

بررسی متالوگرافی، ICP-OES و SEM-EDS سه شیء آلیاژی عصر مفرغ مکشوف از بخش جنوبی حوضه‌ی هلیل‌رود، جیرفت*

فاطمه یآوری^۱

رحمت عباس نژاد سیرستی^{۲*}

محمد مرتضوی^۳

نادر علیدادی سلیمانی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۲۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۳/۰۱
(از ص ۶۷ تا ۸۲)

چکیده

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد باستان‌شناسی دانشگاه مازندران
۲. استادیار گروه باستان‌شناسی دانشگاه مازندران
r.abbasnejad@umz.ac.ir
۳. استادیار گروه موزه‌داری دانشگاه هنر اصفهان
۴. کارشناس ارشد سازمان میراث فرهنگی، صنایع‌دستی و گردشگری

فعالیت‌های جدید باستان‌شناسی در جیرفت، در جنوب استان کرمان، علاوه‌بر کشف شواهد آغاز شهرنشینی، منجر به شناسایی مدارک فلزکاری، اشیای فلزی، شواهد معدن‌کاری کهن و سرباره‌های استحاله‌ی کان‌سنگ‌ها گردیده است. در مجموعه‌ی اشیای بازیافتی از حفاران غیرمجاز از منطقه‌ی معروف به «میل فرهاد»، در جنوب خاوری دشت جیرفت، یک سنجاق و دو میله مفرغی انتخاب و در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. بر پایه‌ی مقایسه آن‌ها، با نمونه‌های مکشوف از کاوش‌های علمی باستان‌شناسی، قدمت آن‌ها به عصر مفرغ (اواخر هزاره‌ی چهارم و سوم ق.م.) برمی‌گردد. هدف نگارندگان شناخت آلیاژگری فلزات و مسائل فنی فلزکاری عصر مفرغ است که با پرسش‌هایی در زمینه ترکیبات عنصری و روش‌های ساخت، زنجیره تولیدی و عملکردی اشیاء و سازوکارهای اقتصادی-اجتماعی جوامع عصر مفرغ منطقه مورد مطالعه دنبال شده است. تولید اشیاء با روش‌های ذوب و قالب‌گیری و چکش‌کاری، دارا بودن زنجیره تولیدی و عملکردی در سطح منطقه‌ای و فرامنطقه‌ای و همچنین، وجود ساختار اقتصادی-اجتماعی و اداری پیشرفته در جوامع عصر مفرغ منطقه، پیش‌فرض‌های مقاله حاضر هستند. نگارندگان، با استفاده از روش متالوگرافی، روش‌های ساخت این اشیاء را چکش‌کاری سرد و چکش‌کاری گرم، تشخیص داده‌اند. عناصر موجود در آخال‌ها، گوی‌چها و ناخالصی‌های این اشیاء، با استفاده از روش‌های ICP-OES و SEM-EDS بررسی کمی و کیفی شدند. ترکیب اصلی این سه آلیاژ از نظر فنی، مشابه فلزکاری عصر مفرغ منطقه جنوب خاوری ایران است؛ سنجاق و یکی از میله‌ها، از نوع آلیاژ مس آرسنیک و میله دیگر، از مس تقریباً خالص می‌باشد. دیگر عناصر شناسایی شده در آن‌ها، نظیر: آنتیموان، روی، قلع، سرب، استرانسیم، آهن و نقره، با نتایج آزمایش‌های شیمیایی کان‌سنگ‌های منطقه، هم‌پوشانی به‌نسبت دقیقی دارند. گونه‌شناسی این اشیاء و تشابه فنی و ساختاری آن‌ها، روابط بین محوطه‌های باستانی منطقه‌ی جنوب خاوری ایران را با یکدیگر و همچنین، با سایر مراکز باستانی در فلات ایران و مناطق هم‌جوار، قابل تحلیل می‌سازد.

کلیدواژگان: عصر مفرغ، جیرفت، سنجاق فلزی، میله فلزی، متالوگرافی.

* این مقاله مستخرج از پایان‌نامه‌ی «فاطمه یآوری» دانش‌آموخته کارشناسی ارشد باستان‌شناسی دانشگاه مازندران، با عنوان: «فلزکاری حوزه هلیل‌رود در عصر مفرغ: مطالعه موردی سنجاق‌ها و میله‌های مفرغی» که در بهمن‌ماه سال ۱۳۹۳ تدوین و دفاع گردیده است.

مقدمه

پس از طی کردن مراحل فنی فلزکاری، نظیر چکش کاری سرد و گرم، ذوب فلز و استحاله‌ی سنگ معدن، فلزگر باستان مرحله بسیار مهم ترکیب کردن فلزات را پدید آورد و با این کار ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی فلزات را بهبود بخشید (Wer- time, 1973)؛ البته، پیش از آلیاژگری و در مرحله‌های قالب‌گیری و استحصال فلز از سنگ معدن، ویژگی مطلوب برخی ناخالصی‌های موجود در بافت فلز و تأثیرشان در ممانعت از جذب گازهای مختلف، امری شناخته‌شده برای وی، بوده است. عده‌ای از باستان‌فلزشناسان، اعتقاد دارند که آلیاژ مفرغ برای اولین بار حین ذوب سنگ‌مس حاوی عنصرهای قلع و آرسنیک، به‌طور اتفاقی شناخته شد؛ اما، این شناخت به دست‌یابی بشر به‌خصوصیت آلیاژها منجر نشد (Forbes, 1971: 15; Child 1942). در مرحله‌ی آلیاژگری، فلزگر کهن، به عمد و در چارچوب یک فرآیند فنی، فلزات و شبه‌فلزاتی نظیر: قلع، آنتیموان، نیکل، روی و آرسنیک را، به مس اضافه نمود و خصوصیتی، چون: دوام، استحکام، میزان چکش‌خواری و برخی از دیگر خواص فیزیکی آن‌را، ارتقاء داد. کوشش فلزگران عصر مفرغ در تولید این آلیاژها، در لایه‌های محوطه‌های باستانی آسیای جنوب باختری و از جمله فلات ایران، به‌ویژه منطقه‌ی جنوب خاوری آن مشاهده شده است (Moorey, 1969: 133; Thornton & Ehlers 2003).

اکنون، شواهد باستان‌فلزشناسی در ایران، نشان‌دهنده است که در عصر مفرغ آلیاژهای متنوعی تولید و مورد استفاده قرار گرفته‌اند؛ اما، آلیاژ غالب در میان آن‌ها، مفرغ مرکب از مس و آرسنیک است. اغلب مفرغ‌های شه‌داد، مس آرسنیک‌ی هستند (وطن‌دوست، ۱۳۶۷: ۱۰۴)؛ اما، تعدادی اشیای مفرغی با درصد بالای قلع نیز، در این محوطه (Hakemi, 1997: 59) شناسایی شده‌اند. در میان انبوه اشیای مفرغی با پایه‌ی آرسنیک در تپه یحیی (Heskel & Lamberg- Karlovsky, 1979: 256;) (Thornton & Lamberg- Karlovsky 2002)، شهرسوخته (Tosi, 1969: 379) و همچنین، تپه حصار (Pigott, Howard & Epstein, 1982: 232)، تعدادی اشیای مفرغی با پایه‌ی مس-قلع، در برخی از این محل‌ها به‌دست آمده است. این وضعیت در دوره‌ی III5 سیلک نیز، مشاهده گردیده است (Ghirshman, 1938: 238). مطالعات آزمایشگاهی بر روی تعدادی اشیای مفرغی از قبیل: قلم، درفش و سنجاق، از دوره‌ی IV یحیی، نشان‌دهنده است که فلز اصلی آن‌ها از سنگ‌مس استحصال و با درصد بسیار بالای آرسنیک ترکیب شده است (Tylecote & Mckerrell, 1970: 37-8)؛ همچنین، از دوره‌ی یاد شده در تپه یحیی، چند شیء حاوی مس و روی، به‌دست آمده که نشان‌دهنده‌ی تولید آلیاژ برنج در این محوطه هستند (Thornton & Ehlers 2003).

در میان عناصر مختلفی که در حالت ترکیبی با مس، نوعی آلیاژ را به‌وجود آورده‌اند، آمیختن آرسنیک با مس، کار بسیار مشکلی بوده است. این شبه‌فلز، فرار است؛ اما، فلزگر باستان، این کار فنی سخت را با موفقیت انجام داد (Charles 1974). بر پایه‌ی شواهد باستان‌فلزشناسی، در اوایل هزاره‌ی سوم ق.م، کاربرد آرسنیک محدود و عنصر قلع، جایگزین آن شد که شواهد جالب توجهی در این خصوص از بین‌النهرین کشف شده است. اشیای مفرغی مکشوف از قبرهای سلطنتی «اور»، بین

۱۰ تا ۱۵ درصد قلع دارند. این فرآیند فنی و شیمیایی در اواخر هزاره‌ی دوم و اوایل هزاره‌ی اول ق.م. در اشیای مفرغی لرستان نیز، گزارش شده است (Moorey, 1969: 134). با آن‌که تولید مفرغ با پایه‌ی آرسنیک مشکل بوده و در مقابل، مفرغ با پایه‌ی قلع ویژگی‌های مطلوب زیادی نظیر: استحکام، شکل‌پذیری آسان و سهولت در کار راه داشته است (Lechtman, 1996: 502)؛ ساخت آلیاژ مفرغ آرسنیک، به‌طور عموم در محوطه‌های باستانی فلات ایران از عصر مفرغ تا عصر آهن متداول بوده است (Pigott, 1999: 81). مهم‌ترین دلیل این امر، ویژگی کان‌سارهای مس ایران است که حاوی درصد بالایی از شبه فلز آرسنیک- هستند.

آگاهی داریم که منطقه جنوب خاوری ایران از نظر باستان‌شناسی از اهمیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار است؛ در محوطه‌هایی چون: تل ابلیس، تپه‌یحیی، شه‌داد و شهرسوخته، مدارک متنوع و مطلوبی از فلزکاری کهن گردآوری شده است. شواهد معدن‌کاری باستانی و محل‌های انباشت سرباره‌های ذوب کان‌سنگ‌ها در نقاط مختلف این منطقه گزارش شده است. کشفیات باستان‌شناسی اخیر جیرفت در حوزه هلیل‌رود، واقع در جنوب استان کرمان که منجر به شناسایی و کشف برخی شواهد فلزکاری و اشیای فلزی شده (مجیدزاده، ۱۳۷۸: ۳۵)، بر آگاهی‌های ما در زمینه‌ی فلزکاری کهن منطقه جنوب خاوری ایران افزوده است. بررسی‌های باستان‌شناسی، زمین‌شناسی و معدنی نشان داده است که کان‌سارهای متنوع فلزی، به‌ویژه مس، در این منطقه به فراوانی وجود دارند و شواهد معدن‌کاری کهن و محل‌های انباشت سرباره‌های ناشی از استحصال فلز از کان‌سنگ در ارتفاعات شمال باختری، باختری و جنوب دشت جیرفت و بخش‌های شمالی حوضه‌ی هلیل‌رود، گزارش شده است (دانشی ۱۳۸۶؛ شه‌سواری ۱۳۹۰؛ علی‌دادی سلیمانی، ۱۳۸۷: ۲۶).

پژوهش حاضر که متکی بر مطالعات آزمایشگاهی است، نشان می‌دهد که آلیاژ مفرغ با پایه‌ی آرسنیک، مهم‌ترین آلیاژ در محوطه‌های عصر مفرغ جیرفت بوده است. این مقاله که به تحلیل بررسی‌های آزمایشگاهی، روی دو میله و یک سنجاق فلزی باز یافته از کاوش‌های غیرمجاز در محوطه‌ی «میل فرهاد»، واقع در بخش جنوبی حوضه‌ی هلیل‌رود، در خاور جیرفت، پرداخته است (نقشه ۱) که منجر به کسب اطلاعاتی در خصوص آلیاژگری فلزات، به‌ویژه مس و آرسنیک و تولید مفرغ و همچنین، مسائل فنی فلزکاری عصر مفرغ در منطقه‌ی مورد مطالعه گردیده است. نگارندگان، با طرح سه پرسش و فرضیه، اهداف خود را پی‌گیری نموده‌اند؛ اول، ترکیبات عنصری، نوع آلیاژ و روش‌های ساخت اشیای فلزی مورد مطالعه چگونه بوده است؟ این اشیای فلزی با روش‌های ذوب و قالب‌گیری و چکش‌کاری ساخته شده‌اند؛ ترکیبات عنصری آن‌ها، مشابه کان‌سارهای فلزی منطقه است و نوع آلیاژ آن‌ها، مفرغ با پایه‌ی مس-آرسنیک می‌باشد؛ دوم، زنجیره‌ی تولیدی و عملکردی این اشیای فلزی در کدام‌یک از حالت‌های منطقه‌ای و یا فرامنطقه‌ای قابل تفسیر و تحلیل است؟ این اشیای فلزی از نظر تولیدی و عملکردی در هر دو حالت منطقه‌ای و فرامنطقه‌ای قابل تحلیل‌اند؛ و سوم، ساز و کارهای اجتماعی، اقتصادی و سیاسی جوامع عصر مفرغ را در منطقه‌ی جنوب خاوری ایران، به‌طور عام؛ و حوضه‌ی هلیل‌رود، به‌طور خاص؛ چگونه می‌توان از راه مطالعه‌ی فنی سنجاق‌ها و میله‌های مفرغی بازسازی نمود؟ به‌نظر می‌رسد که تحلیل‌های فن‌شناسی، ساختاری

و شکلی روی اشیای فلزی مورد مطالعه، وجود سازوکارهای اجتماعی، اقتصادی و سیاسی و پیچیدگی‌های اقتصادی، اجتماعی و اداری را در جوامع عصر مفرغ در منطقه مورد مطالعه ثابت نماید.



▲ نقشه ۱. موقعیت استان کرمان و شهرستان جیرفت و محوطه‌های باستانی: میل فرهاد، تل ابلیس و تپه یحیی (یاوری ۱۳۹۳).

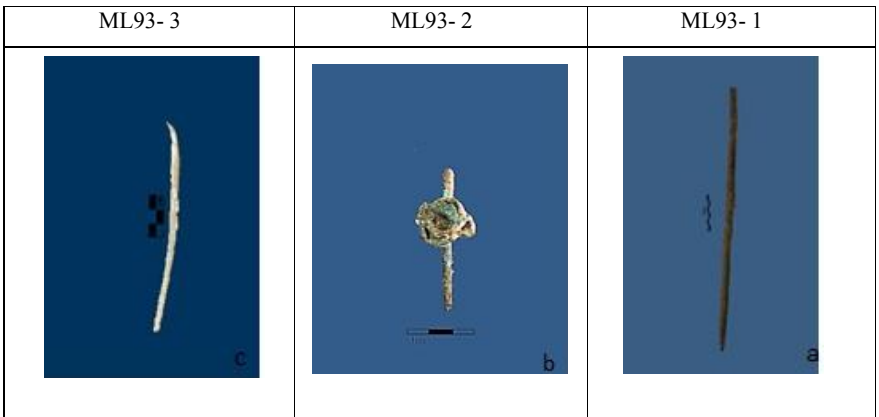
روش پژوهش: مواد و روش‌ها

نمونه‌های مورد بررسی در این پژوهش، سه شیء فلزی هستند که از حفاری‌های غیرمجاز در بخش جنوبی حوضه‌ی هلیل‌رود، در ناحیه رودبار جیرفت، به‌دست آمده و در حال حاضر، در انبار - پایگاه مطالعات باستان‌شناسی جیرفت - نگهداری می‌شوند (تصویر ۱). شیء شماره‌ی ۱، میله‌ای فلزی با نام آزمایشگاهی ML93-1، با طول ۲۰ و قطر یک سانتی‌متر؛ شیء شماره‌ی ۲، سنجاق فلزی با نام آزمایشگاهی ML93-2، با طول ۷/۱ و عرض ۳/۲ و قطر ۱/۲ سانتی‌متر؛ و شیء شماره‌ی ۳، میله‌ای فلزی با نام آزمایشگاهی ML93-3، با طول ۱۴ و قطر یک سانتی‌متر، نام‌گذاری شده و مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. بر پایه‌ی تطبیق این اشیاء با نمونه‌های مشابه به‌دست آمده از کاوش‌های باستان‌شناسی در منطقه، این‌ها، مربوط به عصر مفرغ (اواخر هزاره‌ی چهارم و سوم ق.م.) هستند.

بررسی متالوگرافی نمونه‌های فلزی با هدف‌های ذیل و به‌منظور شناسایی و بررسی روش‌ها و مراحل ذوب انواع سنگ‌های معدنی و تشخیص عملیات گداختن، ذوب، ریخته‌گری و قالب‌گیری اشیای فلزی مورد مطالعه و همچنین، درک تغییرات مکانیکی و حرارتی آن‌ها، صورت پذیرفته است.

- بررسی ریزساختاری اشیاء.
- تعیین ساختمان داخلی و بررسی آن از نظر دانه‌بندی، مرزدانه‌ها و توزیع آن‌ها.
- تعیین چگونگی عملیات مکانیکی به‌کاررفته در ساخت اشیاء، نظیر چکش‌کاری و حرارتی (تاب‌کاری^۲).

برای این منظور، سطح نمونه‌ها از آلودگی‌های سطحی حاصل از دفن و مواد ناشی از خوردگی، پاک‌سازی گردید و سپس، مقداری از مغز فلزی به‌وسیله‌ی ارّه‌مویی از مقطع طولی جدا شد. مغز فلزی در رزین اپوکسی ۷۲۵، پوشش (مانت^۳) و سپس سطح نمونه با سمباده، تا شماره ۲۰۰۰ پرداخت گردید. پرداخت‌نهایی، در -مرکز متالورژی رازی تهران- با خمیر الماس ۰/۲۵ میکرون انجام گرفت. نمونه‌ها،

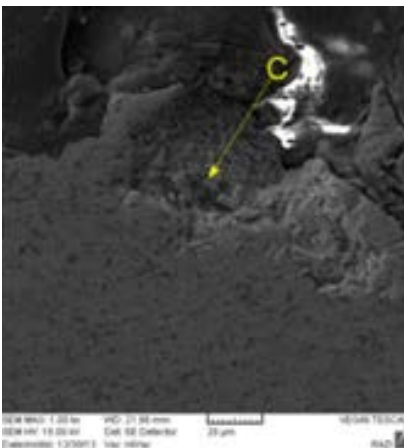
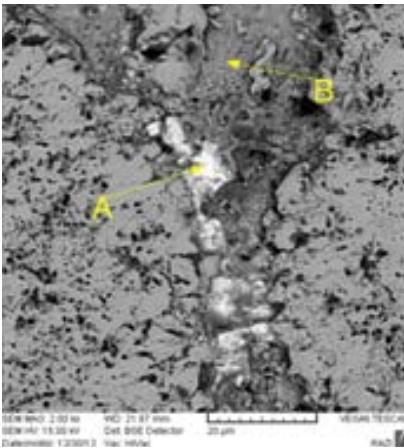


تصویر ۱. اشیای فلزی مورد مطالعه، مکتشف از بخش جنوبی حوضه‌ی هلیل‌رود در رودبار جیرفت، از راست به چپ شیء شماره ۱، ۲ و ۳ (یاوری ۱۳۹۳).

پس از آماده‌سازی به‌وسیله‌ی میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به طیف‌بینی پاشنده انرژی- (SEM-EDS)، مورد مطالعه و بررسی آزمایشگاهی قرار گرفتند. دستگاه SEM دارای مدل VEGA II و ساخت شرکت TESKAN جمهوری چک- و دستگاه EDS، دارای مدل RONTEC، مجهز به نرم‌افزار QUANTAX، با مدل QX2، بوده است. آنالیز همه‌ی نمونه‌ها، به‌صورت نقطه‌ای و از سطح مقطع طولی انجام شد. به‌علاوه، یکی از میله‌های فلزی (نمونه شماره ML93-3)، به روش ICP (آنالیز توزیع عناصر) مورد آزمایش قرار گرفت. هدف از انجام آنالیز SEM-EDS، که بر روی بدنه‌ی فلزی نمونه‌ها، آخال‌ها، گوی‌چه‌ها و ناخالصی‌های موجود در نمونه‌ها، انجام شد؛ بررسی ساختار، ترکیب و توزیع فازهای آن‌ها بوده است. به‌منظور انجام آزمایش متالوگرافی، در سطح فلزی نمونه‌های آماده‌شده با محلول کلروفریک آبی^۷، طبق استاندارد خوردگی^۸ ایجاد شد (Scott, 1991: 72). نمونه‌های آماده‌شده، در زیر میکروسکوپ نوری مدل METALLUGERMAN - Mic-0 510، مورد بررسی قرار گرفتند. جهت انجام آزمایش ICP، نمونه از مغز فلز با متالماسه، به‌صورت پودر برداشته شده، در اسید حل گردیده و به روش ICP-OES و با دستگاه Varian 735، در شرکت مطالعات معدنی زر آزمای تهران- مورد آزمایش قرار گرفت.

مطالعات آزمایشگاهی

نتایج آنالیزهای انجام‌شده روی نمونه‌ها، در جدول‌های شماره ۱ تا ۳، آمده است. در این جدول‌ها، نتایج آنالیز SEM-EDS، در دو بخش‌ریال شامل: بدنه و ناحیه^۹، در جدول‌های شماره ۱ و ۲، و نتایج تجزیه ICP-OES، نمونه‌ی MI93-3، در جدول شماره ۳، گزارش گردیده است. نتایج در هر سه جدول، با درصد وزنی نشان داده شده است.



بررسی آزمایشگاهی میله‌ی فلزی، نمونه‌ی شماره ۱ (ML93-1)

آزمایش SEM-EDS

بررسی SEM-EDS در این نمونه، در سه نقطه‌ی B، A و C (تصویر ۲)، جهت شناسایی ناخالصی‌ها و یک نقطه از بدنه‌ی نمونه صورت گرفت (جدول ۲). تصاویر متالوگرافی این نمونه، در تصویر ۲، نمایش داده شده است. ناخالصی‌ها در این نمونه، در ناحیه‌ی A، ۱۲/۴۷ درصد اکسیژن، ۱۲/۰۸ درصد مس و ۷۵/۴۶ درصد سرب دارند. تجزیه این ناحیه، نشان‌دهنده وجود گوی‌چه‌ی سرب است. ناحیه‌ی B، دارای ۲/۴۸ درصد اکسیژن، ۳۱/۸۰ درصد کربن و ۶۵/۷۲ درصد مس است. ناخالصی این بخش نمونه، کربن می‌باشد. نتایج تجزیه، نشان‌دهنده‌ی خوردگی در این ناحیه است. ناحیه‌ی C، ۹۶/۴۴ درصد مس، ۰/۰۵ درصد آرسنیک و ۳/۰۵ درصد اکسیژن دارد. تجزیه این ناحیه، نشان‌دهنده‌ی خوردگی مس است. بدنه‌ی این میله فلزی، دارای ۹۹/۹۵ درصد مس و ۰/۰۴ درصد آرسنیک است. ماده‌ی اولیه این نمونه، مس تقریباً خالص است. درصد بالای مس در این نمونه قابل تأمل است. این امر می‌تواند ناشی از توانایی و مهارت بالای فلزگر، در امر استحصال مس از سنگ معدن بوده باشد.

▲ تصویر ۲. نمایش ناخالصی بررسی شده در سه ناحیه‌ی B، A و C در میله‌ی فلزی، میله‌ی فلزی شماره ۱ (ML93-1)، با بزرگ‌نمایی ۲۰۰ درصد (نگارندگان ۱۳۹۳).

بررسی آزمایشگاهی سنجاق فلزی، نمونه‌ی شماره ۲ (ML93-2) آزمایش SEM-EDS

در این شیء، در دو بخش از نقطه‌ی A، جهت شناسایی ناخالصی‌ها و بدنه نمونه (تصویر ۳)، بررسی SEM-EDS صورت گرفت (جدول ۲). نتیجه تصاویر متالوگرافی در تصویر ۶، نشان داده شده است. در این نمونه، بدنه دارای ۰/۰۱ درصد نیکل، ۹۰/۸۶ درصد مس، ۸/۹۳ درصد آرسنیک و ۰/۱۹ درصد آنتیموان می‌باشد. این نمونه، بالاترین درصد وزنی آرسنیک را در میان نمونه‌های آزمایش شده نشان داده است. نتیجه‌ی تجزیه، بیان‌گر آن است که این نمونه، آلیاژ مس-آرسنیک می‌باشد. در ناحیه‌ی A، ۰/۰۶ درصد نیکل، ۳۹/۹۸ درصد مس، ۰/۳۴ درصد آرسنیک، ۶۰/۵۶ درصد نقره، ۰/۰۲ درصد قلع و ۰/۰۳ درصد آنتیموان وجود دارد. در ناحیه‌ی B، ۳۱/۳۱ درصد کربن و ۶۸/۶۹ درصد مس مشاهده گردید. نتایج تجزیه‌ی این بخش، نشان‌دهنده‌ی ترکیبات کلیدی ناشی از خوردگی است.

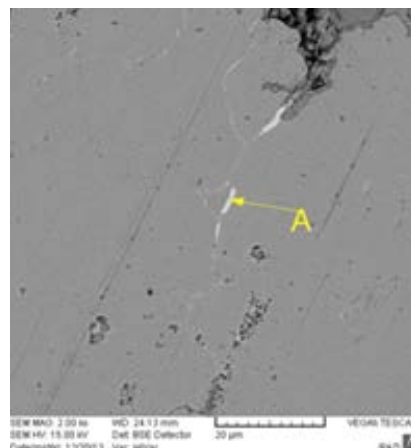
در ناحیه‌ی C، ۱۳/۲۹ درصد اکسیژن، ۰/۱۲ درصد نیکل، ۲/۴۱ درصد مس، ۲/۹۳ درصد آرسنیک، ۱۲/۷۰ درصد استرانسیم، ۰/۰۱ نقره و ۶۸/۵۵ درصد سرب شناسایی شده است. نتایج تجزیه در این ناحیه نیز، نشان‌دهنده‌ی وجود گوی‌چهی سرب در آن است. در ناحیه‌های D و E، به ترتیب: ۵/۵۹ و ۸/۳۵ درصد اکسیژن و ۹۴/۵۶ و ۹۱/۶۵ درصد مس، مشاهده شده است که بیان‌گر اکسید مس در این دو ناحیه هستند.

بررسی آزمایشگاهی میله‌ی فلزی، نمونه‌ی شماره ۳ (ML93-3) آزمایش SEM-EDS

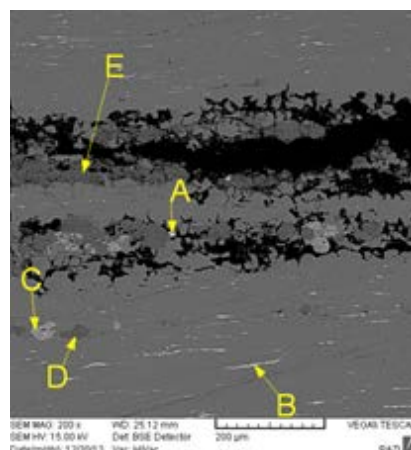
بررسی آزمایشگاهی SEM-EDS در این نمونه، در پنج نقطه‌ی A، B، C، D و E (تصویر ۴)، جهت شناسایی ناخالصی‌ها و وضعیت بدنه‌ی نمونه صورت گرفت (جدول ۱). آزمایش، نشان‌دهنده است که بدنه‌ی این میله دارای ۹۰/۴۹ درصد مس، ۳/۴۱ درصد آرسنیک، ۹/۲۴ درصد استرانسیم، ۰/۱۳ درصد نقره، ۰/۰۶ درصد قلع و ۰/۰۱ درصد نیکل می‌باشد.

عنصر جالب توجه در این نمونه، استرانسیم است که از لحاظ فنی، نقشی مشابه سرب را در ترکیب با مس دارد. این عنصر، روان‌کننده‌ی مس است و در ریخته‌گری بسیار کارآمد می‌باشد (میسون و مُر، ۱۳۷۶: ۱۹۸، ۲۰۶). در این نمونه، احتمال وجود استرانسیم، به صورت تمرکز موضعی در بعضی بخش‌ها تشخیص داده شد که تصویر پراکندگی عناصر^۱، صحت این موضوع را تأیید نموده است (تصویر ۵). در ناحیه‌ی A، ۱۳/۷۷ درصد اکسیژن، ۷/۲۸ درصد مس و ۷۸/۹۵ درصد سرب وجود دارد. درصد بالای سرب در این ناحیه، نشان از وجود گوی‌چهی سرب در نمونه است. ناحیه‌ی B، ۶/۲۷ درصد اکسیژن، ۱۹/۵۱ درصد مس، ۱۴/۵۴ درصد آرسنیک و ۵۹/۶۸ درصد سرب دارد. این ناحیه، در مقطع نمونه نیز، نشان‌دهنده‌ی گوی‌چهی سرب است.

علاوه‌بر آزمایش SEM-EDS و تصویر پراکندگی عناصر، برای حصول اطمینان در مورد ترکیب این نمونه، آنالیز بدنه با روش ICP انجام شد. نتیجه‌ی آنالیز در جدول شماره ۳، ذکر شده است.

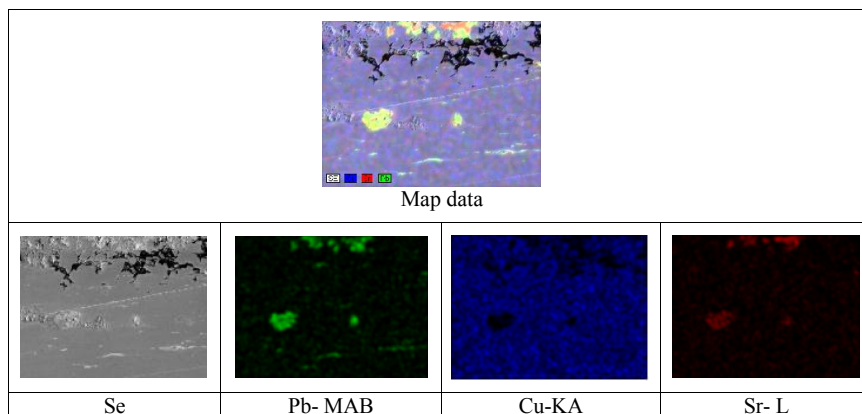


▲ تصویر ۳. آنالیز نقطه‌ی A، جهت شناسایی ناخالصی، سنجاق فلزی شماره ۲ (ML93-2)، با بزرگ‌نمایی ۲۰۰ درصد (نگارندگان ۱۳۹۳).



▲ تصویر ۴. آنالیز ۵ نقطه‌ی A، B، C، D و E، جهت شناسایی ناخالصی در میله‌ی فلزی شماره ۳ (ML93-3)، با بزرگ‌نمایی ۲۰۰ درصد (نگارندگان ۱۳۹۳).

► تصویر ۵. تصویر پراکندگی عناصر از بدنه‌ی میله‌ی فلزی شماره ۳ (ML93-3)، با بزرگ‌نمایی ۲۰۰ درصد (نگارندگان ۱۳۹۳).



جدول ۱. نتایج آنالیز ترکیب بدنه در سه نمونه‌ی مورد مطالعه با روش SEM-EDS (نگارندگان ۱۳۹۳).

Sample No.	Object	Cu	As	Ni	Sr	O	Pb	Ag	Sn	Sb	Total
Matrix MI93-1	Rod	99/95	0/04	-	-	-	-	-	-	-	76/7
Matrix MI93-2	Pin	90/86	8/93	0/01	-	-	-	-	-	0/19	74/9
Matrix MI93-3	Rod	90/49	0/05	9/24	9/24	-	-	0/13	0/06	-	78/0

آزمایش ICP

نتیجه‌ی این آزمایش در میله‌ی فلزی شماره ۳ (ML93-3)، با هدف شناسایی درصد وزنی استرانسیم صورت گرفت. مقدار استرانسیم، کمتر از ۱ درصد شناسایی شد که با نتیجه تجزیه‌ی SEM-EDS هم‌خوانی نداشته است. دلیل این امر، همگن نبودن ترکیب بدنه در نمونه و عدم پراکندگی یک‌نواخت عناصر در سرتاسر نمونه بوده است. مهر تأیید این مساله، تجزیه‌ی عنصری مجدد به روش SEM-EDS بود که تفاوت درصد عنصری را در آن نشان داد. سه دلیل برای حضور استرانسیم در این نمونه وجود دارد: اول، تشکیل کمپلکس جاذب که به احتمال، در این‌جا شرایط برای استرانسیم مساعد بوده و تمرکز آن در این برش زیاد شده است؛ دوم، جدایش فازی که در مرحله‌ی ذوب اتفاق می‌افتد، چکش‌کاری، سومین علت تمرکز استرانسیم است. زمانی که فلز گرم می‌شود، جنبش مولکولی افزایش می‌یابد، فضای بین مولکولی بیش‌تر می‌گردد، مهاجرت عناصر اتفاق می‌افتد و تمرکز انتخابی صورت می‌گیرد (میسون و مِر، همان: ۱۹۸ و ۲۰۶).

جدول ۲. نتایج آنالیز ترکیب آخال‌ها در سه نمونه‌ی مورد مطالعه با روش SEM-EDS (نگارندگان ۱۳۹۳).

Sample No.	Object	Cu	As	Ni	Sr	O	Pb	Ag	Sn	Cl	Sb	Total
ML93-1 A	Rod	12/08	-	-	-	12/47	75/46	-	-	-	-	115/7
ML93-1 C	Rod	96/44	-	-	-	3/05	-	-	0/05	-	-	61/0
ML93-2 A	Pin	38/98	0/34	0/06	-	-	-	60/56	0/02	-	0/03	76/3
ML93-3 A	Rod	7/28	-	-	-	13/77	78/95	-	-	-	-	103/9
ML93-3 B	Rod	19/51	14/54	-	-	6/27	59/68	-	-	-	-	101/8
ML93-3 C	Rod	2/41	2/93	0/12	12/70	13/29	68/55	0/01	-	-	-	132/0
ML93-3 D	Rod	94/56	-	-	-	5/44	-	-	-	-	-	102/7
ML93-3 E	Rod	91/65	-	-	-	8/35	-	-	-	-	-	89/5

Element	Unit	Ag	Cu	Sn	Pb	Sr	Fe	S	Si	As	Sb	Mg	Ni	Ca
Method Sol	%	0/04	95/01	<0/01	0/16	<0/01	0/01	0/05	<0/01	3/41	0/02	<0/01	0/09	0/04

آزمایش‌های متالوگرافی

آزمایش متالوگرافی میله‌ی فلزی شماره ۱ (ML93-1)

در بررسی‌های متالوگرافی، خطوط لغزش زیادی در ریزساختار نمونه مشاهده گردیده که نشان‌دهنده‌ی چکش کاری مس می‌باشد (تصویر ۶ الف). دانه‌های فشرده کریستاله، حاکی از چکش کاری پی‌درپی سرد و بعد از آن گرم‌نمودن شیء و سرانجام چکش کاری سرد است. این فرآیند، به‌صورت -مرحله به مرحله- اتفاق می‌افتاده است (Thornton et al., 2010: 10). علاوه‌بر این، آخال‌های کشیده در امتداد طولی نمونه که در مقطع فلزی قبل از خوردگی به‌وضوح قابل مشاهده است (تصویر ۶ ب) نیز، نشان‌دهنده‌ی استفاده از چکش کاری در فرآیند ساخت این شیء است.

آزمایش متالوگرافی سنجاق فلزی شماره ۲ (ML93-2)

ریزساختار در این نمونه، دارای دانه‌های باز تبلور یافته و دوقلویی با خطوط مستقیم می‌باشد. چنین ساختاری، حاکی از چکش کاری گرم و یا چکش کاری سرد به همراه تاب کاری است (Scott, 2002: 97). خطوط مستقیم دوقلویی^{۱۱} در این نمونه، نشان‌دهنده‌ی عملیات مکانیکی یادشده می‌باشد (تصویرهای ۷ الف و ب).

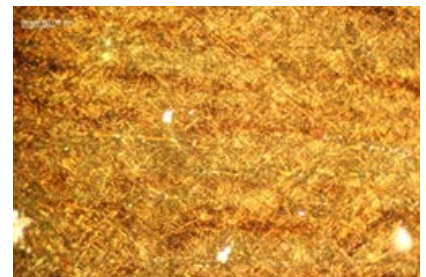
آزمایش متالوگرافی میله‌ی فلزی شماره ۳ (ML93-3)

ریزساختار در این نمونه نیز، دانه‌های باز تبلور یافته و خطوط دوقلویی را نشان می‌دهد که بیان‌گر استفاده از روش چکش کاری گرم و یا چکش کاری سرد به همراه تاب کاری در ساخت این شیء است؛ همچنین، خطوط دوقلویی مستقیم بر تاب کاری، در آخرین مرحله‌ی ساخت شیء دلالت دارد (تصویرهای ۸ الف و ب). آخال‌های کشیده در امتداد طولی نمونه که در ریزساختارها مشاهده می‌شود، دلیلی دیگر بر استفاده از چکش کاری در فرآیند ساخت این شیء است (Fleming et al., 2006: 56).

بحث و یافته‌های پژوهش

ایران، یکی از مناطق پیش‌گام در بسیاری از فناوری‌های دوران باستان، از جمله فلزکاری بوده است. پژوهش‌های صورت‌گرفته روی ۱۷۲ آلیاژ مس، نشان‌دهنده‌ی فرآیند فلزکاری کهن برای اولین بار در: آناتولی، قفقاز، ایران و لوانت، رخ داده است (Oudbashi & Davami, 2014: 179). در ایران همانند نقاط یادشده، مواد اولیه‌ی فلزکاری از راه جستجو و تهیه‌ی مس طبیعی، استحصال فلز از سنگ‌های معدنی و آمیختن فلزات، به‌منظور تولید آلیاژها تأمین گردیده است. اولین مس‌های طبیعی از جنوب‌غربی ایران، در دشت دهلران، در تپه علی‌کش و کوه‌پایه‌های زاگرس به‌دست آمده است (Pigott 2004). در زاغه و تل موشکی، فلزاتی به‌دست آمده که از مس طبیعی و با روش عملیات حرارتی ساخته شده‌اند (Moorey 1982; Thorn- ton 2009). در تپه یحیی (Thornton & Lamberg- Karlovsky 2002; 2013) نیز، فرآیند فلزکاری با مس خالص طبیعی و مس آلیاژی، مورد شناسایی قرار گرفته است.

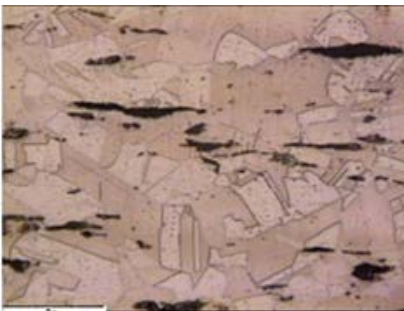
▲ جدول ۳. آنالیز توزیع عناصر میله‌ی فلزی، نمونه‌ی شماره ۳ (ML93-3) با روش ICP-OES (نگارندگان ۱۳۹۳).



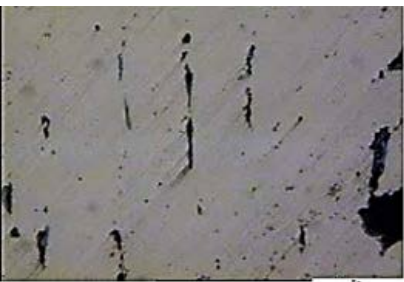
▲ تصویر ۶ الف. نمایش متالوگرافی میله‌ی فلزی شماره ۱ (ML93-1) بعد از ایجاد خوردگی، با بزرگ‌نمایی ۵۰۰ درصد (نگارندگان ۱۳۹۳).



▲ تصویر ۶ ب. نمایش متالوگرافی میله‌ی فلزی شماره ۱ (ML93-1) قبل از ایجاد خوردگی، با بزرگ‌نمایی ۲۵۰ درصد (نگارندگان ۱۳۹۳).



▲ تصویر ۷ الف. نمایش متالوگرافی سنجاق فلزی شماره ۲، (ML93-2) بعد از ایجاد خوردگی، با بزرگ‌نمایی ۵۰۰ درصد (نگارندگان ۱۳۹۳).



▲ تصویر ۷ ب. نمایش متالوگرافی سنجاق فلزی شماره ۲ (ML93-2) بعد از ایجاد خوردگی، با بزرگ‌نمایی ۲۵۰ درصد (نگارندگان ۱۳۹۳).

کمربند فلززایی کرمان، بخش جنوبی ایالت فلززایی ارومیه - دختر را، تشکیل می‌دهد و غنی‌ترین کمربند مس‌دار ایران محسوب می‌شود. در مناطق خاوری و جنوب خاوری ایران، در ارتفاعات و دشتهای کرمان و دشتهای کویر لوت، مراکز معدنی کهن و شواهد شدّادی زیادی شناسایی شده است (Caldwell, 1967: 318-331). بقایای معدن‌کاری کهن، حین اجرای یک طرح بزرگ زمین‌شناسی اقتصادی و شناسایی کان‌سارهای مس ایران، گزارش شده‌اند (Bazin & Hubner, 1969). پژوهش‌های باستان‌شناسی-زمین‌شناسی، در یکی از معادن نزدیک تپه یحیی، به‌نام: «معدن مس شیخ عالی»، منجر به تاریخ‌گذاری عملیات معدن‌کاری و استحصال مس از کان‌سار در حدود ۳۰۰۰ ق.م. شده است (Berthoud et al. 1979). کشف بوته‌های ذوب فلز در تل ابلیس، بیان‌گر استحاله‌ی سنگ‌مس سولفیدی در دوره‌های I و II (تقریباً ۴۰۰۰ ق.م.) و رواج عملیات پیچیده‌ی ذوب و استحاله‌ی سنگ معدن و استحصال فلز در این محل است (Dougherty & Caldwell, 1967: 17-20). تولید شمش در اوایل هزاره‌ی چهارم ق.م. صورت پذیرفته است (Moorey, 1982: 83). در عصر مفرغ، شمش‌های فلزی به‌صورت آلیاژ تولید می‌شده‌اند. در تپه یحیی، تولید شمش و آلیاژ مفرغ با پایه‌ی قلع و با پایه‌ی آرسنیک گزارش شده است؛ اما، آلیاژ غالب و متداول از نوع آرسنیک‌ی بوده است. تعدادی از اشیای مفرغی مربوط به دوره‌ی VB یحیی با بهره‌گیری از روش ذوب و قالب‌گیری، تولید شده‌اند (Lamberg-Karlovsky, 1974: 230). فن استحاله‌ی سنگ‌مس در تپه یحیی، به‌گواهی یک توده‌ی شمش فلزی که از لایه‌های مربوط به دوره‌ی VA یحیی (۳۳۰۰-۳۶۰۰ ق.م.) به‌همراه تعدادی اسکنه، سوزن و درفش مفرغی به‌دست آمده، اتفاق افتاده است. همان‌گونه که گفته شد، آلیاژ مفرغ با پایه‌ی قلع و آرسنیک در اواخر هزاره‌ی چهارم و در خلال هزاره سوم ق.م. تولید شد. کاربرد این دو نوع آلیاژ به‌نسبت هم‌سان و مشابه، در برخی از مراکز عصر مفرغ فلات ایران درخور ملاحظه است؛ اما، در برخی نواحی ایران، به‌ویژه منطقه‌ی جنوب خاوری آن، آلیاژ مفرغ اغلب از نوع آرسنیک‌دار بوده است. اشیای مفرغی دوره‌ی V تپه یحیی (۳۳۰۰-۳۷۰۰ ق.م.)، (Beale & Lamberg - Karlovsky, 1986: 247 - 51)، از راه ذوب سنگ‌مس تولید و با درصد به‌نسبت زیادی آرسنیک ترکیب شده‌اند (Tylecote & Tosi, 1970: 37 - 8). تولید آلیاژهای مسی آرسنیک‌دار در شهرسوخته (Tosi, 1969: 379) و شهداد (وطن‌دوست، ۱۳۶۷: ۱۰۴)، گزارش شده است. برخی از اشیای مفرغی شهداد، دارای ۹۵ تا ۹۸ درصد مس، ۰/۵ تا ۳ درصد سرب و ۱ درصد آرسنیک هستند (Hakemi, 1997: 59).

باستان‌شناسان، فرآیند فلزکاری مس را در چهار مرحله تقسیم‌بندی نموده‌اند؛ مرحله‌ی اول، بهره‌گیری از مس طبیعی و خالص در ساخت اشیای فلزی بوده است. فلزگران باستان، در مرحله‌ی دوم که در ابتدای دوران مس‌وسنگ اتفاق افتاده، مس طبیعی را ذوب و ریخته‌گری نمودند. از آن‌جایی که برخی از منابع مس طبیعی ایران نیز، دارای ناخالصی آرسنیک می‌باشند، احتمال دارد فلزگران در این دوره، به‌طور تصادفی با خواص آلیاژی این نوع مس طبیعی آشنا شده باشند. در مرحله‌ی سوم، استحصال مس از راه ذوب سنگ‌مس اکسیدی، مانند کوپریت و مالاکیت و سپس، سنگ‌مس سولفیدی صورت پذیرفته است. مذاب مس حاصل از این فرآیند

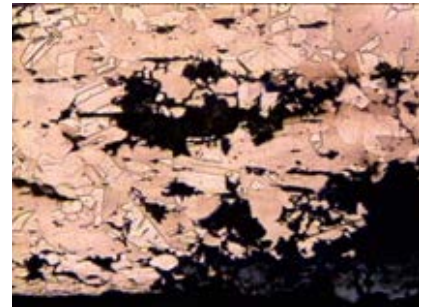
ذوب، حاوی ناخالصی‌های مختلفی است. از آنجایی که کان‌سارهای مس ایران دارای درصد بالای آرسنیک می‌باشند، این شبه‌فلز در جریان روند استحصال مس، در حالت ترکیبی به‌همراه سایر عناصر، وارد جسم فلز شده و فلزگر از خاصیت مطلوب این ترکیب آلیاژی بهره برده است. چهارمین مرحله در تولید آلیاژ، در اثر کسب مهارت و تجربه در فلزکاری و در اواخر هزاره‌ی چهارم و اوایل هزاره‌ی سوم ق.م. رخ داده است. این مرحله تا عصر آهن استمرار یافته و به تولید اشیای مفرغی در هزاره‌های دوم و اول ق.م. در محوطه‌هایی چون: در استان لرستان، مارلیک، هفت تپه، سنگ‌تراشان و نظایر آن، منجر گردیده است (Oudbashi & Davami, 2014: 179).

آگاهی داریم که ذوب سنگ‌مس در کوره، با استحاله‌ی سنگ‌های اکسیدی، مانند کوپریت یا مالاکیت، تقریباً از نیمه هزاره‌ی پنجم ق.م. در محوطه‌هایی نظیر: تل ابلیس، تپه قبرستان، سیلک، حصار و شوش (Thornton 2001; 2009; Thorn-ton & Lamberg-Karlovsky 2002; Pernicka 2004; Dougherty & Caldwell 1966)، آغاز شد؛ اگرچه اغلب، تولید آلیاژ در جریان ذوب و استحاله‌ی سنگ‌مس صورت می‌پذیرفته است؛ ولی، به‌دلیل وجود برخی ناخالصی در بعضی از سنگ‌های معدنی، مانند تنانتیت^{۱۲} و مس خاکستری^{۱۳}، آلیاژ تصادفی نیز، تولید می‌شده است (Coghlan 1975). برای ساخت آلیاژ عمدی مفرغ با پایه‌ی آرسنیک در دوران باستان، با سه روش عمل می‌شده است: اول، استحاله سنگ‌مس اکسیدی و زرنیخ سرخ^{۱۴} و یا زرنیخ^{۱۵}؛ دوم، استحاله‌ی سنگ معدن حاوی آرسنیک بالا، مانند آرسنوپریت و تنانتیت مخلوط با سولفید مس؛ و سوم، اضافه کردن زرنیخ به مس مذاب (Ibid)؛ البته، روش چهارمی برای تولید این آلیاژ گزارش شده است؛ یعنی آلیاژ آرسنید-آهن، که محصول اتفاقی با ذوب سرب بوده است (Thornton 2009).

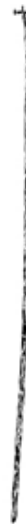
میزان آرسنیک در سه شی فلزی مورد مطالعه‌ی مقاله حاضر، در محدوده‌ی بین ۲ تا ۸ درصد است. احتمالاً، روش دوم در دو میله‌ی فلزی (نمونه‌های ML93-1 و ML93-3)، و روش سوم در سنجاق فلزی (نمونه‌ی ML93-2)، برای تولید این آلیاژها مورد استفاده قرار گرفته است. براساس نمودار فازی مس-آرسنیک (Scott, 1991: 123) نیز، میزان آرسنیک در این نمونه‌ها، در محدوده‌ی بین ۲ تا ۸ درصد شناسایی شده است (نمودار ۱). این میزان آرسنیک با ناحیه‌ی فاز محلول α ، در نمودار مذکور مطابقت دارد. مواد تشکیل‌دهنده‌ی اشیای دارای ساختار α ، قابلیت چکش‌کاری مطلوبی دارند. در فاز بالاتر از α ، شی دچار سختی و شکنندگی می‌شود. نتایج متالوگرافی سه شی یادشده نیز، با نمودار فازی مس-آرسنیک مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

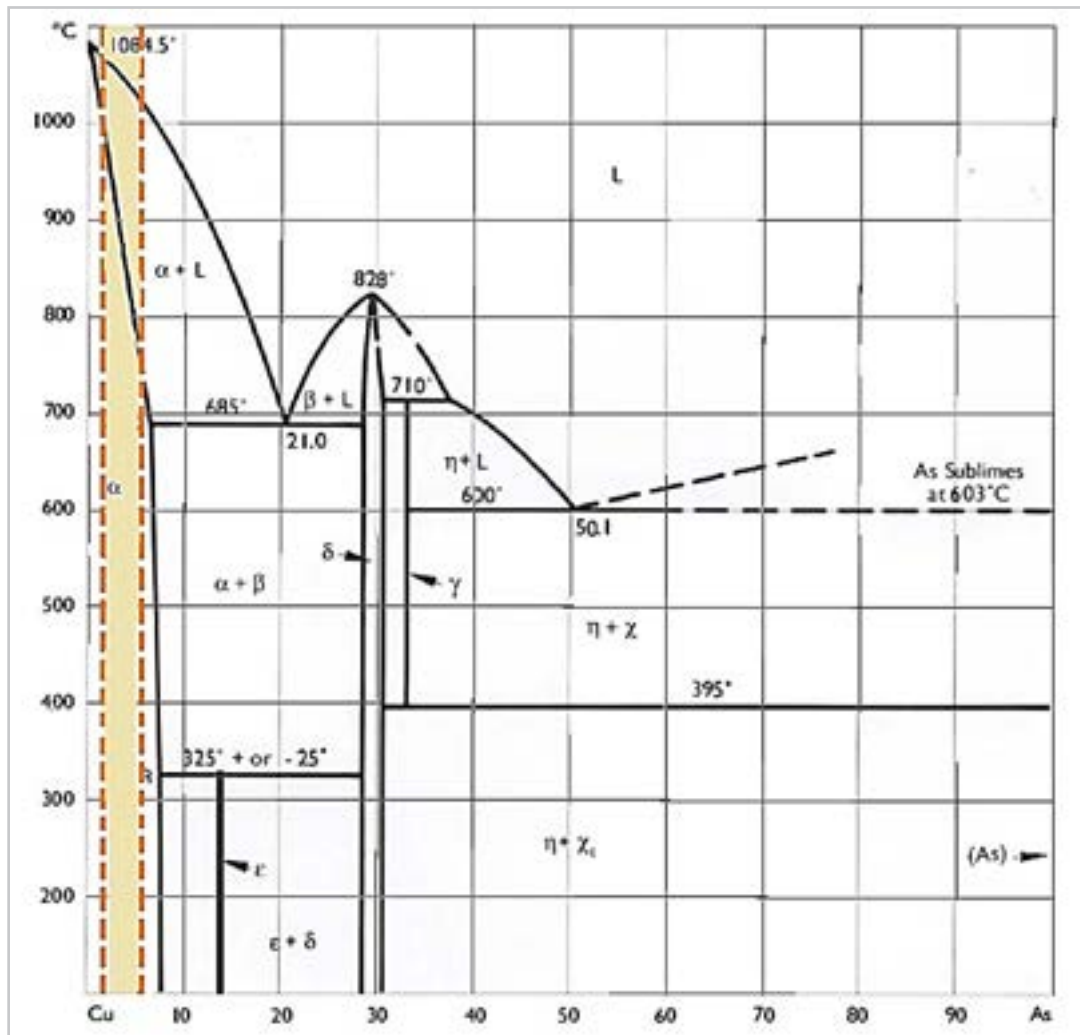
همان‌طوری که از نظر گذشت، سه نمونه‌ی فلزی با روش‌های SEM-EDS و ICP-OES، مورد مطالعه قرار گرفتند. در پاسخ به پرسش اول، این که ترکیبات عنصری، نوع آلیاژ و روش‌های ساخت اشیای فلزی مورد مطالعه چگونه بوده است؟ باید گفت که نتایج حاصل از آزمایش SEM-EDS نشان داد که ساختار این اشیای دارای تنوع آلیاژهای مس است. ساختارها، شامل: مس بومی و ترکیب مس-آرسنیک با درصدهای مختلف می‌باشد. عناصر شناسایی شده، شامل: مس، آرسنیک، آنتیموان، روی، قلع، سرب، استرانسیم، آهن، نقره، آلومینیوم و برخی عناصر کم‌مقدار دیگر



▲ تصویر ۸ الف. نمایش متالوگرافی میله‌ی فلزی شماره ۳ (ML93-3)، بعد از ایجاد خوردگی، با بزرگ‌نمایی ۵۰۰ درصد (نگارندگان ۱۳۹۳).



▲ تصویر ۸ ب. محل برداشت نمونه در میله‌ی فلزی شماره ۳، (ML93-3) (نگارندگان ۱۳۹۳).



▲ نمودار ۱.۱ دیاگرام فازی مس-آرسنیک، (Scott, 1991: 123).

است. توجه به بررسی معدنی حوضه‌ی هلیل‌رود، نشان می‌دهد که ترکیب کیفی و کمی عناصر کان‌سارهای منطقه با نتایج آزمایش‌های انجام‌شده هم‌پوشانی به‌نسبت دقیقی دارد. این امر، به‌دلیل قرارداد داشتن بخش جنوبی این حوضه، در موقعیت خاصی از زون‌های کوه‌زایی فلات ایران می‌باشد؛ لذا، یافت شدن عناصر ذکرشده در این اشیاء، امری طبیعی می‌باشد. کان‌سارهای مس، به‌فاصله‌ی کمی از محل‌های مورد مطالعه‌ی پژوهش حاضر قرار دارند. عناصر شناسایی‌شده از هم‌بسته‌های مس می‌باشند و معمولاً با کان‌سارهای مس شناسایی می‌شوند. یکی از عناصر جالب توجه که با درصد بالایی در یکی از نمونه‌ها شناسایی شد، استرانسیم است. این عنصر، در زمره‌ی عناصر ترکیبی با آلیاژهای ساخته‌شده از مس محسوب نمی‌گردد؛ زیرا، آن را نمی‌توان مانند آرسنیک یا قلع به مس افزود. این عنصر به احتمال زیاد، باید در هنگام عملیات ذوب سنگ‌مس، وارد مذاب گردیده باشد؛ بنابراین، حضور استرانسیم در اشیای فلزی، می‌تواند در تحلیل محلی بودن منبع مواد اولیه‌ی فلزی صنعت فلزکاری جنوب خاوری ایران کمک نماید. از جمله کان‌سارهای مس حاوی این عنصر در منطقه، معادن منطقه‌ی کهنوج و همچنین،

معادن «فتتر» و «نعمت» هستند. این معادن، در فاصله کمی با منطقه‌ی میل فرهاد، محل کشف اشیای فلزی مورد مطالعه، قرار دارند؛ البته، تطبیق نتایج آزمایشگاهی با نمودارهای دیاگرام فازی مس-آرسنیک، منشأ محلی مواد خام فلزی این اشیا را تأیید می‌کند.

تحلیل منطقه‌ای و یا فرامنطقه‌ای زنجیره‌ی تولیدی و عملکردی این اشیای فلزی و بازسازی سازوکارهای اجتماعی، اقتصادی و سیاسی جوامع عصر مفرغ منطقه‌ی مورد مطالعه، پرسش‌های دوم و سوم این مقاله هستند که نگارندگان برای رسیدن به پاسخ آن‌ها، گونه‌شناسی و بررسی فنی و ساختاری اشیای فلزی موصوف را مورد توجه قرار دادند. پیش از این، از نظر گذشت که مواد خام اشیای فلزی دوره‌ی VA یحیی (دوره‌ی آغازعیلامی^۶)، از راه تکنیک ذوب سنگ‌های معدنی حاصل شده‌اند. بر پایه‌ی نتایج آزمایش‌ها، فلزگر در این زمان از فن آلیاژسازی آگاهی داشته و اغلب از آرسنیک و به‌میزان بسیار محدودتر، از قلع در این امر بهره گرفته است. اشیای فلزی شهداد و شهرسوخته نیز، وضعیت مشابهی را نشان می‌دهند. مطالعات آزمایشگاهی روی اشیای مورد مطالعه پژوهش حاضر، ترکیب مس بومی و مفرغ با پایه‌ی مس-آرسنیک و مس-قلع را ثابت نموده است. بنابراین، تشابه و هم‌سویی فنی و ساختاری این اشیا با اشیای مشابه در محوطه‌های شناخته‌شده در منطقه‌ی جنوب خاوری ایران آشکار است. این اشیا از نظر گونه‌شناسی، در سطح منطقه‌ای و فرامنطقه‌ای، دارای تنوع و تشابه ساختاری و شکلی هستند. به‌عنوان مثال، تکنیک و نقش تبرهای فلزی، نقوش برجسته‌ی ظروف، نظیر: نقش برجسته‌ی عقاب در کف، مهرهای مشبک فلزی، نقش سواران در کاسه‌ها و صفحه‌های فلزی و سنگی، پیکرک‌های حیوانی و نظایر آن، نمونه‌هایی از این گونه‌شناسی مشابه هستند. وجود یک رویه‌ی درون منطقه‌ای و سبک‌های بین‌فرهنگی میان تمدن‌های منطقه‌ی جنوب خاوری ایران، از جمله منطقه‌ی مورد مطالعه‌ی مقاله حاضر، از راه این گونه‌شناسی قابل تحلیل است.

با گونه‌شناسی میله و سنجاق فلزی و مطالعه‌ی شباهت‌های ساختاری و شکلی آن‌ها با نمونه‌های مشابه در سطوح درون منطقه‌ای و برون منطقه‌ای، روابط بین محوطه‌های منطقه‌ی مورد پژوهش با محوطه‌های جنوب خاوری ایران و همچنین، با مراکز غربی و جنوب‌غربی و فراتر از آن با بین‌النهرین از یک‌سو، و بلوچستان و ترکمنستان از سوی دیگر، قابل پی‌جویی و تحلیل است. این توزیع پراکندگی گسترده، نشان از وجود جوامع پیچیده‌ای در امر تولید و توزیع این‌گونه اشیا و جریان داشتن برهم‌کنش‌های فرهنگی بین جوامع دارد. به این ترتیب، از راه فلزکاری، می‌توان پیچیدگی‌های اقتصادی، اجتماعی و سیاسی این جوامع را بررسی و تبیین نمود. از این منظر، باید فرآیند فلزکاری را به‌عنوان یک زنجیره‌ی صنعتی در نظر گرفت که گروه‌هایی، چون: معدن‌کاران، گدازگران، تولیدکنندگان، بازرگانان و استفاده‌کنندگان از محصولات در این حلقه، فعالیت داشته‌اند. کشف شواهد معدن‌کاری کهن و انباشته‌های وسیع سرباره‌های ذوب فلز، وجود منابع آبی و منابع سوخت کافی، گردآوری اشیای متنوع فلزی و شمش فلزی، کشف کتیبه‌های گلی و اشیای شمارشی، نشانه‌هایی از وجود سازوکارهای تولیدی، فنی، اقتصادی و اداری در منطقه‌ی مورد پژوهش هستند.

پی‌نوشت

1. Hammering.
2. Annealing.
 هنگامی که فلزات برای مدتی تحت چکش کاری سرد قرار می‌گیرند سخت و شکننده شده و قابلیت چکش کاری بیش‌تر را از دست می‌دهند و به عبارتی خاصیت انعطاف‌پذیری و شکل‌پذیری فلز کاهش می‌یابد. برای غلبه بر این مشکل، فلز را حرارت داده و به تدریج سرد می‌کنند. به این فرآیند تاب کاری گفته می‌شود. ساختار فلزی در اثر تاب کاری، نظم شبکه‌ای خود را باز می‌یابد. در این حالت فلز نرم شده و امکان چکش کاری مجدد آن فراهم می‌آید (Society.sushiant.com/Category).
3. Mounting.
 عمل قراردادن نمونه در یک ماده غیرفلزی مانند شیشه، پلاستیک و یا رزین، مانتینگ نامیده می‌شود. انجام این عمل زمانی که نمونه نامنظم، کوچک، خیلی نرم، ترد و یا متخلخل باشد و یا این‌که نیاز به حفظ لبه‌های آن احساس شود، ضروری است.
4. Matrix.
5. Inclusions.
 آخال‌ها، کثیفی‌ها و ناخالصی‌هایی هستند که در حین ذوب‌ریزی و یا قالب‌گیری کثیف در قطعات فلزی ایجاد می‌شوند.
6. Globules.
 گوی‌چه‌ها نوعی ناخالصی و فاز نامحلول در ترکیب آلیاژی بدنه هستند که دلیل ایجاد آنها دارا بودن شبکه‌های کریستالی غیرمشابه و حجم اتمی و نقاط ذوب متفاوت با بدنه می‌باشد.
7. FeCl₃: 10 g, H₂O: 120ml, HCl: 30ml.
8. Etching.
 این عمل ایجاد نوعی خوردگی سطحی به‌وسیله‌ی اسید است که در سطح نمونه‌های مورد مطالعه به‌منظور مشاهده مرزدهانه‌های فلزی، ایجاد می‌شود.
9. Zone.
10. Map.
11. Twin Lines.
 در فلزاتی که تحت عملیات مکانیکی (چکش کاری) قرار گرفته‌اند، فرآیند تبلور مجدد که در اثر تاب کاری اتفاق می‌افتد اغلب منجر به تشکیل باندهای دوقلویی یا دوقلوی تاب کاری می‌شود (Society.sushiant.com/Category).
12. Tenanetite (Cu₃AsS₃25).
13. Grey Copper 12As₄S₁₃.
14. Realgar (As₄S₄).
15. Orpiment (As₂S₃).
16. Proto Elamite

کتابنامه

- دانشی، علی، ۱۳۸۶، «گزارش بررسی و شناسایی باستان‌شناسی شهرستان جیرفت (حوزه‌ی ساردوئیة)»، فصل دوم، اداره کل میراث فرهنگی و گردشگری استان کرمان (منتشر نشده).
- شهسوار، میثم، ۱۳۹۰، «گزارش بررسی و شناسایی باستان‌شناسی شهرستان رابر»، فصل چهارم، اداره کل میراث فرهنگی و گردشگری استان کرمان (منتشر نشده).
- علی‌دادی سلیمانی، نادر، ۱۳۸۷، «مقدمه‌ای بر جغرافیای طبیعی و محیط زیست حوزه‌ی هلیل»، مجموعه مقالات نخستین همایش بین‌المللی تمدن حوزه‌ی هلیل، به‌کوشش: یوسف مجیدزاده، سازمان میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری استان کرمان، کرمان، چاپ اول، صص ۲۸-۲۲.
- مجیدزاده، یوسف، ۱۳۸۷، «پروژه باستان‌شناختی حوزه‌ی هلیل: کشفی افسانه‌ای»، مجموعه مقالات نخستین همایش بین‌المللی تمدن حوزه‌ی هلیل، به‌کوشش: یوسف مجیدزاده، سازمان میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری استان کرمان، کرمان، چاپ اول، صص ۵۲-۳۱.
- میسون، برایان و کارلتون مُر، ۱۳۷۶، اصول ژئوشیمی، ترجمه: علی اصغر شرفی، شیراز: نشر دانشگاه شیراز، چاپ سوم.

- وطن‌دوست، رسول، ۱۳۶۷، «مرمت، حفاظت و مطالعه فنی تعدادی از اشیاء فلزی گنجینه ارجان»، اثر، سازمان میراث فرهنگی کشور، شماره ۱۵ و ۱۶، صص ۹۸-۱۱۰.

- یآوری، فاطمه، ۱۳۹۳، «فلزگری حوضه‌ی هلیل‌رود در عصر مفرغ: مطالعه موردی سنجاق‌ها و میله‌های مفرغی»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد باستان‌شناسی دانشگاه مازندران، استاد راهنما: رحمت عباس‌نژاد سرستی (منتشر نشده).

- Bazin, D. & H. Hubner, 1969, *Copper Deposits in Iran, Geological Survey of Iran*, Ministry of Information Press, Tehran.

- Beale T. W. & Lamberg-Karlovsky, C.C., 1986, "Summary of Change and Development in the Early Periods at Tepe Yahya, 4900-3300 B. C." in *Excavation at Tepe Yahya, Iran, 1967-75, the Early periods*, Pea-body Museum of Archaeology and Ethnology, Harvard University, c.c. Lamberg-Karlovsky & T.W. Beale (eds.).

- Berthoud T. et al., 1979. "The Early Iranian Metallurgy: Analytical Study of Copper Ores from Iran", in *Proceedings of the 18th International Symposium on Archaeometry and Archaeological Propection*, Köln: Rheinland Verlag: 68-74.

- Caldwell J.R., 1967, *Investigation at Tal-i-Iblis*, Illinois State Museum Preliminary Reports 9, Springfield.

- Charles, J. A., 1974, "Early arsenical bronzes—a metallurgical view", *American Journal of Archaeology*, 71 (1): 21-26.

- Childe, V.G., 1942, *What Happened in History*, Harmonds Worth, Penguin Books.

- Coghlan, H. H., 1975, *Notes on the Prehistoric Metallurgy of Copper and Bronze in the Old World*, Occasional Paper on Technology 4, 2nd ed., Oxford.

- Dougherty, R. C. & Caldwell, J. R., 1966, "Evidence of Early Pyrometallurgy in the Kerman Range in Iran", *Science*, Vol. 153: 984-985.

- Dougherty R., & Caldwell, J. R., 1967, "Evidence of Early Pyrometallurgy in the Kerman Range in Iran", in J. R. Caldwell (ed.), *Investigations at Tal-i-Iblis*, Springfield: Illinois State Museum.

- Fleming, S. J. et al., 2006, "The Archaeometallurgy of War Kabud, Western Iran", *Iranica Antiqua* XLI: 47-57

- Forbes R. J., 1971, "Studies in Ancient Technology", Vol. VIII, Leiden.

- Ghirshman, R., 1938, *Fouilles de Sialk pres de Kashan 1933, 1934, 1937*, Vol. I, Paris: Librairie Orientaliste Paul Geutner. 206.

- Hakemi, A., 1997, *Shahdad: Archaeological Excavations of a Bronze Age Center in Iran*, Rome: Ismeo, Translated by S. M. S. Sajjadi, New Delhi: Instituto Italiano per il Midio et Estremo Oriente.

- Heskell, D. & Lamberg-Karlovsky, C.C., 1979, "An alternative sequence for the development of metallurgy: Tepe Yahya", Iran. In T. A. Wertime & J. Muhly, (eds.), *The Coming of the Age of Iron*. New Haven: Yale University Press, pp. 229-266.

- Lamberg-Karlovsky C.C., 1974, "Survey of Excavation in Iran, 1972-73: Tepe Yahya", *Iran* 12.

- Lechtman, H., 1996, "Arsenic Bronze: Dirty copper or chosen alloy? A view from the Americas", *Journal of Field Archaeology* 23: 477- 514.
- Moorey, R. S., 1969, "Prehistoric copper and bronze metallurgy in western Iran (with special Reference to Luristan)", *Iran*, No.7: 133-134
- Moorey P. R. S., 1982, "Archaeology and Pre-Achaemenid Metalworking in Iran: a fifteen year retrospective", *Iran* 20: 81-101.
- Oudbashi, O. & Davami, P., 2014, "Metallography and microstructure interpretation of some archaeological tin bronze vessels from Iran", *Materials Characterization*, Vol. 97: 79- 87.
- Pernicka E., 2004, "Copper and Silver in Arisman and Tappeh Sialk and the Early Metallurgy in Iran", in Presiens Antike Pracht, Deuteshes Bergbau-Museum Bochum, T. Stöllner, R. Slotta & A. R. Vatadoust (eds.), Band 2, Vol. 1: 232- 239.
- Pigott, V. C., 1999, "The Development of Metal Production on the Iranian Plateau: An Archaeometallurgical Perspective, In The Archaeometallurgy of the Asian Old World, V. C." Pigott (ed.), pp. 73- 106, MASCAP 16. Philadelphia: University of Pennsylvania Museum of Archaeology and Anthropology.
- Pigott, V. C., 2004, "On the Importance of Iran in the Study of Pre-historic Copper-Base Metallurgy, In Persia's Ancient Splendour, Mining, Handicraft and Archaeology, Stöllner T., Slotta R. & A.R" Vatandoust (eds.), pp. 28-43.
- Pigott, V.C., Howard S. M. & Epstein S. M., 1982, "Pyrotechnology and Culture Change at Bronze Age Tepe Hissar (Iran), Erly Py-rotechnology: The evolution of the first fire-using industries," Paper Preeented at a Seminar on Early Pyrotechnology Held at the Smithsonian Institution, Washington, D.C., and the National Bureau of Standards, Gaithersburg, Maryland, April 19-20.
- Scott, D. A., 1991, *Metallography and Microstructure of Ancient and Historic Metals*, Los Angeles: Getty Conservation institute.
- Scott, D. A., 2002, *Copper and Bronze in Art: Corrosion, Colorants and Conservation*, Getty, Conservation Institute Publications, Los Angeles
- Thornton, C. P., 2001, *Tepe Yahya Revisited: The assessment of the metallurgical sequence of the Iranian Plateau from the Chalcolithic to the Iron Age through chemical and metal-lographic analyses of a trinket"technology*, B.A. Thesis, Harvard University.
- Thornton, C. P., 2009, "The Emergence of Complex Metallurgy on the Iranian Plateau: Escaping the Levantine Paradigm", *Journal of World Prehistory*, Vol. 22 (3): 301-327.
- Thornton, C. P. & Ehlers C., 2003, "Early Brass in the Ancient Near East", in Institute for Archaeo- Metallurgical Studies News (iams) 23, University College London, 3-8.
- Thornton, C. P., Golden, J. M., Cillick, D.J., Pigott, V. C., Rehren T. H., & Roberts, B. W., 2010. "A Chalcolithic Error: Rebuttal to Amzallag 2009", *American Journal of Archaeology* 114: 305- 315.
- Thornton, C. P. & Lamberg- Karlovsky C.C., 2002, "On pins and needles: tracing the evolution of copper-base alloying at Tepe Yahya, Iran, via ICP-MS analysis of common-place items", *Journal of Archaeological Sci-*

ence 29 (12): 1451-1460.

- Thornton C.P. & Lamberg-Karlovsky, C.C., 2013, "A New Look at the Prehistoric Metallurgy of Southeastern Iran", *British Institute of Persian Studies*, Vol. 42: 47-59.

- Tosi, M., 1969, *Excavation at Shahr- i – Sokhta, Preliminary Report on the Second Campaign September – December 1968*. East and West 19.

- Tylecote, R. F. & Mckerrell H., 1970, "Examination of Copper Alloy Tools form Tal-y-Yahya, Iran", in *Bulletin of the Historical Metallurgy Group*, Vol. 5: 37-38.

- Wertime, T. A., 1973, "The Beginning of Metallurgy: A New Look", *Science* 182: 875-887

- فلزات، Society.sushiant.com/Category/۱۳۹۳/۰۱/۲۲