



تصویرگیری با استفاده از پرتو ایکس تک انرژی پروتون-القایی

نعیمه فرجی پور قهرود^۱، امیدرضا کاکویی*^۲، بهزاد یداله‌زاده^۲

۱. گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی: ۱۹۳۹۵-۳۶۹۷، تهران - ایران

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

چکیده: این مقاله، راه‌اندازی جای گاه انجام آزمایش پرتونگاری با استفاده از پرتو ایکس تک انرژی پروتون-القایی در آزمایشگاه واندوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای را گزارش می‌کند. باریکه‌ی پروتون پراثری با شدت جریان چند صد نانو آمپر ضمن عبور از روزنه‌های مناسب در مسیر باریکه با یک هدف فلزی برخورد و پرتو ایکس تک انرژی ایجاد می‌کند. با تغییر هدف، تنوع گسترده‌ای از پرتو ایکس تک انرژی با طول موج‌های مختلف قابل حصول است. بهره‌ی تولید پرتو ایکس مشخصه‌ی پروتون-القایی با استفاده از یک آشکارساز SDD اندازه‌گیری می‌شود. با عبور پرتو ایکس از پنجره‌ی محفظه و برهم‌کنش آن با نمونه‌ی مورد نظر، شرایط لازم برای پرتونگاری با «تصویرگیری کنتراست لبه‌ی K» فراهم می‌شود. با راه‌اندازی روش آنالیز بیان شده‌ی استفاده‌کننده از جذب لبه‌ی K عنصر مورد نظر در نمونه، امکان بهبود کنتراست تصویر پرتونگاری نمونه‌های مختلف میراث فرهنگی نظیر نمونه‌های نوشتاری، پارچه و سکه در آزمایشگاه واندوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای فراهم شده است.

کلیدواژه‌ها: تصویرگیری، پرتو ایکس پروتون-القایی، پرتو ایکس تک انرژی

Imaging by the Use of Monochromatic X-Rays Induced by Proton Beam

N. Farajipour Ghahroudi¹, O. Kakuee*², B. Yadollahzadeh¹

1. Department of Physics, Payame Noor University, P.O.Box: 19395-3697, Tehran – Iran

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

Abstract: In this research work, commissioning of a radiography end station using proton-induced monochromatic X-rays in the Van de Graaff laboratory of Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI) is reported. An energetic proton beam with a current of hundreds of nanoamps after passing through the relevant slits in the beam path, is used to irradiate a metallic target leading to the generation of monochromatic X-rays. By altering the target, a wide variety of monochromatic X-rays with different wavelengths could be generated. The yield of characteristic proton-induced X-ray emission is measured using a Silicon Drift Detector (SDD). The generated X-rays could then pass through the window of the reaction chamber and irradiate the sample of interest. In this way, the required conditions for radiography by the “K-edge contrast imaging” could be provided. By implementing the mentioned analytical technique, using the K-edge absorption of the interest element in the sample, radiographic image contrast could be improved for different samples of cultural heritage such as manuscripts, clothes, and coins in the Van de Graaff lab of NSTRI.

Keywords: Imaging, Proton-Induced X-Ray, Monochromatic X-Ray



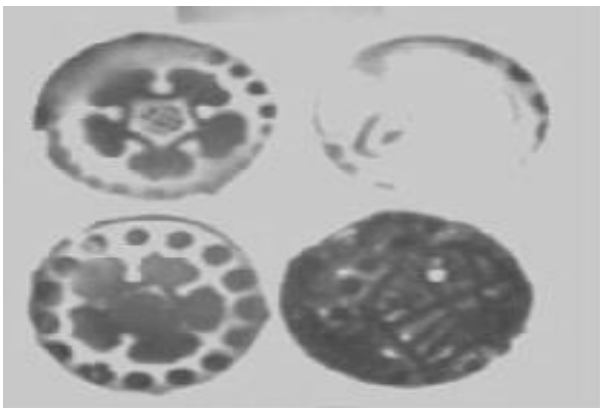
۱. مقدمه

مکمل روش گسیل پرتو ایکس ذره-القایی (PIXE) و سایر روش‌های تجزیه با باریکه‌ی یونی است. در شکل ۱ تصویر پرتونگاری سکه‌های نقره‌ای به دست آمده با پرتوهای تک انرژی عنصر قلع نمایش داده شده است. در این تصویرها عدم یکنواختی نقره به خوبی تعیین شده است [۲].

تصویر به دست آمده می‌تواند کمک شایانی در تجزیه‌ی عنصری نمونه به خصوص برای انتخاب محل تابش پروتون برای انجام تجزیه‌ی عنصری با استفاده از تکنیک پرتو ایکس ذره-القایی داشته باشد. با توجه به اهمیت روش تصویرگیری کنتراست لبه‌ی K [۲]، این روش تجزیه‌ای هم‌اکنون در آزمایشگاه واندوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای در حال بهره‌برداری است.

۲. مفاهیم و نظریه

یکی از راهکارهای تولید پرتو ایکس تک انرژی، استفاده از پرتو ایکس یون-القایی است. تولید پرتو ایکس یون-القایی، یک فرایند چند مرحله‌ای است. ابتدا یون در برهم‌کنش با اتم هدف یک حفره در لایه‌های الکترونی اتم ایجاد می‌کند و در مرحله‌ی دوم این حفره‌ی الکترونی توسط الکترون‌های لایه‌(های) بیرونی پر و اختلاف انرژی بین ترازها به صورت پرتو ایکس مشخصه یا الکترون اوژه گسیل می‌شود. در فرایند تولید پرتو ایکس پارامترهایی نظیر بهره‌ی تولید پرتو ایکس هدف‌های نازک و ضخیم، بهره‌ی فلورسانسی، سطح مقطع یونش، شدت پرتو ایکس گسیل شده، افت انرژی پرتابه یا ذره‌ی تابشی، تضعیف پرتو ایکس، فلورسانسی ثانویه و انتقال‌های پرتو ایکس مهم هستند.



شکل ۱. تصویر پرتونگاری سکه‌های نقره‌ای به دست آمده با پرتوهای تک انرژی عنصر قلع [۲].

مشخصه‌یابی اشیای میراث فرهنگی و آثار هنری یکی از اقدام‌های ضروری برای شناسایی تاریخ تولید، مکان و روش تولید، و انتخاب روش مناسب برای حفظ، نگهداری و مرمت این آثار است. بسیاری از آثار میراث فرهنگی طی زمان در معرض فرسایش، خوردگی و سایش قرار گرفته و شناسایی دقیق این آثار نیاز به روش‌های مشخصه‌یابی مناسب دارد. روش‌های تجزیه با باریکه‌ی یونی، فلورسانسی پرتو ایکس و پراش پرتو ایکس از جمله روش‌های متداول مورد استفاده برای مشخصه‌یابی آثار فرهنگی و هنری به شمار می‌روند [۱، ۲].

استفاده از پرتونگاری نیز از جمله روش‌های غیرمخرب است که در طول زمان برای تحلیل میزان خوردگی و سایش آثار میراث فرهنگی، توسعه یافته است [۲]. با استفاده از پرتونگاری، تعیین عمق خوردگی و نقشه‌ی طرح روی اشیای باستانی امکان‌پذیر است. تصویر حاصل از پرتونگاری به تفاوت احتمال جذب پرتو ایکس در نمونه (برهم‌کنش پرتو ایکس با نمونه) و نوع فیلم ثبت تصویر بستگی دارد. تصویر پرتونگاری شامل نقاط روشن و تاریک است که حاصل برهم‌کنش پرتو ایکس عبوری از نمونه و فیلم پرتونگاری است. نقاط روشن نشان‌دهنده‌ی جذب پرتو ایکس در نمونه است. رابطه‌ی جذب پرتو ایکس در یک نمونه این است

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

که در آن I شدت پرتوهای خروجی و I_0 شدت پرتوهای فرودی به نمونه است. احتمال جذب پرتو ایکس در نمونه به ضریب جذب (μ) تشکیل‌دهنده‌ی نمونه و ضخامت x آن بستگی دارد. برای پدیده‌ی فوتوالکتریک سطح مقطع جذب برحسب انرژی به صورت E^{-3} کاهش و با عدد اتمی عنصر هدف به صورت Z^3 افزایش می‌یابد. با این حال، سطح مقطع جذب فوتوالکتریک در لبه‌های جذب به شدت افزایش می‌یابد و به این ترتیب می‌توان با انتخاب پرتوهای ایکس تک انرژی با انرژی بیش‌تر و کم‌تر از انرژی نظیر لبه‌ی جذب و با استفاده از تصویرگیری کنتراست لبه‌ی K، رفتار نمونه را در مواجهه با پرتو تحلیل کرد و نوع و غلظت این عنصرها و نقشه‌ی اتمی آن‌ها را در نمونه مطالعه کرد. این روش



۲.۲ بهره‌ی فلورسانسی و سطح مقطع یونش

رابطه‌ی بین سطح مقطع تولید پرتو ایکس با بهره‌ی فلورسانسی و سطح مقطع یونش چنین است

$$\sigma_p^x(E_1) = \omega_K \sigma_K^I \quad (6)$$

که در آن σ_K^I سطح مقطع یونش لایه‌ی K است و ω به بهره‌ی فلورسانسی معروف است. بهره‌ی فلورسانسی برای لایه‌ی K را با ω_K و لایه‌ی L را همراه با زیر لایه‌هایش به صورت ω_{L_i} نشان می‌دهند. ω_s با رابطه‌ی تجربی زیر داده می‌شود، که در آن $s = K, L, M$ و a_i ضرایب‌های حاصل از به‌کارگیری روش کم‌ترین مربعات برای انطباق داده‌ها است [۳].

$$\left(\frac{\omega_s}{1 - \omega_s} \right)^{\frac{1}{F}} = \sum_{i=0}^3 a_i Z_i^i \quad (7)$$

اگر انرژی پرتو ایکس فرودی به انرژی نظیر لبه‌ی جذب نمونه نزدیک باشد، جذب پرتو ایکس به وسیله‌ی نمونه، منجر به کاهش شدید در شدت پرتو می‌شود و از این رو در فیلم آشکارساز این مناطق سفید و مناطقی که مورد برخورد پرتو واقع شده‌اند تیره خواهند شد [۴].

۳. مواد و روش‌ها

با تصحیح و تغییر کاربری محفظه‌ی برهم‌کنش موجود در آزمایشگاه، امکان پرتونگاری اشیاء کوچک باستانی فراهم شد [۵]. با توجه به مطالعه‌های انجام شده در زمینه‌ی پرتونگاری با پرتو ایکس تک انرژی دو شیوه‌ی متداول عبارت‌اند از تصویرگیری با پرتو ایکس انعکاسی و تصویرگیری با پرتو ایکس عبوری. با توجه به اهمیت پارامتر خودجذبی در شیوه‌ی عبوری، هدف مورد تابش باید کاملاً نازک باشد. تهیه‌ی هدف‌های نازک و خنک کردن آن کار دشواری است؛ از این رو، طراحی و ساخت محفظه‌ی برهم‌کنش براساس شیوه‌ی انعکاسی انجام شد. در شکل ۲ نمایی از چیدمان آزمایش پرتونگاری پرتو ایکس تک انرژی و تصویر یک نمونه‌ی باستانی و پرتونگاری آن نشان داده شده است [۶].

۱.۲ بهره‌ی تولید پرتو ایکس در هدف‌های نازک و ضخیم [۳]
در یک هدف نازک افت انرژی پرتابه و جذب پرتو ایکس قابل اغماض است. در حالی که در یک هدف ضخیم، یون فرودی کاملاً متوقف می‌شود و اصلاح‌هایی برای جذب پرتو ایکس مورد نیاز است. برای هدف‌های نازک، رابطه‌ی بین سطح مقطع تولید پرتو ایکس $\sigma_p^x(E_1)$ و تعداد فوتون‌های پرتو ایکس $I_p(E_1)$ در قله‌ی p برای انرژی یون فرودی E_1 این است

$$I_p(E_1) = (\epsilon/968E - 17) N_T x \sigma_p^x Q \Omega \epsilon / \sin(\theta_i) \quad (2)$$

که در آن N_T تعداد اتم‌های هدف در واحد حجم (cm^{-3})، x ضخامت هدف ($\mu\text{g cm}^{-2}$)، Q کل بار تابشی به هدف (μC)، Ω زاویه‌ی فضای آشکارساز، θ_i زاویه‌ی بین سطح و مسیر پرتو و ϵ بازده‌ی آشکارسازی کل است. معادله‌ی ۲ با در نظر گرفتن افت انرژی پرتابه و ضریب جذب پرتو ایکس توسط هدف چنین نوشته می‌شود

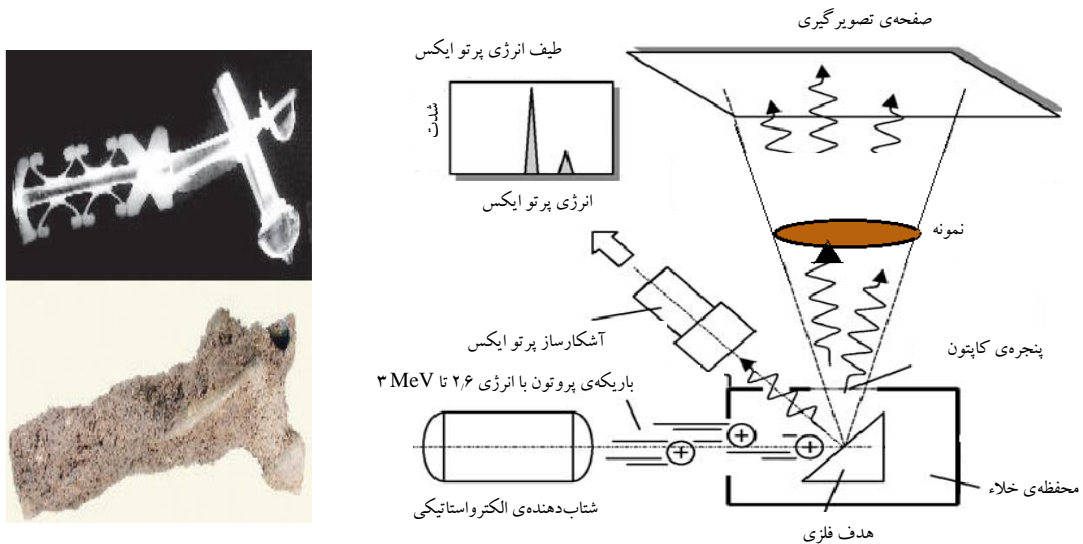
$$I_p(E_1 - \Delta E/2) = \epsilon/968 \times 10^{17} N_T x \sigma_p^x Q \Omega x \epsilon \exp[-0.05(\mu/\rho)t \sec(\theta_0)] / \sin(\theta_i) \quad (3)$$

که در آن، μ/ρ ضریب جذب جرمی هدف ($\text{cm}^{-2}\text{g}^{-1}$) برای پرتو ایکس با انرژی E_x (keV)، ΔE افت انرژی یون با انرژی اولیه‌ی E_1 (MeV) در هدف است. هنگامی که هدف ضخیم است، کاهش سرعت یون فرودی و جذب پرتو ایکس در هدف، باید مدنظر قرار گیرد و معادله‌ی دقیق‌تری مورد نیاز است. مرزباچر و لوئیس^(۱) عبارتی را برای شدت پرتو ایکس، $I_p(E_1)$ ، به عنوان تابعی از سطح مقطع تولید پرتو ایکس برای قله p ارائه دادند

$$I_p(E_1) \propto \Omega \epsilon \int_{E_0}^E \sigma_p^x(E_1) \frac{dE}{S(E)} \exp(-\mu x) \quad (4)$$

$$\mu x = \left(\frac{\mu}{\rho} \right) \int_{E_0}^E \frac{dE}{S(E)} \frac{\cos(\theta_i)}{\cos(\theta_0)} \quad (5)$$

در رابطه‌های بالا، $S(E)$ توان ایستاندگی هدف برای یون با انرژی E_1 برحسب $\text{MeV cm}^2 \text{g}^{-1}$ ، θ_i و θ_0 زاویه‌ی بین مسیر یون و پرتو ایکس با عمود بر سطح هدف هستند.



شکل ۲. ترتیب آزمایشی پرتونگاری پروتو ایکس تک انرژی (تصویر سمت راست) و تصویر به دست آمده از یک شیء باستانی (سمت چپ) [۶].

ج) درگاه نصب آشکارساز پروتو ایکس؛

با توجه مطالعه‌های انجام شده در آزمایش‌های مشابه و لزوم استفاده از آشکارساز پروتو ایکس برای ارزیابی باریکه‌ی یونی فرودی، تحت زاویه‌ی 90° نسبت به امتداد باریکه‌ی فرودی، درگاه مناسب برای نصب آشکارساز ایجاد شد.

د) درگاه خروج پروتو ایکس و محل قرارگیری نمونه؛

با در نظر گرفتن قطر باریکه‌ی فرودی در محل قرارگیری هدف و اندازه‌ی نمونه‌ی مورد مطالعه، محاسبه‌هایی برای بهینه کردن فاصله و قطر روزنه‌ی خروج باریکه از محفظه و هم‌چنین فاصله‌ی نمونه و فیلم از روزنه انجام شد. با تعیین قطر باریکه‌ی فرودی در حدود ۲ mm که با زاویه 45° به هدف برخورد می‌کند، قطر باریکه روی هدف حدود ۳ mm خواهد شد. با توجه به مطالعه‌های انجام شده در آزمایش‌های مشابه که فاصله‌ی هدف تا نمونه ۳۰ mm در نظر گرفته شده است و برای این که بتوان در این فاصله از نمونه‌هایی تا قطر ۲۲/۵ mm استفاده کرد، روزنه‌ای به قطر ۱۶ mm در فاصله‌ی ۲۰ mm از هدف در یکی از وجه‌های محفظه ایجاد شد. از این مکان تا فاصله‌ی ۳۰ mm از هدف، قطر روزنه به صورت مخروطی افزایش داده شد. موردهای ذکر شده، با استفاده از نرم‌افزار سالیدورک^(۲) طراحی و تغییرهای لازم بر روی بدنه‌ی اصلی محفظه‌ی برهم‌کنش اعمال شد. در شکل ۳ نقشه و تصویر سه بعدی محفظه‌ی برهم‌کنش و هم‌چنین نگه‌دارنده‌ی نمونه نشان داده شده است.

۱.۳ طراحی محفظه‌ی برهم‌کنش

در محفظه‌ی برهم‌کنش، باریکه‌ی پروتون فرودی به هدف فلزی برخورد کرده و پروتو ایکس حاصل به نمونه‌ی مورد مطالعه تابیده و با عبور از آن به فیلم پرتونگاری نصب شده در پشت نمونه، برخورد کرده و تصویر نهایی را ایجاد می‌کند (شکل ۲). طی این فرایند هدف فلزی بسیار داغ شده و می‌تواند خود نیز الکترون‌هایی با انرژی‌های مختلف گسیل کند که این کار باعث ایجاد خطا در تصویر نهایی شده و از دقت پرتونگاری می‌کاهد. برای حل این مشکل، با عبور آب از یک لوله‌ی مسی که به صفحه‌ی هدف جوش داده شده است هدف خنک می‌شود. هم‌چنین در طول آزمایش نوع و مقدار پروتو ایکس تابیده شده به نمونه با استفاده از آشکارساز پروتو ایکس کنترل می‌شود. با توجه به موردهای پیش‌گفته و با انجام تصحیح‌های زیر محفظه‌ی برهم‌کنش موجود اصلاح شد:

الف) درگاه‌های ورود و خروج باریکه؛

درگاه‌های ورود و خروج باریکه با توجه به استانداردهای تجهیزهای موجود در آزمایشگاه واندوگراف باز طراحی و تصحیح شدند.

ب) درگاه مربوط به نصب و جابه‌جایی سیستم نگه‌دارنده‌ی هدف؛ بنا بر اهمیت خنک‌سازی هدف و لزوم جابه‌جایی آن به صورت چرخشی و انتقالی، درگاه‌هایی برای نصب سیستم نگه‌دارنده‌ی هدف با حفظ موقعیت هدف نسبت به مرکز محفظه در هنگام چرخش، به صورت خارج از مرکز، طراحی و ایجاد شد.

چندین هدف روی آن فراهم شود. از ورقه‌های فلزی از جنس Zr ، Cu ، Fe ، Ag ، Mo ، Sn و Sb به عنوان هدف استفاده شد.

در شکل ۴ تصویری از محفظه‌ی برهم‌کنش به‌همراه آشکارساز پرتو ایکس، شیر مغناطیسی ایمنی خلاء و سیستم خنک‌سازی نصب شده بر روی خط باریکه‌ی 15° چپ آزمایشگاه واندوگراف نشان داده شده است.

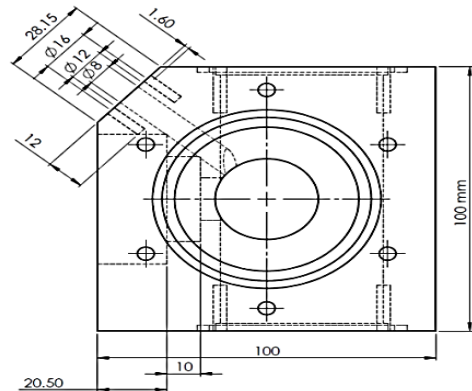
۴. یافته‌ها و بحث

با توجه به ترتیب آزمایشی پرتونگاری پرتو ایکس (شکل ۲)، و با در نظر گرفتن ملاحظه‌های مربوط به سطح مقطع برهم‌کنش پروتون و محدودیت‌های مربوط به شتاب‌دهنده، انرژی باریکه‌ی پروتون حدود 2.5 MeV و جریان باریکه 250 nA انتخاب شد. با در نظر گرفتن شدت یکسان پرتو فرودی، شرایط آزمایش برای پرتو دهی تمام نمونه‌ها یکسان انتخاب شد.

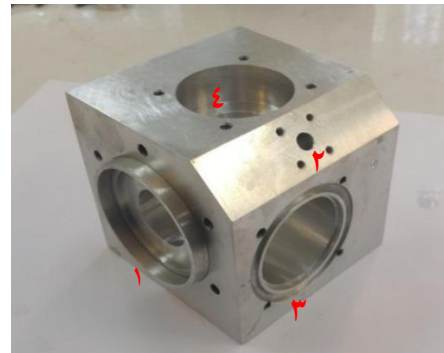
۱.۴ تعیین ضریب جذب نمونه‌ی مورد مطالعه

به عنوان نمونه ضریب جذب فلز Ti تعیین شد. برای این منظور، فلز Ti با ضخامت‌های 50 ، 250 ، 450 ، 650 ، 850 و $1050\ \mu\text{m}$ تحت تابش پرتو ایکس ناشی از هدف فلزی Sb قرار گرفت تا با تفاوت در میزان جذب پرتو ایکس و روشنایی تصویر ظاهر شده، ضریب جذب نمونه تعیین شود (شکل ۵).

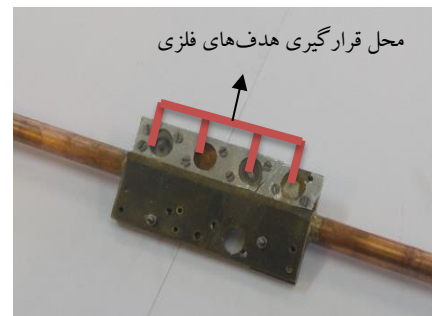
برای محاسبه‌ی ضریب جذب خطی از روی مقدارهای تیرگی مرحله‌های زیر به انجام رسید: با استفاده از برنامه‌ی ایمیج جی (۳)، که یک برنامه‌ی پردازش تصویر است و براساس نسبت دادن عدد به مقدار روشنایی و تیرگی فیلم، کار پردازش تصویر را انجام می‌دهد، ابتدا از روی فیلم‌های پرتونگاری [دندانپزشکی کدک] بیشینه مقدارهای تیرگی و روشنایی مشخص شد (به ترتیب ۱۱۱ و ۱۵۳). بیشینه مقدار تیرگی (معادل عبور بیشینه‌ی پرتو ایکس) و بیشینه مقدار روشنایی (معادل جذب بیشینه‌ی پرتو ایکس) به‌نجار شدند. هم‌چنین با استفاده از برنامه‌ی ایمیج جی مقدارهای میانگین روشنایی برای نواحی مختلف Ti با ضخامت‌های متفاوت 50 ، 250 ، 450 ، 650 ، 850 و $1050\ \mu\text{m}$ تعیین و نمودار تیرگی برحسب I/I_0 برای ضخامت‌های گوناگون ورقه‌ی Ti رسم شد (شکل ۶). از روی نمودار به دست آمده، معادله‌ی تیرگی استنباط شد. مقدارهای محاسبه شده برای تیرگی از روی این معادله در جدول ۱ درج شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

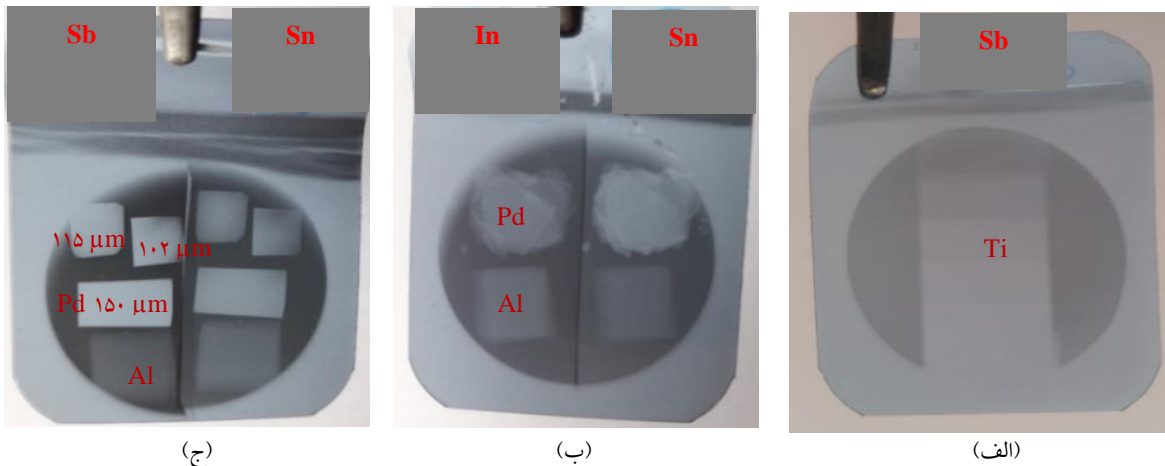
شکل ۳. الف) نقشه‌ی محفظه‌ی برهم‌کنش طراحی شده؛ ب) تصویری از بدنه‌ی اصلی محفظه‌ی برهم‌کنش؛ ج) سیستم نگه‌دارنده‌ی هدف. ۱) درگاه ورود و خروج باریکه؛ ۲) درگاه نصب آشکارساز پرتو ایکس؛ ۳) درگاه نصب نگه‌دارنده‌ی هدف؛ ۴) درگاه نصب نمونه و فیلم پرتونگاری.

۱.۱.۳ سیستم نگه‌دارنده‌ی هدف

همان‌طور که در شکل ۳ ج نشان داده شده است در طراحی سیستم نگه‌دارنده‌ی هدف، امکان نصب چندین هدف در داخل محفظه پیش‌بینی شده است. صفحه‌ی برنجی به علت برخورداری از رسانندگی گرمایی مناسب، انتخاب و طوری طراحی شد که امکان عبور آب از داخل آن برای خنک‌سازی هدف و هم‌چنین نصب



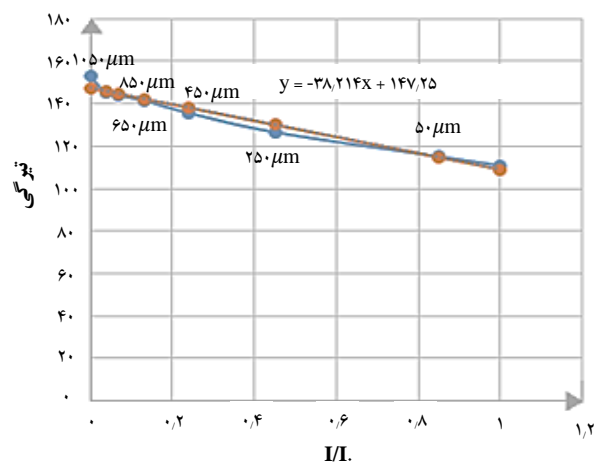
شکل ۴. محفظه‌ی برهم کنش به همراه آشکارساز پرتو ایکس و سیستم خنک‌سازی.



شکل ۵. الف) تصویر فیلم پرتونگاری پرتودیده در آزمایش ۱ با نمونه‌ی Ti؛ ب) تصویر فیلم پرتونگاری پرتودیده در قسمت اول آزمایش ۲ با نمونه‌های Pd و Al؛ ج) تصویر فیلم پرتونگاری پرتودیده در قسمت دوم آزمایش ۲ با نمونه‌های Al و Ag.

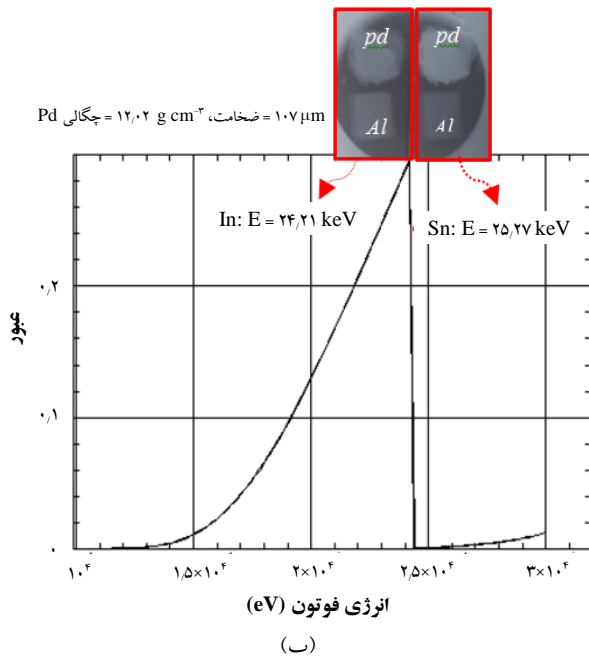
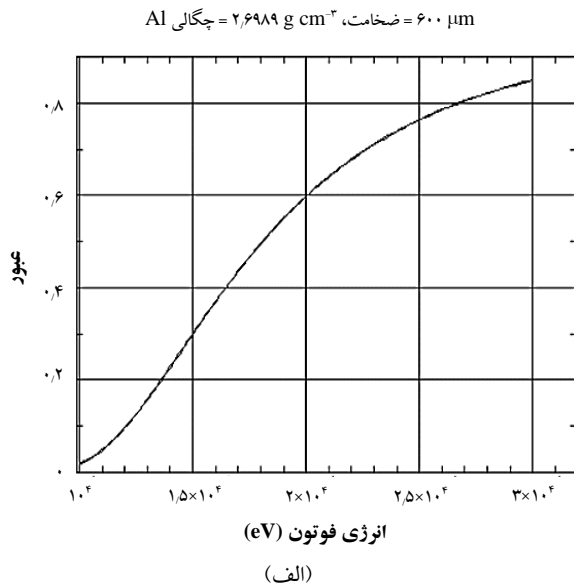
جدول ۱. میانگین مقدارهای روشنایی در مکان‌های مختلف از شکل ۵ الف

I/I_0	تیرگی به دست آمده از ایمپج جی	تیرگی به دست آمده از معادله	ضخامت Ti (μm)
۰	۱۵۳	۱۴۷	
۰٫۰۳۷	۱۴۵	۱۴۳	۱۰۵۰
۰٫۰۶۹	۱۴۴	۱۴۵	۸۵۰
۰٫۱۳	۱۴۱	۱۴۲	۶۵۰
۰٫۲۴	۱۳۶	۱۳۸	۴۵۰
۰٫۴۵	۱۲۷	۱۳۰	۲۵۰
۰٫۸۵	۱۱۴	۱۱۵	۵۰
۱	۱۱۱	۱۰۹	



شکل ۶. نمودار تیرگی برحسب I/I_0 برای ضخامت‌های گوناگون ورقه‌ی Ti.

پرتو ایکس در انرژی‌های مختلف از نمونه، با استفاده از مرجع [۷] تعیین و در شکل ۷ نشان داده شد. با توجه به شکل ۷، انتظار می‌رود برای نمونه‌ی Pd میزان عبور پرتو ایکس حاصل از In بیش از پرتو ایکس مشخصه‌ی Sn باشد. هم‌چنین با توجه به لبه‌ی جذب K عنصر Al انتظار می‌رود برای هر دو انرژی پرتو ایکس، جذب در نمونه‌ی Al کم باشد.



شکل ۷. رابطه‌ی بین عبور پرتو ایکس از نمونه‌های (الف) Al و (ب) Pd و انرژی فوتون.

از اندازه‌گیری مقدار $\bar{\mu}$ برابر با $0,00274 \mu\text{m}^{-1}$ تعیین شده است. از طرفی با استفاده از منبع‌های داده‌ی پورتال "مرکز برای اپتیک پرتو ایکس"^(۴) [۷] (CXRO) می‌توان ضریب جذب را محاسبه و مقدار آن را با مقدار تجربی به دست آمده مقایسه نمود. قابل ذکر این‌که در این برنامه طول تضعیف^(۵) محاسبه می‌شود که عکس این مقدار همان ضریب جذب است.

با استفاده از منبع داده‌های پورتال "مرکز برای اپتیک پرتو ایکس"، برای پرتو ایکس مشخصه‌ی آنتیموان ($26,3 \text{ keV}$) ضریب جذب $0,00315 \mu\text{m}^{-1}$ به دست آمد. خطای نسبی مقدار تجربی نسبت به مقدار محاسبه شده چنین به دست می‌آید

$$\left(1 - \frac{\bar{\mu} = 0,00274 \mu\text{m}^{-1}}{\mu = 0,00315 \mu\text{m}^{-1}}\right) \times 100 = 13\% \quad (۸)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود خطای نسبی اندازه‌گیری حدود ۱۳٪ است که می‌تواند مربوط به خطای اندازه‌گیری ضخامت نمونه و مرحله‌های ظهور و ثبوت فیلم پرتونگاری و هم‌چنین خطای اندازه‌گیری در استفاده از برنامه‌ی ایمیج جی باشد که در آن برای ناحیه‌های با روشنایی و تاریکی بیشینه مقدارهای میانگین در نظر گرفته می‌شود.

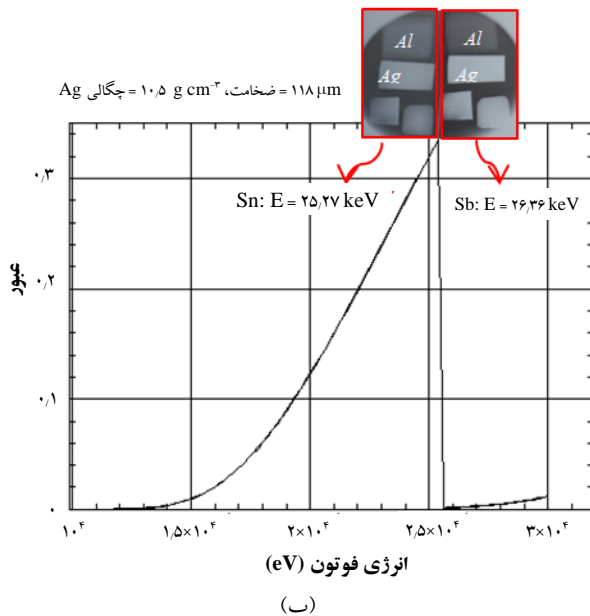
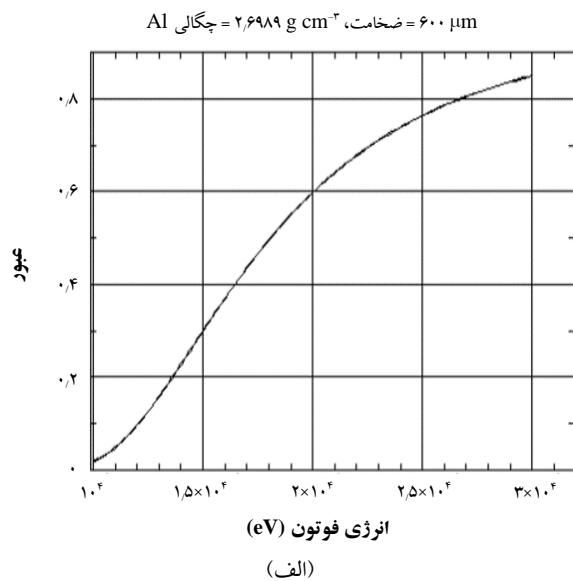
۲.۴ تصویرگیری از یک نمونه

هدف، تصویرگیری از یک نمونه با استفاده از پرتوهای ایکس تک انرژی با انرژی بیش‌تر و کم‌تر از لبه‌ی جذب نمونه بود که در شکل ۵ ب و ج نشان داده شده است. برای این منظور هدف‌های فلزی $\text{Sn}(E_{\text{ka}} = 25,27 \text{ keV})$ ، $\text{Sb}(E_{\text{ka}} = 26,36 \text{ keV})$ ، $\text{In}(E_{\text{ka}} = 24,21 \text{ keV})$ و نمونه‌های $\text{Pd}(E_{\text{k-edge}} = 24,36 \text{ keV})$ و $\text{Ag}(E_{\text{k-edge}} = 25,53 \text{ keV})$ انتخاب شدند. از فلز $\text{Al}(E_{\text{k-edge}} = 1,56 \text{ keV})$ که لبه‌ی جذب K آن در محدوده پرتوهای ایکس تک انرژی هدف انتخاب شده نیست، به عنوان نمونه‌ی شاهد استفاده شد.

(الف) ابتدا دو ورقه از جنس In و Sn که انرژی‌های پرتو ایکس آن‌ها نزدیک‌ترین مقدار به لبه‌ی جذب K عنصر Pd است به عنوان هدف برای نمونه‌ی Pd مورد مطالعه قرار گرفت. میزان عبور

**جدول ۲.** میانگین مقدار روشنایی مکان‌هایی از شکل ۵ ب

هدف	نمونه	میانگین روشنایی	مقدار بهنجار شده
In	زمینه	۸۸	۸۸
Sn	زمینه	۸۸	۸۸
In	Pd	۱۲۵	۱۲۴
Sn	Pd	۱۳۳	۱۳۳
In	Al	۱۱۰	۱۰۹
Sn	Al	۹۵	۹۵

**شکل ۸.** رابطه‌ی بین عبور پرتو ایکس از نمونه‌های (الف) آلومینیم و (ب) نقره و انرژی فوتون.

برای یکسان بودن شرایط ظهور و ثبوت فیلم پرتونگاری دندانپزشکی نیمی از آن با استفاده از ضخامت مناسبی از سرب پوشانده شده و در قسمت دیگر فیلم نمونه‌های Al و Pd نصب شده و تحت تابش پرتو ایکس گسیل شده از In قرار گرفتند. سپس نمونه‌های Al و Pd به نیمی دیگر فیلم که توسط سرب محافظت شده بود انتقال یافته و این بار سرب در محل پرتو دیده نصب شد و پرتو ایکس حاصل از Sn به نمونه تابانده شد. فیلم‌های پرتونگاری پس از انجام مرحله‌های ظهور و ثبوت [۸] اسکن و با استفاده از نرم‌افزار ایمیج جی رفتار Pd در برابر پرتوهای ایکس مشخصه‌ی Sn و In به صورت عددی بررسی شد. در این برنامه رنگ سیاه با عدد صفر و رنگ سفید با عدد ۲۵۶ مشخص می‌شود. بنابراین هر اندازه عدد بزرگ‌تر باشد نشان‌دهنده روشنایی بیشتر آن خواهد بود. داده‌های حاصل در جدول ۲ نشان داده شده است.

با بهنجار نمودن اطلاعات دو تصویر نشان داده شد که میانگین عددی کنتراست فیلم مرتبط با هدف Sn بیش‌تر از میانگین عددی کنتراست فیلم مربوط به هدف In است یعنی فیلم با هدف Sn سفیدتر بوده و این به معنای جذب بیشتر پرتو ایکس گسیل شده از Sn نسبت به پرتو ایکس حاصل از In در نمونه‌ی Pd است و این دستاورد قابل پیش‌بینی بود.

در این قسمت نیز مرحله‌های قسمت الف تکرار شد با این تفاوت که از نمونه‌های Ag و Al و هدف‌های Sn و Sb استفاده شد.

همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است با توجه به نمودار عبور پرتو ایکس برحسب انرژی برای Ag انتظار می‌رود که در موردی که پرتو ایکس مشخصه‌ی حاصل از Sn به نمونه تابیده می‌شود، مقدار زیادی از پرتو از نمونه عبور کند ولی وقتی که نمونه در معرض پرتو ایکس مشخصه‌ی حاصل از Sb است انتظار می‌رود مقدار عبور آن کمینه بوده و Ag قسمت اعظم آن را جذب کند. هم‌چنین با توجه به لایه K عنصر Al انتظار می‌رود برای هر دو انرژی پرتو ایکس، میزان عبور تقریباً یکسان باشد. با استفاده از برنامه‌ی ایمیج جی رفتار Ag در برابر پرتوهای ایکس حاصل از Sn و Sb به صورت عددی بررسی و در جدول ۳ نشان داده شد.



pd بر روی فیلم پرتونگاری به وسیله‌ی پرتوهای ایکس تک انرژی حاصل از Sn و In به صورت عددی بررسی شد. هنگامی که پرتو ایکس حاصل از In به نمونه تابیده می‌شود، چون انرژی پرتو ایکس تابشی کوچک‌تر از انرژی متناظر با لبه‌ی جذب K فلز Pd است، مقدار قابل توجهی از پرتو ایکس از نمونه عبور می‌کند. ولی وقتی که نمونه در معرض پرتو ایکس حاصل از Sn باشد، چون انرژی پرتو ایکس حاصل از Sn بیش از انرژی متناظر با لبه‌ی جذب K فلز Pd است، عبور حداقل مقدار خود را دارد. هم‌چنین ضخامت‌های مختلف Ag به عنوان نمونه‌ی مورد پرتودهی با استفاده از پرتو ایکس تولید شده در هدف‌های Sn و Sb مورد مطالعه قرار گرفت؛ در این مورد، تمام مقدارهای عددی به دست آمده برای هدف Sn کوچک‌تر از مقدارهای مربوط به هدف Sb است که این در میزان روشنایی کم‌تر فیلم پرتونگاری پرتو دیده در حضور هدف Sn قابل مشاهده است. به این ترتیب با راه‌اندازی تکنیک تجزیه‌ی عنصری توصیف شده، با استفاده از تصویرگیری کنتراست در لبه‌ی K، امکان بهبود کنتراست تصویر در آزمایشگاه واندوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای فراهم شد؛ این تکنیک می‌تواند به خصوص برای نمونه‌های مختلف میراث فرهنگی نظیر نمونه‌های نوشتاری، پارچه و سکه مورد استفاده قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

از ریاست محترم آزمایشگاه واندوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای به جهت فراهم نمودن امکان استفاده از تجهیزهای آزمایشگاه در انجام این پژوهش بسیار سپاسگزاریم.

پی‌نوشت‌ها

1. Merzbacher and Lewis
2. Solidworks
3. ImageJ
4. The Center for X-Ray Optics at Lawrence Berkeley National Laboratory
5. Attenuation Length

جدول ۳. میانگین مقدار روشنایی مکان‌هایی از شکل ۵ ج

هدف	نمونه	میانگین روشنایی	مقدارهای بهنجار شده
Sb	زمینه	۶۳	۶۳
Sn	زمینه	۶۶	۶۳
Sb	Ag (۱۵۳μm)	۱۴۳	۱۳۶
Sn	Ag (۱۵۳μm)	۶۳	۶۳
Sb	Ag (۱۱۵μm)	۱۵۷	۱۵۷
Sn	Ag (۱۱۵μm)	۱۲۱	۱۱۵
Sb	Ag (۱۰۲μm)	۱۶۵	۱۶۶
Sn	Ag (۱۰۲μm)	۱۲۵	۱۱۹
Sb	Al	۹۷	۹۷
Sn	Al	۱۰۷	۱۰۱

از مقایسه‌ی نتیجه‌های عددی به دست آمده در ضخامت‌های مختلف Ag (به عنوان نمونه‌ی مورد سنجش) با استفاده از پرتو ایکس حاصل از هدف‌های Sn و Sb مشاهده می‌شود که تمام مقدارهای عددی کنتراست به دست آمده برای هدف Sn کوچک‌تر از مقدارهای عددی کنتراست به دست آمده برای هدف Sb است و این نشان‌دهنده‌ی مقدار روشنایی کم‌تر فیلم پرتونگاری در معرض پرتو ایکس حاصل از هدف Sn قرار گرفته است. پس با استفاده از دستگاه وری آزمایش طراحی شده، امکان تمایز توزیع عنصرها حتی با عدد اتمی نزدیک، در نمونه‌های فلزی نیز مقدور است.

۵. نتیجه‌گیری

پرتونگاری تکنیکی برای تعیین جزئیات ساختاری نمونه است. تصویر ثبت شده در پرتونگاری متعارف نمونه‌ی فلزی، به علت وجود پرتو ایکس ناشی از تابش ترمزی الکترون حساسیت کم‌تری دارد و کنتراست لازم برای مشاهده‌ی جزئیات در تصویر، ایجاد نمی‌شود. برای بهبود این وضعیت، طراحی و راه‌اندازی پرتونگاری با استفاده از پرتوهای ایکس تک انرژی القایی شده به وسیله‌ی پروتون‌های پرانرژی در هدف مناسب بررسی شد. در این راستا، با تابش پرتو ایکس تک انرژی حاصل از هدف Sb بر فلز Ti با ضخامت‌های گوناگون و مشاهده‌ی تفاوت در مقدار جذب پرتو ایکس، تعیین تجربی ضریب جذب نمونه و مقایسه‌ی آن با مقدار کتابخانه‌ای انجام شد. در ادامه تصویر ایجاد شده از نمونه‌ی



مرجع ها

- [1] Diana Leyva Pernía, Ana E. Cabal Rodríguez, Simulation and evaluation of the absorption edge subtraction technique in energy-resolved X-ray radiography applied to the cultural heritage studies, (2011).
- [2] Lucile Beck, Recent trends in IBA for cultural heritage studies, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 332 (2014) 439-444.
- [3] R. Bird, J.S. Williams, Ion Beams for Materials Analysis, ACADEMIC PRESS AUSTRALIA, (1989).
- [4] D. Sokaras, Ch. Zarkadas, R. Fliegauf, B. Beckhoff, A.G. Karydas, Proton induced quasi-monochromatic x-ray beams for soft x-ray spectroscopy studies and selective x-ray fluorescence analysis, Review of scientific instruments, 83 (2012) 123102.
- [5] M. Laméhi-Rachti, P. Oliayi, J. Rahighi, F. Shokouhi, M. Fakhrai, Application of PIXRF in the analysis of archaeological tiles, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, 184 (2001) 430-436.
- [6] S. Iwatania, J. Kanekoa, J. Hasegaw, Imaging by using proton-induced quasi-monochromatic X-ray emission, Science and Technology of Advanced Materials., 5 (2004) 597-602.
- [7] The Center for X-Ray Optics, a multi-disciplined research group within Lawrence Berkeley National Laboratory's (LBNL) Materials Sciences Division (MSD).
- [8] Stuart C. White, Michael J. Pharoah, Oral Radiology, Principles and Interpretation., Seventh edition, 2013.