

تاریخ دریافت مقاله: ۹۱/۱۰/۲۶

تاریخ پذیرش نهایی: ۹۱/۱۲/۹

علی‌رضا بهرمان<sup>۱</sup>

## بررسی علمی-آزمایشگاهی شیوه طلاکاری تزیینات حرم مطهر مولای متقیان علی(ع)

### چکیده

مطالعه پیش رو، پژوهشی است علمی-آزمایشگاهی که برای بازشناسی یکی از فنون هنری صنعتی فراموش شده جهان باستان انجام پذیرفته است. در جهان باستان از این فن به‌طور گسترده برای ساخت آثار هنری و تزیینی استفاده می‌شده است. صنعتگران هنرمند باستانی با استفاده از این فن بر روی مصنوعات هنری که از جنس فلزاتی چون مس و نقره ساخته می‌شد، پوششی از جنس طلا ایجاد می‌کرده‌اند تا آنها جلوه‌ای طلاگونه پیدا نمایند. این فن که حدود ۲۰۰۰ سال قبل توسط انسان کشف گردید حتی تا قرون متأخر مورد استفاده قرار گرفته می‌شد. این پژوهش که با هدف بازشناسی رموز این فن طراحی شده است با مطالعه آزمایشگاهی نمونه‌های تاریخی آغاز گردید و با ساخت نمونه‌های جدید که بر بستر دانش سنتی ملغمه ساخته شدند، ادامه یافت. در فرآیند این پژوهش، فن پوشش‌دهی طلا بر روی فلز پایه با روش ملغمه بازشناسی گردید و سپس ویژگی‌های فنی آن همچون شناسایی مکانیزم تشکیل لایه طلا و چسبندگی آن بر فلز پایه، شناسایی مقاومت لایه طلا در شرایط محیط طبیعی و همچنین سنجش ضخامت لایه پوشش طلای تشکیل شده با این روش مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفت. در پایان پژوهش، این فن به‌عنوان روشی با قابلیت‌های کاربردی مناسب معرفی گردید و از آن در بازپیرایی تزیینات طلاکاری یکی از مهم‌ترین بناهای مذهبی شیعیان مورد استفاده قرار گرفت.

**کلیدواژه‌ها:** فلزکاری، ملغمه، پوشش فلزی، آلیاژ، حفاظت.

۱. مربی پژوهشگاه سازمان میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری، دکتری مرمت آثار تاریخی، استان تهران، شهر تهران  
E-mail: Alireza\_bahreman2002@yahoo.com

## مقدمه

فنون به کار گرفته شده در بناها و آثار ساخته شده در جهان باستان بعضاً چنان از پیچیدگی برخوردار هستند که برخی ساختن آنها را فراتر از توان انسان دانسته و به موجودات فرازمینی نسبت می‌دهند. اما با عبور از این فرضیه دور از ذهن، باید پذیرفت که بناها و آثار صنعتی و هنری جهان باستان بر پایه فنون و تجربه‌ای ساخته شده‌اند که افزون بر شکوه و زیبایی به خوبی توانسته‌اند در برابر پدیده‌های طبیعی مقاومت نموده، تا روزگار ما بر جای بمانند. این ویژگی‌ها نشان از صحت انتخاب مصالح، فنون و مهارت معماران و صنعتگران جهان باستان دارد، لذا بسیاری از محققان حوزه علوم در تلاش‌اند با بازشناسی فنون جهان باستان از قابلیت‌های علمی-کاربردی آنها حتی در صنعت معاصر بهره‌مند شوند. اما بازشناخت این فنون کاری است دشوار، چرا که متأسفانه دانش فنی بسیاری از آنها در گذر زمان و به دلایل مختلف از حافظه بشری محو و یا بسیار کم‌رنگ شده است. امروزه کارشناسان حوزه حفاظت از میراث فرهنگی اهمیت بازشناسی این فنون را با دقت بیشتری دنبال می‌کنند، زیرا به خوبی به نقش آنها در حفاظت و مرمت بناها و مصنوعات بر جای مانده از جهان باستان واقف هستند. مطالعات علمی-آزمایشگاهی و تجربیات حوزه مرمت آثار به‌درستی نشان داده است که در بسیاری از موارد استفاده از مواد و مصالح و فنون قدیمی در مرمت آثار تاریخی با کالبد بنا و اثر تاریخی همخوانی و سازگاری بیشتری دارد. بر بستر چنین ضرورتی در این پژوهش تلاش گردید با استفاده از روش‌های علمی-آزمایشگاهی فن پوشش‌دهی مس با روش ملغمه‌کاری طلا مورد بازشناسی قرار داده شده و قابلیت‌های آن شناسایی شود. روش‌شناسی این پژوهش بر مطالعات تاریخی، نمونه‌برداری، نمونه‌سازی و انجام آزمون‌های آزمایشگاهی و تحلیل نتایج حاصل مبتنی است. نظریه حاکم بر این پژوهش این است که فونونی که در ساخت آثار و اشیاء در جهان باستان به کار رفته‌اند بعضاً از قابلیت‌های زیادی برخوردار هستند، به طوری که در صورت بازشناسی و احیای آنها حتی در جهان معاصر نیز می‌توانند کاربرد مجدد یابند. این پژوهش بر این اصل نیز تأکید دارد که ضروری است در اقدامات مرمتی مداخله‌جویانه آثار تاریخی، استفاده از مصالح و فنون قدیمی مورد توجه و تأکید قرار گیرد.

## تاریخچه

روش اندودکاری فلزی، روشی است که در آن سطح یک فلز با لایه نازکی از فلزی دیگر پوشش داده می‌شود. برای دستیابی به این فن لازم است که فلز اندود به حالت مایع در آمده تا امکان تشکیل لایه نازک فراهم گردد. در جهان باستان این امر یا از طریق ذوب حرارتی ممکن می‌گردیده و یا از طریق انحلال فلز در جیوه. تاریخ کشف جیوه توسط انسان به‌درستی مشخص نیست، اما ارسطو در کتاب خود بدان اشاره کرده است (Ringnes, 1989, 732). استفاده از فلز جیوه در تولیدات هنری و صنعتی تمدن‌های جهان باستان مانند چین، مصر، هند شناسایی شده است، به‌طور مثال در آثار کشف شده در یکی از آرامگاه‌های مصر به تاریخ ۱۵۰۰ قبل از میلاد جیوه شناسایی شده است (Weeks, 1932, 11).

صنعتگران و هنرمندان جهان باستان ظروف مس را با قلع و نقره و مس را با طلا پوشش می‌دادند. این پوشش ظروف مسی را در برابر اسیدهای آلی موجود در مواد غذایی ترش‌مزه محافظت می‌کرد و مانع از تشکیل واکنش‌هایی می‌شد که ترکیبات سمی مس را ایجاد می‌کنند،

اما اندود طلا بیشتر با هدف زیبا نمودن و ایجاد منظری طلاگونه برای اشیای مسی و یا نقره‌ای انجام می‌پذیرفت. هرچند پوشش طلا نیز مس و نقره را در برابر واکنش‌های اکسیداسیون محافظت می‌نمود. در رساله‌های دانشمندان علم شیمی و کیمیا ایران زمین روش پوشش‌دهی فلزات با قلع و طلا را روش ملغمه نامیده‌اند «(زکریای رازی، ۱۳۷۱، ۴۱۰)». این روش در لغت نامه‌های لاتین با نام ormolu معرفی می‌شود.

در این روش لایه‌ای بسیار نازک از طلا بر سطح فلز اندود شده، می‌نشیند و به آن جلوه طلایی می‌بخشد؛ به این ترتیب فلزکاران با مصرف مقدار کمی از فلز طلا می‌توانستند سطح یک ظرف بزرگ را مطلاً نمایند. مطالعات باستان‌شناسی نشان می‌دهد که در مصر باستان از روش پوشش‌دهی اشیاء با فلز طلا استفاده می‌شده است (Crina, 2010, 47-62).

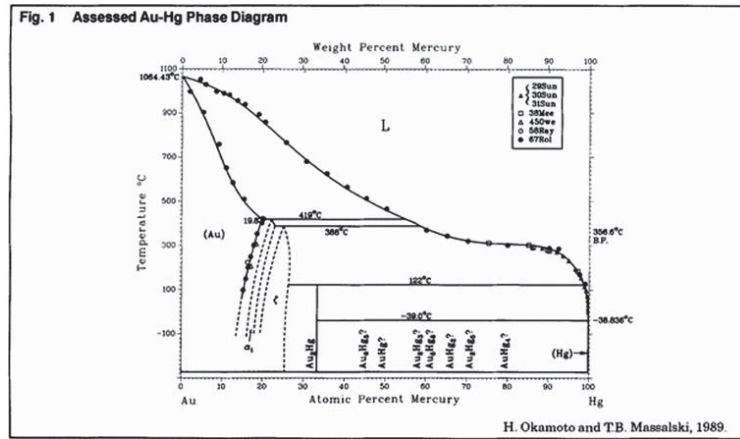
علی‌رغم آنکه در برخی از متون باستان‌شناسی به کاربرد روش ملغمه توسط هنرمندان عهد هخامنشی اشاره شده است، اما قدیمی‌ترین اشیای کشف شده ایرانی که این روش بر روی آن‌ها انجام شده مربوط به دوره ساسانی است. هنرمندان ساسانی برای مطلاً نمودن بشقاب‌ها و ریتون‌های نقره‌ای از روش ملغمه استفاده نموده‌اند. در کتاب مشهور علم‌الاسرار اثر دانشمند بزرگ علم شیمی ایران، محمد زکریای رازی، (۲۵۱-۳۱۳ هـ.ق) به معرفی ملغمه‌کاری پرداخته شده و از آن با عنوان فرازیدن طلا یاد کرده و می‌نویسد «این کار برای سرخی دادن خوبست، روش کار آنست که سونش (براده فلز) طلا را بگیر و با چهار برابر وزنش جیوه ملغمه کن، و روی آن یک‌چهارم وزنش گوگرد زرد و مانند آن زاگ بریز، و با آب نشادر روی صلایه بسای، و چندان‌که در بالا گفته شد بفراز و بالایی را پایینی کن تا همه‌اش فرازیده شود. آنگاه آن را با محلول پنج زاگ آغشته کن، و در شیشه‌ای در دیگ پر از خاکستر برشته کن. این کار را چندان بکن تا همه‌اش شنگرف سرخ گردد. یک‌درهم آن سی‌درهم از هر فلزی را رنگ می‌کند، انشاءالله» (زکریای رازی، ۱۳۷۱، ۱۸۹). «روش دیگر- سونش طلا را چندان‌که خواهی بگیر و با هم‌وزنش جیوه ملغمه کن و با هم‌وزنش نشادر بسای میان دو قحح بریز که قحح زیری گل گرفته است و روی زغال افروخته بگذار و چون دود کند آن را از روی آتش بردار و بگذار سرد شود و این کار را دوباره بکن و سپس آن را باز کن و بیرون بیاور و با آب نشادر آغشته کن و خوب بسای تا خشک شود و دوباره میان دو قحح بریز و وصل را استوار کن و کار پیشی را پنج‌بار بکن و پس از آن بسای و روی صفحه آزمایش بریز و آزمایش کن تا آب شود و خوب بدود و در صفحه فرو رود» (همان، ۱۲۹). صنعت ملغمه‌کاری در سده‌های اسلامی ادامه و توسعه یافت به‌طوری که در سال ۹۳۲ هـ.ق به‌دستور شاه‌طهماسب صفوی از این روش برای مطلاً نمودن خشت‌های مسی گنبد حرم امام رضا(ع) استفاده شد. این فن با ابداع روش آبکاری الکتریکی از یک‌سو و از سوی دیگر مخاطرات جانی ناشی از بخار جیوه که در فرآیند ملغمه‌کاری تولید و برای ملغمه‌کاران خطرناک بود، منسوخ و به‌فراموشی سپرده شد. بنابراین امروزه کمتر کسی از جزییات اجرایی این فن آگاهی دارد.

### بحث

همانگونه که قبلاً اشاره شد ملغمه طلا بر اساس انحلال طلا در فلز جیوه صورت می‌پذیرد. جیوه فلزی است مایع به رنگ سفید نقره‌ای با نماد Hg، عدد اتمی ۸۰، وزن اتمی ۲۰۰/۵۹، وزن مخصوص ۱۳/۵۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب، سختی ۱/۵ در مقیاس موس، نقطه جوش ۳۵۷ درجه سانتی‌گراد و نقطه ذوب ۳۸/۷۲- درجه سانتی‌گراد؛ فلزی است سنگین، براق، سمی که در دمای

محیط تبخیر می‌گردد. با توجه به این ویژگی جیوه که در دمای محیط تبخیر می‌شود، انتظار می‌رود که در مطالعه آنالیتیک پوشش‌های ملغمه‌کاری قدیمی با قدمتی بیش از چندین صد سال، تمامی جیوه موجود در لایه پوششی طلا تبخیر شده باشد و دیگر جیوه‌ای در آن شناسایی نگردد؛ حال آنکه در نمودار مطالعه آزمایشگاهی نمونه‌های قدیمی و از آن جمله خشت طلای گنبد حرم امام علی(ع) با قدمتی نزدیک به سیصد سال میزان جیوه بالاتر از ۱۱٪ شناسایی گردید. شناسایی این مقدار جیوه نشان داد که جیوه مصرفی نتوانسته است به تمامی در دمای محیط تبخیر گردد. مشابه این آزمایش در آزمایشگاه‌های دیگر بر روی نمونه‌های قدیمی انجام و در آنجا نیز میزانی در محدوده ۱۵ تا ۲۵٪ جیوه شناسایی شده بود. لذا نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در پوشش‌های ملغمه‌کاری بخشی از جیوه در فاز پایدار قرار گرفته و تبخیر نمی‌شود. بنابراین لایه طلای تشکیل شده بر روی اشیای فلزی که با روش ملغمه تشکیل می‌گردد، طلای خالص نبوده و در واقع آلیاژی از طلا و جیوه است. با مراجعه به دیاگرام تعادل فازی طلا و جیوه که نشان‌دهنده یک سیستم آلیاژی به‌روش ترسیمی است و رفتار آلیاژها را در اثر تغییرات حالت ماده از حالت جامد به مایع و بالعکس بررسی می‌کند، مشخص شد که تغییر حالت جیوه در فرآیند تغییرات حرارتی از حالت مایع به جامد و تشکیل آلیاژ پایدار طلا-جیوه در دمای حدود ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌پذیرد. بنابراین در هنگام مخلوط نمودن طلا با جیوه در دمای محیط، جیوه در شبکه کریستالی طلا وارد و طلا را در حالت مایع قرار می‌دهد. در نمودار ارائه شده، نقطه A نشان‌دهنده آلیاژ طلا-جیوه در دمای محیط (۲۲ درجه سانتی‌گراد) است و در حالت مایع قرار دارد. در آلیاژ نسبت طلا به جیوه برابر ۱ به ۶ یا ۸۳/۴٪ جیوه و ۱۶/۶٪ طلا است. در این حالت آلیاژ شامل  $Au_2Hg$  همراه با جیوه اضافی است. بر اساس شکل ۱ در آلیاژ فوق در فرآیند افزایش حرارت، جیوه تبخیر می‌شود و همراه با افزایش حرارت و در واحد زمان نسبت جیوه و طلا تغییر می‌یابد. هنگامی که دما از ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد، آلیاژ جیوه-طلا شروع به تغییر رنگ کرده، همزمان دچار تغییر حالت مایع به جامد می‌شود. در این دما هر دو حالت آلیاژ نقره‌ای رنگ جیوه-طلا به‌همراه فاز جامد و زردرنگ ( ) توأماً قابل مشاهده است. این حالت ( )  $Au_2Hg$  در نقطه B بر روی نمودار نشان داده شده است. با ادامه عملیات حرارتی، میزان جیوه کاهش یافته و با عبور آلیاژ از نقطه B و رسیدن مقدار جیوه به کمیت حدود ۲۵٪، فاز جامد و جدید  $Au_3Hg$  تشکیل می‌گردد که حتی با افزایش دما تا ۳۷۵ درجه یعنی نقطه جوش جیوه (نقطه C) مقدار جیوه در آن از ۲۵٪ کاهش نمی‌یابد. با توجه به اینکه آنالیز پوشش‌های ملغمه قدیمی همواره مقداری جیوه در کمیت‌های ۱۵ تا ۲۵٪ را نشان داده است، می‌توان نتیجه گرفت که فاز جامد آلیاژی  $Au_2Hg$  یک فاز آلیاژی پایدار است

نمودار ۱. نمودار تعادل فاز آلیاژ جیوه-طلا



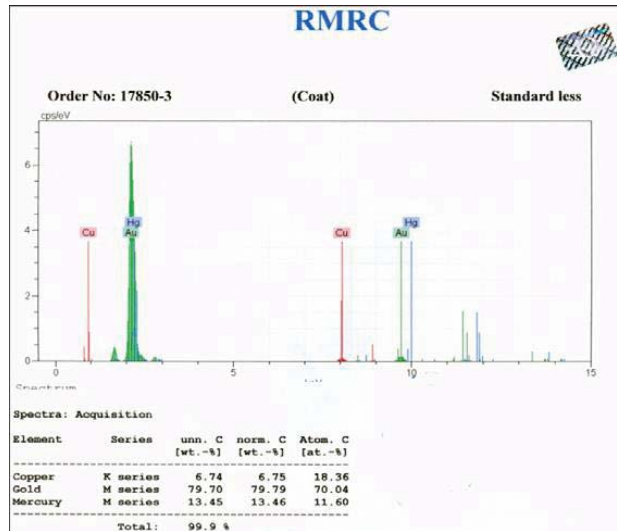
منبع: Oksamoto and Massalski

### نتایج مطالعات آزمایشگاهی

#### شناسایی درصد جیوه در لایه طلای حاصل از ملغمه

نمونه‌های مورد آزمایش در دو گروه آماده شد. گروه نمونه‌های ساخته شده در آزمایشگاه و گروه نمونه برداشت شده از قطعات ملغمه‌کاری شده کتیبه حرم امام علی (ع).  
 - آزمایش نمونه‌های گروه اول: نمونه‌های آزمایشگاهی بر اساس دستورالعمل‌های ارائه شده در متون تاریخی و بر روی ورق مس جدید انجام گردید. برای ساخت خمیر ملغمه طلا، یک حجم طلا در شش حجم جیوه انحلال داده شد. ملغمه حاصل طی عملیات مکانیکی و حرارتی بر فلز پایه «مس» نشانده شد. نمونه تهیه شده با سیستم SEM مورد مطالعه قرار گرفت نتیجه حاصل از این مطالعه ۱۵/۲۰ تا ۱۶/۸۸٪ جیوه را در لایه طلا نشان داد (نمودار ۲).

نمودار ۲. شناسایی جیوه در ملغمه ساخته شده در آزمایشگاه



منبع: نگارنده

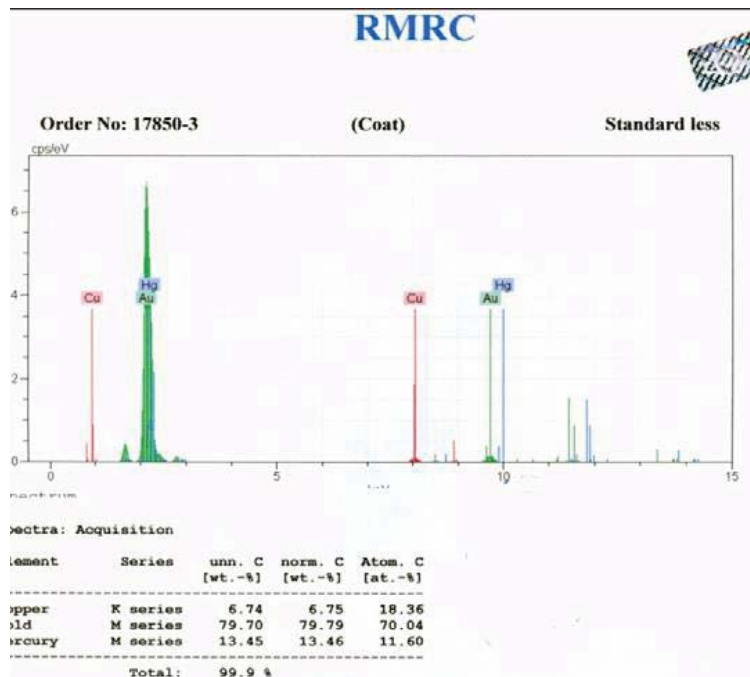
- آزمایش نمونه گروه دوم: نمونه از بخشی از یک قطعه کتیبه مطلا شده حرم مطهر امام علی(ع) مربوط به دوره نادرشاه افشار برداشت شد (تصویر ۱).



تصویر ۱. یک قطعه از کتیبه گریو گنبد حرم مطهر امام علی(ع). منبع: نگارنده

نمونه تهیه شده با سیستم SEM مورد مطالعه قرار گرفت و نتیجه حاصل نشان داد که در لایه طلا نمونه قدیمی نیز میزان جیوه ۱۳/۴۶ تا ۱۱/۶۰ درصد است. بنابراین نتیجه گرفته شد که لایه طلای تشکیل شده بر روی مس با روش ملغمه آلیاژ پایدار طلا-جیوه را تشکیل می‌دهد که جیوه آن قادر به تبخیر و خارج شدن از آلیاژ نیست (نمودار ۳).

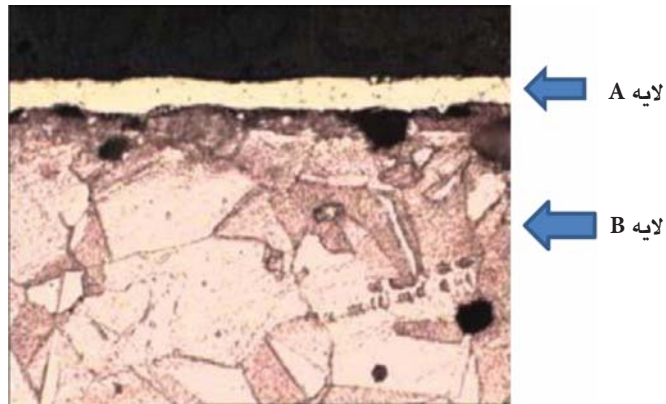
نمودار ۲. شناسایی جیوه در لایه طلای کتیبه گریو گنبد مطهر حرم امام علی(ع)



منبع: نگارنده

### شناسایی ویژگی‌های متالوژیکی لایه پوشش طلا در نمونه

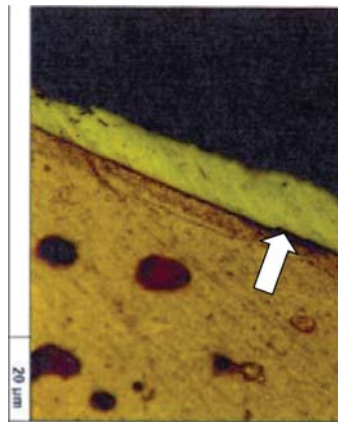
نمونه‌های برداشت شده از کتیبه حرم با هدف شناسایی ساختار فلز پایه و همچنین ضخامت و ویژگی‌های لایه پوشش طلا با روش متالوگرافی آماده‌سازی شد. در تصویر ۲ لایه A، نمایش برش مقطع عرضی لایه طلای پوششی و لایه B نمایش برش مقطع عرضی فلز پایه یا خشت مسی را نشان می‌دهد. در تصویر، تخلخل در لایه طلا که مربوط به تبخیر جیوه در فرآیند پخت ملغمه است به صورت نقاط تیره دیده می‌شود، همچنین عیوب ریخته‌گری فلز پایه و خوردگی‌های ایجاد شده در آن نیز در تصویر به صورت لکه‌هایی قابل مشاهده است.



تصویر ۲. عکس میکروسکوپی، نمایش مقطع عرضی لایه‌های طلا و فلز پای. بزرگ‌نمایی X۱۰۰۰، منبع: یافته‌های تحقیق

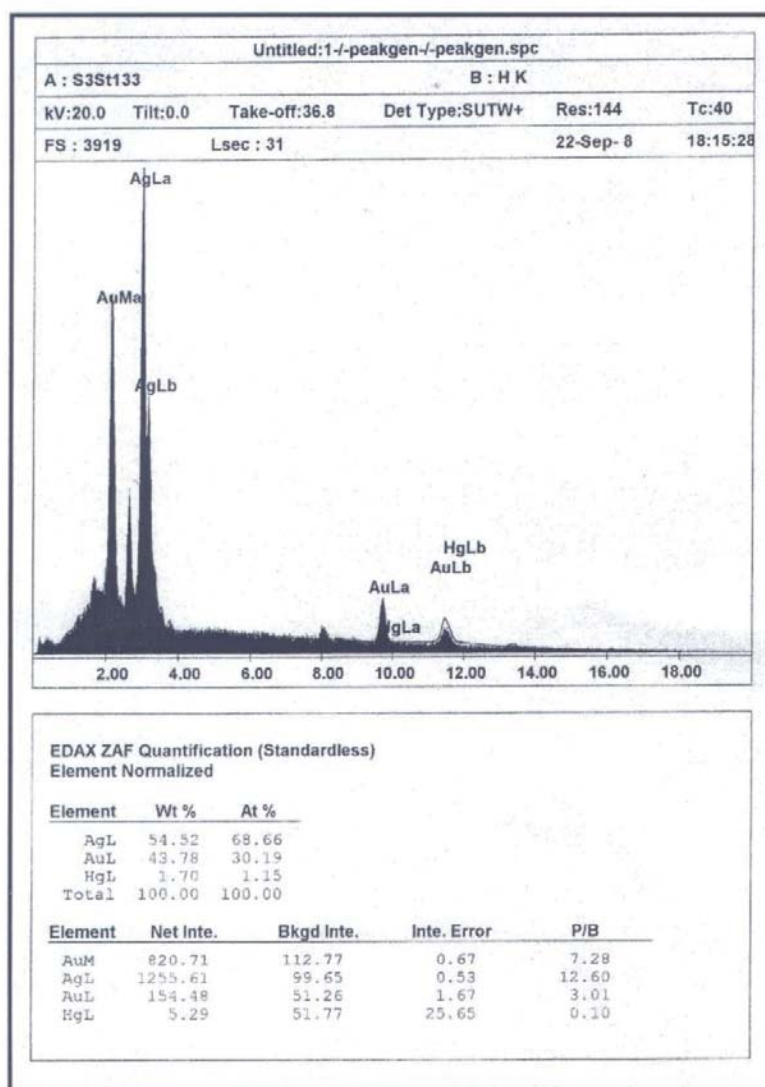
### مطالعه مکانیزم اتصال لایه طلا بر فلز پایه (مس)

در تصویر ۳، عکس میکروسکوپی، مقطع عرضی لایه طلا و فلز پایه را در نمونه ملغمه قدیمی نمایش می‌دهد. در تصویر، در حد فاصل لایه آلیاژ جیوه-طلا و فلز پایه مس تغییر رنگی مشاهده می‌شود. محدوده مذکور با روش SEM مورد مطالعه قرار داده شد. دیاگرام ارایه شده (نمودار ۳) توسط سیستم SEM نشان داد که تغییر رنگ موجود در تصویر مربوط به فاز آلیاژی است که در اثر نفوذ آلیاژ طلا-جیوه در فلز پایه مس تشکیل می‌شود. این فرآیند طی عملیات حرارتی ملغمه‌کاری رخ می‌دهد.



تصویر ۳. عکس میکروسکوپی، نمایش مقطع عرضی نمونه. بزرگ‌نمایی تصویر ۵۰۰ برابر، علامت، محل تشکیل آلیاژ طلا-جیوه و مس را نشان می‌دهد، منبع: یافته‌های تحقیق

نمودار ۳. آنالیز آلیاژ تشکیل شده در نقطه تماس طلا-مس را نشان می‌دهد.



منبع: یافته‌های تحقیق

**مکانیزم اتصال و پایدار ماندن پوشش طلای حاصله از ملغمه بر فلز پایه**  
 اتصال مستحکم و پایدار پوشش فلزی طلا بر سطح فلز پایه از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی پوشش است. برای شناسایی این مکانیزم، محدوده محل اتصال پوشش بر سطح فلز پایه مورد بررسی قرار گرفت (تصویر ۳).

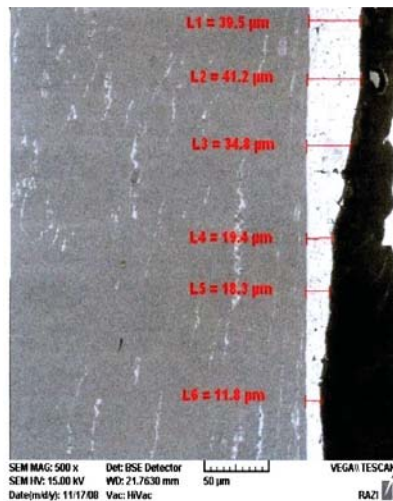
همان‌طور که قبلاً اشاره شد در بررسی تصاویر تهیه شده با سیستم SEM در محدوده مورد اشاره یک تغییر رنگ محسوس ملاحظه می‌شد، این محدوده با استفاده از سیستم SEM و دیتکتور BSE یا Back (Detector Scattered Electron) مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه آنالیز (نمودار ۳) نشان داد که در محدوده فوق یک فاز آلیاژی با حضور مس، جیوه و طلا تشکیل



شده و پوشش طلا را به صورت یک پوشش نفوذی در آورده است. پوشش نفوذی نوعی پوشش است که در آن فلز پوشش‌دهنده به داخل شبکه کریستالی فلز پایه نفوذ می‌کند و اتصال مستحکمی بین پوشش و فلز پایه حاصل می‌شود، عمل نفوذ معمولاً در دماهای بالاتر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد قابل ملاحظه است. از جمله مشخصه‌های ویژه پوشش‌های نفوذی، پیوند متالورژیکی به وجود آمده بین پوشش و زیرلایه در اثر فرآیند نفوذ است (گل‌عذار، ۱۳۸۲، ۲۳۷-۲۳۸). یکی از مشخصه‌های ویژه پوشش‌های نفوذی، حضور یک لایه آلیاژی روی سطح زیرلایه است (همان، ۲۴۸-۲۵۰). این لایه سطحی متشکل از چندین لایه آلیاژی مستقل و متفاوت است. در ضمن با تشکیل حالت نفوذی، فلز پوشش به داخل لایه زیر نفوذ می‌کند و یک ناحیه آلیاژی را تشکیل می‌دهد که ضخامت آن تابعی از دما و زمان عملیات است. در نهایت فازهای جدید (شامل محلول‌های جامد و ترکیبات) در ناحیه نفوذی تشکیل می‌شود. لایه خارجی نیز اغلب شامل مقادیر کمی از عنصر زیرلایه است. این امر ناشی از پدیده اجتناب‌ناپذیر نفوذ هم‌زمان اتم‌های زیرلایه و پوشش در یکدیگر است. بنابراین پوشش ملغمه نسبت به سایر روش‌های ایجاد پوشش «آبکاری الکتریکی» از قدرت چسبندگی بالایی برخوردار است.

### بررسی ضخامت لایه طلای تشکیل شده در روش ملغمه

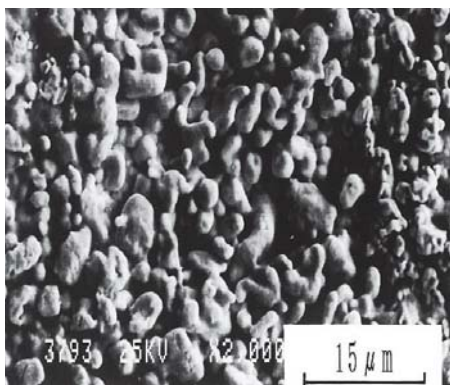
ایجاد حداکثر ضخامت لایه طلا با روش ملغمه از دیگر موضوعات مورد توجه در این مطالعه بود. با توجه به اینکه در طلاکاری گنبد بناهای مقدس، طلاکاری خشت‌های مسی نه تنها به عنوان پوشش تزئینی-حفاظتی، بلکه با هدف تقدیم هدیه‌ای ارزشمند و بر اساس اعتقادات انجام می‌گیرد، بنابراین سعی می‌شود که ضخامت طلای نشانده شده در مقیاس زیاد و ارزشمند باشد. در روش‌های الکتریکی ایجاد ضخامت لایه با محدودیت فنی مواجه بوده و زمانی که لایه تشکیل شده از محدوده‌های ۸ تا ۱۰ میکرون بالاتر می‌رود، پوشش طلا تغییر رنگ داده و دشواری‌های فنی زیادی پدید می‌آید به طوری که پوشش طلا تالو خود را تا حد زیادی از دست می‌دهد. بنابراین در این پژوهش شناسایی محدودیت‌های افزایش ضخامت لایه طلا در روش ملغمه مورد مطالعه قرار گرفت. نمونه آماده شده برای مطالعه، نواری از ورق مس با ضخامت ۴ میلی‌متر و بلندی ۱۵ سانتی‌متر بود. این نوار در امتداد طول بر اساس سانتی‌متر مدرج گردید، سپس عملیات ملغمه‌کاری و نشانیدن خمیر ملغمه در امتداد طول در یک منحنی افزایشی انجام پذیرفت. نمونه تهیه شده پس از مصقل زدن (صیقل نمودن) لایه طلای تشکیل شده، با استفاده از سیستم SEM بررسی و ضخامت‌سنجی شد. تصاویر تهیه شده با این روش نشان داد که ایجاد ضخامت لایه در روش ملغمه با محدودیت مواجه نیست و ضخامت با تکرار دفعات ملغمه‌کاری می‌تواند در حد دلخواه افزایش یابد (تصاویر ۴ و ۵). افزون بر آن مشخص گردید که با تکرار پی‌درپی خمیرگذاری، انسجام و یکنواختی لایه تشکیل شده دچار خدشه نگردیده و در مجموع لایه تشکیل شده یک کلیت واحد را تشکیل می‌دهد.



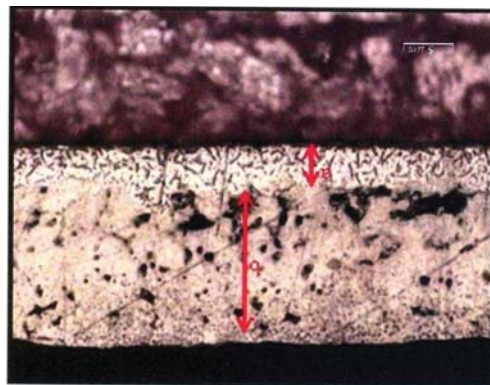
تصویر ۴. ضخامت لایه طلا در محدوده ۱۳ تا ۱۶ میکرون، تصویر ۵. ضخامت لایه طلا در محدوده ۱۱ تا ۳۴ میکرون، منبع: یافته‌های تحقیق

### عملیات نهایی (پرداخت لایه طلا) در ایجاد پوشش طلا با روش ملغمه

همانگونه که قبلاً اشاره شد، در فرآیند تشکیل لایه طلا در روش ملغمه، همراه با افزایش دما به بالاتر از ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد جیوه شروع به تصعید نموده و موازی با آن فاز جامد آلیاژی طلا و جیوه تشکیل می‌گردد، اما در این حالت هنوز مقداری جیوه در لایه تشکیل شده وجود دارد که در آلیاژ شرکت نکرده و با افزایش دما از لایه تشکیل شده خارج می‌گردد. بنابراین فاز جامد آلیاژ طلا-جیوه متخلخل می‌گردد. تخلخل موجود سطح پوشش را کدر نموده و دیگر پوشش تالو طلائی ندارد (تصویر ۶ و ۷).



تصویر ۷. بافت متخلخل لایه طلا بزرگ‌نمایی ۲۰۰۰ برابر، تهیه شده با میکروسکوپ روبشی، منبع: یافته‌های تحقیق

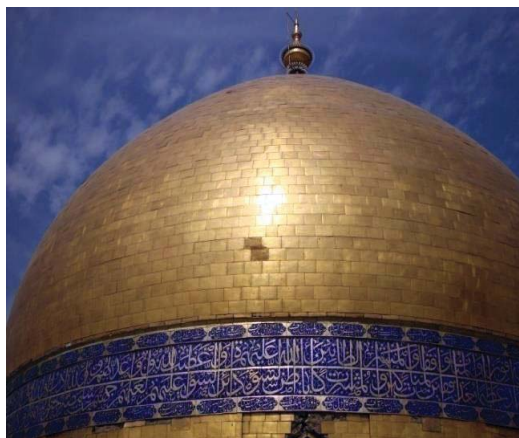


تصویر ۶. بافت متخلخل لایه طلا بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰ برابر، منبع: یافته‌های تحقیق

برای دستیابی به جلا و تالو لایه پوشش طلا، لازم است لایه تشکیل شده مصقل شود. با توجه به اینکه در این حالت آلیاژ طلا-جیوه تشکیل شده از نرمی برخوردار است، سنگ مصقل تخلخل موجود در آن را بر طرف و آلیاژ را متراکم و نتیجتاً براق می‌کند و لایه طلا را زیبا و براق جلوه می‌دهد.

## نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از مطالعات علمی آزمایشگاهی انجام پذیرفته در پژوهش ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و متالورژیکی لایه طلای تشکیل شده با روش ملغمه را مورد شناسایی قرار داد و قابلیت‌های کاربردی آن را مشخص نمود. بر اساس نتایج حاصل مشخص شد که چسبندگی لایه طلای ایجاد شده با روش ملغمه بر سطح فلز پایه از نوع چسبندگی نفوذی بوده که طی آن اتم‌های طلا به لایه سطحی ساختار پایه نفوذ می‌کنند و اتصال محکمی را با آن برقرار می‌نمایند. از سوی دیگر آزمایش‌های انجام گرفته در این پژوهش مشخص نمود که لایه طلای تشکیل شده با روش ملغمه محدودیت ضخامت ندارد و ضخامت آن را می‌توان به میزان دلخواه تغییر داد. نتایج حاصل از این پژوهش همچنین نشان داد چنانچه روش ملغمه با توجه به نکات فنی مترتب بر آن اجرا گردد، لایه تشکیل شده پوششی مقاوم در برابر پدیده‌های محیطی و از آن جمله رطوبت است. هرچند این امر قبلاً با باقی‌مانده لایه طلای ظروف تاریخی و همچنین پوشش طلای خشت‌های مسی بناهای قدیمی به اثبات رسیده بود، اما در این پژوهش با اعمال روش‌های علمی-آزمایشگاهی بر آن تأکید شد. مطالعات این پژوهش همچنین نشان داد که با افزایش ضخامت لایه پوشش طلا و افزایش تراکم آن با اجرای مصقل‌کاری صحیح به طوری که امکان نفوذ اکسیژن در لایه پوشش به حداقل ممکن کاهش یابد، نقش حفاظتی لایه پوشش جهت حفاظت فلز پایه نیز افزایش می‌یابد. از دیگر نتایج حاصل از این پژوهش باید به این نکته مهم اشاره نمود که اصولاً لایه تشکیل شده با روش ملغمه به لحاظ تالو و حالت‌های فیزیکی با پوشش‌های صنعتی متفاوت است و پوشش ملغمه ویژگی‌ها و حالات‌های قدیمی را با خود دارد، حالتی که منظر اثر تاریخی را تغییر نخواهد داد. لذا می‌توان از این روش به عنوان روشی کاربردی جهت مرمت و بازپیرایی آثار تاریخی که با روش ملغمه تزئین شده‌اند، مانند گنبد‌های مطلا شده که عموماً هم نیاز به مرمت دارند، استفاده نمود. لذا با توجه به نتایج علمی حاصل از این پژوهش، از روش ملغمه برای مرمت و بازپیرایی خشت‌های طلای گنبد و ایوان طلای حرم مطهر امام علی (ع) که به دست هنرمندان ایرانی و در عهد نادر شاه افشار ساخته و پرداخته شده است استفاده نمود. (تصویر ۸ و ۹).



تصویر ۹. یخست‌های گنبد مطهر حرم امام علی (ع)، منبع: نگارنده



تصویر ۸. یکی از خشت‌های کتیبه گریو گنبد مطهر حرم امام علی (ع) که با روش ملغمه مرمت و بازپیرایی شده است، منبع: نگارنده

## فهرست منابع

- آلتسیبویا آ.ای. و لوین س. ز. (۱۳۵۲) *کاهش دهندگان خوردگی فلزها*، ترجمه اسفندیار عمیدزاد، تهران: انتشارات اقبال.
- پلوخی، پ. (۱۳۶۷) *فرآیندهای فلزکاری*، ترجمه خسرو نادران طحان، تهران: مرکز نشر دانشگاهی.
- ترنت، ای. ام. (۱۳۶۵) *آبکاری فلزات (روکشهای فلزی)*، ترجمه فریدون مجدنی و ناصر خواجه نصیری، تهران: جهاد دانشگاهی.
- زکریای رازی، محمد (۱۳۷۲) *رازهای صنعت کیمیا یا کتاب الاسرار*، ترجمه مهندس حسنعلی شیبانی، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- قربانی، محمد (۱۳۸۵) *پوشش دادن فلزات*، تهران: مؤسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف.
- گلغزار، محمدعلی (۱۳۸۲) *عملیات حرارتی و مهندسی سطح*، اصفهان: انتشارات ارکان.
- Bellegem, Michel van; Rohrs, Stephan and McLeod Bet (2008) "A Spanish Medieval altar 'set': new investigation and assessment of its date and manufacture" *Technical Research Bulletin*, Vol. 2, British Museum,
- Bellegema, M.J.T.M. van; Ankersmitb, H.A.; Langhc R. van and Weid W. (2004) "Historical usage and the problem of fretting", *Proceedings of Metal 2004 National Museum of Australia Canberra ACT*, 4-8 October 2004, published by the National Museum of Australia [www.nma.gov.au](http://www.nma.gov.au)
- Ingol, Gabriel Maria; Padelettil, Giuseppina Carol; Tilde de, Riccucci1,Cristina; Guida, Giuseppe; Angelini, Emma and Grassini, Sabrina (2008) "Microchemical Investigation of Ancient Silver and Gold Plated Objects: Coating Techniques and Degradation Mechanisms" [www.afir.org.ro/sica/ref/2008\\_Ingo.pdf](http://www.afir.org.ro/sica/ref/2008_Ingo.pdf)
- Idea radiation technology series no. 2 "Cultural Heritage Research" <http://www.iaea.org/Publications/index.html>