Journal of Archaeological Studies
Vol 13, Is 1 - Serial Number 25, Spring 2021

Formerly "the Journal of the Faculty of Literature and Humanities"... University of Tehran

Formation, Development and Evolutions in Metallurgy of Copper and its Alloys during the Prehistoric Period of Iran: From Copper Usage to Evidences of Brass

Omid Oudbashi [1]

(139-166)

doi 10.22059/jarcs.2020.289501.1412512
Online ISSN: 2251-9297 Print ISSN: 2676-4288-
https://jarcs.ut.ac.ir

Received: 24, december, 2017; Accepted: 10 June, 2021

The Iranian Plateau and its residents can be enumerated as one of the pioneers in progress of technology, science and knowledge in the ancient world. The development of metallurgy on the Iranian Plateau has been a topic of interest to both archaeologists and scientists for many years because of the remarkable history of the metallurgical activities in this region and concerned the wide variety of the technologies, compositions, innovations, etc. (Figure 1). Results of many investigations in metallurgy of ancient Iranian Plateau show usage of copper and its alloys in different periods of Iran history from prehistoric to Islamic era. In this paper, formation, evolutions and developments occurred in metallurgy of copper alloys have reviewed and in prehistoric period of Iran (7000-500 BC) based on archaeological and archaeometallurgical investigations. The results of analytical and archaeological studies state the first metal used in prehistory of Iranian Plateau has been copper. It is apparent that the Iranian Plateau has a significant history in the metallurgy of copper and its alloys in the prehistoric period. It has begun in the Neolithic period and during 4000 years has transformed from forming objects by hammering native copper to extensive smelting of oxidic and sulphidic ores in Chalcolithic era. The ancient metalworkers used native copper to manufacture small decorative objects, as it was observed in Ali Kosh Neolithic site (Figure 2). It was developed by shaping native copper to produce small functional objects such as objects discovered from late Neolithic sites (Figure 2). It was continued by melting native copper to cast objects. Furthermore, metallurgical processes were extended by smelting copper oxidic ores in crucibles during 5th and 4th millennium BC. In fact, the chalcolithic period (ca. 4500-3000 BC) is the period of emergence and development of smelting of oxidic and then sulphidic copper ores in small scale. There are numerous evidences of copper smelting in the chalcolithic archaeological sites such as Qabristan, Tal-i Iblis, etc. showing the crucible smelting technology in different regions of the Iranian Plateau (Figure 3). This technology was developed by large-scale smelting of copper ores, as it was discovered in Arisman, near Kashan. Of course, the metallurgical technologies during the late chalcolithic period (ca. 3500-3000 BC), is a mixture of crucible smelting and furnace smelting (Figure 4). It is worth noting that the main metallic composition in the Chalcolithic period is arsenical copper that may has been produced accidentally by smelting As-bearing copper ores leading to obtain metallic copper with significant amounts of arsenic (Figure 5). Nevertheless, some evidences of intentional arsenical copper production have been found during late Chalcolithic and early Bronze Age archaeological sites, such as Arisman.

The third millennium BC was occurred with occurrence of a new alloy, tin bronze. Early evidences of this technology was observed in western Iran, Luristan at the beginning of the third millennium BC. Some tin bronze objects with significant amounts of tin were detected among

1. Corresponding Author Email: o.oudbashi@aui.ac.ir.
Associate Professor, Department of Conservation of Cultural and Historical Properties, Faculty of Conservation, Art University of Esfahan, Esfahan, Iran.

copper and arsenical copper objects discovered from Early Bronze Age graveyards such as Kalleh Nisar and Bani Surmeh (Figure 6). Although, early evidences of tin bronze metallurgy have been occurred in the third millennium BC but this technology was limited for about 1000 years in western and south-western Iran. Results of analytical studies revealed that the main copper base metallurgy has been copper and arsenical copper in other regions of the Iranian Plateau during the third millennium BC. Tin bronze was emerged in central Iran during the middle and late Bronze Age (ca. 2500-1500 BC) such as evidences from Malyan (Fars). Therefore, no evidence of tin bronze has been observed in eastern Iran, even at the mid of the second millennium BC. Although tin bronze was occurred during the early Bronze Age and was spread during middle and late Bronze Age in western and central Iran, but it was the main copper-based alloy during the Iron Age of the Iranian Plateau (ca. 1500-550 BC). Results of analytical investigations states that tin bronze has been the main material in production of metallic objects at the whole of the Iranian Plateau. The ritual objects from Iron Age graveyards of western, northern and central Iran show application of tin bronze to produce these objects. The large scale tin bronze production is the Iron Age of Iran is an interesting aspect, as this alloy has been observed in different archaeological sites such as Hasanlu and Marlik (Figure 7). One of the important collections form this category are the Luristan Bronzes, the enigmatic and extraordinary metallic objects that were produced in high-quality craftsmanship and were placed in graves and sanctuaries as ritual objects (Figure 8). The results of chemical analysis on the Luristan Bronzes, as well as other tin bronze objects from Iran, shows that thy may have been produced by uncontrolled alloying methods. In fact, controlling tin content has not been an important case for ancient metalworkers during the Iron Age (and also the Bronze Age). Also, no correlation between tin content and object's typology is visible in the tin bronze objects from prehistoric Iran, that is in contrast with accent cuneiform texts from Mesopotamia. It may show that tin bronze metallurgy in the Iranian Plateau may has not been in connection with the Mesopotamian technology. Although, evidences of copper-zinc objects have been observed among the other copper based artefacts from second and first millennium BC, but it can't be stated that this material has been used as a deliberately produced metallurgical product. It is more probable that these limited examples of copper-zinc objects (probably brass) were produced by smelting Zn-bearing copper ores. Nevertheless, evidences of low-zinc objects from Tappeh Yahya (southern Iran) and Luristan shows occurrence of early brasses (probable accidentally) during the prehistoric Iran.

Results of numerous analytical studies on the prehistoric copper base metallurgy during the last decades revealed interesting aspects of this technology from about 8000 BC. It has been started by using native copper and then developed by smelting oxidic and sulphidic copper in crucibles during the Neolithic and Chalcolithic periods. Large scale smelting sites also were occurred during the late chalcolithic and early Bronze Age. Furthermore, application of different copper alloys such as arsenical copper, tin bronze and brass from Chalcolithic to Iron Age are important developments in archaeometallurgy in Iran. Totally, process of formation and development of copper metallurgy in prehistoric Iran has been introduced and revised based on technical and archaeological finds belonging a period about 6500 years (Figure 9).

Keywords: Iran, Archaeometallurgy, Native Copper, Smelting, Arsenical copper, Tin Bronze, Brass

مطالعات باستان‌شناسی، دورهٔ ۱۳، شمارهٔ ۱، بهار ۱۴۰۰ / ۱۴۱

شکل‌گیری، توسعه و تحولات فلزگری مس و آلیاژهای آن در دوران پیش از تاریخ فلات ایران: از به‌کارگیری مس تا شواهد تولید برنج

امید عودباشی[۱]

دانشیار گروه مرمت اشیاء فرهنگی و تاریخی، دانشکده مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۰

چکیده

فلزگری باستانی در ایران همواره فن و صنعتی در حال تحول بوده و ابداعات متنوعی در این حوزه رخ داده که از جنبه‌های فنی و هنری و کاربردی منحصربه‌فرد و جالب‌توجه است. در این مقاله تلاش شده تا شکل‌گیری و تحولات رخ داده در فلزگری آلیاژهای مس در دوران پیش از تاریخ ایران بر اساس یافته‌های باستان‌شناسی و مطالعات فلزگری کهن (آرکئومتالورژی) مورد مطالعه و تحلیل قرار گیرند. در این مقاله ابداعات و تحولات رخ داده در حوزه فلزگری مس و آلیاژهای آن در حدود ۶۵۰۰ سال (بین حدود ۷۰۰۰ تا ۵۰۰ ق.م) مورد معرفی فنی و باستان‌شناسی قرار گرفته‌اند. نتایج مطالعات فلزگری در ایران نشان می‌دهد که اولین فلز مورد استفاده، مس بوده است. روند استفاده از این فلز از دوره نوسنگی در فلات ایران آغاز شده و در طول چهار هزار سال از شکل‌دهی مس آزاد تا استحصال سنگ معدن‌های اکسیدی و سولفیدی در دوره مس‌سنگی ادامه یافته است. همچنین استفاده از آلیاژهای مس ارسنیکی، برنز و برنج از دوره مس‌سنگی تا عصر آهن از تحولات فلزگری مس در ایران بوده است. بر اساس نتایج ایران را می‌توان یکی از نواحی پیشرو و مهم در شکل‌گیری و توسعه فلزگری آلیاژهای مس در دوران پیش از تاریخ دانست.

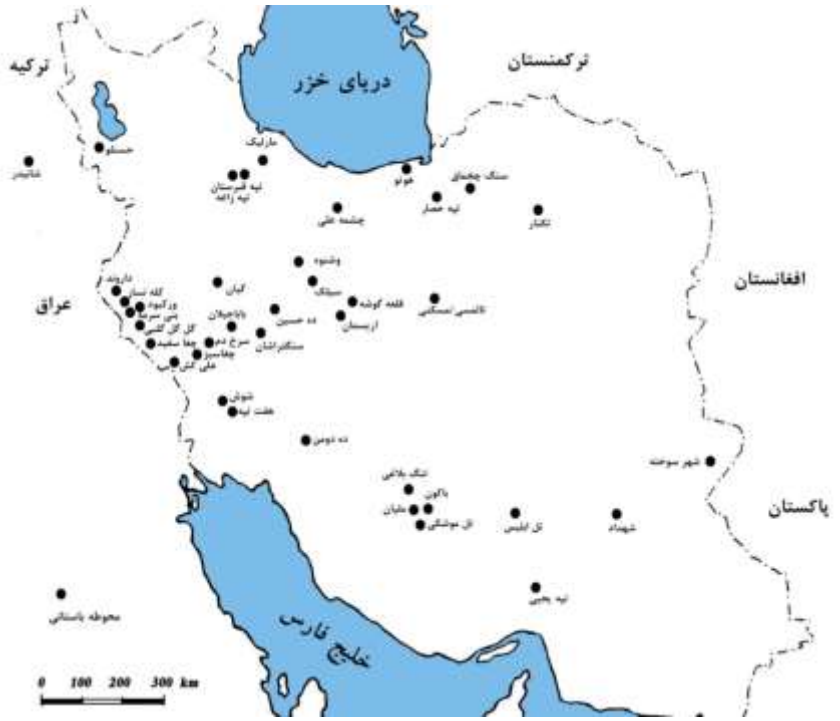
واژه‌های کلیدی: ایران، فلزگری کهن، مس آزاد، استحصال، مس ارسنیکی، برنز قلعی، برنج.

۱.مقدمه

امروزه دانش متالورژی نقش مهمی در صنایع و تولیدات از لوازم روزمره تا پیچیده‌ترین ساخته‌های بشر ایفاء می‌کند. سابقه این دانش و ابداع آن را می‌توان یکی از تحولات مهم در شکل‌گیری و توسعه فرهنگ و تمدن دانست. اهمیت شکل‌گیری و تحول دانش فلزگری در دنیای باستان که به فلزگری کهن یا آرکئومتالورژی موسوم است به حدی است که بر تقسیم‌بندی دوره‌های فرهنگی پیش از تاریخ برقرار شده در قرون ۱۹ و ۲۰ میلادی تأثیر زیادی گذاشته است (فاگان، ۱۳۸۲). این امر می‌تواند به دلیل اهمیت امروزی فلزات و دانش متالورژی و همچنین باقیماندن اشیاء و بقایای آن پس از چند هزار سال باشد. گسترش فلزگری در فلات ایران در طول ده‌ها سال همواره موضوعی جالب‌توجه برای باستان‌شناسان و پژوهشگران بوده و دلیل آن نیز گذشته شاخص فعالیت‌های فلزگری در ایران از حدود ۷۰۰۰ سال ق.م است (Thornton, 2009a; Pigott, 2004). در حقیقت تاریخ غنی فلات ایران و نیز بقایای گسترده و متنوع فلزگری و اشیاء فلزی یافت‌شده در نقاط مختلف ایران منبع مهمی جهت مطالعات باستان‌شناسی و فلزگری کهن به‌خصوص در چند دهه گذشته بوده است (Arab et al, 2004; Pleiner, 2004; Thornton et al, 2007). از نیمه دوم قرن بیستم تعداد زیادی از محوطه‌های پیش از تاریخ در ایران مورد مطالعه و کاوش قرار گرفته‌اند. بسیاری از آنها حاوی اطلاعات ارزشمندی در زمینه فلزگری شامل سرباره، کوره و بوته، قالب، اشیاء فلزی و دیگر ابزار، بقایا و محصولات مختلف استحصال، تولید و ساخت فلز و آثار فلزی متعلق به فلزگران پیش از تاریخ هستند (شکل ۱)، مانند

۱. رایانامهٔ نویسندهٔ مسئول: o.oudbashi@aui.ac.ir

فعالیت‌های انجام شده و نتایج به دست آمده از تپه یحیی کرمان (Heskel et al, 1986; Heskel et al, 1980; Thornton et al, 2004a)، تپه حصار دامغان (Thornton, 2009b)، تل ابلیس کرمان (Frame, 2004)، آثار برنزی ناحیه لرستان (Oudbashi et al, 2013; Fleming et al, 2005) و هفت تپه خوزستان (Oudbashi et al, 2009).



شکل ۱- موقعیت محوطه‌های مرتبط با فلزگری کهن در فلات ایران که در متن مقاله به آنها اشاره شده است.

Figure 1- Location of archaeological sites related to ancient metallurgy in the Iranian Plateau that are mentioned in the paper.

مطالعه بر روی بقایای فلزگری در دوره پیش از تاریخ ایران موجب شده تا امروزه بخشی از منظر فعالیت‌های فلزگری در این دوره از تاریخ فلات ایران مشخص گردد. در عین حال، این نتایج بیانگر استفاده گسترده از فلزات مختلف در تمامی نقاط فلات ایران جهت ساخت ابزار و وسایل روزمره و نیز اشیاء آیینی و تزیینی است. هدف از این مقاله نگاهی بر روند شکل‌گیری، تحولات و تداوم فلزگری مس در ایران و تغییر و تحولات و ابداعات صورت گرفته در زمینه استفاده از مس و آلیاژهای مختلف آن نیز فن‌های عمده و اصلی استخراج و استحصال فلزات بوده و محدوده زمانی پیش از تاریخ ایران بین حدود ۷۰۰۰ تا ۵۰۰ سال ق.م را دربر می‌گیرد. با توجه به استفاده از دیگر فلزات مانند طلا و نقره در کنار مس در این دوره زمانی و گستردگی مطالب در رابطه با آنها، تنها فلزگری مس و آلیاژهای آن مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- آغاز فلزگری در ایران

۲-۱- شواهد اولیه در دوران نوسنگی

مس را می‌توان اولین فلز مورد استفاده توسط انسان در اکثر نقاط دنیا برشمرد. اولین شواهد استفاده از مس به ناحیه خاور نزدیک بازمی‌گردد که شامل استفاده از مس آزاد[1] بوده است. شواهد بیانگر استفاده اولیه از مس

1. Native Copper

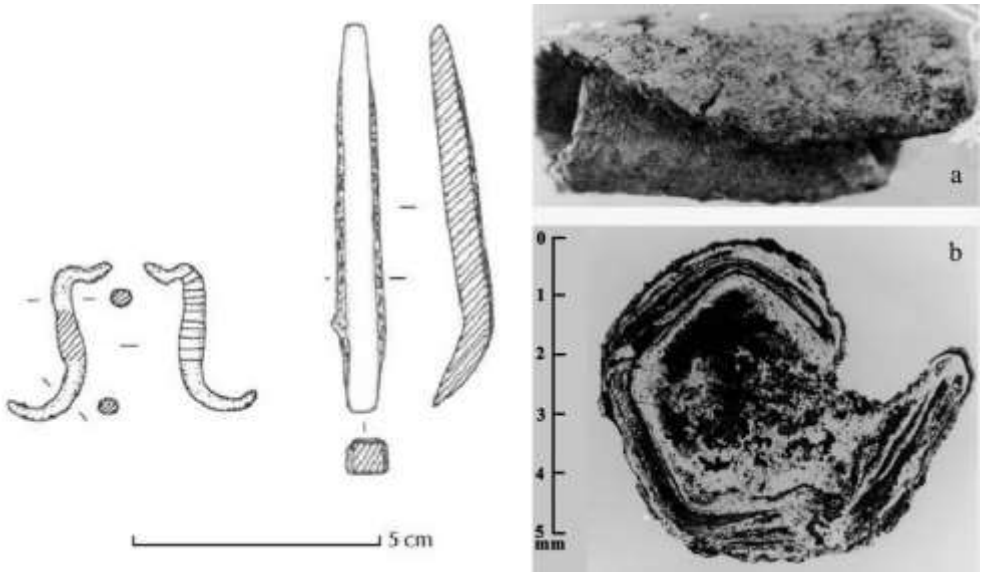
آزاد در دوره نوسنگی و مس‌سنگی در فلات ایران بوده است. از سوی دیگر، مطالعات باستان‌شناسی نشان داده که در هزاره نهم ق.م آویزهای تزیینی از کانی‌های مس ساخته می‌شده است (Pigott, 1999). اولین نمونه شناخته‌شده از این دست در خاور نزدیک، مهره‌های متعلق به هزاره نهم ق.م از غار شانیدر در کردستان عراق است (Coghlan, 1975: 40). شواهد باستان‌شناسی شروع استفاده کلی از مس را در فلات ایران حدود ۱۰۰۰۰ سال قبل، یعنی پیش از بین‌النهرین و البته حدود ۱۰۰۰ سال پس از آناتولی نشان می‌دهد (Pigott, 2004; Pigott et al, 2003a:163; Thornton, 2009a). اولین نمونه شناسایی‌شده استفاده از فلز مس در ایران، یک مهره تابیده کاملاً خورده شده از مس آزاد است که در محوطه باستانی تپه علی کش (دوره نوسنگی) در ناحیه دهلران به دست آمده است (شکل ۲). این نمونه که تاریخ آن به اواخر هزاره هشتم و اوایل هزاره هفتم ق.م باز می‌گردد توسط سیریل استانلی اسمیت[1] مورد مطالعه قرار گرفته است (Thornton, 2009a; Pigott, 2004; Smith, 1967; 1969). کشف این مهره مسی از بعضی جهات قابل‌توجه است: این شیء حدود هزار سال پس از استفاده از مس آزاد در ناحیه آناتولی ساخته‌شده، در ناحیه‌ای کشف شده که با ذخایر مس آزاد ایران فاصله قابل‌توجهی دارد، و تا حدود هزار سال بعد در دیگر نواحی فلات ایران نشانه‌ای از استفاده از مس آزاد دیده نمی‌شود. به علاوه، با توجه به وجود ابزار ساخته‌شده از ابسیدین در تپه علی کش که منشأ آن احتمالاً نزدیکی دریاچه وان در ترکیه امروزی است، احتمال ارتباط بین این محوطه و ناحیه آناتولی وجود دارد (Thornton, 2009a). یکی از منابع مهم مس آزاد در دنیای باستان معدن ارگانی[2] نزدیک به منشأ یکی از شاخه‌های غربی رودخانه دجله، در شرق آناتولی، بوده است. در ناحیه فلزگری باستانی تال‌مسی در مرکز ایران نیز رخنمون مهمی از مس آزاد دیده‌شده که در دنیای باستان ایران مورد استفاده قرار می‌گرفته است (Coghlan, 1975: 20). اهمیت دیگر این مهره را می‌توان به دلیل تاریخ آن دانست. بر اساس نتایج تاریخ‌نگاری کربن ۱۴ در محوطه تپه علی کش (Hole, 2000)، می‌توان گفت که این نمونه در حدود هفت هزار سال ق.م ساخته‌شده و در حقیقت متعلق به دوره نوسنگی است. در دوره نوسنگی استفاده از فلزات در بسیاری از نقاط جهان دیده نمی‌شود، برای مثال استفاده از فلز در دوره نوسنگی حتی در ناحیه‌ای مانند بین‌النهرین نیز دیده نمی‌شود (Thornton, 2009a). این امر بیانگر اهمیت ایران به عنوان ناحیه‌ای پیشرو در زمینه استفاده از فلزات و این شیء به دلیل تاریخ و محل کشف آن است.

۲-۲- گسترش استفاده از مس

در حدود هزاره هفتم ق.م استفاده از مس آزاد جهت ساخت ابزار در بعضی نواحی دیگر فلات ایران نیز دیده می‌شود مانند تپه زاغه قزوین در شمال ایران (Pernicka, 2004) و چغاسفید در غرب ایران (Bernbeck, 2004). این اشیاء به‌وسیله چرخه متناوبی از چکش‌کاری و تابکاری (عملیات حرارتی) بر روی قطعات مس آزاد ساخته شده‌اند. این فرایند جهت شکل‌دهی مناسب و جلوگیری از کار سخت شدن قطعه مسی انجام می‌شده است (Pernicka, 2004; Scott, 2002).

1. Cyril Stanley Smith
2. Ergani

با ورود به هزاره ششم ق.م به‌کارگیری مس آزاد گسترش می‌یابد. شواهدی از استفاده از مس آزاد جهت ساخت ابزار و اشیاء در نواحی مختلف فلات ایران در نیمه اول هزاره ششم ق.م دیده می‌شود مانند نمونه‌های یافته شده در تپه یحیی کرمان (Thornton, 2009a)، و قلاب ماهیگیری و زیورآلات کشف شده در تل موشکی فارس در جنوب ایران (Bernbeck, 2004) و تپه سیلک کاشان در ایران مرکزی (Pernicka, 2004). در کاوش‌های محوطه‌های دوره نوسنگی با سفال (۷۳۰۰ تا ۴۵۰۰ ق.م) اشیاء فلزی بیشتری در نقاط مختلف ایران کشف شده است. در کاوش‌های محوطه تل موشکی فارس، چغاسبز، غار هوتو، تپه سنگ چخماق شرقی اشیاء کوچکی مانند میخ کشف‌شده که همگی متعلق به دوره نوسنگی باسفال هستند (Helwing, 2013; Hole et al, 1969; Ghirshman, 1938; Thornton, 2010b; Thornton 2009b). همچنین، تعدادی درفش ساخته‌شده از مس آزاد از کاوش‌های محوطه تپه زاغه در دشت قزوین متعلق به اواسط هزاره ششم ق.م، قطعات ساخته‌شده از مس از محوطه چغاسفید متعلق به هزاره پنجم ق.م، و اشیاء مسی متنوعی از محوطه تپه سیلک کاشان (سیلک I) مانند میخ، درفش، فنرهای مارپیچ، متعلق به هزاره پنجم ق.م، به دست آمده است (Pigott, 1999). در محوطه تپه یحیی کرمان نیز دو درفش مسی ساخته‌شده از مس آزاد به دست آمده است (Heskel et al, 1980).



شکل ۲- راست: نما و مقطع مهره ساخته‌شده از مس آزاد متعلق به محوطه باستانی تپه علی کش دهلران (هزاره هشتم/هفتم ق.م). (Pigott, 2004; Smith, 1967). چپ: دو نمونه شیء مسی متعلق به تل موشکی فارس (Helwing, 2013).

Figure 2- Right: View and section of the bead made of native copper discovered from the Ali Kosh Archaeological site, Dehloran (8th/7th millennium BC) (Pigott, 2004; Smith, 1967). Left: two copper objects discovered from Mushki, Fras (Helwing, 2013).

آنالیز نمونه تپه علی‌کش و یک نمونه از محوطه سیلک بیانگر این مطلب بود که هر دو به‌وسیله کار سرد بر روی مس آزاد ساخته شده‌اند. سی. اس. اسمیت دو نمونه مس آزاد متعلق به تال‌مسی را نیز آنالیز و مشاهده نمود که حاوی مقدار کمی نقره آزاد همراه با مقدار بسیار کمی ارسنیک (۰/۰۸ درصد وزنی) هست (Smith, 1968).

۳- ذوب و استحصال

۳-۱- ذوب مس آزاد

احتمالاً اولین مرحله متالورژی آذری[1] در ایران، ذوب و ریخته‌گری مس آزاد بوده است. در حقیقت این مرحله پیش از استحصال فلز از سنگ معدن رخ داده است (Wertime, 1973). استفاده از مس در دوره مس‌سنگی به طرز چشمگیری نسبت به دوره نوسنگی افزایش یافت (Pigott, 1999). نمونه‌های اشیاء مسی شناسایی‌شده در مس‌سنگی ابتدایی یا انتقالی (۵۵۰۰ تا ۵۰۰۰ ق.م) معمولاً اشیایی کوچک با کاربردهای محدود هستند که در کنار اشیاء ساخته‌شده از استخوان، سفال و دیگر مواد کشف شده‌اند. البته باید خاطر نشان نمود که تنوع، ابعاد و کاربرد این اشیاء نسبت به نمونه‌های دوره نوسنگی بسیار متنوع‌تر است. افزایش استفاده از مس در ساخت اشیاء متنوع موجب شد تا در دوره مس‌سنگی ابتدایی، اشیاء متنوعی مانند درفش، میخ، سوزن، تیغه خنجر، قلم، سرتبرهای ابتدایی، سرگرزها، اشیاء تزیینی و از این قبیل ساخته شوند (Moorey, 1982). برای مثال اشیاء کشف شده از محوطه‌های مس‌سنگی ابتدایی ناحیه فارس مانند اشیاء مسی کشف شده از محوطه تل باکون (میخ، خنجر، مهر) یا ناحیه تنگ بلاغی (میخ و درفش) (Helwing, 2013; Alizadeh, 2006). نتایج مطالعات و آزمایش‌های متنوع بیانگر این مطلب است که اشیاء در دوره مس‌سنگی ابتدایی با استفاده از مس ارسنیکی ساخته شده‌اند. البته هیچ نشانه‌ای از آلیاژسازی تعمدی در این دوره در دست نیست و به نظر می‌رسد که منابع مس آزاد (و در ادامه سنگ معدن‌های مس) مورد استفاده در مس‌سنگی ابتدایی حاوی میزان قابل‌ملاحظه ارسنیک بوده‌اند. شواهدی از استفاده از ریخته‌گری جهت ساخت ابزار و اشیاء در هزاره پنجم و اوایل هزاره چهارم ق.م در ایران دیده شده است مانند محوطه باستانی سیلک (Moorey, 1969). یکی از نکات مهم در فلزگری این دوره استفاده از ذخایر مس آزاد حاوی کانی‌های مس-ارسنیک است. فلزگران کهن از ذخایر مس حاوی ارسنیک جهت ذوب و ریخته‌گری استفاده کرده و در نتیجه آن آلیاژی تصادفی (آلیاژ مس ارسنیکی) تولید می‌کرده‌اند. از سوی دیگر ذوب مس آزاد همراه با ترکیبات ارسنیدی در بوته می‌توانسته موجب این امر گردد (Pigott, 2004). ناحیه انارک در مرکز ایران را می‌توان یکی از منابع بسیار مهم حاوی مس آزاد و نیز مس دارای ارسنیک دانست. ذخایر موجود در نواحی کوهستانی تال‌مسی و مسکنی به دلیل وجود ارسنیدهای مس از اهمیت خاصی برخوردار هستند مانند آلگودونیت[2] ($Cu_{6-7}As$)، انارجیت[3] (Cu_3AsS_4) و دومایکیت[4] (Cu_3As) (Pigott, 2004; Thornton et al, 2002). یکی دیگر از نواحی مهم از نظر میزان ارسنیک، ناحیه تکنار در نزدیکی محوطه باستانی تپه حصار دامغان است. با توجه به وجود شواهد فلزگری و استحصال مس در تپه حصار، این ذخیره احتمالاً جهت تأمین مواد اولیه در این ناحیه مورد استفاده قرار می‌گرفته است (Pigott et al, 1982). در هزاره چهارم ق.م نیز ساخت اشیاء با استفاده از مس ارسنیکی رواج داشت.

1. Pyrometallurgy
2. Algodonite
3. Enargite
4. Domeykite

۳-۲- استحصال مس از سنگ معدن

مرحله بعدی متالورژی مس را می‌توان استحصال مس از سنگ معدن‌های مختلف آن دانست. استحصال سنگ معدن مس از هزاره پنجم ق.م در فلات ایران ابتدا با استفاده از سنگ معدن‌های اکسیدی مانند کوپریت و مالاکیت انجام شده است مانند تل ابلیس کرمان، تپه قبرستان قزوین، سیلک کاشان و شوش (Thornton, 2009a; Pernicka, 2004; Thornton et al, 2002; Dougherty et al, 1966).

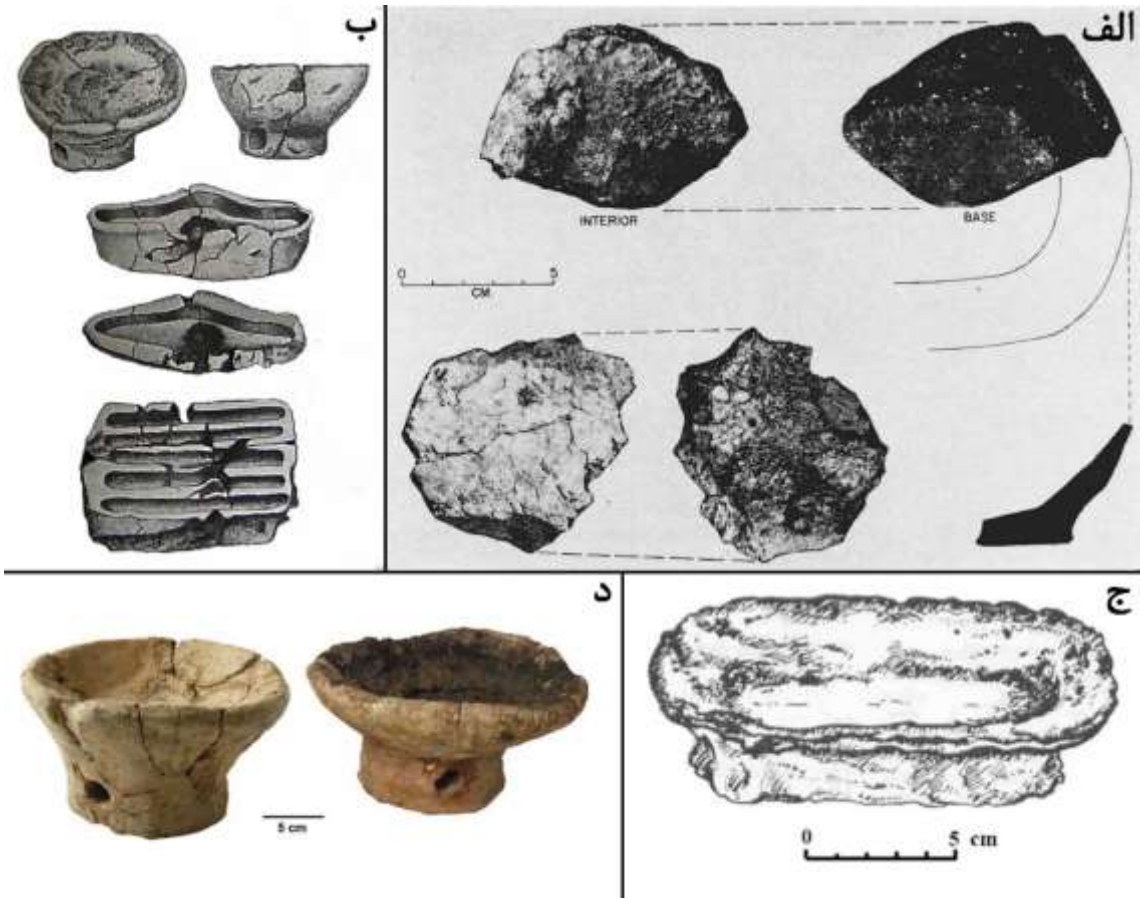
اولین شواهد استحصال مس در ایران را می‌توان متعلق به محوطه باستانی تل ابلیس کرمان دانست. این محوطه که در نزدیکی منابع متعدد مس قرار گرفته است در دهه ۱۹۶۰م توسط ژوزف ر. کالدول[1] مورد مطالعات و کاوش‌های باستان‌شناسی قرار گرفته است. در لایه‌های زیرین این محوطه (متعلق به اواخر هزاره ششم و اوایل هزاره پنجم ق.م) قطعات زیادی از بوته‌های ذوب، مقادیری مالاکیت و ذغال یافت شده است. ماهیت مواد یافت شده بیانگر فناوری نسبتاً پیشرفته مورد استفاده در تل ابلیس جهت احیاء مس از سنگ معدن اکسیدی (مالاکیت) است (Thornton, 2009a). در این محوطه از بوته‌های سفالی روباز جهت استحصال استفاده می‌شده است و پس از پر کردن بوته با مالاکیت خرد شده، آن را در یک چاله در زمین گذاشته و با ذغال پوشانده و آتش را روشن می‌کرده‌اند. نتایج مطالعات بر روی نمونه‌های بوته‌ها نشان می‌دهد که در بعضی موارد حرارتی بیش از $1150^{\circ}C$ استفاده شده و محیط استحصال در شرایط احیاء بوده است (Dougherty et al, 1966; Frame, 2004).

در کنار یافته‌های فلزگری تل ابلیس، شواهد متعددی از اشیاء فلزی و بقایای فلزگری متعلق به هزاره پنجم ق.م از محوطه‌های دیگر فلات ایران به دست آمده است. برای مثال، اشیاء به دست آمده از محوطه باستانی شوش، تپه حصار دامغان، تپه یحیی کرمان، تپه سیلک کاشان و چشمه‌علی ری. بسیاری از این نمونه‌ها هنوز مورد مطالعه دقیق قرار نگرفته‌اند و ماهیت آنها از نظر ترکیب شیمیایی و شیوه ساخت کاملاً مشخص نیست (Thornton, 2009a). در هزاره چهارم ق.م، می‌توان به شواهد فلزگری یافت شده در تپه قبرستان قزوین اشاره نمود (Thornton, 2009a). در این محوطه دو کارگاه مشخص فلزگری یافت شده است که از آنها تعدادی قالب جهت ساخت تبر و کلنگ، مقادیر قابل‌توجهی سنگ معدن اکسیدی خرد شده و آماده جهت استحصال مس، بوته و کوره به دست آمده است. این شواهد بیانگر کیفیت بالای عملیات فلزگری جهت استحصال مس و ریخته‌گری و تولید اشیاء مختلف است (Majidzadeh, 1979).

محوطه باستانی اریسمان که در ناحیه‌ای بین نطنز و کاشان قرار دارد نیز به عنوان یکی از محوطه‌های مهم و شاخص در زمینه فلزگری مس در پیش از تاریخ به شمار می‌رود. شواهد مختلف فلزگری مانند کوره، بوته، توده‌های بزرگ سرباره و اشیاء متنوع فلزی کشف شده از کاوش‌های این محوطه نشان می‌دهد که ناحیه اریسمان از هزاره چهارم تا هزاره سوم ق.م (اواسط دوره کالکولیتیک تا اوایل عصر مفرغ) یک مرکز مهم و عمده فلزگری و استحصال مس در فلات مرکزی ایران بوده است (Pernicka, 2004; Stöllner et al, 2004; Vatandoust et al, 2011). مطالعات باستان‌شناسی و فلزگری انجام شده در این محوطه توسط هیئت مشترک ایران و آلمان در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۲ موجب کشف یک ناحیه بزرگ صنعتگری پیش از تاریخ شد. در کنار آن بسیاری از محوطه‌های معدن‌کاری باستانی و نیز محوطه‌های مرتبط با فلزگری در اطراف

1. Joseph R. Caldwell

کاشان و نطنز مورد مطالعه و بررسی‌های مقدماتی قرار گرفتند مانند محوطه معدن‌کاری عصر مفرغ وشنوه بین کاشان و قم (Stöllner et al, 2004) و محوطه قلعه گوشه متعلق به اوایل هزاره چهارم ق.م (Thornton, 2009a). بر پایه نتایج، محوطه اریسمان مرکز بزرگ متالورژی مس و نقره در حدود ۶۰۰۰ سال قبل بوده است. شواهد بیانگر عملیات مختلف فلزگری کامل شامل استحصال مقدماتی مس تا ساخت اشیاء پیچیده مانند سرتبرهای دارای سوراخ دسته و اشیاء تزیینی و کاربردی دیگر است. از سوی دیگر فرایند استحصال نقره با استفاده از روش قال‌گذاری[1] نیز در این محوطه انجام می‌شده است (Vatandoust, 2004; Vatandoust et al, 2011; Chegini et al, 2000).



شکل ۳: الف- قطعاتی از بوته ذوب فلز متعاق به محوطه تل ابلیس کرمان (Dougherty et al, 1966)، ب- قطعات مختلف بوته استحصال و قالب جهت ریخته‌گری اشیاء متعلق به تپه قبرستان قزوین (Majidzadeh, 1979)، ج- طرح یک بوته کوچک ذوب فلز از محوطه تل ابلیس کرمان (Thornton, 2009a)، د- تصویر دو نمونه از بوته‌های ذوب مس از تپه قبرستان (Thornton, 2009a).

Figure 3- a- Fragments of smelting crucible discovered from Tel-i Iblis, Kerman (Dougherty et al, 1966), b- various examples of crucible and cast mold from Qabristan, Qazin Plain (Majidzadeh, 1979); c- sketching of a small crucible from Tel-i Iblis, Kerman (Thornton, 2009a), d- two examples of copper smelting/melting from Qabristan, Qazvin Plain (Thornton, 2009a).

1.Cupellation

محوطه باستانی سیلک را نیز در زمینه تولید فلز اهمیت دارد. البته میزان و گستردگی تولید فلز در سیلک با اریسمان قابل‌مقایسه نیست. سیلک را باید به عنوان یک شهر و اقامتگاه دانست که در آن استحصال و تولید مس و نقره/سرب نیز در مقیاس کوچک انجام می‌شده است (Nezafati et al, 2006).

شکل ۴- راست: کوره استحصال مس، اریسمان، حدود ۳۰۰۰ سال ق.م (Thornton, 2009a). چپ: بوته ذوب مس متعلق به محوطه باستانی اریسمان (آرشیو پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی).

Figure 4- Right: copper smelting furnace, Arisman, ca. 3000 BCE (Thornton, 2009a). Left: a crucible discovered from Arisman (Courtesy: Archive of RCCCR).

از اولین مراحل استحصال در فلات ایران (و حتی در بعضی اشیاء ساخته شده از مس آزاد)، ارسنیک نقش مهمی در فلزگری مس ایفا کرده است، این عنصر به عنوان یک اکسیدزدا[1] عمل کرده و ریخته‌گری را بهبود می‌بخشد، فلز را سخت می‌کند و بر رنگ مس تأثیر می‌گذارد (Thornton, 2009a). نتایج آنالیز نمونه‌های مختلف متعلق به دوره مس‌سنگی (حدود ۴۵۰۰ تا ۳۰۰۰ ق.م) بیانگر استفاده از آلیاژ مس ارسنیکی در ناحیه خاور نزدیک (به خصوص ایران) است. در حقیقت ظهور آلیاژ مس ارسنیکی را می‌توان مرحله انتقال بین استفاده از مس ریختگی به آلیاژ برنز دانست. ظهور این آلیاژ ابتدا با استفاده از منابع مس حاوی ارسنیک و استحصال مس از آنها صورت گرفت که موجب آلیاژسازی تصادفی شده است. با ادامه این فرایند، فلزگران باستانی احتمالاً متوجه تفاوت کیفیت و ظاهر فلز استحصال شده می‌شوند و استفاده از منابع حاوی ارسنیک به شکل گسترده‌ای صورت می‌گیرد. بر این اساس، شاید بتوان گفت که اولین تلاش‌ها در زمینه آلیاژسازی در پیش از تاریخ، تولید آلیاژ مس ارسنیکی بوده است (Thornton, 2010؛ طلایی، ۱۳۸۷). بررسی‌ها نشان‌دهنده این است که کانه‌های مخلوط یا چندفلزی توسط فلزگران پیش از تاریخ در هزاره چهارم ق.م به منظور دستیابی به مزایای منتج از تفاوت‌های فیزیکی و شیمیایی آنها مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Thornton, 2009a). در برخی منابع میزان کمتر از ۲ درصد ارسنیک را به عنوان آلیاژ تصادفی قلمداد می‌کنند. در میزان ارسنیک بیش از ۲ درصد در آلیاژ، اچ. اچ. کوگلان[2] سه روش جهت ساخت تعمدی آلیاژ مس ارسنیکی را مطرح می‌کند (Coghlan, 1975):

1. Deoxidant
2 H. H. Coghlan

- استحصال هم‌زمان سنگ معدن اکسیدی مس با زرنیخ سرخ (As_4S_4) یا زرنیخ (As_2S_3).
- استفاده از کانی‌های حاوی ارسنیک بالا مانند ارسنوپیریت یا تنانیت (مس خاکستری) مخلوط شده با سولفیدهای مس.
- افزودن زرنیخ یا زرنیخ سرخ به مس مذاب.

شکل ۵- راست: تبر ساخته‌شده از مس ارسنیکی متعلق به دوره کالکولیتیک (مس سنگی)، شوش I/II، میانه هزاره چهارم ق.م، موزه لوور (Benoit, 2004). چپ: دو حلقه مسی متعلق به محوطه اریسمان (آرشیو پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی).

Figure 5- Right: Axe made of arsenical copper from Chalcolithic period, Susa I/II, mid of fourth millennium BC, Louvre museum (Benoit, 2004). Left: two copper bracelets from Arisman (Courtesy: Archive of RCCCR).

از سوی دیگر، تورنتون[1] و همکاران (2009) در مطالعات انجام شده بر روی بقایای استحصال مس و سرباره‌های باقیمانده در تپه حصار دامغان به نوعی اشپایس[2] اشاره می‌کنند. این ماده در حقیقت ترکیبی شامل ارسنید آهن است. این ماده در حقیقت ترکیبی شبه فلزی است که محصول جانبی استحصال مس یا سرب بوده است. در واقع فلزگران در این ناحیه با تولید اشپایس آهن غنی از ارسنیک، ماده خام تولید آلیاژ مس ارسنیکی را به دست می‌آورده‌اند.

۴- ظهور و توسعه آلیاژ برنز

هزاره سوم ق.م را می‌توان آغاز مرحله جدیدی در فلزگری فلات ایران دانست. این دوره با ظهور آلیاژی جدید در تولیدات فلزی متقارن است. واژه برنز آلیاژهای مختلفی از مس را پوشش می‌دهد. در واژه‌شناسی متالورژی نوین، برنز به آلیاژهای مس با دیگر فلزات، به غیر از روی گفته می‌شود (فرهنگ، ۱۳۷۹). اما در واژه‌شناسی باستان‌شناسی و آرکئومتالورژی (فلزگری کهن)، برنز یا مفرغ به آلیاژ مس و قلع (برنز قلعی) اطلاق می‌شود. در بعضی مواقع سرب نیز به این سیستم اضافه شده و سیستم سه‌جزیی (مس-قلع-سرب) با دمای ذوب پایین‌تر را تشکیل می‌دهد. افزودن سرب موجب می‌شود تا عملیات ریخته‌گری آسان‌تر صورت گیرد و به افزایش توده در ریخته‌گری کمک می‌کند. همچنین با توجه به هزینه بالای استفاده از قلع، سرب جایگزینی مناسب برای قلع در دنیای باستان بوده است (Scott, 2002).

برنز را می‌توان اولین آلیاژ واقعی مس دانست که از افزودن قلع به مس به روش‌های مختلف جهت بالا بردن کیفیت مکانیکی و شیمیایی تولید می‌شود. اینکه مس ارسنیکی را باید اولین آلیاژ مس دانست تا حدی

1. C. P. Thornton
2. Speiss

صحیح است اما با توجه به مطالب ذکر شده در بالا، تولید و استفاده از مس ارسنیکی در حدود ۲۰۰۰ سال به عنوان فرایندی اتفاقی در فلزگری کهن رخ می‌داده است و تنها در حدود هزاره چهارم فلزگران امکان تولید عمدی این آلیاژ را یافته‌اند. تنها دلیل استفاده فلزگران کهن در هزاره‌های پنجم و اوایل چهارم ق.م از منابع حاوی ارسنیک، کیفیت مناسب‌تر فلز تولیدشده از این منابع نسبت به سنگ معدن‌های بدون ارسنیک بوده است. افزودن قلع به مس موجب بالا رفتن سیالیت مذاب و سهولت بیشتر در ریخته‌گری آن نسبت به روی و ارسنیک می‌شود. البته این امر به میزان قلع نیز بستگی دارد، اگر میزان قلع از حدود ۱۰ درصد در آلیاژ بیشتر شود، آلیاژ سخت و شکننده می‌شود (Ingo et al, 2002; Maddin et al, 1977).

آلیاژ برنز در حدود هزاره سوم ق.م در ایران غربی و بین‌النهرین شناخته شد هرچند در دیگر نواحی ایران تا حدود هزار سال بعد نیز مورد استفاده قرار نگرفت. اولین شواهد ظهور آلیاژ برنز (مس-قلع) ساخته‌شده به‌صورت تعمدی در ایران متعلق به غرب ایران است و به حدود ۳۰۰۰ سال ق.م بازمی‌گردد. اولین نمونه تاریخ‌گذاری شده، در محوطه گورستان باستانی کله نسار در پشتکوه لرستان یافت شده که به اواخر هزار چهارم ق.م بازمی‌گردد (Pigott, 2004; Fleming et al, 2005; Nezafati et al, 2006b). از دیگر نمونه‌های اولیه برنز می‌توان به اشیاء کشف شده در شوش متعلق به اواخر هزاره چهارم/اوایل هزاره سوم ق.م (Moorey, 1982; Nezafati, 2006)، یک نمونه برنزی قلعی حاوی ارسنیک از تپه گیان نهاوند متعلق به هزاره سوم ق.م (Nezafati, 2006)، یک سوزن برنزی از سیلک کاشان (Ghirshman, 1938)، هزاره سوم ق.م، و شیء ساخته‌شده از برنز کم قلع ارسنیکی از تپه یحیی از هزاره سوم ق.م اشاره نمود (Thornton et al, 2004b). با این وجود، استفاده از برنز جهت ساخت اشیاء مختلف تا اواسط هزاره دوم ق.م نیز در ایران به‌طور گسترده مشاهده نشده است. یکی از موارد جالب توجه در زمینه استفاده از آلیاژ برنز در هزاره سوم ق.م، محوطه تل ملیان در ناحیه فارس امروزی است. مطالعات انجام شده در این محوطه بر روی نمونه‌های فلزی متعلق به حدود ۱۸۰۰-۲۲۰۰ ق.م بیانگر استفاده از آلیاژ برنز جهت ساخت اشیاء با کاربردهای متنوع بوده است. البته محل دقیق ساخت این اشیاء مشخص نیست و شواهدی از فرایند تولید فلز در این محوطه و در دوره ذکر شده مشاهده نشده است اما اهمیت این محوطه به این دلیل است که جزء اولین شواهد استفاده از برنز پس از نمونه‌های اولیه اواخر هزاره چهارم/اوایل هزاره سوم ق.م در فلات ایران است (Pigott et al, 2003a).

در بسیاری از منابع آلیاژهای مس-قلع با بیش از ۲ تا ۳ درصد قلع به عنوان آلیاژهای برنز تعمدی مورد نظر قرار گیرند و میزان کمتر از آن به عنوان ناخالصی واردشده در هنگام استحصال قلمداد می‌شود. احتمالاً اولین منابع قلع مورد استفاده توسط فلزگران، منابع مس نیز بوده‌اند. به نظر می‌رسد که فلزگران باستان از جهت تولید و استحصال مس فلزی یا آلیاژ مس-ارسنیک، از منابع مس یا مس حاوی ارسنیکی استفاده کرده‌اند که برحسب اتفاق حاوی میزان قابل‌توجهی کانی قلع نیز بوده است. با استفاده از این منابع به‌طور غیر عمد آلیاژ برنز تولید شده است. به‌طور حتم محصول نهایی با آنچه از منابع اولیه دیگر به دست می‌آمده متفاوت بوده است و این شاید آغاز توجه انسان به استفاده از قلع در ساخت آلیاژ بوده است (Nezafati, 2006, Muhly, 1985).

برای تولید آلیاژ برنز در دوران باستان پنج روش زیر را می‌توان مدنظر قرار داد (Coghlan, 1975; Pigott, 2004; Oudbashi et al, 2015a):

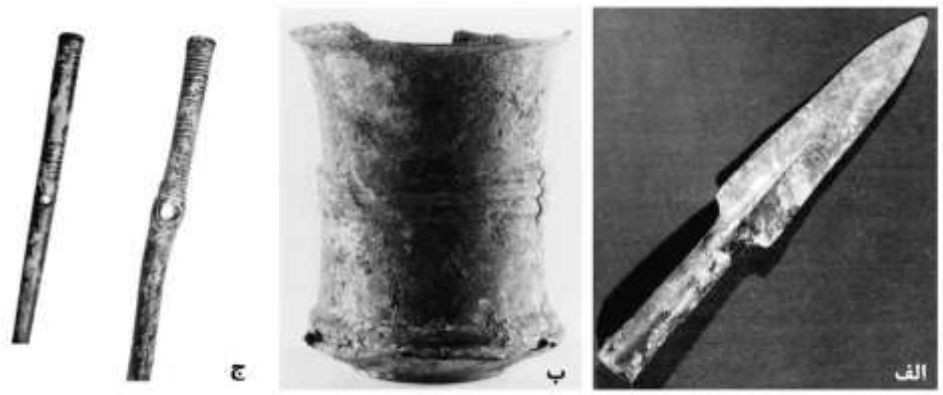
۱- ذوب مخلوطی از مس و قلع فلزی استحصال شده همراه با هم،
۲- اضافه کردن کانی کاسیتریت (SnO_2) به مس مذاب در بوته زیر پوششی از ذغال (احیاء کاسیتریت)،
۳- استحصال سنگ معدن مس-قلع طبیعی یا سنگ معدن حاوی هر دو فلز مس و قلع در ترکیب،
۴- استحصال مخلوط از کانه مس همراه با کاسیتریت (استحصال توام[1])،
۵- بازیابی و ذوب مجدد قطعات شکسته برنزی

در روش اول با مخلوط کردن قلع فلزی و مس فلزی و ذوب آنها همراه با یکدیگر، قلع به عنوان اکسیدزدا عمل کرده و همچنین سیالیت مذاب را در فرایند ریخته‌گری افزایش می‌دهد. در عین حال افزودن حدود ۵٪ قلع نقطه ذوب مس را از حدود ۱۰۸۴ °C به ۱۰۵۰°C، و افزودن ۱۰٪ به ۱۰۰۵°C و ۱۵٪ به ۹۶۰°C کاهش می‌دهد (Pigott et al, 2003a). استفاده از روش اول در تولید برنز در پیش از تاریخ ایران محتمل به نظر نمی‌رسد به دلیل اینکه در زمان کشف و استفاده اولیه از برنز در عصر مفرغ، هنوز استحصال قلع از سنگ معدن آن انجام نمی‌شده است (Coghlan, 1975). در حقیقت هنوز شواهدی از تولید قلع فلزی در پیش از تاریخ ایران مشاهده نشده است اگرچه شواهدی از این فرایند در هزاره دوم ق.م در ناحیه مدیترانه (آناتولی) مشاهده شده است (Pulak, 2000). استفاده از روش دوم در دوران باستان عملی بوده است. این روش اضافه کردن و احیاء کاسیتریت در مس مذاب در دمای حدود ۱۲۰۰°C است. این روش زمانی نتیجه خواهد داد که سطح بوته ذوب با ذغال پوشیده داشته باشد. این عملیات موجب می‌شود که شرایط محیط احیاء برای کاسیتریت و تبدیل آن به قلع فلزی در زیر ذغال به وجود آید (Pigott et al, 2003a). روش سوم نیز در دوران باستان محتمل بوده است به‌خصوص در اولین مراحل تولید برنز، احتمالاً سنگ معدن‌های حاوی مس و قلع مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Nezafati, 2006; Oudbashi et al, 2016a; Oudbashi et al, 2017a). برخی پژوهشگران و باستان‌شناسان کانی استانیت (Cu_2SnFeS_4) یا پیریت قلع را به عنوان منبعی جهت ساخت برنز معرفی کرده‌اند. با توجه به نیاز به فرایند پیچیده جهت استحصال فلز از این کانی امکان استحصال قلع به تنهایی از آن در دوران باستان بسیار غیرمحتمل به نظر می‌رسد (Coghlan, 1975). با این حال شواهدی از استحصال این کانی جهت تولید مستقیم آلیاژ برنز در پیش از تاریخ ایران (عصر مفرغ) در معدن باستانی ده حسین در غرب ایران مشاهده شده است (Nezafati, 2006). اضافه کردن سنگ معدن قلع به سنگ معدن مس و استحصال آنها همراه با هم در بوته یا کوره (روش چهارم) می‌تواند دمای عملیات استحصال را تا حدود ۲۰۰ °C پایین‌تر از دمای اولیه کاهش دهد که موجب می‌شود تا زمان حرارت‌دهی جهت استحصال نیز کاهش یابد. به استحصال سنگ معدن‌های دو فلز (در اینجا مس و قلع) با یکدیگر جهت ساخت آلیاژ (برنز) و همچنین به استحصال مخلوط سنگ معدن‌های اکسیدی و سولفیدی مس برای تولید مس فلزی استحصال توام می‌گویند (Rovira et al, 2009; Pigott et al, 2003a; Pigott et al, 2003b; Rostoker et al, 1989; Rostoker et al, 1991). این روش احتمالاً در تولید برنز برای ساخت اولین نمونه‌های اشیاء برنزی متعلق به اوایل عصر مفرغ مکشوفه از ناحیه پشتکوه لرستان نیز مورد استفاده قرار گرفته است (Thornton, 2009a; Pigott, 2004; Fleming, 2005; Nezafati et al, 2006b). استفاده از اشیاء یا قطعات برنزی شکسته و غیرقابل استفاده و ذوب مجدد آنها نیز می‌توانسته یکی از روش‌های تولید مجدد اشیاء از طریق بازیابی مواد باشد. البته اشیاء تولیدشده از این روش احتمالاً میزان قلع کمتری نسبت به ماده اولیه استفاده شده داشته‌اند

1. Co-Smelting

زیرا به دلیل اکسیداسیون قلع طی فرایند ذوب میزان قلع در محصول یا شیء نهایی، نسبت به قطعات بازیابی شده، کاهش چشمگیری می‌یافته است (Valério et al, 2010; Figueiredo et al, 2010).

به‌طورکلی تعیین و شناسایی منابع قلع باستانی یکی از سؤالات مهم در زمینه آغاز متالورژی برنز در عصر مفرغ (۱۵۰۰-۳۳۰۰ ق.م) در آسیای جنوبی و به‌خصوص ایران است (Pigott, 2004). در طول سالیان گذشته به‌طور گسترده در زمینه منابع قلع مورد استفاده در تولید میزان انبوه برنز بین اواسط عصر مفرغ (حدود ۲۵۰۰ ق.م) تا انتهای عصر آهن (حدود ۵۵۰ ق.م) در فلات ایران مواردی مختلفی ذکر شده است (Coghlan, 1975; Maddin, 1977; Pigott et al, 2003a; Muhly, 1985). افغانستان را یکی از منابع مهم قلع مورد استفاده در ایران می‌دانند. دلیل آن وجود منابع متعدد قلع در ناحیه افغانستان و همسایگی و احتمالاً روابط فرهنگی و تجاری بین فرهنگ‌های موجود در فلات ایران و افغانستان است. یکی دیگر از نواحی مورد نظر در این زمینه ناحیه فلات آناتولی (ترکیه امروزی) است. با توجه به وجود منابع قلع در این ناحیه، آناتولی را نیز می‌توان یکی دیگر از منابع بالقوه در زمینه تأمین قلع مورد نیاز جهت ساخت برنز در عصر مفرغ دانست (Coghlan, 1975; Muhly, 1985). با این وجود، جستجو در زمینه منابع قلع موجود در ایران همواره از مباحث مورد توجه باستان‌شناسان و متخصصان فنّاوری و متالورژی باستانی بوده است. باستان‌شناس بریتانیایی پی. آر. اس. موری[1] دو ناحیه را در فلات ایران به عنوان منابع احتمالی قلع معرفی کرده است: ۱) نواحی مرکزی کویر لوت در ایران مرکزی و ۲) نواحی شمال غرب ایران در آذربایجان. در مورد کویر لوت شواهد کمی در دست است و آذربایجان را نیز می‌توان به عنوان ناحیه‌ای بالقوه مدنظر قرار داد (Moorey, 1969). بعضی دیگر از محققان نیز وجود منابع قلع در ایران را ذکر کرده‌اند (Coghlan, 1975). مطالعات انجام شده بر روی منابع فلزی موجود در ایران، بیانگر وجود چهار منبع قلع در ناحیه شرق ایران در محدوده سیستان و در همسایگی افغانستان است (Vatandoust-Haghighi, 1999). البته باید توجه داشت که هیچ‌گونه شواهد دقیقی از استفاده از این منابع در فلزگری کهن در دست نیست و از سوی دیگر در محوطه عصر مفرغ شهر سوخته که در نزدیکی این منابع قرار دارد، هیچ‌گونه شواهدی از تولید آلیاژ برنز قلعی مشاهده نشده است (Thornton et al, 2004a).



شکل ۶- الف) سرنیزه کشف شده از یک قبر در محوطه عصر مفرغ کله نسار، پشتکوه لرستان، ب) ظرف مشکوفه از کله نسار، ج) دو میخ مکشوفه از محوطه عصر مفرغ بنی سرمه در لرستان. آنالیز شیمیایی بیانگر استفاده از آلیاژ برنز قلعی برای تولید این اشیاء در اوایل هزاره سوم ق.م است (Begemann et al, 2008: 53, Pl. 6).

Figure 6- a- the spearhead discovered from a grave of Kalleh Nisar, Pusht-i Kuh, Luristan. b- a vessel from Kalleh Nisar, c- two pins discovered from Bani Surmeh Bronze Age site, Luristan. Chemical analysis proved using tin bronze for production of these objects in early third millennium BC (Begemann et al, 2008: 53, Pl. 6).

1 P. R. S. Moorey

مطالعات جدید انجام شده در ناحیه ده حسین در زاگرس میانی نیز بیانگر وجود منابع قلع و مس در کنار یکدیگر است. از سوی دیگر نتایج پژوهش در این ناحیه نشان می‌دهد که این منبع احتمالاً از عصر مفرغ تا عصر آهن جهت تولید برنز به‌ویژه در ناحیه لرستان مورد بهره‌برداری قرار می‌گرفته است (Nezafati et al, 2006b; Nezafati, 2006).

همان‌طور که ذکر شد، علیرغم ظهور برنز در غرب ایران (لرستان) در ۳۰۰۰ ق.م، استفاده از قلع جهت آلیاژسازی و استفاده از برنز برای ساخت اشیاء و ابزار تا حدود ۲۰۰۰ ق.م در نواحی مختلف فلات ایران رایج نشد. بسیاری از نمونه‌های فلزات آنالیز شده متعلق به هزاره سوم ق.م در محوطه‌های مختلف فلات ایران حاوی قلع نیستند و استفاده از برنز بسیار نادر بوده است. برای مثال در حدود ۲۰۰ نمونه آنالیز شده از تپه حصار دامغان متعلق به حدود ۲۰۰۰ ق.م، تنها شش قطعه حاوی قلع شناسایی شده است (Pigott et al, 1982). تنها در مواردی مانند تل ملیان (Pigott et al, 2003a) یا تپه یحیی (Thornton et al, 2002) شاهد استفاده از برنز در حدود ۲۰۰۰ ق.م هستیم. با این حال، غرب ایران و به خصوص ناحیه لرستان از نقطه نظر تولید و استفاده از آلیاژ برنز قلعی در طول عصر مفرغ از اهمیت خاصی برخوردار است. مطالعات باستان‌شناسی و فلزگری انجام شده بر روی محوطه‌های عصر مفرغ در ناحیه لرستان بیانگر استفاده از آلیاژ برنز است. بخش زیادی از این اشیاء از درون قبرهای قبرستان‌های عصر مفرغ کشف شده‌اند. مطالعات انجام شده بر روی نمونه‌های اشیاء فلزی کشف شده از قبرستان‌های عصر مفرغ اولیه و میانی در ناحیه پشتکوه لرستان مانند کله نسار، بنی سرمه، ورکبود، داروند و گل‌گل گلبی نشان‌دهنده ساخت اشیاء با برنز بوده و میزان قلع در نمونه‌های آنالیز شده متفاوت است (Begemann et al, 2008; Fleming et al, 2005). از سوی دیگر، مطالعات جدید بر روی اشیاء گورستان باستانی ده دومن در جنوب غرب ایران در ناحیه زاگرس مرکزی نشان می‌دهد که از آلیاژ برنز قلعی با درصد قلع متفاوت در کنار آلیاژ مس ارسنیکی جهت ساخت ظروف قرار گرفته در قبرهای عصر مفرغ اولیه و میانی (هزاره سوم ق.م) استفاده شده است (Oudbashi et al, 2016a). نتایج مطالعات بر روی اشیاء فلزی متنوعی بر روی این محوطه‌های باستانی نشان می‌دهد که استفاده از آلیاژ برنز قلعی در ناحیه غرب ایران پیش از نواحی مرکزی و شرق ایران رواج یافته است. نکته مهم دیگر در ترکیب اشیاء ساخته‌شده از آلیاژهای مس در عصر مفرغ ناحیه غرب ایران تنوع ترکیب فلز بر اساس مطالعات آماری شامل مس ناخالص، مس ارسنیکی، برنز قلعی و آلیاژ مس-ارسنیک-قلع (آلیاژ چندجزیی) به عنوان مواد مورد استفاده در تولید اشیاء فلزی است (عودباشی، ۱۳۹۶).

با آغاز عصر آهن در حدود ۱۵۰۰ ق.م، استفاده از آلیاژ برنز ادامه یافت. برنز را می‌توان آلیاژ معمول در ساخت اشیاء تزیینی و کاربردی در عصر آهن فلات ایران (۵۵۰-۱۵۰۰ ق.م) دانست (Moorey, 1982). با توجه به نتایج مطالعات باستان‌شناسی استفاده از آلیاژ برنز به خصوص در شمال، غرب و شمال غرب ایران معمول بوده و مقادیر قابل توجهی از اشیاء برنزی از محوطه‌های مختلف عصر آهن این مناطق به دست آمده است. سواحل دریای خزر در گیلان یکی از این نواحی بوده است (Haerinck, 1988). کاوش‌های انجام شده در محوطه باستانی مارلیک موجب کشف مجموعه بزرگی از آثار برنزی در گورهای عصر آهن شد. این اشیاء برنزی در کنار اشیاء طلا و نقره و نیز سفال‌های تزیینی در کنار اجساد قرار داده شده بودند. اشیاء برنزی این

مجموعه شامل اشیایی مانند ظروف لوله‌دار، مجسمه‌های حیوانات، شمشیر، خنجر و ... هستند (نگهبان، ۱۳۷۸). مطالعات آزمایشگاهی نسبتاً گسترده‌ای بر روی اشیاء فلزی به دست آمده از گورستان عصر آهن مارلیک انجام شده است (Vatandoust-Haghighi, 1977; Tylecote, 1972; Oudbashi et al, 2015a). نتایج این آزمایش‌ها بیانگر تولید اشیاء متنوع با استفاده از آلیاژ برنز قلعی است. میزان قلع در اشیاء مختلف متفاوت بوده و بین حدود ۲ تا ۱۳ درصد متغیر است. نکته جالب توجه این است که در برخی نمونه‌ها میزان عناصری مانند ارسنیک و سرب بیش از یک درصد وزنی گزارش شده است که نشان می‌دهد آلیاژ اصلی مورد استفاده در تولید اشیاء مکشوفه از گورستان مارلیک آلیاژ دو جزیی برنز قلعی بوده است (Vatandoust-Haghighi, 1977; Oudbashi et al, 2017a) و تنها در یک مورد از مس تقریباً خالص برای ساخت شیء استفاده شده و ترکیب شامل مس همراه با عناصر دیگر به عنوان ناخالصی است (Vatandoust-Haghighi, 1977).

شکل ۷- راست: یکی از ظروف برنزی لوله‌دار مکشوفه از مارلیک که حاوی نقش برجسته چند شیر است (نگهبان، ۱۳۷۸). چپ: شیر برنزی کشف شده از محوطه عصر آهن حسنلو (عکس از محسن چاره ساز).

Figure 7- Right: a spouted vessel from Marlik with decorative reliefs of lions (Negahban, 1999). Left: a bronze statues of lion discovered from Hasanlu Iron Age site (Courtesy: Mohsen Charesaz)

در شمال غرب ایران نیز در عصر آهن، شواهد بسیاری از کاربرد برنز در ساخت اشیاء تزیینی و آیینی مشاهده شده است. برای مثال در کاوش‌های محوطه معروف عصر آهن حسنلو در جنوب دریاچه ارومیه، بیش از ۲۰۰۰ شیء برنزی و مسی به دست آمده است. بسیاری از این اشیاء به روش‌های مختلف تزیین شده‌اند. از سوی دیگر، اشیاء دوفلزی[1] متعددی نیز در این مجموعه کشف شده است که با استفاده از برنز و آهن ساخته شده‌اند مانند خنجرهایی با تیغه آهنی و دسته برنزی و میخ‌های آهنی با سر شیر ساخته‌شده از برنز (Pigott 1990; Thornton et al 2011).

یکی از نواحی بسیار مهم در فلزگری عصر آهن در ایران، ناحیه جغرافیایی لرستان است. البته این ناحیه جغرافیایی پیش از این دوره نیز از نظرگاه تحولات فلزگری بسیار مهم بوده است. مطالعات انجام شده در نواحی مختلف لرستان در محوطه‌های پیش از عصر آهن نیز بیانگر توسعه صنعت فلزگری در این ناحیه بوده است (Moorey, 1969). لرستان از دیدگاه جغرافیایی و در متون باستان‌شناسی ناحیه مرکزی غرب فلات ایران (زاگرس مرکزی) بوده و به دو بخش پشتکوه (ایلام امروزی) و پیشکوه (لرستان امروزی) تقسیم می‌گردد.

1. Bi-metallic

مجموعه بزرگ آثار برنزی به دست آمده از این ناحیه بـه برنزهـای لرسـتان معـروف اسـت. ایـن اصـطلاح بـه مجموعه‌ای از اشیاء برنزی تزیینی با سبکی خاص و محلی منسوب می‌شود که متعلق به محدوده زمـانی عصـر آهن ایران (حدود ۱۳۰۰ تـا ۶۵۰ ق.م) هستند (Overlaet 2005; 2004). کشف آثار برنزی عصر آهـن در لرسـتان بیشتر حاصل مجموعه وسیعی از فعالیت‌های غیرعلمی و قاچاق اشیاء عتیقه در حدود ۱۹۲۰ تا ۱۹۳۰ میلادی بوده است و به همین دلیل تا چند دهه بعد شناخت دقیقی از محتوای باستانی، تاریخ و فنّاوری ایـن مجموعـه نفیس حاصل نشده بود. در حال حاضر در بسیاری از موزه‌های ایران و جهان، آثار متنوعی از مجموعه برنزهـای لرستان موجود دارد که بخش عظیمی از آنها از طریق حفاری‌هـای قاچـاق، غیرقـانونی و غیرعلمـی بـه دسـت آمده‌اند و منشأ و محل کشف آنها مشخص نیست (Overlaet, 2006; 2004; Muscarella, 1990). با گسترش مطالعات باستان‌شناسی در ناحیه لرستان و به‌خصوص کاوش‌ها و مطالعات انجام‌شده توسـط هیئـت هلمـز بـه سرپرستی اریک اف. اشمیت در محوطه سـرخ‌دم (Schmidt et al, 1989)، هیـأت باسـتان‌شناسـی بلژیکـی در ایران (BAMI) به سرپرستی لویی واندنبرگ[1] در تعداد زیادی از محوطه‌ها و گورستان‌هـای عصـر آهـن ناحیـه پشتکوه (ایلام امـروزی) (Overlaet, 2005) و مطالعـات جدیـد انجـام شـده توسـط باسـتان‌شناسـان ایرانـی در محوطه‌های عصر آهن پیشکوه (لرستان امروزی) مانند گورستان باباجیلان در شـمال لرسـتان (حسـن‌پـور، ۱۳۹۰؛ Hasanpur et al, 2015)، محوطه سنگتراشان در جنوب خـرم‌آبـاد (Oudbashi et al, 2013) و محوطـه عصـر مفرغ و عصر آهن دیاآردیزی مورانی در جنوب لرستان (حسن‌پور و همکاران، ۱۳۹۴؛ پالیزوان، ۱۳۹۶)، امروزه تا حـد زیادی تاریخ و منشأ باستان‌شناسی این مجموعه عظـیم مشـخص شـده اسـت. نکتـه مهـم در مـورد برنزهـای لرستان، فنّاوری آلیاژسازی و ساخت اشیاء متنوع است. برنزهای لرستان در واقـع مجموعـه‌ای متنـوع از اشـیاء تزیینی-آیینی هستند که شامل یراق و دهنه اسب دارای قطعات تزیینی صورت، سلاح و تجهیزات شامل تبـر، کلنگ، خنجر و شمشیر، دسته‌های تزیینی سنگ، پلاک‌ها و صـفحات تـزیین‌دار، جـواهرات و قطعـات آذینـی، میله‌ها و میخ‌های بلند با سر تزیینی ریخته‌گری یا چکش‌کاری شده، علم‌ها یا بت‌ها، ظروف متنوع ساخته‌شـده از صفحات فلزی و نیز اشیاء دو فلزی مانند تبرها و خنجرها با دسته برنزی و تیغه آهنـی هسـتند (Overlaet, 2004; 2006; Muscarella, 1990; 1988; Moorey, 1974; 1971). به نظر می‌رسد که ساخت اشیاء دوفلـزی در عصر آهن با توجه به آغاز استفاده از آهن در اواسط این دوره در غرب و شـمال غـرب ایـران مرسـوم شـده است. مطالعات محدودی بر روی فلزگری در ناحیه لرستان در هزاره اول ق.م انجام شده است که نشـان‌دهنـده کیفیت بالای تولید و ساخت اشیاء مختلف با استفاده از آلیاژ برنز در این دوره است. نتـایج منتشرشـده توسـط پی. آر. اس. موری بر روی اشیاء موجود در موزه آشمولین نشان می‌دهد که بیشتر نمونه‌های برنزی آنالیز شده متعلق به مجموعه برنزهای لرستان حاوی بین ۴ تا ۱۳ درصد قلع هستند. تنها در ۶ نمونه میـزان بـالاتری تـا ۱۸/۱ درصد مشاهده شده است. نتایج این آنالیزها نشان می‌دهد که تلاشی جهت رسـیدن بـه یـک اسـتاندارد یکنواخت وجود نداشته است و میخ‌ها (سنجاق‌هـا) و طلسم‌ها، که سختی و مقاومت در آنها لزوماً خواسته اصـلی نیست، میزان قلعی برابر، یا حتی بیشتر از ابزار و اسلحه‌ها دارند. دهنه‌های اسب با داشتن بین ۵ تا ۱۰ درصـد

1. Louis Vanden Berghe

قلع ترکیب ثابت‌تری را نشان می‌دهند (Moorey, 1969). در مطالعه انجام شده بر روی تعداد دیگری از اشیاء برنزی منسوب به لرستان در موزه آشمولین نیز این مورد به‌خوبی به چشم می‌خورد که درصد قلع به عنوان عنصر اصلی آلیاژساز در نمونه‌ها متغیر بوده و الگوی مشخصی را نشان نمی‌دهد (Moorey, 1964). در عین حال، عناصر دیگری نیز به عنوان آلیاژساز یا ناخالصی و در حد فرعی و کمیاب در این آنالیزها مشاهده شده‌اند که شامل، ارسنیک، سرب، نیکل، آهن، نقره و روی هستند. این عناصر در میزان نسبتاً بالا احتمالاً عمداً به ترکیب آلیاژ افزوده شده‌اند و در حد کمیاب ناخالصی‌های حاصل از فرایند ذوب و استحصال سنگ معدن بوده‌اند. آزمایش‌های انجام شده بر روی اشیاء کشف شده توسط هیأت باستان‌شناسی بلژیکی در ایران نیز بیانگر میزان متغیر قلع در نمونه‌های مختلف است. در عین حال عناصر دیگری مانند ارسنیک، آهن، نیکل و سرب نیز به عنوان عناصر ذره شناسایی شده‌اند (Fleming et al, 2005; 2006).

شکل ۸- تعدادی از اشیاء برنزی متعلق به مجموعه برنزهای لرستان موزهٔ قلعه فلک‌الأفلاک خرم‌آباد. ظرف لوله‌دار از کاوش‌های محوطه سنگتراشان کشف شده است و منشأ سه شیء دیگر مشخص نیست (عکس‌ها از امید عودباشی، مهرداد ملکزاده و آرشیو موزه فلک الافلاک).

Figure 8- Some bronze objects from the well-known collection of Luristan Bronzes, Falak-ol-Aflak museum, Khorramabad. The spouted vessel is discovered from Sangtarashan site and the provenance of others is unknown (Courtesy: Omid Oudbashi, Mehrdad Malekzadeh and Archive of Falak-ol-Aflak museum).

یکی از جدیدترین مطالعات و کاوش‌های باستان‌شناسی در ناحیه لرستان مربوط به محوطه باستانی سنگ‌تراشان است. این محوطه باستانی در ۵۲ کیلومتری جنوب شرق شهر خرم‌آباد و قرار دارد. محوطه از سال ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۰ به مدت ۶ فصل مورد کاوش قرار گرفته و اشیاء برنزی منحصربه‌فرد و متنوعی متعلق به

سبک برنزهای لرستان از این محوطه به دست آمده است (Oudbashi et al, 2013). نتایج آزمایش بر روی تعدادی از اشیاء محوطه سنگتراشان نشان می‌دهد که اشیاء از آلیاژ برنز قلعی ساخته شده‌اند. در حقیقت فرایند آلیاژسازی در این ناحیه جهت ساخت ظروف بر پایه یک سیستم دو جزیی بوده و تنها از قلع به عنوان عنصر اصلی آلیاژساز استفاده شده است و دیگر عناصر را تنها می‌توان به عنوان ناخالصی موجود در ترکیب برشمرد. در واقع میزان قلع در این نمونه‌ها نیز مانند نمونه‌های دیگر متعلق به محوطه‌های باستانی ناحیه لرستان از الگوی خاصی پیروی نکرده و نشان می‌دهد که میزان قلع افزوده‌شده به مس تحت کنترل فلزگران نبوده است. در حقیقت می‌توان نتیجه گرفت که فلزگران در ناحیه لرستان از روش استحصال توام سنگ معدن مس (احتمالاً مخلوط اکسیدها و سولفیدهای مس) و سنگ معدن قلع (کاسیتریت) استفاده می‌کرده‌اند (عودباشی و همکاران، ۱۳۸۹؛ ۱۳۹۱؛ ۱۳۹۲؛ Oudbashi et al, 2013; Oudbashi et al, 2014). از سوی دیگر، مطالعات آزمایشگاهی انجام شده بر روی تعدادی از اشیاء مکشوفه از گورستان عصر آهن باباجیلان در پیشکوه لرستان، تأییدکننده دیگر نتایج حاصله از مطالعات انجام شده بر روی برنزهای لرستان است. نتایج این مطالعات نیز بیانگر استفاده از آلیاژ برنز قلعی با میزان قلع متفاوت در تولید اشیاء متنوع تزیینی و ظروف برنزی است (Oudbashi et al, 2018; Oudbashi et al, 2016b). تولید آلیاژ برنز با میزان قلع متنوع در بسیاری از مجموعه‌های اشیاء برنزی پیش از تاریخ ایران (مانند نمونه‌های شمال غرب و غرب ایران) مشاهده شده است. این موضوع هم در اشیاء برنزی عصر مفرغ و هم در بسیاری از برنزهای عصر آهن ایران مانند برنزهای لرستان قابل مشاهده شده است. وقوع این پدیده را می‌توان به استفاده از روش‌های غیرکنترلی ذکر شده پیش از این در تولید آلیاژ مانند استحصال توام یا سمانته‌کردن مرتبط دانست. در حقیقت، هدف فلزگران باستانی در پیش از تاریخ فلات ایران تولید اشیاء برنزی با ترکیب مشابه نبوده و یا امکان انجام این فرایند در آن زمان هنوز برای فلزگران به وجود نیامده است.

۵- برنج: فناوری جدید یا آلیاژ اتفاقی؟

در بسیاری از نواحی دنیا برنج (Cu-Zn) به عنوان آلیاژی نسبتاً جدید شناخته می‌شود و استفاده گسترده از آن به دوران روم باستان در اروپا (Thornton, 2007; Center for Archaeology Guidelines, 2001) و دوره اسلامی در ایران بازمی‌گردد (احسانی، ۱۳۸۲). با این حال شواهد جالب توجهی از تولید آلیاژ برنج در خاورمیانه و ایران در پیش از تاریخ وجود دارد. تولید آلیاژ برنج به دلیل فرار شدن روی در دمای ۹۰۷ درجه سانتی‌گراد بسیار مشکل است (یعنی حدود ۱۰۰ درجه پایین‌تر از نقطه ذوب مس) و از سوی دیگر استحصال روی فلزی نیز تا حدود قرن ۱۸ میلادی انجام نپذیرفته است. روش دیگر که احتمالاً در دنیای باستان استفاده می‌شده روش سمانته کردن است (Pollard et al, 1996). البته نمونه‌هایی از اشیاء برنجی از نواحی مختلف آسیای مرکزی متعلق به پیش از هزاره دوم ق.م به دست آمده که حاوی کمتر از ۸ درصد روی بوده‌اند و احتمالاً به روش استحصال توام سنگ معدن مس و روی و به‌طور تصادفی تولید شده‌اند (Thornton et al, 2003). شواهدی از تولید آلیاژ برنج در پیش از تاریخ فلات ایران وجود دارد که با توجه به میزان روی در آنها می‌تواند بیانگر تولید تعمدی آلیاژ باشد، مانند نمونه‌های کشف شده از تپه یحیی متعلق به هزاره دوم ق.م که حاوی کمتر از ۲۰ درصد روی بوده‌اند (Thornton, 2007; Thornton et al, 2003). همچنین در تعدادی اشیاء موسوم به

برنزهای لرستان نیز میزان قابل توجهی از روی شناسایی شده است (Moorey, 1964; Northover, 1997). البته نمونه‌های متنوع دیگری از تولید و استفاده از برنج در نواحی دیگر خاورمیانه مشاهده در پیش از تاریخ مشاهده شده است (برای مطالعه بیشتر و آشنایی با نمونه‌های مطالعه شده نگاه کنید به Thornton, 2007; Thornton et al, 2003) با این حال تعداد و گستردگی نمونه‌های موجود نمی‌تواند بیانگر یک صنعت شکل‌گرفته و فرایند تولید گسترده در این ناحیه باشد با این حال وجود مقدار قابل‌توجه روی (تا ۲۰ درصد) در برخی نمونه‌ها بیانگر این مطلب است که فلزگران پیش از تاریخ احتمالاً با خواص ماده استحصال‌شده از سنگ معدنی خاص آشنا بوده‌اند و سعی کرده‌اند تا محصولی جدید با خواصی متفاوت را تولید کنند هرچند استنتاج قطعی در زمینه تولید آلیاژ مس-روی در دوران پیش از تاریخ در ایران و خاورمیانه نیازمند گسترش مطالعات فلزگری کهن و کشف نمونه‌های بیشتر از محوطه‌های متنوع‌تر است.

۶- بحث و نتیجه‌گیری

ایران سرزمینی مهم در مطالعات باستان‌شناسی است و در حدود ۱۵۰ سال گذشته مورد توجه بسیاری از باستان‌شناسان، پژوهشگران و متخصصان علوم مختلف در حوزه مطالعات باستان‌شناسی و باستان‌سنجی بوده است. در حقیقت، فلات ایران یکی از نواحی پیشرو در زمینه‌های مختلف تاریخ فناوری و تولید مواد در دوران باستان بوده است. مطالعات و پژوهش‌های گسترده تاریخ فلزگری بیانگر این مطلب است که اولین شواهد فلزگری در دنیای باستان در نواحی فلات ایران، آناتولی و قفقاز رخ داده است. از دیدگاه فلزگری، مس اولین فلز مورد استفاده توسط انسان بوده و کاربرد آن در فلات ایران به حدود ۹۰۰۰ سال قبل بازمی‌گردد. بر اساس مطالعات و مطالب ذکر شده در صفحات قبل، فلزگری مس را در پیش از تاریخ فلات ایران می‌توان به چهار دوره مشخص تقسیم‌بندی نمود:

۱. آغاز استفاده از مس آزاد جهت ساخت و تولید اشیاء کوچک و تزیینی که حد شامل دو مرحله است:
- استفاده از مس آزاد موجود در طبیعت با استفاده از چکش‌کاری قطعات کوچک مس.
- ذوب مس آزاد در بوته‌های کوچک و ریخته‌گری در قالب جهت تولید و شکل‌دهی اشیاء کوچک کاربردی و تزیینی.

۲. استحصال مس از سنگ معدن‌های آن شامل سنگ معدن‌های اکسیدی و سولفیدی شامل:
- استحصال مس در بوته‌های کوچک سفالی
- استحصال گسترده در کوره‌های ذوب سنگ معدن

۳. تولید آلیاژ برنز (مس و قلع) جهت تولید اشیاء فلزی که در ابتدا به‌صورت اتفاقی رخ داده و سپس با توسعه استفاده از برنز، به شکل تعمدی و البته با استفاده از استحصال توام سنگ معدن مس و قلع یا روش سمانته کردن انجام می‌شده است.

۴. اولین شواهد تولید و استفاده از آلیاژ برنج که می‌توانسته به‌صورت اتفاقی یا تعمدی رخ داده باشد.

شکل ۹ دوره‌های مختلف پیش از تاریخ ایران و پدیده‌های اصلی فلزگری مس در این دوران را بیان می‌کند. البته این تقسیم‌بندی کلی بوده و جزییات متنوعی مانند ابعاد و اندازه قالب‌ها و بوته‌ها، مقدار سنگ معدن استحصال‌شده، ترکیب و مقادیر عناصر آلیاژی و مواردی از این دست در روند توسعه فلزگری نقش مهمی دارند. در حقیقت، آغاز فلزگری در فلات ایران را باید در دوره نوسنگی جستجو نمود، هرچند شواهد شناسایی‌شده در مطالعات باستان‌شناسی تنها به استفاده محدود از مس آزاد جهت ساخت اشیاء کوچک و نیز ذوب مس آزاد جهت شکل‌دهی و قالب‌ریزی اشیاء تزیینی و کاربردی دلالت دارد. با این حال، عدم شناسایی گسترده محوطه‌های باستان‌شناسی به خصوص در دوره نوسنگی، کم بودن اشیاء فلزی کشف شده از

محوطه‌های این دوره و نیاز به کاوش‌های باستان‌شناسی گسترده در این دوره زمانی، موجب شده است تا نمونه‌های متنوع اشیاء فلزی دوره نوسنگی در دسترس نباشند. از سوی دیگر، تنها در برخی موارد معدود، مطالعات فنی شامل متالوگرافی و شناسایی ماهیت شیمیایی اشیاء بر روی نمونه‌های اولیه انجام شده است که خود موجب شده تا دانش فعلی در مورد فن‌های فلزگری در دوره نوسنگی بسیار محدود بوده و نیاز به مطالعات گسترده‌تر در حوزه باستان‌شناسی و آرکئومتالورژی به شدت احساس می‌گردد.

شکل ۹- روند توسعه و شکل‌گیری پدیده‌های فلزگری مس و آلیاژهای آن در پیش از تاریخ فلات ایران.

Figure 9- A schematic diagram showing the formation and development of copper base metallurgical processes in prehistory of the Iranian Plateau.

از سوی دیگر با گسترش فلزگری مس در هزاره پنجم و چهارم ق.م، شاهد استحصال مس از سنگ معدن‌های اکسیدی (مانند مالاکیت) و سولفیدی (مانند کالکوسیت و کالکوپیریت) هستیم. امکان استحصال مس از سنگ معدن موجب شد تا فلزگران در ایران، منابع گسترده مس را جایگزین منابع محدود مس آزاد نمایند. با توجه به فراوانی منابع مس در فلات ایران، این امر موجب گسترش فلزگری مس و استحصال گسترده آن شد. البته باید خاطرنشان نمود که استحصال فلز از سنگ معدن با رشد دانش فناوری آذری در فلات ایران همسو بوده است. در حقیقت، امکان ایجاد شرایط حرارتی مناسب جهت استحصال مس چه به شکل محدود در بوته‌های سفالی و چه به‌صورت گسترده در کوره به دلیل امکان تولید حرارت مناسب بوده است. با گذر زمان، در دوره مس‌سنگی شاهد شکل‌گیری مراکز مهم فلزگری و در حقیقت تجارت احتمالی فلز هستیم. محوطه‌هایی مانند شهداد کرمان، تپه قبرستان قزوین، سیلک، شوش، اریسمان و مواردی از این دست، مراکز مهم فلزگری در دوره مس‌سنگی تا اوایل عصر مفرغ هستند. نکته مهم در مورد برخی از این محوطه‌ها، نزدیکی آنها به منابع شناخته‌شده مس در ایران است. منابع مس در فلات مرکزی ایران را می‌توان شامل منابع ناحیه کرمان امروزی و منابع استفاده شده در دوران باستان در حاشیه کویر لوت مانند معادن نخلک، تال‌مسی، انارک و تکنار قلمداد نمود. نتایج مطالعات بر روی اشیاء فلزی دوره مس‌سنگی و عصر مفرغ و نیز

معادن و منابع شناخته‌شده در ایران بیانگر وجود میزان قابل‌توجه ارسنیک هم در اشیاء و هم در سنگ معدن است. در حقیقت، منابع مس استفاده شده در دوران باستان حاوی مقادیر قابل‌توجهی ارسنیک بوده‌اند و این موضوع موجب شده تا اشیاء مسی این دوره‌ها نیز حاوی میزان قابل توجهی از این عنصر باشند. در واقع، شواهد بیانگر استحصال توام ترکیبات مس و ارسنیک و تولید اتفاقی آلیاژ مس ارسنیکی بوده است که خواص مناسب‌تری از مس خالص جهت ساخت اشیاء مختلف، و به خصوص ابزار، دارد. شناسایی منابع جدید مس در اواخر هزاره چهارم و اوایل هزاره سوم قوم موجب شده تا پدیده‌ای به نام برنز یا مفرغ با عنوان آلیاژی جدید در فلزگری ایران ظاهر گردد. اولین نمونه‌های برنز را می‌توان در هزاره چهارم ق.م مشاهده نمود. احتمالاً آشنایی با خواص آلیاژ جدید به دلیل استحصال توام کانه‌های مس همراه با مقدار قابل توجهی از کاسیتریت (SnO_2) بوده است که موجب شده تا اشیاء تولیدشده از منابع مس جدید خواص متفاوتی از اشیاء ساخته‌شده از منابع کهن‌تر را برای فلزگران به نمایش بگذارند. فرایند تولید و استفاده از برنز در فلات ایران تا دوران تاریخی ادامه یافته است هرچند در طول هزاره سوم، شاهد نمونه‌های بسیار کمی از اشیاء ساخته‌شده از برنز هستیم. با این حال توسعه تولید و کاربرد برنز در ساخت اشیاء فلزی بیشتر در هزاره اول ق.م (عصر آهن) قابل مشاهده است. به عنوان مثال، تولید گسترده اشیاء برنزی در شمال، غرب و شمال غرب ایران در عصر آهن و به خصوص در ناحیه زاگرس مرکزی و لرستان امروزی بیانگر کاربرد گسترده این آلیاژ است. هرچند استفاده از برنز هم در کاربردهای روزمره و هم در ساخت اشیاء تزیینی و آیینی در عصر آهن مشاهده می‌شود.

نکته مهم در موضوع تولید برنز قلعی، منابع قلع مورد استفاده در دوران پیش از تاریخ است. هر چند بسیاری از محققان معتقدند که ایران حاوی منابع گسترده قلع است و البته نتایج مطالعات زمین‌شناسی نیز مؤید این مطلب است، اما اینکه کدام منطقه به عنوان منابع قلع در ایران مورد استفاده قرار گرفته است، هنوز یکی از پرسش‌های مهم در حوزه فلزگری کهن در ایران است. برخی شواهد نشان‌دهنده استفاده از منابع موجود در ناحیه زاگرس مرکزی در تولید اشیاء برنزی در عصر مفرغ است (Nezafati, 2006). با این وجود، منابع مورد استفاده جهت تولید برنز –به خصوص در عصر آهن- هنوز ناشناخته مانده است. با توجه به گستردگی تولید برنز در عصر آهن ایران (و نیز استفاده از قلع در دوره‌های تاریخی و اسلامی) باید منابع قلع گسترده‌تری را در فلات ایران جستجو نمود که در طول دوره‌های مختلف مورد بهره‌برداری و استحصال قرار گرفته‌اند. در بسیاری از منابع، استفاده از برنج (آلیاژ مس و روی) به دوران تاریخی و حتی دوران اسلامی در ایران نسبت داده شده است. نتایج مطالعات جدید بر روی تعدادی از اشیاء پیش از تاریخ ایران نشان‌دهنده این مطلب است که تعداد کمی اشیاء ساخته‌شده از برنج با درصدهای متغیر روی در بین اشیاء مسی و برنزی وجود دارند. برای مثال اشیاء مطالعه شده متعلق به هزاره دوم ق.م در از تپه یحیی و هزاره اول از لرستان. با این حال، نمونه‌های برنج شناسایی شده از دوره پیش از تاریخ بسیار محدود بوده و نیازمند مطالعه و آزمایش گسترده‌تر بر روی اشیاء کشف شده از محوطه‌های مختلف است. در حال حاضر، تنها می‌توان این اشیاء را حاصل تجربه‌های فلزگران در استحصال سنگ معدن‌های مس از منابع جدید دانست که به دلیل وجود ترکیبات روی، احتمالاً موجب تولید تصادفی آلیاژی جدید شده‌اند. با توجه به مطالعات انجام شده می‌توان بیان نمود که مطالعه و شناخت شکل‌گیری، توسعه و روند فلزگری کهن در پیش از تاریخ فلات ایران نیازمند انجام پژوهش‌های گسترده در حوزه‌های باستان‌شناسی، آرکئومتالورژی، آنالیزهای شیمیایی، زمین‌شناسی و

ژئوشیمی و به‌طورکلی کاربرد کلیه علوم و فنون جدید جهت دستیابی به اطلاعات جدید و جامع در حوزه فلزگری کهن در فلات ایران است.

سپاسگزاری

از همکاران و دوستان گرامی آقایان دکتر عطا حسن‌پور، دکتر مهرداد ملکزاده، محسن چاره‌ساز و مسعود دارابی جهت پیشنهادها، در اختیار قرار دادن برخی تصاویر و همچنین منابع استفاده شده در این مقاله سپاسگزاری می‌نمایم.

منابع

احسانی، محمدتقی، (۱۳۸۲)، *هفت هزار سال هنر فلزکاری در ایران*، تهران، علمی و فرهنگی.

پالیزوان، سمانه، (۱۳۹۶)، «مطالعه روش ساخت در تعدادی از اشیاء برنزی محوطه عصر آهن دیاآردیزی مورانی لرستان»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد باستان‌سنجی، دانشکده مرمت، دانشگاه هنر اصفهان.

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.

حسن‌پور، عطا، جوادی نیا، زهرا، صادقی راد، مسعود، حیدری زبیر، (۱۳۹۴)، کاوش اضطراری محوطهٔ دیاآردیزی مورانی (پل‌دختر- لرستان)، مرکز اسناد اداره کل میراث فرهنگی، صنایع‌دستی و گردشگری استان لرستان.

طلایی، حسن، (۱۳۸۷)، *عصر آهن ایران*، تهران، سمت.

عودباشی، امید، (۱۳۹۶)، «مطالعه فرایند تولید آلیاژ برنز قلعی در دوران پیش از تاریخ ایران بر اساس مطالعات آماری و تحلیل نتایج»، مجموعهٔ مقالات نخستین همایش ملی کاربرد روش های آماری در پژوهش های باستان شناسی ایران.

عودباشی، امید، امامی، سید محمدامین، دوامی، پرویز، (۱۳۸۹)، «فلزگری کهن (آرکئومتالورژی) در ناحیه لرستان: بررسی ساختاری و شیمیایی آثار برنزی محوطه باستانی سنگ‌تراشان خرم‌آباد متعلق به هزاره اول ق.م»، مجموعه مقالات چهارمین همایش مشترک انجمن مهندسین متالورژی و جامعه علمی ریخته‌گری ایران، دانشگاه علم و صنعت ایران، صص ۱۲۰۸-۱۲۱۸.

عودباشی، امید، مرتضوی، محمد، حسن‌پور، عطا، (۱۳۹۱)، «فرایند چکش‌کاری-تابکاری متناوب در ساخت گل‌میخ‌های کوچک برنزی باستانی متعلق به لرستان»، مجموعهٔ مقالات ششمین همایش مشترک انجمن مهندسین متالورژی و انجمن علمی ریخته‌گری ایران، دانشکده متالورژی دانشگاه تهران.

عودباشی، امید، حسن‌پور، عطا، ملک‌زاده، مهرداد، (۱۳۹۴)، «مطالعات آرکئومتالورژی در محوطه سنگتراشان لرستان، هزاره اول ق.م»، مجموعهٔ مقالات همایش بین‌المللی باستان‌شناسان جوان، دانشکده ادبیات و علوم انسانی و معاونت فرهنگی دانشگاه تهران، صص ۶۳۳-۶۴۴.

فاگان، برایان، (۱۳۸۲)، *سرآغاز: درآمدی بر باستان‌شناسی (اصول، مبانی و روش‌ها)*، ترجمهٔ غ. شاملو، تهران، سمت.

فرهنگ، پرویز، (۱۳۷۹)، *فرهنگ بزرگ متالورژی و مواد و ضمیمه*، تهران، دنیا.

نگهبان، عزت‌الله، (۱۳۷۸)، *حفاری‌های مارلیک*، تهران، سازمان میراث فرهنگی کشور.

Alizadeh. A. 2006. *The Origins of State Organizations in Prehistoric Highland Fars, Southern Iran, Excavations at Tall-e Bakun*, Chicago. Oriental Institute Publications 128.

Arab. R. Rehren. T. 2004. The Pyrotechnological Expedition of 1968. In *Persia's Ancient Splendour, Mining, Handicraft and Archaeology*. Stöllner. T. Slotta. R. Vatandoust. A. (eds.), Deutsches Bergbau-Museum, Bochum: 550-555.

Begemann. F. Haerinck. E. Overlaet. B. Schmitt-Strecker. S. Tallon. F. 2008. An Archaeo-Metallurgical Study of the Early and Middle Bronze Age in Luristan, Iran. *Iranica Antiqua*, XLIII: 2-66.

Benoit. A. 2004. Susa. In *Persia's Ancient Splendour, Mining, Handicraft and Archaeology*. Stöllner. T. Slotta. R. Vatandoust. A. (eds.), Deutsches Bergbau-Museum, Bochum: 178-192.

Bernbeck. R. 2004. Iran in the Neolithic. In *Persia's Ancient Splendour, Mining, Handicraft and Archaeology*. Stöllner. T. Slotta. R. Vatandoust. A. (eds.), Deutsches Bergbau-Museum, Bochum: 140-147.

Centre for Archaeology Guidelines. 2001. *Archaeometallurgy*. Jones. D. M. (Ed.), London, English Heritage.

Chegini N. N. Helwing. B. Parzinger. H. Vatandoust. A. 2004. A Prehistoric Industrial Settlement on the Iranian Plateau–Research at Arisman. In *Persia's Ancient Splendour, Mining, Handicraft and Archaeology*, Stöllner. T. Slotta. R. Vatandoust. A. (eds.), Deutsches Bergbau-Museum, Bochum: 210-216.

Chegini. N. N. Momenzadeh. M. Parzinger. H. Pernicka. E. Stöllner. T. Vatandoust. A. Weisgerber. G. 2000. Preliminary Report on Archaeometallurgical Investigations around the Prehistoric Site of Arisman Near Kashan, Western Central Iran. *Archaeologische Mitteilungen aus Iran und Turan*, 32: 281-318.

Coghlan H. H. 1975. *Notes on the Prehistoric Metallurgy of Copper and Bronze in the Old World*. Oxford: Occasional Paper on Technology 4, 2nd Edition, Pitt Rivers Museum.

Dougherty. R. C. Caldwell. J. R. 1966. Evidence of Early PyrometalIurgy in the Kerman Range in Iran. *Science*, 153: 984-985.

Ehsani. M. T. 2003. *Seven Thousand Years of Metalworking in Iran*. Elmi and Farhangi Publications [In Persian].

Fagan. B. M. 2013. *In the Beginning: An Introduction to Archaeology*. Pearson, 13th Edition.

Farhang. P. 2010. *Encyclopaedia of Metallurgy and Materials, and Supplementary Entries*. Donya Publications, Tehran [in Persian].

Figueiredo. E. Silva. R. J. C. Senna-Martinez. S. C. Araújo. M. F. Fernandes. F. M. B. Inês Vaz. J. L. 2010. Smelting and Recycling Evidences from the Late Bronze Age Habitat Site of Baiões (Viseu, Portugal). *Journal of Archaeological Science*, 37: 1623–1634.

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*, XLI: 31-57.

Fleming. S. J. Pigott. V. C. Swann. C. P. Nash. S. K. 2005. Bronze in Luristan: Preliminary Analytical Evidence from Copper/Bronze Artifacts Excavated by the Belgian Mission in Iran. *Iranica Antiqua*, XL: 35-64.

Frame. L. D. 2004. *Investigations at Tal-i Iblis: Evidence for Copper Smelting during the Chalcolithic Period*. BS thesis, Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology.

Ghirshman. R. 1938. *Fouilles de Sialk*. Paris, Librairie Orientaliste Paul Guenthner.

Haerinck. E. 1988. The Iron Age in Guilan: Proposal for a Chronology. In *Bronzeworking Centres of Western Asia 1000-539 B.C.*, Curtis. J. (ed.), London: 63-78.

Hasanpour. A. 2011. Dating of Iron Age II in Northern Luristan According to Accurate Dating of Baba Jilan Graveyard. MA Thesis, Islamic Azad University, Tehran central Branch [in Persian].

Hasanpur. A. Hashemi. Z. Overlaet. B. 2015. The Baba Jilan Graveyard Near Nurabad, Pish-i Kuh Luristan-a Preliminary Report. *Iranica Antiqua*, L: 171-212.

Hasanpour. A. Javadinia. Z. Sadeghi Rad. M. Heidari. Z. 2015. *Emergency Excavation of Dia Ardizi Moorani Archaeological Site (Pol-e Dokhtar-Lorestan)*. Archive of Cultural Heritage, Handicrafts and Tourism Organization of Lorestan province [in Persian].

Helwing. B. 2013. Early Metallurgy in Iran-an Innovative Region as Seen from the Inside. In *Metal Matters: Innovative Technologies and Social Change in Prehistory and Antiquity*, Burmeister. S. Hansen. S. Kunst. M. Müller-Scheeßel N. (Eds.), Menschen-Kulturen-Traditionen, Forschungs Cluster 2, Band 12, DEUTSCHES ARCHAOLOGISCHES INSTITUT, Berlin: 105-136.

Heskel. D. L. Lamberg-Karlovsky. C. C. 1986. Metallurgical Technology. In *Excavations at Tepe Yahya, Iran: The Early Periods*. Lamberg-Karlovsky. C. C. Beale. T. (Eds.), Cambridge: 207-214.

Heskel. D. L. Lamberg-Karlovsky. C. C. 1980. An Alternative Sequence for the Development of Metallurgy: Tepe Yahya, Iran. In *The coming of the Age of Iron*. Wertime. T. Muhly. J. (Eds.), New Haven, Yale University Press: 229-266.

Hole. F. 2000. New Radiocarbon Dates for Ali Kosh, Iran. *Neolithics*, 1: 13.

Hole. F. Flannery. K. V. Neely. J. A. 1969. *Prehistory and Human Ecology of the Deh Luran Plain: an Early Village Sequence from Khuzistan, Iran*. Memoirs of the Museum of Anthropology, University of Michigan 1, Ann Arbor.

Ingo. G. M. Angelini. E. Bultrini. G. Calliari. I. Dabala. M. de Caro. T. 2002. Study of Long-Term Corrosion Layers Grown on High-Tin Leaded Bronzes by Means of the Combined Use of GDOES and SEM+EDS. *Surface and Interface Analysis*, 34: 337-342.

Maddin. R. Wheeler. T. S. Muhly. J. D. 1977. Tin in the Ancient Near East: Old Questions and New Finds. *Expedition*, 19: 35-47.

Majidzadeh. Y. 1979. An Early Coppersmith Workshop at Tepe Ghabristan. In *Akten des VII. Internationalen Kongresses für Iranische Kunst und Archäologie*, München 7-10 September 1976, Archaeologische Mitteilungen aus Iran, 6, Berlin, Verlag Dietrich Reimer: 82-92.

Moorey. P. R. S. 1982. Archaeology and Pre-Achaemenid Metalworking in Iran: A Fifteen Year Retrospective. *Iran*, 20: 81-101.

Moorey. P. R. S. 1974. *Ancient Persian Bronzes in the Adam Collection*. London, Faber & Faber.

Moorey. P. R. S. 1971. *Catalogue of the Ancient Persian Bronzes in the Ashmolean Museum*. Oxford: Oxford University Press.

Moorey. P. R. S. 1969. Prehistoric Copper and Bronze Metallurgy in Western Iran (With Special Reference to Lūristān). *Iran*, 7: 131-153.

Moorey. P. R. S. 1964. An Interim Report on Some Analyses of "Luristan Bronzes". *Archaeometry*, 7: 72-79.

Muhly. J. D. 1985. Sources of Tin and the Beginnings of Bronze Metallurgy. *American Journal of Archaeology*, 89: 275-291.

Muscarella. O. W. 1990. Bronzes of Luristan. In *Encyclopedia Iranica*, Yarshater. E. (ed.), Vol. IV, London & New York, Routledge & Kegan Paul: 478-483.

Muscarella. O. W. 1988. *Bronze and Iron: Ancient Near Eastern Artifacts in The Metropolitan Museum of Art*. New York, Metropolitan Museum of Art.

Negahban. E. O. 2009. *Excavations at Marlik*. ICHO Publications [in Persian].

Nezafati N. 2006. *Au-Sn-W-Cu-Mineralization in the Astaneh-Sarband Area, West Central Iran, including a comparison of the ores with ancient bronze artifacts from Western Asia*. PhD Dissertation, Der Geowissenschaftlichen Fakultät, Der Eberhard-Karls-Universität Tübingen, Germany, Unpublished.

Nezafati. N. Pernicka. E. 2006a. The Smelters of Sialk: Outcomes of the First Stage of Archaeometallurgical Researches at Tappeh Sialk. In *The fishermen of Sialk*, Archaeological Report Monograph Series 7, Shahmirzadi. S. M. (Ed.), Tehran, Iranian Center for Archaeological Research: 79-102.

Nezafati. N. Pernicka. E. Momenzadeh. M. 2006b. Ancient Tin: Old Question and a New Answer. *Antiquity*, 80: 308.

Northover. J. P. 1997. The Analysis of Early Copper and Copper Alloys. In *The Art of Ancient Iran: Copper and Bronze*. Mahboubian. H. (ed.). London, Philip Wilson: 325–242.

Oudbashi. O. 2017. Study of The Production Process of Tin Bronze in Prehistoric Period of Iran According to Statistical Studies and Analysis of Results. In *Proceedings of First National Conference of Application of Statistical Methods in Archaeological Researches in Iran* [in Persian].

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*, 10: 1443-1458.

Oudbashi. O. Hessari. M. 2017. Iron Age Tin Bronze Metallurgy at Marlik, Northern Iran: an Analytical Investigation. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 9: 233–249.

Oudbashi. O. Naseri. R. Malekzadeh. M. 2016a. Technical Studies on the Bronze Age Metal Artefacts from the Graveyard of Deh Dumen, South-Western Iran (Third Millennium BC). *Archaeometry*, 58: 947–965.

Oudbashi. O. Hasanpour. A. 2016b. Microscopic Study on some Iron Age Bronze Objects from Western Iran. *Heritage Science*, 4: 8.

Oudbashi. O. Hassanpour. A. Malekzadeh. M. 2016. Archaeometallurgical Investigations in Sangtarashan Site of Lorestan, First millennium BC. In *Proceeding of International Congress of Young Archaeologists*, University of Tehran, 27-29 October 2013, University of Tehran Press, Tehran: 633-644 [in Persian].

Oudbashi. O. Davami. P. 2014. Metallography and Microstructure Interpretation of some Archaeological Tin Bronze Vessels from Iran. *Materials Characterization*, 97: 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*, XLVIII: 147-174.

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*, Collini. L. (Ed.,), Rijeka, InTech Open Access: 153- 178.

Oudbashi. O. Mortazavi. M. Hasanpour. A. 2012. Alternating Forging-Annealing Operation in Manufacturing Ancient Bronze Small Shield Pins from Luristan. In *Proceedings of 6th Joint Conference of Society of Metallurgy Engineers and Society of Casting of Iran*, 6th-8th November 2012, University of Tehran Publications, 2012 [in Persian].

Oudbashi. O. Emami. S. M. Davami. P. 2010. Archaeometallurgy in the Luristan Region: Chemical and Microstructural Analysis of Bronze Objects from Sangtarashan Archaeological Site of Khorramabad, First Millennium BC. In *Proceedings of 4th Joint Conference of the Iranian metallurgical Enginnering Society and the Iranian Foundry Society*. Iran University of Science and Technology: 1208-1218 [in Persian].

Oudbashi. O. Emami. S. M. Bakhshandehfard. H. 2009. Preliminary Archaeometallurgical Studies on Mineralogical Structure and Chemical Composition of Ancient Metal Objects and Slag from Haft Tepe, Southwest Iran, Khuzestan (Middle Elamite Period). *Proceedings of 36th International Symposium on Archaeometry, ISA 2006*, 2-6 May 2006, Moreau J. F. Auger. R. Chabot. J. Herzog. A. (Eds.), Université Laval, Quebec City, Canada, CELAT Publications: 407-412.

Overlaet. B. 2006. Luristan Bronzes: I. The Field Research. In *Encyclopaedia Iranica Online*, Yarshater E. (ed.), Originally Published: November 15, 2006 Available at http://www.iranica.com/articles/luristan-bronzes-i-the-field-research.

Overlaet. B. 2005. The Chronology of the Iron Age in the Pusht-i Kuh, Luristan. *Iranica Antiqua*, 40: 1-33.

Overlaet. B. 2004. Luristan Metalwork in the Iron Age. In *Persia's Ancient Splendour, Mining, Handicraft and Archaeology*, Stöllner. T. Slotta. R. Vatandoust. A. (Eds.), Deutsches Bergbau-Museum, Bochum: 328-338.

Palizvan. S. 2017. *Study of the Manufacturing Methods in Some of the Bronze Objects of Iron Age in the Dia Ardizi of Moorani, Luristan*. MSc. Art University of Isfahan [in Persian].

Pernicka. E. 2004. Copper and Silver in Arisman and Tappeh Sialk and the Early Metallurgy in Iran. In *Persia's Ancient Splendour, Mining, Handicraft and Archaeology*, Stöllner. T. Slotta. R. Vatandoust. A. (Eds.), Deutsches Bergbau-Museum, Bochum: 232-239.

Pigott. V. C. 2004. On the Importance of Iran in the Study of Prehistoric Copper-Base Metallurgy, In *Persia's Ancient Splendour, Mining, Handicraft and Archaeology*, Stöllner. T. Slotta. R. Vatandoust. A. (Eds.), Deutsches Bergbau- Museum, Bochum: 28-43.

Pigott. V. C. 1999. The Development of Metal Production in Iranian Plateau: An Archaeometallurgical Perspective. In *The Archaeometallurgy of Asian Old World*, Pigott. V. C. (Ed.), University Museum Monograph 89, Philadephia, University of Pennsilvania Museum: 73-106.

Pigott. V. C. 1990. Bronze; in Pre-Islamic Iran. In *Encyclopedia Iranica*, Yarshater. E. (ed.), Vol. IV, London and New York, Routledge & Kegan Paul: 457-471.

Pigott. V. C. Rogers. H. C. Nash. S. K. 2003a. Archaeometallurgical Investigations at Tal-e Malyan: The Evidence for Tin-Bronze in the Kaftari Phase. In *Yeki Bud, Yeki Nabud: Essays on the archaeology of Iran in honor of William M. Sumner*, Miller. N. F. Abdi. K. (Eds.), Philadelphia, University of Pennsylvania Museum of Archaeology and Anthropology: 161-175.

Pigott. V. C. Rogers. H. C. Nash. S. K. 2003b. Archaeometallurgical Investigations at Tal-e Malyan: Banesh Period Finds from ABC and TUV. In *Early Urban Life in the Land of Anshan: Excavations at Tal-e Malyan in the Highlands of Iran*, Sumner. W. M. (Ed.), University of Pennsylvania Museum of Archaeology and Anthropology, Philadelphia: 94-102.

Pigott. V. C. Howard. S. M. Epstein. S. M. 1982. Pyrotechnology and Culture Change at Bronze Age Tepe Hisar (Iran). In *Early Pyrotechnology, The Evolution of the First Fire-Using Industries*, Wertime. T. A. Wertime. S. A. (Eds.), Washington D. C.: 215-236.

Pleiner. R. 2004. Memories of the Archaeometallurgic Expeditions to Iran and Afghanistan in the Years 1966 and 1968. In *Persia's Ancient Splendour, Mining, Handicraft and Archaeology*, Stöllner. T. Slotta. R. Vatandoust. A. (Eds.), Deutsches Bergbau-Museum, Bochum: 556-560.

Pollard. A. M. Heron. C. 1996. *Archaeological Chemistry*. Cambridge, The Royal Society of Chemistry, Second Edition.

Pulak. C. 2000. The Copper and Tin Ingots from the Late Bronze Age Shipwreck at Uluburun. In *Anatolian Metal I*, Yalçin. Ü. (Ed.) Der Anschnitt 13. Deutsches Bergbau-Museum, Bochum: 137-157.

Rostoker. W. Dvorak. J. R. 1991. Some Experiments with Co-smelting to Copper Alloys. *Archaeomaterials*, 5: 5-20.

Rostoker. W. Pigott. V. C. Dvorak. J. R. 1989. Direct Reduction to Copper Metal by Oxide-Sulfide Metal Interaction. *Archeomaterials*, 3: 69-87.

Rovira. S. Montero-Ruiz. I. Renzi. M. 2009. Experimental Co-Smelting to Copper-Tin Alloys. In *Metals and Mines: Studies in Archaeometallurgy*, La Niece. S. Hook. D. Craddock. P. T. (Eds.), London, Archetype Publications: 407-414.

Schmidt. E. F. Van Loon. M. N. Curvers. H. H. 1989. *The Holmes expeditions to Luristan*. 2 Vols., Chicago, The Oriental Institute of the University of Chicago Publications 108.

Scott. D. A. 2002. *Copper and Bronze in Art, Corrosion, Colorants, Conservation*. Los Angeles, Getty Conservation Institute.

Smith. C. S. 1969. Analysis of the Copper Bead from Ali Kosh. In *Prehistory and human ecology of the Deh Luran Plain: An early village sequence from Khuzistan, Iran*, Hole. F. Flannery. K. V. Neely. J. A. (Eds.), Ann Arbor: University of Michigan: 427-428.

Smith. C. S. 1968. Metallographic Study of Early Artifacts Made from Native Copper. In *Actes du XI Congres International d'Histoire Des Sciences*, Vol. 6, Warsaw, 1965: 237-243.

Smith. C. S. 1967. The Interpretation of Microstructures of Metallic Artifacts. In *Application of Science in the Examination of Works of Art*, Young. W. J. (Ed.), September 7-16, 1965, Boston, Research Laboratory of Museum of Fine Arts: 20-52.

Stöllner. Th. Doll. M. Mir Eskanderi. M. Momenzadeh. M. Pasternak. R. Steffens. G. 2004. Bronze Age Copper Mining at Veshnāveh. In *Persia's Ancient Splendour, Mining, Handicraft and Archaeology*, Stöllner. T. Slotta. R. Vatandoust. A. (Eds.), Deutsches Bergbau-Museum, Bochum: 240-257.

Tala'I. H. 2008. *Iron Age of Iran*. Tehran: Samt [in Persian].

Thornton. C. P. 2010a. The rise of Arsenical Copper in Southeastern Iran. *Iranica Antiqua*, XLV: 31-50.

Thornton. C. P. 2010b. Sang-e Chakhmaq. In *Encyclopaedia Iranica Online*, Yarshater. E. (ed.), Originally Published: 25 October 2010 Available at: http://www.iranicaonline.org/articles/sang-chakhmaq

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

Thornton. C. P. 2009b. *The Chalcolithic and Early Bronze Age Metallurgy of Tepe Hissar, Northeast Iran: A Challenge to the Levantine Paradigm*. PhD dissertation, Department of Anthropology, University of Pennsylvania.

Thornton. C. P. 2007. Of Brass and Bronze in Prehistoric Southwest Asia. In *Metals and Mines: Studies in Archaeometallurgy*, La Niece. S. Hook. D. Craddock. P. T. (Eds.), London, Archetype Publications: 189-201.

Thornton. C. P. Pigott. V. C. 2011. Blade-Type Weaponry of Hasanlu IVB. In *Peoples and Crafts of Hasanlu IVB*, de Schauensee. M. Dyson Jr. R. H. (Eds.), Philadelphia, University of Pennsylvania Museum Publications: 135-182.

Thornton. C. P. Rehren. Th. Pigott. V. C. 2009. The Production of Speiss (Iron Arsenide) During the Early Bronze Age in Iran. *Journal of Archaeological Science*, 36: 308-316.

Thornton. C. P. Rehren. Th. 2007. Report on the First Iranian Prehistoric Slag Workshop. *Iran*, XLV: 315-318.

Thornton. C. P. Lamberg-Karlovsky. C. C. 2004a. Tappeh Yahya and the Prehistoric Metallurgy of South-eastern Iran. In *Persia's Ancient Splendour, Mining, Handicraft and Archaeology*, Stöllner. T. Slotta. R. Vatandoust. A. (Eds.), Deutsches Bergbau-Museum, Bochum: 264-273.

Thornton. C. P. Lamberg-Karlovsky. C. C. 2004b. A New Look at the Prehistoric Metallurgy of Southeastern Iran. *Iran*, 42: 61-76.

Thornton. C. P. Ehlers. C. B. 2003. Early Brass in the Ancient Near East. *IAMS*, 23: 3-8.

Thornton. C. P. Lamberg-Karlovsky. C. C. Liezers. M. Young. 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*, 29: 1451-1460.

Valério. P. Silva. R. J. C. Monge Soares. A. M. Araújo. M. F. Fernandes. F. M. B. Silva. A. C. Berrocal-Rangel. L. 2010. Technological Continuity in Early Iron Age Bronze Metallurgy at the South-Western Iberian Peninsula—a Sight from Castro dos Ratinhos. *Journal of Archaeological Science*, 37: 1811-1819.

Vatandoust. A. 2004. Old Mining and Metallurgy in Iran- Past and Future of a Research Perspective. In *Persia's Ancient Splendour, Mining, Handicraft and Archaeology*, Stöllner. T. Slotta. R. Vatandoust. A. (Eds.), Deutsches Bergbau-Museum, Bochum: 2-7.

Vatandoust. A. Parzinger H. Helwing. B. (Eds.), 2011. *Early Mining and Metallurgy on the Western Central Iranian Plateau: The First Five Years of Work*. (Archaologie in Iran Und Turan), Mainz, Philipp von Zabern for Eurasien-Abteilung des Deutschen Archäologischen Instituts Außs enstelle Teheran.

Vatandoust-Haghighi. A. 1999. A View on Prehistoric Iranian Metalworking: Elemental Analysis and Metallographic Examinations. In *The Beginnings of Metallurgy*, Der Anschnitt, Beiheft 9, Hauptmann. A. Pernicka. E. Rehren. Th. Yalçin. Ü. (Eds.), Bochum: 121-140.

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

Wertime. T. A. 1973. The Beginning of Metallurgy: A New Look. *Science*, 182: 875- 887.