Micro-Observation: Magnifying Hidden Secrets in Historical Artifacts

Mandana Tayebi *

Research Center for Conservation of Cultural Relics, Research Institute of Cultural Heritage & Tourism, Tehran, Iran

Abstract

Archaeological artifacts represent the cultures and civilizations of the past, carrying invaluable information about daily life, beliefs, technology, and social relations of those times. With advancements in technology, new tools and methods have emerged for examining and analyzing these artifacts, providing new insights into their unknown aspects.Micro-observation emphasizes the systematic and detailed examination of artifacts and the use of innovative techniques, playing a key role in the conservation and restoration of cultural and historical objects. This article reviews various techniques of micro-observation, such as microscopic studies, high-resolution imaging, 3D scanning, and spectroscopy analysis, demonstrating how these technologies contribute to a deeper understanding of the initial conditions of materials and patterns of degradation. Additionally, presented case studies illustrate the successful applications of micro-observation in various fields, highlighting its diversity and effectiveness in addressing specific challenges in the conservation and restoration of fragile and valuable objects.

Keywords: Micro-observation, technology, pathology, documentation, conservation, restoration

Knowledge and Conservation Restoration

Special Issue. Vol .1
No.2
2017 December
Pages 50-59

https://journal.richt.ir/kcr

Corresponding Author

Mandana Tayebi

Research Center for Conservation of Cultural Relics, Research Institute of Cultural Heritage & Tourism, Tehran, Iran

Email
m.tayebi@richt.ir

Copyright © 2017,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.

رَصَد خُرد (آشکارسازی اسرار پنهان در آثار تاریخی)

ماندانا طیبی*

کارشناس ارشد، پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی–فرهنگی. ایران

چکیده

آثار باستانی نمایندگان فرهنگ و تمدن گذشته و حامل اطلاعات ارزشمندی درباره زندگی روزمره، باورها، فناوری و روابط اجتماعی آن دوران هستند. با پیشرفت فناوری، ابزارها و روش‌های نوینی برای بررسی و تحلیل این آثار پدید آمده‌اند و می‌توانند اطلاعات جدیدی درباره جنبه‌های ناشناخته آن‌ها فراهم کنند. رصد خُرد با بررسی دقیق و نظام‌مند وضعیت آثار و استفاده از روش‌های نوآورانه، به‌عنوان یک روش علمی، نقشی کلیدی در حفاظت و مرمت اشیاء فرهنگی و تاریخی دارد. این مقاله مروری است بر برخی از روش‌های مختلف رصد خرد؛ مانند مطالعات میکروسکوپی، تصویربرداری با وضوح بالا، اسکن سه‌بعدی و تحلیل طیف‌سنجی و نشان می‌دهد که چگونه این فناوری‌ها به درک عمیق‌تر از شرایط اولیه مواد و الگوهای تخریب کمک می‌کنند. همچنین، مطالعات موردی ارائه‌شده کاربردهای موفق رصد خُرد در زمینه‌های مختلف را نشان می‌دهند و تنوع و اثربخشی آن را در مواجهه با چالش‌های خاص در حفاظت و مرمت اشیاء شکننده و ارزشمند برجسته می‌سازند.

واژگان کلیدی: رصد خُرد، فن‌شناسی، آسیب‌شناسی، مستندنگاری، حفاظت، مرمت

فصلنامه دانش حفاظت و مرمت

ویژه‌نامه: سال اول، شماره ۲
پاییز.۱۳۹۶
۵۰ –۵۹

https://journal.richt.ir/kcr

نویسنده مسئول
ماندانا طیبی
کارشناس ارشد، پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی–فرهنگی. ایران

رایانامه
m.tayebi@richt.ir

دسترسی به این مقاله برای همگان آزاد است. هرگونه استفاده غیر تجاری از آن در صورت ارجاع مناسب، مجاز شناخته می‌شود.

مقدمه

حفاظت و مرمت اشیاء فرهنگی به‌دلیل نقش حیاتی که در حفظ میراث تاریخی و فرهنگی ملت‌ها ایفا می‌کند، از اهمیت بالایی برخوردارند. این آثار که نمادهایی از تاریخ و فرهنگ یک جامعه هستند، علاوه‌بر اینکه به‌عنوان منابع آموزشی و پژوهشی عمل می‌کنند، راه‌های فهم ما از گذشته و حفظ تاریخ معاصر را فراهم می‌آورند (Smith, 2020).

تحقیقات در زمینه حفاظت و مرمت اشیاء تاریخی به دهه‌ها قبل برمی‌گردد. یکی از نخستین مطالعات در این حوزه در سال ۱۹۷۵ توسط هاوکز[1] انجام شد که به بررسی روش‌های مرمت و تأثیر آن‌ها بر ارزش تاریخی اشیاء پرداخت. رصد خُرد شامل روش‌های پیشرفته‌ای است که امکان بررسی دقیق و جزئی اشیاء را فراهم می‌آورد؛ این روش‌ها که شامل تصویربرداری با وضوح بالا، تحلیل‌های طیف‌سنجی و میکروسکوپی الکترونی (SEM) می‌شوند، به پژوهشگران اجازه می‌دهند تا آسیب‌های موجود را به‌دقت شناسایی کنند و به تحلیل مواد سازنده اشیاء بپردازند. این امر در تعیین استراتژی‌های مرمتی مؤثر، ضروری است (Brown & Taylor, 2021). برانتی[2] و همکارانش در سال ۲۰۱۳ در پژوهش‌های خود به بررسی تأثیر فناوری‌های نوین بر تحلیل اشیاء تاریخی پرداخته و نشان داده‌اند که به‌عنوان نمونه استفاده از میکروسکوپ‌های الکترونی و طیف‌سنجی می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره ترکیبات مواد ارائه دهد. در این راستا، رصد خُرد به‌عنوان یک روش علمی، نقش بسزایی در حفظ و نگهداری این آثار دارد و به شناسایی به‌موقع مشکلات موجود و نیازهای مرمتی کمک شایانی می‌کند (Jones, 2019). علاوه بر این، از رصد خُرد در شناسایی تغییرات محیطی و تأثیر آن‌ها بر اشیاء و محافظت بهتر در برابر عوامل تخریبی می‌توان بهره برد (Wilson, 2018).

استفاده از میکروسکوپ‌های الکترونی و روش‌های پیشرفته دیگر، مانند طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس (XRF) و توموگرافی کامپیوتری (CT)، به محققان این امکان را می‌دهد تا به بررسی دقیق‌تر ترکیبات شیمیایی، ساختارهای داخلی و سطوح آثار باستانی بپردازند. این روش‌ها می‌توانند اطلاعات ارزشمندی درباره فرایندهای ساخت، مواد اولیه استفاده‌شده و روش‌های هنری و صنعتی زمان ساخت اثر فراهم کنند. برای مثال، بررسی بافت سطوح سفال‌های باستانی با میکروسکوپ الکترونی می‌تواند به شناسایی روش‌های ساخت و ترکیبات شیمیایی آن‌ها کمک کند. استفاده از طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس برای تحلیل رنگ‌های استفاده‌شده در نقاشی‌های دیواری مصر باستان نشان داده است که هنرمندان آن دوران از ترکیبات مختلفی مانند آهن و مس برای تولید رنگ‌های متنوع استفاده می‌کردند. این یافته‌ها اطلاعاتی درباره روش‌های هنری و مواد مورد استفاده فراهم می‌کنند (Johnson & Carter, 2019) و می‌توانند دیدگاه‌های جدیدی درباره مواد سازنده، مصالح مرمتی و شیوه‌های حفاظتی مناسب برای آثار ارائه دهند.

ضرورت رصد خُرد در حفاظت و مرمت اشیاء تاریخی

رصد خُرد در حفاظت و مرمت اشیاء تاریخی به معنای نظارت و بررسی مداوم وضعیت این اشیاء با هدف حفظ و نگهداری بهتر آن‌ها است. این رصد شامل جنبه‌های کلیدی است که در این مقاله به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

۱. شناسایی آسیب‌ها: رصد خُرد به کارشناسان امکان شناسایی آسیب‌های کوچک و پنهانی را می‌دهد که در ارزیابی‌های اولیه ممکن است نادیده گرفته شوند. از روش‌های مورد استفاده برای این کار میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی هستند که در شناسایی مواد و آسیب‌های بالقوه در راستای انجام اقدامات اصلاحی سریع و مؤثر کمک می‌کنند (Garcia, 2022).

۲. تحلیل مواد: روش‌های پیشرفته رصد خُرد، مانند طیف‌سنجی مادون‌قرمز و رامان، امکان تحلیل دقیق ترکیب شیمیایی و فیزیکی مواد سازنده اشیاء را فراهم می‌آورند. این اطلاعات برای انتخاب دقیق‌ترین مواد و روش‌های حفاظت و مرمت استفاده می‌شود و می‌تواند به حفظ اصالت و دوام بیشتر اشیاء بیانجامد (Johnson, 2023) .

۳. پیشگیری از آسیب‌های محیط: با پایش دقیق تغییرات محیطی مانند دما، رطوبت و نور، می‌توان شرایط نامطلوبی را شناسایی کرد که ممکن است به آثار تاریخی آسیب برسانند. استفاده از سنسورهای پیشرفته و سیستم‌های کنترل اتوماتیک محیط، به مرمتگران امکان انجام به‌موقع اقدامات پیشگیرانه را می‌دهد و از این طریق سبب افزایش طول عمر اشیاء می‌شود (Miller, 2021).

۴. بهبود فرایند مرمت: استفاده از رصد خُرد در فرایندهای مرمت نه‌تنها به بهینه‌سازی آن‌ها کمک می‌کند، بلکه استفاده از ابزارهای آزمایشگاهی پیشرفته، امکان ارزیابی علمی و دقیق کیفیت کارهای انجام‌شده را فراهم می‌آورد. این رویکرد نوین به مرمتگران اجازه می‌دهد که با استفاده از داده‌های عینی، نتایج کار خود را مورد ارزیابی قرار دهند و روش‌های مرمت را براساس شواهد واقعی بهبود بخشند (Lee & Kim, 2022).

۵. مستندسازی و ثبت اطلاعات: رصد خُرد به ثبت دقیق وضعیت اشیاء قبل و بعد از مرمت کمک می‌کند. این اطلاعات نه‌تنها برای مرمت‌های بعدی بلکه به‌عنوان بخشی از تاریخچه هر شیء ارزشمند هستند. ثبت منظم و دقیق این داده‌ها به حفظ سوابق تاریخی و فرهنگی کمک شایانی می‌کند و امکان مقایسه تغییرات طولانی‌مدت را فراهم می‌آورد (Smith, 2020).

نمونه‌هایی از تحقیقات پیشین

۱. تحلیل میکروسکوپی مواد: در مطالعه‌ای که توسط گارسیا و همکارانش در سال ۲۰۲۲ انجام شد، استفاده از میکروسکوپ الکترونی برای تحلیل مواد سازنده اشیاء تاریخی مورد بررسی قرار گرفت. این مطالعه نشان داد که تحلیل دقیق مواد می‌تواند به شناسایی آسیب‌های پنهان و نیازهای مرمت کمک کند (Garcia, 2022).

۲. رصد تغییرات محیطی: میلر و همکارانش در سال ۲۰۲۱ در تحقیقی به بررسی تأثیر تغییرات دما و رطوبت بر اشیاء فرهنگی پرداختند. نتایج نشان داد که رصد دقیق این تغییرات می‌تواند به پیشگیری از آسیب‌های جدی کمک کند (Miller, 2021).

.۳. روش‌های نوین در مرمت: در سال ۲۰۲۳ جانسون در مطالعه‌ای به بررسی روش‌های نوین رصد خُرد در مرمت اشیاء پرداخت. این مطالعه نشان داد که استفاده از فناوری‌های نوین مانند تصویربرداری سه‌بعدی و تحلیل شیمیایی می‌تواند به بهبود فرایند مرمت کمک کند (Johnson, 2023).

۴. آموزش متخصصان مرمت: در سال ۲۰۲۲ لی و کیم در تحقیقی به بررسی نیازهای آموزشی متخصصان مرمت در زمینه رصد خُرد پرداختند. این مطالعه بر اهمیت آموزش‌های تخصصی در راستای بهبود فرایندهای مرمت تأکید کرد (Lee & Kim, 2022).

گزیده‌ای از روش‌های رصد خُرد و کاربرد آن‌ها

با توجه به پیشرفت‌های اخیر در فناوری و ابزارهای علمی، انتظار می‌رود که این روش‌ها به کشف اطلاعات جدید و ارزشمندی درباره آثار باستانی منجر شوند. این روش‌ها نه تنها به محققان در فهم بهتر هنر و علم گذشته کمک می‌کنند، بلکه می‌توانند کمکی برای حفاظت بهتر از این آثار باشند (Jones, 2018).

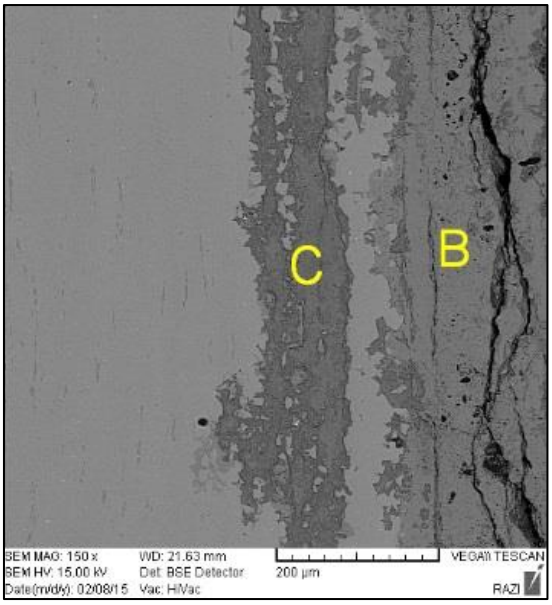
میکروسکوپ الکترونی

از روش‌های مهم در رصد خُرد استفاده از میکروسکوپ الکترونی است. این ابزار قدرتمند می‌تواند جزئیات بسیار ریز سطوح را با بزرگ‌نمایی بالا نمایش دهد. میکروسکوپ‌های الکترونی دو نوع اصلی دارند: میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)؛ هر دو نوع میکروسکوپ دارای قابلیت‌های منحصربه‌فردی هستند که می‌توانند در مطالعات باستان‌شناسی، حفاظت و مرمت آثار بسیار مفید باشند (Jones, 2018).

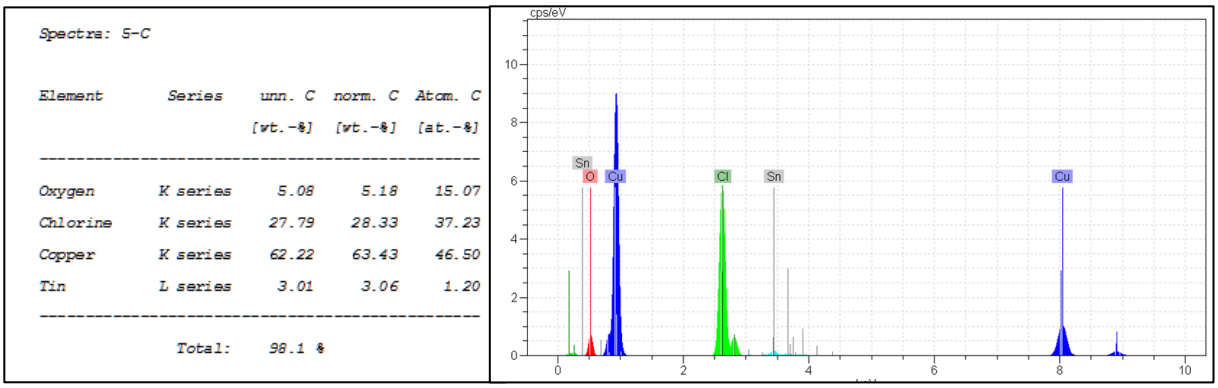
میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با اسکن کردن سطح نمونه با یک پرتوی الکترونی، تصاویر سه‌بعدی با وضوح بالا از سطوح مختلف ارائه می‌دهد. این روش برای مطالعه بافت‌ها و ساختارهای سطحی آثار باستانی بسیار مفید است. برای مثال، بررسی سطوح سفال‌ها با استفاده از SEM می‌تواند به شناسایی روش‌های ساخت و فرایندهای پخت آن‌ها کمک کند. مطالعات نشان داده‌اند که بافت و ترکیبات سطحی سفال‌ها می‌توانند اطلاعاتی درباره منشأ مواد اولیه و روش‌های تولید ارائه دهند (Clark, 20190).

به‌عنوان نمونه در مطالعه انجام‌شده روی یک اثر برنزی مکشوفه در محوطه تاریخی بم (کد نمونهBM9) با استفاده از میکروسکوپ الکترونی نتایج زیر حاصل شد که همراه با تصاویر مربوطه قابل ارائه است (دوستی ثانی و همکاران، ۱۳۹۸).

پس از تهیه تصاویر SEM (شکل ۱) و تجزیه لایه خوردگی سطح نمونه (ناحیه B) با استفاده از فناوری EDX و مقایسه با نتایج XRD این محصولات اکسید مس I یا کوپریت تشخیص داده شدند. نتایج EDX لایه‌های داخلی در ناحیه C تصویر نشان‌دهنده ترکیبات کلریدی است که در شکل ۲ قابل مشاهده است (شکل ۲).



شکل ۱. تصویر SEM از سطح مقطع لایه‌های محصولات خوردگی نمونه BM9



Spectra: 5-C

Element	Series	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]
Oxygen	K series	5.08	5.18	15.07
Chlorine	K series	27.79	28.33	37.23
Copper	K series	62.22	63.43	46.50
Tin	L series	3.01	3.06	1.20

Total: 98.1 %

شکل ۲. نتایج آنالیز EDX لایه محصولات خوردگی C

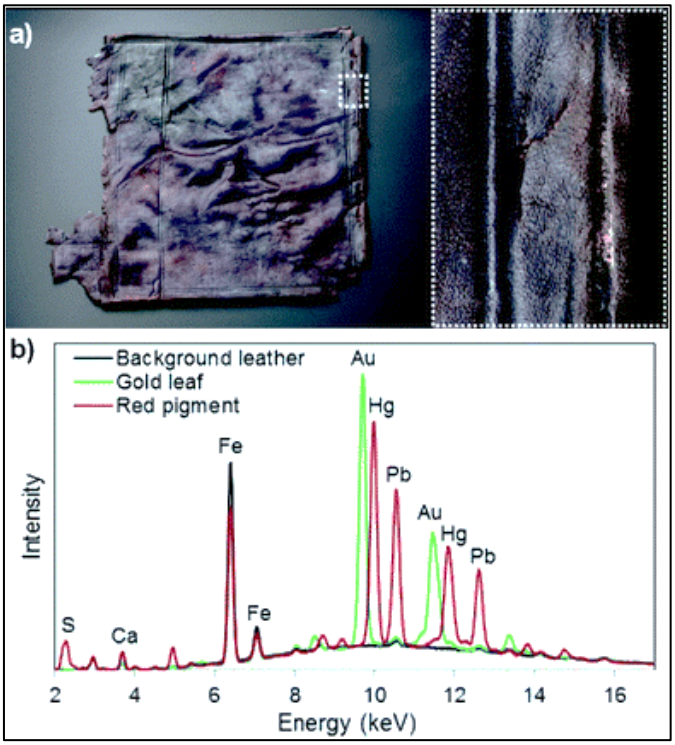
میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) امکان مشاهده ساختارهای داخلی مواد را با وضوح بسیار بالا فراهم می‌کند. این روش برای مطالعه نانوذرات و ساختارهای بلوری در آثار باستانی به کار می‌رود. برای مثال، بررسی ترکیبات رنگی در نقاشی‌های دیواری با استفاده از TEM نشان داده است که هنرمندان باستان از نانوذرات برای ایجاد اثرات خاص رنگی استفاده می‌کردند. این اطلاعات می‌تواند به ما در فهم بهتر روش‌های هنری و شیمیایی مورد استفاده کمک کند (Jones, 2018).

ترکیب SEM و TEM می‌تواند اطلاعات جامعی درباره نمونه‌های مورد مطالعه فراهم کند. برای مثال، در یک مطالعه موردی، ترکیب این دو روش برای تحلیل ابزارهای سنگی نشان داده است که روش‌های مختلفی برای ساخت این ابزارها استفاده شده و هر روش تأثیرات مختلفی بر روی ساختار نهایی ابزارها داشته است. این اطلاعات می‌تواند به باستان‌شناسان کمک کند تا فرایندهای تولید و استفاده از ابزارهای سنگی را بهتر درک کنند (Johnson & Carter, 2019). استفاده از میکروسکوپ‌های الکترونی مزایای زیادی دارد. این روش‌ها می‌توانند به شناسایی دقیق‌تر مواد و روش‌های ساخت آثار باستانی کمک کنند و اطلاعاتی فراهم کنند که با روش‌های سنتی قابل دسترسی نیستند. بااین‌حال، چالش‌هایی نیز وجود دارد. نمونه‌ها باید به‌طور خاصی آماده شوند، تجهیزات مورد نیاز بسیار گران‌قیمت‌اند و استفاده از آن‌ها نیازمند تخصص بالایی است (Jones, 2018).

آنالیز ترکیبات شیمیایی

از دیگر روش‌های مهم در رصد خُرد، استفاده از روش‌های آنالیز ترکیبات شیمیایی مانند طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس (XRF) است. این روش‌ها می‌توانند اطلاعات دقیقی درباره ترکیبات شیمیایی آثار به ما بدهند. طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس (XRF) از روش‌های غیرمخرب است که برای شناسایی عناصر شیمیایی موجود در مواد به کار می‌رود. این روش با تاباندن پرتو ایکس به نمونه و اندازه‌گیری فلورسانس حاصل از عناصر مختلف، امکان تعیین ترکیبات شیمیایی را فراهم می‌کند. از کاربردهای مهم XRF، تحلیل رنگ‌ها و پوشش‌های سطحی در آثار است. برای مثال، بررسی نقاشی‌های دیواری مصر باستان با استفاده از XRF نشان داده است که هنرمندان از ترکیبات مختلفی مانند آهن و مس برای تولید رنگ‌های متنوع استفاده می‌کردند. این اطلاعات نه‌تنها روش‌های هنری مورد استفاده را روشن می‌کند، بلکه می‌تواند دیدگاه‌های جدیدی درباره تجارت و تبادل مواد بین فرهنگ‌های مختلف ارائه دهد (Johnson & Carter, 2019). علم به این موارد به مرمتگران و حفاظتگران در ارائه راهکارهای درست و مناسب در مواجهه با این آثار کمک می‌کند.

لندن یک کشتی جنگی بود که در مارس ۱۶۶۵ در پی یک انفجار غرق شد. با اکتشافات انجام‌شده بیش از ۷۰۰ شیء از بستر دریا کشف شدند، از جمله یک جلد کتاب چرمی بسیار شکننده با تکه‌هایی از تزئینات باقی‌مانده (تصویر ۳). XRF دستی برای بررسی ترکیب شیمیایی تزئینات و شناسایی رنگدانه‌های خاص طلایی و قرمز استفاده شد. تجزیه و تحلیل وجود طلا (Au) را تایید و سرب (Pb) و جیوه (Hg) را در رنگ قرمز شناسایی کرد. طبق نتایج، می‌توان استفاده از رنگدانه‌های سینره/ سرخاب (به ترتیب HgS طبیعی و مصنوعی) و رنگدانه‌های سرب قرمز (Pb_3O_4) را محتمل دانست (شکل ۳) (pubs.rsc.org).



شکل ۳. الف) جلد کتاب چرمی از کشتی غرق‌شده لندن؛ ب) طیف XRF از چرم زمینه، ورق طلا و رنگ قرمز

XRF همچنین در تحلیل ترکیبات سفال‌ها و فلزات باستانی کاربرد دارد. بررسی سفال‌ها با استفاده از XRF می‌تواند اطلاعات دقیقی درباره مواد اولیه مورد استفاده و روش‌های ساخت آن‌ها ارائه دهد. به‌عنوان مثال، مطالعه ترکیبات سفال‌های کشف‌شده در سایت‌های باستانی خاورمیانه نشان داده است که این سفال‌ها حاوی ترکیبات متنوعی مانند سیلیس، آلومینا و اکسیدهای آهن هستند که می‌توانند به شناسایی منشأ جغرافیایی و روش‌های تولید کمک کنند (Clark, 2019). از دیگر کاربردهای XRF در باستان‌شناسی، شناسایی آلیاژ استفاده‌شده در اشیاء فلزی است. با استفاده از این روش، می‌توان ترکیبات دقیق فلزات و آلیاژهای مورد استفاده در ساخت ابزارها، سلاح‌ها و زیورآلات باستانی را شناسایی کرد. برای مثال، بررسی اشیاء برنزی کشف‌شده در سایت‌های باستانی اروپا نشان داده است که این اشیاء حاوی ترکیبات مختلفی از مس، قلع و گاهی سرب بوده‌اند. این اطلاعات می‌تواند به درک بهتر روش‌های متالورژی و تجارت فلزات در دوران باستان کمک کند (Davis, 2018). استفاده از XRF دارای مزایای زیادی است. این روش غیرمخرب است و می‌تواند به‌سرعت اطلاعات دقیقی درباره

ترکیبات شیمیایی نمونه‌ها ارائه دهد. بااین‌حال، چالش‌هایی نیز وجود دارد. از چالش‌های اصلی، نیاز به کالیبراسیون دقیق دستگاه و تفسیر صحیح نتایج است. همچنین، در برخی موارد، ترکیبات سطحی ممکن است با ترکیبات داخلی نمونه‌ها متفاوت و نیاز به تحلیل‌های تکمیلی داشته باشند (Jones, 2018).

تصویربرداری سه‌بعدی و توموگرافی

تصویربرداری سه‌بعدی و توموگرافی از دیگر روش‌های پیشرفته در مطالعه آثار تاریخی هستند. این روش‌ها می‌توانند تصاویر دقیقی از ساختارهای داخلی آثار بدون نیاز به تخریب آن‌ها ارائه دهند. تصویربرداری سه‌بعدی به محققان این امکان را می‌دهد تا به‌طور کامل و دقیق از زوایای مختلف به بررسی آثار بپردازند و اطلاعات جامعی درباره ساختار و ویژگی‌های آن‌ها به دست آورند (Brown & Wilson, 2021). تصویربرداری سه‌بعدی شامل استفاده از روش‌های مختلفی مانند اسکن لیزری و فوتوگرامتری برای ایجاد مدل‌های سه‌بعدی دقیق است. این مدل‌ها می‌توانند به‌عنوان ابزارهای آموزشی و پژوهشی مورد استفاده قرار گیرند و به بازسازی دیجیتال و حفظ آثار کمک کنند (Jones, 2018). یکی دیگر از روش‌های اصلی تصویربرداری سه‌بعدی، تصویربرداری لیزری است. این روش می‌تواند مدل‌های دقیق و با وضوح بالا از آثار باستانی تولید کند. به‌عنوان مثال، اسکن لیزری یک تندیس باستانی نه‌تنها می‌تواند جزئیات سطحی دقیق آن را ثبت کند، بلکه می‌تواند برای ایجاد مدل‌های دیجیتال مورد استفاده قرار گیرد که به محققان امکان مطالعه دقیق‌تر و بدون نیاز به جابه‌جایی شیء اصلی را می‌دهد (Jones, 2018). فوتوگرامتری نیز از روش‌های تصویربرداری سه‌بعدی است که با استفاده از عکس‌های متعدد از زوایای مختلف، مدل‌های سه‌بعدی از آثار باستانی ایجاد می‌کند. این روش نسبتاً کم‌هزینه‌تر از اسکن لیزری است و می‌تواند برای مستندسازی و تحلیل‌های دقیق آثار باستانی مورد استفاده قرار گیرد. برای مثال، از فوتوگرامتری می‌توان برای ثبت جزئیات دیوارنگاره‌ها و نقش‌برجسته‌ها استفاده کرد. این مدل‌های دیجیتال می‌توانند برای مطالعات تطبیقی و تحلیل‌های تاریخی بسیار مفید باشند. استفاده از توموگرافی (CT) در باستان‌شناسی مزایای زیادی دارد. این روش غیرمخرب است و می‌تواند تصاویر بسیار دقیقی از ساختارهای داخلی بدون نیاز به باز کردن یا تخریب نمونه‌ها ارائه دهد. همچنین، امکان تجزیه و تحلیل دیجیتالی و بازسازی سه‌بعدی آثار را فراهم و از این طریق به حفاظت و نمایش بهتر آن‌ها کمک می‌کند. برای مثال، مطالعه یک مومیایی با استفاده از CT می‌تواند به محققان اطلاعات دقیقی درباره روش‌های مومیایی کردن و وضعیت سلامتی افراد در دوران باستان ارائه دهد (Clark, 2019, pp.135-150). موزه درنتس[۳] در مرکز پزشکی میندِر[۴] در آمرسفورت هلند مطالعاتی با استفاده از سی‌تی‌اسکن و آندوسکوپی روی شیئی شبیه مجسمه سنتی بودا (شکل ۴) مربوط به قرن یازدهم یا دوازدهم میلادی، انجام داد و مشخص شد که این یادگار باستانی به‌طور کامل بقایای مومیایی‌شده یک استاد بودایی را معروف به لیوکوآن[۵] از مدرسه مدیتیشن چینی دربرگرفته است. کشف شگفت‌انگیز دیگری رخ داد: به جای اعضای بدن که قبل از مومیایی کردن خارج شده بودند، رول‌هایی از تکه‌های کاغذ کشف شد که دارای نوشته‌هایی به خط چینی بودند (jobson, 2015).

شکل ۴. سی‌تی‌اسکن مجسمه ۱۰۰۰ ساله بودا نشان داد راهب مومیایی‌شده داخل آن پنهان شده است.

باوجود مزایای فراوان CT استفاده از روش‌های تصویربرداری سه‌بعدی و توموگرافی با چالش‌هایی نیز همراه است. از مهم‌ترین چالش‌ها، نیاز به تجهیزات پیشرفته و گران‌قیمت است که دسترسی به آن‌ها برای همه محققان ممکن نیست. علاوه‌بر این، تحلیل و تفسیر داده‌های حاصل از این روش‌ها نیازمند تخصص و دانش بالایی است. همچنین، در برخی موارد نتایج ممکن است تحت تأثیر شرایط محیطی یا ویژگی‌های خاص نمونه‌ها قرار گیرند که می‌تواند دقت تحلیل‌ها را کاهش دهد (Jones, 2018).

تحلیل سطح میکروسکوپی

تحلیل سطح میکروسکوپی از روش‌های مهم و کاربردی در حوزه رصد خُرد است که به محققان این امکان را می‌دهد تا فرایندهای تولید، کاربرد و حفاظت از آثار را با جزئیات بیشتری درک کنند. این روش شامل بررسی و تحلیل الگوهای سایش، خراش‌ها و نشانه‌های دیگر روی سطح ابزارها و اشیاء باستانی است (Davis, 2018). از کاربردهای مهم تحلیل ردپاهای میکروسکوپی، بررسی ابزارهای سنگی است. ابزارهای سنگی از مهم‌ترین شواهد باستان‌شناسی هستند که می‌توانند اطلاعات زیادی درباره روش‌های تولید و استفاده از آن‌ها به دست دهند. برای مثال، بررسی الگوهای سایش روی ابزارهای سنگی نشان داده است که این ابزارها چگونه و با چه روش‌هایی برای برش، خراشیدن و حکاکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Clark, 2019). سفال‌ها و سرامیک‌ها نیز می‌توانند موضوع مناسبی برای تحلیل ردپاهای میکروسکوپی باشند. بررسی سطوح سفال‌ها با استفاده از میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی می‌تواند به شناسایی روش‌های ساخت، روش‌های تزئین و فرایندهای پخت کمک کند (Jones, 2018). فلزات نیز می‌توانند موضوع تحلیل ردپاهای میکروسکوپی قرار گیرند. بررسی سطوح فلزی با استفاده از میکروسکوپ‌های الکترونی می‌تواند برای شناسایی روش‌های ساخت، ترکیب آلیاژها و روش‌های استفاده از فلزات مورد استفاده قرار بگیرد. به‌عنوان مثال، تحلیل ردپاهای میکروسکوپی روی اشیاء برنزی باستانی نشان داده است که این اشیاء چگونه و با چه روش‌هایی ساخته شده‌اند و این اطلاعات می‌تواند به درک بهتر متالورژی باستانی کمک کند (Davis, 2018).

علاوه‌بر مواد معدنی، مواد آلی نیز می‌توانند موضوع تحلیل ردپاهای میکروسکوپی باشند. بررسی الیاف، چوب و استخوان‌ها با استفاده از میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی می‌تواند اطلاعاتی درباره چیستی، روش‌های تولید و استفاده از این مواد فراهم کند (Brown & Wilson, 2021). با وجود مزایای فراوان، تحلیل ردپاهای میکروسکوپی با چالش‌ها و محدودیت‌هایی نیز همراه است. از مهم‌ترین چالش‌ها، نیاز به تجهیزات پیشرفته و تخصص بالاست. علاوه‌بر این، تحلیل و تفسیر داده‌های میکروسکوپی نیازمند دقت و تجربه زیادی است. همچنین، در برخی موارد، نتایج ممکن است تحت تأثیر شرایط محیطی یا فرسایش‌های بعدی قرار گیرد که می‌تواند دقت تحلیل‌ها را کاهش دهد (Clark, 2019).

ژئوشیمی در باستان‌شناسی

ژئوشیمی از ابزارهای مهم در مطالعات باستان‌شناسی و آثار تاریخی است که به محققان این امکان را می‌دهد تا ترکیب شیمیایی و منشأ مواد مورد استفاده در ساخت آثار را شناسایی کنند. این روش‌ها می‌توانند اطلاعات ارزشمندی درباره منابع مواد خام، روش‌های تولید و تبادلات تجاری در دوران باستان به دست دهند. از روش‌های مهم ژئوشیمی، تحلیل ایزوتوپی است. این روش شامل اندازه‌گیری نسبت‌های ایزوتوپی عناصر مختلف در مواد باستانی است که می‌تواند به شناسایی منشأ جغرافیایی و تغییرات محیطی دوران باستان منجر شود. Thompson, 2022). برای مثال، تحلیل ایزوتوپی سرب در سفال‌های باستانی می‌تواند به شناسایی معادن سرب مورد استفاده در تولید این سفال‌ها و تبادلات تجاری بین مناطق مختلف کمک کند (تحلیل ایزوتوپی سرب در سفال‌های باستانی یک روش علمی است که به باستان‌شناسان و محققان کمک می‌کند تا منشأ مواد اولیه مورد استفاده در ساخت سفال‌ها را شناسایی کنند. هر معدن سرب دارای ترکیب ایزوتوپی منحصر به فردی است که مانند یک "اثر انگشت" شیمیایی عمل می‌کند. با مقایسه این ترکیبات در سفال‌های باستانی با نمونه‌های شناخته‌شده از معادن مختلف، می‌توان تعیین کرد که سرب استفاده‌شده از کدام معدن استخراج شده است.

طیف‌سنجی جرمی[۶] از روش‌های ژئوشیمی است که برای شناسایی ترکیبات شیمیایی و ایزوتوپی مواد باستانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش می‌تواند با دقت بالا ترکیبات عناصر موجود در نمونه‌ها را تعیین کند. به‌عنوان مثال، استفاده از طیف‌سنجی جرمی برای تحلیل فلزات باستانی نشان داده است که این فلزات حاوی ترکیبات مختلفی از عناصر کمیاب هستند که به شناسایی روش‌های متالورژی و منابع مواد خام کمک می‌کند (Smith, 2020). تحلیل ریزساختاری نیز از دیگر کاربردهای ژئوشیمی در باستان‌شناسی است که شامل مطالعه ساختارهای میکروسکوپی و نانومتری مواد باستانی می‌شود. این روش می‌تواند اطلاعاتی در رابطه با تغییرات حرارتی اثر و فرایندهای تولید در دوران باستان در اختیار بگذارد. برای مثال، بررسی ریزساختارهای فلزات باستانی نشان داده است که این فلزات چگونه و با چه روش‌هایی ساخته شده‌اند (Brown & Wilson).

تحلیل ریزساختار از دیگر کاربردهای ژئوشیمی در باستان‌شناسی است که شامل مطالعه ساختارهای میکروسکوپی و نانومتری مواد باستانی می‌شود. این روش می‌تواند اطلاعاتی در رابطه با تغییرات حرارتی اثر و فرایندهای تولید در دوران باستان در اختیار بگذارد. به‌عنوان مثال، در مطالعه‌ای بر روی فلزات باستانی کشف‌شده از محوطه تاریخی سیلک، نتایج حاصل از بررسی ریزساختارها نشان داد که این فلزات عمدتاً از آلیاژهای مس و قلع ساخته شده‌اند که برای تولید ابزارهای فلزی و برخی تزئینات به کار می‌رفته‌اند. نتایج این تحقیق همچنین نشان می‌دهد که فناوری ذوب فلزات در سیلک پیشرفته بوده است. بررسی ریزساختارها و ترکیبات شیمیایی موجود در این فلزات می‌تواند به مطالعه تبادلات تجاری و فنی بین ایران و سایر مناطق کمک کند. (Karympoor et al., 2015). تحلیل رسوبات و لایه‌های زمینی نیز می‌تواند اطلاعات مهمی درباره تغییرات محیطی و اقلیمی دوران باستان فراهم کند. با مطالعه ترکیبات شیمیایی و ایزوتوپی رسوبات، محققان می‌توانند تغییرات آب‌وهوایی، فعالیت‌های آتشفشانی و رویدادهای زیست‌محیطی دیگر را بازسازی کنند. این اطلاعات می‌تواند به فهم بهتر تأثیرات محیطی بر جوامع و آثار باستانی و روش‌های سازگاری آن‌ها اطلاع‌رسانی کند (Clark, 2019). استفاده از روش‌های ژئوشیمی در باستان‌شناسی دارای مزایای زیادی است. این روش‌ها می‌توانند اطلاعات دقیقی درباره منشأ مواد و فرایندهای تولید ارائه دهند که با روش‌های دیگر قابل دسترسی نیستند. با این‌حال، چالش‌هایی نیز وجود دارد. تحلیل‌های ژئوشیمی نیازمند تجهیزات پیشرفته و تخصص بالا هستند و نتایج ممکن است تحت‌تأثیر آلودگی‌های محیطی قرار گیرند. همچنین، تفسیر صحیح داده‌های ژئوشیمی نیازمند دانش گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف علمی است (Thompson, 2022).

نتیجه‌گیری

استفاده از روش‌های پیشرفته مانند میکروسکوپ الکترونی، طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس، توموگرافی کامپیوتری، تصویربرداری سه‌بعدی و تحلیل‌های ژئوشیمی امکان دسترسی به اطلاعات دقیق‌تر و جامع‌تری از آثار و اشیاء تاریخی را فراهم می‌کند. این روش‌ها علاوه بر اینکه به ما در درک بهتر از هنر و علم گذشته کمک می‌کنند به حفاظت بهتر از این آثار نیز یاری می‌رسانند. پیشرفت‌های فنی در ابزارها و روش‌های تحلیل علمی، به محققان این امکان را داده است که به بررسی جزئیات میکروسکوپی و ساختاری آثار بپردازند. برای مثال، استفاده از میکروسکوپ الکترونی برای تحلیل سطوح و ترکیبات داخلی آثار باستانی به شناسایی دقیق‌تر روش‌های ساخت و مواد اولیه استفاده‌شده کمک کرده است. روش‌های تصویربرداری سه‌بعدی و توموگرافی نیز نقش مهمی در حفاظت و مرمت آثار باستانی ایفا می‌کنند. این روش‌ها امکان مستندسازی دقیق و غیرمخرب آثار را فراهم می‌کنند و به مرمتگران این امکان را می‌دهند که برنامه‌های مرمتی دقیقی براساس اطلاعات به‌دست‌آمده تدوین کنند. توموگرافی می‌تواند به شناسایی ساختار و آسیب‌های داخلی و تدوین راهبردهای مرمتی و حفاظتی مؤثر کمک کند. استفاده از طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس و تحلیل‌های ژئوشیمی به شناسایی ترکیبات شیمیایی و منشأ مواد اولیه آثار کمک کرده است. این روش‌ها می‌توانند اطلاعات دقیقی درباره روش‌های ساخت آثار هنری یا صنعتی، مورد استفاده در دوران گذشته به دست دهند. یافته‌های حاصل از این مطالعات نه‌تنها روش‌های ساخت را روشن می‌کند، بلکه دیدگاه‌های جدیدی درباره تبادلات تجاری و فرهنگی بین مناطق مختلف ارائه می‌دهد.

در نهایت لازم به ذکر است که با وجود مزایای فراوان، استفاده از روش‌های پیشرفته با چالش‌هایی نیز همراه است. نیاز به تجهیزات پیشرفته و تخصص بالا، هزینه‌های بالای تحلیل‌ها و تفسیر دقیق داده‌ها از جمله این چالش‌ها هستند. با این‌حال، پیشرفت‌های روزافزون در فناوری و روش‌های علمی، امیدواری برای بهبود و توسعه این روش‌ها در آینده را افزایش می‌دهد. انتظار می‌رود که با توسعه فناوری‌های نوین، امکان دسترسی به اطلاعات دقیق‌تر و جامع‌تری از آثار باستانی فراهم شود و این اطلاعات به حفاظت بهتر و درک عمیق‌تر از فرهنگ‌ها و تمدن‌های گذشته کمک کند.

سپاسگزاری

سپاس بی‌کران پروردگار یکتا را که هستی‌مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونمان شد و به همنشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه‌چینی از علم و معرفت را روزی‌مان ساخت. از کلیه دوستان و همکاران خوبم در پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی–فرهنگی در مسیر تولید و چاپ این مقاله نهایت تشکر را دارم. در پایان از همکاری و همراهی بی‌دریغ دخترم ستاره جواهر در مسیر تولید این مقاله قدردانی کرده برایش آرزوی موفقیت و سربلندی می‌کنم.

پی‌نوشت‌ها

[1] Hawkes
[2] Brunetti
[3] Drents
[4] Meander
[5] Liuquan
[6] Mass Spectrometry

منابع

دوستی ثانی، نرگس؛ ایلخانی، مهشید؛ خدیر، شیبا؛ ابراهیمی، افشین. (۱۳۹۸). مطالعات فنی و خوردگی تعدادی از آثار برنزی مکشوفه در محوطه میراث جهانی بم، *فصلنامه تخصصی دانش حفاظت و مرمت* ۲ (۱) ۲۱-۳۳.

Brown, A., & Taylor, J. (2021). The Importance of Microanalysis in Conservation. *Journal of Cultural Heritage*, 15(2), 101-110.

Brown, A. & Wilson, P. (2021). 3D Imaging Techniques in Archaeology: From Surface Scanning to CT. *Journal of Cultural Heritage*, 12(3), 205-220.

Clark, E. (2019). Environmental Changes and Archaeological Implications: A Geochemical Perspective. *Antiquity*, 93(370), 135-150.

Davis, M. (2018). Microscopic Wear Analysis on Stone Tools: Implications for Prehistoric Technology. *Antiquity*, 92(363), 467-480.

Garcia, R. (2022). Electron Microscopy in Historical Artifact Analysis. *Heritage Science*, 10(3), 150-162.

Garcia, R. (2023). Training for the Future: Educating Conservators in Modern Techniques. *Conservation Journal*, 12(1), 45-58

Jobson, Christofer. (2015). CT Scan of 1,000-Year-Old Buddha Statue Reveals Mummified Monk Hidden Inside, https://www.thisiscolossal.com/2015/02/buddah-mummy/

Johnson, M. (2023). New Techniques in Conservation: A Focus on Micro-Monitoring. *Journal of Archaeological Science*, 29(4), 400-415

Johnson, L. & Carter, R. (2019). XRF Analysis of Ancient Paints: Case Studies from Egyptian Tombs. *Archaeometry*, 61(4), 789-802.

Jones, L. (2019). Micro-Monitoring of Cultural Artifacts: Techniques and Applications. *Heritage Science*, 7(3), 200-215.

Jones, P., & Taylor, R. (2018). Modern Imaging Techniques in Historical Studies. *Historical Methods*, 51(3), 123-135.

Lee, H., & Kim, S. (2022). Educational Needs for Conservators in Microanalysis. *International Journal of Conservation*, 8(2), 78-85

Miller, S. (2022). Enhancing Artifact Lifespan through Precision Monitoring. *Journal of Archaeological Science*, 28(4), 345-360

Karympoor, M. A., et al. (2015). "Metallurgical Analysis of Bronze Artifacts from the Silk Mound: Evidence for Trade and Technology in Ancient Iran." Journal of Iranian Archaeology, 29(3), 45-60.

Miller, S. (2021). Environmental Impacts on Artifacts: A Study of Historical Objects. *Journal of Environmental Science and Heritage*, 10(2), 75-90.

Smith, T. (2020). Cultural Heritage and its Preservation: A Global Perspective. *International Journal of Heritage Studies*, 26(5), 500-515.

Thompson, K. (2022). Geochemical Provenancing of Egyptian Pyramid Stones. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 236, 45-60.

Wilson, K. (2018). Environmental Impacts on Artifacts: A Study of Historical Objects. *Journal of Environmental Science and Heritage*, 10(2), 75-90

https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2021/ay/d1ay90094c

- (2021). Hand-held X-ray fluorescence analysis of archaeological artefacts: challenges, advantages and limitations, *Anal. Methods*, 13, 3731-3734