

بازسازی ناهمواری سطح یک سکه رومی باستانی با استفاده از آشکارساز رانش سیلیکونی چهار-قسمتی پرتوهای ایکس مشخصه

سحر اکبری^۱، سمیه هارونی^{۱*} و ابراهیم غلامی حاتم^{۲*}

^۱دانشکده فیزیک، دانشگاه کاشان، کاشان، اصفهان، ایران.

^۲گروه فیزیک، دانشگاه ملایر، ملایر، همدان، ایران.

*اصفهان، کاشان، کیلومتر ۶ بلوار قطب راوندی، دانشگاه کاشان، دانشکده فیزیک، کدپستی: ۵۳۱۵۳-۸۷۳۱۷

*همدان، ملایر، کیلومتر ۴ جاده اراک، دانشگاه ملایر، دانشکده علوم پایه، کدپستی: ۶۵۷۱۹-۹۵۸۶۳

پست الکترونیکی: sharooni@kashanu.ac.ir e.gholami@malayeru.ac.ir

چکیده

اطلاعات سه‌بعدی سطوح مواد جهت انجام آنالیزها با استفاده از روش‌های القای متمرکز یون یا فوتون، چالش مهمی در علم مواد محسوب می‌شود که در زمینه‌های مختلف کاربرد دارد. تابش‌های یون‌ساز، مانند پروتون‌ها، ذرات آلفا و الکترون‌ها، با برهم‌کنش‌های خود در ماده، منجر به تولید پرتوهای ایکس مشخصه می‌شوند که این پرتوها برای تحلیل ترکیب عنصری مواد اهمیت ویژه‌ای دارند. ناهمواری سطح تا حد زیادی بر دقت تحلیل‌ها تأثیر می‌گذارد، بنابراین بازسازی آن از اهمیت زیادی برخوردار است. در این مطالعه با استفاده از یک آشکارساز چند-قسمتی در روش میکروپیکسی، به بازسازی ناهمواری سطح یک سکه باستانی رومی مربوط به قرن چهارم میلادی پرداخته شده است. برای تعیین ترکیب عنصری سکه از روش‌های انتشار پرتو ایکس ناشی از ذرات (PIXE) و تحلیل فلورسانس پرتو ایکس (XRF) استفاده شد. همچنین با استفاده از آشکارساز رانش سیلیکون حلقوی چهار قسمتی و در نظر گرفتن مجموعه‌ای از تصاویر دوتایی به دست آمده توسط قسمت‌های متعادل آشکارساز ابتدا مؤلفه‌های گرادیان ناهمواری سطح استخراج شد و سپس بازسازی توپوگرافی سطح با انتگرال‌گیری عددی از مؤلفه‌های گرادیان در دو بعد انجام شد. نتایج حاصل از این مطالعه در بازسازی ناهمواری سطح براساس عناصر تشکیل‌دهنده آن نشان می‌دهد که این یافته‌ها می‌توانند در مطالعات باستان‌شناسی و تحلیل اشیاء تاریخی نقش به‌سزایی ایفا کنند و به محققان کمک کنند تا با دقت بیشتری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آثار باستانی را بررسی کنند.

کلیدواژگان: بازسازی ناهمواری سطح، انتشار پرتو ایکس ناشی از ذرات، آشکارساز رانش سیلیکون چهار قسمتی، پیکسی، تعیین ترکیب عنصری.

۱. مقدمه

بررسی ویژگی‌های سکه‌ها را بیشتر می‌کند. از جمله چالش‌های مرتبط با این بررسی، بازسازی ناهمواری‌های سه‌بعدی سطح سکه‌هاست که تأثیر زیادی بر کیفیت و دقت تحلیل‌ها دارد. شبیه‌سازی‌ها نشان داده‌اند که ناهمواری‌های کوچک هم

در دوران امپراتوری روم باستان، سکه‌ها نه تنها به‌عنوان وسیله‌ای برای مبادله، بلکه به‌عنوان نمادی از تاریخ و فرهنگ آن زمان، اهمیت بسیاری داشتند [۱]. طرح‌ها و کتیبه‌های این سکه‌ها به شناسایی و تأیید اصالت آن‌ها کمک می‌کردند و این امر اهمیت

روم باستان با ساختار سطحی واقعی و پیچیده استفاده شده است که در معرض تغییر و تحولات جوی و شرایط مختلف نگهداری بوده است.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. انجام آنالیز میکروپیکسی

سکه مورد بررسی مربوط به دوران حکومت امپراتور کنستان^۳ بین سال‌های ۳۳۷ تا ۳۵۰ بعد از میلاد است [۶]. این سکه که از نوع سستنیالیس^۴ است و وزنی برابر با ۱/۶۷ gr گرم و قطر ۱۵/۵ mm دارد.



شکل (۱): تصویری از سکه رومی مورد مطالعه. قسمت (الف) روی سکه و قسمت (ب) پشت سکه را نشان می‌دهد.

بررسی نمونه‌ها به روش میکروپیکسی، با استفاده از یک آشکارساز رانش سیلیکون حلقوی چهار قسمتی در مرکز میکروباریکه موسسه ژوزف استفان^۵ واقع در لیوبلیانا، در کشور اسلونی [۷] انجام شد. روش مورد استفاده در این پژوهش، شامل میکروباریکه‌ای از پروتون‌ها است که با انرژی ۳ MeV و قطر ۴ μm ناحیه‌ای از سطح سکه را به ابعاد ۱۴۰۰×۱۴۰۰ μm^۲ جاروب می‌کند. برهم‌کنش باریکه فرودی با نمونه باعث تولید پرتوهای ایکس مشخصه به صورت همسان‌گرد می‌شود. این پرتوها توسط آشکارساز چهارقسمتی که در زاویه ۱۳۵° نسبت به نمونه قرار گرفته است ثبت می‌شوند (شکل ۲). مساحت هر قسمت از ناحیه فعال آشکارساز برابر ۱۱/۳۰ mm^۲ است که

می‌تواند تأثیر زیادی بر انتشار پرتو ایکس داشته باشند و نیاز به بازسازی دقیق ناهمواری سطح را بیشتر می‌کنند [۲].

آشکارسازهای پرتو ایکس چند قسمتی در طیف‌سنجی به روش انتشار پرتو ایکس ناشی از ذرات^۱ که به اختصار پیکسی گفته می‌شود کاربرد پیدا کرده است. این آشکارسازها به‌طور قابل توجهی دارای تفکیک انرژی و بازده انرژی بهتر در دامنه‌های انرژی بالا و حتی پایین هستند [۴،۳] که این موضوع برای استفاده بهینه از ویژگی تحلیل چند عنصری پیکسی حائز اهمیت است. به‌علاوه، با امکان مشاهده نمونه از چند زاویه مختلف و رفع محدودیت‌های اثر سایه در تصاویر پرتوی ایکس توانایی ما را در شناسایی جزئیات ارتقاء می‌دهند [۵].

در این پژوهش، با استفاده از آشکارساز رانش سیلیکون^۲ چهار-قسمتی حلقوی، الگوریتمی را به کار می‌بریم که از تصاویر پرتو ایکس دو بعدی به‌دست‌آمده برای استخراج مؤلفه‌های گرادیان ناهمواری سه‌بعدی سطح در ناحیه اسکن شده استفاده می‌کند. در این روش از عدم تقارن بهره پرتو ایکس قسمت‌های متعامد برای تعریف فاکتور عدم تقارن بهره پرتوی ایکس استفاده می‌شود. تفاوت‌ها در نسبت بهره پرتو ایکس برای بخش‌های متعامد از طریق مدل نظری نمونه سطح شیب‌دار به زاویه شیب محلی سطح تبدیل می‌شوند. سپس با انتگرال‌گیری از زوایای شیب محلی، مؤلفه‌های گرادیان در هریک از راستاهای اسکن نمونه به دست می‌آیند و در ادامه ناهمواری سطح با انتگرال‌گیری از مؤلفه‌های گرادیان بازسازی می‌شود [۵]. یکی از موارد کاربرد روش نوین بازسازی عنصری توپوگرافی سطح معرفی شده در نمونه‌هایی است که عناصر سطحی با روش هائی شیمایی قابل شستشو نیستند و از جمله آن‌ها نمونه‌های باستان‌شناسی است. بنابراین، در این پژوهش یک نمونه سکه واقعی مربوط به دوران

^۵ Jožef Stefan Institute

^۱ Particle Induced X-Ray Emission (PIXE)

^۲ SDD

^۳ Constans

^۴ Centenionalis

[۹]. این نرم‌افزار غلظت عناصر تشکیل‌دهنده پتینه را نیز برحسب ng/cm^2 ارائه می‌کند [۱۰].

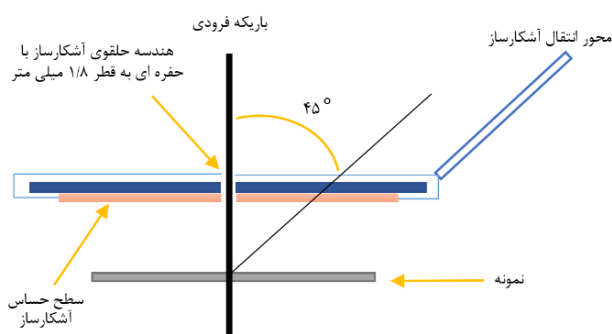
۲.۲. دیگر آنالیزهای تکمیلی

علاوه بر آنالیز میکروپیکسی، تحلیل عنصری نمونه با استفاده از روش XRF^1 نیز انجام شد. اندازه گیری‌ها توسط دستگاه قابل حمل Hitachi X-met ۸۰۰۰ انجام شد و برای تحلیل فلزات، از دو پیش‌تنظیم لوله متفاوت ۴۰ kV و ۸ kV استفاده شد. XRF از یک مولد اشعه ایکس استفاده می‌کند و در مقایسه با میکروپیکسی، قادر است سکه را در عمق بیشتری بررسی کند و اطلاعات دقیقی درباره ترکیب عنصری آن ارائه دهد [۱۱]. در بررسی دیگری به‌منظور تفکیک عناصر سازنده آلیاژ سکه و پتینه آن، سکه‌ای مشابه که پتینه‌اش با استفاده از اسید پاک شده بود تحت آزمایش پیکسی متداول^۲ قرار گرفت. این روش که با استفاده از آشکارساز Si(Li) واقع در مؤسسه ژوزف استفان [۱۲] انجام شد اجازه می‌دهد تا غلظت عنصری که پرتو ایکس آن‌ها در محدوده انرژی‌های پایین قرار می‌گیرد با دقت بیشتری مورد بررسی قرار گیرند.

۲.۳. روش تئوری

به‌منظور بازسازی ناهمواری سه‌بعدی سطح نمونه از الگوریتم معرفی شده در بازسازی سطح با استفاده از آشکارساز چهارقسمتی در آنالیز میکروپیکسی [۱۳] استفاده می‌شود. در حالی که در مطالعه اولیه، الگوریتم به‌عنوان یک روش نوین معرفی شده، پژوهش فعلی به‌کارگیری عملی این الگوریتم در زمینه تحلیل آثار باستانی و بازسازی توپوگرافی سطح این نمونه‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهد. در این روش با استفاده از اختلاف مسیری که فوتون از نقطه تولید تا رسیدن به آشکارسازهایی که به‌طور متقارن قرار گرفته‌اند پیدا می‌کند،

به‌طور متقارن در اطراف یک حفره مرکزی به قطر $1/8 \text{ mm}$ قرار گرفته‌اند. در زمان انجام آزمایش، فاصله کاری $7/79 \text{ mm}$ بود که یک زاویه فضایی 445 mSr را پوشش می‌دهد. هندسه آشکارساز در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل (۲): هندسه آشکارساز رانش سیلیکون حلقوی چهار قسمتی با حفره مرکزی.

در رویکرد مورد استفاده برای بازسازی کمی ناهمواری سه‌بعدی سطح، ابتدا باریکه فرودی ناحیه‌ای از سکه را با ابعاد $1400 \times 1400 \mu\text{m}$ اسکن می‌کند. این ناحیه در شکل ۱ مشخص شده است. جاروب کردن نمونه به مدت ۲۶ دقیقه و ۲۵ ثانیه طول کشید و بار فرودی برابر با $8/79 \text{ nC}$ جریان برابر با $5/5 \text{ pA}$ و نرخ ثبت داده‌ها برابر با 22 kHz بود. برهم‌کنش باریکه فرودی با پوسته داخلی اتم‌های هدف سبب تولید پرتوهای ایکس مشخصه و انتشار آن‌ها به‌صورت همسان‌گرد می‌شود. ناهمواری سطح باعث می‌شود پرتوهای ایکس تولید شده از یک نقطه در نمونه، برای رسیدن به آشکارساز طول مسیرهای متفاوتی را طی کنند، در نتیجه شدت‌های متفاوتی توسط آشکارسازها ثبت می‌شود. داده‌های مربوط به این طیف‌ها ذخیره و در نرم افزار OMDAQ-۳ فراخوانی شدند [۸]. این نرم‌افزار امکان دستیابی به اطلاعات مکانی را فراهم کرد و تصاویر دو بعدی با ابعاد 256×256 پیکسل به‌دست آمد. سپس طیف‌ها با استفاده از نرم افزار GUPIX مورد بررسی قرار گرفته و غلظت عناصر تشکیل‌دهنده آلیاژ بر حسب ppm به‌دست آمد

² Conventional PIXE

¹ X-ray fluorescence

قسمتی حلقوی و متقارن، ناشی از تفاوت در طول مسیر طی شده توسط پرتو ایکس است. به این ترتیب، ساختار سطح، باعث ایجاد اثری مانند سایه در تصاویر دوبعدی پرتو ایکس می‌شود. باتوجه به این‌که هر کدام از آشکارسازها از زاویه‌ای متفاوت به نمونه نگاه می‌کنند، اثر سایه در بخش‌های متفاوتی از تصاویر تشکیل می‌شود و با کنار هم قرار دادن این تصاویر، الگوی سایه‌ها کامل شده و ناهمواری سطح بازسازی می‌شود. پس از محاسبه بهره پرتو ایکس، مقادیر عدم تقارن برای نمونه‌ای که زاویه سطح آن نسبت به سطح افق از 45° تا -45° متغیر است در راستای آشکارسازهای ۱ و ۲ (و ۳ و ۴) محاسبه می‌شود. برای هر مقدار محاسبه شده از فاکتور عدم تقارن، زاویه شیب متناظری وجود دارد. بنابراین، با مقایسه مقادیر تئوری عدم تقارن محاسبه شده با مقادیر تجربی به دست آمده از داده‌های پرتوی ایکس هر قسمت از آشکارساز، می‌توان زاویه شیب محلی را تعیین کرد. سپس با داشتن زوایای ناهمواری در چارچوب آرایه-های آشکارساز چهارقسمتی، تصاویر گرادیان در مناطق اسکن شده به دست می‌آید و ناهمواری سه بعدی سطح با انتگرال‌گیری از بردار گرادیان در هر دو جهت از ناحیه اسکن شده (X, Y) بازسازی می‌شود.

۳. بحث و نتایج

در این مطالعه با استفاده از روش میکروپیکسی و بهره‌گیری از آشکارساز رانش سیلیکونی حلقوی چهارقسمتی به بازسازی ناهمواری سطح یک سکه باستانی رومی پرداخته شد. به‌منظور در نظر گرفتن یک مقدار میانگین برای ترکیب عنصری، طیف‌های به‌دست‌آمده از قسمت‌های مختلف آشکارساز با یکدیگر ترکیب شدند و غلظت هر عنصر به‌صورت میانگینی از غلظت‌های محاسبه شده توسط چهار آشکارساز ارائه شد.

با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده برای غلظت عناصر، Cu با $39/32\%$ ، Pb با $31/73\%$ و Sn با $18/36\%$ درصد عناصر

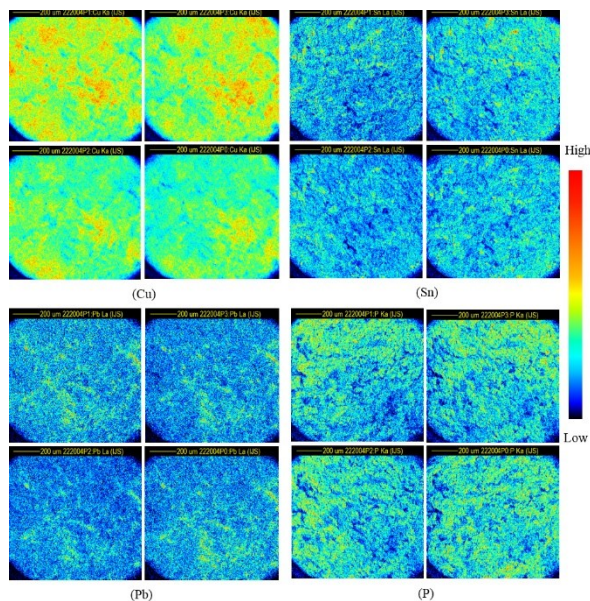
می‌توانیم ناهمواری سطح نمونه را بازسازی کنیم [۱۴]. با استفاده از اختلاف سیگنال‌های ثبت شده توسط هر جفت از آشکارسازها با بهرمندی از روابط زیر، فاکتور عدم تقارن برای یک پیکسل معین (i, j) در تصاویر بهره‌ی پرتوی ایکس به دست می‌آید.

$$A_{1r}(i, j) = \frac{Y_1 - Y_r}{Y_1 + Y_r} \quad (1)$$

$$A_{3r}(i, j) = \frac{Y_3 - Y_r}{Y_3 + Y_r} \quad (2)$$

در این روابط Y_1 و Y_r و Y_3 و Y_r بهره پرتو ایکس به‌دست‌آمده از آشکارسازهای ۱ و ۲ (۳ و ۴) و A_{1r} و A_{3r} فاکتور عدم تقارن در راستای قرارگیری آشکارسازهای ۱ و ۲ (۳ و ۴) است. بیشترین مقدار ممکن برای دامنه عدم تقارن برابر ۱ است و زمانی اتفاق می‌افتد که شمارش آشکارساز شماره ۲ (یا ۴) نسبت به پرتو ایکس صفر است و کمترین مقدار آن برابر با ۱- است و زمانی اتفاق می‌افتد که شمارش آشکارساز شماره ۱ (یا ۳) نسبت به پرتو ایکس صفر باشد. عدم تقارن صفر نیز به این معنی است که هیچ تفاوتی در شدت‌های ثبت شده توسط آشکارساز ۱ و ۳ (یا ۲ و ۴) وجود ندارد و پرتوهای ایکس فاصله یکسانی را تا رسیدن به آشکارسازها طی کرده‌اند. پروتون‌ها هنگام حرکت در نمونه و برهم‌کنش با الکترون‌های اتمی، به تدریج انرژی خود را از دست می‌دهند تا زمانی که به‌طور کامل متوقف شوند.

برای محاسبه بهره پرتو ایکس در عمق‌های مختلف، نمونه از سطح تا عمقی که پروتون‌ها متوقف می‌شوند به لایه‌هایی تقسیم‌بندی می‌شود و انرژی پروتون‌ها در هر یک از این نمایه‌های عمقی محاسبه می‌شود. سپس با محاسبه سطح مقطع تولید پرتو ایکس در هریک از این انرژی‌ها، بهره پرتو ایکس مربوط به هر سلول در تصاویر دوبعدی پرتو ایکس، برای هریک از آشکارسازهای ۱ تا ۴ تعیین می‌شود. برای نمونه‌های همگن، تفاوت اصلی در شدت ثبت شده برای آشکارسازهای چند



شکل (۳): تصاویر دوبعدی پرتو ایکس که از چهار قسمت آشکارساز برای عناصر اصلی تشکیل دهنده آلیاژ سکه و پتینه به دست آمده‌اند.

ارتباط بین عناصر تشکیل دهنده آلیاژ سکه و نیز پتینه در شکل ۴ نمایش داده شده است. در تحلیل همبستگی، مقدار P برای ارزیابی معنی داری بودن رابطه بین دو متغیر استفاده می‌شود. اگر مقدار P کمتر از ۰/۰۵ باشد، رابطه بین دو متغیر معمولاً معنی دار، و اگر کمتر از ۰/۰۱ باشد، همبستگی بسیار قوی و معنی دار است.

همبستگی مشاهده شده بین Ag و Sn، As و Mn، و Pb و Zn بیانگر تعاملات شیمیایی و فیزیکی در فرایند ساخت و یا استفاده از سکه است که می‌تواند بر کیفیت و دوام سکه تأثیرگذار باشد. همچنین بین K و Cl همبستگی قوی وجود دارد که می‌تواند نشان‌دهنده فرایندهای ژئوشیمیایی یا دگرسانی^۳ باشد که به مرور زمان منجر به تشکیل پتینه روی سکه شده است. تحلیل این ارتباطات به درک بهتر از خصوصیات و منشأ نمونه‌ها کمک می‌کند و در تفسیر داده‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

اصلی تشکیل دهنده آلیاژ سکه و عنصر P با $30886/5 \text{ ng/cm}^2$ عنصر اصلی تشکیل دهنده پتینه هستند. مقدار میانگین غلظت عناصر محاسبه شده از چهار آشکارساز برای عناصر تشکیل دهنده پتینه و آلیاژ به طور جداگانه در جدول ۱ و جدول ۲ ارائه شده است. عناصری که با S مشخص شده‌اند عناصر تشکیل دهنده پتینه هستند و به آن‌ها عناصر سطحی^۱ گفته می‌شود. تصاویر دوبعدی توزیع عنصری Cu، Pb، Sn، P که توسط آشکارساز ثبت شده در شکل ۳ آورده شده است.

جدول (۱): مقادیر محاسبه شده برای غلظت عناصر تشکیل دهنده پتینه و پائین‌ترین حد تشخیص مربوط به هر عنصر.

عنصر - گذار اصلی	غلظت میانگین (ppm)	LOD ² (ppm)
Al-K (S)	۳۶۶۳/۵	۵۵/۵
Si-K (S)	۲۲۹۹۴/۵	۵۰/۱
P-K (S)	۳۰۸۸۶/۵	۵۱/۹
Cl-K (S)	۱۴۵۶/۱	۱۰۱/۶
K-K (S)	۴۶۶/۴	۳۵۷/۲
Ca-K (S)	۵۲۵۷۹/۷	۹۸۰/۶
Ti-K (S)	۱۰۰۸/۳	۷۲/۶

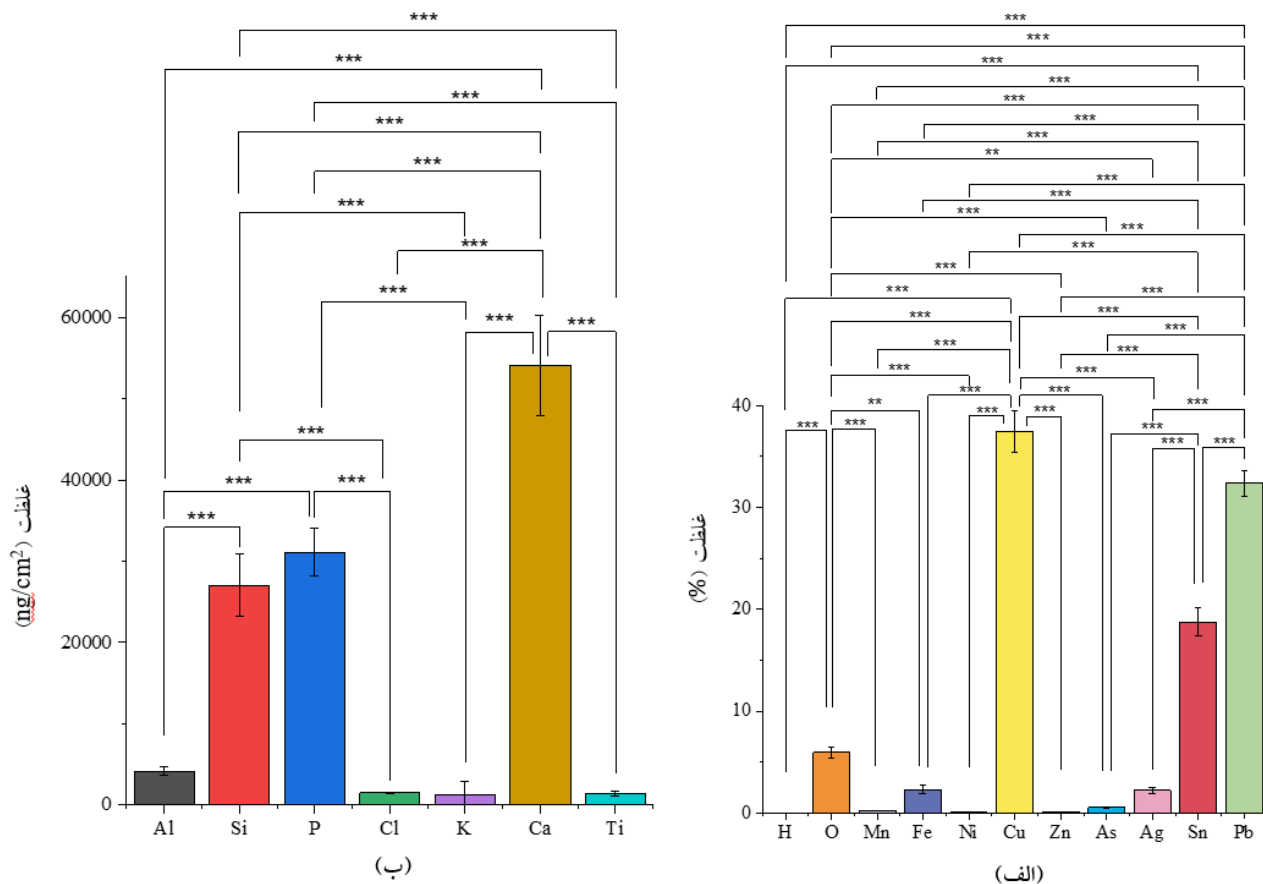
جدول (۲): مقادیر محاسبه شده برای غلظت عناصر اصلی تشکیل دهنده آلیاژ سکه و پائین‌ترین حد تشخیص مربوط به هر عنصر.

عنصر - گذار اصلی	غلظت میانگین (ppm)	LOD (ppm)
Mn-K	۲۱۵۷/۵	۳۳/۶
Fe-K	۲۰۴۱۵/۰	۴۴/۸
Ni-K	۵۲۱/۵	۴۱/۹
Cu-K	۳۹۳۲۳۸/۴	۳۸/۵
Zn-K	۹۲۸/۹	۱۰۴/۹
As-K	۴۶۷۷/۴	۳۵۰/۶
Ag-La	۱۹۳۸۲/۲	۳۵۰/۳
Sn-La	۱۸۳۶۷۳/۶	۳۳۸/۸
Pb-La	۳۱۷۳۱۱/۲	۱۲۹۴/۸

³ alteration

¹ Surface elements

² Limit of detection

* $p \leq 0.05$ ** $p \leq 0.01$ *** $p \leq 0.001$ 

شکل (۴): بررسی نموداری ارتباط بین عناصر تشکیل دهنده آلیاژ سکه و پتینه. شکل (الف) عناصر تشکیل دهنده آلیاژ سکه و شکل (ب) عناصر تشکیل دهنده پتینه را نشان می‌دهد.

W و Bi تنها به روش XRF شناسایی شده که نشان می‌دهد ممکن است این عناصر در مقادیر بسیار کم وجود داشته باشند و تأثیر قابل توجهی بر ترکیب کلی نداشته باشند. ترکیب عنصری به دست آمده از روش میکروپیکسی حاصل از آشکارساز چهار-قسمتی برای محاسبه وابستگی عدم تقارن به شیب محلی در مدل سطح شیب‌دار صاف استفاده شد.

دامنه عدم تقارن در هر راستا، به فاصله بین دو آشکارساز متعامد و تفاوت طول مسیری که پرتوهای ایکس تا رسیدن به هریک از آشکارسازها طی می‌کنند بستگی دارد. با توجه به این که آشکارسازها تحت زاویه 135° درجه نسبت به باریکه فرودی قرار گرفته‌اند، فاکتور عدم تقارن در زاویه $-\pi/4$ تا $\pi/4$ بررسی می‌شود.

به منظور انجام بررسی‌های بیشتر در خصوص ترکیب عناصر تشکیل دهنده سکه و پتینه، ترکیب عنصری نمونه به روش XRF و همچنین به روش پیکسی متداول برای سکه بدون پتینه مورد بررسی قرار گرفت. غلظت به دست آمده برای عناصر از روش‌های مختلف در جدول ۳ گزارش شده است. با توجه به مقادیر محاسبه شده، می‌توان گفت Cu، Pb و Sn عناصر اصلی تشکیل دهنده آلیاژ سکه هستند. علاوه بر عناصر اصلی، عناصر Mn، Fe، Ni، As، Ag، Sb در غلظت‌های بسیار کم شناسایی شدند که نشان دهنده وجود ناخالصی‌ها در ترکیب آلیاژ است. عناصر Al، Si، P، Cl، K، Ca و Ti روی سطح سکه وجود دارند و پتینه را تشکیل می‌دهند. در سکه شسته شده با HCl غلظت این عناصر به صفر می‌رسد. وجود عنصری مانند Hf،

جدول (۳): مقادیر محاسبه شده برای غلظت عناصر به روش های مختلف.

روش ها	میکروپیکسی (%)	XRF (%)	پیکسی متداول (%)
نوع نمونه	سکه همراه با	سکه همراه با	سکه مرجع بدون
	پتینه	پتینه	پتینه
Al	± ۰/۰۰۹	۲/۰۴ ± ۰/۰۵۰	-
	۰/۳۶۶		
Si	± ۰/۰۱۹	-	-
	۲/۲۹۹		
P	± ۰/۰۱۸	۳/۰۸ ± ۰/۰۱۳	-
	۳/۰۸۸		
Cl	± ۰/۰۰۷	-	۳/۶۸ ± ۰/۰۰۹
	۰/۱۴۵		
K	± ۰/۰۰۵	-	-
	۰/۰۴۶		
Ca	± ۰/۰۴۴	-	۰/۱۳ ± ۰/۰۲
	۵/۲۵۷		
Ti	± ۰/۰۰۶	-	-
	۰/۱۰۰		
Mn	± ۰/۰۰۰	۰/۱۵ ± ۰/۰۱۱	-
	۰/۰۰۲		
Fe	-	۱/۳۹ ± ۰/۰۱۸	۰/۱۹ ± ۰/۰۱
Co	-	۰/۰۲ ± ۰/۰۰۵	-
Ni	-	۰/۰۲ ± ۰/۰۰۵	۰/۲۰ ± ۰/۰۲
Cu	± ۰/۰۰۱	± ۰/۰۶۵	۹۲/۲۸ ± ۰/۲۱
	۳۹/۳۲	۴۵/۱۳	
Zn	۰/۰۹ ± ۰/۱۵۳	۰/۰۵ ± ۰/۰۰۴	-
As	۰/۴۷ ± ۰/۲۴۴	۰/۳۳ ± ۰/۰۰۷	۰/۴۴ ± ۰/۰۱
Ag	۱/۹۳ ± ۰/۰۱۵	۱/۶۵ ± ۰/۰۱۹	۰/۰۸ ± ۰/۰۱
Sn	± ۰/۰۰۳	۸/۱۱ ± ۰/۰۴۹	۰/۲۲ ± ۰/۰۲
	۱۸/۳۶		
Sb	-	۰/۱۹ ± ۰/۰۲۰	۰/۰۷ ± ۰/۰۱
Hf	-	۰/۱۶ ± ۰/۰۱۱	-
W	-	۰/۰۵ ± ۰/۰۰۹	-
Pb	± ۰/۰۰۴	± ۰/۰۶۱	۲/۷۱ ± ۰/۰۵
	۳۱/۷۲	۳۶/۲۷	
Bi	-	۰/۰۹ ± ۰/۰۰۸	-

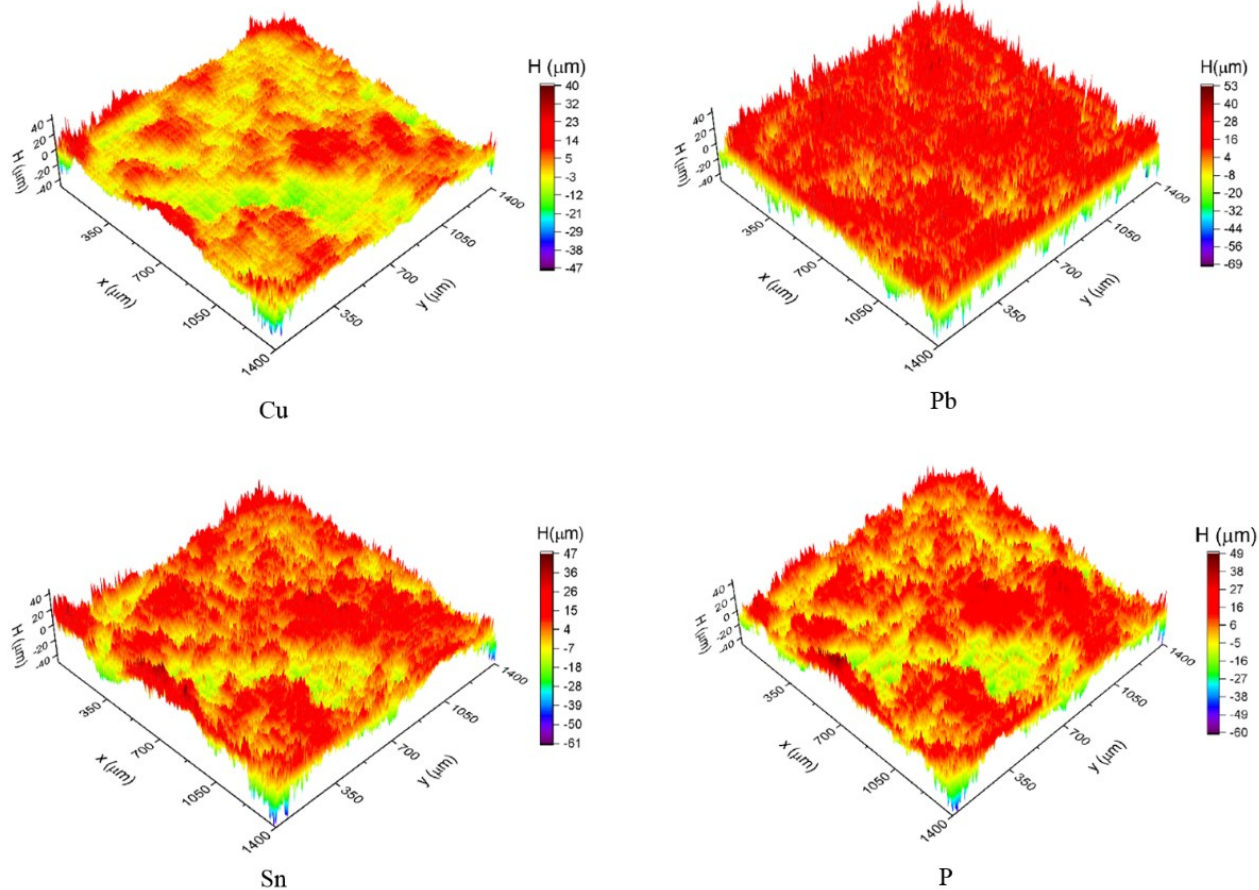
به عبارتی زاویه شیب محلی در ناحیه $\alpha \leq \theta \leq -\alpha$ بازسازی می شود که α زاویه قطبی هر یک از قسمت های آشکارساز نسبت به باریکه فرودی است. عدم تقارن به صورت ماتریسی با ابعاد تصاویر دو بعدی پرتو ایکس ارائه می شود و هر عنصر عدم تقارن به پیکسل معادل آن در تصاویر مرجع نسبت داده می شود. عدم تقارن از طریق یک تابع معکوس محاسبه و به زوایای شیب محلی در چارچوب آشکارساز رانش سیلیکونی تبدیل می شود و به این ترتیب، تفاوت های موجود در تصاویر دو بعدی پرتو ایکس به زوایای شیب محلی نسبت داده می شود. G_x (G_y) مؤلفه ی گرادیان دو بعدی در امتداد محور x (y) از ناحیه اسکن شده است و به ساختار نمونه در این راستا حساسیت نشان می دهد. توانمندی روش مورد استفاده در این است که می تواند زاویه شیب محلی و به نوبه خود مؤلفه ی گرادیان را در دو جهت مستقل به دست آورد و در نتیجه می تواند ناهمواری سه بعدی سطح نمونه را بازسازی کند. این روش همچنین می تواند برای نمونه های ترکیبی، با غلظت مشخص عناصر بر حسب درصد، که در آن اختلاف طول مسیر پرتو ایکس از در داخل ماده در مقیاس چند میکرومتر است، استفاده شود. با استفاده از این روش، بازسازی ناهمواری سطح به صورت سه-بعدی در شکل ۵ نمایش داده شده است و توزیع و میزان ناهمواری های سطح را به خوبی آشکار می کند. این تصویر نشان دهنده نقاط پستی و بلندی در سطح سکه های باستانی بوده و به وضوح تفاوت ها و تغییرات ریز در ناهمواری سطح را به نمایش می گذارد و می تواند به عنوان ابزاری مؤثر در شناسایی ویژگی های سطحی سکه ها و ارزیابی دقت و کیفیت فرآیندهای ترمیمی به کار رود.

۴. نتیجه گیری

در این مطالعه، غلظت عناصر تشکیل دهنده یک سکه باستانی رومی با استفاده از روش های مختلف تعیین شد. براساس مقادیر به دست آمده از روش های میکروپیکسی، XRF و پیکسی

سپس با بهره‌گیری از داده‌های میکروپیکسی و با استفاده از یک الگوریتم عددی، بازسازی کامل ناهمواری عنصری سه‌بعدی سطح سکه انجام شد.

متداول، می‌توان گفت Cu، Pb و Sn عناصر اصلی تشکیل‌دهنده آلیاژ سکه و P عنصر اصلی تشکیل‌دهنده پتینه به شمار می‌رود. همچنین سایر عناصر تشکیل‌دهنده آلیاژ و پتینه شناسایی شدند.



شکل (۵): بازسازی ناهمواری عنصری سطح در راستای اسکن نمونه برای عناصر اصلی تشکیل‌دهنده سکه و پتینه.

زمینه‌های مختلف از جمله بازسازی ناهمواری عنصری سطح آثار میراث فرهنگی که در آن‌ها برداشتن یا پرداخت سطح مجاز نیست، کاربردهای گسترده‌ای پیدا کند.

۵. تشکر و قدردانی

آزمایش‌های این مطالعه در مرکز میکرو باریکه مؤسسه ژوزف استفان کشور اسلونی از طریق ارسال پیشنهاد به شماره ST-۲۳۰۰۳۲۸۰ و با حمایت اتحادیه اروپا در چارچوب توافق‌نامه شماره RADIATE ۸۲۴۰۹۶ برنامه ۲۰۲۰ HORIZON انجام شده است.

این روش بر اساس ثبت تصاویر دوبعدی پرتوی ایکس در آشکارساز حلقوی رانش سلیکونی چهار-قسمتی طراحی شده است و برای دستیابی به دو مؤلفه مستقل گرادیان ناهمواری از انتگرال‌گیری عددی استفاده می‌کند. ضریب مقیاس مورد نیاز را می‌توان با اندازه‌گیری یک نمونه با ارتفاع شناخته شده یا سطح صاف، پیش یا پس از اندازه‌گیری‌ها با استفاده از همان تنظیمات آزمایش به دست آورد. انتظار می‌رود که بازسازی ناهمواری سه‌بعدی عنصری سطح در روش‌های مبتنی بر میکروباریکه پرتو ایکس، نیاز به تحلیل‌های دقیق‌تر داده‌ها را برطرف کرده و در

۶. مراجع

1. P. de Bree. Roman economic history from coins and Papyri: Monetary Value, Trust and Crisis. *J. Ancient History* 10 (1) (2022) 99-134.
2. T. Trojek. Reconstruction of the relief of an investigated object with scanning X-ray fluorescence microanalysis and Monte Carlo simulations of surface effects. *Appl. Radiat. Isot.* 70 (7) (2012) 1206-1209.
3. K. Sera, S. Goto, T. Hosokawa, Y. Saitoh. Use of a silicon drift detector (SDD) in the quantitative analysis of in-air PIXE. *Int. J. PIXE* 26 (03n04) (2016) 113-128.
4. G. W. Grime, V. Palitisin, D. Redfern. A comparison of energy dispersive X-ray detectors for PIXE applications. IBA & PIXE - SIMS Conf., 2021.
5. S. Molodtsov, A. Gurbich, C. Jeynes. Accurate ion beam analysis in the presence of surface roughness. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 41 (20) (2008) 205303.
6. J. W. Leedom. Constantius II: three revisions. *Byzantion* 48 (1) (1978) 132-145.
7. P. Pelicon, M. Kelemen, E. Punzón Quijorna, P. Vavpetič, K. Vogel-Mikuš, M. Vencelj, T. Reinert. Four segment Silicon Drift Detector for micro-PIXE covering a solid angle of 1 steradian. IBA & PIXE - SIMS Conf., 2021.
8. G. Grime. The "Q factor" method: quantitative microPIXE analysis using RBS normalisation. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sec. B: Beam Interact. Mater. Atoms* 109 (1996) 170-174.
9. J. L. Campbell, D. J. T. Cureatz, E. L. Flannigan, C. M. Heirwegh, J. A. Maxwell, J. L. Russell, S. M. Taylor. The Guelph PIXE software package V. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sec. B: Beam Interact. Mater. Atoms* 499 (2021) 77-88.
10. P. Pelicon, N. C. Podaru, P. Vavpetič, L. Jeromel, N. O. Potocnik, S. Ondračka, A. Gott dang, D. J. M. Mous. A high brightness proton injector for the Tandatron accelerator at Jožef Stefan Institute. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sec. B: Beam Interact. Mater. Atom* 332 (2014) 229-233.
11. Ž. Šmit. XANTHO—A simple basic program for fitting X-ray spectra. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sec. B: Beam Interact. Mater. Atom* 540 (2023) 19-23.
12. M. Žitnik, P. Pelicon, N. Grlj, A. G. Karydas, D. Sokaras, R. Schütz, B. Kanngießer. Three-dimensional imaging of aerosol particles with scanning proton microprobe in a confocal arrangement. *Appl. Phys. Lett.* 93 (9) (2008) 094104.
13. E. G. Hatam, P. Pelicon, E. Punzon-Quijorna, M. Kelemen, P. Vavpetič, P. Pongrac,, Application of four-segments annular silicon drift detector for 3-D surface topography reconstruction by micro-PIXE. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sec. B: Beam Interact. Mater. Atom* 541 (2023) 205-215.
14. E. G. Hatam, M. Lamahi-Rachti, P. Vavpetič, N. Grlj, P. Pelicon. Surface topography reconstruction by stereo-PIXE. *J. Analytical Atomic Spectrometry* 27 (5) (2012) 834-840.