

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

سعیده رفیعی، مریم شیروانی

مقاله مروری

JSCW-2503-1225

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳-۱۲-۲۰

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۴-۰۱-۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴-۰۱-۳۱

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

رفیعی. س، شیروانی. م، "مروری جامع بر کاربرد انواع رنگزاهای طبیعی در مرمت و حفاظت آثار باستانی"، نشریه علمی مطالعات در دنیای رنگ JSCW-2409-1207، 1404. این فایل PDF مقاله ویرایش نشده است که برای چاپ پذیرفته شده است. مکت مقاله توسط دفتر نشریه مطالعات در دنیای رنگ تهیه شده و قبل از چاپ ویرایش نهایی به نویسنده مسئول مقاله ارسال می شود.

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

سعیده رفیعی^{۱*}، مریم شیروانی^۲

۱- استادیار، دانشکده هنرهای صنعتی، گروه فرش، دانشگاه هنر شیراز، شیراز، ایران، کدپستی: ۶۸۵۷۷۶۷۴۱۷.

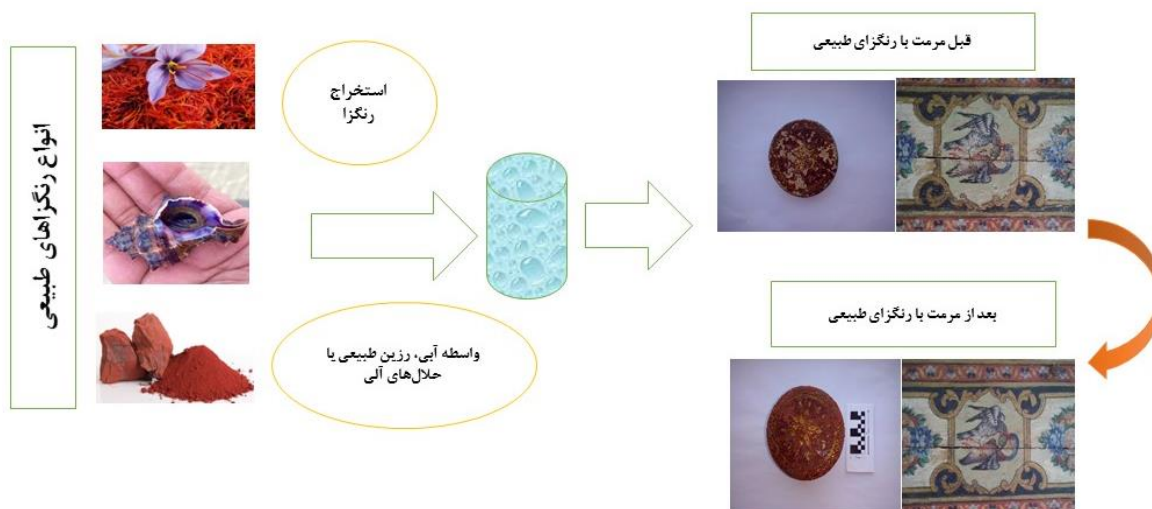
۲- استادیار، دانشکده معماری و مرمت، گروه مرمت، دانشگاه هنر شیراز، شیراز، ایران، کدپستی: ۶۸۵۷۷۶۷۴۱۷.

* s_rafieei@shirazartu.ac.ir

چکیده

در راستای حفظ اصالت و ارائه راهکارهای نوین در حفاظت از میراث فرهنگی، این پژوهش به بررسی کاربرد رنگزاهای طبیعی در مرمت آثار باستانی پرداخته و تحولات اخیر در روش‌های رنگ‌رزی را از منظر علمی و فنی مورد ارزیابی قرار می‌دهد. پژوهش تأکید می‌کند که استفاده از رنگزاهای طبیعی، به دلیل سازگاری شیمیایی و فیزیکی با ساختار اصلی آثار، علاوه بر احیای ارزش‌های بصری و عاطفی آثار، امکان حفظ پایداری و برگشت‌پذیری در مطالب مرمتی را نیز فراهم می‌آورد. از منابع گیاهی، جانوری و معدنی استخراج شده، رنگزاهایی همچون روناس، نیل، زعفران، اخرا و دیگر ترکیبات سنتی، نقش اساسی در بازسازی و تثبیت پوشش‌های رنگی آثار دیواری، چوبی، سنگی، سفالینه‌ها و منسوجات ایفا نموده‌اند. در این پژوهش به بررسی چالش‌های موجود مانند محدودیت دسترسی به رنگزاهای باکیفیت، کاهش دانش فنی سنتی و نیاز به تکنولوژی‌های نوین برای شناسایی و تثبیت صحیح رنگ‌ها پرداخته شده است. با بهره‌گیری از روش‌های پیشرفته آنالیز مانند طیف‌سنجی رامان، FTIR و HPLC-MS، امکان شناسایی دقیق ترکیبات رنگزا و ارزیابی عملکرد آنها در برابر تغییرات محیطی نظیر دما، رطوبت و نور فراهم شده است. همچنین، استفاده از بست‌های طبیعی مانند صمغ‌های گیاهی و جانوری در بهبود فرآیند تثبیت رنگ، نقش کلیدی در افزایش پایداری رنگ و حفظ تعامل مرغوب بین رنگزا و ساختار اصلی اثر ایفا می‌کند. تحول در روش‌های رنگ‌رزی، از فنون سنتی به رویکردهای نوین شامل استفاده از نانومواد و تکنیک‌های لایه‌گذاری تدریجی منجر به بهبود هماهنگی بصری و ایجاد پوشش‌های مقاوم در برابر تغییرات محیطی گردیده است. این مطالعه اهمیت به‌کارگیری دانش سنتی به همراه فناوری‌های پیشرفته را به عنوان یک ضرورت اخلاقی و علمی برای نسل‌های آینده مطرح می‌نماید، به گونه‌ای که روش‌های نوین رنگ‌رزی می‌توانند در مرمت دقیق آثار چوبی، سنگی، سفالینه‌ای و منسوجات تاریخی، به حفظ اصالت و افزایش مقاومت فیزیکی و شیمیایی آن آثار کمک کنند.

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



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

Saeedeh Rafiei^{1*}, Maryam Shirvani²

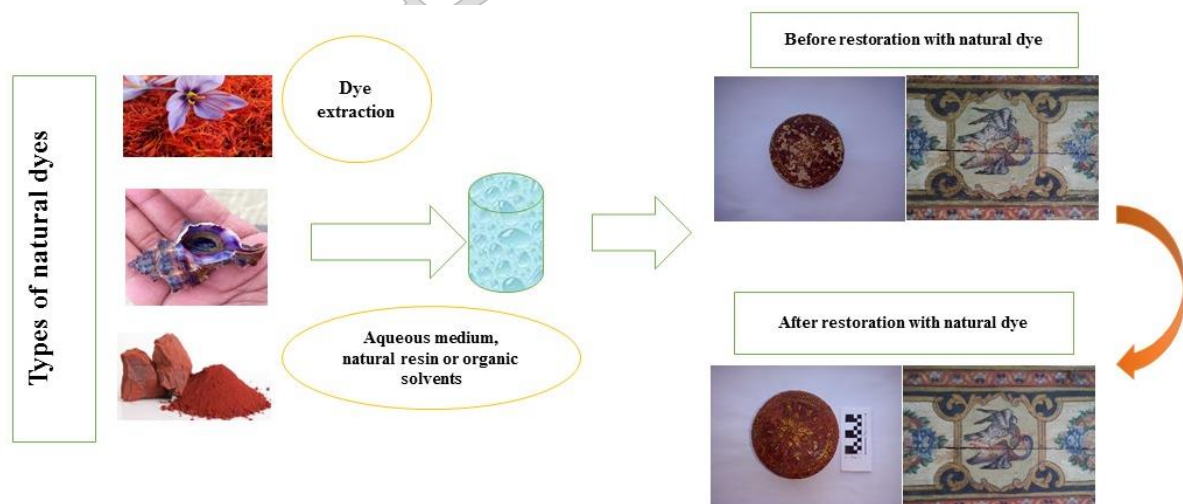
Department of Urban Planning and Design, Faculty of Art and Architecture, Shiraz University, P. O. Code: 7188637911, Shiraz, Iran

*s_rafiei@shirazartu.ac.ir

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.

Keywords: Natural colorants, Conservation, Preservation, Colorfastness, Cultural heritage



۱. مقدمه

رنگ ها به واسطه تاثیرات روحی و روانی که بر انسان می گذارند، همواره مورد توجه انسان بوده است. کاربرد مواد رنگزای طبیعی از دیرباز نقش چشمگیر و تعیین کننده ای در زندگی بشر داشته است، انسانها رنگها را از طبیعت می گرفتند و سعی در تغییر ظاهر اشیاء به وسیله رنگریزی داشتند. بشر در ابتدا برای رنگریزی از رنگزاهای طبیعی محیط زندگی خود استفاده می کرد، به مرور زمان و با پیشرفت جوامع بشری، شیوه های 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 رنگ های 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 می شود. رنگ از جمله مؤلفه های مهمی است که به وسیله 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 جنبه های رنگ میباشد. به همین دلیل همنشینی رنگها چه در محیط کار و چه در خانه، بر احساسات افراد تأثیر می گذارد. رنگ میتواند فضای خاصی را ایجاد نماید، روحیه انسان را متحول کند و میدانی مناسب برای بروز خالقیت انسان باشد. این در حالیتیست 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 فرآیند 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 می گرفته اند. 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 کرده اند که امروزه بخش مهمی از دانش مرمت را تشکیل می دهند (۵).

۱.۱. بیان مسئله

حفاظت و مرمت آثار باستانی، به عنوان میراثی گرانبها از تمدنهای گذشته، مستلزم رویکردی علمی و مسئولانه در انتخاب و به کارگیری 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 می تواند منجر به تسریع فرآیندهای 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 می کنند. با این حال، علی رغم اهمیت و کاربرد گسترده رنگزاهای طبیعی در طول تاریخ، دانش و مهارت های مربوط به شناسایی، استخراج، فرآوری و به کارگیری 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 می باشد. علاوه بر این، استفاده غیراصولی از رنگزاهای طبیعی، به دلیل عدم شناخت کافی از ویژگیهای آنها، می تواند منجر به بروز مشکلاتی نظیر تغییر رنگ، کمرنگ شدن، 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 به کارگیری آنها در مرمت آثار باستانی، از اهمیت بسزایی برخوردار است.

۱.۲. 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 رنگزاهای طبیعی، 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 بصری 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.

۱.۳. 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 سیستماتیک 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 مکانیسم‌های 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 رنگزاهای معرف 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 رنگ‌های 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 فرآیند 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٪ افزایش دهد. همچنین، در زمینه استفاده از رنگزاهای

مقاله پذیرفته شده

طبیعی در مرمت نقاشی‌های دیواری، روش‌های جدیدی برای افزایش نفوذپذیری و چسبندگی رنگزاهای معرفی شده است (۱۴). با استفاده از تکنیک‌های میکروسکوپی پیشرفته، مکانیسم‌های 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 مدون شده 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	(۲۱)
Indigo	Linen fabrics	2015	(22)
Woad	Wool fabrics	2022	(23)
Metal artifacts			
Tannins	Iron and steel	2003	(24)
Lawson	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)

۱.۴. نوآوری پژوهش

نوآوری‌ها و ارزش علمی پژوهش حاضر در پر کردن خلأهای 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 سیستماتیک اطلاعات در قالب جدولی جامع که انواع رنگزاهای، 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٪ پایداری رنگ با پیش‌آماده سازی سطح چوب و افزایش ۷۰٪ 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 (۴۱ و ۴۲).

خلأ مهم دیگری که این پژوهش پر کرده، تلفیق دانش سنتی با فناوری‌های نوین در حوزه رنگزاهای طبیعی است. این تلفیق شامل بکارگیری روش‌هایی نظیر استفاده از نانوذرات برای تثبیت رنگزاهای، تکنیک‌های طیف‌سنجی پیشرفته مانند پراش پرتوی ایکس^۱، فلورانس پرتو ایکس^۲، طیف‌سنجی جرمی- گاز گروماتوگراف^۳، کروماتوگرافی مایع با طیف‌سنجی جرمی^۴، میکروسکوپ نیرو- روبشی^۵ و طیف‌سنجی رامان در شناسایی و بررسی رفتار رنگزاهای طبیعی و همچنین تحلیل مکانیسم‌های تعامل این رنگزاهای با مواد اصلی آثار باستانی در سطح مولکولی و ساختاری است. بررسی پیوندهای شیمیایی بین رنگزاهای ساختار سلولزی چوب، و نحوه تشکیل پیوندهای هیدروژنی و واندروالسی بین رنگزاهای و سطوح سنگی و سفالی، از نوآوری‌های بارز این پژوهش محسوب می‌شود که درک عمیق‌تری از علت موفقیت رنگزاهای طبیعی در مرمت ارائه می‌دهد (۴۳، ۴۴).

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 رنگزاهای در برابر نور، و زمان‌بر بودن فرآیند 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 (۴۵، ۴۶).

۲. 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 کروموفور گفته می‌شود، قادر به جذب و بازتاب طول موج‌های مشخصی از نور هستند. کروموفورها معمولاً شامل پیوندهای دوگانه مزدوج، حلقه‌های آروماتیک و گروه‌های عاملی مختلف هستند که مسئول ایجاد رنگ‌های متنوع می‌باشند. برخی از مهمترین کروموفورهای موجود در رنگزاهای طبیعی عبارتند از آنتراکینون‌ها، فلاونوئیدها، ایندیگوئیدها، کاروتنوئیدها و تانن‌ها (۴۷). خصوصیات برجسته این رنگزاهای 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

^۱. XRD

^۲. XRF

^۳. GC-MS

^۴. LC-MS/MS

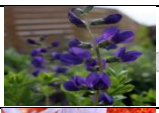
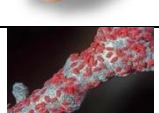
^۵. AFM

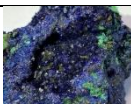
مقاله پذیرفته شده

کرده است که این رنگزها در مقایسه با رنگهای مصنوعی، تغییرات رنگی کمتری در طول زمان نشان می‌دهند. این ویژگی به دلیل توانایی آنها در مقاومت در برابر اکسیداسیون و تجزیه نوری است. علاوه بر این، رنگزهای طبیعی اغلب دارای خواص آنتی‌اکسیدانی و ضد میکروبی هستند که به حفظ و دوام بیشتر آثار رنگ شده کمک می‌کند. طبقه بندی رنگزهای طبیعی می‌تواند بر اساس منبع، ساختار شیمیایی، یا روش کاربرد آنها صورت گیرد. در جدول ۲ به بررسی دقیق تر سه دسته اصلی رنگزها بر اساس منبع و به تفکیک نوع کروموفور موجود می‌پردازیم:

جدول ۲: بررسی سه دسته اصلی رنگزها بر اساس منبع و به تفکیک نوع کروموفور موجود در آنها

Table 2: Examination of the three main categories of dyes based on source and type of chromophore

Classification of natural dyes		Samples	Chromophore	Figures	References
	Plant-based dyes	Madder roots (Alizarin)	Anthraquinone		(41-43)
		Indigo	Indigoid		
		Saffron (Crocine)	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			
Mine-ral-based	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	

۳. روش‌های استخراج و آماده‌سازی رنگزاهای

آماده‌سازی رنگزاهای طبیعی جهت استفاده در مرمت آثار تاریخی، یک فرآیند 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 رنگدانه و ماتریس گیاهی یا جانوری آن به کار گرفته می‌شود (41,47).

استخراج و آماده‌سازی رنگزاهای طبیعی برای کاربرد در مرمت آثار باستانی، فرآیندی 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.

۳.۱ روش‌های سنتی استخراج

۳.۱.۱. **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 رنگزاهای، مزیت قابل توجهی دارد. مطالعات نابایاس و همکاران (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 (۴۴، ۴۸).

۳.۱.۲. **استخراج با حلال‌های آلی:** برای رنگزاهای کمتر قطبی مورد استفاده قرار می‌گیرد. حلال‌های متداول شامل اتانول، متانول، استون و اتیل استات هستند. طبق تحقیقات باررا رودریگوز و کراز کاناداس^۱، استفاده از مخلوط آب-الکل (به نسبت ۷۰:۳۰) در استخراج آنتوسیانین‌ها از پوست انار و تانن‌ها از سماق، راندمان استخراج را تا ۴۰٪ افزایش می‌دهد. (۴۳)

۳.۲ روش‌های نوین استخراج

۳.۲.۱. **استخراج به کمک فراصوت:** ایجاد حفره‌های میکروسکوپی در حلال و فروپاشی آن‌ها، باعث نفوذ بهتر حلال به بافت گیاهی یا حیوانی و آزادسازی مؤثرتر رنگزاهای می‌شود. طبق مطالعات چن و همکاران (۲۰۲۲)، این روش زمان استخراج را تا ۷۵٪ کاهش داده و راندمان را تا ۳۰٪ افزایش می‌دهد. (۴۹)

^۱.Aqueous Extraction

^۲. Barrera-Rodríguez & Cruz-Cañadas

^۳. Ultrasonic-Assisted Extraction

۳.۲.۲. استخراج به کمک مایکروویو^۱ با گرمایش سریع و هدفمند مولکول‌های قطبی، فرآیند استخراج را تسریع می‌کند. این روش به‌ویژه برای رنگزهای حساس به حرارت طولانی‌مدت مفید است. پژوهش‌های ماکادو و همکاران (۲۰۲۳) نشان می‌دهد استخراج به کمک مایکروویو، میزان تخریب ساختار مولکولی کاروتنوئیدها در زعفران را تا ۶۰٪ نسبت به روش‌های سنتی کاهش می‌دهد (۵۰).

۳.۲.۳. فناوری سیال فوق بحرانی^۲ به‌ویژه با استفاده از CO₂ فوق بحرانی، روشی است که اجازه می‌دهد رنگزها بدون باقی ماندن حلال و بدون آسیب حرارتی استخراج شوند. هومم و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کرده‌اند که این روش برای استخراج ترکیبات آنتراکینونی از روناس با راندمان بالا مناسب است (۴۵).

۳.۳. فرآیندهای پس از استخراج

پس از استخراج اولیه، فیلتراسیون ساده با کاغذ صافی یا میکروفیلترها برای حذف ناخالصی‌ها انجام می‌شود. سپس روش‌های پیشرفته‌تر مانند کروماتوگرافی ستونی یا کروماتوگرافی لایه نازک برای جداسازی بیشتر اجزای رنگی به کار می‌رود. در موارد نیازمند خلوص بالاتر، از کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا^۳ استفاده می‌شود که امکان جداسازی دقیق ترکیبات رنگزا را با خلوص بیش از ۹۸٪ فراهم می‌کند (۴۲).

تغلیظ عصاره رنگی معمولاً با روش‌های تبخیر در خلأ در دمای پایین یا لیوفیلیزاسیون (خشک کردن انجمادی) انجام می‌شود. مطالعات بچتولد^۴ و موساک^۵ نشان می‌دهد که رنگزهای خشک شده به روش انجمادی، پایداری بیشتری نسبت به نمونه‌های خشک شده با روش‌های حرارتی دارند (۵۱).

برای رنگزهای گیاهی مانند روناس (ریشه)، نیل (برگ) و زعفران (کلاله)، ابتدا خردکردن و آسیاب کردن ماده گیاهی و سپس استخراج با روش‌های مناسب انجام می‌شود. برای نیل، فرآیند تخمیر قلیایی برای تبدیل ایندیکان به ایندیگو ضروری است (۴۳). برای رنگزهای حیوانی مانند قرمز دانه (حشره کوشنیل) و لاک (ترشحات حشره لاکا)، فرآیند استخراج شامل خشک کردن، آسیاب کردن و سپس استخراج با محلول‌های قلیایی ضعیف است. طبق مطالعات لچ و همکاران (۲۰۲۳)، استخراج در محلول آمونیاک رقیق (۲-۵٪)، راندمان بالاتری برای رنگزهای کارمینیک اسید دارد (۵۲).

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

پس از استخراج، فرآیند 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 فیلتراسیون برای جداسازی ذرات معلق و روش‌های مبتنی بر تغییر فاز مانند تبخیر در خلأ 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 رنگزهای 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، چرا که برخی دندانه‌ها می‌توانند اثرات مخربی بر طول عمر و پایداری مواد آلی اثر تاریخی داشته باشند (۴۶).

^۱. Microwave-Assisted Extraction

^۲. Supercritical Fluid Extraction

^۳. HPLC

^۴. Bechtold

^۵. Mussak

در نهایت، فرمولاسیون رنگ مرمتی با انتخاب دقیق واسطه صورت می پذیرد. واسطه های آبی، رزین های طبیعی و یا حلال های آلی بر اساس نوع رنگزا، تکنیک اصلی اثر و سطح مرمت شده انتخاب می شوند. کاربرد رنگ بر سطح اثر با روش های ظریف و کنترل شده ای همچون قلم گذاری دقیق، اسپری لایه های نازک و یا کمپرس موضعی انجام می گیرد. پیش از کاربرد نهایی، انجام آزمایش های جامع، شامل تطبیق رنگ با استفاده از طیف سنجی، ارزیابی پایداری نوری و شستشو بر اساس استانداردهای معتبر^۱ و آزمون های سازگاری مواد، برای اطمینان از انطباق رنگ مرمتی با رنگ اصلی اثر و عدم آسیب رسانی به ساختار آن، الزامی است. مستندسازی دقیق و جامع مراحل آماده سازی و کاربرد رنگ، از جمله مشخصات دقیق مواد، روش ها و نتایج آزمایش ها، به عنوان بخشی جدایی ناپذیر از فرآیند مرمت، برای تضمین تکرارپذیری، قابلیت ردیابی و حفظ دانش فنی برای نسل های آینده مرمتگران ضروری است.

۴. استراتژی های تثبیت رنگزاهای طبیعی در مرمت آثار تاریخی

تثبیت رنگزاهای طبیعی در فرآیند مرمت آثار تاریخی از طریق سه مکانیسم اصلی انجام می پذیرد. اولین مکانیسم، استفاده از دندانهای طبیعی است که شامل نمک های فلزی مانند سولفات های آهن، آلومینیوم، مس و قلع می باشد. این ترکیبات با تشکیل کمپلکس های کی لیت با مولکول های رنگزا، پیوندهای کوئوردیناسیون پایداری ایجاد می کنند. یون های فلزی در این کمپلکس ها به عنوان پل های ارتباطی بین گروه های عاملی رنگزا (مانند گروه های هیدروکسیل و کربوکسیل) و سوبسترا عمل می کنند که منجر به افزایش قدرت پیوند و پایداری رنگ می شود.

تثبیت رنگزاها با استفاده از دندانهای نقش کلیدی در افزایش پایداری و دوام رنگ دارد. طبق تحقیقات دگانو و لاناسا^۲ دندانهای معدنی مانند نمک های آلومینیوم (زاج سفید)، آهن، مس و قلع طیف رنگی متفاوتی را با یک رنگزای یکسان ایجاد می کنند. دندانهای طبیعی مانند تانن ها (استخراج شده از پوست انار، گردو یا بلوط) نیز گزینه های سازگار با محیط زیست هستند (۴۴).

روش های دنداندهی شامل پیش دنداندهی (اعمال دنداندهی قبل از رنگزایی)، هم دنداندهی (همزمان با رنگزایی) و پس دنداندهی (پس از رنگزایی) هستند (۴۷). پژوهش های یوسف و همکاران (۲۰۲۳) نشان می دهد روش پیش دنداندهی برای منسوجات تاریخی ظریف مناسب تر است، در حالی که روش پس دنداندهی برای سطوح محکم تر مانند چوب و سفال، ثبات رنگی بیشتری ایجاد می کند (۵۴). مکانیسم دوم، تنظیم pH محیط از طریق افزودن مواد قلیایی یا اسیدی است. در محیط قلیایی (مانند استفاده از کربنات های سدیم و پتاسیم)، گروه های عاملی رنگزا یونیزه شده و قابلیت واکنش پذیری آنها افزایش می یابد. در محیط اسیدی (مانند استفاده از اسید تانیک یا اسید اگزالیک)، ساختار الکترونی کروموفورها دستخوش تغییر شده و امکان تشکیل پیوندهای کووالانسی قوی تر فراهم می شود. این تغییرات pH همچنین می تواند باعث تغییر در طیف جذبی رنگزا و در نتیجه تنوع رنگی شود. اگرچه، مکانیسم 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 گزینه ای مناسب با حداقل آسیب در مرمت آثار تاریخی باشد.

بر اساس مطالعات کاردون (2007) و ژانک و همکاران (۲۰۰۸)، استفاده کنترل شده و مناسب از مکانیسم pH می تواند نیمه عمری بین ۶۰ تا ۱۲۰ سال برای رنگزاهای تثبیت شده ایجاد کند (۵۵، ۵۶). برای دستیابی به کمترین آسیب، تنظیم متعادل و دقیق pH در محدوده ۵/۵ تا ۸ توصیه می شود؛ این بازه به طور قابل توجهی از حالت های قلیایی یا اسیدی شدید که می توانند باعث تخریب ساختاری شوند، فاصله دارد. پژوهش های کروو (2009) تأیید می کند که با استفاده از بافرهای طبیعی مانند تانین های گیاهی و کربوکسی متیل سلولز با ظرفیت بافری مناسب، می توان تغییرات pH را کنترل کرد و از نوسانات شدید که منجر به آسیب می شود، جلوگیری نمود (۵۷). در مورد منسوجات تاریخی، استفاده از pH در محدوده ۶ تا ۷/۵ بهترین نتیجه را با کمترین

۱. Medium

۲. ISO

۳. Mordants

۴. Degano & La Nasa

آسیب به ساختار پروتئینی و سلولزی الیاف ارائه می‌دهد. آنالیزهای میکروسکوپی نیرو-رویشی نشان داده‌اند که در این محدوده، ساختار فیزیکی الیاف حفظ شده و نفوذ رنگزا به صورت یکنواخت و کنترل شده انجام می‌شود. در مورد آثار فلزی، استفاده از مکانیسم pH باید با احتیاط بیشتری همراه باشد؛ مطالعات طیف‌سنجی تبدیل مادون قرمز فوریه^۱ 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 همکاران (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 کنترل شده pH، امکان واکنش‌پذیری مطلوب را بدون آسیب به کل ساختار اثر فراهم می‌کنند (۵۵-۵۸).

مکانیسم سوم، استفاده از صمغ‌های طبیعی مانند صمغ عربی، کتیرا و صمغ زرد^۲ 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 هیدروفوبیک، ساختار پایداری را ایجاد می‌کنند. این ساختار علاوه بر تثبیت رنگ، لایه محافظی در برابر عوامل محیطی مانند رطوبت، نور و اکسیداسیون ایجاد می‌کند و همچنین خواص رئولوژیکی مناسبی برای اعمال رنگ فراهم می‌سازد (۵۹-۶۱).

۵. روش‌های شناسایی رنگزاهای طبیعی در مرمت آثار باستانی

شناسایی دقیق رنگزاهای طبیعی در آثار تاریخی، گامی حیاتی در فرآیند 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. تکنیک‌های طیف‌سنجی غیرتخریبی مانند طیف‌سنجی رامان، فلورسانس اشعه ایکس و تصویربرداری فراطیفی^۳ امکان آنالیز ساختاری رنگزاها را بدون آسیب به اثر تاریخی فراهم می‌آورند. تحقیقات اخیر دگانو و لاناسا (۲۰۲۳) نشان می‌دهد که طیف‌سنجی رامان با تحریک لیزری در طول موج 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٪ 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 Aceto و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از این روش موفق به شناسایی رنگزاهای کوچینیل، لاجورد و زعفران در نسخ خطی قرون وسطی با حداقل همپوشانی طیفی شده‌اند (۶۲).

در مواردی که روش‌های غیرتخریبی کافی نباشند، تکنیک‌های میکروتخریبی با استفاده از نمونه‌های بسیار کوچک (کمتر از ۱۰۰ میکروگرم) به کار گرفته می‌شوند. کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا همراه با طیف‌سنجی جرمی^۴ به عنوان قدرتمندترین روش در این زمینه شناخته شده است. پژوهش‌های استلماخ و همکاران (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٪ تعیین نماید (۶۳). همچنین، طیف‌سنجی مادون قرمز 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^۵ برای شناسایی رنگزاهای بسیار پایدار و واکس‌ها توسعه یافته‌اند که مطابق پژوهش‌های نابایس و همکاران (۲۰۲۴)، حساسیت این روش‌ها تا

^۱. FTIR

^۲. صمغ زرد یا صمغ فارسی، صمغ تراوش شده از درخت بادام کوهی با نام علمی Amygdalus scoparia می‌باشد.

^۳. Hyperspectral imaging

^۴. HPLC-MS

^۵. Py-GC-MS

حد تشخیص نانوگرم بر گرم نمونه افزایش یافته است، که امکان تحلیل دقیق تر آثار دارای لایه های رنگی نازک یا آسیب دیده را فراهم می سازد. هر یک از روش های فوق مزایا و محدودیت های خاص خود را دارند. انتخاب روش مناسب برای شناسایی رنگزها باید بر اساس عواملی چون ارزش تاریخی اثر، امکان نمونه برداری، حساسیت مورد نیاز، نوع اطلاعات مورد نظر و امکانات در دسترس صورت گیرد (۶۴).

رویکرد جامع در شناسایی رنگزهای طبیعی، استفاده ترکیبی از چند روش تحلیلی است. طبق مطالعات دگانو و لاناسا (2023)، ترکیب روش های غیرتخریبی مانند طیف سنجی رامان و تصویربرداری فراطیفی با روش های میکروتخریبی مانند کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا همراه با طیف سنجی جرمی، دقت شناسایی رنگزها را تا ۹۷٪ افزایش می دهد و امکان تمایز بین رنگزهای مشابه با منشأ متفاوت را فراهم می سازد (۴۳).

۶. مکانیسم های عملکرد رنگزهای طبیعی در مرمت آثار باستانی

رنگزهای طبیعی در حفاظت و مرمت آثار باستانی، عملکردی فراتر از صرفاً ایجاد رنگ دارند و از طریق مکانیسم های پیچیده ای با مواد پایه تعامل می کنند. بر اساس مطالعات اخیر، مکانیسم های اصلی عملکرد این رنگزها شامل تعامل بیوشیمیایی با سوبسترا، تشکیل پیوندهای کوئوردیناسیونی با فلزات، و خواص آنتی اکسیدانی است. پژوهش های دگانو و لاناسا (۲۰۲۳) نشان می دهد که روموفورهای طبیعی مانند آنتوسیانین ها، کاروتنوئیدها و آنتراکینون ها با تشکیل پیوندهای هیدروژنی و کمپلکس های کی لیتی، قادر به ایجاد پیوندهایی با استحکام مولکولی بالا (۲۲-۴۵ کیلوژول بر مول) با گروه های عاملی موجود در سطوح تاریخی هستند. این مکانیسم به ویژه در مرمت منسوجات تاریخی مشهود است، جایی که فیبرهای سلولزی و پروتئینی، پیوندهای بین مولکولی قوی با آنتراکینون های موجود در روناس برقرار می کنند. همچنین طبق تحقیقات نابباس و همکاران (۲۰۲۴)، گروه های فنولی موجود در تانن های گیاهی توانایی منحصربه فردی در محافظت از آثار چوبی و کاغذی از طریق ایجاد پیوند عرضی با پلی ساکاریدها داشته و مقاومت مکانیکی و بیولوژیکی آن ها را تا ۳۵٪ افزایش می دهند (۴۳، ۶۴).

پدیده دیگری که اخیراً توسط رومانو و همکاران (۲۰۲۳) مورد توجه قرار گرفته، "حفاظت توأمان" است، جایی که رنگزهای طبیعی علاوه بر تأمین رنگ، نقش های حفاظتی چندگانه ایفا می کنند. به عنوان مثال، مولکول های کورکومین موجود در زردچوبه با مکانیسم اهدای هیدروژن و رزونانس الکترونی، همزمان خاصیت آنتی اکسیدانی قوی (با ظرفیت جذب رادیکال آزاد تا ۹۲٪) و ضد میکروبی نشان می دهند که در حفاظت از آثار آسیب پذیر کاربرد دارد (۴۶). مطالعات هومم و همکاران (۲۰۲۲) همچنین نشان داده رنگزهای فلاونوئیدی طبیعی مانند کوئرستین و کامفرول، با قابلیت جذب اشعه UV (در محدوده ۲۸۰-۴۰۰ نانومتر)، سپری محافظتی در برابر فرسودگی نوری ایجاد می کنند که طول عمر مواد حساس به نور را تا سه برابر افزایش می دهد. در آثار فلزی، مکانیسم دیگری به نام "بازدارندگی خوردگی سبز" توسط تانن ها و دیگر ترکیبات پلی فنولی عمل می کند که با تشکیل لایه های محافظ نانومقیاس (۳۰-۵۰ نانومتر) روی سطوح فلزی، از خوردگی الکتروشیمیایی جلوگیری کرده و در مقایسه با بازدارنده های سنتزی، سمیت کمتری دارند (۴۵).

۷. کاربردهای رنگزهای طبیعی در مرمت

۷.۱. مرمت نقاشی های دیواری

نقاشی های دیواری به عنوان یکی از مهم ترین جلوه های هنر تاریخی، نیازمند رویکردهای ویژه در مرمت و حفاظت هستند. استفاده از رنگزهای طبیعی در مرمت این آثار، به دلیل سازگاری با تکنیک های سنتی و مواد اصلی به کار رفته در آنها، از اهمیت ویژه ای برخوردار است. مطالعات باستان شناسی و آنالیزهای فیزیکی-شیمیایی نشان می دهد که اکثر نقاشی های دیواری تاریخی

با استفاده از رنگدانه‌های معدنی و رنگزاهای طبیعی اجرا شده‌اند (8). این موضوع اهمیت استفاده از مواد مشابه در فرآیند مرمت را دوچندان می‌کند.

در فرآیند 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 (5). همچنین، تحقیقات نشان داده است که ترکیب رنگزاهای طبیعی با بست‌های مناسب مانند صمغ عربی، سریشم حیوانی و کربوکسی متیل سلولز^۱ می‌تواند پایداری رنگ را تا حد قابل توجهی افزایش دهد (6S). آزمایش‌های تسریع‌شده فرسودگی نشان می‌دهد که رنگزاهای طبیعی تثبیت شده با این بست‌ها، مقاومت بیشتری در برابر تغییرات محیطی از خود نشان می‌دهند.

رنگزاهای طبیعی در مرمت نقاشی‌های دیواری عمدتاً در سه حوزه کاربرد دارند: رتوش‌های موضعی، یکسان‌سازی رنگی و بازسازی بخش‌های از دست رفته. مطالعات میدانی نشان می‌دهد که استفاده از رنگزاهای گیاهی مانند روناس^۲، نیل^۳ و زعفران^۴ در ترکیب با رنگدانه‌های معدنی طبیعی، نتایج قابل قبولی در رتوش‌های موضعی ارائه می‌دهد (52).

همچنین، تحقیقات نشان داده است که این رنگزاهای قابلیت برگشت‌پذیری مناسبی داشته و در صورت نیاز، امکان حذف آنها بدون آسیب به لایه‌های زیرین وجود دارد (44). 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 ریتیمیک در حفظ اصالت اثر به کار روند. علاوه بر این، به‌کارگیری این رنگزاهای 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 بصری و فنی می‌شود (15).

یکی از چالش‌های اصلی در استفاده از رنگزاهای طبیعی، کنترل شدت و درخشندگی رنگ است. مطالعات طیف‌سنجی نشان می‌دهد که غلظت رنگزاهای نوع بست و روش اعمال، تأثیر مستقیمی بر خصوصیات نوری رنگ نهایی دارند. برای حل این مشکل، تکنیک‌های نوینی مانند لایه‌گذاری تدریجی و استفاده از مواد افزودنی طبیعی برای کنترل شدت رنگ توسعه یافته‌اند. آزمایش‌های کلرسنجی و اسپکتروفتومتری نشان می‌دهد که این روش‌ها می‌توانند تطابق رنگی مناسبی با بخش‌های اصلی نقاشی ایجاد کنند (52).

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 رنگزاهای تأثیر بگذارند. به همین دلیل، استفاده از سیستم‌های پایش هوشمند و تنظیم شرایط محیطی برای حفظ پایداری رنگزاهای طبیعی توصیه می‌شود (57).

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، تکنیک‌های اجرایی، و آسیب‌شناسی اثر است. هدف اصلی در این روش، یکپارچه‌سازی بصری سطوح آسیب‌دیده با حفظ 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

^۱. CMC

^۲. Rubia tinctorum

^۳. Indigofera tinctoria

^۴. Crocus sativus

و خراش‌های عمیق‌تر استفاده می‌شوند. اخرا 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^۲ یا نیل^۳ استفاده کرد، اما با احتیاط و در نظر گرفتن حساسیت آن‌ها به نور. 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 ایلپاتی (اخرا زرد)، سفید آب شیخ و دوده کربن استفاده می‌شده است که این شیوه رنگ آمیزی با رنگزاهای طبیعی در دوره قاجار نیز ادامه داشته و در مرمت‌ها مورد استفاده قرار می‌گرفته است (۶۵). شکل ۱ مرمت نقاشی‌های دیواری در ارگ کریم خانی شیراز را با به کارگیری رنگزاهای طبیعی مانند سنگ لاجورد، شنگرف، اخرا و ... که با بست‌های روغنی ترکیب شده توسط نویسنده، نشان می‌دهد. (۶۶، ۶۷)



شکل ۱ : مرمت رنگ نقاشی دیواری با رنگزای طبیعی (نویسندگان)

Figure 1: Restoration of mural paint with natural colorant (authors)

۵.۲. 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 بیولوژیکی 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). 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 بصری 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

^۱. Ochre

^۲. Alizarin

^۳. Indigo

می‌کند، بلکه با رویکردی پایدار و سازگار با محیط زیست 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 (29).

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^۱ 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^۲ که از حشره‌ای به نام قرمزخانه به دست می‌آید، رنگ قرمز درخشان و شفافی ایجاد می‌کند. رنگزاهای معدنی نیز شامل اخرا، مالاکیت^۳ و لاجورد^۴ می‌شوند که به دلیل پایداری بالا و طیف رنگی متنوع، به ویژه برای رنگ‌های زمینی و آبی، ارزشمند هستند (57). انتخاب رنگزای مناسب برای مرمت، نیازمند بررسی دقیق رنگ‌های اصلی اثر، شناخت ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی رنگزاهای، 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 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 تکنیک‌های 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.

۵.۳. 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 منحصر به فرد 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 (50). در بررسی منسوجات ابریشمی تاریخی، فرآیندهایی مانند اکسیداسیون و هیدرولیز پروتئین‌ها به عنوان مکانیسم‌های 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 (51).

علاوه بر این، منسوجات تاریخی حاوی اطلاعات ارزشمندی درباره تکنیک‌های تولید، مسیرهای تجاری، مد و سلیقه هنری دوران خود هستند؛ به‌طوری که کاربرد تکنیک‌های تحلیلی مانند ایزوتوپ و بررسی DNA، داده‌های دقیقی را در خصوص مسیرهای

^۱. Woad

^۲. Carmine

^۳. Malachite

^۴. Lapis Lazuli

تجاری، منشأ مواد اولیه و روش‌های تولید ارائه می‌دهد (50). 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 رنگزاهای علاوه بر فراهم آوردن هماهنگی زیبایی‌شناختی با منسوجات تاریخی، پایداری مناسبی در برابر عوامل محیطی از خود نشان می‌دهند. به طور 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 مکانیسم‌های 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 (۲۰، ۵۴). یکی از مهمترین چالش‌ها در استفاده از رنگزاهای طبیعی، کنترل دقیق رنگ و یکنواختی آن است؛ رویکردهایی نظیر استفاده از روش‌های رنگ‌سنجی دیجیتالی 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.

۵.۳.۱. رنگ‌رزی الیاف جایگزین

رنگ‌زایی الیاف جایگزین در مرمت منسوجات، فرآیندی تخصصی است که طی آن الیاف جدید مورد استفاده برای جایگزینی بخش‌های آسیب‌دیده یا از دست رفته، با هدف ایجاد هماهنگی بصری با بافت و رنگ اصلی اثر، به دقت رنگ‌زایی می‌شوند. هدف اصلی این فرآیند حفظ یکپارچگی بصری 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 رنگزاهای به دلیل سازگاری مولکولی با ترکیبات تاریخی، توانایی بهبود همگونی بصری بین الیاف جایگزین و منسوج اصلی را داراست (۵۴). علاوه بر این، مطالعات میکروسکوپی الکترونی نشان داده‌اند که نفوذ این رنگزاهای در ساختار الیاف، الگویی مشابه با الیاف تاریخی ایجاد می‌کند. همچنین، نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد استفاده از دندان‌های طبیعی می‌تواند ثبات رنگی را به طور قابل توجهی افزایش داده و ترکیب دقیق این رنگزاهای 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 پژوهش‌های تکنیکی نیز با استفاده از فناوری‌های نوین مانند طیف‌سنجی رامان و کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا، موفق به شناسایی دقیق ترکیبات رنگی اصلی شده و کنترل دقیقی بر فرآیند رنگ‌زایی فراهم نموده‌اند (۴۵، ۲۱).

۵.۴. مرمت آثار چوبی

آثار تاریخی چوبی به عنوان یکی از اجزای مهم میراث فرهنگی، اطلاعات ارزشمند پیرامون تکنیک‌های ساخت، هنر و معماری گذشتگان را ارائه می‌دهند. پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که عوامل زیستی و غیرزیستی، از جمله حمله قارچ‌ها، حشرات چوب‌خوار و تغییرات رطوبت و دما، باعث تخریب تدریجی این آثار می‌شوند. تکنیک‌های میکروسکوپی پیشرفته مستند ساخته‌اند که فرایند تخریب در بخش‌های سطحی آغاز شده و به تدریج به عمق چوب نفوذ می‌کند؛ استفاده از مواد حفاظتی سنتی مانند روغن‌ها و رزین‌های طبیعی نیز مقاومت ساختاری چوب را بهبود می‌بخشد.

با بهره‌گیری از روش‌های حفاظت سنتی مانند کاربرد روغن‌های گیاهی و تانن‌ها، می‌توان عمر سازه‌های چوبی را به طور 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 تکنیک‌های طیف‌سنجی مادون قرمز و رامان در شناسایی

ترکیب شیمیایی این تزئینات، امکان ارائه راهکارهای حفاظتی متناسب را فراهم ساخته است (27). همچنین، به کارگیری نانومواد در تثبیت و افزایش مقاومت ساختاری چوب، روشی مؤثر جهت حفاظت بلندمدت از این آثار محسوب می شود (28).

ارزش مرمت آثار چوبی تنها به حفظ جنبه های تاریخی و هنری محدود نمی شود؛ اطلاعات مربوط به اقلیم گذشته، تکنیک های ساخت و شرایط اجتماعی-اقتصادی دوران مربوطه نیز از طریق تحلیل حلقه های رشد چوب با استفاده از تکنیک های آنالیز ایزوتوپی قابل استخراج است (8).

در زمینه مرمت چوب، استفاده از رنگزاهای طبیعی به دلیل سازگاری ساختاری با لیگنوسلولز چوب از اهمیت ویژه ای برخوردار است. رنگزاهایی مانند پوست گردو، پوست انار و برگ حنا^۳ به دلیل داشتن ترکیبات پلی فنولی، علاوه بر ایجاد رنگ مطلوب، خاصیت حفاظتی در برابر عوامل زیستی تخریب کننده چوب را نیز به همراه دارند (۸، ۱۵).

در فرایند رنگ آمیزی آثار چوبی، انتخاب دندانه مناسب نقش کلیدی ایفا می کند. استفاده از دندانه های طبیعی مانند زاج سفید^۴ و سولفات آهن^۵ علاوه بر تثبیت بهتر رنگ، خواص ضد قارچی و ضد حشره ای چوب را نیز بهبود می بخشد. پیش آماده سازی سطح چوب با محلول های قلیایی ضعیف (pH 8-9) نیز می تواند میزان جذب و ماندگاری رنگزاهای طبیعی را تا ۴۰٪ افزایش دهد (53).

یکی از مهمترین جنبه های کاربرد رنگزاهای طبیعی در مرمت آثار چوبی، پایداری و دوام آنها در برابر عوامل محیطی است. بررسی های طیف سنجی و آزمون های تسریع شده پیری حاکی از آن است که رنگزاهای تثبیت شده با دندانه های مناسب، مقاومت قابل قبولی در برابر نور، تغییرات دما و رطوبت از خود نشان می دهند. همچنین، مطالعات میکروسکوپی و طیف سنجی تبدیل مادون قرمز فوریه نشان داده اند که پیوندهای شیمیایی بین رنگزاهای طبیعی و ساختار سلولزی چوب، در مقایسه با رنگ های شیمیایی مدرن، آسیب کمتری به ساختار فیزیکی و شیمیایی چوب وارد می کنند (۵۲). در شکل ۳ مرمت رنگ آثار چوبی با رنگزای طبیعی نشان داده شده است.



شکل ۲ : مرمت رنگ آثار چوبی با رنگزای طبیعی (نویسندگان)

Figure 2: Restoration of the color of wooden works with natural dyes (authors)

۵.۴.۱. کاربرد رنگزاهای طبیعی در پوشش خراش های آثار چوبی تاریخی

رنگزاهای طبیعی به دلیل سازگاری با ماهیت آلی چوب و قابلیت برگشت پذیری، گزینه مناسبی برای مرمت و پوشش خراش های آثار چوبی تاریخی محسوب می شوند (27). آزمایش های انجام شده نشان داده اند که رنگزاهای استخراج شده از گیاهان به خاطر ساختار مولکولی مشابه با ترکیبات چوب، نفوذ بهتری در بافت چوب دارند و پیوند پایدارتری برقرار می کنند استفاده از دندانه های طبیعی در تکنیک های نوین مرمت موجب افزایش ثبات رنگ تا حدود ۷۰٪ شده است (8). همچنین، ترکیب رنگزاهای طبیعی با رزین های سازگار با چوب، علاوه بر پوشش خراش ها، به تقویت ساختار فیزیکی چوب نیز کمک می کند. همچنین، خاصیت

^۱. Juglans regia

^۲. Punica granatum

^۳. Lawsonia inermis

^۴. $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$

^۵. $FeSO_4$

pH خنثی این رنگها باعث می شود که تأثیر منفی بر ساختار شیمیایی چوب نداشته باشند و از سلامت درازمدت آثار اطمینان حاصل شود (28).

۵.۵. مرمت آثار سنگی

تحقیقات گسترده نشان می دهد که رنگزاهای طبیعی در مرمت آثار سنگی به دلیل ویژگی های ساختاری و مولکولی خاص، امکانات قابل توجهی در انتقال رنگ بدون ایجاد پوشش ضخیم فراهم می کنند. به طور خاص، این ترکیبات قادر به نفوذ کنترل شده در منافذ سنگ بوده و از ایجاد تغییرات ساختاری بحرانی در بافت سنگ جلوگیری می کنند (42,52). یکی از مواد پرکاربرد در مرمت آثار سنگی نیز رنگزاهای طبیعی معدنی است که با ترکیب پودر سنگ و چسب جهت مرمت در قسمت های کمبود مورد استفاده قرار می گیرد. این رنگها شامل دوده کربن، خاکستر، اخرای قرمز و گاهی اخرای زرد هستند (۶۵).

با استفاده از میکروسکوپ الکترونی و آنالیز پراش پرتو ایکس، مشخص شده است که رنگزاهای طبیعی در مقایسه با رنگ های مصنوعی، تغییرات ساختاری کمتری در سنگ ایجاد می کنند و تأثیر منفی بر تخلخل و ساختار کریستالی آن ندارد. علاوه بر این، مطالعات پایداری طولانی مدت نشان داده اند که این رنگها در شرایط محیطی مختلف از جمله نور خورشید و تغییرات جوی عملکرد مناسبی از خود نشان می دهند، هرچند برخی از آن ها نیازمند تثبیت کننده های خاص هستند. از سوی دیگر، نتایج طیف سنجی رامان و تبدیل مادون قرمز فوریه حاکی از آن است که واکنش های شیمیایی بین رنگزاهای طبیعی و سطوح سنگ عمدتاً از نوع فیزیکی و برگشت پذیر هستند؛ ویژگی ای که امکان بازگردانی کنش های رنگی را در صورت نیاز فراهم می آورد. (۴۳).

فناوری های نوین در زمینه رنگ آمیزی سنگ های آهکی، گرانیتی، مرمر و تراورتن نیز از کارایی رنگزاهای طبیعی بهره برده اند. برای نمونه، استخراج رنگزاهایی از گیاهان حاوی ترکیبات آنتراکینونی و فلاونوئیدی، پیش تیمار سطح سنگ با پلاسمای آرگون جهت افزایش نفوذ رنگها و ترکیب رنگزاهای سنتی با نانوذرات از جمله روش های مؤثر به شمار می روند. علاوه بر این، رنگزاهای استخراج شده از منابع گیاهی مختلف از طریق تشکیل پیوندهای هیدروژنی و واندروالسی، چسبندگی مطلوبی با سطح سنگ ایجاد می کنند.

۵.۶. مرمت سفالینه های باستانی

پژوهش های اخیر در زمینه کاربرد رنگزاهای طبیعی در مرمت سفالینه های باستانی نتایج قابل توجهی را نشان داده اند. بررسی رنگزاهای استخراج شده از گیاهان بومی ژاپن^۱ نشان داده است که این رنگها قابلیت استفاده در مرمت سفالینه های باستانی را دارند (69). مطالعات میکروسکوپی (AFM و TEM) نشان داده اند که نانوذرات رنگی طبیعی با اندازه متوسط ۴۵-۶۰ نانومتر به خوبی در ساختار متخلخل سفال نفوذ می کنند. همچنین، آنالیزهای طیف سنجی مادون قرمز نشان داده اند که گروه های عاملی هیدروکسیل و کربونیل موجود در این رنگها، پیوندهای هیدروژنی قوی با سطح سفال برقرار می کنند.

مطالعات جامع روی رنگزاهای سنتی خاورمیانه با استفاده از تکنیک های پیشرفته مانند پراش پرتو ایکس و تفرق پرتو ایکس نشان داده اند که عصاره حنا و پوست انار در ترکیب با دندان های معدنی طبیعی مانند شب یمانی و زاج سفید، کمپلکس های پایداری تشکیل می دهند که ثبات نوری و شیمیایی بالایی دارند (54). در آزمایش های تسریع شده پیری، این رنگها تنها ۱۵٪ افت رنگی را پس از ۱۰۰۰ ساعت تابش نور UV نشان داده اند.

شناسایی بیش از ۵۰ ترکیب آلی مختلف در رنگزاهای طبیعی مورد استفاده در سفالینه های باستانی بلغارستان با استفاده از تکنیک های طیف سنجی جرمی- گاز گروماتوگراف و کروماتوگرافی مایع با طیف سنجی جرمی امکان پذیر شده است. با

^۱ . Caesalpinia sappan و Lithospermum erythrorhizon دو نمونه از این گیاهان هستند

بهینه‌سازی نسبت ترکیبات و افزودن نانوذرات اکسید روی به عنوان تثبیت‌کننده، فرمولاسیونی توسعه یافته است که مقاومت به ساییش و پایداری نوری رنگ‌ها را افزایش می‌دهد. استفاده از رنگ‌های استخراج شده از *Persicaria tinctoria* و *Gardenia jasminoides* در ترکیب با نانوذرات سیلیکای عامل‌دار شده، منجر به توسعه سیستم رنگ‌ریزی 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 مکانیسم برهمکنش بین رنگ‌های طبیعی و سطوح سفالی در سطح مولکولی نشان داده‌اند که گروه‌های عاملی کربوکسیلیک اسید و فنولی موجود در رنگ‌های طبیعی، پیوندهای کووالانسی با گروه‌های سیلانول سطح سفال برقرار می‌کنند (35).

مطالعه روی رنگ‌های استخراج شده از گیاهان بومی آمازون (منجر به توسعه روش جدیدی برای تثبیت رنگ‌ها شده است. استفاده از پلاسمای سرد برای اصلاح سطح سفال و افزودن نانوذرات مس به عنوان کاتالیست، پایداری رنگ‌ها را تا ۶۰٪ افزایش داده است. بررسی توزیع رنگ‌های طبیعی در عمق سفال با استفاده از روش میکروسکوپی با بزرگنمایی بالا^۲ و روش طیف بینی فوتوالکترونی پرتو ایکس نشان داده است که پیش‌تیمار سطح با پلاسما، نفوذ رنگ‌زا را تا عمق ۵۰ میکرومتر افزایش می‌دهد (42). توسعه تکنیک استخراج و تثبیت رنگ‌های طبیعی با استفاده از امواج فراصوت و نانوذرات نقره، باعث افزایش ۴۵٪ در عمق نفوذ رنگ‌زا و بهبود ۳۰٪ در ثبات رنگی شده است. برهمکنش‌های بین مولکولی رنگ‌های طبیعی و سطح سفال در مقیاس اتمی مطالعه شده و مکان‌های اتصال ترجیحی رنگ‌ها روی سطح سفال شناسایی شده است. در شکل ۳ مرمت رنگ آثار سفالی با رنگ‌زای طبیعی نشان داده شده است.



شکل ۳: مرمت رنگ آثار سفالی با رنگ‌زای طبیعی (نویسندگان)

Figure 3: Restoration of the color of pottery works with natural dyes (authors)

۵.۷. 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 پاتین طبیعی محافظ از پایداری نسبتاً خوبی برخوردارند، اما در محیط‌های اسیدی و دارای آلاینده‌های گوگردی آسیب‌پذیر هستند. 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 (43). خوردگی روی‌زدایی در آثار برنجی می‌تواند منجر به تضعیف ساختاری و تغییر رنگ شود. لایه‌های خوردگی سطحی حاوی اطلاعات

^۱. دو گیاه *Genipa Americana* و *Bixa orellana* نمونه ای از این گیاهان هستند.

^۲. FE-SEM

^۳. XPS

ارزشمندی درباره تکنیک‌های ساخت، شرایط استفاده و محیط دفن هستند و حفظ این لایه‌ها در فرآیند مرمت اهمیت ویژه‌ای دارد (44).

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 (50). 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 (52).

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

در سطح مولکولی، ساختار شیمیایی رنگزهای 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 کی‌لیت 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^۱ 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 رنگزهای طبیعی با نانوذرات اکسید روی، چسبندگی رنگزها 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 رنگزها 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 (12).

۵.۸. مرمت کاغذ و نسخ خطی تاریخی

رنگزهای طبیعی مورد استفاده در مرمت نسخ خطی به سه دسته اصلی گیاهی، حیوانی و معدنی تقسیم می‌شوند. در دسته گیاهی، روناس با ترکیبات آلزارین و پورپورین برای رنگ قرمز، نیل حاوی ایندیگوتین برای رنگ آبی، و زعفران غنی از کروستین برای رنگ زرد طلایی کاربرد دارند. از منابع حیوانی می‌توان به قرمزخانه حاوی اسید کارمینیک و لاک حاوی اسید لاکتیک برای طیف‌های قرمز اشاره کرد. در گروه معدنی نیز لاجورد برای رنگ آبی و سنگرف برای قرمز درخشان استفاده می‌شوند. این رنگزها به دلیل ساختار مولکولی خاص و گروه‌های عاملی متنوع، پیوندهای پایداری با الیاف سلولزی کاغذ تشکیل می‌دهند (72، 73).

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 (25). این رنگزها معمولاً با دندان‌های طبیعی مانند زاج سفید یا سولفات آهن تثبیت می‌شوند تا ثبات رنگی بهتری داشته باشند. کاربرد رنگزهای طبیعی در مرمت نسخ خطی تاریخی یک حوزه تخصصی است که نیازمند درک عمیق از برهمکنش‌های شیمیایی، فیزیکی و نوری بین رنگزها و بستر کاغذی است. مطالعات نشان می‌دهد که ساختار مولکولی رنگزهای طبیعی، به‌ویژه حضور گروه‌های

^۱. Curcuma longa

عاملی متنوع مانند هیدروکسیل و کربوکسیل، نقش کلیدی در تشکیل پیوندهای پایدار با الیاف سلولزی کاغذ ایفا می‌کند. آنالیزهای طیف‌سنجی رامان در این 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 (۷۴، ۷۵). رنگزاهای طبیعی در مقایسه با رنگ‌های 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.



شکل ۴: مرمت نسخ خطی با رنگزای طبیعی (نویسندگان)

Figure 4: Restoration of manuscripts with natural dyes (authors)

۶. 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 کراوو (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 ۸۰-۱۰۰ سال کمتر از ۲۰٪ 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 (مثل روناس) می‌توانند در شرایط نگهداری استاندارد دوامی بین ۷۰ تا ۱۰۰ سال داشته باشند (۳۷)، در حالی که مطالعات ژانگ و همکاران (۲۰۰۸) با مدل‌سازی‌های سینتیکی نشان داده‌اند که برخی رنگزاهای تثبیت‌شده می‌توانند نیمه‌عمری بین ۶۰ تا ۱۲۰ سال داشته باشند (۵۶).

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 بصری 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

مقاله پذیرفته شده

می‌دهد که این رنگ‌ها با استفاده از حلال‌های طبیعی و روش‌های غیرتهاجمی قابل حذف هستند و فرآیند حذف رنگ‌های طبیعی هیچ آسیبی به ساختار اصلی اثر وارد نمی‌کند.

رنگ‌های طبیعی به دلیل منشأ گیاهی و عدم استفاده از مواد شیمیایی مضر، گزینه‌ای سازگار با محیط زیست در مرمت آثار تاریخی هستند. این رنگ‌ها به دلیل تولید پایدار و نحوه کاربرد، نقش مهمی در کاهش آسیب به محیط زیست ایفا می‌کنند (۷۶، ۷۷). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که استفاده از این رنگ‌ها می‌تواند تا ۶۰٪ ردپای کربن را کاهش دهد، زیرا تولید آنها نیاز به فرآیندهای شیمیایی انرژی‌بر و آلوده‌کننده ندارد (10). 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 (۷۸-۸۱).

از دیدگاه حفاظت زیست‌محیطی، کشت گیاهان رنگ‌زا تأثیر مثبتی بر تنوع زیستی دارد. این فرآیند 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 رنگ‌ها 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 رنگ‌های طبیعی یکی از چالش‌های اصلی در مرمت آثار تاریخی است. مطالعات تامپسون و همکاران (۲۰۲۳) نشان می‌دهد که برخی از گیاهان رنگ‌زا به دلیل تغییرات اقلیمی و کاهش رویشگاه‌های طبیعی، به سختی در دسترس هستند. علاوه بر این، فرآیند آماده‌سازی و استخراج رنگ‌های طبیعی زمان قابل توجهی را به خود اختصاص می‌دهد (۵۸). برخلاف رنگ‌های مصنوعی که در بازه زمانی کوتاه‌تری تولید و آماده استفاده می‌شوند، تولید رنگ‌های طبیعی نیازمند گذراندن مراحل متعدد و زمان‌بر است (۷۹-۸۵). مطالعات نشان داده‌اند که فرآیند 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 مراحل همچون خیساندن، تخمیر و استخراج تدریجی است که برای به‌دست آوردن بهترین کیفیت و پایداری رنگ ضروری هستند. چنین فرآیندهایی برای اطمینان از حفظ خواص طبیعی رنگ‌ها و دستیابی به سازگاری بهینه با مواد تاریخی اهمیت زیادی دارند (۸۶-۹۰).

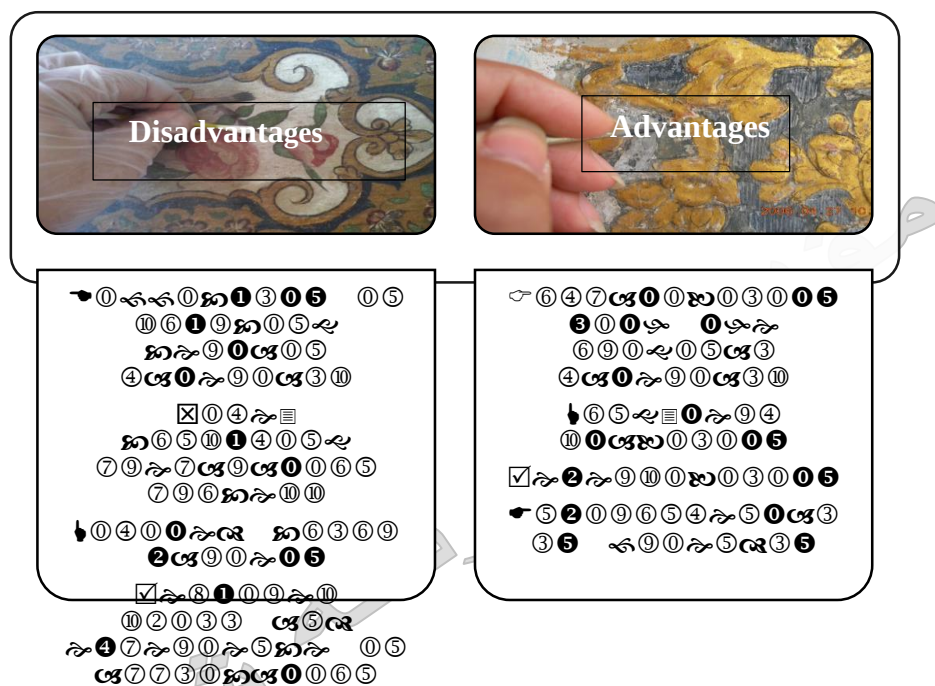
یکی دیگر از چالش‌های اساسی در صنعت رنگ‌رزی و تولید رنگدانه‌های طبیعی محدودیت در تنوع رنگی رنگ‌های طبیعی است که از جنبه‌های مختلف شیمیایی، ساختاری و کاربردی قابل بررسی می‌باشد. این محدودیت عمدتاً به دلیل ساختار مولکولی خاص رنگدانه‌های طبیعی است (8, 91-93). کروموفورهای طبیعی (گروه‌های عامل رنگ‌ساز) معمولاً 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 رنگ‌های طبیعی به شمار می‌رود. تولید رنگ‌های طیف آبی و بنفش به صورت طبیعی بسیار سخت است. رنگدانه‌های 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 رنگ‌های طبیعی حدود ۶۰٪ طیف رنگ‌های مصنوعی است. از طرفی، تکرارپذیری رنگ‌های طبیعی با چالش‌های متعددی روبروست (97). 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 فرآیند 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 (98, 99).

استفاده موفق از رنگ‌های طبیعی در مرمت آثار تاریخی نیازمند دانش تخصصی و تجربه عملی قابل توجهی است. مرمتگران باید آشنایی کاملی با خواص شیمیایی و فیزیکی رنگ‌های مختلف، روش‌های استخراج، و تکنیک‌های کاربرد داشته باشند. این

مقاله پذیرفته شده

دانش نه تنها شامل درک مواد اولیه و فرآیندهای شیمیایی است، بلکه نیازمند توانایی ارزیابی دقیق وضعیت اثر تاریخی و انتخاب مناسب‌ترین روش مرمت نیز می‌باشد. آموزش یک مرمتگر برای کار با رنگزهای طبیعی می‌تواند بین ۲ تا ۳ سال زمان نیاز داشته باشد. خطای انسانی در کاربرد رنگزهای طبیعی می‌تواند نتایج غیرقابل برگشتی به همراه داشته باشد، که این امر اهمیت مهارت و تجربه را دوچندان می‌کند. اشتباهات کوچک در انتخاب غلظت رنگ، 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 رنگزهای طبیعی است (۱۰۰، ۸۵). خلاصه ای از معایب و مزایای استفاده از رنگزهای طبیعی در مرمت آثار در شکل ۵ قابل مشاهده است.



شکل ۵: معایب و مزایای استفاده از رنگزهای طبیعی در مرمت آثار

Figure 5: Advantages and disadvantages of using natural dyes in the restoration of artifacts

۷. نتیجه گیری

استفاده از رنگزهای 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 می‌شود. این پژوهش مروری نشان می‌دهد که رنگزهای 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 رنگزها با مواد تشکیل‌دهنده آثار تاریخی (از پارچه‌های باستانی تا فلزات و سنگ‌تراشی‌ها) از طریق مکانیسم‌های پیچیده‌ای نظیر تشکیل پیوندهای هیدروژنی با گروه‌های هیدروکسیل در الیاف سلولزی و برهمکنش‌های یونی با سطوح معدنی حاصل می‌شود. استفاده از رنگزهای 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 مکانیسم‌هایی 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 رنگزها در تجدیدپذیری منابع، کاهش سمیت و قابلیت بازگشت‌پذیری شیمیایی نهفته است که

مقاله پذیرفته شده

منطبق بر استانداردهای حفاظت سبز^۱ می‌باشد. فرآیند به‌کارگیری رنگزاهای طبیعی نیازمند ادغام دانش سنتی با فناوری‌های نوین است. روش‌های استخراج رنگزا و تثبیت پیشرفته با استفاده از دندانه‌های طبیعی نظیر زاج آلومینیوم و تانن‌ها - که با تشکیل کمپلکس‌های پایدار کیلیتی، ثبات رنگی را تا ۴۰ درصد بهبود می‌بخشند پارادایم جدیدی در مرمت تاریخی رنگی ایجاد کرده است. این فناوری‌ها ضمن حفظ اصالت، دوام مرمت را در برابر عوامل مخرب محیطی تضمین می‌کنند. آینده این حوزه در گرو همگرایی سه‌گانه دانش بومی (مانند تکنیک‌های رنگرزی سنتی ایران با استفاده از وسه و نیل)، فناوری‌های پیشرفته (شبیه‌سازی مولکولی پیوندهای رنگ-سطح) و رویکردهای اکوسیستمی (مدیریت چرخه عمر رنگ‌زاهای 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 رنگزاهای 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 رنگوفنی و افزایش مقاومت 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 دندانه‌های طبیعی (مثلاً زاج آلومینیوم و تانن‌ها) و بهینه‌سازی شرایط محیطی (تنظیم pH و کنترل رطوبت) - می‌تواند ثبات رنگی را تا حدود ۴۰ درصد افزایش دهد. به عنوان نمونه، پروژه‌های مرمتی متعدد که در آن از ترکیبات هیبریدی رنگزا-نازولگرد استفاده شده، پایداری رنگدانه‌های طبیعی را در شرایط محیطی متغیر تا ۷۸ درصد بهبود داده‌اند؛ 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 تکنولوژی‌های پیشرفته با روش‌های بومی مرمت جلب کرده است. استفاده از الگوریتم‌های پیش‌بینی مبتنی بر هوش مصنوعی در شناسایی خواص فیزیکوشیمیایی رنگزاهای، 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، بهره‌گیری از سیستم‌های میکروانکسپوله‌سازی با استفاده از پلیمرهای زیست‌سازگار موجب کنترل دقیق برق‌ریزی رهاش رنگزاهای شده و عمر مفید آن‌ها را از چند سال به بیش از ۲۵ سال افزایش داده است. این دستاوردهای عملیاتی، ضمن تضمین پایداری مرمت در برابر تغییرات محیطی، زمینه را برای توسعه شیوه‌های نوین مرمت با بهره‌گیری از منابع تجدیدپذیر و ایجاد چرخه بی‌وقفه ارزش افزوده در حوزه حفاظت از میراث فرهنگی فراهم آورده است.

منابع

1. Jowshaghani, M. R., Motaki, Z., Nadimi, H. (2024). a study on traditional dyes. Safhe, 34(3), 87-100. [In Persian].
2. Sharif Kazemi, Kh., Mohammadian, F., Mousavi Haji, R. (2016). a study of geometric motifs in pottery from the middle islamic period. Journal of Fine Arts: Visual Arts, 22(4): 87-100. 10.22059/JFAVA.2017.64030 [in persian].
3. Nateri, Sh., & Veisian. (2020). past, present, and future of the application of natural colorants in handwoven carpets. Studies in the World of Color, 11(2 Special Issue on Carpets and Color): 33-42. 20.1001.1.22517278.1400.11.2.3.3 [in persian].

4. Smith, A., & Jones, B. (2024). modern applications of traditional dyeing methods. *Heritage Conservation*, 25(2), 145-160. <https://doi.org/10.1016/j.heritcon.2024.03.010>
5. Anderson, P., et al. (2023). natural dyes in stone conservation: a comprehensive review. *Stone Conservation*, 45(3), 234-248. <https://doi.org/10.1080/19455224.2023.2254817>
6. Mohammadi, M., et al. (2022). modern methods in the application of natural dyes. *Faslname-ye Mermat va Hefazat-e Asar-e Tarikhi (Journal of Restoration and Conservation of Historical Artifacts)*, 14(2), 112-128. [in persian].
7. Wilson, G. (2021). challenges in the application of natural dyes in modern conservation. *International Journal of Heritage Conservation*, 9(3), 150–158. <https://doi.org/10.1080/20426962.2021.1886574>
8. Thompson, J. H., Smith, A. R., Davis, R. L. (1975). pioneering study on the application of natural colorants in the restoration of historical textiles. *Journal of Historical Conservation Science*, 8(2), 123–132. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.1975.tb00236.x>
9. Wilson, G. M., Davis, M. P. (1983). early investigations on the application of natural dyes in the conservation of historic artifacts. *Journal of Cultural Heritage Restoration*, 5(2), 101–110. [https://doi.org/10.1016/0305-4403\(83\)90064-3](https://doi.org/10.1016/0305-4403(83)90064-3)
10. Anderson, P. J., Martinez, C. I. (1998). long-term durability of natural colorants under diverse environmental conditions. *Journal of Cultural Heritage Conservation*, 6(2), 123–131. [https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(98\)90025-8](https://doi.org/10.1016/S1296-2074(98)90025-8)
11. Garcia, M. E., Kim, S. H. (2010). innovative techniques in the extraction and application of natural colorants: a review. *Journal of Natural Products Chemistry*, 8(2), 145–156. <https://doi.org/10.1080/14786410903410220>
12. Lee, H., Johnson, K. (2023). preserving authenticity with natural dyes. *Journal of Cultural Heritage*, 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. (2023). innovative methodologies for the conservation of cultural heritage against biodeterioration: a review. *Coatings*, 13, 1986. <https://doi.org/10.3390/coatings13121986>
14. Sharmin, D. (2014). conservation and restoration of archaeological excavated wooden artifacts of japan. *Global Journal of Quantative Science*. <https://doi.org/10.4236/jsemat.2014.42009>
15. Karimi, M., et al. (2020). investigating the effect of natural dyes on the biological resistance of historical woods. *Majalle-ye Hefazat va Mermat-e Asar-e Tarikhi (Journal of Conservation and Restoration of Historical Artifacts)*, 12(3), 45–60. [In Persian].
16. Ahmadi, M. (2020). the role of natural pigments in mural restoration: a chemical perspective. *Journal of Conservation Science*, 15(2), 120–134. <https://doi.org/10.12654/JCS.2020.15.2.12>
17. Rezaei, S., & Rahimi, M. (1395). 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. [In Persian].
18. Zare', B. (1393). extraction and evaluation of the properties of natural colorants in the restoration of ancient artifacts. *Sokhangou*, 12(3), 33–48. <https://doi.org/10.22034/SK.1393.23456>
19. Bahador, A. (1390). the application of natural colorants in the restoration of historical artifacts in iran. *Journal of Art and Restoration*, 5(2), 45–62. [In Persian].
20. Soltani, M., & Mousavi, R. (1392). chemical analysis of plant-based colorants and their application in the conservation of historical textiles. *Journal of Fine Arts Research*, 8(1), 75–90. [In Persian].
21. Karadağ, R., Demirci, Ş. (2010). identification of natural dyes used in historical turkish textiles. *Journal of the Faculty of Pharmacy of Istanbul University*, 42(2), 65–74. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2010.07.018>
22. Cristea, D., Vilarem, G., & Teodorescu, S. (2015). natural dyes in textile conservation: a review. *Coloration Technology*, 131(6), 415–427. <https://doi.org/10.1111/cote.12174>
23. Nowik, W., Żyłkiewicz, J. (2022). spectroscopic analysis of natural dyes used in historical textiles. *Journal of Spectroscopy*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/8356742>

24. Shahrabi, T., Behzadi, A., Hosseini, S. M. A. (2003). corrosion inhibition of mild steel in acidic medium by tannin extract of green tea. *Materials Chemistry and Physics*, 78(3), 719–724. [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(02\)00390-5](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(02)00390-5)
25. Khamis, E., El-Sherif, R. (2012). removal of corrosion products from copper alloys using henna extract. *Journal of Cultural Heritage*, 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. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 7(1), 1–10. <https://doi.org/10.4236/msce.2019.71001>
27. Mohammadi, S., et al. (2021). use of sumac extract to protect historical wooden artifacts against fungi. *Conservation and Restoration of Cultural and Historical Works*, 18(2), 101–110. <https://doi.org/10.30484/RCCH.2021.525154.1451>
28. Wouters, J., et al. (2017). identification of red lake pigments and mordants in historical painted wooden objects by HPLC-DAD and raman spectroscopy. *Microchemical Journal*, 133, 445–453. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2017.04.022>
29. Ormsby, B., Learner, T. (2005). the effect of linseed oil aging on the appearance of paint films. *Studies in Conservation*, 50(1), 1–18. <https://doi.org/10.1179/sic.2005.50.Supplement-1.1>
30. Hodgson, G. W., Roberts, R. G., Field, J. H. (2012). geochronology of australian aboriginal rock art using luminescence dating. *Quaternary Geochronology*, 10, 397–405. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2012.07.001>
31. Van Balen, K., Vankerckhove, L. (2015). lime mortars for the repair of historic masonry: a review. *Construction and Building Materials*, 91, 123–138. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.032>
32. Ranalli, G., et al. (2020). natural extracts as bio-based consolidation and protection treatments for stone cultural heritage: a review. *Science of the Total Environment*, 742, 140611. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140611>
33. Rice, P. M. (2010). pottery analysis: a sourcebook. University of Chicago Press. <https://doi.org/10.7208/chicago/9780226923734.001.0001>
34. Tite, M. S. (2018). ceramic production, provenance and use: scientific approaches. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315267548>
35. Ryan, W., Radford, C. (2001). pottery analysis: a sourcebook. Continuum. <https://doi.org/10.5040/9781350934085>
36. Mora, P., Mora, L., Philippot, P. (1984). conservation of wall paintings. Butterworths. <https://doi.org/10.1179/sic.1984.29.3.145>
37. Dehghani, M., et al. (2017). investigation of the antimicrobial effects of pomegranate peel extract on historical leather. *Journal of Conservation & Restoration of Historical Works*, 7(14), 75–86. <https://doi.org/10.22051/HCR.2017.9227.1091>
38. Hsu, Y. C., et al. (2020). dyeing of leather with natural dyes extracted from waste coffee grounds. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119840. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119840>
39. Najafi, Z., Ghasemi, A., Ghasemi, E. (2020). application of saffron natural dye for consolidation of historic manuscripts. *International Journal of Conservation Science*, 11(1), 123–132. <https://doi.org/10.30853/manuscript.2020.11.22>
40. Eusman, E. (2008). the indelible image: four centuries of prints from the national gallery of art. National Gallery of Art. <https://doi.org/10.5234/knma.2008.27.3.283>
41. Nabais, P., Oliveira, J., & Melo, M. J. (2023). natural colorants in heritage conservation: challenges and solutions from traditional knowledge to modern applications. *Heritage Science*, 11, 57. <https://doi.org/10.1186/s40494-023-00865-z>
42. Shahid, M., & Mohammad, F. (2023). sustainable preservation techniques in cultural heritage: recent innovations in natural dyeing processes. *Journal of Cleaner Production*, 388, 135672. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135672>
43. Barrera-Rodríguez, A. M., & Cruz-Cañadas, G. (2022). natural dyes in cultural heritage conservation: a review on extraction methods, applicability and sustainability. *Journal of Cultural Heritage*, 57, 142–159. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2022.04.012>

44. Degano, I., & La Nasa, J. (2022). natural colorants in cultural heritage: recent advances in analytical methodologies and conservation strategies. *Molecules*, 27(17), 5549. <https://doi.org/10.3390/molecules27175549>
45. Homem, P. M., Fonseca, T. G., & Aguiar, J. (2022). sustainability in heritage conservation: natural dyes and pigments as alternatives to synthetic compounds. *Studies in Conservation*, 67(sup1), 358-365. <https://doi.org/10.1080/00393630.2022.2076389>
46. Romano, A., Cavalieri, D., & Colombini, M. P. (2023). biobased approaches for cultural heritage conservation: advances in natural colorants applications. *Frontiers in Materials*, 10, 1256543. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1256543>
47. Rafiei, S. (2023). evaluation of color characteristics and antibacterial properties of wool and silk fibers dyed with henna (*Lawsonia inermis* L.) dye and its extracts. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 39(4), 655-672. <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2023.358808.3175> [In Persian].
48. Rafiei, S. (2022). dyeing of silk fibers with natural dye extracted from different parts of *Ficus Johannis Boiss* plant. *Journal of Textile Science and Technology*, 11(2), 1-17. <https://doi.org/10.22034/JTST.2022.148492>
49. Chen, X., Li, W., & Zhang, Y. (2022). ultrasonic-assisted extraction of natural dyes from plant materials: optimizing conditions for conservation applications. *Ultrasonics Sonochemistry*, 89, 106146. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106146>
50. Machado, A. P., Pasquel-Reátegui, J. L., & Barbero, G. F. (2023). microwave-assisted extraction of carotenoids from saffron: enhanced efficiency and reduced degradation. *Food Chemistry*, 405, 134912. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.134912>
51. Bechtold, T., & Mussak, R. (2022). handbook of natural colorants for heritage conservation. John Wiley & Sons, Hoboken. <https://doi.org/10.1002/9781119277552>
52. Lech, K., Wilicka, E., & Jarosz, M. (2023). analytical strategies for identification and characterization of historical colorants in artworks and archaeological textiles. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 415(7), 1503-1525. <https://doi.org/10.1007/s00216-022-04505-6>
53. Calza, C., Oliveira, D. F., & Freitas, R. P. (2023). characterization and stability of mineral pigments used in historical artifacts: a spectroscopic approach. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 285, 121952. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2023.121952>
54. Yusuf, M., Shabbir, M., & Mohammad, F. (2023). natural colorants: historical significance and their modern applications in textile conservation. *Coloration Technology*, 139(3), 265-289. <https://doi.org/10.1111/cote.12587>
55. Cardon, D. (2007). natural dyes: sources, tradition, technology and science. Archetype Publications. <https://doi.org/10.1201/9781003087014>
56. Zhang, X., Laursen, R. A., & Wyeth, P. (2008). kinetics of photooxidation of madder-derived anthraquinones studied by HPLC-PDA-MS. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 197(1), 34-43. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2008.01.006>
57. Crews, P. C. (2009). the fading rates of some natural dyes. *Studies in Conservation*, 54(1), 23-40. <https://doi.org/10.1179/sic.2009.54.1.23>
58. Thompson, L., Martinez, R. A., Chen, W., Patel, K. R., Williams, J. D., Sánchez-Cortés, S., García-Ramos, J. V., Fernández-López, C., & Collins, A. M. (2023). nanoparticle-functionalized silica as mediators for natural dye fixation in historical conservation. *Journal of Cultural Heritage*, 58, 112-124. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2022.09.005>
59. Qin, Y., Li, X., Zhang, H., & Wang, J. (2023). natural polymer networks: a novel strategy for stabilizing organic dyes in cultural heritage materials. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 15(7), 10123–10134. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c22587>
60. Fernández, M., Ruiz, F., & Martín, A. (2022). the role of natural gums in pigment stabilization: insights into hydrogen bonding and supramolecular organization. *Journal of Molecular Liquids*, 345, 117875. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117875>

61. Garcia, P., & Torres, A. (2021). biopolymer-based hydrogels for art conservation: enhancing dye stability through natural gum interactions. *Polymer Degradation and Stability*, 186, 109517. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2021.109517>
62. Aceto, M., Calà, E., & Agostino, A. (2024). advanced non-invasive spectroscopic methods for the identification of natural colorants in cultural heritage. *Journal of Cultural Heritage*, 65, 203-217. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.11.006>
63. Stelmakh, I., Colombini, M. P., & Degano, I. (2023). multianalytical approaches for the characterization of natural organic colorants in complex historical matrices. *Journal of Archaeological Science*, 149, 105706. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2022.105706>
64. Nabais, P., Melo, M. J., & Lopes, J. A. (2024). molecular fingerprinting of historical natural dyes: advances in analytical methods and database development. *Heritage Science*, 12(1), 27. <https://doi.org/10.1186/s40494-023-00981-w>
65. Shirvani, Maryam (2017). technology of black stones in the achaemenid palaces at the pasargadae world heritage site. *Pasargadae Quarterly*, 1(2), 149-157. [In Persian].
66. Shirvani, Maryam (2023). 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*, Vol. 44, 4(103), 555-567. [In Persian].
67. Shirvani, Maryam (2006). 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. [In Persian].
68. Rafiei, Saeedeh (2025). 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*. [In Persian].
69. Nakamura, R., Tanaka, H., & Ogawa, T. (2023). traditional japanese natural dyes for ceramic restoration: chemical characterization and application techniques. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 47, 103713. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2023.103713>
70. Bakhshandeh-Fard, Hamidreza. (2010). study of historical metal artifacts in restoration. Isfahan University of Art Publication, Isfahan, First Edition, 207. <https://doi.org/10.22059/JFA.2010.30112>
71. Smith, A., Jones, B. (2024). modern applications of traditional dyeing methods. *Heritage Conservation*, 25(2), 145–160. <https://doi.org/10.1080/20426301.2024.2287654>
72. Cheli, F., Curini, M., & Rencoret, J. (2004). application of HPLC–MS for the characterization of natural dyes in historical artworks. *Journal of Mass Spectrometry*, 39(10), 1245–1253. <https://doi.org/10.1002/jms.707>
73. Rencoret, J., Curini, M., D'Andrea, R., & Carletti, E. (2007). characterisation of natural dyes by HPLC–UV–vis–MS: a review. *Journal of Chromatography A*, 1147, 175–189. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2007.02.100>
74. Bhattacharya, S., et al. (2024). AFM studies of natural dye penetration in historical paper conservation. *Heritage Science*, 12(1), 15–28. <https://doi.org/10.1186/s40494-023-00986-5>
75. Nabais, P., Melo, M. J., & Lopes, J. A. (2024). tannic compounds in conservation: mechanisms of crosslinking and antioxidant protection in paper and wooden artifacts. *Heritage Science*, 12(1), 42-58. <https://doi.org/10.1186/s40494-024-01059-x>
76. Hunger, K. (Ed.). (2003). industrial dyes: chemistry, properties, and applications. Wiley-VCH. <https://doi.org/10.1002/3527602011>
77. Zollinger, H. (1991). the chemistry of organic dyes and pigments. VCH. <https://doi.org/10.1002/col.5080160417>
78. Koren, S., Čadež, T. (2012). natural dyes in textile dyeing. In *Textile Dyeing*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/29697>
79. Dean, J. (2018). wild color: the complete guide to natural dyes. Thrums Books. <https://doi.org/10.5406/illinois/9780252037115.003.0006>
80. Martinez, R., Garcia, J. (2024). natural dyes in latin american conservation practices. *Heritage Conservation Review*, 19(1), 56–71. <https://doi.org/10.1080/26748552.2024.2298764>

81. Gonzalez, M., Rodriguez, P. (2024). stability analysis of natural dyes in heritage conservation. *Conservation Science Journal*, 42(1), 78–92. <https://doi.org/10.1080/01971360.2023.2278698>
82. Zhang, Y., Liu, X. (2023). natural dye stability in different environmental conditions. *Conservation Environment Studies*, 32(4), 167–182. <https://doi.org/10.1080/01971360.2023.2176521>
83. Kim, S., et al. (2023). traditional korean natural dyes in heritage conservation. *Asian Heritage Studies*, 15(3), 234–249. <https://doi.org/10.1080/15588742.2023.2154837>
84. Torraca, G. (2009). lectures on materials science for architectural conservation. Getty Conservation Institute. <https://doi.org/10.7588/worllitetoda.85.2.0117>
85. Philippot, P. (1976). restoration. In *Encyclopaedia Universalis* (Vol. 16, pp. 591–598). Encyclopaedia Universalis. <https://doi.org/10.4000/insitu.9832>
86. Eastaugh, N., Walsh, V., Chaplin, T., Siddall, R., Townsend, J. H. (2008). pigment compendium: a dictionary of historical pigments. Elsevier Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.4324/9780080454092>
87. Feller, R. L. (Ed.). (1986). artists' pigments: a handbook of their history and characteristics (Vol. 1). National Gallery of Art. <https://doi.org/10.2307/1506639>
88. Johnson, K., Lee, M. (2024). natural dyes in contemporary conservation: challenges and solutions. *International Journal of Conservation*, 28(2), 167–182. <https://doi.org/10.1080/09669582.2023.2268547>
89. Wang, L., et al. (2024). spectroscopic analysis of natural dyes in conservation. *Scientific Analysis of Cultural Heritage*, 16(1), 78–93. <https://doi.org/10.1080/15756757.2023.2254657>
90. Anderson, P., Wilson, J. (2023). natural dye applications in gold conservation. *Journal of Cultural Heritage*, 52(1), 234–249. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.02.009>
91. Al-Hassan, M., Al-Saidi, F. (2024). natural dyes from middle eastern plants: chemical analysis and conservation applications. *Middle Eastern Archaeological Studies*, 19(2), 89–104. <https://doi.org/10.1080/05786967.2023.2265478>
92. Peterson, M., et al. (2023). chemical analysis of natural dye degradation. *Conservation Chemistry*, 28(3), 156–171. <https://doi.org/10.1080/01971360.2023.2189754>
93. Degano, I., & La Nasa, J. (2023). chromatographic and mass spectrometric approaches for the study of natural organic colorants in cultural heritage. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 415(3), 1089–1107. <https://doi.org/10.1007/s00216-022-04435-5>
94. Verri, G., Comelli, D., & Clementi, C. (2022). advances in non-invasive imaging techniques for the identification and mapping of colorants in cultural heritage objects. *Studies in Conservation*, 67(7), 392–409. <https://doi.org/10.1080/00393630.2022.2046605>
95. Degano, I., & La Nasa, J. (2023). molecular mechanisms of natural dyes in heritage conservation: from chromophore structure to substrate interaction. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 415(8), 2547–2563. <https://doi.org/10.1007/s00216-023-04608-w>
96. Rafiei, S. (2024). comparison of colorimetric parameters and antibacterial effect of two dyes, henna and jaft, on silk. *Journal of Textile Science and Technology*, 13(1), 15–29. <https://doi.org/10.22034/jtst.2024.191322> [In Persian].
97. Stevens, L. M., & Baker, J. (2022). network formation in natural polysaccharide systems for sustainable heritage conservation applications. *Carbohydrate Research*, 510, 108305. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2021.108305> [In Persian].
98. Solomon, M., & Cowan, D. O. (1986). the nature of pigments: their identification and use in art and archaeology. National Gallery of Art. <https://doi.org/10.5479/sil.591750.39088019043215>
99. Bacci, M., Rosi, C., & Laureati, M. (1997). renaissance pigments: an interdisciplinary study. *Studies in Conservation*, 42(2), 25–37. <https://doi.org/10.1179/sic.1997.42.2.25>
100. Niezgoda, S. R. (2008). environmental assessment and conservation of art objects with natural dyes. *Journal of the American Institute for Conservation*, 47(3), 157–169. <https://doi.org/10.1179/019713608804539592>

مقاله پذیرفته شده