

شناسایی و تمایز رنگدانه‌های آبی موسوم به لاجورد در تذهیب دوره صفویّه

محدثه حسینی صومعه^۱، حمیدرضا بخشنده فرد^{۲*}، حسام اصلانی^۲

۱- دانشجوی دکتری، گروه مرمت، دانشکده مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران، صندوق پستی: ۱۷۴۴

۲- استادیار، گروه مرمت، دانشکده مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران، صندوق پستی: ۱۷۴۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۶/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۴/۳۰ در دسترس به صورت الکترونیکی از: ۱۳۹۷/۱۱/۲۸

چکیده

در این پژوهش رنگدانه‌های آبی به لحاظ ترکیب شیمیایی و شکل در دو نسخه خطی متعلق به دوره صفویه مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای دستیابی به این هدف، از روش بررسی میکروسکوپی با لوپ دیجیتالی (Dino Light) و سپس میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDX) استفاده شد. نتایج حاصل از تجزیه عنصری سه نوع رنگدانه آبی را نشان دادند. در لاجورد طبیعی عنصر کلسیم وجود دارد، در حالی که در نمونه لاجورد مصنوعی این عنصر ناپیداست. در ترکیب شیمیایی رنگدانه لاجورد فرنگی نیز، عنصر کبالت مشخص گردید که آن را از دو نوع لاجورد دیگر متمایز می‌کند. تصاویر حاصل از SEM نیز تمایزهای شکل را برای ساختار آنان آشکار نمودند به طوری که ذراتی بلوری، گوشه‌دار و ناهمسان برای لاجورد طبیعی و فرنگی، و برای لاجورد مصنوعی ذراتی با لبه‌هایی گرد و بی‌شکل نمایان شدند.

واژه‌های کلیدی: رنگدانه لاجورد طبیعی، رنگدانه لاجورد مصنوعی، رنگدانه آبی فرنگی، تذهیب دوره صفویه، SEM-EDX.

Identification of Blue Pigments Known as Lazurite in The Illumination of The Safavid Era

M. Hosseini Someah, H. R. Bakhshandehfar*, H. Aslani

Department of Conservation of Historic Properties, Art University of Isfahan, P. O. Box: 1744, Isfahan, Iran

Received: 12-09-2017

Accepted: 21-07-2018

Available online: 17-02-2019

Abstract

In this research, blue pigments are evaluated in terms of their chemical composition and morphology in two manuscripts of the Safavid era. For this purpose, microscopic approach with Dino Light and SEM and EDX are used. The results of the element analysis showed three types of blue pigments. In natural lazurite, there is calcium. However, the element does not exist in artificial lazurite. In the chemical composition of western lazurite, there was cobalt that makes it distinct from other lazurite. SEM images also showed morphological components for their structure, so that there were crystal disparate particles for natural and western lazuli, and round shapeless particles were identified in artificial lazurite. *J. Color Sci. Tech.* 12(2019), 293-304©. Institute for Color Science and Technology.

Keywords: Natural lazurite Pigment, Artificial lazurite pigment, Western blue pigment, Illumination of the Safavid era, SEM-EDX.

۱- مقدمه

لاجورد از کلمه لاتین Lapis به معنای سنگ و Lazulus به معنای آبی گرفته شده، به این علت که کانی آن دارای دانه‌های معدنی مکعبی (Lazurite) و نوعی ارتعاش رنگ آبی تیره به رنگ رنگدانه معدنی پایه‌ای خود دارند [۱]. که این رنگ آبی ناشی از ارتعاش نسبت زرد و آبی S^{-2} و S^{-3} ، کروموفور رادیکالی یون گوگرد ($n=2,3S_n^-$) است که تنها در یکی از ترکیبات معدنی‌اش به نام لازوریت موجود است [۲، ۳]. لاجورد طبیعی یک ترکیب شیمیایی سولفور شامل سدیم، آلومینیم و سیلیکات‌های معدنی با فرمول $(Na,Ca)_8[(Al,Si)_{12}O_{24}]S_n$ است [۴]. به عنوان یک سنگ رسوبی معدنی، لازوریت معمولاً با دیگر سیلیکات‌های معدنی مانند؛ دیاپوسیت ($CaMgSi_2O_6$)، فورستریت (Mg_2SiO_4)، ولاستونیت ($CaSiO_3$)، کلسیت ($CaCO_3$)، پریست (FeS_2) [۲] و زیرکون ($ZrSiO_4$) همراه است [۵]. لاجورد طبیعی در تمدن‌های باستانی و به عنوان هدایای گران‌بها به واسطه شدت درخشش رنگ آبی خود شناخته شده است. همراهی لاجورد طبیعی با گروه‌های طلائی رنگ پریست (که گاهی با طلا اشتباه گرفته می‌شود) بر ارزش آن نسبت به سایر مواد می‌افزاید [۵]. مردمان باستان از اولین دوره‌های تاریخی رنگدانه‌های معدنی لاجورد، را که از جمله کانی‌های رنگی فلزات سنگین بودند، مورد استفاده قرار می‌دادند. این سنگ حداقل از هزاره سوم قبل از میلاد، شناخته شده بود و منبع اصلی آن در گذشته از معادن باستانی بدخشان (افغانستان کنونی) [۶، ۷] و شمال شرق آن بوده است. یعنی در دره سنگ آهکی رودخانه کوچک جایی که معدن سار سنگ و بیش از ۶۰۰ هزار سال استخراج داشته است. از دیگر منابع در شرق در ناحیه‌ای اطراف دریاچه بایکال (جنوب شرقی سیبری)، پاکستان، ایران، چین تبت، روسیه (کوه‌های اورال)، کشور برمه (میانمار) و رشته کوه‌های آند در شیلی (مکانی که تمدن پیشین کلمبیا (تمدن اینکاها) بوده) را می‌توان نام برد. رنگدانه آبی لاجورد گران‌ترین رنگدانه آبی در طی قرن ۱۴ تا ۱۷ میلادی با ترکیبی به فرمول شیمیایی $Na_6Ca_2Al_6Si_6O_{24}[(SO_4)_2S;Cl;(OH)]_2$ بوده است [۸]. پلینی بزرگ لاجورد طبیعی را به تکه‌ای از ستاره آسمان یا تکه‌ای از آسمان درخشان تشبیه می‌کند. قدیمی‌ترین موارد استفاده از لاجورد طبیعی در مهره‌ها و آویزهای قبل از سلسله تمدن‌های مصر باستان در حدود ۳۵۰۰ سال قبل شناخته شده است. این رنگدانه آبی در دیواره نگاره‌های رومی نیز تقریباً در ۱۸۰۰ سال قبل از میلاد مسیح نیز پیدا شده است [۵]. در دوره بیزانس، آبی لاجورد اصل را از سرچشمه‌های رود اگزوس در افغانستان به اروپا می‌آوردند. در همین زمان لاجورد به شمال یعنی ترکستان چین هم صادر می‌شد. در ایران نیز، کاربرد این سنگ لزوماً برای نقاشی نبود بلکه در مواردی همچون ساخت کاخ داریوش اول در شوش و احتمالاً دیواره نگاره‌های آن نیز به کار رفته است. در دوره اسلامی نیز سنگ لاجورد به همراه طلا، با ارزش‌ترین

رنگ در نگارگری محسوب می‌شده است. در تنسوق نامه ایلخانی نیز، لاجورد از دو واژه قدیمی ایرانی «لاج» به معنی خالص و تنها و «ورد» که نام گل به صورت عام می‌باشد، آورده شده است. لاجورد به معنی گل نیلوفر آبی که به صورت لاجوردی و لاجوردین آمده و نام رنگ را هم به یاد می‌آورد. به اعتقاد فوربس کیفیت مطلوب لاجورد در عهد باستان بسیار ابتدایی بوده و تهیه رنگ لاجوردی (فاقد سیلیس و سنگ آهک) بعد از قرن ششم و طی قرن هفتم میلادی در افغانستان پدید می‌آید و کاربرد آن در دوره بیزانسی آغاز می‌شود [۹].

آبی لاجورد مصنوعی در سال ۱۸۰۶ توسط کلمنت و دسارمز کشف شد و در سال ۱۸۲۴ میلادی جی بی گایمت موفق به سنتز آن شد و هنرمندان را از قید کمیابی رنگدانه‌های آبی معدنی همچون لاجورد اصل و آزوریت رها کرد [۱۰]. در اروپا نیز آبی اولترامارین (آبی لاجورد طبیعی) که با جدا شدن از ماده خام اولیه و با خردشدن، پودر کردن و پاک کردن از دیگر مواد معدنی لازوریت به دست می‌آمد، به طور وسیع در قرن‌های ۱۴ و ۱۵ میلادی در سراسر اروپا مورد استفاده قرار گرفت [۱۱]. در متون اسلامی، تنها در رساله سیمی نیشابوری، روشی برای ساخت لاجورد مصنوعی ارائه شده است که لاجورد عملی نامیده شده که از نیل و سفیدآب بوده است و دستورالعمل دیگری در این خصوص نیست [۹].

لاجورد فرنگی معروف به آبی اسمالت، یکی از قدیمی‌ترین رنگدانه‌های کبالت با فرمول $(CoO-nSiO_2)$ که در دنیای باستانی مصر و بین‌النهرین مورد استفاده بوده است. در اروپا نیز در اوایل قرون وسطی در آثار شیشه‌ای و لعاب سرامیک‌ها کاربرد داشته است [۱۱]. این رنگدانه در نیمه قرن ۱۵ میلادی کاربرد فراوانی در میان نقاشان با روش روغن و فرسک داشت. در قرن ۱۷ میلادی، آبی اسمالت یکی از رنگدانه‌های آبی اصلی در نقاشی سبک باروک بود. این رنگدانه شیشه پتاسیم‌دار به همراه اکسید کبالت است که از گداختن کانه‌های طبیعی کبالت نظیر کبالتیت ($CoAsS$) و اسمالتیت ($CoAs_2$) و تبدیل آنان به اکسید کبالت تهیه می‌شود [۱۲]. اسمالت نام معمول رنگدانه‌ای است که میان قرن ۱۶ تا ۱۸ میلادی در دست هنرمندان قرار گرفت. توانایی ته رنگ‌های نمک‌های کبالت در شیشه به مصری معروفند. رنگ آبی اصلی در حقیقت ناشی از محیط شیمیایی تتراهیدرال Co^{+2} است. وضعیت اتم‌های اکسیژن در اطراف کبالت باعث سطوح سه بعدی تقسیم شدنی می‌شوند به طوری که فوتون‌ها در محدوده مرئی را جذب می‌کنند [۱۳]. ناخالصی‌های موجود در شیشه‌های غنی از پتاسیم که از ۰.۵ تا ۱۰ درصد کبالت دارند، شدت رنگ آبی را تشدید می‌کنند. در قرن ۱۷ میلادی، بسیاری از منابع معروف کبالت اروپا از اتولبرگ آلمان مرکزی که سنگ‌های سولفیدی غنی از کبالت داشت تهیه می‌شد، اما دیگر عناصر دو ظرفیتی مانند؛ آهن، نیکل و استرانسیم را نیز به همراه داشت [۱۳]. در متون اسلامی نیز دو متن به لاجورد- کبالت اشاره نموده‌اند، و ساخت لاجورد بدلی را بیان نموده‌اند. در مجموعه صنایع

آن دارای سرلوحه بسیار زیبایی است. در دو صفحه نخستین نام دعا با طلا و حاشیه زرین دو جدولی با زر و لاجورد مزین گشته است (شکل ۱). این نسخه خطی به خط عبدالله یزدی نگاشته شده و تاریخ کتابت مشخص نیست که یحیی خان مشیرالدوله (وزیر امور خارجه دولت ایران) در تاریخ شعبان ۱۳۰۴ هـ.ق. این نسخه را به فرزندش معتمدالملک هدیه کرده است.

۲-۱-۲- نسخه خطی جُنگ شعر

نسخه خطی جُنگ شعر با شماره اموالی ۵۳۱۹، متعلق به دوره صفوی (قرن دهم هجری قمری) مجموعه اشعاری است که هر بخش آن مربوط به شعر یک شاعر است و نویسنده آن هم در همه بخش‌ها مشخص نیست. این مجموعه حاوی اشعاری از شاعران قرن ششم تا نهم هجری همچون بدرالدین، قوامی رازی، سنائی غزنوی، عمادی غزنوی، سعدی شیرازی، عبدالواسع جلیلی، غیره می‌باشد که به خط نستعلیق خوش در قرن دهم هجری قمری نگاشته شده است. رنگدانه آبی به کار رفته در تذهیب و جدول کشی این نسخه دارای تنوع رنگدانه آبی است، به طوری که بخش‌های اول، وسط و تا به آخر دارای رنگدانه آبی متفاوت از یکدیگر می‌باشند (شکل ۲).

۲-۲- دستگاه‌های مورد استفاده

در این پژوهش به منظور دستیابی به اطلاعات فنی از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. از نمونه رنگدانه‌های آبی هر دو اثر مذکور، جهت بررسی و تمایز ساختاری و ریخت، نمونه‌برداری شد. این نمونه‌ها با تیغ بیستوری برداشته و در میکروتیوپ نگه‌داری شدند تا جهت انجام آنالیزهای دستگاهی آماده گردند. محل نمونه‌ها و حروف اختصاری برای هر یک از نمونه‌ها در جدول ۱، بیان گردیده است.



شکل ۱: صفحه نخستین نسخه خطی ۱۳۹.

نیز از سنگی سیاه، بسیار سست و نرم که از کوهی در کاشان آورده شده که مورد استفاده شیشه‌گران و معرف کبالت بوده، نام برده شده است [۹]. این رنگدانه همانند رنگدانه لاجورد طبیعی استفاده فراوانی در کارهای هنری داشته است. به این دلیل که ارزان‌تر از لاجورد طبیعی، آزروریت و آبی اولترامارین بوده است. این رنگدانه اغلب به واسطه روغن چسباننده خود رو به زوال رفته و باعث تغییرات ظاهری در نقاشی می‌شود [۸] و به مرور زمان به سمت قهوه‌ای و خاکستری تا سبز شدن پیش می‌رود. علت این امر ناشی از مقادیر زیاد شیشه پتاسیم‌دار در ساختار این رنگدانه است که منجر به ناپایداری این رنگدانه می‌شود. لاجورد فرنگی به دلیل ماهیت شیشه‌ای و شفاف خود قدرت پوشانندگی خوبی نداشته و به همین دلیل در اوایل قرن ۱۹ میلادی کاربرد آن متوقف شد [۱۱]. برای شناسایی رنگدانه‌ها، ابزارها و دستگاه‌های مختلفی وجود دارند؛ از جمله میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) که برای بررسی سطح و ریخت‌شناسی رنگدانه‌ها استفاده می‌شود [۱۴]. در واقع ساختار میکروسکوپی و ترکیبات شیمیایی رنگدانه‌ها با این دستگاه شناسایی می‌گردد [۱۵]. هنگامی که طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDX) به کار گرفته می‌شود، شناسایی رنگدانه‌ها میسر می‌شود [۱۶، ۱۷]. این دستگاه امکان بررسی ریخت‌شناسی سطوح و ترکیبات عنصری رنگدانه‌ها را در ابعاد بالایی میکرون و زیر میکرون فراهم می‌آورد [۳]. شناسایی رنگدانه‌های مورد استفاده در آثار هنری از این جهت که به امر مرمت، حفاظت، تاریخ‌گذاری و زیبایی‌شناسی آنان کمک می‌نماید مهم است و منجر به دستیابی اطلاعات تاریخی، هنری، فنی و اقتصادی در خصوص آنان می‌شود [۱۷]. از آنجا که بخش اعظم تذهیب و نگارگری نسخ خطی، مرقرعات و نگاره‌های دوره‌های ایرانی - اسلامی با این رنگدانه‌های آبی زینت یافته‌اند، ضروری است تا پژوهشی در خصوص تفاوت و تمایز میان رنگدانه‌های موسوم به لاجورد صورت گیرد. هدف از این پژوهش، بررسی رنگدانه‌های آبی در دو نسخه خطی است تا علاوه بر بیان تفاوت ظاهری در رنگ‌های آبی تذهیب، فن ساختاری و ترکیب شیمیایی این رنگدانه‌ها به لحاظ ریخت و شکل ساختاری نیز تعیین گردند. این امر تدویر کتاب آرابی را نیز در نسخ خطی آشکار می‌کند. بنابراین از رنگدانه‌های آبی دو اثر تاریخی (نسخه خطی جُنگ شعر و نسخه خطی دعا) موجود در کتابخانه و موزه ملی ملک که همگی مربوط به دوره صفویه (اوایل و اواخر این دوره) بودند، نمونه‌برداری شد و مورد بررسی قرار گرفتند.

۲- بخش تجربی

۲-۱- معرفی نمونه‌های مطالعاتی

۲-۱-۱- نسخه خطی دعا

این نسخه خطی با شماره اموالی ۱۳۹ در موسسه کتابخانه و موزه ملی ملک موجود است که به خط نسخ نوشته شده و صفحه نخستین

جدول ۱: علائم و حروف اختصاری مربوط به نمونه‌ها.

حروف اختصاری	نمونه رنگدانه آبی	ردیف	نام اثر
BD ₁₃₉	آبی تیره تذهیب	۱	
BL ₁₃₉	آبی روشن تذهیب	۲	نسخه خطی الدعا- شماره اموالی ۱۳۹
B ₁₃₉	آبی روشن جدول کشی	۳	
BD _J	آبی تیره جنگ شعر	۱	
BL _J	آبی روشن جنگ شعر	۲	نسخه خطی جنگ شعر- شماره اموالی ۵۳۱۹
B _{39J}	آبی صفحه ۳۹ از جنگ شعر	۳	
B _{441J}	آبی صفحه ۴۴۱ از جنگ شعر	۴	



شکل ۲: سمت راست، برگ نخست از مجموعه جنگ شعر و سمت چپ، رنگدانه آبی مورد استفاده در تذهیب نسخه خطی جنگ شعر.

ساختاری و شیمیایی باشند که برای اثبات آن، نمونه هر یک از رنگدانه‌های آبی در هر دو اثر پس از آنالیز عنصری و ساختاری مورد بررسی قرار گرفت. جدول ۲ عناصر به دست آمده از تجزیه عنصری SEM-EDX از رنگدانه‌های آبی دو نسخه خطی را نشان می‌دهد. در نمونه ردیف ۱ نسخه خطی ۱۳۹، عنصر سدیم زیر ۱٪ و عناصر آلومینیم، سیلیس و گوگرد کمتر از ۲٪ درصد وزنی رنگدانه آبی را به خود اختصاص داده‌اند. نمونه ردیف ۲ این نسخه خطی نیز کمتر از ۲٪ وزنی رنگدانه آبی را به خود اختصاص داده‌اند. این درحالی است که در نمونه ردیف ۱ نسخه خطی جنگ شعر، عنصر سدیم در حدود ۹٪، آلومینیم ۱۰٪، سیلیس ۱۱٪ و گوگرد ۴٪ درصد وزنی را شامل شده است. در این میان عنصر کلسیم در دو رنگدانه تیره و روشن نسخه خطی الدعا با مقادیر کمتر از ۹٪ و ۳٪ در مقابل میزان کلسیم آبی نسخه خطی جنگ شعر قرار گرفته است. این عناصر همگی نشان‌دهنده لاجورد طبیعی استخراج شده با فرمول $(\text{Na}, \text{Ca})_8(\text{AlSiO}_4)_6(\text{SO}_4, \text{S}, \text{Cl})_2$ و مربوط به آسیا می‌باشد [۱].

برای بررسی سطوح و ریخت‌شناسی سطح رنگدانه‌های مطالعاتی موجود در دو اثر تاریخی، پس از پوشش دادن با طلا از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، ساخت شرکت TESCAN، مدل VEGA3 است که به سیستم آنالیزگر EDX مجهز و توانایی شناسایی عناصر سنگین‌تر از بور را داراست. در این پژوهش، آنالیز نمونه‌ها در ولتاژ شتاب‌دهندگی ۱۲ K V انجام شد. همچنین از میکروسکوپ لوپ دیجیتال (Dino- Light) با بزرگ‌نمایی در حدود ۵۰۰ برابر، جهت بررسی جزئیات رنگدانه‌ها بر سطح کاغذ استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- رنگدانه آبی لاجورد اصل

۳-۱-۱- تجزیه عنصری EDX نمونه‌ها

بر مبنای مطالعات تاریخی، اغلب نگاره‌ها و تذهیب‌های نسخ خطی دوره صفویه از هم‌نشینی رنگ آبی لاجورد با طلا زینت یافته‌اند. با بررسی تنوع رنگی این رنگدانه در تذهیب‌ها و جدول کشی‌های نسخ خطی چنین فرضی شد که این رنگدانه‌ها می‌بایست دارای تمایزات

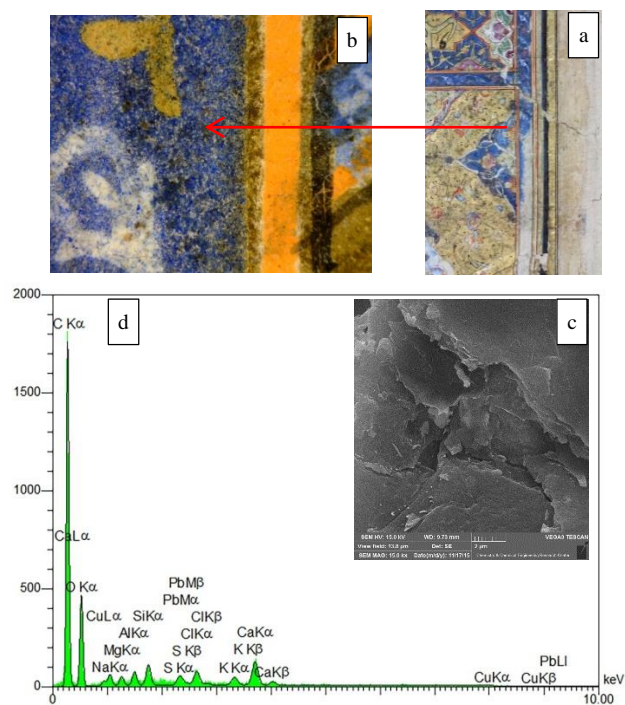
جدول ۲: درصد وزنی عناصر حاصل از آنالیز SEM-EDX رنگدانه لاجورد طبیعی.

نسخه خطی جنگ شعر - ۵۳۱۹		نسخه خطی الدعاء - ۱۳۹				Line	Elt
آبی تیره (BD ₁)		آبی روشن (BL ₁₃₉)		آبی تیره (BD ₁₃₉)			
%A	%W	%A	%W	%A	%W		
۲۱,۰۹	۱۱,۲۹	۵۲,۷۳	۱۸,۸۷	۷۱,۳۱	۵۶,۱۴	Ka	C
۴۶,۳۴	۳۳,۰۳	۲۵,۶۶	۱۲,۲۳	۱۹,۴۸	۲۰,۴۳	Ka	O
۸,۴۸	۸,۶۹	۲,۰۵	۱,۴۱	۰,۶۴	۰,۹۷	Ka	Na
-	-	۱,۶۱	۱,۱۷	۰,۴۶	۰,۷۴	Ka	Mg
۷,۹۹	۹,۶۰	۱,۶۴	۱,۳۲	۰,۶۷	۱,۱۹	Ka	Al
۸,۶۶	۱۰,۸۴	۲,۱۰	۱,۷۵	۱,۰۶	۱,۹۶	Ka	Si
۲,۲۱	۳,۱۶	-	-	۰,۵۳	۱,۱۲	Ka	S
-	-	-	-	۱,۲۲	۲,۸۴	Ka	Cl
۱,۱۱	۱,۹۴	-	-	۰,۹۵	۲,۴۴	Ka	K
-	-	۱,۵۹	۱,۴۷	-	-	Ka	P
۲,۲۱	۳,۹۴	۲,۵۴	۳,۰۴	۳,۱۸	۸,۳۶	Ka	Ca
-	-	-	-	۰,۲۸	۱,۱۷	La	Cu
-	-	۱,۰۷	۳,۵۷	-	-	La	Cd
-	-	۱,۵۸	۹,۳۰	-	-	Ma	Au
۱,۹۰	۱۷,۵۱	۷,۴۳	۴۵,۸۷	۰,۱۹	۲,۶۴	Ma	Pb
۱۰۰,۰۰	۱۰۰,۰۰	۱۰۰,۰۰	۱۰۰,۰۰	۱۰۰,۰۰	۱۰۰,۰۰		

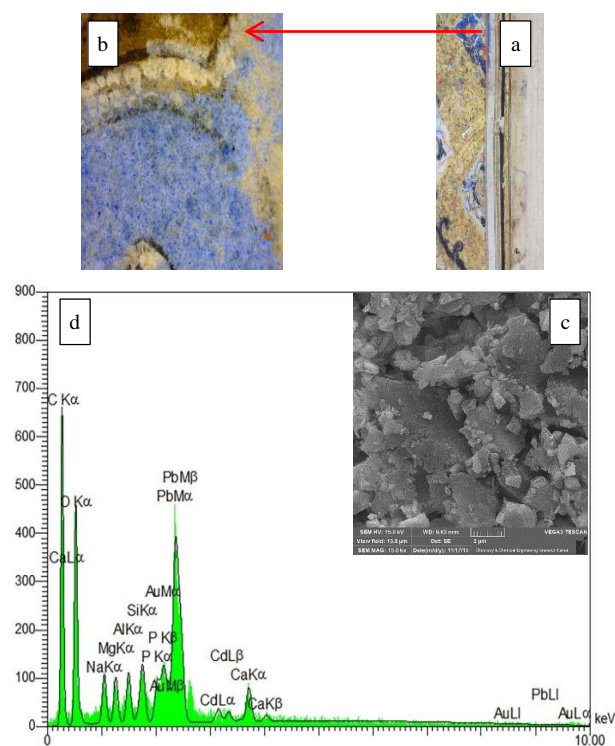
«سپیده کمانگران» نامیده شده و از رنگمایه‌های اصلی سفید در نگارگری ایران دانسته شده است که جهت کاهش تیرگی رنگ با دیگر رنگ‌ها به کار می‌رفته است [۹]. هنرمندان معمولاً برای به دست آوردن آبی‌های مختلف (شیدهای رنگی) آن را با سفیدآب شیخ (2PbCO₃.Pb(OH)₂) می‌آمیختند [۲۰، ۱۹]. همچنین وجود عنصر منیزیم در نمونه‌ها حضور پرکننده‌هایی مانند پلک (نمک منیزیم خالص) و تالک را نشان می‌دهند. پلک محلول، مرکب سفیدی است که در رساله خوشنویسی سیمی نیشابوری و گلزار صفا از آن یاد شده و در کتاب مجموعه صنایع برای ساخت بتونه یه آن اشاره گشته است [۹]. تالک یا سنگ صابون نیز، همان سیلیکات منیزیم آبدار به فرمول 3MgO.4SiO₂.H₂O است که به علت نرمی زیاد، جهت یکدستی ذرات، ایجاد لایه صاف و نازک به عنوان پرکننده به ماده رنگی اضافه می‌شود [۶]. سایر عناصر اضافی از جمله کلسیم و پتاسیم می‌تواند از ناشی از استخراج لاجورد طبیعی، تصفیه و یا شستشوی سنگ لاجورد طبیعی در هنگام تهیه رنگ لاجوردی باشد [۹] که در طیف‌سنجی ظاهر گشته‌اند. در تصاویر زیر محل نمونه، پیک تجزیه عنصری رنگدانه لاجورد طبیعی و تصویر حاصل از SEM برای هر نمونه آورده شده است (شکل‌های ۳، ۴ و ۵).

یکی از مشکلات شناسایی رنگدانه آبی لاجورد به دلیل برانگیختگی کم و آشکاری اندک عنصر کلسیم است که شاخصه اصلی و مشخصه این رنگدانه است [۱۸]. وجود عنصر کلسیم در این تجزیه عنصری، تصدیق بر لاجورد طبیعی می‌باشد. به طوری که لاجورد طبیعی با دیگر سیلیکات‌های معدنی آهکی، همچون کلسیت همراه است [۱]. بنابراین هنرمند از لاجورد طبیعی با دو رنگ تیره و روشن برای تذهیب نسخه خطی الدعاء و آبی تیره برای کتاب آرایه نسخه خطی جنگ شعر استفاده کرده است (نوارهای آبی در جدول ۱).

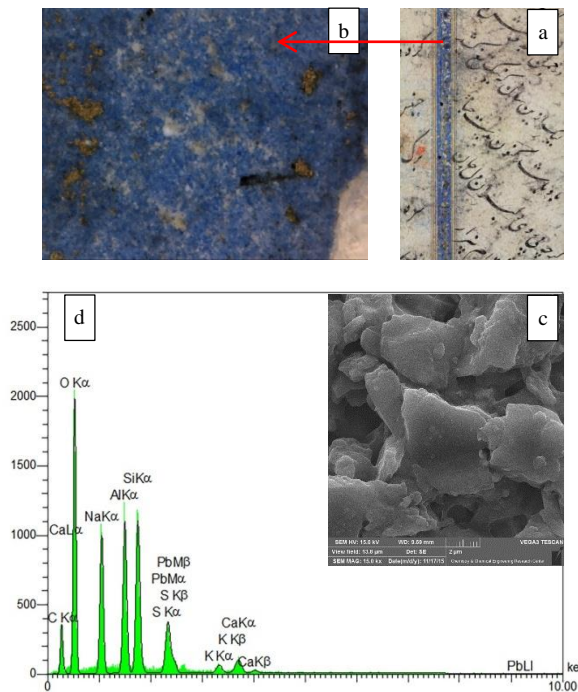
اگر چه در این میان عنصر سرب با درصد وزنی در حدود ۱۸٪، کربن ۱۱,۵٪ و عنصر اکسیژن ۳۳٪ دارای بیشترین درصد وزنی می‌باشند، اما عناصری هستند که در ترکیب با این رنگدانه آبی لاجورد طبیعی به کار رفته‌اند. این عناصر نشان‌دهنده سفیدآب شیخ است که جهت روشن نمودن رنگدانه آبی لاجورد به پالت رنگی هنرمند اضافه شده‌اند. کربنات قلیایی سرب یا سفیدآب شیخ از مهم‌ترین رنگدانه‌های سرب با حدود ۷۰ درصد کربنات سرب و ۳۰ درصد هیدرات سرب است. این رنگدانه معمولاً با ترکیب با یک روغن مورد استفاده قرار گرفته [۱۸] و در کتاب عرایس الجواهر و نفایس،



شکل ۳: تصاویری از رنگدانه آبی تیره (BD₁₃₉) در نسخه خطی ۱۳۹: a، محل رنگدانه آبی در سرلوحه تذهیب؛ b، ریخت‌شناسی سطح رنگدانه آبی در بزرگ‌نمایی ۴۲۵ برابر با Dino light، c، تصویر SEM از ریخت‌شناسی سطح رنگدانه با بزرگ‌نمایی ۱۵۰۰۰ برابر و d، طیف EDX.



شکل ۴: تصاویری از رنگدانه آبی روشن (BL₁₃₉) در نسخه خطی ۱۳۹: (a) محل رنگدانه آبی در سرلوحه تذهیب، (b) ریخت‌شناسی سطح رنگدانه آبی در بزرگ‌نمایی ۴۲۵ برابر با Dino light، (c) تصویر SEM از ریخت‌شناسی سطح رنگدانه با بزرگ‌نمایی ۱۵۰۰۰ برابر و (d) طیف EDX.



شکل ۵: تصاویری از رنگدانه آبی تیره (BDJ) در نسخه خطی جنگ شعر ۵۳۱۹: (a) محل رنگدانه آبی تیره در جدول کشی و تذهیب، (b) ریخت‌شناسی سطح رنگدانه آبی در بزرگ‌نمایی ۴۲۵ برابر با Dino light، (c) تصویر SEM از ریخت‌شناسی سطح رنگدانه با بزرگ‌نمایی ۱۵۰۰۰ برابر و (d)، طیف EDX.

تجزیه عنصری در جدول ۳ نشان می‌دهد که تنها در یک نمونه، تفاوت ساختاری شیمیایی با دیگر نمونه‌های آبی وجود دارد. نمونه ردیف ۲ نسخه خطی جنگ شعر، در صد وزنی عنصر سدیم و آلومینیم را کمتر از ۱٪ و سیلیس را کمتر از ۲٪ وزنی بیان داشته است. لاجورد مصنوعی از نوع طبیعی آن در طیف‌سنجی به سختی شناسایی می‌شود، زیرا که لاجورد مصنوعی یا آبی اولترامارین کپی ساختاری از نمونه اصل خود است [۲۲]. اگر چه حضور این عناصر همگی نشان‌دهنده لاجورد می‌باشند، اما عنصر کلسیم در این میان مشاهده نشده است (شکل ۶). بنابراین هنرمند برای آبی روشن نسخه خطی جنگ شعر از لاجورد مصنوعی استفاده کرده است (نوار سبز در جدول ۱).

۲-۲-۳- آنالیز SEM نمونه‌ها

لاجورد مصنوعی برخلاف نوع طبیعی آن دارای ذرات یک‌دست و همگن است (c در تصویر ۶). ذرات گرد آن دارای ابعاد مشابه با ذرات سفیدآب سرب است [۲۳]. استفاده از این رنگدانه آبی برای اولین بار برای تصویرسازی در کتب احتمالاً حدود سال ۱۸۳۰ و یا زودتر بوده است.

۲-۱-۳- ریخت‌شناسی نمونه‌ها

نمونه رنگدانه‌های آبی با نام‌های BL139, BD139, BDJ با بزرگ‌نمایی ۴۲۵ برابر با لوپ دیجیتال و هم با میکروسکوپ الکترونی مورد بررسی قرار گرفتند. در تصاویر Dino light، دارای ذرات غیرهمسان و گوشه‌دار مشاهده شدند (تصاویر b در شکل‌های ۳، ۴ و ۵). در تصاویر SEM نیز ذرات به صورت گوشه‌دار، ناهمسان و شکسته‌شده مشاهده شدند (تصاویر c در شکل‌های ۴، ۵ و ۶). به لحاظ شکل ظاهری، ذرات کاملاً آبی و نیمه‌شفاف لاجورد طبیعی دارای شکستگی‌های صدفی شکل هستند، که اگر کاملاً پودر وریز نشده باشند دارای ذرات درشت و گوشه‌دار با زاویه‌های تند می‌باشند [۶]. در تصاویر SEM نیز، مورفولوژی ذرات و تنوع در اندازه ذرات پراکنده رنگدانه آبی لاجورد متفاوت از ذرات یک اندازه، کوچک و گرد رنگدانه مصنوعی آن است [۱، ۲۱].

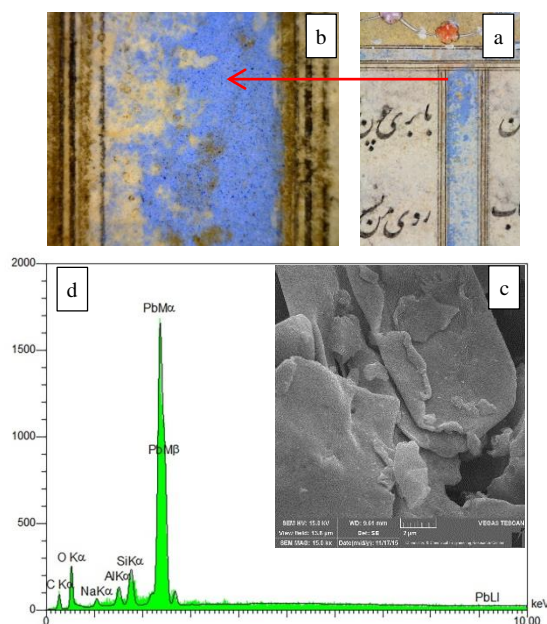
۲-۳- رنگدانه آبی لاجورد مصنوعی

۲-۱- آنالیز EDX نمونه‌ها

جدول ۳، عناصر به دست آمده از تجزیه عنصری SEM-EDX از رنگدانه‌های آبی دو نسخه خطی را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از این

جدول ۳: درصد وزنی عناصر حاصل از آنالیز SEM-EDX رنگدانه لاجورد مصنوعی.

نسخه خطی جنگ شعر - ۵۳۱۹		Line	Elt
آبی روشن (BLJ)			
%A	%W		
۱۵,۵۳	۱,۷۱	Ka	C
۲۵,۳۲	۳,۷۱	Ka	O
۱,۶۲	۰,۳۴	Ka	Na
۲,۹۷	۰,۷۳	Ka	Al
۶,۰۰	۱,۵۴	Ka	Si
۴۸,۵۴	۹۱,۹۷	Ma	Pb
۱۰۰,۰۰	۱۰۰,۰۰		



شکل ۶: تصاویری از رنگدانه آبی روشن (BLJ) در نسخه خطی جنگ شعر ۵۳۱۹: (a) محل رنگدانه آبی تیره در جدول کشی و تذهیب، (b) ریخت‌شناسی سطح رنگدانه آبی در بزرگ‌نمایی ۴۲۵ برابر با Dino light، (c) تصویر SEM از ریخت‌شناسی سطح رنگدانه با بزرگ‌نمایی ۱۵۰۰۰ برابر و (d) طیف EDX.

۳-۳-۳ رنگدانه آبی لاجورد فرنگی

۱-۳-۳ آنالیز عنصری (SEM-EDX) نمونه‌ها

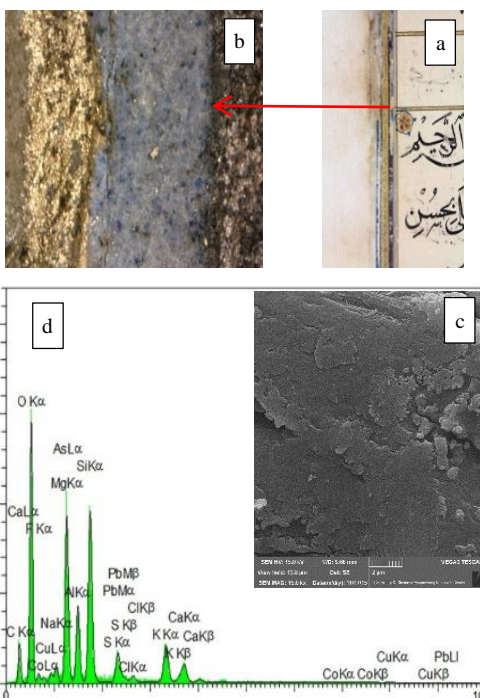
فازهای عنصری و ترکیبی دو نمونه دیگر برداشته شده از رنگدانه‌های جنگ شعر، با نام‌های B39J, B441J و یک نمونه از رنگدانه آبی نسخه خطی ۱۳۹ به نام B139 با آنالیز EDX مورد ارزیابی قرار گرفت (شکل‌های ۸، ۷ و ۹). در همه این نمونه‌ها علاوه بر سیلیس سازنده سیلیکات‌ها، آلومین و پتاسیم، عنصر کبالت نیز مشاهده شد. این ترکیبات همانند ترکیبات رنگدانه آبی لاجورد فرنگی می‌باشد. لاجورد فرنگی ترکیبی از سیلیکات پتاس می‌باشد که با اکسید کبالت رنگ شده است. البته در شیشه‌های آبی رنگ مصری درصد کمی از کبالت به همراه مس کشف شده است. بنابراین هنرمند برای تذهیب برخی از بخش‌های نسخه خطی الدعا و جنگ شعر از آبی لاجورد فرنگی استفاده کرده است (نوارهای صورتی در جدول شماره ۱).

۲-۳-۳ ریخت‌شناسی نمونه‌ها

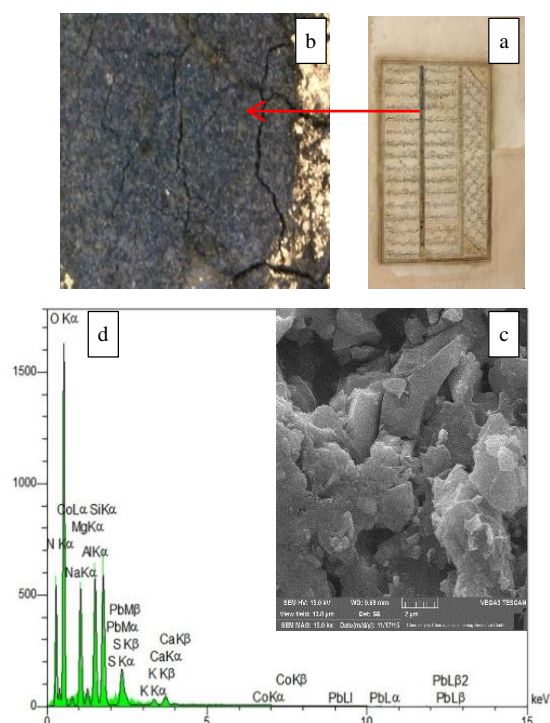
نمونه رنگدانه‌های آبی فرنگی با نام‌های B139, B441J, B39J با بزرگ‌نمایی ۴۲۵ برابر با لوپ دیجیتال و هم با میکروسکوپ الکترونی مورد بررسی قرار گرفتند. در تصاویر Dino light، با دانه‌بندی مختلف و شیشه‌ای مشاهده شدند (تصاویر b در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰). ساختار میکروسکوپی لاجورد فرنگی، به صورت شیشه‌ای و شکستگی‌های حلزونی شکل حتی با بزرگ‌نمایی‌های کم قابل مشاهده است. ذرات گوشه‌دار یا مدور، ذراتی با لبه‌های پهن و نازک (برخی شبیه تیغه‌های تیز) و وجود حباب‌های درشت هوا در ذرات همگی از ویژگی‌های ساختاری لاجورد فرنگی است [۶] در تصاویر SEM نیز ذرات به صورت گوشه‌دار، ناهمسان و با شکستگی نوک تیز مشاهده شدند (تصاویر c در شکل‌های ۷، ۸ و ۹).

جدول ۴: درصد وزنی عناصر حاصل از آنالیز SEM-EDX رنگدانه لاجورد فرنگی.

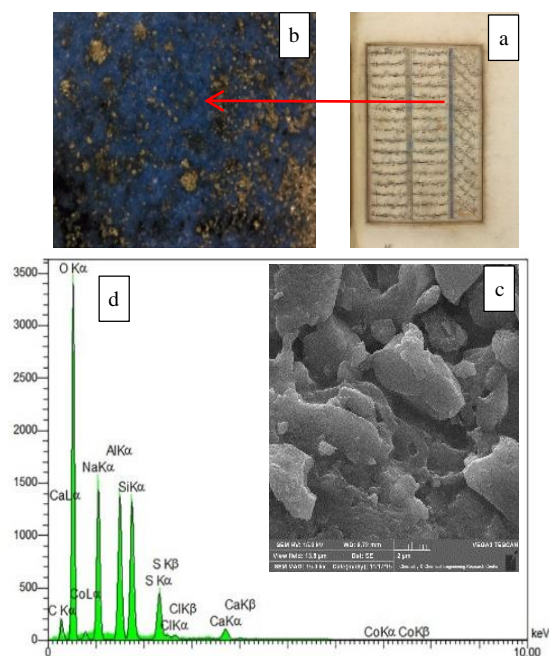
نسخه خطی جنگ شعر - ۵۳۱۹				نسخه خطی الدعا - ۱۳۹		Line	Elt
آبی صفحه ۴۴۱ (B441J)		آبی صفحه ۳۹ (B39J)		آبی جدول کشی (B139)			
%A	%W	%A	%W	%A	%W		
۱۲,۰۹	۷,۵۰	۳۰,۸۷	۲۰,۴۱	۱۸,۵۹	۱۰,۴۶	Ka	C
۵۵,۰۳	۴۵,۵۰	۴۲,۷۹	۳۷,۶۸	۴۶,۱۲	۳۴,۵۸	Ka	O
-	-	-	-	۱,۲۹	۱,۱۵	Ka	F
۹,۹۹	۱۱,۸۸	۵,۰۴	۶,۳۷	۰,۹۸	۱,۰۶	Ka	Na
-	-	۰,۶۵	۰,۸۸	۸,۲۲	۹,۳۷	Ka	Mg
۸,۳۰	۱۱,۵۷	۴,۸۷	۷,۲۳	۴,۰۱	۵,۰۷	Ka	Al
۸,۳۳	۱۲,۰۹	۵,۳۸	۸,۳۱	۹,۴۳	۱۲,۴۰	Ka	Si
۳,۹۶	۶,۵۶	۱,۴۷	۲,۶۰	۱,۸۲	۲,۷۳	Ka	S
۰,۴۳	۰,۸۰	-	-	۰,۵۲	۰,۸۶	Ka	Cl
-	-	۰,۵۰	۱,۰۷	۴,۴۱	۸,۰۸	Ka	K
۱,۶۳	۳,۳۸	۰,۹۱	۲,۰۰	۲,۵۹	۴,۸۷	Ka	Ca
۰,۲۴	۰,۷۳	۰,۳۹	۱,۲۵	۰,۴۴	۱,۲۱	La	Co
-	-	-	-	۰,۶۰	۱,۷۷	La	Cu
-	-	-	-	۰,۵۱	۱,۷۹	Ma	As
-	-	۰,۶۳	۷,۱۹	۰,۴۷	۴,۶۱	Ma	Pb
۱۰۰,۰۰	۱۰۰,۰۰	۱۰۰,۰۰	۱۰۰,۰۰	۱۰۰,۰۰	۱۰۰,۰۰		



شکل ۷: تصاویری از رنگدانه آبی جدول کشی (B139) در نسخه خطی ۱۳۹، (a) محل رنگدانه آبی در جدول کشی، (b) ریخت‌شناسی سطح رنگدانه آبی در بزرگ‌نمایی ۴۲۵ برابر با Dino light، (c) تصویر SEM از ریخت‌شناسی سطح رنگدانه با بزرگ‌نمایی ۱۵۰۰۰ برابر و (d) طیف EDX.



شکل ۸: تصاویری از رنگدانه آبی جدول کشی در صفحه ۳۹ (B39J) در نسخه خطی جنگ شعر ۵۳۱۹، (a) محل رنگدانه آبی در جدول کشی، (b) ریخت‌شناسی سطح رنگدانه آبی در بزرگ‌نمایی ۴۲۵ برابر با Dino light، (c) تصویر SEM از ریخت‌شناسی سطح رنگدانه با بزرگ‌نمایی ۱۵۰۰۰ برابر و (d) طیف EDX.



شکل ۹: تصاویری از رنگدانه آبی جدول کشی در صفحه ۴۴۱ (B441J) در نسخه خطی جنگ شعر ۵۳۱۹، (a) محل رنگدانه آبی در جدول کشی، (b) ریخت‌شناسی سطح رنگدانه آبی در بزرگ‌نمایی ۴۲۵ برابر با Dino light، (c) تصویر SEM از ریخت‌شناسی سطح رنگدانه با بزرگ‌نمایی ۱۵۰۰۰ برابر و (d) طیف EDX.

۴- نتیجه‌گیری

آبی موسوم به لاجورد در این آثار استفاده شده‌اند. در نسخه خطی الدعا دو نوع لاجورد به کار رفته است، به طوری که در تذهیب صفحه نخست آن، از لاجورد طبیعی با دو شید تیره و روشن استفاده گردیده

آزمون‌های انجام شده بر روی رنگدانه‌های آبی موجود در تذهیب و جدول کشی دو اثر خطی متعلق به دوره صفویه نشان دادند که سه نوع

طبیعی و فرنگی نشان می‌دهند، در حالی که در لاجورد مصنوعی این ذرات دارای لبه‌هایی گرد و بی‌شکل هستند. علاوه بر این سفید آب شیخ از جمله رنگدانه‌های دیگری بود که برای روشن نمودن رنگ‌های آبی این دو اثر استفاده شده است. همچنین پرکننده‌هایی همچون طلق یا تالک، با ساختاری از عنصر شیمیایی منیزیم در تهیه رنگدانه‌های لاجورد به آن افزوده شده‌اند. از آنجا که این تنوع رنگدانه‌های آبی لاجورد در طول یک نسخه خطی توالی کار بر روی یک نسخه خطی را بیان می‌نماید، می‌تواند سختی شیوه ساخت و تهیه لاجورد طبیعی را نشان دهد که هنرمند را بر آن داشته است تا تنها در قسمت‌های مهم از جمله سرلوحه‌های تذهیب در برگه‌های آغازین نسخه از لاجورد طبیعی استفاده نماید و در طی کار از سایر رنگدانه‌های لاجورد مصنوعی و فرنگی استفاده نماید. بنابراین این تفاوت ساختاری در رنگدانه‌های آبی مورد استفاده در نسخ خطی تدور در تاریخ هنر رنگدانه‌ها را آشکار می‌سازد.

است. اما آبی مورد استفاده در جدول کشی‌های صفحات از نوع آبی فرنگی است که در تجزیه عنصری، عنصر کبالت را ظاهر نمود. در نسخه خطی جنگ شعر نیز آبی تیره از نوع لاجورد طبیعی شناسایی شد، اما آبی روشن لاجورد مصنوعی استفاده شده بود. سایر رنگ‌های آبی موجود در این نسخه خطی لاجورد فرنگی است که در تذهیب و جدول کشی‌های این نسخه خطی به کار رفته‌اند. نتایج حاصل از تجزیه عنصری SEM-EDX تفاوت میان این رنگدانه‌ها را به واسطه ساختار شیمیایی‌شان آشکار نمود. به طوری که در رنگدانه آبی لاجورد علاوه بر عناصر اصلی همچون سدیم، آلومینیم، سیلیس و گوگرد عنصر کلسیم نیز وجود دارد، این در حالی است که در لاجورد مصنوعی این عنصر ناپیداست. در ترکیب شیمیایی رنگدانه لاجورد فرنگی نیز کبالت وجود دارد که شاخصه این رنگدانه است و آن را از دو نوع لاجورد دیگر متمایز می‌کند. تصاویر حاصل از ریخت‌شناسی سطح رنگدانه‌های آبی نیز ساختار ذراتی بلور مانند، گوشه‌دار و ناهمسان را برای لاجورد

۵- مراجع

- I. Osticioli, N. F. C. Mendes, A. Nevin, F. P. S. C. Gil, M. Becucci, E. Castellucci, Analysis of natural and artificial ultramarine blue pigments using laser induced breakdown and pulsed Raman spectroscopy, statistical analysis and light microscopy. *Spectrochim. Acta Part A*. 73 (2009), 525–531.
- G. D. Smith, R. J. Klinshaw, The presence of trapped carbon dioxide in lapis lazuli and its potential use in geo-sourcing natural ultramarine pigment. *J. Cult. Herit.* 10 (2009), 415–421.
- Q. G. Zeng, G. X. Zhang, C. W. Leung, J. Zuo, Studies of wall painting fragments from Kaiping Diaolou by SEM/EDX, micro Raman and FT-IR spectroscopy. *J. Microchem.* 96 (2010), 330–336.
- V. S. F. Muralha, L. Burgio, R. J. H. Clarka, Raman spectroscopy analysis of pigments on 16–17th c. Persian manuscripts. *Spectrochim. Acta Part A*. 92 (2012), 21–28.
- E. M. A. Ali, H. G. M. Edwards, Analytical Raman spectroscopy in a forensic art context: The non-destructive discrimination of genuine and fake lapis lazuli. *Spectrochim Acta A*. 121 (2014), 415–419.
- R. J. Gentens, G. L. Stout, Painting materials: A short encyclopedia (Dover art instruction). *Chem.* 1942, 105–151.
- م. ب. کثیری، شناسایی رنگدانه لاجورد در نگاره‌های ایرانی با استفاده از روش‌های نشر پرتو ایکس القایی پروتون (PIXE) و میکروسکوپی نیروی اتمی (AFM). *نشریه علمی پژوهشی علوم و فناوری رنگ*. ۹(۱۳۹۴)، ۲۵۸–۲۵۱.
- N. Buzgar, A. Buzatua, A. I. Apopei, V. Cotiug, In situ raman spectroscopy at the voronet, monastery (16th century, romania): New results for green and blue pigments. *Vib. Spectrosc.* 72 (2014), 142–148.
- Y. Porter, Painters, painting and books (An essay on Persian technical literature 12- 19th centuries. 1998, 102–115.
- M. Bacci, D. Magrini, M. Picollo, M. Vervat, A study of the blue colors used by Telemaco Signorini (1835–1901). *J. Cult. Herit.* 10 (2009), 275–280.
- D. Jonynaite, J. Senvaitiene, A. Beganskiene, A. Kareiva, Spectroscopic analysis of blue cobalt smalt pigment. *J. Vib. Spectrosc.* 52 (2010), 158–162.
- S. Panighello, A. Kavcic, K. Vogel-Mikus, N. H. Tennent, A. Wallert, S. B. Hocevar, J. T. van Elteren, Investigation of smalt in cross-sections of 17th century paintings using elemental mapping by laser ablation ICP-MS. *Microchem J.* 125 (2016), 105–115.
- K. Janssens, G. V. D. Snickt, M. Alfeld, P. Noble, A. van Loon, J. Delaney, D. Conover, J. Zeibel, J. Dik, Rembrandt's 'Saul and David' (c. 1652): Use of multiple types of smalt evidenced by means of non-destructive imaging. *Microchem J.* 126 (2016), 515–523.
- C. Giraldo, J. I. Tobon, O. J. R. Baena, Ultramarine blue pigment: A non-conventional pozzolan. *J. Constr. Buil. Mater.* 36 (2012), 305–310.
- F. Gao, X. Zhou, H. Zhou, M. Li, H. Tong, S. Liu, Characterization and analysis of sandstone substrate, mortar layers, gold foils, and paintings of the Avalokitesvara Statues in Dazu County (China). *J. Cult. Herit.* 21 (2016), 881–888.
- A. Veiga, J. Mirao, A. J. Candeias, P. S. Rodrigues, D. M. Teixeira, V. S. F. Muralha, J. G. Teixeira, Pigment analysis of Portuguese portrait miniatures of 17th and 18th centuries by Raman Microscopy and SEM-EDS. *J. Raman Spectrosc.* 45(2014), 947–957.
- P. Jin, W. Huang, J. Wang, G. Zhao, X. I. Wang, The identification of the pigments used to paint statues of Feixiang Cliff in China in late 19th century by micro-Raman spectroscopy and scanning electron microscopy/energy dispersive X-ray analysis. *J. Mol. Struct.* 983 (2010), 22–26.
- L. Bonizzoni, A. Galli, G. Poldi, M. Milazzo, In situ non-invasive EDXRF analysis to reconstruct, stratigraphy and thickness of Renaissance pictorial multilayers. *J. X-Ray. Spectrom.* 36(2007), 55–61
- R. Sefcu, V. Pitthard, S. Chlumska, I. Turkova, A multianalytical study of oil binding media and pigments on Bohemian Panel Paintings from the first half of the 14th century. *J. Cult Herit.* (2016), 1–10.

20. N. Grassi, A. Migliori, P. A. Mand, H. Calvo del Castillo, Identification of lapis-lazuli pigments in paint layers by PIGE measurements. *J. Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. B.* 219–220 (2004), 48–52.
21. S. Bianchin, U. Casellato, M. Favaro, P. A. Vigato, M. P. Colombini, G. Gautier, Physico-chemical and analytical studies of the mural paintings at Kariye Museum of Istanbul. *J. Cult. Herit.* 9 (2008), 179–183.
22. B. Prieto, P. Sanmartín, L. P. Pardo, B. Silva, Recovery of the traditional colours of painted woodwork in the Historical Centre of Lugo (NW Spain). *J. Cult. Herit.* 12 (2011), 279–286.
23. A. Atrei, F. Benetti, S. Bracci, D. Magrini, N. Marchettini, An integrated approach to the study of a reworked painting “Madonna with child” attributed to Pietro Lorenzetti. *J. Cult. Herit.* 15(2014) 80–84.