Application of X-Ray Diffraction (XRD) in Cultural Heritage and Archaeology Studies

Fatemeh Hajian[1*], Hamed Amirkhani[2]

1. M.Sc. in Geology, Expert at XRD Laboratory, Conservation and Restoration Research Institute, Cultural Heritage Research Institute.
2. Geology Expert.

Abstract

Diffraction-based techniques are fundamental tools for the characterization and understanding of materials of different nature, including those relevant to cultural heritage. Both conservation science and archaeometry may extensively profit from the information provided by diffraction techniques. The various methods and techniques of single-crystal and powder diffraction as applied to cultural heritage materials are briefly described with reference to specific examples, focusing on the extracted information in terms of (1) phase identification and quantification of crystalline compounds and complex polyphasic mixtures, (2) the texture and orientation of the crystalline phases, (3) the atomic and molecular structure of the phases involved, and (4) the physical microstructural state of the material in terms of crystallite size and accumulated strain. This paper presents a review of X-ray techniques used in art and archaeology and their applications as a non-destructive research tool in examining artistic and ancient objects. XRD is a standard procedure that provides information about the manufacturing process and condition of objects without physical contact, as well as insights into material composition and crystalline structure, making it widely used by archaeologists, curators, and conservators. The present paper aims to discuss the contribution of X-ray diffraction to cultural heritage and archaeology studies, based on personal experiences and those of other colleagues with various crystalline and non-crystalline materials. For this reason, the paper presents only a selection of cases identified by X-ray diffraction in cultural heritage conservation studies. It should be noted that X-ray diffraction plays a critical role in the analysis and characterization of these diverse materials. Another important goal of this work is to encourage in-depth studies on the use of X-ray techniques in the study of historical, archaeological, and artistic materials.

Keywords: X-Ray Diffraction, Cultural Heritage, Archaeology, Ancient Materials.

Knowledge and Conservation Restoration

Special Issue. No.2
September 2018
Pages 18-28

https://journal.richt.ir/kcr

Corresponding Author

Fatemeh Hajian

Email
fateme13630414@gmail.com

Copyright © 2020, Knowledge of Conservation and Restoration. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution noncommercial 4.0. International License which permits copy and redistribute the material just in noncommercial usages, provided the original work is properly cited.

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-11-25]

کاربرد پراش پرتو ایکس (XRD) در مطالعات میراث فرهنگی و باستان‌شناسی

فاطمه حاجیان*[1]، حامد امیرخانی [2]

۱. کارشناس ارشد زمین‌شناسی و کارشناس آزمایشگاه XRDپژوهشکده حفاظت و مرمت پژوهشگاه میراث فرهنگی.
۲. کارشناس زمین‌شناسی .

فصلنامه دانش حفاظت و مرمت

ویژه‌نامه: شماره ۲، تابستان.۱۳۹۷
۱۸-۲۸

https://journal.richt.ir/kcr

نویسنده مسئول
فاطمه حاجیان

رایانامه
fateme13630414@gmail.c om

چکیده

استفاده از روش‌های تحلیلی، که در ابتدا در علم مواد توسعه یافت، برای اشیاء هنری و باستانی گسترش یافت تا به مرمتگران و باستان‌شناسان امکان کسب اطلاعات در مورد ترکیب مواد را بدهد. این اطلاعات به پاسخگویی به سؤالاتی درباره فرآیند تولید مصنوعات، شیوه زندگی و فرهنگ مناطق موردمطالعه کمک می‌کند. همچنین، این بررسی‌ها برای حفاظت، مرمت، تعیین اصالت و سابقه مرمت اشیاء باستانی مفید است. علاوه بر این، میراث فرهنگی به دلیل اثرات مخرب آلودگی محیطی و عوامل طبیعی در حال تخریب است. تخریب آثار تاریخی در فضای باز شناخته‌شده است، اما حتی آثار نگهداری شده در موزه‌ها و کتابخانه‌ها نیز در معرض زوال هستند. این پدیده‌ها باید به‌طور کامل مطالعه شوند تا فرآیند تخریب درک شده و روش‌هایی برای پیشگیری یا کاهش سرعت آن توسعه یابد. طی بیست سال گذشته، پراش پودری پرتو X برای توصیف مواد بلورین و غیر بلورین باستانی، تاریخی و هنری مانند سرامیک، فلزات، محصولات خوردگی، سرباره، سنگ، ملاط، رنگ‌دانه (مواد کاملاً یا تا حدی بلورین)، سلولز، کاغذ، چوب، پاپیروس، شیشه‌های باستانی و موزاییک (مواد غیر بلورین یا تا حدی بلورین) به‌طور گسترده استفاده‌شده است.

واژگان کلیدی: پراش اشعه ایکس، میراث فرهنگی، باستان شناسی، مواد باستانی.

مقاله منتخب دهمین همایش دوسالانه حفاظت و مرمت اشیا فرهنگی و تاریخی و تزئینات وابسته به معماری
دسترسی به این مقاله برای همگان آزاد است. هرگونه استفاده غیرتجاری از آن در صورت ارجاع مناسب، مجاز شناخته می‌شود.

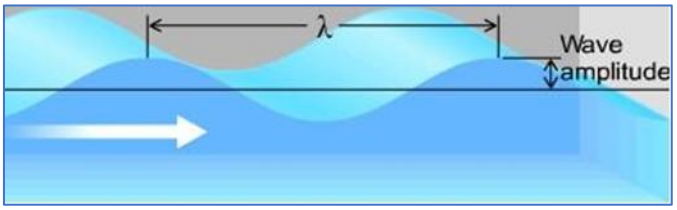
[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-11-25]

۱.مقدمه

استفاده از روش‌های تحلیلی، که ابتدا در علم مواد توسعه یافت، برای اشیای هنری و باستانی گسترش یافته است. این فن‌ها به مرمتگران و باستان‌شناسان امکان می‌دهند اطلاعاتی درباره ترکیب مواد به دست آورند تا به سؤالاتی در خصوص فرآیند تولید مصنوعات و در نتیجه شیوه زندگی و فرهنگ منطقه مورد مطالعه پاسخ دهند. علاوه بر این، چنین بررسی‌هایی در زمینه حفاظت و مرمت اشیای باستانی، تعیین اصالت و سابقه مرمت مفید است. همچنین، میراث فرهنگی ما به دلیل اثرات مخرب آلودگی محیط‌زیستی و عوامل طبیعی در حال نابودی است. تخریب آثار تاریخی در فضای باز شناخته‌شده است، اما حتی آثار موجود در نمایشگاه‌ها، موزه‌ها و کتابخانه‌ها نیز رو به زوال هستند. این پدیده‌ها باید به‌طور کامل مطالعه شوند تا فرآیند تخریب درک شده و روش‌هایی برای جلوگیری یا کاهش سرعت آن توسعه یابد. در طول بیست سال گذشته، روش پراش پودری پرتو ایکس به‌طور گسترده برای توصیف مواد بلوری و غیربلوری مختلف، از جمله مواد باستانی، تاریخی و هنری، استفاده شده است. نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات انجام‌شده توسط نویسندگان و همکارانشان، همچنین تجربیات دیگران بر روی اشیایی از مواد مختلف مانند سرامیک، فلزات، محصولات خوردگی، سرباره، سنگ، ملاط، رنگ‌دانه (مواد تا حدی یا کاملاً بلوری)، سلولز، کاغذ، چوب، پاپیروس، شیشه‌های باستانی و موزاییک (مواد غیربلوری یا تا حدی بلوری) به‌صورت خلاصه ارائه شده است. با توجه به اهمیت و حساسیت بالای آثار تاریخی، هنری و فرهنگی، همواره به دنبال رویکردی غیرمخرب هستیم تا بر اساس تعامل بین امواج الکترومغناطیسی و آثار هنری به حل مسئله بپردازیم. این امر منجر به توسعه روشی مبتنی بر استفاده از فن‌های مختلف مکمل، شامل مجموعه‌ای از روش‌های غیرمخرب (یا میکرومخرب) شده است که قادر به شناسایی خصوصیات کامل اشیا هستند. برای شناخت بهتر، زمینه‌های گوناگون مرتبط را به‌صورت خلاصه بررسی می‌کنیم. روش‌های باستان سنجی به شرح زیر هستند:

۱.۲پراش‌سنج اشعه ایکس

پراش پرتو ایکس در سال ۱۸۹۵ توسط فیزیکدان آلمانی، ویلیام کنراد رونتگن، کشف شد و به دلیل ناشناخته بودن ماهیت پرتو در آن زمان، به این نام ثبت گردید. تابش اشعه ایکس، تابشی الکترومغناطیسی با طول موجی بین ۰.۱ تا ۱۰۰ آنگستروم است که نزدیک به فواصل بین‌اتمی در یک بلور است.



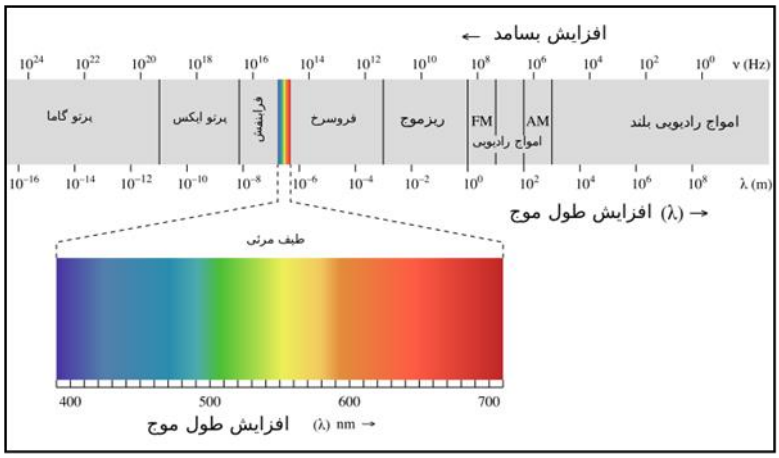
شکل ۱. نمای شماتیک از طول موج

دستگاه پراش اشعه ایکس ابزار مهمی است که برای شناسایی فازها از طریق مقایسه اطلاعات ساختارهای شناخته‌شده به کار می‌رود. XRD تغییرات در مؤلفه‌های مختلف سلول، آرایش، اندازه کریستالی و سایر مؤلفه‌های ساختاری را تعیین می‌کند. حاصل پراش پرتو ایکس، یک دیفراکتوگرام یا الگوی پراش است. هر نمونه با توجه به ساختار بلوری خود، الگوی پراش منحصربه‌فردی دارد که با مقایسه آن با الگوهای پراش استاندارد، نوع ترکیب شناسایی می‌شود. شناسایی نمونه‌ها در الگوی پراش پودری بر اساس موقعیت خطوط و شدت نسبی آن‌ها صورت می‌گیرد. اگر نمونه‌ها خالص باشند، مقایسه الگوی پراش با کتابخانه به‌راحتی انجام می‌شود، اما در مورد نمونه‌های میراث فرهنگی که معمولاً مخلوطی از چندین ماده هستند، این کار نیاز به زمان بیشتری دارد (بهادری، ۱۳۹۳).

۲.۲.آنالیز طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه

کاربرد اصلی این دستگاه، شناسایی کیفی ترکیبات آلی و حتی برخی ترکیبات معدنی است. شناسایی کیفی نمونه مجهول اغلب از طریق مقایسه طیف نمونه با طیف‌های معلوم موجود در کتب مرجع یا کتابخانه طیفی دستگاه انجام می‌گیرد. در صورت عدم دسترسی به چنین منابعی، می‌توان با مراجعه به جدول ارتعاش پیوندهای مختلف در ناحیه IR، گروه‌های عاملی موجود در نمونه مجهول را تعیین کرد که البته این روش بسیار تخصصی است. جذب‌های مربوط به هر پیوند در بخش کوچکی از ناحیه ارتعاشی فروسرخ یافت می‌شوند (نوحی، ۱۳۹۳).

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-11-25]



شکل ۲. طول‌موج طیف‌های موردبررسی توسط FTIR

۳.۲.میکروسکوپ نوری

میکروسکوپ نوری برای بزرگ‌نمایی‌های متفاوت جهت بررسی موجودات و ساختار موادی که با چشم غیرمسلح قابل‌بررسی نیستند، کاربرد دارد. در مطالعات میکروسکوپی، مرحله اول شامل دانش و فنّاوری‌های میکروسکوپ و تحول و تکامل آن‌هاست که قسمت عمده آن بر علم فیزیک، فناوری‌های دقیق و اطلاعات علمی در زمینه‌های دیگر استوار است. مرحله دوم، کاربرد میکروسکوپ به‌عنوان ابزاری برای تشخیص و تحلیل است که مستلزم شناخت مراحل کاری، دقت‌ها و خطاهایی است که در استفاده از این وسیله مدنظر بوده و هر مورد تخصص و شرایط ویژه خود را ایجاب می‌کند. بررسی و مطالعه محصولات خوردگی، آسیب‌شناسی نمونه‌های کاشی لعاب‌دار، آجر و سنگ قبل و بعد از آزمایش‌های مقاومت در برابر تغییر شرایط محیطی، و انجام مطالعات میکروسکوپی روی نمونه‌ها طی مراحل مختلف پیری‌سازی تسریعی از کاربردهای این وسیله است.

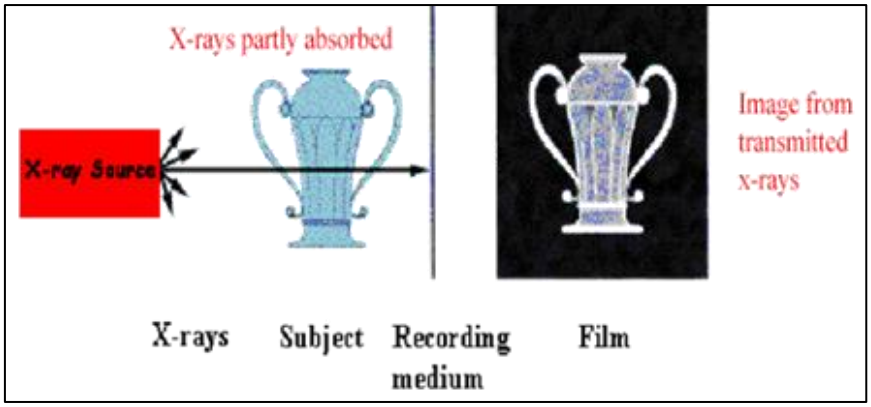
۴.۲.طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس

استفاده از طیف نشری اشعه ایکس برای بررسی ترکیب عنصری مواد، روشی به نام طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس را به وجود آورده است. پرتوهای ایکس در اثر بمباران ماده با ذرات پرانرژی مانند الکترون، پروتون یا فوتون‌های اشعه ایکس ایجاد می‌شوند. برانگیختگی نمونه در اثر تابش پرتو ایکس، انتقال الکترونی در لایه‌های مختلف اتم را به دنبال دارد که هر انتقال الکترونی با نشر یک خط طیفی پرتو ایکس همراه است. طول موج خطوط طیفی نشرشده مبنای تجزیه کیفی عناصر و شدت پرتوها متناسب با فراوانی یا کمیت عناصر موجود در نمونه است. این روش به‌عنوان مکمل مطالعات کانی‌شناسی و پتروگرافی، کاربرد زیادی در بررسی‌های باستان‌شناسی و حفاظت از آثار دارد. از جمله کاربردهای این روش، شناسایی مواد و مصالح (آجر، خشت، ملاط، کاشی، سنگ معدن، سنگ آهک، سرباره، خاک و ...) مورداستفاده در بناها، مجموعه‌ها یا پل‌های تاریخی است که می‌تواند در شناسایی نوع مواد تشکیل‌دهنده، بخش‌های اصلی و مرمتی، ویژگی‌های خاک مورداستفاده برای اقدامات حفاظتی و بازسازی و غیره کمک کند.

۵.۲.پرتونگاری اشعه ایکس (X-Ray Radiography)

این روش برای بررسی آثار مختلف از جمله فلزات و آلیاژها، نقاشی، سفال و نسخ خطی و همچنین در عملیات حفاظت و مرمت آثار به کار می‌رود. شیوه‌های تزیین روی فلزات و ساخت اشیا، نشان‌دهنده مهارت‌های خاص صنعتگران و بازتابی از آداب، رسوم و فرهنگ جوامع بشری است. رادیوگرافی نقش ارزشمندی در تشخیص روش‌های ساخت ایفا می‌کند و به شناخت جوامع تولیدکننده اشیا و گسترش فهم ما از تاریخ فناوری کمک می‌کند. این روش، جزئیات ترکیبی و ساختاری یک شیء را که با چشم غیرمسلح دیده نمی‌شود، نمایان می‌سازد. رادیوگرافی یک روش عکاسی با استفاده از پرتو یونیزه‌کننده است و پرتوهای الکترومغناطیس، اشعه بتا و نوترون‌ها می‌توانند به‌عنوان پرتوهای یونیزه‌کننده در رادیوگرافی به کار روند. در این روش، شیء در برابر پرتو ایکس قرار می‌گیرد و پرتو ایکس نفوذکرده پس از عبور به فیلم رادیوگرافی حساس برخورد می‌کند. تصویر به‌دست‌آمده بر اساس اختلاف مواد در چگالی، ضخامت و نوع مواد، که بر میزان جذب پرتو مؤثر است، شکل می‌گیرد. بنابراین، قسمت‌هایی از شیء که دارای چگالی و عدد اتمی بالایی هستند، بر روی فیلم به‌صورت نواحی تاریک ظاهر می‌شوند (رحیمی، ۱۳۹۳).

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-11-25]



شکل ۳. شمایی از روند تهیه تصویر بوسیله دستگاه پرتونگاری اشعه ایکس

۳. بررسی مواد بر پایه سلولز

۱.۳. کاغذ

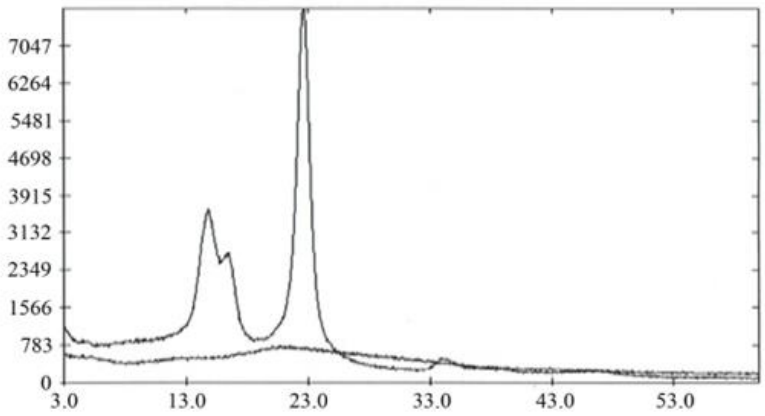
به‌خوبی می‌دانیم که کاغذ از دو بخش اصلی تشکیل شده است: سلولز و مواد افزودنی. سلولز از پاره‌های پارچه کتانی، پنبه و خمیر چوب به دست می‌آید، در حالی که مواد افزودنی شامل رنگ، چسب و پرکننده‌هاست. سلولز تنها بخش بلوری کاغذ است و روش مورداستفاده برای توصیف آن، تعیین ارزش بلورینگی است که با افزایش سن کاهش می‌یابد. دلایل تخریب مواد کتابخانه‌ای توسط عوامل شیمیایی، فیزیکی یا بیولوژیکی به‌طور گسترده بحث شده است (Calvini et al., 1997; Franceschi et al., 2001; Franceschi et al., 2004; Vicini et al., 2004; Princi et al., 2005; Calvini et al., 2006; Franceschi, 2011).

مواد اولیه و تولیدکننده کاغذ در طول زمان تغییر کرده‌اند: قدیمی‌ترین کاغذها که کاملاً از پارچه سلولزی تشکیل شده‌اند، در صورت نگهداری در محیط مناسب، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خود را در طول زمان حفظ می‌کنند. در مقابل، حفاظت از کاغذهای جدید به دلایلی مشکل است (Calvini et al., 2006; Franceschi, 2011).

شاخص نسبی و تبلور ابعاد بلور به‌عنوان ارزیابی کیفی خواص مکانیکی الیاف سلولز در نظر گرفته‌شده و درنتیجه برای شاخص حفاظت از کاغذ استفاده‌شده است. برای این منظور، از روش زاویه پراکندگی اشعه ایکس (WAXS) استفاده‌شده است. تبلور اشعه ایکس (XC) و شاخص نسبی ابعاد میانگین بلوره (A 002/۱) به شرح زیر محاسبه شد: ارزش XC برابر است با نسبت:

$$(I_{002} - I_{AMORPH}) / I_{002} \quad (۱)$$

که در آن I_{002} ارتفاع قله در $\theta = 22.5۲^{\circ}$ و I_{AMORPH} شدت پس‌زمینه در $\theta = 20۲^{\circ}$ است، درحالی‌که A 002 عرض کامل در نیمه ارتفاع قله $\theta = 22.5۲^{\circ}$ است. الگوی اشعه ایکس برای کاغذ سلولز خالص واتمن که با سلولز آمورف مقایسه شده، نشان داده شده است. از طریق این روش، امکان رسیدن به چندین واکنش تغییری یک کاغذ استاندارد و کاغذ واقعی فراهم شد (Calvini et al., 2006; Franceschi, 2011).



شکل ۴. زاویه گسترش الگوی پراش اشعه ایکس برای کاغذ سلولزی خالص در مقایسه با سلولز بی‌نظم. شدت کانت‌ها در واحدهای مطلق در مقابل θ۲ پراگ (زاویه دتکتور)

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-11-25]

۲.۳. چوب

به روشی مشابه، داده‌های XRD در ارزیابی درجه بلورینگی سلولز در انواع مختلف نمونه‌های چوب طبیعی، مصنوعی قدیمی و باستانی اشباع از آب استفاده شده است. نتایج به‌دست‌آمده برای درک اثر زمان بر ساختار و خواص چوب و همچنین بررسی اثر حضور فلزات در داخل چوب‌ها مفید بوده است. به‌طور کلی، اثر تغییرات (آلتراسیون) مس قوی‌تر از آهن است (Franceschi et al., 2008a; Franceschi et al., 2008b; Franceschi et al., 2008c; Vecchio et al., 2006).

سنجش رنگ انجام‌شده بر روی نمونه‌های مختلف چوب در خصوص عملکرد زمان، نتایج تخریب چوب را تصدیق می‌کند. به عبارت دیگر، با افزایش آلتراسیون، رنگ چوب تیره‌تر می‌شود (Franceschi et al., 2008b).

۳.۳. پاپیروس

مطالعات انجام‌شده بر روی ورق‌های پاپیروس جدید (ساخته‌شده در موزه دل پاپیرو دی سیراکوزا) و باستانی (از موزه باستان‌شناسی قاهره) شامل بررسی‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، میکروسکوپ نوری (OM)، پراش اشعه ایکس و آنالیز حرارتی است. نتایج به‌دست‌آمده، اختلاف برجسته‌ای را در تولید پاپیروس روم–یونانی و مصری نشان می‌دهد (Franceschi et al., 2004).

یکی دیگر از نتایج قابل‌توجه در مشاهده میکروسکوپی، ویژگی‌های مورفولوژیکی گیاه پاپیروس است که هنوز در ورق‌های پاپیروس باستانی قابل‌مشاهده است، حتی اگر در نتیجه مراحل تولید و گذشت زمان دچار تغییر شکل شده باشند. پراش پرتو ایکس همراه با OM و آنالیز SEM، تفاوت در محتویات لیگنین‌های مختلف در بخش‌های مختلف گیاه پاپیروس را برجسته کرده است. علاوه بر پراش پرتو ایکس، آنالیز حرارتی و مشاهده با میکروسکوپ ابزارهای مفیدی برای مطالعه پاپیروس‌های باستانی هستند که به شناسایی مواد افزودنی مورداستفاده در تولید ورق‌های پاپیروس کمک می‌کند. کریستال‌های اگزالات کلسیم و دانه‌های نشاسته تشخیص داده شده، نشان می‌دهد کاغذهای مصر باستان در مقایسه با پاپیروس یونانی–رومی از نشاسته غنی‌تر است. مشاهدات محققان نشان می‌دهد پاپیروس‌های مصری ترجیحاً شامل نشاسته هستند، یعنی ماده‌ای که به‌صورت طبیعی در این گیاه به‌صورت ذخیره وجود دارد. در حقیقت، آن را در باقی‌مانده‌های دسته آوندی غلاف نشاسته تشخیص داده‌اند. در نتیجه، پاپیروس مصری و یونانی–رومی باستان در رفتار حرارتی نیز متفاوت‌اند (Franceschi et al., 2004).

۴. بررسی سایر مواد بلوری

۱.۴. فلزات، محصولات خوردگی، سرباره

برای مواد بلوری، استفاده از روش‌های پراش اشعه ایکس مفید است. فلزات کوچک مانند سکه را می‌توان مستقیماً با پراش‌سنج آنالیز کرد. برای اشیای بزرگ‌تر، گاهی مجبور به تهیه نمونه‌های میکرو هستیم که این واقعیت، روش را تا حدی مخرب می‌کند. در این مورد، روش گاینر نشان داد که پراش پرتو ایکس روش مهمی برای نشان‌دادن تغییرات کوچک در فاصله شبکه‌ای آلیاژ محلول‌های جامد با مقایسه شدت و نسبت خطوط الگوی پراش است و همچنین برای تشخیص تفاوت‌های ساختاری کوچک بین محصولات خوردگی مشابه کاربرد دارد (Franceschi et al., 2007; Franceschi, 2008; Franceschi et al., 1998b & Stagno et al., 1992; Franceschi).

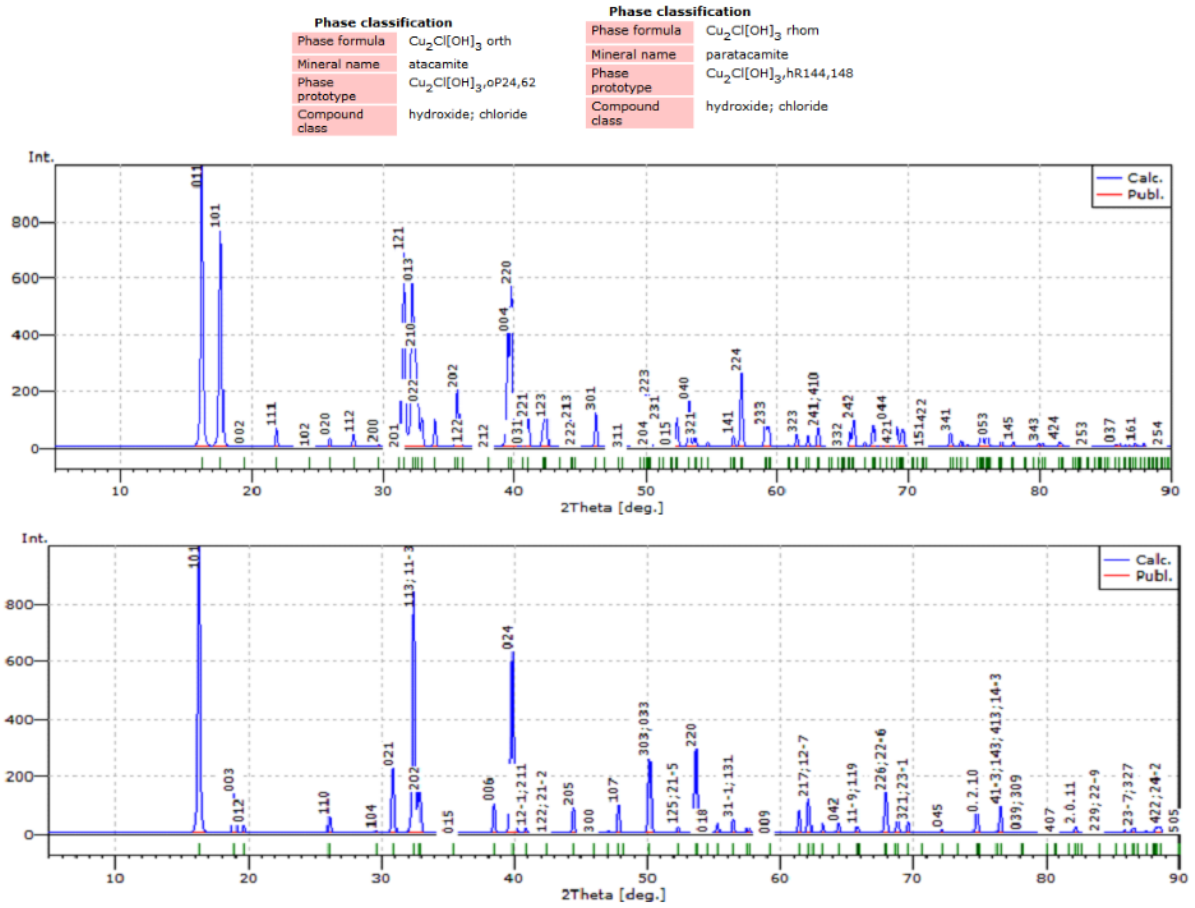
در مطالعات مربوط به مجسمه‌سازی باستانی و بقایای فلزی باستانی، با استفاده از پراش پودری پرتو ایکس، ترکیب آلیاژ و ماهیت محصولات خوردگی اغلب مورد ارزیابی قرار می‌گیرد



شکل ۵: نمونه پودری برای انجام آنالیز

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-11-25]

نمونه‌ای از آماده‌سازی نمونه برای پراش پودری نشان داده شده است که در آن از پودر Si به‌عنوان استاندارد برای تصحیح خطوط پراش پرتو ایکس دو محصول خوردگی مختلف استفاده شده است. در بررسی پراش پرتو ایکس، یک مرجع استاندارد و بانک اطلاعاتی داریم که با مقایسه پراش به‌دست‌آمده با الگوهای پراش استاندارد، نوع ترکیب شناسایی می‌شود. شناسایی نمونه‌ها در الگوی پراش پودری بر اساس موقعیت خطها و شدت نسبی آن‌ها صورت می‌گیرد. بانک داده برای محصولات خوردگی اصلی برنز، جهت ارزیابی سریع و مطمئن برنزهای باستانی توسعه داده شده است (Nole, n.d & Franceschi).



شکل ۶. پراش پودری اشعه ایکس برای آتاکامیت (بالا) و پاراتاکامیت (در زیر)، دو محصول خوردگی رایج برنز

مقایسه بین الگوهای پراش اشعه ایکس دو محصول خوردگی معمول مجسمه‌های برنزی که در معرض محیط دریایی تشکیل می‌شوند، آتاکامیت و پاراتاکامیت با فرمول شیمیایی مشابه $Cu_2Cl(OH)_3$، رایج‌ترین محصولات خوردگی هستند.

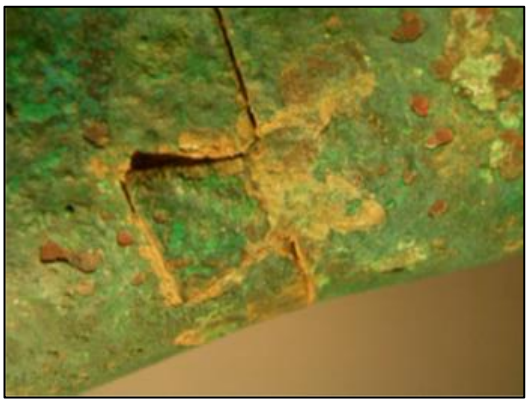


شکل ۷. سکه سربی مربوط به دوران پیش از روم با امضای آلبین

یک سکه مربوط به دوران پیش از روم با امضای آلبین تیمیلوم که از سرب تقریباً خالص تشکیل شده، نشان داده شده است (Franceschi & Palazzi, 2000). XRDامکان قرار دادن مستقیم سکه در دیفراکتومتر اتوماتیک دستگاه برای تشخیص کانی‌های سطحی سرب به

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-11-25]

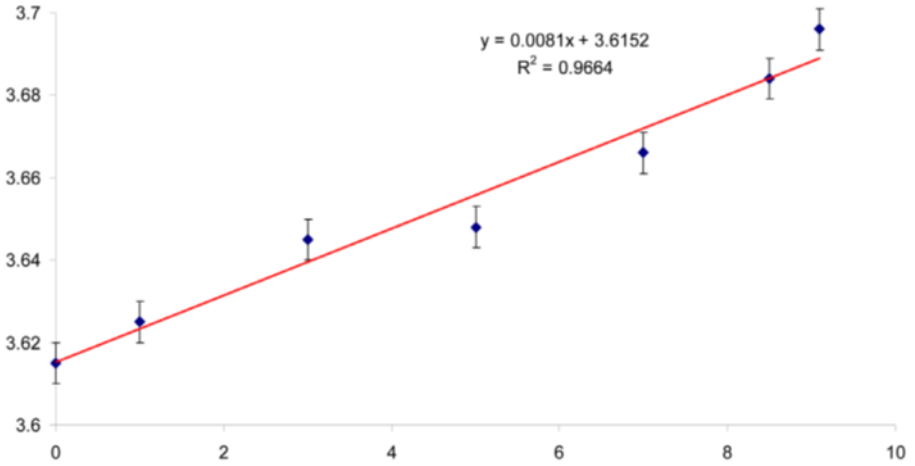
شکل کربنات سرب را می‌دهد. تمام قله‌ها می‌توانند بر اساس ساختار ارتورومبیک سروسیت با a=5.195 Å ، b=8.436 Å، c=6.152 Å شاخص‌بندی شوند.



شکل ۸. محصولات خوردگی در یک مجسمه برنزی رومی

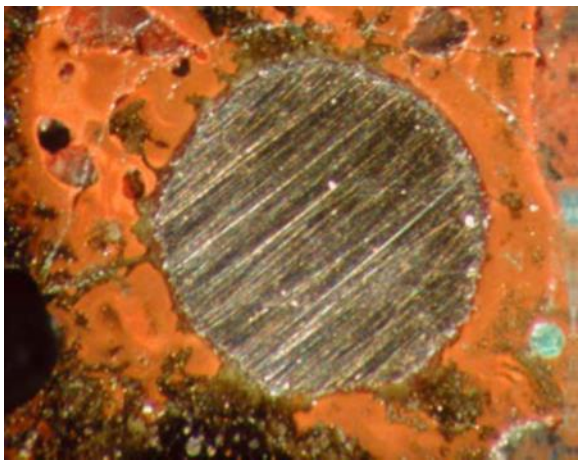
نمونه‌ای از محصولات خوردگی در یک مجسمه برنزی رومی نشان داده شده است که محل ارتباط دو نقطه اتصال در مجسمه است.

بررسی سرباره‌های سایت‌های مختلف باستان‌شناسی با استفاده از هر دو روش پراش اشعه ایکس و میکروسکوپ نوری و الکترونی انجام شده است (Luciano, 2003 & Franceschi, 1998; Franceschi).



شکل ۹. قانون وگارد نشان‌دهنده وابستگی خطی فاصله شبکه در ترکیب: محور y نشان‌دهنده مقدار ثابت شبکه در یک آنگستروم در مقابل ترکیب درصد اتمی قلع در آلیاژ برنز

تغییر فاصله شبکه برای برنز حرارت‌دیده از ترکیب‌های مختلف، در یک روند خطی معمول برای محلول جامد که به‌عنوان قانون وگارد شناخته شده است، آورده شده است. این روند، مشابه نتایج به‌دست‌آمده برای محلول جامد Cu-As و Cu-Zn است که در ارزیابی ترکیبات آلیاژهای دوتایی باستانی مفید هستند.



شکل ۱۰. مقطع میکروسکوپی از سرباره ذوب مس (۱۰۰ برابر)

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-11-25]

تصویر میکروسکوپی گزارش‌شده از یک مقطع سرباره حاصل ذوب مس ارائه شده است (Luciano, 2003 & Franceschi).

۲.۴. سنگ، ملاط

پراش پرتوایکس ابزاری مهم در مطالعه این نوع مواد برای شناسایی ترکیب، تخریب یا حفاظت و در برخی موارد، شناسایی منشأ آن‌هاست (Contardi et al., 1994; Contardi et al., 1997; Bakolas et al., 1995; Contardi et al., 2000).

۳.۴. شیشه‌ای، موزاییک

یک پایان‌نامه دکتری بر روی شیشه‌های باستانی عصر برنز و عصر آهن، مربوط به حفاری‌های باستان‌شناسی لیگوریا انجام شده است (Nole, 2012). بررسی اصلی با استفاده از فلورسانس اشعه ایکس، میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شده است، اما در برخی موارد، پراش پرتو ایکس برای شناسایی اجزای بلوری حاضر در شیشه، یعنی رنگ و عامل انعکاس‌دهنده، مورداستفاده قرار گرفته است (Franceschi et al., 2010). تعدادی مطالعه بر روی موزاییک انجام‌شده که معمولاً با استفاده از دستگاه‌های فلورسانس اشعه ایکس قابل‌حمل بوده است (Vassallo et al., 2009). هنگامی‌که یک تکه موزاییک جداگانه در دسترس باشد، برای جلوگیری از نمونه‌سازی، آزمایش پراش اشعه ایکس به‌طور مستقیم بر روی تکه موزاییک انجام‌شده است (Nole et al., 2010).

۴.۴. رنگ‌دانه، رنگ

بدیهی است که رنگ‌دانه‌ها به‌عنوان مواد بلوری معمولاً با استفاده از روش پراش اشعه ایکس شناسایی می‌شوند (Mairani et al., 1997; Franceschi et al., 2011). علاوه بر توصیف و شناسایی رنگ‌دانه مورداستفاده در نقاشی، با استفاده از پراش پودری اشعه ایکس و روش‌های آنالیز حرارتی، ثبات رنگ‌دانه و تشخیص فرآیند تخریب تعیین می‌شود. برای این منظور، از یک سری رنگ‌دانه‌های تجاری مانند آزوریت، مالاکیت، لاجورد طبیعی، آبی مصری و یا رنگ‌دانه‌های تهیه‌شده در آزمایشگاه مانند استات مس و استات مس خنثی استفاده شده است. استفاده از تابش سینکروترون برای بهبود شناخت انتقال فازی و محدوده پایداری حرارتی هر رنگ‌دانه، با هدف تعریف مقیاس پایداری ترمودینامیکی نسبی رنگ‌دانه و محصولات آلتراسیون آن است. هدف گسترش مطالعه بر روی ثبات رنگ‌دانه، دوام رنگ و آثار هنری است.

۵. نتیجه‌گیری

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، در مطالعات مربوط به میراث فرهنگی، باستان‌شناسی و آثار هنری، انجام مجموعه‌ای از بررسی‌های فیزیکی و شیمیایی مکمل برای شناخت کامل اشیا لازم است. نشان داده شد که پراش پرتوایکس ابزاری مفید نه‌تنها در توصیف فازهای بلوری، بلکه در مواد تقریباً بی‌نظم نیز هست. گسترش مطالعات در طی سال‌ها فعالیت در بخش‌های مختلف حفاظت از میراث فرهنگی، اطلاعات بسیار مفیدی برای باستان‌شناسان، مرمتگران و متصدیان میراث فرهنگی ارائه داده است.

سپاسگزاری

از تمامی همکاران عزیز در پژوهشکده حفاظت و مرمت، به‌ویژه سرکار خانم رویا بهادری که افتخار شاگردی ایشان را در بخش XRD دارم، کمال تشکر را دارم. همچنین از آقای دکتر احمدی که با راهنمایی‌ها و تشویق مداومشان شور و شوق کار را در من ایجاد کردند، قدردانی و تشکر می‌نمایم.

منابع

Bakolas, A., Biscontin, G., Contardi, V., Franceschi, E., Moropoulou, A., Palazzi, D., & Zendri, E. (1995). Thermoanalytical research on traditional mortars in Venice. Thermochimica Acta, 269/270, 817–828.

Calvini, P., Franceschi, E., & Palazzi, D. (1997). Traditional and new methodologies in the study of paper degradation. In Proceedings of the 1st International Congress on Science and Technology for the Safeguard of Cultural Heritage in the Mediterranean Basin (pp. 1245–1248). Catania, Siracusa, 27 November–2 December 1995.

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-11-25]

Calvini, P., Gorassini, A., Luciano, G., & Franceschi, E. (2006). FTIR and WAXS analysis of periodate oxycellulose: Evidence for a cluster mechanism of oxidation. Vibrational Spectroscopy, 40(2), 177–183.

Contardi, V., Franceschi, E., & Palazzi, D. (1997). The damaging of Pietra di Finale consequent to the action of polluted rains: Preliminary investigations. In Proceedings of the 1st International Congress on Science and Technology for the Safeguard of Cultural Heritage in the Mediterranean Basin (pp. 1091–1093). Catania, Siracusa, 27 November–2 December 1995.

Contardi, V., Franceschi, E., Palazzi, D., & Pedemonte, E. (1994). Studies on environmental deterioration in slate manufactured articles of the old historical centre of Genoa using X-ray diffraction, scanning electron microscopy, calcimetry and porosimetry. Some investigations on polymeric materials shielding. Science and Technology for Cultural Heritage, 3, 149–153.

Contardi, V., Franceschi, E., Zanicchi, G., Palazzi, D., Bosio, S., Cortesogno, L., & Gaggero, L. (2000). On the conservation of architectural artistic handwork of the Pietra di Finale. Journal of Cultural Heritage, 1(1), 1–8.

Franceschi, C. M., Costa, G., & Franceschi, E. (2011). Aging of the paint palette of Valerio Castello (1624–1659) in different paintings of the same age (1650–1655). Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 103(1), 69–73.

Franceschi, E. (1998). Nuovi scavi nel complesso di S. Maria in Passione: Indagini archeometriche. Rivista di Studi Liguri, 63–64, 309–313.

Franceschi, E. (2000). Syntèse de dix ans de recherche sur la première métallurgie en Ligurie (1988–1998). In Proceedings of the 2nd International Congress on Science and Technology for the Safeguard of Cultural Heritage in the Mediterranean Basin (Vol. 1, pp. 521–525). Paris, 5–9 July 1999.

Franceschi, E. (2008). Indagini archeometriche su due reperti metallici provenienti dal lago di Mezzano. In P. Petitti & F. Rossi (Eds.), AES Metalli Preistorici dalla Tuscia, Catalogo della Mostra, Museo della Preistoria della Tuscia e della Rocca Farnese, Collana di Studi, Testi e Cataloghi, 2 (pp. 17–20). Valentano, Rocca Farnese, 12 September–31 October 2008.

Franceschi, E. (2011). Thermoanalytical methods: A valuable tool for the study of cellulose-based materials of art and archaeology. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 104(2), 527–539.

Franceschi, E. (2014). X-ray diffraction in cultural heritage and archaeology studies. Open Access Library Journal (OALib), 1, 1–10.

Franceschi, E., & Campana, N. (1992). Analisi di manufatti metallici preistorici e protostorici dal Castellaro di Uscio. In Archeometallurgia: Ricerche e prospettive (pp. 527–534). Cooperativa Libraria Universitaria Editrice.

Franceschi, E., & Luciano, G. (2003). Indagini archeometriche su alcune scorie provenienti dagli scavi di Nora. In B. M. Giannattasio (Ed.), NORA area c scavi 1996–1999 (pp. 293–299). Brigati ed.

Franceschi, E., & Palazzi, D. (2000). The contribution of micro-destructive investigations on corrosion layers to the study of provenance of archaeological bronze artefacts. In Proceedings of the 2nd International Congress on Science and Technology for the Safeguard of Cultural Heritage in the Mediterranean Basin (Vol. 1, pp. 413–416). Paris, 5–9 July 1999.

Franceschi, E., Cascone, I., & Nole, D. (2007). Non-destructive characterisation of several copper-based finds from different archaeological sites of Liguria (Italy). In Archaeometallurgy 2007, Grado, Aquileia.

Franceschi, E., Cascone, I., & Nole, D. (2008a). Thermal, XRD and spectrophotometric study on artificially degraded woods. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 91(1), 119–123.

Franceschi, E., Cascone, I., & Nole, D. (2008b). Study of artificially degraded woods simulating natural ageing of archaeological findings. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 92(1), 319–322.

Franceschi, E., Cascone, I., & Nole, D. (2008c). Caratterizzazione chimico fisica di legni bagnati e confronto con legni archeologici. GRADUS. Rivista di Archeologia dell'acqua, 3, 79–90.

Franceschi, E., Giorgi, M., Luciano, G., & Palazzi, D. (2004). Archaeometallurgical characterisation of two small copper-based statues from the Cividale Museum (Friuli, Italy). Journal of Cultural Heritage, 5(2), 205–211.

Franceschi, E., Luciano, G., Carosi, F., Cornara, L., & Montanari, C. (2004). Thermal and microscope analysis as a tool in the characterization of ancient papyri. Thermochimica Acta, 418(1–2), 39–45.

Franceschi, E., Macciò, L., & Palazzi, D. (1998a). A physical chemical contribution to the knowledge of ancient statuary: Investigations on some metallic objects from the Capitoline Museums, Rome. Praktische Metallographie, 35(12), 681–691.

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-11-25]

Franceschi, E., Macciò, L., Palazzi, D., & Rosa, L. (1998b). The corrosion of metallic artifacts within different environments. Archaeological objects and laboratory simulations. In METAL 98 (pp. 92–93). James & James (Science Publishers).

Franceschi, E., Manfrinetti, P., Minguzzi, M., & Palazzi, D. (1994). Microdestructive sampling and analyzing methods in the characterization of ancient metallic artifacts. In Proceedings of the 4th International Conference on Non-Destructive Testing of Works of Art (pp. 713–722). Berlin, 3–8 October 1994.

Franceschi, E., Palazzi, D., & Rosa, L. (2001). Indagini chimico fisiche su reperti metallici ritrovati in una tomba campaniforme in località Castellari, presso Loano (Savona, Italia). In Bell Beakers Today (pp. 629–631). Riva del Garda, 11–16 May 1998, Trento.

Ienco, M. G., Pinasco, M. R., Stagno, E., Campana, N., Maggi, R., & Franceschi, E. (1995). Some aspects of metallurgical technologies in prehistoric and protohistoric Liguria. Praktische Metallographie, 4, 166–181.

Mairani, A., Matthaes, P., Pedemonte, E., Franceschi, E., Bensi, P., & Terminiello, G. (1997). Bernardo Strozzi: An example of analytical methodic. In Proceedings of the 1st International Congress on Science and Technology for the Safeguard of Cultural Heritage in the Mediterranean Basin (pp. 575–577). Catania, Siracusa, 27 November–2 December 1995.

Nole, D. (2012). Metodi chimico-fisici per i beni culturali: Studio archeometrico su materiali vitrei della Liguria antica [Doctoral dissertation]. University of Genoa.

Nole, D., Franceschi, E., Masi, C., & Vassallo, S. (2010). Indagini archeometriche non distruttive sui mosaici del sacrario dei caduti di Staglieno a Genova. In M. Vandini (Ed.), Riflessioni e Trasparenze: Diagnosi e Conservazione di Opere e Manufatti Vetrosi, Atti del V Congresso Nazionale dell'AIAr (pp. 193–205). Pàtron Editore.

Pifferetti, A. A., Franceschi, E., & Marino, M. (2001). Estudio arqueometalurgico de una diadema del alto Anchayuyo. In Mendoza, Jornadas SAM, CONAMET—AAS 2001 (pp. 779–786). September 2001.

Princi, E., Vicini, S., Pedemonte, E., Mulas, A., Franceschi, E., Luciano, G., & Trefiletti, V. (2005). Thermal analysis and characterisation of cellulose grafted with acrylic monomers. Thermochimica Acta, 425(1–2), 173–179.

Rafalska-Lasocha, A., & Lasocha, W. (n.d.). X-ray diffraction in investigations of the objects of cultural heritage.

Schreiner, M., Frühmann, B., Jembrih-Simbürger, D., & Linke, R. (2004). X-rays in art and archaeology – An overview. International Centre for Diffraction Data (ICDD), 47.

Stagno, E., Ienco, M. G., Pinasco, M. R., Franceschi, E., Campana, N., & Maggi, R. (1992). Studio di manufatti in bronzo del VII sec. a. C. provenienti dalla Necropoli di Chiavari. La Metallurgia Italiana, 84(10), 795–804.

Uda, M., Demortier, G., & Nakai, I. (2005). X-rays for archaeology. Springer.

Vassallo, S., Franceschi, E., & Nole, D. (2009). Indagini sul Sacrario dei Caduti della Prima guerra mondiale di Staglieno. In G. Rossini & C. Masi (Eds.), Da Baroni a Piacentini, Immagine e memoria della Grande Guerra a Genova e in Liguria (pp. 186–190). SKIRA Editore.

Vecchio, S., Luciano, G., & Franceschi, E. (2006). Explorative kinetic study on the thermal degradation of five wood species for the application in the archaeological field. Annali di Chimica, 96(11–12), 715–725.

Vicini, S., Princi, E., Luciano, G., Franceschi, E., Pedemonte, E., Oldak, D., Kaczmarek, H., & Sionkowska, A. (2004). Thermal analysis and characterisation of cellulose oxidised with sodium methaperiodate. Thermochimica Acta, 418(1–2), 123–130.

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-11-25]