رد پای تولید توتیا در جنوب شرق ایران: مطالعات شیمیایی و مینرالوژیک بر روی میخ های سفالین به جای مانده از فلزگری با استفاده از آزمایش های پتروگرافی و ICP-OES

نازنین خجسته بهزادی[۱]، فرزاد مافی[۲*]، سید محمد امین امامی[۳]

mafifarzad@gmail.com*

۱. دانشجوی دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ابهر

۲. استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ابهر

۳. استاد، دانشگاه هنر اصفهان

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۷/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۴/۱۳

تعداد صفحات: ۱۱

شناسه دیجیتال(doi): https://10.66224/kcr.9.1.37

فصلنامه علمی- پژوهشی دانش حفاظت و مرمت

شاپای الکترونیکی: ۶۲۱۷-۳۰۶۰

شاپای چاپی: ۶۰۹۳-۲۵۳۸

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.

چکیده

ناحیه کرمان با دارا بودن منابع عظیم و غنی معدنی، از مهم ترین مناطق در شناسایی و استخراج فلزات به شمار می‌آید. شهر بم در جنوب‌شرق این استان به دلیل شرایط خاص زمین‌شناسی و زمین‌ریخت‌شناسی از دیرباز به مرکزی استراتژیک برای پیوند مسیر جنوب‌خاوری ایران با سیستان تبدیل شده است. بررسی باستان‌شناختی بخش مرکزی شهرستان بم با هدف شناسایی مراکز ذوب فلز و معادن کهن در طول سال های (۱۳۹۷-۱۳۹۸ ه.ش) آغاز شد. در این مقاله، با استناد به نتایج بررسی‌های میدانی انجام‌شده در بخش مرکزی بم، مطالعات آزمایشگاهی شیمیایی و مینرالوژیک بر روی چهار نمونه از میخ‌های سفالین مکشوفه از چهار ناحیه مربوط به فعالیت‌های فلزگری انجام گرفته است. این آزمایشات با هدف شناسایی کاربری این میخ‌ها و بررسی فرآیندهای استحصال به کار رفته است. نمونه های میخ‌های سفالین مورد مطالعه از طریق تحلیل پتروگرافی و ژئوشیمیایی با استفاده از روش ICP-OES از چهار محوطه شناسایی‌شده انجام شده است. پتروگرافی میخ‌های سفالی، حاکی از درجه حرارت بالای ساخت این اشیاء و بافت پورفیری شامل مواد پرکننده عمدتاً آذرین است. نتایج آنالیز شیمیایی میخ‌های سفالی نشان می دهد که حدود ۷۲ درصد از ترکیب شیمیایی این میخ‌ها متشکل از عنصر روی بوده و استحصال آگاهانه این فلز را اثبات می کند. وجود تکنولوژی کافی در راستای انجام فرایند اکسیداسیون روی و تولید توتیا در این محوطه می تواند دلیلی بر شروع یکی از پیچیده‌ترین و فن‌آورانه‌ترین فرایندهای استحصال فلز در دنیای باستان باشد. نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی میخ‌های سفالین به دست آمده از برخی محوطه ها حاکی از استفاده از این میخ‌ها جهت استحصال اکسید روی (توتیا) بوده است.

واژگان کلیدی: میخ های سفالین، فلزگری‌باستان، پتروگرافی، ICP-OES، جنوب شرق ایران، بم.

۱.مقدمه

ناحیه معدنی و کانی‌زایی ذخایر فلزی کرمان با مساحتی در حدود ۵۰ هزار کیلومتر مربع شامل مناطق غربی، جنوب و جنوب شرقی استان کرمان است. شواهد معدن‌کاوی و فلزکاری کهن در حوزه فرهنگی کرمان به عنوان یکی از وسیع‌ترین مناطق در جنوب شرقی ایران و دربردارندهٔ غنی‌ترین ذخایر معدنی در ایران، پیشتر نیز مورد توجه برخی پژوهشگران قرار گرفته و برخی معادن کهن، کوره ها و محوطه های فلزکاری در نقاطی از پهنه این استان از دهه‌های قبل گزارش شده است. از جمله این معادن کهن و محوطه های مرتبط با فلزکاری، می توان به تل‌ابلیس، تپه یحیی، شیخ عالی و خبیص (شهداد) اشاره کرد. همچنین، سایر محوطه های کوچک و بزرگ معدن کاری، ذوب فلزات و اسکان فلزکاران به بیش از یکصد مورد می‌رسد. فعالیت‌های معدنی باستانی در کانسارهای آهن گل گهر، مس میدوک، مس سرچشمه، سرب و روی قنات مروان و بسیاری دیگر نیز مشاهده می شود (مومن زاده و فرجاد باستانی، ۱۳۶۹). همچنین کاوش‌ها و بررسی‌های تل ابلیس در جلگه بردسیر، شواهد و یافته‌های ارزشمندی از فلزکاری کهن را نمایان کرده است (Caldwell,1967)؛ تپه یحیی و معدن باستانی شیخ عالی در نزدیکی آن، فعالیت گسترده فلزکاران را از دوران پیش از تاریخ تا دوره‌های اسلامی نشان داده است (Thornton and

مقاله حاضر برگرفته از رساله دکتری نویسنده اول تحت عنوان « رد پای تولید توتیا در جنوب شرق ایران: مطالعات شیمیایی و مینرالوژیک بر روی میخ های سفالین به جای مانده از فلزگری با استفاده از آزمایش های پتروگرافی و ICP-OES » است که به راهنمایی نویسنده دوم و مشاوره نویسنده سوم در گروه باستان شناسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد ابهر به انجام رسیده است.

nazaninkhojastehbehzadi@iau.ir

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-10-09]

[DOI: 10.66224/kcr.9.1.37]

Lamberg-Karlovsky, 2001)؛ و یافته‌های فلزی متعدد در شهداد در حاشیه غربی لوت (حاکمی،۱۳۵۴) و نیز یافته‌های فلزی در دارستان بم در حاشیه شرقی لوت نشانگر بهره‌گیری از فلز و رونق فلزگری در این نواحی در ادوار پیش از تاریخ است (گاراژیان، ۱۳۸۷). این بهره‌وری و توسعه فن‌آوری در استحصال فلزات شاخص به مانند مس، طلا، نقره، سرب و آهن از دیرباز در فلات ایران به صورت شاخص انجام شده است.

در این میان فلز روی از زمره فلزاتی است که علی‌رغم کاربردهای متنوع صنعتی و آرایشی همچنان از بعد تکنولوژی استحصال در ابهام است. روی در ایران به صورت توتیا (اکسید روی ZnO) معرفی شده و سابقه استفاده از آن به زمان ساسانیان بازمی گردد. ابوریحان بیرونی در قرن یازدهم میلادی فرایند تولید توتیا را چنین توصیف می کند: "سنگ معدن روی را در کوره‌ای که با میخ های سفالی پخته و چیدمان شده، پر گشته قرار می‌دادند. با روشن کردن آتش در زیر کوره، بخارات روی به سمت بالا متصاعد شده و به میخ ها می چسبید و پس از خنک شدن (یعنی تقطیر)، لایه‌ای فلس مانند از اکسید روی یا توتیا، روی آن ها تشکیل می شده است". این فن‌آوری بعدها توسط مارکوپولو در قرن سیزدهم (Polo,1903) و ابوالقاسم کاشانی (۱۳۵۳) در منطقه‌ی کرمان توضیح داده شد. بقایای کوره های ذوب سنگ معدن روی و تولید توتیا در نواحی مرکزی ایران، مانند بهاباد و کوهبنان، هنوز قابل مشاهده است. توتیا نه تنها در مصارف طبی و صنعتی در ایران کاربرد داشت، بلکه به عنوان محصولی تجاری به نقاط دیگر جهان صادر می‌شد (قزوینی، ۱۳۶۶). متون کهن، از جمله آثار شهمردان ابی الخیر (۱۳۶۲)، ویژگی های توتیا را چنین بر می شمارند: "مس را سفید می کند، طلا را شکننده و سرخ رنگ می‌سازد و در ساخت برنج نقش کلیدی دارد". با این پیشینه غنی، متون فنی اندکی درباره‌ی فن‌آوری تقطیر روی در ایران وجود دارد. آثار حمد الله مستوفی (۱۳۶۲)، ابوالقاسم کاشانی (۱۳۵۳) و عقیلی خراسانی (۱۳۷۱) از معدود منابعی هستند که به این موضوع پرداخته‌اند.

با بررسی‌های پیمایشی در محوطه های بخش مرکزی شهر بم، آثار و شواهد وجود کوره های باستانی در اطراف معادن سرب و روی منطقه نمایان شد. این بررسی با تاکید بر زیستگاه های روستایی به عنوان بخشی از حیات پایدار پهنه بم به انجام رسید. هدف بررسی دقیق فن‌آوری باستانی استحصال روی در این کوره ها، شناسایی نوع فلز استحصال شده، تحلیل فرایندهای متالورژیکی و بازسازی فن‌آوری به کار رفته با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، مشاهدات میکروسکپی ریزساختارها و شیمیایی است. با مطالعات آزمایشگاهی بر روی میخ های سفالین در چهار محدوده مورد مطالعه در بخش مرکزی بم، به بررسی ترکیب شیمیایی میخ‌های سفالین و بافت ساختار آنان جهت ردیابی فلز روی و نحوه استحصال آن پرداخته می شود.

شروع مطالعات باستان شناسی جهت بررسی شهرستان بم، به سرپرستی محمدتقی عطایی (۱۳۸۳) به انجام رسید. پس از آن، در دشت لوت و منطقه دارستان بم، بازدیدهایی به سرپرستی عمران گاراژیان (۱۳۸۶) صورت گرفت. همچنین، فصل دوم بررسی‌های شهرستان بم، به سرپرستی شهرام زارع (۱۳۸۷) تداوم یافت. زارع فصل سوم بررسی شهرستان بم را نیز در سال ۱۳۹۱ به انجام رساند. همچنین، در فاصلهٔ سال های ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۴ مطالعات منظر فرهنگی بم زیر نظر مرحوم شهریار عدل و توسط لیلا فاضل ادامه یافت و در مجموع چهار شهرستان بم، نرماشیر، فهرج و ریگان مورد بررسی قرار گرفتند و نتایج آن در کتابی با عنوان «مطالعات باستان شناسی ناحیه منظر فرهنگی بم–شهرستان های فهرج و ریگان» منتشرشد (فاضل، ۱۳۹۹). از سال ۱۳۹۷ تاکنون مطالعات تکمیلی با رویکرد باستان‌سنجی و فلزگری باستانی به منظور شناخت بیشتر محوطه های معرفی شده انجام شده که به غنای هرچه بیشتر منطقه کرمان می‌افزاید (Khojasteh Behzadi et al; 2023). لازم به ذکر است که بررسی‌های باستان‌شناختی با رویکردهای میان رشته‌ای و خصوصا معدن کاری در بخش مرکزی بم تکمیل نشده است و هنوز گاه نگاری از منطقه در دسترس نیست. اطلاعات ما در این زمینه براساس متون تاریخی از این مناطق نام برده، می باشد.

۲. پیشینه تولید توتیا

توتیا از بعد شیمیایی اکسید روی (ZnO) است. اکسید روی در طبیعت به طور نادر وجود دارد ولی در دوران باستان به صورت اتفاقی بر اثر حرارت دادن سنگ های دارای روی در کوره های باستانی تولید می شده است. واژه توتیا در اصل معرب کلمه دودها یا دودی‌یای فارسی است. توتیا به دو شکل ممکن است یافت شود:

۱. به صورت طبیعی و خالص در معادن روی به نام زینکیت یافت می شود (ZnO) که اختصاصات کانی شناسی آن عبارتند از: رنگ قرمز، سختی ۵ تا ۵/۴ و وزن مخصوص ۴/۵ تا ۷/۵

۲. توتیا ناخالص که البته این نوع از توتیا امروزه در دسترس نمی باشد و احتمالا دارای نا خالصی هایی از عناصر دیگر بوده است. به طور کلی در دو دسته از کتب علمی قدیم از توتیا نام برده شده است. دسته اول کتب ادویه، که درباره داروشناسی و داروسازی است و دسته دوم کتاب های جواهر، که در مورد سنگ شناسی و کانی شناسی تالیف شده‌اند. اکثر مولفین فارسی و عربی زبان کتب ادویه و جواهر واژه توتیا را معرب کلمه «دودها» یا «دودیا» ی فارسی دانسته‌اند. در فرهنگ زبان‌های فارسی از قبیل مجمع الفرس، آنندراج، برهان قاطع، (که فقط درباره توتیای اکبر مطلبی دارد)، فرهنگ رشیدی و غیاث اللغات درباره توتیا چیزی نوشته نشده است اما در فرهنگ معین و لغت نامه دهخدا توتیا را همان اثمد (سرمه) دانسته‌اند. در فرهنگ انگلیسی آکسفورد در توضیح ریشه این واژه گفته شده است که یک کلمه خارجی و احتمالا فارسی می باشد که وارد زبان عربی شده است. براساس شواهد به دست آمده کوره های تولید توتیا دارای ساختار خاصی بوده و اغلب به صورت دو طبقه درست می شدند. سنگ‌های حاوی ترکیبات روی بر روی منبع حرارتی کوره و در قسمت پایینی کوره قرار داشتند و تا درجه حرارت حدود ۹۰۰ درجه سانتیگراد حرارت را متحمل می شدند. در قسمت بالای کوره یک صفحه مشبک بوده که در داخل آن ها میخ‌های از جنس سفال چیدمان می شدند. بخار حاوی روی که در درجه حرارت بالا پخته شده است پس از خنک شدن بخارات حاوی روی (تصعید) بر روی میخ‌های سفالین به صورت ZnO می‌نشسته و در نهایت ماده جامد نهایی که از سطح میخ های سفالین تراشیده و جدا می شده، همان توتیا بوده است (عقیلی خراسانی، ۱۳۷۱). شواهد باستان شناسی و تاریخی نشان دهنده ی بهره برداری از فلز روی به صورت اکسید روی (توتیا) در تمدن های کهن، به ویژه در ایران، هند و چین است. در هند منطقه زاوار در راجستان از مراکز اصلی تولید روی در دوران باستان بوده و کاوش‌های باستان شناسی در این منطقه که به بازه‌ی زمانی ۱۰۲۵ تا ۱۲۸۰ .م تاریخ گذاری شده‌اند، شواهدی از کوره های پیچیده‌ی ذوب روی را آشکار کرده است. این کوره ها براساس تقطیر رو به پایین عمل می کردند، به طوری که بخارات روی در محفظه های جداگانه متراکم و جمع آوری می شدند. اوج فن‌آوری تولید توتیا بین قرون چهاردهم تا شانزدهم میلادی بود، اما پس از آن به دلیل عوامل اجتماعی–سیاسی رو به افول گذاشت (Carddock et al; 1983; Freestone; 1985; Carddock et al; 1985 al). هند به عنوان اولین کشوری که روی را به صورت صنعتی ذوب کرد شناخته می شود. چالش اصلی در فرایند استحصال روی، احیای اکسید روی بود که در دمای زیر ۱۰۰۰ درجه‌ی سانتی گراد با کربن انجام نمی شده و نیازمند روش های

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-10-09]
[DOI: 10.66224/kcr.9.1.37]

پیشرفته نظیر تقطیر بوده است. ، چین نیز به طور مستقل فن‌آوری استخراج روی را توسعه داد. اسناد تاریخی نشان می دهند که تولید روی در مقیاس بزرگ در این کشور از دوره سلسله مینگ (۱۶۴۴ – ۱۳۶۸) آغاز شد (Zhou, 2001). بر خلاف روش هندی، فرایند چینی بر پایه تقطیر رو به بالا بود و از دیگ کوره تقطیر با کندانسورهای داخلی در بخش بالایی استفاده می شده است. این روش امکان متراکم سازی بخارات روی را در محیطی کنترل شده فراهم می‌کرده و تا اواخر قرن بیستم در استان‌هایی مانند سیچوان، گوئیژو و یون‌نان رواج داشته است. تفاوت های ساختاری در کوره ها و دیگ های تقطیر نشان دهنده‌ی اهمیت و ضرورت نوآوری‌های بومی در راستای احیای اکسید روی بوده است.

کرمان از نظر تاریخی به عنوان یکی از مناطق پیشرو صنعت معدن و ذوب فلزات شناخته می شود. محمد زاوش علت این امر را موقعیت جغرافیایی و زیست محیطی کرمان می داند که نسبت به سایر مناطق «مرکزی» ایران آب بیشتری برخوردار بوده و به علاوه وجود درخت های پسته وحشی (بنه) و بوته‌های قیچ (که در شمال کویر به آن طاق می‌گویند) در این نواحی سوخت مناسبی برای کوره ها محسوب می شده است. (زاوش، ۱۳۴۸) کوره های ذوب قدیم و سرباره های باقی مانده از آن ها در مناطق یزد، کرمان، قم، کاشان، اراک، خراسان همچنین در دامنه رشته کوه های بلوچستان مانند سرباره های معدنی مس چهل کوره و معادن متروکه سرب و روی خارستان و بیدستر تفتان حاکی از آشنایی و مهارت فلزکاران آن دوران در امر شناسایی و استحصال فلز از مواد معدنی از هزاران سال پیش دارد. در مورد معرفی محوطه های مرتبط با ذوب فلز روی در ایران مطالعه‌ای در استان یزد بر روی محوطه ذوب فلز روی در منطقه ندوشن توسط کمالی و همکاران (۲۰۲۴) انجام شده که درآن میخ‌های سفالی و سرباره‌های ذوب مورد بررسی پتروگرافی، آنالیز شیمیایی و سن‌سنجی قرار گرفته‌اند (Kamali et al., 2024).

۳. موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه

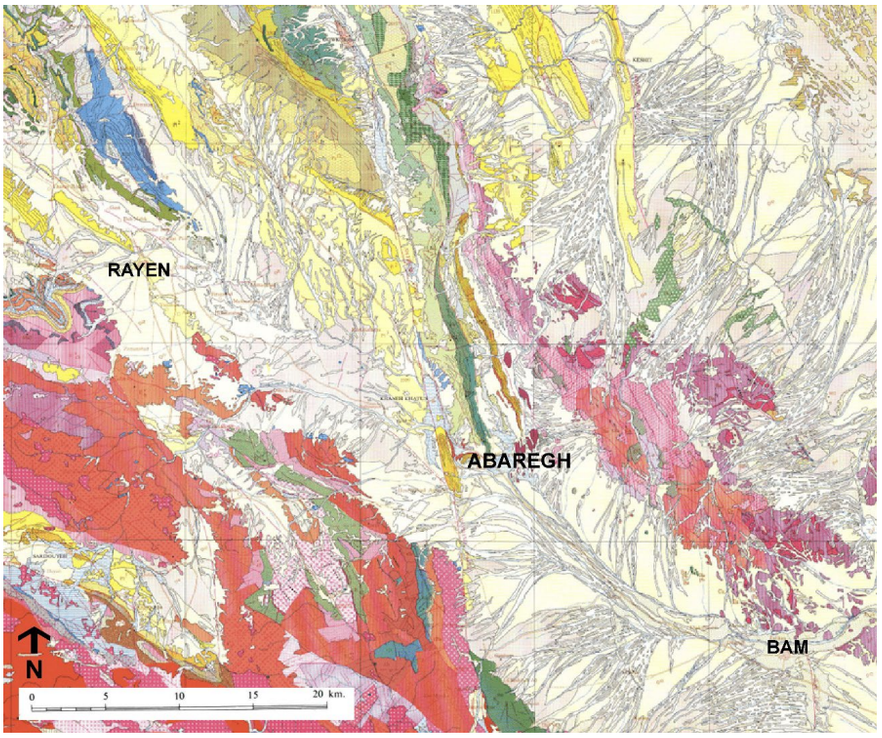
شهر بم در فاصله ۱۹۰ کیلومتری مرکز استان کرمان (شهر کرمان) و جنوب شرقی آن است. طول شرقی مرکز شهر بم ۵۸ درجه و ۲۰ دقیقه طول شرقی و ۲۹ درجه و ۰۶ دقیقه عرض شمالی و ارتفاع آن از سطح آب‌های آزاد ۱۰۶۰ متر است. حد طبیعی شهر بم از شمال به کوه‌های کبودی و از شرق به لوت زنگی احمد و از جنوب به دشت بم و از غرب به دشت دارزین محدود می‌گردد. شهر بم در گوشهٔ شمال شرقی دشت بم واقع شده است و از جهت غرب به شکستگی دارزین و جهت شمال آن به منطقه لوت و شرق آن به گسل نای‌بند (افراز در ۴ کیلومتری شرق شهر بم) و در جهت جنوب آن هم به پیشکوه‌های بارز ختم می‌گردد (مرکز امار ایران، ۱۳۹۳) (شکل ۱). حدود سیاسی آن از شمال به شهرستان کرمان، از شرق به شهرستان‌های نرماشیر و فهرج، از جنوب به شهرستان‌های ریگان و عنبرآباد و از غرب به شهرستان جیرفت منتهی می‌گردد. در میان دو استان کرمان و سیستان بلوچستان و در کنار تنها راه ارتباطی آن ها، تنها شهری که مرکزیت اجتماعی و سیاسی خود را از دوران گذشته تا به امروز حفظ نموده است، بم است. «موقعیت بم از جهت این که در چهار راه ارتباط میان هرموز (میناب فعلی) و بندر طیس (نزدیک چابهار)، سیستان و گواشیر (شهر فعلی کرمان) قرار گرفته، حایز اهمیت فراوان است، زیرا دریای عمان و سواحل هندوستان، کاروان‌هایی را که از هزارها کیلومتر راه بیابانی و ریگزار گذشته بودند، به شهرهای شمالی مثل کرمان، یزد، طبس، نیشابور و ری ارتباط می‌داده است و در واقع راه ادویه و راه فلفل را به راه ابریشم پیوند می‌داده است» (باستانی پاریزی، ۱۳۷۱).

شکل ۱. موقعیت شهرستان بم در استان کرمان (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۳)

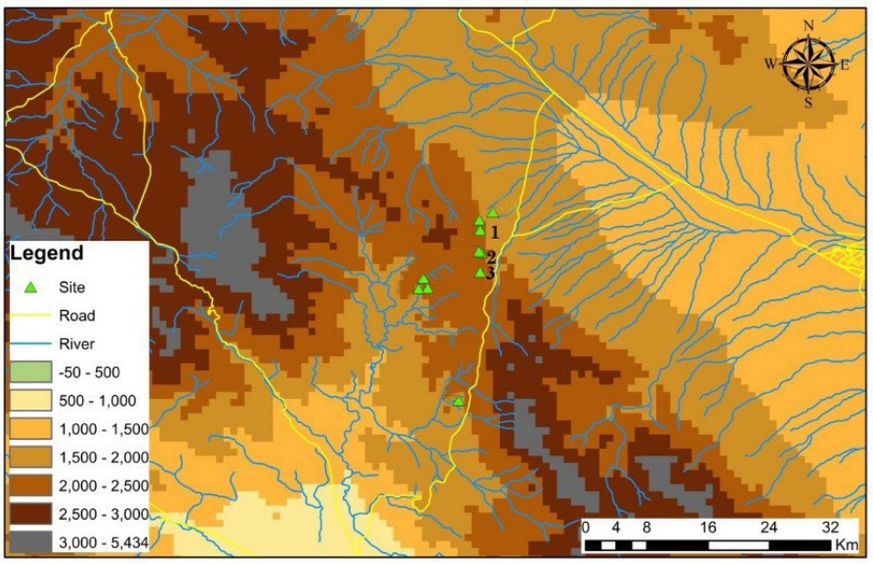
بم در گذشته، دارالاربعه (محال اربعه) به معنای چهار ناحیه نامیده می‌شد و علت آن وجود چهار شهر معتبر در یک ناحیه محدود بود که زیر نظر یک حوزه حاکمیتی قرار داشته‌اند. چنان‌که در برخی از منابع تاریخی، این چهار شهر به صورت «بم، نرماشیر، نسا و ریگان» و در برخی دیگر به صورت «بم، نرماشیر، نسا و گَزان خواست» نوشته شده است. امروزه بم به دروازه جنوب شرقی ایران معروف است. زیرا تنها راه ارتباطی به سوی جنوب شرقی ایران از بم می‌گذرد. این شهر معتبرترین و با ارزش‌ترین شهر تاریخی و باستانی بین کرمان و سیستان بوده و مرکزیت اقتصادی و اداری خود را از دوران پیش تا امروز حفظ کرده است (وزیری، ۱۳۶۴). شهرستان بم شامل چهاربخش به نام های مرکزی، ریگان، فهرج و نرماشیر است. منطقه مورد مطالعه در بخش مرکزی قرار دارد که ناحیه کوهستانی این منطقه می باشد، کوه های بم در واقع ادامه رشته کوه های مرکزی ایران است که به جبال بارز شهرت دارند. این کوه ها مانند سدی میان شهرستان بم و شهرستان جیرفت واقع شده است و بم را از شهرستان جیرفت جدا می کند. از بعد زمین‌شناسی این منطقه دارای مشخصات بسیار خاصی است. کمربند آتشفشان–رسوبی ایران مرکزی موسوم به کمربند آتشفشانی–رسوبی ارومیه–دختر (یا سهند–بزمان) به عنوان خاستگاه کانسارهای مس پورفیری ایران مورد توجه قرار دارد (شکل ۲). کمربند آتشفشان رسوبی دهج–ساردوئیه با ۹۵۵ کیلومتر طول و حدود ۴۵ کیلومتر عرض، به طور کامل در استان کرمان قرار می گیرد. این کمربند با روند شمال غرب جنوب شرق، از مناطق انار و دهج شروع می شود و به جبال بارز جیرفت خاتمه می یابد. فعالیت کمربند آتشفشان رسوبی دهج ساردوئیه به طور شدید از ائوسن آغاز و تا کواترنر ادامه داشته است. به دلیل آن که تشکیلات ائوسن، مهم ترین و پهناورترین واحد های زمین شناسی این زون را به خود اختصاص می دهد (آقانباتی،۱۳۸۳). بم براساس تقسیم بندی واحد زمین شناسی و ساختمانی کشور ایران جزو واحد ایران مرکزی (واحد بلوک لوت که بخش جنوبی آن در شهرستان بم قرار گرفته است) محسوب می شود. قدیمی ترین تشکیلات زمین شناسی در اطراف این شهرستان متعلق به دوران مزوزوئیک است. وفورسنگ های کنگلومرا (سنگ جوش) و ماسه سنگ نشانه پیش روی دریا –عهد ائوسن– در این منطقه است.این سنگ ها به طور عمده در شمال و شمال شرقی بم و به مقدار نه چندان زیاد در جنوب و جنوب شرقی آن یافت شده است (اسعدپور بهزادی، ۱۳۸۱). در شمال شهر بین تشکیلات آذرین، آثاری از تشکیلات دوره میوسن (دوره‌ای که در آن طبقات مارنی، گچی و رسوبات دریائی تشکیل شده است) دیده می شود. با توجه به این مسئله

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-10-09]
[DOI: 10.66224/kcr.9.1.37]

که در نزدیکی ابارق –واقع در شمال غربی شهرستان بم– تشکیلات آندزیتی (سنگ آذرین که دارای کوارتز و میکاست) وجود دارد، در حد فاصل آندزیت ها و آهک ها چشمه های آب گرم با درجه حرارتی بین ۲۵ تا ۳۵ درجه سانتی گراد به وجود آمده است. چشمه آب گرم موجود در ابارق نمونه‌ای بارز از این قبیل چشمه ها می باشد. در نواحی غرب شهرستان بم و در حاشیه کوه دهبکری و کوه هزار، آثار دوره کرتاسه به مقدار کم وجود دارد. ارتفاعات حاشیه غرب تا جنوب غربی منطقه که به سلسله جبال بارز محدود می گردد، دنباله قسمت انتهائی و برون زدگی آذرین مرکزی ایران است (اسعدپور بهزادی،۱۳۸۱). سنگ های محدوده جبال بارز از نوع سنگ های آذر آواری از قبیل توف های حد واسط، اسیدی و ایگنیمبریت و سنگ های آتشفشانی شامل آندزیت–بازالت، آندزیت، داسیت–آندزیت و داسیت هستند. سنگ های میوسن شامل دیوریت و انواع گرانیتوئیدها از قبیل تونالیت، گرانودیوریت پورفیری، گرانیت، گرانیت پورفیری، لوکوگرانیت و گرانوفیر هستند. ماگماهای اولیه با ترکیب بازیک وجود داشته که تفریق کانی های مانند پیروکسن و پلاژیوکلاز در این ماگما سبب تحول شده و در نتیجه سری سنگ های کالکوالکالن در آندزیت–بازالت تا داسیت را به وجود آورده که همراه با سنگ های ولکانوکلاستیک رخنمون دارند. تشکیل کانی هایی نظیر پیروکسن ، تیتانوماگنتیت و پلاژیوکلاز سبب تحول در ماگمای دیوریتی شده که در نتیجه آن با نفوذ ماگما به بخش های فوقانی گرانیتوئیدهای متنوعی بسته به ترتیب ماگما و عمق نفوذ آن تشکیل شده‌اند (آل طه کوهبنانی و دیگران، ۱۳۸۲). نقشه زمین شناسی محدوده بم–راین و نقشه توپوگرافی و ارتفاعی مناطق مورد کاوش در اشکال ۲ و ۳ آورده شده است.



شکل ۲. نقشه زمین شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ بم در محور بم–راین به همراه محوطه های بررسی شده (سازمان زمین شناسی کشوری)



شکل۳. موقعیت مکانی و ارتفاع از سطح دریا در محوطه های مورد بررسی. محوطه ۱ (کوه چاه)، محوطه ۲ (مرغک علیا) و محوطه ۳ (ده نو)

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-10-09]

[DOI: 10.66224/kcr.9.1.37]

۴. معرفی محوطه های کلیدی مناطق مورد بررسی

۴. ۱. منطقه ابارق/ اوارق

اوارق، ابارق یا اباریک که برخی آن را اوارک نیز نامیده‌اند، از آبادی های قدیمی منطقه بم به شمار می آید که در ۵۰ کیلومتری شمال غربی شهر بم قرارگرفته است. ژنرال سایکس در سفرنامه خود از نمونه های مختلف سرب، روی کوه های شمال غربی این منطقه نام برده است (سایکس ،۱۳۶۳،۲۵۱). فیروز میرزا فرمان فرما در سفرنامه کرمان و بلوچستان (فرمان فرما ،۱۳۴۲، ۶) از چشمه آب گرم این منطقه و نیز پرفسور هاینس گوبه (گوبه ،۱۳۷۰،۳۶۷) نیز از این آبادی نام برده اند. ابارق از طرف شمال به کوه کله گاوی، از جنوب به کوه دهبکری، از مغرب به کوه سرخ و از مشرق به کوه کبودی یا طلای سیاه محدود است. رودخانه فصلی تهرود در جنوب باختری آبادی روان است. (شکل ۲) کوه شاه چهل تن در شمال باختری و کوه سرخ در باخترآبادی واقع است. آب گرمی که از کوه شاه چهل تن سرچشمه می گیرد، در باخترآبادی روان است (اسعدپور بهزادی، ۱۳۸۱). امروزه منطقه ابارق از مناطق فعال معدنی است و معدن فعال سرب–روی–نقره خان خاتون در ۳۰ کیلومتری ابارق قرار دارد. از دیگر معادن فعال این منطقه معدن سنگ مرمر سروستان بم است که در جاده فرعی مسیر بم، جیرفت قرار دارد. یکی از مکان های مورد مطالعه در منطقه ابارق، جاده فرعی ابارق به سمت دهستان کشیت (بخشی از منطقه کوهبنان کرمان) است. در این قسمت، میان تپه‌های متعدد و بوته‌های گیاهی، سطحی به پهنای ۲۰۰ متر پوشیده از آثار فراوانی از میخ های سفالی، زغال و سرباره کوره است. نمونه های با کد NBB-01 از این محوطه برداشت شد.

۴. ۲. مرغک و دهبکری

مرغک و دهبکری از مناطق کوهستانی منطقه غربی دشت بم به حساب می آیند. در ۵۴ کیلومتری باختر بم و در ۴ کیلومتری باختر جاده آسفالته جیرفت–دارزین، رودخانه مرغک که از کوه‌های جمالی و بختیاری سرچشمه می گیرد، در جنوب آبادی روان است، کوه آب چکو در شمال و شمال خاور آبادی است. از دهات وابسته به این آبادی گسترده می توان دهنه مرغک، گل ملک، ده ردین (دره دین)، شیرکش، سه درآن، بیدخون، آب شورو، تافیات، دو جنگان، ده نو، زریا، کهنو، کهن آب، گبارو، گزما، گل آباد، گل انداز و دو گل را نام برد. رودخانه دهبکری نیز از کوه های دغو و جبال بارز سرچشمه می گیرد، در خاور آبادی روان است.کوه شیر در خاور و کوه سرخ در باختر آبادی است. این رودخانه دهبکری را به دو بخش شرقی و غربی تقسیم کرده است. دهبکری منطقه ای است که به طور کلی حدود ۷۰ کیلومتر مربع را در بر می گیرد. (اسعدپور بهزادی، ۱۳۸۱). فیروز میرزا فرمان فرما در سفرنامه کرمان و بلوچستان، از این آبادی به عنوان منزل هجدهم یاد برده است. (فرمان فرما: ۱۳۴۲ ،۸۰). سایکس نیز در سفرنامه خود از این منطقه نام برده است. (سایکس، ۱۳۶۳). سلسله جبال کرمان با کوه های مرتفع و برف‌گیر همچون کوه هزار (با ۴۵۰۰ متر ارتفاع)، کوه چهل‌تن و کوه لاله‌زار و همچنین رودهایی چون هلیل‌رود، تهرود، چاری، بمپور و لاله‌زار شرایط مساعدی را برای زندگی فراهم نمود که موجب ایجاد تمدن‌هایی به قدمت دوره میان‌سنگی تا دوره‌های اسلامی شده است و به عنوان دالانی میان دو بیابان خشک، تمدن‌های کهنی را در مجاورت یکدیگر پیوند زده است. تپه یحیی نزدیک انتهای شمالی سلسله جبال کرمان، تل ابلیس در قسمت مرکزی آن و دره بمپور نزدیک انتهای جنوبی آن قرار گرفته است (عباس‌نژاد، ۱۳۸۲).

۴. ۳. کوه چاه

در ابتدای جاده بم–دهبکری، در امتداد رشته کوه جبال بارز، در حاشیه سمت چپ جاده روستایی به نام گون گرگی قرار دارد که در دامنه آن و در مسیر رودخانه کوهی به نام کوه چاه قرار دارد. ارتفاع آن از سطح دریا ۲۱۲۲ متر است. بر سطح بیرونی دامنه کوه به سمت قله، پراکندگی فراوانی از سرباره و آثار ذوب فلزی وجود دارد و در بالای کوه، در نزدیکی قلّه، چاهی دستکند و عمیق به شکل چهار گوش و در ابعاد تقریبی ۲ در ۲ متر آثار بهره‌برداری سنگ معدنی را در طول سالیان مستمر نشان می دهد. در قسمت سمت راست این تونل اصلی، تونل‌های کوچک‌تر و به هم پیوسته‌ای نیز دیده می شود. نمونه های با کد NBB-02 از این محوطه برداشت شد (شکل ۵).

۴. ۴. مرغک علیا (ده ردین)

روستای مرغک در مسیر جاده بم به جیرفت و در ۴۰ کیلومتری شهر بم قرار گرفته است. این روستا در دامنه های کوه های بارز قرار گرفته است. بیش از ۲۵ کیلومتر منطقه با پوشش گیاهی پوشیده شده است و رودخانه فصلی در میان آن جریان دارد. میخ های سفالین این محوطه روستایی در نتیجه سیل و طغیان رودخانه فصلی که از میان محوطه مسکونی روستا گذر کرده با خراب شدن خانه ای در مسیر رودخانه کوره و میخ های سفالی پدیدار شد (شکل ۶) (نمونه NBB-03 از این محوطه برداشت شده است).

۴. ۵. دهنه مرغک (دهنوی مرغک)، ده نو

درمسیر جاده بم به جیرفت ودر ۳۵ کیلومتری شهر بم روستای ده نو قرار دارد. ورودی روستا از سمت راست به دره ای با پوشش گیاهی منطقه مشرف می شود که امروزه آثار کشت محصولات اهالی روستا در آن نمایان است. منطقه ای در بالای عرض شمالی، سمت چپ دره، آثار کوره و فراوانی میخ های سفالی دیده می شود ، تفاوت آثار سفالی این منطقه با سایر مناطق بخش مرکزی بم نمایان است. میخ های سفالی این دره، به شکل مدور دیده می شوند که در مقایسه با نقاط دیگر، متفاوت اند. نمونه های با کد NBB-04 از این محوطه برداشت شده است (شکل ۶).

۵. مواد و روش ها

مطالعات اولیه این پژوهش شامل جمع آوری، دسته بندی و ارزیابی اطلاعات موجود درباره میخ‌های سفالین مرتبط با فرایند استحصال روی از تمامی مناطق مهم و کلیدی مورد توجه در این نوشتار بوده است (شکل ۴). در بررسی پیمایشی در بخش مرکزی شهر بم، ابتدا نمونه برداری از دشت ابارق (درامتداد روستای ابارق) انجام شد. نمونه های برداشت شده از این محوطه NBB-01 نامیده شدند. محوطه های نسبتا وسیعی با پراکندگی متفاوت ولی بالا از میخ‌های سفالین که بسیاری از این میخ‌ها، شکسته شده بودند دیده شد. از میان تمامی نمونه های برداشت شده از مناطق عنوان شده در قسمت قبلی نمونه هایی انتخاب شدند که سالم تر بودند و کمتر آسیب دیده بودند و در برخی موارد لکه‌های سفید باقی مانده احتمالا از فلز روی بر سطح آن ها مشاهده می‌شد. در منطقه ده بکری و کوه چاه همچنین با پراکندگی فراوان از سرباره‌های ذوب فلز و دهانه‌های تونل‌های معدنی مشاهده شدند. پراکندگی میخ های سفالین در این ناحیه به نسبت سرباره ها کمتر است. نمونه برداشت شده از این منطقه NBB-02 نامیده شد. در روستای مرغک (ده ردین) با طغیان رودخانه فصلی و تخریب خانه مسکونی، آثار کوره نمایان شده و پراکندگی میخ های سفالین مشهود گردید. میخ های سفالین این ناحیه نسبت به منطقه ابارق کمی باریک تر و شکسته تر می باشند، نمونه های برداشت شده از این منطقه NBB-03 نامیده شدند. در منطقه دهنو (دره دهنو در امتداد روستای دهنو)، پراکندگی میخ های

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-10-09]

[DOI: 10.66224/kcr.9.1.37]

سفالین و آثار کوره های احتمای ذوب نمایان شدند. میخ‌های سفالین در این ناحیه باریک و نوع دیگری از میخ‌های سفالین به صورت مدور هم دیده می شود. نمونه های برداشت شده از دره دهنو NBB-04 نامیده شده‌اند. کلیه نمونه های برداشت شده دارای سطح نسبتا صاف بوده و تغییرات رنگی در بسیاری موارد ناشی از تجمعات رسوبی جدید بر روی آنان است. براساس رنگ ایجاد شده بر روی برخی از نمونه های میخ‌های استوانه‌ای که بیشتر در محدوده بژ، کرمی متمایل به سبز و تیره قرار دارد حاکی از این مهم است که میخ‌های سفالین احتمالا در معرض درجه حرارت‌های بالا و در محیط اکسیدی تا احیا قرار داشته بودند. البته این مهم تا زمانی که به طور کاملا مشخص کوره ذوب و استحصال روی به دست نیامده است قابل اثبات نمی باشد.

منطقه کوه چاه

منطقه ابارق

منطقه مرغک علیا و ده ردین

شکل ۴. نمونه های مطالعاتی و محدوده‌های اکتشافی آنان (عکس ها از نگارنده)

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-10-09]

[DOI: 10.66224/kcr.9.1.37]

نمونه های برداشت شده از هر منطقه پس از دسته‌بندی نمونه های هر منطقه، با هدف شناسایی شیمیایی و مطالعات ساختاری مورد آزمایشات تکمیلی شیمیایی قرار گرفتند که بر روی چهار نمونه معرفی شده انجام گردیدند. در این راستا ترکیب شیمیایی عناصر کمیاب نمونه‌ها با روش ICP-OES طیف سنجی نشر نوری پلاسمای جفت شده القایی در موسسه مطالعات معدنی زر آزما بر روی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. طیف سنج نشر نوری یک آنالیز بسیار پر کاربرد جهت تعیین غلظت عناصر در مقادیر کم و با دقت بالا است. در حقیقت هنگامی که غلظت احتمالی ماده بیشتر از یک ppm باشد، این روش مناسب ترین روش چه از لحاظ دقت و حد تشخیص و چه از لحاظ هزینه آنالیز است. آنالیز ICP-OES در جهت تشخیص غلظت فلزات گران بها و فلزات سنگین در نمونه های خاک، سنگ و آب در مقادیر بسیار ناچیز بهترین روش آنالیزی می باشند. مقدار ۱۰۰ میلی‌گرم از نمونه در مخلوط ۵۰/۵۰ % اسید کلریدریک و سولفوریک حل شده تا محلول شفاف ایجاد گردد. مشاهدات و بررسی‌های پتروگرافی با هدف شناسایی ساختار و بافت کانی‌شناسی و کریستال‌های احتمالی تولید شده انجام گردید. مشاهدات میکروسکپی یک شیوه اصلی و اساسی است که توسط زمین شناسان برای توصیف و طبقه بندی سنگ‌ها یا تشخیص کانی های موجود در مواد خاص مانند سفال و سرباره‌های ذوب باستانی براساس ویژگی های نوری و بصری آن ها، با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان صورت می‌گیرد (shortland & Degryse,2020;Whitbread,1989).

تعداد ۴ نمونه میخ سفالی برای انجام آنالیز پتروگرافی و مطالعه مقطع نازک در آزمایشگاه حفاظت و مرمت آثار فرهنگی-تاریخی مورد بررسی قرار گرفتند. در روش پتروگرافی از نمونه مورد نظر لایه ی نازکی به ضخامت ۳۰ میکرون بر روی لام آزمایشگاهی تهیه و بعد از اتمام فرایند برش نمونه و ساب، نمونه کاور شده تا از آسیب های احتمالی مصون بماند. از نمونه های ارسال شده مقطع نازک تهیه شده و با میکروسکوپ پلاریزان مدل Canada Smart Tech مطالعه شدند. برای مطالعه میکروسکوپی این نمونه از میکروسکوپ دو چشمی پلاریزان با بزرگ نمایی 5X در حالت نور عبوری استفاده شده است.

۶. نتایج

۶. ۱. ترکیب شیمیایی نمونه‌ها براساس روش ICP-OES

ترکیب شیمیایی نمونه‌ها براساس عناصر کمیاب و ردیاب در وهله اول نشان از ترکیب یک سفال با ترکیبات مشخص همچون کلسیم، آهن، الومینیوم و منیزیم است. این عناصر به نسبت بیشترین درصد عناصر تشکیل دهنده میخ‌های سفالین را تشکیل می‌دهند. پتاسیم به عنوان یک عنصر نمک ساز در این نمونه‌ها شناسایی شده است. پتاسیم و سدیم همچنین می تواند دارای منشا رسی و در ساختار ایلیت ظاهر شود. البته مقادیر تقریبا یکسان این عنصر حدس دوم را بیشتر به واقعیت نزدیک می کند و می توان عنوان کرد که در وهله اول به احتمال زیاد میخ‌های سفالین از رس با ساختار ایلیت درست شده‌اند (Maggetti, 1982; Maggetti, 2001) که از لحاظ زمین‌شناسی با تشکیلات منطقه البته همخوانی دارد. وجود عناصری همچون کادمیم، نیکل، کبالت و مس نشان از وجود و پراکندگی عناصر براساس منشاء زمین‌شناسی از نوع افیولیتی در این عناصر دارد که در بافت سفال به جای مانده است. کادمیم (Cd^{2+}) و منگنز (Mn^{2+}) در این ترکیبات می توانند در قالب جانشینی ایزومورفی در شبکه ZnO جایگزین شود. وجود این عناصر با مقادیر متغییر نشان از جایگزینی ایزومورفی در ساختار کریستال شیمی زینکیت (ZnO) دارد. (Rajabzadeh et al, 2020) این مهم از زمره موارد مهمی است که نشان می دهد میخ‌های سفالین ارتباطی منطقی و مستقیم با عنصر روی Zn داشته‌اند. روی با نسبت‌های مناسبی در این نمونه‌ها شناسایی گردید. مقادیر نزدیک به ۱ یا کمی بالاتر از ۱ درصد در ساختارهای میخ‌های آنالیز شده حقیقتا نشان از تمرکز و یا به جای ماندن روی در طول مدت زمان باشد (Li et al, 2020 ; Caraddock, 1990). این مقادیر به واقع و براساس شواهد به جای مانده نشان از فرآوری روی براساس متد جمع آوری روی به صورت «سیمان سازی» هستند. این مراحل در زمان رومی‌ها بسیار رایج بوده. رومی‌ها در فرآیندی به نام «سیمان‌سازی» که حاصل از گرم کردن سنگ معدن مس و روی (کالامین) با هم در یک بوته‌ی دربسته برای تولید اوریکالوم (یا اوری‌چالکوم) بوده، مهارت داشتند. این فرایند سیمان سازی یک فرآیند در حالت جامد نبوده و در دمای مس مذاب (حدود ۱۱۰۰۰ درجه سانتیگراد) انجام می‌گرفته است. این فرآیند که نسبتاً سریع انجام می شده تا فشار بخار روی موجود در مس، مقدار جذب مس را کاهش داده و سپس در درجه حرارت‌های پایین‌تر سیمان‌سازی بیشتر صورت می‌گرفته است. در حالت ایده‌آل بین حدود ۹۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد برای مدت زمان بسیار طولانی‌تر، می توان روی بیشتری را حفظ کرد (Craddock and Eckstein, 2003). با این حال، اکسید روی نمی تواند توسط کربن احیا شود تا زمانی که دما به مراتب بالاتر از نقطه جوش نسبتاً پایین این فلز (۹۰۷ درجه سانتیگراد) برسد. بنابراین، کوره هایی که برای ذوب سایر فلزات توسعه یافته‌اند، نمی توانند روی تولید کنند. مقادیر کمی از روی فلزی گاهی اوقات در دودکش‌های کوره های سرب یافت می شود چرا که به صورت کاملا عمده این عنصر همواره به همراه سرب و نقره رخنمون داشته است. به همین دلیل مقادیر نسبتا کم نقره و سرب نیز می تواند این مهم را اثبات نماید که در این محوطه ها یا از ذخایر مس همراه با روی استفاده می شده و یا به طور مستقیم از کانسارهای سرب و روی و نقره بهره‌برداری می شده است. روی می تواند در دودکش‌های کوره جمع آوری شود اما با توجه به نبود ساختار شاخص کوره هیچ منبع وجود ندارد. در دوران تاریخی به روی جمع آوری شده از دیواره کوره ها «سرب تقلبی» یا «جعل متقابل» می‌گفتند. در چین، بحث بسیار مفصلی در ارتباط با یک فلز جدید یا سرب «جعلی» یا «نامرغوب» عنوان می شده که برای ساخت برنج با مس استفاده مورد استفاده قرار می‌گرفته است. و در حین عملیات در جایی قبل از فرآیند سیمان‌سازی جمع آوری می شده است. براین اساس چنین به نظر می‌رسد که روی در چین شناخته شده نبوده است (Craddock, 1987).

۶. ۲. مطالعات پتروگرافی میخ‌های سفالین

مشاهدات پتروگرافی بر روی مقاطع نازک نمونه های میخ‌های سفالین نشان از خمیره سفالینی دارد که در درجه حرات پایین پخته شده است. این امر در بافت متخلخل نمونه‌ها مشخص شده (شکل۵، تصویر۱) و همچنین در وجود کانی های کربناته من جمله کلسیت که هنوز درجه حرارت تخریب خود را پشت سر نگذاشته (تقریبا ۸۰۰ درجه سانتیگراد) و به صورت اولیه و با ساختار شاخص اوروترومبیک هنوز در داخل بافت سفالین قابل مشاهده هستند (شکل۵، تصویر۲). کربنات ها و کلسیت در برخی موارد به درجه حرارتی نزدیک به درجه حرارت دگرسانی ساختاری خود رسیدند که در آن مرزهای بیرونی کانی دچار تغییرات ساختاری گشته در حالی که در قسمت مرکزی هنوز بقایای کانی اولیه (کلسیت) دیده می شود (شکل۵، تصویر۲). این تصویر نشان می دهد که محدوده حرارتی پخت میخ‌های سفالین در محدوده نزدیک به ۸۵۰ درجه سانتیگراد قرار داشته است (Fabbri et al, 2014). شاید علت اصلی در نداشتن پخت کافی به دلیل این بوده که بر روی یک سطح بسیار متخلخل مقادیر بیشتری از روی می توانسته میعان و در خلل و فرج انتشار یابد. از طرف دیگر تمامی نمونه های یافت شده بر روی سطح مقطع خود رنگ‌های متفاوتی را آشکار می‌سازند که نشان از پخت

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-10-09]

[DOI: 10.66224/kcr.9.1.37]

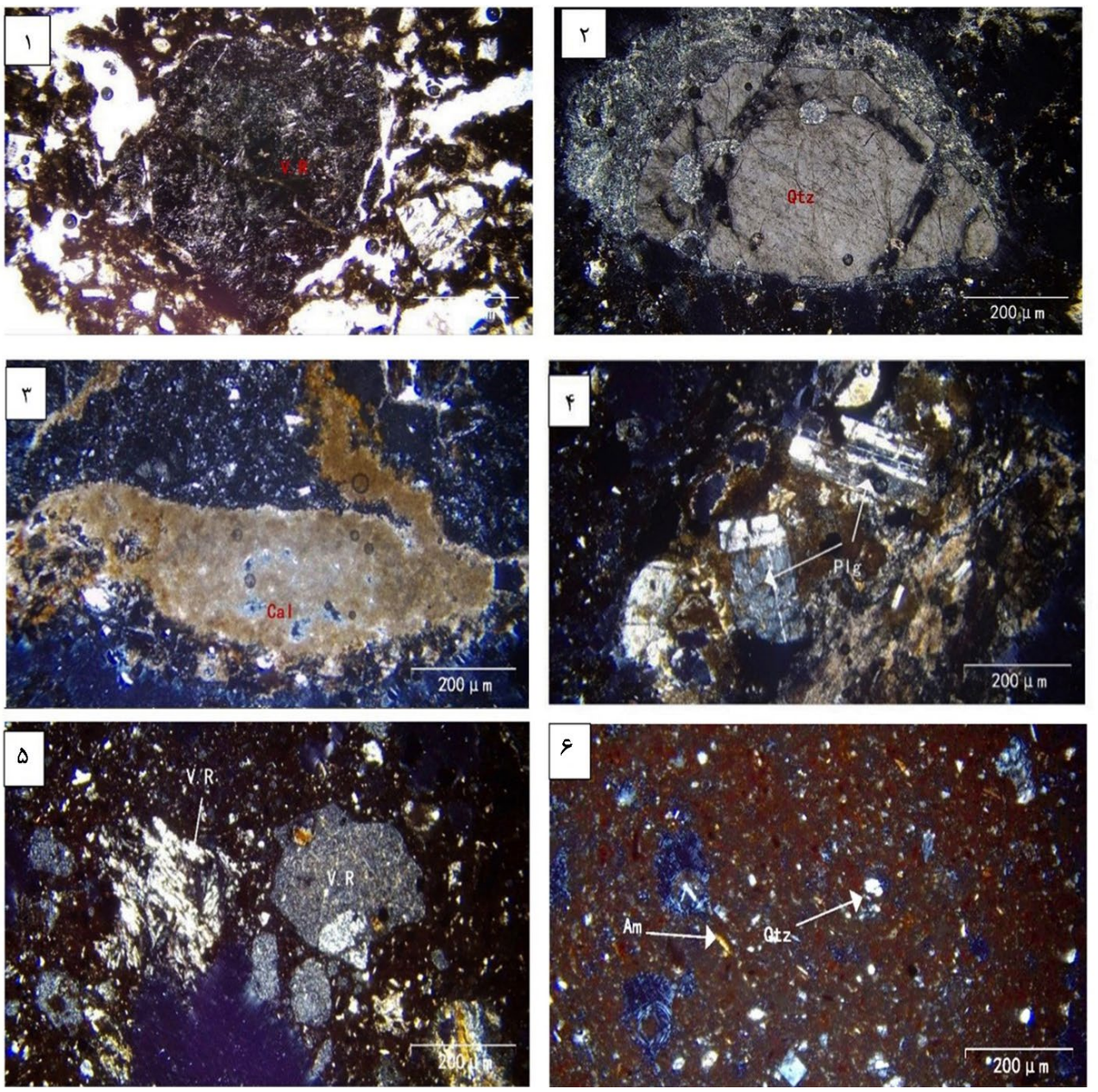
جدول ۱. ترکیب شیمیایی عناصر ردیاب در نمونه های میخ‌های سفالین با استفاده از ICP-OES. نتایج براساس ppm. نتایج ارائه شده به صورت زرد رنگ درصد وزنی عناصر هستند.

Element	Ag	Al	As	Ba	Be	Ca	Cd	Ce	Co	Cr	Cu	Fe
DL	0.5	100	0.5	5	1	100	0.1	1	1	1	1	100
NBB-01	0.73	74237	28.3	868	2.1	24862	40.1	43	11.8	30	32	40877
	0.000073	7.4237	0.00283	0.0868	0.00021	2.4862	0.00401	0.0043	0.00118	0.003	0.0032	4.0877
NBB-02	0.64	70268	53.5	146	2.4	23322	1.3	59	12.6	18	30	57345
	0.000064	7.0268	0.00535	0.0146	0.00024	2.3322	0.00013	0.0059	0.00126	0.0018	0.003	5.7345
NBB-03	1.9	79745	28.1	438	2.1	25551	4.2	67	16.3	100	147	48334
	0.00019	7.9745	0.00281	0.0438	0.00021	2.5551	0.00042	0.0067	0.00163	0.01	0.0147	4.8334
NBB-04	1.19	80018	39.1	401	1.7	42376	0.9	45	17.1	43	51	42663
	0.000119	8.0018	0.00391	0.0401	0.00017	4.2376	0.00009	0.0045	0.00171	0.0043	0.0051	4.2663
Element	**K**	**La**	**Li**	**Mg**	**Mn**	**Mo**	**Na**	**Ni**	**P**	**Pb**	**S**	**Sb**
DL	100	1	1	100	5	0.5	100	1	10	1	50	0.5
NBB-01	29880	26	55	10265	870	1.09	20961	14	560	1293	382	1.08
	2.988	0.0026	0.0055	1.0265	0.087	0.000109	2.0961	0.0014	0.056	0.1293	0.0382	0.000108
NBB-02	31287	32	39	8373	1128	1.14	14171	6	1577	651	123	1.09
	3.1287	0.0032	0.0039	0.8373	0.1128	0.000114	1.4171	0.0006	0.1577	0.0651	0.0123	0.000109
NBB-03	27603	39	94	8568	920	1.54	18204	41	1578	6536	175	1.25
	2.7603	0.0039	0.0094	0.8568	0.092	0.000154	1.8204	0.0041	0.1578	0.6536	0.0175	0.000125
NBB-04	23977	26	55	14812	1188	1.21	16161	33	765	877	261	1.41
	2.3977	0.0026	0.0055	1.4812	0.1188	0.000121	1.6161	0.0033	0.0765	0.0877	0.0261	0.000141
Element	**Sc**	**Sr**	**Th**	**Ti**	**U**	**V**	**Y**	**Yb**	**Zn**	**Zr**		
DL	0.5	2	5	10	5	1	0.5	0.2	1	5		
NBB-01	12.6	477	<5	3469	<5	66	16.7	1.9	4618	62		
	0.00126	0.0477	n.d.	0.3469	n.d.	0.0066	0.00167	0.00019	0.4618	0.0062		
NBB-02	15.6	261	<5	5598	<5	24	35.6	3.6	8456	205		
	0.00156	0.0261	n.d.	0.5598	n.d.	0.0024	0.00356	0.00036	0.8456	0.0205		
NBB-03	14.4	543	<5	4834	<5	116	17.6	2.2	12848	129		
	0.00144	0.0543	n.d.	0.4834	n.d.	0.0116	0.00176	0.00022	1.2848	0.0129		
NBB-04	16.1	460	<5	3542	<5	96	20.7	2.4	16592	92		
	0.00161	0.046	n.d.	0.3542	n.d.	0.0096	0.00207	0.00024	1.6592	0.0092		

ناقص و گرادیان حرارتی تقریبا متغییر در هنگام استفاده بوده است. پخت ناقص می توانسته حتی به دلیل پخت مجدد و متفاوت نیز ایجاد شود. بار اول برای ساخت خود میخ‌ها و در وهله دوم پس از جایگزینی آنان بر روی شبکه‌های تعبیه شده در داخل کوره، به همین دلیل کلسیت در برخی از نمونه‌ها تغییرات ساختاری نسبی از خود نشان می دهد (شکل۵، تصویر۳). در بسیاری از نمونه های سفالین کانی های آذرین به مانند کوارتز، پلاژیوکلاز و آمفیبول دیده می شوند که مشخصه استفاده از مواد پر کننده همان ناحیه و از سنگ‌های آذرین بودند. مواد و سنگ‌های پر کننده میخ‌های سفالین از ورز کافی برخوردار نبوده و دارای اندازه‌های بسیار متفاوتی می باشند. پلاژیوکلازها با ساختار دوقلویی های کاملا مشخص و ساختار کارسبادر نشان از منشاء آتشفشانی آنان دارد. این مدل از ساختارهای آتشفشانی در بسیاری از مواد فرهنگی منطقه کرمان و جیرفت دیده شده است (شکل۵، تصویر۴) (Sedghi et al, 2022). کوارتز و کانی های آذرین در داخل بافت میخ‌ها اکثرا دارای ساختار فنوکریستالین بوده و اندازه دانه‌های بسیار متغییری را دارا هستند که در ماتریکس تیره رنگی از مواد رسی در محدوده پخت احیاء پراکنده شده‌اند (شکل۵، تصویر ۵). ماتریکس سفالین نمونه های مورد بررسی اکثرا تیره بوده و نشان از قرار گرفتن در محیط احیا در داخل کوره دارند لیکن این فرایند احیا به طور کامل انجام نگرفته و به همین دلیل در بسیاری از نمونه‌ها از کانی مگنتیت اثری به وجود نیامده است. در برخی از نمونه‌ها ولی برعکس ماتریکس قرمز رنگ و شرایط محیطی اکسیداسیون را مشخص می‌کنند (شکل۵، تصویر۶). این نمونه از ورز کافی برخوردار بوده و اندازه ذرات پرکننده در بافت ماتریکس یکنواخت‌تر از بقیه نمونه‌ها بوده است. تخلخل در این نمونه به دلیل قرار گرفتن در شرایط حرارتی بالا و پخت نسبتا خوب بوده است. در این نمونه نیز مواد پر کننده شامل ذرات

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-10-09]
[DOI: 10.66224/kcr.9.1.37]

آتشفشانی نظیر کوارتز، پلاژیوکلاز، آمفیبول هستند. در برخی نمونه‌ها نظیر این نمونه ذرات بسیار کوچکی از کانی آپاتیت نیز دیده می شود.
به طور کلی در داخل بافت این نمونه های میخ‌های سفالین ذرات کوارتز و کلسیت در برخی موارد در اندازه‌های بزرگ قابل مشاهده است. وجود کلسیت در این حالت و دارای خصلت رنگین‌کمانی نشان از درجه حرارت پخت بسیار پایین این دسته از نمونه‌ها دارد. در چنین حالتی درجه حرارت پخت گاها کمتر از ۷۵۰ درجه سانتیگراد بوده است. مواد پر کننده اصلی این سفال‌ها همان طور که قبلا اشاره شده شامل ذرات بسیار ریز آتشفشانی و در برخی موارد ذرات بسیار ریز موسکوویت با خصلت چندرنگی و کشیده یا منشوری نیز دیده می شود (شکل۵، تصویر۵). کوارتز همیشه با رنگ روشن یا خاکستری و پلاژیوکلازها و فلدسپات ها با دوقلویی مشخص، رخ و رنگ خاکستری در داخل نمونه‌ها پراکنده شده‌اند. هماتیت فقط در یک نمونه به عنوان بافت تشکیل دهنده ماتریکس مشاهده شد. و سه دلیل می تواند برای حضور آن عنوان کرد. ۱) به دلیل وجود آهن در داخل خاک رس اولیه، ۲) پخت در اتمسفر اکسیدی کوره ۳) اکسید شده ترکیبات آهن دار در دوران دفن (Maritan et al, 2021). وجود هماتیت و ترکیبات اکسیدی آهن‌دار در منطقه بم و غنی بودن خاک منطقه از ترکیبات آهنی و رس‌های آهن دار دور از ذهن نمی تواند باشد. این نمونه‌ها دارای خاصیت بیرفرنژانس نیستند و نشان از درجه حرارت پخت پایین است.



شکل ۵. تصویر ۱. تصویر میکروسکوپی، نورقطبیده PPL با بزرگ نمایی 5X ، و قطعه سنگ آذرین در مرکز تصویر. تصویر ۲. تصویر میکروسکوپی با نورقطبیده XPL و بزرگ نمایی 5X ،کانی کلسیت با ساختار نیمه تغییر یافته در مرکز تصویر. تصویر ۳. تصویر میکروسکوپی با نور قطبیده XPL و بزرگ نمایی 5X، ترکیبات کربناته و کلسیت در مرکز. تصویر ۴. میکروسکوپی با نورپلاریزه XPL، و بزرگ نمایی 5X، کانی پلاژیوکلاز همراه محصور در کربنات‌ها در مرکز تصویر دیده می‌شوند. تصویر ۵. تصویر میکروسکوپی با نور XPL و بزرگ نمایی 5X، نمایی دیگر از خمیره نمونه به همراه قطعات درشت سنگ آذرین همراه با کوارتز ریز دانه. تصویر ۶. تصویر میکروسکوپی با نور XPL، و بزرگ نمایی 5X، قطعات فراوان کوارتز همراه با کانی آمفیبول در خمیره قرمز و اکسیدی سفال به صورت همگن دیده می‌شود.

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-10-09]
[DOI: 10.66224/kcr.9.1.37]

۷. بحث

به نظر می‌رسد این درک که برای ساخت روی لازم است فلز به صورت بخار تولید و سپس متراکم شود، ابتدا در قرن سیزدهم یا چهاردهم در هند حاصل شده باشد. متالوژیست‌های چین تا قرن شانزدهم به تولید روی در مقیاس بزرگ دست یافته بودند. در غرب، این اصل برای اولین بار در سال ۱۷۴۳ در انگلستان تحت رهبری ویلیام چمپیون به کار گرفته شد. در پایان قرن هجدهم در بلژیک و لهستان پیشرفت‌هایی در کوره حاصل شد و این فرآیند تا زمان توسعه یک فرآیند الکترولیتی در سال ۱۹۱۷ بدون تغییر باقی ماند. در پایان دهه ۱۹۲۰، با توسعه یک فرآیند تقطیر مداوم، پیشرفت چشمگیری در ایالات متحده حاصل شد و در طول دهه ۱۹۳۰ یک فرآیند الکتروترمیک برای تولید مداوم روی طراحی شد. یکی از پیشرفت‌های دهه ۱۹۶۰، کوره بلند روی–سرب بود که در آن سرد کردن سریع گازها یک اصل کلیدی است. فرآیندهای تولید روی به تفصیل در فرآوری روی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

برای اطلاع از فن‌آوری استحصال روی به عنوان یکی از فن‌آوری های کهن در ایران لازم بود مطالعات شیمیایی بیشتری بر روی داده های به دست آمده از آثار به دست آمده از کوره های استحصال و اشیا مرتبط با فرایند فلزگری (میخ‌های سفالین) مورد مطالعه، انجام گیرد. استحصال فلز روی، به دلیل تفاوت های بنیادی با فلزاتی مانند مس و آهن، فرایندی متفاوت و پیچیده است. این گزارش‌ها، همراه با شواهد باستان شناختی، نشان دهنده ی پیشرفت قابل توجه فن‌آوری تقطیر روی در ایران باستان است. بقایای کوره ها و میخ های سفالین مرتبط با این فرایند در استان‌های کرمان، یزد، اصفهان، خراسان و سیستان و بلوچستان یافت شده اند (Khojasteh Behzadi et al., 2023 ; کمالی، ۱۴۰۳). انطباق مکان این کوره ها با کمربند کانه زایی سرب–روی ایران، از مهارت و شناخت بالای معدن کاران باستانی در شناسایی ذخایر معدنی حکایت دارد. آثار کوره های متعدد در دشت ابارق تا مسیر کوهستانی در امتداد ناحیه جبال بارز به طور پیوسته نشان از گسترش استفاده از فلز روی در این منطقه است. کوره های استحصال روی در ایران، بر خلاف کوره های متداول سایر فلزات، به صورت دو طبقه طراحی شده اند. این امر به دلیل انجام بهتر فرایند تقطیر و تجمع روی انجام می‌گرفته است. این کوره ها بلند و باریک شامل طبقه ی زیرین برای حرارت دهی به سنگ معدن و طبقه ی بالایی با صفحه ای مشبک از جنس رس هستند که میخ های سفالی پخته شده روی آن قرار می گیرند. این میخ ها، با طول ۵ تا ۱۵ سانتی متر و قطر ۱ تا ۳ سانتی متر ، به شکل قلمی و نوک تیز ساخته می شدند. مورفولوژی و شکل این میخ‌ها دلیل بر جمع آوری بهتر فلزات مایع و یا تجمع پیدا کرده بر روی این میخ‌های سفالین است. براساس تو صیف مستوفی در نزهه القلوب، با حرارت دهی سنگ معدن ، بخارات روی از طریق تصعید بالا آمده و برسطح میخ ها رسوب می کردند. پس از خنک شدن، اکسید روی یا توتیا (اکسید روی) از میخ ها جدا می‌شد. عقیلی خراسانی (۱۳۷۱) در مورد نحوه استحصال توتیا می نویسد: "از خاک چسبنده که در عراق آن را خاک رست می نامند قلم هایی بلند به طوری که دو سر آن اندک باریک باشد می سازند و خشک نموده و به آن نمک غوطه می دهند و باز خشک نموده و در طبقات کوره، چپ و راست و چلیپا خوابانده می چینند تا این که در حین گداز سرب دود بر آن ها بپیچد و منعقد گردد و دود ضایع نگردد و چون زمانی ممتد گذشت و یافتند که دود بسیاری در آن ها پیچیده و منعقد شده است آن ها را برمی آورند و می شکنند و دودهای منعقد را از آن ها جدا می نمایند". علاوه بر نوع کوره های به کار رفته، در متون قدیم به محل شکل‌گیری مناسب این کوره ها از منظر موقعیت جغرافیایی و زیست محیطی نیز تاکید شده است وجود درخت های پسته وحشی (بنه) در این منطقه که باعث فراهم آوردن سوخت مناسب و نیز قرارگرفتن آن ها در مسیر رودخانه ها می توان اشاره کرد. در ارتباط با کاربرد این ماده، هم از کاربردهای طبی برخوردار بوده که خواص طبی زیادی چون درمان درد چشم، درمان زخم ها را می توان نام برد. توضیحات و تحلیل کاربری برای توتیا در کتب و نوشتارهای قدیم بسیار زیاد است. خواجه نصیر الدین طوسی در"تنسوخ نامه ایلخانی" می نویسد: "توتیا را انواعی است بعضی صناعی و بعضی معدنی اما آن چه صناعی است توتیای نایژه خوانند و آن در زمین کرمان سازند". یکی دیگر از کاربردهای توتیا استفاده از آن در تهیه آلیاژ برنج می باشد. ذکریای رازی در کتاب "الاثبات" نحوه تهیه برنج را از مس و توتیا توضیح می دهد و خواجه نصیر الدین طوسی در این باره می نویسد: "اگر توتیا را بکوبند و در آتش نرم بریان کنند چنان که نسوزد، پس بر مس گداخته اندازد و سر بوته را بپوشانند مس رنگ بگرداند و رنگ زر گیرد". این طراحی کوره و وجود این نوع فن‌آوری پیچیده و منحصر به فرد، جایگاه ویژه‌ای در تاریخ مهندسی و متالورژی در ایران باستان دارد و ضرورت حفاظت و کاوش به منظور کسب اطلاعات تکمیلی به عنوان میراثی ارزشمند برای پژوهش های آینده را برجسته می کند.

۸. نتیجه گیری

این پژوهش با بررسی دقیق محوطه های ذوب فلز روی در بخش مرکزی بم و با استفاده از روش های پتروگرافی و ژئو شیمی، شواهد ارزشمندی از فن‌آوری کهن استحصال روی در ایران ارائه کرده است. پتروگرافی میخ های سفالین نشان دهنده بافت پورفیری یا فنوکریست های کوارتز را نشان می دهد. براساس داده های حاصل از آنالیز شیمیایی، نمونه های میخ های سفالین دارای عناصر مختلفی مانند روی (Zn)، سرب (Pb)، آهن (Fe)، مس (Cu) و تعدادی دیگر از عناصر هستند. میزان بالای روی در نمونه ها تایید می کند که استوانه های سفالی به خوبی توانسته اند بخار روی را جذب کنند و نشان دهنده موفقیت فرایند تصعید و جذب بخار رویی بر روی میخ ها است.

احتمالا همراه با روی، سرب و مس نیز به صورت بخار در آمده و به سطح میخ ها جذب شده اند. این عناصر به عنوان ناخالصی های موجود در سنگ معدن ممکن است در این فرایند همراه با روی جذب شده است. آهن و عناصر قلیایی خاکی مانند کلسیم، منگنز، مس، نقره، سرب و کبالت نیز به صورت جزئی در سطح میخ ها دیده می شود و ممکن است ناشی از مواد معدنی موجود در سنگ معدن یا ناخالصی های موجود در کوره باشد. بررسی فرایند استخراج روی در ایران باستان نشان می دهد که این فرایند به خوبی طراحی شده و میخ های سفالی به عنوان واسطی کارآمد برای جذب بخار روی عمل می کرده اند. استفاده از کانی کالامین به دلیل تجزیه آسان در دماهای پایین‌تر تکنیکی هوشمندانه بوده است که باعث شده فرایند استخراج فلز روی در دمای مناسب و بدون نیاز به تجهیزات پیشرفته انجام شود. کوره های ذوب فلز روی با ساختار خاص خود سبب این نوع فنآوری و بهبود تکنولوژی استحصال شده‌اند. سنگ‌های خام معدنی جهت حرارت دهی در کف کوره قرار داشته و طبقه دوم مشبک است. میخ های سفالین درون این مشبک‌ها قرار دارند تا پس از حرارت دهی سنگ معدن حاوی مس و روی یا سرب و روی و نقره در طبقه اول بخارات روی تولید شده بر روی میخ های سفالی رسوب کند و به صورت توتیا جمع آوری شود. با توجه به سیاه بودن نوک اکثر میخ‌های سفالین به نظر می‌رسد که این میخ‌های سفالین بایستی به صورت عمودی قرار گیرند تا بهترین شرایط جمع آوری را داشته باشند. این روش استخراج روی، نمونه‌ای از دانش پیشرفته متالورژی در ایران باستان را به نمایش می‌گذارد و نشان دهنده آگاهی از ویژگی های شیمیایی و فیزیکی فلزات و کانی‌ها در آن دوره تاریخی ایران است.

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-10-09]

[DOI: 10.66224/kcr.9.1.37]

سپاسگزاری

از جناب آقای دکتر امین اله کمالی در پژوهشگاه میراث فرهنگی، برای پیگیری حمایت های بی وقفه ایشان در انجام آزمایش های مربوطه و از جناب آقای مهندس سید ایرج بهشتی برای تهیه و مطالعه مقاطع پتروگرافی نمونه ها کمال تشکر و قدردانی را دارم، همچنین از جناب آقای دکتر بابک بیکلو برای ارائه نقطه نظرات ارزشمند که به بهبود این پژوهش کمک شایانی کرده اند، صمیمانه سپاسگزارم و در نهایت از داوران این مقاله تشکر می کنم که بدون شک ایرادات دقیق و راهنمایی های آنان سبب گردید تا این نوشتار به سرانجام برسد.

منابع/References

آل طه کوهبنانی، بابک، وثوقی عابدینی، منصور (۱۳۸۲). پتروژنز و پتروگرافی سنگ های آذرین جنوب شرق بم (جبال بارز)، نشریه: علوم پایه دانشگاه آزاد اسلامی، ۱۳ (۴۹۰)، ۱۰۹۹ — ۱۱۰۷.

احمد علی خان، وزیری، (۱۳۶۴). تاریخ کرمان به کوشش باستانی پاریزی. تهران: انتشارات علمی.

اسعد پور بهزادی، زهرا (۱۳۸۱). مروارید دریای کهن. تهران: انتشارات امیررضا.

آقانباتی، علی (۱۳۸۳). زمین شناسی ایران. تهران: سازمان زمین شناسی کشور.

حاکمی، علی (۱۳۸۵). گزارش هشت فصل بررسی و کاوش در شهداد (دشت لوت: ۱۳۴۷-۱۳۵۴) به کوشش محمد موسوی. تهران: سازمان میراث فرهنگی و صنایع دستی و گردشگری.

الخیر، شهمردان (۱۳۶۲). نزهت نامه علائی به تصحیح دکتر فرهنگ جهانپور.تهران: موسسه مطالعات و تحقیقات فرهنگی.

زارع، شهرام؛ عطایی، محمدتقی (۱۳۹۴). قلعه‌های بم: نگاهی مقدماتی به الگوی دفاعی-امنیتی در منظر فرهنگی بم. دو فصلنامه ایران‌شناسی باستان‌پژوهی، ۹(۷)، ۹۹-۱۲۹.

زاوش ، محمد (۱۳۴۸). کانی شناسی در ایران قدیم. تهران: انتشارات بنیاد فرهنگ ایران.

سایکس، سرپرسی (۱۳۶۳). سفرنامه ده هزار میل در ایران (مترجم حسین سعادت نوری). تهران: انتشارات لوحه.

عباس نژاد، رحمت (۱۳۸۲). معدن کاری باستانی در جنوب شرقی ایران: گزارشی درباره یافته های جدید. مجله باستان شناسی و تاریخ، ۱۷(۲)، ۶۵ -۷۳.

عقیلی خراسانی، محمدحسین (۱۳۷۱). مخزن الادویه. تهران: انتشارات آموزش انقلاب اسلامی.

فاضل، لیلا (۱۳۹۹). مطالعات باستان شناسی ناحیه منظر فرهنگی بم-شهرستان های فهرج و ریگان استان کرمان، به همراه معرفی آثار نویافته شهرستان های بم و نرماشیر، زیر نظر: شهریار عدل. شیراز: انتشارات کتیبه نوین.

فرمانفرما، فیروزمیرزا (۱۳۶۰). سفرنامه کرمان و بلوچستان، به کوشش منصوره اتحادیه (نظام مافی)، اصفهان: بابک.

کاشانی، ابوالقاسم(۱۳۵۳). عرایس الجواهر و نفایس الاطایب. (به کوشش ایرج افشار). تهران: انتشارات انجمن آثار ملی.

کمالی، امین الله (۱۴۰۳). استحصال روی در ایران باستان: تحلیل ژئوشیمیایی و پتروگرافی میخ های سفالی و سرباره های کوره ذوب فلز بهاباد، یزد، فصلنامه دانش حفاظت و مرمت، ۷ (۳)، ص ۳۹-۵۸.

گاراژیان، عمران (۱۳۸۷). گزارش توصیفی گمانه‌زنی به منظور لایه‌نگاری تل آتشی و یکی از اقمار آن، دارستان بم. سازمان میراث فرهنگی کشور (منتشرنشده).

گوبه، هاینس (۱۳۷۰). کرمان در قلمرو تحقیقات ایرانی، مقاله ارگ بم. به کوشش رسول دریا گشت. کرمان: انتشارات مرکز کرمان شناسی.

مستوفی قزوینی، حمدالله (۱۳۸۱). نزهه القلوب. تهران: انتشارات مطهری.

مستوفی، احمد (۱۳۵۱). شهداد و جغرافیای تاریخی دشت لوت. تهران: موسسه جغرافیا، گزارش های جغرافیایی. شماره ۸.

مومن‌زاده، مرتضی؛ فرجاد باستانی، محسن (۱۳۶۹). مروری بر آثار معدن کاری باستانی در خطه کرمان. کرمان: انتشارات مرکز کرمان‌شناسی.

Caldwell,Joseph R.(1967),"Investigations at Tal-i-Iblis , III inois sate museum preliminary, Report No 9 III inois.

Craddock, P T and Eckstein, K. Production of Brass in Antiquity by Direct Reduction, in P.T. Craddock and J. Lang (eds.), Mining and Metal Production through the Ages, British Museum Press, London, 2003, pp.216-30.

Craddock, P. T., Zinc in classical antiquity. British Museum: 1990.

Craddock, P., The early history of zinc. Endeavour 1987, 11 (4), 183-191.

Craddock,P.T,Eckstein k .& Meeks, N.D.(1983) . Zinc production in medieval (India : The evidence from Zawar , Rajasthan . Antiquity , 57 (220), 180_187 .

Elikay Dehno, S.; Kamali, A. A.; Beheshti, S. I.; Ebrahimi, M.; Aarab, A., Unveiling Shahdad: Exploring ancient copper reserves and metallurgical practices on Iran's Southeast Plateau. L'Anthropologie 2025, 129 (1), 103343.

Emami, M.; Elikay Dehno, S.; Eskandari, N.; Pritzel, C., Tracing the pyro-technological evidence during the 3rd millennium bc in "Shahdad" through archaeometallurgical remains. Archeometriai Műhely 2024, XXI (3), 253-264.

Emami, M.; Parvaresh, A. In Mineralogish, Petrochemische Untersuchungen an Kupferschlacken aus „SHEIKH-ALI" Ophiolithkupferlagerstaetten, Kerman, Iran, Archäometrie und Denkmalpflege 2016, Jahrestagung an der Georg-August-Universität Göttingen 28. September, Susanne Greiff, A. K., Frank Schlütter, Michael Prange (Hrsg.), Ed. Metalla, Sonderheft 8

Eskandari, N.; Emami, S. M., Re-tracing Copper Metallurgy in the Shahdad Region (3rd Millennium BCE). Journal of Archaeological Studies 2022, 14 (2), 1-17.

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-10-09]

[DOI: 10.66224/kcr.9.1.37]

the Ming and Qing Doynasties (AD 1368-1911) [Doctoral dissertation, University college London]. UCL Discovery.

Thornton, c.p. (2007) . of brass and bronz in prehistoric soth Aisa. In Metals a mines : Studies in archaeometallurgy (pp.123_135). Archetype Publications.

Thoronton, c.p & lamberg-karlosky, c.c, 2001,"Tappeh Yahya and the prehistoric metallurgy of south-eastern iran.

Wertime, T. A., Man's First Encounters With Metallurgy: Man's discovery of ores and metals helped to shape his sense of science, technology, and history. Science 1964, 146 (3649), 1257-1267.

Fabbri, B.; Gualtieri, S.; Shoval, S., The presence of calcite in archeological ceramics. Journal of the European Ceramic Society 2014, 34 (7), 1899-1911.

Hauptmann, A., The Archaeometallurgy of Copper; Evidence from Faynan, Jordan. Springer 2007; p 396.

Jahrestagung an der Georg-August-Universität Göttingen 28. September, 2016; pp 205-208.

Khojasteh Behzadi , N. , Mafi,F., & Emami , S.M. (2023) .The study of mining and metallurgy in the Central part of Bam country based on archaeological survey and histrocal sources . Journal of Archaelogical Stadies , 15 (2), 57_73 .

Li, Y.; Xiao, B.; Juleff, G.; Huang, W.; Li, D.; Bai, J., Ancient zinc smelting in the Upper and Middle Yangtze River region. Antiquity 2020, 94 (375), e17.

Maggetti, M., Chemical analyses of ancient ceramics: What for? CHIMIA International Journal for Chemistry 2001, 55 (11), 923-930.

Maggetti, M., Phase analysis and its significance for technology and origin. In In Archaeological ceramics, 1982; pp 121-133.

Maritan, L.; Ganzarolli, G.; Antonelli, F.; Rigo, M.; Kapatza, A.; Bajnok, K.; Coletti, C.; Mazzoli, C.; Lazzarini, L.; Vedovetto, P.; Chavarría Arnau, A., What kind of calcite? Disclosing the origin of sparry calcite temper in ancient ceramics. Journal of Archaeological Science 2021, 129, 105358.

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

Polo , M. (1903). The book of ser Marco polo , The venetian , concerning The kingdoms and marvels of the East (vol 2) . Scribner.

Rajabzadeh, A.; Kouhestani, H.; Mokhtari, M. A. A.; Zohdi, A., Mineralization, structure, texture and genesis of sediment-hosted Chehrabad Pb–Zn–Cu deposit, NW Zanjan. Journal of Economic Geology 2020, 12 (2), 177-202.

Sedghi, Y.; Sani, F. S.; Eskandari, N.; Emami, M., Beyond a Decoration; Mineralogical and Micro-structural Study of the Early Bronze Age "Life Cycle Jar" from Keshik Cemetery, Sistan and Balouchistan, Iran. Interdisciplinaria Archaeologica 2022, VIII (1), 1-12.

Shortland , A . & Degryse ,P., (2020) . " Ceramics " . In : K . Brritton & M.P.Richards(Eds), Archaeological Science: An Introduction (335_346) Cambridge University Press.

Zhou,w. (2001). Distilling zinc china: the technology of large- scale zinc production in chongqing during

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-10-09]

[DOI: 10.66224/kcr.9.1.37]

Tracing Tutia Production in Southeastern Iran: Chemical and Mineralogical Studies of Ceramic Nails Associated with Metallurgical Activities Using Petrographic and ICP-OES Analyses

Nazanin Khojasteh Behzadi[1], Farzad Mafi[2]*, Seyed Mohammad Amin Emami[3]

mafifarzad@gmail.com*

1. PhD Candidate, Department of Archaeology, Ab.C., Islamic Azad University, Abhar, Iran
2. Assistant professor, Department of Archaeology, Ab.C., Islamic Azad University, Abhar, Iran
3. Associate professor, Department of Archaeology, University of Esfahan- Art University of Esfahan, Iran

Received: 2025.10.20

Accepted: 2026.06.20

doi: https://10.66224/kcr.9.1.37

Knowledge of Conservation and Restoration

pISSN: 2538-6093 eISSN: 3060-6217

This journal adheres to COPE guidelines. Access to this article is free for all. Any non-commercial use of it is permitted, provided appropriate attribution is given.

Owing to its vast and rich mineral resources, the Kerman region is regarded as one of the most significant areas for the identification and extraction of metals in Iran. The city of Bam, located in the southeastern part of this province, has long served as a strategic center linking southeastern Iran with Sistan due to its distinctive geological and geomorphological conditions. Archaeological surveys conducted in the central district of Bam County during 2018–2019 aimed to identify ancient mining areas and metallurgical smelting centers. Drawing upon the results of these field investigations, the present study undertakes chemical and mineralogical laboratory analyses of four ceramic nail samples recovered from four areas associated with metallurgical activities. These analyses were carried out to determine the function of the ceramic nails and to investigate the extraction processes involved. The studied samples were examined through petrographic and geochemical analyses using the ICP-OES method across the four identified sites. Petrographic examination of the ceramic nails indicates high firing temperatures during manufacture and reveals a porphyritic texture containing predominantly igneous inclusions as temper materials. The results of the chemical analyses demonstrate that approximately 72% of the chemical composition of these ceramic nails consists of zinc, thereby confirming the intentional extraction of this metal. The existence of sufficient technological knowledge for the oxidation of zinc and the production of Tutia (zinc oxide) at these sites may indicate the emergence of one of the most sophisticated and technologically advanced metallurgical extraction processes in the ancient world. The analytical results obtained from the ceramic nails recovered from several of these sites further suggest that they were specifically employed in the extraction and production of zinc oxide (Tutia).

Keywords: Ceramic Nails; Archaeometallurgy; Petrography; ICP-OES; Southeastern Iran; Bam.

Introduction

This study investigates an ancient zinc-extraction technology in Iran, with a particular focus on the archaeological evidence preserved in clay nails or clay cylinders associated with the process. The article begins from the premise that zinc production in antiquity required a specialized and

This article is beased on the first auther's doctoral dissertation, entitled "Tracing Tutia Production in Southeastern Iran: Chemical and Mineralogical Studies of Ceramic Nails Associated with Metallurgical Activities Using Petrographic and ICP-OES Analyses", supervised by the second author and advised by the third author at the Department of Archaelogy, Islamic Azad University, Abhar Branch.

nazaninkhojastehbehzadi@iau.ir

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-10-09]

[DOI: 10.66224/kcr.9.1.37]

highly adaptive metallurgical system, one that differed significantly from the extraction methods used for other metals. Rather than relying on direct smelting alone, this technique involved the thermal processing of zinc-bearing ores, especially calamine, under controlled conditions that allowed zinc vapor to be captured and condensed. The research is situated within the broader context of Iranian metallurgical history. It aims to clarify how ancient craftsmen were able to exploit the physicochemical properties of zinc compounds long before modern industrial technologies emerged.

The study emphasizes the importance of identifying, classifying, and evaluating the archaeological remains associated with this extraction method, particularly the clay nails recovered from several sites in central Bam. These objects are not merely incidental remains; they represent functional components of a technological chain that made zinc recovery possible. By examining their distribution, condition, composition, and microstructural features, the research seeks to reconstruct the operational logic of the ancient system. In this sense, the article contributes both to archaeological interpretation and to the history of science and technology in Iran.

A key assumption of the study is that these clay elements are direct witnesses to a sophisticated and localized metallurgical tradition. Their morphology, color changes, and chemical signatures collectively provide evidence for exposure to high temperatures, oxidizing and reducing environments, and zinc vapor. The research thus places ancient zinc extraction within a technological framework that was empirical, regionally adapted, and surprisingly efficient. Overall, the introduction establishes the central question: how did ancient Iranian metallurgists design and operate a system capable of extracting zinc from ore, and what can the surviving clay remains reveal about that process?

Research Methodology

The research is based on field investigations in the central Bam region, where several areas were surveyed and sampled for evidence related to ancient zinc production. The main surveyed zones include the Abarq plain (NBB-01), Deh Bakri and Kuh-e Chah (NBB-02), Morghak village (Deh Redin) (NBB-03), and the Dehno valley (NBB-04). In each locality, the researchers collected archaeological samples with particular attention to the better-preserved clay nails and to traces that could indicate zinc-related metallurgical activity. Selection criteria were primarily based on preservation quality and on visible or probable traces of zinc on the surfaces of the samples.

The methodological approach combines field archaeology with laboratory analyses. After collection, the samples were subjected to petrographic study and chemical analysis to identify their mineralogical composition and elemental content. Petrographic examination helped determine texture, fabric, and inclusions, while chemical analysis was used to detect the presence and concentration of metals such as zinc, lead, iron, and copper. These analyses were essential for distinguishing ordinary ceramic materials from artifacts that had been exposed to zinc vapor or associated with metallurgical furnaces.

The study also incorporated observation of contextual evidence, such as slag deposits and mining tunnel openings, where available, to support the interpretation of the clay nails as components of an extraction system. By combining archaeological context, material description, and laboratory data, the researchers created a multi-layered methodological framework. This made it possible to move beyond simple artifact description and toward a reconstruction of the technological process itself. In short, the method integrates survey archaeology, artifact selection, petrography, and compositional analysis to demonstrate the function and significance of the clay nails in ancient zinc extraction.

Discussion

1. Archaeological Context and Spatial Distribution

One of the most important findings of the study is the wide distribution of clay nails across the surveyed areas of Bam. Their occurrence in multiple locations suggests that zinc-related activity was not isolated to a single workshop but formed part of a broader metallurgical landscape. In some places, the presence of slag and mining-related features further strengthens the interpretation that these remains belong to a system of ore processing and metal recovery. The spatial pattern indicates that ancient zinc extraction was likely organized around accessible ore sources and furnace installations. The association of the artifacts with particular topographic settings also implies that production was influenced by local geology, resource availability, and logistical considerations. This broader distribution helps demonstrate that zinc extraction was a regional technological tradition rather than an accidental or short-lived experiment.

2. Functional Interpretation of the Clay Nails

The clay nails are interpreted as key components in the zinc-extraction process, functioning as devices that absorbed or retained zinc vapor during the thermal treatment of calamine. Their shape, surface darkening, and breakage patterns support this interpretation. The article suggests that the nails were positioned vertically, with their tips facing upward, to maximize the collection of metal vapor. Their darkened ends indicate prolonged exposure to heat and reactive furnace atmospheres. This functional reading is significant because it shows that the objects were not random ceramic fragments but deliberately produced tools integrated into a sophisticated in-

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-10-09]

[DOI: 10.66224/kcr.9.1.37]

dustrial procedure. The clay material served as a practical medium for condensation and collection, demonstrating an ingenious use of locally available resources. Such a system reflects a high degree of experimental knowledge and adaptation to the chemical behavior of zinc at elevated temperatures.

3. Chemical Evidence and Metallurgical Signatures

Chemical analysis provides some of the strongest support for the identification of these artifacts as part of an ancient zinc-production system. The samples from NBB-01 to NBB-04 contain measurable amounts of zinc, along with lead, iron, copper, and, in smaller quantities, calcium, manganese, silver, and cobalt. The presence of zinc is especially important because it directly confirms contact with zinc-bearing vapors or residues. Rather than being ordinary ceramic objects, the clay nails exhibit metallurgical signatures that reveal their role in the extraction environment. Lead and copper may reflect impurities present in the ore or furnace charge, while iron likely derives from both the surrounding geology and the thermal conditions of the operation. The trace elements suggest that the materials were exposed to a complex chemical environment shaped by mineral impurities, furnace design, and oxidation-reduction processes. In this respect, the chemical data transform the clay nails from typological objects into direct evidence of ancient technological performance.

4. Petrographic Features and Ceramic Fabric

Petrographic analysis adds another layer of understanding by revealing the internal fabric and mineral inclusions of the clay nails. The study reports porphyritic textures or quartz phenocrysts, indicating that the clay bodies were made from raw materials containing visible mineral grains and were not highly refined. These characteristics may have improved thermal resistance during furnace use. The petrographic results also help explain how the artifacts withstood high-temperature conditions while still functioning within the extraction system. Their ceramic composition appears to have been deliberately suited to repeated heating and exposure to reactive furnace gases. This points to an empirical understanding of material performance in ancient workshop practice. The petrographic evidence, therefore, complements the chemical results by showing that the clay nails were not only chemically involved in zinc recovery but also mechanically and thermally adapted to the demands of the process.

5. Technological Significance of Calamine-Based Zinc Extraction

The article emphasizes that the use of calamine was a particularly effective strategy because it decomposes more easily at relatively lower temperatures than some other zinc-bearing materials. This made it possible to extract zinc through a controlled sublimation process without requiring the advanced apparatus of modern metallurgy. The method reflects a deep practical understanding of ore behavior, furnace temperature, and vapor capture. In this system, the furnace and the clay nails worked together as parts of a coordinated technological sequence. The choice of calamine suggests that ancient metallurgists were not merely exploiting metal ores in a general sense; they were applying a specific and optimized technique tailored to zinc chemistry. This is one of the most remarkable aspects of the study, because it shows that ancient Iranian metallurgists had developed a specialized extraction method based on observation, experimentation, and accumulated craft knowledge.

6. Broader Implications for Ancient Iranian Metallurgy

The findings collectively demonstrate that ancient Iran possessed a highly developed metallurgical tradition capable of sophisticated non-ferrous metal production. The clay nails provide concrete material evidence of a process that required control over temperature, gas flow, and ore selection. Their survival allows scholars to reconstruct not just the products of metallurgy but the operational logic behind them. The study, therefore, has significance beyond the narrow case of zinc extraction: it contributes to a broader understanding of ancient scientific knowledge in Iran. The evidence suggests that metallurgical expertise was transmitted, refined, and adapted over time within local traditions. This challenges any simplistic view of ancient technology as rudimentary or accidental. Instead, the article presents zinc production as a carefully engineered process rooted in deep empirical knowledge. In this sense, the research also bridges archaeology and the history of technology, showing how material remains can illuminate intellectual and practical achievements in the ancient world.

Conclusion

This study provides compelling archaeological and analytical evidence for an ancient zinc-extraction technology in Iran, centered on the use of clay nails in a calamine-based sublimation process. Through field survey, sample selection, petrographic study, and chemical analysis, the researchers demonstrate that these artifacts were not ordinary ceramic remains but active components of a specialized metallurgical system. Their distribution across multiple sites in the central Bam region, together with associated slag and mining features, indicates that zinc production was part of a broader regional tradition rather than a singular isolated practice. The chemical presence of zinc and related metals confirms exposure to metallur-

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-10-09]

[DOI: 10.66224/kcr.9.1.37]

gical environments, while the petrographic characteristics reveal materials capable of withstanding intense thermal conditions.

One of the main contributions of the article is its reconstruction of the functional role of the clay nails. Their form, darkened tips, and likely vertical placement suggest that they served as collectors of zinc vapor during the extraction process. This interpretation highlights the ingenuity of ancient craftsmen in designing tools that matched the physical and chemical behavior of zinc-bearing ores. The study also underscores the importance of calamine, whose properties made it suitable for a controlled extraction method at comparatively lower temperatures.

More broadly, the article demonstrates that ancient Iranian metallurgists possessed a sophisticated understanding of materials and furnace technology. The evidence presented here enriches our knowledge of early zinc production and reveals a technical tradition grounded in experimentation, adaptation, and practical mastery. As a result, the research makes an important contribution to both archaeology and the history of science, showing that ancient metallurgical innovation in Iran was more advanced and systematic than previously assumed.

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-10-09]

[DOI: 10.66224/kcr.9.1.37]