20

Journal Homepage: http://journal.richt.ir/mbp/
P. ISSN: 2645-5048 & E. ISSN: 2645-5706
Motaleat-eBastanshenasi-eParseh(MBP) || Vol. 6 || No. 20 || Summer 2022 ||

# Analytical Archeometry: Facilities and Research Opportunities

**Kakuee, O.[1]; Montazerzohouri, M.[2]; Abedi, A.[3]; Biganeh, A.[1]; Fathollahi, V.[1]; Lamehi-Rachti, M.[1]; Mesbahi, Sh.[4]; Movafeghi A.[5]; Oud-Bashi, O.[6]; Rok-Rok, B.[5]; Yahaghi, E.[7]; Zahedifar, M.[8]**

Type of Article: **Research**
Pp: 345-372
Received: 2021/05/08; Accepted: 2021/12/12
https://dx.doi.org/10.66224/PJAS.6.20.345



## Abstract

Archeology is the scientific study of human activity through the recovery and analysis of the remained material culture. The prerequisite for the development of archeological knowledge in the country is access to equipped laboratories, hiring experienced specialists, and expanding national, and international cooperation. Due to rapid advances in instrumental analysis, relevant people in the fields of art and archeometry should be aware of the advantages and limitations of different types of instrumental analysis. In this paper, facilities and research opportunities in analytical archeometry using natural science in Iran are presented and discussed. To introduce the technical capacities of the country in this field, the available equipment and facilities for performing nuclear analysis techniques and their related data analysis are investigated. Moreover, to identify the materials used in the cultural heritage samples and to determine their origin, characterization of some of these samples has been done using nuclear analysis methods. The activities performed in this research include X-ray and neutron imaging of the structure of an ancient jar belonging to the early Qajar period, elemental analysis of miniature in an ancient manuscript using elemental analysis method, investigation of the golden threads in the precious carpet belonging to the Safavid period using elemental and structural, and elemental analysis of luster tiles belonging to the Kashan using elemental analysis. The results of this research show that the existing technical capacities in the country can provide new opportunities for archeologists to understand the nature of the cultural heritage samples in more depth and to provide more accurate analysis of the investigated samples.

**Keywords:** Analytical Archeometry, Cultural Heritage, Elemental Analysis, Structural Analysis.

1. Research Institute of Physics and Accelerators, Research Institute of Nuclear Sciences and Technologies, Tehran, Iran (Corresponding Author).
***Email:*** okakuee@aeoi.org.ir
2. Assistant Professor, Department of Archaeology, Faculty of Literature and Humanities, University of Tehran, Tehran, Iran.
3. Assistant Professor of Department of Archaeology, Tabriz University of Islamic Arts, Tabriz, Iran.
4. Research Institute for Protection and Restoration of Historical-Cultural Artifacts, Tehran, Iran.
5. Nuclear Science and Technology Research Institute, Reactor Research Institute, Tehran, Iran.
6. Associate Professor, Department of Archaeology, Faculty of Conservation and Restoration, Isfahan University of Arts, Isfahan, Iran.
7. Department of Physics, School of Basic Sciences, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.
8. Faculty of Physics, Kashan University, Kashan, Iran.

***Motaleat-e Bastanshenasi-e Parseh* (MBP)**

**Parseh Journal of Archaeological Studies**
Journal of Archeology Department of Archeology Research Institute, Cultural Heritage and Tourism Research Institute (RICHT), Tehran, Iran

***Publisher:*** *Cultural Heritage and Tourism Research Institute (RICHT).*
*Copyright©2022, The Authors. This open-access article is published under the terms of the* ***Creative Commons****.*

**Citations:** Kakuee, O.; Montazer Zohouri, M.; Abedi, A.; Biganeh, A.; Fathollahi, V.; Mesbahi, S. et al., (2022). "Analytical Archeometry: Facilities and Research Opportunities". *Parseh J Archaeol Stud*, 6 (20): 345-372. (https://dx.doi.org/10.66224/PJAS.6.20.345).
**Homepage of this Article:** http://journal.richt.ir/mbp/article-1-571-en.html

## Introduction

Archeology is an interdisciplinary science that studies ancient artifacts using analytical methods of various sciences and provides a deep insight into biological, social, cultural, and economic processes, and technologies used by humans throughout history. From the 20th century, cultural heritage researchers used the experts of all sciences and their new methods for the comprehensive reconstruction, biological and cultural transformation of humans, and knowledge of ancient artifacts and previous civilizations. As a result of this synergy, the recognition of cultural findings from archaeological excavations went beyond their mere description and classification, and more detailed analyzes of them were presented. Today's archeology can be seen as the result of chemical studies in archeology since 1795 in Europe (Pollard, 2007: 5). These studies included preliminary investigations regarding metals, minerals, glass, and some organic remains. In 1853 A.D, in the archaeological reports, the first appendices related to chemical analysis were presented by the archaeologist Austen Henry Layard, which was the beginning of the scientific and systematic cooperation in the two fields of chemistry and archaeology (Layard, 2018: 9).

## Materials and Methods

**Neutron and X-ray radiography:** A jar sample from the Qajar period has been used for radiographic images. Figure .1 shows the results of the experiment.

**PIXE analysis of the miniature:** The PIXE analysis of the miniatures from the 15$^{th}$ century is measured in this work. Figure 2. Shows the setup of the experiment.

**Micro-PIXE and RBS of the gold fibers in the Safavid carpet:** Figure 3 shows an exquisite carpet from the Safavid period from the Iran carpet museum. The elemental analysis of the fibers used in this carpet is performed by micro-PIXE and RBS. The detail of this experiment is presented in (Torkiha, 2010: 17).

**PIXE-PIGE analysis of the Zarrinfam tiles:** Figure 4 shows the ancient Zarrinfam tile related to the Tapehsilk shrine in Kashan. To check the presence of the Azure pigments in the blue color, the PIXE-PIGE analysis of the carpet is performed. The detail of this experiment is presented in (Ghadiri, 2015: 9).

## Data

The elemental map of the fiber of the carpet obtained by micro-RBS and PIXE is shown in Figure 5. The PIXE and PIGE of the Zarrinfam tiles are presented in Figures 5 and 6, respectively.

**Discussion**

The structural investigation of a jar from the Qajar period by the X-ray and neutron radiography showed that neutron radiography can show the detail of the sample. The PIXE analysis of the blue pigment in the miniature shows that the origin of this pigment is Lazorite stone (Kakuee, 2014: 124). The presence of the characteristic element of the mercury in the pink pigment shows that the origin of this color is the mineral Shangerf, which was also used to make red color in the Iranian ancient times. The bright pink color is also due to the green malachite pigment added to the main pigment of Shangerf (Kakuee, 2012: 178). The composition of the elements in the yellow pigment also indicates the use of gold in this pigment in order to increase its brightness. The use of gold to decorate the paintings in this form is still used. Regarding the black color, due to the presence of the characteristic element Mn in this pigment, its origin can be attributed to the mineral Pyrolusite (Clark, 2002: 7).

The micro-PIXE and RBS of the gold fibers in the Safavid carpet shows that there are large amounts of the sulfur element in the composition of all 3 fibers which is related to the silk thread used in making the fibers. The elemental distribution map of all 3 samples shows that gold, silver, and copper were used to make and decorate these fibers. In other parts of the fibers, no other characteristic element indicating the presence of pigment in the fibers was observed. Therefore, the silk used in making these fibers is raw and without dyeing. Micro-PIXE elemental analysis also shows that in the old samples of Golabatoon fibers, a thin layer of gold is covered on silver wires.

The PIXE analysis of the ancient Zarrinfam tile related to the Tapehsilk is performed by WinQxas (WinQxas, 2009) and the PIGE analysis is done by Fitzpeak software (FitzPeaks, 2011). Elements with an atomic number greater than aluminum have been detected using the PIXE analysis and elements F, Na, and Mg have been detected by PIGE analysis. The characteristic element for identifying lapis lazuli is Na, which is detected in large quantities in the samples 2 and 3. The amount of Na element in the sample 1 is very small and sample 4 also lacks this element. To confirm the results, all the 4 samples were exposed to the proton beam. In this case, induced light emission was detected only from the samples 1 to 3. Therefore, we can safely say that sample 4 is not lapis lazuli. Moreover, as shown in Table 2, the high amount of Co element in Zarrinfam tile distinguishes it from lapis lazuli stone. In fact, the combination of Co element with a glaze of Na alkaline elements in the sample is the origin of the azure color in Zarrinfam tile. The results of this research provide a suitable solution for determining the origin of lapis lazuli in the ancient samples and can be a suitable solution for monitoring of the economic and cultural relations of the past.

## Conclusion

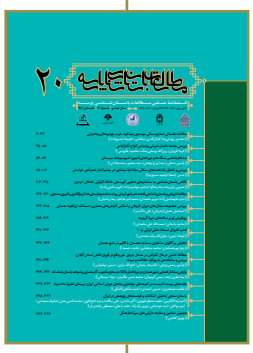
In this article, the scientific and technical capacities of the country and the active centers in the field of archeology, the state of analysis and software related to the data analysis are presented. To identify the active laboratories in the field of analysis of ancient artifacts, several active laboratories in the field of the analysis of archaeological samples and cultural heritage were introduced in this paper. Moreover, the results of the analytical archeology using several techniques were presented and discussed.

نشانی پایگاه نشریه: http://journal.richt.ir/mbp
P. ISSN: 2645-5048 & E. ISSN: 2645-5706
فصلنامهٔ علمی مطالعات باستان‌شناسی پارسه || شمارهٔ ۲۰ || سال ششم || تابستان ۱۴۰۱ ||

# باستان‌سنجی تحلیلی: امکانات و فرصت‌های پژوهش در ایران

امیدرضا کاکویی[I]؛ مجید منتظرظهوری[II]؛ اکبر عابدی[III]؛ علی بیگانه[I]؛ وحید فتح‌اللهی[I]؛ محمد لامعی‌رشتی[I]؛ شکوفه مصباحی[IV]؛ امیر موافقی[V]، امید عودباشی[VI]؛ بهروز رک‌رک[V]؛ عفت یاحقی[VII]؛ مصطفی زاهدی‌فر[VIII]

نوع مقاله: پژوهشی
صص: ۳۷۲ - ۳۴۵
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۱
شناسهٔ دیجیتال (DOI): https://dx.doi.org/10.66224/PJAS.6.20.345



## چکیده

پیش‌نیاز توسعهٔ دانش باستان‌شناسی در کشور، دسترسی به آزمایشگاه‌های مجهز، به‌کارگیری متخصصان مجرب و گسترش همکاری‌های ملی و بین‌المللی است. امروزه دستاوردهای صنعت هسته‌ای در کشور می‌تواند سبب ارتقا کیفی و کمّی دانش باستان‌سنجی شود. با توجه به رشد و توسعهٔ روزافزون روش‌های آنالیز مواد، لازم است مزایا و محدودیت‌های این روش‌ها موردتوجه پژوهشگران حوزهٔ باستان‌سنجی قرارگیرد. در این پژوهش، امکانات و فرصت‌های پژوهش در علم باستان‌سنجی تحلیلی با استفاده از روش‌های علوم تجربی در ایران ارائه و بحث شده است. به‌منظور معرفی ظرفیت‌های فنی کشور در این حوزه، تجهیزات و امکانات موجود برای انجام آنالیز و تحلیل داده‌های مرتبط با آن بررسی شده‌اند. علاوه‌بر این، به‌منظور شناخت مواد به‌کار برده شده در نمونه‌های باستانی و تعیین خاستگاه آن‌ها، مطالعهٔ چند نمونه از این آثار با استفاده از روش‌های مختلف انجام شده است. فعالیت‌های انجام‌شده در این پژوهش شامل: پرتونگاری با ایکس و نوترون برای تصویربرداری از ساختار یک کوزهٔ تاریخی مربوط به اوایل دورهٔ قاجار، آنالیز عنصری آثار نگارگری در نسخ خطی با استفاده از روش آنالیز عنصری به‌منظورتعیین منشأ رنگ‌دانه‌های به‌کاررفته در آن، مطالعهٔ الیاف طلا در فرش‌های نفیس دورهٔ صفویه با استفاده از آنالیز هم‌زمان آنالیز عنصری و ساختاری، و آنالیز عنصری رنگ‌دانه‌های به‌کاررفته در نمونه‌های کاشی زرین‌فام مربوط به کاشان به‌روش آنالیز عنصری است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد ظرفیت‌های فنی موجود در کشور می‌تواند در شناخت ماهیت آثار باستانی و ارائهٔ تحلیل‌های دقیق‌تر از این آثار، فرصت‌های جدیدی را در اختیار باستان‌شناسان کشور قرار دهد.

**کلیدواژگان:** باستان‌سنجی تحلیلی، آثار باستانی، آنالیز عنصری، آنالیز ساختاری.

I. پژوهشکدهٔ فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران (نویسندهٔ مسئول).
***Email:*** okakuee@aeoi.org.ir
II. استادیار گروه باستان‌شناسی، دانشکدهٔ ادبیات و علوم انسانی دانشگاه تهران، تهران، ایران.
III. استادیار گروه باستان‌سنجی و باستان‌شناسی دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران.
IV. پژوهشکدهٔ حفاظت و مرمت آثار تاریخی-فرهنگی، تهران، ایران.
V. پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکدهٔ راکتور، تهران، ایران.
VI. دانشیار گروه باستان‌شناسی، دانشکدهٔ حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران.
VII. گروه فیزیک، دانشکدهٔ علوم پایه، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.
VIII. دانشکدهٔ فیزیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

**ارجاع به مقاله:** کاکویی، امیدرضا؛ منتظرظهوری، مجید؛ عابدی، اکبر؛ بیگانه، علی؛ فتح‌اللهی، وحید؛ لامعی‌رشتی، محمد؛ و همکاران، (۱۴۰۱). «باستان‌سنجی تحلیلی: امکانات و فرصت‌های پژوهش در ایران». مطالعات باستان‌شناسی پارسه، ۶ (۲۰): ۳۷۲-۳۴۵. ( https://dx.doi.org/10.66224/PJAS.6.20.345).
**صفحهٔ اصلی مقاله در سامانهٔ نشریه:** http://journal.richt.ir/mbp/article-1-571-fa.html

فصلنامهٔ علمی مطالعات باستان‌شناسی پارسه
نشریهٔ پژوهشکدهٔ باستان‌شناسی، پژوهشگاه میراث‌فرهنگی و گردشگری، تهران، ایران

ناشر: پژوهشگاه میراث‌فرهنگی و گردشگری

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

## مقدمه

باستان‌سنجی علمی میان‌رشته‌ای است که با استفاده از روش‌های تحلیلی علوم مختلف، آثار باستانی را مورد مطالعه قرار می‌دهد و بینش عمیقی از فرآیندهای زیستی، اجتماعی، فرهنگی، اقتصادی و فناوری‌های به‌کاررفته توسط انسان‌ها درطول تاریخ ارائه می‌دهد. پژوهشگران میراث‌فرهنگی از نیمهٔ دوم قرن بیستم میلادی برای بازسازی همه‌جانبه، دگرگونی زیستی و فرهنگی انسان و شناخت آثار باستانی و تمدن‌های پیشین، از خبرگان کلیهٔ علوم و روش‌های نوین آن بهره بردند. در نتیجهٔ این هم‌افزایی، شناخت یافته‌های فرهنگی حاصل از کاوش‌های باستان‌شناسی از توصیف و طبقه‌بندی صرف آن‌ها فراتر رفته و تحلیل‌های دقیق‌تری از آن‌ها ارائه شد. باستان‌سنجی امروزی را می‌توان حاصل مطالعات شیمی در باستان‌شناسی از سال ۱۷۹۵م.، در اروپا دانست (Pollard, 2007: 5). این مطالعات شامل بررسی‌های اولیه درخصوص فلزات، کانی‌ها، شیشه‌ها و برخی بقایای آلی بود. در سال ۱۸۵۳ م.، در گزارش‌های باستان‌شناسی نخستین پیوست‌های مربوط به آنالیز شیمیایی توسط باستان‌شناس «استن هنری لایارد» (Austen Henry Layard) ارائه شد که سرآغازی برای همکاری علمی و نظام‌مند در دو حوزهٔ شیمی و باستان‌شناسی شد (Layard, 2018: 9). پس از آن، حضور علم شیمیِ تجزیه در گزارش‌های باستان‌شناسی پررنگ‌تر شد و جنبه‌های جدیدتری از باستان‌سنجی، فراتر از شناسایی سادهٔ آثار و تعیین فناوری ساخت آن‌ها مطرح شد. امروزه کاربرد شیمی تجزیه در باستان‌شناسی از تمرکز روی مواد معدنی فراتر رفته و حوزه‌های مهمی برای بررسی بقایای مواد آلی مثل: مواد غذایی، بقایای انسانی و جانوری، پروتئین‌ها، چربی‌ها، انواع مولکول‌های زیستی و DNAها را دربر می‌گیرد.

قرن نوزدهم میلادی شاهد همکاری بیشتری بین حوزه‌های باستان‌شناسی و هنر با علوم پایه و مهندسی بود. در روند این همگرایی و پیرو درخواست رسمی گالری ملی لندن جهت ارائهٔ راهکار برای تمیز کردن نقاشی‌های نفیس، «مایکل فارادی» (Michael Faraday) مطالعات گوناگونی برای تعیین منشأ اثرات تخریبی برروی این آثار انجام داد. او نشان‌داد که ترکیبات گوگرد آزادشده توسط دود زغال‌سنگ و روشنایی گازی، اثرات مخربی بر آثار هنری دارند و به‌هنگام ایجاد هوای مه‌آلود و رطوبت زیاد در لندن نیز اثرات تخریبی شدیدتر می‌شوند. در سال ۱۸۸۸م.، بخش علمی در موزهٔ دولتی برلین آلمان تأسیس شد و موزهٔ ملی انگلیس نیز در سال ۱۹۲۱م.، از این‌کار پیروی کرد (Kenneth, 2005: 4).

در نتیجهٔ پیشرفت‌های سریع علم و فناوری در جنگ جهانی دوم، گسترهٔ وسیع‌تری از روش‌های آنالیز در مطالعهٔ آثار تاریخی به‌کار گرفته شد که از آن‌میان می‌توان به آنالیزهای پرتو ایکس و میکروسکوپ الکترونی، آنالیزهای فعال‌سازی نوترونی و طیف‌سنج جرمی اشاره کرد. بیشتر این پژوهش‌ها درراستای شناخت مواد برای تعیین منشأ آن‌ها به‌منظور تعیین چگونگی اشاعهٔ فرهنگی در جوامع بشری صورت گرفته است (Bernard, 1972: 3). در اوایل دههٔ ۱۹۶۰م.، نظریه‌های مبتنی‌بر انتشارگرایی در حوزهٔ باستان‌شناسی، جای خود را به نظریه‌های نوین حوزه‌های علوم‌اجتماعی و انسان‌شناسی دادند. این تحول تحت‌عنوان باستان‌شناسی نوین شناخته شد و به‌وضوح در پی تبیین رفتارهای گذشتهٔ انسان، به‌جای توصیف مطلق آن‌ها بود. فلسفهٔ علم نیز در آن دوره نقش مهمی در فراهم آوردن واژگان برای رهیافت آماری و کمی به باستان‌شناسی داشت؛ این مرحله را می‌توان تولد واقعی «باستان‌سنجی» درنظر گرفت. واژهٔ «باستان‌سنجی» نخستین‌بار در اوایل دههٔ ۱۹۶۰م.، توسط «کریستوفر هاوکس» (Christopher Hawkes) در دانشگاه آکسفورد معرفی شد (Pollard, 2012: 6). باستان‌سنجی را می‌توان استفاده از روش‌های تجربی و مبتنی‌بر سنجشِ برآمده از علوم پایه و علوم مهندسی برای بررسی علمی میراث‌فرهنگی تعریف کرد. این گرایش تحقیقاتی در برخی قالب‌های شناخته‌شدهٔ امروزی می‌تواند به پرسش‌های حوزهٔ باستان‌شناسی

درمورد منشأیابی آثار، فرآیندهای معدن‌کاری، شناخت روش‌های ساخت آثار و بهینه‌سازی مواد، تعیین اصالت اشیاء و سالیابی مواد، شناخت ساختار و ویژگی‌های مواد باستانی و موزه‌ای به‌منظور آسیب‌شناسی و فرآیند تخریب و ترمیم آن‌ها پاسخ دهد. علاوه‌بر این، علم باستان‌سنجی می‌تواند در رابطه با شناخت جانداران گذشته و گوناگونی زندگی آن‌ها ازلحاظ اقلیمی و هم‌چنین چگونگی مرگ آن‌ها براساس شواهد باقی‌مانده، ازجمله بقایای استخوانی آن‌ها به‌کار گرفته شود؛ اگرچه حوزهٔ مطالعات باستان‌سنجی با برخی رشته‌های دیگر هم‌پوشانی بسیاری دارد، این علم می‌تواند در عین گستردگی زیر چتر مطالعات علمی باستان‌شناسی، هویت مستقلی نیز داشته باشد.

امروزه باستان‌سنجی بیشتر در حوزهٔ مهندسی معنا می‌یابد و در شناخت سرگذشت بشری، رهیافت‌ها، دستاوردها و فقدان‌ها درراستای ترسیم چشم‌اندازهای آیندهٔ جوامع بشری مؤثر و راه‌گشاست. این علم می‌تواند از نحوهٔ سازمان‌دهی انسان‌ها در قالب گروه‌های اجتماعی، چگونگی بهره‌برداری از محیط اطراف، نوع فعالیت، مصنوعات و اعتقادات آن‌ها، نحوهٔ برقراری ارتباط با یکدیگر، و علت دگرگونی جوامع آن‌ها اطلاعات ارزشمندی در اختیار باستان‌شناسان قرار دهد.

با توجه به پیشرفت‌های سریع در آنالیز دستگاهی، افراد ذی‌ربط در حوزهٔ آثار هنری و باستانی باید از مزایا و محدودیت‌های انواع مختلف آنالیز دستگاهی آگاه باشند و ضمن همکاری با موزه‌دار، باستان‌شناس، معمار و هنرمند، واژگان فناورانه و افراد خبره را بشناسند. این پژوهش درراستای معرفی ظرفیت‌های علوم‌تجربی کشور در زمینهٔ باستان‌سنجی ارائه شده است. در این پژوهش ضمن بیان پیشینه و وضعیت باستان‌سنجی در ایران، به پرسش‌ها و چشم‌اندازهای این حوزه می‌پردازد. سپس درکنار شناخت قابلیت‌های باستان‌سنجی، تعدادی از آزمایشگاه‌های فعال در حوزهٔ باستان‌سنجی معرفی و نمونه‌هایی از مطالعه موردی در موضوع باستان‌سنجی ارائه شده است. درواقع در این پژوهش تلاش شده است نیازهای باستان‌شناس از یک‌سو و توانمندی علوم‌تجربی در باستان‌سنجی ازسوی دیگر بیان شود تا از ارتباط کارآمدتر این دو گروه بستر مناسب جهت شناسایی و معرفی میراث‌فرهنگی فراهم گردد.

روش‌های باستان‌سنجی ضمن شناخت ماهیت و مفهوم اثر، به باستان‌شناس جهت ارائهٔ تحلیل‌های باستان‌شناختی دقیق‌تر و شناخت ویژگی‌های مواد و ترکیب‌های به‌کاررفته در اثر با حفظ اصالت آن کمک مؤثری می‌کند. با بررسی ماهیت و توزیع مکانی مواد در یک اثر می‌توان سرنخ‌هایی برای درک فناوری‌های ساخت قدیمی، روش و شیوهٔ ساخت هنرمندان اثر، محل ساخت، و کاربرد آثار باستانی به‌دست آورد. روش‌های آنالیز تحلیلی راهکار مؤثری برای تعیین ماهیت و مقدار مادهٔ مورد استفاده توسط هنرمند و تعیین روش ساخت اثر باستانی یا دستورالعمل هنرمند برای کار خود را ارائه می‌دهند. با شناخت ویژگی‌هایی نظیر نوع و روش به‌کارگیری مواد در ساختار آثار هنری و بناها و تزئینات معماری، می‌توان نسبت به ارزش‌های موجود در مصالح سنتی، نقاط ضعف و قوت آن آگاه شد. درضمن، اطلاعات حاصل از روش‌های تحلیلی باستان‌سنجی می‌تواند برای ارزیابی وضعیت اثر مورد استفاده قرار گیرد تا ضمن جست‌وجوی تغییر در مواد آن، از پیشرفت دگرسانی جلوگیری شده و اقدامات مناسب برای حفاظت و مرمت آن تعیین شود.

با توجه به ارزش مادی و فرهنگی آثار باستانی، اصالت‌سنجی این آثار بسیار مهم است و اغلب به دانش افراد خبره با تخصص‌های گوناگون نیاز دارد. برای این‌که اصالت اثری تعیین شود، این اثر باید از جنبهٔ قدمت، ویژگی و مختصات هنری، مقایسهٔ تطبیقی، شیوه و مواد ساخت، با استفاده از روش‌های آنالیز ارزیابی شود. پس از آن، نتایج به‌دست‌آمده با اطلاعات ثبت‌شده از آثار اصیل مقایسه می‌شود. بدیهی است که به‌منظور آنالیز آثار هنری و باستانی باید ویژگی‌های این آثار مدنظر قرار گیرند. این آثار اغلب غیرقابل‌جایگزین، بسیار گران‌بها، دارای ترکیب‌های پیچیده، ناهمگن، سطوح نامنظم، دارای ابعاد بزرگ، شکننده و آسیب‌پذیر هستند. بیشتر این آثار هنگام

قرارگیری در خلأ به‌دلیل انتشار گاز، رطوبت خود را از دست داده و شکننده‌تر می‌شوند. روش آنالیز درمورد اشیاء باستانی باید تاحد امکان غیرمخرب باشد تا شکل ظاهری و تمامیت جسم موردبررسی حفظ شود، سریع باشد تا بتوان تعداد زیادی نمونه را در زمان کم آنالیز کرد، همگانی باشد؛ یعنی بتوان آن‌ها را درمورد اشیاء مختلف در اندازه‌های مختلف به‌کار برد. روش آنالیز باید حساس و بس‌عنصری باشد تا بیشترین اطلاعات ممکن را در اختیار قرار دهد (Wätjen, 1987: 1).

پرسش‌هایی که در باستان‌سنجی با آن روبه‌رو هستیم عبارتنداز: یافته‌های فرهنگی که از بستر و کاوش‌های علمی به‌دست نیامده‌اند و ماهیت تاریخی آن‌ها نامشخص است، آیا اصالت تاریخی دارند یا جعلی هستند؟ قدمت برخی یافته‌های فرهنگی به چه زمانی بازمی‌گردد؟ آیا یافته‌ها و آثار فرهنگی در فرآیند تاریخی ازنظر ساختاری دچار تغییرات شیمیایی شده‌اند و یا در روند تغییر قرار دارند؟ مواد فرهنگی مورد مطالعه از چه عناصر و ترکیباتی ساخته شده است؟ مواد اولیهٔ به‌کاررفته در اثر از کدام ناحیه تهیه و در کجا تولید شده است؟ فرآیند تولید مواد اولیه چگونه است و با چه ابزارهایی ساخته شده است؟

پاسخ به این پرسش‌ها به‌صورت مستقیم با آنالیز نمونه‌ها توسط ابزارهای آنالیز یا از راه تحلیل داده‌های حاصل از روش‌های مختلف آنالیز ممکن است. روش‌های سالیابی با استفاده از کربن۱۴ و ترمولومینسانس برای تعیین قدمت آثار باستانی مثل سرامیک‌ها و باقی‌ماندهٔ مواد آلی به‌کار می‌روند. علاوه‌بر این، تغییرات سطحی ناشی از حضور طولانی‌مدت در محیط مثل نفوذ هیدروژن در شیشهٔ آتشفشانی، از دیگر روش‌های تعیین قدمت آثار است. برای تعیین ویژگی‌های مواد به‌کاررفته در یک اثر نیز از روش‌های تحلیلی استفاده می‌شود؛ به‌طور کلی می‌توان این روش‌ها را به دو دستهٔ زیر طبقه‌بندی کرد.

**روش اول:** بررسی دیداری شامل تصویربرداری با نور مرئی، تصویربرداری مادون قرمز (IR) و ماوراء بنفش (UV)، میکروسکوپ فلورسانس، رادیوگرافی و میکروسکوپ نوری.

**روش دوم:** آنالیز غیرمخرب بدون نیاز به نمونه‌سازی با استفاده از روش‌های فلورسانس پرتو ایکس قابل‌حمل (XRF)، پراش پرتو ایکس قابل حمل (XRD)، طیف‌سنجی رامان، تبدیل فوریه-مادون قرمز (FT-IR)، رادیوگرافی گاما و نوترون، روش‌های آنالیز با باریکهٔ یونی شامل گسیل القائی پرتوی ایکس با پروتون (PIXE) و گاما (PIGE)، و طیف‌سنجی پس‌پراکندگی رادرفورد (RBS).

**روش سوم:** آنالیزهای ریزسنجی مخرب با نمونه‌برداری از آثار با استفاده از روش‌های میکروسکوپ الکترونی (SEM و TEM)، کروماتوگرافی گازی (GC)، طیف‌سنجی پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP)، جذب اتمی (AAS) و آنالیز فعال‌سازی نوترونی (NAA). جزئیات مربوط به روش‌های معرفی‌شده در قسمت پی‌نوشت و محدودهٔ قابل‌مطالعه توسط آن‌ها در جدول ۴ (در پیوست) ارائه شده است. در ادامهٔ این پژوهش، ضمن بیان وضعیت موجود باستان‌سنجی در ایران، روش‌های علوم‌تجربی و محاسباتی برای پاسخ به نیازهای باستان‌سنجی آورده شده است؛ در ضمن مواردی از دستاوردهای نگارندگان در قسمت پایانی مطالب ارائه شده که تعدادی از این دستاوردها برای نخستین‌بار ارائه شده است.

## پیشینهٔ باستان‌سنجی در ایران

با گذشت بیش از ۷۰سال از تأسیس رشتهٔ باستان‌شناسی (۱۳۱۴ ش.) و رشتهٔ مرمت آثار و اشیاء (۱۳۵۶ ش.)، حوزهٔ مطالعات میراث‌فرهنگی ایران به‌دلیل فقدان رشتهٔ باستان‌سنجی و دیگر رشته‌های مرتبط با علوم باستان‌شناختی هم‌چنان فاقد استقلال بوده و با وجود گذشت ۴۲سال از انقلاب اسلامی ایران، مطالعات حوزهٔ میراث‌فرهنگی هم‌چنان به پژوهش‌های خارج از کشور وابسته است. اهمیت و ضرورت استقلال کشور در حوزهٔ باستان‌سنجی زمانی آشکار و برجسته

می‌شود که بدانیم هر تحلیل فرهنگی و اجتماعی از گذشته مبتنی‌بر اطلاعات باستان‌شناختی و تاریخی، در ابتدا نیازمند ارائهٔ تحلیل‌های علمی از آثار و مواد باستانی و تاریخی است؛ و درنتیجه، در فقدان این تحلیل‌های علمی-آزمایشگاهی و یا درصورت ناصحیح بودن نتایج آن‌ها، در عمل تمامی تحلیل‌های فرهنگی و اجتماعی به خطا منجر خواهد شد. این ضرورت وقتی بیشتر آشکار می‌شود که بدانیم تحلیل‌های فرهنگی و اجتماعی دربارهٔ تاریخ و گذشته، به سهم خود جایگاه مهمی در سیاست‌گذاری‌های فرهنگی و اجتماعی هر دولت و نظام دارد و جمهوری اسلامی ایران نیز از این قاعده جدا نیست؛ بنابراین، عدم استقلال در دانش باستان‌سنجی، دست‌کم به معنا و مفهوم عدم استقلال در بخشی از سیاست‌گذاری‌های فرهنگی و اجتماعی در ایران است. پیش از انقلاب اسلامی در ایران، باستان‌سنجی نیز همانند باستان‌شناسی اولین‌بار توسط گروه‌های کاوش خارجی مطرح شد. در دههٔ ۱۳۵۰ش.، با شکل‌گیری مرکز باستان‌شناسی و آزمایشگاه‌های آن، ایران نیز وارد مرحلهٔ نوین علمی در این زمینه شد. با توجه به اهمیت دانش سنجش و اندازه‌گیری، به‌ویژه در گاه‌نگاری دقیق و مطلق در باستان‌شناسی، نخستین گام همکاری با مرکز اتمی دانشگاه تهران (سازمان انرژی اتمی امروز) در این دهه برداشته شد. در آن دوران بیش از ۸۰ نمونه از محوطه‌های باستانی ایران نظیرِ تپه‌های ترنگ، ملیان و حصار اندازه‌گیری و سنجش شد (مهدوی، ۱۳۵۲: ۴).

اولین آزمایشگاه مرمت در سال ۱۳۵۱ش.، در مرکز باستان‌شناسی ایران تأسیس شد و با ارتقاء آن در سال ۱۳۶۹ش.، نهادی به‌نام «آزمایشگاه تحقیقات مرکزی حفاظت و مرمت آثار تاریخی-فرهنگی» به‌منظور گسترش زمینه‌های پژوهشی درجهت شناخت و درک بیشتر و دقیق‌تر از آثار و حفاظت و نگه‌داری آن‌ها در سازمان میراث‌فرهنگی کشور ایجاد شد. این آزمایشگاه در سال ۱۳۷۴ش.، به «مرکز تحقیقات مرمت آثار تاریخی-فرهنگی» و در سال ۱۳۷۵ش.، به «پژوهشکدهٔ حفاظت و مرمت آثار تاریخی-فرهنگی» تبدیل شد. از همان بدو تأسیس پژوهشکدهٔ مرمت، زمینه‌های مطالعات علمی و باستان‌سنجی کشور برروی میراث‌فرهنگی با تجهیز آزمایشگاه‌های سالیابی به‌روش کربن۱۴ و هم‌چنین سالیابی ترمولومینسانس درکنار آزمایشگاه‌های آنالیز و شناخت مواد فراهم شد؛ اگرچه اولین تلاش‌های حوزهٔ باستان‌سنجی توسط مرمتگران در ایران انجام شده است، این فعالیت‌ها بیشتر نشان‌دهندهٔ فعالیت یک گروه از متخصصان در دو شاخهٔ متفاوت مرمت اشیاء تاریخی و باستان‌سنجی است. ازسوی دیگر، در سال ۱۳۷۰ش.، یک توافق‌نامهٔ همکاری بین‌المللی بین «سازمان زمین‌شناسی کشور در بخش مطالعات کانی‌شناسی» و «دانشگاه ماینز» آلمان به امضاء رسید که مبنای آن، مطالعهٔ پیشینهٔ فلزکاری و معدن‌کاری در ایران بود. دو سال بعد با افزوده شدن سازمان میراث‌فرهنگی کشور به این تفاهم، «کمیتهٔ مطالعات معدن‌کاری و فلزکاری کهن» در پژوهشکدهٔ حفاظت و مرمت آثار تاریخی-فرهنگی کشور پایه‌گذاری شد. از برون‌دادهای این تفاهم شاید بتوان به «همایش بین‌المللی پژوهشی-آموزشی معدن‌کاری و فلزکاری کهن در کشورهای آسیای میانه» توسط کمیتهٔ مطالعات معدن‌کاری و فلزکاری کهن در سال ۱۳۷۷ش.، با همکاری «مرکز باستان‌شناسی آلمان»، «موزهٔ معدن بوخوم» و «دانشگاه فرایبورگ» آلمان اشاره نمود. در ادامه نیز با شکل‌گیری دورهٔ آموزشی معدن‌کاوی کهن و فلزکاری در کاشان در سال ۱۳۷۸ش.، و آغاز به‌کار پروژهٔ مشترک مطالعات معدن‌کاوی و فلزکاری کهن در مناطق اریسمان، محوطهٔ معدنی وشنوه قم و محوطهٔ معدنی انارک در فاصلهٔ سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۴ش.، این روند ادامه یافته است.

در دههٔ ۱۳۸۰ش.، سازمان میراث‌فرهنگی ازطریق ایجاد همایش‌های مستمر، جایگاه این علم را در ایران ارتقاء بخشید. در این دوره برای رفع نیازهای حوزهٔ باستان‌سنجی، چندین آزمایشگاه در پژوهشگاه میراث‌فرهنگی راه‌اندازی شد. در دههٔ ۱۳۹۰ش.، با توجه به نیاز کشور به متخصص باستان‌سنجی، «رشتهٔ باستان‌سنجی» در «دانشگاه هنر اسلامی تبریز» و «دانشگاه هنر اصفهان»

تأسیس شد. نخستین انتشارات پراکنده به زبان فارسی در حوزهٔ باستان‌سنجی نیز مجموعه مقالاتی بود که درراستای همایش‌های حفاظت و مرمت آثار تاریخی از سال ۱۳۷۵ش.، به‌بعد به چاپ رسیده و تا به امروز نیز ادامه دارد. از این‌میان، نخستین تلاشی که باعث به‌رسمیت شناخته شدن این حوزه در میان باستان‌شناسان و دیگر متخصصین مرتبط گردید، برگزاری نخستین همایش باستان‌سنجی کشور با عنوان «باستان‌سنجی در ایران: نقش علوم‌پایه در باستان‌شناسی» در سال ۱۳۸۱ش.، به‌همت «مسعود آذرنوش» است؛ با این‌حال، پس از گذشت چندین‌سال، برآیند تلاش‌های انجام‌شده در این حوزه رضایت‌بخش نیست. درحال‌حاضر حتی تعاریف مشخصی برای باستان‌سنجی در شاکلهٔ وزارت میراث‌فرهنگی کشور لحاظ نشده و مجموعه‌ای مستقل برای فعالیت در این حوزه توسط هیچ مرکزی معرفی نشده است.

## توانمندی پژوهش: آزمایشگاه‌های تحلیلی در مطالعهٔ آثار باستانی و هنری

پیش‌نیاز توسعهٔ دانش باستان‌سنجی در کشور، دسترسی به آزمایشگاه‌های مجهز، به خدمت گرفتن متخصصین با تجربه و گسترش همکاری‌های ملی و بین‌المللی است. شناخت آزمایشگاه‌های فعال در زمینهٔ مشخصه‌یابی آثار باستانی و معرفی توانمندی پژوهشی آن‌ها به پژوهشگران حوزهٔ باستان‌سنجی بسیار حائزاهمیت است. به این‌منظور، چندین آزمایشگاه فعال کشور در زمینهٔ آنالیز نمونه‌های میراث‌فرهنگی و هنری، در پی‌نوشت این مقاله معرفی شده است. مهم‌ترین مراکز فعال کشور در این زمینه عبارتنداز: آزمایشگاه واندوگراف تهران[۱]، آزمایشگاه‌های پرتونگاری سازمان انرژی اتمی ایران[۲]، آزمایشگاه مؤسسهٔ باستان‌شناسی دانشگاه تهران[۳]، دانشگاه هنر اصفهان[۴]، دانشکدهٔ حفاظت آثار تاریخی دانشگاه هنرهای اسلامی تبریز[۵] و دانشکدهٔ فیزیک دانشگاه کاشان[۶]. این آزمایشگاه‌ها با توجه به آشنایی شخصی و پذیرش تقاضای همکاری در این کار پژوهشی معرفی شده‌اند و ممکن است شامل همهٔ آزمایشگاه‌های مهم این حوزه در کشور نباشد[۷].

## روش‌های تحلیل داده در باستان‌سنجی

مطالعهٔ آثار هنری نیاز به استفاده از روش‌های مشخصه‌یابی تحلیلی و روش‌های آماری جهت استخراج بیشینهٔ اطلاعات از نمونه‌های با پیچیدگی زیاد و اندازهٔ کوچک دارد. روش‌های تحلیلی مورد استفاده در آنالیز نمونه‌های یافته‌های فرهنگی و هنری در ادامه گزارش شده است. از روش‌های آماری نظیرِ انحراف معیار، هم وردایی، بردار ویژه و مقدار ویژه برای بررسی هم‌بستگی داده‌ها در نمونه‌های مختلف استفاده می‌شود. با این‌حال جهت استخراج بیشینهٔ اطلاعات از آزمایش‌های انجام‌شده و تسهیل در تحلیل داده از روش‌های تحلیل آماری چندمتغیره، نظیرِ آنالیز مؤلفه‌های اصلی، روش‌های دسته‌بندی و آنالیز خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی نیز استفاده می‌شود. آنالیز مؤلفه‌های اصلی، راهی مناسب برای شناسایی الگوهای داده است و می‌تواند داده‌ها را به‌نحوی بیان کند که شباهت‌ها و تفاوت‌های آن‌ها برجسته‌تر شود؛ درواقع این روش یک شیوهٔ قدرتمند داده‌کاوی است که با کاهش ابعاد داده، بیان مناسب‌تری برای تفسیر اطلاعات سیستم مورد بررسی فراهم می‌کند (Jackson, 1991: 9). علاوه‌بر این، روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی اطلاعات ارزشمندی از متغیرهای اصلی مرتبط با فرآیند مورد مطالعه در اختیار قرار می‌دهد.

آنالیز خوشه‌ای نیز یک روش مناسب برای سازماندهی داده در چارچوب قابل‌فهم است. در این روش، هریک از متغیرها یک بُعد در فضای چند بُعدی تعریف می‌کنند؛ به‌عنوان مثال، غلظت عنصری هر نمونه توسط یک نقطه در این فضا تعریف می‌شود. عدم تشابه بین نمونه‌ها با توجه به فاصلهٔ بین نقاط اندازه‌گیری می‌شود و برای N نمونه، N نقطه در فضای N-بُعدی تعریف می‌شود؛ سپس با تلفیق سیستم براساس معیار خوشه‌ای، تعداد کمتری از خوشه‌های بزرگ ایجاد

می‌شود (Aghaaligol, 2007: 799). تحلیل آماری نمونه‌ها نیز با استفاده از نرم‌افزارهای آماری مثل SPSS قابل انجام است (SPSS, 1989).

با توجه به این‌که نمونه‌های میراث‌فرهنگی با استفاده از روش‌های تحلیلی متفاوت آنالیز می‌شوند و زمینهٔ علمی کاربران باستان‌سنجی متفاوت است، معرفی برنامه‌ای بروز، کارآمد، کاربَردوست و منبع باز که برای روش‌های آنالیز متفاوت قابل‌استفاده باشد، می‌تواند نقش مؤثری در توسعهٔ این علم، به‌ویژه در میان کاربران جدید داشته باشد. مهم‌ترین چالش نرم‌افزارنویسان در این حوزه، توانایی خواندن و تحلیل طیف‌های حاصل از روش‌های مختلف آنالیز است. تحلیل این طیف‌ها شامل: اعمال ضرایب کالیبراسیون، انتخاب ناحیهٔ موردنظر از طیف، استخراج داده‌هایی مثل غلظت عناصر و تحلیل آماری چندمتغیرهٔ اطلاعات برای ایجاد هم‌بستگی و درنتیجه تسهیل در تفسیر اطلاعات نمونه است. بخش وسیعی از اطلاعات ذکرشده توسط برنامهٔ PyMCA قابل‌دست‌یابی است (Cotte, 2016: 10). این برنامه، توانایی خواندن طیف‌های حاصل از دستگاه‌های متفاوتی را دارد و اخیراً قابلیت پشتیبانی از طیف‌های حاصل از دستگاه ریز باریکهٔ یونی شرکت Oxford Microbeams نیز به قابلیت این برنامه افزوده شده است (Nikbakht, 2018: 112). برنامهٔ Python نیز به‌عنوان یک زبان برنامه‌نویسی مفسر شئ‌گرا و سطح بالا، امکان انجام محاسبات آماری کمی، به‌ویژه در مطالعات چندمتغیری موردنیاز در آنالیزهای عنصری را فراهم می‌کند. علاوه‌بر این، با استفاده از واسطه‌های گرافیکی این برنامه مثل «تیکینتر» (Tikinter) می‌توان برای نمایش انواع نمودارها استفاده کرد (Kuhlman, 2009: 1). به‌منظور پردازش، تحلیل و استخراج اطلاعات از تصاویر میکروسکوپی نیز می‌توان از نرم‌افزارهای Mipar (Sosa, 2014:123)، ImageJ (Rasband, 1977: 1) و Imorph استفاده کرد (Brun, 2009: 123).

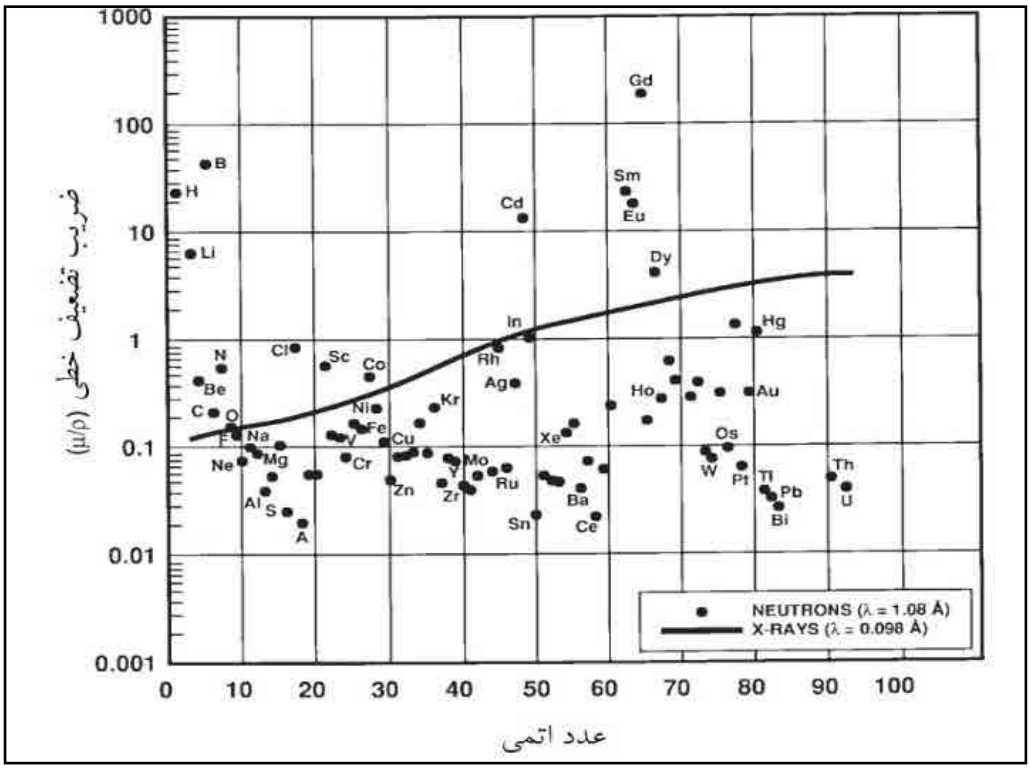
## پژوهش‌های موردی جدید در باستان‌سنجی

در این بخش، پژوهش‌های انجام‌شده در حوزهٔ آنالیز آثار میراث‌فرهنگی و هنری ارائه شده است. شیوه‌های ارائه‌شده در این قسمت شامل پرتونگاری با ایکس و نوترون برای تصویربرداری از ساختار یک کوزهٔ عتیقه، آنالیز PIXE آثار نگارگری در نسخ خطی، مطالعهٔ الیاف طلا در فرش‌های نفیس با استفاده از آنالیز هم‌زمان PIXE-RBS و آنالیز عنصری نمونه‌های کاشی زرین‌فام به‌روش آنالیز PIXE-PIGE است.

### ۱. پرتونگاری با تابش ایکس و نوترون برای اشیاء هنری

استفاده از پرتونگاره‌های ایکس و نوترون، یک روش کارآمد برای شناسایی عیوب داخلی و ساختار پیچیدهٔ آثار باستانی است. با توجه به تفاوت در احتمال برهم‌کنش نوترون و پرتو ایکس با مواد، از روی پرتونگاره‌ها می‌توان اطلاعات مختلفی به‌دست آورد. تصویر ۱، احتمال واکنش نوترون و ایکس را برای عناصر با عدد اتمی مختلف به‌نقل از استاندارد ASTM E748 نشان می‌دهد (ASTM, 2019: 4).

با توجه به تصویر ۱، برای بسیاری از اتم‌ها ضریب تضعیف خطی نوترون و ایکس کاملاً متفاوت است؛ بنابراین احتمال اندرکنش پرتوهای ایکس و نوترون برای هر ماده متفاوت است؛ بنابراین در رادیوگرافی با نوترون و ایکس تصاویر متفاوتی حاصل خواهد شد که می‌توانند مکمل هم باشند. با توجه به زیاد بودن ضریب تضعیف خطی نوترون برای عناصر با عدد اتمی کوچک‌تر، رادیوگرافی نوترون از مواد حاوی عناصر سبکی مثل هیدروژن و ترکیبات آن (مواد آلی) بسیار مناسب است و از ابزارهای مهم در باستان‌شناسی محسوب می‌شود. برای پرتونگاری با هر دو روش ایکس و نوترون می‌توان از روش کلاسیک استفاده از فیلم رادیوگرافی و یا روش مدرن دیجیتال استفاده کرد. مزیت




**تصویر ۱. احتمال واکنش نوترون و ایکس برای عناصر با عدد اتمی مختلف (ASTM, 2019: 4).**

**Fig. 1. The probability of the neutron and X-ray for elements with different atomic number (ASTM, 2019: 4).**

روش دیجیتال حذف عملیات ظهور و ثبوت، سرعت بالاتر و تولید مستقیم تصویر رادیوگرافی به فرم دیجیتال است. این روش سهولت بهتری را برای تفسیر و استفاده از شیوه‌های پردازش تصویر فراهم می‌سازد. پراکندگی نوترون و پرتو ایکس از نمونه و هم‌چنین وجود نوفه‌های الکترونیکی، سبب کاهش کیفیت تصاویر و ایجاد مات‌شدگی برروی پرتونگاره‌های حاصل از این دو روش می‌شود. برای بهبود کیفیت تصاویر این دو روش، از روش‌های مختلف پردازش تصویر مبتنی‌بر صافی‌های فرکانسی و مکانی مانند صافی گاوسی استفاده می‌شود. با استفاده از این صافی‌ها، پرتونگاره‌های ایکس و نوترون به شناسایی آسیب‌ها و ساختار درونی اشیاء هنری می‌پردازد و با بهبود کیفیت پرتونگاره‌ها، ساختار اشیاء بهتر مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این تحقیق، ضمن بررسی پرتونگاره‌های ایکس و نوترون، به چگونگی شناسایی آسیب‌ها و ساختار درونی اشیاء هنری پرداخته شده و روش بهبود کیفیت پرتونگاره‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. روش پرتونگاری ایکس در آزمایشگاه آزمون‌های غیرمخرب سازمان انرژی اتمی و پرتونگاره‌های نوترونی در «راکتور تحقیقاتی تهران» انجام شده است. آزمایشگاه رادیوگرافی این مرکز به هر دو روش رادیوگرافی فیلم و رادیوگرافی دیجیتال مجهز است. برای رادیوگرافی نوترونی مهم‌ترین نیاز تأمین یک منبع نوترونی با شار کافی و مناسب از نوترون‌ها است. آزمایشگاه‌های رادیوگرافی نوترونی سازمان انرژی اتمی ایران در پژوهشکدهٔ راکتور و ایمنی هسته‌ای مستقر هستند و اخیراً سیستم آن بازسازی و قابلیت نوترون رادیوگرافی دیجیتال و شاتر جدید به آن اضافه شده است؛ تصویر ۲، شاتر سیستم جدید رادیوگرافی نوترون در راکتور تحقیقاتی تهران را نشان می‌دهد.

**الف) پرتونگاری با تابش ایکس:** برای تهیهٔ تصاویر پرتونگاری نمونه در این تحقیق، از یک ظرف سفالی (کوزه) مربوط به اوایل دورهٔ قاجار استفاده شده است. برای این پرتونگاری دستگاه



**تصویر ۲. شاتر سیستم رادیوگرافی نوترون راکتور تحقیقاتی تهران (نگارندگان، ۱۳۹۹).**

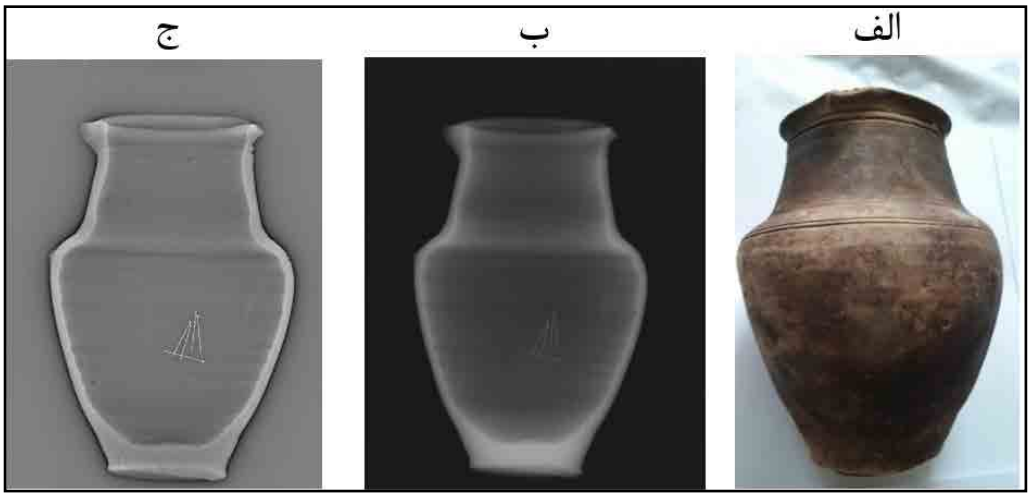
**Fig. 2. The shutter of the neutron radiography of the Tehran research reactor (Authors, 2019).**

مولد پرتو ایکس در ولتاژ 130kV و جریان ۰/۶ mA در مدت‌زمان ۲ دقیقه تنظیم شده است. تصویر ۳، چیدمان پرتونگاری با تابش ایکس را نشان می‌دهد. در این چیدمان، کوزه روی صفحهٔ تصویرساز (IP)[۲] قرار گرفته است و فرآیند تصویربرداری با روش پرتونگاری رایانه‌ای انجام شده است. تصویر کوزهٔ باستانی در تصویر ۴-الف و تصویر پرتونگاری آن در تصویر ۴-ب نشان داده شده است. زیر صفحات IP صفحهٔ سربی قرار گرفته تا پس پراکندگی تابش برروی تصویر به حداقل برسد. روبشگر لیزری مخصوص برای صفحات IP با قدرت تفکیک مکانی 50µm استفاده شده است. هم‌چنین در کلیهٔ آزمایش‌های پرتونگاری، ایمنی و حفاظت دربرابر اشعه مطابق با قانون حفاظت در برابر اشعهٔ کشور و استاندارد ملی شمارهٔ ۷۷۵۱ رعایت شده است (ISO, 2013: 1).



**تصویر ۳. نمایی از چیدمان پرتونگاری (نگارندگان، ۱۳۹۹).**

**Fig. 3. A schematic of the radiography set-up (Authors, 2019).**




**تصویر ۴ الف. تصویر ظرف سفالی (کوزه)، ب. پرتونگارهٔ ایکس، ج. پرتو نگاره نوترون (نگارندگان، ۱۳۹۹).**
**Fig. 4. a) The image of a clay pot (jar), b) X-ray image, c) neutron image (Authors, 2019).**

**ب) پرتونگاری با تابش نوترون:** برای پرتونگاری نوترونی از سیستم جدید رادیوگرافی نوترون راکتور تحقیقاتی تهران استفاده شده است. این راکتور با قدرت ۵ مگاوات از نوع استخری با کندکنندهٔ گرافیت، خنک‌کنندهٔ آب سبک و سوخت صفحه‌ای با غنای ۲۰٪ وزنی (U-235) است. اخیراً جهت بهبود پارامترهای باریکهٔ نوترونی سیستم پرتونگاری، یک باریکهٔ نوترونی جدید نصب شده است که پرتودهی کوزه با استفاده از این باریکه انجام شده است. شار نوترون بیشتر و مقدار نسبت نوترون به گاما در سیستم جدید، موجب کاهش زمان پرتودهی و افزایش میزان تضاد تصاویر می‌شود. چیدمان انجام این آزمایش در تصویر ۵، نشان داده شده است. پس از دست‌یابی به قدرت پایدار و باریکهٔ یکنواخت نوترونی، کاست حاوی تبدیل‌گر و فیلم دیجیتال رادیوگرافی به‌صورت دستی در محل خود جای داده شد. زمان پرتودهی نوترون حدود ۲ دقیقه با شار نوترونی $۱۰^{۶}\frac{n}{cm^{2}.s}$ انتخاب شده است. این تصویر به‌کمک روبشگر لیزری با قدرت تفکیک مکانی 50μm به‌دست آمده است. در این حالت از برهم‌کنش نوترون‌های حرارتی عبوری از جسم با لایهٔ گادولونیم که روی صفحات CR قرار دارد، تصویر کوزه ایجاد می‌شود. در مرحلهٔ پردازش تصویر به‌منظور افزایش تباین تصویر از یک الگوریتم صافی گاوسی استفاده شده است. پرتونگاره نوترونی از کوزه پس از بازسازی تصویر در تصویر ۴-ج نشان داده شده است. این تصویر به‌کمک روبشگر لیزری با قدرت تفکیک مکانی 50μm به‌دست آمده است. همان‌گونه‌که در این تصویر نشان داده شده است، در پرتونگارهٔ نوترون درمقایسه با پرتونگارهٔ ایکس، شیارهای افقی روی کوزه، سوزن‌های ته‌گرد داخل آن و ساختار کلی کوزه با کیفیت بهتری مشخص شده‌اند؛ به‌طورکلی هرچه عدد اتمی نمونه به جرم نوترون نزدیک‌تر باشد، احتمال تولید نوترون حرارتی و انجام اندرکنش با مادهٔ فعال فیلم بیشتر است؛ به‌طورمثال، اجسام حاوی پلاستیک که دارای هیدروژن در ساختار مولکولی هستند، در پرتونگاری نوترون وضوح بیشتری دارند.

## ۲. آنالیز PIXE آثار نگارگری در نسخ خطی

در فرهنگ فارسی، نسخه‌های خطی اشعار گران‌بها، با نقاشی‌های نگارگری و تذهیب تزئین شده‌اند تا داستان شعر را برای خواننده تجسم کنند. داستان یوسف و زلیخا که توسط «جامی» به زبان فارسی نگارش شده است، یکی از کتاب‌های شعری است که در قرن ۱۵م.، در «مدرسهٔ بخارا» نگارش و تذهیب شده است. به‌منظور جمع‌آوری اطلاعات موردنیاز برای حفظ و ترمیم این




**تصویر ۵. چیدمان پرتونگاری نوترونی (نگارندگان، ۱۳۹۹).**
**Fig. 5. The neutron radiography set-up (Authors, 2019).**

اثر، ترکیب عناصر موجود در رنگ‌دانه‌های به‌کاررفته در این اثر با استفاده از روش PIXE استخراج شده است. چیدمان انجام این آزمایش در تصویر ۶، نشان داده شده است. برای انجام این‌کار، با یک باریکهٔ 2/2 MeV پروتون به‌قطر ۱ mm شتاب‌دهندهٔ واندوگراف تهران، چند نقطه از این نمونه آنالیز شده است. در این روش، باریکهٔ ذرات از محیط خلأ به محیط هوا منتقل می‌شوند و نمونه در اتمسفر هوا تحت بمباران پروتون‌ها قرار می‌گیرد. در این حالت، نمونهٔ تحت‌بررسی و آشکارساز در محیط هوا قرار دارند که به این‌ترتیب محدودیت اندازه‌گیری ناشی از ابعاد و شکل متفاوت رفع خواهد شد. پرتو ایکس پروتون القایی با استفاده از یک آشکارساز Si(Li) در زاویهٔ ۱۳۵درجه آشکارسازی شده است. در این چیدمان، بار الکتریکی باریکهٔ یون فرودی برروی هر نمونه ازطریق اندازه‌گیری تابش ایکس $K_{\alpha}$ مربوط به گاز آرگون موجود در هوای مسیر باریکه، به‌هنجار شده است. غلظت عنصری در رنگ‌دانه‌ها برای چند نقطه از این نمونه در جدول ۱، ارائه شده است. با توجه به این جدول، رنگ‌دانهٔ سبز موجود در این اثر برپایهٔ اکسید مس ($Cu_2O$) و اکسید آهن ($Fe_2O_3$) است که منشأ آن سنگ مالاکیت (مرمر سبز) است (Vandenabeele, 2004: 644). ترکیبات عنصری موجود در رنگ‌دانهٔ آبی نشان می‌دهد که این رنگ‌دانه از سنگ لازوریت گرفته شده است. مقادیر قابل‌توجه سرب اندازه‌گیری‌شده در این رنگ‌دانه نیز به‌دلیل اندرکنش بخشی از باریکه با رنگ سفید (سفیدآب شیخ) گل‌های نگارگری در مجاورت با رنگ آبی است (Kakuee, 2014: 124). وجود عنصر مشخصهٔ جیوه در رنگ‌دانهٔ صورتی نشان می‌دهد که منشأ این رنگ کانی شنگرف است که در قدیم برای ساخت رنگ قرمز نیز در ایران کاربرد داشته است. روشن بودن رنگ صورتی نیز ناشی از رنگ‌دانهٔ سبزرنگ مالاکیت است که به رنگ‌دانهٔ اصلی شنگرف اضافه شده است (Kakuee, 2012: 178). ترکیب عناصر موجود در رنگ‌دانهٔ زرد نیز بیانگر استفاده از طلا در این رنگ‌دانه به‌منظور افزایش درخشندگی آن است. استفاده از طلا برای تزئین نگارگری‌هایی به این سبک امروزه نیز کاربرد دارد. درمورد رنگ سیاه نیز با توجه به وجود عنصر مشخصهٔ Mn در این رنگ‌دانه می‌توان خاستگاه آن‌را به کانی پیرولوزیت نسبت داد (Clark, 2002: 7).

## ۳. مطالعهٔ الیاف طلا در فرش نفیس دورهٔ صفویه با استفاده از میکرو PIXE و RBS

در سدهٔ سوم پیش‌ازمیلاد، گلابتون‌دوزی با الیاف طلا در ایران بسیار رواج داشته است. از آن دوران، ایرانیان به‌وسیلهٔ نخ‌های زرین که به ظرافت تابیده می‌شدند، نقوش متنوعی را که اکثراً الهام‌گرفته از بینش و فرهنگ آن روزگار بود، برروی فرش و پارچه می‌بافتند. در فرآیند آماده‌سازی این الیاف، لایهٔ نازکی از طلا برروی نواری از نقره یا مس نصب شده و سپس این نوار برروی مغزی از جنس نخ



**تصویر ۶. چیدمان آنالیز PIXE آثار نگارگری در نسخ خطی (نگارندگان، ۱۳۹۹).**

**Fig. 6. The set-up of PIXE analysis of illuminations in the manuscript (Authors, 2019).**

**جدول ۱. غلظت به‌هنجارشدهٔ عناصر مختلف موجود در رنگ‌دانه‌ها در نمونهٔ نگارگری در چند نقطهٔ متفاوت از این اثر (نگارندگان، ۱۳۹۹).**

**Tab. 1. The normalized concentration of different elements in the pigments of illuminations in different points (Authors, 2019).**

| رنگ | غلظت به‌هنجارشده عناصر موجود در رنگ‌دانه (ppm) | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Si | P | S | Cl | K | Ca | Fe | Cu | Pb | عناصر دیگر |
| آبی | ۳۶۷۸ | ۲۴۶ | ۵۶۷ | ۲۶ | ۱۷ | ۱۸ | ۴ | ۰ | ۱۰۵۸ | – |
| صورتی | ۱۶۶۱ | ۲۰۴ | ۳۸۸ | ۴۱ | ۹ | ۱۹ | ۴ | ۰ | ۳۷۲ | Hg (۴۹) |
| زرد | ۱۳۱۷ | ۱۲۶ | ۱۰ | ۳۴ | ۲۰ | ۱۵ | ۴ | ۰ | ۶ | Au(۹۱) و Hg(۱) |
| سیاه | ۲۴۷۳ | ۱۹۵ | ۳۳۳ | ۵۵ | ۲۲ | ۲۸ | ۰ | ۰ | ۱۷۸ | Au(۱) و Mn(۷) |
| سبز | ۱۳۹۷ | ۹۱ | ۶۷۴ | ۳۹ | ۱۳ | ۴۷ | ۱۹ | ۳۴۱ | ۴۲۹ | Au(۱۰) و Cr(۴) و Zn(۳) و Ba(۷) |

ابریشم پیچیده می‌شود. ترکیب هنر گلابتون‌دوزی با فرش‌بافی در دورهٔ صفویه به اوج خود رسید. تصویر ۷، یک فرش نفیس دورهٔ صفویه را نشان می‌دهد که به این روش بافته شده است.

به‌منظور اندازه‌گیری عناصر تشکیل‌دهندهٔ بدنهٔ اصلی و تزئینات به‌کاررفته در ساخت الیاف این اثر، چند نمونه از این الیاف از موزهٔ فرش ایران جمع‌آوری و در تصویر ۸، نشان داده شده است. تعیین غلظت عنصری و ضخامت الیاف این نمونه‌ها با استفاده از روش آنالیز ریز باریکهٔ PIXE و RBS با استفاده از سیستم ریز باریکهٔ یونی در شتاب‌دهندهٔ واندوگراف تهران انجام شده است. در این سیستم که باریکهٔ یونی کانونی برپایهٔ استفاده از سه عدد چهارقطبی مغناطیسی ایجاد می‌شود، باریکهٔ پروتون تا قطر ۱۰ میکرون کانونی می‌شود و با انرژی 2/2 MeV و شدت جریان 100 pA برروی نمونه تابانده می‌شود. جزئیات مربوط به ساخت این ریزباریکهٔ یونی در آزمایشگاه واندوگراف



**تصویر ۷. فرش نفیس مربوط به دورهٔ صفویه از موزهٔ فرش ایران (نگارندگان، ۱۳۹۹).**

**Fig. 7. An exquisite carpet from the Safavid period from the Iran carpet museum (Authors, 2019).**

تهران در مرجع (Torkiha, 2010: 17) ارائه شده است. چیدمان انجام این آزمایش در تصویر ۹، نشان داده شده است. در این چیدمان، باریکهٔ پروتون، نمونه و آشکارساز همگی در محیط خلأ قرار دارند که این موضوع سبب ایجاد محدودیت‌هایی در نوع و ابعاد نمونه می‌شود. برای انجام آنالیز میکروپیکسی، آشکارساز Si(Li) در زاویهٔ ۱۳۵درجه نسبت به باریکهٔ فرودی قرار داده شده است تا انرژی تابش‌های القایی ایکس مشخصهٔ عنصر موردنظر را اندازه‌گیری کند. برای انجام آنالیز میکرو RBS نیز یک آشکارساز سد سطحی سیلیسیومی در زاویهٔ ۱۶۵درجه نسبت به باریکهٔ فرودی قرار داده شده است. این آشکارساز، انرژی پروتون برگشتی از سطح نمونه را اندازه‌گیری می‌کند. انرژی پروتون برگشتی متناسب با جرم عنصر درون نمونه است و طیف انرژی مربوط به آن می‌تواند غلظت عنصری عناصر موجود درون نمونه را در اختیار قرار دهد.

نقشهٔ توزیع عنصری حاصل از طیف میکرو RBS به‌همراه طیف میکروپیکسی نمونه‌های موردمطالعه در تصاویر ۱۲-۱۰ نشان داده شده است. نتایج این اندازه‌گیری نشان می‌دهد که مقادیر




**تصویر ۸. نمونهٔ الیاف گلابتون موردمطالعه (نگارندگان، ۱۳۹۹).**

**Fig. 8. The investigated Golabatoon fibers (Authors, 2019).**



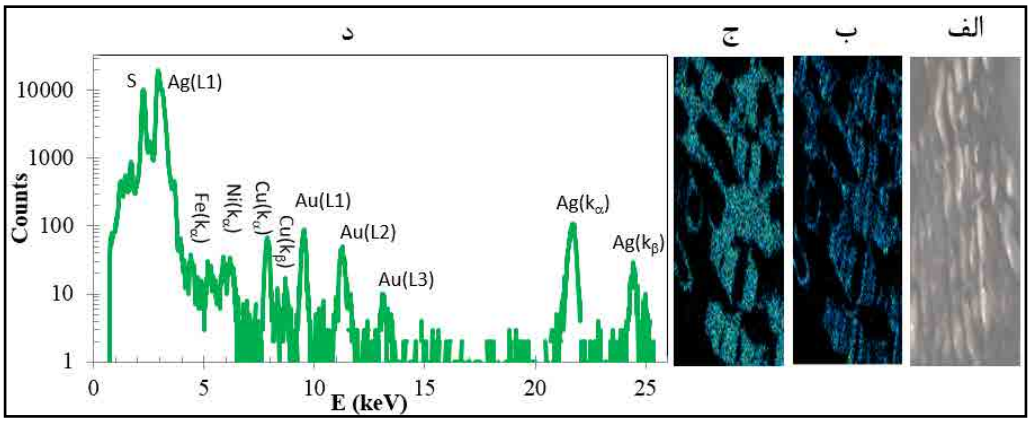

**تصویر ۹. تصویری از قسمت‌های مختلف محفظهٔ آزمایش سیستم میکروپیکسی در این شکل نشان داده شده است: ۱- چهارقطبی مغناطیسی، ۲- محل ورود باریکه به محفظهٔ آزمایش، ۳- آشکارساز Si(Li) برای آشکارسازی Xهای مشخص، ۴- آشکارساز سطحی سیلیسیومی برای آشکارسازی ذرات عبوری از نمونه، ۵- آشکارساز سطحی سیلیسیومی برای آشکارسازی ذرات برگشتی از نمونه، ۶-میکروسکوپ اپتیکی، ۷- محل قرار گرفتن نمونه (نگارندگان، ۱۳۹۹).**

**Fig. 9. The picture of the different parts of the micro-PIXE chamber is shown in this figure: 1) magnetic quadrupole, 2) Beam entrance to the chamber, 3) Si (Li) detector for characteristics X-ray detection, 4) Silicon surface barrier detector for particles passing through the sample, 5) Silicon surface barrier detector to detect the returned particles from the sample, 6) optical microscope, 7) the sample host (Authors, 2019).**

زیادی از عنصر گوگرد در ترکیب هر سه الیاف وجود دارد که مربوط به نخ ابریشم به‌کاررفته در ساخت الیاف است. نقشهٔ توزیع عنصری هر سه نمونه نشان می‌دهد که طلا، نقره و مس برای ساخت و تزئین این الیاف به‌کار رفته‌اند. در سایر نقاط الیاف، هیچ عنصر مشخصهٔ دیگری که بیانگر وجود رنگ‌دانه در الیاف باشد مشاهده نشده است؛ بنابراین، ابریشم به‌کاررفته در ساخت این الیاف به‌صورت خام و بدون رنگرزی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. آنالیز عنصری میکروپیکسی نشان می‌دهد که در نمونه‌های قدیمی از الیاف گلابتون، یک لایهٔ نازک از طلا برروی سیم‌های نقره‌ای پوشیده شده است (نمونهٔ ۱) و یا یک لایهٔ نازک از نقره برروی سیم‌های مسی قرار گرفته است (نمونهٔ ۲). در نمونه‌های معاصر از این الیاف (نمونهٔ ۳) نیز ابریشم تنها با روکشی از فلز مس ساخته شده‌اند.

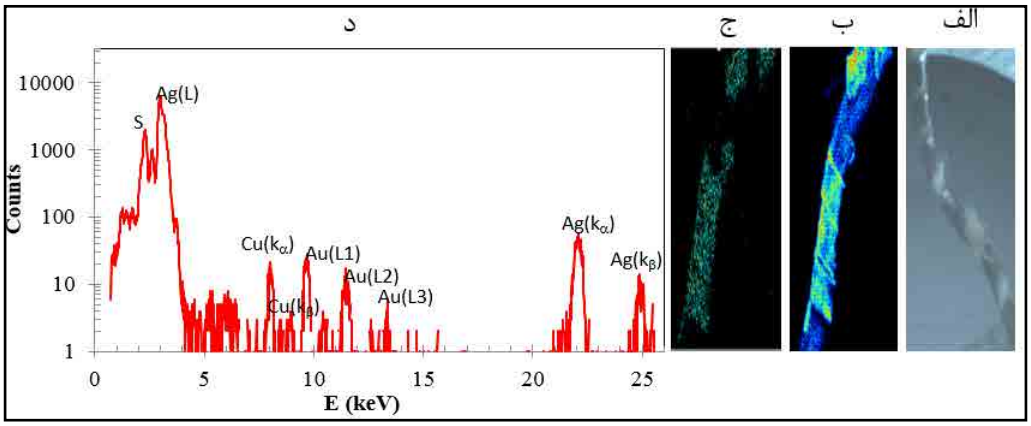
## ۴. آنالیز عنصری نمونه‌های کاشی زرین‌فام و لاجورد به‌روش PIXE-PIGE

سفالگری، قدیمی‌ترین فناوری است که انسان موفق به ابداع آن شده است. سفال، حاصل مخلوط گل رس با آمیزه‌های آلی و غیرآلی و یا حاصل مخلوط آن با سنگ‌های کوارتز و کائولن است که به‌کمک دست و چرخ سفالگری ساخته و سپس پخته می‌شود. این هنر از دوران نوسنگی آغاز شد و در قرون وسطی به اوج شهرت و اعتبار رسید. سفالینه‌های به‌دست‌آمده از هزارهٔ ششم پیش‌ازمیلاد، تپه‌های سیلک حاکی از قدمت این فناوری و هنر در شهر کاشان است. کهن‌ترین شواهد پیرامون استفاده از چرخ سفالگری نیز از همین محوطه باستانی در دورهٔ سیلک بوده است.




تصویر ۱۰. نتایج آنالیز نمونهٔ شمارهٔ ۲: الف) نمونهٔ الیاف زیر میکروسکوپ نوری، ب) نقشهٔ عنصری طلا با استفاده از طیف میکرو RBS، ج) نقشهٔ عنصری نقره با استفاده از طیف میکرو RBS، د) طیف میکروپیکسی (در این طیف عناصر مس، نیکل، آهن، کلسیم، نقره و گوگرد آشکارسازی شده‌اند) (نگارندگان، ۱۳۹۹).

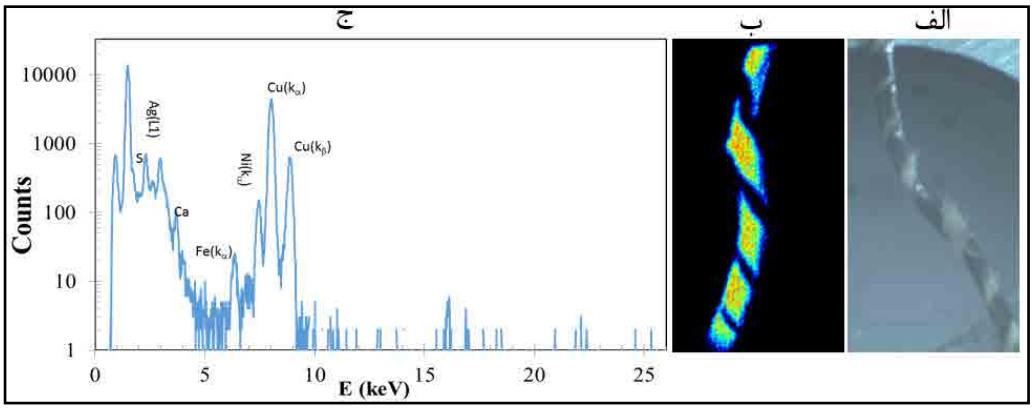
**Fig. 10. The results of analysis for sample number 2: a) the fiber sample under the optical microscope, b) the elemental map of the gold using micro-RBS, c) the elemental map silver using micro-RBS, d) micro-PIXE spectrum (in this spectrum the Cu, Ni, Fe, Ca, Ag, and S are detected) (Authors, 2019).**




تصویر ۱۱. نتایج آنالیز نمونهٔ شمارهٔ ۱: الف) تصویر نمونهٔ الیاف زیر دستگاه میکروسکوپ نوری، ب) نقشهٔ عنصری گوگرد از طیف میکرو RBS، ج) نقشهٔ عنصری طلا از طیف RBS، د) طیف میکروپیکسی (در این طیف عناصر مس، نیکل، آهن، کلسیم، نقره و گوگرد آشکارسازی شده‌اند)، (نگارندگان، ۱۳۹۹).

**Fig. 11. The results of analysis for sample number 1: a) the picture of the fiber sample under the optical microscope, b) the elemental map of Sulfur by micro-RBS, c) the elemental map of gold using RBS, d) micro-PIXE spectrum (in this spectrum the Cu, Ni, Fe, Ca, Ag, and S are detected), (Authors, 2019).**

یکی از مهم‌ترین کاربردهای متجانس با سفالگری، ساخت کاشی‌های تزئینی لعاب‌دار است که برای تزئین بناهای حکومتی و مذهبی در ایران و بین‌النهرین از دیر باز به‌کار می‌رفته است؛ درواقع، هنر کاشی‌کاری را می‌توان نمادی از تزئینات آمودی معماری سنتی ایران در دوران تاریخی و دوران اسلامی به‌شمار آورد. هنرمندان این دوران با تکیه‌بر شناخت تجربی‌شان از مواد و طبیعت پیرامون و بدون بهره‌گیری از ابزارهای پیشرفته کنونی و تنها با ترکیب آب، خاک و آتش، شاهکارهایی از




**تصویر ۱۲. نتایج آنالیز نمونهٔ شمارهٔ ۲: الف) نمونهٔ الیاف زیر دستگاه ریزسنج نوری، ب) نقشهٔ عنصری مس با استفاده از طیف میکرو RBS، ج) طیف میکروپیکسی (در این طیف عناصر مس، نیکل، آهن، کلسیم، نقره و گوگرد آشکارسازی شده‌اند) (نگارندگان، ۱۳۹۹).**

**Fig. 12. The results of analysis for samples number 2: a) thr fiber sample under the optical microscope, b) the elemental map of Cu using micro-RBS spectrum, c) micro-PIXE spectrum (in this spectrum the Cu, Ni, Fe, Ca, Ag, and S are detected), (Authors, 2019).**

هنر تزئینی خلق کردند. خلق این آثار بیانگر شناخت عمیق آن‌ها از مواد شیمیایی و دست‌یابی به ترکیباتی است که سال‌ها دوام آورده و درخشش خود را حفظ کرده‌اند. یکی از زیباترین کاشی‌های ایرانی که همواره موردتوجه بسیاری از محققین در سراسر دنیا بوده، «کاشی زرین‌فام» است. این کاشی که حدود ۸۰۰ سال پیش در دورهٔ خوارزمشاهی به‌دست خاندان «ابی‌طاهر کاشانی» ساخته شده، به‌دلیل دارا بودن نام سازنده و ذکر تاریخ ساخت برروی نقوش آن، کاملاً گویای تاریخی مستند و درخشان دربارهٔ فناوری متعالی است و می‌تواند دریچه‌ای از فناوری گذشتگان را برای نسل امروز باز کند. تصویر ۱۳، قطعه‌ای از کاشی زرین‌فام مربوط به کاشان و چند نمونه سنگ لاجورد را نشان می‌دهد.

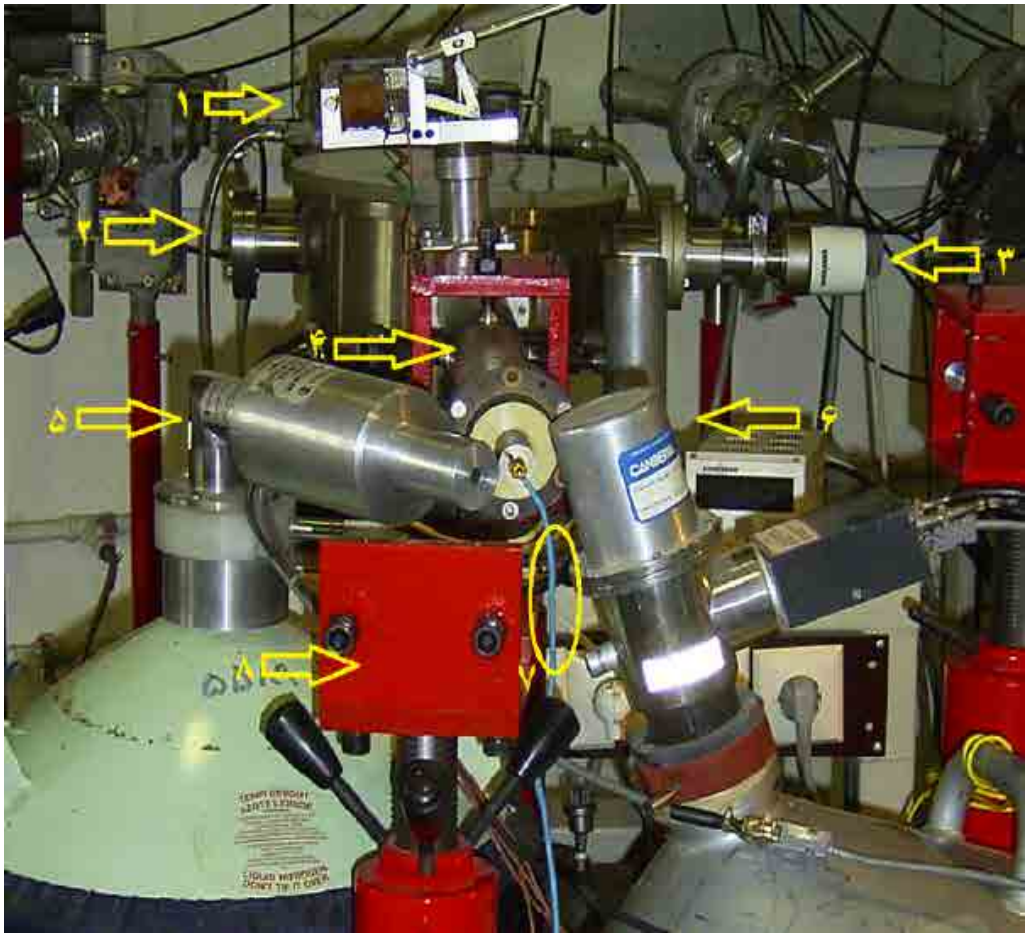
در این پژوهش، به‌منظور بررسی وجود رنگ‌دانه‌های لاجوردی در رنگ آبی موجود در این نمونه‌ها، طیف‌سنجی با استفاده از آنالیز هم‌زمان PIXE-PIGE مورد بررسی قرار گرفته است (قدیری، ۱۳۹۳: ۲۴). برای انجام این‌کار، بخش آبی‌رنگ کاشی زرین‌فام (تصویر ۱۳-۱) با ۳ نمونه سنگ لاجورد خریداری‌شده از بازار (تصاویر ۱۳-۲ و ۱۳-۳) مقایسه شده است. چیدمان انجام این آزمایش در تصویر ۱۴، نشان داده شده است. با توجه به امکان تخریب نمونه در خلأ، آنالیز نمونه‌ها در خارج از محفظه انجام شده است. برای انجام این‌کار، باریکهٔ پروتون با انرژی 2/2 MeV و جریان 80 nA برروی نمونه تابانده شده است. آشکارساز Si(Li) برای اندازه‌گیری تابش ایکس القایی در روش PIXE در زاویهٔ ۱۳۵درجه، و آشکارساز HPGe برای اندازه‌گیری تابش گاما القایی در روش PIGE در زاویهٔ ۹۰درجه مورداستفاده قرار گرفته است.

برای تحلیل طیف PIXE از نرم‌افزار WinQxas (WinQxas, 2009) و برای تحلیل طیف گاما از نرم‌افزار FitzPeaks (FitzPeaks, 2011) استفاده شده است. طیف PIXE و PIGE از رنگ‌دانهٔ آبی کاشی زرین‌فام در تصاویر ۱۵ و ۱۶، نشان داده شده است. نتایج آنالیز PIXE در جدول ۲ و آنالیز PIGE در جدول ۳، ارائه شده است. عنصرهای با عدد اتمی بزرگ‌تر از آلومینیوم با استفاده از آنالیز PIXE و عناصر Na، F، و Mg با استفاده از آنالیز PIGE آشکار شده‌اند. داده‌های ارائه‌شده در جدول ۲، نشان می‌دهد که تنوع عنصری (به‌ویژه عناصر سنگین معدنی) در نمونه‌های ۱، ۲ و ۳، بیشتر از




تصویر ۱۳. ۱) کاشی باستانی زرین‌فام مربوط به زیارتگاه تپه‌سیلک در کاشان، ۲) و ۳) نمونه‌های سنگ لاجورد (قدیری، ۱۳۹۳: ۲۴).

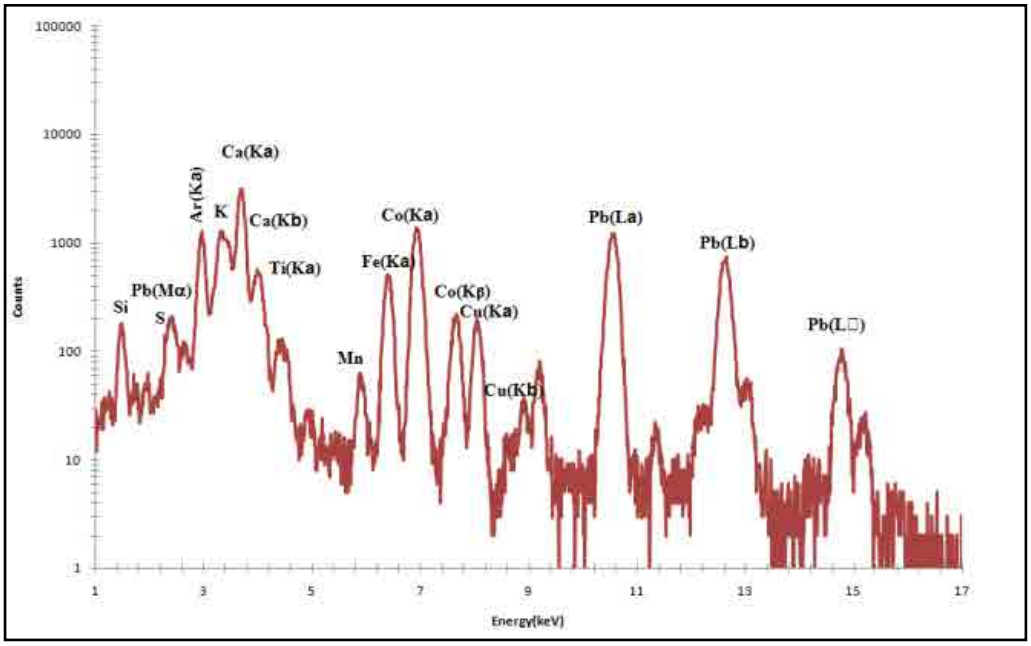
**Fig. 13. 1) Ancient Zarrinfam tile related to the Tapehsilk shrine in Kashan, 2) and 3) the samples of the lapis lazuli (Ghadiri, 2013: 24).**




تصویر ۱۴. چیدمان آزمایش ترکیب PIXE-PIGE هم‌زمان: ۱) شیر مغناطیسی، ۲) محفظه خلأ، ۳) حس‌گر فشار خلأ، ۴) مسیر باریکه، ۵) آشکارساز Si(Li)، ۶) آشکارساز HPGe، ۷) سیم جمع‌آوری بار، ۸) محل قرارگیری نمونه (قدیری، ۱۳۹۳: ۲۴).

**Fig. 14. The set-up of the simultaneous PIXE-PIGE: 1) magnetic valve, 2) vaccum chamber, 3) the vaccum pressure sensor, 4) the beam pass, 5) Si(Li) detector, 6) HPGe detector, 7) the charge collection wire, 8) the sample host (Ghadiri, 2013: 24).**

نمونهٔ ۴ است. عنصر مشخصه برای شناسایی سنگ لاجورد، عنصر سدیم است که به‌مقدار زیادی در نمونه‌های ۲ و ۳ آشکارسازی شده است. مقدار عنصر سدیم در نمونهٔ ۱ بسیار ناچیز و نمونهٔ ۴ نیز فاقد این عنصر است. به‌منظور تأیید نتایج، هر ۴ نمونه درمعرض باریکهٔ پروتون قرار داده شدند. در این حالت، گسیل نور القایی تنها از نمونه‌های ۱ تا ۳ آشکارسازی شد؛ بنابراین با اطمینان می‌توان گفت نمونهٔ ۴ سنگ لاجورد نیست. علاوه‌بر این، همان‌گونه‌که در جدول ۲، نشان داده شده است، مقادیر بسیار زیاد عنصر Co در کاشی زرین‌فام، آن را از سنگ لاجورد متمایز می‌کند؛ درواقع، ترکیب عنصر Co با لعابی از عناصر قلیایی Na درون نمونه، منشأ ایجاد رنگ لاجورد در کاشی زرین‌فام است. نتایج این پژوهش راهکار مناسبی برای تعیین منشأ رنگ لاجورد در نمونه‌های باستانی ارائه می‌دهد و می‌تواند راهکار مناسبی برای رصد روابط اقتصادی و فرهنگی گذشتگان باشد.

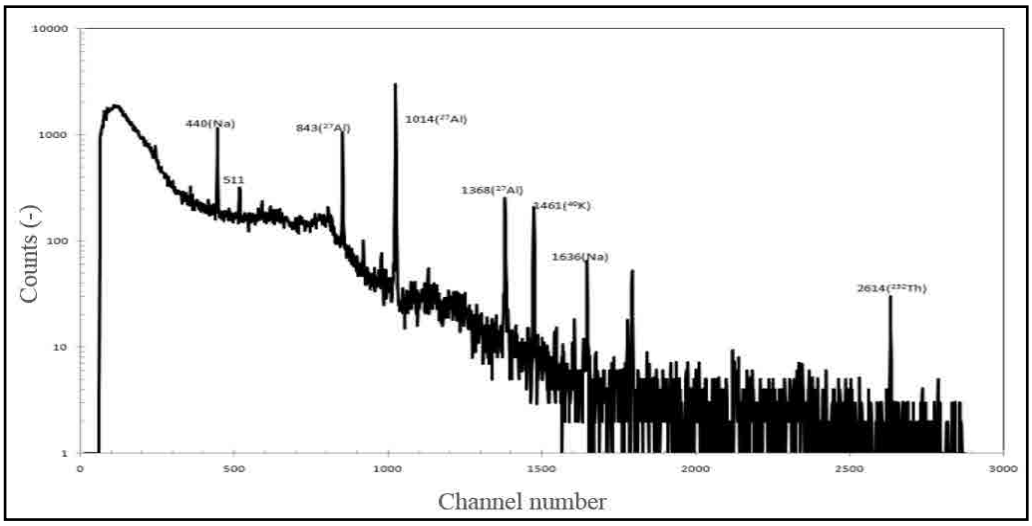



**تصویر ۱۵. طیف PIXE به‌دست‌آمده از رنگ آبی کاشی زرین‌فام (قدیری، ۱۳۹۳: ۲۴).**

**Fig. 15. The PIXE spectrum obtained from the blue pigment of the Zarrinfam tile (Ghadiri, 2013: 24).**

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ظرفیت‌های علمی و فنی کشور و مراکز فعال در حوزهٔ باستان‌سنجی، وضعیت روش‌های آنالیز دستگاهی و روش‌های نرم‌افزاری مرتبط با تحلیل داده‌های آن ارائه شده است. به‌منظور شناسایی آزمایشگاه‌های فعال درزمینهٔ آنالیز آثار باستانی و معرفی توانمندی‌های پژوهشی آن‌ها به پژوهشگران، چندین آزمایشگاه فعال کشور درزمینهٔ آنالیز نمونه‌های باستان‌شناسی و میراث‌فرهنگی، معرفی و تجهیزات و روش‌های آنالیز موجود در آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. علاوه‌بر این، نتایج باستان‌سنجی تحلیلی با استفاده از روش‌های آنالیز تحلیلی برای چند نمونه از آثار فرهنگی و هنری در سازمان انرژی اتمی ایران ارائه شد. بررسی ساختار یک کوزهٔ سفالین ساده بدون لعاب مربوط به قرون متأخر اسلامی (قاجار) با استفاده از پرتونگاری‌های ایکس و نوترون در پژوهشکدهٔ راکتور و ایمنی هسته‌ای نشان‌داد که در پرتونگاری نوترون در مقایسه با ایکس، ساختار و فرم اصلی کوزه با کیفیت بهتری مشخص می‌شود. به‌منظور تعیین مواد به‌کاررفته در




**تصویر ۱۶. طیف PIGE به‌دست‌آمده از رنگ آبی کاشی زرین‌فام (قدیری، ۱۳۹۳: ۲۴).**

**Fig. 16. The PIGE spectrum obtained from the blue pigment of the Zarrinfam tile (Ghadiri, 2013: 24).**

**جدول ۲. نتایج آنالیز PIXE از نمونه‌ها (قدیری، ۱۳۹۳: ۲۴).**

**Tab. 2. The results of the PIXE analysis of the samples (Ghadiri, 2013: 24).**

| نمونه | غلظت نسبی عناصر موجود درون نمونه (ppm) | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Zn | Cu | Co | Fe | Mn | Ti | Ca | K | Cl | عناصر دیگر |
| ۱ | ۹۰ ±۲۱ | – | ۱۴۳۸۷ ±۱۵۴ | ۴۹۹۱ ±۹۳ | ۴۵۲ ±۳۲ | ۶۱۷ ±۴۰ | ۲۱۳۸۹ ±۲۶۱ | ۹۸۲۹ ±۴۵ | ۷۲۱ ±۴۴ | Sn(۷۸۴۱±۱۶۰) Pb(۱۵۶۰۹±۱۶۲) |
| ۲ | ۱۴۹۴ ±۶۳ | ۳۶۲۹ ±۹۲ | ۷۹۳ ±۵۳ | ۲۴۰۱ ±۷۹ | ۱۷۹۸ ±۷۴ | ۴۹۴۵ ±۱۰۸ | ۲۵۵۷۵۴ ±۶۷۶ | ۱۳۰۰۹ ±۱۶۹ | ۸۰۴ ±۶۰ | Cr(۴۸۲±۵۸) |
| ۳ | ۴۰۲۳ ±۱۰۷ | ۱۰۵۱۹ ±۱۶۲ | ۴۸۱ ±۵۴ | ۹۵۸ ±۶۶ | ۴۳۲ ±۶۲ | ۱۶۸۰ ±۸۰ | ۲۴۴۲۱۳ ±۷۱۵ | ۹۵۶۵ ±۱۶۱ | ۳۵۷ ±۵۷ | Ni(۳۰۷۴±۸۸) Cr(۳۱۰۸±۹۸) |
| ۴ | ۱۰۰ ±۱۳ | ۱۹۸۶ ±۶۰ | – | ۹۲ ±۱۳ | – | ۷۸ ±۱۶ | ۴۵۹ ±۳۱ | – | ۵۳۱ ±۳۳ | S(۱۸۷±۲۳) Ni(۶۲±۱۱) |

**جدول ۳. نتایج آنالیز PIGE نمونه‌ها (قدیری، ۱۳۹۳: ۲۴).**

**Tab. 3. The results of PIGE of the samples (Ghadiri, 2013: 24).**

| نمونه | عنصر مشخصه | | |
|---|---|---|---|
| | F | Na | Mg |
| | پرتو گاما (keV) | | |
| | ۱۱۰ | ۴۴۰ | ۵۸۵ |
| ۱ | – | ۲۷۱±۱۰ | – |
| ۲ | – | ۱۵۹۷۵±۴۲ | – |
| ۳ | ۲۹۵۴±۳۷ | ۷۷۷۷±۹۸ | ۳۶۳±۱۱ |
| ۴ | – | – | – |

چند نمونه از آثار میراث‌فرهنگی، شامل: آثار نگارگری در نسخ خطی، الیاف طلا در فرش نفیس دورهٔ صفویه نیز از شیوه‌های PIXE، RBS و PIGE در پژوهشکدهٔ فیزیک و شتابگرها استفاده شده است؛ به‌عنوان ارائه یک راهکار برای تعیین منشأ رنگ در نمونه‌های باستانی نیز رنگ‌دانه‌های موجود در رنگ آبی کاشی زرین‌فامِ به‌دست‌آمده از کاشان با استفاده از طیف‌سنجی PIXE-PIGE بررسی شد. نتایج این اندازه‌گیری می‌تواند برای ارائه تحلیل‌های دقیق‌تر از روابط اقتصادی و فرهنگی گذشتگان مورد استفاده قرار گیرد.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهند که بهره‌گیری مناسب از امکانات و ظرفیت‌های فنی موجود در مراکز علوم‌تجربی کشور می‌تواند هم‌چون بازویی توانمند در ارتقاء کیفی و کمّی فعالیت‌های علمی-پژوهشی در حوزهٔ باستان‌سنجی ایفای نقش کند. در این پژوهش، تلاش شده است ضمن ارائهٔ نتایج فعالیت‌های پژوهشی صورت‌گرفته در کشور در زمینهٔ باستان‌سنجی، نقش علوم‌تجربی برای پژوهشگران این حوزه تبیین شود. این پژوهش، به‌عنوان شروعی برای حرکت مستمر و علمی برای ارتقاء باستان‌سنجی در کشور و مطالبه از نهادهای تصمیم‌ساز برای توجه به باستان‌سنجی تحلیلی ارائه شده است.

## پی‌نوشت

**۱. آزمایشگاه واندوگراف تهران، پژوهشکدهٔ فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای:**

امروزه دانش هسته‌ای در عرصه‌های مختلف زندگی بسیار توسعه یافته است؛ اگرچه شتاب‌دهندهٔ ذرات در ابتدا برای پژوهش‌های حوزهٔ فیزیک هسته‌ای استفاده می‌شد، امروزه دستاوردهای منحصربه‌فرد این حوزه سبب شده است شتاب‌دهنده‌ها راهکارهایی بدیع برای کاربردهای مختلف پزشکی ارائه کنند (Denker: 2005: 4). از سال ۱۹۵۶م.، استفاده از روش‌های آنالیز هسته‌ای در باستان‌سنجی موردتوجه قرار گرفت (Harbottle, 1985: 5; Cookson:1980: 145). از آن پس، این روش‌ها به‌سرعت در باستان‌شناسی و باستان‌سنجی متداول شدند؛ به‌طوری‌که موزهٔ لوور با خرید شتاب‌دهنده، آزمایشگاه ویژه‌ای برای باستان‌سنجی تأسیس کرد (Kusko, 1999: 288)؛ ازجمله مزیت‌های روش آنالیز با باریکهٔ یونی، خصوصیت‌های غیرتخریبی، بس‌عنصری و سریع آن است. با استفاده از این‌روش، آشکارسازی تمامی عناصر جدول تناوبی در لایه‌های تقریباً سطحی با دقت چند ذره در میلیون امکان‌پذیر است. در روش آنالیز با باریکهٔ یونی، یون‌های سبک پرانرژی (پروتون، هلیوم یا دوتریم) با انرژی ۰/۵ تا ۵ MeV به سطح نمونه برخورد می‌کند. برای عناصر سنگین، سد کولنی بین پرتابه و هدف، مانع انجام واکنش هسته‌ای می‌شود و فقط فرآیندهای پراکندگی کشسان پرتابه و هدف (پس پراکندگی رادرفورد) و اندرکنش پرتابه با الکترون‌های مدار هسته امکان‌پذیر است. با اندازه‌گیری شدت و انرژی ذرات پراکنده‌شده (در روش RBS) و شدت و انرژی پرتوهای ایکس گسیل‌شده از هدف می‌توان به نوع و چگونگی توزیع عناصر موجود در هدف پی‌برد (Verma, 2007: 325). درمورد هسته‌های سبک، به‌دلیل پایین‌تر بودن سد کولنی، پرتابه می‌تواند با هستهٔ هدف اندرکنش دهد. در این‌صورت، واکنش هسته‌ای رخ می‌دهد و ذره‌ای متفاوت از پرتابه در واکنش تولید می‌شود. انرژی این ذره معرف عنصر موجود در نمونه و شدت آن بیانگر غلظت عناصر موجود در نمونه است (روش‌های PIGE و NRA). درصورتی‌که عنصر موجود در هدف سبک‌تر از پرتابه باشد (به‌طورمثال، پرتابهٔ هلیوم و هدف هیدروژن)، عنصر موجود در هدف در زاویه‌های جلو پراکنده می‌شود و با آشکارسازی این ذرات می‌توان به غلظت هیدروژن در نمونه پی‌برد (روش ERD). علاوه‌بر این، در برخورد یون-اتم، به‌دلیل برانگیختگی مستقیم یا به‌علت گذار آبشاری الکترون‌ها، امکان تولید نور مرئی وجود دارد که طول موج و شدت این نور می‌تواند نوع و غلظت برخی عناصر را تعیین کند (روش IBIL). با توجه به این‌که نور مرئی به‌دلیل گذارهای الکترون از لایهٔ خارجی اتم گسیل می‌شود، انتظار می‌رود با استفاده از روش IBIL، اطلاعاتی از پیوندهای مولکولی مادهٔ هدف نیز حاصل شود. در سال‌های اولیهٔ استفاده از شتاب‌دهنده‌ها، باریکهٔ یونی اغلب با ابعادی درحدود چند میلی‌مترمربع در دسترس بود. با ساخت ابزار ریز باریکهٔ یونی، قطر خروجی پرتو یونی به‌حد چند میکرون کاهش یافت. با این باریکه، نه‌تنها آنالیز با باریکهٔ یونی نقطه‌ای برای ابعاد چند میکرون ممکن است، بلکه با روبش سطح نمونه به‌وسیلهٔ باریکهٔ میکرونی در دو راستای طولی و عرضی و ثبت مکان تابش‌های ایکس مشخصهٔ گسیل‌شده از نمونه، امکان تعیین توزیع عناصر موجود در نمونه به‌صورت تصویر دوبُعدی ممکن می‌شود (Grime, 1998: 27). استفاده از روش PIXE در ایران نیز چند سال پس از کشف این روش (Oliaiy, 1999: 495) و در فاصلهٔ کوتاهی پس از راه‌اندازی شتاب‌دهندهٔ واندوگراف آغاز شد. اولین نتایج آنالیز عنصری درمورد نمونه‌های آب با استفاده از این روش در سال ۱۳۵۶ش.، منتشر شد؛ بنابراین وسایل و امکانات کافی برای استفاده از روش‌های آنالیز هسته‌ای در باستان‌سنجی در آزمایشگاه واندوگراف موجود بود. این فعالیت در سال ۱۳۷۰ش.، آغاز شد و به‌تدریج همکاری با باستان‌شناسان وسعت یافت. از آن زمان، این روش‌ها درمورد اشیاء باستانی به‌کار گرفته شده است. برخی از نمونه‌های به‌کارگیری روش آنالیز با باریکهٔ یونی برای بررسی‌های باستان‌سنجی در آزمایشگاه واندوگراف عبارتنداز: سکه‌های اشکانی موزهٔ تماشاگه پول (Hajivaliei, 2008: 1587)، تحولات کاشی‌کاری در مسجد جامع اصفهان (Agha aligol, 2007: 799)، آنالیز عنصری سفال‌های لعاب‌دار (Agha aligol, 2009: 487)، آنالیز عنصری لعاب‌های زرین‌فام قدیمی ایران (Kakuee, 2013: 132)، آنالیز عناصر مرکب، کاغذ و تذهیب به‌روش پیکسی خارجی (Kakuee, 2012: 178).

درحال‌حاضر آزمایشگاه واندوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای با استفاده از شتاب‌دهندهٔ الکترواستاتیک 3 MV فعالیت‌های پژوهشی و خدمات آنالیز با باریکهٔ یونی را برای علوم مختلف ارائه می‌دهد (Nikbakht, 2018: 112). با استفاده از این شتاب‌دهنده، باریکهٔ اتمی و مولکولی پروتون، دوتریم و آلفا در بازهٔ انرژی MeV ۳-۰/۳ در دسترس است. امروزه در آزمایشگاه واندوگراف تهران، اغلب روش‌های آنالیز با باریکهٔ یونی (شامل: IBIL، PIGE، PIXE، RBS و NRA) با استفاده از باریکهٔ متداول و روش‌های NRA، IBIL و PIXE با استفاده از ریزباریکهٔ یونی در دسترس است. این روش‌ها برای استفاده در رشته‌های باستان‌سنجی، علوم‌محیطی، علم مواد و فیزیک هسته‌ای به‌کار می‌روند (Gerami, 2016: 80 ; Kakuee, 2016: 156). روش سال‌یابی قطعی نیز یکی از روش‌هایی است که برای تعیین قدمت آثار باستانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مشهورترین روش شناخته‌شده در سالیابیِ یافته‌های حاصل از کاوش‌های باستانی، روش سالیابی ۱۴C است (Scharpenseel, 1977: 11). در این روش با تعیین غلظت ۱۴C در نمونه‌های آلی، مقدار رادیوکربن موجود در نمونه به قدمت اثر نسبت داده می‌شود. این روش تنها برای سالیابی آثاری که منشأ آن‌ها موجودات زنده است، کاربرد دارد. با استفاده از این روش، سالیابی نمونه‌هایی با عمر کمتر از حدود ۶۰ هزار سال معتبر است. یکی از روش‌های سالیابی با ۱۴C، روش جذب مستقیم گاز $CO_2$ است. با توجه به سهولت جذب گاز $CO_2$ در این‌روش، زمان کوتاه جهت سنتز نمونه و هزینه‌های پایین اندازه‌گیری نمونه، مقدمات راه‌اندازی این روش نیز در آزمایشگاه واندوگراف فراهم شده است.

**۲. آزمایشگاه‌های پرتونگاری سازمان انرژی اتمی ایران:**

آزمون رادیوگرافی صنعتی یک روش نسبتاً قدیمی، اما کارآمد از روش‌های آزمون غیرمخرب است که اطلاعات ارزشمندی از حجم قطعهٔ تحت‌آزمون فراهم می‌کند. این آزمون می‌تواند با فوتون (تابش ایکس و گاما) و یا نوترون صورت پذیرد که هرکدام از آن‌ها مستلزم تجهیزات و ابزار مخصوص به خود هستند. آزمایشگاه آزمون‌های غیرمخرب سازمان انرژی اتمی ایران در مرکز نظام ایمنی هسته‌ای کشور مستقر شده است و به‌عنوان یک مرجع ملی در زمینهٔ آزمون‌های غیرمخرب فعالیت می‌کند. این آزمایشگاه علاوه‌بر نظارت بر صدور مدارک کارکنان آزمون‌های غیرمخرب، در پنج روش اصلی آزمون‌های غیرمخرب شامل رادیوگرافی صنعتی با تابش ایکس و گاما درکنار بازرسی چشمی فعالیت می‌کند. آزمایشگاه رادیوگرافی این مرکز به هر دو روش رادیوگرافی فیلم و رادیوگرافی دیجیتال مجهز است. مهم‌ترین نیاز برای انجام رادیوگرافی نوترون، تأمین یک منبع نوترونی با شار کافی و مناسب از نوترون است. آزمایشگاه رادیوگرافی نوترونی پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای در پژوهشکدهٔ راکتور و ایمنی هسته‌ای مستقر است. اخیراً سیستم رادیوگرافی نوترونی راکتور تحقیقاتی تهران بازسازی شده و قابلیت نوترون رادیوگرافی دیجیتال به آن اضافه شده است.

**۳. آزمایشگاه مؤسسهٔ باستان‌شناسی دانشگاه تهران:**

مؤسسهٔ باستان‌شناسی دانشگاه تهران دستگاه‌های آنالیز XRF برای آنالیز عنصری نمونه‌های معدنی، میکروسکوپ نوری پلاریزان و دستگاه‌های تهیهٔ مقطع نازک را در اختیار دارد؛ به‌طورکلی، با توجه به امکانات فعلی در این آزمایشگاه می‌توان پتروگرافی کانی‌ها و بررسی آنالیز عنصری نمونه‌های معدنی و عناصر کم‌مقدار موجود در آثار باستانی را مطالعه کرد. علاوه‌بر این، میکروسکوپ نوری عبوری-انعکاسی و حلقهٔ دیجیتال با بزرگ‌نمایی مطلوب در این آزمایشگاه می‌تواند برای بررسی مقاطع صیقلی، مقاطع نازک و بقایای گیاهی روی نمونه‌های باستانی مورد استفاده قرار گیرد.

**۴. دانشگاه هنر اصفهان:**

دانشگاه هنر اصفهان بیش از ۴۰ سال سابقهٔ آموزش و پژوهش در حوزهٔ حفاظت و مرمت آثار و بناهای تاریخی و فرهنگی دارد. این دانشگاه در سال ۱۳۵۵ش.، به‌عنوان یک مرکز آموزش حفاظت و مرمت شکل گرفت و پس از انقلاب اسلامی به‌عنوان زیرمجموعه دانشگاه هنر اصفهان به فعالیت خود ادامه داد. مطالعه در حوزهٔ حفاظت و مرمت آثار تاریخی و فرهنگی، شناسایی مواد باستانی و فناوری‌های تولید آن‌ها، بخشی از فعالیت‌های این مرکز در طول ۴۰ سال گذشته بوده است. با توجه به پایان‌نامه‌های انجام‌شده در رشتهٔ مرمت آثار تاریخی و فرهنگی در مقاطع مختلف در این مرکز، می‌توان گفت مطالعه و شناسایی آثار و مواد باستانی با استفاده از روش‌های علمی، پیشینهٔ قابل‌توجهی در این دانشگاه دارد. با این‌حال تمرکز بر حوزهٔ باستان‌سنجی در این دانشگاه با راه‌اندازی این رشته در مقطع کارشناسی‌ارشد در سال ۱۳۹۳ش.، صورت گرفت. وجود ابزارهای مورداستفاده در هر دو رشتهٔ باستان‌سنجی و مرمت اشیاء تاریخی موجب شده است، دانشکدهٔ حفاظت و مرمت دانشگاه هنر اصفهان قابلیت انجام پایان‌نامه‌های دانشجویی و نیز طرح‌های پژوهشی در حوزهٔ باستان‌سنجی و حوزه‌های مشابه با آن را داشته باشد. ازسوی دیگر، تجهیزات متنوع موجود در آزمایشگاه‌های حفاظت و مرمت دانشکده به‌منظور مطالعات باستان‌سنجی نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این تجهیزات شامل: میکروسکوپ‌های نوری پلاریزان و متالوگرافی، دستگاه آنالیز طیف‌سنج جذب اتمی (AAS)، دستگاه آنالیز FT-IR، دستگاه آنالیز micro-XRF، کروماتوگرافی گازی (GC) و طیف‌سنجی انعکاسی فیبر نوری (FORS) هستند. علاوه‌بر این، آزمایشگاه رادیوگرافی هنری نیز نزدیک به ۲۰ سال در دانشگاه هنر اصفهان دایر است و حدود ۱۰۰۰ نمونهٔ تاریخی در آن مورد مطالعه قرار گرفته است. علاوه‌بر این، امکانات آماده‌سازی نمونه‌های متالوگرافی نیز وجود دارد. این تجهیزات و امکانات در آزمایشگاه‌های دانشکدهٔ حفاظت و مرمت و آزمایشگاه مرکزی دانشگاه هنر اصفهان نصب و راه‌اندازی شده است. ازسوی دیگر، دانشگاه هنر اصفهان ارتباط بسیار خوبی در زمینهٔ همکاری با دیگر مراکز و دانشگاه‌های کشور درخصوص انجام آنالیز در قالب شبکهٔ آزمایشگاه‌های علمی ایران (شاعا) و دیگر تفاهم‌نامه‌های موجود دارد. این ارتباطات امکان توسعهٔ مطالعات آزمایشگاهی برروی طیف وسیعی از نمونه‌های باستانی را برای این دانشگاه فراهم کرده است. درحال‌حاضر، مطالعهٔ شناخت مواد و فناوری‌های باستانی مثل فلزگری باستانی، سرامیک‌ها و شیشه‌های باستانی، آثار هنری، مواد آلی، عاج و استخوان به‌صورت پایان‌نامه‌های دانشجویی، همکاری‌های مشترک داخلی و هم‌چنین پروژه‌های پژوهشی بین‌المللی درحال انجام است. ازسوی دیگر، انتشارات متنوعی در این‌زمینه ازسوی اعضاء وابسته به این دانشگاه در دانشکدهٔ حفاظت و مرمت منتشر شده است که بخش عمده‌ای از انتشارات در این حوزه را شامل می‌شود.

**۵. دانشکدهٔ حفاظت آثار تاریخی دانشگاه هنرهای اسلامی تبریز:**

در سال ۱۳۹۱ش.، با پیش‌قدم شدن دانشکدهٔ هنرهای کاربردی دانشگاه هنر اسلامی تبریز، رشتهٔ باستان‌سنجی برای نخستین‌بار در کشور در دو گرایش آلی و معدنی در مقطع کارشناسی‌ارشد راه‌اندازی شد و فعالیت‌های علمی آن در قالب همایش‌های

ملی کاربرد تحلیل‌های علمی در باستان‌سنجی و مرمت میراث‌فرهنگی موردتوجه قرار گرفت. درحال‌حاضر، اعضاء هیأت‌علمی این دانشکده در حوزه‌های باستان‌سنجی (گرایش مواد آلی و معدنی)، باستان‌شناسی (گرایش‌های اسلامی و پیش‌ازتاریخ)، و مرمت اشیاء تاریخی و فرهنگی، مشغول پژوهش و تربیت نیروی انسانی هستند. در حوزهٔ مرمت آثار تاریخی، این گروه آموزشی دارای امکاناتی مثل: کتابخانهٔ تخصصی مرمت و باستان‌سنجی، آزمایشگاه شیمی عمومی و تجزیه، آزمایشگاه و کارگاه مرمت فلز و متالوگرافی، کارگاه مرمت نقاشی و آرایه‌های معماری، کارگاه مرمت مواد آلی (کاغذ، پارچه و عکس، چرم، عاج و استخوان)، کارگاه‌های سفال، شیشه و سنگ، کارگاه شناخت مواد و مصالح ساختمانی، و آتلیه عکاسی است. مهم‌ترین دستگاه‌های این دانشگاه عبارتنداز: میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)، اسپکتروفتومتر، طیف‌سنج مادون قرمز (FT/IR)، میکروسکوپ پلاریزان، الکتروفورز مویین)، ریزسختی‌سنج، تبخیرکنندهٔ چرخان، نورسنج شعله‌ای، همگن‌ساز مکانیکی، سانتریفیوژ، میکروسکوپ استریو، میکروسکوپ رامان و PHمتر. علاوه‌بر این، با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) در این دانشکده، امکان بررسی جزئیات نمونه در مقیاس نانومتر وجود دارد.

**۶. دانشکدهٔ فیزیک دانشگاه کاشان**

ازجمله فعالیت‌های انجام‌گرفته در آزمایشگاه فیزیک هسته‌ای دانشگاه کاشان، سالیابی انواع سفال، آجر و کاشی بازمانده از دوران گذشته به‌روش گرمالیان است. سالیابی به‌روش گرمالیان دارای شیوه‌های مختلفی ازجمله: روش ریزدانه، روش دز ذرات آلفا، روش دز اولیه، روش انتقال نور و فلدسپات است. سالیابی با استفاده از روش‌های ذکرشده تاکنون برروی نمونه‌هایی متعلق به دو بخش شمالی و مناطق مرکزی ایران انجام شده است. روش ریزدانه برای آثار سرامیکی ارجحیت دارد. در این روش از دانه‌های کوارتز با وزن تقریبی ۵ mg استفاده می‌شود. جهت آماده‌سازی نمونه، قطعهٔ موردنظر خرد شده و سپس با استون شست‌وشو می‌شود؛ سپس از یک حمام فراصوت جهت پراکنده کردن نمونه استفاده می‌شود و بدین‌ترتیب دانه‌ها به‌اندازهٔ ۱ تا ۸ میکرون از هم جدا می‌شوند. پس از چندین مرحله شست‌وشو با اسید کلریک برای زدودن کربنات‌ها و استفاده از دستگاه سانتریفیوژ و شست‌وشو با اتانول و احیای دانه‌های به‌دست‌آمده در استون، حدود ۷۰ نمونهٔ یکسان آماده می‌شوند. تمام مراحل اندازه‌گیری دز طبیعی انتقال‌یافته به نمونه با استفاده از شمارش‌گر ترمولومینسانس روی همین نمونه‌ها انجام می‌شود؛ سپس پرتوزایی ایزوتوپ‌های موجود در خاک اطراف نمونه برای تخمین آهنگ دز انتقال‌یافته به نمونه طی سالیانی که مدفون بوده، با استفاده از روش XRF و آشکارساز HPGe تعیین می‌شود. آهنگ دز انتقال‌یافته توسط پرتوهای کیهانی نیز به‌صورت جداگانه تعیین می‌شود. با داشتن دز کلی جذب‌شده توسط نمونه و آهنگ دز انتقال‌یافته می‌توان عمر نمونه را تخمین زد.

۷. پژوهشکدهٔ حفاظت و مرمت آثار تاریخی و فرهنگی از پژوهشگاه میراث‌فرهنگی و گردشگری نیز با آزمایشگاه‌های تخصصی در رابطه با باستان‌سنجی فعالیت دارد که متأسفانه امکان معرفی آن در این پژوهش فراهم نشده است.

## کتابنامه


- مهدوی، عزیزه، (۱۳۵۲). «نتایج جدید سالیابی نمونه‌های باستانی در ایران با روش کربن ۱۴ و اهمیت آن». گزارش‌های دومین مجمع سالانهٔ کاوش‌ها و پژوهش‌های باستان‌شناسی در ایران، تهران.

- قدیری، مرجان، (۱۳۹۳)، «ترکیب طیف‌سنجی گسیل پرتو ایکس ذره-القایی و طیف‌سنجی گسیل پرتو گامای پروتون-القایی برای تجزیهٔ رنگ لاجوردی در کاشی باستانی». مجلهٔ علوم و فنون هسته‌ای، ۷۰: ۲۴-۱۹.

- Aghaaligol, D., (2007). "Analysis of 18th-19th century's historical of Iranian ink and paper belonging to the Qajar dynasty". *Apll. Phys. A,* 89 (1): 799-805.

- Aghaaligol, D., (2009). "Provenance study of ancient Iranian luster pottery using PIXE multivariate statistical analysis". *J. Cult. Heritage,* 10 (1): 487-492.

- ASTM E748, (2019). "Standard Guide for Thermal Neutron Radiography of Materials". *ASTM International, West Conshohocken,* PA, 1(1): 26-42.

- Bernard, K., (1972). *Secrets of the past: nuclear energy applications in art and archaeology* U.S. Atomic energy commission office of information services.

- Brun, E., (2009). "Imorph: An open source software for 3D structural and geometrical analysis of porous media". *Conference Paper, Metfoa*, 9(1): 23.

- Clark, R., (2002). "Pigment identification by spectroscopic means: an arts/science interface". *C. R. Chim*, 5(1): 7-20.

- Cookson, J. A., (1980). "Applications of the PIXE Technique and of Nuclear Microbeams". *Nuclear Physics Methods in Materials Research, Vieweg Teubner Verlag*: 145-159.

- Cotte, M., (2016). "Watching kinetic studies as chemical maps using open-source software". *Analytical chemistry,* 88 (12): 6154-6160.

- Denker, A., (2005). "Industrial and medical applications of high-energy ions". *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B: Beam Interactions with Materials and Atoms,* 240 (1-2): 61-68.

- FitzPeak Software. 2001. http://www. jimfitz.demon.co.uk.

- Ghadiri, M., (2015). "Combination of particle-induced X-ray emission (PIXE) spectrometry and proton-induced gamma-ray emission (PIGE) spectrometry for analysis of azure color in tile". *Journal of Nuclear Science and Technology (JonSat)*, 35(4): 19-24.

- Gerami, F., (2016). "Porosity estimation of alumina samples based on resonant backscattering spectrometry". *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B: Beam Interactions with Materials and Atoms,* 373 (1): 80-84.

- Grime, G., (1988). "Focusing protons and light ions to micron and submicron dimensions". *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B: Beam Interactions with Materials and Atoms,* 30 (3): 227-234.

- Hajivaliei, M., (2008). "Application of PIXE to study ancient Iranian silver coins". *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B: Beam Interactions with Materials and Atoms,* 266(8): 1578-1582.

- Harbottle, G., (1986). "Twenty-five years of research in the analysis of archaeological artifacts and works of art. Nucl". *Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B: Beam Interactions with Materials and Atoms,* 14(1): 10-15.

- ISO 17636-2., (2013). Non-destructive testing of welds - Radiographic testing - Part 2: X- and gamma-ray techniques with digital detectors 1: 9-11.

- Jackson, E., (1991). *A User's Guide to Principal Components*. John Wiley & Sons Inc. 1991, New York.

- Kakuee, O., (2012). "External PIXE analysis of an Iranian 15th century poetry book". *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B. Beam Interactions with Materials and Atoms,* 273(1): 178-181.

- Kakuee, O., (2013). "Ion Beam Analysis of Hydrogen-Treated Ti/TiN Protective Nanomultilayers". *Acta Physica Polonica A,* 122(1): 132-137.

- Kakuee, O., (2014). "PIXE analysis of Persian miniature used in 16th century poetry manuscript". *Acta Physics Polonica A,* 125 (3): 1244.

- Kakuee, O., (2016). "Development of a versatile user-friendly IBA experimental chamber". *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B: Beam Interactions with Materials and Atoms,* 371(3): 156-160.

- Kenneth, R. F., (2005). *Scientific Examination of Art: Modern Techniques in*

*Conservation and Analysis, Chapter: Changing Approaches in Art Conservation: 1925 to the Present.* Joyce Hill Stoner, National Academy of Sciences, Washington, D.C.

- Kuhlman, D., (2009). *A python book*: Beginning python, advanced python, and python exercises.

- Kusko, B. H., (1990). "PIXE at the Louvre Museum. Nucl. Instrum". *Methods Phys. Res., Sect. B: Beam Interactions with Materials and Atoms,* 49.1 (4): 288-292.

- Layard, A. H., (1853). *Discoveries in the ruins of Nineveh and Babylon*. Internet Archive. G. P. Putnam and Co.

- Mahdavi, A., (1973). "The new results of the dating ancient samples in Iran by carbon-14 method and its importance". Reports of the second annual conference of the archeological excavation and researches in Iran.

- Nikbakht, T., (2018). "An efficient approach to integrated MeV ion imaging". *Ultramicroscopy,* 186 (2): 112-119.

- Oliaiy, P., (1999). "Application of PIXE to study ancient Iranian silver coins". *Int. j. PIXE* 1 (74): 495-500.

- Pollard, A. M., (2007). *Analytical chemistry in archeometry.* Cambridge University Press.

- Pollard, A. M., (2012). "From 'Maxbleeps' to ISA: a Short History of the International Symposium on Archaeometry and Some Thoughts on the Development of Archaeological Science". *Archaeometry,* virtual_issues: 1-12.

- Rasbandm, W., (1997). ImageJ software.

- Scharpenseel, H., (1977). "Radiocarbon dating of soils, a review". Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde". *J. Plant Nutr. Soil Sci.,* 140 (2): 159-174.

- Sosa, J., (2014). "Development and application of MIPAR™: a novel software package for two-and three-dimensional microstructural characterization". *Integrating Materials and Manufacturing Innovation,* 3(1): 123-140.

- SPSS., (2003). *Statistical Package for the Social Sciences for Windows Release 12.0.0 Standard License*. Copyright© SPCC Inc.

- Torkiha, M., (2010). "An external sub-milliprobe optimized for PIXE analysis of archaeological samples". *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B,* 268 (1): 1517-1522.

- Vandenabeele, P., (2004). "Comprehensive Analytical Chemistry Eds". *Elsevier Amsterdam,* 42(1): 644.

- Verma, H. R., (2007). "Atomic and nuclear analytical methods". *Springer-Verlag Berlin Heidelberg,* 25(1): 14-17.

- Wätjen, U., (1987). "Currently used computer programmes for PIXE analysis." Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B: Beam". *Interactions with Materials and Atoms,* 22 (3): 29-33.

- WinQxas Software. (2007). http://winqxas. software.informer.com.