Journal of Research on Archaeometry, 2020; 6 (2):41–55

Journal of Research on Archaeometry

DOI: 10.52547/jra.6.2.41 URL: http://jra-tabriziau.ir/

Original Paper

Kahiro II: The Importance of Copper Oxide Extraction Technology in 4th Millennium BC in Halil River Basin

Seyed Mohammadamin Emami[1]*, Meysam Shahsavari[2]

[1] Associate Professor at Department of Conservation of Cultural Properties and Archaeometry, Art University of Isfahan, IRAN-Professor invite at IRAMAT Institute for Research on Archeomaterial, University Bordeaux Montaigne, FRANCE

[2] Assistant Professor at Department of Archaeology, University of Jiroft, Jiroft, IRAN

Received: 10/9/2019 **Accepted: 02/02/2020**

Abstract

During an archaeological survey in the area known as Halil River cultural district, a large number of metallic slag and crucibles were found which have been scattered as residues over the surface of the site, called Chayiro II. The study on the melting slags and crucibles help to know about the metallurgical processes and the presence of copper as the main metals in this region. 10 samples have been selected for mineralogical investigations for identifying the crystalline phases, X-ray fluorescence analysis for better clustering the chemical composition as well as microscopical investigations. Copper droplets in the microscopic textures of the slags indicate the extraction of copper at this time in this region. Copper droplets have been dispersed as the crystalline form and are useful as a factor to estimate the melting temperature. The parts of the melting copper droplets found in this range also show copper casting. The igneous minerals found in the texture of crucibles show the use of an igneous source for their production as the main metallurgical vessels for purification as well as casting. Copper oxide minerals are mainly consisted of cuprite (Cu_2O) and delafossite ($CuFeO_2$) in the investigated samples. The existence of oxide minerals as melts residues indicates the melting of copper oxide in the region. Indeed, the accumulated of residues of oxide compounds are mainly the remains of an incomplete process of extraction or casting, which results in the formation of oxide copper at the last casting stage. It seems that copper oxide components are used for the production of matte or copper ingots. Based on the investigations, Kahiro II can be introduced as one of the focal points about the further consideration in this region. Copper oxides are the one of the oldest copper components that used for metal casting and extraction, via direct reduction.

Keywords: Halil River Basin, Chalcolitic Period, Archaeometallurgy, Copper Oxide

Introduction

Mineralogy and ore petrology were the essential interdisciplinary investigations for solving the archaeological questions. The questions in this regard go to the metallurgy and metal's manufacturing processes. The metallurgy of south east of Iran had a very long evidence based on the previous investigations carried out by Iranian as well as European archaeologists and scientists [8]. The emergence of metallurgy in this region is of great interest, because of the huge number of archaeological sites which have been excavated there. Metallurgical background in south east of

* Corresponding author: m.emami@aui.ac.ir

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 2020-03-23]

[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.2.1.7]

[DOI: 10.52547/jra.6.2.41]

Iran goes back to 6th millennium BC forward. The process is done practically and experimentally. In this manner, this district is well known as the birth place of metallurgy in the Iranian plateau [11].
Kahiro II is one of the places which located in the north east of Kerman province. This place is highlighted based on different metallurgical residues which are scattered on the surface. The objects are ores, slags and crucibles. All of these remains can be focused for interpreting the metallurgical features in this region. The use of copper as main metal is proven based on the macroscopical observation, but it is still not enough for further assumption. On the other side the importance of metallurgy in this region will be focused on the *in-situ* metallurgy of imported facilities [42]. In this regard Kahiro II is located in a logistic location. Based on the archaeological survey in this site, many objects were found such as flint, ceramics which were helpful to have estimation on the chronology of this site.

The question regarding Kahiro II is concentrated on the kind of metal which has been excavated, and the metallurgical characterization of the slags as well as crucibles, for estimating the manufacturing temperature. The metals can be very important because the evidence of copper oxide extraction in Iran is few, and this point can lead us to a very long tradition of melting. Copper sulphide is used approximately at the end of chalcolithic period.1.

Material and methods

10 samples from slags and crucibles were selected for mineralogical chemical analysis. In this regard polarization light microscopy carried out in order to describe the crystalline phases as well as pterologically interpretation of the phases occurred in the texture of the objects. Mineralogical observation is done via an Olympus B51, microscope at the department of building material chemistry of University Siegen, Germany. X-ray fluorescence analysis was carried out for determining the bulk chemical composition of the materials with a Spectrum Plus instrument at the same institute in Germany [16].

Discussion

The important highlights which were essential for considering the samples here was the existence of different mineralogical decompositions based on copper oxide phases.

Observations via optical microscopy of the slag samples suggest the tiny droplets of copper within the glassy matrix. This condition is occurred thermodynamically if the silica and copper come to the equilibrium together [33]. Therefore, copper cannot be re-melt and the temperature is around 900°C to 1200°C. The occurrences of malachite as carbonate exactly on the surface of the slags indicated the rapid cooling as well as oxidation condition. In this proposes any copper sulphide or sulphidic rims were seen around the copper droplets [38]. This suggests the use of copper oxide as direct reduction process. In contrast we have to identify copper sulfide within the melt. This came to understanding, because ancient metallurgy was not carried out completely.

Crucibles show also the use and forming of copper oxide with respect to the occurrence of delafossite within the texture. Delafossite is a typical copper-iron bearing minerals divided from the extraction of copper oxide in high oxygen fugacity [16, 44]. This phase including the iron oxides in the crucible also suggests the extraction of cooper oxide using in this site.

Results

Kahiro II is a very logistic site for investigation the region based on the materials which have been found there. Archaeological context of Kahiro II shown that this site chronologically belongs to chalcolithic period, based on ceramic and flint objects. 20 20 samples were selected based on the field survey of Kahiro II. The samples are mainly residual of metallurgical processes such as slags and crucibles. Mineralogical- chemical investigations suggested that the copper oxide were extracted in 4th millennium BC and this process went ahead via direct reduction of copper ore.

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2028-03-13]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.2.1.7]
[DOI: 10.52547/jra.6.2.41]

پژوهه باستان‌سنجی ۱۳۹۹؛ ۶(۲): ۴۱-۵۵

پژوهه باستان‌سنجی

DOI: 10.52547/jra.6.2.41

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

دانشگاه هنر اسلامی تبریز ۱۳۷۸

مقاله پژوهشی

محوطهٔ کهیرو II: شواهدی از ذوب فلز مس در سرشاخه‌های هلیل‌رود در اوایل هزارهٔ چهارم پیش از میلاد

محمدامین امامی*[۱]، میثم شهسواری[۲]

۱. دانشیار دانشکده مرمت دانشگاه هنر اصفهان و استاد مدعو در مؤسسه تحقیقات فیزیک کاربردی در باستان‌شناسی و باستان‌سنجی، دانشگاه بوردو

۲. استادیار گروه باستان شناسی دانشگاه جیرفت، کرمان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۳

چکیده

طی یک بررسی باستان‌شناختی در منطقهٔ موسوم به سرشاخه‌های حوزهٔ فرهنگی هلیل‌رود، در میان مواد فرهنگی پراکنده بر سطح محوطه‌ای به نام کهیرو II، تعداد زیادی سرباره‌های ذوب فلز و بوته‌های ریخته‌گری و بقایای فلزگری مشاهده شد. مطالعه بر سرباره‌های ذوب و وجود قطرات و گویچه‌های مسی در بافت میکروسکپی سرباره‌ها نشان از استحصال فرایند فلزگری مس در این برههٔ زمانی در این منطقه، دارد. تعداد دَه نمونه از مواد فرهنگی از منطقه کهیرو II انتخاب شدند و بر اساس آزمایش‌های مینرالوژی جهت شناسایی خصوصیات بافت سرباره و بوته، و فلورسانس اشعهٔ ایکس جهت شناسایی ترکیب شیمیایی بین مواد مکشوفه و مطالعات ریزساختاری و میکروسکپی موردبررسی قرار گرفتند. قطرات مس در زمینهٔ کریستالین سیلیسی سرباره پراکنده‌شده‌اند و به‌عنوان یک فاکتور جهت تخمین درجهٔ حرارت ذوب و ترکیب فلز مفید هستند. قطعات بوته‌های ذوب یافت شده در این محدوده نیز نشان از ریخته‌گری مس دارند. بوته‌های ذوب، بدنهٔ سرامیکی دارند که اغلب از کانی‌های آذرین (کوارتز، فلدسپات، پلاژیوکلاز) به‌عنوان تمپر در بافت آن‌ها استفاده‌شده است. محصولات ذوب و بقایای ذوب در ناحیهٔ داخلی بوته، تجمع دارند که شامل کانی‌های اکسیدی مس همچون کوپریت (Cu_2S) و دلافوسیت ($CuFeO_2$) است. وجود کانی‌های اکسیدی به‌عنوان بقایای ذوب در کف بوته حکایت از ذوب مس اکسیدی و کربناته در منطقه دارد، زیرا بقایای تجمع یافته ترکیبات اکسیدی در کف بوته، عمدتاً بقایای فرایند ناقص استحصال و یا ریخته‌گری هستند و سبب تشکیل مس کربناته یا اکسیدی در آخرین مرحلهٔ ریخته‌گری می‌شوند. چنین به نظر می‌رسد که این بوته‌ها جهت فرایند تولید مات یا شمش مس مورداستفاده قرارمی‌گرفته‌اند. منطقهٔ کهیرو II به‌واسطهٔ وجود بقایای استحصال مس از سنگ معدن کربناته، می‌تواند به‌عنوان یکی از مناطق قدیمی و کلیدی در سرشاخه‌های هلیل رود معرفی شود.

واژگان کلیدی: فلزشناسی باستانی، مینرالوژی، پترولوژی، سربارهٔ ذوب، سرشاخه‌های هلیل‌رود، دوران مس‌سنگی

* 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 2023-03-23]

[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.2.1.7]

[DOI: 10.52547/jra.6.2.41]

۱. مقدمه

فلات ایران ازجمله مناطق بسیار مهم در ارتباط با ذوب و فلزگری فلزات در دنیای باستان است. به تعبیر بسیاری از محققان، ایران به دلیل شرایط زمین‌شناسی خود خواستگاه اصلی تولید و ذوب برخی فلزات ازجمله مس و سپس آلیاژهای آن ازجمله برنز بوده است [1-3]. در تمام حوزهٔ فرهنگی هلیل‌رود به‌ویژه در منطقهٔ سرشاخه‌های این مسیل فرهنگی شواهد مهمی از محوطه‌های فلزکاری کهن شناسایی‌شده است. منظور از محوطهٔ فلزکاری کهن، محوطه‌ای است که در آن عمل استحصال مس از سنگ حاوی فلز صورت گرفته است و بقایای این فعالیت در قالب تجمع‌های سرباره و تفاله‌های فرایند ذوب و استحصال و در مواردی بقایای مختصری از کوره‌های مربوط به فرایند ذوب، در منطقه بر جای می‌ماند [4]. این محوطه‌ها بخش مهمی از تاریخچهٔ فلزگری و ذوب در یک منطقه را در بردارند و از این نظر دارای اهمیت فراوان هستند. تولید فلز و چگونگی انتقال آن در بسیاری از مقالات علمی موضوع بحث قرار داشته و در این خصوص نظرات زیادی در راستای چگونگی تولید فلزات و انتقال آن در اولین مهروموم‌های مورد توجه محققان به دانش فلزگری باستانی وجود داشته است [5]. فلزات در دنیای باستان یا به‌عنوان یک کالای لوکس و تجملاتی و یا به‌عنوان ابزارهایی برای نبرد مورد خریدوفروش قرار می‌گرفتند و به همین دلیل بسیاری از مناطق و حوزه‌های فرهنگی سعی در توسعهٔ این صنعت، چه به‌عنوان بازاری برای خریدوفروش آن و چه به‌عنوان محلی صنعتی جهت تولید آن، داشته‌اند [6]. در این خصوص نه‌تنها تولید فلزات در دنیای باستان نقش مهمی را در پیشبرد تکنیکی یک منطقه به همراه داشته بلکه دادوستد و تجارت آن نیز بسیار حائز اهمیت بوده است. در این راستا حوزه‌های فرهنگی پرقدرت از بین‌النهرین در غرب تا حوزهٔ فرهنگی سیستان و پنجاب در شرق ایران بسیار تحت تأثیر این ارتباط قرار داشتند. در این خصوص حوزه فرهنگی هلیل رود به‌عنوان یکی از کانون‌های اصلی تولید و مهاجرت فلزات به شمار می‌آید [1]. مطالعه بر روی محوطه‌های ذوب و فلزگری با دشواری‌هایی نیز همراه است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

الف) این محوطه‌ها اغلب، در مناطقی قرارگرفته‌اند که دسترسی به آن‌ها دشوار است و گاهی امکان شناسایی پراکندگی محوطه‌های کاوش در یک بررسی باستان‌شناسی میسر نیست.

ب) امکان تاریخ‌گذاری دقیق در برخی از این محوطه‌ها به دلیل فقر مواد باستان‌شناختی کافی و لایه‌نگاری علمی وجود ندارد، چراکه در بیشتر موارد بقایای فلزگری و استحصال در این محوطه‌ها بر روی زمین اثرات خود را بر جای گذاشته‌اند.

ج) مدت‌زمان انجام این فعالیت‌ها نیز از موارد بسیار حائز اهمیت است، زیرا این محوطه‌ها عموماً کارگاه‌های کوچکی بوده‌اند که در فصول خاصی از سال استفاده می‌شده و سپس متروک‌شده‌اند.

محوطهٔ کهیرو II، طی یک بررسی باستان‌شناسی، شناسایی شد که با توجه به شواهد سطحی، به دوران مس‌سنگی (اوایل تا اواسط این دوره) تعلق دارد. پراکندگی بقایای مواد فلزی و بقایای ذوب فلز در این محوطه نکتهٔ باارزشی در مطالعات فلزکاری کهن در هزارهٔ چهارم پیش از میلاد در این منطقه خواهد بود. این منطقه فلزگری که کهن به نظر می‌رسد، از نوع محوطه‌های استقراری است که نمونه‌های مشابه آن در مناطق کوهپایه‌ای، و حاشیه‌ای دشت‌های حوزهٔ هلیل به تعداد زیاد شناسایی‌شده است [7]. این محوطه ازلحاظ وسعت کوچک است، اما با توجه به مواد منقول و غیرمنقولی که در آن یافت شده و به‌ویژه به لحاظ دورهٔ زمانی، در مطالعات باستان‌شناسی افزون بر پژوهش‌های فلزکاری کهن در حوزهٔ فرهنگی هلیل‌رود بسیار مهم است. در این مقاله، پس از توصیف محوطه و شواهد باستان‌شناختی به مطالعهٔ آزمایشگاهی شواهد فلزکاری به‌دست‌آمده و گردآوری‌شده از مواد پراکنده‌شده در سطح آن پرداخته‌شده است. در این مهم که این منطقه به‌عنوان یک محدودهٔ فلزگری و صنعتی مورداستفاده بوده است، شکی نیست اما چگونگی فرایند ذوب و این نکته که چه ماده‌ای و یا چه نوع سنگ معدنی در این پروسه استفاده می‌شده است، ازجمله موارد مهم در تحلیل ساختار صنعتی منطقه و نوع

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2028-03-23]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.2.1.7]
[DOI: 10.52547/jra.6.2.41]

فرایند متالورژی و نوع فلز مورد استحصال در این محوطه است.

ازجمله مهم‌ترین پرسش‌هایی که در این مقاله مطرح‌شده‌اند عبارت هستند از: در این محل چه محصول فلزی و از چه نوع سنگ معدن فلزی تولید می‌شده‌اند؟ شیوه‌های فرایند تولید این محصولات چگونه بوده است؟

۲. پیشینهٔ پژوهش

۲-۱. اهمیت مطالعات فلزگری باستانی مس در جنوب شرق ایران

در ارتباط باسابقه فعالیت‌های فن در راستای استحصال مس طبیعی به‌صورت مات فلزی یا فلز غیر آلیاژی تا ذوب و استحصال این کانی فلزی از ذخایر سولفیدی آن در جنوب غرب مطالعات زیادی صورت گرفته است [1,6]. مطالعه بر روی تکنیک فلزگری مس در این ناحیهٔ وسیع سبب درک ارتباط فرهنگی و فن در بین جوامع این ناحیهٔ جغرافیایی می‌شود [8]. این محدوده از جنوب شرق ایران از این بابت بسیار حائز اهمیت است که استفاده از مس طبیعی و خالص و همچنین ترکیبات آن به‌صورت آلیاژهای حاوی آرسنیک، انتیموان، سرب و نیکل در این محدوده، در پیش‌ازتاریخ این محدوده موردتوجه و استفاده قرارگرفته است [9-10]. تکنولوژی فلزگری در بسیاری از منابع بر اساس دو تئوری، موردبحث قرارگرفته‌اند: اینکه آیا فلزگری در بخش‌های مختلف فلات ایران به‌صورت اتفاقی و یا تجربی رخداده است. مطالعات گستردهٔ آرکئومتالورژیک شواهد بسیار زیادی را در ارتباط با استفادهٔ بهینه از یک فلز معین در یک منطقهٔ خاص، مشخص می‌کند که در بسیاری موارد به سنت‌های فلزگری در یک منطقهٔ خاص نیز معروف شده‌اند [4]. بر اساس مطالعات فلزگری کهن انجام‌شده، فلزگری قدیمی و استفاده از آلیاژها در دنیای قدیم در ناحیهٔ جنوب شرق ایران به‌طور اتفاقی انجام نمی‌گرفته است و در این خصوص آلیاژهای مس (آرسنیکی یا همراه با قلع) در قسمت‌هایی از آناتولی، آسیای مرکزی و ایران از قدیم شناخته‌شده و در کنار عطریات، نقره و چرم در حال دادوستد بودند [11]. در این راستا وجود اشیاء متعددی از انواع آلیاژهای مس (از نوع مس آرسنیکی و یا حاوی قلع) در منطقهٔ کرمان از دیرباز گزارش‌شده است و سوابق مطالعات معدن‌کاری در این ناحیه به مطالعات محققان آمریکایی و انگلیسی در دو دههٔ گذشته در این منطقه برمی‌گردد [12-14]. در مهروموم‌های ۱۹۷۰ میلادی نیز بررسی‌هایی توسط محققان انگلیسی انجام شد که همه بر متالورژی بسیار ارزشمندی بر پایهٔ مس در سرشاخه‌های هلیل‌رود یک‌صدا بودند [15].

در حال حاضر و در صنعت امروزی نیز بررسی‌های اولیه جهت برآورد پتانسیل‌های معدنی در یک ناحیه عموماً بر اساس شواهد به‌جای مانده از معدن‌کاری قدیم میسر است. بیش از ۹۵٪ از معادن فلزی کشور بر اساس شواهد سنتی به‌جای مانده از فعالیت‌های معدن‌کاری کشف، و سپس موردمطالعه سیستماتیک و درنهایت استخراج مواد معدنی قرارگرفته‌اند [16]. اساس این مطالعات بر شواهد برجای‌ماندهٔ ناشی از فعالیت‌های ذوب فلز، استحصال و استخراج سنگ مادر از کوه استوار است. ایجاد تونل‌های افقی و عمودی جهت استخراج و دستیابی هر چه‌بهتر به مادهٔ معدنی گواه این واقعیت است که علم معدن‌کاری از دیرباز با درایت خاصی انجام می‌شده است. سنگ‌های معدنی با برونزدهای متفاوت و مشخصهٔ خود چه از جهت رنگ و چه از جهت نوع کانی زایی و ساختار ایجادشده بر روی زمین همواره توجه کاوشگران و اقوام گذشته را به خود جلب می‌کرده‌اند. کانی‌های مسی یا کربنات‌های مس بارنگ سبز و آبی بر روی زمین رخنمون دارند و این شاید یکی از دلایلی است که از دیرباز توجه انسان را به مس جلب کرده است [17]. آنچه مهم است و شواهد بسیاری را دراین‌ارتباط به همراه دارد، این است که با شناسایی مس و استحصال این ماده، بشر وارد عصر نوینی از تاریخ شد، دوران مس-سنگی. استخراج فلزاتی نظیر مس، طلا، نقره، سرب و روی را به ایرانیان نسبت می‌دهند، و در این راستا مناطق بسیاری نیز اثبات‌کنندهٔ وجود معدن‌کاران و صنعتگران قدیمی در فلات ایران است [18]. در این خصوص، اولین آثاری که در اکثر مواقع به چشم می‌خورند، سرباره‌های ذوب فلز هستند. ازآنجایی‌که سرباره‌های ذوب مواد طبیعی نبوده، بلکه نتیجه و ماحصل دست بشر و تفکر صنعتگر قدیمی در جهت به آوری مواد خام در زمان خود بوده‌اند، بنابراین

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2028-03-23]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.2.1.7]
[DOI: 10.52547/jra.6.2.41]

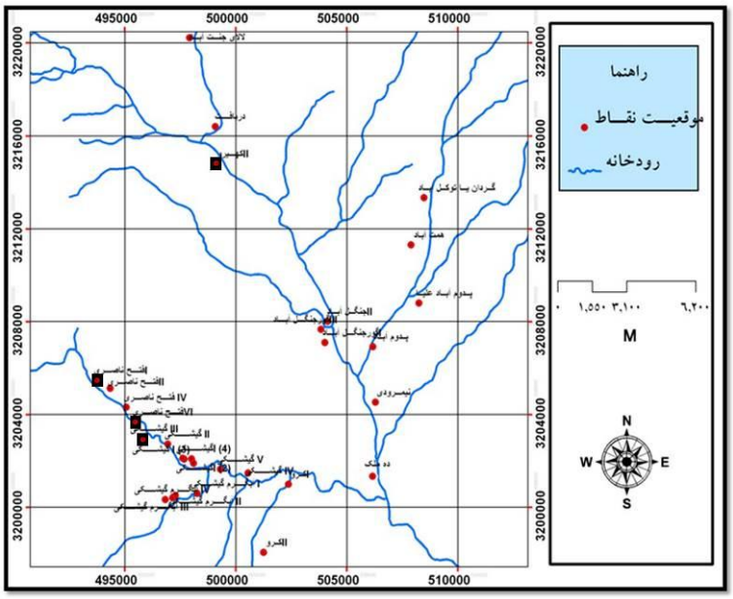
مطالعه بر روی آنان از پیچیدگی خاصی برخوردار است. فاکتورهای در نظر گرفته‌شده برای مطالعهٔ سرباره‌ها و محصولات به‌جای مانده از فرایند ذوب، تلفیقی هستند از مطالعات پتروگرافی، متالوگرافی و روش‌های آزمایشگاهی شیمی تر و شیمی دستگاهی و سنجش‌های حرارتی جهت تعیین شرایط و دمای ذوب. مطالعهٔ سیستماتیک و استفاده از روش‌های آزمایشگاهی بر روی سرباره‌های ذوب و تفاله‌های به‌جای مانده از فرایندهای ذوب، هم برای باستان‌شناسان و هم متخصصان مواد تاریخی مهم است. نکات کلیدی دراین‌ارتباط عبارت هستند از: ۱) شناخت فلز مورد استخراج و یا دیگر فلزات همراه با ماده معدنی در ناحیه به‌صورت اصلی (Major) یا فرعی (Trace) و روش‌های کانه‌آرایی آنان [19, 20]. ۲) روش‌های معدن‌کاری و استخراج فلز [19]. ۳) متالورژی به‌عنوان یک روش جهت‌دار جهت شناسایی تکنیک به‌کاررفته در دنیای قدیم در ناحیهٔ مذکور [8, 21].

ناحیهٔ موردمطالعه ازلحاظ نوع ذخایر معدنی در منطقه معدنی مس پورفیری کشور قرار می‌گیرد که آلتراسیون های متعددی را به‌خصوص در کل استان کرمان نشان می‌دهند [22]. بیشتر ذخایر این ناحیه از نوع ذخایر مس پورفیری هستند و تشکیلاتی مشابه با نوع کانسار مس سرچشمه را دارد. در اکثر نقاط مورد برداشت و مطالعه، کانی‌سازی مس درروی سطح زمین به‌صورت رگه‌هایی باضخامت متغیر، مالاکیت (دارای ۵۷٫۴٪ مس) و آزوریت (دارای ۵۵٫۳٪ مس) مشاهده می‌شود. آنچه مسلم است چنین کانی‌هایی به‌عنوان یک سنگ مادر جهت استخراج مس در دوران قدیم می‌توانستند مطرح شوند. اما متالورژی استخراجی از سنگ کربناته برای هزارهٔ چهارم از پیچیدگی زیادی برخوردار بوده، زیرا اکسید کردن و پختن کربنات سبب اکسید شدن برخی از ماده فلزی (مس) نیز می‌شده که در برخی موارد مستلزم کنترل دقیق صنعتگران ناحیه از فرایند استحصال بوده است [18]. آنچه می‌تواند به‌عنوان یک فاکتور مهم موردتوجه قرار گیرد این است که تمدن حاکم در ناحیه، از پتانسیل‌های منطقه جهت ایجاد حرارت و آتش مطلع بوده است و سنگ‌های سیلیکاته و کربناته در محل، مورد بهره‌برداری و آماده‌سازی قرار می‌گرفتند [23]. در بسیاری موارد شاید بتوان با توجه به پراکندگی و دوری مسافتی بسیار زیاد سراچه‌های معدنی از محل‌های ذوب از یکدیگر و ایزوله نبودن یا دور بودن آنان از استقرارهای انسانی، به یک تکنیک کوچ‌نشینی اشاره کرد [24]. محل مناسب برای ایجاد کورهٔ ذوب، سوخت مناسب، مقدار زیاد و فراوانی این مادهٔ سوختنی ازجمله فاکتورهایی بوده‌اند که برای تعیین محل ذوب سنگ‌های معدنی می‌توانسته‌اند مناسب باشند. درنهایت، لازم به ذکر است که در ارتباط با فلزگری باستانی علاوه بر فلز استحصال‌شده، شرایط ذوب و استحصال و شمش‌سازی آن نیز از موارد بسیار مهم بوده‌اند. منطقهٔ معدن‌کاری کهیرو II ازجمله جالب‌ترین مناطق معدنی مس شناخته‌شدهٔ باسابقهٔ قدیمی در ناحیه است. ذخیرهٔ اکثر معادن فلزی هم‌جوار، از نوع ذخایر مس پر عیار و دگرسانی است و بافت اصلی منطقه را کالکوسیت به همراه کالکوپیریت تشکیل می‌دهد.

۲-۲. توصیف محوطهٔ کهیرو II و منطقهٔ کاوش

طی بررسی باستان‌شناختی موردنظر در منطقهٔ قدرودخانه بیست و نه محوطهٔ متعلق به عصر مس‌سنگی (از اوایل تا اواخر این دوره) شناسایی‌شده است (نقشه ۱) که از میان آن‌ها تعداد چهار مورد که در نقشه با مربع‌های سیاه‌رنگ مشخص شده‌اند، سابقهٔ تاریخی قدیمی‌تر و به اوایل تا اواسط این دوران تعلق دارند [25]. تقریباً تمام استقرارهای شناسایی‌شده در این منطقه را می‌توان با توجه به گسترش و پراکندگی قابل‌ملاحظهٔ مواد فرهنگی در سطحی وسیع، شیوهٔ پراکنش مواد فرهنگی بر سطح و تُنُک بودن این مواد و عدم وجود آثار معماری مشخص، با زندگی کوچ‌نشینی پیوند داد. به‌ویژه که امروزه نیز این شیوه در منطقهٔ موردبررسی همچنان شیوهٔ غالب و در بخش‌های بزرگی از آن تنها شیوهٔ زندگی است [25]. هرچند برخی از استقرارها ـ مانند کروI و گُردان ـ شرایط متفاوتی دارند و به نظر می‌رسد که نوعی زندگی یکجانشینی در آن‌ها وجود داشته است [25]. محوطهٔ کهیرو II در نگاه نخست و به لحاظ شواهد بسیار ضعیف وجود معماری، محوطه‌ای مرتبط بازندگی کوچ‌نشینی به

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2028-03-13]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.2.1.7]
[DOI: 10.52547/jra.6.2.41]



نقشه ۱: ۲۹محوطه‌های مکشوفه در منطقهٔ متعلق به عصر مس‌سنگی. از میان آن‌ها تعداد چهار مورد که با مربع‌های سیاه‌رنگ نشان داده‌شده‌اند، قدیمی‌تر هستند و به اوایل و اواسط این دوران تعلق دارند.

Map 1. 29 Excavated areas in Kahiro era from chalcolitic. Among them the oldest one illustrate as black circle

به شمار می‌رود. نزدیک‌ترین مرکز شهری به منطقهٔ موردبررسی، شهر رابر است که در فاصلهٔ حدود بیست کیلومتری شمال غرب منطقه واقع شده است. طی این فصل بررسی تعداد هفتاد و یک اثر باستانی اعم از محوطه، گورستان‌های پراکندهٔ متعلق به دوره‌های تاریخی، محوطه‌های فلزکاری کهن و نقش کنده، شناسایی شدند. آثار یادشده، دوره‌های مس‌سنگی تا سده‌های متأخر هجری را در برمی‌گیرند [26]. محوطهٔ کهیروII در فاصلهٔ حدود ششصد متری غرب روستایی کوچک به همین نام قرارگرفته و یک جادهٔ خاکی ـ که به روستاهای عشایری منتهی می‌شود ـ از کنار آن می‌گذرد (شکل ۱). بستر رودخانه‌ای به نام شصت پیچ در فاصلهٔ حدود صد متری آن واقع‌شده است که پس از طی مسافت کوتاهی پس‌ازآن با بستر رودخانهٔ هلیل‌رود تلاقی می‌کند. روستای کهیرو بر ساحل غربی رودخانهٔ هلیل رود قرارگرفته است و جادهٔ مهمی که منطقهٔ قدرودخانه را به اسفندقه و جیرفت متصل می‌کند، از ساحل غربی رودخانه می‌گذرد. این جاده در حال حاضر نیز به‌عنوان یک ایل راه بزرگ، مورداستفادهٔ عشایر منطقه است.

نظر می‌رسد، زیرا مواد فرهنگی نسبتاً اندکی بر سطح آن پراکنده است، حفاری‌های غیرمجاز، دلیلی بر وجود لایه‌های باستان‌شناختی در عمق ارائه نمی‌دهند اما پس از بررسی دقیق‌تر، به‌ویژه توجه به سوختگی خاک، وجود بوته‌های مربوط به فلزکاری و سرباره‌های ذوب مشاهده می‌شوند که دلیلی هستند بر این مهم که محوطهٔ فوق یک کارگاه صنعتی و تولید فلز بوده است. چنین محوطه‌ای، به‌ویژه، باسابقهٔ تاریخی اوایل تا اواسط عصر مس‌سنگی ازنظر زمانی بسیار منحصربه‌فرد است.

این محوطه طی بررسی باستان‌شناختی منطقهٔ قدرودخانه از توابع شهرستان رابر، در سال ۱۳۹۰ شناسایی شد. بررسی یادشده در ادامهٔ بررسی‌های موسوم به شناسایی سرشاخه‌های هلیل‌رود و درواقع به‌عنوان چهارمین فصل این بررسی‌ها صورت پذیرفت [26]. سه فصل نخست (شامل بخش‌هایی از شهرستان‌های بافت و رابر) به سرپرستی حسین توفیقیان در مهروموم‌های ۱۳۸۳ و ۱۳۹۲ انجام شدند (منتشرنشده). منطقهٔ قدرودخانه در سمت جنوب شرق ایران و در استان کرمان قرارگرفته است و ازنظر تقسیمات کشوری، بخشی از شهرستان رابر

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2023-03-13]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.2.1.7]
[DOI: 10.52547/jra.6.2.41]



شکل ۱: محوطهٔ کهیرو II در فاصلهٔ حدود ششصد متری غرب روستایی به همین نام و در کنار یک جادهٔ خاکی که از اطراف روستاهای عشایری می‌گذرد، قرار دارد
Fig. 1: Kahiro II, located in 600 in west of Kahiro village close to an old migratory road

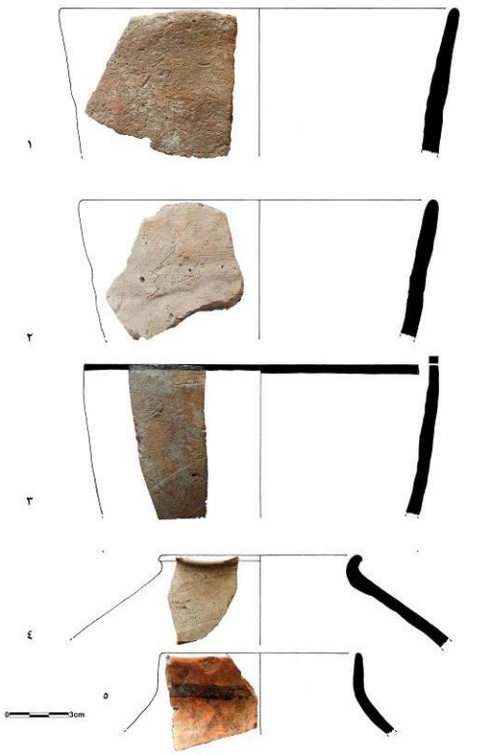
ابعاد این محوطه که در ارتفاع ۱۷۶۰ متری از سطح دریا قرارگرفته، در حدود ۵۰×۱۰۰ متر (با احتساب حریم) است. این محوطه بر دامنهٔ جنوبی یک‌رشته تپهٔ کم ارتفاع واقع است و از جوانب دیگر به دشت و زمین‌های هموار منتهی می‌شود. در سطح این محوطه چندین چالهٔ حفاری غیرمجاز گزارش‌شده که برخی از آن‌ها عمق زیادی دارند اما بیش‌تر آن‌ها چالهٔ کم‌عمقی هستند و تنها خاک سطحی را کنار زده‌اند. فعالیت‌های معدن‌کاری جدید سبب اختلاط در پراکندگی سرباره‌ها شده و سرباره‌ها به‌صورت توده‌های بسیار حجیم در گوشه و کنار منطقه به‌صورت بسیار پراکنده شده‌اند (شکل ۲). در این محوطه همچنین شمار زیادی قطعات گلی و سنگی به‌شدت حرارت دیده مشاهده شده که بر سطح خارجی آن‌ها آثار مس ذوب‌شده و همچنین اکسید مس و مواد مذاب مشاهده‌شده است.

چنین قطعاتی به‌احتمال‌زیاد قطعات باقی‌مانده از دیوارهٔ کوره و یا قسمت‌های انتهایی لوله‌های دم کوره بودند که با مذاب داغ و سرباره در تماس قرار داشتند [27, 28]. این تکه‌های پخته‌شده در اطراف یک برآمدگی کوتاه که تقریباً در مرکز محوطه واقع است پراکنده بودند که با توجه به خاک سرخ‌رنگ و حرارت دیدهٔ آن و نیز وجود این قطعه‌ها، به‌احتمال‌زیاد بقایای یک کورهٔ ذوب فلز بوده‌اند (شکل ۳ بالا و سمت چپ). وجود یک سنگ گرانیتی با گودی کم‌عمقی در وسط آن نیز به‌احتمال‌زیاد، بی‌ارتباط با این فعالیت‌ها نیست (شکل ۳ پایین و سمت چپ). مشابه چنین سنگ‌هایی که وابسته به قراین‌های مرتبط با حرارت یا آتش هستند در معادن شمال فلات مرکزی ایران نیز شناسایی‌شده‌اند [17, 29]. در اطراف این کوره، تجمع خرده‌های قطعات سرباره مشاهده شد (شکل ۴).



شکل ۲: فعالیت‌های معدن‌کاری به‌واسطهٔ پراکندگی سرباره‌ها در منطقه
Fig. 2: Archaeometallurgical activities and the scattering of the slags on the ground

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2023-03-13]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.2.1.7]
[DOI: 10.52547/jra.6.2.41]



شکل ۵: نمونه‌های شاخص سفالین از سطح محوطه که به کار گرفته‌شده است؛ این نمونه سفال‌ها طراحی شدند و مورد مقایسه‌های گونهٔ شناختی قرار گرفتند

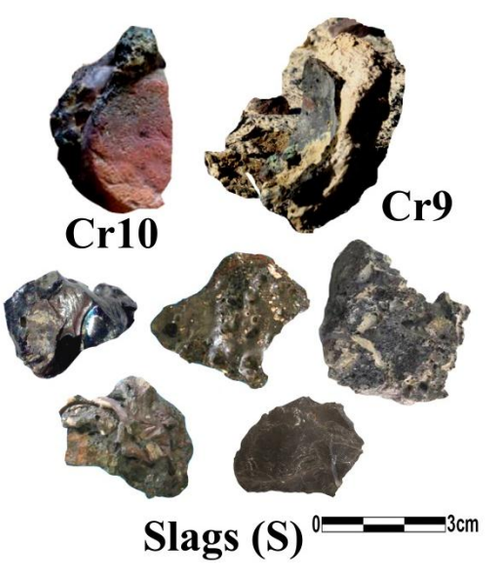
Fig. 5: Typical ceramic samples for typological and structural modifications

۲-۳. تاریخ‌گذاری محوطه

برخلاف محوطه‌های هم‌دوره ـ چه در منطقهٔ موردبررسی و چه در سراسر حوزهٔ فرهنگی هلیل‌رود ـ که اغلب پراکنش متراکم سفالی دارند، بر سطح محوطهٔ کهیروII، سفال چندانی مشاهده نشد. با توجه به این نکته، روش گردآوری نمونه‌های شاخص از سطح این محوطه به کار گرفته شد؛ این نمونه سفال‌ها طراحی و عکاسی شدند و مورد مقایسه‌های گونهٔ شناختی قرار گرفتند (شکل ۵). با توجه به مقایسه‌های صورت گرفته، به‌ویژه با دو محوطهٔ کاوش شدهٔ تپه یحیی و تل ابلیس، می‌توان این محوطه را به اوایل و اواسط عصر مس و سنگ تاریخ‌گذاری کرد [15].

۳. معرفی نمونه‌ها و روش مطالعه

تعداد دَه نمونه حاوی دو نمونه بوته و هشت نمونه سرباره از محوطهٔ کهیرو II موردبررسی میکروسکپی و شیمیایی قرار گرفتند. بوته‌ها با ساختار منحنی شکل و چسبیده بودن سرباره بر روی بافت داخلی آن مشاهده‌شده‌اند. دیواره‌های کوره در اثر حرارت زیاد در برخی موارد به رنگ قرمز آشکارشده‌اند (شکل ۶). حالت موجی بر روی سرباره نشان از غلظت بالای سرباره و به‌احتمال‌زیاد وجود درصد سیلیس بالای آن و سرعت سرد شدن کند مذاب دارد [39]. ریخته‌گری به یک سمت انجام می‌شده و فقط برای یک‌بار، زیرا در هیچ قطعه سرباره دو طرف قطعه بافت جریانی را نشان نمی‌دهد بلکه فقط در یک‌طرف دیده می‌شود (سرباره‌ها حالت رسوب‌گذاری لایه‌ای را ندارند). این مهم همچنین می‌تواند دلیلی بر این باشد که در منطقهٔ موردمطالعه، فرایند ذوب مجدد سرباره جهت خالص‌سازی فلز نیز استفاده نمی‌شده است [30]. مطالعات میکروسکپی در سرباره‌های منطقهٔ کهیرو II باهدف شناسایی آنالیزهای شیمیایی با فازهای کریستالین و میکروسکپی به وجود آمده در بافت سرباره انجام شد. مطالعات فلزشناسی و کانی‌شناسی سرباره‌ها و یک نمونه بوتهٔ ذوب باهدف شناسایی فازهای پدیدار شده و پاراژنز آنان با استفاده از روش میکروسکوپ پلاریزان در دوحالت نور عبوری و منعکسه به‌وسیله Olympus B51 در



شکل ۶: برخی نمونه‌های شاخص سرباره و بوته‌های ذوب در محوطه که موردمطالعه قرار گرفتند

Fig. 6: Typical slags and crucibles from the studied region

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2028-03-23]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.2.1.7]
[DOI: 10.52547/jra.6.2.41]

دانشگاه زیگن آلمان انجام شد. هدف از این روش درک و بررسی توالی کانی‌های به وجود آمده و ترکیبات اصلی در سرباره بوده است. ترکیب شیمیایی کلی نمونه‌ها توسط آنالیز عنصری فلورسانس اشعهٔ ایکس بر اساس طول‌موج (WXRF) توسط دستگاه Spectra Plus همچنین در دانشگاه زیگن آلمان انجام شد. مطالعات انجام‌شده در این پژوهش، تنها بر اساس روش‌های شناسایی فازی میکروسکپی و آنالیز شیمیایی مواد است. با توجه به حجم کم نمونه‌های در دسترس، امکان انجام مطالعات تکمیلی مقدور نبود.

٤. نتایج و بحث

٤-١. نتایج مطالعات کانی‌شناسی بر روی بوته های ذوب از محوطهٔ کهیرو II

تعدادی سرباره‌های ذوب فلز و بوته‌های ریخته‌گری و بقایای فلزگری مشاهده شد که برحسب نوع مواد مکشوفه حاوی تعداد متعددی سرباره و قطعات بوته‌های ذوب فلز هستند. سئوال اصلی موردبحث در این بخش از مقاله نیز مربوط به بررسی نوع فلز و تکنولوژی فلزگری در محوطهٔ کهیرو است. بر اساس فازهای مشخص‌شده، ترکیبات اصلی شیمیایی (Major Components) و کانی‌شناسی در سرباره‌های ذوب، شامل حضور فازهای کریستالین از گروه پیروکسن‌ها و اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن بوده است. این در حالی است که در برخی از سرباره‌ها، آهن به‌صورت Fe_2O_3 نیز بر روی سطح آن ظاهر شده که نشان از اکسیداسیون سطحی نمونه دارد و به‌صورت ثانویه در اثر مرور زمان تشکیل شده است [31, 32]. وجود فازهای فلزی و همچنین کمپلکس سولفیدی در سرباره بیشتر بیانگر یک شیوهٔ مشخص است تا یک استثنا و یا یک مورد غیرعادی [33, 34].

به‌طورکلی در فرایند فلزگری مس در هزاره‌های پیشین باید به دو نوع استحصال مس با توجه به سنگ اولیه توجه داشت: استحصال مس از ترکیبات سنگ‌های اکسیدی یا کربناته و یا از سولفیدهای آن بوده است [27]. استحصال مس از مس اکسیدی در یک مرحله یعنی تنها احیاء اکسید مس و تولید مس صورت می‌گرفته است و استحصال مس از ترکیبات سولفیدی آن در دو مرحلهٔ تشویه سنگ معدن سولفید مس و به دست آوردن ترکیبات اکسیدی فلز و سپس احیاء آن در مرحلهٔ بعدی صورت می‌گرفته است [11, 13].

ازجمله اثرات بسیار مهم در این محدوده، حضور تعداد محدودی بوته‌های ذوب فلز بوده است. قطعات بوته‌های ذوب یافت شده در این محدوده نیز نشان از ذوب و ریخته‌گری مس دارند [35, 36]. بوته‌های ذوب ازلحاظ مواد سازنده و خصلت ظاهری دارای خصوصیات سرامیکی هستند اما با توجه به نوع کاربری آنان در فرایندهای ذوب و ریخته‌گری به‌عنوان موادی با خصلت چندگانه و میان ماده‌ای که بافت آن درجهٔ حرارت‌های بالا را متحمل بوده، مطرح می‌شوند. بوته‌های ذوب، اغلب بدنهٔ سرامیکی و بافت غنی از فلز دارند که در هنگام عملیات ذوب، ریخته‌گری و یا خالص‌سازی در درون بافت آن تجمع یافته‌اند [30]. بدنهٔ بوته‌های یافت شده از منطقهٔ کهیرو II، عمدتاً از سرامیک‌های رسی با آهک بالا با بافت متراکم و کانی‌های آذرین (کوارتز، فلدسپات، پلاژیوکلاز) که به‌عنوان تمپر در بافت آن‌ها استفاده‌شده، تشکیل‌شده‌اند [37] (شکل ۷).

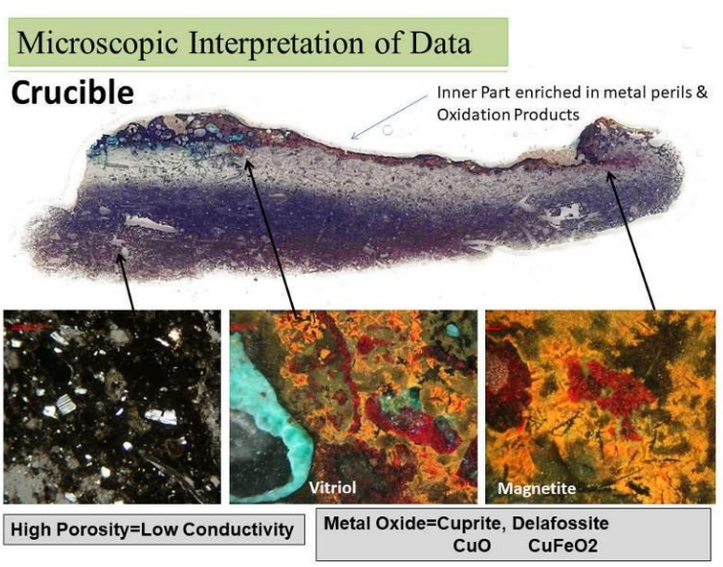
ترکیبات کانی‌شناسی ناشی از ذوب در ناحیهٔ داخلی بوته تجمع داشته که شامل کانی‌های اکسیدی مس همچون کوپریت (Cu_2O) و دلافوسیت ($CuFeO_2$) است. کوپریت با توجه به ساختار کریستالین و ایزومتریک کوبیک خود به‌صورت یک‌فاز کاملاً ایزوتروپ در بافت بوته‌ها نشان داده‌شده است. کوپریت خاصیت انعکاس داخلی بالایی دارد و به همین جهت در حوزهٔ تاریکی میکروسکوپ بارنگ قرمز پررنگی ظاهر می‌شود [7]. کوپیریت اولین فازی است که پس از اکسیداسیون فلز خالص مس آشکار می‌شود. درصورتی‌که کوپریت از استحصال دومرحله‌ای مس سولفیدی (تشویه سولفید و سپس احیاء اکسید) منتج شده باشد باید لایه‌های نازک ترکیبات متفاوت سولفید مس (بارنگ آبی یا خاکستری) در کنار آن و یا در مناطق داخلی آن مشاهده شوند، اما همان‌طور که در شکل ۷ قابل‌مشاهده است این ترکیبات در داخل بافت نمونه مشاهده نمی‌شود که دلیلی بر اکسید

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2028-03-23]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.2.1.7]
[DOI: 10.52547/jra.6.2.41]

شدن مس در درون بافت آن است [31, 38]. بافت کوپریتی با اکسیدهای آهنی و دلافوسیت به رنگ زرد و نارنجی محاصره شده است.

کوپریت در طبیعت یا به‌صورت اولیه در شرایط اکسیداسیون با فشار اکسیژن بالا بلافاصله بعد از کالکوسیت (Cu_2S) به وجود می‌آید که این حالتی است که مس فلزی یا مات مس در سیستم دیده نمی‌شود ($Cu_2S + 3/2\ O_2 \rightarrow Cu_2O + SO_2\uparrow$). این مورد در داخل بوته‌های ذوب کهیرو II قابل‌مشاهده است و یا در قالب یک‌فاز ثانویه به‌صورت یک‌لایهٔ مرزی در کنار مس فلزی دیده می‌شود که بدین معنی است که کوپریت در حین ذوب به وجود نیامده بلکه بعد از عملیات ذوب تشکیل شده است. علت تشکیل کوپریت ثانویه به این دلیل است که دو فاز کالکوسیت و کوپریت ازلحاظ ترمودینامیکی بر اساس رابطهٔ روبرو در کنار یکدیگر پایدار نیستند ($Cu_2S + 2CuO \rightarrow 4Cu + SO_2\uparrow$) [39-40]. ولی بر همین اساس باید در داخل بافت نمونه، مس خالص به‌صورت قطرات مسی مشخص شود که این مورد در نمونه‌های کهیرو دیده نمی‌شود، پس ثانویه بودن آن کاملاً رد است. دلافوسیت از دیگر فازهای ثانویه است که از اکسید شدن مس به همراه کالکوپیریت تحت فشار اکسیژن بالا پدید می‌آید. این کانی در اثر تفریق و سرد شدن سریع به‌صورت یوتکتیک با کوپریت نمایان می‌شود. وجود کوپیریت و دلافوسیت با یکدیگر در یک بافت زمینه، مشخصهٔ اکسیداسیون سریع یا سوپر اکسیداسیون مس است [39]. البته وجود قطرات مس در سرباره‌های ذوب باوجود آنان در بوتهٔ ذوب تفاوت دارد و در ادامه، قابل‌تحلیل است.

وجود فازهای اکسیدی نظیر کوپریت و دلافوسیت در مجاورت یکدیگر حاکی از فرایند اکسیداسیون خیلی سریع و یا انجام فرایند فلزکاری تحت تأثیر یک محیط با فشار اکسیژن بالا بوده است [27, 42]. این امر حتی سبب تولید مالاکیت و ویتریول (نوعی سولفات مس) در سطوح خارجی بوته به‌واسطهٔ اکسیداسیون سریع در یک محیط قلیایی شده است [43]. وجود کانی‌های اکسیدی به‌عنوان بقایای ذوب در کف بوته حاکی از وجود ذوب مس اکسیدی در منطقه است زیرا بقایای تجمع یافتهٔ ترکیبات اکسیدی در کف بوته عمدتاً بقایای فرایند ناقص استحصال و یا ریخته‌گری هستند و سبب تشکیل مس اکسیدی در آخرین مرحلهٔ ریخته‌گری می‌شوند. همچنین با توجه به این نکته که کانی دلافوسیت یکی از مهم‌ترین منابع تولید مس با قریب بر ۶۵٪ مس در ترکیب شیمیایی خود هستند، چنین نتیجه می‌شود که این بوته‌ها جهت فرایند تولید شمش مس از مس اکسیدی مورداستفاده



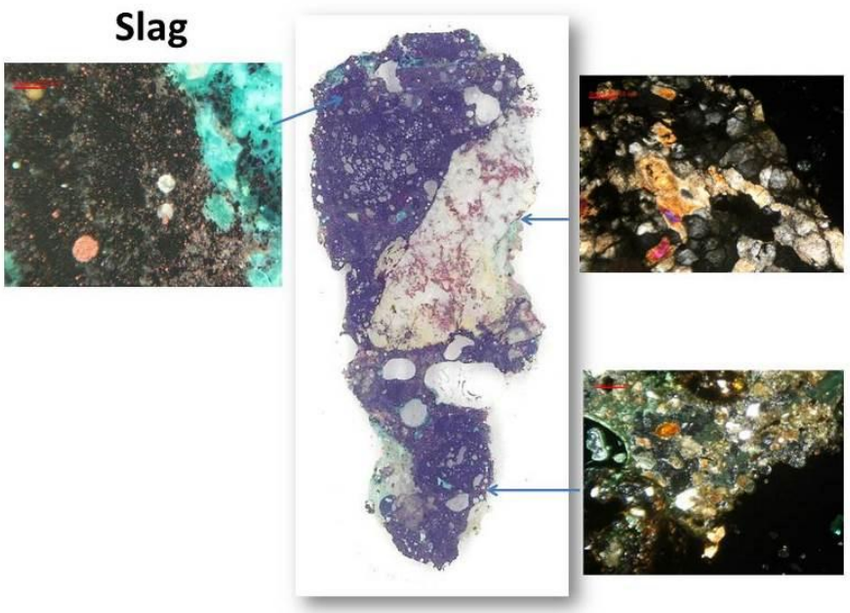
شکل ۷: یکی از قطعات بوتهٔ ذوب از منطقه کهیرو II از نمای عرضی به همراه تمامی زون‌ها و مواد تشکیل‌دهندهٔ آن
Fig. 7: One crucible from Kahiro and the cross section of studied objects with all mineralogical constituents

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2023-03-13]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.2.1.7]
[DOI: 10.52547/jra.6.2.41]

قرارگرفته‌اند. این مهم رابطهٔ مستقیمی بین فشار اکسیژن و ترکیب کانی‌شناسی بوته دارد. میزان اکسیداسیون کوپریت در حوزهٔ تاریکی مشاهدات رابطهٔ مستقیم با میزان مس اکسیدشده دارد و انعکاس رنگ قرمز بسیار پررنگ در لایه‌های کوپریتی حاکی از میزان بالای مس اکسیدشده است [44]. وجود دلافوسیت نیز تأکیدی بر موارد ذکرشده در فوق است. این فاز در حالتی که فشار اکسیژن بسیار بالا است، به‌خصوص در بوته‌هایی که دارای سطح باز و در تماس با هوا هستند، تولید می‌شود.

سرباره‌های مکشوفه از این ناحیه نیز موردبررسی میکروسکپی قرار گرفتند و در بافت داخلی آنان قطرات مس که در زمینهٔ کریستالین غنی از سیلیس قرار دارند، شناسایی‌شده‌اند (شکل ۸). ساختار سیلیسی سرباره ترکیبات فایالیتی ندارند و به‌صورت پراکنده تجمعات پیروکسنی در داخل بافت شیشه‌ای سرباره مشاهده می‌شود. از این بابت می‌توانند جهت تخمین درجه حرارت ذوب مفید واقع شوند [45]. وجود قطرات فلزی مس در زمینهٔ سیلیسی دلیلی بر درجهٔ حرارت فرایند در حدود ۹۸۰ درجه سانتی‌گراد است که قابل‌مقایسه با مناطق دیگر فلزگری کهن در فلات ایران است [46, 47]. پیروکسن کانی است که در شرایطی به وجود می‌آید که مقادیر CaO و FeO در محیط ذوب بالا باشد که این مهم در منطقهٔ کهیرو قابل‌مشاهده است. افزایش میزان Al_2O_3 و SiO_2 نیز به‌عنوان موادی که به‌صورت کمک‌ذوب در داخل مذاب نقش دارند، جهت پایین آوردن دمای ذوب نقش مناسبی را ایفا کرده است. این ترکیبات به‌صورت کاملاً اتفاقی از ساختارهای معماری کوره‌ها و استفاده از سنگ‌های گرانیتی، به محیط ذوب واردشده و فرایند ذوب را به‌گونه‌ای در درجه حرارت‌های پایین‌تر کنترل کرده‌اند [30, 48].

از طرف دیگر وجود قطرات خالص مسی در بافت سیلیکاته سرباره نشان از استفاده از کربنات و یا اکسید این فلز و احیای مستقیم آن در کوره دارد [49]. این مهم، به این دلیل مورد اهمیت است که در مطالعات میکروسکوپی سرباره‌ها هیچ نشانه‌ای از ترکیبات سولفیدی مشاهده نمی‌کنیم [17]. عدم وجود سولفید از این بُعد حائز اهمیت است که در استحصال مس سولفیدی همواره مقداری سولفید در منطقهٔ تشویه باقی می‌ماند که این مهم در استحصال فلز از ترکیبات اکسیدی آن دیده نمی‌شود.



شکل ۸: یکی از سرباره‌های موردمطالعه در مقطع عرضی کامل و توضیح قسمت‌های متفاوت آن در مقاطع نازک نمونه
Fig. 8: One typical copper slag from Kahiro II in cross section and all discussion of phase constituents

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2022-03-13]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.2.1.7]
[DOI: 10.52547/jra.6.2.41]

٤-٢. نتایج مطالعات شیمیایی بر روی بوته‌های ذوب از محوطهٔ کهیرو

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از روش فلورسانس اشعهٔ ایکس، نمونه‌های منطقه ترکیبات اصلی و فرعی مشخصی دارند که در جدول ۱ نشان داده‌شده است. ترکیب شیمیایی سرباره‌ها با فازهای کریستالین شناسایی‌شده هم‌خوانی دارد و نشانگر وجود ترکیباتی شامل، FeO ،MnO، Al_2O_3، P_2O_5 و آلکالی اکسیدها است. این عناصر بسته به نوع تکنیک و خصوصیات مادهٔ خام تولید شده و ازاین‌رو به ترکیبات متغیر داخل بافت سرباره نیز گفته می‌شوند (Variable Component).

همان‌طور که در جدول دیده می‌شود، نمونه‌های مورد آزمایش به‌جهت دارا بودن درصد کلسیم بالا در سرباره‌ها و در بوته‌ها با یکدیگر مشابهت دارند و در بوته‌های ذوب تا حدودی به دلیل استفاده از مواد اولیه و کربناته بیشتر است. کلسیم در سرباره‌های ذوب، مادهٔ اصلی کمک‌کننده در کاهش درجهٔ حرارت ذوب است (کمک‌ذوب) و همچنین از ترکیباتی محسوب می‌شود که به تشکیل پیروکسن‌های کلسیم‌دار، همان‌طور که در مبحث قبلی اشاره شد، کمک می‌کند. این ماده همچنین سبب تشکیل فاز کریستالین سیلیکاته به‌نام کیرش‌اشتاینیت (Kirschsteinit) می‌شود که در مقادیر بسیار جزئی در زیر میکروسکوپ مورد شناسایی قرار گرفت که از مشخصات مهم این فاز، وجود منگز در ساختار آن است. وجود درصد نسبتاً ثابت منگنز در نمونه‌های مطالعه شده در منطقهٔ کهیرو II نیز گواهی بر تشکیل این فاز است [48, 50]. فازهای سیلیکاتی در نمونه‌های مورد آزمایش سرباره‌ها نسبتاً بالا است و سبب ایجاد بافت شیشه‌ای در بافت سرباره شده است. مقادیر دی‌اکسید تیتانیم در این مواد بسیار مشابه است و نشان از وجود این ماده به نسبت تقریباً یکسان در درون ساختار آهن موجود در بافت کانی‌سازی منطقه به‌صورت مخلوط جانشینی دارد (Exsolution). وجود ترکیبات آهنی با درصد یکسان و نه‌چندان بالا در این نمونه‌ها حاکی از استفاده از یک ترکیب آهن‌دار به همراه سنگ معدنی مس (مالاکیت و کوپریت) جهت تولید و استحصال مس است که این ترکیب آهن‌دار می‌تواند از ترکیبات همراه کانسارهای مسی مانند هماتیت یا لیمونیت باشد.

ترکیبات فسفاته نیز از اهمیت بالایی برخوردار هستند. اگرچه تغییرات آنان در بافت سرباره‌ها و بوته‌ها زیاد نیست، قابل‌اغماض هم نیست. ترکیبات فسفردار، یافتن منابع معدنی بر پایهٔ فسفر و یا آلتراسیون‌های رودخانه‌ای جهت استحصال مس را تسهیل می‌کنند [51].

بر اساس نتایج ارائه‌شده در جدول ۱، مقادیر بالای سیلیکات و مقادیر نسبتاً یکسان آهن از منشأ سنگ معدنی و یا به‌عنوان کمک‌ذوب در داخل ترکیبات مورد

جدول ۱: نتایج ترکیب شیمیایی کلی نمونه‌ها به‌صورت درصد وزنی
Table 1: Chemical composition of the samples as bulk in W%.

Sample	MgO	Al2O3	SiO2	P2O5	K2O	CaO	FeO	TiO2	MnO	CuO	SrO
S.1	0.8	3	20.8	4.4	0.14	17.8	1.11	0.11	0.18	51.2	0.041
S.2	1.7	4.7	21.6	5.2	0.22	19.1	1.02	0.14	0.41	45.3	0.12
S.3	1.7	15.7	30.1	0.2	0.71	11.9	1.66	0.21	4.7	31.8	0.25
S.4	1.3	5.5	25.3	2.8	0.31	16.6	1.33	0.13	0.43	46.1	0.059
S.5	1.8	3.8	1806	3.7	0.31	17.2	1.45	0.11	0.38	52.7	0.051
S.6	3.6	19.1	18.9	0.18	0.75	10.3	0.98	0.17	1.8	43.5	0.12
S.7	1.4	3.6	20.6	3.3	0.55	12.4	1.01	0.19	0.39	55.9	0.12
S.8	1.7	5.7	28.9	3.3	0.2	14.7	1.87	0.1	0.46	57.6	0.09
Cr.9	2.1	3.7	14.7	4	0.18	17.6	2.1	0.1	0.3	54.8	0.09
Cr.10	1.4	2.3	13.7	2.8	0.25	19.3	3.5	0.14	0.72	39.7	0.073

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2023-03-13]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.2.1.7]
[DOI: 10.52547/jra.6.2.41]

آزمایش، نسبت داده می‌شوند. مطالعهٔ میکروسکپی قطرات فلزی در بافت سرباره‌ها و دارا بودن هاله‌های قرمزرنگ در کناره‌های آنان، نشان از وجود این عنصر در فرایند ذوب فلز در این ناحیه دارد. نکتهٔ قابل‌توجه در این مواد، نبودن ترکیبات آرسنیکی و یا قلع است که خود دلیلی بر استفاده از فلز خام (Unalloyed Copper Extraction) است و نه آلیاژسازی در این منطقه. با توجه به میزان بالای نسبت SiO_2/Al_2O_3، به نظر می‌رسد شن و ماسهٔ رودخانه‌ای، به مخلوط اضافه شده تا خواص بهینه‌ای را جهت جداسازی بهتر فلز ذوب‌شده از ترکیبات آهنی واردشده به مخلوط ذوب‌شده، ایجاد کند [52]. چنین تأثیری را همچنین اکسید کلسیم می‌تواند به‌عنوان یک کمک‌ذوب اضافه‌شده از ترکیبات کربناته در منطقه داشته باشد (به عنوان مثال استفاده از سنگ معدن کربناته نظیر مالاکیت). استفاده از سنگ معدن مالاکیتی با توجه به مقادیر بالای کربنات و مقادیر ثابت کم آهن در این منطقه می‌تواند معرفی شود [53, 54]. همچنین در ارتباط با نمونه‌های Cr9 و Cr10 که متعلق به بوته‌های ذوب هستند باید چنین اشاره کرد که ترکیبات سازنده این بوته‌ها بیشتر از مواد اضافه‌شدهٔ گرانیتی برخوردار است که آهن نسبتاً بالایی به دلیل اکسیدسیون سطحی دارد. وجود استرانسیم در این ترکیبات، حتی با توجه به مقادیر کم، ناشی از وجود مقادیر بالای پلاژیوکلاز است زیرا Sr در ساختار پلاژیوکلاز به‌صورت جانشینی همواره یافت می‌شود [37]. بر اساس مطالعات انجام‌شده و شیمی سرباره‌ها و بوته‌های ذوب چنین به نظر می‌رسد که پروسهٔ انجام‌شده در منطقهٔ کهیرو II تولید مس شمش و نسبتاً خالص در داخل بوته بوده که از ترکیبات کربناته و اکسیدی مس بهره می‌برده است. حضور قطرات فلزی مس در بافت سیلیکاته سرباره‌ها دلیلی بر همین موضوع است. نبودن آرسنیک و قلع در این ترکیبات، مشخصهٔ استفاده از ترکیبات کربناته مس است، زیرا آرسنیک دارای خصلت جایگزینی در ساختار مالاکیت نیست و نمی‌تواند پس از استحصال در داخل گلوله‌های مسی نیز حضورداشته باشد. وجود آرسنیک یا قلع در داخل مس سبب ایجاد رنگ صورتی در مس می‌شود که در این نمونه‌ها اصلاً مشاهده نمی‌شود. تمامی موارد اشاره‌شده در بالا حاکی از این مهم است که مس از یک ترکیب مالاکیتی و در اثر احیاء آن به‌دست‌آمده است. ترکیبات مالاکیتی در منطقه در داخل سنگ‌های گرانیتی موجود هستند و به همین دلیل دارای نسبت یکسان در آن، هستند. همچنین از همین تشکیلات جهت درست کردن دیواره‌های کوره و مواد افزودنی در بوته‌های ذوب استفاده‌شده است. درصد زیاد کلسیم و آلومینیوم و مقادیر یکسان آهن گواه چنین تحلیلی در این پژوهش است.

۵. نتیجه‌گیری

بر اساس پژوهش صورت گرفته تعدادی از بوته‌های ذوب و سرباره‌های ذوب فلز به‌دست‌آمده از منطقه کهیرو II در جیرفت، موردمطالعه و بررسی قرار گرفتند. محوطهٔ کهیرو II با توجه به مقایسه‌های گونه‌شناختی سفالی، به اوایل تا اواسط عصر مس سنگ تعلق دارد. در این محوطه، شواهدی از یک فعالیت صنعتی وجود دارد که آن را در میان محوطه‌های شناسایی‌شدهٔ هم‌زمان خود در منطقهٔ قدرودخانه منحصربه‌فرد می‌کند؛ شواهدی در ارتباط با ذوب مس در این منطقه و در بافت محلی و در میان محوطه‌های شناسایی‌شدهٔ هم‌زمان که عموماً با نوعی زندگی مبتنی بر کوچ روی مرتبط هستند، پرسش‌های زیادی را در ارتباط باسنت فلزگری در منطقه مطرح می‌کند که جز با کاوش‌های باستان‌شناسی امکان پاسخ‌گویی به آن‌ها میسر نیست. فلزکاری منطقه بر اساس استفادهٔ از کربنات‌های مس (مالاکیت) صورت گرفته و معادن آن در حال حاضر نامشخص است و این شیوه جزو شیوه‌های احیای مس از کربنات‌های در دسترس آن، به طریق مستقیم است. در فرایند استحصال فلز در این منطقه از ذخایر مس اکسیدی استفاده‌شده است، زیرا در هیچ‌یک از ساختارهای میکروسکپی تجمع سولفیدی در بافت شیشه‌ای سرباره و بوته دیده نمی‌شود. وجود مقادیر یکسان آهن و کلسیم و منیزیم حاکی از استفاده از ذخایر یکسان در منطقه ولی به‌طور احتمالاً غیرآگاهانه به‌عنوان کمک‌ذوب، بوده است. سرباره‌ها حاوی ترکیبات سولفیدی نبوده‌اند و تمامی روند

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2023-03-23]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.2.1.7]
[DOI: 10.52547/jra.6.2.41]

کریستالیزاسیون در داخل بافت سرباره به‌واسطهٔ قطرات مس اکسیدی و مس خالص در فشار اکسیژن بالا تولید و کنترل می‌شده‌اند. با توجه به عدم حضور فازهایی چون ملیلیت و فایالیت در بافت شیشه‌ای سرباره‌ها، به نظر می‌رسد این مواد در شرایط یوتکتیکی و با سرعت‌بالا سرد شده‌اند. مشاهدات تکنولوژی استحصال مس در این ناحیه به‌عنوان یکی از قدیمی‌ترین نواحی استحصال مس در این حوزهٔ فرهنگی، می‌تواند مطرح شود.

References

[1] Muhly, J.D., Sources of tin and the beginnings of bronze metallurgy. American Journal of Archaeology. 1985, pp. 275-291.

[2] Pigott, V. C., The development of metal production on the Iranian plateau: University of Pennsylvania Museum Press. Philadelphia. 1999.

[3] Pigott,V. C., Sources of tin and the tin trade in southwest Asia: recent research and its relevance to current understanding. In Metallurgy: Understanding How, Learning Why: Studies in Honor of James D. Muhly. INSTAP Academic Press. Philadelphia. Pennsylvania 2011.

[4] Hauptmann, A., Begemann, F. and Schmitt-Strecker, S., "Copper objects from Arad: their composition and provenance. Bulletin of the American Schools of Oriental Research. 1999; vol. 314: 1-17

[5] Wertime, T. A., Metallurgical expedition through the persian desert. A team brings traditional metallurgy to bear on archaeology. Science; 1968; (159): 927-935,.

[6] Pigott, V., On the importance of Iran in the study of prehistoric copper-base metallurgy. Persia's Ancient Splendour, Mining, Handicraft and Archaeology, 2004.

[7] Erb-Satullol, N. L., Alloys from Anau: The Manipulation of Metallic Properties in 3rd Millennium B.C. Southern Central Asia. Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 2011; (1319): Materials Research Society.

[8] Wertime, T. A., The furnace versus the goat: the pyrotechnologic industries and Mediterranean deforestation in antiquity. Journal of Field Archaeology. 1983; (3): 445-452,.

[9] Hauptmann A. 5000 Jahre Kupfer in Oman: Die Entwicklung der Kupfermetallurgie vom 3. Jahrtausend bis zur Neuzeit. Dt. Bergbaumuseum; 1985.

[10] Weeks, L., Alizadeh, K., Niakan, L., Alamdari, K., Zeidi, M., Khosrowzadeh, A., The Neolithic settlement of highland SW Iran: new evidence from the Mamasani District. Iran. 2006; (44): 1-31.

[11] 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.

[12] Rehren T, Pernicka E. Coins, artefacts and isotopes—archaeometallurgy and archaeometry. Archaeometry. 2008 Apr;50(2):232-48.

[13] Thornton, C. P., Lamberg-Karlovsky, C. C., Liezers, M. and Young, S. M. 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): 1451-1460,.

[14] Weeks, L., Iran and the Bronze Age Metals Trade in the Persian Gulf. International Journal of the Society of Iranian Archaeologists. 2016; (2): 13-25.

[15] Magee, P., Lamberg-Karlovsky, C. C. and Grave, P., Excavations at Tepe Yahya, Iran 1967-1975: The Iron Age Settlement. Peabody Museum of Archaeology. 2004; (3): 46-54

[16] Emami, M. and Parvaresh, A., Mineralogish, Petrochemische Untersuchungen an Kupferschlacken aus „SHEIKH-ALI“ Ophiolithkupferlagerstaetten, Kerman, Iran. in Archäometrie und Denkmalpflege 2016, Jahrestagung an der Georg-August-Universität Göttingen 28. 2016; pp. 205-208.

[17] Emami, M., “Toroud”, the late motion for As-Sb bearing Cu prodution from 2nd

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2023-03-23]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.2.1.7]
[DOI: 10.52547/jra.6.2.41]

millennium BC in Iran: An archaeometallurgical approach. Mediterranean Archaeology and Archaeometry. 2014; (14):169-188.
[18] Pigott, V and Pigott, V., The development of metal production on the Iranian plateau: University of Pennsylvania Museum Press, Philadelphia, 1999.
[19] Momenzadeh, M., Metallic mineral resources of Iran, mined in ancient times: a brief review, Persiens antike Pracht: Bergbau, Handwerk, Archäologie: Katalog der Ausstellungdes Deutschen Bergbau-Museums Bochum. 2004; (28): 8-21, 2004.
[20] Moorey, P., The archaeological evidence for metallurgy and related technologies in Mesopotamia, c. 5500–2100 BC. Iraq. 1982; (44): 13-38.
[21] Addis, A., Angelini, I., Nimis, P. and Artioli, G., Late Bronze Age Copper Smelting Slags from Luserna (Trentino, Italy): Interpretation of the Metallurgical Process. Archaeometry. 2016; (58): 96-114.
[22] Badrzadeh, Z., Barrett, T. J., Peter, J, M., Gimeno, D., Sabzehei, M. and Aghazadeh, M. Geology, mineralogy, and sulfur isotope geochemistry of the Sargaz Cu–Zn volcanogenic massive sulfide deposit, Sanandaj–Sirjan Zone, Iran. Mineralium Deposita. 2011; (46): 905-923.
[23] Lechtman H. and Klein, S., The production of copper–arsenic alloys (arsenic bronze) by cosmelting: modern experiment, ancient practice. Journal of Archaeological Science. 1999; (26): 497-526.
[24] Lamberg-Karlovsky CC. Trade mechanisms in Indus-Mesopotamian interrelations. Journal of the American Oriental Society. 1972 Apr 1:222-9.
[25] Radivojević M, Roberts BW, Pernicka E, Stos-Gale Z, Martinón-Torres M, Rehren T, Bray P, Brandherm D, Ling J, Mei J, Vandkilde H. The provenance, use, and circulation of metals in the European Bronze Age: the state of debate. Journal of archaeological research. 2019 Jun 15;27(2):131-85.
[26] Rehren, T., Boscher, L. and Pernicka, E., Large scale smelting of speiss and arsenical copper at Early Bronze Age Arisman, Iran. Journal of Archaeological Science. 2012; (39): 1717-1727.
[27] Nezafati, N and Hessari, M., Tappeh Shoghali; A significant early silver production site in north central Iran. Periodico Di Mineralogia. 2017; (86): 67-73.
[28] Liu, S., Rehren, T., Pernicka, E and Hausleiter, A., Copper processing in the oases of northwest Arabia: technology, alloys and provenance. Journal of Archaeological Science. 2015; (53): 492-503.
[29] Hauptmann, A., The archaeometallurgy of copper: evidence from Faynan, Jordan: Springer Science & Business Media, 2007.
[30] Mödlinger, M., Cziegler, A., Macció, D., Schnideritsch, H. and Sabatini, B., Archaeological Arsenical Bronzes and Equilibrium in the As-Cu System. Metallurgical and Materials Transactions B. 2018; (49): 2505-2513.
[31] Wang, W., Chen, F., Wang, Y., Qian, W., Mei, J. and Martinón-Torres, M., Copper metallurgy in prehistoric upper Ili Valley, Xinjiang, China. Archaeological and Anthropological Sciences. 2018; 1-11.
[32] Yagel, O. A., Ben-Yosef, E and Craddock, P. T., Late Bronze Age copper production in Timna: new evidence from Site 3. Levant. 2016; (48): 33-51.
[33] Rademakers, FW. and Farci, C., Reconstructing bronze production technology from ancient crucible slag: experimental perspectives on tin oxide identification. Journal of Archaeological Science: Reports. 2018; (18): 343-355.
[34] Rademakers FW, Nikis N, De Putter T, Degryse P. Copper production and trade in the Niari Basin (Republic of Congo) during the 13th to 19th centuries ce: Chemical and Lead isotope characterization. Archaeometry. 2018 Dec;60(6):1251-70.
[35] Emami M, Kowald T, Trettin R. Preliminary archaeometallurgical studies on copper extraction from polymetallic ore sources in Meymand, south central Iranian desert. Archaeological and Anthropological Sciences. 2017 Oct 1;9(7):1515-28.
[36] Killick D, Fenn T. Archaeometallurgy: the study of preindustrial mining and metallurgy. Annual Review of Anthropology. 2012 Sep 24;41.
[37] Z. Hezarkhani and I. Keesmann,

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2028-03-13]
[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.2.1.7]
[DOI: 10.52547/jra.6.2.41]

"Archäometallurgische Untersuchungen im Gebiet von Saghand-Posht-e-Badam (Zentraliran). Metalla (Forschungsberichte des Deutschen Bergbau-Museums, Bochum). 1996; (3.2): 101-125.

[38] Radivojević M, Pendić J, Srejić A, Korać M, Davey C, Benzonelli A, Martinon-Torres M, Jovanović N, Kamberović Ž. Experimental design of the Cu-As-Sn ternary colour diagram. Journal of Archaeological Science. 2018 Feb 1;90:106-19.

a. 40. RMaddin R, Muhly JD, Stech T. Early metalworking at Çayönü. na; 1999.

[39] R. Alipour and T. Rehren, "Persian Pulād Production: Chāhak Tradition," Journal of Islamic Archaeology, vol. 1, pp. 231-261, 2015.

[40] Wayman, M. L. and Duke, M. J. M., Eds., The effects of melting of native copper (Der Anschnitt-The Beginings of Metallurgy Beiheft 9). Bochum: Zeitschrift für Kunst und Kultur im Bergbau, 1999.

[41] Keesmann I, BACHMANN H, Hauptmann A. Classification of iron-rich slags according to the phase-composition. InFortschritte der Mineralogie 1984 Jan 1 (Vol. 62, pp. 114-116). Naegele U Obermiller Johannesstrasse 3a, D 70176 Stuttgart, Germany: E Schweizerbart'sche Verlags.

[42] Lamberg-Karlovsky CC, Kohl PL. The Early Bronze Age of Iran as seen from Tepe Yahya. Expedition. 1971 Apr 1;13(3):14.

[43] Long G, Peng Y, Bradshaw D. A review of copper–arsenic mineral removal from copper concentrates. Minerals Engineering. 2012 Oct 1;36:179-86.

[44] Keesmann I, Niemeyer HG, Golschani F. Schlackenfunde von Toscanos. Madrider Mitteilungen. 1983(24):65-75.

[45] Wechsler N, Shustak M, Ben-Yosef E. Diffraction stack imaging as a potential tool for detecting underground voids–the case of the ancient copper mines of Timna Valley (Israel). Archaeological Prospection. 2020 Jan;27(1):27-37.

[46] Craddock PT. From hearth to furnace: evidences for the earliest metal smelting technologies in the eastern Mediterranean. Paléorient. 2000 Jan 1:151-65.

[47] Craddock PT. Refractories with a purpose II: Ceramics for casting. The Old Potter's Almanack. 2014 Jun 26;19(1):2-17.

[48] Wood N, Doherty C, Rastelli S. Some aspects of Yue ware production at Shanglinhu in the late Tang dynasty.

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2023-03-13]

[DOR: 20.1001.1.24764647.1399.6.2.1.7]

[DOI: 10.52547/jra.6.2.41]