



Review Paper

An Overview of the Application of Plasma Technology in the Protection of Cultural and Historical Objects



Farah Sadat Madani^{*1}, Manijeh Hadian Dehkordi²

¹ MA in Conservation of Cultural Properties, Research Center for Conservation of Cultural Relics (RCCCR), Tehran, IRAN

² Assistant Professor, Research Center for Conservation of Cultural Relics (RCCCR), Tehran, IRAN

Received: 16/04/2018

Accepted: 25/06/2018

Abstract

Nowadays, over time and 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. So throughout the world, researchers are seeking to develop and use safe and standard methods in this area. One of these methods is the plasma technology. Plasma can be defined as the fourth state of matter. Giving energy to a gas will induce the ionization of some of its molecules and atoms. The plasma contains therefore, besides neutral molecules, positively and negatively charged particles, although its overall charge is neutral. Cold plasma due to 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. Cold plasma in disinfection and cleaning treatments of works has been examined as a non-toxic and non-invasive alternative in the field of cultural heritage. Different methodologies were developed in time using mechanical methods, solvents and, more recently, laser, to cleaning of architectural surfaces, and in a more recent time, atmospheric plasma began to be tested for such application. A positive feature of plasma is the fact that is contactless: it does not interfere mechanically with the surface being treated, and also with soft chemical action, the process of cleaning only limited to the first layers of the surface. Hence this method can prevent the adverse effects of solvent and /or imprisonment and lateral harmful products on the pores and porous surface, which is often present in common cleaning methods. In other words this method could be a good alternative for abrasion methods, that cannot remove the dirt from the pores and often lead to the damaging of the original surface, or for chemical methods, which solvents can transport undesired materials (dirt or old coatings) deeper inside through pores, cavities or cracks. Plasma might substitute or be used in combination with other techniques, particularly for delicate objects where original material might be endangered by a mechanical or wet cleaning method. In many cases the plasma alone is not as efficient as traditional methods. For instance, in case of removal of graffiti, a combination of plasma with traditional cleaning methods showed surprisingly good results or in the case of removal of oil paint from wall paintings, a pre-treatment with plasma can improve the removal with traditional solvents. The application of innovative cleaning technology on cultural properties demands sufficient knowledge concerning the cleaning process itself and the long-term behavior of an object after cleaning, because they are often unique and irreplaceable. Furthermore, the experiences carried out in various museums and research centers mentioned in this paper showed that cold plasma is appropriate methods to remove corrosion

* Corresponding author: fsm2200@yahoo.com

curst on metals particularly tarnished silver. Decontamination of wood and the objects based on cellulose like paper and cotton as well as protein materials (leather, wool) is another application of cold plasma presented in the paper.

Keywords: Plasma technology, Cultural Heritage, Cleaning, Disinfection, Non-destructive.



مروری بر کاربرد فناوری پلاسما در حفاظت آثار فرهنگی و تاریخی

فرح سادات مدنی^{۱*}، منیژه هادیان دهکردی^۲

۱. کارشناس ارشد مرمت اشیاء تاریخی، پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی-فرهنگی، تهران، ایران

۲. استادیار و عضو هیئت علمی پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی-فرهنگی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۴/۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱/۲۷

چکیده

امروزه با گذشت زمان و افزایش آگاهی از تأثیرات مخرب ناشی از استفاده مواد شیمیایی و سمی برای آثار مورد درمان، محیط و کاربران، جایگزینی یا حداقل استفاده از این مواد مخرب در درمان و حفاظت آثار، یک اولویت محسوب می‌شود. لذا در سراسر جهان محققین درصدد توسعه و استفاده از روش‌های بی‌خطر و استاندارد در این حوزه هستند. یکی از این روش‌ها، استفاده از فناوری پلاسما است. پلاسما حالتی از ماده با ماهیت محیط یونیزه، شامل مجموعه‌ای از یون‌های مثبت، الکترون‌ها و اتم‌های خنثی با غلظت معین است. پلاسمای سرد به دلیل ویژگی‌هایی از قبیل دمای پایین و انرژی بالا، علاوه بر طیف گسترده‌ای از برنامه‌های کاربردی در حوزه‌های مختلف، از سال ۱۹۷۹ م. موردتوجه متخصصین حفاظت و مرمت آثار تاریخی-فرهنگی نیز قرار گرفته و در طول سال‌های گذشته، در درمان‌های ضدعفونی و به‌ویژه پاکسازی آثار، به‌عنوان یک گزینه‌ی غیرسمی و غیرتهاجمی در حوزه‌ی میراث فرهنگی موردبررسی قرار گرفته است. بر اساس مطالعات انجام‌شده، پاکسازی پلاسما یک روش بدون تماس و قابل کنترل است که روند پاکسازی، تنها به لایه‌های اولیه سطح محدود می‌شود. به همین دلیل این روش می‌تواند مانع از ایجاد تأثیرات نامطلوب ناشی از انتشار و یا حبس حلال‌های شیمیایی و محصولات مضر جانبی آن‌ها در منافذ و ساختار متخلخل بستر شود که اغلب در روش‌های پاکسازی رایج وجود دارد. پس از سال‌ها استفاده از روش‌های مختلفی مثل روش‌های مکانیکی، 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 می‌تواند جایگزین مناسبی باشد برای روش‌های مکانیکی (سایش) که نمی‌توانند چرکینه‌های داخل منافذ را بردارند و اغلب باعث آسیب و از بین رفتن سطح اصلی می‌شوند و یا برای روش‌های شیمیایی (استفاده از حلال‌ها) که می‌توانند چرکینه‌ها و یا پوشش‌های کهنه و قدیمی را از طریق منافذ، حفره‌ها و ترک‌ها به لایه‌های عمیق‌تر منتقل کنند. لذا در این مقاله ضمن معرفی و آشنایی با فناوری پلاسما به‌عنوان یک شیوه‌ی نوین و ایمن در امر حفاظت از آثار تاریخی، برخی از مطالعات موردی انجام‌شده در مراکز مختلف فرهنگی و نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعات نیز ارائه می‌شود. مقاله‌ی مذکور می‌تواند آغازی بر استفاده این فناوری در حوزه حفاظت از میراث فرهنگی در کشور باشد.

واژگان کلیدی: فناوری پلاسما، میراث فرهنگی، پاکسازی، ضدعفونی، غیرتخریبی.

* مسئول مکاتبات: پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری، پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی-فرهنگی، کد پستی ۱۱۳۶۹۱۳۴۳۱

پست الکترونیکی: fsm2200@yahoo.com

© حق نشر متعلق به نویسنده(گان) است و نویسنده تحت مجوز Creative Commons Attribution License به مجله اجازه می‌دهد مقاله چاپ شده را با دیگران به اشتراک بگذارد منوط بر اینکه حقوق مؤلف اثر حفظ و به انتشار اولیه مقاله در این مجله اشاره شود.

۱. مقدمه

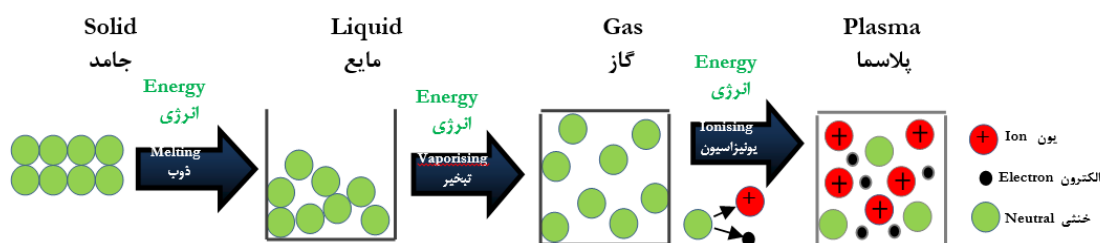
بدون شک مرمت آثار تاریخی و فرهنگی کار دشواری است زیرا نه تنها باید بهبود فیزیکی شیء و حفظ ظاهر خاص آن، مورد توجه قرار گیرد، بلکه باید حفظ ارزش‌ها و تداوم آن نیز در طول زمان تضمین شود [1]. هر یک از آثار تاریخی به نوبه‌ی خود دارای ویژگی‌های خاص و پیچیده‌ای است که باید در نهایت دقت مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گیرند. در این ارتباط مداخلات تخصصی و کنترل شده گاه برای انجام عملیات حفاظتی لازم می‌شود که می‌تواند شامل ضد عفونی و یا پاکسازی آثار فرهنگی شود. این درمان‌ها با استفاده از روش‌ها و موادی صورت می‌گیرند که اغلب تهاجمی یا مخرب هستند. روش‌هایی که ممکن است باعث از بین بردن ویژگی‌ها و اطلاعاتی از سطح شی شوند [2] و یا موادی که به دلیل سمیت، نه تنها وضعیت آثار بلکه شخص درگیر در انجام درمان را نیز در معرض خطر قرار دهند. علاوه بر این تأثیر منفی چنین موادی بر محیط زیست را نیز باید در نظر داشت. لذا امروزه گرایش‌ها در سراسر جهان به سوی جایگزینی یا حداقل استفاده از این روش‌ها است و در این خصوص نه تنها از روش‌های استاندارد و فناوری‌های جدید استفاده می‌شود بلکه کارشناسان رشته‌های مختلف مرمت، علوم، کامپیوتر و مهندسی را نیز درگیر می‌کند [3]. استفاده از فناوری‌های نوین به ویژه در حوزه‌ی میراث فرهنگی به دلیل بارزش و منحصربه‌فرد بودن آثار تاریخی، از حساسیت بیشتری نیز برخوردار است و نگرانی‌ها و سؤالاتی چون اثرات مستقیم و جانبی این روش‌ها را روی آثار مطرح می‌کند؛ بنابراین به کارگیری و اطمینان از غیر تخریبی بودن این روش‌ها نیازمند کسب تجربه لازم و کافی در این خصوص است.

فناوری پلاسما یکی از روش‌های نوین در حوزه‌ی میراث فرهنگی است که از سال ۱۹۷۹ م. مورد توجه متخصصین حفاظت و مرمت آثار تاریخی قرار گرفت. این روش ابتدا برای حفاظت فلزات و عمدتاً برای درمان و حذف خوردگی اشیای نقره‌ای و آهنی باستانی مورد استفاده قرار گرفت و به تدریج شرایط مطلوب درمان و به‌طور تجربی برای این نوع آثار تعیین شد [4-8]. با نتایج مثبت به دست آمده از روش پلاسما در حفاظت آثار فلزی، این

روش به تدریج در درمان‌های ضد عفونی نیز مورد توجه قرار گرفت و در حوزه‌ی حفاظت به سمت ضد عفونی و استحکام بخشی مواد آلی [9,10] و همچنین پاکسازی آثار نقاشی سوق پیدا کرد [11]. اگرچه امروزه فناوری پلاسما به عنوان یک روش غیر شیمیایی (بدون نیاز به مواد حلال‌های شیمیایی)، ایمن و دوستدار محیط زیست شناخته شده و کاهش مدت زمان و هزینه‌های درمان را به همراه داشته است [12]، اما برای هر یک از اشیاء، شرایط درمان منحصربه‌فرد و خاص بوده و نیازمند بررسی‌های دقیق بر روی عوامل مختلفی همچون روش تولید پلاسما، ماهیت گاز پلاسما و متغیرهای آن (چگالی، دما و فشار)، نوع آثار و آسیب‌های وارده است [13]. در این مقاله ضمن معرفی فناوری پلاسما و کاربردهای آن در صنایع، به بررسی تجربیات به دست آمده از آن در موزه‌ها و مراکز فرهنگی خارجی پرداخته می‌شود. هدف از این مقاله آشنایی متخصصان حفاظت و مرمت داخلی با این فناوری و قابلیت‌های آن به عنوان یک روش جایگزین ایمن و یا مکمل روش‌های مرسوم پاکسازی سطوح و ضد عفونی آثار است که گاه منجر به آسیب‌های قابل توجهی به آن‌ها می‌شوند. علاوه بر این، آشنایی با این روش می‌تواند به متخصصان مربوطه کمک کند که با به کارگیری و ساخت تجهیزات لازم و متناسب با نیازهای حوزه‌ی حفاظت و مرمت آثار در کشور، شرایط کسب تجربیات لازم و کافی برای استفاده از آن و مقایسه با سایر روش‌های مشابه فراهم گردد.

۲. پلاسما و کاربرد آن در صنایع

پلاسما حالتی از ماده است که با اعمال انرژی و یا حرارت به یک گاز خنثی در دامنه‌ی وسیعی از دما و فشار تولید می‌شود [14] (شکل ۱). این ماده با ماهیت محیط یونیزه، مجموعه‌ای از یون‌های مثبت، الکترون‌ها و اتم‌های خنثی با غلظت معین است، به طوری که مقدار الکترون‌ها و یون‌های مثبت در یک محیط پلاسما تقریباً برابر است و حالت پلاسمای مواد، تقریباً شبیه خنثی بوده و حالت‌های خاصی را در مقابل مغناطیس نشان می‌دهد [15-17]. پلاسما در جهان بسیار شایع است و گفته می‌شود که ۹۹٪ مواد موجود در طبیعت در حالت پلاسما



شکل ۱: پلازما به عنوان حالت چهارم ماده [20]
Fig. 1: plasma as the fourth state of matter [20]

رنگ آمیزی، مقاومت در برابر عوامل اکسید کننده، پوشش های محافظ، برق انداختن، افزایش خاصیت ضد مرکب به واسطه ی اصلاح کاغذ قبل از چاپ، محافظت در برابر نور خورشید و پرتوهای ماوراء بنفش، پلیمریزاسیون با مونومر، پلیمرهای مصنوعی در پیوند با سلولز و رسوبات زیستی تجزیه پذیر است. از مزایای این نوع فرایندها عدم استفاده از حلال های شیمیایی و بی نیازی به آب است [24]. فناوری پلازما قادر است انواع زباله ها را بدون توجه به نوع آن ها، به مواد قابل استفاده و سازگار با محیط زیست تبدیل کند [25]. پسماندهای جامد شهری، مصالح و نخاله های ساختمانی، لجن فاضلاب های صنعتی و شهری و حتی پسماندهای خطرناک عفونی و بیمارستانی از طریق این فناوری ایمن قابل امحاء هستند.

درمان پلاسمای سطح، فرایندی است که انرژی سطح بسیاری از مواد را به منظور اصلاح خواص سطحی آن ها (قابلیت اتصال و پیوستگی، تری، چسبندگی و غیره) افزایش می دهد. با پلاسمای سطح می توان سطح موادی همچون شیشه، فلز، شبه فلزات، پلاستیک، پلیمر، پارچه، فیلم، کاغذ و مقوا را تمیز، فعال یا حکاکی کرد [14,26,27] (شکل ۲ و ۳).

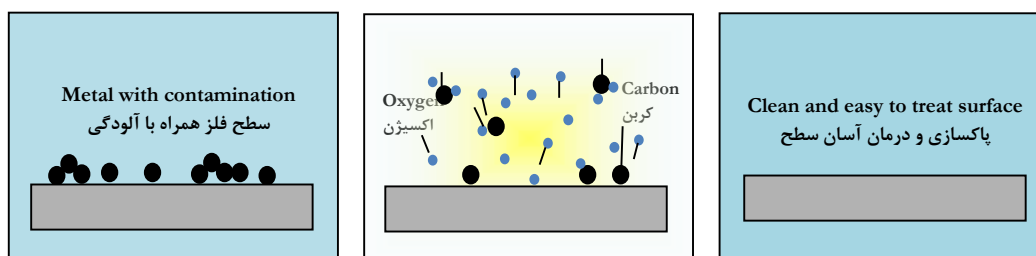
۳. انواع پلازما

از دو طریق حرارت و تخلیه ی الکتریکی می توان پلازما تولید کرد. در پلاسمای حرارتی (Thermal plasma) یا پلاسمای گرم دمای همه ی اجزاء موجود شامل الکترون ها، اجزاء اتمی و مولکولی تقریباً برابر و در تعادل حرارتی و دمای خیلی بالا است. در این نوع پلازما دما به دمای گازها از چند ده هزار تا پنجاه هزار درجه ی کلوین متغیر است. این نوع پلازما به دلیل دمای بسیار بالا و اثرات

هستند [16,18,19]. رعدوبرق، تابش ملایم شفق قطبی، خورشید و نور پراکنی آن نمونه های شناخته شده ی پلازما و مثال هایی از پلاسمای طبیعی و غیر قابل کنترل هستند [14,18]. در صنعت با الگوبرداری از طبیعت از پلازما استفاده های فراوان و مفیدی شده است.

از جمله حوزه های استفاده از فناوری پلازما می توان به پزشکی، صنایع و محیط زیست اشاره کرد. برای مثال در حوزه ی پزشکی می توان به استریل کردن لوازم و قطعات پزشکی، ترمیم زخم ها، از بین بردن سلول های سرطانی، از بین بردن عفونت چشم، پردازش دندان و ضد عفونی کردن آن، سازگار کردن ایمپلنت ها برای قرارگیری در بدن انسان اشاره کرد. از مزایای استریل به روش پلازما، امکان استریل ابزارهای حساس به رطوبت و گرما، غیرسمی بودن ماده ی اولیه آن (پراکسید هیدروژن)، عدم ایجاد پسماند سمی، کاهش زمان استریل، مقرون به صرفه بودن و دوستانه محیط زیست است [21]. همچنین روش گاز پلازما روشی ایده آل جهت غیر فعال سازی میکروارگانیسم ها در بسته بندی مواد غذایی در راستای ارتقای کیفی آن ها و افزایش عمر نگهداری مواد غذایی بسته بندی شده است [22].

از پلازما می توان برای اصلاح سطح و افزایش خواص اصلی مواد نساجی استفاده کرد. این درمان ها برای افزایش قابلیت رنگ پذیری پلیمرها، قابلیت چاپ، بهبود ثبات و استحکام رنگ، مقاومت شستشوی بافته و تغییر انرژی سطح الیاف پارچه ها ثابت شده است [23]. از کاربردهای پلازما در صنعت کاغذ می توان به تولید کاغذ ضد شعله، ضد استاتیک، ضد باکتری، ضد کپک و سطوح زیستی سازگار آن اشاره کرد. ویژگی های مفید دیگری که می توان با پلازما به دست آورد، ضدآب شدن کاغذ پس از

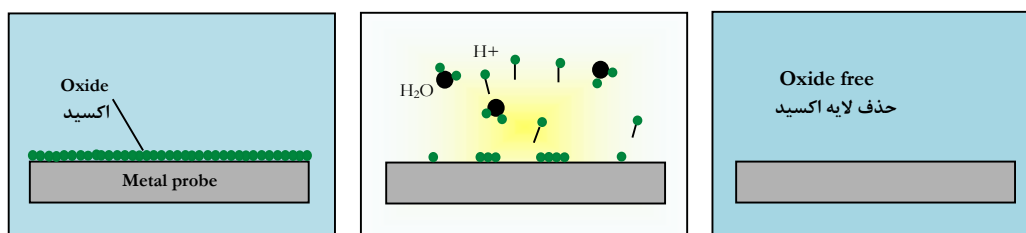


شکل ۲: پاکسازی آلاینده‌های آلی در سطح نمونه فلزی: قبل از درمان (تصویر چپ)، درمان پلاسما (تصویر وسط)، پس از درمان (تصویر راست) [14]

Fig. 2: Cleaning the organic pollutants at the metal surface: before plasma treatment (left); plasma treatment (center); after plasma treatment (right) [14]

یک فرآیند بسیار انعطاف‌پذیر و درمان مواد با اشکال پیچیده و ابعاد مختلف به‌وسیله‌ی آن امکان‌پذیر است [29]. در پلاسمای سرد فشار اتمسفری، گاز بعد از برانگیختگی بر سطح موردنظر اعمال می‌شود. کنترل تخلیه‌ی الکتریکی، دمای خروجی گاز از منبع را محدود می‌کند. به‌علاوه، سرعت درمان می‌تواند به‌اندازه‌ای بالا باشد که مانع از هرگونه افزایش دما در سطح ماده‌ی تحت درمان شود. اصل روش مشابه با روش پلاسمای خلأ است، با این تفاوت که استفاده از میدان‌های الکتریکی بسیار شدیدتر است. به همین دلیل مشعل مورد استفاده پلاسما در این روش همیشه با ابعاد کوچک است [29]. تفاوت خاص پلاسمای فشار اتمسفری با پلاسمای فشار بالا یا کم در این است که برخلاف این دو مورد، به محفظه یا اتاقکی که شیء در آن قرار گیرد، نیازی نیست. این نوع پلاسما به‌طور مستقیم در خط تولید استفاده می‌شود و در نتیجه نیازی به محیط خلأ پرهزینه نخواهد بود [29]. پلاسمای تخلیه‌ی سد دی‌الکتریک (Dielectric Barrier Discharge (DBD)، پلاسمای رادیوفرکانس (Radio Frequency (RF)، پلاسمای تخلیه‌ی کرونا (Corona Discharge Plasma)، پلاسمای تخلیه‌ی تابان

تخریبی آن، کاربردی در حوزه میراث فرهنگی ندارد. در پلاسمای غیرحرارتی یا پلاسمای سرد (cold plasma)، درجه‌ی حرارت اجزاء کاملاً متفاوت و معمولاً دمای الکترون‌ها به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از اجزای دیگر است [16,28]. دمای الکترون‌ها تا چند ده هزار کلوین و دمای سایر اجزاء که همان دمای کلی گاز است، در حدود دمای محیط تا چند صد درجه‌ی کلوین است [20]. در پلاسمای سرد فشار پایین، گاز (آرگون یا اکسیژن) با فشار مشخصی داخل محفظه‌ی خلأ، تزریق می‌شود. با ورود انرژی در قالب یک میدان الکتریکی، گاز به‌طور جزئی تجزیه و پلاسما ایجاد می‌شود. اجزاء ناشی از این تجزیه، اتم‌های خنثی، یون‌ها، الکترون‌ها و رادیکال‌های مختلف هستند. رادیکال‌های تشکیل‌شده، مولکول‌های بسیار واکنش‌پذیری هستند که می‌توانند با یکدیگر و با سطوح مجاور از جمله سطوح مواد تحت درمان، وارد واکنش و موجب اصلاح ویژگی‌های سطح آن‌ها شوند، اگرچه این واکنش‌ها به گاز مورد استفاده، بستگی دارد. مدت‌زمان قرارگیری مواد تحت درمان در معرض پلاسما، می‌تواند از چند ثانیه تا چند دقیقه با توجه به کاربرد موردنظر متفاوت باشد. پلاسمای سرد فشار کم، یا خلأ



شکل ۳: پاکسازی لایه اکسید: قبل از درمان (چپ)، درمان پلاسما (وسط)، پس از درمان (راست) [14]

Fig. 3: Clearing the oxide layer: before plasma treatment (left); plasma treatment (center); after plasma treatment (right) [14]

جدول ۱: انواع پلاسما [30,31]

Table 1: Different types of plasma [30,31]

کاربرد Application	نحوه تولید Production method	ویژگی‌ها Specifications	پلاسما Plasma
درمان متالورژی، عملیات حرارتی، جوشکاری، استخراج فلزات Metallurgy treatment, Heat treatment, Welding, metal extraction	تخلیه از نوع قوس الکتریکی، واکنش‌های گرما-هسته‌ای و اثر لیزر Arc discharge, Heat-Nuclear reactions & Laser effect	تبادل حرارتی بین اجزاء، دمای بالا، یونیزاسیون کامل و تعادل ترمودینامیکی گاز Thermal equilibrium, High temperature, complete ionization & Thermodynamic equilibrium of gas	پلاسمای حرارتی یا پلاسمای گرم Thermal plasma
درمان سطح، لایه نشانی، تولید اوزون، تصفیه هوا، کاهش آلودگی هوا، ضد عفونی آب و استریل کردن Surfaces treatment, Coating deposition, Ozone production, Air purification, Reduction of air pollution, Water disinfection and sterilization	تخلیه الکتریکی گاز در فشار پایین Gas discharge at low pressure	نابرابری درجه‌ی حرارت اجزاء، خارج از تعادل ترمودینامیکی و یونیزاسیون جزئی گاز Different temperature of components, Non-equilibrium & Low gas ionization	فشار پایین یا خلاء Low pressure or Vacuum پلاسمای غیرحرارتی یا پلاسمای سرد Non-thermal or cold plasma
	تخلیه الکتریکی گاز در فشار اتمسفری Gas discharge at atmospheric pressure		فشار اتمسفری Atmospheric pressure

اشمیت-آت (Schmidt-Ott)، از موزه ملی سوئیس، تأثیر درمان پلاسمای سرد (فشار پایین) با استفاده از گاز هیدروژن خالص را بر محصولات خوردگی فلزات شامل نمونه‌های آهنی و نقره‌ای مورد بررسی قرار داد [34].

اساس روش شامل 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 احیاکننده‌ی قوی نسبت به هیدروژن نوزاد، عمل می‌کنند. اشیای آهنی مورد آزمایش شامل تعدادی میخ آهنی از یک سایت باستانی (Site of Wetzikon-Kempton Hinwilerstr) با خوردگی‌های قابل توجه بودند. برای بررسی تأثیر درمان بر روی این اشیاء، نمونه‌های متالوگرافی قبل و بعد از درمان آماده شد. سپس مشخصات نمونه (شکل، فرم) در قبل و بعد از درمان پلاسما با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکوپ نوری پلاریزان مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی و کنترل فرایند پلاسما از طیف‌سنجی نوری استفاده و همچنین تأثیر درمان بر روی نمونه‌های متالوگرافی بررسی شد.

(Glow discharge)، از انواع پلاسمای سرد فشار اتمسفری هستند. انواع پلاسما، ویژگی‌ها و برخی کاربردهای آن‌ها در جدول ۱ خلاصه شده است.

۴. کاربرد فناوری پلاسمای سرد در حفاظت از

آثار تاریخی

پلاسمای سرد به دلیل ویژگی‌هایی از قبیل دمای پایین و انرژی بالا به‌عنوان یک شیوه نوین و ایمن در حوزه میراث فرهنگی، در بسیاری از موزه‌ها و مراکز تحقیقاتی به‌منظور انجام اقدامات حفاظتی و مرمتی بر روی آثار مختلف مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است که برخی از این موارد به‌جمال شرح داده می‌شوند.

۴-۱. کاربرد پلاسما در درمان آثار فلزی

امروزه فناوری پلاسما در بسیاری از موزه‌ها از جمله: موزه وال دواز (Val d' Oise) در فرانسه [32]، موزه ملی سوئیس، موزه بوهیمیا مرکزی (Museum of Central Bohemia in Roztoky) و موزه فنی در Brno، به بخشی از فرایند حفاظت از اشیاء آهنی باستانی تبدیل شده است. از جمله مزایای این روش، بهبود پاکسازی مکانیکی و تسریع در روند نمک‌زدایی بعدی است [33].



شکل ۴: تصاویری از جام نقره‌ای در قبل و بعد از درمان پلاسما هیدروژن به مدت ۲ ساعت و نیم [34]
Fig. 4: Images of Silver chalice before and after 2.5 hours hydrogen plasma reduction [34]

یک میدان الکتریکی خارجی حاوی انرژی کافی، در میان بسیاری از برهم‌کنش‌های دیگر، شتاب می‌گیرند و مولکول‌های هیدروژن را در دما و فشار پایین به اتم‌های هیدروژن تجزیه می‌کنند. این ذرات فعال با لایه‌های خوردگی در سطح شیء وارد واکنش می‌شوند. سپس لایه‌ی احیاء شده، سست و شکننده و به‌راحتی برداشته می‌شود. علاوه بر آن، فازهای حاوی کلریدها نیز سست و ناپایدار شده و در فاز گازی برداشته می‌شوند.

در این تحقیق از رایج‌ترین فلزات باستانی (آهن، مس، برنز و برنج) برای ایجاد خوردگی مصنوعی استفاده شد. طول درمان پلاسما با توجه به نمونه، نوع خوردگی و چرخه‌ی کار از ۴۰ تا ۱۲۰ دقیقه متغیر بود. لایه‌های خوردگی به‌وسیله‌ی میکروسکوپ الکترونی موردبررسی قرار گرفتند؛ و خواص مشخصه‌ی حذف لایه‌های مختلف خوردگی به‌وسیله‌ی طیف‌سنجی نوری در طول درمان تعیین شد.

نتایج حاصل از این تحقیقات، به‌خوبی قابلیت اجرایی پلاسما هیدروژن رادیو فرکانس را در بین بردن خوردگی سطح فلزات باستانی نشان داد. نتایج امکان استفاده از شیوه‌ی تخلیه‌ی پالسی را نیز نشان داد که با کاهش متوسط انرژی کاربردی، دمای نمونه به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد، اگرچه روند درمان به‌طور قابل ملاحظه‌ای طولانی‌تر می‌شود. از سوی دیگر فرایند پلاسما تقریباً در همه‌ی موارد مشابه و مؤثر بوده است. این نتایج به‌ویژه برای درمان اشیاء برنزی حساس به دما و یا برای اشیایی با ساختار شکننده (مثل اشیایی با میزان خوردگی بالا) بسیار حائز اهمیت است. دستگاه

نمونه‌های نقره‌ای نیز شامل تعدادی از آثار نقره‌ای تاریخی از جمله یک جام نقره‌ای با لکه‌های تیره و ناهموار بود که با پلاسما هیدروژن خالص به مدت دو ساعت و نیم درمان شد (شکل ۴).

مزایای استفاده از درمان پلاسما، تأثیر مثبت در تسهیل پاکسازی مکانیکی و تسریع نمک‌زدایی بعدی با سولفیت قلیایی برای آثار آهنی باستانی و همچنین قابلیت پلاسما هیدروژن در احیاء لایه‌های سولفید نقره بود، بدون آنکه تغییری در ساختار سطح و یا تداخلی در اطلاعات موجود در فلز کاری باستانی ایجاد کند [35].

روش احیاء هیدروژن در مقایسه با سایر روش‌های متداول پاکسازی نقره، دارای مزایای فراوانی است، از جمله اینکه هیچ‌گونه تغییری در ساختار سطح ایجاد نمی‌شود، هیچ‌گونه پس‌مانده ناشی از درمان در داخل یا روی اثر باقی نمی‌ماند و اینکه این روش بدون از دست دادن فلز نقره است. احیاء پلاسما، روشی مناسب برای آثار نقره‌ای تاریخی است، به‌ویژه برای آثاری که برای پاکسازی با روش‌های مکانیکی یا شیمیایی بسیار شکننده و ضعیف هستند [34].

در تحقیقی دیگر فرتینک کراچما (František Krčma) و همکاران، حذف لایه‌های خوردگی را در سطح اشیای فلزی با استفاده از پلاسما هیدروژن رادیو فرکانس موردبررسی و مطالعه قرار دادند [33]. این روش بر اساس احیاء محصولات خوردگی، با گونه‌های احیاء‌کننده مثل اتم‌های هیدروژن و مولکول‌های برانگیخته در پلاسما تخلیه‌ی تابان هیدروژن در فشار و دمای پایین، است. در پلاسما تخلیه‌ی تابان، الکترون‌ها به‌وسیله‌ی



شکل ۵: تصاویری از پرتوی داگرتوتایپ: (تصاویر چپ) قبل از درمان، (تصاویر میانی) پس از اولین درمان پلاسما (نیمه‌ی چپ تصاویر)، (تصاویر راست) پس از دومین درمان پلاسما (نیمه‌ی چپ تصاویر) [36]

Fig. 5: Images of 19th century daguerreotype portrait: (left) untreated conditions; (center) after 1st plasma treatment (left side); (right) after 2nd plasma treatment (left side) [36]

میکروسکوپی با میکروسکوپ الکترونی روبشی و میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) مورد بررسی قرار گرفت. همچنین محصولات خوردگی سطح داگرتوتایپ با آنالیزهای غیرتخریبی (SEM-EDS, ATR-FTIR) شناسایی شد.

نتایج حاصل از آنالیزهای FTIR, Raman, EDS-SEM در قبل و بعد از درمان پلاسما نشان داد که درمان در حذف لایه‌ی نازک کدر مؤثر بوده است، بدون اینکه تغییری در مورفولوژی سطح ایجاد کند؛ اما این روش موجب کاهش عناصر محیطی از جمله C, S, Cl و O شد، که احتمالاً به علت کاهش سولفور و کلرورهای نقره‌ی تشکیل شده حاصل از واکنش با هوای محیط داخل بوده است.

۴-۲. تأثیر درمان پلاسما بر مواد با پایه‌ی

سلولز و پروتئین

توتولین (Totolin) و همکاران، در خصوص استفاده از پلاسمای فرکانس بالا در حوزه‌ی حفاظت و مرمت آثار فرهنگی با اشاره به ضدعفونی، حاکاکی و تشکیل لایه‌های محافظ و استحکام‌بخش پلیمری، به مطالعه و بررسی پرداختند [41, 42]. در این تحقیق مجموعه‌ای از مواد شاهد بر پایه‌ی سلولز و پروتئین (کتان، کاغذ، ابریشم، پشم و چرم)، با ترکیباتی مشابه با مواد تاریخی

طیف‌سنجی نوری حذف قابل توجه کلر و نیتروژن را نشان داد، اما حذف سولفور در شرایط موجود پلاسما ضعیف بود. م. بسلی (M. Boselli) و همکاران در تحقیقی دیگر، امکان استفاده از پلاسمای سرد در فشار اتمسفری را برای تمیز کردن سطح یک تصویر عکاسی داگرتوتایپ (Daguerreotype) خورده شده متعلق به قرن ۱۹م. مورد بررسی قرار دادند [36].

سطح داگرتوتایپ‌ها معمولاً با یک لایه‌ی نامنظم تیره و مات پوشیده شده که ترکیب آن از قطعه‌ای به قطعه دیگر متفاوت و بستگی به روش آماده‌سازی و سابقه‌ی احتمالی حفاظت و پاکسازی آن‌ها دارد. قرار گرفتن در معرض رطوبت جوی و سولفور باعث تشکیل یک لایه‌ی فیلم کدر شامل ترکیبات نقره مثل سولفید نقره، اکسید نقره و کلرید نقره می‌شود [37-39]. علاوه بر آن، لایه‌ای از ذرات سیلیکات ناشی از تخریب پوشش شیشه‌ای نیز می‌تواند وجود داشته باشد [40]. در این تحقیق از ترکیب گاز آرگون-هیدروژن، برای حذف محصولات خوردگی بدون استفاده از حلال‌های شیمیایی استفاده شد. قبل از درمان، خوردگی قابل توجه یا کدری که باعث تیرگی تصویر عکاسی شده در سطح قابل مشاهده بود (شکل ۵).

مشاهدات بصری داگرتوتایپ با عکاسی ماکرو، مستندنگاری شد. مورفولوژی سطح در مقیاس

به‌وسیله‌ی پلاسمای فرکانس بالا به مدت ۱ ساعت درمان شدند. برای ارزیابی تأثیر درمان پلاسما بر روی مواد به‌صورت توده و در سطح، نمونه‌ها در قبل و بعد از درمان با روش‌های XRD، SEM، XPS، FTIR و آنالیز عنصری مورد بررسی قرار گرفتند.

نتایج آنالیز ATR-FTIR: طیف‌های قبل و بعد از درمان نمونه‌های کتان، تغییرات شیمیایی خیلی کمی را در ناحیه‌ی گروه کربونیل سطح نمونه‌ی بافته نشان داد [43-45]. تغییرات ایجادشده در سطح الیاف کتان در مقیاس نانومتری و نه بیشتر از چندلایه‌ی ماکرومولکولی ایجاد شد [46]. طیف قبل و بعد از درمان نمونه‌های کاغذ، نشان داد که تأثیر پلاسما بر روی کاغذ مشابه با مورد نمونه‌های کتان بود. طیف‌های به‌دست‌آمده از نمونه‌های ابریشم، تغییرات بیشتری را نسبت به نمونه‌های کتان نشان داد. ساختار فایبرون (fibroin) که جزء اصلی پروتئین مربوط به ابریشم طبیعی است، بعد از درمان پلاسما دستخوش تغییرات ناشی از اکسیداسیون در زنجیره‌ی ماکرومولکولی شد. طیف‌های قبل و بعد از درمان نمونه‌های پشم نشان داد که شدت نوارهای جذبی گروه‌های متیل با افزایش زمان درمان کاهش می‌یابد درحالی‌که پلاسما تأثیری بر گروه‌های آمید نداشت. طیف‌های قبل و بعد از درمان نمونه‌ی چرم، تغییرات مشابه با نمونه‌ی پشم را نشان داد که به این معناست که تأثیر پلاسما بر ترکیبات پروتئینی یکسان و فقط در سطح و غیر تخریبی است.

نتایج آنالیز XPS: تکنیک^۱ ESCA(XPS) فقط امکان ردیابی الکترون‌هایی را می‌دهد که تحت شرایط خلأ از سطح مواد مورد بررسی در عمق ۱۰nm منتشر شده‌اند. با توجه به منشأ سلولزی مشابه در کاغذ و کتان، نتایج XPS برای آن‌ها یکسان بود. نتایج کلیه‌ی نمونه‌های مورد بررسی در قبل و بعد از درمان با پلاسما، فرایندهایی از اکسیداسیون ناشی از درمان پلاسما، کاهش کربن و افزایش میزان اکسیژن ناشی از اکسیداسیون را نشان داد. از سوی دیگر نتایج آنالیز عنصری سطح به‌دست‌آمده از ESCA(XPS) عملکرد پلاسما را فقط در سطح و در حد نانومتر تأیید می‌کند.

نتایج آنالیز XRD: در نمونه‌های کتان، درجه‌ی

بلورینگی در اثر اکسیداسیون و فرایندهای پیوند عرضی ناشی از عمل پلاسما، به‌طور جزئی تحت تأثیر قرار گرفت. در ارتباط با نمونه‌های کاغذ، پلاسما نه در تغییرات ساختاری و نه در درجه بلورینگی تأثیری نداشت. درحالی‌که در نمونه‌ی ابریشم، نظم کریستالی پروتئین و در پشم درجه‌ی بلورینگی تحت تأثیر قرار گرفت. در ارتباط با نمونه‌ی چرم تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای در درجه بلورینگی دیده نشد.

نتایج آنالیز SEM: نتایج حاصل از بررسی‌های انجام‌شده با میکروسکوپ الکترونی نشان داد که پلاسما تغییرات شیمیایی و توپوگرافی در سطح لیف ایجاد می‌کند بدون اینکه تأثیری بر بخش‌های داخلی آن داشته باشد.

درنهایت نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های بررسی سطح و حجم نشان داد که تأثیر پلاسما فقط بر سطح و تا عمق چند نانومتر است. استفاده از پلاسمای سرد فرکانس بالا، برای ضدعفونی آثار تاریخی- فرهنگی بر پایه‌ی سلولز طبیعی و مواد پروتئینی توصیه می‌شود. پلاسما در مقایسه با سایر روش‌های مشابه اثر تخریبی بر روی این‌گونه آثار ندارد و یکپارچگی آن‌ها حفظ می‌شود [41].

ج. یوانید (G. Ioanid) و همکاران، نیز تغییرات ایجادشده به‌وسیله‌ی اجزاء فعال پلاسمای اتمسفری در بستر سلولزی را مورد مطالعه قرار دادند [47]. مطالعات روی سه نمونه جلد کاغذی از کتاب‌های تاریخی (مربوط به سال‌های ۱۹۲۰، ۱۹۱۹، ۱۸۵۳م.) متعلق به مجموعه‌های خصوصی انجام شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی، در همه‌ی موارد الیاف کتان را نشان داد که هیچ‌گونه تغییری در تصاویر قبل و بعد از درمان با پلاسمای فرکانس بالا، حتی بعد از ۶۰ دقیقه درمان، ایجاد نشده بود. کاهش تدریجی میانگین درجه‌ی پلیمریزاسیون، با افزایش زمان پلاسمای فرکانس بالا، نشان می‌دهد که درمان طولانی‌مدت برای بستر سلولزی مضر است. در یک جمع‌بندی کلی این مطالعات نشان داد که درمان کوتاه‌مدت، حدود ۳۰ دقیقه، تخریب زیادی در بیوپلیمر مورد استفاده به‌عنوان تکیه‌گاه ایجاد نمی‌کند، اما می‌تواند ناخالصی‌های سطح را که باعث تغییر تکیه‌گاه می‌شوند، از بین ببرد. این درمان‌ها اثر ضد باکتری و ضد قارچ نیز دارند.

حذف دوده در سطوح نقاشی موردبررسی قرار دادند. در این تحقیق به‌طور خاص از سه رنگدانه طبیعی معدنی، زرد کادمیوم (CdS - ZnO)، قهوه‌ای سوخته (Fe_2O_3)، اکسید سبز کروم هیدراته (Cr_2O_3 - $(\text{OH})_2$) استفاده شد. تصاویر SEM خوردگی جزئی بست را در طول درمان نشان داد. بعد از درمان پلاسما تغییرات قابل‌توجهی در هیچ‌یک از رنگدانه‌های مورد مطالعه دیده نشد؛ بنابراین، پلاسما فرکانس بالا را می‌توان به‌عنوان یک روش پاکسازی جزئی برای حذف دوده انباشته شده در سطح لایه تصویری سطوح نقاشی موردتوجه قرار داد [49].

۴-۵. پروژه اتحادیه اروپا-پانا (پلاسما و نانو برای عصر جدید حفاظت نرم، EU-PANNA)
پروژه‌ی PANNA، پلاسما و نانو برای عصر جدید حفاظت نرم، پروژه‌ی مشترک اتحادیه‌ی اروپا با تمرکز بر شیوه‌های جدید پاکسازی و حفاظت از آثار فرهنگی با استفاده از پلاسمای اتمسفری است که در سال‌های ۲۰۱۱-۲۰۱۴ م. انجام شده است [50].

ازجمله اهداف پروژه، پاکسازی انواع مختلف مواد (با توسعه‌ی مشعل جدید پلاسما)، پوشش‌های محافظ جدید آبگریز و برگشت‌پذیر و همچنین حذف کامل آن‌ها بعد از کهنگی است. در این راستا پروژه‌های مختلفی در اتحادیه‌ی اروپا تعریف و اجرا شده است. در ادامه نتایج برخی از پروژه‌های انجام‌شده در قالب پروژه‌ی PANNA به‌طور خلاصه ذکر می‌شود.

۴-۵-۱. پاکسازی ورنی در تصویر قرن ۱۸م. نیکلاس مقدس (SAINT NICHOLAS)
میلیانا (Milyana) و همکاران، روش پاکسازی پلاسمای اتمسفری (Ar/O_2) را به‌عنوان یک جایگزین مناسب، برای پاک کردن ورنی روغنی Olifa³ موردبررسی و مطالعه قرار دادند. به‌طور سنتی برای پاک کردن ورنی فوق از حلال‌های شیمیایی و ابزارهای مکانیکی استفاده می‌شود. این تحقیق بیشتر بر مقایسه‌ی روش‌های سنتی و درمان پلاسما برای پاکسازی ورنی Olifa متمرکز شد [50, 51]. مطالعات بر روی تصویر نیکلاس مقدس

۴-۳. کاربرد پلاسما در ضدعفونی آثار چوبی
در مطالعات انجام‌شده توسط لکلایر (Leclair) و همکاران، کارایی فناوری پلاسمای سرد فشار اتمسفری در ضدعفونی سطوح چوبی آلوده به قارچ، به‌عنوان یک جایگزین مناسب برای روش‌های رایج ازجمله استفاده از آفت‌کش‌ها، بررسی شد [48].

در این تحقیق که بر اثر بخشی روش پس‌تاب (afterglow) فشار اتمسفری به‌عنوان یک درمان قطعی تأکید شده است، ابتدا کارایی پس‌تاب پلاسما به‌طور مستقیم بر روی کشت قارچی (pullulans) *Aureobasidium* بررسی شد. در این مطالعه از ترکیب گاز نیتروژن و اکسیژن، با میزان ۰/۵ و ۲۰٪ اکسیژن در زمان‌های مختلف درمان: ۱، ۲ و ۱۵ دقیقه استفاده شد. نتایج تحقیقات، کارایی پس‌تاب در غیرفعال کردن اسپورهای قارچی را در ۱۵ دقیقه درمان نشان داد. علاوه بر آن، حتی برای مدت‌زمان کوتاه‌تر، حدود ۲ دقیقه، نیز نتایج مثبت بوده است که مزیت بزرگ چنین محیط‌هایی را نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج اولیه، به نظر می‌رسد که ماهیت ترکیب گاز، پارامتر مهمی در فرایند ضدعفونی نیست. همان‌گونه که با افزایش درصد اکسیژن از صفر به ۵٪ و ۲۰٪، تفاوت قابل‌توجهی مشاهده نشد. با این وجود تأثیر پارامترهایی مانند زمان درمان و ترکیب گاز باید موردبررسی بیشتری قرار گیرد.

۴-۴. پاکسازی دوده از سطوح آثار نقاشی با استفاده از پلاسما

راتلج (Rutledge) و همکاران، پاکسازی دوده ناشی از آتش بر روی سطوح نقاشی را با پلاسمای امواج رادیو در محیط اکسیژن موردبررسی قرار دادند. در این تحقیق بررسی فرایند قبل و بعد از پاکسازی با استفاده از مطالعات میکروسکوپی و نور انعکاسی نشان داد که حذف آسیب‌های ناشی از دوده به‌طور یکنواخت و مؤثر از روی سطوح نقاشی امکان‌پذیر است [11].

ج. یوانید (G. Ioanid) و همکاران، استفاده از پلاسمای سرد فرکانس بالا با استفاده از گاز اکسیژن/آرگون را برای



شکل ۷: قطعه‌ای از نقاشی دیواری، قبل از درمان (قسمت راست تصویر) و بعد از ۲ دقیقه

درمان با پلاسما (قسمت چپ تصویر) [52]

Fig. 7: Wall painting fragment. Before treatment (right side) and after treatment with plasma for two minutes (left side) [52]



شکل ۶: تصویری از قبل (چپ) و بعد از درمان پاکسازی پلاسما (راست) [50]

Fig. 6: Russian icon before (left) and after (right) plasma [50] (cleaning)

پاکسازی سنتی که ترکیبی از روش‌های شیمیایی و مکانیکی است، علاوه بر وقت‌گیر بودن، می‌تواند به لایه نقاشی زیرین نیز آسیب برساند. کامنوا (Kamenova) و همکاران مزایای استفاده از ترکیب درمان پلاسما با روش‌های سنتی را در چنین مواردی بررسی کردند [52]. تحقیقات ابتدا بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی، سپس بر روی قطعات اصلی نقاشی دیواری متعلق به کلیسای در بلغارستان (St. George church in Golyamo Belovo, Bulgaria) انجام شد به این منظور ابتدا سطوح قطعات با پلاسما درمان (شکل ۷) و سپس رنگ‌روغن با استفاده از حلال آلی و به کمک بیستوری، به‌طور کامل برداشته شد. در مرحله آخر پاکسازی‌شده در جا (In situ) و در محل کلیسا بود که سه ناحیه‌ی مختلف بر طبق روش‌های رایج برای پاکسازی قطعات، درمان شدند. تأثیر پاکسازی ترکیبی (روش پلاسما + روش‌های سنتی) با نتایج حاصل از روش‌های پاکسازی سنتی (بدون پلاسما) مقایسه شد. نتایج نشان داد که پیش‌درمان پلاسما علاوه بر کاهش زمان درمان و در نتیجه کاهش خطر آسیب به لایه‌های نقاشی زیرین، حذف رنگ‌روغن را آسان می‌کند [52].

۴-۵-۳. استفاده از پلاسما در پاکسازی سطوح

معماری

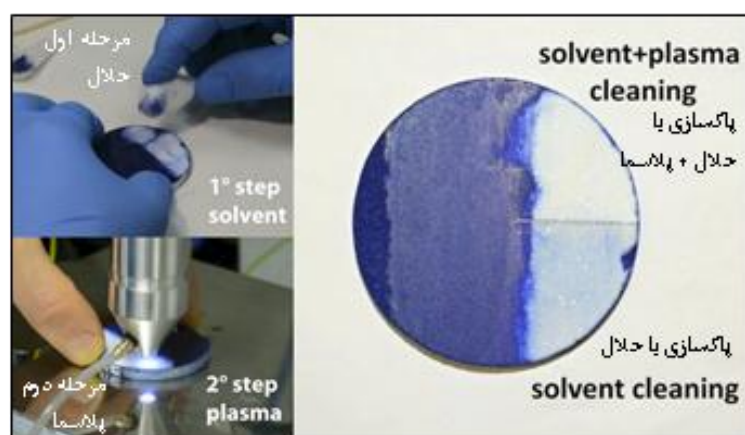
ولتولینا (Votolina) و همکاران، انواع مشعل‌های پلاسمای اتمسفری را به‌عنوان ابزار پاکسازی برای پاک کردن

متعلق به قرن ۱۸م. روسیه (شکل ۶) صورت گرفت. ورنی Olifa مورد استفاده در این نقاشی، به‌وسیله‌ی نور UV، میکروسکوپ نوری، IR و رنگ‌سنجی در قبل و بعد از پاکسازی، بررسی شد. مزیت اصلی درمان بدون تماس با پلاسما (بدون مداخلات فیزیکی و مکانیکی با سطح مورد درمان)، عدم ایجاد هرگونه تغییر شیمیایی و مکانیکی در لایه‌های رنگ زیرین است. علاوه بر آن، با پاکسازی پلاسما به استحکام بخشی مقدماتی سطح درمان نیازی نیست و در نتیجه از بروز اشکالات بعدی جلوگیری می‌شود. نتایج به‌دست آمده نشان داد که پاکسازی پلاسما هیچ تأثیر منفی بر روی لایه‌های اصلی رنگ نداشته و درجه‌ی پاکسازی بیشتر از حد انتظار بوده است؛ بنابراین استفاده از پلاسما برای حذف ورنی Olifa به‌عنوان یک جایگزین و یا مکمل روش‌های رایج پیشنهاد می‌شود [51].

۴-۵-۲. حذف لایه‌های سطحی روغنی در

نقاشی‌های دیواری

پنهان شدن نقاشی‌های دیواری اصلی در زیر لایه‌های نقاشی روغنی، از مشکلات شایع در حفاظت از کلیساهای ارتودوکس شرقی است. حذف این نقاشی‌های سطحی که



شکل ۸: نتایج به‌دست‌آمده با دو روش پاکسازی: (حلال) و (ترکیب حلال و پلاسما) [50]
Fig. 8: results obtained with the 2 methods of cleaning: solvent and Solvent+plasma[50]

محیط‌زیست و کارکنان، ایده‌ی جایگزینی درمان‌های مضر که در آن از روش‌ها و مواد سمی استفاده می‌شود، با درمان‌های غیرسمی و غیرتخریبی و دوستدار محیط‌زیست افزایش یافته است. در میان روش‌های استاندارد مرمت، استفاده از فناوری پلاسما، درمانی جدید در حوزه‌ی میراث فرهنگی است که به‌عنوان یک روش غیرتخریبی و کارآمد گزارش شده است. درمان پلاسما روشی است غیر تماسی که با توجه به نوع و شرایط نمونه و نوع درمان، شرایط به‌طور موردی برای هر نمونه طراحی می‌شود، این روش تغییرات ساختاری در مواد ایجاد نمی‌کند و مواد شیمیایی مورد استفاده در آن بسیار کمتر از درمان‌های رایج است. علاوه بر این زمان درمان کوتاه 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 باین وجود کارایی و ایمنی روش پلاسما در مورد آثار ظریف باید با دقت بیشتری موردتوجه قرار گیرد. به‌عبارتی دیگر در برخی موارد چنین تکنیکی ممکن است برای آثار بسیار ظریف مناسب نباشد. لازم به ذکر است که متغیرهای مختلفی در روند پاکسازی نقش دارند، از یک‌طرف ضخامت و یا نوع آلاینده و همچنین میزان سختی و ناهمواری سطح موردنظر و از طرف دیگر نوع درمان پلاسما، زمان درمان و انتخاب ترکیب گاز؛ بنابراین قبل از هرگونه تصمیمی در انتخاب نوع درمان سطح، انجام آزمایش‌های مختلف در محل ضروری است.

سطوح سنگی و نقاشی‌های دیواری موردبررسی و مطالعه قرار دادند. در این تحقیق که در قالب پروژه PANNA انجام شد، حذف گچ و دوده و همچنین پلیمرهای جدید و قدیمی و گرافیتی به‌وسیله انواع ابزارهای تجاری پلاسما بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی و نمونه‌های اصلی مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیقات، قابلیت‌ها و اشکالات مشعل‌های تجاری پلاسما را به‌عنوان ابزار پاکسازی نشان داد و بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، مشعل‌های جدید پلاسما در حوزه‌ی حفاظت از میراث فرهنگی طراحی شدند[53].

با طرح پیشنهادی پروژه PANNA برای پاکسازی گرافیتی از سطوح تاریخی شهر به‌وسیله‌ی روش پلاسما، اجرای آزمایشی پاکسازی در محل میدان Prato delle Valle در شهر پادووا (Padova) ایتالیا، با همکاری موسسه‌ی شیمی معدنی و شورای ملی تحقیقات انجام شد[54,55]. پاکسازی پلاسما (آرگون+اکسیژن) در مرحله‌ی دوم بعد از پاکسازی با حلال (ایزوپروپانول Iso propanol) انجام شد. نتایج این پاکسازی که به حذف کامل گرافیتی منجر شد، بسیار رضایت‌بخش بود. تصویر نهایی در سمت راست (شکل ۸)، با مقایسه دو روش پاکسازی، نتیجه بهتر پاکسازی را با ترکیب حلال و پلاسما به‌خوبی نشان می‌دهد[50].

۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

بر اساس کنوانسیون استکهلم^۴ در خصوص حفظ

پی‌نوشت‌ها

1. Electron Spectroscopy for Chemical Analysis (X-ray Photoelectron Spectroscopy)
2. Europe-Plasma and Nano for New Age Soft Conservation
۳. نام ورنی مورد استفاده در شمایل‌های روسی بر پایه روغن بزرک جوشانده همراه با مقدار کمی از استات کبالت ۳٪ یا لیتارژ (مونو اکسید سرب) به عنوان تسریع کننده پلیمریزاسیون روغن است [56].
۴. کنوانسیون استکهلم یک توافق بین‌المللی قانونی با هدف حفاظت از سلامت انسان و محیط‌زیست در برابر آلاینده‌های آلی پایدار و برنامه‌ریزی جهت کاهش و حذف کاربرد آن‌ها است که در سال ۲۰۰۲ م. تصویب شده است. کشور ایران نیز در سال ۱۳۸۵ رسماً به این کنوانسیون پیوست.

References

- [1] Hoffman BT. Art and cultural heritage: law, policy and practice. Cambridge University Press; 2006.
- [2] 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 2015;67:586–99.
- [3] Buzatu OL, Goras BT, Goras L, Ioanid EG. Evaluation of the Plasma cleaned surface of a Heritage wooden painting using LQA Methods. Acta Tech Napocensis 2012;53:9.
- [4] Daniels VD, Holland L, Pascoe MW. Gas plasma reactions for the conservation of antiquities. Stud Conserv 1979;24:85–92.
- [5] Scheider JP, Vepřek S. Application of low-pressure hydrogen plasma to the conservation of ancient iron artifacts. Stud Conserv 1986;31:29–37. doi:https://doi.org/10.1179/sic.1986.31.1.29.
- [6] Vepřek S, Eckmann C, Elmer JT. Recent progress in the restoration of archeological metallic artifacts by means of low-pressure plasma treatment. Plasma Chem Plasma Process 1988;8:445–66. doi:https://doi.org/10.1007/BF01016059.
- [7] Sjøgren A, Buchwald VF. Hydrogen plasma reactions in a DC mode for the conservation of iron meteorites and antiquities. Stud Conserv 1991;36:161–71.
- [8] Schmidt-Ott K, Boissonnas L. Low-pressure hydrogen plasma to the conservation of ancient iron artefacts. Stud Conserv 2002;31:29–37.
- [9] Vohrer U, Trick I, Bernhardt J, Oehr C, Brunner H. Plasma treatment—an increasing technology for paper restoration? Surf Coatings Technol 2001;142:1069–73. doi:https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01280-4.
- [10] Ioanid EG, Ioanid A, Rusu DE, Popescu C-M, Stoica I. Surface changes upon high-frequency plasma treatment of heritage photographs. J Cult Herit 2011;12:399–407. doi:https://doi.org/10.1016/j.culher.2011.04.002.
- [11] Rutledge SK, Banks BA, Forkapa M, Stueber T, Sechkar E, Malinowski K. Atomic oxygen treatment as a method of recovering smoke-damaged paintings. J Am Inst Conserv 2000;39:65–74. doi:https://doi.org/10.2307/3179964.
- [12] Totolin MI, Ioanid GE, Neamtu I. Plasma chemistry and the environment. Environ Eng Manag J 2009;8. doi:https://doi.org/10.30638/eeenj.2009.219.
- [13] 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 Scientific; 2010, p. 377–84.
- [14] Plasma technology, Diener electronic GmbH+Co.KG. Germany 2007.
- [15] Plasma Technology, Process Diversity, Sustainability. 2001.
- [16] Margot J. la physique des plasmas; La Physique au Canada. vol. 4. 2012: 68(4):183
- [17] Raimbault J-L. Introduction à la Physique des Plasmas. Faculté des Sciences d'Orsay, Paris-Sud-XI, Laboratoire de Physique des Plasmas. 2012-2013.

امروزه درمان 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 علیرغم موارد ذکر شده، پلاسما هنوز یک روش رایج و مرسوم در بحث عملی حفاظت محسوب نمی‌شود. در پایان متذکر می‌شود که هر نمونه‌ی مورد مطالعه با توجه به ساختار آلی و غیر آلی 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 جزئیات شرایط درمان و تجهیزات مورد استفاده صرف نظر شده است.

- [18] Rausher H, Perucca M, Buyle G. Plasma Technology for hyperfunctional surfaces 2010.
- [19] Nehra V, Kumar A, Dwivedi HK. Atmospheric non-thermal plasma sources. *Int J Eng* 2008;2:53–68.
- [20] Jögl, I et al. plasma treatment for environment protection. EU 2012.
- [21] Rahimi S. Sterilization and Sterilizer devices. Mashhad: Lotus Publishing; 2017. [in Persian]
[رحیمی سارا. استریلیزاسیون و دستگاه‌های استریلایزر. مشهد: انتشارات لوتوس؛ ۱۳۹۶.]
- [22] MohammadiKia M, Jamshidian M. Plasma Technology and Its applications in the food packaging. first Natl. Conf. Dev. a Compr. Strateg. Tehran: Iran National Quality Award; 2014. [in Persian]
[محمدی کیا میلاد، جمشیدیان مجید. فناوری پلاسما و کاربردهای آن در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی. نخستین کنفرانس ملی توسعه کیفیت راهبردی فراگیر در سلامت غذا. تهران: انجمن مدیریت کیفیت ایران؛ ۱۳۹۳.]
- [23] Malik T, Parmar S. Use of plasma Technology in Textiles. Fibre2Fashion Pvt Ltd 2018. <https://www.fibre2fashion.com/industry-article/1798/use-of-plasma-technology-in-textiles> (accessed May 20, 2018).
- [24] Decina A. Plasma For Materials. Plasmaprometeo; Cent Excell Res Dev Technol Transf F Appl Plasmas 2013. http://www.plasmaprometeo.unimib.it/index4a97.html?page_id=549 (accessed May 8, 2018).
- [25] A Hashemi A, Khatibi S. Plasma technology and its applications in waste disposal. Application of chemistry in the environment, Islamic Azad University, Ahar branch 2010; 1(3):35–45. [in Persian]
[اصل هاشمی احمد، خطیبی شاکر. تکنیک پلاسما و کاربرد آن در دفع مواد زائد. کاربرد شیمی در محیط زیست؛ دانشگاه آزاد اسلامی؛ واحد اهر. ۱۳۸۹؛ ۱(۳): ۳۵–۴۵.]
- [26] Taylor W. Technical synopsis of plasma surface treatments. Univ Florida, Gainesville, FL 2009.
- [27] Mazloom S, F Shojaei M, Kamani M, Mirzaei H. An review on the possibility of using cold plasma technology in the packaging industry. *J Packag Sci Technol* 2013; 4(14):48–61. [in Persian]
[مظلوم سوگل، فلاح شجاعی مونا، کمانی محمدحسن، میرزایی حبیب‌الله. مروری بر امکان استفاده از فناوری پلاسمای سرد در صنعت بسته‌بندی. فصلنامه علمی-ترویجی علوم و فنون بسته‌بندی. ۱۳۹۲؛ ۴(۱۴): ۴۸–۶۱.]
- [28] Matsumoto T, Wang D, Namihira T, Akiyama H. Non-thermal plasma technic for air pollution control. *Air Pollution-A Compr. Perspect., In Tech*; 2012. doi: <https://doi.org/10.5772/50419>.
- [29] Meyer-Vernet N. Les plasmas, quatrième état de la matière. Laboratoire d'Etudes Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique Observatoire de Paris; CNRS. Universite A. Rodin. 2017.
- [30] Cormier J M. Dépollution des effluents gazeux par plasma; A la pointe de l'instrumentation et de la technologie. Centre National de la Recherche Scientifique:(CNRS) France. n.d. <http://www.cnrs.fr/publications/imagesdelaphysique/couv-PDF/IdP200304/18Cormier.pdf> (accessed Feb 30, 2018).
- [31] Shishoo R. Plasma technologies for textiles. Elsevier; 2007. doi:<https://doi.org/10.1533/9781845692575>.
- [32] 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* 2002;49:256–63. doi:<https://doi.org/10.1108/00035590210431755>.
- [33] Krčma F, Sázkavská V, Zemánek N, Řádková L, Fojtíková P, Příkryl R, et al. Reduction of Corrosion Layers in Low Temperature Plasma. *Proc. XVIIIth Symp. Phys. Switch. Arc*, 2009, p. 60–9.
- [34] Schmidt-Ott K. Plasma-reduction: Its potential for use in the conservation of metals. *Proc Met* 2004;4:235–46.
- [35] Schmidt-Ott K. Applications of low pressure plasma treatment at the Swiss National Museum and assessment of the results. *Zeitschrift Für Schweizerische Archäologie Und Kunstgeschichte* 1997;54:45–50.
- [36] 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.
- [37] Barger MS, Giri AP, White WB, Edmondson TM. Cleaning daguerreotypes. *Stud Conserv* 1986;31:15–28.
- [38] Centeno SA, Meller T, Kennedy N, Wypyski M. The daguerreotype surface as a SERS substrate: characterization of image deterioration in plates from the 19th century studio of Southworth & Hawes. *J Raman Spectrosc An Int J Orig Work All Asp Raman Spectrosc Incl High Order Process Also Brillouin Rayleigh Scatt* 2008;39:914–21. doi:<https://doi.org/10.1002/jrs.1934>.
- [39] Barger MS, Messier R, White WB.

- Nondestructive assessment of daguerreotype image quality by diffuse reflectance spectroscopy. *Stud Conserv* 1984;29:84–6.
- [40] Turovets I, Maggen M, Lewis A. Cleaning of daguerreotypes with an excimer laser. *Stud Conserv* 1998;43:89–100.
- [41] Totolin M, Macocinschi D, Ioanid GE, Filip D, Ioanid A. Materials supports for cultural heritage objects treated in cold plasma. *Optoelectron Adv Mater-Rapid Commun* 2007;1:309–14.
- [42] Totolin M, Cazacu G, Vasile C. Cellulosic materials modification by physical and chemical methods. *Fine Struct Papermak Fibres, COST Action E54 Book*, (Eds P Ander, W Bauer, S Heinemann, P Kallio, R Passas A Treimanis), COST Off Brussels 2011:27–38.
- [43] Jung HZ, Ward TL, Benerito RR. The effect of argon cold plasma on water absorption of cotton. *Text Res J* 1977;47:217–23. doi:https://doi.org/10.1177/004051757704700312.
- [44] Ward TL, Benerito RR. Modification of cotton by radiofrequency plasma of ammonia. *Text Res J* 1982;52:256–63. doi:https://doi.org/10.1177/004051758205200405.
- [45] Malek RMA, Holme I. The effect of plasma treatment on some properties of cotton. *Iran Polym J* 2003;12:271–80.
- [46] Fisher ER. A Review of Plasma-Surface Interactions During Processing of Polymeric Materials Measured Using the IRIS Technique. *Plasma Process Polym* 2004;1:13–27. doi:https://doi.org/10.1002/ppap.200400011.
- [47] Ioanid G, Ioanid A, Rusu D. High frequency cold plasma possibility of application in the stationary cultural heritage field. *Eur J Sci Theol* 2010;6:83–92.
- [48] Leclaire C, Lecoq E, Orial G, Clement F, Bousta F. Fungal decontamination by cold plasma: an innovating process for wood treatment. *Braga COST Action IE0601/ESWM-International Conf.*, 2008, p. 5–7.
- [49] Ioanid G, Ioanid A, Rusu D, Salajejan D. Behaviour under high frequency plasma treatment of some pigments used for painting of religious icons on wood. *Eur J Sci Theol* 2011;7:79–89.
- [50] Patelli A, Favaro M, Simon S, Storme P, Scopece P, Kamenova V, et al. PANNA Project–Plasma and Nano for New Age Soft Conservation. Development of a Full-Life Protocol for the Conservation of Cultural Heritage. *Euro-Mediterranean Conf.*, 2012, p. 793–800.
- [51] Milyana, S et al. Cleaning of varnish on 18th century russian icon Saint Nicholas by means of atmospheric pressure plasma. 6th Int. Congr. Sci. Technol. Safeguard Cult. Herit. Mediterr. Basin, Athens, Greece: 2013.
- [52] Kamenova, V et al. Oil overpaintings removal using atmospheric pressure plasma. *VALMAR-Roma*: 2014.
- [53] Voltolina S, Aibéo C, Cavallin T, Egel E, Favaro M, Kamenova V, et al. Assessment of atmospheric plasma torches for cleaning architectural surfaces. *Built Herit* 2013;4:1051–7.
- [54] Aibeo C, Egel E, Pamplona M, Simon S. Cleaning graffiti and soot with atmospheric plasma. *Berliner Beitrage Zur Archäom Kunsttechnologie Und Konserv* 2014;22:69–76.
- [55] Plasma cleaning for Prato delle Valle. *PANNA Proj* 2016.
- [56] Anca Sandu IC, Bracci S, Lobefaro M, Sandu I. Integrated methodology for the evaluation of cleaning effectiveness in two Russian icons (16th–17th centuries). *Microsc Res Tech* 2010;73:752–60.