

مطالعات آزمایشگاهی بر روی آلیاژ و ریزساختار اشیاء برنزی محوطه عصر آهن باباجیلان لرستان

امید عودباشی*

استادیار گروه مرمت آثار تاریخی دانشگاه هنر اصفهان

عطا حسن پور

دانشجوی دکتری باستان‌شناسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

(از ص ۱۳۳ تا ۱۴۹)

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۰۹/۱۶؛ تاریخ پذیرش قطعی: ۹۵/۰۶/۰۳

چکیده

استفاده از برنز در تولید اشیاء در عصر آهن، در نواحی مختلف ایران معمول بوده و طی کاوش‌ها مجموعه‌های بزرگی از اشیاء برنزی متعلق به این دوره به‌دست آمده است. بسیاری از این اشیاء در ناحیه لرستان به‌عنوان اشیاء آیینی از گورهای محوطه‌های عصر آهن به‌دست آمده‌اند. در این مقاله تعدادی از اشیاء به‌دست آمده از گورستان عصر آهن باباجیلان پیشکوه لرستان مورد مطالعات آزمایشگاهی قرار گرفته‌اند. به این منظور، روش‌های متالوگرافی و آنالیز عنصری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به آنالیز اسپکتروسکوپی پراش انرژی پرتو ایکس (SEM-EDS) به‌کار گرفته شدند. نتایج مطالعات نشان داد که اشیاء مورد مطالعه از برنز قلعی با میزان قلع متنوع ساخته شده‌اند. این پدیده در برنزهای عصر آهن، موضوعی معمول بوده و نشان‌دهنده عدم کنترل میزان قلع در فرآیند تولید برنز است. آنالیز ریزساختار نمونه‌ها بیانگر وجود آخال‌های سولفیدی و گویچه‌های سربی پراکنده است. مطالعات متالوگرافی نشان داد که به‌منظور شکل‌دهی و ساخت، از چرخه متناوب کار سرد و تابکاری استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی: عصر آهن، باباجیلان، برنز، آخال‌های سولفیدی، تابکاری

* رابانامه نویسنده مسئول: o.oudbashi@aui.ac.ir

۱. مقدمه

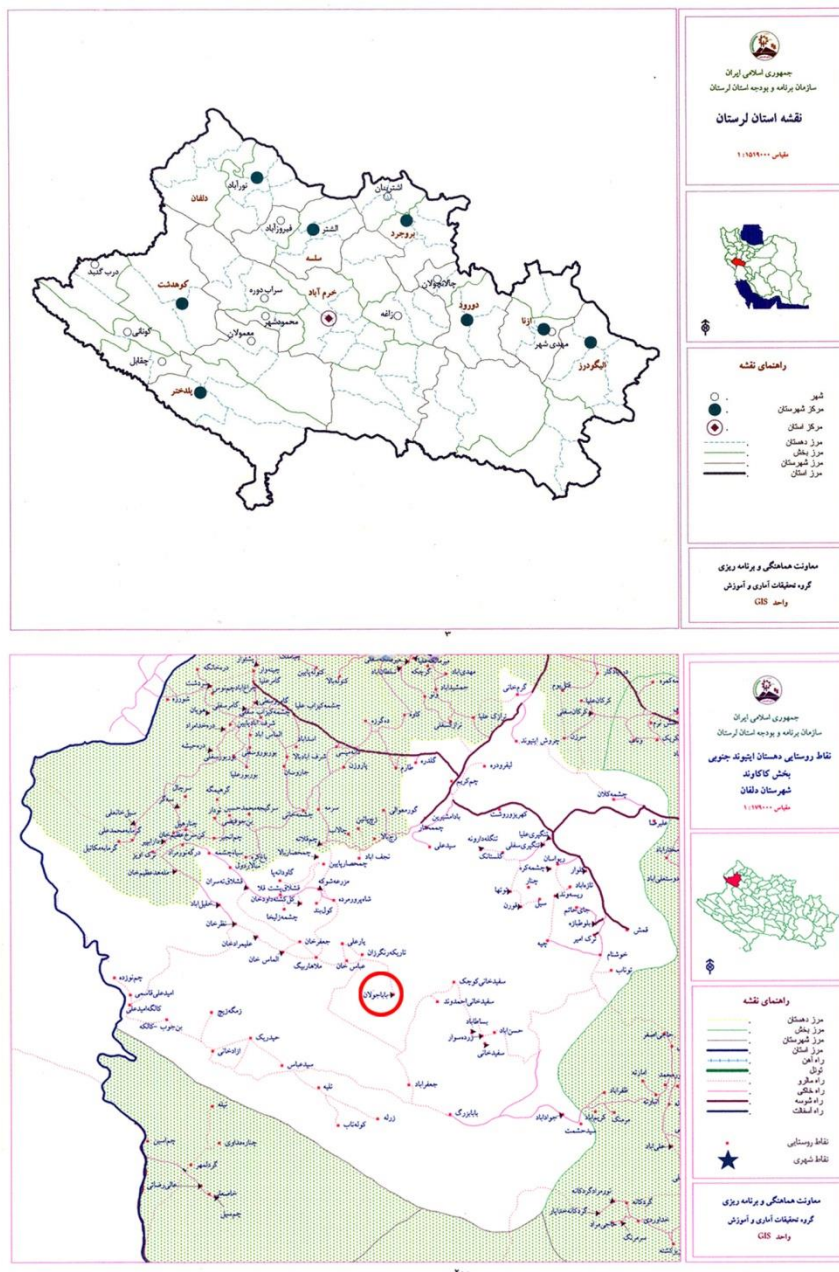
طی صد سال گذشته کشف اشیاء متنوع برنزی متعلق به هزاره اول ق.م از ناحیه لرستان، یکی از جنبه‌های جالب توجه باستان‌شناسی پیش از تاریخ فلات ایران است. به‌رغم تعداد بسیار زیاد اشیاء موسوم به برنزه‌های لرستان در موزه‌های مختلف، کاوش‌های باستان‌شناسی محدودی در این ناحیه انجام شده و بخش کمی از مجموعه‌های بزرگ منسوب، از این کاوش‌ها به‌دست‌آمده است. همین موضوع موجب شده است تا مطالعات گوناگون بر روی اشیاء برنزی حاصل از کاوش‌های علمی در لرستان، اهمیت خاصی بیابد؛ زیرا نتایج آن می‌تواند به شناخت منشاء، فناوری ساخت و نیز روابط موجود در عصر آهن غرب ایران یاری کند.

طی دهه‌های گذشته به ایران، به‌عنوان یکی از مناطق مهم فلزگری دوران پیش از تاریخ بسیار توجه شده؛ به‌گونه‌ای که بسیاری از مطالعات آزمایشگاهی و میدانی بر آثار فلزگری به‌دست‌آمده از کاوش‌های باستان‌شناسی ایران تمرکز یافته است (Thornton, 2009; Helwing, 2013 & Oudbashi et al., 2012). با این حال، به علت محدود بودن این مطالعات، کمبود امکانات و منابع و نیز عدم دسترسی به بسیاری از آثار فلزی موجود در موزه‌های ایران، نتایج این مطالعات تنها بخش کوچکی از تحولات فلزگری را در فلات ایران آشکار کرده است. این کمبود، به‌ویژه درباره ناحیه لرستان بیشتر محسوس است. بخش بزرگی از مطالعات انجام‌شده بر روی برنزه‌های لرستان متعلق به بیش از چهار سال گذشته است و از آن زمان به این سو، مطالعات در این حوزه بسیار کاهش یافته است. همچنین مطالعات فلزگری کهن در لرستان بیشتر بر روی اشیاء کاوش‌شده در حدود نیم قرن پیش انجام شده است (Fleming et al., 2006; Fleming et al., 2005 & Begemann et al, 2008) و تنها بخش کوچکی از این مطالعات درباره اشیایی است که به‌تازگی به دست آمده‌اند (Oudbashi et al., 2014; Oudbashi et al., 2013).

هدف از این مقاله، ارائه نتایج مطالعه آزمایشگاهی تعدادی از اشیاء برنزی مکشوفه از محوطه عصر آهن باباجیلان است. این اشیاء به تازگی از کاوش‌های باستان‌شناسی به‌دست‌آمده‌اند و این نتایج می‌تواند به توسعه دانش موجود در زمینه فلزگری باستانی در عصر آهن کمک کند. آثار فلزی به‌دست‌آمده از قبور کشف‌شده در محوطه باستانی باباجیلان لرستان از دیدگاه باستان‌شناسی و فلزگری کهن، نمونه‌هایی جالب توجه هستند. تاکنون بیشتر مطالعات فلزگری در محوطه لرستان درباره محوطه‌ها و یافته‌های ناحیه پشتکوه انجام شده است (مثل Fleming et al, 2005). آثار فلزی به‌دست‌آمده از حفاری‌های این محوطه تاریخی، یکی از محدود مجموعه‌های آثار عصر آهن است که طی کاوشی علمی در ناحیه پیشکوه لرستان کشف شده‌اند و مطالعه ساختار و ترکیب اجزاء تشکیل‌دهنده آنها از دیدگاه فلزگری باستانی به‌منظور شناخت و مقایسه آنها با دیگر نمونه‌های مطالعه‌شده از همین دوره و ناحیه، ضروری به‌نظر می‌رسد. یادآوری می‌کند که در این پژوهش تنها اشیاء ساخته‌شده از آلیاژ مس مطالعه شده‌اند و مطالعه اشیاء آهنی با توجه به تفاوت ساختاری/ شیمیایی و نیاز به تحقیقات گسترده در این زمینه، در پژوهشی دیگر انجام خواهد شد.

۲. محوطه باستانی باباجیلان

محوطه باباجیلان یکی از محوطه‌های باستانی عصر آهن ناحیه لرستان است که به‌تازگی کاوش‌های باستان‌شناسی در آن انجام شده است. این محوطه در شمال استان لرستان و در غرب ناحیه پیشکوه قرار دارد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محوطه باباجیلان در شمال غرب لرستان

گورستان باباجیلان در موقعیت جغرافیایی $158^{\circ} 40' 47''$ طول شرقی و $33^{\circ} 59' 33''$ عرض شمالی در دامنه جنوبی کوه مرتفع سرکشتی قرار دارد. این محوطه تا شهر نورآباد لرستان، مرکز دلفان، حدود ۴۵ کیلومتر فاصله دارد و روستای باباجیلان در ۳ کیلومتری جنوب غرب آن واقع است (شکل ۱). کاوش این گورستان در پائیز سال‌های ۸۶ و ۸۷ در دو فصل انجام شد؛ در فصل نخست، پژوهش و بررسی سطحی صورت گرفت و در فصل دوم با کاوش مستمر، بقایای ۱۱ گور به دست آمد. در کنار برخی از گورها و همچنین لابه‌لای خاک‌های به هم ریخته سطح گورستان اشیاء متعدد مفرغی، آهنی، سفالی، سنگی و... نیز کشف شد که نشان از

غناي مادي آن، قبل از غارت و تخریب داشت (حسن‌پور، ۱۳۹۰ و Hasanpur et al., 2015: 179-187). براساس مقایسه‌های صورت‌گرفته می‌توان گفت که گورهای کاوش‌شده باباجیلان با گورستان‌های کاوش‌شده لرستان در پشتکوه مانند برخی از قبور گورستان بردبال و همچنین گورستان شورابه بیشترین شباهت را دارند؛ زیرا اکثر گورستان‌ها دارای گورهای چهارچینه سنگی یا گورهای آرامگاهی هستند که دیوار آنها از چند ردیف سنگ تشکیل شده است اگرچه در دیوارهای گورهای به‌دست‌آمده در باباجیلان فقط یک ردیف سنگ به‌حالت عمودی کار گذاشته شده است. نمونه‌هایی از این گورها در گورستان بردبال و شورابه پشتکوه کشف شده است (Vanden Berghe 1970: Figs: 8 and 14). همچنین در مقایسه با گورستان‌های کاوش‌شده در ناحیه پیشکوه، ساختار این قبور با نمونه‌های به‌دست‌آمده از خاتون‌بان نورآباد شباهت نزدیکی دارند (Haerinck et al. 2004: 109).

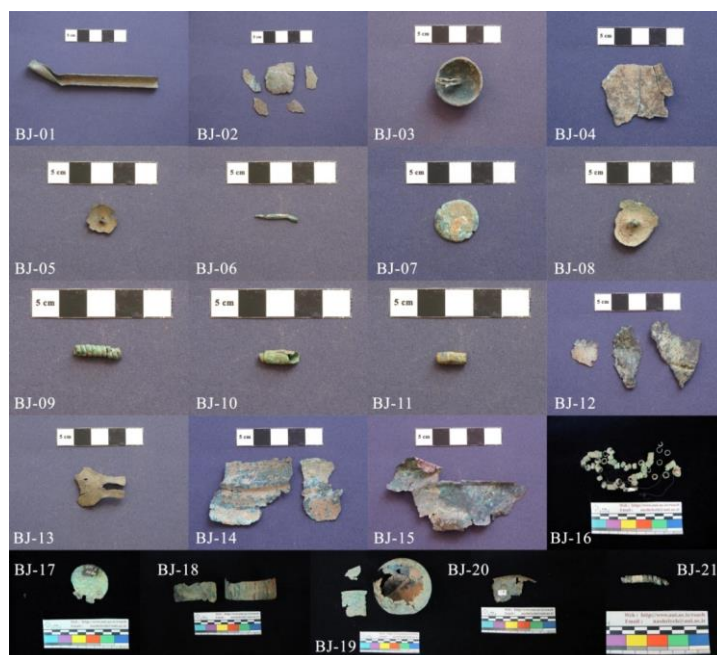
۳. روش پژوهش

برای مطالعه و شناسایی روند فلزگری و ساخت اشیاء برنزی اشیاء به‌دست‌آمده از محوطه گورستان باباجیلان، پژوهشی آزمایشگاهی شامل مطالعات ریزساختاری و آنالیزهای شیمیایی با استفاده از روش‌های میکروسکوپی و آنالیز دستگاهی طراحی و سعی شد تا با توجه به موضوع و محدودیت‌های آن، مانند ناممکن بودن نمونه‌برداری از اشیاء مختلف و محدودیت در روش‌های آنالیز قابل دسترسی، کمیت مناسبی از اشیاء انتخاب شود و در عین حال روش‌های مورد استفاده، پاسخگوی پرسش‌های این پژوهش باشند.

برای انجام مطالعات فلزگری و شناسایی ترکیب شیمیایی اشیاء فلزی محوطه باباجیلان، تعداد ۲۱ نمونه از اشیاء فلزی این محوطه انتخاب شدند (شکل ۲)؛ بخشی از این اشیاء در هنگام کاوش‌های باستان‌شناسی انتخاب و نمونه‌برداری شدند و بخشی دیگر که اکنون در موزه قلعه فلک‌الافلاک خرم‌آباد نگهداری می‌شوند، به‌تازگی نمونه‌برداری شده‌اند. مشخصات و ماهیت نمونه‌های مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.

به‌منظور انجام مطالعات از بخش کوچکی از هر قطعه، یک تکه کوچک با استفاده از اره جواهرسازی جدا شد و از آن مقطع صیقلی تهیه شد (Scott, 1991: 61-62). برای آماده‌سازی نمونه‌ها، تکه‌های جداشده از هر نمونه درون رزین اپوکسی دو جزئی (رزین و سخت‌کننده) ثابت (Mount) شد و سپس با استفاده از کاغذ سنباده (به‌ترتیب شماره‌های ۲۴۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۲۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰) ساییده شدند. پس از آن، برای حصول سطح صاف و براق، نمونه‌های مانده با خمیر الماس ۳ میکرون و ۰/۵ میکرون صیقل داده شدند.

برای مطالعه ریزساختار و شناسایی فازها و عناصر تشکیل‌دهنده موجود در آنها به‌صورت آنالیز نقطه‌ای از روش میکروسکوپی الکترونی روبشی همراه با اسپکتروسکوپی پراش انرژی پرتو ایکس^۱ (SEM-EDS) استفاده شد. به این منظور، مقاطع صیقلی آماده‌شده نمونه‌ها بدون هیچ‌گونه آماده‌سازی و پیش از اچ‌کردن با استفاده از روش میکروسکوپی الکترونی روبشی مطالعه شدند. این آزمایش در آزمایشگاه میکروسکوپ الکترونی (SEM) بنیاد علوم کاربردی رازی تهران و با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی^۲ (FE-SEM) مدل MIRA3 ساخت شرکت TESCAN جمهوری چک به همراه دستگاه اسپکتروسکوپی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) مدل SAMx ساخت فرانسه انجام شد.



شکل ۲-۲۱ نمونه برنزی مطالعه شده متعلق به محوطه عصر آهن باباجیلان

برای مشاهدات میکروسکوپی و شناسایی ریزساختار نمونه‌ها، از میکروسکوپ نوری پلاریزان با نور انعکاسی استفاده شد. نمونه‌های ثابت شده قبل و بعد از اچ کردن با استفاده از میکروسکوپ متالوگرافی مدل BK-POL/BK-POLR ساخت شرکت Alltion کشور چین مطالعه شدند. برای اچ کردن نمونه‌ها از محلول کلرید آهن III الکلی استفاده شد (Scott, 1991: 72).

جدول ۱- مشخصات ۲۱ نمونه برنزی مورد مطالعه محوطه باباجیلان

مشخصات	محل نمونه برداری	کد نمونه	ردیف
لوله ظرف	محوطه باباجیلان	BJ-01	۱
بدنه ظرف		BJ-02	۲
گل میخ		BJ-03	۳
بدنه ظرف		BJ-04	۴
دکمه		BJ-05	۵
میخ		BJ-06	۶
صفحه مدور		BJ-07	۷
دکمه		BJ-08	۸
فنر		BJ-09	۹
مهره		BJ-10	۱۰
مهره		BJ-11	۱۱
بدنه ظرف		BJ-12	۱۲
نامشخص		BJ-13	۱۳
بدنه ظرف		BJ-14	۱۴
بدنه ظرف		BJ-15	۱۵
گردنبند	موزه قلعه فلک الافلاک	BJ-16	۱۶
دکمه		BJ-17	۱۷
حلقه دستبند		BJ-18	۱۸
ظرف		BJ-19	۱۹
بدنه ظرف		BJ-20	۲۰
فنر		BJ-21	۲۱

۴. نتایج و بحث

به‌منظور شناسایی ترکیب شیمیایی نمونه‌های فلزی محوطه باباجیلان و مشاهده ریزساختار و فازهای موجود در آنها در بزرگ‌نمایی بالا و همچنین آنالیز فازها، نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی مطالعه شدند. نتایج آنالیز اسپکتروسکوپی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) بر روی زمینه فلزی نمونه‌ها در جدول شماره ۲ ارائه شده است. این نتایج به‌خوبی نشان می‌دهد که تمامی ۲۱ نمونه مورد مطالعه از آلیاژ برنز قلعی ساخته شده‌اند. مس در نمونه‌ها بین ۷۹/۸۸ و ۹۰/۲۲ درصد وزنی شناسایی شده است. بیشترین میزان قلع در نمونه‌ها ۱۶/۴۲ درصد وزنی اندازه‌گیری شد، درحالی‌که کمترین میزان آن ۳/۹۵ درصد وزنی است. نتایج آزمایش به‌خوبی بیانگر تفاوت میزان قلع در نمونه‌های مختلف آنالیزشده است. تفاوت در میزان قلع در اشیاء برنزی پیش از تاریخ در ایران موضوعی معمول است و در بسیاری از نمونه‌های برنزی آنالیزشده از محوطه‌های مختلف لرستان و دیگر نواحی ایران دیده شده است (Fleming et al., 2005: 47-49; Begemann et al., 2008: 15-17; Oudbashi et al., 2014: 75 & Oudbashi et al., 2015). 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 کشف‌شده در بین‌النهرین، 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 می‌کرده‌اند (Potts, 1997: 169 & Moorey, 1994: 252). برای مثال، به‌منظور تولید ظروف از یک نسبت و برای تولید جنگ‌افزارها یا اشیاء تزئینی از نسبتی متفاوت استفاده شده است. باوجوداین، 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 هیچ‌عنوان دیده نشده است (Oudbashi et al., 2014: 76 & Oudbashi et al., 2015).

دیگر عنصر شناسایی شده در ترکیب نمونه‌ها، سرب است. میزان سرب نیز در نمونه‌های مختلف متنوع بوده و از ۰/۵۳ تا ۶/۳۹ درصد وزنی در نوسان است؛ البته در بیشتر نمونه‌ها میزان سرب حدود ۲ درصد و کمتر از آن و تنها در دو نمونه به میزان زیاد شناسایی شده است (BJ-16 & BJ-10). با توجه به استفاده از آنالیز نیمه‌کمی اسپکتروسکوپی پراش انرژی پرتو ایکس امکان دارد که میزان دقیق سرب موجود در نمونه‌ها کمتر از میزان شناسایی شده با این روش باشد. باوجوداین، مقدار زیاد سرب شناسایی شده در ترکیب دو نمونه، موضوعی جالب‌توجه است. با توجه به میزان متنوع سرب در نمونه‌ها، می‌توان دریافت که احتمالاً این عنصر به‌عنوان ناخالصی از سنگ معدن‌های مورد استفاده وارد ترکیب آلیاژ شده است.

ارسنیک و روی نیز در اکثر نمونه‌ها کمتر از ۱ درصد شناسایی شده‌اند؛ البته در ۵ نمونه مقدار ارسنیک بیش از یک درصد وزنی است و در یکی از آنها این مقدار ۲/۸۷ درصد اندازه‌گیری شده است. در یک نمونه نیز مقدار روی بیش از یک درصد وزنی است. روی در نمونه‌های برنزی مطالعه‌شده عصر آهن ایران، به‌عنوان عنصر کمیاب شناسایی شده است (Oudbashi et al., 2014: 75; Oudbashi et al., 2015 & Oudbashi et al., 2013: 156). وجود روی به مقدار کم در ترکیب آلیاژ می‌تواند به دلیل وجود آن در ترکیب سنگ معدن استفاده شده باشد، هرچند شواهدی از وجود روی به میزان بالا در تعداد معدودی از اشیاء فلزی پیش از تاریخ ایران دیده شده است. در حقیقت، شواهدی از تولید آلیاژ برنج در پیش از تاریخ فلات ایران وجود دارد که با توجه به میزان روی در آنها، می‌تواند بیانگر تولید عمدی آلیاژ باشد؛ مانند نمونه‌های کشف‌شده از تپه‌یجی

متعلق به هزاره دوم ق.م که حاوی کمتر از ۲۰ درصد روی بوده‌اند (Thornton et al, 2003: 4). همچنین در تعدادی اشیاء موسوم به برنزه‌های لرستان نیز میزان زیادی از روی شناسایی شده است (Moorey, 1964: 78).

جدول ۲- نتایج آنالیز SEM-EDS بر روی ۲۱ نمونه مورد مطالعه بر پایه درصد وزنی

	Cu	Sn	Pb	As	Zn	Fe	S
BJ-01	۸۷/۵۶	۸/۵۳	۱/۹۶	۰/۹۷	۰/۵۹	۰/۱۷	۰/۲۱
BJ-02	۸۴/۵۰	۱۲/۶۱	۱/۱۱	۰/۷۰	۰/۷۴	۰/۱۹	۰/۱۶
BJ-03	۸۲/۲۸	۱۴/۶۴	۰/۷۷	۰/۶۱	۰/۸۲	۰/۱۹	۰/۶۹
BJ-04	۷۹/۸۸	۱۶/۴۲	۱/۹۵	۰/۶۹	۰/۶۱	۰/۱۵	۰/۲۹
BJ-05	۸۴/۷۰	۱۲/۷۵	۱/۳۸	۰/۴۰	۰/۶۴	۰/۱۴	۰/۰۰
BJ-06	۸۰/۳۰	۱۵/۰۱	۱/۹۵	۱/۲۹	۰/۶۰	۰/۱۷	۰/۶۷
BJ-07	۸۸/۴۹	۸/۱۴	۱/۷۱	۰/۵۴	۰/۶۶	۰/۴۶	۰/۰۰
BJ-08	۸۵/۵۱	۱۱/۸۸	۱/۱۱	۰/۳۲	۰/۷۷	۰/۲۱	۰/۲۰
BJ-09	۸۷/۱۶	۱۰/۲۱	۰/۸۵	۰/۸۷	۰/۸۳	۰/۰۰	۰/۰۸
BJ-10	۸۴/۷۰	۹/۳۱	۳/۵۵	۱/۵۰	۰/۵۵	۰/۴۰	۰/۰۰
BJ-11	۸۸/۱۱	۷/۸۵	۰/۶۲	۰/۶۴	۱/۰۹	۱/۷۰	۰/۰۰
BJ-12	۸۳/۰۶	۱۴/۶۳	۱/۲۷	۰/۳۵	۰/۵۲	۰/۱۷	۰/۰۰
BJ-13	۸۴/۸۷	۱۲/۳۹	۰/۵۳	۰/۷۰	۰/۸۶	۰/۲۷	۰/۳۸
BJ-14	۸۴/۲۵	۱۳/۴۴	۰/۷۸	۰/۴۰	۰/۶۲	۰/۳۲	۰/۱۹
BJ-15	۸۴/۹۰	۱۱/۱۷	۲/۰۹	۰/۷۴	۰/۷۰	۰/۴۰	۰/۰۰
BJ-16	۸۴/۶۴	۶/۲۹	۶/۳۹	۱/۴۹	۰/۷۸	۰/۲۲	۰/۱۹
BJ-17	۸۵/۳۴	۱۲/۵۹	۰/۹۹	۰/۳۲	۰/۵۰	۰/۱۵	۰/۱۲
BJ-18	۹۰/۲۲	۳/۹۵	۱/۶۶	۲/۸۷	۰/۷۲	۰/۴۰	۰/۱۸
BJ-19	۸۲/۶۴	۱۴/۱۲	۱/۴۱	۰/۶۱	۰/۷۵	۰/۳۲	۰/۱۳
BJ-20	۸۱/۴۱	۱۴/۴۵	۲/۱۰	۱/۲۰	۰/۷۴	۰/۱۰	۰/۰۰
BJ-21	۸۶/۰۲	۱۰/۳۰	۱/۴۷	۰/۶۷	۰/۹۳	۰/۴۴	۰/۱۷

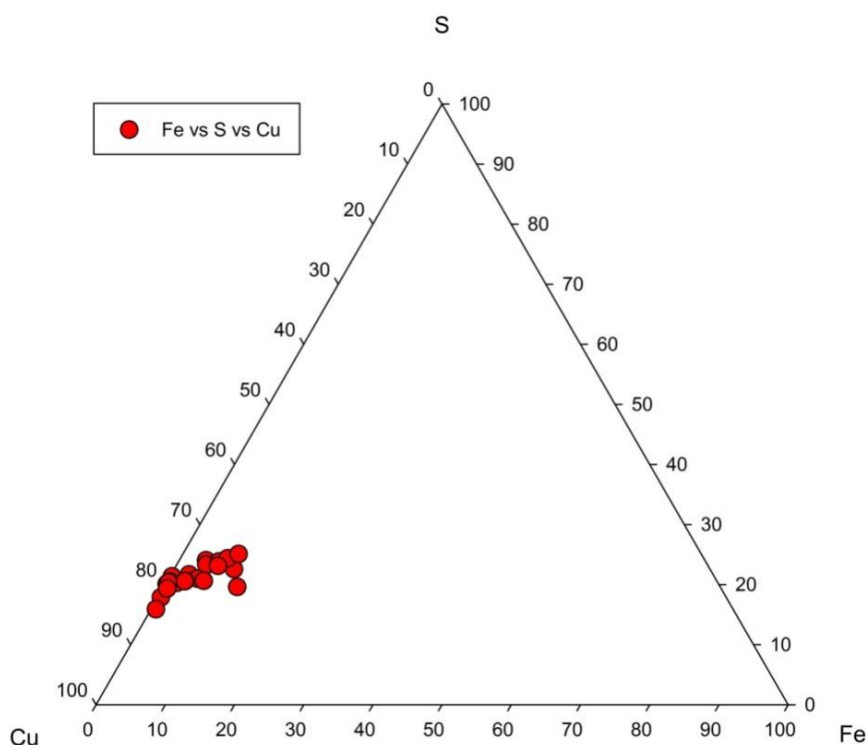
برای شناسایی ماهیت ریزساختاری نمونه‌ها از روش میکروسکوپی الکترونی روبشی (SEM) در بزرگ‌نمایی بالا استفاده شد. در تصاویر SEM-BSE (Scanning Electron Microscopy-Backscattered Electrons)،

جدول ۳- نتایج آنالیز SEM-EDS بر روی آخال‌های تیره و گویچه‌های روشن مشاهده شده در تصاویر SEM-BSE در نمونه‌های مختلف بر پایه درصد وزنی، S آخال‌های سولفیدی و Pb گویچه‌های سربی هستند.

	S	Fe	Cu	Zn	As	Sn	Pb	Sb	Si	C
BJ-01/S	۲۱/۲۶	۲/۵۴	۷۴/۲۹	۰/۷۵	۰/۳۱	۰/۸۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
BJ-02/S	۱۹/۸۱	۱/۴۹	۷۶/۴۵	۰/۶۵	۰/۱۷	۱/۴۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
BJ-03/S	۲۳/۳۴	۳/۷۶	۶۹/۹۹	۰/۴۹	۰/۸۴	۱/۵۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
BJ-04/S	۲۰/۸۲	۰/۲۹	۷۶/۳۹	۱/۲۲	۰/۱۹	۱/۰۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
BJ-05/S	۱۷/۱۹	۰/۴۱	۷۸/۵۷	۰/۶۷	۰/۲۵	۲/۹۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
BJ-06/S	۲۲/۸۱	۴/۱۹	۷۰/۹۵	۰/۵۸	۰/۱۶	۱/۳۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
BJ-07/S	۲۱/۴۰	۸/۲۲	۶۵/۲۷	۲/۲۸	۰/۲۶	۲/۴۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۹	۰/۰۰
BJ-08/S	۲۰/۶۱	۴/۱۴	۷۳/۵۶	۰/۵۹	۰/۰۰	۱/۱۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
BJ-09/S	۲۳/۳۶	۵/۷۲	۶۸/۹۸	۰/۷۴	۰/۲۳	۰/۹۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
BJ-10/S	۲۳/۸۱	۶/۶۹	۶۷/۲۸	۰/۵۸	۰/۵۴	۱/۱۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
BJ-11/S	۲۰/۰۸	۰/۴۱	۷۷/۵۸	۰/۷۵	۰/۰۰	۱/۱۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
BJ-12/S	۱۹/۴۶	۰/۱۵	۷۷/۳۷	۰/۶۶	۰/۳۷	۲/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
BJ-13/S	۱۹/۷۹	۰/۲۹	۷۷/۱۳	۰/۷۵	۰/۵۱	۱/۵۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
BJ-14/S	۲۰/۲۰	۲/۵۶	۷۵/۳۸	۰/۷۷	۰/۰۰	۱/۰۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
BJ-15/S	۱۸/۸۳	۱۰/۱۶	۶۷/۰۵	۰/۸۲	۰/۰۰	۳/۱۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
BJ-16/S	۲۴/۷۹	۷/۹۷	۶۶/۱۴	۰/۴۳	۰/۰۰	۰/۶۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
BJ-17/S	۱۴/۶۱	۰/۶۵	۷۶/۷۶	۰/۷۳	۰/۲۸	۶/۹۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
BJ-18/S	۲۱/۳۰	۵/۵۹	۶۵/۲۸	۴/۶۶	۰/۴۹	۲/۶۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
BJ-19/S	۱۹/۸۶	۲/۴۸	۷۴/۳۱	۰/۶۴	۰/۱۷	۲/۵۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
BJ-20/S	۱۸/۹۱	۰/۶۱	۷۸/۴۲	۰/۵۶	۰/۰۰	۱/۵۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
BJ-21/S	۱۸/۹۲	۴/۸۴	۶۸/۰۷	۱/۱۲	۰/۹۸	۶/۰۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
BJ-04/Pb	۰/۱۵	۰/۰۰	۲۱/۱۹	۰/۴۷	۰/۱۴	۴/۴۹	۷۳/۵۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
BJ-05/Pb	۰/۱۸	۰/۰۰	۱۷/۶۶	۰/۴۶	۰/۱۳	۴/۳۳	۷۷/۲۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
BJ-07/Pb	۰/۴۲	۰/۰۰	۳۴/۰۳	۰/۸۸	۰/۲۱	۴/۳۲	۵۹/۱۶	۰/۸۵	۰/۱۳	۰/۰۰
BJ-08/Pb	۰/۱۴	۰/۰۰	۳/۴۵	۰/۳۶	۰/۵۷	۰/۳۲	۹۵/۱۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
BJ-12/Pb	۰/۱۹	۰/۰۰	۲۱/۸۹	۰/۵۱	۰/۱۱	۴/۱۵	۷۳/۱۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
BJ-13/Pb	۰/۱۶	۰/۰۰	۷/۴۱	۰/۴۹	۰/۳۳	۰/۶۶	۹۰/۹۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
BJ-14/Pb	۰/۳۵	۰/۰۰	۶/۲۹	۰/۵۳	۰/۰۰	۰/۳۳	۹۲/۵۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
BJ-16/Pb	۰/۱۳	۰/۰۰	۲/۸۰	۰/۲۷	۰/۳۴	۰/۲۰	۸۴/۶۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۱/۶۵
BJ-18/Pb	۰/۲۸	۰/۰۰	۱۷/۲۶	۰/۶۱	۰/۲۴	۰/۶۶	۸۰/۹۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
BJ-19/Pb	۰/۱۹	۰/۰۰	۸/۰۴	۰/۵۵	۰/۵۰	۱/۱۰	۸۹/۶۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
BJ-21/Pb	۰/۳۹	۰/۰۰	۵/۴۴	۰/۹۴	۰/۳۶	۰/۴۲	۹۲/۴۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰

با توجه به نتایج آنالیز آخال‌های تیره دیده شده در تصاویر SEM-BSE می‌توان دریافت که این آخال‌ها ترکیبات سولفید مس هستند. شکل ۴ نمودار سه‌وجهی در سیستم Cu-Fe-S براساس نتایج آنالیز آخال‌های

سولفیدی را نمایش می‌دهد. با توجه به محل قرارگیری نتایج آنالیز در این سیستم به‌خوبی می‌توان دید که آخال‌های موجود ترکیبات سولفید مس و احتمالاً تشکیل‌شده از کالکوسیت (Cu_2S) (Chalcocite) یا دیجینیت (Cu_9S_5) (Digenite) هستند. 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 استفاده‌شده در تولید برنز باشد. استحصال مس از این ترکیبات روشی معمول در فلزگری مس در پیش از تاریخ بوده است (Bachmann, 1982: 21-26; Hauptmann, 2014: 103 & Coghlan, 1975: 20). در آغاز، در ابتدای دوره کالکولیتیک (Chalcolithic) (حدود هزاره پنجم ق.م)، استحصال مس از سنگ معدن‌های اکسیدی صورت می‌گرفته است، اما به‌مرور زمان در هزاره چهارم و سوم ق.م (اواسط دوره کالکولیتیک و عصر مفرغ) از سنگ معدن‌های سولفیدی یا مخلوطی از سنگ معدن‌های سولفیدی و اکسیدی برای استحصال مس استفاده می‌شود (Oudbashi et al, 2012: 159; Henderson, 2000: 214-220 & Hauptmann, 2014: 103-). وجود میزان کم آهن می‌تواند به دلیل حضور سولفید آهن مانند پیروتیت (Fe_{1-x}S) (Pyrrhotite) یا مخلوط بودن سنگ معدن سولفیدی مورد استفاده با ترکیبات سولفید آهن و مس مانند کالکوپیریت (CuFeS_2) (Chalcopyrite) باشد (Klein and Hurlbut Jr., 1999: 354 & Bachmann, 1982: 22-26).



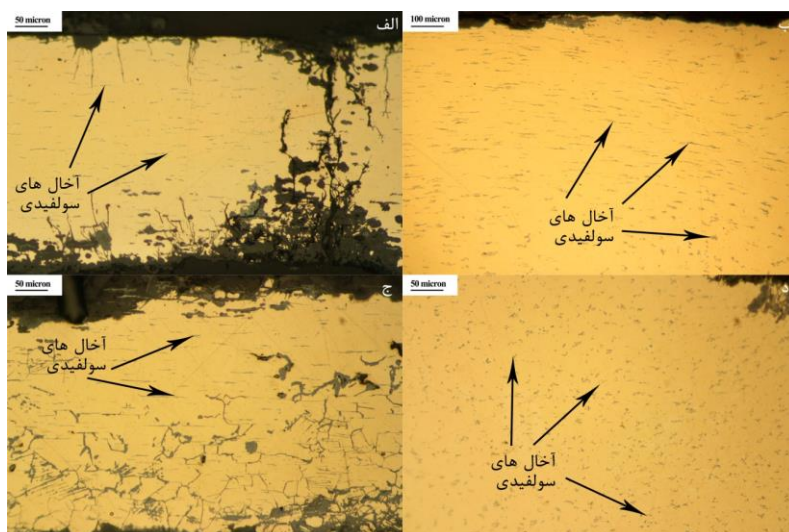
شکل ۴- نمودار سه‌تایی سیستم Cu-Fe-S بر اساس نتایج آنالیز EDS آخال‌های خاکستری.

همان‌گونه که ذکر شد، گویچه‌های بسیار کوچک و روشنی نیز در تصاویر SEM-BSE تقریباً به‌صورت مدور در مقطع عرضی نمونه‌ها دیده می‌شوند که در سراسر زمینه فلزی پراکنده شده‌اند (شکل ۳). اندازه این

گویچه‌ها از آخال‌های سولفیدی کوچک‌تر است. برای شناسایی ماهیت شیمیایی این گویچه‌ها، یازده مورد از آنها در نمونه‌های متفاوت آنالیز شدند که نتایج آن در جدول ۳ آمده است. براساس این نتایج، عنصر اصلی تشکیل‌دهنده این گویچه‌ها سرب است. میزان سرب در نمونه‌ها متنوع بوده و بین ۵۹/۱۶ تا ۹۵/۱۶ درصد وزنی اندازه‌گیری شده است. مس و قلع نیز به مقدار زیادی در ترکیب آنها دیده شده است؛ البته مقدار مس در نمونه‌ها به شدت متغیر بوده و میزان قلع نیز حداکثر حدود ۴ درصد در برخی از آنها شناسایی شده است. به‌طور کلی میزان زیاد مس و قلع می‌تواند به دلیل تأثیر ناحیه آنالیز بر روی نتایج باشد؛ زیرا با توجه به کوچک بودن فازهای آنالیز شده امکان تأثیر ترکیب زمینه فلزی احاطه‌کننده آنها در روش میکروآنالیز EDS بر روی ترکیب گویچه‌ها وجود دارد. ارسنیک، روی و آهن در گویچه‌های آنالیز شده، به‌عنوان عناصر فرعی شناسایی شده‌اند. میزان کربن موجود در یکی از گویچه‌ها قابل توجه است که می‌تواند به دلیل بقایای خمیر الماس استفاده‌شده برای پرداخت نهایی سطح مقطع باشد. با توجه به میزان بسیار کم سرب در ترکیب آلیاژ نمونه‌های مورد مطالعه، می‌توان گفت که این عنصر به‌طور اتفاقی به‌عنوان ناخالصی از سنگ معدن به ترکیب وارد شده است.

برای شناسایی ریزساختار اشیاء مورد مطالعه محوطه باباجیلان و شناسایی روش‌های ساخت و شکل‌دهی آنها، مقاطع صیقلی آماده‌شده از هر نمونه با استفاده از میکروسکوپ نوری (متالوگرافی) مطالعه شدند. هر نمونه قبل و بعد از اچ‌کردن با استفاده از میکروسکوپ نوری مشاهده و تصاویر آن ثبت شد. همان‌گونه که در تصاویر SEM-BSE نیز دیده شد، به‌طور کلی ریزساختار بیشتر نمونه‌ها قبل از اچ حاوی آخال‌های تیره پخش‌شده در زمینه برنزی است. این آخال‌ها در تصاویر متالوگرافی به رنگ سبز-خاکستری دیده می‌شوند. در بسیاری از نمونه‌ها، این آخال‌ها در راستای طولی مقطع عرضی کشیده شده‌اند، اما در برخی نیز به شکل فازهای نسبتاً گرد یا بدون شکل مشخص قابل مشاهده هستند (شکل ۵). همان‌گونه که پیش از این ذکر شد، نتایج آنالیز اسپکتروسکوپی پراش انرژی پرتو ایکس نشان داد که این آخال‌ها شامل ترکیب‌های سولفید مس ناشی از فرآیند استحصال هستند که در ریزساختار اشیاء برنزی باقی‌مانده‌اند.

برای مطالعه ریزساختار فلزی موجود در نمونه‌ها و تعیین ماهیت دانه‌ای ریزساختار و شکل و وضعیت دانه‌های تشکیل‌دهنده آن در نمونه‌های مورد مطالعه، مقطع صیقلی کلیه نمونه‌ها با استفاده از محلول کلرید آهن III الکلی اچ شد (Scott, 1991: 72) و سپس با استفاده از میکروسکوپ نوری مشاهده شدند. در تمامی نمونه‌ها ریزساختار شامل دانه‌های کارشده محلول جامد فاز آلفا (محلول جامد مس و قلع) است که در بسیاری موارد باز تبلور یافته است (شکل‌های ۶ و ۷). این ریزساختار شامل دانه‌های شش‌وجهی (اکثراً به شکل کج و تغییر شکل یافته) است که در بسیاری از آنها یک یا چند خط دوقلویی دیده می‌شود. در بسیاری از نمونه‌ها دانه‌ها حالت کشیده دارند و درون برخی از آنها خطوط لغزش (کرنش) (Strain Lines or Slip Bands) قابل مشاهده است. خطوط دوقلویی در برخی نمونه‌ها به‌صورت کاملاً صاف در طول دانه‌ها پیش رفته‌اند، اما در برخی تا حدی کج شده‌اند. آخال‌های سولفیدی اچ‌نشده و تغییرنیافته در ریزساختار اکثر نمونه‌ها به‌خوبی در یک راستا کشیده شده‌اند. در تمامی ۲۱ نمونه می‌توان ریزساختاری نسبتاً مشابه شامل دانه‌های کارشده و در برخی موارد باز تبلور یافته را دید. در برخی نمونه‌ها، درون اکثر دانه‌ها خطوط لغزش دیده می‌شود. مقدار زیاد خطوط لغزش در برخی نمونه‌ها بیانگر انجام کار سنگین برای شکل‌دهی است.



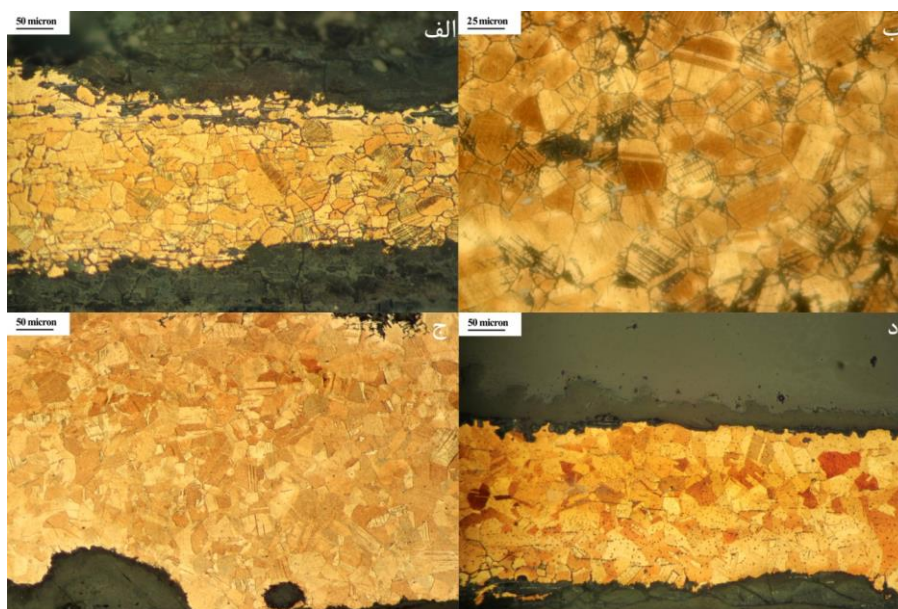
شکل ۵- تصویر متالوگرافی تعدادی از نمونه‌های محوطه باباجیلان پیش از اچ: الف) BJ-02، ب) BJ-03، ج) BJ-04، د) BJ-06. آخال‌های سولفیدی و نفوذ خوردگی در ریزساختار فلزی به خوبی در تصاویر دیده می‌شود.

اندازه دانه‌ها در نمونه‌های مختلف متفاوت است و نمی‌توان الگویی مشابه در اندازه و شکل دانه‌های کار شده و باز تبلور یافته آنها دید. در تعداد زیادی از نمونه‌ها ریزساختار بسیار ریزدانه‌ای مشاهده می‌شود که حتی موجب شده است امکان مطالعه شکل دقیق دانه‌ها و مشاهده خطوط لغزش و دوقلویی در آنها با استفاده از میکروسکوپ نوری تا حدی مشکل باشد. با این حال، ریزساختارهای مشاهده شده در همگی ۲۱ نمونه را می‌توان از یک نوع و دسته و در واقع مشابه با یکدیگر دانست. 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 دادن کار گرم، یعنی ترکیب هم‌زمان کار و عملیات حرارتی یا اجرای عملیات مکانیکی بر روی قطعه داغ و گداخته شده نیز باشد (Scott, 1991: 7; Moorey, 1994: 256 & Ellis, 2000: 356). اما با توجه به میزان حرارت بالای مورد نیاز، احتمال استفاده از کار گرم در ساخت اشیاء در عصر آهن ضعیف است. اجرای عملیات مکانیکی پس از مدتی موجب ایجاد کار سختی (Work-Hardening) در قطعه می‌شده است که در حقیقت ادامه عملیات مکانیکی را بر روی قطعه غیرممکن می‌کرده و احتمال وقوع شکستگی در ساختار برنزی قطعه به وجود می‌آمده است. برای از بین بردن کار سختی و بازگرداندن قابلیت کار در قطعه، آن را تا دمای بین ۵۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد حرارت می‌داده و سپس مجدداً بر روی قطعه کار می‌کرده‌اند؛ به این فرآیند «تابکاری» گفته می‌شود. برای ساخت یک قطعه از یک شمش، ممکن است به‌طور متناوب بارها بر روی آن کار و عملیات حرارتی انجام داده باشند. هرچه تعداد دفعات چرخه کار و تابکاری بیشتر باشد، دانه‌بندی ریزتری در نمونه دیده می‌شود (Scott, 1991: 240 & Dungworth, 2013: 151 & Nerantzis, 2012: 240).

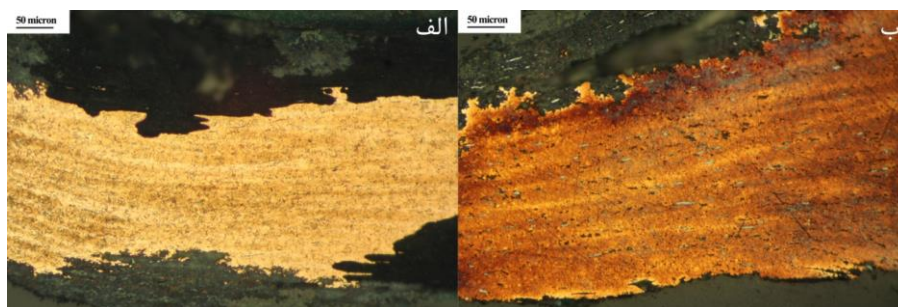
وجود خطوط لغزش می‌تواند نشان‌دهنده انجام عملیات مکانیکی به‌عنوان مرحله پایانی شکل‌دهی در قطعه باشد؛ بدین معنی که در پایان بر روی قطعه، تابکاری انجام نشده است (Scott, 1991: 7-8)؛ البته میزان کم تابکاری در مرحله پایانی هم می‌تواند عامل باقی‌ماندن مقداری از خطوط لغزش در دانه‌ها باشد. در فلزاتی که

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 بخش‌های اچ‌شده به شکل تعدادی خطوط باریک در بعضی از دانه‌ها دیده می‌شود؛ این خطوط «نوارهای لغزش» یا «خطوط کرنش» نامیده می‌شوند. با توجه به اینکه در برخی نمونه‌ها خطوط لغزش در دانه‌ها به خوبی آشکار هستند، می‌توان دریافت که پس از آخرین مرحله انجام کار سرد، بر روی قطعه تابکاری صورت نگرفته است.

نکته جالب توجه وجود بقایای مغزه‌دارشدن در ریزساختار دو نمونه BJ-07 و BJ-16 است (شکل ۷). این بقایا به صورت خطوط روشن و تیره تقریباً موازی در روی ریزساختار دانه‌ای نمونه‌ها دیده می‌شود. در حقیقت، این موضوع نشان می‌دهد که عملیات ترمومکانیکی انجام‌شده بر روی قطعه برای از بین بردن مغزه‌دارشدن ایجاد شده در زمان ریخته‌گری و انجماد قطعه کافی نبوده است و به‌رغم تغییر ایجادشده در ریزساختار، این مغزه‌دارشدن در آن باقی مانده است. در این دو نمونه، ریزساختار دانه‌ای تا حدی به‌سختی قابل تشخیص است (Dungworth, 2013: 150 & Scott, 1991: 9).

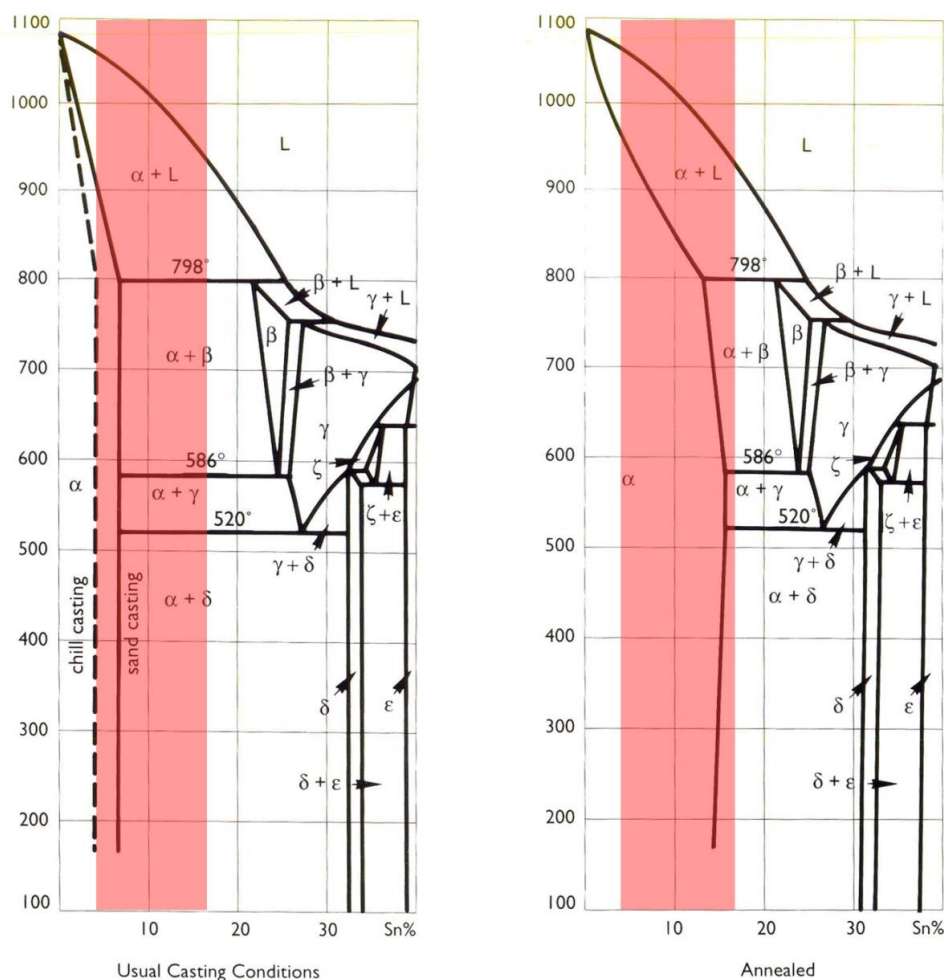


شکل ۶- تصویر متالوگرافی تعدادی از نمونه‌های محوطه باباجیلان پس از اچ‌شدن در محلول کلرید آهن III الکلی، الف) BJ-04، ب) BJ-08، ج) BJ-12، د) BJ-19. ریزساختار نمونه‌ها شامل دانه‌های کارشده و باز تبلور یافته محلول جامد آلفای مس و خطوط لغزش در برخی نمونه‌هاست. اندازه دانه‌ها در نمونه‌های مختلف متفاوت است.



شکل ۷- تصویر متالوگرافی دو نمونه محوطه باباجیلان پس از اچ‌شدن در محلول کلرید آهن III الکلی؛ الف) BJ-07، ب) BJ-16، بقایای مغزه‌دارشدن اولیه قطعه ریخته‌گری شده، در ریزساختار باقیمانده است.

شکل ۸ بخشی از منحنی سیستم Cu-Sn را در شرایط ریخته‌گری و تابکاری می‌دهد (Scott, 1991: 123). میزان قلع اندازه‌گیری شده در نمونه‌ها در این منحنی مشخص شده است. با توجه به منحنی می‌توان دریافت که دو فاز محلول جامد مس (α) و فاز بین‌دندریتی یوتکتوئید $\alpha + \delta$ در شرایط ریخته‌گری معمولی در این برنرها ایجاد می‌شود، در حالی که فاز اصلی ایجاد شده در شرایط تابکاری تنها فاز آلفاست. این ریزساختار در تمامی نمونه‌های مطالعه شده به خوبی آشکار بود.



شکل ۸- بخشی از منحنی سیستم مس-قلع؛ راست) شرایط تابکاری، چپ) شرایط معمول ریخته‌گری (Scott, 1991: 123) که در آن محدوده میزان قلع شناسایی شده در نمونه‌های مختلف محوطه باباجیلان براساس نتایج آنالیز مشخص شده است.

درحقیقت، ریزساختارهای دیده شده در نمونه‌ها به خوبی با نظریه‌های موجود در زمینه ریزساختار و ترکیب برنرهای قلعی مطابقت دارند. براساس ترکیب شیمیایی و ریزساختار برنرهای محوطه باباجیلان، روند زیر برای ساخت اشیاء برنزی مطالعه شده پیشنهاد می‌شود:

- تولید آلیاژ برنز با استفاده از روش‌هایی مانند استحصال توأم یا سمانته کردن (Cementation) سنگ معدن‌های سولفیدی/اکسیدی مس و کاسیتريت برای تولید قطره (Prill) یا شمش کوچک برنزی؛

- ذوب قطره‌ها یا شمش‌های برنزی کوچک در بوته و تولید شمش یا قطعه بزرگ برای اشیاء با ابعاد بزرگ؛
- انجام دادن کار سرد بر روی قطعات اولیه برای شکل‌دهی و تولید اشیاء صفحه‌ای فلزی؛
- تابکاری بر روی قطعات کار شده به منظور رفع کارسختی در آنها؛
- ادامه چرخه کار و تابکاری برای حصول شکل نهایی؛
- انجام دادن کار سرد سطحی بر روی برخی قطعات برای شکل‌دهی نهایی یا تزئین.

۵. نتیجه

برای شناسایی روش آلیاژسازی و تولید برنز در ناحیه لرستان در هزاره اول ق.م، مطالعات آزمایشگاهی با استفاده از روش‌های میکروسکوپی و آنالیز عنصری بر روی تعدادی از نمونه‌های کشف شده از محوطه باباجیلان پیشکوه لرستان انجام شد. نتایج آنالیز ۲۱ نمونه اشیاء متنوع، بیانگر استفاده از آلیاژ برنز (مس-قلع) در ساخت آنهاست و عناصر فلزی دیگر مانند آرسنیک، سرب و روی تنها به میزان کم (به استثناء چند نمونه) شناسایی شده‌اند. نکته جالب توجه این است که مقدار قلع در ترکیب نمونه‌ها از الگوی مشخصی پیروی نمی‌کند و بین حدود ۴ تا ۱۶ درصد وزنی متغیر است که نشان‌دهنده استفاده از روش آلیاژسازی کنترل نشده مانند سمانته کردن یا استحصال توأم سنگ معدن‌های مس و قلع برای تولید آلیاژ برنز است. تفاوت در ترکیب آلیاژ برنز، موضوعی معمول در برنزه‌های پیش از تاریخ ایران است. مطالعات میکروسکوپی نیز نشان داد که تعداد زیادی فازهای متنوع در ریزساختار اشیاء وجود دارد که شامل ترکیبات سولفید مس و گویچه‌های سربی هستند. وجود آخال‌های سولفید مس پخش شده در ماتریس فلزی و کشیده شده در راستای طولی در ریزساختار آلیاژهای مس باستانی، می‌تواند بیانگر استفاده از سنگ معدن‌های اکسیدی همراه با مقداری سنگ معدن سولفید مس برای استحصال باشد. مشاهدات میکروسکوپی مقطع عرضی نمونه‌ها نیز نشان داد که اشیاء برنزی مورد مطالعه با استفاده از روش چکش کاری سرد و تابکاری متعاقب، برای بازگرداندن قابلیت کارپذیری به قطعه، ساخته شده‌اند. میزان و شدت کار و تابکاری انجام شده بر روی قطعات با توجه به ضخامت کم اشیاء و اندازه دانه‌ها و همچنین تنش موجود در ریزساختار به خوبی مشخص است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از آقای مهندس بهنام رحمانی و خانم مهندس نازنین نیکرو از بنیاد علوم کاربردی رازی، خانم مهندس عاطفه شکفته و آقای صالح غایی از دانشگاه هنر اصفهان و آقای روح‌الدین پورزرین از موزه قلعه فلک‌الافلاک برای کمک‌ها و راهنمایی‌هایشان در پیشبرد و انجام این پژوهش سپاسگزاری می‌کنند. این مقاله مستخرج از طرحی پژوهشی است که به شماره ۹۳۹/۱۰ در معاونت پژوهشی دانشگاه هنر اصفهان در ۱۳۹۵ پایان یافته است.

پی‌نوشت

1. Scanning Electron Microscopy coupled with Energy Dispersive X-ray Spectroscopy.
2. Field Emission Scanning Electron Microscope.

منابع

- حسن‌پور، عطا، (۱۳۹۰)، «تاریخ‌نگاری عصر آهن II در لرستان شمالی بر طبق تاریخ‌نگاری دقیق گورستان باباجیلان»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد باستان‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکز.
- Bachmann, H. G., 1982. *The identification of slags from archaeological sites*, Occasional Publications 6, London, UCL, Institute of Archaeology.
- Begemann, F., et al. 2008. An archaeo-metallurgical study of the early and middle Bronze Age in Luristan, Iran, *Iranica Antiqua*, 43, 1-66.
- Coghlan, H. H., 1975. *Notes on the prehistoric metallurgy of Copper and Bronze in the old world*, Occasional Paper on Technology 4, 2nd Ed., Oxford, Pitt Rivers Museum.,
- Dungworth, D., 2013. An experimental study of some early copper smiting techniques, in: D. Dungworth and R. C. P. Doonan (eds.), *Accidental and Experimental Archaeometallurgy*, London, 149–152.
- Ellis, L. (ed.) (2000), *Archaeological method and theory: an Encyclopaedia*, New York, Garland publishing Inc..
- Fleming, S. J., et al. 2006. The archaeometallurgy of War Kabud, western Iran, *Iranica Antiqua*, 41, 31-57.
- Fleming, S. J. et al. 2005. Bronze in Luristan: preliminary analytical evidence from copper/bronze artifacts excavated by the Belgian Mission in Iran, *Iranica Antiqua*, 40, 35-64.
- Haerinck E. et al. 2004. Finds from Khatunban B – Badavar Valley (Luristan) in the Iran Bastan Museum, Teheran, *Iranica Antiqua*, 39, 105-168.
- Hasanpur, A. et al. 2015. The Baba Jilan Graveyard near Nurabad, Pish-i Kuh, Luristan, a preliminary Report, *Iranica Antiqua*, 50, 171-212.
- Hauptmann, A. 2014. The investigation of archaeometallurgical slag, in: B.W. Roberts and C.P. Thornton (eds.), *Archaeometallurgy in global perspective, methods and syntheses*, New York, Springer, 91-105.
- Helwing, B. 2013. Early metallurgy in Iran – an innovative region as seen from the inside, in: S. Burmeister, S. Hansen, M. Kunst and N. Müller-Scheeßel (eds.), *metal matters: innovative technologies and social change in prehistory and antiquity*, Menschen-Kulturen-Traditionen, Forschungs Cluster 2, Band 12, Berlin, Deutsches Archäologisches Institut, 105-136.
- Henderson, J. 2000. *The science and archaeology of materials: an investigation of inorganic materials*, London, Routledge.
- Klein, C. and C. S. Hurlbut Jr., 1999. *Manual of mineralogy*, Revised 21st ed. (After J.D. Dana), Toronto, John Wiley and Sons Inc.
- Moorey P. R. S., 1994. *Ancient mesopotamian materials and industries: the archaeological evidence*, Oxford, Oxford University Press.
- Moorey, P. R. S. 1964. An interim report on some analyses of Luristan Bronzes, *Archaeometry*, 7, 72-79.
- Nerantzis, N., 2012. Shaping bronze by heat and hammer: an experimental reproduction of Minoan copper alloy forming techniques, *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 12, 237-247.
- Oudbashi, O. and M. Hessari, 2015. Iron Age tin bronze metallurgy at Marlik, Northern Iran: an analytical investigation, *Archaeological and Anthropological Sciences*, DOI 10.1007/s12520-015-0280-1.
- Oudbashi, O. and P. Davami, 2014. Metallography and microstructure interpretation of some archaeological tin bronze vessels from Iran, *Materials Characterization*, 97, 74-82.
- Oudbashi, O., et al. 2013. Archaeometallurgical studies on the bronze Vessels from Sangtarashan, Luristan, W-Iran. *Iranica Antiqua*, 48, 147-174.

Oudbashi O et al. 2012. Bronze in archaeology: a review of the archaeometallurgy of bronze in ancient Iran, in: L. Collini (ed.), *copper alloys-early applications and current performance-enhancing processes*, Rijek, InTech Open Access Publication, 153- 178.

Potts D. T., 1997. *Mesopotamian civilization: the material foundations*, New York, Cornell University Press.

Schmidt, E. F., et al. 1989. *The Holmes expeditions to Luristan*, 2 Vols., The University of Chicago Oriental Institute Publications 108, Chicago.

Scott, D. A., 1991. *Metallography and microstructure of ancient and historic metals*, Los Angeles, Getty Conservation Institute.

Thornton, C. P., 2009. The Emergence of complex metallurgy on the Iranian Plateau: escaping the Levantine paradigm, *Journal of World Prehistory*, 22, 301-327.

Thornton, C. P., 2007. Of brass and bronze in prehistoric southwest Asia, in: S. La Niece, D. Hook and P. T. Craddock (eds.), *metals and mines: studies in archaeometallurgy*, London, Archetype Publications, 189-201

Thornton, C. P., and C. B. Ehlers, 2003. Early brass in the ancient Near East, *IAMS*, 23, 3-8.

Vanden, Berghe, L. 1970. Luristan, prospections archeoiogiques dans la region de Badr, *Archeologia*, 36, 10-21.