تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۹/۳۰
تاریخ پذیرش مقاله: : ۱۳۹۵/۱۱/۵

آنالیز با ریزباریکهٔ یونی: ابزاری توانمند در باستان‌سنجی، مرمت و حفاظت اشیای تاریخی و فرهنگی

داود آقاعلی گل[۱]، پروین اولیایی[۲]، محمود مرادی[۳]، محمد لامعی رشتی[٤]

چکیده

در بررسی تکنولوژی ساخت و محل تولید اشیای تاریخی و همچنین پیشنهاد و تدوین راهکارهای حفاظتی و مرمت این آثار، داشتن اطلاعات کافی از نمونهٔ مورد بررسی ضروری است. اطلاعات مورد نیاز بسته به نوع نمونه و اشیای تاریخی متفاوت است. تعیین و اندازه‌گیری دقیق ترکیب عنصری و مواد سازنده این اشیا یکی از اطلاعات ضروری است که امروزه با استفاده از علوم و فنون آزمایشگاهی مدرن قابل دست‌یابی است . در این مقاله، برخی از نتایج به‌دست‌آمده از بررسی نمونه‌های مختلف تاریخی و فرهنگی که در چند سال اخیر با استفاده از باریکهٔ یونی میکرونی در آزمایشگاه وان‌دوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای مورد مطالعه و پژوهش قرار گرفته اند، ارائه شده است. بررسی سفال‌های مینایی نقاشی‌شده جهت تعیین رنگدانه‌های مختلف به‌کاررفته در آن، تعیین ضخامت و خلوص لایه‌های طلاکاری‌شده در سفال‌های مینایی زراندود، بررسی و تعیین عامل درخشندگی در نقاشی‌های دیواری یک مکان تاریخی، بررسی علل خوردگی و تخریب یک نسخه از دست‌نوشته‌های قدیمی، تعیین خلوص و عیار سکه‌های برنزی الیمایی، و همچنین بررسی و تعیین نوع شیشه‌های تاریخی ایرانی از جمله مواردی است که در این مقاله به آنها اشاره خواهد شد. نتایج حاصل از این آنالیزها و تعیین مواد تشکیل‌دهندهٔ آنها در مطالعهٔ تکنیک ساخت و فن‌شناسی، بررسی اصالت نمونه‌ها، و نهایتاً حفاظت این آثار تاریخی کمک قابل توجهی خواهد کرد.

کلیدواژه‌ها: باریکهٔ میکرونی، باستان‌سنجی، ترکیب عنصری، حفاظت، مرمت.

---

۱. پژوهشگر، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکدهٔ فیزیک و شتابگرها، daghaaligol@aeoi.org.ir
۲. مربی پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکدهٔ فیزیک و شتابگرها، poliaiy@aeoi.org.ir
۳. کارشناس پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکدهٔ فیزیک و شتابگرها، mmoradi2@yahoo.com،
۴. استاد پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکدهٔ فیزیک و شتابگرها، mlamehi@aeoi.org.ir

مقدمه

امروزه استفاده از دانش و فناوری هسته‌ای گسترش زیادی در عرصه‌های مختلف علمی و تحقیقاتی یافته است. از جمله فناوری‌هایی که امروزه نقش عمده‌ای در تحقیقات و پژوهش در جهان دارند استفاده از شتاب-دهنده‌های ذرات است. اگرچه در ابتدا، غالباً شتاب-دهنده‌ها برای پژوهش‌های فیزیک هسته‌ای به کار گرفته شده اند اما امروزه شتاب‌دهنده‌ها در زمینه‌های گوناگون علمی از جمله آنالیز و مشخصه‌یابی مواد و نمونه‌های تاریخی و باستانی به طور گسترده به کار گرفته می‌شوند. هرچند روش‌های متعدد و گوناگونی مانند XRF، NAA، SEM برای باستان‌سنجی و مشخصه‌یابی نمونه‌های تاریخی وجود دارد، اما روش آنالیز با باریکهٔ یونی میکرونی به دلیل مزایایی مانند غیر مخرب بودن و همچنین بس‌عنصری و سریع بودن از جایگاه خاص و ویژه‌ای در باستان‌سنجی برخوردار است. با روش آنالیز با باریکهٔ یونی میکرونی، آشکارسازی تمامی عناصر جدول تناوبی در لایه‌های تقریباً سطحی با دقت چند اتم در میلیون امکان‌پذیر است. همچنین آنالیز نمایهٔ عمقی توزیع عناصر در نمونه و نیز تعیین و تشخیص نقشهٔ توزیع یکنواختی عناصر موجود در نمونه ممکن است (Bird et al, 1989:210-257; Johansson et al, 1998:272-291).

در بررسی تکنولوژی ساخت و محل تولید اشیای تاریخی و همچنین پیشنهاد و تدوین راهکارهای حفاظتی و مرمت این آثار، داشتن اطلاعات کافی از نمونهٔ مورد بررسی ضروری است. اطلاعات مورد نیاز متناسب با نوع نمونه و اشیای تاریخیِ مورد بررسی، متفاوت خواهند بود. تعیین و اندازه‌گیری دقیق ترکیب عنصری و مواد سازندهٔ این اشیا یکی از اطلاعات ضروری است که حدود چهار دهه است که در آزمایشگاه وان‌دوگراف انجام می‌گیرد. در این مقاله، برخی از نتایج به‌دست‌آمده از بررسی نمونه‌های مختلف تاریخی و فرهنگی که در دو سال گذشته با استفاده از باریکهٔ یونی میکرونی برای اولین بار در آزمایشگاه وان‌دوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای مورد مطالعه و پژوهش قرار گرفته اند و نتایج جالبی از آن به دست آمده، ارائه شده است.

روش تحقیق

با استفاده از باریکهٔ یونی میکرونی می‌توان توانایی‌ها و قابلیت‌های آنالیز با باریکهٔ یونی متداول را به میزان زیادی افزایش داد. به وسیله باریکهٔ میکرونی می‌توان سطح نمونهٔ مورد بررسی را جاروب (اسکن) کرد و با استفاده از روش‌های آنالیز PIXE، RBS و STIM تصویرهای دوبعدی از توزیع عنصری موجود در نمونه و تغییرات چگالی سطحی بر حسب عمق نمونه با قدرت تفکیک‌پذیری در مقیاس میکرون تهیه کرد. آنالیز عنصری مواد با استفاده از باریکهٔ یونی میکرونی Micro-PIXE نامیده می‌شود. آنالیز عنصری به روش پیکسی (PIXE =Proton Induced X-ray Emission) یکی از روش‌های متداول در آنالیز عنصری مواد است. پیکسی یا «گسیل پرتو X در اثر برانگیختگی با پروتون» روش توانمندی برای آنالیز بس‌عنصری (از سدیم تا اورانیوم) و غیرتخریبی نمونه‌های مختلف است. در این روشِ آنالیز، نمونهٔ مورد بررسی تحت تابش پروتون قرار می‌گیرد. در اثر برخورد پروتون با اتم هدف پرتو X مشخصه‌ای گسیل می‌شود که انرژی پرتو X، نوع عنصر حاضر در نمونه و تعداد پرتوهای X با انرژی معین غلظت عنصر در نمونه را مشخص می‌کند. همان‌طور که اشاره شد با استفاده از باریکهٔ میکرونی پروتون می‌توان توانایی‌ها و قابلیت‌های آنالیز عنصری روش پیکسی را به میزان زیادی افزایش داد. همچنین برای نمونه‌های نازک مانند نسخه‌های خطی که باریکهٔ یونی از آن عبور می‌کند، می‌توان توزیع چگالی سطحی نمونه را بر حسب عمق بررسی و مطالعه کرد که به آن Micro-STIM گفته می‌شود. علاوه بر این با استفاده از آشکارسازی ذرات برگشتی از نمونه که به صورت کشسان پراکنده می‌شوند، اطلاعات مفیدی از توزیع عمقی عناصر تشکیل‌دهندهٔ نمونه به دست می‌آید که به آن Micro-

RBS گفته می‌شود (Bird et al., 1989: 210-257; Johansson et al., 1998: 272-291). نحوهٔ ابزارآرایی و تولید باریکهٔ میکرونی در آزمایشگاه وان‌دوگراف در مقالهٔ مفصلی که در مجلهٔ *علوم و فنون هسته‌ای* چاپ شده، گزارش شده است (آقاعلی گل و دیگران، ۱۳۸۶: ۲ـ ۳).

در این پژوهش از باریکهٔ پروتون با انرژی ۲–۲/۵MeV و با شدتی در حدود ۵۰–۱۰۰pA که توسط شتاب‌دهنده وان‌دوگراف ۳MV آزمایشگاه وان‌دوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای تولید می‌شود، استفاده شده است. قطر باریکهٔ پروتون در این آزمایش در حدود ۱۰ میکرون تنظیم شده است. برای آشکارسازی اشعهٔ X (Micro-PIXE) از آشکارساز Si(Li) با قدرت تفکیک ۱۵۰eV که در زاویهٔ ۱۳۵ درجه نسبت به پرتوهای پروتون فرودی قرار گرفته، برای اندازه‌گیری کَمّی و کیفی عناصر موجود در نمونه‌ها استفاده شده است. برای آشکارسازی ذرات عبوری از نمونه‌ها (STIM=Scanning Transmission Ion Microscope) از آشکارساز سد سطحی که در زاویهٔ ۲۰ درجه نسبت به جهت باریکه قرار گرفته و همچنین برای آشکارسازی ذرات برگشتی از نمونهٔ (RBS= Rutherford Backscattering Spectrometry) از آشکارساز سد سطحی که در زاویهٔ ۱۶۰ درجه نسبت به باریکه قرار گرفته، استفاده شده است. در این پژوهش‌ها از تکنیک RBS برای اندازه‌گیری عناصر سبک و تعیین ضخامت لایه‌های نازک سطحی و از تکنیک STIM برای بررسی ساختار داخلی برخی از نمونه‌ها استفاده شده است.

پیشینهٔ تحقیق

استفاده از روش پیکسی در فعالیت‌های باستان‌سنجی و مرمت در ایران از سال ۱۳۷۰ در آزمایشگاه وان‌دوگراف سازمان انرژی اتمی آغاز شده است و هم‌اکنون به دههٔ چهارم فعالیت خود رسیده است (لامعی رشتی، ۱۳۸۲: ۹ـ ۱۴). با راه‌اندازی سیستم آنالیز با باریکهٔ یونی میکرونی در اواخر سال ۱۳۸۳، این فعالیت‌ها بهبود چشمگیری یافته که به گسترش پژوهش در این زمینه انجامیده است.

زمینه‌هایی که آنالیز با باریکهٔ یونی میکرونی می‌تواند برای آنها سودمند باشد، بسیار وسیع و گسترده است (آقاعلی گل و دیگران، ۱۳۸۶: ۳ـ ۱۰). در این مقاله برخی از نتایج به‌دست‌آمده از بررسی نمونه‌های مختلف تاریخی و فرهنگی که در دو سال گذشته با استفاده از باریکهٔ یونی میکرونی در آزمایشگاه وان‌دوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای مورد مطالعه و پژوهش قرار گرفته اند، ارائه شده است.

بحث اصلی

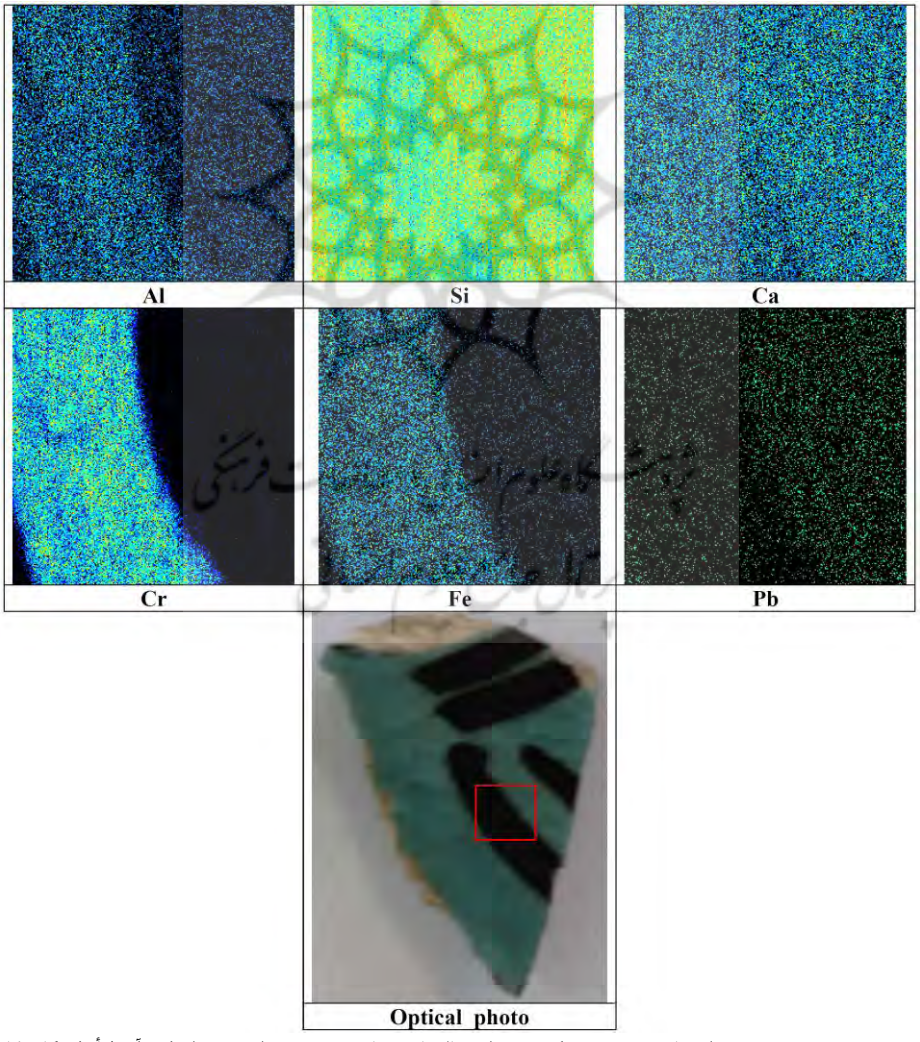
بررسی سفال‌های مینایی نقاشی‌شده به منظور تعیین رنگدانه‌های مختلف به‌کاررفته در آن، تعیین ضخامت و خلوص لایه‌های طلاکاری‌شده در سفال‌های مینایی زراندود، بررسی و تعیین عامل درخشندگی در نقاشی‌های دیواری یک مکان تاریخی، بررسی علل خوردگی و تخریب یک نسخه از دست نوشته‌های قدیمی، تعیین خلوص و عیار سکه‌های برنزی الیمایی و سکه‌های نقرهٔ دورهٔ ایلخانی و همچنین بررسی و تعیین نوع شیشه‌های تاریخی ایرانی از جملهٔ مواردی است که در این مقاله به آنها اشاره خواهد شد. در بررسی و مطالعهٔ تمام این نمونه‌های تاریخی مشاهده می‌شود که ایجاد و استفاده از توزیع عنصریِ عناصر موجود در نمونه‌ها بسیار مفید و سودمند است.

سفال‌های مینایی

سفال مینایی به گروهی از سرامیک‌های خاص و تجملی دورهٔ اسلامی اطلاق می‌شود که در ساخت آن، روی لعاب سفید یا فیروزه‌ای، نقوش مختلفی ترسیم و نقاشی می‌کردند و به همین دلیل این گونه سفال‌ها زیرمجموعهٔ سفال‌های رولعابی محسوب می‌شود. این نوع از سفال‌ها در دورهٔ زمانی کوتاهی در دوران میانی اسلام (نیمهٔ دوم قرن دوازدهم میلادی) به طور گسترده در ایران و برخی دیگر از کشورها از جمله سوریه و ترکیه رواج داشته است (Smith, 2001: 9-11) در یک طرح پژوهشی گسترده با همکاری دانشگاه هنر اصفهان تعداد زیادی از

سفال‌های مینایی به‌دست‌آمده در ری و قلعهٔ الموت، در آزمایشگاه وان‌دوگراف بررسی و مطالعه شدند. هدف از بررسی این سفال‌ها شناسایی رنگدانه‌های طبیعی مورد استفاده در رنگ‌های به‌کاررفته در نقاشی روی لعاب‌ها، اندازه‌گیری ضخامت لعاب‌ها و عناصر استفاده‌شده در تهیهٔ لعاب‌ها، و همچنین اندازه‌گیری ضخامت لایهٔ طلا و خلوص آن در نمونه‌های زراندودشده بود.

برای تعیین رنگدانه‌های استفاده‌شده در هر نمونه، قسمت‌های مختلفی از نمونه در ابعاد ۲/۵ میلی‌متر در ۲/۵ میلی‌متر با توجه به نوع رنگ‌های موجود آنالیز شدند. نتایج به‌دست‌آمده از توزیع عنصری برخی از عناصر موجود در یک نمونه از سفال‌های مینایی ری که با استفاده از روش Micro-PIXE به دست آمده است، به همراه تصویر اپتیکی نمونه، در تصویر ۱ نشان داده شده است. نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز نشان می‌دهد که رنگ مشکی به طور عمده از عنصر کروم و آهن تشکیل شده است و همچنین مقدار کمی نیز در آن آلومینیم دیده می‌شود، زیرا با مقایسهٔ تصویر اپتیکی ناحیهٔ آنالیزشده و توزیع عنصری عناصر، مشاهده می‌شود که تنها در ناحیه‌ای با رنگ مشکی، تعداد Xهای مشخصهٔ این عناصر قابل توجه است. میزان قابل توجه عناصر کروم و آهن در ترکیب رنگ مشکی نشان می‌دهد که برای تولید رنگ مشکی در نمونه‌های مطالعه‌شده، از کانی کرومیت $(Fe,Mg)(Cr,Al)_2O_4$ استفاده شده است (کاشانی، ۱۳۸۶).

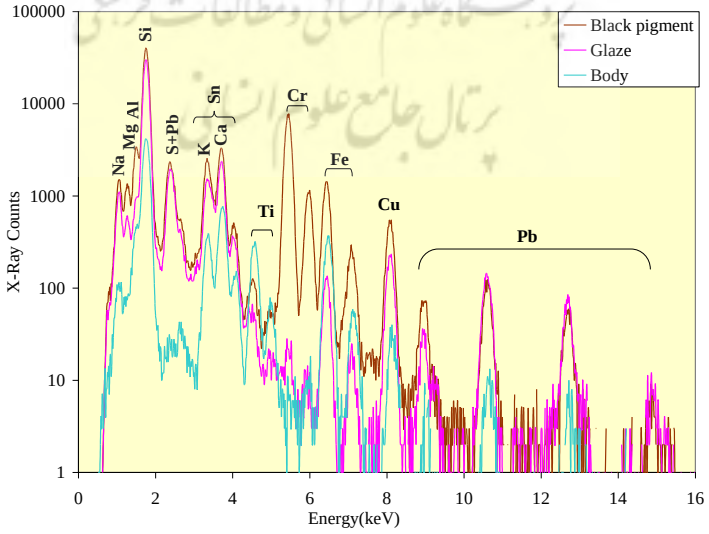


تصویر ۱. توزیع عنصری برخی از عناصر موجود در یک نمونه از سفال‌های مینایی ری به همراه تصویر اپتیکی آن (مأخذ: نگارندگان).

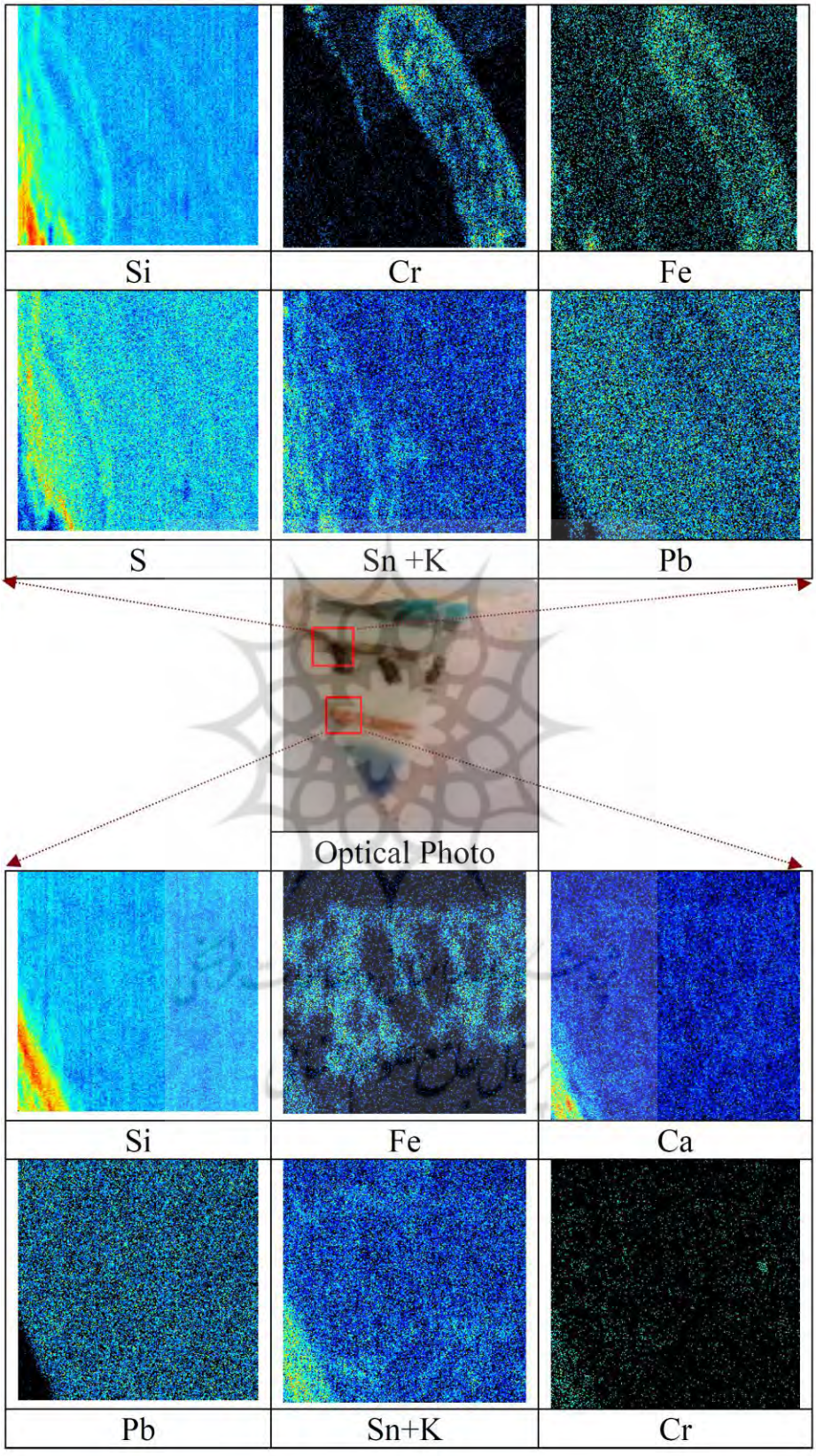
در تصویر ۲ مقایسهٔ طیف‌های به‌دست‌آمده از آنالیز ناحیهٔ مورد بررسی با استفاده از روش Micro-PIXE برای رنگ‌های مشکی و لعاب فیروزه‌ای و همچنین بدنهٔ سفال ارائه شده است. اختلاف عناصر موجود در رنگ‌های مختلف و بدنه در تصویر ۲ کاملاً مشخص است. همان‌طور که در این طیف‌ها دیده می‌شود عناصر کروم و آهن و آلومینیم در طیف مربوط به رنگ مشکی از نظر فراوانی تفاوت چشمگیری با لعاب فیروزه‌ای دارد. همچنین نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز این ناحیه نشان می‌دهد که عنصر سرب به طور مشخص در لعاب فیروزه‌ای وجود دارد. عنصر سرب به عنوان گدازآور در تهیهٔ لعاب استفاده می‌شود تا نقطهٔ ذوب لعاب را کاهش دهد. همچنین بدنهٔ سفال (خمیرهٔ سفال) عمدتاً از عناصری مانند Na، Al، Si، K، و Ca تشکیل شده است که علت آن ترکیب شدن کانی‌های معدنی مانند کوارتز و فلدسپات و کلسیت است.

برای بررسی ترکیبات رنگدانه‌های قرمز و قهوه‌ای با استفاده از روش Micro-PIXE نتایج به‌دست‌آمده از توزیع عنصری عناصر موجود در دو ناحیهٔ آنالیزشده در یکی دیگر از نمونه‌های مربوط به ری در تصویر ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، رنگدانهٔ قرمز به طور عمده از عنصر آهن و رنگدانهٔ قهوه‌ای روشن و تیره به طور عمده از عنصر آهن و کروم تشکیل شده است. همچنین توزیع عنصری Pb نشان می‌دهد که توزیع این عنصر در تمام سطح نمونه همگن و یکنواخت است در صورتی که توزیع عنصری Sn این گونه نیست و در برخی از نقاط کاملاً ناهمگن است. همچنین توزیع عنصری نواحی آنالیزشده نشان می‌دهد که عنصر مشخص و شاخصی عامل لعاب کِرم رنگ نیست.

برای بررسی لایه‌های نازک مانند لایه‌های زراندود که در تزیینات بسیاری از سفال‌های ری و الموت استفاده شده است و باریکهٔ یونی قادر به عبور از آن لایه است، از روش Micro-RBS استفاده می‌شود. این روش آنالیز بر پایهٔ آشکارسازی ذرات بارداری که به طور کشسان از هستهٔ اتم‌های موجود در نمونه پراکنده می‌شوند، استوار است. در این روش باریکه‌ای از یون‌های فرودی، با انرژی مشخص به نمونه برخورد و در عمق نمونه حرکت می‌کنند. این یون‌های فرودی در اثر برخورد با اتم‌های نمونه هدف، به‌تدریج در طول مسیرشان انرژی خود را از دست می‌دهند و پراکنده می‌شوند. یون‌های پس پراکنده‌شده با آشکارساز سد سطحی آشکار می‌شوند. از طیف به‌دست‌آمده اطلاعات مفیدی در مورد ضخامت لایه‌های نازک موجود در هدف و همچنین توزیع عمقی عناصر تشکیل‌دهنده لایه‌ها به دست آید.



تصویر ۲. مقایسهٔ طیف‌های به‌دست‌آمده از آنالیز ناحیه با رنگ مشکی، لعاب فیروزه‌ای و همچنین بدنهٔ سفال (مأخذ: نگارندگان).

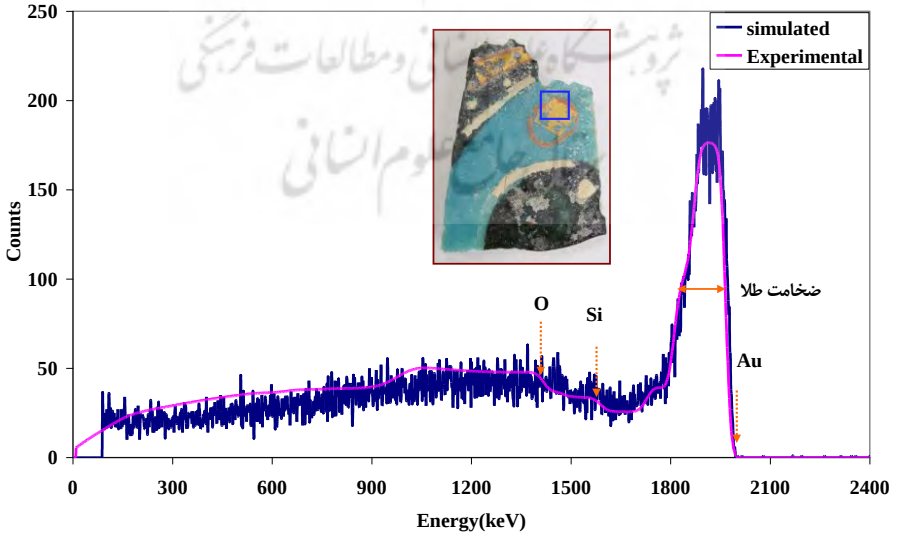


تصویر ۳. توزیع عنصری برخی از عناصر موجود در رنگ قرمز و رنگ قهوه‌ای یکی از نمونه‌های مربوط به ری (مأخذ: نگارندگان).

در شکل ۴ طیف Micro-RBS به‌دست‌آمده از ناحیهٔ زراندود در یکی از نمونه‌های قلعهٔ الموت نشان داده شده است. در این تصویر لایهٔ نازک طلا که روی نمونه نشانده شده است به شکل یک قلهٔ جدا دیده می‌شود که پهنای این قله همان‌طور که در تصویر ۴ نشان داده شده است، متناسب با ضخامت لایهٔ طلا است. همچنین در این تصویر مشخص است که عناصر اصلی تشکیل‌دهندهٔ لعاب که لایهٔ طلا روی آن قرار گرفته است، سیلیسیم (Si) و اکسیژن (O) است و با علامت پیکان نشان داده شده است. طیف به‌دست‌آمده از Micro-RBS نشان می‌دهد که ناحیه‌ای که بین انرژی ۱۶۰۰keV تا ۱۸۵۰keV وجود دارد، مربوط به ناحیهٔ مشترک لعاب و لایهٔ طلاکاری شده است. با استفاده از برازش طیف تجربی با استفاده از نرم‌افزار SIMNRA می‌توان ضخامت و ساختار لایه‌های مختلف در نمونه‌ها را مشخص کرد (Mayer,1997:1-206). نتایج این محاسبات نشان می‌دهد که لایهٔ اول که مربوط به لایهٔ طلا است، ضخامتی در حدود ۳۰۰ نانومتر دارد و طلای استفاده‌شده در این نمونه نیز خالص بوده است. با توجه به ضخامت طلای به‌دست‌آمده و بررسی روش‌های مختلف ایجاد لایهٔ طلا بر روی اشیای باستانی، می‌توان به این نتیجه رسید که از روش طلاکوبی برای ایجاد لایه‌های طلا در این نمونه استفاده شده است.

دست‌نوشته‌های قدیمی

یکی از مشکلات اساسی و جدی که اسناد، کتاب‌ها و دست‌نوشته‌های کاغذی قدیمی را در کتابخانه‌ها و مجموعه‌های شخصی تهدید می‌کند، تخریب و خوردگی بستر کاغذی است. یکی از علل آسیب و تخریب اسناد کاغذی، واکنش مرکب استفاده‌شده با مواد کاغذ است (Area et al ,2011: 5307). به منظور یافتن علل تخریب در صفحات دست‌نوشته‌ای از قرآن کریم، این صفحات با استفاده از باریکهٔ یونی میکرونی مطالعه و بررسی شده اند. تصویر اپتیکی پشت و روی یکی از صفحات این دست نوشته در تصویر ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در تصویر ۵ الف مشخص است، خطوط طلایی‌رنگ برای تذهیب و تزیین این دست‌نوشته در تمام این صفحه و همچنین صفحات دیگر استفاده شده است. همان‌طور که در این تصویر کاملاً مشخص است، بستر کاغذی در روی این خطوط طلایی‌رنگ دچار خوردگی شده و این خوردگی تا جایی پیش رفته است که در برخی نواحی در این دست‌نوشته بستر کاغذی دچار پارگی شده است که در تصویر ۵ ب این تخریب و پارگی کاملاً واضح است.



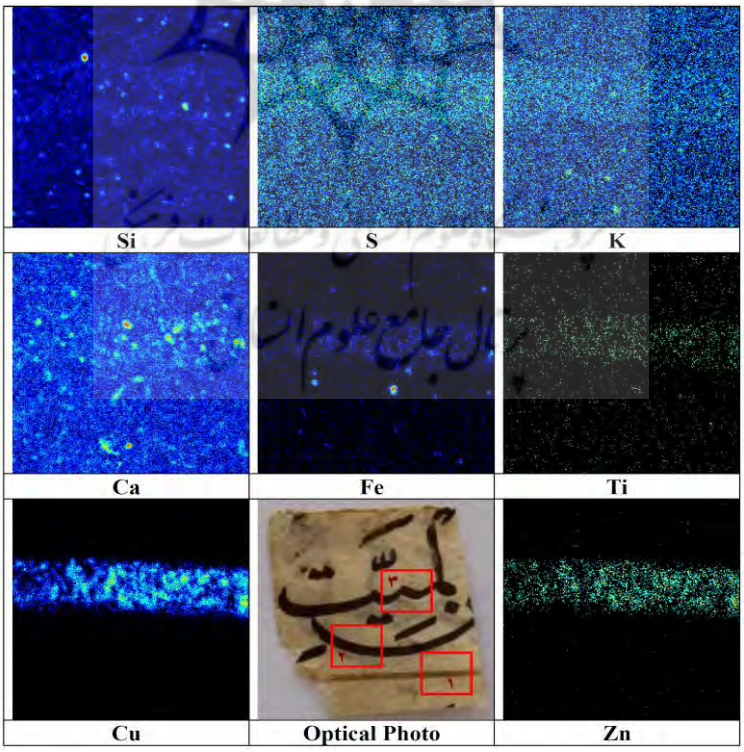
تصویر ۴. طیف Micro-RBS به‌دست‌آمده از قسمت آنالیزشده یکی از نمونه‌های الموت (تصویر ضمیمه) و همچنین طیف شبیه‌سازی‌شده با نرم‌افزار SIMNRA (مأخذ: نگارندگان).

در تصویر ۶ توزیع عنصری برخی از عناصر موجود در کاغذ و خطوط تذهیب به‌کاررفته در آن ارائه شده است. همچنین در این شکل تصویر اپتیکی نمونه و نواحی مختلف آنالیزشده نیز نشان داده شده است. در این نمونه مورد بررسی، سه ناحیهٔ مختلف آنالیزشده با مربع قرمز در تصویر اپتیکی مشخص شده است. در تصویر ۶ برای نمونه توزیع عنصری ناحیهٔ ۱ ارائه شده است. توزیع دوبعدی عناصر نشان می‌دهد که خطوط تذهیب طلایی‌رنگ مورد استفاده در تزیین این متن، به طور عمده از عناصر مس (Cu) و روی (Zn) تشکیل شده است. زیرا اگر تصویر اپتیکی ناحیهٔ ۱ را با توزیع عنصری عناصر موجود در نمونه مقایسه کنیم، مشخص است که تنها در قسمتی از ناحیهٔ ۱ که خط تذهیب وجود دارد، عناصر مس و روی به مقدار فراوان دیده می‌شود و در خارج از خطوط تذهیب این عناصر وجود ندارد. بنابراین کاملاً آشکار است که در این دست‌نوشته به جای استفاده از طلا از آلیاژی طلایی‌رنگ استفاده شده است.

بنابراین آنالیز میکروپیکسی نشان داد که عنصر عمدهٔ استفاده‌شده در خطوط تذهیب مس است. با بررسی ترکیبات رنگدانه‌های مختلف مس مشخص شده که یکی از انواع مختلف رنگدانه‌های مس، زنگار یا استات مس (II) با فرمول شیمیایی $Cu(CH_3COO)_2$ است که در برابر رطوبت محیطی بسیار حساس است (Fauble et al., 2007:669). بنابراین در شرایط محیطی نامناسب، مانند رطوبت بالا، عنصر مس می‌تواند با اکسیداسیون موضعی کاغذ که عمدتاً از سلولز تشکیل شده، باعث تخریب کامل بستر کاغذی شود. نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش با گزارش‌های ارائه‌شده در مقالات دیگر که در این زمینه چاپ شده است، تطابق دارد. در این مقالات از یون‌های مس به عنوان کاتالیزور در فرایند اکسیداسیون سلولز و محصولات سلولزی دیگر یاد شده و از این نوع خوردگی به عنوان خوردگی و تخریب بر اساس رنگدانه‌های مسی نام برده شده است (Selih et al., 2007:1476).

تصویر ۵. تصویر اپتیکی رو (الف) و پشت (ب) یکی از صفحات دست‌نوشتهٔ قدیمی که دچار آسیب جدی شده است در این شکل نشان داده شده است (مأخذ: نگارندگان).

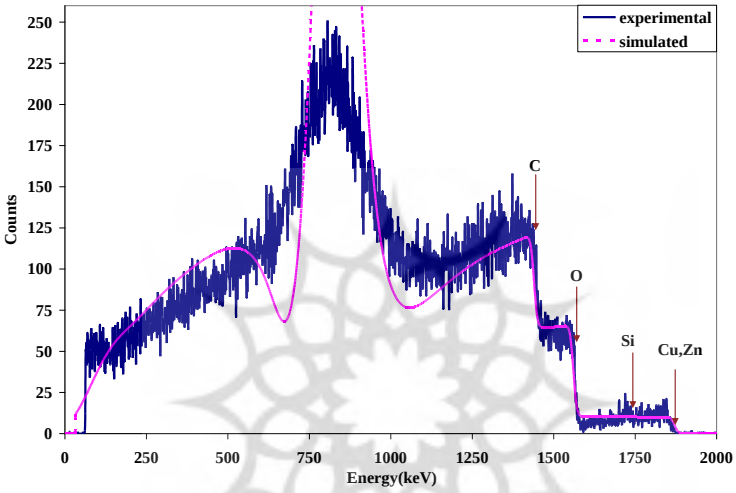
همچنین در توزیع عنصری تصویر ۶ مشخص است که مقدار کمی نیز عناصر گوگرد (S) و تیتانیم (Ti) و آهن (Fe) در مرکب خطوط تذهیب وجود دارد. نواحی دیگر آنالیزشده در این نمونه (ناحیهٔ ۲ و ۳) به منظور بررسی ترکیب مرکب مشکی و تعیین نوع مرکب انجام شده است. نتایج آنالیز این دو ناحیه نشان می‌دهد که عنصر معدنی مانند آهن یا گوگرد در مرکب مشکی که با این روش قابل اندازه‌گیری باشد، وجود ندارد. بنابراین نوع مرکب مشکی این دست‌نوشته از نوع آهن مازو نیست و از نوع مرکب کربنی است و بنابراین باعث تخریب کاغذ نشده است. در ادامه، به منظور بررسی میزان نفوذ مرکب در بستر کاغذی و برآوردی از میزان نفوذ آن و همچنین تخمینی از عناصر سبک موجود در کاغذ که با استفاده از میکروپیکسی قادر به اندازه‌گیری آن نیستیم، از تکنیک Micro-RBS استفاده شده است. در تصویر ۷ طیف RBS به‌دست‌آمده از ناحیهٔ ۱ در نمونه نشان داده شده در تصویر۶ به همراه طیف شبیه‌سازی شده که با استفاده از نرم‌افزار SIMNRA.6 ارائه شده است. در این تصویر مشخص است که عناصر عمده موجود در کاغذ، عناصر سبک مانند کربن و اکسیژن هستند. با استفاده از برازش طیف تجربی با استفاده از نرم‌افزار SIMNRA.6، مقادیری که برای این عناصر سبک برحسب درصد اتمی به دست می‌آید عبارت است از: C: 0.293 و O: 0.232 و H: 0.463 . این مقادیر به ترکیب اتمی تشکیل‌دهندهٔ سلولز ($C_6H_{10}O_5$) که مادهٔ عمدهٔ تشکیل‌دهندهٔ کاغذ است، بسیار نزدیک است و با آن توافق دارد. نتیجهٔ دیگری که می‌توان از تصویر ۷ به دست آورد، برآوردی از میزان نفوذ مرکب در کاغذ است. این تصویر نشان می‌دهد که مرکب استفاده‌شده کاملاً در بستر کاغذ نفوذ کرده است و در حال حاضر جزئی از آن محسوب می‌شود. زیرا در صورتی که این چنین نبود باید لایهٔ مرکب به صورت یک قله با پهنای مشخص که متناسب با ضخامت مرکب است، در طیف تصویر ۷ مشاهده شود، در صورتی که در تصویر چنین قله‌ای مشاهده نمی‌شود (Oliaiy et al,2009: 479).



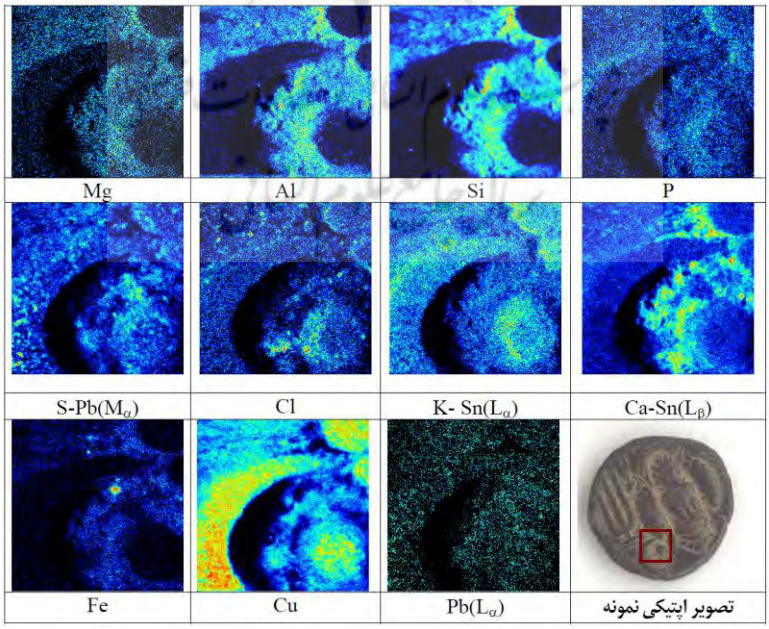
تصویر ۶. توزیع عنصری برخی از عناصر موجود در کاغذ و خطوط تذهیب به‌کاررفته در آن. در این شکل تصویر اپتیکی نمونه و ناحیهٔ آنالیزشده (ناحیهٔ ۱) نیز نشان داده شده است (مأخذ: نگارندگان).

سکه‌های برنزی و نقره‌ای

با مطالعه و اندازه‌گیری خلوص و عیار سکه‌های نقره و برنز می‌توان به اطلاعاتی مناسبی در زمینه وضع اقتصادی، سیاسی و اجتماعی حکومت‌ها و همچنین تکنولوژی ضرب سکه‌ها دست یافت. در چند سال گذشته تعداد قابل توجهی سکه از دوران تاریخی مختلف در آزمایشگاه وان‌دوگراف با روش پیکسی متعارف (قطر باریکهٔ چند میلی‌متر) آنالیز شده است. با توجه به اینکه اندازه‌گیری عناصر موجود در سکه‌ها نقش مهمی در تعیین دقیق عیار و خلوص سکه‌ها دارند، بنابراین تعدادی از نمونه‌هایی که با پیکسی متداول آنالیز شده اند با روش میکروپیکسی نیز آنالیز شده اند. نتایج آنالیز با میکرو پیکسی نشان می‌دهد که در صورتی که در روی نمونه‌ها رسوب ناشی از تدفین آنها در زمین و یا محصولات خوردگی وجود داشته باشد، تغییرات میزان خلوص سکه‌ها در نواحی مختلف نمونه‌های مورد بررسی بسیار زیاد خواهد بود.



تصویر ۷. طیف RBS به‌دست‌آمده از ناحیهٔ ۱ نمونه تصویر ۶ به همراه طیف شبیه‌سازی‌شده که با استفاده از نرم‌افزار SIMNRA.6 (مأخذ: نگارندگان).



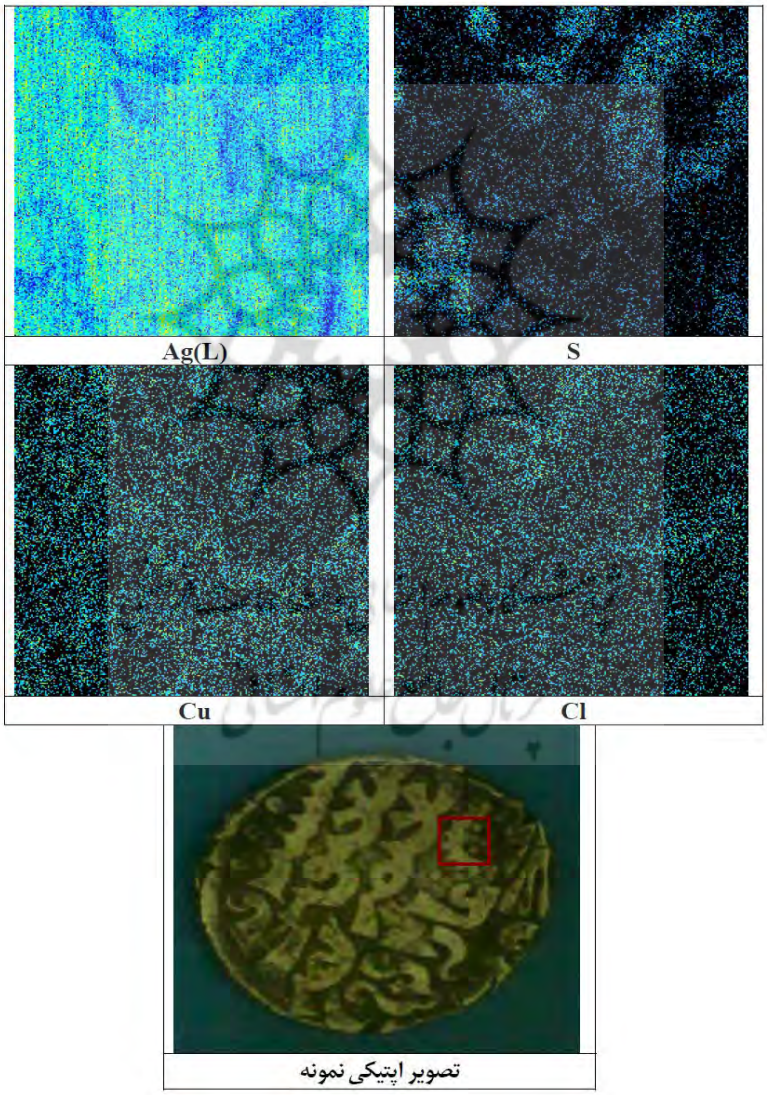
تصویر ۸. توزیع عنصری عناصر موجود در یک نمونه از سکه‌های برنزی الیمایی به همراه تصویر اپتیکی (مأخذ: نگارندگان).

در شکل ۸ توزیع عنصری عناصر موجود در یک نمونه از سکهٔ برنزی الیمایی ارائه شده است. همچنین در این شکل تصویر اپتیکی نمونه و نواحی مختلف آنالیزشده نیز نشان داده شده است. در نمونهٔ بررسی‌شده، توزیع دوبعدی عناصر نشان می‌دهد که رسوب ناشی از تدفین که سطح سکه را کامل پوشانده است، به طور عمده از عناصر منیزیم، آلومینیم، سیلیسیم، کلیسیم، و آهن تشکیل شده است که این عناصر همان عناصر عمدهٔ ناشی از خاک هستند. همچنین با توجه به تصویر ۸ می‌توان مشاهده کرد که در بخشی از ناحیهٔ آنالیزشده که رسوب قابل توجهی وجود ندارد، عمدهٔ عناصر مس و سرب و قلع هستند که همان عناصر تشکیل‌دهندهٔ آلیاژ برنز اند. برای اینکه اثر وجود رسوب را بر عیار و خلوص سکه برآورد کنیم، نواحی دارای رسوب و بدون رسوب را به طور جداگانه در روی نمونهٔ مورد بررسی برای اندازه‌گیری درصد عناصر موجود بررسی می‌کنیم. نتایج به‌دست‌آمده از این بررسی با استفاده از نرم‌افزار WinGUPIX برای این نواحی در جدول ۱ ارائه شده است (Campbell et al., 2010: 3356). نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد در صورتی که در آنالیز نمونه، امکان اندازه‌گیری توزیع عنصری و اندازه‌گیری غلظت عناصر به طور جداگانه برای نقاط مختلف ناحیه آنالیزشده وجود نداشته باشد، مانند آنچه در روش آنالیز با پیکسی متداول و یا XRF انجام می‌شود و مجبور باشیم کل یک ناحیهٔ آنالیزشده را در بررسی درصد عناصر منظور کنیم، نتایجی مشابه ستون چهارم که مربوط به کل ناحیهٔ آنالیزشده است به دست می‌آید. به عنوان مثال میزان مس که خلوص آن عیار سکه را نشان دهد در کل ناحیهٔ آنالیزشده حدود ۴۸ درصد است. در صورتی که در ناحیه‌ای که رسوب وجود ندارد، مقدار آن حدود ۷۵ درصد است که این دو مقدار به میزان قابل توجهی با یکدیگر تفاوت دارند.

جدول ۱. نتایج آنالیز عنصری و مقدار عناصر تشکیل‌دهندهٔ نمونه‌ای از سکهٔ الیمایی در نواحی آنالیزشده (مأخذ: نگارندگان).

	روی نمونه			پشت نمونه
عناصر تشکیل دهنده(%)	ناحیه بدون رسوب	ناحیه دارای رسوب	کل ناحیه آنالیز شده	کل ناحیه آنالیز شده
Na	-	1.20	0.66	-
Mg	0.02	2.31	1.44	0.09
Al	0.50	7.97	5.19	0.29
Si	1.19	26.62	15.41	1.59
P	0.73	1.35	1.29	0.87
S	0.51	0.77	0.73	0.67
Cl	1.15	1.37	1.44	1.01
K	0.17	2.57	1.18	0.19
Ca	0.48	11.76	5.26	0.44
Ti	-	0.36	0.13	-
V	-	0.03	0.02	-
Fe	0.06	2.60	1.01	0.06
Co	0.01	0.03	0.02	0.01
Ni	0.02	0.04	0.01	-
Cu	75.50	25.32	48.15	78.96
As	0.18	-	0.09	0.17
Ag	2.04	2.04	2.71	1.62
Sn	9.09	4.65	7.35	6.56
Pb	8.34	9.10	7.89	7.53

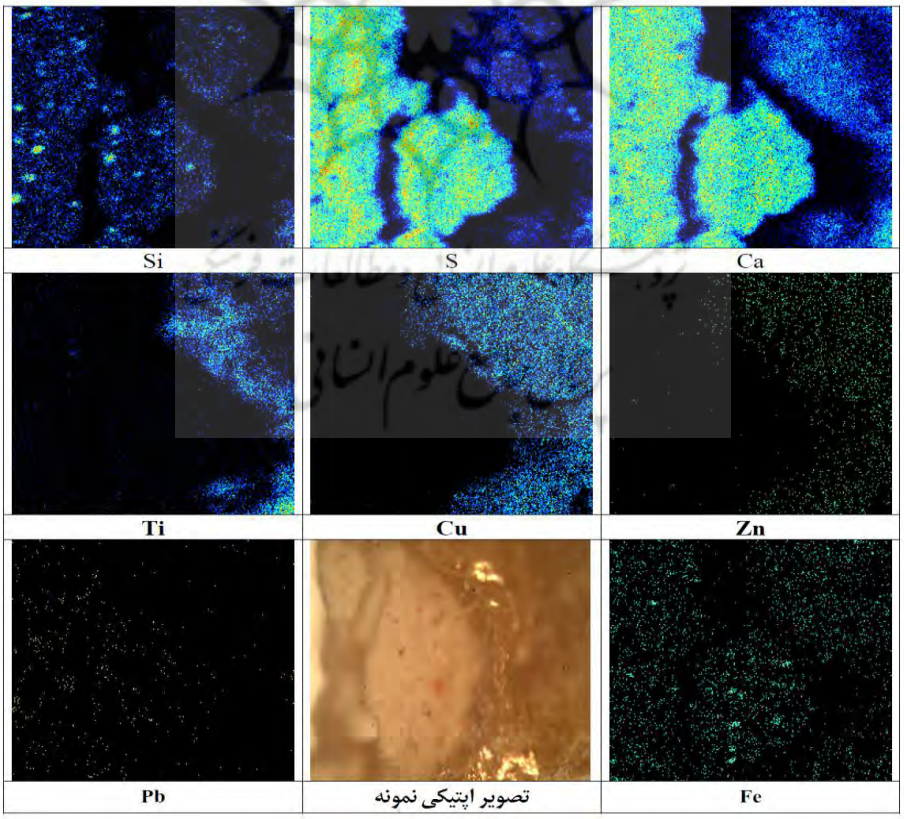
علاوه بر این با نگاهی به مقادیر عناصر دیگر این اختلاف برای نقاط مختلف کاملاً مشهود است. همچنین در این جدول نتایج عناصر موجود در این سکه در صورتی که پشت نمونه آنالیز شود، آورده شده است که مشخص است نتایج آنالیز پشتِ نمونه به نتایج به‌دست‌آمده از ناحیه‌ای که رسوب وجود ندارد، بسیار نزدیک است. علت این اختلاف کم به خاطر سطوح تقریباً یکنواخت پشتِ نمونه است که روی آن رسوبی وجود ندارد. همچنین عامل دیگری که باعث می‌شود تعیین و اندازه‌گیری عیار سکه‌ها با خطا همراه باشد، پوشیده شدن سطح نمونه با محصولات خوردگی است. در تصویر ۹ نتایج به‌دست‌آمده از توزیع عنصری عناصر موجود در یک نمونه از سکه‌های نقره‌ای دورهٔ ایلخانی به همراه تصویر اپتیکی آن نشان داده شده است. همان‌طور که کاملاً مشخص است عمدهٔ محصول خوردگی در این نمونه ترکیبات ایجاد شده با سولفور و کلر هستند. بنابراین در اندازه‌گیری عیار سکه‌ها باید به این نکته نیز توجه داشته باشیم که سطحی از نمونه که برای تعیین عیار آنالیز می‌شود تا حد امکان عاری از خوردگی باشد و یا اینکه نتایج اندازه‌گیری شده برای تعیین دقیق خلوص نقره تصحیح شود.



تصویر ۹. توزیع عنصری عناصر موجود در یک نمونه از سکه‌های نقره‌ای دورهٔ ایلخانی به همراه تصویر اپتیکی آن (مأخذ: نگارندگان).

نقاشی دیواری

یکی دیگر از نمونه‌هایی که اخیراً در آزمایشگاه وان-دوگراف با روش میکروپیکسی بررسی و مطالعه شده است، نمونه‌های مربوط به نقاشی‌های دیواری عمارت‌های تاریخی دوران قاجاریه در تهران بود. هدف از این مطالعه شناسایی عناصر طلایی‌رنگ و تعیین درجهٔ خلوص آنها و همچنین شناسایی لایه‌های مختلف به‌کارگرفته شده در خلق این نقاشی‌ها بود. نتایج و توزیع عنصری یکی از نمونه‌های بررسی‌شده از این نقاشی‌های دیواری به همراه تصویر میکروسکوپی آن در تصویر ۱۰ نشان داده شده است. با بررسی توزیع عنصری، اطلاعات مهمی در مورد این نمونه بدست می‌آید. همان‌طور که در تصویر ۱۰ کاملاً مشخص است در این نمونه حداقل سه لایهٔ متمایز می‌توان شناسایی کرد: ۱. لایهٔ تشکیل‌شده از عنصر کلیسیم و سولفور که در اصل بستر اولیه برای نقاشی است و همان سولفات کلیسیم یا گچ است؛ ۲. لایهٔ میانی که به طور عمده از عنصر تیتانیم تشکیل شده است که احتمالاً مربوط به اکسید تیتانیم است که به عنوان رنگدانه سفید استفاده شده است؛ ۳. لایهٔ متشکل از عنصر مس و روی که مربوط به ناحیه‌ای از نمونه است که حالت درخشان و زرین دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که از لایهٔ نازک برنز که در برخی منابع از آن با عنوان شبه‌طلا (طلای بدلی) یاد شده است به منظور ایجاد رنگ طلایی درخشان استفاده شده است. همچنین با توجه به این توزیع عنصری، مشاهده می‌شود که در لایهٔ گچ که به عنوان بستر اصلی استفاده شده است، ناخالصی سیلیسیم و آهن و سرب به مقدار کمی دیده می‌شود. همچنین توزیع عنصری نشان می‌دهد که لایهٔ برنز استفاده‌شده تقریباً خالص است و اندکی ناخالصی آهن دارد. بنابراین با استفاده از یک ناحیهٔ آنالیز که با نقشهٔ توزیع عنصری همراه بود به اطلاعات مورد نیاز در مورد این نمونه دست یافتیم.



تصویر ۱۰. توزیع عنصری نمونه‌ای از یک نقاشی دیواری به همراه تصویر میکروسکوپ نوری آن (مأخذ: نگارندگان).

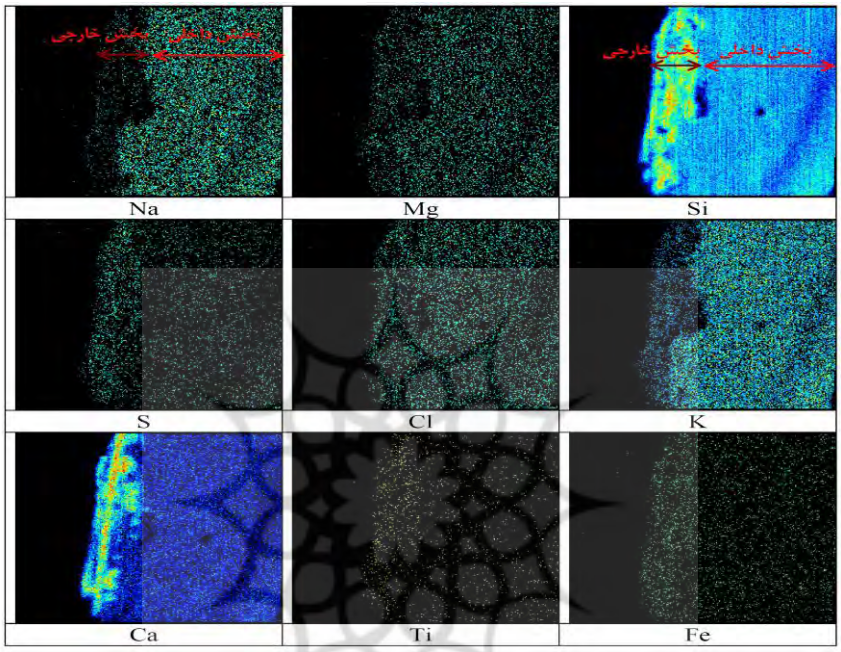
شیشه‌های قدیمی ایرانی

یکی از انواع اشیای باستانی و تاریخی که اهمیت بسیار دارند و نمونه‌های مختلفی از آنها در حفاری‌های مختلف در دوران مختلف تاریخی به دست آمده، ظروف شیشه‌ای هستند. اگرچه بررسی و مطالعه روی شیشهٔ قدیمی ایرانی همواره مورد توجه محققان و باستان‌شناسان بوده است اما مرور و بررسی تحقیقات پیشین انجام‌شده روی اشیای شیشه‌ای کشف‌شده از مناطق مختلف ایران نشان می‌دهد که در سال‌های گذشته، بسیار محدود و فقط روی تعداد اندکی از اشیای شیشه‌ای ایرانی تحقیقات و بررسی‌هایی بر پایهٔ آنالیز شیمیایی و عنصری انجام شده است. در مهم‌ترین این پژوهش‌ها که توسط روبرت. اچ. بریل و همکاران او بر روی اشیای شیشه‌های ایرانی انجام شده است؛ تعدادی از شیشه‌های قدیمی که در شهر نیشابور به دست آمده و متعلق به قرن نهم و دهم میلادی (اوایل دوران اسلامی) است بررسی شده اند (Brill,1999). در ایران نیز در سال‌های اخیر تحقیق اساسی و جامعی روی نمونه‌ها و مصنوعات شیشه‌ای انجام نشده است و فقط چند بررسی مقدماتی روی نمونه‌های شیشه‌ای انجام شده است. بنابراین در پژوهشی گسترده که از سال گذشته در آزمایشگاه وان‌دوگراف شروع شده، تلاش می‌شود که تا کار بررسی و تحقیق روی شیشه‌های قدیمی بدست‌آمده در شمال غرب ایران که در موزهٔ اردبیل و تکاب نگهداری می‌شوند و مربوط به دورهٔ میانی اسلام هستند و همچنین نمونه‌های متعددی از جنوب ایران که مربوط به دورهٔ اشکانی و اوایل دوران اسلامی اند انجام شود. این بررسی‌ها شامل مطالعهٔ فن‌شناسی و آسیب‌شناسی این نمونه‌هاست که کمک قابل توجهی به حفاظت این نمونه‌ها می‌کند. همچنین با اندازه‌گیری عناصر اصلی و کم‌مقدار این شیشه‌ها، نوع شیشه‌ها و مواد خام مورد استفاده در ساخت آنها و همچنین عامل ایجاد رنگ هر یک از شیشه‌ها مشخص می‌شود.

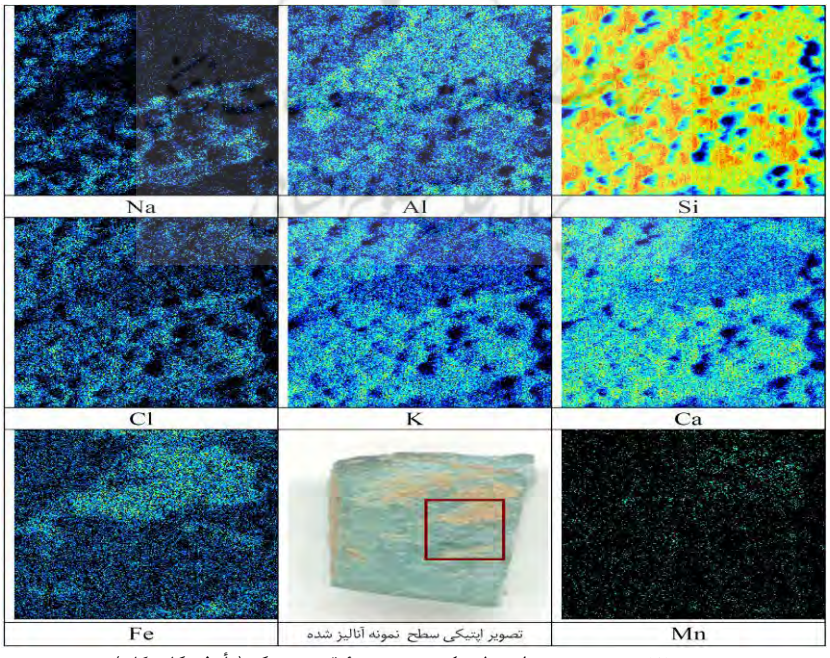
بر اساس مراجع مختلف (Henderson,2013:56-81) مواد تشکیل‌دهندهٔ مصنوعات شیشه‌ای به چهار دستهٔ عمده تقسیم می‌شود: ۱. مواد پایه که مادهٔ اصلی تمام مصنوعات شیشه‌ای است. این مواد شامل سیلیس یا اکسید سلیسیم است که به صورت شن، سنگ چخماق، یا سنگ چینی استفاده می‌شده است؛ ۲. مواد ذوب‌کننده که باعث می‌شود نقطهٔ ذوب سیلیس کم‌تر شود. این مواد شامل سود و پتاس بوده است و به صورت کربنات سدیم، سولفات سدیم، و استات سدیم استفاده می‌شدند؛ ۳. مواد تثبیت‌کننده که به منظور مخلوط شدن بهتر مواد پایه و ذوب‌کننده و همچنین جلوگیری از حل شدن شیشه در مواد مختلف استفاده می‌شده است. کربنات کلسیم از رایج‌ترین مواد تثبیت‌کننده بوده است؛ ۴. مواد سفیدکننده و رنگ‌دهنده که شیشه‌گران به منظور خنثی کردن رنگ در خمیر شیشه و همچنین ایجاد شیشه‌های رنگی از آنها بهره می‌گرفته اند. این مواد عالباً شامل اکسیدهای فلزی مانند اکسید منگنز، آهن، مس، کروم، و کبالت بوده اند که به خمیرهٔ شیشه اضافه می‌شده اند. تعیین و اندازه‌گیری هر یک از این چهار دسته مواد به برخی از پرسش‌ها در زمینهٔ فن‌شناسی و تکنیک ساخت، نوع شیشه و مواد خام مورد استفاده در ساخت، و همچنین آسیب‌شناسی و بررسی محصولات خوردگی پاسخ خواهد داد.

اگرچه اشیای شیشه‌ای کاملاً در برابر خوردگی مقام هستند، اما اگر در تماس با آب و رطوبت قرار گیرند، آسیب‌پذیر می‌شوند. بنابراین آب اولین عامل بسیار مؤثر در فرایند خوردگی شیشه‌های قدیمی است. رطوبت موجود در محیط باعث کاهش غلظت یون‌های قلیایی مانند Na^+ و K^+ در شیشه می‌شوند و بنابراین در این عمل یک لایهٔ تغییرشکل‌یافته ایجاد می‌شود که کاملاً از یون‌های Na^+ و K^+ تهی هستند (Grassi, 2007: 712) و ضخامت این لایه از چند نانومتر تا چند صد میکرومتر نیز می‌رسد. در تصویر ۱۱، توزیع عنصری عناصر موجود در یک نمونهٔ تهیه‌شده از یک شیشه قدیمی که از سطح مقطع آنالیزشده، نشان داده شده است. همان‌طور که در این تصویر مشخص است، بخش خارجی که سطحی از

شیشه است که با محیط تماس داشته است کاملاً از یون‌های قلیایی سدیم و پتاسیم تهی شده است و میزان این یون‌ها در سطح نمونه به میزان قابل توجهی کاهش یافته است و بر عکس عناصری مانند سیلیسیم و کلیسیم که در محیط وجود دارد در سطح افزایش قابل توجهی داشته است. تعیین این لایه نقش بسیار مهمی در اندازه‌گیری و تعیین درصد عناصر تشکیل‌دهندهٔ شیشه‌ها دارد. زیرا در صورتی که آنالیز نمونه فقط از سطح خارجی انجام شود به سبب وجود این لایهٔ تهی از عناصر قلیایی، تعیین نوع شیشه و عناصر سازندهٔ آن کاملاً نادرست خواهد بود. آنالیز عنصری این نمونه نشان می‌دهد که در بخش خارجی کم‌تر از ۵ درصد سدیم و حدود ۸۰ درصد سیلیسیم وجود دارد.



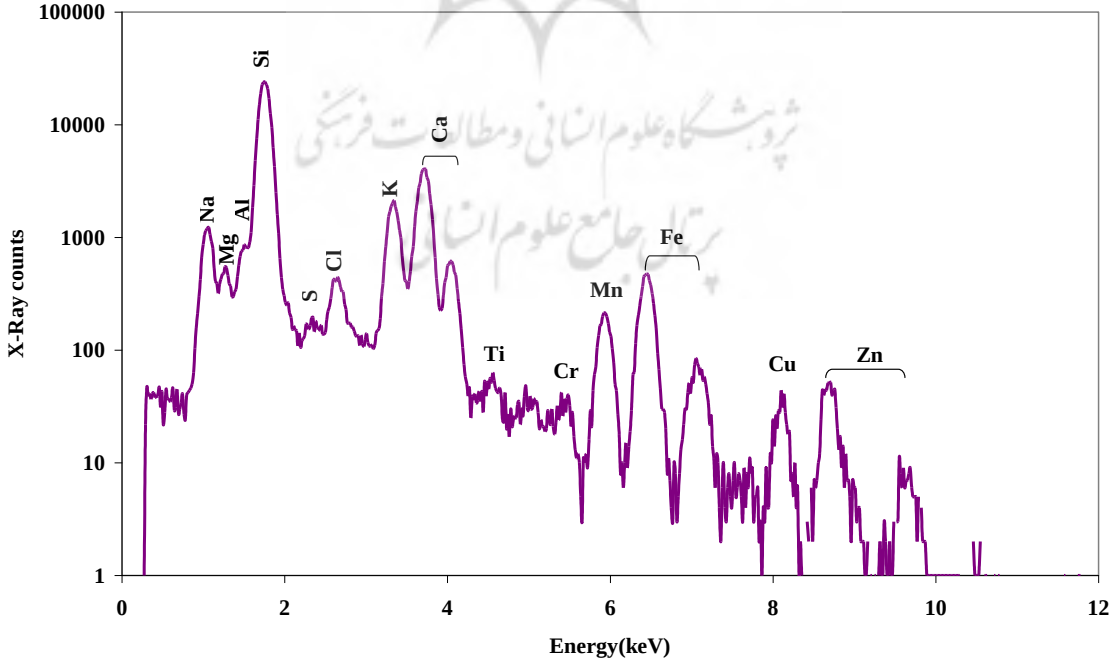
تصویر ۱۱. توزیع عنصری به‌دست‌آمده از آنالیز از سطح مقطع یک نمونهٔ تهیه‌شده از یک شیشهٔ قدیمی (مأخذ: نگارندگان).



تصویر ۱۲. توزیع عنصری از سطح یک نمونه شیشهٔ قدیمی دیگر (مأخذ: نگارندگان).

یکی دیگر از پارامترهایی که در بررسی و آنالیز شیشه‌های قدیمی باید به آن توجه شود، وجود محصولات خوردگی است که در سطح نمونه ایجاد شده است. در صورتی که آنالیز نمونهٔ مورد بررسی با دستگاهی مانند XRF یا پیکسی متداول ـ که قادر به تهیه نقشه توزیع عنصری نیستند ـ انجام شود به احتمال زیاد در اندازه‌گیری دقیق محصولات خوردگی و همچنین عناصر تشکیل‌دهندهٔ نمونهٔ خطای قابل توجهی وجود خواهد داشت. در تصویر ۱۲، توزیع عنصری عناصر موجود در یک نمونهٔ تهیه‌شده از یک شیشهٔ قدیمی دیگر که سطح خارجی آن آنالیز شده، نشان داده شده است. همان‌طور که در این تصویر مشخص است بخش خارجی نمونه که با محیط تماس داشته است، دارای رسوبی از ترکیبات آهن است و همین رسوب باعث شده که یون‌های قلیایی سدیم و پتاسیم در ناحیهٔ رسوب به میزان قابل توجهی کاهش یابند. بنابراین برای تعیین نوع شیشه‌های قدیمی (از نظر تکنیک ساخت)، اندازه‌گیری دقیق عناصر تشکیل‌دهنده در بخشی از نمونه با حداقل خوردگی ضرورت دارد. نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد که بدین منظور آنالیز بخشی از سطح مقطع نمونه که در تماس با محیط بیرونی نبوده است، لازم است. به عنوان مثال طیف میکروپیکسی به‌دست‌آمده از آنالیز یکی از نمونه‌های شیشه‌ای رنگی به رنگ بنفش که از سطح مقطع آنالیزشده و ناحیهٔ آنالیز به گونه‌ای انتخاب شده که دارای خوردگی نباشد در تصویر ۱۳ نشان داده شده است. در این طیف عناصر قابل اندازه‌گیری در نمونه‌ها مشخص شده است.

برای اینکه بینش بهتری در مورد عناصر تشکیل‌دهندهٔ این شیشه به دست آوریم، در جدول زیر عناصر موجود در این نمونهٔ آنالیزشده بر حسب درصد وزنی ارائه شده است. بر اساس این جدول و مقادیر آنالیز عنصری به برخی از نتایجی به دست آمده اشاره می‌شود. بر اساس میزان اکسید سدیم موجود در نمونه که حدود ۱۵ درصد است نتیجه می‌گیریم که نوع شیشه از نوع سودا است و با توجه به اینکه مقادیر اکسید منیزیم و اکسید پتاسیم از ۱/۵ درصد بیش‌تر است، می‌توان حدس زد که نوع ماده‌ای که به عنوان منبع اکسید سدیم استفاده شده است خاکستر به‌دست‌آمده از گیاهان است. همچنین با توجه میزان اکسید آلومینیم می‌وان تشخیص داد که سیلیکای استفاده در تهیهٔ این شیشه خالص نبوده است و دارای ناخالصی زیادی بوده است. همچنین با توجه به مقادیر کم اکسید مس و روی مشخص است که به عنوان عامل رنگزا از ترکیب این دو اکسید استفاده شده است.



تصویر ۱۳ . آنالیز سطح مقطع یک نمونه دیگر از شیشه‌های قدیمی. ناحیهٔ آنالیز به گونه‌ای انتخاب شده که دارای خوردگی نباشد (مأخذ: نگارندگان).

جدول ۲. نتایج آنالیز عنصری و مقدار عناصر تشکیل‌دهندهٔ نمونه‌ای از شیشهٔ بنفش‌رنگ برای ناحیهٔ آنالیزشده (مأخذ: نگارندگان).

Elements	مقدار عناصر بر حسب درصد
Na_2O	15.41
MgO	2.75
Al_2O_3	2.56
SiO_2	65.51
P_2O_5	0.59
SO_3	0.24
Cl	0.45
K_2O	2.71
CaO	6.53
TiO_2	0.07
Cr_2O_3	-
MnO	0.6
Fe_2O_3	1.72
CoO	0.01
Cu_2O	0.19
ZnO	0.44

نتیجه‌گیری

آنالیز با باریکهٔ یونی میکرونی در زمینه‌های بسیار وسیع و گسترده‌ای سودمند است. در این مقاله تنها خلاصهٔ برخی از نتایجی که در دو سال گذشته برای اولین بار در کشور در آزمایشگاه وان‌دوگراف به دست آمده ارائه شده است. نتایج ارائه‌شده در این مقاله، قابلیت‌ها و کاربردهای این روش آنالیز را باستان‌سنجی و استفاده از نتایج آن در مرمت و حفاظت این نمونه‌ها را نشان می‌دهد. این نتایج بیان می‌کند که استفاده از این روش آنالیز با توجه به توانایی‌های بی‌نظیر خود، توانسته است تحول اساسی در بررسی و آنالیز نمونه‌های مختلف ایجاد کند.

منابع

آقاعلی گل، داود و پروین اولیائی و علی باقی‌زاده، و فرح شکوهی و امیدرضا کاکوئی و بیژن موحد و محمد فرمهینی فراهانی و محمود مرادی و محمد لامعی رشتی. (۱۳۸۶). «آنالیز عنصری نمونه‌های مختلف با استفاده از میکروسکوپ روبشی پروتون». در *مجلهٔ علوم و فنون هسته‌ای*، ش۴۰، ص ۱ـ ۱۰.

کاشانی، ابوالقاسم عبدالله. (۱۳۸۶). *عرایس الجواهر و نفایس الاطایب*. به کوشش ایرج افشار. تهران: انتشارات انجمن آثار ملی.

لامعی رشتی، محمد. (۱۳۸۲). «نقش تحلیل عنصری در باستان‌سنجی: تجربهٔ آزمایشگاه وان‌دوگراف». در *مجلهٔ فیزیک*، ش۲۱، ص ۹ـ ۱۴.

Area, M. C & H. Cheradame. (2011). "Paper aging and degradation: Recent findings and research methods". in *BioResources*, Vol.6, No.4, pp.5307-5337.

Bird. J.R. & J. S. Williams. (1989). *Ion Beams for Materials Analysis*. Academic press.

Brill, R. H. (1999). *Chemical analyses of early glasses*. Vol. I and II. New York: the Corning Museum of Glass.

Campbell, J. L & , N. I. Boyd & N. Grassi & P. Bonnick, & J. A. Maxwell. (2010)."The Guelph PIXE software package IV". in *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, Vol.268, pp.3356-3363.

Faubel, W & S. Staub & R. Simon & S. Heissler & A. Pataki, & G. Banik. (2007). "Non-destructive analysis for the investigation of decomposition phenomena of historical manuscripts and prints". in S*pectrochimica Acta Part B,* Vol.62, pp.669-676.

Grassi,N; Giuntini, L.; Mando, P.A. & Massi, M. (2007). Advantages of scanning-"mode ion beam analysis for the study of Cultural Heritage". in *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, Vol.256, pp.712-718.

Henderson, J. (2013). *Ancient Glass: An Interdisciplinary Exploration*. Cambridge University Press.

Johansson, Sven A. E. & John L. Campbell. (1998). *PIXE: A Novel Technique for Elemental Analysis*. Wiley.

Mayer, M. (1997). *SIMNRA User's Guide, Report IPP 9/113*. Max-Planck-Institut für

(2007). "The role of transition metals in oxidative degradation of cellulose". in *Polymer Degradation and Stability*, Vol.92, pp.1476-1481.
Smith, D. (2001). "Considering the colors of Minai ware". in *MetObjectives*, no.3(1), pp.9-11.
Plasmaphysik.
Oliaiy, P & D. Agha-Aligol & F. Shokouhi & M. Lamehi-Rachti, (2009). "Analysis of Iranian postage stamps belonging to the Qajar dynasty (18th–20th Century's) by micro-PIXE". in *X-Ray Spectrom*, Vol.38, pp.479-486.
Selih, V. S & M. Strlic & J. Kolar, & B. Pihlar.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی