



## مرواری بر استحصال و ویژگی‌های آلیاژ‌های مس-آرسنیکی در دنیای باستان (مقاله مروری)

وحید پورزرقان<sup>۱\*</sup>، سیدمحمدامین امامی<sup>۲</sup>، حمیدرضا بخشندۀ فرد<sup>۳</sup>

۱. دانشآموخته دکتری تخصصی حفاظت و مرمت، دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران

۲. استاد، دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

۳. دانشیار، دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۱

### چکیده

بی‌شک یکی از مهمترین عناصر آلیاژ‌کننده در دنیای باستان، عنصر آرسنیک است که نقش مهمی در دست‌ساخته‌های آلیاژ‌های اوایل عصر برنز را ایفا کرده است. آلیاژ‌های مس آرسنیکی و برنزهای آرسنیکی بی‌تردید به عنوان یک آلیاژ ساخته شده دست بشر از جایگاه ویژه‌ای در بین باستان‌شنا سان و محققان فلزگری کهن برخوردار است. آرسنیک به عنوان یک عنصر آلوده‌کننده و ناخالصی در تمام محیط به صورت پراکنده وجود دارد و فلزگر باستان با توجه به معایب و مضرات این عنصر برای اهداف آینی و کاربردی، در تولید آلیاژ مس آرسنیکی استفاده کرده است. آرسنیک به عنوان یک عنصر چالش‌برانگیز در ساخت این آثار و همچنین ویژگی‌های خاصی که در سطح این آثار ایجاد می‌نماید، ظاهر می‌گردد که از مهمترین ویژگی این عنصر در ریخته‌گری، ایجاد جدایش معکوس در سطح این آثار است که ایجاد پدیده عرق آرسنیک در این آلیاژها می‌نماید. مواد معدنی اولیه مورد استفاده در ساخت این آلیاژها اولوینیت  $Cu_2(AsO_4)(OH)$  یا کیلنوتویس  $Cu_3(AsO_4)_2(OH)$ ، سولفور آرسنید آهن  $FeAsS$  و انارژیت  $Cu_3AsS_4$  هستند که یا به صورت احیاء مستقیم یا به روش ذوب همزمان Co-Smelting مورد استحصال قرار گرفته‌اند و یا اینکه آرسنیک به صورت آگاهانه از طریق Speiss، در تولید آلیاژ مس آرسنیکی در هزاره سوم مورد استفاده قرار گرفته است. از استحصال این فلزات چندین محصول دیگر همراه با ذوب همزمان که شامل مات Matt، اشپایس Speiss و سرباره Slag است، ایجاد می‌شوند. هدف اصلی این مقاله با توجه به اهمیت موضوع آلیاژ‌های مس آرسنیکی در حوزه باستان‌شناسی و بررسی‌های فلزگری کهن، ارائه یک بررسی جامع در مورد روش‌های استحصال، ویژگی‌های فیزیکی این آلیاژها و نقش آرسنیک و تأثیر آن به عنوان عنصر آلیاژی در شکل‌گیری سطح نقره‌ای و همچنین محصولات جانبی دیگر به عنوان موضوعی پراهمیت در بررسی آلیاژ‌های اوایل عصر برنز پرداخته شده است.

**واژگان کلیدی:** آلیاژ‌های مس-آرسنیکی، عرق آرسنیک، مات، اشپایس، سرباره، فلزگری کهن

\* نویسنده مسئول مکاتبات: اصفهان، دانشگاه هنر، دانشکده حفاظت و مرمت.

پست الکترونیکی: Vahidpourzarghan@gmail.com

## ۱. مقدمه

استفاده از مس دست‌کم به ده هزار سال ق.م برمی‌گردد. نخستین شواهد برای استخراج این فلز از رسوب‌های مس طبیعی از محوطه‌ی Cagonus tepesi در جنوب شرقی ترکیه است که به شکل مهره‌هایی از مالاکیت و مس طبیعی یافت شده است. همچنین در هزاره ۹ تا ۷ ق.م در تپه‌ی کوش در غرب ایران نیز چنین مهره‌هایی کشف شده است [1]. آلیاژهای مس و آرسنیک و برنزهای آرسنیکی، در سرتاسر خاور نزدیک و اروپا از اوایل هزاره چهارم ق.م تا اواخر عصر برنز تولید و استفاده شده است [2]. در آمریکا، برنزهای آرسنیکی نخست در ناحیه آند [3]

در جنوب آمریکا توسعه یافت [4-5].

برنزهای آرسنیکی در پایان هزاره ۴ و در اوایل هزاره سوم ق.م عموماً با غلظت بالای ۵ درصد آرسنیک مورد استفاده قرار گرفته است و این در حالی است که برنزهای قلعی در طی میانه هزاره سوم ق.م معروفی شده‌اند. هوسلر معتقد است که آرسنوپریت منبع اصلی آرسنیک در غرب مکزیک برای تولید گستردگی برنز آرسنیکی از ۱۲۰۰ ق.م تا استیلای اروپا بود. با توجه به آزمایش‌های انجام‌شده، برخی از زنگ‌های ساخته‌شده در غرب مکزیک، حاوی ۱۳ درصد وزنی آرسنیک بوده است و حتی در برخی درصد آرسنیک بین ۲۲ تا ۲۳ درصد وزنی شناسایی شده است [6]. به‌حال نخستین ماده خام استفاده شده برای ذوب مس بدون شک

از طریق رسوبات مس اکسیدی تهیه شده است [7].

شواهدی از ذوب مس به شکل سرباره‌های اولیه در محوطه‌های آناтолی مانند چاتال‌هیوک پیدا شده است که به هزاره ششم ق.م می‌رسد. ذوب ناخودآگاه یا تصادفی کانه‌های مس با آرسنیک در نخستین مدل‌های اولیه از آلیاژهای مس-آرسنیکی با رنگ طلایی و ویژگی‌های سخت‌کنندگی خوبی حاصل شده است. شواهدی از این سرباره‌ها نیز در اریسمان [8] و تپه‌ی حصار [9] به صورت چندین تن از اشپایس که در تولید آلیاژهای آرسنیکی مورد استفاده قرار گرفته، مشاهده می‌شود.

یکی از مهمترین ناجیههای ایدئال برای تولید مس آرسنیکی، کشور ایران است که شامل ذوب سنگ‌های معدنی پیچیده سولفور آرسنید است [10]. مهمترین محل

## ۲. ویژگی‌های شیمیایی آرسنیک

آرسنیک با علامت شیمیایی As، جزء نیمه فلزات در جدول تناوبی قرار دارد. جایگاه این عناصر در جدول تناوبی بین فلزات و نافلزات قرار دارد. مقدار این عنصر در پوسته زمین، کم است (Emsley As = 1.8 ppm).

پیکربندی الکترونی آرسنیک به صورت  $[Ar] 3d^{10} 4s^2 4p^3$  است که باعث ایجاد افزایش الکترون و اوربیتال‌های پرنشده می‌شود [21].

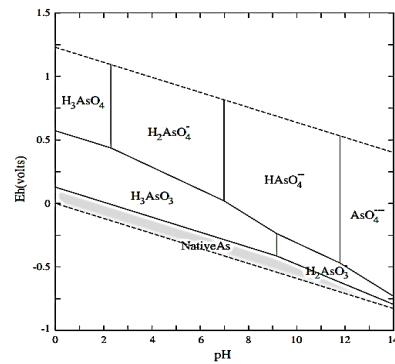
ظرفیت آرسنیک به حالت‌های مختلف اکسیداسیون که متتشکل از  $-3$  (آرسین)،  $+0$  (آرسنیک)،  $+3$  (آرسنیت) و  $+5$  (آرسنات) است، وجود دارد. شکل ساختاری  $As^{3+}$  شامل سه پیوند هرمنی و یک جفت الکترون به عنوان بازوی چهارم وجهی است. در محلول آبی، آرسنیت با ساختار هرمنی، شامل سه لیگاند اکسیژن و جفت الکترون تنها را حفظ می‌کند. آرسنیک پنج ظرفیتی، چهاروجهی منتظم است که به لیگاندهای اکسیژن پیوند خورده است و در نتیجه، آنیون آرسنات ( $AsO_4^{3-}$ ) پایدار را ایجاد می‌کند. آرسنیک عموماً به عنوان اکسی آنیون‌های معدنی آرسنیت ( $As^{3+}$ ) یا آرسنات

کاتیون‌های فلزی، خاک رس و ... pH و Eh می‌تواند دارد [28]. ازین رو آرسنیک بدلیل سمیت آن در محدوده وسیعی از pH و Eh بسیار نگران کننده است. سمیت آرسنیک بین حالت‌های اکسیداسیون آرسنیک، متفاوت بیان شده است، یعنی آرسین سمی تراز آرسنیت و آرسنیت سمی تراز آرسنات است [29].

### ۳. ترکیبات آرسنیک با دیگر عناصر

سولفید آرسنیک به نام انارژیت  $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$  یک کانی راهنمای حاوی رسوبات کم مس در آهن است [30]. عناصر آرسنیک، آنتیموان و بیسموت عناصری با گرایش کالکوفیل و مقداری سیدروفیل هستند. میل ترکیبی آرسنیک با مواد معدنی سولفیدی بیشتر است اما به هر حال میزان کمی از آرسنیک می‌تواند در ترکیبات بین فلزی، نیز قرار گیرند [30]. آرسنیک به عنوان یک محصول جانبی، اغلب در مس و سنگ آهن وجود دارد. همچنین آرسنیک میل ترکیبی زیادی به کبالت و نیکل از خود نشان می‌دهد که به سنگ معدن، خصوصاً رگه‌های گرمابی مرتبط است. آرسنوبیریت به عنوان حامل طلا، قابل توجه است و عمدها طلا به صورت ناخالصی کوچکی در آرسنوبیریت وجود دارد. آرسنیک طبیعی ممکن است حاوی آنتیموان باشد و جامد  $\text{SbAs}$  را تشکیل دهد [31]. آرسنیدهای مس شامل آگوندیت، دومیکیت و ویتینیت هستند. طلا و نقره اغلب به آرسنید و همچنین آرسنیدهای سولفیدی متصل هستند. Ni-As نیکولیت (Niccolite) نسبتاً نادر است. تانتیت فهلور یکی از رایج‌ترین سنگ معدن آرسنیک، در کنار آرسنوبیریت و انارژیت است؛ مانند تتراهیدریت آنتیموان-فهلور که اغلب دارای ۲ درصد وزنی نقره است [32]. اکسیداسیون سوپرژنی آرسنوبیریت یا ماده معدنی غنی از آرسنیک در ارتباط با مس (فهلور، انارژیت) می‌تواند منجر به ایجاد مس آرسنات‌های سبزرنگ شود. آرسنات‌های سبزرنگ در گوسان‌ها و پوشش‌های شسته شده رخ می‌دهند و به آسانی می‌تواند با مس خالص اشتباه گرفته شود. تعداد زیادی از آرسنات‌ها با طیف گسترده‌ای از فلزات دیگر مانند (Pb, Cu, Fe, Zn, Ni, Co) ترکیب می‌شوند. جدایش آهن آرسنیک در هیدروکسید آهن می‌تواند منجر به تجمع آرسنیک بر روی سطح و یا در آب زیرزمینی شود [33].

$(\text{As}^{5+})$  یافت می‌شوند [22]. ترکیبات آرسنیک می‌تواند به صورت گونه‌های آلی یا معدنی، وجود داشته باشد و به طور معمول گونه‌های آرسنیک محلول معدنی، سمی تراز ترکیبات آرسنیک آلی محلول هستند [23]. گونه‌های غالب را در مرزهای خط آب، در سیستم  $\text{As}-\text{H}_2\text{O}$  در دمای  $25^\circ\text{C}$  و در فشار ۱ bar نشان داده است. در یک محیط اکسیده‌تر آرسنات به طور کلی، شکل غالب آرسنیک است که در (شکل ۱) قابل مشاهده است.



شکل ۱: دیاگرام Eh-pH برای سیستم  $\text{As}-\text{O}-\text{H}$  در  $25^\circ\text{C}$  و فشار ۱۰۶ M  $\Sigma\text{As}$ . ۱Bar تنظیم شده است.

Fig. 1: Eh-pH diagram for As-O-H system at  $25^\circ\text{C}$  and 1 Bar pressure.  $\Sigma\text{As}$  is set at M10-6.

آرسنیک پنج ظرفیتی به شکل  $\text{H}_3\text{AsO}_4$  در pH پایین،  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  به صورت  $\text{H}_3\text{AsO}_4$  در مقادیر pH بالاتر از ۲ تجزیه می‌شود. آرسنیت به صورت  $\text{H}_3\text{AsO}_3$  در pH=۹ ظاهر می‌شود.  $\text{H}_3\text{AsO}_3$  در pH بالای ۹ به صورت  $\text{HAsO}_3^{3-}$  و  $\text{HAsO}_3^{2-}$  تجزیه می‌شود. آرسنیت و آرسنات هر دو در آب محلول هستند. بین حال آرسنیت سمی تراز آرسنات است [24-25].

آرسنات تمایل بیشتری نسبت به آرسنیت برای رسوب خارج از محلول با افزودن کاتیون فلزی دارد. رسوبات فلزهای آرسنات به صورت کلی از فرم  $\text{Mn}(\text{AsO}_4)_m \cdot \text{H}_2\text{O}$  پیروی می‌کند [26].

پایداری رسوبات به کاتیون مورد استفاده برای تشکیل رسوب و شرایطی که در آن رسوب نگهداری می‌شود به دما و پتانسیل اکسایش، کاهش (Eh) بستگی دارد [27]. تحرک آرسنیک به غلظت آرسنیک و سایر گونه‌های موجود (مانند

در (جدول ۱)، مهمترین ترکیبات آرسنیک با دیگر عناصر اورده شده است. از مهمترین ترکیبات فلز مس با آرسنیک شامل: آرسنوبیریت  $\text{FeAsS}$ ، اناڑیت  $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ ، دومیکیت  $\text{Cu}_3\text{As}$  و تریپیکیت  $\text{CuAs}_2\text{O}_4$  است. شبیه‌فلز آرسنیک با دیگر عناصر ترکیباتی ایجاد می‌کند که تاکنون تحقیقی در این زمینه انجام نشده است.

آرسنیک تحت شرایط اکسیدکننده، اکسیدها (هیدروکسی) آهن، حلایت آرسنیک را کنترل می‌کنند. آرسنیک‌ها در نزدیک سطح مرکز می‌شوند [30].

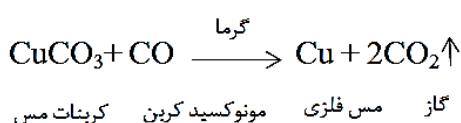
بیشترین حلایت آرسنیک در مس برابر با  $7/9\text{Cu}$  درصد وزنی آرسنیک در دمای  $685^\circ\text{C}$  است و بعد از آن حلایت کاهش می‌یابد. در این مرحله با کاهش دما، آرسنیک اضافه شده به طور قابل توجهی دمای کریستالیزاسیون را کاهش می‌دهد [30].

جدول ۱: رایج‌ترین مواد معدنی حاوی آرسنیک [34]

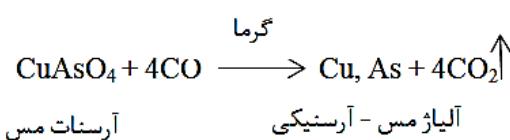
Table 1: The most common minerals Containing Arsenic [34]

اسم	ماده معدنی	فرمول
Sulfides and Solfosalts	Arsenopyrite	$\text{FeAsS}$
-	Arsenical pyrite	$\text{Fe}(\text{As}, \text{S})_2$
-	Cobaltite	$\text{CoAsS}$
-	Enargite	$\text{Cu}_3\text{AsS}_4$
-	Gersdorffite	$\text{NiAsS}$
-	Orpiment	$\text{As}_2\text{S}_3$
-	Proustite	$\text{Ag}_3\text{AsS}_3$
-	Realger	$\text{As}_4\text{S}_4$
-	Tennantite	$(\text{Cu}, \text{Fe})_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$
Arsenides	Domeykite	$\text{Cu}_3\text{As}$
-	Löllingite	$\text{FeAs}_2$
-	Nickeline	$\text{NiAs}$
-	Rammelsbergite	$\text{NiAs}_2$
-	Safflorite	$\text{CoAs}_2$
-	Sperrylite	$\text{PtAs}_2$
As (III) Oxides	Arsenolite	$\text{As}_2\text{O}_3$
-	Claudite	$\text{As}_2\text{O}_3$
-	Gebhardite	$\text{Pb}_8(\text{As}_2\text{O}_5)_3\text{OCl}_6$
-	Leiteite	$\text{ZnAs}_2\text{O}_4$
-	Reinerite	$\text{Zn}_3(\text{AsO}_3)_2$
-	Trippkeite	$\text{CuAs}_2\text{O}_4$
As (V) Oxides	Austinite	$\text{CaZnAsO}_4\text{OH}$
-	Conichalcite	$\text{CaCuAsO}_4\text{OH}$
-	Erythrite	$\text{Co}_3(\text{AsO}_4)_2\cdot 8\text{H}_2\text{O}$
-	Hörensite	$\text{Mg}_3(\text{AsO}_4)_2\cdot 8\text{H}_2\text{O}$
-	Juhubaumite	$\text{Ca}_5(\text{AsO}_4)_3\text{OH}$
-	Mansfieldite	$\text{AlAsO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$
-	Oliverite	$\text{Cu}_2(\text{AsO}_4)\text{OH}$
-	Sarmientite	$\text{Fe}_2\text{AsO}_4\text{SO}_4\text{OH}\cdot 5\text{H}_2\text{O}$
-	Scorodite	$\text{FeAsO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$

شده است، برای به دست آوردن مس فلزی، استفاده از مواد معدنی اکسیدی آن، مناسب است که در این شرایط، محیط ذوب باید شامل محیط احیاکننده باشد؛ و این شرایط از طریق احتراق جزئی بهوسیله زغال چوب که ایجاد مونوکسید کربن  $\text{CO}$  می‌کند، تهییه می‌شود. مونوکسید کربن با اکسیژن در مواد معدنی کانسنگ ترکیب می‌شود و کانه به ترکیبات فلزی آن احیا می‌شود. معادله های (۴-۱) و (۴-۲) مثال هایی از واکنش ذوب مستقیم در مجاورت کوره یا بوته است [35-36].

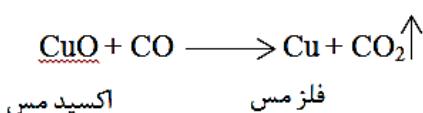
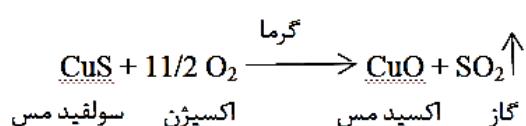


ذوب به روش احیا مستقیم از کانه اکسیدی، آلیاژی از مس و آرسنیک که دو ترکیب فلزی از مواد معدنی هستند ایجاد می‌شود که واکنش آن به صورت زیر است.



محقق‌ها [37-40] پیشنهاد کردند که آهنگرهای اولیه تنها انتخاب در دسترس برای استخراج فلز از کانه‌های سولفیدی، استفاده از روش دو- مرحله‌ای به شرح زیر است.  
۱- برشه کردن.

۲- به دنبال برشه کردن از طریق ذوب مستقیم، کانه اکسیدی و کانه سولفید تولید شده که دارای واکنش‌های (۴-۳، ۴-۴) است.



#### ۴. استخراج فلزات آرسنیکی

فلزگران برای استفاده از مس- آرسنیکی به عنوان یک ماده در ساخت یک شی، نیاز به استخراج آن از کانسنگ اولیه داشته‌اند؛ بنابراین استخراج و استحصلال آلیاژ مس- آرسنیکی از طریق ذوب احیا مستقیم یا ذوب همزمان (توام) که شامل مراحل زیر است، انجام می‌شود:

#### ۴-۱. روش احیا مستقیم

ذوب به روش احیا مستقیم در یک بوته یا کوره ساده انجام

واکنش (۱-۴)

در صورتی که مواد معدنی فلزی در کانسنگ آرسنات مس، یعنی  $\text{Cu}_2(\text{AsO}_4)(\text{OH})$  روی کانسنگ سولفور آرسنید مس  $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$  تشکیل شود.

واکنش (۲-۴)

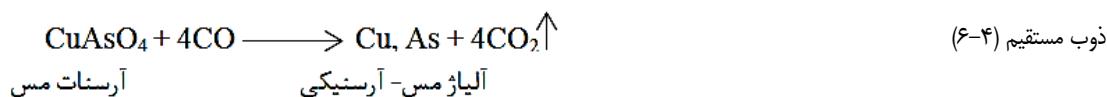
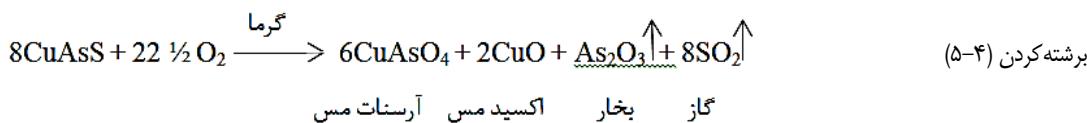
بیشتر کانه‌های حاوی آرسنیک دنیا، سولفیدی هستند. برای مثال کانه سولفور آرسنید مس مانند، انارژیت  $\text{Enargite}$  کانه سولفور آرسنید آهن  $\text{FeAsS}$ , arsenopyrite آند،  $\text{Andase}$  هرچند از نظر فراوانی دارای میزان کمی از آرسنیک است اما به هر حال دارای عنصر آرسنیک هستند. کانه‌های سولفیدی نمی‌توانند از طریق مونوکسید کربن احیا شوند. این واقعیت دلیل بر آن شده است که بسیاری از

برشه کردن (۳-۴)

ذوب مستقیم (۴-۴)

هم مس و هم آرسنیک در طی برشهشدن، اکسید می‌شوند که در ابتدا به فرم آرسنات مس و تری اکسید آرسنیوس  $\text{As}_2\text{O}_3$  که به صورت دود یا بخار سفید هستند از محیط خارج می‌شوند. مطابق با واکنش (۵-۴) در ذوب مستقیم آلیاز Cu-As تولید می‌شود که

با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته توسط لخمن نشان داده شد در صورتی که کانسنگ یک سولفور آرسنید، شامل مس و آرسنیک باشد. واکنش محصولات متفاوت به محض برشهشدن، مطابق واکنش‌های (۴-۵) (۴-۶) در انجام می‌شود.



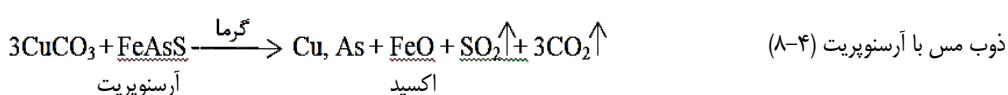
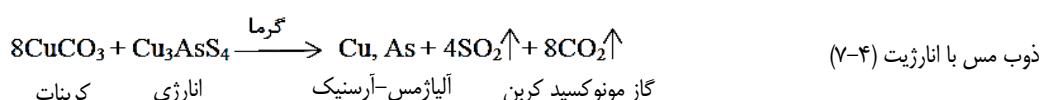
منجر به ایجاد مونو اکسید کربن که غیر ضروری است، می‌شود. در ذوب همزمان اکسید و کانه‌های سولفید با هم مخلوط می‌شوند و در کوره یا بوته آهنگری شارژ می‌شوند.

گاز کربن دی اکسید مطابق با واکنش (۶-۴) نیز از محیط خارج می‌گردد.

**۴.۳. ذوب همزمان کانه‌های اکسید مس با مس یا آهن سولفور آرسنید**  
در واکنش سولفور از طریق واکنش (۷-۴) اکسیده شده و به عنوان یک عامل احیاکننده، به صورت گاز از محیط خارج می‌شود. زمانی که محتوای شارژ یک کانه سولفور آرسنید از مس یا آهن باشد، حذف مرحله برشهش کردن به شدت باعث کاهش اکسیداسیون آرسنیک به بخار  $\text{As}_2\text{S}_3$  می‌شود. واکنش (۸-۴).

#### ۴. استخراج فلزات به روش ذوب همزمان (Co-smelting)

با توجه به اینکه سولفور موجود به عنوان سولفید در مواد معدنی فلزی متعلق به کانه‌های اولیه، می‌تواند، کانه اکسید مس را به مس فلزی در ذوب همزمان احیا کند [41]. شرایط ترمودینامیکی که تحت استخراج مس از اکسیدهاییش صورت می‌گیرد، می‌تواند با سولفور به عنوان یک عامل احیاکننده بررسی شود. از این‌رو زغال چوب نمی‌تواند به عنوان سوخت مورد نیاز ذوب محسوب شود، زیرا

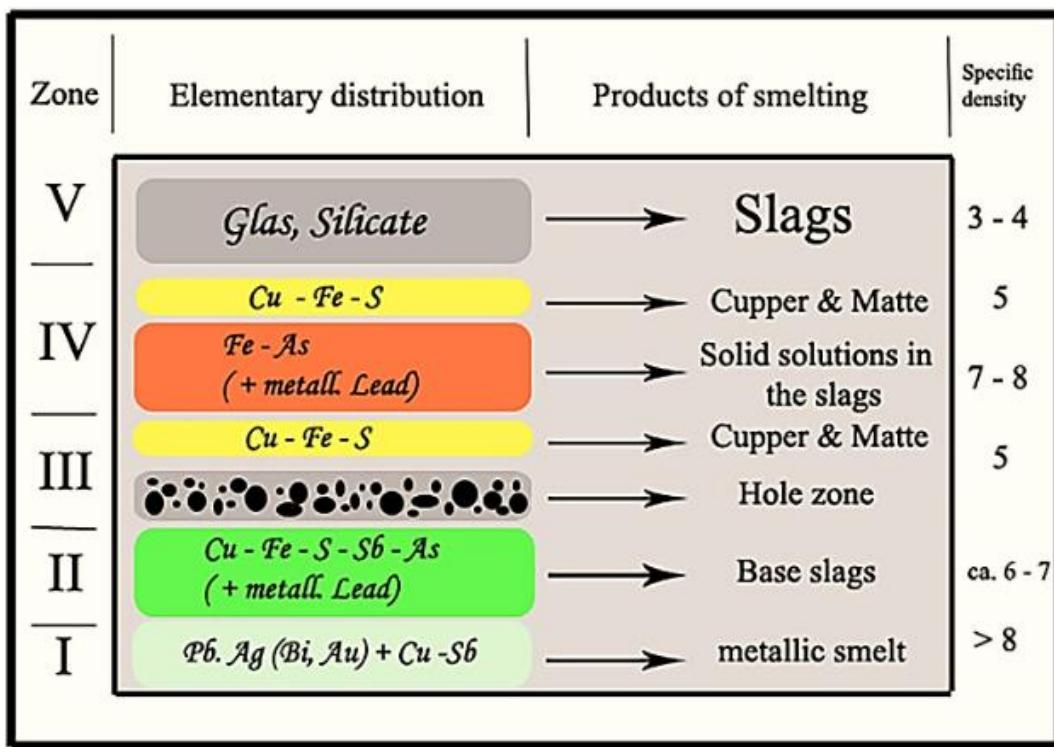


- مات (Matt): سولفیدهای مس یا مس و آهن (به عنوان مثال:  $\text{CuS}$ ,  $\text{Cu}_2\text{S}$ ,  $\text{Cu}_3\text{FeS}_4$ ).
- اشپایس (Speiss): آرسنیدهای مس و آهن.
- سرباره (Slag): زمانی که سیلیس  $\text{SiO}_2$  کافی در سنگ‌های معدن با اکسید آهن ( $\text{FeO}$ ) موجود باشد،

**۵. محصولات به دست آمده از ذوب همزمان**  
چندین محصول دیگر ممکن است از ذوب همزمان همراه با فلز یا آلیاز باشد، ایجاد شود که به غلظت گوگرد و آهن در شارژ بستگی دارد. این محصولات شامل موارد زیر است.

مشخص است که اجزاء ریز و کروی شکل فلزی و نیمه فلزی مواد به صورت پراکنده در آن رخ می‌دهد [30]. نحوه توزیع و موقعیت این عناصر در (شکل ۲) آورده شده است.

به صورت فایلیت با ترکیب  $(Fe_2SiO_4)$  که تا حدی به صورت آمورف است ایجاد می‌شود. بجز لایه نیمه بلوری در نزدیکی مات که حاوی فایلیت و به صورت کشیده است؛ که قسمت بین بخش‌های آمورف و کربستالی بهوضوح



شکل ۲: شکل شماتیک از ذوب مس از سنگ معدن سولفید/آرسنید به علاوه تشکیل اشپایس آهنی. فازهای جدایش یافته در جامعه تکنولوژی باستان بر اساس وزن مخصوص شان [42,15].

Fig. 2: Schematic diagram of copper smelting from sulphide/arsenide ores with the formation of ferric sprite. Separated phases in ancient technological society based on their specific gravity [42,15].

(۱) [44]. سولفیدهای مس ممکن است حاوی مواد مختلفی از فلزات دیگر باشند در صورتی که میل به ترکیب با گوگرد را دارند. این فلزات شامل آهن، آرسنیک، آنتیموان، نیکل، کبات و روی است. علاوه بر این مات می‌تواند حاوی طلا و نقره باشد. در بیشترین مقدار آرسنیک یا آنتیموان، جداسازی اشپایس رایج است. مات مس یا مات آهن-مس یا مات سرب، محصولات واسطه‌ای، در استخراج مس یا نقره از سنگ معدن سولفیدی یا سولفاته هستند (جدول ۲). یکی از مزایای اصلی ذوب برای مات، مایع‌سازی و جداسازی سریع آن حتی قبل از تشکیل یک سرباره سیلیسی است. نقطه ذوب سولفیدها نسبتاً کم است و این امر به جداسازی بهتر مات از سرباره کمک می‌کند.

### ۵-۱. مات (Matt)

کلمه مات، مخلوط مذاب سولفیدی فلزات سنگین، ترجیحاً آن‌هایی که از مس، آهن و سرب که از سرباره سیلیسی در طی فرایند ذوب جدا شده‌اند را توصیف می‌کند [43]. مات‌ها، گاهی، حاوی مقداری اکسید هستند. سرباره‌های سیلیسی و سولفیدی فقط در حد بسیار محدود قابل اختلاط هستند. سولفیدها چگالی بیشتری نسبت به سرباره سیلیسی پیرامون که با آن تولید شدند را دارد. چگالی سرباره حدود  $gr/cm^3$  ۴-۵ است. چگالی مات (مس)، حدود  $5/8-4/8 gr/cm^3$  و حتی بالاتر با محتوای سرب است. بر این اساس و در حالت ایدئال یک جدایش گرانشی بین دو حالت مایع وجود دارد که کزمن جدایی سرباره و مات را توضیح داده است (شکل

جدول ۲: فازهای سولفیدی در مات‌ها در سرباره‌های فلزگری کهن و مدرن [45-47].  
Table 2: Sulphide phases in mattes in archaeometallurgical and modern slags [45-47].

فارسی	اسم فاز لاتین	فرمول شیمیایی	Cu(wt%)	Fe (wt%)	Other (wt%)
برونیت	Bornite	Cu <sub>5</sub> FeS <sub>4</sub>	۶۳/۳	۱۱/۱	-
ایدایت	Idaite	Cu <sub>3</sub> FeS <sub>4</sub>	۵۰/۹	۱۴/۹	-
کالکوسیت، دیجنیت	Chalcocite, digenite	Cu <sub>9+x</sub> S <sub>5</sub>	۸۰	-	-
کالکوپریت	Chalcopyrite	CuFeS <sub>4</sub>	۳۴/۶	۳۰/۴	-
کالکوپروتین (ایزوکوبانیت)	Chalcopyrrhotine (Isocubanite)	CuFe <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	۲۳/۴	۴۱/۲	-
کوولیت	Covellite	CuS	۶۶/۵	-	-
کوبانیت	Cubanite	CuFe <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	۲۳/۴	۴۱/۲	-
کوپروستسیت	Cuprostibite	Cu <sub>2</sub> Sb	۵۱/۱	-	۴۸/۹(Sb)
گالنیت	Galenite	PbS	-	-	۸۶/۶ (Pb)
کوتکیت	Koutekite	Cu <sub>5</sub> As <sub>2</sub>	۶۸	-	-
پیروتیت	Pyrrhotite	Fe <sub>1-x</sub> S	۴/۵ ≥	۶۰/۴	-
اسفالریت، وورتزیت	Sphalerite, wurtzite	ZnS	-	۱۴/۷	۵۱/۶ (Zn)
تالناخیتی	Talnakhite	Cu <sub>9</sub> Fe <sub>8</sub> S <sub>16</sub>	۳۷/۲	۲۱/۸	۷/۶ (Ni)

می‌توان گفت، حلالیت اکسیژن در مات بوته، نسبت به مات کوره کمتر است. البته در آزمایش انجام شده توسط ساندمان [48] نشان می‌دهد که نه تنها اکسیژن نقش مهمی را ایفا می‌کند، بلکه دما نیز تأثیر بسیار مهمی در تشکیل برونیت دارد. با توجه به سطوح اکسیژن، برونیت در دمای Bronite دارد. از این رو احتمال می‌رود که سرعت خنک شدن کوره، کمتر از سرعت خنک شدن بوته باشد.

## ۱-۵. مس مات (مس رشتهدی Filament (Copper

مس خالص تنها در مات برونیت که از ذوب کوره به دست آمده است، یا در داخل خرج و فروج و یا در شکاف‌هایی داخل مات که به صورت رشتهدی رشد کرده و یا به عنوان یک نوار در مرز مشترک مات و آلیاژ فلزی است، ظاهر می‌شوند. شکاف امتصاص پذیری در سیستم Cu-Fe-S این تأثیر را توضیح می‌دهد. در این بررسی توسط تیدمن، مس

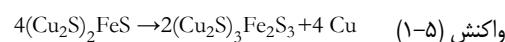
از محصولات تشکیل شده چه در بوته و چه در کوره ذوب فلزات، شامل سرباره، مات، اشپایس و فلز است. با این حال، با توجه به بررسی‌های لخمن، مات کوره و بوته از لحاظ شیمیایی دارای دو جنبه متفاوت‌اند. مات کوره دارای ترکیب کالکوسیت  $\text{Cu}_2\text{S}$  هستند، این در حالی است که مات کوره‌ای دارای ترکیب برونیت  $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ، با درصد وزنی آهن است که به عنوان کمکذوب عمل می‌نماید. جنبه دوم از نظر فیزیکی، مات‌های بوته، دارای لایه‌های مجزا و منسجمی هستند. مات کالکوسیتی معمولاً تمايل به توزيع همگنی در سرتاسر دانه‌ها یا پوسته اطراف فلز را دارد، اما در مات کوره‌ای، مات‌های بورنیت به صورت لایه‌ای کاملاً جدا شده در بالای توده فلز دیده می‌شوند. در ترکیب مات و بهویژه نسبت آهن به مس، میزان اکسیژن موجود می‌تواند جهت اکسیداسیون آهن خارج از مات، نقش قابل توجهی را ایفا کند که نشان می‌دهد اکسیژن، در تعادل آهن به مگنتیت در سرباره آهن - اشباع از سیلیکات و در مقایسه کلی،

**۵-۲. اشپایس (Speiss)**  
 کلمه اشپایس شامل، ترکیبات فلزی سگین آهن، مس، نیکل و کبالت با مقادیر عمدتی از آرسنیک و آنتیموان را توصیف می‌کند؛ که آن‌ها را آرسنیدها یا آنتیمونیدها می‌نامند. اشپایس و مات سولفیدی، تنها به صورت مقدار کمی در یکدیگر حل می‌شوند که شکاف امتزاج پذیر زیادی بین آن‌ها وجود دارد (شکل ۳). مات تنها چند درصد از این نیمه فلزات را شامل می‌شود. درحالی که اشپایس تنها شامل چند درصد گوگرد است. از نقطه نظر متالورژیکی، اشپایس یک محصول ناخواسته است که محصول نقره- سرب و مس را تشکیل می‌دهد [30].

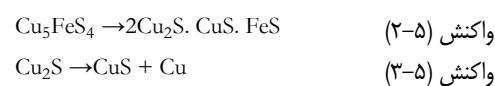
### ۲-۵. تشکیل اشپایس

اشپایس محصول فرعی ناخواسته، مس مذاب است که عمدتاً شامل طیف گسترده‌ای از آرسنیدها و آنتیمونیدها هستند. با توجه به آزمایش‌های انجام شده توسط لخمن و کلین، مات می‌تواند آرسنیک را حل کند، اما حلالیت آرسنیک در مات کاهش می‌یابد که با افزایش محتوای مس این کمبود جبران می‌شود و باعث تشکیل فازهای اشپایس در داخل مات می‌شود. تشکیل اشپایس بیشتر به غلظت آهن در سیستم بستگی دارد، زیرا آهن میل ترکیبی بیشتری برای ترکیب‌شدن با آرسنیک نسبت به مس دارد [50]. اشپایس به صورت محدودی می‌تواند در مات توزیع شود. در صورتی که اشپایس بیشتر از محدوده حد حلالیت حل شود، وارد آلیاژ می‌شود [51]. اشپایس ماده‌ای است که از نظر ظاهری شبیه به فلز است. اگرچه این ماده شکننده است و غیر از ریخته‌گری قابل کار نیست و از آن به عنوان یک محصول زائد و دور ریختنی یاد می‌شود [36]. وقوع اشپایس باعث کاهش شدید فلز در هنگام ذوب مس می‌شود. در مورد استحصال فلزات دیگر، وقوع اشپایس، در مورد ذوب سرب، به عنوان مرحله مقدماتی در تولید نقره، مصر تلقی می‌شود؛ زیرا مقدار زیادی از فلز نقره را به جای فلز سرب در اشپایس به دام انداخته که ممکن است توسط کوپلاسیون از یکدیگر جدا شوند [52]. اشپایس‌های غنی از سرب و مس در مراکز اروپای غربی و اوایل عصر کالکلوتیک تولید شده است [53-54]، گاهی اشپایس

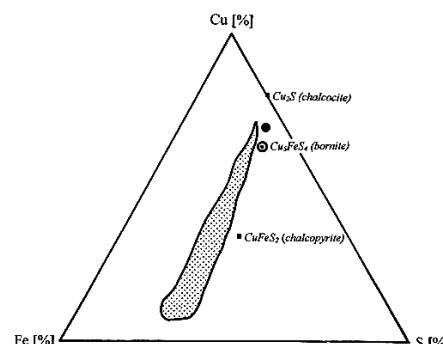
خالص از مذاب با ترکیب تقریبی  $(\text{Cu}_2\text{S})_2\text{FeS}$  (Cu<sub>2</sub>S)<sub>2</sub>FeS در حدود ۶۲ درصد وزنی مس که این مذاب به برونت و رسوب‌های مس به صورت «مس مویرگی» یا «مس رشته‌ای» تجزیه می‌شود، نشان داده شده است. تبیین این واکنش را به صورت واکنش (۱-۵) شرح می‌دهد [49-50].



در واکنش (۱-۵) مذاب باید غنی از Cu<sub>2</sub>S باشد تا واکنش انجام شود، در غیر این صورت Cu<sub>2</sub>S تا حدی به صورت واکنش‌های (۲-۵) و (۳-۵) انجام می‌شود [50].



حداکثر رسوب مس در محلول مذاب، تقریباً ۶۲ درصد است. در این ترکیب ۱۵/۷ تا ۲۵ درصد وزنی، مذاب به صورت مس رشته‌ای رسوب می‌کند که دمای واکنش بین ۱۸۵°C و ۵۴۸°C است [49] که با توجه به (شکل ۳) محصولات مات ایجاد شده در آزمایش‌های تبیین به صورت نقطه‌ای سیاه نزدیک به قسمت بالایی شکاف امتزاج پذیر قرار دارد. گوشه‌ای از شکاف امتزاج پذیری که در آن رسوب مس از مذاب بیشتر است.



شکل ۳: فاز سه‌تایی Cu-Fe-S، نشان دهنده منطقه تجزیه مات و رسوب مس برای دماهای بین ۱۸۵°C و ۵۴۸°C. عالیم ● نشان دهنده مات و ☐ نشان دهنده، شکاف امتزاج پذیری: ناحیه تجزیه مات و رسوب مس [49].

Fig. 3: Ternary phase diagram for the system Cu-Fe-S, indicating the region of matte decomposition and copper precipitation for temperatures between 180°C and 548°C. Symbols ● indicates Matt and ☐ indicates miscibility gap: area of opaque breakdown and copper deposition [49].

هم آرسنیک و هم آنیومان به عنوان عناصر آلیاژی مس استفاده می‌شود و زنجیرهای بین مس آرسنیکی و آنیومانی وجود دارد (تمام آرسنیک و آنتیموان در محلول جامد در فاز مس  $\alpha$  قرار دارد). برخی ترکیبات بین فلزی دیگر) و اشپایس محلول جامد  $\alpha$  با برخی ترکیبات بین فلزی دیگر) و اشپایس مناسب (حاوی فاز  $\alpha$  محلول جامد یا بدون آن) است. در مورد سرب باید گفت که سرب یک فلز واسطه نیست و نمی‌تواند ترکیب فلزی بین آرسنیک و آنتیموان را تشکیل دهد و نمی‌تواند بخشی از اشپایس باشد، اما به دلیل ارتباط ژیوشیمیابی سرب با بسیاری از سنگ‌هایمعدنی فلزات پایه و نقطه ذوب کم سرب، اغلب در هنگام تشکیل، همراه با فاز اشپایس دیده می‌شود.

اشپایس پایه فلزی از بسیاری از محوطه‌های تاریخی و پیش از تاریخ، به ویژه هنگام ذوب سنگ‌هایمعدنی مس یا سرب غنی از آرسنیک یا آنتیموان به دست آمده است [57-59].

گزارش‌های زیادی از تولید اشپایس آهنی از خاور نزدیک و آسیای میانه منتشر شده است. در اوایل عصر برنز از هزاره سوم ق.م در شهر سوخته، در جنوب شرق ایران [60-61]، احتمالاً در اسپیلز بزمان در شهرستان ایرانشهر [13-16] در پروس-کاتسامباس Poros-Katsambas در اوایل عصر برنز در شمال کرت، در کارگاه‌های جریکو (اردن) [62] در بوگازکوی Boğazköy مربوط به هزاره ۲ ق.م در مرکز ترکیه [63]، قطعاتی در کارگاه کامید ال-لوز Kamid el-Loz در لبنان [64] در کارگاه ترینز (Triyens) یونان [65-66] و همچنین در یک بافت رومی- یونانی در کیترا Kythera این ماده تولید شده است [67]. همچنین اشپایس‌های غنی از سرب و مس در مرکز اروپای غربی در اوایل عصر کالکلوتیک تولید شده است [53, 68]. گاهی اشپایس پایه فلزی به صورت شمش در اوخر عصر برنز [69-71] و در روم باستان دادوستد شده است [72-74] که احتمالاً از این ماده برای استخراج بیشتر مس، سرب و یا نقره که در اشپایس به دام افتاده بودند استفاده می‌کردند. در قرون‌وسطی، اشپایس به صورت یک ماده ناخواسته بوده است [74-76]. به‌حال اشپایس، محصولی مهم در هزاره اول تا سوم ق.م بوده است. حتی در کشتی غرق شده در دریای

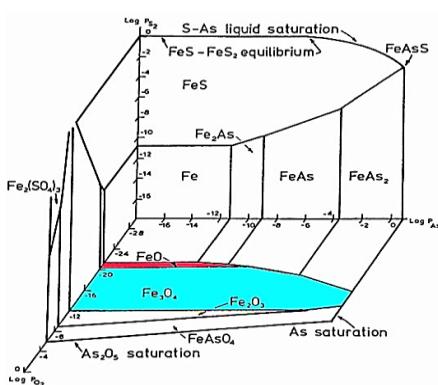
به صورت شمش در اوخر عصر برنز استفاده شده است. احتمالاً از اشپایس برای استخراج بیشتر مس، نقره و سرب که در آن به دام افتاده‌اند استفاده شده است.

## ۲-۵. سرباره اشپایس (Speiss Slag)

ترتیتون معتقد است که در حال حاضر هیچ آلیاژی شناخته نشده است که به این روش ساخته شده باشد، در عوض ممکن است به عنوان یک جزء آلیاژی، در تولید مس آرسنیکدار استفاده شده باشد. برای این کار می‌توان اشپایس غنی از آرسنیک را با مس در یک بوته تحت شرایط اکسیدکننده ذوب کرد (مات مس) که در این فرایند آهن از طریق سرباره حذف خواهد شد. اگرچه مقداری آرسنیک در این فرایند به عنوان دود  $As_2O_3$  از بین می‌رود، اما به‌هرحال به اندازه کافی با مس ترکیب می‌شود که این مقدار از آرسنیک برای تولید مس آرسنیکدار مناسب است [55]. از طرف دیگر فلزکار می‌تواند از نقطه‌جوش کم آرسنیک ( $614^{\circ}C$ ) برای انتقال آرسنیک از اشپایس به سطح آثار پایه مسی در یک بوته سریسته تحت شرایط کاهشی از طریق فرایندی با عنوان سمنت‌سازی استفاده نماید. چنین شیوه نقره‌سازی با استفاده از آرسنیک، از هزاره سوم ق.م در آثاری مانند گاو هورزو تپه [56] مشاهده شده است. حدس دیگر در مورد اشپایس و آهن آرسنیکدار این است که به‌آسانی ذوب می‌شوند و ممکن است به عنوان یک فلز ریخته‌گری مورد استفاده قرار گیرد.

در بررسی‌های متالورژی کهن (Archaeometallurgy) دو نوع اشپایس وجود دارد که در این حوزه مورد توجه قرار گرفته است. نخست اشپایس آهنی که معمولاً مخلوطی از آهن آرسنیکدار و آرسنیدهای آهن است و نوع دوم اشپایس پایه فلزی که معمولاً مخلوطی از مس، نیکل، آهن و یا نقره است و به عنوان آرسنیدها و آنتیموئیدها اغلب با مقداری گوگرد و سرب همراه هستند [30]. از نظر سطح ماده، اشپایس به ترکیبات بین فلزی مشکل از فلزات و عناصر اصلی گروه پنجم جدول تناوبی، یعنی  $Bi, N, P, As, Sb$  اشاره دارد. در عمل تنها آرسنیک، آنیم وان و فسفر به عنوان جزء آلیاژی در آهن اولیه نقش مهمی را ایفا می‌کنند و گاهی نیز در ذوب سرب براساس مواد معدنی، فسفر ظاهر می‌گردد.

طبیعی است. ازین‌رو، ترکیب شیمیایی سرباره‌ها به صورت دامنه‌ای خاص و پیچیده از ترکیبات مختلف، در شرایط خاص ترمودینامیکی است. در بسیاری از موارد بخش‌هایی از دیواره‌های ذوب کوره و یا ماسه‌سنگ‌های حرارت دیده نیز جزئی از سرباره‌ها رده‌بندی می‌شوند که در حقیقت این نوع رده‌بندی تمایز با تعریف علمی سرباره پیدا می‌کند. بخش‌هایی از قسمت‌های کوره ذوب و ماسه‌سنگ‌های کف کوره، جزء دسته‌بندی سرباره‌ها تلقی نمی‌شوند. این بخش‌ها و قطعات کوره می‌توانند اطلاعات بسیار زیادی در مورد پخت و در بعضی موارد میزان درجه حرارت را در عملیات ذوب مشخص نماید. با توجه به شرایط استحصال و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی، این سرباره‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند (Metallurgical) که شامل ۱- سرباره‌های متالورژیک (Non-Metallurgical) و ۲- سرباره‌های غیر متالورژیک (Technological Slags) هستند.<sup>[80-81]</sup> از نظر توری، سرباره‌های غنی از آهن، می‌تواند از آرسنات‌های ذوب آهن، مانند اسکورودیت در طول هوزادگی آرسنوبیریت شکل گیرد. این مسئله با حضور منظم مگنتیت در این سرباره‌ها سازگار خواهد بود. برای تولید اشپایس از چنین کانی‌هایی کاملاً اکسیدشده در شرایط اکسایش و کاهش، گستره‌ای از پایداری مگنتیت و ووستیت مطابق با (شکل ۴) وجود دارد. این نمودار ناحیه‌های پایداری، گوگرد، آرسنیک و اکسیژن را به طور همزمان نشان می‌دهد.



شکل ۴: موقعیت حوزه‌های پایداری فازهای مختلف در سیستم Fe-As-O-S در ۹۷۳ درجه کلوین در فشارهای جزئی مختلف اکسیژن، گوگرد و آرسنیک. اقتباس شده از چاکرابورتی و لینچ [82].

Fig. 4: The position of stability domains of different phases in the Fe-As-O-S system at 973 K at different partial pressures of oxygen, sulfur and arsenic. Adapted from Chakraborty and Lynch [82].

بالتیک اشپایس غنی از مس و نیکل دیده شده که اهمیت این محصول را در عصر برنز برجسته کرده است [9]. اشپایس شاید از ذوب سنگ‌های آرسنید مانند آرسنوبیریت (FeAs<sub>2</sub>)، لولنگیت (Löllingite) یا اسکورودیت (FeAsO<sub>4.2H<sub>2</sub>O</sub>) و سپس به عنوان فلز برای ریخته‌گری استفاده شده است یا برای تولید مس آرسنیک به عنوان جز آلیاژی استفاده شده است. در اینجا لولنگیت دارای ترکیب با ۲۷ درصد آهن و ۷۳ درصد وزنی آرسنیک است؛ بنابراین می‌توان گفت که اشپایس یک محصول متالورژیک است و نه یک ماده معدنی.

همچنین باید اشاره کرد که بسیاری از آثار مکشوف مربوط به هزاره ۳ و ۴ ق.م. مانند نهال میشمار (Nahal Mishmar) در لیوانت، ارسلان تپه در آنانتویی و شنگویت (Shengavite) در قفقاز، دارای حداقل ۲۵ درصد وزنی آرسنیک هستند و احتمالاً این آثار از اشپایس ساخته شده‌اند [77-79].

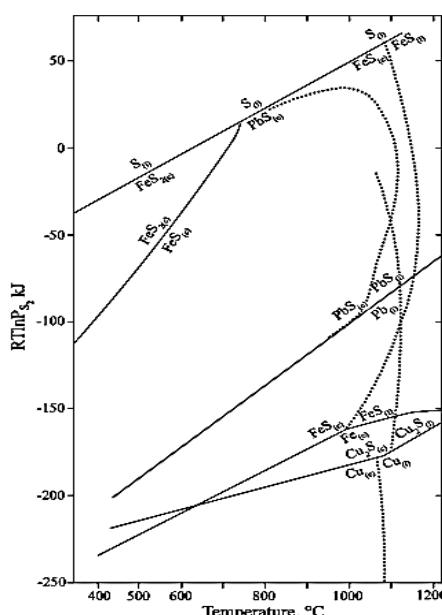
تحت شرایط تعادلی هم مس- آرسنیکی و هم مس- آنتیموانی، فازهای بین فلزی خالص با حدود ۳۰ درصد وزنی به عنوان فازهای Cu<sub>3</sub>Sb و Cu<sub>3</sub>As شناخته شده است؛ بنابراین آلیاژهای دارای بیش از ۲۰ درصد وزنی آرسنیک و یا آنتیموان را می‌توان به عنوان هم‌مرز اشپایس پایه فلزی تعریف کرد [30].

دمای ذوب این آلیاژ با ۱۵ تا ۲۰ درصد آرسنیک نسبتاً پایین است و یک یوتکنیک دوتایی برای مس و آرسنیک، مس و آنتیموان که هر کدام در دمای کمتر از ۷۰۰°C ذوب می‌شوند، وجود دارد. همچنین وجود سرب می‌تواند دمای ذوب را بسیار کم کند و در نتیجه محدوده انجماد برای آلیاژهایی نزدیک به یوتکنیک را افزایش دهد. این ویژگی احتمالاً باعث شده است تا آلیاژهای غنی از اشپایس را برای ریخته‌گری‌های پیچیده و دشوار مناسب نماید.

### ۳-۵. سرباره

سرباره‌ها، تفاله‌های سیلیکات‌های ناشی از فرآیند ذوب هستند که به صورت یک سیلیکات‌های مذاب و یا به صورت مخلوطی از چند سیلیکات دیده می‌شوند که دارای بافت شیشه‌ای هستند. در شرایط خاص ترکیب سرباره‌ها شامل ترکیبی از اکسیدها، فسفات‌ها، برات‌ها، سولفیدها، کاربیدها و فلزهایی به صورت

[5] [86]. در حقیقت در ذوب مس، گوگرد تمایل بیشتری به جذب مس نسبت به آهن دارد، بنابراین گرمای تشکیل  $2\text{CuO} + \text{FeS}$  بیشتر از  $\text{Cu}_2\text{S}$  است. بر این اساس واکنش  $\text{Cu}_2\text{S} + \text{FeO} = \text{Cu}_2\text{S} + \text{FeS}$  و از چپ به راست خواهد بود [87] در مقابل در سیستمی با هر دو فلز و عنصر اکسیژن، آهن به صورت قوی‌تری با اکسیژن پیوند برقرار می‌کند؛ بنابراین در یک سیستم حاوی فلزات و عناصری مانند گوگرد، اکسیژن و آهن، اکسید آهن را تولید می‌کند و از این‌رو جذب سرباره مذاب می‌شود، در حالی که مس ترجیحاً به عنوان یک فاز مذاب جداگانه با گوگرد پیوند می‌دهد تا مات را تولید کند [88].



شکل ۵: سبک الینگهام برای آهن، مس و سرب در ارتباط با گوگرد. باز ترسیم شده [86] نشان می‌دهد که در دماهای بالاتر از حدود  $650^\circ\text{C}$  خط واکنش  $\text{Cu}_2\text{S} - \text{Cu}$  در فشارهای جزئی کمتر است گوگرد از خطا و واکنش  $\text{FeS} - \text{Fe}$  نشان می‌دهد که مس در مقایسه با آهن ترجیحاً با گوگرد واکنش می‌دهد.

Fig. 5: Ellingham style diagram for iron, copper and lead in relation to sulphur. Redrawn [86] The graph shows that at temperatures above about  $650^\circ\text{C}$ , the reaction line  $\text{Cu}_2\text{S} - \text{Cu}$  is lower at partial pressures of sulfur than the  $\text{FeS} - \text{Fe}$  line, indicating that Cu compared to Fe it reacts preferentially with sulfur.

## ۶. تشکیل فازهای تشکیل شونده با توجه به دیاگرام تعادلی فازی مس-آرسنیک

مس و آرسنیک در حالت جامد تا حدودی در یکدیگر محلول هستند. در دمای یوتکتیک یعنی در دمای  $685^\circ\text{C}$

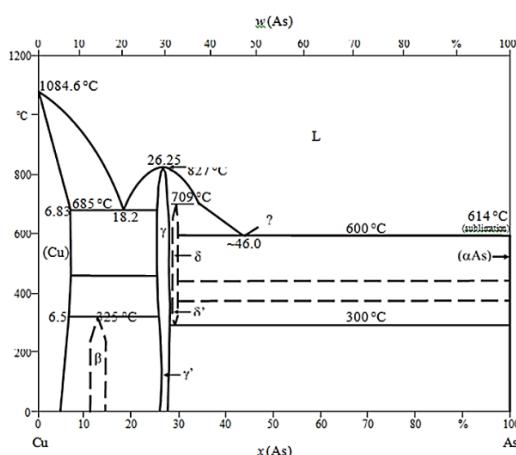
سرباره‌ها از نظر رنگ ظاهری به سه دسته تقسیم می‌شوند که شامل سرباره خاکستری، سیاه و قهوه‌ای رنگ است [83-84]. با توجه به سرباره‌های خاکستری رنگ به دست آمده از منطقه اریسمان که از نظر ماکروسکوپی متراکم و به صورت لکه‌های سبزرنگ اکسید مس در سطح بیرون و گاهی اوقات الگوی جریان معمولی در سرباره‌ها دیده می‌شود. سرباره‌های خاکستری رنگ به دست آمده از اریسمان، نشان از ذوب سنگ معدن مس در تولید مس آرسنیک را تأیید می‌کند. وجود ووستیت  $\text{FeO}$  در سرباره خاکستری نشان از شرایط احیاکننده‌تری در ذوب است. همچنین، وجود ناخالصی‌های سولفیدی در این سرباره می‌تواند ناشی از حضور مقداری سولفور در شارژ بوته باشد. سرباره‌های قهوه‌ای رنگ نیز می‌تواند دلیل بر وجود عناصر دیگری مانند دیواره‌های ذوب کوره یا ریفرکتوری باشد و نشان می‌دهد که از سرباره‌های خاکستری رنگ متخلخل تر و ناهمگن‌تر هستند. در بررسی سیستم  $\text{Fe}-\text{As}$  همه ساختار اشپایس بین دمای  $825^\circ\text{C}$  با فازهای متفاوت که به میزان آرسنیک یا آهن و شرایط اتمسفری کوره بستگی دارد ایجاد می‌شود [85]. در بررسی‌های ترنتون، تفاوت اصلی سرباره قهوه‌ای و خاکستری، مقدار اکسید آهن و آهک کم است و در سرباره قهوه‌ای قادر مس گزارش شده است؛ اما میانگین محتوای اکسید آرسنیک در سرباره‌های قهوه‌ای تقریباً ۱۰ برابر بیشتر از سرباره خاکستری است. ناخالصی‌های فلزی در سرباره‌های قهوه‌ای همگی به صورت ترکیبات آهن-آرسنیک و یا سولفید هستند [144-145]. ترنتون معتقد است پریل‌هایی که در سرباره‌ها به دام افتاده‌اند، محدوده‌ای از ترکیبات  $\text{Fe}_2\text{As}_2$  است. مات و اشپایس از طریق اختلال ناپذیری متقابل و چگالی متفاوت در حالت مایع، بعد از انجماد به وسیله عملیات مکانیکی از یکدیگر جدا می‌شوند [30].

گزارش‌های مختلف در سیستم  $\text{Fe}-\text{As}$  و اکسید  $\text{Fe}$  ذکر شده است که تحت شرایط کاهش  $\text{Fe}$  تا دمای ذوب خودش پایدار است، درحالی که در اتمسفر غنی از  $\text{CO}_2$  به  $\text{FeO}$  و  $\text{FeS}$  بخار آرسنیک و مونوکسید کربن واکنش می‌دهند.

نمودارهای الینگهام برای واکنش پذیری فلزات مختلف با گوگرد نشان می‌دهد که در سیستم حاوی مس، آهن و گوگرد در کوره معمولی در دمای بالا مس تمایل بیشتری برای ترکیب با گوگرد نسبت به آهن از خود نشان می‌دهد (شکل

به عنوان فاز  $\beta$  و فاز  $\gamma$  در این دیاگرام فازی مشخص شده است. فاز  $\beta$  از نظر استوکیومتری بین  $Cu_6As$  و  $Cu_9As$  به وسیله یک واکنش پریتکنیک در حدود دمای  $325^{\circ}C$  ایجاد شده است. فاز شیمیایی  $Cu_6As$  با نماد پیرسون 2 و گروه فضایی  $P6/mmc$  [94] است. فاز  $\gamma$  با فرمول شیمیایی  $Cu_3As$  نزدیک به  $Cu_3As$ ، در ساختار هگزاگونال متبلور شده و با علامت پیرسون 24 و گروه فضایی  $\bar{T}P3 Cl$  [95] نشان داده شده است. این آرسنیدهای بین فلزی از فرایندهای ریخته‌گری آلیاژ  $Cu$ -As به دست آمده است [96]. فرم دمای بالا برای  $Cu_3As$  با ساختار هگزاگونال با علامت پیرسون 3 و گروه فضایی  $P63/mmc$  گزارش شده است. مطابق بررسی‌های سابرایمین و لوچ (Subraminns and Laue) این تها گزارشی از فرم دومیکیت دمای بالا بوده است؛ بنابراین این فاز در دمای بالا تأیید نشده است و در بررسی‌های بعدی در سیستم  $Cu$ -As و با نادیده گرفتن فاز  $\beta$  در دمای اتاق، فاز مس می‌تواند تقریباً  $6\text{ wt\%}$  آرسنیک را در دمای اتاق بدون رسوب آرسنید فاز  $\gamma$  در خود حل کند.

$\alpha$ -domeykite دارای ساختار مکعبی و در گروه فضایی  $\bar{A}43d$  تعریف شده است که این مینزال در  $225^{\circ}C$  به  $143d$  تغییر شده است که این مینزال در  $600^{\circ}C$  به  $\beta$ -domeykite و  $\beta$ -domeykite کریستالوگرافی، مینزال  $\beta$ -domeykite دومیکیت ساختگی نامیده می‌شود. با توجه به داده‌های مینزال‌الوژی، رایج‌ترین پدیده طبیعی، شکل  $Cu_3As$  را به عنوان مینزال (Fig. 6) در نظر گرفته‌اند [97-98].



شکل ۶: نمودار تعادلی مس-آرسنیک [129].  
Fig. 6: Copper-arsenic equilibrium diagram [129].

در صد (Wt=7.8%) آرسنیک در مس حل می‌شود. در دمای پایین‌تر، حلالیت به  $6/5$  در صد (Wt=6.9%) در دمای اتاق کاهش می‌یابد [89]. بخشی از مس خالص در نمودار تعادل فازی نشان می‌دهد. یک پوتکنیک  $18/2$  در صد (Wt=21%) آرسنیک و دو ترکیب بین فلزی مس غنی از فاز  $\beta$  و فاز  $Cu_3As$  به صورت پرتکنیکی در بین دمای بین  $300^{\circ}C$  تا  $350^{\circ}C$  شکل می‌گیرد [90].

فاز  $\gamma$ ،  $Cu_3As$  به صورت متجانس در دمای  $827^{\circ}C$  شکل می‌گیرد و تقریباً مستقل از دما و در دامنه ترکیبی بین  $25/5$  و  $27/5$  آرسنیک وجود دارد. مواد معدنی مذکور به صورت طبیعی ترکیب  $Cu_3As$  که به عنوان دومیکیت شناخته می‌شود، ایجاد می‌کند [91]. در آزمایش‌های نورث‌اور یوتکنیک  $Cu_3As$  بدون شرایط تعادلی در مس شامل ۳ در صد آرسنیک یافته شده است [92]. همچنین بود، پیدایش نخستین فاز  $\gamma$  در حدود ۲ در صد آرسنیک را ثبت کرد که این فاز قبلاً در آلیاژهای شامل ۱ در صد آرسنیک نیز مشاهده شده است [93].

مشکل دیگر در ریخته‌گری آلیاژهای مس-آرسنیکی گرایش به جایش دانه‌ای است. دیاگرام تعادل فازی مس-آرسنیک در (شکل ۶) نشان می‌دهد که انجماد در طی فاصله زمانی زیادی رخ می‌دهد. قبلاً اشاره شد در صورتی که شرایط بدون تعادل باشد، رشد ریزساختارها اغلب به صورت دندریتی است. در این مورد جایش دانه‌ای یا هسته‌دار شدن در مرکز دندریت‌ها دارای ترکیب غنی از مس مذاب با نقطه ذوب بالاتر شکل گرفته است؛ در حالی که مس در ناحیه‌ی بین دندریت‌های بیشتر حاوی ترکیب با نقطه ذوب کمتری است.

دیاگرام فازی  $Cu$ -As، توسط اسکینر (Skinner) و لوچ (Luce) در سال ۱۹۷۱ پیشنهاد داده شد که شامل هم‌آرسنیدهای  $\beta$ -domeykite و  $\alpha$ -domeykite فازهای مینزالی دمای پایین فرض شده است.  $Cu_3As$  به ترتیب با فرمول  $Cu_{27}As$  و  $\beta$ -domeykite مطابق با دیاگرام مینزالی، پایداری بالای مینزال خالص در فشار ۱ اتمسفر باید نزدیک به  $90^{\circ}C$  باشد (دمای پایین‌تر نسبت به آچه قبلاً گزارش شده است). مطابق دیاگرام فازی (شکل ۶) آرسنیدهای بین فلزی احتمالاً در دمای پایین روی می‌دهند. این فازها

توزیع مجدد، خودشان می‌توانند منجر به ایجاد جدایش ماکرو و میکرو شوند.  
از این فرایند در طی جدایش معکوس می‌تواند منجر به ایجاد سطح نقره‌ای، روی آلیاژ Cu-As شود. در طی فرایند انجماد، جدایش معکوس می‌تواند وقتی باقیمانده ماده مذاب در مجاری بین‌دانه‌ای به بیرون نیرو وارد می‌کند، روی دهد. انقباض حرارتی، نیروی محركه اصلی است که منجر به ایجاد این پدیده‌ها می‌شود [103].

در دیاگرام تعادلی مس-آرسنیک نشان می‌دهد که زمینه روشن بین‌دندریتی، باید نقطه پایین یوتکتیک از ترکیب دومیکیت و فاز  $\gamma$  باشد که موجب جدایش نرمال و مغزه‌دارشدن در طی ریخته‌گری شده است.

در طول انجماد، هنگامی که آلیاژ Cu-As در تماس با قالب است، از داخل محلول ریخته شده در قالب، محلول با آرسنیک بالاتر، به سمت بیرون رانده می‌شود. تغییر گازهای محلول که در طی فرایند جامدسازی آزاد می‌شوند، نیز به افزایش فشار داخلی کمک خواهد کرد و باعث می‌شوند یوتکتیک  $(\gamma+\alpha)$  غنی از آرسنیک بهمراه فیدرهای بین‌دندریتی به سطح فشار وارد نمایند؛ که در نتیجه این شرایط، غلظت آرسنیک به طور قابل توجهی از بقیه ریخته‌گری در نزدیکی سطح بیشتر مشاهده خواهد شد (شکل ۷).

در مورد عرق آرسنیک، جدایش معکوس در غلظت‌های بسیار پایین از آرسنیک نسبت به برنزهای قلعی روی می‌دهد [106]. احتمالاً بدلیل فشار بخار بالای آرسنیک در آلیاژ مذاب است. بهانه‌زده ۲ درصد آرسنیک در مس برای تأمین ساختار یوتکتیک کافی است و ازین‌رو امکان تعریق وجود دارد [107].

در این فرایند هر چه محتوای آرسنیک بیشتر باشد می‌توان عرق بیشتری و در نتیجه لایه سطحی گستره‌تر و ضخیم‌تری بر روی سطح ایجاد کند. عرق آرسنیک یک ریزساختار یوتکتیک شامل محلول جامد  $\alpha$  و ترکیب  $\gamma$  یعنی  $(\gamma+\alpha)$  شامل  $29/6$  درصد آرسنیک است. جدایش معکوس (پدیده هراش) در آلیاژهای مس-آرسنیکی، با انجماد آلیاژ، Cu-As، در فشار بالاتر، غلظت محلول آرسنیک باعث

## ۷. وجود آرسنیک در پاتین

جیملا-مایر (Giumlia-Mair)، میکس (Meeks) و مودلینگر (Modlinger) معتقدند که عنصر آرسنیک در پاتین‌های اشیاء، بیشتر جهت زیبایی اشیاء بکار گرفته شده‌اند و اغلب شامل میزان کمی طلا، آرسنیک یا فلزهای دیگر هستند که در تشکیل جلای نقره‌ای [99]، طلایی و سیاه‌رنگ استفاده شده است [100].

کرادوک (Craddock) و جیملا-مایر بر این عقیده‌اند که بر روی برنزهای مصر باستان که به عنوان هسم-کم hsm-km مشهورند، پاتین سیاه وجود دارد که در ترکیب آنها حدوداً ۴ درصد طلا، ۱ درصد آرسنیک و ۱ درصد نقره وجود دارد. با این حال جیملا-مایر، پاتین‌های تیره و درخشان را بر روی آثار مصری فاقد طلا می‌داند؛ اما نسبتاً میزان کمی از آرسنیک، قلع، آهن و سرب در این نوع پاتین‌ها وجود دارد [100].

یکی از اولین نشریه‌هایی که کار آزمایش روی شاکادو Shakudo ژاپنی را توصیف کرد، مجله آن مربوط به تاریخ ۱۹۲۹ م است؛ که مشخص کرده است حدود ۵ درصد طلا با مس ایجاد پاتین سیاه می‌کند. آنالیزهای آزمایشگاهی نیز نشان می‌دهد که عناصر آلیاژ‌کننده با درصدهای کم متفاوت، مانند آرسنیک یا آنتیموان می‌توانند در رنگ پاتین تأثیر داشته باشند. تأثیرات کم طلا، نقره، آرسنیک، آهن و قلع اضافه شده به مس را روی رنگ سطحی آلیاژ بعد از تولید پاتین‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند [101].

## ۸. ایجاد پوشش نقره‌ای در آلیاژهای مس-آرسنیک

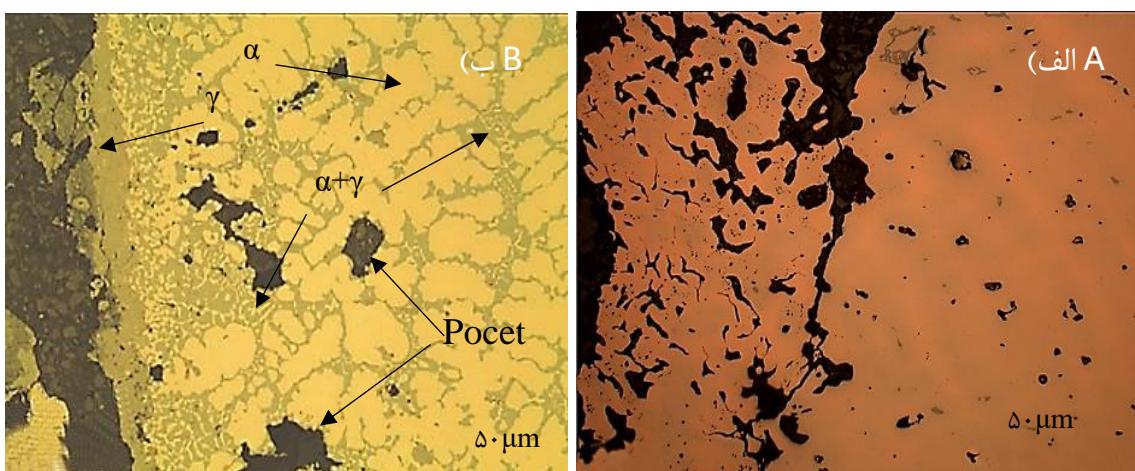
### ۸-۱. جدایش معکوس (Invers Segregation)

جدایش یا سگریگیشن (Segregation) به جداسازی مواد تشکیل‌دهنده در یک آلیاژ یا مناطقی با ترکیب شیمیایی مختلف در آن آلیاژ، گفته می‌شود [102]. به عبارت دیگر، عدم یکنواختی توزیع عناصر آلیاژی در ساختمان فلزی را جدایش می‌نامند.

زمانی که یک آلیاژ ریخته‌گری شروع به انجماد می‌کند، بسته به دما، خاصیت قالب و ماده، عنصرهای در محلول مایع

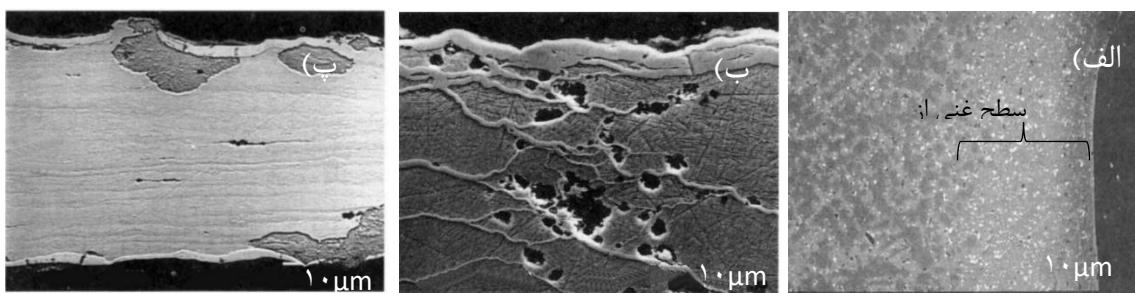
وزنی در هنگام بازپخت به صورت پاکت‌هایی در زیر سطح آلیاژ ظاهر می‌شوند (شکل ۷-ب) و با افزایش غلظت آرسنیک باعث می‌شود این پاکت‌ها در سطح ظاهر شوند و یا موجب جداشدن بخشی از آلیاژ از شیء می‌شوند [104]. از این‌رو در دنیاً باستان، فلزگر توانایی ایجاد سطح نقره‌ای را بر روی اشیاء کامل را داشته است، از این‌رو در برخی از این اشیاء مانند برخی از سکه‌های کارتائین Carthaginian حاوی آرسنیک بین  $\frac{3}{1}$  تا  $\frac{12}{2}$  درصد دیده شده است (شکل ۸).

حرکت به سمت قالب ریخته‌گری می‌شود. فیدرهای بین-دندریتی یوتکتیک ( $\gamma+\alpha$ ) غنی از آرسنیک که باعث فشار به سطح می‌شود، به صورت چشمگیری منجر به غلظت‌های از آرسنیک بیشتر در نزدیکی سطح، نسبت به بقیه ریخته‌گری می‌شوند. لایه سطحی یوتکتیک ( $\gamma+\alpha$ ، به محض اینکه شی بازپخت شود تغییر شکل می‌دهد (شکل ۷-الف) و به آسانی به محلول جامد  $\alpha$  غنی از آرسنیک تبدیل می‌شود [108-109]. در بررسی‌های مودلینگ، آرسنیک با ۵ درصد



شکل ۷: (الف) ساختار برنز آرسنیکی بعد از نیم ساعت در اثر بخار آرسنیک، شکاف و یا پاکت‌هایی ایجاد شده است [104].  
ب) وجود فازهای  $\alpha$  و فاز  $\gamma$  در سطح و ساختار یوتکتیک پاکت‌هایی ایجاد شده ( $\alpha+\gamma$ ) [105].

Fig. 7: A) The structure of arsenic bronze after half an hour of annealing. In the effect of arsenic radiation, gaps or pockets have been created [104]. B) The presence of  $\alpha$  and  $\gamma$  phases on the surface, created pockets and the presence of eutectic ( $\alpha+\gamma$ ) [105].



شکل ۸: (الف) سکه کارتائین با محتوای آرسنیک  $\frac{1}{3}$  تا  $\frac{12}{2}$  درصد آرسنیک [110]. (ب) تیغه Quimperle، لایه مرکب فاز  $\gamma$  گستردگی داشت [111]. (پ) تیغه Los millares اسپانیا و فاز  $\gamma$  پوشیده شده در سطح و رسوب آرسنیک به صورت رشته‌ای در ساختار فلز [112].

Fig. 8: A) Carthaginian coin with arsenic content of 1.3 to 12.2% arsenic [110], B) French Quimperle blade,  $\gamma$ -phase compound layer spread on the blade. [111], C) Los millares blade of Spain and  $\gamma$  phase covered on the surface and arsenic deposition in the form of filaments in the metal structure [112].

رسوبات رشته‌ایی آرسنید پس از ریخته‌گری ایجاد شود، می‌تواند تنها با تحول حالت جامد تفسیر شود. در نتیجه، این نوع رسوبات آرسنید این ایده را تقویت می‌کند که زمان طولانی‌مدت در محیط دفن باعث رسوب آرسنید مس در مرزدانه‌های فاز مس شده است که می‌تواند دلیل بر جایش آرسنیک از محلول جامد فوق اشباع شده در دمای پایین باشد.

#### ۸-۲. سمنتاسیون (Cementation)

یکی دیگر از ویژگی‌های آلیاژهای مس-آرسنیکی ایجاد لایه سمنتاسیون در سطح شی است که در برنزهای به دست آمده از مصر باستان و آناتولی قابل مشاهده است. در اوایل دهه ۱۹۷۰ میلادی بر روی سطح برنز گاو نر به دست آمده از محوطه آناتولی از هورزتپه Horoztepe در ترکیه امروزی که حاوی لایه غنی از آرسنیک بود، یافت شد که مربوط به ۲۱۰۰ ق.م. است. چنین پوششی در سطح، پرسشی را مطرح می‌کند که آیا این لایه مربوط به ویژگی سطح اصلی بوده و یا به صورت جداگانه در تمام سطح به کاررفته است [56]. اسیمیت معتقد است که این پیکره فاقد آرسنیک بوده است و اینکه آرسنیک به عنوان یک پاتین یا پوشش دهنده باید به آن افزوده شده باشد. به هر حال احیای چنین تکنولوژی چشمگیری از ساخت یک پاتین مس-آرسنیکی که مربوط به ۵ هزار سال پیش در آناتولی ترکیه توسعه یافته، مشکل است. اسیمیت به این نتیجه رسیده است بعید است که آلیاژ مس-آرسنیکی در حالت مذاب به کاررفته باشد؛ زیرا ریزساختارها هیچ علامتی مبنی بر وجود فاز یوتکنیک آلفا+ دومیکیت  $(\text{Cu}_3\text{As})_{\alpha+\beta}$  را نشان نمی‌دهند. در نتیجه بکار بردن آن در حالت مذاب غیرممکن است. اخیراً بیله یک روش متفاوت را پیشنهاد می‌کند که نشان می‌دهد این چنین گاو برنزی در ۴ تا ۵ قسمت ریخته شده که در ریخته‌گری این آلیاژ از آرسنیک استفاده شده است. بیله یافت که نیم‌شقة از این گاو به وسیله مس آرسنیکی ریخته شده است در حالی که پاهای جلو از برنز قلع سربی ساخته شده است. آنالیز ایکس‌آر دی XRD از پهلوی گاو فاز مس-آرسنیک ویتنی‌بایت Whitneyite و دومیکیت Domeykite را نشان می‌دهد و پیشنهادشده که به دلیل جایش سطحی از آرسنیک است (شکل ۹).

به هر حال ساختار دندربیتی  $\alpha$  با ناحیه‌های ضخیم‌تر، روی سطح این سکه‌ها (کارتازین) و فیدرهای بین دندربیتی از بدنه فلز، آشکارا ماهیت ریخته‌گری شده، جایش معکوس را در سطح این سکه‌ها نشان می‌دهد [113]. همچنین در اثر دیگری بر روی سطح تیغه‌ایی از کووییمپرل، Quimperle، فرانسه، ساخته شده از آلیاژ مس-آرسنیک، یک لایه مرکب گستردۀ ۷ روی سطح تیغه دیده شده است [111-112]. همچنین در اثر دیگری از اوایل عصر برنز در تیغه از لوس میلارس، Los millares، اسپانیا، فار ۷ دیده شده است که به نظر می‌رسد که در مورد تیغه لوس میلارس، لایه ترکیبی تقریباً احتمالاً نتیجه عرق آرسنیک که به شدت کار شده بوده و هنوز شواهدی از چکش کاری را حفظ کرده است، دیده می‌شود. در مورد تیغه لوس میلارس بعید است که یک سطح کاری عمده به وسیله فرایند سمنتاسیون انجام شود، چنان‌چه برای گاو نر هورزتپه بکار رفته فرایند سمنتاسیون بکار رفته است، رشته‌های ضخیم ترکیب ۷ در بدنه فلزی ناشی از رسوب پس از دفن است که به صورت دویده شده در مرزدانه‌ها، در طول زمان دفن رسوب ایجاد کرده است (شکل ۸). اگرچه ساختار آلفا+دومیکیت  $(\text{Cu}_3\text{As})_{\alpha+\beta}$  در آلیاژهای مس آرسنیکی توسط ریخته‌گری شناسایی نشده است (فرایند مذاب). اطلاعات این مینرال نشان می‌دهد که ساختار مکعب می‌تواند فرم پایدار دومیکیت در سیستم SEM در دمای اتاق باشد [98، 114]. در ساختارهای Cu-As دو نوع ساختار خاکستری نشان داده شده است که یکی شامل رشته‌های نازک‌تر و دوم دارای رسوبات یا رشته‌های ضخیم‌تر است.

دو نوع مورفولوژی اساسی برای آرسنیدها وجود دارد که بستگی به ضخامت‌شان دارد. این نوع ترکیبات رشته‌ای به سختی با دگرگونی (تبديل) یوتکنیک ارتباط دارند؛ زیرا آن‌ها ساختار دوفازی را نشان نمی‌دهند. با این حال، رسوبات رشته‌ای آرسنید ضخیم‌تر مربوط به ریخته‌گری غیرتعادلی است؛ مانند ریزجایش‌های رشته‌ای که عملیات حرارتی بازپخت قادر به از بین بردن بیشتر آن نبوده است. رسوبات رشته‌ای آرسنید نازک‌تر می‌تواند در اطراف مرزدانه‌های جوانه‌زده شده، مشاهده شود. بازپخت تبلور مجدد، تنها پس از فرایند ترمودینامیکی رخ می‌دهد؛ بنابراین، هنگامی که

[116]، ظاهراً این نوع تزئین بر روی این گوشواره در اثر خوردگی تعمدی در سطح ایجاد شده است (شکل [13]).

**۴-۸. رسوب پس از رسوب‌گذاری (Post-depositional precipitation of γ-phase)**

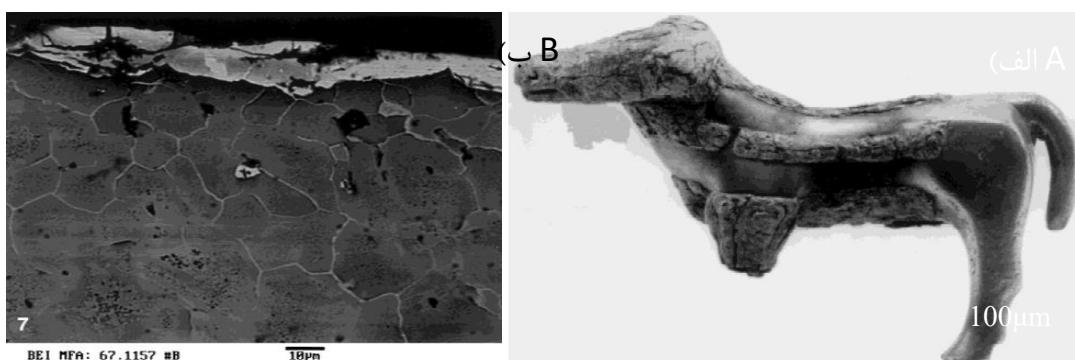
فاز  $\gamma$  دومیکیت، می‌تواند هم در سطح و هم در مرزدانه‌ها رسوب کند [56,117,118,120]. این فاز حتی می‌تواند در دمای اتفاق در بین مرزدانه‌ها، در آلیاژهایی با میزان آرسنیک بالا که بهشدت بر روی آن‌ها کارشده و همگن‌شده‌اند، نیز ایجاد شود [108,109,122]. با این حال [119] اتفاق مشابهی از رشته‌های ترکیب  $\gamma$  را در تیغه‌های از موندسه Mondese استرالیا را ثبت شده است و معتقد است که فاز  $\gamma$  بین‌دانه‌ای از محلول جامد غنی از آرسنیک در طول زمان دفن، رسوب کرده است. در سوزن مس-آرسنیکی بدست آمده از پرو [121] یک نوع متفاوت از این نوع رسوب مشاهده شده است. این رسوب، آگادونیت alogodonite شامل  $Cu_3As$  درصد آرسنیک) در مرزدانه‌ها مشاهده می‌شود و تصور می‌شود که به صورت الکتروشیمیایی رسوب ایجاد شده است که این رسوب مشابه با رسوب مجدد در برنز خورده شده است [113,123].

تکه‌ای مس طبیعی از انارک، ایران، نشان می‌دهد، با مرزدانه‌های غنی‌شده از  $3/5$  درصد آرسنیک که به صورت رگه ظاهر می‌شود. این پدیده متفاوت گرایش طبیعی آرسنیک به غنی شدن یا رسوب دادن در مرز مشترک را نشان می‌دهد. این رسوبات حتی پس از خوردگی بسیار شدید آلیاژهای مس- آرسنیکی در خوردگی‌های بین‌دانه‌ای و شکستگی‌ها، در آلیاژهای کاملاً خورده شده، از محوطه‌های شهر سوخته و اسپیدر بزمان با توجه به آنالیزهای میکروسکوپ نوری و آنالیز SEM-EDX نیز به صورت رشته‌ای سبزرنگ که حاوی تجمع آرسنیک است، دیده می‌شود [13].

تفسیری برای حضور فاز دومیکیت جدایش معکوس روی سطح ریخته‌گری، احتمالاً جوابگوی پوشش دهنده‌گی در این مورد است زیرا در طول روند ریخته‌گری بعضی از مؤلفه‌ها با نقطه ذوب پایین‌تر، مانند فاز غنی از آرسنیک می‌تواند به سطح بیرونی قالب انتقال یابد. پوشش‌های آرسنیکی بر روی بعضی از برنزهای مصری یافت شده است اما تابه‌حال هیچ شواهد متالوگرافی منتشر نشده است. در محوطه‌های تاریخی دیگر نیز ظاهراً برای ایجاد پوشش نقره‌ای از فاز  $\gamma$  استفاده شده است که در این مورد مدلینگ معتقد است که در شهر سوخته مربوط به هزاره سوم ق.م. این سطح نقره‌ای احتمالاً با بکار بردن اشپاپس جهت سماتانتاسیون سطح بر روی آثار کامل شده، استفاده شده است [104]، یا اینکه ترونتون معتقد است برای دادن پوشش نقره‌ای فلز مس را در پودر آرسنیک قرار داده‌اند [9]. تاکنون چنین موردنی، به دلیل وجود خوردگی بسیار شدید آثار مس-آرسنیکی در این محوطه گزارش نشده است [13].

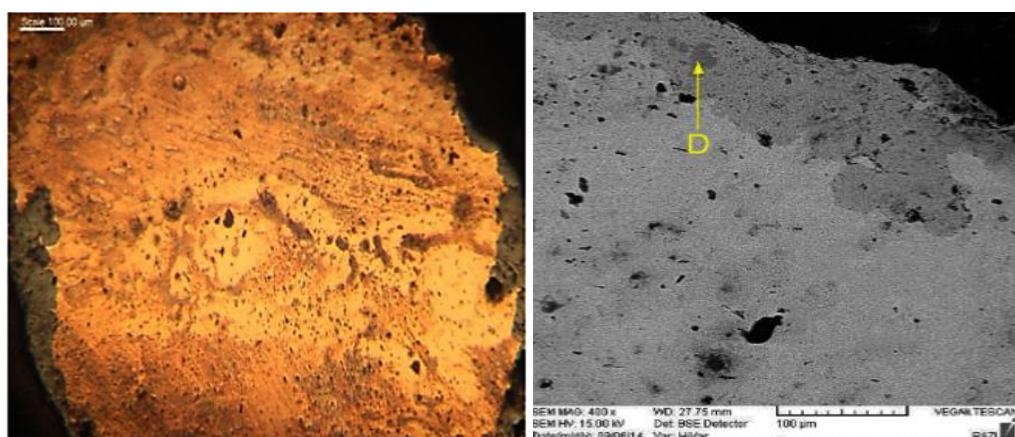
**۴-۹. خوردگی تعمدی (Intentional corrosion/Copper depletion)**

از دیگر آسیب‌های آثار مس-آرسنیکی، ایجاد خوردگی تعمدی یا به عبارتی کاهش مس در سطح است که وجود محلول جامد  $\alpha$  غنی از آرسنیک در سطح است. در این نوع آسیب که جزوی از موارد تزئینی جهت ایجاد سطح نقره‌ای در سطح مورد استفاده قرار گرفته است. بعد از ریخته‌گری، آلیاژ مس آرسنیکی (با ترکیب  $4$  تا  $8$  درصد وزنی آرسنیک) را در محلول سدیم کلرید، به مدت تقریباً دو روز قرار می‌دهند که نهایتاً سطح نقره‌ای رنگی بر روی اثر ظاهر می‌شود که ایجاد فاز  $\gamma$  می‌نماید [115]؛ اما تابه‌حال اثری با این نوع تزئین سطحی ناشی از خوردگی مورد شناسایی قرار نگرفته است [104]؛ اما با توجه به آنالیزها (SEM-EDX) و بررسی‌های صورت گرفته، از گوشواره به دست آمده از جعفرآباد گرگان -J-A-2010-



شکل ۹: (الف) تصویر SEM از گاو هورز تپه که وجود فاز  $\gamma$  به صورت گستردۀ در سطح نشان دهنده پوشش سماتاسیون در سطح این اثر است.  
ب) گاو به دست آمده از هورز تپه.

Fig. 9- A) SEM image of Horztepe bull, the presence of  $\gamma$  phase widely on the surface indicates the cementation coating on the surface of this effect. B) bull obtained from Horz Tepe.



شکل ۱۰: خوردگی تعمدی برای پوشش نقمه‌ای رنگ در اولین نمونه گوشواره به دست آمده از جعفرآباد گرگان [116] (J-A-2010-35)  
Fig. 10: Intentional corrosion for silver coating in the first earring sample obtained from Jafarabad, Gorgan (J-A-2010-35) [116]

انرژی آزاد خواهد شد. مطابق با گزارش‌ها [124] آلیاژهای مس با حدود ۱۸ درصد آرسنیک نشان می‌دهد که سخت کاری در دمای  $600^{\circ}\text{C}$  تا  $500^{\circ}\text{C}$  بسیار شکل‌پذیر هستند. برنزهای آرسنیکی که با گرم‌الله و چکش کاری شده‌اند در دمای  $625^{\circ}\text{C}$  به شدت شکل‌پذیر هستند. آلیاژهایی با محتوای ۱۳ درصد آرسنیک حالت پلاستیک و چکش خواری دارند که به صورت ترک‌هایی در لبه‌ها اشیاء باقی خواهند ماند [125].

یکی از مشکلات در سخت کاری آلیاژهای مس-آرسنیکی در هوا، یعنی در شرایط اکسیداسیون می‌تواند باعث از دست رفتن آرسنیک شود؛ و محتوای آرسنیک داخلی از ۸/۷ درصد به  $7/3$  درصد کاهش دهد [113].

## ۹. ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی برنز آرسنیکی

فلزگران اولیه کشف کردند، با اضافه کردن آرسنیک، قلع، روی یا سرب به مس، به طور چشمگیری باعث تغییر در رنگ فلز و همچنین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خواهند شد و هر نوع از این آلیاژها، با توجه به روش ریخته‌گری درجه خوردگی را تغییر می‌دهند [100].

### ۹-۱. سخت کاری

سخت کاری در دماهای بالا و در زیر دمای تبلور مجدد دوباره انجام می‌شود. تغییر شکل دادن باعث جذب انرژی در طی کار سرد می‌شود که از طریق تبلور مجدد این

شود و شکل پذیری به ماده برگرد. تابکاری در دمای معمولی منجر به حذف فشارهای باقیمانده ناشی از کار سرد می‌شود. هسته‌دار شدن دانه‌های جدید را تبلور مجدد نامیده می‌شود. با توجه به اینکه بیشتر ناجایی‌ها از طریق این مرحله حذف شده‌اند، ماده تبلور یافته از استحکام پایینی برخوردار است. آلیازهای متبلور شده در دماهای بالاتر نسبت به فلزات خالص به دلیل حذف شدن عناصر در محلول جامد یا دیگر فازها مانع حرکت ناجایی‌ها می‌شوند. مس خالص در دمای  $200^{\circ}\text{C}$  تا  $270^{\circ}\text{C}$  دوباره متبلور می‌شود در حالی که در مس آرسنیکی این امر در دامنه دمایی  $300^{\circ}\text{C}$  تا  $400^{\circ}\text{C}$  اتفاق می‌افتد [129].

بود معتقد است که حتی بعد از تابکاری در دمای  $60^{\circ}\text{C}$  نمونه مس با میزان  $6/0.6$  آرسنیک از طریق جدایش دانه‌ای در ریخته‌گری، دندریت‌های نسبتاً غنی از مس واپیچیده شده با جزایری از فاز دومیکیت  $\text{Cu}_3\text{As}$  به صورت پراکنده ایجاد خواهد شد. او همچنین نشان داد که تبلور مجدد در ناحیه‌های غنی از مس در دمای پایین  $300^{\circ}\text{C}$  در میکرو ساختارها ظاهر نمی‌شوند. در بررسی‌های متالوگرافی برای تبلور مجدد، دانه‌های هم محور و بهجای دانه‌های تغییر شکل داده شده، دانه‌های کشیده شده مشخص شده است [130-131].

دانه‌های متبلور شده در صورتی که دارای ابعاد کوچک و میزان تغییرات زیاد باشد، ایجاد می‌شوند. زمان بازپخت کوتاه، دماهای پایین‌تر و فازهای ثانویه از رشد دانه‌ها جلوگیری می‌کنند. در بررسی‌های متالوگرافی، مخصوصاً زمانی که مس در شبکه FCC تابکاری شده، خطوط دوقطبی‌ها می‌توانند به عنوان شاهدی برای تبلور مجدد باشند. شاهد دیگر، برای تبلور مجدد، کاهش استحکام و سختی متعلق به ماده تابکاری شده است که از طریق اندازه-گیری سختی می‌تواند تعیین شود [129].

## ۱۰. ویژگی‌های مکانیکی

هانسون و ماریت Hanson and Marryat هستند که مس حاوی ۱ درصد آرسنیک، باعث افزایش سختی برنیل Brnill نمی‌شوند [131]. همچنین برای مس

مطابق با مشاهده‌های نورس‌آور، شواهد کمی جهت کار سختی آلیازهای مس-آرسنیکی پیش از تاریخ وجود دارد. در متالوگرافی این آثار ناخالصی‌های کشیده شده نمی‌توانند به عنوان شواهدی برای این کار محسوب شوند زیرا هم سولفیدها و اکسیدها در کار سرد تغییرپذیر هستند [126].

## ۹-۲. کار سرد

افزایش سختی‌پذیری کاری، یعنی تأثیر کار سرد، یکی از قابل توجه‌ترین ویژگی‌های آلیازهای مس-آرسنیکی است. کار سرد، تغییر فلز در زیر دمای تبلور مجدد دوباره است. با انجام کار سرد شکل نهایی مورد نظر حاصل می‌شود و فلز در یک‌زمان مقاوم می‌شود. مقاومت یا کار سختی در نتیجه افزایش تعداد ناجایی‌ها است. زمانی که فشار بکار رفته افزایش یابد بازده مقاومت، ناجایی‌ها در فلز شروع به لغزش می‌کنند. اثرهای این حرکت می‌تواند در بخش متالوگرافی همان‌طور که خطوط لغزش نامیده می‌شوند، دیده شود. افزایش بیشتر فشار به کاررفته منجر به شکستگی دانه‌ها می‌شود؛ که در بررسی‌های متالوگرافی به صورت تغییر شکل و ساختار فیبری شکل مشاهده می‌شوند. این ناجایی‌ها متقابلاً در مرز دانه‌ها و ناخالصی‌ها بر روی یکدیگر افتاده و در درجه معینی از تغییر شکل، حرکت ناجایی‌ها مانع از تغییر شکل بیشتر خواهد شد؛ که در نتیجه منجر به افزایش مقاومت ماده می‌شود که به عنوان کار سختی شناخته می‌شود. در صورتی که ماده بیشتر تغییر پیدا کند، ساختار آن از طریق شکستن تخریب خواهد شد. بوهمن معتقد است که سخت شدگی تنها به عنوان تأثیر کار سرد است [127] که در مقایسه با دیگر محققان مانند بود و اثوابی معتقدند که آلیاز با محتوای ۲ درصد آرسنیک به طور چشمگیری شکننده است [128-129].

## ۹-۳. بازپخت

با توجه به آنچه در بالا در مورد کار سرد گفته شد، کار سرد باعث افزایش تعداد ناجایی‌ها در ماده می‌شود. در صورتی که حرکت ناجایی‌ها، مانع از تغییر شکل شود، ترک‌ها شکل می‌گیرند و ماده شکننده خواهد شد. در صورتی که ماده نیاز به تغییر شکل بیشتر باشد، اثر کار سختی باید حذف

## ۱۱. ویژگی‌های کاری

آرسنیک به عنوان یک بازدارنده خوردگی بین‌دانه‌ای، نیز می‌تواند از طریق توزیع مساوی آرسنیک در محلول جامد، نقش مهمی را داشته باشد [132-133]. ذوب سنگ‌های معدنی حاوی آرسنیک و کار بر روی مس آرسنیکی می‌تواند منجر به تبخیر زیاد اکسید آرسنیک ( $\text{As}_2\text{O}_3$ ) شود و دقیقاً مشخص نیست که آیا فلزگر عصر برنز از تبخیر گاز آرسنیک اطلاع داشته است یا نه. به هر حال سلیمچانوف با اطمینان توضیح می‌دهد که در طی ذوب مس و مواد معدنی آرسنیکی نه تنها فلزگر، بلکه تمام موجودات زنده اطراف آن از بن رفته‌اند [135]؛ بنابراین چارلس بر این باور است که استفاده از مس آرسنیکی برای یک دوره ۳۰۰ تا ۴۰۰ ساله بهنوعی کنترل و توسعه یافته است. به‌منظور کنترل این خطر یقیناً فلزگر قدیمی به مشخصه بوی شبیه، سیر توجه داشته است که نتیجه بخار اکسید آرسنیک است. کرتختی یا سستی شدید مزمن آرسنیک با التهاب عصبی- آرسنیکی همراه بوده است که منجر به فلنج همیشگی شده و می‌تواند در درازمدت لنگیدن فلزگران اسطوره‌های قدیمی را شرح دهد [136].

دلایل دیگر جایگزینی آلیاژهای مس- آرسنیکی می‌تواند به‌دلیل کنترل روند فلزگری و تولید باشد. در مقایسه بررنزهای آرسنیکی ذوب شده از کانسنگ‌های مربوطه، بررنزهای قلعی از طریق اضافه کردن قلع به مس مذاب راحت‌تر کنترل می‌شوند. بررنزهای قلعی وابستگی بیشتری بین ترکیب، رنگ و ویژگی‌های مکانیکی نسبت به مس آرسنیکی و فلزهای فهلور از خود نشان می‌دهند [137].

با توجه به وجود آرسنیک در آلیاژ و چالش‌پذیر بودن مقدار آرسنیک اضافه شده به آلیاژ، عمده و غیر عمده بودن این عنصر به دست ساخته‌های حاوی این عنصر مطرح است. چند فرضیه در خصوص کشف آلیاژها از ذوب غیرعمده از کانه‌های حاوی آرسنیک تا آلیاژهای عمده با آرسنیک طبیعی وجود دارد [138] که بر اساس اضافه شدن مقدار آرسنیک موجود در آلیاژ، تعمدی یا غیر تعمدی بودن این عنصر مطرح است، چنانکه رایتر

با محتوای ۲ درصد آرسنیک سختی به HV ۵۳ اندازه‌گیری شده است که تنها کمی بیشتر از سختی مس یعنی، سختی HV ۵۰ است. افزایش عده سختی با حدود ۷ درصد آرسنیک ثبت شده است. بالای ۸ درصد آرسنیک، باعث شکننده شدن، آلیاژ خواهد شد. ازین‌رو نتایج نشان می‌دهد که تا محدوده حلایلت جامد، محلول جامد مس با آرسنیک سخت می‌شود که قابل توجه نیست [54, 126]. بود همچنین مشاهده کرده است که آهسته سرد شدن محلول مذاب در قالب‌های ماسه‌ای، موضوعی مهم برای سخت شدن محلول نسبت به ریخته‌گری در قالب‌های فلزی است. همچنین یافته‌های بود نشان می‌دهد که سرد کردن قالب‌های ماسه‌ای به تعادل نزدیک‌تر خواهد بود، بنابراین قسمت زیاد آرسنیک در محلول جامد قابل پیش‌بینی خواهد بود [5].

یافته‌های هانسون و مریت نشان می‌دهد که اندازه کربستال آرسنیک در ریخته‌گری که منجر به افزایش مقاومت کششی خواهد شد، کاهش می‌یابد؛ و این به دلیل اینکه افزایش مقاومت کششی همراه با کاهش اندازه دانه‌ها خواهد بود. میزان ۱ درصد آرسنیک در تشکیل محلول جامد، اندکی افزایش مقاومت کششی نشان خواهد داد، درحالی که شکل پذیری بی‌تأثیر می‌شود [131].

لخمن Lechtman در بررسی‌هایش نشان می‌دهد که آلیاژهای مس- آرسنیکی لوله شده ضخامت‌شان به ۵۰ و ۷۰ کاهش خواهد یافت که با افزایش میزان آرسنیک و درجه کاری، شکل پذیری و استحکام کششی آلیاژ افزایش می‌یابد [54, 129, 125].

آلیاژهای مس، تقریباً با ۴ تا ۵ درصد آرسنیک دامنه بھینه ترکیب، برحسب کار سرد و کار سخت است. نتایج نورس اور Northover نشان می‌دهد که اکثر اشیای قدیمی مس آرسنیکی دارای میزان آرسنیک کمتر از ۴ تا ۵ درصد هستند [92, 122]. وجود ۸ درصد آرسنیک نیز در آثار به‌دست‌آمده از اسپیدر زمان باعث شکست در ساختار فلز شده است [15]. از تأثیر مهم آرسنیک در مس، موجب افزایش ریز سختی در طول کار سرد می‌شود. معادله (۱) ارتباط بین ریز سختی و میزان آرسنیک نشان داده شده است.

$$\text{HVCu} = 26y + 74 \quad (\text{Wt \%})$$

[132-134]

با محتوای ۱۱/۷ و ۸/۰۱ درصد آرسنیک، انجامداد با تغییر بخار سفید اکسید آرسنیک همراه بوده است [107].

### ۱۳. نتیجه‌گیری

از مهم‌ترین آلیاژهای اوایل عصر باستان، آلیاژهای مس آرسنیکی است. با توجه به اهمیت این آلیاژ در بررسی‌های فلزگری کهن و باستان‌شناسی، آثار ساخته شده و محصولات جانبی این آلیاژ از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است؛ اما با توجه به سمی بودن این عنصر و خطرهای ناشی از آن، باعث اختلال‌های عصبی و یا فلنج‌شدنگی بر روی آهنگر باستان شده است و به مرور زمان باعث جایگزین شدن عنصر قلع در آلیاژ برزنت شده است. استخراج و استحصال فلزهای مس آرسنیکی، با دو روش احیاء مستقیم و روش ذوب همزمان صورت گرفته است؛ که در روش ذوب احیاء مستقیم از کانه اکسیدی، آلیاژ از مس و آرسنیک که در ترکیب فلزی با هم هستند، ایجاد می‌شود؛ اما با توجه به اینکه بیشتر کانسنگ‌های اولیه، کانه‌های سولفیدی هستند، فلزگران از دو روش یعنی، روش بررشته کردن و ذوب مستقیم که باعث احیاء فلز می‌شود، استفاده کرده‌اند. در روش بررشته کردن، کانه اکسیدی تولید شده و سولفور به صورت دی اکسید گوگرد از ترکیب خارج شده و سپس با ذوب مستقیم، احیاء فلز مس و آرسنیک صورت گرفته است؛ که محصولات جانبی دیگر مانند مات، سرباره و اشپایس از تولید این آلیاژها به دست آمده است. از مهم‌ترین ویژگی‌آلیاژهای مس آرسنیکی، ایجاد پدیده جدایش معکوس در هنگام ریخته‌گری است که به دلیل فشار بالای گاز  $\text{As}_2\text{O}_3$ ، موجب ایجاد لایه یا پوششی از فاز گستردۀ ۷ یا دومیکیت، در سطح این آلیاژها شده است، اما با توجه به بررسی‌های انجام‌شده و آگاهی فلزگران از مضرات وجود گاز آرسنیک، احتمالاً فلزگر باستان با آگاهی اقدام به ایجاد پوشش نقره‌ای بر روی سطح این آثار نموده است. به‌هرحال در دنیای صنعتی و مدرنیزه امروز، وجود آرسنیک را به مقدار بسیار ناچیز در حد ppm را نوعی عنصر آلوده‌کننده برای مس می‌دانند. به‌هرحال در دنیای باستان با توجه به مسائل آئینی و کاربردی، ظاهر نقره‌ای برای اشیای فلزی از اهمیت و جایگاه خاصی برخوردار بوده است. روش‌های ایجاد سطح

پیشنهاد کرد که آلیاژهای مسی حاوی بیشتر از ۱ درصد آرسنیک محصولاتی هستند که آگاهانه ساخته شده‌اند [139].

گاهی تهیه نخستین آلیاژها، به عنوان نوعی جادوگری تفسیر شده است [140]. همچنین پیشنهاد می‌شود که کانه‌های مس کربناتی، یا اکسیدی مانند مالاکیت بهتر با مواد معدنی آرسنیکدار مانند الینیت، Olivenite مخلوط و ذوب می‌شوند [141]. غلظت عناصر فرار، مانند آرسنیک، آنتیموان و روی بستگی به روش تشویه کاتی دارد. میزان آرسنیک نهایی در فلز تمام‌شده، بیشتر به دمای ذوب وابسته است [142].

### ۱۴. تأثیر آرسنیک بر مس

چنانکه زویسکر Zwicker گزارش کرده است، افزایش ۵/۰ درصد آرسنیک به مس، می‌تواند از ایجاد خلل و فرج حتی زمانی که ریخته‌گری تحت شرایط اکسیداسیون باشد، جلوگیری کند [143]. با این حال ماریت و هنسون گزارش کرده‌اند ریخته‌گری با آلیاژهای مس حاوی تقریباً ۱ درصد آرسنیک مشکل است. با افزایش میزان اکسیژن این مشکل به اندازه زیادی از بین می‌رود. کمی نقص در ریخته‌گری، تأثیر شدیدی بر ویژگی‌های مکانیکی آن مؤثر باشد [131]. بود و اُتاوی Budd and Ottawa نشان دادند که آلیاژهای مس با آرسنیک بالای ۱۱/۷ درصد در قالب شنی متخلخل شده است [128]. ریخت‌شناسی این خلل و فرج به شکل کروی و نیمه کروی، نشانه مهمی برای خروج گاز آرسنیک از این حفره‌ها، است [5]. مکرل و تلیکت یک افت ۱ درصد آرسنیک را بعد از ۲ ساعت ذوب و سرد کردن برای آلیاژ با ۹/۷ درصد آرسنیک مشاهده کرده‌اند. این در حالی است که در یک شرایط اتمسفر، بدون اکسیداسیون، اثری از افت آرسنیک مشاهده نشده است [113]. بود و اُتاوی ثبت کردند که ذوب و آلیاژ کردن تحت زغال چوب منتج به شرایط احیاکنندگی زیاد می‌شود که در این شرایط هیچ شاهدی از افت آرسنیک یافت نشده است. در بررسی‌های این محققان، آلیاژهایی،

شده است، از موضوع‌های چالش‌برانگیز در حوزه حفاظتی و فلزگری کهنه بوده است. از مهم‌ترین ویژگی‌آلیاژهای مس آرسنیکی، در محیط دفن، رسوب آرسنیک در مرزدانه‌ها است که به صورت دیویده شده در زمینه این آثار دیده می‌شود. وجود این نوع رشته‌های آرسنیکی باعث، هویت و اصالت بیشتر این آثار شده است. این رسوبات حتی در آلياژهایی که در محیط دفن به شدت دچار خوردگی شده‌اند، مانند آلياژهای مس آرسنیکی شهر سوخته و اسپیدر بزمان دیده شده است.

نقره‌ای با استفاده از ۱- جدایش معکوس، ۲- سماننتاسیون ۳- خوردگی تعمدی، ۴- رسوب پس از رسوب‌گذاری انجام شده است. این روش‌ها اگرچه باعث آسیب‌هایی به این آلیاژها شده است اما به‌هرحال با توجه به جنبه زیباشناختی و مبانی حفاظتی، تابه‌حال کمتر مورد توجه قرار گرفته است. به‌هرحال، وجود آلياژهای آرسنیکی در عصر باستان از جایگاه ویژه‌ای برخوردار هستند هم از نظر اهمیت و محتوای آرسنیک در زمان ساخت (تعمدی یا غیر تعمدی اضافه شدن آن) به این آثار و هم از نظر قرارگیری آلياژهای آرسنیکی در طول محیط دفن که باعث خارج شدن این عنصر از آلياژ

## References

- [1] Tylecote R.F. A History of Metallurgy, second ed, The Institute of Materials, London, Materials, London, 1992. 1-9.
- [2] Heskel, D. & Lamberg-Karlovsky, C. C. An alternative sequence for the development of metallurgy: Tepe Yahya, Iran. In (T. Wertime & J. Muhly, Eds) The Coming of the Age of Iron. New Haven: Yale University Press, (1980) pp. 229–266.
- [3] Lechtman H. Tradition and styles in central Andean metalworking. In: Maddin R (ed) The beginnings of the use of metals and alloys, Cambridge, MA, (1988). pp 344–378.
- [4] Budd, P. Haggerty, R. Pollard, A. Scaife, B. and Thomas, R. Rethinking the quest for provenance. *Antiquity*, (1996). 70:168–174.
- [5] Budd, P. A metallographic investigation of Eneolithic arsenical copper. PhD thesis, University of Bradford, Dep. of Archaeological Science, Bradford. (1991).
- [6] Hosler, D. The Sounds and Colors of Power. London: The MIT Press, (1994). p. 310.
- [7] Rappjir G, Determining the origins of sulfide smelting, in: A. Hauptmann, Pernicka. E, Wagner. G.A. (Eds.), Old World Archaeometallurgy, Proceedings of the International Symposium “Old World Archaeometallurgy” Heidelberg, Dt. Bergbau-Museum, Bochum,
- [8] 1987, pp. 107–110 (1989).
- [9] Rehren, Thilo. Boscher, Loïc. Pernicka, Ernst. Large scale smelting of speiss and arsenical copper at Early Bronze Age Arisman, Iran. *Journal of Archaeological Science*. (2012). 39. 1717-1727.
- [10] Thornton, C.P. Rehren, Th. Pigott, V.C. The production of speiss (iron arsenide) during the Early Bronze Age in Iran. *Journal of Archaeological Science*, (2009). 36. 308–316.
- [11] Rostoker, W., Pigott, V. C. & Dvorak, J. R. Direct reduction to copper metal by oxide-sulfide mineral interaction. *Archaeomaterials* (1989). 3, 69–87.
- [12] Meier, David Mathias Philip. Preliminary Archaeometallurgical Investigations of Bronze Age Metal Finds from Shahdad and Tepe Yahya Iranian journal of archaeological studies. (2011). 1: 2.
- [13] Pourzarghan, Vahid. Sarhadi-Dadian, Hossein. Hosseini, Samine. Identifying the Technology of a Bronze Dagger Discovered in Espidezh Region of Bazman in Sistan and Baluchestan, Iran. *Journal of Anthropology and Archaeology*. 2017. Vol. 5, No. 1, pp. 47-55 [In Persian].

- [وحید پور زرقان، حسین سرحدی دادیان، ثمینه حسینی. شنا سایی فن خنجر برنزی مک‌شوفه از تاحیه اسپیدز بزمان واقع در سیستان و بلوچستان. ایران. مجله انسان‌شناسی و باستان‌شناسی، ۱۷، ۵ (۴۷-۵۵)]
- [14] Pourzarghan, Vahid. Analysis of corrosion mechanism of arsenic-copper discovered of Spidej region of Bazman and Shahr-i-Sokhta areas in line with conservation of these objects. PhD Thesis, Art University of Isfahan. 2022. [In Persian].
- [وحید پور زرقان، تحلیل سازو کار خوردگی مس-آرسنیکی به دست آمده از محوطه اسپیدز بزمان و شهر سوخته در راستای پایداری این آثار، رساله دکتری، ۲۰۲۲، دانشگاه هنر اصفهان]
- [15] Pourzarghan, Vahid. Bakhshandefard, Hamidreza. Heydari, Mohammad. Microscopic and Microstructural Study of Arsenic Copper from Spidej Bazamn. Journal of Research on Archaeometry. 2020 6 (2):75–89. DOI: 10.52547/jra.6.2.75. URL: <http://jra-tabriziau.ir> [In Persian].
- [وحید پور زرقان، حمیدرضا بخشندفرد، محمد حیدری، مطالعات میکروسکوپی و ریزساختاری مس آرسنیکی از محوطه اسپیدز بزمان، پژوهه‌های باستان‌شناسی، ۲۰۲۰، ۶ (۲)، ۷۵-۸۹]
- [16] Emami, Mohammadamin. Dardeniz, Gonca. Vallcorba, Oriol. Pourzarghan. Vahid. Tayyari, Javad. Towards a deeper understanding of the third millennium BC Iranian metallurgy: Use of synchrotron light for characterizing arsenic-bearing minerals in metal objects from Espidej. Surf Interface Anal. 2022. 1–15. John Wiley & Sons, Ltd [In Persian].
- [محمد امامی، گونکا داردنیز، اریول والکوربا، وحید پور زرقان، جواد طیاری، درک عمیق از مطالوری هزاره سوم ق.م استفاده از نور سینکورتون برای ویژگی‌های مواد معدنی خاوی آرسنیک در اشیاء فلزی بدست آمده از اسپیدز بزمان، تحلیل فصل مشترک سطح، ۲۰۲۲، جان ولی، ۱-۱۵]
- [17] Sabouhi Sani. Farahangiz. Corrosion recognition and study technique and provides a solution for the Bronze Age espidez cemetery metal objects in South East Cultural Museum of Iran. M.A. Thesis. Art University of Isfahan. 2019. [In Persian].
- [فرنگیس صبوحی ثانی، شنا سایی خوردگی و تکنیک ساخت اشیاء فلزی بدست آمده از عصر برنز از گورستان اسپیدز در موزه میراث جنوب شرق ایران، رساله کارشناسی ارشد، ۱۹، ۲۰۱۹، دانشگاه هنر اصفهان]
- [18] Hauptmann, A., Rehren, Th., & Schmitt-Strecker, S. Early Bronze Age copper metallurgy at Shahr-i Sokhta (Iran), reconsidered. In Th. Stöllner, G. Koerlin, G. Steffens & J. Cierny (Eds.), *Man and Mining—Mensch und Bergbau. Studies in Honour of Gerd Weisgerber.* (2003). pp. 197–213) (Der Anschnitt, Beiheft 16). Bochum: Deutsches Bergbau-Museum.
- [19] Potts DT. Mesopotamian civilization. The material foundations. Cornell University Press. (1997).
- [20] Muhy JD. Copper and tin: the distribution of mineral resources and the nature of the metals trade in the Bronze Age. The Connecticut Academy of Arts and Sciences, New Haven. (1973).
- [21] Emsley J. The elements, 2nd edn. Oxford University Press, Oxford. (1991).
- [22] O'Day, P.A. Chemistry and mineralogy of arsenic. Elements 2 (2), 77–83. Okereke, A., Stevens, S.E., 1991. Kinetics of Iron oxidation by Thiobacillus ferrooxidans. Appl. Environ. Microbiol. 2006 57 (4), 1052–1056.
- [23] Gallegos-Garcia, M., Ramírez-Muñiz, K., Song, S. Arsenic removal from water by adsorption using iron oxide minerals as adsorbents: a review. Miner. Process. Ext. Metall. Rev., 2012. 33 (5), 301–315.
- [24] Mandal, B.K., Suzuki, K.T. Arsenic round the world: a review. Talanta., 2002. 58 (1), 201–235.
- [25] Yang, B., Zhang, G.L., Deng, W., Ma, J. Review of arsenic pollution and treatment progress in nonferrous metallurgy industry. Adv. Mater. Res. 2013. 634, 3239–3243.

- [26] Panagiotaras, Dionisios. Papoulis, Dimitrios and Elias Stathatos. Geochemistry of Arsenic and Toxic Response. 2015. DOI: 10.1201/b18734-6. <https://www.researchgate.net/publication/283005429>.
- [27] Ritcey, G.M., Tailings management in gold plants. *Hydrometallurgy*. 2005. 78 (1), 3–20.
- [28] Riveros, P.A., Dutrizac, J.E., Spencer, P. Arsenic disposal practices in the metallurgical industry. *Can. Metall. Q.* 2001. 40 (4), 395–420.
- [29] Bissen, M., Frimmel, F.H., Arsenic-a review. Part I: occurrence, toxicity, speciation,mobility. *Acta Hydrochim. Hydrobiol.* 2003a 31 (1), 9–18.
- [30] Vaughan, D.J. Arsenic. *Elements.*, 2006 2, 71–75.
- [31] Hauptmann, Andreas. *Archaeometallurgy –Materials Science Aspects*. Springer. 2019. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-50367-3>.
- [32] Ramdohr P, Strunz H. Klockmanns Lehrbuch der Mineralogie. Enke Verlag, Stuttgart. (1978).
- [33] Quiring H. Die Metallischen Rohstoffe, ihre Lagerungsverhältnisse und ihre wirtschaftliche Bedeutung 8: Arsen. Enke, Stuttgart. (1946).
- [34] Tretner A. Sorptions- und Redoxprozesse von Arsen an oxidischen Oberflächen. Experimentelle Untersuchungen. PhD-diss, Univers Heidelberg. (2002).
- [35] Nazari, Amir Mohammad. Radzinski, Rebecca. Ghahreman, Ahmad. Review of arsenic metallurgy: Treatment of arsenical minerals and the immobilization of arsenic. *Hydrometallurgy*. 2017. 174 258–281.
- [36] Tylecote, R.F. A History of Metallurgy Second edition. London. 1992.
- [37] Lechtman, Heather. Klein, Sabine. The Production of Copper–Arsenic Alloys (Arsenic Bronze) by Cosmelting: Modern Experiment, Ancient Practice. *Journal of Archaeological Science* (1999) 26, 497–526.
- [38] Charles, J. A. The coming of copper and copper-base alloys and iron: a metallurgical sequence. In (T. A. Wertime & J. D. Muhly, Eds) *The Coming of the Age of Iron*. New Haven, CT: Yale University Press. (1980) pp. 151–181.
- [39] Tylecote, R. F. Summary of results of experimental work on early copper smelting. In (W. A. Oddy, Ed.) *Aspects of Early Metallurgy*. London: British Museum. (1980b), pp. 5–12.
- [40] Zwicker, U., Greiner, H., Hofmann, K.-H. & Reithinger, M. Smelting, refining, and alloying of copper and copper alloys in crucible furnaces during prehistoric up to Roman times. In (P. T. Craddock & M. J. Hughes, Eds) *Furnaces and Smelting Technology in Antiquity*. London: British Museum. (1985) pp. 103–115.
- [41] Rapp Jr., G. Determining the origins of sulfide smelting. In (A. Hauptmann, E. Pernicka & G. A. Wagner, Eds) *Old World Archaeometallurgy*. Bochum: Selbstverlag des Deutschen Bergbau-Museums, (1989) pp. 107–110.
- [42] Rostoker, W., Pigott, V. C. & Dvorak, J. R. Direct reduction to copper metal by oxide-sulfide mineral interaction. *Archaeomaterials*. (1989). 3, 69–87.
- [43] Keesmann I, Bachmann H, Hauptmann A. Klassifikation eisenreicher Schlacken nach dem Phasenbestand. *Fortschritte der Mineralogie*. 1984. 62:114–116.
- [44] Tafel V. Lehrbuch der Metallhüttenkunde 2 (Wismut, Blei, Zinn, Antimon, Zink, Quecksilber, Nickel, Aluminium). Hirzel, Leipzig. (1929).
- [45] Keesmann, I., Rio Tinto: Die Technik der Silbergewinnung zu Beginn des Mittelalters, in: Conference papers, Archeologie, Sou's theme “Argent, plomb et cuivre dans l'histoire”. CNRS, Villeurbanne, 1991. pp. 1–13.
- [46] Ettler V, Johan Z, Selmi Wallisova M, Mihaljević M, Šebek O. Slag

- remains from the Na Slupi site (Prague, Czech Republic): evidence for early medieval non-ferrous metal smelting. *J Archaeol Sci.* (2015) 53:72–83.
- [47] Hauptmann A. 5000 Jahre Kupfer in Oman 1: die Entwicklung der Kupfermetallurgie vom 3. Jahrtausend bis zur Neuzeit Der Anschnitt Beih 4. (1985).
- [48] Westner K, Klein S, Gassmann G. Roman to medieval precious and base metal smelting near Ulpiana (Kosovo): evidence for complex multistage extraction of silver. In: Körlin G, Prange M, Stöllner T, Yalçın Ü (eds) From bright ores to shiny metals, *Festschrift a Hauptmann. Der Anschnitt Beih*, (2016). Vol 29, pp 205–218.
- [49] Sundman, B., Jansson, B. & Anderson, J.-O. The ThermoCalc data base system. *Calphad* 9, (1985). 153–190
- [50] Tafel, V. Lehrbuch der Metallhüttenkunde. Bd. 1 Leipzig: S. Hirzel Verlagsbuchhandlung.
- [51] Tiedemann, H. Die Haarkupferbildung im Kupferstein. *Metall und Erz.* (1926). 23, 200–210
- [52] Kassianidou, V., 1998. Was silver actually recovered from speiss in antiquity? In: Rehren, Th., Hauptmann, A., Muhly, J.D. (Eds.), *Metallurgica Antiqua. Der Anschnitt, Beiheft 8.* Deutsches Bergbau-Museum, Bochum, (1951). pp. 69–76.
- [53] [Craddock PT. Dto., 3. The origins and early use of Brass. *J Archaeol Sci* 3:93–113.
- [54] Müller R, Rehren T, Rovira S (2004) Almizaraque and the early copper metallurgy of southeastern Spain: new data. *Madridrer Mitt.* (1978). 45:33–56.
- [55] Keesmann I, Moreno Onorato A. Naturwissenschaftliche Untersuchungen zur frühen Technologie von Kupfer und Kupfer-Arsen-bronze. In: Hauptmann A, Pernika E, Rehren T, Yalçın Ü (eds) The beginnings of metallurgy, *Der Anschnitt Beih*, (1999). vol 9, pp 317–332.
- [56] Lechtman H. Arsenic bronze: dirty copper or chosen alloy? A view from the Americas. *J Field Archaeol.* (1996) 23(4):477–514.
- [57] Zwicker, U., Natural copper-arsenic alloy and smelted arsenic bronzes in early metal production. In: Mohen, J.-P., Eluere, C. (Eds.), *Découverte du Metal*. Picard, Paris, 1991. pp. 331–340.
- [58] Smith, C.S., An examination of the arsenic-rich coating on a bronze bull from Horoztepe. In: Young, W.J. (Ed.), *Application of Science in the Examination of Works of Art*. Boston Museum of Fine Arts, Boston, 1973. pp. 96–102.
- [59] Bachmann, H.-G., The Identification of Slags from Archaeological Sites. Institute of Archaeology, London. Occasional Publication. 1982. No. 6.
- [60] Keesmann, I. Eisen in antiken Schlacken des südwestiberischen Sulphiderz-Gürtels. *Pallas.* 1999 50, 339–360.
- [61] Rehren, Th., Schneider, J., Bartels, Ch., Medieval lead-silver smelting in the Siegerland, West Germany. *Historical Metallurgy.* 1999. 33, 73–84.
- [62] Doonan, R., Day, P., Dimpoulou-Rethemiotaki, N., Lame excuses for emerging complexity in Early Bronze Age Crete: the metallurgical finds from Poros Katsambas and their context. In: Day, P., Doonan, R. (Eds.), *Metallurgy in the Early Bronze Age Aegean*. Oxbow Books, Oxford, 2007. pp. 98–122.
- [63] Hauptmann, A., Rehren, Th., Schmitt-Strecker, S., Early Bronze Age copper metallurgy at Shahr-i Sokhta (Iran), reconsidered. In: Stoßlner, T., Koerlin, G., Steffens, G., Cierny, J. (Eds.), *Man and Mining/Mensch und Bergbau. Studies in Honour of Gerd Weisgerber: Der Anschnitt, Beiheft 16.* Deutsches BergbauMuseum, Bochum, 2003. pp. 197–213.
- [64] Khalil, L., Bachmann, H.-G., Evidence of copper smelting in Bronze Age Jericho. *Historical Metallurgy.* 1981. 15, 103–106.

- [65] Muhly, J.D., Maddin, R., Stech, T., O'zgen, E., Iron in Anatolia and the nature of the Hittite iron industry. *Anatolian Studies*. 1985. 35, 67–84.
- [66] Frisch, B., Mansfeld, G., Thiele, W.-R., Kamid el-Loz 6. Die Werkstätten der spätbronzezeitlichen Palaestine. Dr. Rudolf Habelt GMBH, Bonn. 1985.
- [67] Kilian, K., 1983. Ausgrabungen in Tiryns. Bericht zu den Grabungen. *Archäologischer Anzeiger* 3, 1981 294–328.
- [68] Waldbaum, J.C., The coming of iron in the eastern Mediterranean: Thirty years of archaeological and technological research. In: Pigott, V.C. (Ed.), *The Archaeometallurgy of the Asian Old World*. University Museum Monograph 89. The University Museum, University of Pennsylvania, Philadelphia, 1999. pp. 27–57.
- [69] Broodbank, C., Rehren, Th., Zianni, A., Scientific analysis of metal objects and metallurgical remains from Kastri, Kythera. *Annals of the British School in Athens*. 2007. 102, 221–240.
- [70] Muñller, R., Rehren, Th., Rovira, S., Almizaraque and the early copper metallurgy of southeast Spain: New data. *Madrider Mitteilungen*. 2004. 45, 33–56.
- [71] Paulin, A., Orel, N.T. Metallurgical examinations in the archaeometallurgical projects of the National Museum of Slovenia. *Materiali in Tehnologije*, 2003. 37 (5), 251–259. Paulin, A., Spaic, S., Spruk, S., Heath, D.J., Trampuz-Orel, N., Speiss from Late Bronze Age. *Erzmetall*. 1999. 52 (11), 615–622.
- [72] Paulin, A., Spaic, S., Heath, D.J., Trampuz-Orel, N., Analysis of Late Bronze Age Speiss. *Bulletin of the Metals Museum*. 2000. 32, 29–41.
- [73] Tylecote, R.F., *The Early History of Metallurgy in Europe*. Longman, New York. 1987.
- [74] Craddock, P.T., Freestone, I.C., Hunt Ortiz, M., Recovery of silver from speiss at Rio Tinto (SW Spain). *IAMS Newsletter*. 1987. 10/11, 8–11.
- [75] Goldenberg, G., *Archäometallurgische Untersuchungen zur Entwicklung des Metallhüttenwesens im Schwarzwald. Blei, Silber- und Kupfergewinnung von der Frühgeschichte bis zum 19. Jahrhundert*. In: Goldenberg, G., Otto, J., Steuer, H. (Eds.), *Archäometallurgische Untersuchungen zum Metallhüttenwesen im Schwarzwald*. Thorbecke Verlag, Sigmaringen, 1996. pp. 9–275.
- [76] Rehren, Th., Schneider, J., Bartels, Ch., Medieval lead-silver smelting in the Siegerland, West Germany. *Historical Metallurgy*. 1999. 33, 73–84.
- [77] Boscher, L. A Reconstruction of Early Bronze Age Arsenical Copper Production at Arisman on the Iranian Plateau. Unpublished MSc thesis, UCL Institute of Archaeology, London. 2010.
- [78] Tadmor, M., Kedem, D., Begemann, F., Hauptmann, A., Pernicka, E., SchmittStrecker, S., The Nahal Mishmar hoard from the Judean Desert: technology, composition, and provenance. *Atiqot*. 1995. 27, 95–148.
- [79] Palmieri, A.M., Frangipane, M., Hauptmann, A., Hess, K., Early metallurgy at Arslantepe during the Late Chalcolithic and the Early Bronze Age IA-IB periods. In: Hauptmann, A., Pernicka, E., Rehren, Th., Yalcin, U. (Eds.), *The Beginnings of Metallurgy*. Der Anschnitt, Beiheft 9. Deutsches Bergbau-Museum, Bochum, 1999. pp. 141–149.
- [80] Meliksetian, K., Pernicka, E., Badaylan, R., Avetisyan, P., Geochemical characterization of Armenian Early Bronze Age metal artefacts and their relation to copper ores. In: *Archaeometallurgy in Europe*. Associazione Italiana di Metallurgia, Milano, 2003. pp. 597–606.
- [81] Bachmann, H.G., "The identification of slags from archaeological sites",

- Institute of Archaeology London. Occasional Publication, (1982). No.6
- [82] [امامی، سید محمدامین، اهمیت مطالعات میرالوژیک بر روی سرباره‌های ذوب قدیمی در پاراژنر کانی‌های فلزی. کنفرانس مهندسی معدن ایران ۱۳۸۳.]
- [83] Chakraborti, N., Lynch, D.C. Thermodynamics of roasting arsenopyrite. Metallurgical Transactions B., 1983. 14B, 239-251.
- [84] Radivojević, Miljana. Rehren, Thilo. Paint It Black: The Rise of Metallurgy in the Balkans. J Archaeol Method Theory. 2015. DOI 10.1007/s10816-014-9238-3.
- [85] Radivojević, Miljana. Archaeometallurgy of the Vinča culture: a case study of the site of Belovode in eastern Serbia. Historical Metallurgy. 2013. 47(1). 13–32.
- [86] Raghavan, V., Phase Diagrams of Ternary Iron Alloys Part 2: Ternary Systems Containing Iron and Sulphur. Indian Institute of Metals, Calcutta. 1988.
- [87] Willis, G.M., Toguri, J.M., Yazawa's diagram. The AusIMM Metallurgical Society. 2009. Special Paper., 1-8.
- [88] Emami, Mohammadamin. Kowald, Torsten. Trettin, Reinhard. Preliminary archaeometallurgical studies on copper extraction from polymetallic ore sources in Meymand, south central Iranian desert. Archaeol Anthropol. 2015. Sci DOI 10.1007/s12520-016-0319-y [In Persian].
- [89] [محمد امین امامی، تورستن کوالد، رین هارد ترین، مطالعه مقدماتی فلزگری در استخراج مس از منابع کان سنگ چند فلزی در میمند، ناحیه جنوب مرکزی ایران، باستان‌شناسی علوم انسانی]
- [90] Craddock, P.T. Early Metal Mining and Production. Smithsonian Institution, Washington D.C, 1995.
- [91] Dies, K. Kupfer und kupferlegierungen in der technik. Springer, Berlin, Heidelberg, New York. 1967
- [92] Subramanian, P. R. and Laughlin, D. E. As-Cu (Arsenic-Copper). In Subramanian, P. R., editor, Phase diagrams of binary copper alloys, Monograph Series on Alloy Phase Diagrams, (1994a) pages 43–52. The Materials Information Society, Materials Park. Ohio.
- [93] Hanson, D. and Marryat, C. Investigation of the effects of impurities on copper. Part III – The effect of arsenic on copper. Journal of the Institute of Metals, (1927). 37:121–148.
- [94] Northover, J.P. Properties and use of arsenic-copper alloys. In Old World Archaeometallurgy, Proceedings of the International Symposium, Heidelberg 1987 (eds A. Hauptman, E. Pernicka, and G.A. Wagner) Selbstverlag des Deutschen Bergbau-Museums, Bochum, (1989). pp. 111–118.
- [95] Budd, P. Eneolithic arsenical copper: heat treatment and the metallographic interpretation of manufacturing processes. In Proceedings of the International Symposium on Archaeometry, Heidelberg 1990, pages 35–44, Basel. Birkhäuser Verlag.
- [96] [Naud, J. & Priest, P. Contributions to the study of the copper-arsenic system. Mater Res Bull, (1972). 783–792 (in French).]
- [97] Bengough, G.D. & Hill, B.P. The properties and constitution of copper-arsenic alloys. J Inst Met. (1910). 3, 34–71.
- [98] Skinner, B.J. & Luce, F.D. Stabilities and compositions of  $\alpha$ -domeykite and algodonite. Econ Geol. (1971). 66, 133–139.
- [99] Heyding, R.D. & Despault, G.J.G. The copper/arsenic system and the copper arsenide minerals. Can J Chem. (1960). 38(12), 2477–2481.
- [100] Pereira, Filipa. Silva, Rui J. C. Monge Soares, António M. Araújo, Maria F. Oliveira, Maria J. Martins, Rui M. S. and Schell, Norberth. Effects of Long-Term Aging in Arsenical Copper Alloys Microsc. Microanal. 2015. 21, 1413–1419. doi:10.1017/S1431927615015263.
- [101] Giumlia-Mair, Alessandra. Investigation of a Copper-based Hoard from the Megalithic Site of al-

- Midamman, Yemen: An Interdisciplinary Approach. *Journal of Archaeological Science*. 2002 29, 195-209.  
doi:10.1006/jasc.2001.0686, available online at <http://www.idealibrary.com> on.
- [102] Scott, D. A, Copper and Bronze in Art: Corrosion, Colorants and Conservation, Los Angeles, Getty Conservation Institute Publications, (2002).
- [103] Giumenta-Mair, A., and M. Lehr. Patinating black bronzes: Texts and tests. In Proceedings of the Fourth International Conference on the Beginning of the Use on Metals and Alloys, 1998 103-8. Tokyo: Japan Institute of Metals.
- [104] ASM Handbook Volume 17. Nondestructive Evaluation and Quality Control. ASM International, 1992.
- [105] Boeira, A., Ferreira, I.L., Garcia, A., Alloy composition and metal/mold heat transfer efficiency affecting inverse segregation and porosity of as-cast AlxCu alloys. *Mater. Des.* 2009. 30, 2090e2098. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2008.08>.
- [106] Mödlinger M. and Sabatini B. A Re-evaluation of inverse segregation in prehistoric As-Cu objects. *Journal of Archaeological Science*, 2016 74, pp 60-74.
- [107] Mödlinger, Marianne. Cziegler, Andreas. Schnideritsch, Holger. Sabatini, Benjamin. Archaeological Arsenical Bronzes and Equilibrium in the As-Cu System. *Metallurgical and Materials Transactions*. 2017. DOI: 10.1007/s11663-018-1322-8 <https://www.researchgate.net/publication/326312521>.
- [108] Mödlinger1, Marianne. Calderon, Raquel de Oro. Haubner, Roland. Arsenic loss during metallurgical processing of arsenical bronze. *Archaeological and Anthropological Sciences*. 2018. DOI: 10.1007/s12520-017-0534-1 <https://www.researchgate.net/publication/319199072>.
- [109] Budd, P. and Ottaway, B. The properties of arsenical copper alloys: implications for the development of Eneolithic metallurgy. In Budd, P., Chapman, (1991).
- [110] Meeks, N. Patination phenomena on Roman and Chinese high-tin bronze mirrors and other artefacts. In Metal Plating and Patination, ed. S. LaNiece and P. Craddock, 1993a 63-84. Oxford: Butterworth-Heinemann. Meeks, N. Surface characterization of tinned bronze, high-tin bronze, tinned iron and arsenical bronze. In Metal Plating and Patination, ed. S. LaNiece and P. Craddock, 1993b. pp 247- 75. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- [111] La Niece, S., and Carradice, I. White copper: The arsenical coinage of the Libyan revolt 241-238 BC. *Journal of the Historical Metallurgy Society*, (1989). 23(1), 9-16.
- [112] Briard, J., and Mohen, J.-P. Le tumulus de la forêt de Cannoit à Quimperle (Finistère). *Antiquités Nationales*, (1974), 6, 46-60.
- [113] Hook, D.R., Freestone, I.C., Meeks, N.D., Craddock, P.T., and Moreno Onorato, A. The early production of Copper Alloys in SouthEast Spain. In *Archaeometry 90* (eds E. Pernika, and G.A. Wagner) *Proceedings of the Archaeometry Conference*, Heidelberg 1990, Birkhäuser Verlag, Basel, (1991). pp. 65-76.
- [114] McKerrell, H. and Tylecote, R. F. The working of copper-arsenic alloys in the Early Bronze Age and the effect of the determination of provenance. *Proceedings of the Prehistoric Society*, (1972) (38):209- 218.
- [115] Meeks ND. Surface characterization of tin bronze, tinned iron and arsenical bronze. In: La Niece S, Craddock P (eds) *Metal plating and Patination. Cultural, technical and historical developments*. Butterworth Heinemann, (1993). pp 247-275.
- [116] Ryndina, N., The potential of metallography in investigations of early objects made of copper and

- copper-based alloys. *Hist. Metall.* 2009. 43/1, 1-18.
- [117] Yadolah Hafshejani, Atefe. Technology and Cause of deterioration investigation of some bronze ornamentation were found in Kurgan's excavations of jafarabad and interpretation a conservation and restoration plan. M.A. Thesis. Art University of Isfahan.2015.
- [118] [عاطفه ید الهی هفشه جانی، فن شناسی و بررسی دلیل تخریب و بعضی از تزئینات برنزی یافته شده از جعفر آباد گرگان و تحلیل نقشه حفاظت و مرمت، رساله کارشناسی ارشد، دانشگاه هنر اصفهان، ۲۰۱۵]
- [119] Ravich, I.G., Ryndina, N.V., Early copper-arsenic alloys and the problems of their use in the Bronze Age of the North Caucasus. *Bull. Metals Mus.* 1995. 23, 1-18.
- [120] [120] Budd, P., Gale, D., Pollard, A.M., Thomas, R.G., Williams, P.A., The early development of metallurgy in the British Isles. *Antiquity.* 1992. 66, 677-686.
- [121] Budd, P.D. Determination of the Manufacturing Processes of Early Prehistoric Arsenical Copper Artefacts by Microstructural Analysis Based on a Reevaluation of the Mechanical Prop. 1991b
- [122] Rovira, S., Gomez, R.P., Las primeras etapas metalúrgicas en la península Ibérica. Estudios metalográficos (Madrid). 2003.
- [123] Smith CS. An examination of the arsenic-rich coating on a Bronze Age bull from Horoztepe. In: Young WJ (ed) Applicat Sc Examin arts, (1973). pp 96–102.
- [124] Northover P. Properties and use of arsenic-copper alloys. In: Hauptmann A, Pernicka E, Wagner GA (eds) Old World Archaeometallurgy. Proc Internat. (1989).
- [125] Pereira, F., Silva, R.J.C., Monge Soares, A.M., Araújo, M.F., The role of arsenic in Chalcolithic copper artefacts e insights from Vila Nova de São Pedro (Portugal). ~ J. Archaeol. Sci. 2013. 40, 2045-2056. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jas.2012.12.015>
- [126] Ravich, I.G., Ryndina, N.V. Early copper-arsenic alloys and the problems of their use in the Bronze Age of the North Caucasus. *Bull. Metals Mus.* 1995. 23, 1e18.
- [127] Lechtman, H. Arsenic bronze: Dirty copper or chosen alloy? A view from the Americas. *Journal of Field Archaeology,* (1996). 23(4):477–514.
- [128] Northover, P. Exotic alloys in antiquity. In Rehren, T., Hauptmann, A., and Muhly, J. D., editors, *Metallurgia Antiqua, Der Anschnitt:* (1998). Beiheft 8, pages 113–121. Deutsches Bergbaumuseum Bochum, Bochum.
- [129] Böhne, C Zur Frage der Härtung von Kupferwaffen und Geräten. *Technische Beiträge zur Archäologie,* (1965). 2:126–130.
- [130] Budd P, Ottaway BS. The properties of arsenical copper alloys: implications for the development of neolithic metallurgy. In: Budd P, Chapman B, Jackson C, Janaway R, Ottaway BS (eds). (1991).
- [131] Bosk M. Material properties of copper alloys containing arsenic, antimony, and bismuth. The material of Early Bronze A. (2003).
- [132] Budd, P. Enolithic arsenical copper: heat treatment and metallographic interpretation of manufacutering processes. In proceeding of the international symposium on archaeometry, Heidelberg 1990, 35-44-Basel. Birkhäuser verlag.
- [133] Hanson, D. Marryat, C. Investigation of the effects of impurities on copper. Part III- the effect of arsenic on the copper. journal of institute of metals. 1927. 37, 121-148.
- [134] Scott. D. A. Metallography and microstructure of ancient and historic metals. Gettyconservation inst. J. Paul Getty Museum. Malibu. Calif. 1991.
- [135] Scott, David A. Schwab, Roland. Metallography in Archaeology and Art. Springer Nature Switzerland. 2019. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-11265-3>.

- [136] Scott, D.A. Ancient Metals: Microstructure and Metallurgy Vol I. Principles and Practice. Conservation science Press. 2010.
- [137] Selimchanov, I. R Arsenical copper in H.H. Coghlans works and investigations in the laboratory of the Institute of History at the Academie of Sciences at Azerbaijan SSR. Historical Metallurgy, (1982). 16(2):50–57.
- [138] Charles, J. A. Early arsenical bronzes – a metallurgical view. American Journal of Archaeology, (1967). (1):21–26.
- [139] Askeland, D. R. The science and engineering of materials. PWS Publishing Company, Boston. (1994).
- [140] Pernicka, E. Gewinnung und Verbretung der metalle in pärhistorischer Zeit. Jahrbuch des Römisches-Germanen. Nationalmuseum Mainz. 1990. 21–129.
- [141] Witter, W. Neues zu den Barrenring-Hortfunden im Vorlande der Ost-alpen. Prähistorische Zeitschrift, (1953). 34/35:179–190.
- [142] Spiridonov, A. A. Kupfer in der Geschichte der Menschheit. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig. (1986).
- [143] Ottaway, B. Prähistorische Archäometallurgie. Verlag Marie L. Leidorf, Espelkamp. (1994).
- [144] Pollard, A. M., Thomas, R. G., and Willianm, P. Some experiments concerning smelting of arsenical copper. In Budd, P., Chapman, B., Jackson, C., Janaway, R., and Ottaway, B., editors, Archaeological Sciences 1989, Oxford. Oxbow Books.
- [145] Zwicker, U. Natural copper-arsenic alloys and smelted arsenic bronzes in early metal production. In Mohen, J.-P., editor, Découverte du métal, volume 2 of Millénaires, (1991). Pages 331–340. Picard, Paris.
- [146] Thornton C. The chalcolithic and early Bronze Age metallurgy of Tepe Hissar, Northeast Iran: a challenge to the “Levantine paradigm”. PhD-diss Univers of Philadelphia. (2009b).
- [147] Thornton C. The emergence of complex metallurgy on the Iranian plateau: escaping the Levantine paradigm. J World Prehist. (2009a). 22:301–327.