

بررسی محوطه کهن ذوب فلز چاه جمال خُشومنگ در استان یزد براساس مطالعات ژئوشیمی و کانی شناسی

امین اله کمالی^{۱*}، مهدی رازانی^۲، سید ایرج بهشتی^۳، حمید فدایی^۱، وحید ابراهیم زاده^۴

a.kamali@richt.ir*

۱. استادیار، باستان سنجی و علوم طبیعی، پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی-فرهنگی، پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری، تهران، ایران
۲. دانشیار، مرمت و باستان سنجی، دانشکده حفاظت آثار فرهنگی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، ایران
۳. کارشناس پژوهشی، پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی-فرهنگی، پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری، تهران، ایران
۴. کارشناسی ارشد، شرکت زمین شناسی مهندسی و علوم زمین امید، یزد، ایران

چکیده

محوطه های ذوب فلز چاه جمال خُشومنگ در استان یزد، بخش خرانق و شرق شهرستان اردکان، در ۲۵ کیلومتری جنوب روستای ساغند و ۱۲۰ کیلومتری یزد واقع شده اند. پژوهش حاضر با هدف شناسایی فناوری ذوب و منشأ کانه های مورد استفاده در این محوطه ها، نمونه های سرباره برداشته شده از دو محوطه ذوب فلز را از طریق مطالعات میدانی، پتروگرافی و آنالیز شیمیایی به روش (ICP-OES) بررسی کرده است. نتایج پتروگرافی حضور کانی های سیلیکاتی پیروکسن و فیالیت در زمینه ی شیشه ای، همراه با فازهای فلزی مس طبیعی، کانی های سولفیدی مس (کالکوسیت و کوولیت) و کانی آهن دار وستیت را نشان می دهد. مقدار بالای سیلیس در نتایج آنالیز شیمیایی، در کنار حضور CaO و MgO ، حاکی از استفاده از کمک ذوب های سیلیسی و کربناته برای کاهش ویسکوزیته سرباره است؛ این شواهد، همراه با ترکیب کانی شناختی مشاهده شده، دمای ذوب را حدود ۱۱۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد و شرایط درون کوره را احیایی و نسبتاً کنترل شده نشان می دهد. این محوطه های ذوب فلز که با هدف استخراج مس ایجاد شده بودند، علاوه بر مس، حاوی عناصر سرب، روی و نقره نیز هستند که نشان می دهد ماده خام تأمین کننده این کوره ها از یک کانسار پلی متال بوده است. در خصوص منشأ این مواد خام معدنی نیز می توان به تونل ها و چاهک های اکتشافی کهن، در فاصله حدود دو کیلومتری این محوطه ها، اشاره کرد که تأمین کننده محلی مواد اولیه این کوره های ذوب بوده اند. یافته های این پژوهش درک و آگاهی ما را نسبت به فناوری استخراج فلزات در فلات مرکزی ایران ارتقا می بخشد.

کلمات کلیدی: باستان فلزسنجی، فلات ایران، ذوب فلز باستانی، چاه جمال خُشومنگ، مطالعات ژئوشیمیایی، کوره ذوب.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۱/۳۱

تعداد صفحات: ۱۰

شناسه دیجیتال (doi):

فصلنامه علمی - پژوهشی دانش حفاظت و مرمت

شاپای الکترونیکی: ۳۰۶۰-۶۲۱۷

شاپای چاپی: ۶۰۹۳-۲۵۳۸



۱. مقدمه

باستان فلزسنجی به عنوان یک حوزه میان رشته ای، نقشی بنیادین در بازسازی و درک جوامع گذشته، تحولات فناورانه و پویایی های پیچیده اقتصادی-اجتماعی آن ها ایفا می کند. اهمیت فلزات در فرایند توسعه تمدن ها از روزگار باستان شناخته شده بود و امروزه مطالعه علمی بقایای فلزی و شیوه های تولید آن ها، از معدن کاری و استخراج کانسنگ تا ذوب، آلیاژسازی و ساخت اشیاء، چشم اندازی منحصربه فرد برای شناخت توانمندی های فناورانه، شبکه های تجاری و ساختارهای اجتماعی جوامع کهن فراهم می سازد (Giardino, 2022; Oudbashi

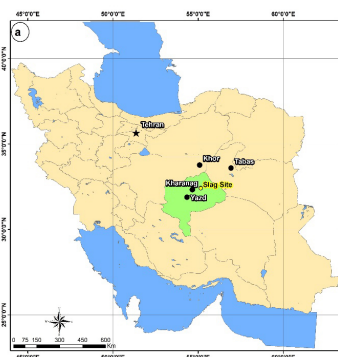
et al., 2012; Pigott, 2004a). فلات ایران با برخورداری از منابع غنی معدنی و پیشینه ای طولانی در نوآوری های متالورژیکی، یکی از کانون های اصلی فعالیت های باستان فلزسنجی در دنیای باستان به شمار می آید (Pigott, 2004a; Thornton, 2009). این منطقه نه تنها در مراحل آغازین بهره گیری از مس طبیعی در دوران نوسنگی (Pigott, 2004a)، بلکه در توسعه فرایندهای پیشرفته تر، مانند ذوب مس از کانسنگ در دوره کالکولیتیک و پیدایش آلیاژهایی همچون مفرغ آرسنیک و مفرغ قلعی، نقشی پیشگام داشته است (Pigott, 2004a; Thornton & Lamberg-

این نشریه از قوانین Cope پیروی می کند. دسترسی به این مقاله برای همگان آزاد است. هرگونه استفاده غیرتجاری از آن در صورت ارجاع مناسب، مجاز شناخته می شود.

این محوطه چیست؛ و دوم، منشأ مواد اولیه و نوع کانه‌های مورد استفاده در این فرایند کدام است؟ پاسخ به این پرسش‌ها به روشن سازی جنبه‌های فنی متالورژی کهن در این منطقه کمک میکند.

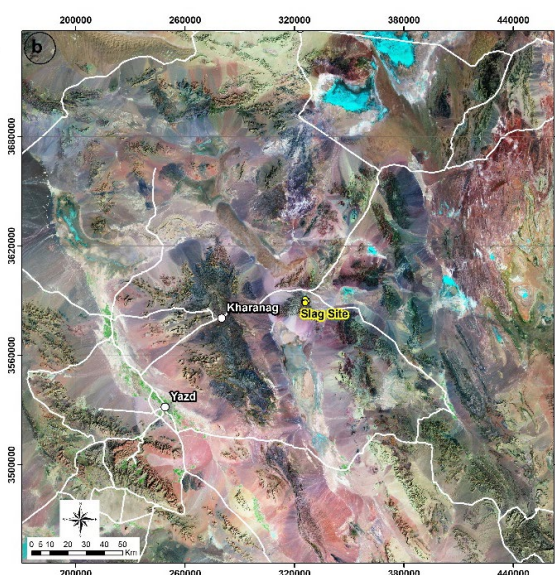
۲. موقعیت، دسترسی و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

محوطه ذوب فلز چاه جمال در مختصات جغرافیایی (۳۲۷۰۰۵,۰۰۷۰۱۵ و ۳۵۸۹۹۵۱,۷۵۰۷۴) واقع شده است. محدوده چاه جمال در استان یزد، بخش خراق و شرق شهرستان اردکان و در ۲۵ کیلومتری جنوب روستای ساغند و ۱۲۰ کیلومتری یزد واقع شده است (شکل ۱). مهمترین راه‌های ارتباطی منطقه، جاده آسفالت یزد-طبس است که از باختر و شمال ناحیه می‌گذرد و راه آسفالت معدن آهن چادرملو-ساغند نیز به راه بالا متصل می‌شود.



شکل ۱. موقعیت محوطه ذوب فلز چاه جمال. نقشه ایران و موقعیت محوطه ذوب فلز چاه جمال در استان یزد (a) (ساس پلنت، ۲۰۱۷)

Figure 1. Location of the Chah Jamal metal smelting site. (a) Map of Iran and the location of the Chah Jamal metal smelting site in Yazd Province. (SAS Planet, 2017)



شکل ۱. موقعیت محوطه ذوب فلز چاه جمال. (b) تصویر ماهواره‌ای منطقه و راه‌های دسترسی به محوطه باستانی ذوب فلز چاه جمال (ساس پلنت، ۲۰۱۷)

Figure 1. Location of the Chah Jamal metal smelting site. (b) Satellite image of the area and access routes to the Chah Jamal ancient metal smelting site (SAS Planet, 2017)

محدوده چاه جمال واقع در فلات مرکزی ایران، دارای واحدهای چینهای متنوعی از پرکامبرین تا پلیوسن است که نشان‌دهنده تاریخچه تکتونیکی و رسوبی پیچیده‌ای است. قدیمی‌ترین واحد (پرکامبرین-پالئوزوئیک) در

(Karlovsy, 2004). در حقیقت، می‌توان فلات ایران را “قلمرو فناورانه” (Technological Oikumênê) دانست که از نخستین دوره‌های استقرار روستاها به آزمایشگاهی برای آزمون مواد و فرایندهای پیروتکنولوژیک گوناگون، از عملیات حرارتی بر روی سنگ چخماق و پخت سفال گرفته تا تولید گچ و آهک و در نهایت متالورژی تبدیل شد (Pigott, 2004a). در این میان، شناسایی و مطالعه محوطه‌های اولیه تولید فلز، به‌ویژه کوره‌های ذوب و منابع کانسنگ استفاده شده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Giardino, 2022; Pigott, 2004a; Hashemi et al., 2024; Eskandari, Emami, 2022). این محوطه‌ها شواهد مستقیمی از فن‌آوری‌های به‌کاررفته، مقیاس تولید، و نوع مواد اولیه ارائه داده و به ما امکان می‌دهند تا مراکز تخصصی فلزکاری را در گذشته شناسایی کنیم (Pigott, 2004a; Eskandari & Emami, 2022). مطالعات ژئوشیمیایی و کانی‌شناسی بر روی کانسنگ‌ها، سرباره‌ها، قطعات بوته و بقایای کوره، ابزارهای قدرتمندی برای بازسازی فرایندهای ذوب، تعیین نوع کانسنگ‌های مصرفی (اکسیدی یا سولفیدی)، شناسایی دمای کوره، و حتی ردیابی منشأ مواد اولیه از طریق تجزیه و تحلیل ایزوتوپ‌های پایدار (مانند ایزوتوپ‌های سرب) یا عناصر کمیاب هستند (Giardino, 2022; Bérard et al., 2020; Dehno et al., 2025; Eskandari & Emami, 2022). کاربرد روش‌های تحلیلی پیشرفته مانند طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی ICP-MS (Giardino, 2022; Mortazavi et al., 2011; Oudbashi et al., 2016) میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس SEM-EDS (Giardino, 2022; Mortazavi et al., 2011; Oudbashi et al., 2016) و حتی تابش سینکروترون (SAS Bulletin et al., 2016) و حتی تابش سینکروترون (SAS Bulletin et al., 2016) امکان بررسی‌های دقیق‌تری بر روی ترکیب شیمیایی و ساختار مواد باستان‌شناختی، از جمله شناسایی کانی‌های خاص در فازهای فلزی یا محصولات خوردگی را فراهم آورده است (Emami et al., 2022).

فلات ایران، با توجه به شواهد گسترده از فعالیت‌های متالورژیکی کهن (Pigott, 2004a; Thornton, 2009; Vatandoust et al., 2011) از جمله محوطه‌هایی چون تپه قبرستان، تپه حصار، اریسمان، تل ابلیس، تپه یحیی، و شهداد (Pigott, 2004a; Thornton & Lamberg-Karlovsky, 2004; Eskandari & Emami, 2022; Dehno et al., 2025)، همچنان نیازمند پژوهش‌های گسترده برای شناسایی مراکز کمتر شناخته شده و درک کامل پویایی‌های تولید و تبادل فلز است. با وجود اهمیت معدنکاری و فلزکاری کهن در فلات مرکزی ایران، از جمله استان یزد، این حوزه همچنان نیازمند مطالعات گسترده‌تری است. در این استان، پژوهش‌های پراکنده‌ای در زمینه فلزکاری و معدنکاری کهن انجام شده که می‌توان به برخی از آن‌ها اشاره کرد. عزیزی خراقی (۱۴۰۰) در بررسی باستان‌شناسی شهرستان خاتم، بیش از ۱۸ محوطه ذوب فلز کهن، متعلق به دوران پیش از تاریخ تا اسلامی متأخر، شناسایی و معرفی کرد. در ادامه این پژوهش، کمالی و همکاران (۱۴۰۱) بر روی نمونه‌های همین محوطه‌ها مطالعات پتروگرافی و ژئوشیمیایی، به منظور شناسایی کانه‌های استحصال، انجام دادند. علاوه بر این، کمالی و همکاران طی سال‌های ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ به مطالعه معدنکاری و فلزکاری کهن در مناطق ندوشن، خراق، رباط پشت بادام و بهاباد پرداختند و نشان دادند که کوره‌های شناسایی شده در این نواحی عمدتاً برای استخراج فلزات روی و مس به کار می‌رفته‌اند (کمالی و همکاران، ۱۴۰۲). هدف پژوهش حاضر، انجام مطالعات میدانی و آزمایشگاهی بر محوطه چاه جمال خُشومنگ است. این پژوهش با استفاده از مطالعات ژئوشیمیایی و پتروگرافی به دو پرسش اصلی پاسخ می‌دهد: نخست، ویژگی‌های کوره‌ها و فناوری ذوب فلز در

پراکنده مشاهده می شود که نشان دهنده فعالیت متالورژیکی محدودتر یا تخریب بیشتر در مقایسه با محوطه ۱ است. سرباره های موجود دارای بافت متخلخل و رنگ خاکستری تیره هستند. بقایای سنگ های معدنی مس در این محوطه اندک است. فرسایش ناشی از عوامل طبیعی مانند بارندگی و سیلاب ها به پراکندگی و کاهش آثار این محوطه منجر شده است. منبع سوخت احتمالی، مشابه محوطه ۱، شامل پوشش گیاهی منطقه بوده است. (شکل ۳).

۴. مواد و روش ها

۴.۱. نمونه برداری از سرباره های ذوب فلز

این تحقیق شامل بررسی دو محوطه باستانی ذوب فلز در منطقه چاه جمال است. در مرحله نخست، تلاش شد از هر یک از این محوطه ها نمونه هایی به صورت هدفمند برداشت شود تا بتوان به پرسش های اصلی پژوهش پاسخ داد. نمونه برداری به صورت سطحی و با رعایت اصول استاندارد انجام گرفت تا نمونه های به دست آمده نماینده مناسبی از فرایند ذوب فلز در این محوطه ها باشند و اطلاعات متالورژیکی قابل اتکایی فراهم آورند (شکل ۴). با توجه به ابعاد کوره ها، تلاش شد نمونه ها از بخش هایی برداشت شوند که کمتر در معرض فرسایش یا دگرسانی قرار داشته اند. در مجموع، از هر محوطه ۱۲ نمونه برداشت شد که در کل ۲۴ نمونه را شامل می شود. این نمونه ها عمدتاً دارای رنگ سیاه یا سبز تیره، همراه با مورفولوژی نامنظم، بافت گداخته و متراکم و در برخی موارد متخلخل بودند. اندازه نمونه ها بین ۳ تا ۱۵ سانتی متر متغیر بود. هدف اصلی از این نمونه برداری، انجام مطالعات پتروگرافی برای شناسایی کانه های مورد استفاده و نیز آنالیز شیمیایی به منظور تعیین میزان و نوع عناصر در نمونه ها بود. تمامی نمونه ها با دقت کدگذاری شدند و موقعیت دقیق جغرافیایی آن ها شامل طول و عرض جغرافیایی ثبت گردید (جدول ۱). سپس از هر محوطه سه نمونه و در مجموع شش نمونه برای انجام مطالعات پتروگرافی انتخاب شدند.



شکل ۴. موقعیت نمونه های برداشت شده از محوطه های ذوب فلز چاه جمال (خُشومنگ) در تصویر ماهواره ای

Figure 4. Location of samples collected from the Chah Jamal (Khoshomang) metal smelting sites on the satellite image.

محدوده شامل شیل، مارن، ژپس، آهک دولومیتی و آندزیت است که در مجاورت توده های گرانیتی دچار دگرگونی شده و هاله هایی از هورنفلس، اسکارن و آمفیبولیت را تشکیل داده است. در غرب گسل های بزرگ مقیاس پشت بادم، واحدهای سنگی شامل فیلیت، اسلیت و آمفیبولیت با بافت نماتو پورفیرو گرانوبلاستیک و پروتولیت آذرین بازیک رخمون دارند. در ائوسن فوقانی این محدوده واحدهای سنگی شامل هورنفلس، اسکارن و کالکسیلیکات با دگرسانی پروپیلیتیکی مشاهده می شوند. همچنین واحدهای میوسن این محدوده شامل مارن و آهک ماسه ای است. واحدهای پلیوسن شامل کنگلومراهای پلی ژنتیک و منوژنتیک هستند (سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۷۹). این واحدها تحت تأثیر فرایندهای تکتونیکی مانند گسل خوردگی و ماگماتیسم قرار گرفته اند. کانه زایی های فلزی، شامل مگنتیت، هماتیت و مالاکیت است که در اسکارن های آهن-مس و رگه های سیلیسی مشاهده می شوند. آثار معدن کاری شدادی مس-آهن، شامل تونل ها، چاهک ها و کوره های ذوب در فاصله دو کیلومتری نشان دهنده قدمت استخراج در این منطقه است. کانه زایی مس به صورت مالاکیت و کالکوپریت در رگه های سیلیسی-هیدروکسید آهنی و لنزهای مگنتیتی در سنگ های کربناته دیده می شود و احتمال تشکیل اسکارن در مجاورت توده های گرانیتی-گرانودیوریتی بالاست.

۳. معرفی و ویژگی های محوطه ذوب فلز

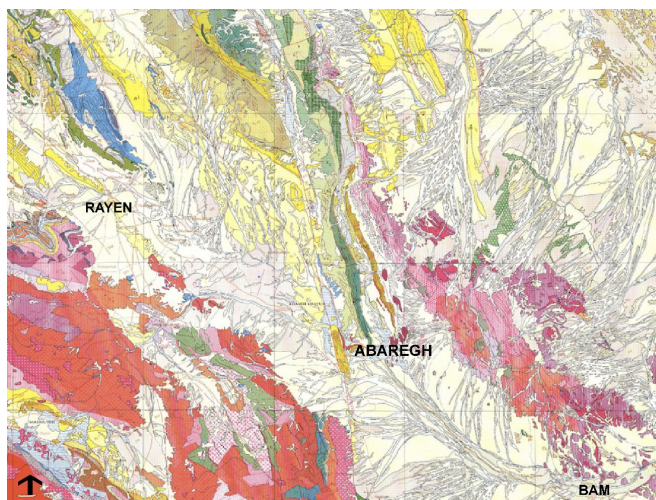
در منطقه چاه جمال خوشمگ، دو محوطه ذوب فلز شناسایی شده است. محوطه های شماره ۱ و ۲ در فاصله چند صد متری از یکدیگر قرار دارند. از میان این دو محوطه، تنها در محوطه ذوب فلز شماره ۱ آثار قابل توجهی از سرباره باقی مانده است. بخش های زیادی از سرباره های محوطه ذوب فلز شماره ۲ از بین رفته و تنها مقدار کمی از آن باقی مانده است. این تخریب عمدتاً به دلیل تأثیر رودخانه مجاور و نزولات جوی رخ داده است.

۳.۱. محوطه ذوب فلز شماره ۱

محوطه ذوب فلز شماره ۱ در مختصات جغرافیایی (۳۲۷۰۰۵,۰۰۷۰۱۵) و (۳۵۸۹۹۵۱,۷۵۰۷۴) واقع شده است. این محوطه دارای طول تقریبی ۲۰ متر، عرض ۱۰ متر و مساحت حدود ۲۰۰ مترمربع در نزدیکی محوطه ذوب فلز شماره ۲ است و توپوگرافی اطراف آن عمدتاً هموار با شیب ملایم است. آثار قابل توجهی از سرباره های ذوب فلز در این محوطه مشاهده می شود که نشان دهنده فعالیت متالورژیکی گسترده است. سرباره ها عمدتاً به صورت توده های متخلخل با رنگ سبز تیره تا خاکستری دیده می شوند و حاوی بقایای ذرات مس و سیلیکات های آهن هستند. شواهد پراکنده ای از سنگ های معدنی مس، احتمالاً از نوع کانه های سولفیدی مانند کالکوپریت در اطراف محوطه یافت شده است. منبع سوخت این کوره ها احتمالاً شامل پوشش گیاهی محلی مانند بوته ها و درختچه های مقاوم بیابانی منطقه بوده است. تاکنون، بقایای ساختاری کوره به صورت واضح شناسایی نشده، اما پراکندگی سرباره ها نشان دهنده استفاده مکرر از این مکان است. تاریخ گذاری دقیق این محوطه نیازمند مطالعات باستان شناسی و همچنین انجام آنالیزهای سالیابی است (شکل ۲).

۳.۲. محوطه ذوب فلز شماره ۲

محوطه ذوب فلز ۲ در مختصات جغرافیایی (۳۲۶۸۸۷,۸۷۴۸۴۳) و (۳۵۸۹۹۹۰,۸۶۸۱۷) قرار دارد و در فاصله چند صد متری از محوطه ذوب فلز ۱ واقع شده است. این محوطه دارای طول تقریبی ۱۲ متر، عرض ۶ متر و مساحت حدود ۷۲ مترمربع است. توپوگرافی منطقه مشابه محوطه ۱ بوده و عمدتاً هموار با تپه های کم ارتفاع است. آثار سرباره در این محوطه به صورت



شکل ۲. محوطه ذوب فلز شماره ۱ و بخش‌های باقی‌مانده از کوره ذوب
Figure 2. Metal smelting site No. 1 and the remaining sections of the smelting furnace.



شکل ۳. محوطه ذوب فلز شماره ۲ و آثار باقی‌مانده از کوره ذوب
Figure 3. Metal smelting site No. 2 and the remains of the smelting furnace.

۲.۴. روش‌شناسی و تجهیزات آزمایشگاهی

نمونه‌های منتخب با هدف بررسی ساختار، بافت، کانه‌های استحصالی و کانی‌های تشکیل‌دهنده سرباره‌ها به منظور تهیه مقاطع نازک و نازک-صیقلی (Thin-Polished Sections)، به آزمایشگاه پتروگرافی پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی-فرهنگی ارسال شدند. در این آزمایشگاه از نمونه‌ها مقاطع نازک با ضخامت استاندارد ۳۰ میکرومتر (۰/۰۳ میلی‌متر) تهیه و مطالعه این مقاطع با استفاده از میکروسکوپ پولاریزان مدل Canada Smart Tech انجام شد. هدف از این مطالعات، شناسایی ترکیب کانی‌شناسی، بررسی ویژگی‌های بافتی سرباره‌ها و تحلیل فرایندهای متالورژیکی به‌کاررفته در کوره‌های کهن بود.

پس از انجام مطالعات پتروگرافی، از همان نمونه‌های انتخاب‌شده (سه نمونه از هر محوطه، در مجموع شش نمونه) برای آنالیز شیمیایی به روش طیف‌سنجی نشر نوری پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-OES) استفاده شد. این آنالیز در شرکت زرکاوان انجام گرفت تا غلظت عناصر موجود در هر نمونه تعیین شود. دقت این روش در حد ppb بوده است. به منظور تطبیق بهتر داده‌ها با مطالعات استاندارد باستان فلزسنجی و امکان مقایسه با داده‌های موجود در منابع علمی بین‌المللی، غلظت عنصری اندازه‌گیری شده با استفاده از ضرایب تبدیل عنصر به اکسید (مانند تبدیل Si به SiO_2 و Fe به Fe_2O_3) به فرم اکسیدهای متناظر بازمحاسبه شد. لازم به ذکر است که

جدول ۱. موقعیت جغرافیایی نمونه‌های برداشت‌شده محوطه ذوب فلز چاه جمال (خُشومنگ) و نوع آنالیزهای انجام‌شده بر روی هر نمونه.

Table 1. Geographical location (UTM) of samples collected from the Chah Jamal (Khoshomang) metal smelting site and the types of analyses performed on each sample.

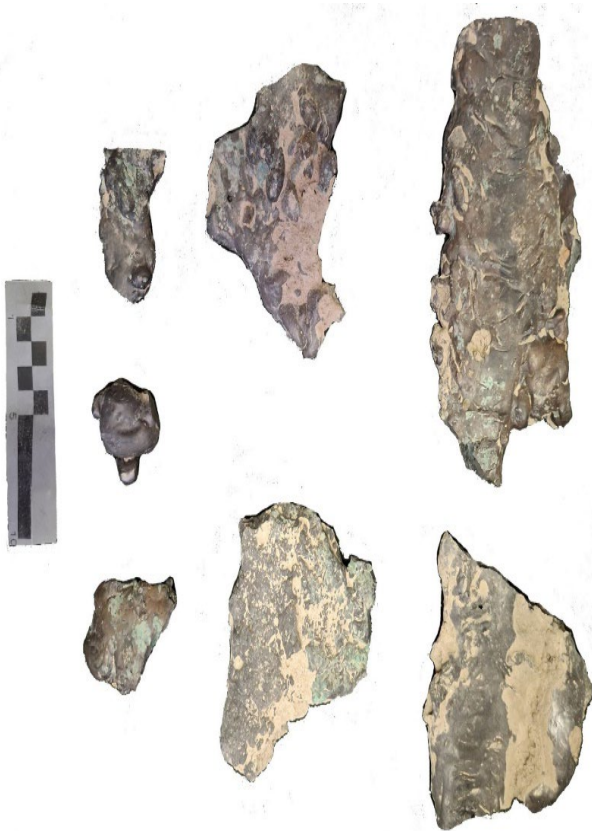
NAME	X	Y	Analysis
YD-01-TP/ICP	327005.7863	3589950.939	ICP
YD-02-TP/ICP	326889.934	3589989.759	ICP
YD-011-TP/ICP	327004.4634	3589952.398	ICP
YD-012-TP/ICP	327003.8498	3589951.099	ICP
YD-022-ICP	326885.9155	3589992.33	ICP
YD-023-ICP	326881.9874	3589997.006	ICP

زبر و متخلخل با حباب‌های کوچک و مناطق صاف‌تر است که احتمالاً به شرایط کوره و نرخ سرد شدن وابسته است.

در فرایند هضم اسیدی نمونه‌ها، سیلیکات‌ها به طور کامل حل نمی‌شوند و اندازه‌گیری دقیق سیلیس مستلزم روش‌های مکمل مانند XRF است؛ از این رو مقدار اکسید سیلیسیم (SiO_2) گزارش شده در این پژوهش برآوردی است، در حالی که سایر عناصر با دقت مناسبی از طریق ICP-OES تعیین شده‌اند.

۵. بررسی ماکروسکوپی نمونه‌ها

نمونه‌های سرباره مربوط به محوطه ذوب فلز شماره ۱ دارای رنگ‌های خاکستری تیره، قهوه‌ای روشن و سبز کم‌رنگ هستند که این تنوع رنگی به اکسید شدن فلز مس، نسبت داده می‌شود (شکل ۵). نمونه‌های سرباره محوطه ذوب فلز شماره ۱۱، اندازه این سرباره‌ها از ۴ سانتی‌متر تا بیش از ۱۳ سانتی‌متر متغیر است و اشکال آن‌ها به‌طور کلی نامنظم با لبه‌های شکسته و تیز است؛ سطوح این نمونه‌ها ترکیبی از ناهمواری‌های برجسته و در مقیاس کمتر، سطوح صاف‌تر هستند که حاکی از سرد شدن سریع سرباره‌ها پس از فرایند ذوب است. این سرباره‌ها همچنین دارای تخلخل قابل توجهی هستند که احتمالاً نتیجه به دام افتادن گازها در طی فرایند ذوب و سرد شدن سریع است.



شکل ۶. نمونه‌های سرباره محوطه ذوب فلز شماره ۲
Figure 6. Slag samples from metal smelting site No. 2.

۶. مطالعات پتروگرافی

مطالعه پتروگرافی سرباره‌های محوطه‌های ذوب فلز چاه جمال (خشومنگ) با هدف بررسی ویژگی‌های میکروسکوپی و شناسایی کانه‌های استخراجی انجام شد. فازهای مشاهده‌شده در سرباره‌های محوطه ذوب فلز شماره ۱، به‌طور کلی شامل فازهای سیلیکاتی و فلزی است. مطالعه مقاطع نازک نشان می‌دهد که فاز سیلیکاتی بخش عمده این سرباره‌ها را تشکیل می‌دهد و کانی پیروکسن به‌عنوان جزء اصلی آن، به‌صورت بلورهای دم‌چلچله‌ای و دم‌جارویی با رنگ قهوه‌ای تا سبز کم‌رنگ دیده می‌شود. علاوه بر پیروکسن، کانی فایالیت نیز بخشی از ترکیب سیلیکاتی این سرباره‌ها را تشکیل می‌دهد. در فاز فلزی، وزیکول‌های فراوانی از مس طبیعی (Native Copper) به همراه مس سولفیدی، که احتمالاً کالکوسیت است، مشاهده می‌شود که این کانه‌ها از نظر ابعاد متفاوت هستند. همچنین، ترکیب آهن‌دار ووستیت به مقدار قابل توجهی در خمیره سرباره‌ها حضور دارد که نشان‌دهنده شرایط احیائی و تعاملات شیمیایی در طی فرایند ذوب است. خمیره سرباره عمدتاً از فازهای شیشه‌ای تشکیل شده است که به‌صورت زمینه‌ای تیره و یکنواخت دیده می‌شود و حاوی ذرات پراکنده سیلیکاتی و فلزی است (شکل ۷). مطالعات میکروسکوپی مقاطع نازک-صیقلی سرباره‌های محوطه ذوب فلز شماره ۲، حضور فازهای سیلیکاتی و فلزی را آشکار می‌کند. در فاز سیلیکاتی، کانی غالب پیروکسن است که به‌صورت بلورهای دم‌چلچله‌ای با رنگ سبز تا زرد مشاهده می‌شود. بخش قابل توجهی از ماتریس سرباره را شیشه‌ای به رنگ سیاه تشکیل می‌دهد که نشان‌دهنده سرد شدن سریع



شکل ۵. نمونه‌های سرباره محوطه ذوب فلز شماره ۱
Figure 5. Slag samples from metal smelting site No. 1.

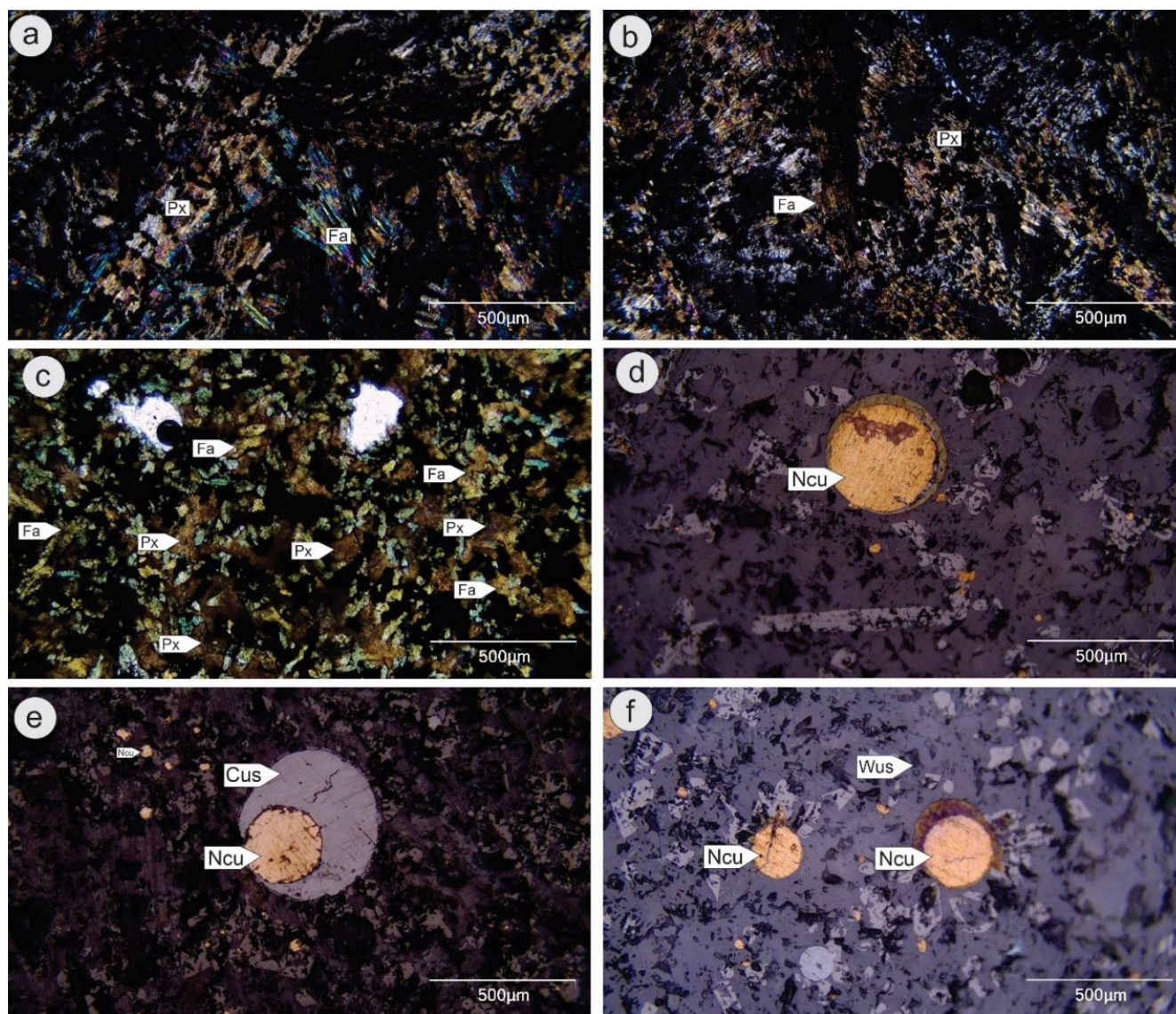
همچنین نمونه‌های سرباره محوطه ذوب فلز شماره ۲ نیز به رنگ‌های خاکستری، قهوه‌ای و سبز مایل به خاکستری هستند که حضور اکسیدها و ناخالصی‌های مس، به‌ویژه در لکه‌های سبز، عامل این رنگ‌هاست (شکل ۶). نمونه‌های سرباره محوطه ذوب فلز شماره ۲۲، اندازه سرباره‌ها از قطعات کوچک (حدود ۲ تا ۵ سانتی‌متر) تا بلوک‌های بزرگ‌تر (تا ۱۰ سانتی‌متر یا بیشتر) متغیر است و اشکال نامنظم با لبه‌های ناهموار دارند که نشان‌دهنده سرد شدن طبیعی آن‌ها پس از ذوب است. بافت آن‌ها ترکیبی از سطوح

(فلاکس های) سیلیسی و بیانگر به کارگیری کمک ذوب های کربناته (مانند سنگ آهک) به منظور کاهش گرانیوی (ویسکوزیته) سرباره است. با توجه به مشاهدات صحرایی و مطالعات پتروگرافی، نمونه های سرباره های این محوطه ها نشان می دهند که کارگاه های ذوب فلز موجود در این محل به منظور استخراج مس مورد استفاده قرار گرفته اند. براساس نتایج آنالیزهای انجام شده، می توان گفت که نمونه های این محوطه دارای عیار مسی در حدود ۱/۵ تا ۳ درصد هستند. همچنین در کنار مس، عناصری مانند سرب با عیاری در حدود ۰/۴ درصد، کبالت با میانگین ۲۳۰ ppm، نقره در محدوده ۰/۹۶ تا ۳/۷۶ ppm و روی با میانگین ۰/۱۶ درصد نیز شناسایی شده اند. براساس نتایج این آنالیزها می توان نتیجه گرفت که ماده خام تأمین کننده این کوره های ذوب، احتمالاً از یک کانسار پلی متال منشأ گرفته است. با توجه به این که میزان مس در نمونه های سرباره های این محوطه نسبتاً بالا است، احتمالاً این امر ناشی از راندمان نسبتاً پایین کوره های ذوب فلز بوده است.

و تشکیل ماتریس است. در فاز فلزی، کانه های مس طبیعی به صورت ریزبلورهای پراکنده در متن سرباره دیده می شوند، در حالی که کانی کوولیت (Covellite) به صورت درشت بلور قابل تشخیص است و بیانگر حضور سولفیدهای مس است. علاوه بر این، کانی آهن دار ووستیت نیز به مقدار قابل توجهی در این سرباره ها مشاهده می شود (شکل ۸).

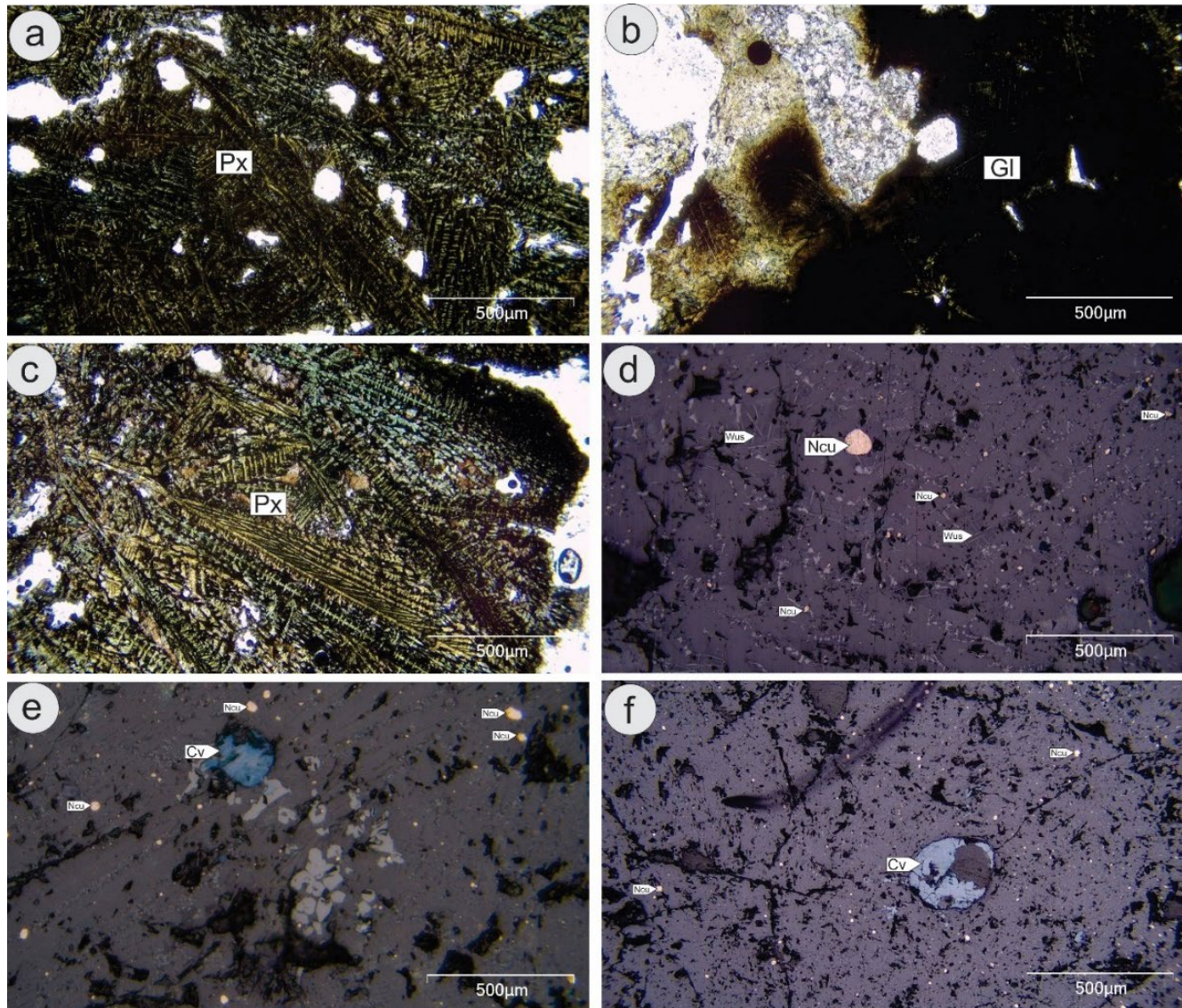
۷. شیمی سرباره ها

برای آنالیز نمونه های برداشت شده از دو محوطه ذوب فلز به روش (ICP-OES) مورد آنالیز قرار گرفتند. نتایج این آنالیز در جدول شماره یک آمده است. با توجه به این که در این پژوهش داده های XRF را نداریم با استفاده از تبدیل داده های ICP به XRF بخشی از سوالات در حوزه اکسیدها را پاسخ داده ایم. نتایج آنالیز اکسیدهای اصلی نشان می دهد که SiO_2 براساس مقادیر تخمینی جزء غالب ترکیب شیمیایی است (۶۱/۷۳ تا ۶۸/۳۷ درصد) و پس از آن Fe_2O_3 (۱۴/۳۰ درصد، در همه نمونه ها)، CaO (۶/۳۱ تا ۷/۵۷ درصد) و MgO (۱/۷۸ تا ۳/۳۲ درصد) قرار دارند (شکل ۹). محتوای بالای SiO_2 و CaO نشان دهنده استفاده از کمک ذوب های



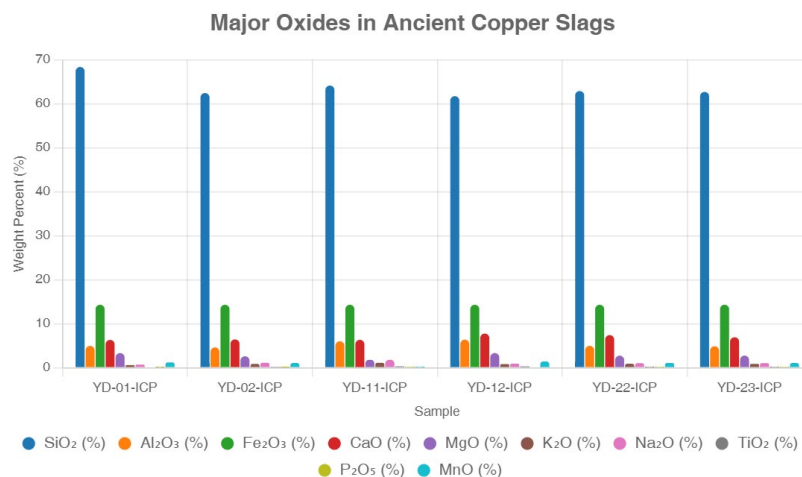
شکل ۷. تصاویر میکروسکوپی مقاطع نازک و صیقلی سرباره های ذوب محوطه ذوب فلز شماره ۱ چاه جمال. (a, b, c) فایالیت و پیروکسن در زمینه شیشه ای (XPL); پیروکسن به صورت پراکنده و دمچلچله ای و فایالیت به صورت سوزنی شکل (d, e, f) فازهای فلزی مشاهده شده که شامل مس طبیعی و مس به صورت سولفیدی (احتمالاً کالکوسیت). اختصارات: Fa: فایالیت، Px: پیروکسن، Ncu: مس طبیعی، Cus: مس سولفیدی.

Figure 7. Microscopic images of thin and polished sections of slag from the Chah Jamal metal smelting site No. 1. a, b, c) Fayalite and pyroxene in a glassy matrix (XPL); pyroxene appearing sporadically and acicular, and fayalite in a needle-like form; d, e, f) Observed metallic phases including native copper and copper in sulfide form (possibly chalcocite). Abbreviations: Fa: Fayalite, Px: Pyroxene, Ncu: Native copper, Cus: Copper sulfide.



شکل ۸. تصاویر میکروسکوپی مقاطع نازک و صیقلی سرباره‌های محوطه ذوب شماره ۲ چاه جمال خُشومنگ. (a, b, c) پیروکسن به رنگ سبز و زرد و فاز شیشه‌ای (XPL)؛ (d) مس طبیعی که به صورت ریز و پراکنده در متن سرباره قابل مشاهده است و (e, f) کانی کوولیت و مس طبیعی. اختصارات: Px: پیروکسن، Gl: شیشه، NCu: مس طبیعی، Cv: کوولیت.

Figure 8. Microscopic images of thin and polished sections of slag from the Chah Jamal Khoshomang smelting site No. 2. a, b, c) Pyroxene in green and yellow colors and a glassy phase (XPL); d) Native copper visible as fine and scattered within the slag matrix; e, f) Covellite and native copper minerals. Abbreviations: Px: Pyroxene, Gl: Glass, NCu: Native copper, Cv: Covellite.



شکل ۹. نمودار ستونی اکسیدهای اصلی در نمونه‌های سرباره

Figure 9. Bar chart of the main oxides in slag samples.

جدول ۱. نتایج آنالیز شیمیایی سرباره‌های ذوب فلز محوطه چاه جمال به روش ICP-OES (اکسیدهای اصلی از تبدیل داده‌های عنصری محاسبه شده‌اند)

Table 1. Results of chemical analysis of slag from the Chah Jamal metal smelting site using ICP-OES (main oxides calculated from elemental data).

Sample	YD-01-ICP	YD-11-ICP	YD-12-ICP	YD-2-ICP	YD-22-ICP	YD-23-ICP
SiO ₂	68.37	68.005	64.702	68.71	67.229	67.852
Al ₂ O ₃	4.953	5.989	6.364	4.601	4.966	4.855
Fe ₂ O ₃	14.297	14.297	14.297	14.297	14.297	14.297
CaO	6.307	6.315	7.749	6.423	7.404	6.905
MgO	3.316	1.779	3.316	2.589	2.729	2.736
Na ₂ O	0.691	1.8	0.901	1.123	1.027	1.03
K ₂ O	0.577	1.113	0.807	0.839	0.902	0.858
TiO ₂	0.153	0.288	0.29	0.166	0.185	0.18
MnO	1.194	0.187	1.396	1.052	1.055	1.077
P ₂ O ₅	0.142	0.227	0.178	0.2	0.206	0.21
Ag	1.11	3.76	1.66	2.7	0.96	1.19
As	13.4	21.4	12.9	36	18.7	20.7
Ba	384	232	288	302	290	437
Be	17	2.8	26.5	8.4	8.3	8.4
Cd	0.46	0.41	0.7	1	0.9	0.9
Ce	30	38	79	41	43	40
Co	238.4	159.3	521.9	179.4	144.9	150.6
Cr	22	61	31	29	32	28
Cu	21067	23793	22524	30457	15660	17265
La	20	27	38	23	25	25
Li	55	33	71	43	41	41
Mo	13.6	2.88	9.2	14.2	15.6	16.4
Ni	53	351	106	220	147	158
Pb	147	257	179	239	366	428
S	606	1167	218	2776	727	716
Sb	10.48	17.32	1.31	1.54	1.4	13.32
Sc	4.3	7.7	7	4.9	5.1	5
Sr	632	1258	716	3830	1123	1162
Th	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Ti	916	1728	1737	993	1109	1080
U	<5	<5	<5	<5	<5	<5
V	35	62	52	34	37	37
Y	24.9	19.3	31.5	36.7	38	38.5
Yb	4.7	4.3	4.5	5	5.1	5.2
Zn	924	770	1499	2154	2244	2383
Zr	44	98	68	53	57	57

۸. بحث و بررسی

مطالعات صحرایی، پتروگرافی و ژئوشیمیایی که بر روی نمونه‌های برداشته شده از محوطه‌های ذوب فلز انجام شده، اطلاعات لازم برای پاسخگویی به پرسش‌های اصلی این پژوهش را فراهم می‌آورد. این بحث ابتدا به ویژگی‌های فن‌آورانه فرایند ذوب و عملکرد کوره‌ها و سپس به منشأ و نوع کانه‌های استحصالی می‌پردازد. در ادامه، داده‌های صحرایی، پتروگرافی و نتایج آنالیز شیمیایی با یکدیگر تلفیق می‌شوند تا تصویری منسجم از فن‌آوری کهن در استحصال فلزات، به ویژه مس، ارائه شود. پراکندگی سرباره‌ها در این دو محوطه ذوب فلز، با وسعت‌های ۲۰۰ و ۷۲ مترمربع، نشان از آن دارد که این منطقه میزبان دو کارگاه ذوب فلز مرتبط با یکدیگر بوده است. بررسی ماکروسکوپی نمونه‌های برداشت شده از سرباره‌های دو محوطه نشان می‌دهد که رنگ آن‌ها از خاکستری تا سبز متغیر است که علت آن حضور اکسیدهای مس (سبز شدن ناشی از اکسیداسیون فلز مس) است. این سرباره‌ها دارای سطوحی نامنظم و تخلخل قابل توجهی هستند که به خروج گازها طی فرایند ذوب مرتبط است. مطالعات میکروسکوپی نشان می‌دهد که کانی‌های اصلی تشکیل دهنده این سرباره‌ها فایالیت و پیروکسن هستند. کانه‌های استحصالی شناسایی شده در این سرباره‌ها شامل کانی‌های مسی نظیر کوولیت، مس طبیعی و کالکوسیت، و کانی آهن‌دار وستیت است که حضور آن نشانه‌ای از شرایط احیایی درون کوره‌هاست.

نتایج آنالیزهای شیمیایی نشان دهنده میزان بالای سیلیس و پس از آن اکسیدهای آهن است. علاوه بر سیلیس، کلسیم و منیزیم نیز به مقادیر قابل توجهی حضور دارند که عمدتاً به عنوان فلاکس‌های سیلیسی و کربناته، جهت کاهش ویسکوزیته و کنترل شرایط دمایی کوره‌ها به کار رفته‌اند. دمای تخمینی این کوره‌ها حدود ۱۱۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد بوده و حضور کانی فایالیت، همراه با کانی آهن‌دار وستیت در سرباره‌ها، نشان دهنده شرایط احیایی نسبی و کنترل شده درون کوره‌هاست. کانی‌های سیلیکاته پیروکسن و فایالیت در زمینه‌ای شیشه‌ای نیز مؤید همین دما و سرد شدن نسبتاً سریع سرباره‌ها هستند. میزان بالای سیلیس (تخمینی) و ترکیبات کربناته در سرباره‌ها به کاهش ویسکوزیته، پایین آوردن دمای ذوب و تسهیل در جداسازی ناخالصی‌ها کمک کرده‌اند؛ ویژگی‌هایی که با ساختار و عملکرد کوره‌های شناسایی شده در محوطه همخوانی دارد. با توجه به رخنمون‌های سنگ‌های کربناته و رگه‌های سیلیسی در نزدیکی این محوطه، تأمین چنین موادی از منابع محلی نیز کاملاً محتمل است. داده‌های آنالیز شیمیایی نشان دهنده باقی ماندن مس تا حدود سه درصد در این سرباره‌هاست؛ مقداری که در محدوده معمول سرباره‌های متالورژی باستانی قرار دارد و بیش از آن که نشانه ناکارآمدی خاص این کوره‌ها باشد، با راندمان متعارف فن‌آوری ذوب دوران باستان قابل توجیه است. علاوه بر مس، آنومالی نسبتاً ضعیف سرب و روی، و همچنین آنومالی نقره در این سرباره‌ها مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد سنگ خام تأمین کننده این کوره‌ها احتمالاً از یک کانسار پلی‌متال به دست آمده است.

در پاسخ به پرسش نخست این پژوهش، در مورد فن‌آوری به کاررفته برای استخراج فلز مس در محوطه‌های ذوب فلز چاه جمال خُشومنگ، می‌توان گفت این فن‌آوری مبتنی بر استفاده از کانه‌های سولفیدی مس، به ویژه کالکوپریت، کالکوسیت و کوولیت، در شرایط احیایی بوده است. این کانه‌ها، با وجود تفاوت در عیار مس (کالکوپریت عیاری متوسط و کالکوسیت و کوولیت عیاری بالاتر دارند)، شواهد صحرایی، پتروگرافی و ژئوشیمیایی حاکی از نقش برجسته آن‌ها در تأمین مواد خام برای این کوره‌هاست. با توجه به شواهد زمین‌شناسی منطقه، کانسنگ در دسترس برای تأمین خوراک این کوره‌ها عمدتاً از نوع سولفیدی بوده است؛ امری که با شواهد

معدنکاری کهن شناسایی شده در شعاع چند کیلومتری این محوطه‌های ذوب فلز همخوانی دارد.

در ارتباط با پرسش دوم این پژوهش، درباره منشأ و نوع کانه‌های مورد استفاده در فرایند ذوب، می‌توان اظهار داشت که ماده معدنی اولیه به کاررفته در محوطه‌های ذوب فلز چاه جمال، از منابع محلی و نزدیک به محل کوره‌ها تأمین شده است. شواهدی از فعالیت‌های معدنکاری قدیمی، شامل چاهک‌ها و تونل‌هایی در شعاع حدود دو کیلومتری این محوطه‌ها، شناسایی شده است. بررسی‌های صحرایی در این مناطق نشان دهنده حضور کانه‌های سولفیدی مس، به ویژه کالکوپریت و کالکوسیت، در این معادن کهن است؛ موضوعی که با نتایج حاصل از مطالعات پتروگرافی و آنالیزهای ژئوشیمیایی سرباره‌های یافت شده در محوطه‌های ذوب مطابقت دارد. علاوه بر این، وجود آنومالی‌های عناصر همراه هم چون سرب، روی، نقره و سایر فلزات در نتایج آنالیزهای انجام شده بر روی نمونه‌های سرباره، مؤید آن است که ماده معدنی مورد استفاده از نوع کانسارهای پلی‌متال (چندفلزی) بوده است. این یافته با شواهد معدنکاری در شعاع چند کیلومتری محوطه‌های ذوب هم‌راستا بوده و احتمال استخراج و بهره‌برداری از چنین کانسارهایی در گذشته را تقویت می‌کند.

۹. نتیجه‌گیری

هدف از پژوهش حاضر، بررسی فن‌آوری ذوب فلز و منشأ کانه‌های مورد استفاده در محوطه‌های باستانی چاه جمال خُشومنگ در استان یزد، از طریق مطالعات میدانی، پتروگرافی و ژئوشیمیایی بر روی نمونه‌های سرباره بود. نتایج نشان داد که سرباره‌های هردو محوطه از نظر کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی همپوشانی قابل توجهی دارند. کانی‌های اصلی شناسایی شده شامل پیروکسن و فایالیت در زمینه‌ای شیشه‌ای است و کانه‌های فلزی همراه آن‌ها مس طبیعی، کانی‌های سولفیدی مس (کالکوسیت و کوولیت) و کانی آهن‌دار وستیت است. بر این اساس، دمای عملیاتی کوره‌ها حدود ۱۱۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد و شرایط درون کوره احیایی تخمین زده شد. نتایج آنالیزهای شیمیایی نیز بالا بودن میزان سیلیس، اکسید کلسیم و منیزیم را نشان داد که کاربرد آن‌ها به عنوان فلاکس‌های سیلیسی و کربناته در فرایند ذوب بوده است. در پاسخ به پرسش نخست این پژوهش، فن‌آوری ذوب در محوطه‌های چاه جمال خُشومنگ مبتنی بر استحصال مس از کانه‌های سولفیدی، به ویژه کالکوپریت، کالکوسیت و کوولیت، در شرایط احیایی بوده است. در پاسخ به پرسش دوم پژوهش، شواهد صحرایی و ژئوشیمیایی نشان می‌دهد که ماده خام تأمین کننده این کوره‌ها از منابع محلی، به ویژه معادن کهن شناسایی شده در شعاع چند کیلومتری این محوطه‌ها (شامل تونل‌ها و چاهک‌های قدیمی)، تأمین شده است. همچنین آنومالی‌های سرب، روی و نقره در نمونه‌های سرباره حاکی از تأمین مواد خام از یک کانسار پلی‌متال است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که محوطه‌های چاه جمال خُشومنگ نمونه‌ای از کارگاه‌های ذوب فلز و استحصال مس در فلات مرکزی ایران‌اند و درک ما را از دانش و فن‌آوری متالورژیکی کهن در بخش مرکزی فلات ایران گسترش می‌دهند. با این حال، نبود شواهد ساختاری روشن از کوره‌ها و عدم امکان تاریخ‌گذاری دقیق یا نسبی این محوطه‌ها از محدودیت‌های اصلی این پژوهش است. از این رو، انجام کاوش‌های باستان‌شناسی هدفمند و مطالعات تکمیلی نظیر تاریخ‌گذاری مطلق، برای تعیین دقیق‌تر قدمت، توالی زمانی و جایگاه منطقه‌ای این محوطه‌ها در پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود.

<https://doi.org/10.22059/jarcs.2022.345208.143139>

سیاسگزاری

بدین وسیله صمیمانه از آقای مهندس شکری، از شرکت زمین شناسی مهندسی امید، به دلیل پشتیبانی‌های لجستیکی و همکاری‌های بی‌دریغشان که نقش به‌سزایی در پیشرفت این پژوهش داشت، قدردانی می‌کنم. همچنین از دکتر مهری و مهندس مسعودی به خاطر تلاش‌های ارزشمندشان در زمینه‌های مستندسازی، نمونه‌برداری و پشتیبانی علمی سپاسگزارم. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از جناب آقای دکتر علی لاجپانی به پاس همکاری ارزشمند ایشان در ترسیم نقشه‌ها و مستندسازی این پژوهش، صمیمانه قدردانی و تشکر نمایند.

حمایت مالی و معنوی: حمایت مالی و معنوی این پژوهش بر عهده نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان در پژوهش

- نویسنده اول: مسئول نمونه‌برداری و تحلیل داده‌ها.
- نویسنده دوم: عهده‌دار تحلیل داده‌ها و نگارش متن.
- نویسنده سوم: انجام مطالعات پتروگرافی.
- نویسنده چهارم: بازخوانی و ویرایش متن.
- نویسنده پنجم: مسئول نمونه‌برداری و مطالعات میدانی.

تعارض منافع

نویسندگان تأکید کرده‌اند که در این مطالعه و پژوهش هیچ گونه تعارض منافی وجود ندارد.

References/منابع

- Fenn, T. R. (Ed.). (2012). Archaeometallurgy section. *SAS Bulletin*, 35(2), 19–28. Society for Archaeological Sciences.
- Giardino, C. (2022). Archaeometallurgy: A discipline between past and future. In S. D'Amico & V. Venuti (Eds.), *Handbook of cultural heritage analysis* (pp. 673–702). Springer Nature Switzerland AG.
- Hashemi, Z., Nezafati, N., & Demant, D. (2024). Looking for ancient metalworking sites of Luristan (Western Iran): A preliminary archaeometallurgical approach. *METALLA*, 31(1), 43–64.
- Mortazavi, M., Salehi Kakhki, A., Golozar, M. A., & Tala'i, H. (2011). Preliminary metallurgical investigation of copper-based artifacts at Tepe Sagzabad in Qazvin Plain, Iran (1500–800 BC). *Iranian Journal of Archaeological Studies*, 1(2), 49–59.
- Oudbashi, O., Emami, S. M., & Davami, P. (2012). Bronze in archaeology: A review of the archaeometallurgy of bronze in ancient Iran. In L. Collini (Ed.), *Copper alloys: Early applications and current performance enhancing processes* (pp. 153–178). InTech.
- Oudbashi, O., Naseri, R., & Malekzadeh, M. (2016). Technical studies on the Bronze Age metal artefacts from the graveyard of Deh Dumen, South-Western Iran (third millennium BC). *Archaeometry*, 58(1), 60–77. <https://doi.org/10.1111/arcm.12158>
- Pigott, V. C. (2004). On the importance of Iran in the study of prehistoric copper-base metallurgy. In T. Stöllner, R. Slotta, & A. Vatandoust (Eds.), *Persia's ancient splendour: Mining, handicraft and archaeology* (pp. 28–43). Deutsches Bergbau-Museum.
- Thornton, C. P. (2009). The emergence of complex metallurgy on the Iranian Plateau: Escaping the Levantine paradigm. *Journal of World Prehistory*, 22(3), 301–327. <https://doi.org/10.1007/s10963-009-9020-0>
- Thornton, C. P., & Lamberg-Karlovsky, C. C. (2004). A new look at the prehistoric metallurgy of Southeastern Iran. *Iran*, 42, 47–59. <https://doi.org/10.1080/05786967.2004.11834645>
- Vatandoust, A., Parzinger, H., & Helwing, B. (Eds.). (2011). *Early mining and metallurgy on the Western Central Iranian Plateau: The first five years of work* (Archäologie in Iran und Turan Band 9). Philipp von Zabern.
- Kamali, A., Beheshti, S. I., Azizi Kharanaghi, M. H., & Bérard, E., Dillmann, P., Téreygeol, F., Gemelli, E., Hérubel, A., Bourgarit, D., Mille, B., & Toureille, V. (2020). Ancient armour provenance by LA-ICP-MS analysis of microscopic slag inclusions. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 35(5), 901–913. <https://doi.org/10.1039/C9JA00388A>
- Dehno, S. E., Kamali, A. A., Beheshti, S. I., Ebrahimi, M., & Aarab, A. (2025). Unveiling Shahdad: Exploring ancient copper reserves and metallurgical practices on Iran's Southeast Plateau. *L'Anthropologie*, 129(1), 103343. <https://doi.org/10.1016/j.anthro.2024.103343>
- Emami, M., Dardeniz, G., Vallcorba, O., Pourzargan, V., & Tayyari, J. (2022). Towards a deeper understanding of the third millennium BC Iranian metallurgy: Use of synchrotron light for characterizing arsenic-bearing minerals in metal objects from Espidej. *Surface and Interface Analysis*, 54(4), 463–474. <https://doi.org/10.1002/sia.7076>
- Eskandari, N., & Emami, S. M. (2022). Re-tracing copper metallurgy in the Shahdad region (3rd millennium BCE). *Journal of Archaeological Studies*, 14(2), 143–168.

Darkhal, N. (2022). Physicochemical analysis of slags from Yazd Province: A metallurgical approach to extractive ores (Khatam County). Research Institute of Cultural Heritage and Tourism, Conservation Department. (In Persian).

عزیزی خرائقی، محمدحسین. (۱۴۰۰). بررسی باستان شناسی شهرستان خاتم (بخش های هرات، چاهک و ایثار)، پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری.

کمالی، امین‌اله، بهشتی، سید ایرج، عزیزی خرائقی، محمدحسین، و دارخال، نازلی. (۱۴۰۱). بررسی فیزیکوشیمیایی سرباره های استان یزد به منظور رهیافتی به کانه های استحصالی (شهرستان خاتم). پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی-فرهنگی، پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری.

کمالی، امین‌اله، حمید فدایی، بهشتی، سید ایرج، علی اعراب و عظیمی، مولودسادات. (۱۴۰۲). مطالعات معدن کاوی کهن و فلزکاری روی در ایران، مطالعه موردی: معدن سرب- روی نیوک میبد استان یزد. پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی-فرهنگی، پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری.

کمالی، امین‌اله، فدایی، حمید، بهشتی، سید ایرج، اعراب، علی. (۱۴۰۴). بررسی محوطه های باستانی ذوب فلز در مناطق ذووه، چاه جمال (خوشومی)، بهاباد و دهانه لشکر در استان یزد. پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی-فرهنگی، پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری.