Journal of Research on Archaeometry, 2021; 7 (2): 111-134

Journal of Research on Archaeometry

DOI: 10.52547/jra.7.2.111

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

Original Paper

Technical Study of Chemical Compounds in the Glaze of The Mosaic Tiles in the Green Dome of Kerman (Qobeh Sabz)

Vahideh Rahimi Mehr *

Assistant Professor, Department of Architecture, Faculty of Art, Architecture & Urbanism, Kerman branch, Islamic Azad University, Kerman, IRAN

Received: 22/10/2021 **Accepted: 22/12/2021**

Abstract

Identifying the materials used in the construction and decoration of the building is of great importance to complete the discussion of a historical monument and its restoration. One of the buildings that need to be studied in this field as a prominent and valuable building is the green dome of Kerman (Qobeh Sabz) that has not been technically studied on its mosaic tiles. The colors of the tiles of this building are black, azure, white, and turquoise, yellow and green. This research has been carried out in the field of applied research to better understand the architecture of the past and the techniques of making architectural decorations. In order to achieve the goal, the method of scanning electron microscopy equipped with X-ray energy separation analysis has been used to identify glaze elements and body petrography in the studied samples. The results show that the black color of the glaze is due to the presence of substances such as manganese in the glaze. The turquoise glaze color is obtained by combining copper compounds in the rich glaze in alkaline elements such as potassium. Also, lead antimony, iron oxide and cadmium cause yellow glaze and tin in white glaze causes white color. The azure color is also caused by cobalt oxide, and the green color of the glaze is due to the presence of copper and iron. Petrographic analysis, XRD and XRF analysis for qualitative identification of minerals, existing phases, and elemental analysis of 4 samples of the tile body, shows that quartz has been used as a filler and there are calcareous soils in the bodies. Petrographic and XRD results on tile biscuits indicate oxidation baking environment and baking temperature less than 800 degrees for three samples BL, B-2, and B-4 and temperature above 850 for sample G-4.

Keywords: Green Dome, Petrography, SEM-EDS, Mosaic Tile, Glaze Dye Factors

*Corresponding Author: rahimimehr@iauk.ac.ir

Copyright© 2021, the Authors | This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-.NonCommercial terms

Introduction

One of the factors that have influenced the evolution of tile decorations is the materials used in the body and tile glaze, which play an important role in its strength and beauty, and its knowing helps to restore the building. Kerman is one of the cities whose tiles have adorned its historical monuments. In the north of Kerman, there is a neighborhood called Green Dome, that there is an important historical monument called Green Dome in it, which in 1276 earthquake, unfortunately, was destroyed and only part of the mosaic tiles of this building remained. The point which increases the importance of this build is the historical nature and antiquity of mosaic tiles in this building. The main purpose of this study is to identify the elements and factors that create color in the glaze of building tiles and to identify the minerals that make tile biscuits. In this regard, this research tries to examine the body and glaze of colored tiles used in parts of the building by laboratory methods in order to provide information to activists in this field for the restoration of this building.

Materials and Methods

This research has been carried out in the field of applied research in order to better understand the architecture of the past and the techniques of making materials, which tries to deal with the technology and knowledge of chemical materials and materials used in the manufacture of glaze for mosaic tile decorations in the green dome of Kerman. In analytical laboratory studies, an electron microscope at the Razi Foundation was used to identify the constituent elements of the glaze and the factors that create the color in the samples. The analyzer (EDS) used in this device has a resolution of 126 ev> and a resolution of more than 5000 ppm to identify the elements from element B onwards in the periodic table. To study the structure of tile biscuits have been used from the thin section petrography method by the microscopic, XRD, and XRF. This test was performed in Zarazma Mahan Petrology Laboratory.

Results

Quantitative and qualitative identification of elements in glazes was performed using scanning electron microscopy electron scanning system. Analysis of colored glazes showed that lead was present in all samples and its amount in the green glaze was more than others and lead in the black glaze was the lowest. (Table 2 to 7 and Figure 6 to 12). Lead makes the glaze shiny and creates the fine and well colors. Calcium has also been used as a glaze modifier in all studied samples. Silica is used as a lattice and in some glazes, potassium is used as a melt. The color factor was also identified in all glazes. The results of petrography and mineralogy of tile biscuits also showed that the samples contain abundant clay minerals and quartz is the most abundant mineral.

Discussion

In white glaze, tin is present in the amount of about 8% and tin has acted as a coloring agent in the glaze. The black color of the black mosaic tile is due to Cobalt. Also, oxygen in the black glaze is more than all the samples. The turquoise color in the studied glazes is obtained from the juxtaposition of copper compounds in glazes rich in alkaline elements such as potassium. Analysis of the azure glaze sample shows that azure paint is created by cobalt and in this glaze titanium is used as a stabilizer and the use of zirconium has caused azure glaze fewer cracks in the green dome. Also, the results of the yellow sample showed that there are several coloring agents in this sample that have made this color stronger in the glaze. Lead antimony, iron, and cadmium helped to create the yellow color. Titanium oxide and tin-vanadium pigments have also helped to strengthen the yellow color. The presence of copper has caused a dark green color, and the presence of vanadium and chromium has had a partial effect on this color. The high amount of calcium in this glaze (above 9%) has made it more stable than other green glazes. The results of the biscuit analysis showed that quartz was used as a filler in the body of the tiles and calcium carbonate was used as a smelter. The three compounds (Al_2O_3, SiO_2, and CaO) make up the bulk of the sample compounds in the tile body of the test material. These compounds indicate that a part of the body soil is related to the soils obtained from SiO_2 metamorphic rocks and also in the construction of the body of these tiles there are calcareous soils of CaO, Al_2O_3.

Conclusion

During this research, the colored glazes of six samples and the body structure of four samples, probably related to the Safavid period, were studied. The results of the EDX analysis of glazes identified the main coloring agent in glazes. The results of EDX analysis of glazes suggested that lead was present in all samples. Lead polishes the glaze and shows the colors well. The analysis showed that the glaze of the turquoise and black samples was of the alkaline type and the glaze of the other samples was of the alkaline lead type, and in all the studied samples, calcium was used as a glaze modifier. The results of the phase and chemical composition of the biscuits show that quartz has been used as a filler to reduce the amount of shrinkage of the body. Also, the presence of calcite in three samples shows that the baking temperature of three samples BL, B-2, and B-4 was less than 800 degrees, and the temperature for sample G-4 is above 850. The presence of calcite in addition to increasing porosity in the biscuit caused the body of three samples Bl, B- 2, B-4 to have a lighter color than the G-4 sample.

Acknowledgments

This article is the result of a research project entitled "Identification of chemical compounds used in the decoration of green dome mosaic tiles in Kerman" approved by the Islamic Azad University of Kerman in 1400, which has been implemented with the financial support of the Islamic Azad University of Kerman. I consider it necessary to appreciate the cooperation of the Vice Chancellor for Research of the Islamic Azad University of Kerman, Dr. Maryam Kazemipour, and the Director of Cultural Heritage, Handicrafts and Tourism of Kerman Province, Mr. Active and Mr. Riahian, Head of Green Dome Restoration. I am also very grateful for the valuable guidance of the reviewers of this journal, which led to the improvement of the text of the article.

پژوهه باستان‌سنجی ۱۴۰۰؛ ۷(۲): ۱۱۱-۱۳۴

پژوهه باستان‌سنجی

DOI: 10.52547/jra.7.2.111

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

مقاله پژوهشی

مطالعه فنی ترکیبات شیمیایی لعاب کاشیهای معرق قبه سبزکرمان

وحیده رحیمی مهر*

استادیار معماری، گروه معماری، دانشکده هنر ، معماری و شهرسازی واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۳۰ **تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۰۱**

چکیده

شناسایی مواد و مصالح به کار رفته در ساخت و تزئینات بنا برای تکمیل مباحث یک اثر تاریخی و مرمت آن از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از بناهایی که به عنوان یک بنای بارز و با ارزش نیاز به مطالعه‌ای در این زمینه دارد، قبه سبز کرمان است که تاکنون مطالعه فنی روی کاشیهای معرق آن صورت نگرفته است. کاشی های این بنا به رنگ های سیاه، لاجوردی، سفید، فیروزهای، زرد و سبز هستند. این پژوهش در حوزه تحقیقات کاربردی جهت شناخت بهتر معماری گذشته و فنون ساخت آرایه های معماری صورت گرفته است. در راستای رسیدن به هدف، از روش بررسی میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به آنالیز تفکیک انرژی پرتوی ایکس برای شناسایی عناصر لعاب و پتروگرافی بدنه در نمونه‌های موردمطالعه استفاده‌شده است. نتایج نشان می‌دهد که رنگ مشکی لعاب ناشی از وجود موادی چون منگنز در لعاب است. رنگ لعاب فیروزه‌ای از کنار هم قرارگیری ترکیبات مس در لعاب غنی از عناصر قلیایی مانند پتاسیم حاصل شده، همچنین آنتیموانات سرب، اکسید آهن و سولفات کادمیوم عامل رنگ لعاب زرد و اکسید قلع و سولفات قلع در لعاب سربی عامل رنگ سفید است. همچنین رنگ لاجوردی به واسطه اکسید کبالت و سولفات کبالت ایجاد شده است و عامل رنگ سبز لعاب وجود سولفات مس و آهن است. آنالیز پتروگرافی، آنالیز XRD و XRF جهت شناسایی کیفی کانی‌ها، فازهای موجود و آنالیز عنصری ۴ نمونه بدنه کاشی، نشان می‌دهد که از کوارتز به‌عنوان پرکننده استفاده شده است و در بدنه‌ها خاک‌های آهکی وجود دارد. نتایج پتروگرافی و XRD بیسکویت کاشی، حاکی از محیط پخت اکسیداسیون و دمای پخت کمتر از ۸۰۰ درجه برای سه نمونه B-2, BL و B-4 و دمای بالای ۸۵۰ برای نمونه G-4 است.

واژگان کلیدی: قبه سبز، پتروگرافی، SEM-EDS، کاشی معرق، عوامل رنگزای لعاب.

* نویسنده مسئول مکاتبات: آدرس پستی: کرمان، بلوار ولیعصر-دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان، کد پستی: ۷۶۳۵۱۶۸۱۱۱

پست الکترونیکی: rahimimehr@iauk.ac.ir

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

۱. مقدمه

کاشی‌کاری یکی از رکن‌های اساسی و مهم در تزئینات معماری است که تأثیر بسزایی در مقاومت و زیبایی آن‌ها دارد و شناخت آن به مرمت بنا کمک شایانی می‌کند. استفاده از تزئینات لعاب‌دار به نیمهٔ اول هزارهٔ سوم قبل از میلاد در تمدن بین‌النهرین بازمی‌گردد [1]. این روش در هزارهٔ دوم پیش از میلاد به ایران راه یافت[2] و در دورهٔ اسلامی، اوج و شکوفایی خود را طی کرد. آشنایی ایرانیان با صنعت سفالگری سبب کشف لعاب‌هایی برای زیبایی و استحکام‌بخشی به سفالینه‌ها شد. در گذشته، لعاب‌کاران برای رسیدن به لعاب موردنظر خود مواد اولیه لعاب را با نسبت‌های وزنی با یکدیگر بر اساس تجاربی که طی سال‌ها زحمت و انجام آزمایشات به‌دست آورده بودند، می‌آمیختند. بنابراین لعاب‌کاران سنتی در قدیم سعی می‌کردند تا کل مقدار لعاب لازم را برای اجرای کاشی‌کاری یک بنا حساب کنند تا تغییر رنگ محسوسی در طول اجرا به وجود نیاید. به‌طوری‌که در غیرازاین حالت، هماهنگ کردن لعاب‌ها در زمان‌های مختلف بسیار مشکل به نظر می‌رسد و نیاز به آزمایش کردن زیاد دارد که به‌ندرت این کار انجام می‌گرفت [3]. یکی از شهرهایی که کاشی به بناهای تاریخی آن زینت داده، کرمان است. در شمال شهر کرمان، محله‌ای با قدمت ۸۰۰ سال وجود دارد که به محلهٔ قبه سبز معروف است (شکل۱و ۲). وجه‌تسمیه آن برگرفته از وجود یک بنای تاریخی مهم به نام قبه سبز است که ازلحاظ سبک ساختمان و معماری، در ردیف آثار باارزش ایران به شمار می‌رود. در خصوص قدمت بنا اختلاف‌نظرهای متعددی وجود دارد که اسلام‌پناه در مقاله تاریخ کتیبهٔ قبه سبز کرمان [4] به آن‌ها اشاره‌کرده است. البته ایشان با بیان نظرات سایکس، بایرون و ... و همچنین بررسی نظرات افرادی چون ویلبر و گدار که معتقد هستند بنا متعلق به سال ۸۴۰ هجری قمری است درخصوص تاریخ کتیبه‌های بنا و سنگ قبر موجود در بنا، نتیجه‌گیری کرده که تزئینات به دوره صفویه تعلق دارند. ولی با توجه به اینکه تاریخ کتیبه‌ها به تاریخ مرمت یا نصب آن‌ها مربوط بوده است نمی‌توان بدون آنالیزهای آزمایشگاهی بر بقایای بنا و تزئینات آن، درخصوص قدمت آن‌ها نظری قطعی داد. اما آنچه که در تابلوی مربوط به میراث فرهنگی و در آخرین مقالهٔ چاپ شده در خصوص این بنا ذکر شده، این مطلب است که قبه سبز از بناهای بی‌نظیر قرن هفتم هجری و متعلق به دورهٔ قراختاییان بوده [5] که متأسفانه در زلزلهٔ سال ۱۲۷۶ هجری شمسی از بین رفته و تنها ایوان بلند و بخشی از کاشی‌کاری معرق این بنا باقی مانده است که نشان از زیبایی و اصالت هنر و معماری دوران اسلامی دارد [6] (شکل۳) و احتمالاً طبق بررسی‌های مهندس اسلام‌پناه این کاشی‌های معرق، مربوط به دورهٔ صفویه هستند [4].

قبه سبز (مدرسه مقدسه، عصمتیه یا قطبیه) یکی از مراکز فرهنگی و مدارس بزرگ و مجهز کرمان بوده است. دولت قراختائیان کرمان با اتکا به مغول‌ها شکل یافت و زنانی که از بین آن قوم به فرمانروایی رسیدند، متکی به حمایت مغولان بودند [7-8]. به همین دلیل مقبولیت برای این دولت مشکل بود. تعدادی از فروانروایان این سلسله مانند براق و ترکان خاتون، مسلمانانی بودند که برای رسیدن به این هدف، با برپایی مدرسه، مقبره و همراهی با مدرسان و تجلیل از مشایخ صوفیه می‌کوشیدند که مقبولیت برای دولت خود کسب کنند[9]. اقدامات این حکمرانان در حوزهٔ موقوفات و ساخت عمارت خیریهٔ وقفی شایان توجه بود [10]. از زمان حاکمیت قراختاییان در کرمان، نشانه‌های بسیار قوی از تمدن غنی و فرهنگ پیشرفته در قرن ششم در این خطه دیده می‌شود. در این دوره، بناهای تاریخی بسیار زیادی با کارکردهای مختلف در کرمان ساخته شده بودند که امروزه اثر محدودی از آن‌ها بر جای مانده است. قبه سبز (قطبیه) یکی از آن آثار است که سابقهٔ آن به دورهٔ حاکمیت قراختاییان در این خطّه می‌رسد [5]. قبهٔ مذبور ساختمان عجیب استوانه‌ای شکلی بوده که خارج از محوطهٔ آن خاتم‌کاری و تذهیب بسیار زیبایی به‌کاررفته بوده است. در گچ‌کاری‌های داخل محوطه نیز به صورت کم و بیش آثار طلاکاری

و تذهیب هم ملاحظه می‌شده است. در منابع تاریخ آمده است: "خداوند ترکان می‌خواست که هرچند زودتر مدرّسان را در مدرسه اجالس کند تا ایمهٔ تالمیذ بر تحصیل مواظبت نمایند و به تضییع و تعطیل روزگار نگذرانند، اندرون صفه‌ها را فرمود به کاهگل اندایش کردن و به سفید اعاج و به خطوط الجورد و زر آرایش دادن" [10-11]. استاک (Stack) از کسانی است که در خاطرات خود به توصیف این بنا پرداخته است. او در سال ۱۲۹۸ هجری قمری، بنا را از نزدیک دیده و از آن به عنوان بلندترین بنای کرمان نام برده که از ۱۴ مایلی به محض پدیدار شدن شهر دیده می‌شده است و این چنین نوشته که ساختمان آن بیشتر از همه جلب توجه می‌کرده است. او دربارهٔ شکل و اندازه گنبد می‌نویسد که گنبد ساختار استوانه‌ای پوشیده با یک قبه به رنگ آبی دارد. او این ساختار گنبد را عجیب توصیف کرده است. استاک ارتفاع گنبد را ۴۰ پا و قطرش را ۳۰ پا دانسته و فضای داخلی گنبدخانه را مزین به آبی و نقوش نقاشی شدهٔ ستاره و نقوش گیاهی بر گچ سفید، توصیف کرده است. او همچنین از دیوارنگاره‌های آبی و طلایی سقف نیز سخن به میان آورده است. به گفتهٔ او در دیوارهای بسیار قطور مقبره که با مصالح کم ارزشی چون آجر نیمه پخته و خشت ساخته شده بوده، آسیب‌های ترک و سوراخ دیده می‌شده است. او در میان بنا سنگ قبری دیده که دیواره بلندی داشته و کتیبه‌ای کوچک با خوشنویسی طغرا بر بالای آن نقش بسته بوده و به دلیل ارتفاع زیادش امکان خواندن تاریخ ساخت و نام سازنده برایش میسر نبوده است [12]. سایکس نیز در سفرنامه‌اش قبهٔ سبز را برجسته‌ترین بنای کرمان تا سال ۱۸۹۶ میلادی (مصادف۱۲۷۵ شمسی) نامبرده است. او نیز ساختمان قبه را عجیب و استوانه‌ای توصیف کرده و ارتفاع آن را کمی بلندتر از استاک تخمین زده است (سایکس ارتفاع گنبد را ۵۰ پا تخمین زده است) و از وجود خاتم‌کاری و تذهیب‌کاری زیبا و دلفریبی در خارج از محوطه و گچبری داخل محوطهٔ مزیّن به آثار مذهب و مطلّای پراکندهٔ ممتازی سخن به میان آورده است [13]. روایات نشان می‌دهند که روی دیوار کتیبه‌ای بوده است با این متن: عمل استاد خواجه شکر الله و استاد عنایت الله ولدان استاد نظام بدیع معمار اصفهانی". همچنین تاریخ کتیبه این بنا ششصد و چهل هجری بوده است که این تاریخ هشت سال بعد از وفات براق، مؤسس سلسه قراختائی، را نشان می‌دهد [13-14]. قبه سبز تا ۱۲۴ سال پیش، پا بر جا بوده است. از منظر معماری، برخی منابع، این بنا را دارای ویژگی‌هایی می‌دانند که آن را در بین سایر بناهای این دوره متمایز می‌سازد. گنبد دوپوش قبه با ساقهٔ بلند عنصر شاخص و حدّ واسط منار بوده است. مورفولوژی گنبد مؤیّد زیبایی‌شناسی خاصی بوده است که در معماری کرمان کمتر سابقه داشته است. ارتفاع دادن به گنبد تا حدی که ساقهٔ آن شبیه منارهٔ بلند و کشیده‌ای شود، از ویژگی‌های بناهای دورهٔ تیموریان است که در هیچ بنای دیگر کرمان مشاهده نمی‌شود. علاوه بر آن جزئیات سر در بنا دارای نوآوری‌های خاصی بوده که‌گونه‌ای بدیع در معماری کرمان به شمار می‌رفته است [15]. این بنا مناره‌های ۱۷ متری سر به فلک کشیده‌ای داشته است که در اوایل قرن سیزدهم هجری قمری، هدف گلوله و توپ‌های سپاهیان آقا محمدخان قاجار قرار گرفت و قسمت‌هایی از آن خراب شد و بقیهٔ آن در اثر زلزله ۱۳۱۳ ه ش فرو ریخت. دانشور در کتاب محله‌های قدیمی شهر کرمان چنین نگاشته که قبل از زلزله، نجّاری اکثر روزها به داخل منارهٔ قبه سبز می‌رفته و چوب‌هایی که به عنوان مهار در ساخت مناره به کار رفته بوده را برش داده و می‌فروخته که همین عمل در ویرانی منار زمان زلزله مؤثر بوده است [6]. روایت است بلندای منار چنان بوده که سایهٔ آن‌ها به هنگام غروب، روی طاق علی که چند کیلومتر آن طرف‌تر بوده، نقش می‌بسته است [15]. زیباترین قسمت باقی‌مانده از بنا ایوان بزرگی است که دو طرف آن، دو ستون پیچکی شکل دیده می‌شود که از شاهکارهای هنری معماری، محسوب می‌شود. این بنا که یک مجموعهٔ فرهنگی کامل شامل مدرسه، دارالشفاء، مسجد و بازار بوده در تاریخ ۱۵ دی ۱۳۱۰ شمسی با شماره ثبت ۱۲۴ به‌عنوان یکی از آثار ملی

ایران به ثبت رسیده‌است. محدودهٔ امروزی قبه سبز، مقبرهٔ یکی از امرای قراختایی و قسمتی از مدرسهٔ عصمتیه است. در چند سال اخیر تنها بخشی از ایوان این بنا مورد مرمت قرار گرفته است و امکان بازدید برای عموم به دلیل عدم تکمیل و ناتمام بودن موضوع بازسازی حریم و بنا فراهم نیست و متروک شده است. موضوعی که اهیمت این بنا را زیادتر می‌کند، قدمت بالای کاشی‌های معرق این بنا است که پیرنیا و جوادی در تحقیقات خود به آن اشاره داشته‌اند [16-17] (شکل۴).

مطالعه بر این تزئینات می‌تواند به شناخت این هنر و مرمت بهتر بنا، کمک شایانی کند. زیرا در صورت تصمیم بر اجرای کاشی‌های نگه‌داری شده در جعبه-های موجود در محوطه بنا، نیاز به ساخت کاشی‌هایی با لعاب‌های مشابه و همگون است. از آنجا که کاشی-های قبه سبز کرمان به عنوان اثری مطرح و با ارزش شناخته می‌شوند و کاشی‌های این بنا آسیب‌های بسیاری دیده‌اند، بررسی ترکیبات لعاب‌های رنگی و آسیب‌های آن‌ها برای مرمت‌گران، موضوعی مهم است که تاکنون به آن پرداخته نشده است. از طرفی، شناخت ترکیب لعاب‌های رنگی به کار رفته در کاشی‌های بنا می‌تواند در پژوهش‌های مرتبط با فرسایش لعاب کاشی‌ها و مرمت آن‌ها نقش مهمی ایفا کند. بنابراین، هدف اصلی از مطالعه، شناسایی عناصر تشکیل دهندهٔ لعاب‌های رنگی و عوامل ایجاد رنگ در این لعاب‌ها و کانی‌های تشکیل‌دهندهٔ بیسکویت کاشی است تا برای مرمت این بنا اطلاعاتی در اختیار فعالان این حوزه قرار دهد.

شکل ۱: محدوده بافت تاریخی کرمان و موقعیت قبه سبز، مأخذ: شهرداری کرمان

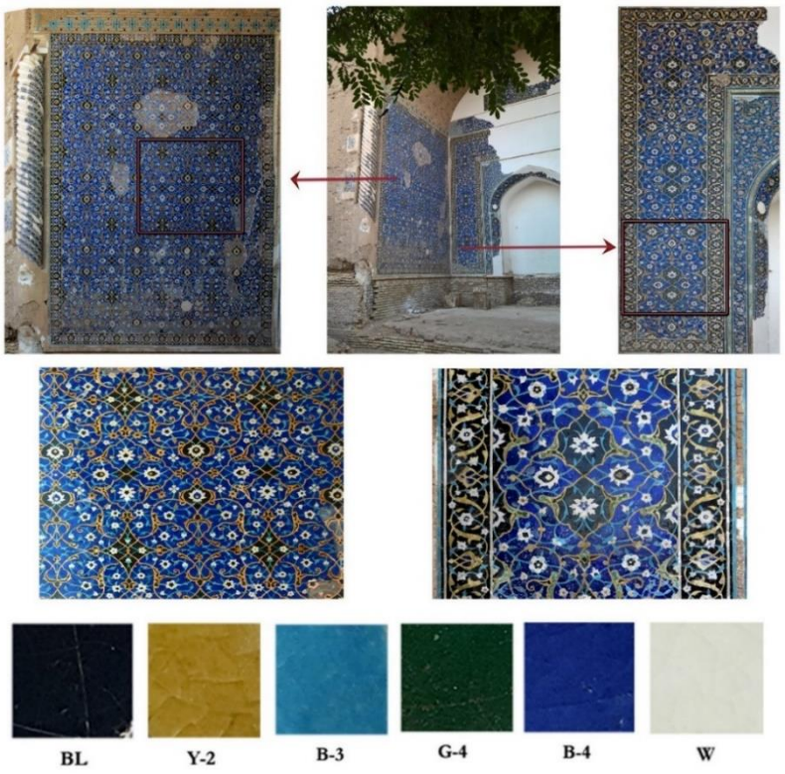
Fig. 1: The historical context of Kerman and the location of the Green Dome, Source: Kerman Municipality

شکل۲:حدود تقریبی محدوده محله قبه سبز، مأخذ: گوگل ارث

Fig. 2: Approximate area of Green Dome neighborhood, Source: Google Earth

شکل۳: ایوان سردر قبه سبز کرمان، (نگارنده، تیرماه ۱۴۰۰)

Fig. 3: Green Dome Porch, Source: Author, in july 2021



شکل ۴: کاشی‌های داخل ایوان قبه سبز و رنگ کاشی‌های به کار رفته در لعاب کاشی‌ها، (نگارنده، تیرماه ۱۴۰۰)

Fig. 4: Tiles inside the green dome porch and the color of the tiles used in glazing the tiles, Source: Author, in july 2021

۲. پیشینهٔ پژوهش

پیشینهٔ پژوهش در دو بخش، قابل پیگیری است. بخش اول مطالعات پیرامون بنای قبه سبز است. در خصوص مطالعات پیرامون قبه سبز، تحقیقات اندکی صورت گرفته است که در اینجا مروری بر آن‌ها انجام می‌شود. این مطالعات، ساختار کیفی داشته‌اند و مطالعهٔ آزمایشگاهی روی بنا انجام نشده است. جواد نظریه (۱۳۸۵) در مقاله‌ای تحت عنوان تحلیل معماری گنبد سبز، در اولین همایش قبه سبز کرمان به زیبایی کاشی‌های معرق بنا اشاره می‌کند [18] و دانشور در کتاب محله‌های قدیم شهر کرمان در خصوص ویژگی-های بنای قبه سبز در محلهٔ قبه سبز به بیان مطالبی پرداخته و بخش‌هایی از بنا را توصیف و به معماری خاص این بنا اشاره کرده است [6]. در پژوهشی که در سال‌های اخیر صورت گرفته محققان از روشی قیاسی برای استدلال از نظریه براندی دربارهٔ حفاظت این آثار معماری بهره برده‌اند [5]. بخش دوم، تحقیقاتی است که به طور غیر مستقیم با بنای مورد مطالعه در ارتباط است ولی به طور مستقیم با روش تحقیق ارتباط دارد و به تحقیق در بناهای دیگر درخصوص ساختار لعاب-های رنگی تاریخی اختصاص دارد که شامل مطالعات زیر است:

از قدیمی‌ترین مستندات موجود در ادبیات، کتاب عرایس الجواهر و نفایس الاطایب نوشتهٔ کاشانی است که در آن به ساخت لعاب کاشی و منابع تهیهٔ آن پرداخته شده است. کاشانی، وجود مس سوخته در کاشی‌کاری را ترکیبی اصلی بر شمرده و از کاربرد موادی چون نحاس محروق (روی سوخته) در ایجاد رنگ لعاب سبز صحبت کرده است [19]. سالاریه (۱۳۷۵) در کتابی تحت عنوان لعاب (خواص، کاربرد و عیوب) به صورت علمی عناصر و ساختار لعاب را بررسی کرده است. در این کتاب، رنگ‌دانه‌های موجود در لعاب‌های کاشی به صورت مجزا ذکر شده‌اند که براساس آن می‌توان عناصر قابل شناسایی در لعاب‌های

مورد مطالعه را آنالیز کرد [20]. قادری (۱۳۹۶) در پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد خود با عنوان" بررسی عوامل تأثیرگذار بر کیفیت لعاب فیروزه‌ای و دستیابی به روش کنترل کیفیت رنگ آن در روش سنتی در راستای مرمت و بازسازی تزئینات کاشی‌کاری"، به فن‌شناسی لعاب و ساخت رنگ فیروزه‌ای براساس ترکیبات شیمیایی سنتی و مدرن پرداخته است. او در این پژوهش بر اساس روش مرسوم در کارگاهای سنتی، اقدام به تولید لعاب فیروزه‌ای کرده و با کنترل عوامل مؤثر هم‌چون ترکیبات و شرایط پخت، تلاش کرده تا به رنگ فیروزه‌ای مورد نظربرسد. نتایج پژوهش حاکی از این بوده‌اند که سیلیکات زیرکونیوم فاز اصلی لعاب و رنگ است [21]. همچنین در حوزه تحقیقات آزمایشگاهی، مطالعات متعددی در خصوص عوامل رنگزای لعاب‌های کاشی‌های هفت رنگ ایران توسط محققان ایرانی و خارجی صورت گرفته، اما در خصوص کاشی‌های معرّق، مطالعات محدودی انجام شده است که از آن‌ها به موارد زیر می‌توان اشاره کرد: مسعود باتر و همکاران (۱۳۹۶)، در مقاله‌ای به شناسایی مواد و رنگ‌های کاشی‌های معرق بنای تاریخی مصلای مشهد به روش میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به طیف‌سنج پراکش انرژی پرتوی ایکس پرداخته است و نتیجهٔ پژوهش او نشان داده که برای رنگ سفید از قلع به همراه اکسید سرب، رنگ سیاه از اکسید منگنز، رنگ لاجورد از اکسید کبالت، رنگ فیروزه ای از اکسید مس، رنگ قهوه‌ای از اکسید آهن، از آنتیموانات سرب برای لعاب زرد و از اکسید مس در ترکیب با لعاب سربی برای رنگ سبز استفاده شده است [22]. فرزانه شکیباپور (۱۳۹۶)، در پایان‌نامه کارشناسی ارشد با عنوان"آسیب‌شناسی لعاب کاشی معرق ضلع شمالی کاخ گلستان (عمارت خوابگاه) به منظور ارائه راهکار حفاظتی" با هدف فن‌شناسی عناصر موجود در بدنه و لعاب، به بررسی عوامل مؤثر بر آسیب-های لعاب کاشی‌های معرق بنای مذکور پرداخته است. در این پژوهش نیز از طیف‌سنجی اشعه ایکس و میکروسکوپ الکترونی روبشی برای آنالیز عنصری اکسیدهای فلزی رنگ‌ساز موجود در لعاب کاشی با رنگ‌های زرد، سفید، آبی فیروزه‌ای، لاجوردی، سبز و قرمز صورتی استفاده شده است. نتایج نشان داده‌اند که به ترتیب از سرب، سفیدآب شیخ، اکسید مس در لعاب قلیایی، اکسید کبالت، اکسید مس در لعاب سربی، اکسید آهن در ترکیب با سیلیس و اکسید سدیم در این لعاب‌های رنگی استفاده شده است [23]. سلیمانی (۱۳۹۱) در بررسی کتیبه‌های کاشی معرق در گنبد غفاریه مراغه با آنالیز بر روی سه نمونه از کاشی‌های معرق این بنا، به این نتیجه رسید که عامل رنگ سیاه لعاب، منگنز است و میزان منگنز و سرب در تغییر میزان رنگ سیاه مؤثر است، چنانچه رنگ لعاب مشکی‌تر میزان منگنز بیشتری نسبت به لعاب مشکی با رنگ بادمجانی دارد و سرب در لعاب تیره‌تر، کمتر است یا وجود ندارد. همچنین در بررسی نمونهٔ لعاب فیروزه‌ای عامل رنگ‌ساز مس شناسایی شد [24]. اکبری‌فرد (۱۳۹۱) با بررسی فنی، آسیب‌شناسی و ارائهٔ طرح حفاظت کتیبهٔ معرق کاشی خدای‌خانهٔ مسجد عتیق شیراز، به این نتیجه رسید که قلع، عامل رنگزای لعاب-های سفید در این مسجد محسوب می‌شود، لعاب زرد به واسطهٔ حضور قلع و سرب در لعاب ایجاد شده و مس و کبالت به ترتیب عامل رنگ لعاب‌های فیروزه‌ای و لاجوردی است [25]. مرور ادبیات و پیشینهٔ پژوهش حاکی از این موضوع است که مطالعهٔ محدودی روی بنای قبه سبز در حیطهٔ معماری و تزئینات انجام شده است. همچنین مطالعات انجام شده در زمینهٔ شناخت لعاب‌های کاشی‌های معرق این بنا و سایر بناهای تاریخی ایران به شیوهٔ تجربی نیز اندک است و نتایج آنالیز تحقیقات انجام شده، نشان می‌دهند (جدول ۱) برای رنگ‌های لعاب سفید، قلع و قلع و سرب به عنوان عامل رنگزا به کار می‌رفتند، همچنین در همهٔ نمونه‌ها از کبالت و مس به ترتیب برای رنگ لعاب‌های لاجوردی و فیروزه‌ای استفاده شده و سرب به همراه عنصری دیگر در ایجاد رنگ زرد مؤثر بوده است. همچنین نمونه‌های لعاب فیروزه‌ای و سبز بررسی شده درتحقیقات پیشین، از نوع لعاب قلیایی بوده‌اند. بنابراین،

پژوهش در مورد کاشی‌های معرق این بنای با ارزش، به روش تجربی با استفاده از بررسی‌های آزمایشگاهی، به لحاظ باستان‌سنجی اهمیت خاصی دارد.

جدول ۱: جمعبندی نتایج تحقیقات پیشین در کاشی‌های معرق مورد بررسی
Table 1: Summarizing the results of previous research on the studied mosaic tiles

پژوهش ها Researches	باتر و همکاران(۱۳۹۶) Butter et al, 2017	اکبری فرد (۱۳۹۱) Akbari fard, 2012	سلیمانی(۱۳۹۱) Soleimani,2012	شکیبا پور(۱۳۹۶) Shakibapor, 2017
بنای مورد بررسی The building under study	مصلی تاریخی مشهد Historical mosque of Mashhad	مسجد عتیق شیراز Atiq Mosque of Shiraz	گنبد غفاریه مراغه Ghaffar dome of Maragheh	خوابگاه کاخ گلستان Golestan Palace Dormitory
قدمت آثار مورد مطالعه Date of the sample	صفویه Safavid	صفاریان Saffarid	ایلخانان Ilkhanate	قاجاریه Qajar
عامل رنگ سفید white color agent	قلع و سرب Tin and lead	قلع Tin	_	سرب Lead
نوع لعاب Glaze type	لعاب سرب قلیایی Alkaline lead glaze	لعاب سرب قلیایی Alkaline lead glaze	_	لعاب قلیایی Alkaline lead glaze
عامل رنگ مشکی Black color agent	منگنز Manganese	_	منگنز Manganese	_
نوع لعاب Glaze type	لعاب سرب قلیایی Alkaline lead glaze	_	لعاب قلیایی Alkaline glaze	_
عامل رنگ فیروزه‌ای Turquoise color agent	مس Copper	مس Copper	مس Copper	مس Copper
نوع لعاب Glaze type	لعاب قلیایی Alkaline glaze	لعاب قلیایی Alkaline glaze	لعاب قلیایی Alkaline glaze	لعاب قلیایی Alkaline glaze
عامل رنگ زرد Yellow color agent	آنتیموان و سرب Antimony and lead	قلع و سرب Tin and lead	_	سرب و آهن Lead and Iron
نوع لعاب Glaze type	لعاب سربی Lead glaze	لعاب سرب قلیایی Alkaline lead glaze	_	لعاب قلیایی Alkaline glaze
عامل رنگ لاجوردی Azure color agent	کبالت Cobalt	کبالت Cobalt	_	کبالت Cobalt
نوع لعاب Glaze type	لعاب قلیایی Alkaline glaze	لعاب قلیایی Alkaline glaze	_	لعاب سربی Lead glaze
عامل رنگ سبز Green color agent	مس Copper	_	_	مس Copper
نوع لعاب Glaze type	لعاب سربی Lead glaze	_	_	لعاب سربی Lead glaze
عامل رنگ قهوه‌ای Brown color agent	آهن Iron	_		_
نوع لعاب Glaze type	لعاب سربی Lead glaze	_		_
عامل رنگ قرمز Red color agent	_	منگنز Manganese	_	آهن Iron
نوع لعاب Glaze type	_	لعاب قلیایی Alkaline glaze	_	لعاب قلیایی Alkaline glaze

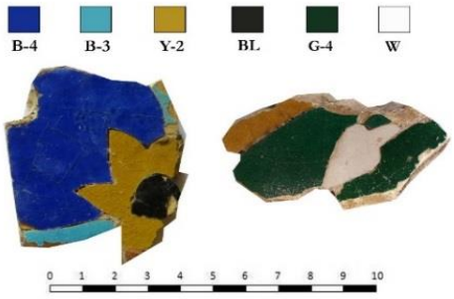
۳. مواد و روش

این تحقیق در حوزهٔ تحقیقات کاربردی، در جهت شناخت بهتر معماری گذشته و فنون ساخت تزئینات صورت گرفته است که به روش تجربی- تحلیلی، سعی دارد به فن‌شناسی و شناخت مواد و مصالح و ترکیبات شیمیایی به کار رفته در ساخت لعاب تزئینات کاشی معرّق بنای قبه سبز کرمان بپردازد. در راستای اهداف پژوهش و با توجه به اطلاعات مورد نیاز، امکانات

موجود و نمونه‌های دردسترس (شکل ۵) از روش‌های تجربی برای انجام پژوهش بهره گرفته شد. زیرا برای شناخت بدنه، درصد مواد به کار رفته، عناصر تشکیل-دهنده لعاب، تعیین عامل رنگ در لعاب‌های مورد بررسی و برررسی آسیب‌ها نیاز به آزمایش‌های میکروسکوپی دقیق است تا بتوان به کمک مجموع نتایج، اطلاعات درستی از آن استخراج کرد. از این روی، پس از بررسی‌های ماکروسکوپی، با تکیه بر مطالعات انجام گرفته بر آثار اهداف پژوهش و نمونه-های موجود، روش‌های زیر انتخاب شدند.

- شناسایی عناصر لعاب با میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز تفکیک انرژی پرتوی ایکس (SEM-EDS).
- طیف‌سنجی پراش پرتو ایکسXRD برای شناسایی کیفی کانی‌ها (دارای ساختار بلوری) و فازهای موجود در مواد مورد استفاده در بدنه.
- تهیهٔ مقاطع میکروسکوپی بدنه و مطالعهٔ میکروسکوپی مقطع نازک با میکروسکوپ نوری پولاریزان.

در این مطالعهٔ آزمایشگاهی برای شناخت عناصر تشکیل دهندهٔ لعاب و عوامل ایجاد رنگ در آن، از میکروسکوپ الکترونی بنیاد علوم کاربردی رازی مدل MIRA3ساخت شرکت TESCAN مجهز به آشکارساز BSE جهت تشخیص تغییرات فازی بر اساس عدد اتمی در نمونه، استفاده شده است. آنالایزر (EDS) به کار رفته در این دستگاه، دارای قدرت تفکیک ۱۲۶ ev > و حد تفکیک بیشتر از ppm۵۰۰۰ برای شناسایی عناصر موجود از عنصر بور (B) به بعد در جدول تناوبی است. برای مطالعهٔ ساختار بدنه‌های (بیسکویت‌های) کاشی از روش پتروگرافی مقطع نازک به روش میکروسکوپی استفاده شده‌است. این آزمایش، در آزمایشگاه پترولوژی زر آزما در ماهان صورت گرفته است.



شکل ۵: نمونه‌های کاشی مورد مطالعه
Fig. 5: Tile samples studied

٤. نتایج و یافته‌ها

٤-١. آنالیز لعاب

شناسایی کمّی و کیفی عناصر موجود در لعابِ نمونه کاشی‌ها با استفاده از سیستم اسکن الکترون میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد. آنالیز روی لعاب سیاه نشان داده است (جدول ۲، شکل ۶) که بیشترین عنصر شناسایی شده در لعاب، اکسیژن است و همچنین سیلیس به عنوان شبکه‌ساز است. میزان این عنصر در لعاب آنالیز شده 28.11 درصد است. بعد از آن پتاسیم با 3.46 درصد وزنی، بیشترین میزان را به خود اختصاص داده است و کلسیم و سدیم به ترتیب با 2.95 و 2.90 درصد وزنی در ردهٔ سوم و چهارم از نظر میزان قرار دارند. بعد از آلومنیوم که به میزان 2.46 درصد در بین عناصر وجود دارد، سرب با میزان 1.61 و سپس منگنز و کلر به ترتیب با میزان 1.33 و 1.26 درصد وزنی در لعاب سیاه حضور دارد.

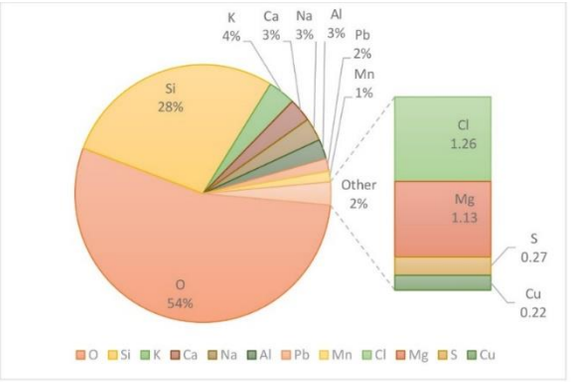
وجود منگنز به میزان 1.33 درصد وزنی در نمونه، نشان دهندهٔ این مطلب است که رنگ سیاه کاشی معرق سیاه رنگ، ناشی از اکسید منگنز است. همچنین اکسیژن در لعاب مشکی از همهٔ نمونه‌ها بیشتر است و چون میزان اکسیژن زیاد است، رنگ تیره ایجاد شده است. با توجه به میزان کم سرب در لعاب و میزان بالای عناصر قلیایی و قلیایی خاکی، این لعاب از نوع لعاب‌های قلیایی است.

آنالیز روی لعاب کاشی معرق نمونهٔ سفید رنگ (جدول ۳) نشان داده است که سیلیس مادهٔ اولیهٔ سازندهی لعاب و به عنوان شبکه ساز است. میزان این عنصر در

لعاب آنالیز شده 56.63 درصد است. بعد از آن سرب با 17.33 درصد وزنی بیشترین میزان را به خود اختصاص داده است. اکسید سرب موجود در این لعاب به عنوان دگرگون‌ساز شبکه در لعاب عمل می‌کند. بعد از سرب، قلع به میزان 7.83 درصد وزنی در لعاب وجود دارد و پتاسیم چهارمین عنصر با درصد بالا در این لعاب است که میزان اکسید آن 7.73 درصد وزنی است و مابقی عناصر به ترتیب شامل سدیم، آلومنیوم، منیزیم، کلسیم، آهن، گوگرد و وانادیوم است (جدول ۳، شکل ۷). در بررسی نمونهٔ لعاب سفید، قلع به میزان حدود ۸ درصد وجود دارد و احتمالاً اکسید قلع به همراه اکسید سرب به عنوان عامل ایجاد رنگ در لعاب عمل کرده است. با توجه به ترکیب شیمیایی این لعاب و عناصر قلیایی موجود در آن، لعاب این کاشی جزء لعاب‌های سرب قلیایی است.

جدول۲: نتایج تجزیه عنصری لعاب مشکی رنگ
Table 2: Elemental decomposition results of black glaze

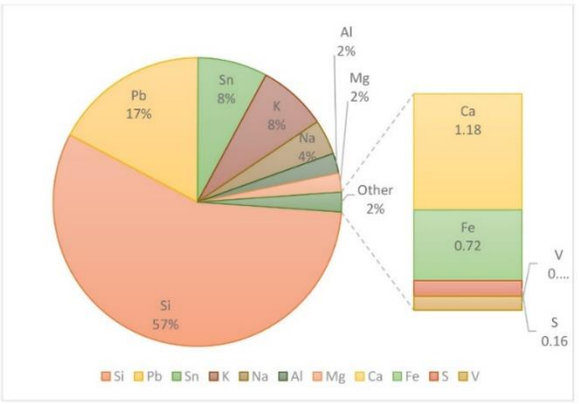
A%	W%	Elt
درصد اتمی	درصد وزنی	نام عنصر
69.26	54.30	**O**
20.42	28.11	**Si**
1.81	3.46	**K**
2.57	2.90	**Na**
1.50	2.95	**Ca**
1.86	2.46	**Al**
0.95	1.13	**Mg**
0.73	1.26	**Cl**
0.17	0.27	**S**
0.50	1.33	**Mn**
0.07	0.22	**Cu**
0.16	1.61	**Pb**



شکل ۶ نمودار میزان فراوانی درصد وزنی عناصر لعاب مشکی
Fig. 6: Graph of the frequency percentage by weight of black glaze elements

جدول۳: نتایج تجزیه عنصری لعاب سفید رنگ
Table 3: Results of elemental decomposition of white glaze

A%	W%	Elt
درصد اتمی	درصد وزنی	نام عنصر
6.19	3.92	**Na**
3.17	2.12	**Mg**
3.03	2.25	**Al**
73.19	56.63	**Si**
0.18	0.16	**S**
7.17	7.73	**K**
1.07	1.18	**Ca**
0.1	0.14	**V**
0.47	0.72	**Fe**
2.39	7.83	**Sn**
3.04	17.33	**Pb**

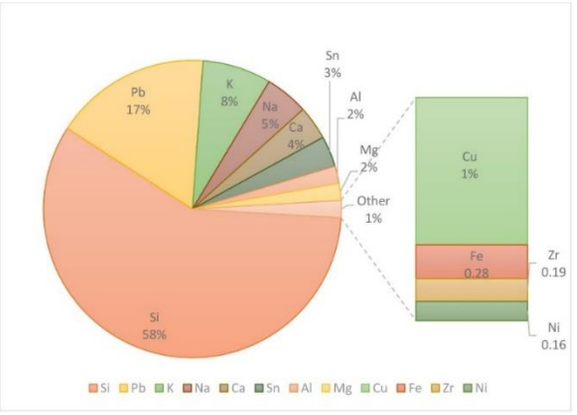


شکل۷: نمودار میزان فراوانی درصد وزنی عناصر لعاب سفید
Fig. 7: Graph of frequency percentage by weight of white glaze elements

نتایج آنالیز عنصری لعاب فیروزه‌ای در کاشی معرق بنای قبه سبز نشان می‌دهد که عنصر شاخص مربوط به سه عنصرسیلیس، سرب و پتاسیم است که به ترتیب دارای درصد وزنی 58.2، 17.01، 7.47 در لعاب هستند. چهارمین پیک شاخص مربوط به سدیم با درصد وزنی 4.71، پنجمین و ششن و هفتمین پیک مربوط به کلسیم و قلع و الومینیوم است که به ترتیب دارای درصد وزنی 3.68، 3.34 و1.89 هستند و مابقی عناصر شناسایی شده شامل منیزیم، مس، آهن، زیرکونیوم و نیکل است (جدول ۴، شکل ۸). در بررسی آنالیز رنگ فیروزه‌ای، نتایج نشان می‌دهند که رنگ فیروزه‌ای در لعاب‌های مورد بررسی از کنار هم قرارگیری ترکیبات مس در لعاب غنی از عناصر قلیایی مانند پتاسیم حاصل شده است. با توجه به میزان سرب و عناصر قلیایی، لعاب این کاشی جزء لعاب‌های سرب قلیایی است.

جدول ۴: نتایج تجزیه عنصری نمونه لعاب فیروزه‌ای
Table 4: Results of elemental decomposition of turquoise glaze

A%	W%	Elt
درصد اتمی	درصد وزنی	نام عنصر
7.19	4.71	**Na**
2.66	1.84	**Mg**
2.46	1.89	**Al**
72.84	58.2	**Si**
6.72	7.47	**K**
3.23	3.68	**Ca**
0.17	0.28	**Fe**
0.09	0.16	**Ni**
0.68	1.23	**Cu**
0.07	0.19	**Zr**
0.99	3.34	**Sn**
2.89	17.01	**Pb**



شکل ۸: نمودار میزان فراوانی درصد وزنی عناصر لعاب فیروزه‌ای
Fig. 8: Graph of frequency percentage by weight of turquoise glaze elements

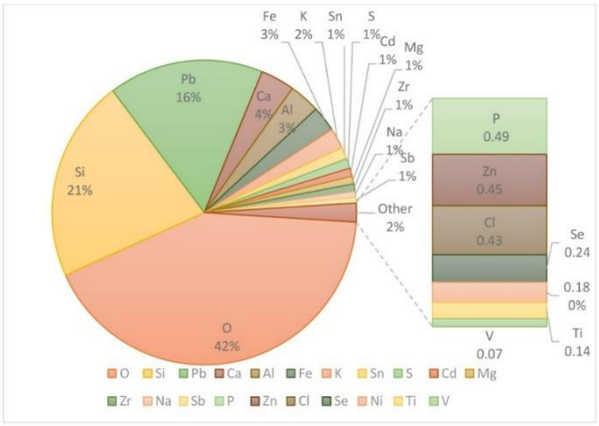
نتایج آنالیز عنصری لعاب زرد رنگ به روش SEM-EDX در جدول و شکل زیر آمده است. (جدول ۵، شکل ۹). نتایج نشان می‌دهند، شاخص‌ترین پیک، مربوط به دو عنصرسیلیس و سرب است که به ترتیب دارای درصد وزنی 21.48، 16.47 در لعاب هستند. سومین تا پنجمین پیک شاخص مربوط به کلسیم، آلومینیوم و آهن با درصد وزنی 3.62، 3.28 و2.7 است. ششمین تا دوازدهمین عنصر از نظر میزان درصد وزنی در لعاب، عناصر پتاسیم، قلع، گوگرد، کادمیوم، منیزیم، زیرکونیوم و سدیم هستند و مابقی عناصر شناسایی شده شامل، فسفر، روی، کلر، سلنیوم، نیکل، تیتانیوم و وانادیوم است. نتایج آنالیز نشان می‌دهند چند عامل رنگ‌زا در این نمونه وجود دارد که سبب قوی ترشدن این رنگ در لعاب شده است. چنانچه به نظر می‌رسد، آنتیموانات سرب، اکسید آهن و کادمیوم عامل رنگ زرد بوده‌اند. همچنین اکسید تیتان و رنگ‌دانه‌های قلع-وانادیوم به قوی شدن رنگ زرد کمک کرده است. اکسید روی هم که به تنهایی رنگ خاصی ندارد بر روی اکسیدهای رنگی اثر گذاشته و به تغییر رنگ آن‌ها کمک کرده است. لعاب کاشی زرد رنگ از نوع سرب قلیایی است.

آنالیز انجام شده بر لعاب لاجوردی نشان داده است که سیلیس مادهٔ اولیهٔ سازندهی لعاب و به عنوان شبکه‌ساز است. میزان این عنصر در لعاب انالیز شده 28.32 درصد است. بعد از آن سدیم و پتاسیم با 3.63 و 2.70 درصد وزنی بیشترین میزان را به خود اختصاص داده‌اند و سرب، آلومینیوم، منیزیم، زیرکونیوم و کلسیم در رده-های بعد، از نظر میزان قراردارند. عناصر دیگر تشکیل دهندهٔ لعاب شامل آهن، گوگرد، کبالت و کروم هستند (جدول ۶، شکل ۱۰). آنالیز نمونه لعاب لاجوردی، نشان

می‌دهد که رنگ لاجوردی به واسطهٔ وجود کبالت در لعاب ایجاد شده است و وجود زیرکونیوم سبب شده که لعاب لاجوردی در بنای قبه سبز کمتر ترک داشته باشد. البته چون روی، در لعاب وجود ندارد ترکیب کبالت، آهن و وجود اکسید منیزیم در لعاب نیز به ایجاد رنگ آبی تیره کمک کرده است. با توجه به ترکیب شیمیایی لعاب مورد بررسی و میزان سرب اندک، به نظر می‌رسد لعاب لاجوردی از نوع قلیایی است.

جدول ۵: نتایج تجزیه عنصری لعاب زرد رنگ
Table 5: Results of elemental decomposition of yellow glaze

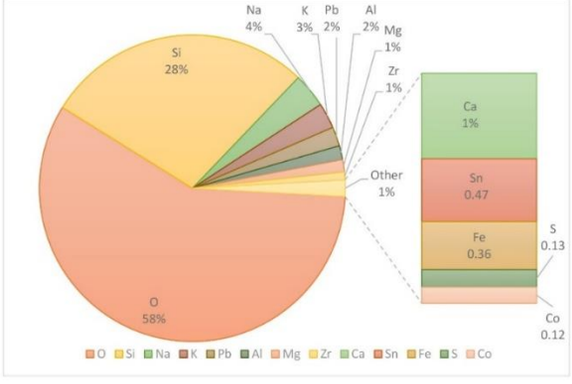
Elt	W%	A%
نام عنصر	درصد وزنی	درصد اتمی
Na	0.63	0.69
O	42.24	66.48
Mg	0.82	0.85
Al	3.28	3.06
Si	21.48	19.26
P	0.49	0.4
S	1.04	0.82
Cl	0.43	0.31
K	2.17	1.4
Ca	3.62	2.27
Ti	0.14	0.07
V	0.07	0.04
Fe	2.7	1.22
Ni	0.18	0.08
Zn	0.45	0.17
Se	0.24	0.08
Zr	0.79	0.22
Cd	0.86	0.19
Sn	1.27	0.27
Sb	0.6	0.12
Pb	16.47	2



شکل ۹: نمودار میزان فراوانی درصد وزنی عناصر لعاب زرد
Fig. 9: Graph of frequency percentage by weight of yellow glaze elements

جدول۶: نتایج تجزیه عنصری لعاب لاجوردی
Table 6: Results of elemental analysis of azure glaze

A%	W%	Elt
درصد اتمی	درصد وزنی	نام عنصر
3.15	3.63	**Na**
72.21	57.98	**O**
1.05	1.28	**Mg**
1.09	1.48	**Al**
20.09	28.32	**Si**
0.08	0.13	**S**
1.38	2.70	**K**
0.32	0.64	**Ca**
0.13	0.36	**Fe**
0.04	0.12	**Co**
0.19	0.85	**Zr**
0.08	0.47	**Sn**
0.20	2.03	**Pb**

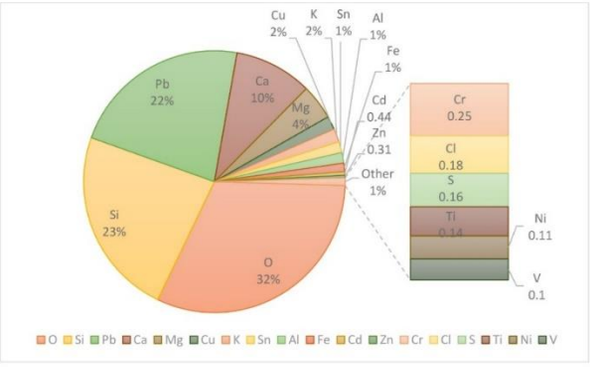


شکل ۱۰: نمودار میزان فراوانی درصد وزنی عناصر لعاب لاجوردی
Fig. 10: Graph of frequency percentage by weight of azure glaze elements

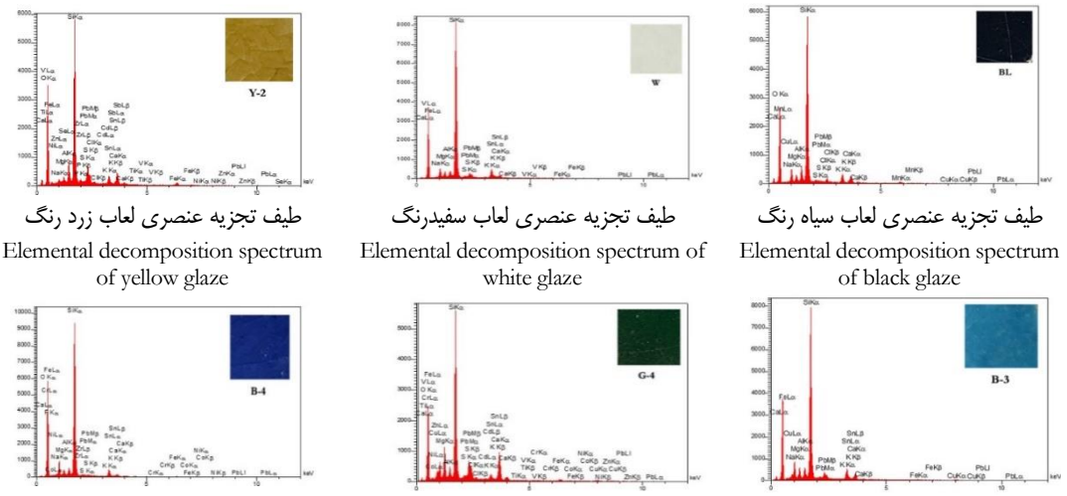
نتایج آنالیز عنصری لعاب سبز رنگ به روش SEM-EDX نشان می‌دهد (جدول ۷، شکل ۱۱) که بعد از اکسیژن، بالاترین میزان عناصر در لعاب مربوط به سیلیس و سرب است و بعد از آن، کلسیم و منیزیم به ترتیب دارای بیشترین درصد وزنی معادل 9.64 و 4.34 هستند. پیک‌های بعدی را عناصر مس (1.66%) پتاسیم (1.65%)، قلع (1.35%)، آلومینیوم (1.31%) تشکیل می‌دهند و کادمیوم با درصد وزنی 0.44 و روی با درصد وزنی 0.31 جزو دیگر عناصر تشکیل دهندهٔ لعاب هستند. همچنین کمتر از یک درصد از لعاب را عناصر کروم، کلر، گوگرد، تیتان، نیکل و وانادیوم تشکیل می‌دهند. آنالیز لعاب سبز رنگ، نشان داد وجود مس و آهن سبب ایجاد رنگ سبز تیره شده است و وجود وانادیوم وکروم هم تا حدودی در ایجاد این رنگ، تأثیر داشته است. میزان بالای کلسیم در این لعاب (بالای ۹ درصد) سبب پایداری بیشتر آن نسبت به سایر لعاب‌های سبز رنگ شده است. به همین دلیل این لعاب نسبت به سایر لعاب کاشی‌های رنگی بنای قبه سبز کمترین آسیب ناشی از ترک را داشته است. همچنین، میزان درصد بالای منیزیم نشان می‌دهد که از آن به عنوان گدازآور استفاده شده است. با توجه به میزان سرب و عناصر قلیایی، لعاب این کاشی جزء لعاب‌های سرب قلیایی است. رنگ و طیف تجزیهٔ عنصری لعاب کاشی‌های مورد بررسی بنای قبه سبز در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

جدول۷: نتایج تجزیه عنصری لعاب سبز
Table 7: Results of elemental analysis of green glaze

Elt	W%	A%
نام عنصر	درصد وزنی	درصد اتمی
Mg	4.34	5.08
Al	1.31	1.38
O	31.68	56.35
Si	23.31	23.61
S	0.16	0.15
Cl	0.18	0.15
K	1.65	1.2
Ca	9.64	6.84
Ti	0.14	0.08
V	0.1	0.06
Cr	0.25	0.13
Fe	1.05	0.54
Ni	0.11	0.05
Cu	1.66	0.74
Zn	0.31	0.13
Cd	0.44	0.11
Sn	1.35	0.32
Pb	22.32	3.06



شکل ۱۱: نمودار میزان فراوانی درصد وزنی عناصر لعاب سبز
Fig. 11: Graph of frequency percentage by weight of green glaze elements



طیف تجزیه عنصری لعاب زرد رنگ
Elemental decomposition spectrum of yellow glaze

طیف تجزیه عنصری لعاب سفیدرنگ
Elemental decomposition spectrum of white glaze

طیف تجزیه عنصری لعاب سیاه رنگ
Elemental decomposition spectrum of black glaze

طیف تجزیه عنصری لعاب لاجوردی
Elemental decomposition spectrum of azure glaze

طیف تجزیه عنصری لعاب سبز
Elemental decomposition spectrum of green glaze

طیف تجزیه عنصری لعاب فیروزه‌ای
Elemental decomposition spectrum of turquoise glaze

شکل ۱۲: طیف تجزیه عنصری لعاب کاشی‌های مورد بررسی بنای قبه سبز به روش SEM- EDX

Fig. 12: Elemental decomposition spectrum of glazed tiles of green dome construction by SEM-EDX method

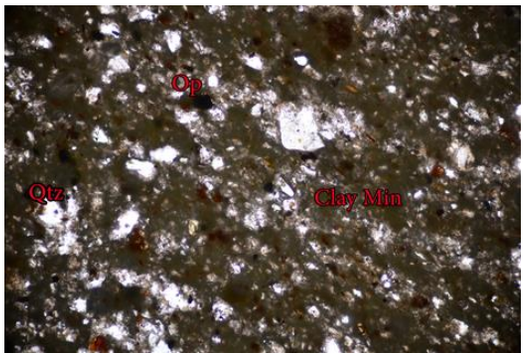
۲-٤. نتایج پتروگرافی و کانی‌شناسی بدنه کاشی

برای مطالعه و طبقه‌بندی بدنهٔ کاشی، از پتروگرافی مقطع نازک استفاده می‌شود. این روش، در بررسی طیف گسترده‌ای از مواد، شامل سنگ‌ها، مواد معدنی، سفال، سرباره‌ها، بتن، آجر، اندود (مخلوطی از آهک یا گچ) مورد استفاده قرار می‌گیرد. اطلاعات به دست آمده از پتروگرافی، سبب شناخت برخی از جنبه‌های مهم مطالعات سفال از جمله منشأ و تکنیک تولید آن‌ها خواهد شد [26].

در این پژوهش، بر چهار نمونه بدنهٔ کاشی‌های مورد مطالعه، پتروگرافی صورت گرفت. اما چون غالب اجزاء سازندهٔ نمونه‌های مورد بررسی، بسیار ریز هستند از این رو، برای بررسی‌های دقیق میکروسکپی این روش چندان مناسب به نظر نمی‌رسد و به‌ویژه شناسایی انواع کانی‌های رسی موجود، نیازمند آنالیز نمونه با XRD است. بنابراین در ادامه، آنالیز XRD بر روی نمونه‌ها صورت گرفت.

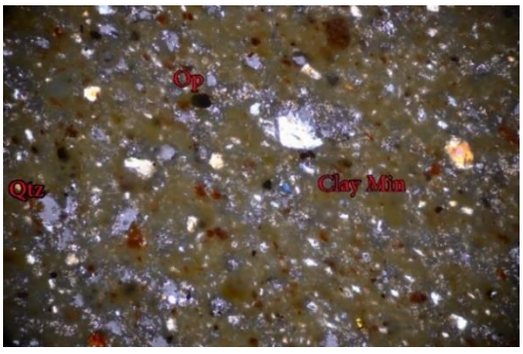
در بررسی پتروگرافی، کوارتز شاخص‌ترین کانی قابل مشاهده در مقاطع نازک تهیه شده از نمونه‌های بدنه کاشی‌های معرق است. حضور کواتز، نشان دهندهٔ این است که در بدنهٔ کاشی‌های معرق، احتمالاً از ماسهٔ سیلیسی خُرد شده یا شن خُرد و الک شده استفاده شده است [27]. احتمال دارد که ذرات کوارتز، محصول هوازدگی و خردشدن سنگ مادر مولد خاک در بدنهٔ کاشی باشد [28]. از دیگر کانی‌هایی که در مقاطع میکروسکوپی مشاهده شده، فلدسپات است که در تمامی سفال‌های تاریخی وجود دارد. این کانی، خود، عامل تشکیل دهندهٔ کانی‌های رسی است و همراه سایر کانی‌های رسی در بدنهٔ کاشی‌ها دیده می‌شود و گاهی به صورت آگاهانه برای پایین آوردن دمای پخت از آن به عنوان گدازآور استفاده می‌شود. از دیگر کانی‌های شناسایی شده اوژیت از فازهای گروه پیروکسن است. کانی‌های اپک (تیره) نیز در همهٔ نمونه‌ها قابل مشاهده است.

پتروگرافی بدنهٔ کاشی نمونهٔ B-4 نشان داد که کانی-های رسی (مانند کائولینیت، مونتموریلونیت و...) فراوانترین سازندهٔ نمونه هستند که همراه اکسید آهن چون ماتریکسی دربرگیرندهٔ بلورهای بی‌شکل و اغلب زاویه‌دار کوارتز (بیشتر در ابعاد سیلت یا قطر کمتر از ۶۰ میکرون و شماری کمی هم بزرگتر)، شمار کمی میکا (بیوتیت تیغه‌ای) کربنات بی‌شکل و گاه فروژینه، نیز کانی‌های کدر– اکسید آهن هستند (شکل۱۳ –۱۶).



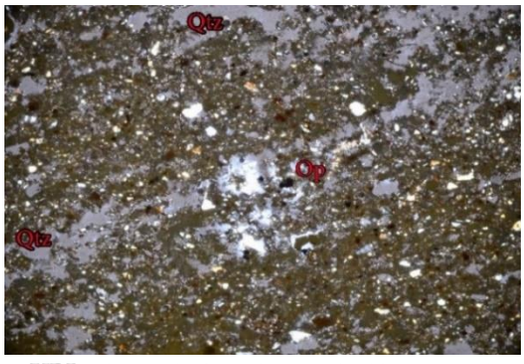
شکل۱۳: وجود کانی کوارتز و کانی رس، بزرگنمایی۱۰۰ حالت PPL

Figure 13: the presence of Mineral of quartz and clay mineral, 100x, PPL mode



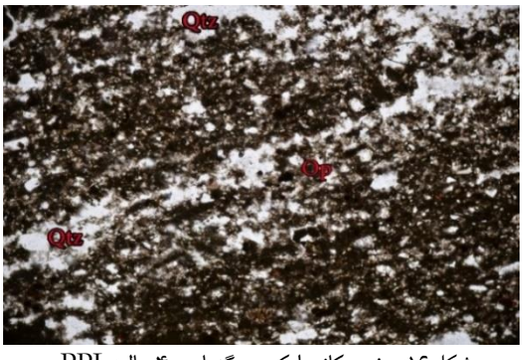
شکل۱۴ حضور کانی کوارتز و اپک، بزرگنمایی۱۰۰ حالتXPL

Figure 14: the presence of Mineral Quartz & Op , 100x, XPL mode



شکل۱۵: وجود کانی کوارتز و اپک، بزرگنمایی۴۰ حالتXPL

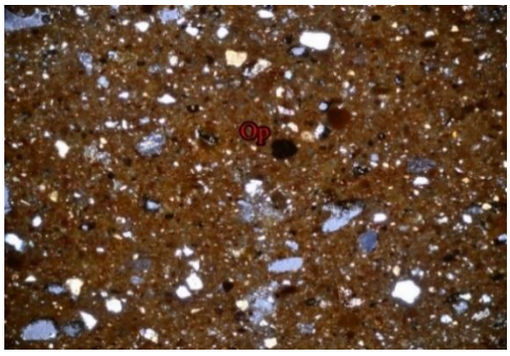
Figure 15: the presence of Quartz & Op, 40x, XPL mode



شکل۱۶: حضور کانی اپک، بزرگنمایی۴۰ حالتPPL

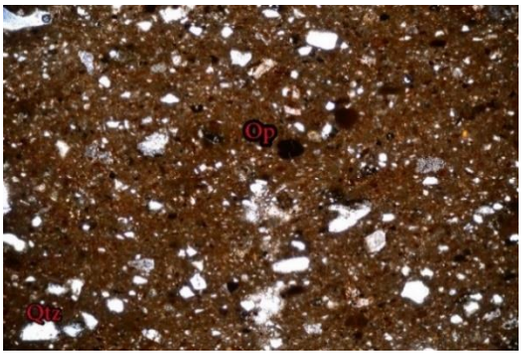
Figure 16: the presence of Mineral Op, 40x, PPL mode

پتروگرافی بدنهٔ کاشی B-2 نشان داد که نمونه حاوی کانی‌های رسی فراوان است. بلورهای بی‌شکل و اغلب زاویه‌دار کوارتز (در ابعاد سیلت و ماسه ریز)، فلدسپارهای آلتره و تجزیه شده، شمار کمی کانی مافیک (کلینوپیروکسن)، کانی‌های کدر، قطعات ریز سنگی آهکی و سیلیسی در خمیره یا ماتریکس گِلی متشکل از کانی‌های رسی (مانند کائولینیت، مونتموریلونیت و...)، همراه با اکسید- ئیدروکسیدهای آهن زیاد، و کمی کربنات جای دارند. در مقایسه با نمونهٔ B-4 دانه‌های آواری، فراوانی بیشتری دارند (شکل۱۷ -۲۰).



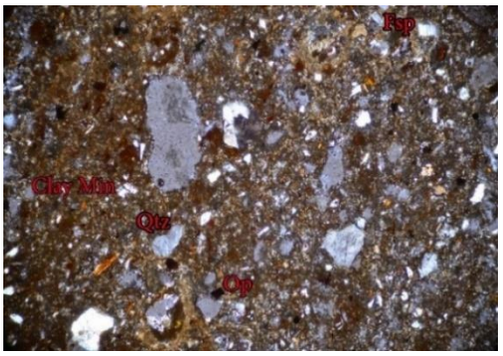
شکل۱۷: حضور کانی اپک، بزرگنمایی۴۰ حالتXPL

Figure 17: the presence of Mineral Op, 40x, XPL mode



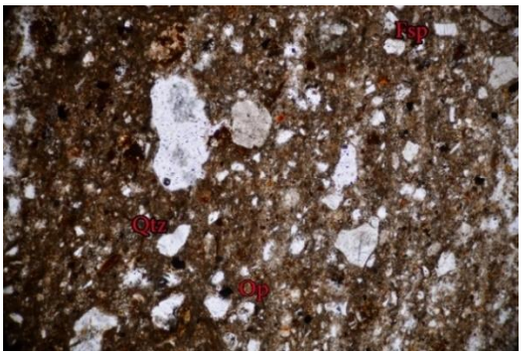
شکل۱۸: حضور کانی کوارتز و اپک، بزرگنمایی۴۰ حالتPPL

Figure 18: the presence of Mineral Quartz & Op, 40x, PPL mode



شکل۱۹: کانی کوارتز، فلدسپار، کانی‌های رسی و اپک، بزرگنمایی۱۰۰ حالتXPL

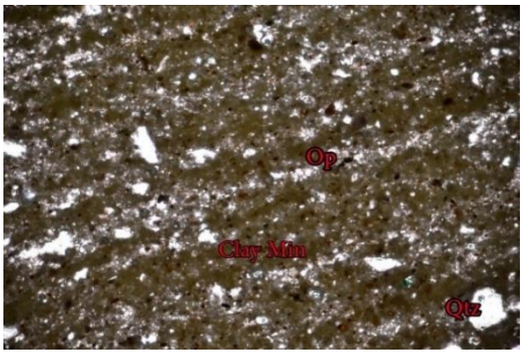
Figure 19: Quartz mineral, feldspar, clay minerals, and Op, 100x, XPL mode



شکل۲۰: حضور کانی فلدسپار و کوارتز و اپک، بزرگنمایی۱۰۰ حالتPPL

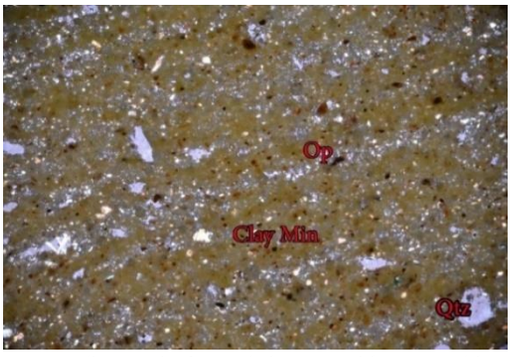
Figure 20: Quartz mineral, feldspar, clay minerals, and Op, 100x, XPL mode

نمونهٔ مورد بررسی G-4 حاوی کانی‌های رسی فراوان است. کانی‌های رسی (مانند کائولینیت، مونتموریلونیت و...) فراوانترین سازندهٔ نمونه است که همراه اکسید - ئیدروکسیدهای آهن چون ماتریکسی دربرگیرنده اجزاء آواری مانند بلورهای بی‌شکل و اغلب زاویه‌دار کوارتز (عمدتاً در ابعاد سیلت یا با قطر کمتر از ۶۰ میکرون و به‌ندرت در محدودهٔ ماسه ریز) با فراوانی کم، کانی کدر خیلی ریز، معدود فلدسپار و کمی هم کربنات است (شکل۲۱ –۲۴).



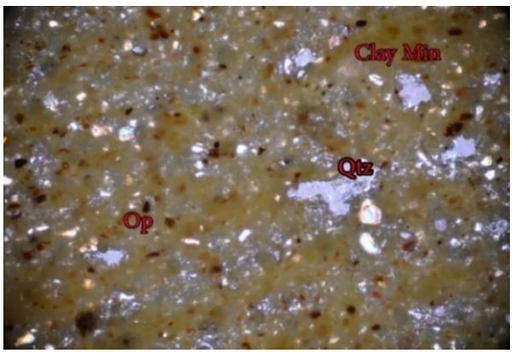
شکل۲۱: وجود کانی اپک، بزرگنمایی۴۰ حالتPPL

Figure 21: the presence of Mineral Op, 40x, PPL mode



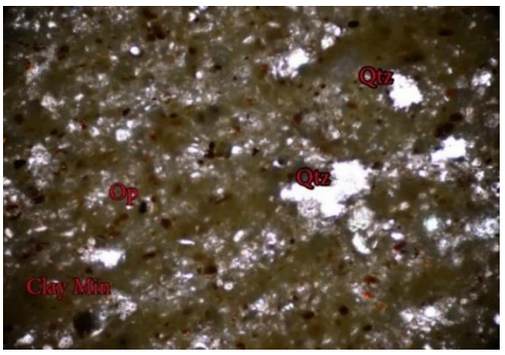
شکل۲۲: وجود کانی رسی و کوارتز، بزرگنمایی۴۰ حالتXPL

Figure 22: the presence of quartz and clay minerals, , 40x, XPL mode



شکل۲۳: کانی رسی، اپک وکوارتز، بزرگنمایی۱۰۰ حالتXPL

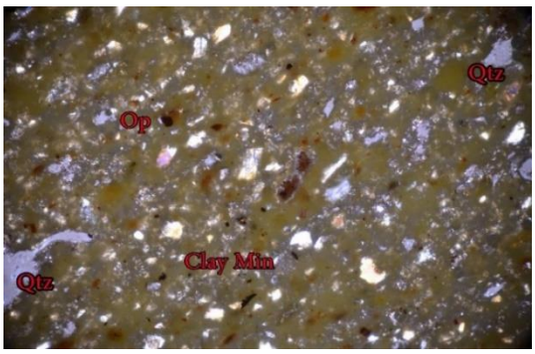
Figure 23: clay minerals, Op, Quartz, 100x, XPL mode



شکل۲۴: وجود کانی اپک و کوارتز، بزرگنمایی۱۰۰ حالتPPL

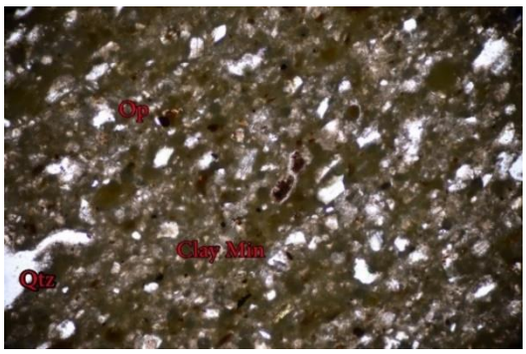
Figure 24: the presence of Mineral Op & Quartz, 100x, PPL mode

نمونهٔ مورد بررسی BL بیشتر حاوی کانی‌های رسی و کربنات است. کانی‌های فیلوسیلیکاته (بیشتر کانی رسی مانند کائولینیت، مونتموریلونیت و...) زیاد همراه کربنات دربرگیرندهٔ بلورهای بی‌شکل و گاه زاویه‌دار کوارتز (در بخشی از برش نازک فراوانتر شده)، قطعات اکسیده یا میکرایتی فروژینه، شمار کمی فلدسپار تجزیه شده، و کانی‌های کدر- اکسید آهن هستند (شکل۲۵-۲۸).



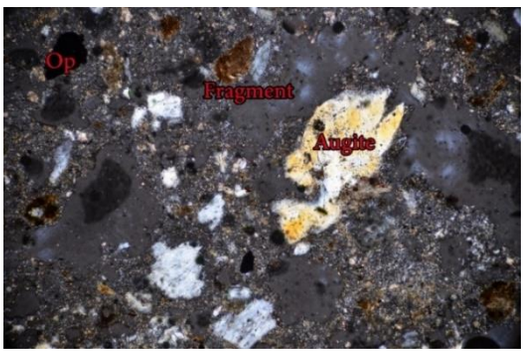
شکل۲۵: وجود کانی رسی، اپک وکوارتز، بزرگنمایی۱۰۰ حالت XPL

Figure 25: the presence of clay minerals, Op, Quartz, 100x, XPL mode



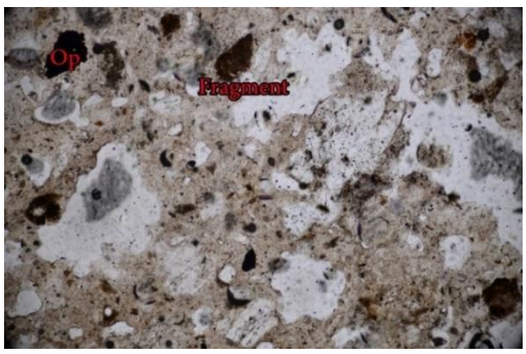
شکل۲۶: وجود کانی اپک، بزرگنمایی۱۰۰حالتPPL

Figure 26: the presence of Mineral Op, 100x, PPL mode



شکل۲۷: کانی اپک و اوژیت، بزرگنمایی۲۰۰ حالتXPL

Figure 27: Op mineral, and Augite, 200x, XPL mode



شکل۲۸: وجود کانی اپک، بزرگنمایی۳۰۰ حالتPPL

Figure 28: the presence of Mineral Op, 100x, PPL mode

الگوی XRD نمونه بدنه کاشی‌های مورد مطالعه در این کار تحقیقاتی در شکل ۲۹ نشان داده شده است و فازهای غالب در آن‌ها مشخص شده‌اند. همانگونه که در شکل ۲۹ مشخص است الگوی XRD بدنه کاشی G-4 (منحنی a) با بقیهٔ نمونه‌ها متفاوت است. در بدنهٔ کاشی این نمونه، ۲۷ درصد کوارتز بالاتر بوده و پراش-های مربوط به آن بلندتر هستند. همچنین در این نمونه، پراش ظاهر شده در ۱۱/۶۵ از θ۲ مربوط به آلبایت است که شدت بالایی دارد. در نمونه بدنه کاشی B-4 و B-2 الگوی XRD کاملاً مطابق یکدیگر است و درصد اوژیت در آن‌ها بیشتر از نمونهٔ G-4 است (منحنی b و c). الگوی XRD بدنهٔ کاشی BL ترکیبی از دو مدل الگوی پراش G-4 و B-4یا B-2 است. با توجه به نتایج، می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که خاک به کار رفته در بدنهٔ کاشی G-4 با دیگر نمونه‌ها متفاوت است و خاک به کار رفته در BL نیز ترکیبی از دو خاک موجود است. همچنین پراش‌های مربوط به فازهای فرعی شامل فلدسپات سدیم، گهلنیت، سدیم آلومینیوم اکساید و آنورتیت نیز در الگوی XRD وجود دارد که

از شدت کمتری برخوردار هستند و یا توسط پراش‌های اصلی پوشیده شده‌اند.

از طرفی با استفاده از رابطهٔ دبای- شرر (Debye-Scherrer) (۱)، اندازهٔ دانه کریستالی را برحسب پهنای پیک تفرق اشعه ایکس در نصف ارتفاع و سایر شرایط تفرق می‌توان به دست آورد.

$$D = \frac{K\lambda}{\beta cos\theta} \qquad (۱)$$

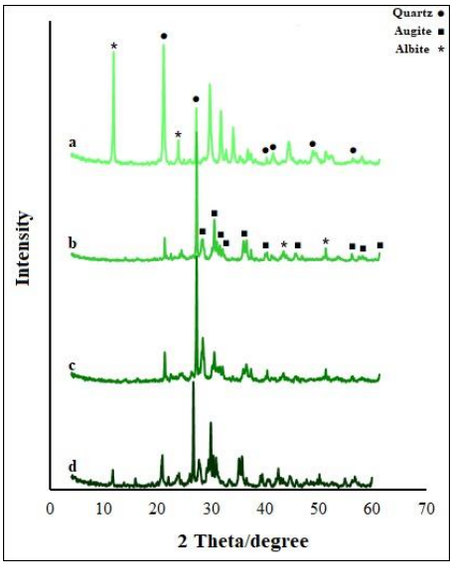
در رابطه (۱)، D اندازه دانه کریستالی، λ طول موج بر حسب آنگستروم (۰/۱۵۴۱۸)، θ زاویه پراش و β پهنای پرتو (بر حسب رادیان) در نصف شدت پرتو افکنی ماکزیمم است و مقدار K (۰/۹) در نظر گرفته شده است.

رابطهٔ دبای-شرر برای به‌دست آوردن میانگین اندازه ذرات در هر چهار بدنه کاشی و با استفاده از نتایج XRD به دست آمد که در جدول ۸ نشان داده شده است. با توجه به اینکه در دماهای بالای پخت، فرآیند تف جوشی (Sintering) صورت می‌گیرد و ذرات به یکدیگر می‌چسبند و ذراتی با اندازه بزرگتر را تشکیل می‌دهند می‌توان نتیجه گرفت که دمای پخت G-4 و BL از B-2 و B-4 بیشتر است.

جدول ۸: اندازه ذرات به دست آمده از الگوی XRD

Table 8: Particle size obtained from the XRD pattern

نمونه	Bl	B-2	B-4	G-4
میانگین اندازه ذرات Average particle size	۴۹/۵۲ nm	۴۲/۲۳ nm	۴۱/۴۵ nm	۵۵/۷۴ nm



شکل۲۹: الگوی XRD بدنه کاشی‌های a) G-4، b) B-4، c) B-2 و d) BL.

Figure 29: XRD pattern of tile body a) G-4, b) B-4, c) B-2 and d) BL.

نتایج پتروگرافی، طیف سنجی پراش پرتو ایکس و آنالیز عنصری بدنه (جدول ۹ و ۱۰) ۴ نمونه مورد بررسی نشان می‌دهند که در بدنهٔ کاشی‌های مورد بررسی از کوارتز به صورت ریزدانه به عنوان پرکننده و کلسیت کربنات به عنوان گدازآور استفاده شده است. سه ترکیب اکسید آلومینیم، سیلیس و کربنات کلسیم (Al2O3 ، SiO2 و CaO) بخش عمدهٔ ترکیبات نمونه بدنه‌های کاشی‌های مورد آزمایش را شامل می‌شوند. این ترکیبات نشان می‌دهند که در ساخت بدنه این کاشی‌ها خاک‌های آهکی CaO, Al2O3 وجود دارد و سهمی از خاک بدنه، مربوط به خاک‌های حاصل از سنگ‌های دگرگونی SiO2 است.

جدول۹: نتایج پتروگرافی و XRD کاشی‌های معرق قبه سبز
Table 9: Petrographic and XRD of green dome mosaic tiles

نمونه Sample	B-4	B-2	Bl	G-4
بافت Texture	آواری خیلی ریز، میکرو و کریپتوکریستالین Very fine detritus, micro and cryptocrystalline	آواری خیلی ریز، میکرو و کریپتوکریستالین Very fine detritus, micro and cryptocrystalline	آواری خیلی ریز، میکرو و کریپتوکریستالین Very fine detritus, micro and cryptocrystalline	دانه‌ای خیلی ریز، میکرو و کریپتوکریستالین Very fine grain, micro and cryptocrystalline
کانی شاخص در نتایج پتروگرافی و XRD Index mineral in petrographic and XRD results	کوارتز Quartz	کوارتز Quartz	کوارتز Quartz	کوارتز Quartz
مشخصه میکروسکوپی Especially microscopic	خاکستری رنگ در حالت XPL	خاکستری رنگ در حالت XPL	خاکستری رنگ در حالت XPL	خاکستری رنگ در حالت XPL
نتایج پراش اشعه ی پرتو ایکس XRD results	آلبیت Albite	آلبیت Albite	اوژیت Augite	دیوپسید Diopside
	اوژیت Augite	فلدسپات پتاسیم Potassium Feldspar	آلبیت Albite	گلنیت Gehlenite
	فلدسپات پتاسیم Potassium Feldspar	اوژیت Augite	فلدسپات پتاسیم Potassium Feldspar	سدیم آلومینیوم اکساید Sodium Aluminium Oxide
	ایلیت Illite	کلسیت Calcite	ژیپس Gypsum	آنورتیت Anorthite
	کلسیت Calcite	گوتیت Goethite	ایلیت Illite	
	گوتیت Goethite		گوتیت Goethite	
			کلسیت Calcite	

در آنالیز XRD سه نمونهٔ بدنهٔ مورد بررسی، وجود کلسیت که در پخت سفال به صورت یک دماسنج عمل می‌کند این احتمال را می‌دهد که دمای پخت بدنه سه نمونه BL, B-2 و B-4 کمتر از ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد بوده است [29] و در نمونه G-4، عدم وجود کلسیت، حرارت بالای پخت سفال را نشان می‌دهد و نتیجه می‌شود که دمای پخت بدنه این نمونه کاشی بالای ۸۰۰ درجه بوده است. همچنین وجود آنوریت در نمونه G-4، نشان می‌دهد که نحوهٔ پخت این نمونه با سرعت آرام صورت گرفته و پیک گرما در کوره پخت به یکباره افزایش نداشته است. آنورتیت جزو دسته کانی‌هایی است که در درجه حرارت بالا پایدار است و

می‌تواند به صورت ثانویه و از مجاورت و واکنش بین فیلو سیلیکات‌ها با دانه‌های کلسیت نیز به وجود بیاید [30] که در این نمونه وجود دارد و نشان‌دهندهٔ دمای پخت بالا است. همچنین در این نمونه دیوپسید وجود دارد که در دمای بالای ۶۰۰ تشکیل می‌شود [31] و گلنیت، از فازهای ثانویهٔ مهم در درجه حرارت بالا در پخت، تنها در این نمونه شناسایی شده است.

جدول ۱۰: نتایج آنالیز XRFبدنه کاشی¬ها

Table 10: Results of XRF analysis of tile biscuits

SrO	Zn	Pb	Cu	Cr2O3	TiO2	SO3	P2O5	Na2O	MnO	MgO	K2O	Fe2O3	CaO	BaO	Al2O3	SiO2	Element
0.06	<0.01	0.78	0.12	0.01	0.62	0.59	0.41	2.23	0.1	4.77	2.52	5.69	11.82	0.05	12.45	52.43	B-2
<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.59	0.75	0.2	2.99	0.09	4.39	2.3	5.34	13.25	0.04	11.68	54.06	B-4
0.08	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.51	8	0.13	1.99	0.21	3.92	1.51	4.56	15.68	0.05	10.59	41.78	BL
0.1	<0.01	0.5	<0.01	0.01	0.62	1.9	0.22	1.91	0.09	4.62	2.29	5.46	13.71	0.04	12.24	52.69	G-4

۵. بحث در یافته‌ها

نتایج حاصل از آنالیز Edx لعاب‌ها نشان داد که سرب در تمامی نمونه‌ها وجود دارد. سرب، سبب درخشندگی و جلا در لعاب شده و رنگ‌ها را به خوبی نشان می‌دهد. آنالیز نشان داد که لعاب نمونه مشکی از نوع قلیایی و لعاب سایر نمونه‌ها از نوع سرب قلیایی است و در همهٔ نمونه‌های مورد بررسی، کلسیم به عنوان اصلاح‌ساز لعاب به کار گرفته شده است. نتایج حاصل از مطالعه و تجزیه عنصری ترکیب شیمیایی لعاب و شناسایی عوامل ایجاد رنگ در لعاب کاشی‌های معرق بنای قبه سبز، با نتایج حاصل از بررسی آزمایشگاهی ترکیب شیمیایی لعاب کاشی‌های معرق در سایر بناهای ایران مطابقت دارد و قابل مقایسه است (جدول۱۱).

جدول ۱۱: مقایسه نتایج حاصل از تجزیه عنصری لعاب کاشی‌های معرق قبه سبز کرمان با نتایج به‌دست آمده توسط سایر محققان در شناسایی ترکیب عنصری لعاب کاشی‌های معرق ایران.

Table 11: Comparison of the results of elemental analysis of Kerman Green Dome glazed tiles with the results obtained by other researchers in identifying the elemental composition of glazed mosaic tiles in Iran

رنگ لعاب در مطالعات صورت گرفته Glaze color in studies	لعاب سفید White glaze	لعاب سیاه Black glaze	لعاب فیروزه‌ای Turquoise glaze	لعاب زرد Yellow glaze	لعاب لاجوردی Azure glaze	لعاب سبز Green glaze
این تحقیق This research	قلع و سرب Tin and lead	منگنز Manganese	مس copper	آنتیموان، آهن، سرب و کادمیوم Antimony, iron, lead and cadmium	کبالت Cobalt	مس، آهن Copper and iron
باتر و همکاران Butter et al	قلع و سرب Tin and lead	منگنز Manganese	مس copper	آنتیموان و سرب Antimony and lead	کبالت Cobalt	مس copper
اکبری فرد Akbari fard	قلع Tin	_	مس copper	قلع و سرب Tin and lead	کبالت Cobalt	_
سلیمانی Soleimani	_	منگنز Manganese	مس copper	_	_	_
شکیبا پور Shakibapor	سرب lead	_	مس copper	سرب و آهن Lead and iron	کبالت Cobalt	مس copper

در بررسی بدنه کاشی، دانه‌های کوارتز در اندازه‌های تقریباً یکسان در همهٔ نمونه‌ها پخش شده‌اند که نشان از ورز خوردن خوب این مواد پر کننده دارد. به احتمال قوی، شناسایی فازهای شکل گرفته در درجه حرارت بالا مانند گلنیت و کانی‌های گروه پیروکسن که یک کانی ثانویه درجه حرارت بالا محسوب می‌شود، نشان از پخت کامل بدنهٔ کاشی‌ها دارد. نتیجهٔ بررسی بدنهٔ کاشی‌های معرق قبه سبز با نتایج حاصل از آنالیز بدنه کاشی‌های معرق سایر بناها قابل مقایسه است و نکتهٔ مهم، وجود کوارتز به عنوان اولین فاز شاخص در همهٔ نمونه‌ها است (جدول ۱۲).

جدول ۱۲: مقایسه نتایج حاصل از آنالیز بدنه کاشی‌های معرق قبه سبز کرمان با نتایج به‌دست آمده توسط سایر محققان
Table 12: Comparison of the results of body analysis of Kerman Green Dome mosaic tiles with the results obtained by other researchers

مطالعات Studies	فاز شاخص در بدنه Index phase in biscuits	توضیحات Description
این تحقیق This research	کوارتز Quartz	دمای فازهای تشکیل‌دهنده بدنه‌کاشی‌ها یکسان نبوده است. The temperature of the phases that make up the body of the tiles is not the same.
باتر و همکاران Butter et al	کوارتز Quartz	_
اکبری فرد Akbari fard	کوارتز Quartz	به دلیل وجود فازهای کربناته مانند کلسیت، دمای پخت کاشی کمتر از ۸۰۰ بوده است. Due to the presence of carbonate phases such as calcite, the tile baking temperature was less than 800.
سلیمانی Soleimani	کوارتز Quartz	دمای فازهای تشکیل‌دهنده بدنه‌کاشی‌ها یکسان نبوده است. The temperature of the phases that make up the body of the tiles is not the same.
شکیبا پور Shakibapor	کوارتز Quartz	به دلیل عدم تشکیل فاز پیروکسن دمای پخت کاشی کمتر از ۹۰۰ بوده است. Due to the lack of pyroxene phase, the tile firing temperature was less than 900.

رنگ روشن بدنهٔ کاشی‌ها نشان می‌دهد که اتمسفر کوره در حین پخت اکسیداسیون بوده است. همچنین نتایج آنالیز نشان داد که فاز اوژیت در سه نمونهٔ مورد بررسی وجود دارد و گلنیت، از فازهای ثانویه مهم در درجه حرارت بالا تنها در نمونه G-4 موجود است. وجود CaO در نتایج تحلیل‌ها وجود کربنات کلسیم را تأیید می‌کند. ناخالصی‌هایی چون سیلیس، اکسید آهن، اکسید منیزیم و آلومنیوم در کانی اصلی تشکیل دهندهٔ سنگ آهک ممکن است، وجود داشته باشد. با توجه به اینکه تمامی ترکیبات مذکور در نتایج تحلیل بدنه‌ها قابل مشاهده است، می‌توان بخش عمدهٔ خاک به کاررفته در ساخت بدنه کاشی را حاصل از سنگ‌های آهکی دانست؛ ازسوی دیگر، مواد و کانی‌های شناسایی شده در پتروگرافی و آنالیزهای شیمیایی نمونه‌ها نشان می‌دهند که بدنه کاشی سه نمونه ازنظر نوع کانی‌ها و ترکیبات عناصر به کاررفته در ساختار آن‌ها، به همدیگر شباهت دارد و به نوعی ازنظر گزینش مواد و عناصر، ترکیبات یکسانی داشته‌اند.

٦. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، لعاب‌های رنگی شش نمونه و ساختار بدنهٔ چهار نمونه، احتمالاً مربوط به دورهٔ صفویه، مورد مطالعه قرار گرفت. از نتایج آنالیز Edx لعاب‌ها عامل اصلی رنگ‌ساز در لعاب‌های رنگی شناسایی شد. نتایج نشان دادند که رنگ سیاه کاشی معرق سیاه رنگ نمونه مورد بررسی در بنای قبه سبز ناشی از منگنز است. رنگ فیروزه‌ای لعاب از کنار هم قرارگیری ترکیبات مس در لعاب غنی از عناصر قلیایی مانند پتاسیم حاصل شده و کادمیوم، اکسید آهن و آنتیموانات سرب عامل

رنگ زرد و قلع در لعاب سربی عامل رنگ سفید محسوب می‌شود. همچنین رنگ لعاب لاجوردی به واسطهٔ کبالت و رنگ سبز نمونهٔ مورد بررسی به واسطهٔ اکسید مس و آهن موجود در لعاب ایجاد شده است، همچنین حضور وانادیوم وکروم در آنالیز این لعاب نشان از تأثیر این دو عنصر بر درجه رنگ حاصله داشته است. نتایج نشان داده‌اند که سرب در همه نمونه‌ها وجود دارد و میزان آن در لعاب سبز بیشتر از سایرین و در لعاب مشکی دارای کمترین میزان است.

نتایج فازشناسی و ترکیب شیمیایی بدنه‌های مورد بررسی نشان می‌دهند که در بدنه کاشی‌ها از کوارتز به عنوان پرکننده برای کاهش میزان انقباض بدنه استفاده شده است. همچنین وجود کلسیت و ایلیت در سه نمونه نشان می‌دهد که احتمالاً دمای پخت بدنه سه نمونه Bl ، B-2، B-4بین ۷۵۰ تا ۸۰۰ درجه بوده است و در نمونه G-4 عدم وجود کلیست نشان از دمای بالاتر از ۸۰۰ درجه دارد و با وجود فازهایی چون گهلنیت و آنوریت و دیوپسید دمای پخت این نمونه را می‌توان حدود۸۰۰ تا درجه۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، تخمین زد.

حضور کلسیت علاوه بر افزایش تخلخل در بدنه در حین پخت، سبب شده که بدنهٔ سه نمونه Bl، B-2، B-4نسبت به نمونه G-4 رنگ روشن‌تری داشته باشند.

با توجه به نتایج به‌دست آمده و برای تکمیل تحقیقات مربوط به بنای مهم قبه سبز در تحقیقات بعدی سالیابی کاشی‌های قسمت‌های مختلف سردر قبه سبز می‌تواند صورت گیرد تا قدمت کاشی‌کاری‌ها به طور دقیق‌تر مشخص شود. همچنین با توجه به شباهت کاشی‌های زغره این بنا و بنای مسجد جامع کرمان که مربوط به دورهٔ آل‌مظفر است مقایسهٔ فن ساخت و اجرای کاشی-های زغره بنای قبه سبز با کاشی‌های زغره مسجد جامع نیز می‌تواند شناخت بهتری از کاشی‌های معرق ایران به ما دهد.

سپاسگزاری

این مقاله حاصل از طرح تحقیقاتی با عنوان" شناسایی ترکیبات شیمیایی به کار رفته در تزئینات کاشی‌کاری معرق قبه سبز کرمان" مصوب دانشگاه آزاد اسلامی کرمان در سال ۱۴۰۰ است که با حمایت مالی دانشگاه آزاد اسلامی کرمان اجرا شده است. بر خود لازم می-دانم از همکاری معاونت پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی کرمان، سرکار خانم دکتر مریم کاظمی‌پور و مدیر کل اداره کل میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری استان کرمان، جناب فعالی و جناب ریاحیان سرپرست مرمت بنای قبه سبز، قدردانی نمایم.

References

[1] Moortgat, Anton, The Art of Ancient Mesopotamia: The Classical Art of the Near East, Tehran: SAMT, 2008. [In Persian]
[مورتگات، آنتون، هنر بین النهرین باستان (هنر کلاسیک خاور نزدیک)، مترجم: زهرا باستی و محمد رحیم صراف، تهران: سازمان مطالعه و تدوین کتب علوم انسانی(سمت)، ۱۳۸۷]

[2] Girshman, Roman, Ziggurat at Chogha Zanbil, Vol 1, Translated by Asghar Karimi, Tehran: Cultural Heritage Organization, 1994. [In Persian]
[گیرشمن، رومن، زیگورات چغازنبیل، جلد اول، ترجمه اضغر کریمی، تهران: سازمان میراث فرهنگی کشور، ۱۳۷۳]

[3] Chaman, Hamid Reza, Nasir Al-Molk Mosque Tile Glazing Technology and Efforts to Restore the Red Glaze of Nasir Al-Molk Mosque, Master Thesis in Restoration of Historical Objects, Isfahan University of Arts: Faculty of Conservation and Restoration, 2005. [In Persian]
[چمن، حمیدرضا، فن‌شناسی لعاب کاشی‌های مسجد نصیرالملک و تلاش برای بازآوری لعاب قرمز مسجد نصیرالملک، پایان‌نامه کارشناسی

ارشد رشته مرمت اشیا تاریخی، دانشگاه هنراصفهان: دانشکده حفاظت و مرمت، ۱۳۸۴.]

[4] Islam panah, Mohammad Hosein, History of Kerman Green Dome Inscription, Yaghma Memorial, 1992, pp: 400-405. [In Persian]

[اسلام پناه، محمد حسین، تاریخ کتیبه قبه سبز کرمان، یادنامه یغما، ۱۳۷۰، صص۴۰۰-۴۰۵]

[5] Mohammadi, Mohsen; Mohammadi, Mohammad; Khajehpour, Mansour, Identification and Protection of Present Values in "Green Dome" Historical Monument in Kerman, Iranian Islamic City Studies Quarterly, 2013, 12: 79-88. [In Persian]

[محمدی، محسن؛ محمدی، محمد؛ خواجه پور، منصور، بازشناسی و حفاظت ارزش های موجود در اثر تاریخی «قبه سبز» کرمان، فصلنامه مطالعات شهر ایرانی اسلامی، ۱۳۹۲، ۱۲: ۷۹-۸۸.]

[6] Daneshvar, Mohammad, Old Neighborhoods of Kerman, Kerman: Kerman Studies Center, 2009. [In Persian]

[دانشور، محمد، محله‌های قدیمی شهر کرمان،کرمان: مرکز کرمان‌شناسی، ۱۳۸۸.]

[7] Munshi Kermani, Naser-al-Din, Simt al- ula-li-l- hadrat-i-l-ulya, (History of the Qara Khitai of Kerman), Tehran: Dr. Mahmoud Afshar Yazdi Publications, 2015. [In Persian]

[منشی کرمانی، ناصرالدین، سمط العلی للحضره العلیا (تاریخ قراختائیان کرمان)، تهران: انتشارات دکتر محمود افشار یزدی، ۱۳۹۴]

[8] Shirazi, Fazlollah ibn Abdallah, Tarik-i Wassaf (Tajziyat al-amṣar wa-tazjiyat al-a'ṣar), Tehran: Mirmah, 2020. [In Persian]

[شیرازی، فضل الله بن عبدالله، تاریخ وصاف (تجزیه الامصار و تزجیه الاعصار) ، تهران: میرماه، ۱۳۹۹.]

[9] Emami Khoei, Mohammad Taghi, Taghvaei, Fatemeh, Signs of the Development of Iranian Culture in the Waqf School of Turkan Khatoon (Qarakhtaeian of Kerman), Bi-Quarterly of moskuya, 2013, 8 (24): 7-28. [In Persian]

[امامی خویی، محمدتقی، تقوایی فاطمه، نشانه‌های توسعه فرهنگ ایرانی در مدرسه وقفی ترکان خاتون (قراختاییان کرمان) ، دو فصلنامه مسکویه , ۱۳۹۲، ۸(۲۴): ۷-۲۸.]

[10] Rosta, Jamshid, Elchian Qarakhtaei in the court of Khwarezm Shahs; Foundations of the Kerman Qarakhtaean dynasty, Scientific and Research Journal of Iranian History, 2012, 5 (2), 73-102. [In Persian]

[روستا، جمشید، ایلچیان قراختایی در دربار خوارزمشاهیان؛ زمینه‌های تأسیس سلسلهٔ قراختاییان کرمان، مجله علمی و پژوهشی تاریخ ایران، ۱۳۹۱، ۵ (۲)، ۷۳-۱۰۲]

[11] Iqbal Ashtiani, Abbas, Pirnia, Hassan, Full History of Iran (from the beginning to the end of the Pahlavi dynasty), Tehran: Donyayeketaab, 2011. [In Persian]

[اقبال آشتیانی، عباس، پیرنیا، حسن، تاریخ مفصل ایران (از آغاز تا پایان سلسله پهلوی)، تهران: دنیای کتاب، ۱۳۹۰.]

[12] Stack, Edward, Six months in Persia; Travelogue of Edward Stack, translated by Shahla Tahmasebi, Tehran: Goqnoos, 2020. [In Persian]

[استاک، ادوارد، شش ماه در ایران؛ سفرنامه ادوارد استاک، ترجمه شهلا طهماسبی، تهران: ققنوس، ۱۳۹۹.]

[13] Sykes,Sir Percy Molesworth, Travelogue of General Sykes, ten thousand miles in Iran, Translated by Hossein Saadat Nouri, Tehran: Donyayeketaab, 2016. [In Persian]

[14] Anonymous, History of the Qarakhtaian Empire, edited by Mohammad Ebrahim Bastani Parizi, Tehran, Elm, 2011. [In Persian]

[بی‌نام، تاریخ شاهی قراختائیان، تصحیح محمد ابراهیم باستانی پاریزی، تهران، علم، ۱۳۹۰.]

[15] Ziaei, Seyed Abbas, Qarakhtaei Cultural Heritage of Kerman, 750-year-old Turkan Khatoon University,

رنگ آن در روش سنتی در راستای مرمت و بازسازی تزئینات کاشی‌کاری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه هنر اصفهان: دانشکده حفاظت و مرمت، ۱۳۹۶.]

[22] Bater M, Saberniya M, Ahmadi H. Identification of Materials and Colorants in Decorative Mosaic Tiles of Musalla Historical Building in Mashhad. JRA. 2017; 3 (1): 29-46. [In Persian]

[باتر مسعود، صابرنیا ملیحه، احمدی حسین، شناسایی مواد و رنگ‌های به‌کاررفته در تزیینات کاشی‌کاری معرق بنای تاریخی مصلای مشهد، پژوهه باستان‌سنجی، ۱۳۹۶، ۳ (۱): ۲۹-۴۶.]

[23] Shakibapour, Farzaneh, Pathology of mosaic tile glaze on the north side of Golestan Palace (dormitory building), in order to provide a protective solution, Master Thesis, Tehran University of Arts, Faculty of Conservation and Restoration, 2017. [Original in Persian with English Abstract or Summary]

[شکیبا پور، فرزانه، آسیب‌شناسی لعاب کاشی معرق ضلع شمالی کاخ گلستان (عمارت خوابگاه)، به منظور ارائه راهکار حفاظتی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه هنر تهران، دانشکده حفاظت و مرمت، ۱۳۹۶.]

[24] Soleimani, Parvin, Theoretical and practical principles of restoration of mosaic tile inscriptions in Iran Case study; Ghaffariyeh dome of Maragheh city, Isfahan University of Arts, Faculty of Conservation and Restoration, 2012. [In Persian]

[سلیمانی، پروین، اصول نظری و عملی مرمت کتیبه-های کاشی معرق در ایران مطالعه موردی؛ گنبد غفاریه شهرستان مراغه، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه هنر تهران، دانشکده حفاظت و مرمت، ۱۳۹۱.]

[25] Akbari fard. Maryam, Technical study, pathology and presentation of the protection plan of mosaic inscriptions of stone and tiles of the house of God of Atiq Mosque in Shiraz, Isfahan University of Arts, Faculty of Iranian Studies Journal, 2006, 5 (10): 127-160. [In Persian]

[ضیائی، سید عباس، میراث فرهنگی قراختائیان کرمان، دانشگاه ۷۵۰ سالهٔ ترکان خاتون، مجله مطالعات ایرانی، ۱۳۸۵، ۵ (۱۰) : ۱۲۷-۱۶۰.]

[16] Pirnia, Mohammad Karim, Introduction to Islamic Architecture of Iran, Tehran: Iran University of Science and Technology, 2011. [In Persian]

[پیرنیا، محمد کریم، آشنایی با معماری اسلامی ایران، تهران: دانشگاه علم و صنعت، ۱۳۹۰.]

[17] Javadi, Shohreh, Green Dome, the oldest example of mosaic tile in Iran, Journal of Honar-Ha-Ye-Ziba, 2000, 7 (12): 12-20. [In Persian]

[جوادی، شهره، قبه سبز، قدیمی‌ترین نمونه کاشی-کاری معرق در ایران، نشریه هنرهای زیبا، ۱۳۷۹ ،۷ (۱۲): ۱۲-۲۰.]

[18] Nazariyeh, Javad, Green Dome Architectural Analysis, The First Green Dome Conference of Kerman, Kerman, 2006. [In Persian]

[نظریه، جواد، تحلیل معماری گنبد سبز، اولین همایش قبه سبز کرمان، کرمان، ۱۳۸۵.]

[19] Kashani, Abdollah, Arais Al javaher - Nafais Al jatayeb, Tehran: Almai, 2008. [In Persian]

[کاشانی، عبدالله، عرایس الجواهر و نفایس الطایب، تهران: انتشارات المعی، ۱۳۸۶.]

[20] Salarieh, Mahmoud, Glaze (Properties, Application and Defects), Tehran: Islamic Azad University, 2004. [In Persian]

سالاریه، محمود،، لعاب (خواص، کاربرد و عیوب)، تهران: دانشگاه آزاد اسلامی،۱۳۸۳]

[21] Ghaderi, Massoud, Investigating the Factors Affecting the Quality of Turquoise Glaze and Achieving the Color Quality Control Method in the Traditional Method for Repairing Tile Decorations, Master Thesis, Isfahan University of Arts: Faculty of Conservation and Restoration, 2017. [In Persian]

[قادری، مسعود، بررسی عوامل تأثیرگذار بر کیفیت لعاب فیروزه‌ای و دستیابی به روش کنترل کیفیت

[29] Sardari, A., Taheri, M. The Petrography and XRF Analysis of Bakun Pottery Assemblage at Tal-e Mash Karim, Semirom District. Pazhoheshha-ye Bastan shenasi Iran, 2018; 7(15): 65-80. [Original in Persian with English Abstract or Summary]
[سرداری، علی‌رضا، طاهری، محمدحسین، بهشتی، سید ایرج. آنالیز پتروگرافی و XRF سفال‌های دورهٔ باکونِ تل‌مش‌کریم شهرستان سمیرم، پژوهش‌های باستان شناسی ایران، ۱۳۹۶: ۷ (۱۵): ۶۵-۸۰.]

[30] Martineau, R., Walter-Simonnet, A. V., Grobéty, B., Buatier, M., Clay resources and technical choices for Neolithic pottery (Chalian, Jura, France), chemical, mineralogical and grain-size analyses, Archaeometry, 2007, 49 (1), 23-52. [Original in Persian with English Abstract or Summary]

[31] Mineralogy and consideration of backing conditions of Chogha Zanbil historical bricks. Iranian Journal of Ceramic Science & Engineering. 2015; 4 (2): 33-46. [In Persian]
[هادیان دهکردی منیژه. کانی‌شناسی و بررسی شرایط پخت آجرهای تاریخی چغازنبیل. علم و مهندسی سرامیک. ۱۳۹۴؛ ۴ (۲): ۳۳-۴۶.]

Conservation and Restoration, 2012. [In Persian]
[اکبری‌فرد، مریم، بررسی فنی، آسیب‌شناسی و ارائه طرح حفاظت کتیبه معرق سنگ و کاشی خدای خانه مسجد عتیق شیراز، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه هنر اصفهان: دانشکده حفاظت و مرمت، ۱۳۹۱.]

[26] Peterson SE, Betancourt PP. Thin-section petrography of ceramic materials. INSTAP Academic Press (Institute for Aegean Prehistory); 2009 Aug 10.

[27] Riederer J. Thin section microscopy applied to the study of archaeological ceramics. Hyperfine Interactions 2004; 154:143–58. doi.org/10.1023/B:HYPE.0000032029.24557.

[28] Nourzehi Z, Ajorloo B, B Kasiri M. The Archaeo-mineralogy of the Bronze Age pottery shreds from Kul-tepe of Ajabshir, Eastern lake Urmia Basin, Iran. Journal of Research on Archaeometry 2017; 2(2):1–17. [In Persian]
[نوروزی، زینب، آجرلو، بهرام، باقرزاده کثیری، مسعود، ابراهیمی، قادر، باستان کانی‌شناسی سفالینه‌های عصر مفرغ کول تپه عجب‌شیر، شرق دریاچه ارومیه، پژوهه باستان‌سنجی، ۱۳۹۵؛ ۲(۲): ۱-۱۷.]