

تحلیل چندگانه تکنیک‌های طلاکاری در دیوارنگاری‌های دوره زندیه: مطالعه موردی

ارگ کریم خانی و دیوانخانه شیراز

مریم شیروانی^۱، سعیده رفیعی^۲

مقاله پژوهشی

JSCW-2509-1264

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴-۰۷-۰۷

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۴-۰۹-۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴-۰۹-۱۲

خواهشمند است این مقاله به صورت زیر در مراجع قید شود:

م.شیروانی، س. رفیعی "تحلیل چندگانه تکنیک‌های طلاکاری در دیوارنگاری‌های دوره زندیه: مطالعه موردی ارگ کریم خانی و

دیوانخانه شیراز"، نشریه علمی مطالعات در دنیای رنگ JSCW-2509-1264 این فایل PDF مقاله ویرایش نشده است که برای

چاپ پذیرفته شده است. ماکت مقاله توسط دفتر نشریه مطالعات در دنیای رنگ تهیه شده و قبل از چاپ ویرایش نهایی به

نویسنده مسئول مقاله ارسال می‌شود.

تحلیل چندگانه تکنیک‌های طلاکاری در دیوارنگاری‌های دوره زندیه: مطالعه موردی

ارگ کریم خانی و دیوانخانه شیراز

مریم شیروانی^{۱*}، سعیده رفیعی^۲

۱- استادیار، دانشکده معماری و مرمت، گروه مرمت، دانشگاه هنر شیراز، شیراز، ایران، کدپستی: ۷۱۴۶۶۹۶۹۸۹.

۲- استادیار، دانشکده هنرهای صنعتی، گروه فرش، دانشگاه هنر شیراز، شیراز، ایران، کدپستی: ۷۱۴۶۶۹۶۹۸۹

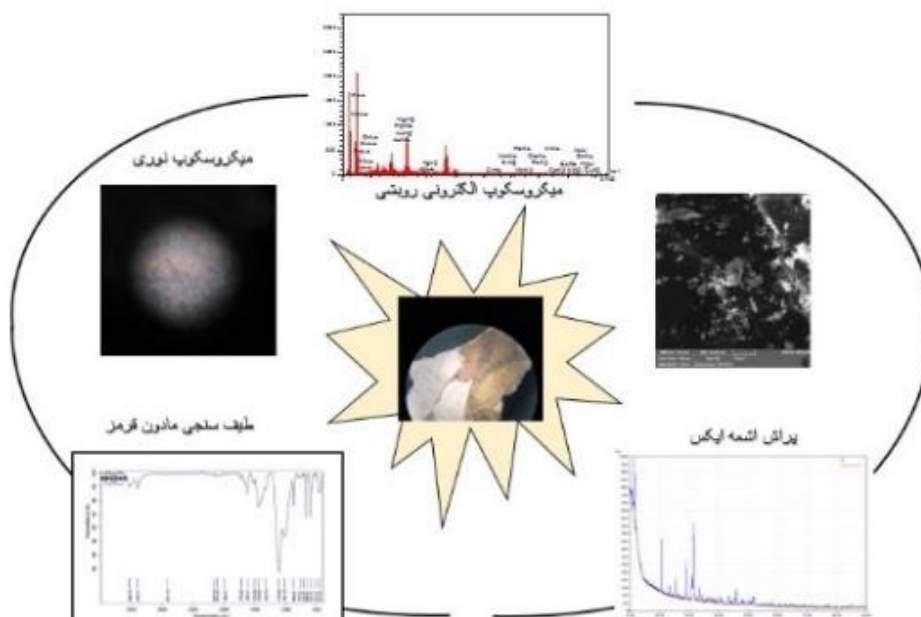
*M_shirvani@shirazartu.ac.ir

چکیده

پژوهش حاضر نخستین مطالعه جامع ساختارشناسی لایه طلاکاری در دیوارنگاری‌های دوره زندیه است که بر اساس نمونه‌برداری از ارگ کریم‌خانی و عمارت دیوانخانه شیراز، ترکیب شیمیایی، ساختاری و مکانیسم‌های تخریب این آرایه‌های تزئینی بررسی شده است. روش پژوهش با استفاده از رویکرد چندآزمایشگاهی شامل طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR)، پراش اشعه ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به طیف‌نگاری پراش انرژی پرتو ایکس (SEM-EDS) و رنگ‌سنجی (سیستم CIELAB)، انجام پذیرفته و یافته‌ها نشان‌دهنده تفاوت‌های قابل توجه بین دو بنا هستند: در ارگ کریم‌خانی، لایه طلایی عمدتاً از ورق‌های طلا با خلوص بالا حدود ۷۰٪ (Au) (بر بستری از گچ هیدراته $(CaSO_4 \cdot 2H_2O)$ و آنهیدریت $(CaSO_4)$ همراه با چسب پروتئینی (سریشم) و روغن تشکیل شده، که با سطح صاف‌تر و روشنایی بالاتر ($L^* \approx 63.13$) همراه است. در مقابل، عمارت دیوانخانه از تکنیک ملغمه طلا با حدود ۷۰٪ Hg و ۲۰٪ Au بهره برده، که حضور عناصر فلزی فرعی مانند مس (Cu)، نقره (Ag)، روی (Zn)، نیکل (Ni) و آهن (Fe) را نشان می‌دهد و با ناهمواری سطحی و روشنایی کمتر ($L^* \approx 57.55$) مشخص می‌شود. FTIR حضور پروتئین و روغن را تأیید کرد، XRD فازهای معدنی غالب (گچ و هانتیت) را شناسایی نمود، و SEM-EDS تفاوت‌های عنصری را برجسته ساخت. نتایج حاصل شده نشان می‌دهد که حساسیت بستر گچی بر رطوبت بر خطرات خوردگی حیوه تاثیر داشته است. یافته‌ها می‌تواند بر گزینش استراتژی حفاظت تاثیر داشته و تفاوت تکنیکی دوران زند با دیگر دوران‌ها را نشان دهد و پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده مانند استفاده از تکنیک‌های مکمل رامان یا XRF ارائه می‌دهند.

کلمات کلیدی: دوره زندیه، طلاکاری، طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه، پراش اشعه ایکس، میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به طیف‌نگاری پراش انرژی پرتو ایکس، رنگ‌سنجی

روش شناسایی رنگدانه طلا دیوارنگاره زندیه



Multi-Analytical Investigation of Gilding Techniques in Zand Dynasty Mural Paintings: A Case Study of Karim Khan Castel and Divankhaneh Mansion in Shiraz

Maryam Shirvani*¹, Saeedeh Rafiei²

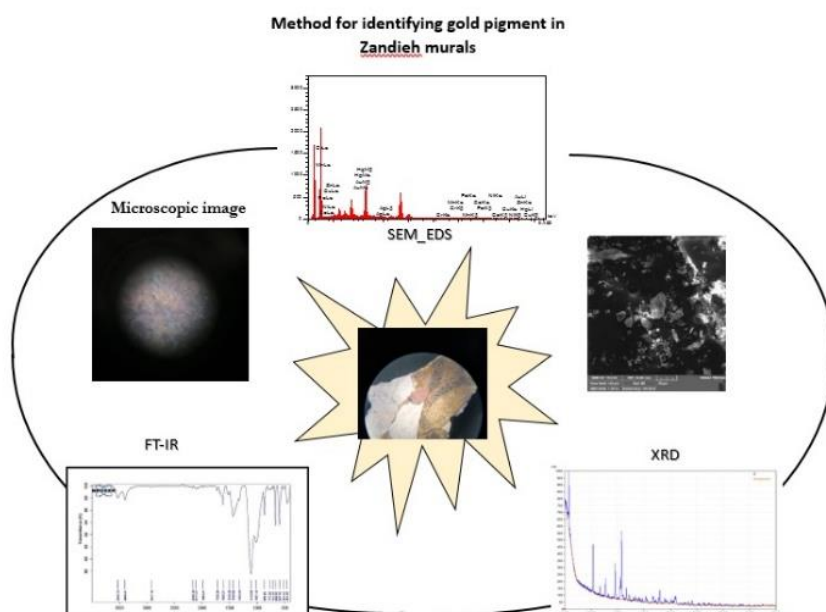
1- Department of Restoration of historical buildings, Faculty of Architecture and Restoration, Shiraz University of Arts, P. O. Code: 7146696989, Fars, Iran.

2- Department of Carpet, Faculty of Applied Arts, Shiraz University of Arts, P. O. Code: 7146696989, Fars, Iran.

Abstract

This study represents the first comprehensive structural analysis of gilding layers in Zand-era mural paintings. Employing a multi-analytical approach including FTIR, XRD, SEM-EDS, and CIELAB, the chemical composition, structure, and degradation mechanisms of these decorative layers were investigated. The findings reveal significant differences between the two sites: in the Karim Khan Citadel, the gold layer primarily consists of high-purity gold foil (approximately 70% Au) applied over a gypsum-based substrate ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and CaSO_4) with proteinaceous binder (likely animal glue) and oil, exhibiting a smoother surface and higher brightness ($L^* \approx 63.13$). In contrast, the Divankhaneh Mansion utilized gold amalgam technique (with about 70% Hg and 20% Au), incorporating secondary metallic elements such as copper (Cu), silver (Ag), zinc (Zn), nickel (Ni), and iron (Fe), characterized by surface irregularities and lower brightness ($L^* \approx 57.55$). FTIR confirmed the presence of proteins and oils, XRD identified dominant mineral phases (gypsum and huntite), and SEM-EDS highlighted elemental variations. These results provide a scientific foundation for sustainable conservation strategies.

Keywords: Zand era, Gold leafing, Fourier-Transform Infrared, X Ray Diffinition, Scanning Electron Microscopy, Colorimetry



بررسی و تحلیل رنگدانه‌ها، شناسایی ترکیبات شیمیایی و مواد تشکیل‌دهنده آنها، یکی از رکن‌های اصلی در مطالعات علمی آثار تاریخی و هنری محسوب می‌شود [۱]. این تحلیل‌ها نه تنها به شناخت منشأ مواد اولیه و فنون هنری استفاده‌شده در گذشته کمک می‌کنند، بلکه نقش کلیدی در تعیین مکانیسم‌های تخریب و طراحی استراتژی‌های حفاظتی ایفا می‌کنند [۲]. هر اثر تاریخی مجموعه‌ای از ترکیبات پیچیده است که تحت تأثیر عوامل محیطی (رطوبت، نور، آلاینده‌ها) و فرآیندهای شیمیایی-فیزیکی دچار تغییرات گسترده‌ای می‌شود [۳-۴]. بنابراین، تحلیل دقیق مواد به‌کاررفته در آثار هنری، ابزاری ضروری برای درک پایداری آنها در برابر عوامل تخریبی و بهینه‌سازی روش‌های مرمتی است.

در شهر شیراز، به‌عنوان پایتخت فرهنگی دوره زندیه (۱۱۳۷-۱۲۰۵ ه.ق)، آثار معماری و تزیینی متعددی ساخته شده است. از جمله این آثار، ارگ کریم خانی و دیوانخانه زندیه به‌عنوان نمونه‌های شاخص هنر تزیینی این دوره محسوب می‌شوند. این بناها با استفاده از آرایه‌های تزیینی متنوعی، از جمله دیوارنگاری‌های رنگی، زینت یافته‌اند. یکی از این تزیینات، طلاکاری است که به‌دلیل زیبایی و ارزش نمادین، نقش برجسته‌ای در هنر اسلامی و ایرانی داشته است [۲]. با این حال، تاکنون مطالعات علمی جامعی برای شناسایی مواد تشکیل‌دهنده لایه طلاکاری و مکانیسم‌های تخریب آن در دوره زندیه انجام نشده است. این شکاف پژوهشی اهمیت بررسی‌های چندآزمایشگاهی را در این حوزه برجسته می‌کند. با وجود اینکه مطالعات متعددی در زمینه تحلیل طلاکاری دوره‌های صفویه و قاجاریه انجام شده است، هیچ پژوهشی تاکنون از روش‌های علمی پیشرفته مانند SEM-EDS، FTIR، XRD و رنگ‌سنجی برای بررسی لایه طلاکاری در آثار زندیه استفاده نکرده است.

مطالعات پیشین بیشتر بر تحلیل تکنیک‌های طلاکاری دوره‌های صفویه و قاجاریه تمرکز کرده‌اند. به‌عنوان مثال، احمدی و همکاران (۱۳۹۰) با استفاده از آنالیز FTIR و SEM-EDS، ماده چسباننده در طلاچسبانی کاخ گلستان تهران را روغن کمان شناسایی کردند [۵]. هلاکویی (۱۳۸۷) در مطالعه‌ای بر روی آثار صفویه (کاخ عالی‌قاپو، چهل‌ستون، هشت‌بهشت)، از ترکیب گچ تیز، گل ارمنی و چسب پروتئینی برای لایه‌بندی طلاکاری گزارش داد [۶]. محتشم (۱۳۹۵) نیز در کلیسای وانک اصفهان، نشان داد که لایه طلا با استفاده از روغن بر روی سطح چسبانده شده است [۷]. طینتی (۱۳۹۸) در پایان‌نامه خود، چسب سریشم را برای لایه طلاچینی و روغن برزک را برای لایه طلاچسبان در کلیسای وانک و بیت‌الحم شناسایی کرد [۸]. همچنین، حاجی‌سیدجوادی و همکاران (۱۳۹۹) در عمارت چهل‌ستون قزوین، لایه طلاچسبان را شامل گل سرخ، ورق طلا و گچ گزارش کردند [۹]. کوچک‌زایی و همکاران (۱۴۰۰) نیز با استفاده از طیف‌سنجی میکرو رامان و SEM-EDS، رنگ طلایی را ترکیبی از آلیاژ مس و طلا شناسایی کردند [۲]. در این میان در روند پژوهش دو موضوع مطرح می‌شود. اولین شناخت ترکیب لایه‌های طلاکاری در دوره زندیه و بررسی تفاوت آن با دوره‌های قبلی (صفویه/قاجار) و همچنین واکاوی تأثیر عوامل محیطی (رطوبت، تخلخل گچ، آلاینده‌ها) که کدامین گروه منجر به تخریب لایه طلا در بناهای زندیه شده است.

برای پاسخ‌گویی به این سؤالات، این مطالعه از روش‌های چندآزمایشگاهی شامل طیف‌سنجی فلوئورسانس اشعه ایکس (XRF)، پراش اشعه ایکس (XRD)، طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR)، میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به پراش انرژی پرتو ایکس (SEM-EDS) و رنگ‌سنجی (سیستم CIELAB) استفاده کرده است. این روش‌ها امکان شناسایی عناصر شیمیایی، ترکیبات معدنی/آلی، و مکانیسم‌های تخریب را فراهم می‌کنند [۱۰-۱۶].

هدف این پژوهش، تحلیل ساختار لایه طلاکاری در ارگ کریم خانی و دیوانخانه زندیه و ارائه چارچوبی علمی برای حفاظت از این آثار تاریخی است. یافته‌ها نه تنها به درک تکنیک‌های هنری دوره زندیه کمک می‌کنند، بلکه پایه‌ای برای طراحی استراتژی‌های مرمتی مبتنی بر شواهد فراهم می‌آورند.

۲- بخش تجربی

۲-۱- معرفی اثر و نمونه برداری

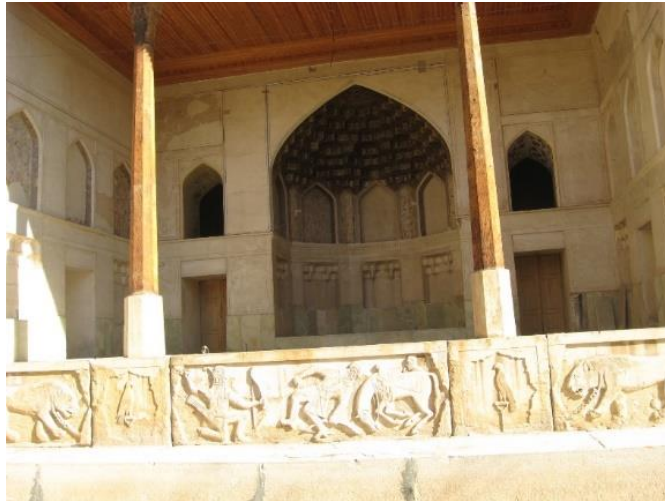
ارگ یا کاخ اندرونی کریم خان با پلانی مستطیل شکل و با مساحتی در حدود ۴۰۰۰ متر مربع در زمینی به وسعت ۱۱۸۰۰ متر مربع در غرب میدان توپخانه آن زمان بنا شد. نمای بیرونی کاملاً ساده و خشن بوده که استحکام و قدرت را تداعی می‌کند و داخل بنا مملو از تزیینات است [۱۷]. (شکل ۱). عمارت دیوانخانه از دیگر بناهای شاخص این دوران در شیراز است که کمتر شناخته شده است. این اثر در نزدیکی ارگ کریم خانی قرار داشته و همزمان با ساخت دیگر بناهای حکومت زندیه ساخته شده است و به عنوان محل مکاتبات اداری و دیوانی دوره زندیه کاربری داشته و فضایی است که کریم خان برای دیدار سفیران، وزیران، رسیدگی به شکایات مردمی و ... از آن استفاده می‌کرده و در یک جبهه ساخته شده است [۱۸]. (شکل ۲). در دوران قاجار بواسطه تغییرات حکومتی ایجاد شده، آغا محمدخان دستور تخریب بناهای زندی را صادر کرد. اما این بناها بواسطه استحکام فوق العاده‌شان از تخریب درامان مانده ولی عمده تزیینات آن تخریب شده و یا در زیر لایه گچ پوشانده شدند [۱۹]. نگاه کریم خان در تزیینات انتخاب شده در معماری بناها، بازتابی از نمادهای فرهنگی- انسانی است که به عنوان مفهومی درونی در بطن جامعه زند خود را نشان دادند. به طور کلی سادگی در طراحی تزیینات فضاهای بیرونی و تلاش برای نمایش سرزندگی و نشاط در طراحی فضاهای داخلی از ویژگی‌های خاص تزیینات در این دوره به حساب می‌آید [۱۸]. در واقع نقاشی دیواری در دوره زند تداوم حرکتی است که از زمان شاه عباس دوم و شاه طهماسب با تأثیر از شیوه‌های نقاشی اروپایی آغاز شده، در دوره سلطنت نادر به رکود نشسته و در زمان استیلای سلاطین زندیه مجدداً بارور گشته است [۲۰].



شکل ۱- ارگ کریم خانی شیراز

Figure 1: Karim Khan Castel

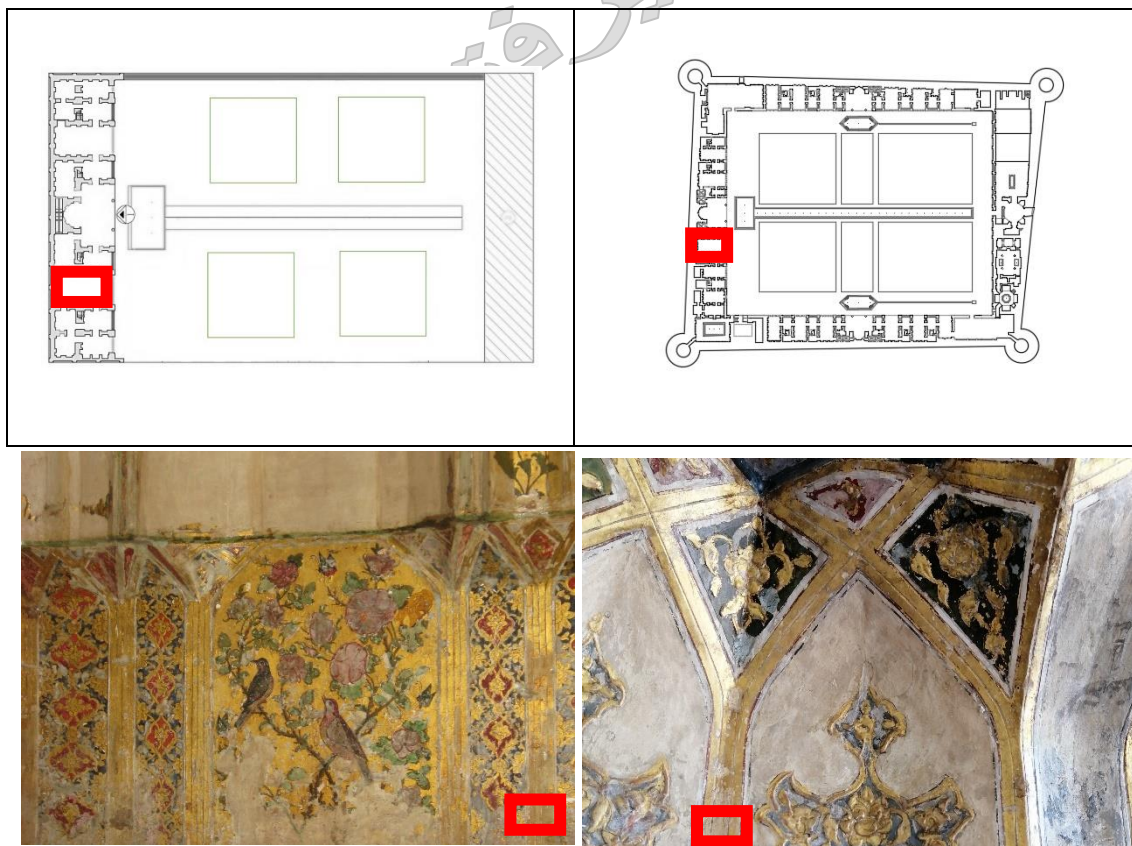
مقاله پذیرفته شده



شکل ۲- دیوانخانه زندیه شیراز

Figure 2: Divankhaneh Mansion

نمونه برداری از لایه های دیوارنگاره ها در آثار تاریخی کاری بسیار مهم است زیرا امکان برداشتن لایه های زیاد وجود ندارد. به همین علت برداشت دقیق از سطح اثر به همراه تمامی لایه های تشکیل دهنده مهم است. برای نمونه برداری از لایه رنگ طلایی از قسمت هایی که مرتبط به دوران زندیه بوده و اثری از تزیینات الحاقی قاجار بر روی آن وجود نداشت نمونه برداری صورت گرفت (شکل ۳).



شکل ۳- محل نمونه برداری در ارگ کریم خانی و عمارت دیوانخانه زندیه

Figure 3: Sampling location in Karim Khan Castel and Divankhaneh Mansion

۲-۲- روش تحقیق

روش تحقیق در این پژوهش ترکیبی از مطالعات میدانی، آزمایشگاهی و کتابخانه‌ای بوده است. هدف اصلی این مطالعه، تحلیل ساختار لایه طلاکاری و بستر مورد استفاده در دیوارنگاری‌های ارگ کریم خانی و دیوانخانه زندیه با به‌کارگیری روش‌های چندآزمایشگاهی شامل طیف‌سنجی فلوئورسانس اشعه ایکس (XRF)، پراش اشعه ایکس (XRD)، طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR)، میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به پراش انرژی پرتو ایکس (SEM-EDS) و رنگ‌سنجی (سیستم CIELAB) اعلام شده است. تمامی مراحل نمونه‌برداری و آنالیزها با رعایت استانداردهای اخلاقی و با مجوزهای لازم از سازمان میراث فرهنگی و گردشگری ایران انجام شد. نمونه‌های مورد مطالعه با حداقل مداخله فیزیکی از مناطقی انتخاب شدند که تنها مربوط به دوره زندیه بوده و هیچ نشانه‌ای از تزیینات الحاقی قاجاریه بر روی آنها وجود نداشت. این رویکرد اطمینان از اصالت نمونه‌ها و حفظ ساختار لایه‌بندی مواد (از بستر تا لایه طلا) را فراهم کرد. نمونه‌ها پس از برداشت، برای حذف آلودگی‌های سطحی و چسب‌های احتمالی الحاقی از دوره‌های مرمتی بعدی، تحت یک فرآیند پاکسازی کنترل شده قرار گرفتند. این عمل با احتیاط فراوان و با استفاده از یک سواب پنبه‌ای که به مقدار بسیار کمی استون آغشته شده بود، به صورت موضعی و با حداقل زمان تماس انجام شد. هدف از این کار، به حداقل رساندن نفوذ حلال به لایه‌های زیرین و آسیب احتمالی به بایندره‌های پروتئینی اصلی بود. به ویژه برای آنالیز حساس FTIR که هدف آن شناسایی ترکیبات آلی است، بخش‌هایی از نمونه انتخاب شدند که در معرض حلال قرار نگرفته بودند تا از اصالت نتایج اطمینان حاصل شود. در نهایت، پاکسازی تکمیلی سطح با محلول آب و الکل صورت گرفت.

برای آنالیزهای میکروسکوپی، بخشی از نمونه‌ها به صورت برش عرضی آماده شدند تا لایه‌بندی دقیق مواد قابل مشاهده باشد. نمونه‌ها در رزین اپوکسی قرار گرفتند و پس از سفت شدن، با کاغذ سنباده‌های با دانه‌بندی متفاوت (از ۶۰۰ تا ۲۰۰۰) پلیش شدند تا سطح مورد نظر برای بررسی‌های میکروسکوپی آماده شود.

۲-۳- بخش دستگاهی

۲-۳-۱- رنگ سنجی

در آنالیز رنگ‌سنجی، از دستگاه اسپکتروفوتومتر انعکاسی Gretag Macbeth مدل Color-Eye 7000 A استفاده شد. اندازه‌گیری‌ها در سیستم CIELAB تحت منبع نوری استاندارد D65 و زاویه مشاهده ۱۰ درجه در محدوده طول موج ۳۶۰-۷۶۰ نانومتر با فواصل ۱۰ نانومتری انجام گرفت. قبل از هر اندازه‌گیری، دستگاه با استفاده از صفحه استاندارد سفید PTFE کالیبره شد تا دقت نتایج تضمین گردد. همچنین، کابینت نوری ICS-TEXICON با چهار منبع نوری متفاوت برای ارزیابی بصری نمونه‌ها و مقایسه رنگدانه‌ها تحت شرایط نوری متنوع به کار رفت.

۲-۳-۲- میکروسکوپ نوری

در مطالعه میکروسکوپ نوری، از دستگاه‌های ZTX-3E020 (چین) و Nikon E100 (ژاپن) با بزرگنمایی‌های ۵x و ۴۰x استفاده شد تا ساختار بافتی و لایه‌بندی مواد قابل تحلیل باشد. تصاویر با استفاده از دوربین دیجیتال متصل به میکروسکوپ ثبت شدند.

۲-۳-۳- طیف سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز

آنالیز طیف سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز FTIR توسط دستگاه مدل Tensor II ساخت شرکت Bruker آلمانی در حالت ATR (Attenuated Total Reflectance) در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه شیراز، به کار گرفته شد تا بدون نیاز به پرس کردن نمونه با KBr، گروه‌های عاملی آلی و معدنی موجود در لایه‌های طلاکاری شناسایی شوند. طیف‌ها در محدوده $4000-400\text{ cm}^{-1}$ با رزولوشن 4 cm^{-1} و تعداد اسکن ۱۶ بار ثبت گردیدند.

۲-۳-۴- فلونئورسانس اشعه ایکس

آنالیز XRD توسط دستگاه مدل EXPLORER ساخت کشور ایتالیا و شرکت GNR تحت ولتاژ 40 Kv در دانشگاه صنعتی شیراز صورت گرفته است. برای آنالیز فازهای کریستالی در لایه‌های گچی و فلزی، دستگاه XRD مدل EXPLORER ساخت شرکت GNR (ایتالیا) با ولتاژ 40 kV ، جریان 20 mA ، سرعت اسکن $2^\circ/\text{min}$ و گام 0.02° به کار رفت.

۲-۳-۵- میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به پراش انرژی پرتو ایکس (SEM-EDS)

برای تحلیل عنصری (Au, Ag, Cu, Hg) و مورفولوژی سطح لایه طلا، از میکروسکوپ الکترونی روبشی TESCAN-Vega3 مجهز به EDS استفاده شد. برای ارزیابی شکل بلوری و ترکیب عنصری نمونه مورد بررسی از آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM مدل TESCAN-Vega3 ساخت شرکت TESCAN جمهوری چک و مجهز به طیف سنج تفرق انرژی پرتو ایکس (EDS) در دانشگاه شیراز استفاده شده است. نمونه‌ها با ولتاژ 20 Kv برای ارزیابی احتمال حضور طلا بدون پوشش دهی مورد بررسی قرار گرفتند. نمونه‌ها بدون پوشش فلزی تحت آنالیز قرار گرفتند تا تداخل لایه‌های رسانا با نتایج مربوط به محتوای طلا به حداقل برسد. پارامترهای عملیاتی شامل ولتاژ شتاب‌دهنده 20 kV و فاصله کاری 10 mm بودند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج رنگ سنجی

از روش دستگاهی اسپکتروفوتومتری برای تجزیه و تحلیل کمی نمونه‌ها استفاده می‌شود. با کمک این دستگاه می‌توان خالص بودن یا وجود ناخالصی نمونه‌ها را تشخیص داد. a^* (میزان سبزی-، میزان قرمزی +)، b^* (میزان زردی +، میزان آبی -) و L^* (میزان درصد روشنایی رنگ است).

بر اساس نتایج حاصل شده در جدول ۱، نمونه طلایی ارگ کریم‌خانی درصد روشنایی (L^*) بیشتری نسبت به نمونه دیوانخانه نشان می‌دهد. این تفاوت در روشنایی، که با نتایج آنالیز عنصری (SEM-EDS) که در بخش‌های بعد ارائه شده و خلوص بالاتر طلا را در نمونه ارگ تأیید می‌کند (همخوانی دارد، می‌تواند نشان‌دهنده کیفیت بهتر مواد اولیه یا شرایط حفاظتی مناسب‌تر در ارگ باشد).

علاوه بر این، اگرچه براقیت و درخشندگی سطوح طلاکاری شده هر دو بنا به مرور زمان کاسته شده است، درصد روشنایی بالاتر نمونه‌های ارگ کریم‌خانی، نشان‌دهنده کیفیت مرغوب‌تر مواد و مصالح و حفاظت بیشتر این بنا نسبت به دیوانخانه است که این موضوع با نتایج بدست آمده از آنالیزهای انجام شده بعدی مطابقت دارد. علاوه بر این، مشاهده می‌شود که درصد روشنایی سطوح طلاکاری شده در هر دو نمونه،

مقاله پذیرفته شده

در مقایسه با سطوح طلایی تازه یا نمونه‌های تاریخی بهتر محافظت شده، کاهش قابل توجهی یافته است. یکی از دلایل اصلی این امر می‌تواند این باشد که این نقاشی‌ها برای مدت طولانی در زیر لایه گچ پوشانده شده بودند و حتی پس از پاکسازی، نفوذ ذرات ریز گچ به بافت سطحی و همچنین فرسودگی طبیعی ناشی از گذر زمان، منجر به کدر شدن و کاهش درخشندگی آن‌ها شده است.

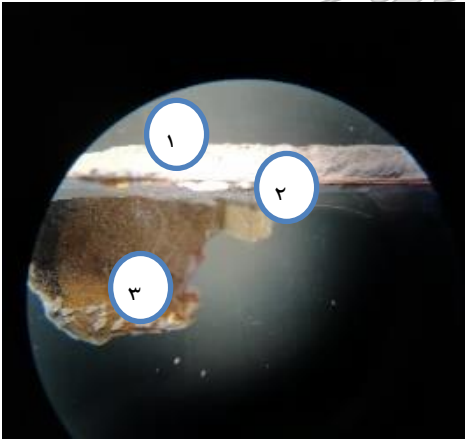
تخریب رنگ طلایی به علت وجود ناخالصی فلزی نیز در این امر موثر است. نتایج رنگ سنجی نشان داد که هر دو نمونه مقادیر مثبت a^* و b^* دارند که نشان از قرمزی و زردی هر دو نمونه داشت. از سویی دیگر میزان زردی در نمونه ارگ بسیار بیشتر از نمونه دیوانخانه بود که نشان از میزان طلای بیشتری در این نمونه دارد.

جدول ۱: مقایسه پارامترهای رنگی ($a^*b^*L^*$) نمونه‌های رنگ طلایی ارگ کریم خان و عمارت دیوانخانه

Table 1: Comparison of color parameters ($a^*b^*L^*$) gold color in Kharim Khan Castel and Divankhaneh Mansion

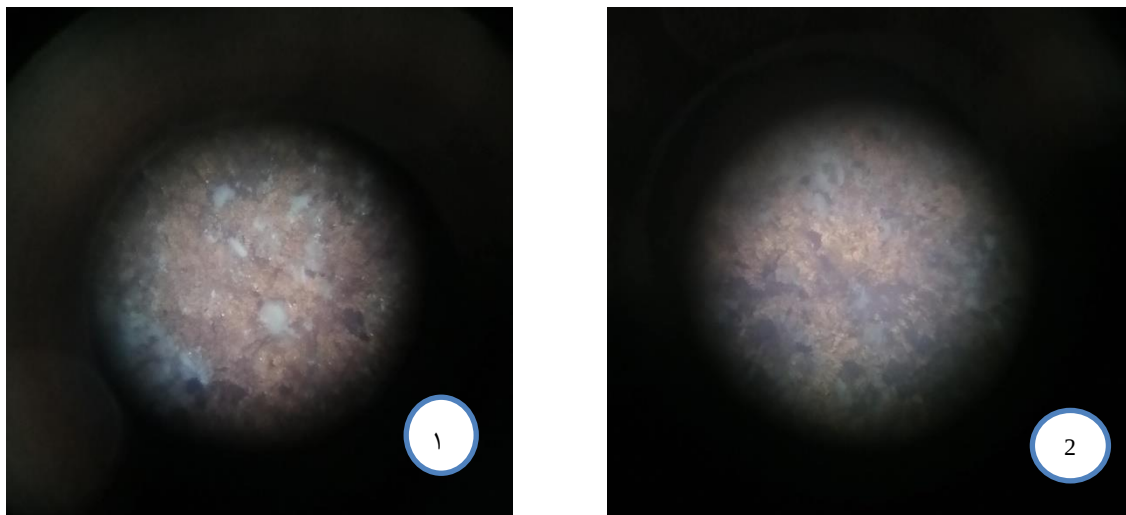
(K/S)	b^*	a^*	L^*	Sample Color
1/92	26.02	6.67	63.13	Sample Kharim Khan Castel
2/56	16.29	5.30	57.55	Sample Divankhaneh Mansion

پس از نمونه برداری کامل از لایه تزئینات طلاکاری در ارگ کریم خانی و عمارت دیوانخانه، ترتیب لایه نگاری تزئینات به وسیله میکروسکوپ نوری انجام شد. در این تزئینات لایه‌ها بدین صورت اجرا شده است که بر روی لایه آجر یک لایه کاهگل قرار گرفته و سپس لایه گچ روی آن است. روی گچ از یک لایه بوم کننده استفاده شده است و رنگ طلایی روی آن اجرا شده است (شکل ۵ و ۶).

 ارگ کریم خانی	 دیوانخانه زندیه
۱- لایه آستر Lining layer ۲- لایه بوم کننده Canvas layer ۳- لایه طلا Gold Layer	۱- لایه آستر Lining layer ۲- لایه بوم کننده Canvas layer ۳- لایه طلا Gold Layer

شکل ۵: تصویر میکروسکوپی از لایه بستر و طلا در ارگ کریم خانی و عمارت دیوانخانه با بزرگنمایی ۵X

Figure5: Microscopic image of the substrate and gold layer in Karim khan Castel and Divankhaneh Mansion



شکل ۶: تصویر میکروسکوپی از لایه طلا در ارگ کریم خان (۱) و دیوانخانه زندیه (۲) با بزرگنمایی ۴۰۰X

Figure 6: Microscopic image of the gold layer in Karim khan Castel (1) and Divankhaneh Mansion (2) 400 X

۳-۲- نتایج آنالیز FT-IR

طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FTIR) به عنوان یک تکنیک تحلیلی قدرتمند و غیرتخریبی در حوزه علوم مواد و حفاظت آثار تاریخی، نقش کلیدی در شناسایی کیفی ترکیبات آلی و معدنی ایفا می‌کند. این روش بر پایه جذب پرتوهای مادون قرمز توسط مولکول‌ها عمل می‌کند و با اندازه‌گیری حالت‌های ارتعاشی پیوندهای شیمیایی، امکان تشخیص گروه‌های عاملی مختلف را فراهم می‌آورد. در مطالعات میراث فرهنگی، FTIR به طور گسترده برای شناسایی رزین‌ها، روغن‌ها، پروتئین‌ها و سایر مواد آلی به کار می‌رود، زیرا قادر است بدون نیاز به تخریب نمونه، اطلاعات ارزشمندی در مورد ساختار مولکولی ارائه دهد [۲۱، ۲۲]. در این پژوهش، تحلیل FTIR بر روی نمونه‌های طلاکاری استخراج‌شده از ارگ کریم‌خانی و عمارت دیوانخانه زندیه انجام شد تا ترکیبات آلی و معدنی لایه‌های زیرین و بستر طلاکاری شناسایی شوند. این تحلیل در حالت بازتاب کلی تضعیف‌شده (Attenuated Total Reflectance; ATR) صورت گرفت، که اجازه می‌دهد نمونه‌ها بدون آماده‌سازی پیچیده (مانند مخلوط کردن با KBr) بررسی شوند. طیف‌ها در محدوده ۴۰۰ تا ۴۰۰۰ cm^{-1} با رزولوشن ۴ cm^{-1} و میانگین ۱۶ اسکن ثبت گردیدند.

۳-۲-۱- شناسایی مواد آلی

یکی از جنبه‌های کلیدی تحلیل FTIR، بررسی مواد آلی است که اغلب به عنوان چسبنده‌ها یا بوم‌کننده‌ها در تکنیک‌های طلاکاری سنتی به کار می‌روند. در این راستا، تمرکز ویژه‌ای بر پروتئین‌ها صورت گرفت، زیرا این ترکیبات معمولاً از منابع طبیعی مانند سریشم حیوانی (glue) مشتق می‌شوند و در اتصال لایه‌های تزئینی به بستر معدنی نقش حیاتی دارند. تحلیل طیفی پروتئین‌ها بر پایه ارزیابی حالت‌های ارتعاشی اتم‌ها در مولکول‌های پروتئینی استوار است، که این حالت‌ها با ساختارهای اولیه (توالی آمینواسیدها)، ثانویه (پیچ‌خوردگی‌های α -

مقاله پذیرفته شده

هلیکس یا- β شیت)، ثالثیه (پیکربندی سه بعدی) و ربعی (تعاملات بین زیرواحدها) پروتئین‌ها مرتبط هستند. برای تعیین دقیق ساختار، از پارامترهایی مانند بسامد (wavenumber)، شدت (intensity) و عرض نوار (bandwidth) بهره گرفته می‌شود.

پیک‌های طیفی مشاهده شده در نمونه‌ها، وجود پروتئین را به طور قاطع تأیید می‌کنند. این پیک‌ها شامل نوارهای جذبی در محدوده‌های تقریبی $1480, 1600, 1620, 3400, 3500, 1320, 1535$ و 1500 cm^{-1} هستند، که عمدتاً به آمیدهای نوع I در حدود $1620-1680 \text{ cm}^{-1}$ مرتبط با ارتعاش کششی (C=O و نوع II در حدود $1500-1550 \text{ cm}^{-1}$ ، مرتبط با ارتعاش خمشی N-H و کششی C-N نسبت داده می‌شوند. این نوارها در تصاویر ۷ (نمونه ارگ کریم‌خانی) و ۸ (نمونه دیوانخانه زندیه) به وضوح قابل مشاهده‌اند و نشان‌دهنده حضور یک ماده پروتئینی آلی، احتمالاً سریشم (animal glue)، هستند (شکل ۷ و ۸). سریشم، که از کلاژن حیوانی به دست می‌آید، به عنوان یک چسب طبیعی در هنرهای سنتی ایرانی برای برقراری اتصال محکم بین لایه‌های چینی (مانند گچ) و سطح تکیه‌گاه (مانند دیوار آجری) استفاده می‌شده است. علاوه بر این، تحلیل نشان داد که ترکیب گچ زنده (anhydrous calcium sulfate) با این ماده پروتئینی، دو عامل اصلی در ایجاد پیوندهای پایدار میان آرایه‌های تزئینی و بستر هستند [۲۱]. این یافته با مطالعات تاریخی هنر زندیه همخوانی دارد، جایی که چنین ترکیباتی برای افزایش دوام لایه‌های طلاکاری در برابر عوامل محیطی مانند رطوبت و تغییرات دمایی به کار می‌رفته‌اند.

علاوه بر پروتئین‌ها، نوارهای جذبی در 2852 و 2924 cm^{-1} مرتبط با ارتعاشات کششی C-H در زنجیره‌های هیدروکربنی و 1531 cm^{-1} (مرتبط با گروه‌های کربوکسیل یا آمیدی) نیز وجود یک ماده آلی پروتئینی را تقویت می‌کنند، که معمولاً به عنوان بوم‌کننده (ground layer) لایه رنگ به کار می‌رود. همچنین، نوار جذبی برجسته در 1740 cm^{-1} نشان‌دهنده حضور روغن (احتمالاً روغن‌های طبیعی مانند روغن بذر کتان یا گردو) است، که می‌تواند به عنوان یک عامل نرم‌کننده یا محافظ در فرمولاسیون لایه‌های طلاکاری عمل کرده باشد [۲۲]. این روغن‌ها در تکنیک‌های سنتی برای بهبود چسبندگی و جلوگیری از ترک‌خوردگی لایه‌ها استفاده می‌شوند و حضور آن‌ها در نمونه‌ها، نشان‌دهنده تداوم روش‌های هنری دوره زندیه است.

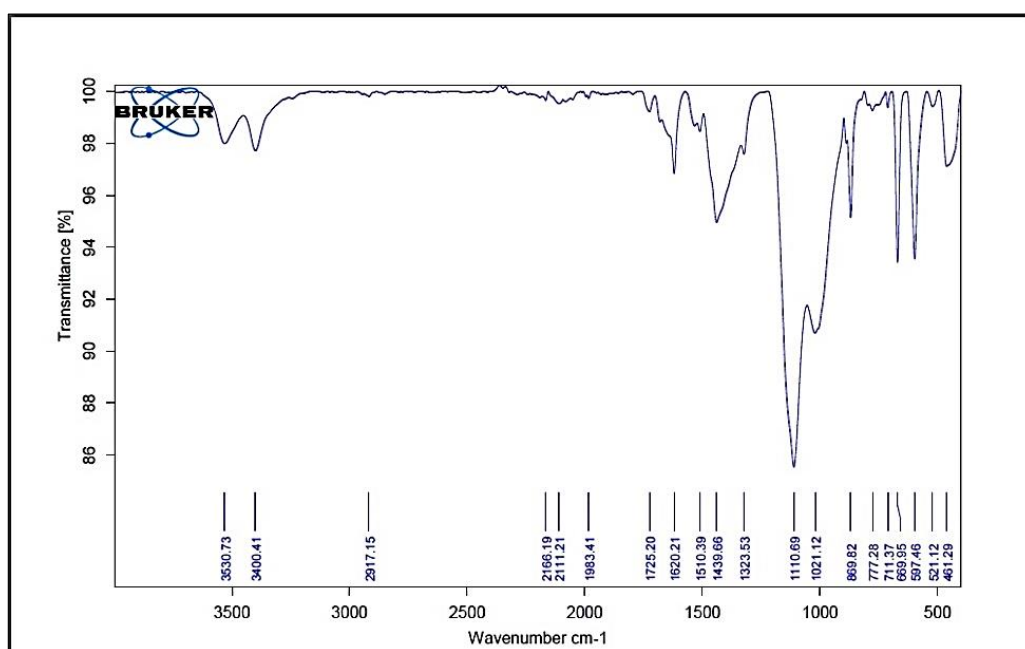
۲-۳- شناسایی مواد معدنی

تحلیل FTIR نه تنها مواد آلی، بلکه ترکیبات معدنی را نیز با دقت بالا شناسایی کرد، که این امر برای درک ساختار بستر طلاکاری ضروری است. وجود گچ (calcium sulfate) به عنوان ماده اصلی بستر، با چندین نوار جذبی تأیید شد. برای مثال، نوار در 3405 cm^{-1} به ارتعاشات کششی نامتقارن پیوند O-H نسبت داده می‌شود، که نشان‌دهنده حضور آب کریستالی در ساختار گچ هیدراته ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) است. ارتعاش کششی تیز در 1621 cm^{-1} احتمالاً به پیوند هیدروکسیل (OH) در همین ساختار شیمیایی مربوط می‌شود. همچنین، نوارهای ارتعاشی در 1115 cm^{-1} ارتعاشات کششی نامتقارن پیوند (S=O و نواحی خمشی در محدوده 600 تا 700 cm^{-1} به عنوان منطقه اثر انگشتی ثانویه برای کلسیم سولفات، تحت تأثیر پیوند S-O حضور گچ را قاطعانه ثابت می‌کنند.

علاوه بر گچ، نوارهای در $1420, 868$ و 776 cm^{-1} نشان‌دهنده وجود کلسیم کربنات (CaCO_3) هستند، که می‌تواند به عنوان یک پرکننده یا ناخالصی طبیعی در لایه‌های گچی عمل کند. این ترکیبات معدنی، که اساس بستر طلاکاری را تشکیل می‌دهند، با نتایج سایر تحلیل‌ها مانند (XRD) همخوانی دارند و بر کیفیت مواد مورد استفاده در دوره زندیه تأکید می‌کنند [۲۲]. حضور همزمان گچ هیدراته و آنهیدریت

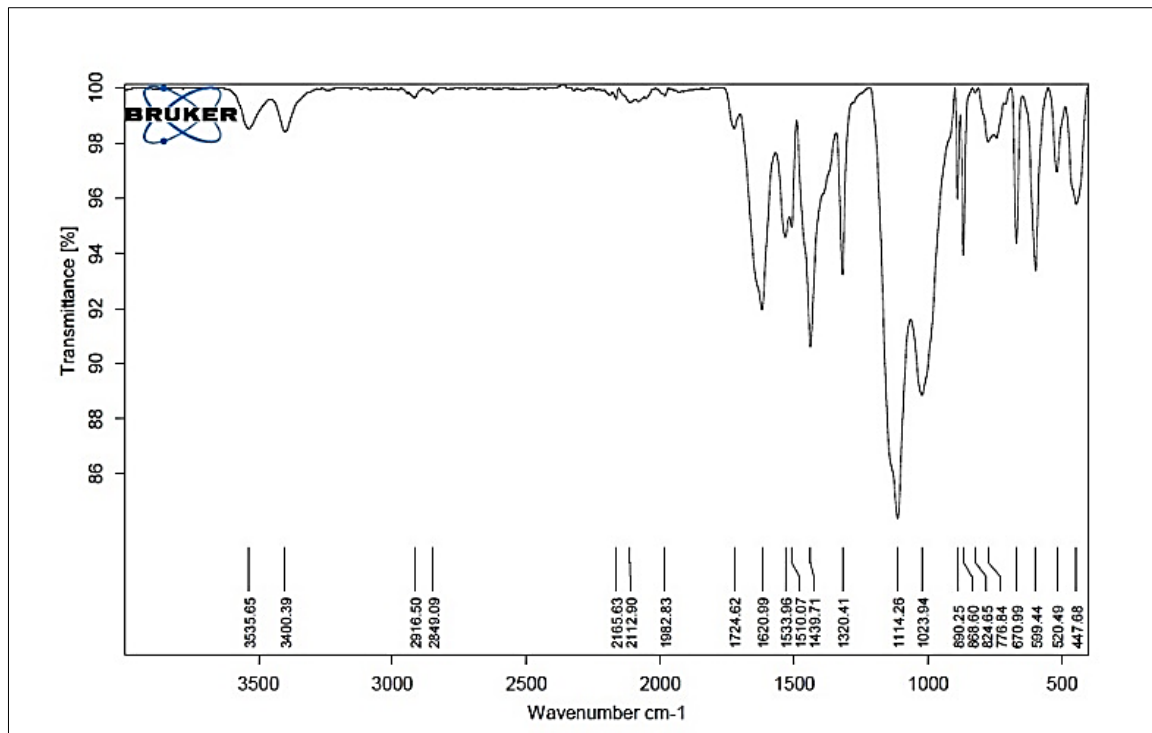
(anhydrous form) در نمونه‌ها، ممکن است ناشی از فرآیندهای خشک‌سازی یا تغییرات محیطی در طول زمان باشد، که این امر نیاز به استراتژی‌های حفاظتی خاص برای جلوگیری از تخریب بیشتر را برجسته می‌سازد.

در مجموع، نتایج FTIR نه تنها ترکیبات آلی و معدنی لایه‌های طلاکاری را شناسایی کرد، بلکه بینش‌های ارزشمندی در مورد تکنیک‌های هنری دوره زندیه ارائه داد. این یافته‌ها، با تأکید بر استفاده از مواد سنتی مانند سریشم و روغن در کنار بستر گچی، می‌توانند مبنای علمی برای برنامه‌ریزی اقدامات حفاظتی و مرمتی قرار گیرند. برای مثال، انتخاب استحکام‌بخش‌ها یا لایه‌های محافظ باید با ساختار معدنی و آلی این لایه‌ها سازگار باشد تا از آسیب‌های ناشی از ناسازگاری شیمیایی جلوگیری شود. مقایسه این نتایج با مطالعات مشابه در سایر آثار تاریخی ایرانی (مانند دوران صفویه یا قاجار) می‌تواند به درک گسترده‌تری از تکامل تکنیک‌های طلاکاری منجر شود [۲۱، ۲۲].



شکل ۷: طیف FTIR نمونه طلاکاری ارگ کریم خان

Figure 7: FTIR spectrum of the gilded sample of Karim Khan Castel



شکل 8: طیف FTIR نمونه طلاکاری دیوان خانه

Figure 8: FTIR spectrum of the gilded sample of Divankhane Mansion

۳-۳- نتایج آنالیز XRD

پراش اشعه ایکس (X-ray Diffraction; XRD) به عنوان یک تکنیک تحلیلی غیرتخریبی و قدرتمند در حوزه علوم مواد و باستان‌شناسی، برای شناسایی فازهای کریستالی در نمونه‌های جامد به کار می‌رود. این روش بر پایه پراش پرتوهای ایکس توسط شبکه‌های کریستالی عمل می‌کند و با تولید الگوهای پراش منحصر به فرد (پیک‌های طیفی)، امکان تشخیص دقیق ترکیبات معدنی و فلزی را فراهم می‌آورد. در مطالعات میراث فرهنگی، XRD نقش کلیدی در تعیین ساختار مواد بستر، رنگدانه‌ها و لایه‌های تزئینی ایفا می‌کند، زیرا می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در مورد منشأ مواد، فرآیندهای تولید و مکانیسم‌های تخریب ارائه دهد [۲۳، ۲۴]. در این پژوهش، تحلیل XRD بر روی نمونه‌های پودری شده لایه طلاکاری استخراج شده از ارگ کریم‌خانی و عمارت دیوانخانه زندیه انجام شد تا فازهای کریستالی اصلی شناسایی شوند (شکل ۹ و ۱۰). این یافته‌ها نه تنها ترکیبات معدنی غالب را برجسته می‌کنند، بلکه بینش‌هایی در مورد تکنیک‌های هنری دوره زندیه و چالش‌های حفاظتی مرتبط با آن‌ها فراهم می‌آورند.

۳-۳-۱- شناسایی فازهای معدنی غالب

نتایج XRD نشان‌دهنده حضور گسترده فازهای مبتنی بر کلسیم سولفات در هر دو نمونه است، که بیشترین پیک‌های طیفی را به خود اختصاص داده‌اند. این فازها شامل کلسیم سولفات دی‌هیدرات ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)، معروف به گچ هیدراته یا gypsum و کلسیم سولفات آنهیدریت (CaSO_4)، (فرم بدون آب) می‌شوند. گچ دی‌هیدرات یک ترکیب شیمیایی طبیعی است که در آن دو مولکول آب به هر مولکول کلسیم سولفات متصل شده و به صورت سنگ سفیدرنگی در طبیعت یافت می‌شود. این ماده پایه اصلی گچ سفید سنتی است که در هنرهای معماری ایرانی برای تهیه لایه‌های بستر و چینی به کار می‌رود. از سوی دیگر، CaSO_4 به عنوان گچ آنهیدریت شناخته می‌شود، که فاقد آب کریستالی است و اغلب در فرآیندهای خشک‌سازی یا تحت تأثیر عوامل محیطی (مانند گرما یا کم‌آبی) از فرم هیدراته مشتق می‌شود. حضور همزمان هر دو فرم در نمونه‌های طلاکاری هر دو بنا (با کدهای مرجع ۰۴۳۲-۰۳۶-۰۰ برای gypsum و ۰۷۸۷-۰۸۰-۰۱ یا ۰۱-۰۷۲-۰۵۰۳ برای آنهیدریت، طبق جدول‌های ۲ و ۳) تأیید شد، که این امر نشان‌دهنده استفاده از گچ به عنوان ماده اصلی بستر در تکنیک‌های طلاکاری دوره زندیه است [۲۳].

علاوه بر کلسیم سولفات، فاز معدنی دیگری که در هر دو نمونه شناسایی شد، هانتایت ($\text{Mg}_3\text{Ca}(\text{CO}_3)_4$)، کد مرجع ۰۴۰۹-۰۱۴-۰۰ است (جدول ۲ و ۳). هانتایت یک کربنات کلسیم-منیزیم طبیعی است که اغلب به عنوان پرکننده یا ناخالصی در لایه‌های گچی ظاهر می‌شود و می‌تواند از منابع معدنی محلی (مانند معادن اطراف شیراز) ناشی شود. حضور این ترکیب، که در مطالعات قبلی هنرهای ایرانی کمتر گزارش شده، بر تنوع مواد معدنی مورد استفاده در دوره زندیه تأکید می‌کند و ممکن است به بهبود خواص مکانیکی لایه‌ها (مانند افزایش سختی یا کاهش ترک‌خوردگی) کمک کرده باشد. این یافته‌ها با نتایج تحلیل‌های مکمل مانند FTIR همخوانی دارند، جایی که نوارهای جذبی مرتبط با گروه‌های سولفات و کربنات مشاهده شدند، و نشان‌دهنده یک بستر معدنی پیچیده است که لایه طلایی بر روی آن اجرا شده [۲۴].

دلیل اصلی حضور گسترده گچ در نتایج XRD، نازکی فوق‌العاده لایه طلا (در حد میکرومتر) و دشواری جداسازی کامل آن از بستر زیرین است. علی‌رغم دقت بالا در نمونه‌برداری (با تمرکز بر لایه‌های طلایی بدون آلودگی‌های الحاقی قاجاری)، لایه نازکی از گچ نیز همراه نمونه برداشته شد. علاوه بر این، فرآیند آماده‌سازی نمونه برای XRD شامل تبدیل به پودر است، که این امر پیک‌های مربوط به فازهای معدنی زیرین را تقویت می‌کند. چنین چالشی در مطالعات لایه‌های نازک فلزی رایج است و تأکید می‌کند بر نیاز به تکنیک‌های نمونه‌برداری پیشرفته‌تر، مانند میکرو-نمونه‌برداری لیزری، در تحقیقات آینده [۲۳].

۳-۳-۲- شناسایی فازهای فلزی و ترکیبات مرتبط

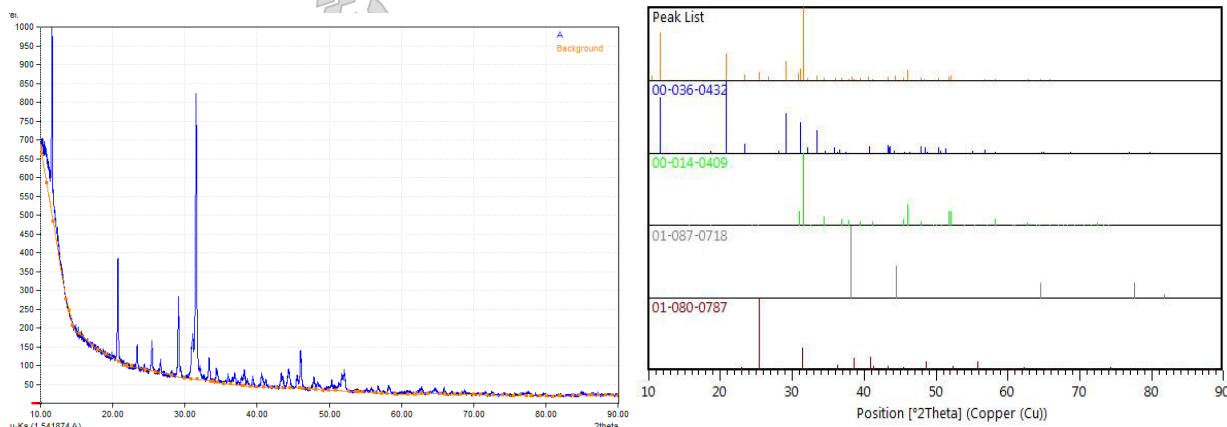
علاوه بر فازهای معدنی، مقادیر کمتری از نقره (Ag) در هر دو نمونه شناسایی شد، که به صورت فرم کریستالی Silver 3C (کدهای مرجع ۰۷۱۸-۰۸۷-۰۱ برای نمونه ارگ و ۰۷۱۹-۰۸۷-۰۱ برای نمونه دیوانخانه) ظاهر شده است (جدول ۲ و ۳). در برخی موارد، نقره ممکن است به صورت کاربید مانند (Ag_2C_2) وجود داشته باشد، که این ترکیب به دلیل مقاومت بالای خود در برابر خوردگی، حرارت و عوامل محیطی، در تزیینات معماری سنتی برای ایجاد نقوش بادوام بر روی سطوح ساختمانی استفاده می‌شده است [۲۳]. حضور نقره در لایه طلاکاری می‌تواند بخشی از آلیاژ فلزی (مانند آلیاژ طلا-نقره) باشد که برای کاهش هزینه‌ها یا بهبود خواص مکانیکی (مانند انعطاف‌پذیری)

مقاله پذیرفته شده

به کار رفته، یا ممکن است ناشی از ناخالصی‌های طبیعی در ورق‌های طلا باشد. این یافته با نتایج SEM-EDS همخوانی دارد، جایی که نقره در نمونه دیوانخانه به طور برجسته‌تری مشاهده شد، و نشان‌دهنده تفاوت‌های احتمالی در کیفیت مواد بین دو بنا است - برای مثال، استفاده از آلیاژهای با خلوص بالاتر در ارگ کریم‌خانی.

عدم شناسایی مستقیم طلا (Au) در الگوهای XRD می‌تواند به دلیل نازکی لایه و غلبه فازهای معدنی باشد، اما حضور آن از طریق تحلیل‌های مکمل مانند EDS تأیید شده است. این محدودیت XRD در تشخیص فلزات نازک، اهمیت رویکرد چندآزمایشگاهی را برجسته می‌کند.

در مجموع، نتایج XRD ترکیبات معدنی غالب (گچ هیدراته، آنهیدریت و هانتایت) و فلزی (نقره) را در لایه‌های طلاکاری دوره زندیه تأیید کرد، که این امر بر استفاده از مواد سنتی و محلی در هنر این دوره دلالت دارد. مقایسه بین دو بنا نشان می‌دهد که نمونه ارگ کریم‌خانی از کیفیت بالاتری برخوردار است (با پیک‌های واضح‌تر و تنوع کمتر ناخالصی‌ها)، که ممکن است به حفاظت بهتر این بنا در طول تاریخ نسبت داده شود. این یافته‌ها نه تنها به درک تکنیک‌های هنری زندیه کمک می‌کنند، بلکه مبنایی علمی برای استراتژی‌های حفاظتی فراهم می‌آورند. برای مثال، حضور گچ هیدراته حساس به رطوبت، نیاز به کنترل محیطی (مانند تنظیم رطوبت نسبی زیر ۵۰٪) را تأکید می‌کند. تا از فرآیندهای هیدراتاسیون/دهیدراتاسیون جلوگیری شود، که می‌تواند منجر به ترک‌خوردگی یا از دست رفتن چسبندگی لایه طلا گردد. همچنین، وجود نقره مقاوم می‌تواند در طراحی پوشش‌های محافظا (مانند لایه‌های پلیمری سازگار) مفید باشد. مقایسه این نتایج با مطالعات دوران صفویه یا قاجار (که اغلب گچ را به عنوان بستر اصلی گزارش کرده‌اند) نشان‌دهنده تداوم اما با نوآوری‌های جزئی در دوره زندیه است [۲۳، ۲۴]. تحقیقات آینده می‌تواند بر مدل‌سازی تخریب بر پایه این داده‌ها تمرکز کند تا پروتکل‌های مرمتی دقیق‌تری توسعه یابد.



شکل ۹: طیف XRD نمونه طلاکاری ارگ کریم خان

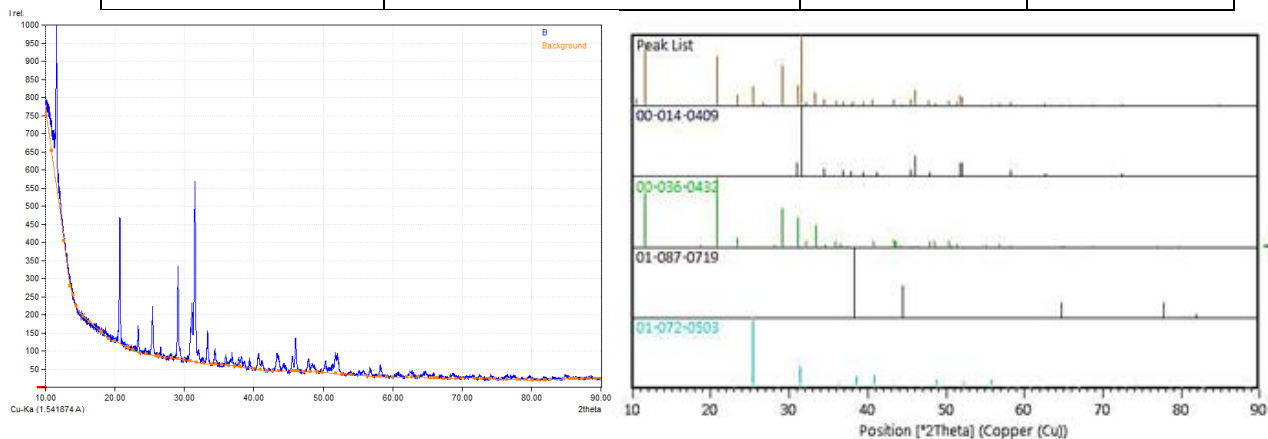
Figure 9: XRD spectrum of the gilded sample of Karim Khan Castel

جدول ۲: نتایج آنالیز عنصری XRD نمونه طلاکاری شده ارگ

Table 2: XRD elemental analysis results of gold sample in Karim Khan Castel

کد مرجع	نام ترکیب	نام ماده معدنی	فرمول شیمیایی
00-036-0432	Calcium Sulfate Hydrate	Gypsum	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
00-014-0409	Calcium Magnesium Carbonate	Huntite	$\text{Mg}_3\text{Ca}(\text{CO}_3)_4$

01-087-0718	Silver	Silver 3C	Ag
01-080-0787	Calcium Sulfate	-	Ca(SO ₄)



شکل ۱۰: طیف XRD نمونه طلاکاری دیوانخانه

Figure 10: XRD spectrum of the gilded sample of Divankhane Mansion

جدول ۳: نتایج آنالیز عنصری XRD نمونه طلاکاری شده دیوان خانه

Table 3: XRD elemental analysis results of gold sample in Divankhaneh Mansion

کد مرجع	نام ترکیب	نام ماده معدنی	فرمول شیمیایی
00-036-0432	Calcium Sulfate Hydrate	Gypsum	CaSO ₄ .2H ₂ O
00-014-0409	Calcium Magnesium Carbonate	Huntite	Mg ₃ Ca(CO ₃) ₄
01-087-0719	Silver	Silver 3C	Ag
01-072-0503	Calcium Sulfate	-	Ca(SO ₄)

۳-۴ نتایج آنالیز SEM-EDS

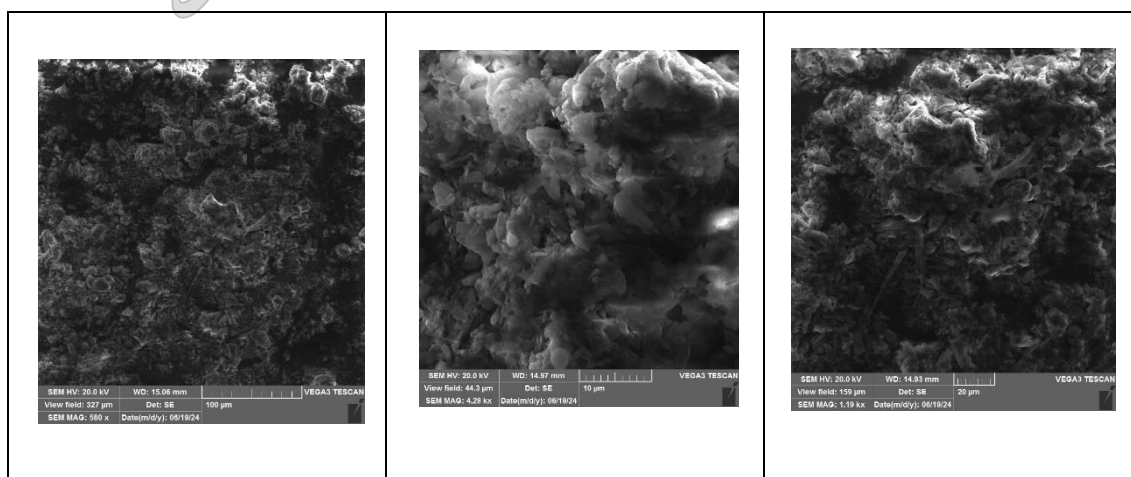
میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به طیف‌نگاری پراش انرژی پرتو ایکس (Scanning Electron Microscopy - Energy Dispersive X-ray Spectroscopy; SEM-EDS) به عنوان یک تکنیک تحلیلی پیشرفته و چندمنظوره در حوزه علوم مواد و حفاظت میراث فرهنگی، نقش محوری در بررسی مورفولوژی سطحی، ساختار میکروسکوپی و ترکیب عنصری نمونه‌ها ایفا می‌کند. این روش با ترکیب تصویربرداری با وضوح بالا (SEM) و تحلیل نیمه‌کمی عناصر (EDS)، امکان شناسایی دقیق مواد تشکیل‌دهنده آثار هنری را بدون تخریب گسترده فراهم می‌آورد. در مطالعات آثار تاریخی، SEM-EDS برای تشخیص عناصر فلزی در لایه‌های تزئینی، ارزیابی مکانیسم‌های تخریب (مانند خوردگی یا آلودگی) و هدایت تصمیم‌گیری‌های حفاظتی پیش از هرگونه مداخله مرمتی ضروری است، زیرا نتایج آن می‌تواند به انتخاب مواد سازگار و روش‌های بازسازی ایمن منجر شود [۲۴، ۲۱]. در این پژوهش، تحلیل SEM-EDS بر روی نمونه‌های لایه طلاکاری استخراج‌شده از ارگ کریم‌خانی و عمارت دیوانخانه زندیه انجام شد تا مورفولوژی سطح، توزیع عناصر و ترکیب شیمیایی لایه‌ها بررسی شود. دستگاه مورد استفاده مدل MIRA3 ساخت شرکت TESCAN چک بود، با پارامترهای عملیاتی شامل ولتاژ شتاب‌دهنده ۱۵ kV، بزرگنمایی تا ۵۰۰۰ برابر و حالت خلأ بالا. تصاویر SEM در شکل‌های ۱۱ (نمونه ارگ کریم‌خانی) و ۱۲ (نمونه دیوانخانه) برای سه نقطه

مختلف از هر نمونه ارائه شده‌اند، و طیف‌های EDS همراه با جداول نیمه کمی در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده‌اند. این یافته‌ها نه تنها تکنیک‌های هنری دوره زندیه را روشن می‌سازند، بلکه بینش‌هایی ارزشمند برای استراتژی‌های حفاظتی ارائه می‌دهند.

۳-۴-۱- بررسی مورفولوژی سطحی و ساختار میکروسکوپی

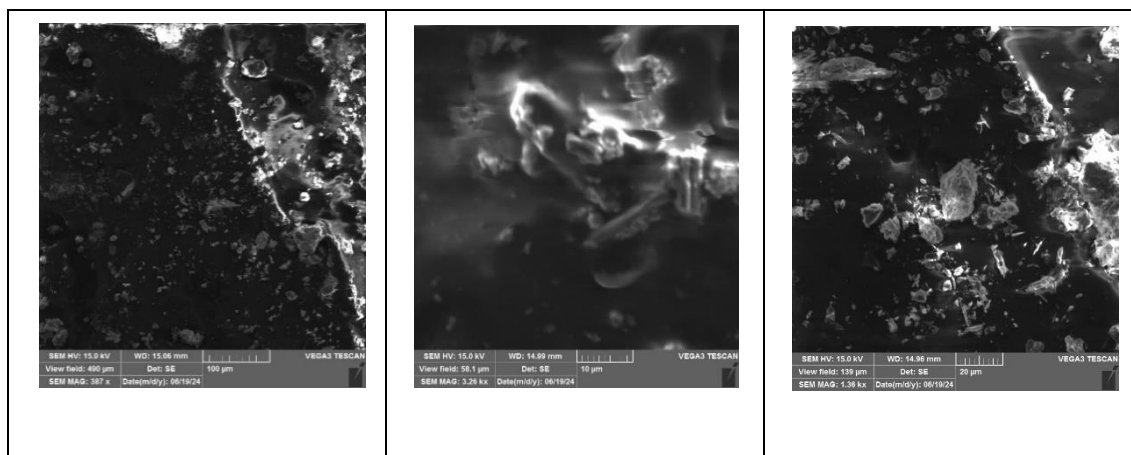
تصاویر SEM از نمونه‌های طلاکاری هر دو بنا، ساختار لایه طلا را به صورت یک پوشش یکنواخت و پیوسته نشان می‌دهند که فاقد ظاهر پودری یا دانه‌ای متراکم است (شکل‌های ۱۱ و ۱۲). این مورفولوژی، که در بزرگنمایی‌های مختلف (از ۱۰۰ تا ۵۰۰۰ برابر) مشاهده شد، نشان‌دهنده استفاده از ورق طلا (gold leaf) به جای رنگدانه‌های پودری طلایی است. در تکنیک‌های سنتی طلاکاری ایرانی، ورق‌های طلا اغلب بر روی بسترهای چسبنده اعمال می‌شوند تا یک لایه نازک و براق ایجاد کنند، که این امر با تصاویر به دست آمده همخوانی دارد. در نمونه ارگ کریم‌خانی، سطح لایه طلا صاف‌تر و کمتر متخلخل به نظر می‌رسد، که می‌تواند به کیفیت بالاتر مواد یا شرایط حفاظتی بهتر نسبت داده شود. در مقابل، نمونه دیوانخانه برخی ناهمواری‌ها و ترک‌های میکروسکوپی را نشان می‌دهد، که ممکن است ناشی از عوامل تخریبی مانند رطوبت یا آلاینده‌های محیطی باشد [۲۴].

علاوه بر لایه طلا، تصاویر SEM حضور ذرات معدنی زیرین (مانند کریستال‌های گچی) را آشکار می‌کنند، که این امر با نتایج XRD حضور گچ هیدراته و آنهیدریت سازگار است. این ذرات اغلب به صورت بلورهای نامنظم با اندازه ۱-۱۰ میکرومتر ظاهر می‌شوند و نشان‌دهنده نفوذ لایه طلا در ساختار متخلخل بستر است. چنین ساختاری می‌تواند دوام لایه را افزایش دهد، اما همزمان آن را در برابر تخریب‌های شیمیایی (مانند سولفات‌شدن) آسیب‌پذیر می‌سازد. مقایسه مورفولوژی بین دو نمونه تأکید می‌کند بر تفاوت‌های احتمالی در روش‌های اعمال: ارگ کریم‌خانی احتمالاً از تکنیک‌های دقیق‌تر (مانند طلاچینی با چسب پروتئینی) بهره برده، در حالی که دیوانخانه ممکن است تحت تأثیر محدودیت‌های اقتصادی یا زمانی بوده باشد.



شکل ۱۱- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌های طلا ارگ کریم‌خانی

Figure 11- SEM Picture of Gold Sample in Karim khan Castel



شکل ۱۲ - تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه های طلا ارگ کریم خانی دیوانخانه

Figure 12 - SEM Picture of Gold Sample in Divankhaneh Mansion

۳-۴-۲- تحلیل عنصری و توزیع ترکیبات

تحلیل EDS در نواحی متعدد از نمونه های طلاکاری، توزیع عنصری را با دقت نیمه کمی (بر پایه درصد وزنی W% و اتمی A%) آشکار کرد (شکل ۱۳ و ۱۴). نتایج نشان دهنده تفاوت های قابل توجه در خلوص طلا (Au) بین دو بنا هستند: در نمونه ارگ کریم خانی، درصد طلا حدود ۷۰٪ (W% ≈ 69/50، A% ≈ 58/50) است، در حالی که در نمونه دیوانخانه این میزان به حدود ۲۰٪ (W% ≈ 20/27، A% ≈ 17/99) کاهش می یابد. این تفاوت می تواند به استفاده از آلیاژهای با کیفیت بالاتر در ارگ (به عنوان بنای سلطنتی) نسبت داده شود، که با نتایج رنگ سنجی (بالاتر بودن روشنایی و زردی در نمونه ارگ) همخوانی دارد.

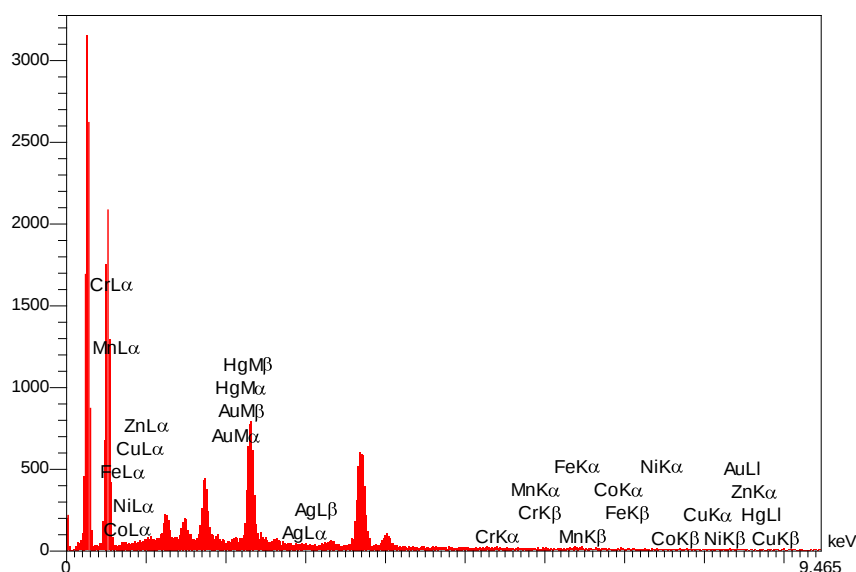
عنصر جیوه (Hg) به طور برجسته در نمونه دیوانخانه (W% 70/64، A% ≈ 64/00) شناسایی شد، در حالی که در ارگ مقدار آن ناچیز (W% ≈ 2/14، A% ≈ 0/34) است. مس (Cu) نیز به عنوان عنصر فلزی غالب دیگر ظاهر شد (در ارگ W% ≈ 2/11، در دیوانخانه W% ≈ 3/75)، که در بسیاری از مطالعات رنگدانه های طلایی تاریخی (مانند آلیاژهای برنزی یا طلایی) گزارش شده و می تواند برای افزایش دوام یا کاهش هزینه به کار رفته باشد [۲۵]. عناصر فلزی فرعی شامل روی (Zn)، کبالت (Co)، نیکل (Ni) و آهن (Fe) با مقادیر نسبتاً یکسان در هر دو نمونه (در حدود ۱-۴ W%) شناسایی شدند، که ممکن است ناخالصی های طبیعی یا افزودنی های آلیاژی باشند. نقره (Ag) تنها در نمونه دیوانخانه (W% ≈ 0/45، A% ≈ 0/51) مشاهده شد، که با نتایج XRD حضور Ag به صورت کریستالی سازگار است و می تواند بخشی از آلیاژ الکتروم (طلا-نقره) باشد.

عناصر غیرفلزی مانند کلسیم (Ca)، سیلیسیم (Si) و اکسیژن (O) نیز در هر دو نمونه شناسایی شدند (برای مثال، در ارگ Ca W% ≈ 3/01، O W% ≈ 6/48)، که این امر به ترکیبات معدنی بستر مانند گچ، (CaSO₄) اشاره دارد (جدول ۴ و ۵). حضور این عناصر، همراه با کربن (C) در برخی نقاط، وجود مواد آلی (مانند چسب پروتئینی شناسایی شده در FTIR) را تقویت می کند. نتایج کلی EDS نشان دهنده این است که عناصر اصلی لایه طلایی شامل طلا، مس و جیوه هستند، با تفاوت های چشمگیر در خلوص و ترکیب که بر تکنیک های متفاوت دلالت دارد [۲۱].

۳-۴-۳- بحث در مورد تکنیک های طلاکاری و مقایسه تاریخی

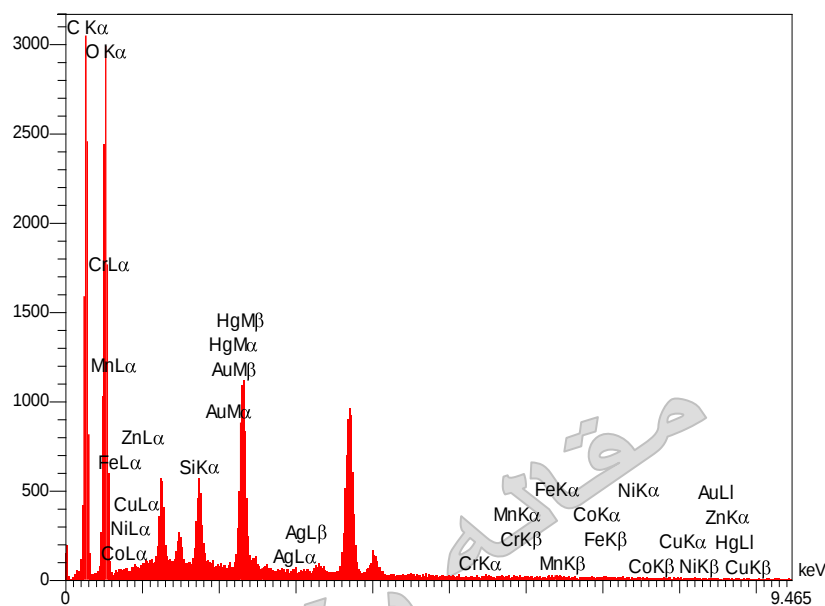
حضور بالای جیوه در نمونه دیوانخانه، استفاده از تکنیک ملغمه طلا (amalgam gilding) یا طلاکاری جیوه‌ای را تأیید می‌کند، که در آن طلا به دلیل کمبود یا هزینه بالا با جیوه ترکیب می‌شود. فرآیند این تکنیک شامل تبدیل طلا به ورق‌های نازک یا قطعات ریز، حرارت‌دهی، و غوطه‌ورسازی در محلول پیش‌گرم‌شده جیوه است تا طلا جذب شود (با تولید دود مشخص). سپس، مخلوط با میله آهنی هم زده می‌شود تا آلیاژی یکنواخت تشکیل گردد، با نسبت جیوه به طلا معمولاً ۶:۱ یا ۸:۱ - که با داده‌های این مطالعه ($\text{Hg:Au} \approx 3.5:1$) در دیوانخانه) همخوانی دارد [۲۱]. این روش، که در هنرهای اسلامی و ایرانی رایج بوده، برای سطوح بزرگ یا بودجه محدود مناسب است، اما خطرات زیست‌محیطی (سمیت جیوه) و تخریبی (تبخیر جیوه در طول زمان) را به همراه دارد. در مقابل، نمونه ارگ احتمالاً از تکنیک طلاچینی با ورق خالص (بدون جیوه) استفاده کرده، که با درصد بالای طلا سازگار است. مقایسه با نتایج XRD (جدول ۶) نشان‌دهنده همخوانی بالا است: عناصری مانند Ca، O و Ag در هر دو روش شناسایی شدند، که این امر اعتبار رویکرد چندآزمایشگاهی را تأیید می‌کند. این یافته‌ها با مطالعات قبلی (مانند هلاکویی در آثار صفویه، که آلیاژهای طلا-مس را گزارش کرد) همخوانی دارند، اما نوآوری‌هایی مانند استفاده از ملغمه در دیوانخانه را برجسته می‌سازند [۱۳، ۲۴].

نتایج SEM-EDS ترکیب لایه طلاکاری دوره زندیه را به عنوان یک سیستم پیچیده فلزی-معدنی (با طلا، جیوه و مس به عنوان عناصر اصلی) آشکار کرد، با تفاوت‌های کیفی بین دو بنا که بر تنوع تکنیکی دلالت دارد. این یافته‌ها مبنایی علمی برای حفاظت فراهم می‌آورند: برای نمونه دیوانخانه، تمرکز بر حذف باقی‌مانده‌های جیوه (با روش‌های غیرتهاجمی مانند جذب خلأ) ضروری است تا از خوردگی بیشتر جلوگیری شود، در حالی که در ارگ، تقویت چسبندگی لایه طلا با استحکام‌بخش‌های سازگار (مانند رزین‌های طبیعی) توصیه می‌شود. مقایسه با دوران‌های مجاور (صفویه/قاجار) نشان‌دهنده تداوم اما با انطباق‌های محلی در زندیه است، و تحقیقات آینده می‌تواند بر مدل‌سازی سه‌بعدی مورفولوژی برای پیش‌بینی تخریب تمرکز کند [۲۱، ۲۴]. این تحلیل نه تنها به درک هنری کمک می‌کند، بلکه به حفظ پایدار این میراث فرهنگی یاری می‌رساند.



شکل ۱۳. طیف EDX رنگ طلائی به کاررفته در ارگ

Figure 13. EDX spectrum of gold color used in Karim Khan Castel



شکل ۱۴. طیف EDX رنگ طلایی به کاررفته در دیوانخانه

Figure 14. EDX spectrum of gold color used in Divankhane Mansion

جدول ۵- آنالیز نیمه کمی رنگ طلایی دیوانخانه

Table 5- semi-quantitative analysis of gold color used in Divankhane Mansion

عناصر	Line	W%	A%
C	Ka	0.001	0.9
O	Ka	0.08	0.61
Si	Ka	0.41	0.21
Cr	Ka	0.00	0.00
Mn	Ka	0.00	0.00
Fe	Ka	0.95	2.99
CO	Ka	0.85	2.51
Ni	Ka	1.13	3.35
Cu	Ka	3.75	4.81
Zn	Ka	1.62	4.34
Ag	la	0.45	0.51
Au	la	20.27	17.99
Hg	Ma	70.64	64.00
		10000	10000

جدول ۴- آنالیز نیمه کمی رنگ طلایی ارگ

Table 4- semi-quantitative analysis of gold color used in Karim Khan Castel

عناصر	Line	W%	A%
Ca	Ka	3.01	2.9
O	Ka	6.48	0.61
Si	Ka	0.41	0.21
Cr	Ka	1.28	0.43
Mn	Ka	1.91	2.38
Fe	Ka	0.84	2.13
CO	Ka	2.24	2.44
Ni	Ka	1.48	2.13
Cu	Ka	2.11	9.74
Zn	Ka	3.68	8.62
Ag	la	3.04	5.62
Au	la	69.50	58.50
Hg	la	2.14	0.34
		10000	10000

۳-۵- مقایسه نتایج آنالیز SEM-EDS و XRD

یکی از جنبه‌های کلیدی در رویکرد چندآزمایشگاهی به تحلیل آثار تاریخی، مقایسه نتایج تکنیک‌های مختلف است تا اعتبار یافته‌ها افزایش یابد و تصویری جامع از ترکیب مواد به دست آید. در این پژوهش، مقایسه بین نتایج SEM-EDS که بر مورفولوژی و تحلیل عنصری نیمه کمی تمرکز دارد (و XRD که فازهای کریستالی را شناسایی می‌کند) برای نمونه‌های لایه طلاکاری از ارگ کریم‌خانی و عمارت دیوانخانه زندیه انجام شد. این مقایسه، که در جدول ۶ خلاصه شده، بر عناصری با مقادیر بالاتر (بر پایه درصد وزنی یا شدت پیک‌ها) تأکید دارد و نشان‌دهنده همخوانی‌های قابل توجهی بین دو روش است. چنین تحلیلی نه تنها صحت داده‌ها را تأیید می‌کند، بلکه بینش‌های عمیق‌تری در مورد ساختار لایه‌ها، ناخالصی‌ها و مکانیسم‌های احتمالی تخریب ارائه می‌دهد. برای مثال، همخوانی در شناسایی فازهای معدنی می‌تواند به درک بهتر پایداری بستر گچی کمک کند، در حالی که تفاوت‌ها ممکن است به محدودیت‌های هر تکنیک (مانند حساسیت XRD به ساختار کریستالی و EDS به توزیع سطحی) نسبت داده شود [۲۳، ۲۴]. این مقایسه بر پایه داده‌های جدول‌های ۲ و ۳ (XRD) و شکل‌های ۱۳ و ۱۴ (EDS) انجام شده و عناصر فلزی و غیرفلزی را در هر دو بنا پوشش می‌دهد.

جدول ۶ : مقایسه نتایج آنالیز SEM-EDAX و XRD در نمونه‌های طلاکاری دیوانخانه و ارگ

Table 6: Comparison of the results of SEM-EDAX and XRD analysis in Divankhaneh and Arg gilding samples

آنالیز عنصر	XRD		SEM-EDAX	
	ارگ	دیوانخانه	ارگ	دیوانخانه
Mg	*	*	-	-
Ca	*	*	*	*
O	*	*	*	*
C	*	*	*	*
Hg	-	-	*	*
Cu	-	-	*	*
Zn	-	-	*	*
Ag	*	*	*	*
Au	-	-	*	*

۳-۵-۱- همخوانی در شناسایی عناصر غیرفلزی و فازهای معدنی

نتایج نشان‌دهنده تعداد قابل توجهی همپوشانی در عناصر غیرفلزی و ترکیبات معدنی بین دو روش است، که این امر ترکیب غالب بستر لایه طلاکاری را تأیید می‌کند. برای نمونه، عناصر اکسیژن (O)، کربن (C) و کلسیم (Ca) که اجزای اصلی گچ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ یا CaSO_4 هستند - در هر دو تحلیل SEM-EDS و XRD برای نمونه‌های هر دو بنا شناسایی شدند. در EDS، این عناصر به صورت درصد‌های وزنی قابل توجه (مانند $\text{O} \approx 6.48\%$ در ارگ و $\approx 0.08\%$ در دیوانخانه، همراه با $\text{Ca} \approx 3.01\%$ در ارگ) ظاهر می‌شوند، که نشان‌دهنده حضور گسترده گروه‌های سولفات و کربنات است. در XRD، این ترکیبات به صورت فازهای کریستالی مانند $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (gypsum) ، کد ۰۰-۰۳۶-۰۴۳۲ و calcium sulfate anhydrite (CaSO_4) ، کدهای ۰۱-۰۸۰-۰۷۸۷ و ۰۱-۰۷۲-۰۵۰۳ با پیک‌های غالب تأیید می‌شوند.

مقاله پذیرفته شده

همچنین، هانتایت $(\text{Mg}_3\text{Ca}(\text{CO}_3)_4)$ ، کد ۰۴۰۹-۰۱۴-۰۰ در XRD شناسایی شد، که حضور Mg و Ca در آن با سیگنال‌های EDS مانند حضور Si و Ca به عنوان ناخالصی‌های معدنی) همخوانی دارد.

این همخوانی‌ها بر استفاده از گچ به عنوان ماده اصلی بستر در تکنیک‌های طلاکاری دوره زندیه تأکید می‌کنند و نشان می‌دهند که لایه معدنی زیرین، علی‌رغم نازکی لایه طلا، در هر دو روش detectable است. چنین یافته‌ای اهمیت دارد، زیرا گچ حساس به رطوبت است و می‌تواند منجر به تخریب‌هایی مانند ترک‌خوردگی یا از دست رفتن چسبندگی شود - عاملی که در مقایسه بین بناها (با پایداری بالاتر در ارگ) مشهود است [۲۴].

۲-۵-۳- همخوانی در شناسایی عناصر فلزی

در حوزه عناصر فلزی، مقایسه نشان‌دهنده شناسایی مشترک چندین عنصر کلیدی است که نقش آن‌ها در آلیاژ لایه طلایی حیاتی است. برجسته‌ترین مثال، عنصر نقره (Ag) است که در هر دو روش برای نمونه‌های هر دو بنا تشخیص داده شد. در XRD، نقره به صورت فاز کریستالی (Silver 3C) کدهای ۰۷۱۸-۰۸۷-۰۱ برای ارگ و ۰۷۱۹-۰۸۷-۰۱ برای دیوانخانه ظاهر می‌شود، که ممکن است به فرم‌های کاربریدی (مانند Ag_2C_2 یا آلیاژی اشاره کند و به دلیل مقاومت بالا در برابر خوردگی و حرارت، در تزیینات معماری سنتی استفاده می‌شده است [۲۲]). در EDS، نقره تنها در نمونه دیوانخانه ($W\% \approx 0.45$) شناسایی شد، اما حضور آن در ارگ ممکن است در مقادیر trace زیر حد تشخیص نیمه‌کمی) باشد. این همخوانی نشان‌دهنده این است که نقره بخشی از آلیاژ مقاوم در برابر عوامل محیطی بوده و می‌تواند به عنوان یک نشانگر برای کیفیت مواد عمل کند - با غلبه در دیوانخانه که از تکنیک ملغمه استفاده کرده است.

عناصر فلزی دیگر مانند مس (Cu)، روی (Zn)، نیکل (Ni) و آهن (Fe) نیز در EDS با درصد‌های ۲-۴٪ شناسایی شدند، که با عدم حضور مستقیم در XRD به دلیل تمرکز XRD بر فازهای کریستالی غالب) قابل توجیه است، اما به طور غیرمستقیم با فازهای معدنی مرتبط هستند. طلا (Au) و جیوه (Hg) عناصر اصلی لایه - در EDS برجسته هستند ($\text{Au} \approx 70\%$) در ارگ، $\text{Hg} \approx 70\%$ در دیوانخانه)، در حالی که XRD آن‌ها را مستقیماً شناسایی نکرد (احتمالاً به دلیل نازکی لایه و غلبه گچ)، اما این تفاوت تکنیکی اعتبار کلی را کاهش نمی‌دهد.

۳-۵-۳- تفاوت‌ها و محدودیت‌ها

علی‌رغم همخوانی‌های گسترده، برخی تفاوت‌ها مشاهده می‌شود که به ماهیت تکنیک‌ها مربوط است. برای مثال، EDS عناصری مانند کبالت (Co) و کروم (Cr) را در مقادیر trace شناسایی کرد که در XRD غایب هستند، زیرا XRD به فازهای کریستالی حساس است و ممکن است این عناصر به صورت آمورف یا ناخالصی‌های جزئی وجود داشته باشند. همچنین، تمرکز EDS بر سطح (عمق نفوذ کم) در مقابل XRD که ساختار حجمی را بررسی می‌کند، می‌تواند تفاوت‌هایی در شدت سیگنال‌ها ایجاد کند. این محدودیت‌ها تأکید می‌کنند بر نیاز به تکنیک‌های مکمل مانند XRF برای تحلیل عمیق‌تر.

۴-۵-۳- نتیجه‌گیری از مقایسه و پیامدهای تحقیقاتی

در مجموع، مقایسه نتایج SEM-EDS و XRD همخوانی بالایی را نشان می‌دهد، با شناسایی مشترک عناصری مانند O, C, Ca (برای گچ) و Ag (به صورت کریستالی یا کاربریدی) در هر دو بنا، که این امر ترکیب لایه طلاکاری را به عنوان یک سیستم معدنی-فلزی پیچیده تأیید

مقاله پذیرفته شده

می‌کند. این یافته‌ها نه تنها تکنیک‌های هنری دوره زندیه (مانند استفاده از آلیاژهای مقاوم) را روشن می‌سازند، بلکه مبنایی برای حفاظت فراهم می‌آورند: برای مثال، حضور نقره و گچ می‌تواند به انتخاب مواد مرمتی سازگار (مانند پوشش‌های ضد خوردگی) منجر شود. مقایسه با مطالعات مشابه (مانند کوچک‌زایی و همکاران در آثار قاجاری [۲]) نشان‌دهنده تداوم الگوها اما با تفاوت‌های محلی است. تحقیقات آینده می‌تواند این مقایسه را به مدل‌های آماری گسترش دهد تا پیش‌بینی تخریب دقیق‌تری ارائه شود، و در نهایت به حفظ پایدار میراث فرهنگی زندیه کمک کند [۲۳، ۲۴].

۴. نتیجه‌گیری

این پژوهش، با تمرکز بر ساختارشناسی لایه‌های طلاکاری در دیوارنگاری‌های دوره زندیه (مطالعه موردی ارگ کریم‌خانی و عمارت دیوانخانه شیراز)، نخستین تلاش سیستماتیک برای تحلیل علمی این آرایه‌های تزئینی با استفاده از رویکرد چندآزمایشگاهی است. یافته‌های به‌دست‌آمده از تکنیک‌های پیشرفته مانند طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR)، پراش اشعه ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به طیف‌نگاری پراش انرژی پرتو ایکس (SEM-EDS)، و رنگ‌سنجی (سیستم CIELAB) نه تنها ترکیب شیمیایی و ساختاری این لایه‌ها را روشن ساختند، بلکه بینش‌های ارزشمندی در مورد تکنیک‌های هنری سنتی، مکانیسم‌های تخریب، و استراتژی‌های حفاظتی ارائه دادند. نتایج نشان‌دهنده تنوع قابل توجه در مواد و روش‌های به‌کاررفته بین دو بنا هستند: در ارگ کریم‌خانی، لایه طلایی عمدتاً از ورق‌های طلا با خلوص بالا (حدود ۷۰٪ Au) تشکیل شده، که بر بستری از گچ هیدراته ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) و آنهیدریت (CaSO_4) همراه با چسب پروتئینی (احتمالاً سریشم حیوانی) و روغن اجرا شده است. در مقابل، عمارت دیوانخانه از تکنیک ملغمه طلا (با نسبت بالای جیوه به طلا، حدود ۷۰٪ Hg بهره‌برده، که این امر با حضور عناصر فلزی فرعی مانند مس (Cu)، نقره (Ag)، روی (Zn)، نیکل (Ni) و آهن (Fe) همراه است. این تفاوت‌ها، که با پارامترهای رنگی (مانند L^* بالاتر در ارگ، نشان‌دهنده روشنایی بیشتر) و مورفولوژی سطحی (سطح صاف‌تر در ارگ vs. ناهمواری در دیوانخانه) تأیید شدند، می‌توانند به عوامل تاریخی مانند محدودیت‌های اقتصادی یا اولویت‌های هنری در دوره زندیه نسبت داده شوند.

از منظر تحلیلی، همخوانی بالای نتایج بین تکنیک‌ها (مانند شناسایی مشترک فازهای معدنی گچ و هانتایت $(\text{Mg}_3\text{Ca}(\text{CO}_3)_4)$ در XRD و EDS، یا نوارهای جذبی پروتئینی در FTIR) اعتبار رویکرد چندآزمایشگاهی را تأیید می‌کند و بر محدودیت‌های هر روش (مانند تمرکز XRD بر ساختار کریستالی vs. تحلیل سطحی EDS) تأکید دارد. این یافته‌ها با مطالعات پیشین در دوره‌های صفویه و قاجاریه (مانند استفاده از آلیاژهای طلا-مس در آثار هلاکویی [۶] یا روغن کمان در کاخ گلستان [۵]) همخوانی دارند، اما نوآوری‌هایی مانند کاربرد ملغمه جیوه‌ای در دیوانخانه را برجسته می‌سازند، که این امر تداوم اما انطباق محلی تکنیک‌های هنری در زندیه را نشان می‌دهد. علاوه بر این، تحلیل‌ها مکانیسم‌های تخریب را آشکار کردند: نفوذ لایه طلا در ساختار متخلخل گچ منجر به کاهش روشنایی در گذر زمان شده، در حالی که حضور جیوه در دیوانخانه خطرات خوردگی شیمیایی و سمیت زیست‌محیطی را افزایش می‌دهد. این عوامل، همراه با حساسیت گچ به رطوبت و آلاینده‌ها، بر نیاز به نظارت محیطی دقیق (مانند کنترل رطوبت نسبی زیر ۵۰٪ و دمای پایدار) تأکید می‌کنند.

پیامدهای حفاظتی این پژوهش گسترده هستند و می‌توانند مبنایی علمی برای برنامه‌ریزی مرمتی فراهم آورند. برای ارگ کریم‌خانی، توصیه می‌شود از استحکام‌بخش‌های سازگار (مانند رزین‌های طبیعی مبتنی بر پروتئین) برای تقویت چسبندگی لایه طلا استفاده شود، در حالی که در دیوانخانه، اولویت بر حذف باقی‌مانده‌های جیوه با روش‌های غیرتهاجمی (مانند جذب خلأ یا پوشش‌های محافظ) است تا از تخریب بیشتر جلوگیری گردد. این استراتژی‌ها نه تنها دوام آثار را افزایش می‌دهند، بلکه با اصول حفاظت پایدار (مانند حداقل مداخله و سازگاری

مواد) همخوانی دارند و می‌توانند به عنوان الگویی برای سایر بناهای زندیه (مانند مسجد وکیل یا بازار وکیل) اعمال شوند. از دیدگاه فرهنگی، این مطالعه به حفظ میراث هنری دوره زندیه - که نمادی از شکوفایی معماری ایرانی در قرن ۱۸ میلادی است - کمک می‌کند و اهمیت آن را در زمینه هنر اسلامی برجسته می‌سازد.

با وجود دستاوردهای این پژوهش، محدودیت‌هایی مانند نازکی لایه طلا (که جداسازی کامل از بستر را دشوار می‌سازد) و تمرکز بر دو بنا وجود دارد، که این امر نیاز به مطالعات گسترده‌تر را ایجاب می‌کند. پیشنهادهای آینده شامل گسترش تحلیل به تکنیک‌های پیشرفته‌تر مانند طیف‌سنجی رامان یا مدل‌سازی سه‌بعدی مورفولوژی برای پیش‌بینی تخریب، و مقایسه با آثار زندیه در مناطق دیگر (مانند کرمان یا اصفهان) است. همچنین، بررسی تأثیر عوامل زیست‌محیطی مدرن (مانند آلودگی هوا در شیراز) می‌تواند به توسعه پروتکل‌های حفاظتی پویا منجر شود. در نهایت، این پژوهش نه تنها شکاف تحقیقاتی در مطالعات علمی آثار زندیه را پر می‌کند، بلکه بر اهمیت ادغام علوم مواد با حفاظت میراث فرهنگی تأکید دارد، و می‌تواند الهام‌بخش تحقیقات میان‌رشته‌ای برای نسل‌های آینده باشد. با ادامه چنین تلاش‌هایی، می‌توان اطمینان حاصل کرد که زیبایی و ارزش تاریخی دیوارنگاری‌های طلایی زندیه برای آیندگان حفظ شود.

سپاسگزاری

لازم است از ریاست محترم سازمان میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری استان فارس، مدیریت محترم و همکاران در بخش معاونت فنی اداره میراث فرهنگی شهرستان شیراز و همکاران در بخش آزمایشگاه دانشگاه شیراز کمال تشکر و قدردانی را در خصوص همکاری‌های صمیمانه ایشان داشته باشم.

تعارض منافع:

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

۵- مراجع

1. Nemati-Babaylou A, Koochakzai A, Malekifar, L. Using Spectroscopic and Microscopic Methods in the Study of the Identification Characteristics of Paint Materials Produced Based on Traditional Persian Recipes: Cinnabar Red. Journal of Color Science and Technology. 2014; 18(1): 25-36. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.17358779.1402.18.1.3.5>. [In Persian].
2. Koochakzai A, hamzavi Y, shojae far F. Identification of red, blue and golden pigments in Qajar Mural Painting anaclitic fire place in Goharion House in Tabriz. Journal of Color Science and Technology. 2021; 15(4): 287-299. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.17358779.1400.15.4.3.4>. [In Persian].
3. Trevino K. M, Wagner C. R, Tamura E. K, Garcia J, Louie A. Y. "Small molecule sensors for the colorimetric detection of Copper (II): A review of the literature from 2010 to 2022", Dyes Pigm. 110881, 2022.
4. Melo MJ, Nabais P, Vieira M, Araújo R, Otero V, Lopes J, Martín L. "Between past and future: Advanced studies of ancient colours to safeguard cultural heritage and new sustainable applications", Dyes Pigm. 2022: (208), 11081. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2022.110815>
5. Ahmadi H, Abed Esfahani A, Mohtasham A. Technology of Gilding Ornament on Stone in Golestan

- Palace Complex. Maremat-e Asar & Baft-haye Tarikhi-Farhangi Biannual, 2011; 1(1): 1-14. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.23453850.1390.1.1.3.1> [In Persian].
6. Holakooei, P. Technology and pathology of the porcelain layer of the decorations of some buildings of the Safavid era of Isfahan (Aliqapo, Chehelston and Hasht Behesht). Master's thesis. Tehran University of Art. 2007. [In Persian].
7. Mohtasham A. Technical study of Gilding ornaments on stony inscriptions in Vank Cathedral- Isfahan . Journal of Research on Archaeometry. 2017; 2(2): 77-89. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.24764647.1395.2.2.2.0> [In Persian].
8. Tainti, T. Structural study of porcelain layer arrays in Vank and Bethlehem churches of Isfahan. Master's thesis. Islamic Art University of Tabriz.2018. [In Persian].
9. Hajisayyedjavadi S.M, Fahimifar A, hamzavi Y. Study and Recognition of Mineral Matter of Pastiglia Layer and Gliding of Safavid Period in Qazvin Chehelsotoun. PAZHOHESH-HA-YE BASTANSHENASI IRAN, 2020; 10(25): 241-225. <https://doi.org/10.22084/nbsh.2019.20259.2027> [In Persian].
10. Josa V. G, Bertolino S. R., Laguens A, Riveros J. A, Castellano G. X-ray and scanning electron microscopy archaeometric studies of pigments from the Aguada culture, Argentina. *Microchem. J.* 2010; (96): 259-268. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2010.03.010>
11. Franquelo M. L., Duran A, Herrera L. K., Jimenez de Haro M. C., Perez-Rodriguez J. L. Comparison between micro-Raman and micro-FTIR spectroscopy techniques for the characterization of pigments from southern spain cultural heritage. *J. Mol. Struct*, 2009; (924-926): 404-412. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2008.11.041>
12. Chaplin R T. D, Clark J. H., Martinón-Torres M. A combined Raman microscopy, XRF and SEM–EDX study of three valuable objects-A large painted leather screen and two illuminated title pages in 17th century books of ordinances of the Worshipful Company of Barbers, London. *J. Mol. Struct.*; 2010; (976): 350-359. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2010.03.042>
13. Haswell R., Carlyle L, Mensch K. T. J. Van Gogh's Painting Grounds: Quantitative determination of bulking agents (Extenders) using SEM/EDX. *Microchim. Acta.* , 2006; (155): 163-167. <https://doi.org/10.1007/s00604-006-0536-7>
14. Clark R. J. H, Mirabaud S. Identification of the pigments on a sixteenth century Persian book of poetry by Raman microscopy. *J. Raman Spectrosc.*. 2006; (37): 235-239. https://doi.org/10.1002/jrs.1473?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
15. Cosentino A. Identification of pigments by multispectral imaging; a flowchart method. *Heritage Sci.* 2014, 2(8): 1-12. <https://doi.org/10.1186/2050-7445-2-8>
16. Grabowski B, Masarczyk W, Głomb P, Mendys A. Automatic pigment identification from hyperspectral data. *J. Cult. Heritage.*, 2018 (31): 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.01.003>
17. Shafiei, F, Esfandiaripour H. Art and Architecture Exhibition in Karim Khani Palace, Shiraz: Organization of Cultural Heritage, Handicrafts and Tourism of Fars Province. 2004.[In Persian]
18. Shirvani M. The impact of Community Culture and Effect Functional on Body of Formation and Architectural Decoration in Buildings s'Zandiye by Looking at the Divankhaneh Mansion. *Jurnal of Fine Arts: Visual Arts.* 2021; 25 (4): 27- 34. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.22286039.1399.25.4.3.0> . [In Persian].

19. Mirshamsi F, Mirzaabolghasemi M.S, Zarekhalili. F. Diversity of Plant Motives in Wall-Paintings at the Time of the Zand in Shiraz. Journal of Fine Arts: Visual Arts. 2017; 22(1): 43- 52. <https://doi.org/10.22059/jfava.2017.61009> . [In Persian].
20. Sharif zadeh A M. Murall Painting in Iran (Zand and Qajar). Organization of Cultural Heritage, Handicrafts and Tourism of Tehran Province, 1993. [In Persian].
21. Abbasi J, Bahadori R, Bozorgmehr M A, Beheshti S I, Bahrololoumi F. Identification of Materials and Pigments Used in Mural Painting of Rahim Abad Historic Garden & Mansion in Birjand. JRA 2017; 2 (2):63-76URL: <http://jra-tabriziau.ir/article-1-63-en.html> .[In Persian].
22. Moazen S, Vali H, Banayi S. a Review of the Role of Infrared Thermography in Conservation and Restoration of Historic Buildings as A Non-destructive Method and Its Application in the Construction Industry. Athar 2021; 42 (3) :234-259. URL: <http://athar.richt.ir/article-2-931-fa.html> .[In Persian].
23. Abbasi J, Bahadori R, Cappa F, Jembrih-Simbuerger D, Schreiner M, Beheshti S I. Laboratory Studies on Materials and Pigments Used in Inscriptions and Mural Paintings in the Tomb of Ghadmagah in Neishabour. Parseh J Archaeol Stud.2023; 7(23): 325-356. [doi:10.30699/PJAS.7.23.325](https://doi.org/10.30699/PJAS.7.23.325) URL: <http://journal.richt.ir/mbp/article-1-507-fa.html> [In Persian].
24. Mortazavi M, Goladhar M, Salehi Kakhki A. review of techniques and methods of gilding historical metal works, the second national conference on the use of scientific analysis in archeology and restoration of cultural heritage, 2013. [In Persian].
25. Rafiei, S. Comparison of colorimetric parameters and antibacterial effect of two dyes, henna and jaft, on silk. Journal of Textile Science and Technology, 2024; 13(1): 15-29. <https://doi.org/10.22034/jtst.2024.191322> .[In Persian].