Journal of Research on Archaeometry, 2020; 6 (1):33–46

Journal of Research on Archaeometry

DOI: 10.29252/jra.6.1.33

URL: http://jra-tabriziau.ir/

Original Paper

Research on Inscriptions from Proto-Elamite Period in Tappeh Sofalin based on ESEM and AFM Methods for Preparation of the Mud

Mohammadamin Emami[1], Morteza Hessari[2*]

[1] *Associate Professor, Department of Conservation and Restoration, Art University of Isfehan, IRAN*
[2] *Associate Professor, Department of Archaeology, Art University of Isfehan, IRAN*

Received: 26/11/2018 **Accepted: 28/06/2020**

Abstract

The study of cultural heritage artifacts and the research of a protection and restoration intervention create with - and are often limited to - a complete characterization of their surface. This is not only factual for museum objects, but also for archaeological artifacts, because the object as it was discovered may contain precious unknown information that could be lost by too much aggressive interposition. Clayey tablets and metallic pins from the protohistoric site of Tappeh Sofalin have been studied by means of mineralogical and chemical characterizations. The main part of the research is done in order to get representative interpretation concerning the relationship between these two tools, as the first technological features in writing in this period. Muli-analytical methods were applied for these devotions. ICP-MS carried out in order to have the chemical compositions of trace elements and ESEM was applied for discriminating the distribution of the elements on the surface of the pin and the tablets. The elemental distributions getting a modeling of clustering with respect to the similarities between the elements concentrated on the surface of the pin as well as on the tablets. The clustering of the chemical, mineralogical results from this site is supported by means of surface characterization via AFM microscopy that dedicated information on the use of the pin as equipment appreciated for engraving the surface of tablets. The surface feature of the objects was observed and controlled by the use of AFM. This microscope enables the study of the electrically conductive or insulating specimen without precise coating or preparation; the AFM involves of a microscale cantilever with a sharp angle (probe) at its end which is used to scan the specimen surface. Thanks to very sensitive displacement controls of the specimen and of the tip by piezoelectric tubes, the equipment allows a measurement of the surface topography with a precision of less than one nanometer in height and a few nanometers in lateral position. The AFM is the only method among these that provides the ability to quantify the majority of material types and also the roughness of a surface characteristic and unrivaled three-dimensional spatial resolution. The AFM offers total 3D surface measurement by imaging topography (height), where they can be investigated to determine areal surface roughness parameters; for example statistics on the domain and grain size or their hardness. Comparison of tools for surface characterization can provide the information about materials properties beyond topography. For instance, AFMs can measure a mechanical (e.g., elastic modulus), and functional properties (e.g., piezoelectric response). The surface roughness of archaeological clay based materials altered due to different environmental parameters, but the effect of graving in nanoscale on their surface can be investigated by atomic force microscopy in order to identify the traces of elements which were remained as the residue during the manufacturing process. On the other hand, this investigations help to trace the effects of

* Corresponding author: mhessari@yahoo.de

Copyright© 2020, the Authors | This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any - medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution NonCommercial .terms

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2028-08-17]

[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.1.1.5]

[DOI: 10.29252/jra.6.1.33]

the originality on the surface of an objects. Quantitative values of the roughness, the lateral correlation length, and the roughness exponent are extracted from the measurement. The results suggest some residual signs of originalities from the clay tablets during the manufacturing processes.

Keywords: Proto-Elamite, Scanning Electrone Microscopy, Atomic Force Microscopy, Tappeh Sofalin

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2028-08-17]

[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.1.1.5]

[DOI: 10.29252/jra.6.1.33]

پژوهه باستان‌سنجی ۱۳۹۹؛ ۶(۱): ۳۳-۴۶

پژوهه باستان‌سنجی

DOI: 10.29252/jra.6.1.33

URL: http://jra-tabriziau.ir/

مقاله پژوهشی

بررسی گِل‌نوشته‌های آغاز ایلامی در محوطهٔ سفالین بر اساس مطالعات میکروسکوپ الکترونی و میکروسکوپ نیروی اتمی

محمدامین امامی*[۱]، مرتضی حصاری[۲]

۱. دانشیار و عضو هیئت‌علمی دانشکده مرمت دانشگاه هنر اصفهان و استاد مدعو در مؤسسهٔ تحقیقات فیزیک کاربردی در مواد باستانی، دانشگاه بوردو، فرانسه

۲. دانشیار باستان‌شناسی، عضو هیئت‌علمی دانشکدهٔ مرمت دانشگاه هنر اصفهان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۰۸

چکیده

محوطهٔ سفالین در شمال شهر پیشوا و شرق دشت ری (دشت ورامین- پیشوا) قرار دارد. این محوطه، به دلیل وجود مواد فرهنگی و استقراری از دورهٔ آغاز نگارش به‌مانند گِل نوشته، مُهر و اثر مُهر در مرکز فلات ایران بیشترِ توجه را به خود معطوف داشته است. در همین راستا این پژوهش، به‌منظور شناخت و مطالعهٔ میکروسکپی و شیمیایی حداقل، بخشی از گِل نوشته‌های آغاز ایلامی، انجام شد. مهم‌ترین پرسش در این پژوهش، دستیابی به ارائهٔ پاسخ در جهت ارتباط بین نمونه‌های گِل نوشته و قلمِ نگارشی به‌دست‌آمده از تپهٔ سفالین از طریق آزمایش‌ها شیمیایی و ساختار شناسی بر روی دو نمونه گل نوشته و یک‌قلم فلزی از آثار این محوطه است. در این پژوهش، چگونگی ارتباط نمونهٔ گل نوشته با نمونهٔ قلم یافت شده از طریق آزمایش‌هایی شیمیایی جهت شناسایی عنصری رسوبات سطحی، انجام شد. بر این اساس، عناصر شیمیایی رسوبات سطحی قلم، توسط میکروسکوپ الکترونی موردبررسی قرار گرفتند و رد یابی شباهت‌های ژئوشیمیایی بین عناصر اصلی و عناصر کمیاب موجود در قلم و کتیبه، مورد تحلیل قرار گرفت. همچنین تصاویر مطالعات سطحی توسط اسکن میکروسکوپ روبشی اتمی (AFM)، برخی از ساختارهای مربوط به وجود حکاکی بر روی کتیبه با قلم را آشکار کرده است. با استفاده از میکروسکوپ روبشی اتمی، ویژگی‌های سطح اشیاء موردبررسی و کنترل قرار داده می‌شود. این وسیله، با توجه به کنترل جابه‌جایی بسیار حساس نمونه و توسط سوزن بسیار نازک کندیلور، امکان اندازه‌گیری توپوگرافی سطح و همچنین میزان اصطکاک را با دقت کمتر از یک نانومتر از ارتفاع و چند نانومتر در موقعیت جانبی، فراهم می‌کند. میکروسکوپ روبشی اتمی (AFM)، یکی از معدود روش‌هایی است که با استفاده از آن می‌توان به میزان زبری مواد با استفاده از خصوصیت اصطکاک آن‌ها، پی برد. مقایسهٔ داده‌های میکروسکوپ روبشی اتمی می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای توصیف سطح در مطالعات خصوصیات سطح و اصالت شناسی مواد تاریخی، مورداستفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: فنّاوری، تکنیک نوشتن، آغاز ایلامی، میکروسکوپ الکترونی، میکروسکوپ نیروی اتمی، تپهٔ سفالین

* مسئول مکاتبات: اصفهان، خیابان حکیم نظامی، چهارراه خاقانی، دانشگاه هنر اصفهان، دفتر روابط علمی و بین‌المللی، صندوق پستی ۱۷۴۴

پست الکترونیکی: m.emami@aui.ac.ir

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

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2028-08-17]

[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.1.1.5]

[DOI: 10.29252/jra.6.1.33]

۱. مقدمه

گل‌نوشته‌های آغاز نگارش، تنها در ایران به‌دست‌آمده آمده‌اند و هم‌افق با گل‌نوشته‌های جمدت نصری (اروک۳) در بین‌النهرین هستند. گل‌نوشته‌های آغاز ایلامی در حوزه‌های فرهنگی خوزستان، فارس، کرمان، سیستان و فلات ایران به‌دست‌آمده‌اند. شیوهٔ نگارشی آن‌ها به‌خوبی شناخته‌شده نیست، اما بیشتر زبان‌شناسان این دوره، معتقد هستند که شیوهٔ نگارش این گل‌نوشته‌ها، شیوه‌ای مستقل از گونهٔ هم‌زمانِ به دست آمدهٔ آن‌ها از بین‌النهرین دارد و این شیوهٔ نگارش را مرتبط با نمونه گل‌نوشته‌های نخست، می‌دانند [1].

بر این اساس، نحوهٔ نگارش بر گل‌نوشته‌های تاریخی در تپه سفالین در حاشیهٔ شمالی فلات مرکزی ایران بر اساس ابزارهای منسوب به حکاکی و نوشتن بر روی این لوحه‌ها در این مقاله، موردبحث قرار می‌گیرد. دراین‌ارتباط، آرکئومتالورژی یا فلزگری باستانی در منطقه، تنها بر اساس یک سوزن فلزی بررسی نمی‌شود، بلکه ایجاد یک ارتباط منطقی بین لوحه‌های مکشوفه و ابزار نوشتاری آنان، با استفاده از آزمایش‌های شیمیایی و میکروسکوپی، موردبحث و بررسی قرار می‌گیرد.

در ارتباط با کشفیات باستان‌شناسی، عدم گزارش‌های مبنی بر وجود ابزار صنعتی مورداستفاده در محوطه‌های باستانی همواره موردتوجه و تعجب بوده است. در ارتباط با صنعت فلزگری و فنّاوری ذوب و استحصال فلزات در فلات ایران و همچنین معدنکاری باستانی و ابزار و وسایل مورد کاربرد در این حوزه، اطلاعات متعددی در دسترس است [2]. در ارتباط با ابزار و وسایل موردنیاز در صنعت فلزگری و استحصال فلز در مرکز فلات ایران (کرمان و جیرفت) نیز محققان متعددی کاوش و تحقیق کرده‌اند [2, 3]. مطالعات باستان‌شناسی و باستان‌سنجی صورت گرفته به‌منظور شناسایی ابزار مورداستفاده جهت خلق یک اثر و یا روند تکنولوژیکی مواد ساخته‌شده از سنگ و سفال و یا شیشه، سابقهٔ زیادی ندارند و در بیشتر موارد، انتساب برخی اشیاء به‌عنوان ابزارهای فنّاوری در محوطه‌ها، مبتنی بر حدس و یا ارتباط ظاهری و تطبیقی بین اشیاء است. دراین‌ارتباط، گل نوشته ها و لوحه‌های تاریخی از جمله مواردی هستند که به‌واسطهٔ خصلت فرهنگی- تاریخی خود، در قالب یکی از اثرات به جای مانده از سنت نوشتاری بشر، از اهمیت بسیار بالایی برخوردار هستند. مطالعه بر روی منشأ و نحوهٔ ساخت گل‌نوشته‌ها، همچنین بر اساس رنگ و بافت آن‌ها متفاوت است [4].

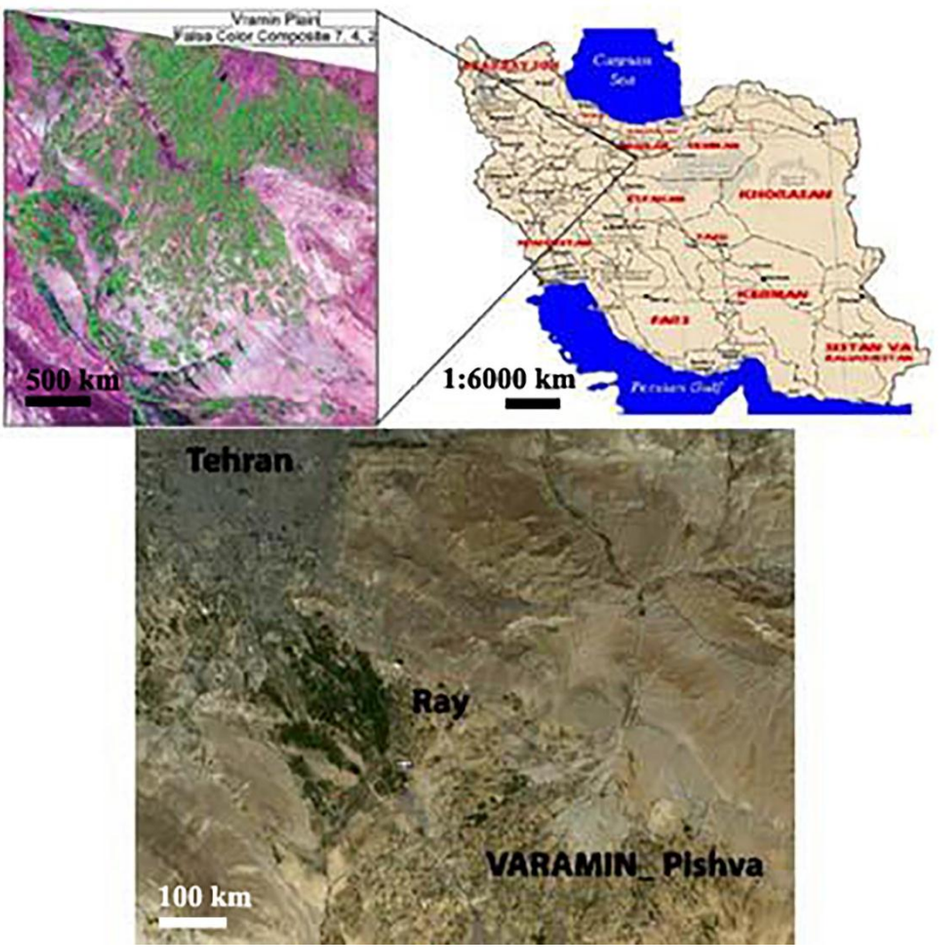
در این‌میان، بسیاری از این روش‌های شناسایی و تجزیه شیمیایی، به‌صورت روش‌های شناسایی مواد درروی زمین و یا در لایه‌های حفاری گزارش‌شده‌اند و در مواردی نیز با استفاده از روش‌های ژئوشیمیایی و تجزیهٔ ریزساختار ابزارآلات، به چگونگی ارتباط بین این ابزارها و اشیاء مکشوفه از منطقه حفاری پرداخته‌شده است. یکی از بهترین مثال‌های کاربردی، دراین زمینه، مطالعاتی است که در ارتباط با ردیابی ژئوشیمیایی از یک سنجاق فلزی بر پایهٔ مس با یک سوزن فلزی از همان جنس، بر اساس تحلیل‌های ICP-MS صورت گرفته است [4].

مطالعات ساختارشناسی و ردیابی عناصر کمیاب جهت ارتباط اشیاء با کاربری ابزاری و اشیاء ساخته‌شده، از مواردی است که در مطالعه بر روی مواد فرهنگی، از اهمیت زیادی برخورداراست. دراین‌رابطه، بیشترین تمرکز بر نحوهٔ فرسایش و تنوع تغییرات احتمالی در سطوح این اشیاء (در این مقاله گل‌نوشته‌ها) است [5-6]. نحوهٔ فرسایش و نوع رسوب‌گذاری بر این آثار، وابسته به نوع استفاده از ابزار (به‌صورت حکاکی و یا ضربه‌ای) و همچنین شرایط محیط دفن و جغرافیای منطقهٔ دفن است.

۲. موقعیت جغرافیایی سفالین

سفالین در حاشیهٔ شهرک نقش‌جهان شهر پیشوا، شرق دشت ری، در دشت رسوبی و حاصلخیز ورامین -پیشوا، واقع‌شده است. مساحت این دشت، ۱۳۸هزار هکتار است که بیش از ۶۰ هزار هکتار آن را زمین‌های کشاورزی تشکیل می‌دهد. وسعت محوطهٔ سفالین بیش از ۲۰ هکتار است. سفالین مابین سال‌های ۱۳۸۵-۱۳۹۰ هجری شمسی، در شش فصل، مورد کاوش قرار گرفت. مدارک آغاز نگارشی به‌مانند گل نوشته از این محوطه در کارگاه‌های مختلف به‌دست‌آمده است (نقشه۱).

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2028-08-17]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.1.1.5]
[DOI: 10.29252/jra.6.1.33]



نقشه ۱: موقعیت قرارگیری محوطه سفالین در مرکز فلات ایران
Map 1. Location of tappeh Sofalin in central Iranian plateau

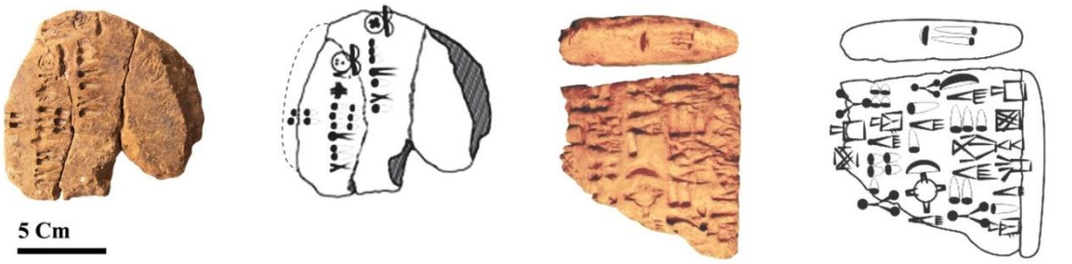
۳. یافته‌های فرهنگی باستانی سفالین

مواد فرهنگی به‌دست‌آمده از محوطهٔ سفالین در مرکز فلات ایران، سبب افزایش اطلاعات ما دربارهٔ دورهٔ آغاز نگارش در ایران، در حوزهٔ فرهنگی فلات ایران شده است. تصویر محل تپه سفالین و آثار به دست آمده از آن، در گزارش‌ها و منابع دیگر ذکرشده است و در این مقاله ضرورتی بر تکرار آن نیست، چراکه سؤال اصلی این مقاله، بیشتر بر خصوصیات و مشخصات اشیا تکیه دارد. از یافته‌های فرهنگی شاخص به‌دست‌آمده از سفالین می توان به سفال لبه واریخته، سینی‌های بانشی، چندرنگ، و نیز مدارک سیستم نظارتی جامعه در بخش‌های اقتصادی مانند کالاشمارها، مهرهای استوانه‌ای، اثر مُهرها و گل‌نوشته‌های آغاز ایلامی، اشاره کرد. در یک نگاه کلی بر اساس فضاهای صنعتی در کنار یافته‌های نظارتی مختلف متعلق به دورهٔ آغاز نگارش و تدفین‌های آغاز ایلامی به همراه گورنهاده‌های مختلف در این محوطه، به نظر می‌رسد محوطهٔ سفالین یک جامعهٔ نظامند در دو مرحلهٔ آغاز نگارش ابتدایی (افق شوش۲) و پیشرفته (آغاز ایلامی) داشته است [7, 8].

۳-۱. گل‌نوشته‌های سفالین

شواهد نگارشی دورهٔ آغاز ایلامی که مختص این دوره هستند، نشان‌دهندهٔ استقلال شیوهٔ نگارش آن‌ها از شیوهٔ نگارش بین‌النهرینی‌ها است؛ در این دورهٔ فرهنگی، شاهد توسعه در بیش‌تر بخش‌های مختلف اقتصادی، تولیدی-بازرگانی و مدیریتی هستیم. ولایت‌های آغاز ایلامی را می‌توان به‌عنوان بخشی از شبکهٔ تجاری شرق باستان در نظر گرفت که محدودهٔ جغرافیایی درّهٔ سند، ایران،

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2028-08-17]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.1.1.5]
[DOI: 10.29252/jra.6.1.33]



شکل ۱: گل‌نوشته‌های آغاز ایلامی به‌دست‌آمده از کاوش‌های محوطه سفالین
Fig. 1: Neo-Ilamite tablets excavated from Tappeh Sofalin

بین‌النهرین و حتی مصر را در مسیر زمینی و دریایی در خلیج‌فارس پوشش می‌داده‌است [7]. گل‌نوشته‌های آغاز نگارشی مرحلهٔ دوم یا آغاز ایلامی سفالین از کارگاه‌های مختلف در طی شش فصل کاوش به‌دست‌آمده‌اند. به‌عنوان آثار شاخص آغاز ایلامی سفالین می‌توان از انواع مهروموم‌های گلی، اثر مهر، سفال‌های لوله ناودانی، سفال‌های کف نخ بر، سفال دورنگ، سفال چندرنگ و سفال‌های لبه واریخته نام برد. گل‌نوشته‌های تپهٔ سفالین به‌طور متوسط ۶ cm طول، ۴ cm عرض و ۲ cm ضخامت دارند. آن‌ها به شکل گرد، مربع و مستطیل هستند. بیشتر متون آغاز ایلامی تپهٔ سفالین شامل شمارش تعداد کارگران، حساب جیرهٔ کارگران، جمع‌آوری تعداد دام گوسفند و بز و مقدار دارایی نخبگان جامعه است (شکل ۱) [7].

یازده قطعه از گل‌نوشته‌های آغاز ایلامی تپهٔ سفالین که در ابتدا کشف‌شده‌اند بیشتر دربارهٔ سرشماری با موضوع‌های تولید محصولات غله و گله‌های حیوانی هستند، که در تحقیقات پیشین موردتوجه قرارگرفته‌اند [25]. در این گل‌نوشته‌های ساختار انسانی استفاده‌شده، مانند کارگران، از هر دو جنس زن و مرد نیز ثبت‌شده است؛ اما نسبت فراوانی این نوع گل‌نوشته‌ها در تپهٔ سفالین نسبت به متون گله‌داری و پرداخت جیرهٔ کارگران کم‌تر است. نمونه تصویر شمارهٔ ۱ دارای نشانه‌های ترکیبی و پیشرفته است. این گل‌نوشته در سیستم شمارشی متفاوت مانند ده‌تایی (شکل ۱ راست) و شصت تایی (شکل ۱ چپ) و مربوط به سرشماری گله‌های حیوانی است. تعداد و موضوعات مطالعه شدهٔ اولیه در این محوطه، از یک‌سو بیانگر وجود یک ساختار پیشرفته در جامعهٔ عصر آغاز ایلامی در سفالین (مرکز فلات ایران) است، و از سوی دیگر وجود ارتباط از مسیر جادهٔ خراسان بزرگ به‌سوی جنوب غرب ایران به‌ویژه شوش در خوزستان را نشان می‌دهد. این ارتباط، به‌هیچ‌وجه بحث تأثیرپذیری و یا تأثیرگذاری نیست، بلکه یک نوع تعاملی است که مابین دو مرکز دیده می‌شود.

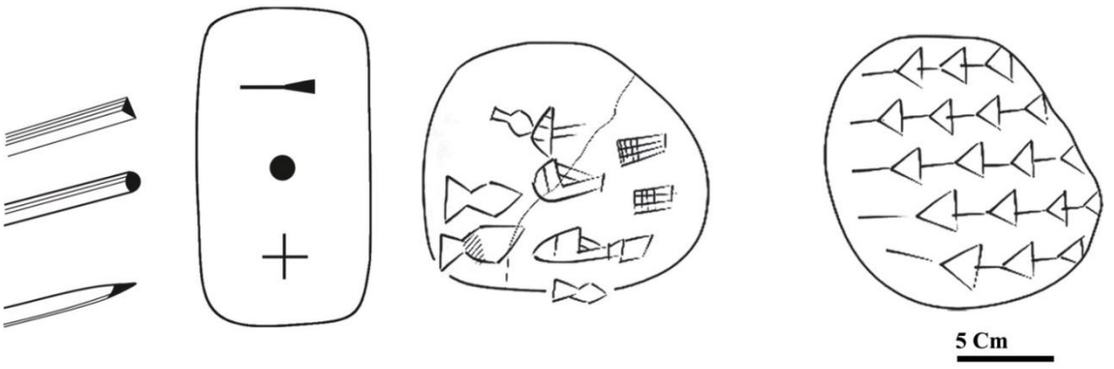
۳-۲. نگارندگان/کاتبان

با توجه به انواع گل‌نوشته‌های شرح داده‌شده، مشخص شد که در سیستم مدیریتی جامعه، گروه‌های تخصصی در بخش‌های مختلف مشغول به کار بوده‌اند. یکی از این گروه‌های تخصصی شاغل، نگارندگان یا کاتبانِ گل‌نوشته ها هستند. برای این گروه از نخبگان باید پیشینهٔ فعالیت آن‌ها را در خصوص ثبت و ضبط اطلاعات، حداقل از زمان استفاده از گوی‌های شمارشی در نظر گرفت. این گروه نخبهٔ اجتماعی، توانایی شمارش، خواندن، نوشتن و ثبت و ضبط اطلاعات را داشتند. این توانایی خواندن و نوشتن ازهر نسلی به نسل دیگر آموزش داده می‌شده است. در بین‌النهرین، به‌طور مسلم گروه نخبگان جدید، در مدارس تعلیم داده می‌شدند و در آنجا تمرین می‌کردند. این واقعیت بر اساس گل‌نوشته‌های معروف به مشق نگارش (Scribal Exercise) از دورهٔ اروک ۴ به بعد تأیید می‌شود (شکل ۲ راست و وسط) [9,10].

۳-۳. قلم نگارش

نگارندگانِ سفالین در طی زمان برای نگارش، از قلم‌های مختلف چوبی، فلزی و غیره استفاده می‌کردند. از قلم های نوک‌تیز جهت حفر نشانه‌های نگارشی، از

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2028-08-17]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.1.1.5]
[DOI: 10.29252/jra.6.1.33]



شکل ۲. الف: انواع قلم‌های کاتب و اشکال آن‌ها بر روی گل نوشته؛ ب: انواع مشق‌های نگارش، بین‌النهرین
Fig. 2: Right: the kind of pins applied for writing, Middle and left different written in Mesopotamian.

قلم‌های نوک‌گرد جهت حفر نشانه‌های شمارشی و از قلم‌های نوک مثلثی جهت نگارش آغازمیخی و میخی بر روی گل مرطوب استفاده می‌شد (شکل ۲ چپ).

٤. روش‌های شیمیایی و دستگاهی مواد

تجزیه‌های شیمیایی در این مقاله بر اساس تحلیل ارتباط منطقی بین لوح گلی مکشوفه و قلم فلزی حاصل از فعالیت‌ها و کاوش‌های باستان‌شناسی در تپه سفالین مطرح‌شده است.

روش‌های تجزیهٔ مواد در این مقاله، برحسب سؤال موردبحث و نوع مواد موردمطالعه، طبقه‌بندی و تحلیل می‌شوند. ازجمله موارد بسیار مهم دراین زمینه، مقدار بسیار کم نمونه‌ها و کمیاب بودن آنان در منطقه است که باید تا حد ممکن از تخریب و آسیب‌رسانی به این نمونه‌های مطالعاتی جلوگیری کرد. در این مقاله، بررسی ترکیب شیمیایی گل‌نوشته‌های موردتحقیق، توسط تجزیه ICP-MS انجام گرفت. تجزیه ICP-MS محدودیت نمونه‌برداری را کاهش می‌دهد و می‌توان از قطعات بسیار کوچک جهت تجزیه شیمیایی و شناسایی ترکیب عناصر اصلی، جزئی و کمیاب استفاده کرد. در این روش، نمونه در اسید حل می‌شود و محلول نمونهٔ موردمطالعه از مقدار چند میلی‌گرم تا ppm مورد تحلیل قرار می‌گیرد [11]. نمونه، با استفاده از دستگاه ICP Spectro-ARCOS در مرکز مطالعات رازی در تهران مورد تجزیه قرار گرفت. با توجه به اینکه تمامی گل نوشته‌ها از ضخامت زیادی برخوردار نبودند و بافت سستی داشتند و همچنین در کل سطح موردمطالعه، آثار خطوط و نقوش حک‌شده مشاهده می‌شد، امکان تهیهٔ نمونهٔ مقطع نازک میسر نبود. مطالعات ریزساختاری و ترکیب شیمیایی نقطه‌ای یا منطقه‌ای در نمونهٔ فلزی توسط میکروسکوپ الکترونی از نوع Philips XL 30 در دانشگاه زیگن آلمان انجام‌گرفته است. در این روش، ریز ساختارها و ترکیبات آلیاژی و همچنین ترکیب رسوبات روی سطوح خارجی این قلم فلزی مورد شناسایی و بررسی قرار گرفت تا تمرکز ترکیبات مشابه بر روی سطح قلم فلزی و لوح گلی کشف‌شده، به دست آید. تصویر توپوگرافی از داخلِ اثر خراش یا حک نمونه، به‌وسیلهٔ میکروسکوپ روبش اتمی از شرکت Jeol Tosca^{Tm} 400، در دانشگاه زیگن آلمان، جهت تحلیل رفتار مکانیکی سطح لوح در برخورد با یک شیء فلزی مستحکم انجام گرفت.

نمونه‌برداری از لوح گلی، صرفاً شامل نمونه‌برداری سطحی از رسوبات و بقایای قشر سطحی لوح است و از عمق نمونه نیز مقدار mg ۱۰۰ جهت تجزیهٔ ICP-MS، تهیه شد. از قلم فلزی نیز تنها دو نمونه از بخش ابتدایی و انتهایی آن، جهت آماده‌سازی مقطع صیقلی، تهیه شد. کلیهٔ مطالعات متالوگرافی، با استفاده از مشاهده به‌وسیلهٔ میکروسکوپ الکترونی در حالت BSE (Backscattered Electron) بر روی این دو سطح، انجام شد (شکل‌های ۳ و ۴).

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2023-08-17]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.1.1.5]
[DOI: 10.29252/jra.6.1.33]

شکل ۳: قلم فلزی حفاری‌شده از سفالین. جنس قلم با توجه به‌ظاهر ترکیبات آن و نوع خوردگی، از مفرغ است.

Fig. 3: The metallic pin excavated from Tappeh Sofalin. Macroscopically and based on typical copper corrosion patina is classified as bronze.

شکل ۴: لوح گلی مورد آزمایش از تپه سفالین به همراه نوشته حک‌شده بر آن.

Fig. 4: Analyzed tablets inclusive some traces engraved on it

۵. نتایج و بحث

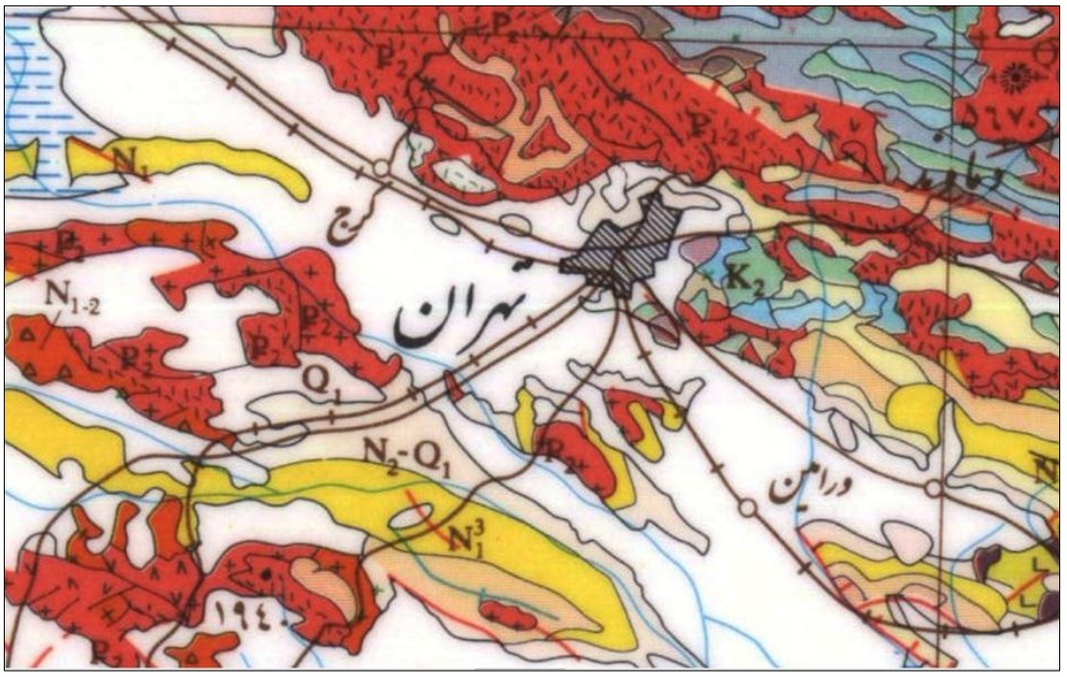
۵-۱. نتایج مطالعات شیمیایی بر روی ترکیب کلی لوح گلی

مطالعات تجزیهٔ شیمیایی، باهدف تعیین ترکیب شیمیایی عناصر اصلی و کمیاب لوحه‌های گلی بر روی مواد موردمطالعه انجام شد. با توجه به این مهم که تپه سفالین در منطقهٔ پیشوا و ازلحاظ زمین‌شناسی در حاشیهٔ شمالی تشکیلات ایران مرکزی قرار دارد، وجود رسوبات کربناته عصر حاضر در منطقه، تأثیر بسزایی بر کل آثار و اشیاء یافت شده، داشته است. با توجه به اینکه تاریخ‌نگاری باستان‌شناسی، تاریخ محدودهٔ تپه سفالین را به دوران آغازین ایلام نسبت می‌دهد، احتمال پخته شدن و استفاده از آتش در ساخت این لوحه‌های گلی با توجه به ترکیب شیمیایی به‌دست‌آمده و خصوصیات بافت ظاهری نمونه ها، مورد تأیید نیست و تمامی آنان به‌عنوان لوحه‌های گلی خشک مطرح می‌شوند. به عبارتی ترکیب شیمیایی لوحه‌ها به‌قدری به ترکیب شیمیایی خاک حوزهٔ مرکزی فلات ایران شبیه است که به‌عنوان یک اثرانگشت شیمیایی نمی‌تواند موردتوجه قرار نگیرد. ترکیب شیمیایی گل نوشتهٔ موردمطالعه در جدول ۱ آورده شده و نتایج حاصل، نشان‌دهندهٔ ترکیبات کربناته حوزهٔ شمالی فلات مرکزی ایران است. نتایج گزارش‌شده در جدول ۱، مقدار درصد وزنی اکسیدهای اصلی و فرعی است و عناصر کمیاب موجود در روی لوحه در جدول شمارهٔ ۲ گزارش‌شده است. مطالعات زمین‌شناسی و لیتولوژی خاک در منطقه پیشوا در ورامین، این مناطق را به‌عنوان مناطقی غنی از لایه‌های آهکی، گچی و دولومیتی معرفی کرده است [12, 13]. بااین‌حال، با توجه به نقشهٔ زمین‌شناسی منطقه ورامین در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰۰ (شکل ۵) و تشکیلات کربناتهٔ عصر حاضر و حضور گچ و بلورهای دوباره رشد یافتهٔ آن، به وجود این قطعات در یک ساختار غنی از سولفات می‌توان پی برد که از مشخصات منطقه پیشوا نیز است. خاک منطقهٔ سفالین نیز جهت بررسی تفاوت‌ها و تشابهات شیمیایی (ترکیبات اصلی، فرعی و کمیاب) موردبررسی قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۳ آمده است.

منطقهٔ موردمطالعه، بخشی از پهنهٔ آتش‌فشانی جنوب تهران است. برون‌زدگی توده‌های عظیم گرانیتوئیدی-تونالیتی سبب دگرگونی در توف‌ها و آهک‌های موجود در منطقه شده است. در این خصوص، تمامی فلزات سنگین غیر از آلومینیم از دیدگاه ژئوشیمیایی دارای پتانسیل بالایی برای تمرکز در سنگ‌های گرانیتوئیدی هستند. وجود سنگ‌های آتش‌فشانی در منطقه و وجود ترکیبات ورگه‌های سولفیدی در این سنگ‌ها یکی از عوامل آزادسازی فلزات سنگین چون آرسنیک، سرب و کادمیم هستند که این فلزات سنگین خواصی مشابه خواص گوگرد را دارند [24].

حضور یون‌های شناسایی‌شده و دارای شعاع اتمی زیاد، به دلیل حساسیت بالا نسبت به تغییرات شرایط محیطی پس از دفن و حلالیت زیاد به‌واسطهٔ مجاورت

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2028-08-17]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.1.1.5]
[DOI: 10.29252/jra.6.1.33]



شکل ۵: نقشه زمین‌شناسی جنوب و جنوب شرق تهران به همراه رخساره‌های زمین‌شناسی آن. سطوح قرمز مشخصه وجود رگه‌های آذرین اسیدی هستند (P2). رنگ زرد، رسوبات میوسن (N3-1) و رنگ سفید، دشت‌های آبرفتی عهد حاضر و رنگ کرم نشان‌دهندهٔ رخساره‌های رسوبی غنی از رس است(N2-Q1).

Fig. 5: Geological map and geological setting of south and southeast of Tehran. Red signs are magmatic veins (P2), yellow part from Neocene (N3-1) and the white part is the recent alluvial deposition. The cream part is the Marn and Los out crops (N2-Q1).

نزدیک با سطح آب‌های زیرزمینی در محیط دفن در طول مُهروموم‌های متمادی، از اهمیت بیشتری برخوردار هستند. ترکیباتی نظیر P_2O_5، Fe_2O_3 و K_2O در اکثر اشیاء باستانی مدفون در اعماق تا ۱٫۵ m مشاهده می‌شوند که ناشی از فعالیت‌های آنتروپوژنیک یا طبیعیِ وابسته به تأثیرات ترکیبات آلی نظیر گیاهان، بقایای جانوری و انسانی (قبرها) و محیط‌های باتلاقی است [8]. غلظت این ترکیبات در سطح نمونه و در عمق آن یکسان نیست، زیرا گرادیان تغییرات و انتقال مواد از سطح لوح تا عمق لوح برحسب نوع ترکیب و غلظت ترکیب در محلول، متفاوت است [14]. خارجی‌ترین قشر مورد تجزیه در این لوحه‌های گلی، به‌عنوان رسوبات روی لوحه‌ها نام‌گذاری شده و تجزیهٔ شیمیایی در دو منطقهٔ قشر سطحی (انباشت رسوبات سطحی) و لایهٔ داخلی جهت شناسایی تغیرات شیمیایی، اعمال‌شده است.

جدول ۱: نتایج حاصل از تجزیه ICP-MS از دو ناحیه رسوبات سطحی و بافت داخلی لوحه‌های گلی برحسب درصد وزنی(W%)

Table 1: ICP-MS of major and minor components from the inner part and outer accumulation of the tablet in W%.

نمونه	SiO_2	CaO_3	Fe_2O_3	Al_2O_3	Na_2O	MgO	K_2O	P_2O_5	MnO	TiO_2
Accumulation	49.00	14.00	5.60	6.00	3.60	4.00	3.00	0.70	0.10	0.00
Rock	50.50	12.10	3.50	9.50	1.50	4.10	2.60	0.30	0.20	0.50

جدول ۲: نتایج مقدار عناصر کمیاب حاصل از تجزیه ICP-MS از دو ناحیه رسوبات سطحی و بافت داخلی لوحه‌های گلی برحسب ppm

Table 2: ICP-MS of trace components from the inner part and outer accumulation of the tablet in ppm.

Sample	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Ge	Ni	Pb	Sc
Surface Contamination	110	433	25	90	749	899	nd	292	394	123
Rock	91	nd	nd	nd	25	102	nd	53	111	66

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2023-08-17]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.1.1.5]
[DOI: 10.29252/jra.6.1.33]

جدول ۳: نتایج مقدار عناصر کمیاب حاصل از تجزیه ICP-MS از خاک منطقه برحسب ppm
Table 3: ICP-MS of trace components of the soil in ppm.

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	Na_2O	MgO	MnO	P_2O_5	K_2O	TiO_2	Cu	Co	Ni	Sc
w%	w%	w%	w%	w%	w%	w%	w%	w%	w%	ppm	ppm	ppm	ppm
27.22	17.2	4.98	37.68	1.22	5.06	0.98	0.44	1.11	0.77	323	120	315	111

Pb	Ba	Cr	Cd	Ge	As	Ni
ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
303	224	12	nd	nd	98	178

بر اساس نتایج ارائه‌شده در جدول یک، نزدیک‌ترین ترکیبِ مینرالوژیک به لوح مورداستفاده، ترکیبات آهکی و به احتمال زیاد، کلسیتی است. درصد آهک در لایهٔ رسوبات سطحی تا ۲٪ افزایش داشته که دلیلی برافزایش غلظت یون‌های کلسیم انتقال‌یافته از محیط بر روی لایهٔ رسوبات سطحی است. باوجود اینکه لوحهٔ گلی در محیطی با غلظت آهک بالا دفن شده است، در لایهٔ رسوبات سطحی آن، درصد آهک (۲٪) افزایش چندان زیادی نداشته است و دلیل این اتفاق، آن است که محلول‌هایی آبی با غلظت زیاد یون‌های قلیایی و قلیایی خاکی وجود دارند که سبب حل شدن و انتقال محلول‌های آهکی به محیط هم‌جوار می‌شوند [15]. وجود تغییرات نه‌چندان زیاد آهن در لایهٔ درونی، در مقایسه با لایه‌های بیرونی لوحه ها، خود نشان‌دهندهٔ این مهم است که محیط دفن، محیطی اکسیدی نبوده، بلکه به دلیل هم‌جواری با شرایط محیط گورستانی و شرایط دفن، تبادلات اکسیدهای آهن به ظرفیت‌های بالاتر در خاک لوح انجام نپذیرفته است [16]. تفاوت در مقادیر نتایج تجزیهٔ عنصری مواد کمیاب در سطح لوحه گلی به‌عنوان رسوبات تجمع یافته و مغز لوحه گلی بسیار حائز اهمیت است و می‌تواند دلیلی بر تأثیرات محیط پیرامون بر شیء باشد. بر اساس جدول ۲ باریم، کادمیم، کبالت و ژرمانیوم از محیط پیرامون بر روی سطح خارجی تجمع یافته‌اند و از مشخصات محیط پیرامون شیء هستند. ترکیباتی همچون کروم، مس، ارسنیک، نیکل و سرب نیز نقش مهمی در ارتباط با عناصر کمیابی دارند که هم از محیط و هم از نوک قلم می‌توانسته بر روی سطح خارجی لوح گلی بر جای بماند. بر همین اساس، به‌احتمال بسیار زیاد، مقدار بسیار بالای Cu (899 ppm) در روی این اثر، از نوک تیغهٔ فلزی نشئت یافته است. مقادیر نیکل و سرب نیز در این مقدار، قابل‌مقایسه با مقادیر احتمالی موجود در خاک نیستند. سرب در خاک چندان محلول نیست و به‌عنوان یک‌فاز غیر متحرک می‌تواند در نقش تجمعات سطحی پدیدار شود. مقادیر اندک ان نیز با مقادیر استاندارد وجود کادمیم در خاک (۲۵–۵۰ ppm) مطابقت دارد [23].

۵-۲. نتایج مطالعات ساختاری و شیمیایی با میکروسکوپ الکترونی

مطالعات میکروسکوپی باهدف شناسایی ناهنجاری یا تمرکز عناصر موجود در قسمت‌های متفاوت این قلم فلزی، انجام شد. در این رابطه، سطح کامل مقطع نمونهٔ موردمطالعه به‌وسیلهٔ میکروسکوپ الکترونی در حالت Back Scattered مورد مشاهده قرار گرفت و بر اساس عناصر متفاوت تشکیل‌شده، روبش (اسکن) و ناهنجاری‌ها به‌صورت تجمعات رنگی، قابل‌تحلیل و بررسی شدند (شکل ۶a). اسکن سطوح در مقیاس بزرگ، در حد کل سطح نمونهٔ موردمطالعه، می‌تواند از بابت چگونگی پراکندگی عناصر، کاملاً مهم باشد، چراکه ساختارهای متفاوتی نیز بر اساس تصویر میکروسکپ الکترونی در حالت Backscatered از نمونه قابل‌مشاهده است (شکل ۶b). عناصر مهم و موردبررسی در این تحقیق، شامل برخی عناصری است که برحسب جنس شیء–یا از خود شیء منشأ گرفته و یا از محیط پیرامون شیء– و نوع کاربری نمونه، مورداستفاده قرارگرفته است (O, Si, Ca, Pb, Cl, Cu) [17]. نکتهٔ حائز اهمیت در تفسیر این تصاویر، تفاوت‌های بسیار مشهودی است که در ارتباط با ناهنجاری‌های عنصری در سر و انتهای این قلم فلزی وجود دارد.

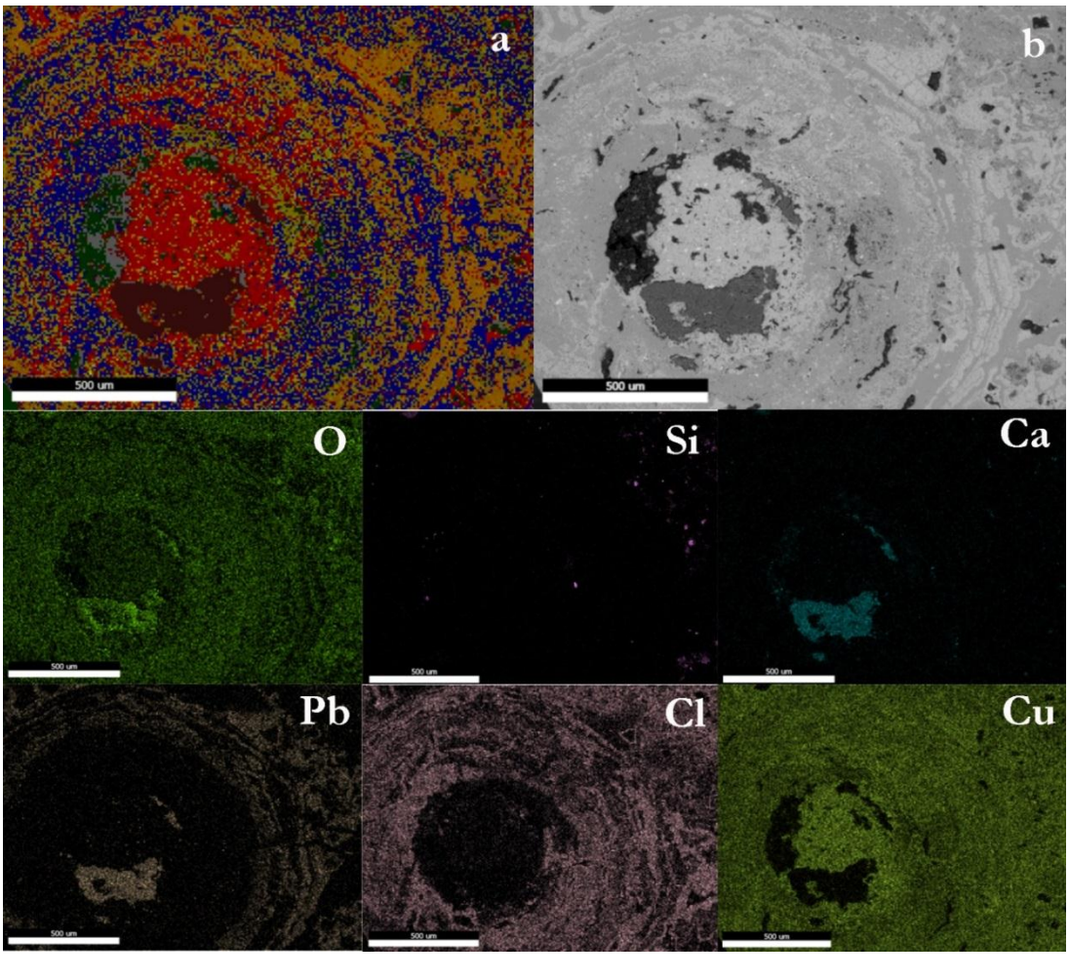
اسکن عنصری کلی تمام سطح نمونه، می‌تواند به مجموعه اسکن‌های انفرادی در سطح نمونهٔ مورد آزمایش

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2028-08-17]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.1.1.5]
[DOI: 10.29252/jra.6.1.33]

تقسیم شود تا دراین‌ارتباط بتوان تحلیلی از چگونگی پراکندگی عناصر در جای‌جای نمونه به دست آورد. اکسیژن، تراکم یکنواختی را در اسکن بر تمامی سطح نمونه نشان می‌دهد. این آنومالی، به دلیل وجود ترکیبات اکسیدی، هم به‌صورت اکسیدهای قلیایی و قلیایی خاکی از محیط پیرامون و هم به‌صورت اکسیدهای فلزی در سرتاسر نمونه دیده می‌شود. سیلیسیم با تمرکز بسیار قابل‌توجهی فقط در قسمت‌هایی از سطح خارجی قلم دیده می‌شود. این، می‌تواند به دلیل آن باشد که سیلیسیم از عناصر شاخص متعلق به قلم نیست. کلسیم، جالب‌ترین نحوهٔ تمرکز را در نمونه دارد و آن تمرکز، در مرکز و در خارجی‌ترین قسمت نوک قلم است. بر اساس تصاویر میکروسکپی در مرکز قلم، ترکیبات کربناته مس یا خوردگی مفرغ دیده نشده و درنتیجه احتمال اینکه این تمرکز کلسیم از محیط هم‌جوار باشد، موجه‌تر است. عدم تمرکز کلسیم در مرکز نمونه، این گمان را به وجود می‌آورد که آیا محلول‌های خورنده از طریق ترَک و شکاف، سبب تمرکز غیریکنواخت کلسیم در نوک قلم شده است. اما با توجه به نبودن ترک یا شکاف در جهت مسیر عبور یون‌های حاوی کلسیم، این ادعا نمی‌تواند صحیح باشد و کلسیم به احتمال زیاد، به‌صورت ته‌نشست‌های رسوبی از یک ناحیهٔ غنی از کلسیم به‌جای مانده است [18]. این ناحیه می‌تواند سطح یک لوح گلی در مدت‌زمان تماس با محیط دفن باشد. وجود ساختارهای شکیل کریستالی کربناته (کلسیتی) در شکل ۷ با بزرگنمایی ۲۰۰ برابر، کاملاً مشخص‌کنندهٔ حرکت و تماس این ماده با سطح ثانویه‌ای است چراکه نوع قرارگیری شبکه‌های کریستالین همگی گویای یک انسجام ساختاری است. نکتهٔ جالب‌توجه در تصویر با بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر در سمت راست، حرکت به سمت داخل این ساختار آهکی در ساختار مسی است. ساختار مس در این نمونه، به‌واسطهٔ وجود آلیاژ سرب، نرم‌تر است. در قسمت سمت راست‌بالای تصویر b۶ این در هم فرورفتگی ساختاری، به‌طور کامل، مشخص و قابل‌شناسایی است. دانه‌های سفیدرنگ با انعکاس نوربالا در قسمت‌های مرکزی این ساختار ذرات سربی هستند که در ساختار تیره‌رنگ کربناته مرکزی تشکیل نشده‌اند بلکه به‌واسطهٔ ضربه یا مالش در ساختار محبوس شده‌اند. سرب، کلر و مس از عناصر وابسته به متالورژی شیء هستند. حضور کلر در سرتاسر نمونه به‌جز در مغز آن، نشان‌دهندهٔ ابتلای شیء به بیماری برنز است که به‌صورت متوالی و تدریجی قسمت‌های زیادی از شیء را در برگرفته است [19]. بر اساس اسکن عنصر مس در نمونه و با توجه به وجود مغز فلزی در نمونه، می‌توان عنوان کرد که خوردگی به‌صورت پیشرفته در تمامی قسمت‌های شیء ظهور پیدا نکرده است. سرب، بیشتر در لایه‌های رویی و تا اعماق حدوداً ۳۰۰ میکرومتر به‌صورت ساختار یا تجمع لایه‌ای مشاهده‌شده است. اضافه شدن سرب، جهت کارآمد ساختن شیء در فراوری ساخت آن است. سرب در حال حاضر نیز به‌عنوان یک فلز اضافه‌شده به آلیاژ، جهت شکل‌پذیری بهتر آن استفاده می‌شود [20].

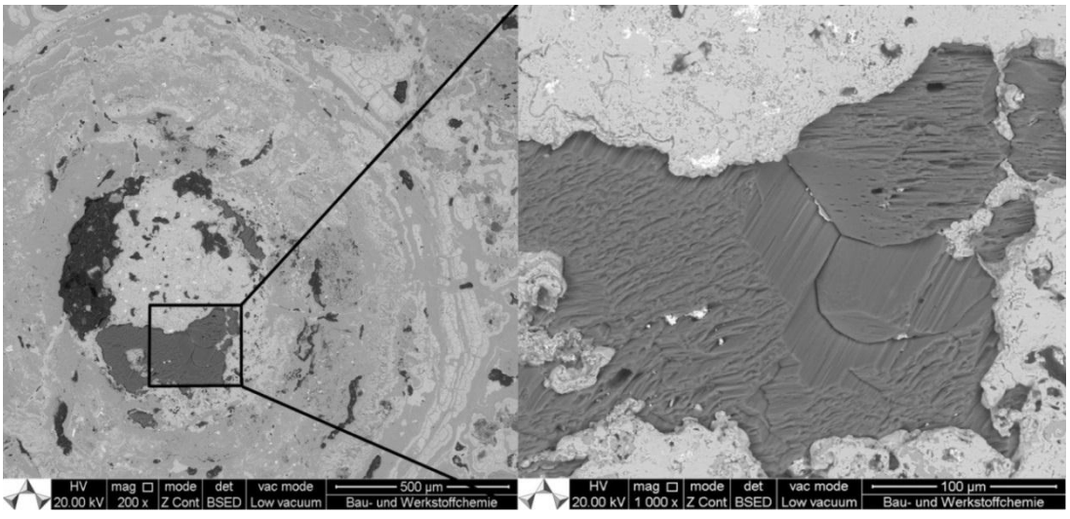
مراحل مطالعاتی فوق، بر روی قسمت انتهایی نمونه قلم فلزی نیز انجام شد و شباهت‌ها و تفاوت‌های قابل‌توجهی مشهود گشت (شکل ۸). تصویر میکروسکوپ الکترونی قسمت انتهایی نمونه، در تصویر b۸ مشخص و اسکن عناصر تشکیل‌دهندهٔ سطح نمونه در تصویر a۸ مشخص شده است. عناصر اکسیژن، سیلیسیم و کلسیم به‌مانند قسمت نوک در قسمت انتهایی نیز مشاهده می شوند. در این خصوص، کلسیم دارای یک پراکندگی مرزی بسیار مشخص در سرتاسر محیط خارجی نمونه است و در قسمت داخلی، هیچ اثری از این عنصر وجود ندارد. از طرفی، حضور مقدار قابل‌توجهی سیلیسیم در مقام مقایسه با قسمت نوک قلم، به چشم می‌خورد. سیلیسیم و کلسیم در این مناطق، بدون تردید از محیط پیرامون یا لوح گلی بوده‌اند چراکه هیچ آنومالی و تجمع مشخصی در قسمت‌های داخلی دیده نمی‌شود. سرب، کلر و مس نیز به‌مانند قسمت لبه دیده می‌شود. تفاوت تجمع این سه عنصر آخری با قسمت لبهٔ قلم در این است که در این قسمت، مغز فلزی بسیار کم دیده می‌شود و یا اصلاً دیده نمی‌شود. به تعقیب همین موضوع، تمرکز کلر نیز تمامی قسمت‌های سطحی نمونه را پوشانده است. خوردگی فلز مس در این قسمت نمونه به‌مراتب پیشرفته‌تر از قسمت نوک نمونه است. نکتهٔ حائز اهمیت در این تصویر، این مورد است که تجمع کلسیم در زیر لایه‌های خوردگی

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2028-08-17]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.1.1.5]
[DOI: 10.29252/jra.6.1.33]



شکل ۶ (a)تصویر اسکن عنصری نوک قلم فلزی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی و (b)تصویر میکروسکپ الکترونی سطح در حالت Backscatered به همراه اسکن ردیابی انفرادی وجود عناصر O, Si, Ca, Pb, Cl, Cu

Fig. 6: A) Scanning electron microscope image of the pin. B) Scanning electron microscope image in backscattered mode with map pf elements such as Cu, Cl, Pb, Ca, Si, O



شکل ۷: نوک نمونه به همراه تجمع آهک یا کلسیت در زیر لایه خوردگی. دانه‌های با نور منعکس به بالا، ذرات سربی هستند.

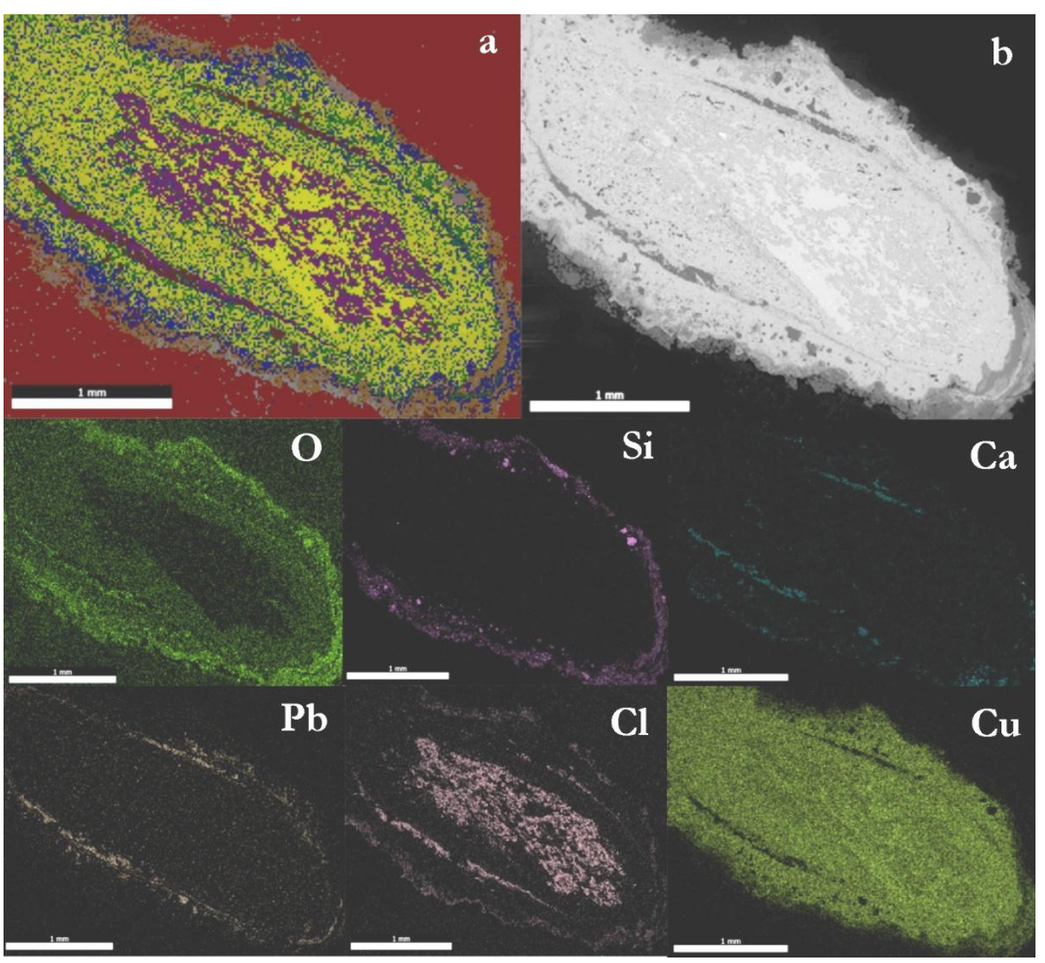
Fig. 7: Top of the pin with accumulation of calcite under the corrosion layer. Fragments with high reflection are lead.

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2028-08-17]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.1.1.5]
[DOI: 10.29252/jra.6.1.33]

قرارگرفته است. این توالی به این مفهوم است کـه در ابتـدا تماس با محیط یا شیء حاوی کلسیم وجـود داشـته (دوران استفاده از شیء) و پس از استفاده‌های مکرر، این شیء دفن شده و در معرض شرایط محیطی تأثیرگذار جهت خـوردگی قرارگرفته اسـت [21]. ازجملـه مـوارد قابـل‌تحلیـل در ایـن شکل، توجه به این مهم است که در تمـامی قسـمت‌هـایی کـه آنومـالی کلسـیم مشـاهده مـی‌شـود، هـیچ آنومـالی از محصولات خوردگی مس یا مفـرغ نیسـت. ایـن موضـوع، چنین تحلیل می‌شود که در ابتدا مس و سـپس لایـه‌هـای حاوی کلسیم شیء موردبحث را تحـت تـأثیر قـرار داده‌انـد. تمرکز سرب به‌طور یکنواخت در سطح خارجی نمونـه دیـده می‌شود که این امر، وابسته به متالورژی نمونه است.

۵-۳. مطالعات ساختاری با روش میکروسکوپ اتمی روبشی

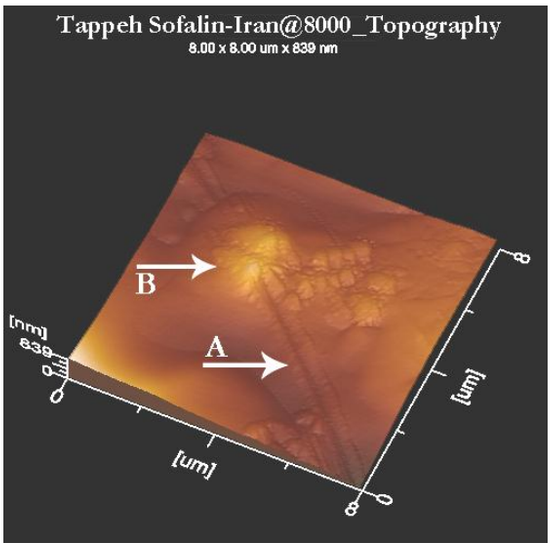
در ارتباط با نوشتن به‌وسیلهٔ یک شیء فلزی سخت (قلمی از جنس برنز) بر روی یک سطح نرم (لـوح گلـی) مفهـوم فیزیک اصطکاکی جهت مطالعه تأثیر رفتار مکانیکی بـین شیء فلزی و سطح گلی، نقش مهمی را ایفا مـی‌کنـد. بـر اسـاس تئـوری اصـطکاکی (Tribology) [22]، نوشـته و حکاکی عبارت از ایجاد ردی از خراش بر روی یک سـطح نرم، است. در این خلال، ساختارهای سطح نرم در مقیاس بسیار ریز و میکرومتری دچار چـروک و در انتهـایی‌تـرین مکان یعنی جایی که قلم از حرکت بازمی‌ایستد، دچار جمع شدگی ساختاری می‌شوند. این مهم، با توجه به تصویر



شکل ۸: (a) تصویر اسکن عنصری انتهای قلم فلزی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی و (b) تصویر الکترونی خالص سطح به همراه اسکن ردیابی وجود عناصر O, Si, Ca, Pb, Cl, Cu

Fig. 8: A) Scanning electron image of the bottom of pin. B) Scanning electron image of the surface with the trace of such elements as Cu, Cl, Pb, Ca, Si, O.

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2028-08-17]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.1.1.5]
[DOI: 10.29252/jra.6.1.33]



شکل ۹: تصویر توپوگرافی سطحی رد خراش بر روی لوح گلی با استفاده از میکروسکوپ روبش اتمی. A) خط خراش و ساختار چروک‌خورده در دو طرف آن و B) همچنین تجمع لایه‌های سطحی روی لوح اثبات‌کننده رفتار مکانیکی اصطکاکی بر سطح است.
Fig. 9: AFM image of the surface and topography of the tablets, with trace of scratch effect. Scratching is shown with the sign of wavy lines around the scratch, based on mechanical properties of the surface of tablets.

میکروسکوپ نیروی اتمی از توپوگرافی سطح داخلی یکی از اثرات حکاکی و خراش‌ها کاملاً مشخص است (شکل ۹). در این تصویر، ردّ خراش به‌صورت منحنی‌هایی ریز در دو طرف خط خراش و به‌صورت یکنواخت و متوالی تا انتها ادامه دارد. در قسمت مرکزی تصویر ایستادن قلم و تجمع بافت چروک‌خورده کاملاً مشخص است. بازهٔ این خط خراش در حدود چند میکرومتر است که با نوک‌تیز و قابلیت نوشتاری خوب یک‌قلم فلزی، مطابقت دارد.

٦. نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش، بررسی ارتباط احتمالی بین قلم برنزی کشف‌شده از تپه سفالین با لوحه‌های گلی مکشوفه از این ناحیه است. در این راستا با توجه به شباهت‌های ساختاری لوحه‌های گلی مکشوفه، یک لوحه به‌عنوان مرجع انتخاب شد. مواد متشکله مغز لوح و نهشته‌های رسوبی روی قشر سطح آن لوحه مورد آزمایش ICP-MS قرار گرفت. در این راستا بیشترین ترکیباتی که نقش مهمی را در رابطه با شیمی لوحه ایفا می‌کردند، اکسید کلسیم و سیلیس و نمک‌های آلکالین بودند. با توجه به تجزیهٔ انجام‌شده، علی رغم ترکیبات اصلی ذکرشده در بالا در ارتباط با عناصر کمیاب اندازه گیری شده، مقدار دو عنصر مس و سرب از اهمیت بالایی برخوردار است. این دو عنصر از بافت لوحه گلی منتج نشده‌اند و بدون تردید از محیط دفن یا پیرامون اثر به روی لوح تجمع کرده‌اند. البته حضور این مواد در خاک منطقه، مستلزم بررسی فاز شناسی آن خاک است. در این رابطه، این سؤال که آیا کاتبان منطقهٔ سفالین یادبودهای خود را با استفاده از ابزارهای برنزی می نگاشتند، تقویت یافت. ابزار یافت شده به‌واسطهٔ مورفولوژی نوک اثر، می‌توانسته به‌عنوان یک‌قلم مطرح شود. مطالعه بر یک‌قلم برنزی به دست آمده از این ناحیه، با استفاده از بررسی‌های میکروسکوپ الکترونی و روبش یا اسکن عناصر موجود در بافت فلزی نمونه، نتایج بسیار جالب‌توجهی را به همراه داشت. بر اساس مطالعه بر روی سطح مقطع فلزات در سمت نوک و انتهای نمونه، تمرکز و توالی جالبی از مغز فلزی، تمرکز آهکی و محصولات خوردگی مشاهده شد. این توالی یک مسیر منطقی را در ارتباط باوجود یک نمونهٔ خالص فلزی و تماس آن با یک شیء آهکی و (یا بر پایه آهک) و نهایتاً ایجاد محصولات خوردگی در محیط دفن (به‌عنوان محیط کاربری شیء) به اثبات می‌رساند. در این رابطه، علاوه بر عنصر مس، با توجه به مطالعات

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2028-08-17]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.1.1.5]
[DOI: 10.29252/jra.6.1.33]

تصاویر میکروسکوپ الکترونی، وجود سرب نیز به‌عنوان یک مادهٔ مشخص جهت تسهیل فرایندهای متالورژیک به اثبات رسید و همچنین ساختارهای غنی از سرب در تصاویر میکروسکوپ الکترونی مشخص شدند. با توجه به اسکن عنصر سرب در لایه‌های خارجی قلم فلزی، وجود سرب (حدوداً ۳۹۴ ppm) در سطح خارجی لوحه‌ها نیز دلیلی بر استفاده از این اشیا به‌عنوان ابزار حک کردن و یا نوشتن در تپه سفالین است.

References

[1] George, A. R., 1992, Frayne Douglas R.: Old Babylonian period (2003–1595 BC).(The Royal Inscriptions of Mesopotamia. Early Periods, Vol. 4.) xxxi, 853 pp., 7 microfiches. Toronto, Buffalo and London: University of Toronto Press, 1990, Bulletin of the School of Oriental and African Studies, 55(3), 538-540.

[2] De Ryck I, Adriaens A, Adams F. An overview of Mesopotamian bronze metallurgy during the 3rd millennium BC. Journal of Cultural Heritage. 2005 Jul 1;6(3):261-8.

[3] Powers J, Smilgies DM, Geil EC, Clinton K, Dimitrova N, Peachin M, Thorne RE. X-ray fluorescence imaging analysis of inscription provenance. Journal of archaeological science. 2009 Feb 1;36(2):343-50.

[4] Thornton CP, Rehren T, Pigott VC. The production of speiss (iron arsenide) during the Early Bronze Age in Iran. Journal of Archaeological Science. 2009 Feb 1;36(2):308-16.

[5] Colomban P. On-site Raman identification and dating of ancient glasses: a review of procedures and tools. Journal of Cultural Heritage. 2008 Dec 1;9:e55-60.

[6] Pope GA. Weathering of petroglyphs: direct assessment and implications for dating methods. Antiquity. 2000 Dec;74(286):833-43.

[7] Hessari M. New Evidence of the Emergence of Complex Societies Discovered on the Central Iranian Plateau. Iranian Journal of Archaeological Studies. 2011;1(2):35-48.

[8] Dahl JL, Yousefi Zoshk R. The proto-Elamite Tablets from Tape Sofalin. Iranian journal of archaeological studies. 2012;2(1):57-73.

[9] Nissen HJ, Kelly-Buccellati M, Porada E. 'Sumerian'vs.'Akkadian'Art: Art and Politics in Babylonia of the mid-third Millennium BC.

[10] Englund R. The state of decipherment of Proto-Elamite. 2001.

[11] Jenner GA, Longerich HP, Jackson SE, Fryer BJ. ICP-MS—A powerful tool for high-precision trace-element analysis in Earth sciences: Evidence from analysis of selected USGS reference samples. Chemical Geology. 1990 Jun 20;83(1-2):133-48.

[12] Arian M, Noroozpour H. The Biggest Salt-Tongue Canopy of Central Iran. Open Journal of Geology. 2015 Feb 12;5(02):55.

[13] Talbot C, Aftabi P. Geology and models of salt extrusion at Qum Kuh, central Iran. Journal of the Geological Society. 2004 Mar 1;161(2):321-34.

[14] Moor C, Lymberopoulou T, Dietrich VJ. Determination of heavy metals in soils, sediments and geological materials by ICP-AES and ICP-MS. Microchimica Acta. 2001;136(3-4):123-8.

[15] Barbana F, Bertoncello R, Milanese L, Sada C. Alteration and corrosion phenomena in Roman submerged glass fragments. Journal of non-crystalline solids. 2004 Jul 1;337(2):136-41.

[16] Alam AM, Xie S, Saha DK, Chowdhury SQ. Clay mineralogy of archaeological soil: an approach to paleoclimatic and environmental reconstruction of the archaeological sites of the Paharpur area, Badalgacchi upazila, Naogaon district, Bangladesh. Environmental geology. 2008 Feb 1;53(8):1639-50.

[17] Emami SM, Kowald T, Trettin R. Mineralogical and chemical investigation on the recrystallization process during sintering in phase-interface areas in ancient ceramic matrices. Materials and Manufacturing Processes. 2009 Jul 24;24(9):934-41.

[18] Thornton CP, Lamberg-Karlovsky CC,

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2028-08-17]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.1.1.5]
[DOI: 10.29252/jra.6.1.33]

Liezers M, Young SMM. On Pins and Needles: Tracing the Evolution of Copper-base Alloying at Tepe Yahya, Iran, via ICP-MS Analysis of Common-place Items. Journal of Archaeological Science. 2002;29(12):1451-60.

[19] Oudbashi O, Emami SM. A Note on the Corrosion Morphology of some Middle Elamite Copper Alloy Artefacts from Haft Tappeh, South-West Iran. Studies in Conservation. 2010;55(1):20-5.

[20] Farquhar RM, Vitali V. Lead isotope measurements and their application to Roman lead and bronze artifacts from Carthage. MASCA research papers in science and archaeology. 1989 Jan 29;6:39-45.

[21] Marusic K, Otmacic-Curkovic H, Takenouti H, Mance AD, Stupinsek-Lisac E. Corrosion protection of synthetic bronze patina. Chemical and biochemical engineering quarterly. 2007 Mar 29;21(1):71-6.

[22] Gluchy A, Vargiolu R, Mordant C, Zahouani H. Tribology's contribution to archaeology. Surface engineering. 2008 Mar 1;24(2):154-61.

[23] Sharma S, Prasad FM. Accumulation of lead and cadmium in soil and vegetable crops along major highways in Agra (India). Journal of Chemistry. 2010 Oct 1;7(4):1174-83.

[24] Dehghani M, Abbasnejad A. Cadmium, Arsenic, Lead and Nitrate Pollution in the Groundwater of Anar Plain. Journal of Environmental Studies 2011; 36(56):28-30

[25] Dahi, J. L., Hessari, M., Yousefi Zoshk, R., The Proto Elamite Tablets from Tape Sofalin, Iranian Journal of Archaeological Studies, 2012, vol. 2, issue 1., Pp: 57-73

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2028-08-17]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.1.1.5]
[DOI: 10.29252/jra.6.1.33]