

روش‌های آزمایشگاهی مؤثر در تجزیه و تحلیل داده‌های سفالی

محمود حیدریان

عضو هیات علمی گروه باستان‌شناسی دانشگاه شهرکرد،

دکتر اکبر عابدی

عضو هیات علمی گروه باستان‌سنجی دانشگاه هنر اسلامی تبریز

akbarabede@gmail.com

حامد تقی‌زاده

دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه شهرکرد

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۷/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۹/۲۰)

چکیده

سفال از جمله مهم‌ترین داده‌هایی است که به فراوانی از محوطه‌های باستانی به دست می‌آید و جایگاه ویژه‌ای در مطالعات باستان‌شناختی دارد. بیشتر مطالعاتی که تاکنون بر روی سفال انجام شده است به صورت ظاهری و از روی تزئینات آن صورت گرفته است. با توجه به پیشرفت علم و استفاده از علوم میان‌رشته‌ای در مطالعات باستان‌شناسی پیشرفت شگرفی در این زمینه صورت گرفته است. یکی از مباحثی که امروزه به باستان‌شناسان این اجازه را می‌دهد تا باستان‌شناسی را با عنوان یک علم معرفی کنند، تطابق روش‌های علمی و اشتراک بین باستان‌شناسی با زیست‌شناسی، شیمی، تاریخ، جغرافیا، آمار و دیگر رشته‌ها در مطالعه گذشته انسان است. باستان‌شناسی در بسیاری از پژوهش‌هایش با مدل‌های علمی نظیر ارائه فرضیه و سپس آزمایش آن سازگار شده است. کانی‌نگاری (پتروگرافی) یکی از روش‌های مشترک در زمین‌شناسی و باستان‌شناسی است که در زمین‌شناسی برای مطالعه سنگ‌ها و کانی‌ها به کار می‌رود؛ ولی در باستان‌شناسی از آن نه تنها در مطالعه اشیاء و مواد سنگی بلکه در مطالعه اشیاء سفالی نیز استفاده می‌شود. در پژوهش حاضر از مطالعات کتابخانه‌ای و میدانی استفاده شده است. هدف از انجام این پژوهش معرفی و کاربرد انواع روش‌های آزمایشگاهی صورت گرفته بر روی سفال است تا با تکیه بر این آگاهی بتوان برای آینده برنامه‌ریزی‌های بهتری انجام داد.

واژگان کلیدی: سفال، روش‌های آزمایشگاهی، علوم میان‌رشته‌ای، روش‌های XRF و XRD و PIXE و AFM

مقدمه

امروزه باستان‌شناسی به یک حوزه کاملاً بین رشته‌ای و تخصصی تبدیل شده و نیاز به پاسخ‌های علمی دقیق در جنبه‌های مختلف، رشته‌های علمی را با یکدیگر ترکیب ساخته و گرایش‌ها و حوزه‌های گوناگونی را به وجود آورده است. یکی از این حوزه‌ها که به عنوان موضوعی بین-رشته‌ای در قالب علوم باستان‌شناختی مورد توجه گسترده‌ای قرار گرفته، باستان‌سنجی (Archaeometry) است. باستان‌سنجی یک اصطلاح ترکیبی و ساختگی است. این حوزه علمی، به ارائه داده‌های باستان‌شناسی و یا پدیده‌های مرتبط با آن‌ها به صورت داده‌های کمی - قابل اندازه‌گیری - و کیفی می‌پردازد. در واقع، باستان‌سنجی با بهره‌گیری از روش‌های شیمیایی و فیزیکی، به یاری باستان‌شناسی و تاریخ هنر آمده است. برخی معتقدند همکاری فیزیک‌دانان، شیمی‌دانان، کارشناسان زمین‌شناسی، زیست‌شناسی، مهندسان، پزشکان و متخصصین ژنتیک و دیگر علوم در پژوهش‌های باستان‌شناسی، امروزه منجر به ایجاد رشته‌ای به نام باستان‌سنجی شده است. باستان‌سنجی به علمی میان‌رشته‌ای گفته می‌شود که با بهره‌گیری از علوم طبیعی و مهندسی سعی در پاسخ‌گویی به سوالات باستان‌شناسان دارد (بحرالعلمی، ۱۳۹۳، ص ۳۳) استفاده از روش‌های آزمایشگاهی علاوه بر داده‌های باستانی در صنعت امروزی نیز کاربردهای گوناگونی دارد از جمله تکنولوژی ساخت سرامیک، وضعیت خاک زمین و استفاده

در کشاورزی و رشد تکنولوژی و منابع استفاده شده در صنعت سفال‌سازی. در حال حاضر نیاز به چنین تکنیک‌های نوینی، به دلیل سوالات متعددی که در ارتباط با یافته‌های علمی گذشته برای باستان‌شناسان وجود دارد، ضروری می‌باشد (ارکان، ۱۳۸۵، ص ۲).

استفاده از روش‌های آنالیز هسته‌ای در باستان‌سنجی در آزمایشگاه واندوگراف از سال ۱۳۷۰ آغاز شد و به تدریج با همکاری باستان‌شناسان توسعه یافت (محمدی فر، ۱۳۹۲، ص ۶۷). کانی‌نگاری (پتروگرافی) یکی از روش‌های مشترک در زمین‌شناسی و باستان‌شناسی است که در زمین‌شناسی برای مطالعه سنگ‌ها و کانی‌ها به کار می‌رود، ولی در باستان‌شناسی از آن نه تنها در مطالعه اشیاء و مواد سنگی بلکه در مطالعه اشیاء سفالی نیز استفاده می‌شود (نقشینه و همکاران، ۱۳۹۲، ص ۶۸). استفاده از پتروگرافی برای مطالعه ظروف سفالین در باستان‌شناسی سابقه چند دهه‌ای دارد. یکی از نخستین افرادی که از این روش استفاده کرد "آنا شپرد" است که در مطالعه سفال‌های جنوب‌غربی آمریکا، روش پتروگرافی را به کار برد (نقشینه و همکاران، ۱۳۹۲، ص ۶۸).

روش‌های آزمایشگاهی

یکی از مسائل کلیدی در مطالعات آزمایشگاهی داده‌های باستان‌شناسی، شناسایی مواد می‌باشد. اصطلاح "Characterization" معانی گسترده‌ای را در بر می‌گیرد. ساختار فیزیکی و

۳- تعیین اینکه کدام قسمت از شیء، اصلی و کدام قسمت ترمیم شده است و همچنین اصالت اشیاء؛ و

۴- تعیین روش‌های مرمت این اشیاء. همه دستگاه‌هایی که در آزمایشگاه‌های فیزیک برای آنالیز و تجزیه عنصری و ترکیبی به کار می‌روند مانند میکروسکوپ‌های مختلف یا دستگاه‌ها و روش‌های XRD, XRF, AFM, SEM, PIXE, NAA، پرتوهای سینکروتون، آنالیز رامان و بسیاری دستگاه‌های دیگر، برای بررسی آثار تاریخی، فرهنگی و هنری مورد استفاده قرار می‌گیرند تا بتوان تصویری از شرایط اقتصادی، اجتماعی، چگونگی استخراج و استحصال مواد اولیه و فن‌آوری‌های گذشته به دست داد (بحرالعلوم، ۱۳۹۳، ص ۳۵). در زیر به معرفی تعدادی از روش‌های آزمایشگاهی می‌پردازیم.

روش پیکسی: روش پیکسی (Pixe: Proton Induced X-ray Emission) (پرتو X گسیلی در اثر برانگیختگی با پروتون) در سال ۱۹۷۰ م. کشف شد. این روش که غیر مخرب و سریع است برای نخستین بار در باستان‌شناسی کاربرد یافت. از آن پس این روش و روش برگرفته از آن به سرعت در باستان‌شناسی و باستان‌سنجی متداول شد و حتی موزه لوور با خرید شتاب‌دهنده‌ای مناسب، آزمایشگاه ویژه‌ای تاسیس کرد (لامعی رشتی و همکاران، ۱۳۸۱، ص ۴۳۱). در این روش آنالیز، نمونه مورد بررسی

شیمیایی مواد، شناسایی منبع و محل ساخت، شناسایی مواد خام، شناخت مصنوعات تکنولوژیکی و غیره. مهم‌ترین چالش پیش روی روش‌های آزمایشگاهی، در مورد اشیای ارزشمند هنری و تاریخی است و کسب اطلاعات از این نوع آثار، بدون استفاده از تکنیک‌های مخرب یا نمونه‌برداری می‌باشد. توسعه استفاده از چنین تکنیک‌ها و روش‌هایی، بدون شک گام بزرگ‌تری را در افزایش دانش‌مان بر خواهد داشت. البته استفاده از چنین روش‌های پیشرفته و غیر مخرب در حال گسترش می‌باشد که عموماً بر روی آثار نفیس هنری و اشیای تاریخی انجام می‌پذیرد. تجزیه آزمایشگاهی بر روی داده‌های باستانی، به تکنیک‌های مختلفی منتهی گردیده است. این روش‌های آزمایشی بر دو گونه از داده‌های باستان‌شناسی به کار می‌آیند: داده‌های آلی (Organic) و غیر آلی یا معدنی (Inorganic). مواد آلی ریشه در حیات زنده طبیعی دارند و شامل داده‌های حیوانی مانند استخوان و داده‌های گیاهی مانند چوب می‌باشند. مواد غیر آلی ریشه در کانی‌ها و زمین دارند؛ مانند سنگ، سفال، فلز و شیشه (ارکان، ۱۳۸۵: ۳). اصولاً هدف از آنالیز اشیای باستانی پاسخ به یک یا چند سوال زیر است:

- ۱- یافتن منشأ به منظور قرار دادن شیء باستانی در مجموعه تاریخی-جغرافیایی خود؛
- ۲- دستیابی به تکنولوژی ساخت؛

روش‌های آزمایشگاهی مؤثر در تجزیه.....

یکی از بهترین این روش‌ها اشعه X طیف‌سنجی فلورسانس (XRF) می‌باشد (Claes Martin et al, 1999: 263). XRF مخفف اصطلاح "X-Ray Fluorescence" به مفهوم فلورسانس (شب رنگی) اشعه مجهول (ایکس) است (شکل ۲). اصول طیف‌نگاری XRF، بر اساس تجزیه ریز (Microanalysis) در بافت شیء است (ارکان، ۱۳۸۵: ۹). فلورسانس پرتو اشعه ایکس (X-ray, XRF fluorescence) به دلیل سرعت آن و غیر مخرب بودن آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش در زمینه مصنوعات فرهنگی برای مدت طولانی استفاده می‌شده و هنوز هم به عنوان یکی از روش‌های تجزیه و تحلیل مواد مورد استفاده قرار می‌گیرد (Keiichi Sugihara. et al, 2001: 433) مزیت این روش نسبت به پیکسی این است که با انتخاب مناسب هدف اولیه، عناصر خاصی را می‌توان ترجیحاً در نمونه تشخیص داد. در این روش پرتو X به نمونه مجهول تابیده و در اثر برانگیختن اتم‌ها باعث پدید آمدن پرتو X ثانویه می‌شود. سپس با تعیین طول موج یا انرژی پرتو X ثانویه، عنصرهای مورد نظر را می‌توان شناسایی کرد (محمدی‌فر، ۱۳۹۲: ۶۸) پرتو خروجی از لوله پدیدآورنده پرتو X به نمونه می‌تابد و در اثر بمباران، الکترون‌های موجود در مدارهای داخلی اتم خارج شده و جایگزینی این الکترون‌ها از مدارهای بالایی، سبب پدید آمدن پرتو X خواهد شد. اساس این پدیده، مانند حالتی است که نمونه، توسط

تحت تابش پروتون با انرژی $1\text{ meV} - 2\text{ meV}$ قرار می‌گیرد. در اثر برخورد پروتون با الکترون‌های اتم‌های هدف، پرتوهای X مشخصه‌ای گسیل می‌شود که انرژی پرتوهای X نوع عناصر موجود در نمونه و تعداد پرتوهای X با انرژی معین، غلظت عناصر موجود در نمونه را مشخص می‌کند (لامعی رشتی، ۱۳۸۵، ص ۶). در این روش می‌توان آنالیز کمی برای عناصر تا دقت ppm را اندازه‌گیری نمود (سبزی‌علی و همکاران، ۱۳۹۱، ص ۱۰۵). با توجه به اندازه کوچک باریکه پروتون، با این روش آنالیز می‌توان فقط یک نقطه از نمونه را آنالیز کرد. همچنین می‌توان سطح نمونه را توسط باریکه میکرونی پروتون جاروب (اسکن) کرد و توزیع عناصر مربوط به هر نقطه را به دست آورد (شکل ۱). از این روست که این دستگاه را میکروسکوپ روبشی پروتون نامیده‌اند (لامعی رشتی، ۱۳۸۵: ۶). آنالیز طیف را با استفاده از نرم‌افزار "گوپیکس"^۱ انجام می‌دهیم که یک روش پارامتری برای آنالیز کمی به ما ارائه می‌دهد و در همه جا، به طور متداول برای آنالیز طیف‌های پیکسی استفاده می‌شود (خادمی ندوشن و همکاران، ۱۳۹۴، ص ۵۸).

روش آزمایش XRF: چندین تکنیک ابزاری امروزه در تجزیه و تحلیل سفال اعمال می‌شود؛

^۱ . مگا الکترون ولت.

^۲ GUPIX. برنامه گوپیکس با استفاده از پارامترهای فیزیکی معلوم، مثل سطح مقطع یونیزاسیون اشعه X، جرم کاهش یافته مؤثر و بهره فلورسانسی طیف را آنالیز می‌کند.

فواصل بین اتم‌ها در مواد بلوری برابر است، بنابراین مواد بلوری برای پرتو X می‌توانند نقش توری پراش را ایفا کنند (اسدی فرد، ۱۳۸۴، ص ۹۱).

روش آزمایشگاهی AFM: میکروسکوپ نیروی اتمی یا AFM^3 دستگاهی است که برای بررسی خواص و ساختار سطحی مواد در ابعاد نانومتر به کار می‌رود (اسدی فرد، ۱۳۸۴، ص ۱۱). از کاربردهای این روش آزمایشگاهی می‌توان به عدم محدودیت در بررسی اغلب سطوح در شرایط محیطی مختلف، عدم نیاز به آماده‌سازی نمونه در اغلب موارد، سرعت بالای اندازه‌گیری، تهیه تصاویر سه بعدی و توانایی بررسی انواع خواص سطحی موجب توجه ویژه و رو به رشد به AFM در حوزه‌های مختلف تکنولوژی کاربردی اعم از الکترونیک، هوا فضا، خودروسازی، علم مواد، بیولوژی، ارتباطات از راه دور، انرژی، داروسازی، لوازم آرایشی، پتروشیمی و ... شده است (همان، ۲۹). انعطاف‌پذیری، سیگنال‌های بالقوه متعدد و امکان عملکرد دستگاه در مدهای مختلف محققین را در بررسی سطوح گوناگون، تحت شرایط محیطی متفاوت توانمند ساخته است. این دستگاه امکان عملکرد در محیط خلأ، هوا و مایع را دارد. بر خلاف اکثر روش‌های بررسی خواص سطوح، در این روش غالباً محدودیت اساسی بر

الکترون بمباران می‌شد (اسدی فرد، ۱۳۸۴، ص ۹۸). XRF برای آنالیز نمونه‌های همگن و یا آن‌هایی که نسبت به تجزیه شدن مقاوم هستند، کارایی بالایی دارد. همچنین هنگامی که با اشیای موزه‌ای سر و کار داریم، سیستم XRF به دلیل غیر مخرب بودنش روش مطلوبی به شمار می‌رود. از این روش برای منشأیابی افسیدین، شیشه، سرامیک و فلز نیز استفاده می‌شود (نیکنامی و رضایی، ۱۳۹۲، ص ۱۶۹).

روش XRD: روش پراش پرتو ایکس ($X\text{-ray}$ XRD , Diffraction), از آن جهت که روش مستقیمی برای تعیین نوع فازها و ساختار بلورین مواد است، بسیار اهمیت دارد. در واقع پیشرفت چند دهه اخیر شناسایی فازی، کانی‌شناسی و بلورشناسی، در گرو کشف این روش می‌باشد (محمدی فر، ۱۳۹۲، ص ۷۰) این روش یکی از روش‌های مفید و کاربردی در شناسایی و تجزیه مواد ریزدانه مانند کانی‌های رسی است. با استفاده از این روش می‌توان فضای میان‌لایه‌ای ذرات رس را بررسی کرد. استفاده از پراش پرتو X در بررسی کانی‌های رسی بر این پایه استوار است که این پرتوها را با ذرات رس برخورد داده تا در میان لایه‌های اتمی شبکه رس نفوذ کرده و توسط تک‌تک ورقه‌های یونی مجزا شکست یابد (سلیمانی و زبیدی، ۱۳۹۳، ص ۱۴۲). با روش پراش پرتو X طول موج‌های مختلف را می‌توان جدا ساخته و اندازه‌گیری نمود. چون طول موج‌های پرتو X با

روش‌های آزمایشگاهی مؤثر در تجزیه.....

روی نوع سطح و محیط آن وجود ندارد (اسدی- فرد، ۱۳۸۴، ص ۱۱).

روش آزمایشگاهی SEM: میکروسکوپ الکترونی روبشی (Scanning Electron Microscope) یکی از بهترین روش‌های آنالیزی است که امروزه در حوزه‌های مختلف کاربردهای فراوانی دارد. این میکروسکوپ، امکان بررسی و آنالیز شیمیایی، ترکیب، سطح و ریزساختار داخلی را در ابعاد میکرونی و نانومتری فراهم آورده است. بررسی‌ها با این میکروسکوپ در کل به دو گروه میکروسکوپی و اسپکتروسکوپی تقسیم می‌شود که مورد اول برای بررسی فازها، ذرات، مورفولوژی و... است و حالت دوم برای بررسی‌های شیمیایی لایه‌های بیرونی همچون سطح به کار برده می‌شود (علیزاده ذوالبین، ۱۳۹۲، ص ۲۵). همه دستگاه‌های SEM دارای یک تفنگ الکترونی در بالای ستون خود هستند که برای پدید آوردن باریکه الکترونی بکار می‌رود. همچنین یک ستون الکترونی برای همگرا کردن باریکه الکترونی و پدید آوردن تغییرات لازم در شرایط کاری آن نیز وجود دارد (همان). در شکل (۳) نمای کلی از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داده شده است.

روش آنالیز سینکروترون: اولین بار توسط لوییس آلوارز ابداع شد، نوعی از شتاب دهند ذرات به شکل یک حلقه دایره‌ای است که با کمک میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، تابش

الکترومغناطیسی تولید می‌کند ذراتی که با سرعتی نزدیک به سرعت نور در یک محیط الکترومغناطیسی حرکت می‌کنند، در جهت حرکتشان، نوری منتشر می‌کنند که تابش سینکروترون یا نور سنکروترون نامیده می‌شود. روش‌های جدید سینکروترون راه حل‌های منحصر به فردی در حل مسائل کانی‌شناسی، بلورشناسی، ژئوشیمی، فیزیک، شیمی و حتی زیست‌شناسی را فراهم آورده‌اند. توانایی بدست آوردن اطلاعات ساختاری، حتی انجام آزمایش‌هایی در سیستم‌های ناهمگن را برای پژوهشگران ممکن ساخته است (رزم آرا، ۱۳۸۲، ص ۱۰۹). کاربردهای تابش سینکروترونی: کاربرد پرتو ایکس در آنالیز مواد و علوم نانو (شامل تکنیک‌های جذب پرتو ایکس، فلورسانس، پراکندگی و توپوگرافی)، لیتوگرافی، رادیوگرافی، کاربردهای پزشکی، مطالعات هنری، باستان‌شناسی و میراث فرهنگی.

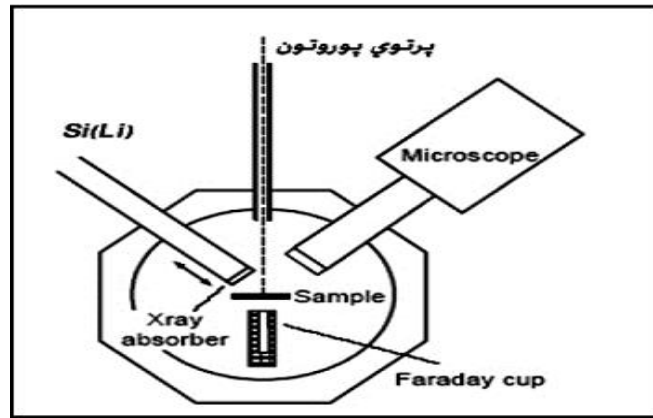
نتیجه‌گیری

همان‌طور که از پیش روی گذشت، در این نوشتار برخی از روش‌ها و علوم میان‌رشته‌ای مرتبط با باستان‌شناسی که هر یک به نوعی در بازسازی جنبه‌های مختلف زندگی بشر راهگشا هستند، بررسی شدند. گسترش علم باستان‌شناسی در چند دهه اخیر و توجه روز افزون به تعامل و نقش منابع زیست محیطی در فعالیت‌های بشری و خلق بناهای باستانی باعث

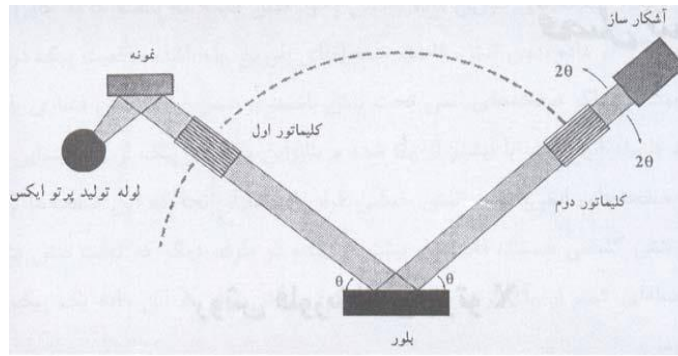
منابع

- ۱- ارکان، ع، ۱۳۸۵، "شناخت منبع خاک استفاده شده در گونه‌های سفال دوره مس سنگی محوطه شهریری با روش XRF و XRD"، پایان نامه کارشناسی ارشد باستان‌شناسی، دانشگاه تربیت مدرس، (منتشر نشده).
 - ۲- اسدی فرد، ر و همکاران، ۱۳۸۴، "آشنایی با تجهیزات آزمایشگاهی فناوری نانو: اندازه گیری و تعیین مشخصات"، تهران: ستاد ویژه توسعه فناوری نانو.
 - ۳- بحرالعلومی، ف، ۱۳۹۳، "باستان‌سنجی، راه ارتباطی علوم طبیعی و باستان‌شناسی"، مجله فیزیک روز، ش ۵، صص ۳۷-۳۲.
 - ۴- رزم آرا، م، ۱۳۸۲، "مطالعه تغییرات شیمیایی و ساختمانی سولفیدهای نقره و مس توسط SRS (مطالعه‌ای از کاربردهای سینکروترون بر مبنای XAS در کانی‌شناسی - بلورشناسی و ژئوشیمی)"، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، ش ۲، صص ۱۱۸-۱۰۷.
 - ۵- سبز علی، م، خادمی ندوشن، ف. گودرزی، ع، سودایی، ب، صادقی سقدل، ح، ۱۳۹۱، "آنالیز سکه‌های نقره‌ای (یک درهمی) فرهاد چهارم به روش PIXE"، مجله پیام باستان‌شناس، سال نهم، ش ۱۷، صص ۱۱۲ تا ۱۰۳.
- گردیده تا باستان‌شناسان نیاز روزمره‌ای به علوم دیگر به خصوص علوم پایه و مهندسی پیدا کنند. وجود یک گروه با تخصص‌های باستان‌شناسی و علوم مرتبط در کنار یکدیگر سبب تحلیل هر چه بهتر موضوع‌های این رشته شده است. با قرار دادن ویژگی‌ها، کاربردها و روش‌های علوم میان‌رشته‌ای مختلف در کنار یکدیگر، درمی‌یابیم که تمامی مواد فرهنگی از اهمیت یکسانی در مطالعات باستان‌شناسی برخوردار هستند و مطالعه هر یک تا چه اندازه به بازسازی جوامع گذشته کمک می‌نماید. برای نمونه، از طریق بررسی سازمان تولید سفال به میزان و سطح فرهنگی جامعه پی می‌بریم و از طریق مطالعه بقایای استخوانی جانوری در همان محوطه، اقتصاد معیشتی و شیوه‌های دامپروری و کشاورزی را شناسایی می‌نماییم. در واقع قرار دادن تمامی این مطالعات در کنار یکدیگر، این توانایی را در یک باستان‌شناس ایجاد می‌کند که بتواند صحیح‌ترین تفسیر را در مورد سازمان‌های اجتماعی و اقتصادی، مسائل و پیچیدگی‌های فرهنگی و سطح فناوری ارائه دهد. در پایان امید می‌رود که پژوهش‌های آینده به منظور پاسخ‌دهی به بسیاری از پرسش‌ها، کمتر به توصیف‌های کلی متکی باشند و بیشتر سعی بر تجزیه و تحلیل یافته‌ها به روش‌های معتبر علمی که در این نوشتار به اجمال بدان‌ها اشاره شد، داشته باشند.

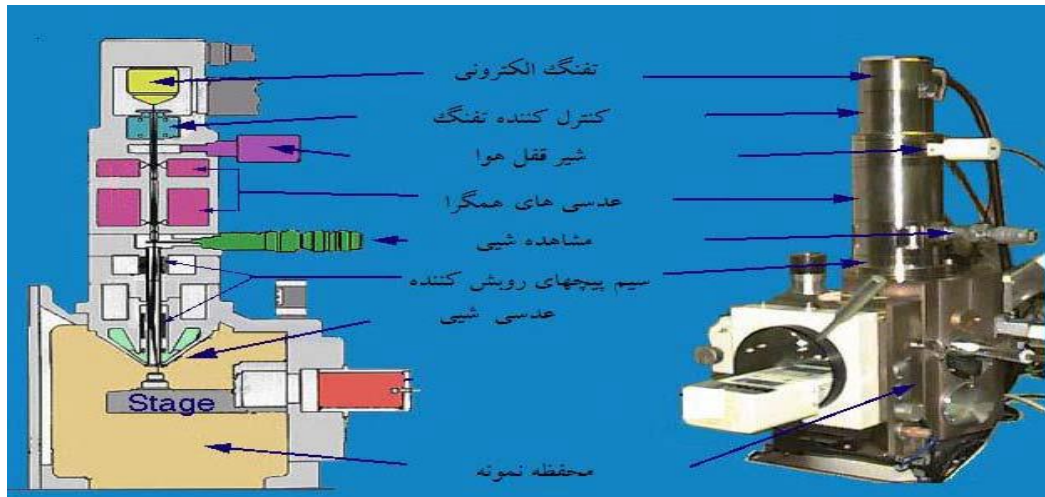
- ۶- سبزی علی، م، گودرزی، ع، خزایی کوهپر، م، خادمی ندوشن، ف، ۱۳۸۹، "مطالعه وضعیت اقتصادی اشکانیان در دوران مهرداد اول و مهرداد دوم، بر اساس آزمایش سکه‌های نقره (یک درهمی) بوسیله دستگاه XRF"، مجله پیام باستان‌شناسی، سال هفتم، ش ۱۳، صص ۹۱ تا ۱۰۰.
- ۷- سلیمانی، ب، زبیدی، ج، ۱۳۹۳، "بررسی شیل‌های مشکل‌ساز سازندهای پابده و گورپی با استفاده از روش‌های NGS، XRD و XRF در میدان نفتی کارون و ارائه گل بهینه حفاری"، مجله ژئوشیمی، سال سوم، ش ۲، صص ۱۵۲-۱۴۱.
- ۸- علیزاده ذوالبین، م، غفرانی، س، الماسی، ع، ۱۳۹۲، "مبانی آماده‌سازی نمونه برای دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)"، فصلنامه تخصصی دانش آزمایشگاهی ایران، ش ۴، صص ۳۲-۲۴.
- ۹- لامعی رشتی، م، ۱۳۸۵، "سی سال آنالیز با باریکه یونی: تجربه آزمایشگاه واندوگراف"، مقاله نامه کنفرانس فیزیک ایران.
- ۱۰- لامعی رشتی، م، شکوهی، ف. اولیایی، پروین. ۱۳۸۱، "معرفی روش پیکسی خارجی در آنالیز مرکب و کاغذ قدیمی"، نامه بهرستان، سال سوم، ش ۲، دفتر ۶، صص ۴۳۶-۴۳۱.
- ۱۱- محمدی فر، ی، عرب، ا. ۱۳۹۲، "مطالعه ترکیب سفال کلینکی دوره اشکانی منطقه همدان با استفاده از سه روش: PIXE، XRF، XRD با هدف تعیین میزان تشابه و تمایز"، مجله پژوهش‌های باستان‌شناسی ایران، دوره سوم، ش ۴، ۷۶-۵۷.
- ۱۲- نقشینه، ام، حاتمی، ا، نیکروان متین، ه، ۱۳۹۲، "مطالعه پتروگرافی سفال عصر آهن غار هوتو"، مجله پژوهش‌های باستان‌شناسی ایران، دوره سوم، ش ۵، صص ۷۸-۶۳.
- ۱۳- نیکنامی، ک، رضایی، ا، ۱۳۹۲، "تجزیه‌ی عنصری خاک باستانی دوره‌ی مس-سنگی تپه زاغه برای شناسایی مکان‌های فعالیت‌های ویژه"، مجله مطالعات باستان‌شناسی، دوره ۵، ش ۲، صص ۱۸۲-۱۶۳.
- 14- Claes Martin et al, 1999. "Micro-analysis of Artists' Pigments by Grazing-Emission X-ray Fluorescence Spectrometry". Copyright (C) JCPDS-International Centre for Diffraction.
- 15- Keiichi SUGIHARA. et al. 2001. "analysis of pigments used in scroll paintings of a national treasure "tale of Genji" using a portable x-ray fluorescence spectrometer". International center for data, advances in x-ray analysis. Vol. 44.



شکل ۱. طرح کلی سیستم آنالیز به روش PIXE (محمدی فر، ۱۳۹۲: ۶۷)



شکل ۲. نمایش دستگاه فلورسانس پرتو ایکس (XRF) (اسدی فرد، ۱۳۸۴: ۹۹)



شکل ۳. اجزای اصلی یک میکروسکوپ الکترونی روبشی (اسدی فرد، ۱۳۸۴: ۴۸)