

Study of the metalworking art in ancient Baluchistan: Technical investigation of bronze alloys discovered from the Spidej cemetery in Bazman (3200-2800 BC)

Seyyed Mohsen Haji Seyyed Javadi¹

1. Assistant Professor, Department of Art and Architecture, Payam Noor University, Tehran, Iran

Abstract

Bronze was one of the important metals in ancient times. This metal has been with mankind since the third millennium BC in advancing the history of the metallurgical industry. The use of this metal was also common in different regions of Iran. During the excavations of the cultural area of southeastern Iran, especially in the Baluchestan region, significant and diverse artifacts have been found, including the Bronze Age Spidej cemetery located in Iranshahr city. Therefore, the present study is a step towards understanding the construction technique and analyzing ancient metalworking technology in the Spidej cemetery located in Baluchistan, Iran. In this regard, four pieces of bronze artifacts discovered from this site were analyzed and examined using metallographic (OM) and scanning electron microscopy equipped with an X-ray diffraction spectrometer (SEM-EDS). The results showed that the objects studied were made of relatively pure unalloyed copper (95%) and copper-tin (Cu-Sn). Microstructural analysis of the samples showed sulfide inclusions and lead spheres in some of the samples. In the metallographic section, the results indicate that after initial shaping (casting), cold and hot forging was used to shape and manufacture the objects.

Keywords:

Metallography, Bronze, Spidej Cemetery, Bronze Age, SEM-EDS

موسسه پژوهش‌های علمی و تخصصی
پایام نور

مطالعه هنر فلزگری در بلوچستان باستان: بررسی فنی آلیاژهای مفرغی مکشوف از گورستان اسپیدژ بزمان (۳۲۰۰-۲۸۰۰ ق.م)

سیدمحسن حاجی سیدجوادی ۱

۱. استادیار، گروه هنر و معماری، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

چکیده

مفرغ یکی از مهم‌ترین آلیاژهای مورد استفاده در دوران باستان است که از هزاره سوم پیش از میلاد نقشی اساسی در تحول فناوری فلزکاری ایفا کرده است. شواهد گسترده‌ای از کاربرد این فلز در نواحی مختلف ایران، به ویژه حوزه فرهنگی جنوب شرق کشور، به دست آمده است. گورستان اسپیدژ در شهرستان ایرانشهر، به عنوان یکی از محوطه‌های شاخص عصر مفرغ در بلوچستان، مجموعه‌ای متنوع از اشیاء فلزی را دربردارد که بررسی آن‌ها امکان بازسازی فناوری فلزکاری باستانی را فراهم می‌سازد. پژوهش حاضر با هدف شناسایی فن ساخت و تحلیل فناوری تولید مصنوعات فلزی در این محوطه و در پاسخ به این پرسش انجام شده است که ویژگی‌های ترکیب شیمیایی، ریزساختاری و شیوه‌های ساخت اشیاء مفرغی اسپیدژ چه اطلاعاتی درباره فناوری فلزکاری عصر مفرغ در جنوب شرق ایران ارائه می‌کند؟ برای تحقق این هدف، چهار نمونه از اشیاء مفرغی مکشوفه با بهره‌گیری از روش متالوگرافی نوری (OM) و میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به طیف‌سنج پراش پرتو ایکس (SEM-EDS) مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که اشیاء مورد بررسی از مس نسبتاً خالص (حدود ۹۵٪) و آلیاژ مس-قلع ساخته شده‌اند. ریزساختار نمونه‌ها بیانگر حضور آخال‌های سولفیدی و گوچه‌های سربی در برخی از آثار است. همچنین داده‌های متالوگرافی حاکی از آن است که مصنوعات پس از ریخته‌گری اولیه، تحت فرآیندهای چکش کاری سرد و گرم برای تکمیل شکل‌دهی قرار گرفته‌اند. این یافته‌ها تصویری روشن از شیوه‌های تولید و دانش فنی صنعتگران عصر مفرغ در جنوب شرق ایران ارائه می‌کند.

واژگان کلیدی

متالوگرافی، مفرغ، گورستان اسپیدژ، عصر مفرغ، SEM-EDS

شناخت و تحلیل فرایندهای فلزکاری و دستیابی انسان به فناوری استخراج و تولید فلز، از بنیادی‌ترین مباحث در مطالعات باستان‌شناسی، زمین‌شناسی و باستان‌منالورژی به‌شمار می‌آید. به‌کارگیری تکنیک‌های مختلف فلزکاری، از جمله استخراج سنگ معدن، ذوب، گداخت، چکش‌کاری سرد و گرم، و در نهایت دستیابی به آلیاژهای گوناگون، نقشی تعیین‌کننده در تحول ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی فلزات داشته است (Wertime, 1973). در این راستا، ظهور فلزات و توسعه فناوری‌های مرتبط با آن، یکی از نقاط عطف فرهنگی در تاریخ جوامع انسانی محسوب می‌شود؛ چراکه این فرایند در تحولات اقتصادی، سیاسی، نوآوری‌های فنی و نظام‌های تجاری نقش برجسته‌ای ایفا کرده است. دوره‌های فلزی، به‌ویژه عصر مفرغ و عصر آهن، از مهم‌ترین مقاطع تاریخ فرهنگ مادی به‌شمار می‌روند (Pigott, 2004). عصر مفرغ، که از اواخر هزاره چهارم و طی هزاره سوم پیش از میلاد تثبیت شد، در فلات ایران و به‌ویژه در منطقه جنوب‌شرق کشور، با توسعه و گسترش آلیاژ مفرغ همراه بوده است. شواهد باستان‌شناسی این منطقه حاکی از آن است که جوامع باستانی جنوب‌شرق ایران با تمامی مراحل تولید فلز، از استحصال سنگ معدن تا ذوب، آلیاژسازی و شکل‌دهی اشیاء فلزی، آشنایی کامل داشته‌اند. بررسی معادن فلزی، بقایای کوره‌های ذوب و کارگاه‌های فلزکاری در این ناحیه اطلاعات ارزشمندی درباره شیوه‌های بهره‌برداری از منابع معدنی و تکنیک‌های منالورژیکی در اختیار پژوهشگران قرار داده است. افزون بر این، داده‌های به‌دست‌آمده از محوطه‌های عصر مفرغ جنوب‌شرق ایران، شواهد مهمی در جهت شناخت تعاملات فرهنگی این منطقه با حوزه‌هایی همچون بین‌النهرین و جنوب‌غربی ایران فراهم می‌کند (عباس‌نژادسرسی و فاضلی‌نشلی، ۱۳۸۵). در این میان، گورستان باستانی اسپیدژ در استان سیستان و بلوچستان، یکی از مهم‌ترین و غنی‌ترین محوطه‌های عصر مفرغ در جنوب‌شرق ایران به‌شمار می‌رود. این محوطه که در ۴۰ کیلومتری جنوب‌غربی شهرستان بزمان و در محدوده‌ای به وسعت تقریبی ۲۵ هکتار قرار دارد، به‌دلیل گستره وسیع قبور و تنوع چشمگیر یافته‌های فرهنگی، اهمیت ویژه‌ای در مطالعات باستان‌منالورژی منطقه دارد. قبور اسپیدژ از نوع سردابه‌ای بوده و اشیاء همراه مردگان، طیف گسترده‌ای از آثار فلزی از جمله ظروف، ابزار، جنگ‌افزارها و زیورآلات را در بر می‌گیرد. همچنین، وجود بقایای کوره‌های ذوب و استحصال فلز در بخش جنوب‌شرقی ارتفاعات محوطه، بیانگر فعالیت‌های گسترده فلزکاری در این محل است؛ فعالیت‌هایی که انجام بررسی‌های میان‌رشته‌ای از منظر باستان‌شناسی، تاریخ هنر، حفاظت و مرمت و نیز باستان‌سنجی را ضروری می‌سازد؛ لذا در این پژوهش سعی شده است تا با طرح پرسش‌هایی در زمینه باستان‌سنجی آلیاژهای مفرغی مکشوف از این گورستان به مطالعه آنها پرداخته شود. در این راستا پژوهش حاضر به روش تحلیلی-تجربی و با

تکیه بر روش‌های آزمایشگاهی متالورژی به بررسی چهار قطعه مفرغی پرداخته است تا به برخی از سوالات مطرح شده در این

زمینه پاسخگو باشد. سوالات مطرح شده در این پژوهش عبارتند از:

۱- ترکیب عنصری و ماهیت آلیاژهای به کار رفته در اشیاء فلزی گورستان اسپیدز چیست؟

۲- چه فناوری‌ها و روش‌های متالورژیکی برای تولید اشیاء مورد استفاده قرار گرفته است؟

بر این اساس، اهداف این مطالعه به صورت متمرکز بر شناسایی دقیق ترکیب آلیاژهای موجود در نمونه‌های مورد مطالعه و بررسی

فناوری ساخت و فرایندهای متالورژیکی به کار رفته در تولید اشیاء فلزی عصر مفرغ در بلوچستان قرار دارد.

۲. پیشینه پژوهش

در سال‌های گذشته، پژوهش‌های متعددی درباره اشیاء فلزی جنوب‌شرق ایران در حوزه‌های مختلف باستان‌سنجی، فناوری

فلزکاری و گونه‌شناسی انجام شده است. برای نمونه، بررسی‌های میکروسکوپی و ریزساختارشناسی بر روی مس آرسنیک

به‌دست‌آمده از محوطه اسپیدز بزمان نشان داده است که بخشی از اشیاء از آلیاژ Cu-As-Zn و بخشی دیگر از آلیاژ Cu-As و به

روش ریخته‌گری در قالب ساخته شده‌اند؛ این یافته‌ها اشیاء را در گروه برنزه‌های آرسنیک‌دار قرار می‌دهد (پورزرغان و همکاران،

۱۳۹۹). همچنین، مطالعه فرایند فلزکاری در محوطه‌های شاخص جنوب‌شرق ایران از جمله تل ابلیس، تپه یجی، شه‌داد و شهر

سوخته نشان می‌دهد که صنعت فلزکاری این منطقه از منظر فناوریانه، پنج مرحله اصلی شامل چکش‌کاری سرد، چکش‌کاری گرم و

گداختن، ذوب فلز، ذوب و استحصال فلز از سنگ معدن، و در نهایت فرایند آلیاژسازی را طی کرده است (عباس نژاد سرستی و

فاضلی نشلی، ۱۳۸۵). از سوی دیگر، تحلیل‌های عنصری و گونه‌شناسی مجموعه‌ای از ۲۹ مهر و قطعات مهر فلزی (مس و نقره) و

۱۹ مهر سرامیکی عصر مفرغ از جازموریان شرقی شامل محوطه‌های اسپیدز، چگردک و کشیک ابعاد تازه‌ای از سنت‌های تولید و

کاربری این آثار را آشکار کرده است (Heydari, et al 2018). افزون بر این، بررسی فناوری ساخت خنجر به‌دست‌آمده از اسپیدز با

استفاده از میکروسکوپ متالوگرافی (OM) و میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به طیف‌سنج پراش پرتوی ایکس (SEM-

EDS) نشان داده است که این خنجر از آلیاژ Cu-As و به روش ریخته‌گری تولید شده است (Pourzarghan, et al 2017).

همچنین نتایج پژوهش‌های ریزساختاری بر روی اشیاء مس آرسنیک اسپیدز بیانگر آن است که برخی از آثار از آلیاژ Cu-As-Zn

و برخی دیگر از آلیاژ Cu-As و به روش ریخته‌گری در قالب ساخته شده‌اند. تصاویر SEM نیز نشان می‌دهد که وجود ناخالصی‌های

نقطه‌ای و کشیده در زمینه فلز می‌تواند ناشی از استفاده از مس تصفیه نشده همراه با اسپایس (Speiss) در فرایند تولید باشد.

یکنواختی و درصد نسبتاً بالای آرسنیک (حدود ۵ درصد) در این نمونه‌ها مؤید آن است که آلیاژسازی به روش ذوب هم‌زمان (Co-

smelting) انجام گرفته است. افزون بر این، بررسی‌های فلزنگاری حاکی از آن است که عملیات فیزیکی دوره‌ای شامل کار سرد و

بازپخت (تاب‌کاری) برای افزایش شکل‌پذیری این اشیاء به کار رفته است (Pourzarghan et al., 2020). در پایان این مرور، روشن

می‌شود که با وجود انجام پژوهش‌های پراکنده درباره ترکیب، فناوری و گونه‌شناسی آثار فلزی جنوب‌شرق ایران، تحلیلی یکپارچه و

همزمان از داده‌های فناوریانه و باستان‌سنجی مفرغ‌های محوطه اسپیدژ ارائه نشده است؛ از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف پرکردن این

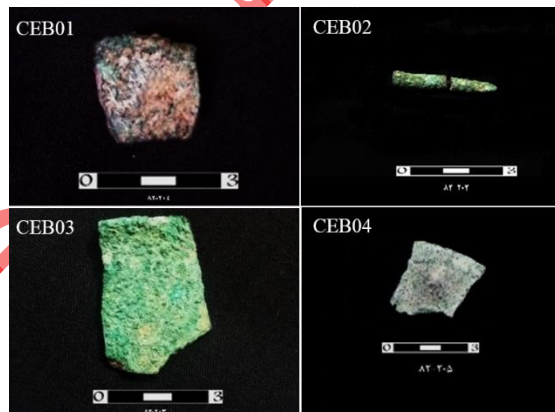
خلأ و تبیین جایگاه واقعی اسپیدژ در سنت فلزکاری عصر مفرغ، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

۳. روش پژوهش / مواد و روش‌ها

۳-۱. معرفی نمونه‌ها

به‌منظور گسترش مطالعات فلزگری باستانی، بررسی روش‌های تولید آثار مفرغی در عصر مفرغ، و دستیابی به شناخت دقیق‌تر از فنون فلزکاری محوطه اسپیدژ، چهار قطعه شی فلزی برای انجام آزمایش‌های تخصصی انتخاب شد. نمونه‌های مورد مطالعه شامل چهار قطعه از آثار برنزی مکشوفه از گورستان اسپیدژ در شهرستان بزمان است که از کاوش‌های سال ۱۳۸۱ ه.ش. به‌دست آمده‌اند. این مجموعه شامل قطعاتی از بدنه دو ظرف فلزی، یک سنجاق و یک آینه است.

برای شناسایی و ارجاع دقیق، نمونه‌ها بر اساس یک نظام نام‌گذاری لاتینی دو بخشی کدگذاری شدند. در این نظام، بخش نخست مخفی از سه حرف اول لاتین عبارت «گورستان اسپیدژ بلوچستان» (CEB01) است و بخش دوم عددی دو رقمی را شامل می‌شود که بیانگر شماره هر نمونه است. این کدگذاری امکان ردیابی، ثبت و مقایسه دقیق نمونه‌ها را در مراحل مختلف تحلیل آزمایشگاهی فراهم می‌کند (شکل ۱).



شکل ۱. نمونه‌های مورد مطالعه

۳-۲. روش‌های آزمایشگاهی

در این پژوهش، پس از نمونه‌برداری از هر شیء، به‌منظور بررسی ریزساختار آثار فلزی، از میکروسکوپ نوری (OM) استفاده شد. فرآیند تهیه مقاطع در آزمایشگاه متالوگرافی دانشگاه هنر اصفهان انجام گرفت. میکروسکوپ انعکاسی مورد استفاده، مدل BK-POL/BK-POLR ساخت کشور چین بود. برای آماده‌سازی نمونه‌ها، از هر یک از اشیاء مورد مطالعه مقدار اندکی نمونه جهت تهیه مقطع صیقلی برداشت شد. نمونه‌های جداشده در رزین اپوکسی مانت شده و سپس به ترتیب با سنباده‌های ۸۰۰، ۱۲۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ پرداخت شدند. در مرحله بعد، مقاطع با استفاده

از خمیر الماس ۳، ۶ و ۱ میکرون پولیش شدند. نمونه‌ها ابتدا در حלת پولیش‌خورده و بدون اچ مورد مشاهده قرار گرفتند و سپس برای آشکارسازی ریزساختار، با محلول خورنده کلرید آهن (III) (شامل ۱۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر، ۳۰ میلی‌لیتر اسید کلریدریک و ۱۰ گرم کلرید آهن (III)) اچ شدند. در پایان، مقاطع اچ‌شده با استفاده از میکروسکوپ نوری انعکاسی و نیز دستگاه SEM-EDX برای شناسایی ویژگی‌های ریزساختاری و ترکیب عنصری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

برای مطالعه سطح مقطع نمونه‌ها، شناسایی عناصر تشکیل‌دهنده، تعیین میزان پراکندگی این عناصر و تشخیص آخال‌های موجود، از روش میکروسکوپ الکترونی روبشی همراه با طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (SEM-EDS) و به‌صورت آنالیز نقطه‌ای (Spot Analysis) استفاده شد. این آزمایش‌ها در آزمایشگاه SEM مرکز پژوهش متالورژی رازی تهران انجام گرفت. برای این منظور، از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل VEGA III ساخت شرکت TESCAN (جمهوری چک) بهره گرفته شد. همچنین، آنالیز عنصری با استفاده از دستگاه EDS مدل RONTEC ساخت کشور آلمان و با نرم‌افزار QUANTAX (QX2) انجام شد. ولتاژ شتاب‌دهنده مورد استفاده در دستگاه SEM بسته به شرایط تصویربرداری و آنالیز، در بازه ۰/۲ تا ۳۰ کیلوولت تنظیم گردیده است.

۴. یافته‌ها و بحث

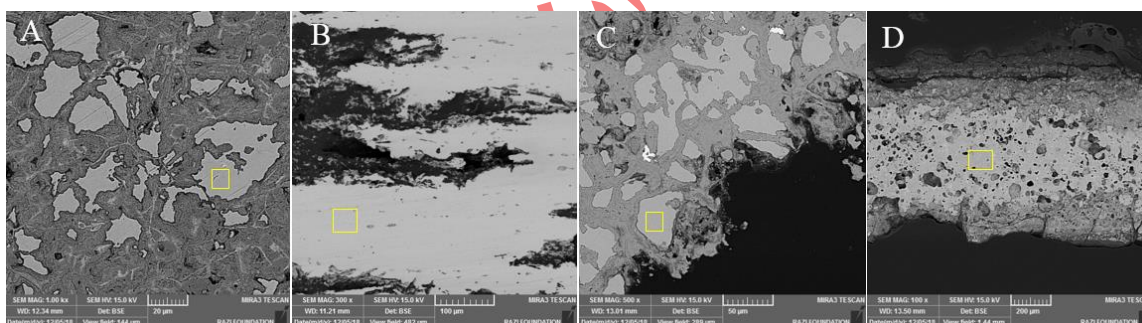
۴-۱. ترکیب شیمیایی

نتایج آنالیز SEM-EDS در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد نمونه‌های فلزی محوطه‌ای اسپیدژ از آلیاژهای پایه مس است که مقدار مس در تجزیه ترکیب شیمیایی آن‌ها حدود ۸۰ تا ۹۵ درصد وزنی است. بیشترین میزان مس در نمونه CEB02 به مقدار ۹۵ درصد وزنی شناسایی شده است. نتایج آنالیز EDS نشان‌دهنده استفاده از آلیاژ مفرغ با حدود ۹۰ درصد مس و کمتر از ۱۲ درصد وزنی قلع است که این ترکیب آلیاژی به‌عنوان یک نسبت مناسب به‌منظور انجام کار مکانیکی در دوران پیش از تاریخ شناخته شده است. میزان قلع در نمونه‌ها بین ۲ تا ۱۲ درصد است که بیشترین میزان در نمونه CEB01 و در نمونه CEB02 این عنصر در حد ذره شناسایی شده است. تفاوت مشاهده شده در میزان قلع در آثار مفرغی به‌علت کاربرد متفاوت اشیاء بوده است (عودباشی و حسن‌پور، ۱۳۹۵). میزان آرسنیک به‌عنوان عناصر اصلی در تمامی نمونه‌ها به جز نمونه CEB01 بین ۱ تا ۳ درصد شناسایی شده است که تنها در نمونه CEB03 این میزان بیشتر از سه درصد بوده و در واقع بیش‌تر از آن مقداری است که به‌توان حضور آن را ناخواسته تصور نمود (Lechtman et al, 1999). چنان که حضور میزان پایین‌تر از سه درصد آرسنیک ناشی از وجود این عنصر در سنگ معدن مورد استفاده بوده است. آرسنیک در غلظت‌های پایین بر خواص مس تأثیر بسزایی ندارد. در واقع مس آرسنیکی مس ناخالصی است و حذف آرسنیک از مس مذاب در فرایند متالورژی مشکل است و حضور آرسنیک می‌تواند ویژگی شکل‌پذیری مس را کاهش دهد اما در برخی موارد آرسنیک به‌عنوان یک افزودنی آلیاژی سودمند در نظر گرفته می‌شود

(Garbacz- Klempla et al., 2015). در حقیقت، مس آرسنیک ریخته‌گری شده حاوی مقادیر آرسنیک بیشتری ۳ تا ۵ درصد نسبت به اشیاء مس آرسنیک کار شده هستند. این ممکن است بخاطر انجام کار روی شیء باشد که منجر به از دست رفتن و کاهش میزان آرسنیک در شیء شده است (Pike, 2003). روی (Zn) در تمامی نمونه‌ها به مقدار یک ناچیز و در نمونه CEB04 به میزان ۵ درصد وزنی شناسایی شده است. وجود روی در این منطقه به‌عنوان یکی از عناصر موجود در ذخایر مسی حائز اهمیت است. روی در مدل کانی‌سازی ذخایر با منشأ آتشفشانی و به‌صورت توده‌های سولفیدی در منطقه مشاهده می‌شود. موقعیت زمین‌شناسی منطقه که شامل توده‌های افیولیتی است حاکی بر مدعی حضور روی در این مدل کانی‌سازی است (Emami, 2017). روی در شرایط اکسیداسیون لایه‌ای مقاوم با خوردگی را تشکیل داده که سبب شده است که شیء مورد مطالعه کمتر از بقیه در معرض آسیب قرار گرفته باشد. میزان آهن در تمامی نمونه‌ها بسیار ناچیز و قابل چشم‌پوشی است (جدول ۱ و شکل ۲).

جدول ۱. درصد عناصر موجود در آلیاژ نمونه‌های مورد مطالعه با استفاده از دستگاه SEM-EDS

Sample No.	Cu	Sn	As	Zn	Pb	Fe	Sb	Ni	Al	Cl	O
CEB01	۸۲/۵۰	۱۲/۰۷	۰/۶۹	۰/۷۱	۰/۹۶	۰/۱۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۲۹	۰/۲۶	۱/۷۴
CEB02	۹۵/۰۶	۰/۳۳	۱/۷۹	۰/۴۱	۰/۶۵	۰/۰۹	۰/۲۰	۰/۰۰	۰/۰۶	۰/۱۳	۱/۱۶
CEB03	۸۹/۳۶	۲/۸۲	۳/۳۳	۰/۵۷	۱/۴۲	۰/۲۰	۰/۲۸	۰/۲۵	۰/۱۸	۰/۲۴	۱/۴۶
CEB04	۸۲/۷۶	۶/۵۱	۱/۶۴	۵/۶۱	۰/۶۶	۰/۱۲	۰/۳۹	۰/۱۸	۰/۰۶	۰/۱۲	۱/۵۹



شکل ۲. تصاویر SEM-EDS مربوط به نقاط آنالیز شده برای دستیابی به درصد عناصر موجود در آلیاژ نمونه‌های مورد مطالعه، تصویر A مربوط به نمونه CEB01، تصویر B مربوط به نمونه CEB02، تصویر C مربوط به نمونه CEB03 و تصویر D مربوط به نمونه CEB04 می‌باشند.

۴-۲. ناخالصی‌ها و فازهای موجود در نمونه‌ها

ریزساختار نمونه‌ها قبل از اچ به روش SEM با آشکارساز BSE تحت بزرگنمایی‌های مختلف بررسی شد. در تصاویر میکروسکوپی در زمینه فلزی فازهای متنوعی به‌صورت فاز تیره به رنگ خاکستری تیره و سفید دیده می‌شوند. در نتایج مشخص شده است فازهای خاکستری تیره رنگ (نقاط A) در چهار نمونه‌ی مورد پژوهش حاصل شناسایی ترکیبات مس، گوگرد، قلع و میزان کمی سرب است. میزان ۵۶/۴۳ درصد روی در نمونه CEB04 که این مقدار ناخالصی نشان دهنده‌ی یک فرایند متالورژی یا آلیاژسازی کنترل نشده است و از سنگ معدن وارد زمینه فلزی شده‌اند (شکل ۳) می‌توان دریافت که ناخالصی‌های تیره در ساختار بعضی از نمونه‌ها بقایای مربوط به سولفید مس تشکیل دهنده سنگ معدن مس هستند و در فرایند استحصال مس در زمینه فلزی باقی مانده‌اند (Emami, 2014). در ابتدای دوره کالکولیتییک (هزاره پنجم)، استحصال مس از سنگ معدن‌های اکسیدی صورت

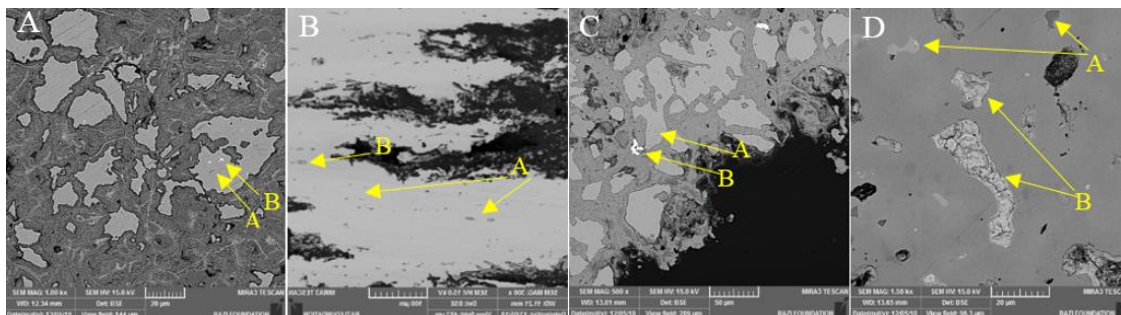
می گرفته است، اما با گذشت زمان در هزاره چهارم و سوم ق.م از سنگ معدن های سولفیدی یا مخلوطی از سنگ معدن های سولفیدی و اکسیدی برای استحصال مس استفاده می شده است (عودباشی و حسن پور، ۱۳۹۵).

بر اساس نتایج جهت شناسایی ترکیب شیمیایی گویچه های سربی عنصر اصلی تشکیل دهنده این گویچه ها سرب است و میزان سرب بین ۱ تا ۸۵ درصد وزنی اندازه گیری شده است که با نقاط B مشخص شده اند و عناصر موجود در این زمینه قلع به میزان قابل توجهی در دو نمونه CEB01 و CEB03 آنتیموان در دو نمونه CEB02 و CEB03 به میزان قابل توجهی شناسایی شده، آرسنیک در سه نمونه CEB01، CEB02 و CEB03 شناسایی شده است که می تواند به علت استفاده از سنگ معدن مورد استفاده در ساخت آلیاژ مورد نظر باشد.

حضور طیف گسترده ای از عناصر در ترکیب اجزای فازی ریزساختاری در نمونه ها حاکی از فرایند متالورژی کنترل نشده در ساخت آلیاژها است که در زمینه فلزی در مراحل استحصال مس باقی مانده اند و ترکیب موجود در بافت ماتریکس فلز مس متشکل از نیکل، روی، نقره، آنتیموان، آرسنیک، سرب و غیره است که این عناصر در اغلب آلیاژهای مسی باستانی شناسایی و گاهی به عنوان ناخالصی نیز مشاهده شده است و وجود آنها در زمینه فلزی پدیده معمولی است (جدول ۲ و شکل ۳).

جدول ۲. درصد عناصر مربوط به ناخالصی های موجود در نمونه های مورد مطالعه با استفاده از دستگاه SEM-EDS

Sample No.	Cu	Sn	As	Zn	Pb	Fe	Sb	Ni	Al	S	Si	Cl	O
CEB01A	۷۲/۱۲	۱/۰۳	۰/۴۵	۰/۲۷	۵/۲۸	۰/۱۱	۰/۷۴	۰/۱۲	۰/۱۷	۱۷/۷۲	۰/۱۵	۰/۳۳	۱/۵۰
CEB01B	۵/۳۰	۱۱/۷۸	۹/۱۷	۰/۴۰	۵۷/۳۵	۰/۱۴	۰/۳۲	۰/۱۵	۰/۱۲	۰/۰۰	۰/۳۵	۱/۳۸	۱۳/۵۵
CEB02A	۵۸/۹۶	۲/۰۴	۴/۵۸	۰/۴۶	۶/۱۶	۰/۱۵	۱۴/۱۰	۰/۰۰	۰/۲۱	۹/۸۱	۰/۰۵	۰/۲۱	۳/۲۸
CEB02B	۱۵/۶۳	۰/۴۵	۱۷/۷۱	۰/۳۷	۳۰/۵۳	۰/۵۴	۲۲/۰۴	۰/۱۹	۰/۰۶	۰/۰۹	۰/۱۵	۰/۱۷	۱۲/۰۶
CEB03A	۷۰/۹۴	۱/۲۵	۰/۸۲	۰/۳۴	۵/۴۲	۰/۱۱	۰/۳۸	۰/۰۰	۰/۲۰	۱۷/۳۹	۰/۳۳	۰/۴۲	۲/۵۰
CEB03B	۴/۲۶	۳۱/۹۷	۹/۸۳	۰/۳۰	۱/۲۳	۰/۳۹	۵/۱۶	۰/۰۰	۰/۳۴	۰/۲۹	۰/۸۲	۰/۳۰	۴۰/۲۰
CEB04A	۱۰/۳۲	۱/۳۹	۰/۰۰	۵۶/۴۳	۱/۵۴	۰/۴۰	۰/۳۸	۰/۱۰	۰/۰۰	۲۸/۱۵	۰/۰۰	۰/۲۳	۱/۰۶
CEB04B	۲/۷۲	۰/۱۳	۰/۱۶	۰/۶۷	۸۴/۲۵	۰/۱۵	۰/۱۲	۰/۲۱	۰/۱۲	۰/۰۰	۰/۲۷	۰/۹۸	۱۰/۲۲

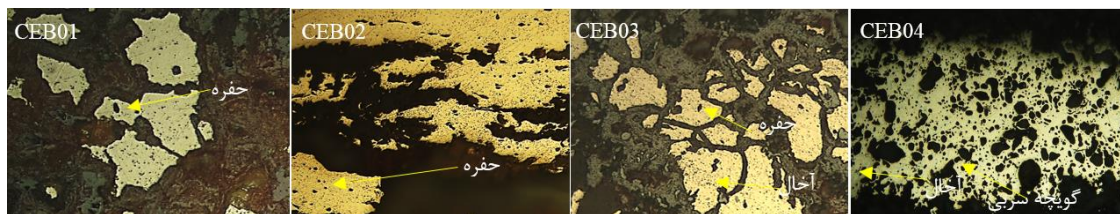


شکل ۳. تصاویر SEM-EDS مربوط به آخال‌های باقی‌مانده در سطح فلز در نمونه‌های مورد مطالعه، تصویر A مربوط به نمونه CEB01، تصویر B مربوط به نمونه CEB02، تصویر C مربوط به نمونه CEB03 و تصویر D مربوط به نمونه CEB04 می‌باشند.

۴-۳. متالوگرافی

مطالعات متالوگرافی در نمونه‌های مورد مطالعه روش ساخت تقریباً یکسانی برای آن‌ها را نشان می‌دهند اما عملیات صورت گرفته به منظور شکل‌دهی نهایی تا حدودی متفاوت بوده است. بررسی ریزساختاری نمونه CEB01 نشان‌دهنده چکش‌کاری است که خطوط دوقلویی ثابت‌کننده آن است، اندازه‌ی دانه‌های بسیار کوچک در واقع نشان از نوع ریخته‌گری و اینکه این شیء به سرعت سرد شده است، دانه‌بندی ریز مشخصه شکل بلور است و بلور ریز یعنی دانه‌بندی خیلی ریز و سرعت سرد شدن شیء است. باندهای دوقلویی در ریزساختار این نمونه نشان از فرایندی است که بر روی اشیاء فلزی مثل مس با شبکه FCC کار سرد یا گرم و آنیل (تابکاری) انجام شده است و عدم خطوط کرنش (لغزشی) نشان‌دهنده آنیل (تابکاری) نهایی اشیاء به‌منظور خارج شدن تنش‌های ناشی از کار سرد در ساختار فلز است (Frame, 2010, Scott, 1991) و وجود باندهای دوقلویی خمیده نشان‌دهنده کار سرد پس از تابکاری است (Scott, 2002). در نمونه CEB02، ریزساختار فلزی حاکی از این است که نمونه پس از شکل‌دهی اولیه چکش‌کاری شده است و برای دست‌یابی به فرم مورد نظر در مرحله نهایی به‌شدت چکش‌کاری سرد شده است که شواهد آن به‌صورت خطوط لغزشی فراوان در ساختار نمونه مشخص است (Scott, 1991). در نمونه CEB03، ریزساختار حاکی از دانه‌های کار شده در این نمونه است هم از طرفی یکی دیگر از دلایل مغز فلزی کمتر و خوردگی بیشتر نمونه وجود تنش‌های پسماند (خطوط لغزشی) ناشی از چکش‌کاری سرد در مرحله نهایی آن‌ها است که باعث افزایش تمایل به خوردگی و اکسایش در آلیاژهای فلزی می‌شود (پیرون، ۱۳۸۷: ۱۵۹). اما سردکاری یا کرنش فرایند بسیار مهمی است که برای سخت کردن فلزات یا آلیاژهایی که قابل عملیات حرارتی نیستند به کار می‌رود (دیتز، ۱۳۸۷: ۲۸۵). ریزساختار در نمونه CEB04، ساختار نشان می‌دهد که این نمونه در حالت ریختگی است؛ به روشنی مغزه‌دار شدن آشکار است بافت آلفای نارنجی رنگ حاکی از وجود مس در حالی که نواحی آبی-خاکستری غنی‌تر از قلع هستند. شبکه گسترده‌ی هاپیو یوتکتوئید $\alpha + \delta$ به وضوح به رنگ سفید دیده می‌شود و بخشی از مقطع را به دلیل وجود قلع در صورتی که آلیاژ به‌طور قابل ملاحظه‌ای سرد شده باشد را اشغال کرده است (اسکات، ۱۳۹۵: ۲۷). هنگامی که مفرغ قلع‌دار ریخته‌گری شود، در صورتی که آلیاژ به‌طور قابل ملاحظه‌ای سریع سرد شده باشد جدایش

پیدا می‌کند که معمولاً همراه با رشد ساختار دندریتی بوده و بوتکتوئید $\alpha+\delta$ فضای بین دندریتها را پر می‌کند. به دلیل نقطه ذوب بالاتر مس نسبت به قلع، دندریتها در مرکز غنی از مس بوده و در مرزخانه‌ها تجمع بالاتری از قلع وجود خواهد داشت. در مقادیر پایین قلع، امکان جذب تمام قلع در ساختار دندریتی وجود دارد (Casaletto et al., 2006). بسته به میزان جذب قلع در ساختار دندریتی مقدار فاز دلتای بین دندریتی نیز کاهش خواهد یافت. اما در مقادیر قلع حدود ۱۰ درصد بسیار غیر معمول است که در اشیاء تاریخی ریخته‌گری شده همه فاز دلتا جذب شود و معمولاً دندریتها با یک ماتریکس از بوتکتوئید $\alpha+\delta$ احاطه شده است (Couture-Rigert et al., 2012; Scott, 2014). از دیگر مواردی که در بررسی متالوگرافیکی قابل تشخیص است، وجود تخلخل در ریزساختار فلزی است که در نمونه CEB04، به طور واضح مشخص است. در فلزاتی که ریخته‌گری شده‌اند تخلخل و حفره‌هایی مشاهده می‌شود که می‌تواند در نتیجه گازهای حل شده در مذاب و یا حفره‌های بین دندریتی که طی انجماد پر نشده است، باشد. وقتی فلز مذاب سرد شود آن مقدار اکسیژن خروج یافته و واکنش با فلز می‌دهد و ممکن است تخلخل به وجود بیاورد. با هیدروژن باعث تشکیل بخار آب می‌شود در نتیجه تخلخل ریخته‌گری زیادی را به وجود آورده (Scott, 1992). در مرحله نهایی چکش کاری سرد بر روی نمونه صورت گرفته که خطوط لغزش این امر را ثابت می‌کند. در مورد چکش کاری سرد یا سردکاری نهایی آلیاژهای باستان غالباً به دست آوردن فرم مورد دلخواه، مد نظر بوده است البته در مورد اشیائی که دستیابی به استحکام و سختی بیشتر، جزو فاکتورهای اصلی تولید می‌باشد بر روی این قبیل آثار در مرحله نهایی چکش کاری سرد انجام شده است همانطور که در اکثر نمونه‌های مطالعه شده در پژوهش حاضر اثر سردکاری نهایی مشخص است اما نمی‌توان به قطع هدف از سردکاری نهایی را برای رسیدن به سختی بالا تبیین نمود (شکل ۴ و ۵).



شکل ۴. تصاویر متالوگرافی قبل از اچ مربوط به نمونه‌های مورد مطالعه



شکل ۵. تصاویر متالوگرافی بعد از اچ مربوط به نمونه‌های مورد مطالعه

نتیجه‌گیری

به‌منظور شناسایی شیوه‌های آلیاژسازی در بلوچستان طی هزاره سوم پیش از میلاد، تعدادی از آثار فلزی به‌دست‌آمده از محوطه اسپیدژ بر پایه مجموعه‌ای از آزمایش‌ها و آنالیزهای دستگاهی مورد مطالعه قرار گرفت. بررسی چهار نمونه فلزی منتخب از گورستان اسپیدژ نشان می‌دهد که فناوری فلزکاری این محوطه بر استفاده از ترکیبات متنوع مس استوار بوده است. یافته‌ها حاکی از آن است که در ساخت مصنوعات فلزی، به‌طور هم‌زمان از آلیاژهای مس-قلع (Cu-Sn)، مس نسبتاً خالص و مس آرسنیک (Cu-As) - تنها در یک نمونه - استفاده شده و سایر عناصر فلزی صرفاً در مقادیر اندک حضور داشته‌اند. در یکی از نمونه‌ها حضور ۵ درصد وزنی روی و ۱۱ درصد وزنی سرب شناسایی شد؛ مقادیری که می‌توان آن‌ها را ناشی از آلیاژسازی آگاهانه دانست. درصد قلع در نمونه‌های برنزی بین ۴ تا ۱۲ درصد متغیر است. ناهمگونی ترکیب شیمیایی میان نمونه‌ها نشان می‌دهد که منشأ سنگ معدن مورد استفاده یکنواخت نبوده و بنابراین نمی‌توان الگوی واحدی برای تمامی اشیاء تعریف کرد. نتایج ریزساختاری نیز وجود فازهای متنوعی را آشکار ساخت؛ از جمله ترکیبات سولفید مس که احتمالاً بازمانده‌های سولفیدهای موجود در سنگ معدن اولیه هستند و طی فرآیند استحصال در زمینه فلزی به‌جا مانده‌اند. افزون بر این، گوپچه‌های سربی در دو نمونه و حضور نقره و قلع در دو نمونه دیگر مشاهده شد. بررسی‌های میکروسکوپی نشان می‌دهد که در هر چهار نمونه، از چکش‌کاری سرد به‌عنوان روش اصلی شکل‌دهی نهایی استفاده شده است.

سپاسگزاری: نگارنده مقاله از جناب آقای یاسین صدقی (دکتری مرمت اشیاء فرهنگی و تاریخی و مسئول اصالت

سنجی آثار موزه‌ای در موسسه فرهنگی موزه‌های بنیاد) بابت در اختیار گذاشتن نمونه‌ها و راهنمایی‌شان در پیشبرد این

پژوهش سپاسگزاری می‌نماید.

منابع

- ابراهیم زاده، عیسی. (۱۳۹۱). *جغرافیای ناحیه‌ای جنوب شرق ایران با تأکید بر سیستان و بلوچستان*، سازمان مطالعه و تدوین کتب علوم انسانی دانشگاه‌ها (سمت)، مرکز تحقیق و توسعه علوم انسانی.
- اسکات، دیوید. (۱۳۹۵). *متالوگرافی و ریزساختار در فلزات باستانی و تاریخی*، ترجمه‌ی امید عودباشی و عاطفه شکفته، انتشارات جهاد دانشگاهی اصفهان، چاپ اول.
- پورزرقان، وحید. بخشنده‌فرد، حمیدرضا. حیدری، محمد. (۱۳۹۹). بررسی‌های میکروسکوپی و ریزساختارشناسی مس آرسنیک از منطقه اسپیدژ بزمان، پژوهش باستان سنجی، ۶ (۲): ۷۵-۸۹.
- پیرون، د. ل. (۱۳۸۷). *الکتروشیمیایی خوردگی*، ترجمه‌ی محمدعلی گل‌عذار با همکاری احمد رضا ریاحی. مرکز نشر، اصفهان: دانشگاه صنعتی اصفهان.
- دیتر، ج. ای. (۱۳۷۳). *متالورژی مکانیکی*، ترجمه‌ی شهره شهیدی، تهران: مرکز نشر دانشگاهی.
- سید سجادی، سید منصور. (۱۳۷۴). *باستان‌شناسی و تاریخ بلوچستان*، نشر سازمان میراث فرهنگی کشور.
- عباس‌نژاد سرشتی، رحمت، و فاضلی نشلی، حسن. (۱۳۸۵). فرایند فلزکاری در جنوب شرقی ایران در هزاره‌های چهارم و سوم ق. م: سازوکارهای اقتصادی، اجتماعی و سیاسی، *پژوهش‌های تاریخی ایران و اسلام*، شماره ۲: ۷۵-۸۱.
- عودباشی، امید. حسن‌پور، ع. (۱۳۹۵). مطالعات آزمایشگاهی بر روی آلیاژ و ریزساختار اشیاء برنزی محوطه‌ی عصر آهن باباجیلان لرستان، *مطالعات باستان‌شناسی*، ۸ (۱): ۱۳۳-۱۴۹.
- Abbasnejad Serashti, R, and Fazeli Nashli, H. (2006). The Metalworking Process in Southeast Iran in the Fourth and Third Millennium BC: Economic, Social, and Political Mechanisms, *Historical Researches of Iran and Islam*, No. 2: 75-81. [In Persian].
- Casaleto, M. P., De Caro, T., Ingo, G. M., & Riccucci, C. (2006). Production of reference "ancient" Cu-based alloys and their accelerated degradation methods. *Applied Physics A*, 83(4), 617-622.
- Couture-Rigert, D. E., Sirois, P. J., & Moffatt, E. A. (2012). An investigation into the cause of corrosion on indoor bronze sculpture. *Studies in conservation*, 57(3), 142-163.
- Dieter, J. A. (1994). *Mechanical Metallurgy*. Translated by Shohreh Shahidi, Tehran: University Press. [In Persian].
- Ebrahimzadeh, I. (2012). *Regional geography of south east of Iran Sistan Baluchestan*, Samt Publication. [In Persian].
- Emami M (2014) "Toroud", the late motion for As-Sb bearing Cu production from 2nd millennium BC in Iran: an archaeometallurgical approach. *Mediterr Archaeol Archaeometry* 14(2):169-188.
- Emami, M., Kowald, T., & Trettin, R. (2017). Preliminary archaeometallurgical studies on copper extraction from polymetallic ore sources in Meymand, south central Iranian desert. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 9(7), 1515-1528.
- Frame, L. (2010). Metallurgical investigations at Godin Tepe, Iran, Part I: the metal

- finds. *Journal of Archaeological Science*, 37(7), 1700-1715.
- Garbacz-Klempka, A., Kozana, J., Piękoś, M., Cieślak, W., Perek-Nowak, M., Kowalski, Ł., ... & Łoś, J. (2015). Copper and arsenical copper during Eneolithic in metallographic and mechanical properties examination. *Archives of Foundry Engineering*, 15.
- Heydari, M., Desset, F., & Vidale, M. (2018). Bronze Age Glyptics of Eastern Jazmurian, Iran. *Paleorient*, 44(1), 133-154.
- Heydari, M., Desset, F., & Vidale, M. (2019). a Late 4th – Early 3rd Millennium BC Grave at Spidej (Eastern Jazmurian, Iranian Baluchistan). *Iranica Antiqua*.
- Lechtman, H., & Klein, S. (1999). The production of copper–arsenic alloys (arsenic bronze) by cosmelting: modern experiment, ancient practice. *Journal of Archaeological science*, 26(5), 497-526.
- Oudbashi, O. and Hasanpour, A. (2016). Experimental Studies on Alloy Composition and Microstructure of some Bronze Objects from Iron Age Site of Baba Jilan, Luristan. *Journal of Archaeological Studies*, 8(1), 133-149. doi: 10.22059/jars.2016.59499 . [In Persian].
- Pigott, V. C. (2004). On the importance of Iran in the study of prehistoric copper-base metallurgy. *Persiens Antike Pracht. Katalog der Ausstellung des Deutschen Bergbau-Museums Bochum vom*, 28, 28-43.
- Piron, D. L. (1991). *The Electrochemistry of Corrosion*. Translated by Mohammadali Golozar, Esfahan : Isfahan University of Technology. [In Persian].
- Pourzarghan V, Bakhshandefard H, Heydari M. (2020). Microscopic and Microstructural Study of Arsenic Copper from Spidezh of Bazman. *JRA*. 6(2), 75-89. doi:10.52547/jra.6.2.75. [In Persian].
- Pourzarghan, V., Sarhadi- Dadian, H., & Hosseini, S. (2017). Identifying the Technology of a Bronze Dagger Discovered in Espidezh Region of Bazman in Sistan and Baluchestan, Iran. *Journal of Anthropology and Archaeology* June 5 (1), 47-54.
- Scott, D. A. (1991). *Metallography and Microstructure of Ancient and Historic Metals*: The J. Paul Getty trust, Singapor.
- Scott, D. A. (1992). *Metallography and microstructure in ancient and historic metals*. Getty publications.
- Scott, D. A. (2002). *Copper and bronze in art: corrosion, colorants, conservation*. Getty publications.
- Scott, D. A. (2014). Metallography and microstructure of metallic artifacts. In *Archaeometallurgy in Global Perspective* (pp. 67-89). Springer, New York, NY.
- Seyed Sajjadi, S, M. (1995). Archaeology and History of Baluchistan, National Cultural Heritage Organization Publication. [In Persian].
- Stuart, B. H. (2007). *Analytical techniques in materials conservation*. John Wiley & Sons.
- Wertime, T. A. (1973). The beginnings of metallurgy: A new look: Arguments over diffusion and independent invention ignore the complex metallurgic crafts leading to iron. *Science*, 182(4115), 875-887.