

Tabriz Islamic Art University
1999

DOI: 10.29252/jra.3.1.29

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

Original Paper

Identification of Materials and Colorants in Decorative Mosaic Tiles of Musalla Historical Building in Mashhad



CrossMark

Masoud Bater^{1*}, Maliheh Saberniya², Hossein Ahmadi³

¹Assistant professor, Department of Conservation and Restoration of Cultural Properties, University of Zabol, Zabol, IRAN

²BA in Conservation and Restoration of Cultural Properties, Organization of Libraries, Museums and Document Center of Astane Qudse Razavi, Mashhad, IRAN

³Associate professor, Department of Conservation and Restoration of Cultural Properties, Art University of Isfahan, Isfahan, IRAN

Received: 31/03/2017

Accepted: 15/06/2017

The Mashhad Musalla is one of the largest and most beautiful historic musallas in Iran. Mashhad Musalla has been built during the Safavid Empire, ordered by Suleiman I. Tile's inscription on the Iwan of Musalla gateway gives the date of the end of construction, in the year 1087 AH. This monument is located at the east of Mashhad. The building has a high porch and two porticoes on both sides. Musalla of Mashhad is constructed of bricks and it was previously used for prayers of the two Eids. The building has been decorated with stucco decoration, tile-working, wall painting and Muqarnas. The building is decorated with stucco decoration, tile-working, painting and Muqarnas. The glazed tile decorations of the Mashhad Musalla include glazed haft-rang and mosaic tiles. During Safavid period, all religious buildings were embellished with tiling decorations. The most prominent decorative element in Mashhad Musalla is tile-working. The tiles in the Mashhad Musalla are predominantly white, black, blue, turquoise, green, yellow and brown. The subject studied in this paper is the creating colorants elements and identification of the chemical composition of the glazed tiles in Mashhad Musalla. Scientific and analytical research was done by Scanning electron microscopy in combination with energy dispersive X-ray microanalysis (SEM-EDX) and Polarized light microscopy (PLM). Scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX) were used to determine the elemental compositions of the tile glazes. According to the results obtained, tin (II) oxide together with lead glaze has yielded white color, manganese oxide had been responsible for black color, cobalt (II) together with magnesium oxide and fluorine has yielded blue color, copper oxide was responsible of the turquoise color, lead glaze with the low content of iron oxides has yielded a brown hue, yellow color is attained by lead antimonite and copper oxide together with lead glaze had been responsible for green color. The comparison of the results of the chemical analysis of the Safavid glazed tiles in historic Musalla of Mashhad and results obtained by other scholars who have worked on the identification of the elemental composition of the glaze of Safavid tiles in the other monuments of Iran, indicated that the creating colorant elements were the same, with a little difference, during the seventeenth century and over the Safavid period in Iran. Finally, thin-section analysis under a polarizing microscope was applied to study the petrographic composition on the tile samples. The results of structural study and mineralogical composition of the body mosaic tiles of Mashhad historical Musalla by petrography method showed that the presence of Muscovite,

* Corresponding author: masoud.bater@gmail.com

Hornblendes, Biotite, Quartz and Feldspar minerals as the main crystalline phases within the samples. Based on the applied methods, the mineralogical analysis of tile bodies has revealed some considerable results on the composition of this kind of tiles. Apart from minor differences related to the groundmass composition, all the tile bodies examined by thin-section analysis show similar micro-structure characteristics and analogous petrographic compositions. On the other hand, the results of the elemental analysis of the glaze of Safavid tiles and considering little difference between chemical composition of the Safavid glazed tiles of the Mashhad historical Musalla and the elemental composition of the glaze of Safavid tiles in the other regions of Iran, it can be deduced that the raw materials used have probably been provided from the local resources.

Keywords: Mosaic tile, Mashhad Musalla, Petrography, SEM-EDX.





شناسایی مواد و رنگ‌های به‌کاررفته در تزیینات کاشیکاری

معرق بنای تاریخی مصلاهی مشهد

مسعود باتر^{۱*}، ملیحه صابرنیا^۲، حسین احمدی^۳

۱. استادیار گروه مرمت آثار تاریخی، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه زابل، زابل، ایران

۲. کارشناس مرمت مرکز حفاظت و مرمت اموال فرهنگی سازمان، کتابخانه‌ها، موزه‌ها و مرکز اسناد آستان قدس رضوی، مشهد، ایران

۳. دانشیار گروه مرمت اشیاء فرهنگی و تاریخی، دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۳/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱/۱۱

چکیده

مصلاهی مشهد، یکی از بزرگ‌ترین و زیباترین مصالح‌های تاریخی ایران است. این مصلا در عصر صفویان و به دستور شاه سلیمان اول صفوی ساخته شده است. طبق کتیبه کاشیکاری ایوان، مصلا در سال ۱۰۸۷ ه.ق، در شرق شهر مشهد بنا شده است. این بنای تاریخی، دارای ایوان مرکزی رفیعی در وسط و دو رواق گنبددار در طرفین است. تزئینات مصلاهی تاریخی مشهد، شامل: گچبری، کاشیکاری، نقاشی و مقرنس‌کاری است. در دوران صفویه، تمام بناهای مذهبی با تزئینات کاشیکاری، تزیین می‌شد. مهم‌ترین عنصر تزئینی مصلاهی مشهد نیز، تزئینات کاشیکاری است. کاشی‌های مصلاهی مشهد، به رنگ‌های سفید، سیاه، لاجوردی، فیروزه‌ای، سبز، زرد و قهوه‌ای هستند. برای تعیین ترکیب شیمیایی لعاب کاشی‌ها از روش میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به طیف‌سنج پراکنش انرژی پرتوی ایکس (SEM-EDX) استفاده شد. بر طبق نتایج، در لعاب کاشی‌های معرق این بنا، از اکسید قلع به همراه لعاب سربی برای رنگ سفید، از اکسید منگنز برای رنگ سیاه، از اکسید کبالت همراه اکسید منیزیم و فلئوئور برای رنگ آبی لاجوردی، از اکسید مس برای رنگ فیروزه‌ای، از ترکیب اکسید آهن و لعاب سربی برای رنگ قهوه‌ای، از آنتیمون‌ات سرب برای رنگ زرد و از ترکیب لعاب سربی همراه اکسید مس برای رنگ سبز استفاده شده است. مقایسه نتایج حاصل از شناسایی ترکیب لعاب کاشی‌های صفوی مصلاهی تاریخی مشهد با نتایج به‌دست آمده توسط سایر پژوهشگران، حاکی از تشابه عوامل ایجاد رنگ لعاب کاشی‌های به‌کاررفته در تزیین بناهای تاریخی در طول قرن ۱۷م. (قرن ۱۱ ه.ق)، در عصر صفوی در بیشتر مناطق ایران است. علاوه بر این، نتایج حاصل از مقاطع نازک پتروگرافی بدنه کاشی‌ها حاکی از وجود فازهای موسکویت، هورنبلند، بیوتیت، کوآتز و فلدسپار در آن‌ها بود. بر اساس داده‌های حاصل از تجزیه و تحلیل کانی‌شناسی بدنه کاشی‌ها نتایج قابل توجهی در مورد ترکیب این نوع کاشی حاصل گردید.

واژگان کلیدی: کاشی معرق، مصلاهی تاریخی مشهد، پتروگرافی، SEM-EDX.

* مسئول مکاتبات: زابل، کیلومتر دوم جاده بنجاره، پردیس دانشگاه زابل، دانشکده هنر و معماری، گروه مرمت آثار تاریخی، کد پستی ۹۹۸۶۱۵۵۲۸.

پست الکترونیکی: masoud.bater@gmail.com

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

۱. مقدمه

با وجودی که در معماری اسلامی، در هر شهری مسجد بزرگی تحت عنوان مسجد جامع، برای اجتماع مؤمنین، توسط حاکمان ساخته می‌شد تا نمازهای مهم مانند نماز جمعه در آن اقامه شود ولی کمتر اتفاق می‌افتاد که این مساجد، گنجایش تمام مردم مقید به نماز جماعت را داشته باشند؛ به‌خصوص در هنگام برگزاری نماز عیدین، نماز باران برای رفع خشک‌سالی و دعا‌های دسته‌جمعی برای رفع بلاها و بیماری‌های مسری، همچون وبا و طاعون که تمام مسلمانان، از خرد و کلان، برای اجابت دعا، جمع می‌شدند؛ به همین خاطر، این‌گونه مراسم که به فضای بسیار وسیعی نیاز داشت، در زمین وسیع و آزادی که «مصلا» نام داشت و عموماً در کنار شهر، خارج از برج و بارو و دیوارهای آن واقع شده بود، برگزار می‌شد [1]. بنابراین، مصلا به معنای محل اجتماع خاص و عام است در قطعه زمینی وسیع و آزاد که قبلاً در خارج شهر آماده شده بود و به‌صورت محصور و یا غیر محصور، برحسب افزایش یا کاهش وسعت شهر و تعداد ساکنان آن، گاهی مورد استفاده قرار می‌گرفت و گاهی متروک می‌شد [1,2].

در ایران نیز از همان آغاز دوره اسلامی، ساختمان مصلا، بخش اجتناب‌ناپذیری در تکمیل بناهای مذهبی شهر به شمار می‌رفته است که صرفاً مکانی برای برگزاری نماز در هوای آزاد بوده است [3]. از مصلاهای تاریخی ایران، می‌توان به مصلاهی اصفهان در خارج از برج و باروی شهر، نزدیک دروازه طوقچی، با ساختمانی از نوع شبستانی، مصلاهی طوق، در ۱۴ km جنوب غربی مشهد، مصلاهی یزد که اکنون به مصلاهی مدرسه معروف شده و در نزدیکی میدان امیرچخماق است، مصلاهی همدان، در جنوب شرقی شهر کنونی، مصلاهی سبزوار در ۲ km شرق سبزوار و مصلاهی تاریخی مشهد در محله پایین خیابان مشهد اشاره کرد [1,2,4].

مصلاهی تاریخی مشهد، در پایین خیابان مشهد (بلوار مصلاهی کنونی) واقع شده است و به همین علت به نام مصلاهی پایین خیابان مشهد نیز شناخته می‌شود (اشکال ۱ و ۲-1,2, Figures). این بنا از آثار تاریخی به‌جای مانده

از عصر حکمرانی شاه سلیمان اول صفوی (۱۰۷۳-۱۰۲۶ ه.ش) است که طبق کتیبه‌های کاشی معرق موجود بر روی بنا (شکل ۳-3, Fig)، در سال ۱۰۸۷ ه.ق ساخته شده است [3-5, 1]. طبق گفته پوپ (Pope) و دی یز (Diez) این بنا، بزرگ‌ترین و زیباترین مصلاهی است که هنوز در ایران پابرجاست و نمونه بسیار خوبی از حفظ کیفیت بالای معماری ایران، حتی در پایان سده ۱۱ ه.ق است [3,6].

بنای تاریخی مصلاهی مشهد، دارای پلانی مستطیل شکل است [4]. ساختمان بنا، عبارت است از: ایوان مرکزی بلند و رفیعی در وسط که در طرفین آن دو رواق گنبددار (شکل ۲-2, Fig) بنا شده است [1]. در وسط ضلع خلفی ایوان مرکزی نیز محرابی ساخته شده که پلان آن ۵ ضلعی است و نمای آن با کاشی معرق تزیین شده است [4] (شکل ۴-4, Fig). مواد و مصالح به‌کار رفته در ساخت ایوان مرکزی و دو رواق گنبددار مجاور آن، آجر است و بدنه داخلی بنا با گچ اندود شده است. این بنا در سال ۱۳۱۰ هجری شمسی به شماره ۱۴۱ در فهرست آثار ملی ایران به ثبت رسیده است. امروزه، مصلاهی تاریخی مشهد در اختیار سازمان میراث فرهنگی، صنایع‌دستی و گردشگری استان خراسان رضوی است و چون کاربری اصلی خود را از دست داده و متروک شده است، پس از انجام عملیات مرمت آن در طی سالیان گذشته، کاربری آن تغییر داده شده است و از آن به‌عنوان مرکز فرهنگی و آموزشی برای تولید صنایع‌دستی و ساخت کاشی سنتی، استفاده می‌شود.

هدف از مطالعه حاضر، شناخت ترکیب لعاب و عوامل ایجاد رنگ در کاشی‌های معرق عصر صفوی در بنای تاریخی مصلاهی مشهد است. نتایج این پژوهش، می‌تواند در شناخت فنون تهیه لعاب عصر صفوی و شناسایی رنگدانه‌های به‌کاررفته در کاشی‌های رنگارنگ این دوره به ما کمک نماید. علاوه بر این، شناخت ترکیب لعاب و کانی‌های تشکیل‌دهنده بدنه کاشی‌ها، می‌تواند در پژوهش‌های مرتبط با بررسی روند فرسایش و تخریب لعاب در کاشی‌های معرق، بسیار مفید باشد.



شکل ۲: نمای اصلی بنای مصلاهی تاریخی مشهد
Fig. 2: The main facade of Mashhad historical Musalla



شکل ۱: موقعیت قرارگیری مصلاهی تاریخی مشهد در حاشیه بلوار مصلاهی مشهد
Fig. 1: Location of Mashhad historical Musalla on Musalla Blvd. Mashhad

آن‌ها مشاهده می‌شود. پژوهش‌های محققانی که به مطالعه تاریخ، معماری و جنبه‌های هنری مصلاهی تاریخی مشهد، پرداخته‌اند، حاکی از آن است که این بنا، احتمالاً با الگوبرداری از مصلاهی تاریخی طبرق (ساخته به سال ۸۳۷ ه. ق.) ساخته شده (اشکال ۵ و ۶-۵، Figures 5,6) است. پژوهشگران متعددی در آثار خود بر کیفیت برجسته معماری، مهندسی ساخت و ظرافت و زیبایی فوق‌العاده هنر کاشیکاری در مصلاهی تاریخی مشهد (شکل ۷-۷، Fig.)، تأکید نموده‌اند [1,3,6].



شکل ۴: محراب کاشیکاری شده بنا در وسط ایوان مرکزی با پلان پنج‌ضلعی
Fig. 4: Mihrab tile in the middle of the central porch with a pentagon plan

۲. پیشینه تحقیق

پژوهش‌هایی که درباره مصلاهی تاریخی مشهد انجام شده، بسیار اندک و محدود است. از سوی دیگر، این بنا در بیشتر این تحقیق‌ها نیز، تنها از منظر تاریخی و بر اساس مشاهدات میدانی و مطالعه کتابخانه‌ای، مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. بدین ترتیب در آثار و نوشته‌های به‌جای مانده در این زمینه به‌ندرت نشانی از پژوهش‌های تجربی و استفاده از روش‌های آزمایشگاهی، برای شناخت مواد و مصالح به‌کار رفته در بنا به‌منظور شناسایی فنون ساخت بنا و تزئینات معماری



شکل ۳: درج تاریخ ساخت بنا بر روی کتیبه کاشیکاری نمای ایوان اصلی
Fig. 3: Insert date of the construction on the tile inscription of the main facade of the porch



شکل ۶: نمای ایوان اصلی مصلای تاریخی طرق
Fig: 6: The main porch facade of Toroq historical Musalla



شکل ۵: نمای ایوان اصلی مصلای تاریخی مشهد
Fig: 5: The main porch facade of Mashhad historical Musalla

در مسجد امام اصفهان، بیانگر آن بوده است که در لعاب کاشی‌های این بنا، از سرب، برای ایجاد رنگ زرد، از مس برای رنگ سبز، از اکسید سیلیس به‌عنوان شبکه‌ساز لعاب، از اکسید سرب، به‌عنوان دگرگون‌ساز لعاب و از آلومین و اکسید قلع نیز به‌عنوان کمک شبکه‌ساز لعاب، استفاده شده است [8]. شناسایی ترکیب شیمیایی لعاب صفوی کتیبه خط ثلث کاشی در ایوان جنوبی حرم امام علی (ع) در نجف اشرف به روش میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به طیف‌سنج پراکنش انرژی پرتوی ایکس (SEM-EDX) نشان داد که لعاب زرد رنگ در این کاشی، از نوع سربی است و در ترکیب این لعاب، اثری از اکسید کروم، اکسید تیتانیوم و یا آنتیمونات سرب، مشاهده نشده است. در واقع، در این لعاب زرد رنگ، وجود اکسید آهن در زیر لایه شفاف لعاب سربی، موجب ایجاد رنگ زرد در

بررسی ترکیب لعاب کاشی‌های برخی از بناهای عصر صفوی ایران (مسجد کبود در تبریز و پل خواجه، مسجد امام و مدرسه چهارباغ در اصفهان) به روش نشر اشعه ایکس القایی پرتون (PIXE)، حاکی از آن بوده که لعاب کاشی‌های عصر صفوی در این ابنیه تاریخی از نوع سربی قلیایی و عامل ایجاد رنگ در آن‌ها، اکسیدهای فلزی مختلف بوده است. علاوه بر این، مطالعه آزمایشگاهی انجام‌شده، نشان داده است که در لعاب کاشی‌های این بناهای تاریخی از کبالت برای ایجاد رنگ آبی لاجوردی، از مس برای رنگ فیروزه‌ای، از ترکیب قلع و سرب برای رنگ زرد و از منگنز برای رنگ سیاه استفاده شده است [7]. بررسی لعاب کاشی‌های هفت‌رنگ صفوی به روش میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به طیف‌سنج پراکنش انرژی پرتوی ایکس (SEM-EDX)،



شکل ۷: نمایی از کاشی‌های بسیار زیبای معرق به‌کاررفته در مصلای تاریخی مشهد
Fig: 7: A view of the absolutely beautiful of mosaic tiles used in Mashhad historical Musalla

اصلی‌ترین، شیوه تزئین ابنیه مذهبی در عصر صفوی است، لذا، پژوهش در مورد تزئینات کاشیکاری بنای تاریخی مصلاهی مشهد به‌عنوان مهم‌ترین نمونه به‌جای مانده از این گروه از بناهای تاریخی مذهبی ایران که از آثار شاخص عصر صفوی است، به روش تجربی با استفاده از بررسی‌های آزمایشگاهی از اهمیت و ارزش خاصی به لحاظ مطالعه موادشناسی و باستان‌سنجی برخوردار است.

۳. مواد و روش‌ها

این پژوهش کاربردی با استفاده از روش‌های پژوهشی تجربی - تحلیلی انجام شده است. برای جمع‌آوری داده‌ها از روش‌های مختلف، شامل: مطالعه کتابخانه‌ای، مطالعه میدانی و بررسی آزمایشگاهی، استفاده شده است.

به‌منظور فن‌شناسی و شناخت مواد و مصالح به‌کاررفته و شیوه ساخت لعاب در تزئینات کاشیکاری معرق عصر صفوی در بنای مصلاهی مشهد و شناخت ترکیب شیمیایی عوامل ایجاد رنگ در لعاب کاشی‌ها از روش تجزیه دستگاهی میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به طیف‌سنج پراکنش انرژی پرتوی ایکس (SEM-EDX) استفاده شد. این مطالعه آزمایشگاهی برای شناخت ترکیب عناصر تشکیل‌دهنده لعاب و عوامل ایجاد رنگ در آن‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی مدل VEGW2، ساخت شرکت TESCA جمهوری چک در پژوهشکده متالورژی رازی تهران انجام شد. برای مطالعه ساختاری بدنه کاشی‌های معرق نیز از روش پتروگرافی مقطع نازک به روش میکروسکوپی استفاده گردید، برای این منظور از میکروسکوپ پلاریزان مدل، Olympus، ساخت کشور ژاپن استفاده شد، این بررسی‌های میکروسکوپی در آزمایشگاه سنگ‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد انجام گردید. در پایان با تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از مطالعه کتابخانه‌ای، مشاهدات میدانی و بررسی آزمایشگاهی، نتایج تحقیق ارائه گردید.

۴. نتایج و بحث در یافته‌ها

۴-۱. مشاهدات ظاهری و نمونه‌برداری

مطالعاتی که به‌صورت مشاهدات بصری بر روی تزئینات بنای تاریخی مصلاهی مشهد انجام شد، حاکی از آن است

آن، شده است. تجزیه ترکیب شیمیایی لعاب آبی لاجوردی در کتیبه کاشی این بنا نیز حاکی از وجود اکسید کبالت، به‌عنوان عامل ایجاد رنگ آبی در ترکیب این لعاب، بوده است [9]. مطالعه آزمایشگاهی لعاب کاشی‌های عصر صفوی در بناهای مناطق مختلف ایران در قرن ۱۷ م (قرن ۱۱ ه.ق)؛ همچون: مسجد جامع عباسی، کلیسای بیت‌الرحم و عالی‌قاپوی اصفهان، مسجد جامع قزوین و چشمه عمارت بهشهر و مدرسه عباسقلی خان مشهد به روش میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به طیف‌سنج پراکنش انرژی پرتوی ایکس (SEM-EDX)، توسط هلاکویی، حاکی از آن بوده است که در کاشی‌های عصر صفوی در بناهای تاریخی فوق، برای رنگ سفید، از اکسید قلع به همراه اکسید سرب، برای رنگ سبز، از اکسید مس، برای رنگ آبی لاجوردی، از اکسید کبالت، برای رنگ زرد از ترکیب اکسید سرب و اکسید قلع، برای رنگ فیروزه‌ای از اکسید مس در لعاب سرب قلیایی، برای رنگ سیاه از اکسید منگنز و برای رنگ قهوه‌ای از اکسید منگنز و اکسید آهن استفاده شده است [10]. مطالعه میش‌مست و هولاکویی بر روی لعاب‌های کاشی‌های صفوی امامزاده اسماعیل قزوین و تجزیه عنصری ترکیب لعاب کاشی‌ها، به روش الکترون میکرو پروب (EPMA)، نشان داد که برای ایجاد رنگ آبی لاجوردی در لعاب کاشی‌های این بنا، از کبالت و برای ایجاد رنگ سفید از لعاب سرب قلیایی با درصد بالایی از قلع و سرب، استفاده شده است [11].

مرور ادبیات و پیشینه تحقیق، حاکی از آن است که مطالعه بسیار محدودی بر روی شناخت ترکیب لعاب کاشی‌های عصر صفوی به روش‌های تجربی و آزمایشگاهی انجام شده است و در بیشتر موارد، معماری و تزئینات به‌کاررفته در بناهای تاریخی این دوره از منظر تاریخی، معماری و هنری مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است ولی در مورد شناخت مواد و مصالح به‌کاررفته در ساخت بناهای عصر صفوی و تزئینات آن‌ها، تاکنون پژوهش‌های اندکی به شیوه تجربی انجام شده است، خاصه آن که تزئینات کاشیکاری در بناهای تاریخی عصر صفوی، به‌ویژه در بناهای مذهبی این دوران؛ از جمله، مصلاهی تاریخی مشهد، جزء مهم‌ترین و

صفوی نبود و از مدت‌ها قبل، از اواخر دوره ایلخانی و تیموری مراحل شکل‌گیری آن آغاز گشته بود، ولی تکامل واقعی و گسترش استفاده از آن در دوره صفوی محقق شد [12,13]. علت استفاده از کاشی معرق در تزئینات مصلاهی تاریخی مشهد آن است که هرچند در دوره صفوی، روش مرسوم تزئینات کاشیکاری در ابنیه این دوران، کاشی هفت‌رنگ بوده است ولی رواج کاشیکاری هفت‌رنگ، هرگز کاشی معرق را از رونق نینداخت و کاشی معرق، همچنان زینت‌بخش معماری عصر صفوی بوده است.

گزارش مرمت‌های انجام شده در مصلاهی تاریخی مشهد، مشاهدات میدانی و بررسی ماکروسکوپی کاشی‌های معرق این بنا، نشان‌دهنده آن است که تزئینات کاشیکاری نمای ایوان مرکزی، در برخی از مناطق تا حدودی، مرمت و بازسازی شده ولی کاشی‌های محراب بنا، دست‌نخورده است و مداخلات انجام شده در آن، محدود به حفاظت، تثبیت وضع موجود و تحکیم کاشی‌ها بوده است؛ بنابراین، کاشی‌های محراب بنا، کاملاً اصیل هستند. از این رو از هر یک از رنگ‌های مختلف کاشی‌های معرق محراب بنا، برای شناسایی ترکیب شیمیایی لعاب کاشی‌ها و مطالعه ساختار بدنه آن‌ها به

که مهم‌ترین بخش تزئینات معماری این بنا چه از نظر کمی و چه کیفی، تزئینات کاشیکاری است که با زیبایی بسیار، بخش اعظم بدنه این بنا را زینت داده است. در این تزئینات کاشیکاری، از نقوش مختلف هندسی، اسلیمی، ختایی و کتیبه‌های کاشی در طیف متنوعی از رنگ‌های چشم‌نواز، شامل: سفید، سیاه، آبی لاجوردی، فیروزه‌ای، سبز، زرد و قهوه‌ای استفاده شده است. تضاد مناسب این رنگ‌ها، موجب شده است که طرح‌ها و نقوش سطح کاشی‌ها، بهتر دیده شود و جذاب‌تر به نظر برسد. با وجود آنکه بنای تاریخی مصلاهی مشهد در اواخر عصر صفویه، در زمان شاه سلیمان اول صفوی در سال ۱۰۸۷ هـ.ق ساخته شده است ولی مهم‌ترین روش تزئینات معماری که بخش اعظم بدنه بنا با آن تزئین شده است؛ کاشیکاری معرق است. در حالی که کاشی معرق، فن و روش برتر و رایج تزئین بنا در عصر تیموری است و در دوره صفوی، اولویت اول در شیوه اجرای تزئینات کاشیکاری، کاشی هفت‌رنگ بوده است.

دلیل استفاده از تزئینات کاشیکاری هفت‌رنگ را در عصر صفوی، گسترش روزافزون آثار معماری به خصوص در زمان شاه‌عباس اول در اصفهان و مسائل اقتصادی دانسته‌اند. اگرچه کاشی هفت‌رنگ، ابداع هنرمندان عصر



شکل ۸: محل نمونه‌برداری از کاشی‌های معرق اصیل محراب مصلاهی تاریخی مشهد که با دایره سیاه‌رنگ مشخص شده است، (A) رنگ سفید، (B) رنگ سیاه، (C) رنگ آبی لاجوردی، (D) رنگ فیروزه‌ای، (E) رنگ قهوه‌ای، (F) رنگ زرد، (G) رنگ سبز
Fig: 8: Sampling location of original mosaic tiles of the mihrab of Mashhad historical Musalla is marked with a black circle, A) White color, B) Black color, C) Blue color, D) Turquoise color, E) Brown color, F) Yellow color, G) Green color

سفید رنگ در کاشی‌های معرق این بنا (شکل ۹-۹ Fig) و نتایج حاصل از آن (جدول ۱-۱ Table)، نشان داد که با توجه به حضور ۲/۴۰ درصد وزنی قلع، همراه با ۱۴/۶۱ درصد وزنی سرب در این نمونه لعاب، رنگ سفید در این کاشی‌ها، ترکیبی از اکسید قلع به همراه اکسید سرب است. با توجه به ترکیب شیمیایی این لعاب و میزان سرب آن^۱ و محتوی عناصر قلیایی و قلیایی خاکی موجود در آن، لعاب این کاشی سفیدرنگ، جزء لعاب‌های سرب قلیایی است [15].

بررسی طیف حاصل از تجزیه عنصری لعاب سیاه‌رنگ در کاشی‌های معرق این بنا به روش SEM-EDX (شکل ۱۰-۱۰ Fig) و نتایج حاصل (جدول ۲-۲

جدول ۱: نتایج تجزیه عنصری نمونه لعاب کاشی سفیدرنگ
Table 1: Elemental analysis results of the white glaze

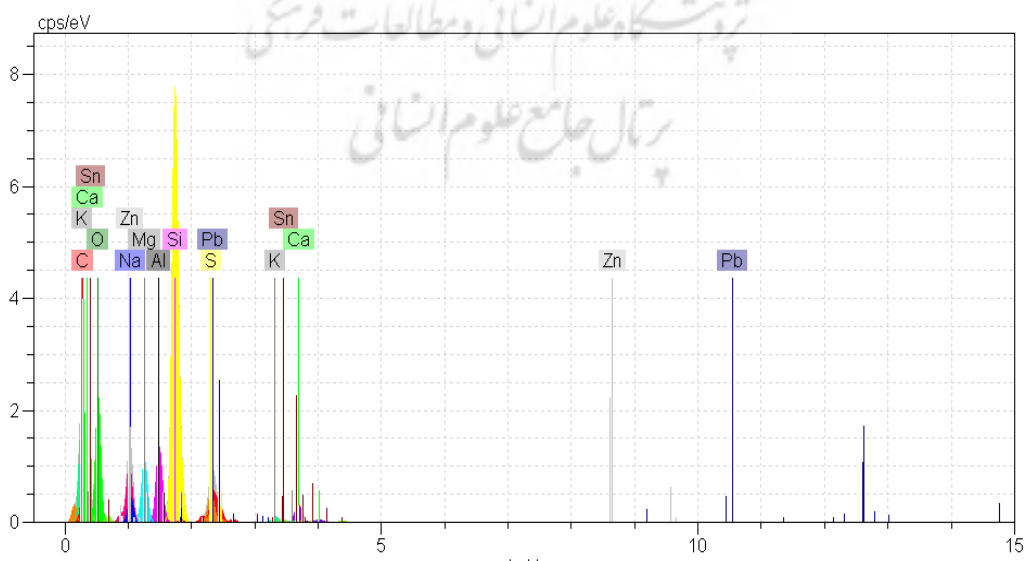
درصد اتمی Atomic percent A%	درصد وزنی weight percent w %	نام عنصر Element
5.06	3.51	Na
10.03	7.35	Mg
10.84	8.82	Al
59.42	5.37	Si
4.49	4.35	S
1.37	1.59	K
5.72	6.95	Ca
0.66	2.40	Sn
2.32	14.61	Pb

مقدار بسیار اندکی، نمونه‌برداری شد تا نمونه‌های مورد نظر به شیوه تجربی، با استفاده از روش‌های تجزیه دستگاهی، مورد بررسی و مطالعه قرار گیرد. محل نمونه‌برداری از هر یک از رنگ‌های کاشی‌های معرق در شکل ۸، مشخص شده است.

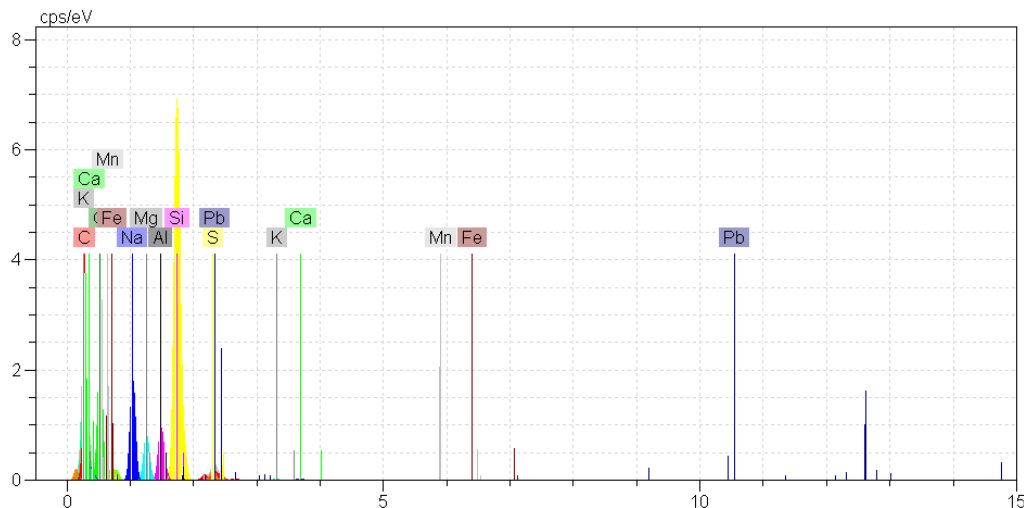
۴-۲. آنالیز عنصری لعاب کاشی‌ها با روش SEM-EDX

وضعیت ساختار لعاب در آثار سفالی لعاب‌دار از جمله کاشی‌ها و خصوصیات آن که لعاب از خود بروز می‌دهد، به شدت به ترکیب شیمیایی آن وابسته است [14]. بنابراین به منظور شناسایی کمی و کیفی ترکیب شیمیایی لعاب در کاشی‌های معرق صفوی در مصلاهی تاریخی مشهد و تعیین عناصر تشکیل‌دهنده آن‌ها، به ویژه، عوامل ایجاد رنگ در لعاب از روش میکروسکوپ الکترونی روبشی، مجهز به سیستم تجزیه پرتوی ایکس پراکنده شده (SEM-EDX) استفاده شد. برای این منظور از انواع مختلف لعاب‌های کاشی‌های معرق اصیل بنا، به رنگ‌های مختلف، شامل: لعاب سفید، سیاه، لاجوردی، فیروزه‌ای، قهوه‌ای، زرد و سبز به میزان بسیار کمی، نمونه‌برداری شد و سپس نمونه‌ها به روش دستگاهی فوق، مورد آزمایش و تجزیه قرار گرفت که نتایج آن به شرح زیر است:

بررسی طیف به دست آمده از تجزیه عنصری لعاب



شکل ۹: طیف تجزیه عنصری لعاب کاشی سفیدرنگ به روش SEM-EDX
Fig. 9: Elemental analysis spectrum of the white glaze by SEM-EDX method



شکل ۱۰: طیف تجزیه عنصری لعاب کاشی سیاه‌رنگ به روش SEM-EDX
Fig. 10: Elemental analysis spectrum of the black glaze by SEM-EDX method

برای ایجاد رنگ آبی لاجوردی در کاشی‌ها، استفاده شده و از اکسید منیزیم و فلئور برای تشدید تنالیته آبی بهره گرفته شده است؛ بنابراین رنگ آبی لاجوردی، ترکیبی از اکسید کبالت با اکسید منیزیم و فلئور است. در لعاب‌های غنی از اکسید منیزیم، رنگ آبی لعاب حاصل از ترکیبات کبالت به رنگ بنفش و به تیرگی متمایل می‌شود. ترکیبات فلئور در لعاب نیز، بیشتر اثر تیره‌کننده و روان‌کننده دارند. در ضمن، تنها در لعاب‌های بدون سرب، فلئور اثر تشدیدکنندگی بر روی رنگ آبی کبالت دارد [16]، به همین خاطر در طیف تجزیه عنصری نمونه لعاب آبی لاجوردی کاشی‌های معرق بنای تاریخی مصلاهی مشهد نیز، ترکیب لعاب فاقد اکسید سرب است و

جدول ۲: نتایج تجزیه عنصری نمونه لعاب کاشی سیاه‌رنگ
Table 2: Elemental analysis results of the black glaze

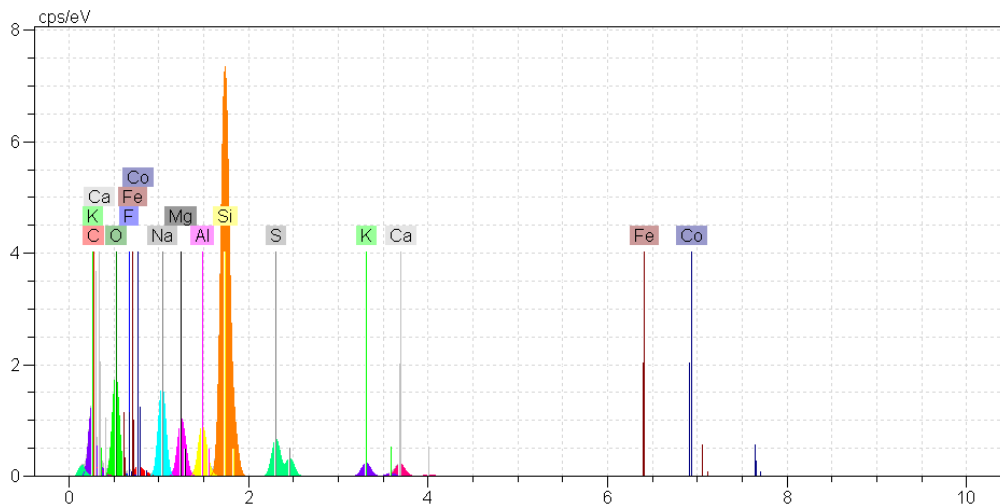
نام عنصر Element	درصد وزنی weight percent w %	درصد اتمی Atomic percent A%
Na	16.89	21.09
Mg	6.83	8.09
Al	7.81	8.34
Si	56.16	57.43
S	1.95	1.77
K	0.20	0.16
Ca	0.61	0.45
Mn	2.50	1.32
Fe	1.16	0.53
Pb	5.82	0.82

Table 2)، نشان‌دهنده آن است که با توجه به حضور بارز منگنز به میزان ۲/۵ درصد وزنی در این نمونه لعاب، از اکسید منگنز برای ایجاد رنگ سیاه در لعاب کاشی‌های معرق این بنا، استفاده شده است. با توجه به میزان کم سرب در این لعاب و میزان بالای عناصر قلیایی و قلیایی خاکی موجود در آن، لعاب این کاشی سیاه‌رنگ، جزء لعاب‌های سرب قلیایی است [15].

جدول ۳: نتایج تجزیه عنصری نمونه لعاب کاشی آبی لاجوردی
Table 3: Elemental analysis results of the blue glaze

نام عنصر Element	درصد وزنی weight percent w %	درصد اتمی Atomic percent A%
Na	12.11	14.52
Mg	7.27	8.22
Al	6.62	6.74
Si	54.24	53.07
S	8.90	7.62
K	3.27	2.29
Ca	3.23	2.22
Fe	0.54	0.27
Co	0.44	0.21
F	3.29	4.75

بررسی طیف به‌دست‌آمده از آنالیز لعاب آبی لاجوردی به روش SEM-EDX (شکل ۱۱-۱۱ Fig) و نتایج به‌دست‌آمده از آن (جدول ۳-3 Table)، نشان داد که با توجه به وجود ۰/۴۴ درصد وزنی کبالت به همراه مقدار زیادی از منیزیم به میزان ۷/۲۷ درصد وزنی و ۳/۲۹ درصد وزنی، فلئور در این نمونه لعاب، از اکسید کبالت



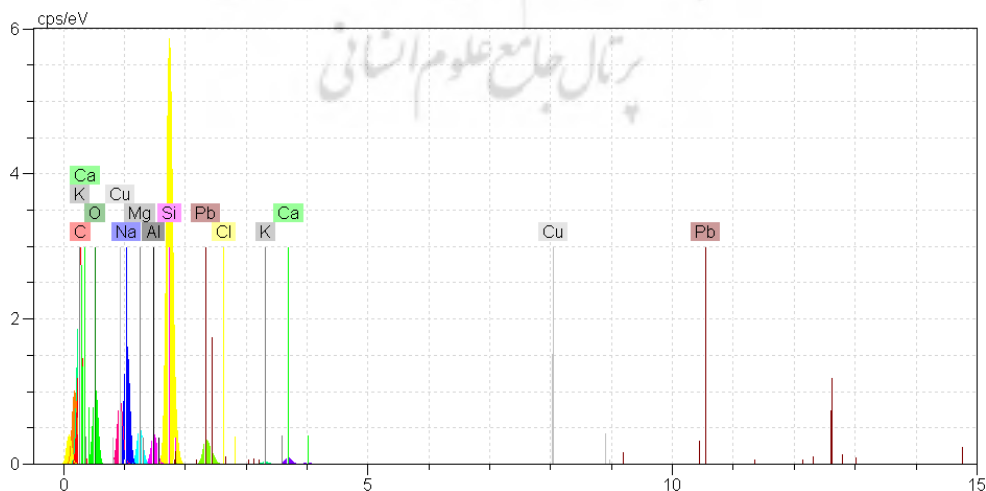
شکل ۱۱: طیف آنالیز عنصری لعاب کاشی آبی لاجوردی به روش SEM-EDX
Fig. 11: Elemental analysis spectrum of the blue glaze by SEM-EDX method

وزنی در این نمونه لعاب، از اکسید مس برای ایجاد رنگ فیروزه‌ای در این لعاب، استفاده شده است. با توجه به میزان کم سرب و محتوی عناصر قلیایی و قلیایی خاکی موجود در آن، لعاب این کاشی فیروزه‌ای‌رنگ، جزء لعاب‌های قلیایی است [15].

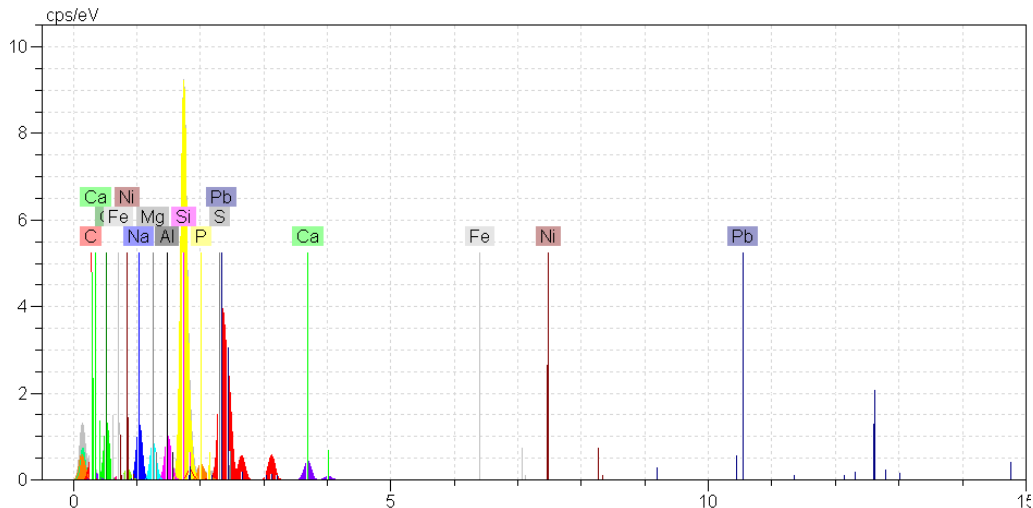
بررسی طیف به‌دست‌آمده از تجزیه عنصری لعاب قهوه‌ای‌رنگ در کاشی‌های معرق این بنا (شکل ۱۳- Fig. 13) و نتایج حاصل از آن (جدول ۵-5 Table)، نشان داد که با توجه به حضور ۰/۲ درصد وزنی آهن، همراه با مقدار بالای سرب به میزان ۵۴/۷۱ درصد وزنی، در این نمونه لعاب، رنگ قهوه‌ای، در لعاب

به‌جای آن میزان سیلیس لعاب تا ۵۴/۲۴ درصد وزنی، افزایش یافته است. با توجه به عدم وجود سرب در این لعاب و محتوی عناصر قلیایی و قلیایی خاکی موجود در آن، به‌ویژه درصد بالای سدیم آن و میزان پتاسیم لعاب که در محدوده ۱/۸-۳/۴ است، لعاب این کاشی لاجوردی‌رنگ، جزء لعاب‌های قلیایی است [15].

بررسی طیف حاصل از آنالیز عنصری لعاب فیروزه‌ای‌رنگ در کاشی‌های معرق بنای مصلاهی مشهد به روش SEM-EDX (شکل ۱۲- Fig. 12) و نتایج به‌دست‌آمده از آن (جدول ۴-4 Table)، حاکی از آن است که با توجه به حضور بارز مس به میزان ۴۷/۲۴ درصد



شکل ۱۲: طیف تجزیه عنصری لعاب کاشی فیروزه‌ای‌رنگ به روش SEM-EDX
Fig. 12: Elemental analysis spectrum of the turquoise glaze by SEM-EDX method



۱۳: طیف تجزیه عنصری لعاب کاشی قهوه‌ای‌رنگ به روش SEM-EDX
Fig: 13: Elemental analysis spectrum of the brown glaze by SEM-EDX method

سرب ($2PbO.Sb_2O_5$) استفاده شده است. در رنگ زرد آیموانات سرب، آنتیموان با سرب لعاب، ترکیب و تشکیل آیموانات سرب می‌دهد. در این حال برای ایجاد رنگ زرد، بایستی لعاب موردنظر غنی از سرب باشد، زیرا در لعاب‌های بدون سرب یا کم سرب، اکسید آیموان (Sb_2O_3) به وجود آمده در لعاب باعث ایجاد رنگ سفید در لعاب می‌شود. ساده‌ترین روش برای به دست آوردن رنگ زرد، در چنین حالتی، افزودن مقداری آنتیموانات سرب به ترکیب لعاب‌های سربی است که رنگ زرد پررنگ زیبایی ایجاد می‌کند [16]. آنتیموانات سرب از ترکیبات معمول برای ایجاد رنگ زرد در لعاب است. حضور مقادیری از اکسید سرب و آلومینیوم باعث ثبات و پایداری ترکیب و جلوگیری از فرار آنتیموان در خلال

جدول ۴: نتایج تجزیه عنصری نمونه لعاب کاشی فیروزه‌ای‌رنگ
Table 4: Elemental analysis results of the turquoise glaze

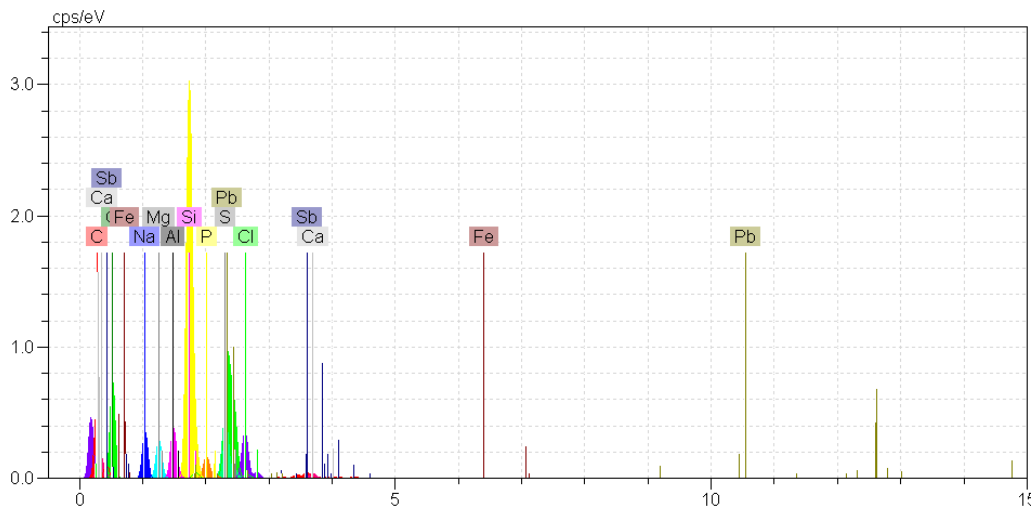
نام عنصر Element	درصد وزنی weight percent w %	درصد اتمی Atomic percent A% A%At%
Na	10.25	17.40
Mg	2.57	4.06
Al	2.06	3.05
Si	3.54	42.48
K	0.64	0.67
Ca	2.52	2.48
Cu	47.24	29.03
Pb	4.13	0.79

کاشی‌های معرق مصلاهی تاریخی مشهد، حاصل ترکیبی از لعاب سربی با اکسید آهن است. با توجه به درصد بسیار بالای سرب در این لعاب، به میزان ۵۴/۷۱ درصد وزنی و مقدار قابل توجه سیلیس آن، به میزان ۲۸/۸۴ درصد وزنی و محتوی عناصر قلیایی و قلیایی خاکی موجود در آن، لعاب این کاشی قهوه‌ای‌رنگ، جزء لعاب‌های سربی است [15].

جدول ۵: نتایج تجزیه عنصری نمونه لعاب کاشی قهوه‌ای‌رنگ
Table 5: Elemental analysis results of the brown glaze

نام عنصر Element	درصد وزنی weight percent w %	درصد اتمی Atomic percent A%
Na	4.68	10.78
Mg	2.88	6.27
Al	3.33	6.55
Si	28.84	54.4
P	1.88	3.24
Ca	3.43	4.54
Fe	0.20	0.18
Ni	0.02	0.01
Pb	54.71	13.99

بررسی طیف حاصل از تجزیه لعاب زردرنگ در کاشی‌های معرق این بنا به روش SEM-EDX (شکل ۱۴- Fig: 14) و نتایج به دست آمده از تجزیه عنصری لعاب در کاشی‌های زردرنگ (جدول ۶- Table 6)، نشان‌دهنده آن است که با توجه به حضور بارز سرب به میزان ۳۵/۶۹ درصد وزنی، همراه با ۴/۳ درصد وزنی، آنتیموان در این نمونه لعاب، برای ایجاد رنگ زرد، از ترکیب آیموانات



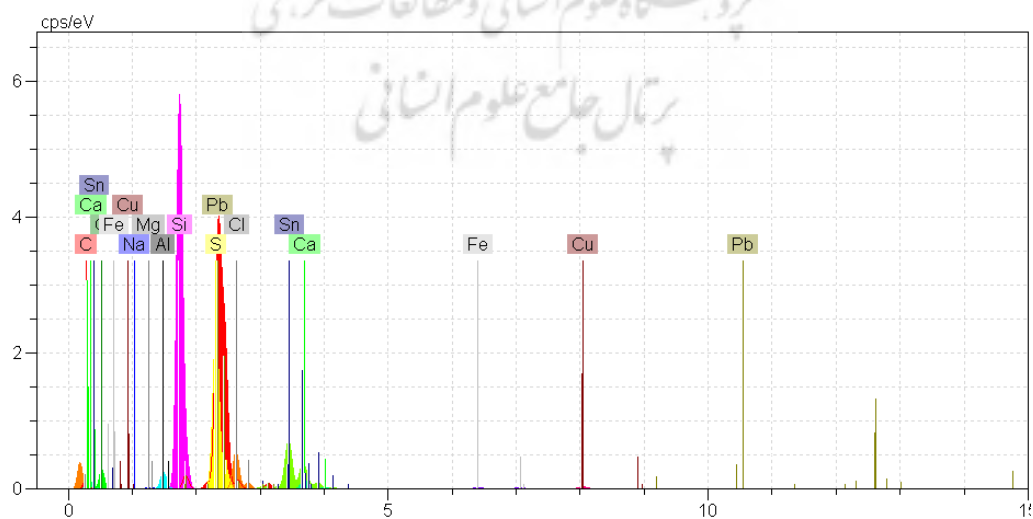
شکل ۱۴: طیف تجزیه عنصری لعاب کاشی زردرنگ به روش SEM-EDX
 Fig. 14: Elemental analysis spectrum of the yellow glaze by SEM-EDX method

عمل تکلیس می‌شود [17]. با توجه به میزان بالای سرب در این لعاب؛ یعنی ۳۵/۶۹ درصد وزنی و محتوی عناصر قلیایی و قلیایی خاکی موجود در آن، لعاب این کاشی زرد رنگ، جزء لعاب‌های سربی است [15].

بررسی طیف به دست آمده از تجزیه عنصری لعاب سبزرنگ به روش SEM-EDX (شکل ۱۵-۱۵ Fig) و نتایج حاصل از آن (جدول ۷-۷ Table)، حاکی از آن است که با توجه به حضور ۲/۹۸ درصد وزنی مس به همراه مقدار بالایی از سرب به میزان ۴۸/۴۳ درصد وزنی در این لعاب، از اکسید مس برای ایجاد رنگ سبز در این

جدول ۶: نتایج تجزیه عنصری نمونه لعاب کاشی زردرنگ
 Table 6: Elemental analysis results of the yellow glaze

نام عنصر Element	درصد وزنی weight percent w %	درصد اتمی Atomic percent A%
Na	4.15	7.90
Mg	2.95	5.34
Al	3.80	6.18
Si	29.48	45.99
P	2.37	3.34
S	6.50	8.85
Cl	3.22	7.07
Ca	1.17	1.28
Fe	6.30	4.95
Sb	4.30	1.55
Pb	35.69	7.51



شکل ۱۵: طیف تجزیه عنصری لعاب کاشی سبزرنگ به روش SEM-EDX
 Fig. 15: Elemental analysis spectrum of the green glaze by SEM-EDX method

جدول ۷: نتایج تجزیه عنصری نمونه لعاب کاشی سبزرنگ
Table 7: Elemental analysis results of the green glaze

نام عنصر Element	درصد وزنی weight percent w%	درصد اتمی Atomic percent A%
Al	0.83	1.98
Si	19.02	43.58
S	10.20	20.47
Cl	3.14	5.70
Ca	1.01	1.62
Fe	1.22	1.41
Cu	2.98	3.02
Sn	13.13	7.11
Pb	48.43	15.03

می‌رسد که در ترکیب لعاب این کاشی‌ها از سیلیس و آلومین به‌عنوان شبکه‌ساز لعاب، از سرب، سدیم، پتاسیم و منیزیم برای اصلاح شبکه لعاب، از فلزات واسطه، همچون: منگنز، آهن، مس و کبالت به‌عنوان عامل ایجاد رنگ و از سدیم، پتاسیم و سرب به‌عنوان کمک‌ذوب استفاده شده است [15]. از سوی دیگر با توجه به حضور عناصر واسطه رنگ‌ساز همچون مس، آنتیموان، منگنز و کبالت در ترکیب شیمیایی لعاب کاشی‌ها و ناپایداری این عناصر در دمای بالای 1000°C ، می‌توان نتیجه گرفت که احتمالاً لعاب این کاشی‌ها در دمایی کمتر از 1000°C پخته شده است [14].

نتایج حاصل از مطالعه و تجزیه عنصری ترکیب شیمیایی لعاب و شناسایی عوامل ایجاد رنگ در لعاب کاشی‌های معرق عصر صفوی مصلاهی تاریخی مشهد به‌خوبی با نتایج حاصل از بررسی و مطالعه آزمایشگاهی ترکیب شیمیایی لعاب کاشی‌های عصر صفوی در سایر مناطق ایران، مطابقت و همخوانی داشته و قابل مقایسه است (جدول ۸-Table 8).

نمونه استفاده شده است؛ بنابراین رنگ سبز در این نمونه لعاب کاشی معرق، ترکیبی از اکسید مس با لعاب سربی است. با توجه به درصد بسیار بالای سرب در این لعاب، به میزان $48/43$ درصد وزنی و محتوی بسیار کم عناصر قلیایی و قلیایی خاکی موجود در آن، لعاب این کاشی سبزرنگ، از نوع لعاب‌های سربی است [15].
با توجه به نتایج حاصل از تجزیه عنصری ترکیب لعاب در کاشی‌های معرق مصلاهی تاریخی مشهد، به نظر

جدول ۸: مقایسه نتایج حاصل از تجزیه عنصری لعاب کاشی‌های عصر صفوی مصلاهی تاریخی مشهد با نتایج به‌دست‌آمده توسط سایر محققین در

مورد شناسایی ترکیب عنصری لعاب کاشی‌های عصر صفوی در بناهای تاریخی سایر مناطق ایران

Table 8: Comparison of Elemental analysis results of tile-making in the Safavid era of Mashhad historical Musalla with the results obtained by other scholars on the identification of the elemental composition of the glaze of Safavid era tiles in the monuments of other regions of Iran.

نمونه‌های لعاب Glaze samples	Lamchi-Rachti, et al, 2001	Abed Esfahani & Zahedian, 2007	Soltanzadeh, et al, 2009	Holakoeei, 2013	Mishmastnehi & Holakoeei, 2015	This study, 2018
لعاب کاشی سفیدرنگ the white glaze				قلع و سرب Tin & lead	قلع و سرب Tin & lead	قلع و سرب Tin & lead
لعاب کاشی سیاه‌رنگ the black glaze	منگنز Manganese			منگنز Manganese		منگنز Manganese
لعاب کاشی لاجوردی‌رنگ the blue glaze	کبالت cobalt(II)		کبالت cobalt(II)	کبالت cobalt(II)	کبالت cobalt(II)	کبالت cobalt(II)
لعاب کاشی فیروزه‌ای‌رنگ the turquoise glaze	مس Copper	مس Copper		مس Copper		مس Copper
لعاب کاشی قهوه‌ای‌رنگ the brown glaze				منگنز و آهن Manganese & Iron		آهن Iron
لعاب کاشی زردرنگ the yellow glaze	قلع و سرب Tin & lead	سرب lead	آهن و سرب Lead & Iron	قلع و سرب Tin & lead		آنتیموان و سرب Lead & Antimony
لعاب کاشی سبزرنگ the green glaze				مس Copper		مس Copper
قدمت آثار مورد مطالعه Date of the sample	قرن ۱۵-۱۸ م 15th- 18th century	قرن ۱۷ م 17th century	قرن ۱۶-۱۷ م 16th- 17th century	قرن ۱۷ م 17th century	قرن ۱۷ م 17th century	قرن ۱۷ م 17th century

۴-۳. مطالعه ساختاری بدنه کاشی‌های معرق

به روش پتروگرافی

مطالعه بافت و ساختار بدنه کاشی‌های معرق مصالای تاریخی مشهد، به روش پتروگرافی، علاوه بر امکان شناسایی ترکیبات آن‌ها، میزان استحکام و پایداری قطعات را نیز در مقابل عوامل آسیب‌رسان و شرایط محیطی به ما نشان می‌دهد. به‌منظور بررسی بافت و ترکیب کانی‌شناسی بدنه کاشی‌های معرق صفوی در مصالای تاریخی مشهد، تعداد پنج نمونه اصیل از بدنه کاشی‌های معرق بنا انتخاب شد و پس از برش و تهیه مقطع نازک از آن‌ها، نمونه‌ها در زیر میکروسکوپ پتروگرافی با نور عبوری و پلاریزه مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از بررسی و مطالعه میکروسکوپی بدنه کاشی‌های معرق صفوی به روش پتروگرافی به شرح ذیل است (جدول ۹-۹):

کوارتز (Quartz)، شاخص‌ترین کانی قابل مشاهده در مقاطع نازک تهیه‌شده از نمونه‌های بدنه کاشی‌های معرق مصالای تاریخی مشهد است. این کانی به شکل بلورهای تیز و زاویه‌دار مشاهده می‌شود که پراکندگی و اندازه ذرات آن در تمام بافت بدنه کاشی‌ها، تقریباً یکسان است. حضور ذرات کوارتز به این شکل، حاکی از آن است که احتمالاً از ماسه سیلیسی خردشده یا شن خرد و الک شده [18]، در بدنه کاشی‌های معرق استفاده شده است؛ علاوه بر این احتمال دارد که ذرات کوارتز، محصول

هوازدگی و خرد شدن سنگ مادر مولد خاک مورد استفاده در ساخت بدنه کاشی‌ها بوده باشد [19]؛ که به نظر می‌رسد، این سنگ مادر اولیه، یک سنگ گرانیتی (Granite) و یا یک سنگ ریولیتی (Rhyolite) با میزان کوارتز بالا بوده است. بدین ترتیب، مشاهده می‌شود که از ذرات کوارتز به‌عنوان پرکننده بدنه کاشی‌ها استفاده شده است. استفاده از ذرات کوارتز ریزدانه و گوشه‌دار همراه با کانی‌های رسی و آب پس از ورز دادن، بافتی متراکم و همگن در بدنه کاشی‌ها، ایجاد کرده [20] و موجب پیوستگی بیشتر اجزاء بافت بدنه به یکدیگر شده است (اشکال ۱۶، ۱۷ و ۱۸-17, 16, 18 Figures). از سوی دیگر، وجود مقادیر زیاد سیلیس در ترکیب بدنه کاشی‌ها، موجب سخت شدن بدنه شده و میزان شکل‌پذیری آن‌ها را تا حدی کم می‌کند.

در بین دانه‌های کوارتز، خطوط شکستگی، دیده می‌شود که احتمالاً مربوط به زمان ساخت بدنه کاشی‌ها است (شکل ۱۶-16 Fig). این خطوط، اکسیدها و فلدسپات‌هایی هستند که جانشین فضاهای خالی موجود شده‌اند و به شکل خطوط شکستگی درآمده‌اند. به نظر می‌رسد که در هنگام پخت بدنه کاشی‌ها در کوره، اکسیدهای آهن موجود در بدنه و لعاب کاشی به سمت بلورهای کانی موجود در بدنه، حرکت کرده و جذب فضاهای خالی آن‌ها شده و به‌صورت خطوط شکستگی، کانی‌ها را احاطه نموده‌است و یا این‌که این خطوط،

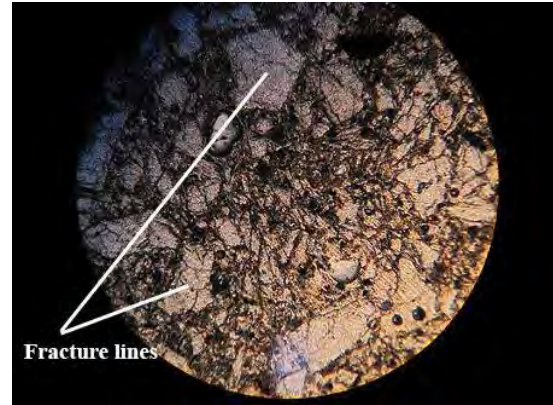
جدول ۹: نتایج مطالعه ساختاری و ترکیب کانی‌شناسی بدنه کاشی‌های معرق مصالای مشهد به روش پتروگرافی

Table 9: The results of structural study and mineralogical composition of the body mosaic tiles of Mashhad historical Musalla by petrography method

شماره نمونه Sample number	نام گروه Group name	نام کانی Mineral name	درصد Percent	مشخصات میکروسکوپی Microscopic specification
1	میکای سفید White mica	مسکوویت Muscovite	1	لکه سفید در حالت PPL White spot in PPL mode
2	آمفیبول Amphibole	هورنبلند Hornblende	2-3	لکه قهوه‌ای در حالت SPL Brown spot in SPL mode
3	میکای قهوه‌ای Brown mica	بیوتیت Biotite	2-3	نقاط ریز قهوه‌ای در حالت SPL Tiny brown spot in SPL
4	کوارتز Quartz	کوارتز Quartz	60-65	خاکستری‌رنگ در حالت PPL Gray color in PPL mode
5	فلدسپار Feldspar	فلدسپار Feldspar	25-30	خاکستری‌رنگ در حالت PPL Gray color in PPL mode



شکل ۱۷: کوارتز باز تبلور شده، بزرگنمایی 100X حالت PPL
Fig: 17: Recrystallized quartz, 100x, PPL mode



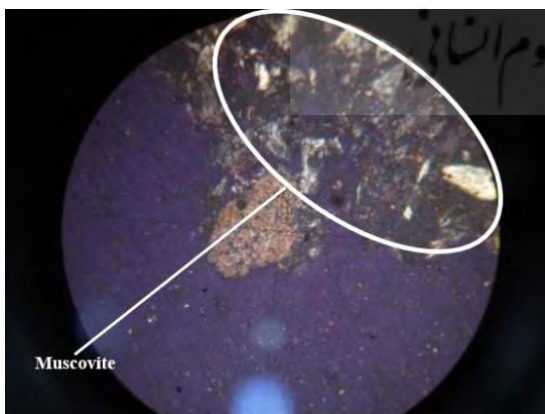
شکل ۱۶: حضور ذرات کوارتز و خطوط شکستگی در بین آن‌ها، بزرگنمایی 100X حالت PPL
Fig: 16: The presence of quartz particles and fracture lines among them, 100x, PPL mode

مسکوویت (Muscovite) و بیوتیت (Biotite) است (اشکال ۱۹ و ۲۰-۱۹). حضور فاز بیوتیت، احتمالاً ناشی از نفوذ آهن به درون بافت است. بررسی ذرات بیوتیت با بزرگنمایی بالا، حاکی از پیوستگی بافت زمینه و ذرات بیوتیت است که ناشی از واکنش حاشیه ذرات با بافت بدنه است.

مهم‌ترین نقش کانی‌های فیلوسیلیکاتی، همچون مسکوویت و بیوتیت، در بدنه آثار سرامیکی، همچون کاشی‌ها، با توجه به پلاستیسیته کم آن‌ها، همراهی با کانی‌های رسی بدنه کاشی و جلوگیری از انقباض بیش از حد بدنه در هنگام خشک شدن آن‌ها است. با توجه به مشابهت ساختاری مسکوویت و بیوتیت با کانی‌های

احتمال دارد، حاصل شکستگی و ریزترک‌های موجود در بدنه کاشی‌ها بوده باشد. در برخی از نقاط، ذرات کوارتز دچار حالت باز تبلور شده‌اند که احتمالاً در اثر حرارت زیاد ناشی از زمان پخت بدنه کاشی‌ها در کوره سنتی کاشی‌پزی است (شکل ۱۷-۱۷ Fig). به‌علاوه، بر روی برخی از آن‌ها یک لایه اکسید آهن نیز به چشم می‌خورد که به نظر می‌رسد ناشی از فرآیند پخت و شرایط اتمسفر کوره باشد (شکل ۱۸-۱۸ Fig). از سوی دیگر در بین دانه‌های کوارتز، پدیده هوازگی نیز مشاهده می‌گردد که منجر به ورقه شدن سطح بدنه در نمونه‌ها، شده است.

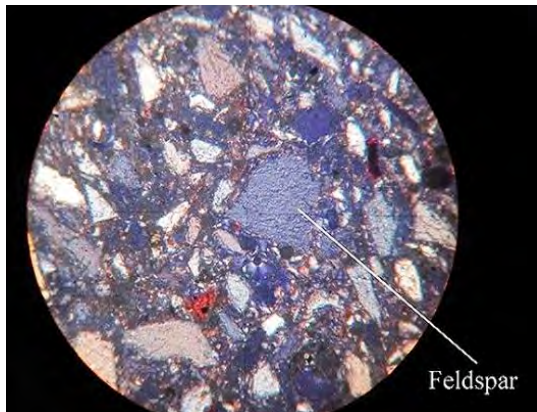
از دیگر کانی‌های شناسایی‌شده به روش پتروگرافی در مقاطع نازک حاصل از بدنه کاشی‌های معرق، فازهای



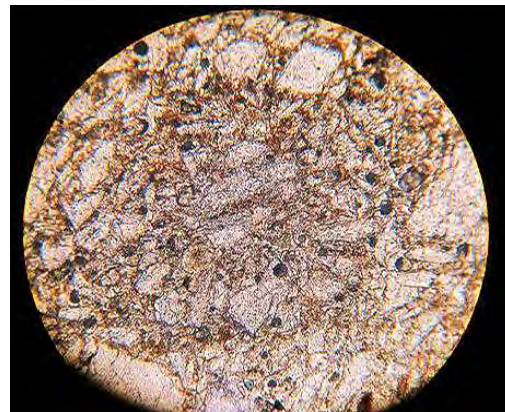
شکل ۱۹: کانی مسکوویت، بزرگنمایی 100X حالت PPL
Fig: 19: Muscovite mineral, 100x, PPL mode



شکل ۱۸: وجود لایه اکسید آهن بر روی ذرات کوارتز، بزرگنمایی 25X حالت PPL
Fig: 18: The presence of iron oxide layer on the quartz particles, 25x, PPL mode



شکل ۲۱: کانی فلدسپار به صورت لکه خاکستری رنگ، بزرگنمایی ۲۵X
حالت PPL
Fig: 21: Feldspar mineral in to form a Gray blemish, 25x, PPL mode



شکل ۲۰: کانی بیوتیت به صورت نقاط ریز قهوه‌ای، بزرگنمایی ۱۰۰X
حالت XPL
Fig: 20: Biotite mineral in to form a tiny brown spots, 100x, XPL mode

اصلی تشکیل‌دهنده پوسته زمین است و خود عامل تشکیل‌دهنده کانی‌های رسی است؛ بنابراین همراه سایر کانی‌های رسی در ترکیب بدنه کاشی‌ها نیز دیده می‌شود. گاهی نیز استفاده از این کانی در ترکیب آثار سفالی، همچون بدنه کاشی‌ها، آگاهانه و به‌عنوان گدازآور برای پایین آوردن دمای پخت بوده است.

هورنبلند (Hornblende) نیز از دیگر کانی‌های شناسایی شده در بدنه کاشی‌ها بوده است که به‌صورت لکه‌های قهوه‌ای در رگه‌های هوازگی بدنه مشاهده می‌شود (اشکال ۲۲ و ۲۳-۲۲-۲۳). این کانی، جزو آمفیبول‌های (Amphiboles) واسطه است که عمومی‌ترین آمفیبول‌های منوکلینیک (Monoclinic Amphiboles) را تشکیل می‌دهند.

رسی، این کانی‌ها به سهولت در ترکیب بدنه کاشی‌ها، جای گرفته و با آزاد کردن سیلیکا و آلومینا از دمای 850°C در هنگام پخت در کوره به جوانه‌زنی محصولات جدید و فرآیند شیشه‌ای شدن بدنه کاشی‌ها، کمک شایانی می‌کنند [21]. علاوه بر این، ترکیباتی چون مسکوویت از ساختارهای مولایت (Mullite) بوده و در شرایط مناسب از لحاظ دما، زمان و ماندگاری، می‌تواند به جوانه‌زنی مولایت منجر شود که در نهایت، موجب افزایش دوام و استحکام بدنه کاشی‌ها می‌شود [22]. فلدسپار (Feldspar)، از دیگر کانی‌های شناسایی شده در مقاطع میکروسکوپی بدنه کاشی‌ها است (شکل ۲۱-۲۱). حضور فلدسپارها تقریباً در تمامی سفال‌های تاریخی، امری اجتناب‌ناپذیر است؛ چراکه این کانی، جزء ترکیبات



شکل ۲۳: کانی هورنبلند و هوازگی اطراف آن، بزرگنمایی ۱۰۰X حالت XPL
Fig: 23: Hornblende mineral and weathering around it, 100x, XPL mode



شکل ۲۲: کانی هورنبلند، بزرگنمایی، ۱۰۰X حالت XPL
Fig: 22: Hornblende mineral, 100x, XPL mode

۵. نتیجه گیری

بررسی و مطالعه آزمایشگاهی ترکیب شیمیایی لعاب کاشی‌های معرق بنای صفوی مصلاهی مشهد به روش میکروسکوپ الکترونی روبشی، مجهز به طیف‌سنج پراکنش انرژی پرتوی ایکس (SEM-EDX) نشان داد که در ترکیب شیمیایی لعاب کاشی‌های معرق این بنا، از اکسید قلع به همراه اکسید سرب برای رنگ سفید، از اکسید منگنز برای رنگ سیاه، از اکسید کبالت برای رنگ آبی لاجوردی، از اکسید مس برای رنگ فیروزه‌ای، از اکسید آهن برای رنگ قهوه‌ای، از آنیموانات سرب برای لعاب زردرنگ و از ترکیب لعاب سربی همراه با اکسید مس برای رنگ سبز استفاده شده است. بخش اعظم نتایج به دست آمده در این بخش، با نتایج حاصل از بررسی‌های سایر پژوهشگرانی که به مطالعه آزمایشگاهی ترکیب شیمیایی لعاب کاشی‌های عصر صفوی در بناهای شاخص این دوره در مناطق مختلف ایران (تبریز، اصفهان، قزوین، مشهد، بهشهر و نجف) پرداخته‌اند، مطابقت و همخوانی دارد. بنابراین به نظر می‌رسد که با وجود اختلاف و بعد زمانی و مکانی موجود در بناهای تاریخی فوق، در عصر صفوی در تمامی این مناطق از ترکیب شیمیایی مشابهی برای ساخت لعاب کاشی‌ها و ایجاد رنگ‌های مختلف در آن‌ها استفاده شده است. از سوی دیگر، هرچند تفاوت‌های بسیار جزئی در نتایج به دست آمده از تجزیه عنصری لعاب کاشی‌های عصر صفوی در این مناطق مشاهده می‌شود ولی ترکیب اصلی آن‌ها، مشابه یکدیگر است. به علاوه، وجود همین تفاوت‌های جزئی در میان نتایج به دست آمده از آنالیز عنصری لعاب کاشی‌های عصر صفوی در مناطق مختلف که احتمالاً به استفاده از منابع محلی برای تأمین مواد اولیه مورد نیاز برای ساخت لعاب کاشی‌ها مربوط می‌شود، می‌تواند در شناخت، انتساب و منشایابی نمونه‌های تاریخی کاشی، مورداستفاده محققین و پژوهشگران قرار گیرد. مطالعه بافت و ترکیب کانی‌شناسی بدنه کاشی‌ها، به روش پتروگرافی با کمک میکروسکوپ پلاریزان نیز حاکی از وجود فازهایی، همچون کوارتز، مسکوویت، بیوتیت، فلدسپار و هورنبلند بود. از ذرات کوارتز به عنوان پرکننده برای کاهش میزان انقباض بدنه کاشی‌ها در

هنگام خشک شدن آن‌ها، استفاده شده است که حاصل آن ایجاد بافتی متراکم در بدنه و افزایش سختی و استحکام آنها بوده است. با وجود شناسایی خطوط شکستگی و رگه‌های هوازگی در بین فازهای موجود در بدنه کاشی‌ها؛ از جمله در کوارتز و هورنبلند، به دلیل وجود فازهای مستحکمی، همچون؛ مسکوویت و بیوتیت در بدنه و همراهی آنها با کانی‌های رسی بدنه، آزاد کردن سیلیکا و آلومینا، جوانه‌زنی محصولات جدید و کمک به فرآیند شیشه‌ای شدن در هنگام پخت، بدنه کاشی‌های مورد استفاده در مصلاهی تاریخی مشهد از استحکام و دوام نسبتاً خوبی برخوردار بوده است.

سپاسگزاری

مقاله حاضر در گروه مرمت آثار تاریخی دانشکده هنر و معماری دانشگاه زابل انجام شده است که در این راستا از حمایت دانشگاه زابل برای انجام این پژوهش سپاسگزاری می‌گردد. همچنین از همکاری اداره کل سازمان میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری استان خراسان رضوی؛ و در آخر از زحمات کارکنان آزمایشگاه پتروگرافی دانشگاه فردوسی مشهد و مسئولین آزمایشگاه میکروسکوپ الکترونی پژوهشکده متالورژی رازی تهران نیز صمیمانه تشکر و قدردانی می‌گردد.

پی‌نوشت‌ها

۱. لعاب به کار رفته در کاشی‌ها، بر اساس محتوی اکسید سرب، میزان اکسیدهای قلیایی و اکسیدهای قلیایی خاکی به سه گروه اصلی، لعاب‌های قلیایی، لعاب‌های سرب قلیایی و لعاب‌های سربی، تقسیم می‌شود. در لعاب‌های قلیایی، میزان اکسید سرب بسیار پایین و به طور متوسط، بین ۳-۰ درصد وزنی است. حداکثر میزان اکسید سرب در این لعاب‌ها، گاهی به ۴ درصد نیز می‌رسد. میزان اکسید سرب در لعاب‌های سرب قلیایی، بین ۳۰-۱۰ درصد وزنی، متغیر است. حداقل میزان اکسید سرب در این لعاب‌ها ۴/۸ و حداکثر ۳۰ درصد وزنی است. در لعاب‌های سربی نیز معمولاً، میزان اکسید سرب، بیش از ۳۰ درصد وزنی است؛ یعنی میزان اسید سرب در این لعاب‌ها، به طور متوسط، بین ۶۱-۳۱ درصد وزنی، متغیر است [15].

References

- [1] Godard A, Godard Y, Siroux M. Athar-e-Iran. Translated by Sarvghad Moghadam Abolhasan. Mashhad: Astan-e-quds-Razavi; 1992. [in Persian]
[گذار آندره. آثار ایران. ترجمه سروغد مقدم ابوالحسن. چاپ پنجم. مشهد: نشر بنیاد پژوهش‌های اسلامی آستان قدس رضوی؛ ۱۳۸۷]
- [2] Kiani M Y. Iranian architecture on islamic period. Tehran: SAMT publication; 2001. [in Persian]
[کیانی یوسف. معماری ایران دوره اسلامی. چاپ اول. تهران: نشر سمت؛ ۱۳۷۹]
- [3] Pope AU, Ackerman P, Besterman T. A survey of Persian art from prehistoric times to the present: Arthur Upham Pope, editor; Phillis Ackerman, assistant editor. vol. 6. Oxford University Press; 1964.
- [4] Mollazadeh K. Schools and religious buildings (Takyeh, Hussainia, Khanqah, Qadamgah, School, Musalla). Tehran: Sooreh Mehr publication; 2003. [in Persian]
[ملازاده کاظم. مدارس و بناهای مذهبی (تکیه، حسینیه، خانقاه، قدمگاه، مدرسه، مصلا). چاپ اول. تهران: سوره مهر؛ ۱۳۸۱]
- [5] Masoomi M. History of the science of archaeology. Tehran: SAMT Publication; 2005. [in Persian]
[معصومی غلامرضا. تاریخچه علم باستان‌شناسی. چاپ اول. تهران: نشر سمت؛ ۱۳۸۳]
- [6] Diez E. Churasanische Baudenkmäler. vol. 7. Reimer; 1918.
- [7] Lamehi-Rachti M, Oliayi P, Rahighi J, Shokouhi F, Fakhrai M. Application of PIXRF in the analysis of archaeological glazed tiles. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 2001;184:430–6. doi:https://doi.org/10.1016/S0168-583X(01)00791-1.
- [8] Abed Esfahani A, Zahedian K. Surveying the elements changing the colors of the yellow and green enamels of the 7-colored (haft-rang) tiles in ImamMosque of Isfahan (Safavid Era). Maremat & Pazhouhesh 2007;2(3):37–42. [in Persian]
[عابد اصفهانی عباس، زاهدیان کتایون. بررسی عوامل تغییر رنگ در لعاب‌های زرد و سبز کاشی‌های هفت‌رنگ مسجد امام اصفهان (دوره صفویه). مرمت و پژوهش ۱۳۸۶؛ ۲(۳): ۳۷–۴۲]
- [9] Soltanzadeh S, Vatandoust R, Bahraman A. Conservation and restoration of the damages made on glaze of the 7-colored tiles Imam Ali (PBUH) Holy Shrine. Maremat & Pazhouhesh 2009;3(6):37–42. [in Persian]
[سلطان‌زاده شادی، وطن‌دوست رسول، بهرمان علیرضا. طرح حفاظت و مرمت رنگ‌پریدگی لعاب کاشی‌های هفت‌رنگ حرم حضرت علی (ع). مرمت و پژوهش ۱۳۸۸؛ ۳(۶): ۳۷–۴۲]
- [10] Holakooei P. Technological study of the seventeenth century haft rang tiles in Iran with a comparative view to the cuerda seca tiles in Spain (Doctoral dissertation, Università degli Studi di Ferrara).
- [11] Mishmastnehi M, Holakooei P. Technological study of the gilded haft-rang tiles of the Imamzadih Ismail mausoleum in Qazvin, Iran. Heritage Science 2015;3:15. doi:https://doi.org/10.1186/s40494-015-0044-3.
- [12] Kiani M Y. Decorations related with the Iranian architecture of the Islamic period. Tehran: Iranian Cultural Heritage Organization; 2004. [in Persian]
[کیانی یوسف. تزئینات وابسته به معماری ایران دوره اسلامی. چاپ اول. تهران: نشر سازمان میراث فرهنگی کشور؛ ۱۳۷۶]
- [13] Porter V. Islamic tiles. British Museum Press; 1995.
- [14] Eppler RA. Corrosion of glazes and enamels. Corros Glas Ceram Ceram Supercond Noyes pubs 1992.
- [15] Gradmann R. Analysis of historical islamic glazes and the development of a substitution material 2016.
- [16] Abbasiyan MM. Analysis of historical islamic glazes and the development of a substitution. Tehran: Gutenberg publication; 1992. [in Persian]
[عباسیان میر محمد. صنعت لعاب سازی و رنگ‌های آن. چاپ اول. تهران: نشر گوتنبرگ؛ ۱۳۷۰]
- [17] Rahimi A MM. The technology of white wares. 2003. [in Persian]
[رحیمی افسون، متین مهران. تکنولوژی سرامیک‌های ظریف. چاپ دوم. تهران: نشر سهامی انتشار؛ ۱۳۸۲]
- [18] Riederer J. Thin section microscopy applied to the study of archaeological ceramics. Hyperfine Interactions 2004;154:143–58. doi:https://doi.org/10.1023/B:HYPE.0000032029.24557.b1.
- [19] 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. [Original in Persian with English Abstract]

[نورزهی زینب، آجرلو بهرام، باقرزاده کثیری مسعود، ابراهیمی قادر. باستان‌کانی‌شناسی سفالینه‌های عصر مفرغ کول‌تپه عجب‌شیر، شرق دریاچه ارومیه. پژوهش باستان‌سنجی ۱۳۹۵؛ ۲ (۲): ۱-۱۷.]

- [20] Noghani S, Emami M. Structural pattern of parthian clinky pottery: An Archaeometric Study. *Archaeological Studies* 2012;3(2):15-34. [Original in Persian with English Abstract]
[نوغانی سمیه، امامی سید محمدمین.]

ساختارشناسی سفال جلینکی متعلق به دوران پارسی بر اساس مطالعات آرکتومتریکی (باستان‌سنجی).

مطالعات باستان‌شناسی ۱۳۹۰؛ ۳ (۲): ۳۴-۱۵.]

- [21] Cultrone G, Rodriguez-Navarro C, Sebastian E, Cazalla O, De La Torre MJ. Carbonate and silicate phase reactions during ceramic firing. *European Journal of Mineralogy* 2001;13:621-34. doi:<https://doi.org/10.1127/0935-1221/2001/0013-0621>.
- [22] Rodriguez-Navarro C, Cultrone G, Sanchez-Navas A, Sebastian E. TEM study of mullite growth after muscovite breakdown. *American Mineralogist* 2003;88:713-24. doi:<https://doi.org/10.2138/am-2003-5-601>.

