

## بررسی روش ساخت و مطالعه تکنیک طلاکاری روکش فلزی درب مسجد امام اصفهان

مهتاب ایزدی دهکردی

گروه مرمت اشیا و آثار تاریخی و فرهنگی، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه آزاد، یزد، ایران

محمد مرتضوی، امید عودباشی

دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران

(دریافت مقاله: ۹۷/۰۳/۲۱ - پذیرش مقاله: ۹۷/۰۸/۰۷)

### چکیده

هنر صفوی همواره از هنرهای غنی و باارزش سرزمین ایران بوده و در میان هنرهای اسلامی نیز از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. در میان آثار به جای مانده از عصر صفوی، مجموعه میدان نقش جهان از اهمیت خاصی برخوردار است که در آن مسجد امام اصفهان دارای ویژگی‌ها و تعدد هنرهای بسیار است. اما یکی از ویژگی‌های بارز آن که تاکنون مورد بررسی فنی قرار نگرفته، درب اصلی مسجد و پوشش فلزی آن است. در این پژوهش با محوریت شناسایی جنس پوشش فلزی درب و نحوه ساخت آن، همچنین شناسایی روش طلاکاری بکار رفته در تزئین درب، سعی شده گامی در جهت شناسایی بهتر هنر فلزکاری عصر صفوی برداشته شود. بدین منظور از قسمت‌های مختلف درب نمونه برداری شد و با روش‌های آنالیز دستگاهی شامل SEM-EDS، ICP-OES و همچنین متالوگرافی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که در ساخت ورقه فلزی روی درب از آلیاژ نقره و مس استفاده شده است. همچنین مقادیر بسیار کمی از عناصر آرسنیک، روی و سرب نیز در ترکیب آلیاژی شناسایی شد که می‌تواند مربوط به سنگ معدن مورد استفاده و فرآیند فالگذاری برای استخراج باشد. روکش نقره‌ای با روش چکش کاری و تابکاری به صورت ورقه در آمده است که نشانه‌های این فرآیند به صورت خطوط لغزش و دوقلوایی‌ها در ریزساختارها مشاهده می‌شوند. همچنین برای تزئینات طلاکاری آن، از روش طلاکاری آتشی استفاده شده است. وجود جیوه در لایه طلا و همچنین خلل و فرج موجود در آن، استفاده از این روش طلاکاری را تایید می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: مسجد امام اصفهان، طلاکاری آتشی، SEM-EDS، ICP-OES متالوگرافی.

## Investigation of Manufacturing and Gilding Technique of Metallic Door Facing of Masji-i Iamām, Isfahān

Mahtab Izadi Dehkordi

Department of Conservation and Restoration, Faculty of Art and Architecture, Yazd branch, Islamic Azad University, Yazd, Iran

Mohammad Mortazavi, Omid Oudbashi

Assistant Professor, Faculty of Conservation and Restoration, Art University of Isfahan, Isfahan, Iran, P.O.Box 1744

(Received 11 June 2018, accepted 29 October 2018)

### Abstract

The art of Safavid period has always been the rich and valuable arts of the Iran which has a great important in art of Islamic period. Among the remaining monuments and relics from the Safavid period in Isfahan, Naqshi-i Jahan square is of particular importance in which Masjid-i Iamām has outstanding artistic features. So, numerous studies have been carried out on different aspects of this Masjid. However, one of the most prominent features that has not been investigated is the main door of the mosque and its metallic facing. The aims of this paper are to identify the alloy composition, manufacturing and gilding technique that have been used in metallic door facings of Masjid-i Iamām, Isfahan, in order to recognize the Safavid metalwork. For this purpose, different parts of the door were sampled and analyzed by SEM-EDS, ICP-OES and also Metallography. The results showed that an alloy of silver and copper has been used in manufacturing of metal sheet of the door. Also a very few amounts of arsenic, zinc and lead were identified in the alloy composition, which can be related to the ore extraction and cupellation process. Slip lines and twins were identify in the microstructure of the silver sheet. Accordingly, metallographic investigation showed that thin silver sheet have been made by hammering and annealing. In addition, the fire gilding (amalgam gilding) was distinguished as surface decorating technique. The presence of mercury in the gold layers and the porosity in the gold layers confirmed the use of amalgam gilding.

**Keywords:** Masji-i Iamām, Isfahan, Fire gilding, SEM-EDS, ICP-OES, Metallography.

**E-mail of corresponding author:** mahtab\_izadi@yahoo.com.

## مقدمه

درب ورودی دالان قندیل‌خانه مقبره شیخ صفی‌الدین اردبیلی، درب مدرسه چهارباغ اصفهان و درب مسجد امام اصفهان اشاره کرد [۹]. با توجه به بررسی‌هایی که بر روی نتایج مطالعات آثار هنری عصر صفویه صورت گرفته، تاکنون هیچگونه پژوهشی بر روی تکنیک طلاکاری این آثار صورت نگرفته و بررسی‌ها در حد طرح کلی آثار و نقوش آنها بوده است. مسجد امام اصفهان، یکی از شاهکارهای بجا مانده از دوره صفوی است که مجموعه‌ای از هنرهای گوناگون در آن بکار رفته است. این مسجد در جنوب میدان نقش جهان قرار دارد و دومین شاهکار معماری است که زیر نظر شاه عباس بنا شد. بنای این مسجد در سال ۱۰۲۱ هـ.ق. شروع شد و در سال ۱۰۴۰ هـ.ق. و بعد از فوت شاه عباس به پایان رسید [۱۰ و ۱۱]. یکی از شاخصه‌های مهم این مسجد تاریخی، درب اصلی آن است که بر شکوه و زیبایی مسجد افزوده است. درب اصلی مسجد امام اصفهان، از چوب ساخته شده و با ورقه‌های فلزی دربردارنده اشعار و نقوش مختلف پوشیده شده است. از نمونه‌های دیگر این نوع از فلزکاری و استفاده از فلز در عصر صفوی می‌توان به درب اصلی مدرسه مادرشاه اصفهان و درب اصلی دالان مقبره شیخ صفی‌الدین اردبیلی اشاره کرد که تاکنون مطالعه‌ای در مورد روش‌های ساخت، فلز یا آلیاژ بکار رفته در پوشش فلزی آنها و روش‌های طلاکاری مورد استفاده در تزیین درب‌ها بخصوص درب اصلی مسجد امام اصفهان صورت نگرفته است.

درخصوص درب مسجد امام اصفهان تنها می‌توان به مقاله آلن (1995) اشاره کرد که در آن به کتیبه خوانی و توصیف ظاهری درب پرداخته شده است. با توجه به اهمیت تاریخی و هنری درب اصلی مسجد امام اصفهان، بررسی فنی و

تاریخچه طلاکاری در جهان از زمان کاربرد لایه طلا روی یک فلز کم ارزش‌تر مانند نقره و مس، به حداقل ۵۰۰۰ سال قبل برمی‌گردد [۲ و ۱]. سه روش عمده برای طلاکاری فلزات در طول تاریخ، شناسایی شده است که شامل تهی سازی سطح<sup>۱</sup>، بکارگیری ورقه طلا<sup>۲</sup> و طلاکاری آتشی<sup>۳</sup> (ملغمه‌ای) است [۳]. طلاکاری آتشی تکنیک برجسته طلاکاری آثار فلزی از قرن ۴ ق.م. در چین و قرن ۳ میلادی در اروپا است [۴]. همچنین این روش طلاکاری در دوره ساسانی بطور گسترده برای تزیین سطح شمار قابل توجهی از اشیای نقره‌ای بکار رفته است [۵ و ۶]. در این تکنیک، سطح شی با آمالگام یا ملغمه (ترکیب طلا و جیوه) پوشانده می‌شود که بعد از چند دقیقه حرارت در دمایی در حدود ۲۵۰ تا ۳۰۰ درجه سانتیگراد، جیوه تبخیر شده، دو سوم وزنش را از دست می‌دهد و آمالگام از خاکستری به طلایی تغییر رنگ پیدا می‌کند [۷]. از قدیمی‌ترین نمونه‌های استفاده از طلا برای تزیین آثار فلزی در ایران می‌توان به بشقاب ایلامی اشاره کرد [۸]. علاوه بر این نمونه‌هایی از دوره‌های هخامنشی، اشکانی و ساسانی نیز بدست آمده است [۲]. طبق بررسی‌هایی که به لحاظ تکنیکی بر روی این اشیاء انجام گرفته است، می‌توان گفت که بطور کلی از دو روش برای طلاکاری ظروف و اشیاء در ایران استفاده شده که شامل طلاکاری ورقه‌ای و طلاکاری آتشی است. طلاکاری جیوه‌ای (ملغمه‌ای) از دوره ساسانی در ایران رواج داشته است [۸]. در دوره صفویه نیز نمونه‌های متعددی وجود دارد که بر روی آنها تکنیک طلاکاری صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به

<sup>1</sup> Depletion gilding

<sup>2</sup> Foil gilding, Leaf gilding

<sup>3</sup> Amalgam gilding یا Fire gilding

بیننده قابل مشاهده نباشد. در شکل ۱ محل‌های نمونه‌برداری مشخص شده است. نحوه نامگذاری نمونه‌ها بدین صورت انجام گرفت که حرف اول نام انگلیسی با توجه به نوع فلز مورد نظر انتخاب شد؛ مانند S مخفف Silver، عدد بعد از آن مربوط به شماره نمونه و عدد بعد از خط تیره مربوط به سال نمونه‌برداری و انجام آزمایش یعنی ۲۰۱۶ است. وجود حرف G در ابتدای نام برخی از نمونه‌ها، نشان از وجود لایه طلاکاری (Gilded) بر روی نمونه مورد نظر است (جدول ۱). پس از نمونه برداری، برای انجام آزمایشات متالوگرافی، میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FE-SEM) و ICP-OES آماده سازی نمونه‌ها انجام شد.

تکنیکی آن در این پژوهش مورد توجه قرار گرفته است. شناخت بیشتر هنر و تکنیک‌های بکار رفته در ساخت آن و همچنین هنرهای تزئینی مانند شناخت روش طلاکاری، علاوه بر شناخت بهتر هنرهای عصر صفوی در شاخه فلزات، به محافظت و نگهداری هرچه بهتر آن نیز کمک می‌نماید.

#### مواد و روش تحقیق

بمنظور بررسی و مطالعه تکنیک ساخت پوشش فلزی سطح درب اصلی مسجد امام اصفهان، ترکیب آلیاژی آن و روش تزئین (طلاکاری)، ابتدا از قسمت‌های مختلف پوشش فلزی درب، نمونه برداری شد. نمونه‌ها از قسمت‌هایی انتخاب شد که کمترین آسیب به درب وارد شود و به لحاظ بصری برای

جدول ۱. مشخصات نمونه‌های مورد بررسی در این پژوهش

ردیف	کد نمونه	محل نمونه برداری	مشخصات نمونه
۱	GS02-16	سرترنج مشبک زراندود لنگه درب سمت چپ	ورقه نقره زراندود
۲	GS06-16	سرترنج مشبک زراندود لنگه درب سمت چپ	ورقه نقره زراندود
۳	S07-16	چارچوب در قسمت بالا سمت راست	ورقه نقره
۴	S08-16	کناره کتیبه بالایی سمت راست در لنگه درب راست	نوار باریک از ورقه نقره
۵	GS09-16	گل چهارپر زراندود در حاشیه سمت راست درب راست	ورقه نقره زراندود
۶	S10-16	چارچوب در سمت راست	ورقه نقره
۷	S11-16	قسمت پایین لنگه درب سمت چپ	ورقه نقره
۸	S12-16	کناره سمت چپ در لنگه درب راست	ورقه نقره

[۱۲]. مطالعه و بررسی مقاطع تهیه شده از نظر ریزساختار و لایه طلاکاری با استفاده از میکروسکوپ نوری مدل BK-POL/BK-POLR مجهز به دوربین کانن EOS KISS XS CCD و نرم افزار شکل برداری Breeze system انجام شد.

بمنظور شناسایی ترکیب آلیاژی ورقه‌های بکار رفته روی سطح درب، سه نمونه فاقد لایه طلا برای انجام آزمایشات ICP-OES انتخاب گردید. انتخاب نمونه‌های فاقد طلا بدین جهت است که وجود لایه طلا کاری بر روی نمونه‌ها و انجام آزمایش ICP-OES باعث وجود طلا در نتایج شده که می‌تواند در تشخیص معادنی که نقره از آن‌ها استخراج شده است، ایجاد خطا نماید. قبل از انجام آزمایش، نمونه‌ها با استفاده از سنباده از هرگونه آلودگی و خوردگی پاکسازی شد. آنالیز عنصری با استفاده از دستگاه ICP-OES مدل Varian در آزمایشگاه زرآزما واقع در تهران انجام گرفت. در جدول ۲ آزمایشات انجام شده بر روی نمونه‌های مختلف به تفکیک بیان شده است.

بمنظور مانع نمونه‌ها از رزین اپوکسی Arak SEK20 و هاردنر با نسبت ۲ به ۱ استفاده شده است. پس از پرداخت و صیقلی نمودن سطح نمونه‌های مانع شده با سنباده‌های مختلف و در نهایت خمیر الماس در دانه بندی‌های متفاوت (از ۳ تا ۰/۲۵ میکرون)، نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FE-SEM) ساخت شرکت TE-SCAN مدل MIRAS3 ساخت کشور جمهوری چک مجهز به طیف‌بینی پاشنده انرژی (EDS) مدل RONTEC ساخت کشور آلمان، دارای نرم‌افزار SAMx در بنیاد علوم کاربردی رازی تهران مورد آنالیز و بررسی ریزساختاری قرار گرفتند.

پس از انجام آزمایشات SEM، نمونه‌ها برای متالوگرافی آماده شد. مقطع نمونه‌ها قبل و بعد از اچ با میکروسکوپ متالوگرافی مورد بررسی قرار گرفت. برای اچ نمونه‌های نقره‌ای از محلول دی‌کرومات پتاسیم اسیدی (۱۰۰ ml) دی کرومات پتاسیم اشباع در آب، ۱۰ ml اسید سولفوریک و ۲ ml کلرید سدیم اشباع) استفاده شد

جدول ۲. آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های مختلف

S12-16	S11-16	S10-16	GS09-16	GS06-16	GS02-16	نمونه نوع آزمایش
•	•	•	•	•	•	SEM-EDS
•	•	•	•	•	•	METALOGRAPHY
•	•					ICP-OES

## نتایج و بحث

### نتایج آنالیز عنصری ورقه‌ها با استفاده از- FESEM-EDS و ICP-OES

آنالیز ماتریس فلزی بر روی نمونه‌های مانت شده با استفاده از FESEM-EDS انجام شد. در این مرحله زمینه فلزی ورقه‌های نقره فاقد لایه طلا و ورقه‌های نقره دارای لایه طلا (زراندود) مورد آنالیز قرار گرفت. نتایج آنالیز EDS نشان داد که در ساخت ورقه‌های فلزی روی درب اصلی مسجد امام اصفهان از آلیاژی از نقره و مس استفاده شده است (جدول ۳). مقدار نقره در نمونه‌های

مختلف در حدود (wt%) ۹۸-۹۰ و مقدار مس در حدود (wt%) ۹-۲ شناسایی شد. مس یکی از عناصر آلیاژی معمول در آثار نقره‌ای تاریخی است [۱۲ و ۱۳] و در بسیاری از اشیای نقره‌ای تاریخی، مقادیری مس در ترکیب آلیاژی شناسایی شده است [۱۴ و ۱۵]. افزودن مس به نقره به صورت قابل توجهی استحکام آن را افزایش می‌دهد [۵ و ۱۶]. علاوه بر این، افزودن مس به نقره در گذشته بمنظور کاهش میزان استفاده از این فلز و در نتیجه کاهش هزینه بوده است [۱۷].

جدول ۳. نتیجه آنالیز عنصری (SEM-EDS) ورقه فلزی سطح درب مسجد امام اصفهان بر اساس درصد وزنی (wt%)

شماره نمونه	Ag	Cu	S
GS02-16-1	۹۷/۰۳	۲/۵۲	۰/۴۵
GS06-16-5	۹۷/۶۵	۱/۸۷	۰/۴۸
GS06-16-6	۹۴/۵۴	۴/۱۳	۱/۳۳
GS09-16-1	۹۷/۱۲	۲/۴۶	۰/۴۲
GS09-16-2	۹۶/۹۷	۲/۶۴	۰/۳۹
S10-16-1	۹۸/۲۳	۱/۴۱	۰/۳۷
S11-16-1	۹۰/۸۸	۸/۸۵	۰/۲۷
S12-16-1	۹۷/۳۹	۲/۲۹	۰/۳۲

شماره S11-16 مقدار بسیار قابل توجهی از مس (wt% ۳۳) در ترکیب آلیاژی ورقه نقره شناسایی شد. احتمال دارد که به مرور زمان این قسمت به علت قرارگیری در پایین درب، دچار آسیب شده است و در دوره‌های بعد تعمیر شده باشد، لذا ورقه فلزی بکار رفته در دوره‌های بعد از نظر ترکیب آلیاژی متفاوت از دو نمونه دیگر (قسمت‌های مشبک) اصلی است.

همچنین آنالیز عنصری ورقه‌های نقره‌ای فاقد لایه طلا بمنظور شناسایی دقیق‌تر ترکیب آلیاژی با استفاده از ICP-OES انجام شد. در آنالیز ICP-OES نمونه‌های شماره S10-16 و S12-16 ترکیب آلیاژی تقریباً مشابه با حدود (wt% ۹۷ نقره و (wt% ۲ شناسایی شد (جدول ۴). این نتایج، مقادیر به دست آمده از آنالیز EDS برای ترکیب آلیاژی ورقه‌های فلزی روی درب را نیز تأیید می‌کند. با این وجود، در نمونه



شکل ۱. لنگه درب سمت راست و سمت چپ مسجد امام اصفهان و محل‌های نمونه برداری (عکس از نگارندگان، ۱۳۹۶)

جدول ۴. نتایج آنالیز عنصری ورقه‌های فلزی با استفاده از ICP-OES بر اساس درصد وزنی (wt%)

شماره نمونه	Ag	Cu	As	Pb	Zn	S	Fe	P
S10-16	۹۶/۸۸۹	۲/۶۶۸	۰/۰۰۲	۰/۲۳۱	۰/۰۰۵	۰/۰۳۳	۰/۰۲۸	۰/۰۰۸
S11-16	۶۴/۷۷۹	۳۳/۰۵۸	۰/۰۱۷	۰/۱۷	۰/۱۵۳	۰/۳۳۵	۰/۱۳۸	۰/۳۳۴
S12-16	۹۷/۸۶۹	۱/۶۹۴	۰/۰۰۲	۰/۱۰۶	۰/۰۰۶	۰/۰۲۲	۰/۰۲۸	۰/۰۰۵

آلیاژی با نسبت تقریباً مشابه از نقره و مس در تمام بخش‌ها به جز قسمت پایین درب مسجد امام اصفهان استفاده شده است.

#### بررسی ریزساختاری ورقه‌ها با SEM و OM

در ادامه مطالعه فناوری ساخت ورقه‌های فلزی درب مسجد امام اصفهان، بررسی ریزساختاری نمونه‌ها قبل و بعد از اچ انجام شد. در تصاویر بدست آمده از بررسی ریزساختاری ورقه‌های فلزی با میکروسکوپ نوری (OM)، دانه‌های بازتبلور یافته دارای نوارهای دوقلویی مشاهده شد (شکل ۲) که نشان دهنده استفاده از چکش کاری و تابکاری در فرآیند ساخت و ایجاد ورقه‌های فلزی است [۱۳، ۲۳ و ۲۴]. علاوه بر این، در ریزساختار ورقه فلزی نمونه شماره S10-16 نوارهای دوقلویی تغییر شکل یافته و خطوط لغزش در تصاویر متالوگرافی نمونه‌ها مشخص گردید. وجود نوارهای دوقلویی تغییر شکل یافته و خطوط لغزش در ریزساختار، نشان دهنده استفاده از چکش کاری سرد بعنوان آخرین مرحله شکل دهی ورقه‌های فلزی است [۱۲].

علاوه بر این، در بررسی ریزساختار نمونه S10-16 شواهدی از مغزه دار شدن مربوط به ریخته‌گری اولیه قطعات نقره نیز مشاهده می‌شود که در ریزساختار به صورت نواره تیره و روشن در راستای طولی نمونه ادامه یافته است (شکل ۳). به

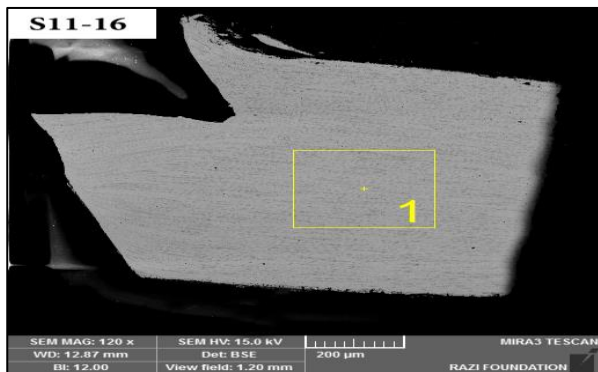
مقدار بیشتر مس در ترکیب آلیاژی نمونه شماره S11-16 در آنالیز EDS نیز مشخص شده است. علاوه بر این در بررسی ریزساختاری این نمونه با میکروسکوپ الکترونی روبشی (تصاویر ۴ و ۵) نیز ریزساختار متفاوتی از سایر نمونه‌ها مشخص شد. در آنالیز عنصری ورقه‌های فلزی با ICP-OES، علاوه بر Ag و Cu بعنوان عناصر اصلی آلیاژی، As، Pb، Zn، S، Fe و P نیز به مقدار بسیار کم<sup>۱</sup> (کمتر از ۰/۵ wt%) شناسایی شد. این عناصر بعنوان ناخالصی‌های باقی‌مانده از سنگ معدن اولیه شناخته می‌شوند [۱۸]. مقادیر بسیار مشابه از این عناصر در نمونه‌های S10-16 و S12-16 نشان دهنده استفاده از سنگ معدن با ترکیب مینرالوژیکی یکسان برای استخراج نقره است [۱۵]. از طرفی مقادیر متفاوت از عناصر کم مقدار (جزیی) بویژه Fe، S، Zn و P در نمونه S11-16 در مقایسه با دو نمونه دیگر می‌تواند مربوط به مس افزوده شده به ترکیب آلیاژی نیز باشد. این عناصر در اشیای مسی و آلیاژهای آن نیز شناسایی شده است [۱۸، ۱۹ و ۲۰]. از طرفی عدم شناسایی طلا در ترکیب نقره، نشان دهنده استفاده از کانی‌های سولفید سرب<sup>۲</sup> برای استخراج نقره است [۲۱]. علاوه بر این، وجود مقادیر بسیار کم سرب (کمتر از ۱ wt%) شناسایی شده در آنالیز ICP-OES نشان دهنده فرآیند تصفیه و خالص‌سازی خوب نقره است [۲۲]. با توجه به نتایج آنالیز ورقه‌های نقره‌ای مشخص گردید که از ترکیب

<sup>۱</sup> Trace elements

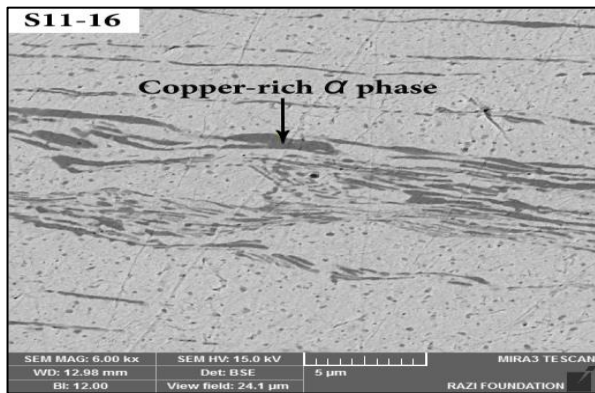
<sup>۲</sup> Lead sulphide ores



مطالعه متالوگرافیکی نمونه S11-16، ریزساختار فیبری<sup>۱</sup> مشخصه آلیاژ دوفازی که تحت عملیات مکانیکی (چکش کاری سرد) قرار گرفته است، را نشان داد [۱۲ و ۲۶] (تصاویر ۴ و ۵). آلیاژ Ag-Cu یک سیستم یوتکتیک دوتایی ساده به ترتیب با دما و ترکیب یوتکتیک ۷۹۹ °C و wt% ۲۸/۱ است [۲۷]. حداکثر حد حلالیت مس در نقره در حالت جامد در دمای یوتکتیک، ۸/۲۷٪ است [۲۸].

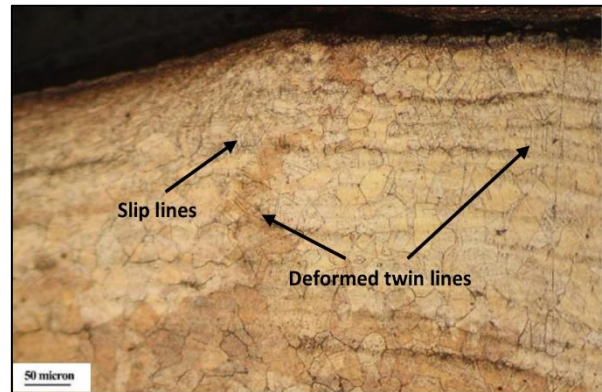


شکل ۴. ریزساختار فیبری نمونه S11-16 نشان دهنده چکش کاری سرد آلیاژ دوفازی.



شکل ۵. ریزساختار فیبری نمونه S11-16 نشان دهنده چکش کاری سرد آلیاژ دوفازی. فاز تیره نشان دهنده فاز غنی از مس  $\alpha$  در ریزساختار است.

دلیل سرد شدن غیرتعدلی مذاب، مغزه دار شدن در ریزساختار اشیای تاریخی اتفاق می افتد. با توجه به عملیات تابکاری انجام گرفته روی نمونه، این ناهمگنی در ترکیب دانه ها بطور کامل از بین نرفته و در ریزساختار به صورت نوارهای تیره و روشن مشاهده شود [۲۵].



شکل ۲. شکل متالوگرافی نمونه S10-16 نشان دهنده ریزساختار با دانه های باز تبلور یافته و دارای دوقلوبی های تغییر شکل یافته و خطوط لغزش.



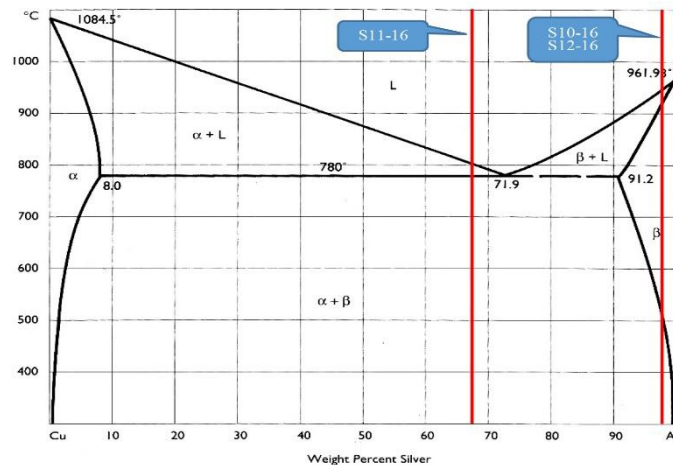
شکل ۳. شکل متالوگرافی نمونه S10-16 که در آن مغزه بندی باقی مانده در ریزساختار به صورت نوارهای تیره و روشن در راستای طولی نمونه قابل مشاهده است.

<sup>1</sup> Fibrous structure



مذاب به ترکیب یوتکتیک نزدیک شده و ریزساختار  $\beta+\alpha$  از مذاب شکل می‌گیرد. در شکل SEM-BSE این نمونه (شکل ۵) فاز غنی از مس  $\alpha$  با رنگ تیره مشاهده می‌شود. چکش‌کاری قطعه با ریزساختار دو فازی منجر به کشیدگی ریزساختار در راستای طولی شده است. نمونه‌هایی از این نوع ریزساختار در اشیای آلیاژی Ag-Cu تاریخی بدست آمده از ایران نیز شناسایی شده است [۲۹].

میزان مس موجود در ترکیب آلیاژی نمونه S11-16 با توجه به آنالیز ICP-OES، در حدود ۳۳ wt% شناسایی شد که کمی بیشتر از ترکیب یوتکتیک در آلیاژ Ag-Cu است. آلیاژهای دارای مقادیر مس بیشتر از میزان یوتکتیک، با عنوان هایپر یوتکتیک شناخته می‌شود. بر این اساس، با توجه به دیگرام فازی (شکل ۶)، ریزساختار ترکیبی از فاز  $\alpha$  و یوتکتیک  $\beta+\alpha$  است [۱۳]. عبارتی ابتدا فاز  $\alpha$  شکل گرفته و در ادامه با کاهش دما و انجماد مقادیر بیشتر مس، ترکیب



شکل ۶. نمودار فازی آلیاژ Ag-Cu [۱۲] که در آن نواحی مربوط به ترکیب آلیاژی نمونه‌های S10-16، S11-16 و S12-16 بر اساس مقدار مس و نقره شناسایی شده در آنالیز ICP-OES مشخص شده است

از OM و FESEM-EDS مورد بررسی و آنالیز قرار گرفت. در تصاویر متالوگرافی نمونه‌ها ساختار اسفنجی و متخلخل لایه طلائی روی بستر فلزی که از مشخصه‌های تکنیک طلاکاری معروف به طلاکاری ملغمه‌ای است [۷، ۳۰، ۳۱]، مشاهده شد (شکل ۷). در طلاکاری ملغمه‌ای، بخشی از جیوه موجود در ترکیب Au-Hg بکار رفته روی سطح، در اثر حرارت تبخیر شده و ساختار متخلخلی را ایجاد می‌کند [۳۲]. عبارتی در اثر تبخیر جیوه، سطح طلاکاری شده دارای ظاهری مات است. از این رو در زمان طلاکاری، پس

### بررسی میکروسکوپی و آنالیز لایه طلائی

از جمله تزیینات بکار رفته برای تزیین سطح ورقه‌های نقره‌ای درب مسجد امام اصفهان، اجرای لایه طلائی بر روی بخش‌هایی از آن است. بمنظور شناسایی لایه سطحی و همچنین تکنیک اجرا، نمونه برداری از این قسمت‌ها انجام شد. سه نمونه GS02-16، GS06-16 و GS09-16 از بخش‌های بالایی و پایینی درب که دارای تزیینات طلائی بودند جدا و مانت شد. مقطع عرضی نمونه‌ها از نظر ساختاری، لایه‌های تشکیل دهنده و ترکیب عنصری با استفاده

از خاکستری رنگ می‌دهد [۷ و ۳۵]. در واقع در فرآیند تشکیل آمالگام، جیوه طلا را حل کرده و در حضور جیوه مازاد منجر به ایجاد آلیاژی نیمه مایع<sup>۱</sup> متشکل از دو فاز  $Hg_{(l)}$  و  $Au_2Hg$  می‌شود [۳۲ و ۳۶]. هنگامی که این ترکیب حرارت داده شود، جیوه مایع (فلزی) موجود در ترکیب آلیاژی آمالگام، تبخیر شده و رنگ آن از خاکستری به زرد تغییر می‌کند که نشان دهنده واکنش در حالت جامد است که در آن  $\gamma$ -آمالگام طلا ( $Au_2Hg$ ) مقداری جیوه از دست داده و به  $\zeta$ -آمالگام طلا ( $Au_3Hg$ ) تبدیل می‌شود [۷]. حرارت دهی بیشتر منجر به تشکیل محلول جامد طلا و جیوه با عنوان فاز  $\alpha$  خواهد شد [۳]. نمودار فازی Au-Hg که در آن ترکیبات مختلف آلیاژی مشخص شده است در شکل ۹ ارائه شده است. همچنان که در نمودار فازی مشاهده می‌شود، میزان جیوه در ترکیب فاز  $\alpha$  حداکثر ۲۱ wt% است.

بررسی میکروسکوپی سطح مقطع نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر، دو لایه متفاوت را در تصاویر BSE نمایان ساخت (شکل ۹). نتایج آنالیز عنصری لایه‌ها با استفاده از FESEM-EDS بطور مجزا در جدول ۶ ارائه شده است. مقایسه نتایج بدست آمده در این خصوص به همراه تصاویر میکروسکوپی، نشان دهنده ایجاد یک لایه نفوذی متشکل از Ag, Au, Hg و مقادیر بسیار کم Cu در فاصله بین فلز زمینه و لایه طلایی رویی است.

از حرارت دهی و تبخیر جیوه، سطح کار صیقل کاری می‌شود تا از این طریق لایه متخلخل طلا، فشرده شده و سطحی صاف و درخشان ایجاد شود [۳۳]. در بررسی میکروسکوپی مقاطع نمونه‌ها، نواحی دارای لایه متراکم طلا نیز قابل تشخیص است. در سمت راست شکل ۷ در بخش‌های فرورفته لایه متخلخل طلا قابل تشخیص است اما در سمت چپ شکل در قسمت‌هایی که سطح برجسته شده و امکان صیقل کاری سطح وجود داشته است، لایه طلا متراکم شده و دارای ضخامت کمتری است.



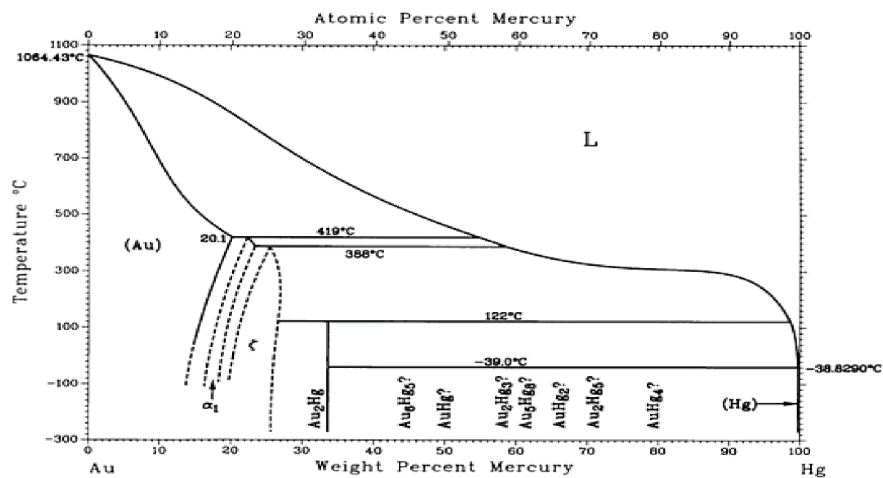
شکل ۷. لایه طلا در نمونه GS06-16 به صورت متخلخل و پرداخت نشده در قسمت فرورفته سطح در سمت راست شکل مشاهده می‌شود. لایه طلا در سمت چپ شکل (قسمت برجسته سطح) پرداخت و صیقل کاری شده و در نتیجه متراکم شده است.

در ادامه، آنالیز مقطع نمونه‌ها با استفاده از SEM-EDS انجام شد. نتایج آنالیز عنصری لایه طلایی هر سه نمونه در جدول ۵ ارائه شده است. شناسایی جیوه به همراه طلا در لایه رویی ورقه‌های نقره‌ای، نشان دهنده استفاده از تکنیک طلاکاری ملغمه‌ای (آمالگام) برای تزیین سطح است [۳۲ و ۳۴]. هنگامی که جیوه و طلا برای ساخت ملغمه مخلوط می‌شود، دو فلز با یکدیگر واکنش داده و تشکیل فاز  $\gamma$ -آمالگام طلا ( $Au_2Hg$ )

<sup>۱</sup> Semi-liquid alloy

جدول ۵. نتیجه آنالیز عنصری لایه بیرونی (طلایی) نمونه ها با استفاده از SEM-EDS بر اساس درصد وزنی (wt%)

شماره نمونه	Ag	Cu	Au	Hg	O	S	Cl
GS02-16-5	۵/۰۴	۰/۱۷	۶۶/۵۸	۲۸/۲۱	۰	۰	۰
GS06-16-3	۴۱/۰۸	۳/۴۵	۳۸/۹۰	۱۴/۰۳	۱/۹۵	۰/۶۰	۰
GS06-16-4	۱۵/۴۵	۰/۳۷	۵۸/۵۶	۲۵/۶۲	۰	۰	۰
GS09-16-3	۲۸/۶۳	۰/۴۱	۴۵/۱۳	۱۹/۶۶	۳/۶۷	۰	۲/۵۰



شکل ۸. نمودار فازی Au-Hg نشان دهنده ترکیبات مختلف آمالگام طلا-جیوه [۳۷]

ملغمه Au-Hg و یا حرارت دهی برای مدت نسبتاً طولانی باشد.

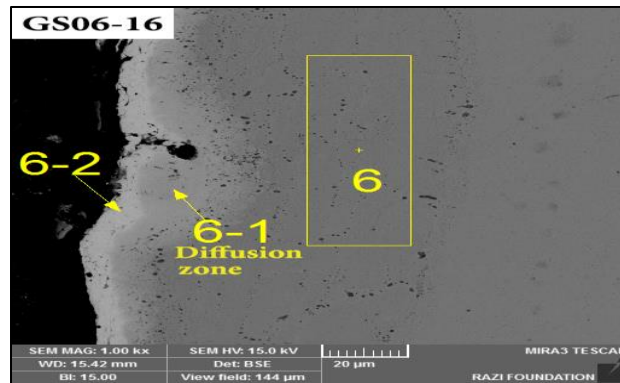
### نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی‌های انجام شده در خصوص ترکیب آلیاژی ورقه‌های فلزی سطح درب مسجد امام اصفهان، و همچنین روش ساخت و تکنیک اجرای تزیینات طلایی روی آن، نتایج زیر حاصل شده است. بدنه اصلی پوشش فلزی درب، از آلیاژ Ag-Cu با میزان نقره در حدود ۹۷ wt% ساخته شده است. براساس تصاویر متالوگرافی، برای ساخت ورقه‌های نقره از

میزان قابل توجه Ag در این ناحیه نشان دهنده نفوذ نقره از سطح بستر است. وجود ناحیه نفوذی<sup>۱</sup> متشکل از طلا و نقره در کنار شناسایی جیوه در این ناحیه و لایه مطالای سطحی، استفاده از روش طلاکاری ملغمه‌ای (آتشی) را تأیید می‌کند [۳]. از طرفی، حرارت مورد نیاز برای تبخیر جیوه از ملغمه Au-Hg و تشکیل لایه طلایی روی سطح، دمایی بالاتر از نقطه جوش جیوه (۳۵۶ °C) است [۳۱]. براین اساس، تشکیل لایه نفوذی با ضخامت تقریباً زیاد نسبت به لایه طلایی، می‌تواند نشان دهنده استفاده از دماهای بالاتر در زمان حرارت دهی پس از آغشته کردن سطح ورقه‌های نقره به

<sup>1</sup> Diffusion zone

چکش کاری و تابکاری استفاده شده است که نشانه‌های آن را در دوقلویی‌ها و خطوط لغزش می‌توان مشاهده کرد.



شکل ۹. شکل SEM-BSE مقطع نمونه GS06-16 که در زمینه (۶)، ناحیه نفوذی (۶-۱) و لایه رویی (۶-۲) قابل تشخیص است. نتیجه آنالیز نواحی مشخص شده در شکل در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶ نتیجه آنالیز عنصری زمینه، ناحیه نفوذی و ناحیه بیرونی (طلایی) نمونه‌ها با استفاده از SEM-EDS بر اساس درصد وزنی (wt%)

S	Hg	Au	Cu	Ag	نمونه GS06-16
۰/۴۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۸۷	۹۷/۶۵	زمینه (ناحیه ۶)
۰/۷۴	۳۹/۸۳	۷/۲۱	۰/۲۹	۵۱/۴۹	ناحیه نفوذی (۶-۱)
۰/۰۰	۳۵/۶۶	۵۸/۶۰	۰/۳۰	۵/۴۴	ناحیه بیرونی (۶-۲)

است. با توجه به تشکیل لایه نفوذی با ضخامت تقریباً زیاد نسبت به لایه طلایی، استفاده از دماهای بالاتر از  $356^{\circ}\text{C}$  در زمان حرارت دهی پس از آغشته کردن سطح ورقه‌های نقره به ملغمه Au-Hg و یا حرارت دهی برای مدت نسبتاً طولانی مشخص گردید.

#### تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود واجب می‌دانند از همکاری و مساعدت ریاست محترم اداره کل میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری استان اصفهان، جناب آقای دکتر الهیاری و همچنین رئیس محترم اداره اموال منقول اداره کل میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری استان اصفهان سرکار

علاوه براین، ساختار دانه‌ای کشیده در راستای طولی مقطع نمونه‌ها نیز نشان از عملیات چکش کاری بر روی ورقه‌ها دارد. از طرفی با توجه شواهد مغزه‌بندی باقی‌مانده در ریزساختار، استفاده از فرآیند ریخته‌گری برای ساخت قطعه اولیه قابل ردیابی است. بر اساس نتایج آنالیز لایه طلایی و شناسایی جیوه و طلا در ترکیب لایه رویی، وجود ناحیه نفوذی و ساختار متخلخل لایه طلا، مشخص گردید که تزیین و طلاکاری سطح ورقه‌های نقره‌ای درب مسجد امام اصفهان با استفاده از ترکیبی از Au-Hg معروف به روش طلاکاری ملغمه‌ای (آتشی) انجام شده است. وجود لایه واسطه (نفوذی) و نفوذ طلا به لایه زیرین بر اثر حرارت ناشی از روش طلاکاری، در تصاویر متالوگرافی قابل مشاهده

۱۰. گدار، آندره، گدار، یدا، سیرو، ماکسیم، و دیگران، آثار ایران، ترجمه ابوالحسن سرومقدم، جلد ۳ و ۴، مشهد، موسسه چاپ و انتشارات آستان قدس رضوی، ۱۳۷۵،  
۱۱. کنبی، شیلا، عصر طلایی هنر ایران، افشار، حسن، نشر مرکز، تهران، ۱۳۸۶.

12. Scott, D.A., *Metallography and Microstructure of ancient and historic metals*, Getty Conservation Institute in association with Archetype Books, (1991).  
13. Scott, D.A., *Ancient Metals: Microstructure and Metallurgy*, Principles and Practice, CSP: Conservation Science Press, Los Angeles, (2010)  
14. Scott, D.A., *A Technical and Analytical Study of two Silver Plates in the Collection of the J. Paul Getty Museum*, The J. Paul Getty museum Journal, 18(1990) 33-52.  
15. Mortazavi, M., Naghavi, S., Khanjari, R., & Agha-Aligol D., *Metallurgical Study on some Sasanian Silver coins in Sistan Museum*, Archaeological and Anthropological Sciences, (2017).  
16. <https://doi.org/10.1007/s12520-017-0511-8>.  
17. Meyers. P., Sayre, E.V., *The Determination of Trace Elements in Ancient Silver Objects by Thermal Neutron Activation Analysis*, Bulletin of the American Group. International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, 11(1971) 29-33.  
18. Costa, V., *The deterioration of silver alloys and some aspects of their conservation*, Studies in Conservation, 46(2001) 18-34.  
19. Meyers, P., van Zelst, L., Sayre, E.V., *Determination of major components and trace elements in ancient silver by thermal neutron activation analysis*, Journal of Radioanalytical Chemistry, 16(1973) 67-78.  
20. Mortazavi, M., Salehi Kakhki, A., Golozar, M. A., Tala'i, H., *Preliminary Metallurgical Investigation of Copper-Based Artifacts at Tepe Sagzabad in Qazvin Plain, Iran (1500-800 BC)*, Iranian Journal of Archaeological Studies, 1(2011) 49-59.  
21. Friedman, A.M., Conway, M., Kastner, M., Milsted, J., Metta, D., Fields, P.R., Olsen,

خانم مهندس حمیدی، که در راستای انجام این پژوهش از هیچ کمکی دریغ نکردند، تشکر و قدردانی نمایم.

## مراجع

1. Oddy, W.A., *Gilding through the ages: an outline history of the process in the Old World*, Gold Bulletin, 14 (2)(1981)75-79.  
2. Oddy, W.A., *Gilding: an outline of the technological history of the plating of gold on to silver or copper in the Old World*, Endeavour, New Series, 15(1991)1, Pergamon Press plc, Great Britain.  
3. Ynsa, M.D., Chamón, J., Gutiérrez, P.C., Gomez-Morilla, I., Enguita, O., Pardo, A.I., Arroyo, M., Barrio, J., Ferretti, M., Climent-Font, A., *Study of ancient Islamic gilded pieces combining PIXE-RBS on external microprobe with sem images*, Applied Physics A, 92(2008) 235-241.  
4. Oddy, A., *A History of Gilding with Particular Reference to Statuary*, In *Gilded Metals: History, Technology and Conservation*, Terry Drayman-Weisser (ed.), Archetype Publications Ltd., (2000)1-19.  
5. Meyers P., Harper P., 1981, *Silver vessels of the Sasanian period. I: the Royal Imagery* New York, The Metropolitan Museum of Art, New York.  
6. Gunter, A.C., and Jett, P., *Ancient Iranian Metalwork in the Arthur M. Sackler Gallery and the Freer Gallery of Art*, Arthur M. Sackler Gallery, Smithsonian Institution, (1992).  
7. Anheuser, K., *The practice and characterization of historic fire gilding techniques*, JOM, 49(1997) 58-62.  
8. Oddy, A., *Gilding of metals in the Old World*, In *Metal Plating and Patination: Cultural, Technical and Historical Developments*, Susan La Niece and Paul Craddock (eds.), Butterworth-Heinemann Ltd, London, (1993) 171-181.  
9. Allan, J.W, *Silver door facings of the Safavid Period*, Iran, 33(1995) 123 137.

- Technology and Conservation*, Terry Drayman-Weisser (ed.), Archetype Publications Ltd., (2000) 21-47.
32. Lechtman, H.N., *Ancient Methods of Gilding Silver: Examples from the Old and the New Worlds*, In Science and Archaeology, Robert H. Brill (ed.), MIT Press, Cambridge, Mass, (1971) 2-30.
33. Northover, P. and Anheuser, K., *Gilding in Britain: Celtic, Roman and Saxon*, In Gilded Metals: History, Technology and Conservation, Terry Drayman-Weisser (ed.), Archetype Publications Ltd., (2000) 109-121.
34. Brambilla, L., *Multianalytical Approach for the Study of Bronze and Gilded Bronze Artefacts*, PhD Thesis, Università degli Studi di Milano(2011).
35. Ingo, G.M., Padeletti, G., de Caro, T., Riccucci, C., Guida, G., Angelini E., and Grassini, S., *Microchemical Investigation of Ancient Silver and Gold Plated Objects: Coating Techniques and Degradation Mechanisms*, In International Conference on Conservation Strategies for Saving Indoor Metallic Collections, Cairo, (2007) 9-13.
36. Cordier, M., *Outdoor bronze conservation: assessment of protective treatments by accelerated aging and of treatment removal procedures by laser cleaning*, MA Thesis, Alma Mater Studiorum – Università di Bologna, (2013).
37. Jackson, P.A., *mplementation and Detection Optimisation of Gold Nanoparticles as Contrast Media in Diagnostic Radiology*, PhD Thesis, College of Science, Engineering and Health RMIT University, (2010).
38. Baker, H., Okamoto, H., (eds.), ASM Handbook, Volume 3, Alloy Phase Diagrams, Prepared under the direction of the ASM International Alloy Phase Diagram and Handbook Committees, (1992).
- E., *Copper artifacts: correlation with source types of copper ores*, Science, 152(1966)1504-1506.
22. Giovannelli, G., Natali, S., Bozzini, B., Siciliano, A., Sarcinelli, G., Vitale, R., *Microstructural characterization of early western Greek incuse coins*, Archaeometry 47, (2005)817-833.
23. Tripathy, B., Rautray, T.R., Rautray, A., Vijayan, V., *Elemental analysis of silver coins by PIXE technique*, Applied Radiation and Isotopes, 68(2010) 454-458.
24. Frame, L., 2010, *Metallurgical investigations at Godin Tepe, Iran*, Part I: the metal finds Journal of Archaeological Science, 37(2010) 1700-1715.
25. I., Bilani, O., Stergioudis, G., Polychroniadis, E.K., *On the comparative study of three silver coins of the IIIrd century B.C. minted in Korkyra, Dyrrachion and by the Illyrian king Monounios*, Applied Physics A, 83(2006) 637-642.
26. Dungworth, D., *An experimental study of some early copper smithing techniques*, In D Dungworth and R C P Doonan (eds.) *Accidental and Experimental Archaeometallurgy*, London, (2013) 149–152.
27. Martínón-Torres, M., Valcárcel Rojas, R., Cooper, J., Rehren T., *Metals, microanalysis and meaning: a study of metal objects excavated from the indigenous cemetery of El Chorro de Maíta, Cuba*, Journal of Archaeological Science, 34(2007)194-204.
28. Hörz, G., Kallfass, M., *The treasure of gold and silver artifacts from the Royal Tombs of Sipán, Peru—a study on the Moche metalworking techniques*, Materials Characterization, 45(2000) 391-419.
29. Northover, P., Northover, S., Wilson, A., *Microstructures of Ancient and Historic Silver*, In Metal, International Council of Museums ICOM-CC, (2013)253–260.
30. Oudbashi, O., and Shekofteh, A., *Chemical and microstructural analysis of some Achaemenian silver alloy artefacts from Hamedan, western Iran*, Periodico di Mineralogia, 84(2015) 419-434.
31. Selwyn, L., *Corrosion Chemistry of Gilded Silver and Copper*, In *Gilded Metals: History*,