



ژورنال علمی باستان‌شناسی ایران

PAZHOSH-HA-YE BASTANSHENASI IRAN  
P. ISSN: 2345-5225 & E. ISSN: 2345-5500  
Homepage: <https://nbsh.basu.ac.ir/>  
Vol. 12, No. 34, Autumn 2022



## Elemental Analysis of Silver Coins of the Hormizd IV Sassanids, Issued in Bishapur by PIXE Method

Jozi, Z.<sup>1</sup>

<https://dx.doi.org/10.22084/NB.2021.24200.2329>

Received: 2021/05/04; Accepted: 2021/12/27

Type of Article: **Research**

Pp: 215-240

### Abstract

The reign of Hormizd IV Sassanids (579-590 AD) should be considered a period full of wars and conflicts with other governments and tribes. Here the coins can be considered a valuable document in archaeological data that were not created like the texts for the purpose of re-reading, hence the elemental analysis of coins of this period, especially using the PIXE method, can provide valuable information about the political-economic situation to provide a better analysis of the situation at that time. Since the city of Bishapur is an important and stable city in that era and has one of the most active mints, it was selected as a sample in this study. The coins of the Hormizd IV were Issued in Bishapur in 10 different years, so from each date, 2 coins were selected for testing, and in addition, 2 coins from Khosrow I (531-579 AD) and 2 coins from Khosrow II (591-628 AD) was also added for comparison. The main questions of this research are: 1- Elemental analysis of the coins of Hormizd IV, multiplied by Bishapur, what analysis of the elemental structure of the coins provides? 2- How was the economic power and monetary policies of the Hormizd IV period compared to the reigns of Khosrow I and Khosrow II, relying on Bishapur coins? As a result, it was found that the average amount of silver purity of these coins was 95.25% and the amount of 3.08% copper was added to the metal of the coins to grade it, and also due to the presence of lead (0.05%) and gold (0.90%) in These coins indicated that the silver mines used were in fact lead mines of the Cerussite type. In addition, the lower purity of silver, the high amount of copper and the greater elemental diversity of the coins of Hormizd IV, showed that the quality of coins of that period was lower than the coins of Khosrow I and Khosrow II.

**Keywords:** Numismatics, Hormizd IV, Bishapur, PIXE Experiment, Archaeometry.

1. Assistant Professor, Archaeological Department, Faculty of Literature and Humanities, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran  
**Email:** Zj332244@gmail.com

**Citations:** Jozi, Z., 2022, "Elemental Analysis of Silver Coins of the Hormizd IV Sassanids, Issued in Bishapur by PIXE Method". *Pazhoheshha-ye Bastan Shenasi Iran*, 12(34): 215-240. doi: 10.22084/nb.2021.24200.2329

**Homepage of this Article:** [https://nbsh.basu.ac.ir/article\\_4940.html?lang=en](https://nbsh.basu.ac.ir/article_4940.html?lang=en)

PAZHOSH-HA-YE BASTANSHENASI IRAN  
Archaeological Researches of Iran  
Journal of Department of Archaeology, Faculty of Art and Architecture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran.

*Publisher: Bu-Ali Sina University. All rights reserved.*

© Copyright©2022, The Authors. This open-access article is published under the terms of the *Creative Commons*.

## Introduction

Hormizd IV was elected king after the death of Khosrow I and when he was consulting for the conclusion of a peace treaty in Byzantium. Khosrow I's death occurred while Iran was at war with Eastern Rome on its western borders; Hormizd's accession to the throne came to an abrupt halt, as he was not content to relinquish any of his father's conquests. With the outbreak of the war between Iran and Rome and its intensification, the Khazars invaded Azerbaijan, the Arabs looted several western cities, and the Gok-Turks captured Balkh and its suburbs. For these reasons Hormizd had to reduce all the expenses of the court. Considering that the city of Bishapur was one of the most important cities of the Sasanian period and one of the most active mints of that era, its location was such that it was more stable than other cities caught in the war, for this reason. The minted coins of this city (in all dates of minting) as an example of Sasanian period mint coins, are subjected to elemental analysis (by PIXE method) and analyzed to analyze the economic situation of Bishapur city. At the height of these conflicts, the functioning and commitment of this mint to the central minting system should be presented; In addition, the economic power and silver value of the dirhams of that period should also be measured in comparison with the reign of Khosrow I and Khosrow II. In order to test PIXE, 20 coins were selected on 10 different dates from Hormizd IV, and in addition, 2 coins with different dates from Khosrow I and 2 coins with different dates from Khosrow II, all of which were minted in Bishapur. For comparison, from private collections (the collections of Mr. Seyed Hassan Sadat-Razavi (samples 1-13, 15-16, and 18-20), Seyed Ali Seyed Mousavi (samples 21-24), and Masoud Mir Abedini (samples 14 and 17)) was selected and the coins were sent to the laboratory of Bhubaneswar Institute of Physics (Orissa State, India). This research follows two main questions: 1- Elemental analysis of the coins of Hormizd IV, multiplied by Bishapur, what analysis of the elemental structure of the coins provides? 2- How was the economic power and monetary policies of the Hormizd IV period compared to the reigns of Khosrow I and Khosrow II, relying on Bishapur coins?

## Identified Traces

According to the test results, it has the highest amount of elements after silver (Ag), copper (Cu), iron (Fe), lead (Pb), and gold (Au); Therefore, these elements, which were also present in all the coins, should be considered as the main elements that make up the metal of the samples. The

most important analytical part of this research is based on the silver purity of these coins; The results of elemental analysis show that the purity of silver in these coins is between 95.17-95.33%, which has an average purity of 95.25%; Also, the average amount of silver in the coins of Khosrow I was 95.36% and in the coins of Khosrow II it is 96.43%. The coins of this research have an amount of 2.58-3.40% copper, which has an average purity of 3.08%; Also, the average amount of copper in Khosrow I coins is 2.83% and in Khosrow II coins is 2.30%. The amount of iron purity in these Hormizd IV coins is between 0.51-0.69%, which has an average of 0.57%; Also, the average amount of iron in Khosrow I coins is 0.55% and in Khosrow II coins is 0.00%. The fourth Hormizd IV coins also contain 0.05% lead and 0.90% gold on average. The next issue is the amount of element diversity, which reaches 16 elements in Hormizd IV coins; But in the variety of elements in the coins of Khosrow I, there are 6 elements and in the coins of Khosrow II, there are only 3 elements.

### Conclusion

The purity of silver in these studied coins is between 95.17-95.33%, which has an average purity of 95.25%. This amount of purity is very high and can indicate the economic power of Bishapur city in the era of Hormizd IV. Usually, the copper element is naturally present in the amount of less than 2% in the metal of coins, but if the amount of this element is more than 2%, it cannot be considered natural and it must have been optional mixing; The coins of this research have an average of 3.08% copper, which shows a deliberate alloying to refine the metal of the coin. Also, the presence of iron element is usually caused by surface pollution from the burial environment of the coins, and accordingly, the coins of this research contain a small amount of iron, i.e. 0.57% iron. In addition, due to the presence of lead element, an average of 0.05% indicates the use of lead mines for silver metal, and haste and lack of precision in its extraction. Also, lead mines are divided into cerussite and galena, cerussite mines contain between 0.2-1.5% and galena mines contain less than 0.2% of gold, so these coins contain 0.90% gold on average. It is present in their elemental compositions, which can also indicate the use of cerussite mines. In order to compare 2 coins of Khosrow I and 2 coins of Khosrow II minted in Bishapur, it was tested. The amount of silver in the coins of Khosrow I is 95.36% and in the coins of Khosrow II 96.43%, but the amount of silver in the coins of Hormizd IV is 95.25%, this amount of purity is similar to the coins of Khosrow I, but there is a big difference, that is It creates

a difference of 1.18% with the coins of Khosrow II, which indicates the superiority of the economic power and the coinage system in the period of Khosrow II. The amount of copper in the coins of Khosrow I is 2.83% and in the coins of Khosrow II is 2.30%, but the amount of copper in the coins of Hormizd IV is 3.08%, and the difference between 0.25 and 0.78% of the amount of copper indicates the lowering of the purity. Silver in the era of Hormizd IV was compared to the periods before and after it. The variety of elements in the coins of Khosrow I was 6 elements and in the coins of Khosrow II only 3 elements, but the variety of elements in the coins of Hormizd IV reached 16 elements. The extra elements reduce the quality of the metal of the coin and usually they are removed, but due to the costs this caused in line with the policy of reducing court costs in the Hormizd IV period, the extra elements are not removed and as a result the coin they had lower quality than before and after.



پژوهش‌های باستان‌شناسی ایران

فصلنامه علمی پژوهش‌های باستان‌شناسی ایران  
P-ISSN: 2345-5225 & E-ISSN: 2345-5500  
نشانی پایگاه نشریه: <https://nbsh.basui.ac.ir>  
شماره ۳۴ دوره دوازدهم، پاییز ۱۴۰۱

## تجزیه عنصری سکه‌های نقره هرمز چهارم ساسانی، ضرب شده در بیشاپور به روش پیکسی (PIXE)

زهرة جوزی<sup>۱</sup>

شناسه دیجیتال (DOI): <https://dx.doi.org/10.22084/NB.2021.24200.2329>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۱۴، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۰۶

نوع مقاله: پژوهشی

صص: ۲۴۰-۲۱۵

### چکیده

دوره شاهنشاهی «هرمز چهارم» ساسانی (۵۷۹-۵۹۰ م.) را باید دوره‌ای پر از جنگ و درگیری با سایر دولت‌ها و اقوام همسایه دانست. در اینجا سکه‌ها را می‌توان سندی ارزشمند در داده‌های باستان‌شناختی دانست که مانند متون با هدف خوانش مجدد ایجاد نشده‌اند؛ از این رو، تجزیه عنصری سکه‌های این دوره، به خصوص با استفاده از شیوه دقیق و غیرمخرب پیکسی، می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره شرایط سیاسی-اقتصادی در اختیار گذارد تا تحلیل بهتری از شرایط آن عصر ارائه گردد. از آنجا که شهر بیشاپور، شهری مهم و با ثبات در آن عصر است و یکی از فعال‌ترین ضربخانه‌ها در آن قرار داشته، به عنوان نمونه در این پژوهش انتخاب گردید. سکه‌های هرمز چهارم، ضرب بیشاپور در ۱۰ سال مختلف به ضرب رسیده؛ به همین دلیل از هر تاریخ تعداد دو سکه برای آزمایش انتخاب گردید و علاوه بر آن نیز تعداد دو سکه از «خسرو اول» (۵۳۱-۵۷۹ م.) و دو سکه از «خسرو دوم» (۵۹۱-۶۲۸ م.) نیز به جهت مقایسه، بدان افزوده شد. پرسش‌های اصلی این پژوهش عبارتند از: ۱- تجزیه عنصری سکه‌های هرمز چهارم ضرب بیشاپور، چه تحلیلی از ساختار عنصری سکه‌ها ارائه می‌دهد؟ ۲- قدرت اقتصادی و سیاست‌های پولی دوره هرمز چهارم در مقایسه با دوران خسرو اول و خسرو دوم با تکیه بر سکه‌های ضرب بیشاپور، چگونه بوده است؟ در نتیجه مشخص گردید که مقدار میانگین خلوص نقره این سکه‌ها ۹۵٫۲۵٪ بوده و مقدار ۳٫۰۸٪ مس جهت عیار نمودن به فلز سکه‌ها افزوده شده و هم‌چنین با توجه به وجود عنصر سرب (۰٫۰۵٪) و طلا (۰٫۶۹٪) در این سکه‌ها مشخص نمود که معادن نقره مورد استفاده، در واقع معادن سرب و از نوع سروزیت<sup>۱</sup> بوده است. علاوه بر آن، پایین‌تر بودن خلوص نقره، بالا بودن مقدار مس و بیشتر بودن تنوع عنصری سکه‌های هرمز چهارم، نشان داد که کیفیت سکه‌های آن دوره از سکه‌های دوران خسرو اول و خسرو دوم پایین‌تر بوده است.

**کلیدواژگان:** سکه‌شناسی، هرمز چهارم ساسانی، بیشاپور، آزمایش پیکسی، باستان‌سنجی.

I. استادیار گروه باستان‌شناسی، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

Email: Zj332244@gmail.com

ارجاع به مقاله: جوزی، زهرة، ۱۴۰۱، «تجزیه عنصری سکه‌های نقره هرمز چهارم ساسانی، ضرب شده در بیشاپور به روش پیکسی (PIXE)»، پژوهش‌های باستان‌شناسی ایران، ۱۲(۳۴): ۲۱۵-۲۴۰. doi: 10.22084/nb.2021.24200.2329

صفحه اصلی مقاله در سامانه نشریه:

[https://nbsh.basui.ac.ir/article\\_4940.htm?lang=fa](https://nbsh.basui.ac.ir/article_4940.htm?lang=fa)

فصلنامه علمی گروه باستان‌شناسی دانشکده هنر و معماری، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

© حق نشر متعلق به نویسنده(گان) است و نویسنده تحت مجوز Creative Commons Attribution License به مجله اجازه می‌دهد مقاله 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

«هرمزد چهارم»، پس از مرگ «خسرو انوشیروان» (خسرو اول) و زمانی که برای انعقاد معاهده صلح در بیزانس مشغول رایزنی بود، به پادشاهی برگزیده شد (Menander Protector, 1985: 153). ویژگی‌های شخصیتی هرمزد چهارم، همگان را رنجانده بود؛ همان طور که «سبئوس» گفته: «هرمزد به واسطه تبارش، برجسته‌تر از نیاکان پدری و به همان اندازه وحشی‌تر از نیاکان مادری‌اش بود» (Sebeos, 1904: 18). او برای مهار کردن قدرت اشراف، به خشونت با آن‌ها، بدنام کردنشان و حتی اعدام آنان پرداخت؛ از این رو، وی به طبقه‌های پایین جامعه اهمیت فراوانی داده و توانست بدان واسطه از پدر خود پیشی بگیرد، اما حسن نیت او جواب عکس داد و طبقات پایین علیه او شورید (Theophylact Simocatta, 1986: 3, 8-13, 16).

هرمزد بر آن بود تا تمامی هزینه‌های دربار را پایین بیاورد، حتی تا آنجا پیش رفت که دستمزد لشکریان را تا یک دهم پایین آورد و او نه تنها دادخواست موبدان زرتشتی را که برای آزار مسیحیان، فرستاده بودند را رد نمود، بلکه گفت می‌خواهد همه زبردستان او به آزادی دین خود را پرستش کنند؛ بنابراین او با موبدان زرتشتی در افتاده و بر پایه گزارش‌ها بسیاری از آن‌ها و هزاران تن از اشراف وابسته به موبدان را کشت و سبب ناخشنودی را فراهم آورد (Ibid: 3, 13, 16).

مرگ خسرو انوشیروان در حالی رقم خورد که ایران در مرزهای غربی با روم شرقی در حال جنگ بود. در ماه‌های آخر عمر انوشیروان، مذاکرات صلح با امپراتور «تیریوس دوم» (۵۷۴-۵۷۸ م. به همراه «ژوستین دوم؟» ۵۷۸-۵۸۲ م. به تنهایی) در جریان بود، اما با برتخت نشینی هرمز به یک باره متوقف شد؛ چرا که او راضی نبود تا از هیچ‌کدام از فتوحات پدرش چشم‌پوشی کند. با وقوع جنگ میان ایران و روم و شدت گرفتن آن، خزرها، آذربایجان را مورد تاخت و تاز قرار داده، اعراب چندین شهر غربی را غارت کرده و گوگ‌ترک‌ها نیز بلخ و مضافات آن را به تصرف خود درآوردند (Pourshariati, 2008: 124).

از مهم‌ترین این اتفاقات، حمله گوگ‌ترک‌ها به استان‌های شرقی شاهنشاهی ساسانی بود، با این حال «بهرام چوبین»، اسپهبد معروف ایرانی، در نبرد آنان را به سختی شکست داد. این اتفاق باعث شهرت بهرام شد که در نهایت رشک هرمز را برانگیخت و او بهرام را از عنوان اسپهبدی خلع کرد. تصمیم هرمز خشم بهرام چوبین را برانگیخت و او سر به شورش برداشت. از آنجایی که او یک فرد نظامی بود، سربازان ساسانی نیز از اسپهبد در برابر شاهنشاه طرف‌داری کردند و بهرام به سمت تیسفون به راه افتاد؛ اما پیش از رسیدن او، «ویستهم» و «بندوی»، احتمالاً با همکاری خسرو پرویز، هرمز را از سلطنت برکنار و کور کرده، در نهایت او را کشتند (Shahbazi, 2004: 466-467).

از آنجایی که در دوره هرمزد چهارم ساسانی، ایران سراسر درگیر جنگ‌ها و ترکتازی‌های اقوام مختلف بوده و علاوه بر آن نیز خود هرمزد در پی آن بوده که تمامی هزینه‌های کشوری را پایین آورد، و نیز با توجه به این که شهر بیشاپور یکی از مهم‌ترین شهرهای دوره ساسانی و یکی از فعال‌ترین ضرابخانه‌های آن عصر بوده،

موقعیت قرارگیری آن نیز به‌گونه‌ای بوده که ثبات بیشتری نسبت به سایر شهرهای گرفتار جنگ داشته، به‌همین دلیل سکه‌های ضرب این شهر (در تمامی تاریخ‌های ضرب) به‌عنوان نمونه‌ای از سکه‌های ضرب‌خانه‌های دوره ساسانی، مورد تجزیه عنصری (به روش پیکسی) و تحلیل قرار می‌گیرد تا تحلیلی از اوضاع اقتصادی شهر بیشاپور در اوج این نزاع‌ها و نحوه عملکرد و تعهد این ضرب‌خانه به نظام مرکزی ضرب مسکوکات ارائه گردد؛ به اضافه آن‌که قدرت اقتصادی و عیار نقره درهم‌های آن دوره در قیاس با دوران حکومت خسرو اول و خسرو دوم ساسانی نیز سنجیده شود.

در اینجا سکه‌ها را می‌توان سندی ارزشمند و بهترین داده‌های باستان‌شناختی دانست؛ زیرا سکه‌ها متعلق به همان عصر بوده و مانند متون با هدف خوانش مجدد ایجاد نشده‌اند (کیان‌زادگان و همکاران، ۱۳۹۸: ۱۸۲)؛ از این‌رو، تجزیه عنصری سکه‌های این دوره، به‌ویژه با استفاده از تجزیه عنصری پیکسی می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره شرایط سیاسی-اقتصادی در اختیار گذارد، تا تحلیل بهتری از شرایط دوران مورد پژوهش به دست آید (Beck et al., 2004: 153-162)؛ بنابراین سعی این پژوهش بر آن بوده که علاوه بر تلفیق نگاه‌های تاریخی و اطلاعات سکه‌شناسی، به تجزیه عنصری پیکسی سکه‌های هرمزد چهارم پرداخته شود.

**پرسش‌ها و فرضیات پژوهش:** این پژوهش دو پرسش اصلی را در پی دارد: ۱- تجزیه عنصری سکه‌های هرمزد چهارم ضرب بیشاپور، چه تحلیلی از ساختار عنصری سکه‌ها ارائه می‌دهد؟ ۲- قدرت اقتصادی و سیاست‌های پولی دوره هرمزد چهارم در مقایسه با دوران خسرو اول و خسرو دوم با تکیه بر سکه‌های ضرب بیشاپور، چگونه بوده است؟ و اما فرضیات این پژوهش: ۱- سه تحلیل از ساختار سکه‌های موجود می‌تواند ارائه شود؛ تحلیل اول، با توجه به سه عنصر اصلی، نقره، مس و آهن است که بر قدرت اقتصادی دلالت دارد؛ تحلیل دوم، با توجه به دو عنصر سرب و طلا است که بر یافتن نوع معادن استوار است؛ و در آخر مسأله تنوع عنصری مطرح می‌شود که کیفیت ساختاری فلز سکه‌ها را تحلیل می‌کند. در اینجا چون هنوز آزمایشی صورت نگرفته، نمی‌توان فرضیه را ارائه داد، اما براساس پژوهش‌های گذشته این احتمال وجود دارد که سکه‌های این دوره با استانداردهای سایر سکه‌های ساسانی به ضرب رسیده باشند. ۲- با توجه به این‌که ایران در دوره هرمزد چهارم درگیر جنگ‌ها و نزاع‌های طولانی مدتی بوده، و علاوه بر آن، او سیاست‌های کاهش هزینه‌های دیوانی را دنبال می‌کرده، این امر می‌تواند نشانه‌ای از پایین آمدن کیفیت فلز سکه‌ها نسبت به دوران خسرو اول و خسرو دوم باشد.

**روش پژوهش:** در پژوهش داده‌های باستانی و ترکیبات عنصری آن‌ها روش‌های متفاوتی نظیر «پراش پرتو ایکس»<sup>۲</sup>، «فلورسانس پرتو ایکس»<sup>۳</sup>، «انتشار اشعه ایکس ناشی از ذرات»<sup>۴</sup>، «طیف‌سنجی جذب اتمی»<sup>۵</sup>، «تجزیه فعال سازی نوترونی»<sup>۶</sup>، و غیره استفاده می‌شود (خادمی‌ندوشن و همکاران، ۱۳۹۴: ۵۴). در این پژوهش از میان سایر شیوه‌های تجزیه عنصری، از شیوه پیکسی به دلیل سرعت، دقت بالا، و از همه

مهم‌تر غیرمخرب بودن آن، برای مطالعه سکه‌ها استفاده شده است. این شیوه انواع گوناگونی نظیر: «پیکسی متعارف»، «پیکسی با باریکه خارجی»<sup>۷</sup>، «میکروپیکسی»<sup>۸</sup>، و «فلورسانس پرتوی ایکس ناشی از پروتون»<sup>۹</sup> را برای مطالعات باستان‌سنجی ارائه می‌دهد (لامعی‌رشتی، ۱۳۸۲: ۷۵-۹۲)؛ بنابراین پایه این پژوهش بر پیکسی متعارف قرار گرفت و این شیوه، روشی معمول برای تجزیه عنصری نمونه‌های همگن، مانند سکه‌ها محسوب می‌شود. در نمونه‌های همگن اجزای آن به صورت یکنواخت پراکنده شده‌اند و در صورت غیرهمگن بودن نمونه‌ها می‌توان از روش‌های دیگر مانند میکروپیکسی و غیره استفاده نمود (اسماعیل‌زاده‌کیوی، ۱۳۹۲: ۲۸). به منظور آزمایش پیکسی، تعداد ۲۰ سکه در ۱۰ تاریخ متفاوت از هرمزد چهارم انتخاب گردید و علاوه بر آن تعداد دو سکه با تاریخ‌های متفاوت از خسرو اول و دو سکه با تاریخ‌های متفاوت از خسرو دوم که همگی در بیشاپور به ضرب رسیده، نیز جهت مقایسه، از مجموعه‌های خصوصی (مجموعه‌های آقایان: سیدحسن سادات‌رضوی (نمونه‌های ۱-۱۳، ۱۵-۱۶، و ۱۸-۲۰)، سیدعلی سیدموسوی (نمونه‌های ۲۱-۲۴)، و مسعود میرعابدینی (نمونه‌های ۱۴ و ۱۷)) انتخاب گردید و سکه‌ها به آزمایشگاه مؤسسه فیزیک بوبانسور (ایالت اورپسا، هند)<sup>۱۰</sup>، ارسال گردید.

### پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های عمومی در راستای تجزیه عنصری سکه‌های ساسانی به انجام رسیده، اما هیچ‌کدام از آن‌ها به مطالعه سکه‌های هرمزد چهارم ساسانی با رویکردی اختصاصی نپرداخته است. تمامی این پژوهش‌ها در مقالات «مطالعه و تحلیل ۳۰ سکه نقره‌ای دوره ساسانی موزه همدان با استفاده از روش PIXE» (حاج‌ولیئی و همکاران، ۱۳۸۸: ۱۴۱-۱۴۹)، «مطالعه سکه‌های نقره ساسانی با استفاده از تکنیک XRF»<sup>۱۱</sup> (Sodaei et al., 2013: 211-215)، «گنجینه‌ای از عصر یزدگرد سوم در کرمان»<sup>۱۲</sup> (Heidemann, 2014: 79-124)، «مطالعه آماری سکه‌های نقره هخامنشی، اشکانی و ساسانی با استفاده از آنالیز عنصری به روش پیکسی» (اولیایی و همکاران، ۱۳۹۴: ۱۷-۲۸)، «به‌کارگیری روش طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس (WDXRF) در مطالعه سکه‌های نقره ساسانی» (حاج‌ولیئی و سودایی، ۱۳۹۴: ۱۶۳-۱۷۴)، و «تجزیه عنصری سکه‌های پیروز ساسانی به روش پیکسی (PIXE)، مطالعه موردی: سکه‌های گنجینه پیروزگت کشف‌شده از روستای تیس چابهار» (کیان‌زادگان و همکاران، ۱۳۹۸: ۱۸۱-۱۹۶) خلاصه می‌شود؛ اما تمامی آن‌ها از نظر اهداف و رویکرد پژوهشی با پژوهش حاضر متفاوت است.

### مروری بر اوضاع سیاسی ایران در دوره هرمزد چهارم

هرمزد در روابط خارجی سازش‌ناپذیر بود؛ پیمان صلح با بیزانس را پاره ساخت و از رومیان درخواست خراجی نمود که آنان نمی‌توانستند پرداخت کنند (Menander Protector, 1985: 9-24). رومیان هم‌چنین با پذیرفتن شخص نامعتبری به‌عنوان پسر خسرو اول، خشم هرمزد چهارم را برانگیختند (John of Ephesus, 1862: 6, 29).



دوران پادشاهی هرمزد چهارم برپا بود. «مناندر پروتکتور» آورده است که «ایرانی‌ها و رومی‌ها صلح برقرار کرده بودند، اگر خسرو از جهان چشم فرو نبسته بود و پسر او، هرمزد چهارم، یک نابکار به تمام معنا، جای او را نگرفته بود» (Menander Protector, 1985: 207-209).

هنگام برتخت نشستن هرمزد چهارم، امپراتور «تیریوس دوم» پیشنهاد پیمان‌نامه صلحی نمود که در آن امپراتوری بیزانس از تمامیت ارمنستان چشم پوشیده، شهر دارا را به ایران برگردانده و در عوض شهر آرنزیر که پایگاه رومیان بود را بازستاند. هرمزد از این پیشنهاد سرباز زد و تیریوس دوم به فرمانده شرق، «مئوریس» دستور داد تا برای جنگ با ایران آماده گردد (Menander Protector, 1985: 209-215; Theophylact Simocatta, 1986: 1-3, 17; John of Ephesus, 1862: 6, 22).

پس از توقف مذاکرات صلح، مئوریس، ژنرال رومی از مرز گذشت و به کردستان حمله ور شد. او حتی در نظر داشت تا سال آینده میان رودان جنوبی را نیز اشغال کند؛ اما «منذر»، شاه غسانی که به رومیان خیانت کرده بود، برنامه‌های رومی‌ها به هرمز اطلاع داد. در پیامد این اتفاق، مئوریس مجبور به عقب‌نشینی به مرزهای روم شد. در جریان این عقب‌نشینی، «آذرماهان» اسپهبد ایرانی به تعقیب او پرداخت، اما در نهایت مئوریس با موفقیت از مرز عبور کرد (Whitby, 2001: 102).

سال بعد و در ۵۸۲ م.، اسپهبد ایرانی «تهم خسرو» از مرز ایران و روم گذر کرد و شهر کنستانتینا را محاصره کرد، اما مئوریس با موفقیت او را شکست داد و خود تهم خسرو نیز کشته شد؛ با این حال، شرایط سلامتی تیریوس دوم او را مجبور کرد تا به سرعت به قسطنطنیه عقب‌نشینی کند. در همین زمان، «جان میستاکن»، جانشین مئوریس در مرزهای ایران و روم، در نیمفئوس با ساسانیان روبه‌رو شد، اما از سپاه ایرانی شکست خورد. «فیلیپیکوس» پس از این شکست جایگزین او شد، اما او نیز شکست خورد. فیلیپیکوس سال‌های ۵۸۴-۵۸۵ م. را در خاک ایران گذراند و بخش‌هایی از آن را اشغال کرده بود. در پاسخ، ایرانیان به شهرهای مونوکاریوم و مارتیوپولیس حمله ور شدند. یک سال بعد، فیلیپیکوس از خاک ایران عقب‌نشست و در ۵۸۶ م. در سال‌چون ایرانیان را شکست داد و چلومارون را محاصره کرد، اما در ورود به شهر ناکام ماند. او پس از این رویداد، به شهر آمید عقب‌نشست و در سال ۵۸۷ م. «هراکلیوس» جایگزین او شد (Ibid).

در سال ۵۸۸ م.، ایرانیان دوباره به کنستانتینا در خاک روم حمله ور شدند اما مدافعان شهر به خوبی پایداری کردند. رومیان در پاسخ ارزانیان را در خاک ایران محاصره کردند که این عملیات نیز ناموفق بود. ایرانیان در پاسخ دوباره مارتیوپولیس را محاصره کردند که این بار پیروزی با رومیان بود؛ اما در سال ۵۸۹ م.، ایرانیان با موفقیت وارد مارتیوپولیس شدند و فیلیپیکوس را دو بار شکست دادند. دولت قسطنطنیه، فیلیپیکوس را فراخواند و «کمنتیلوس» را جایگزین او کرد. کمنتیلوس با موفقیت در نبرد سیسائورانون ساسانیان را شکست داد. او سپس مارتیوپولیس را

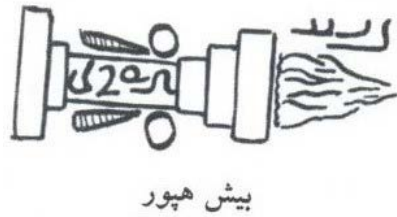
محاصره کرد که در همین زمان بود «گوک‌ترکان» به مرزهای شرقی ایران حمله‌ور شدند (Ibid).

در سال ۵۸۸ م. ایران وارد یک بحران جدی شد. در اوج جنگ با رومیان، خزرها به آذربایجان حمله کرده و مردم منطقه را قتل‌عام کردند. چند شهر در مرزهای غربی نیز توسط اعراب غارت شد و بلخ به اشغال گوک‌ترکان درآمد. «فردوسی» می‌گوید که «نستوه» پدر خود «مهران ستاد» را به «هرمزد» معرفی کرده و مهران ستاد به شاهنشاه توصیه کرد که «بهرام چوبین» را به جنگ در مرزهای شرقی بفرستد (Pourshariati, 2008: 124).

هرمزد نیز همان‌گونه که به او گفته شده بود، بهرام را با سپاهی مرکب از ۱۳ هزار اسوار به جنگ خاقان گوک‌ترک فرستاد (Shahbazi, 1988: 414-522). او در آوریل سال ۵۸۸ م. در نبرد با سپاه مشترک هپتالیان و گوک‌ترک‌ها به یک پیروزی قاطع رسید و در ۵۸۹ م. بلخ را فتح کرد. بهرام سپس از آمودریا گذشت و در همان سال در نبردی ارتش گوک‌ترک‌ها را شکست داد و حتی خاقان آنان را نیز به گفته شاهنامه شخصاً با پرتاب تیری کشت. بهرام چوبین پس از این پیروزی به سمت بخارا پیش‌روی کرد و در آنجا به نام هرمزد سکه زد. «بیرمودا»، پسر خاقان در این شهر به سپاه بهرام حمله کرد و اسپهد ساسانی او را نیز با قاطعیت شکست داد و حتی خود شاهزاده گوک‌ترک را نیز دستگیر کرد و به تیسفون فرستاد. گفته شده هرمزد ۴۰ روز او را به عنوان اسیر در کاخ خود نگاه‌داشت و سپس وی را آزاد کرد و به میان مردمش فرستاد (Rezakhani, 2017: 178; Jaques, 2007: 463; Litvinsky & Dani, 1996: 368-369).

پس از پیروزی‌های بهرام در شرق، هرمزد او را به آذربایجان فرستاد تا خزرها را پس براند. بهرام چوبین در این نبرد نیز پیروز شد و سپس از سوی شاهنشاه ساسانی مأمور جنگ با رومیان گردید. در نبرد اول، او سپاه رومی را در گرجستان شکست داد، اما در اتفاقات پس از نبرد دچار یک حمله غافل‌گیرانه شد. هرمزد که پس از پیروزی‌های متوالی بهرام به او رشک برده بود، از همین شکست استفاده کرد و او را از جایگاهش خلع کرده و او را تحقیر کرد (Shahbazi, 1988: 414-522; Martindale et al., 1992: 167).

براساس یک روایت دیگر، این ایزدگشنسپ بود که باعث بدبینی هرمزد نسبت به بهرام شد. او از این گفت که بهرام چوبین بهترین بخش غنیمت‌ها را برای خود نگاه‌داشته و آنان را به پایتخت نفرستاده‌است. به هر صورت، هرمزد محبوبیت و شهرت بهرام را برنتابید و او را از فرماندهی سپاه کنار گذاشت. گفته شده او برای تحقیر بیشتر بهرام چوبین، زنجیری برای او فرستاد تا به او یادآوری کند که پس از همه این پیروزی‌ها، درنهایت او هنوز بنده شاه شاهان است (Tafazzoli, 1988: 260). سرانجام این اتفاق، منجر به شورش بهرام چوبین علیه تاج و تخت گردید. شورش این اسپهد پیامدی جز سقوط هرمزد چهارم برای شاهنشاه ساسانی نداشت.



بیش هپور

▲ شکل ۱. نگارش نام ضربخانه بیشاپور در سکه‌های بهرام چهارم ساسانی (انصاری و زرشناس، ۱۳۹۲: ۳۰).

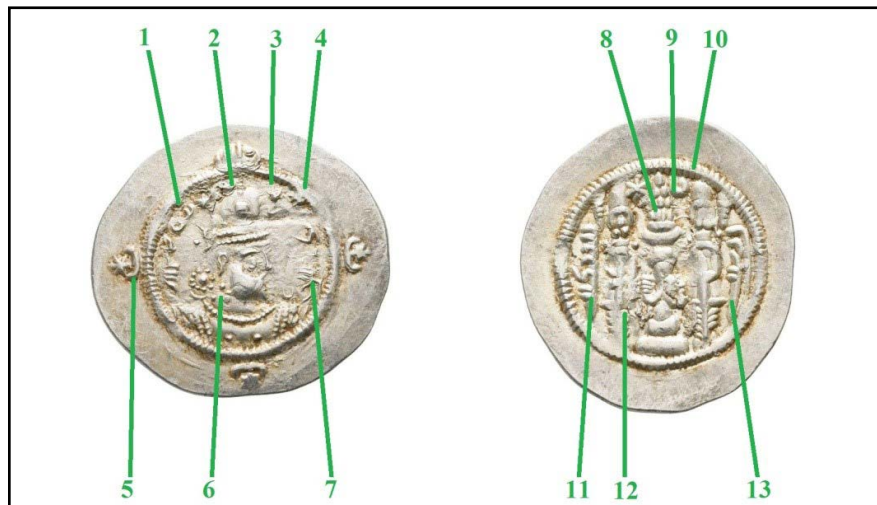
Fig. 1. Writing the name of the Bishapur mint on the coins of Bahram IV Sassanid (Ansari & Zarshenas, 2012: 30).

### مختصری در باره ضربخانه شهر بیشاپور

علامت اختصاری BIS، بدون شک نشانه ضربخانه بیشاپور در فارس است (انصاری و زرشناس، ۱۳۹۲: ۲۹) و نخستین بار هرتسفلد براساس نوشته یک مهر، درستی نام این ضربخانه را تأیید نمود. نام بیشاپور بر روی تعدادی از مهرهای کتیبه‌دار هم به اختصار و هم کامل آورده شده است (Hertsfeld, 1938: 418; Paruk, 1944: 100; Frye, 1973: 63). نام این ضربخانه برای نخستین بار بر پشت سکه‌های بهرام چهارم ساسانی (۳۸۸-۳۹۹ م.) حک شده است؛ بدین صورت که سه حرف اول، یعنی BIS در سمت چپ شعله آتش‌دان و مابقی حروف، یعنی hpwl در پایه‌ستون مانند آتش‌دان نقر گشته است (شکل ۱). نام ضربخانه بیشاپور بر سکه هرمزد چهارم به صورت خلاصه و به شکل BIS نگاشته شده و نگارش نام این ضربخانه به این گونه اختصاری تا پایان دوره ساسانی و حتی صدر اسلام تا دوران برچیده شدن سکه‌های عرب-ساسانی (اواخر قرن اول هجری قمری) رواج داشته است (Walker, 1941: cx-cxi; Paruk, 1944: 100; Gaube, 1973: 92).

### معرفی سکه‌های مورد آزمایش

سکه‌ها در دوران گذشته و به طور غالب از طلا، نقره، و مس به ضرب می‌رسیدند؛ شاهنشاهی ساسانی نیز مانند سایر حکومت‌های هم‌دوره و پیشین، از این نظام سه فلزی تبعیت کرده و آن را حفظ داشته‌اند؛ هرچند که سکه‌های طلا جنبه مبادلاتی چندانی نداشتند. در دوره هرمزد چهارم، ضرب دینارهای طلا متوقف شده و پیشیزهای مسین نیز با تعداد اندکی به ضرب می‌رسیدند، اما ضرب درهم‌های نقره متناسب با نیاز روز جامعه، ادامه داشت. درهم‌های هرمزد چهارم از وزنی در حدود ۴٫۱۰ تا ۴٫۱۵ گرم برخوردار است (ر.ک. به: گوبل، ۱۳۸۲: ۱۰۹-۱۱۵). طرح درهم‌های این دوره نیز از درهم‌های دیگر شاهان ساسانی پس از دوران حاکمیت پیروز اول (۴۵۹-۴۸۴ م.)، به اقتباس رفته بود (ر.ک. به: کیان‌زادگان و همکاران، ۱۳۹۸: ۱۸۴)؛ به درهم هرمزد چهارم ضرب شده در بیشاپور به سال ۱۰ هرمزدی (شکل ۲) توجه کنید.



► شکل ۲. نمونه درهم‌های هرمزد چهارم ساسانی، ضرب‌شده در بیشاپور به سال ۱۰ هرمزدی (نگارنده، ۱۴۰۰).

Fig. 2. Example of dirhams of Hormizd IV Sasanian period, minted in Bishapur in the 10<sup>th</sup> year of Hormizd (Author).

**روی سکه:** (۱) واژه پهلوی 'pzwt' (Abzūd). (۲) تاج شاهی. (۳) هلال ماه و ستاره. (۴) دایره زنجیره‌ای روی سکه. (۵) هلال ماه و ستاره روی موقعیت‌های ۳، ۶، و ۹ ساعت. (۶) نقش نیم‌رخ شاه ساسانی. (۷) نام هرمزد به خط پهلوی OHORMAZD. **پشت سکه:** (۸) آتشدان مقدس زرتشتی. (۹) هلال ماه و ستاره. (۱۰) دایره زنجیره‌ای پشت سکه. (۱۱) تاریخ ضرب سکه به خط پهلوی 'srā' (۱۰ هرمزدی). (۱۲) دو نگهبان ایستاده در طرفین آتشدان مقدس زرتشتی. (۱۳) مکان ضرب سکه به خط پهلوی BYŠ (بیشاپور).

سکه‌های هرمزد چهارم ضرب بیشاپور در بازه زمانی سال‌های ۱-۲ و ۵-۱۲ هرمزدی (۵۷۹-۵۸۰ و ۵۸۳-۵۹۰ م.) به ضرب رسیده و ۱۰ سکه متفاوت از نظر تاریخ ضرب را دربر می‌گیرد؛ بنابراین از هر تاریخ ضرب سکه‌های هرمزد چهارم، دو سکه برای آزمایش در نظر گرفته شد و تعداد دو سکه از خسرو اول و دو سکه از خسرو دوم که همگی در بیشاپور به ضرب رسیده‌اند، نیز در جایگاه داده‌هایی برای مقایسه انتخاب گردید؛ چراکه دوره شاهنشاهی خسرو اول، همراه با اصلاحاتی اساسی در سراسر نظام دیوانی کشور است و این اصلاحات به همان شکل تا پایان حکومت خسرو دوم نیز ادامه پیدا می‌کند و حتی با تغییرات اندکی تا قبل از حمله مغولان باقی می‌ماند؛ در نهایت تعداد ۲۴ سکه در مؤسسه فیزیک بوبانسور، با روش پیکسی مورد آزمایش قرار گرفت (شکل ۳). مشخصات تمام سکه‌های مورد آزمایش در جدول ۱ و ۲ آمده است.



### تجزیه عنصری سکه‌های مورد آزمایش

وقتی تجزیه عنصری روی مقادیر مطلق عناصر انجام می‌گیرد، روشن است که باید به آلودگی نمونه‌ها توجه شود؛ بنابراین آماده‌کردن نمونه‌ها یکی از مشکلات اساسی در آزمایش پیکسی است. برای تجزیه عنصری بهتر و دقیق‌تر نمونه‌ها، در بسیاری از

▲ شکل ۳. نمونه سکه‌های آزمایش شده (نگارنده، ۱۴۰۰).

Fig. 3. Sample of tested coins (Author).

جدول ۱. جامع مشخصات سکه‌های اصلی مورد آزمایش (نگارنده، ۱۴۰۰).  
Table 1. Characteristics of the main tested coins (Author).

ردیف	دوره	پادشاه	محل ضرب	تاریخ ضرب	واحد پولی	جنس فلز	وزن	قطر
۱	ساسانی	هرمزد چهارم	بیشاپور	۱ هرمزدی	درهم	نقره	۴.۱۰ گرم	۲۹ میلی‌متر
۲	ساسانی	هرمزد چهارم	بیشاپور	۱ هرمزدی	درهم	نقره	۴.۰۹ گرم	۲۸ میلی‌متر
۳	ساسانی	هرمزد چهارم	بیشاپور	۲ هرمزدی	درهم	نقره	۴.۱۱ گرم	۲۹ میلی‌متر
۴	ساسانی	هرمزد چهارم	بیشاپور	۲ هرمزدی	درهم	نقره	۴.۱۰ گرم	۲۹ میلی‌متر
۵	ساسانی	هرمزد چهارم	بیشاپور	۵ هرمزدی	درهم	نقره	۴.۱۴ گرم	۲۹ میلی‌متر
۶	ساسانی	هرمزد چهارم	بیشاپور	۵ هرمزدی	درهم	نقره	۴.۱۱ گرم	۲۸ میلی‌متر
۷	ساسانی	هرمزد چهارم	بیشاپور	۶ هرمزدی	درهم	نقره	۴.۰۷ گرم	۲۹ میلی‌متر
۸	ساسانی	هرمزد چهارم	بیشاپور	۶ هرمزدی	درهم	نقره	۴.۰۹ گرم	۲۹ میلی‌متر
۹	ساسانی	هرمزد چهارم	بیشاپور	۷ هرمزدی	درهم	نقره	۴.۱۱ گرم	۲۹ میلی‌متر
۱۰	ساسانی	هرمزد چهارم	بیشاپور	۷ هرمزدی	درهم	نقره	۴.۱۳ گرم	۳۰ میلی‌متر
۱۱	ساسانی	هرمزد چهارم	بیشاپور	۸ هرمزدی	درهم	نقره	۴.۱۰ گرم	۲۹ میلی‌متر
۱۲	ساسانی	هرمزد چهارم	بیشاپور	۸ هرمزدی	درهم	نقره	۴.۱۲ گرم	۲۹ میلی‌متر
۱۳	ساسانی	هرمزد چهارم	بیشاپور	۹ هرمزدی	درهم	نقره	۴.۰۹ گرم	۳۰ میلی‌متر
۱۴	ساسانی	هرمزد چهارم	بیشاپور	۹ هرمزدی	درهم	نقره	۴.۱۰ گرم	۲۹ میلی‌متر
۱۵	ساسانی	هرمزد چهارم	بیشاپور	۱۰ هرمزدی	درهم	نقره	۴.۱۲ گرم	۳۰ میلی‌متر
۱۶	ساسانی	هرمزد چهارم	بیشاپور	۱۰ هرمزدی	درهم	نقره	۴.۱۳ گرم	۳۰ میلی‌متر
۱۷	ساسانی	هرمزد چهارم	بیشاپور	۱۱ هرمزدی	درهم	نقره	۴.۱۱ گرم	۳۰ میلی‌متر
۱۸	ساسانی	هرمزد چهارم	بیشاپور	۱۱ هرمزدی	درهم	نقره	۴.۱۱ گرم	۳۰ میلی‌متر
۱۹	ساسانی	هرمزد چهارم	بیشاپور	۱۲ هرمزدی	درهم	نقره	۴.۱۰ گرم	۳۰ میلی‌متر
۲۰	ساسانی	هرمزد چهارم	بیشاپور	۱۲ هرمزدی	درهم	نقره	۴.۱۱ گرم	۳۰ میلی‌متر

جدول ۲. جامع مشخصات سکه‌های مقایسه‌ای مورد آزمایش (نگارنده، ۱۴۰۰).  
Table 2. Characteristics of comparative coins tested (Author).

ردیف	دوره	پادشاه	محل ضرب	تاریخ ضرب	واحد پولی	جنس فلز	وزن	قطر
۲۱	ساسانی	خسرو اول	بیشاپور	۲۷ خسروی	درهم	نقره	۴.۱۲ گرم	۲۹ میلی‌متر
۲۲	ساسانی	خسرو اول	بیشاپور	۳۱ خسروی	درهم	نقره	۴.۱۱ گرم	۲۸ میلی‌متر
۲۳	ساسانی	خسرو دوم	بیشاپور	۲۹ خسروی	درهم	نقره	۴.۱۲ گرم	۳۱ میلی‌متر
۲۴	ساسانی	خسرو دوم	بیشاپور	۳۲ خسروی	درهم	نقره	۴.۱۳ گرم	۳۱ میلی‌متر

موارد ترجیح داده می‌شود از نمونه‌های نازک که بعضاً از نمونه‌های ضخیم به دست می‌آید، استفاده شود. اگر زمانی به دست آوردن یک نمونه نازک از نمونه ضخیم مشکل و در عمل غیرممکن باشد، نمونه ضخیم خود، مستقیم تحت تابش پروتون قرار می‌گیرد (کیان‌زادگان و همکاران، ۱۳۹۸: ۱۸۸؛ اسماعیل‌زاده‌کیوی، ۱۳۹۲: ۲۸-۲۹؛ Johansson & Johansson, 1973-516). خوشبختانه سکه‌ها، نمونه‌های نازک در نظر گرفته می‌شوند.

به دلیل نگرانی از یونیزاسیون<sup>۱۳</sup> سطح سکه‌های نقره (با آلیاژی از مس)، به دلیل پاک‌سازی غیراصولی (Beck et al., 2004: 153-162)، سکه‌های این پژوهش در محلول اسید بسیار رقیق (در حدود پنج ساعت) غوطه‌ور گشته و پس از آن با آب مقطر شستشو شدند؛ بدین ترتیب لایه‌های آلودگی از روی سطح آن‌ها برداشته شد. با توجه به این‌که مقادیر برخی از عناصر بسیار ناچیز هستند، اگر توجه زیادی در گذاشت و برداشت نمونه اعمال نشود، آلودگی‌هایی در همان حد ممکن است به سادگی به هدف برسند؛ بنابراین باید در انتقال نمونه‌ها دقت داشت و آن را به حداقل رساند و حتی می‌توان نمونه‌ها را قبل از قراردادن در محفظه، در صورت امکان با مواد تمیزکننده، از قبیل الکل و غیره تمیز کرد (کیان‌زادگان، ۱۳۹۷: ۵).

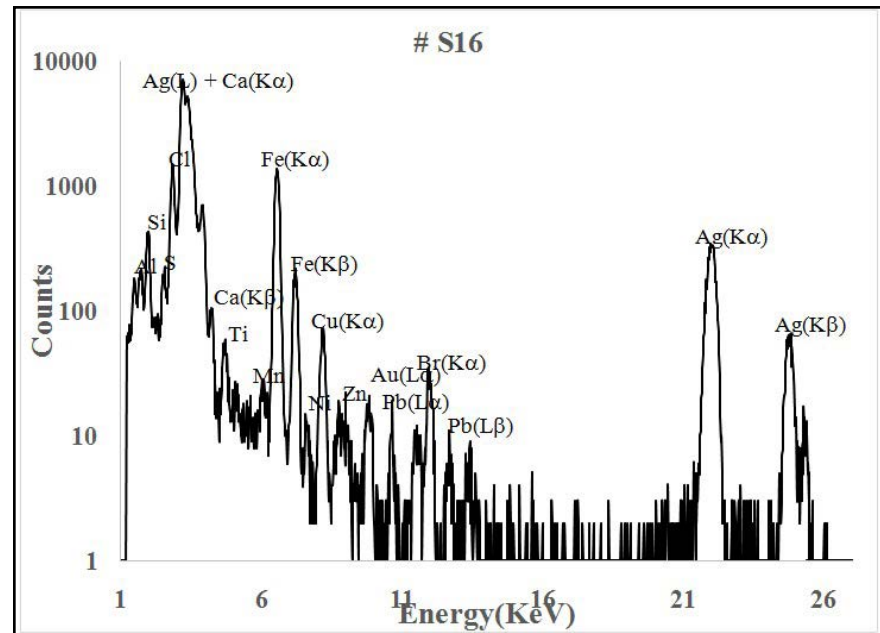
مسائل مختلفی در آزمایش پیکسی در نظر گرفته می‌شود تا میزان خلوص مطلق اجزای اصلی و عناصر کم‌مقدار نمونه‌ها به خوبی تعیین گردد (Ishii & Morita, 1988: 209-216). با توجه به مطالعات انجام‌شده، بهترین حالت تعیین مقدار عناصر، بر استفاده از انرژی 3 MeV بر پروتون با توجه به ماتریس عنصر اصلی نمونه مورد آزمایش، استوار است (Roumié et al., 2005: 584-590)؛ از این‌رو، در این پژوهش از شتاب‌دهنده متناوب پلترون 14 MV 1.7 مؤسسه فیزیک بوبانسور استفاده گردید.

قراردادن نمونه‌ها در محفظه آزمایش در قسمت نگه‌دارنده چرخشی نمونه هدف که به واسطه کامپیوتر و از طریق موتور پله‌ای<sup>۱۵</sup> قابل کنترل بوده، قدم بعدی را تشکیل می‌دهد؛ محفظه نمونه‌ها دارای چندین درگاه برای عملکردهای متفاوت بوده که دو عملکرد مهم آن برای تجزیه عنصری پیکسی و طیف‌سنجی بازتابی رادرفورد<sup>۱۶</sup> است (Ben Abdelouahed et al., 2010: 59-64). پس از قرارگرفتن نمونه‌ها برای جلوگیری از افت انرژی پروتون و تضعیف پرتوی ایکس گسیلی از نمونه هدف، باید هوای محفظه آزمایش تخلیه گردد و خلأیی در حدود Torr 7-10 ایجاد شود که معمولاً این عمل با استفاده از پمپ‌های چرخشی و دفیوژنی<sup>۱۷</sup> صورت می‌پذیرد (Gaschen et al., 2008: 535-552).

سپس باریکه‌ای از انرژی (در اینجا 3 MeV بر پروتون) از داخل محفظه واکنش عبور می‌کنند و نمونه هدف در مقابل باریکه قرار می‌گیرد. باریکه پس از برخورد به نمونه هدف در صورتی که نمونه نازک باشد، از آن عبور می‌کند و داخل فنجان فارادی<sup>۱۸</sup> متوقف می‌شود که به جمع‌کننده بار متصل است (اولیایی و همکاران، ۱۳۹۴: ۲۱). در درجه تعبیه شده در محفظه قرارگیری نمونه هدف و در راستای زاویه 135° مسیر پرتو، یک آشکارساز ORTEC Si (Li) جمع‌کننده پرتوهای موازی

برای شناسایی پرتوهای ایکس انتشار یافته از نمونه‌های مورد آزمایش، قرار گرفته است که می‌تواند امکان شناسایی عناصر سبک و سنگین را هم‌زمان فراهم آورد (Ben Abdelouahed et al., 2010: 59-64)؛ برای دقت بیشتر در این امر پیشنهاد می‌شود که یک فیلتر آلومینیومی در مقابل پنجره آشکارساز قرار داده شود (Roumié et al., 2006: 612-615).

مشخصه بار پرتو در نمونه، به وسیله تقویت‌کننده یکپارچه بار و با اتصال به یک شمارنده دیجیتال، اندازه‌گیری می‌شود؛ در اینجا برای جلوگیری از اختلال در عملکرد آشکارساز بهتر است جریان پرتو را پایین‌تر از 3 nA نگه‌دارد. سیگنال‌های آشکارساز تشکیل و تقویت می‌شود، و سرانجام از طریق تحلیل ارتفاع پالس، طیف انرژی در یک تحلیل‌گر چندکاناله ذخیره شده و نمایش داده می‌شود (شکل ۴) (Ben Abdelouahed et al., 2010: 59-64).



شکل ۴. نمونه طیف‌های آزمایشگاهی؛ نمونه شماره ۱۶ (نگارنده، ۱۴۰۰).

Fig. 4. Sample of laboratory spectra; Sample number 16 (Author).

برای پردازش طیف‌های به دست آمده و تبیین مقدار خلوص عناصر سکه‌ها از نرم‌افزار گوپیکس<sup>۱۹</sup> استفاده می‌شود (Maxwell et al., 1995: 407-421) و برای این تحلیل، از دست رفتن انرژی 3 MeV بر پروتون، تغییر سطح مقطع تولید پرتوی ایکس با کاهش انرژی پروتون، جذب پرتوی ایکس از اعماق مختلف و تأثیر عنصری (تقویت اثر پرتوی ایکس) آن را مدنظر قرار می‌دهد. این نرم‌افزار از تمام مشخصات پرتوهای ایکس وارد شده در آشکارساز Si (Li) با هدف تولید منحنی نظری، استفاده کرده و هم‌چنین قله کمینه، قله بیشینه، و توالی کم‌انرژی پرتوهای ایکس را محاسبه می‌کند (Ben Abdelouahed et al., 2010: 59-64).

برای محاسبه مقدار خلوص عناصر در سکه‌ها، هر طیف از نظر کیفی مشخص می‌گردد تا جریان‌های مختلف پرتوی ایکس عناصر موجود در طیف و بار کلی Qp

که بر پرتون‌های  $N_p$  حمل شده، را به گوییکس معرفی کند  $Q_p = 1.60210 \cdot 10^{(-)}$   $N_p \mu^C$  (13)؛ سپس داده‌های ورودی توسط برنامه‌ای با هدف تولید طیف نظری با تمام عناصر قابل مشاهده، مورد استفاده قرار می‌گیرند. محاسبه نظری شدت جریان تابش پرتوی ایکس  $I_t(Z)$ ، مبتنی بر فرض نمونه همگن و مسطح است. با توجه به روش این آزمایش، پرتوی پروتون به صورت مکرر در زاویه  $\phi$  برابر  $45^\circ$  با سطح سکه در معرض جریان ذرات قرار می‌گیرد و آشکارساز پرتوی ایکس با زاویه  $\theta$  برابر با  $135^\circ$  در جهت پرتوی پروتون قرار گرفته و یک زاویه سه بعدی کوچک را می‌سازد. محاسبه نظری شدت جریان تابش پرتوی ایکس از عنصر  $Z$  موجود با میزان خلوص  $CZ$ ، با ضخامت حجمی  $d\delta$  در عمق  $\delta$  پشت سطح سکه، به دلیل تعدادی از پروتون‌های  $N_p$ ، به خوبی توسط انتگرال ضخامت روی سکه، محاسبه و تشریح می‌شود:

$$I_t(Z) = N_p \frac{C_Z N_{av}}{A_Z} \omega_Z \frac{\tau_Z}{\tau} \varepsilon_Z f_Z \int \sigma_Z(\delta, E_p) e^{-\mu_Z \delta / \tan \phi} d\delta$$

که کاهش انرژی پرتوی پروتون  $E_p$  وارد شده به نمونه و تضعیف پرتوهای تابشی ایکس عناصر در جهت آشکارساز را محاسبه می‌کند (Ben Abdelouahed et al., 2010: 59-64). در فرمول بالا  $\sigma_Z(\delta, E_p)$  با بخش مقطع یونیزاسیون ارتباط دارد که با عمق  $\delta$  متفاوت بوده و به دلیل از دست دادن انرژی  $dE_p$  از پرتوهای پروتون به دست آمده است. در اینجا  $\omega_Z$  عملکرد فلورسنس،  $\tau_Z/\tau$  کسری از کل انتشار پرتوی ایکس از خط تجزیه شده،  $A_Z$  جرم اتمی عنصر در نظر گرفته شده،  $N_{av}$  عدد آووگادرو<sup>۲۰</sup> بوده،  $\mu_Z$  ضریب جذب پرتوی ایکس تابشی،  $\varepsilon_Z$  بازده آشکارساز، و  $f_Z$  مربوط به کسری از تضعیف حاصل از فیلتر آلومینیومی است که در جلوی آشکارساز قرار گرفته است (Ben Abdelouahed et al., 2009: 37-44).

برای دقیق‌تر شدن تجزیه و تحلیل داده‌های طیفی، باید گوییکس را با نتایج تجزیه دو سکه معاصر، یعنی قسمت داخلی سکه‌های یورو کالیبره<sup>۲۱</sup> کرد؛ چراکه قسمت‌های داخلی سکه‌های یک (۷۵٪ مس و ۲۵٪ نیکل) و دو یورویی (۷۵٪ مس، ۲۰٪ روی، و ۵٪ نیکل) مقادیر خلوص عناصر آن‌ها به خوبی تعریف شده و می‌تواند به عنوان استاندارد مرجع مورد استفاده قرار گیرد. مرحله کالیبراسیون برای به دست آوردن ضریب کالیبراسیون، معروف به مقدار  $H$  انجام می‌شود (Denker et al., 2005: 376-380)، که به شدت محاسبه شده (از پایگاه داده گوییکس)  $I_t(Z)$  از خط پرتوی ایکس تابشی عنصر  $Z$  محاسبه شده با  $Im(Z)$ ، یعنی به فرمول  $Im(z) (= H I_t(Z))$ ، مربوط می‌شود (Shariff et al., 2002: 131-137). آخرین مرحله تعریف روش آزمایش برای گوییکس به دلیل متناسب ساختن طیف اولیه آزمایش است، تا مقادیر عناصر تشکیل دهنده نمونه در رایانه آشکار شود. نتایج تجزیه عنصری ۲۴ سکه اصلی مورد آزمایش در جدول ۳ و ۴ آمده است.



جدول ۳. نتایج تجزیه عنصری سکه‌های اصلی مورد مطالعه به روش پیکسی (نگارنده، ۱۴۰۰).  
Table 3. The results of the elemental analysis of the main studied coins by PIXE method (Author).

شماره	Al	Si	S	Ca	Ti	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Br	Ag	Au	Hg	Pb
۱				۰.۱۸			۰.۵۸		۲.۵۸			۹۵.۲۱	۰.۹۳		۰.۳۱
۲				۰.۱۸			۰.۵۵		۲.۶۲			۹۵.۱۷	۰.۹۵		۰.۳۳
۳		۰.۲۱					۰.۶۱		۲.۹۶			۹۵.۳۵	۰.۸۷		
۴							۰.۶۹		۳.۰۹			۹۵.۳۳	۰.۹۰		
۵					۰.۱۱		۰.۶۳		۲.۹۳			۹۵.۳۱	۱.۰۲		
۶							۰.۶۴		۳.۰۸	۰.۰۹		۹۵.۲۱	۰.۹۸		
۷							۰.۵۱		۳.۳۱			۹۵.۲۷	۰.۸۲	۰.۰۹	
۸							۰.۵۵		۳.۴۰			۹۵.۲۲	۰.۸۳		
۹							۰.۵۶		۳.۲۶			۹۵.۲۴	۰.۹۴		
۱۰							۰.۵۴	۰.۰۵	۲.۹۴			۹۵.۱۹	۱.۰۴	۰.۲۴	
۱۱							۰.۵۹		۳.۰۵		۰.۱۵	۹۵.۲۱	۱.۰۰		
۱۲				۰.۱۶			۰.۵۲		۲.۶۵	۰.۰۷		۹۵.۲۰	۰.۹۶	۰.۲۵	
۱۳	۰.۰۹						۰.۵۷		۳.۰۷			۹۵.۲۸	۰.۹۹		
۱۴							۰.۵۵		۳.۳۷			۹۵.۳۱	۰.۷۷		
۱۵					۰.۰۶		۰.۵۴		۳.۳۳			۹۵.۲۶	۰.۸۱		
۱۶							۰.۶۳		۳.۲۰			۹۵.۲۹	۰.۸۸		
۱۷							۰.۵۲		۳.۳۷			۹۵.۲۵	۰.۸۶		
۱۸			۰.۱۹				۰.۵۴		۳.۱۱			۹۵.۲۷	۰.۸۹		
۱۹					۰.۰۸		۰.۶۱		۳.۲۵			۹۵.۲۳	۰.۸۳		
۲۰	۰.۱۲						۰.۶۲		۳.۰۸			۹۵.۲۸	۰.۹۰		

جدول ۴. نتایج تجزیه عنصری سکه‌های مقایسه‌ای مورد مطالعه به روش پیکسی (نگارنده، ۱۴۰۰).  
Table 4. The results of the elemental analysis of the studied comparative coins by PIXE method (Author).

شماره	Al	Si	S	Ca	Ti	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Br	Ag	Au	Hg	Pb
۲۱				۰.۱۷			۰.۵۳		۲.۸۴			۹۵.۳۸	۰.۸۹		
۲۲				۰.۲۰			۰.۵۷		۲.۸۳			۹۵.۳۵	۰.۸۴		
۲۳									۲.۲۸			۹۶.۴۷	۱.۲۵		
۲۴									۲.۳۳			۹۶.۳۹	۱.۲۸		

### تجزیه و تحلیل یافته‌ها

همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار عنصری را پس از نقره (Ag)، عناصر مس (Cu)، آهن (Fe)، سرب (Pb)، و طلا (Au) دارد؛ بنابراین، این عناصر که در تمامی سکه‌ها نیز وجود داشته‌اند، را باید عناصر اصلی تشکیل‌دهنده فلز نمونه‌ها دانست. اما هر کدام از این عناصر چگونه تحلیل می‌شود؟ ابتدا برای پاسخ به این سؤال باید حد کمترین و بیشترین مقدار هر عنصر مشخص گردد (جدول ۵).

طلا	سرب	آهن	مس	نقره	*
۰.۷۷٪	۰.۲۴٪	۰.۵۱٪	۲.۵۸٪	۹۵.۱۷٪	پایین‌ترین
۱.۰۴٪	۰.۳۳٪	۰.۶۹٪	۳.۴۰٪	۹۵.۳۳٪	بالا‌ترین

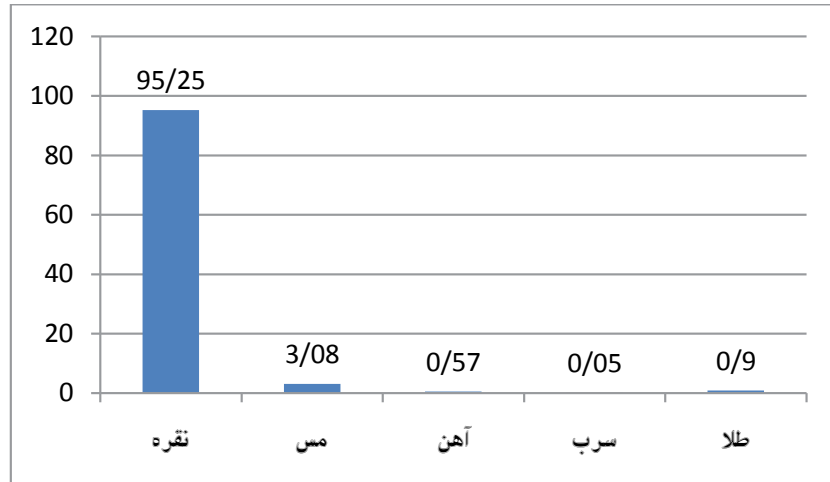
جدول ۵. میزان حد کمترین و بیشترین مقدار عناصر اصلی فلز سکه‌های مورد آزمایش (نگارنده، ۱۴۰۰).

Table 5. The amount of the minimum and maximum amount of the main metal elements of the tested coins (Author).

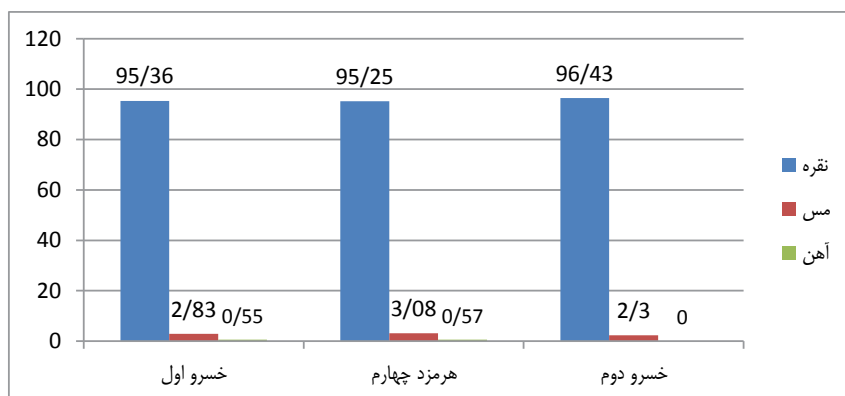
مهم‌ترین بخش تحلیلی این پژوهش بر مقدار خلوص نقره این سکه‌ها استوار است؛ نتایج تجزیه عنصری (جدول ۳) میزان خلوص نقره را در این سکه‌ها بین ۹۵٫۱۷-۹۵٫۳۳٪، نشان می‌دهد که از میانگین خلوص ۹۵٫۲۵٪ برخوردار است. این مقدار از خلوص بسیار بالا بوده و می‌تواند بیانگر قدرت اقتصادی شهر بیشاپور در عصر هرمزد چهارم باشد؛ در واقع، می‌توان گفت در ضرب این سکه‌ها از نقره کامل استفاده شده است. فلز مس به صورت طبیعی با مقادیری کمتر از ۲٪ در فلز سکه‌ها وجود دارد، اما اگر مقدار این عنصر بیشتر از ۲٪ باشد، نمی‌توان آن را طبیعی قلمداد کرد و حتماً آمیختگی اختیاری جهت عیار نمودن قرص سکه‌ها بوده است (Hughes & Hall, 1979: 321-344). سکه‌های این پژوهش دارای مقدار ۲٫۵۸-۳٫۴۰٪ مس است که از میانگین خلوص ۳٫۰۸٪ برخوردار است (شکل ۵) که این می‌تواند نشان‌دهنده آمیختگی اختیاری این فلز جهت پایین آوردن مقدار خلوص نقره باشد. معمولاً مقدار ناچیزی (کمتر از ۱٪) از عنصر آهن به واسطه آلودگی سطحی از محیط دفن شدن سکه‌ها، در ساختار آن‌ها وجود دارد (Flament & Marchetti, 2004: 179-184)، اما در صورتی که مقدار معینی از آهن به سکه‌ها اضافه شده باشد، می‌توان آن را نشانه‌ای برای تنظیم عیار قرص سکه‌ها دانست. مقدار خلوص آهن در این سکه‌ها بین ۰٫۵۱-۰٫۶۹٪ است که از میانگین ۰٫۵۷٪ برخوردار است (شکل ۵) و این مسأله می‌تواند نشان‌دهنده جذب عنصر آهن از آلودگی‌های سطحی یا وجودی آن عنصر در ساختار سنگ معدن باشد که به خوبی فرآیند جداسازی آن انجام نگرفته است.

در حال حاضر حدود نصف نقره موجود در جهان از معادن سرب استخراج می‌شود (Hughes & Hall, 1979: 321-344)؛ بنابراین سرب نیز به طور طبیعی و با مقادیر کمی (۱٪ و کمتر از آن) در سکه‌های نقره مشاهده می‌شود؛ اما این مقدار سرب معمولاً در فرآیند استحصال نقره جدا می‌شود و اگر چنین نباشد، می‌تواند نشان‌دهنده تعجیل و عدم دقت کافی در استحصال فلز نقره باشد (Flament & Marchetti, 2004: 179-184). سکه‌های مورد پژوهش نیز به طور میانگین ۰٫۰۵٪ سرب را در خود جای داده (شکل ۵) که استفاده از معادن سرب، و تعجیل و عدم دقت کافی در استحصال نقره را نشان می‌دهد. معادن سربی که از آن‌ها نقره نیز استخراج می‌شود در دو گروه سروزیت و گالنا قرار می‌گیرند؛ بنابراین اگر نقره استفاده شده در سکه‌ها از معادن سروزیت به دست آمده باشد، مقدار طلای موجود در آن باید به طور تقریبی بین ۰٫۲ تا ۱٫۵٪ متغیر باشد و اما اگر از معادن گالنا استخراج شده باشد، مقدار طلای موجود در آن کمتر از ۰٫۲٪ است (Meyers, 2003: 271). پس در ترکیبات عنصری سکه‌های مورد پژوهش به طور میانگین ۰٫۹۰٪ طلا وجود دارد (شکل ۵) که می‌تواند نشان‌دهنده استفاده از معادن سروزیت باشد.

► شکل ۵. میانگین مقدار عناصر اصلی در سکه‌های مورد آزمایش (نگارنده، ۱۴۰۰).  
Fig. 5. The average amount of the main elements in the tested coins (Author).



همان‌طور که گفته شد، تعداد دو سکه از خسرو اول (نمونه‌های ۲۱-۲۲؛ جداول ۱ و ۲) و دو سکه از خسرو دوم (نمونه‌های ۲۳-۲۴؛ جداول ۱ و ۲) که در بیشاپور به ضرب رسیده‌اند، به منظور مقایسه مورد آزمایش قرار گرفت. مقادیر نقره در سکه‌های خسرو اول ۹۵٫۳۶٪ بود و در سکه‌های خسرو دوم نیز ۹۶٫۴۳٪ است (شکل ۶)؛ این درحالی است که ۹۵٫۲۵٪ مقادیر نقره، سکه‌های هرمزد چهارم تشکیل می‌دهد (شکل ۵) و مقدار اختلاف ۰٫۱۱ و ۱٫۱۸٪ بین مقادیر نقره سکه‌های او و سکه‌های خسرو اول و خسرو دوم ایجاد می‌کند. حال مقدار اختلاف ۰٫۱۱٪ با سکه‌های خسرو اول بسیار اندک بوده و میزان تفاوتی ایجاد نمی‌کند، اما اختلاف ۱٫۱۸٪ با مقادیر نقره سکه‌های خسرو دوم بسیار بالا بوده که نشان‌دهنده قدرت اقتصادی این پادشاه در مقایسه با خسرو اول و هرمزد چهارم است. مقادیر مس در سکه‌های خسرو اول ۲٫۸۳٪ و در سکه‌های خسرو دوم ۲٫۳۰٪ است (شکل ۶)، اما در سکه‌های هرمزد چهارم ۳٫۰۸٪ مقادیر مس را شامل می‌شود (شکل ۵) و مقدار اختلاف ۰٫۲۵ و ۰٫۷۸٪ را بین مقدار مس سکه‌های او و سکه‌های خسرو اول و خسرو دوم ایجاد می‌کند. با توجه به این که بالا رفتن میزان مس در یک سکه به منظور کاهش میزان خلوص نقره صورت می‌گیرد، در اینجا نیز پایین بودن مقدار خلوص نقره سکه‌های هرمزد چهارم در قیاس با خسرو اول و خسرو دوم مشخص می‌گردد. مسأله بعدی میزان تنوع عنصری است که این تنوع در سکه‌های هرمزد چهارم به ۱۶ عنصر می‌رسد؛ اما در تنوع عنصری در سکه‌های خسرو اول، شش عنصر و در سکه‌های خسرو دوم، فقط سه عنصر است (جدول ۲). به‌طور کلی حذف عناصر اضافی در فرآیند خالص نمودن فلز سکه‌ها هزینه‌های زیادی را دربر می‌گرفته و بر کیفیت وجودی سکه‌ها تأثیر بالایی داشته است؛ بنابراین می‌توان دریافت که در دوره هرمزد چهارم، جهت پایین آوردن هزینه‌های ضرب سکه، عناصر اضافی حذف نمی‌شده که منجر به کاسته شدن کیفیت سکه می‌شده، درحالی که در دوره خسرو دوم این مسأله کیفیت فلز سکه بسیار مهم بود؛ به طوری که مقادیر عنصر آهن که همواره جزو عناصر اصلی بوده، به میزان صفر رسیده است (شکل ۶).



شکل ۶. میانگین مقدار عناصر اصلی سکه‌های مورد آزمایش در قیاس با یکدیگر (نگارنده، ۱۴۰۰).

Fig. 6. The average value of the main elements of the tested coins in comparison with each other (Author).

### نتیجه‌گیری

میزان خلوص نقره در این سکه‌های مورد مطالعه بین ۹۵٫۱۷-۹۵٫۳۳٪ بوده که از میانگین خلوص ۹۵٫۲۵٪ برخوردار است. این مقدار از خلوص بسیار بالا بوده و می‌تواند بیانگر قدرت اقتصادی شهر بیشاپور در عصر هرمزد چهارم باشد. معمولاً عنصر مس به صورت طبیعی با مقادیری کمتر از ۲٪ در فلز سکه‌ها وجود دارد، اما اگر مقدار این عنصر بیشتر از ۲٪ باشد، نمی‌توان آن را طبیعی قلمداد کرد و حتماً آمیختگی اختیاری صورت پذیرفته است؛ سکه‌های این پژوهش به طور میانگین دارای ۳٫۰۸٪ مس است که آمیختگی عمدی جهت عیارکردن فلز سکه را نشان می‌دهد. هم‌چنین وجود عنصر آهن معمولاً به واسطه آلودگی سطحی از محیط دفن شدن سکه‌ها ناشی می‌شود و برهمین اساس، سکه‌های این پژوهش مقدار ناچیزی آهن، یعنی ۰٫۵۷٪ آهن در خود جای داده‌اند. علاوه بر آن، به دلیل وجود عنصر سرب، به طور میانگین ۰٫۰۵٪ نشانگر استفاده از معادن سرب برای فلز نقره، و تعجیل و عدم دقت کافی در استحصال آن بوده است. هم‌چنین معادن سرب به دو گونه سروزیت و گالنا تقسیم می‌شوند که معادن سروزیت بین ۰٫۲-۱٫۵٪ و معادن گالنا کمتر از ۰٫۲٪ عنصر طلا را در خود جای داده‌اند، پس در این سکه‌ها به طور میانگین ۰٫۹۰٪ طلا در ترکیبات عنصری آن‌ها وجود دارد که این نیز می‌تواند نشان‌دهنده استفاده از معادن سروزیت باشد.

به منظور مقایسه دو سکه از خسرو اول و دو سکه از خسرو دوم، ضرب شده در بیشاپور، مورد آزمایش قرار گرفت. مقادیر نقره در سکه‌های خسرو اول ۹۵٫۳۶٪ و در سکه‌های خسرو دوم ۹۶٫۴۳٪، اما مقادیر نقره در سکه‌های هرمزد چهارم ۹۵٫۲۵٪ است، این مقدار خلوص مشابه با سکه‌های خسرو اول است، اما اختلاف زیادی، یعنی اختلاف ۱٫۱۸٪ با سکه‌های خسرو دوم را ایجاد می‌کند که این نشان‌دهنده برتری قدرت اقتصادی و نظام ضرب سکه در دوره خسرو دوم است. مقادیر مس در سکه‌های خسرو اول ۲٫۸۳٪ و در سکه‌های خسرو دوم ۲٫۳۰٪، اما مقادیر مس در سکه‌های هرمزد چهارم ۳٫۰۸٪ است و وجود اختلاف ۰٫۲۵ و ۰٫۷۸٪ بین مقدار مس، نشان‌دهنده پایین آوردن مقدار خلوص نقره در عصر هرمزد چهارم در قیاس با دوره‌های قبل و بعد از خود بوده است. تنوع عنصری در سکه‌های خسرو اول، شش عنصر و در سکه‌های

خسرو دوم فقط سه عنصر بوده، اما تنوع عنصری در سکه‌های هرمزد چهارم به ۱۶ عنصر می‌رسد. عناصر اضافه باعث کاهش کیفیت فلز سکه می‌شود و معمولاً آن‌ها حذف می‌شوند، اما این امر به دلیل هزینه‌هایی که داشته در راستای سیاست کاهش هزینه‌های دیوانی دوره هرمزد چهارم، عناصر اضافه حذف نمی‌شده و در نتیجه سکه‌ها کیفیت پایین‌تری نسبت به قبل و بعد خود داشتند.

### سپاسگزاری

در پایان نگارنده بر خود لازم می‌داند از آقای محمدمبین سعادت‌مهر (دانشجوی دکترای باستان‌شناسی دانشگاه مازندران) و آقایان سیدحسن سادات‌رضوی، سیدعلی سیدموسوی، و مسعود میرعبادینی (مجموعه‌داران سکه‌های دوران تاریخی)، به جهت در اختیار قرار دادن سکه‌های مورد مطالعه این پژوهش، سپاسگزاری نماید.

### پی‌نوشت

1. Cerussite
2. X-Ray Diffraction (XRD)
3. X-Ray Fluorescence (XRF)
4. Particle-Induced X-Ray Emission (PIXE)
5. Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)
6. Neutron Activation Analysis (NAA)
7. External PIXE
8. Micro PIXE
9. Proton-Induced X-Ray Fluorescence (PIXRF)
10. Institute of Physics, Bhubaneswar (IOPB)
11. A Study of Sasanian Silver Coins Employing the XRF Technique
12. A Hoard from the Time of Yazdgerd III in Kirmān
13. Ionization
14. Tandem Pelletron Accelerator
15. Stepper Motor
16. Rutherford Backscattering Spectrometry (RBS)
17. Diffusion Pump
18. Faraday Cup
19. GUPIX
20. Avogadro Constant
21. Calibration
22. Galena

### کتابنامه

- اسماعیل‌زاده‌کیوی، سینا، ۱۳۹۲، «مطالعه اشیای مکشوفه از بافت تاریخی اردبیل و محوطه تاریخی مجموعه شیخ‌الدین اردبیلی با روش گسیل پرتو ایکس با تابش پروتون (PIXE)». پایان‌نامه کارشناسی ارشد، اردبیل: دانشکده علوم دانشگاه محقق‌اردبیلی (منتشرنشده).
- انصاری، مریم؛ و زرشناس، زهره، ۱۳۹۲، «بازجستن ضرابخانه‌های ساسانیان در فارس». زبان‌شناخت، ۴ (۸): ۲۵-۳۶.

- اولیایی، پروین؛ آفریده، حسین؛ و آقاعلی‌گل، داوود؛ ۱۳۹۴، «مطالعه آماری سکه‌های نقره هخامنشی، اشکانی و ساسانی با استفاده از آنالیز عنصری به روش پیکسی». *مطالعات باستان‌شناسی*، ۷ (۱): ۱۷-۲۸.
- حاج‌ولیئی، مهدی؛ محمدی‌فر، یعقوب؛ قیاسی، کیارش؛ لامعی‌رشتی، محمد؛ و اولیایی، پروین، ۱۳۸۸، «مطالعه و تحلیل ۳۰ سکه نقره‌ای دوره ساسانی موزه همدان با استفاده از روش PIXE». *مطالعات ایرانی*، ۸ (۱۶): ۱۴۱-۱۴۹.
- حاج‌ولیئی، مهدی؛ و سوادیی، بیتا، ۱۳۹۴، «به‌کارگیری روش طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس (WDXRF) در مطالعه سکه‌های نقره ساسانیان». *پژوهش‌های باستان‌شناسی ایران*، ۵ (۹): ۱۶۳-۱۷۴.
- خادمی‌ندوشن، فرهنگ؛ محقق، مریم؛ هژبری‌نوبری، علیرضا؛ و مسجدی‌خاک، پرستو، ۱۳۹۴، «بررسی اوضاع سیاسی-اقتصادی حکومت اشکانیان در سال‌های ۵۷-۲ پ.م. (دوران پادشاهی ارد دوم و فرهاد چهارم) براساس ترکیبات شیمیایی سکه‌های نقره با روش آزمایشگاهی PIXE». *پژوهش‌های باستان‌شناسی ایران*، ۵ (۸): ۵۳-۶۶.
- کیان‌زادگان، سوسن، ۱۳۹۷، «تحلیل قدرت اقتصادی در دوره پیروز ساسانی به کمک آزمایش PIXE: مطالعه موردی سکه‌های مکشوفه از پیروزگت (چابهار، بلوچستان ایران)». پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، مشهد: دانشکده ادبیات و علوم انسانی دانشگاه فردوسی مشهد (منتشر نشده).
- کیان‌زادگان، سوسن؛ رجایی، سیدجلال؛ مسجدی‌خاک، پرستو؛ و سعادت‌مهر، محمدامین، ۱۳۹۸، «تجزیه عنصری سکه‌های پیروز ساسانی به روش پیکسی (PIXE)، مطالعه موردی: سکه‌های گنجینه پیروزگت کشف شده از روستای تیس چابهار». *پژوهش‌های باستان‌شناسی ایران*، ۹ (۲۲): ۱۸۱-۱۹۶.
- گوپل، رابرت، ۱۳۸۲، «بخش اول: امور مالی». *تاریخ اقتصاد دولت ساسانی*. به‌کوشش: فرانس آلتهایم و روت استیل، تهران: علمی و فرهنگی.
- لامعی‌رشتی، محمد، ۱۳۸۲، «نقش تحلیل عنصری در باستان‌سنجی: تجزیه آزمایشگاه و اندوگراف». *مجموعه مقالات نخستین همایش باستان‌سنجی در ایران: نقش علوم پایه در باستان‌شناسی*. به‌کوشش: مسعود آذرنوش. تهران: سازمان میراث فرهنگی کشور (پژوهشکده باستان‌شناسی): ۷۵-۹۲.

- Ansari, M. & Zarshenas, Z., 2014, "Locating the Sassanid Mint Houses in the Province of Fars". *Zaban Shenakht*, 4 (8): 25-36 [in Persian].

- Beck, L.; Bosonnet, S.; Réveillon, S.; Eliot, D.; & Pilon, F., 2004, "Silver Surface Enrichment of Silver-Copper Alloys: a Limitation for the Analysis of Ancient Silver Coins by Surface Techniques". *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 226 (1-2): 153-162.

- Ben Abdelouahed, H.; Gharbi, F.; Roumié, M.; Baccouche, S.; Ben Romdhane, K.; Nsouli, B.; & Trabelsi, A., 2010, "PIXE Analysis of

- Medieval Silver Coins". *Materials Characterization*. 61(1): 59-64.
- Ben Abdelouahed, H.; Incerti, S. & Mantero, A., 2009, "New Geant4 Cross Section Models for PIXE Simulation". *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 267(1): 37-44.
  - Denker, A.; Bohne, W.; Campbell, J. L.; Heide, P.; Hopman, T.; Maxwell, J. A.; Opitz-Coutureau, J.; Rauschenberg, J.; Röhrich, J. & Strub, E., 2005, "High-Energy PIXE Using Very Energetic Protons: Quantitative Analysis and Cross-Sections". *X-Ray Spectrometry*, 34(4): 376-380.
  - Esmailzadeh Kivi, S., 2013, "Study of the Artifacts Excavated from Historical Texture of Ardabil and Historical Site of Sheikh Safi al-Din Shrine in Ardabil by the Proton Induced X-Ray Emission (PIXE) Method". M.A. Dissertation. Ardabil: University of Mohaghegh Ardabili, Faculty of Science (unpublished). [in Persian].
  - Flament. C. & Marchetti, P., 2004, "Analysis of ancient silver coins". *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 226(1-2): 179-184.
  - Frye, R. N., 1973, *Sasanian Remains from Qasr-i Abu Nasr: Seals, Sealings, and Coins*. Cambridge (Massachusetts, United States): Harvard University Press.
  - Gaschen, A. A-M.; Döbeli, M.; Markwitz, A.; Barry, B.; Ulrich-Bochsler, S.; & Krähenbühl, U., 2008, "Restrictions on Fluorine Depth Profiling for Exposure Age Dating in Archaeological Bones". *Journal of Archaeological Science*, 35(3): 535-552.
  - Gaube, H., 1973, *Arabosasanidische Numismatik*. Braunschweig: Klinckschardt & Biermann.
  - Gobl, R., 2003, "Part I: Financial Affairs". *The Economic History of the Sassanid Government*. eds. F. Altheim & R. Stiehl, Tehran: Elmi va Farhangi [in Persian].
  - Hajivaliei, M. & Sodaiei, B., 2015, "Application of WDXRF Spectrometry to Study the Sassanian Silver Coins". *Pazhoheshha-ye Bastan Shenasi Iran*, 5 (9): 163-174 [in Persian].
  - Hajivaliei, M.; Mohammadifar, Y.; Ghiyasi, K.; Lamehi Rachti, M.; & Oliyai, P., 2009, "Study and Analysis of 30 Sasanian Period Silver Cins of Hamedan Museum Using PIXE Method". *Iranian Studies*, 8 (16): 141-149. [in Persian].
  - Heidemann, S.; Riederer, J. & Weber, D., 2014, "A Hoard from the Time of Yazdgard III in Kirmān". *Iran*, 52 (1): 79-124.

- Herzfeld, E., (1938). "Notes on the Achaemenid Coinage and Some Sasanian Mint-Names". *Transactions of the International Numismatic Congress : organized and held in London by the Royal Numismatic Society, June 30-July 3, 1936, on the occasion of its centenary.* Edited by J. Allan; H. Mattingly; & E.S.G. Robinson. London : B. Quaritch Ltd: 413-426.
- Hughes, M. J. & Hall, J. A., 1979, "X-Ray Fluorescence Analysis of Late Roman and Sassanian Silver Plate". *Journal of Archaeological Science*, 6(4): 321-344.
- Ishii, K. & Morita, S., 1988, "Theoretical Estimation of PIXE Detection Limits". *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 34(2): 209-216.
- Jaques, T., 2007, *Dictionary of Battles and Sieges: F-O*. Westport: Greenwood Publishing Group.
- Johansson, S. A. E. & Johansson, T. B., (1976). "Analytical Application of Particle Induced X-Ray Emission". *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 137(3): 473-516.
- John of Ephesus., 1862. *Historiae Ecclesiasticae*. tr. J. M. Schönfelder. Munich: [L.et.n.].
- Khademi Nadooshan, F.; Mohaghegh, M.; Hojabri Nobari, A. R. & Masjedi Khak, P., 2015, "Study in the Politico-Economic Condition of Parthians Between the 57-2 B.C, the Kingdom of 2nd Orod and 4th Farhad, Based on the Analysis of Chemical Compounds of Silver Coins Using PIXE Method". *Pazhoheshha-ye Bastan shenasi Iran*, 8: 53-66 [in Persian].
- Kianzadegan, S., 2018, "An Analysis of Iran's Economic Power During the Reign of Sasanian Peroz I with the Help of the PIXE Experiment: the Case Study of the Coins Unearthed in Perozgat (Chabahar, Balouchestan's Iran)". M.A. Dissertation. Mashhad: Ferdowsi University of Mashhad, Faculty of Letters and Human Sciences (un-published). [in Persian].
- Kianzadegan, S.; Rajaei, S. J.; Masjedi Khak, P. & Saadat Mehr, M. A., 2019, "El-emental Analysis of Peruz, the Sassanid King, Coins by Using PIXE Technique, A Case Study of Peruzgat Treasure Coins, Discovered in Tis Village, Chabahar". *Pazho-heshha-ye Bastan Shenasi Iran*, 22: 181-196, [in Persian].
- Lamchi Racht, M., 2003, "The Role of Elemental Analysis in Archaeometry: Anal-ysis of the Van de Graaff Lab". in: ed. M. Azarnoush. *Proceedings of the First Iranian Archaeometric Conference: The Role of*



*Basic Sciences in Archeology*, Tehran: National Heritage Organization (Institute of Archeology), 75-92 [in Persian].

- Litvinsky, B. A. & Dani, A. H., 1996, *History of Civilizations of Central Asia: The Crossroads of Civilizations, A.D. 250 to 750*. Paris: UNESCO.

- Martindale, J. R.; Jones, A. H. M. & Morris, J., 1992, *The Prosopography of the Later Roman Empire*. vol. 3, Cambridge: Cambridge University Press.

- Maxwell, J. A.; Teesdale, W. J. & Campbell, J. L., 1995, "The Guelph PIXE Software Package II". *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 95(3): 407-421.

- Menander Protector, 1985, *The History of Menander the Guardsman*. tr. R. C. Blockley, Liverpool: Francis Cairns Ltd.

- Meyers, P., 2003, "Production, Distribution, and Control of Silver: Information Provided by Elemental Composition of Ancient Silver Objects". *Patterns and Process: a Festschrift in Honor of Dr. Edward V. Sayre*. Suitland: Smithsonian Center for Materials Research and Education: 271-288.

- Mossig-Walburg, K., 2000, "Die Flucht des Persischen Prinzen Hormizd und Sein Exil im Römischen Reich – eine Untersuchung der Quellen". *Iranica Antiqua*, 35: 69-109.

- Oliyai, P.; Afarideh, H. & Agha Aligol, D., 2015, "Statistical Study of the Achae-menid, Parthian and Sassanid Silver Coins Using Elemental Analysis by PIXE Tech-nique". *Journal of Archaeological Studies*, 7(1): 17-28 [in Persian].

- Paruck, F. D. J., 1944, "Mint-Marks on Sāsānian and Arab Sāsānian Coin". *Journal of the Numismatic Society of India*, 6: 79-151.

- Pourshariati, P., 2008, *Decline and Fall of the Sasanian Empire: The Sasanian-Parthian Confederacy and the Arab Conquest of Iran*. London and New York: I.B. Tauris.

- Rezakhani, Kh., 2017, *Re Orienting the Sasanians: East Iran in Late Antiquity*. Edinburgh: Edinburgh University Press.

- Roumié, M.; Nsouli, B.; Atalla, C. & Waksman, S. Y., 2005, "Application of PIXE Using AI Funny Filter for Cluster Analysis of Byzantine Amphorae from Beirut". *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 227(4): 584-590.

- Roumié, M.; Reynolds, P.; Atallah, C.; Bakraji, E.; Zahraman, K. & Nsouli, B., 2006, "Provenance Study of Excavated Pottery from Beirut

Using PIXE Cluster Analysis”. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 249(1-2): 612-615.

- Sebeos, 1904, *Histoire d’Heraclius par l’evêque Sebeos*. tr. F. Macler, Paris: Imprimerie Nationale.

- Shahbazi, A. Sh., 1988, “Bahrām VI Čōbīn”. ed, E. Yarshater. London: Routledge, in: *Encyclopaedia Iranica*, 3 (5): 514–522.

- Shahbazi, A. Sh., 2004, “Hormozd IV”. ed, E. Yarshater. London: Routledge. in: *Encyclopaedia Iranica*, 12 (5): 466–467.

- Shariff, A.; Bulow, K.; Elfman, M.; Kristiansson, P.; Malmqvist, K. & Pallon, J., 2002, “Calibration of a New Chamber Using GUPIX Software Package for PIXE Analysis”. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 189(1-4): 131-137.

- Sodaei, B.; Masjedi Khak, P. & Khazaie, M., 2013, “A Study of Sasanian Silver Coins Employing the XRF Technique”. *Interdisciplinaria Archaeologica: Natural Sciences in Archaeology*, IV (2): 211-215.

- Tafazzoli, A., 1988, “Āzīn Jošnas”. ed, E. Yarshater. London: Routledge. in: *Encyclopaedia Iranica*, 3 (3): 260.

- Theophylact Simocatta, 1986, *The History of Theophylact Simocatta*. tr. M. Whitby & M. Whitby, Oxford: Oxford University Press.

- Walker, J., 1941, *A catalogue of the Arab-Sassanian coins (Umayyad governors in the East, Arab-Ephthalites, ‘Abbasid governors in Tabarīstan adn Bukhara)*. London: British Museum.

- Whitby, M., 2001, “The successors of Justinian”. in: *The Cambridge Ancient History (Volume 14: Late Antiquity: Empire and Successors, AD 425–600)*, ed. A. Cameron. Cambridge: Cambridge University Press: 86-111.