



شناسایی ترکیبات لعاب‌های به‌کاررفته در آجرهای لعاب‌دار تخت جمشید با تأکید بر لعاب سبز و زرد

I ساسان سامانیان

II ساره بهمنی

III امین بهمنی

نوع مقاله: پژوهشی؛ صص: ۱۵۸-۱۳۵
تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۴
شناسه دیجیتال (DOI): 10.30699/PJAS.5.15.135

چکیده

لعاب ماده جدیدی نیست و سال‌هاست که بشر با آن آشناست. لعاب‌ها طیف گسترده‌ای از ترکیبات آلی و معدنی را دربر می‌گیرند. این پژوهش درخصوص شناسایی لعاب آجرهای لعاب‌دار هخامنشی در تخت جمشید است که تاکنون بر روی این آجرها مطالعاتی در زمینه معرفی انجام پذیرفته، اما مطالعات فنی جامعی در مورد شناسایی ترکیبات لعاب‌های آن‌ها صورت نگرفته است. لعاب‌های مورد استفاده در آجرهای سفالی تخت جمشید به رنگ‌های سفید، سبز کم‌رنگ، سبز پررنگ، قهوه‌ای تیره، خاکستری و زرد حنایی رنگ آمیزی شده‌اند، که در این پژوهش لعاب‌های سبز کم‌رنگ و سبز پررنگ و زرد حنایی سربی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این پژوهش که از نوع تجربی-آزمایشگاهی با استناد به مدارک معتبر علمی است، با هدف شناخت عناصر تشکیل‌دهنده لعاب‌ها در آجرهای لعاب‌دار هخامنشی در تخت جمشید انجام پذیرفته و پرسش اصلی این است که، عمده‌ترین عوامل رنگ‌کننده در لعاب‌های سبز کم‌رنگ و سبز پررنگ و زرد حنایی در این آجرسفال‌ها چیست؟ در این راستا با استفاده از روش‌های XRD, SEM, DTA و TGA و آنالیز شیمیایی تر' بدنه و لعاب‌ها شناسایی شد که بدنه این نوع آجرها یک بدنه سیلیسی و به صورت بسیار متخلخل است. با توجه به آزمایشات صورت‌گرفته، نتایج به دست آمده در این پژوهش نشان می‌دهند که در ترکیب تمامی لعاب‌ها آهن و منیزیم وجود دارد که احتمالاً در ترکیب اصلی (لعاب پایه) غیر از اثرات رنگی به صورت ناخالصی وجود داشته‌اند.

کلیدواژگان: تخت جمشید، آجرهای لعاب‌دار، روش شیمی تر، لعاب زردرنگ، لعاب سبزرنگ، لعاب سربی.

I. استادیار گروه هنر، دانشکده هنر و معماری دانشگاه شیراز، شیراز، ایران (نویسنده مسئول).
samanian_sa@yahoo.com

II. کارشناسی ارشد هنر اسلامی، مدرس دانشکده هنر و معماری دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

III. کارشناسی ارشد ریزبست فناوری (نانویوتکنولوژی) دانشگاه تهران، تهران، ایران.

مقدمه

سابقه به‌کارگیری آجرهای لعاب‌دار در تزئین بناهای کاخ‌ها و معابد به تمدن بین‌النهرین باستان بازمی‌گردد. سومری‌ها و اکدی‌ها در ۲۵۰۰ پ.م.، نمونه‌های هنری خلق کردند که هنر بابل و آشور وارث آنان شد. آن‌ها اساس هنر کلاسیک را در خاور نزدیک در دوره باستان بنیان نهادند. سومری‌ها دیوار بناهای خود را با مخلوطی از گل نپخته با رنگ‌های سیاه، سفید و قرمز پوشش می‌دادند.

بابلی‌ها نقوش برجسته روی دیواره بناهای خود را با لعاب تزئین می‌کردند. در بابل محوطه وسیعی از آجرهای لعاب‌دار چند رنگ به دست آمده که با کنار هم چیدن آن‌ها، قطعات سردر یک بنا به دست آمده است (مورتگات، ۱۳۸۷: ۲۹۷).

ایلامیان در هزاره دوم پ.م.، در تزئین بناها و کاخ‌های خود از آجرهای لعاب‌دار استفاده کرده‌اند که نمونه شاخص آثار آن‌ها، زیگورات چغازنبیل است که با آجرهای لعاب‌دار سفید، سبز و آبی تزئین شده است. در دوره حکومت هخامنشیان نیز یکی از روش‌های تزئین بناها و کاخ‌ها، استفاده از آجرهای لعاب‌دار رنگی بوده است (گیرشمن، ۱۳۷۱: ۱۳۹-۱۳۰).

شوش و تخت جمشید از جمله بناهای متعلق به زمان هخامنشیان است که دارای آجرهای لعاب‌دار هستند. آن‌ها نقوش گیاهی و حیوانات اساطیری به‌کاررفته در کاخ‌های شوش و تخت جمشید را با لعاب‌های رنگین تزئین می‌کردند.

درواقع هخامنشیان تزئین کاخ‌ها و پرستشگاه‌ها را به وسیله نقاشی بر روی اندود گچ یا به وسیله کاشی‌های الوان انجام می‌دادند که نمونه‌های متعددی از این آثار در ساختمان‌های مربوط به آن دوره به دست آمده است. نقش سربازان جاویدان که در کاخ آپادانا در شوش پیدا شده است، با آن‌که به صورت نیم‌برجسته رنگین انجام شده، ولی تمام ویژگی‌های یک نقاشی دیواری در آن به‌کاررفته است (بریان، ۱۳۸۰: ۱۳۴-۱۳۲).

تخت جمشید که بدون شک یکی از باشکوه‌ترین یادمان‌های دنیای باستان به‌شمار می‌رود. آجرهای لعاب‌دار در قسمت‌های مختلف از این بنا توسط «اشمیت» پیدا شده که مقداری از آن در موزه ایران باستان و تعدادی در سایر موزه‌ها از جمله موزه تخت جمشید قرار دارد. نمونه‌هایی که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است، در دیوار شرقی کاخ اختصاصی زنان در زمان خشایارشا که امروزه به‌عنوان ساختمان اداری میراث فرهنگی مرودشت مورد استفاده قرار می‌گیرد، واقع شده است.

آجرهای لعاب‌دار مورد بحث در این پژوهش شامل این قسمت‌های دیوار شرقی کاخ می‌شوند: گاردها (محافظان)، ابوالهول رو در رو، کاشی با سرهای شیر، کاشی با آذین گل روزت شانزده‌پر، دست در آستین جامه، سری با عمامه، پاهایی در کفش و... که لعاب آجرهای این قسمت‌ها سیلیسی هستند و با لعاب قهوه‌ای، سبز کم‌رنگ و پررنگ، زرد، سفید، خاکستری و مشکی مزین شده‌اند که در این پژوهش آجر لعاب‌های سبز کم‌رنگ و پررنگ و هم‌چنین زرد با هدف شناخت عناصر تشکیل‌دهنده لعاب‌ها در آجرهای لعاب‌دار هخامنشی در تخت جمشید مورد آزمایش و بررسی قرار می‌گیرند و ضرورت انجام این پژوهش، مرمت و حفاظت از این آجرهای لعاب‌دار است.

پرسش‌های پژوهش: در انجام پژوهش پیش‌رو پاسخ‌گویی به پرسش‌های ذیل مدنظر بوده است: ۱- اجزای تشکیل‌دهنده و عمده‌ترین عوامل رنگ‌کننده در لعاب‌های سبز کم‌رنگ و سبز پررنگ و زرد حنایی در این آجرهای لعاب‌دار چیست؟ ۲- اجزای تشکیل‌دهنده بدنه در این آجرهای لعاب‌دار کدام‌اند؟ **روش پژوهش:** برای شناسایی مواد، روش‌های مختلفی وجود دارد که کاربرد هر روش با توجه به نوع مواد تعیین می‌شود. برخی از این روش‌ها عبارتند از: روش XRF، XRD، اتمیک ابزورشن، اسپکتوفوتومتتری، میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی، TGA، DTA، SEM، XRD، روش پیکسی (Pixe) و... که تعدادی از روش‌ها جهت آنالیز و شناسایی ترکیب مواد و تعدادی جهت بررسی رفتار و تغییرات فیزیکی و شیمیایی مواد است.

در این پژوهش چون بیشتر شناخت رنگ‌ها مطرح بوده است، سعی شده بیشتر از روش‌هایی که برای شناخت و آنالیز ترکیب مواد کاربرد دارند استفاده شود؛ چراکه این پژوهش با هدف شناخت عناصر تشکیل‌دهنده لعاب‌ها در آجرهای لعاب‌دار هخامنشی در تخت جمشید انجام پذیرفته و از نوع تجربی-آزمایشگاهی با استناد به مدارک معتبر علمی و انجام مطالعات کتابخانه‌ای و بازدید از محوطه تاریخی تخت جمشید است، که در این راستا با استفاده از روش‌های XRD، SEM، DTA، TGA، XRD بدنه و لعاب‌ها شناسایی شدند و عمده‌ترین عوامل رنگ‌کننده این لعاب‌ها مورد شناسایی قرار گرفت.

از جمله دستگاه‌های به‌کاررفته در این پژوهش عبارتند از:

- میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) Scanning Electron Microscope مدل Philips X130 سازنده کشور هلند در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی اصفهان؛
- دستگاه پراش اشعه ایکس X-Ray Diffraction (XRD) مدل Panalytical X'pert سازنده کشور هلند در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی اصفهان؛
- دستگاه آنالیز حرارتی هم‌زمان Differential thermal analysis و Thermal Gravimetric Analysis (TGA/DTA) مدل Limface سازنده کشور آلمان در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی اصفهان.

پیشینه پژوهش

«ارنست هرتسفلد» باستان‌شناس آلمانی در سال ۱۳۰۲ ه.ش.، به مدت شش هفته موفق به بررسی در تخت جمشید شد؛ این تحقیق به منظور شناسایی و برآورد وضع حفاظتی محوطه انجام شد، و مبنای طرح بزرگ او برای کاوش در تخت جمشید و مرمت آن بود (موسوی، ۱۳۸۱: ۵۱). هرتسفلد گزارش این تحقیق شش هفته‌ای را به همراه عکس‌های قابل توجهی در سال ۱۳۲۸ ه.ش.، به چاپ رسانید (Herzfeld, 1928). ترتیب کارگاه‌های کاوش و انجام خاکبرداری به وسیله هیأت علمی تخت جمشید در بهار سال ۱۳۱۰ ه.ش.، به وسیله ارنست هرتسفلد پی‌ریزی گشت. او در آبان ماه ۱۳۱۱ ه.ش.، پلکان سنگی بزرگ جبهه شرقی آپادانا و پلکان شمالی کاخ سه‌دروازه را که هر دوی آن‌ها دارای نقوش برجسته و حجاری‌های ممتاز هستند، شناسایی کرد. در سال ۱۳۱۲ ه.ش.، مجسمه عظیم گاو که متعلق به پایه‌های سنگی طرفین ایوان ورودی تالار تختگاه بود، ظاهر گشت. در قسمت شرقی همان کاخ، هیأت علمی موفق به کشف پلکان سنگی و تعداد زیادی الواح گلی گردید (اشمیت، ۱۳۴۲). هرتسفلد هرگز گزارش جامعی از کاوش‌های خود در تخت جمشید چاپ نکرد و تنها یادگار او، کتاب ایران در شرق باستان (هرتسفلد، ۱۳۸۱) و مقالات گوناگون اوست. سرانجام در اواخر سال ۱۳۱۳ ه.ش.، هرتسفلد از کار برکنار شد و به جای او «اریک اشمیت» سرپرستی هیأت باستان‌شناسی را به عهده گرفت. در سال ۱۳۱۴ ه.ش.، کاوش در گوشه جنوب شرقی تختگاه تخت جمشید آغاز گردید و در ادامه سایر بخش‌های خزانه تخت جمشید کاوش شد؛ از جمله کشفیات مهم این فصل نقش برجسته، بارعام داریوش اول و صد لوح گلی به خط میخی بود که در اطاق‌های نزدیک نقش مزبور به دست آمد. در سال‌های ۱۳۱۶ الی ۱۳۱۸ ه.ش.، خاکبرداری از تالارهای وسیع خزانه، ایوان صدستون، و جبهه شمالی کاخ آپادانا، قسمت جنوبی آپادانا و جناح غربی حرم‌سرا انجام شد و از جمله آثار بارزش کشف شده در این بخش‌ها، آجرهای لعاب‌دار با نقوش گیاهی، هندسی و کتیبه‌دار بود (اشمیت، ۱۳۴۲). اشمیت نتایج کاوش‌های خود را در سه مجلد به نام‌های تخت جمشید ۱، تخت جمشید ۲ و تخت جمشید ۳ در سال‌های ۱۹۵۳، ۱۹۵۷ و ۱۹۷۰ م. منتشر کرد (Schmidt, 1953; 1957 & 1970).

پس از عزیمت هیأت علمی آمریکایی به آمریکا، وزارت فرهنگ وقت و اداره کل باستان‌شناسی مستقیماً امور کاوش و خاکبرداری آثار به وسیله بنگاه علمی تخت جمشید را زیر نظر گرفت (سامی، ۱۳۴۸: ۳۹۳). در سال ۱۳۱۸ ه.ش.، ابتدا به مدت چهار ماه، «حسین روان‌بد» روی تختگاه تخت جمشید کاوش

کرد. پس از آن از اوایل دی ماه ۱۳۱۸ ه.ش.، تا اواسط تیرماه ۱۳۱۹ ه.ش.، حدود شش ماه «عیسی بهنام» ادامه کار را پیگیری نمود. در اواخر سال ۱۳۱۹ تا اوسط ۱۳۲۱ ه.ش.، «محمود راد» بازرس فنی اداره کل باستان‌شناسی، کاوش تخت جمشید را دنبال نمود (سامی، ۱۳۳۰: ۲۲۰) و پس از آن تا سال ۱۳۴۰ ه.ش.، سرپرستی کاوش‌ها به عهده «علی سامی»، مدیر بنگاه علمی تخت جمشید قرار داشت که در این مدت خاکبرداری از بخش‌های مختلف بنای تخت جمشید انجام گردید (سامی، ۱۳۴۸: ۳۹۴). تأسیس موزه و کتابخانه تخت جمشید و ماکت نمونه تخت جمشید و بنا و آثار، از دیگر فعالیت‌های بنگاه علمی تخت جمشید به سرپرستی علی سامی بود (سامی، ۱۳۴۸: ۳۹۵). پس از وقفه‌ای چندساله در حفاریات و کاوش‌های علمی در تخت جمشید، از سال ۱۳۴۷ تا ۱۳۵۲ ه.ش.، هیأتی از طرف اداره کل باستان‌شناسی و فرهنگ عامه وزارت فرهنگ و هنر به سرپرستی «اکبر تجویدی» به مدت پنج فصل در باروی شرقی تخت جمشید بر بالای کوه رحمت، شمال غربی حیاط سنگی واقع در دشت جنوبی پایین دست تختگاه و قسمت جنوبی تختگاه موسوم به «برزن جنوبی» کاوش کرد. تجویدی گزارش این کاوش‌ها را در سال ۱۳۵۵ ه.ش.، به چاپ رسانید (تجویدی، ۱۳۵۵). بعد از آن در سال ۱۳۸۱ ه.ش.، با تشکیل بنیاد پژوهشی پارسه-پاسارگاد، توجه خاصی به بررسی‌های باستان‌شناختی تختگاه تخت جمشید و حفاظت و مرمت آثار موجود در آن شد. این بنیاد اقدام به تشکیل گروه‌های علمی در تخت جمشید کرد تا فعالیت‌های علمی در شاخه‌های مختلف و مجزا از هم دنبال شود، که در این راستا فعالیت‌های باستان‌شناسی زیادی تا کنون انجام گرفته و یا در حال انجام است.

در زمینه آجرهای به‌کاررفته در آثار باستانی فارس، آقای «سیدمحمد امین‌امامی» و همکاران پژوهشی با عنوان «روش‌های باستان‌سنجی به‌منظور ساختارشناسی آجرهای کشف‌شده از تل آجری تخت جمشید» را در سال ۱۳۹۳ ه.ش.، انجام داده‌اند که در این پژوهش، ساختار تشکیل‌دهنده آجرهای محوطه تل آجری را با کمک آنالیز XRD و XRF مورد بررسی قرار داده و در این بین به لعاب‌هایی که در حین پخت این آجرها تشکیل شده نیز پرداخته‌اند. در مورد عمده‌ترین عوامل رنگ‌کننده در لعاب‌های آجرسفال‌های تخت جمشید و انجام آزمایشاتی در جهت شناسایی عناصر سازنده این لعاب‌ها، تاکنون گزارش یا پژوهشی صورت نگرفته است.

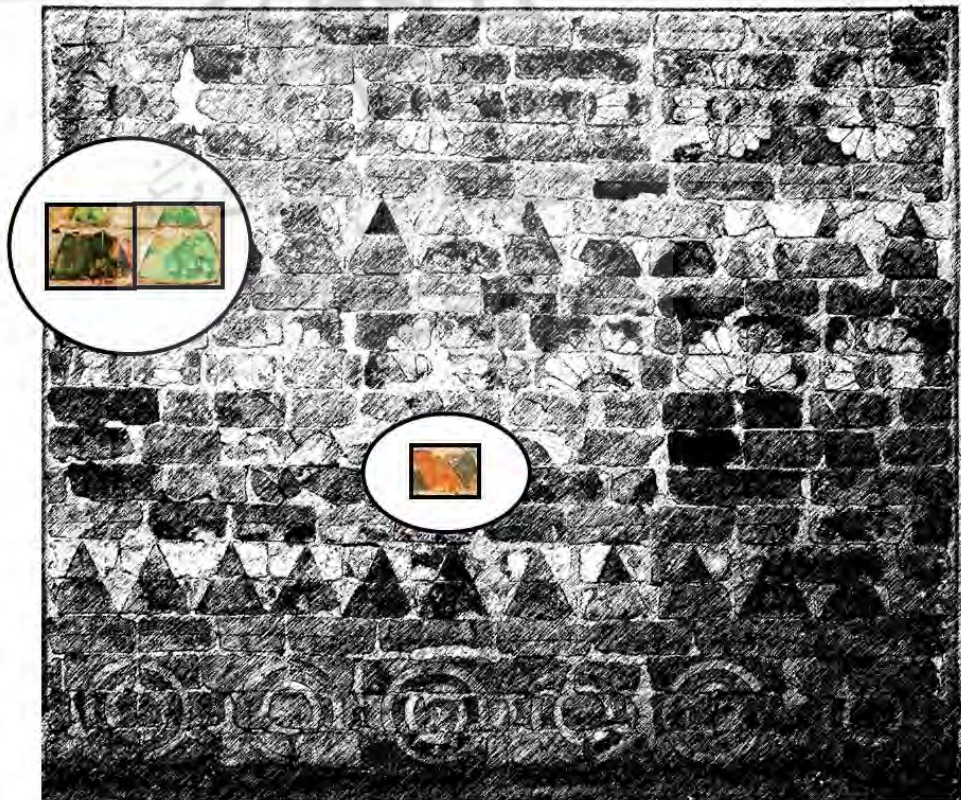
معرفی نمونه مورد بررسی (آجرهای لعاب‌دار)

آجرهای لعاب‌دار و کاشی‌های تخت جمشید در قسمت‌های مختلف این بنا و مخصوصاً در کاخ آپادانا شناسایی شده‌اند و سپس کنار هم قرار گرفته و سپس در دیوار شرقی کاخ اختصاصی زنان در زمان خشایارشا (حرمسرا) نصب شده‌اند. این کاخ در حال حاضر به‌عنوان موزه تخت جمشید و ساختمان اداری میراث‌فرهنگی مرودشت مورد استفاده قرار گرفته است. ظاهر بدنه این نوع آجرها بسیار متخلخل به نظر می‌رسد و به‌رنگ شیری و مانند سنگ چخماق براق هستند. آجرهای لعاب‌دار به رنگ‌های سفید، سبز کم‌رنگ، سبز پررنگ، قهوه‌ای تیره، خاکستری و زرد حنایی رنگ آمیزی و طراحی شده که این طرح‌ها به‌وسیله خطوط سرمه‌ای رنگ (آبی و لاجوردی) از هم تفکیک و قلم‌گیری شده‌اند و ظاهر لعاب نشان می‌دهد که در طول سالیان گذشته به‌طور مداوم در حال تخریب و تغییرات فیزیکی و شیمیایی بوده است؛ و به‌طوری‌که در تصاویر مشاهده می‌کنید سطح لعاب‌ها بسیار زبر، ناصاف و مات است (تصویر ۱).

کیفیت این لعاب‌ها در زمان ساخت (زمان هخامنشیان) ظاهری مناسب‌تر از حال حاضر داشته است؛ اما به دلیل این‌که اکثر آجرهای مورد بررسی در تخت جمشید در فضای باز در معرض باد و باران و عوامل جوی قرار داشته‌اند، با گذشت زمان طولانی لعاب‌ها تخریب شده‌اند. این آجرلعاب‌ها اکثراً در ابعاد نسبتاً بزرگ‌اند که یک طرف آن‌ها لعاب‌دار هستند و با روی هم قرار گرفتن آن‌ها مجموعاً به صورت یک طرح بزرگ رنگی مشاهده می‌شوند (تصویر ۲).



تصویر ۱. طرح کلی آجرهای مورد بررسی (نگارندگان، ۱۳۹۶).

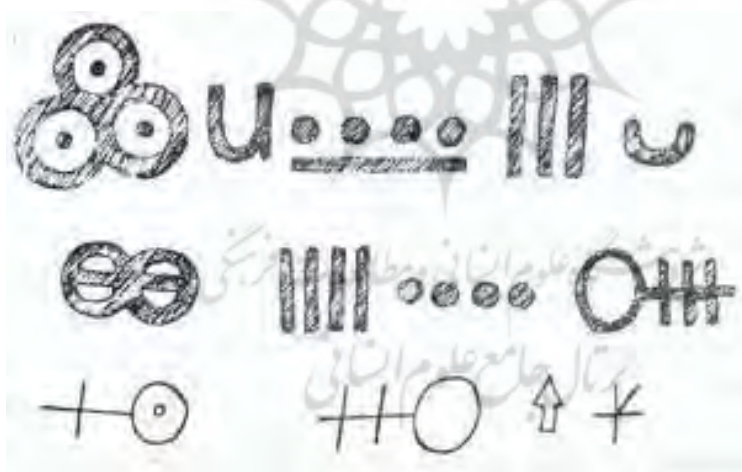


تصویر ۲. نمونه‌های انتخاب‌شده (نگارندگان، ۱۳۹۶).

معمولاً یک طرف از بدنه آجر که لعاب دار نیست، به وسیله لکه های کوچک لعاب رنگی نشانه گذاری شده اند که این لکه ها و علامت ها را می توان هم به عنوان امضاء سازنده قطعه تلقی نمود و هم می تواند نشانه ای جهت ترتیب قرار دادن قطعات در کنار هم باشد که البته احتمال مورد اول بیشتر است (هرتسفلد، ۱۳۸۱: ۲۴۳)، (تصاویر ۳ و ۴).



تصویر ۳. لعاب رنگی نشانه گذاری (نگارندگان، ۱۳۹۶).



تصویر ۴. نمونه ای از نشانه گذاری بر روی آجرها (نگارندگان، ۱۳۹۶).

معرفی نمونه ها

آجر که در واقع از خانواده سرامیک ها به حساب می آید، از سیلیس SiO_2 (معمولاً بین ۵۵ تا ۶۵ درصد وزنی) و آلومینا (۱۰ تا ۱۵ درصد وزنی) و ۲۵ درصد از سایر تشکیل دهنده ها ترکیب شده است. آجرهای رُسی با قراردادن رُس ها در قالب مناسب و پختن آن ها در کوره ساخته می شوند. آجرها با توجه به مواد اولیه مورد استفاده و روش تولید، دارای خصوصیات متفاوتی هستند (ویسه، ۱۳۷۳: ۳).

نمونه های مورد پژوهش بسیار ناچیز بودند که بعد از نمونه برداری به صورت لایه های پولکی شکل و جهت آماده سازی آزمون به صورت پودر درآمدند. لازم به توضیح است که به علت این که جداسازی بسیار دقیق لایه رنگ از روی آجرهای لعاب دار نصب شده در تخت جمشید امکان پذیر نبود، لذا درصدی

از بدنه زیر رنگ همراه با لعاب بوده است و به دلیل سیلیسی بودن بدنه، احتمالاً درصدی از سیلیس شناسایی شده در لعاب‌ها مربوط به بدنه زیر رنگ بوده است (جدول ۱).

جدول ۱. معرفی نمونه‌ها (نگارندگان، ۱۳۹۶).

کد	نمونه	تصویر نمونه‌ها	تعداد
۱	بدنه		۵
۲	لعاب سبز پررنگ		۳
۳	لعاب سبز کم‌رنگ		۳
۴	لعاب زرد		۳

معرفی آزمون‌ها

- آنالیز شیمی‌تر

در این روش مواد را به صورت پودر درآورده و ذوب قلیایی نموده و در اسیدهای مختلف حل کرده و در بعضی مواقع به روش‌های تیتراسیون آنالیز کیفی و هم‌چنین روش‌های دیگر آنالیز کمی انجام می‌دهند. این روش در صورتی که از خطاهای آزمایش‌گر صرف‌نظر شود، روش بسیار مطمئنی است.

- آنالیز حرارتی TGA-DTA

یکی از روش‌های پُرکاربرد در آنالیز مواد، آنالیز حرارتی TGA-DTA است. آنالیز حرارتی TGA-DTA تغییرات موجود در نمونه بر اثر حرارت را اندازه‌گیری کرده و به صورت نمودار در اختیار کاربر قرار می‌دهد. این آزمایش امکان بررسی نمونه را تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد فراهم می‌کند.

در صورت نیاز به بررسی نمونه‌های توده‌ای سفت، وزن آن‌ها تا ۱۰ میلی‌گرم و اندازه آن‌ها تا ۲ میلی‌متر قابل آنالیز با دستگاه TGA-DTA است. یکی از روش‌های آنالیز حرارتی TGA یا وزن‌سنجی حرارتی است که تغییرات جرم را به عنوان تابعی از دما و زمان نشان می‌دهد. در این روش افت وزن ماده در اثر تجزیه یا از دست دادن آب بررسی شده و افزایش وزن نیز به دلیل جذب یا اکسید شدن رخ داده و اندازه‌گیری می‌شود. آنالیز DTA یا آنالیز حرارتی افتراقی، روشی برای اندازه‌گیری اختلاف دمای بین نمونه و مرجع در شرایط جریان گرمایی ثابت است. در این آنالیز، جریان گرما در طول انجام آزمایش برای نمونه و مرجع بدون تغییر است. با توجه به این‌که در این روش تفاوت‌های دما اندازه‌گیری می‌شود، یک روشی کیفی محسوب می‌شود.

اصول آنالیز DTA به این صورت است که دو ترموکوپل تعبیه شده در دستگاه، تفاوت گرمای بین نمونه و ماده مرجع را که به صورت متقارن در کوره قرار گرفتند، اندازه‌گیری می‌کنند (میسر و ای‌تار، ۱۳۹۰: ۸۸).

- روش XRD

اشعه رونتگنی (ایکس) در سال ۱۸۹۵ م. توسط «ویلهلم کنراد رونتگن» (Wilhelm Conrad Roentgen) کشف و توسط وی، «اشعه ایکس» نامیده شد. اصطلاح اشعه ایکس (X-ray) در بسیاری

از کشورها متداول تر است. تشعشعات رونتگنی، بخشی از طیف الکترومغناطیسی را تشکیل می‌دهد که دارای طول موج حدود ۸-۱۰ تا ۱۲-۱۰ متر است (کریشنر، ۱۳۷۰:۱).

- روش SEM

آنالیز SEM یا میکروسکوپ الکترونی روبشی از اعضاء خانواده میکروسکوپ‌های الکترونی است که جهت تصویربرداری از نمونه و تعیین ویژگی‌های سطحی و مورفولوژی آن استفاده می‌شود. درحقیقت در این روش ثبت تصویر توسط الکترون‌ها صورت گرفته که قدرت بزرگ‌نمایی آن بسیار بیشتر از میکروسکوپ‌های نوری است و تا چندصد هزار برابر می‌توانند تصویربرداری کنند. دستگاه میکروسکوپ الکترونی که جهت شناسایی مواد به‌کار می‌رود، معمولاً به دو صورت SEM و TEM، و عملکرد آن‌ها یکی براساس بازگشت الکترون‌ها از سطح نمونه و دیگری براساس عبور الکترون‌ها از نمونه است.

اگر یک دسته اشعه الکترونی با ولتاژ بالا مثلاً ۲۰ kw به نمونه برخورد کند، بعد از برخورد، یک سری از الکترون‌ها با یکدیگر تداخل می‌کنند و از نمونه خارج می‌شوند که انرژی کمی را از دست داده‌اند. این نوع الکترون‌ها به الکترون‌های برگشتی معروف هستند. علاوه بر این، یک سری از الکترون‌ها نیز در اثر برخورد اشعه با نمونه از نمونه جدا شده و انرژی کمی دارند که باعث ظاهر شدن پستی و بلندی سطح نمونه می‌گردند. با توجه به این‌که مواد مختلف دارای سطوح انرژی متفاوت هستند، در نتیجه گراف‌هایی که در اثر برخورد این الکترون‌ها به نمونه به دست می‌آید، متفاوت و مختص به همان نمونه خاص است (میسلر و ای‌تار، ۱۳۹۰:۸۹).

آزمون‌های انجام شده بر روی نمونه‌ها

بر روی دو قطعه کوچک از بدنه آزمون‌های حجم نمونه، وزن مخصوص ظاهری و وزن حجمی به روش غوطه‌وری انجام شد، که نتایج محاسبات در زیر مشخص شده است (جدول ۲).

جدول ۲. نتایج آزمون‌های حجم بدنه (نگارندگان، ۱۳۹۶).

وزن حجمی	وزن مخصوص ظاهری	حجم نمونه	کد نمونه
۱/۳۴	۱/۴۷	۱۴/۷	۱A
۱/۱۶	۱/۲۷	۷/۹۰	1 B

- آزمون آنالیز شیمی تر بر روی بدنه (نمونه ۱)

علاوه بر آزمون‌های بالا (حجم نمونه، وزن مخصوص ظاهری و وزن حجمی به روش غوطه‌وری) آنالیز شیمیایی به روش تر نیز بر روی نمونه‌های مورد بررسی انجام شد که در کل مشخص شد حدود ۷۹ درصد SiO_2 (سیلیس) و ۱۶ درصد Ca_2O_3 (اکسید کلسیم) در بدنه وجود دارد و آنالیز به دست آمده از بدنه به صورت زیر نشان داده شده است (جدول ۳).

جدول ۳. نتایج آنالیز شیمیایی به روش تر بر روی بدنه (نگارندگان، ۱۳۹۶).

اکسید	SiO_2	R_2O_3	Al_2O_3	Fe_2O_3	Ca_2O_3	Mgo	L.O.I
درصد	۷۹			۱/۵۰	۱۶	ناچیز	۳

با توجه به این‌که ظاهر بدنه شبیه دانه‌های ریز گوشه‌داری است که از گوشه‌های تیز به هم چسبیده‌اند (مانند شن‌ریزه‌های نوک‌تیزی که در کنار هم چسبیده‌اند و فضای خالی زیادی بین آن‌ها وجود دارد) و با توجه به آنالیز شیمی ترانجام شده، می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود - ذرات بسیار ریز سیلیس احتمالاً با مقداری آهک مخلوط شده و حرارت داده و پخت شده‌اند و آهک به‌عنوان کمک ذوب عمل کرده و باعث به هم چسبیدن ذرات سیلیس شده است. - ممکن است ترکیب بدنه به صورت یک ترکیب آماده در طبیعت (شن‌ریزه) وجود داشته و بدون اضافه کردن مواد دیگر پخت شده باشند.

- ممکن است بدنه در دمایی پخته شده است که مقدار ۱۶ درصد اکسید کلسیم برای یک ترکیب با درصد سیلیس بالا به‌عنوان کمک ذوب کافی نبوده است که ناچار بایستی دمای خیلی زیادی مهیا می‌کرده‌اند^۲، مگر این‌که در یک دمای پایین علاوه بر اکسید کلسیم، مواد دیگر نیز به‌عنوان کمک ذوب اضافه شده باشد و نهایتاً در هنگام پخت این مواد با هم ترکیب شده و باعث تغییر فاز شده باشند.

- آزمون XRD و AST (DTA, TGA) بر روی بدنه (نمونه ۱)

بر روی نمونه بدنه، علاوه بر آنالیز شیمی تر آزمون XRD و آزمون DTA (آنالیز حرارتی) و آزمون TGA (تغییر وزن) انجام شده است (جدول ۴).

جدول ۴. نتیجه آزمون XRD بدنه (نگارندگان، ۱۳۹۶).

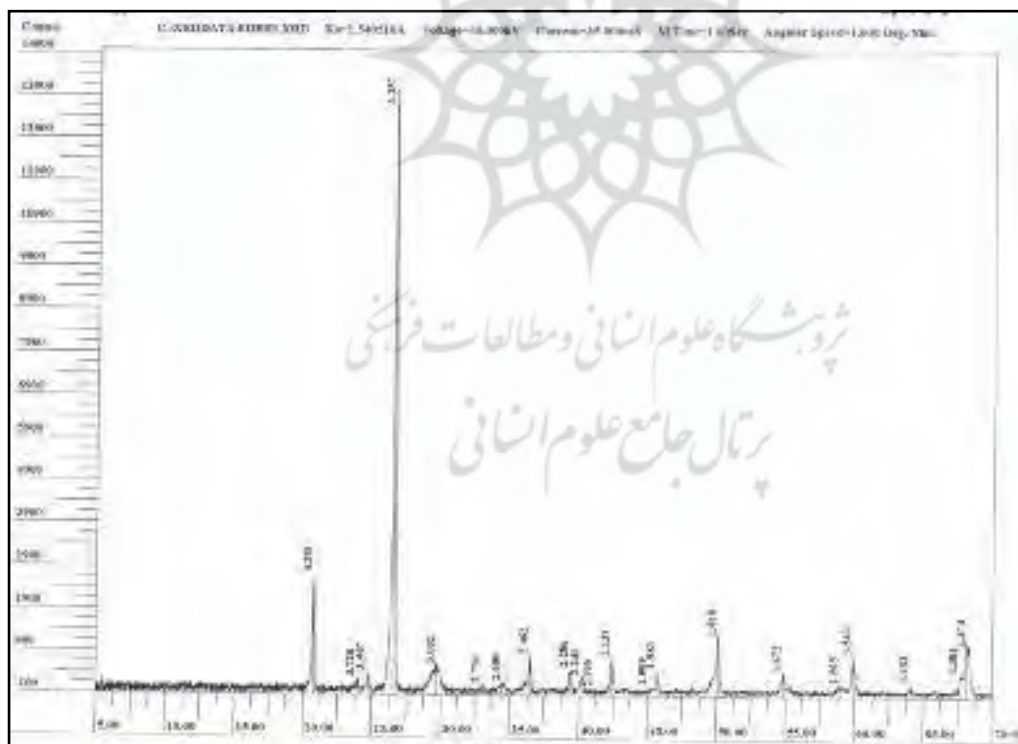
نتیجه	کد نمونه	کد آزمایش
Sio ₂ , Quartz, 33-1161, main Phase Cao, 28-775, low crystallinty phase	۱	ESHDE-S

33-1161		JCPDS-ICDD		PDF-2 Sets 1-42 database		Quality: *	
d Å	Int.	h k l	d Å	Int.	h k l	d Å	Int.
4.257	22	1 0 0	4.257	22	1 0 0	4.257	22
3.342	100	1 0 1	3.342	100	1 0 1	3.342	100
2.457	8	1 1 0	2.457	8	1 1 0	2.457	8
2.282	8	1 0 2	2.282	8	1 0 2	2.282	8
2.237	4	1 1 1	2.237	4	1 1 1	2.237	4
Rad: CuKα Lambda: 1.540598 Filter: Mono. d-sp: Diff. Cutoff: Int: Diffractometer I/Icor: 3.6 Ref: Natl. Bur. Stand. (U.S.) Monogr. 25, 18 61 (1981)							
2.127	6	2 0 0	2.127	6	2 0 0	2.127	6
1.9792	4	2 0 1	1.9792	4	2 0 1	1.9792	4
1.8179	14	1 1 2	1.8179	14	1 1 2	1.8179	14
1.8021	<1	0 0 3	1.8021	<1	0 0 3	1.8021	<1
1.6719	4	2 0 2	1.6719	4	2 0 2	1.6719	4
Sys: Hexagonal S.G.: P3221 (154) a: 4.9133(2) b: c: 5.4053(4) A: C: 1.1001 A: B: C: Z: 3 mp:							
1.6591	2	1 0 3	1.6591	2	1 0 3	1.6591	2
1.6082	<1	2 1 0	1.6082	<1	2 1 0	1.6082	<1
1.5418	9	2 1 1	1.5418	9	2 1 1	1.5418	9
1.4536	1	1 1 3	1.4536	1	1 1 3	1.4536	1
1.4189	<1	3 0 0	1.4189	<1	3 0 0	1.4189	<1
Dx: 2.65 Dm: 2.66 SS/FOM: F30=77(.013,31) sa: nuB: 1.544, sy: 1.553, Sign: + 2V Ref: Swanson, Fuyat, Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, 3 24 (1954)							
1.3820	6	2 1 2	1.3820	6	2 1 2	1.3820	6
1.3752	7	2 0 3	1.3752	7	2 0 3	1.3752	7
1.3718	8	3 0 1	1.3718	8	3 0 1	1.3718	8
1.2880	2	1 0 4	1.2880	2	1 0 4	1.2880	2
1.2558	2	3 0 2	1.2558	2	3 0 2	1.2558	2
Color: Colorless Pattern at 25 C. Sample from the Glass Section at NBS, Gaithersburg, Maryland, USA, ground single-crystals of optical quality. Pattern reviewed by J. Holzer and G. McCarthy, North Dakota State University, Fargo, North Dakota, USA, JCPDS Grant-In-Aid Report: (1990). Agrees well with experimental and calculated patterns. O2Si type. Quartz group. Also called: millica. Silicon used an internal standard. PSC: hPS. To replace 5-490. Plus 6 reflections to 0.9089. Wwt: 60.08. Volume[CD]: 113.00.							
1.2285	1	2 2 0	1.2285	1	2 2 0	1.2285	1
1.1999	2	2 1 3	1.1999	2	2 1 3	1.1999	2
1.1978	1	2 2 1	1.1978	1	2 2 1	1.1978	1
1.1843	3	1 1 4	1.1843	3	1 1 4	1.1843	3
1.1804	3	3 1 0	1.1804	3	3 1 0	1.1804	3
d Å Int. h k l d Å Int. h k l d Å Int. h k l 1.1532 1 3 1 1 1.0476 1 1 0 5 0.9873 1 3 1 3 1.1405 <1 2 0 4 1.0438 <1 4 0 1 0.9783 <1 3 0 4 1.1143 <1 3 0 3 1.0347 <1 2 1 4 0.9762 1 3 2 0 1.0813 2 3 1 2 1.0150 1 2 2 3 0.9636 <1 2 0 5 1.0635 <1 4 0 0 0.9898 1 4 0 2							
Strong lines: 3.34/X 4.26/2 1.82/1 1.54/1 2.46/1 2.28/1 1.37/1 1.38/1							

شکل ۱. کارت شناسایی ASTM مربوط به SiO₂ (نگارندگان، ۱۳۹۶).

28-775 JCPDS-ICDD-ICDD PDF-2 Sets 1-42 database		Quality:	
		d Å	Int.
CaO			
Calcium Oxide		3.68	40
		3.33	100
		3.00	100
		2.52	20
		2.28	60
Rad: CuKα	Lambda: 1.5418	Filter: Ni	d-sp:
Cutoff:	Int: Diffractometer	I/Icor:	
Ref: Kovgan, Nakhodnova, Russ. J. Inorg. Chem. (Engl. Transl.), 18 208 (1973)			2.09 40
			1.91 60
			1.88 60
Sys:	S.G.:		
a:	b:	c:	A:
A:	B:	C:	Z:
Ref:			mp:
Dx:	Dm:	SS/POM:	
ea:	nwb:	ey:	Sign:
Ref:			ZV:
Mwt: 56.08.			
Strong lines: 3.33/X 3.00/X 2.28/6 1.91/6 1.88/6 3.68/4 2.09/4 2.52/2			

شکل ۲. کارت شناسایی ASTM مربوط به Cao (نگارندگان، ۱۳۹۶).



نمودار ۱. آزمون XRD بدنه (نگارندگان، ۱۳۹۶).

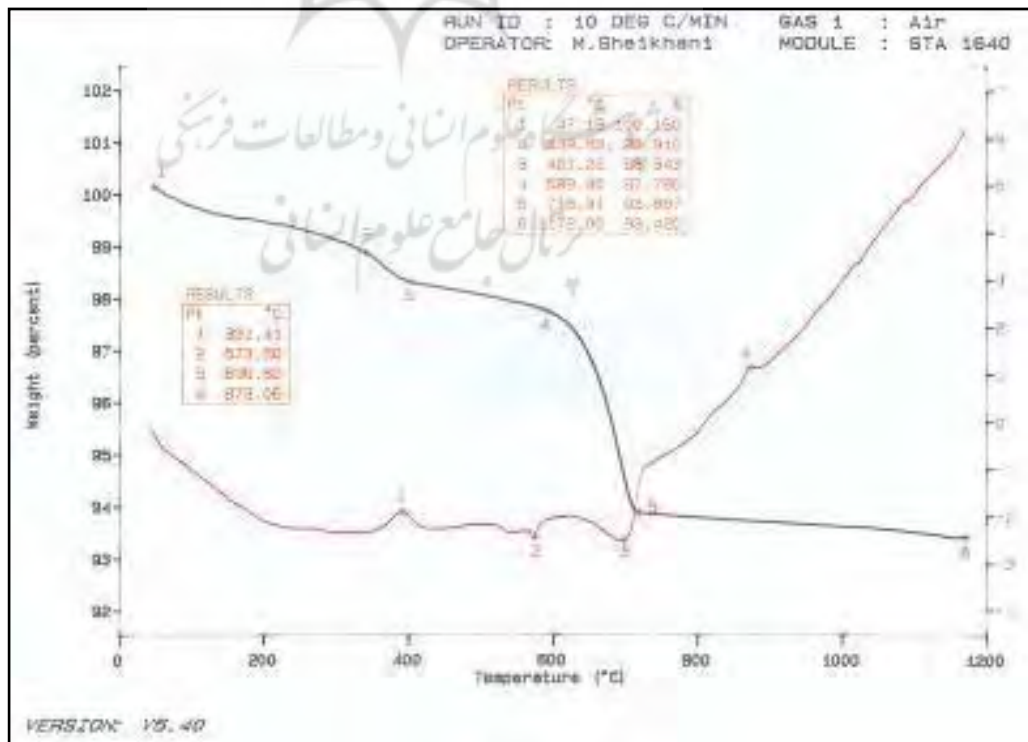
نتیجه گیری از آزمون های XRD, DTA و TGA (نمونه ۱)

با مقایسه نتایج حاصل از آزمون ها (جدول ۲ و نمودارهای ۱ و ۲) با آزمون آنالیز شیمی تر علاوه بر مواردی که در بحث آنالیز شیمی تر بدنه بیان شد، نکات پیش رو نیز به مطالب بیان شده اضافه می گردد.

File Name : C:\XRDDATA\ESHDE-S.XRD
 Lambda : 1.5405
 Peak Lines In Graph Bounderies 5.00 to 70.00 Degree

No.	Two Theta	d	I/I0
1	20.73	4.281	19
2	26.53	3.357	100
3	36.43	2.464	10
4	39.38	2.286	8
5	42.38	2.131	6
6	50.08	1.820	15
7	59.93	1.542	9
8	23.88	3.723	2
9	29.35	3.040	4
10	40.22	2.240	3
11	45.73	1.982	4
12	54.83	1.673	4
13	64.02	1.453	2
14	67.70	1.383	6
15	68.23	1.373	7
16	5.83	15.146	1
17	55.33	1.659	1
18	13.32	6.641	0
19	65.77	1.419	1
20	48.57	1.873	0

شکل ۳. اطلاعات متعلق به گراف XRD بدنه (نگارندگان، ۱۳۹۶).









نمودار ۲. نمودار STA بدنه (TGA و DTA)، (نگارندگان، ۱۳۹۶).

- جدول ۲ و نمودار ۱ XRD، سیلیسی بودن بدنه فوق را تأیید می‌نماید.
- در آزمون شیمی تر مشاهده شد اکسید کلسیم در ترکیب احتمالاً نقش کمک ذوب داشته است و با توجه به نمودار ۲ TGA می‌توان گفت که احتمالاً کربنات کلسیم به اکسید کلسیم تبدیل شده است و کاهش وزن نیز حاصل این تبدیل بوده که به وضوح در نمودار TGA در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد رؤیت می‌شود.

- نمودار ۲ نشان می‌دهد که ۱۶٪ اکسید کلسیم موجود در ترکیب برای انجام عمل پخت تقریباً کافی بوده است؛ به طوری که یک عملیات پخت در دمای تقریبی کمتر از ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد بر روی بدنه انجام و باعث شده بدنه به استحکام نسبی برسد، که اگرچه متخلخل است، ولی ظاهر آن نشان می‌دهد که دانه‌های سیلیسی تماماً در گوشه‌ها ذوب و به هم متصل شده‌اند. چنانچه گفته شد، لعاب‌های سبز کم‌رنگ و پررنگ و لعاب زرد حنایی از جمله لعاب‌های به‌کاررفته در آجرهای لعاب‌دار تخت جمشید هستند که در اینجا مورد بررسی قرار می‌دهیم.

جدول ۵. تطبیق لعاب نمونه‌های مورد مطالعه با جدول MUNSELL (MUNSELL, 1988).

نمونه‌ها	نمونه لعاب‌ها	رنگ لعاب و کد آن براساس جدول MUNSELL	رنگ‌های تطبیق داده شده جدول MUNSELL
سبز کم‌رنگ		10GY4/10	
سبز پررنگ		10GY1/2	
زرد حنایی		5Y8/14	

اکسیدهای رنگ‌کننده سبز

مخلوطی از اکسید مس و لعاب سربی، نسبت به ترکیب شیمیایی لعاب، می‌تواند انواع رنگ‌های سبز را به وجود آورد. رنگ آبی ایرانی را می‌توان فقط توسط مخلوطی از این اکسید و لعاب قلیایی قوی بدون سرب تولید کرد. اگر به یک لعاب مسی سبزرنگ مقداری اسید بوریک اضافه کنند، رنگ این لعاب فیروزه‌ای می‌شود و با اضافه کردن ۸ تا ۱۰ درصد قلع به همین لعاب، شدت رنگ فیروزه‌ای بیشتر ظاهر می‌شود (Pampuch, 1976: 78).

اکسید کروم نیز لعاب را معمولاً به رنگ سبز درمی‌آورد و حتی در دماهای زیاد، این رنگ پایدار است. با افزایش مقدار اکسید روی در این نوع لعاب‌ها، اثر رنگ‌بری داشته و رنگ سبز را به رنگ خاکستری مایل به سبز چرک‌تاب و نهایتاً به قهوه‌ای تغییر می‌دهد؛ بنابراین برای تولید رنگ‌های کرومی سبز، مواد لعاب باید فاقد اکسید روی باشد (Walter, 1955: 107).

لعاب سبزرنگ آجر لعاب‌های تخت جمشید

این لعاب بعد از نمونه‌برداری به صورت لایه‌های پولکی شکل بود که جهت آماده‌سازی آزمون به صورت پودر درآمد. لازم به توضیح است که به علت این‌که جداسازی بسیار دقیق لایه رنگ از روی آجرهای لعاب‌دار نصب‌شده در تخت جمشید امکان‌پذیر نبود؛ لذا درصدی از بدنه زیر رنگ همراه با لعاب بوده

است و به دلیل سیلیسی بودن بدنه، احتمالاً درصدی از سیلیس شناسایی شده در لعاب‌ها مربوط به بدنه زیر رنگ بوده است (تصویر ۵).



تصویر ۵. خشت با لعاب سبز کم‌رنگ و سبز پررنگ مورد بررسی (نگارندگان، ۱۳۹۶).

نمونه مورد بررسی (نمونه دو سبز پررنگ) ابتدا تحت آزمون XRD قرار گرفت (جدول ۶ و نمودار ۳ آزمون XRD). هم‌چنین رنگ سبز کم‌رنگ تحت آزمون XRD و SEM قرار گرفت که نتایج حاصل در (جدول ۷ و نمودار ۴ آزمون XRD و نمودار ۵ آزمون SEM) نشان داده شده است.

بررسی نتایج لعاب سبزرنگ

جدول ۶ و نمودار ۳ (XRD) در رنگ سبز پررنگ (نمونه ۲) وجود دو فاز کوارتز SiO_2 و «هیدین برگیت»^۳ $\text{Ca}(\text{Fe},\text{Mn})\text{Si}_2\text{O}_6$ را نشان می‌دهد و هم‌چنین جدول ۶ و نمودار ۴ (XRD) بر روی سبز کم‌رنگ (نمونه ۲) همان دو فازی که در سبز پررنگ موجود بود را شناسایی می‌کند. کوارتز SiO_2 و هیدین برگیت $\text{Ca}(\text{Fe},\text{Mn})\text{Si}_2\text{O}_6$ و در واقع می‌توان بیان کرد که فاز اصلی رنگ سبز پررنگ و سبز کم‌رنگ هر دو یکی است و احتمالاً درصد مواد رنگ‌کننده موجود در ترکیب با هم متفاوت است و احياناً در لعاب سبز پررنگ (نمونه ۲) عامل رنگ‌کننده درصدی بیشتر از لعاب سبز کم‌رنگ، یا ممکن است در نمونه ۲ سبز پررنگ علاوه بر عامل رنگ‌کننده سبز وجود یا عدم وجود عنصری دیگر می‌تواند باعث کاهش یا افزایش خاصیت رنگی سبز شده باشد.

علاوه بر مقایسه نتایج آزمون XRD بر روی رنگ‌های سبز پررنگ و سبز کم‌رنگ با توجه به نمودار ۵ که نتیجه آزمون SEM سبز کم‌رنگ است، بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که مس در لعاب‌های قلیایی باعث ایجاد رنگ آبی و در لعاب‌های سربی باعث ایجاد رنگ سبز می‌شود (حدوداً زیر ۱٪ رنگ سبز کم‌رنگ حاصل می‌شود و بین ۲ تا ۳ درصد رنگ سبز پررنگ را ایجاد می‌نماید).

جدول ۶. نتیجه آزمون XRD سبز پررنگ (نگارندگان، ۱۳۹۶).

نتیجه	کد نمونه	کد آزمایش
Quartz, SiO_2 33-1161, main PPhase + $\text{Ca}(\text{Fe},\text{Mn})\text{Si}_2\text{O}_6$ 41-1372 Hedenbergite	2	EDHE1

باتوجه به نمودار ۵ آزمون SEM وجود Pb (سرب) در لعاب سبز پررنگ در حد قابل ملاحظه‌ای رؤیت می‌شود و خود دلیل بر سربی بودن لعاب این نمونه است. در نمودار ۵ آزمون SEM وجود عنصر عمده‌ای

جدول ۷. نتیجه آزمون XRD سبز کم رنگ (نگارندگان، ۱۳۹۶).

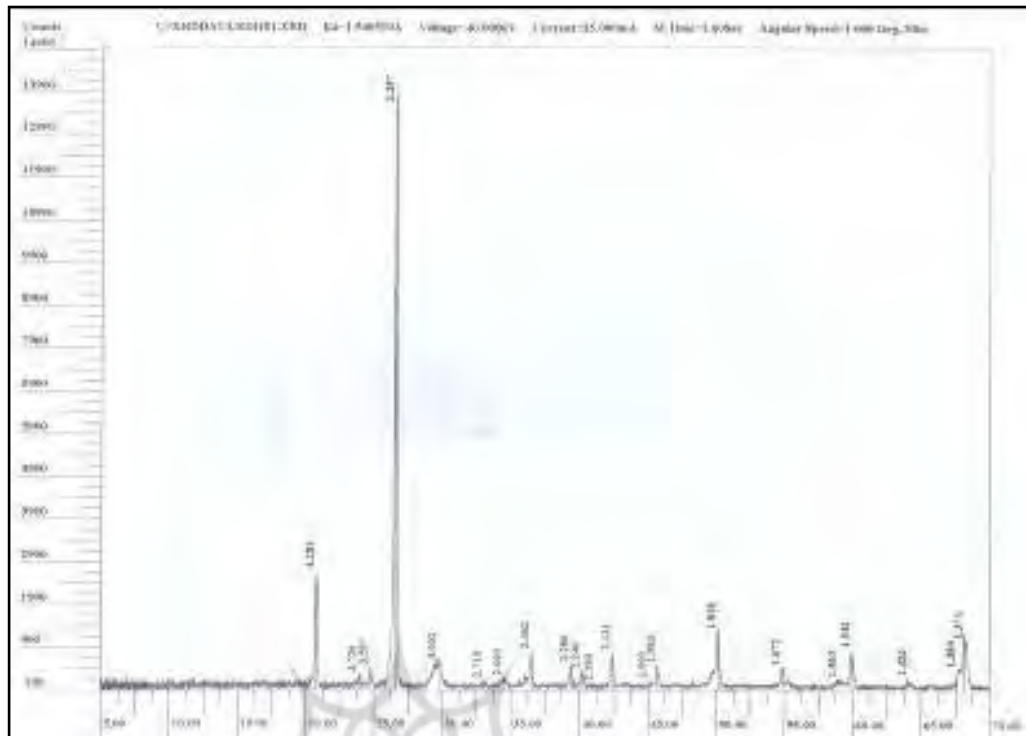
نتیجه	کد نمونه	کد آزمایش
Quartz, SiO ₂ 33-1161, main PPhase + Ca(Fe, Mn) Si ₂ O ₆ 41-1372 Hedenbergite	3	EDHE2

41-1372 JCPDS-ICDD ICDD.		PDF-2 Sets 1-42 database		Quality: *	
d Å	Int.	h k l	d Å	Int.	h k l
6.57	25	1 1 0	1.5122	8	2 4 2, -1 3 3
4.77	20	2 0 0	1.5066	7	-4 4 2
4.527	12	0 2 0	1.4984	5	6 2 0, -4 2 3
3.379	4	0 2 1	1.4553	4	-6 2 2
3.280	30	2 2 0	1.4500	12	3 5 1, -5 1 3
Ca(Fe, Mn)Si ₂ O ₆ 2 6 Calcium Iron Manganese Silicate Hedenbergite, manganooan Rad: CuKα Lambda: 1.54178 Filter: Mono. d-sp: Diff. Cutoff: 17.7 Int: Diffractometer I/ cor: Ref: Keller, L., Arizona State University, Tempe, Arizona, USA, ICDD Grant-in-Aid, (1988)					
Sys: Monoclinic S.G.: C2/c (15) a: 9.865(3) b: 9.047(3) c: 5.259(1) A: 1.0904 C: 0.5813 B: 104.97(2) C: Z: 4 mp: Ref: Ibid.					
Dx: 3.63 Dm: 3.55 SS/FOM: F30=88(.010,35)					
ea: 1.716, nwb: 1.723, ey: 1.741, Sign: +, 2θ: 47 deg. Ref: Deer, W., Howie, R., Zussman, J., Rock Forming Minerals, 2A 217 (1978)					
Color: Dark green Specimen from Iron Cap mine, Graham County, Arizona, USA. Microprobe analysis, average of fourteen (wt.%): SiO ₂ 49.18, Al ₂ O ₃ 0.22, FeO 16.1, MnO 10.5, MgO 1.81, CaO 22.76. Ca _{0.99} (Fe _{0.54} Mn _{0.36} Mg _{0.11})(Si _{1.99} Al _{0.01})O ₆ . Optical data on specimen from western Karamazar, USSR. Pyroxene group, clinopyroxene subgroup. Silicon used as internal standard. PSC: mC40. To replace 24-204 and 38-415. Structure reference: Ito, Y., Matsunoto, T., Yoshiasa, A., Mineral. J., 11 84 (1982). Mwt: 247.73. Volume[CD]: 453.43.					
2.262	4	0 4 0	1.4476	16	5 3 1
2.240	9	1 1 2	1.4455	14	0 6 1
2.224	5	-3 1 2			
2.216	0	0 2 2			
2.208	4	-2 2 2			
2.187	10	3 3 0			
2.152	20	-3 3 1			
2.127	10	-4 2 0			
2.108	4	4 2 0			
2.066	8	0 4 1			
1.890	6	3 3 1	1.6275	9	-2 2 3
1.865	5	1 0 0	1.6234	7	5 1 1
1.855	3	2 2 2	1.6117	4	5 3 0
1.842	4	-4 2 2	1.5874	10	6 0 0
1.834	4	1 3 2	1.5730	8	1 1 3, 3 5 0
1.827	3	2 4 1, -3 3 2	1.5498	5	4 0 2
1.806	2	4 1 1	1.5432	6	-6 2 1
1.7776	20	4 2 0	1.5370	7	-6 0 2
1.7403	3	3 2 2	1.5287	3	-6 3 2
1.7036	3	-1 5 1	1.5188	4	-3 3 2
Strong lines: 3.01/8 3.00/9 2.56/5 3.28/3 2.54/3 6.57/3 2.59/3 4.77/2					

شکل ۴. کارت شناسایی ASTM مربوط به Hedenbergite (نگارندگان، ۱۳۹۶).

که می‌توان به عنوان عامل رنگ‌کننده در این لعاب رنگی به آن اشاره کرد، Cu (مس) است که تقریباً میزان آن نسبت به عناصر دیگر (به غیر از Ca و Si) قابل ملاحظه‌تر است؛ بنابراین به دلیل سربی بودن لعاب، وجود مس در این لعاب سربی باعث ایجاد رنگ سبز می‌شود.

وجود Ca (کلسیم) در لعاب‌ها (به خصوص لعاب‌های سربی) باعث ایجاد رنگ سفید و تقریباً باعث آپیک شدن رنگ لعاب می‌گردد و می‌توان گفت که یکی از عوامل پررنگ بودن یا کم‌رنگ بودن نمونه‌های ۲ و ۳ می‌تواند به علت تفاوت میزان درصد CaO (اکسید کلسیم) موجود باشد. در صورت صحت این موضوع می‌توان گفت که در سبز کم‌رنگ (نمونه ۲) درصد CaO (اکسید کلسیم) بیشتر بوده و احتمال قوی‌تر این است که درصد عامل رنگ‌زای اصلی Cu (مس) در لعاب سبز پررنگ (نمونه ۲)

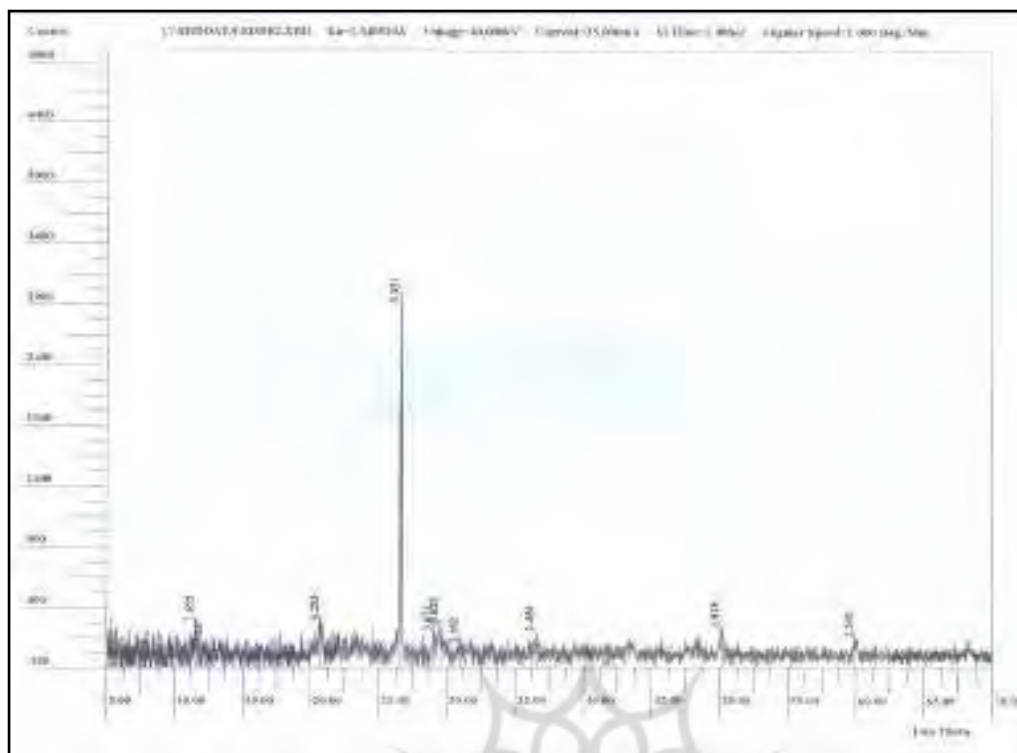


نمودار ۳. آزمون XRD سبزی پرنگ (نگارندگان، ۱۳۹۶).

File Name : C:\XRDDATA\EDHE1.XRD
 Lambda : 1.5405
 Peak Lines In Graph Boundaries 5.00 to 70.00 Degree

No.	Two Theta	d	I/I0
1	20.73	4.281	19
2	26.53	3.357	100
3	36.47	2.462	6
4	42.38	2.131	5
5	50.12	1.818	9
6	59.92	1.542	6
7	68.18	1.374	8
8	23.90	3.720	2
9	24.73	3.597	3
10	29.73	3.002	4
11	39.38	2.286	3
12	40.22	2.240	2
13	41.18	2.190	0
14	45.72	1.983	3
15	54.85	1.672	3
16	58.98	1.565	1
17	33.03	2.710	1
18	34.47	2.600	1
19	64.05	1.453	1
20	67.63	1.384	3
21	45.08	2.009	1

شکل ۵. متعلق به گراف XRD سبزی پرنگ (نگارندگان، ۱۳۹۶).



نمودار ۴. آزمون XRD سبز کم رنگ (نگارندگان، ۱۳۹۶).

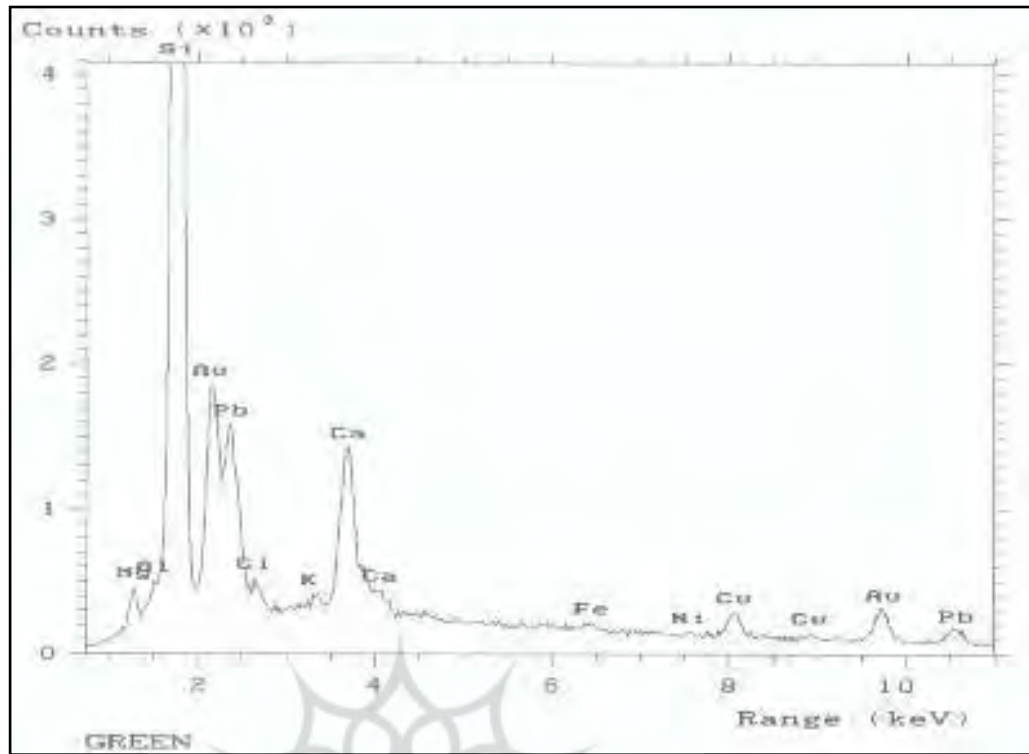
```
File Name :C:\XRDDATA\EDHE2.XRD
Lambda : 1.5405
Peak Lines In Graph Bounderies 5.00 to 70.00 Degree :
```

No.	Two Theta	d	I/I0
1	11.55	7.655	8
2	20.72	4.283	9
3	26.58	3.351	100
4	50.12	1.818	7
5	29.05	3.071	6
6	31.00	2.882	2
7	36.55	2.456	6
8	59.98	1.541	4
9	12.22	7.237	2
10	29.50	3.025	8

شکل ۶. متعلق به گراف XRD سبز کم رنگ (نگارندگان، ۱۳۹۶).

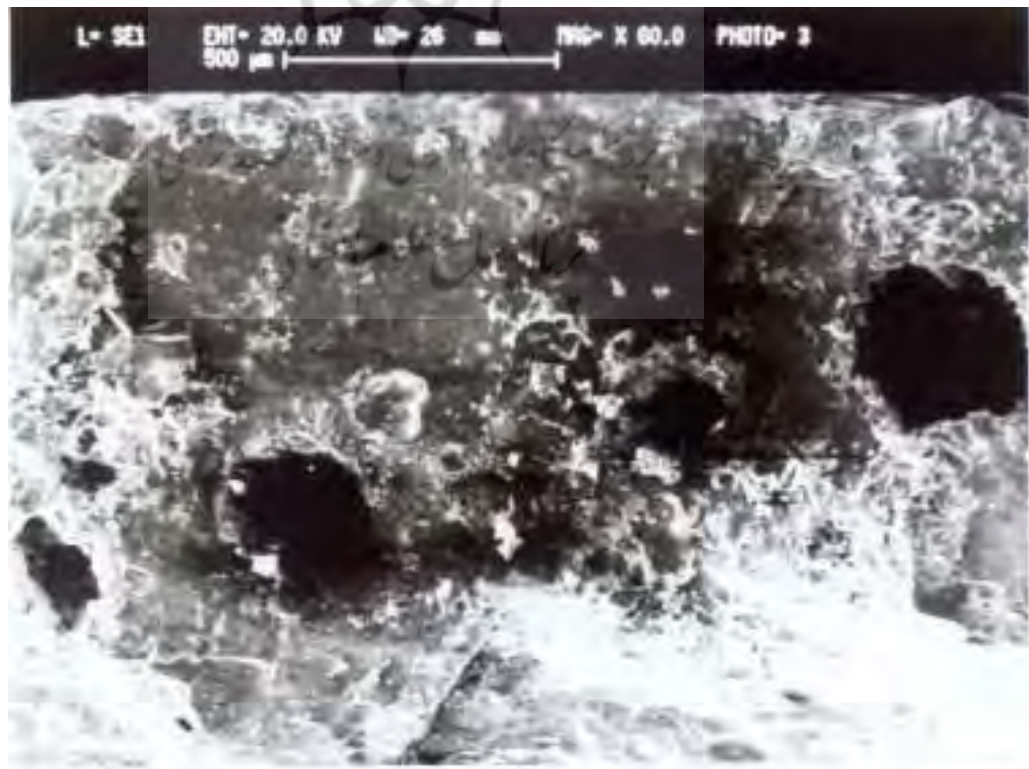
بیشتر بوده است. وجود طلا (Au) در نمودار ۵ آزمون SEM، دلیل بر وجود طلا در ترکیب لعاب و رنگ نیست؛ بلکه مربوط به سامانه آزمایش با دستگاه میکروسکوپ الکترونی است، چون زیر میکروسکوپ الکترونی اشعه الکترونی به نمونه برخورد می‌کند و برای هدایت الکتریکی گرمایی یک لایه پوشش طلا به ضخامت ۲۰ نانومتر روی نمونه کشیده می‌شود که پیک‌های طلای موجود در نمودار SEM مربوط به این موضوع است.

در تصویر میکروسکوپی تهیه شده از سطح لعاب سبزرنگ مشخص می‌شود که این تصویر به دلیل این‌که فازهای موجود در رنگ به خوبی از یکدیگر تفکیک نشده‌اند و مرز بین دانه‌های کریستالی کاملاً



نمودار ۵. نتیجه آزمون SEM سبز کم‌رنگ (نگارندگان، ۱۳۹۶).

مشخص نیست و تقریباً به صورت تک‌فاز نشان داده می‌شوند؛ از این رو این تصویر نشانگر سطح نمونه است و شکل فازها و ذرات کریستالی را نشان نمی‌دهد (تصویر ۶).



تصویر ۶. عکس میکروسکوپی از نمونه ۳ لعاب سبز کم‌رنگ (نگارندگان، ۱۳۹۶).

با توجه به عناصر مشخص شده در آزمون‌های (SEM و XRD) لعاب سبزرنگ نمونه‌های مورد بررسی یک فرمول که بتوان تقریباً لعابی شبیه و نزدیک به لعاب سبز به کار برده شده در آجرهای لعاب دار مورد بحث را حاصل کند، ارائه شده است.

البته دمای پخت این لعاب با فرمول زیر حدود ۱۰۸۰ درجه سانتی‌گراد (SK01a) است که تقریباً ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد از دمای پختی که بر روی آجرهای لعاب دار هخامنشی انجام شده است، بیشتر است و به دلیل این فرمول با دمای ۱۰۸۰ درجه سانتی‌گراد انتخاب شده و ترکیب لعاب با درصد سیلیس بالاتری انتخاب گردیده است تا با سیلیسی بودن بدنه مطابقت داشته باشد و این دمای بالاتر، باعث بهتر ذوب شدن لعاب و یکنواختی پخت می‌گردد. یکنواخت نبودن پخت مشکلی بود که بر نمونه‌های مورد بررسی آشکار بود؛ علاوه بر این، در حال حاضر مهیا کردن دمای ۱۰۸۰ درجه سانتی‌گراد امکان پذیر است.

فرمول زگر

اکسید سرب PbO ۰/۶	اکسید آلومینیوم Al ₂ O ₃ ۰/۲۰	کوارتز SiO ₂ ۲/۱
اکسید کلسیم CaO ۰/۳		
اکسید پتاسیم K ₂ O ۰/۱۰		

به فرمول زگر فوق بایستی حدوداً ۲٪ CuO (اکسید مس) اضافه گردد و اگر حدوداً ۳٪ CuO اضافه شود، تقریباً رنگ آبی سبز می‌دهد.

اکسیدهای رنگ‌کننده لعاب زرد

در لعاب‌های اسیدی غنی از سرب، اضافه کردن مقدار بسیار کمی اکسید کروم، حداکثر تا ۱٪ در دمای پایین، رنگ زرد حاصل می‌کند. هم‌چنین ترکیب با CaO و SnO₂ می‌توان رنگ صورتی به دست آورد (Barsoum, 1997: 208).

اکسید آهن لعاب‌ها را در محیط پخت اکسیدی به ترتیب به رنگ زرد و سپس قرمز قهوه‌ای و رنگ قرمز شرابی و نهایتاً به رنگ قهوه‌ای تغییر می‌دهد (Sabia, 1999: 115).

اکسید تیتان TiO₂ لعاب‌های سربی را زردرنگ و لعاب‌های بدون سرب را سفیدرنگ می‌کند، ولی با محتوی بودن مقدار کمی اکسید آهن در لعاب یا در اکسید تیتان مجدداً زردرنگ می‌شود.

رنگ لعاب زرد مورد نظر (نمونه ۴) بر روی بعضی از آجرهای لعاب دار هخامنشی تقریباً متمایل به صورتی و حنایی است (این موضوع بر روی نمونه ۴ مشهود بود) این لعاب نسبت به لعاب سبز بسیار درخشنده‌تر به نظر می‌رسد. احتمالاً عوامل فیزیکی و شیمیایی تخریبی بر روی سطح لعاب زرد کمتر از لعاب سبز اثر داشته است (تصویر ۷).



تصویر ۷. آجر با لعاب زردرنگ مورد بررسی (نگارندگان، ۱۳۹۶).

لعاب زردرنگ تحت آزمون XRD قرار گرفت که نتایج آزمون فوق در جدول ۸ و نمودار ۶ آزمون XRD مشاهده می‌گردد و هم‌چنین آزمون SEM نیز بر روی نمونه فوق انجام شده که نتیجه این آزمون در نمودار ۷ مشهود است.

جدول ۸ نشان می‌دهد که رنگ زرد شامل دو فاز یکی $CdPbO_3$ و یک فاز کوارتز با درصد تبلور پایین است. پیک‌ها در نمودار ۶ آزمون XRD کاملاً مجزا و مشخص هستند.

جدول ۸. نتیجه آزمون XRD لعاب زردرنگ (نگارندگان، ۱۳۹۶).

کد آزمایش	کد نمونه	نتیجه
EDHE4	۴	$CdPbO_3$, 25-109 Quartz, Sio2, 33-1161, low Crystallinity

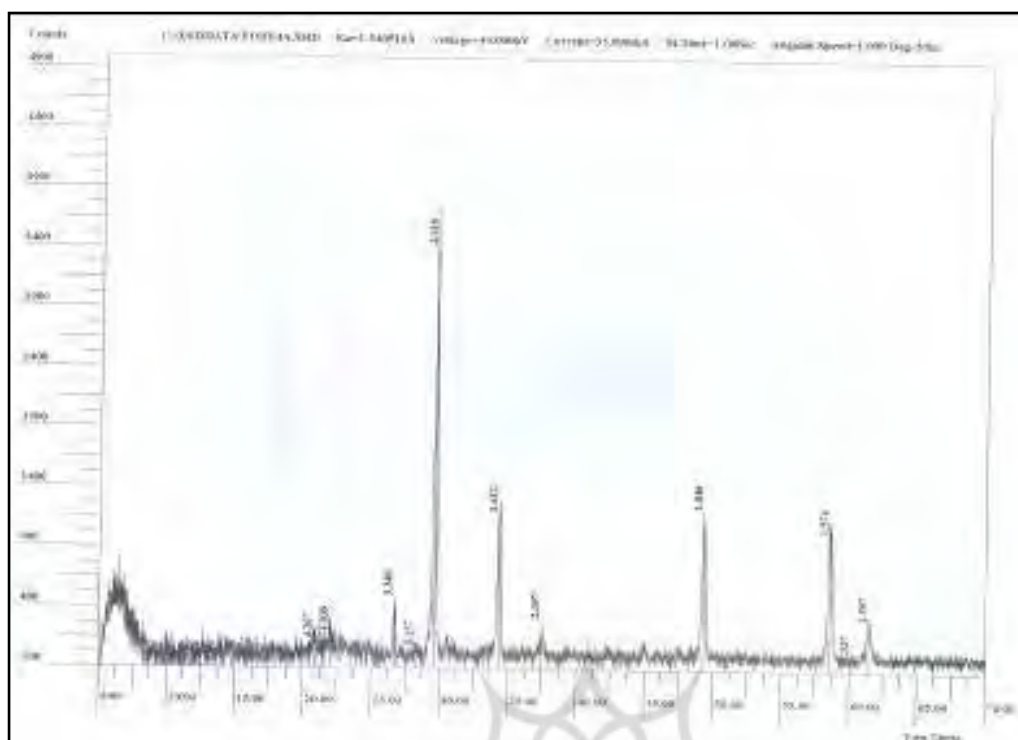
25-109		JCPDS-ICDD		PDF-2 Sets 1-42 database		Quality: i		
d Å	Int.	h k l	d Å	Int.	h k l	d Å	Int.	
4.27	8	2 1 1	3.02	100	2 2 2	2.621	35	4 0 0
2.464	6	4 1 1	2.464	6	4 1 1	2.336	1	4 2 0
2.229	3	3 3 2	2.133	1	4 2 2	2.049	9	4 3 1
1.846	40	4 4 0	1.695	5	5 3 2	1.611	5	5 4 1
1.574	30	6 2 2	1.540	5	6 3 1	1.508	6	4 4 4
1.478	2	5 4 3	1.448	1	6 4 0	1.421	4	6 3 3
1.397	1	6 4 2	1.327	2	6 5 1	1.306	3	8 0 0
1.286	3	8 1 1	1.267	2	8 2 0	1.249	1	6 5 3
1.231	2	6 6 0	1.215	3	8 3 1			
1.199	6	6 6 2	1.025	2	10 2 0	0.910	1	8 8 2
1.168	5	8 4 0	1.006	3	10 2 2	0.903	1	10 5 3
1.154	<1	8 3 3	0.996	2	10 3 1	0.889	1	11 4 1
1.140	<1	8 4 2	0.979	3	8 7 1	0.883	2	10 6 2
1.101	2	8 5 1	0.970	3	10 4 0	0.871	1	12 0 0
1.078	2	9 3 2	0.962	2	9 6 1	0.865	2	9 8 1
1.066	4	8 4 4	0.954	3	10 4 2	0.859	2	12 2 0
1.055	2	9 4 1	0.946	2	8 7 3	0.853	1	10 7 1
1.045	1	8 6 0	0.931	1	10 5 1	0.847	2	10 6 4
1.034	<1	10 1 1	0.924	<1	8 8 0	0.816	4	10 8 0

Strong lines: 3.02/X 1.85/4 2.62/4 1.57/3 2.05/1 4.27/1 2.46/1 1.51/1

جدول شماره ۱۷: کارت شناسایی ASTM مربوط به $cdPbO_3$

شکل ۷. کارت شناسایی ASTM مربوط به $CdPbO_3$ (نگارندگان، ۱۳۹۶).

در نمودار ۷ آزمون SEM عناصری که قابل ملاحظه بودند و تشخیص داده شدند، عبارتند از: Pb از PbO (اکسید سرب)، K از KCl (کلرید پتاسیم)، Cr از Cr_2O_3 (اکسید کروم)، Ca از Cao (اکسید کلسیم)، Fe از Fe_2O_3 (اکسید آهن)، Al از Al_2O_3 (اکسید آلومینیوم) و Ti از TiO_2 (اکسید تیتان) هستند. وجود Pb (سرب) خود دلیل واضحی بر سربی بودن لعاب زردرنگ است که خود یکی از عمده‌ترین دلایل شفافیت بیشتر لعاب زردرنگ نسبت به سایر لعاب‌ها است و همان‌طور که در اول بحث



نمودار ۶. آزمون XRD لعاب زردرنگ (نگارندگان، ۱۳۹۶).

```

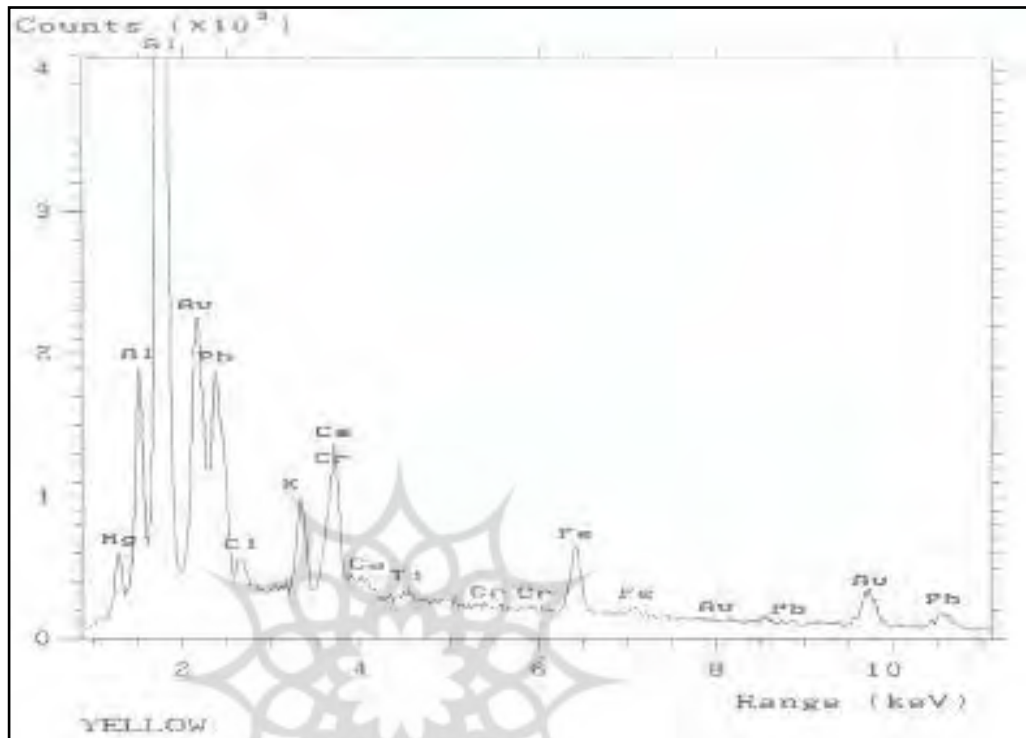
File Name :C:\XRDDATA\EDHE4A.XRD
Lambda : 1.5405
Peak Lines In Graph Boundaries 5.00 to 70.00 Degree :
No. Two Theta d I/I0
1 61.48 1.507 9
2 60.15 1.537 -1
3 58.60 1.574 30
4 49.32 1.846 36
5 37.49 2.397 9
6 34.30 2.612 35
7 29.59 3.016 100
8 28.24 3.157 1
9 21.99 4.039 5
10 20.80 4.267 3
11 26.67 3.340 14
    
```

شکل ۸. متعلق به گراف XRD لعاب زردرنگ (نگارندگان، ۱۳۹۶).

(لعاب زردرنگ) بیان شد، در لعاب‌های اسیدی غنی از سرب اضافه کردن مقدار بسیار کمی (اکسید کروم) Cr_2O_3 حداکثر تا یک درصد در دمای پایین، رنگ زرد حاصل می‌کند. با توجه به این‌که لعاب زردرنگ سربی است و همان‌طور که در نمودار ۷ آزمون SEM مقدار کم اکسید کروم مشاهده می‌شود؛ بنابراین یکی از عوامل زرد بودن این لعاب احتمالاً وجود مقدار کم اکسید کروم در لعاب سربی بوده است.

وجود Fe از Fe_2O_3 (اکسید آهن) در صورتی می‌تواند باعث ایجاد رنگ زرد شده باشد که محیط پخت لعاب یک محیط احیایی بوده باشد، ولی تاکنون مدرکی جهت اثبات احیایی بودن عمل پخت بر روی

این نوع آجرهای لعاب‌دار هخامنشی (نمونه‌های رنگ مورد بررسی) نداریم. اکسید تیتان، لعاب‌های سربی را زرد رنگ می‌کند و در اینجا با یک لعاب سربی حاوی اکسید تیتان روبه‌رو هستیم؛ پس می‌توان از اکسید تیتان به‌عنوان یک عامل احتمالی زردکننده در این لعاب نام برد.

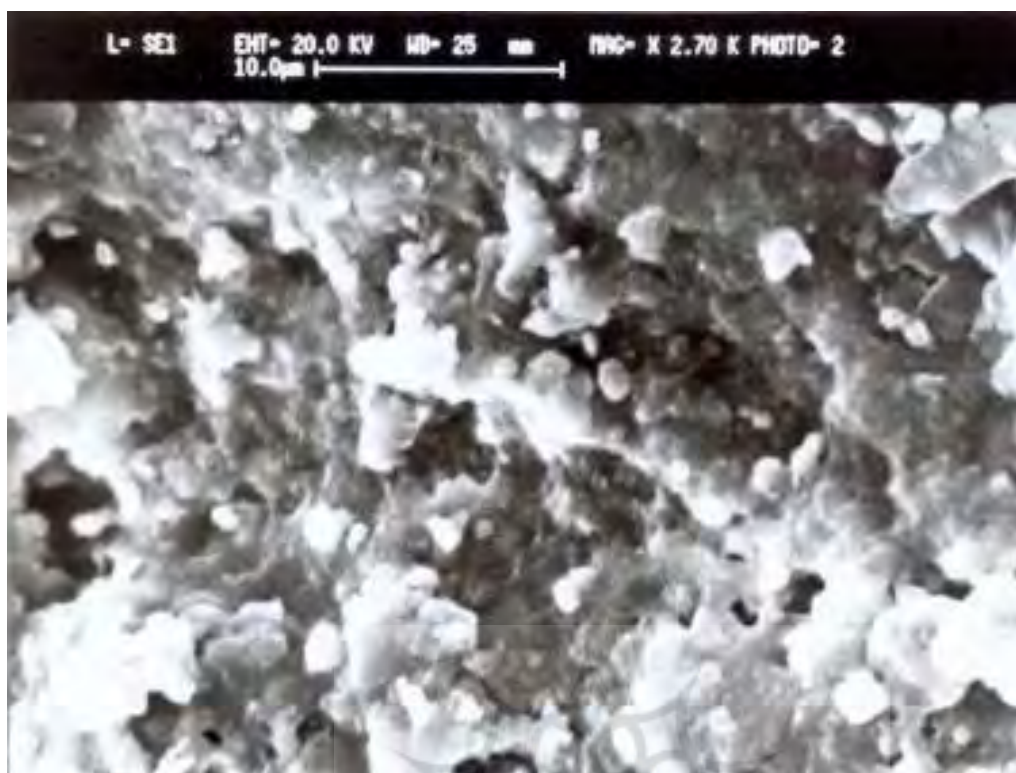


نمودار ۷. نتیجه آزمون SEM لعاب زرد رنگ (نگارندگان، ۱۳۹۶).

در مجموع، به نظر می‌رسد دو عامل اکسید کروم به مقدار کم و اکسید تیتان، عوامل زرد رنگ لعاب فوق هستند؛ ضمن این‌که وجود اکسید کلسیم خود می‌تواند دلیلی بر تمایل بودن رنگ لعاب فوق به رنگ حنایی باشد. برای این‌که با اکسید تیتان لعاب‌های مات زرد رنگی تهیه شود، باید مقداری اکسید آهن برای تقویت رنگ زرد اضافه کرد؛ ولی مقدار بیش از حد اکسید موجب تغییر رنگ به قهوه‌ای می‌شود. افزایش مقداری اکسید آلومینیوم، لعاب‌های محتوی آهن را به طرف رنگ قهوه‌ای (حنایی) تمایل می‌دهد (عباسیان، ۱۳۷۰: ۱۱۶).

با توجه به مطالب ذکر شده و مشاهده نمودار ۷ آزمون SEM، دیده می‌شود که در این نمودار، وجود آهن مشخص شده و هم‌چنین وجود اکسید آلومینیوم در ترکیب اولیه لعاب قابل ملاحظه‌تر از نمودارهای SEM رنگ‌های دیگر است؛ پس جدا از تمام احتمالات دیگر، یک احتمال قوی‌تری که می‌توان بیان کرد این است که اکسید آهن موجود، عامل رنگ‌کننده زرد در این لعاب بوده است و افزایش اکسید آلومینیوم باعث تمایل این رنگ به حنایی شده است. با توجه به تحلیل بیان شده می‌توان چنین استنباط کرد که احتمالاً برای تهیه لعاب زرد رنگ مورد نظر (نمونه ۴)، از مواد اولیه‌ای استفاده شده که اکسید آهن بیشتری به‌عنوان ناخالصی وجود داشته و اکسید آلومینیوم بیشتری در ترکیب داشته است.

فازها در این نمونه با درصد تبلور پایین هستند و به همین دلیل جدایش فازی (مرز دانه‌ها) کاملاً مشخص نیست. برای تهیه رنگ زرد شبیه نمونه ۴ می‌توان به شرح ذیل عمل کرد: «با آنتیمونات^۵ سرب می‌توان رنگ زرد به دست آورد که کاربرد آن تا دمای (۱۰۶۰) SK02a درجه سانتی‌گراد امکان‌پذیر است. با تغییر دادن B2O3 (براکس) (که معمولاً به‌عنوان کمک ذوب استفاده



تصویر ۸. عکس میکروسکوپی از لعاب زردرنگ (نگارندگان، ۱۳۹۶).

می‌شود)، قلیایی‌ها و کوارتز و هم‌چنین اکسید آهن محتوی در این رنگ می‌توان انواع رنگ‌های زرد دیگری را به وجود آورد» (همان: ۲۱۱).

فرمول زگر زیر برای لعاب «آونتورین» آهن

اکسید سدیم Na_2O ۱/۰	اکسید آلومینیوم Al_2O_3 ۰/۱۵	کوارتز SiO_2 ۷/۰
براکس B_2O_3 ۱/۲۵		
اکسید آهن Fe_2O_3 ۰/۷۵		

که مواد فرمول لعاب فوق عبارتند از:

۱۳/۵ برات کلسینه شده، ۴/۱ درصد اسید بوریک، ۷/۲ درصد کربنات سدیم کلسینه شده، ۱۶ درصد اکسید آهن، ۵/۲ درصد کائولن، ۵/۴ درصد کوارتز؛ چنانچه مقدار اکسید آهن کم باشد، لعاب زرد به وجود می‌آید.

نتیجه‌گیری

ظاهر بدنه آجرهای لعاب‌دار موجود در تخت جمشید که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است، بسیار متخلخل به نظر می‌رسد و به رنگ شیری و مانند سنگ چخماق براق است. نمونه برداری از آجرهای لعاب‌دار هخامنشی در تخت جمشید بسیار ناچیز بودند که انجام آزمایشات بر روی آن‌ها بایستی بسیار دقیق صورت می‌گرفت. نتایج حاصل از نمونه‌ها را تجزیه و تحلیل نموده و می‌توان نکاتی را به شرح پیش‌رو بیان کرد.

آزمون XRD بر روی این آجرها سیلیسی بودن بدنه فوق را تأیید نمود و با توجه به آزمون TGA می‌توان گفت که احتمالاً کربنات کلسیم به اکسید کلسیم تبدیل شده است و کاهش وزن نیز حاصل این تبدیل بوده است.

لعاب‌های سبز و زردرنگ سربی بوده‌اند. دلیل برآقی این لعاب‌ها نسبت به لعاب‌های دیگر، سربی بودن آن‌هاست که هنوز شفافیت بیشتر آن‌ها واضح است. در ترکیب تمام لعاب‌ها آهن و منیزیم وجود داشته است که احتمالاً در ترکیب اصلی لعاب پایه جدا از اثرات رنگی که داشته، به‌صورت ناخالصی وجود داشته‌اند. آزمون XRD بر روی لعاب‌های سبزرنگ وجود دو فاز کوارتز SiO_2 و هیدین برگیته $Ca(Fe,Mn)Si_2O_6$ را نشان می‌دهد. فاز اصلی رنگ سبز پررنگ و سبز کم‌رنگ یکی بوده و با توجه به آزمون SEM وجود Pb (سرب) در لعاب سبز پررنگ در حد قابل ملاحظه‌ای رؤیت شد و خود دلیل بر سربی بودن لعاب این نمونه است؛ هم‌چنین وجود عنصر عمده‌ای که می‌توان به‌عنوان عامل رنگ‌کننده در این لعاب رنگی به آن اشاره کرد Cu (مس) است که تقریباً میزان آن نسبت به عناصر دیگر (به‌غیر از Si و Ca) قابل ملاحظه‌تر است؛ بنابراین به دلیل سربی بودن لعاب، وجود مس در این لعاب سربی باعث ایجاد رنگ سبز می‌شود. وجود Ca (کلسیم) در لعاب‌های سبز (به‌خصوص لعاب‌های سربی) باعث ایجاد رنگ سفید و تقریباً باعث آپک شدن رنگ لعاب می‌گردد و می‌توان گفت که یکی از عوامل پررنگ بودن یا کم‌رنگ بودن نمونه‌های ۲ و ۳، تفاوت میزان درصد CaO (اکسید کلسیم) موجود است.

آزمون SEM لعاب زردرنگ، وجود عناصر Pb از PbO (اکسید سرب)، K از KCl (کلرید پتاسیم)، Cr از Cr_2O_3 (اکسید کروم)، Ca از CaO (اکسید کلسیم) Fe از Fe_2O_3 (اکسید آهن)، Al از Al_2O_3 (اکسید آلومینیوم) و Ti از TiO_2 (اکسید تیتان) را تشخیص داد. وجود Pb (سرب) خود دلیل واضحی بر سربی بودن لعاب زردرنگ است که خود یکی از عمده‌ترین دلایل شفافیت بیشتر این لعاب نسبت به سایر لعاب‌هاست و در لعاب‌های اسیدی غنی از سرب اضافه کردن مقدار بسیار کمی (اکسید کروم) Cr_2O_3 حداکثر تا یک درصد در دمای پایین، رنگ زرد حاصل می‌کند. با توجه به این‌که لعاب زردرنگ سربی است؛ بنابراین یکی از عوامل زرد بودن این لعاب احتمالاً وجود مقدار کم اکسید کروم در لعاب سربی بوده است. اکسید تیتان، لعاب‌های سربی را زردرنگ می‌کند و در اینجا با یک لعاب سربی حاوی اکسید تیتان روبه‌رو هستیم؛ پس می‌توان از اکسید تیتان به‌عنوان یک عامل احتمالی زردکننده در این لعاب نام برد و وجود آهن باعث تمایل این رنگ به حنایی بوده است.

پی‌نوشت

۱. آزمون‌های محلولی.
۲. حدوداً برای سیلیس خالص ۱۷۰۰ درجه سانتی‌گراد دما لازم است تا حالت ذوب پیدا کند.
3. Heden Bergite
۴. شماره مخروط زگر، نشان‌دهنده دمای پخت تقریبی لعاب‌ها و عدد a01 بیانگر دمای پخت ۱۰۸۰ درجه سانتی‌گراد است.
5. زرد Sb_2O_5 سفید و Sb_2O_3
6. Aventurine Glaze

نوعی لعاب که در آن بلورهای بسیار ریز و متعددی بر اثر تابش نور به آن‌ها، به‌صورت ذرات طلائی می‌درخشند. لعاب پایه یا اکسیدهایی مانند آهن، کروم و تیتان اشباع می‌شوند و در نتیجه بلورها جدا شده و در داخل لعاب (برعکس لعاب‌های بلوری که فقط در سطح تشکیل بلور می‌دهند) تشکیل بلور می‌دهند.

کتابنامه

- اشمیت، اریک، (۱۳۴۲). تخت جمشید، بناها، نقش‌ها و نبشته‌ها. ترجمه عبدالله فریاد، تهران: انتشارات فرانکلین. امیرکبیر.
- بریان، پیر، (۱۳۸۰). امپراطوری هخامنشی. ترجمه ناهید فروغان، تهران: نشر قطره.
- تجویدی، اکبر، (۱۳۵۵). دانستنی‌های نوین درباره هنر و باستان‌شناسی عصر هخامنشی، بر پایه

- کاوش‌های پنج‌ساله تخت جمشید. تهران: انتشارات مرکز باستان‌شناسی ایران.
- سامی، علی، (۱۳۳۰). کاوش‌های دوازده‌ساله بنگاه علمی تخت جمشید و نقاط مختلف تاریخی. شیراز: چاپخانه مصطفوی، جلد دوم.
- سامی، علی، (۱۳۴۸). پایتخت‌های شاهنشاهان هخامنشی، شوش - هگمتانه - تخت جمشید. شیراز: انتشارات دانشگاه پهلوی.
- عباسیان، میرمحمد، (۱۳۷۰). صنعت لعاب‌سازی و رنگ‌های آن. تهران: گوتنبرگ.
- کریشنر، هارالد، (۱۳۷۰). شناسایی مواد به‌کمک اشعه ایکس. ترجمه عباس طائب، تهران: انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.
- گیرشمن، رومن، (۱۳۷۱). هنر ایران در دوره ماد و هخامنشی. ترجمه عیسی بهنام، تهران: علمی فرهنگی.
- مورتگارت، آنتوان، (۱۳۸۷). هنر بین‌النهرین باستان (هنر کلاسیک خاور نزدیک). ترجمه زهرا باستی و محمدرحیم صراف، تهران: سمت.
- موسوی، علی، (۱۳۸۱). «ارنست هرتسفلد و تحول باستان‌شناسی در ایران: ۱۳۱۴-۱۳۰۴». مجله باستان‌شناسی و تاریخ، سال ۱۷، شماره ۱، شماره پیاپی ۳۳، صص: ۴۵-۵۶.
- میسلر، گری‌ال؛ و ای‌تار، دونالد، (۱۳۹۰). شیمی معدنی. ترجمه سیدزاده صابونچی و حسینی صدر، تهران: انتشارات بوعلی سینا.
- ویسه، سهراب، (۱۳۷۳). آجررسی. تهران: مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.
- هرتسفلد، ارنست، (۱۳۸۱). ایران در شرق باستان. ترجمه همایون صنعتی‌زاده، تهران: انتشارات پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی و دانشگاه شهیدباهنر کرمان.
- Barsoum, M. W., (1997). *Fundamentals of ceramics*. New York, McGraw-Hill.
- Herzfeld, E., (1928). *Rapport Sur l'Etat Actuel Actuel Des Ruines De Persepolis*. Dietrich Reimer.
- Munsell, A. H., (1988). *Munsell- a color notation*. 15th ed. Macbeth, Div. of Kollmorgen, Baltimore.
- Pampuch, R., (1976). *Ceramic Materials: an introduction to their properties*. Elsevier Scientific Pub.
- Schmidt, E. F., (1953). *Perssepolis I, Structures, Reliefs*. Inscriptions, The University of Chicago Press Chicago, Illinois.
- Sabia, R., (1999). *Einishing of Advanced Ceramics and Glasses*. USA, The American Ceramic Society.
- Walter, A., (1955). *Coloured Ceramics from Ashur and Earlier, Ancient Assyrian Wall Paintings*. London.