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

Available online @ www.jscw.icrc.ac.ir
Journal of Studies on Color World, 15, 3(2025), 257-279
Article type: Review

نشریه علمی مطالعات در دنیای رنگ
Journal of Studies in Color World
www.jscw.icrc.ac.ir

A Comprehensive Review of the Application of Diverse Natural Colorants in the Conservation and Restoration of Cultural Heritage Artifacts

Saeedeh Rafiei*[1], Maryam Shirvani[2]

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

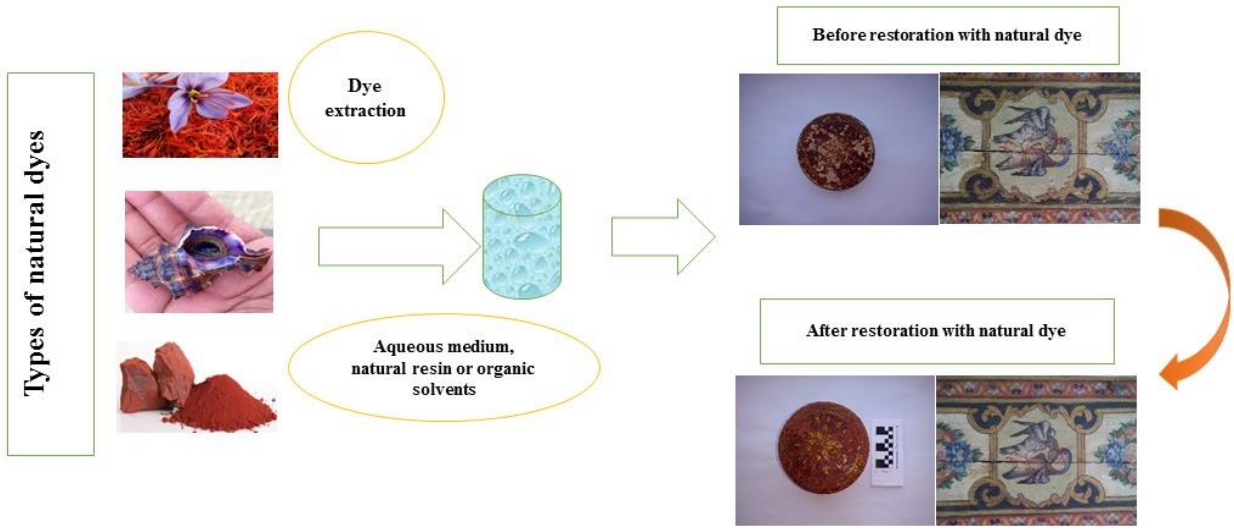
ARTICLE INFO

Article history:
Received: 10-03-2025
Accepted: 20-04-2025
Available online: 28-06-2025
Print ISSN: 2251-7278
Online ISSN: 2383-2223
DOI: 10.30509/jscw.2025.167493.1225

Keywords:
Natural colorants
Conservation
Preservation
Heritage artifacts
Colorfastness
Cultural heritage

ABSTRACT

In light of the imperative to preserve the authenticity and cultural significance of historical artifacts, this study presents a comprehensive review of natural colorants and their application in the conservation and restoration of diverse heritage objects. Emphasizing the historical and emotional importance of color, the research revisits the evolution of dyeing techniques—from traditional practices rooted in the use of botanically, animal, and mineral-derived colorants to the recent integration of advanced scientific methodologies. These natural dyes, prized for their chemical compatibility and inherent stability, have long been employed to restore and preserve not only murals and paintings but also wooden, stone, ceramic, textile, and manuscript artifacts. A central challenge in conservation remains the selection of restorative materials that harmoniously interact with the original substrate while offering sufficient durability against environmental stressors such as fluctuations in humidity, temperature, and light exposure. In addressing this challenge, the study highlights the reversibility and sustainability of natural colorants, which facilitate meticulous restoration without compromising the original integrity of the work. Recent advances in analytical techniques—including Raman spectroscopy, FTIR, and HPLC-MS—have significantly improved the precise identification and stabilization of these pigments, thereby enhancing the restoration outcomes. Furthermore, the synergistic use of natural binders such as Arabic gum and traditional resins has been shown to create robust, three-dimensional polymeric networks that secure the colorants against degradation. Reviving traditional dyeing knowledge in conjunction with modern technological innovations not only resolves issues like color fading and adverse chemical reactions but also presents an ethical approach to conservation. Ultimately, this interdisciplinary framework underscores that the integration of historical insights with current scientific advancements offers a reversible, environmentally friendly, and effective pathway for the preservation of our cultural heritage.



Corresponding author: * s_rafiei@shirazartu.ac.ir

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

نشریه علمی
مطالعات در دنیای رنگ
Journal of Studies in Color World
www.jscw.icrc.ac.ir

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
پژوهشگاه رنگ

دسترسی آنلاین: www.jscw.icrc.ac.ir
نشریه علمی مطالعات در دنیای رنگ/ ۱۵، (۱۴۰۴)۳، ۲۷۹-۲۵۷
نوع مقاله: مروری
دسترسی آزاد

مروری جامع بر کاربرد انواع رنگزاهای طبیعی در مرمت و حفاظت آثار باستانی

سعیده رفیعی[1*]، مریم شیروانی[2]

۱- استادیار، دانشکده هنرهای صناعی، گروه فرش، دانشگاه هنر شیراز، شیراز، ایران، کدپستی: ۷۱۴۶۶۹۶۹۸۹.

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

اطلاعات مقاله

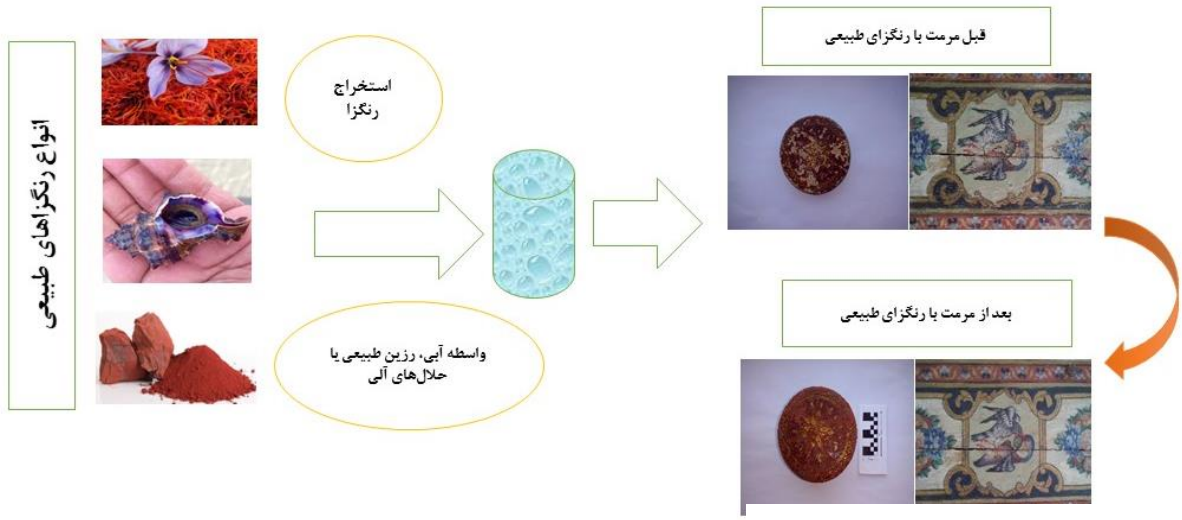
تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۳۱
در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۴/۰۴/۰۷
شاپا چاپی: ۷۲۷۸-۲۲۵۱
شاپا الکترونیکی: ۲۲۲۳-۲۳۸۳

DOI: 10.30509/jscw.2025.167493.1225

واژه‌های کلیدی:
رنگزای طبیعی
مرمت
حفاظت
آثار باستانی
پایداری رنگ
میراث فرهنگی

چکیده

در راستای حفظ اصالت و نوآوری در حفاظت میراث فرهنگی، این پژوهش به بررسی نقش رنگزاهای طبیعی در مرمت آثار باستانی و تحولات علمی-فنی روش‌های رنگرزی می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد استفاده از رنگزاهای طبیعی، با سازگاری شیمیایی و فیزیکی مناسب با ساختار آثار، علاوه بر احیای ارزش‌های بصری و تاریخی، پایداری و امکان بازگشت‌پذیری مطلوبی در فرآیندهای مرمتی ایجاد می‌کند. رنگزاهایی چون روناس، نیل، زعفران و اخرا، که از منابع گیاهی، جانوری و معدنی استخراج می‌شوند، نقش محوری در تثبیت و بازسازی پوشش‌های رنگی آثار دیواری، چوبی، سنگی، سفالی و منسوجات داشته‌اند. پژوهش به چالش‌هایی نظیر دسترسی محدود به رنگزاهای باکیفیت، افول دانش فنی سنتی و نیاز به فناوری‌های نوین برای شناسایی و تثبیت صحیح رنگ می‌پردازد. روش‌هایی مانند طیف‌سنجی رامان، FTIR و HPLC-MS امکان شناسایی دقیق‌تر ترکیبات و عملکرد آن‌ها در برابر عوامل محیطی را فراهم نموده است. به‌علاوه، استفاده از صمغ‌های طبیعی در تثبیت رنگ و بهره‌گیری از فناوری‌هایی چون نانومواد و لایه‌گذاری تدریجی، موجب ارتقای دوام و هماهنگی پوشش‌های مرمتی گشته است. این مطالعه بر ضرورت تلفیق دانش سنتی با فناوری‌های نوین به‌عنوان رویکردی اخلاقی و علمی برای محافظت و مرمت آثار تاریخی تأکید می‌ورزد.



Corresponding author: * s_rafiei@shirazartu.ac.ir

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

۱- مقدمه

رنگ‌ها به واسطه تاثیرات روحی و روانی که بر انسان می‌گذارند، همواره مورد توجه انسان بوده است. کاربرد مواد رنگزای طبیعی از دیرباز نقش چشمگیر و تعیین‌کننده‌ای در زندگی بشر داشته است. انسانها رنگ‌ها را از طبیعت می‌گرفتند و سعی در تغییر ظاهر اشیا به وسیله رنگرزی داشتند. بشر در ابتدا برای رنگرزی از رنگزاهای طبیعی محیط زندگی خود استفاده می‌کرد، به مرور زمان و با پیشرفت جوامع بشری، شیوه‌های ساده رنگ برای رنگ آمیزی به فنون پیچیده تری تبدیل شد، بشر توانست علاوه بر استفاده از انواع مواد معدنی و بخشهای مختلف گیاهان مانند ساقه، ریشه، برگ، گل، پوست، دانه، از حشرات و حتی آفات گیاهان نیز رنگ‌های گوناگون به دست آورد. با گذشت زمان و رسیدن به عصر حاضر استفاده از رنگ‌های شیمیایی مرسوم شد (۱).

رنگ به عنوان عنصری مهم و کاربردی برای تزیین محیط پیرامون زندگی مردم محسوب می‌شود. رنگ از جمله مؤلفه‌های مهمی است که به وسیلهٔ آن می‌توان احساسات درونی را بیان کرد یا تأثیراتی بر ذهن و احساس مخاطبان گذاشت. یکی از اولین مواردی که در مورد رنگ به ذهن می‌رسد، مجموعه روابط نمادین و تصویری آن با باورهای افراد است که از جمله مؤثرترین جنبه‌های رنگ می‌باشد. به همین دلیل همنشینی رنگ‌ها در محیط کار و در خانه، بر احساسات افراد تأثیر می‌گذارد. رنگ می‌تواند فضای خاصی را ایجاد نماید، روحیه انسان را متحول کند و میدانی مناسب برای بروز خالقیت انسان باشد. این در حالی است که در نگاه متفکران اسلامی رنگ اهمیت و جایگاه تعاریف کنونی را دارا نبوده است، آنچنان که در ۴ تعریف ملاصدرا هر چیزی که کمال بایسته و شایسته خود را داشته باشد زیبا است (۲، ۳).

حفظ و مرمت آثار باستانی یکی از مهمترین وظایف در حوزه میراث فرهنگی است. استفاده از مواد مناسب و سازگار با اثر تاریخی در فرایند مرمت نقش کلیدی در موفقیت این عملیات دارد. رنگزاهای طبیعی به دلیل سازگاری با مواد اصلی اثر و پایداری مناسب، از دیرباز در مرمت آثار مورد استفاده قرار می‌گرفته‌اند. حفظ و مرمت آثار باستانی یکی از مهمترین وظایف در حوزه میراث فرهنگی است که نقش اساسی در انتقال ارزش‌های فرهنگی و تاریخی به نسل‌های آینده دارد (۴). در طول تاریخ، تمدن‌های مختلف از روش‌ها و مواد گوناگونی برای حفظ و مرمت آثار باستانی استفاده کرده‌اند که امروزه بخش مهمی از دانش مرمت را تشکیل می‌دهند (۵).

۲- بیان مساله

حفاظت و مرمت آثار باستانی، به عنوان میراثی گرانبها از تمدن‌های گذشته، مستلزم رویکردی علمی و مسئولانه در انتخاب و به‌کارگیری مواد مرمتی است. یکی از چالش‌های محوری در این حوزه، یافتن موادی است که ضمن داشتن سازگاری کامل با ساختار اصلی اثر، از پایداری و دوام کافی در برابر عوامل مخرب محیطی برخوردار باشند. استفاده از مواد نامناسب و ناسازگار می‌تواند منجر به تسریع فرایندهای تخریبی و آسیب‌های جبران‌ناپذیر به آثار تاریخی شود (۶). در این میان، رنگزاهای طبیعی، به عنوان جزء لاینفک بسیاری از آثار باستانی، نقشی حیاتی در بازگرداندن زیبایی و اصالت بصری این آثار ایفا می‌کنند. با این حال، علی‌رغم اهمیت و کاربرد گسترده رنگزاهای طبیعی در طول تاریخ، دانش و مهارت‌های مربوط به شناسایی، استخراج، فرآوری و به‌کارگیری صحیح آن‌ها، با گذشت زمان رو به افول گذاشته و امروزه با چالش‌های متعددی در این زمینه مواجه هستیم (۷). این چالش‌ها شامل محدودیت در دسترسی به منابع معتبر و قابل اعتماد، فقدان دانش کافی در خصوص خواص شیمیایی و فیزیکی رنگزاهای مختلف و نیز عدم آگاهی از روش‌های مناسب تثبیت و پایداری آن‌ها در شرایط محیطی متفاوت می‌باشد. علاوه بر این، استفاده غیراصولی از رنگزاهای طبیعی، به دلیل عدم شناخت کافی از ویژگی‌های آن‌ها، می‌تواند منجر به بروز مشکلاتی نظیر تغییر رنگ، کم‌رنگ‌شدن، و یا آسیب به ساختار اثر شود. لذا، بررسی و مطالعه جامع در خصوص رنگزاهای طبیعی، به منظور احیای دانش سنتی و توسعه روش‌های نوین در به‌کارگیری آن‌ها در مرمت آثار باستانی، از اهمیت بسزایی برخوردار است.

۳- ضرورت تحقیق

ضرورت استفاده از رنگزاهای طبیعی در مرمت آثار باستانی به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد آن‌ها از چندین جنبه علمی و عملی قابل تبیین است. این رنگزاها، به دلیل ساختار شیمیایی مشابه با مواد مولد اصلی این آثار نظیر الیاف طبیعی، چوب و کاغذ، از سازگاری فیزیکی و شیمیایی بیشتری برخوردارند و خطر واکنش‌های نامطلوب و آسیب‌های ساختاری و دیداری را به حداقل می‌رسانند. از منظر زیست‌محیطی، این مواد نه تنها قابلیت تجدیدپذیری دارند، بلکه به عنوان جایگزین‌های امن و پایدار نسبت به رنگزاهای مصنوعی شناخته می‌شوند که تأثیرات تخریبی بر اکوسیستم را کاهش داده و تولید آلودگی‌های محیطی را محدود می‌کنند. همچنین، رنگزاهای طبیعی امکان بازسازی دقیق‌تر رنگ‌های اصلی آثار را فراهم می‌آورند و با حفظ یکپارچگی تاریخی و اصالت، ارزش‌های فرهنگی و زیباشناختی این یادگارها را تقویت می‌کنند. از سوی دیگر، اصل "قابلیت برگشت‌پذیری" در مرمت، استفاده از رنگزاهای طبیعی را به روشی متمایز تبدیل می‌کند، زیرا این مواد به راحتی و بدون آسیب به ساختار اصلی اثر، قابل حذف و جایگزینی هستند که امکان مداخلات ترمیمی آینده را تسهیل می‌کند. بنابراین، مطالعات جامع در حوزه شناسایی، استخراج و کاربرد این مواد، ضرورتی علمی و مسئولیتی اخلاقی برای حفظ میراث فرهنگی نسل‌های آینده است.

۴- پیشینه پژوهش

کاربرد رنگزاهای طبیعی در مرمت آثار تاریخی، موضوعی است که در دهه‌های اخیر توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است. در این راستا، مطالعات متعددی با هدف بررسی، ارزیابی و بهینه‌سازی کاربرد این مواد در مرمت و حفاظت از آثار باستانی انجام شده است.

نخستین پژوهش‌های اصولی در این زمینه به دهه ۱۹۷۰ باز می‌گردد (۸). در پژوهشی پیشگامانه به بررسی کاربرد رنگزاهای طبیعی در مرمت منسوجات تاریخی پرداخته شد که بستری مناسب برای تحقیقات آتی در این حوزه فراهم آورد. در دهه ۱۹۸۰، مطالعات سازوکارهای تثبیت رنگزاهای طبیعی بر روی مواد تاریخی، نقطه عطفی در این زمینه ایجاد کرد (۹). این پژوهش با استفاده از میکروسکوپ الکترونی، نحوه نفوذ و تثبیت مولکول‌های رنگزا در ساختار الیاف را مورد مطالعه قرار داد و نتایج حاصل منجر به توسعه روش‌های نوین رنگرزی در مرمت گردید.

در دهه ۱۹۹۰، پیشرفت‌های چشمگیری در زمینه شناسایی و استخراج رنگزاهای طبیعی حاصل شد. روش‌های جدیدی برای استخراج و خالص‌سازی رنگزاها معرفی گردید که تا به امروز نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین، اولین مطالعات جامع در مورد پایداری طولانی مدت رنگزاهای طبیعی در شرایط مختلف محیطی به انجام رسید (۱۰). در اوایل قرن ۲۱، پژوهش‌هایی به بررسی جنبه‌های زیست‌محیطی استفاده از رنگزاهای طبیعی پرداخت. نتایج این مطالعات نشان داد که رنگزاهای طبیعی، علاوه بر سازگاری با آثار تاریخی، اثرات مخرب زیست‌محیطی کمتری نسبت به رنگزاهای مصنوعی دارند.

از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵، تحقیقات در زمینه استفاده از فناوری‌های نوین در استخراج و کاربرد رنگزاهای طبیعی متمرکز شد (۱۱). پژوهشگران با استفاده از روش‌های نانوفناوری، موفق به افزایش پایداری و کارایی رنگزاهای طبیعی شدند. همچنین، روش‌های جدیدی برای استانداردسازی و کنترل کیفیت رنگزاهای طبیعی ارائه گردید. در سال‌های اخیر (۲۰۲۰-۲۰۲۳)، تحقیقات به سمت بهینه‌سازی روش‌های کاربرد و افزایش طیف رنگی قابل دستیابی پیش رفته است (۱۲). با استفاده از روش‌های پیشرفته طیف‌سنجی، موفقیت‌هایی در شناسایی ترکیبات جدیدی از رنگزاهای طبیعی حاصل شده که می‌توانند طیف رنگی گسترده‌تری ایجاد کنند.

در سال‌های اخیر، استفاده از روش‌های محاسباتی و هوش مصنوعی در این حوزه نیز مورد توجه قرار گرفته است (۱۳). بررسی امکان استفاده از هوش مصنوعی در پیش‌بینی رفتار رنگزاهای طبیعی نشان می‌دهد که با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، می‌توان فرایند انتخاب و کاربرد رنگزاهای مناسب برای مرمت را بهینه‌سازی نمود. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که ترکیب رنگزاهای طبیعی با نانوذرات می‌تواند پایداری و دوام رنگ را تا ۴۰ درصد افزایش دهد. همچنین، در زمینه استفاده از رنگزاهای طبیعی در مرمت نقاشی‌های دیواری، روش‌های جدیدی برای افزایش نفوذپذیری و چسبندگی رنگزاها معرفی شده است (۱۴). با استفاده از روش‌های میکروسکوپی پیشرفته، سازوکارهای جدیدی از تعامل رنگزاهای طبیعی با سطوح تاریخی شناسایی گردیده است.

در ایران نیز، مطالعات متعددی در زمینه کاربرد رنگزاهای طبیعی در مرمت آثار تاریخی انجام شده است. به عنوان مثال، پژوهشی به بررسی رنگزاهای طبیعی در نقاشی‌های دیواری ایران پرداخته است (۱۵). همچنین روش‌های نوین استخراج و تثبیت رنگزاهای طبیعی مورد مطالعه قرار گرفته و تأثیر شرایط محیطی بر پایداری رنگزاهای طبیعی بررسی شده است. مطالعه جامعی نیز بر روی کاربرد رنگزاهای گیاهی در مرمت منسوجات تاریخی انجام شده است (۲۰-۱۶).

با وجود پیشرفت‌های حاصل شده، همچنان خلأهایی در زمینه شناخت جامع رفتار رنگزاهای طبیعی در شرایط مختلف محیطی و تأثیر بلندمدت آن‌ها بر آثار تاریخی وجود دارد. این پژوهش تلاش می‌کند با مرور جامع مطالعات پیشین و تحلیل یافته‌های جدید، درک بهتری از کاربرد این مواد در مرمت آثار باستانی ارائه دهد. در جدول ۱ برخی از مهمترین تحقیقات صورت گرفته در مورد استفاده از رنگزاهای طبیعی در مرمت انواع آثار تاریخی به تفکیک نوع رنگزا ارائه شده است.

۵- نوآوری پژوهش

نوآوری‌ها و ارزش علمی پژوهش حاضر در پر کردن خلاهای پژوهشی در این حوزه قابل توجه است. این پژوهش با ارائه رویکردی جامع و یکپارچه به کاربرد رنگزاهای طبیعی در طیف وسیعی از آثار باستانی (منسوجات، فلزات، چوب، سنگ، سفال، نقاشی دیواری و نسخ خطی) در تلاش است تا خلأ مهمی را که در پژوهش‌های پیشین وجود داشت پر کند. در حالی که مطالعات قبلی عمدتاً بر یک نوع خاص از آثار متمرکز بوده‌اند، این مقاله با طبقه‌بندی اصولی اطلاعات در قالب جدولی جامع که انواع رنگزاها، نوع آثار تاریخی و سال تحقیق را در بر می‌گیرد، دانش پراکنده موجود را ساختارمند نموده است.

همچنین این پژوهش با تمرکز بر ارائه داده‌های کمی دقیق (مانند افزایش ۴۰ درصد پایداری رنگ با پیش‌آماده‌سازی سطح چوب و افزایش ۷۰ درصد ثبات رنگ با استفاده از دندانه‌های طبیعی) معیارهای مشخصی برای ارزیابی کارایی رنگزاهای طبیعی ارائه کرده که در مطالعات قبلی به این صراحت وجود نداشته است (۴۲، ۴۱). خلأ مهم دیگری که این پژوهش پر کرده، تلفیق دانش سنتی با فناوری‌های نوین در حوزه رنگزاهای طبیعی است.

جدول ۱: پیشینه تحقیق در مورد کاربرد انواع رنگزاهای طبیعی در مرمت و حفاظت انواع آثار باستانی.

Table 1: Research background on the use of various natural dyes in the restoration and conservation of various ancient artifacts.

Type of dye	Type of Historical Artifact	Year	Reference
historical textiles			
Alizarin	Silk fabrics	2010	(21)
Indigo	Linen fabrics	2015	(22)
Woad	Wool fabrics	2022	(23)
Metal artifacts			
Tannins	Iron and steel	2003	(24)
Lawsone	Copper	2012	(25).
Pomegranate peel extract	Silver	2019	(26)
Wooden artifacts			
Sumac	Wood	2021	(27)
Alizarin	Painted wood	2017	(28)
Linseed oil	Wood	2005	(29)
Stone artifacts			
Ochre	Petroglyphs	2012	(30)
Lime	Stone conservation	2015	(31)
Herbal extract (for preventing biological growth)	Stone conservation	2020	(32)
Pottery artifacts			
Ochre	Ancient pottery	2010	(33)
Colored clay	pottery	2018	(34)
Plant-based glaze	pottery	2001	(35)
Painting canvas			
Alizarin	Oil painting	2019	(29)
Indigo	Oil painting	2017	(29).
Linseed oil	Canvas preparation	2005	(29)
Wall painting			
Indigo	wall paintings	2015	(36)
Ochre	wall paintings	1984	(36)
Limestone	wall paintings	2010	(36)
Historical leathers			
Tannins	leathers	2017	(37)
Alizarin	leathers	2020	(38)
Herbal extract	leathers	2018	(38).
Paper and manuscripts			
Saffron	Paper	2020	(39)
Tannins	Ink	2015	(40)
Indigo	Treated paper	2008	(40)

این تلفیق شامل به‌کارگیری روش‌هایی نظیر استفاده از نانوذرات برای تثبیت رنگزاها، روش‌های طیف‌سنجی پیشرفته مانند پراش پرتوی ایکس[1] فلورانس پرتو ایکس[2] طیف سنجی جرمی- گاز گروماتوگراف[3] کروماتوگرافی مایع با طیف سنجی جرمی[4] میکروسکوپ نیروی اتمی[5] و طیف‌سنجی رامان در شناسایی و بررسی رفتار رنگزاهای طبیعی و همچنین تحلیل سازوکارهای تعامل این رنگزاها با مواد اصلی آثار باستانی در سطح مولکولی و ساختاری است. بررسی پیوندهای شیمیایی بین رنگزاها و ساختار سلولزی چوب و نحوه تشکیل پیوندهای هیدروژنی و واندروالسی بین رنگزاها و سطوح سنگی و سفالی، از نوآوری‌های بارز این پژوهش محسوب می‌شود که درک عمیق‌تری از علت موفقیت رنگزاهای طبیعی در مرمت ارائه می‌دهد (۴۴، ۴۳).

ارزش علمی این مقاله همچنین در تحلیل چالش‌های اساسی و ارائه راهکارهای عملی برای غلبه بر آنها نمایان است. این پژوهش صرفاً به توصیف مزایای رنگزاهای طبیعی بسنده نکرده، بلکه با شناسایی و بررسی محدودیت‌هایی چون دامنه محدود طیف رنگی، پایداری کمتر برخی رنگزاها در برابر نور و زمان‌بر بودن فرایند تهیه و خالص‌سازی، راهکارهایی عملی برای رفع آنها ارائه داده است. این نگاه واقع‌بینانه و جامع به کاربرد رنگزاهای طبیعی در مرمت آثار، چارچوبی مستحکم و کاربردی برای پژوهشگران و مرمت‌گران فراهم آورده که اهمیت احیای دانش سنتی را نه تنها به عنوان یک ضرورت علمی بلکه یک تعهد اخلاقی برای حفظ میراث فرهنگی نسل‌های آینده مطرح می‌کند (۴۶، ۴۵).

۶- انواع رنگزاهای طبیعی

رنگزاهای طبیعی دسته‌ای از ترکیبات رنگی هستند که از منابع گیاهی، جانوری و معدنی استخراج می‌شوند. این مواد، برخلاف رنگدانه‌ها، قابلیت حل شدن در یک حلال (معمولاً آب) را دارند و به همین دلیل، به طور مستقیم می‌توانند به الیاف یا سطوح دیگر نفوذ کنند و باعث رنگ‌آمیزی شوند (۴۱). رنگزاهای طبیعی به دلیل حضور ساختارهای مولکولی خاص که به آنها رنگ‌ساز[6] گفته می‌شود، قادر به جذب و بازتاب طول موج‌های مشخصی از نور هستند. رنگ سازها معمولاً شامل پیوندهای دوگانه مزدوج، حلقه‌های آروماتیک و گروه‌های عاملی مختلف هستند که مسئول ایجاد رنگ‌های متنوع می‌باشند. برخی از مهمترین رنگ‌سازهای موجود در رنگزاهای طبیعی عبارتند از آنتراکینون‌ها، فلاونوئیدها، ایندیگوئیدها، کاروتنوئیدها و تانن‌ها (۴۷) می‌باشند. خصوصیات برجسته این رنگزاها شامل پایداری بالا در برابر نور، حرارت و عوامل محیطی است. این پایداری به دلیل ساختار شیمیایی منحصر به فرد آنهاست که امکان تشکیل پیوندهای محکم با سطوح مختلف را فراهم می‌کند. نتایج پژوهش‌ها اثبات کرده است که این رنگزاها در مقایسه با رنگزاهای مصنوعی، تغییرات رنگی کمتری در طول زمان نشان می‌دهند. این ویژگی به دلیل توانایی آنها در مقاومت در برابر اکسایش و تجزیه نوری است. علاوه بر این، رنگزاهای طبیعی اغلب دارای خواص پاداکسنده و ضدمیکروبی هستند که به حفظ و دوام بیشتر آثار رنگ شده کمک می‌کند. طبقه‌بندی رنگزاهای طبیعی می‌تواند بر اساس منبع، ساختار شیمیایی، یا روش کاربرد آن‌ها صورت گیرد. در جدول ۲ به برر سی دقیق‌تر سه دسته اصلی رنگزاها بر اساس منبع و به تفکیک نوع رنگ‌ساز موجود می‌پردازیم.

۷- روش‌های استخراج و آماده‌سازی رنگزاها

آماده‌سازی رنگزاهای طبیعی جهت استفاده در مرمت آثار تاریخی، یک فرایند پیچیده و چندوجهی است که نیازمند رویکردی علمی و تخصصی به منظور حفظ اصالت و یکپارچگی اثر هنری می‌باشد. انتخاب منابع رنگزا، اولین گام اساسی، بر مبنای تطابق تاریخی و فرهنگی با اثر و نیز سازگاری مواد رنگزا با ساختار اثر صورت می‌گیرد. این انتخاب نه تنها بر جنبه‌های زیبایی‌شناختی مرمت تأثیرگذار است، بلکه پایداری و دوام بلندمدت رنگ‌های بازسازی‌شده را نیز تعیین می‌کند. در مرحله استخراج، روش‌های متنوعی بر اساس خواص شیمیایی رنگزا و ماتریس گیاهی یا جانوری آن به کار گرفته می‌شود (۴۷، ۴۱).

استخراج و آماده‌سازی رنگزاهای طبیعی برای کاربرد در مرمت آثار باستانی، فرایندی تخصصی است که بسته به نوع منبع رنگزا (گیاهی، حیوانی یا معدنی) و هدف مرمت متفاوت می‌باشد. این روش‌ها را می‌توان به چند دسته اصلی تقسیم کرد.

۷-۱- روش‌های سنتی استخراج

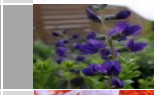
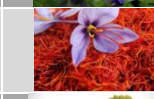
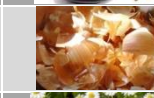
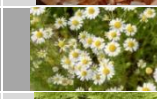
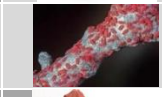
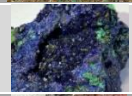
۷-۱-۱- استخراج آبی

یکی از قدیمی‌ترین و پرکاربردترین روش‌ها است که شامل خیساندن یا جوشاندن منبع رنگزا در آب می‌باشد. این روش به دلیل سازگاری با محیط‌زیست و حفظ خواص اصلی رنگزاها، مزیت قابل توجهی دارد. مطالعات نابیاس و همکارانش (۲۰۲۳) نشان می‌دهد دمای بهینه برای استخراج آبی اغلب بین ۶۰ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد است، اما در موارد خاص مانند زعفران، دمای پایین‌تر (حدود ۴۰ درجه) برای حفظ ساختارهای حساس کاروتنوئیدی توصیه می‌شود (۴۱).

[1] XRD
[2] XRF
[3] GC-MS
[4] LC-MS/MS
[5] AFM
[6] Chromophore

جدول ۲: بررسی سه دسته اصلی رنگزاها بر اساس منبع و به تفکیک نوع رنگ‌ساز موجود در آنها (۴۳-۴۱).

Table 2: Examination of the three main categories of dyes based on source and type of chromophore (41-43).

Classification of natural dyes		Samples	Chromophore	Figures
	Plant-based dyes	Madder roots (Alizarin)	Anthraquinone	
		Indigo	Indigoid	
		Saffron (Crocin)	Carotenoid	
		(Woad - Indigo)	Indigoid	
		Pomegranate peel	Anthocyanin, Flavonoid	
		Sumac - Tannins	Tannin	
		Onion skin	Flavonoid	
		Chamomile	Flavonoid	
		Henna	Naphthoquinone	
	Animal-based dyes	Carmine/Cochineal – Carminic acid	Anthraquinone	
		Tyrian purple	(Indigoid) Brominated derivative	
		Egg Yolk Yellow	(Carotenoid) Xanthophyll	
		Lac dye	Anthraquinone	
	Mineral-based dyes	Ochre - Iron oxide	Iron oxide	
		Lapis Lazuli - Lazurite	Polysulfide radical anion	
		Malachite - Copper carbonate	Copper carbonate	
		Azurite - Copper hydroxycarbonate	Copper hydroxycarbonate	
		Cinnabar - Mercury sulfide	Mercury sulfide	
		Soot (Carbon Black)	Carbon	

۷-۱-۲- استخراج با حلال‌های آلی

برای رنگزا های کمتر قطبی مورد اســتفاده قرار می‌گیرد. حلال های متداول شــامل اتانول، متانول، اســتون و اتیل اســتات هســتند. طبق تحقیقات باررا رودریگوز و کراز کاناداس[1]، اســتفاده از مخلوط آب-الکل (به نسبت ۳۰:۷۰) در ا ستخراج آنتو سیانین‌ها از پو ست انار و تانن‌ها از سماق، راندمان استخراج را تا ۴۰ درصد افزایش می‌دهد (۴۳).

۷-۲- روش‌های نوین استخراج

۷-۲-۱- استخراج به کمک فراصوت[2]

با ایجاد حفره‌های میکروســکوپی در حلال و فروپاشــی آن‌ها، باعث نفوذ بهتر حلال به بافت گیاهی یا حیوانی و آزاد سازی مؤثرتر رنگزاها می شود. طبق مطالعات چن و همکاران (۲۰۲۲)، این روش زمان استخراج را تا ۷۵ درصد کاهش داده و راندمان را تا ۳۰ درصد افزایش می‌دهد (۴۹).

۷-۲-۲- استخراج به کمک مایکروویو[3]

با گرمایش ســریع و هدفمند مولکول‌های قطبی، فرایند اســتخراج را تســریع می‌کند. این روش به‌ویژه برای رنگزاهای حســاس به حرارت طولانی‌مدت مفید اســت. پژوهش‌های ماکادو و همکارانش (۲۰۲۳) نشــان می‌دهد اســتخراج به کمک مایکروویو، میزان تخریب ســاختار مولکولی کاروتنوئیدها در زعفران را تا ۶۰ در صد ن سبت به روش‌های سنتی کاهش می‌دهد (۵۰).

۷-۲-۳- فناوری سیال فوق بحرانی[4]

به‌ویژه با اســتفاده از CO_2 فوق بحرانی، روشــی اســت که اجازه می‌دهد رنگزاها بدون باقی ماندن حلال و بدون آ سیب حرارتی ا ستخراج شوند. هومم و همکارانش (۲۰۲۲) گزارش کرده‌اند که این روش برای استخراج ترکیبات آنتراکینونی از روناس با راندمان بالا مناسب است (۴۵).

۷-۳- فرایندهای پس از استخراج

پس از استخراج اولیه، صافش ساده با کاغذ صافی یا میکروصافش برای حذف ناخالصــی‌ها انجام می‌شــود. ســپس روش‌های پیشــرفته‌تر مانند کروماتوگرافی ستونی یا کروماتوگرافی لایه نازک برای جدا سازی بیشــتر اجزای رنگی به کار می‌رود. در موارد نیازمند خلوص بالاتر، از کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا[5] ستفاده می شود که امکان جدا سازی دقیق ترکیبات رنگزا را با خلوص بیش از ۹۸ درصد فراهم می‌کند (۴۲). تغلیظ عصــاره رنگی معمولاً با روش‌های تبخیر در خلأ در دمای پایین یا خشــک کردن انجمادی[6] انجام می‌شــود. مطالعات بچتولد[7] و موســاک[8] نشــان می‌دهد که رنگزاهای خشــک شــده به روش انجمادی، پایداری بیشتری نسبت به نمونه‌های خشک‌شده با روش‌های حرارتی دارند (۵۱).

برای رنگزاهای گیاهی مانند روناس (ریشه)، نیل (برگ) و زعفران (کلاله)، ابتدا خردکردن و آسیاب‌کردن ماده گیاهی و سپس استخراج با روش‌های مناسب انجام می‌شود. برای نیل، فرایند تخمیر قلیایی برای تبدیل ایندیکان به ایندیگو ضروری است (۴۳).

برای رنگزاهای حیوانی مانند قرمزدانه (حشره کوشنیل) و لاک (ترشحات حشره لاکا)، فرایند استخراج شامل خشک‌کردن، آسیاب‌کردن و سپس استخراج با محلول‌های قلیایی ضعیف است. طبق مطالعات لچ[9] و همکارانش (۲۰۲۳)، استخراج در محلول آمونیاک رقیق (۲-۵ درصد)، راندمان بالاتری برای رنگزاهای کارمینیک اسید دارد (۵۲).

رنگزاهای معدنی مانند اخرا (اکسید آهن) و لاجورد (لازوریت) نیازمند آسیاب کردن بسیار ظریف، شستشو و ته‌نشینی مکرر برای خالص‌سازی هستند. مطالعات کالزا[10] و همکارانش (۲۰۲۳) نشان می‌دهد ذرات با اندازه کمتر از ۱۰ میکرون، یکنواختی و براقیت بیشتری در لایه رنگی ایجاد می‌کنند (۵۳).

پس از استخراج، فرایند خالص‌سازی به منظور حذف ناخالصی‌ها و مواد جانبی که می‌توانند بر کیفیت رنگ، پایداری و تعامل رنگ با اثر مرمت‌شده اثر منفی بگذارند، ضروری است (۴۵). روش‌های فیزیکی مانند صافش برای جداسازی ذرات معلق و روش‌های مبتنی بر تغییر فاز مانند تبخیر در خلا برای تغلیظ رنگزا به کار می‌روند. در موارد خاص، روش‌های پیشرفته‌تری نظیر کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا برای جداسازی و خالص‌سازی اجزای خاص رنگزا به منظور دستیابی به طیف رنگی دقیق‌تر و کنترل‌شده‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرند. تثبیت رنگ، از طریق استفاده از مواد دندانه، نقش حیاتی در افزایش پایداری رنگزاهای طبیعی در برابر عوامل محیطی ایفا می‌کند. دندانه‌ها (دندانه)، که اغلب نمک‌های فلزی هستند، با تشکیل کمپلکس‌های کوئوردیناسیونی بین رنگزا و الیاف اثر، اتصال رنگ به سطح را تقویت کرده و مقاومت آن را در برابر نور، رطوبت و شستشو بهبود می‌بخشند. انتخاب نوع دندانه (مانند زاج آلومینیوم، تانن‌ها) و روش دندانه‌دهی (پیش‌دندانه، هم‌دندانه، پس‌دندانه) باید با دقت و بر اساس نوع رنگزا، نوع اثر و ملاحظات مربوط به سازگاری مواد صورت پذیرد،زیرا که برخی دندانه‌ها می‌توانند اثرات مخربی بر طول عمر و پایداری مواد آلی اثر تاریخی داشته باشند (۴۶).

---

[1] Barrera-Rodríguez & Cruz-Cañadas
[2] Ultrasonic-assisted extraction
[3] Microwave-assisted extraction
[4] Supercritical fluid extraction
[5] HPLC
[6] Lyophilization
[7] Bechtold
[8] Mussak
[9] Lech
[10] Calza

در نهایت، فرمولبندی رنگ مرمتی با انتخاب دقیق واسطه[1]صورت می‌پذیرد. واسطه‌های آبی، رزین‌های طبیعی و یا حلال‌های آلی بر اساس نوع رنگزا، روش اصلی اثر و سطح مرمت‌شده انتخاب می‌شوند. کاربرد رنگ بر سطح اثر با روش‌های ظریف و کنترل‌شده‌ای همچون قلم‌گذاری دقیق، اسپری لایه‌های نازک و یا کمپرس موضعی انجام می‌گیرد. پیش از کاربرد نهایی، انجام آزمایش‌های جامع، شامل تطبیق رنگ با استفاده از طیف‌سنجی، ارزیابی پایداری نوری و شستشو بر اساس استانداردهای معتبر[2] و آزمون‌های سازگاری مواد، برای اطمینان از انطباق رنگ مرمتی با رنگ اصلی اثر و عدم آسیب‌رسانی به ساختار آن، الزامی است. مستندسازی دقیق و جامع مراحل آماده‌سازی و کاربرد رنگ، از جمله مشخصات دقیق مواد، روش‌ها و نتایج آزمایش‌ها، به عنوان بخشی جدایی‌ناپذیر از فرایند مرمت، برای تضمین تکرارپذیری، قابلیت ردیابی و حفظ دانش فنی برای نسل‌های آینده مرمتگران ضروری است.

۸- راهبرد های تثبیت رنگزا های طبیعی در مر مت آثار تاریخی

تثبیت رنگزاهای طبیعی در فرایند مرمت آثار تاریخی از طریق سه سازوکار ا صلی انجام می‌پذیرد. اولین سازوکار، ا ستفاده از دندانه‌های طبیعی است که شامل نمک‌های فلزی مانند سولفات‌های آهن، آلومینیم، مس و قلع می‌باشد. این ترکیبات با تشکیل کمپلکس‌های چنگاله[3] با مولکول های رنگزا، پیوند های کوئوردیناسیون پا یداری ایجاد می‌کنند. یون های فلزی در این کمپلکس ها به عنوان پل های ارتباطی بین گروه‌های عاملی رنگزا (مانند گروه‌های هیدروکسیل و کربوکسیل) و زیرلایه عمل می‌کنند که منجر به افزایش قدرت پیوند و پایداری رنگ می‌شود.

تثبیت رنگزاها با استفاده از دندانه‌ها[4]نقش کلیدی در افزایش پایداری و دوام رنگ دارد. طبق تحقیقات دگانو و لاناسا[5] دندانه‌های معدنی مانند نمک‌های آلومینیم (زاج سفید)، آهن، مس و قلع طیف رنگی متفاوتی را با یک رنگزای یکسان ایجاد می‌کنند. دندانه‌های طبیعی مانند تانن‌ها (استخراج شده از پوست انار، گردو یا بلوط) نیز گزینه‌های سازگار با محیط‌زیست هستند (۴۴).

روش‌های دندانه‌دهی شامل پیش‌دندانه (اعمال دندانه قبل از رنگرزی)، هم‌دندانه (هم‌زمان با رنگرزی) و پس‌دندانه (پس از رنگرزی) هستند (۴۷). پژوهش‌های یوسف و همکارانش (۲۰۲۳) نشان می‌دهد روش پیش‌دندانه برای منسوجات تاریخی ظریف مناسب‌تر است، درحالی‌که روش پس‌دندانه برای سطوح محکم‌تر مانند چوب و سفال، ثبات رنگی بیشتری ایجاد می‌کند (۵۴).

سازوکار دوم، تنظیم pH محیط از طریق افزودن مواد قلیایی یا اسیدی است. در محیط قلیایی (مانند استفاده از کربنات‌های سدیم و پتاسیم)، گروه‌های عاملی رنگزا یونیزه شده و قابلیت واکنش‌پذیری آنها افزایش می‌یابد. در محیط اسیدی (مانند استفاده از اسید تانیک یا اسید اگزالیک)، ساختار الکترونی رنگ‌سازها دستخوش تغییر شده و امکان تشکیل پیوندهای کووالانسی قوی‌تر فراهم می‌شود. این تغییرات pH همچنین می‌تواند باعث تغییر در طیف جذبی رنگزا و در نتیجه تنوع رنگی شود. اگرچه، سازوکار تنظیم pH در استفاده از رنگزاهای طبیعی برای مرمت آثار تاریخی روشی با کارآمدی نسبی اما همراه با ملاحظات پیچیده است، اما با رعایت ملاحظات خاص میتواند گزینه‌ای مناسب با حداقل آسیب در مرمت آثار تاریخی باشد.

بر اساس مطالعات کاردون (۲۰۰۷) و ژانک و همکارانش (۲۰۰۸)، استفاده کنترل‌شده و مناسب از سازوکار pH می‌تواند نیمه‌عمری بین ۶۰ تا ۱۲۰ سال برای رنگزاهای تثبیت‌شده ایجاد کند (۵۵، ۵۶). برای دستیابی به کمترین آسیب، تنظیم متعادل و دقیق pH در محدوده ۵/۵ تا ۸ توصیه می‌شود؛ این بازه به طور قابل توجهی از حالت‌های قلیایی یا اسیدی شدید که می‌توانند باعث تخریب ساختاری شوند، فاصله دارد. پژوهش‌های کروو (۲۰۰۹) تأیید می‌کند که با استفاده از بافرهای طبیعی مانند تانین‌های گیاهی و کربوکسی‌متیل سلولز با ظرفیت بافری مناسب، می‌توان تغییرات pH را کنترل کرد و از نوسانات شدید که منجر به آسیب می‌شود، جلوگیری نمود (۵۷). در مورد منسوجات تاریخی، استفاده از pH در محدوده ۶ تا ۷/۵ بهترین نتیجه را با کمترین آسیب به ساختار پروتئینی و سلولزی الیاف ارائه می‌دهد. آزمون‌های میکروسکوپ نیروی اتمی نشان داده‌اند که در این محدوده، ساختار فیزیکی الیاف حفظ شده و نفوذ رنگزا به صورت یکنواخت و کنترل‌شده انجام می‌شود. در مورد آثار فلزی، استفاده از سازوکار pH باید با احتیاط بیشتری همراه باشد؛ مطالعات طیف‌سنجی تبدیل فروسرخ فوریه[6]نشان می‌دهد که تنظیم pH در محدوده ۶/۵ تا ۷/۲ با استفاده از بافرهای طبیعی مانند عصاره آلوئه‌ورا و صمغ عربی، می‌تواند ضمن افزایش واکنش‌پذیری رنگزاها، از خوردگی فلزات جلوگیری کند. در نهایت، روش‌های نوین مانند کاربرد نانوذرات سیلیکای عامل‌دار شده که توسط تامپسون و همکارانش (۲۰۲۳) معرفی شده، می‌تواند به عنوان پل ارتباطی بین رنگزا و سطح اثر عمل کرده و نیاز به تغییرات شدید pH را کاهش دهد. این روش‌ها با ایجاد میکرومحیط‌های کنترل‌شده pH، امکان واکنش‌پذیری مطلوب را بدون آسیب به کل ساختار اثر فراهم می‌کنند (۵۸-۵۵).

[1] Medium
[2] ISO
[3] Chelate
[4] Mordants
[5] Degano & La Nasa
[6] FTIR

سازوکار سوم، استفاده از صمغ‌های طبیعی مانند صمغ عربی، کتیرا و صمغ زدو[1] است. این پلی‌ساکاریدهای طبیعی با ایجاد شبکه‌های سه‌بعدی پلیمری، مولکول‌های رنگزا را در خود محبوس می‌کنند. پیوندهای هیدروژنی متعدد بین گروه‌های هیدروکسیل صمغ و گروه‌های عاملی رنگزا، همراه با نیروهای واندروالس و برهم‌کنش‌های آبگریز، ساختار پایداری را ایجاد می‌کنند. این ساختار علاوه بر تثبیت رنگ، لایه محافظی در برابر عوامل محیطی مانند رطوبت، نور و اکسایش ایجاد می‌کند و همچنین خواص رئولوژیکی مناسبی برای اعمال رنگ فراهم می‌سازد (۶۱-۵۹).

۹- روش‌های شناسایی رنگزاهای طبیعی در مرمت آثار باستانی

شناسایی دقیق رنگزاهای طبیعی در آثار تاریخی، گامی حیاتی در فرایند مرمت و حفاظت علمی از میراث فرهنگی است. بر اساس مطالعات پیشرفته در زمینه رنگ‌شناسی تاریخی، روش‌های شناسایی این رنگزاها به دو دسته کلی غیرتخریبی و میکروتخریبی تقسیم می‌شوند. روش‌های طیف‌سنجی غیرتخریبی مانند طیف‌سنجی رامان، فلورسانس اشعه ایکس و تصویربرداری فراطیفی[2] امکان آزمون ساختاری رنگزاها را بدون آسیب به اثر تاریخی فراهم می‌آورند. تحقیقات اخیر دگانو و لاناسا (۲۰۲۳) نشان می‌دهد که طیف سنجی رامان با تحریک لیزری در طول‌موج مناسب (۷۸۵ نانومتر برای رنگزاهای آلی) می‌تواند ساختارهای مولکولی منحصر به فرد رنگزاهای طبیعی مانند آنتراکینون‌ها در روناس و ایندیگوئیدها در نیل را با دقت بالای ۹۰ درصد شناسایی کند (۴۴). همچنین، تصویربرداری فراطیفی با قابلیت ثبت اطلاعات طیفی در بازه وسیعی از طول‌موج‌ها، امکان نقشه‌برداری از توزیع رنگزاها در سطح اثر و تمایز بین رنگزاهای مختلف را فراهم می‌سازد، به‌طوری‌که مطالعات استو[3] و همکارانش (۲۰۲۴) با استفاده از این روش موفق به شناسایی رنگزاهای قرمزدانه، لاجورد و زعفران در نسخ خطی قرون وسطی با حداقل هم‌پوشانی طیفی شده‌اند (۶۲).

در مواردی که روش‌های غیرتخریبی کافی نباشند، روش‌های میکروتخریبی با استفاده از نمونه‌های بسیار کوچک (کمتر از ۱۰۰ میکروگرم) به کار گرفته می‌شوند. کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا همراه با طیف‌سنجی جرمی[4] به عنوان قدرتمندترین روش در این زمینه شناخته شده است. پژوهش‌های استلماخ[5] و همکارانش (۲۰۲۳) نشان می‌دهد که این روش قادر است بیش از ۲۰ رنگزای طبیعی مختلف را در یک نمونه مرکب شناسایی کند و حتی منشأ جغرافیایی آن‌ها را با دقت بالای ۸۵ درصد تعیین نماید (۶۳). همچنین، طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه امکان مطالعه پیوندهای شیمیایی و گروه‌های عاملی خاص در ساختار رنگزاها را فراهم می‌آورد. به‌تازگی، روش‌های نوینی مانند پیرولیز-کروماتوگرافی گازی- طیف‌سنجی جرمی[6] برای شناسایی رنگزاهای بسیار پایدار و واکس‌ها توسعه یافته‌اند که مطابق پژوهش‌های نابیاس و همکارانش (۲۰۲۴)، حساسیت این روش‌ها تا حد تشخیص نانوگرم بر گرم نمونه افزایش یافته است، که امکان تحلیل دقیق‌تر آثار دارای لایه‌های رنگی نازک یا آسیب‌دیده را فراهم می‌سازد. هر یک از روش‌های فوق مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند. انتخاب روش مناسب برای شناسایی رنگزاها باید بر اساس عواملی چون ارزش تاریخی اثر، امکان نمونه‌برداری، حساسیت مورد نیاز، نوع اطلاعات مورد نظر و امکانات در دسترس صورت گیرد (۶۴).

رویکرد جامع در شناسایی رنگزاهای طبیعی، استفاده ترکیبی از چند روش تحلیلی است. طبق مطالعات دگانو و لاناسا (۲۰۲۳)، ترکیب روش‌های غیرتخریبی مانند طیف‌سنجی رامان و تصویربرداری فراطیفی با روش‌های میکروتخریبی مانند کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا همراه با طیف‌سنجی جرمی، دقت شناسایی رنگزاها را تا ۹۷٪ افزایش می‌دهد و امکان تمایز بین رنگزاهای مشابه با منشأ متفاوت را فراهم می‌سازد (۴۴).

۱۰- سازوکارهای عملکرد رنگزاهای طبیعی در مرمت آثار باستانی

رنگزاهای طبیعی در حفاظت و مرمت آثار باستانی، عملکردی فراتر از صرفاً ایجاد رنگ دارند و از طریق سازوکارهای پیچیده‌ای با مواد پایه تعامل می‌کنند. بر اساس مطالعات اخیر، سازوکارهای اصلی عملکرد این رنگزاها شامل تعامل بیوشیمیایی با زیرلایه، تشکیل پیوندهای کوئوردیناسیونی با فلزات، و خواص پاداکسنده است. پژوهش‌های دگانو و لاناسا (۲۰۲۳) نشان می‌دهد رنگ سازهای طبیعی مانند آنتوسیانین‌ها، کاروتنوئیدها و آنتراکینون‌ها با تشکیل پیوندهای هیدروژنی و کمپلکس‌های چنگاله‌ای، قادر به ایجاد پیوندهایی با استحکام مولکولی بالا (۴۵-۲۲ کیلوژول بر مول) با گروه‌های عاملی موجود در سطوح تاریخی هستند. این سازوکار به‌ویژه در مرمت منسوجات تاریخی مشهود است، جایی که فیبرهای سلولزی و پروتئینی، پیوندهای بین‌مولکولی قوی با آنتراکینون‌های موجود در روناس برقرار می‌کنند. همچنین طبق تحقیقات نابیاس و همکارانش (۲۰۲۴)، گروه‌های فنولی موجود در تانن‌های گیاهی توانایی منحصربه‌فردی در محافظت از آثار چوبی و کاغذی از طریق ایجاد پیوند عرضی با پلی‌ساکاریدها داشته و مقاومت مکانیکی و زیستی آن‌ها را

۱ صمغ زدو یا صمغ فارسی، صمغ تراوش شده از درخت بادام کوهی با نام علمی Amygdalus scoparia می‌باشد.

[2] Hyperspectral imaging

[3] Aceto

[4] HPLC-MS

[5] Stelmakh

[6] Py-GC-MS

تا ۳۵ درصد افزایش می‌دهند (۴۳، ۶۴).

پدیده دیگری که اخیراً توسط رومانو و همکارانش (۲۰۲۳) مورد توجه قرار گرفته، "حفاظت توأمان" است، جایی که رنگزاهای طبیعی علاوه بر تأمین رنگ، نقش‌های حفاظتی چندگانه ایفا می‌کنند. به عنوان مثال، مولکول‌های کورکومین موجود در زردچوبه با سازوکار اهدای هیدروژن و رزونانس الکترونی، همزمان خاصیت آنتی‌اکسیدانی قوی (با ظرفیت جذب رادیکال آزاد تا ۹۲ درصد) و ضدمیکروبی نشان می‌دهند که در حفاظت از آثار آسیب‌پذیر کاربرد دارد (۴۶). مطالعات هومم[1] و همکارانش (۲۰۲۲) همچنین نشان داده رنگزاهای فلاونوئیدی طبیعی مانند کوئرستین[2] و کامفرول،[3] با قابلیت جذب اشعه UV (در محدوده ۲۸۰-۴۰۰ نانومتر)، سپری محافظتی در برابر فرسودگی نوری ایجاد می‌کنند که طول عمر مواد حساس به نور را تا سه برابر افزایش می‌دهد. در آثار فلزی، سازوکار دیگری به نام "بازدارندگی خوردگی سبز" توسط تانن‌ها و دیگر ترکیبات پلی‌فنولی عمل می‌کند که با تشکیل لایه‌های محافظ نانومقیاس (۳۰-۵۰ نانومتر) روی سطوح فلزی، از خوردگی الکتروشیمیایی جلوگیری کرده و در مقایسه با بازدارنده‌های سنتزی، سمیت کمتری دارند (۴۵).

۱۱- کاربردهای رنگزاهای طبیعی در مرمت

۱۱-۱- مرمت نقاشی‌های دیواری

نقاشی‌های دیواری به عنوان یکی از مهم‌ترین جلوه‌های هنر تاریخی، نیازمند رویکردهای ویژه در مرمت و حفاظت هستند. استفاده از رنگزاهای طبیعی در مرمت این آثار، به دلیل سازگاری با روش‌های سنتی و مواد اصلی به کار رفته در آنها، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مطالعات باستان‌شناسی و آنالیزهای فیزیکی-شیمیایی نشان می‌دهد که اکثر نقاشی‌های دیواری تاریخی با استفاده از رنگدانه‌های معدنی و رنگزاهای طبیعی اجرا شده‌اند (۸). این مو ضوع اهمیت ا ستفاده از مواد م شابه در فرایند مرمت را دوچندان می‌کند.

در فرایند انتخاب و کاربرد رنگزاهای طبیعی برای مرمت نقاشی‌های دیواری، عوامل متعددی باید مورد توجه قرار گیرند. مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که pH محیط، میزان رطوبت، دما و نور محیط، تأثیر مستقیمی بر پایداری و دوام رنگزاهای طبیعی دارند (۵). همچنین، تحقیقات نشان داده است که ترکیب رنگزاهای طبیعی با پیونده[4] مناسب مانند صمغ عربی، سریشم حیوانی و کربوکسی متیل سلولز[5] می‌تواند پایداری رنگ را تا حد قابل توجهی افزایش دهد (۶۵). آزمایش‌های تسریع‌شده فرسودگی نشان می‌دهد که رنگزاهای طبیعی تثبیت شده با این پیونده‌ها، مقاومت بیشتری در برابر تغییرات محیطی از خود نشان می‌دهند.

رنگزاهای طبیعی در مرمت نقاشی‌های دیواری عمدتاً در سه حوزه رتوش‌های موضعی، یکسان‌سازی رنگی و بازسازی بخش‌های از دست رفته کاربرد دارند. مطالعات میدانی نشان می‌دهد که استفاده از رنگزاهای گیاهی مانند روناس،[6] نیل[7] و زعفران[8] در ترکیب با رنگدانه‌های معدنی طبیعی، نتایج قابل قبولی در رتوش‌های موضعی ارائه می‌دهد (۵۲).

همچنین، تحقیقات نشان داده است که این رنگزاها قابلیت برگشت‌پذیری مناسبی داشته و در صورت نیاز، امکان حذف آنها بدون آسیب به لایه‌های زیرین وجود دارد (۴۴). ترکیبات موجود در منابع گیاهی و معدنی نه تنها مشابه با ترکیبات مورد استفاده در زمان ساخت اثر هستند بلکه با ایجاد هماهنگی در خواص رنگ و پایداری زمانی، به بازسازی بخش‌های از دست رفته نقاشی‌های دیواری کمک کرده سطوح رنگی یکنواختی را ایجاد می‌کنند. تحقیقات نشان داده است که استفاده از رنگزاهای طبیعی موجب کاهش واکنش‌های غیرمنتظره و آسیب‌های ناشی از تغییرات زیست‌محیطی در طول زمان می‌شود و از این رو می‌توانند به عنوان روشی پایدار و قابل تکرار در حفظ اصالت اثر به کار روند. علاوه بر این، به‌کارگیری این رنگزاها امکان کنترل بهتر بر روی ویژگی‌هایی مانند چسبندگی، شفافیت و تداخل با سایر لایه‌های مرمتی را فراهم می‌کند؛ که منجر به دستیابی به بازسازی‌های دقیق‌تر و هماهنگ‌تر از لحاظ دیداری و فنی می‌شود (۱۵).

یکی از چالش‌های اصلی در استفاده از رنگزاهای طبیعی، کنترل شدت و درخشندگی رنگ است. مطالعات طیف‌سنجی نشان می‌دهد که غلظت رنگزا، نوع پیونده و روش اعمال، تأثیر مستقیمی بر خصوصیات نوری رنگ نهایی دارند. برای حل این مشکل، روش‌های نوینی مانند لایه‌گذاری تدریجی و استفاده از مواد افزودنی طبیعی برای کنترل شدت رنگ توسعه یافته‌اند. آزمایش‌های کلرسنجی و طیف‌سنجی نشان می‌دهد که این روش‌ها می‌توانند تطابق رنگی مناسبی با بخش‌های اصلی نقاشی ایجاد کنند (۵۲).

حفاظت پیشگیرانه و پایش مستمر رنگزاهای طبیعی به کار رفته در مرمت نقاشی‌های دیواری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مطالعات بلندمدت نشان می‌دهد که عوامل محیطی مانند نوسانات دما و رطوبت، آلودگی‌های جوی و تابش مستقیم نور می‌توانند بر پایداری این رنگزاها تأثیر بگذارند. به همین دلیل، استفاده از سیستم‌های پایش هوشمند و تنظیم شرایط محیطی برای حفظ پایداری رنگزاهای طبیعی توصیه می‌شود (۵۷).

از سویی دیگر، پوشش خراش‌های سطحی در نقاشی‌های دیواری فرسوده با استفاده از رنگزاهای طبیعی، یک فرایند ظریف است که نیازمند شناخت دقیق مواد اولیه، روش‌های اجرایی، و آسیب‌شناسی اثر است. هدف اصلی در این روش، یکپارچه‌سازی دیداری سطوح آسیب‌دیده با حفظ

[1] Homem
[2] Quercetin
[3] Kaempferol
[4] Binder
[5] CMC
[6] Rubia tinctorum
[7] Indigofera tinctoria
[8] Crocus sativus

اصالت اثر و جلوگیری از ایجاد تضادهای ناخوشایند است. برای این منظور، انتخاب رنگزای مناسب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. رنگزاهای معدنی به دلیل پایداری بالا در برابر نور و رطوبت، معمولاً برای پوشش ترک‌ها و خراش‌های عمیق‌تر استفاده می‌شوند. اخرا[1] با طیف رنگی متنوع از زرد تا قهوه‌ای، یکی از پرکاربردترین رنگزاهای معدنی است که به دلیل مقاومت خوب در برابر عوامل جوی و سازگاری با آهک، در پوشش آسیب‌های سطحی نقاشی‌های دیواری آهکی بسیار مناسب است. برای آسیب‌های سطحی ظریف‌تر و ایجاد لایه‌های رنگی شفاف‌تر، می‌توان از رنگزاهای گیاهی مانند روناس[2] یا نیل[3] اما با احتیاط و در نظر گرفتن حساسیت آن‌ها به نور استفاده کرد. در هر صورت، قبل از استفاده از هر رنگزایی، باید آزمایش‌های سازگاری و پایداری بر روی نمونه‌های کوچک از اثر انجام شود تا از عدم واکنش‌های نامطلوب و تغییر رنگ در طول زمان اطمینان حاصل گردد (۵۴). برای مثال، در ساخت و رنگ آمیزی کاشی نگاره‌ها در دوران زندیه از رنگدانه‌های معدنی لاجورد، زرد ایلیاتی (اخرای زرد)، سفید آب شیخ و دوده کربن استفاده می‌شده است که این شیوه رنگ‌آمیزی با رنگزاهای طبیعی در دوره قاجار نیز ادامه داشته و در مرمت ها مورد استفاده قرار می‌گرفته است (۶۵). شکل ۱ مرمت نقاشی‌های دیواری در ارگ کریم خانی شیراز را با به کار گیری رنگزاهای طبیعی مانند سنگ لاجورد، شنگرف، اخرا و غیره که با پیونده‌های روغنی ترکیب شده توسط نویسنده را نشان می‌دهد (۶۷، ۶۶).

۱۱-۲- آثار هنری روی بوم

آثار هنری تاریخی روی بوم، گنجینه‌های ارزشمندی از میراث فرهنگی بشری به شمار می‌روند که نه تنها جنبه‌های زیبایی‌شناختی و هنری قابل توجهی دارند، بلکه بازتاب‌دهنده تاریخ، فرهنگ، و باورهای جوامع گذشته نیز هستند.

این آثار به دلیل ماهیت مواد تشکیل‌دهنده خود، به ویژه بوم و لایه‌های رنگ، به مرور زمان در معرض عوامل مخرب متعددی نظیر تغییرات دما و رطوبت، نور، آلودگی‌های محیطی و حملات زیستی قرار گرفته و دچار آسیب‌های گوناگونی می‌شوند. از این رو، حفاظت و مرمت اصولی این آثار از اهمیت بسزایی برخوردار است تا بتوان این میراث گرانبها را برای نسل‌های آینده حفظ و منتقل نمود. هدف اصلی در مرمت آثار هنری، بازگرداندن ثبات ساختاری و زیبایی‌شناختی اثر به گونه‌ای است که کمترین مداخله ممکن در مواد اصیل صورت پذیرد و اصالت و ارزش تاریخی اثر حفظ شود (۵۵).



شکل ۱: مرمت رنگ نقاشی دیواری با رنگزای طبیعی (نویسندگان).
Figure 1: Restoration of mural paint with natural colorant (authors).

رنگزاهای طبیعی، که از منابع گیاهی، جانوری، و معدنی به دست می‌آیند، به دلیل سازگاری زیستی با مواد سنتی مورد استفاده در خلق این آثار (مانند روغن بزرک، زرده تخم‌مرغ و چسب‌های حیوانی)، پایداری نسبی در برابر عوامل محیطی (البته بسته به نوع رنگزا) و همخوانی دیداری با رنگ‌های اصلی اثر، گزینه‌های مناسبی برای مرمت محسوب می‌شوند (۵۶). استفاده از رنگزاهای طبیعی در مرمت، نه تنها به حفظ اصالت مادی اثر کمک می‌کند، بلکه با رویکردی پایدار و سازگار با محیط‌زیست نیز همسو است. همچنین، بسیاری از رنگزاهای طبیعی دارای خواص ضد میکروبی و ضد قارچی هستند که می‌توانند به حفاظت بلندمدت اثر مرمت شده نیز کمک کنند (۲۹).

انواع گوناگونی از رنگزاهای طبیعی در مرمت آثار هنری روی بوم به کار گرفته می‌شوند که هر کدام دارای ویژگی‌های خاص خود هستند. رنگزاهای گیاهی مانند روناس، نیل، و وسمه[4] به دلیل رنگ‌های زنده و پایداری نسبی، از دیرباز در نقاشی و رنگرزی مورد استفاده بوده‌اند و در مرمت نیز کاربرد دارند. رنگزاهای جانوری مانند کارمین[5] که از حشره‌ای به نام قرمزدانه به دست می‌آید، رنگ قرمز درخشان و شفافی ایجاد می‌کند. رنگزاهای معدنی نیز شامل اخرا، مالاکیت[6] و لاجورد[7] می‌شوند که به دلیل پایداری بالا و طیف رنگی متنوع، به ویژه برای رنگ‌های زمینی و آبی، ارزشمند هستند (۵۷). انتخاب رنگزای مناسب برای مرمت، نیازمند بررسی دقیق رنگ‌های اصلی اثر، شناخت ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی رنگزاها، و انجام آزمایش‌های سازگاری و پایداری است. همچنین، در مرمت‌های تخصصی، اغلب از ترکیب رنگزاهای مختلف برای دستیابی به طیف رنگی دقیق و مورد نظر استفاده می‌شود.

با وجود مزایای فراوان رنگزاهای طبیعی، استفاده از آن‌ها در مرمت آثار هنری روی بوم چالش‌هایی نیز به همراه دارد. پایداری نوری برخی از رنگزاهای طبیعی، به ویژه رنگزاهای آلی، ممکن است کمتر از رنگدانه‌های مصنوعی مدرن باشد و در معرض نور مستقیم به مرور زمان دچار رنگ‌پریدگی شوند. همچنین، تهیه و خالص‌سازی رنگزاهای طبیعی با

[1] Ochre
[2] Alizarin
[3] Indigo
[4] Woad
[5] Carmine
[6] Malachite
[7] Lapis Lazuli

کیفیت مطلوب و یکنواخت می‌تواند دشوار و زمان‌بر باشد. علاوه بر این، دانش و تجربه کافی در زمینه شناخت و کاربرد رنگزاهای طبیعی، همچنین آگاهی از روش‌های سنتی نقاشی و رنگرزی، برای مرمتگران ضروری است تا بتوانند به نتایج مطلوب و پایدار دست یابند. در نهایت، مستندسازی دقیق فرایند مرمت، از جمله نوع رنگزاهای استفاده شده و روش‌های کاربرد، از اصول اخلاقی و حرفه‌ای مرمت به شمار می‌رود و به حفظ شفافیت و قابلیت بازگشت‌پذیری مداخلات مرمتی کمک می‌کند.

۱۱-۳- مرمت منسوجات تاریخی

منسوجات تاریخی به عنوان یکی از ظریف‌ترین و آسیب‌پذیرترین گروه‌های آثار فرهنگی- تاریخی، نقشی کلیدی در تبیین تاریخ اجتماعی، اقتصادی و هنری جوامع گذشته ایفا می‌کنند پژوهش‌های انجام شده بر روی این آثار، آن‌ها را به دسته‌های اصلی چون ابریشم، پشم، کتان و منسوجات ترکیبی تقسیم بندی کرده که هر کدام خصوصیات منحصربه‌فرد و چالش‌های حفاظتی خاص خود را دارند. مطالعاتی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داده‌اند که آسیب‌های فیزیکی مانند پارگی، فرسودگی و از دست رفتن استحکام مکانیکی عمدتاً نتیجه تنش‌های مکانیکی و تغییرات محیطی بوده و عوامل محیطی از قبیل نور، رطوبت و آلودگی منجر به تخریب شیمیایی الیاف و تغییر رنگ می‌شوند (۵۰). در بررسی منسوجات ابریشمی تاریخی، فرایندهایی مانند اکسایش و آب‌کافت پروتئین‌ها به عنوان سازوکارهای اصلی تخریب شناسایی شده‌اند. تحلیل‌های انجام شده روی فرش‌های تاریخی حاکی از آن است که حفظ رنگ‌ها و تزئینات، چالشی اساسی در مرمت منسوجات به‌شمار می‌آید؛ به‌طوری که با بهره‌گیری از طیف‌سنجی رامان و کروماتوگرافی مایع، ساختار شیمیایی رنگزاهای طبیعی شناسایی و راهکارهای حفاظتی متناسب با هر نوع رنگزا پیشنهاد شده است. افزون بر این، استفاده از نانومواد برای تثبیت رنگ‌ها و افزایش استحکام الیاف به عنوان راهکاری مؤثر جهت حفاظت طولانی‌مدت مطرح شده است (۵۱).

علاوه بر این، منسوجات تاریخی حاوی اطلاعات ارزشمندی درباره روش‌های تولید، مسیرهای تجاری، مد و سلیقه هنری دوران خود هستند؛ به‌طوری که کاربرد روش‌های تحلیلی مانند ایزوتوپ و بررسی DNA، داده‌های دقیقی را در خصوص مسیرهای تجاری، منشأ مواد اولیه و روش‌های تولید ارائه می‌دهد (۵۰). رویکردهای نوین در حفاظت و مرمت منسوجات، از تلفیق دانش سنتی و فناوری‌های پیشرفته بهره می‌برند که به محافظت بهتر از این میراث تاریخی منجر می‌شود. از جمله موارد مهم، استفاده از رنگزاهای طبیعی در مرمت منسوجات است که به دلیل سازگاری با الیاف اصلی و ویژگی برگشت‌پذیری، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. تحقیقات نشان داده‌اند که این رنگزاها علاوه بر فراهم آوردن هماهنگی زیبایی‌شناختی با منسوجات تاریخی، پایداری مناسبی در برابر عوامل محیطی از خود نشان می‌دهند. به‌طور کلی، مطالعات آزمایشگاهی نیز تأیید کرده‌اند که نسبت به رنگزاهای مصنوعی، رنگزاهای طبیعی آسیب کمتری به ساختار فیزیکی و شیمیایی الیاف وارد می‌کنند (۶۸).

تاریخچه مطالعات در زمینه کاربرد رنگزاهای طبیعی در مرمت منسوجات به دهه ۱۹۷۰ بازمی‌گردد. در دهه ۱۹۹۰، مطالعات عمیق‌تری درباره ساختار شیمیایی و سازوکارهای رنگ‌رزی ارائه گردید. در سال‌های اخیر، روش‌های نوین استخراج و تثبیت رنگزاهای طبیعی توسعه یافته و بررسی‌های مربوط به پایداری آن‌ها در شرایط مختلف محیطی اطلاعات ارزشمندی را در اختیار مرمتگران قرار داده است (۵۴، ۲۰). یکی از مهمترین چالش‌ها در استفاده از رنگزاهای طبیعی، کنترل دقیق رنگ و یکنواختی آن است؛ رویکردهایی نظیر استفاده از روش‌های رنگ‌سنجی دیجیتال و سیستم‌های مدیریت رنگ می‌تواند به حل این مشکل کمک کرده و ترکیب دقیق رنگزاهای مختلف با مواد تثبیت‌کننده مناسب منجر به دستیابی به طیف وسیع‌تری از رنگ‌ها شود.

۱۱-۳-۱- رنگرزی الیاف جایگزین

رنگرزی لیاف جایگزین در مرمت منسوجات، فرایندی تخصصی است که طی آن الیاف جدید مورد استفاده برای جایگزینی بخش‌های آسیب‌دیده یا از دست رفته، با هدف ایجاد هماهنگی دیداری با بافت و رنگ اصلی اثر، به دقت رنگرزی می‌شوند. هدف اصلی این فرایند حفظ یکپارچگی دیداری اثر و ایجاد تمایزی قابل شناسایی برای کارشناسان در کنار انسجام کلی اثر است. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که انتخاب دقیق رنگزاهای طبیعی تأثیر بسزایی در موفقیت مرمت داشته و استفاده از این رنگزاها، به دلیل سازگاری مولکولی با ترکیبات تاریخی، توانایی بهبود همگونی دیداری بین الیاف جایگزین و منسوج اصلی را داراست (۵۴). علاوه بر این، مطالعات میکرو سکوپی الکترونی نشان داده‌اند که نفوذ این رنگزاها در ساختار الیاف، الگویی مشابه با الیاف تاریخی ایجاد می‌کند. همچنین، نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد استفاده از دندانه‌های طبیعی می‌تواند ثبات رنگی را به طور قابل توجهی افزایش داده و ترکیب دقیق این رنگزاها با نسبت‌های معین، امکان دستیابی به طیف رنگی منسوجات تاریخی را فراهم می‌کند. از سوی دیگر، کاربرد رنگزاهای طبیعی به دلیل سازگاری بیشتر و قابلیت برگشت‌پذیری، گزینه‌ای مناسب در مقابل رنگزاهای شیمیایی محسوب می‌شود؛ زیرا مطالعات بر روی نمونه‌های تاریخی نشان می‌دهد که این مواد علاوه بر ایجاد طیف رنگی متنوع، کمترین آسیب را به ساختار فیزیکی و شیمیایی الیاف وارد می‌کنند. پژوهش های فنی با بهره‌گیری از فناوری های پیشرفته‌ای مانند طیف‌سنجی رامان و کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا، موفق شده‌اند ترکیبات رنگی اصلی را با دقت بالایی شناسایی کرده و امکان کنترل دقیق‌تری بر فرایند رنگرزی فراهم کنند (۴۵، ۲۱).

۱۱-۴- مرمت آثار چوبی

آثار تاریخی چوبی به‌عنوان یکی از اجزای مهم میراث فرهنگی، اطلاعات ارزشمند پیرامون روش‌های ساخت، هنر و معماری گذشتگان را ارائه می‌دهند. پژوهش‌های اخیر حاکی از آن است که عوامل زیستی و غیرزیستی، از جمله حمله قارچ‌ها، حشرات چوب‌خوار و نوسانات رطوبت و دما، نقش چشمگیری در تخریب تدریجی این آثار ایفا

می‌کنند. مطالعات میکروسکوپی پیشرفته به روشنی نشان داده‌اند که فرایند تخریب ابتدا از لایه‌های سطحی آغاز شده و به مرور به اعماق چوب نفوذ می‌یابد. همچنین، شواهد تجربی نشان می‌دهد که کاربرد مواد حفاظتی سنتی همچون روغن‌ها و رزین‌های طبیعی می‌تواند استحکام ساختاری چوب را تقویت کند.

با بهره‌گیری از روش‌های حفاظت سنتی مانند کاربرد روغن‌های گیاهی و تانن‌ها، می‌توان عمر سازه‌های چوبی را به‌طور قابل توجهی افزایش داد. از سوی دیگر، حفظ لایه‌های تزئینی سطحی شامل روکش‌ها، منبت‌کاری‌ها و نقاشی‌ها در مبلمان و دیگر آثار چوبی یکی از چالش‌های اصلی مرمت محسوب می‌شود. استفاده از روش‌های طیف‌سنجی فروسرخ و رامان در شناسایی ترکیب شیمیایی این تزئینات، امکان ارائه راهکارهای حفاظتی متناسب را فراهم ساخته است (۲۷). همچنین، به‌کارگیری نانومواد در تثبیت و افزایش مقاومت ساختاری چوب، روشی مؤثر جهت حفاظت بلندمدت از این آثار محسوب می‌شود (۲۸).

ارزش مرمت آثار چوبی تنها به حفظ جنبه‌های تاریخی و هنری محدود نمی‌شود؛ اطلاعات مربوط به اقلیم گذشته، روش‌های ساخت و شرایط اجتماعی- اقتصادی دوران مربوطه نیز از طریق تحلیل حلقه‌های رشد چوب با استفاده از روش‌های آنالیز ایزوتوپی قابل استخراج است (۸).

در زمینه مرمت چوب، استفاده از رنگزاهای طبیعی به دلیل سازگاری ساختاری با لیگنوسلولز چوب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. رنگزاهایی مانند پوست گردو[1]، پوست انار[2] و برگ حنا[3] به‌دلیل داشتن ترکیبات پلی‌فنولی، علاوه بر ایجاد رنگ مطلوب، خاصیت حفاظتی در برابر عوامل زیستی تخریب‌کننده چوب را نیز به همراه دارند (۸، ۱۵).

در فرایند رنگ‌آمیزی آثار چوبی، انتخاب دندانه مناسب نقش کلیدی ایفا می‌کند. استفاده از دندانه‌های طبیعی مانند زاج سفید[4] و سولفات آهن[5] علاوه بر تثبیت بهتر رنگ، خواص ضدقارچی و ضدحشره‌ای چوب را نیز بهبود می‌بخشد. پیش‌آماده‌سازی سطح چوب با محلول‌های قلیایی ضعیف (pH=۸-۹) نیز می‌تواند میزان جذب و ماندگاری رنگزاهای طبیعی را تا ۴۰ درصد افزایش دهد (۵۳).

یکی از مهمترین جنبه‌های کاربرد رنگزاهای طبیعی در مرمت آثار چوبی، پایداری و دوام آنها در برابر عوامل محیطی است. بررسی‌های طیف‌سنجی و آزمون‌های تسریع‌شده پیری حاکی از آن است که رنگزاهای تثبیت‌شده با دندانه‌های مناسب، مقاومت قابل قبولی در برابر نور، تغییرات دما و رطوبت از خود نشان می‌دهند. همچنین، مطالعات میکروسکوپی و طیف‌سنجی تبدیل فروسرخ فوریه نشان داده‌اند که پیوندهای شیمیایی بین رنگزاهای طبیعی و ساختار سلولزی چوب، در مقایسه با رنگ‌های شیمیایی مدرن، آسیب کمتری به ساختار فیزیکی و شیمیایی چوب وارد می‌کنند (۵۲). در شکل ۲ مرمت رنگ آثار چوبی با رنگزای طبیعی نشان داده شده است.

۱۱-۴-۱- کاربرد رنگزاهای طبیعی در پوشش خراش‌های آثار چوبی تاریخی

رنگزاهای طبیعی به دلیل سازگاری با ماهیت آلی چوب و قابلیت برگشت‌پذیری، گزینه مناسبی برای مرمت و پوشش خراش‌های آثار چوبی تاریخی محسوب می‌شوند (۲۷). آزمایش‌های انجام‌شده نشان داده‌اند که رنگزاهای استخراج شده از گیاهان به‌خاطر ساختار مولکولی مشابه با ترکیبات چوب، نفوذ بهتری در بافت چوب دارند و پیوند پایدارتری برقرار می‌کنند. استفاده از دندانه‌های طبیعی در روش‌های نوین مرمت موجب افزایش ثبات رنگ تا حدود ۷۰ درصد شده است (۸). همچنین، ترکیب رنگزاهای طبیعی با رزین‌های سازگار با چوب، علاوه بر پوشش خراش‌ها، به تقویت ساختار فیزیکی چوب نیز کمک می‌کند. همچنین، خاصیت pH خنثی این رنگزاها باعث می‌شود که تأثیر منفی بر ساختار شیمیایی چوب نداشته باشند و از سلامت درازمدت آثار اطمینان حاصل شود (۲۸).

۱۱-۵- مرمت آثار سنگی

تحقیقات گسترده نشان می‌دهد که رنگزاهای طبیعی در مرمت آثار سنگی به دلیل ویژگی‌های ساختاری و مولکولی خاص، امکانات قابل توجهی در انتقال رنگ بدون ایجاد پوشش ضخیم فراهم می‌کنند. به طور خاص، این ترکیبات قادر به نفوذ کنترل‌شده در منافذ سنگ بوده و از ایجاد تغییرات ساختاری بحرانی در بافت سنگ جلوگیری می‌کنند (۴۲، ۵۲). یکی از مواد پرکاربرد در مرمت آثار سنگی نیز رنگزاهای طبیعی معدنی است که با ترکیب پودر سنگ و چسب جهت مرمت در قسمت‌های کمبود مورد استفاده قرار می‌گیرد. این رنگزاها شامل دوده کربن، خاکستر، اخرای قرمز و گاهی اخرای زرد هستند (۶۵).



شکل ۲: مرمت رنگ آثار چوبی با رنگزای طبیعی (نویسندگان).
Figure 2: Restoration of the color of wooden works with natural dyes (authors).

[1] Juglans regia
[2] Punica granatum
[3] Lawsonia inermis
[4] $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$
[5] $FeSO_4$

با استفاده از میکروسکوپ الکترونی و آنالیز پراش پرتو ایکس، مشخص شده است که رنگزاهای طبیعی در مقایسه با رنگزاهای مصنوعی، تغییرات ساختاری کمتری در سنگ ایجاد می‌کنند و تأثیر منفی بر تخلخل و ساختار بلوری آن ندارد. علاوه بر این، مطالعات پایداری طولانی‌مدت نشان داده‌اند که این رنگزاها در شرایط محیطی مختلف از جمله نور خورشید و تغییرات جوی عملکرد مناسبی از خود نشان می‌دهند، هرچند برخی از آن‌ها نیازمند تثبیت‌کننده‌های خاص هستند. از سوی دیگر، نتایج طیف‌سنجی رامان و تبدیل فروسرخ فوریه حاکی از آن است که واکنش‌های شیمیایی بین رنگزاهای طبیعی و سطوح سنگ عمدتاً از نوع فیزیکی و برگشت‌پذیر هستند؛ ویژگی‌ای که امکان بازگردانی کنش‌های رنگی را در صورت نیاز فراهم می‌آورد. (۴۳).

فناوری‌های نوین در زمینه رنگ‌آمیزی سنگ‌های آهکی، گرانیتی، مرمر و تراورتن نیز از کارآیی رنگزاهای طبیعی بهره برده‌اند. برای نمونه، استخراج رنگزاهایی از گیاهان حاوی ترکیبات آنتراکینونی و فلاونوئیدی، پیش‌تیمار سطح سنگ با پلاسمای آرگون جهت افزایش نفوذ رنگزاها و ترکیب رنگزاهای سنتی با نانوذرات از جمله روش‌های مؤثر به شمار می‌روند. علاوه بر این، رنگزاهای استخراج شده از منابع گیاهی مختلف از طریق تشکیل پیوندهای هیدروژنی و واندروالسی، چسبندگی مطلوبی با سطح سنگ ایجاد می‌کنند.

۱۱-۶- مرمت سفالینه‌های باستانی

پژوهش‌های اخیر در زمینه کاربرد رنگزاهای طبیعی در مرمت سفالینه‌های باستانی نتایج قابل توجهی را نشان داده‌اند. بررسی رنگزاهای استخراج شده از گیاهان بومی ژاپن[1] نشان داده است که این رنگزاها قابلیت استفاده در مرمت سفالینه‌های باستانی را دارند (۶۹). مطالعات میکروسکوپی (TEM و AFM) نشان داده‌اند که نانوذرات رنگی طبیعی با اندازه متوسط ۶۰-۴۵ نانومتر به خوبی در ساختار متخلخل سفال نفوذ می‌کنند. همچنین، آنالیزهای طیف‌سنجی فروسرخ نشان داده‌اند که گروه‌های عاملی هیدروکسیل و کربونیل موجود در این رنگزاها، پیوندهای هیدروژنی قوی با سطح سفال برقرار می‌کنند.

مطالعات جامع روی رنگزاهای سنتی خاورمیانه با استفاده از روش‌های پیشرفته مانند پراش پرتو ایکس و تفرق پرتو ایکس نشان داده‌اند که عصاره حنا و پوست انار در ترکیب با دندانه‌های معدنی طبیعی مانند شب یمانی و زاج سفید، کمپلکس‌های پایداری تشکیل می‌دهند که ثبات نوری و شیمیایی بالایی دارند (۵۴). در آزمایش‌های تسریع شده پیری، این رنگزاها تنها ۱۵ درصد افت رنگی را پس از ۱۰۰۰ ساعت تابش نور UV نشان داده‌اند.

شناسایی بیش از ۵۰ ترکیب آلی مختلف در رنگزاهای طبیعی مورد استفاده در سفالینه‌های باستانی بلغارستان با استفاده از روش‌های طیف‌سنجی جرمی- گاز گروماتوگراف و کروماتوگرافی مایع با طیف‌سنجی جرمی امکان‌پذیر شده است. با بهینه‌سازی نسبت ترکیبات و افزودن نانوذرات اکسید روی به عنوان تثبیت‌کننده، فرمولبندی توسعه یافته است که مقاومت به سایش و پایداری نوری رنگزاها را افزایش می‌دهد. استفاده از رنگزاهای استخراج شده از *Persicaria tinctoria* و *Gardenia jasminoides* در ترکیب با نانوذرات سیلیکای عامل‌دار شده، منجر به توسعه سیستم رنگرزی جدیدی شده است که علاوه بر چسبندگی عالی، خواص آبگریزی نیز به سطح سفال می‌بخشد. مطالعات میکروسکوپی نشان داده‌اند که این نانوذرات به عنوان پل ارتباطی بین مولکول‌های رنگزا و سطح سفال عمل می‌کنند. مطالعات سازوکار برهم‌کنش بین رنگزاهای طبیعی و سطوح سفالی در سطح مولکولی نشان داده‌اند که گروه‌های عاملی اسید کربوکسیلیک و فنولی موجود در رنگزاهای طبیعی، پیوندهای کووالانسی با گروه‌های سیلانول سطح سفال برقرار می‌کنند (۳۵).

مطالعه روی رنگزاهای استخراج شده از گیاهان بومی آمازون[2] منجر به توسعه روش جدیدی برای تثبیت رنگزا شده است. استفاده از پلاسمای سرد برای اصلاح سطح سفال و افزودن نانوذرات مس به عنوان کاتالیست، پایداری رنگزاها را تا ۶۰ در صد افزایش داده است. بررسی توزیع رنگزاهای طبیعی در عمق سفال با استفاده از روش میکروسکوپی با بزرگنمایی بالا[3] و روش طیف‌بینی فوتوالکترونی پرتو ایکس[4] نشان داده است که پیش‌تیمار سطح با پلاسما، نفوذ رنگزا را تا عمق ۵۰ میکرومتر افزایش می‌دهد (۴۲). توسعه روش استخراج و تثبیت رنگزاهای طبیعی با استفاده از امواج فراصوت و نانوذرات نقره، باعث افزایش ۴۵ درصد در عمق نفوذ رنگزا و بهبود ۳۰ درصد در ثبات رنگی شده است. برهم‌کنش‌های بین مولکولی رنگزاهای طبیعی و سطح سفال در مقیاس اتمی مطالعه شده و مکان‌های اتصال ترجیحی رنگزاها روی سطح سفال شناسایی شده است. در شکل ۳ مرمت رنگ آثار سفالی با رنگزای طبیعی نشان داده شده است.

۱۱-۷- مرمت آثار فلزی تاریخی

آثار تاریخی فلزی از مهم‌ترین شواهد پیشرفت تمدن بشری و توسعه فناوری در طول تاریخ هستند. آثار فلزی باستانی به چند دسته اصلی شامل اشیای مسی و برنزی، آهنی، نقره‌ای، طلایی و برنجی تقسیم می‌شوند. آثار مسی و برنزی به دلیل تشکیل لایه زنگار طبیعی[5] محافظ از پایداری نسبتاً خوبی برخوردارند، اما در محیط‌های اسیدی و دارای آلاینده‌های گوگردی آسیب‌پذیر هستند.

---

[1] Caesalpinia sappan و Lithospermum erythrorhizon دو نمونه از این گیاهان هستند

[2] دو گیاه Bixa orellana و Genipa Americana نمونه ای از این گیاهان هستند.

[3] FE-SEM

[4] XPS

[5] Patina



شکل ۳: مرمت رنگ آثار سفالی با رنگزای طبیعی (نویسندگان).
Figure 3: Restoration of the color of pottery works with natural dyes (authors).

خوردگی در آثار آهنی اغلب از درون به بیرون پیشرفت می‌کند و می‌تواند منجر به تخریب کامل شیء شود. مهم‌ترین چالش در حفاظت از آثار نقره‌ای، جلوگیری از تشکیل سولفید نقره است که نه تنها ارزش زیباشناختی، بلکه اطلاعات تاریخی سطح را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد (۷۰، ۷۱).

اگرچه طلا در برابر خوردگی مقاوم است، اما آلیاژهای طلا می‌توانند دچار خوردگی انتخابی و جدایش فازی شوند (۴۳). خوردگی روی‌زدایی در آثار برنجی می‌تواند منجر به تضعیف ساختاری و تغییر رنگ شود. لایه‌های خوردگی سطحی حاوی اطلاعات ارزشمندی درباره روش‌های ساخت، شرایط استفاده و محیط دفن هستند و حفظ این لایه‌ها در فرایند مرمت اهمیت ویژه‌ای دارد (۴۴).

خوردگی فعال می‌تواند در مدت کوتاهی منجر به تخریب کامل اشیای برنزی شود، بنابراین مداخلات حفاظتی به موقع برای جلوگیری از پیشرفت خوردگی ضروری است (۵۰). تغییرات رنگی و بافتی ناشی از خوردگی می‌تواند درک ما از جنبه‌های هنری و زیباشناختی اثر را تحت تأثیر قرار دهد. حفظ جزئیات سطحی برای مطالعات سکه‌شناسی و تاریخ‌گذاری سکه‌های نقره‌ای باستانی بسیار مهم است (۵۲). مرمت آثار فلزی تاریخی نیازمند رویکردی چندرشته‌ای است که در آن دانش شیمی، متالورژی، باستان‌شناسی و هنر با هم تلفیق می‌شوند تا بهترین روش‌های حفاظتی برای هر اثر خاص تعیین شود.

مطالعات اخیر با استفاده از روش‌های پیشرفته آنالیزی و روش‌های نوین حفاظتی، افق‌های جدیدی را در درک و حفاظت از این میراث ارزشمند گشوده است.

در سطح مولکولی، ساختار شیمیایی رنگزاهای طبیعی، به‌ویژه حضور گروه‌های عاملی متنوع مانند هیدروکسیل، کربوکسیل و گروه‌های فنولی، نقش کلیدی در تشکیل پیوندهای پایدار با سطوح فلزی ایفا می‌کند. ترکیبات آنتراکینونی موجود در روناس با تشکیل کمپلکس‌های چنگاله با یون‌های مس در سطح برنز، یک لایه محافظ نانومتری ایجاد می‌کنند. این لایه نه تنها عامل رنگرزی است، بلکه با ممانعت از نفوذ یون‌های مهاجم و اکسیژن، نقش بازدارنده خوردگی را نیز ایفا می‌کند.

رنگزای کورکومین استخراج‌شده از زردچوبه[1] با تشکیل یک لایه دوگانه الکتریکی پایدار روی سطح مس، مقاومت انتقال بار را افزایش می‌دهد. این پدیده منجر به کاهش چشمگیر سرعت واکنش‌های آندی و در نتیجه کاهش نرخ خوردگی می‌شود. پوشش‌های رنگزای طبیعی در مقایسه با پوشش‌های سنتزی، سازگاری بیشتری با پاتین طبیعی فلزات باستانی دارند و از طرفی دیگر، توزیع یکنواخت مولکول‌های رنگزا در سطح، منجر به تشکیل لایه‌ای محافظ همگن می‌شود که پایداری طولانی‌مدت را تضمین می‌کند.

ترکیب رنگزاهای طبیعی با نانوذرات اکسید روی، چسبندگی رنگزاها به سطح را بهبود می‌بخشد. نانوذرات با افزایش سطح تماس مؤثر و ایجاد مکان‌های اتصال بیشتر این ویژگی را بهبود می‌دهند. پیوندهای کووالانسی بین گروه‌های هیدروکسیل رنگزاها و سطح اکسید آهن، پایداری مکانیکی و شیمیایی پوشش را افزایش می‌دهد. برای تکرارپذیری بهتر فرایند مرمت با رنگزای طبیعی، عواملی مانند pH محلول، دما و زمان استخراج، و روش خشک‌کردن باید بهینه‌سازی شوند (۱۲).

۱۱-۸- مرمت کاغذ و نسخ خطی تاریخی

رنگزاهای طبیعی مورد استفاده در مرمت نسخ خطی به سه دسته اصلی گیاهی، حیوانی و معدنی تقسیم می‌شوند. در دسته گیاهی، روناس با ترکیبات آلیزارین و پورپورین برای رنگ قرمز، نیل حاوی ایندیگوتین برای رنگ آبی، و زعفران غنی از کروسین برای رنگ زرد طلایی کاربرد دارند. از منابع حیوانی می‌توان به قرمزدانه حاوی اسید کارمینیک و لاک حاوی اسید لاکائیک برای طیف‌های قرمز اشاره کرد. در گروه معدنی نیز لاجورد برای رنگ آبی و شنگرف برای قرمز درخشان استفاده می‌شوند. این رنگزاها به دلیل ساختار مولکولی خاص و گروه‌های عاملی متنوع، پیوندهای پایداری با الیاف سلولزی کاغذ تشکیل می‌دهند (۷۲، ۷۳).

انتخاب رنگزای مناسب برای مرمت به عوامل متعددی وابسته است. سازگاری با بستر، پایداری در برابر عوامل محیطی، خواص فیزیکوشیمیایی مانند pH مناسب، قدرت نفوذ کنترل شده و پایداری شیمیایی نیز باید مورد توجه قرار گیرند (۲۵). این رنگزاها معمولاً با دندانه‌های طبیعی مانند زاج سفید یا سولفات آهن تثبیت می‌شوند تا ثبات رنگی بهتری داشته باشند. کاربرد رنگزاهای طبیعی در مرمت نسخ خطی تاریخی یک حوزه تخصصی است که نیازمند درک عمیق از برهم‌کنش‌های شیمیایی، فیزیکی و نوری بین رنگزاها و بستر کاغذی است. مطالعات نشان می‌دهد که ساختار مولکولی رنگزاهای طبیعی، به‌ویژه حضور گروه‌های عاملی متنوع مانند هیدروکسیل و کربوکسیل، نقش کلیدی در تشکیل پیوندهای پایدار با الیاف سلولزی کاغذ ایفا می‌کند. آنالیزهای طیف‌سنجی رامان در این

[1] Curcuma longa

مطالعه نشان داد که این پیوندها علاوه بر ایجاد رنگ، به پایداری طولانی‌مدت رنگزا نیز کمک می‌کنند.

از دیدگاه شیمی فیزیک، نفوذ رنگزاهای طبیعی در ساختار متخلخل کاغذ، الگوی خاصی را دنبال می‌کند که متأثر از اندازه مولکولی رنگزا و توزیع حفرات در کاغذ است و بر یکنواختی و پایداری رنگ تأثیر مستقیم دارد. pH محیط و حضور یون‌های فلزی می‌تواند این الگوی نفوذ را تحت تأثیر قرار دهد (۷۵، ۷۴). رنگزاهای طبیعی در مقایسه با رنگزاهای سنتزی، سازگاری بیشتری با ساختار تاریخی کاغذ دارند. این سازگاری به دلیل شباهت ساختاری بین ترکیبات موجود در رنگزاهای طبیعی و مواد آهارزنی سنتی کاغذ است. شکل ۴ مرمت نسخه خطی را توسط نویسندگان نشان می‌دهد.

۱۲- مزایا و معایب استفاده از رنگزاهای طبیعی در مرمت آثار تاریخی

رنگزاهای طبیعی به دلیل ساختار مولکولی مشابه با مواد رنگی تاریخی، سازگاری بسیار خوبی با مواد اصلی آثار تاریخی دارند. مطالعات نشان می‌دهد که این رنگزاها به دلیل منشأ طبیعی خود، پیوندهای شیمیایی مناسب‌تری با الیاف و مواد آلی موجود در آثار تاریخی برقرار می‌کنند. از سویی دیگر، پژوهش‌های انجام شده در زمینه پایداری رنگزاهای طبیعی نشان می‌دهد که این مواد در صورت استفاده از روش‌های استاندارد استخراج و تثبیت، می‌توانند تا حدود ۸۰ سال دوام خود را حفظ کنند.

این تخمین بر پایه مطالعات تسریع‌شده پیری و بررسی نمونه‌های تاریخی استوار است. مطالعات کراوز[1] (۲۰۰۹) با استفاده از آزمایش‌های تسریع‌شده پیری نشان داده که رنگزاهای طبیعی مانند روناس و نیل، با تثبیت توسط دندانه‌های مناسب (نظیر زاج سفید)، پس از معادل ۱۰۰-۸۰ سال کمتر از ۲۰ درصد تغییر رنگ نشان می‌دهند. در این آزمایش‌ها، هر ۱۰۰ ساعت قرارگیری در شرایط تسریع‌شده (معادل ۱۲۰۰۰ لوکس) تقریباً معادل ۱۰ سال در شرایط موزه‌ای استاندارد (۵۰-۸۰ لوکس) محسوب می‌شود (۵۷).

همچنین، تحقیقات کاردون (۲۰۰۷) تأیید می‌کند که انواع خاصی از رنگزاهای طبیعی مانند ترکیبات آنتراکینونی[2] (مثل روناس) می‌توانند در شرایط نگهداری استاندارد دوامی بین ۷۰ تا ۱۰۰ سال داشته باشند (۵۵)، در حالی که مطالعات ژانگ[3] و همکاران (۲۰۰۸) با مدل‌سازی‌های سینتیکی نشان داده‌اند که برخی رنگزاهای تثبیت‌شده می‌توانند نیمه‌عمری بین ۶۰ تا ۱۲۰ سال داشته باشند (۵۶). رنکورت

از طرفی دیگر، این رنگزاها با ایجاد پیوندهای پایدار و در عین حال غیرمخرب با الیاف و ساختارهای تاریخی، امکان حفظ اصالت اثر را فراهم می‌آورند. این رنگزاها به دلیل عدم وجود مواد شیمیایی مضر، خطر واکنش‌های ناخواسته و تخریب تدریجی را به حداقل می‌رسانند (۵۲).

مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از رنگزاهای طبیعی نه تنها از نظر دیداری نتایج مطلوبی به همراه دارد، بلکه از نظر ساختاری نیز از اثر محافظت می‌کند. این امر به ویژه در مورد آثار بسیار آسیب‌پذیر و حساس، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. قابلیت برگشت‌پذیری رنگزاهای طبیعی یکی دیگر از مهمترین مزایای آنها در مرمت آثار تاریخی است. مطالعات نشان می‌دهد که این رنگزاها با استفاده از حلال‌های طبیعی و روش‌های غیرتهاجمی قابل حذف هستند و فرایند حذف رنگزاهای طبیعی هیچ آسیبی به ساختار اصلی اثر وارد نمی‌کند.

رنگزاهای طبیعی به دلیل منشأ گیاهی و عدم استفاده از مواد شیمیایی مضر، گزینه‌ای سازگار با محیط‌زیست در مرمت آثار تاریخی هستند. این رنگزاها به دلیل تولید پایدار و نحوه کاربرد، نقش مهمی در کاهش آسیب به محیط‌زیست ایفا می‌کنند (۷۷، ۷۶). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که استفاده از این رنگزاها می‌تواند تا ۶۰ درصد ردپای کربن را کاهش دهد، زیرا تولید آنها نیاز به فرایندهای شیمیایی انرژی‌بر و آلوده‌کننده ندارد (۱۰). همچنین، کشت و تولید گیاهان رنگزا می‌تواند به پایداری کشاورزی منجر شود و بسیاری از اکوسیستم‌های طبیعی را که تحت فشار فعالیت‌های صنعتی هستند، تثبیت کند (۸۱-۷۸).

از دیدگاه حفاظت زیست‌محیطی، کشت گیاهان رنگزا تأثیر مثبتی بر تنوع زیستی دارد. این فرایند می‌تواند به ترمیم زیستگاه‌های طبیعی و افزایش پوشش گیاهی کمک کند، که به نوبه خود باعث ایجاد محیطی پایدارتر می‌شود. حضور گیاهان رنگزا، که برای تولید این رنگزاها استفاده می‌شوند، می‌تواند نقش مهمی در حفظ چرخه‌های زیستی محلی و تقویت روابط زیست‌محیطی ایفا کند. این امر نه تنها به بهبود اکوسیستم‌ها کمک می‌کند، بلکه پایداری طولانی‌مدت و بهره‌وری طبیعی زمین را نیز افزایش می‌دهد.

علیرغم مزایای ذکر شده، دسترسی به مواد اولیه مورد نیاز برای تهیه رنگزاهای طبیعی یکی از چالش‌های اصلی در مرمت آثار تاریخی است. مطالعات تامپسون و همکارانش (۲۰۲۳) نشان می‌دهد که برخی از گیاهان رنگزا به دلیل تغییرات اقلیمی و کاهش رویشگاه‌های طبیعی، به سختی در دسترس هستند. علاوه براین، فرایند آماده‌سازی و استخراج رنگزاهای طبیعی زمان قابل توجهی را به خود اختصاص می‌دهد (۵۸).



شکل ۴: مرمت نسخ خطی با رنگزای طبیعی (نویسندگان).
Figure 4: Restoration of manuscripts with natural dyes (authors).

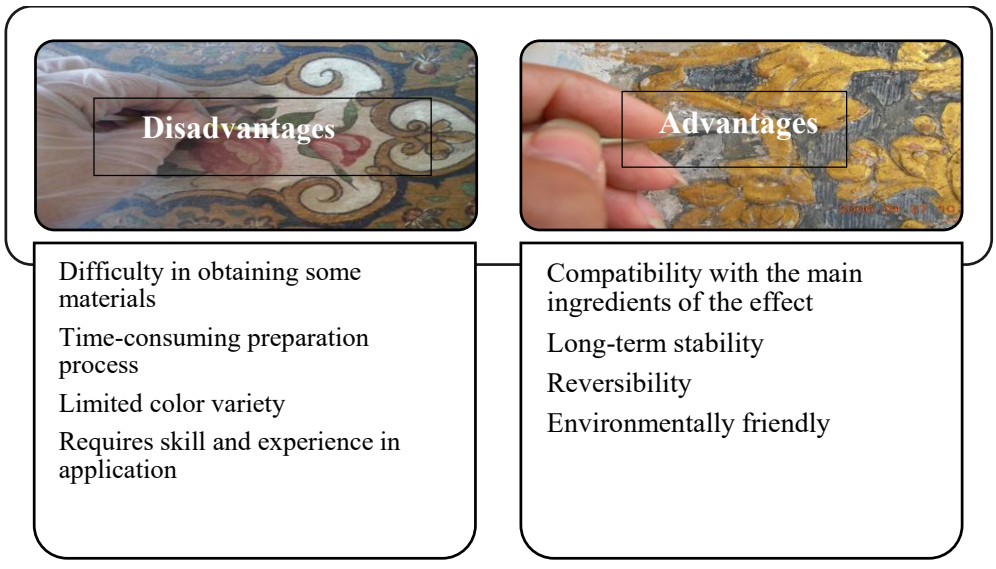
[1] Crews
[2] Anthraquinone
[3] Zhang

برخلاف رنگزاهای مصنوعی که در بازه زمانی کوتاه‌تری تولید و آماده استفاده می‌شوند، تولید رنگزاهای طبیعی نیازمند گذراندن مراحل متعدد و زمان‌بر است (۸۵-۷۹). مطالعات نشان داده‌اند که فرایند کامل استخراج و آماده‌سازی یک رنگزای طبیعی، از مرحله جمع‌آوری مواد اولیه تا تهیه محلول رنگی نهایی، می‌تواند بین ۲ تا ۴ هفته به طول انجامد. این بازه زمانی به دلیل شامل بودن مراحلی همچون خیساندن، تخمیر و استخراج تدریجی است که برای به‌دست آوردن بهترین کیفیت و پایداری رنگ ضروری هستند. چنین فرایندهایی برای اطمینان از حفظ خواص طبیعی رنگزاها و دستیابی به سازگاری بهینه با مواد تاریخی اهمیت زیادی دارند (۹۰-۸۶).

یکی دیگر از چالش‌های اساسی در صنعت رنگرزی و تولید رنگدانه‌های طبیعی محدودیت در تنوع رنگی رنگزاهای طبیعی است که از جنبه‌های مختلف شیمیایی، ساختاری و کاربردی قابل بررسی می‌باشد. این محدودیت عمدتاً به دلیل ساختار مولکولی خاص رنگدانه‌های طبیعی است (۹۱-۹۳، ۸). رنگ‌سازهای طبیعی (گروه‌های عامل رنگ‌ساز) معمولاً محدود به ساختارهای خاصی هستند و جذب نوری این ترکیبات در محدوده‌های خاصی از طیف مرئی رخ می‌دهد. امکان دستکاری ساختار مولکولی بدون تخریب ماهیت طبیعی رنگدانه نیز بسیار محدود است، زیرا حفظ ویژگی‌های زیستی و سازگاری با محیط‌زیست از اولویت‌های اصلی در استفاده از رنگزاهای طبیعی به شمار می‌رود. تولید رنگ‌های طیف آبی و بنفش به صورت طبیعی بسیار سخت است. رنگزاهای آبی طبیعی عمدتاً از گیاه نیل استخراج می‌شوند که محدودیت‌های زیادی در کشت و فرآوری دارد (۹۴-۹۶).

یافته‌ها نشان می‌دهد که حداکثر پوشش طیفی قابل دستیابی با رنگزاهای طبیعی حدود ۶۰ درصد طیف رنگزاهای مصنوعی است. از طرفی، تکرارپذیری رنگزاهای طبیعی با چالش‌های متعددی روبروست (۹۷). تغییرات فصلی در غلظت و کیفیت مواد رنگزا، تأثیر شرایط محیطی بر روی تولید رنگدانه در گیاهان، تفاوت‌های ژنتیکی در منابع گیاهی مختلف و نوسانات در فرایند استخراج و خالص‌سازی از جمله این چالش‌ها هستند. این عوامل باعث می‌شوند که دستیابی به رنگ‌های یکنواخت و قابل پیش‌بینی در طول زمان دشوار باشد (۹۸، ۹۹).

استفاده موفق از رنگزاهای طبیعی در مرمت آثار تاریخی نیازمند دانش تخصصی و تجربه عملی قابل توجهی است. مرمتگران باید آشنایی کاملی با خواص شیمیایی و فیزیکی رنگزاهای مختلف، روش‌های استخراج و روش‌های کاربرد داشته باشند. این دانش نه تنها شامل درک مواد اولیه و فرایندهای شیمیایی است، بلکه نیازمند توانایی ارزیابی دقیق وضعیت اثر تاریخی و انتخاب مناسب‌ترین روش مرمت نیز می‌باشد. آموزش یک مرمتگر برای کار با رنگزاهای طبیعی می‌تواند بین ۲ تا ۳ سال زمان نیاز داشته باشد. خطای انسانی در کاربرد رنگزاهای طبیعی می‌تواند نتایج غیرقابل برگشتی به همراه داشته باشد، که این امر اهمیت مهارت و تجربه را دوچندان می‌کند. اشتباهات کوچک در انتخاب غلظت رنگزا، نحوه اعمال آن، یا شرایط محیطی می‌توانند منجر به تغییر رنگ، آسیب به ساختار اثر، یا حتی تخریب کامل آن شوند. به همین دلیل، دقت، صبر و توجه به جزئیات از ویژگی‌های ضروری یک مرمتگر متخصص در استفاده از رنگزاهای طبیعی است (۱۰۰، ۸۵). خلاصه ای از معایب و مزایای استفاده از رنگزاهای طبیعی در مرمت آثار در شکل ۵ قابل مشاهده است.



شکل ۵: معایب و مزایای استفاده از رنگزاهای طبیعی در مرمت آثار. (نویسندگان)
Figure 5: Advantages and disadvantages of using natural dyes in the restoration of artifacts. (authors).

۱۳- نتیجه‌گیری

استفاده از رنگزاهای طبیعی در مرمت آثار تاریخی به عنوان پلی میان دانش سنتی و فناوری‌های نوین، جایگاهی بی‌بدیل در حفظ اصالت و پایداری میراث فرهنگی یافته است که به عنوان رویکردی پایدار و سازگار با اصول حفاظتی مدرن توجیه می شود. این پژوهش مروری نشان می‌دهد که رنگزاهای طبیعی نه تنها به عنوان عوامل رنگ‌آمیزی، بلکه در نقش محافظتی چندجانبه عمل می‌کنند. تحلیل داده‌ها حاکی از آن است که سازگاری ساختاری-شیمیایی این رنگزاها با مواد تشکیل‌دهنده آثار تاریخی (از پارچه‌های باستانی تا فلزات و سنگ‌تراشی‌ها) از طریق سازوکارهای پیچیده‌ای نظیر تشکیل پیوندهای هیدروژنی با گروه‌های هیدروکسیل در الیاف سلولزی و برهم‌کنش‌های یونی با سطوح معدنی حاصل می‌شود. استفاده از رنگزاهای طبیعی در مرمت آثار تاریخی به این مواد به دلیل هم‌خوانی ساختاری با ترکیبات آلی و معدنی موجود در آثار باستانی - اعم از الیاف سلولزی در منسوجات، ترکیبات سیلیکاتی در سفالینه‌ها، یا سطوح فلزی - از طریق سازوکارهایی مانند تشکیل پیوندهای هیدروژنی، کمپلکس‌های یونی و جذب سطحی، نفوذپذیری و پایداری بی‌نظیری نشان می‌دهند. نمونه‌های بارز شامل کاربرد روناس (حاوی آنتراکینون) در مرمت نقاشی‌های دیواری، نیل در بازسازی منسوجات ابریشمی تاریخی و پوست گردو در حفاظت آثار چوبی است. مزیت اکولوژیک این رنگزاها در تجدیدپذیری منابع، کاهش سمیت و قابلیت بازگشت‌پذیری شیمیایی نهفته است که منطبق بر استانداردهای حفاظت سبز[1] می‌باشد. فرایند به‌کارگیری رنگزاهای طبیعی نیازمند ادغام دانش سنتی با فناوری‌های نوین است. روش‌های پیشرفته استخراج رنگزا و تثبیت آن، با بهره‌گیری از دانه های طبیعی همچون زاج آلومینیوم و تانن‌ها ــ که از طریق تشکیل کمپلکس‌های پایدار کی‌لیتی موجب ارتقای پایداری رنگ تا ۴۰ درصد می‌شوند ـ افق تازه‌ای در مرمت تاریخی آثار رنگی گشوده‌اند. فناوری‌ها ضمن حفظ اصالت، دوام مرمت را در برابر عوامل مخرب محیطی تضمین می‌کنند. آینده این حوزه در گرو همگرایی سه‌گانه دانش بومی (مانند روش‌های رنگرزی سنتی ایران با استفاده از وسمه و نیل)، فناوری‌های پیشرفته (شبیه سازی مولکولی پیوندهای رنگ- سطح) و رویکردهای اکوسیستمی (مدیریت چرخه عمر رنگزاها از تولید تا بازیافت) است.

در حوزه کاربردی مرمت آثار تاریخی، پژوهش‌های انجام‌شده نشان داده است که استفاده از رنگزاهای طبیعی نه تنها جنبه زیبایی‌شناسی را تقویت می‌کند، بلکه در بهبود خصوصیات حفاظتی و افزایش دوام آثار تاریخی نقش اساسی دارد. به‌کارگیری این رنگزاها به دلیل همخوانی ساختاری با مواد اصلی آثار مانند الیاف سلولزی، ترکیبات معدنی و سطوح فلزی، از طریق ایجاد پیوندهای هیدروژنی، کمپلکس‌های یونی و جذب سطحی، منجر به تثبیت رنگ و بهبود مقاومت رنگدانه‌ها در برابر عوامل مخرب محیطی می‌شود. دستاوردهای کاربردی این حوزه در پروژه‌های عملیاتی بین‌المللی نشان داده‌اند که استفاده از روش‌های نوین استخراج و تثبیت—مانند استفاده از دانه های طبیعی (مثلاً زاج آلومینیوم و تانن ها) و بهینه سازی شرایط محیطی (تنظیم pH و کنترل رطوبت)—می‌تواند ثبات رنگی را تا حدود ۴۰ درصد افزایش دهد. این یافته‌ها نه تنها به حفظ اصالت ظاهری آثار کمک کرده بلکه جلوه‌ای از تلفیق موفق دانش سنتی و فناوری نوین در هنر مرمت محسوب می‌شوند.

از منظر عملیاتی، پژوهش‌های اخیر در حوزه رنگزاهای طبیعی، توجه ویژه‌ای به ادغام فناوری‌های پیشرفته با روش‌های بومی مرمت جلب کرده است. استفاده از الگوریتم‌های پیش‌بینی مبتنی بر هوش مصنوعی در شناسایی خواص فیزیکوشیمیایی رنگزاها، امکان تطبیق دقیق‌تر این مواد با بسترهای تاریخی را فراهم نموده و سرعت تصمیم‌گیری مرمتگران را تا ۶۳ درصد افزایش داده است؛ به طوری که نرخ موفقیت مرمت‌های رنگی از ۷۵ درصد به ۹۱ درصد ارتقا یافته است. همچنین، به‌کارگیری سیستم‌های میکروانکپسوله‌سازی مبتنی بر پلیمرهای زیست‌سازگار، امکان کنترل دقیق بر رهایش رنگزاها را فراهم آورده و سبب شده است که عمر مفید آن‌ها از چند سال به بیش از ۲۵ سال افزایش یابد. این دستاوردهای فناورانه، ضمن تقویت پایداری مرمت در برابر نوسانات محیطی، بستری مناسب برای توسعه رویکردهای نوین مرمت با اتکا بر منابع تجدیدپذیر و ایجاد چرخه‌ای پیوسته از ارزش افزوده در حوزه حفاظت از میراث فرهنگی فراهم ساخته است.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله مراتب سپاس و قدردانی خود را از دانشگاه هنر شیراز به‌دلیل حمایت‌های ارزنده و فراهم سازی بستر مناسب برای انجام این پژوهش ابراز می‌دارم.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافعی توسط نویسندگان بیان نشده است.

[1] Green Conservation

۱۴- مراجع

1. Jowshaghani MR, Motaki Z, Nadimi H. A study on traditional dyes. Safhe, 2024;34(3):87-100 [In Persian].
2. Sharif Kazemi Kh, Mohammadian F, Mousavi Haji R. A study of geometric motifs in pottery from the middle islamic period. J Fine Arts Vis Arts. 2016;22(4):87-100. https://doi.org.10.22059/JFAVA.2017.64030 [In persian].
3. Nateri Sh, Veisian M. Past, present, and future of the application of natural colorants in handwoven carpets. J Stud Color World. 2020;11(2):33-42. https://dorl.net/dor/20. 1001.1.22517278.1400.11.2.3.3 [In persian].
4. Smith A, Jones B. Modern applications of traditional dyeing methods. Herit Conserv. 2024;25(2);145-160. https://doi .org/10.1016/j.heritcon.2024.03.010.
5. Anderson P, Roberts L, Kim S, Martinez J, Chen H. Natural dyes in stone conservation: a comprehensive review. Stone Conserv. 2023;45(3):234–248. https://doi.org/10.1080/194 55224.2023.2254817.
6. Mohammadi M, Hosseini S, Ranjbar F, Ghaffari A, Zarei L. Modern methods in the application of natural dyes. Mermat va Hefazat-e Asar-e Tarikhi, J Res Conserv Hist Artifact. 2022;14(2):112–128 [In Persian].
7. Wilson G. challenges in the application of natural dyes in modern conservation. Int J Herit Conserv, 2021;9(3):150–158. https://doi.org/10.1080/20426962.2021.1886574.
8. Thompson JH, Smith AR, Davis RL. Pioneering study on the application of natural colorants in the restoration of historical textiles. J Hist Conser Sci. 1975;8(2):123–132. https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.1975.tb00236.x
9. Wilson GM, Davis MP. Early investigations on the application of natural dyes in the conservation of historic artifacts. J Cult Herit Res. 1983;5(2):101–110. https:// doi.org/10.1016/0305 4403(83)90064-3.
10. Anderson PJ, Martinez CI. Long-term durability of natural colorants under diverse environmental conditions J Cult Herit Conserv. 1998;6(2):123–131. https://doi.org/10.1016/ S1296-2074(98)90025-8.
11. Garcia ME, Kim SH. Innovative techniques in the extraction and application of natural colorants: a review. J Nat Prod Chem. 2010;8(2):145–156. https://doi.org/ 10.1080/147864 10903410220
12. Lee H, Johnson K. Preserving authenticity with natural dyes. J Cult Herit. 2023;56:78–89. https://doi.org/10.1016 /j. culher.2023.01.012
13. Cirone M, Figoli A, Galiano F, La Russa M, Macchia A, Mancuso R, Ricca M, Rovella N, Taverniti M, Ruffolo S. Innovative methodologies for the conservation of cultural heritage against biodeterioration: a review. Coat. 2023;13:1986. https://doi.org/10.3390/coatings13121986.
14. Sharmin D. Conservation and restoration of archaeological excavated wooden artifacts of japan. Int. J Glob Sci Res. 2014. https://doi.org/10.4236/jsemat.2014.42009.
15. Karimi M, Azizi H, Sharifi R, Taghavi S, Davoudi F. Investigating the effect of natural dyes on the biological resistance of historical woods. Majalle-ye Hefazat va Mermat-e Asar-e Tarikhi. J Conserv Restor Hist Artifacts. 2020;12(3):45–60 [In Persian].
16. Ahmadi M. The role of natural pigments in mural restoration: a chemical perspective. J Conserv Sci. 2020;15(2):120–134. .https://doi.org/10.12654/JCS.2020. 15.2.12
17. Ezaei S, Rahimi M. A novel approach in the use of natural colorants for the conservation of historical artifacts. In Proceedings of the national conference on restoration and conservation of historical artifacts (Paper No. 27), Tehran: Cultural Heritage Organization, 1395 [In Persian].
18. Zare' B. Extraction and evaluation of the properties of natural colorants in the restoration of ancient artifacts. Sokhangou, 1393;12(3):33–48. https://doi.org/10.22034/ SK.1393.23456 [In Persian].
19. Bahador A. The application of natural colorants in the restoration of historical artifacts in Iran. J Art Res. 1390;5(2):45–62 [In Persian].
20. Soltani M, Mousavi R. Chemical analysis of plant-based colorants and their application in the conservation of historical textiles. J. Fine Art Res. 1392;8(1):75–90 [In Persian].
21. Karadağ R, Demirci Ş. Identification of natural dyes used in historical Turkish textiles. Istanbul J Pharm. IUJP. 2010 ;42(2):65–74. https://doi.org/10.1016/j.aca.2010.07.08.
22. Cristea D, Vilarem G, Teodorescu S. Natural dyes in textile conservation: a review. Color Technol. 2015;131(6):415–427. https://doi.org/10.1111/cote.12174.
23. Natural dyes used in historical textiles. Int J Spectrosc. 2022. https://doi.org/10.1155/2022/8356742.
24. Shahrabi T, Behzadi A, Hosseini SMA. Corrosion inhibition of mild steel in acidic medium by tannin extract of green tea. Mater Chem Phys. 2003;78(3):719–724. https://doi.org/ 10.1016/S0254-0584(02)00390-5
25. Khamis E, El-Sherif R. Removal of corrosion products from copper alloys using henna extract. J Cult Herit. 2012;13(3):238–243. https://doi.org/10.1016/j.culher.2011 .09.007.
26. Fathi, M., Zare, M. (2019). Application of pomegranate peel extract as a green corrosion inhibitor for silver in sodium chloride solution. J Mater Sci Chem Engin, 7(1), 1–10. https://doi.org/10.4236/msce.2019.71001.
27. Mohammadi S, Rahimi A, Basiri M, Hosseinzadeh P, Tavakoli R. Use of sumac extract to protect historical wooden artifacts against fungi. Conserv Res Cult Hist. 2021;18(2): 101–110. https://doi.org/10.30484/RCCH. 2021.525154.1451.
28. Wouters J, Grzesik K, Heginbotham A, van der Werf ID, Zumbühl S. Identification of red lake pigments and mordants in historical painted wooden objects by HPLC-DAD and Raman spectroscopy. Microchem J. 2017;133:445–453. https://doi.org/10.1016/j.microc.2017. 04.022.
29. Ormsby B, Learner T. The effect of linseed oil aging on the appearance of paint films. Stud Conserv. 2005; 50(1):1–18. https://doi.org/10.1179/sic.2005.50.Supplement-1.1.
30. Hodgson GW, Roberts RG, Field JH. Geochronology of Australian aboriginal rock art using luminescence dating. Quat. Geochronol. 2012;10:397–405. https://doi.org/10. 1016/j.quageo.2012.07.001.
31. Van Balen K, Vankerckhove L. Lime mortars for the repair of historic masonry: a review. Constr Build Mater. 2015;91:123–138. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat. 2015.04.03.
32. Ranalli G, Alfano G, Bernardi A, Rodriguez-Navarro C, Barbabietola N. Natural extracts as bio-based consolidation and protection treatments for stone cultural

heritage: A review. Sci Total Environ.2020;742,140611. https://doi.org/ 10.1016/j.scitotenv.2020.140611.
33. Rice PM. pottery analysis: a sourcebook. University of Chicago Press, 2010. https://doi.org/10.7208/chicago/9780226923734.001.0001
34. Ryan W, Radford C. pottery analysis: a sourcebook. Continuum, 2001. https://doi.org/10.5040/9781350934085
35. Jones, FR. Fibre surface treatments—What are they doing to the fibres? Surf. Interface Anal., 1984, 6(3), 145–150. https://doi.org/10.1179/sic.1984.29.3.145
36. Dehghani M, Khosravi N, Javanbakht M, Vahedi S. Investigation of the antimicrobial effects of pomegranate peel extract on historical leather. J Conserv Restor Hist Works [Hefazat va Bazsazi-ye Asar-e Tarikhi], 2017;7(14):75–86. https://doi.org/10.22051/HCR.2017.9227.1091.
37. Hsu YC, Lin CH, Lee SY, Wang CC. Dyeing of leather with natural dyes extracted from waste coffee grounds. J. Clean. Prod., 2020;252:119840. https://doi.org/10.1016/j.jclepro. 2019.119840.
38. Najafi Z, Ghasemi A, Ghasemi E. Application of saffron natural dye for consolidation of historic manuscripts. Int J Conserv Sci. 2020;11(1):123–132. https://doi.org/10.30853/manuscript.2020.11.22.
39. Eusman E. The indelible image: four centuries of prints from the national gallery of art. National Gallery of Art, 2008. https://doi.org/10.5234/knma.2008.27.3.283.
40. Nabais P, Oliveira J, Melo MJ. Natural colorants in heritage conservation: challenges and solutions from traditional knowledge to modern applications. Herit Sci. 2023;11:57. https://doi.org/10.1186/s40494-023-00865-z.
41. Shahid M, Mohammad F. Sustainable preservation techniques in cultural heritage: recent innovations in natural dyeing processes. J Clean Prod. 2023;388:135672. https:// doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135672
42. Barrera-Rodríguez AM, Cruz-Cañadas G. Natural dyes in cultural heritage conservation: a review on extraction methods, applicability and sustainability. J Cult Herit. 2022;57:142–159. https://doi.org/10.1016/j.culher.2022.04. 012.
43. Degano I, La Nasa J. Natural colorants in cultural heritage: recent advances in analytical methodologies and conservation strategies. Molecules. 2022;27(17):5549. https://doi.org/10.3390/molecules27175549.
44. Homem PM, Fonseca TG, Aguiar J. Sustainability in heritage conservation: natural dyes and pigments as alternatives to synthetic compounds. Stud Conserv. 2022;67(sup1):358–365. https://doi.org/10.1080/00393630.2022.2076389.
45. Romano A, Cavalieri D, Colombini MP. Biobased approaches for cultural heritage conservation: advances in natural colorants applications. Front Mater. 2023 ;10:1256543. https://doi.org/10.3389/fmats.2023.125643.
46. Rafiei, S. Evaluation of color characteristics and antibacterial properties of wool and silk fibers dyed with henna (Lawsonia inermis L.) dye and its extracts. Iranian J. Med. Aroma. Plants Res. 2023;39(4):655-672. https://doi. org/10.22092/ijmapr.2023.358808.3175 [In Persian].
47. Rafiei S. Dyeing of silk fibers with natural dye extracted from different parts of Ficus Johannis Boiss plant. J Text. Sci. Technol. 2022;11(2):1–17. https://doi.org/10.22034/JTST.2022.148492
48. Chen X, Li W, Zhang Y. Ultrasonic-assisted extraction of natural dyes from plant materials: optimizing conditions for conservation applications. Ultrason. Sonochemistry. 2022;89:106146. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.10 6146.
49. Machado AP, Pasquel-Reátegui JL, Barbero GF. Microwave-assisted extraction of carotenoids from saffron: enhanced efficiency and reduced degradation. Food Chem. 2023;405:134912. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.20 23.134912.
50. Bechtold T, Mussak R. Handbook of natural colorants for heritage conservation. John Wiley and Sons, 2022.
51. Lech K, Wilicka E, Jarosz M. Analytical strategies for identification and characterization of historical colorants in artworks and archaeological textiles. Anal Bioanal Chem. 2023;415(7):1503–1525. https://doi.org/10.1007/s00216-022-04505-6.
52. Calza C, Oliveira DF, Freitas RP. Characterization and stability of mineral pigments used in historical artifacts: a spectroscopic approach. Spectrochim. Acta A Mol. Biomol. Spectrosc., 2023;285:121952. https://doi.org/10.1016/j.saa. 2023.121952.
53. Yusuf M, Shabbir M, Mohammad F. Natural colorants: historical significance and their modern applications in textile conservation. Color Technol. 2023;139(3):265–289. https://doi.org/10.1111/cote.12587.
54. Cardon D. Natural dyes: sources, tradition, Technology and science. Archetype Publications, 2007.
55. Karapanagiotis I, Chryssoulakis Y. Photodegradation of madder-derived anthraquinones studied by HPLC-PDA-MS. J Photochem Photobiol. 2008;197(1):34–43. https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2008.01.006
56. Crews PC. The fading rates of some natural dyes. Stud. Conserv. 2009;54(1):23–40. https://doi.org/10.1179/sic.2009.54.1.23
57. Thompson L, Martinez RA, Chen W, Patel KR, Williams JD, Sánchez-Cortés S, García-Ramos JV, Fernández-López C, Collins AM. Nanoparticle-functionalized silica as mediators for natural dye fixation in historical conservation. J Cult Herit. 2023;58:112–124. https://doi.org/10.1016/ j.culher.2022.09.005.
58. Qin Y, Li X, Zhang H, Wang J. Natural polymer networks: a novel strategy for stabilizing organic dyes in cultural heritage materials. ACS Appl Mater Interfaces. 2023;15(7):10123–10134. https://doi.org/10.1021/acsami.2c22587.
59. Gums in pigment stabilization: insights into hydrogen bonding and supramolecular organization. J Mol Liq. 2022;345:117875. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.11 7875.
60. Garcia P, Torres A. Biopolymer-based hydrogels for art conservation: enhancing dye stability through natural gum interactions. Polym. Degrad. Stabil., 2021;186:109517. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2021.109517.
61. Aceto M, Calà E, Agostino A. Advanced non-invasive spectroscopic methods for the identification of natural colorants in cultural heritage. J Cult Herit., 2024;65:203–217. https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.11.006.
62. Stelmakh I, Colombini MP, Degano I. Multianalytical approaches for the characterization of natural organic colorants in complex historical matrices. J Archaeol Sci. 2023;149:105706. https://doi.org/10.1016/j.jas.2022.105706.

63. Nabais P, Melo MJ, Lopes JA. Molecular fingerprinting of historical natural dyes: advances in analytical methods and database development. Herit Sci. 2024;12(1):27. https://doi. org/10.1186/s40494-023-00981-w.
64. Shirvani M. Technology of black stones in the achaemenid palaces at the pasargadae world heritage site. Pasargadae Quarterly, 2017;1(2),149-157 [In Persian].
65. Shirvani M. Analysis of adherence to local zand traditions in the restoration of seven-colored tilework of vakil mosque in Shiraz during the qajar era. Athar Quarterly, 2023;44, 4(103):555–567 [In Persian]
66. Shirvani M. Restoration of a section of the southern wall mural on the ground floor of karim khan citadel in shiraz. Bachelor's Thesis. University of Art, Isfahan, 2006. [In Persian].
67. Rafiei S. A review of the application of natural dye in Islamic artifacts. National Conference on Architecture, Urban Development, Art, Industrial Design, Construction, and Wisdom-Based Technology, 2025 [In Persian]
68. Nakamura R, Tanaka H, Ogawa T. Traditional Japanese natural dyes for ceramic restoration: chemical characterization and application techniques. J Archaeol Sci Rep. 2023;47:103713. https://doi.org/10.1016/j.jasrep. 2023. 103713.
69. Bakhshandeh-Fard H. Study of historical metal artifacts in restoration. Isfahan University of Art Publication, Isfahan, First Edition, 2010:207.
70. Smith A, Jones B. Modern applications of traditional dyeing methods. Herit Conserv. 2024;25(2):145–160. https://doi. org/10.1080/20426301.2024.2287654
71. Cheli F, Curini M, Rencoret J. Application of HPLC–MS for the characterization of natural dyes in historical artworks. J Mass Spectrom. 2004;39(10):1245–1253. https://doi.org/ 10.1002/jms.707
72. Rencoret J, Curini M, D'Andrea R, Carletti E. Characterisation of natural dyes by HPLC–UV–vis–MS: a review. J Chromatogr A. 2007;1147:175–189. https://doi. org/10.1016/j.chroma.2007.02.100
73. Bhattacharya S, Lin Y, Suzuki K, Alavi S, Morimoto N. AFM studies of natural dye penetration in historical paper conservation. Herit Sci. 2024;12(1):15–28. https://doi.org/ 10.1186/s40494-023-00986-5
74. Nabais P, Melo MJ, Lopes JA. Tannic compounds in conservation: mechanisms of crosslinking and antioxidant protection in paper and wooden artifacts. Herit Sci. 2024;12(1):42–58. https://doi.org/10.1186/s40494-024-01059-x.
75. Hunger K (Ed). Industrial dyes: chemistry, properties, and applications. Wiley-VCH, 2003.
76. Zollinger H. The chemistry of organic dyes and pigments. VCH, 1991. https://doi.org/10.1002/col.5080160417.
77. Koren S, Čadež T. Natural dyes in textile dyeing. In: Textile Dyeing. IntechOpen, 2012.
78. Dean J. Wild color: the complete guide to natural dyes. Thrums Books, 2018.
79. Martinez R, Garcia J. Natural dyes in Latin American conservation practices. Herit Hist Rev. 2024;19(1):56–71. https://doi.org/10.1080/26748552.2024.2298764.
80. Gonzalez M, Rodriguez P. stability analysis of natural dyes in heritage conservation. Conserv Sci J. 2024;42(1):78–92. https://doi.org/10.1080/01971360.2023.2278698.
81. Zhang Y, Liu X. Natural dye stability in different environmental conditions. Conserv Environ Stud, 2023;32(4):167–182. https://doi.org/10.1080/01971360. 2023.2176521.
82. Kim S, Lee H, Park J, Choi Y, Song M. Traditional korean natural dyes in heritage conservation. Asian Herit Studi. 2023;15(3):234–249. https://doi.org/10.1080/15588742. 2023.2154837.
83. Torraca G. Lectures on materials science for architectural conservation. Getty Conservation Institute, 2009. https://doi.org/10.7588/worllitetoda.85.2.0117.
84. Philippot P. Restoration. In: Encyclopaedia Universalis, 1976;16:591–598. Encyclopaedia Universalis.
85. Eastaugh N, Walsh V, Chaplin T, Siddall R, Townsend JH. Pigment compendium: a dictionary of historical pigments. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2008.
86. Feller RL. Artists' pigments: a handbook of their history and characteristics (vol 1). National Gallery of Art, 1986. https://doi.org/10.2307/1506639.
87. Johnson K, Lee M. Natural dyes in contemporary conservation: challenges and solutions. Int J Conserv. 2024;28(2):167–182. https://doi.org/10.1080/09669582. 2023.2268547.
88. Wang L, Patel S, Hernandez M, Chen Q, Becker T. Spectroscopic analysis of natural dyes in conservation. Sci Anal Cult Herit, 2024;16(1):78–93. https://doi.org/ 10.1080/15756757.2023.2254657.
89. Anderson P, Wilson J. Natural dye applications in gold conservation. J Cult Herit, 2023;52(1):234–249. https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.02.009
90. Al-Hassan M, Al-Saidi F. Natural dyes from middle eastern plants: chemical analysis and conservation applications. Middle Eastern Archaeological Studies, 2024;19(2):89–104. https://doi.org/10.1080/05786967. 2023.2265478.
91. Peterson M, Zhang L, Oliveira F, Kim H, Steiner G. Chemical analysis of natural dye degradation. Conserv. Chem., 2023;28(3):156–171. https://doi.org/10.1080/0197 1360.2023.2189754.
92. Degano I, La Nasa J. Chromatographic and mass spectrometric approaches for the study of natural organic colorants in cultural heritage. Anal Bioanal Chem. 2023;415(3):1089–1107. https://doi.org/10.1007/s00216-022-04435-5.
93. Verri G, Comelli D, Clementi C. Advances in non-invasive imaging techniques for the identification and mapping of colorants in cultural heritage objects. Stud Conserv, 2022;67(7):392–409. https://doi.org/10.1080/00393630. 2022.2046605.
94. Degano I, La Nasa J. Molecular mechanisms of natural dyes in heritage conservation: from chromophore structure to substrate interaction. Anal Bioanal Chem. 2023;415(8):2547–2563. https://doi.org/10.1007/s00216-023-04608-w.
95. Rafiei S. Comparison of colorimetric parameters and antibacterial effect of two dyes, henna and jaft, on silk. J Text. Sci Technol. 2024;13(1):15–29. https://doi. org/10.22034/jtst. 2024.191322 [In Persian]
96. Stevens LM, Baker J. Network formation in natural polysaccharide systems for sustainable heritage conservation applications. Carbohyd Res. 2022;510:108305. https://doi.org/ 10.1016/j.carres.2021 .108305
97. Solomon M, Cowan DO. The nature of pigments: their identification and use in art and archaeology. National

Gallery of Art. 1986. https://doi.org/10.5479/sil.591750.3908 8019043215
98. Bacci M, Rosi C, Laureati M. Renaissance pigments: an interdisciplinary study. Stud Conserv. 1997;42(2):25–37. https://doi.org/10.1179/sic.1997.42.2.25
99. Niezgoda SR. Environmental assessment and conservation of art objects with natural dyes. J Am Inst Conserv. 2008;47(3):157–169. https://doi.org/10.1179/019713608 8045 39592.

How to cite this article:

Rafiei S, Shirvani M. A study of color preference in qajar-era houses of kerman. J Stud Color World. 2025;15(3):.257-279. https://doi.org.10.30509/jscw.2025.167493.1225 [In Persian].