DOI: 10.22034/JACO.2025.540548.1488

ترجمهٔ انگلیسی این مقاله نیز تحت عنوان:
Laboratory Studies on the Alloy Composition and Microstructural Features of Metal Objects from the Taj Amir (Dehnow) Cemetery, Yasuj, Dating to the Second Millennium BCE
در همین شماره مجله به چاپ رسیده است.

مقالهٔ پژوهشی

مطالعات آزمایشگاهی بر روی آلیاژ و ریزساختارشناسی اشیای فلزی از گورستان تاج‌امیر (دهنو) یاسوج، متعلق به هزارهٔ دوم پیش‌از میلاد*

الهام توکلی نسب[۱]، حمیدرضا بخشنده‌فرد[۲]**

۱. گروه باستان‌شناسی، دانشکدهٔ مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، ایران
۲. گروه مرمت آثار و اشیای فرهنگی، دانشکدهٔ حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۱ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۱۲

چکیده
مطالعه و شناخت فنـــاوری‌های تولیـــد و اســـتفاده از فلزات در ساخت اشـــیای مختلف در نقـــاط مختلـــف ایـــران بسیار مهم اســـت. با تولید آلیاژهای پایه‌مس، مانند برنز قلع‌دار و برنز آرسنیکی، صنعتگران کهن به سطح بالایی از دانش و مهارت فنی در زمینهٔ متالورژی دست یافتند. محوطهٔ باستانی گورستان تاج‌امیر در دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه دنا و در بخش شرقی شهر یاسوج (استان کهگیلویه و بویراحمد) واقع شده است. این گورستان در سال ۱۳۸۸ هجری شمسی و به‌دنبال عملیات عمرانی مربوط به احداث کتابخانهٔ دانشگاه علوم پزشکی یاسوج شناسایی شد. در جریان کاوش‌های انجام‌شده در این محوطه، مجموعه‌ای از اشیای فلزی به‌ویژه آثار مفرغی از درون گورها به دست آمد. در این پژوهش، تعدادی از اشیای مفرغی سالم‌تر و ازنظر شکل و کاربری متنوع‌تر، متعلق به لایه‌های تدفینی هم‌زمان از گورستان تاج‌امیر (دهنو) یاسوج، با هدف شناخت ویژگی‌های فناوری و شیوه‌های ساخت در دورهٔ میانهٔ هزارهٔ دوم پیش‌از میلاد انتخاب و تحت بررسی‌های آزمایشگاهی شامل متالوگرافی، XRF و SEM-EDS قرار گرفتند تا درک دقیق‌تری از فنون ساخت و فناوری آلیاژسازی در این مجموعه به دست آید. برای این منظور، از روش‌های تحلیل ریزساختار، میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به طیف‌سنج پراکندگی انرژی پرتوی ایکس (SEM-EDS) و نیز آزمون فلورسانس پرتوی ایکس (XRF) جهت تعیین ترکیب عنصری نمونه‌ها استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد دو نمونهٔ بررسی‌شده از آلیاژ برنز قلعی با درصد نسبتاً مشخصی از قلع ساخته شده‌اند که بیانگر آگاهی سازندگان از کنترل مقدار قلع در فرایند تولید برنز است. همچنین، یکی از نمونه‌ها به‌دلیل داشتن درصد بالای نقره، ماهیت نقره‌ای خود را آشکار کرد. شواهد ساختاری نشان می‌دهد تولید این اشیا ازطریق ذوب، ریخته‌گری و سپس چکش‌کاری انجام شده و در فرایند شکل‌دهی آن‌ها، چرخه‌های متناوب کار سرد و تاب‌کاری به کار رفته است.

واژگان کلیدی: *گورستان تاج‌امیر، برنز، ریزساختارشناسی، طیف‌سنجی فلورسانس اشعهٔ ایکس، میکروسکوپ الکترونی روبشی، طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوی ایکس.*

مقدمه
فلزکاری همواره به‌عنوان یکی از شاخص‌های اصلی توسعه و تعالی جوامع انسانی شناخته می‌شود و از مهم‌ترین مراحل در مسیر تکامل تمدن‌های باستانی تا دوران معاصر است. می‌توان گفت به‌کارگیری فلزات، نه‌تنها نشانه‌ای از پیشرفت فناوری و تخصصی‌شدن فعالیت‌های انسانی است بلکه عاملی اساسی در تحول صنعت و زندگی اجتماعی محسوب می‌شود. بهره‌گیری از فلز در تولید ابزار و وسایل، یکی از برجسته‌ترین عوامل شتاب‌دهنده در روند پیشرفت جوامع پیشاتاریخی بوده است. در دهه‌های گذشته، ایران به‌عنوان یکی از مراکز عمدهٔ فلزگری در دوران پیش‌از تاریخ، مدنظر پژوهشگران بوده است؛ به‌گونه‌ای که مطالعات میدانی و آزمایشگاهی متعددی بر آثار فلزگری به‌دست‌آمده از کاوش‌های باستان‌شناسی این سرزمین انجام شده است (Oudbashi et al., 2012, 55–74). این مطالعات شامل بررسی اشیای فلزی، قالب‌ها، سرباره‌ها و ابزارهای مرتبط با فرایند فلزکاری است و شواهدی از پیشرفت‌های مهم فناوری فلزکاری در فلات ایران ارائه می‌دهد. گورستان تاج‌امیر در حدود ۲۰۰ متری رود بشار و روی دامنه‌ای با شیب تقریباً ۳۰ درجه واقع شده است. این محوطه در پاییز سال ۱۳۸۸، در جریان

* این مقاله برگرفته از پایان‌نامهٔ کارشناسی‌ارشد «الهام توکلی نسب» باعنوان «بررسی باستان‌شناختی اشیای فلزی گورستان تاج امیر (دهنو) شهرستان یاسوج» است که به راهنمایی دکتر «بابک رفیعی» و دکتر «حمیدرضا بخشنده فرد» در دانشکدهٔ مرمت، دانشگاه هنر اصفهان در سال ۱۳۹۸ انجام شده است.

** نویسندهٔ مسئول: hr.bakhshan@aui.ac.ir، ۰۹۱۳۳۰۸۹۴۰۶

عملیات گودبرداری برای ساخت کتابخانهٔ دانشگاه علوم پزشکی یاسوج شناسایی شد (Rahimi & Vahdati, 2016, 101–120). براساس گزارش کاوش‌های مقدماتی، بیش‌از هفت هکتار از محوطه، تخریب شده و تنها حدود سه هکتار باقی مانده است (تصاویر ۱ و ۲). در فصل نخست کاوش، ۱۶ گور متراکم بررسی شد و مطالعات ژئوفیزیکی نیز به تعیین حیطهٔ گورستان حدود دو هکتار کمک کردند. ساختارهای مهمی شامل سنگ‌چینی داخل گورها، تعبیهٔ سنگ‌هایی بزرگ در بخش جنوبی به‌عنوان نماد و ایجاد ورودی برای اتاقک دفن شناسایی شده‌اند. ابزارهایی چون سفال، اشیای برنزی و سنگی به‌عنوان هدایای تدفینی در کنار اجساد قرار داده شده‌اند. یافته‌های معماری و باستان‌شناختی نشان می‌دهد این گورستان احتمالاً به جمعیت‌های کوچ‌رو باز می‌گردد و به حدود سال‌های ۲۰۰۰ پیش‌از میلاد مرتبط است. این گورستان درسال ۱۳۹۰ با نام گورستان دهنو در فهرست آثار ملی کشور قرارگرفت (Ghezelbash et al., 2016, 171–190).

فرایند ثبت این محوطه در فهرست آثار ملی ایران در زمستان سال ۱۳۹۰ خورشیدی، باعنوان «گورستان دهنو» که از روستای

تصویر ۱. موقعیت قرارگیری گورستان در دانشگاه علوم پزشکی یاسوج، نمای ماهواره‌ای گورستان در کنار مسجد دانشگاه. مأخذ: https://www.google.com/maps/search

تصویر ۲. وضعیت گمانه‌های کاوش‌شده. مأخذ: Ghezelbash et al., 2016, 177–178

هم‌نام در نزدیکی آن الهام گرفته است، انجام شد. تراکم بالای گورها در فضایی محدود، بیانگر گستردگی و اهمیت این محوطه است. ارزش علمی و تاریخی گورستان دهنو در آن است که بخشی از اطلاعات مربوط به زندگی و باورهای مردمان ساکن در منطقهٔ بویراحمد حدود ۳۵۰۰ سال پیش را در خود جای داده است. براساس شواهد به‌دست‌آمده از کاوش‌های باستان‌شناختی، می‌توان گورستان تاجامیر را متعلق به گروه‌ها یا اجتماعات کوچ‌نشین ایلامی در نیمهٔ نخست هزارهٔ دوم پیش‌از میلاد دانست. در این پژوهش، تعدادی از اشیای مفرغی سالم‌تر و ازنظر شکل و کاربری متنوع‌تر، متعلق به لایه‌های تدفینی هم‌زمان از گورستان تاجامیر دهنوی یاسوج، با هدف شناخت ویژگی‌های فناوری و شیوه‌های ساخت در دورهٔ میانهٔ هزارهٔ دوم پیش‌از میلاد انتخاب و در آزمایشگاه بررسی شدند. این مطالعات شامل آنالیز عنصری با روش XRF، بررسی‌های میکروسکوپی و ریزساختاری با استفاده از SEM-EDS و متالوگرافی نوری است که هر یک اطلاعات مکملی دربارهٔ ترکیب آلیاژی، مراحل ساخت و فرایندهای حرارتی احتمالی به‌کاررفته در تولید این اشیا فراهم می‌کنند.

هدف اصلی این پژوهش، بازسازی جنبه‌هایی از فناوری فلزکاری در جنوب فلات ایران و بررسی میزان آگاهی صنعتگران آن دوران از کنترل ترکیب و خواص آلیاژهای پایه‌مس است. پرسش‌های اساسی این مطالعه عبارت‌اند از:

۱. ترکیب شیمیایی و نسبت عناصر آلیاژی در اشیای گورستان تاجامیر چگونه است؟

۲. آیا می‌توان براساس ویژگی‌های ریزساختاری و ترکیب شیمیایی، تفاوتی در روش‌های ساخت یا کیفیت فنی این اشیا شناسایی کرد؟

۳. این داده‌ها چه سرنخ‌هایی در خصوص منشأ مواد اولیه و سطح شناخت فناوری فلزکاری در دورهٔ میانهٔ هزارهٔ دوم پیش‌از میلاد ارائه می‌دهند؟

نتایج حاصل از این تحلیل‌ها می‌تواند درک روشن‌تری از فنون آلیاژسازی، مراحل تولید و احتمالاً وجود کارگاه‌های محلی یا شبکه‌های تبادل مواد خام در منطقهٔ یاسوج فراهم آورد. به این ترتیب، این پژوهش نه‌تنها به مطالعهٔ موردی مجموعه‌ای از آثار مفرغی می‌پردازد بلکه در راستای بازسازی الگوهای فناوری فلزکاری در فلات ایران در میانهٔ هزارهٔ دوم پیش‌از میلاد نیز گامی مؤثر برمی‌دارد.

معرفی محوطه

گورستان تاجامیر، واقع در نزدیکی روستای دهنو و در فاصلهٔ حدود ۲۰۰ متری رود بشار، بر دامنه‌ای کم‌شیب و جنگلی با شیب تقریبی ۳۰ درجه قرار دارد. این موقعیت طبیعی سبب شده است لایه‌های رسوبی کمی بر روی تدفین‌ها انباشته شوند و بیشتر گورها در سطحی نزدیک به زمین باقی بمانند (Ghezelbash et al., 2016, 177–178).

در سال ۱۳۹۱، مرحله‌ای تازه از کاوش‌های باستان‌شناختی در این گورستان انجام شد که به کشف مجموعه‌ای گسترده از اشیای فلزی، سفالی و سنگی انجامید. در این فصل، ۱۶ گور در بخش شمالی محوطهٔ کاوش‌شده و مستندسازی قرار گرفت و مطالعات ژئوفیزیکی در وسعتی نزدیک به دو هکتار با استفاده از گرادیومتر بخارسزیم- روبیدیوم انجام شد. داده‌های مغناطیسی به‌دست‌آمده نشان داد این گورستان گستردگی و تراکم چشمگیری دارد. از میان ۱۶ گور کاوش‌شده، تنها پنج مورد به‌صورت سالم و درجا حفظ شده بودند، درحالی‌که بقیهٔ گورها به نظر می‌رسد در گذشته غارت و یا تخریب عمدی شده‌اند. نفوذ رسوبات و فروریختن پوشش تدفین نیز در تخریب ظروف و بقایای استخوانی نقش داشته است. با وجود این آسیب‌ها، کاوش‌ها به شناسایی ۱۵۶ شیء منجر شد که شامل سه ظرف کامل، ۱۷ ظرف ناقص، بیش‌از ۱۸۸۵ قطعهٔ لبهٔ ظروف سفالی و مجموعه‌ای ارزشمند از مهره‌های سنگی و فلزی به‌ویژه، کشف ۵۸ مهرهٔ سنگی، ۱۹ مهرهٔ نقره‌ای و یک مهرهٔ مفرغی که عمدتاً در گور شمارهٔ هشت و گورخمرهٔ شمارهٔ ۱۶ قرار داشتند بود که نشان‌دهندهٔ اهمیت زیورآلات و اشیای تزیینی در آیین‌های تدفینی این جامعه است. همچنین، وجود هدایای تدفینی خاص مانند ۱۰ سرپیکان سنگی در گور شمارهٔ چهار، خنجر مفرغی و قمقمهٔ سفالی منقوش در سایر تدفین‌ها، بیانگر تنوع کارکردی و نمادین اشیای همراه مردگان است. تنوع و تعدد ظروف سفالی و اشیای فلزی حاکی از پیچیدگی آیین‌های تدفینی و جایگاه ویژهٔ مردگان در ساختار اجتماعی جامعه بوده است. حضور اشیای فلزی، ازجمله سرنیزه‌ها، دستبندها، حلقه‌ها و خنجرها، نشان‌دهندهٔ تسلط کامل این جامعه بر فناوری فلزکاری و دسترسی به منابع مفرغ و نقره است. افزون بر این، شواهدی از زیورآلات نقره‌ای بیانگر ارتباطات اقتصادی و مبادلات فرامنطقه‌ای است، زیرا نقره در مقیاس محلی منابع محدودی داشته و احتمالاً ازطریق شبکه‌های تجاری وارد منطقه شده است. بررسی اشیایی که پیش‌تر در جریان تخریب‌های سال ۱۳۸۸ شناسایی و به مخزن موزهٔ یاسوج منتقل شده بودند، مجموعه‌ای ارزشمند شامل ۱۳ ظرف مفرغی، یک ظرف سنگ صابون منقوش و چند قطعهٔ فلزی و سفالی دیگر را نشان داد. مقایسهٔ این یافته‌ها با اشیای حاصل از کاوش رسمی، به درک جامع‌تر از کارکرد و تنوع اشیای تدفینی کمک می‌کند. به‌طور کلی، داده‌های به‌دست‌آمده از گورستان تاج‌امیر اهمیت فراوانی در مطالعهٔ ساختار اجتماعی و فرهنگی جوامع باستانی جنوب غرب ایران دارند. تمرکز بالای اشیای تدفینی، می‌تواند نشانه‌ای از جایگاه اقتصادی و نمادین فلز در زندگی این جوامع باشد. همچنین، شواهد موجود گواه آن است که این منطقه در نیمهٔ نخست هزارهٔ دوم پیش‌از میلاد بخشی از شبکه‌های فرهنگی و اقتصادی مرتبط با اقوام ایلامی و گروه‌های کوچ‌نشین منطقه بوده است. بدین ترتیب، گورستان تاج‌امیر نه‌تنها به‌عنوان یک محوطهٔ تدفینی بلکه به‌عنوان منبعی کلیدی برای شناخت تعاملات اجتماعی، اقتصادی و فنی در زاگرس میانی و جنوب غرب ایران قلمداد می‌شود. ارائهٔ نتایج آزمایشگاهی تعدادی از اشیای فلزی به‌دست‌آمده از این گورستان، می‌تواند اطلاعات ارزشمندی دربارهٔ فناوری فلزکاری، شیوه‌های ساخت و ترکیب آلیاژی در این منطقه فراهم آورد و پایه‌ای برای مطالعات باستان‌متالورژیکی آتی باشد.

پیشینهٔ پژوهش

مطالعات آنالیز عنصری و ریزساختارشناسی اشیای فلزی در فلات ایران، به‌ویژه در مناطق زاگرس میانی و جنوب غربی، نشان‌دهندهٔ پیشرفت‌های مهم در فناوری فلزکاری از هزارهٔ دوم پیش‌از میلاد است. این مطالعات عمدتاً با هدف شناسایی ترکیب آلیاژ، تکنیک‌های ساخت و فرایندهای تولید اشیای فلزی انجام شده و بینش‌های مهمی دربارهٔ منابع معدنی و شبکه‌های تبادلات فرهنگی و اقتصادی آن دوره فراهم آورده‌اند. در این زمینه، پژوهش‌های متعددی در محوطه‌های مختلف منطقه انجام شده است اما مطالعهٔ متمرکز در این محوطه توسط پژوهشگران انجام شده است. به‌عنوان مثال، قزلباش و همکاران (Ghezelbash et al., 2016) در بررسی گورستان تاج‌امیر یاسوج گزارش دادند که کاوش و مستندنگاری ۱۶ گور در بخش شمالی گورستان و مطالعات ژئوفیزیکی به وسعت دو هکتار، بخشی از نتایج فصل نخست پژوهش را تشکیل داده است. این بررسی‌ها، همراه با تحلیل هدایای تدفینی شامل ظروف سفالی، فلزی و سنگی و همچنین زیورآلات و ابزارهای فلزی، به روشن‌شدن جایگاه اجتماعی و اقتصادی مردگان و پیچیدگی آیین‌های تدفینی کمک کرده است. در بررسی گورستان تاج‌امیر یاسوج گزارش دادند کاوش و مستندنگاری ۱۶ گور در بخش شمالی گورستان و بررسی ژئوفیزیک به وسعت دو هکتار، بخشی از نتایج فصل نخست پژوهش بود. آن‌ها واحدهای ساختاری گوناگون هر گور شامل پوشش قلوه‌سنگی و خرپشته‌ای فضای چالهٔ تدفین، دیوارهٔ سنگ‌چین چالهٔ تدفین، ورودی چالهٔ تدفین، تاج یا نشانهٔ گور و فضای جلوی ورودی چالهٔ تدفین را به‌طور جداگانه توصیف و مستند کردند. هدایای تدفینی شامل ظروف سفالی، اشیای فلزی و سنگی، ابزارهای سنگی، زیورآلات و جنگ‌افزارهای مفرغی و سنگی بودند. براساس شواهد باستان‌شناختی ارائه شده، آن‌ها نتیجه گرفتند، گورستان تاج‌امیر متعلق به یکی از اقوام یا گروه‌های کوچ‌نشین ایلامی در نیمهٔ نخست هزارهٔ دوم پیش‌از میلاد بوده است.

با وجود اهمیت این مطالعات، تمرکز پژوهش‌های پیشین عمدتاً بر شناسایی و طبقه‌بندی آثار و توصیف باستان‌شناختی بوده و به مطالعات دقیق آزمایشگاهی، شامل آنالیز ریزساختاری و عنصری اشیای فلزی در این منطقه، کمتر شده است. پژوهش‌های مشابه در مناطق همجوار زاگرس میانی، مانند مطالعات بر روی محوطه‌های دایاآردیزی مورانی، باباجیلان و بیرگان، با استفاده از روش‌های SEM-EDS، متالوگرافی و رادیوگرافی اشعهٔ ایکس، اطلاعات مهمی دربارهٔ ترکیب آلیاژ و فنون ساخت ارائه کرده‌اند.

مطالعات باستان‌متالورژیکی بر روی هفت نمونه سنجاق‌سر مفرغی عصر آهن از محوطهٔ دایاآردیزی مورانی لرستان توسط پالیزوان و همکارانش (Palizvan et al., 2021) نشان داد ترکیب آلیاژ و فنون ساخت این اشیا می‌تواند اطلاعات ارزشمندی دربارهٔ فرایندهای تولید و منابع فلزات منطقه ارائه دهد. نتایج تحلیل SEM-EDS نشان داد به‌جز یک نمونه مس- آرسنیکی، سایر سنجاق‌سرها از مفرغ قلعی با میزان متغیر قلع ساخته شده‌اند و روش تولید غالب بدون کنترل دقیق قلع بوده است (مشابه دیگر محوطه‌های عصر آهن ایران) (Helwing, 2021). مطالعات ریزساختاری نشان داد آخال‌های سولفیدی در نمونه‌ها حضور دارند که نشان‌دهندهٔ استفاده از سنگ معدن‌های سولفیدی مس (احتمالاً مخلوط با سنگ معدن‌های اکسیدی) است. همچنین دانه‌های کارشده و بازتبلوریافته با خطوط دوقلویی و خطوط لغزش، حکایت از چکش‌کاری، تاب‌کاری و چکش‌کاری سرد در مراحل مختلف تولید دارد. این یافته‌ها، در کنار پژوهش‌های دیگر زاگرس میانی و جنوب غرب ایران، تصویری جامع از مهارت‌های فلزگری عصر آهن و استفاده از منابع معدنی محلی ارائه می‌کنند. مطالعات آزمایشگاهی روی اشیای برنزی محوطهٔ عصر آهن باباجیلان پیش‌کوه لرستان نشان داد این اشیا عمدتاً از برنز قلعی با میزان متغیر قلع ساخته شده‌اند که بیانگر عدم کنترل دقیق قلع در فرایند تولید است (Oudbashi & Hasanpour, 2016). آنالیز ریزساختاری نمونه‌ها، حضور آخال‌های سولفیدی و گویچه‌های پراکندهٔ سربی را نشان داد و بررسی متالوگرافی حکایت از استفاده از چرخهٔ متناوب کار سرد و تاب‌کاری در مراحل شکل‌دهی و ساخت دارد. این یافته‌ها، تصویری از مهارت‌های فلزگری عصر آهن و روش‌های تولید برنز در لرستان ارائه می‌کنند. در کاوش‌های تپهٔ زاغه (سد کارون چهار) تعداد متعددی اشیای فلزی متعلق به دورهٔ ایلام میانه کشف شد که چهار نمونه گوشوارهٔ فلزی برای بررسی فنی، ریزساختار و آسیب‌شناسی انتخاب شدند (Pornak et al., 2024). تحلیل ترکیب عنصری با استفاده از SEM-EDS نشان داد این اشیا از آلیاژهای برنج، مس خالص، مفرغ و نقره ساخته شده‌اند. مطالعات متالوگرافی و رادیوگرافی اشعهٔ ایکس نشان داد گوشوارهٔ برنجی در چرخه‌ای از کار سرد و آنیلینگ شکل گرفته و آخرین مرحلهٔ آن کار سرد بوده است، گوشوارهٔ مسی و نقره‌ای ازطریق چرخهٔ متناوب چکش‌کاری و تاب‌کاری ساخته شده‌اند و نمونهٔ مفرغی دندریت‌ها را دارد که بیانگر روش ریخته‌گری است. یافته‌های آن‌ها، تصویری جامع از روش‌های ساخت، چرخهٔ تولید و نیز فرایندهای خوردگی اشیای فلزی دورهٔ ایلام میانه را ارائه می‌کنند و اهمیت مطالعهٔ آزمایشگاهی در شناخت تکنولوژی فلزگری کهن را برجسته می‌سازند. در محوطهٔ KR۳۸۵ منطقهٔ بیرگان، شهرستان کوهرنگ، استان چهارمحال و بختیاری، آثار فلزی و سفالی متعلق به هزارهٔ دوم پیش‌از میلاد کشف شد که پنج نمونهٔ فلزی برای بررسی آزمایشگاهی انتخاب شد (Khodabakhshi et al., 2019). به‌منظور تعیین نوع آلیاژ، ترکیب شیمیایی و تکنیک ساخت، از روش‌های متالوگرافی، Micro-PIXE، SEM-EDS و رادیوگرافی اشعهٔ ایکس استفاده شد. نتایج نشان داد این اشیا شامل دو گروه برنز (Cu-Sn) با درصد متفاوت قلع و مس آرسنیکی هستند. مطالعات ریزساختاری حاکی از استفاده از چرخه‌های چکش‌کاری و ریخته‌گری در شکل‌دهی اشیا است و مهارت‌های فلزگری هزارهٔ دوم پیش‌از میلاد در منطقه را ارائه می‌کند. همچنین دو محوطهٔ مهم تاریخی تپهٔ فرودگاه و سنگ‌تراشان در خرم‌آباد کاوش شدند که طی آن اشیای مفرغی ظریف و باارزشی به دست آمده است. در این پژوهش از هر محوطه، دو نمونهٔ برنزی انتخاب شد و با توجه به هم‌دوره‌بودن و نزدیکی جغرافیایی مناطق، نتایج حاصل از آنالیزهای آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه شد. روش‌های استفاده‌شده شامل متالوگرافی، میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به آنالیز عنصری (SEM-EDS)، رادیوگرافی اشعهٔ ایکس و توموگرافی کامپیوتری بود. نتایج نشان داد همهٔ اشیای مطالعه‌شده از آلیاژ برنز ساخته شده‌اند و ریزساختار آن‌ها حاکی از استفاده از تکنیک‌های چکش‌کاری و تاب‌کاری در فرایند تولید است (Gravand et al., 2019). همچنین در پژوهش دیگر بخشنده‌فرد و همکاران (Bakhshandehfard et al., 2025)، شش نمونه از آثار فلزی کشف‌شده از دو محوطهٔ عیلامی تپهٔ سنجر در شمال دشت شوشان خوزستان و تپهٔ قلاگپ در دشت ازنای لرستان را بررسی متالورژیکی کردند. هدف مطالعه، شناسایی ترکیب شیمیایی و ویژگی‌های ریزساختاری این نمونه‌ها بود. نتایج نشان داد تمامی نمونه‌ها آثار کار سرد، کار گرم و تاب‌کاری دارند و اغلب دچار خوردگی شدید شده‌اند. ترکیب آلیاژی آن‌ها شامل برنز قلعی، برنز سربی و مس آرسنیک‌دار است. مقایسهٔ یافته‌ها با پژوهش‌های مشابه در شمال غرب فلات ایران حاکی از شباهت چشمگیر در مواد، میزان عناصر و روش‌های فلزکاری است. همچنین، وجود ناخالصی‌ها و ترکیب عناصر نمونه‌ها نشان داد شیوه‌های استخراج فلز از سنگ معدن در این مناطق نیز ماهیت مشترکی داشته‌اند. نوآوری پژوهش‌های اخیر در منطقهٔ تاج‌امیر و محوطه‌های همجوار، علاوه‌بر ارائهٔ داده‌های باستان‌شناختی، شامل بهره‌گیری از روش‌های آزمایشگاهی دقیق برای تحلیل ترکیب آلیاژ، ریزساختار و تکنیک‌های ساخت اشیای فلزی است. این رویکرد، امکان بازسازی فرایندهای تولید و درک بهتر شبکه‌های اقتصادی و فرهنگی هزارهٔ دوم پیش‌از میلاد را فراهم می‌کند و خلاءهای پژوهشی پیشین را پر می‌سازد. بررسی این آثار، در کنار مطالعات باستان‌متالورژیکی مشابه، فرصت تحلیل جامع فناوری فلزکاری، ترکیب آلیاژها و روش‌های ساخت را فراهم می‌آورد و اهمیت گورستان تاج‌امیر را به‌عنوان یک منبع کلیدی برای شناخت تعاملات فرهنگی، اقتصادی و تکنولوژیکی در زاگرس میانی برجسته می‌سازد.

روش تحقیق

این پژوهش بر پایهٔ روش‌های آزمایشگاهی و مطالعات فن‌شناسی و بررسی لایه‌های خوردگی انجام شده است. بدین منظور، تعداد سه نمونهٔ فلزی شامل نمونهٔ شمارهٔ یک (TA124-1) ظرف فلزی با ضخامت دو میلی‌متر و ارتفاع پنج سانتی‌متر؛ نمونهٔ شمارهٔ دو (TA251-2) ظرف فلزی با ضخامت پنج میلی‌متر و ارتفاع ۹/۴ سانتی‌متر؛ نمونهٔ شمارهٔ سه (TA167-3) حلقه‌ای فلزی با دو سوراخ در دو سر، ضخامت ۰/۲ میلی‌متر و قطر ۳/۱ سانتی‌متر از نمونه‌های فلزی به‌دست‌آمده از گورستان تاج‌امیر به‌طور هدفمند انتخاب شد (تصویر ۳). این نمونه‌ها پس از آماده‌سازی، تحت مجموعه‌ای از آزمون‌های آزمایشگاهی قرار گرفتند تا ترکیب عنصری، ریزساختار و ویژگی‌های فناورانهٔ آن‌ها بررسی شود. داده‌های حاصل از این آزمایش‌ها امکان شناسایی نوع آلیاژ، فناوری ساخت و همچنین درک بهتر از شیوه‌های تولید و کاربرد فلزات در این محوطهٔ باستانی را فراهم ساخته است. ازنظر طبقه‌بندی، دو نموهٔ نخست در گروه ظروف و نمونهٔ سوم در ردیف اشیای حلقه‌ای قرار می‌گیرند. به‌منظور شناخت ترکیب و فناوری ساخت، مجموعه‌ای از روش‌های آزمایشگاهی به کار گرفته شد. این روش‌ها شامل موارد زیر بودند:

۱) ریزساختارنگاری با میکروسکوپ نوری: برای مطالعهٔ ساختار فلزی، بررسی دانه‌بندی، شناسایی فازهای آلیاژی و تشخیص شواهد تغییر شکل مکانیکی.

۲) میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به طیف‌سنج انرژی پرتو ایکس (EDS): به‌منظور مشاهدهٔ ویژگی‌های ریزساختاری مقاطع و تعیین نیمه‌کمی ترکیب عناصر سازنده و نیز امکان بررسی دقیق لایه‌های خوردگی و محصولات ناشی از آن.

۳) فلورسانس پرتوی ایکس (XRF): برای تعیین درصد وزنی عناصر اصلی و فرعی و دستیابی به درک دقیق‌تر از ترکیب آلیاژی.

۴) مطالعات آسیب‌شناسی: به‌منظور بررسی خوردگی، شدت تخریب و تغییرات ناشی از دفن.

انتخاب این مجموعه روش‌ها براساس رویکردهای رایج در مطالعات فلزگری باستانی صورت گرفت. داده‌های حاصل نقش کلیدی در شناسایی نوع آلیاژها، تمایز میان گروه‌های مختلف برنز و تحلیل فناوری ساخت ایفا کردند. همچنین، ترکیب داده‌های متالوگرافی با نتایج آنالیزهای عنصری، امکان بازسازی نسبی فرایندهای خوردگی و شرایط محیطی تأثیرگذار را فراهم آورد. در نهایت، به‌کارگیری هم‌زمان این روش‌ها، چهارچوبی جامع برای شناخت فناوری تولید، ترکیب آلیاژی و وضعیت حفاظتی آثار فلزی گورستان تاج‌امیر فراهم ساخت.

یافته‌ها

• مطالعات ریزساختارشناسی

به‌منظور بررسی ریزساختار آلیاژها، مقاطع متالوگرافی از سه نمونهٔ فلزی انتخاب‌شده از گورستان تاج امیر تهیه شد. برای این منظور، ابتدا مقاطع در رزین اپوکسی دوجزئی (رزین + سخت‌کننده)، مانت شده و سپس با استفاده از ورق‌های ساینده کاربید سیلیسیوم از زبرترین تا نرم‌ترین شماره، پرداخت شدند. در ادامه، صیقل نهایی با خمیر الماس به‌ترتیب شش میکرون، سه میکرون و یک میکرون انجام شد تا سطحی براق و بدون خش حاصل شود. این آماده‌سازی دقیق، امکان آشکارسازی فازها و ساختارهای آلیاژی را فراهم کرد. برای مشاهدهٔ ریزساختار، از میکروسکوپ پلاریزان مدل BK-POL/BK-POLR مجهز به دوربین Canon EOS Kiss X4 CCD و نرم‌افزار Breeze System استفاده شد. مطالعات پیش و پس‌از اچ‌کردن[1] انجام شد تا بتوان جزئیات متفاوت در فازها و مرز دانه‌ها را آشکار ساخت. انتخاب محلول اچ برای هر نمونه براساس ترکیب شیمیایی آلیاژ انجام شد. دو نمونه که دارای ترکیب مسی بودند، با محلول اچ استاندارد آلیاژهای مس (محلول کلرید آهن III آبی) بررسی شدند؛ درحالی‌که نمونهٔ سوم که مقدار زیادی نقره داشت، با محلول اچ نقره (دی‌کرومات پتاسیم اسیدی) مطابق دستورالعمل‌ها (Scott, 1991, 72) اچ شد. علاوه‌بر مطالعات ریزساختاری، برای بررسی وضعیت سطحی و ظاهر کلانِ نمونه‌ها، از میکروسکوپ استریو مدل ZSM-1001-3E استفاده شد. این مرحله کمک کرد تا عیوب سطحی، آثار خوردگی و ویژگی‌های فن‌ساختی همچون روش چکش‌کاری یا آثار ریخته‌گری شناسایی شوند. ازنظر تحلیلی، انتخاب روش‌های فوق، نشان‌دهندهٔ پیوند میان مطالعات باستان‌سنجی و آسیب‌شناسی فلزات باستانی است.

الف	ب	پ
TA124-1	TA251-2	TA167-3

تصویر ۳. نمونه‌های مطالعه‌شدهٔ به‌دست‌آمده از گورستان تاج امیر یاسوج. مأخذ: نگارندگان.

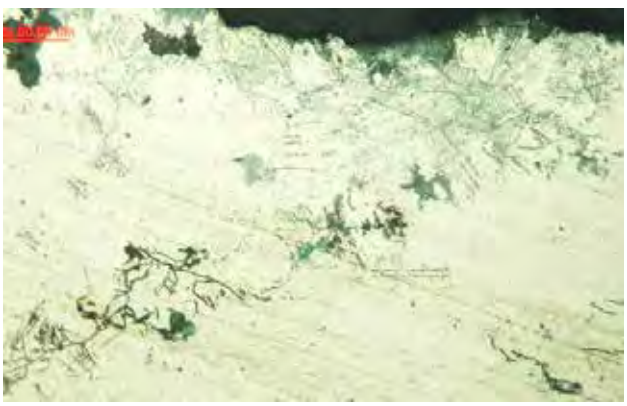
میکروسکوپ پلاریزان امکان بررسی دقیق فازهای متالوگرافی، نوع دگریختگی‌ها و حضور احتمالی ناخالصی‌ها را فراهم ساخت، درحالی‌که میکروسکوپ استریو، اطلاعاتی مقدماتی دربارهٔ شیوهٔ ساخت و میزان تخریب سطحی ارائه داد.

– ظرف فلزی شمارهٔ یک (1-124TA)

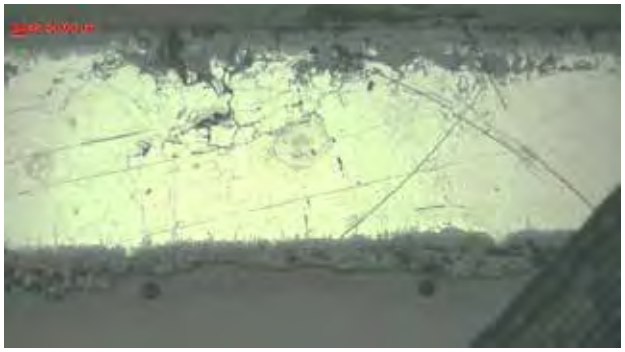
در نمونهٔ تاریخی بررسی‌شده، مشاهدهٔ دانه‌های تخت و کشیده، خطوط لغزش، آثار بازپخت و ترک‌های تنشی، بیانگر به‌کارگیری توالی منظم عملیات مکانیکی و حرارتی در فرایند ساخت شیء است. تخت و کشیده‌شدن دانه‌ها ناشی از اعمال چکش‌کاری سرد یا نیمه‌گرم در مراحل شکل‌دهی است، درحالی‌که وجود آثار بازپخت نشان می‌دهد صنعتگر با آگاهی از اصول کنترل خواص مکانیکی، در فواصل مشخص، اقدام به حرارت‌دهی و بازپخت فلز کرده تا تنش‌های درونی کاهش یافته و قابلیت تغییر شکل مجدد فراهم شود. خطوط لغزش مشاهده‌شده درون دانه‌ها، حاصل تغییر شکلِ پلاستیک ناشی از چکش‌کاری بوده و ترک‌های تنشی احتمالاً در اثر شدت بالای کار مکانیکی بدون بازپخت کافی یا سردشدن سریع پس‌از حرارت‌دهی ایجاد شده‌اند. همچنین، خوردگی‌های مرزدانه‌ای و درون‌دانه‌ای در مقطع فلزی می‌تواند بیانگر ناهمگنی ترکیب آلیاژ و فعالیت انتخابی خوردگی در امتداد مرزدانه‌ها باشد. درمجموع، این شواهد متالوگرافی نشان می‌دهد شیء مذکور حاصل به‌کارگیری دانش فنی و مهارت بالای صنعتگر در اجرای چرخه‌های متناوب چکش‌کاری و تاب‌کاری بوده است؛ فرایندی که ضمن افزایش استحکام مکانیکی، امکان دست‌یابی به شکل مطلوب و یکنواختی بافت فلزی را فراهم کرده است (Artioli, 2010). این روش‌ها موجب افزایش شکل‌پذیری و مقاومت مکانیکی فلز شده و امکان تولید اشیای پیچیده و ظریف را فراهم می‌کرد. با مقایسهٔ یافته‌های تاج‌امیر با نمونه‌های مشابه در سایر محوطه‌های ایران، می‌توان شباهت‌های فناوری ساخت را مشاهده کرد. به‌عنوان مثال، در کاوش‌های مارلیک در گیلان، ظروف و اشیای مفرغی ریزساختاری مشابه دارند و آثار چکش‌کاری و آنیلینگ در آن‌ها نیز ثبت شده است (Oudbashi & Hessari, 2017). همچنین در محوطه‌های جنوب شرق ایران مانند جیرفت (Weeks, 2004)، اسپیدژ (Bakhshandehfard et al., 2024) و شهرسوخته (Bakhshandehfard et al., 2025)، مقاطع فلزی نشان می‌دهند صنعتگران با استفاده از چرخه‌های حرارتی و مکانیکی مشابه، به شکل‌دهی دقیق ظروف و ابزارها دست یافته‌اند. این مقایسه نشان می‌دهد فنون فلزکاری در مناطق مختلف فلات ایران، هرچند محلی و بومی‌سازی‌شده، برپایهٔ اصول مشترک و رویکردهای فنی مشابهی شکل گرفته بودند. ازاین‌رو، ریزساختار نمونه‌ها فرایندهای تولید اشیا را روشن می‌کند.

– ظرف فلزی شمارهٔ دو (2-251TA)

ریز ساختارها در این نمونه، ترک تنشی و خطوط لغزش زیادی را نشان می‌دهد که می‌تواند مربوط به مرحلهٔ چکش‌کاری بر روی شیء باشد (Caron et al., 2004, 775–788). ریزساختار اچ‌شدهٔ نمونه شامل دانه‌های بازتبلوریافتهٔ ریزی است که حاوی خطوط دوقلویی آشکار هستند. (تصویر ۴). دوقلویی کریستال زمانی اتفاق می‌افتد که دو کریستال جداگانه برخی از نقاط شبکهٔ کریستالی را به‌صورت متقارن به اشتراک می‌گذارند. نتیجه، رشد دو کریستال جداگانه در چندین شکل خاص است. سطحی که در آن نقاط شبکه در کریستال های دوقلویی مشترک هستند، یک سطح ترکیب یا صفحهٔ دوقلویی نامیده می‌شود و مشخصهٔ ساختارهای کارشده است. خوردگی مرز دانه‌ای و درون دانه‌ای نیز دیده می‌شود (تصویر ۵). میزان قلع و مس در دو نمونهٔ برنزی مطالعه‌شده تقریباً یکسان است و ترکیب یکنواخت آلیاژ، دقت بالای فرایند آلیاژسازی را نشان می‌دهد؛ موضوعی که بیانگر سطح بالای دانش فنی و تسلط صنعتگران بر فناوری فلزکاری در دوران باستان



تصویر ۴. در ریزساختار نمونه ظرف فلزی شمارهٔ یک (1-124TA) خطوط لغزش زیادی دیده می‌شود که نشان‌دهندهٔ چکش‌کاری سرد بعد از بازپخت است و خوردگی‌های مرزدانه‌ای نیز با بزرگنمایی ۲۰۰ برابر مشاهده می‌شود. مأخذ: آرشیو نگارندگان.



تصویر ۵. در ریزساختار نمونه ظرف فلزی شمارهٔ یک (2-251TA) خطوط لغزش زیادی دیده می‌شود که نشان‌دهندهٔ چکش‌کاری است و خوردگی‌های مرزدانه‌ای با بزرگنمایی ۲۰۰ برابر مشاهده می‌شود. مأخذ: آرشیو نگارندگان.

است. مشاهدات ریزساختاری نیز شباهت بین این نمونه‌ها را نشان می‌دهند که علاوه‌بر تأیید یکنواختی آلیاژ، حکایت از استفاده از روش‌های تولید مشابه دارد. جزئیات بیشتر در جدول ۱ وجود دارد.

– ظرف فلزی شمارهٔ سه (3-167TA)

بررسی میکروساختار نمونه نشان می‌دهد آلیاژ مطالعه‌شده از دو فاز محلول جامد اصلی تشکیل شده است: فاز α (محلول جامد مسِ غنی از نقره) و فاز β (محلول جامد نقرهٔ غنی از مس). فاز β عمدتاً به‌صورت ذرات پراکنده در مرز دانه‌های فاز α مشاهده می‌شود. حضور نقره به‌صورت محلول در فاز α موجب افزایش مقاومت مکانیکی آلیاژ از طریق مکانیزم سخت‌شدن محلول، جامد می‌شود و همچنین می‌تواند انرژی‌های کرنش ناشی از تغییر شکل شبکهٔ بلوری را کاهش دهد که در نتیجه دمای تبلور مجدد آلیاژ را افزایش می‌دهد. آلیاژهای نقره- مس نمونه‌های کلاسیک یوتکتیک هستند که در نمودار فازی Ag–Cu، دمای یوتکتیک حدود ۷۷۹ C° و ترکیب تقریبی ۷۲ wt% نقره را نشان می‌دهد. در این ساختار یوتکتیک، هنگام سردشدن از حالت مایع، فازهای α و β به‌صورت همزمان رسوب می‌کنند و ناحیهٔ دوفازی α+β را شکل می‌دهند. حلالیت متقابل مس و نقره در دماهای پایین محدود است و با کاهش دما، میزان حل‌پذیری نقره در فاز α و مس در فاز β کاهش می‌یابد که منجر به تشکیل ذرات پراکنده و مشخصات میکروساختاری معمول یوتکتیک می‌شود. این الگوی فازبندی و ریزساختار نهایی، بر خواص مکانیکی و پاسخ آلیاژ به فرایندهای حرارتی و مکانیکی تأثیر مستقیم دارد و نشان‌دهندهٔ کنترل دقیق ترکیب و سرمایش در تولید آلیاژهای نقره- مس با کارکردهای کاربردی یا تزیینی است (Scott, 1991, 12–13). ریزساختار نمونه‌های بررسی‌شده، نقاط روشن و تاریک کشیده‌ای را نشان می‌دهد که بیانگر جدایش فازهای آلیاژ مس و نقره از یکدیگر است. این ویژگی‌ها، شواهد مستقیمی از اعمال چکش‌کاری و تغییر شکل پلاستیک در مراحل ساخت شیء فراهم می‌کند (تصویر ۶). کشیدگی دانه‌ها و الگوهای فازی مشاهده‌شده در ریزساختار، حاکی از این است که صنعتگر با استفاده از چرخه‌های مکانیکی، خواص فلز را بهینه کرده و شکل نهایی را ایجاد کرده است. ریزساختارهای یک ریزساختار معمولی از یک آلیاژ نقره تاحدودی باکیفیت را نشان می‌دهد که دانه‌های فاز α نشان‌دهندهٔ خالص دانه‌های نقره و یوتکتیک حاوی مخلوطی از نقره و درصد مس (مس ۷۵/۶۵ درصد و ۲۱/۶۳ درصد مس براساس نتایج فلورسانس اشعهٔ ایکس) است.

نتایج حاصل از بررسی میکروساختار نمونه با شواهد تجربی و نتایج پیشین در مطالعات مشابه هم‌خوانی دارد. همان‌طور که در مطالعات قبلی گزارش شده است، آلیاژهای نقره- مس ریزساختار یوتکتیک α+β دارند و فاز β به‌صورت ذرات پراکنده در مرز دانه‌های فاز α مشاهده می‌شود. حضور نقره به‌صورت محلول در فاز α و رسوب ذرات فاز β، افزایش استحکام مکانیکی آلیاژ و رفتار ترمودینامیکی سامانه را موجب می‌شود، از جمله دمای تبلور مجدد و حلالیت متقابل عناصر را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (Zuo et al., 2015, 69–72).

جدول ۱. نتایج آنالیز (SEM-EDS) نمونه‌ها برحسب درصد وزنی (wt%). مأخذ: نگارندگان.

نمونه/عنصر	کربن	اکسیژن	سلیسیم	گوگرد	کلر	آهن	مس	روی	آرسنیک	نقره	قلع	آنتیموان	سرب
TA124-1	۷/۹۸	۲/۲۵	۰/۱۵	۰/۱۶	۰/۱۹	۰/۲۷	۷۵/۱	۰/۹۴	۰/۵۴	–	۱۰/۹۹	۰/۷۹	۰/۷۶
TA251-2	۷/۴۷	۲/۱۵	۰/۱۸	۰/۱۹	۰/۱۸	۰/۱۳	۷۴/۸۹	۰/۵۰	۰/۵۵	–	۱۲/۲۷	۰/۸۱	۰/۶۸
TA167-3	۷/۵۲	–	۰/۳۸	۰/۳۱	–	۰/۱۰	۱/۸۰	۰/۴۹	۰/۷۳	۸۷/۱۸	۰/۷۶	–	۰/۷۳

تصویر ۶. در ریزساختار نمونه ظرف فلزی شمارهٔ سه (3-167-TA) ریزساختار این نمونه در بزرگنمایی ۲۰۰ برابر، نقاط روشن و تاریک کشیده‌ای را نشان می‌دهد که بیانگر جدایش فلزهای آلیاژ مس و نقره از یکدیگر است. این الگوی کشیدگی، شواهد محکمی از اعمال چکش‌کاری و تغییر شکل پلاستیک در فرایند ساخت شیء فراهم می‌آورد و نشان می‌دهد صنعتگر از روش‌های مکانیکی برای شکل‌دهی و کنترل خواص فلز استفاده کرده است. مأخذ: آرشیو نگارندگان.

• میکروسکوپ الکترونی روبشی

برای تعیین ترکیب عنصری نمونه‌ها، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به طیف‌سنج انرژی پرتوی ایکس (EDS) در آزمایشگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی بنیاد علوم کاربردی رازی، تهران، استفاده شد. هم‌چنین، اسپکتروسکوپی پراش انرژی پرتوی ایکس (XRF) ساخت فرانسه، به‌منظور تعیین درصد وزنی عناصر موجود در نمونه‌ها به‌کار گرفته شد. ترکیب این دو روش امکان شناسایی دقیق عناصر سازندهٔ آلیاژها و بررسی تفاوت‌های فازی و آلیاژسازی در نمونه‌های فلزی را فراهم کرد.

– نمونهٔ یک (1-124TA)

آنالیز SEM-EDS روی این نمونه در هفت نقطهٔ مشخص A تا G و ماتریکس فلز انجام شد تا ترکیب عناصر، ناخالصی‌ها و وضعیت بدنهٔ نمونه بررسی شود. نتایج نشان داد ماتریکس فلزی مقدار زیادی مس و قلع دارد و ترکیب آن نمایانگر آلیاژ برنز قلعی است. میزان ناخالصی‌ها در ماتریکس بسیار پایین بود و سطح نمونه کمتر دچار خوردگی شده بود. در نواحی مختلف نمونه، تغییرات جزئی در ترکیب عناصر مشاهده شد که می‌تواند به توزیع ناهمگن قلع و مس و همچنین نفوذ عناصر دیگر مرتبط با فرایند تولید و شرایط دفن اشاره داشته باشد. به‌طور کلی در نقاطی مانند A و B، میزان مس و قلع غالب است و حضور مقدار کمی کربن، اکسیژن و آنتیموان نشان‌دهندهٔ ورود ناخالصی‌ها و احتمالاً اثرات خوردگی سطحی است.

در نقاط C و E، علاوه‌بر مس و قلع، مقادیر کم سرب و سلیسیم یافت شد که می‌تواند ناشی از افزودنی‌ها یا آلودگی‌های محیطی باشد.

نقطهٔ F درصد بالاتری اکسیژن و ترکیب مشخصی از مس و قلع دارد که نشان‌دهندهٔ تشکیل اکسید مس در این بخش است.

در نقطهٔ G نیز ترکیب نسبی مس و قلع همراه با اکسیژن، نمایانگر تغییرات سطحی محدود و پراکندگی فازها است.

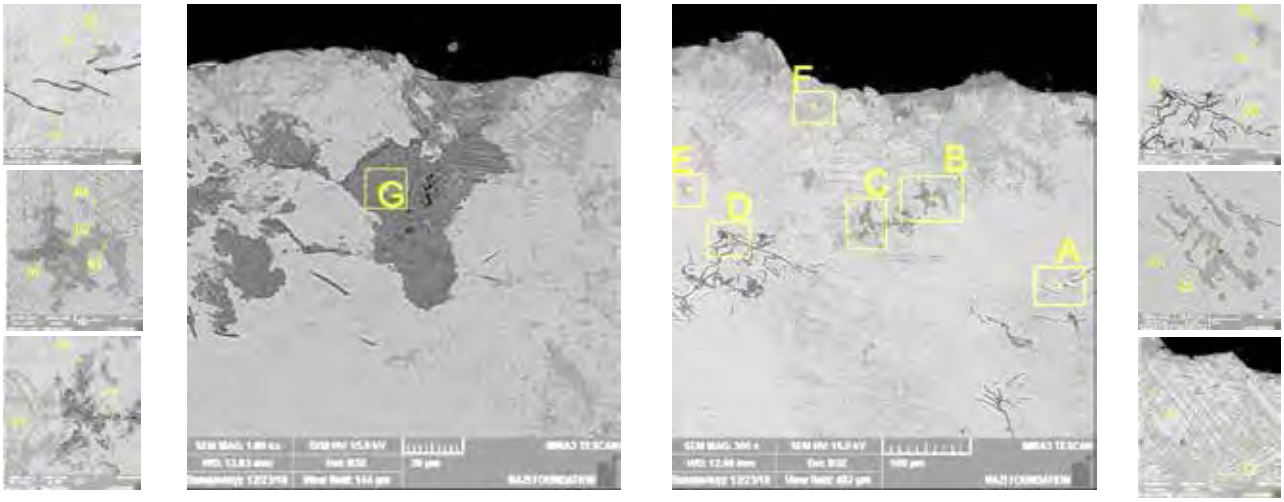
به‌طور کلی، داده‌های SEM-EDS نشان می‌دهد نمونه از برنز قلعی نسبتاً خالص ساخته شده و در برخی نواحی، اثرات خوردگی و اکسیداسیون سطحی مشاهده می‌شود. توزیع عناصر فلزی و ناخالصی‌ها با توجه به فرایند تولید و شکل‌دهی (چکش‌کاری و تاب‌کاری) تفسیر می‌شود و شواهد نشان می‌دهد صنعتگر کنترل مناسبی بر ترکیب آلیاژ داشته است (تصویر ۷).

بالاترین میزان سرب در این نمونه ۱/۹۸ درصد است که این میزان کمتر از مقداری سربی است که معمولاً به‌صورت آگاهانه افزوده می‌شود. بنابراین نمی‌تواند آگاهانه و جهت تسهیل فرایند ریخته‌گری افزوده شده باشد (Petersen, 2010, 277–278). درصد بالای مس در این نمونه تأمل‌برانگیز است. این امر می‌تواند ناشی از توانایی بالای فلزگر در امر استحصال مس از سنگ معدن باشد. نتایج آنالیزهای انجام‌شده روی نمونه‌ها، در جداول ۱ و ۲ آمده است که نتایج آنالیز، SEM-EDS در دو بخش شامل بدنه و ناحیه، در جدول ۱ و نتایج XRF در جدول ۲ با درصد وزنی نشان داده شده است.

– نمونهٔ دو (2-251TA)

آنالیز SEM-EDS بر روی چهار نقطهٔ مشخص A تا D و ماتریکس نمونه انجام شد تا وضعیت عناصر، ناخالصی‌ها و اثرات خوردگی شناسایی شود. نتایج نشان داد ترکیب فلزات و توزیع عناصر در نقاط مختلف نمونه با یکدیگر تفاوت دارد که این تفاوت‌ها می‌تواند ناشی از فرایندهای ساخت، تغییرات سطحی و واکنش با محیط دفن باشد.

ناحیهٔ A: ترکیب غالب شامل مس و درصد کمتری قلع بود. کاهش قلع در این ناحیه نشان‌دهندهٔ پدیدهٔ قلع‌زدایی است که معمولاً در تماس طولانی‌مدت با محیط‌های خورنده، مانند خاک مرطوب، رخ می‌دهد و منجر به کاهش مقاومت مکانیکی و تغییر رنگ و ساختار سطحی می‌شود (Robbiola et al., 1998; Scott, 2002). حضور اکسیژن نیز تأیید می‌کند که اکسیداسیون سطحی در این بخش رخ داده است.



تصویر ۷. بررسی ساختار فلزی، محصولات خوردگی و آنالیز نمونهٔ شمارهٔ یک (TA-124-1)، نقاط به کمک میکروسکوپ الکترونی با مد BSE با بزرگنمایی ۳۰۰ برابر اندازه‌گیری شده است. مأخذ: نگارندگان.

جدول ۲. نتایج آنالیز آزمون طیف‌سنجی فلورسانس اشعهٔ ایکس (XRF) نمونه‌های مطالعه‌شده براساس میزان درصد وزنی wt%. مأخذ: نگارندگان.

نمونه	نیکل	سرب	آرسنیک	طلا	نقره	آنتیموان	قلع	روی	مس
۲۵۱	۰/۳۸	۰/۰۳	۰/۲۴	۰/۰۱	۰/۰۸	۰/۰۳	۱۰/۸۵	۰/۳۳	۸۸/۰۱
۱۶۷	۰/۰۶	۰/۳۸	۰/۳۳	۱/۵۷	۷۵/۶۵	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۱۶	۲۱/۶۳
۱۲۴	۰/۵۸	۰/۰۲	۰/۳۸	۰/۱۵	۰/۰۴	۰/۰۱	۹/۵۱	۰/۲۸	۸۸/۷۷

ناحیهٔ B: در این نقطه افزایش نسبی قلع همراه با کاهش مس و افزایش اکسیژن مشاهده شد که نشان‌دهندهٔ خوردگی درونی فلز است. پدیدهٔ خوردگی قلع منجر به تجمع مواد نامحلول، مانند اکسیدهای قلع می‌شود و می‌تواند روند قلع‌زدایی را محدود کند. همچنین خطوط مستقیم موازی در مقاطع دانه‌ها نشانهٔ اعمال چکش‌کاری و تغییر شکل پلاستیک فلز است.

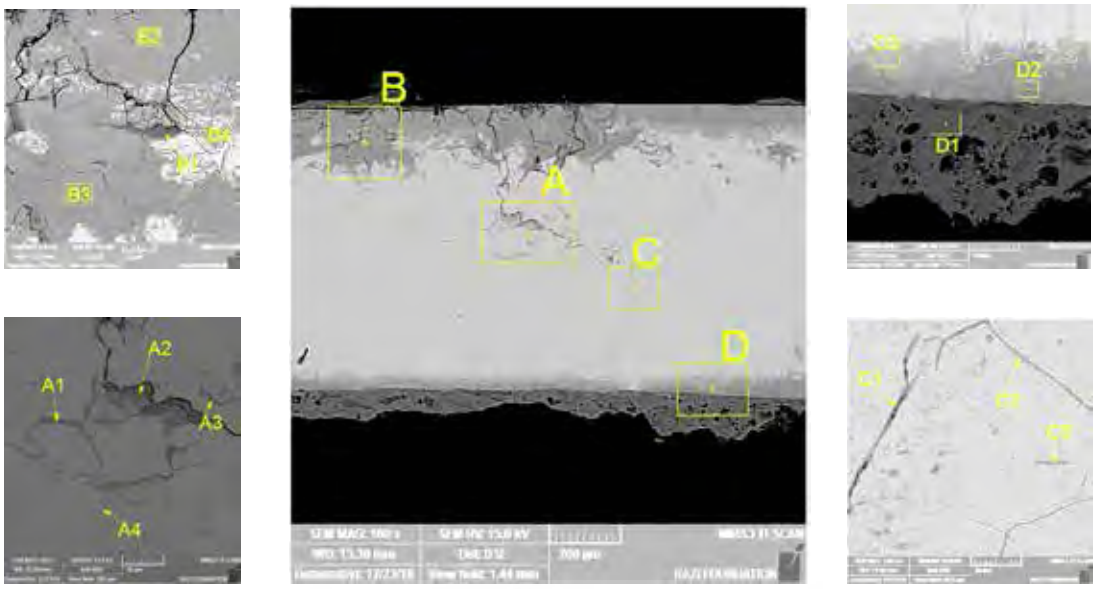
ناحیهٔ C: علاوه‌بر مس و قلع، حضور مقادیر زیادی گوگرد و آهن مشاهده شد که ممکن است ناشی از تشکیل ترکیبات سولفیدی مس مانند کالکوپریت و پیروتیت باشد (Klein et al., 1993). این یافته‌ها نشان‌دهندهٔ خوردگی پیشرفته در این بخش و تأثیر محیط دفن بر ترکیب سطحی فلز است.

ناحیهٔ D: افزایش قلع و کاهش مس همراه با میزان بالای اکسیژن در این بخش، نشانهٔ اکسیداسیون و خوردگی سطحی است و گویای تغییرات شیمیایی و فازی در طول زمان است.

به‌طور کلی، نتایج SEM-EDS نشان می‌دهد نمونهٔ مطالعه‌شده از آلیاژ برنز قلعی ساخته شده و در نقاط مختلف، ترکیب عناصر تحت‌تأثیر فرایندهای محیطی و خوردگی سطحی قرار گرفته است.

تفاوت‌های محلی در نسبت مس و قلع و حضور عناصر ثانویه، نمایان‌گر ناهمگنی فازها و اثرات متنوع فرایندهای محیطی بر نمونه است (تصویر ۸).

آنالیز SEM-EDS نمونه‌های گورستان تاج‌امیر در ماتریکس و چهار ناحیهٔ مشخص A تا D انجام شد تا وضعیت ترکیب عناصر، ناخالصی‌ها و اثرات محیطی بر نمونه شناسایی شود. داده‌ها نشان می‌دهد نمونه از آلیاژ برنز قلعی ساخته شده و مس و قلع به‌طور آگاهانه در ترکیب آلیاژ حضور دارند، به‌طوری که درصد بالای مس و حدود ۱۲–۱۳ درصد قلع در ماتریکس، بیانگر کنترل دقیق نسبت عناصر توسط صنعتگر است. در ناحیهٔ A، کاهش نسبی قلع همراه با افزایش اکسیژن و حضور مقادیر کم عناصر دیگر (کلر و سرب) مشاهده شد. این شرایط نشانهٔ قلع‌زدایی و اکسیداسیون سطحی است که معمولاً در اثر تماس طولانی‌مدت با خاک مرطوب رخ می‌دهد و منجر به تغییر رنگ، کاهش مقاومت مکانیکی و تغییرات سطحی می‌شود (Robbiola et al., 1998; Scott, 2002). ناحیهٔ B نیز شواهدی از کاهش قلع و افزایش اکسیژن دارد که بیانگر خوردگی درونی و قلع‌زدایی است. در این ناحیه، تجمع اکسیدهای



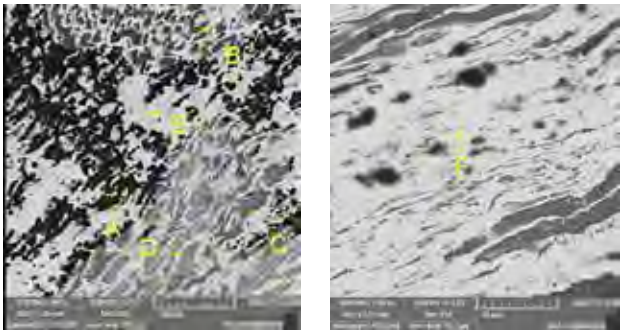
تصویر ۸. بررسی ساختار فلزی، محصولات خوردگی و آنالیز نمونهٔ دو (2-251-TA) به کمک میکروسکوپ الکترونی با مُد BSE با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر اندازه‌گیری شده است. مأخذ: نگارندگان.

قلع ممکن است روند قلع‌زدایی را محدود کرده و برخی مناطق فلز را در برابر خوردگی محافظت کند. همچنین خطوط مستقیم موازی در مقاطع دانه‌ها، نشان‌دهندهٔ اعمال چکش‌کاری و تغییر شکل پلاستیک است.

در ناحیهٔ C، علاوه‌بر مس و قلع، مقادیر زیادی گوگرد و آهن ثبت شد که احتمال تشکیل ترکیبات سولفیدی مانند کالکوپریت و پیروتیت را نشان می‌دهد (Klein et al., 1993). این یافته‌ها نمایانگر خوردگی پیشرفته و تأثیر محیط دفن بر ترکیب سطحی فلز است. ناحیهٔ D، افزایش نسبی قلع، کاهش مس و مقدار بالای اکسیژن را نشان می‌دهد که نشانهٔ اکسیداسیون و خوردگی سطحی است. این تغییرات، همراه با حضور مقادیر کم عناصری مانند سیلیسیم و منیزیم، احتمال نفوذ عناصر محیطی از خاک و سنگ‌های اطراف را تأیید می‌کند. در مجموع، آنالیز SEM-EDS نشان می‌دهد نمونه علاوه‌بر اینکه یک آلیاژ برنز قلعی نسبتاً خالص و کنترل‌شده است، تحت‌تأثیر فرایندهای محیطی شامل قلع‌زدایی، خوردگی درونی، اکسیداسیون سطحی و نفوذ عناصر ثانویه قرار گرفته است. این تحلیل همچنین امکان تطبیق فناوری ساخت با نمونه‌های مشابه در دیگر محوطه‌های ایران را فراهم می‌کند و نشان می‌دهد تکنیک‌های تولید برنز در دورهٔ مدنظر، کنترل دقیق بر نسبت عناصر و مراحل چکش‌کاری و بازپخت را شامل شده است (Scott, 2002, 225).

– نمونهٔ سه (3-167TA)

آنالیز SEM-EDS نمونه در پنج نقطهٔ مشخص A تا F و ماتریکس انجام شد تا ترکیب عناصر، ناخالصی‌ها و وضعیت فلز بررسی شود. نتایج نشان می‌دهد نمونه شامل آلیاژ نقره- مس است و نسبت عناصر در نقاط مختلف، تنوع فازی و اثرات محیطی را آشکار می‌کند. ناحیهٔ A، ترکیب غالب شامل نقره با درصد بالا و مقدار اندکی مس و قلع است. حضور اکسیژن و کربن محدود نشان می‌دهد سطح این ناحیه کمترین خوردگی را تجربه کرده و فلز تقریباً خالص باقی مانده است. در ناحیهٔ B علاوه‌بر نقره و مس، درصد زیادی کلسیم مشاهده شد که می‌تواند ناشی از تأثیر محیط خاک و تشکیل بی‌کربنات کلسیم باشد (Huang et al., 2021). این نشان می‌دهد واکنش‌های شیمیایی خاک می‌توانند ترکیب سطحی نمونه را تغییر دهند. در نواحی C و D، ترکیب عناصر نشان‌دهندهٔ وجود آلیاژ یوتکتیک نقره- مس است. در این مناطق، ساختار دوفازی شامل صفحات ریز فاز آلفا و فاز بتای پراکنده در میان یکدیگر مشاهده می‌شود. فاز آلفای اولیه می‌تواند به‌صورت دندریت‌های مغزدار یا دانه‌های محلول جامد ظاهر شود و پرکنندهٔ دور دانه‌ها ترکیبی از فازهای یوتکتیک آلفا و بتا است. این ویژگی‌ها نشان می‌دهد سرعت سردشدن و کنترل دمای ذوب در فرایند تولید، شکل و ویژگی‌های فازی آلیاژ را تعیین کرده است (Scott, 1991). در ناحیهٔ E، درصد بالای نقره همراه با عدم حضور اکسیژن و شواهد خوردگی، بیانگر سطح فلزی تقریباً خالص و بدون اکسیداسیون است. در ناحیهٔ F و ماتریکس، حضور بالای نقره و درصد بالای مس نشان می‌دهد این بخش نمونه به‌عنوان یک شیء نقره‌ای تولید شده است. ماتریکس فلز نیز ترکیب نقره- مس یکنواخت دارد و اثرات محیطی و خوردگی در آن محدود است. درمجموع، تحلیل SEM-EDS نشان می‌دهد نمونه‌ها شامل آلیاژ نقره- مس با کنترل دقیق ترکیب عناصر و ویژگی‌های فازی یوتکتیک هستند (تصویر ۹). نمونهٔ نقره-مس به‌دست‌آمده بیانگر



تصویر ۹. بررسی ساختار فلزی، محصولات خوردگی و آنالیز نمونهٔ شمارهٔ سه (3-167TA) به کمک میکروسکوپ الکترونی با مُد BSE با بزرگنمایی ۴۰۰ برابر اندازه‌گیری شده است. مأخذ: نگارندگان.

آن است که فلزکاران باستان با کنترل دقیق ترکیب عناصر و بهره‌گیری از ویژگی‌های فازی یوتکتیک، به آلیاژی هم‌زمان سخت، بادوام و زیبا دست یافته‌اند. زیرا نقرهٔ خالص به‌دلیل نرمی زیاد برای ساخت اشیای کاربردی و زینتی کافی نبود، درحالی‌که افزودن مس موجب افزایش سختی و دوام آن می‌شد. افزودن مس به نقره علاوه‌بر افزایش استحکام، امکان ذوب و ریخته‌گری آسان‌تر و ایجاد ساختار ریزدانه و سطحی براق را فراهم می‌کرد. این شواهد به‌خوبی نشان می‌دهد صنعتگران نه‌تنها به مواد خام دسترسی داشتند بلکه به‌طور تجربی نسبت‌های بهینه را می‌شناختند و با بهره‌گیری از آن‌ها توانسته بودند آلیاژی مناسب برای تولید زیورآلات و اشیای هنری فراهم آورند. در پژوهش انجام‌شده روی نمونه‌های مطالعه‌شده، همان‌طور که قبلاً ذکر شد، یکی از اشیا از جنس نقره و دو نمونهٔ دیگر از جنس مفرغ هستند. در دو نمونهٔ مفرغی، میزان قلع و مس تقریباً برابر بوده و آلیاژسازی به‌صورت یکنواخت و کنترل‌شده انجام شده است؛ امری که بیانگر دست‌یابی به فناوری پیشرفته در فرایند تولید آلیاژ و نشان‌دهندهٔ سطح بالای دانش فنی در متالورژی باستان است. چنین شواهدی نه‌تنها گویای تسلط صنعتگران بر اصول آلیاژسازی و کنترل ترکیب شیمیایی فلزات است بلکه بیانگر وجود شبکه‌های انتقال دانش فنی و مهارت‌های فلزکاری در دوره‌ای است که جوامع ایلامی و کوچ‌نشینان جنوب غرب ایران در تبادلات فرهنگی و اقتصادی فعالی قرار داشتند. وجود آثار چرخه‌های متوالی کار سرد و بازپخت در مقاطع فلزی نیز نشان می‌دهد صنعتگران با درک مناسبی از رفتار مکانیکی فلزات، عملیات حرارتی را برای بهبود شکل‌پذیری و افزایش استحکام نهایی قطعات به‌کار گرفته‌اند. این یافته‌ها، کنار داده‌های باستان‌شناختی، امکان بازسازی فنون ساخت و درک عمیق‌تری از سطح مهارت و سازماندهی فناوری فلزکاری در پیش‌تاریخ ایران را فراهم می‌سازند. همچنین، اطلاعات به‌دست‌آمده قابلیت ارزیابی و مقایسهٔ ویژگی‌های ترکیب شیمیایی و ریزساختاری با نمونه‌های هم‌دوره در سایر محوطه‌های ایران را فراهم می‌کند.

• فلوئورسانس اشعهٔ ایکس XRF

طیف‌سنجی فلوئورسانس اشعهٔ ایکس (XRF) یکی از روش‌های متداول و غیرتخریبی برای تعیین ترکیب عنصری کمی و کیفی مواد است. این روش قادر است درصد عناصر موجود در نمونه‌ها را با دقت مناسب شناسایی کند و برای انواع سنگ‌ها، مواد معدنی، رسوبات و نمونه‌های فلزی کاربرد دارد. اساس کار XRF بر اندازه‌گیری فلورسانس ثانویه ناشی از تابش اشعهٔ ایکس اولیه به نمونه است. هر عنصر دارای طیف فلورسانس منحصربه‌فردی است که به‌عنوان «اثر انگشت» آن عنصر شناخته می‌شود. در این پژوهش، آنالیز XRF با استفاده از دستگاه μ-XRF ساخت شرکت Unisantis S.A، مدل XMF-104 انجام شد. نمونه‌ها تحت ولتاژ ۳۵ کیلوولت و جریان ۴۰۰ میکروآمپر برای مدت ۳۰۰ ثانیه در شرایط هوا اندازه‌گیری شدند. نرم‌افزار Smart XRF برای پردازش داده‌ها و تعیین درصد عناصر به کار گرفته شد. استفاده از μ-XRF برای نمونه‌های باستانی چند مزیت مهم دارد: اول، این روش غیرتخریبی است و هیچ آسیبی به نمونه‌ها وارد نمی‌کند؛ دوم، امکان اندازه‌گیری دقیق عناصر سبک و سنگین و تعیین توزیع آن‌ها در نقاط مختلف نمونه فراهم می‌شود؛ سوم، داده‌های حاصل از XRF قابلیت مقایسه با نمونه‌های مشابه در سایر محوطه‌های باستانی را دارد و می‌تواند اطلاعات ارزشمندی دربارهٔ فن تولید و انتخاب مواد اولیه ارائه دهد. بااین‌حال، محدودیت‌هایی نیز وجود دارد؛ مثلاً حساسیت μ-XRF به عناصر بسیار سبک (مانند هیدروژن و لیتیم) محدود است و عمق نفوذ اشعه در نمونه‌های فلزی زیاد نیست، بنابراین اطلاعات به‌دست‌آمده بیشتر مربوط به سطح و لایه‌های خارجی نمونه است. علاوه‌بر این، حضور خوردگی، رسوب خاک یا پوشش‌های اکسیدی می‌تواند بر دقت اندازه‌گیری درصد عناصر تأثیر گذارد. بااین‌حال، با آماده‌سازی مناسب سطح نمونه و انتخاب نقاط مختلف، این روش همچنان یکی از مطمئن‌ترین و پرکاربردترین ابزارهای آنالیز عنصری در مطالعات فلزگری باستانی محسوب می‌شود.

نتایج آزمون فلورسانس پرتوی ایکس (XRF) در نمونه‌های ۱۲۴ و ۲۵۱، میزان مس بالاتری را نسبت به آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM-EDS) نشان می‌دهد، درحالی‌که میزان نقره در نمونهٔ ۱۶۷ در مقایسه با داده‌های حاصل از آزمون SEM کمتر است. هم‌چنین، مقدار ۱/۵۷ درصد طلا در این نمونه شناسایی شد که احتمالاً ناشی از وجود پوشش طلا بر سطح اثر در زمان آزمون طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتوی ایکس در میکروسکوپ الکترونی روبشی بوده است. مقدار ۱/۵۷ درصد طلای شناسایی‌شده در این نمونه، به‌احتمال زیاد منشأ سطحی و تکنولوژیک دارد و بخشی از ترکیب اصلی آلیاژ محسوب نمی‌شود. در روش میکروسکوپ الکترونی روبشی به‌دلیل عمق نفوذ بسیار محدود پرتو (چند میکرون)، ترکیب شیمیایی به‌دست‌آمده عمدتاً بازتاب‌دهندهٔ ویژگی‌های لایه‌های سطحی است. بنابراین، چنین میزان فلز طلا

می‌تواند ناشی از کاربرد لایه‌ای بسیار نازک طلا درزمان ساخت اثر برای افزایش جلوه و ارزش آن باشد. هم‌چنین، امکان دارد این مقدار، حاصل بقایای طلاکاری فرسوده باشد که هم‌چنان به‌صورت ذرات ریز در لایه‌های خوردگی یا رسوبات سطحی باقی مانده‌اند. سناریوی دیگر، انتقال ذرات طلا از اشیای مجاور یا رسوبات محیط دفن به سطح اثر است. در هر صورت، وجود چنین درصدی طلا در نتایج EDS الزاماً نشان‌دهندهٔ حضور طلا در ترکیب کلی آلیاژ پایه نیست. علاوه‌بر این، میزان مس موجود در ماتریس این نمونه، براساس داده‌های XRF بیش‌از مقداری است که در آزمون SEM گزارش شده است. به نظر می‌رسد نتایج حاصل از آزمون XRF به‌دلیل ماهیت کمی آن، اعتبار بیشتری نسبت به آزمون نیمه‌کمی میکروسکوپ الکترونی روبشی دارد. ازنظر باستان‌شناسی، داده‌های کمی XRF امکان برآورد دقیق‌تر نسبت‌های عناصر اصلی آلیاژ را فراهم می‌کند و بدین ترتیب می‌توان ویژگی‌های تکنولوژیکی آثار، ازجمله انتخاب ترکیب آلیاژی و کنترل نسبت مس به عناصر آلیاژی را با اطمینان بیشتری بررسی کرد. این اطلاعات برای تحلیل سطح فناوری فلزکاری، مقایسه با دیگر محوطه‌های هم‌دوره و بررسی تغییرات احتمالی در شیوه‌های تولید و انتخاب مواد در دورهٔ فرهنگی مطالعه‌شده اهمیت دارد.

بحث

بررسی‌ها و مشاهدات ریزساختارشناسی در نمونه‌های اول و دوم، شواهد مهمی از به‌کارگیری چرخه‌های منظم عملیات مکانیکی و حرارتی در فرایند ساخت اشیا را ارائه می‌دهد. دانه‌های تخت و کشیده، خطوط لغزش، آثار بازپخت و ترک‌های تنشی در مقاطع فلزی نشان صنعتگران از توالی کنترل‌شدهٔ چکش‌کاری سرد یا نیمه‌گرم و حرارت‌دهی‌های بازپخت متناوب استفاده کرده‌اند. تخت و کشیده‌شدن دانه‌ها ناشی از اعمال تغییرشکل پلاستیک است و خطوط لغزش داخل دانه‌ها، اثر مستقیم چکش‌کاری را نشان می‌دهد. وجود آثار بازپخت، حکایت از آگاهی صنعتگران نسبت به اصول کنترل تنش‌های درونی و افزایش قابلیت شکل‌دهی مجدد فلز دارد، درحالی‌که ترک‌های تنشی، احتمالاً ناشی از اعمال کار مکانیکی شدید بدون بازپخت کافی یا سردشدن سریع پس از حرارت‌دهی است. علاوه‌بر این، خوردگی‌های مرزدانه‌ای و درون‌دانه‌ای مشاهده‌شده بیانگر ناهمگنی نسبی ترکیب آلیاژ و فعالیت انتخابی خوردگی در امتداد مرزدانه‌ها است. بررسی ریزساختار دیگر نمونهٔ سوم نشان داد آلیاژ مطالعه‌شده شامل دو فاز اصلی محلول جامد است: فاز α (محلول جامد مس غنی از نقره) و فاز β (محلول جامد نقرهٔ غنی از مس). فاز β عمدتاً به‌صورت ذرات پراکنده در مرز دانه‌های فاز α مشاهده می‌شود. حضور نقره در فاز α (محلول جامد مس غنی از نقره) موجب افزایش مقاومت مکانیکی آلیاژ ازطریق سخت‌شدن محلول جامد و کاهش انرژی کرنش شبکهٔ بلوری می‌شود. این مکانیسم، به‌ویژه در حضور توزیع یکنواخت نقره در داخل دانه‌های α، باعث افزایش دمای تبلور مجدد آلیاژ می‌گردد. نمونه‌های بررسی‌شده ساختار یوتکتیک کلاسیک α+β را نشان می‌دهند که مطابق نمودار فازی Ag–Cu، دمای یوتکتیک حدود ۷۷۹ درجهٔ سانتی‌گراد ترکیب آن تقریباً ۷۲ درصد نقره است. در طول سردشدن از حالت مایع، فازهای α و β به‌صورت همزمان رسوب می‌کنند و ناحیهٔ دوفازی α+β شکل می‌گیرد. در دماهای پایین‌تر، حلالیت متقابل عناصر کاهش یافته و فاز α عمدتاً مس غنی و فاز β نقرهٔ غنی می‌شود. این کاهش حلالیت منجر به تشکیل ذرات پراکنده فاز β در مرز دانه‌های α می‌شود که ریزساختار مشخص یوتکتیک را شکل می‌دهد. توزیع فازهای پراکنده و اندازهٔ دانه‌ها، به‌طور مستقیم بر رفتار مکانیکی آلیاژ، ازجمله سختی، مقاومت به خمش و پاسخ به عملیات حرارتی و مکانیکی، تأثیر می‌گذارد. علاوه‌بر این، الگوهای کشیده و خطوط جدایش فازها در ریزساختار نشان‌دهندهٔ تأثیر مستقیم فرایندهای مکانیکی مانند چکش‌کاری، تاب‌کاری و بازپخت بر تغییر شکل پلاستیک و بهینه‌سازی خواص مکانیکی آلیاژ است. این ویژگی‌ها، کنار کنترل دقیق ترکیب شیمیایی و نسبت عناصر، تأیید می‌کند که صنعتگران توانسته‌اند با تسلط بر رفتار ترمودینامیکی سامانه، آلیاژهایی با ریزساختار پایدار و خواص مکانیکی مناسب تولید کنند که هم برای کاربردهای تزیینی و هم کاربردهای عملکردی دوام بالایی داشته باشد. نتایج XRF وSEM-EDS، هم‌خوانی زیادی را با این مشاهدات نشان می‌دهد. در نمونهٔ ۱۶۷، میزان نقره حدود ۶۵/۷۵ درصد و مس ۶۳/۲۱ درصد گزارش شده و ۱/۵۷ درصد طلا نیز شناسایی شد که به احتمال زیاد ناشی از پوشش سطحی یا ذرات پراکندهٔ طلا در لایه‌های خوردگی است و ترکیب اصلی آلیاژ پایه محسوب نمی‌شود. تفاوت بین داده‌های XRF و SEM-EDS، ماهیت کمی و نیمه‌کمی این روش‌ها را نشان می‌دهد؛ XRF ترکیب ماتریس آلیاژ را به‌صورت کمی و کلی ارائه می‌دهد، درحالی‌که SEM-EDS به‌دلیل نفوذ محدود، عمدتاً ویژگی‌های سطحی و ذرات پراکنده را اندازه‌گیری می‌کند. داده‌های XRF همچنین نشان‌دهندهٔ یکنواختی و کنترل دقیق نسبت عناصر اصلی در نمونه‌های برنز ۱۲۴ و ۲۵۱ است و درصد قلع تقریباً یکسان (۱۰-۱۳ درصد) بیانگر دقت بالای فرایند آلیاژسازی و تسلط صنعتگران بر ترکیب شیمیایی است. ریزساختار نمونه‌ها همچنین نشان می‌دهد صنعتگران توانسته‌اند با استفاده از چرخه‌های مکانیکی و حرارتی، دانه‌بندی یکنواخت، پراکندگی مناسب فاز β و خواص مکانیکی بهینه را ایجاد کنند. نقاط روشن و تاریک‌کشیده، جدایش فازهای α و β و الگوهای یوتکتیک، شواهد مستقیمی از اعمال کنترل‌شدهٔ چکش‌کاری، تاب‌کاری و بازپخت است. این یافته‌ها با مطالعات پیشین درخصوص آلیاژهای نقره- مس هم‌خوانی دارد و نشان می‌دهد تسلط بر خواص ذوب، انجماد و رفتار ترمودینامیکی سامانه، نقش کلیدی در تولید اشیا با کیفیت بالا و دوام طولانی داشته است

(Scott, 1991, 12–13). در جدول ۳، ترکیب شیمیایی (میانگین عناصر اصلی)، نوع آلیاژ، ویژگی‌های ریزساختاری و ملاحظات فن‌شناسی و تاریخی به‌دست‌آمده از چند محوطهٔ تاریخی شامل هفت‌تپه، سنگ‌تراشان، قلاگپ، سنجر به‌صورت خلاصه و مقایسه‌ای تنظیم شده است.

در واقع می‌توان گفت ازنظر ترکیب آلیاژ، اشیای تاج‌امیر ازنظر نسبت قلع (۱۰-۱۳ درصد) و وجود جزئی نقره، از برنزهای متداول عیلامی پیشرفته‌تراند. حضور Ag در برخی نمونه‌ها نشان‌دهندهٔ تمایل به افزایش سختی و زیبایی سطحی است. در محوطه‌های عیلامی، آلیاژها اغلب قلع‌دار با درصد پایین‌تر (۲-۸ درصد) یا آرسنیک‌دارند و از لحاظ ریزساختار در تاج‌امیر، وجود ساختار یوتکتیک (Cu–Ag) (α+β) و شواهد چکش‌کاری و بازپخت‌های متوالی، بیانگر فناوری پیشرفته‌تر و کنترل آگاهانه بر فرایندهای مکانیکی است، درحالی‌که در محوطه‌های عیلامی، ساختارها عمدتاً بازتبلور یافته یا دانه‌ریز ساده‌اند. از جنبهٔ تکنولوژی ساخت، صنعتگران تاج‌امیر از چرخه‌های حرارتی و مکانیکی دقیق (چکش‌کاری و تاب‌کاری منظم) برای بهینه‌سازی خواص مکانیکی استفاده کرده‌اند. این سطح از مهارت، فراتر از آن چیزی است که در محوطه‌های هم‌دورهٔ جنوب غربی ایران (عیلام) دیده می‌شود و از منظر جنبه‌های فرهنگی و منطقه‌ای به نظر می‌رسد فلزکاران تاج‌امیر از شبکه‌های انتقال دانش متالورژی جنوب غرب ایران تأثیر گرفته‌اند اما فناوری محلی خود را در جهت تولید آلیاژهای سخت‌تر و مقاوم‌تر توسعه داده‌اند. به‌طور کلی، این شواهد متالوگرافی و شیمیایی نشان می‌دهد اشیای بررسی‌شده حاصل به‌کارگیری دانش فنی بالا و مهارت عملی صنعتگران در دوران باستان هستند. کنترل نسبت عناصر، انتخاب روش‌های مکانیکی و حرارتی و ایجاد ریزساختار یکنواخت و پایدار، نمایانگر درک عمیق خواص شیمیایی و مکانیکی فلزات و استفادهٔ آگاهانه از تکنیک‌های پیشرفتهٔ فلزکاری در تولید اشیای کاربردی و تزیینی است.

جدول ۳. بررسی تطبیقی ویژگی‌های آلیاژی و ریزساختاری اشیای فلزی گورستان تاج‌امیر دهنو، یاسوج با برخی محوطه‌های عیلامی جنوب غرب ایران. مأخذ: نگارندگان.

محوطه	قدمت	ویژگی‌های ریزساختاری	نوع آلیاژ	دیگر عناصر	نیکل (%)	سرب (%)	نقره (%)	آرسنیک (%)	قلع (%)	مس (%)
هفت‌تپه	میانهٔ هزارهٔ دوم پ.م	–	برنز قلع‌دار و کم‌قلع	فسفر جزئی	≥ ۰/۷	۰/۶-۱/۹	–	–	۰/۲- ۴/۶	۹۵-۹۸
سنگ‌تراشان	میانه تا اواخر هزارهٔ دوم پ.م	دانه‌ریز، خطوط لغزش و بازتبلور؛ شواهد کار مکانیکی	برنز قلع‌دار	فسفر و روی، آنتیموان جزئی	≤۰/۴	۰/۶-۰/۸	<۱	۰/۳-۰/۷	۹-۱۳	۸۶-۹۱
قلاگپ	میانهٔ هزارهٔ دوم پ.م	دانه‌ریز، خطوط لغزش، بازتبلور؛ در برخی فاقد ساختار Cu–Sn	برنز قلع‌دار و مس آرسنیک‌دار	–	–	۰/۵<	–	۲/۰<	۱/۳- ۳/۶	۶۹-۸۳
سنجر	میانه تا اواخر هزارهٔ دوم پ.م	ساختار دانه‌ریز و بازتبلور؛ در برخی فاقد فاز δ	برنز قلع‌دار و مس آرسنیک‌دار	–	–	–	–	۰/۲<	۱۸-۰	۹۵-۷۴
تاج‌امیر دهنو، یاسوج	نیمهٔ دوم هزارهٔ دوم پ.م	دانه‌های تخت و کشیده، خطوط لغزش، بازپخت، فازهای α و β یوتکتیک Ag–Cu، بازتبلور کنترل‌شده	برنز قلع‌دار و آلیاژ نقره-مس	آنتیموان روی و آهن، فسفر جزئی	۰/۰۶- ۰/۵۸	۰/۰۲-۰/۶۸	تا ۷۵/۶ در نمونهٔ مس-نقره	۰/۳- ۰/۷	۱۳-۹	با SEM–EDS ۷۵-۹۹ با 74XRF- 88

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از تجزیه‌وتحلیل نمونه‌های فلزی به‌دست آمده از گورستان تاج امیر نشان داد دو نمونه از این مجموعه، از آلیاژ برنز قلعی ساخته شده‌اند، به‌طوری‌که عناصر اصلی آن‌ها مس و قلع هستند. درصد قلع در این دو نمونه تقریباً بین ۱۲ تا ۱۳ درصد است و تفاوت مهمی میان آن‌ها مشاهده نمی‌شود که این امر می‌تواند نشان‌دهندهٔ کنترل دقیق و آگاهانهٔ فلزکاران بر نسبت عناصر آلیاژ در طول فرایند تولید باشد. این میزان کنترل در تعیین کیفیت مکانیکی، سختی و قابلیت شکل‌دهی آلیاژ اهمیت فراوان داشته و بیانگر درک عمیق صنعتگران آن دوره از خواص فیزیکی و شیمیایی فلزات است. علاوه‌بر عناصر اصلی، مقادیر اندکی از عناصر ثانویه و ناخالص شامل روی، گوگرد، آهن، آنتیموان، سرب و آرسنیک در ساختار نمونه‌ها مشاهده شد که احتمالاً ناشی از ناخالصی‌های طبیعی موجود در سنگ معدن یا فرایندهای استخراج و ذوب فلزات است. حضور این عناصر، اگرچه به مقدار کم است، نشان‌دهندهٔ چالش‌های متالوژیکی آن دوره و محدودیت‌های منابع اولیهٔ فلزی در منطقه است و می‌تواند اطلاعاتی مهم دربارهٔ شیوهٔ استخراج، فرآوری و انتخاب مواد اولیه در اختیار پژوهشگران قرار دهد. مطالعات متالوگرافی و مشاهدات میکروسکوپی مقاطع طولی و عرضی نمونه‌ها نشان داد ساختار آن‌ها شامل دانه‌های بازتبلوریافتهٔ تک‌فاز همراه با خطوط دوقلویی و خطوط کرنش است. این ویژگی‌ها نشان‌دهندهٔ استفاده از فرایندهای مکانیکی پیشرفته، ازجمله سردکاری و تاب‌کاری، برای شکل‌دهی فلزات است. ظروف و ورقه‌های فلزی ازطریق چکش‌کاری کنترل‌شده، فرم داده شده‌اند که باعث ایجاد سختی ناشی از کارسرد و توزیع یکنواخت تنش در شبکهٔ بلوری می‌شود. این ریزساختارهای حاصل، علاوه‌بر بازتاب مهارت عملی بالای صنعتگران، نشان‌دهندهٔ آگاهی آن‌ها از تأثیر تغییرات میکروسکوپی بر خواص مکانیکی مانند مقاومت به خمش، سختی و دوام اشیا است. خطوط کشیدگی و کرنش در ریزساختار، علاوه‌بر تأیید روش‌های مکانیکی، می‌تواند نشان‌دهندهٔ تلاش صنعتگران برای افزایش مقاومت سطحی و جلوگیری از شکست در طول استفاده یا دفن نیز باشد. نمونهٔ سوم با درصد بالای نقره (حدود ۸۷/۱۸ درصد) مشخص شد و بنابراین می‌توان آن را به‌عنوان یک شی نقره‌ای یا غنی‌شده از نقره طبقه‌بندی کرد. تحلیل متالوگرافی این نمونه نشان داد در ساختار آن کشیدگی‌های روشن و تاریک و جدایش مشخص آلیاژ مس و نقره وجود دارد که نمایانگر کنترل دقیق فرایند چکش‌کاری و انتخاب آگاهانهٔ ترکیب عناصر بوده است. ریزساختار این نمونه شامل دانه‌های فاز α نقرهٔ خالص و مناطق یوتکتیک حاوی مخلوطی از نقره و مس است که حاکی از درک مهندسی پیچیده از خواص ذوب و انجماد آلیاژها بوده و نشان می‌دهد، تولیدکنندگان توانسته‌اند با توجه به کاربرد مدنظر، انتخاب آگاهانه‌ای در ترکیب عناصر و نسبت آن‌ها انجام دهند. نتایج فلورسانس اشعهٔ ایکس نشان می‌دهد یوتکتیک شامل حدود ۷۵/۶۵ درصد نقره و ۲۱/۶۳ درصد مس بوده است که بیانگر دقت بالا در کنترل نسبت عناصر و تولید نمونه‌های با کیفیت است. یافته‌ها نشان می‌دهد فلزکاران آن دوره با آگاهی از تأثیر ناخالصی‌ها، فرایندهای حرارتی و مکانیکی، توانسته‌اند محصولاتی بادوام و مقاوم در برابر خوردگی و تغییرات محیطی ایجاد کنند که تا هزاران سال پس از دفن، بخشی از ساختار اصلی خود را حفظ کرده‌اند. همچنین وجود عناصر ثانویه و درصد کنترل‌شدهٔ قلع در نمونه‌ها نشان می‌دهد انتخاب منابع معدنی و فرآوری آن‌ها به‌صورت آگاهانه انجام شده است و دسترسی به منابع فلزی در منطقه یا پیرامون محل دفن فراهم بوده است.

بااین‌حال، برای تأیید کامل این فرضیه، نیاز به اطلاعات باستان‌شناختی و زمین‌شیمیایی دقیق‌تر وجود دارد. نتایج حاصل از بررسی نمونه‌های گورستان تاج امیر نشان می‌دهد اشیای مطالعه‌شده از آلیاژهای مس- نقره با ریزساختار یوتکتیک α+β تشکیل شده‌اند. ترکیب شیمیایی و پراکندگی ذرات فاز β در مرز دانه‌های فاز α، حاکی از کنترل نسبی ترکیب آلیاژ و تسلط صنعتگران بر فرایندهای ذوب و شکل‌دهی است. این یافته‌ها نشان می‌دهد صنعتگران گورستان تاج‌امیر توانایی در کنترل ترکیب آلیاژها داشته و با استفاده از تکنیک‌های پیشرفتهٔ فلزکاری، آلیاژهایی با خواص مکانیکی مناسب و ریزساختار پایدار ایجاد کنند، بدون اینکه بتوان ادعاهای گسترده‌ای دربارهٔ شبکه‌های تبادلات یا سبک زندگی جامعهٔ مربوطهٔ مطرح کرد. این داده‌ها همچنین امکان پاسخ به پرسش‌های اصلی پژوهش را فراهم می‌کنند. ترکیب شیمیایی و نسبت عناصر آلیاژی نشان می‌دهد اشیا عمدتاً از آلیاژهای مس-نقره با ریزساختار یوتکتیک α+β تشکیل شده‌اند و پراکندگی یکنواخت فاز β در مرز دانه‌ها و حلالیت محدود عناصر، کنترل دقیق نسبت آلیاژ را تأیید می‌کند. تفاوت‌های جزئی در ریزساختار، اندازه و توزیع ذرات فاز β، حکایت از تنوع محدود در مهارت و دقت صنعتگران در فرایندهای ذوب و شکل‌دهی دارد اما سطح کیفی اشیا به‌طور کلی بالا و یکنواخت است. علاوه‌بر این، بررسی ریزساختار و ترکیب عناصر نشان می‌دهد فلزکاران توانسته‌اند آلیاژهایی با خواص مکانیکی مناسب و ریزساختار پایدار ایجاد کنند که نشان‌دهندهٔ درک عمیق آن‌ها از تأثیر تغییرات میکروسکوپی بر دوام و عملکرد اشیا است. همچنین، حضور عناصر ثانویه و کنترل نسبت قلع در نمونه‌های برنز، سرنخ‌هایی محدود دربارهٔ منشأ مواد اولیه و انتخاب منابع معدنی ارائه می‌دهد، هرچند برای تأیید کامل شبکه‌های مبادلات یا مسیرهای تأمین فلزات، نیاز به داده‌های باستان‌شناختی و زمین‌شیمیایی جامع‌تر وجود دارد. نمونه‌های فلزی بررسی‌شده نه‌تنها ارزش کاربردی و تزیینی دارند بلکه بازتابی از دانش فنی و مهارت‌های صنعتی، شناخت دقیق فرایندهای فلزکاری و آگاهی از خواص عناصر و اثرات محیطی بر دوام آن‌ها نیز محسوب می‌شوند. این مطالعه، فراتر از بررسی ترکیب شیمیایی و ریزساختار آلیاژها، می‌تواند به درک بهتر فنون

پیشرفتهٔ فلزکاری و مهارت‌های تکنیکی جامعه‌ای که این اشیا را تولید کرده است کمک کند و نقش فناوری فلزکاری با کاربردهای روزمره و آیینی را به‌روشنی نشان دهد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله لازم می‌دانند از حمایت‌های ریاست محترم دانشگاه در فراهم‌شدن بستر مناسب پژوهش و مطالعه کمال تشکر را نمایند.

اعلام عدم تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که در انجام این پژوهش هیچ‌گونه تعارض منافعی برای ایشان وجود نداشته است.

پی‌نوشت‌ها

۱. در ریزساختارشناسی، اچ‌کردن مرحله‌ای شیمیایی برای آشکارسازی ریزساختار است. با استفاده از محلول‌های اسیدی مناسب (مثلا نیتریک اسید رقیق در الکل)، مرزدانه‌ها، فازها و آخال‌ها برجسته می‌شوند. سطح نمونه پیش‌از اچ باید صیقلی باشد و زمان و غلظت محلول دقیق کنترل شود تا ریزساختار بدون آسیب دیده شود. پس از اچ، نمونه با میکروسکوپ نوری یا SEM بررسی می‌شود تا تکنیک ساخت و ویژگی‌های فلز تحلیل شود.

فهرست منابع

• Artioli, G. (2010). *Scientific methods and cultural heritage: an introduction to the application of materials science to archaeometry and conservation science.* Oxford University Press.

• Bakhshandehfard, H., Barani, F., & Sardari, A. (2025). Study of ancient metallurgy on metal artifacts belonging to the Elamite sites of Sanjar hill in Khuzestan and Qalagap hill in Lurestan. *Founding Research Journal*, *9*(1). https://doi.org/10.22034/frj.2025.492662.1206

• Bakhshandehfard, H., Pourzarghan, V., & Emami, M. (2024). Application of electrochemical methods to assess the stability and investigation of factors influencing the ancient copper-arsenic artefacts from 3rd Millennium BC. *Archaeological and Anthropological Sciences, 16*(7), 109. https://doi.org/10.1007/s12520-024-02014-4

• Caron, R. N., Barth, R. G., & Tyler, D. E. (2004). Metallography and microstructures of copper and its alloys. In *Metallography and Microstructures* (pp. 775-788). ASM International.

• Ghezelbash, E., Jafari, M. J., Rajabi, N., & Mohammadkhani, K. (2016). Archaeological excavation at Taj Amir cemetery, Yasouj. *Journal of Archaeological Studies, 8*(1), 171–190. https://doi.org/10.22059/jarcs.2016.59501

• Gravand, M., Bakhshandehfard, H., & Sajadi, A. (2019). A study on the manufacturing techniques of bronze objects from Tepee Foroodgah and Sangtarashan ancient sites of Khorramabad, Luristan. *Journal of Archaeological Studies, 11*(2), 245-260. https://doi.org/10.22059/jarcs.2019.73180

• Helwing, B. (2021). Patterns of early metallurgy on the Iranian Plateau, from the beginnings to the end of the Bronze Age. In C. Marro & T. Stöllner (Eds.), *On Salt, Copper and Gold: The Origins of Early Mining and Metallurgy in the Caucasus* (pp. 201–229). MOM Editions. https://doi.org/10.4000/books.momeditions.12567

• Huang, Y. C., Rao, A., Huang, S. J., Chang, C. Y., Drechsler, M., Knaus, J., ... & Gebauer, D. (2021). Uncovering the role of bicarbonate in calcium carbonate formation at near-neutral pH. *Angewandte Chemie International Edition, 60*(30), 16707-16713. https://doi.org/10.1002/anie.202104002

• Klein, C., Hurlbut, S., & Cornelius, S. J. (1993). *Manual of mineralogy (after James D. Dana)*. John Wiley & Sons.

• Khodabakhshi, F., Bakhshandefard, H., & Agha-Aligol, D. (2019). Experimental and microscopic studies of some copper alloy objects from the Biregan Archeological site of Kouhrang, Second millennium BC. *Journal of Research on Archaeometry. 5*(2), 149-167. http://dx.doi.org/10.29252/jra.5.2.149

• Oudbashi, O., Emami, S. M., & Davami, P. (2012). Bronze in archaeology: a review of the archaeometallurgy of bronze in ancient Iran. *Copper Alloys-early Applications and Current Performance-Enhancing Processes*, 161-186.

• Oudbashi, O., & 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. https://doi.org/10.22059/jarcs.2016.59499

• Oudbashi, O., & Hessari, M. (2017). Iron Age tin bronze metallurgy at Marlik, Northern Iran: An analytical investigation. *Archaeological and Anthropological Sciences, 9*, 223–249. https://doi.org/10.1007/s12520-015-0280-1

• Palizvan, S., Oudbashi, O., Mortazavy, M., & Hasanpour, A. (2021). A Study on composition and manufacturing method of bronze pins from Dia Ardizi of Moorani Iron age site, Luristan. *Archaeological Research of Iran, 11*(28), 73-92. https://doi.org/10.22084/nbsh.2020.15185.1698

• Pornak, P., Bakhshandefard, H. R., & Noroozi, A. A. (2024). Study and conservation of four metal earrings were found from: the Tepe Zaghe the Dam4-Karun excavation (article taken from the treatise). *Parseh Archaeological Studies, 8*(28), 141-167. http://dx.doi.org/10.22034/PJAS.8.28.141

• Petersen, G. G. (2010). *Mining and Metallurgy in Ancient Perú*. Geological Society of America.

• Rahimi, G., & Vahdati, A. A. (2016). The Iron Age cemetery of Taj Amir, southwestern Iran. *Journal of Archaeological Research and Conservation Science, 3*(2), 101–120. https://www.miladrahimi.ir/1400/03/12

• Robbiola, L., Blengino, J. M., & Fiaud, C. (1998). Morphology and mechanisms of formation of natural patinas on archaeological Cu–Sn alloys. *Corrosion Science, 40*(12), 2083-2111. https://doi.org/10.1016/S0010-938X(98)00096-1

• Scott, D. A. (1991). *Metallography and microstructure of ancient and historic metals.* Getty Conservation Institute.

• Scott, D. A. (2002). *Copper and bronze in art: Corrosion, colorants, conservation.* Getty Conservation Institute.

• Weeks, L. (2004). *Early metallurgy of the persian gulf: Technology, trade, and the bronze Age world.* Brill Academic Publishers.

• Zuo, X., Han, K., Zhao, C., Niu, R., & Wang, E. (2015). Precipitation and dissolution of Ag in ageing hypoeutectic alloys. *Journal of Alloys and Compounds, 622*, 69-72. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.10.037

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

COPYRIGHTS
Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to journal of Art and Civilization of the Orient. This is an open-access article disributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

نحوه ارجاع به این مقاله
توکلی نسب، الهام و بخشنده‌فرد، حمیدرضا. (۱۴۰۵). مطالعات آزمایشگاهی بر روی آلیاژ و ریزساختارشناسی اشیای فلزی از گورستان تاج‌امیر (دهنو) یاسوج، متعلق به هزارهٔ دوم پیش‌از میلاد. *مجلهٔ هنر و تمدن شرق*، ۱۴(۵۱)، ۱۶-۳۱.

DOI: 10.22034/jaco.2025.540548.1488
URL: https://www.jaco-sj.com/article_235261.html