نشریه علمی

پژوهش‌نامه ریخته‌گری

انجمن علمی ریخته‌گری ایران

مقاله پژوهشی:

مطالعه فلزگری اشیا فلزی باستانی از محوطه‌های عیلامی تپه سنجر خوزستان و تپه قلاگپ لرستان

فاطمه بارانی[۱]، حمیدرضا بخشنده‌فرد[۲*]، علیرضا سرداری[۳]

۱- دانش‌آموخته، رشته مرمت اشیاء تاریخی و فرهنگی، دانشکده مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران Email: Baroon7140@gmail.com

۲- دانشیار، گروه مرمت آثار و اشیاء فرهنگی، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان ، ایران Email، hr.bakhshan@aui.ac.ir :

۳- استادیار پژوهشکده میراث فرهنگی و گردشگری Email: a.sardari@richt.ir

*** نویسنده مکاتبه کننده: حمیدرضا بخشنده‌فرد** Email:hr.bakhshan@aui.ac.ir

تاریخ دریافت:
تاریخ بازنگری:
تاریخ پذیرش:

چکیده:

اهمیت شکل‌گیری و تحول دانش متالورژی در دنیای باستان (آرکئومتالورژی) به حدی است که بر تقسیم بندی دوره‌های فرهنگی پیش از تاریخ تاثیر گذاشته است. گسترش فلزکاری در فلات ایران همواره موضوعی جالب توجه برای دانشمندان بوده و دلیل آن پیشینه شاخص فعالیت‌های فلزگری در ایران از حدود ۷۰۰۰ سال قبل از میلاد است. در حقیقت تاریخ غنی فلات ایران و یافته‌ها فلزگری در نقاط مختلف ایران منبع مهمی برای مطالعات فلزگری کهن است. در پژوهش حاضر به بررسی ۶ نمونه از آثار فلزی متعلق به دو محوطه تپه سنجر و تپه قلاگپ متعلق به تمدن عیلام، دو تمدن باستانی که یکی در لرستان شرقی و در دشت ازنا معروف به تپه قلاگپ و دیگری تپه سنجر در شمال دشت شوشان، خوزستان پرداخته شده است. هدف از انجام این مطالعات، شناسایی ترکیب شیمیایی، بررسی ماهیت ریزساختاری نمونه های فلزی کشف شده از این محوطه‌ها است. نتایج نشان‌دهنده کار سرد، کار گرم و تابکاری بر روی تمامی نمونه هاست و همگی به جز ۱ نمونه دارای خوردگی شدید بوده و ترکیب آلیاژ برنز قلعی، برنز سربی و مس ارسنیک دار شناسایی شد. نتیجه تطبیق نتایج با سایر پژوهش‌ها نشان داد که فلزگری باستانی در این محوطه‌ها با آثار در محدوده شمال غرب فلات ایران تا حدود زیادی مشابه است و از لحاظ مواد تشکیل دهنده و میزان مواد شباهت‌ها بسیار زیاد است. هم‌چنین مشخص شد که شیوه استخراج فلز از سنگ معدن نیز تشابهات بسیاری دارد که ناخالصی‌ها و عناصر موجود در نمونه ها نشان دهنده آن است.

واژه‌های کلیدی:

فلزگری‌باستان،
عیلام،
تپه‌سنجرخوزستان،
تپه قلاگپ لرستان.

ارجاع به این مقاله:

فاطمه بارانی، حمیدرضا بخشنده‌فرد، علیرضا سرداری، مطالعه فلزگری اشیا فلزی باستانی از محوطه‌های عیلامی تپه سنجر خوزستان و تپه قلاگپ لرستان، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، جلد ۹ شماره ۱، صفحات .

شناسه دیجیتال: :(DOI)

مقدمه

فلزگری یکی از مراحل مهم در زندگی جوامع باستان تا به امروز بوده است که نشان‌دهنده پیشرفت و آشنایی مردمان با تکنولوژی و تخصصی شدن کارهاست. بر اساس تحقیقات و مطالعات انجام شده در زمینه فلزگری، آناتولی، قفقاز، ایران و شام به عنوان مکان‌هایی شناخته شده اند که اولین استفاده از فلزات مشاهده شده است [۱] .

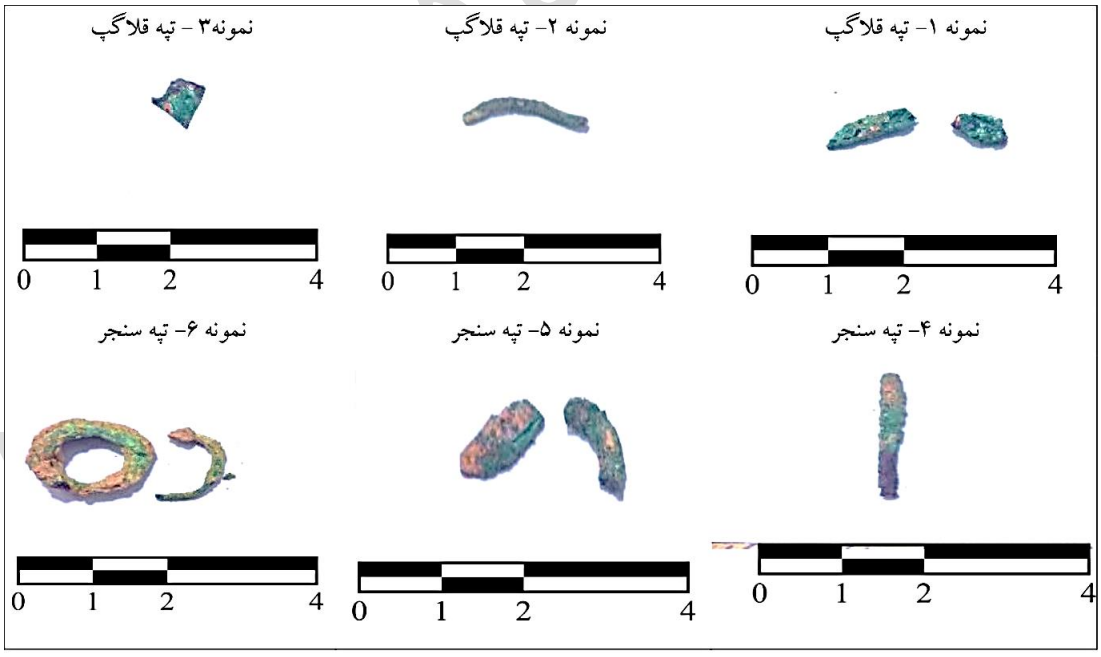
گسترش فلزگری در فلات ایران همواره موضوعی جالب توجه برای باستان‌شناسان و دانشمندان بوده است و دلیل آن پیشینه‌ی شاخص فعالیت‌های فلزگری در ایران از حدود ۷۰۰۰ سال قبل از میلاد است [۲] و بقایای گسترده و متنوع فلزگری در نقاط

مختلف ایران منبع مهمی برای مطالعات باستان‌شناسی و فلزگری کهن، به‌خصوص در چند دهه گذشته بوده است. با مطالعه فناوری و تاریخچه فلزگری عیلام می‌توان تصویر روشنی از هزاره‌های سوم ق.م تا اول ق.م میلاد به‌دست آورد. در این راستا مطالعاتی در تپه‌های منطقه زاگرس مرکزی انجام شده است و نتایج حاصل از آن‌ها تا حدودی فلزگری عیلامی را مشخص کرده است، اما به دلیل نبودن توالی دوره‌ها در همه‌جا نیاز به مطالعات گسترده‌تری است. در پی رسیدگی به توالی تاریخی دوره عیلام پس از تپه‌هایی هم‌چون شوش و هفت تپه و ... دو محوطه جدید مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این دو محوطه در فاصله چند ساعت از یکدیگر و در محدوده دشت‌های غربی زاگرس قرار دارند؛ تپه سنجر در شمال دشت شوشان، در استان خوزستان با وسعت تقریبی ۱۷هکتار از دوره‌های اواخر پیش از تاریخ و هم‌چنین دوره‌های ایلام قدیم، میانی و جدید است [۳].

تپه سنجر محوطه‌ای است که از تپه‌ای بزرگ با وسعت حدود ۱۷ هکتار و چند تپه کوچک یک تا دو هکتاری تشکیل شده است [۴]. این محوطه در ۱۸کیلومتری شمال شوش در مسیر راه دهلران به خوزستان واقع شده است. تپه سنجر به عنوان یکی از کانون‌های اولیه ظهور ایلامی‌ها، مرکز مهمی برای شناخت آثار مادی بازمانده از این دوره فرهنگی است. در شمال شرقی سنجر به فاصله ۳۱۶ کیلومتر، در لرستان شرقی و در دشت ازنا تپه تاریخی قلاگپ قرار دارد. این تپه با وسعت ۲ هکتار و توالی لایه‌های نوسنگی تا دوره اسلامی، براساس یافته‌های سطحی و مطالعات اولیه می‌تواند به عنوان یکی از کانون‌های مهم فرهنگی منطقه، چشم انداز روشنی را برای مطالعات بعدی ایجاد کند. آثار یافت شده از تپه قلاگپ شامل آثاری از اواسط هزاره دوم پ.م تا اواخر هزاره اول پ.م و آثار سنجر متعلق به آغاز ایلام و ایلام میانی (۳۱۰۰ تا ۲۶۰۰ پ.م) است [۵].

مواد و روش پژوهش

در این پژوهش به‌منظور مطالعه و شناسایی ترکیب شیمیایی اشیاء فلزی به‌دست آمده از دو محوطه باستانی تپه سنجر و تپه قلاگپ و کسب اطلاعات جدید و دقیق‌تری از فناوری و تکنولوژی ساخت و فلزگری عیلام و تمدن عیلامی بررسی بر روی تعداد ۶ عدد از آثار مفرغی شامل۳ شی متعلق به تپه سنجر و ۳ شی متعلق به تپه قلاگپ انجام شد. (شکل۱).



شکل ۱ -شش عدد از آثار مفرغی شامل سه شی متعلق به تپه سنجر و سه شی متعلق به تپه قلاگپ

در این راستا از روش‌های آنالیز دستگاهی میکروسکوپ الکترونی روبشی، با استفاده از دستگاه SEM-EDS مدل VEGA II، TESCAN، به همراه دستگاه اسپکتروفتومتر پراش اشعه ایکس(EDS) مدل RONTEC انجام شد. طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس (XRF) توسط Unisantis SMART-XRF مدل XMF-104 به همراه آشکارساز XR-100CR و مطالعات ریزساختارنگاری با استفاده از میکروسکوپ نوری انعکاسی ساخت شرکت Primotech Zeiss انجام شد. نمونه‌ها با استفاده از کلرید فریک محلول در آب $FeCl_3$ (10g) +HCl (30ml) in H_2O (120ml) حکاکی(اچ) شده اند[۶]. بررسی متالوگرافی، بعد از آنالیز SEM صورت گرفت. مطالعات، شامل شناسایی ترکیب شیمیایی آلیاژ اشیاء و میزان عناصر اصلی، فرعی و کم‌یاب موجود در ترکیب به منظور شناسایی روش تولید آلیاژ و مقایسه ترکیب در نمونه‌های مختلف و هم‌چنین مطالعه و بررسی ساختار فلزی نمونه‌های مورد پژوهش و شیوه ساخت آن‌ها بود.

نتایج و بحث

بررسی با میکروسکوپ الکترونی روبشی

در این پژوهش، با توجه به محدودیت‌هایی همچون عدم امکان نمونه‌برداری گسترده از تمامی اشیاء، تعداد اندک نمونه‌های قابل مطالعه و حجم کم مغز فلزی باقی‌مانده در آن‌ها، مجموعه‌ای محدود اما هدفمند از آثار انتخاب گردید تا داده‌های به‌دست‌آمده بتواند به پرسش‌های اصلی تحقیق پاسخ دهد. نمونه‌برداری با رعایت اصول حداقل مداخله و مطابق با استانداردهای حفاظت علمی صورت گرفت؛ به این ترتیب، قطعات بسیار کوچک از لبه‌ها، شکستگی‌ها و بخش‌های آسیب‌دیده آثار جدا شد تا کمترین آسیب به یکپارچگی شی وارد گردد. قطعات انتخابی پس از مانت در رزین، تحت مراحل آماده‌سازی متالوگرافی شامل سایش تدریجی با سنباده‌های با دانه‌بندی مختلف، پولیش نهایی با سوسپانسیون الماسه و شست‌وشوی دقیق قرار گرفتند. سپس مقاطع تهیه‌شده در شرایط خلأ پوشش‌دهی شدند تا برای مطالعات میکروسکوپی آماده گردند. بررسی‌های انجام‌شده شامل دو بخش اصلی بود: نخست، آنالیز ترکیب شیمیایی آلیاژ با هدف شناسایی عناصر اصلی، فرعی و کمیاب به‌منظور درک فناوری تولید و مقایسه ترکیب در میان نمونه‌ها؛ دوم، مطالعه ریزساختار فلزی برای تحلیل شیوه ساخت، فرایندهای متالورژیکی و تأثیر خوردگی. در این راستا، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به سیستم آنالیز اسپکتروسکوپی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) استفاده شد. این روش، ضمن فراهم آوردن تصاویر با بزرگنمایی و تفکیک‌پذیری بالا، امکان شناسایی مرز دانه‌ها، فازهای ثانویه، ناهمگنی‌های آلیاژی و محصولات خوردگی را فراهم ساخت. آنالیز EDS نیز به‌عنوان روشی مکمل، ترکیب شیمیایی مقاطع و نقاط انتخابی را تعیین نمود و داده‌های کیفی و نیمه‌کمی در خصوص عناصر سازنده ارائه کرد[۶] [۷]. نتایج مشاهدات با میکروسکوپ الکترونی و آنالیز اسپکتروسکوپی پراش انرژی پرتو ایکس (EDX) بر روی زمینه فلزی نمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

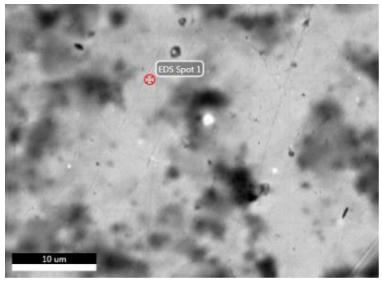
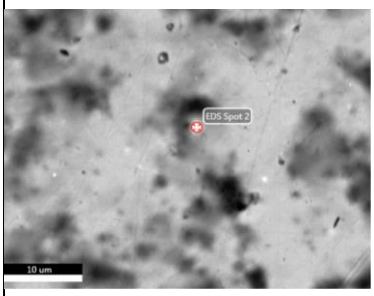
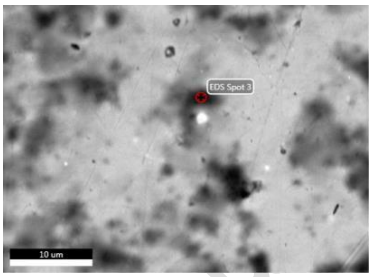
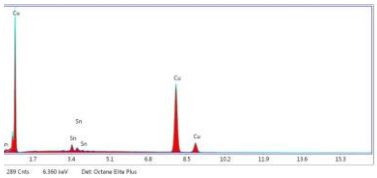
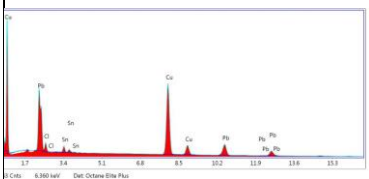
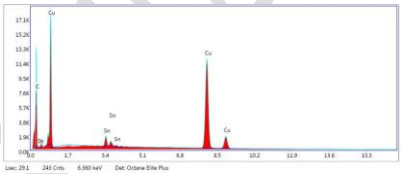
جدول ۱ - نتایجEDX ، کل سطح (full area) نمونه‌های مورد پژوهش

عناصر/ نمونه	Cu	Sn	As	Pb	C	O	Cl	خوردگی
نمونه ۱ - قلاگپ ۱۱۰۱	۶۵/۱۶	۳/۵۷	-	-	۲۴/۴۸	۶/۷۹	-	*
نمونه ۲ - قلاگپ ۱۰۶۳	۶۹/۵۶	۱/۳۵	-	-	۱۹/۷۸	۹/۳۱	-	*
نمونه۳ - قلاگپ ۱۰۴۱	۸۱/۲۴	--	۲/۰۷	-	۱۴/۳۴	۴/۴۳	-	*
نمونه ۴ - سنجر ۱۰۴۰	۷۹/۶۰	-	-	-	۱۵/۳۹	۵/۰۲		*
نمونه۵ - سنجر ۱۰۶۹	۷۴/۶۴	۱۸/۰۶	-	-	-	۶/۳۵	۰/۹۵	*
نمونه ۶ - سنجر ۱۱۹۵	۹۵/۳۳	-	۴/۶۷	-	-	-	-	-

این نتایج به خوبی نشان می‌دهد که نمونه‌های مورد مطالعه همگی از درصد بالای مس برخوردارند و نمونه ۱ و ۲ و ۵ از میزان بالایی قلع برخوردارند و در عین حال نمونه‌های ۳و ۴ و ۶ فاقد قلع بوده و دارای ارسنیک هستند و تنها نمونه ۱، در کنار قلع از درصد بالایی سرب در یک نقطه برخوردار بوده است. سه عدد از نمونه‌ها برنز قلعی و سه عدد مس ارسنیک‌دار هستند. نتایج حاصل از آنالیز عنصری نشان می‌دهد که نمونه‌های مورد مطالعه به‌طورکلی دارای درصد بالایی از مس هستند. در بررسی دقیق‌تر، میانگین مقدار مس در نمونه اوّل (قلاگپ ۱۱۰۱) بر اساس سه ناحیه آنالیزشده برابر با ۶۱/۱۵ درصد وزنی است. این میانگین، حاصل جمع‌بندی مقادیر نقطه‌ای در سه بخش مختلف سطح مقطع این نمونه است. با این حال، مقادیر حداقل و حداکثر مس بر اساس آنالیز کل سطح (full area) (جدول ۱) از شش نمونه مذکور به دست آمده‌اند که در آن مقدار مس در کمترین حالت برابر با ۶۵/۱۶ درصد وزنی و در بیشترین حالت معادل ۹۶/۸۳ درصد وزنی ثبت شده است. بنابراین، اختلاف عدد میانگین ذکرشده در متن با داده‌های جدول ناشی از تفاوت روش محاسبه میانگین ناحیه‌ای در برابر کل سطح (full area) است. این نتایج به‌خوبی نشان می‌دهد که تمامی نمونه‌ها از درصد بالایی مس برخوردارند، هرچند ترکیب عناصر آلیاژی در میان آن‌ها تفاوت قابل توجهی دارد. به‌عنوان نمونه، در سه مورد (نمونه‌های ۱، ۲ و ۵) درصد قابل توجهی قلع شناسایی شد، در حالی‌که سه نمونه دیگر (۳، ۴ و ۶) فاقد قلع بوده و در عوض حاوی مقادیر قابل ملاحظه‌ای ارسنیک هستند. همچنین، تنها در نمونه ۱ در کنار قلع، یک نقطه با درصد نسبتاً بالای سرب مشاهده شد. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که سه نمونه متعلق به گروه برنزهای قلعی بوده و سه نمونه دیگر در زمره آلیاژهای مس–ارسنیک قرار می‌گیرند. دامنه تغییرات مس در کل مجموعه، از ۶۵/۱۶ درصد وزنی (نمونه ۱ – قلاگپ ۱۱۰۱) تا ۹۵/۳۳ درصد وزنی (نمونه ۶ – سنجر ۱۱۹۵) متغیر است. بیشترین میزان قلع در میان نمونه‌ها برابر با ۱۸/۰۶ درصد وزنی و کمترین آن ۱/۳۵ درصد وزنی اندازه‌گیری شد. همچنین در نمونه‌های قلاگپ ۱۰۴۱ ، سنجر ۱۰۴۰و سنجر ۱۱۹۵ قلع مشاهده نشد. این اختلاف نشان می‌دهد که میزان قلع در اشیای مختلف به‌طور قابل توجهی متغیر بوده و انتخاب و کنترل آن در فرایند تولید این آلیاژها نقش مهمی داشته است. به‌طور کلی، نتایج آزمایش‌ها علاوه بر تأیید استفاده گسترده از مس، نشان‌دهنده وجود دو سنت متفاوت آلیاژسازی (برنز قلعی و مس ارسنیک‌دار) در میان آثار فلزی به‌دست‌آمده از محوطه‌های مورد بررسی است. نتایج آزمایش به خوبی بیانگر تفاوت میزان قلع در نمونه‌های مختلف آنالیز شده است. تفاوت در میزان قلع در اشیاء برنزی پیش از تاریخ در ایران موضوعی معمول است و در بسیاری از نمونه‌های برنزی آنالیز شده از محوطه‌های مختلف لرستان و دیگر نواحی ایران دیده شده است [۸]. در برخی منابع ذکر شده است که تنوع ترکیب در آلیاژهای برنز پیش از تاریخ به دلیل کارکرد متفاوت اشیاء مختلف بوده است. براساس متون کشف شده در بین النهرین، فلزگران در دوران باستان برای ساخت اشیاء مختلف از نسبت‌های مشخص قلع به مس مانند ۹:۱ یا ۸:۱ و یا ۱۶:۱ استفاده می‌کرده اند [۸]. برای مثال، به منظور تولید ظروف از یک نسبت و برای تولید جنگ افزارها یا اشیاء تزیینی از نسبتی متفاوت می‌شود. با وجود این، مطالعات آزمایشگاهی بر روی اشیاء برنزی محوطه‌های مختلف ایران نشان داده است که حتی در عصر آهن نیز این‌گونه نسبت‌ها در ترکیب اشیاء مشابه (از نظر کاربرد) به هیچ عنوان دیده نشده است [۷]. دیگر عنصر شناسایی شده در ترکیب یک نمونه، سرب است. نمونه شماره یک در آنالیز نقطه‌ای (SPOT 2) دارای ۳۵/۲۱ درصد وزنی سرب است. با توجه به استفاده از آنالیز نیمه کمی اسپکتروسکوپی پراش انرژی پرتو ایکس و طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس، امکان دارد که میزان دقیق سرب موجود در نمونه کمتر از میزان شناسایی شده با این روش باشد[۹] ،[۱۰]. با وجود این، مقدار زیاد سرب شناسایی شده در ترکیب این نمونه می‌توان دریافت که احتمالا این عنصر به عنوان ناخالصی از سنگ معدن‌های مورد استفاده وارد ترکیب آلیاژ شده است. [۱۱]. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز (EDX) کل سطح (full Area) بر روی نمونه‌های مورد مطالعه، عنصر ارسنیک در محدوده‌ای میان ۲/۰۷ درصد تا ۴/۶۷ درصد شناسایی شد؛ به‌گونه‌ای که بیشترین مقدار آن ۴/۶۷ درصد و کمترین مقدار آن ۲/۰۷ درصد اندازه‌گیری گردید. همچنین، نتایج نشان داد که در نمونه‌های شماره ۱، ۲، ۴ و ۵، ارسنیک قابل شناسایی نبود.

جدول ۲ - نتایج آنالیز نقطه ای SEM-EDX به همراه تصویر نقاط آنالیز شده و پیک‌های به دست آمده از EDX در هر نمونه

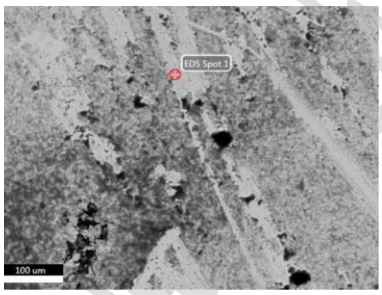
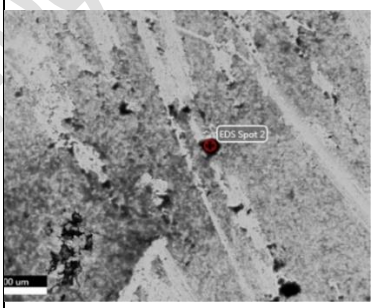
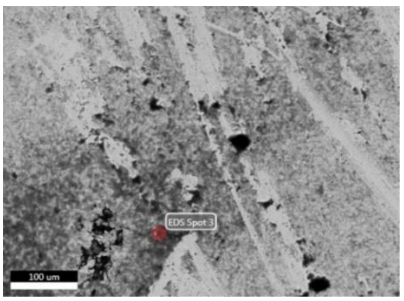
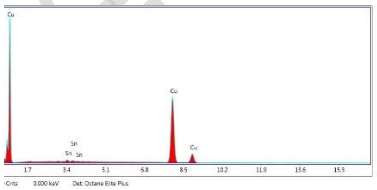
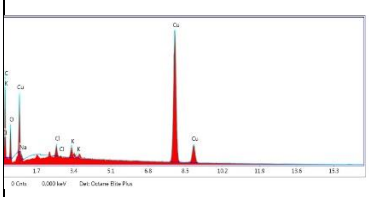
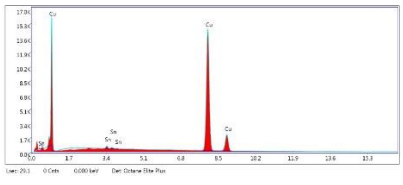
نمونه ۱ - قلاگپ ۱۱۰۱

Spot 1	Spot 2	Spot 3
		
		

Cu	Sn	As	Pb	Cu	Sn	As	Pb	Cu	Sn	As	Pb
۹۳/۵۵	۶/۴۵	-	-	۴۰/۳۸	۲/۸۰	-	۳۵/۲۱	۵۱/۳۳	۳/۶۴	-	-

درصد بالای مس و قلع و کمی سرب (آنالیز بخش روشن)

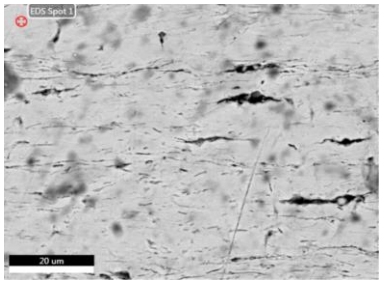
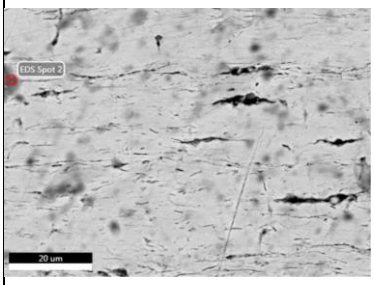
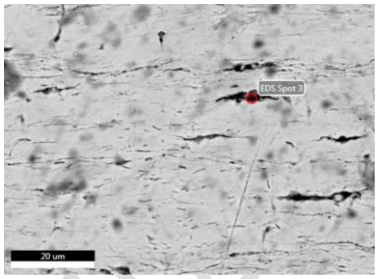
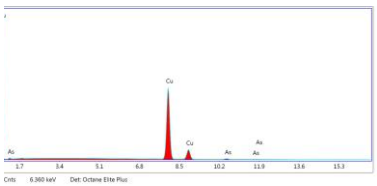
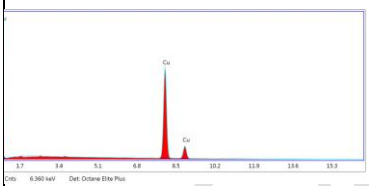
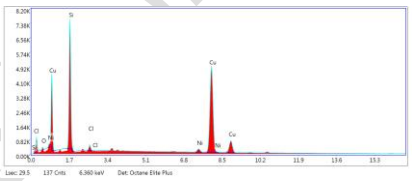
نمونه ۲ - قلاگپ۱۱۶۳

Spot 1	Spot 2	Spot 3
		
		

Cu	Sn	As	Pb	Cu	Sn	As	Pb	Cu	Sn	As	Pb
۸۴/۷۰	۱/۶۳	-	-	۵۶/۸۰	-	-	-	۹۸/۶۵	۱/۳۵	-	-

درصد بالای مس و قلع فاقد قلع در بخش تیره

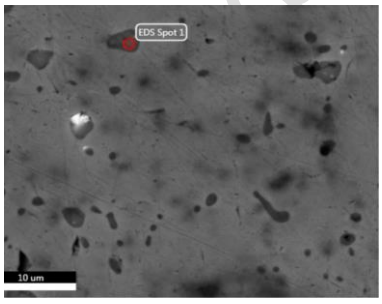
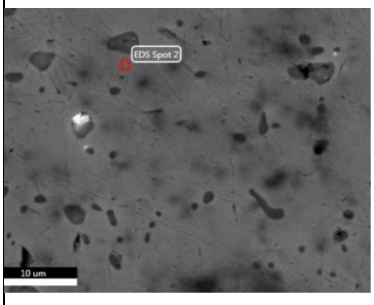
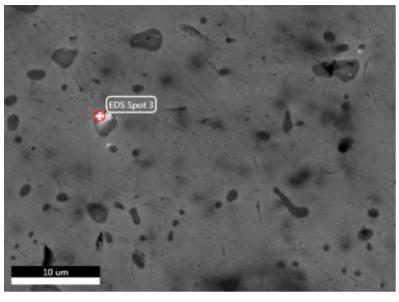
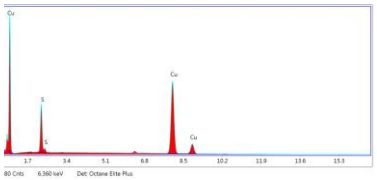
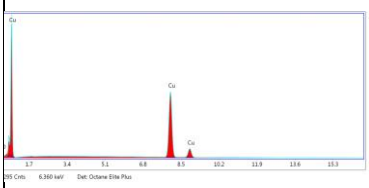
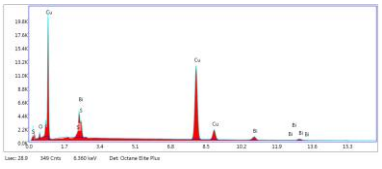
نمونه ۳ – قلاگپ۱۰۴۱

Spot 1	Spot 2	Spot 3
		
		

Cu	Sn	As	Pb	Cu	Sn	As	Pb	Cu	Sn	As	Pb
۸۲/۹۲	–	–	–	۵۶/۱۸	–	–	–	۶۹/۱۱		–	–

درصد بالای مس، فاقد قلع با ارسنیک در آنالیز نمای کلی

نمونه۴ – سنجر۱۰۴۰

Spot 1	Spot 2	Spot 3
		
		

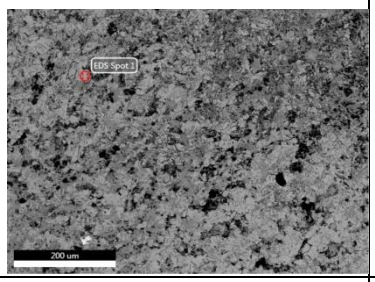
Cu	Sn	As	Pb	Cu	Sn	As	Pb	Cu	Sn	As	Pb

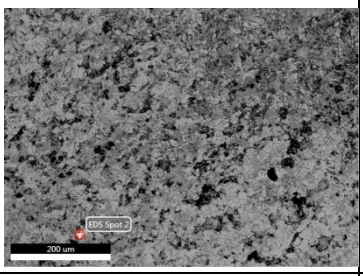
۸۲/۳۳	–	–	–	۸۰/۵۱	–	–	–	۷۴/۴۱	–	–	–

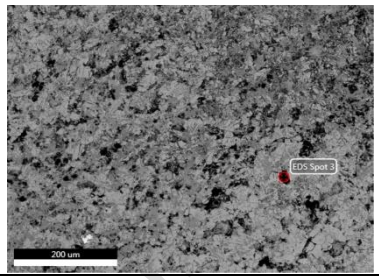
درصد بالای مس و فاقد قلع و ۲۲/٤۱ درصد وزنی Bi

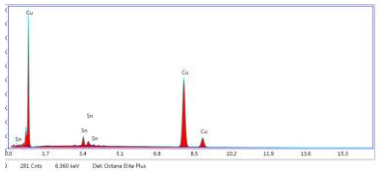
نمونه ۵ – سنجر ۱۰۶۹

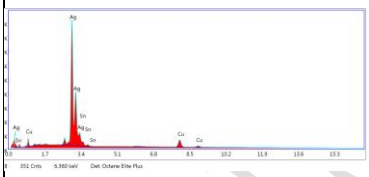
Spot 1 | Spot 2 | Spot 3

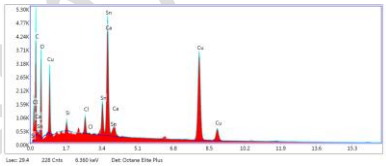






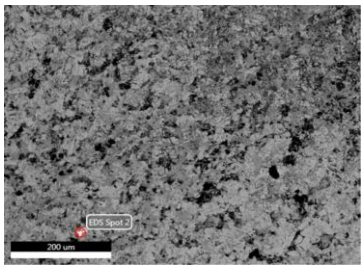


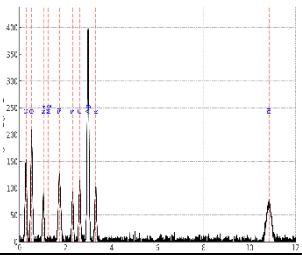




Cu	Sn	As	Pb	Cu	Sn	As	Pb	Cu	Sn	As	Pb
۹۱/۲۸	۸/۷۲	–	–	۹/۵۶	۳/۲۶	–	–	۳۰/۲۴	۷/۴۹	–	–

درصد بالای مس و قلع و با ۸۷/۱۷ درصد وزنی Ag

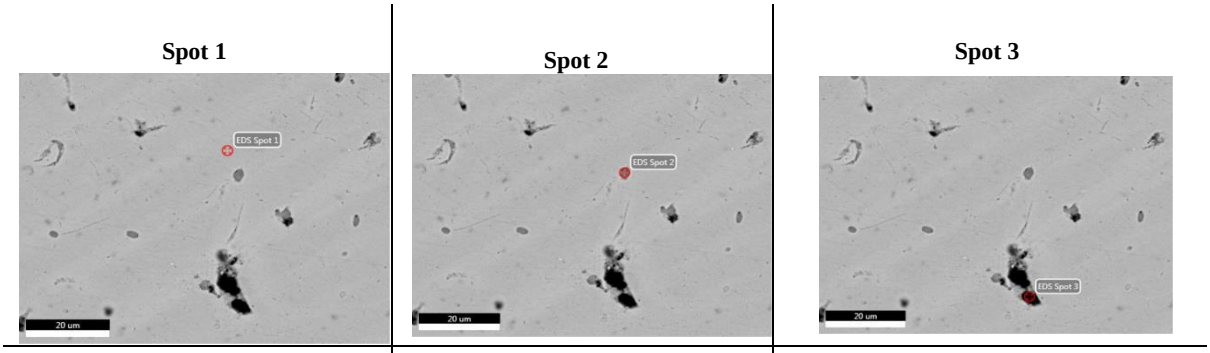




Ag	C	O	Na	Si	S	Cl	K	Bi
۸۷/۱۷	۲/۱۵	۴/۳۲	۰/۸۵	۱/۲۲	۰/۹۵	۱/۱۰	۰/۷۵	۰/۷۹

آنالیز نقطه روشن در نمونه ۵ ، Ag با ۸۷/۱۷ درصد وزنی عناصر دیگر شامل Cl, K, Na, O, C, S, Si, Bi به میزان کم

نمونه ۶ – سنجر ۱۱۹۵



Cu	Sn	As	Pb	Cu	Sn	As	Pb	Cu	Sn	As	Pb
۸۳/۹۶	–	۳/۸۹	–	۴۳/۲	–	–	–	۳۳/۹۱	–	–	–

درصد بالای مس و ارسنیک و فاقد قلع، دارای ۴/۲۹ درصد وزنی Fe

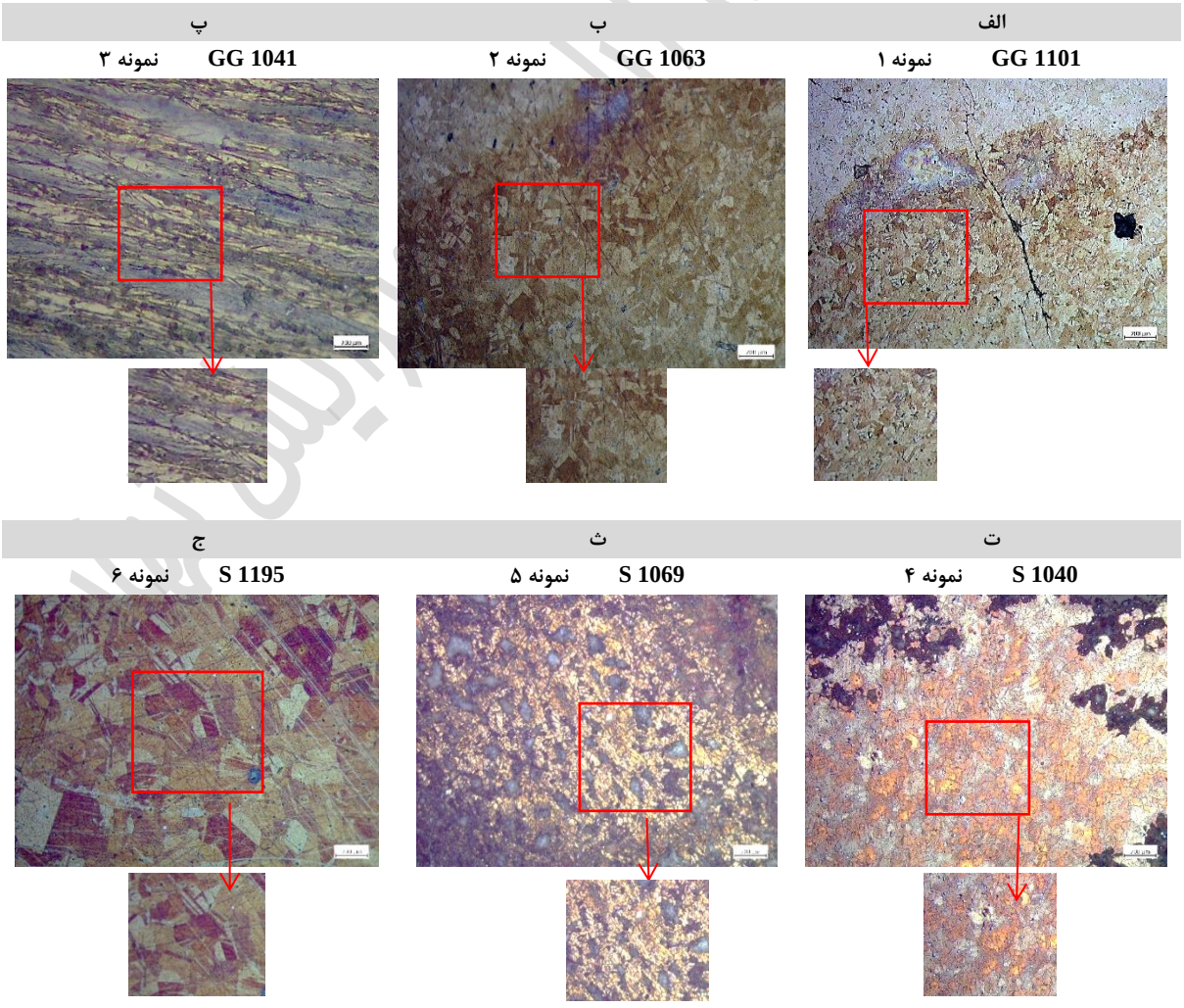
در تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی ریزساختار نمونه‌ها شامل زمینه فلزی همراه با فازهای ریز متنوعی است که در آن پراکنده شده اند. به طورکلی در نمونه‌ها یک فضای توسی خاکستری تیره، یک فضای توسی خاکستری روشن، نقاط تیره و نقاط سفید قابل مشاهده بود. برای شناسایی ترکیب شیمیایی آخال‌ها سیاه و سفید و بخش‌های تیره و روشن نمونه‌ها، از روش آنالیز نقطه‌ای EDX استفاده شد. به این منظور، آنالیز از بخش تیره و روشن و نقاط سفید و سیاه از هر نمونه انجام شد که نتایج آن در جدول ۲ همراه با تصاویر آورده شده است. نتایج آنالیز اسپکتروسکوپی پراش انرژی پرتو ایکس بر روی فضای توسی تیره نشان می‌دهد که ترکیب این بخش در نمونه ۱ شامل مس، قلع و سرب است، در نمونه ۲، ۳، ۴ و ۶ تنها شامل قلع و در نمونه ۵ شامل مس و قلع است. آنالیز بخش توسی روشن نیز در نمونه ۱، ۲ و ۵ شامل مس و قلع و در نمونه‌های ۳ و ۶ شامل مس و ارسنیک بوده و تنها در نمونه ۴ مس به تنهایی شناسایی شد. در نمونه شماره ۶، آنالیز نقطه‌ای (Spot 1) نشان‌دهنده حضور ارسنیک با میزان ۳٫۸۹٪ است، در حالی که میانگین کل منطقه (Full Area) در همین نمونه ۴٫۶۷٪ است. (جدول ۱). این اختلاف به دلیل پراکندگی نامتوازن ارسنیک در سطح نمونه و تفاوت بین آنالیز نقطه‌ای و میانگین کل منطقه رخ داده است .هم‌چنین نقاط سیاه در نمونه ۱ و ۲ و ۵ شامل مس و قلع و در نمونه ۳ و ۴ و ۶ صرفا مس دیده شد. در نمونه ۶ در آنالیز بخش روشن مقدار ۴/۲۹ درصد وزنی Fe و ۸/۹۱ درصد وزنی S مشاهده شد که احتمالا این نقطه روشن در نمونه یک آخال سولفیدی است و آنالیز نیز به‌خوبی ترکیب Cu-Fe-S را نشان می‌دهد. وجود آخال‌های سولفید مس در ریزساختار اشیاء برنزی باستانی می‌تواند به دلیل استفاده از سنگ معدن‌های سولفیدی یا مخلوطی از سنگ معدن‌های سولفیدی و اکسیدی برای استحصال مس استفاده شده، در تولید برنز باشد. استحصال مس از این ترکیبات روشی معمول در فلزگری مس در پیش از تاریخ بوده است. هم‌چنین در نمونه ۵ در آنالیز نقطه روشن، Ag با ۸۷/۱۷ درصد وزنی شناسایی شده است. عناصر دیگر شامل Cl, K, Na, O, C, S, Si, Bi به میزان کم در نمونه‌ها شناسایی شد که احتمالا ناخالصی‌های سنگ معدن بوده است. (جدول۲).

بررسی ریزساختاری

برای مطالعه ریزساختار فلزی موجود در نمونه‌ها و تعیین ماهیت دانه‌ای ریزساختار و شکل و وضعیت دانه‌های تشکیل‌دهنده آن در نمونه‌های مورد مطالعه، ابتدا از میکروسکوپ نوری استفاده شد [۱۲]. بررسی‌های متالوگرافی نشان داد که در تعدادی از نمونه‌ها، ریزساختار شامل دانه‌های کارشده محلول جامد فاز آلفا (محلول جامد مس و قلع) [۶] است که در بسیاری موارد دچار

بازتبلور شده‌اند. این ویژگی به‌طور مشخص در نمونه‌های ۱(قلاگپ ۱۱۰۱)، ۲(قلاگپ۱۱۶۳) و ۵(سنجر ۱۰۶۹) مشاهده شد. در مقابل، نمونه‌های ۳(قلاگپ۱۰۴۱)، ۴(سنجر۱۰۴۰) و ۶(سنجر ۱۱۹۵) فاقد ساختار مس–قلع بوده و ترکیب متفاوتی از فازها را نشان می‌دهند. ریزساختار در این نمونه‌ها عمدتاً شامل دانه‌های شش‌وجهی است که اغلب به صورت کج و تغییرشکل‌یافته ظاهر شده‌اند و در بسیاری از آن‌ها یک یا چند خط دوقلویی قابل مشاهده است. نمونه‌ها بسیار ریزدانه بوده و درون برخی از دانه‌ها خطوط لغزش ناشی از کرنش به‌وضوح مشاهده می‌شود. خطوط دوقلویی در برخی از نمونه‌ها به صورت یکنواخت در طول دانه‌ها گسترش یافته‌اند، در حالی‌که در برخی دیگر انحراف و کجی در امتداد آن‌ها دیده می‌شود. به‌طور کلی، در تمامی شش نمونه می‌توان ریزساختاری نسبتاً مشابه شامل دانه‌های کارشده و در مواردی بازتبلور یافته را مشاهده کرد. (شکل ۲). مقدار زیاد خطوط لغزش در نمونه‌ها بیانگر انجام کار سنگین برای شکل‌دهی است. اندازه دانه‌ها در نمونه‌های مختلف متفاوت است، اما به طورکلی بسیار ریز دانه هستند، این نوع ریزساختار در آلیاژهای مس به دلیل اعمال چرخه‌ای متناوب از اجرای کار و عملیات حرارتی بر روی قطعات فلزی به وجود می‌آید؛ البته باید یادآوری کرد که وجود این نوع ریزساختار در اشیاء برنزی می‌تواند به دلیل انجام کار گرم، یعنی ترکیب هم زمان کار و عملیات حرارتی با اجرای عملیات مکانیکی بر روی قطعهٔ داغ و گداخته شده نیز باشد [۱۲]. اجرای عملیات مکانیکی بر روی قطعات برنزی، پس از مدتی منجر به ایجاد پدیده‌ی کارسختی در ساختار می‌شده است؛ پدیده‌ای که ادامه‌ی فرایند تغییر شکل پلاستیک را غیرممکن ساخته و خطر بروز شکستگی در قطعه را افزایش می‌داده است.

شکل ۲ - ریزساختاری نمونه‌های GG 1041, GG 1063, GG 1101 به دست آمده از تپه قلاگپ و S 1095, S 1069, S 1040 از تپه سنجر



به‌منظور رفع این مشکل و بازگرداندن قابلیت تغییر شکل، از فرایند تابکاری استفاده می‌شده است. شواهد متالوگرافی به‌دست‌آمده از نمونه‌های مورد مطالعه این موضوع را به‌خوبی تأیید می‌کند. در برخی از نمونه‌ها (به‌ویژه نمونه‌های ۱، ۲ و ۵) ساختار دانه‌های بازتبلور یافته به‌وضوح قابل مشاهده است. همچنین در نمونه‌ی۶، حضور دانه‌های بازتبلور یافته همراه با دوقلویی‌های ناشی از تابکاری دیده می‌شود. در مجموع، مشاهده‌ی دانه‌های هم‌محور بازتبلور یافته و دوقلویی های آنیل، فرضیه‌ی انجام کار گرم در فرایند ساخت این نمونه‌ها را تقویت می‌کند. این ویژگی‌ها بیانگر آن است که تغییر شکل در بخشی از قطعات در دمایی پایین‌تر از دمای بازتبلور آلیاژ انجام شده است. در مقابل، در نمونه‌ی ۶ ساختاری متفاوت مشاهده شد؛ به‌گونه‌ای که دانه‌های کشیده‌شده در یک جهت مشخص، همراه با باندهای برشی شدید، آشکار است. بنابراین، ترکیب شواهد حاصل از بازتبلور، حضور خطوط لغزش و دوقلویی‌های آنیل نشان می‌دهد که صنعتگران در فرایند شکل‌دهی این قطعات، از روش‌های متنوعی شامل کار سرد و کار گرم بهره گرفته‌اند [۱۳]. (جدول ۳). در شکل ۲- الف متالوگرافی ساختار دانه‌ای هم‌محور مشاهده می‌شود که بیانگر وقوع فرایند بازبلوری پس از تغییر شکل مکانیکی و تابکاری است. حضور ترک میان‌دانه‌ای نشان‌دهنده‌ی تنش‌های مکانیکی یا اثرات خوردگی در دوره‌ی تدفین است. تغییر رنگ‌های سطحی نیز ناشی از تشکیل لایه‌های اکسیدی و محصولات خوردگی مس و قلع است. ترکیب این شواهد بیانگر آن است که قطعه پس از کار مکانیکی تحت عملیات حرارتی تابکاری قرار گرفته و سپس در شرایط مدفون دچار خوردگی و ایجاد ترک شده است. در شکل ۲- ب ساختار دانه‌ای هم‌محور و نسبتاً یکنواخت در سراسر زمینه مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده‌ی وقوع فرایند بازتبلور پس از تغییر شکل مکانیکی و سپس تابکاری است. مرزهای دانه‌ها واضح‌اند و شکل چندضلعی آن‌ها بیانگر تعادل متالورژیکی پس از بازتبلور است. عدم مشاهده‌ی دانه‌های کشیده یا باندهای لغزش، نشان می‌دهد که تغییر شکل پلاستیک شدید در مرحله‌ی نهایی وجود نداشته و نمونه بیشتر در حالت کار گرم تثبیت شده است. تغییر رنگ‌های موضعی در بخش‌هایی از سطح نیز ناشی از لایه‌های نازک اکسیدی و محصولات خوردگی مس و قلع در اثر شرایط تدفین است. در شکل۲- پ زمینه‌ی میکروساختاری متشکل از دانه‌های کشیده و تغییر شکل‌یافته در یک جهت مشخص است که همراه با باندهای لغزش و برش‌های شدید مشاهده می‌شوند. این ویژگی‌ها به‌وضوح بیانگر تغییر شکل پلاستیک در حالت کار سرد هستند. عدم حضور گسترده‌ی دانه‌های هم‌محور بازتبلور یافته نشان می‌دهد که نمونه پس از تغییر شکل، تحت عملیات حرارتی کامل قرار نگرفته است. تغییر رنگ‌های سطحی با هاله‌های آبی–سبز نیز حاصل تشکیل لایه‌های اکسیدی و محصولات خوردگی ثانویه در اثر شرایط تدفین طولانی‌مدت است. در شکل ۲- ت ساختار متالوگرافی این برنز پیشاتاریخی نشان‌دهنده حضور فاز آلفا با نواحی غنی از قلع فاز (δ) است که سختی و شکنندگی قطعه را افزایش داده است. کشیدگی دانه‌ها بیانگر چکش‌کاری و آثار بازپخت نشانه رفع کارسختی توسط حرارت‌دهی است. این شواهد بیانگر آگاهی صنعتگر از ترکیب آلیاژ و کنترل خواص مکانیکی از طریق توالی عملیات مکانیکی و حرارتی است. در شکل ۲-ث تصویر متالوگرافی این نمونه برنز پیشاتاریخی نشان‌دهنده ساختاری متشکل از فاز آلفا به‌عنوان زمینه اصلی آلیاژ است که به‌صورت پراکنده در میان بافت مشاهده می‌شود، اما به دلیل فرایندهای خوردگی طولانی‌مدت و شرایط پسادیپوزیسیونی، بخش قابل توجهی از ساختار اولیه دگرگون شده و محصولات خوردگی شامل اکسیدها و ترکیبات ثانویه مس جایگزین بخش‌های وسیعی از آن گردیده است. حضور تخلخل‌ها و نواحی تیره نیز بیانگر شدت این تغییرات و از بین رفتن تدریجی مرزدانه‌هاست؛ ازاین‌رو این تصویر بیش از آن‌که بازتاب‌دهنده جزئیات ریخت‌شناسی اولیه آلیاژ باشد، وضعیت خوردگی و دگرگونی ثانویه فلز را نشان می‌دهد.

و نهایتا در شکل ۲-ج این ساختار متالوگرافی در این نمونه برنز پیشاتاریخی ترکیبی از فاز آلفا (زمینه غنی از مس) و فاز δ (بین‌فلزی مس–قلع) را نشان می‌دهد. حضور این دو فاز بیانگر درصد قابل توجهی قلع در آلیاژ است. کشیدگی دانه‌ها و نوارهای لغزش حاکی از انجام کار مکانیکی (چکش‌کاری) پس از ریخته‌گری است و شواهدی از بازبلور نیز مشاهده می‌شود که احتمالاً ناشی از تابکاری برای رفع کارسختی بوده است. در مجموع، این ساختار نشان‌دهنده شناخت و به‌کارگیری فنون پیشرفته فلزکاری چون کار سرد و بازپخت در تولید اشیای برنزی دوران پیشاتاریخی است. در مجموع، این ویژگی‌ها بازتاب‌دهنده‌ی ترکیب کار مکانیکی و عملیات حرارتی در تولید برنز پیشاتاریخی هستند. برای ساخت یک قطعه از یک شمش، ممکن است به طور متناوب بارها بر روی آن کار و عملیات حرارتی انجام داده باشند و مسلماً هرچه تعداد دفعات چرخه کار و تابکاری بیشتر باشد، دانه بندی ریزتری در نمونه دیده می‌شود [۱۳]، [۱۴].

جدول ۳ - نتایج متالوگرافی نمونه های مورد پژوهش

نمونه‌ها	بلور ریز	بلور درشت	دوقلویی	خطوط کرنش	کار سرد	کار گرم	تابکاری	کشیدگی دانه	خوردگی
نمونه ۱ -قلاگپ ۱۱۰۱	√	–	√	√	√	√	√	√	√
نمونه۲-قلاگپ ۱۰۶۳	√	–	√	√	√	√	√	√	√
نمونه۳ قلاگپ ۱۰۴۱	√	–	√	√	√	–	√	√	√
نمونه ۴ - سنجر ۱۰۴۰	√	-	–	متوسط	√	√	√	√	√
نمونه۵ - سنجر ۱۰۶۹	√	–	√	√	√	√	√	√	√
نمونه ۶ - سنجر ۱۱۹۵	√	–	√	√	√	√	√	√	√

توضیحات تکمیلی

در نمونه‌های ۱، ۲ و ۵ حضور دانه‌های بازتبلور یافته و دوقلویی‌های آنیل به‌وضوح دیده شد (نشانه‌ی تابکاری و کار گرم).

نمونه‌ی ۳ ساختاری کشیده با باندهای لغزش دارد که بیانگر کار سرد شدید و عدم تابکاری کامل است.

نمونه‌ی ۴ دارای ساختار $\alpha + \delta$ با شواهد بازپخت و چکش‌کاری است.

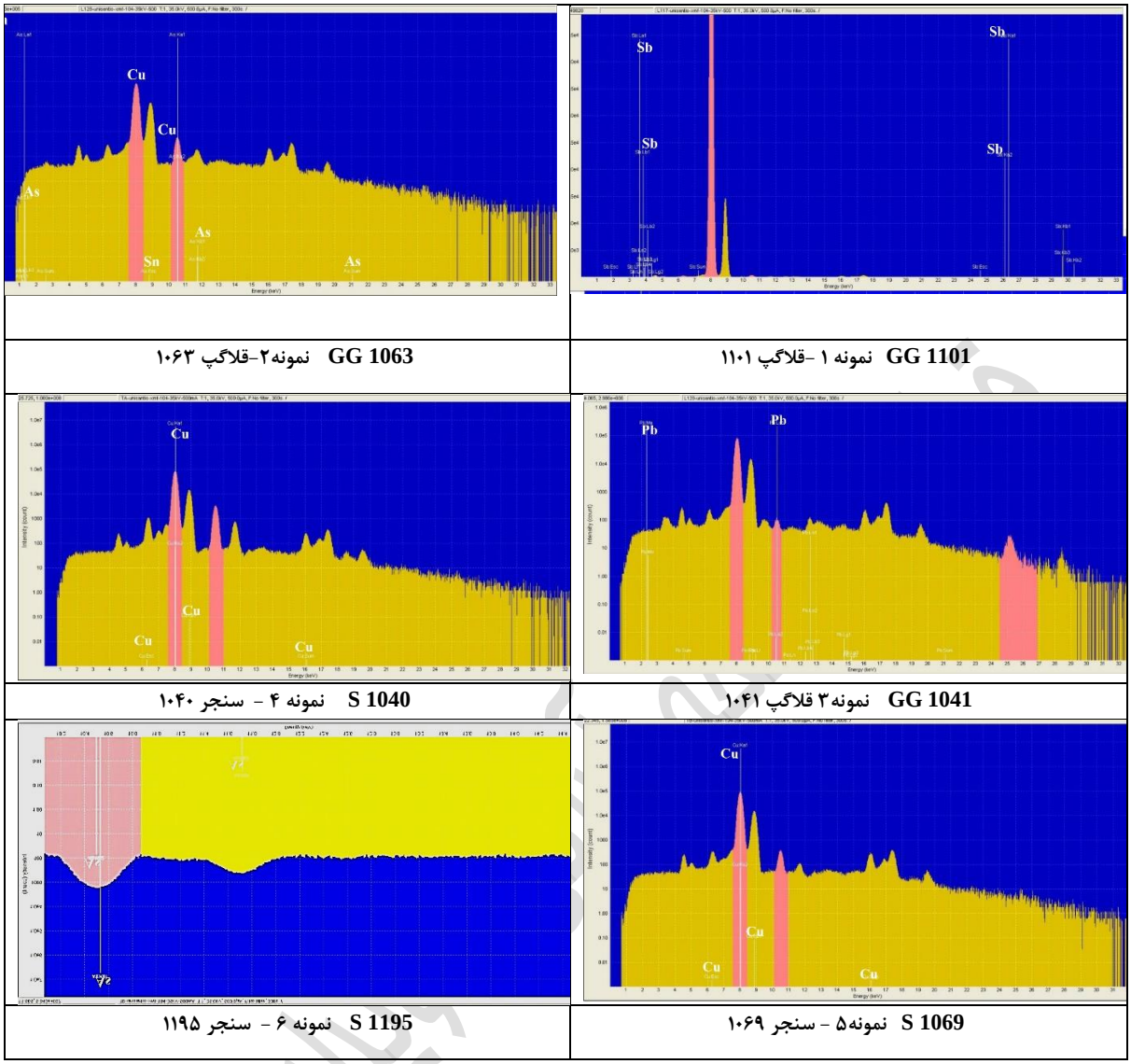
نمونه‌ی ۶ ساختاری دگرگون‌شده به‌دلیل خوردگی شدید دارد، اما هم‌زمان دوقلویی و بازتبلور نیز در آن مشاهده می‌شود.

وجود خطوط لغزش می تواند نشان دهنده انجام عملیات مکانیکی به عنوان مرحله پایانی شکل‌دهی در قطعه باشد؛ بدین معنی که در پایان بر روی قطعه، تابکاری انجام نشده است [۶]. 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 یک سری از حرکت‌های موازی منجر شده و نوارهای لغزش یا خطوط کرنش ایجاد شود که در بخش‌های اچ شده به شکل تعدادی خطوط باریک در بعضی از دانه‌ها دیده می‌شود. با توجه به اینکه در برخی نمونه‌ها خطوط لغزش در دانه‌ها به خوبی آشکار هستند، می‌توان احتمال داد که پس از آخرین مرحله انجام کار سرد، بر روی قطعه تابکاری صورت نگرفته است [۱۲]. همه نمونه‌ها دارای خوردگی شدید بودند و هم‌چنین در نمونه شماره ۴ کشیدگی زیاد در دانه‌ها دیده می‌شود که می‌تواند به خاطر کار سرد سنگین اتفاق افتاده است. (شکل۲).

طیف سنجی فلورسانس اشعه ایکس

این آزمایش بر روی نمونه‌ها انجام شده که نتایج پیرامون مس و آلیاژ سازهای آن یعنی سرب، قلع و ارسنیک بررسی شد. (شکل۲). نتایج آزمون فلورسانس اشعه ایکس همان‌طوری که در جدول۴ دیده می‌شود، نشان داد میزان عنصر اصلی آلیاژ مس در نمونه‌های مورد پژوهش بالای۹۰ درصد است. در نمونه ۱ قلاگپ ۱۱۰۱ میزان عنصر مس(۹۷/۶۳) این میزان در نمونه۲ قلاگپ ۱۰۶۳ (۹۸/۴۳) شناسایی و در نمونه ۳ قلاگپ۱۰۴۱ ، میزان (۹۸/۸۸) درصد و در نمونه‌های به‌دست آمده از تپه سنجر خوزستان نمونه۴ سنجر ۱۰۴۰ ، میزان مس(۹۸/۹۴) درصد، نمونه ۵ سنجر ۱۰۶۹ میزان آن (۹۰/۳۸) درصد و در نمونه۶ سنجر ۱۱۹۵ ، میزان عنصر مس(۹۳/۳۸) درصد شناسایی شد. عنصر قلع در نمونه‌های ۱ و۲ مربوط به تپه قلاگپ به ترتیب (۱/۹۴)، (۰/۷۱۳) و تنها در نمونه ۵ از تپه سنجر میزان قابل‌توجه (۶/۱۰) درصد شناسایی شد.

میزان عنصر ارسنیک در نمونه‌ها به ترتیب (۰/۰۸۲۷)، (۰/۴۲۹)، (۱/۱۲)،(۰/۶۸۰)، (۳/۵۲)، (۶/۲۵) درصد به‌دست آمد. عنصر سرب براساس این آزمایش در نمونه‌های ۱ و۲ از تپه قلاگپ به میزان ناچیز ردیابی شد. (جدول۴).



GG 1101 نمونه ۱ -قلاگپ ۱۱۰۱ | GG 1063 نمونه۲-قلاگپ ۱۰۶۳

GG 1041 نمونه۳ قلاگپ ۱۰۴۱ | S 1040 نمونه ۴ - سنجر ۱۰۴۰

S 1069 نمونه۵ - سنجر ۱۰۶۹ | S 1195 نمونه ۶ - سنجر ۱۱۹۵

شکل ۳- طیف XRF نمونه‌های GG 1101, GG 1063, GG 1041 از تپه قلاگپ و نمونه‌های S 1040, S 1069, S 1095 از تپه سنجر

جدول شماره ۴- نتایج طیف سنجی فلورسانس اشعه ایکس XRF

نمونه‌ها / عناصر	Pb	As	Sn	Cu
نمو نه۱-قلاگپ ۱۱۰۱	۰/۰۸۲۷	۰/۰۸۲۷	۱/۹۴	۹۷/۶۳
نمونه۲-قلاگپ ۱۰۶۳	۰/۴۲۹	۰/۴۲۹	۰/۷۱۳	۹۸/۴۳
نمونه ۳-قلاگپ ۱۰۴۱	-	۱/۱۲	-	۹۸/۸۸
نمونه۴- سنجر ۱۰۴۰	-	۰/۶۸۰	-	۹۸/۹۴
نمونه ۵- سنجر ۱۰۶۹	-	۳/۵۲	۶/۱۰	۹۰/۳۸
نمونه۶- سنجر ۱۱۹۵	-	۶/۲۵	-	۹۳/۳۸

۴-۲ بررسی تطبیقی نتایج

بررسی تطبیقی با محوطه هفت تپه:

محوطه باستانی هفت تپه در استان خوزستان قرار دارد. این محوطه شامل ۱۴ تپه باستانی و مساحتی در حدود ۱/۷ در ۱/۳ کیلومتر است. محوطه هفت تپه بین سال های ۱۳۴۴ تا ۱۳۵۷ هجری خورشیدی توسط عزت الله نگهبان مورد حفاری‌های باستان‌شناسی قرارگرفته است [۱۵]. این محوطه متعلق به دوره عیلام میانه (حدود قرن ۱۴ قبل از میلاد) و مرکز فرمانروایی پادشاه عیلامی، تپتی آهار بوده است. در حفاری‌های انجام شده در این محوطه ، آثار مختلفی مانند بقایای معماری خشتی و آجری، اشیای مختلف سفالی، فلزی، سنگی کشف شده است [۱۶]. به منظور تحلیل دقیق تر از نتایج به نزدیکترین مطالعه به موضوع مطالعات پیرامون فلزگری هفت تپه است، که در آن به مطالعه شواهد و بقایای فلزگری کشف شده در محوطه باستانی هفت تپه (قرن ۱۴ قبل از میلاد) بر اساس مطالعات آزمایشگاهی پرداخته شده است [۱۷]. برای آنالیز ترکیب شیمیایی و ویژگی‌های ساختاری بقایای فلزگری کهن در محوطه هفت تپه‌ی خوزستان، از روش‌های آنالیز SEM-EDS و متالوگرافی استفاده شدکه مشابه آنالیزهای انجام شده بر روی نمونه‌های این پژوهش است. (جدول ۵).

جدول ۵- نتایج SEM-EDX از ۵ نمونه فلز هفت تپه [۱۰].

نمونه	Cu	Sn	Pb	As	S	Ni	O	Fe	Ca
HT-03-12/N	۹۷/۷۹	۰/۲۲	۱/۵۹	–	–	–	–	–	–
HT-06-12/N	۹۷/۰۱	۲/۶۱	۰/۲۱	–	۰/۱۷	–	–	–	–
HT-07-12/N	۹۵/۰۷	۴/۱۶	–	۰/۰۵	۰/۷۱	۰/۰۱	–	–	–
HT-09-12/N	۹۵/۸۲	۴/۱۸	–	–	–	–	–	–	–
HT-10-12/N	۹۶/۹۶	–	۰/۲۹	۲/۷۵	–	–	–	–	–

نتایج نشان داد که فرایند فلزکاری در هفت تپه به منظور استخراج فلز مس از سنگ معدن‌های سولفیدی انجام می‌شده است، اما در نمونه‌های مورد مطالعه در پژوهش حاضرتنها یک نمونه سولفید مشاهده شد که احتمالا مربوط به مرحله ذوب فلز و سنگ معدن است. هم‌چنین مطالعات ریزساختاری بر روی نمونه‌های اشیا هفت تپه نشان داده است که برای شکل‌دهی نهایی آن‌ها پس از ریخته‌گری، از عملیات چکش‌کاری سرد و تابکاری استفاده می‌شده است که کاملا مطابق نتایج به دست آمده از مطالعات متالوگرافی پژوهش حاضر است. با مقایسه نتایج داده‌ها به نظر می‌رسد که در هر دو پژوهش انجام شده نتایج حاکی از وجود مس قلعی به طور گسترده و وجود مس ارسنیک دار و بعضا مس سربی است. با توجه به مقدار ناخالصی ها می‌توان به این نتیجه رسید که شیوه فلزگری در این دوره ها مشابه است و کنترل شده نیست. هم‌چنین در مقاله‌ای با عنوان« مروری بر متالورژی برنز بین النهرین در طول هزاره سوم قبل از میلاد» به کوشش آدامز و همکاران در دو دانشگاه گنت و آنتیورپ بلژیک، به بررسی آثار برنزی بین النهرین و خاور نزدیک که هم‌دوره با تمدن ایلامی است؛ پرداخته اند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان‌دهنده استفاده از آلیاژ مس و ارسنیک تا اواسط هزاره سوم قبل از میلاد و مس قلعی نیز در آثار قابل مشاهده است. به نظر می‌رسد در طول هزاره چهارم قبل از میلاد تا اواخر عصر برنز نیز ارسنیک ۳تا ۵ درصد هم‌چنان مورد استفاده قرار می‌گرفته است. اما در ۱۵۰۰ قبل از میلاد استفاده از قلع کاملاً جایگزین ارسنیک شده است.

بررسی تطبیقی با محوطه سنگ تراشان

محوطه باستانی سنگتراشان یکی از جدیدترین حفاری های باستان شناسی در ناحیه لرستان در حدود ۳۰ کیلومتری جنوب شرق خرم آباد قرار گرفته است [۱۸]. طی شش فصل حفاری اشیاء مفرغی، آهنی، سفالی و به‌دست آمده است. مجموعه مفرغی شامل ظروف مختلف، جنگ افزارهایی مانند شمشیر، خنجر، سرتیر، سرپیکان، بت‌ها و مجسمه‌های مختلف، پلاک‌های تزیینی،

سنجاق‌ها، خنجرهای دوفلزی با تیغه آهنی و دسته مفرغی و اشیا متفرقه دیگر هستند. نتایج مقایسه و بررسی داده‌های مورد نظر با نتایج نمونه‌های محوطه سنگتراشان نشان داد [۱۹]. با توجه به میزان عناصر در ترکیب آلیاژ، نمونه های سنگتراشان از آلیاژ دو جزیی مس قلع ساخته شده اند و مقدار عناصری مانند سرب، روی و نیکل هم در بعضی نمونه‌ها می‌تواند به دلیل محدوده آنالیز انجام شده بر روی سطح مقطع نمونه یا ناخالصی‌ها باشد.

جدول ۶- آنالیز SEM-EDX ۴ نمونه فلزی از محوطه سنگتراشان [۱۲].

نمونه	Cu	Sn	Pb	As	Zn	Ag	P	Ni	Fe	Sb	Si	S
ST-01-10	۸۸/۶۱	۱۱/۳۲	–	۰/۰۲	–	–	۰/۰۳	–	–	–	–	–
ST-02-10	۹۰/۷۹	۷/۷۵	۰/۶۱	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۶۷	۰/۱۴	–	–	–	–	–
ST-03-10	۸۶/۱۸	۹/۴۳	۰/۸۱	۰/۷۳	۱/۲۳	۰/۵۴	۰/۲۴	۰/۴۲	۰/۴۲	–	–	–
ST-04-10	۸۴/۸۸	۱۳/۳۶	۱/۱۶	۰/۲۲	۰/۰۲	–	۰/۲۰	۰/۰۱	۰/۰۱	–	–	۰/۱۵

در نتایج پژوهش حاضر نیز مس قلعی اصلی‌ترین نتیجه یافته شده بود و هم‌چنین وجود ناخالصی‌ها از سنگ معدن و فرایند استخراج ایجاد شده بود. (جدول۶ ، چهار نمونه فلزی از محوطه سنگتراشان). در واقع، با توجه به نتایج می‌توان دریافت که به غیر از مس و قلع، باقی عناصر به طور تصادفی از فرایند استحصال سنگ معدن وارد ترکیب شده اند [۱۲]. نتایج این آزمایش‌ها با دیگر مطالعات انجام شده بر روی برنزهای لرستان مطابقت دارد و داده‌های حاصل از آنالیزهای شیمیایی در دیگر محوطه‌های ناحیه لرستان نیز بیانگر تولید آلیاژ برنز با درصد قلع متفاوت همراه با درصد بسیار کم عناصر فلزی دیگر به عنوان ناخالصی است [۲۰] [۲۱]. جدول ۷ به‌صورت خلاصه مقایسه‌ای میان ترکیب شیمیایی و ویژگی‌های ریزساختاری اشیای فلزی به‌دست‌آمده از محوطه‌های مختلف عیلامی (هفت‌تپه، سنگتراشان، قلاگپ و سنجر) ارائه می‌دهد.

جدول۷- مقایسه‌ای ترکیب شیمیایی و ویژگی‌های ریزساختاری اشیای فلزی محوطه‌های عیلامی

شماره نمونه	محوطه	قدمت	ویژگی‌های ریزساختاری	نوع آلیاژ	Cu (%)	As (%)	Sn (%)	Pb (%)	Si/Sb/Zn/P (%)	Ag (%)	S (%)	Ni (%)	Fe (%)
HT-03-12/N	هفت‌تپه	عیلامی	-	برنز کم‌قلع	۹۷/۷۹	–	۰/۲۲	۱/۵۹	-	-	-	-	-
HT-06-12/N	هفت‌تپه	عیلامی	-	برنز کم‌قلع	۹۷/۰۱	–	۲/۶۱	۰/۲۱	-	-	۰/۱۷	-	-
HT-07-12/N	هفت‌تپه	عیلامی	-	برنز قلع‌دار	۹۵/۰۷	۰/۰۵	۴/۱۶	-	-	-	۰/۷۱	۰/۰۱	-
HT-09-12/N	هفت‌تپه	عیلامی	-	برنز قلع‌دار	۹۵/۸۲	–	۴/۱۸	-	-	-	-	-	-
HT-10-12/N	هفت‌تپه	عیلامی	-	مس ارسنیک‌دار	۹۶/۹۶	/۷۵۲	–	۰/۲۹	-	-	-	-	-
ST-01-10	سنگتراشان	عیلامی	-	برنز قلع‌دار	۸۸/۶۱	۰/۰۲	۱۱/۳۲	–	P ۰/۰۳	-	-	-	-
ST-02-10	سنگتراشان	عیلامی	-	برنز قلع‌دار	۹۰/۷۹	۰/۰۳	۷/۷۵	۰/۶۱	Zn ۰/۰۱ P ۰/۱۴	۰/۶۷	-	-	-
ST-03-10	سنگتراشان	عیلامی	-	برنز قلع‌دار	۸۶/۱۸	۰/۷۳	۹/۴۳	۰/۸۱	P ۰/۲۴ Sb ۰/۵۴	۰/۲۳	–	/۴۲۰	۰/۴۲
ST-04-10	سنگتراشان	عیلامی	-	برنز قلع‌دار	۸/۸۸۴	۰/۲۲	۱/۳۶۳	۱/۱۶	Zn ۰/۰۲ P ۰/۲۰	–	۰/۱۵	۰/۰۱	۰/۰۱

۱	قلاگپ ۱۱۰۱	عیلامی	دانه‌ریز، خطوط لغزش، بازتبلور	برنز قلع‌دار	۶۵/۱۶	As	۳/۵۷	/۰۸۲۷۰	-	-	-	-	-
۲	قلاگپ ۱۰۶۳	عیلامی	دانه‌ریز، خطوط لغزش، بازتبلور	برنز قلع‌دار	۶۹/۵۶	–	۱/۳۵	۰/۴۲۹	-	-	-	-	-
۳	قلاگپ ۱۰۴۱	عیلامی	فاقد ساختار مس–قلع، خطوط لغزش	مس ارسنیک‌دار	۸۱/۲۴	–	--	–	-	-	-	-	-
۴	سنجر ۱۰۴۰	عیلامی	فاقد ساختار مس–قلع، خطوط لغزش	مس ارسنیک‌دار	۷۹/۶۰	۲/۰۷	–	–	-	-	-	-	-
۵	سنجر ۱۰۶۹	عیلامی	دانه‌ریز، بازتبلور	برنز قلع‌دار	۷۴/۶۴	–	۱۸/۰۶	–	-	۱/۸۷۷	-	-	-
۶	سنجر ۱۱۹۵	عیلامی	فاقد ساختار مس–قلع، خطوط لغزش	مس ارسنیک‌دار	۹۵/۳۳	–	–	–	-	-	۹/۸۱	–	۲/۴۹

علامت «–» به معنای مقدار کم، نامشخص یا ردیابی نشده است. ستون «قدمت» بر اساس تعلق نمونه‌ها به دوره عیلامی درج شده است.این جدول امکان مقایسه مستقیم بین نمونه‌ها و همچنین تطبیق با داده‌های سایر پژوهشگران را فراهم می‌کند. ستون «ویژگی‌های ریزساختاری» نشان‌دهنده میزان کار سختی، خطوط لغزش و بازتبلور فلز است که اطلاعات مهمی درباره روش‌های فلزگری پیش از تاریخ ارائه می‌دهد.

داده‌ها نشان می‌دهند که در این مجموعه، هم برنزهای کم‌قلع و قلع‌دار و هم نمونه‌های مس ارسنیک‌دار وجود داشته است که تنوع فنّاوری و انتخاب آلیاژی در این دوره را بازتاب می‌دهد. در برخی نمونه‌ها ساختارهایی چون دانه‌ریز، خطوط لغزش و بازتبلور شناسایی شده که نشانگر به‌کارگیری عملیات حرارتی یا مکانیکی در فرایند تولید است، در حالی‌که نمونه‌های مس ارسنیک‌دار اغلب فاقد ساختار مس–قلع بوده و تنها خطوط لغزش در آن‌ها مشاهده شده است. به‌طور کلی، همان‌گونه که جدول ۷ نشان می‌دهد، ترکیب شیمیایی متنوع و تفاوت‌های ریزساختاری میان محوطه‌ها می‌تواند نشانه‌ای از تفاوت‌های محلی در دسترسی به منابع فلزی، دانش آلیاژسازی و سنت‌های تولید فلز در حوزه فرهنگی عیلام باشد.

نتیجه‌گیری

بررسی نمونه‌های فلزی به‌دست‌آمده از دو محوطه‌ی تپه سنجر (خوزستان) و تپه قلاگپ (لرستان) با هدف گسترش دانش فلزگری باستانی در این منطقه انجام شد. نتایج آزمون‌ها نشان داد که عنصر اصلی آلیاژ، یعنی مس، در تمامی نمونه‌های مورد مطالعه بیش از ۹۰ درصد وزنی است. عنصر قلع در نمونه‌های ۱ و ۲ از قلاگپ ناچیز بود و تنها در نمونه‌های تپه سنجر مقدار قابل توجهی معادل ۶/۱۰ درصد شناسایی شد. آنالیز نیمه‌کمی طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (XRF) بر روی زمینه‌ی فلزی تأیید کرد که همه‌ی نمونه‌ها دارای درصد بالایی از مس هستند. بر این اساس، نمونه‌های ۱، ۲ و ۵ به‌عنوان برنزهای قلع‌دار و نمونه‌های ۳، ۴ و ۶ به‌عنوان مس ارسنیک‌دار شناسایی شدند. همچنین، تنها نمونه‌ی ۱ از قلاگپ علاوه بر قلع، درصد قابل توجهی سرب در یک نقطه نشان داد. در مجموع، سه نمونه برنز قلع‌دار و سه نمونه مس ارسنیک‌دار در میان یافته‌ها تشخیص

داده شدند. میزان مس در نمونه‌ها بین ۱۶/۶۵ تا ۹۶/۸۳ درصد وزنی، و قلع بین ۳۵/۱ تا ۰۶/۱۷ درصد وزنی متغیر بود که بیانگر تفاوت قابل توجهی در میزان قلع بین اشیای مختلف است؛ موضوعی که در بسیاری از آثار فلزی پیش از تاریخ ایران، به‌ویژه در لرستان و دیگر نواحی فلات ایران، بارها مشاهده شده است. عنصر ارسنیک در پنج نمونه نخست بسیار ناچیز و تنها در نمونه‌ی ۶ از سنجر به مقدار ۲۵/۶ درصد گزارش شد. سرب نیز تنها در دو نمونه از قلاگپ به میزان اندک شناسایی گردید. مطالعه‌ی ریزساختارها نشان داد که نمونه‌های ۱ و ۲ از قلاگپ و نمونه‌ی ۵ از سنجر دارای ساختار دانه‌ریز، محلول جامد آلفا (مس ـ قلع) و شواهد بازتبلور هستند. در مقابل، نمونه‌های ۳ و ۴ از قلاگپ و نمونه‌ی ۶ از سنجر فاقد ساختار مس ـ قلع بوده و بیشتر به‌عنوان آلیاژهای ارسنیک‌دار معرفی می‌شوند. در بیشتر نمونه‌ها، خطوط لغزش و گاه دوقلویی‌های مکانیکی مشاهده شد که نشان‌دهنده‌ی اعمال کار مکانیکی شدید در فرایند شکل‌دهی فلز است. اندازه‌ی دانه‌ها عموماً بسیار ریز بوده که ناشی از چرخه‌های متناوب چکش‌کاری و عملیات حرارتی (تابکاری) است. در نمونه‌ی ۶ از سنجر نیز وجود آخال سولفیدی با ۴/۲۹ درصد آهن و ۸/۹۱ درصد گوگرد ثبت گردید که احتمالاً نتیجه‌ی استفاده از سنگ معدن‌های سولفیدی یا ترکیب آن‌ها با کانه‌های اکسیدی در فرایند استحصال مس بوده است. چنین روشی در فلزکاری پیشاتاریخ به‌ویژه در تولید برنز امری متداول به‌شمار می‌رفته است. همچنین، حضور ۸۷/۱۷ درصد نقره در نمونه‌ی ۵ از سنجر قابل توجه است. تمامی نمونه‌ها از آلیاژهای مسی تشکیل شده و از نظر ریزساختار و ترکیب با سایر حوزه‌های فلزگری هم‌دوره‌ی خود، همچون هفت‌تپه و سنگتراشان، شباهت‌های زیادی دارند. وجود ناخالصی‌ها و عناصر جانبی نیز بازتاب‌دهنده‌ی ماهیت کانی‌های مورد استفاده و روش‌های ابتدایی استحصال فلز است. به‌طور کلی، ترکیب آلیاژها شامل برنز قلع‌دار، برنز سربی و مس ارسنیک‌دار است. مقایسه‌ی نتایج این پژوهش با مطالعات انجام‌شده در سایر محوطه‌های عیلامی (هفت‌تپه و سنگتراشان) نشان می‌دهد که دانش فلزگری باستانی در شمال‌غرب فلات ایران دارای ویژگی‌های مشترک بسیاری بوده است. در هفت‌تپه، غالباً برنزهای کم‌قلع و ساده مشاهده می‌شود که احتمالاً برای مصارف عمومی ساخته می‌شده‌اند. در سنگتراشان، برنزهای قلع‌دار پیشرفته‌تر و ترکیب‌های متنوع‌تر حاکی از مهارت بالاتر در متالورژی است. قلاگپ و سنجر اما مرحله‌ی گذار را بازتاب می‌دهند؛ یعنی هم نشینی و هم‌زمانی مس ارسنیک‌دار و برنز قلع‌دار که نشانگر پیوند سنت‌های کهن با نوآوری‌های نوین در آلیاژسازی است. این روند در مجموع بیانگر تکامل تدریجی متالورژی عیلامی است که از استفاده‌ی مس ارسنیک‌دار آغاز شده و به تولید برنزهای قلع‌دار پیشرفته‌تر همراه با اعمال عملیات مکانیکی و حرارتی برای بهبود خواص مکانیکی و عملکردی فلز انجامیده است.

سپاس‌گزاری

بدین‌وسیله از مسئولین آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی اصفهان و آزمایشگاه مرکزی دانشگاه هنر اصفهان به‌خاطر همکاری‌های ارزشمند در انجام آزمایش‌ها و فراهم‌سازی امکانات پژوهشی لازم سپاس‌گزاری می‌شود. همچنین از زحمات مسئولین و کارشناسان آزمایشگاه متالوگرافی دانشگاه هنر اصفهان که در انجام مطالعات ریزساختاری یاری‌رسان این پژوهش بودند، صمیمانه قدردانی می‌گردد.

۵ مراجع

[1] Thornton, C. P .The Emergence of Complex Metallurgy on the Iranian Plateau: Escaping the Levantine Paradigm, *Journal of World Prehistory*, 22, 2009, 301-327.

[2] Pigott, V. C., *The development of metal production on the Iranian plateau*,University of Pennsylvania Museum Press. Philadelphia, 1999,25-34.

[۳] سرداری زارچی، علیرضا و سمیرا عطارپور، مدارک باستان شناسی دوران آغاز ایلامی و ایلام قدیم در تپه سنجر خوزستان، *مطالعات باستان شناسی*، دوره ۱۰، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۳۹۷. (سرداری زارچی، ۱۳۹۳).

[۴] بدیعی، *جغرافیای مفصل ایران*، جلد اول، تهران: نشر اقبال، چاپ چهارم. برنبک، راینهارد. پ کا. سوزان.۱۳۸۰، گزارشی کوتاه درباره محوطه باستانی ده حاجی در دشت بروجرد، ترجمه کامیار عبدی، *باستان‌شناسی و تاریخ*، سال پانزدهم، شماره.۴۵- اول و دوم، پائیز و زمستان ۱۳۷۹ بهار و تابستان ۱۳۸۰.

[۵] عبدالهی مصطفی, سرداری زارچی علیرضا. شرق زاگرس مرکزی در دوره نوسنگی بر اساس کاوش های باستان شناسی تپه قلاگپ. ۱۳۹۰.

[6] Scott, D. A. Metallography and Microstructure of Ancient and Historic Metals (No. 77). Los Angeles, CA: The Getty Conservation Institute, 1991,67-76.

[7] Craddock, P. T. (2009). *Scientific Investigation of Copies, Fakes and Forgeries*. Oxford: Butterworth-Heinemann.

[8] Oudbashi, O., Davami, P., Metallography and microstructure interpretation of some archaeological tin bronze vessels from Iran, *Materials Characterization*, 97, 2014, pp: 74–82.

[9] Moorey, P.R.S; *Ancient Mesopotamia Materials and industries* Clarendon press.oxford,1994, 216-239.

[۹] بخشنده‌فرد، حمیدرضا، ربیعی،حسنا، مطالعه فنی پیرامون نحوه ساخت و بازرسی خوردگی اشیاء فلزی عصرمفرغ مربوط به کاوش‌های گورستان شهر سوخته، *پژوهه باستان‌سنجی*، ۱۰(۱)۳۲-۱۳، ۱۴۰۳.

[۱۰] بخشنده‌فرد، حمیدرضا، *بررسی آثار تاریخی فلزی در مرمت*، ۱۳۸۹،اصفهان: دانشگاه هنر اصفهان

[11] Stuart, B. (2007). Analytical techniques in materials Conservations. England: John Cviley an sons Ltd, 234-237.

[12] Scott, D. A. *Metallography and Microstructure of Ancient and Historic Metals* (No. 77). Los Angeles, CA: The Getty Conservation Institute, 1991, 19–27.

[13] Dungworth, D ‘An experimental study of some early copper smithing techniques’, in D Dungworth and R C P Doonan (eds) Accidental and Experimental Archaeometallurgy. London: Historical Metallurgy Society, 2013, 149–152.

[14[Scott, D. A. Metallography and Microstructure of Ancient and Historic Metals (No. 77). Los Angeles, CA: The Getty Conservation Institute, 1991,25-29.

[15] Negahbaran, Ezat O. Excavations at Haft Tepe, Iran. Journal of Near Eastern Studies, 1995 54(4):293.

[16] Izzat Allāh Nigāhbān, Excavations at Haft Tepe, Iran, UPenn Museum of Archaeology, 1991, 46-50.

[۱۷] عودباشی ، امید، تحلیل ریخت‌شناسی خوردگی و شرایط حفاظتی در مجموعه‌های برنزی به‌دست آمده از حفاری با تمرکز بر سیستم فلز-محیط- خوردگی، رساله دکتری، ۱۳۹۲ دانشکده حفاظت و مرمت دانشگاه هنر اصفهان.

[۱۸] ملک زاده، مهرداد، نگاره شناسی و نشانه شناسی مفرغ‌های لرستانی بر پای یافته‌های کاوش باستان‌شناختی سنگ‌تراشان خرم آباد، رساله دکتری، ۱۳۹۱ ، گروه باستان شناسی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس.

[19] Oudbashi, Omid, Davami Parviz, Metallography and microstructure interpretation of some archaeological tin bronze vessels from Iran,*Materials Characterization*,Volume 97,2014, 74-82,ISSN 1044-5803, https://doi.org/10.1016/j.matchar.2014.09.007.

[20] Fleming, S.J., Pigott, V.C., Swann, C.P., & Nash, S.K.. Bronze in Luristan : Preliminary analytical evidence from copper/bronze artifacts excavated by the belgian mission in Iran. *Iranica Antiqua*, 2005,40, 35-64.

[۲۱] گراوند, مهدیه , بخشنده فرد, حمیدرضا و سجادی, علی . (۱۳۹۸). مقایسه ریزساختار و تکنیک ساخت چهار شئ برنزی به‌دست‌آمده از حفاری‌های دو محوطه تپه فرودگاه و سنگتراشان خرم آباد .*مطالعات باستان شناسی* doi: 10.22059/jarcs.2019.73180 , *11*(2), 245-260.

IRANIAN FOUNDRYMEN'S SOCIETY

Founding Research Journal

Research Paper:

Study of ancient metallurgy on metal artifacts belonging to the Elamite sites of Sanjar hill in Khuzestan and Qalagap hill in Lurestan

Fatemeh Barani [1], Hamidreza Bakhshandehfard [2*] Alireza Sardari [3]

1. Graduated, Department of Restoration of Historical and Cultural Objects, Faculty of Conservation, Isfahan Art University, Isfahan, Iran Email: Baroon7140@gmail.com
2. Associate Professor, Department of Restoration of Cultural Artifacts and Objects, Faculty of Conservation, Isfahan Art University, Iran, (corresponding author), Email:hr.bakhshan@aui.ac.ir
3. Assistant Professor of Cultural Heritage and Tourism Research Institute Email a.sardari@richt.ir

* Corresponding author, Email: hr.bakhshan@aui.ac.ir

Paper history:

Receive:
Revise:
Accept:

Keywords:
Ancient metallurgy,
Elam,
Sanjar hill Khuzestan,
Qalagap hill Lurestan

Abstract:

The importance of the formation and development of metallurgical knowledge in the ancient world (archaeometallurgy) is such that it has influenced the division of prehistoric cultural periods. The development of metalworking in the plateau of Iran has always been an interesting topic, and the reason for that is the history of metalworking activities in Iran since about 7000 BC. In fact, the rich history of the Iranian plateau and the findings of metallurgy in different parts of are an important source for archaeometallurg studies.

In this research, six samples of metalartefacts belonging to Sanjar Hill and Qalagap Hill Related to the the Elam, two ancient civilizations, one in eastern Lurestan and Azna Plain known as Qalagap and the other Sanjar in the north of Shoshan Plain, Khuzestan, were examined. The purpose of these studies is to identify the chemical composition, investigate the microstructural of these samples.

The results show cold working, hot working and annealing on all the samples and all except 1 sample has severe corrosion and the combination of tin bronze alloy, lead bronze and arsenic copper was identified.

The result of comparing the results with other researches showed that the ancient metallurgy in these areas is similar to the works in the northwestern area of the Iranian plateau, and in terms of ingredients and the amount of materials, the similarities are very high. It was also found that the method of extracting metal has many similarities, which is indicated by the impurities and elements in the samples.

Please cite this article using:

Fatemeh Barani, Hamidreza Bakhshandehfard, Alireza Sardari , Study of ancient metallurgy on metal artifacts belonging to the Elamite sites of Sanjar hill in Khuzestan and Qalagap hill in Lurestan, in Persian, Founding Research Journal,

DOI: