

دانشگاه تبریز  
۱۳۸۸

DOI: 10.29252/jra.6.2.200

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

CrossMark

## محوطه کهیرو II: شواهدی از ذوب فلز مس در سرشاخه‌های هلیل‌رود در اوایل هزاره چهارم پیش از میلاد

محمدامین امامی<sup>۱\*</sup>، میثم شهسواری<sup>۲</sup>

۱. دانشیار دانشکده مرمت دانشگاه هنر اصفهان و استاد مدعو در مؤسسه تحقیقات فیزیک کاربردی در باستان‌شناسی و باستان‌سنجی، دانشگاه بوردو  
۲. استادیار گروه باستان‌شناسی دانشگاه جیرفت، کرمان، ایران.

### چکیده

طی یک بررسی باستان‌شناختی در منطقه موسوم به سرشاخه‌های حوزه 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 میکروسکوپی سرباره‌ها نشان از استحصال فرایند فلز-گری مس در این برهه زمانی در این منطقه، دارد. تعداد ده نمونه از مواد فرهنگی از منطقه کهیرو II انتخاب شدند و بر اساس آزمایش‌های مینرالوژی جهت شناسایی خصوصیات بافت سرباره و بوته، و فلورسانس اشعه ایکس جهت شناسایی ترکیب شیمیایی بین مواد مکشوفه و مطالعات ریزساختاری و میکروسکوپی مورد بررسی قرار گرفتند. قطرات مس در زمینه کریستالین سیلیسی سرباره پراکنده شده‌اند و به‌عنوان یک فاکتور جهت تخمین درجه حرارت ذوب و ترکیب فلز مفید هستند. قطعات بوته‌های ذوب یافت شده در این محدوده نیز نشان از ریخته‌گری مس دارند. بوته‌های ذوب، بدنه سرامیکی دارند که اغلب از کانی‌های آذرین (کوارتز، فلدسپات، پلاژیوکلاز) به‌عنوان تمپر در بافت آن‌ها استفاده شده است. محصولات ذوب و بقایای ذوب در ناحیه داخلی بوته، تجمع دارند که شامل کانی‌های اکسیدی مس همچون کوپریت ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) و دلافوسیت ( $\text{CuFeO}_2$ ) 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 مرحله ریخته‌گری می‌شوند. چنین به نظر می‌رسد که این بوته‌ها جهت فرایند تولید مات یا شمش مس مورد استفاده قرار می‌گرفته‌اند. منطقه کهیرو II به‌واسطه وجود بقایای استحصال مس از سنگ معدن کربناته، می‌تواند به‌عنوان یکی از مناطق قدیمی و کلیدی در سرشاخه‌های هلیل‌رود معرفی شود.

**واژگان کلیدی:** فلزشناسی باستانی، مینرالوژی، پترولوژی، سرباره ذوب، سرشاخه‌های هلیل‌رود، دوران مس‌سنجی

## ۱. مقدمه

فلزات ایران از جمله 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 از جمله مس و سپس آلیاژهای آن از جمله برنز بوده است [1-3]. در تمام حوزه فرهنگی هلیل‌رود به‌ویژه در منطقه سرشاخه‌های این مسیل فرهنگی شواهد مهمی از محوطه‌های فلزکاری کهن شناسایی شده است. منظور از محوطه 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 تاریخچه 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 مهر و موم‌های 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 خرید و فروش قرار می‌گرفتند و به همین دلیل بسیاری از مناطق و حوزه‌های فرهنگی سعی در توسعه این صنعت، چه به‌عنوان بازاری برای خرید و فروش آن و چه به‌عنوان محلی صنعتی جهت تولید آن، داشته‌اند [6]. در این خصوص نه تنها 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 پر قدرت از بین‌النهرین در غرب تا حوزه فرهنگی سیستان و پنجاب در شرق ایران بسیار تحت تأثیر این ارتباط قرار داشتند. در این خصوص حوزه فرهنگی هلیل‌رود 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 قرار گرفته‌اند 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 متروک شده‌اند.

محوطه کپیرو 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 نکته بارز و در مطالعات فلزکاری کهن در هزاره چهارم پیش از میلاد در این منطقه خواهد بود. این منطقه فلزگری که کهن به نظر می‌رسد، از نوع محوطه‌های استقرار است که نمونه‌های مشابه آن در مناطق کوهپایه‌ای، و حاشیه‌ای دشتهای حوزه هلیل به تعداد زیاد شناسایی شده است [7]. این محوطه از لحاظ وسعت کوچک است، اما با توجه به مواد منقول و غیرمنقولی که در آن یافت شده و به‌ویژه به لحاظ دوره زمانی، در مطالعات باستان‌شناسی افزون بر پژوهش‌های فلزکاری کهن در حوزه فرهنگی هلیل‌رود بسیار مهم است. در این مقاله، پس از توصیف محوطه و شواهد باستان‌شناختی به مطالعه آزمایشگاهی شواهد فلزکاری به‌دست‌آمده و گردآوری شده از مواد پراکنده شده در سطح آن پرداخته شده است. در این مهم که این منطقه به‌عنوان یک محدوده فلزگری و صنعتی مورد استفاده 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، از جمله موارد مهم در تحلیل ساختار صنعتی منطقه و نوع فرایند متالورژی و نوع فلز مورد استحصال در این محوطه است.

از جمله مهم‌ترین پرسش‌هایی که در این مقاله مطرح شده‌اند 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. پیشینه پژوهش

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

در ارتباط با سابقه فعالیت‌های فن در راستای استحصال مس طبیعی به صورت 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 ناحیه وسیع سبب درک ارتباط فرهنگی و فن در بین جوامع این ناحیه 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 به صورت آلیاژهای حاوی آرسنیک، انتیمون، سرب و نیکل در این محدوده، در پیش‌از تاریخ این محدوده مورد توجه و استفاده قرار گرفته است [9-10]. تکنولوژی فلزگری در بسیاری از منابع بر اساس دو تئوری، مورد بحث قرار گرفته‌اند: اینکه آیا فلزگری در بخش‌های مختلف فلات ایران به صورت اتفاقی و یا تجربی رخ داده است. مطالعات گسترده آرکئومتالورژیک شواهد بسیار زیادی را در ارتباط با استفاده بهینه از یک فلز معین در یک منطقه خاص، مشخص می‌کند که در بسیاری موارد به سنت‌های فلزگری در یک منطقه خاص نیز معروف شده‌اند [4]. بر اساس مطالعات فلزگری کهن انجام‌شده، فلزگری قدیمی و استفاده از آلیاژها در دنیای قدیم در ناحیه جنوب شرق ایران به طور اتفاقی انجام نمی‌گرفته است و در این خصوص آلیاژهای مس (آرسنیک یا همراه با قلع) در قسمت‌هایی از آناتولی، آسیای مرکزی و ایران از قدیم شناخته شده 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 آرسنیک و یا حاوی قلع) در منطقه کرمان از دیرباز گزارش شده است و سوابق مطالعات معدن کاری در این ناحیه به مطالعات محققان آمریکایی و انگلیسی در دو دهه گذشته در این منطقه برمی‌گردد [12-14]. در مهر و موم‌های ۱۹۷۰ میلادی نیز بررسی‌هایی توسط محققان انگلیسی انجام شد که همه بر متالورژی بسیار ارزشمندی بر پایه مس در سرشاخه‌های هلیل رود 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 معدن کاری قدیم میسر است. بیش از ۹۵٪ از معادن فلزی کشور بر اساس شواهد سنتی به‌جای مانده از فعالیت‌های معدن-کاری کشف، و سپس مورد مطالعه سیستماتیک و در نهایت استخراج مواد معدنی قرار گرفته‌اند [16]. اساس این مطالعات بر شواهد برجای‌مانده ناشی از فعالیت‌های ذوب فلز، استحصال و استخراج سنگ مادر از کوه استوار است. ایجاد تونل‌های افقی و عمودی جهت استخراج و دستیابی هر چه بهتر به ماده معدنی گواه این واقعیت است که علم معدن کاری از دیرباز با درایت خاصی انجام می‌شده است. سنگ‌های معدنی با برنزدهای متفاوت و مشخصه 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 در این ارتباط 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 اثبات‌کننده وجود معدن کاران و صنعتگران قدیمی در فلات ایران است [18]. در این خصوص، اولین آثاری که در اکثر مواقع به چشم می‌خورند، سرباره‌های ذوب فلز هستند. از آنجایی که سرباره‌های ذوب مواد طبیعی نبوده، بلکه نتیجه و محصول دست بشر و تفکر صنعتگر قدیمی در جهت به‌آوری مواد خام در زمان خود بوده‌اند، بنابراین مطالعه بر روی آنان از پیچیدگی خاصی برخوردار است. فاکتورهای در نظر گرفته‌شده برای مطالعه 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. مطالعه 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 در این ارتباط 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 ناحیه مذکور [8, 21].

ناحیه مورد مطالعه از لحاظ نوع ذخایر معدنی در منطقه معدنی مس پورفیری کشور قرار می‌گیرد که آتراسیون‌های 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 در روی سطح زمین به‌صورت رگه‌هایی با ضخامت متغیر، مالاکیت (دارای ۴۵٪ مس) و آزوریت (دارای ۳۵۵٪ 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 هزاره 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 مورد توجه 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 بودن یا دور بودن آنان از استقرارهای انسانی، به یک تکنیک کوچ‌نشینی اشاره کرد [24]. محل مناسب برای ایجاد کوره ذوب، سوخت مناسب، مقدار زیاد و فراوانی این ماده سوختنی از جمله فاکتورهایی بوده‌اند که برای تعیین محل ذوب سنگ‌های معدنی می‌توانسته‌اند مناسب باشند. در نهایت، 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. منطقه معدن‌کاری کهپرو II از جمله جالب‌ترین مناطق معدنی مس شناخته‌شده با سابقه قدیمی در ناحیه است. ذخیره 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 محوطه کهپرو II و منطقه کاوش

طی بررسی باستان‌شناختی مورد نظر در منطقه قدرودخانه بیست و نه محوطه متعلق به عصر مس‌سنگی (از اوایل تا اواخر این دوره) شناسایی شده است (نقشه ۱) که از میان آن‌ها تعداد چهار مورد که در نقشه با مربع‌های سیاه‌رنگ مشخص شده‌اند، سابقه 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 قابل ملاحظه مواد فرهنگی در سطحی وسیع، شیوه پراکنش مواد فرهنگی بر سطح و تنگ بودن این مواد و عدم وجود آثار معماری مشخص، با زندگی کوچ‌نشینی پیوند داد. به‌ویژه که امروزه نیز این شیوه در منطقه مورد بررسی همچنان شیوه غالب و در بخش‌های بزرگی از آن تنها شیوه زندگی است [25]. هرچند برخی از استقرارها - مانند کرو I و گردان - شرایط متفاوتی دارند و به نظر می‌رسد که نوعی زندگی یکجانشینی در آن‌ها وجود داشته است [25]. محوطه کهپرو II در نگاه نخست و به لحاظ شواهد بسیار ضعیف وجود معماری، محوطه‌ای مرتبط با زندگی کوچ‌نشینی به 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 محوطه فوق یک کارگاه صنعتی و تولید فلز بوده است. چنین محوطه‌ای، به‌ویژه، با سابقه تاریخی اوایل تا اواسط عصر مس‌سنگی از نظر زمانی بسیار منحصر به فرد است.





شکل ۱: محوطه کهبیرو II در فاصله حدود ششصد متری غرب روستایی به همین نام و در کنار یک جاده 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 قرار گرفته، در حدود ۱۰۰×۵۰ متر (با احتساب حریم) است. این محوطه بر دامنه جنوبی یک رشته تپه کم ارتفاع واقع است و از جوانب دیگر به دشت و زمین‌های هموار منتهی می‌شود. در سطح این محوطه چندین چاله حفاری غیرمجاز گزارش شده که برخی از آن‌ها عمق زیادی دارند اما بیش‌تر آن‌ها چاله کم‌عمقی هستند و تنها خاک سطحی را کنار زده‌اند. فعالیت‌های معدن‌کاری جدید سبب اختلاط در پراکندگی سرباره‌ها شده و سرباره‌ها به صورت توده‌های بسیار حجیم در گوشه و کنار منطقه به صورت بسیار پراکنده شده‌اند (شکل ۲). در این محوطه همچنین شمار زیادی قطعات گلی و سنگی به شدت حرارت دیده مشاهده شده که بر سطح خارجی آن‌ها آثار مس ذوب‌شده و همچنین اکسید مس و مواد مذاب مشاهده شده است. چنین قطعاتی به احتمال زیاد قطعات باقی‌مانده از دیواره 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 دیده آن و نیز وجود این قطعه‌ها، به احتمال زیاد بقایای یک کوره ذوب فلز بوده‌اند (شکل ۳ بالا و سمت چپ). وجود یک سنگ گرانیته با گودی کم‌عمقی در وسط آن نیز به احتمال زیاد، 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 شناسایی شده‌اند [17, 29]. در اطراف این کوره، تجمع خرده‌های قطعات سرباره مشاهده شد (شکل ۴).

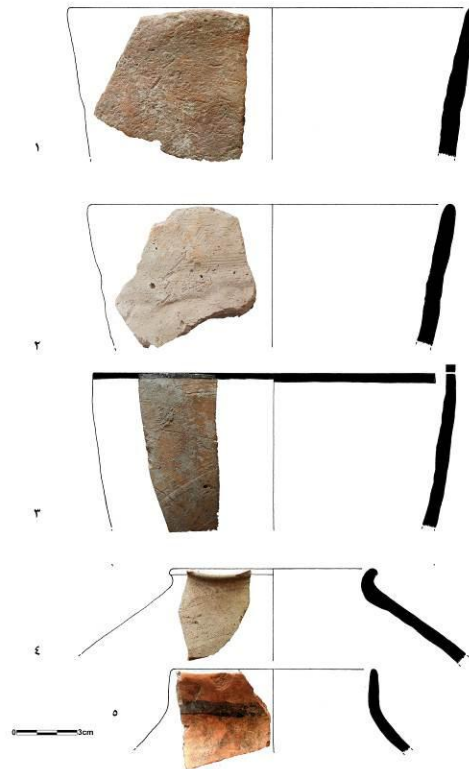


شکل ۲: فعالیت‌های معدن‌کاری به‌واسطه پراکندگی سرباره‌ها در منطقه

Fig. 2: Archaeometallurgical activities and the scattering of the slags on the ground

## ۲-۳. تاریخ‌گذاری محوطه

برخلاف محوطه‌های هم‌دوره - چه در منطقه مورد بررسی و چه در سراسر حوزه فرهنگی هلیل‌رود - که اغلب پراکنش متراکم سفالی دارند، بر سطح محوطه کهیرو II، 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 گونه‌شناختی قرار گرفتند (شکل ۵). با توجه به مقایسه‌های صورت گرفته، به‌ویژه با دو محوطه کاوش شده تپه یحیی و تل ابلیس، می‌توان این محوطه را به اوایل و اواسط عصر مس و سنگ تاریخ‌گذاری کرد [15].

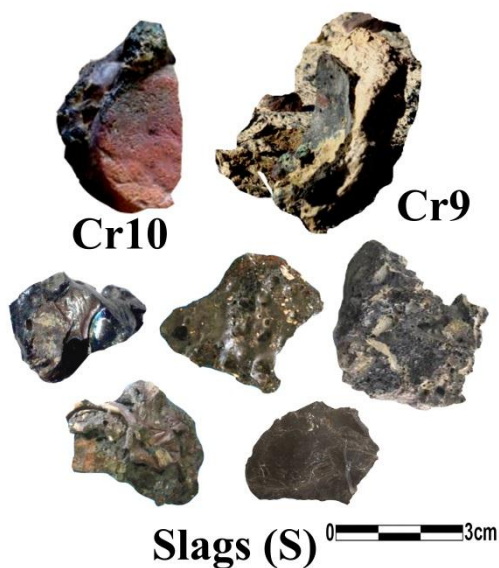


شکل ۵: نمونه‌های شاخص سفالین از سطح محوطه که به کار گرفته شده است؛ این نمونه سفال‌ها طراحی شدند و مورد مقایسه‌های گونه‌شناختی قرار گرفتند  
Fig. 5: Typical ceramic samples for typological and structural modifications

## ۳. معرفی نمونه‌ها و روش مطالعه

تعداد ده نمونه حاوی دو نمونه بوته و هشت نمونه سرباره از محوطه کهیرو II مورد بررسی میکروسکوپی و شیمیایی قرار گرفتند. بوته‌ها با ساختار منحنی شکل و چسبیده بودن سرباره بر روی بافت داخلی آن مشاهده شده‌اند. دیواره‌های کوره در اثر حرارت زیاد در برخی موارد به رنگ قرمز آشکار شده‌اند (شکل ۶). حالت موجی بر روی سرباره نشان از غلظت بالای سرباره و به احتمال زیاد 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 یک طرف دیده می‌شود (سرباره‌ها حالت رسوب‌گذاری لایه‌ای را ندارند). این مهم همچنین می‌تواند دلیلی بر این باشد که در منطقه مورد مطالعه، فرایند ذوب مجدد سرباره جهت خالص‌سازی فلز نیز استفاده نمی‌شده است [30]. مطالعات میکروسکوپی در سرباره‌های منطقه کهیرو II با هدف شناسایی آنالیزهای شیمیایی با فازهای کریستالین و میکروسکوپی به وجود آمده در بافت سرباره انجام شد. مطالعات فلزشناسی و کانی‌شناسی سرباره‌ها و یک نمونه بوته ذوب

باهدف شناسایی فازهای پدیدار شده و پاراژنز آنان با استفاده از روش میکروسکوپ پلاریزان در دو حالت نور عبوری و منعکسه به وسیله Olympus B51 در 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 اشعه ایکس بر اساس طول موج (WXRf) توسط دستگاه Spectra<sup>Plus</sup> در دانشگاه زیگن آلمان انجام شد. مطالعات انجام شده در این پژوهش، تنها بر اساس روش‌های شناسایی فازی میکروسکوپی و آنالیز شیمیایی مواد است. با توجه به حجم کم نمونه‌های در دسترس، امکان انجام مطالعات تکمیلی مقدور نبود.



شکل ۶: برخی نمونه‌های شاخص سرباره و بوت‌های ذوب در محوطه که مورد مطالعه قرار گرفتند  
Fig. 6: Typical slags and crucibles from the studied region

#### ۴. نتایج و بحث

##### ۴-۱. نتایج مطالعات کانی‌شناسی بر روی بوت‌های ذوب از محوطه کهریز II

تعدادی سرباره‌های ذوب فلز و بوت‌های ریخته‌گری و بقایای فلزگری مشاهده شد که برحسب نوع مواد مکشوفه حاوی تعداد متعددی سرباره و قطعات بوت‌های ذوب فلز هستند. سؤال اصلی مورد بحث در این بخش از مقاله نیز مربوط به بررسی نوع فلز و تکنولوژی فلزگری در محوطه کهریز است. بر اساس فازهای مشخص شده، 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 به صورت  $Fe_2O_3$  نیز بر روی سطح آن ظاهر شده که نشان از اکسیداسیون سطحی نمونه دارد و به صورت ثانویه در اثر مرور زمان تشکیل شده است [31, 32]. وجود فازهای فلزی و همچنین کمپلکس سولفیدی در سرباره بیشتر بیانگر یک شیوه مشخص است تا یک استثنا و یا یک مورد غیرعادی [33, 34].

به‌طور کلی 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



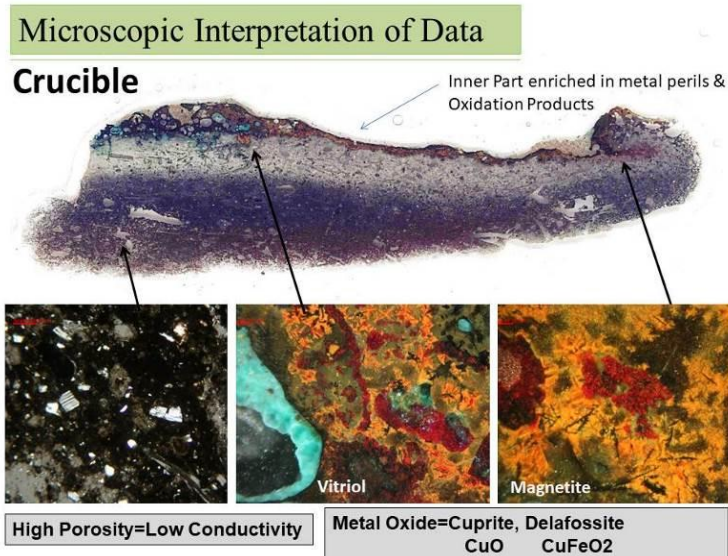
یعنی تنها احیاء اکسید مس و تولید مس صورت می‌گرفته است و استحصال مس از ترکیبات سولفیدی آن در دو مرحله تشویه سنگ معدن سولفید مس و به دست آوردن ترکیبات اکسیدی فلز و سپس احیاء آن در مرحله بعدی صورت می‌گرفته است [11, 13]. از جمله اثرات بسیار مهم در این محدوده، حضور تعداد محدودی بوته‌های ذوب فلز بوده است. قطعات بوته‌های ذوب یافت شده در این محدوده نیز نشان از ذوب و ریخته‌گری مس دارند [35, 36]. بوته‌های ذوب از لحاظ 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 درجه حرارت‌های بالا را متحمل بوده، مطرح می‌شوند. بوته‌های ذوب، اغلب بدنه سرامیکی و بافت غنی از فلز دارند که در هنگام عملیات ذوب، ریخته‌گری و یا خالص‌سازی در درون بافت آن تجمع یافته‌اند [30]. بدنه بوته‌های یافت شده از منطقه کهیرو II، عمدتاً از سرامیک‌های رسی با آهک بالا با بافت متراکم و کانی‌های آذرین (کوارتز، فلدسپات، پلاژیوکلاز) که به‌عنوان تمپر در بافت آن‌ها استفاده شده، تشکیل شده‌اند [37] (شکل ۷).

ترکیبات کانی‌شناسی ناشی از ذوب در ناحیه داخلی بوته تجمع داشته که شامل کانی‌های اکسیدی مس همچون کوپریت ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) و دلافوسیت ( $\text{CuFeO}_2$ ) است. کوپریت با توجه به ساختار کریستالین و ایزومتریک کوپیک خود به‌صورت یک‌فاز کاملاً ایزوتروپ در بافت بوته‌ها نشان داده شده است. کوپریت خاصیت انعکاس داخلی بالایی دارد و به همین جهت در حوزه تاریکی میکروسکوپ بارنگ قرمز پررنگی ظاهر می‌شود [7]. کوپریت اولین فازی است که پس از اکسیداسیون فلز خالص مس آشکار می‌شود. در صورتی که 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 قابل مشاهده است این ترکیبات در داخل بافت نمونه مشاهده نمی‌شود که دلیلی بر اکسید 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 ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) به وجود می‌آید که این حالتی است که مس فلزی یا مات مس در سیستم دیده نمی‌شود ( $\text{Cu}_2\text{S} + 3/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{Cu}_2\text{O} + \text{SO}_2\uparrow$ ). این مورد در داخل بوته‌های ذوب کهیرو II قابل مشاهده است و یا در قالب یک‌فاز ثانویه به‌صورت یک‌لایه 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 از لحاظ ترمودینامیکی بر اساس رابطه روبرو در کنار یکدیگر پایدار نیستند ( $\text{Cu}_2\text{S} + 2\text{CuO} \rightarrow 4\text{Cu} + \text{SO}_2\uparrow$ ) [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 کالکوپریت تحت فشار اکسیژن بالا پدید می‌آید. این کانی در اثر تفریق و سرد شدن سریع به‌صورت یوتکتیک با کوپریت نمایان می‌شود. وجود کوپریت و دلافوسیت با یکدیگر در یک بافت زمینه، مشخصه اکسیداسیون سریع یا سوپر اکسیداسیون مس است [39]. البته وجود قطرات مس در سرباره‌های ذوب باوجود آنان در بوته ذوب تفاوت دارد و در ادامه، قابل تحلیل است.

وجود فازهای اکسیدی نظیر کوپریت و دلافوسیت در مجاورت یکدیگر حاکی از فرایند اکسیداسیون خیلی سریع و یا انجام فرایند فلز کاری 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 به‌واسطه 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 یافته ترکیبات اکسیدی در کف بوته عمدتاً بقایای فرایند ناقص استحصال و یا ریخته‌گری هستند و سبب تشکیل مس اکسیدی در آخرین مرحله 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

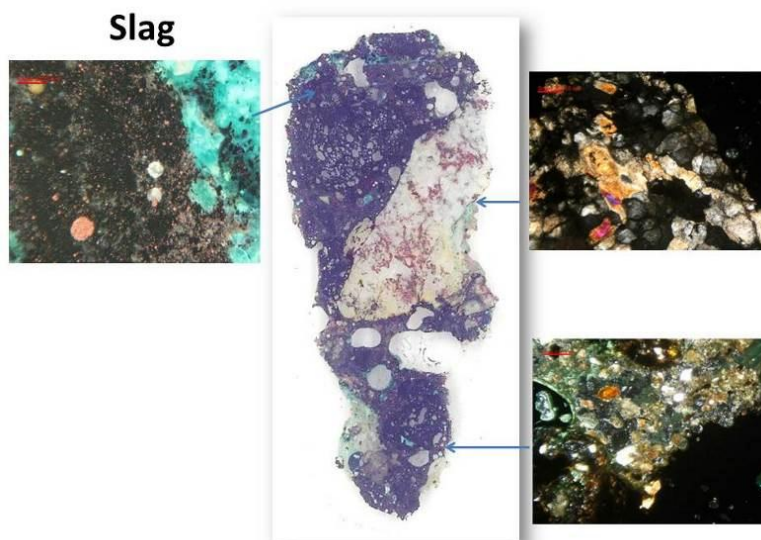
هستند، چنین نتیجه می‌شود که این بوت‌ها جهت فرایند تولید شمش مس از مس اکسیدی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این مهم رابطه مستقیمی بین فشار اکسیژن و ترکیب کانی‌شناسی بوت‌ها دارد. میزان اکسیداسیون کوپریت در حوزه تاریکی مشاهدات رابطه مستقیم با میزان مس اکسیدشده دارد و انعکاس رنگ قرمز بسیار پررنگ در لایه‌های کوپریتی حاکی از میزان بالای مس اکسیدشده است [44]. وجود دلافوسیت نیز تأکیدی بر موارد ذکر شده در فوق است. این فاز در حالتی که فشار اکسیژن بسیار بالا است، به‌خصوص در بوت‌هاهایی که دارای سطح باز و در تماس با هوا هستند، تولید می‌شود.



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

سرباره‌های مکشوفه از این ناحیه نیز مورد بررسی میکروسکوپی قرار گرفتند و در بافت داخلی آنان قطرات مس که در زمینه کریستالین غنی از سیلیس قرار دارند، شناسایی شده‌اند (شکل ۸). ساختار سیلیسی سرباره ترکیبات فیالییتی 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 زمینه سیلیسی دلیلی بر درجه 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 منطقه کهیرو قابل مشاهده 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 وارد شده 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 منطقه تشویه باقی می‌ماند که این مهم در استحصال فلز از ترکیبات اکسیدی آن دیده نمی‌شود.



شکل ۸: یکی از سرباره‌های مورد مطالعه 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

#### ۴-۲. نتایج مطالعات شیمیایی بر روی بوت‌های ذوب از محوطه کهبرو

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

همان‌طور که در جدول دیده می‌شود، نمونه‌های مورد آزمایش به جهت دارا بودن درصد کلسیم بالا در سرباره‌ها و در بوت‌ها با یکدیگر مشابهت دارند و در بوت‌های ذوب تا حدودی به دلیل استفاده از مواد اولیه و کربناته بیشتر است. کلسیم در سرباره‌های ذوب، ماده اصلی کمک‌کننده در کاهش درجه حرارت ذوب است (کمک‌ذوب) و همچنین از ترکیباتی محسوب می‌شود که به تشکیل پیروکسن-های کلسیم‌دار، همان‌طور که در مبحث قبلی اشاره شد، کمک می‌کند. این ماده همچنین سبب تشکیل فاز کریستالین سیلیکاته به نام کیرش‌اشتاینیت (Kirschsteinite) می‌شود که در مقادیر بسیار جزئی در زیر میکروسکوپ مورد شناسایی قرار گرفت که از مشخصات مهم این فاز، وجود منگنز در ساختار آن است. وجود درصد نسبتاً ثابت منگنز در نمونه‌های مطالعه شده در منطقه کهبرو 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 تیتانیوم 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 به صورت 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 بوت‌ها زیاد نیست، قابل‌اغماض هم نیست. ترکیبات فسفردار، یافتن منابع معدنی بر پایه فسفر و یا آلتراسیون‌های رودخانه‌ای جهت استحصال مس را تسهیل می‌کنند [51].

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

Sample	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	FeO	TiO <sub>2</sub>	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	18.06	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

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۱، مقادیر بالای سیلیکات و مقادیر نسبتاً یکسان آهن از منشأ سنگ معدنی و یا به عنوان کمک ذوب در داخل ترکیبات مورد آزمایش، نسبت داده می‌شوند. مطالعه میکروسکوپی قطرات فلزی در بافت سرباره‌ها و دارا بودن هاله‌های قرمز رنگ در کناره‌های آنان، نشان از وجود این عنصر در فرایند ذوب فلز در این ناحیه دارد. نکته قابل توجه در این مواد، نبودن ترکیبات آرسنیک 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 ماسه رودخانه‌ای، به مخلوط اضافه شده تا خواص بهینه‌ای را جهت جداسازی بهتر فلز ذوب شده از ترکیبات آهنی وارد شده به مخلوط ذوب شده، ایجاد کند [52]. چنین تأثیری را همچنین اکسید کلسیم می‌تواند به عنوان یک کمک ذوب اضافه شده 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 اضافه شده 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 به صورت جانشینی همواره یافت می‌شود [37]. بر اساس مطالعات انجام شده و شیمی سرباره‌ها و بوته‌های ذوب چنین به نظر می‌رسد که پروسه انجام شده در منطقه کهپرو 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، مشخصه 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 حضور داشته باشد. وجود آرسنیک یا قلع در داخل مس سبب ایجاد رنگ صورتی در مس می‌شود که در این نمونه‌ها اصلاً مشاهده نمی‌شود. تمامی موارد اشاره شده در بالا حاکی از این مهم است که مس از یک ترکیب مالاکیتی و در اثر احیاء آن به دست آمده 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 استفاده شده است. درصد زیاد کلسیم و آلومینیوم و مقادیر یکسان آهن گواهِ چنین تحلیلی در این پژوهش است.

## ۶. نتیجه گیری

بر اساس پژوهش صورت گرفته تعدادی از بوته‌های ذوب و سرباره‌های ذوب فلز به دست آمده از منطقه کهپرو II در جیرفت، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفتند. محوطه کهپرو 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 شناسایی شده هم‌زمان خود در منطقه قدرودخانه منحصربه‌فرد می‌کند؛ شواهدی در ارتباط با ذوب مس در این منطقه و در بافت محلی و در میان محوطه‌های شناسایی شده هم‌زمان که عموماً با نوعی زندگی مبتنی بر کوچ روی مرتبط هستند، پرسش‌های زیادی را در ارتباط با سنت فلزگری در منطقه مطرح می‌کند که جز با کاوش‌های باستان‌شناسی امکان پاسخ‌گویی به آن‌ها میسر نیست. فلزکاری منطقه بر اساس استفاده 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 استفاده شده است، زیرا در هیچ‌یک از ساختارهای میکروسکوپی 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 کریستالیزاسیون در داخل بافت سرباره به‌واسطه قطرات مس اکسیدی و مس خالص در فشار اکسیژن بالا تولید و کنترل می‌شده‌اند. با توجه به عدم حضور فازهایی چون ملیت و فایالیت در بافت شیشه‌ای سرباره‌ها، به نظر می‌رسد این مواد در شرایط یوتکتیکی و با سرعت بالا سرد شده‌اند. مشاهدات تکنولوژی استحصال مس در این ناحیه به‌عنوان یکی از قدیمی‌ترین نواحی استحصال مس در این حوزه 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-Satullo, 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 Parvareh, A., Mineralogisch, 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 production from 2nd 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 Ausstellungen des 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.
- [شهرسواری. میثم و خ. سهراب. بررسی باستان‌شناسی سرشاخه‌های هلیل‌رود: محوطه‌های متعلق به دوره مس سنگ؛ استقرارها و معماری گورها، مجله پژوهش‌های باستان‌شناختی مدرس ۱۳۹۲، ۵: ۳۷–۵۲.]
- [شهرسواری. میثم و د. محمد. گزارش مقدماتی بررسی باستان‌شناختی سرشاخه‌های هلیل‌رود: منطقه‌ی قدروخانه (رابر)، مجله پژوهش‌های باستان‌شناسی مدرس ۱۳۹۰، ۳–۴: ۷۲–۹۴.]
- [25] Radivojević M, Roberts BW, Pernicka E, Stos-Gale Z, Martínón-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 Martínón-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, "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. In *Fortschritte 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.
- [امامی. سیدمحمدامین. اهمیت مطالعات مینرالوژیک بر روی سرباره‌های ذوب قدیمی در پاراژنز کانی‌های فلز، کنفرانس مهندسی معدن ایران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۳۸۳.]
- [44] Keesmann I, Niemeyer HG, Golschani F. *Schlackenfund von Toscanos*. *Madriider 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.