پژوهش‌های باستان‌شناسی ایران
فصلنامهٔ علمی پژوهش‌های باستان‌شناسی ایران
P. ISSN: 2345-5225 & E. ISSN: 2345-5500
شمارهٔ ۳۳، دورهٔ دوازدهم، بهار ۱۴۰۱

مطالعات آزمایشگاهی، تحلیل داده‌ها و شناسایی فرآیند تولید در اشیاء آلیاژ مس متعلق به محوطه‌های عصر آهن ورکبود و مارلیک

ریحانه رجبیان[I]، امید عودباشی[II]، داود آقاعلی‌گل[III]، مرتضی حصاری[IV]

شناسهٔ دیجیتال (DOI): 10.22084/NB.2021.21607.2137
تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۲۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۴
نوع مقاله: پژوهشی؛ صص: ۷۸-۵۹

چکیده

کاوش‌های باستان‌شناسی در گورستان‌های عصر آهن ایران، به‌خصوص در نواحی شمال و غرب ایران، نشان‌دهندهٔ وجود اشیاء متنوع آیینی است که به‌همراه جسد در گورها قرار داده‌شده‌اند. بخش عمده‌ای از اشیاء به‌دست‌آمده از کاوش‌های گورستان‌های عصر آهن ایران، اشیائی هستند که از آلیاژهای مس، به‌خصوص آلیاژ مفرغ قلعی ساخته‌شده‌اند. در این پژوهش چهار عدد از اشیاء آلیاژ مس متعلق به دو محوطهٔ ورکبودِ لرستان و مارلیکِ گیلان مورد مطالعات آزمایشگاهی قرارگرفته‌اند. هدف از این پژوهش، شناسایی ترکیب آلیاژ و ویژگی‌های ریزساختاری در این اشیاء فلزی (به‌عنوان مطالعهٔ موردی) و مقایسهٔ نتایج با مطالعات انجام‌شده درگذشته، به‌منظور شناسایی روش تولید و ساخت اشیاء ساخته‌شده از آلیاژهای مس در این دو محوطهٔ عصر آهن ایران است. پرسش پژوهش بدین‌قرار است: فناوری تولید اشیاء آلیاژ مس در دو محوطهٔ مورد مطالعه چه بوده است؟ به این‌منظور، جهت شناسایی ترکیب فلز/آلیاژ و عناصر اصلی و فرعی تشکیل‌دهندهٔ آن و هم‌چنین مشاهدات ریزساختاری از روش‌های آنالیز Micro-PIXE و مشاهدات میکروسکوپی (متالوگرافی) استفاده‌شده است. نتایج آنالیز شیمیایی اشیاء موردمطالعه بیانگر این است اشیاء شامل سه مورد آلیاژ دو جزئی مس و قلع (مفرغ قلعی) و یک مورد آلیاژ مس و روی (احتمالاً برنج) است. اشیاء مفرغی حاوی درصد متفاوت قلع در ترکیب هستند که می‌توانند نشان‌دهندهٔ روند تولید آلیاژ مفرغ با استفاده از روش کنترل نشدهٔ آلیاژسازی باشد. این‌امر در اشیاء مفرغی متعلق به عصر آهن ایران معمول بوده است. در ترکیب یک نمونه حدود ۱۴٪ وزنی روی اندازه‌گیری شده است که این میزان می‌تواند بیانگر تولید آلیاژ برنج (احتمالاً به‌شکل تصادفی) باشد. نتایج مطالعات میکروسکوپی نیز نشان می‌دهد که مرحلهٔ اول ساخت اشیاء موردمطالعه ریخته‌گری بوده است که برروی تعدادی از اشیاء بعد از عملیات ریخته‌گری، عملیات ترمومکانیکی (به‌میزان محدود) انجام‌شده است. تنها یک شئ با استفاده از چرخه‌های متناوب کار و تابکاری ساخته‌شده است.

کلیدواژگان: عصر آهن ایران، فلزگری باستانی، ورکبود، مارلیک، مفرغ قلعی، ریخته‌گری.

I. کارشناس‌ارشد باستان‌سنجی، دانشکدهٔ حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران.
II. دانشیار گروه مرمت اشیاء فرهنگی و تاریخی، دانشکدهٔ حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران (نویسندهٔ مسئول).
o.oudbashi@aui.ac.ir
III. پژوهشگر، آزمایشگاه واندوگراف، پژوهشکدهٔ فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران.
IV. دانشیار گروه باستان‌شناسی پیش‌ازتاریخ، پژوهشکدهٔ باستان‌شناسی، پژوهشگاه میراث‌فرهنگی و گردشگری، تهران، ایران.

مقدمه

یکی از دوره‌های فرهنگی مهم در پیش‌ازتاریخ ایران، «عصر آهن» است. پس از گذشت دوره‌های مس‌وسنگ و مفرغ (بین هزارهٔ پنجم تا دوم پیش‌ازمیلاد)، عصر آهن در اواسط هزارهٔ دوم پیش‌ازمیلاد آغازشده و در اواسط هزارهٔ اول پیش‌ازمیلاد پایان می‌یابد. این دوران مهم در تاریخ و باستان‌شناسی ایران مقطع زمانی حدود ۱۵۰۰ تا ۵۵۰ پ.م. تا پیش از ظهور امپراتوری هخامنشی را شامل می‌شود (Muscarella, 2006: 605; Peregrine, 2002; Overlaet, 2013: 377; Vahdati, 2018: 52). البته این تاریخ‌گذاری در بخش‌های مختلف ایران تاحدی متفاوت است مانند شمال‌غرب ایران که عصر آهن آن بین حدود ۱۲۵۰ تا ۵۵۰ پ.م. تاریخ‌گذاری شده است (Danti, 2013: 327). جدای از تحولات خاص رخ‌داده در عصر آهن از نقطه‌نظر باستان‌شناسی، اهمیت این عصر درزمینهٔ فناوری باستانی شامل ظهور فلزگری آهن، توسعهٔ فلزگری آلیاژهای مس و هم‌چنین توسعهٔ دیگر فناوری‌های باستانی، مانند: سفال، شیشه، لعاب و دیگر آثار و مواد متنوع نیز قابل‌توجه است (طلایی، ۱۳۸۷: ۴۰؛ Hassanzadeh & Curtis, 2018: 166). در عصر آهن فلزات مختلفی ازجمله: آهن، مس، مفرغ قلعی، نقره و طلا مورداستفاده قرارمی‌گرفته‌اند. درمیان فلزات مختلف آهن برای اولین‌بار در این دوره ظاهرشده و احتمالاً به‌همین دلیل این دوران را «عصر آهن» نامیده‌اند (طلایی، ۱۳۸۷: ۴۰)، اگرچه ظهور آهن در برخی نواحی ایران پیش‌ازاین دوره و در برخی نواحی نیز در میانهٔ این دوره رخ‌داده است (Thornton, 2009: 309; Pigott, 1989: 67). براساس مطالعات آزمایشگاهی انجام‌شده برروی اشیاء فلزی ساخته‌شده از آلیاژهای مس در ایران، استفاده از مفرغ قلعی در تولید اشیاء متنوع در عصر آهن در نواحی مختلف ایران معمول بوده است و مجموعه‌های بزرگی از اشیاء مفرغی متعلق به این دوره مطالعه شده‌اند (Oudbashi & Davami, 2014: 79; Oudbashi & Hasanpour, 2018: 1456; Fleming et al; 2006: 35). در کاوش‌های باستان‌شناسی متعدد انجام‌شده برروی محوطه‌ها و گورستان‌های عصر آهن، ابزار و اشیاء مفرغی متنوعی مشاهده و گزارش‌شده است. در حقیقت، یکی از برجسته‌ترین شواهد فلزگری در عصر آهن ایران، توسعهٔ چشمگیر تولید آثار مفرغی در مناطق مختلف به‌خصوص شمال و غرب ایران است و از مهم‌ترین پدیده‌های فلزگری عصر آهن در غرب ایران مجموعهٔ اشیاء مفرغی مکشوف از ناحیهٔ لرستان است (Moorey, 1982; Overlaet, 2005: 11). ازسوی دیگر شواهد گسترده‌ای از استفاده از آلیاژ مفرغ در شمال ایران در عصر آهن مشاهده‌شده است (Haerinck, 1988)؛ برای مثال، می‌توان به مجموعه‌های مفرغی کشف‌شده از محوطه‌های عصر آهن مارلیک و تول تالش در گیلان اشاره نمود (Oudbashi & Hessari, 2017: 247; Vahdati, 2007: 126).

درحقیقت می‌توان بیان نمود که براساس مطالعات باستان‌شناسی و آزمایشگاهی، غرب (لرستان) و شمال ایران نواحی مهمی درزمینهٔ فلزگری و توسعهٔ آلیاژ مفرغ قلعی در عصر آهن هستند (Oudbashi, 2019a: 211-212; Oudbashi, 2019b: 92). این‌امر باوجود مطالعات محدود انجام‌شده برروی فلزگری مفرغ قلعی در پیش‌ازتاریخ

ایران، به‌خوبی مشهود است. بااین‌وجود، مطالعات انجام‌شده برروی فلزگری مفرغ در عصر آهن در این نواحی محدود به انجام مطالعات آزمایشگاهی معدودی برروی برخی از اشیاء فلزی محوطه‌هایی در لرستان، مانند: ورکبود (Fleming et al., 2006)، سنگتراشان و باباجیلان (Oudbashi & Davami, 2014; Oudbashi & Hasanpour, 2018; Oudbashi et al., 2013)، و در شمال، مانند مارلیک در گیلان (Oudbashi & Hessari, 2017) و چند محوطه یا مجموعهٔ دیگر می‌شود (Mortazavi et al., 2011; Sodaei & Kashani, 2017). البته باید خاطرنشان نمود که نتایج این مطالعات توانسته است جنبه‌هایی از فلزگری آلیاژهای مس و به‌خصوص مفرغ قلعی را در عصر آهن آشکار سازد.

بر این‌اساس، یک مطالعهٔ آزمایشگاهی به‌منظور توسعهٔ مطالعات فلزگری برروی اشیاء فلزی عصر آهن با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی و هم‌چنین مقایسه با نتایج مطالعات انجام‌شده پیش‌ازاین، طراحی و اجرا شده است. دلیل این‌امر، باوجود مطالعات انجام‌شده برروی دو محوطهٔ ورکبود لرستان و مارلیک گیلان، انجام مطالعات آزمایشگاهی و مقایسهٔ فرآیند تولید مفرغ در این دو ناحیه در عصر آهن براساس داده‌های نسبتاً گسترده موجود در این‌خصوص است. به‌همین دلیل دو محوطه که پیش‌از این موردمطالعه قرارگرفته‌اند با استفاده از یک مطالعهٔ موردی و هم‌چنین به‌کارگیری اطلاعات موجود از پژوهش‌های پیشین، مورد مقایسه قرارگرفته‌اند. با توجه به مطالعات انجام‌شده، نیاز به توسعهٔ مطالعات فلزگری با استفاده از روش‌های مختلف آنالیز شیمیایی و ریزساختاری (میکروسکوپی) جهت شناسایی بهتر جنبه‌های متنوع فلزگری آلیاژ مفرغ در عصر آهن ایران و هم‌چنین مقایسه نتایج مطالعات جدید با نتایج منتشرشده درگذشته به‌خوبی احساس می‌شود. هم‌چنین، توسعهٔ روش‌شناسی مطالعات فلزگری و استفاده از روش‌های مختلف آزمایشگاهی جهت حصول نتایج مناسب و قابل استناد نیز ضروری به‌نظر می‌رسد.

پرسش‌های پژوهش: پرسش اصلی این پژوهش آن است که شیوهٔ ساخت و تولید اشیاء آلیاژ مس عصر آهن براساس نتایج مطالعات آزمایشگاهی (نتایج منتشرشدهٔ پیشین و آنالیزهای جدید) اشیاء محوطه‌های مارلیک و ورکبود چه بوده است؟ ازآنجایی‌که اشیاء فلزی بخش مهمی از بقایای باستان‌شناسی را تشکیل می‌دهند، دستیابی به فناوری فلزگری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ترکیب شیمیایی، روش تولید و ساخت در اشیاء کشف‌شده در محوطه‌های باستانی عصر آهن ورکبود لرستان و مارلیک گیلان می‌تواند به بخشی از پرسش‌های موجود درخصوص تاریخ و فناوری ساخت و ترکیب و نیز نحوهٔ تولید اشیاء فلزی عصر آهن در شمال و غرب ایران پاسخ دهد.

روش پژوهش: روش پژوهش تلفیقی از روش‌های کتابخانه‌ای و آزمایشگاهی است. به این‌منظور، جهت شناسایی ترکیب فلز/آلیاژ و عناصر اصلی و فرعی تشکیل‌دهندهٔ آن و هم‌چنین مشاهدات ریزساختاری از روش‌های آنالیز Micro-PIXE و مشاهدات میکروسکوپی (متالوگرافی) استفاده‌شده است.

پیشینهٔ پژوهش

در طول قرن گذشته، مطالعات مختلفی توسط برروی اشیاء مفرغی لرستان در زمینه‌هایی چون: باستان‌شناسی و فناوری فلزگری صورت‌گرفته است که برای مثال، می‌توان به مطالعات انجام‌شده برروی ۴۸ شئ مفرغی از ورکبود و مطالعهٔ فناوری ساخت ۱۶۹ شئ آلیاژ مس از چهار گورستان عصر آهن ناحیهٔ لرستان کاوش‌شده توسط گروه باستان‌شناسی بلژیکی در ایران[1] (Fleming et al., BAMI) (2006: 31-57)، تجزیه‌وتحلیل مجموعه‌ای از مفرغ‌های باستانی غرب ایران در موزه آشمولین آکسفورد (Moorey, 1964: 72-79)، مطالعات آزمایشگاهی و بررسی فن ساخت دو نمونه گل‌میخ به‌کاررفته در ظروف مفرغی محوطهٔ سنگتراشان (حسن‌پور و همکاران، ۱۳۹۱)، مطالعهٔ فرآیند فلزکاری آثار مفرغی محوطهٔ هفت‌تپهٔ خوزستان (Oudbashi et al., 2019; Oudbashi & Mishmastnehi, 2020)، شناسایی روش ساخت ۲۲ نمونه از ظروف مفرغی محوطهٔ سنگتراشان لرستان (Oudbashi et al., 2013; Oudbashi et al., 2014) و مطالعهٔ فن‌شناسی مجسمهٔ مفرغی قوچ تسمه‌جان (اصلانی، ۱۳۷۴) اشاره نمود. ازسوی دیگر، مطالعات فلزگری در شمال ایران (در محدودهٔ زمانی عصر آهن) نسبت به غرب ایران کمتر موردتوجه بوده است؛ بااین‌حال، گورستان عصر آهن مارلیک به‌صورت نسبتاً گسترده‌ای موردتوجه قرارگرفته است و مطالعات فلزگری باستانی برروی اشیاء فلزی مکشوف از گورهای این محوطه انجام‌شده است (Oudbashi & Hessari, 2017: 233-249; Tylekote, 1972; Vatandoost-Haghighi,1977). هم‌چنین می‌توان به مطالعات انجام‌شده برروی اشیاء عصر آهن مکشوف از ناحیهٔ تالش گیلان (حسینی‌پناه صومعه‌سرایی و همکاران، ۱۳۹۷) و هم‌چنین محوطهٔ سگزآباد دشت قزوین اشاره نمود (Mortazavi et al., 2011).

نکتهٔ مهم درخصوص مطالعات انجام‌شده برروی فلزگری آلیاژهای مس در عصر آهن در نواحی غرب و شمال ایران توسعهٔ شکل‌گیری فلزگری آلیاژ مفرغ قلعی (مفرغ) است که اگرچه پیشینهٔ تولید و استفاده از آن به‌صورت محدود به اوایل عصر مفرغ در غرب ایران بازمی‌گردد، اما می‌توان این آلیاژ را مادهٔ اصلی در تولید اشیاء فلزی در عصر آهن برشمرد. بااین‌وجود، نیاز به توسعهٔ مطالعات فلزگری در نواحی مختلف ایران و هم‌چنین بازنگری داده‌های موجود در این زمینه ضروری به‌نظر می‌رسد.

محوطه‌های باستانی ورکبود و مارلیک

براساس مطالعات انجام‌شده، «لویی واندنبرگ» بین سال‌های ۱۹۶۵ و ۱۹۶۶ میلادی گورستان ورکبود مربوط به عصر آهن III (۸۰۰ تا ۵۵۰ پ.م.)، که در ۲۵ کیلومتری شمال‌غربی ایلام در ناحیهٔ پشتکوه لرستان (استان ایلام امروزی) واقع است، را مورد کاوش قرار داده است. درمجموع ۲۰۳ گور در گورستان ورکبود کشف و ثبت‌شده است. ۱۵۳ گور دست‌نخورده و با پیشوند A و ۵۰ مورد از گورهای غارت‌شده با پیشوند B ثبت‌شده‌اند (Haerinck & Overlaet, 2004; Vanden Berghe, 1987). مجموعهٔ اشیاء فلزی مکشوف از گورستان ورکبود تصویری کلی از فناوری فلزگری

عصر آهن III در ناحیهٔ پشتکوه لرستان را نمایش می‌دهد (Fleming et al., 2006: 31-57). ازسوی دیگر، یکی از مهم‌ترین محوطه‌های عصر آهن I ایران (نیمهٔ دوم هزارهٔ دوم پ.م.) محوطه و گورستان مارلیک یا چراغ‌علی‌تپه گیلان است (نگهبان، ۱۳۷۸: ۲۸؛ Haerinck,1988: 63-78). تپه مارلیک در درهٔ گوهررود، در منطقهٔ رحمت‌آباد در استان گیلان قرارگرفته است. در ناحیهٔ سطح تپه ۵۳ گور کشف‌شده است. این گورها شامل چهار گروه گورهای بزرگ در بین چندین تخته‌سنگ، گورهایی با اندازهٔ متوسط و شکل چهارضلعی، گورهای کوچک به‌شکل نامنظم و گور حاوی جسد اسب است (نگهبان، ۱۳۷۸: ۶۸). آثار فلزی به‌دست‌آمده از این محوطه از دیدگاه فناوری فلزگری نمونه‌های جالب‌توجهی هستند که در یک کاوش علمی از یک محوطهٔ عصر آهن به‌دست‌آمده‌اند. شاخص‌ترین اشیاء یافت‌شده از گورهای این محوطه، مجموعهٔ اشیاء فلزی شامل اشیاء طلایی، نقره‌ای و مفرغی هستند (نگهبان، ۱۳۷۸: ۳۰۴-۳۰۵ و ۴۷۸-۴۷۹؛ Negahban, 1989: 175-198; Negahban, 1983; Neghban, 1981).

روش پژوهش

معرفی اشیاء

جهت مطالعات آزمایشگاهی به‌منظور توسعهٔ مطالعات فلزگری باستانی و روش‌های تولید آثار مفرغی در عصر آهن ایران و هم‌چنین شناخت بهتر فلزگری کهن در دو محوطهٔ عصر آهن ورکبود لرستان و مارلیک گیلان، چهار شئ فلزی موردمطالعه و نمونه‌برداری قرارگرفتند. دلیل انتخاب تعداد کم اشیاء جهت مطالعهٔ موردی، محدودیت‌های موجود درخصوص نمونه‌برداری و مطالعات آزمایشگاهی برروی اشیاء موزه‌ای بوده است. به‌همین دلیل، تنها اشیایی انتخاب شدند که امکان نمونه‌برداری از آن‌ها وجود داشته است.

آثار موردمطالعه از گورستان عصر آهن III ورکبود شامل یک النگو (WK.A3-2)، یک النگوی پیچ (WK.A4-2) و یک دستبند منقوش (WK.B7-5) است. دو شئ اول متعلق به گورهای دست‌نخوردهٔ شمارهٔ ۳ و ۴ هستند و شئ سوم از گور غارت‌شدهٔ شمارهٔ ۷ محوطه به‌دست‌آمده است (Vanden Berghe, 1987; Haerinck & Overlaet, 2004). شئ WK.A3-2 تزئینات خاصی ندارد، اما النگوی WK.A4-2 دارای تزئینات پیچ‌دار بر روی سطح است و در شئ سوم نقش صورت دو گربه‌سان از روبه‌رو و به‌صورت مقابل یکدیگر برروی دستبند ایجادشده است (شکل ۱).

جدول ۱. مشخصات اشیاء موردمطالعه در این پژوهش (نگارندگان، ۱۴۰۰). ▼

کد شئ	محوطه	دوره	مشخصات شیء	منبع
WK.A3-2	ورکبود	عصر آهن III	النگوی ساده	Vanden Berghe, 1987
WK.A4-2	ورکبود	عصر آهن III	النگو با طرح پیچ‌دار	Vanden Berghe, 1987
WK.B7-5	ورکبود	عصر آهن III	دستبند منقوش با نقش صورت گربه‌سان	Vanden Berghe, 1987
XVIIIC	مارلیک	عصر آهن I	مهر استامپی با دستهٔ شکسته	نگهبان، ۱۳۷۸

شکل ۱. تصاویر اشیاء موردمطالعه در این پژوهش، اشیاء WK.A4-2، WK.A3-2 و WK.B7-5 به‌دست‌آمده از گورستان عصر آهن III ورکبود و مهر XVIIIC به‌دست‌آمده از محوطه عصر آهن I مارلیک گیلان است(نگارندگان، ۱۴۰۰).◄

هم‌چنین یک عدد مُهر فلزی (شئ XVIIIC) نیز از محوطهٔ عصر آهن مارلیک گیلان موردمطالعه قرارگرفته است. این مهر در گزارش کاوش گورستان مارلیک به‌عنوان یکی از اشیاء شاخص کشف‌شده از این گورستان معرفی‌شده است که از گور شمارهٔ ۳۶ به‌دست‌آمده است و با شمارهٔ M 1390 در گزارش کاوش محوطهٔ ثبت‌شده است. این مهر دارای سر مهر به‌شکل گل چهارپر است و که نقشی انتزاعی در آن ایجادشده است. بالای دستهٔ مهر نیز حجمی به‌شکل به‌صورت یک پرندهٔ کوچک وجود دارد که جزئیات آن در گزارش منتشرشده کاوش ارائه‌شده است (نگهبان، ۱۳۷۸: ۴۷۶؛ Negahban, 1977: 18, Figs. 40-41). کد استفاده شده در این پژوهش درحقیقت محل کشف این مهر (ترانشهٔ شمارهٔ XVIIIC) براساس برچسب متصل به آن در مخزن موزه ملی ایران و ترانشهٔ محل کشف آن در گزارش کاوش است. هر چهار شئ موردمطالعه درحال حاضر در موزه ملی ایران نگه‌داری می‌شوند. مشخصات اشیاء در جدول ۱ به‌اختصار ارائه‌شده است.

روش‌های آزمایشگاهی

در ابتدا یک نمونهٔ کوچک از هر شئ با استفاده از ارّهٔ جواهرسازی جداشده و جهت تهیهٔ مقطع صیقلی استفاده شد. برای تهیهٔ مقاطع صیقلی پس از ثابت کردن (مانت) نمونه‌ها در رزین اپوکسی، به‌منظور دستیابی به سطح صیقلی، سنباده‌زنی نمونه‌ها روی کاغذ سیلیسیوم کاربید با افزایش شمارهٔ کاغذ به‌ترتیب از ۲۴۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ و سپس صیقل‌دهی مقاطع توسط خمیر الماسه با اندازهٔ دانه‌های ۶، ۳، ۱، ۰/۲۵ میکرون انجام شد.

به‌منظور شناسایی عناصر تشکیل‌دهندهٔ آلیاژ، از روش طیف‌سنجی نشر پرتوایکس القائی پروتون[۲] با باریکهٔ پروتون میکرونی (Micro-PIXE) استفاده شد. در این روش

آنالیز، نمونهٔ موردبررسی تحت تابش ریزباریکهٔ پروتون قرار می‌گیرد. در اثر برخورد پروتون با اتم هدف پرتو X مشخصی گسیل می‌شود که انرژی پرتو X، نوع عنصر حاضر در نمونه و تعداد پرتوهای X با انرژی معین غلظت عنصر در نمونه را مشخص می‌کند. مزیت عمدهٔ روش Micro-PIXE، حساسیت در حد ppm، غیرتخریبی بودن و چندعنصری بودن آن و امکان انجام آزمایش در اتمسفر معمولی و یا گاز هلیم روی نمونه‌های بزرگ و شکننده است (Johansson et al., 1995; Malmqvist, 1996). در این پژوهش از باریکهٔ پروتون با انرژی MeV 5/2 و با شدتی در حدود pA ۵۰-۱۰۰ که توسط شتاب‌دهندهٔ واندوگراف MV 3 آزمایشگاه واندوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای تولید می‌شود، استفاده‌شده است. قطر باریکهٔ پروتون در این آزمایش در حدود ۱۰ میکرون تنظیم‌شده است. برای آشکارسازی اشعهٔ X (Micro-PIXE) از آشکارساز Si (Li) باقدرت تفکیک eV150، که در زاویهٔ ۱۳۵ درجه نسبت به پرتوهای پروتون فرودی قرارگرفته، برای اندازه‌گیری کَمّی و کیفی عناصر موجود در نمونه‌ها استفاده‌شده است. طیف‌های به‌دست‌آمده برای اندازه‌گیری ترکیب عنصری نمونه‌ها با استفاده از نرم‌افزار GUPIXWIN پردازش شدند. هم‌چنین به‌منظور مطالعهٔ ریزساختار نمونه‌ها و شناسایی روش‌های به‌کاربرده شده در ساخت اشیاء، مقطع صیقلی نمونه‌های فلزی با استفاده از میکروسکوپ نوری متالوگرافی موردمطالعه قرار گرفتند. مقطع نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ متالوگرافی مدل MR-11 ساخت شرکت OGAWA SEIKI محصول کشور ژاپن در دانشکدهٔ حفاظت و مرمت دانشگاه هنر اصفهان موردمطالعه قرارگرفتند. جهت اچ کردن از محلول آبی کلرید آهن III استفاده شد و تصاویر با بزرگ‌نمایی‌های مختلف گرفته شدند.

نتایج و بحث

ترکیب شیمیایی

نتایج آنالیز Micro-PIXE در جدول۲ ارائه‌شده است. نتایج نشان می‌دهد ترکیب سه شئ شامل مهر (XVIIIC)، دستبند منقوش (WK.B7-5) و النگوی ساده (WK.A3-2) شامل آلیاژ دوجزئی مس و قلع (Cu-Sn) است و مس بیشترین بخش ترکیب را دربرگرفته است. میزان مس در ترکیب این سه شئ بین ۹۳ تا ۸۸٪ وزنی شناسایی‌شده است و میزان قلع بین ۱۰/۹۷ تا ۵/۸۶٪ متغیر است.

عناصر دیگر کمتر از یک درصد هستند که بخش کمی از ترکیب را دربرگرفته‌اند. این عناصر احتمالاً در حین فرآیند استحصال سنگ معدن جهت استخراج مس یا قلع وارد ترکیب‌شده‌اند.

◄جدول۲. نتایج آنالیز عنصری با روش Micro-PIXE برروی اشیاء موردمطالعه براساس درصد وزنی (نگارندگان، ۱۴۰۰).

	Cu	Sn	As	Al	Zn	Pb
WK.A3-2	**90.34**	**8.74**	-	0.17	-	-
WK.A4-2	**80.93**	0.40	0.13	**1.81**	**14.33**	**2.05**
WK.B7-5	**93.47**	**5.86**	0.15	-	-	0.26
XVIIIC	**88.22**	**10.97**	0.04	-	-	-

شئ WK.A4-2 دارای ترکیبی کاملاً متفاوت با سه شئ دیگر است. نتایج آنالیز نشان می‌دهد که روی (Zn) عنصر آلیاژی اصلی است و ترکیب شیمیایی این شئ شامل ۸۰/۹۳٪ مس، ۱۴/۳۳٪ روی، ۲/۰۵٪ سرب و ۱/۸۱٪ آلومینیوم (احتمالاً ناخالصی تحت‌تأثیر شرایط دفن و خوردگی) است. روی در اشیاء مفرغی مطالعه‌شدهٔ عصر آهن ایران (به‌خصوص لرستان و شمال ایران) بیشتر به‌عنوان عنصری کمیاب[۳] شناسایی‌شده است (Oudbashi & Hessari, 2017: 241; Oudbashi et al., 2013: 156; Oudbashi & Davami, 2014: 76; Tylekote, 1972; Vatandoost-Haghighi, 1977).

اشیاء مفرغی موردمطالعه ازنظر ترکیب آلیاژ در گروه آلیاژهای مفرغ با درصد قلع پایین یا مفرغ کم‌قلع قرار می‌گیرند. این گروه شامل مفرغ‌هایی هستند که در آن‌ها میزان قلع کمتر از ۱۵/۸٪ وزنی است (Scott, 2014; Chase, 1994). مفرغ‌های کم‌قلع از خواص چکش‌خواری خوبی در حالت‌های سرد و گرم برخوردار هستند و به‌خوبی با استفاده از عملیات مکانیکی (معمولاً همراه با عملیات حرارتی) تغییر شکل می‌دهند، که امکان کار برروی اشیاء ظریف و تزئینی را فراهم می‌کند (Caron et al., 2004; Scott, 1991: 25).

شواهد کمی از اشیاء با ترکیب مشابه با آلیاژ برنج (مس و روی) در پیش‌ازتاریخ فلات ایران وجود دارد. با توجه به‌میزان روی در برخی اشیاء کشف‌شده از محوطه‌های پیش‌ازتاریخ ایران، می‌توان بیان نمود که احتمال تولید تعمدی آلیاژ برنج در پیش‌ازتاریخ وجود داشته است؛ مانند اشیاء کشف‌شده از تپه یحیی متعلق به هزارهٔ دوم پیش‌ازمیلاد که حاوی کمتر از ۲۰٪ روی هستند (Thornton, 2002: 1451-1460; Thornton and Ehlers, 2003: 3-8). هم‌چنین در تعدادی از اشیاء مجموعهٔ آنالیز شدهٔ مفرغ‌های لرستان متعلق به موزه آشمولین نیز میزان زیادی از روی شناسایی‌شده است (Moorey, 1964: 72-79). درعین‌حال با توجه به تعداد کم اشیاء حاوی میزان بالای روی در پیش‌ازتاریخ ایران، این احتمال نیز وجود دارد که استفاده از سنگ معدن‌های حاوی میزان قابل‌توجه روی موجب تولید اتفاقی این اشیاء شده باشد.

همان‌گونه که پیش‌ازاین ذکر شد، تعدادی از اشیاء مفرغی محوطهٔ مارلیک گیلان و ورکبود لرستان درگذشته نیز مورد مطالعات آزمایشگاهی قرارگرفته‌اند. در پژوهشی که توسط «وطندوست-حقیقی»[۴] انجام‌گرفته است، ۳۷ شئ از محوطهٔ مارلیک مورد آنالیز قرارگرفته‌اند. میزان قلع در اشیاء آنالیزشده بین ۲/۳۶ تا ۱۳/۵٪ متغیر است. در یک شئ نیز میزان قلع تنها ۰/۰۶۵٪ شناسایی‌شده است. سرب نیز در اکثر اشیاء به‌عنوان عنصر فرعی شناسایی‌شده و تنها در پنج شئ میزان آن از یک درصد بیشتر بوده است. ارسنیک نیز در چهار شئ به‌عنوان عنصر اصلی (بیش از یک درصد) شناسایی‌شده است (Vatandoost-Haghighi, 1977). هم‌چنین در پژوهشی دیگر، ۲۵ شئ دیگر از اشیاء محوطهٔ مارلیک مطالعه شده‌اند. میزان قلع در ۲۵ شئ آنالیز شده بین ۴ تا ۱۰/۸۳ است. دیگر عناصر به‌عنوان عناصر فرعی کمتر از یک درصد در ترکیب شناسایی‌شده‌اند. نکتهٔ جالب‌توجه مشابهت میزان روی در همهٔ اشیاء است

به شکلی که روی بین ۰/۱۱ تا ۰/۱۳٪ شناسایی‌شده است (Oudbashi & Hessari, 2017: 233-249). مطالعات انجام‌شده توسط «تیلکوت»[5] برروی پنج شئ فلزی از محوطهٔ مارلیک انجام‌شده است که شامل یک دستهٔ خنجر مفرغی با تیغهٔ آهنی (شئ دوفلزی)، یک سرنیزهٔ آهنی، یک تیغه یا میخ آهنی، نوار باریک ساخته‌شده از آلیاژ مس و یک سرپیکان ساخته‌شده از مفرغ است (Tylecote, 1972). براساس نتایج آنالیز اشیاء محوطهٔ مارلیک می‌توان بیان نمود که عناصر اصلی موجود در ترکیب آلیاژ در این اشیاء شامل مس و قلع است. نتایج بیانگر تولید مفرغ قلعی با میزان قلع متفاوت در اشیاء مختلف است.

ازسوی دیگر، آنالیزهای انجام‌شده برروی ۴۸ شئ متعلق به گورستان ورکبود بیانگر تولید مفرغ قلعی در این دوره است (Fleming et al., 2006: 31-57). در بین ۱۹ مورد شئ زینتی، مقدار قلع از ۳/۴٪ تا ۱۲/۷٪ متغیر است. در بین ۲۳ ظرف مقدار قلع بین ۲/۶ تا ۱۸/۲٪ تغییر می‌کند. نکتهٔ قابل‌توجه، این است که ارتباطی بین مقدار قلع در ترکیب اشیاء مفرغی و کارکرد یا گونهٔ آن‌ها وجود ندارد. اساس الگوهای متفاوتی از مقدار قلع در ترکیب اشیاء زینتی، جنگ‌افزارها و ظروف قابل‌مشاهده است. شکل ۲، نمودار پراکندگی میزان مس و قلع در ترکیب گونه‌های مختلف اشیاء محوطه‌های مارلیک و ورکبود و هم‌چنین چهار شئ آنالیزشده در این پژوهش را نمایش می‌دهد. این نمودار برای انجام مقایسه برروی فلزگری در عصر آهن بین دو محوطهٔ مارلیک و ورکبود انجام‌شده است و نتایج حاصل از آن نشان‌دهندهٔ فرآیند فلزگری انجام‌شده در این دو محوطه است. براساس نمودار ارائه‌شده چند مورد زیر را می‌توان بیان نمود:

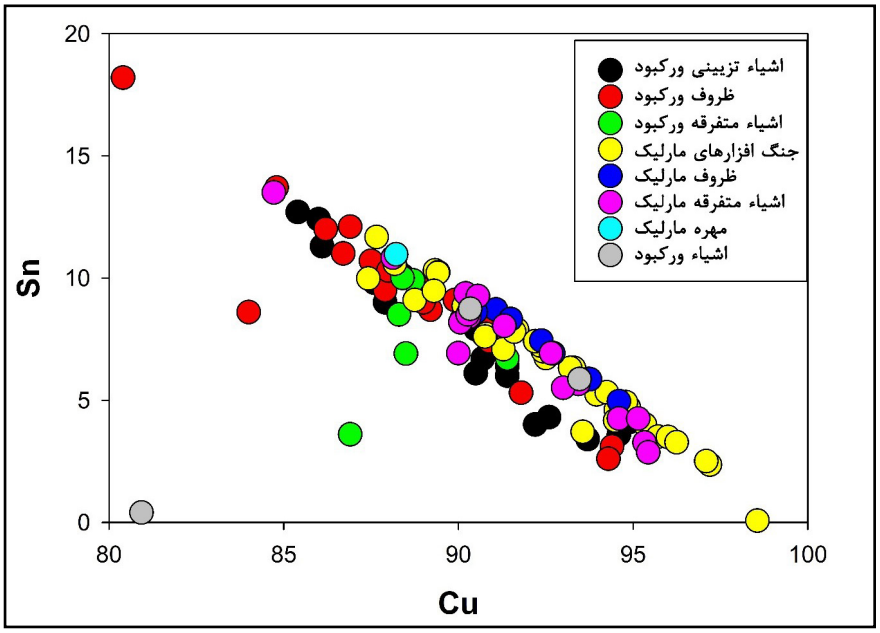
- میزان قلع در ترکیب اشیاء آنالیزشده از دو محوطه متفاوت بوده و میزان آن بین کمتر از یک درصد و حدود ۱۸٪ متغیر است.

- میزان قلع ارتباطی با ماهیت ظاهری و کاربردی اشیاء ندارد و برای مثال، در ظروف محوطهٔ ورکبود (نقاط قرمزرنگ) یا جنگ‌افزارهای مارلیک (نقاط زردرنگ) میزان قلع بسیار متنوع است.

- در دو مورد میزان قلع بسیار کم است که نشان‌دهندهٔ عدم استفاده از مفرغ قلعی در این دو شئ است.

- ترکیب چهار شئ آنالیز شده در این پژوهش (نقاط سبز آبی و خاکستری) به‌خوبی با دیگر اشیاء آنالیزشده پیش‌ازاین هم‌خوانی دارد، به‌جز یک مورد از اشیاء ورکبود حاوی میزان بسیار کم قلع که در حقیقت شئ ساخته‌شده از آلیاژ مس و روی است.

- براساس نمودار شکل ۲، یک هم‌بستگی خطی قوی معکوس بین درصد وزنی مس و قلع در کلیت اشیاء آنالیز شده مشاهده می‌شود و این رابطه به‌صورت کلی نشان می‌دهد که یک الگوی مشخص از ترکیب مفرغ قلعی در بین اکثر اشیاء در دو محوطهٔ باستانی مارلیک و ورکبود وجود داشته و تنها اشیاء تزئینی ورکبود از این رابطهٔ موجود مقداری منحرف هستند؛ درحالی‌که خود این اشیاء نیز به‌طور مستقل از یک رابطهٔ خطی پیروی می‌کنند. بااین‌وجود بین ماهیت ظاهری (گونه‌شناسی



شکل ۲. نمودار پراکندگی مس و قلع (Cu vs. Sn) در اشیاء آنالیزشده در محوطه‌های مارلیک و ورکبود براساس گونه‌شناسی و گروه‌های اشیاء آنالیزشده، نقاط سبز-آبی و خاکستری متعلق به چهار شئ آنالیزشده در این پژوهش هستند (نگارندگان، ۱۴۰۰).◄

اشیاء) و ترکیب آن‌ها رابطهٔ مشخصی وجود ندارد.

ترکیب اصلی آلیاژ در اکثر اشیاء دو محوطه، شامل آلیاژ مفرغ قلعی بوده و تنها در چند مورد محدود میزان ارسنیک و سرب تاحدی قابل‌ملاحظه است. بااین‌وجود نمی‌توان بیان نمود که استفاده از آلیاژ مس ارسنیکی (یا مفرغ ارسنیکی) در این دو محوطه متداول بوده است و یا از سرب به‌عنوان افزودنی تعمدی در ترکیب استفاده‌شده است. درحقیقت، هر دو این عناصر به‌عنوان ناخالصی در زمان تولید و استحصال سنگ معدن وارد ترکیب فلز/آلیاژ شده‌اند. درعین‌حال میزان بالای روی در یکی از اشیاء آنالیز شده در این پژوهش نیز نمی‌تواند بیانگر استفاده از آلیاژ برنج در آن دوران باشد؛ به این‌دلیل که اشیاء حاوی میزان بالای روی در دوران پیش‌ازتاریخ فلات ایران به‌صورت بسیار محدود و تنها در چند محوطه شناسایی‌شده‌اند (Thornton, 2002: 1451-1460; Thornton & Ehlers, 2003: 3-8; Moorey, 1964: 78). بر همین‌اساس می‌توان بیان نمود که فرآیند تولید آلیاژ مس و روی (برنج) را نمی‌توان یک فرآیند تعمدی و شناخته‌شده در عصر آهن برشمرد. درحقیقت، با توجه به مدارک و شواهد موجود امکان اثبات یا رد فرضیهٔ تولید برنج در پیش‌ازتاریخ ایران وجود ندارد و تعداد کم اشیاء مشاهده‌شده حاوی میزان بالای روی صرفاً می‌توانند نشان‌دهندهٔ وقوع یک پدیدهٔ تصادفی و تحت‌تأثیر میزان بالای روی در سنگ معدن استفاده‌شده باشند.

هم‌چنین عدم ارتباط میزان عنصر آلیاژی با گونه یا کاربرد اشیاء، موضوعی رایج در فلزگری مفرغ قلعی در پیش‌ازتاریخ ایران است. براساس نتایج مطالعات انجام‌شده برروی فناوری تولید آلیاژ مفرغ در دوران پیش‌ازتاریخ، فلزگران باستان از یک ترکیب یا آلیاژ خاص با میزان قلع مشخص برای تولید آثار مشابه استفاده نمی‌کرده‌اند که دلیل آن می‌تواند استفاده از یک روش آلیاژسازی غیرکنترلی، مانند استحصال توأم یا سمانته کردن و یا استحصال سنگ‌معدن‌های حاوی مس و قلع جهت تولید آلیاژ

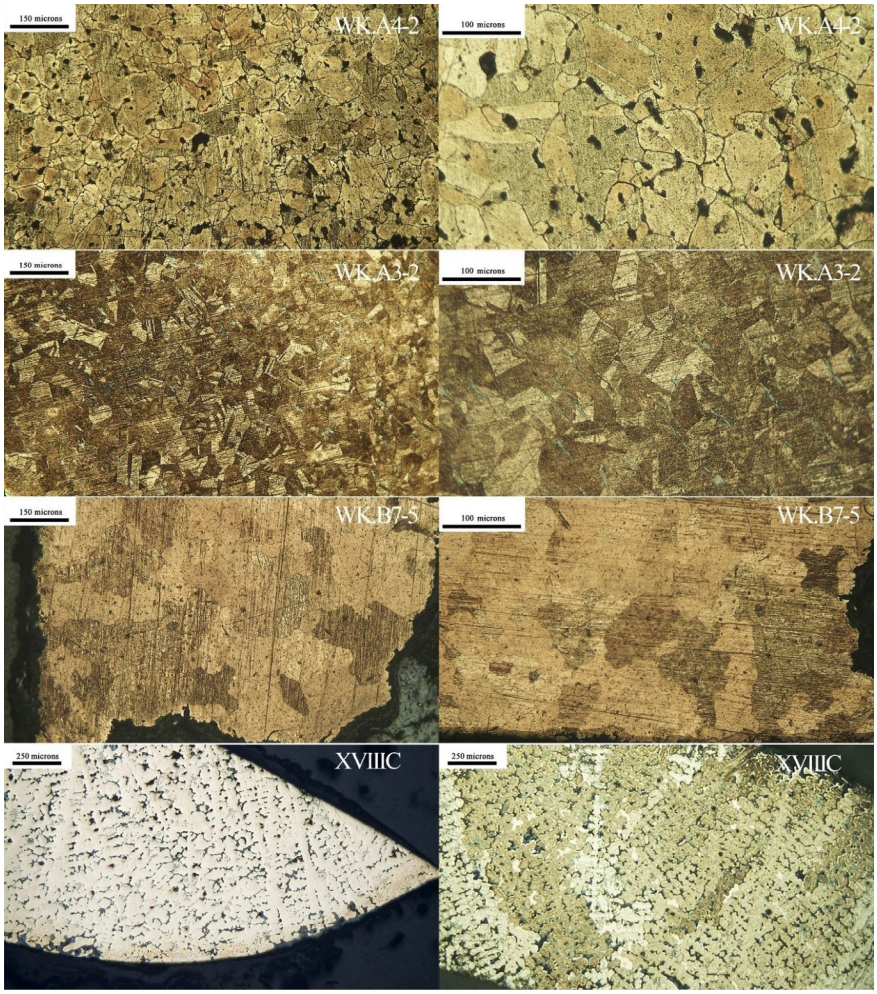
باشد (Oudbashi & Davami, 2014: 74-82; Oudbashi & Hessari, 2017: 233-249; Oudbashi & Hasanpour, 2018).

متالوگرافی

به‌منظور شناسایی و مشاهدهٔ ریزساختار اشیاء موردمطالعه، از روش متالوگرافی استفاده شد. ریزساختار شئ WK.A4-2 شامل دانه‌های هم‌محور کارشده و بازتبلور محلول جامد آلفا همراه با خطوط دوقلویی صاف درون‌دانه‌ها است (شکل ۳). وجود خطوط دوقلویی بیانگر انجام کار (چکش‌کاری) همراه با عملیات حرارتی متعاقب جهت شکل‌دهی به شمش یا قطعهٔ ریخته‌گری شده است (Scott, 1991: 7-8; Valério et al., 2010: 597-604). خطوط دوقلویی صاف بیانگر این است که تابکاری (عملیات حرارتی) آخرین مرحله در شکل‌دهی قطعه بوده است (Scott, 1991: 8). ازسوی دیگر، تشخیص این موضوع که ریزساختار حاوی دانه‌های دوقلویی درنتیجهٔ کار سرد و تابکاری به‌وجود آمده است یا کارگرم بسیار سخت است؟ چراکه می‌توان کار سرد را با تابکاری در یک عملیات (کارگرم) ترکیب نمود؛ به این‌شکل که فلز تا حد برافروختگی حرارت‌دیده و سپس تحت چکش‌کاری قرار گیرد. این‌شرایط نیز همان ساختار بازتبلوریافته دانه‌ها را فراهم می‌آورد (Scott, 1991: 7; Caron, 2004: 775-788). ریزساختار شئ WK.A3-2 نیز شامل دانه‌های کارشده و بازتبلوریافتهٔ محلول جامد آلفا و حاوی خطوط دوقلویی صاف درون‌دانه‌ها است. در این شئ اندازه دانه‌ها نسبت به شئ پیشین بسیار ریزتر است؛ هر چه تعداد دفعات چرخهٔ کار و تابکاری بیشتر باشد دانه‌بندی ریزتری در ساختار شئ دیده می‌شود، پس اندازهٔ کوچک دانه‌ها در ریزساختار نشان‌دهندهٔ تعداد چرخه‌های بیشتر کار و تابکاری است (Scott, 1991: 8). با توجه به ساختار این شئ مشخص است که مراحل ساخت شئ شامل چرخه‌های متناوب کار و تابکاری بوده است، که برای رسیدن به شکل نهایی چندین‌بار انجام‌شده است؛ به‌عبارتی شئ پس از تابکاری، به‌صورت پیوسته و مداوم تا حصول شکل نهایی تحت عملیات ترمومکانیکی شامل تابکاری و چکش‌کاری (یا کارگرم) قرارگرفته است (Scott, 1991: 8; Valério et al., 2010: 603; Caron et al., 2004).

ریزساختار شئ WK.B7-5 با دو شئ دیگر کاملاً متفاوت است. در اینجا دانه‌های هم‌محور نسبتاً بزرگ بدون وجود خطوط دوقلویی دیده می‌شوند. در این مورد، برای تبدیل قطعهٔ مفرغ ریختگی به شئ موردنظر از عملیات حرارتی استفاده‌شده است. در حقیقت، پس از ریخته‌گری به‌منظور از بین بردن ساختار جدایش‌یافته، قطعه یا شئ تحت عملیات حرارتی قرارگرفته است (Dungworth, 2013: 149-152; Scott, 2014: 67-90). این‌امر موجب‌شده است تا ریزساختار مغزه‌دار شده از بین رفته و دانه‌های هم‌محور بزرگ در ریزساختار تشکیل شوند. حضور خطوط لغزش در برخی دانه‌ها بیانگر استفاده از مقداری عملیات مکانیکی (چکش‌کاری) در مرحلهٔ نهایی شکل‌دهی و ساخت شئ است (Scott, 1991: 8-9).

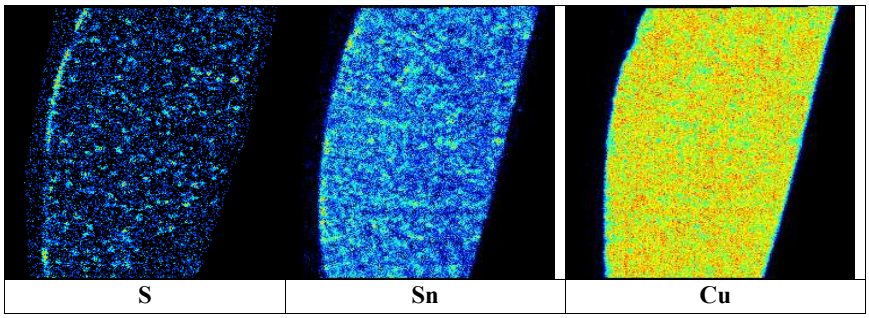
ریزساختار شئ XVIIIC نشان‌دهندهٔ جدایش و مغزه‌دارشدن بوده و شامل



شکل ۳. تصاویر متالوگرافی چهار شئ موردمطالعه، در شئ XVIIIC تصاویر قبل و بعد از اچ ارائه‌شده است، اما در دیگر اشیاء تصاویر ریزساختار اچ‌شده در بزرگ‌نمایی‌های مختلف ارائه‌شده‌اند. اچ‌شده با محلول کلرید آهن III الکلی (نگارندگان، ۱۴۰۰). ◄

ساختاری دندریتی است. ساختار دندریتی بیانگر ریخته‌گری این شئ مفرغی است. رشد دندریتی در حین فرآیند ریخته‌گری و در فرآیند انجماد در فلزات ناخالص یا آلیاژها رخ می‌دهد. در یک قطعه یا شئ که به‌آرامی در قالب سرد شده باشد، دندریت‌ها نیز به‌آرامی شکل‌گرفته و گاهی می‌توان آن‌ها را با چشم غیرمسلح نیز مشاهده نمود (Scott, 1991: 5; Caron, 2004: 775-788). سردشدن سریع‌تر موجب تشکیل دندریت‌های کوچک‌تر می‌شود. اندازهٔ دندریت‌ها در ریزساختار شئ XVIIIC بیانگر این است که زمان کافی برای سردشدن مذاب در زمان ساخت قطعه وجود داشته است. حفره‌های بین دندریتی که در تصاویر متالوگرافی به‌شکل تیره قابل‌تشخیص هستند، با خوردگی پرشده‌اند. هم‌چنین نواحی بسیار ریزی از فاز غنی از قلع هم در بین برخی دندریت‌ها دیده می‌شود که احتمالاً فاز یوتکتویید آلفا + دلتا است که در زمان انجماد و به‌دلیل عدم انحلال کامل قلع در مس تشکیل‌شده‌اند (Scott, 1991: 15; Scott, 2014: 67-90).

شکل ۴، نقشهٔ توزیع عنصری مقطع شئ XVIIIC به‌دست‌آمده با روش Micro-PIXE را برای عناصر قلع، مس و گوگرد نمایش می‌دهد. حفره‌های بین دندریتی که در تصاویر بارنگ تیره قابل‌تشخیص هستند، احتمالاً در برخی موارد با

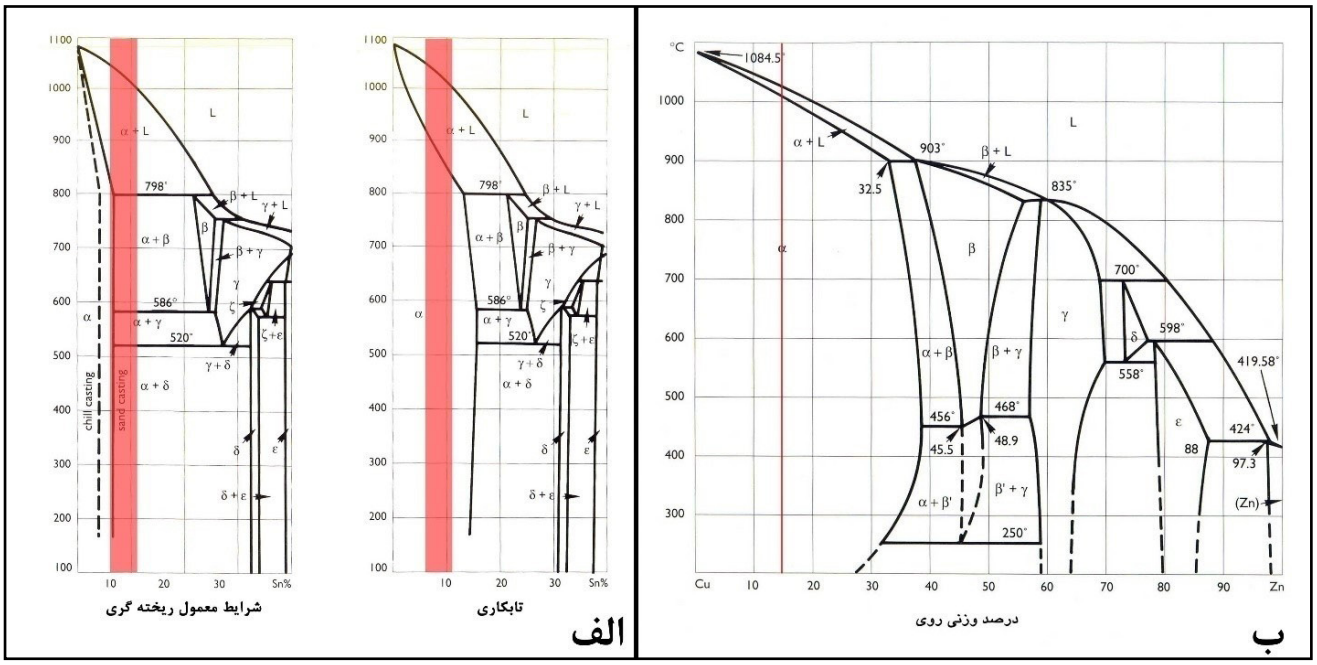


◄شکل ۴. نقشهٔ توزیع عنصری به‌دست‌آمده از روش Micro-PIXE برای عناصر موجود در شئ XVIIIC از محوطهٔ مارلیک (نگارندگان، ۱۴۰۰).

خوردگی پرشده‌اند. هم‌چنین نواحی بسیار ریزی از فاز غنی از قلع هم در بین برخی دندریت‌ها دیده می‌شود که همان‌گونه که در تصاویر متالوگرافی ذکر شد احتمالاً یوتکتوییدِ آلفا + دلتا هستند بر اثر جدایش و عدم انحلال کامل قلع در ماتریس مس، تشکیل شده‌اند.

حضور گوگرد می‌تواند به‌دلیل وجود آخال‌های سولفیدی باشد که معمولاً در ریزساختار اشیاء مفرغی عصر آهن مشاهده می‌شوند و نشان‌دهندهٔ استفاده از سنگ معدن‌های سولفیدی مس (برخی مواقع در کنار سنگ معدن‌های اکسیدی مس) به‌عنوان مادهٔ اولیه یا سنگ معدن جهت استحصال مس است (Oudbashi & Davami, 2014: 74-82; Oudbashi & Hessari, 2017: 233-249; Oudbashi & Hasanpour, 2018: 1443-1458; Oudbashi et al., 2013: 147-174). شکل ۵-الف نمودارهای سیستم مس-قلع را در شرایط ریخته‌گری معمولی و تابکاری نمایش می‌دهد (Scott, 1991: 123; Hanson, 1951). محدود میزان قلع اندازه‌گیری شده در سه شئ مفرغی به رنگ قرمز برروی دو نمودار مشخص‌شده است. براساس نمودارها می‌توان بیان نمود که در شرایط ریخته‌گری احتمال تشکیل فاز غنی از قلع یوتکتوییدِ آلفا + دلتا همراه با محلول جامد آلفا وجود دارد. ازسوی دیگر، براساس نمودار شرایط تابکاری، در صورت انجام تابکاری برروی قطعهٔ مفرغی ریختگی در محدودهٔ ترکیبی مشابه با اشیاء آنالیز شده، شرایط به‌سوی از بین رفتن فاز یوتکتوییدِ و یکنواخت‌شدن ماتریس فلزی (محلول جامد آلفا) پیش خواهد رفت. این دو موضوع به‌خوبی در ریزساختار اشیاء مفرغی محوطه‌های مارلیک و ورکبود قابل‌مشاهده است. در مهرهٔ مفرغی محوطهٔ مارلیک (XVIIIC)، ساختار دندریتی مغزه‌دار شدهٔ محلول جامد آلفا و فاز بین دندریتی یوتکتوییدِ قابل‌مشاهده هستند؛ درحالی‌که در دو شئ مفرغی محوطهٔ ورکبود (WK.A3-2 و WK.B7-5) به‌دلیل انجام عملیات حرارتی (تابکاری)، دانه‌های بازتبلوریافتهٔ محلول جامد آلفا تشکیل‌دهندهٔ ساختار این اشیاء هستند.

هم‌چنین، نمودار ارائه‌شده در شکل ۵-ب نشان‌دهندهٔ نمودار تعادلی مس-روی است که میزان روی اندازه‌گیری شده در شئ WK.A4-2 محوطهٔ ورکبود برروی آن مشخص‌شده است (Scott, 1991: 131). براساس نمودار فاز اصلی و تنها فاز تشکیل‌دهندهٔ ریزساختار محلول جامد آلفا است که براساس مطالعات متالوگرافی نیز تأیید شده است. ریزساختار این شئ شامل دانه‌های بازتبلوریافتهٔ محلول جامد



▲ شکل ۵. الف) نمودارهای فازی نیمه‌تعادلی مس-قلع در شرایط معمول ریخته‌گری و شرایط تابکاری (Scott, 1991: 123; Hanson et al., 1951)، ب) نمودار فازی تعادلی مس و روی (Scott, 1991: 131)، میزان قلع و روی اندازه‌گیری شده در اشیاء موردمطالعه برروی نمودارها مشخص‌شده‌اند. نمودار الف به‌خوبی بیانگر شکل‌گیری محلول جامد آلفا در شرایط تابکاری و احتمال تشکیل یوتکتوییدِ آلفا + دلتا در شرایط ریخته‌گری در این میزان از قلع است. ازسوی دیگر نمودار ب، نشان می‌دهد که ساختار شئ حاوی میزان بالای روی تنها شامل محلول جامد آلفا است. درحقیقت، مشاهدات متالوگرافی تا حد زیادی با تئوری‌های موجود در متالورژی مطابقت دارند (نگارندگان، ۱۴۰۰).

آلفا است که به‌دلیل انجام تابکاری حاوی خطوط دوقلویی هستند. با توجه به قابلیت انحلال بالای روی در مس، امکان تشکیل فازهای بین فلزی دیگر در این شئ وجود نداشته و احتمالاً پس از ریخته‌گری آلیاژ و تولید شمش یا قطعهٔ اولیه نیز ریزساختار شامل دندریت‌های محلول جامد آلفا بوده است. بر این‌اساس می‌توان بیان نمود که نتایج آنالیز شیمیایی و ریزساختاری چهار شئ متعلق به عصر آهن به‌خوبی با نمودارهای فازی موجود مطابقت داشته و نشان‌دهندهٔ فرآیند تولید و شکل‌دهی اشیاء موردمطالعه هستند.

نتیجه‌گیری

مطالعهٔ روش تولید و ترکیب آلیاژ در تعدادی از اشیاء فلزی عصر آهن ایران (۱۵۰۰-۵۵۰ پ.م.) با استفاده از روش‌های آنالیز شیمیایی و میکروسکوپی انجام شد. اندازه‌گیری ترکیب عنصری با استفاده از روش Micro-PIXE نشان‌داد که ترکیب سه شئ شامل آلیاژ دوجزئی مس و قلع است که نشان‌دهندهٔ استفاده از آلیاژ مفرغ قلعی در تولید این اشیاء است. میزان قلع در ترکیب این اشیاء متفاوت است که نشان‌دهندهٔ عدم استفاده از عملیات کنترل‌شدهٔ آلیاژسازی است. بر این‌اساس و هم‌چنین نتایج موجود از مطالعات آزمایشگاهی برروی اشیاء دو گورستان ورکبود و مارلیک (و هم‌چنین مطالعات دیگر انجام‌شده برروی فلزگری آلیاژهای مس در عصر آهن) می‌توان نتیجه گرفت فلزگران عصر آهن الگوی مشخصی در آلیاژسازی مفرغ برحسب نوع و ماهیت ظاهری (گونه‌شناسی) اشیاء تولیدشده نداشته‌اند. دیگر عناصر در ترکیب این آلیاژها به میزان کم و به‌عنوان عناصر فرعی شناسایی‌شده‌اند. عدم وجود میزان قابل‌توجه عناصر فلزی دیگر می‌تواند به‌دلیل عدم وجود آن‌ها به‌میزان قابل‌توجه در ترکیب سنگ معدن اولیه و نیز عدم افزودن آن‌ها به‌شکل

تعمدی به آلیاژ باشد. تنها در ترکیب شئ WK.A4-2 مقدار ۱۴٪ روی مشاهده‌شده می‌تواند بیانگر تولید تصادفی آلیاژ برنج باشد، به این‌دلیل که تنها تعداد کمی اشیاء تولیدشده از آلیاژ مس و روی در پیش‌ازتاریخ ایران مشاهده‌شده است. مطالعات ریزساختاری و متالوگرافی اشیاء موردمطالعه به‌خوبی نشان‌دهندهٔ روند تولید و شکل‌دهی اشیاء مطالعه شده است. ریزساختار اشیاء مطالعه شده تاحدی با یکدیگر متفاوت بوده و بیانگر استفاده از روش‌های متنوع تولید و شکل‌دهی شامل ریخته‌گری در قالب، عملیات حرارتی و هم‌چنین چکش‌کاری جهت ساخت و شکل‌دهی این اشیاء تزئینی بوده است. درمجموع می‌توان بیان نمود که تولید اشیاء آلیاژ مس در عصر آهن ایران بیشتر شامل استفاده از مفرغ قلعی و کاربرد روش‌های مختلف ساخت و شکل‌دهی بوده است. درحقیقت، فلزگران در عصر آهن با استفاده از روش‌های غیرکنترلی سعی در تولید آلیاژ مفرغ قلعی نموده و به‌خوبی از روش‌های مختلف فلزکاری برای تولید و ساخت اشیاء متنوع استفاده می‌نموده‌اند. مشاهدهٔ یک شئ حاوی میزان بسیار زیاد روی و میزان بسیار کم قلع در اشیاء محوطهٔ ورکبود در نوع خود منحصربه‌فرد و مهم است به این‌دلیل که پیش‌ازاین تنها چندمورد اشیاء حاوی روی در مجموعهٔ موزه آشمولین آکسفورد شناسایی‌شده بودند و این شئ تنها موردی از اشیاء حاوی میزان بالای روی در عصر آهن غرب ایران است که از کاوش‌های باستان‌شناسی به‌دست‌آمده است. نتایج آنالیز سه شئ دیگر، درحقیقت تأییدکنندهٔ نتایج مطالعات پیشین هستند و درعین‌حال مقایسهٔ این نتایج به‌خوبی روند فلزگری آلیاژ مفرغ قلعی در عصر آهن ایران را نمایش می‌دهد. توسعهٔ مطالعات آزمایشگاهی برروی اشیاء متنوع متعلق به عصر آهن می‌تواند موجب گسترش دانش موجود و شناخت بهتر فرآیندها و فنون استفاده‌شده توسط فلزگران باستان درزمینهٔ تولید اشیاء منحصربه‌فرد فلزی گردد.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از آقای دکتر محمدرضا کارگرفرد (رئیس سابق موزه ملی ایران)، آقای دکتر جبرئیل نوکنده (رئیس فعلی موزه ملی ایران) و آقای یوسف حسن‌زاده (مدیر امور پژوهشی موزه ملی ایران) به‌خاطر کمک در دسترسی به اشیاء و نمونه‌برداری سپاسگزاری می‌نمایند.

پی‌نوشت

1. Belgian Archaeological Mission in Iran
2. Proton Induced X-ray Emission Spectroscopy
3. Trace Element
4. Vatandoost-Haghighi
5. Tylecote

کتابنامه

- اصلانی، ح.، ۱۳۷۴، «مطالعات ساختاری در ردیابی فن‌شناسی مفرغ و

فن‌شناسی عملی، حفاظت و مرمت مجسمۀ طسمه‌جان». پایان‌نامۀ کارشناسی مرمت آثار تاریخی، دانشگاه هنر، دانشکدۀ پردیس اصفهان (منتشرنشده).
- طلایی، حسن، ۱۳۸۷، عصر آهن ایران. تهران: سازمان مطالعه و تدوین کتب علوم انسانی دانشگاه‌ها (سمت).
- عودباشی، امید؛ امامی، سید محمد، احمدی، حسین؛ و دوامی، پرویز، ۱۳۹۳، «فلزگری کهن و استحصال مس در محوطۀ باستانی هفت‌تپۀ خوزستان، هزارۀ دوم قبل‌ازمیلاد». نشریۀ مهندسی متالورژی مواد، شمارۀ ۲۵ (۲)، صص: ۹۹-۱۱۲.
- عودباشی، امید؛ مرتضوی، م.؛ و حسن‌پور، عطا، ۱۳۹۱، «فرآیند چکش‌کاری-تابکاری متناوب در ساخت گل‌میخ‌های کوچک مفرغی باستانی متعلق به لرستان». دانشکدۀ مهندسی متالورژی و مواد، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران.
- نگهبان، عزت‌الله، ۱۳۷۸، حفاری‌های مارلیک. جلد اول، چاپ اول، تهران: سازمان میراث‌فرهنگی کشور.
- یداللهی‌هفشجانی، عاطفه؛ بخشنده‌فرد، حمیدرضا؛ و ایروانی‌قدیم، فرشید، ۱۳۹۵، مطالعۀ آلیاژ و روش ساخت النگوهای اقوام مهاجر اوراسیا؛ نمونۀ موردی: النگوهای به‌دست‌آمده از کورگان هشت جعفرآباد». مطالعات باستان‌شناسی، شمارۀ ۸ (۱)، صص: ۱۹۱-۲۰۴.

- Aslani, H., 1995. “Structural analysis for study of bronze technology and practical study and conservation of Tasmeh Jan ram”. BSc thesis of Conservation of Historic Objects, University of Art (Unpublished), (In Persian).

- Caron, R. N.; Barth, R. G. & Tyler, D. E., 2004, “Metallography and microstructures of copper and its alloys”. *ASM Handbook 9: Metallography and Microstructures,* ASM International, Materials Park, OH, Pp: 775-788.

- Chase, W. T., 1994, “Chinese bronzes: casting, finishing, patination, and corrosion”. In: Scott DA, Podany, J., Considane, B. B. (eds.), *Ancient and Historic Metals: Conservation and Scientific Research*. The Getty Conservation Institute, Los Angeles

- Danti, M. D., 2013, “The Late Bronze and Early Iron Age in northwestern Iran”. In: Potts D. T. (ed.), *The Oxford handbook of ancient Iran*. Oxford University Press, Oxford, Pp: 327–376

- Dungworth, D., 2013, “An Experimental Study of Some Early Bronze Smithing Techniques”. In: *Accidental and Experimental Archaeometallurgy*, D. Dungworth & R. C. P. Doonan, Eds., Vol. HMS Occasional Publication 7, Historical Metallurgical Society, London, Pp: 149-152.

- 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*, No. 41, Pp: 31-57.

- Haerinck, E. & Overlaet, B., 2004, *The Iron Age III graveyard at War Kabud, Pusht-i Kuh, Luristan, Luristan Excavation Documents V, ActaIranica 42*, troisiemeserie, vol. XXVII, Leuven.

- Haerinck, E., 1988, "The Iron Age in Guilan: Proposal for a Chronology". In: *Bronzeworking Centers of Western Asia, c. 1000 B.C.-539 B.C.,* London, Pp: 63-78.

- Hanson, D. & Pell-Walpole, W. T., 1951, *Chill Cast Tin Bronzes*. Arnold, London.

- Hassanzadeh, Y. & Curtis, J., 2018, "Western Iran in the Iron Age". In: *I am Ashurbanipal: King of the World, King of Assyria,* G. Brereton (Eds.), Thames & Hudson, Pp: 166-179.

- Johansson, S. A. E.; Campbell, J. L. & Malmqvist, K.G., (Eds.), 1995, *Particle-Induced X-ray Emission Spectrometry (PIXE)*. John Wiley and Sons INC., New York.

- Malmqvist, K. G., 1996, "Particle-Induced X-Ray Emission — A Quantitative Technique Suitable for Microanalysis". In: Benoit, D., Bresse, J. F., Van't dack, L., Werner, H., Wernisch, J., (eds), *Microbeam and Nanobeam Analysis. Mikrochimica Acta Supplement,* Vol. 13, Springer, Vienna, Pp: 117-134.

- Moorey, P. R. S., 1982, "Archaeology and Pre-Achaemenid Metalworking in Iran: A Fifteen Year Retrospective". *Iran*, No. 20, Pp: 81-101.

- Moorey, P. R. S., 1964, "An Interim Report on Some Analyses of "Luristan Bronzes"". *Archaeometry*, No. 7, Pp: 72-79.

- Mortazavi, M.; Salehi Kakhki, A.; Golozar, M. A. & Talái, H., 2011, "Preliminary metallurgical investigation of copper-based artifacts at Tepe Sagzabad in Qazvin Plain, Iran (1500–800 BC)". *Iranian Journal of Archaeological Studies*, No. 1, Pp: 49-59.

- Muscarella, O. W., 2006, "Iron Age". In: *Encyclopedia Iranica*, Yrashater, E. (Ed.), Vol. XIII, Fasc. 6, Pp: 605-609.

- Negahban, E. O., 1989, "Pendants from Marlik". *Iranica Antiqua,* No. 24, Pp: 175-198.

- Negahban, E. O., 1983, *Metal Vessels from Marlik* (Prahistorische Bronzefunde). Abteilung II, Band 3, Munchen.

- Negahban, E. O., 1981, Maceheads from Marlik, American Journal of Archaeology, 85/4, 367-378.

- Negahban, E. O., 1977, "Seals of Marlik, Marlik". *Journal of Institute and Department of Archaeology*, No. 2, Pp: 2-25.

- Negahban, E. O., 1999. “Excavations at Marlik”. Tehran, ICHO, (In Persian).

- Oudbashi, O., 2019a, “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, Sanandaj, Pp: 206-219.

- Oudbashi, O., 2019b, “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. & Mishmastnehi, M., 2020, “Archaeometallurgy of copper in the Middle Elamite period of southwestern Iran: Analytical investigation of various parts of the copper production in Haft Tappeh”. *Journal of Archaeological Science: Reports,* No. 30, Pp: 102-216.

- Oudbashi, O.; Mortazavi, M. & Hasanpour, A., 2012, “Alternating Forging-Annealing Operation in Manufacturing Ancient Bronze Small Shield Pins from Luristan”. *Sixth Join Conference of Metallurgical Engineers Society and Foundry Society of Iran,* University of Tehran, 2012, (In Persian).

- Oudbashi, O.; Agha-Aligol, Mishmastnehi, M. & Barnoos, V., 2019, “The Elamite metalworkers: multianalytical study on copper objects and ingots from second millennium BC of southwestern Iran”. *Archaeological and Anthropological Sciences*, No. 11, Pp: 2059–2072.

- 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*, No. 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*, No. 9, Pp: 233-249.

- Oudbashi, O. & Davami, P., 2014, “Metallography and Microstructure in interpretation of some archaeological Tin Bronze Vessels from Iran”. *Materials Characterization*, No. 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*, No. 48, Pp: 147-174.

- Oudbashi, O.; Emami, S. M.; Ahmadi, H. & Davami, P., 2014. "Archaeometallurgy and Smelting Technology of Copper in Haft Tappeh Ancient Site of Khuzestan, Second Millennium BC". *Journal of Metallurgical Engineering and Materials,* Vol. 25 (2), Pp: 99-112, (In Persian).

- Overlaet, B., 2013," Luristan during the Iron Age". In: Potts, D. T. (ed), *The Oxford handbook of ancient Iran*. Oxford University Press, Oxford, Pp: 377–391

- Overlaet, B., 2005, "The Chronology of the Iron Age in the Pusht-i Kuh, Luristan". *Iranica Antiqua*, No. XL, Pp: 1-33.

- Pigott, V. C., 1989, "The Emergence of Iron Use at Hasanlu". *Expedition*, No. 31, Pp: 67.

- Peregrine, P. N., 2002, "Iranian Iron Age". In: Peregrine P. N., Ember M. (eds), *Encyclopedia of Prehistory*, Springer, Boston, MA, Pp: 196-197.

- Scott, D. A., 2014, "Metallography and Microstructure of Metallic Artifacts". In: *Archaeometallurgy in Global Perspective, Methods and Syntheses,* B. W. Roberts, C. P. Thornton (Eds.), Springer, New York, Pp: 67-90.

- Scott, D. A., 1991, *Metallography and Microstructure of Ancient and Historic Metals.* Getty Conservation Institute, Los Angeles.

- Sodaei, B. & Kashani, P., 2017," Analytical Assessment of Chaltasian Slag: Evidence of Early Copper Production in the Central Plateau of Iran". *Interdisciplinaria archaeologica Natural Sciences in Archaeology*, No. 8, Pp: 137–144.

- Tala'I, H., 2009, *The Iron Age of Iran*. Theran: SAMT, (In Persian).

- Thornton, C. P., 2009, "The Emergence of Complex Metallurgy on the Iranian Plateau: Escaping the Levantine Paradigm". *Journal of World Prehistory,* No. 22, Pp: 301-327.

- Thornton C. P. & Ehlers, C., 2003, "Early brass in the ancient Near East". *IAMS,* No. 23, Pp: 3-8.

- Thornton, C. P.; Lamberg-Karlovsky, C. C.; Liezers, M. & Young, S. M. M., 2002, "On Pins and Needles: Tracing the Evolution of Copper-base Alloying at Tepe Yahya, Iran, via ICP-MS Analysis of Common-place Items". *Journal of Archaeological Science,* No. 29, Pp: 1451-1460.

- Tylekote, R. F., 1972, "A Metallurgical Examination of Some Objects from Marlik, Iran". *Bulletin of the Historical Metallurgy Group*, No. 6, Pp: 34-35.

- Vahdati, A. A., 2018, "The early Iron age in northern Khorasan". In: Lhuillier, J., Boroffka, N. (eds), *A millennium of history: The Iron age*

in southern Central Asia (2nd and 1st millennia BC), proceedings of the conference held in Berlin (June 23–25, 2014), dedicated to the memory of Viktor Ivanovich, Sarianidi, Archäologie in Iran und Turan, Vol. 17, Pp: 51-66.

- Vahdati, A. A., 2007, "Marlik and Toul-e Talish, A Dating Problem". *Iranica Antiqua*, No. 42, Pp: 125-138.

- 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". *Materials Science Forum,* No. 636-637, Pp: 597-604.

- Vanden Berghe, L., 1987, "Les pratiques funéraires à l'âge du Fer III au Pusht-i Kuh, Luristan: les nécropoles žgenre War Kabud'". *Iranica Antiqua,* No. 32, Pp: 201-266.

- Vatandoost-Haghighi, A. R., 1977, "Aspects of Prehistoric Iranian Copper and Bronze Technology". Ph.D. dissertation, Institute of Archaeology, London.