



ترکیب طیف‌سنجی گسیل پرتو ایکس ذره-القایی و طیف‌سنجی گسیل پرتو گامای پروتون-القایی برای تجزیه‌ی رنگ لاجوردی در کاشی باستانی

مرجان قدیری*^۱، محمد ترکیهای اصفهانی^۱، امیدرضا کاکویی^۲، وحید فتح‌اللهی^۲

۱. دانشکده فیزیک، دانشگاه کاشان، صندوق پستی: ۸۷۳۱۷۵۱۱۶۷، کاشان - ایران

۲. پژوهشکده‌ی فیزیک و شتاب‌گرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران - ایران

چکیده: تجزیه با استفاده از باریکه‌ی یونی، به دلیل حساسیت بالا، سریع، بس‌عنصری بودن، غیرمخرب بودن و عدم استفاده از نمونه‌سازی به ویژه برای تجزیه‌ی رنگ‌دانه‌ها به طور گسترده استفاده می‌شود. از طیف‌سنجی گسیل پرتو ایکس ذره-القایی و طیف‌سنجی گسیل پرتو گامای پروتون-القایی با باریکه‌ی خارجی به طور هم‌زمان برای نمونه‌های بزرگ باستانی که در محیط خارج از خلأ تحت تابش قرار می‌گیرند استفاده می‌شود. در این کار پژوهشی از باریکه‌ی خارجی برای تجزیه‌ی نمونه‌های سنگ لاجورد و رنگ لاجوردی کاشی باستانی استفاده شد. با مقایسه‌ی طیف‌ها، مشخص شد که رنگ لاجوردی موجود در کاشی باستانی از رنگ‌دانه‌ی کبالت است در حالی که در سنگ لاجورد، کبالت وجود ندارد و سدیم عنصر مشخصه‌ی رنگ لاجوردی در نمونه‌های سنگ لاجورد است. هم‌چنین نشان داده شد که می‌توان با استفاده از تجزیه با باریکه‌ی یونی، لاجورد را شناسایی کرد.

کلیدواژه‌ها: گسیل پرتو ایکس ذره-القایی، گسیل پرتو گامای پروتون-القایی، تجزیه‌ی رنگ لاجوردی، کاشی باستانی

Combination of particle-induced X-ray emission (PIXE) spectrometry and proton-induced gamma-ray emission (PIGE) spectrometry for analysis of azure color in tile

M. Ghadiri*¹, M. Torkiha¹, O.R. Kakuee², V. Fathollahi²

1. Department of Physics, Kashan University, P.O.Box: 8731751167, Kashan - Iran

2. Research School of Physics and Accelerators, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 14155-1339, Tehran - Iran

Abstract: Ion beam analysis (IBA) has been widely used for fast, sensitive, multi-elemental and nondestructive analysis without any sampling, especially for the pigment analysis. External beam PIXE and PIGE techniques are applied simultaneously to large archaeological samples, kept at atmospheric pressure during the irradiation. In this research work, an external beam was used for the analysis of lapis lazuli samples and the azure color of the archaeological tile. By comparing the spectra, we found that cobalt is used to create azure color in archaeological tiles, while in lapis lazuli, no cobalt is observed and sodium is the characteristic element of the azure color in the lapis lazuli samples. It was also shown that lapis lazuli can be identified by the ion beam analysis.

Keywords: PIXE, PIGE, Azure color analysis, Archaeological tile

*email: marjanghadiri64@yahoo.com

تاریخ دریافت مقاله: ۹۲/۴/۱۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۳/۸/۱۷



۱. مقدمه

عمده اثرهای باستانی به جا مانده از انسان مانند کنده کاری‌ها، ابزارها و سلاح‌ها از سنگ تشکیل شده است. هم‌چنین استفاده از سنگ‌ها به صورت اثرهای زینتی و تزئینی و یا به عنوان رنگ‌دانه در نقاشی‌ها از گذشته‌ای دور متداول بوده است. با مطالعه‌ی اثرهای باستانی می‌توان رابطه‌های فرهنگی، تجاری، رونق و نابودی تمدن‌های باستانی را بررسی کرد. گام نخست در این مسیر، باستان‌سنجی است. آزمایشگاه واندوگراف با معرفی و توسعه‌ی باستان‌سنجی با استفاده از روش‌های هسته‌ای سعی نموده است گامی برای کشف و معرفی گنجینه‌ی ارزشمند ایرانی-اسلامی بردارد. سرزمین ایران که در دوره‌ی باستان به محدوده‌ی وسیعی اطلاق می‌شده است، جای‌گاهی بوده، برای ارتباط بین ملت‌های شرق و غرب، و به همین علت سهم به‌سزایی در ارتباط‌های فرهنگی و اقتصادی جهان قدیم بر عهده داشته است. برای رصد ارتباط‌های اقتصادی و اجتماعی بین جامعه‌های گوناگون، مطالعه‌ی کالای مبادله شده در این دادوستد ضروری است. در این میان استفاده از سنگ لاجورد^(۱) نقش به‌سزایی دارد. واژه لاجورد، از واژه‌ی لاژورد در فارسی باستان گرفته شده که در عربی به صورت لاجورد در آمده و وارد زبان‌های دیگر شده است. این واژه در فارسی، به معنای آسمان و آسمانی رنگ است. استفاده از این سنگ از دوره‌ی قرون وسطی در ایران رایج بوده و در انواع مختلفی از روش‌های نقاشی استفاده شده است. هزینه‌ی آن به دلیل پرزحمت بودن فرایند استخراج از معدن‌ها و به دلیل دشواری عرضه‌ی مواد خام، بسیار زیاد بوده و از افغانستان وارد می‌شده است [۱]. با توجه به این که در گذشته، افغانستان جزئی از ایران بوده، بنابراین با رصد لاجورد افغانستان می‌توان نفوذ ایران را در رفت و آمدهای تجاری از طرفی با چین و هندوستان و از سویی با کشورهای غربی (روم و بیزانس) و اقصی نقاط جهان در چند هزار سال گذشته رصد کرد.

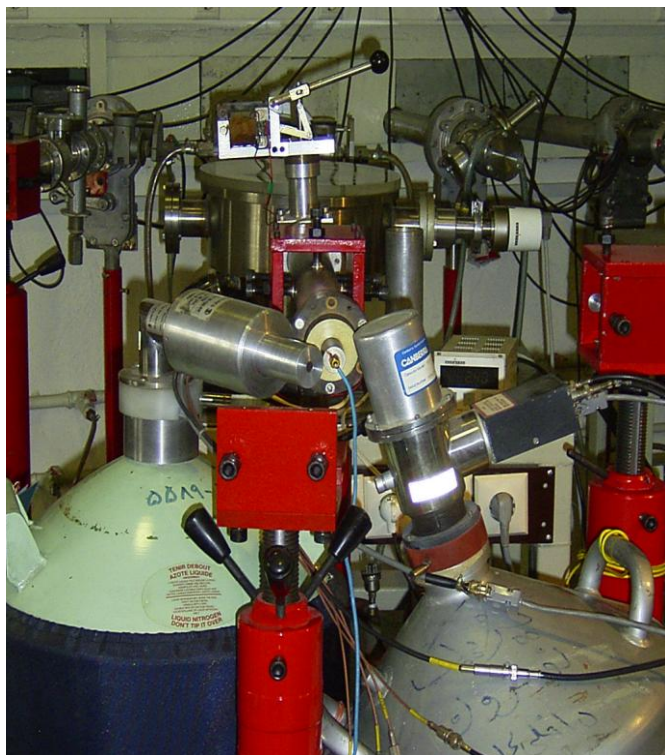
لاجورد یک رنگ‌دانه‌ی آبی به دست آمده از یک سنگ نیمه‌قیمتی است که به‌طور عمده از لازوریت معدنی $(3Na_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2Na_2S)$ تشکیل شده و هم‌چنین حاوی مقادیر کمی و متغیر کلسیت ($CaCO_3$) و پیریت (FeS_2) است. لاجورد یک رنگ‌دانه‌ی بسیار با ارزش تلقی شده و به ویژه در اثرهای هنری مذهبی به منظور تأکید بر ارزش‌های

نمادین آن‌ها مورد استفاده قرار گرفته است [۲]. نشأت گرفتن رنگ لاجوردی در نمونه‌های کاشی باستانی نیز قابل تأمل است. برای مشخصه‌یابی اثرهای باستانی، روش‌های تجزیه‌ای مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳]. در این میان تجزیه با باریکه‌ی یونی با توجه به خصوصیت‌های منحصر به فرد، غیرمخرب، سریع، همگانی، همه‌کاره و حساس و بس عنصری بودن آن بسیار مورد توجه است [۴، ۵]. استفاده از تجزیه با باریکه‌ی یونی برای باستان‌سنجی پس از توسعه‌ی طیف-سنجی گسیل پرتو ایکس ذره-القایی^(۲) در اوایل دهه‌ی ۷۰ میلادی آغاز شد. از آن زمان، تسهیلات و خطوط باریکه‌ی تجزیه با باریکه‌ی یونی، ویژه‌ی تجزیه‌ی اثرهای باستانی در آزمایشگاه‌های مختلف راه‌اندازی شده است. در این راستا شتاب‌دهنده‌ی ALGAE در موزه‌ی لوور [۶]، آزمایشگاه شتاب‌دهنده‌ی ۵ MeV در مادرید [۷] و شتاب‌دهنده‌ی تاندم ۳ MeV در فیرنز [۸] برای تجزیه‌ی نمونه‌های باستانی راه‌اندازی شده‌اند. در آزمایشگاه واندوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای نیز یک خط باریکه برای تجزیه‌ی اثرهای هنری با باریکه‌ی یونی راه‌اندازی شده است [۹]. در پژوهشی که توسط اولیایی و همکاران گزارش شده است، با بررسی عیار سکه‌ها در دوره‌ی اشکانی، نشان داده شد که همبستگی واضحی بین شرایط سیاسی و عیار سکه‌ها وجود داشته است [۱۰].

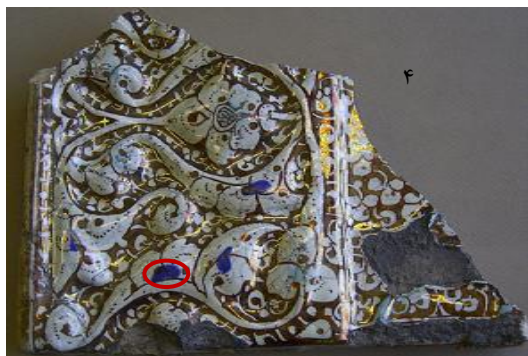
کاکویی و همکاران، با تجزیه‌ی اثرهایی از مینیاتور فارسی در کتاب شعر «یوسف و زلیخا» رنگ‌دانه‌های استفاده شده در مکتب نگارگری بخارا (۹۰۵ تا ۱۱۱۴ هجری شمسی) را تعیین نمودند [۱۱]؛ در این کار پژوهشی نیز از تجزیه با باریکه‌ی یونی برای مشخصه‌یابی نمونه‌ها استفاده شده است.

طیف‌سنجی ترکیبی گسیل پرتو ایکس ذره-القایی و گسیل پرتو گامای ذره-القایی^(۳) از جمله‌ی شیوه‌های تجزیه‌ای با باریکه‌ی یونی است که بر مبنای فن آوری هسته‌ای در طی نیم قرن گذشته امکان خوبی را برای مشخصه‌یابی اثرهای هنری و باستانی در اختیار هنرمندان، باستان‌شناسان و مرمت‌کننده‌های اثرهای باستانی قرار داده است [۱۲، ۱۳]. لزوم ترکیب این دو طیف‌سنجی برای تجزیه‌ی عنصری نمونه‌های باستانی مربوط به محدوده‌ی کاربرد آن‌ها است. با طیف‌سنجی گسیل پرتو ایکس ذره-القایی، عنصرهای با عدد اتمی بزرگ‌تر از ۱۳ با دقت یک در میلیون

شد. برای بهنجار کردن طیف‌های مختلف به دست آمده، از قله‌ی طیف پرتو ایکس Ar استفاده شد [۹].



شکل ۱. دستگاه‌وری طیف‌سنجی-باریکه خارجی PIXE و PIGE؛ آشکارساز HPGe در سمت راست شکل و آشکارساز Si(Li) در سمت چپ قرار دارد.



شکل ۲. نمونه‌های استفاده شده؛ نمونه‌های ۱ تا ۳ نمونه‌های لاجورد و نمونه‌ی ۴ کاشی زرین فام قدیمی است. محل رنگ لاجوردی بررسی شده در نمونه‌ی ۴ با دایره به رنگ قرمز نشان داده شده است.

قابل شناسایی اند و برای عنصرهای سبک‌تر، از طیف‌سنجی گسیل پرتو گامای پروتون-القایی استفاده می‌شود که به عنوان مکمل طیف‌سنجی گسیل پرتو ایکس ذره-القایی امکان تجزیه‌ی عنصرهای سبک تا لیتیم را فراهم می‌آورد [۱۴]. از آن‌جا که Na عنصر مشخصه‌ی لاجورد طبیعی به شمار می‌آید، ضروری است که هم‌زمان با تجزیه‌ی عنصرهای سنگین، این عنصر به همراه سایر عنصرهای سبک عیارسنجی شود.

۲. روش کار

برای بررسی رنگ‌دانه‌های رنگ آبی در نمونه‌ی کاشی باستانی و بررسی امکان حضور رنگ‌دانه‌ی لاجوردی در آن از طیف‌سنجی ترکیبی گسیل پرتو ایکس ذره-القایی و گسیل پرتو گامای پروتون-القایی استفاده شد. با توجه به اندازه‌ی بزرگ نمونه‌ها و امکان تخریب نمونه‌ها در خلأ، از شیوه‌ی تجزیه با باریکه‌ی خارجی برای مشخصه‌یابی نمونه‌ها استفاده شد. باریکه‌ی پروتون به انرژی ۲٫۵ MeV و شدت جریان ۸۰ تا ۹۰ نانوآمپر پس از عبور از محافظ خلأ وارد اتمسفر شده و پس از طی مسیری در حدود ۱ تا ۲ سانتی‌متر و به صورت عمود (با زاویه‌ی فرودی صفر نسبت به خط عمود بر سطح نمونه) به نمونه‌ها تابانیده شد. از یک برگ از جنس کپتون به ضخامت ۷ میکرومتر به عنوان محافظ خلأ استفاده شد.

برای آشکارسازی پرتوهای مشخصه‌ی ایکس گسیل‌شده، از آشکارساز نیم-رسانای Si(Li) تحت زاویه‌ی ۱۳۵ درجه و برای آشکارسازی پرتوهای گامای القایی از آشکارساز HPGe تحت زاویه‌ی ۹۰ درجه استفاده شد. دستگاه‌وری آزمایش در شکل ۱ و نمونه‌های استفاده شده در این اندازه‌گیری در شکل ۲ نشان داده شده است. برای جلوگیری از ثبت پرتوهای ناخواسته‌ی ناشی از واکنش باریکه با دیواره‌ی خط باریکه، یک ورق سرب بین آشکارساز و خط باریکه قرار داده شد.

علامت خروجی آشکارساز، پس از پردازش در پیش تقویت کننده و تقویت کننده، به وسیله‌ی یک سیستم تحلیل گر بس کاناله (MCA) به صورت تابع پاسخ یا طیف ارتفاع تب (شدت بر حسب انرژی پرتو)، ذخیره شد. با تحلیل طیف‌ها امکان تجزیه‌ی پرتوهای گاما و ایکس مشخصه فراهم



جدول ۱. واکنش‌های استفاده شده در طیف‌سنجی گسیل پرتو گامای پروتون-القایی (PIGE)

انرژی پرتو گاما (keV)	واکنش	عنصر
۴۷۸	(p, p'γ)	^۷ Li
۱۱۰، ۱۹۷	(p, p'γ)	^{۱۹} F
۴۴۰، ۱۶۳۶	(p, p'γ)	^{۲۳} Na
۱۶۳۴	(p, α'γ)	^{۲۳} Na
۳۹۰، ۵۸۵	(p, p'γ)	^{۲۵} Mg
۸۴۴، ۱۰۱۴	(p, p'γ)	^{۲۷} Al
۱۳۶۹	(p, α'γ)	^{۲۷} Al
۱۷۷۹	(p, γ)	^{۲۷} Al

۳. نتایج، بحث و نتیجه‌گیری

طیف‌های نوعی PIXE و PIGE به دست آمده در این آزمایش در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. نتایج تجزیه‌ی عنصری نمونه‌ها از طریق طیف‌سنجی PIXE در جدول ۲ و از طریق طیف‌سنجی PIGE در جدول ۳ ارایه شده است. عنصرهای F، Na و Mg از طیف‌سنجی PIGE و دیگر عنصرهای با عدد اتمی بزرگ‌تر از Al از طیف‌سنجی PIXE استخراج شده‌اند. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد تجزیه‌ی Al به دلیل واکنش باریکه با مؤلفه‌های آلومینیمی خط باریکه قابل گزارش نیست. همان‌طور که در تجزیه‌ی نمونه‌ها از طریق طیف‌سنجی PIXE (جدول ۲) مشاهده می‌شود تنوع عنصرهای مشاهده شده در نمونه‌های ۱، ۲ و ۴ بسیار بیش‌تر از نمونه‌ی ۳ و حضور عنصرهای سنگین معدنی در آن‌ها قابل توجه است. عنصر مشخصه برای شناسایی سنگ لاجورد سدیم است. با بررسی جدول ۳ مشاهده می‌شود که عنصر سدیم در نمونه‌های ۱، ۲ به میزان قابل توجه حضور دارد در حالی که در نمونه‌ی ۳ عنصر سدیم مشاهده نمی‌شود و در نمونه‌ی ۴ مقدار آن بسیار ناچیز است. به این ترتیب، می‌توان فقط نمونه‌های ۱ و ۲ را به درستی لاجورد ارزیابی کرد. برای اثبات لاجورد طبیعی، نمونه‌های ۱ تا ۳ در معرض باریکه‌ی پروتونی قرار داده شد و گسیل نور القایی یون‌های پرانرژی مشاهده شد. برای نمونه‌های ۱ و ۲ نور متناظر با لاجورد مشاهده شد ولی برای نمونه‌ی ۳، نوری مشاهده نشد. به این ترتیب این نتیجه تأیید شد که نمونه‌ی شماره ۳ لاجورد نیست.

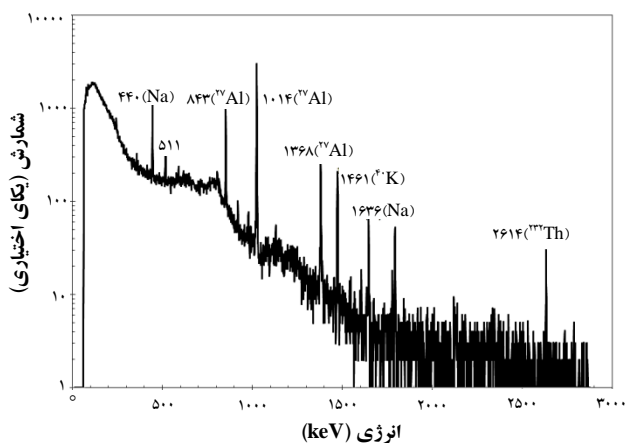
تجزیه و تحلیل طیف‌های PIXE با نرم‌افزار WinQxas [۱۵] و طیف‌های PIGE با نرم‌افزار FitzPeaks [۱۶] برای شناسایی، به ترتیب، عنصرهای سنگین و سبک‌تر از Al به انجام رسید.

با توجه به گستردگی باریکه و برخورد آن به دیواره‌ی آلومینیمی خط باریکه، پرتوهای گامای مشخصه‌ی آلومینیم با انرژی‌های ۱۰۱۴ و ۸۴۴ کیلو الکترون ولت، ناشی از واکنش $^{27}\text{Al}(p, p'\gamma)^{27}\text{Al}$ و $^{27}\text{Al}(p, \alpha'\gamma)^{24}\text{Mg}$ و ۱۷۷۹ کیلو الکترون ولت ناشی از واکنش $^{27}\text{Al}(p, \gamma)^{28}\text{Si}$ در تمامی طیف‌ها ظاهر می‌شدند. به علت استفاده از آشکارساز HPGe بدون حفاظ تابش زمینه، حضور پرتوهای گامای حاصل از تابش زمینه اجتناب‌ناپذیر بود.

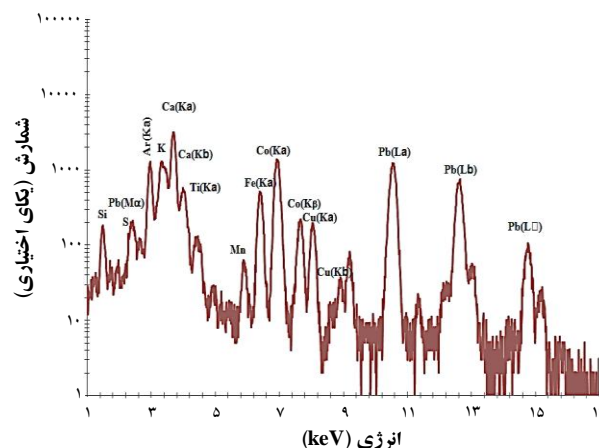
با توجه به انرژی دیگر قله‌های موجود در طیف‌ها و با استفاده از جدول ۱ سایر عنصرهای موجود در نمونه قابل عیارسنجی بودند.

از آن‌جا که باریکه‌ی پروتونی پس از خارج شدن از خط باریکه‌ی تحت‌خلأ و پیش از واکنش با نمونه، مساحتی را در هوا طی می‌کرد، واکنش باریکه با گاز آرگون موجود در هوا سبب برانگیزش اتم‌ها و گسیل پرتو ایکس مشخصه‌ی اتم‌ها می‌شد [۹]. پرتوهای ایکس مشخصه‌ی گاز آرگون ثبت شده به وسیله‌ی آشکارساز پرتو ایکس متناسب با تعداد یون‌های برخوردکننده با نمونه بود. با بهنجار کردن پرتوهای ایکس مشخصه‌ی حاصل از اتم‌های آرگون موجود در هوا تعداد یون‌های برخوردکننده با هر نمونه بهنجار می‌شد. برای مقایسه‌ی داده‌های PIXE و PIGE از عنصرهای نمونه که به صورت مشترک در هر دو اندازه‌گیری حضور داشتند استفاده شد. در این اندازه‌گیری‌ها تنها عنصر Al به صورت مشترک در طیف‌های PIXE و PIGE حضور داشت، ولی با توجه به برخورد باریکه به دیواره‌ی آلومینیمی خط باریکه و سهم نامشخص Al ناشی از نمونه، استفاده از Al گزینه‌ی مناسبی برای تطبیق طیف‌های PIXE و PIGE نبود و از این‌رو مقایسه‌ی هم‌زمان این دو اندازه‌گیری ناممکن ظاهر شد.

با توجه به جذب زیاد پرتو ایکس در هوا، تغییر محل استقرار آشکارساز پرتو ایکس در زمان تنظیم برای آزمایش در روزهای مختلف، وقت گیر بودن تعیین بازده و ضریب H در اندازه‌گیری از طریق طیف‌سنجی PIXE با باریکه‌ی خارجی [۱۷]، نتایج به صورت مقایسه‌ی کیفی ارایه شد.



شکل ۴. طیف PIGE حاصل از رنگ لاجوردی کاشی باستانی.



شکل ۳. طیف PIXE حاصل از رنگ لاجوردی کاشی باستانی.

جدول ۲. نتایج حاصل از طیف‌سنجی PIXE نمونه‌های سنگ لاجورد و کاشی باستانی؛ مجموع خطای برازش و خطای شمارش داده‌ها نشان داده شده است

دیگر عنصرها	Cl	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Co	Cu	Zn	نمونه
Cr(۴۸۲±۵۸)	۸۰۴±۶۰	۱۳۰۰۹±۱۶۹	۲۵۵۷۵۴±۶۷۶	۴۸۴۵±۱۰۸	۱۷۹۸±۷۴	۲۴۰۱±۷۹	۷۹۳±۵۳	۳۶۲۹±۹۲	۱۴۹۴±۶۳	۱
Cr(۳۱۰۸±۹۸)	۳۵۷±۵۷	۹۵۶۵±۱۶۱	۲۴۴۲۱۳±۷۱۵	۱۶۸۰±۸۰	۴۳۲±۶۲	۹۵۸±۶۶	۴۸۱±۵۴	۱۰۵۱۹±۱۶۲	۴۰۲۳±۱۰۷	۲
Ni(۳۰۷۴±۸۸)										
S(۱۸۷±۲۳)	۵۳۱±۳۳	-	۴۵۹±۳۱	۷۸±۱۶	-	۹۲±۱۳	-	۱۹۸۶±۶۰	۱۰۰±۱۳	۳
Ni(۶۲±۱۱)										
Sn(۷۸۴۱±۱۶۰)	۷۲۱±۴۴	۹۸۲۹±۱۴۵	۲۱۳۸۹±۲۶۱	۶۱۷±۴۰	۴۵۲±۳۲	۴۹۹۱±۹۳	۱۴۳۸۷±۱۵۴	-	۹۰±۲۱	۴
pb(۱۵۶۰۹±۱۶۲)										

نمونه‌های اندک مورد استفاده، این پارامترها هنوز به طور کامل تعیین نشده است. پژوهش بیش‌تر در این زمینه می‌تواند برای یافتن راهکاری برای تعیین اصالت لاجورد، و رصد رابطه‌های اقتصادی و فرهنگی ملت‌های گذشته مفید باشد.

مقدار قابل توجه کبالت در کاشی باستانی، آن را از لاجورد که کبالت در آن به میزان کم حضور دارد، متمایز ساخت. به تجربه دیده شده است که در لعاب یا شیشه، سدیم اکسید به طور مجزا هیچ‌گونه رنگی ایجاد نمی‌کند ولی اثر مؤثری بر رنگ‌ها می‌گذارد. برای مثال مشاهده شده است که ترکیب سدیم اکسید با مس رنگ آبی تولید می‌کند. هم‌چنین ترکیب‌های کبالت با لعاب‌های قلیایی، رنگ لاجوردی تولید می‌کند. لازم به ذکر است که رنگ آبی از ترکیب‌های نیکل و پتاسیم سیلیکات‌ها نیز تولید می‌شود [۲۱]. همان‌طور که از جدول ۲ پیدا است رنگ لاجوردی لعاب کاشی، حاصل از کبالت و سدیم است [۲۲].

جدول ۳. نتایج حاصل از طیف‌سنجی PIGE نمونه‌های سنگ لاجورد و کاشی باستانی

نمونه	عنصر		
	Mg	Na	F
	پرتو گاما (keV)		
	۵۸۵	۴۴۰	۱۱۰
۱	-	۱۵۹۷۵±۵۰	-
۲	۳۶۳±۱۰	۷۷۷±۹۸	۲۹۵۴±۳۷
۳	-	-	-
۴	-	۲۷۱±۱۰	-

لاجورد طبیعی عمدتاً از ۳ ناحیه‌ی جغرافیایی عمده‌ی واقع در بدخشان افغانستان، سیبری و شیلی تهیه می‌شود. در پژوهش‌های مختلف سعی شده است با استفاده از تجزیه با باریکه‌ی یونی، پارامترهایی که نشان از اصالت لاجورد دارند، تعیین شوند [۱۸، ۱۹]. در این پژوهش‌ها سعی شده است با تعیین غلظت عنصرهای موجود در نمونه‌های مختلف معیار مناسبی برای اصالت لاجورد به دست آید [۲۰]. با توجه به تعداد کم گزارش‌های موجود و



1. Lapis lazuli
2. Particle induced x- ray emission

3. Particle induced gamma- ray emission Spectroscop

مرجعها

- [1] H. Khajeh-Bidokhti, Research on precious and semi-precious gemstones in Iran and in the world, Geological Survey of Iran, Tehran (1388).
- [2] J. Plesters, Ultramarine blue, Natural and artificial, in artists pigments, A. Roy (Ed.), National Gallery of Art and Oxford University Press, 2 (1993).
- [3] D. Bradley, D. Creagh, Physical techniques in the study of art, archaeology and cultural heritage, Elsevier B.V. (2006).
- [4] L. Beck, L. Pichon, B. Moignard, T. Guillou, P. Walter, Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. B, 269 (2011) 2999.
- [5] A. Zucchiatti, F. Agullo-Lopez, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, 278 (2012) 106.
- [6] T. Calligaro, J.C. Dran, E. Ioannidou, B. Moignard, L. Pichon, J. Salomon, Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. B, 328 (2000) 161-163.
- [7] O. Enguita, M.T. Fernandez-Jimenez, G. Garcia, A. Climent-Font, T. Calderon, G.W. Grime, Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. B, 384 (2004) 219-220.
- [8] L. Giuntini, M. Massi, S. Calusi, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 576 (2007) 266.
- [9] M. Torkiha, M. Lamahi-Rachti, O.R. Kakuee, V. Fathollahi, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., B, 268 (2010) 1517.
- [10] P. Oliaiy, F. Shokouhi, J. Rahighi, M. Lamahi-Rachti, N. Golabi, Int. J. of PIXE, 12 (2002) 245-251.
- [11] O. Kakuee, V. Fathollahi, P.Oliaiy, M. Lamahi-Rachti, M. Sharafi, M.B. Kasiri, PIXE analysis of Persian miniature used in 16th century poetry manuscript, Acta Physics Polonica A, 125 (2014) 1244.
- [12] F. Mathis, G. Othmane, O. Vrielynck, H. Calvo del Castillo, G. Chêne, T. Dupuis, D. Strivay, Nucl. Instr. and Meth, Research B, 268 (11) (2010) 2078-2082.
- [13] R. Bugoi, V. Cojocaru, B. Constantinescu, T. Calligaro, L. Pichon, S. Rohrs, J. Salomon, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, 266 (2008) 2316-2319.
- [14] T. Calligaro, Y. Coquinot, L. Pichon, B. Moignard, Advances in elemental imaging of rocks using the AGLAE external microbeam, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, 269 (2011) 2364-2372.
- [15] Software WinQxas, <http://winqxas.software.informer.com>.
- [16] Software FitzPeak, <http://www.jimfitz.demon.co.uk>.
- [17] Z. Smit, Recent developments of material analysis with PIXE, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, 240 (2005) 258-264.
- [18] T. Calligaro, Y. Coquinot, L. Pichon, G. Pierrat-Bonnefois, P. de Compos, A. Re, D. Angelici, Characterization of the lapis lazuli from the Egyptian treasure of Tôd and its alteration using external μ -PIXE and μ -IBIL, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 318 (2014) 139-144.
- [19] A. Re, Lapis lazuli provenance study by means of micro-PIXE, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, 269 (2011) 2373-2377.
- [20] A. Re, D. Angelici, A. Lo Giudice, E. Maupas, L. Giuntini, S. Calusi, N. Gelli, M. Massi, A. Borghi, L.M. Gallo, G. Pratesi, P.A. Mando, New markers to identify the provenance of lapis lazuli: trace elements in pyrite by means of micro-PIXE, Appl Phys A, 111 (2013) 69-74.
- [21] M.M. Abbasian, Glazing industry and the colored glazes, Gothenburg Publishing Co., Tehran & Mashhad, (1370) 95-150.
- [22] M. Ghadiri, Low- Z elements analysis of ancient sherds by nuclear reaction analysis, university of kashan (Jan 2012).