



Original Paper

A Review of the Applications of Synchrotron Radiation in Archaeological Sciences



Masoud Abdollahi¹, Saeid Asgharizadeh^{2*}, Mehdi Razani³

¹ MA in Photonics-Electronics, Department of Photonics-Electronics, University of Tabriz, IRAN

² Assistant Professor, Department of Photonics-Electronics, University of Tabriz, IRAN

² Assistant Professor, Faculty of Applied Arts, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, IRAN

Received: 28/12/2019

Accepted: 04/07/2020

Abstract

The scientific research regarding investigation, characterization and protection of the archeological specimens is manifested through a notable participation of multidisciplinary subjects and experts, scientists and archeometrists. One of the main principals which are considered by archaeometrists in the study of the precious specimens is the utilizing nondestructive methods. As an example, in synchrotrons, parameters such as the high photon flux, the small source size and the low divergence attained make it a very efficient source for a range of advanced spectroscopy and imaging techniques, adapted to the heterogeneity and great complexity of the materials under study. The use of synchrotron radiation techniques to study cultural heritage and archaeological materials has undergone a steep increase over the past 10–15 years. The techniques mainly have been focused on are: X-ray fluorescence (XRF), X-ray absorption (XAS), X-ray tomography microscopy (XTM), X-ray diffraction (XRD), and Fourier transform-infrared spectroscopy (FT-IR) analyses. Among these, XRF spectroscopy is based on the detection of characteristic X-rays emitted. Impinging X-rays on an atom creates inner electron vacancy in it, where the excited atom returns to its ground state, the fluorescing photon is emitted. The energy of this photon is the difference in energy between the vacancy and the electronic state of the electron filling the vacancy. Analysis of the XRF spectra includes identification of the elements from the fluorescence spectra observed. On the other hand, XAS (or X-ray Absorption Spectroscopy) relies on the absorption of X-rays by atoms of the materials in the vicinity of the absorption edge of one of its constituting elements. This technique gives chemical information on the coordination sphere of the absorber. In X-ray tomography, a set of radiographs are taken and used to reconstruct a 3D morphology of the studied object. With two procedure, the obtained 3D morphology corresponds to what is measured in the radiography: X-ray absorption contrast where the image formed on the detector is described assuming an straight trajectory for each photon when the density of the transversed matter modulates its intensity on the detector; where the main effect of the matter is refraction and the absorption is negligible, X-ray phase contrast plays role while the photon direction changes as it travels inside the material. Diffraction takes place whenever the wavelength of the interacting wave is comparable with a length scale of a periodic structure. Therefore, the analysis of X-ray diffraction patterns gives information about the atomic and molecular structure of matter. For amorphous systems, however, the absence of an ordered structure limits outcomes of the XRD technique. Nevertheless, it gives significant information on average interatomic or intermolecular distances. Infrared spectroscopy is based on a transition in the vibrational state of the molecules when the

* Corresponding author: asgharizadeh@tabrizu.ac.ir

incident photon is absorbed. The energy of this photon is a characteristic of the nature of each vibration, involving a single bond or chemical group in the molecule. In this research, how synchrotron radiation, identified with super brilliant and parallel micro x-rays, can be applied to characterize archeological specimens is presented, and then, some results by which the advantages of using the synchrotron radiation technique over the prior ones can be stressed, noticeably, will be reasoned.

Keywords: X-ray, XRD, Synchrotron, Archaeometry



مروری بر کاربردهای تابش سینکروترون در علوم باستان‌شناختی

مسعود عبداللہی^۱، سعید اصغری‌زاده^{۲*}، مهدی رازانی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، رشته فوتونیک گرایش الکترونیک، دانشگاه تبریز، ایران

۲. استادیار، عضو هیئت علمی دانشکده فیزیک، گروه فوتونیک و فناوری پلاسما، دانشگاه تبریز، ایران

۳. استادیار، عضو هیئت علمی دانشکده هنرهای کاربردی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۰۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۰۷

چکیده

تحقیقات علمی باهدف بررسی، شناسایی و حفاظت از یافته‌های باستان‌شناسی و هنری، بر اساس رویکردی قابل‌تأمل از اشتراک رشته‌های علمی متنوع و با همکاری متخصصان، دانشمندان و باستان‌شناسان در زمینه‌های گوناگون، نمود پیدا می‌کند. در این بستر، انتقال دانش بین گروه‌های تحقیقاتی مختلف، به‌واسطه میزان قابل‌توجهی از تکنیک‌های متداول و پیشرفته علمی، موردتوجه باستان‌شناسان است. یکی از الزامات اصلی که باستان‌شناسان در مطالعات باستانی نمونه‌های باارزش، در نظر می‌گیرند استفاده از تکنیک‌های غیر مخرب است. با درک این مهم، روش‌های مبتنی بر تابش سینکروترون می‌توانند نقش بسزایی را در این زمینه ایفا کنند. در مقاله حاضر، به چگونگی استفاده از تابش سینکروترون که از میکروپرتوهای ایکس بسیار درخشان و موازی شده تشکیل شده است، در تحقیقات مربوط به شناسایی اشیای باستانی و هنری خواهیم پرداخت و برخی نتایج به دست آمده که در آن‌ها مزیت استفاده از تکنیک تابش سینکروترون به‌طور متمایزی نسبت به سایر روش‌های پیشین مورد تأکید است، مورد استناد قرار خواهد گرفت.

واژگان کلیدی: سینکروترون، پرتوایکس، باستان‌شناسی، پراش پرتوایکس، پراکندگی^۱ پرتوایکس

* مسئول مکاتبات: بریز، بلوار ۲۹ بهمن، دانشگاه تبریز دانشکده فیزیک، کد پستی: ۵۱۶۶۱۶۴۷۱

پست الکترونیکی: asgharizadeh@tabrizu.ac.ir

© حق نشر متعلق به نویسنده(گان) است و نویسنده تحت مجوز Creative Commons Attribution License به مجله اجازه می‌دهد مقاله چاپ شده را با دیگران به اشتراک بگذارد منوط بر اینکه حقوق مؤلف اثر حفظ و به انتشار اولیه مقاله در این مجله اشاره شود.

۱. مقدمه

تابش سینکروترونی (Synchrotron radiation) نخستین بار در آزمایشگاه پژوهشی جنرال الکتریک در شنکتادی (Schenectady) نیویورک، مشاهده شد. ذرات باردار با اعمال میدان مغناطیسی، وادار به حرکت در مسیر دایره‌ای می‌شوند تا بارها و بارها از حفره شتاب‌دهنده عبور کنند و انرژی‌شان در هر گذر افزایش یابد. در سینکروترون، هم میدان الکتریکی و هم میدان مغناطیسی متناسب با جرم نسبیتی ذره، تغییر می‌کنند. امواج نوری سینکروترون، امواج الکترومغناطیسی منتشرشده از الکترونی است که با سرعت نزدیک به سرعت نور، در حال حرکت است. این نور می‌تواند تا یک میلیون بار روشن‌تر از نور خورشید باشد [1]. نکته قابل تأمل در تابش سینکروترونی، تولید پالس‌های قوی از پرتوایکس، با طول موج و شدتی است که اجازه می‌دهد مطالعات دقیق از اشیاء در اندازه‌های مختلف از سلول‌های انسانی، ویروس‌ها و اتم‌ها گرفته تا نمونه‌های بزرگ‌تر باستان‌شناسی انجام گیرد؛ به‌طوری‌که با روش‌های دیگر مطالعات، با این دقت قابل انجام نیست. تابش سینکروترون در باستان‌شناسی، شیمی، زمین‌شناسی، علم مواد، پزشکی و فیزیک کاربردهای فراوانی دارد. در مراکز سینکروترون، هر خط نوری برای کاربرد خاصی طراحی می‌شود. سینکروترون‌ها، افزاره‌های به نسبت، گرانی هستند که اغلب توسط همکاری‌های بین‌المللی ساخته می‌شوند. این نوع از همکاری‌ها در پروژه‌های مربوط به ساخت و بهره‌برداری سینکروترون‌ها از مزایای مهم آن به حساب می‌آیند [1].

در شکل ۱، بعد از تولید و تقویت تابش سینکروترونی در مراحل یک تا چهار، در مرحله پنج، علاوه بر تقویت مجدد سینکروترون، پرتوهای ایکس تولید شده، در خطوط نوری مختلف، برای مقاصد گوناگون مورد استفاده قرار می‌گیرد. کاربران سینکروترون، با رعایت تمامی مراتب حفاظت در برابر پرتوهای پرنرژي تولیدشده، قادر به انجام آزمایش بر روی نمونه‌های خود خواهند بود.

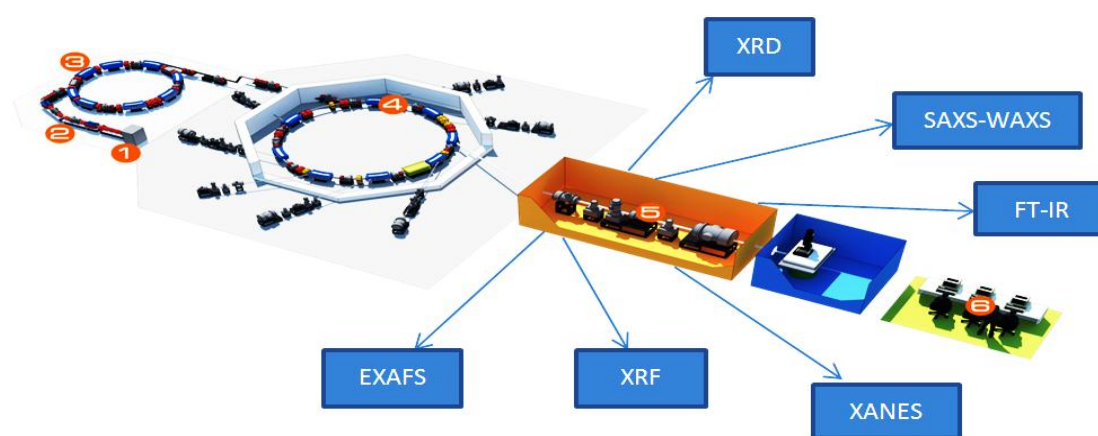
در مرحله یک، تعداد زیادی از الکترون‌ها توسط تفنگ الکترونی و با سازوکار گرمایش الکتریکی کاتد، تولید و با اعمال ولتاژ بالای مثبت به آن‌ها به‌طرف

شتاب‌دهنده خطی سوق داده می‌شوند. در مرحله دو، الکترون‌ها به چندین گروه تقسیم و دسته‌بندی می‌شوند و سپس انرژی آن‌ها تا حدود ۴۰ MeV می‌رسد و وارد تقویت‌کننده می‌شود. مرحله سه، شامل تقویت و افزایش انرژی الکترون است که در آن الکترون‌ها با حرکت در مسیرهای دایروی و در طی کسری از ثانیه انرژی ۱ GeV را به دست می‌آورند. در این حالت الکترون‌ها با سرعتی نزدیک به سرعت نور، در حال حرکت خواهند بود. حلقه ذخیره، در مرحله چهار، انرژی الکترون را مجدداً افزایش می‌دهد تا آن را حدوداً به ۱/۲ GeV برساند. این حلقه، از انواع مختلف آهنرباها از جمله آهنرباهای دوقطبی، چهار قطبی و شش قطبی تشکیل شده‌است که برای راندن الکترون‌های پرنرژي و حرکت دادن آن‌ها درون لوله خلاء، استفاده می‌شود. در مرحله پنج، سیستم خط نوری متشکل از خلاء، آینه‌های موازی کننده، تک‌فام کننده، آینه‌های متمرکز کننده، شکاف و سایر اجزای نوری قرار دارد که پرتوهای ایکس را جهت استفاده در خطوط نوری گوناگون و برای مقاصد مختلف علمی، در اختیار استفاده‌کنندگان قرار می‌دهد.

کاربرد تابش سینکروترون در علم باستان‌شناسی و میراث‌فرهنگی که با همکاری و مشورت باستان‌شناسان، فیزیک‌دانان و شیمی‌دانان انجام می‌پذیرد، پنجره‌ای جدید از علم را به روی جامعه علمی گشوده‌است. دلیل ظهور موفقیت‌آمیز تکنیک سینکروترون در باستان‌شناسی، قدرتمندی این تکنیک در مطالعه بر نمونه‌های ارزشمند باستان‌شناسی است که به‌صورت غیر تخریبی انجام می‌شود [3]. سؤال‌های اصلی باستان‌شناسان در مورد یک شیء قدیمی، می‌تواند شامل موارد زیر باشد:

(۱) از چه ماده‌ای ساخته شده‌است؟ (۲) قدمت آن چقدر است؟ (۳) کجا ساخته شده‌است؟ (۴) چگونه تخریب شده‌است؟ (۵) مکانیسم تخریب آن چیست؟

برای پاسخ دادن به این سؤال‌ها، در اختیار داشتن دانش جامعی که شامل علم به ماهیت مواد اولیه آثار باستانی و روش‌های تولید آن مواد، باشد، ضروری به نظر می‌رسد. در سینکروترون، آزمایش‌ها بر اساس میکرو پرتوهای موازی شده و درخشان پرتوایکس، به‌منظور



شکل ۱: طرح‌واره تولید امواج سینکروترون و استخراج اطلاعات از آن [2]
Fig: 1: Synchrotron wave generation and data extraction [2]

تشدید شده ساختار ریز (EXAFS Extended X-ray absorption fine structure) باشد.

۳. اطلاعات در مورد حضور و ماهیت فازهای بلوری با استفاده از پراش اشعه ایکس (XRD [X-ray diffraction]): اغلب، فوتون‌های پرتوایکس انرژی‌ای بین ۰/۵ تا ۳۰ کیلو الکترون‌ولت، دارند. پراش پودری پرتوایکس (XRPD [X-ray powder diffraction]) یکی از متداول‌ترین روش‌های استفاده از پراش پرتوایکس است.

۴. همچنین اشیاء حجمی، ممکن است برای به دست‌آوردن تصاویر رادیوگرافی یا توپوگرافی باکیفیت بالا، در معرض تابش پرتوهای سینکروترون بسیار پرانرژی، قرار گیرند تا ساختار داخلی آنان آشکارسازی شود.

۲. تاریخچه سینکروترون

در سال ۱۸۶۱ م، ماکسول، معادله‌ای به معادلات شناخته‌شده حاکم بر پدیده‌های الکتریکی و مغناطیسی یعنی قانون گاوس، قانون آمپر و قانون فارادی اضافه کرد که توصیف پدیده‌های الکتریکی و مغناطیسی را در مجموعه معادلاتی، معروف به معادلات ماکسول، وحدت بخشید و سبب پیشرفت‌های چشمگیر در جهان پر تاب‌وتاب فیزیک شد. جمله‌ای که ماکسول ایجاد کرد به قانون آمپر اضافه شد و به جریان جابه‌جایی، معروف است [4].

ایجاد داده‌های پراش، اسپکتروسکوپی و تصویری با قدرت تفکیک منحصربه‌فرد مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مطالعات باستان‌شناسی اغلب از روش‌های زیر و خطوط نوری متناظر استفاده می‌شود [3]:

۱. میکرو آنالیز عنصری تا حد پایین از تراز زیر ppm با استفاده از تجزیه و تحلیل فلورسانس پرتوایکس (μ -XRF [Micro X-ray fluorescence]): این روش با تکیه بر اصولی مشابه با فلورسانس پرتوایکس (XRF [X-ray fluorescence])، برای تجزیه و تحلیل عنصری به کار می‌رود، با این تفاوت که نسبت به XRF از قدرت تفکیک بالایی برخوردار است، زیرا، بزرگی پرتو ناشی از این روش در حد میکرومتر است تا بتواند تمرکز بیشتری روی نمونه داشته باشد و در نتیجه، اطلاعات جزئی‌تر و دقیق‌تری را به دست بدهد. عبارت میکرو در هریک از این روش‌ها شامل مفهوم بالا است. XRF و μ -XRF، هر دو، در علوم باستان‌شناسی کاربرد دارند.

۲. ردیابی محلی ترکیب شیمیایی اجزای یک شیء باستانی با استفاده از طیف‌سنجی جذب اشعه ایکس (XAS [X-ray absorption spectroscopy]): این خط نوری می‌تواند شامل جذب ساختار ریز پرتوایکس (XAFS [X-ray absorption fine structure])، میکرو جذب ساختار ریز پرتوایکس (μ -XAFS)، جذب پرتوایکس در نزدیکی ساختار لبه (XANES [X-ray absorption near edge structure]) و جذب پرتوایکس

خاموش کنیم، زیرا در لوله آن، جرقه‌ای مشاهده کرده بود. خلأ داخل لوله هنوز پابرجا بود و من و لانگموئر به انتهای دیوار رفتیم تا ببینیم چه رخ می‌دهد. نخست فکر کردیم که آنچه می‌دیدیم، چرنکوف (Cherenkov radiation) است اما زود مشخص شد آنچه می‌بینیم تابشی بود که ایواننکو (Ivanenko) و پومرانچوک (Pomeranchuk) پیش‌بینی کرده بودند. نام تابش سینکروترون از همین‌جا گرفته شده است [3]. بعدها با استفاده از این موضوع تلاش‌های چشم‌گیری انجام گرفت تا منابع سینکروترون به وجود آید. در دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ م، شتاب‌دهنده‌های ذرات، در ابتدا برای تحقیق در مورد فیزیک هسته‌ای تولید شدند تا امکان دسترسی دائمی به محققانی که مایل به کار با پرتو سینکروترون هستند، فراهم شود. این منبع سینکروترون، در آلمان طراحی شد. بعدها و با پیشرفت سریع علم، نسل‌های دوم و سوم سینکروترون با کاربردهایی متفاوت‌تر تولید شدند. این پیشرفت تا سال ۱۹۹۶ م. ادامه دار بود. نسل چهارم سینکروترون که بسیار مجهزتر و ایدئال‌تر از نسل‌های قبلی است، هم‌اکنون در کشورهایی همچون برزیل، آمریکا، انگلستان و... در حال راه‌اندازی است [5]. همچنین طرح سزامی (مرکز تابش سینکروترون برای تحقیقات و علوم کاربردی در خاورمیانه) یکی از سینکروترون‌های مجهز است که کشور ایران نیز در ساخت آن مشارکت داشته است. این منبع سینکروترون در شمال غرب کشور اردن قرار دارد. تعدادی از مهم‌ترین مراکز سینکروترون جهان در جدول ۱ آورده شده است.

۳. فیزیک سینکروترون

شتاب دادن ذرات باردار، باعث تابش الکترومغناطیسی آنان می‌شود. عبارت تابش سینکروترونی، اغلب، زمانی استفاده می‌شود که شتاب ذره به‌جای تغییر در سرعتش، از تغییر جهت آن ناشی شود. این در حالی است که مورد مخالف این موضوع که از کاستن سرعت ذره ناشی می‌شود، تابش ترمزی نامیده می‌شود. تابش سنکروترون توسط چشمه‌های خیلی بزرگ ساطع می‌شود، مانند میدان‌های الکترومغناطیسی در اطراف سیاه‌چاله، با این حال، در این

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (۱)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (۲)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (۳)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (۴)$$

در معادلات بالا \mathbf{E} و \mathbf{B} ، به ترتیب، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی هستند. ρ چگالی بار الکتریکی، ϵ_0 گذردهی الکتریکی خلأ و μ_0 ضریب تراوایی مغناطیسی است. همچنین \mathbf{J} ، چگالی جریان رسانشی، است. معادله هارم، با اضافه کردن جمله $\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$ تکمیل شد و نتایج حیرت‌انگیزی را به شرح زیر، برای علم فیزیک به ارمغان آورد:

۱) میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی می‌توانند به‌طور مستقل و دور از چشمه‌های میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی به‌صورت موج انتشار یابند، ۲) تابش گرمایی و نور، خود از همین نوع امواج هستند. ۳) این امواج هنگامی به وجود می‌آیند که بار الکتریکی شتاب بگیرد. در این میان، مورد سوم، مستقیماً به تابش سینکروترون مربوط می‌شود. با کشف الکترون و هسته اتم‌ها، دانشگران در جست‌وجوی راه‌های شناختن این ذرات جدید، به فکر شتاب دادن و برخورد دادن آن‌ها با یکدیگر و یا باهدف‌های شناخته‌شده، افتادند. این کار ابتدا با عبور دادن ذرات باردار از اختلاف پتانسیل الکتریکی ثابت، انجام شد. اما مشخص شد که با این روش، انرژی ذرات را نمی‌توان به بیش از سه میلیون الکترون‌ولت، رساند. در تلاش برای افزایش انرژی نهایی ذرات باردار، شتابگرهای دایره‌ای نخست به‌صورت سینکروترون، سپس به صورت سنکروسینکروترون، و در نهایت سینکروترون به بار آمدند. فرانک الدر (Frank Elder)، فرانکاتول گوریچ (Robert Anatole Gurewitsch)، رابرت لانگموئر (Herb Pollock) این موضوع را در ۱۹۴۷ م، اعلام کردند. پولاک ماجرا را چنین تعریف می‌کند: «در ۲۴ آوریل، لانگموئر (Langmuir) و من با دستگاه کار می‌کردیم و از تکنیسین خواستیم که با یک آشکارساز، فضای اطراف محافظ بتنی را مورد بازرسی قرار دهد. او بی‌درنگ علامت داد که سینکروترون را

در روابط بالا $V(t)$ و $A(t)$ به ترتیب پتانسیل نرده‌ای و برداری هستند. r فاصله ذره تا ناظر، $n = \frac{r}{r_0}$ بردار واحد و $\beta = \frac{v}{c}$ سرعت نرمالیزه شده ذره بردار است. تشریح کامل این پتانسیل‌ها بسیار طولانی و فراتر از محدوده این مقاله است. برای مطالعات بیشتر به مرجع [۶] مراجعه شود. در عوض، در اینجا تنها خواص مهم آهنربای خم (BM) و دستگاه الحاقی (ID) تابش (شکل ۲) را توضیح داده می‌شود. در اغلب مراکز سینکروترون نسل دوم، الکترون‌ها به عنوان ذرات باردار استفاده می‌شوند. میدان مغناطیسی ثابت از یک آهنربای خم، الکترون را در یک مسیر دایره‌ای محصور می‌کند. با توجه به تبدیلات لورنتس، تابش آن در یک زاویه باز کوچک منتشر می‌شود:

$$\Theta \approx \sin \Theta = \frac{1}{\gamma} \quad (7)$$

با برگ خرید لورنتس:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{e}{m_e c^2} \quad (8)$$

در رابطه بالا m و e به ترتیب بار الکتریکی و جرم الکترون هستند و c نیز سرعت نور است. آهنرباهای خم کننده مسیر، طیف پهنی را که حول فرکانس مشخصه، گسترش یافته و متناسب با میدان مغناطیسی و مجذور انرژی الکترون است، منتشر می‌کنند.

قدرت تابش (P)، به مجذور انرژی الکترون (E) و

زمینه ما تنها پرتو تولید شده در تأسیسات سینکروترون را جدول ۱: نمونه‌ای از مهم‌ترین مراکز سینکروترون دنیا (این جدول اطلاعات عمومی نویسندگان از مراکز سینکروترون است)

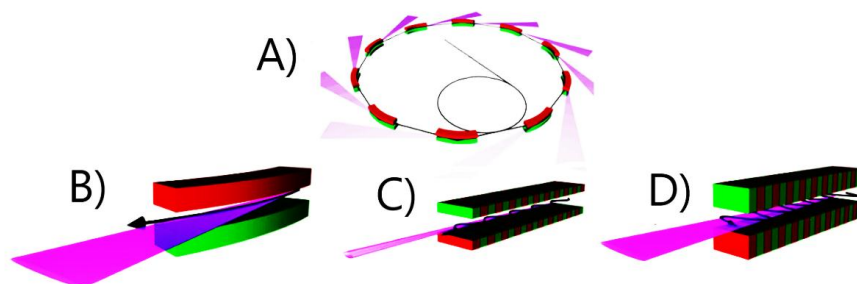
Table 1: Some of the important synchrotron radiation facilities in the world

1	مرکز سینکروترون آلبا، اسپانیا ALBA synchrotron facility, Spain
2	مرکز سینکروترون ساسکاچوان، کانادا Canadian light source facility, Canada
3	مرکز سینکروترون اروپا، فرانسه European synchrotron radiation facility, France
4	مرکز سینکروترون الترا، ایتالیا Elettra synchrotron center, Italy
5	مرکز سینکروترون پترا، آلمان PETRA synchrotron center, Germany
6	مرکز سینکروترون دایاموند، انگلستان Diamond synchrotron center, England
7	مرکز سینکروترون استرالیا، استرالیا Australian Synchrotron center, Australia

مورد بررسی قرار می‌دهیم. خواص ویژه تابش سینکروترون (طول موج در حد آنگستروم، قدرت تفکیک بالا و...) ناشی از تبدیلات لورنتس است که در آن ناظر، در چارچوب آزمایشگاه، تابش‌های ساطع شده توسط یک ذره را به صورت نسبی تحلیل می‌کند. خواص کمی تابش، توسط پتانسیل لینار-ویشرت توصیف شده است:

$$V(t) = \frac{e}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r(t)(1-n(t)\cdot\beta(t))} \right) \quad (5)$$

$$A(t) = \frac{\mu_0 e}{4\pi} \left(\frac{\beta(t)c}{r(t)(1-n(t)\cdot\beta(t))} \right) \quad (6)$$



شکل ۲: A: مجموعه‌ای از الکترون‌هایی که در یک شتاب‌دهنده خطی و (در بیشتر موارد) در یک سینکروترون تقویت کننده، شتاب می‌گیرند. از آهنربای خم کننده مسیر برای هدایت الکترون‌ها و ایجاد تابش سینکروترون استفاده می‌شود. B: آهنربای خم کننده مسیر الکترونی C: نوسان‌ساز (undulators) ($K < 1$) D: مغناطیس لرزاننده (wigglers) ($K > 10$) که در آن K پارامتر انحراف تعریف شده در معادله (6) است [6].

Fig. 2: a) Set of accelerated electrons through a linear accelerator and (in most of the cases) amplifying synchrotron. Bending magnets are used to direct electrons and generate synchrotron radiation, b) magnet to bend the electron trajectory, c) undulator ($K < 1$), d) wigglers ($K > 10$), where K is defined as deviation parameter explained in equation 6 [6].

میدان مغناطیسی (B) از آهنربا بستگی دارد:

$$p \propto E^2 B^2 \gamma I \quad (9)$$

γ طول مسیر الکترون است که در طی آن تابش، به ناظر می‌رسد و به‌طور معمول در محدوده یک تا چند میلی‌متر است. I جریان حلقه ذخیره‌سازی است. به شرطی که ناظر در سطحی از مدار الکترون باشد، نور ساطع‌شده توسط یک الکترون در قوس دایره‌ای به‌صورت خطی قطبی شده است. زمانی که نقطه مشاهده، بیرون از حلقه ذخیره‌سازی باشد، گردش الکترون در یک مدار بیضوی پیش‌بینی می‌شود و تابش آن به‌صورت بیضوی قطبیده خواهد شد. یک دستگاه الحاقی، چیدمانی دوره‌ای از آهنرباها با میدان‌های مخالف یکدیگر است که با طول موج نوسان مغناطیسی λ_u توصیف می‌شود. آن‌ها با ثابت K مشخص می‌شوند، که آن نیز با زاویه انحراف مربوط به ساختار مغناطیسی و واگرایی مخروط سینکروترونی ($\frac{1}{\gamma}$) به صورت زیر تعریف می‌شود [7].

$$K = \frac{eB\lambda_u}{2\pi m_e c} \quad (10)$$

دستگاه‌های الحاقی، به‌عنوان مغناطیس لرزاننده ($K > 10$) و نوسان‌ساز ($K < 1$) طبقه‌بندی می‌شوند (شکل ۲). میدان مغناطیسی نوسان‌سازها، باعث انحراف ضعیفی در مسیر الکترون می‌شود، بنابراین مقدار k در حدود یک یا کمتر از یک است. این امر، منجر به بروز اثرات تداخلی در بین تابش‌های ساطع‌شده از قطب‌های مختلف می‌شود. تداخل‌های سازنده وقتی تشکیل می‌شوند که جبهه‌های موج ناشی از الکترون‌ها در یک قطب، به‌اندازه یک طول موج از خود ذره، در هنگامی که به قطب بعدی می‌رسد، پیشی می‌گیرند. به طور تقریبی، سرعت الکترون با سرعت نور برابر است. به علت انقباض لورنتزی، ساختارهای مغناطیسی با اندازه‌هایی در حدود سانتی‌متر، پرتوهای X از خود ساطع می‌کنند. طول موج ایجادشده از یک نوسان‌ساز به‌صورت زیر با زاویه مشاهده θ بیان می‌شود [8]:

$$\lambda_r(\theta) \approx \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} + (\gamma\theta)^2 \right) \quad (11)$$

توزیع طیفی در حول طول موج بنیادی و هماهنگ‌ها، با افزایش تعداد تناوب‌ها، N، تیزتر می‌شود.

به دلیل میدان‌های مغناطیسی بالای وابسته به

مغناطیس لرزاننده، مسیر الکترون، انحراف زیادی پیدا می‌کند. در حقیقت مقدار K آن‌ها بالا است. با توجه به اینکه انحراف زیاد است، تنها یک تداخل ضعیف بین تابش‌های ساطع‌شده از قطب‌های آهنرباهای مختلف وجود دارد. بنابراین طیف و توان تابشی آن‌ها شبیه به آهنرباهای خم است. درخشندگی یکی از خواص مهم منابع سینکروترون است؛ که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$(12) \quad \frac{\text{فوتون}}{\text{ثانیه}} = \frac{\text{عرض باریکه (0.1\% مساحت چشمه)}}{\left(\frac{\text{میلی رادیان}}{\text{میلی رادیان}} \right)^2} \times \text{درخشندگی}$$

که در اینجا میلی رادیان ($mrad$)، واحد زاویه سه‌بعدی است. درخشندگی یک معیار خوب برای تعیین مناسب بودن تابش ایجادشده برای آزمایش‌های عادی سینکروترون است. در خطوط نوری سینکروترون نسل سوم از نوسان‌سازها استفاده‌شده است زیرا درخشندگی بالایی دارند. باین حال، گاهی برای برخی از کاربردها از مغناطیس لرزاننده استفاده می‌شود. در اغلب منابع سینکروترون، الکترون‌ها از طریق شتاب‌دهنده خطی و تقویت‌کننده سینکروترون، قبل از رسیدن به حلقه ذخیره‌سازی، شتاب‌دار شده‌اند. به دلیل برخورد با مولکول‌های گازی و رویدادهای دیگر، جریان حلقه به‌طور پیوسته کاهش می‌یابد و نیازمند بازبایی مجدد روزانه در مدت‌زمان‌های کوتاه است. تغییرات در جریان حلقه، منجر به کاهش پایداری پرتو خواهد شد. به همین دلیل است که در سینکروترون‌های پیشرفته الکترون‌ها در مدت‌زمان کوتاه به حلقه تحویل داده می‌شوند [8].

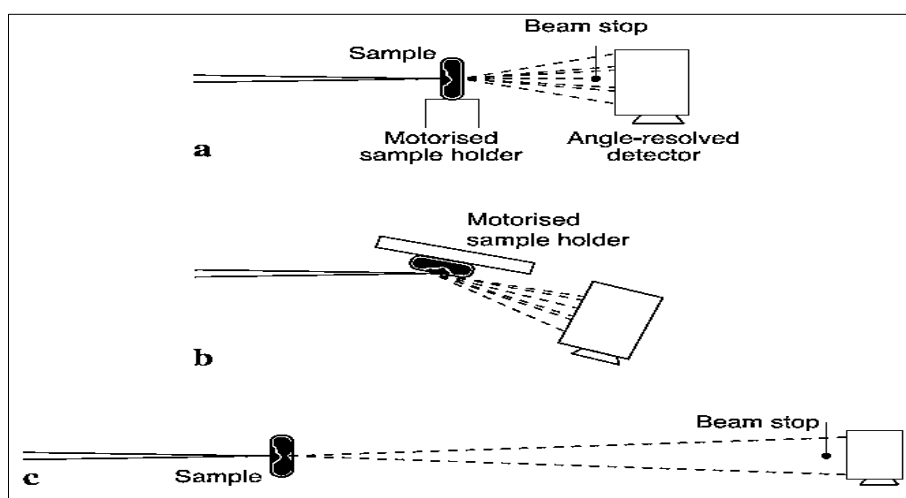
۴. معرفی بخشی از تکنیک‌های پرتوایکس

تولیدشده در سینکروترون

۴-۱. پراش و پراکندگی پرتوایکس به همراه

تکنیک‌های مرتبط

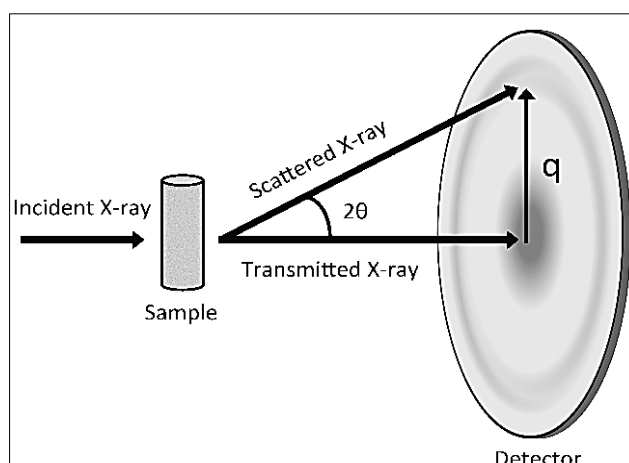
پراش، زمانی رخ می‌دهد که یک موج الکترومغناطیسی با ساختاری متناوب که مقیاس طولی آن مشابه موج فرودی است، اندرکنش (interaction) داشته باشد. این در حالی



شکل ۳: طرح‌واره‌ی نمایش الف) XRD در هندسه عبوری (ب) XRD در هندسه‌ی انعکاسی ج) SAXS [8]
Fig. 3: Pattern of a) XRD in the transmission geometry, b) XRD in the reflection geometry, and c) SAXS [8]

دهد. استفاده اصلی از پراش پرتوایکس در هنر و باستان‌شناسی، شناخت و تعیین فاز بلوری یک ماده مخلوط است. برای این منظور، نمونه، با ساختار پرتوی ایکس عبوری و انعکاسی بررسی می‌شود [9]. پراکندگی پرتوایکس در زوایای کوچک (SAXS [Small angle X-ray scattering])، یکی از روش‌های پراکندگی پرتوایکس است، هنگامی که زاویه پراکندگی کوچک باشد. 20 به عنوان زاویه پراکندگی شناخته می‌شود. هنگامی که $20 < 10^\circ$ باشد، این فن اغلب به عنوان SAXS تعریف می‌شود [10].

است که پراکندگی پرتوایکس شامل توصیف کلی فرآیند اندرکنش پرتوایکس با ماده است. پراش پرتوایکس از آنجایی که طول موجی در حد فواصل بین‌اتمی دارد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از این رو، تحلیل الگوهای پراش پرتو x اطلاعات مفیدی را در مورد ساختار مولکولی و اتمی ماده به دست می‌دهد. ساختار سه‌بعدی مواد بلوری را می‌توان با دقت زیاد تعیین کرد. بررسی دستگاه‌های بی‌شکل، مانند شیشه و مایعات، به دلیل فقدان ساختار منظم داده‌شده، محدود است، اما می‌تواند اطلاعات مهمی را از قبیل متوسط فواصل بین مولکولی یا بین‌اتمی ارائه



شکل ۴: طرح‌واره‌ای از پراکندگی پرتوایکس و بردار پراکندگی q [10]
Fig. 4: Schematic of x-rays scattering and scattering vector q [10]

استفاده از این فن، می‌توان آنالیز عنصری را به صورت کیفی و تا حدودی کمی، به خصوص در مورد نمونه‌های معدنی، باستانی، زمین‌شناسی، کانی‌ها، سنگ‌ها، شیشه، سیمان، سرامیک‌ها و آلیاژهای فلزی انجام داد که ردیابی عناصر از سدیم تا اورانیوم را ممکن می‌سازد و دقت آن در ردیابی عناصر سنگین، بیشتر است. در سینکروترون، پرتوایکس اولیه تولیدشده، در اثر برخورد با نمونه و بمباران آن، الکترون‌های مدارهای داخلی اتم را آزاد می‌کند و فضاهای خالی در پوسته الکترونی اتم‌ها ایجاد می‌شود که این فضاهای خالی اغلب، با الکترون‌هایی که در سطح انرژی بالاتر قرار گرفته‌اند؛ پر می‌شوند. در اثر گذار الکترون از سطح انرژی بالاتر به سطح انرژی پایین‌تر، پرتوایکس ثانویه (فلورسانس) تولید می‌شود که مشخصه عنصرهای موجود در نمونه است و به این ترتیب شناسایی عناصر مختلف صورت می‌گیرد. شکل ۵ تولید اشعه ایکس ثانویه k و L را در اثر انتقال الکترونی نشان می‌دهد [11].

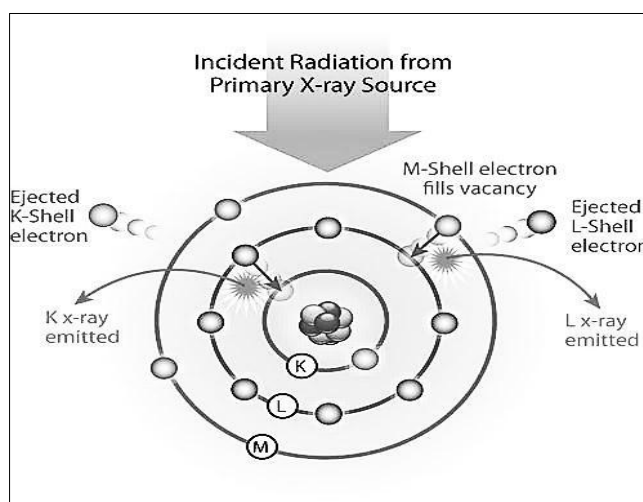
۴-۳. طیف‌سنجی جذب پرتوایکس (XAS)

هنگامی که پرتو X به نمونه‌ای برخورد می‌کند، میدان الکتریکی نوسان‌کننده پرتو الکترومغناطیسی با الکترون‌های مقید در یک اتم در تعامل است. در نتیجه، پرتوایکس وقتی به نمونه برخورد می‌کند، پراکنده، جذب یا نشر می‌شود.

مطابق شکل ۴، q بردار پراکندگی است که از اختلاف بردار موج پرتوایکس فرودی و پراکنده‌شده حاصل می‌شود. رابطه بین فضای حقیقی و فضای وارون بدان معنی است که اطلاعات در مقیاس‌های نسبتاً بزرگ در فضای حقیقی در q ‌های نسبتاً کوچک موجود هستند. به عبارتی، q کوچک به یک ساختار بزرگ‌تر در فضای حقیقی مربوط است [10].

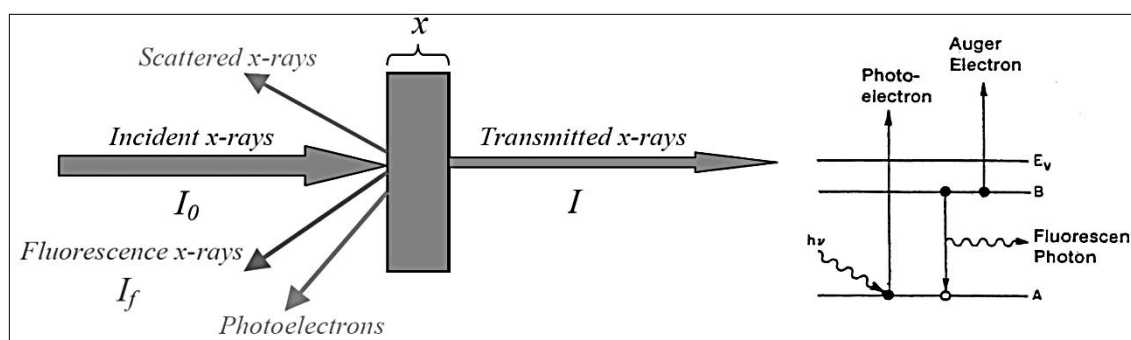
۴-۲. طیف‌نگاری فلورسانس پرتوایکس

طیف‌نگاری فلورسانس پرتوایکس، از روش‌های آنالیز عنصری است که به دلیل سرعت بالای آنالیز در بعضی از صنایع، اهمیت زیادی دارد. این فن، توانایی انجام آنالیز عنصری را به صورت کیفی و نیمه کمی در نمونه‌ها، به خصوص نمونه‌های معدنی، دارد. در اثر تابش پرتوایکس و برانگیختگی نمونه، انتقال الکترونی در لایه‌های مختلف اتم انجام می‌شود که هر انتقال الکترونی همراه با نشر یک خط طیفی پرتوایکس است. طول موج خطوط طیفی نشر شده مبنا برای تجزیه کیفی عناصر و شدت پرتوها، متناسب با فراوانی یا کمیت عناصر موجود در نمونه است. در این روش، پرتوایکس به نمونه می‌تابد و در اثر برانگیختن اتم‌ها و انتقال الکترونی در لایه‌های مختلف اتم، پرتوایکس ثانویه، تولید می‌شود که با تعیین طول موج (انرژی) پرتوایکس ثانویه که مشخصه اتم است، می‌توان عناصر موجود در نمونه موردنظر را شناسایی کرد. با



شکل ۵: طرح‌واره‌ای از XRF [12]

Fig. 5: Schematic of XRF [12]



شکل ۶: طرح‌واره‌ای از اندرکنش پرتوایکس با یک نمونه

Fig. 6: Interaction of x-rays with a sample

ناحیه نزدیک لبه (XANES) که انرژی پرتوایکس فرودی $E = E_0 \pm 10\text{ev}$ است، طیف جذبی ریزساختار پرتوایکس نزدیک لبه (NEXAFS)، در منطقه بین ۱۰ الکترون‌ولت تا ۵۰ الکترون‌ولت بالاتر از لبه ۴ طیف جذبی ریزساختار پرتوایکس تعمیم‌یافته (EXAFS)، در منطقه بین ۵۰ تا ۱۰۰۰ الکترون‌ولت بالاتر از لبه [14].

شکل ۷ نواحی مختلف طیف جذبی پرتوایکس را نشان می‌دهد. بحث در مورد تمامی کاربردهای این روش‌ها از موضوع این مقاله، خارج است. علاقه‌مندان برای مطالعه بیشتر به مرجع [15] مراجعه فرمایند.

۴-۴. توموگرافی رایانه‌ای پرتوایکس

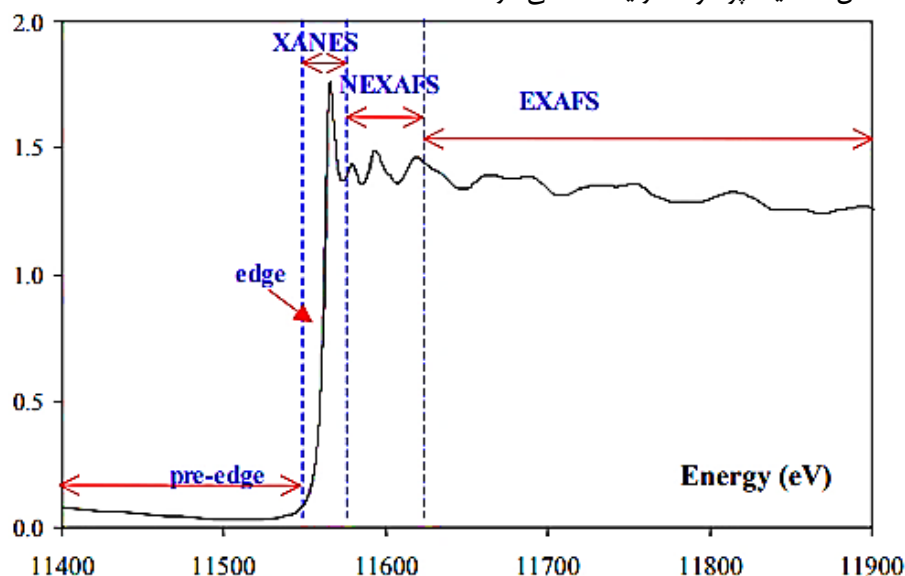
توموگرافی رایانه‌ای با پرتوایکس (CT) یک فن غیر مخرب برای تجسم ویژگی‌های داخلی در اشیاء جامد و برای به دست آوردن اطلاعات دیجیتالی در مورد هندسه و خصوصیات سه‌بعدی آن‌ها است. به هر توموگرافی رایانه‌ای یک بُرش می‌گویند، زیرا، هر توموگرافی، متناظر با لایه‌نگاری جسم موردنظر است. تصویر دیجیتالی، از یک سری پیکسل (عناصر تصویر) تشکیل شده است، درحالی‌که یک برش از توموگرافی رایانه‌ای، از واکسل (المان حجمی) تشکیل شده است. تراز خاکستری، در تصویربرداری توموگرافی رایانه‌ای، متناظر با جذب پرتوایکس است. این تراز، متناسب با میزان پراکندگی یا جذب پرتوایکس به هنگام عبور از المان حجمی تصویر است. جذب پرتوایکس، تابعی از انرژی آن و نیز چگالی و ترکیب ماده مورد تصویربرداری است [16]. تصویربرداری

وقتی باریکه تک‌رنگ پرتوایکس با شدت I_0 از نمونه‌ای با ضخامت یا طول مسیر x عبور می‌کند، شدت عبوری کاهش یافته آن از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = \mu x \quad (10)$$

که μ ضریب جذب خطی نامیده می‌شود. این پارامتر فیزیکی، به نوع اتم‌ها و چگالی ماده بستگی دارد. در انرژی‌های معینی، جذب به شدت افزایش می‌یابد و تا حد لبه جذب (absorption edge) بالا می‌رود. لبه جذب، انرژی‌ای است که در آن، یک افزایش تند و غیرمنتظره، در ضریب جذب پرتوایکس عناصر به وجود می‌آید. لبه‌های جذبی وقتی اتفاق می‌افتند که انرژی فوتون‌های فرودی به اندازه‌ای بزرگ و کافی باشد که سبب برانگیختگی یک الکترون هسته اتم جذب‌کننده شود که در نتیجه یک فوتوالکترون تولید می‌شود؛ بنابراین انرژی این پرتوها معادل انرژی پیوندی الکترون‌های موجود در لایه‌های K، L، M و... اتم جذب‌کننده است. لبه‌های جذب، برحسب انرژی برانگیختن یک الکترون از لایه داخلی به لایه‌های دیگر به صورت $K, L_I, L_{II}, L_{III}, M_I, M_{II}, M_{III}$ و... نام‌گذاری می‌شوند [13]. هر عنصری، انرژی لبه جذب E_0 ویژه خود را دارد و می‌تواند لبه‌های جذب مختلفی داشته باشد. بنابراین از لبه‌های جذب، در شناسایی ساختاری می‌توان استفاده کرد. لبه جذب معمولاً برای عناصر با عدد اتمی ۲۲ به بالا، در نظر گرفته می‌شود. زیرا عناصر سبک، لبه‌های جذب تیز و مشخصی ندارند. به‌طور کلی، یک طیف جذبی پرتوایکس را می‌توان به چهار بخش تقسیم کرد: ۱) ناحیه پیش لبه ($E < E_0$) ۲) جذب پرتوایکس در

توموگرافی، شامل هدایت پرتو X در یک شیء از



شکل ۷: نواحی مختلف طیف جذبی پرتو ایکس [14]

Fig. 7: Different regions of x-ray absorption spectrum [14]

بیشینه و کمینه دارند که می‌توانند برای اهداف مقایسه‌ای به کار گرفته شوند. در مولکول‌ها، دو نوع ارتعاش وجود دارد که در اصطلاح، ارتعاش‌های کششی و خمشی نامیده می‌شوند. ارتعاش کششی به دو صورت متقارن و نامتقارن تقسیم‌بندی می‌شود. هرگاه یک نیم تناوب کششی نامتقارن رخ دهد، گشتاور دوقطبی در یک جهت تغییر می‌یابد و در نیم تناوب دیگر، گشتاور دوقطبی در جهت مخالف جابه‌جا می‌شود. به این ترتیب گشتاور دوقطبی با فرکانس ارتعاشی مولکول، نوسان می‌کند (این نوسان باعث ارتقای مولکول به نوار جذبی مادون قرمز می‌شود و به همین علت آن را فعال مادون قرمز می‌نامند). در حالت ارتعاش کششی متقارن، دو اتم در یک نیم تناوب ارتعاشی، در جهات مختلف حرکت می‌کنند که در این صورت تغییر نهایی در گشتاور دوقطبی مولکول به وجود نمی‌آید و به همین علت آن را غیرفعال مادون قرمز می‌نامند. در این حالت، تغییر در فواصل درون مولکولی، بر قابلیت قطبی شدن پیوندها اثر می‌گذارد. لذا در قطبش پذیری مولکول تغییر حاصل می‌شود و این حالتی است که در طیف‌سنجی رامان مورد توجه قرار می‌گیرد [18]. برهم کنش تابش مادون قرمز با یک نمونه، باعث تغییر انرژی ارتعاشی پیوند

جهت‌های متعدد و اندازه‌گیری کاهش شدت در طول یک سری از مسیرهای خطی است. این کاهش توسط قانون بایر (Beer's law) مشخص شده است که کاهش شدت را تابعی از انرژی پرتو ایکس، طول مسیر و ضریب میرایی خطی مواد توصیف می‌کند. سپس یک الگوریتم تخصصی برای بازسازی توزیع میرایی پرتو X در حجم تصویربرداری مورداستفاده قرار می‌گیرد [17].

۴-۵. روش طیف‌سنجی تبدیل فوریه

مادون قرمز مبتنی بر سینکروترون

روش دیگری که در مطالعه آثار باستانی کاربرد دارد، روش تبدیل فوریه طیف‌سنجی مادون قرمز (FT-IR [Fourier Transform Infrared]) مبتنی بر سینکروترون است. طیف‌سنجی مادون قرمز، بر اساس جذب تابش و بررسی جهش‌های ارتعاشی مولکول‌ها و یون‌های چنداتمی صورت می‌گیرد. این روش، به عنوان یک روش پر قدرت و توسعه یافته برای تعیین ساختار و اندازه‌گیری گونه‌های شیمیایی به کار می‌رود. همچنین این روش، بیشتر در شناسایی ترکیبات آلی کاربرد دارد، زیرا طیف‌های این ترکیبات اغلب، پیچیده هستند و تعداد زیادی پیک‌های

زیادی از لوازم‌آرایی مورد استفاده در مصر باستان که در موزه لوور (Louvre) نگهداری می‌شدند، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته‌اند. در این مطالعه، ترکیبات متفاوت شامل سرب که با روش‌های پیشرفته تولید شیمیایی در آن‌ها ایجاد شده بود، نشان داده شده است. این مطالعه، نشان می‌دهد که در چهار هزار سال پیش، مردم از لوازم‌آرایی برای برجسته کردن چشم‌های خود استفاده می‌کردند. این مطالعه همچنین شامل تجزیه و تحلیل طرح‌واره خط براگ در رابطه با ریزساختار برخی از مواد معدنی (از ه و واپیچیدگی‌های دانه‌ها) است. مطابق شکل ۸ در مخلوط مورد مطالعه، دو فاز طبیعی سرب معدنی سیاه (PbS) و سنگ سرب سفید (O_3) شناسایی شده است. سرب معدنی سیاه ترکیبی است که هنوز هم در آفریقای شمالی به عنوان پایه‌ای برای لوازم‌آرایی سنتی استفاده می‌شود. سنگ سرب سفید وارد ترکیب پودر آرایی شده است و رنگ سفید مایل به خاکستری آن را تشکیل می‌دهد. سرب معدنی سیاه و سنگ سرب سفید، مواد معدنی نسبتاً رایج هستند که در محدوده دریای سرخ پیدا می‌شوند. نتیجه‌ای که از تجزیه و تحلیل‌های بیشتر مطابق شکل ۹ حاصل شد، این بود که دو ماده نادر و کمیاب لورینایت ($PbOHCl$) و فوسفوسژنیت (Cl_2CO_3) در مخلوط‌ها موجود هستند. این فازها در طبیعت، بسیار نادر محسوب می‌شوند و استخراج آن‌ها از مواد معدنی در مقادیر کافی، برای تهیه لوازم‌آرایی ممکن نیست؛ اما باید توجه داشت که این مواد در لوازم‌آرایی مصر باستان به طور گسترده‌ای توسط زنان و مردان به مدت حداقل هشت قرن مورد استفاده قرار می‌گرفتند. این ترکیبات در اصل می‌توانستند برای تغییر اجزای اصلی توسط ماده کلر تشکیل شده باشند، اما در بیش از ۵۰ نمونه که تجزیه و تحلیل شده‌اند، هیچ کاتیون خارجی یا فاز کلریدی یافت نشدند. بنابراین تغییر مواد معدنی سرب طبیعی در داخل ترکیب، بعید به نظر می‌رسد. از این رو، این نتیجه به دست آمد که لورینایت و فوسفوسژنیت به صورت مصنوعی تولید می‌شدند. منشأ ساختگی بودن $PbOHCl$ و $Pb_2Cl_2CO_3$ به وسیله تجزیه و تحلیل طرح‌واره پیک پراش و مقایسه اثرات ناشی از خصوصیات کشش‌ها و ابعاد بلورینی با فازهای طبیعی

در مولکول‌های آن می‌شود که روش مناسبی برای شناسایی گروه‌های عاملی و ساختار مولکولی است. شرط جذب انرژی مادون قرمز توسط مولکول این است که گشتاور دوقطبی در حین ارتعاش تغییر کند. در طیف الکترومغناطیسی ناحیه بین $400-800 \mu m$ مربوط به ناحیه مادون قرمز است ولی ناحیه‌ای که جهت تجزیه شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد، بین $50-800 \mu m$ است [19-20].

۵. مثال‌هایی از کاربرد تکنیک‌های معرفی شده

در علوم باستان‌شناختی

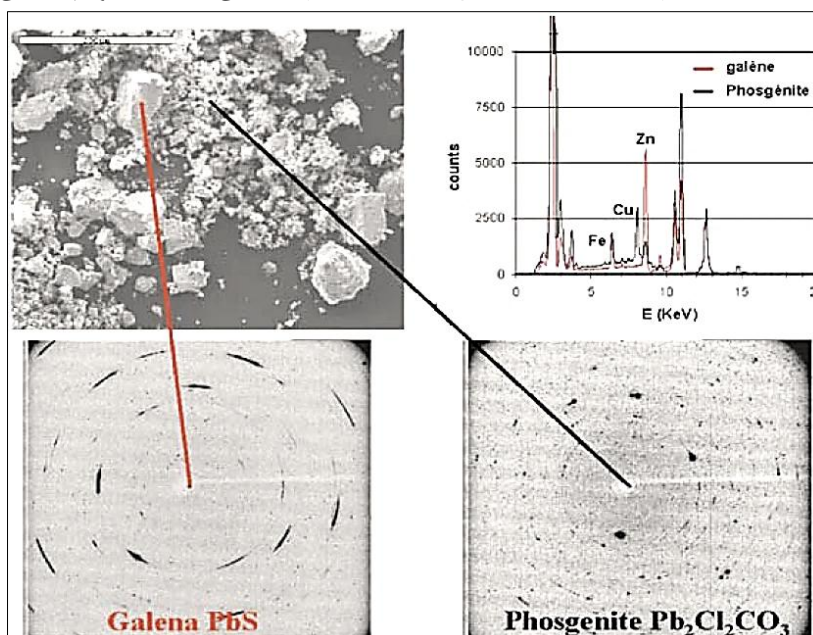
۵-۱. کاربردهای مبتنی بر سینکروترون با استفاده

از روش پراش پرتو ایکس

یکی از کاربردهای مهم سینکروترون در باستان‌شناسی، استفاده از روش پراش پرتو ایکس است. استفاده از این روش در سینکروترون، می‌تواند نسبت سیگنال به نویز بالا و وضوح بسیار عالی ایجاد کند. استفاده از سینکروترون برای این روش هنگامی اهمیت خود را نشان می‌دهد که بدانیم بسیاری از چند بلوری‌های باستان‌شناسی، ناهمگن هستند. تنوع زیاد در اندازه ذره‌ها، حضور فازهای زیاد، تفاوت در ترکیب شیمیایی، جهت‌گیری ناهمسان ذره‌ها و در برخی موارد، فرایند تخریب ایجاد شده در طی سالیان متمادی که موجب تغییراتی در عناصر و در قالب واکنش‌هایی مانند تجزیه و آبکافت می‌شود، ضرورت استفاده از یک منبع پراکندگی با درخشندگی بالا را یادآور می‌شود.

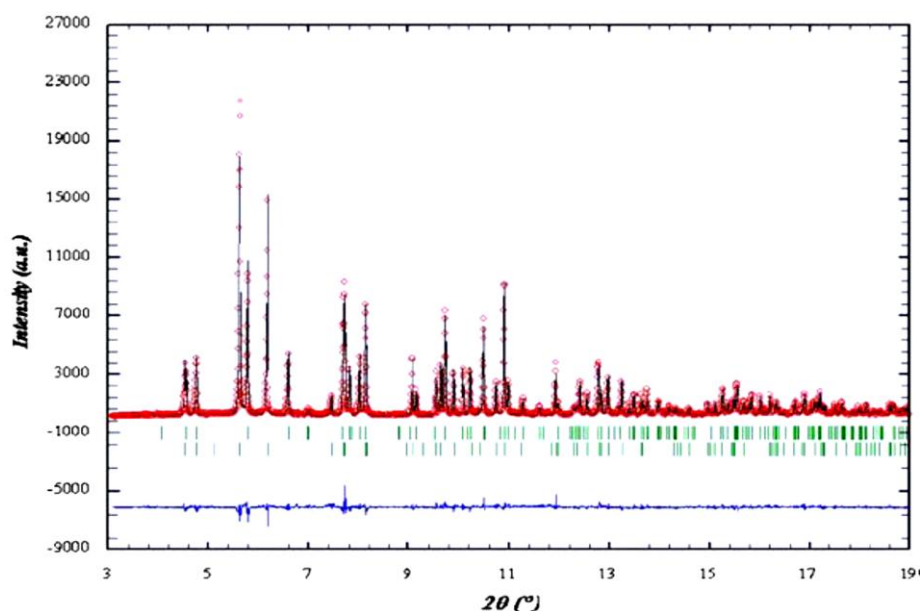
ویژگی خاص تابش سینکروترون (قابلیت تنظیم انرژی، شار فوتون و قدرت تفکیک بالا) می‌تواند به حل بخشی از این مشکلات کمک کند. این ویژگی‌های SR(XRD)-XRD، روشی قدرتمند برای مطالعه آثار باستانی محسوب می‌شود. یکی از معروف‌ترین نمونه‌های کاربرد سینکروترون، پراش پودری پرتو ایکس (SR-XRPD)، در باستان‌شناسی و میراث فرهنگی، تحقیق بر لوازم‌آرایی مصر باستان است [21]. همچنین از تکنیک‌های میکرو پرتوهای سینکروترون (μ -XRF, μ -XRD, μ -XANES) برای شناسایی فاز، عناصر ریز و کمیاب موجود در جمعیت دانه‌ها و برای تعیین کمی مراحل مختلف تشکیل لوازم‌آرایی استفاده می‌شود. تعداد

موجود در آن‌ها، تأیید شد. نتیجه گرفته شد که به احتمال زیاد، سرب معدنی سیاه در لوازم‌آرایی، برای حصول



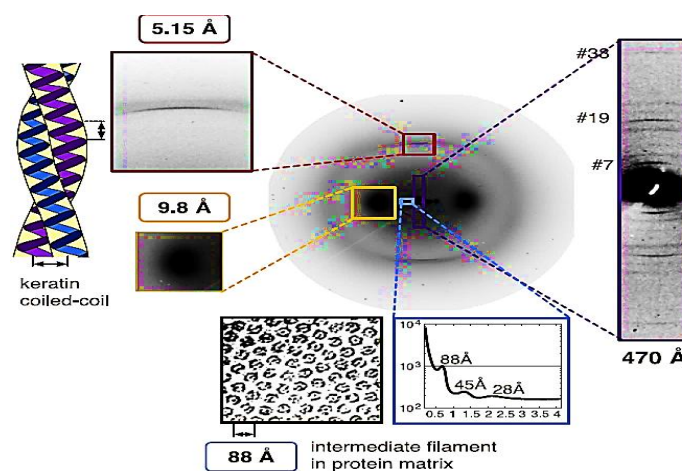
شکل ۸: سمت چپ بالا: تصویر SEM از نمونه باستانی که با میکرو پرتو اشعه ایکس بررسی شده است. سمت چپ پایین: حضور پودر سرب معدنی سیاه در الگوهای پراش دوبعدی پرتو ایکس در داخل نمونه باستانی. سمت راست پایین: تصویر دوبعدی میکرو پرتو اشعه ایکس که حضور پودر فوسژنیت را در داخل نمونه باستانی نشان می‌دهد. سمت راست بالا: الگوهای ثبت‌شده توسط XRF که محتوای ناخالصی در نمونه باستانی را نشان می‌دهد [23].

Fig. 8: up-left: SEM image of a sample investigated by x-rays. Down-left: presence of the black mineral lead powder in 2D x-ray pattern. Down-right: 2D image of micro x-ray in the presence of phosgenite in the sample. Up-right: XRF pattern that shows the impurity content in the sample [23].



شکل ۹: طرح‌واره پراش مشاهده‌شده (نقطه‌ها) و محاسبه‌شده (خطوط) برای لورینایت، فوسژنیت و سنگ سرب سفید. نشانگرها، موقعیت خطوط براگ را نشان می‌دهند [23]

Fig. 9: X-ray scattering pattern (dots) and calculated (solid line) of phosgenite and white lead stone. The pointers show the Bragg peak positions.



شکل ۱۰: تصویر SAXS از موی یک مومیایی مصر باستان، ابر مولکول‌های موجود در کراتین -آلفا با قابلیت وضوح آنگستروم از ماکرو مولکول‌های موجود در آن تشخیص پذیر هستند [26].

Fig. 10: SAXS image of a hair from a mummy form ancient Egypt, super molecules in Chratine-alpha are distinguishable from macromolecules with a resolution of about Angstrom.

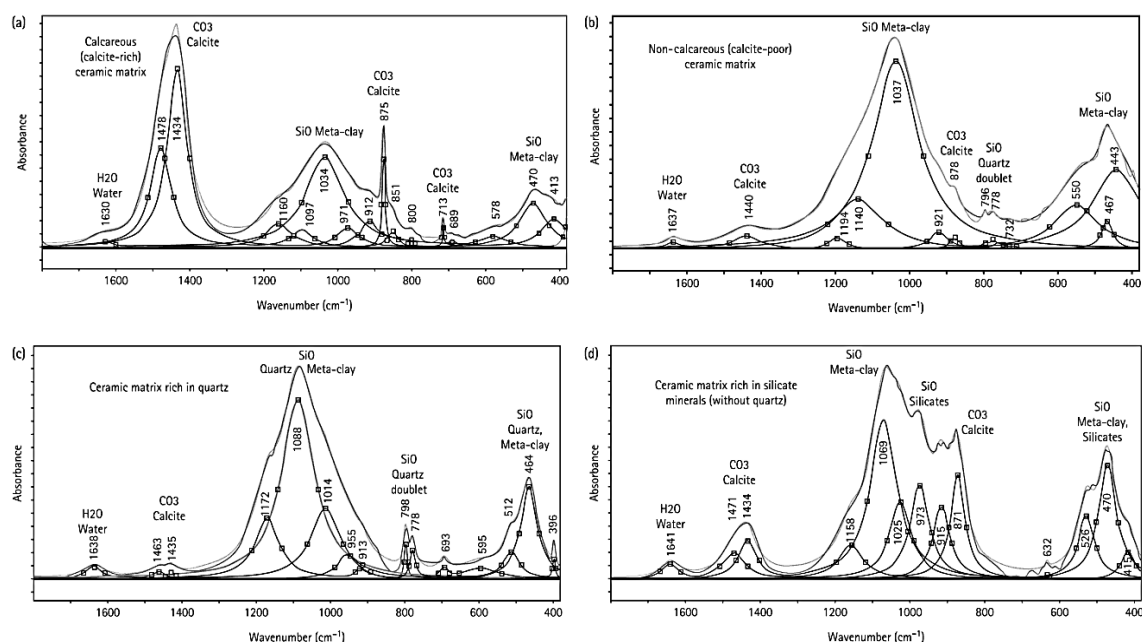
مؤلفه‌های پروتئینی نسبت داد [26-27].

۵-۲. کاربرد طیف‌سنجی تبدیل فوریۀ مادون قرمز مبتنی بر سینکروترون در باستان‌شناسی

طیف‌سنجی FT-IR به تازگی در مطالعهٔ سرامیک‌ها و مصنوعات باستانی کاربردهای فراوانی پیدا کرده است. این روش، یک اثر انگشت کانی‌شناسی از سرامیک را فراهم می‌کند و برای شناسایی ترکیبات معدنی سرامیک باستانی، به روش‌های دیگر کانی‌شناسی ترجیح داده می‌شود. مزیت اصلی طیف‌سنجی FT-IR، توانایی آن در شناسایی ترکیب هر مواد معدنی بلورین و همچنین فازهای شبه آمورف سرامیک خاک رس است. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل با طیف‌سنجی FT-IR برای این مواد تا حدودی، غیر مخرب است، زیرا فقط مقدار کمی از مواد سرامیکی مورد نیاز است، در حالی که روش XRD نیاز به یک نمونه به میزان قابل توجهی بزرگ‌تر، دارد. طیف‌سنجی FT-IR یک ابزار تحلیلی ساده، سریع و قابل اعتماد و به نسبت، ارزان است. یکی از کاربردهای طیف‌سنجی FT-IR معرفی عناصر یک جسم است. روش FT-IR یک بُعد کمی را برای تجزیه و تحلیل کانی‌شناسی

بافت و اثرات آرایشی مطلوب، به صورت پودر در آمده است. برعکس، طرح‌واره پیک لوریانیت و فوسژنیت، فاقد اثرات کششی بودند که نشان می‌داد که کریستال‌ها با سنتز مستقیم تولید می‌شوند. حال سؤال این است: چرا ترکیبات سفید برای اضافه کردن به سرب معدنی سیاه تولید شده در حالی که سنگ سرب سفید در دسترس بود؟ پاسخ را باید در مباحث تاریخی جست‌وجو کرد. در مصر باستان لوازم آرایشی نه تنها برای زیبایی استفاده می‌شد بلکه برای خواص درمانی نیز کاربرد داشتند. در متون سحر و جادوی گریکو-رومان اشاره می‌شود که رسوبات سفید تولید شده توسط *PbO* برای مراقبت از چشم و پوست مناسب است. این ترکیبات سرب می‌تواند به عنوان ضد باکتری‌ها مورد استفاده قرار گیرد و به عنوان محافظ چشم در برابر اشعهٔ نور خورشید استفاده شود [22-25].

مطالعهٔ دیگری که در این زمینه گزارش شده است، بررسی موه‌های یک مومیایی مصری با استفاده از SAXS است. در واقع این مطالعه نشان داد که ساختار ابر مولکولی مولکول کراتین در رشتهٔ مو پس از هزاران سال حفظ شده است. با استفاده از روش بهینه سازی تضاد (contrast) در تصاویر الگوهای حاصل از پراکندگی پرتو ایکس در زوایای کوچک می‌توان به جایگزیده سازی (fixation) کاتیون‌های دو ظرفیتی در مکان‌های خاص از کراتین، پی برد. همچنین می‌توان آن را به نظم دوربرد ترمودینامیکی



شکل ۱۱: داده‌های برازش شده طیف‌های FT-IR مواد سرامیکی از سفال‌های سرامیک سرچاهی لوانتین [28]

Fig. 11: Fit to FTIR data from ceramic material of Levantine sight

وارداتی و الگوی احتمالی مبادلات تجاری یا مبادله بین موقعیت و مناطق مجاور و در نتیجه زمینه اجتماعی تولید سفال را نشان می‌دهد [29].

۶. کاربرد تکنیک‌های مبتنی بر سینکروترون در شناخت مکانیسم تخریب آثار باستانی

مصنوعات باستانی دریایی چوبی، می‌توانند ارزش تاریخی و فرهنگی زیادی داشته باشند، گرچه حفاظت از مواد پیچیده و زیست تخریب‌شده چوب با ترکیبات گوگرد و آهن، امری دشوار است. اغلب به دلیل غوطه‌ور بودن در رسوبات اعماق دریا شرایط حفظ این مواد فراهم می‌شود، همان‌طور که برای کشتی جنگی سوئدی واسا (Vasa) (شکل ۱۲) این اتفاق افتاده است. استفاده از تکنیک XANES مبتنی بر سینکروترون برای جذب در لبه K گوگرد، برای نمونه‌های طبیعی، امکان گونه‌زایی گوگرد را فراهم کرده است. هنگامی که روش مذکور برای شناسایی کشتی واسا اعمال می‌شود، چندین تن از ترکیبات کاهش‌یافته گوگرد که به‌طور غیرمنتظره در تخته‌های چوبی انباشته‌شده و در حال حاضر با فرایندهای اکسیداسیون به‌شدت اسیدی شده است، را نشان می‌دهد. در تعدادی از کشتی‌های تاریخی، آنالیزهای XANES

سرامیک‌های باستانی اضافه می‌کند. شدت نسبی یا مساحت یکپارچه نسبی باندهای جذب در منحنی‌های برازش شده طیف‌های FT-IR (شکل ۱۱) متناسب با غلظت مواد موجود در نمونه‌ها است و بنابراین مقدار سنجی مواد معدنی شناسایی‌شده را ممکن می‌سازد. منحنی کالیبراسیون، تهیه‌شده برای سرامیک با غلظت معینی از مواد معدنی، به‌عنوان مرجع برای محاسبات استفاده می‌شود [28].

همچنین از تحلیل طیف‌سنجی FT-IR برای ارزیابی زادگاه تولید سفال استفاده می‌شود [۲۹]. به روش موازی با پتروگرافی، مجموعه‌ای از سفال‌ها را می‌توان با توجه به ترکیبات معدنی خود، به گروه‌های طیف‌سنجی FT-IR تقسیم کرد. پیدا کردن گروهی از سفال با یک مشخصات اسپکتروسکوپی مشابه، می‌تواند تولید از یک ماده خام و به همین ترتیب، تولید در یک مکان واحد را نشان دهد. از سوی دیگر شناسایی چندین طرح‌واره طیف‌سنجی FT-IR سفالگری در یک محل باستان‌شناسی، ممکن است واردات از چند کارگاه را نشان دهد. مطالعات حاضر، بر پیدا کردن منابع جغرافیایی سفالگری تمرکز پیدا کرده است. ارزیابی زادگاه تولید محصولات سفالی، اطلاعات مربوط به ارتباطات موقعیت با مناطق تولیدی، سفالگری محلی یا



شکل ۱۲: واسا پس از محافظت‌های لازم در نمایشگاه موزه واسا [30]
Fig. 12: Vasa wreck after needed treatments in Vasa exhibition [30]

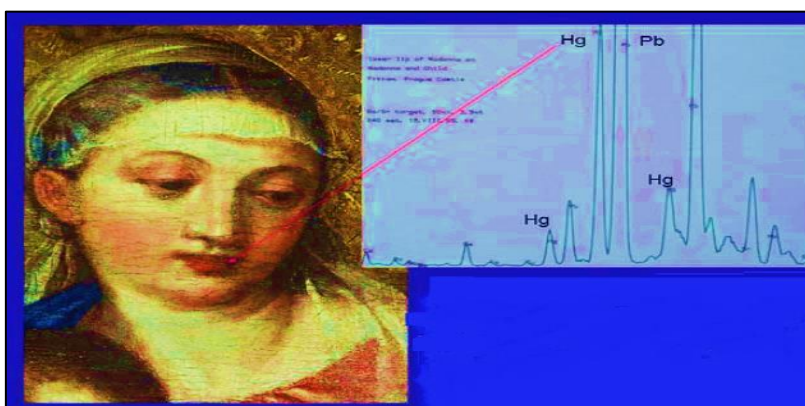
پرتوایکس ذرات (PIXE) برای قسمتی از نمونه به‌طور هم‌زمان استفاده می‌شود که این روش‌ها در شناسایی عناصر به کاررفته در رنگ‌ها و بررسی ساختار آن‌ها کاربرد دارند. در تجزیه و تحلیل مناطق مختلف یک نقاشی، اندازه‌گیری‌های گوناگونی لازم است. هر دو روش، هنوز برای تجزیه و تحلیل رضایت‌بخش از مناطق بزرگ‌تر و یا کل نقاشی مناسب نیستند. آن‌ها نمی‌توانند به‌عنوان تکنیک‌های تصویربرداری طبقه‌بندی شوند. این یک مشکل جدی است، زیرا خواص شیمیایی مناطق مجاور کاملاً متفاوت است. مواد نقاشی در رنگ‌های سستی ناخالصی‌های زیادی دارند که منجر به مشکلاتی در تفسیر طیف‌ها می‌شوند. دلیل پیچیدگی تکنیک‌های استادان قدیمی این است که، به‌طور کلی چندلایه رنگی برای مناطق بزرگ‌تر، جزئیات کوچک‌تر، مناطق سایه و برجسته استفاده شده است. در مطالعه چنین سیستم رنگی چندلایه، لایه‌نازک (بین ضخامت ۱ تا ۱۰۰ میکرومتر) و لایه‌های نامتغیر از نظر فیزیکی جدا نیستند ولی آن‌ها را به‌صورت جداگانه تجزیه و تحلیل می‌کنند. اگر این دو تکنیک مبتنی بر سینکروترون انجام شود، همه این مشکلات حل خواهد شد و این موضوع، قدرت سینکروترون و تفاوت آن را با

ترکیب‌شده با XRF نشان می‌دهد که ترکیبات گوگرد و آهن اغلب به چوب نفوذ کرده و به‌صورت انبوه واکنش نشان داده و انباشته شده‌اند. مطالعات اخیر میکروسکوپی اشعه ایکس نشان می‌دهد که سولفید هیدروژن تولیدشده به‌واسطه باکتری، سبب تشکیل ترکیبات سولفید آهن و ارگانو سولفور در چوب خواهد شد که فعالیت باکتری‌های تجزیه‌کننده چوب را افزایش می‌دهد. به احتمال زیاد، اکسیداسیون سولفیدهای آهن، علت اصلی اسیدی شدن چوب است، درحالی‌که ترکیبات ارگانو و سولفور ممکن است نسبت به اکسیداسیون مقاوم‌تر باشند. برای حفاظت پایدار، ترکیباتی که سولفور اسید را در چوب تشکیل می‌دهند، باید در صورت امکان، همراه با استخراج یون‌های آهن با یک محلول مناسب و کارآمد حذف شوند. در حفاظت و جلوگیری از تخریب آثار باستانی دریایی، یکی از این روش‌ها می‌تواند مؤثر واقع شود [30].

۷. نمونه‌ای از برتری سینکروترون نسبت به

روش‌های عادی تولید پرتوایکس

در مطالعات نقاشی‌های باستانی (همانند آنچه در شکل ۱۳ نشان داده میشود)، از دو تکنیک XRF و گسیل القایی



شکل ۱۳: Hg حضور رنگ قرمز روشن را نشان می‌دهد درحالی که Pb به دلیل حضور سرب سفید است [32]

Fig. 13: Hg shows the bright red, while Pb shows white lead [32]

منابع دیگر نشان می‌دهد [31-32].

ساختار و روش ساخت مهره را نشان داده است. برجستگی بخش مرکزی، از یک قطعه چوب، به جای ایجاد آن از قطعات متفاوت، با توجه به مهارت فوق‌العاده کاربر دستی‌ساز آن ایجاد شده است. علاوه بر این، قطعه‌ای از مواد فیبردار موجود در ساختار داخلی مهره نیز نشان داده شده است. این ممکن است به عنوان یک حامل برای یک ترکیب بودار که با عملکرد مذهبی مهره مطابقت دارد، به کار رفته است [34-35].

۹. جدیدترین پژوهش‌ها در ایران و جهان

یکی از جدیدترین پژوهش‌ها در ایران، مطالعه بر تکه‌های تزیینی شیشه‌ای زیگورات چغازنبیل است که قدمت آن‌ها به ۲۵۰۰ سال قبل از میلاد می‌رسد و در فهرست میراث جهانی یونسکو ثبت شده است. این مطالعه، توسط دانشمندان دانشگاه اصفهان به سرپرستی دکتر محمدمین امامی در مرکز سینکروترون آلبای اسپانیا و با استفاده از پراش پودری پرتوایکس در خط نوری MSPD انجام گرفته است. محققان، به دنبال غلظت کلسیت، کریستوبالیت و گچ در نمونه شیشه‌های آزمایش شده هستند؛ اما سؤال اصلی این تحقیق به ساختار شیشه‌ای در نزدیکی سطح و دلیل اثر درخشندگی این ماده، معطوف شده است. آن‌ها دریافتند که Zeolite A و Wollastonite در نمونه‌ها وجود دارند و اثر درخشش سطح، می‌تواند ناشی از حضور این مواد باشد [36].

پژوهش بعدی که در سال ۲۰۲۰ م. منتشر شده است،

۸. سینکروترون و نقش آن در احیا، بازسازی و

تولید آثار مشابه با اشیاء باستانی

پرتونگاری رایانه‌ای پرتوایکس که در اوایل دهه هفتاد برای کاربردهای پزشکی به وجود آمد، در مطالعه آثار باستانی و میراث فرهنگی نیز به کار گرفته شده است. تلسکوپ رادیوگرافی اشعه ایکس، در حال حاضر به طور فزاینده نقش مهمی را در زمینه تشخیص آثار فرهنگی به جامانده از گذشته، ایفا می‌کند [33]. این روش تحقیق غیر مخرب قدرتمند، قادر به نمایش سه بعدی حجم و ساختار داخلی اشیاء است. اطلاعات به دست آمده، در تعیین روش‌های حفاظت و بازسازی این آثار بسیار مهم است. وجود افزاره‌های پیشرفته سینکروترون علاقه به استفاده از این فن را در میان باستان شناسان افزایش داده است. یک مثال از کاربرد این روش، مطالعه درباره مهره‌های مربوط به قرن شانزدهم میلادی است که یکی از جالب‌ترین اشیاء موجود در موزه ریکس آمستردام هلند است. این جسم چوبی کروی به قطر ۴ cm و شامل دو نیمکره متصل به یک لولای کوچک است تا بتوان آن را باز کرد (شکل ۱۴). در داخل مهره، چوب حکاکی منقش با صحنه‌های زندگی مسیح است. این مینیاتوری‌ها سطح باورنکردنی از کاردستی‌های شگفت‌انگیز با جزئیات حکاکی فراتر از مقیاس میلی‌متر را نشان می‌دهد. توموگرافی پرتوایکس رایانه‌ای مبتنی بر سینکروترون،



شکل ۱۴: سمت چپ: مهره‌ای که طرح مسیح به صلیب کشیده شده را نشان می‌دهد. سمت راست، ردیف بالا: بازسازی حجمی با برش عمودی از میان مهره، نشان‌دهنده ساختار پوسته و همچنین گرهی است که بین پوسته بیرونی و داخلی قرار گرفته است. دهانه پوسته بیرونی قابل توجه است. ردیف پایین: بازسازی حجم پوسته بیرونی با اصل فن معماری گوتیک [35].

Fig. 14: Left - Boxwood prayer nut with Christ carrying the cross and the crucifixion, c. 1515, Rijksmuseum Amsterdam, The Netherlands. Right - Upper row: volume reconstructions with a vertical cut through the middle of the nut, revealing the shell structure as well as the knot sandwiched between the outer and inner shells. Note the openings in the outer shell. Lower row: volume reconstruction of the outer shell with Gothic motif.

حوزه‌های مختلف بیش‌ازپیش احساس می‌شود. به‌این منظور، «طرح شتابگر ملی» به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین طرح‌های علمی کشور در مجموعه‌ای به نام «چشمه نور» در شمال شهر قزوین اجرا می‌شود. طرح شتابگر ملی ایران در اواخر سال ۱۳۸۸ در ابتدا با تشکیل کمیته اجرایی طرح، فعالیت خود را آغاز کرد؛ مطالعات و مشورت‌هایی که در کمیته اجرایی طرح در سال ۱۳۸۹ انجام شد، نشان داد که به دلیل تحقیقات متنوعی که در علوم روز می‌توان انجام داد، شتابگر سینکروترون الکترون، بهترین گزینه به‌عنوان شتابگر ملی در کشور خواهد بود. متخصصان پروژه چشمه نور ایران این شتابگر را این‌گونه معرفی می‌کنند: چشمه نور ایران یک شتابگر سینکروترون با انرژی ۳ گیگا ولت، جریان ۴۰۰ میلی‌آمپر و محیط حلقه انبارش ۵۲۸ متر است. بسیاری از محققان ایرانی مرتبط با تحقیقات سینکروترون که در ایران یا کشورهای دیگر مشغول به تحقیق هستند، از طریق برگزاری دوره‌ها، کارگاه‌ها و کلاس درس گروه‌های آموزشی، شناسایی شده‌اند و اطلاعات مربوط به تحقیقات، نیازمندی‌ها و تجهیزات مورد نیاز آن‌ها جمع‌آوری شده است. در حال حاضر، گروه‌های تخصصی،

تصویربرداری سینکروترون μ -XRF و μ -XANES از محصولات لعاب سیاه در خط نوری PUMA (مرکز سینکروترون سولیل فرانسه) است. مطالعات باستان‌سنجی که به‌خوبی طراحی شده باشند می‌توانند اطلاعات مربوط به فناوری‌های باستانی تولید سرامیک را ارائه دهند و درک بهتر از روش‌های ساخت آن‌ها را فراهم کنند. هدف از این پژوهش، روشن ساختن سؤالات باستان‌شناسی در مورد تفاوت کارگاه‌های غربی-یونانی و شناسایی فناوری‌های مختلف ساخت در کلونی‌ها است.

در این تحقیق، با استفاده از μ -XRF و μ -XANES تغییرات عنصری احتمالی در لعاب و خاصیت آهن‌زایی آن‌ها که می‌تواند نشانگرهای شیمیایی و کانی‌شناسی را برای شناسایی منشأ یا زادگاه فراهم کند، ارزیابی کرده‌اند. نگاشت μ -XRF سطح مقطع هر کدام از نمونه‌ها، از قسمت لعابی تا بدنه آنان، نمایانگر ترکیبات گوناگون لعاب سیاه در آنان است [37].

۱۰. سینکروترون و نیاز مبرم کشور به آن

با توجه به قابلیت‌های فراوان کشور عزیزمان ایران، نیاز به مرکز سینکروترون برای پیشبرد اهداف دانشمندان

به‌طوری که اجزای سازنده، عمر اثر، ردیابی بقایای اثر، علت تخریب، نحوه محافظت و تقریباً همه اطلاعاتی که یک باستان‌شناس از شیء موردنظر خود می‌خواهد به دست آورد، توسط سینکروترون قابل حصول است. دقت بالا و سرعت عمل زیاد، یکی دیگر از مزیت‌های تابش سینکروترون در مطالعات باستان‌شناسی است. قابل‌درک است که این مطالعات، نیازمند همکاری‌های گسترده باستان‌شناسان و مساعدت‌های سازمان‌های حفظ میراث فرهنگی با سینکروترون کارهای هر کشور است. اگر این رابطه‌ها عمیق‌تر باشد آثار باستانی هر کشور به‌صورت علمی و دقیق بررسی خواهند شد و در نتیجه، تمدن، تاریخچه و حتی آداب‌ورسوم هر کشوری، به‌طرز دقیق‌تری قابل ارزیابی خواهد بود. این همکاری‌ها علاوه بر کمک به پیشرفت علمی، جلوگیری از نابودی و تاراج آثار باستانی را نیز فراهم خواهند ساخت.

پی‌نوشت‌ها

۱. پراکندگی پدیده‌ای است که در صورت اندرکنش هر تابشی با ذرات مشاهده می‌شود؛ اما پراش زمانی رخ می‌دهد که علاوه بر وجود تناوب در شبکه، امواج پراکنده شده همدوس باشند.
۲. سنگ‌نگاری یا پتروگرافی شاخه‌ای از سنگ‌شناسی (پترولوژی) است که در آن منشأ سنگ‌ها، به‌ویژه فرایند تشکیل آن‌ها، مورد مطالعه علمی قرار می‌گیرد.

در حال ساخت نمونه‌هایی از قطعات و تجهیزات شتابگر هستند که از آن جمله می‌توان به تقویت‌کننده فرکانس رادیویی پرتوان حالت جامد، حفره شتاب‌دهنده، سیستم کنترل الکترونیکی بسامد رادیویی، چند نمونه منبع تغذیه بسیار پایدار برای الکترومغناطیس‌های حلقه انبارش، ساخت الکترومغناطیس‌های دوقطبی و چهار قطبی برای حلقه انبارش به همراه پایه نگه‌دارنده آن‌ها، سیستم اندازه‌گیری شدت و کیفیت میدان مغناطیسی الکترومغناطیس‌ها، ابزارهای اندازه‌گیری مشخصات باریکه الکترونی، اتاقک‌های خلأ و پمپ یونی برای تولید خلأ بسیار بالا اشاره کرد. انتظار می‌رود با بهره‌برداری از این مرکز شاهد توسعه علمی کشور عزیزمان ایران باشیم [38].

۱۱. نتیجه‌گیری

تابش سینکروترون به دلیل انرژی بالا، قدرت تفکیک بسیار زیاد و از همه مهم‌تر به دلیل خواص غیر تخریبی، یک روش کارآمد در مطالعات علوم باستان‌شناسی و میراث فرهنگی است. حساسیت‌های بالای این آثار و ویژگی‌های منحصر به فرد آثار باستانی سبب شده است تا تابش سینکروترون روش ارزشمندی برای تحقیق در زمینه شناسایی این آثار باشد. بسیاری از آثار باستانی را می‌توان با استفاده از تابش سینکروترون مشخصه‌یابی کرد،

References

- [1] Seeck OH, Murphy B. X-ray Diffraction: Modern Experimental Techniques. Jenny Stanford Publishing; 2015 Feb 10.
- [2] Winick H. Synchrotron radiation sources: a primer. World Scientific; 1995.
- [3] Willmott P. An introduction to synchrotron radiation: techniques and applications. Wiley; 2019 Apr 29.
- [4] Griffiths DJ. Introduction to electrodynamics.
- [5] Eriksson M, Ahlback J, Andersson Å, Johansson M, Kumbaro D, Leemann SC, Lenngren C, Lilja P, Lindau F, Lindgren LJ, Malmgren L. The MAX IV synchrotron light source. THPC058, IPAC. 2011 Jan 1.
- [6] Hofmann A. The physics of synchrotron radiation. Cambridge University Press; 2004 May 13.
- [7] Als-Nielsen J, McMorrow D. Elements of modern X-ray physics. John Wiley & Sons; 2011 Apr 20.
- [8] Bertrand L, Cotte M, Stampanoni M, Thoury M, Marone F, Schöder S. Development and trends in synchrotron studies of ancient and historical materials. Physics Reports. 2012 Oct 1;519(2):51-96.
- [9] Schropp A, Boye P, Goldschmidt A, Hönig S, Hoppe R, Patommel J, Rakete C, Samberg D, Stephan S, Schöder S, Burghammer M. Non-destructive and quantitative imaging of a nano-structured microchip by ptychographic hard X-ray scanning microscopy. Journal of

- microscopy. 2011 Jan;241(1):9-12.
- [10] Tuzikov FV, Zinoviev VV, Vavilin VI, Malygin EG. Application of the small-angle x-ray scattering technique for the study of two-step equilibrium enzyme-substrate interactions. *Biopolymers*. 1996 Feb;38(2):131-9.
- [11] Shackley MS. An introduction to X-ray fluorescence (XRF) analysis in archaeology. In: *X-ray fluorescence spectrometry (XRF) in geoarchaeology* 2011 (pp. 7-44). Springer, New York, NY.
- [12] Brouwer P. Theory of XRF. Almelo, Netherlands: PANalytical BV. 2006.
- [13] Jalilehvand F. Keynote Lecture KN-01. Foundations of Crystallography. 2017;70:C5.
- [14] Whitehead G, Crooks C. Department of Chemistry University of Calgary.
- [15] Nelson RC, Miller JT. An introduction to X-ray absorption spectroscopy and its in situ application to organometallic compounds and homogeneous catalysts. *Catalysis Science & Technology*. 2012;2(3):461-70.
- [16] Kalender WA. X-ray computed tomography. *Physics in Medicine & Biology*. 2006 Jun 20;51(13):R29.
- [17] Baruchel J, Buffiere JY, Maire E. X-ray tomography in material science.
- [18] Cotte M, Checroun E, Mazel V, Solé VA, Richardin P, Taniguchi Y, Walter P, Susini J. Combination of FTIR and X-RAYS Synchrotron-Based Micro-Imaging Techniques for the Study of Ancient Paintings. A Practical Point of View. In: 8th international conference of the Infrared and Raman Users' Group 2009 (pp. 1-9).
- [19] Salvado N, Butí S, Tobin MJ, Pantos E, Prag AJ, Pradell T. Advantages of the use of SR-FT-IR microspectroscopy: applications to cultural heritage. *Analytical chemistry*. 2005 Jun 1;77(11):3444-51.
- [20] Cotte M, Dumas P, Taniguchi Y, Checroun E, Walter P, Susini J. Recent applications and current trends in Cultural Heritage Science using synchrotron-based Fourier transform infrared microspectroscopy. *Comptes Rendus Physique*. 2009 Sep 1;10(7):590-600.
- [21] Sánchez del Río M, Martinetto P, Reyes-Valerio C, Dooryhee E, Suárez M. Synthesis and acid resistance of Maya Blue pigment. *Archaeometry*. 2006 Feb;48(1):115-30.
- [22] Cotte M, Susini J, Dik J, Janssens K. Synchrotron-based X-ray absorption spectroscopy for art conservation: looking back and looking forward. *Accounts of chemical research*. 2010 Jan 8;43(6):705-14.
- [23] Quartieri S. Synchrotron Radiation in Art, Archaeology and Cultural Heritage. In: *Synchrotron Radiation 2015* (pp. 677-695). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [24] Nakai I, Matsunaga M, Adachi M, Hidaka K. I. J. Phys. IV, 7 (1997) 1033-1034.
- [25] Bertrand L, Doucet J, Dumas P, Simionovici A, Tsoucaris G, Walter P. Microbeam synchrotron imaging of hairs from ancient Egyptian mummies. *Journal of synchrotron radiation*. 2003 Sep 1;10(5):387-92.
- [26] Bertrand L, Doucet J, Dumas P, Simionovici A, Tsoucaris G, Walter P. Microbeam synchrotron imaging of hairs from ancient Egyptian mummies. *Journal of synchrotron radiation*. 2003 Sep 1;10(5):387-92. Bertrand L, Doucet J, Dumas P, Simionovici A, Tsoucaris G, Walter P. Microbeam synchrotron imaging of hairs from ancient Egyptian mummies. *Journal of Synchrotron Radiation*. 2003 Sep 1;10(5):387-92.
- [27] Hiller JC, Wess TJ. The use of small-angle X-ray scattering to study archaeological and experimentally altered bone. *Journal of archaeological Science*. 2006;33(4):560-72.
- [28] Creagh DC, Bradley D. Physical techniques in the study of art, archaeology and cultural heritage. Elsevier; 2007 Jul 6.
- [29] Shoval S. Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) in archaeological ceramic analysis. In: *The Oxford Handbook of Archaeological Ceramic Analysis* 2017.
- [30] Sandström M, Fors Y, Persson I. The Vasa's New Battle: Sulfur, Acid and Iron. National Maritime Museums [Statens maritima museer]; 2003.
- [31] Creagh DC, Bradley D. Physical techniques in the study of art, archaeology and cultural heritage. Elsevier; 2007 Jul 6.
- [32] Sandström M, Jalilehvand F, Persson I, Gelius U, Frank P, Hall-Roth I. Deterioration of the seventeenth-century warship Vasa by internal formation of sulphuric acid. *Nature*. 2002 Feb;415(6874):893.

- [33] Creagh DC, Bradley D. Physical techniques in the study of art, archaeology and cultural heritage. Elsevier; 2007 Jul 6.
- [34] Morigi MP, Casali F, Bettuzzi M, Brancaccio R, d'Errico V. Application of X-ray computed tomography to cultural heritage diagnostics. *Applied Physics A*. 2010 Sep 1;100(3):653-61.
- [35] Rigon L, Vallazza E, Arfelli F, Longo R, Dreossi D, Bergamaschi A, Schmitt B, Chen R, Cova MA, Perabò R, Fioravanti M. Synchrotron-radiation microtomography for the non-destructive structural evaluation of bowed stringed instruments. *e-Preservation Science*. 2010;7:71-7.
<https://www.albasynchrotron.es/en/media/news/prehistoric-iranian-glass-under-synchrotron-light>.
- [36] Gianoncelli A, Raneri S, Schoeder S, Okbinoglu T, Barone G, Santostefano A, Mazzoleni P. nSynchrotron μ -XRF imaging and μ -XANES of black-glazed wares at the PUMA beamline: insights on technological markers for colonial productions. *Microchemical Journal*. 2020 Jan 13:104629.
- [37] Rahighi J, Ghasem H, Jafarzadeh M, Sarhadi K, Dehghani J, Khosroabadi H, Yousefi E, Sadeghipanah A, Saeidi F, Fatehi S, Ahmadi E. ILSF, a third generation light source laboratory in Iran. *Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China, TUOAB202*. 2013 May 12.