**Review Paper**

# Application of Plasma Technology in the Protection of Antiquities and Architectural Surfaces[1]

**Marzieh Gholami[2]**

Received: 2020.08.03
Revised:2020.10.17
Accepted:2020.12.20

**Abstract**

In today's world, the nations perceive the valuable position the archeological and historical monuments have in the culture and civilization of their nations. In order to know a historical monument, its raw materials must first be characterized. By identifying the raw materials, suitable protection and restoration methods can be suggested for that monument. With increasing the awareness of the destructive effects of the use of chemical and toxic substances on the objects, the environment and users, the replacement or minimum use of these harmful materials in the treatment and protection of valuable and rare objects is a priority. Cold plasma due to its features such as low temperature and high energy, in addition to a wide range of applications in various fields, since 1979, has attracted the attention of specialists in conservation and restoration of cultural and historical objects.

**Keywords**: *Plasma Technology, Cultural Heritage, Surface Cleaning, Silver Coins, Organic Substances Removal*.

[1] DOI: 10.22051/ijap.2020.32538.1169
[2] M.Sc. Student, Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: raha74.gh@gmail.com

فصلنامهٔ علمی فیزیک کاربردی ایران، دانشگاه الزهرا
سال دهم، پیاپی ۲۲، پاییز ۱۳۹۹

مقالهٔ ترویجی

# کاربرد پلاسما در حفاظت از آثار باستانی و سطوح معماری[1]

مرضیه غلامی[2]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۱۳
تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۷/۲۶
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۳۰

## چکیده

امروزه دیگر می‌دانیم که آثار باستانی و تاریخی چه جایگاه ارزشمندی در فرهنگ و تمدن هر ملت دارد. برای شناخت یک اثر تاریخی باید مواد اولیهٔ آن شناخته شود و سپس با شناخت مواد اولیه می‌توان روش‌های حفاظتی و مرمتی مناسبی برای آن اثر پیشنهاد کرد. با افزایش آگاهی از تأثیرات مخرب ناشی از استفادهٔ مواد شیمیایی و سمی بر آثار مورد مرمت و محیط و کاربران، تعویض این مواد مخرب یا حداقل استفادهٔ کمتر از آن‌ها در مرمت و حفاظت آثار، یک اولویت محسوب می‌شود. پلاسمای سرد به دلیل ویژگی‌هایی از قبیل دمای پایین و انرژی زیاد، علاوه بر طیف گسترده‌ای از برنامه‌های کاربردی در حوزه‌های مختلف، از سال ۱۹۷۹ مورد توجه متخصصان حفاظت و مرمت آثار تاریخی‌ـفرهنگی قرار گرفته و در طول سال‌های گذشته، در ضد عفونی کردن و به ویژه پاکسازی آثار، به عنوان یک گزینهٔ غیرسمی و غیرتهاجمی در حوزهٔ میراث فرهنگی به کار گرفته شده است. پاکسازی پلاسما یک روش بدون

---

[1] DOI: 10.22051/ijap.2020.32538.1169

[2] دانشجوی کارشناسی ارشد، رشته فناوری پلاسما، پژوهشکدهٔ لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
Email: raha74.gh@gmail.com

تماس و تنظیم‌پذیر است که روند پاکسازی با آن، تنها بـه لایـه‌هـای اولیـهٔ سـطح محدود می‌شود.

**واژگان کلیدی**: *فناوری پلاسما، میراث فرهنگی، پاکسازی سطح، سکه‌های نقره، حذف مواد آلی.*

## ۱. مقدمه

در هر خانه‌ای کتابی، فرشی، نوشته‌ای، گلـدانی، تـابلو و میراثـی از پـدران و مـادران و گذشـتگان وجود دارد که با حساسیت خاصی نگهداری می‌شـود و بـرای اعضـای آن خانـه از ارزش و اعتبـار ویژه‌ای برخوردار است، چرا که نشان‌دهندهٔ هویت فرهنگی و میراث خـانوادگی و ارزش‌هـای آن خاندان است. حفظ آثار فرهنگی و تاریخی در یک کشـور نیـز همـین جایگـاه را در بـین اعضـای جامعه دارد و نشان‌دهندهٔ هویت و تمدن آن ملت است، به ویژه ملتی مثل ایـران کـه تمـدنی بسـیار قدیمی و درخشان دارد.

بدون شک، مرمت آثار تاریخی و فرهنگی کـار دشـواری اسـت زیـرا نـه تنهـا بایـد بـه بهبـود فیزیکی شیء و حفظ ظاهر خاص آن توجه کرد، بلکه باید حفظ ارزش‌ها و تداوم آن نیز در طـول زمان تضمین شود. هر یک از آثار تاریخی به نوبهٔ خود ویژگی‌هـای خـاص و پیچیـده‌ای دارد کـه باید در نهایت بـا دقـت بررسـی و تجزیـه و تحلیـل شـود. در ایـن ارتبـاط، مـداخلات تخصصـی و کنترل‌شده گاه برای انجام عملیات حفاظتی لازم می‌شود، که ممکن است شامل ضدعفونی کـردن یا پاکسازی آثار فرهنگی شود. این دستکاری‌ها با استفاده از روش‌ها و موادی صورت می‌گیرد که اغلب تهاجمی یا مخرب است؛ روش‌هایی که ممکن است باعث از بین بردن ویژگـی و اطلاعـاتی از سطح شیء شوند یا موادی که به دلیل سمیّت، نه تنها وضعیت آثار بلکه شخص درگیر در انجام کار را نیز در معرض خطر قرار دهد. علاوه بر این‌ها، تأثیر منفی چنین موادی بر محیط زیست را نیز باید در نظر داشت.

فناوری پلاسما یکی از روش‌های نوین در حوزهٔ میراث فرهنگی است که از سـال ۱۹۷۹مـورد توجه متخصصان حفاظت و مرمت آثار تاریخی قرار گرفت. این روش ابتدا برای حفاظت فلزات و عمدتاً برای مرمت و حذف خوردگی اشیای نقره‌ای و آهنی باستانی استفاده شد و به تدریج شرایط مطلوب ترمیم و به طور تجربی برای این نوع آثار تعیین شد. با نتایج مثبت بـه‌دسـت‌آمـده از روش پلاسما در حفاظت از آثار فلزی، این روش به تدریج در مرمت‌های ضدعفونی نیز به کار رفت. در حوزهٔ حفاظت، این کاربردها به سمت ضدعفونی کردن مـواد آلـی و اسـتحکام‌بخشـی بـه آن‌هـا و همچنین پاکسازی آثار نقاشی سوق پیدا کـرد. اگرچـه امـروزه فنـاوری پلاسـما بـه عنـوان روشـی

غیرشیمیایی بدون نیاز به مواد و حلال‌های شیمیایی و ایمن و دوستدار محیط زیست شناخته شده و کاهش مدت زمان و هزینه‌های مرمت را به همراه داشته است، اما برای هر یک از اشیاء، شرایط مرمتْ منحصربه‌فرد و خاص بوده و نیازمند بررسی‌های دقیق از عوامل مختلفی همچون روش تولید پلاسما و ماهیت گاز پلاسما و متغیرهای آن (چگالی، دما، فشار) و نوع آثار و آسیب‌های وارده است.

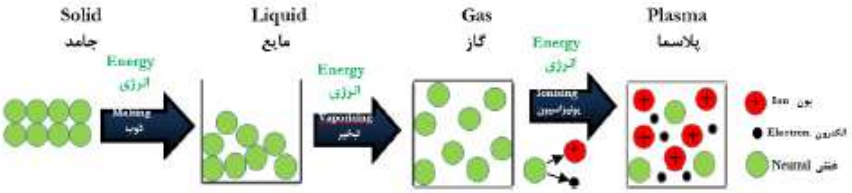
در این مقاله، ضمن معرفی فناوری پلاسما و کاربردهای آن در صنایع، تجربیات به‌دست‌آمده در موزه‌ها و مراکز فرهنگی خارجی را بررسی می‌کنیم. هدف از این مقاله آشنایی متخصصان حفاظت و مرمت داخلی با این فناوری و قابلیت‌های آن به عنوان روشی جایگزین و ایمن یا مکمل روش‌های مرسوم پاکسازی سطوح و ضدعفونی کردن آثار است، که گاه به آسیب‌های شدیدی به آن‌ها می‌شوند. علاوه بر این‌ها، آشنایی با این روش می‌تواند به متخصصان مربوطه کمک کند که با به‌کارگیری و ساخت تجهیزات لازم و متناسب با نیازهای حوزهٔ حفاظت ومرمت آثار در کشور، شرایط کسب تجربیات لازم و کافی برای استفاده از آن و مقایسه با سایر روش‌های مشابه فراهم شود.

## ۲. پلاسما چیست؟

در سال ۱۸۷۹، فیزیک‌دان انگلیسی ویلیام کروکس، هنگام بررسی ویژگی‌های ماده در تخلیهٔ الکتریکی، پیشنهاد کرد که نوع خاصی از گاز به عنوان حالت چهارم ماده نام‌گذاری شود. پلاسما یکی از چهار حالت اصلی ماده است. گاز شبه خنثایی از ذرات باردار و خنثی است که رفتار جمعی از خود ارائه می‌دهند. واژهٔ پلاسما به گاز یونیخته‌ای گفته می‌شود که همه یا بخش چشمگیری از اتم‌های آن تحت تأثیر حرارت یا انرژی، یک یا چند الکترون از دست داده و به یون‌های مثبت تبدیل شده باشند. در واقع به یک گاز خنثی در دامنهٔ وسیعی از فشار و حرارت تبدیل می‌شود.

در حالت‌های جامد و مایع و گاز، دما را می‌توان از دامنهٔ حرکت (سرعت نوسان) ذرات سازندهٔ ماده تعریف کرد، اما در حالت پلاسما، دما از میزان جدایش یون‌های مثبت از الکترون‌ها تعریف می‌شود.

در واقع در حالت عادی می‌توان گفت که اگر جامد را گرم کنیم به مایع و اگر دوباره گرم کنیم، به گاز و باز اگر ادامه دهیم، ماده به پلاسما تبدیل می‌شود که به طور تقریبی در حالت عادی دمای پلاسما را در حدود ۲۰۰۰ درجه سلسیوس بیان می‌کنند (شکل ۱).




**شکل ۱** پلاسما به عنوان حالت چهارم ماده [۱۵].

گفته می‌شود ٪۹۹ ماده موجود در طبیعت در حالت پلاسماست. این برآورد تخمین معقولی است از این واقعیت که درون ستارگان و اتمسفر اطراف آن‌ها ابرهای گازی و نیز فضای بین ستارگان اغلب به صورت پلاسماست. در نزدیکی خود ما، هنگامی که جو زمین را ترک می‌کنیم، بلافاصله با پلاسمایی مواجه می‌شویم که شامل کمربندهای تشعشعی وان‌آلن و بادهای خورشیدی است. با نگاهی به زندگی پیرامونمان می‌توانیم نمونه‌های متنوعی از پلاسما را بیابیم: جرقهٔ رعد و برق، تابش ملایم شفق قطبی، گازهای داخل یک لامپ فلورسنت یا لامپ نئون و یونش و لامپ مهتابی؛ مختصری که در گازهای خروجی موشک دیده می‌شود.

با وجود این، حالت‌های غالب ماده در بخشی از جهان که ما در آن زندگی می‌کنیم جامد و مایع و گاز است. بنابراین، می‌توان گفت ما در ۱ درصدی از جهان زندگی می‌کنیم که در آن حالتی از ماده به جز پلاسما غلبه دارد.

## ۳. کاربردهای پلاسما در صنایع مختلف

از جمله کاربردهای پلاسما در صنایع مختلف می‌توان به طور خلاصه به کاربرد پلاسما در صنعت مواد، الکترونیک، خوروسازی، نفت و پتروشیمی، محیط زیست، نساجی، پزشکی و تولید انرژی اشاره کرد؛ که توضیحات هریک از صنایع از حوصلهٔ این بحث خارج است.

## ۴. انواع پلاسما

از دو طریق حرارت و تخلیهٔ الکتریکی می‌توان پلاسما تولید کرد. در پلاسمای حرارتی یا پلاسمای گرم دمای همهٔ اجزاء موجود شامل الکترون‌ها، اجزاء اتمی و ملکولی تقریباً برابر و در تعادل حرارتی و دمای خیلی بالا است. در این نوع پلاسما، دامنهٔ دمایی گازها از چند ده هزار تا پنجاه هزار کلوین متغیر است. این نوع پلاسما به دلیل دمای بسیار بالا و اثرات تخریبی آن کاربردی در حوزهٔ میراث فرهنگی ندارد.

در پلاسمای غیرحرارتی یا پلاسمای سرد درجهٔ حرارت اجزاء کاملاً متفاوت و معمولاً، دمای الکترون‌ها بسیار بیشتر از اجزای دیگر است. دمای الکترون‌ها تا چند ده هزار کلوین و دمای سایر اجزاء که همان دمای کلی گاز است، در حدود دمای محیط تا چند صد درجهٔ کلوین است.

در پلاسمای سردِ کم‌فشار، گاز (آرگون یا اکسیژن) با فشار مشخصی داخل محفظهٔ خلأ تزریق می‌شود. با ورود انرژی در قالب یک میدان الکتریکی، گاز به طورجزئی تجزیه و پلاسما ایجاد می‌شود. اجزاء ناشی از این تجزیه، اتم‌های خنثی، یون‌ها، الکترون‌ها و رادیکال‌های مختلف است. رادیکال‌های تشکیل‌شده، ملکول‌های بسیار واکنش‌پذیری هستند که می‌توانند با یکدیگر و با سطوح مجاور از جمله سطوح مواد تحت مرمت، وارد واکنش و موجب اصلاح ویژگی‌های سطح آن‌ها شوند، اگرچه این واکنش‌ها به گاز مورداستفاده، بستگی دارد. مدت زمان قرارگیری مواد تحت مرمت در معرض پلاسما، از چند ثانیه تا چند دقیقه با توجه به کاربرد موردنظر متفاوت است.

پلاسمای سرد کم‌فشار یا خلأ، فرایندی بسیار انعطاف‌پذیر است که مرمت اشیاء با اشکال پیچیده و ابعاد مختلف به وسیلهٔ آن امکان‌پذیر است؛ در پلاسمای سرد فشار اتمسفری، گاز بعد از برانگیختگی بر سطح اعمال می‌شود. کنترل تخلیهٔ الکتریکی، دمای خروجی گاز را از منبع محدود می‌کند. به علاوه، سرعت درمان ممکن است به اندازه‌ای زیاد باشد که مانع از هرگونه افزایش دما در سطح مادهٔ تحت مرمت شود. اصل روش مشابه با روش پلاسمای خلأ است، با این تفاوت که استفاده از میدان‌های الکتریکی بسیار شدیدتر است. به همین دلیل، مشعل مورداستفادهٔ پلاسما در این روش همیشه دارای ابعاد کوچک است. تفاوت خاص پلاسمای فشار اتمسفری با پلاسمای پرفشار یا کم‌فشار در آن است که به محفظه یا اتاقکی که شیء در آن قرار بگیرد، نیازی ندارد. این نوع پلاسما به طور مستقیم در خط تولید استفاده می‌شود و در نتیجه نیازی به محیط خلأ پرهزینه ندارد.

انواع پلاسما و ویژگی‌ها و برخی کاربردهای آن‌ها در جدول ۱ خلاصه شده است.

**جدول ۱** انواع پلاسما.

| پلاسما | | ویژگی‌ها | نحوهٔ تولید | کاربرد |
|---|---|---|---|---|
| پلاسمای حرارتی یا پلاسمای گرم | | تعادل حرارتی بین اجزاء، دمای بالا،یونیزاسیون کامل و تعادل ترمودینامیکی گاز | تخلیه از نوع قوس الکتریکی، واکنش‌های گرماهسته‌ای و اثر لیزر | متالورژی، عملیات حرارتی، جوشکاری، استخراج فلزات |
| پلاسمای غیرحرارتی یا پلاسمای سرد | کم‌فشار یا خلأ | نابرابری درجهٔ حرارت اجزاء، خارج از تعادل ترمودینامیکی و یونیزاسیون جزئی گاز | تخلیهٔ الکتریکی گاز در فشار کم | مرمت سطح، لایه‌نشانی، تولید اُزُن، تصفیهٔ هوا، کاهش آلودگی هوا، ضدعفونی کردن آب، استریل کردن |
| | فشار اتمسفری | | تخلیهٔ الکتریکی گاز در فشار اتمسفری | |

## ۵. کاربرد پلاسمای سرد در حفاظت از آثار باستانی و بناهای تاریخی

پس از سال‌ها استفاده از روش‌های مختلفی مثل روش‌های مکانیکی و انواع حلال‌ها و لیزر در پاکسازی سطوح معماری، در سال‌های اخیر پلاسمای اتمسفری برای چنین کاربردی مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج نشان داد که این روش جایگزین مناسبی برای روش‌های مکانیکی (سایش) است که نمی‌تواند چرکینه‌های داخل منافذ را بر دارد و اغلب باعث آسیب زدن و از بین رفتن سطح اصلی می‌شود. همچنین، جایگزین مناسبی است برای روش‌های شیمیایی (استفاده از حلال‌ها) که ممکن است چرکینه‌ها و پوشش‌های کهنه و قدیمی را از طریق منافذ و حفره‌ها و ترک‌ها به لایه‌های عمیق‌تر منتقل کنند. پلاسمای سرد به دلیل ویژگی‌هایی از قبیل دمای پایین و انرژی زیاد به عنوان شیوه‌ای نو و ایمن در حوزهٔ میراث فرهنگی، در بسیاری از موزه‌ها و مراکز تحقیقاتی به منظور انجام اقدامات حفاظتی و مرمتی بر روی آثار مختلف بررسی شده است که با برخی از این موارد آشنا خواهیم شد.

### ۵ـ ۱ کاربرد پلاسمای سرد در ترمیم آثار فلزی

فناوری پلاسما در بسیاری از موزه‌ها ازجمله موزهٔ وال دو آز [1] در فرانسه، موزهٔ ملی سوییس، بوهمیای مرکزی،و موزهٔ فنی در برنو [2]، به بخشی از فرایند حفاظت از اشیاء آهنی باستانی تبدیل شده است. ازجمله مزایای این روش، بهبود پاکسازی مکانیکی و تسریع در روند نمک‌زدایی بعدی است.

اشمیت–آت [3] از موزهٔ ملی سوئیس تأثیر مرمت پلاسمای سرد (کم‌فشار) را با استفاده از گاز هیدروژن خالص در محصولات خوردگی فلزات شامل نمونه‌های آهنی و نقره ای بررسی کرد. اساس این روشْ تولید هیدروژن اتمی در پلاسمای هیدروژن و احیاء شیمیایی محصولات خوردگی توسط آن است. شیء در محیط پلاسما، دارای بار منفی می‌شود، در نتیجه یون‌های مثبت سطح شیء را بمباران می‌کنند و همانطور که بی‌اثر و خنثی می‌شوند، همانند یک عامل احیاکنندهٔ قوی نسبت به هیدروژن نوزاد، عمل می‌کنند.

اشیای آهنی مورد آزمایش شامل تعدادی میخ آهنی از یک سایت باستانی [4] با خوردگی‌های شدید بودند. برای بررسی تأثیر مرمت در این اشیاء، نمونه‌های متالوگرافی قبل و بعد از مرمت

---

[1] Val do Oise
[2] Brno
[3] Schmidt-Ott
[4] Site of Wetzikon-Kempten Hinwilerstr

آماده شد. سپس مشخصات نمونه (شکل، فرم) در قبل و بعد از مرمت پلاسما با میکروسکوپ الکترونی روبشی و میکروسکوپ نوری پلاریزان بررسی شد.

برای بررسی و کنترل فرایند پلاسما از طیف‌سنجی نوری استفاده و همچنین تأثیر درمان در نمونه‌های متالوگرافی بررسی شد. نمونه‌های نقره‌ای نیز شامل تعدادی از آثار نقره‌ای تاریخی ازجمله یک جام نقره‌ای با لکه‌های تیره و ناهموار بود، که به مدت دو ساعت ونیم تحت پلاسمای هیدروژن خالص قرار گرفت (شکل ۲).

مزایای استفاده از پلاسما، تأثیر مثبت در تسهیل پاکسازی مکانیکی و تسریع نمک‌زدایی بعدی با سولفیت قلیایی برای آثار آهنی باستانی و همچنین قابلیت پلاسمای هیدروژن در احیاء لایه‌های سولفید نقره بود، بدون آنکه تغییری در ساختار سطح یا تداخلی در اطلاعات موجود در فلزکاری باستانی ایجاد کند.

**شکل ۲** تصاویری از جام نقره‌ای قبل و بعد از استفاده از پلاسمای هیدروژن به مدت دو ساعت و نیم [۱۶].

## ۵ـ۲ کاربرد پلاسما در پاکسازی سطح برخی سکه‌های نقره‌ای قرون وسطی

پلاسمای سرد فرکانس بالا به عنوان یک روش علمی و غیرمخرب و زیست‌محیطی در نظر گرفته شده است و برای از بین بردن خوردگی موجود در سطح برخی سکه‌های نقره‌ای مربوط به یک مجموعه نویزماتیک[1] در لهستان استفاده شده است.

اثر پلاسما از طریق بررسی سطح سکه قبل و بعد از مرمت توسط روش‌های مختلف تحلیلی اعم از میکروسکوپ الکترونی روبشی-میکرو آنالیز پراکندگی انرژی اشعهٔ ایکس (اس‌ای‌ام-ای‌دی‌ایکس) و پراش اشعهٔ ایکس(ایکس‌آردی)، طیف‌سنجی اف‌تی‌آی‌آر و اندازه‌گیری رنگ‌سنجی، بررسی شد.

[1] Numismatic collection

خوردگی فلزات باستانی، به ویژه سکه‌ها بیانگر اثر ناخواستهٔ برخی فرایندهای فیزیکی و شیمیایی است، مانند مواردی که در خوردگی دخیل است و به تدریج جنبه، شکل، ماهیت و مقاومت آن‌ها را تغییر می‌دهد. سکه‌های حاوی فلزات نجیب (مس،منیزیم) نقاط لکه‌دار یا مناطق دارای خوردگی بیشتر را نشان می‌دهند و در سطح، کلریدها، کربنات‌ها، سولفات‌ها یا اکسیدهای فلزی وجود دارند. همهٔ این محصولات خوردگی مضر نیستند.

برای مثال، اکسیدهای مس موجود در سطح، یک ویژگی بی‌اثر ایجاد می‌کنند که غیرفعال است و نباید از بین برود. اما کلریدهای نقره یا مس یا سولفیدها یک اثر دائمی در فلز ایجاد می‌کنند و باعث خراب شدن جدی وسایل می‌شوند. بنابراین حذف آن‌ها ضروری است.

اثر پلاسمای آرگون/اکسیژن یا هیدروژن/آرگون در فلزات و خوردگی آن‌ها بررسی شده است و همچنین اثر پلاسمای هیدروژن در نقره مطالعه شده است و ثابت شده است که پلاسمای هیدروژن در کاهش کلریدهای نقره و سولفیدهای آن کارآمد است.

## ۵ـ۳ مروری بر روش مرمت

سکه‌های مورد مطالعه ۸۲ سکه با عناوین ام یک تا ام هشتادو دو بودند، که در کردانری کشور بوتوسانی رومانی[1] کشف شده بودند. از میان این سکه‌ها دوسکهٔ ام۶ و ام۹ به نام‌های ویلنیوس[2] و ریگا[3] برای آزمایش انتخاب شدند، که وزن آن‌ها ۱٫۸۶ و ۲٫۳۷ گرم و قطر آن‌ها ۲۰ـ۲۲ میلی‌متر است. همچنین سکه‌ها دارای خوردگی خاص و شماری از ذخایر آلی روی بدنه و سطح خود می‌باشند.

نمونه‌ها مستقیماً در ناحیهٔ پلاسما قرار داده شدند و پلاسما و جسم تحت مرمت در تعاملی ثابت با یکدیگر قرار گرفتند (در تماس فیزیکی اما از لحاظ الکتریکی جدا هستند) پلاسما در تمام سطح جسم گسترش می‌یابد و فرایند پاکسازی تحت عملکرد گونه‌های فعال پلاسما، از طریق فعل و انفعالات شیمیایی و مکانیکی انجام می‌شود. طول دورهٔ مرمت نسبت به عمق نفوذ و نوع خوردگی متفاوت است و هرچه عمق نفوذ خوردگی بیشتر باشد، مدت زمان مرمت افزایش می‌یابد. به منظور جلوگیری از تغییر در متالوگرافی، درمان با پلاسما در دمای پایین انجام می‌شود و برای جلوگیری از گرمای بیش از حد سکه‌ها مرمت به صورت مرحله‌ای انجام شد.

در مرحلهٔ اول، پاکسازی با هدف کاهش ترکیبات آلی با استفاده از پلاسمای اکسیژن دنبال شد، که در از بین بردن رسوبات آلی بسیار مؤثر است.برای این منظور ترکیبی از اکسیژن و آرگون

---

[1] Cordareni, Botosani County, Romania
[2] Vilnius
[3] Riga

(۲۵،۷۵) استفاده شد. اکسیژن در پلاسما به دلیل تماس با ترکیبات آلی بر اثر واکنش‌های اکسیداسیون جدا می‌شود و به فرار محصولاتی چون کربن مونوکسید، کربن دی اکسید و بخار آب می‌انجامد، که توسط دستگاه تخلیه، تخلیه می‌شود. پس از ۲۰ دقیقه مرمت، نتایج از نقاط مختلف توسط میکرو آنالیز ای‌دی‌ایکس ارزیابی شد.

شواهد طیف ای‌دی‌ایکس کاهش کربن و اکسیژن را نشان می‌داد، در حالی که سایر آلاینده‌ها همچنان حضور داشتند. در مرحلهٔ دوم، سکه‌ها به مدت یک ساعت در پلاسمای هیدروژن قرار گرفتند و پس از آن، آن‌ها را با یک برس موی سنجاب مسواک زدند. این عمل چهار مرتبه تکرار شد. بررسی بصری سکه‌ها در هر دو طرف سکه اثباتی بر پاکسازی سطح بود که توسط تصاویر میکروسکوپ الکترونی از مناطق تأیید شد. در هر دو مقیاس بزرگنماییِ کم و با بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر، هیچ تغییری در جزئیات سکه مشاهده نشد. محصولات خوردگی به دلیل سولفیدها و به طور جزیی محصولات خورندهٔ سبز (کربنات‌ها) نیز از بین رفتند. افزایش مقدار درخشندگی در هر دو طرف سکهٔ ام۶ در اولین مرحله از مرمت را می‌توان به حذف رسوبات آلی نسبت داد. محصولات باقی‌ماندهٔ خوردگی در مرحلهٔ دوم مرمت با پلاسمای هیدروژن از بین می‌روند، در نتیجه بعد از مرمت درخشندگی به میزان چشمگیری افزایش می‌یابد.

سکه ام۹ به طور مشابه شبیه سکه ام۶ رفتار می‌کند. تصاویر عکاسی‌شده (اولیه و نهایی سکه‌ها) در شکل ۳ آورده شده است.

## ۵ـ۴ تأثیر مرمت با پلاسما در ضدعفونی شدنِ آثار چوبی

در مطالعات لکلایر [1] و همکاران، کارایی فناوری پلاسمای سرد فشار اتمسفری در ضدعفونی کردنِ سطوح چوبی آلوده به قارچ، به عنوان جایگزین مناسبی برای روش‌های رایج ازجمله استفاده از آفت‌کش‌ها، بررسی شد. در این تحقیق که بر اثربخشی روش پس‌تاب [2] فشار اتمسفری به عنوان یک درمان قطعی تأکید شده است، ابتدا کارایی پس‌تاب پلاسما به طور مستقیم بر کشت قارچی [3] بررسی شد. در این مطالعه، از ترکیب گاز نیتروژن و اکسیژن با میزان ۵ %و ۲۴ ٪ اکسیژن در زمان‌های مختلف درمان، ۱ و ۲و ۱۵ دقیقه استفاده شد. نتایج تحقیقات، کارایی پس‌تاب را در غیرفعال کردن اسپورهای قارچی در ۱۵ دقیقه نشان داد. علاوه بر این، حتی برای مدت زمان کوتاه‌تر، حدود ۲ دقیقه، نیز نتایج مثبت بوده است که مزیت بزرگ چنین محیط‌هایی را نشان

[1] Leclaire
[2] After glow
[3] Aureobasideum pullulans

می‌دهد. با توجه به نتایج اولیه، به نظر می‌رسد که ماهیت ترکیب گاز، پارامتر مهمی در فرایند ضدعفونی کردن نیست. همان گونه که با افزایش درصد اکسیژن از صفر به ۵٪ و۲۴٪، تفاوت زیادی مشاهده نشد. با وجود این، تأثیر پارامترهایی مانند زمان مرمت و ترکیب گاز باید بیشتر بررسی شود.

**شکل ۳** تصاویر عکاسی قبل از مرمت (آدی) و بعد از مرمت (ای‌اچ) با پلاسمای اچ اف.

## ۵ـ۵ پاکسازی نقاشی‌های دیواری و سطوح معماری با پلاسما

روش‌های فعلی برای از بین بردن رسوبات آلی و مواد نامطلوب از نقاشی‌های دیواری و باستانی اغلب با حلال‌های تهاجمی و فناوری‌های ساینده مانند ماسه‌زدایی و همینطور توسط فرایندهای تمیز کردن شیمیایی و مکانیکی انجام می‌شود که اغلب ضررهای خود را به همراه دارد.

در این قسمت، چگونگی زدودن لایه‌های نامطلوب را توسط یک فرایند واحد بررسی می‌کنیم. پلاسمای فشار اتمسفری به عنوان فرایندی مقرون‌به‌صرفه و جایگزینی برای روش‌های

متداول شیمیایی و فیزیکی حال حاضر استفاده می‌شود. در واقع، سعی در حذف لایه‌های رزین مصنوعی و لاک‌ها و رسوبات دوده با قلم‌زنیِ پلاسمایی از سطوح مختلف داریم.

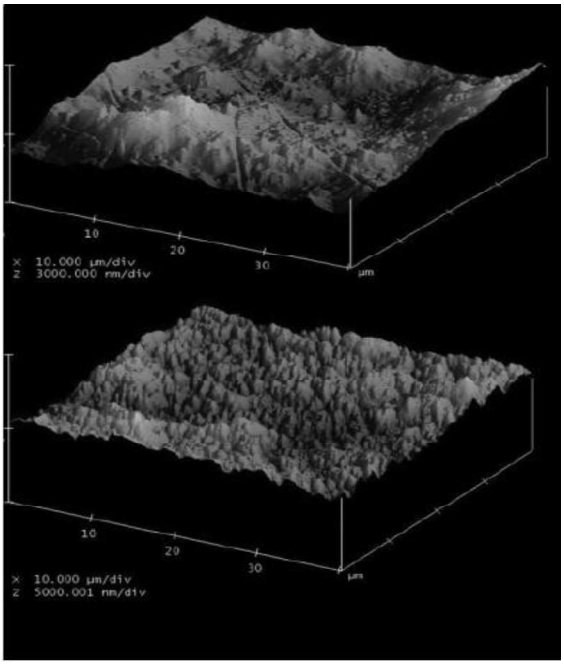
از دو منبع پلاسما برای تعیین بهترین پارامترهای پلاسما به منظور از بین بردن لایه‌های محافظ موجود استفاده شد. یکی از منابع پلاسمایی مورد استفاده پلاسما بلستر[1] است که با مکانیزم تخلیه کرونا کار می‌کند. این منبع پلاسما با فشار اتمسفر کار می‌کند و برای درمان زبری سطح مناسب است.

دومین دستگاه تخلیهٔ سد دی الکتریکی (دی‌بی‌دی) است که خالی از پتانسیل و بار است و در فشار اتمسفر در سیستم استوانه‌ای تولید می‌شود. با هر دو منبع فرسایش صورت می‌گیرد، زیر لایه‌های مختلف نسبت به پلاسما بلستر و دی‌بی‌دی جت واکنش‌های متفاوتی نشان می‌دهند. در پلاسما بلستر نسبت به دی‌بی‌دی جت می‌توان لایه‌های بیشتری را با سرعت زیادتر حذف کرد و استفاده از گاز واکنش‌پذیر بیشترین نرخ فرسایش را فراهم می‌کند. مخلوط آرگون و هیدروژن (۹۵،۵٪) نواخت فرسایشی بیش از ۱۰۰ میکرومتر در دقیقه را تضمین می‌کند. برخی زیرلایه‌ها مانند لاک سلولز بسیار سخت و مقاوم است و ضعیف‌ترین اثر فرسایش را برای این زیرلایه‌ها دارد (کمتر از ۱ میکرومتر). در واقع، لاک سلولز در مقابل درمان در برابر پلاسما بلستر از خود مقاومت نشان داد و بیشترین توان خروجی باعث آسیب حرارتی لایه به شکل لکه‌های سیاه سوخته می‌شود. لذا برای موادی که نسبت به دما حساسند بهتر است از دی‌بی‌دی جت استفاده شود. یکی دیگر از زمینه‌های مورد استفادهٔ دی‌بی‌دی جت‌ها، مات شدن لاک‌های براق است که ترجیحاً به عنوان یک پوشش محافظ بر روی نقاشی‌ها اعمال می‌شوند. برای آثار باستانی مختلف مانند نقاشی‌ها و اسناد و کتاب‌ها، لاک‌هایی با سطح درخشش متفاوت مورد نیاز است. درمان پلاسما اجازه می‌دهد که از ماده‌ای استفاده کنیم که در سطوح مختلف براق تنظیم شود. اثر مات‌کنندگی به دلیل تغییر در زبری سطح ایجاد می‌شود که در شکل ۴ نشان داده شده است. خطوط جوهر و نمک را با استفاده از پلاسمای بلستر در دماهای پایین و توسط دی‌بی‌دی جت از کاغذ جدا کرد.

پاکسازی اسناد و کتاب‌ها زمینهٔ مهمی در حوزهٔ حفاظت است و مسئلهٔ جدیدی را ارائه می‌دهد. پراکندگی‌های آب‌پایه روی سطوح آبگریز ترمیم‌شده با پلاسما می‌چسبند، این اثر برای بازسازی نماهای گچ آهک بسیار مهم است. استفاده از پلاسما بلستر و دی‌بی‌دی جت برای از بین بردن آلودگی‌ها ورسوبات روی نقاشی‌های دیواری تا حدودی موفقیت آمیز بوده است.

---

[1] Plasma blaster




**شکل ۴** تصاویر توپوگرافی سطحی میکروسکوپ نیروی اتمی لایهٔ رزین الکید قبل(بالا) و بعد (پایین) از مرمت با پلاسما.

## ۶. نتیجه‌گیری و افق پیش رو

بر اساس کنوانسیون استکهلم در خصوص محیط زیست و کارکنان، ایدهٔ جایگزینی مرمت‌های مضر که در آن از روش‌ها و مواد سمی استفاده می‌شود، با مرمت‌های غیرسمی و غیرتخریبی و دوستدار محیط زیست افزایش یافته است. در میان روش‌های استاندارد مرمت، استفاده از فناوری پلاسما، درمانی جدید در حوزهٔ میراث فرهنگی است که به عنوان روشی غیرتخریبی و کارآمد گزارش شده است. درمان پلاسما روشی است غیرتماسی که با توجه به نوع و شرایط نمونه و نوع کاربری، شرایط به طور موردی برای هر نمونه طراحی می‌شود، این روش تغییرات ساختاری در مواد ایجاد نمی‌کند و مواد شیمیایی مورداستفاده در آن بسیار کمتر از روش‌های رایج است. علاوه بر این، زمان کوتاه مرمت و آلودگی محیطی کم، از دیگر مزایای این روش محسوب می‌شود.

اگرچه با روش پلاسما اطلاعات فراوان ناشناخته‌ای از اشیاء ظریف نیز آشکار می‌شود، اما کارایی و ایمنی روش پلاسما در مورد آثار ظریف باید با دقت بیشتری بیان شود. به عبارت دیگر، در برخی موارد چنین تکنیکی ممکن است برای آثار بسیار ظریف مناسب نباشد. لازم است ذکر کنیم که متغیرهای مختلفی در روند پاکسازی نقش دارند: از یک طرف ضخامت یا نوع آلاینده و

میزان سختی و ناهمواری سطح مد نظر و از طرف دیگر نوع مرمت با پلاسما، زمان مرمت و انتخاب ترکیب گاز. بنابراین قبل از هرگونه تصمیمی در انتخاب نوع مرمت سطح، انجام آزمایش‌های مختلف در محل ضروری است. امروزه مرمت با پلاسما برای مواد مختلف مثل منسوجات، کاغذ، الیاف سلولزی، چرم، چوب، مواد پلیمری و سرامیکی استفاده می‌شود. حتی در بسیاری از مراکز به بخشی از فرایند حفاظت از آثار آهنی باستانی تبدیل شده است. اما علی رغم مزایای مذکور، پلاسما هنوز یک روش رایج و مرسوم در بحث عملی حفاظت محسوب نمی‌شود. در پایان متذکر می‌شود که هر نمونهٔ مورد مطالعه با توجه به ساختار آلی و غیرآلی بودن آن، به تجهیزات و شرایط خاصی برای ایجاد محیط پلاسما نیاز دارد که خارج از موضوع بحث ما بوده، به همین دلیل در اینجا از شرح تک تک جزئیات شرایط مرمت و جزئیات تجهیزات مورداستفاده صرف نظر شده است.

## ۷. تقدیر و تشکر

این مقاله نتیجه فعالیت کلاسی درس سمینار دوره کارشناسی ارشد فوتونیک پژوهشکده لیزر و پلاسمای دانشگاه شهید بهشتی است که تحت راهنمایی دکتر مهاجرانی انجام شده است.

## پی نوشت

کنوانسیون استکهلم یک توافق بین‌المللی قانونی با هدف حفاظت از سلامت انسان و محیط زیست در برابر آلاینده‌های آلی پایدار و برنامه‌ریزی جهت کاهش و حذف کاربرد آن‌هاست که در سال ۲۰۰۲ تصویب شده است. کشور ایران نیز در سال ۱۳۸۵ رسماً به این کنوانسیون پیوست.

## منابع

[1] Ghiocel Ioanida E, Ioanida A, Emilia Rusub D, Dorofteia F, "Surface investigation of some medieval silver coins cleaned in high-frequency cold plasma", Journal of Cultural Heritage,12,220–226.2011.

[2] Pflugfelder Ch, Mainusch N, Hammer L, Vio 1 W, "Cleaning of Wall Paintings and Architectural Surfaces by Plasma", Plasma Process Polym, 4, S516–S521, 2007.

[3] Eliezer S and Eleizer Y, *The fourth state of matter: An introduction to plasma science* (second edition), Institude of physics publishing, 2017.

[4] Shokri B, "Plasma technology plan and its strategic position", center for presidential Strategic studies, 1389, Tehran, Iran (in persian).

[5] Radkova L, Fojtikova P, Kozakova Z, Krcma F, Sazavska V, Kujawa A, "Sample Temperature During Corrosion Removal by Low Pressure Low-Temperature Hydrogen RF Plasma", Rom Rep Phys,67,586–599,2015.

[6] Daniels VD, Holland L, Pascoe MW, "Gas plasma reactions for the conservation of antiquities", Stud Conserv; 24:85–92,1979.

[7] Xaplanteris CL, Filippaki E., "Chaotic Behavior of Plasma Surface Interaction: A Table of Plasma Treatment Parameters Useful to the Restoration of Metallic Archaeological Objects", Chaotic Syst. Theory Appl., World Scientifi; p. 377–84, 2010.
[8] Kotzamanidi I, Anastassiadis A, Filippaki L, Filippakis SE, Vassiliou P, Sarris E., "Effects of plasma cleaning and conservation treatment on the corrosion layer of corroded steel – XRD evaluation", Anti Corrosion Methods Mater; 49:256–63,2002.
[9] Boselli M, Chiavari C, Colombo V, Ghedini E, Gherardi M, Martini C, *et al.* "Atmospheric pressure non-thermal plasma cleaning of 19th century daguerreotypes", Int. Conf. Plasma Sci. (ICOPS), San Fr. CA, 2013.
[10] Patelli A, Favaro M, Simon S, Storme P,Scopece P, Kamenova V, *et al.* "PANNAProject–Plasma and Nano for New Age Soft Conservation", Development of a Full-Life Protocol for the Conservation of Cultural Heritage. Euro-Mediterranean Conf; p.793–800,2012.
[11] Exner M., Schaedler-Saub U. (hg.), ''European Wall Paintings and Painted Architectural Surfaces of the Middle Ages: Recommendations of How to Deal with the Results of the Earlier Restorations'', Restoring the Restorations? The Treatment of Medieval Wall Paintings and Architectural Polychromic During the 19th and 20th Centuries, Series ofpublications by the Hornemann Institute, Bd. 5; GermanNational Committee of ICOMOS, Bd. XXXVI, Mu¨nchen, p. 289 ff, 2002.
[12] Enachiuc V, comerciale R, Moldovei A , in secoleleXVI–XVII, ilustrata in tezaurul monetar descoperit la Cordareni, judetul Botosani, Acta Moldavie Meridionalis, Vaslui, XII–XIV, 93–99, (1990–1992).
[13] Madani F.S, Hsdian Dehkordi M, "An overview of the application of plasma technology in the protection of cultural and historical object", Journal of Research on Archaeometry; 4 (1):81–942018 (in persian).
[14] Hammer I, Assmann C, Mainusch N, ''Erhaltungszustand und Schaeden aus restauratorischer Sicht'', 1000 Years of Cultural History in Stone - The Cloister of the Former Benedictine Benedictine Monastery of St. Michael in Hildesheim, Series of publications by the Hornemann Institute, Bd 2, CW Niemeyer Buchverlage GmbH, Hannover, pp.138–149, 2000.
[15] Jögl, I *et al.*, "Plasma treatment for environment protection", EU 2012.
[16] Schmidt-Ott K., "Plasma-reduction: Its potential for use in the conservation of metals", Proc Met 2004;4:235–46.