Ministry of Science, Research and Technology
Institute for Color Science & Technology

available online @ www.jcst.icrc.ac.ir
Journal of Color Science and Technology, 17, 1(2023), 1-16
Article type: Research article
Open access

نشریه علمی علوم و فناوری رنگ
Journal of Color Science and Technology
www.jcst.icrc.ac.ir

Characterization of Turquoise and Green Tonality Glazes in the Historical Monument of the Kerman Qara Khitai Period

Vahideh Rahimi mehr
Department of Architecture, Faculty of Art, Architecture and Urbanism, Kerman branch, Islamic Azad University, P.O. Code: 7635168111, Kerman, Iran

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 17-05-2022
Accepted: 24-09-2022
Available online: 13-05-2023
Print ISSN: 1735-8779
Online ISSN: 2383-2169

DOR: 20.1001.1.17358779.1402.17.1.1.0

Keywords:
Glaze
Turquoise
Green
Qara Khitai
EDS
CIE L* a* b*

ABSTRACT

*In the art of tiling, turquoise and green colors have been the colors considered by traditional architects. Their beauty depends on the coloring materials as one of the important glaze materials. This study aims to obtain technical information about the historical glazes of the Green Dome of Kerman. Written sources and field surveys were conducted to obtain samples to achieve this goal, and the color components of the glazes were measured using the CIE L*a* b* system. The X-ray energy diffraction (EDX) spectroscopy method was used to determine the constituent elements in the existing glazes. The results analysis show that the color tonality of the green glazes is due to chromium oxide, copper, vanadium, nickel, and iron in the glaze. The results of the examination of samples of turquoise glaze demonstrate that copper oxide served as the color generator in the glazes and that potassium and sodium oxide also contributed to the strength of the turquoise color.*

***Corresponding author: rahimimehr@iauk.ac.ir**

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
پژوهشگاه رنگ

دسترسی آنلاین: www.jcst.icrc.ac.ir
نشریه علمی علوم و فناوری رنگ/ ۱۷، (۱۴۰۲)۱، ۱۶-۱
نوع مقاله: پژوهشی
دسترسی آزاد

نشریه علمی علوم و فناوری رنگ
Journal of Color Science and Technology
www.jcst.icrc.ac.ir

مشخصه‌یابی لعاب‌های تنالیته فیروزه‌ای و سبز در بنای تاریخی دوره قراختائیان کرمان

وحیده رحیمی‌مهر
استادیار، گروه معماری، دانشکده هنر، معماری و شهرسازی واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران، کدپستی: ۷۶۳۵۱۶۸۱۱۱

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۲/۲۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۷/۲
در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۲/۲/۲۳
شاپا چاپی: ۱۷۳۵-۸۷۷۹
شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۱۶۹

DOR: 20.1001.1.17358779.1402.17.1.1.0

واژه‌های کلیدی:
لعاب
فیروزه‌ای
سبز
قراختائیان
EDS
CIE L*a*b*

چکیده

*در هنر کاشی‌کاری رنگ فیروزه‌ای و سبز از رنگ‌های مورد توجه معماران سنتی بوده است که زیبایی آنها به مواد رنگزا به عنوان یکی از مواد مهم لعاب بستگی دارد. هدف از پژوهش حاضر، دستیابی به اطلاعات فنی لعاب‌های تاریخی قبه سبز کرمان است. برای دستیابی به این هدف، منابع مکتوب و بررسی‌های میدانی جهت تهیه نمونه‌ها انجام پذیرفت و مولفه‌های رنگ لعاب‌ها با استفاده از سیستم CIE L*a*b* اندازه‌گیری شد. برای معین شدن عناصر تشکیل دهنده در لعاب‌های موجود از روش طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که تنالیته رنگ لعاب‌های سبز مورد بررسی به واسطه اکسید کرم، مس، وانادیم، نیکل و آهن موجود در لعاب ایجاد شده است. نتایج آنالیز نمونه لعاب‌های فیروزه‌ای نشان می‌دهد که عامل رنگ فیروزه‌ای در لعاب‌ها اکسید مس بوده است و علاوه بر مس، اکسید پتاسیم و سدیم در شدت رنگ فیروزه‌ای نقش داشته‌اند.*

*Corresponding author: rahimimehr@iauk.ac.ir

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

۱ـ مقدمه

فن‌شناسی علاوه بر شناخت بهتر معماری گذشته و کشف راز ساخت مصالح، به مرمت‌گران جهت حفظ ارزش‌های تاریخی و مرمت بهتر بنا کمک نموده است و این موضوع باعث شده است که پژوهشگران در مطالعات متعدد از روش‌های مختلفی برای فن‌شناسی مصالح استفاده کنند [۵-۱]. یکی از موارد با اهمیت در فن‌شناسی بناهای تاریخی، مطالعه لعاب رنگی کاشی‌ها است. در این بین طیف دو رنگ سبز و فیروزه‌ای دارای خصوصیات مشابه هستند که به وفور در کاشی‌های تاریخی دیده می‌شوند. وجود این دو رنگ در یافته‌های لعابی سفالینه‌های مصر و بین النهرین موید این مطلب است [۶، ۷]. لعاب با عملکرد تزیینی و کاربردی به واسطه ذوب مواد معدنی در سطح بدنه و یا به وسیله پخت بدنه در حضور بخارات قلیایی به وجود می‌آید [۸، ۹] و نه تنها باعث زیبایی سطح معماری شده، بلکه از عناصر دیوار، محافظت می‌کند [۱۰]. از مواد مهم و عمده در لعاب، مواد رنگزا است. رنگ لعاب تعیین‌کننده زیبایی و تا حدی ارزش بدنه‌کاشی است که سفالگران کهن از افشای رموز خود، خودداری می‌کردند. رنگ در لعاب به واسطه افزودن اکسیدهای رنگ‌کننده یا نمک‌های آن، به مواد پایه لعاب ایجاد می‌شود [۱۱]. در لعاب سنتی درجه حرارت کوره و موادی که به سوخت اضافه می‌شده در ایجاد رنگ مورد نظر بسیار موثر بوده است به عنوان مثال برای رنگ سبز مطلوب در کوره کاه می‌ریختند در پخت کاشی‌های با رنگ زرد و قرمز حرارت کم و برای کاشی‌های تنالیته آبی و به ویژه مشکی درجه حرارت بالاتری نیاز بود. علاوه بر این موارد، نحوه آسیاب کردن، نوع کوره، میزان ضخامت و رنگ بدنه نیز بر رنگ لعاب تاثیر داشت [۱۲]. رنگ‌های به کار رفته در سرامیک‌های قدیمی نشان از وجود ناخالصی‌هایی در مواد اولیه مصرف شده دارند ولی در کل رنگ لعاب غالبا از مواد معدنی و اکسیدهای رنگی حاصل می‌شود. تغییراتی که بر اثر ترکیب لعاب با مقدار متفاوت از اکسیدهای رنگ کننده، یا طرز استعمال و پخت به وجود می‌آید، بسیار زیاد است و رنگ‌های زیادی به این طریق به دست می‌آید، به عنوان نمونه اکسید آهن که از مهم‌ترین اکسیدهای رنگی است از قهوه‌ای روشن، زرد تا قرمز را در لعاب ایجاد می‌کند و در صورت افزایش میزان آن، رنگ‌های شکلاتی یا قهوه‌ای سوخته ایجاد می‌شود. نمونه دیگر استفاده از اکسید و کربنات مس در قدیم برای ایجاد لعاب آبی تا سبز است. درصدهای مختلف اکسید مس هم، رنگ‌های سبز روشن تا تیره را ایجاد می‌نماید. این اکسید کاربرد زیادی برای تهیه رنگ مدنظر سفالگران دارد. رنگ آبی در لعاب‌های با آلومینای کم یا بدون آلومینا خوش رنگ‌تر می‌شود و برای آبی سبز مواد دیگری به آن اضافه می‌شود [۱۳]. اکسید کبالت دیگر اکسیدی است که در هر نوع لعاب، رنگ آبی به وجود می‌آورد. البته این اکسید با ثبات‌ترین رنگ کننده لعاب است. اکسید کبالت به صورت پودر بنفش و سیاه وجود دارد و رنگ‌های آبی متوسط، تیره تا سیاه را ایجاد می‌کند. برعکس اکسید کرم بی‌ثبات‌ترین رنگ کننده است و می‌تواند علاوه بر سبز، رنگ‌های قهوه‌ای، قرمز، صورتی را تولید کند و البته رنگ ایجاد شده به نوع لعاب و میزان حرارت هم بستگی دارد. اکسید کبالت اگر با اکسید قلع ترکیب شود رنگ صورتی متمایل به قرمز و قهوه‌ای متمایل به قرمز ایجاد می‌شود. ترکیب اکسید کرم، کبالت و منگنز در شرایط احیا و حرارت پخت بالای ۱۲۵۰ درجه و بالاتر، لعاب آبی متمایل به سبز خواهد داد. اکسید منگنز در لعاب‌های قلیایی رنگ بنفش و در لعاب سربی، بنفش متمایل به قهوه‌ای ایجاد می‌کند [۱۳]. در بررسی رنگ‌های آبی و سبز لعاب، برخی از پژوهشگران به این نتیجه رسیده‌اند که اکسید مس با درصدهای متفاوت در لعاب‌های قلیایی، رنگ‌های آبی مانند فیروزه‌ای ایرانی و در لعاب‌های سربی، انواع رنگ‌های سبز را در لعاب به وجود می‌آورد که به نام توفال مس مشهور است [۱۶-۱۴، ۹].

در کتاب عرایس الجواهر و نفایس الاطایب از مس سوخته، به عنوان ترکیب اصلی لعاب یاد شده و موادی چون نحاس محروق (روی سوخته) عامل ایجاد رنگ لعاب سبز ذکر شده است [۱۷]. در پژوهشی دیگر مقدار اندک اکسید مس عامل رنگ آبی و سبز در لعاب ذکر شده است که در صورت استفاده مقدار زیاد از آن، رنگ‌های بسیار تیره حاصل می‌شود و ممکن است لعاب سیاه دیده شود. نتایج نشان داده رنگ در لعاب‌های اسیدی، به سبز پر رنگ و در لعاب‌های قلیایی بیشتر به رنگ فیروزه‌ای متمایل خواهد شد. البته به خاطر سمی بودن رنگ‌های حاوی مس و پراکنده شدن اکسید مس در لعاب‌های سرب‌دار، مصرف آن خیلی محدود است. همچنین تیتانیم باعث طیف‌های گسترده از رنگ‌های زرد، سبز، یا قهوه‌ای خواهد شد و کرم در برخی لعاب‌ها می‌تواند در ترکیب با سایر عناصر به رنگ سبز منجر گردد [۱۹، ۱۸]. جنگجو نیز در پایان‌نامه ارشد خود به این مطلب اشاره می‌کند که اکسید نیکل و کلرید نیکل نیز در مواردی طیف آبی و سبز را در لعاب ایجاد می‌نماید [۲۰].

نتیجه پژوهش باتر و همکارانش، نشان داده که برای ایجاد رنگ فیروزه‌ای از اکسید مس در لعاب قلیایی و برای سبز از اکسید مس در لعاب سربی استفاده شده است [۲۱]. در تحقیقی دیگر نوغانی به روش غیر تخریبی به شناسایی ترکیب شیمیایی لعاب‌های تاریخی یک کاشی هفت رنگ پرداخته است. نتایج نشان داده که لعاب کاشی از نوع لعاب سربی بوده و در لعاب فیروزه‌ای، اکسید مس و در لعاب سبز اکسید کرم عامل ایجاد رنگ بوده‌اند [۲۲]. قادری در پژوهشی براساس روش مرسوم در کارگاه‌های سنتی اقدام به تولید لعاب فیروزه‌ای کرده و با کنترل عوامل مؤثر هم‌چون ترکیبات و شرایط پخت، تلاش کرده تا به رنگ فیروزه‌ای مورد نظر برسد. نتایج پژوهش حاکی از این بوده است که سیلیکات زیرکونیم فاز اصلی لعاب و رنگ است [۲۳]. نتایج پژوهش شکیباپور، نشان داده است که از اکسید مس در لعاب قلیایی برای رنگ فیروزه‌ای و اکسید مس در لعاب سربی برای ایجاد رنگ سبز استفاده شده است [۲۴]. در پژوهشی مرتبط‌تر

نتایج آنالیز عنصری روی دو نمونه کاشی معرق بنای قبه سبز، حاوی شش رنگ، نشان داد که عامل رنگ نمونه فیروزه‌ای، اکسید مس و عناصر رنگزا لعاب سبز، مس، گوگرد، آهن، کرم و وانادیم است [۲۵] ولی طیف‌های مختلف رنگ فیروزه‌ای و سبز موجود در بنا مورد مطالعه قرار نگرفته است.

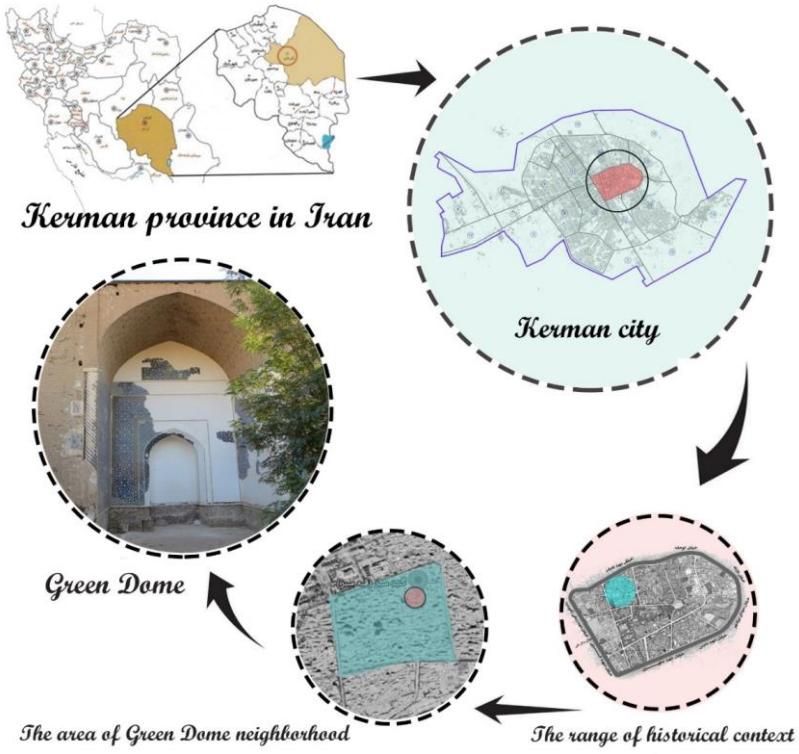
براین اساس، بررسی لعاب‌های رنگی برای معماران و مرمت‌گران، موضوعی با اهمیت است که می‌تواند در بررسی فرسایش لعاب و مرمت آنها نقش مهمی ایفا کند. بنابراین هدف اصلی از مطالعه شناسایی عناصر تشکیل‌دهنده لعاب‌های رنگ فیروزه‌ای و سبز و عوامل ایجاد رنگ در لعاب‌های کاشی‌ها است تا بتوان با تولید لعاب‌های مشابه به مرمت بنا کمک نمود.

قبه سبز از بناهای بی‌نظیر قرن هفتم و متعلق به دوره قراختاییان بوده [۲۶] که متاسفانه در زلزله ۱۲۷۶ از بین رفته و تنها ایوان بلند و بخشی از کاشی‌کاری معرق این بنا باقی‌مانده است. موضوعی که اهیمت شناخت عناصر لعاب‌های بنای قبه سبز کرمان را زیادتر می‌کند، دو مورد است: یکی آسیب زیاد کاشی‌های ریخته شده بنا که داخل جعبه‌هایی در محوطه بنا نگهداری می‌شوند و دیگری قدمت بالای کاشی‌های معرق این بنا است که جوادی به نقل از پیرنیا در تحقیقات خود به آن اشاره داشته و آن را قدیمی‌ترین کاشی‌های معرق ایران نام برده است [۲۷] البته درخصوص قدمت آنها اختلاف نظرهای متعددی وجود دارد که اسلام پناه در مقاله تاریخ کتیبه قبه سبز کرمان [۲۸] به آنها اشاره نموده است و معتقد است که تزئینات بنا به دوره صفویه تعلق دارد که هنوز این مطلب جای شبهه زیادی دارد.

۲ـ بخش تجربی

۲ـ۱ـ معرفی اثر و نمونه‌های مورد بررسی

از معماری گذشته آثار زیادی در قالب تزئینات کاشی‌کاری برجای مانده که از این میان می‌توان به یکی از شاهکارهای دوره قراختاییان کرمان از سلسله‌های ملوک‌الطوایفی ایران اشاره نمود که در حوزه موقوفات و ساخت عمارت خیریه وقفی شایانی داشتند [۳۰، ۲۹]. این بنا که در بافت تاریخی کرمان با نام قبه سبز مشهور است با کاشی‌های معرق آراسته بوده است اما متاسفانه تنها بخش موجود بنا ایوان آن است که بخشی از آن مزین به کاشی است و مابقی آن فروریخته است که میراث فرهنگی کرمان بقایای کاشی‌های با ارزش این بنا را در جعبه‌هایی داخل محوطه نگه می‌دارد.



شکل ۱: موقعیت شهر کرمان، محدوده محله قبه سبز و بقایای بنای قبه سبز.

Figure 1: Location of Kerman city, Green Dome neighborhood and the remains of Green Dome building.

در این بنا از رنگ‌های متفاوتی در لعاب کاشی‌ها استفاده شده است. به طور کلی کاشی‌های این بنا دارای رنگ‌های فیروزه‌ای، لاجوردی، سبز، مشکی، سفید و زرد هستند. مشاهده دقیق بنا و آثار تزئینی باقی‌مانده نشان داد که در این بنا از یک طیف رنگ سبز و فیروزه‌ای استفاده نشده است به گونه‌ای که رنگ فیروزه‌ای نیز در سه تنالیته رنگی به کار رفته است و رنگ سبز دارای پنج تنالیته مختلف است که برخی در بخش‌های نصب شده و برخی در قطعات نگهداری شده متعلق به میراث است. در این پژوهش سعی شده جهت مرمت بنا و شناخت بهتر فن ساخت کاشی و لعاب ها، روی همه تنالیته‌های دیده شده از رنگ‌های سبز و فیروزه‌ای آنالیز صورت گیرد و عناصر تشکیل دهنده این لعاب‌های رنگی با یکدیگر مقایسه شوند.

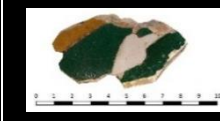
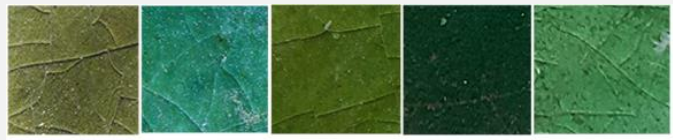
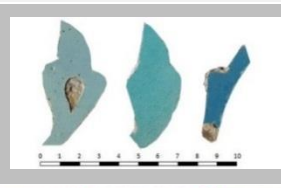
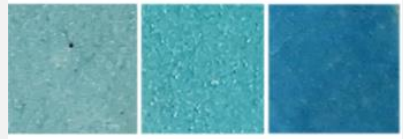
۲-۲- ابزار و روش کار

این پژوهش کاربردی جهت شناسایی مشخصه‌های رنگی لعاب‌ها، عناصرتشکیل دهنده و عامل رنگی لعاب‌های سبز و فیروزه‌ای با روش تجربی- تحلیلی انجام شده است. در ابتدا پس از کسب مجوز از میراث فرهنگی کرمان و بازدید متعدد از بنا، تعداد پنج نوع لعاب سبز و سه نوع لعاب فیروزه‌ای شناسایی و کدگذاری و به آزمایشگاه‌ها ارسال شد. وضعیت رنگی سطوح همه نمونه‌ها با استفاده از آزمون CIE Lab در مرکز توسعه فناوری سرامیک ایران بررسی شد و مشخصه‌های رنگی لعاب‌ها مشخص گردید. برای این آزمون از دستگاه اسپکتروفتومتر انعکاسی مدل Color-Eye A7000 ساخت کشور انگلستان استفاده شد. این دستگاه مجهز به دو دریچه بزرگ و کوچک با سایزهای متفاوت به منظور اندازه‌گیری نمونه‌هایی با اندازه‌های مختلف است که امکان محاسبه محرکه‌های رنگی در فضاهای استاندارد در زیر منابع نوری متداول را دارد.

سپس از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به طیف‌سنج پراکنش انرژی پرتوی ایکس متعلق به بنیاد علوم کاربردی رازی استفاده شد. دو نمونه G-4 , B-3 قبلا برای شناسایی عناصر مورد تحلیل قرار گرفته است و تنها جهت مقایسه در این پژوهش مد نظر قرار گرفت و بقیه نمونه‌ها مورد آزمون قرار گرفت. دستگاه این بنیاد مدل MIRA3 ساخت شرکت TESCAN مجهز به آشکارساز BSE جهت تشخیص تغییرات فازی بر اساس عدد اتمی در نمونه است. آنالایزر (EDS) به کار رفته در این دستگاه دارای قدرت تفکیک بالا و حد تفکیک بیشتر از ۵۰۰۰ ppm برای شناسایی عناصر موجود از عنصر بور (B) به بعد در جدول تناوبی می‌باشد.

جدول ۱: نمونه کاشی‌های مورد بررسی و بزرگنمایی لعاب‌های تنالیته رنگ سبز و فیروزه‌ای.

Table 1: Sample of examined tiles and magnification of green and turquoise tonality glazes.

Samples Image					
Green tonality Glaze	 G-1 G-2 G-3 G-4 G-5				
Samples Image					
Turquoisetonality Glaze	 B-1 B-2 B-3				

۳ـ نتایج و بحث

۳ـ۱ـ بررسی مشخصه‌های رنگی لعاب‌ها براساس آزمون CIE Lab

وضعیت رنگی سطوح برای کمک در ساخت لعاب‌های هم‌رنگ جهت مرمت آتی کاشی‌های بنا، انجام گرفت و مشخصه‌های رنگی مشخص شد که در جدول شماره ۲، سه مولفه مورد بررسی نمایش داده شده است. شاخص *L که شاخص تیرگی و روشنی می‌باشد نشان می‌دهد که در لعاب‌های رنگ آبی فیروزه‌ای نمونه b-3 لعاب تیره‌تر است. در نمونه‌های سبز رنگ لعاب G-4 که تیره‌تر است مقدار شاخص*L از همه کمتر است و نمونه G-2 و سپس G-5 از بین رنگ‌های سبز، روشن‌تر بوده و مقدار شاخص *a نیز در دو نمونه به ترتیب ۳۲,۳۵- و ۳۰,۸۷- است که نشانگر رنگ سبز است و میزان آن در این دو نمونه از سایر لعاب‌ها بیشتر است. مقدار مولفه *b نشان می‌دهد که رنگ نمونه G-3 و G-1 زردی بیشتری دارد و طبق نتایج مولفه *b نمونه G-4 و G-2 میزان زردی کمتری دارد و روی محور زرد - آبی به آبی نزدیک می‌شود.

۳ـ۲ـ تجزیه عنصری لعاب های آبی فیروزه‌ای

نتایج حاصل از تجزیه عنصری لعاب دوطیف رنگ آبی فیروزه‌ای B-2 و B-1 کاشی معرق بنای قبه سبز به روش SEM-EDS در زیر آمده است (جدول ۳- شکل ۳-۴). اکسید سیلیس یکی از مهم‌ترین شبکه‌سازها در لعاب است و در کلیه ترکیب‌های لعاب از این ترکیب استفاده می‌شود که در دو نمونه دارای بیشترین درصد وزنی است .اکسید سیلیس اغلب به صورت کوارتز به لعاب اضافه می‌شود بعد از سیلیس، سرب و سپس پتاسیم در آنالیز دو نمونه دیده می‌شود. در نمونه B-2، میزان قلع، سرب و پتاسیم بیشتر از نمونه B-1 است. همان‌طور که نتایج آنالیز رنگ فیروزه‌ای B-1 و B-2 نشان می‌دهد درآنالیزها عناصری مانند قلع، آلومینیم، کلسیم، سدیم، منیزیم، زیرکونیم، مس، نیکل و آهن مشاهده می‌شود. با توجه به میزان سرب و عناصر قلیایی، لعاب هر دو جزء لعاب‌های سرب قلیایی است.

جدول ۲: مشخصه‌های رنگی لعاب‌ها براساس آزمون CIE Lab.

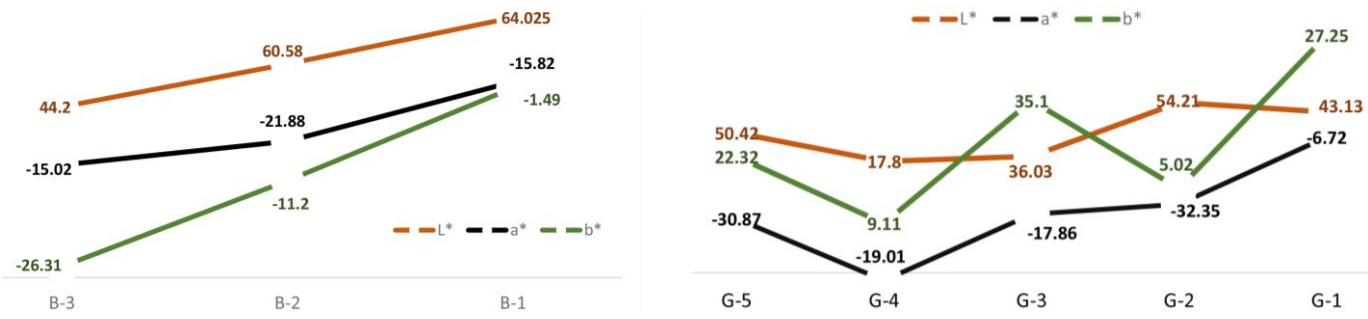
Table 2: Color parameters of glazes based on CIE Lab analysis.

Code	L*	a*	b*
B-1	64.025	−15.82	−1.49
B-2	60.58	-21.88	−11.20
B-3	44.2	−15.02	−26.31
G-1	43.13	-6.72	27.25
G-2	54.21	−32.35	5.02
G-3	36.03	−17.86	35.1
G-4	17.80	−19.01	9.11
G-5	50.42	−30.87	22.32

جدول ۳: نتایج تجزیه عنصری نمونه B-1.

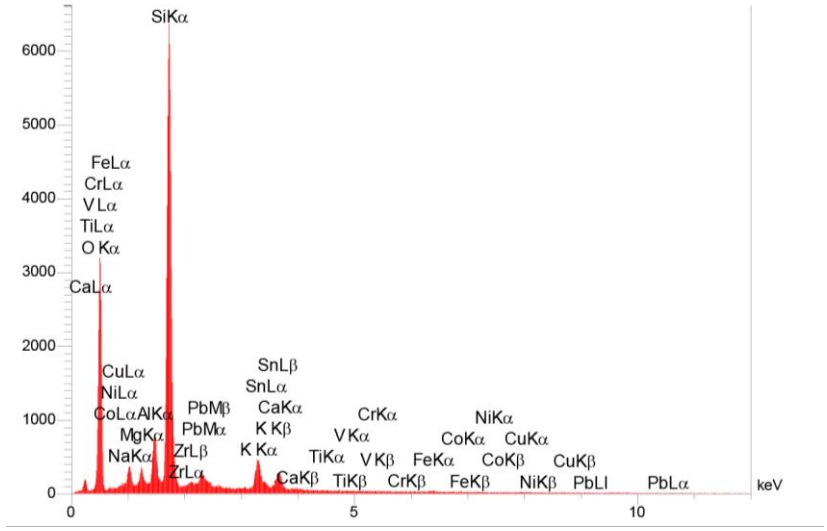
Table 3: Elemental decomposition results of sample B-1.

Elt	W%	A%
Na	0.93	0.92
Mg	0.51	0.48
Al	2.82	2.38
Si	76.12	23.46
K	4.34	2.52
Ca	2.06	1.17
Fe	0.29	0.12
Ni	0.1	0.04
Cu	0.3	0.11
Zr	0.32	0.08
Ti	0.08	0.04
V	0.07	0.03
Cr	0.08	0.04
Co	0.09	0.03
Sn	3.9	0.75
Pb	7.99	0.88



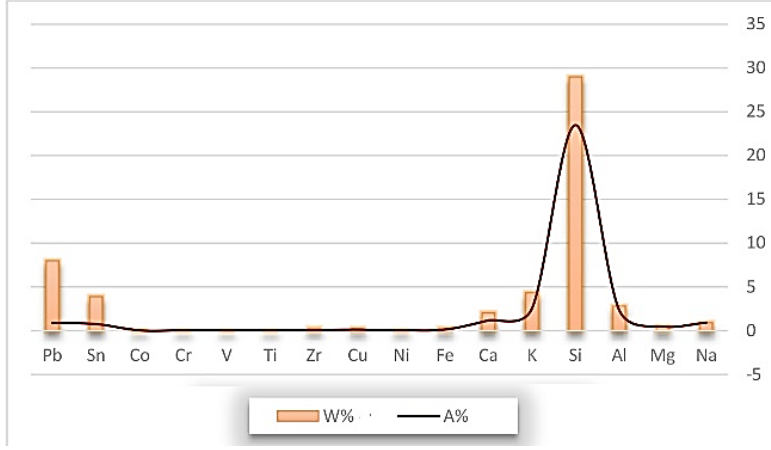
شکل ۲: نتایج رنگ‌سنجی لعاب‌های رنگی براساس آزمون CIE Lab.

Figure 2: Color measurement results of colored glazes based on CIE Lab analysis.



شکل ۳: طیف تجزیه عنصری لعاب کاشی B-1 به روش SEM- EDS.

Figure 3: Elemental decomposition spectrum of glazed tiles of B-1 by SEM-EDS method.



شکل ۴: نمودار درصد اتمی و وزنی عناصر موجود در لعاب B-1.

Figure 4: Graph of atomic and weight percentage of elements in B-1 glaze.

۳ـ۳ـ تجزیه عنصری لعاب‌های سبز

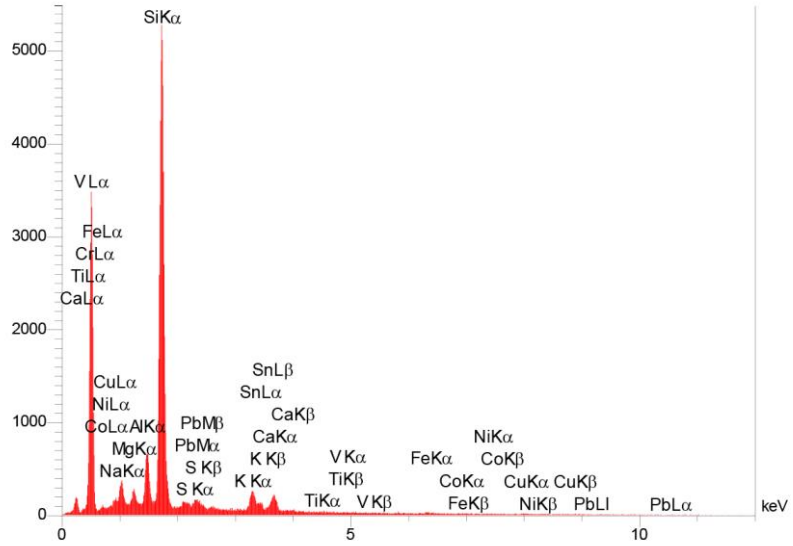
نتایج تجزیه عنصری لعاب سبز رنگ با کد G-1 نشان می‌دهد که سیلیس ماده اولیه سازنده لعاب است. بعد از اکسیژن، سومین عنصر شاخص در لعاب مورد بررسی، سرب است. بعد از آن به ترتیب سدیم، پتاسیم و کلسیم با میزان ۳,۷۸، ۳,۷۶ و ۳ درصد از سایر عناصر بیشتر هستند و سایر عناصر شامل آلومینیم و مس است که در رده‌های ششم و هفتم قرار دارند و عناصری مانند آهن، منیزیم، روی و نیکل کمتر از ۳ درصد وزنی عناصر تشکیل‌دهنده لعاب را شامل می‌شوند. با توجه به میزان سرب و عناصر قلیایی، لعاب این کاشی جزء لعاب‌های سرب قلیایی است.

آنالیز لعاب سبز G-2 نشان می‌دهد که اکسید سیلیس یکی از مهم‌ترین شبکه‌سازها در لعاب نمونه مورد بررسی بوده که دارای بیشترین درصد وزنی از بین عناصر غیر از اکسیژن است. بعد از سرب که به میزان ۱۴,۷۸ درصد وزنی در لعاب مشاهده می‌شود پتاسیم و سپس سدیم بیشترین درصد را به خود اختصاص داده اند. میزان آهن در آنالیز ۲,۰۷ درصد است و بعد از آن کلسیم، آلومینیم و عناصری چون روی، منیزیم، مس و نیکل وجود دارد. لعاب این کاشی جزء لعاب‌های سرب قلیایی است.

جدول ۴: نتایج تجزیه عنصری نمونه B-2.

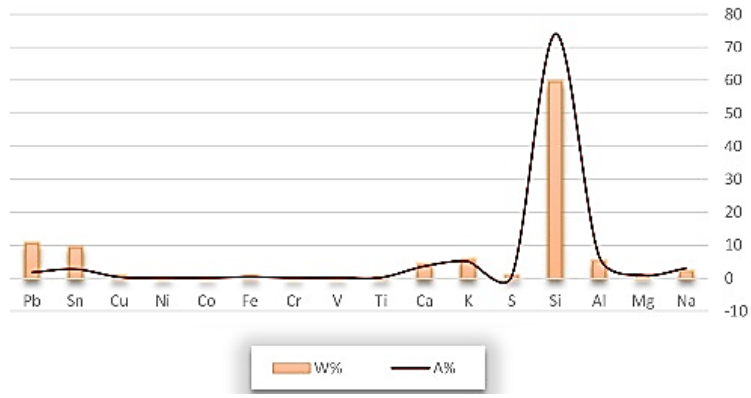
Table 4: Elemental decomposition results of sample B-2.

Elt	W%	A%
Na	1.98	3.01
Mg	0.65	0.93
Al	5.15	6.66
Si	59.54	74.01
S	0.66	0.72
K	5.66	5.05
Ca	4.17	3.63
Ti	0.27	0.19
V	0.22	0.15
Cr	0.2	0.13
Fe	0.65	0.4
Co	0.19	0.11
Ni	0.26	0.15
Cu	0.63	0.34
Sn	9.29	2.73
Pb	10.51	1.77



شکل ۵: طیف تجزیه عنصری لعاب کاشی B-2 به روش SEM- EDS.

Figure 5: Elemental decomposition spectrum of glazed tiles of B-2 using SEM -EDS method.



شکل۶: درصد اتمی و وزنی عناصر موجود در لعاب B-2.

Figure 6: Graph of atomic and weight percentage of elements in B-2 glaze.

جدول ۵: نتایج تجزیه عنصری نمونه G-1.

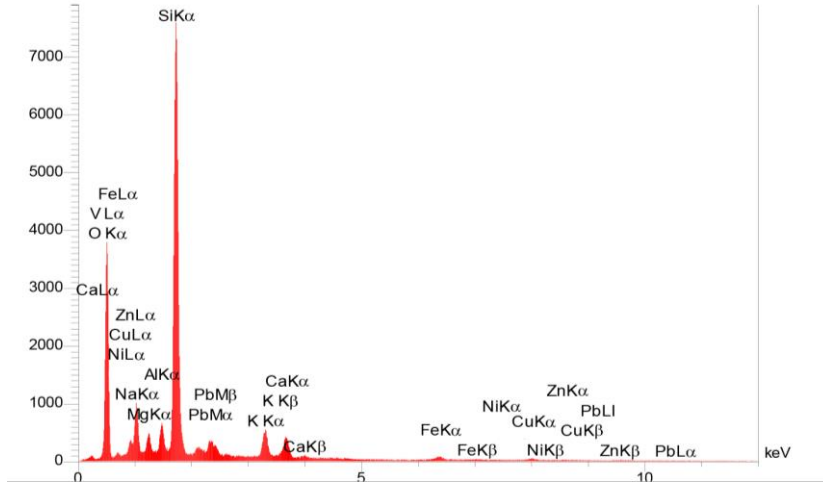
Table 5: Elemental decomposition results of sample G-1.

Elt	W%	A%
Na	3.78	3.66
Mg	0.74	0.67
O	46.79	65.11
Al	1.35	1.12
Si	30.07	23.83
K	3.76	2.14
Ca	3	1.67
Fe	1.03	0.41
Ni	0.1	0.04
Cu	1.12	0.39
Zn	0.27	0.09
Pb	7.98	0.86

جدول ۶: نتایج تجزیه عنصری نمونه G-2.

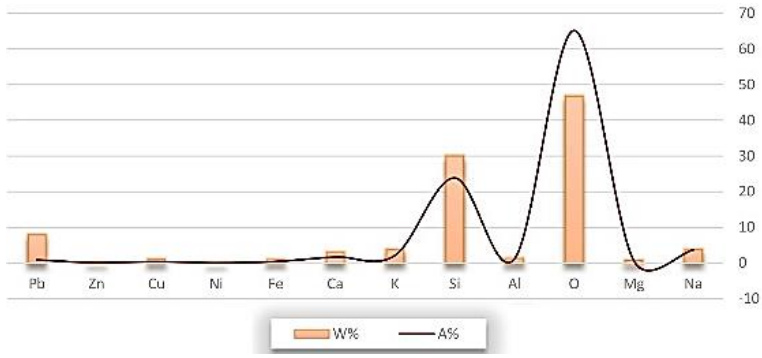
Table 6: Elemental decomposition results of sample G-2.

Elt	W%	A%
Na	3.65	3.8
Mg	0.28	0.28
O	42.92	64.15
Al	0.97	0.86
Si	28.66	24.4
K	4.36	2.67
Ca	1.73	1.03
Fe	2.07	0.89
Ni	0.09	0.04
Cu	0.14	0.05
Zn	0.32	0.12
Pb	14.78	1.71



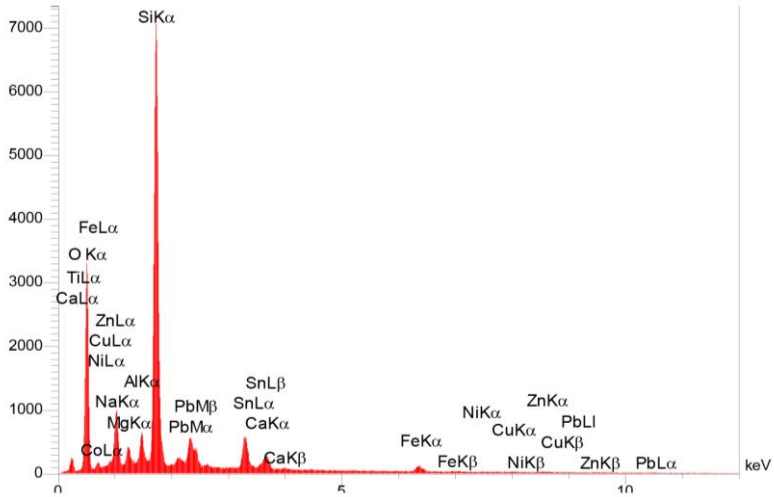
شکل۷: طیف تجزیه عنصری لعاب کاشی G-1 به روش SEM- EDS.

Figure 7: Elemental decomposition spectrum of glazed tiles of G-1 by SEM -EDS method.



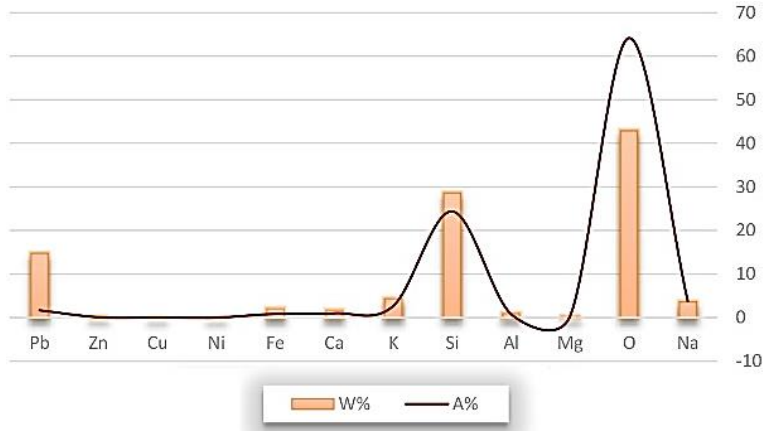
شکل ۸: درصد اتمی و وزنی عناصر موجود در لعاب G-1.

Figure 8: Graph of atomic and weight percentage of elements in G-1 glaze.



شکل ۹: طیف تجزیه عنصری لعاب کاشیG-2 به روش SEM- EDS.

Figure 9: Elemental decomposition spectrum of glazed tiles of G-2 by SEM -EDS method.



شکل ۱۰: درصد اتمی و وزنی عناصر موجود در لعاب سبز G-2

Figure 10: Graph of atomic and weight percentage of elements in G-2 glaze.

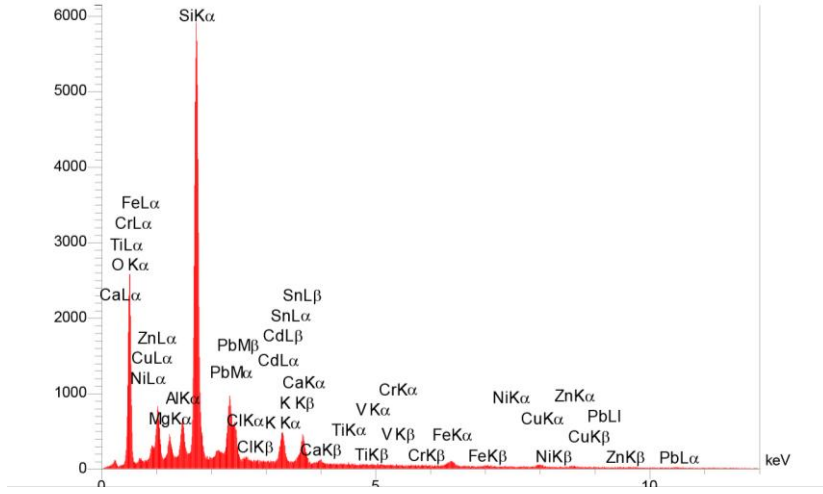
آنالیز مربوط به نمونه سبز G-3 نشان می‌دهد که عنصر سرب بیشترین درصد وزنی یعنی ۳۲,۰۲ درصد را به خود اختصاص داده است و سیلیس دومین عنصر تشکیل دهنده لعاب با درصد وزنی ۲۵,۲۱ است و سومین عنصر اکسیژن است. پتاسیم، کلسیم، آهن و آلومنیم و مس به ترتیب با درصد وزنی ۳,۹۳، ۳,۷۸، ۲,۲ و ۱,۹۱ به ترتیب در رده‌های بعدی عناصر تشکیل‌دهنده لعاب هستند و بعد از منیزیم و روی با درصد وزنی ۱,۳ و ۱,۲۲ سایر عناصر مانند کادمیم، قلع، کلر، نیکل، تیتانیم و کرم با درصد وزنی کمتر از یک درصد در لعاب دیده می‌شوند. با توجه به ترکیب شیمیایی این لعاب و سرب زیاد موجود در آن، لعاب این کاشی جزء لعاب‌های سرب است.

نتایج آنالیز عنصری لعاب سبز رنگ با کد G-5 به روش SEM-EDS در جدول ۸ و گراف های ۱۳ و ۱۴ آمده است. آنالیز مربوط به نمونه سبز G-5 نشان می‌دهد که عنصر سیلیس و سپس سرب بیشترین درصد وزنی یعنی ۲۵,۹۹ و ۱۸,۶۴ درصد را به خود اختصاص داده‌اند و پتاسیم سومین عنصر تشکیل دهنده لعاب با درصد وزنی ۴ است. آلومنیم، کلسیم، منیزیم، قلع، کادمیم، آهن و کلر به ترتیب با درصد وزنی ۳,۴۶، ۱,۸، ۱,۲۹، ۰,۹۱، ۰,۹، ۰,۸۱ و ۰,۴۵ به ترتیب در رده‌های بعدی عناصر تشکیل دهنده لعاب هستند و سایر عناصر مانند تیتان، مس، روی، وانادیم، گوگرد و کروم با درصد وزنی کمتر از یک درصد در لعاب دیده می‌شوند. با توجه به میزان سرب و عناصر قلیایی، لعاب این کاشی جزء لعاب‌های سرب قلیایی است.

جدول ۷: نتایج تجزیه عنصری نمونه G-3.

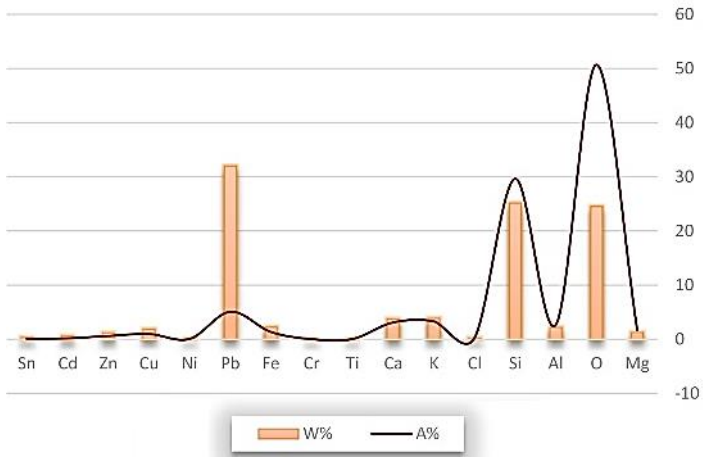
Table 7: Elemental decomposition results of sample G-3.

Elt	W%	A%
Mg	1.3	1.76
Al	2.2	2.69
O	24.55	50.68
Si	25.21	29.64
Cl	0.26	0.24
K	3.93	3.32
Ca	3.78	3.11
Ti	0.09	0.06
Cr	0.07	0.04
Fe	2.31	1.36
Pb	32.02	5.1
Ni	0.14	0.08
Cu	1.91	0.99
Zn	1.22	0.62
Cd	0.66	0.19
Sn	0.36	0.1



شکل۱۱: طیف تجزیه عنصری لعاب کاشی G-3 به روش SEM- EDS.

Figure 11: Elemental decomposition spectrum of glazed tiles of G-3 by SEM -EDS method.



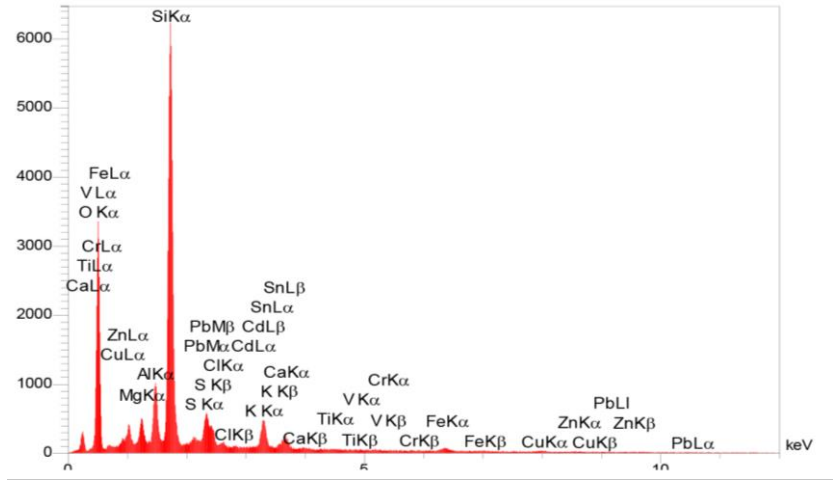
شکل ۱۲: درصد اتمی و وزنی عناصر موجود در لعاب سبز G-3.

Figure 12: Graph of atomic and weight percentage of elements in G-3 glaze.

جدول ۸: نتایج تجزیه عنصری نمونه G-5.

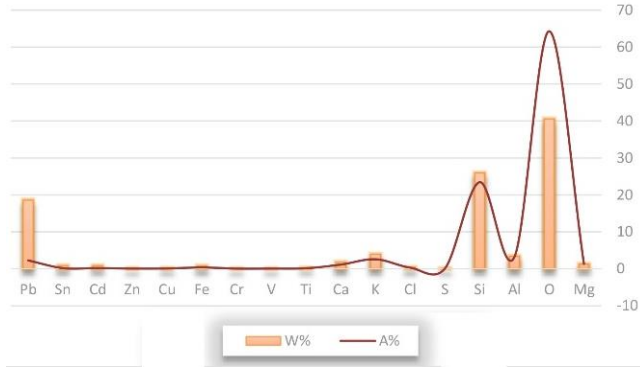
Table 8: Elemental decomposition results of sample G-5.

Elt	W%	A%
Mg	1.29	1.34
O	40.59	64.29
Al	3.46	3.25
Si	25.99	23.45
S	0.15	0.12
Cl	0.45	0.32
K	4	2.59
Ca	1.8	1.14
Ti	0.3	0.16
V	0.15	0.07
Cr	0.13	0.06
Fe	0.81	0.37
Cu	0.25	0.1
Zn	0.19	0.07
Cd	0.9	0.2
Sn	0.91	0.19
Pb	18.64	2.28



شکل ۱۳: طیف تجزیه عنصری لعاب کاشی G-5 به روش SEM- EDS.

Figure 13: Elemental decomposition spectrum of glazed tiles of G-5 by SEM -EDS method.



شکل ۱۴: درصد اتمی و وزنی عناصر موجود در لعاب سبز G-5.

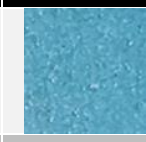
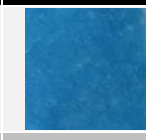
Figure 14: Graph of atomic and weight percentage of elements in G-5 glaze.

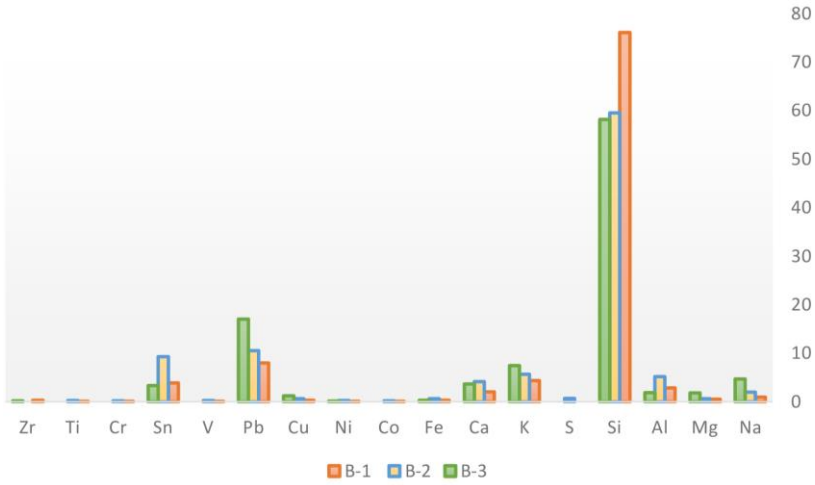
۴ـ نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که سرب در تمامی نمونه‌ها وجود دارد. سرب سبب درخشندگی و جلا در لعاب شده و رنگ‌ها را به خوبی نشان می‌دهد. در آنالیز همه نمونه‌های مورد بررسی کلسیم به عنوان اصلاح‌ساز لعاب به کار رفته است. پتاسیم به عنوان گدازآور در همه نمونه‌های فیروزه‌ای و سبز مشاهده شد. همچنین سدیم هم به عنوان گدازآور در سه نمونه فیروزه‌ای و دو نمونه سبز دیده شد که میزان آنها در کنار میزان سرب نشان دهنده نوع لعاب بوده و بر تنالیته رنگ هم تاثیر گذاشته است. همان‌طور که نتایج آنالیز رنگ فیروزه‌ای نشان می‌دهد، رنگ فیروزه‌ای در لعاب‌های مورد بررسی به دلیل حضور مس به عنوان عامل رنگ‌زا است و احتمالا از کنار هم قرارگیری ترکیبات مس در لعاب غنی از عناصر قلیایی مانند سدیم و پتاسیم حاصل شده است. در بررسی مقایسه‌ای نتایج حاصل از آنالیز سه نمونه فیروزه‌ای رنگ مشخص شد عناصر قلیایی پتاسیم و سدیم در تقویت رنگ آبی موثر بوده است چنانچه در نمونه b-1 رنگ فیروزه‌ای که بسیار کمرنگ‌تر است مقدار پتاسیم ۴٫۳۴ و مقدار سدیم ۰٫۹۳ و در نمونه b-3 که سه نمونه دیگر پر رنگ‌تر است این میزان بیشتر است. مس علاوه بر اینکه عامل اصلی ایجاد رنگ فیروزه ای بوده، بر شدت رنگ نیز تاثیر گذاشته است چنانچه مقایسه نتایج نشان داده با افزایش مقدار مس، رنگ با شدت بیشتری به دست آمده است. همچنین نتایج تجزیه عنصری و رنگ‌سنجی نشان می‌دهد که بین میزان عامل رنگ فیروزه‌ای و شاخص روشنایی L* ارتباط معکوس وجود دارد یعنی با افزایش میزان مس میزان شاخص L* کاهش می‌یابد.

جدول ۹: نوع لعاب و عامل رنگ در نمونه‌های فیروزه‌ای.

Table 9: Glaze type and color factor in turquoise samples.

	B-1	B-2	B-3
Sample/ element			
Glaze Type	Lead-Alkaline	Lead-Alkaline	Lead-Alkaline
Agent Color	copper	copper	copper



شکل ۱۵: مقایسه عناصر موجود در لعاب‌های فیروزه‌ای

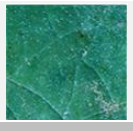
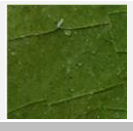
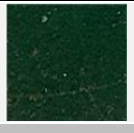
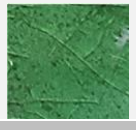
Figure 15: Comparison of elements in turquoise glazes.

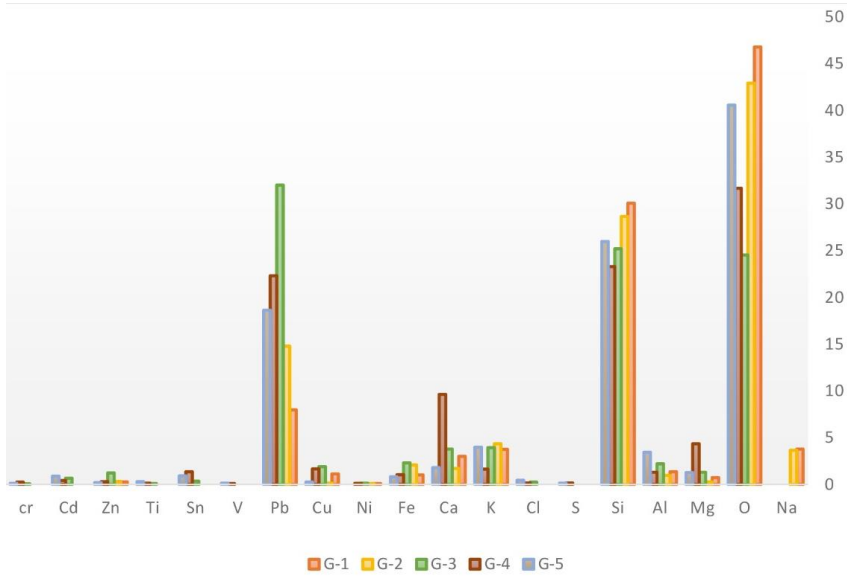
میزان سرب در لعاب G-1 از همه نمونه‌ها کمتر است. در نمونه لعاب سبز رنگ G-1 اکسید نیکل و مس در لعاب حاوی میزان اندک سرب عامل ایجاد رنگ زیتونی و وانادیم، کرم و مقدار کم مس عامل رنگ سبز زمردین در G-5 بوده است. اکسید مس در لعاب سربی به همراه آهن باعث ایجاد رنگ سبز در نمونه G-3 شده است همچنین میزان شاخص b* در این نمونه موید میزان زردی در این رنگ است که از همه نمونه‌های سبز بیشتر است و این مورد احتمالا به واسطه آهن موجود در لعاب می‌باشد. رنگ سبز لعاب G-2 به واسطه وجود اکسید مس در لعاب حاوی عناصر قلیایی ایجاد شده است.

نتایج به دست آمده از تجزیه عنصری لعاب‌های فیروزه‌ای با نتایج حاصل از بررسی سایر پژوهشگرانی که به مطالعه لعاب‌های تاریخی پرداخته‌اند از نظر عامل رنگ زا همخوانی دارند. از نظر نوع لعاب؛ نمونه‌های مورد بررسی قرار گرفته سایر محققین از نوع قلیایی بوده ولی نمونه‌های مورد بررسی در این پژوهش از نوع سرب قلیایی است. در خصوص رنگ سبز، نتیجه تحقیق از نظر وجود عامل مس به عنوان یکی از مواد رنگ زا با سایر پژوهش‌ها مطابقت دارد ولی با توجه به طیف مختلف رنگ سبز در بنای قبه سبز، عوامل رنگ‌زای بیشتری وجود دارد. به نظر می رسد از آنجا که کاشی‌های مورد بررسی توسط سایر محققین مربوط به دوره صفویه و قاجاریه اند و پژوهش در خصوص کاشی‌های صفویه به بعد نشان داده که لعاب‌های فیروزه‌ای، قلیایی و لعاب های سبز از نوع سربی می باشند، اختلاف نوع لعاب و افزایش عامل رنگ‌زا و شاید ناخالصی‌ها در کاشی‌های قبه سبز نظریه قدمت بیشتر کاشی بنا نسبت به سایر کاشی‌های معرق را تشدید می‌کند و این احتمال داده می‌شود که قدمت کاشی‌های مورد بررسی مربوط به دوره قبل صفویه می‌رسد و این موضوع با آزمون سالیابی در پژوهش‌های دیگر قابل پیگیری است.

جدول ۱۰: نوع لعاب و عامل رنگ در نمونه‌های سبز در قبه سبز.

Table 10: Glaze type and color factor in green samples in Green dome.

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5
Sample / Element					
Glaze Type	Lead-Alkaline	Lead-Alkaline	Lead	Lead-Alkaline	Lead-Alkaline
Agents Color	Copper and Nickel	Copper and Alkaline elements	Copper, Lead and Iron	Chromium, Iron, Vanadium, sulfur and Copper	Vanadium, Chromium and Copper



شکل ۱۶ : مقایسه عناصر موجود در لعاب‌های سبز.

Figure 16: Comparison of elements in green glazes**.**

جدول ۱۱: مقایسه نتایج حاصل از تجزیه عنصری لعاب کاشی‌های معرق قبه سبز کرمان با نتایج بدست آمده توسط سایر محققان .

Table 11: Comparison of the results of elemental analysis of Kerman Green Dome glazed tiles with the results obtained by other researchers .

Pigments elements in green spectrum and type of glaze				Observed color	Glaze color in studies
G-5	G-3	G-2	G-1		
Cu–Cr–V Lead-Alkaline glaze	Cu –Fe Lead glaze	Cu Lead-Alkaline glaze	Cu – Ni Lead-Alkaline glaze		This research
–	Cu Lead glaze	–	–		Butter et al
–	–	–	Cr –Cu Lead glaze		Noghani et al
–	–	Cu Lead glaze	–		Shakibapor

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

تشکر و قدردانی

لازم می‌دانم از معاونت پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان، سرکار خانم دکتر مریم کاظمی پور و مدیر کل اداره کل میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری استان کرمان، جناب فعالی جهت همکاری در بازدید بنا و نمونه‌برداری آثار، همچنین راهنمایی اساتید بزرگوار جناب دکتر محمد مهدی فروغی و سرکار خانم دکتر حمیده اسدالله‌زاده قدردانی نمایم.

۵ـ مراجع

1. M. Lamehi-Rachti, P. Oliaiy, J. Rahighi, F. Shokouhi, M. Fakhrai. Application of PIXRF in the analysis of archaeological glazed tiles. *Nucl. Instrum. Methods Phys Res. Sect. B.* 184 (2001), 430-436.
2. A. Koochakzaei. Y.hamzavi. F. shojae far, Identification of red, blue and golden pigments in Qajar Mural painting anaclitic fire place in Goharion House in Tabriz. *J. Color Sci. Tech.* 15 (2022), 287-299. [in Persian]
3. H R. Chaman. Nasir Al-Molk Mosque tile glazing technology and efforts to restore the red glaze of Nasir Al-Molk Mosque, Master Thesis, Isfahan University of Arts, Iran, 2005.
4. M. Yazdani. The identification of black painted colorant in mina'i ceramic based on structural investigation and ancient treatise. *J. Color Sci. Tech.* 14, 3 (2020), 223-235. [in Persian]
5. A. Koochakzaei. A. Nemati Babaylou. L. Daneshpoor. Identification of pigments used in decoration of paper inscription related to ansarin house of tabriz. *J. Color Sci. Tech.* 9 (2015), 297-306. [in Persian]
6. N. Patwardhan, New handbook for potters. Allieb Inc, New Delhi, 2005, 359-360.
7. S. Yousefnejad, R. Vahidzadeh, M H. Talebian, Archaeometrical study of achaemenid glazed bricks found from tall-e-ajori excavation in persepolis. *J. Archaeological Stud.* 5 (2013), 165-179. doi:10.22059/jarcs. 2013. 35950
8. M. Hadian Dehkordi. Use of laboratory researches in conservation and restoration of historical monuments (materials). Tehran University, Tehran. 2007, 139-140.
9. A. Rahimi. M. Matin. Delicate ceramics technology. Enteshar Co, Tehran. 2008, 416.
10. V. Porter, Unitya, Islamic Tiles, translated by Dr. Mahnaz Shayestehfar, Institute of Islamic Art Studies, Tehran, 2002, 14.
11. Y. Amini. M. Shafiei. H. Mir Jafari. Comparison of modern vocabulary with the vocabulary of the raw materials for glaze dyeing in the Islamic period of Iran. *Comp. Stud. Art.* 4 (2014), 29-44.
12. B. Mirhadi, Raw materials for glazes and paints and their calculation, Hesabi, Tehran, 2001, 64.
13. F.Tohidi, The Art of Pottery, First Edition, Samt, Tehran, 2005, 169.
14. A. Sharveh. M. Anushfar, Tile-pottery glaze, Javadan Kherad Publications, Mashhad, 2006. 96.
15. M. M. Abbasian. History of Pottery and Tiles in Iran from the Pre-Eternal Period, Gutenberg, Tehran, 2000. 110.
16. S. Georgiani, Teaching the art and technology of pottery and ceramics, University of Tehran, Tehran, 2012, 259.
17. A. Kashani, Arais Al-Jawahir and Nafais Al-Tayyib, by Iraj Afshar, Publications of the National Works Association, Tehran, 2007, 341.
18. M. Salarieh. Glaze (Properties, Application and Defects), Islamic Azad University, Tehran, 2004, 316-318.
19. R. Basiri, Tiles and Pottery, Gutenberg, Tehran, 1984, 188.
20. A. Jangjoo, Scientific-Laboratory Identification of the method of making tiles decorated with gold plate and study of damage in them (case study of soltanieh ilkhani tile in zanjan), M.Sc. Thesis, Islamic Azad University, Central Tehran branch, Iran, 2005.
21. M. Bater. M. Saberniya, H. Ahmadi Identification of Materials and Colorants in Decorative Mosaic Tiles of Musalla Historical Building in Mashhad. JRA, 3 (2017), 29-46.
22. S. Noghani. F. Shirani, M. Karimnejad, Evaluation of X-Ray microprobe nondestructive analysis for characterization of chemical composition of ancient glazes. *J. Archaeol. Stud.* 9 (2017), 193-210.
23. M. Ghaderi. 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, Iran, 2017.
24. F. Shakibapour. 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 Art, Iran, 2017.
25. V. Rahimimehr. Technical study of chemical compounds in the glaze of the mosaic tiles in the green dome of kerman (Qobeh Sabz). JRA. 7 (2021), 111-134.
26. M. Mohammadi, M. Mohammadi. M. Khajehpour, Identification and Protection of Present Values in “Green Dome” Historical Monument in Kerman. *Iranian Islamic City Studies Quarterly.* 12 (2013), 79-88.
27. Sh. Javadi, Green dome, the oldest example of mosaic tile in Iran, *J. Honar-Ha-Ye-Ziba*, 12 (2000), 12-20.
28. M. H. Islam panah, History of Kerman Green Dome Inscription, Yaghma Memorial, 1992, 400 -405.
29. J. Rosta, Elchian qarakhtaei in the court of khwarezm shahs; foundations of the kerman qarakhtaean dynasty. *Sci. Res. J. Iranian History.* 5 (2012), 73 -102.
30. A. Iqbal Ashtiani, H. Pirnia. Full History of Iran (from the beginning to the end of the Pahlavi dynasty), Tehran: Donyayeketaab, 2011, 131.

How to cite this article:

V. Rahimi mehr, Caharcterization of Turquoise and Green Tonality Glazes in the Historical Monument of Kerman Qara Khitai Period. *J. Color Sci. Tech.* 17, 1(2023), 1-16.

DOR: 20.1001.1.17358779.1402.17.1.1.0