

مقایسه ریزساختار و تکنیک ساخت چهار شیء برنزی به‌دست‌آمده از حفاری‌های دو محوطه تپه‌فرودگاه و سنگتراشان خرم‌آباد

مهدیه گراوند*

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مرمت اشیاء تاریخی و فرهنگی، دانشگاه هنر اصفهان

حمیدرضا بخشنده‌فرد

استادیار گروه مرمت اشیاء تاریخی و فرهنگی، دانشگاه هنر اصفهان

علی سجادی

استادیار پژوهشکده باستان‌شناسی، سازمان میراث فرهنگی و گردشگری

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۲۰

چکیده

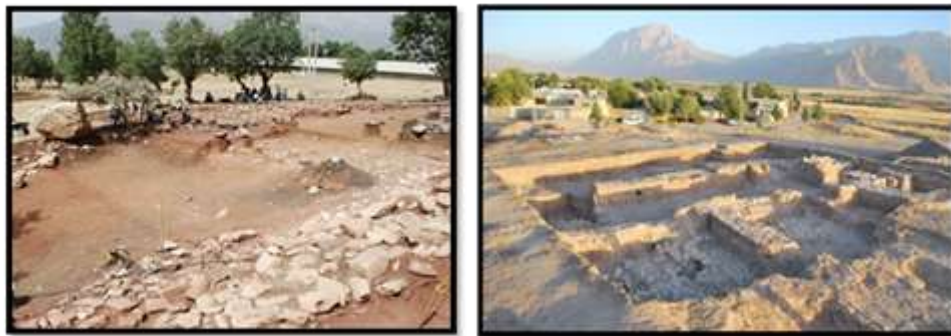
در سال‌های اخیر دو محوطه مهم تاریخی تپه‌فرودگاه و سنگتراشان در شهر خرم‌آباد مورد کاوش قرار گرفته‌اند. اشیای مفرغی با ظرافت و زیبایی بسیار از هر دو محوطه به‌دست‌آمده است، تپه‌فرودگاه در سال ۱۳۹۳ در یک‌فصل حفاری و محوطه سنگتراشان طی شش فصل از سال ۱۳۸۴ مورد کاوش قرار گرفتند که طی این حفاری‌ها تعداد کمی اشیای برنزی از تپه‌فرودگاه به‌دست آمد ولی در سنگتراشان گنجینه‌ای عظیم از آثار برنزی به‌دست آمد. در این پژوهش از هر محوطه تاریخی دو نمونه شیء برنزی انتخاب شد و با توجه به هم‌دوره بودن و نزدیکی مناطق کشف، نتایج حاصل از آنالیزهای انجام‌شده مورد تجزیه تحلیل و مقایسه قرار گرفت. در مقاله موردپژوهش با استفاده از روش‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به دستگاه آنالیز عنصری، متالوگرافی، توموگرافی کامپیوتری و رادیوگرافی پرتو ایکس، نوع آلیاژ، تکنیک ساخت، عناصر و ترکیبات شیمیایی مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده آلیاژ به کار گرفته‌شده در همه اشیای مورد مطالعه برنز تشخیص داده شد و با توجه به ریزساختار اشیای مورد مطالعه، استفاده از چکش کاری و تاب کاری در تکنیک ساخت اشیاء به کار گرفته‌شده است.

واژه‌های کلیدی: مفرغ‌های لرستان، تپه فرودگاه، سنگتراشان، متالوگرافی، توموگرافی کامپیوتری

۱. مقدمه

آوازه مفرغ‌های لرستان از اواخر دهه ۱۹۲۰ میلادی و یا شاید از سال ۱۹۲۸ میلادی در باستان‌شناسی آسیای غربی و خصوصاً لبه غربی فلات ایران پیچید. سرآمدترین دستاورد هنری غرب ایران از اوایل هزاره سوم پ.م (پیش از میلاد) تا هزاره یکم پ.م (پیش از میلاد) آثار مفرغی و مسین معروف به مفرغ‌های لرستان است (ملکزاده، ۱۳۹۱: ۵). بررسی مفرغ‌های به دست آمده از دو محوطه مهم و باستانی تپه فرودگاه و سنگتراشان واقع در شهر خرم‌آباد و مقایسه این اشیاء باهم از مهم‌ترین اهداف این مقاله است.

تپه موسوم به فرودگاه (تصویر راست در عکس ۱)، در حاشیه جنوبی دره خرم‌آباد در میانه‌ی محوطه فرودگاه خرم‌آباد واقع شده است که در سال ۱۳۹۳ این تپه مورد حفاری قرار گرفت که به‌عنوان یکی از مهم‌ترین کاوش‌های اخیر معرفی شده است و به گفته مسئولین میراث فرهنگی استان لرستان، این محوطه از هشت سال قبل به‌عنوان یک سایت باستان‌شناسی ثبت شده است. این محوطه در دل خود دارای چهار دوره است که مهم‌ترین دوره آن متعلق به پیش از تاریخ است که حدود سه مرحله تاریخی در این مقطع در سطح تپه وجود دارد. اشیاء سفالی زیادی که اکثراً پیکرک حیوانات هستند در این محوطه به دست آمده و در بین آن‌ها فقط تعداد بسیار معدودی اشیاء برنزی به چشم می‌خورد (سجادی، ۱۳۹۴: ۲۳۱). با این حال کشف گور متعلق به ۳۲۰۰ سال قبل نیز از یافته‌های این محوطه است که با توجه به اسکلت درون آن شیوه دفن به صورت چمپاته-ای بوده است، و همچنین شاخص‌های به دست آمده و بررسی شده توسط باستان‌شناسان این محوطه را متعلق به عصر آهن تشخیص داده‌اند، محوطه دیگر بانام سنگتراشان در ۵۲ کیلومتری جنوب شرقی خرم‌آباد در بخش پاپی و دهستانی به نام کشور قرار دارد (تصویر چپ در عکس ۱). سنگتراشان دفينه‌ای بسیار باشکوه و عظیم از آثار برنزی را در دل خود جای داده است. این محوطه از نظر کاربردی و با توجه به آثار به دست آمده نمادین و آیینی که اغلب نقش انسان‌های در حال نیایش و پیکرک‌های مذهبی هستند می‌توان این منطقه را یک مکان مقدس و با کمی تردید یک نیایشگاه عنوان کرد (ملکزاده، ۱۳۹۱: ۱۲).



عکس ۱: تصویر راست تپه فرودگاه، و تصویر چپ سنگتراشان (نگارندگان)

۲. پیشینه پژوهش

اشیاء تپه فرودگاه برای اولین بار مورد بررسی و آنالیز قرار گرفت و مستندات آن که بتوان از نوع تکنیک ساخت و عناصر ترکیبی در این اشیاء را ذکر کرد وجود نداشت، قابل ذکر است که چون این محوطه مربوط به عصر آهن است تا حدودی می‌توان آن‌ها را از لحاظ فن و آسیب‌شناسی و همچنین عناصر متشکله در ترکیب خود

قابل قیاس و نزدیک به اشیای برنزی سنگتراشان دانست. اشیای زیادی از محوطه سنگتراشان به دست آمده است و تاکنون فقط چند مورد از آنها مورد بررسی و پژوهش قرار گرفته‌اند.

در مقاله‌ای با عنوان فرایند چکش‌کاری- تاب‌کاری متناوب در ساخت گل‌میخ‌های کوچک، توسط عود باشی و مرتضوی، تعدادی از اشیای لوله دار سنگتراشان مورد آنالیز و بررسی قرار گرفته‌اند و با آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به دستگاه آنالیز عنصری (SEM-EDX) مشخص شد مقدار ۶ تا ۴ درصد قلع در ترکیب برنز وجود دارد. در گروه برنزه‌های کم قلع دارای ساختار تک فازی قرار می‌گیرند و به مقدار کم P, Zn, As, Fe, Pb, S وجود دارد و نتیجه این که ریزساختار فلزی شامل دانه‌های باز تبلور یافته دارای دوقلوبی و خطوط لغزش زیاد بود و نشان‌دهنده فرایند چکش‌کاری، تاب‌کاری متناوب در ساخت گل‌میخ‌های به‌کاررفته در اشیای این منطقه است (عودباشی، ۱۳۹۱: ۲).

نقوی در پایان‌نامه ارشد خود با عنوان بررسی و آنالیز روی چهار شیء آهنی از منطقه سنگتراشان می‌گوید که پس از انجام آنالیزها و انجام توموگرافی مشخص شده که عملیات چکش‌کاری روی این اشیا انجام گرفته است و افزایش چکش‌کاری، یعنی خالص‌سازی بیشتر فلز آهن در نتیجه شکننده شدن آهن است. با وجود اینکه این اشیا در همان محیطی قرار دارند که اشیای برنزی هستند اما خوردگی در آنها غیرفعال است (نقوی، ۱۳۹۱: ۴۹).

عودباشی با انجام آنالیز SEM-EDX روی ۲۲ نمونه از اشیای مطالعاتی محوطه سنگتراشان، باقی ماندن بخش قابل‌ملاحظه‌ای از باقیمانده فلزی در درون ساختار اصلی شیء را عنوان کرده است که بیانگر این است که عناصر اصلی تشکیل‌دهنده ترکیب آلیاژ در نمونه‌ها مس و قلع است که قلع بین ۵/۵ تا ۱۳/۵ درصد متغیر است با این حال میزان قلع متفاوت است و هیچ الگوی مشخصی از آلیاژسازی را ارائه نمی‌دهد و احتمالاً فلزگران سازنده اشیا این منطقه از استحصال توأم سنگ معدن مس و قلع همراه با هم جهت تولید برنز استفاده کرده‌اند (عودباشی، ۱۳۹۲: ۹۶). در مطالعه سطح مقطع نمونه‌های محوطه سنگتراشان، حاوی بیش از ۵۰٪ اصل ساختار فلزی تشکیل‌دهنده هستند که بیانگر وقوع خوردگی محدود در اشیا قرارگرفته در محیط خاکی طی ۳۰۰۰ سال مدفون شدن است (عودباشی، ۱۳۹۲: ۹۷).

شرایط خوردگی اشیای برنزی مربوط به محیط دفن، نوع و خواص فلز بستگی دارد، مطالعه لایه‌های خوردگی تعدادی از اشیای برنزی مربوط به محوطه سنگتراشان لرستان نشان‌دهنده وجود کوپریت به‌عنوان مهم‌ترین محصولات خوردگی در بیشتر نمونه‌ها و همچنین مالاکیت و آزوریت در نمونه‌هاست. مشاهدات سطحی بر روی نمونه‌های مورد مطالعه این محوطه بیان‌گر این مطلب بود که سطح نمونه‌ها حاوی پاتین صاف و یک‌دست با رنگ‌هایی مانند خاکستری تیره، سبز- خاکستری است اما مطالعه مقطع عرضی نمونه‌ها، در حقیقت ساختاری دولایه‌ای دارد که لایه رویی به شکلی یکنواخت و با ضخامتی تقریباً یکسان در داخل ساختار آلیاژ اصلی شکل‌گرفته است و شکل کل قطعه فلزی را پوشانده است (عودباشی، ۱۳۹۲: ۱۱۱).

در بررسی ۹ مورد از نمونه‌های مطالعاتی سنگتراشان که بقایای ظروف شکسته هستند در راستای مطالعات و مشاهدات متالوگرافی در ریزساختار نمونه‌ها پیش از اچ تعداد زیادی آخال خاکستری‌رنگ دیده می‌شود که در راستای طولی مقطع کشیده شده‌اند در اکثر نمونه‌ها میزان کم سرب نشان‌دهنده این است که

¹ SEM-EDX: Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive X-Ray Analysis

فلزگران لرستان از سرب به‌طور گسترده به‌عنوان یک افزودنی تعمدی به آلیاژ استفاده نمی‌کردند و این میزان احتمالاً در فرایند استحصال از کانی‌های حاوی سرب در سنگ معدن وارد ترکیب آلیاژ شده است. شناسایی ساختار این برنرها با استفاده از آنالیز دستگاه ICP^2 (طیف‌سنجی پلاسمای جفت شده القایی) نشان می‌دهد ترکیب این اشیا در اصل از دو عنصر مس و قلع تشکیل شده‌اند (عودباشی، ۱۳۹۲: ۱۲۱۲).

نتایجی که از انجام آنالیزهای دستگاهی به دست آمده است در شناسایی تکنولوژی ساخت و همچنین تشخیص نوع خوردگی‌ها و تخریب‌ها بسیار حائز اهمیت است و برای کنترل و جلوگیری از زوال اثر می‌تواند راه‌کار کاربردی‌تر و مؤثرتری را ارائه داد. با توجه به این‌که در پژوهش حاضر به دنبال دستیابی به فن‌شناسی و آسیب‌شناسی اشیای موردنظر با آنالیزهای دستگاهی از تپه‌فرودگاه و سنگتراشان هستیم به‌طور مختصر نتایج به دست آمده از آنالیزهای انجام شده روی اشیای برنزی مربوط به چند مقاله عنوان شده است.

انجام آنالیز $SEM-EDX$ روی نمونه‌هایی برنزی از مصر انجام گرفته است که شاهد وجود مس، قلع و سرب است که طبق آنالیز XRD انجام گرفته، وجود فازهایی همانند مالاکیت، آتاکامیت، پاراتا کامیت و کوپریت با توجه به شرایط و وجود رطوبت و اکسیژن در اشیا مشاهده شده است (Ghoniem, 2011: 100).

در مطالعه بر روی پنج نمونه از اشیای موزه دهمار یمن که از اشیای برنزی حاوی سرب هستند برای بررسی تأثیر نقش ساختار شیمیایی بر زوال آن‌ها از بررسی $SEM-EDX$ و همچنین XRD استفاده شد و نتایجی به دست آمده است که به درمان و حفاظت این اشیا کمک می‌کند. در بررسی متالوگرافی بر روی سه نمونه، حفره‌هایی روی سطح آلیاژ تشخیص داده شد که نشان از تخریب سطح صاف آلیاژ است که به دلیل خوردگی‌های ناشی از واکنش‌های شیمیایی در ترکیبات با محیط است. انجام آنالیز SEM نشان داد که اشیا حاوی سرب هستند. ترک خوردگی و تغییر شکل در لبه‌های نمونه‌ها مشاهده شده است که در یک نمونه این خوردگی بیش‌تر از نمونه‌های دیگر است و باعث شکاف در شیء شده است. در این پنج نمونه مس، قلع و سرب وجود دارد و آخال‌ها نیز در این نمونه‌ها حضور دارند. طبق آنالیز XRD ، از میان پنج نمونه، دو نمونه دارای مقدار بیشتری کوپریت و ۱۲ تا ۱۵ درصد آتاکامیت بودند و در یک نمونه بیشترین درصد را آتاکامیت تشکیل داده است (Megahed, 2013: 13).

حفاری‌های باستان‌شناسی در محوطه سنگتراشان موجب کشف بقایای سنگی همراه با مجموعه بزرگی از اشیای برنزی همراه با اندکی اشیا ساخته شده از سفال، آهن، سنگ و استخوان شد. محوطه سنگتراشان طی هزاره قبل از میلاد و عصر آهن II تا III مورد استفاده قرار گرفته است. حفاری سنگتراشان از سال ۱۳۸۴ تا سال ۱۳۸۸ در شش فصل انجام گرفت که طی آن ۱۵۰۰ قلم جنس از اشیای نفیس از دل خاک به دست آمد که حدود ۱۲۰۰ قلم اشیای برنزی، آهن و عاج و استخوان است. دو محوطه تاریخی و باستانی تپه‌فرودگاه و سنگتراشان در موقعیتی نه‌چندان دور از هم قرار دارند که فاصله این دو محوطه به خط مستقیم از هم ۳۶ کیلومتر است که در نقشه شماره ۱ موقعیت آن‌ها مشخص شده است.

²: Inductively Coupled Plasma



نقشه ۱: موقعیت محوطه تپه‌فرودگاه و سنگتراشان، www.Google-Earth.com









۳. معرفی آثار و نمونه‌های مشابه

نمونه‌های انتخاب‌شده، از چهار شیء مربوط به عصر آهن هستند که از هر محوطه دو شیء انتخاب شده است که به‌اختصار به معرفی اشیا و نمونه‌های مشابه و همچنین مشخصات ظاهری آن‌ها در جدول ۱ پرداخته شد. نمونه شماره ۱ بشقاب برنزی از محوطه تپه‌فرودگاه، دارای شکستگی و محصولات خوردگی و رسوبات محیطی و همچنین دارای ترک خوردگی در سرتاسر بدنه است، دورتادور ظرف را فرمی برجسته به شکل گل لوتوس به تعداد ۲۷ عدد تشکیل داده است. نمونه شماره ۲ شامل تکه‌هایی از یک ظرف و مربوط به محوطه تپه‌فرودگاه است. نمونه شماره ۳ قوری آبریزدار از محوطه سنگتراشان است این شیء در حفاری با مشخصات *ST84/E107* به‌دست‌آمده است که دارای شکستگی و کمبود در بخش بدنه و همچنین دارای آبریز بلند و بخش شکمی با شیارهای دایره‌ای به شکل چشم انسان است. روی سطح بدنه محصولات خوردگی سبز و آبی‌رنگ مشاهده می‌شود. نمونه شماره ۴ نیز تکه‌هایی از یک سیتولا به‌دست‌آمده از محوطه سنگتراشان است و بخشی مربوط به پایه ظرف است. سیتولا^۳ به ظرفی اطلاق می‌شود که بدنه‌ای استوانه‌ای دارد، لبه ظرف اندکی به بیرون متمایل است و نسبت به بدنه زاویه‌ای قائمه دارد. و کف آن نیم‌کروی است که در کف ظرف برجسته‌ای دکمه‌ای شکل وجود دارد که به‌خاطر این کف کروی ایستایی نداشته و احتمالاً بر روی پایه‌ای مضاعف قرار گرفته است (ملکزاده، ۱۳۹۱: ۱۶۶).

جدول ۱: تصاویر اشیا و نمونه‌های تطبیقی و مستندنگاری، نگارندگان

نمونه	نام شیء	شکل نمونه	نمونه مشابه	مستندنگاری	دوره و محل کشف
FT NO I	بشقاب				عصر آهن تپه فرودگاه خرم‌آباد

³ Situla

				-		عصر آهن تپه فرودگاه خرم آباد
	NO 2	تکه های ظرف				
						عصر آهن سنگتراشان خرم آباد
	NO 3	قوری آبریزدار				
ST						عصر آهن سنگتراشان خرم آباد
	NO 4	تکه های سیتولا				

باتوجه به مطالعات انجام گرفته، در طرح نجات بخشی تپه فرودگاه، مطالعه و خواناسازی بافتار معماری، توالی فرهنگی، ترسیم بافت لایه شناختی اثر، کاوش افقی و مطالعه مواد فرهنگی و داده های باستان شناختی کاوش محدوده گسترده ای از بافتار خشتی و سازه های خاص، دربرگیرنده یک گورستان معاصر و سه دوره فرهنگی معرف عصر آهن و عصر مفرغ آغازین است. اشیای برنزی در لایه اول و در عمق یک متری به دست آمده اند (سجادی، ۱۳۹۴: ۲۳۲). در محوطه سنگتراشان نمونه ها رد فصل اول کاوش ۱۳۸۴ و اوائل ۱۳۹۵ به دست آمدند. هرچند اشیای را بر اساس شاخص های مورد نظر به دوره های نسبت می دهند اما قوری های به این شکل در باستان شناسی عصر آهن ایران به حدفاصل زمانی ۸۵۰ تا ۷۵۰ ق.م تاریخ گذاری می شوند. در واقع تاریخ نهشته شدن دفينه سنگتراشان را می توانیم در لحظه گذار میان عصر آهن II و III تاریخ گذاری کرد (ملکزاده، ۱۳۹۱: ۲۹۳).

۴. روش ها

در این پژوهش که جهت به دست آوردن اطلاعاتی در مورد ساختمان اشیای مورد مطالعه و همچنین نحوه ی توزیع چگالی در اشیاء، آسیب ها و تزیینات احتمالی، از آزمون توموگرافی کامپیوتری استفاده شد که در آزمون توموگرافی کامپیوتری (سی تی اسکن) نیازی به نمونه برداری نبود و اشیاء به طور کامل مورد تصویربرداری قرار گرفتند که این آزمون به کمک دستگاه مدل (Bright Speed 16s) ساخت کشور آمریکا، در بخش سی تی-اسکن بیمارستان عشایر شهر خرم آباد، انجام شد.

در روش بعدی جهت تجزیه و تحلیل ویژگی های میکروساختاری و ترکیب آلیاژ و همچنین ناخالصی های احتمالی موجود در آن ها، و ترکیب شیمیایی فازهای مختلف موجود در مقاطع اچ نشده ی نمونه های مورد مطالعه، و دستیابی به عناصر تشکیل دهنده در ساختار نمونه های مورد بررسی، که در نتیجه آن، به فن ساخت اشیاء پی می بریم از آنالیز نیمه کمی (SEM-EDS) به شیوه ی نقطه ای، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی

رویشی آنالیز انجام گرفت. نمونه‌ها که از بخش مغز فلزی و به صورت برش از مقطع عرضی اشیا هستند برای آماده‌سازی ابتدا باید در رزین مانت قرار گرفته و ثابت شود و سپس پولیش داده‌شده و آماده انجام آنالیز شود. با توجه به مطالب گفته‌شده، آنالیز (SEM-EDS) به صورت نقطه‌ای روی سطح انجام گرفت. انجام آنالیز (SEM-EDS) در دو مرحله و با بزرگ‌نمایی‌های مختلف توسط میکروسکوپ الکترون روبشی مدل (VEGA) (Rontec) مجهز به سیستم شناساگر الکترون برگشتی (BSE) و آنالیز عنصری (SEM) مدل (Rontec) (Quantax/QX2, Germany) در بنیاد علوم کاربردی رازی انجام شد.

برای بررسی ریزساختار اشیای موردپژوهش، نمونه‌ها بعد از آماده‌سازی و ثابت شدن در رزین و قالب مانت، پولیش داده شدند و قبل و بعد از اچ مورد بررسی قرار گرفتند. نمونه‌ها با میکروسکوپ پولاریزان با نور انعکاسی مجهز به دوربین عکاسی کانن با صفحه نمایش جداگانه، مدل (OGAWA Seiki CO, LTD MR-11) و در دو زمینه روشن و تیره تصاویر حاصل مورد بررسی قرار گرفتند. برای شناسایی محصولات خوردگی و رسوبات محیطی روی سطح نمونه‌ها، و دستیابی به فازهای موجود در اشیا، نمونه‌های مختلفی از محصولات خوردگی با رنگ‌های مختلف انتخاب و به صورت پودر درآمد و در دانشگاه اصفهان توسط دستگاه پراش پرتو ایکس مدل (D8 ADVANCE) ساخت کارخانه BRUKER کشور آلمان انجام شد.

۵. نتایج و بحث

۵-۱. بررسی آزمون توموگرافی کامپیوتری (سی‌تی‌اسکن)

سیستم‌های *X-Ray* برای دقت بیشتر در رادیوگرافی دیجیتالی و توموگرافی کامپیوتری کشف و توسعه یافته‌اند، این سیستم‌ها به هدف تحقیق و به کار بردن در حفاظت از میراث فرهنگی و صنعت رادیولوژی توسعه یافته‌اند (Casali, 2006: 2). یکی از مهم‌ترین آنالیزهایی که در حال حاضر می‌تواند برای دستیابی کامل‌تری به فن ساختار اشیا کمک کند؛ توموگرافی کامپیوتری یا سی‌تی‌اسکن است. مهم‌ترین آزمایش‌های سی‌تی‌اسکن را در سال ۱۹۶۸ روی ستون فقرات ۱۳۳ مومیایی انجام داد که در آن به عدم رشد طبیعی ۳۰٪ نمونه‌ها دست یافت (Dawson, 1968: 61). و انجام سی‌تی‌اسکن سه‌بعدی در سال ۱۹۷۰ توسط بکمن روی سر و بدن انجام گرفت (Hughes, 2010: 58). طبق آزمون انجام‌گرفته در هر چهار نمونه، اختلاف دانسیته در بخش‌های مختلف اشیا پدیدار است. اشیا در قسمت‌هایی که مغز فلزی سالم است تصاویر روشن و در بخش‌های خوردگی و کمبود تصاویر به صورت تیره مشاهده می‌شود. در نمونه شماره ۱ (بشقاب برنزی) از تپه‌فرودگاه قسمتی از بدنه ظرف موجود نیست که در تصویر حجم‌سازی شده، به صورت خیلی تیره قابل مشاهده است و در بخش‌هایی که ظرف پوشیده از محصولات خوردگی است تصویر این تیرگی کمتر به چشم می‌خورد و در بخش فلزی سالم تصویر کاملاً روشن است. در نمونه شماره ۲ (تکه‌های ظرف) از تپه فرودگاه، بخش‌هایی از لبه ظرف مورد آزمون قرار گرفت که با تصویر حجم‌سازی شده، نشان‌دهنده حضور کامل فلز اصلی در این قطعه‌ها بود. در نمونه شماره ۳ (قوری آبریزدار) از سنگتراشان به طور کامل مورد آزمون و بررسی قرار گرفت. در تصاویر به دست آمده برجستگی‌ها، فرورفتگی‌ها و بخش‌های کمبود کاملاً مشخص شده‌اند. با توجه به این که در بخش‌های سالم ظرف پس از برخورد اشعه به فلز اصلی و جذب آن، تصویر حاصل به صورت کاملاً شفاف به دست آمده است در بخش‌هایی که فلز اصلی دچار خوردگی شده، عبور اشعه باعث ایجاد تصویر به صورت تیره

شده است. نکته مهمی که در این آزمون در این شی قابل توجه است در جدول شماره ۲ در بخش الحاقی بدنه ظرف (روی بدنه از قبل سوراخی وجود داشته است که با یک قطعه مستطیلی شکل از برنز با چهار عدد پرچ به بدنه برای پوشاندن سوراخ روی ظرف اتصال پیدا کرده است)، در قسمت سوراخ پوشانده شده و اطراف آن تصاویر بسیار تیره ایجاد شده است و این تصاویر و تیرگی‌های قابل ملاحظه با وجود ظاهر سالم ظرف در این بخش، نشان از حضور ضعیف فلز اصلی و پوشانندگی و جایگزینی آن توسط محصولات خوردگی است. در نمونه ۴ (بخشی از سیتولا) از محوطه سنگتراشان نمونه انتخاب شده و مورد آزمون قرار گرفته دارای مغز فلزی کامل و سالم بود.

جدول ۲: تصاویر حجم‌سازی شده حاصل از آزمون سی‌تی‌اسکن

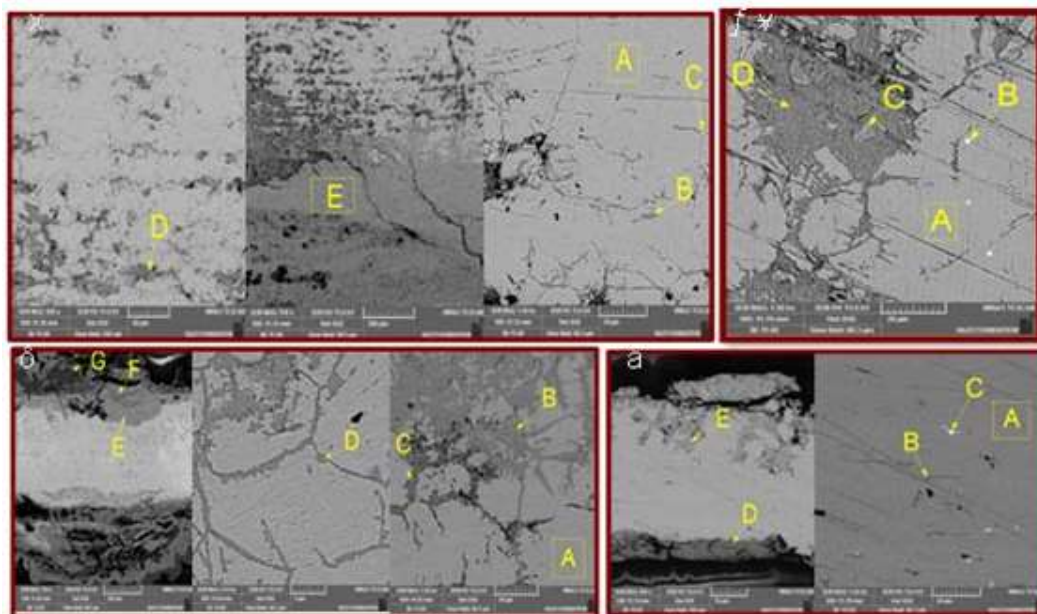
		Sample	شکل اصلی اشیا	تصاویر حجم‌سازی توموگرافی
FT	NO 1			
	NO 2			
ST	NO 3			
	NO 4			

بررسی نتایج آنالیز نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز عنصری SEM-EDS

۲-۵. نتایج آنالیز عنصری SEM-EDS

در نقطه A از تصاویر که ماتریس فلزی نمونه‌ها است در نمونه FT.NO1 در (شکل ۲ تصویر الف) مقدار مس (۷۸٪/۸۷) شناسایی شده است که این میزان در بخش فلزی نمونه شماره FT.NO2 (۸۵٪/۰۹) در (شکل ۲ تصویر ب) است و در نمونه‌های سنگتراشان یعنی شماره ST.NO3 (۸۷٪/۳۸) در (شکل ۲ تصویر ج) و در نمونه ST.NO4 در (شکل ۲ تصویر د) مس (۹۱٪/۷۴) است که با توجه به مقدار مشخص و به دست آمده، در اشیای تپه-فرودگاه این مقدار نسبت به اشیای سنگتراشان کم‌تر است.

عنصر قلع شناسایی شده به‌عنوان جزء دوم آلیاژ برنز در همه نمونه‌ها وجود دارد. در نمونه‌های تپه‌فرودگاه *FT.NO1* و *FT.NO2* به ترتیب، (۲۲/۲۳) و (۱۳/۵۳) و در نمونه‌های سنگتراشان *ST.NO3* و *ST.NO4* همان‌طور که در جدول ۳ مشخص شده است به ترتیب، (۱۲/۱۵) و (۷/۲۹) است. با توجه به حضور بالای قلع در اشیای تپه‌فرودگاه مشخص است که بر روی آن‌ها ریخته‌گری انجام گرفته است. برنزه‌های قلعی را می‌توان به دو گروه کم قلع و پر قلع تقسیم کرد. برنزه‌های کم قلع حاوی کم‌تر از ۱۷ درصد قلع هستند که این مقدار از نقطه نظر انحلال قلع در محلول جامد غنی از مس است. عملاً محدوده واقعی محلول جامد به ۱۴٪ نزدیک‌تر است. بیشتر برنزه‌های باستانی کم‌تر از ۱۷ درصد قلع هستند در این میزان قلع، برنز می‌تواند مورد کار سرد قرار گرفته و تاب‌کاری شود در عین حال اگر میزان قلع بین ۱۷ تا ۱۹٪ باشد، آلیاژ کارپذیر نیست نه کار سرد نه کار گرم (Scott, 1991: 25). در این شرایط قشری از فاز دلتا تشکیل شده و این فاز شکننده مرز دانه‌ها را پوشانده و در نتیجه کار، قطعه شکسته و چندانکه می‌شود. هرچند در بیش از ۱۹٪ قلع می‌توان بر روی برنز کار گرم انجام داد. آلیاژهایی از این نوع تقریباً همواره ریخته‌گری می‌شده‌اند. برنزه‌های قلعی دو جزیی حاوی بیش از ۱۷٪ قلع، اغلب حدود ۲۳٪ قلع دارند. در همه نمونه‌ها ارسنیک به‌طور اتفاقی در ترکیب آلیاژ حضور دارد و ممکن است از استحصال سنگ معدن وارد ترکیب شده باشد. حضور ارسنیک در نمونه شماره ۱ در بیشترین مقدار خود ۱/۵۸٪ است که در نمونه ۲ کمتر از ۱٪ در همه نقاط شناسایی شده است اما در نمونه ۳ ارسنیک اصلاً شناسایی نشده است و در نمونه ۴ حدود ۳٪ تشخیص داده شده است.



شکل ۲: تصاویر مربوط به آنالیز SEM-EDS الف نمونه شماره ۱، ب نمونه شماره ۲، ج نمونه شماره ۳، د نمونه شماره ۴

سرب در نقاط مختلف آنالیز شده به‌شدت افزایش یافته است. در نمونه‌های تپه‌فرودگاه در نمونه *FT.NO1* نقطه *B* (۸۸/۸۴) درصد و در نمونه *FT.NO2* در نقطه *C* (۷۳/۸۲) درصد است و در نمونه‌های سنگتراشان در نمونه *ST.NO3* درصد خیلی کمی نسبت به دیگر نمونه‌ها وجود دارد که در همه نقاط بین (۱/۰۶) درصد تا (۱/۴۹) درصد و در نمونه *ST.NO4* در نقطه *C* (۸۹/۲۴) درصد سرب شناسایی شده است باوجود درصد بالای

سرب در سه نمونه به صورت فاز نامحلول و عدم ترکیب با عنصر مس، به صورت گویچه‌های سربی سفیدرنگ در مرز دانه‌ها تشکیل شده است. در بررسی‌های به عمل آمده بر روی آثار برنزی در دیگر محوطه‌های لرستان نیز در بسیاری از اشیاء میزان سرب کمتر از یک درصد گزارش شده است، این موضوع نشان می‌دهد که احتمالاً فلزگران لرستان از سرب به طور گسترده به عنوان یک افزودنی تعمیدی به آلیاژ استفاده نمی‌کرده‌اند و این میزان کم سرب نیز احتمالاً در فرایند استحصال از کانی‌های حاوی سرب موجود در سنگ معدن وارد ترکیب شده است (عودباشی، ۱۳۹۳: ۸۵).

جدول ۳: نتایج به دست آمده از آنالیز عنصری SEM-EDS در هر چهار نمونه بر حسب درصد وزنی

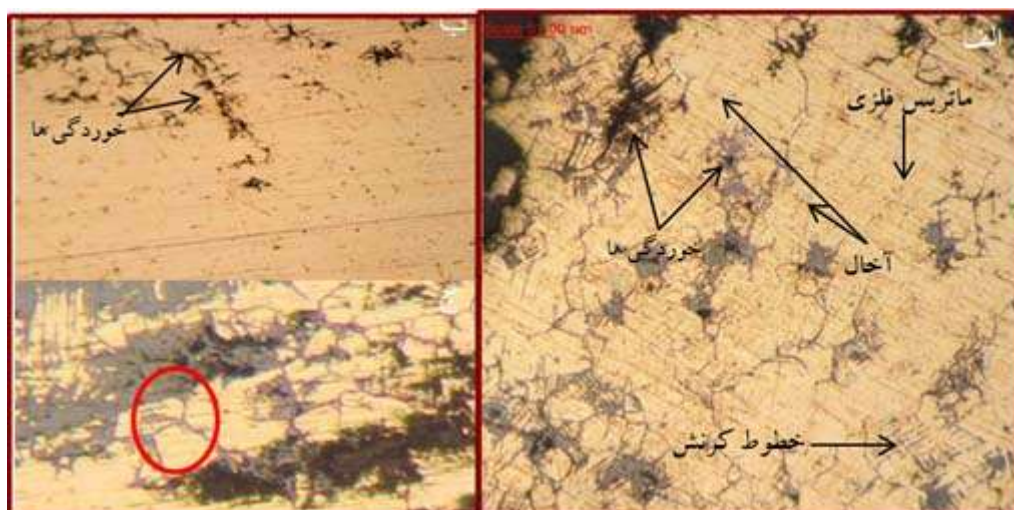
		Cu	Sn	Pb	As	Cl	Fe	O	Si	Al	S	K	Se
Ft: no/1	A	۱۸۷ ۷۴	۱۲۳ ۲۲	۱/۴۸	۰/۳۹	۱/۳	-	-	-	-	-	-	-
	B	۶/۱۲	۲/۰۶	۱/۸۴ ۸۸	۰/۳۰	۲/۶۷	-	-	-	-	-	-	-
	C	۵/۱۱	۱/۰۸ ۵۲	۶/۶۵	۱/۵۸	-	-	۱/۶۳ ۳۴	-	-	-	-	-
	D	۱/۴ ۲۴	۱/۲۵ ۳۶	۳/۸۷	۰/۵۴	۱۶/۱۰	-	۱۹/۹	-	-	-	-	-
Ft: no/2	A	۱/۰۹ ۸۵	۱/۵۴ ۱۳	۱/۰۷	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B	۱/۱۷ ۷۸	۳/۰۹	-	-	-	-	-	-	-	۱/۴۷ ۱۸	-	-
	C	۱/۴۹ ۲۱	۲/۳۱	۱/۸۲ ۷۳	-	-	۲/۱۱	-	-	-	-	-	-
	D	۱/۵۰ ۳۰	۱/۶۹ ۳۸	۲/۷۶	-	۴/۴۵	-	۲۱/۹۱	-	-	-	-	-
	E	۱/۶۹ ۵۴	۱/۹۳ ۱۹	۲/۱۲	۰/۲۰	۰/۳۹	۰/۱۹	۲۱/۹۹	۰/۳۹	-	۰/۱۱	-	-
St: no/3	A	۱/۰۸ ۹۰	۷/۲۹	۱/۷۵	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B	۷۰/۱۶	۴/۲۳		-	-	۱/۶۱ ۲	-	-	-	۱/۲۰ ۲۲	-	-
	C	۹/۵۸	۱/۰۴	۱/۲۴ ۸۹	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	D	۱/۲۱ ۳۸	۹/۰۸	۱/۵۷	-	-	-	۵۰/۷۹	-	-	-	-	-
	E	۱/۸۶ ۶۶	۹/۳۱	۳/۵۲	-	-	-	۲۰/۳۱	-	-	-	-	-
	A	۱/۳۸	۱۲/۱۵	۰/۴۷	-	-	-	-	-	-	-	-	-

St: no/4		۸۷											
	B	۱۰۵ ۵۵	۱۹/۱۳	۱/۴۹	۰/۴۸	۰/۷۰	-	۲۳/۱۴	-	-	-	-	-
	C	۱۷۵ ۴۰	۱۵۶ ۲۳	۱/۴۳	-	۱/۳۴	-	۱۱/۹۳	-	-	-	-	-
	D	۱۷۷ ۶۶	۳/۷۸	-	۰/۷۱	۰/۴۷	-	۳/۴۵	-	-	۱۴/۳۳	-	۱۰/۵۰
	E	۱۲۹ ۲۰	۲۷	۱/۰۶	۰/۵۷	۰/۱۷	-	۵۰/۹۱	-	-	-	-	-
	F	۶/۹۳	۰/۵۰	-	-	-	-	۱۵۸ ۹۲	-	-	-	-	-
	G	۴/۹۹	۰/۲۵	۰/۳۶	۲/۹۹	۰/۱۳	۱/۱۲ ۲	۱/۹۵ ۶۳	۱/۸۱ ۱۸	۵/۰۲	۰/۰۹	۰/۸۲	-

علاوه بر عناصر شناسایی شده، عناصری دیگر از جمله آهن، کربن، گوگرد، سلنیوم، سیلیس و پتاسیم به‌عنوان ناخالصی و آخال‌های حاضر در ترکیب اشیاء شناسایی شدند. بررسی نتایج حاصل از آنالیز عنصری با توجه به در نظر گرفتن اجزای اصلی تشکیل‌دهنده در همه نمونه‌ها آلیاژ برنز شناسایی شد.

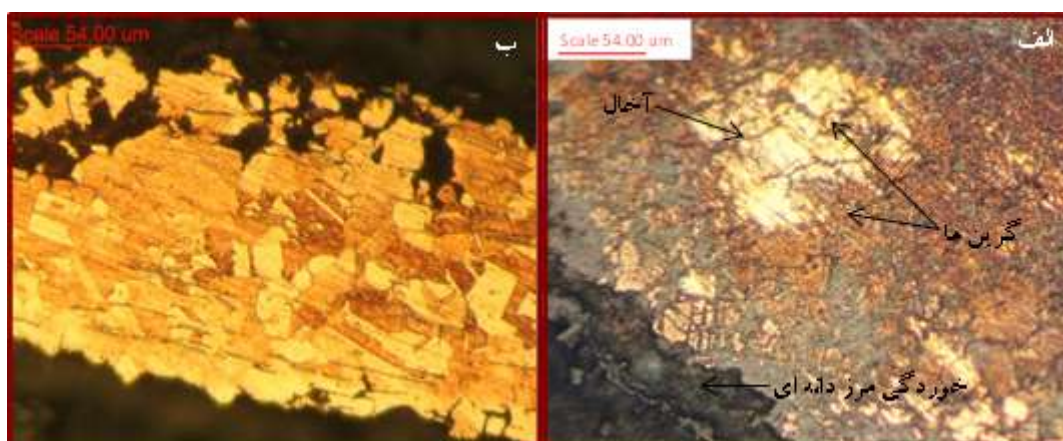
۳-۵. نتایج ریزساختار حاصل از متالوگرافی میکروسکوپ الکترونی پولاریزان

در بحث متالوگرافی و شناخت ریزساختار اشیاء در نمونه *FT.NO/1* طبق مطالعات و تصاویر حاصل بعد از اچ، (شکل ۳) روی سطح با توجه به پراکندگی حضور فازهای نارنجی‌رنگ در ماتریس فلزی، نشان‌دهنده‌ی از غنی از مس است حضور ناخالصی‌های کلریدی به‌طور پراکنده مشاهده می‌شود. مهم‌ترین ساختاری که در این نمونه قابل تشخیص بود فاز یوتکتوئید است که هنگامی رخ می‌دهد که یک محلول جامد به دو فاز مجزا تبدیل شود. در برنرها فاز یوتکتوئید از دو فاز آلفا و دلتا ساخته شده است. یوتکتوئید بسته به سرد شدن آلیاژ شروع به ظاهر شدن در ریزساختار آلیاژ حاوی حدود ۵ تا ۱۵٪ قلع و بیشتر می‌کند. مقدار زیاد فاز یوتکتوئید در برنز باعث مشکل انجام گرفتن عملیات مکانیکی بر روی آن می‌شود پس تاب‌کاری کافی روی برنرهای با ۱۴٪ قلع، موجب رفع یوتکتوئید می‌شود. با این حال در ماتریس فلزی نمونه ۱، خوردگی زیاد در مرز دانه‌ها و آخال‌های سبز کلریدی و خطوط کرنش حاصل از چکش‌کاری مشاهده می‌شود. خطوط کرنش خطوطی موازی هستند که در نتیجه کار مداوم روی آلیاژ در ریزساختار و در داخل دانه‌ها به وجود می‌آیند که در واقع گویای عملیات کار سرد بعد از بازپخت است (Scott, 1991: 9). در نمونه *FT.NO/2* در ماتریس فلزی خوردگی‌های زیادی دیده می‌شود که باعث از بین رفتن بخش ماتریس فلزی و تبدیل آن به محصولات خوردگی شده‌اند. حضور باندهای دوقلویی و خطوط کرنش حاصل از چکش‌کاری و ضربه‌های متناوب روی شیء کاملاً واضح است.



شکل ۳: ریزساختار مقاطع عرضی اچ شده الف نمونه شماره ۱، ب و ج نمونه شماره ۲

در نمونه‌های سنگتراشان نمونه *ST.NO/3* در بخش ماتریس فلزی، فاز غنی از مس در سطح نمونه دیده می‌شود. در این نمونه دانه‌بندی کامل دیده می‌شود در واقع کار مکانیکی نیازمند یک بازپخت است که از این طریق اثرات کار زیاد را از بین ببرد. آخال‌های کشیده به رنگ سبز و خاکستری در اثر فشارهای مکانیکی و تداوم کار سخت به وجود آمده‌اند. در نمونه *ST.NO/4* ماتریس فلزی و فاز غنی از مس مشاهده شد. دانه‌بندی واضح و آخال‌های ریز کلریدی دیده می‌شود و خوردگی مرزدانه‌ای و میان‌دانه‌ای با توجه به خوردگی شدید در این فاز شناسایی شده است (شکل ۴).

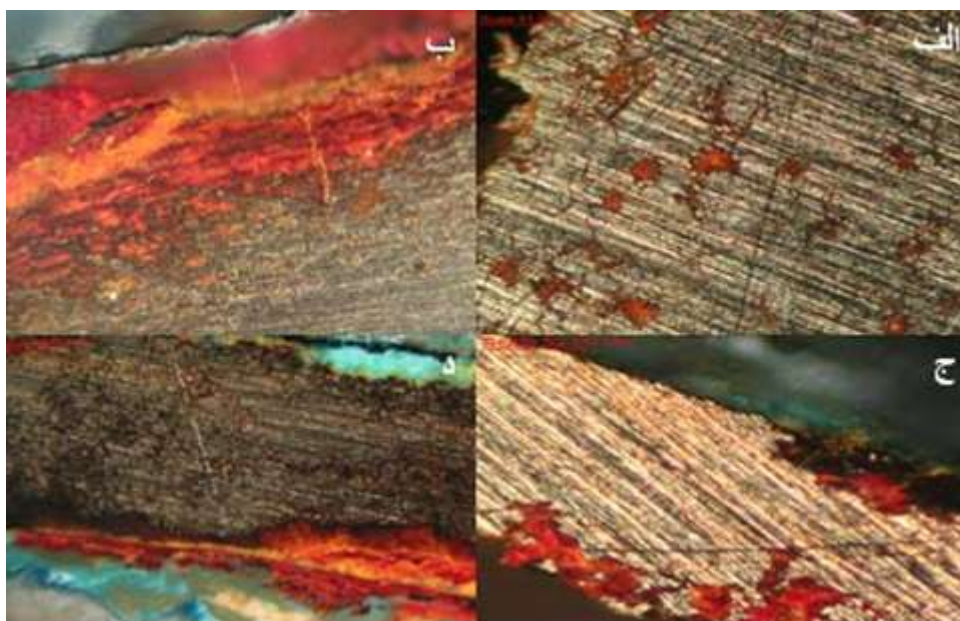


شکل ۴: ریزساختار مقاطع عرضی اچ شده الف نمونه شماره ۳، ب نمونه شماره ۴

۴-۵. نتایج حاصل از آنالیز محصولات خوردگی

پراش اشعه ایکس *XRD* یکی از روش‌های آنالیز دستگاهی است که برای شناسایی نوع محصولات خوردگی و تعیین میزان آن‌ها استفاده می‌شود. این روش دستگاهی، روشی است غیر تخریبی با شناسایی ساختار کریستالی در اشیاء که جهت‌گیری ترجیحی کریستالی را در ساختار موجود مشخص می‌کند. طبق این آنالیز بر روی محصولات خوردگی چهار نمونه اشیای مربوط به دو محوطه مهم و باستانی تپه‌فرودگاه و سنگتراشان

انجام گرفت و بر اساس آن فازهای موجود و میزان خوردگی‌های حاصل از اکسیدی شدن و همچنین وجود واکنش‌های کلریدی و کربنات‌ها که در جدول ۴ آمده است مشخص شد. در نمونه *FT.NO/1* و در تصویر الف از شکل ۵ به‌عنوان یکی از اشیای مهم تپه فرودگاه، شامل کوپریت، مالاکیت، کوارتز، کلسیت و آتاکامیت است. کوپریت به‌عنوان مهم‌ترین فاز و محصول خوردگی محافظ برای این شیء شناسایی شده است. کلسیت مشخص شده می‌تواند حاصل از محیط خاکی باشد که شیء در آن دفن بوده است. در نمونه *FT.NO/2* (شکل ۵ تصویر ب) حضور فازهایی همچون کوپریت، مالاکیت، آتاکامیت، پاراتاکامیت، کوارتز و کلسیت شناسایی شد. اما در نمونه *ST.NO/3* (شکل ۵ تصویر ج) فازهای شناسایی شده عبارت‌اند از کلسیت، مالاکیت، کوارتز، دولومیت، آزوریت و کلینوکلر که نتیجه جالب شناسایی نشدن کوپریت در این نمونه است. همان‌طور که در تصاویر شیء در بخش معرفی آن مشاهده شد، روی بدنه در کنار محصولات خوردگی شناسایی شده حضور کوپریت به چشم می‌خورد که شاید به علت محدودیت در نمونه‌برداری و یا کم بودن میزان آن، دستگاه قادر به شناسایی این فاز نبوده است. این نمونه دارای فازهایی متفاوت از بقیه است که ذکر آن رفت. در نمونه *ST.NO/4* (عکس ۵ تصویر د) کوپریت، کلسیت، مالاکیت، کوارتز، آتاکامیت و پاراتاکامیت شناسایی شد که شباهت فازهای این نمونه به نمونه‌های تپه‌فرودگاه بیشتر از نمونه ۳ است.



شکل ۵: محصولات خوردگی شناسایی شده توسط میکروسکوپ پولاریزان، الف نمونه شماره ۱، ب نمونه شماره ۲، ج نمونه شماره ۳، د نمونه شماره ۴

با توجه به نتایج حاصل از آنالیز فازی *XRD* در چهار نمونه مورد بررسی، نمونه‌ها به‌طور کلی دارای فازهای مشترک کلسیت ($CaCO_3$)، مالاکیت $(Cu_2(CO_3)(OH)_2)$ و کوارتز (SiO_2) هستند. کوارتز می‌تواند حاصل از خاک موجود در نمونه‌ها یا فازهای نفوذ کرده از خاک محیط دفن باشد که در بافت نمونه باقی مانده‌اند. کوپریت (Cu_2O) و آتاکامیت ($Cu_2Cl(OH)_3$) در نمونه‌ها به‌جز نمونه سه وجود دارند. نتایج فازهای شناسایی شده تا حدود زیادی در سه نمونه، نمونه‌های *FT.NO/1* و *FT.NO/2* از محوطه تپه فرودگاه، با نمونه

(*ST.NO/3*) از محوطه سنگتراشان مشابه هستند با این تفاوت که در نمونه شماره دو و چهار، پاراتا کامیت ($Cu_2(OH)_3Cl$) حضور دارد که روشن‌ترین رنگ سبز کلریدی است و حضور آن موجب تخریب در شی می‌شود. اما قابل ذکر است که متفاوت‌ترین ساختار فازی از محصولات خوردگی در نمونه (*ST.NO/3*) یعنی آبریز برنزی از محوطه سنگتراشان به چشم می‌خورد. حضور فازهایی همچون آزوریت $(Cu_3(CO_3)_2(OH)_2)$ ، دولومیت $(CaMg(CO_3)_2)$ و کلینوکلر $(Mg,Al,Fe),(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$ به عنوان سه فاز که در دیگر نمونه‌ها دیده نشد به چشم می‌خورد. همان‌طور که روی سطح بدنه آبریز مشاهده می‌شود محصولات خوردگی آبی‌رنگ تیره و روشن زیادی حضور دارند که نشان‌دهنده آزوریت است. کلینوکلر نیز همانند کوارتز از کانی‌های شاخص موجود در خاک است که از می‌توان گفت از خاک محیط در ترکیب فازی نمونه ایجاد شده است.

آزوریت نتیجه واکنش آب کربناته بر روی مس و یا واکنش کلرید مس یا سولفات مس با سنگ‌آهک یا کلسیت است (بخشده فرد، ۱۳۸۹ : ۵۵). مالاکیت و آزوریت از گروه کربنات‌های قلیایی مس هستند و به عنوان محصولات خوردگی در اشیای متفاوت ساخته شده از آلیاژهای مس دیده شده‌اند. مالاکیت همواره بر روی محصول خوردگی مس یعنی کوپریت به عنوان دومین محصول خوردگی ایجاد می‌شود. حضور مالاکیت بر روی سطح نشان‌دهنده زمینی بودن پاتین و حضور شی به مدت طولانی در زیر خاک است. در واقع این پاتین پس از تشکیل بر روی پاتین کوپریت به عنوان لایه‌ای محافظ که از نظر زیبایی‌شناسی اهمیت زیادی دارد که بر روی اشیای برنزی باستانی ایجاد می‌شود. حضور مالاکیت و آزوریت به عنوان محصول خوردگی زمانی که در تماس با آب خاک یا آب ایجاد شده به وسیله تراکم سطحی حاوی دی‌اکسید کربن باشد، تشکیل می‌شوند. آزوریت ناپایدارتر از مالاکیت است و ممکن است در حضور رطوبت بیشتر و کاهش CO_2 به مالاکیت تبدیل می‌شود. در حقیقت تشکیل مالاکیت بیشتر به خاطر حضور رطوبت زیاد و تشکیل آزوریت در شرایط خشک رخ می‌دهد. یکی از مهم‌ترین نتایجی که در نمونه‌های سنگتراشان به دست آمد، حضور دو فاز آتاکامیت و پاراتا کامیت در نمونه *ST.NO/4* است این فازها در حالی شناسایی شده است که در تمامی نمونه‌های سنگتراشان که از پیش مورد آنالیز قرار گرفته‌اند در هیچ شی شناسایی نشده است. به‌طور کلی می‌توان گفت شباهت‌های زیادی بین چهار نمونه از اشیای وجود دارد. فازهای شناسایی شده در تمامی نمونه‌ها با توجه به مقدار و نوع محصولات خوردگی شناسایی شده است که به‌طور قطعی نباید گفت که نتایج به‌طور کامل است، بر این اساس ممکن است مقدار نمونه تهیه شده بسیار کم باشد و در نتیجه در دستگاه قابل‌شناسایی نباشد. این فازها در نمونه‌های زیادی از محوطه سنگتراشان که مورد آنالیز قرار گرفته‌اند شناسایی نشده است. در نمونه ۳ (قوری آبریزدار) فازهایی مشابه با دیگر نمونه‌ها از قبیل مالاکیت، کوارتز و کلسیت دیده می‌شود، فازهای دیگری که در این نمونه کلینوکلر، دولومیت و آزوریت شناسایی شده است. کوپریت به عنوان اولین محصول خوردگی حاصل از اکسیداسیون و لایه محافظ بر روی سطح فلز ایجاد می‌شود این فاز قهوه‌ای‌رنگ، با وجود اینکه طبق مطالعات و مشاهدات میکروسکوپی بر روی سطح نمونه شماره ۳ دیده شد، در آنالیز فازی تشخیص داده نشد و این احتمال می‌رود که مقدار نمونه حاوی کوپریت بسیار کم بوده که قابل‌شناسایی نبوده است.

جدول ۴. فازهای شناسایی شده در محصولات خوردگی حاصل از آنالیز XRD

شماره نمونه	فازهای شناسایی شده								
	کوپریت (Cu_2O)	مالاکیت ($Cu_2(CO_3)(OH)_2$)	آتاکامیت ($Cu_2Cl(OH)_3$)	پاراتاکامیت ($Cu_2(OH)_3Cl$)	آزوریت ($Cu_3(CO_3)_2(OH)_2$)	دولومیت ($CaMg(CO_3)_2$)	کلسیت ($CaCO_3$)	کوارتز (SiO_2)	کلینوکلر
FT/No 1	+	+	+				+	+	
FT/No 2	+	+	+	+			+	+	
ST/No 3		+			+	+	+	+	+
ST/No 4	+	+	+	+			+	+	

۶. نتیجه

نتایج حاصل از آزمون توموگرافی تصاویری با دانسیته مختلف و تیرگی و روشنی‌ها، است که ضخامت لایه‌ها با توجه به آسیب‌های وارده بر آلیاژ را نشان می‌دهد. در تصاویر ثبت‌شده هرچه شیء سالم‌تر باشد تصویر حاصله روشن‌تر است و در بخش تخریبات و محصولات خوردگی تصویر به صورت تیره ایجاد شد. در میکروسکوپ نوری و نور انعکاسی (متالوگرافی)، با وجود مشخصه‌های دیده‌شده در هر چهار نمونه، خوردگی مرز بین‌دانه‌ای و میان‌دانه‌ای دیده شد که تمام دانه‌بندی‌ها کاملاً در ساختار نمونه‌ها مشخص شده است. حضور خطوط کرنش و یا لغزش در ریزساختار آن‌ها، نشان‌دهنده‌ی چکش کاری و تداوم کار سرد در این نمونه‌هاست. آخال‌های کلریدی و سولفیدی به صورت گرد و یا کشیده حاصل از تنش و کار مکانیکی زیاد است که به علت چکش کاری متناوب بسیاری از آخال‌ها به صورت کشیده و باریک درآمده‌اند. تاب کاری و چکش کاری و تداوم کار سرد عملیاتی هستند که در ساخت و شکل‌دهی اشیا استنباط می‌شود. طبق نتایج به‌دست‌آمده شباهت بسیار از لحاظ فن و تکنیک ساخت در چهار نمونه قابل ملاحظه است. طبق بررسی آنالیز SEM-EDS و آنچه از عناصر به‌دست‌آمده از نتایج آنالیز مشاهده شد، حفظ ساختار فلزی آلیاژ به مقدار زیادی در هر چهار نمونه است، خطوط کرنش و یا لغزش ناشی از چکش کاری در همه نمونه‌ها دیده می‌شود. باین‌حال شباهت‌های زیادی بین نمونه‌ها از دو محوطه وجود دارد. در ریزساختار نمونه‌ها تداوم کار سرد و حتی دانه‌های باز تبلور یافته و همچنین تاب کاری بعد از چکش کاری دیده می‌شود. نتایج حاصل از آنالیز فازی پراش اشعه ایکس (XRD) در اشیای شماره ۱ و ۲ و ۴ فازهای مشابه کوپریت، مالاکیت، آتاکامیت، کوارتز و کلسیت را مشاهده شد که به طور مشترک این فازها وجود دارند. حضور آتاکامیت در هر سه نمونه بیان‌گر حضور و فعال بودن بیماری برنز است و آن‌ها را از لحاظ عملیات مرمتی در اولویت کار قرار می‌دهد. نکته حائز اهمیت در محصولات خوردگی از نمونه‌های سنگتراشان در این پژوهش، حضور فازهای آتاکامیت و پاراتاکامیت است.

منابع

- بخشنده فرد، حمیدرضا، (۱۳۸۹). بررسی آثار تاریخی فلزی در مرمت. دانشگاه هنر اصفهان: چاپ اول.
- سجادی، علی، (۱۳۹۴). «کاوش نجات بخشی باستان‌شناختی تپه فرودگاه خرم‌آباد، فصل نخست». چهاردهمین همایش باستان‌شناسی ایران، تهران: مجموعه مقالات گزارش‌های باستان‌شناسی. ۲۳۱-۲۳۶.
- عودباشی، امید، (۱۳۸۰). پایان‌نامه‌ی کارشناسی، مطالعه و بررسی کاربرد بازدارنده خوردگی در مرمت اشیای مسی. دانشگاه هنر اصفهان.
- عودباشی، امید و امامی، محمدامین و دوامی، پرویز، (۱۳۹۰). «ریخت‌شناسی خوردگی در برنزهای تاریخی: تحلیل فرایند مس‌زدایی در اشیای برنزی هفت‌تپه خوزستان». نشریه مرمت آثار و بافت‌های تاریخی، فرهنگی / دو فصلنامه علمی پژوهشی: شماره اول.
- عودباشی، امید؛ مرتضوی، محمد و حسن‌پور، عطا، (۱۳۹۱). «فرایند چکش‌کاری و تاب‌کاری متناوب در ساخت گل‌میخ‌های برنزی باستان متعلق به لرستان». اولین همایش بین‌المللی، ششمین همایش مشترک انجمن مهندسی متالورژی انجمن ریخته‌گری ایران.
- عودباشی، امید، (۱۳۹۲). «شناسایی ماهیت شیمیایی لایه‌های خوردگی در برنزهای باستانی». علوم و مهندسی سطح.
- عودباشی، امید، (۱۳۹۳). «تحلیل ریخت‌شناسی خوردگی و شرایط حفاظتی در مجموعه‌های برنزی به دست آمده از حفاری با تمرکز بر سیستم فلز-محیط - خوردگی».
- ملک‌زاده، مهرداد، (۱۳۹۱). نگاره‌شناسی و نشانه‌شناسی مفرغ‌های لرستانی بر پایه یافته‌های کاوش باستان‌شناختی سنگتراشان خرم‌آباد: دکتر حمید خطیب شهیدی.
- نقوی، سوگند، (۱۳۹۱). بررسی فنی چهار نمونه خنجر آهنی متعلق به محوطه‌ی تاریخی سنگتراشان خرم‌آباد و ارائه طرح حفظ و مرمت آن‌ها. پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشکده مرمت. دانشگاه هنر اصفهان.
- اسکات، دیوید، (۱۹۹۱)، *متالوگرافی و ریزساختار در فلزات باستانی و تاریخی*. ترجمه امید عودباشی، عاطفه شکفته: جهاد دانشگاهی.
- Dawson, W. R., and P.H.K., Gary 1968. *Catalogue of Egyptian antiquities in British Museum Mummies and Human Remains, British Museum Press, London.*
- Franco, C., 2006. *X-ray, digital radiography and computed tomography for cultural heritage, Department of physics, University of Bologna (Italy).*
- Hughes, S., 2010. *Unwrapping an ancient Egyptian mummy using axial computed. The queensland science Teacher, 36 (4)/ pp.22-24.*
- Oudbashi, O., Mohamadamin Imami S., and Davami, P., 2012 *Bronze in archaeology: A Review of the Archaeometallurgy of bronze in ancient Iran, in: Tech publication. Early Application and Current Performance – Enhancing Processes Collini, L. (ed.), in Tech Rijeka, 153-178.*
- Ghoniem, M., 2011. *The characterization of a corroded Egyptian bronze state and a study of the degradation phenomena, International Journal of Conservation Science. 2 (2) 95-108.*
- Scott, D A., 1991. *Metallography and microstructure of ancient and historical metals, Getty Conservation Institute, Los Angeles.*
- Megahed, M., Mohamed 2013. *The role of chemical composition of leaded bronze alloy in deterioration process, applied on some archaeological statues from Dhamar Museum, Yemen. International Journal of Science and Research (IJSR), vol. (6.14).*