



مطالعات آزمایشگاهی و میکروسکوپی برخی اشیاء از جنس آلیاژ

مس مکشوفه از محوطه بیرگان کوه‌رنگ، هزاره دوم قبل از میلاد

فاطمه خدابخشی^۱، حمیدرضا بخشنده فرد^{۲*}، داوود آقا علی گل^۳

۱. دانش‌آموخته ارشد مرمت اشیاء تاریخی و فرهنگی دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران

۲. استادیار گروه مرمت اشیاء فرهنگی و تاریخی دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران

۳. آزمایشگاه وندوگراف، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۰۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۲۳

چکیده

محوطه KR385 در منطقه بیرگان در شهرستان کوه‌رنگ استان چهارمحال و بختیاری در سومین فصل بررسی باستان‌شناختی شهرستان کوه‌رنگ در سال ۱۳۸۹ شناسایی شد و تعدادی آثار فلزی و سفالی از گورهای شماره ۱ و ۲ این محوطه به دست آمد. آثار فلزی به دست آمده از این محوطه باستانی از نظر باستان‌شناسی و فلزگری کهن، نمونه‌های جالب‌توجهی هستند. مطالعات تطبیقی باستان‌شناسی انجام شده نشان داد که، محوطه‌های باستانی KR385 مربوط به هزاره دوم قبل از میلاد است. در این مقاله پنج شیء فلزی مکشوفه از این محوطه مورد مطالعات آزمایشگاهی قرار گرفته است. به منظور شناخت نوع آلیاژ، ترکیب شیمیایی آلیاژها و فنون ساخت اشیاء از مطالعات میکروسکوپی و روش‌های دستگاهی شامل رادیوگرافی با اشعه ایکس، متالوگرافی، SEM-EDS و Micro-PIXE استفاده شد. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که اشیای به دست آمده از آلیاژ برنز (Cu-Sn) با درصد متفاوت قلع یا اشیاء ساخته شده از Cu-As مس آرسنیک هستند. بررسی ریزساختاری اشیاء بیانگر آن است که در شکل‌دهی آثار این محوطه باستانی از عملیات فلزگری شامل چکش‌کاری و ریخته‌گری استفاده شده است.

واژگان کلیدی: محوطه بیرگان کوه‌رنگ، برنز قلع، آلیاژ مس-آرسنیک، متالوگرافی، چکش‌کاری، ریخته‌گری

*مسئول مکاتبات: خیابان حکیم نظامی، روبروی خیابان خاقانی، دانشگاه هنر اصفهان

پست الکترونیکی: hr.bakhshan@aui.ac.ir

«این نشریه با احترام به قوانین اخلاق در نشریات تابع قوانین کمیته اخلاق در انتشار (COPE) است و از آیین‌نامه اجرایی قانون پیشگیری و مقابله با تقلب در آثار علمی پیگیری می‌نماید.»

۱. مقدمه

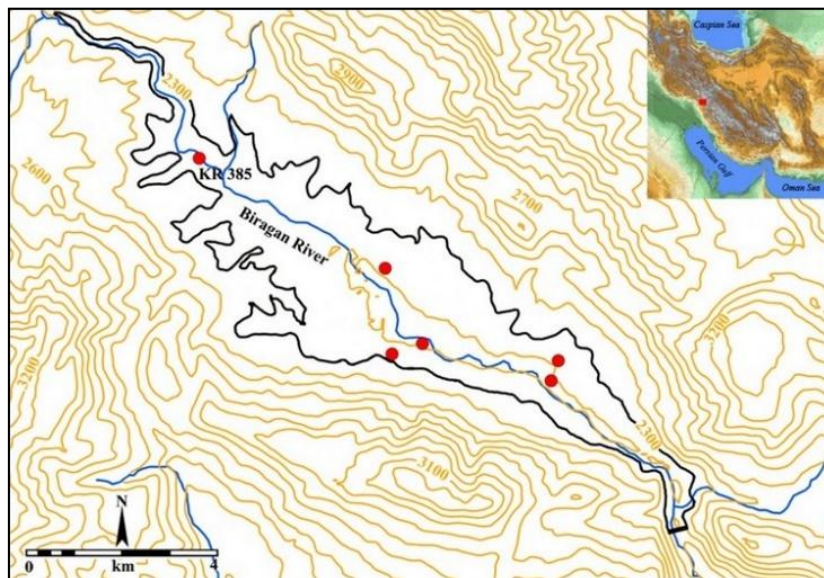
کاوش در بیرگان، بخشی از پروژه نجات‌بخشی محوطه‌های باستانی پشت سد و تونل سوم کوه‌رنگ محسوب می‌شود. بررسی‌های باستان‌شناختی در این منطقه از سال ۱۳۸۶ آغاز شده و در طی آن، ده‌ها محوطه باستانی و تعداد زیادی اشیاء تاریخی کشف شده است [1]. محوطه‌های باستانی منطقه بیرگان کوه‌رنگ از نظر گاهنگاری، طیف گوناگونی را در برمی‌گیرد؛ از گورستان‌های قاجاریه و پهلوی گرفته تا محوطه‌های استقرایی عصر نوسنگی. در این منطقه چندین مرحله کاوش صورت گرفته است و نام یکی از محوطه‌های باستانی آن KR385 است که منسوب به هزاره دوم قبل از میلاد است. تاریخ‌گذاری این محوطه بر اساس مطالعه تطبیقی اشیاء کشف‌شده از این محوطه با مناطق همجوار هم عصر (مثل خوزستان، لرستان و...) انجام شده است [2]. در کاوش‌های صورت گرفته در این منطقه، تدفین انسانی و حیوانی، آثار سفالی، فلزی شامل اشیاء مفرغی و آهنی به‌دست‌آمده است که می‌توان آن‌ها را قسمتی از منابع اطلاعاتی اولیه به‌دست‌آمده از یک محوطه باستان‌شناسی به حساب آورد [3]. از این محوطه تنها شش شیء از آلیاژ مس به‌دست‌آمده است که از لحاظ تاریخی، فرهنگی و فرم و شکل نمونه‌های جالب‌توجه و باارزشی هستند که با ظرافت خاصی ساخته شده‌اند. فناوری تولید و استفاده از آلیاژهای مس به‌منظور ساخت اشیاء مختلف با کاربرد متفاوت از ویژگی‌های فلزگری عصر آهن در نقاط مختلف ایران است. آثار مکشوفه از محوطه بیرگان یکی از مجموعه‌های شاخص فلزگری عصر آهن است.

از آنجایی که مطالعات انجام گرفته در این منطقه و آثار مکشوفه بیشتر در قالب گزارش‌های حفاری است و بررسی‌ها و پژوهش‌های انجام یافته در این منطقه بیشتر مشمول پژوهش‌های باستان‌شناسی با هدف بررسی ارزش و غنای مواد فرهنگی و تاریخی این منطقه بوده است و تاکنون مطالعه تخصصی ساختاری، فن‌شناسی به‌صورت مستقل و با استفاده از روش‌های دستگامی و آزمایشگاهی بر روی اشیاء مکشوفه فلزی به‌دست‌آمده

از این منطقه صورت نگرفته است، اهمیت این محوطه و مطالعه و حفاظت از آثار باستانی آن را دوچندان می‌کند. بر این اساس هدف این مقاله شناخت آلیاژهای فلزی و تکنیک فلزکاری هزاره دوم قبل از میلاد در این منطقه است که در آن با بررسی و مطالعه دقیق فن‌شناسانه به شناخت مواد تشکیل‌دهنده و شیوه ساخت اشیاء پرداخته شده است، به این منظور از روش متالوگرافی، SEM-EDS، micro-PIXE و رادیوگرافی استفاده شده است. با توجه به اینکه اشیاء مورد مطالعه کوچک بوده و نمونه‌برداری از آن‌ها مشکل بود سعی شده است تا حد امکان از روش‌های غیرتخریبی برای مطالعه این اشیاء استفاده شود.

۲. منطقه بیرگان و محوطه KR385

بیرگان در فاصله ۲۰ کیلومتری چلگرد مرکز شهرستان کوه‌رنگ واقع شده است [1]. این منطقه از نظر مختصات جغرافیایی بین مدار ۳۲ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۲۰ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۲۰ دقیقه طول شرقی قرار گرفته است [4]. منطقه بیرگان، جزء مناطق اصلی بیلاقی‌های عشایر بختیاری است. زندگی یکجانشینی در سال ۱۳۱۲ شکل گرفته است و تا قبل از آن تمامی استقرارها از نوع کوچ‌نشینی بوده است [5]. از طرفی اکثر محوطه‌های باستانی شناسایی شده در منطقه آبیگری سد کوه‌رنگ از نوع کوچ‌نشینی است [6]. با وجود این امروزه دره‌ی رودخانه‌ی بیرگان یکی از پرتراکم‌ترین نواحی منطقه از نظر وجود ماندگاه‌های باستانی کوچ‌نشینی در منطقه‌ی کوه‌رنگ است [7]. محوطه‌ی KR385 در سومین فصل بررسی باستان‌شناختی شهرستان کوه‌رنگ در سال ۱۳۸۹ توسط احمد آزادی، باستان‌شناس پژوهشکده‌ی باستان‌شناسی، حفاری شد. این محوطه توسط تیم بررسی‌کننده با نام گورهای سنگ‌چین بیرگان ۱ نیز نامیده شده است. هدف اصلی این پژوهش به دست آوردن بیشترین اطلاعات ممکن از ماهیت این محوطه و بررسی فنی آثار مورد کاوش قبل از آب‌گیری سد کوه‌رنگ و غرق شدن آن‌ها بوده است. محوطه



شکل ۱: نقشه منطقه مخزن سد کوه‌رنگ و محوطه‌های کاوش شده در فصل سوم [4]

Fig. 1: Map of the Kouhrang dam reservoir area and drilling sites in the third chapter

پیکان و سنجاق بوده که همگی از گور شماره‌ی ۱ (لوکوس ۳۰۸، محتویات چاله گور) به‌دست آمده‌اند. هم‌چنین یک قطعه آویز تزئینی از گور شماره‌ی ۲ (لوکوس ۳۱۱، محتویات چاله گور) یافت شد. افزون‌بر آن، یک قطعه مهره‌ی مفرغی کوچک از لوکوس ۳۰۸ (گور شماره‌ی ۱) به‌دست آمده است. سه قطعه از اشیاء به‌دست آمده از جنس آهن بوده که همگی مربوط به گور شماره ۱ و لوکوس ۳۰۸ هستند. این اشیاء شامل سنجاق، سنجاق به همراه زنجیر و سرپیکان بوده که در وضعیت اکسیدشده به‌دست آمده‌اند [8].

۳. پیشینه پژوهش

مطالعات انجام‌شده در محوطه بیرگان کوه‌رنگ محدود به مطالعات باستان‌شناختی است [۱،۴،۵،۶،۸،۹]. در زمینه فن‌شناسی مطالعات داخلی و خارجی متعددی انجام‌شده است. این مطالعات که بر روی اشیاء فلزی متفاوت از آلیاژ مس با روش‌های مختلف صورت گرفته است، نتایج متفاوتی را در برداشته است. مطالعات انجام‌شده بر روی سنجاق‌های میله‌ای حاصل از کاوش‌های منطقه چپ‌سبزه‌غربی لرستان و مطالعات دیگر که در گورستان عصر آهن باباجیلان پیشکوه لرستان انجام شد، نشان‌دهنده ساخت اشیاء از آلیاژ برنز با

در دهستان بیرگان، روی یکی از پایین‌ترین کوهپایه‌های شرقی زردکوه به نام مازه جوو سرد و ۲/۸ کیلومتری شمال‌غرب روستای بیدامین شهریاروی روی خط مستقیم واقع شده است [7]. رود بیرگان در فاصله حدود ۵۰ متری شمال محوطه با جهت تقریبی غربی - شرقی جریان دارد (شکل ۱).

بر اساس کاوش‌های صورت گرفته در محوطه KR385 دو گور باستانی (گور شماره ۱ و ۲) شناسایی شده است که علاوه بر تدفین انسانی و حیوانی، ظروف سفالی هم در آن مشاهده شده است. حاصل کاوش از این دو گور، ظروف و سفال‌هایی با سبک و سیاق یکسان است که در مقابل نیم‌تنه‌ی فوقانی و مقابل زانوهای خم‌شده قرار گرفته بودند. از این دو تدفین، افزون بر ظروف سفالی، اشیاء فلزی به همراه مهره‌های سنگی به‌دست آمده که تمامی این اشیاء به‌جز یک آویز مفرغی از گور شماره ۱ یافت شده است. نمونه‌های این محوطه مربوط به هزاره دوم قبل از میلاد است [2,8]. اشیاء فلزی به‌دست آمده از لحاظ جنس، شامل دو گروه اشیاء مفرغی و آهنی است که خود نیز دارای تقسیم‌بندی ریزتر بر اساس نوع و کاربری شیء است. شش عدد از اشیاء به‌دست آمده از جنس مفرغ بوده که شامل: آویز به شکل پرنده، آویز و مهر استامپی به شکل سرگوزن، سر

منطقه‌ی جنوب خاوری ایران را با یکدیگر و همچنین با سایر مراکز باستانی در فلات ایران و مناطق همجوار قابل تحلیل بیان نمودند [17]. فیگوریدو و همکارانش به منظور شناخت ترکیب مواد و تکنولوژی ساخت گل‌میخ‌های فلزی مربوط به اواخر عصر برنز، استفاده از برنز دوتایی در اواخر عصر برنز در این منطقه و ارتباط تکنولوژی ساخت جدید که منتج از فعل‌وانفعالات محیط باستانی بود را تأیید کردند [18]. مرور مطالب بالا نشان می‌دهد که علیرغم اینکه مطالعات پراکنده‌ای در خصوص آثار فلزی محوطه‌های باستانی هم‌جوار صورت گرفته ولی در زمینه آثار این محوطه باستانی مطالعات کمی صورت گرفته و غالب آن‌ها در زمینه مطالعات باستان‌شناختی است که اهمیت انجام این پژوهش را چندین برابر می‌کند.

۴. مواد و روش پژوهش

نمونه‌های موردبررسی در این پژوهش شامل پنج شیء فلزی هستند که از محوطه KR385 منطقه بیرگان کوه‌رنگ به‌دست‌آمده‌اند. شیء شماره ۱، آویز مفرغی به شکل پرنده با کد KR-1 که طول آن ۳/۳ cm و حداکثر ضخامت آن ۱ cm است. این آویز به شکل پرنده انتزاعی بوده و از وضعیت ظاهری سالمی برخوردار است. شیء شماره ۲، آویز و مهر استامپی با کد KR-2 به شکل سرگوزن بوده و کف آن شامل یک مهر استامپی است که طرح آن به شکل گل چهار پر است. طول آن ۲/۷cm و حداکثر ضخامت آن ۰/۶ cm است. شیء شماره ۳، سر پیکان مفرغی با کد KR-3 که طول آن ۴/۸ cm و حداکثر ضخامت آن ۰/۳ cm است. این سر پیکان از دو قسمت زبانه و تیغه تشکیل شده است که در وسط تیغه سر پیکان یک برآمدگی دیده می‌شود. شیء شماره ۴، سنجاق با کد KR-4 که طول آن ۶/۹ و حداکثر ضخامت در شیء ۰/۳ cm است. این سنجاق که از دو قسمت تشکیل شده است شامل سر سنجاق که گرد بوده و قسمت دوم شامل میله عمودی است. در قسمت وسط این سنجاق خمیدگی نیز دیده می‌شود. شیء شماره ۵، قطعه آویز تزئینی با کد KR-5 تقریباً به شکل ماهی که از دو ورقه نازک متقارن تشکیل شده است که

درصدهای مختلف قلع و مس خالص است که در ساخت آن‌ها از عملیات پیوسته چکش‌کاری و تابکاری استفاده شده است [10,11]. در یکی دیگر از این تحقیقات، برخی از جنبه‌های کاربردی عملیات حرارتی مورد استفاده در تولید اشیاء مسی و آلیاژ مس-قلع تاریخی و باستانی موردبررسی قرار گرفته است که استفاده از تابکاری و کار سرد را برای اشیاء مسی، برنجی و مفرغی نشان داده است و به این نتیجه رسیده‌اند که کار سرد برنزه‌های قلع بالا مانع شکل‌گیری فاز ترد بین فلزی شده و قابلیت کارایی آن را بهبود بخشیده است [12]. مطالعات انجام شده بر روی اشیاء مسی تپه سگزآباد دشت قزوین شواهدی از ادامه استفاده از مس خالص و آلیاژ مس-آرسنیک در کنار آلیاژ مس-قلع در فلات ایران در اوایل عصر آهن را نشان داده است [13].

در یکی دیگر از این بررسی‌ها که بر روی ترکیب شیمیایی تعدادی از اشیاء محوطه عصر آهن مارلیک انجام شده است، تولید مفرغ با درصدهای متفاوت قلع در نمونه‌های مختلف مشاهده شده است که دلیل آن را استفاده از روش‌های فراوری و آلیاژسازی غیرکنترلی، مانند فراوری توأم سنگ معدن‌های مس و قلع یا سماتنه کردن بیان نمودند [14]. طبق مطالعاتی که بر روی اشیاء فلزی تپه بازگیرگران صورت گرفت، مشخص شد که آثار موردبررسی آلیاژ Cu-AS بوده که با ریخته‌گری ساخته شده‌اند [15]. یداللهی و همکاران نیز نوع آلیاژ، ترکیب شیمیایی و تکنیک ساخت الگوهای به‌دست‌آمده از کورگان هشت جعفرآباد مربوط به عصر آهن II را موردبررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که آلیاژ به‌کاررفته مفرغ بوده و ریزساختار آن‌ها بیانگر فرایندی پیوسته از چکش‌کاری و تابکاری بوده که رادیوگرافی نیز چکش‌کاری این آثار را ثابت کرده است [16]. حاصل مطالعات یآوری و همکاران بر روی سه شیء آلیاژی عصر مفرغ مکشوفه از بخش جنوبی حوضه هلیل‌رود جیرفت، حاکی از ساخت اشیاء به‌وسیله چکش‌کاری سرد و گرم از آلیاژ Cu-As و مس تقریباً خالص حاوی مقادیر جزئی عناصر دیگر بود. گونه‌شناسی این اشیاء و مشابهت فنی و ساختاری آن‌ها، ارتباط بین محوطه‌های باستانی



شکل ۲: اشیاء فلزی مورد مطالعه، از راست به چپ و از بالا به پایین: نمونه KR-1، KR-2، KR-3، KR-4 و KR-5
 Fig. 2: Metal objects studied, from right to left and from top to bottom: samples KR-1, KR-2, KR-3, KR-4 and KR-5

رزین اپوکسی برای تهیه مقاطع صیقلی، به منظور دستیابی به سطح صیقلی به سنباده‌زنی مقدماتی نمونه‌ها با کاغذ دارای دانه‌بندی از درشت به ریز به ترتیب ۲۴۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰ و در نهایت صیقل‌دهی مقاطع توسط پنبه آغشته به خمیر الماسه با اندازه دانه‌های الماس ۶، ۳، ۱، ۰/۲۵ میکرون انجام شد. در این پژوهش به منظور شناسایی فنون به کاررفته در ساخت نمونه‌ها و همچنین شناسایی ریزساختار با SEM مطالعه شد. شناخت ریزساختار نمونه فلزی قبل و بعد از حکاکی با این روش در بزرگنمایی‌های بالا امکان‌پذیر می‌شود [19,20,21]. از نمونه‌ها قبل از اچ با بزرگنمایی‌های مختلف تصاویری گرفته شد، سپس جهت مشاهده ریزساختار نمونه‌ها و شناسایی روش ساخت و شکل‌دهی آن‌ها، نمونه‌ها با استفاده از محلول کلرید آهن III الکلی حکاکی شدند [21]. از میکروسکوپ SEM برای مشاهده ریزساختار در بزرگنمایی‌های مختلف و آنالیز شیمیایی فازهای موجود در ریزساختار نمونه‌ها استفاده شد [22]. برای این منظور از میکروسکوپ الکترونی روبشی (FE-SEM)، مدل MIRA III، ساخت شرکت TESCAN، جمهوری چک، مجهز به دستگاه طیف‌سنجی تفرق اشعه ایکس (EDS) مدل SAMx ساخت کشور فرانسه جهت آنالیز استفاده شد.

بر روی هم قرار گرفته‌اند و اتصال قسمت نوک شیء با زمان و قرارگیری در محیط دفن از هم جدا شده است (شکل ۲).

با نظر به منحصربه‌فرد بودن این آثار از نظر ویژگی‌هایی نظیر فرم، شکل و کوچک بودن آن‌ها، سعی شد که این آثار بدون نمونه‌برداری و به روش نیمه‌تخریبی مورد مطالعه قرار گرفته که به منظور حفاظت اشیاء از رطوبت و عوامل آسیب‌رسان و تشدیدکننده خوردگی و همچنین استحکام بخشی به منظور جلوگیری از آسیب به پاتین نوبل یا نجیب، نمونه‌ها به وسیله قلم‌مو، با لایه نازکی از پارالوئید ۳٪ پوشانده شدند. سپس قالب مانت را آماده نموده و ترکیب سیلیکون آماده شده را داخل آن ریخته و پس از آن هر شیء در یک قالب حاوی مایع سیلیکون قرار داده شد. پس از آن که سیلیکون سفت شد، نمونه‌ها را از داخل قالب مانت خارج ساخته و سپس به منظور ثابت کردن نمونه‌ها از رزین اپوکسی استفاده شد. پس از ۲۴ ساعت، نمونه‌ها از داخل قالب‌های مانت بیرون آورده شد و برای تهیه مقطع متالوگرافی آماده شدند. استفاده از سیلیکون به این دلیل بود که بعد از انجام آنالیزهای کمی و کیفی لازم بتوان نمونه را به راحتی و بدون کوچک‌ترین آسیبی از داخل رزین جدا نمود. پس از تثبیت نمونه‌ها در سیلیکون و سپس در

اینکه مواد در جذب و عبور پرتوها رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهند [25]. این آنالیز با استفاده از دستگاه رادیوگرافی مدل ۶۳۰ میلی‌آمپر شیماتزو و تریکسل فرانسه، در بیمارستان آیت‌الله کاشانی اصفهان انجام شد.

۵. نتایج و بحث

۵-۱. مطالعات رادیوگرافی

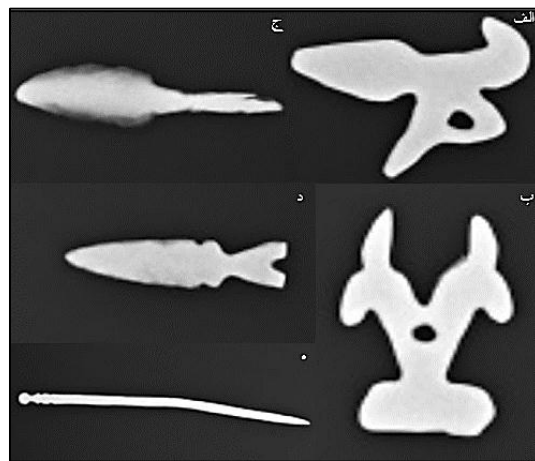
عکس برداری با پرتوایکس یا رادیوگرافی، توانایی درک ویژگی‌های درونی شیء را در اختیار حفاظت‌گران و مرمت‌گران قرار می‌دهد [26]. بدین منظور رادیوگرافی در شرایط کاری ۶۰ mA/s، ۶۰ شدت جریان ۱۰۰ mA و ولتاژ ۵۰ kV انجام شد. بر اساس تصاویر به‌دست‌آمده اشیای مورد مطالعه فاقد تزیین بوده و اتصالی در آن‌ها مشاهده نشد که این امر نشانگر یکپارچه بودن یا ساخت این اشیا به صورت یک‌تکه است. با توجه به تصاویر همه آثار دارای مغز فلزی و بدون ترک یا ریزترک بوده و روشن بودن تصاویر و عدم وجود تیرگی در آن‌ها به دلیل خوردگی بسیار کم در آثار مورد مطالعه است. با توجه به رنگ روشن در تصاویر می‌توان گفت که ضخامت و چگالی این اشیا بالا بوده و فقط در شیء KR-3 (سر پیکان)، تیرگی‌های لبه مشهود است که ناشی از چگالی کم ماده در این قسمت است (شکل ۳).

تصویر حاصل از پرتونگاری اشعه‌ی ایکس شامل نقاط تیره و روشن است که اختلاف میزان عبور اشعه‌ی ایکس از نقاط متفاوت این اشیا را نشان می‌دهد. اختلاف میزان عبور پرتوایکس متناسب با چگالی موجود در هر قسمت است. در نتیجه نواحی با چگالی بیشتر، قدرت جذب بیشتری دارند و به رنگ روشن‌تر دیده می‌شوند و نواحی با چگالی کمتر، تیره‌تر ظاهر می‌شوند. اختلاف چگالی که منجر به ایجاد نواحی روشن و تیره می‌شود در این اشیا کم است که دلیل آن ضخامت یکسان در بیشتر این اشیا است و تنها در لبه‌های کناری و انتهای دسته سر پیکان اختلاف بیشتر دیده می‌شود که دلیل آن خوردگی شدید در این قسمت‌ها است. دلیل دیگر آن می‌تواند چکش‌کاری غیریکنواخت این شیء باشد، به این ترتیب که قسمت‌هایی که بیشتر چکش‌کاری

به منظور تشخیص عناصر تشکیل‌دهنده‌ی آلیاژ و تعیین مقدار نسبی آن‌ها، از روش میکروپیکسی (طیف‌سنجی نشر پرتوایکس القائی با باریکه پروتون میکرونی) استفاده شد. در این روش آنالیز، نمونه مورد بررسی تحت تابش ریز باریکه پروتونی قرار می‌گیرد. در اثر برخورد پروتون با اتم‌های هدف، پرتو X مشخصه‌ای از عناصر تشکیل‌دهنده گسیل می‌شود که انرژی پرتو X، نوع عنصر حاضر در نمونه و شدت پرتوهای X با انرژی مشخص، غلظت عنصر در نمونه را مشخص می‌کند. مزیت عمده روش micro-PIXE دقت در حد ppm، غیرتخریبی بودن آن، عنصری بودن آن و امکان انجام بررسی‌ها در اتمسفر معمولی و یا گاز هلیوم روی نمونه‌های بزرگ و شکننده است [23]. در این پژوهش از باریکه پروتون با انرژی ۲/۵ MeV و با شدتی در حدود ۱۰۰-۵۰ pA که توسط شتاب‌دهنده واندوگراف ۳MV آزمایشگاه واندوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای تولید می‌شود، استفاده شد. قطر باریکه‌ی پروتون در این آزمایش در حدود ۱۰ میکرون تنظیم شده است. برای آشکارسازی اشعه X (Micro-PIXE) از آشکارساز Si(Li) با توان تفکیک ۱۵۰ eV، که در زاویه‌ی ۱۳۵ درجه نسبت به پرتوهای پروتون فرودی قرار گرفته، برای اندازه‌گیری کمی و کیفی عناصر موجود در نمونه‌ها استفاده شد. طیف‌های به‌دست‌آمده برای به دست آوردن ترکیب عنصری نمونه‌ها با استفاده از نرم‌افزار GUPIXWIN پردازش شدند. به دلیل محدودیت ابعادی قسمت صیقل شده برخی از نمونه‌ها (از جمله کوچک بودن اندازه اثر، فرم و خاص بودن آن‌ها از لحاظ پاتین)، این آنالیز روی بخش‌های صیقل یافته نمونه‌های KR-3 و KR-4 و KR-5 و در نمونه‌های KR-1 و KR-2 فقط بخش‌های صیقل نشده (پاتین) مورد آزمایش قرار گرفت. در ادامه از رادیوگرافی اشعه ایکس برای تعیین ضخامت نسبی نواحی مختلف اشیا، آگاهی از وجود اتصال و تزیینات و تعیین فناوری ساخت اشیا استفاده شد [24]. رادیوگرافی روش غیرتخریبی است که متناسب با ضخامت، چگالی و عدد اتمی عناصر، مقداری از پرتو X را جذب و مقداری از آن را عبور می‌دهد ضمن

می‌تواند به دلیل مجاورت اشیای آهنی در کنار اشیای مورد مطالعه در محل دفن باشد. در واقع حضور آهن در ساختار خوردگی این دو شی به دلیل یون آهن وارد شده از محیط اطراف اشیاء و از خاک محصور با شیء است. عناصر دیگر به صورت جزئی شناسایی شدند که احتمالاً می‌توانند از فرایند استحصال سنگ معدن وارد ترکیب آلیاژ شده باشند [۲۵، ۲۷، ۲۸]. در نمونه KR-3 بخش صیقل شده که مربوط به مغز فلزی شی است ۹۶/۰۸٪ مس و ۱/۷۵٪ آرسنیک به عنوان عناصر اصلی مشاهده می‌شود که می‌توان آن را به عنوان آلیاژ مس-آرسنیک مورد توجه قرار داد. وجود حدود ۱/۵٪ As در آنالیز مقطع فلزی می‌تواند مربوط به وجود آرسنیک همراه با مس در رگه‌های سنگ معدن باشد که غیر معمول نیز به نظر نمی‌رسد. تأثیر آرسنیک بر خواص مس در ترکیب آلیاژی در غلظت‌های پایین چشمگیر نیست. معمولاً در بسیاری از آلیاژهای مس باستانی در فلات ایران آرسنیک مشاهده شده است. آلیاژ مس-آرسنیک را می‌توان اولین آلیاژ استفاده شده در ایران دانست که تقریباً از اواخر هزاره پنجم ق.م مشاهده شده است [29].

لکتمن (1996) آلیاژ مس آرسنیک را به سه دسته تقسیم‌بندی کرده است: مس آرسنیک (کمتر از تقریباً ۱/۰٪ آرسنیک)، برنز آرسنیک با آرسنیک کم (حدود ۱/۰ تا ۵ wt٪ آرسنیک) و برنز آرسنیک (۵/۰ تا حدود ۷ wt٪ آرسنیک) که در واقع غلظت آرسنیک را در آلیاژهای مس-آرسنیک در مفهوم عام بیان می‌کند [30]. آرسنیک یک ناخالصی است که حذف آن از مس مذاب در فرایند فراوری متالورژی مشکل است [31]. مس آرسنیک ریخته‌گری شده حاوی مقادیر آرسنیک بیشتری (۳ تا ۵ wt٪) نسبت به اشیاء مس آرسنیک کار شده هستند. این ممکن است به خاطر انجام کار روی



شکل ۳: تصویر رادیوگرافی نمونه‌های الف) KR-1، ب) KR-2، ج) KR-3، د) KR-4، ه) KR-5. مشخصات: ۶۰ میلی‌آمپر بر ثانیه، شدت جریان ۱۰۰ میلی‌آمپر و ولتاژ ۵۰ کیلوولت

Fig. 3: Radiographic image of samples: a) KR-1, b) KR-2, c) KR-3, d) KR-4, E: KR-5. 50KV, 100mA, 60 mA/s

۵-۲. ترکیب شیمیایی اشیاء

به منظور آگاهی از ترکیب شیمیایی اشیاء مورد مطالعه و اندازه‌گیری درصد وزنی عناصر تشکیل دهنده آن‌ها از روش micro-PIXE استفاده شد. نتایج آنالیز شیمیایی نمونه‌ها بر حسب درصد وزنی در جدول ۱ آورده شده است. با توجه به جدول شماره ۱ نمونه‌های KR-1 و KR-2 به ترتیب دارای ۳۶/۵۵ و ۳۹/۴۳ wt٪ مس و ۵۵/۸۴ و ۴۸/۶۲ wt٪ قلع هستند. در این دو نمونه تنها بخش صیقل نشده (پاتین) مورد آنالیز قرار گرفته است. آنالیز پاتین درصد بالای اکسید قلع به جای مانده حاصل از انحلال مس را در سطح نشان می‌دهد که البته با درصد عناصر زمینه اصلی متفاوت است ولی نتیجه هر دو نشان‌دهنده برنز قلع دار است. به طور کلی ترکیب این دو نمونه مس و قلع بوده که همان برنز یا مفرغ است. حضور نسبتاً بالای آهن در نتایج آنالیز این دو نمونه

جدول ۱: نتایج آنالیز micro-PIXE نمونه‌ها (Wt%)

Table 1: Results of micro-PIXE analysis of samples in term (Wt%)

Element	Cu	Sn	As	Pb	Fe	P	Ag	S	Cl	Si	Zn	Al
KR-1(unpolished)	36.55	55.84	0.13	0.39	2.63	0.68	0.27	0.35	0.33	3.24	0.22	0.36
KR-2(unpolished)	39.43	48.62	0.25	0.00	6.15	1.05	0.00	0.15	0.35	3.14	0.34	0.52
KR-3(polished)	96.08	0.00	1.75	0.00	0.24	0.00	0.00	1.08	0.08	0.53	0.24	0.00
KR-4(polished)	82.02	14.62	0.00	0.00	0.3	0.58	0.2	0.16	0.16	1.59	0.37	0.00
KR-5(polished)	87.38	9.36	0.31	0.29	0.12	0.66	0.11	0.21	0.06	1.2	0.3	0.00

زمینه پراکنده‌اند. حفره‌های سیاه‌رنگ در کل سطح نمونه دیده می‌شود. در برخی نقاط به‌خصوص لبه‌های نمونه که خوردگی بیشتر وجود دارد نیز شبه ساختارهای دندریتی به رنگ سیاه دیده می‌شود (شکل ۴- الف تا ج). در بعضی از لایه‌های خوردگی می‌توان جزئیات ساختاری مرتبط با ریزساختار فلزی خورده شده در طول زمان دفن را مشاهده نمود. این نوع ساختار به ساختار رد یا ساختار ریخت‌واره‌ای معروف است که در لایه پاتین بسیاری از برنزهای باستانی به شکل دندریت‌ها یا دانه‌های خورده شده دیده شده است. در این حالت فلز به محصولات خوردگی تبدیل می‌شود اما ساختار متالورژیکی اولیه را در خود حفظ می‌نماید [36,37]. این پدیده این‌گونه توصیف می‌شود که هنگامی که برنز خورده می‌شود، قلع فوراً به شکل اکسید رسوب می‌کند و به همین علت ساختار دندریتی با واکنش جایگزینی حفظ می‌شود [38]. این نوع ساختار خوردگی تنها در داخل ساختار شی خورده شده و زیر سطح اصلی آن قابل مشاهده است و در محصولات خوردگی که به دلیل فرایند انحلال و رسوب مجدد بر سطح رویی شیء ایجاد می‌شوند، قابل مشاهده نیست [27].

در متالوگرافی نمونه‌های KR-3، KR-4 و KR-5 تصویر نمونه قبل از حکاکی درزمینه‌ی روشن نشان‌دهنده‌ی ماتریس طلائی‌رنگ است. آخال‌های به رنگ خاکستری در کل سطح زمینه پراکنده‌اند. در نمونه KR-3 آخال‌های کشیده در امتداد طولی که در ریزساختار مشاهده می‌شود، دلیل دیگری از چکش کاری در فرایند تولید این شیء است [39]. حفره‌های سیاه‌رنگ به میزان اندک در بخش‌هایی از سطح نمونه‌ها دیده می‌شود که مربوط به خوردگی است (شکل ۴- د، ه، ی).

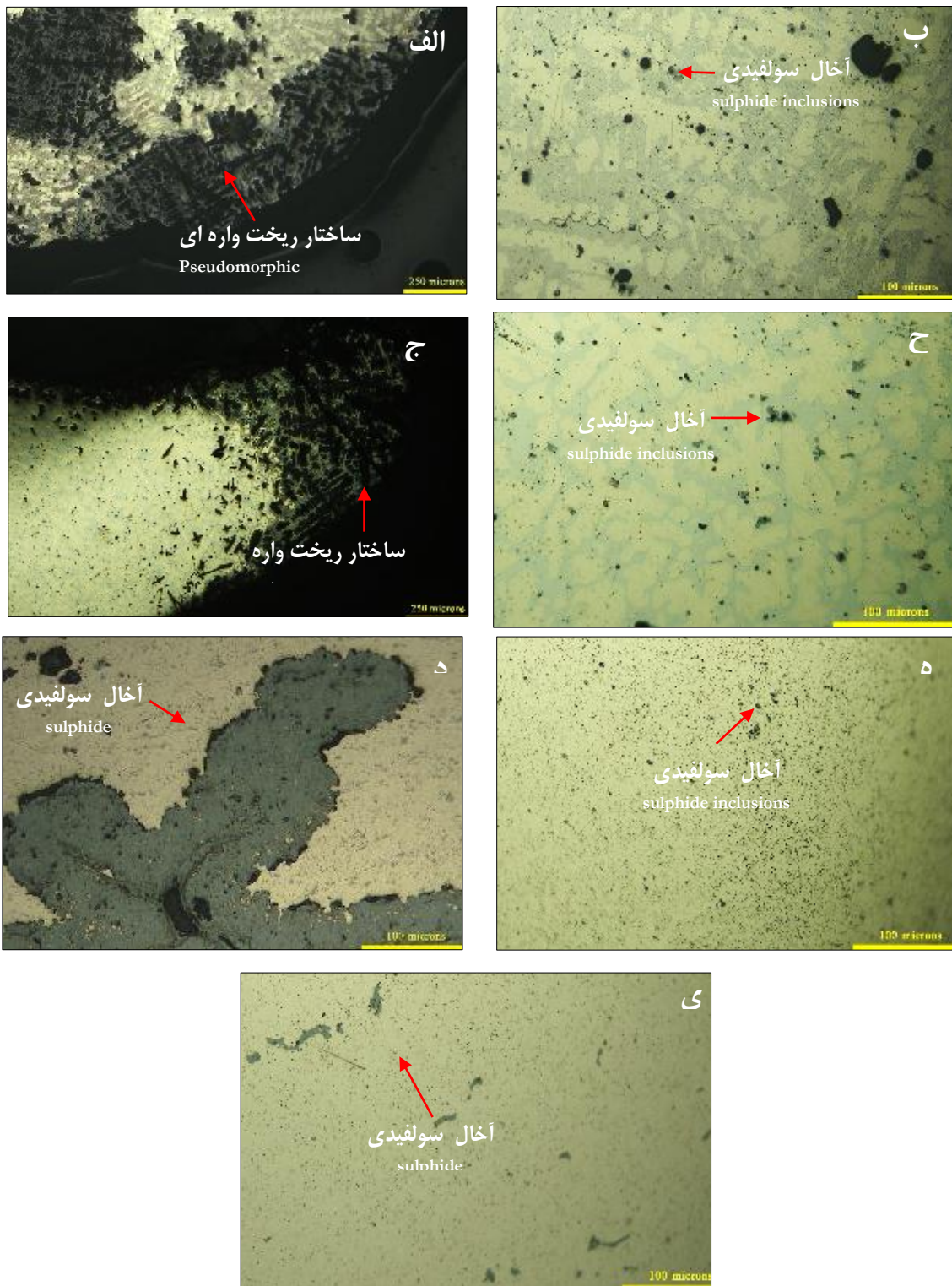
تصویر نمونه‌های KR1 و KR2 بعد از حکاکی نشان‌دهنده ساختار دندریتی است که شامل دندریت‌های مغزه دار شده بوده که حاکی از ساخت این دو شیء با استفاده از روش ریخته‌گری است. علاوه بر فاز آلفای دندریتی، ساختار یوتکتوئید $\delta + \alpha$ (محلول جامد غنی قلع در مس و مس، δ : محصول بین فلزی با ترکیب ثابت، $Cu_{31}Sn_8$) نیز وجود دارد (شکل ۵- الف و ب).

شیء باشد که آرسنیک آن از بین رفته باشد [32]. درواقع آرسنیک بالا باعث محدود شدن شکل‌پذیری برنرها می‌شود و لذا برنهایی که آرسنیک زیادی دارند از طریق ریخته‌گری استحصال می‌شوند.

نمونه‌های KR-4 و KR-5 به ترتیب شامل ۸۲/۰۲ و ۸۷/۳۸٪ مس به‌عنوان عنصر اصلی و ۱۴/۶۲ و ۹/۳۶ قلع به‌عنوان عنصر آلیاژی، عناصر اصلی این نمونه‌ها را تشکیل می‌دهند. به‌طور کلی در میان پنج شیء مورد بررسی، چهار نمونه با توجه به میزان مس و قلع از آلیاژ دوتایی مس و قلع ساخته شده‌اند. در علم متالورژی، برنرها بر اساس میزان قلع به دو گروه اصلی تقسیم می‌شوند و بر اساس آن فازهای فلزی و بین فلزی متفاوتی ظهور می‌کند. این دو گروه شامل برنرهای پر قلع و برنرهای کم قلع هستند. برنرهای کم قلع با محتوا پایین‌تر از ۱۷ wt% و برنرهای پر قلع با میزان ۱۷ تا ۳۵ wt% قلع شناخته شده‌اند [33]. بر این اساس نمونه‌های KR-4 و KR-5 در دسته برنرهای کم قلع قرار دارند. اما با توجه به اینکه در دو نمونه KR-1 و KR-2 فقط پاتین مورد آنالیز قرار گرفته نمی‌توان به‌طور دقیق گفت که این دو، جز کدام دسته از برنرهای قلعی هستند. حضور بالای قلع در بخش پولیش نشده که باعث ایجاد پاتین براق و یکنواخت شده نشان‌دهنده‌ی پدیده‌ی انحلال (حل شویی) مس و غنی شدن سطح از قلع است. در اصل ایجاد قشر غنی از قلع در ساختار خوردگی درونی آثار برنزی را می‌توان به پدیده‌ی مس زدایی آن‌ها نسبت داد که به‌واسطه انحلال انتخابی آرام مس و خروج آن از سطح اشیاء و تبدیل قلع به کاسیتريت و دیگر اکسیدهای قلع به وجود می‌آید [34,35].

۵-۳. متالوگرافی

با استفاده از میکروسکوپ نوری، مقاطع حکاکی نشده‌ی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در تصاویر متالوگرافی اشیاء KR-1 و KR-2 قبل از حکاکی به‌خوبی دندریت‌های حاصل از ریخته‌گری در زمینه روشن دیده می‌شود. آخال‌های به رنگ خاکستری در کل سطح



شکل ۴: ریزساختار میکروسکوپ نوری نمونه‌ها قبل از حکاکی. الف و ب: نمونه KR-1، ج و ح: نمونه KR-2 شامل آخال‌های سولفیدی و ساختار ریختگی، د: نمونه KR-3، ه: نمونه KR-4، ی: نمونه KR-5 شامل آخال‌های سولفیدی

Fig. 4: optical microscopy micrograph of the samples before etching. A and B: sample KR-1, C and H: sample KR-2 containing sulphide inclusions and Ghost Structure, D: sample KR-3, KR-4, KR-5 sample including sulphide inclusions

رشد دندریتی عملاً شکلی از جدایش است که ممکن است در حین فرایند ریخته‌گری رخ دهد. پدیده جدایش اغلب در فلزات ناخالص یا آلیاژها رخ می‌دهد زیرا یکی از اجزا تشکیل‌دهنده در آلیاژ فلز معمولاً نقطه ذوب پایین‌تری از دیگری دارد. در آلیاژ مس و قلع، مس در 1083°C و قلع در 232°C ذوب می‌شود. بخش مرکزی بازوهای دندریتی غنی‌تر از مس خواهد بود زیرا حین سرد شدن از حالت مذاب ابتدا مس انجماد پیدا می‌کند، درحالی‌که بخش‌های بیرونی بازوها غنی‌تر از قلع خواهد بود. نتیجه این است که خیز؟ ترکیبی از منطقه داخلی‌تر بازوهای دندریتی به سطح خارجی‌تر آن وجود دارد. مغزه دار شدن پدیده‌ای است که در ریخته‌گری برنز، آلیاژهای Cu-As رخ می‌دهد [40].

در نمونه KR3، KR4 و KR5 ریزساختار نمونه‌ها پس از حکاکی به‌خوبی 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 تابکاری بعدی در ساخت این اشیاء است [41] (شکل ۵-ج، د، و). با توجه به وجود خطوط لغزش در نمونه KR-3، می‌توان گفت که عملیات مکانیکی مرحله پایانی شکل‌دهی این شی بوده است؛ بدین معنی که در پایان عملیات بر روی قطعه، تابکاری انجام نشده است [21]. البته میزان کم تابکاری در مرحله پایانی هم می‌تواند عامل باقی ماندن مقداری از خطوط لغزش در دانه‌ها باشد. در فلزاتی که بر روی آن‌ها کار سنگین انجام شود، لغزش صفحات بلوری می‌تواند در بلورهای مشخص به ایجاد یک سری از حرکت‌های موازی منجر شود که در نواحی حکاکی شده به شکل تعدادی خطوط باریک در بعضی از دانه‌ها دیده می‌شود؛ این خطوط «نوارهای لغزش» یا «خطوط لغزش» نامیده می‌شوند. با توجه به اینکه در برخی نمونه‌ها خطوط لغزش در دانه‌ها به‌خوبی آشکار هستند، می‌توان دریافت که پس از آخرین مرحله انجام کار سرد، بر روی قطعه مجدداً تابکاری صورت نگرفته است [11].

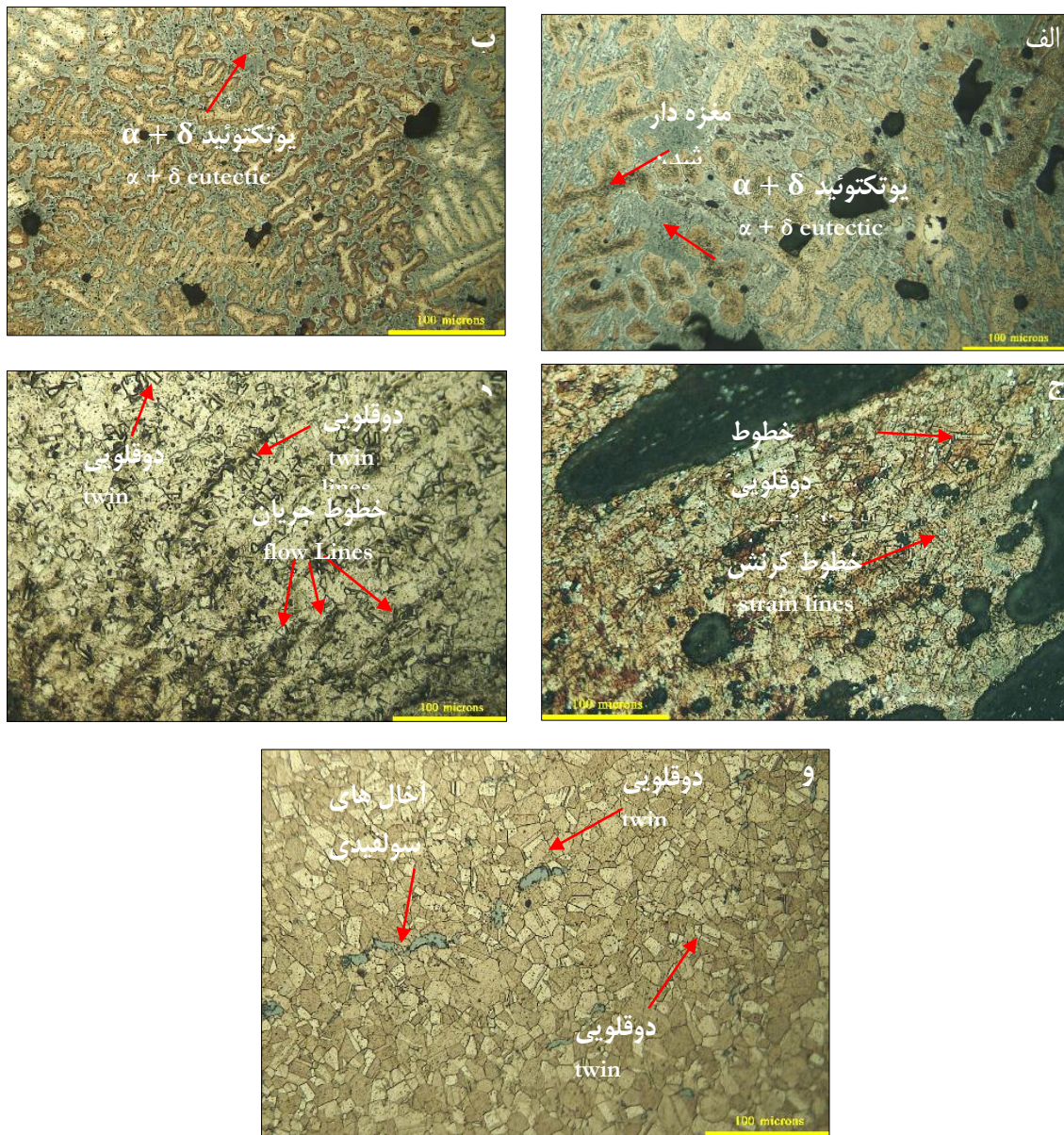
در ریزساختار نمونه KR-4 وجود باندهای دوقلویی صاف و عدم وجود خطوط کرنش نشان‌دهنده‌ی تابکاری

نهایی آن به‌منظور خارج شدن تنش‌های ناشی از کار سرد در ساختار شی است [21,41]. مغزه دار شدن اولیه دندریتی به شکل شبه ساختار در زمینه فلزی دیده می‌شود که اصطلاحاً به آن‌ها خطوط سیلان یا جریانی می‌گویند [42]. این پدیده در واقع به دلیل عدم انجام تابکاری کافی برای از بین بردن مغزه دار شدن اولیه است. در حقیقت، ابتدا شیء یا قطعه ریخته‌گری شده و در آن ساختار مغزه دار شده به وجود آمده است (همان ساختار دندریتی)، سپس جهت شکل‌دهی اثر، عملیات کار مکانیکی و تابکاری بر روی آن انجام شده اما میزان آن برای رفع مغزه دار شدن کافی نبوده است برای همین ریزساختار روی هم افتاده شامل دانه‌های کار شده و باز تبلور یافته همراه با بقایای خطوط جریان کشیده باقی‌مانده از ساختار مغزه دار شده اولیه دیده می‌شوند. در ریزساختار نمونه KR-5 با توجه به عدم وجود خطوط لغزش می‌توان گفت که آخرین مرحله فرآوری آن تابکاری بوده است. آخال‌های سولفیدی اچ نشده و تغییر نیافته در ریزساختار به‌صورت کشیده به رنگ خاکستری در زمینه فلزی قابل مشاهده است (شکل ۵-و).

۴-۵. آنالیز ناخالصی‌ها

مقاطع حکاکی نشده‌ی نمونه‌های مورد مطالعه برای تشخیص فازهای مختلف موجود در این مقاطع و ترکیب شیمیایی این فازها، ابتدا توسط الکترون‌های برگشتی^۴ (BSE) مشاهده و سپس با استفاده از سیستم آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوایکس (EDS) این میکروسکوپ، ترکیب شیمیایی و فازهای مختلف آن، تعیین شد. در تصاویر SEM-BSE نمونه‌ها، فازها و ناخالصی‌ها شامل تنالیت‌های تیره و خاکستری به‌صورت پراکنده در زمینه فلزی مشاهده می‌شوند (شکل ۶) که به‌منظور شناسایی ترکیب شیمیایی آن‌ها از آنالیز EDS استفاده شد. نتایج آنالیز شیمیایی این ذرات ناخالصی در جدول ۲ ارائه شده است.

با توجه به نتایج آنالیز، عناصر اصلی فازهای خاکستری تیره یا همان نقاط A، شامل مس و گوگرد و مقدار قابل توجهی سرب به‌خصوص در نمونه‌های KR-1، KR-2، KR-5 بوده و پس‌از آن اکسیژن قرار دارد. عناصر

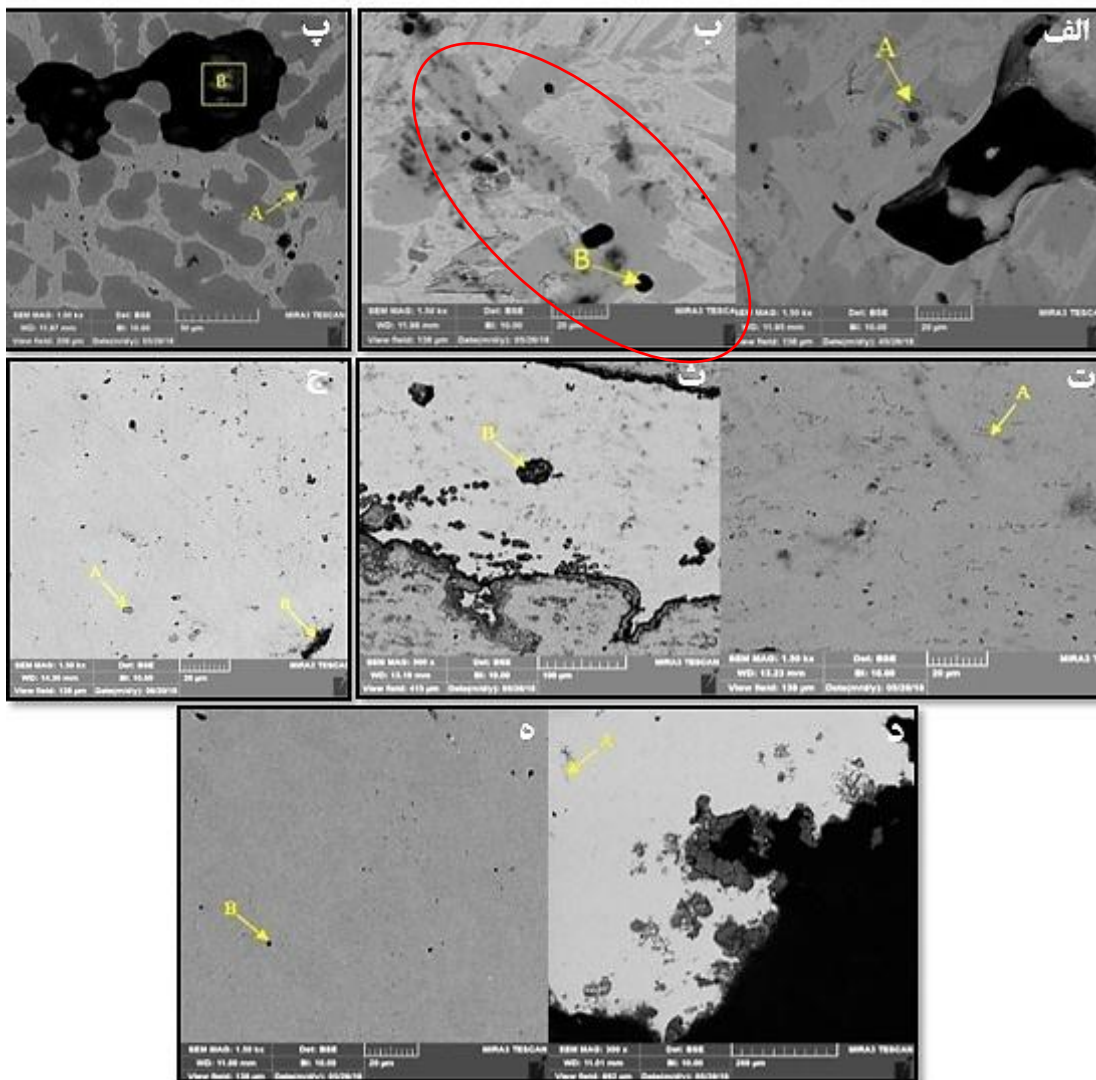


شکل ۵: ریزساختار میکروسکوپ نوری نمونه‌ها پس از حکاکی. الف) KR-1، ب) KR-2 (ساختار یوتکتوئید $\alpha + \delta$)، ج) KR-3، ح) KR-4، و) KR-5 (دانه‌های باز تبلور یافته و خطوط دوقلویی).

Fig. 5: Optical microscopy micrography of samples after etching. a) Sample KR-1; b) sample KR-2 ($\alpha + \delta$ eutectic structure); c) sample KR-3; d) sample KR-4; sample KR-5 (grains crystallized and the twin lines)

طی فرایند ذوب، به مس فلزی تبدیل نمی‌شود و به صورت آخال‌های کوچک در ساختار آلیاژ باقی می‌مانند [44]. در آخال‌های سیاه‌رنگ (نقاط B) عناصر اصلی شامل مس، اکسیژن، گوگرد و قلع است. با توجه به میزان بالای اکسیژن به نظر می‌رسد که این نقاط اکسید مس باشند. در نمونه KR-1 اکسیژن، قلع و گوگرد و پس از آن مس و آهن و آلومینیوم عناصر اصلی این نقطه

دیگر با درصد کم (بین ۱ تا ۳ درصد) در این نقاط شناسایی شده است که می‌توان نتیجه گرفت نقاط A آخال‌های سولفیدی هستند. در واقع می‌توان گفت که آخال‌های خاکستری تیره‌رنگ موجود در ریزساختار این اشیا بقایای سولفید مس تشکیل‌دهنده‌ی سنگ معدن هستند که در فرایند استحصال مس در ساختار فلز باقی مانده‌اند [27,43]. در واقع، برخی سولفیدهای مس در



شکل ۶: ریزساختار SEM-BSE از آخال‌های موجود در نمونه‌های مورد مطالعه. A و B ذرات ناخالصی متفاوتی که ترکیب شیمیایی آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. نمونه‌ها از راست به چپ و از بالا به پایین به ترتیب شامل: نمونه KR-1 (الف و ب)، نمونه KR-2 (پ)، نمونه KR-3 (ت و ث)، نمونه KR-4 (ج)، نمونه KR-5 (د و ه)

Fig. 6: SEM-BSE micrograph of inclusions in the studied samples. A and B are different impurity particles whose chemical composition is presented in Table 2 The samples from right to left and top to bottom, respectively: KR-1 (A and B), KR-2 (C), KR-3 (T and E), KR-4 (C), KR-5 (d and e)

جدول ۲: نتایج آنالیز SEM-EDS آخال‌های اشیای فلزی مورد مطالعه بر پایه درصد وزنی
Table 2: Results of SEM-EDS analysis of inclusions in studied samples (wt%)

Element	O	Al	S	Cl	Fe	Cu	Zn	As	Sn	Sb	Pb	Bi
KR1-A	13.8	3.64	29.78	2.48	0.38	27.83	0.00	2.42	3.14	1.48	20.72	0.00
KR1-B	25.13	8.75	13.72	4.84	9.98	9.71	0.00	5.94	15.24	2.14	0.29	4.26
KR2-A	5.79	2.73	29.54	2.30	1.04	30.19	0.00	1.94	2.49	1.44	22.54	0.00
KR2-B	18.29	4.09	12.25	2.32	0.00	44.82	0.85	3.29	6.79	1.20	6.10	0.00
KR3-A	9.07	5.35	12.57	3.61	0.69	45.65	0.00	7.74	3.36	2.15	6.51	3.00
KR3-B	31.83	5.56	8.00	3.59	0.11	37.47	0.00	4.44	3.14	1.77	1.07	3.02
KR4-A	4.99	2.42	21.08	1.25	0.69	57.51	0.00	1.85	2.11	0.79	5.85	1.46
KR4-B	9.27	5.76	2.26	2.25	0.19	66.82	0.00	4.81	5.96	0.79	0.00	1.89
KR5-A	6.18	3.27	29.67	2.26	0.00	30.73	0.00	2.32	2.32	1.40	21.85	0.00
KR5-B	27.20	3.05	2.49	2.10	37.24	17.91	0.00	2.53	4.44	1.09	0.00	1.95

در همه نمونه‌ها با درصد کم وجود دارد. آهن و روی در نمونه KR-1 به میزان قابل توجه و در لایه A و C شناسایی شده است. وجود آهن احتمالاً مربوط به مجاورت این شی با اشیاء آهنی مدفون در خاک بوده است. آرسنیک نیز در همه نمونه شناسایی شده است اما میزان آن در نمونه KR-3 بالا بوده که حاکی از این است که ترکیب سازنده KR-3 آلیاژ Cu-As است. در همه نمونه‌ها به‌جز KR-3، مس و قلع نقش اصلی را در ترکیب لایه‌های درونی تشکیل شده ایفا می‌کند. مقدار قلع در لایه‌های خوردگی داخلی نسبت به ترکیب آلیاژ، افزایش یافته و مس نسبت به ترکیب آلیاژ کاهش یافته است. به‌طور کلی در این نمونه‌ها به‌خوبی تغییر میزان قلع و مس با افزایش درصد اکسیژن قابل مشاهده است. مقایسه لایه‌های خوردگی نسبت به ترکیب آلیاژ نشان‌دهنده‌ی این است که در برخی لایه‌های خوردگی میزان اکسیژن و قلع افزایش و درصد مس کاهش یافته است. درصد بالای قلع در لایه زیر سطح اصلی (B) به دلیل اکسید شدن مس و غنی شدن این لایه از قلع است.

در پاتین نوع اول یا نجیب، بین ترکیب آلیاژ و پاتین ایجاد شده بر سطح شی، ارتباط قوی وجود دارد. در حقیقت در این نوع پاتین اطلاعات مهمی درباره آلیاژهای برنزی ریخته‌گری شده مانند ساختار دندریتی دیده می‌شود. همچنین اطلاعاتی در ارتباط با روش ساخت و استفاده از اثر را در این قشر می‌توان یافت [45]. به‌عبارت‌دیگر، غنی شدن قلع در لایه داخلی می‌تواند به حالیت کم و ثبات بالا در گونه‌های قلع مربوط باشد [46]، که اجازه می‌دهد یون‌های قلع در محل اصلی خود (لایه خوردگی تیره درونی) باقی بماند [47]. در نمونه KR-3 میزان اکسیژن و کلر نسبت به نمونه‌های دیگر کمی بالاتر بوده و خوردگی‌ها به‌صورت لایه‌های مجزا دیده می‌شوند. در لایه A میزان اکسیژن و آرسنیک نسبت به زمینه اصلی (D) افزایش و درصد مس کاهش یافته است اما در لایه بعدی یعنی B که به رنگ سیاه است میزان اکسیژن افزایش بیشتر و درصد آرسنیک و مس کاهش یافته است. لایه C که بیرونی‌ترین لایه و روی سطح اصلی شیء قرار گرفته است شامل ترکیبات اکسید مس بوده که افزایش

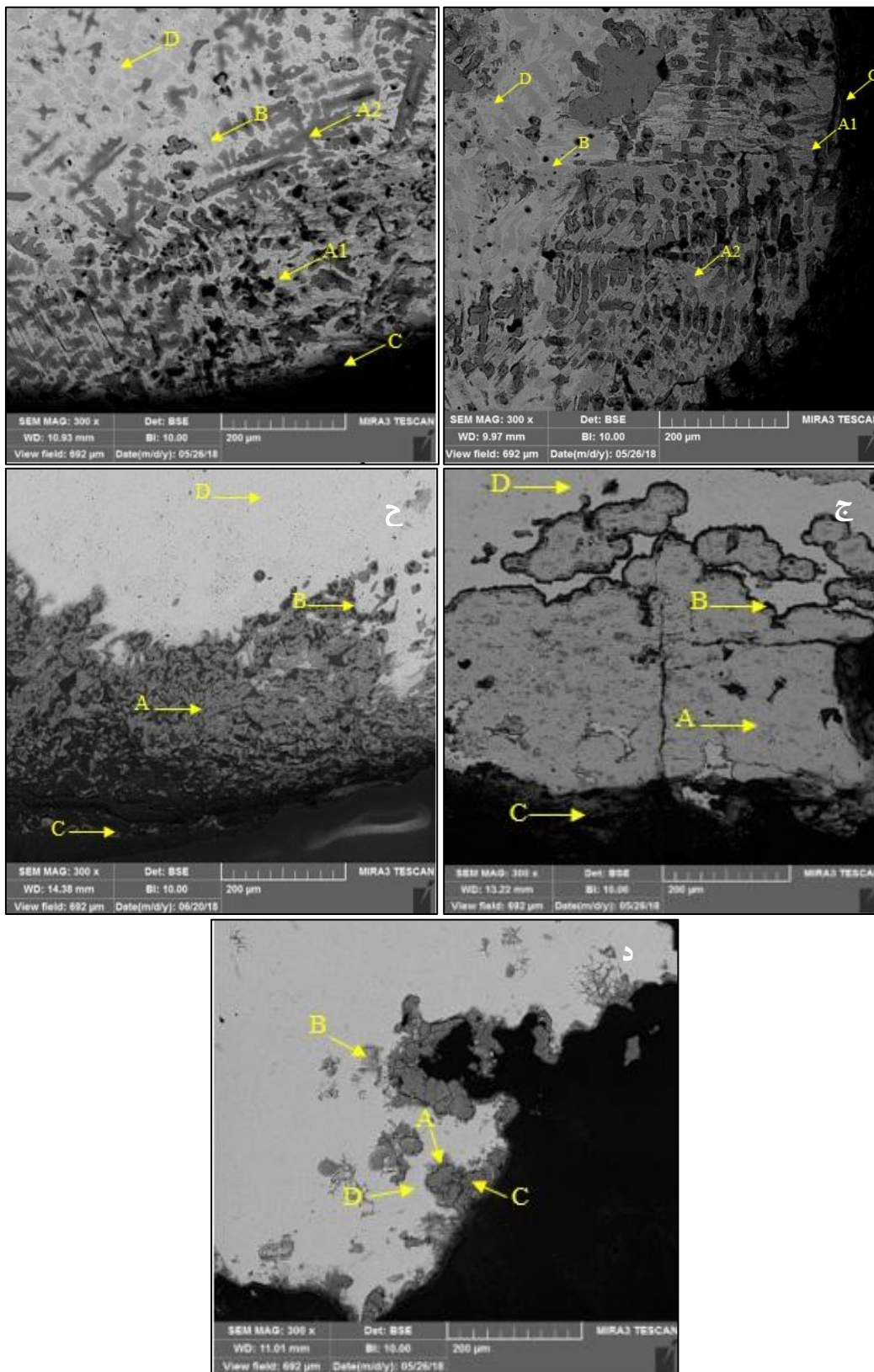
را تشکیل داده‌اند. بر این اساس، احتمالاً این ناخالصی‌ها اکسید قلع همراه با میزان قابل توجهی گوگرد بوده چراکه این آخال‌ها بر روی دندریتی قرار دارد که به دلیل اکسید شدن مس، درصد قلع آن افزایش یافته است. عناصر اصلی در نقطه B نمونه KR-2 شامل مس، گوگرد، اکسیژن و پس از آن قلع و سرب است که احتمالاً ترکیب این آخال‌ها، سولفید مس اکسید شده همراه با سرب بوده و قلع نیز مربوط به زمینه فلزی است که به آنالیز این فاز وارد شده است. در آخال B نمونه KR-5، به ترتیب آهن، اکسیژن و مس بالاترین درصد را دارند که احتمالاً ترکیبات اکسید مس و آهن است.

۵-۵. ترکیب شیمیایی لایه‌های خوردگی

لایه‌های خوردگی تشکیل‌دهنده بخش‌های داخلی و خارجی اشیاء مورد مطالعه از نقطه‌نظر ترکیب شیمیایی و شناخت ماهیت آن‌ها با استفاده از SEM-EDS مورد آنالیز قرار گرفتند. در این نمونه‌ها نقاط با توجه به تغییر رنگ از تیره به روشن از نظر درصد عناصر مورد آنالیز شیمیایی قرار گرفته است (شکل ۷ و جدول ۳).

نتایج آنالیز نقاط A، B و D (ترکیب آلیاژ) مربوط به ترکیب شیمیایی لایه‌های درونی زیر سطح اصلی اشیاء و نقطه C مربوط به لایه بیرونی اشیاء که روی سطح اصلی آن‌ها قرار دارد. ترتیب لایه‌های خوردگی در این نمونه‌ها تقریباً مشابه است و فقط در نمونه KR-3 ساختار متفاوتی را نشان داده است. در لایه‌های خوردگی بخش درونی نمونه‌های KR-1، KR-2، KR-4، KR-5 میزان قلع بالا بوده که نشان‌دهنده‌ی ساخت شی از آلیاژ برنز است. در نقاط آنالیز شده میزان اکسیژن در بخش خارجی قابل توجه است که این امر نشان‌دهنده این است که ترکیب لایه‌های درونی خوردگی در اشیاء مورد مطالعه حاوی ترکیبات اکسیدی مس و قلع است اما درصد آن در لایه C که لایه بیرونی روی سطح اصلی است بالاتر است.

میزان کلر در نمونه‌ها کم و بین ۱ تا ۶ درصد متغیر است که حاصل از خاک محل دفن اشیاء بوده و در نمونه KR-3 درصد آن افزایش بیشتری داشته است. عناصر دیگر مانند آهن، آلومینیوم، گوگرد، آنتیموان و بیسموت نیز



شکل ۷: تصویر SEM-BSE از نمونه‌ها و لایه‌های آنالیز شده، به ترتیب از راست به چپ و از بالا به پایین عبارت‌اند از: نمونه KR-1 (الف)، نمونه KR-2 (ب)، نمونه KR-3 (ج)، نمونه KR-4 (ح)، نمونه KR-5 (د)

Fig. 7: SEM-BSE micrograph of analyzed samples and layers. The samples from right to left and top to bottom, are respectively: KR-1(a), KR-2(b), KR-3(c), KR-4(d), KR-5(e)

جدول ۳: نتایج آنالیز EDS لایه‌های خوردگی نمونه‌های مورد مطالعه محوطه بیرگان بر پایه درصد وزنی
 Table 3: Results of SEM-EDS analysis of corrosion layers in Biregan Kouhrang studied samples (wt%)

Element	O	Al	S	Cl	Fe	Cu	Zn	As	Sn	Sb	Pb	Bi
KR1-A1	2.01	0.04	0.00	0.00	47.38	32.12	5.41	0.04	12.73	0.27	0.00	0.00
KR1-A2	5.94	0.00	0.52	1.32	4.05	5.21	0.00	0.00	81.29	0.98	0.00	0.78
KR1-B	15.20	2.65	2.69	3.70	0.00	51.74	0.00	1.30	20.32	1.95	0.00	0.45
KR1-C	16.32	0.18	0.00	0.13	27.11	45.97	9.27	0.24	0.45	0.18	0.00	0.15
KR1-D	2.81	1.03	3.46	1.47	0.00	59.85	0.00	1.02	28.94	1.29	0.00	0.13
KR2-A1	15.20	1.06	1.95	1.93	0.07	26.79	0.00	1.71	48.34	1.37	0.00	1.85
KR2-A2	36.28	1.24	2.41	2.13	0.00	4.23	0.00	2.71	48.94	0.82	0.00	1.23
KR2-B	9.01	1.31	3.18	3.28	0.00	42.24	0.00	3.44	35.12	1.34	0.00	1.08
KR2-C	74.95	1.81	4.29	2.71	0.19	6.04	0.37	2.49	5.57	1.38	0.00	0.20
KR2-D	5.77	1.53	3.38	4.60	0.00	59.87	0.00	1.46	20.40	1.98	0.00	1.01
KR3-A	32.18	2.07	4.72	3.37	0.00	46.57	0.00	5.64	2.78	1.82	0.00	0.85
KR3-B	44.51	1.60	5.38	5.49	0.52	31.57	0.00	4.42	3.30	1.90	0.00	1.31
KR3-C	38.73	3.35	5.50	4.01	0.00	37.70	0.00	6.69	2.61	0.65	0.00	0.76
KR3-D	29.03	1.68	6.00	6.26	0.12	46.69	0.00	4.18	1.59	1.73	0.85	1.87
KR4-A	40.37	3.92	2.05	1.68	0.11	32.16	0.00	2.76	16.26	0.26	0.00	0.43
KR4-B	30.36	2.69	3.61	2.14	0.06	45.83	0.00	3.57	10.30	0.36	0.00	1.08
KR4-C	47.20	2.12	4.06	2.03	0.00	28.21	0.00	0.01	16.11	0.15	0.00	0.11
KR4-D	3.05	1.02	2.88	2.80	0.00	79.06	0.00	2.38	6.42	0.72	0.00	1.67
KR5-A	27.89	2.95	2.92	2.90	0.00	28.45	0.00	0.53	33.32	0.32	0.00	0.72
KR5-B	15.59	1.88	3.55	3.17	0.04	54.60	0.00	1.44	17.09	1.84	0.00	0.80
KR5-C	35.92	2.93	3.04	2.28	0.19	19.75	0.00	2.91	30.56	1.08	0.00	1.34
KR5-D	11.95	2.07	3.76	3.97	0.05	58.72	0.00	1.25	16.15	1.81	0.00	0.32

با درصد کمتر بوده که نشان دهنده این است که نقطه B مربوط به اکسید مس است. با توجه به نتایج ترکیب شیمیایی لایه‌های خوردگی، در لایه A میزان اکسیژن، قلع در نمونه‌های برنزی و آرسنیک در نمونه مس آرسنیک نسبت به ترکیب آلیاژ افزایش یافته است و به تبع آن میزان مس کاهش یافته است. لایه B درونی‌ترین لایه قبل از لایه A است که میزان قلع در این لایه کمتر از لایه A است اما میزان مس آن بیشتر است. در لایه خوردگی بیرونی سطح (روی سطح شی) میزان اکسیژن افزایش بیشتری را نسبت به دو لایه درونی نشان می‌دهد ولی میزان مس و قلع آن کمتر است. به‌طور کلی فرایند خوردگی رخ داده در نمونه‌های برنزی و آرسنیک ناشی از پدیده مس زدایی یا انحلال انتخابی مس بوده و منجر به غنی شدن پاتین از قلع و آرسنیک شده است.

تصاویر متالوگرافی نمونه‌های KR-1 و KR-2 نشان دهنده ساختار دندریتی است که شامل دندریتهای مغزه دار بوده حاکی از ساخت این اشیاء با استفاده از روش ریخته‌گری است. ریزساختار نمونه‌های KR-3، KR-4 و KR-5 به‌خوبی دانه‌های باز تبلور یافته و خطوط

اکسیژن و آرسنیک و کاهش مس را نشان می‌دهد که بیانگر اکسیداسیون در این لایه است. در واقع در این نمونه نیز انحلال انتخابی مس و افزایش میزان آرسنیک در سطح اتفاق افتاده است.

۶. نتیجه‌گیری

نتایج مطالعات آثار فلزی محوطه بیرگان، نشان دهنده‌ی استفاده از آلیاژ دوجزئی مس و قلع در نمونه‌های KR-1، KR-2، KR-3، KR-4، KR-5 و مس - آرسنیک در نمونه KR-3 است و عناصر فلزی دیگر در حد جزئی شناسایی شدند. تصاویر حاصل از رادیوگرافی نشان داد که اشیاء مورد مطالعه بدون تزئین و اتصال بوده و به‌غیر از نمونه KR3 (سر پیکان) که چگالی متفاوتی را در نقاط مختلف نشان داد بقیه اشیاء تغییرات چگالی نشان ندادند. با توجه به نتایج آنالیز، عناصر اصلی فازهای خاکستری تیره، شامل مس و گوگرد و مقدار قابل توجهی سرب به‌خصوص در نمونه‌های KR-1، KR-2، KR-5 بوده و حاوی اکسیژن نیز است که می‌توان نتیجه گرفت این نقاط آخال‌های سولفیدی هستند. در آخال‌های سیاه‌رنگ عناصر اصلی شامل مس، اکسیژن همراه با عناصر دیگر

مستخرج از رساله کارشناسی ارشد با عنوان " مطالعات فن شناسی و شناخت ماهیت پاتین تعدادی از اشیاء فلزی محوطه بیرگان کوه‌رنگ متعلق به هزاره دوم ق.م " است.

دوقلویی را نشان می‌دهد که بیانگر استفاده از روش چکش کاری گرم و یا چکش کاری سرد به همراه تابکاری در ساخت این اشیاء است.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از آقای احمد آزادی باستان‌شناس محوطه بیرگان، خانم پیمان پرناک، امین اموال اداره میراث فرهنگی و گردشگری استان چهارمحال و بختیاری و تمامی کسانی که در به ثمر رسیدن این کار تحقیقی کمک نمودند، کمال تشکر را دارند. مقاله

پی‌نوشت‌ها

1. Noble Patina
2. Micro-PIXE= Proton Induced X-ray Emission spectroscopy in micron scale
3. Leaching
4. Backscattered Electron

References

- [1] Esmacili Jelodar ME, Preliminary report of the explore salvage of the trench D10 of the area1 in the dam and third tunnel Kouhrang in Chaharmahal O Bakhtiari (first part) borehole; 2013: 1-41. [in Persian]
[اسمعیلی جلودار محمداسماعیل. گزارش مقدماتی کاوش نجات بخشی ترانشه D10 محوطه کارخانه ۱ در محدوده سد و تونل سوم کوه‌رنگ در چهارمحال و بختیاری (بخش اول) گمانه؛ ۱۳۹۱: ۱-۴۱.]
- [2] Azadi A. A Late Bronze/Early Iron nomadic site(KR385) in Bakhtiari Highlands,south-west Iran..Antiquity, project Gallery.Available at://antiquity.ac.uk/projgall/azadi 347,2015.
- [3] Bertholon R. Archaeological Metal Artefacts and Conservation Issues: Longterm Corrosion Studies, In Corrosion of Metallic Heritage Artefacts: Investigation,Conservation and Prediction for Long-Term Behaviour. ed. P. Dillmann, G. 32 (2007). [doi.org/10.1201/9781439824054.ch3]
- [4] Esmacili Jelodar ME, Zolghadr S, an analysis data the explore in the Achaemenid Nomadic site of Shahriyari II, Biregan Kouhrang Bakhtiari. Archaeological Researches of Iran; 2014: 85-88. [in Persian]
[اسمعیلی جلودار محمداسماعیل، ذوالقدر سعید. تحلیل داده های کاوش در محوطه‌ی کوچ‌نشینی شهریار یاری II از دوره‌ی هخامنشی در منطقه‌ی بیرگان کوه‌رنگ
- [5] Esmacili Jelodar ME, Hibtian F. Anthropology report on the Dam reservoir and the third tunnel of Kouhrang, Tehran; 2008: 13-40-70-74-101-407. [in Persian]
[اسماعیلی جلودار محمداسماعیل، هیبتیان فیروزه. گزارش مردم شناسی محدوده مخزن سد و تونل سوم کوه‌رنگ، تهران؛ ۱۳۸۷: ۱۳-۴۰-۷۰-۷۴-۱۰۱-۱۰۷.]
- [6] Kourosh R, Archaeological report of Kouhrang County, central district, first season. Tehran: Archive of The Archaeological Research Institute; 2007 (unpublished). [in Persian]
[روستایی کوروش. گزارش بررسی باستان‌شناختی شهرستان کوه‌رنگ، بخش مرکزی، فصل نخست. تهران: آرشیو پژوهشکده باستان‌شناسی؛ ۱۳۸۶: ۳۰-۱۹۵-۱۹۶ (منتشر نشده).]
- [7] Kourosh R, Archaeological report of Kouhrang County, Central District, third season. Tehran: Archive of The Archaeological Research Institute; 2010 (unpublished). [in Persian]
[روستایی کوروش. گزارش بررسی باستان‌شناختی شهرستان کوه‌رنگ، بخش مرکزی، فصل سوم. تهران: آرشیو پژوهشکده باستان‌شناسی، ۱۳۸۹ (منتشر نشده).]
- [8] Azadi A. Report of second season the explores salvage of the dam and three

- tunnel Kouhrang in; 2013: 1-41. [in Persian]
- [آزادی احمد. گزارش فصل دوم کاوش‌های نجات بخشی سد و تونل سوم کوه‌رنگ؛ ۱۳۹۲.]
- [9] Kourosh R, A Morphological typology of the ancient sites in Kouhrang area. *Archaeological Researches of Iran*, no. 9, fifth Ed; 2015: 27-44. [in Persian]
- [روستایی کوروش. گونه‌شناسی محوطه‌های باستانی منطقه‌ی کوه‌رنگ بختیاری. پژوهش‌های باستان‌شناسی ایران ۱۳۹۴، ۹(۵): ۲۷-۴۴.]
- [10] Safaie ghalati M, Bakhshandefard HR, Hessari M. An Investigation of the structure and construction method of copper alloys Pins excavated from the West Chia Sabz, Lorestan Province. *Archaeological Researches of Iran*; Summer 2018, No. 17. [in Persian]
- [صفایی قلاتی مهشید، بخشنده فرد حمیدرضا، حصاری مرتضی. شناسایی ساختاری و نحوه‌ی ساخت سنجاق‌های میله‌ای آلیاژ مسی منطقه چیا سبز غربی استان لرستان، پژوهش‌های باستان‌شناسی ایران. شماره ۱۷؛ ۱۳۹۷.]
- [11] Oudbashi O, Hasanpour A. Laboratory studies on the alloy and microstructure of bronze objects Iron Age site Babajilan Lorestan, *Archaeological Studies*, spring and summer 2016, 8(1): 133-149. [in Persian]
- [عودباشی امید، حسن‌پور عطا. مطالعات آزمایشگاهی بر روی آلیاژ و ریزساختار اشیاء برنزی محوطه عصر آهن باباجیلان لرستان، مطالعات باستان‌شناسی ۱۳۹۵، ۸(۱): ۱۳۳-۱۴۹.]
- [12] Oudbashi O. Some aspects of heat treatment in ancient and historic copper alloy artefacts; 2011.
- [13] Mortazavi M, Salehi Kakhki A, Golozar M, Talai H. Preliminary metallurgical investigation o Copper-Based Artifacts at Tepe Sagzabade in Qazvin Plain, Iran (1500-800BC) 2011.
- [14] Oudbashi O, Hessari M, Ahmadi H, Hesari M. Investigation on the bronze metallurgy of Tepe Marlik, Gilan. *Archaeological Researches of Iran*; 2015 107-121. [in Persian]
- [عودباشی امید، حصاری مرتضی، احمدی حسین. مطالعه فرایند تولید مفرغ در اشیاء محوطه عصر آهن مارلیک گیلان. پژوهش‌های باستان‌شناسی ایران؛ ۱۳۹۴: ۱۰۷-۱۲۱.]
- [15] Mosleh M, AbdullahKhan Georgy M, Nazifi N, Nokade G, Abbasi Gh. Ancient studies on a selection of copper-base objects of late bronze age period from the Bazgir Tepe, Gorgan plain, *Archeological Studies* 2014, 6(1): 111-124. [in Persian]
- [مصلح مرضیه، عبدالله خان گرجی مهنار، نظافتی نیما، نوکنده جبرئیل، عباسی قربانعلی. مطالعات باستان‌سنجی و مرمتی بر روی منتخبی از اشیاء مس-پایه دوره مفرغ پایانی از تپه بازگیر، دشت گرگان، مطالعات باستان‌شناسی ۱۳۹۳، ۶(۱): ۱۱۱ و ۱۲۴.]
- [16] Yadollahi A, Bakhshandefard HR, Irvani Ghadim F. The Study of Alloy and Manufacturing Techniques of Bangles of Eurasian Nomadic Tribes: Case Study, Bangles Discovered from Jafarabad's Kurgan No 8, *Archeological Studies* 2016, 8(1): 192 - 204. [in Persian]
- [یداللهی عاطفه، بخشنده فرد حمیدرضا، ایروانی فرشید. مطالعه‌ی آلیاژ و روش ساخت النگوهای اقوام مهاجر اوراسیا؛ نمونه موردی، النگوهای به‌دست‌آمده از کورگان هشت جعفرآباد، مطالعات باستان‌شناسی ۱۳۹۵، ۸(۱): ۱۹۲-۲۰۳.]
- [17] Yavari F, Abbas Nejad Sestsity R, Mortazavi M, Alidadi Soleimani N. Metallographic study, ICP-OES, SEM-EDS Three objects of alloying of the Bronze Age from the southern part of the Hali Rood Basin, Jiroft *Archaeological Researches of Iran*, 2016, No. 1: 67. [in Persian]
- [یاوری فاطمه، عباس‌نژاد سرستی رحمت، مرتضوی محمد، علیدادی سلیمانی نادر. بررسی متالوگرافی، SEM-EDS، ICP-OES سه شی آلیاژی عصر مفرغ مکشوفه از بخش جنوبی حوضه هلیل رود، جیرفت، پژوهش‌های باستان‌شناسی ایران، بهار و تابستان ۱۳۹۵، شماره ۱: ۶۷.]
- [18] Figueiredo E, Araújo M, Silva R, Senna-Martinez J, Vaz J. Characterisation of Late Bronze Age large size shield nails by EDXRF, micro-EDXRF and X-ray digital radiography. *Applied Radiation and Isotopes* 2011, 69(9), p.1205-1211. [doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.04.027]

- [19] Norton JT. Metallography and the Study of Art Objects. In Application of Science in the Examination of Works of Art. Ed. W. J. Young. 13-19. Boston: Museum of Fine Arts 1967.
- [20] Smith CS. The interpretation of microstructures of metallic artifacts. In application of science in the examination of Works of Art. Ed. W. J. Young. 20-52. Boston: Museum of Fine Arts 1967.
- [21] Scott DA. Metallography and microstructure of ancient and historic metals. 1991; p. 7-8.
- [22] Stuart B. Analytical techniques in materials conservation. John Wiley & Sons 2007. [doi.org/10.1002/9780470060520]
- [23] Stuart B. Analytical techniques in materials conservation. (Tran: Bagherzadeh). Tabriz: Islamic Art University, 2014. [in Persian]
[استوارت باربارا. روش‌های تجزیه مواد در مرمت و حفاظت آثار تاریخی. (ترجمه: باقرزاده کثیری مسعود). تبریز: دانشگاه هنر اسلامی؛ ۱۳۹۳: ۱۳۱-۱۳۲.]
- [24] Bakhshandefard HR. Investigation the metalwork historical in restoration. Publication: Isfahan Art University, first edition; 2010.
بخشنده فرد حمیدرضا. بررسی آثار تاریخی فلزی در مرمت. انتشارت: دانشگاه هنر اصفهان، چاپ اول. ۱۳۸۹.
- [26] Lang p. "Methods and devices for quantitative analysis of x-ray images." U.S. Patent No. 6(2005),904,123. 7 Jun.
- [25] Artioli G. Scientific methods and cultural heritage: an introduction to the application of materials science to archaeometry and conservation science. Oxford University Press. Oxford University press 2010. [doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199548262.003.0001]
- [27] Oudbashi O. Chemical analysis and microstructure studies on a number of metal objects in the Haft Tape area of Khuzestan. Archaeological and Art History of the Ancient East, 2013. [in Persian]
[عودباشی امید. آنالیز شیمیایی و مطالعات ریزساختاری بر روی تعدادی از اشیای فلزی محوطه هفت تپه خوزستان. نشریه باستان‌شناسی و تاریخ هنر شرق باستان، ۱۳۹۲.]
- [28] Chiavari C, Degli Esposito M, Garagnani GL, Martini C, & Ospitali F. Ancient metallurgy at Sumhuram (Sultanate of Oman): technical aspects of raised inscriptions on South Arabian bronzes. Archaeometry, 53(3) 2011; 528-546. [doi.org/10.1111/j.1475-4754.2010.00541.x]
- [29] Oudbashi O, Emami SM, Davami P. Bronze in Archaeology: A Review of the Archaeometallurgy of bronze in Ancient Iran. In Copper alloys—early applications and current performance-enhancing processes. ed. L. Collin. 153-178. Rijeka: In Tech 2012. [doi.org/10.5772/32687]
- [30] Lechtman H. Arsenic bronze: dirty copper or chosen alloy? A view from the Americas. Journal of Field Archaeology 1996, 23(4): 477-514. [doi.org/10.1179/009346996791973774]
- [31] Garbacz-Klempka AKN. Copper and Arsenical Copper During Eneolithic in Metallographic and Mechanical Properties Examination. Archives of Foundry Engineering 2015, p.15.
- [32] Pike AW. Appendix: Analysis of Caucasian metalwork—the use of antimonial, arsenical and tin bronze in the Late Bronze Age. Ancient Caucasian and related materials in the British Museum. British Museum Occasional Paper 2003: 87-92.
- [33] Hoseiny Panah Someeh Saraee S. Investigation of corrosion processes and propose conservation plan for archaeological bronze finds from Toul-e Talesh, Gilan. M.A. Thesis. Art University of Isfahan, 2016. [in Persian]
[حسینی پناه صومعه‌سرای سولماز. مطالعات آسیب‌شناسی و ارائه طرح حفاظت مجموعه آثار برنزی به‌دست‌آمده از حفاری تول تالش گیلان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مرمت آثار تاریخی، دانشگاه هنر اصفهان؛ ۱۳۹۴.]
- [34] Robbiola L, Blengion J, and Fiaud C. (1998). Morphology and Mechanisms of Formation of Natural Patinas on Archaeological Cu-Sn Alloys. Corrosion Science 40(12). [doi.org/10.1016/S0010-938X(98)00096-1]

- [35] Selwyn LS. Corrosion of Metal Artifacts in Buried Environments. In ASM .2006. Handbook Volume 13C, Corrosion: Environments and Industries. ASM International: 306-322. [doi.org/10.31399/asm.hb.v13c.a000414 2]
- [36] Scott DA. Periodic Corrosion Phenomena in Bronze Antiquities, Studies in Conservation. 1985. 30: 49-57. [doi.org/10.1179/sic.1985.30.2.49]
- [37] Sandu I, Quaranta M, Bejinariu C, Sandu IG, Luca D, Sandu AV. Study on the specific effects of corrosion processes on ancient bronze artefacts, The Annals of "Dunarea De Jos" University of Galati, Fiscile IX., Metallurgy and Material Science 2007;1: 64-73.
- [38] Oddy WA, Meeks ND. Unusual phenomena in the corrosion of ancient bronzes, In Science and Technology in the Service of Conservation. IIC Washington Congress. ed. N. S. Brommelle and G. Thomson. 119-124, London: IIC1982. [doi.org/10.1179/sic.1982.27.Supplement -1.119]
- [39] Fleming SJ. "The Archaeometallurgy of War Kabud, Western Iran", Iranica Antiqua XLI 2006: p. 47-57. [doi.org/10.2143/IA.41.0.2004759]
- [40] Scott DA. Metallography and microstructure of ancient and historic metals, Tran by Oudbashi and Shekofteh. Isfahan: University Jahad Publications, first ed; 2016: 33-34. [in Persian]
 [اسکات دیوید. متالوگرافی و ریزساختار در فلزات باستانی و تاریخی. (ترجمه: عودباشی امید و شکفته عاطفه). اصفهان: انتشارات جهاد دانشگاهی، ۱۳۹۵: ۳۳-۳۴]
- [41] Frame I. Metallurgical Investigations at Godin Tepe, Iran, Part I: The Metal Finds, Journal of Archaeological Science 2010. 37, 1700-1715. [doi.org/10.1016/j.jas.2010.01.030]
- [42] Mortazavi M, Golozar MA. Metallurgical evaluation of ancient necklace beads from Bistoun Kermanshah. The third joint conference of the Society of Metallurgy Engineers and the Scientific Society of Cast Iron in Iran, 2005. [in Persian]
 [مرتضوی محمد، گل‌آذر محمدعلی. ارزیابی متالورژیکی مهره‌های گردنبند باستانی به‌دست‌آمده از بیستون، کرمانشاه. سومین همایش مشترک انجمن مهندسين متالورژی و انجمن علمی ریخته‌گران ایران، ۱۳۸۴]
- [43] Bachmann HG. The identification of slags from archaeological sites, Occasional Publications 6, London, UCL, Institute of Archaeology 1982.
- [44] Valério PS. Bronze production in southwestern Iberian Peninsula: the late bronze age metallurgical workshop from Entre Águas 5 (Portugal). Journal of Archaeological Science 2013, 40(1): 439-451. [doi.org/10.1016/j.jas.2012.07.020]
- [45] Robbiola I, Portier R. A global Approach to the authentication of Ancient Bronzes based on the characterization of the Alloy-Patina-Environment System. Journal of Cultural Heritage 7. (2006). [doi.org/10.1016/j.culher.2005.11.001]
- [46] Alberghina, M.F., R. Barraco, M. Brai, T. Schillaci, and L. Tranchina. Integrated An-alytical Methodologies for the Study of Corrosion Processes in Archaeological Bronzes. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy 2011, 66(2): 129-137. [doi.org/10.1016/j.sab.2010.12.010]
- [47] Mortazavi, M., A.S. Kakhki, M.A. Golozar, and H. Talai. (2015). Tracing manufacturing technique in an archaeological thin sheet tube from Tepe Sagzabad in Qazvin plain, Iran (1500-800 bc). Mediterranean Archaeology & Archaeometry, 15(2).