Journal of Research on
ARCHAEOMETRY
A Peer-Reviewed Academic Journal of Archaeological and Conservation Science Studies

Tabriz Islamic Art University

Research Paper

Identification of Materials Used in the Decorations and Portrait Painting of the Hezar-Pisheh Wooden Box Through a Multi-Analytical Methods

Danial Harandi [1*], Maryam Javani[2]

1. Assistant Professor, Department of Conservation and Archaeometry, Faculty of Applied Arts, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran
2. B.A of Conservation and restoration of cultural properties, Department of Conservation and Archaeometry, Faculty of Applied Arts, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran
* Correspondence: d.harandi@tabriziau.ac.ir, danial.harandi@gmail.com

Abstract

The *Hezar-Pisheh* wooden box, considered one of the earliest forms of packaging in Iran, holds significant artistic and historical value. This study investigates the materials used in the decoration and portrait painting of a wooden box attributed to the late Qajar period. A multi-analytical and non-invasive approach was employed, including Raman spectroscopy, Scanning Electron Microscopy coupled with Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (SEM-EDS), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), and Polarized Light Microscopy. The results revealed the use of white lead (sefidab-e Sheikh) for the white pigment, and the red pigment used in the portrait was identified as red lead. Based on the absorption bands at 832 and 351 cm^{-1} in the Raman spectrum, which are attributable to lead chromate and correspond with reference spectra, it is likely that chrome green was used in the green-painted areas of the box. The decorative framing elements were identified as a metal alloy composed of gold and copper. The frame decorations were created using metallic powder particles made from this gold-copper alloy. Furthermore, FTIR analysis identified the presence of alkyd resin as the varnish layer, an industrial material that became commonly used in Iran from the early 20th century.

Keywords: Pigment, Raman spectroscopy, Hezrapisheh box, Wood painting, Pahlavi Period.

Received: 2024/11/9
Revised: 2025/6/9
Accepted: 2025/6/15
Published: 2025/6/30

Copyright: ©2025 by the Authors. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license)

https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0

Introduction

Over the past three decades, the identification and analytical study of historical pigments has emerged as a crucial area of research in cultural heritage science and related disciplines such as archaeometry and conservation (Harth, 2024). Determining the pigments and dyes used by past artists provides valuable information on the authenticity, provenance, dating, and palettes of artworks (Klöckl, 2023; Pastoureau, 2023), while also tracing technological developments and reflecting the creativity of earlier civilizations. Advances in analytical methods have expanded pigment studies beyond traditional art-historical approaches, enabling precise material identification, authenticity assessment, and improved conservation strategies (Roohi & Holakooei, 2023). Since pigments and binders undergo gradual chemical and physical degradation over time, their characterization helps determine appropriate preservation processes. Many studies rely on spectroscopic techniques developed to identify mineral pigments, organic binders, and degradation products (Dawson, 2007). Such data also reveal material sensitivity to environmental factors such as light, humidity, and pollutants, guiding preventive conservation.

Extensive pigment research has been conducted on Safavid and Qajar works, including manuscripts (Abdel-Ghani, 2022), inks and papers (Agha-Aligol et al., 2007), wall paintings (Akyol & Houreh, 2019), and lacquer paintings (Gardner & Rogge, 2023; Khalili, 1988). Reported pigments include ultramarine, indigo, azurite, lead white, vermilion, red lead, madder, chrome green, carbon black, and cochineal (Bahaadri & Bahraloloomi, 2017;

Koochakzaei & Marefat-Izadi, 2024). Decorative wood painting, while historically important, remains less studied. Although practiced since the Safavid era and reaching its peak in the Zand and Qajar periods, only a few investigations such as those on the Taqavi House in Gorgan and the Shahsavaran Househave identified lead-based whites and reds, ultramarine, chrome yellow, and calcite (Hamzavi et al., 2024; Koochakzaei et al., 2024).

Despite these efforts, no previous research has focused on the pigments and decorative techniques of hezar-pisheh wooden boxes. Addressing this gap, the present study applies non-destructive techniques Raman spectroscopy, Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), scanning electron microscopy with energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS), and polarized light microscopy to identify the pigments and varnishes used in their decoration.

Materials and Methods

The hezar-pisheh box is a decorated wooden container, often featuring portraits and gilded frames, historically used for storing tea sets and occasionally by nomadic tribes during migration (Papoli-Yazdi & Vosoughi, 2019). It is considered one of the oldest forms of packaging. The studied specimen, dated to the late Qajar period (35 × 25 × 13 cm), from a private collection, was transferred to the Tabriz Islamic Art University for restoration. Due to its historical significance and deterioration, material identification was undertaken. After removing the varnish with a 1:1 ethanol–acetone solution, samples were collected from green, white, gold, and red pigments, as well as the varnish layer.

SEM-EDS Analysis

Elemental composition was determined using a FESEM (MIRA3-FEG-SEM, TESCAN, Czech Republic) with EDS at the University of Tabriz. Unvarnished samples were analyzed without coating at 15 kV.

Raman Spectroscopy

Pigments were analyzed with a UniDron-A confocal Raman spectrometer (Andor Technology, Korea) using a 532 nm laser at reduced power. Spectra were interpreted using the CHSOS database (2019).

FTIR Spectroscopy

Varnish samples were mixed with KBr to form pellets and analyzed with a JASCO 680-plus spectrometer (Japan) in the 400–4000 cm^{-1} range.

PLM

Pigments were powdered, mounted in glycerin, and examined under a polarized light microscope (BX51, Olympus, Japan)

Results and Discussion

White Pigment (S1)

SEM-EDS analysis revealed a high lead (Pb) content with minor Mg, Al, Si, and Ca likely from the substrate or impurities. Raman spectra matched lead white, characterized by a strong band at 1050 cm^{-1} (Kostadinovska et al., 2013; Rosi et al., 2011). Lead white consists of cerussite ($PbCO_3$) and hydrocerussite ($Pb_3(CO_3)_2(OH)_2$) in varying ratios and was widely used from antiquity to the 20th century (Gonzalez et al., 2017), including in Iranian art as a pigment, ground, and filler (Hajisayyedjavadi et al., 2023).

Green Pigment (S2)

SEM-EDS analysis of the green pigment showed a high lead content with minor copper, alongside calcium, silicon, aluminum, and magnesium likely originating from the substrate or impurities. Microscopy revealed a mixture of yellow and blue-green particles. Raman spectra matched chrome yellow ($PbCrO_4$) and massicot (PbO), with characteristic vibrations at 832 and 351 cm^{-1}. The combination of chrome yellow with a blue pigment, commonly Prussian blue, produces chrome green. Additional peaks at 135 and 275 cm^{-1} were attributed to lead oxide formed by laser-induced degradation of lead chromate.

Based on these results and comparison with previous studies, the green pigment is identified as chrome green, a material synthesized by Vauquelin in 1809 and produced commercially in Europe from the early 19th century (Erkens et al., 2001). Varnish Layer

FTIR analysis of the varnish layer showed O–H stretching vibrations (3400–3600 cm^{-1}), C–H stretching (2924, 2852 cm^{-1}), ester C=O (1680–1770 cm^{-1}), ester C–O–C (1360–1000 cm^{-1}), and aromatic C–H bending (800–630 cm^{-1}). Peaks at 3453 and 1725 cm^{-1} indicated hydroxyl and carboxylic acid groups of alkyd resin. Additional bands at 1254 cm^{-1} corresponded to benzoic acid esters in melamine resin, while 1117 and 1067 cm^{-1} related to free alcohol C–O stretching. A band at 741 cm^{-1} was assigned to out-of-plane O–H bending. Based on these features, the varnish was identified as alkyd resin, a coating used in Iranian lacquerware since the 20th century, replacing traditional finishes such as shellac and natural oils (Koochakzaei et al., 2021).

Gold Decoration

Microscopic examination revealed fine gold-colored particles in decorative borders. SEM-EDS analysis detected high gold content with minor copper, indicating a gold–copper alloy. Such alloys were historically used in Qajar decorative arts.

Conclusion

The Hezarpisheh wooden box, one of the earliest packaging examples in Iran, was examined using SEM-EDS, Raman spectroscopy, and FTIR to identify decorative and pictorial materials. Results revealed that the white pigment was lead white and the red

pigment was red lead, both lead-based compounds. The green pigment contained lead chromate, with characteristic Raman bands at 832 and 351 cm^{-1}, indicating the use of chrome green (a mixture of chrome yellow and Prussian blue). Additional bands at 135 and 275 cm^{-1} confirmed PbO formation from lead chromate degradation under Raman laser heating. Examination of the gilded decorations identified particles of a gold–copper alloy. FTIR analysis of the varnish layer identified alkyd resin, a coating material introduced in the 20th century as a replacement for traditional finishes. These findings, along with technical evidence, suggest that the box was likely produced during the First Pahlavi period.

Author Contributions: first author was responsible for designing the research analyses and interpreting the data, while the second author contributed to the experimental phases and reviewed the findings.

Funding: This research received no external funding.

Data Availability Statement: All data generated or analyzed during this study are included in this published article.

Acknowledgments: We would like to express our gratitude to Mr. Ali Reza Pour-Shams for supplying the study materials, Dr. Mahboob Alizadeh for his valuable feedback and insightful comments, and Tabriz Islamic Art University for their moral support throughout this research.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

پژوهه باستان‌سنجی

دانشگاه هنر اسلامی تبریز

مقاله پژوهشی

شناسایی فنی مواد به‌کاررفته در تزیینات و نقاشی چهره جعبه چوبی هزارپیشه با استفاده از آنالیزهای تحلیلی

دانیال هرندی[1*]، مریم جوانی[2]

۱. استادیار، گروه مرمت و باستان‌سنجی، دانشکده هنرهای کاربردی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران

۲. کارشناس مرمت آثار تاریخی، دانشکده هنرهای کاربردی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران

مسئول مکاتبات: d.harandi@tabriziau.ac.ir, danial.harandi@gmail.com

چکیده

جعبه چوبی هزارپیشه به‌عنوان یکی از اولین جعبه‌های بسته‌بندی در ایران محسوب می‌شود. هدف از این پژوهش شناسایی مواد به کاررفته در تزیینات و نقاشی چهره یک جعبه چوبی هزارپیشه منسوب به دوره قاجار است. در این راستا از آنالیزهای تحلیلی چندگانه غیرمخرب شامل طیف‌سنج رامان، میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به پراکندگی پرتو ایکس (SEM-EDS)، طیف‌سنج مادون‌قرمز تبدیل فوریه (FTIR) و میکروسکوپ نوری پلاریزان استفاده شد. نتایج نشان داد که از سفیداب شیخ جهت تهیه رنگ سفید و از رنگ‌دانه سرنج در رنگ قرمز چهره استفاده شده است. در طیف رامان رنگ‌دانه سبز، باتوجه به جذب شاخص در ناحیه ۸۳۲ و $351cm^{-1}$ ناشی از ارتعاشات کرومات سرب و همچنین مطابقت و مشابهت آن با طیف‌های مرجع، احتمالاً از رنگ‌دانه سبز کروم در نواحی سبز نگاره روی جعبه استفاده شده است. همچنین در تزیینات کادربندی، پودر ذرات فلزی با آلیاژی از طلا و مس مورد استفاده قرار گرفته‌اند. آنالیز FTIR از لایه ورنی روی نقاشی حاکی از کاربرد آلکید رزین به‌عنوان لایه حفاظتی سطح نقاشی است که استفاده این رزین از قرن بیستم به بعد در ایران رایج بوده است.

واژگان کلیدی: رنگ‌دانه، طیف‌سنجی رامان، جعبه چوبی هزارپیشه، نقاشی روی چوب، دوره پهلوی

دریافت: ۱۴۰۳/۸/۱۹

آخرین اصلاح: ۱۴۰۴/۳/۱۹

پذیرش: ۱۴۰۴/۳/۲۵

انتشار: ۱۴۰۴/۴/۹

Copyright: ©2025 by the Authors. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license)

https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0

۱. مقدمه

در سه دهه اخیر، شناسایی و بررسی تحلیلی رنگ‌دانه‌ها تاریخی به بخش مهمی از مطالعات در حوزه‌های پژوهشی علوم میراث فرهنگی و رشته‌های مرتبط مانند باستان‌سنجی و حفاظت آثار تاریخی و فرهنگی تبدیل شده است (Harth, 2024). شناسایی رنگ‌دانه‌ها و رنگزاهای به‌کاررفته توسط هنرمندان، اطلاعات ارزشمندی درباره اصالت آثار، منشأ مواد، تاریخ‌گذاری آثار و شناسایی پالت هنرمندان گذشته ارائه می‌دهد (Klöckl, 2023; Pastoureau, 2023). توسعه رنگ‌دانه‌ها اغلب به موازات پیشرفت در زمینه‌های دیگر بوده است. با تجزیه و تحلیل رنگ‌دانه‌ها، محققان می‌توانند تکامل آن‌ها را ردیابی و به خلاقیت و نوآوری تمدن‌های گذشته دست یابند.

به لطف پیشرفت‌های اخیر در روش‌های علمی بررسی آثار هنری فراتر از بحث‌های تاریخی هنر پیش رفته است. بهره‌گیری از روش‌های نوین به‌عنوان ابزاری مفید در شناسایی تحلیلی رنگ‌دانه‌ها، به احراز اصالت اشیای مشکوک هنری و تاریخی کمک نموده است (Roohi & Holakooei, 2023). همچنین مواد متشکله نقاشی‌ها در گذر زمان دستخوش تخریب تدریجی شیمیایی و فیزیکی می‌شوند و شناخت آن‌ها در انتخاب فرایندهای حفاظتی کمک می‌کند. این بررسی‌ها طیف وسیعی از روش‌های تحلیلی (عمدتاً طیف‌نگاری) را پوشش می‌دهد که اغلب به‌طور خاص برای کمک به شناسایی رنگ‌های معدنی و چسب‌های آلی و یا محصولات تخریب آن‌ها توسعه یافته است (Dawson, 2007). دانش به دست آمده از تجزیه و تحلیل مواد متشکله رنگ‌دانه‌ها می‌تواند با شناسایی عوامل زوال و تخریب، به

توسعه فرآیندهای حفاظتی مناسب یاری رساند. به‌عنوان مثال، شناسایی ترکیب شیمیایی یک رنگ‌دانه می‌تواند حساسیت آن را به عوامل محیطی مانند نور، رطوبت و آلاینده‌ها را نشان دهد. این اطلاعات برای ایجاد شرایط مناسب نمایش آثار و جلوگیری از آسیب بیشتر به اثر هنری حائز اهمیت است. تاکنون طیف متنوع آثار در دوره‌های صفوی و قاجار از قبیل نسخ خطی (Abdel-Ghani, 2022)، جوهر و کاغذ(Agha-Aligol et al., 2007) ، دیوارنگاره (Akyol & Houreh, 2019) و نقاشی لاکی (Gardner & Rogge, 2023; Khalili, 1988) مورد مطالعه قرار گرفته است. مطالعه بر روی چند نسخه صفوی، به‌طور عمده رنگ‌زاهای لاجورد، نیل، آزوریت، سفید سرب، شنگرف، سرنج و روناس شناسایی شده است (بهادری و بحرالعلومی ۱۳۹۶). همچنین رنگزاهایی از قبیل آبی اولترامارین، سبز کروم، سرنج، سیاه کربن و قرمزدانه در تزیینات دو قلمدان مربوط به دوره قاجار گزارش شده است (کوچکزایی و معرفت ایزدی ۱۴۰۳).

مطالعات انجام شده جهت شناسایی روش ساخت و رنگ‌دانه‌های نقاشی لاکی دوره قاجار ایندیگو به‌عنوان رنگ آبی، زرد ماسیکوت، ورمیلیون به‌عنوان رنگ قرمز، سیاه کربن و سفید سرب جهت رنگ مشکی و سفید در پالت نقاشی در دوره قاجار شناسایی شده است (Abdel-Ghani, 2022).

نقاشی‌های تزیینی روی چوب بخش ارزشمند و کمتر مطالعه شده از میراث هنری ایران به شمار می‌آیند. نقاشی روی چوب در دوره صفویه ایران متداول شده و در دوره زندیه و قاجار به اوج خود رسیده است. مطالعات انجام شده بر روی هنر نقاشی و کتیبه‌نویسی روی چوب تزیینات "شیر سر" خانه تقوی گرگان مربوط به دوره قاجار، رنگ‌های آبی لاجورد، قرمز سرنج، گل‌سفید و مخلوط رنگ سیاه کربن و سیاه آهن شناسایی شد (حمزوی و دیگران، ۱۴۰۳). همچنین در تحقیقی جهت شناسایی رنگ‌دانه‌های به‌کاررفته در نقاشی پنل‌های چوبی خانه تاریخی شاهسواران مربوط به دوره قاجار، رنگ‌دانه‌های قرمز سرب، سفید سرب، اولترامارین، زرد کروم و کانی‌کال‌سیت در نواحی سبزرنگ نقاشی‌ها شناسایی شد (Koochakzaei et al., 2024).

با وجود انجام پژوهش‌های متعدد در زمینه شناسایی و فن‌شناسی ساخت آثار هنری همچون نسخ خطی و دیوارنگاره‌های تاریخی ایران، تاکنون مطالعه‌ای بر روی نقاشی و تزئینات جعبه چوبی هزار پیشه صورت نگرفته است. در این پژوهش، با بهره‌گیری از روش‌های غیرمخرب همچون طیف‌سنجی رامان، طیف‌سنجی مادون‌قرمز تبدیل فوریه (FTIR)، میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به پراکندگی پرتو ایکس (SEM-EDS) و میکروسکوپ نوری پلاریزان، به شناسایی مواد به‌کاررفته در رنگ‌دانه‌ها و ورنی روی نقاشی پرداخته شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. معرفی اثر موردپژوهش

جعبه هزار پیشه، جعبه‌ای چوبی گاه تزیین شده و بسیار نفیس، به‌عنوان محلی مخصوص ظروف مانند استکان و نعلبکی و قوری بوده و بعضاً توسط عشایر در هنگام کوچ مورداستفاده قرار می‌گرفته است. جعبه هزار پیشه جزو قدیمی‌ترین نوع بسته‌بندی در جهان محسوب می‌شود (پاپلی‌یزدی و وثوقی، ۱۳۹۸) این اثر دارای ساختار چوبی با تزیینات نقاشی شده و دارای صورت نگاره و کادرهایی طلایی‌رنگ است. جعبه موردنظر در ابعاد ۳۵cm× ۲۵ و ارتفاع ۱۳cm ساخته‌شده است. اثر منسوب به اواخر دوران قاجار و متعلق به مجموعه شخصی آقای شمس جهت مرمت به آزمایشگاه دانشگاه هنر اسلامی تبریز انتقال یافت. این اثر از جنبه‌های هنری، تاریخی و فنی حائز اهمیت بوده و در معرض آسیب‌های جبران‌ناپذیری قرار داشت. ازاین‌رو مطالعه علمی جهت شناسایی مواد به‌کاررفته در تزیین اثر به‌منظور انتخاب بهترین روش مرمت انجام شد. نقاط نمونه‌برداری در شکل ۱، نمایش‌داده‌شده است. قبل از نمونه‌برداری برای جلوگیری از خطا در آزمایش ورنی روی آن به‌وسیله الکل و استن (نسبت ۱ به ۱) برداشته شد و سپس نمونه‌برداری انجام گرفت. رنگ‌های سبز، سفید و طلایی از نگاره‌ی جلوی جعبه و از درب نمونه رنگ قرمز لباس نگاره و همچنین ورنی روی جعبه جهت شناسایی انتخاب شدند.

۲-۲. میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به پراکندگی پرتوایکس

جهت شناسایی عناصر موجود در رنگ‌دانه از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM) مدل MIRA3-FEG-SEM مجهز به دستگاه طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتوایکس (EDS) محصول شرکت TESCAN کشور جمهوری چک استفاده گردید. این آنالیز در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه تبریز انجام شد. در انتخاب نمونه‌ها سعی بر آن شد که نمونه‌ها فاقد ورنی باشند تا عناصر موجود در ساختار باسقت بیشتری شناسایی گردند. آنالیز EDS نمونه‌ها بدون اجرای پوشش با توان ولتاژ kV 15 انجام شد.

۲-۳. طیف‌سنجی رامان

طیف‌سنجی رامان از رنگ‌دانه‌ها، در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه تبریز به‌وسیله دستگاه رامان کونفوکال مدل UniDron-A محصول شرکت فناوری Andor کشور کره، توسط لیزری با طول‌موج nm ۵۳۲ و توان ۵۰mw با صافی‌های ۲۰-۳۰ درصد از توان لیزر و سیگنال‌های ۱۰ تکرار ۱۰ ثانیه‌ای در دمای آزمایشگاه ثبت شدند. همچنین دیتابیس CHSOS

به‌عنوان مرجع طیف رامان جهت تفسیر و تحلیل طیف‌ها مورداستفاده قرار گرفت (CHSOS., 2019).

۲-٤. طیف‌سنج مادون‌قرمز تبدیل فوریه (FTIR)

برای تهیه طیف مادون‌قرمز تبدیل فوریه، از ورنی روی جعبه ابتدا با کمک تیغ بیستوری تمیز نمونه‌برداری و تقریباً صد برابر آن برمید پتاسیم (KBr) افزوده و قرص ساخته شد (Fedotov et al., 2009). سپس به‌وسیله دستگاه JASCO 680-plus ساخت کشور ژاپن در محدوده cm^{-1} ۴۰۰۰ – ۴۰۰ با ۳۲ اسکن و قدرت تفکیک $4cm^{-1}$ در دانشگاه هنر اسلامی تبریز طیف‌سنجی شد.

۲-۵. میکروسکوپ نوری پلاریزان

جهت بررسی ویژگی‌های بلوری رنگ‌دانه‌ها، از میکروسکوپ نوری پلاریزان مدل BX51 ساخت شرکت OLYMPUS (ژاپن)، متصل به دوربین دیجیتال Canon استفاده شد. برای تهیه تصاویر، ابتدا رنگ‌دانه‌ها به‌صورت پودر درآمدند. سپس پودر تهیه‌شده در بین لام و لامل قرار گرفت و به‌منظور تثبیت نمونه، از گلیسیرین استفاده شد. در نهایت، تصاویر میکروسکوپی تهیه و ثبت گردید (Walsh & Eastaugh, 2006).



شکل ۱. جعبه هزار پیشه و محل نمونه‌گیری جهت شناسایی مواد به‌کاررفته در تزئینات اثر،S1 رنگ سفید،S2: رنگ سبز،S3: رنگ قرمز،S4: ورنی پوششی روی جعبه،S5: رنگ طلایی کادربندی.

Figure 1. The "Hezar-Pisheh" box and sampling locations for the identification of materials used in its decorations: S1 – white paint; S2 – green paint; S3 – red paint; S4 – surface varnish of the box; S5 – gold paint used for framing.

جدول ۱. نتایج عناصر به‌دست‌آمده از آنالیز SEM-EDS از رنگ‌دانه‌های جعبه هزار پیشه

Table 1. Elemental analysis results obtained from SEM–EDS of the pigments used in the "*Hezar-Pisheh*" box.

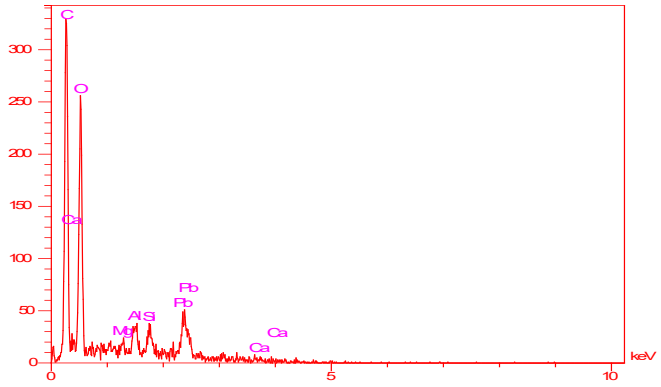
Elm. / Sample	C	O	N	Na	Pb	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Fe	Cu	Au	Ca
S1	49.08	40.65	---	---	6.19	0.87	1.63	1.39	---	----	----	----	----	---	0.07
S2	53.83	29.17	7.64	---	7.02	0.50	0.42	0.47	---	0.24	---	---	0.48	---	0.24
S3	40.30	39.73	8.95	0.25	9.54	---	0.59	0.35	---	---	---	0.29	---	---	---
S5	50.68	39.29	---	--	----	0.80	0.32	0.65	0.16	0.23	0.10	---	0.41	7.37	---

٤. یافته‌ها و بحث

میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به پراکندگی پرتو ایکس، به‌طور گسترده برای شناسایی در اشیا هنری و باستان‌شناسی مورداستفاده قرار گرفته است. این دستگاه یکی از قدرتمندترین ابزارها برای شناسایی رنگ‌دانه‌های تاریخی محسوب می‌شود. از این‌رو، در این تحقیق نیز این ابزار جهت شناسایی اولیه عناصر موجود در رنگ‌دانه‌ها مورداستفاده قرار گرفت. در جدول ۱ نتایج حاصل از آنالیز SEM-EDS رنگ‌دانه‌ها ارائه‌شده است. درصد وزنی عناصر شناسایی شده در جدول مذکور مرتب گردیده که در تحلیل و شناسایی رنگ‌دانه‌ها به آن استناد می‌گردد.

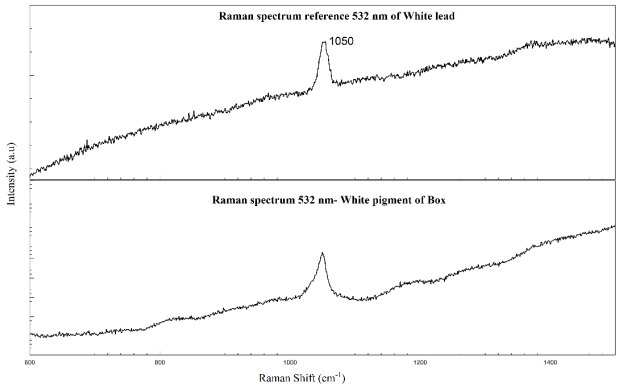
٤-١. رنگ‌دانه سفید (S1)

در جدول ۱، نتایج آنالیز عنصری SEM-EDS از رنگ‌دانه سفید نشان داد که حاوی میزان قابل توجهی از عنصر سرب (Pb) است (شکل ۲). همچنین عناصر دیگر مانند منیزیم، آلومینیوم، سیلیسیم و کلسیم قابل مشاهده است که احتمالاً مربوط لایه بستر رنگ زمینه و ناخالصی همراه نمونه باشد (جدول ۱). از بین رنگ‌دانه‌های سفید تاریخی با پایه سرب، سفیداب سرب که از سوزاندن سرب حاصل می‌شود محتمل بود. طیف رامان رنگ‌دانه سفید با مرجع سفید سرب مقایسه و مطابقت داده شده است (شکل ۳). در طیف رامان رنگ‌دانه سفید جذب قوی در ۱۰۵۰ cm^{-1} از مشخصه سفید سرب قابل مشاهده و شناسایی است (Kostadinovska et al., 2013; Rosi et al., 2011). سفید سرب از ترکیب دو فاز بلوری بانام‌های سیروزیت ($PbCO_3$) و هیدروسیت ($Pb_3(CO_3)_2(OH)_2$) در نسبت‌های متغیر تشکیل شده است. این رنگ‌دانه پرکاربرد به‌صورت جداگانه و یا ترکیب با سایر رنگ‌دانه‌ها از دوران باستان تا قرن بیستم کاربرد فراوانی داشته است (Gonzalez et al., 2017). سفیداب شیخ یا سفید سرب یک رنگ‌دانه پرکاربرد در هنر ایران به‌شمار می‌رود و در نقاشی‌ها به‌عنوان رنگ‌دانه سفید، بستر نقاشی، لایه تدارکاتی و همچنین در مقالات به‌عنوان پرکننده در یک نقاشی دیواری مربوط به دوره قاجار نیز گزارش شده‌است (حاجی سید جوادی و دیگران، ۱۴۰۱).



شکل ۲. آنالیز عنصری SEM-EDS حاصل از رنگ‌دانه سفید.

Figure 2. SEM–EDS elemental analysis of the white pigment.



شکل ۳. طیف‌سنجی رامان رنگ‌دانه سفید و مقایسه آن با طیف مرجع سفید سرب.

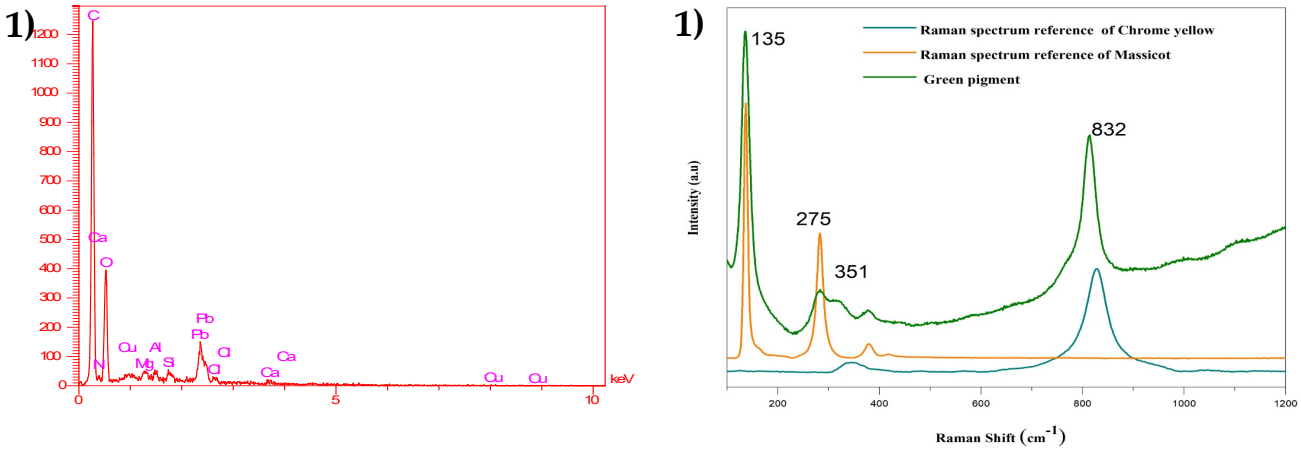
Figure 3. Raman spectroscopy of the white pigment and its comparison with the reference spectrum of lead white pigment.

٤-٢. رنگ‌دانه سبز (S2)

در شکل (۱)۴، عناصر به دست آمده از آنالیز SEM-EDS رنگ‌دانه سبز، درصد قابل توجه سرب و درصد کمی مس شناسایی شدند. همچنین سایر عناصر از قبیل کلسیم، سیلیسیم، آلومینوم و منیزیم قابل مشاهده است که احتمالاً مربوط به لایه بستر و مقادیر جزئی از وجود ناخالصی باشند. در

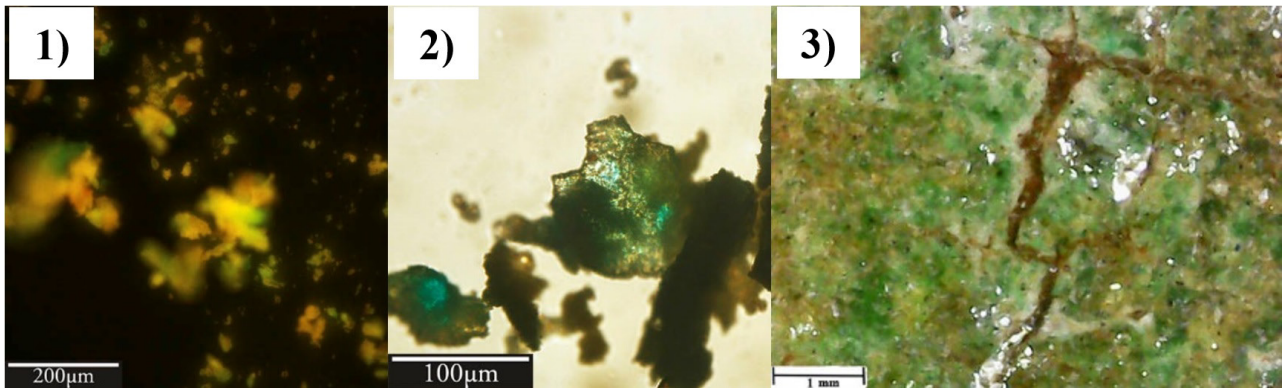
تصاویر میکروسکوپی از رنگ‌دانه رنگ سبز مورد پژوهش، ترکیبی از ذرات زرد و سبزآبی قابل مشاهده است (شکل ۵). در شکل (۲)۴، طیف رامان رنگ‌دانه سبز با شاهد زرد کروم و ماسیکوت (PbO) مطابقت داده شد. طبق پژوهش انجام شده، کرومات سبز در ناحیه ۸۳۲ و ۳۵۱ cm^{-1} دارای ارتعاش است که در طیف رنگ‌دانه سبز نمونه مورد پژوهش نیز مشاهده می‌شود. همچنین بیان شده است که ترکیب کرومات سبز با رنگ‌دانه آبی (معمولا آبی پروس)، رنگ سبز کروم را تشکیل می‌دهند. جذب در ۱۳۵ و ۲۷۵ cm^{-1} نیز می‌تواند به دلیل اکسید سرب که ناشی از تخریب کرمات سرب و تشکیل PbO به واسطه حرارت لیزر رامان است، نسبت داد (کوچکزایی و معرفت ایزدی ۱۴۰۳). قابل ذکر است که عنصر کروم در آنالیز SEM-EDS دقیقاً در محدوده اکسیژن (O) همپوشانی و دارای جذب است که احتمالاً در آنالیز EDS بررسی نشده است. با توجه به نتایج به دست آمده و مقایسه‌ی آن با نتایج دیگر پژوهش‌ها، احتمالاً رنگ سبز مورد مطالعه از نوع سبز کروم است.

گستردگی استفاده از این رنگ در گذشته نیز این احتمال را قوی‌تر می‌کند. در سال ۱۸۰۹م. ووکلن برای اولین بار کرومات سرب را سنتز کرد و ۱۳ سال بعد، مقادیر تجاری آن در دسترس قرار گرفت و در آغاز قرن نوزدهم نیز تولید آن در اروپا آغاز شده است (Erkens et al., 2001). لازم به ذکر است که شناسایی رنگ‌دانه‌هایی که به‌صورت خالص استفاده می‌شدند پیچیدگی زیادی ندارند و می‌توان با ابزارهای آنالیز، شناخت دقیق و کاملی به دست آورد. اما در رنگ‌هایی که به‌صورت ترکیبی تهیه می‌شدند تشخیص ترکیب رنگ با توجه به حساسیت کار و عناصر محیطی در چالش‌های شناسایی دخیل هستند و با توجه به محدودیت نمونه‌برداری در اثر مورد مطالعه، امکان تهیه نمونه از بخش‌های دیگر اثر مقدور نبوده و نتیجه‌ی به‌دست‌آمده، از آنالیز و تفسیر داده‌های موجود و با استناد به پژوهش انجام شده‌ی مشابه صورت گرفت.



شکل ٤. آنالیز عنصری SEM-EDS حاصل از رنگ‌دانه سبز (۱)، طیف رامان رنگ‌دانه سبز نمونه و طیف مرجع رنگ‌دانه زرد کروم و ماسیکوت (۲).

Figure 4. SEM–EDS elemental analysis of the green pigment (1); Raman spectrum of the green pigment sample and its comparison with the reference spectra of chrome yellow and massicot pigments (2).

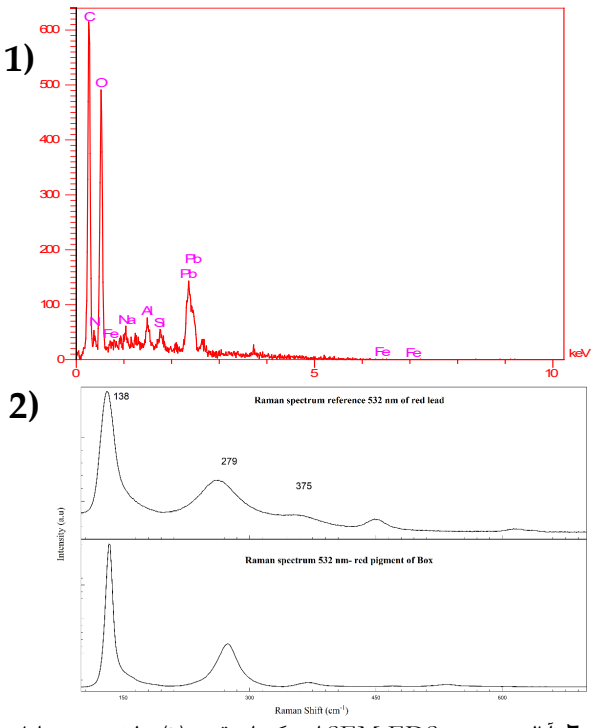


شکل ۵. تصویر میکروسکوپ دیجیتال و مشاهده ترکیب رنگ‌دانه سبز و زرد (۱)، تصاویر میکروسکوپ پلاریزان نور ساده (۲) و متقاطع و مشاهده ترکیب رندانه سبز و زرد در رنگ (۳).

Figure 5. Digital microscope image showing the combination of green and yellow pigments (1); polarized light microscopy image under plane-polarized light (2); polarized light microscopy image under crossed-polarized light, showing the mixture of green and yellow pigments in the paint layer (3).

٤-٣. رنگ‌دانه قرمز (S3)

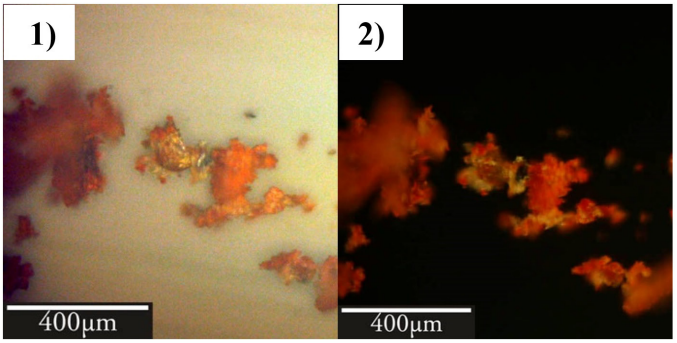
نتایج حاصل از آنالیز SEM-EDS به‌غیراز عناصر کربن و اکسیژن، درصد قابل‌توجهی عنصر Pb ثبت شد (جدول ١). سایر عناصر جزئی مانند سدیم، سلیسیوم و آلومینیوم مشاهده می‌شود که می‌توان به خاک و ناخالصی‌های بستر نقاشی نسبت داد (حاجی سید جوادی و دیگران، ١۴٠١). جهت شناسایی رنگ‌دانه قرمز (S3)، طیف رامان حاصل از رنگ‌دانه با طیف مرجع قرمز سرب مطابقت داده شد. باندهای شاخص ١٣٨، ٢٧٩، ٣٧٥ و ۵۴۵cm^{-1} از مشخصه قرمز سرب در طیف رنگ‌دانه قابل‌ملاحظه است (Franquelo & Perez-Rodriguez, 2016; Li et al., 2024). با توجه به نتایج به‌دست‌آمده قرمز به‌کاررفته در لباس نگاره از نوع قرمز سرب شناسایی شد. قرمز سرب در نور قطبیده ساده، با ذراتی به رنگ نارنجی مات تا قرمز دیده می‌شود و اندازه ذرات بسته به نمونه از بسیار ریز تا متوسط متغیر است. در زیر نور قطبی متقاطع، قرمز-نارنجی قوی دارای درخشش ذرات و نیز دارای انکسار دوگانه متوسط دیده می‌شود (شکل ۶) (Eastaugh et al., 2007).



شکل ٦. آنالیز عنصری SEM-EDS از رنگ‌دانه قرمز (١)، طیف‌سنجی رامان رنگ‌دانه قرمز و مقایسه آن با طیف مرجع رنگ‌دانه قرمز سرب (٢).

Figure 6. SEM–EDS elemental analysis of the red pigment (1); Raman spectroscopy of the red pigment and its comparison with the reference spectrum of red lead pigment (2)

قرمز سرب یا سرنج با نام علمی تتراکسید سرب (III) Pb_3O_4 از اکسید سرب (II) به‌دست می‌آید. بر اساس منابع مکتوب، سابقه‌ی استفاده از آن در ایران، به قرون سوم و چهارم هجری می‌رسد. سرنج به‌عنوان یکی از رنگ‌دانه‌های پرکاربرد، در زمینه‌های مختلف هنری از قبیل نسخ خطی و نقاشی دیواری در طول تاریخ و در ایران استفاده شده‌است (نوغانی و دیگران،١۴٠٣). استفاده از این رنگ‌دانه در تزئینات روی چوب خانه‌ی تقوی گرگان مربوط به دوره قاجار نیز شناسایی شده است (حمزوی و دیگران، ١۴٠٣).

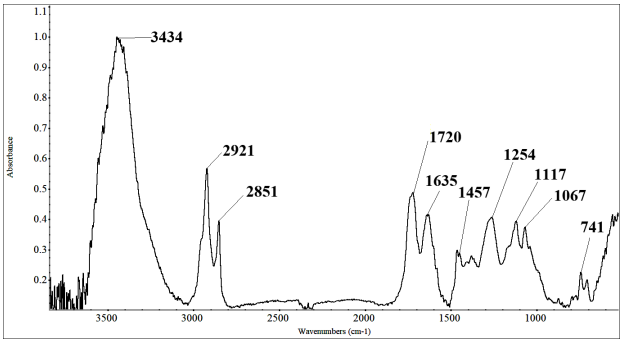


شکل ٧. تصاویر میکروسکوپ نوری پلاریزان به دست آمده با نور ساده (١) و متقاطع (٢).

Figure 7. Polarized light microscopy images obtained under plane-polarized light and (1); crossed-polarized light (2).

٤-٤. شناسایی ورنی و رنگ طلایی نقاشی

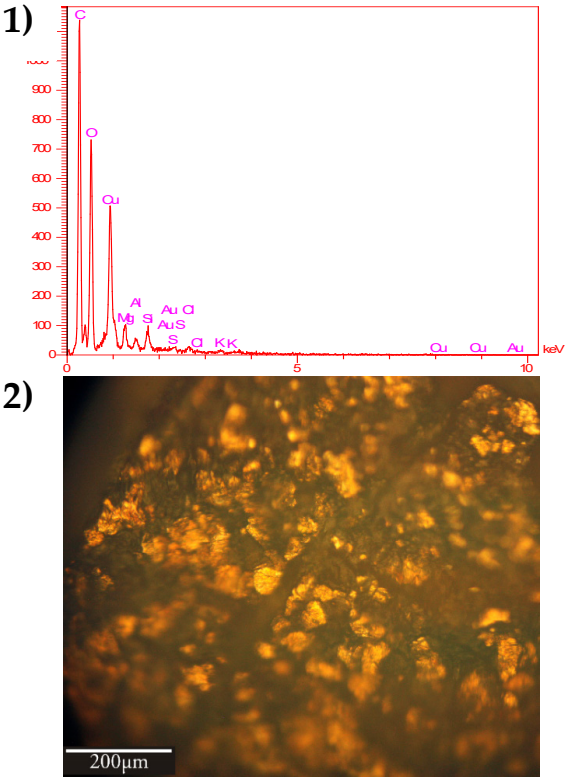
جهت شناسایی لایه پوششی روی جعبه با به‌کارگیری از آنالیز FTIR مورد ارزیابی قرار گرفت. در شکل ٨، طیف مادون قرمز حاصل از ورنی نمایش داده شده است. جذب در محدوده‌ی ٣۴٠٠ cm^{-1} – ٣۶٠٠ به ارتعاشات کششی O-H پیوند هیدروژنی نسبت داده می‌شود. همچنین ارتعاشات کششی C-H در طیف با نوارهای جذب مشخصه محدوده ٢٩٢۴ cm^{-1} و ٢٨۵٢ ظاهر می‌شوند (Bumbac et al., 2017). به‌طور کلی جذب در محدوده ١٧٧٠ cm^{-1}-١۶٨٠، ١٠٠٠ cm^{-1}-١٣۶٠ و ۶٣٠ cm^{-1}-٨٠٠ به ترتیب از گروه استر C=O، استر C-O-C و C-H آروماتیک و حلقه خمشی آروماتیک است. نوارهای جذبی در حوالی ١۴۵٣ cm^{-1} و ١٧٢۵ به ترتیب ناشی از حضور پیوند کششی گروه‌های هیدرکسیل و کربوکسیلیک اسید از آلکید رزین است. پیک در ١٢۵۴ cm^{-1} نشان‌دهنده وجود کشش پیوند C-O مربوط به استرهای بنزوئیک اسید است که در ساختار رزین ملامین وجود دارد. در حالی که نوارهای جذبی که در ١١١٧ cm^{-1} و١٠۶٧ cm^{-1} ظاهر می‌شوند، به ارتعاشات پیوندهای کششی C-O از گروه‌های الکل آزاد در آلکید رزین دلالت می‌کنند. باند ٧۴١ cm^{-1} نیز مربوط به پیوند خمشی خارج از صفحه O-H است (Bumbac et al., 2017; Obidiegwu et al., 2016). آلکید رزین به‌عنوان ورنی در قلمدان‌های متعلق به پهلوی اول نیز شناسایی شده است. این رزین از قرن بیستم میلادی توسط هنرمندان ایرانی در ساخت جعبه‌های لاکی بکار گرفته شده است و جایگزین پوشش‌هایی مانند روغن کمان و شلاک شده است (Koochakzaei et al., 2021). با توجه به نتایج به دست آمده آلکید رزین به‌عنوان لایه پوششی جعبه مورد پژوهش شناسایی می‌شود.



شکل ۸. طیف FTIR حاصل از ورنی روی جعبه.

Figure 8. FTIR spectrum of the varnish layer on the box.

در قسمت‌های مختلف جعبه از رنگ طلایی جهت تزیین جعبه و کادربندی استفاده شده است. در تصویر میکروسکوپی انعکاسی به‌دست‌آمده از میکروسکوپ پلاریزان (شکل (۲)۹)، ذرات ریز طلایی‌رنگ دیده می‌شود. جهت شناسایی بخش طلایی، آنالیز SEM-EDS صورت گرفت. بررسی انجام شده حاکی از وجود درصد قابل‌توجهی از عناصر طلا و مقادیر جزئی از عنصر مس در این رنگ است. نتایج نشان‌دهنده کاربرد آلیاژ طلا و مس در نمونه موردمطالعه است. استفاده از آلیاژهای مس در رنگ طلایی، در تزیین کتیبه کاغذی خانه انصارین تبریز مربوط به دوره قاجار نیز شناسایی شده است (کوچکزایی و دیگران، ۱۳۹۴).



شکل ۹. آنالیز SEM-EDS و عناصر به دست آمده از ذرات طلایی (۱) و تصویر میکروسکوپی انعکاسی از سطح رنگ (۲).

Figure 9. SEM–EDS analysis and elemental composition of the gold particles (1); reflected-light microscopic image of the painted surface (2).

۵. نتیجه‌گیری

جعبه چوبی هزار پیشه به‌عنوان یکی از اولین جعبه‌های بسته‌بندی در ایران بشمار می‌رود. در این پژوهش مواد به‌کاررفته در تزیینات و نقاشی چهره روی جعبه چوبی هزار پیشه با به‌کارگیری آنالیزهای تحلیلی چندگانه موردبررسی قرار گرفت. در آنالیز SEM-EDS رنگ سفید فلز سرب، عنصر شاخص رنگ‌دانه سفیداب سرب (سفیداب شیخ) شناسایی شد. در طیف رامان رنگ‌دانه سفید، جذب قوی در ۱۰۵۰ cm^{-1} از مشخصه سفید سرب، استفاده از این رنگ‌دانه را تأیید می‌کند. در رنگ‌دانه قرمز نیز حضور سرب در آنالیز عنصری و همچنین مطابقت طیف رامان با قرمز سرب نشان داد که رنگ‌دلنه‌ی سرنج (رنگ‌دلنه پرکاربرد قرمز در هنرهای سنتی ایران)، در نواحی قرمز چهره به‌کارگرفته‌شده است. آنالیز SEM-EDS حاصل از رنگ سبز، حضور عنصر شاخص سرب به‌عنوان ماده رنگزا در ساخت رنگ‌دانه مورد تجزیه تحلیل قرار گرفت. در طیف رامان، ارتعاشات مشخص در ناحیه‌های ۸۳۲ و ۳۵۱cm^{-1} ناشی از کرمات سرب دیده شد. سبز کروم معمولاً از ترکیب رنگ‌دلنه‌های زرد کروم و آبی (مانند آبی پروس) تشکیل می‌شود. جذب در ۱۳۵ و ۲۷۵cm^{-1} ناشی از تشکیل اکسید سرب (PbO) در اثر تخریب کرومات سرب تحت تأثیر حرارت لیزر رامان را تائید می‌کند؛ بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده احتمالاً از سبز کروم جهت نقاشی رنگ سبز استفاده شده است. شناسایی ذرات ریز ورق طلا (آلیاژ طلا با مقادیر جزئی مس) در تزیینات طلایی، کاربرد روش‌های تزیینی باارزش را در این اثر تأیید می‌کند. با توجه به شناسایی آلکید رزین به‌عنوان لایه‌ی ورنی روی نقاشی، ساخت جعبه در دوره قاجار دور از انتظار است و یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که اثر احتمالاً در زمان پهلوی اول ساخته شده است. شناسایی و تحلیل دقیق مواد به‌کاررفته در آثار هنری تاریخی می‌تواند نقش مهمی در شناخت اصالت، فناوری ساخت و تعیین راهکارهای مرمتی ایفا کند. در این میان آنالیز طیف‌سنجی رامان ابزار کارآمدی در شناسایی رنگ‌دانه‌های تاریخی به‌ویژه برای ترکیبات معدنی بشمار می‌رود که ترکیب آن با روش‌هایی مانند FTIR و SEM-EDS می‌تواند دقت و صحت تحلیل را افزایش دهد.

تشکر و قدردانی: از جناب آقای علی رضا پور شمس جهت در اختیار گذاشتن اثر مورد مطالعه، دکتر محبوب علیزاده بابت بازبینی و ارائه نظرات سازنده خود و همچنین دانشگاه هنر اسلامی تبریز جهت حمایت‌های معنوی این پژوهش قدردانی بعمل می آید.

مشارکت نویسندگان: نویسنده اول آنالیزهای تحقیق را طراحی کرده و داده‌ها را تفسیر، تجزیه‌وتحلیل کرده است. نویسنده دوم در مراحل آزمایش شرکت داشته و نتایج را موردبررسی قرار داده است.

تأمین مالی: این پژوهش هیچ بودجه خارجی دریافت نکرده است.

تضاد منافع: نویسندگان هیچ‌گونه تضاد منافع را اعلام نمی‌کنند.

دسترسی به داده‌ها و مواد: تمام داده‌های مورد استفاده در این مقاله در این نسخه انتشار یافته در دسترس هستند..

References

Abdel-Ghani, M. (2022). Multidisciplinary study of a Qajar lacquered painting: Technology and materials characterization. *Vibrational Spectroscopy*, *119*, 103355. https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2022.103355

Agha-Aligol, D., Khosravi, F., Lamehi-Rachti, M., Baghizadeh, A., Oliaiy, P., & Shokouhi, F. (2007). Analysis of 18th–19th century's historical samples of Iranian ink and paper belonging to the Qajar dynasty. *Applied Physics A*, *89*(3), 799-805. https://doi.org/10.1007/s00339-007-4178-3

Akyol, A. A., & Houreh, N. D. (2019). Deterioration Problems and Pigment Analyses of the Qajar Period Wall Paintings from Shah Bath in Isfahan. *Akademik Sanat*, *4*(7), 210-226.

Bumbac, M., Zaharescu, T., & Nicolescu, C. M. (2017). Thermal and radiation stability of alkyd based coatings used as insulators in the electrical rotating machines. *Journal of Science and Arts*, *1*(38), 119-130.

CHSOS., C. H. S. O. S. (2019). *FREE Spectra Databases. Pigments Checker v.5*

Dawson, T. L. (2007). Examination, conservation and restoration of painted art. *Coloration Technology*, *123*, 281-292. https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.2007.00096.x

Eastaugh, N., Walsh, V., Chaplin, T., & Siddall, R. (2007). *Pigment compendium: a dictionary of historical pigments*. Routledge.

Erkens, L., Hamers, H., Hermans, R., Claeys, E., & Bijnens, M. (2001). Lead chromates: a review of the state of the art in 2000. *Surface Coatings International Part B: Coatings Transactions*, *84*(3), 169-176. https://doi.org/10.1007/BF02700395

Fedotov, A., Shakhtshneider, T., Chesalov, Y. A., & Surov, E. (2009). The effects of tableting with potassium bromide on the infrared absorption spectra of indomethacin. *Pharmaceutical Chemistry Journal*, *43*, 68-70.

Franquelo, M. L., & Perez-Rodriguez, J. L. (2016). A new approach to the determination of the synthetic or natural origin of red pigments through spectroscopic analysis. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, *166*, 103-111. https://doi.org/10.1016/j.saa.2016.04.054

Gardner, M., & Rogge, C. E. (2023). Beauty revealed: technical analysis and treatment of Zand and Qajar Oil paintings. *Journal of the American Institute for Conservation*, *62*(4), 264-284. https://doi.org/10.1080/01971360.2022.2138245

Gonzalez, V., Gourier, D., Calligaro, T., Toussaint, K., Wallez, G., & Menu, M. (2017). Revealing the origin and history of lead-white pigments by their photoluminescence properties. *Analytical Chemistry*, *89*(5), 2909-2918. https://doi.org/10.1021/acs.analchem.6b04195

Hajisayyedjavadi, S. M., Karimpanah, S., Mokabrian, M., & Tousian Shandiz, G. (2023). Technical Study of Different Layers of Decorative Murals of Imamzadeh Hossein in Qazvin. Parseh Journal of Archaeological Studies, 6(22), 351-378. [In Persian]. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455048.1401.6.22.14.3

Hamzavi, Y., Harandi, D., Niazi, F., & Haji Seyyed Javadi, S. M. (2024). An Investigation into the Characterization of the painted wooden Shir-Sar of Taqavi house in Gorgan. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 39(3), 210-230. [In Persian]. https://doi.org/10.22092/ijwpr.2024.365427.1772

Harth, A. (2024). The study of pigments in cultural heritage: A review using machine learning. *Heritage*, *7*(7), 3664-3695. https://doi.org/10.3390/heritage7070174

Khalili, N. D. (1988). *Persian lacquer painting in the 18th and 19th centuries*. University of London, School of Oriental and African Studies (United Kingdom).

Klöckl, I. (2023). *Handbook of Colorants Chemistry: In Painting, Art and Inks*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG.

Koochakzaei, A., Mohammadi Achachluei, M., & Borzouyan, M. (2024). A Micro-Analytical Approach for Pigments Identification on Qajarid Wooden Panels in Isfahan: Identification of Conichalcite as a Degradation Product of Emerald Green. *Progress in Color, Colorants and Coatings*, *18*(1), 73-85. https://doi.org/10.30509/pccc.2024.167302.1294

Koochakzaei, A., Nemati Babaylou, A., & Jelodarian Bidgoli, B. (2021). Identification of Coatings on Persian Lacquer Papier Mache Penboxes by Fourier Transform Infrared Spectroscopy and Luminescence Imaging. *Heritage*, *4*(3), 1962-1969. https://doi.org/10.3390/heritage4030111

Koochakzaei, A., Nemati Babaylou, A., & Daneshpoor, L. Identification of pigments used in decoration of paper inscription related to Ansarin house of Tabriz. J Color Sci Tech. 2015; 9 (4): 297-306. [In Persian].

https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.17358779.1394.9.4.3.2

Koochakzaei, A., & Marefat-Izady, P. (2024). Application of Micro-Raman Spectroscopy for Identifying Pigments in Qajar Papier-Mache Penboxes (Qalamdan). *Journal of Color Science and Technology*, *18*(1), 57-66. [In Persian]. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.17358779.1402.18.1.5.7

Kostadinovska, M., Jakovleska-Spirovska, Z., & Minčeva-Šukarova, B. (2013). A spectroscopic study of inks from a rare Old Slavic manuscript: Liturgical Collection of chronicles, scriptures, etc. 2nd Virtual International Conference on Advanced Research in Scientific Areas,

Li, Y., Ma, J., He, K., & Wang, F. (2024). Raman Study of 532-Nanometer Laser-Induced Degradation of Red Lead. *Materials*, *17*(4), 770. https://doi.org/10.3390/ma17040770

Noghani, S., Modarresi, P., & Jafari, R. (2024). Rereading the Preparation methods of Minium, Vermilion and Realgar Based on the Text of Ten Historical Treatises from the 4th to the 11th Century AH. Journal of Studies in Color World, 14(3), 237-252. [In Persian]. 10.30509/jscw.2024.167329.1193

Obidiegwu, M., Uzoma, P., Ezeh, V., Nwanonenyi, S., Usifoh, I., & Moneke, U. (2016). Structural characterization of sandbox seed oil-modified alkyd resin. *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, *12*(3), 1-8.

Pastoureau, M. (2023). *Blue: The history of a color*. Princeton University Press.

Roohi, S., & Holakooei, P. (2023). Art historical and scientific controversies about four easel paintings attributed to Kamal al-Molk, the renowned nineteenth-twentieth century Persian painter. *Heritage Science*, *11*(1), 197. https://doi.org/10.1186/s40494-023-01033-z

Rosi, F., Manuali, V., Grygar, T., Bezdicka, P., Brunetti, B., Sgamellotti, A., Burgio, L., Seccaroni, C., & Miliani, C. (2011). Raman scattering features of lead pyroantimonate compounds: implication for the non-invasive identification of yellow pigments on ancient ceramics. Part II. In situ

Walsh, V., & Eastaugh, N. (2006). Historical pigment research: the work of the Pigmentum Project. *Infocus Magazine*, *41*(2), P38.

characterisation of Renaissance plates by portable micro-Raman and XRF studies. *Journal of Raman Spectroscopy*, *42*(3), 407-414. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jrs.2699

Harandi, D. & Javani, M. (2025). Identification of Materials Used in the Decorations and Portrait Painting of the Hezar-Pisheh Wooden Box Through a Multi-Analytical Methods. *Journal of research on Archaeometry, 11*(1), 441. DOI: 10.61882/jra.2025.11.107