه Plant-ash B در تعداد زیادی از نمونه‌ها مقدار اکسید منیزیم بین ۲-۳ درصد است و فقط در ۴ نمونه مقدار آن بین ۴-۶ درصد است. این تفاوت واضح و آشکار بیانگر استفاده از دو نوع ماده اولیه جداگانه و متفاوت به عنوان گدازآور در ساخت نمونه‌های این محوطه‌ها است. از عناصر مهم دیگری که می‌توان نوع گدازآور استفاده شده را مشخص کرد و بر اساس آن‌ها شیشه-های ناترونی را از شیشه‌های تولید شده با خاکستر گیاهان به وضوح تمایز داد، درصد وزنی عنصر کلر است که در نمودار ۳c تغییرات درصد وزنی اکسید سدیم بر حسب کلر نشان داده شده است. تغییرات درصد وزنی اکسید سدیم بر حسب کلر نشان می‌دهد که باز هم شیشه‌های تولید شده با خاکستر گیاهان به دو گروه Plant-ash A و Plant-ash B قابل جداسازی هستند و این دو گروه نیز کاملاً از شیشه‌های ناترونی قابل تفکیک هستند. بررسی‌های انجام شده، نشان داده است که شیشه‌های سیلیکا-سودا-آهک به دست آمده از خاکستر گیاهان دارای ناخالصی کلر زیاد و نمونه‌های ناترونی دارای درصد وزنی کلر بسیار کم هستند [41] که در اینجا نیز کاملاً قابل مشاهده است. تغییرات عناصر قلیایی که شامل مجموع اکسید سدیم و پتاسیم است برحسب عناصر قلیایی خاکی که شامل مجموع اکسید کلسیم و منیزیم است، معیار دیگری برای بررسی نوع گدازآور استفاده شده در شیشه است. نمودار رسم شده در ۳d دوباره به طور واضح نشان می‌دهد که شیشه‌های تولید شده با خاکستر گیاهان در این محوطه‌ها به دو گروه متمایز تقسیم شده‌اند.

همچنین بر اساس این نمودارها وجود برخی از نمونه‌هایی که منشأ غیر بومی دارند و می‌توانند بر اساس تبادلات تجاری به این محوطه‌ها وارد شده باشند، کاملاً مشخص و تأیید می‌شود. به عنوان مثال ترکیبات نمونه‌های ناترونی به گروه‌های شناخته شده شیشه‌های ناترونی در شرق حوزه مدیترانه بسیار نزدیک است و می‌تواند از این مناطق وارد شده باشد [36]. شیشه نوع سرب-باریم نیز یکی از انواع شیشه‌ها است که منشأ و محل تولید آن‌ها چین است و می‌تواند از این کشور به

همبستگی بین این دو ناخالصی، برای نمونه‌های دو گروه با یکدیگر متفاوت است. ضریب همبستگی برای گروه Plant-ash A دارای مقدار $R^2=0.40$ و مقدار ضریب همبستگی برای گروه Plant-ash B دارای مقدار $R^2=0.60$ است. بنابراین بر اساس نحوهٔ تغییرات بین عناصر مرتبط با سیلیس در نمونه‌های آنالیز شده از این محوطه‌ها، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که شیشه‌های این دو گروه بر اساس مادهٔ اولیه سیلیس نیز احتمالاً از منابع اولیهٔ متفاوتی استفاده کرده‌اند [46,47]. همچنین بر اساس روند و نحوهٔ تغییرات درصد وزنی اکسید تیتانیوم بر حسب اکسید آهن (شکل ۴c) و تغییرات نسبی اکسید آهن به اکسید آلومینیم بر حسب تغییرات نسبی اکسید آهن به اکسید تیتانیوم [47] (شکل ۴d) در دو گروه مشخص شدهٔ سیلیکا-سودا-آهک تولید شده با خاکستر گیاهان در نمونه‌های آنالیز شده از تخت سلیمان و اردبیل، استفاده از منابع متفاوت سیلیس دوباره تأیید می‌شود.

Natron و Potash بسیار بهتر از دیگر نمونه‌های آنالیز شده از این محوطه‌ها است. در نمونه‌های ناترونی و پتاس که قطعاً نمونه‌های وارداتی هستند، درصد ناخالصی اکسید آلومینیم حدود ۲ درصد و بسیار کمتر از دیگر نمونه‌های آنالیز شده از این محوطه‌ها است که این ناخالصی بین ۲ تا ۶ درصد تغییر می‌کند. اما با توجه به اینکه تعداد زیادی از نمونه‌های آنالیز شده در دو گروه Plant-ash A و Plant-ash B قرار دارند و مشاهده شد که در نمونه‌های این دو گروه از نظر مادهٔ اولیه سودا و خاکستر استفاده شده در آن‌ها از یکدیگر قابل تفکیک و جدا شدن هستند، برای بررسی بهتر کیفیت سیلیس و تغییرات موجود در آن، نمونه‌های این دو گروه از نظر تغییرات ناخالصی‌های سیلیس به صورت جداگانه نیز بررسی می‌شود. تغییرات اکسید آهن بر حسب اکسید آلومینیم در نمونه‌های متعلق به دو گروه Plant-ash A و Plant-ash B شکل ۴b رسم شده است. این نمودار نشان می‌دهد که بین این دو اکسید یک همبستگی خطی منفی وجود دارد. اما ضریب



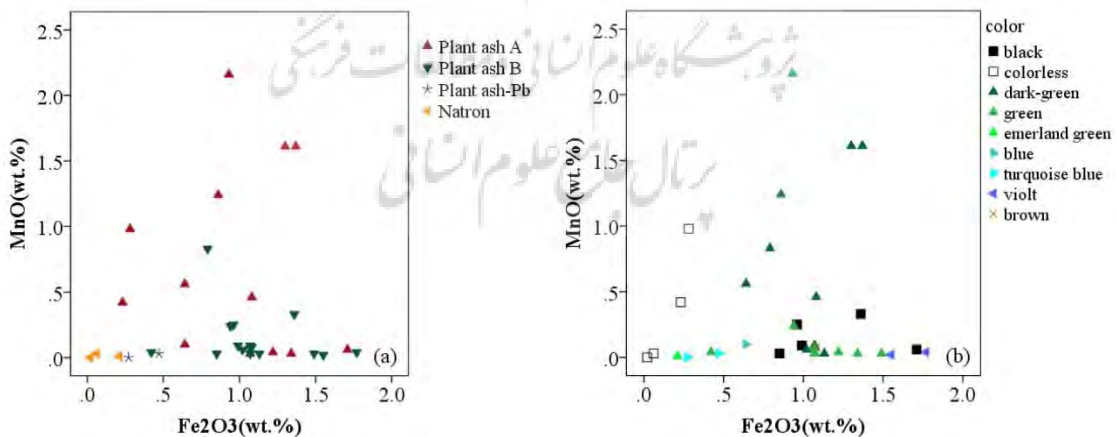
شکل ۴: a- تغییرات درصد وزنی اکسید سیلیسیم بر حسب اکسید آلومینیم در شش گروه مشخص شده در نمونه‌های آنالیز شده، b- تغییرات درصد وزنی اکسید سیلیسیم بر حسب اکسید آلومینیم، c- تغییرات درصد وزنی اکسید تیتانیوم بر حسب اکسید آهن d- تغییرات نسبت اکسید آهن به اکسید آلومینیم بر حسب نسبت اکسید آهن به اکسید تیتانیوم در دو گروه مشخص شده سیلیکا-سودا-آهک تولید شده با خاکستر گیاهان در نمونه‌های آنالیز شده از تخت سلیمان و اردبیل. همبستگی خطی بین ناخالصی‌های مربوط به سیلیس با خط چین قرمز و سبز رنگ برای این دو گروه در این شکل نشان داده شده است.

Fig. 4: (a): Scatter plot in wt.% of silicon oxide (SiO_2) in terms of aluminum oxide (Al_2O_3) in the 6 groups identified in the analyzed samples, (b): Scatter plot in wt.% of silicon oxide (SiO_2) in terms of aluminum oxide (Al_2O_3), (c): Scatter plot in wt.% of titanium oxide in terms of iron oxide (d): Scatter plot in wt.% of ratio of iron oxide to aluminum oxide in terms of the ratio of iron oxide to titanium oxide, in the two identified groups of plant-ash silica-soda-lime in analyzed samples from Takht-e Soleiman and Ardabil. The linear correlation between silica impurities is shown in this figure with red and green dash lines in two groups.

کننده متفاوتی مانند اکسید منگنز یا اکسید آنتیمون و یا ترکیب این دو اکسید استفاده می‌کردند [48]. اما همان‌طور که در تصاویر اپتیکی نمونه‌های آنالیز شده از تخت سلیمان و اردبیل دیده می‌شود (شکل ۲)، در شیشه‌های این دو محوطه علاوه بر رنگ‌های سبز تیره و روشن، رنگ‌های سبز زمردی، ارغوانی، بنفش، سیاه، قهوه‌ای و آبی فیروزه‌ای نیز مشاهده می‌شوند. بنابراین در این بخش نقش عناصر مختلف در ایجاد چنین رنگ‌های متنوع در این شیشه‌ها و عامل ایجاد هر رنگ مشخص خواهد شد. بررسی‌ها نشان می‌دهد برای ایجاد چنین رنگ‌هایی غالباً از اکسیدهای عناصر واسطه مانند اکسیدهای آهن، مس، منگنز و کبالت استفاده می‌شده است. اما در ایجاد رنگ‌های مختلف علاوه بر نوع ماده، دمای اکسیداسیون نیز نقش بسزایی داشته است، زیرا هر کدام از این عناصر واسطه دارای عدد اکسایش مختلفی هستند که در دماهای مختلفی اکسید می‌شوند و با تغییر دما، می‌توان با استفاده از یک ماده رنگزا، رنگ‌های مختلفی تولید کرد [49,50]. همچنین در این نمونه‌ها تعدادی شیشه سفید و بی‌رنگ نیز دیده می‌شود که در ادامه عامل اصلی بی‌رنگ شدن این شیشه‌ها نیز بررسی خواهد شد [50,51].

۳-۵. بررسی مواد رنگزا، بی‌رنگ کننده و کدر کننده

رنگ سبز، یکی از رنگ‌هایی است که همواره و با فراوانی بسیار زیاد در شیشه‌های تاریخی که از دوره‌های مختلف به دست آمده‌اند، مشاهده می‌شود. علت اصلی ایجاد این طیف رنگی در شیشه‌های تاریخی، به طور عمده ناخالصی اکسید آهن موجود در سیلیس است و این رنگ تقریباً در تمام نمونه‌هایی که از شن و ماسه به عنوان ماده اولیه سیلیس استفاده کرده‌اند، وجود دارد. بنابراین اکسید آهن به صورت ناخواسته در ترکیبات شیمیایی شیشه‌های تاریخی وارد و سبب ایجاد طیف رنگی سبز در نمونه‌های شیشه‌ای شده است که غالباً مطلوب هنرمندان و شیشه‌گران نبوده است و همواره سعی آن‌ها این بوده است که تا حد امکان این طیف رنگی را با افزودن موادی به نام رنگبر از بین ببرند [2]. اگرچه از مواد دیگری مانند اکسید مس هم برای ایجاد رنگ سبز در شیشه‌ها استفاده می‌شود که در این موارد این ماده رنگزا به صورت عمدی وارد فرایند ساخت می‌شود. بنابراین نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که شیشه‌گران در دوره‌های مختلف صنعت شیشه‌گری، برای از بین بردن رنگ‌های ناخواسته در شیشه و ایجاد یک ماده شفاف و بی‌رنگ از مواد رنگبر و بی‌رنگ

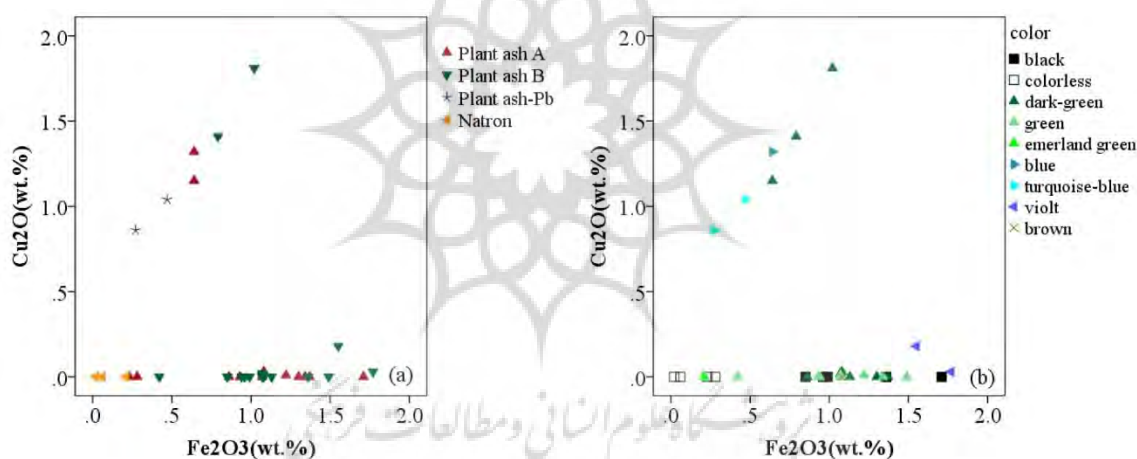


شکل ۵-۲: تغییرات درصد وزنی اکسید آهن بر حسب اکسید منگنز در گروه‌های مختلف مشخص شده بر اساس ماده گدازآور استفاده شده، b - تغییرات درصد وزنی اکسید آهن بر حسب اکسید منگنز بر اساس رنگ‌های ایجاد شده در نمونه‌های آنالیز شده از تخت سلیمان و اردبیل.

Fig.5: Scatter plot in wt.% of (a): iron oxide(Fe_2O_3) in terms of manganese oxide (MnO) in different groups determined based on the flux, (b) iron oxide(Fe_2O_3) in terms of manganese oxide (MnO) based on color of analyzed samples from Takht-e Suleiman and Ardabil.

غیر عمد در شیشه‌ها به عنوان مواد رنگزا وارد شده است، اما در تعدادی از نمونه‌ها به احتمال بسیار زیاد برای ایجاد رنگ مورد نظر در نمونه از اکسید آهنی که به صورت عمد اضافه شده است، نیز کمک گرفته شده است. این رنگ‌ها شامل رنگ قهوه‌ای، سیاه و بنفش هستند که یکی از عناصری که سبب ایجاد چنین رنگی در نمونه شده است، اکسید آهن است. دسته دوم شامل تعدادی از نمونه‌های متعلق به گروه Plant-ash A هستند که اکسید منگنز بین ۲/۲۵-۰/۵۰ درصد و اکسید آهن نیز بین ۱/۵۰-۰/۵۰ درصد تغییر می‌کند که با توجه به شکل ۵b این نمونه‌ها غالباً شامل نمونه‌هایی هستند که رنگ سبز تیره دارند. در این گروه، مادهٔ رنگبر به صورت عمدی وارد شده است ولی مادهٔ رنگزای اکسید آهن باز هم غیر عمد استفاده شده است.

در شکل ۵a تغییرات اکسید آهن بر حسب اکسید منگنز برای نمونه‌های آنالیز شده از این محوطه برای چهار گروه مختلف مشخص شده بر اساس نوع شیشه‌ها و در شکل ۵b تغییرات اکسید آهن بر حسب اکسید منگنز بر حسب نوع رنگ نمونه‌ها رسم شده است. همان‌طور که در شکل ۵a مشاهده می‌شود، بر اساس تغییرات میزان اکسید آهن بر حسب اکسید منگنز، نمونه‌های آنالیز شده از این محوطه به دو دستهٔ عمده تقسیم می‌شوند: دستهٔ اول نمونه‌هایی هستند که در آن‌ها مقدار اکسید منگنز کمتر از ۰/۳ درصد و اکسید آهن نیز کمتر از ۲ درصد است. این گروه تعداد زیادی از نمونه‌های آنالیز شده از تخت سلیمان و اردبیل را شامل می‌شوند و شامل اکثر رنگ‌ها نیز هستند. این تغییر ناخالصی‌ها به این معنی است که اگرچه عامل ایجاد بسیاری از این رنگ‌ها، ناخالصی‌های موجود در سیلیس است که به صورت



شکل ۶: a- تغییرات درصد وزنی اکسید آهن بر حسب اکسید مس در گروه‌های مختلف مشخص شده بر اساس ماده‌گذار آور استفاده شده، b-

تغییرات درصد وزنی اکسید آهن بر حسب اکسید مس بر اساس رنگ‌های ایجاد شده در نمونه‌های آنالیز شده از تخت سلیمان و اردبیل

Fig.6: Scatter plot in wt.% of (a): iron oxide(Fe_2O_3) in terms of copper oxide(Cu_2O) in different groups determined based on the flux, (b) iron oxide(Fe_2O_3) in terms of copper oxide(Cu_2O) based on color of analyzed samples from Takht-e Suleiman and Ardabil.

در این شکل‌ها نشان داده شده است، مشخص است که بر اساس مواد رنگزای اکسید مس و اکسید آهن این نمونه‌ها به سه دستهٔ عمده تقسیم می‌شوند. در دستهٔ اول مشاهده می‌شود که اکسید آهن تنها به عنوان عامل رنگزا عمل می‌کند و این مادهٔ رنگزا تنها از ناخالصی موجود در سیلیس ناشی نمی‌شود و در برخی نمونه‌ها به صورت عمد اضافه شده است. در این گروه بیشتر

در شکل ۶a تغییرات درصد وزنی اکسید آهن بر حسب اکسید مس در گروه‌های مختلف مشخص شده بر اساس نوع شیشه‌ها و در شکل ۶b تغییرات درصد وزنی اکسید آهن بر حسب اکسید مس بر اساس رنگ‌های ایجاد شده در نمونه‌های آنالیز شده از دو محوطهٔ تخت سلیمان و اردبیل نشان داده شده است. بر اساس تغییرات اکسید مس بر حسب اکسید آهن که نتایج آن

محل تولید و تفاوت در مواد اولیه استفاده شده در نمونه‌های کشف شده در هر یک از محوطه‌های تاریخی بتوان اظهار نظر کرد، یکی از فاکتورها راهکارهای مهم بررسی تغییرات درصد وزنی اکسید آلومینیم برحسب نسبت اکسید منیزیم به اکسید کلسیم در نمونه‌های مختلف است که در مقالات متعددی از این رهیافت و مقایسه استفاده شده است [10, 43, 57]. همان‌طور که در مطالب پیشین نیز اشاره شد مقدار اکسید آلومینیم موجود در شیشه‌ها که یکی از ناخالصی‌های موجود در سیلیس است، شاخص بسیار 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 در شیشه‌ها، نشان دهنده ویژگی‌های منابع سودای مورد استفاده در فرایند ساخت است. در شکل ۷ نتایج مقایسه نمونه‌های آنالیز شده در این پژوهش و نمونه‌های آنالیز شده از محوطه‌های مختلف از عراق، سوریه، فلسطین، مصر و ایران نشان داده شده است.

بر اساس این نمودار ترکیبات شیشه‌های نوع سیلیکا-سودا-آهک دوره اسلامی و دوره ساسانی که از نظر تاریخی بسیار نزدیک به شیشه‌های اوایل دوره اسلامی هستند، همان‌طور که در شکل ۷ با خطوط راست خط-چین نشان داده شده است، به سه ناحیه تقریباً مجزا تقسیم می‌شوند که عبارت هستند از: نمونه‌های شرق مدیترانه، نمونه‌های بین‌النهرین نوع ۱ و نمونه‌های بین‌النهرین نوع ۲. بر اساس این نمودار همان‌طور که در شکل ۷ کاملاً مشخص است، نمونه‌های آنالیز شده در این پژوهش که با نماد (سیمبل) مثلث‌های رنگی سبز و قرمز نشان داده شده‌اند، به طور کامل از نمونه‌های آنالیز شده از شرق مدیترانه که شامل محوطه‌هایی از سوریه، مصر، فلسطین و لبنان است، جدا می‌شوند. تنها شیشه‌های ناترونی محوطه‌های تخت سلیمان و اردبیل هستند که در ناحیه مربوط به نمونه‌های شرق مدیترانه قرار گرفته‌اند و کاملاً نیز با منشأ تولید آن‌ها مطابقت دارد. همچنین در شکل ۷ کاملاً مشخص است که شیشه‌های نوع سیلیکا-سودا-آهک تخت سلیمان و اردبیل، به دو گروه عمده تقسیم شده-

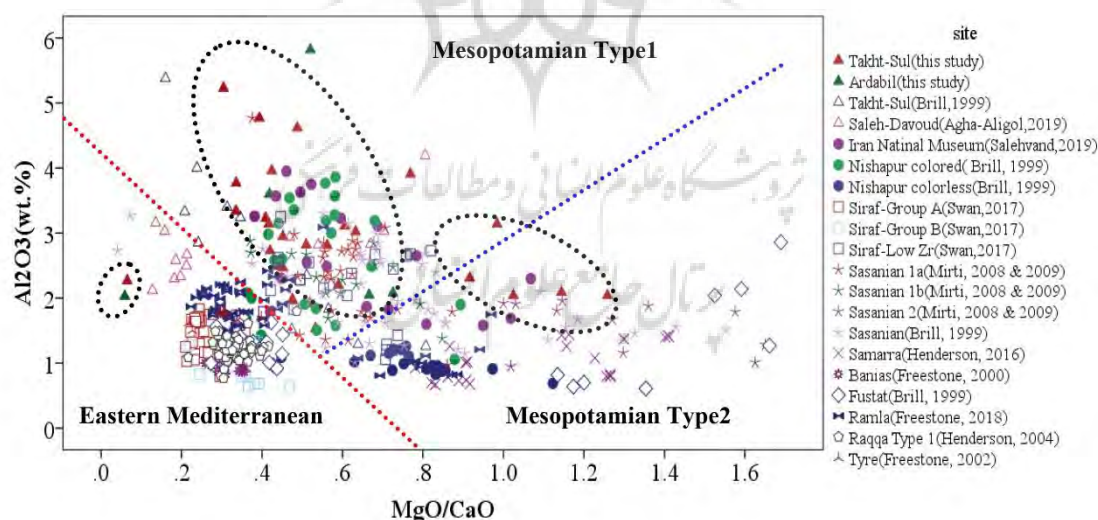
نمونه‌های گروه Plant-ash A و Plant-ash B قرار دارند و شامل نمونه‌های سبز، سیاه، قهوه‌ای و بنفش هستند. اما در نمونه‌های گروه دوم که تنها تعدادی بسیار کمی از نمونه‌ها را شامل می‌شود مقدار اکسید آهن بسیار کم است و این نمونه‌ها سفید رنگ هستند. گروه سوم که فقط شامل نمونه‌های آبی فیروزه‌ای و سبز تیره هستند، اکسید مس به صورت عمد به خمیره شیشه اضافه شده است و اکسید آهن بازم غیر عمد است. در این نمونه‌ها مقدار اکسید مس در بازه ۲/۱-۰/۷۵ درصد تغییر می‌کند.

۵-۴. بررسی محل تولید شیشه‌های نوع سیلیکا-سودا-آهک

برای بررسی خاستگاه و محل تولید نمونه‌های تخت سلیمان و اردبیل، با توجه به اینکه ترکیبات تشکیل دهنده شیشه‌های تاریخی با زمان ساخت و همچنین محل و جغرافیای محل تولید آن ارتباط تنگاتنگ و معنی‌داری دارند [3]، از مقایسه ترکیبات عنصری نمونه‌هایی که از نظر دوره تاریخی نزدیک و مقارن به نمونه‌های میراث جهانی تخت سلیمان و محوطه‌های باستانی اردبیل هستند و همچنین از نظر منطقه‌ای این احتمال وجود دارد که مواد اولیه یا نمونه‌های ساخته شده به صورت کامل، از آنجا تأمین شده باشد، کمک گرفته شد. این مقایسه محوطه‌هایی بسیار مهم از کشورهای حوزه شرق مدیترانه مانند سوریه [52]، فلسطین [43, 53]، لبنان [54] و مصر [7] که در اوایل دوره اسلامی تأمین کننده عمده شیشه در جهان بوده‌اند، را شامل می‌شود. همچنین به دلیل نزدیکی تاریخی شیشه‌های ساسانی و اوایل دوره اسلامی، شیشه‌های آنالیز شده از محوطه‌های تاریخی مانند تیسفون و وه اردشیر [7, 55, 56] و سامراه [8] از کشور هم‌جوار و همسایه مانند عراق نیز با نمونه‌های این منطقه مقایسه شده است. علاوه بر این، نتایج به دست آمده از شیشه‌های ایرانی هم که تاکنون آنالیز شده‌اند با نمونه‌های آنالیز شده در این پژوهش مقایسه شده‌اند [7, 10, 11, 13]. برای این مقایسه و برای اینکه در مورد

از فرمولاسیون و مواد اولیه مورد استفاده در دوره ساسانی ادامه یافته است. همچنین بر اساس دوره تاریخی با توجه به نزدیکی دوران اوایل اسلامی و ساسانی، تفکیک‌پذیری این دو دوره تاریخی به صورت کامل امکان پذیر نیست. بنابراین کاملاً با یقین می‌توان گفت شیشه‌های تخت سلیمان و اردبیل با شیشه‌های دوره اسلامی در حوزه شرق مدیترانه و غالب نمونه‌های ساسانی نوع ۲ کاملاً متفاوت است و با استفاده از منابع تأمین کننده سودا و سیلیس که به صورت بومی و منطقه‌ای در ایران تولید می‌شده است، ساخته شده‌اند، ولی همان‌طور که اشاره شد تعدادی از نمونه‌های تخت سلیمان نیز می‌توانند محل تولیدشان در عراق باشد. لازم به ذکر است که سه گروه دیگر شناسایی شده در این پژوهش که شامل گروه Plant ash-Pb، گروه-Pb Ba و گروه Potash بودند و به طور مبسوط مورد بحث قرار گرفتند، کاملاً نمونه‌های غیر بومی ایران هستند و از مناطق دیگری خارج از ایران به تخت سلیمان و اردبیل وارد شده‌اند.

اند و تقریباً تمام نمونه‌های آنالیز شده از دوره ساسانی این محوطه‌ها در گروه نمونه‌های بین النهرین ۲ که شامل گروه خاصی از نمونه‌های دوره ساسانی که نمونه‌های ساسانی نوع ۲ نامیده شده‌اند [56] و نمونه‌های اوایل دوره اسلامی از سامره در عراق، قرار گرفته‌اند. بنابراین همان‌طور که در این شکل مشخص است به احتمال زیاد محل تولید این نمونه‌های به دست آمده در تخت سلیمان می‌تواند منطقه بین النهرین در عراق باشد. همچنین گروه دیگری از شیشه‌های سیلیکا-سودا-آهک به دست آمده از محوطه‌های مورد مطالعه در این پژوهش در ناحیه‌ای قرار گرفته‌اند که در شکل ۷ با نام بین النهرین نوع ۱ نام‌گذاری شده است. در این ناحیه تقریباً تمام نمونه‌های آنالیز شده از ایران که قدمت آن‌ها به دوره اوایل اسلامی بر می‌گردد و همچنین گروه دیگری از نمونه‌های ساسانی که نمونه‌های ساسانی نوع ۱ نامیده شده و از محوطه‌های تاریخی دوره ساسانی در عراق به دست آمده‌اند [56]، قرار گرفته‌اند. البته نزدیکی ترکیبات سازنده این نمونه‌ها به نمونه‌های دوره ساسانی دور از ذهن نیست، زیرا صنعت شیشه‌گری در دوره اسلامی در ایران با پیروی



شکل ۷: تغییرات درصد وزنی اکسید آلومینیم برحسب نسبت اکسید منیزیم به اکسید کلسیم در تمام نمونه‌های آنالیز شده در این پژوهش و مقایسه آن‌ها با نمونه‌هایی از سوریه [52]، فلسطین [43,53]، لبنان [54]، مصر [7] و محوطه‌های تاریخی مانند تیسفون و وه اردشیر [7,55,56] و سامراه [8] از کشور عراق و همچنین برخی از محوطه‌های تاریخی ایران [7,10, 11,13].

Fig.7: Scatter plot in wt.% of aluminum oxide (Al₂O₃) in terms of the ratio of magnesium oxide (MgO) to calcium oxide (CaO) in all analyzed samples in this study and their comparison with samples from Syria [52], Palestine [43, 53], Lebanon [54], Egypt [7] and few historical sites such as Ctesiphon and Ve Ardashir [7, 55, 56] and Samarra [8] from Iraq as well as some historical sites in Iran [7, 10, 13,11].

۶. نتیجه‌گیری

این پژوهش، به دنبال پاسخگویی به برخی از سؤالات اساسی در مورد فرایند ساخت مصنوعات شیشه‌ای ایران در مناطق شمال غرب و از جمله میراث جهانی تخت سلیمان و محوطه‌های باستانی اردبیل بود. اولین و اساسی‌ترین سؤال مطرح شده این بود که در مصنوعات شیشه‌ای که از این محوطه‌ها به دست آمده‌اند، از چه مواد اولیه‌ای به عنوان موادگدازآور استفاده شده است، زیرا مشخص و تعیین کردن نوع ماده‌گدازآور، می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در بررسی و مطالعه فرایند تجارت و نقل و انتقالات مواد اولیه شیشه داشته باشد. بر این اساس از نتایج به دست آمده از نمونه‌های مورد بررسی در این پژوهش مشخص شد که شیشه‌های آنالیز شده از این محوطه از نظر ترکیبات عنصری بسیار متفاوت هستند و در چندین گروه متمایز قرار می‌گیرند. بر اساس نوع گدازآور استفاده شده، اکثر شیشه‌های آنالیز شده از نوع شیشه‌های سیلیکا-سودا-آهک هستند که سودای به کار رفته در آن‌ها از خاکستر گیاهان تهیه شده است. همچنین در این محوطه‌ها نمونه‌هایی مشاهده می‌شود که درصد وزنی اکسید منیزیم و اکسید پتاسیم کمتر از ۱/۵ درصد است که این نمونه‌ها، از نوع شیشه‌های ناترونی هستند. شیشه‌هایی که از دو نوع گدازآور اکسید سرب و اکسید سدیم به طور هم‌زمان استفاده کرده‌اند و شیشه‌های نوع سرب - باریم و شیشه‌های سیلیکا-پتاس-آهک نیز در مجموعه آنالیز شده شناسایی شدند. بنابراین بر اساس نتایج آنالیز عنصری این نمونه‌ها وجود برخی از نمونه‌هایی که منشأ و محل تولید آن‌ها غیر بومی محسوب می‌شوند و می‌توانند بر اساس تبادلات تجاری به این محوطه‌ها وارد شده باشند کاملاً تأیید می‌شود. همچنین بر اساس نحوه تغییرات بین عناصر مرتبط با سیلیس در نمونه‌های آنالیز شده از این محوطه‌ها، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که شیشه‌های نوع سیلیکا-سودا-آهک بر اساس ماده اولیه سیلیس نیز از منابع اولیه

متفاوتی استفاده کرده‌اند، زیرا نحوه تغییرات درصد وزنی اکسید تیتانیم بر حسب اکسید آهن و تغییرات نسبی اکسید آهن به اکسید آلومینیم بر حسب تغییرات نسبی اکسید آهن به اکسید تیتانیم مشخص می‌کند که شیشه‌های سیلیکا-سودا-آهک تولید شده با خاکستر گیاهان در نمونه‌های آنالیز شده از تخت سلیمان و اردبیل، از نظر ماده اولیه سیلیس از منابع اولیه متفاوتی استفاده کرده‌اند و بنابراین می‌توانند محل تولید گوناگونی داشته باشند.

علاوه بر این در بررسی عناصر مختلف که عامل ایجاد رنگ‌های متنوع در این شیشه‌ها شده‌اند می‌توان نتیجه گرفت که برای ایجاد چنین رنگ‌هایی غالباً از اکسیدهای عناصر واسطه مانند اکسیدهای آهن، مس، منگنز و کبالت استفاده شده است.

اما با مقایسه ترکیبات عنصری نمونه‌هایی که از نظر دوره تاریخی نزدیک و مقارن به نمونه‌های میراث جهانی تخت سلیمان و محوطه‌های باستانی اردبیل هستند، مشخص شد که تعدادی که از شیشه‌های سیلیکا-سودا-آهک تولید شده با خاکستر گیاهان در نمونه‌های آنالیز شده از تخت سلیمان و اردبیل، محل تولید متفاوتی دارند و احتمالاً در مناطق دیگری مانند عراق تولید شده‌اند.

۷. سپاسگزاری

با توجه به اینکه تمام آنالیزهای مورد نیاز برای انجام این پژوهش با حمایت پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای و آزمایشگاه واندوگراف در قالب طرح PRI-P4-98-002 انجام شده است، نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از تمامی عوامل اجرایی پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای و پژوهشکده فیزیک و شتابگرها و به‌ویژه مدیریت آزمایشگاه واندوگراف تشکر و قدردانی نمایند که بدون حمایت آن‌ها انجام این پژوهش امکان‌پذیر نبود.

References

- [1] Moorey PR. Ancient mesopotamian materials and industries: the archaeological evidence. Clarendon; 2013.
- [2] Henderson J. Ancient glass: an interdisciplinary exploration. Cambridge University Press; 2013.
- [3] Rehren T, Freestone IC. Ancient glass: from kaleidoscope to crystal ball. *Journal of Archaeological Science*. 2015;56:233-41.
- [4] Lin Y, Liu T, Toumazou MK, Counts DB, Kakoulli I. Chemical analyses and production technology of archaeological glass from Athienou-Malloura, Cyprus. *Journal of Archaeological Science: Reports*. 2019; 23:700-13.
- [5] Oikonomou A, Triantafyllidis P. An archaeometric study of Archaic glass from Rhodes, Greece: Technological and provenance issues. *Journal of Archaeological Science: Reports*. 2018;22:493-505.
- [6] Whitehouse D. "Things that travelled": the surprising case of raw glass. *Early Medieval Europe*. 2003;12(3):301-5.
- [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] 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. *Microchemical Journal*. 2016; 128:134-52.
- [9] Wypyski MT. Chemical analysis of early Islamic glass from Nishapur. *Journal of Glass Studies*. 2015:121-36.
- [10] 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. *Journal of Archaeological Science: Reports*. 2017; 16:102-16.
- [11] Salehvand N, Agha-Aligol D, Shishegar A, Rachtī ML. The study of chemical composition of Persian glass vessels of the early Islamic centuries (10th– 11th centuries AD) by micro-PIXE; Case Study: Islamic collection in the National Museum of Iran. *Journal of Archaeological Science: Reports*. 2020; 29:102034.
- [12] 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). *Journal of Research on Archaeometry*. 2018;4(1):47-65.
- [آقا علی گل، داود، جعفری زاده، مسلم؛ مرادی، محمود. میکروپیکسی: روشی توانمند در بررسی و تعیین مواد اولیه مصنوعات شیشه‌ای دوره اشکانی کاخ شاور (شوش)، پژوهش باستان سنجی، ۱۳۹۷، ۴(۱)، ۴۷-۶۵]
- [13] Agha-Aligol D, Jafarizadeh M, Rahbar M, Moradi M. Elemental Composition of Glass Beads Excavated From Saleh Davoud Tombs in Susa by Micro-PIXE: Evidences of Trade of Glass Artifacts during the Parthian Period. *Journal of Research on Archaeometry*. 2019;5(1):143-66.
- [آقا علی گل، داود، جعفری زاده، مسلم، رهبر، مهدی، مرادی، محمود. کاربرد روش میکروپیکسی جهت آنالیز عنصری مهره‌های شیشه‌ای مکشوفه از آرامگاه‌های صالح داود خوزستان: شواهدی از تجارت مصنوعات در دوره اشکانی، پژوهش باستان سنجی، ۱۳۹۸، ۵(۱)، ۱۴۳-۱۶۶]
- [14] Agha-Aligol D, Sodaei B, Khosravi L, Karimi M. Investigation and Study of Glass Artifacts of the Sassanid Period; Case Study: Jahangir Dome and GouriyeH Glasses in Ilam Province using Micro-PIXE Technique. *Journal of Research on Archaeometry*. 2019;5(2):47-70.
- [آقا علی گل، داود، سودایی، بیتا، خسروی، لیلا، کریمی، مینا. بررسی و مطالعه مصنوعات شیشه‌ای دوره ساسانی، نمونه مطالعاتی: شیشه‌های محوطه گنبد جهانگیر و (تپه) گوریه در استان ایلام با استفاده از روش میکروپیکسی، پژوهش باستان سنجی، ۱۳۹۸، ۵(۲)، ۷۰-۴۷]
- [15] Bahadori R, Agha-Aligol D. Labratorrial Studies on the Blue and Green Beads Used in the Prehistoric Ornaments of National Museum of Iran. *pazhoheshhaye Bastan shenasi Iran*. 2018; 8(18):45-62.
- [بهادری، رؤیا، آقا علی گل، داود. مطالعات آزمایشگاهی تعدادی از مهره‌های آبی و سبز به‌کاررفته در زیورآلات

- پیش‌از تاریخ موزه ملی ایران، پژوهش‌های باستان‌شناسی ایران، ۱۳۹۷، ۸(۱۸)، ۴۵-۶۲
- [16] Sarferaz A A, Kiani M Y. Takht-e sulyman. Tabriz, Moaseseh ye Tarikh va Farhang Iran.1347.
[سرفراز، علی اکبر و کیانی، محمد یوسف. تخت سلیمان، مؤسسه تاریخ و فرهنگ ایران، تبریز، ۱۳۴۷.]
- [17] Wiegartz H. Archaologischer Anzeiger.tumulus tepe Majid.1965;788
- [18] Naumann R. Die Ruinen von Tacht-e Suleiman und Zendan-e Suleiman und Umgebung. Führer zu archäologischen Plätzen in Iran. 1977.
- [19] Wilson J C. History of Iranian art, translated by Masoud Rajbnia, Tehran: bongah tarjomeh va nashre ketab.1356.
[ویلسن، کریستی. تاریخ صنایع ایران، ترجمه مسعود رجب‌نیا، تهران: بنگاه ترجمه و نشر کتاب، چاپ اول، ۱۳۵۶.]
- [20] Kambakhsh fard S. An inscription of Sabalan mount. Bastanshenasi va honare Iran.1347; 1, 55-9.
[کامبخش فرد، سیف‌الله. سنگ نبشته‌هایی در اطراف سبالان، «باستان‌شناسی و هنر ایران»، ش ۱، ۱۳۴۷، صص ۵۵ تا ۵۹.]
- [21] Haerincq E. Painted pottery of the Ardabil style in Azerbaidjan (Iran). Iranica Antiqua. 1978; 13:75.
[هرینگ، ارنی. سفال ایران در دوره اشکانی، ۱۳۷۶، ترجمه حمیده چوبک، تهران: سازمان میراث فرهنگی کشور.]
- [22] Yousefi H. Site of Qonaq Qiran (ruin dez), national registration file, Ardabil archive of ministry of cultural heritage, handicrafts and tourism. 1381.
[یوسفی، حسن، قلعه قوناخ قیران (رویین دز)، پرونده ثبت ملی اثر، سازمان میراث فرهنگی کشور، مرکز اسناد و آرشیو اداره کل میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری، ۱۳۸۱.]
- [23] Yousefi H. Site of shahar yeri and mekteb oshaglari, national registration file, Ardabil archive of ministry of cultural heritage, handicrafts and tourism.1381.
[یوسفی، حسن، محوطه باستانی شهریری و مکتب اوشاقلاری، پرونده ثبت ملی اثر، سازمان میراث فرهنگی کشور، مرکز اسناد و آرشیو اداره کل میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری، ۱۳۸۱.]
- فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری، ۱۳۸۱.]
- [24] Deravianco A, Zedi M, Zenin A, Gladishu S, Shapkin A. Archaeological study report of the joint expedition of Russia and Iran, on the southern shores of the Caspian Sea, Omal-Banin Ghafori, Tehran: moalef, moaseseh ye binal mel el yeh motaleate gerdesht geri vehsht mina. 1392; 4, 7-22.
[درویانکو، آناتولی، زیدی، محسن، زنین، آناتولی، گلادیشو، سرگی، شاپکین، آندری کریوو. گزارش بررسی باستان‌شناختی هئیت مشترک روسیه- ایران در کرانه‌های جنوبی دریای مازندران، باستان‌شناسی ایران، به کوشش ام‌البنین غفوری، تهران: مؤلف، مؤسسه بین‌المللی مطالعات گردشگری وهشت مینا، ش ۴، سال چهارم، ۱۳۹۲، ۲۲-۷.]
- [25] Burney CA. Meshkin shahr in Iran, 1979; 156-5.
- [26] Ferdowsi A G. Shahnameh Ferdowsi, Mashhad: Sokhan Goster. 1348.
[فردوسی، ابوالقاسم. شاهنامه، مشهد، سخن گستر، ۱۳۸۴.]
- [27] Behazin D. Ardabil (what do I know from Iran?), Tehran: deftere pezhohesh hayeh farhangi.1382.
[به‌آذین، داریوش. اردبیل (از ایران چه میدانم؟). تهران: دفتر پژوهش‌های فرهنگی، چاپ اول، ۱۳۸۲.]
- [28] Mustawfī Q, H□ amdAllāh Ibn Abī Bakr ibn Ah□ mad. Nuzhat-al-qulūb, translated by Moh□ ammad Dabīr Siyāqī, Tehran: ketabkhane Tahury.1336.
[مستوفی قزوینی، حمدالله بن ابی بکر بن احمد. (۱۳۳۶). نزهةالقلوب. به کوشش محمد دبیر سیاقی، تهران: کتابخانه طهوری.]
- [29] Stevens R. The land of the great Sophy. London: Methuen; 1962.
- [30] Yaghout H, Shahab al-din Abu Abdulah. Mojem al-boldān, Tehran, Bina.1965; 1.
[یاقوت حموی، شهاب الدین ابوعبداله الحموی الرومی. معجم البلدان، ج ۱، تهران: بی نا، ۱۹۶۵.]
- [31] Johansson SA, Campbell JL. PIXE: A novel technique for elemental analysis.1988.
- [32] Nastasi M, Mayer JW, Wang Y. Ion beam analysis: fundamentals and applications. CRC Press; 2014.
- [33] Vicenzi EP, Eggins S, Logan A, Wycoczanski R. Microbeam

- characterization of corning archeological reference glasses: new additions to the smithsonian microbeam standard collection. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. 2002; 107(6):719.
- [34] Sayre EV, Smith RW. Compositional categories of ancient glass. *Science*. 1961; 133(3467):1824-6.
- [35] Blomme A, Degryse P, Dotsika E, Ignatiadou D, Longinelli A, Silvestri A. Provenance of polychrome and colourless 8th–4th century BC glass from Pieria, Greece: a chemical and isotopic approach. *Journal of Archaeological Science*. 2017;78:134-46.
- [36] Phelps M, Freestone IC, Gorin-Rosen Y, Gratuze B. Natron glass production and supply in the late antique and early medieval Near East: The effect of the Byzantine-Islamic transition. *Journal of Archaeological Science*. 2016;75:57-71.
- [37] Carmona N, Villegas MA, Jiménez P, Navarro J, García-Heras M. Islamic glasses from Al-Andalus. Characterisation of materials from a Murcian workshop (12th century AD, Spain). *Journal of Cultural Heritage*. 2009;10(3):439-45.
- [38] Qin Y, Wang Y, Chen X, Li H, Xu Y, Li X. The research of burning ancient Chinese lead-barium glass by using mineral raw materials. *Journal of Cultural Heritage*. 2016;21:796-801.
- [39] De Bardi M, Hutter H, Schreiner M, Bertinello R. Potash-lime-silica glass: protection from weathering. *Heritage Science*. 2015;3(1):1-9.
- [40] Zhang B, Cheng HS, Ma B, Li QH, Zhang P, Gan FX, Yang FJ. PIXE and ICP-AES analysis of early glass unearthed from Xinjiang (China). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2005;240(1-2):559-64.
- [41] Jackson CM, Paynter S, Nenna MD, Degryse P. Glassmaking using natron from el-Barnugi (Egypt); Pliny and the Roman glass industry. *Archaeological and Anthropological Sciences*. 2018;10(5):1179-91.
- [42] Henderson J, An J, Ma H. The archaeometry and archaeology of ancient Chinese glass: a review. *Archaeometry*. 2018;60(1):88-104.
- [43] Rosenow D, Meek A, Phelps M, Freestone I. *Things that travelled-Mediterranean Glass in the First Millennium CE*. UCL Press; 2018.
- [44] Topić N, Radović IB, Fazinić S, Šmit Ž, Sijarić M, Gudelj L, Burić T. Compositional analysis of Late Medieval glass from the western Balkan and eastern Adriatic hinterland. *Archaeological and Anthropological Sciences*. 2019; 11(5):2347-65.
- [45] Fiorentino S, Venezia B, Schibille N, Vandini M. Streams across the Silk Roads? The case of Islamic glass from Ghazni. *Journal of Archaeological Science: Reports*. 2019; 25:153-70.
- [46] Shortland AJ, Kirk S, Eremin K, Degryse P, Walton M. The Analysis of Late Bronze Age Glass from Nuzi and the Question of the Origin of Glass-Making. *Archaeometry*. 2018 Aug;60(4):764-83.
- [47] Machado A, Wolf S, Alves LC, Katona-Serneels I, Serneels V, Trümpler S, Vilarigues M. Swiss stained-glass panels: an analytical study. *Microscopy and Microanalysis*. 2017; 23(4):878-90.
- [48] Schibille N, Sterrett-Krause A, Freestone IC. Glass groups, glass supply and recycling in late Roman Carthage. *Archaeological and Anthropological Sciences*. 2017 Sep; 9(6):1223-41.
- [49] Van Wersch L, Loisel C, Mathis F, Strivay D, Bully S. Analyses of early medieval stained window glass from the monastery of Baume-Les-Messieurs (Jura, France). *Archaeometry*. 2016; 58(6):930-46.
- [50] Silvestri A, Tonietto S, Molin G, Guerriero P. The palae-Christian glass mosaic of St. Prosdocius (Padova, Italy): archaeometric characterisation of tesserae with copper-or tin-based opacifiers. *Journal of archaeological science*. 2014; 42:51-67.
- [51] Vataj E, Hobdari E, Röhrs S, Vandenabeele P, Civici N. Analytical characterization of glass tesserae from mosaics of early Christian basilicas in Albania. *Applied Physics A*. 2017;123(1):1-5.
- [52] 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(3):439-68.
- [53] Freestone IC, Gorin-Rosen Y, Hughes MJ. Primary glass from Israel and the production of glass in late antiquity and the early Islamic period. *MOM Éditions*. 2000;33(1):65-83
- [54] Freestone IC. Composition and affinities of glass from the furnaces on the island site, Tyre. *Journal of Glass Studies*. 2002; 67-77.
- [55] Mirti P, Pace M, Negro Ponzi MM, Aceto M. ICP-MS Analysis of Glass Fragments of Parthian and Sasanian Epoch from Seleucia and Veh Ardaš? R (Central Iraq). *Archaeometry*. 2008; 50(3):429-50.
- [56] Mirti P, Pace M, Malandrino M, Ponzi MN. Sasanian glass from Veh Ardašir: new evidences by ICP-MS analysis. *Journal of Archaeological Science*. 2009; 36(4):1061-9.
- [57] Wood M, Panighello S, Orsega EF, Robertshaw P, van Elteren JT, Crowther A, Horton M, Boivin N. Zanzibar and Indian Ocean trade in the first millennium CE: the glass bead evidence. *Archaeological and Anthropological Sciences*. 2017; 9(5):879-901.

