



آنالیز عنصری نمونه‌های مختلف با استفاده از میکروسکوپ روبشی پروتون و بررسی توزیع عناصر در آنها

داوود آقاعلی‌گل*، پروین اولیائی، علی باقی‌زاده، فرح شکوهی، امیدرضا کاکوئی، بیژن موحد،

محمد فرمهبینی فراهانی، محمود مرادی، محمد لامعی رشتی

آزمایشگاه واندوگراف، پژوهشگاه علوم هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۳۴۸۶، تهران - ایران

چکیده: نحوه توزیع عناصر در بسیاری از نمونه‌های بیولوژی، میکروالکترونیک و زمین‌شناسی دارای اهمیت بسیار است. با استفاده از باریکه میکرونی و روبش نمونه می‌توان اطلاعات دقیقی از توزیع عنصری عناصر موجود در نمونه به دست آورد. بعد از راه‌اندازی سیستم میکروسکوپ روبشی پروتون (ریز باریکه) در آزمایشگاه واندوگراف، کاربرد این سیستم در زمینه‌های مختلف علوم آغاز شد. در این مقاله بعضی از نتایج آنالیز عنصری و نحوه توزیع عناصر در نمونه‌های مختلف باستان‌شناسی، بیولوژی، کانی‌شناسی، میکروالکترونیک و بیوتکنولوژی گزارش شده است. نتایج ارائه شده بعد از راه‌اندازی سیستم میکروپیکسی به دست آمده است. هدف از ارائه این نتایج، معرفی سیستم و بیان قابلیت‌های آن در بررسی و آنالیز عنصری مواد است.

واژه‌های کلیدی: آنالیز عنصری، پیکسی، میکروسکوپ روبشی پروتون، توزیع عنصری

Elemental Analysis and Investigation of Distribution of Elements in Different Samples by Scanning Proton Microscope

D. Agha Aligol*, P. Oliyai, A. Baghizadeh, F. Shokouhi, O.R. Kakuee, B. Movahed,
M. Farmahini Farahani, M. Moradi, M. Lamahi Rachti

Van de Graff Laboratory, Nuclear Science Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute,
AEOI, P.O. Box: 11365-3486, Tehran - Iran

Abstract: Finding the distribution of elements in a given sample is very important in biology, microelectronics and geology. By using a microbeam and scanning the samples, we can obtain a great deal of information about the distribution of elements. After the installation of a microprobe system in the Van de Graff Laboratory, we started applying this system. In this paper, we report some preliminary results on the distribution of elements in archaeological, geological, microelectronic samples. The aim of this paper is to describe the capabilities of the microprobe system in material analysis.

Keywords: Elemental Analysis, PIXE, Scanning Proton Microscope, Elemental Distribution

*email: daghaaligol@aeoi.org.ir

۱- مقدمه

آنالیز عنصری به روش پیکسی (PIXE) یکی از روش‌های متداول در آنالیز عنصری مواد است. پیکسی یا "گسیل پرتو X در اثر برانگیختگی با پروتون" روش توانمندی برای آنالیز بس عنصری و غیرتخریبی نمونه‌های مختلف است. در این روش آنالیز، نمونه مورد بررسی تحت تابش پروتون قرار می‌گیرد. در اثر برخورد پروتون با اتم هدف، پرتو X ویژه‌ای گسیل می‌شود که انرژی آن، نوع عنصر موجود در نمونه و شدت پرتوهای X با انرژی معین، غلظت عنصر در نمونه را مشخص می‌کند. با استفاده از باریکه میکرونی پروتون می‌توان توانایی‌ها و قابلیت‌های آنالیز عنصری روش پیکسی را به میزان زیادی افزایش داد. آنالیز عنصری مواد با استفاده از باریکه یونی میکرونی روش میکروپیکسی نامیده می‌شود [۱]. با استفاده از این روش می‌توان توزیع عنصری نمونه را در ابعاد میکرون تعیین کرد. اگر چه این کار برای نمونه‌های همگن مزیتی محسوب نمی‌شود، ولی در مورد نمونه‌هایی که توزیع عنصری غیرهمگن در اندازه‌های چند میکرونی دارند، بسیار مفید و دارای اهمیت است [۲]. همچنین به وسیله باریکه میکرونی پروتون می‌توان سطح نمونه مورد بررسی را روید (اسکن کرد) و تصویری دو بعدی از توزیع عناصر موجود در نمونه بدست آورد. به این جهت است که این دستگاه را میکروسکوپ روبشی پروتون نامیده‌اند. آنالیز مواد با روش میکروپیکسی علاوه بر برتری‌های منحصر به فردی که در بالا به آنها اشاره شد روشی بس عنصری، غیرمخرب و آشکارسازی در حد چند ppm است [۱]. زمینه‌هایی که آنالیز به روش میکروپیکسی ممکن است برای آنها سودمند باشد، بسیار وسیع و گسترده‌اند. در این مقاله برخی از نتایج که بعد از راه‌اندازی سیستم میکروپیکسی در آزمایشگاه واندوگراف سازمان انرژی اتمی به دست آمده‌اند ارائه می‌شود. زمینه‌هایی که از این سیستم برای آنالیز نمونه استفاده شده است عبارتند از: بافت‌های بیولوژی، نمونه‌های زمین‌شناسی، نمونه‌های مربوط به قطعات میکروالکترونیک، باستان‌شناسی و بیوتکنولوژی. خلاصه برخی از نتایج بدست آمده در هر زمینه برای معرفی قابلیت‌ها و کاربردهای این روش در اینجا ارائه شده است.

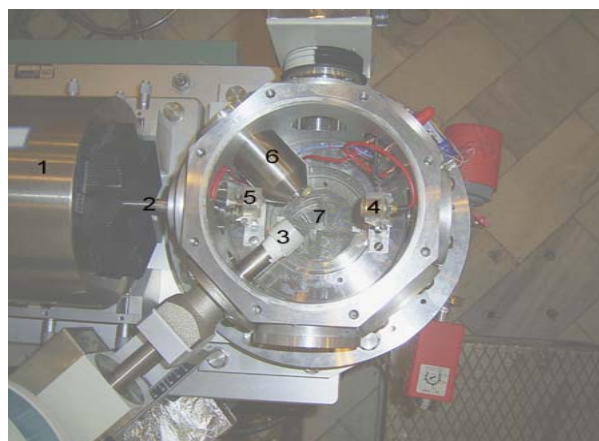
۲- تجهیزات و شرایط آزمایش

باریکه مورد استفاده در پیکسی متداول، ابعادی در حدود 2×2 میلی‌متر مربع دارد. اما با استفاده از عدسی‌های الکترومغناطیسی می‌توان قطر باریکه مورد استفاده در آنالیز را به کمتر از چند میکرون رساند. برای ایجاد باریکه میکرونی، به وسیله یک دیافراگم شیی و یک دیافراگم هم راستاساز، قطر باریکه را به کمتر از 0.9 میلی‌متر کاهش می‌دهیم. سپس باریکه حاصل به وسیله سه عدسی از نوع چهارقطبی مغناطیسی به باریکه‌ای به قطر کمتر از 10 میکرون تبدیل می‌شود. همچنین برای روبش سطح نمونه به وسیله باریکه میکرونی در دو راستای X و Y از سیم‌پیچ‌های الکترومغناطیسی که قبل از عدسی‌های کانونی کننده قرار گرفته‌اند استفاده می‌شود. برای نمایش دادن توزیع عنصری عناصر موجود در یک نمونه به صورت یک تصویر دو بعدی، بازه مناسبی از انرژی را که متناظر با عنصری خاص است، در طیف حاصل از آنالیز انتخاب می‌کنیم. سپس باریکه کانونی شده، سطح نمونه را در راستاهای X و Y جاروب می‌کند. مکان X‌های مشخصه گسیل شده از نمونه که به وسیله آشکارساز، آشکار می‌شوند بصورت تابعی از مکان باریکه، روی نمونه ثبت می‌شوند و تصویر توزیع عنصری را ایجاد می‌کنند [۳]. تصویر کلی از قسمتهای مختلف سیستم باریکه میکرونی در شکل ۱ و نمایی از اتاقک آزمایش میکروپیکسی در شکل ۲ نشان داده شده است که در آن تجهیزات مختلف مورد استفاده مشخص شده‌اند.



شکل ۱- تصویری از قسمتهای مختلف سیستم تولید باریکه میکرونی پروتون در این شکل نشان داده شده است: ۱- چهارقطبی مغناطیسی سه گانه ۲- جبهه روبش باریکه پروتون ۳- دیافراگم هم راستاساز ۴- محفظه آنالیز نمونه.

جمله آنالیز عنصری نمونه‌ها، سالیان متمادی کاربرد داشته است. اما به علت محدودیت در حد آشکارسازی، بسیاری از عناصر مورد توجه زمین‌شناسان با این روش قابل آشکارسازی نبوده است [۴]. با پیدایش میکروسکوپ روبشی پروتون (SPM) و تکامل آن، این محدودیت‌ها تا حد بسیار زیادی برطرف شده‌اند، به طوری که با استفاده از میکروسکوپ روبشی پروتون، آشکارسازی عناصر تا حد چند ppm رسیده، که نسبت به میکروسکوپ روبشی الکترون حدود ۱۰۰ برابر بیشتر است. بنابراین می‌توان این روش را در این زمینه از علوم بسیار بکار برد. در شکل ۳ طیف بدست آمده از نمونه یک کانی سیلیکاتی که با استفاده از روش میکروپیکسی آنالیز شده، نشان داده شده است. قله‌های مربوط به عناصر مختلف در این شکل مشخص شده‌اند. در شکل ۴ توزیع عنصری برخی از عناصر موجود در این کانی سیلیکاتی که با استفاده از این روش آنالیز به دست آمده، نشان داده شده است. در این شکل همبستگی و ارتباط بین عناصر مختلف کاملاً مشخص است. با این همبستگی‌ها می‌توان عناصر تشکیل دهنده یک کانی و نوع آن را مشخص کرد. به عنوان مثال، همبستگی بین عناصر مختلف برای یک ناحیه، در شکل ۴ با مستطیل نشان داده شده است. کاملاً واضح است در محل‌هایی که عنصر آهن وجود دارد، کلسیم نیز وجود دارد. اما در محل‌هایی که این دو عنصر وجود دارند عناصری مانند سیلیسیم، آلومینیوم و پتاسیوم وجود ندارند، همچنین همبستگی بین عناصر آلومینیوم و کلسیم در شکل ۴ دیده می‌شود و در جاهایی که این دو عنصر وجود دارند، عنصر پتاسیوم وجود ندارد. بنابراین مشخص است که با داشتن توزیع عنصری



شکل ۲- تصویری از قسمت‌های مختلف محفظه آزمایش سیستم میکروپیکسی در این شکل نشان داده شده است: ۱- چهار قطبی مغناطیسی ۲- محل ورود باریکه به محفظه آزمایش ۳- آشکارساز Si(Li) برای آشکارسازی Xهای مشخص ۴- آشکارساز سطحی سیلیکون برای آشکارسازی ذرات عبوری از نمونه ۵- آشکارساز سطحی سیلیکون برای آشکارسازی ذرات برگشتی از نمونه ۶- میکروسکوپ اپتیکی ۷- محل قرار گرفتن نمونه.

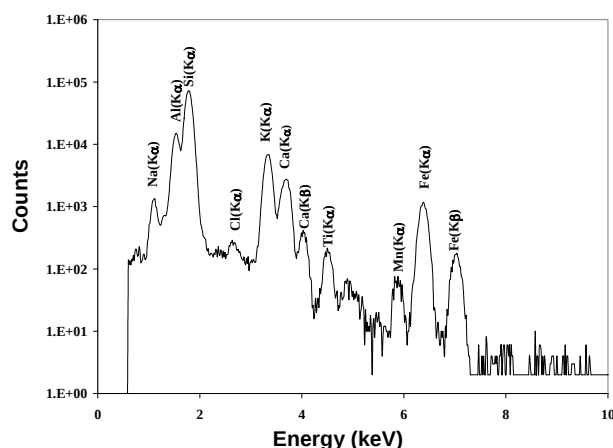
در این پژوهش از باریکه پروتون با انرژی ۲ MeV یا ۲/۲ و جریان باریکه‌ای در حدود ۵۰-۳۰ pA که به وسیله شتابدهنده واندوگراف ۳ MV آزمایشگاه واندوگراف سازمان انرژی اتمی ایران تولید می‌شود، استفاده شده است. قطر باریکه پروتون در این آزمایش در حدود ۱۰ میکرون تنظیم شده است. برای آشکارسازی اشعه X، آشکارساز Si(Li) که در زاویه ۱۳۵ درجه نسبت به باریکه پروتون فرودی قرار گرفته و دارای قدرت تفکیک ۱۵۰ eV می‌باشد، بکار رفته است. همچنین برای آشکارسازی ذرات عبوری از نمونه، از آشکارساز سطحی سیلیکون که پشت نمونه در زاویه ۲۰ درجه نسبت به باریکه قرار گرفته استفاده شده است.

۳- نتایج تجربی و بررسی

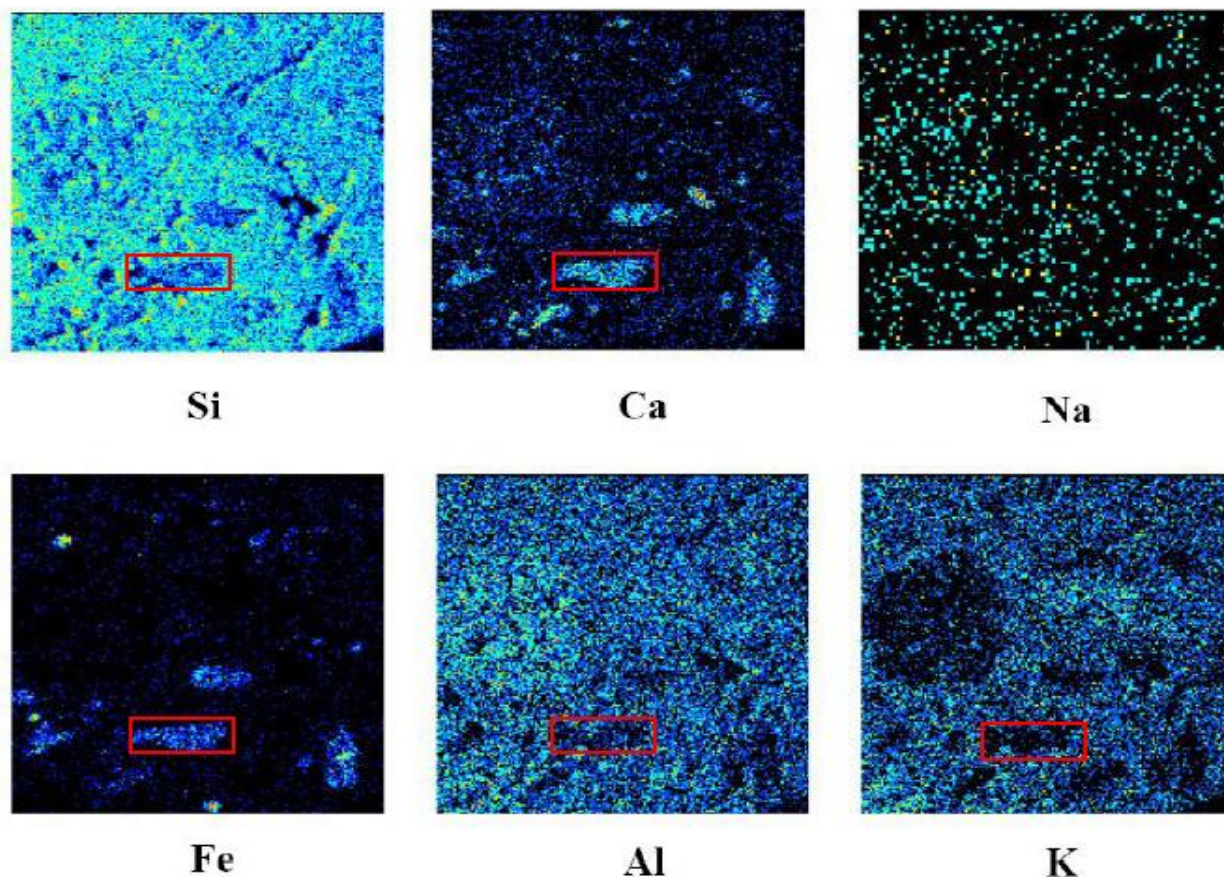
در این مقاله خلاصه‌ای از نتایجی که در زمینه‌های مختلف بعد از راه‌اندازی سیستم میکروپیکسی به دست آمده است، ارائه می‌شود. این زمینه‌ها شامل زمین‌شناسی، باستان‌شناسی، نمونه‌های مربوط به قطعات میکروالکترونیک، بافت‌های بیولوژی و نمونه‌های بیوتکنولوژی است.

۳-۱ زمین‌شناسی

استفاده از میکروسکوپ روبشی الکترون (SEM) به عنوان یکی از مهمترین ابزارها در تحقیقات مربوط به زمین‌شناسی، از



شکل ۳- طیف به دست آمده از آنالیز نمونه‌ای از یک کانی سیلیکاتی در این شکل نشان داده شده است.



شکل ۴- در این شکل توزیع عنصری برخی از عناصر موجود در نمونه‌ای از یک کانی سیلیکاتی نشان داده شده است. همبستگی بین عناصر مختلف برای یک ناحیه در این شکل با مستطیل نشان داده شده است. ابعاد ناحیه آنالیز شده $2/5 \times 2/5$ میلی‌متر می‌باشد.

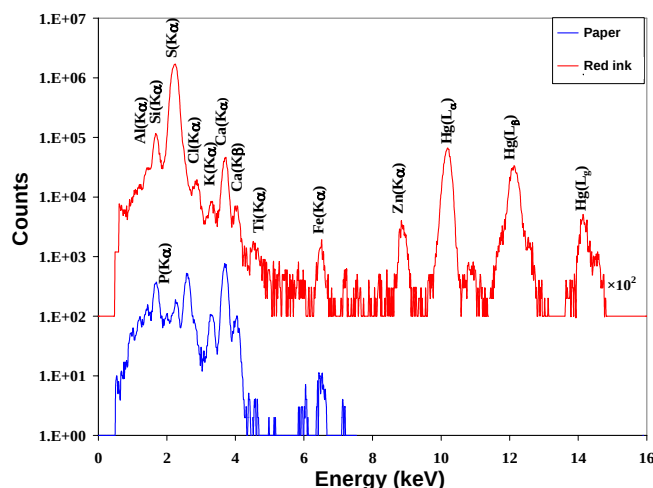
۳-۲- آنالیز مرکب و کاغذ قدیمی

رساله‌ها و نسخ خطی اهمیت زیادی در انتقال دانش بشری و میراث‌های فرهنگی و تاریخی دارند. اما امروزه بخش عمده‌ای از این آثار به علت شرایط نامناسب محیط نگهداری و واکنش‌های داخلی در معرض آسیب دیدگی و تخریب قرار دارند. یکی از نیازهای ضروری در جهت تدوین راه کارهای حفاظتی از نسخه‌های خطی، داشتن اطلاعات کافی از ترکیب عنصری مرکب‌های به کار رفته در این نسخه‌ها است [۶]. در پژوهشی که برای این منظور انجام شد، نمونه‌های مختلفی از دست نوشته‌های مربوط به دوره قاجاریه به وسیله روش میکروپیکسی آنالیز شدند که بخشی از نتایج آن در مجله "نامه بهارستان" چاپ شده است [۷]. در شکل ۵ توزیع عنصری برخی از عناصر موجود در یک نمونه از این آنالیزها ارائه شده است. همان گونه که در این شکل دیده می‌شود، اگر تصویر اپتیکی نمونه آنالیز شده را با تصاویر ایجاد شده از میکروپیکسی مقایسه کنیم، به این نتیجه می‌رسیم

نمونه‌های مختلف در یک نمونه می‌توان عناصر تشکیل دهنده کانی‌ها را با دقت زیاد تعیین کرد. در این صورت این سیستم ممکن است در عرصه استخراج و مطالعه عناصر و کانی‌های مختلف، از جمله کانی‌های اورانیوم، کاربرد داشته باشد [۵].

۳-۲- باستان شناسی

کاربرد روش پیکسی برای آنالیز نمونه‌های باستان‌شناسی در آزمایشگاه واندوگراف از سال ۱۳۷۰ آغاز شده است. با راه‌اندازی سیستم میکروپیکسی تحول بزرگی در این زمینه ایجاد شده است. برخی از نمونه‌های باستان‌شناسی که اخیراً با استفاده از روش میکروپیکسی آنالیز شده‌اند، شامل: آنالیز مرکب و کاغذ قدیمی، آنالیز سفال‌های قدیمی لعاب دار، قسمت‌های مختلفی از یک لباس قدیمی نقاشی شده و ... است که در زیر برخی از نتایج حاصل از این آنالیزها ارائه شده‌اند.



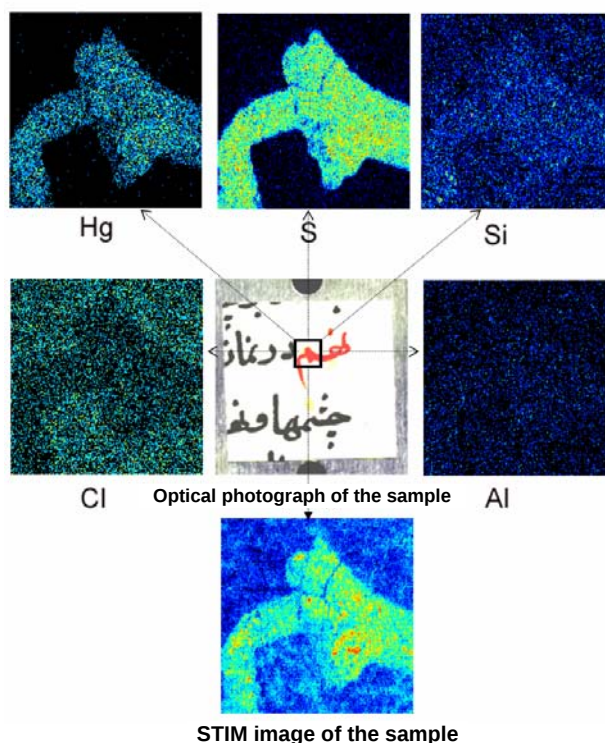
شکل ۶- مقایسه طیف‌های به دست آمده از قسمت سفید کاغذ (بدون مرکب) و ناحیه دارای مرکب قرمز مربوط به یک سند تاریخی در این شکل نشان داده شده است.

ترکیب عنصری مرکب‌های قدیمی را مشخص کرد. بنابراین روش آنالیز میکروپیکسی روش توانمندی در آنالیز اسناد و مدارک قدیمی محسوب می‌شود.

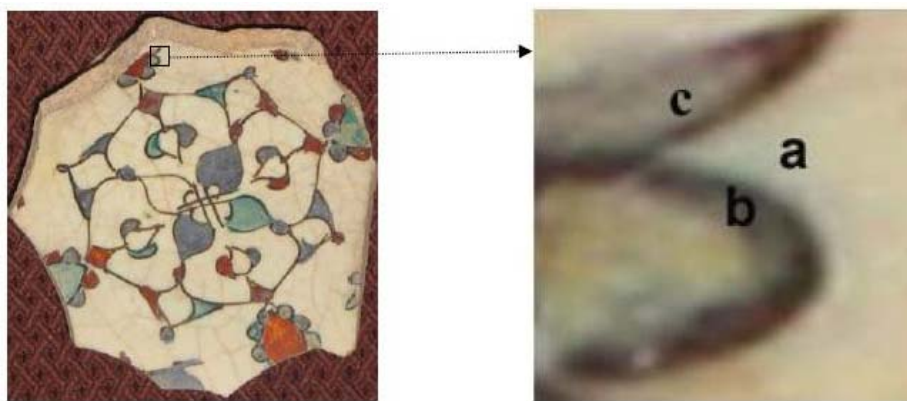
۳-۲-۳ سفال‌های قدیمی

شیوه تهیه لعاب به کار رفته در سفال‌های لعاب‌دار و تعیین مواد معدنی به کار رفته در تهیه این لعاب‌ها از نظر باستان‌شناسی اهمیت ویژه‌ای دارد. آنالیز عنصری لعاب‌ها به وسیله میکروپیکسی یکی از روش‌های متداول و توانمند در تعیین عناصر به کار رفته در این لعاب‌ها است [۸]. در شکل ۷ تصویر اپتیکی نمونه‌ای از یک سفال لعاب‌دار قدیمی و ناحیه آنالیز شده با بزرگ‌نمایی بالا نشان داده است. در شکل ۸ توزیع عنصری به دست آمده از آنالیز این نمونه که دارای رنگهای کرم (ناحیه a)، مشکی (ناحیه b) و زیتونی (ناحیه c) است، نشان داده شده است. همانگونه که در شکل ۸ دیده می‌شود عناصری مانند سرب، گوگرد و سدیم تقریباً در تمام ناحیه آنالیز شده همگن هستند اما در مورد عناصر دیگر ناهمگنی در توزیع عناصر کاملاً محسوس است. از توزیع عنصری این عناصر به وضوح دیده می‌شود رنگ کرم (ناحیه a) دارای عنصر مس، رنگ مشکی (ناحیه b) دارای عنصر کروم و رنگ زیتونی (ناحیه c) دارای عنصر آهن می‌باشد. همچنین مقایسه طیف‌های به دست آمده از قسمتهای زیتونی

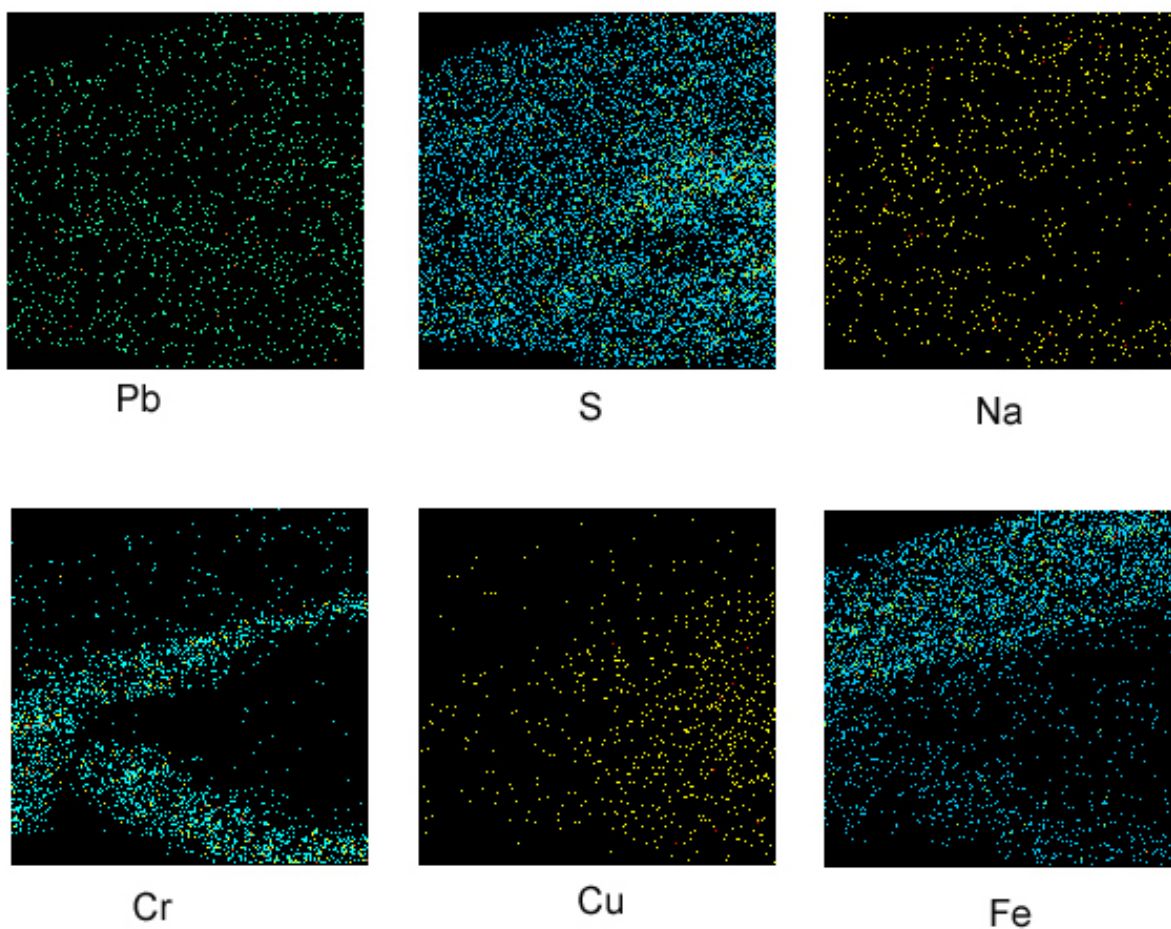
که مرکب قرمز به طور کلی از عناصر جیوه و گوگرد تشکیل شده است و مقدار بسیار کمی هم در این مرکب عناصر سیلیسیم و آلومینیوم وجود دارد. در شکل ۵ نیز تصویر حاصل از پروتون‌های عبوری از نمونه نشان داده شده است. بطوری که دیده می‌شود، قسمت مرکب‌دار در ناحیه آنالیز شده کاملاً مشخص است، زیرا در این ناحیه به طور عمده عنصر سنگینی مانند جیوه وجود دارد که باعث می‌شود میزان جذب انرژی پروتونها در نمونه، در دو ناحیه تغییر فاحشی داشته باشد. در شکل ۶ طیف بدست آمده از ناحیه‌ای که دارای نوشته‌ای با مرکب قرمز است با ناحیه بدون مرکب با هم مقایسه شده است. برای بدست آوردن این دو طیف، دو ناحیه جداگانه در تصاویر ایجاد شده توسط میکروپیکسی انتخاب کردیم. یکی از این نواحی دارای مرکب قرمز و ناحیه دیگر بدون مرکب است. همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود دو طیف اختلاف فاحشی با هم دارند. از مقایسه این دو طیف مشخص می‌شود که مرکب قرمز دارای عناصر کم مقدار دیگری مانند روی (Zn) نیز می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهند که با داشتن توزیع عنصری، می‌توان



شکل ۵- توزیع عنصری برخی از عناصر موجود در نمونه‌ای از یک سند تاریخی برای ناحیه‌ای که با مربع مشخص شده، همچنین ذرات عبوری از آن نشان داده شده است. ابعاد ناحیه آنالیز شده ۲/۵*۲/۵ میلی‌متر می‌باشد.



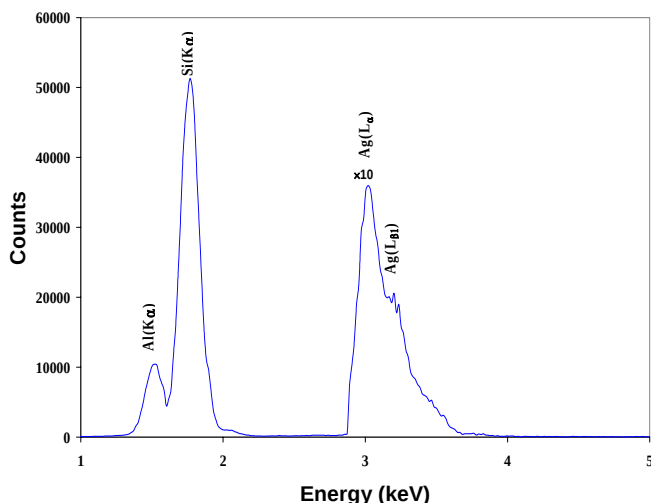
شکل ۷- تصویر اپتیکی نمونه‌ای از یک سفال آنالیز شده و ناحیه آنالیز شده با بزرگ‌نمایی بالا در این شکل نشان داده است.



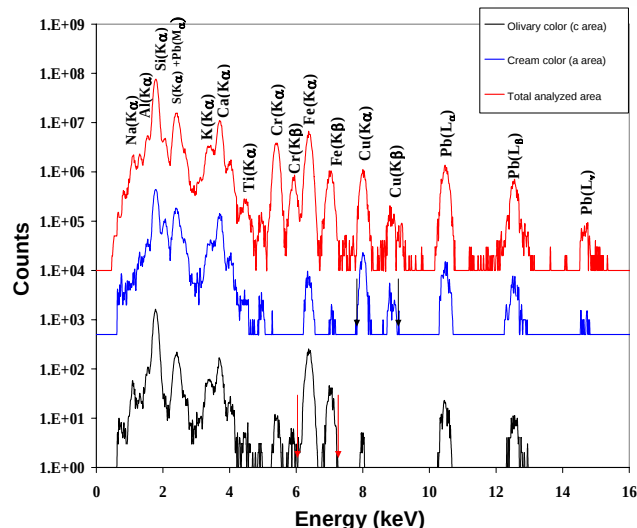
شکل ۸- توزیع عنصری برخی از عناصر موجود در نمونه‌ای از یک سفال لعاب‌دار قدیمی در ناحیه‌ای که در شکل نشان داده است. ابعاد ناحیه آنالیز شده ۲/۵*۲/۵ میلی‌متر می‌باشد.

مشخصه رنگ مشکی است. این عناصر مشخصه در هر یک از طیف‌ها در شکل ۹، بین دو فلش عمودی قرار گرفته‌اند. بنابراین دیده می‌شود که با این روش آنالیز می‌توان اطلاعات مفیدی از ترکیب عنصری لعاب‌های مختلف به دست آورد که در زمینه باستان‌شناسی اهمیت زیادی دارد.

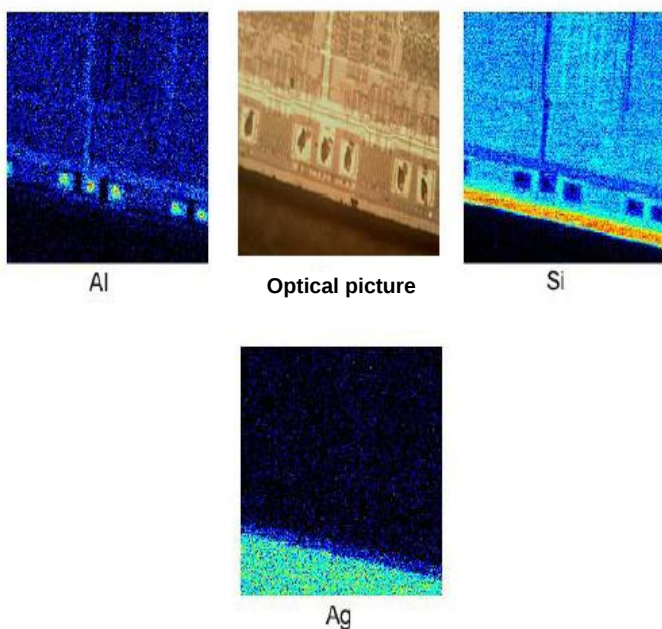
رنگ و کرمی رنگ با تمام ناحیه آنالیز شده مربوط به این نمونه در شکل ۹ نشان داده شده است. در این شکل نیز اختلاف عنصری موجود در رنگ‌های مختلف کاملاً واضح است. همانطور که در این طیف‌ها دیده می‌شود عنصر آهن مشخصه رنگ زیتونی، عنصر مس مشخصه رنگ کرم و عنصر کروم



شکل ۱۰ - طیف به دست آمده از آنالیز نمونه‌ای از یک مدار مجتمع سیلیکونی.



شکل ۹ - مقایسه طیف‌های به دست آمده از قسمتهای دارای رنگ زیتونی و رنگ کرم با کل ناحیه آنالیز شده مربوط به نمونه‌ای از یک سفال لعابدار در این شکل نشان داده شده است.



شکل ۱۱ - توزیع عنصری، عناصر موجود در نمونه‌ای از یک مدار مجتمع برای ناحیه‌ای که تصویر اپتیکی آن نشان داده شده است. ابعاد ناحیه آنالیز شده ۲/۵*۲/۵ میلی‌متر می‌باشد.

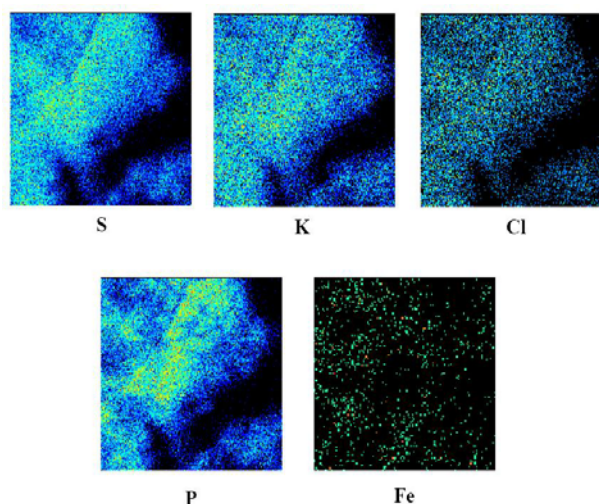
نقره نشان می‌دهد که این فلز در کناره‌های مدار قرار گرفته و برای انتقال گرما مورد استفاده است.

۳-۴ زیست‌شناختی

بافت‌های زیست‌شناختی و یاخته‌ها به طور کلی از عناصر H، O، C و N و چند درصد هم عناصر سبک مانند K و Ca تشکیل شده‌اند. در این بافت‌ها مقدار اندکی هم عناصر سنگین‌تر، که به آنها عناصر کم مقدار گفته می‌شود، وجود دارد. هر یک از این

۳-۳ میکروالکترونیک

یکی از مشکلاتی که ممکن است در حین انجام لایه‌نشانی و ساخت قطعات میکروالکترونیک با آن مواجه شویم، وارد شدن ناخالصی‌های ناخواسته از محیط لایه نشانی و موادی است که از آنها برای لایه‌نشانی استفاده می‌شود. یکی از وسایلی که با دقت بسیار بالا می‌توان با آن این آلودگی‌ها را مشخص کرد، آنالیز با روش میکروپیکسی است [۹]. طیف به دست آمده از یک نمونه مدار مجتمع سیلیکونی (IC) در شکل ۱۰ نشان داده شده است. برای پاسخ‌گویی به این پرسش که: از هر یک از عناصر مشخص شده در طیف، در کدام قسمت از این نمونه و به چه منظوری استفاده شده است، می‌توان از شکل ۱۱ استفاده کرد. توزیع عنصری برخی از مهمترین عناصر که در این مدار مجتمع سیلیکونی وجود دارند، همچنین تصویر اپتیکی نمونه آنالیز شده، در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در تصویر اپتیکی نمونه آنالیز شده، مناطقی که رنگ روشن‌تر دارند مربوط به لایه آلومینیوم قرار گرفته بر روی سیلیکون است. توزیع عنصری سیلیکون در این شکل نشان می‌دهد که این عنصر زیر لایه مدار مجتمع را تشکیل می‌دهد و در جاهایی که لایه آلومینیوم قرار دارد، مقدار آن کمتر است. اما فلز آلومینیوم که از آن در اتصالات داخلی این مدار مجتمع استفاده شده است، فقط در برخی از نواحی وجود دارد؛ این نواحی در توزیع عنصری آلومینیوم با رنگ روشن مشخص شده‌اند. همچنین، در این شکل توزیع عنصری

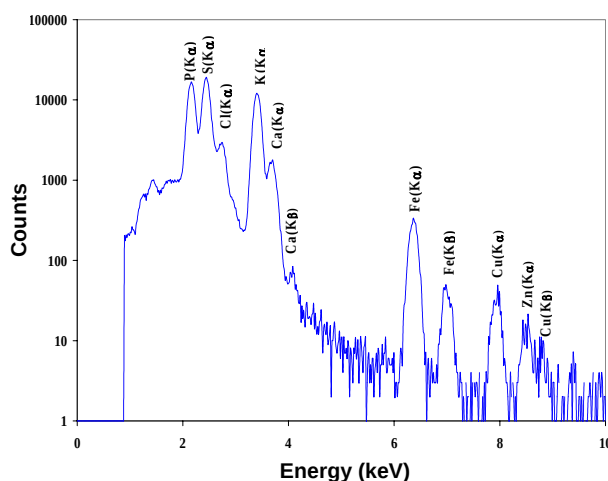


شکل ۱۳- در این شکل توزیع عنصری برخی از عناصر موجود در نمونه‌ای از کبد موش سالم نشان داده شده است. ابعاد ناحیه آنالیز شده 0.8×0.8 میلی‌متر می‌باشد.

۳-۵ بیوتکنولوژی

یکی از شیوه‌هایی که اخیراً برای رفع آلودگی عناصر سنگین آبها و عناصری مانند سزیم و استرانسیوم موجود در استخرهای رآکتور پیشنهاد شده است، استفاده از جلبک‌هایی دریایی است. در این روش عناصری مانند سزیم و استرانسیوم موجود در آب به وسیله جلبک جذب می‌شوند. برای مطالعه میزان جذب عناصر توسط این موجودات، یکی از روش‌های خوب و مناسب، استفاده از روش میکروپیکسی است [۱۲]. در شکل ۱۴ طیف حاصل از آنالیز میکروپیکسی نمونه‌ای از یک جلبک که در محلول دارای استرانسیوم قرار گرفته، نشان داده شده است. بطوری که دیده می‌شود قله‌های مربوط به استرانسیوم جذب شده از محلول توسط جلبک کاملاً واضح است. بقیه عناصر مشخص شده در شکل ۱۴ مربوط به عناصر تشکیل دهنده خود جلبک هستند. در شکل ۱۵ نیز توزیع عنصری برخی از عناصر موجود در این نمونه بعد از قرار گرفتن در محلول استرانسیوم، نشان داده شده است. بطوری که مشاهده می‌شود توزیع عنصر Sr جذب شده در این نمونه تقریباً همگن است. اما توزیع عنصری برخی از عناصر مانند سیلیسیوم، آلومینیوم و کلسیم همگن نیست. یکی از نکات قابل توجه که از توزیع عنصری Sr مشاهده می‌شود این است که در بخشی از نمونه که مقدار کلسیم زیاد است، در آن بخش جذب Sr بسیار کم است؛ این ناحیه در تصاویر مربوط به کلسیم و استرانسیوم با بیضی در شکل ۱۵ نشان داده شده است. همچنین در

عناصر کم مقدار اهمیت ویژه‌ای در فیزیولوژی بدن انسان دارند. به عنوان مثال اندازه‌گیری میزان آهن در کبد، ابزاری برای تشخیص زمان مناسب جهت پیوند مغز استخوان بیماران تالاسمی است. بررسی‌ها نشان می‌دهند که توزیع عناصر موجود در بافت‌های زیست‌شناختی توزیع کاملاً همگن و یکنواختی ندارند [۲]. طیف حاصل از آنالیز نمونه‌ای از کبد یک موش سالم در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در این شکل عناصر کم مقدار تشکیل دهنده کبد مشخص شده است. برای اینکه اطلاعاتی در مورد نحوه توزیع عناصر تشکیل دهنده کبد بدست آید، توزیع این عناصر در شکل ۱۳ ارائه شده است. مشخص شده است که توزیع پتاسیوم در بافت کبد تقریباً یکنواخت است. اما غیریکنواختی ظاهری که در توزیع پتاسیوم در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، مربوط به ضخامت متفاوت نمونه در نقاط مختلف ناحیه آنالیز شده است. از مقایسه توزیع پتاسیوم، با توزیع سایر عناصر می‌توان مسأله ناهمگنی را بررسی کرد. بطوری که در شکل ۱۳ مشخص است توزیع عنصرهای آهن و فسفر در نمونه، یکنواخت نیست و کاملاً ناهمگن هستند. همچنین مشخص است که در قسمت‌هایی که مقدار آهن زیاد است توزیع فسفر کم است. ولی مشاهده می‌شود که بقیه عناصر مانند پتاسیوم، گوگرد و کلر در نمونه توزیع یکنواختی دارند و غیریکنواختی اندکی که در «توزیع عنصری» مربوط به این عناصر دیده می‌شود ناشی از تغییر ضخامت نمونه است. با راه‌اندازی و استفاده از میکروسکوپ روبشی پروتون اندازه‌گیری توزیع عناصر کم مقدار در بافت‌های بیولوژی که اهمیت زیادی در علوم پزشکی دارند، امکان‌پذیر شده است [۱۰ و ۱۱].

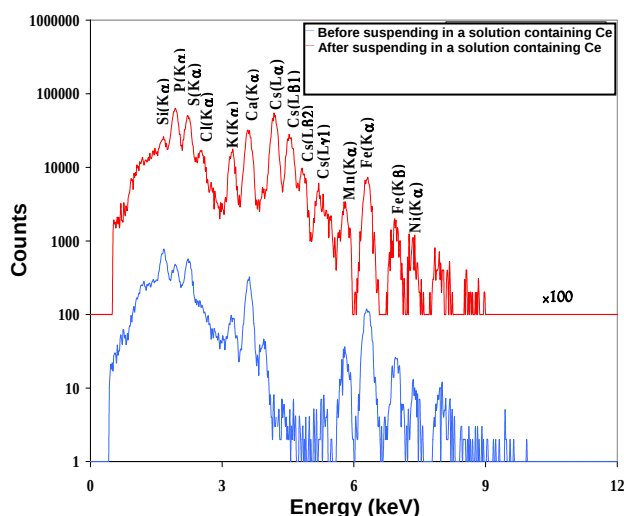


شکل ۱۲- طیف به دست آمده از آنالیز نمونه‌ای از کبد موش سالم.

در شکل ۱۶ نیز طیف حاصل از آنالیز نمونه‌ای از یک جلبک قبل از قرار گرفتن در محلول حاوی سزیوم و بعد از قرار گرفتن در محلول حاوی سزیوم نشان داده شده است. بطوری که دیده می‌شود قله‌های مربوط به سزیوم جذب شده از محلول توسط جلبک کاملاً واضح است که در محدوده انرژی $(4/2-5/3) \text{ keV}$ قرار گرفته است. بقیه عناصر مشخص شده در دو طیف که در شکل ۱۶ مشخص شده است، مربوط به خود جلبک هستند. این نتایج نشان می‌دهد که روش میکروپیکسی، روش بسیار مناسبی برای آنالیز این گونه از نمونه‌ها و اندازه‌گیری میزان جذب عناصری مانند سزیوم و استرانسیوم در نمونه‌ها است.

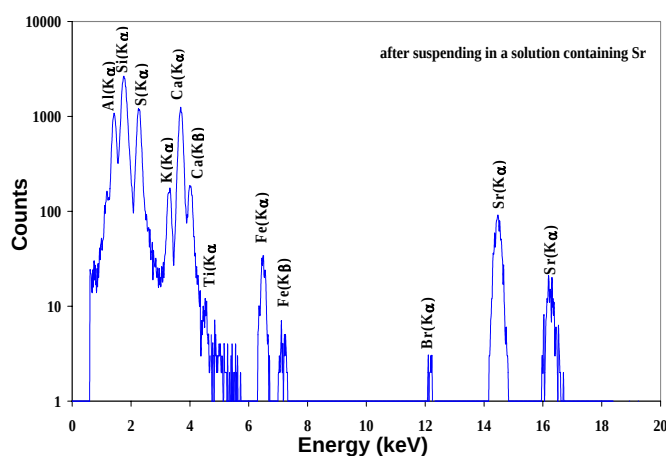
۴- نتیجه‌گیری

زمینه‌هایی که آنالیز با روش میکروپیکسی ممکن است برای آنها سودمند باشد، بسیار وسیع و گسترده است. در این مقاله تنها خلاصه برخی از نتایجی که بعد از راه‌اندازی سیستم میکروپیکسی در آزمایشگاه واندوگراف سازمان انرژی اتمی به دست آمده ارائه شده است. نتایج ارائه شده در این مقاله، قابلیت‌ها و کاربردهای این روش آنالیز را در برخی از شاخه‌های علوم نشان می‌دهد. این نتایج بیان می‌کند که استفاده از این روش آنالیز با توجه به توانایی‌های بی‌نظیر خود می‌تواند تحول اساسی در بررسی و آنالیز نمونه‌های مختلف ایجاد کند. همکاری آزمایشگاه واندوگراف با مراکز مختلف مانند بیمارستانها، موزه‌ها، مراکز وابسته به محیط زیست و ... آغاز شده است و در آینده شاهد نتایج به دست آمده از این روش آنالیز در علوم مختلف در کشور خواهیم بود.

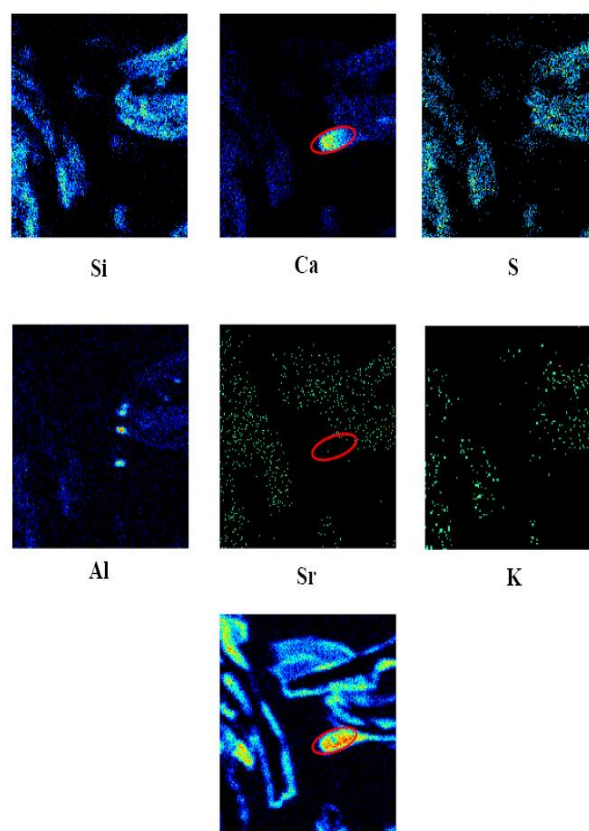


شکل ۱۶- مقایسه طیف‌های به دست آمده از نمونه‌ای از جلبک قبل و بعد از قرار گرفتن در محلول حاوی سزیوم در این شکل نشان داده شده است.

این شکل تصویر ایجاد شده توسط پروتون‌های عبوری نشان داده شده است. این تصویر معیاری از ضخامت نمونه آنالیز شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴- طیف به دست آمده از آنالیز نمونه‌ای از جلبک بعد از قرار گرفتن در محلول حاوی Sr در این شکل نشان داده شده است.



STIM map of the sample

شکل ۱۵- در این شکل توزیع عنصری برخی از عناصر موجود در نمونه‌ای از یک جلبک که در محلول حاوی Sr قرار داده شده، همچنین ذرات عبوری از آن نشان داده شده است. ابعاد ناحیه آنالیز شده $2/5 \times 2/5$ میلی‌متر می‌باشد.



References:

1. S.E. Johansson "Particle induced X-Ray emission spectrometry (PIXE)," John Wiley and Sons Inc. (1995).
2. J.R. Bird and J.S. Williams "Ion beam for materials analysis," Academic Press Australia (1989).
3. G.W. Grime and F. Watt, "Focusing protons and light ions to micron and submicron dimensions," Nucl. Instr. Meth., **B30**, 227-234 (1988).
4. C.G. Ryan, "Ion beam microanalysis in geosciences research," Nucl. Instr. Meth., **B219-220**, 534-549 (2004).
5. R. Ortega, G. Deves, R. Marie, "Nuclear microprobe analysis of uranium-rich speleothems: Methodological aspects," Nucl. Instr. Meth., **B210**, 455-458 (2003).
6. A.M.B. Olsson, T. Calligaro, S. Colinart, J.C. Dran, N.E.G. Lovestan, B. Moignard, J. Salomon, "Micro-PIXE analysis of an ancient egyptian papyrus: identification of pigments used for the book of the dead," Nucl. Instr. Meth., **B181**, 707-714(2001).
7. م. لامعی‌رشتی، د. آقاعلی‌گل، ف. خسروی، پ. اولیائی، ع. باقی‌زاده، ف. شکوهی، "آنالیز عنصری چند نمونه از مرکب و کاغذ دوره قاجار با استفاده از میکروسکوپ روبشی پروتون،" مجله بین‌المللی مطالعات و تحقیقات نسخه‌های خطی، نامه بهارستان، سال ششم و هفتم، دفتر ۱۱-۱۲، صفحه ۲۶۱-۲۶۴ (۱۳۸۴-۱۳۸۵).
8. G.A. Sziki, K.T. Biro, I. Uzonyi, E. Dobos, A.Z. Kiss, "Investigation of incrustrated pottery found in the territory of hungary by micro-PIXE method," Nucl. Instr. Meth., **B210**, 478-482 (2003).
9. M. Massi, L. Giuntini, M.E. fedi, C. Arilli, N. Grassi, P.A. Mando, A. Migliori, E. Focardi, "Use of micro-PIXE analysis for the identification of contaminants in the metal deposition on a CMS pitch adapter," Nucl. Instr. Meth., **B220**, 722-726 (2004).
10. F. Watt, G.W. Grime, J. Takacs, "The Oxford scanning proton microprobe: A medical diagnostic application," Nucl. Instr. Meth., **B3**, 599-605 (1984).
11. U. Lindh, P. Frisk, J. Nystrom, A. Danersund, R. Hudecek, A. Lindvall, S. Thunell, "Nuclear microscopy in biomedical analysis with special emphasis on clinical metal biology," Nucl. Instr. Meth., **B130**, 406-418 (1997).
12. P. Gue, J. Wang, X.Li, J. Zhu, T. Reinert, J. Heitmann, D. Spemann, J. Vogt, R.H. Flaggmeyer, T. Butz, "Study of metal bioaccumulation by nuclear microprobe analysis of algae fossils and living algae cells," Nucl. Instr. Meth., **B161-163**, 801-807 (2000).