

مطالعه ترکیب آلیاژ و روش ساخت سنجاق سرهای مفرغی متعلق به عصر آهن محوطه دایاآردیزی مورانی لرستان

سمانه پالیزوان^I، امید عودباشی^{II}، محمد مرتضوی^{III}، عطا حسن پور^{IV}

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22084/nbsh.2020.15185.1698

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۱۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۱۴

نوع مقاله: پژوهشی؛ صص: ۹۲-۷۳

چکیده

لرستان ناحیه‌ای مهم در زمینه فلزگری عصر آهن در ایران است، اما به نسبت آثار مفرغی فراوان به دست آمده یا منسوب به آن، اطلاعات کمی از فناوری فلزگری کهن در این ناحیه وجود دارد. «دایاآردیزی مورانی» نام یکی از محوطه‌های پیش از تاریخ این ناحیه است که با توجه به آثار و مواد فرهنگی متنوع و فراوان به دست آمده از آن طی تنها فصل کاوش انجام شده، شواهد استقرار از دوره مس و سنگ تا عصر آهن در آن مشاهده شده است. از جمله یافته‌های این محوطه، شماری از اشیاء مفرغی است که تاکنون مطالعه فنی و متالورژیکی بر روی آن‌ها انجام نگرفته است؛ از این رو، با هدف شناخت بخشی از دانش فلزگری کهن این منطقه، هفت سنجاق سر مفرغی متعلق به عصر آهن، به منظور پی بردن به ترکیب شیمیایی و روش ساخت آن‌ها با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی شامل: متالوگرافی و SEM-EDS مورد مطالعه و آنالیز قرار گرفت. نتایج مطالعات SEM-EDS نشان داد که به جز یک نمونه ساخته شده از آلیاژ مس آرسنیک، تمامی سنجاق سرها از مفرغ قلعی با میزان متغیر قلع ساخته شده‌اند که بیانگر روش متداول تولید آلیاژ مفرغ بدون کنترل بر روی میزان قلع (استحصالی هم‌زمان فلز مس و قلع با هم یا استحصال فلز از یک سنگ معدن حاوی ترکیب مس و قلع طبیعی)، همانند دیگر محوطه‌های عصر آهن ایران است. مشاهده آخال‌های سولفیدی نیز در ریزساختار نمونه‌ها بیانگر استفاده از سنگ معدن‌های سولفیدی مس (احتمالاً مخلوط با سنگ معدن‌های اکسیدی) در فرآیند استحصال جهت تولید اشیاء این منطقه است؛ هم‌چنین در مطالعات ریزساختاری این سنجاق سرها، ریزساختار شامل دانه‌های کار شده و باز تبلور یافته دارای خطوط دوقلویی مشخص گردید که نشان دهنده استفاده از چکش کاری و تابکاری برای ساخت این آثار است. افزون بر این، خطوط لغزش نیز در ریزساختار برخی از نمونه‌ها مشاهده گردید که بیانگر استفاده از چکش کاری سرد در مرحله پایانی ساخت این آثار است.

کلیدواژگان: عصر آهن لرستان، دایاآردیزی مورانی، مفرغ قلعی، متالوگرافی، SEM-EDS.

I. کارشناسی ارشد باستان‌شناسی، گروه مرمت اشیاء فرهنگی و تاریخی، دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران.
II. دانشجویار گروه مرمت اشیاء فرهنگی و تاریخی، دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران (نویسنده مسئول).
o.oudbashi@au.ac.ir
III. استادیار گروه مرمت اشیاء فرهنگی و تاریخی، دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران.
IV. دکتری باستان‌شناسی، مدیر امور فرهنگی و روابط عمومی اداره کل میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری استان، خرم‌آباد، ایران.

مقدمه

آشنایی با فلزات و استفاده از آن‌ها، یکی از مهم‌ترین اکتشافات و فناوری‌های استفاده شده توسط بشر بوده است؛ به طوری که سه دوره از ادوار پیش از تاریخ براساس فلزات نام‌گذاری شده است. در نتیجه می‌توان گفت، فلزگری یکی از مراحل مهم در زندگی جوامع باستان تا به امروز بوده است. با توجه به این تقسیم‌بندی، می‌توان گفت که بشر اولین بار در دوران مس و سنگ موفق به شناخت فلز شد و احتمالاً مس اولین فلزی بوده که او توانسته بشناسد (Oudbashi et al., 2012). اگرچه شواهدی از تولید اشیاء فلزی ساخته شده از مس آزاد در دوران نوسنگی در ایران و دیگر نواحی دارای فرهنگ کهن در جهان وجود دارد. براساس تحقیقات و مطالعات انجام شده در زمینه فلزگری، آناتولی، قفقاز و ایران، به عنوان اولین مکان‌هایی شناخته شده‌اند که اولین استفاده فلزات در این مکان‌ها مشاهده شده است. در ایران، مهره مسی پیدا شده در محوطه علی‌کش متعلق به اواخر هزاره هشتم و اوایل هزاره هفتم پیش از میلاد، نشان می‌دهد که فلزگری مس حدوداً به ۱۰ هزار سال پیش برمی‌گردد (Thornton, 2009; Oudbashi et al., 2013; Moorey, 1969). در دوران مس و سنگ با وجود گسترش تولید و کاربرد مس، این فلز به دلیل نرمی و انعطاف‌پذیری کارایی لازم در زمینه ابزارسازی را نداشت و همین عامل موجب دستیابی به آلیاژ مفرغ (آلیاژ حاوی مس و قلع) برای بهبود کارایی مس شد (طلائی، ۱۳۸۹). به این ترتیب، در فلات ایران از هزاره ۴ تا هزاره ۲ پ.م. اشیاء فلزی بسیاری با استفاده از آلیاژهای مختلف مس، مانند مس آرسنیک (به عنوان اولین آلیاژ استفاده شده توسط انسان)، مفرغ قلعی و برنج (احتمالاً تصادفی) ساخته شدند. در حقیقت، استفاده از آلیاژ مفرغ در ایران از حدود ۳۰۰۰ پ.م.، یعنی اوایل عصر مفرغ آغاز شد و استفاده از آن در کنار مس ناخالص و مس آرسنیک در نواحی مختلف ایران در این عصر ادامه یافت (Oudbashi et al., 2012; Oudbashi et al., 2013; Oudbashi et al., 2016; Pigott, 2004). با این وجود، استفاده از آلیاژ مفرغ قلعی در عصر آهن (۱۵۰۰-۵۵۰ پ.م.) به شکلی گسترده در ایران رخ داده است که بیانگر شناخت فلزگران و صنعتگران ایرانی از تولید و استفاده از این آلیاژ برای ساخت اشیاء متنوع بوده است (Oudbashi, 2019; Mortazavi et al., 2011; Oudbashi et al., 2017).

در سال‌های اخیر به مطالعات باستان‌شناختی مربوط به این عصر در ایران توجه بسیاری شده است. در تعدادی از محوطه‌های باستانی کاوش شده در ایران، آثار منقول و غیرمنقول بسیاری مربوط به عصر آهن به دست آمده است که از جمله می‌توان به آثار فلزی متنوع اشاره کرد. مطالعه آثار باستانی، به خصوص آثار فلزی به دست آمده از کاوش‌های باستان‌شناسی (به دلیل ماندگاری آن‌ها در بسیاری از شرایط و نیز اهمیت داده‌های موجود در آن‌ها) بسیار حائز اهمیت است؛ زیرا فلزگری یکی از مراحل مهم در زندگی جوامع باستان تا به امروز بوده است که نشان‌دهنده پیشرفت و آشنایی مردمان با صنعت و فناوری و تخصصی شدن کارهاست. در زمینه فلزگری با توجه به افزایش تولید مفرغ و ساخت اشیاء کاربردی و تزئینی از این آلیاژ در فلات ایران، به خصوص در غرب، شمال غرب و شمال ایران می‌توان

حیطه اصلی فلزگری عصر آهن را مبتنی بر تولید مفرغ دانست (Oudbashi & Hessari, 2017; Oudbashi, 2019; Oudbashi, 2020). یکی از جنبه‌های مورد توجه آثار فلزی پیش از تاریخ، مطالعه استحصال فلز و فناوری ساخت این آثار است که براساس آن می‌توان به اطلاعات بسیاری در زمینه میزان آشنایی جوامع با فرآیندهای فلزگری در یک محوطه، روش‌های ساخت و تولید اشیاء دست‌یافت؛ هم‌چنین می‌توان نشان داد که برای ساخت این فلزات، از چه ترکیباتی به عنوان سنگ معدن استفاده می‌کرده‌اند و تا چه حد از خواص فلزاتی که در فلزگری خود به کار می‌برده‌اند، آگاه بوده‌اند (عودباشی و همکاران، ۱۳۹۳؛ Kienlin et al., 2006). در زمینه فلزگری ایران و آگاهی از فناوری فلز در زمینه تولید مفرغ در طول عصر آهن مطالعاتی در شمال، شمال غرب و غرب ایران صورت گرفته است؛ از جمله محوطه‌هایی که نتایج بررسی‌های صورت گرفته بر روی یافته‌های فلزی عصر آهن آن‌ها در دست است، می‌توان محوطه‌های مارلیک و تول تالش در حاشیه دریای خزر (حسینی پناه صومعه‌سرای و همکاران، ۱۳۹۷؛ Oudbashi & Hessari, 2017)، سگزآباد در دشت قزوین (قدوسیان و همکاران، ۱۳۹۶؛ Mortazavi et al., 2011)، محوطه‌های عصر آهن لرستان (سنگتراشان، ورکیود، کتل گل‌گل، بردبال و باباجیلان)، (Fleming et al., 2006; Fleming et al., 2005; Oudbashi et al., 2018) و گودین تپه کنگاور (Frame, 2010) در غرب ایران را نام برد.

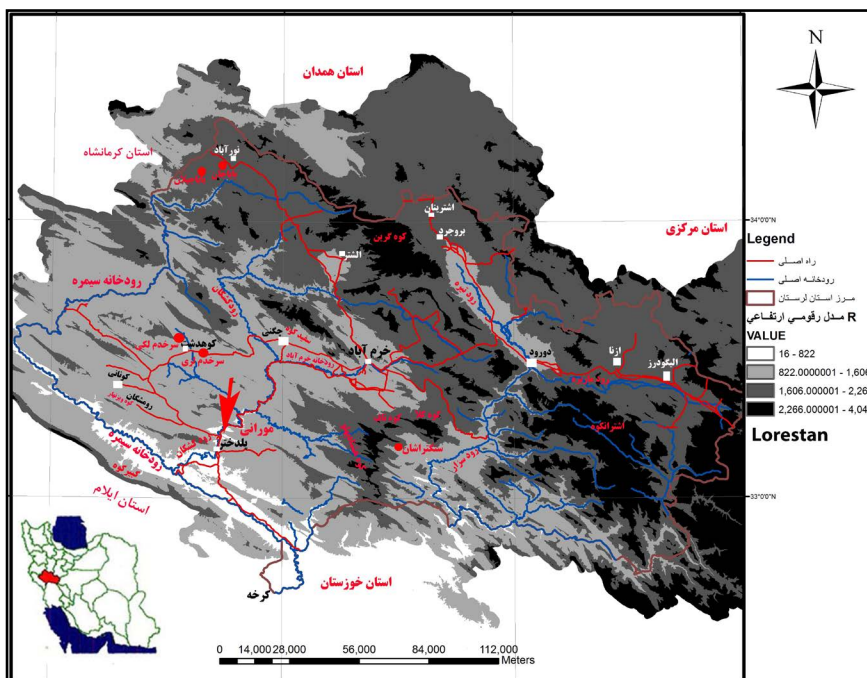
نتایج مطالعات و آنالیزهای انجام شده بر روی اشیاء فلزی محوطه‌های عصر آهن لرستان نشان می‌دهد که آلیاژ غالب در تمامی آن‌ها مفرغ از نوع مفرغ کم قلع بوده است و این اشیاء بیشتر با استفاده از روش چکش‌کاری ساخته شده‌اند؛ هم‌چنین در میزان قلع، کنترلی صورت نگرفته است و ارتباط مشخصی بین میزان قلع در آلیاژ و شکل یا کاربرد شیء وجود نداشته که می‌تواند احتمالاً به دلیل استفاده از روش‌های آلیاژسازی مختلفی باشد که کنترل میزان قلع در آن‌ها امکان پذیر نبوده است. عناصر آرسنیک، نیکل، آهن، روی و نقره در اشیاء مفرغی این محوطه‌ها به میزان بسیار کم مشاهده می‌شوند و هم‌چنین در محوطه‌های عصر آهن لرستان به طور معمول اشیاء ساخته شده از مس آرسنیکی مشاهده نمی‌شود (Oudbashi, 2019; Oudbashi, 2020).

پرسش‌های پژوهش: سؤال اصلی پژوهش حاضر این است که روش تولید سنجاق سرهای مفرغی مکشوف از محوطه دیاآردیزی مورانی متعلق به عصر آهن (لرستان) چه بوده و از چه مواد و فنونی برای ساخت این اشیاء استفاده شده است؟ هم‌چنین هدف از این مقاله، ارائه نتایج مطالعه آزمایشگاهی انجام شده بر روی هفت سنجاق سر مفرغی مربوط به عصر آهن محوطه دیاآردیزی مورانی لرستان است. مطالعه ساختار و ترکیب اجزاء تشکیل دهنده اشیاء مفرغی این محوطه می‌تواند در ارتباط با شناخت فلزگری عصر آهن لرستان بسیار حائز اهمیت باشد؛ زیرا علی‌رغم وجود شمار زیادی از آثار فلزی متعلق به عصر آهن به دست آمده از منطقه لرستان، اطلاعات کمی درباره آن‌ها وجود دارد. با مطالعه و بررسی این آثار می‌توان به بسیاری از سؤالات در حیطه فلزگری لرستان و ایران پاسخ داد. اهمیت دیگر این مطالعه، محوطه دیاآردیزی مورانی است که سنجاق سرهای مکشوف، از این

محوطه به دست آمده‌اند. تاکنون مطالعه‌ای بر روی آثار این محوطه انجام نگرفته است و این مطالعه را می‌توان اولین کار مطالعاتی در این محوطه دانست.

معرفی محوطه مورد مطالعه

محوطه باستانی دایا آردیزی مورانی در ۶۰۰ متری شمال شرق روستای مورانی و ۵۰۰ متری جنوب روستای ملاوی واقع شده است و از نظر تقسیمات سیاسی متعلق به دهستان ملاوی از توابع بخش مرکزی شهرستان پلدختر در استان لرستان است (شکل ۱). نام محوطه از دو بخش «دایا» و «آردیز» تشکیل شده است که در زبان لری «پیرزن» را «دایه» یا «دایا» گویند و «آردیز» نیز به وسیله‌ای برای غربال کردن گفته می‌شود. هنگام پیدا شدن این محوطه و قبل از کاوش آن، قطعات سفالی که دارای سوراخ‌های بسیار بودند، سطح این محوطه را پوشانده بود که قسمت‌هایی از بدنه ظروف آبکش مانند و مربوط به هزاره سوم پیش از میلاد هم‌زمان با دوره اوروک یا آغاز شهرنشینی هستند. دایا نیز نام مقبره‌ای است که در گذشته، پایین‌تر و در قسمت غرب این محوطه وجود داشته که مردمان محلی گمان می‌کردند این غربال‌ها مربوط به این دایا یا پیرزن است.



شکل ۱. موقعیت محوطه دایا آردیزی در تقسیمات سیاسی شهرستان پلدختر (نگارندگان، ۱۳۹۹).

این محوطه بر دامنه جنوبی و رأس یک عارضه طولی اسکله مانند که از دامنه اصلی کوه بنیا جدا گردیده، شکل گرفته است (شکل ۲). این عارضه تماماً صخره‌ای و متشکل از رگه‌های نسبتاً ضخیم سنگ آهک است که حفاصل آن‌ها با لایه‌هایی از شیل پر شده است (شکل ۲).

این محوطه در تابستان ۱۳۹۳ ه.ش. به منظور تعریض جاده به صورت اتفاقی شناسایی شد و سپس تنها فصل کاوش باستان‌شناختی در آن به سرپرستی «عطا



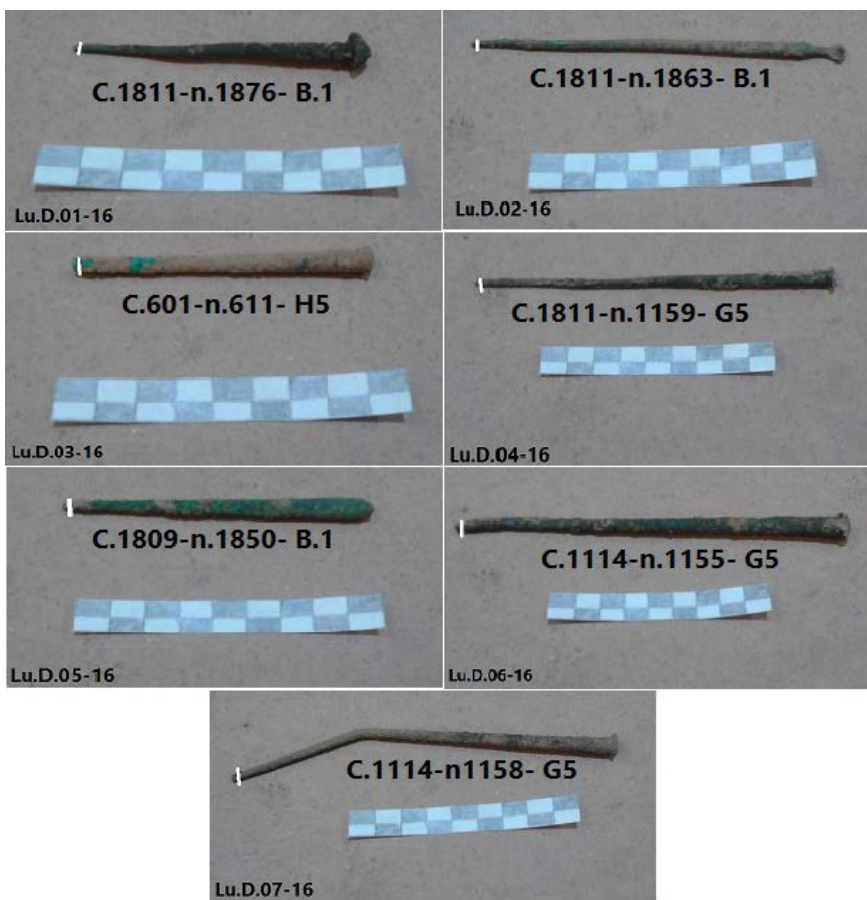
► شکل ۲. محوطه باستانی دایاآردیزی؛ الف) نمای عمومی کوه و محوطه قرار گرفته بر روی آن، ب) بخش‌هایی از استقرار مکشوف در پایین کوه همراه با چند گور در کنار جاده جدید، ج) نمای بخش موسوم به کارگاه که بین فضای خالی رگه‌های سنگ‌های رسوبی شکل گرفته است، د) بقایای ساختمان کوچک مکشوف در محوطه (نگارندگان، ۱۳۹۹).

حسن‌پور» در همان سال انجام شد. این محوطه دارای ۳/۵ هکتار مساحت است و مطالعات باستان‌شناختی در آن با کاوش در ۱۸ کارگاه ۱۰×۱۰ متر انجام شد (پالیزوان، ۱۳۹۶؛ حسن‌پور و همکاران، ۱۳۹۴). طی این کاوش، مواد فرهنگی متنوعی یافت شد که در چند گروه اصلی شامل: (۱) سفال، (۲) دست‌افزارهای سنگی، (۳) یافته‌های استخوانی، (۴) ظروف و جنگ‌افزارهای فلزی، (۵) مهره‌ها، (۶) سنجاق سرها، (۷) یافته‌های صنعتی، و (۸) اشیاء گلی می‌توان آن‌ها را طبقه‌بندی کرد. شکل ۳، تعدادی از اشیاء فلزی، ظروف سفالی و مهره‌های تزئینی مکشوف از این محوطه را نمایش می‌دهد.

از نظر توالی گاهنگاری براساس یافته‌های به دست آمده از کاوش، این محوطه محدوده زمانی بین دوره مس و سنگ تا عصر آهن را دربر می‌گیرد (هزاره چهارم تا هزاره اول پیش از میلاد) که البته در بررسی‌های سطحی قسمت شرقی آن آثاری نیز از دوره‌های ساسانی و احتمالاً اسلامی به دست آمد (حسن‌پور و همکاران، ۱۳۹۴).

مواد و روش پژوهش

در این پژوهش برای مطالعه و شناخت فلزگری در محوطه دایاآردیزی و بررسی تفاوت‌ها و شباهت‌های آن با دیگر محوطه‌های عصر آهن لرستان، تعداد هفت شیء فلزی موسوم به «سنجاق سر» از جنس آلیاژ مس انتخاب شد (شکل ۴). از سنجاق سرها که در حال حاضر در مخزن موزه قلعه فلک‌الافلاک خرم‌آباد نگهداری می‌شود، با استفاده از اژه جواهرسازی، در اندازه‌های بسیار کوچک نمونه‌برداری شد. محل نمونه‌برداری در شکل ۴، با خط ضخیم سفید مشخص شده است. نام‌گذاری نمونه‌ها با توجه به حرف ابتدای نام استان و نام محوطه به انگلیسی، شماره نمونه‌ها و دو عدد پایانی سال انجام مطالعات یعنی ۲۰۱۶، در چهار قسمت برای



▲ شکل ۳. ظروف سفالی، اشیاء متنوع فلزی و انواع مهره‌های تزئینی مکشوف از محوطه دایا آردیزی (نگارندگان، ۱۳۹۹).

شکل ۴. تصاویر اشیاء مورد مطالعه همراه با محل نمونه برداری از آن‌ها (نگارندگان، ۱۳۹۹). ◀

مثال به صورت Lu.D.01-16 انجام شد. مشخصات کلی هر یک از سنجاق سرها در جدول ۱. مشخصات کلی سنجاق سرهای مورد مطالعه به دست آمده از محوطه باستانی دایاآردیزی لرستان (نگارندگان، ۱۳۹۹). ▼

شماره نمونه	نوع قطعه	طول	بیشترین ضخامت	محل کشف	تاریخ کاوش	شماره کاتکتست	کارگاه
Lu.D.01-16	سنجاق سر	۷۵ میلی متر	-	دایاآردیزی	۱۳۹۳	۱۸۱۱	B.1
Lu.D.02-16	سنجاق سر	۱۲۷ میلی متر	۴ میلی متر	دایاآردیزی	۱۳۹۳	۱۸۱۱	B.1
Lu.D.03-16	سنجاق سر	۸۰ میلی متر	۶ میلی متر	دایاآردیزی	۱۳۹۳	۶۰۱	I.5
Lu.D.04-16	سنجاق سر	۱۳۵ میلی متر	۶ میلی متر	دایاآردیزی	۱۳۹۳	۱۱۱۴	G.5
Lu.D.05-16	سنجاق سر	۹۷ میلی متر	۷ میلی متر	دایاآردیزی	۱۳۹۳	۱۸۰۹	B.1
Lu.D.06-16	سنجاق سر	۱۴۴ میلی متر	۶ میلی متر	دایاآردیزی	۱۳۹۳	۱۱۱۴	G.5
Lu.D.07-16	سنجاق سر	۱۵۴ میلی متر	۷ میلی متر	دایاآردیزی	۱۳۹۳	۱۱۱۴	G.5

به منظور آماده سازی نمونه ها جهت انجام مطالعات فلزگری، ابتدا نمونه ها در رزین اپوکسی دو جزئی (رزین و سخت کننده) مانت شدند؛ سپس سطح نمونه ها با کاغذهای سنباده (شماره های ۲۴۰ تا ۳۰۰۰) و خمیر الماس (۳ تا ۵ میکرون) پرداخت و آماده شدند. لازم به ذکر است که تمامی سنجاق سرها در مقطع عرضی مورد بررسی قرار گرفتند. علاوه بر این سنجاق سرهای شماره Lu.D.01-16، Lu.D.02-16، Lu.D.04-16 و Lu.D.06-16 در مقطع طولی نیز مورد مطالعه قرار گرفتند.

در این پژوهش که هدف آن پی بردن به ترکیب شیمیایی (آلیاژ) و روش ساخت سنجاق سرهای به دست آمده از دوره عصر آهن محوطه دایاآردیزی بود، از روش های آزمایشگاهی شامل بررسی های میکروسکوپی با استفاده از میکروسکوپ نوری برای مطالعه ریزساختار نمونه ها و هم چنین میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به طیف سنج تفکیک انرژی پرتو ایکس (SEM-EDS) که روش میکروآنالیز و مشاهده میکروسکوپی در بزرگ نمایی بالا بوده و قادر به شناسایی و اندازه گیری عناصر موجود در ترکیب و ریزساختار اشیاء فلزی باستانی است، استفاده شد (Figueiredo et al., 2010). درحقیقت از روش میکروسکوپی الکترونی روبشی برای تعیین ترکیب شیمیایی و آلیاژ نمونه ها و میکروآنالیز فازها و مشاهده ریزساختار و از مطالعات متالوگرافی برای پی بردن به روش ساخت و شکل دهی اشیاء استفاده شد.

مطالعه ریزساختار و عناصر تشکیل دهنده نمونه های مورد بررسی در این پژوهش با استفاده از SEM-EDS در آزمایشگاه SEM بنیاد علوم کاربردی رازی تهران با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FE-SEM) مدل MIRA III XMU ساخت شرکت TESCAN کشور جمهوری چک به همراه دستگاه طیف سنج تفکیک انرژی اشعه پرتو ایکس (EDS) مدل SAMx ساخت کشور فرانسه انجام شد. به منظور متالوگرافی و بررسی ریزساختاری، نمونه ها قبل و بعد از اچ با استفاده از میکروسکوپ متالوگرافی مدل MR-11 ساخت شرکت OGAWA SEIKI کشور ژاپن مورد مطالعه قرار گرفتند. برای اچ نمونه ها از محلول کلرید آهن III الکلی (۱۲۰ میلی لیتر اتانول، ۳۰ میلی لیتر هیدروکلریک اسید و ۱۰ گرم کلرید آهن III) استفاده شد (اسکات، ۱۳۹۵).

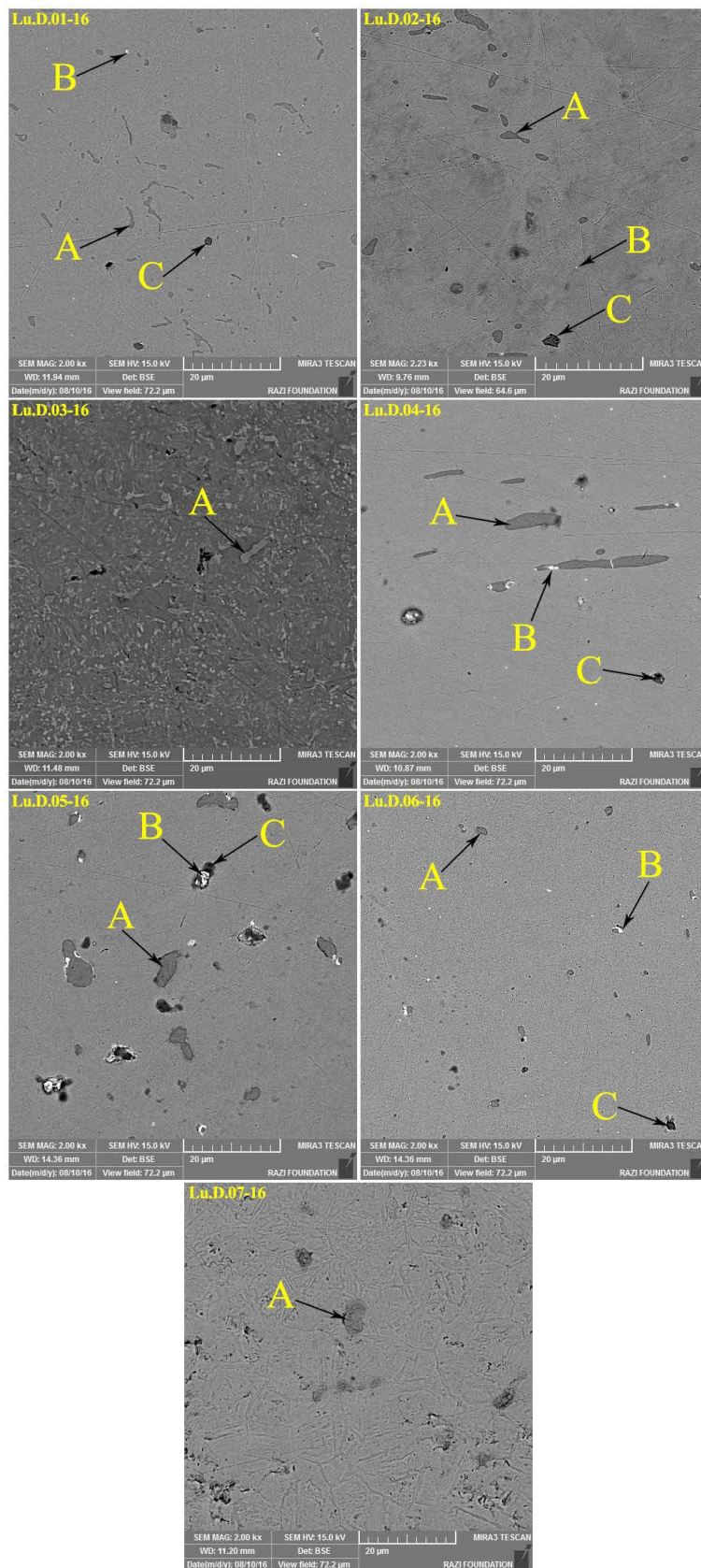
نتایج و بحث

نتایج آنالیز عنصری ترکیب شیمیایی فلز/آلیاژ در نمونه‌ها با استفاده از SEM-EDS که شامل تمام عناصر اصلی و فرعی شناسایی شده در ترکیب شیمیایی این اشیاء می‌شود، در جدول ۲ ارائه شده است. در نتایج آنالیز این اشیاء عناصر فلزی شامل: مس، قلع، آرسنیک، آهن، نیکل، نقره، آنتیموان و بیسموت شناسایی شد. مس در تمام نمونه‌ها بیشترین مقدار را در ترکیب داشته و از حدود ۴۳ تا ۹۰ درصد وزنی متغیر است. کمترین مقدار مس در نمونه‌های Lu.D.03-16 و Lu.D.07-16 به ترتیب ۴۳/۷۹ و ۵۹/۲۳ درصد وزنی شناسایی شد.

جدول ۲. نتایج آنالیز SEM-EDS سنجاق‌سرهای فلزی عصر آهن محوطه دایاردیزی براساس درصد وزنی (%wt) (نگارندگان، ۱۳۹۹).

	Cu	As	Sn	Pb	Fe	Ag	Ni	P	S	Sb	Bi	C	O	Cl
Lu.D.01-16	۸۹/۰۰	۲/۰۷	۱/۷۲	-/۰۰	-/۴۳	۱/۵۸	-/۷۸	-/۱۴	-/۹۹	۱/۰۰	۲/۲۹	-	-	-
Lu.D.02-16	۸۳/۸۰	۰/۵۰	۱۳/۶۶	-/۰۰	-/۱۳	۰/۶۷	-/۰۰	-/۰۷	-/۵۹	-/۰۰	-/۵۸	-	-	-
Lu.D.03-16	۴۳/۷۹	۱/۹۲	۱۶/۳۱	۲/۰۲	-/۷۲	-/۰۰	۱/۰۶	-/۲۶	-/۲۹	-/۰۰	۱/۸۴	-	-	۳۱/۸۱
Lu.D.04-16	۹۰/۴۵	۰/۸۱	۵/۶۵	-/۰۰	-/۲۱	۰/۶۵	-/۲۸	-/۰۰	-/۳۴	-/۶۴	-/۹۹	-	-	-
Lu.D.05-16	۷۶/۳۸	۱/۳۵	۵/۳۳	-/۰۰	-/۱۴	۰/۷۳	-/۲۵	-/۱۲	-/۶۷	۱/۱۵	۱/۵۷	۱۲/۳۰	-	-
Lu.D.06-16	۸۹/۷۳	۱/۴۱	۴/۷۷	-/۰۰	-/۳۴	۰/۶۲	-/۶۰	-/۱۱	-/۴۰	-/۶۴	۱/۳۸	-	-	-
Lu.D.07-16	۵۹/۲۳	۲/۲۷	۱۰/۹۴	-	-/۲۹	۰/۲۶	-/۵۵	-/۱۶	-/۴۲	-/۰۰	۱/۳۷	-	۲۴/۴۱	-

شناسایی میزان بسیار کمتر مس در نمونه‌های Lu.D.03-16 و Lu.D.07-16 نسبت به سایر نمونه‌ها و هم‌چنین شناسایی کلر به میزان ۳۱/۸۱ درصد وزنی در نمونه شماره Lu.D.03-16 و اکسیژن به میزان ۲۴/۴۱ درصد وزنی در نمونه شماره Lu.D.07-16 نشان داد که این نمونه‌ها شدیداً دچار خوردگی شده بودند و ساختار فلزی بدون خوردگی نداشتند. پس از مس، قلع به میزان ۴/۷۷ تا ۱۳/۶۶ درصد وزنی در ترکیب آلیاژی اشیاء بدون خوردگی شناسایی شد، به جز نمونه شماره Lu.D.01-16 که مقدار بیسموت و سپس آرسنیک به ترتیب به میزان ۲/۲۹ و ۲/۰۷ درصد وزنی و بیشتر از قلع (۱/۷۲ درصد وزنی) شناسایی شد. نیکل به مقدار ۱/۰۶ درصد وزنی در نمونه شماره Lu.D.03-16 و نقره به میزان ۱/۵۸ درصد وزنی در نمونه شماره Lu.D.01-16 شناسایی شد؛ میزان سایر عناصر، کمتر از ۱ درصد شناسایی شد. نتایج آنالیز نشان می‌دهد که سنجاق‌سرها به استثناء نمونه Lu.D.01-16 که میزان آرسنیک در آن بیشتر از میزان قلع شناسایی شده است، از آلیاژ مفرغ‌قلعی ساخته شده‌اند. افزودن قلع در طی فرآیند استحصال، موجب کاهش دمای ذوب، افزایش سیالیت فلز مذاب و در نهایت موجب کارایی بهتر فلز مس شده و قابلیت استحکامی آن را در ساخت ابزار افزایش می‌دهد (Giumlia-Mair et al., 2002; Angelini et al., 2007). افزایش قلع، خواص مکانیکی مفرغ را افزایش می‌دهد، حتی اگر مقدار آن به طور کلی از ۱۰-۸ درصد وزنی در ترکیب آلیاژ فراتر نرود (Ingo et al., 2006). با توجه به این‌که فلزات این محوطه مربوط به عصر آهن هستند و پیشینه استفاده گسترده و آشنایی با آلیاژ مفرغ به هزاره سوم پیش از میلاد و قبل از عصر آهن می‌رسد، در نتیجه می‌توان گفت فلزگران این محوطه، عمداً و آگاهانه قلع را به کار می‌برده‌اند (Oudbashi et al., 2013).



► شکل ۵. تصاویر SEM-BSE ریزساختار سنجاق سرهای عصر آهن محوطه دایا آردیزی. آخال‌های سولفیدی با حرف A، گویچه‌های سرب با حرف B و خوردگی و حفره‌ها با حرف C مشخص شده‌اند (نگارندگان، ۱۳۹۹).

در دو نمونه خورده شده شماره Lu.D.03-16 و Lu.D.07-16 که تنها مفرغ بودن آن‌ها قابل تشخیص است و مقدار قلع دقیقاً قابل تعیین نیست، مقدار متفاوت قلع با توجه به نمونه‌های دارای ساختار فلزی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به مقدار متفاوت و متغیر قلع (۴/۷۷ تا ۱۳/۶۶) در ترکیبات مفرغ‌های این محوطه و هم‌چنین مشاهده این موضوع در دیگر محوطه‌های این ناحیه، می‌توان چنین نتیجه گرفت که در این محوطه، کنترلی بر میزان قلع افزوده شده به مس در طی فرآیند آلیاژسازی نداشتند (Mortazavi et al., 2017; Oudbashi & Davami, 2014; Fleming et al., 2006, 2005). از لحاظ میزان قلع نیز مفرغ‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند؛ مفرغ‌های کم‌قلع، که میزان قلع در آن‌ها کمتر از ۱۷ درصد است و این مقدار برابر حداکثر حلالیت قلع در محلول جامد غنی از مس است، و مفرغ‌های پُرقلع که میزان قلع آن‌ها بین ۱۷ تا ۳۵ درصد است و این میزان موجب ایجاد فاز غنی از قلع در مس می‌شود (اسکات، ۱۳۹۵؛ Oudbashi & Mortazavi, 2011). مفرغ‌های این محوطه را با توجه به میزان قلع شناسایی شده در آن‌ها (بین ۴/۷۷ تا ۱۳/۶۶ درصد وزنی) می‌توان جزو مفرغ‌های کم‌قلع طبقه‌بندی کرد. براساس نظر برخی محققین در صورت کمتر بودن میزان قلع به آرسنیک، میزان آرسنیک بین ۰/۵ تا ۷ درصد وزنی می‌تواند نشان‌دهنده استفاده از آلیاژ مس آرسنیک در ساخت شیء باشد (Lechtman, 2014)؛ از این‌رو در نمونه شماره Lu.D.01-16 با توجه به میزان آرسنیک (۲/۰۷ درصد وزنی) بیشتر شناسایی شده نسبت به قلع، می‌توان نتیجه گرفت که این نمونه از آلیاژ مس آرسنیک همراه با مقدار کم قلع ساخته شده است. با توجه به این‌که ترکیب مس آرسنیک، قبل از آلیاژ مفرغ تولید و در ساخت اشیاء به‌کار رفته است، این نمونه بیانگر این مطلب است که در این منطقه، مانند دیگر محوطه‌های عصر آهن ایران مانند سگزآباد و گودین تپه، ساخت آلیاژ مس آرسنیک، اگرچه نه به میزان زیاد و مرسوم، اما هم‌چنان ادامه داشته است (Mortazavi et al., 2010; Frame, 2010). در دیگر نمونه‌ها، میزان کم آرسنیک در کنار میزان قابل توجه قلع، می‌تواند مربوط به فرآیند تولید فلز و استفاده از سنگ معدن‌هایی با میزان کم آرسنیک و یا استفاده از ضایعات مس آرسنیک باشد. در آنالیز کلی (بدنه) نمونه‌ها، سرب فقط در ترکیب شیمیایی سنجاق سر شماره Lu.D.03-16 به میزان ۲/۰۲ درصد وزنی شناسایی شد که می‌تواند مربوط به ترکیبات سنگ معدن مس و قلع دارای میزان جزئی سرب باشد؛ اما با توجه به تصاویر SEM-BSE که از نمونه‌ها تهیه شد، در تمامی سنجاق‌سرها گویچه‌های سرب قابل مشاهده است. تفاوت بین نتایج آنالیز SEM-EDS با تصاویر SEM-BSE می‌تواند خطای ناشی از روش SEM-EDS باشد که روش نیمه‌کمی است. افزودن سرب تا ۲ درصد وزنی به ترکیب آلیاژ، سیالیت مذاب را افزایش می‌دهد (Ingo et al., 2006).

برای شناسایی ماهیت ریزساختاری نمونه‌ها از میکروسکوپی الکترونی روبشی (SEM) در بزرگ‌نمایی بالا استفاده شد. در تصاویر SEM-BSE تمام سنجاق‌سرها، ریزساختاری شامل یک زمینه فلزی همگن همراه با فازهای کوچک مجزا به رنگ خاکستری تیره، گویچه‌های سفید و حفره‌های تیره رنگ مشاهده شد.

نتایج آنالیز SEM-EDS نواحی خاکستری تیره که به صورت کشیده یا نقطه‌ای در شکل ۵ دیده می‌شوند، در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به این که میزان مس و گوگرد در این نواحی بیشتر از سایر عناصر شناسایی شد، می‌توان گفت این نواحی آخال‌های سولفیدی یا همان ناخالصی‌های مربوط به سنگ معدن مورد استفاده برای استحصال فلز اولیه هستند که به دلیل عدم حلالیت آن‌ها در مس، به صورت نواحی مجزا در زمینه فلزی باقی مانده‌اند. میزان بالای مس به همراه درصد پایین‌تر گوگرد و آهن، می‌تواند نشان‌دهنده استفاده از سنگ معدن سولفیدی کالکوپیریت در فرآیند تولید باشد (عودباشی و حسن‌پور، ۱۳۹۵؛ مرتضوی و گل‌عذار، Figueiredo et al., 2007; Valerio et al., 2010; Oudbashi & Hessari, ۱۳۸۹; Angelini et al., 2007; 2017). عناصر دیگری، مانند: نیکل، بیسموت، آنتیموان و نقره نیز در این نواحی شناسایی شد که می‌توانند ناخالصی‌های مربوط به سنگ معدن به کار رفته در فرآیند استحصال باشند (Chiavari et al., 2011). افزون‌بر این، امکان تأثیرگذاری نواحی مجاور در نتایج آنالیز این نواحی با توجه به روش مورد استفاده و هم‌چنین کوچک بودن بخش مورد بررسی نیز نباید از نظر دور بماند. شناسایی میزان قابل توجه کربن در نمونه شماره Lu.D.03-16 با توجه به خوردگی سنجاق سرو و نفوذ یون کلرید از محیط دفن به نواحی داخلی و ماتریس فلزی قابل توضیح است (Ingo et al., 2006; Scott 2002).

جدول ۳. نتایج آنالیز SEM-EDS فازهای سولفیدی خاکستری (نواحی A) سنجاق سرهای فلزی از محوطه دایاآردیزی براساس درصد وزنی (نگارندگان، ۱۳۹۹).

	P	S	Fe	Ni	Cu	As	Ag	Sn	Sb	Bi	Cl
Lu.D.01-16	-	۱۶/۳۰	۴/۲۸	-	۷۹/۴۲	-	-	-	-	-	-
Lu.D.02-16	۰/۴۴	۱۲/۹۵	۳/۳۲	۵/۸۷	۶۵/۱۷	۱/۴۸	۲/۶۵	۳/۶۶	۴/۴۵	۰/۰۰	-
Lu.D.03-16	۰/۲۷	۱۱/۶۳	۰/۶۴	۱/۳۲	۶۱/۴۷	۱/۰۲	۰/۸۵	۴/۹۸	۰/۷۳	۳/۲۱	۱۳/۸۸
Lu.D.04-16	۰/۲۳	۲۲/۸۲	۳/۳۷	۲/۹۷	۵۸/۴۸	۲/۳۲	۲/۰۵	۲/۷۶	۱/۷۹	۳/۲۱	-
Lu.D.05-16	۰/۳۶	۲۲/۲۸	۲/۹۵	۱/۲۱	۶۱/۹۸	۰/۹۸	۱/۷۸	۲/۶۸	۱/۱۵	۴/۶۳	-
Lu.D.06-16	۰/۱۸	۱۶/۷۶	۱/۵۶	۲/۸۰	۷۰/۷۲	۱/۷۷	۱/۳۹	۱/۶۶	۱/۹۷	۱/۹۰	-
Lu.D.07-16	۰/۴۸	۳۶/۵۵	۱/۲۹	۲/۲۳	۵۶/۱۷	۰/۸۲	۰/۸۹	۰/۷۵	۰/۸۳	۰/۰۰	-

گویچه‌های سفید بسیار کوچک و مدوری (نقاط B) نیز در تصاویر SEM-BSE مقطع نمونه‌ها به جز نمونه‌های شماره Lu.D.03-16 و Lu.D.07-16 دیده می‌شود که در سراسر زمینه فلزی پراکنده شده‌اند و نتایج آنالیز آن‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. بالا بودن میزان سرب در این نواحی نسبت به سایر عناصر نشان‌دهنده وجود گویچه‌های سرب است (اسکات، ۱۳۹۵). عدم شناسایی سرب در نمونه شماره Lu.D.02-16 نشان‌دهنده فاز غنی از قلع روشن و هم‌چنین بالا بودن میزان مس نسبت به سرب در نمونه شماره Lu.D.01-16 با توجه به کوچک بودن بخش مورد آنالیز می‌تواند مربوط به نواحی اطراف گویچه‌های سرب باشد که بر روی نتایج تأثیر گذاشته‌اند. در تصاویر SEM-BSE سنجاق سرها به جز فازهای خاکستری رنگ مربوط به آخال‌های سولفیدی و فازهای سفیدرنگ گویچه‌های سرب، فازهای دیگری (نقاط

جدول ۴. نتایج آنالیز SEM-EDS نواحی سفید رنگ (فاز B) در ماتریس فلزی سنجاق سرهای براساس درصد وزنی (نگارندگان، ۱۳۹۹).

	Pb	Cu	Sn	Fe	Ni	Ag	Sb	As	S	P	Bi
Lu.D.01-16	۳۷/۲۲	۴۹/۲۱	۲/۰۳	۱/۴۵	۲/۳۰	۳/۴۲	۱/۶۹	۱/۵۵	۰/۸۲	۰/۳۱	۰/۰۰
Lu.D.02-16	-	۸۱/۶۷	۱۵/۰۷	۰/۲۲	۰/۳۲	۰/۶۸	۰/۰۰	۰/۳۵	۰/۵۵	۰/۰۷	۰/۰۶
Lu.D.04-16	۷۲/۲۲	۱۵/۸۰	۱/۳۹	۵/۰۵	۱/۶۵	۱/۶۰	۱/۴۷	۰/۵۹	-	۰/۲۴	۰/۰۰
Lu.D.05-16	۸۲/۰۲	۸/۶۰	۱/۶۵	۱/۳۴	۲/۵۱	۱/۳۷	-	۰/۷۴	-	۰/۲۰	۰/۰۰
Lu.D.06-16	۷۸/۶۲	۱۵/۰۹	۰/۹۷	۱/۱۵	۱/۰۸	۱/۰۶	۱/۱۹	۰/۶۶	-	۰/۱۸	۰/۰۰

C) دیده شد که ترکیب آن‌ها با آخال‌های سولفیدی و گویچه‌های سربی تفاوت داشت. این فازها تنها در چهار مورد از این نمونه‌ها آنالیز شد که نتایج آن‌ها در جدول ۵ ارائه شده است. در نمونه‌های شماره Lu.D.01-16، Lu.D.02-16 و Lu.D.04-16 حضور عناصر آهن، مس، و در مواردی قلع و سرب در کنار درصد بالای اکسیژن می‌تواند نشان‌دهنده ترکیبات اکسیدی آهن همراه با میزان قابل توجه دیگر عناصر فلزی در این نواحی باشد. عدم وجود گوگرد به میزان قابل توجه در این فازها نشان می‌دهد که این فازها نمی‌توانند آخال سولفیدی باشند؛ بلکه آخال‌های اکسیدی با ترکیب آهن و اکسیژن در ماتریس مس (مفرغ) هستند.

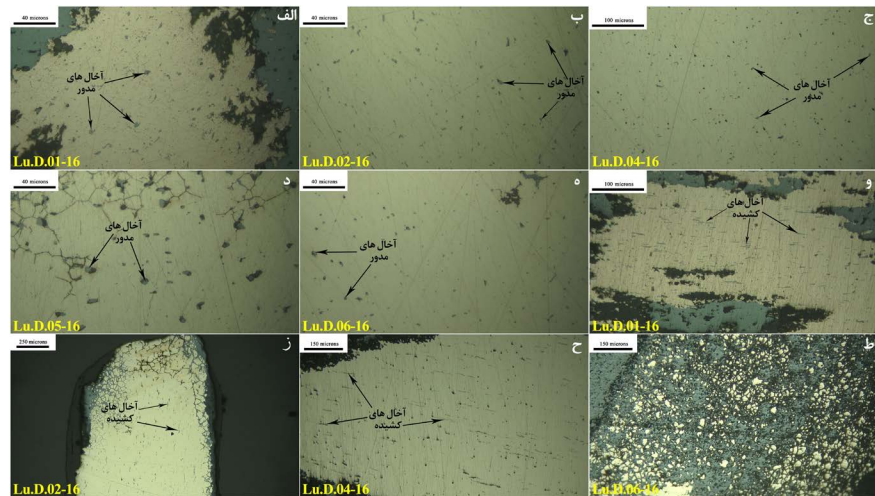
جدول ۵. نتایج آنالیز SEM-EDS نواحی تیره (فاز C) در ماتریس فلزی سنجاق سرهای محوطه دایاردیزی بر پایه درصد وزنی (نگارندگان، ۱۳۹۹).

	O	P	S	Fe	Ni	Cu	As	Ag	Sn	Sb	Pb	Bi
Lu.D.01-16	۳۸/۷۳	۰/۲۴	۰/۸۴	۳۷/۳۵	۲/۹۳	۱۳/۶۰	۱/۳۳	۱/۰۹	۱/۱۵	۱/۵۲	۰/۰۰	۱/۲۱
Lu.D.02-16	۲۰/۰۴	۰/۳۲	۰/۴۹	۱۵/۸۴	۳/۹۴	۴۳/۶۷	۰/۹۹	۱/۴۵	۹/۲۵	۱/۶۷	۰/۰۰	۲/۳۴
Lu.D.04-16	۲۹/۵۴	۰/۱۴	۱/۹۵	۴۸/۳۴	۱/۴۵	۵/۹۴	۰/۵۶	۰/۶۰	۰/۸۵	۰/۹۱	۹/۷۱	۰/۰۰
Lu.D.06-16	۳۵/۲۲	۰/۰۸	۰/۰۰	۴۹/۱۲	۱/۱۴	۳/۵۹	۰/۲۹	۰/۵۱	۰/۵۰	۰/۵۹	۸/۱۳	۰/۸۲

به منظور مطالعات ریزساختاری و شناسایی روش‌های ساخت و شکل‌دهی سنجاق سرهای این محوطه، مقاطع صیقلی نمونه‌ها قبل و بعد از اچ با استفاده از میکروسکوپ نوری مورد مطالعه قرار گرفت. همان‌طور که ذکر شد، نمونه‌های شماره Lu.D.03-16 و Lu.D.07-16 نمونه‌های خورده شده بودند، به همین دلیل تصاویر متالوگرافی قبل و بعد از اچ سنجاق سرها فاقد تصاویر این دو نمونه است. در تصاویر قبل از اچ، ماتریس فلزی به صورت یک ناحیه زرد رنگ با نقاط خاکستری پراکنده در آن - که همان آخال‌های سولفیدی هستند - مشاهده شد (شکل ۶). ساختار فلزی تک‌فازی با دانه‌های کوچک در این اشیاء دیده می‌شود و اشکال کروی یا نامنظم و کشیده خاکستری رنگ در آن‌ها، آخال‌های سولفیدی هستند که با محلول اچ دچار خوردگی نشده‌اند. در تصاویر مقطع عرضی سنجاق سرها، آخال‌ها به شکل نسبتاً مدور (نقطه‌ای) دیده می‌شوند (شکل ۶ الف تا ه). براساس ساختار و شکل آخال‌ها در مقطع طولی، می‌توان فرآیند انجام شده برای ساخت شیء را ردیابی کرد (Frame, 2010).

با توجه به شکل دانه‌ها و ویژگی‌های ریزساختاری، امکان شناسایی فرآیندهای ساخت و عملیات مکانیکی و حرارتی به‌کاررفته در آثار فلزی وجود دارد؛ بدین منظور

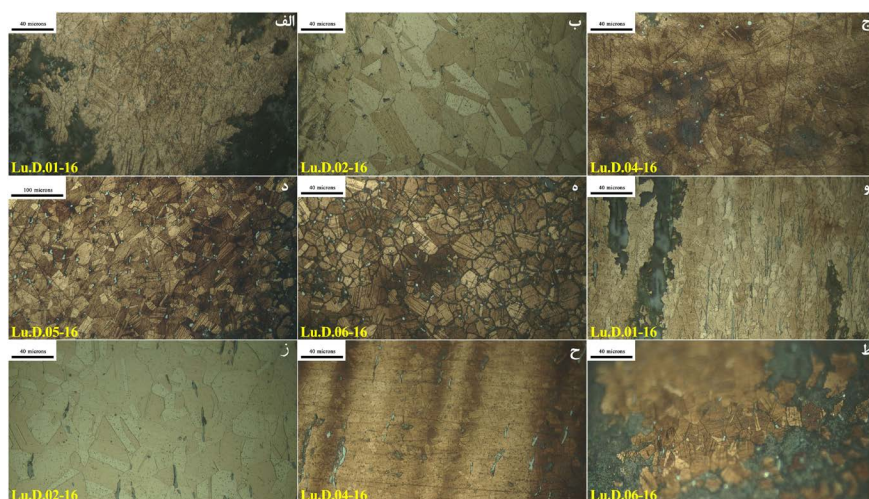
► شکل ۶. تصاویر مقاطع پیش از اچ تعدادی از سنجاق سرهای عصر آهن محوطه دایاآردیزی، الف تا ه) مقطع عرضی تهیه شده از نمونه‌ها؛ و تا ط) مقطع طولی تهیه شده از نمونه‌ها. در تصاویر مقطع عرضی آخال‌های مدور یا نقطه‌ای و در تصاویر مقطع طولی آخال‌های کشیده به خوبی مشخص هستند (نگارندگان، ۱۳۹۹).



برای بررسی شکل دانه‌ها و عملیات انجام شده بر روی آن‌ها، نمونه‌ها اچ و سپس مورد مشاهده میکروسکوپی قرار گرفتند (اسکات، ۱۳۹۵؛ Gomez de Salazar et al., 2004). تصاویر پس از اچ تمامی اشیاء، ساختاری تک‌فاز متشکل از دانه‌های بازتبلور یافته همراه با خطوط دوقلویی را نشان می‌دهد (شکل ۷). عملیات حرارتی، خواص مکانیکی مفرغ را بهبود می‌بخشد و موجب شکل‌پذیری بهتر آن قبل از کار مکانیکی و کار سرد می‌شود (Figueiredo et al., 2007; Oudbashi & Davami, 2014). دفعات انجام عملیات مکانیکی و حرارتی صورت‌گرفته بر روی قطعات فلزی، بر اندازه دانه‌ها تأثیرگذار است؛ هرچه اندازه دانه کوچک‌تر باشد، میزان بیشتر کار گرم و تابکاری انجام شده بر روی فلز را نشان می‌دهد (عودباشی و حسن‌پور، ۱۳۹۵؛ Oudbashi & Davami, 2014). بر این اساس، اندازه کوچک دانه‌ها در سنجاق سرها نشان‌دهنده چکش‌کاری و تابکاری متعدد است که فلزگر باستان برای رسیدن به شکل نهایی استفاده کرده است. دانه‌ها به شکل چندوجهی‌های نامنظم همراه با خطوط دوقلویی صاف و گاه تغییر شکل یافته و خطوط لغزش متقاطع هستند. خطوط دوقلویی موجود در ریزساختار نمونه‌ها، مشخصه عملیات حرارتی و تابکاری پس از انجام کار سرد بر روی فلز است که سبب بهبود قابلیت چکش‌کاری و تغییر شکل فلز می‌شود (اسکات، ۱۳۹۵؛ Kienlin et al., 2006; Angelini et al., 2007; Silva et al., 2008; Oudbashi & Mortazavi et al., 2011). در ریزساختار نمونه‌ها، نوارهای دوقلویی تغییر شکل یافته در کنار نوارهای دوقلویی صاف و هم‌چنین خطوط لغزش دیده می‌شود. نوارهای دوقلویی صاف نشان‌دهنده تابکاری پس از انجام چکش‌کاری پایانی است، اما نوارهای دوقلویی ناصاف در کنار خطوط لغزش، مشخصه چکش‌کاری سرد بعد از تابکاری نهایی است که در تمامی اشیاء مفرغی این محوطه دیده می‌شود (Angelini et al., 2007; Mortazavi et al., 2011). خطوط لغزش نیز مشخصه کار سرد به عنوان کار نهایی است که پس از یک یا چندین چرخه چکش‌کاری و تابکاری متوالی، بر روی فلز انجام شده است (عودباشی و حسن‌پور، ۱۳۹۵؛ Oudbashi & Mortazavi, 2011; Valerio et al., 2010; Davami, 2014).

در تصاویر میکروسکوپی مقطع طولی مربوط به نمونه‌های شماره Lu.D.01-16 و Lu.D.05-16 کشیدگی دانه‌ها در جهت کشیدگی آخال‌ها است که نشان‌دهنده عدم تابکاری کافی پس از چکش‌کاری بر روی این دو شیء است. در تصویر میکروسکوپی مقطع طولی نمونه شماره Lu.D.02-16 ساختار ریزدانه بازتبلور یافته دارای آخال‌های سولفیدی کشیده، دیده می‌شود که بر چکش‌کاری و تابکاری نمونه دلالت دارد (اسکات، ۱۳۹۵). در تصویر میکروسکوپی مقطع طولی نمونه شماره Lu.D.06-16 ساختار ریزدانه دیده می‌شود که اندازه دانه‌ها نشان‌دهنده انجام چکش‌کاری و تابکاری قابل توجهی بر روی شیء است (شکل ۷: و تا ط).

نکته قابل توجه در تصاویر پس از اچ اشیاء فلزی این محوطه، وجود شبیحی از ساختار دندریتی^۱ روی ساختار بازتبلور یافته در نمونه‌های شماره Lu.D.01-16، Lu.D.04-16، Lu.D.06-16 و Lu.D.01-16 است (شکل ۷: ج، و، ح). این‌ها در واقع، باقی‌مانده‌هایی از ساختار دندریتی حاصل از ریخته‌گری اولیه فلز هستند که در طی عملیات حرارتی بعدی، کاملاً از بین نرفته‌اند و به همین دلیل هاله‌ای از آن‌ها باقی مانده و ایجاد تیره و روشنی‌هایی در سطح اشیاء می‌کنند (عودباشی و حسن‌پور، ۱۳۹۵؛ مصلحی و همکاران، ۱۳۹۲؛ اسکات، ۱۳۹۵؛ Dungworth, 2013). شبه ساختار در نمونه شماره Lu.D.01-16 در شکل ۷ بهتر قابل مشاهده است. شکل و ساختار شبه دندریتی نیز در راستای مقطع طولی نمونه‌های Lu.D.01-16 و Lu.D.04-16 می‌تواند نتیجه کشیدگی اجزاء ریزساختار فلز در جهت کار انجام شده باشد (مرتضوی و گل‌عذار، ۱۳۸۹؛ Frame, 2010).



شکل ۷. تصاویر میکروسکوپی مقاطع نمونه‌های سنجاق سرهای عصر آهن محوطه دابآردیزی پس از اچ، الف تا ه) مقطع عرضی تهیه شده از نمونه‌ها؛ و تا ط) مقطع طولی تهیه شده از نمونه‌ها (نگارنگان، ۱۳۹۹).

مطالعه و بررسی اشیاء این محوطه، نتایجی مشابه آن‌چه از نمونه‌های عصر آهن دیگر محوطه‌های لرستان به دست آمده ارائه می‌دهد. از نظر عناصر اصلی، اکثر نمونه‌های این محوطه مانند دیگر نمونه‌های عصر آهن لرستان از مس و قلع یا همان آلیاژ مفرغ از نوع کم‌قلع با مقدار متغیر قلع ساخته شده بودند. در مورد آگاهانه ساخته شدن این آلیاژ در این محوطه و دیگر محوطه‌های عصر آهن لرستان و ایران، با توجه به این‌که این نمونه‌ها مربوط به عصر آهن هستند و آشنایی با

آلیاژ مفرغ به عصر مفرغ برمی‌گردد، می‌توان با اطمینان گفت که آگاهانه و به عمد این آلیاژ را می‌ساخته‌اند (Oudbashi et al., 2013). از طرف دیگر، مطالعه آثار فلزی مربوط به محوطه‌های عصر آهن ایران و به خصوص لرستان، ساخته شدن اکثریت آن‌ها با آلیاژ مفرغ را نشان می‌دهد که بیانگر آشنایی ساکنان این نواحی با این آلیاژ در این دوره از ایران است. در مورد متغیر بودن میزان قلع در این نمونه‌ها و دیگر نمونه‌های عصر آهن لرستان، طبق نظریه‌هایی که وجود دارد موارد ذیل قابل طرح است (Fleming et al., 2005; Oudbashi et al., 2018; Pigott et al., 2004):

- ۱) استحصال هم‌زمان کانی‌های مس و قلع با هم (استحصال توأم).
- ۲) اضافه کردن کانی کاسیتريت به مس مذاب (سمانته کردن).
- ۳) استحصال فلز از یک سنگ معدن ترکیبی حاوی ترکیب مس و قلع طبیعی (استحصال ترکیبی یا هم‌زمان).
- ۴) بازیابی قطعات فلزی شکسته.

در مورد مفرغ‌های لرستان تمامی این نظریه‌ها را می‌توان پذیرفت، اما احتمال پذیرفتن مورد دوم و سوم به دلایلی می‌تواند قوی‌تر باشد؛ چنان‌که نمونه‌های مشابهی از این دو مورد در شرق لرستان (معدن باستانی ده حسین) و خوزستان (هفت‌تپه) در محدوده زمانی هزاره سوم تا اول پیش‌ازمیلاد مشاهده شده است (Nezafati, 2006; Oudbashi et al., 2019; Oudbashi & Mishmastnehi, 2020). در مورد اول نیز مستقیماً سنگ معدن قلع (احتمالاً کاسیتريت) را در فرآیند استحصال به کار می‌برده‌اند که امکان تنظیم میزان قلع و کنترل آن نیز وجود نداشته است. در نمونه‌های این محوطه و باقی اشیاء مفرغی عصر آهن ایران و لرستان، متنوع و متغیر بودن قابل مشاهده‌ای در مقدار قلع که بیانگر کنترل نداشتن بر میزان آن است دیده می‌شود. مورد چهارم نیز به دلیل تعداد زیاد این آلیاژ و تولید فراوان آن در محوطه‌های عصر آهن ایران، نمی‌تواند روش اصلی استفاده شده جهت تولید مفرغ قلعی باشد.

هم‌چنین شناسایی عناصر جزئی یکسان و مشابه، مانند نیکل در نمونه‌های این محوطه و سایر نمونه‌های هم‌دوره در دیگر محوطه‌های لرستان می‌تواند بیانگر این موضوع باشد که احتمالاً از سنگ معدن یکسانی در ساخت آن‌ها استفاده شده است؛ اگرچه شناسایی منابع مورداستفاده جهت تولید مس و مفرغ قلعی در عصر آهن غرب ایران و لرستان نیازمند توسعه مطالعات متنوع فلزگری و معدن‌کاری کهن است.

نتیجه‌گیری

به‌طورکلی نتایج به‌دست آمده از آنالیزهای انجام‌شده بر روی سنجاق سرهای عصر آهن محوطه دایاآردیزی لرستان نشان می‌دهد همانند سایر اشیاء به‌دست آمده از محوطه‌های عصر آهن لرستان و ایران، اشیاء این محوطه نیز از مفرغ کم‌قلع با مقدار متفاوت قلع ساخته شده‌اند که نشان‌دهنده عدم کنترل بر میزان قلع در فرآیند ساخت، مثلاً استحصال هم‌زمان سنگ معدن‌های مس و قلع یا اضافه کردن

کانی قلع به مس مذاب در حین استحصال است. در همه آن‌ها عناصر فلزی دیگر مثل: نیکل، نقره، آرسنیک و آهن به‌عنوان عناصر جزئی شناسایی شد و هم‌چنین در تمام آن‌ها ترکیبات سولفید مس مشخص گردید که می‌تواند نشان‌دهنده استفاده از کانی‌های سولفیدی مس برای استحصال فلز باشد.

مشاهدات میکروسکوپی مقطع عرضی و طولی سنجاق‌سرها یک ساختار تک‌فازی با دانه‌های بازتبلور یافته همراه با خطوط دوقلویی صاف و تغییر شکل یافته و خطوط کرنش را نشان می‌دهد که مشخص می‌کند این اشیاء با استفاده از روش چکش‌کاری سرد و تابکاری ساخته شده‌اند؛ اگرچه میزان و شدت کار و تابکاری در آن‌ها یکسان نیست، اما ریزساختار اکثر آن‌ها میزان و شدت کار و تابکاری زیادی را نشان می‌دهد. هم‌چنین وجود آثاری از ساختار دندریتی اولیه روی ساختار بازتبلور یافته در تعدادی از نمونه‌ها نشان می‌دهد که این اشیاء ابتدا ریخته‌گری شده و سپس با چکش‌کاری و تابکاری، شکل نهایی به‌دست آمده است.

در مجموع می‌توان بیان نمود که فرآیند تولید و ساخت سنجاق‌سرهای مکشوف از محوطه دی‌آردیزی مورانی لرستان شباهت بسیاری با فرآیندهای تولید اشیاء فلزی مطالعه شده از دیگر محوطه‌های عصر آهن ناحیه لرستان دارند که می‌تواند بیانگر شناختی جامع و نسبتاً پیشرفته از فلزگری آلیاژ مفرغ قلعی و تولید اشیاء متنوع از این آلیاژ در ناحیه لرستان در هزاره اول پیش از میلاد باشد.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از جناب آقای روح‌الدین پورزرین (امین اموال موزه قلعه فلک الافلاک)، سرکار خانم ناهید رشیدی (کارشناس ارشد مردم‌شناسی میراث فرهنگی استان لرستان) و سرکار خانم سحر سامانی قطب‌آبادی از دانشگاه هنر اصفهان برای کمک‌ها و راهنمای‌هایشان در پیش‌برد این پژوهش نهایت قدردانی و سپاسگزاری را دارند.

پی‌نوشت

1. Ghost Dendritic Pattern

کتابنامه

- اسکات، دیوید ا.، ۱۳۹۵، متالوگرافی و ریزساختار در فلزات باستانی و تاریخی. ترجمه امید عودباشی و عاطفه شکفته. اصفهان: انتشارات جهاد دانشگاهی (واحد اصفهان).
- پالیزوان، سمانه، ۱۳۹۶، «مطالعه روش ساخت در تعدادی از اشیاء مفرغی محوطه عصر آهن دی‌آردیزی مورانی لرستان». پایان‌نامه کارشناسی ارشد باستان‌سنجی، دانشگاه هنر اصفهان.
- حسن‌پور، عطا؛ جوادی‌نیا، زهرا؛ صادقی‌راد، مسعود؛ و حیدری، زبیر، ۱۳۹۴، «کاوش اضطراری محوطه دی‌آردیزی مورانی (پلدختر- لرستان)». مرکز اسناد اداره کل

- میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری استان لرستان (منتشر نشده).
- حسینی پناه صومعه سرایی، سولماز؛ عودباشی، امید؛ و مرتضوی، محمد، ۱۳۹۷، «مطالعه فرایند فلزگری در مفرغ‌های باستانی دوره آهن گورستان تول تالش گیلان». مجموعه مقالات همایش بین‌المللی باستان‌شناسان جوان، به‌کوشش: محمدحسین عزیزی خراقی، مرتضی خانی‌پور، رضا ناصری، تهران: ۱۳۹۴، بنیاد ایران‌شناسی، صص: ۵۳۱-۵۵۳.
- طلائی، حسن، ۱۳۸۸، عصر مفرغ ایران، تهران: انتشارات سازمان مطالعه و تدوین کتب علوم انسانی دانشگاه‌ها (سمت).
- طلائی، حسن، ۱۳۸۹، عصر آهن ایران. تهران: انتشارات سازمان مطالعه و تدوین کتب علوم انسانی دانشگاه‌ها (سمت).
- عودباشی، امید؛ امامی، سید محمدامین؛ و احمدی، دوامی، ۱۳۹۳، «فلزگری کهن و استحصال مس در محوطه باستانی هفت تپه خوزستان، هزاره دوم قبل از میلاد». مهندسی متالورژی و مواد، شماره ۲۵، دوره ۲، صص: ۹۹-۱۱۲.
- عودباشی، امید؛ و حسن‌پور، عطا، ۱۳۹۵، «مطالعات آزمایشگاهی بر روی آلیاژ و ریزساختار اشیاء مفرغی محوطه عصر آهن باباجیلان لرستان». مطالعات باستان‌شناسی، شماره ۸، دوره ۱، صص: ۱۴۹-۱۳۳.
- قدوسیان، طلحه؛ صمدی، احد؛ و طلائی، حسن، ۱۳۹۶، «واکاوای جنبه‌هایی از متالورژی باستانی دشت قزوین بر مبنای داده‌های فلزی مکشوفه از قبور عصر آهن II قبرستان سگزآباد». مطالعات باستان‌شناسی، سال ۹، شماره ۱، صص: ۱۶۷-۱۸۷.
- مرتضوی، محمد؛ و گل‌عدار، محمدعلی، ۱۳۸۹، «ارزیابی متالورژیکی مهره‌های گردنبند باستانی به دست آمده از بیستون، کرمانشاه». مهندسی متالورژی، سال ۱۳، شماره ۳۹، صص: ۴۴-۳۹.
- مصلحی، مرضیه؛ عبدالله خان گرجی، مهناز؛ نظافتی، نیما؛ نوکنده، جبرئیل؛ و عباسی، قربانعلی، ۱۳۹۲، «مطالعات باستان‌سنجی و مرمتی بر روی منتخبی از اشیاء مس پایه دوره مفرغ پایانی از تپه بازگیر، دشت گرگان». مطالعات باستان‌شناسی، شماره ۸ (۱)، صص: ۱۱۱-۱۲۸.

- Angelini, I.; Frizzi, T.; Alberti, R.; Masiero, E.; Artioli, G.; Molin, G. & Venturino Gambari, M., 2007, "Snapshot of a Final Bronze Age metalworker: archaeometallurgical study of the hoard and the working tools from Chiusa di Pesio, Cuneo, Italy". In: *Proceedings of the 2nd International Conference Archaeometallurgy in Europe*, Pp: 17-21.

- Chiavari, C.; Esposti, M. D.; Garagnani, G. L. & Martini, C., 2011 "Ancient Metallurgy at the Sumhram (Sultanate of Oman): Technical Aspects of Raised Inscriptions on South Arabian Bronze". *Archaeometry*, Vol. 53 (3), Pp: 528-546.

- Gomez de Salazar, J. G.; Barrena, M. I. & Soria, A., 2004, "Ancient iron and bronze pieces from La Tejada: Characterization studies". *JOM*, Vol. 56(6), Pp: 14-16.
- Dungworth, D., 2013, "An experimental study of early bronze smithing techniques". In: *D Dungworth and R C P Doonan (eds) Accidental and Experimental Archaeometallurgy* (London), Pp: 149–152.
- Figueiredo, E.; Senna-Martínez, J. C.; Silva, R. J. C.; Araújo, M. F.; Ventura, J. M. Q. & Carvalho, H., 2007, "Late Bronze Age Metal Artefacts from an Orientalising Burial (?) at Fraga dos Corvos (Macedo de Cavaleiros–NE Portugal): A First Archaeometallurgical Approach". In: *Proceedings of the 2nd International Conference" Archaeometallurgy in Europe*, Pp: 17-21
- Figueiredo, E.; Silva, R. J.; Araújo, M. F. & Senna-Martinez, J. C., 2010, "Identification of ancient gilding technology and Late Bronze Age metallurgy by EDXRF, Micro-EDXRF, SEM-EDS and metallographic techniques". *Microchimica Acta*, Vol. 168(3-4), Pp: 283-291.
- Fleming, S. J.; Pigott, V. C.; Swann, C. P. & Nash, S. K., 2005, "Bronze in Luristan". *Iranica Antiqua*, No. 40, Pp: 35-64.
- Fleming, S. J.; Pigott, V. C.; Swann, C. P.; Nash, S. K.; Haerinck, E. & Overlaet, B., 2006, "The archaeometallurgy of war kabud, Western Iran". *Iranica antiqua*, Vol. 41, Pp: 31-57.
- Frame, L., 2010, "Metallurgical investigations at Godin Tepe, Iran, Part I: the metal finds". *Journal of Archaeological Science*, Vol. 37(7), Pp: 1700-1715.
- Giumlia-Mair, A.; Keall, E. J.; Shugar, A. N. & Stock, S., 2002, "Investigation of a copper-based hoard from the Megalithic site of al-Midamman, Yemen: an interdisciplinary approach". *Journal of Archaeological Science*, Vol. 29(2), Pp: 195-209.
- Ingo, G. M.; de Caro, T.; Riccucci, C.; Angelini, E.; Grassini, S.; Balbi, S.; Bernardini, P.; Silva, D.; Bousselmi L.; Cilingiroglu, A.; Gener, M.; Gouda, V. K.; Al Jarrah, O.; Khosrof, S.; Mahdjoub, Z.; Al Saad, Z.; El-Saddik, W. & Vassiliou, P., 2006, "Large scale investigation of chemical composition, structure and corrosion mechanism of bronze archeological artefacts from Mediterranean basin". *Applied Physics A*, Vol. 83, Pp: 513-520.
- Kienlin, T. L.; Bischoff, E. & Opielka, H., 2006, "Copper and bronze during the Eneolithic and Early Bronze Age: a metallographic examination of axes from the Northalpine region". *Archaeometry*, Vol. 48(3), Pp: 453-468.

- Lechtman, H., 2014, "Arsenic bronze: dirty copper or chosen alloy? A view from the Americas". *Journal of Field Archaeology*, Vol. 23(4), Pp: 477-514.
- Moorey, P. R. S., 1969, "Prehistoric copper and bronze metallurgy in western Iran (with special reference to Lūristān)". *Iran* Vol. 7, Pp: 131-153.
- Mortazavi, M.; Salehi Kakhki, A.; Golozar, M. A. & Tala'i, H., 2011, "Preliminary Metallurgical Investigation of Copper-Based Artifacts at Tepe Sagzabad in Qazvin Plain, Iran (1500-800 BC)". *Iranian Journal of Archaeological Studies*, Vol. 1(2), Pp: 49-59.
- Oudbashi, O., 2020, "A New Look at an Old Technology: Insights into the Metallurgy of Tin Bronze during the Iron Age of Luristan". *Proceedings of the XXth International Congress on Ancient Bronzes: Resource, reconstruction, representation, role*, Bar Publishing, Philipp Baas (Ed.), Pp: 91-100.
- Oudbashi, O., 2019, "The Bronze Metallurgy in the Iron Age: Tin Bronze Production Tradition during the Iron Age in the Central Zagros". *Proceedings of Iron Age in Western Iran and the Neighboring Regions: Problems and Priorities*, 2-3 November, 2019, Sanandaj, Pp: 206-219.
- Oudbashi, O. & Hasanpour, A., 2018, "Bronze alloy production during the Iron Age of Luristan: a multianalytical study on recently discovered bronze objects". *Archaeological and Anthropological Sciences*, Vol. 10, Pp: 1443-1458.
- Oudbashi, O. & Hessari, M., 2017, "Iron Age tin bronze metallurgy at Marlik, Northern Iran: an analytical investigation". *Archaeological and Anthropological Sciences*, Vol. 9, Pp: 1-17.
- Oudbashi, O. & Davami, P., 2014, "Metallography and microstructure interpretation of some archaeological tin bronze vessels from Iran". *Materials Characterization*, Vol. 97, Pp: 74-82.
- Oudbashi, O.; Emami, S. M.; Malekzadeh, M.; Hassanpour, A. & Davami, P., 2013, "Archaeometallurgical studies on the bronze vessels from "Sangtarashan", Luristan, W-Iran". *Iranica Antiqua*, Vol. 48, Pp: 147-74.
- Oudbashi, O.; Emami, S. M. & Davami, P., 2012, "Bronze in Archaeology: A Review of the Archaeometallurgy of Bronze in Ancient Iran". In: *Copper Alloys – Early Applications and Current Performance – Enhancing Processes*, Intech Open Access Publication, Pp: 153-178.
- Oudbashi, O. & Mortazavi, M., 2011, "Some Aspects of Heat Treatment in Ancient and Historic Copper Alloy Artefacts". *Proceedings of International Conference on Materials Heat Treatment (ICMH 2011)*,

Islamic Azad University, Majlesi Branch, May 10-12, 2011, Isfahan, Iran.

- Pigott, V. C., 2004, *Hasanlu and The Emergence of Iron in Early 1st Millennium BC, Western Iran*. Persias Ancient Splendour, Mining, Handicraft and Archaeology, Deutsches Bergbau-Museum, Bochum, Pp: 24-43.

- Scott, D. A., 2002, *Copper and Bronze in art: Corrosion, Colorants, Conservation*. Los Angeles: The Getty Conservation Institute.

- Silva, R. J. C.; Figueiredo, E.; Araújo, M. F.; Pereira, F. & Braz Fernandes, F. M., 2008, "Microstructure interpretation of copper and bronze archaeological artefacts from Portugal". In: *Materials Science Forum*, Vol. 587, Pp: 365-369.

- Thornton, C. P., 2009, "The emergence of complex metallurgy on the Iranian Plateau: escaping the Levantine paradigm". *Journal of World Prehistory*, Vol. 22(3), Pp: 301-327.

- Valério, P.; Silva, R. J. C.; Araújo, M. F.; Soares, A. M. M. & Braz Fernandes, F. M., 2010, "Microstructural signatures of bronze archaeological artifacts from the southwestern Iberian Peninsula". In: *Materials Science Forum*, Vol. 636, Pp: 597-604.