

تقييم فاعلية البرنامج البارز في تنظيم الزجاجة الأثرية المستخرج

من بيئة الدفن

إعداد

حسن شعباة حسن

باحث ماجستير بقسم ترميم الآثار- كلية الآثار- جامعة الفيوم

نجوى سيد عبد الرحيم

أستاذة دكتور بقسم ترميم الآثار- كلية الآثار- جامعة الفيوم

أحمد محمد سلال

أستاذة مساعد بقسم ترميم الآثار- كلية الآثار- جامعة أسوان

صالح محمد صالح

أستاذة دكتور بقسم ترميم الآثار- كلية الآثار- جامعة الفيوم

المخلص:

في هذه الدراسة تم استخدام تقنية البلازما كطريقة جديدة في تنظيف أسطح المشغولات الزجاجية الأثرية من نواتج التلف المختلفة والملتصقة بأسطحها كتقنية صديقة للبيئة. وتهدف هذه الدراسة إلى تنظيف قطعة زجاجية أثرية مستخرجة من أحد حفائر الوجه البحري، والتي كانت تعاني من نواتج تلف مختلفه تتمثل في التكلسات الطينية، وظاهرة الاسوداد، ونواتج تآكل وصدأ الزجاج، وذلك بسبب تأثيرات بيئة دفن التربة، وتم التنظيف بواسطة بلازما الضغط الجوي المستحثة بتقنية بلازما الكورونا (Corona Discharge Plasma) كتقنية إضافية لطرق التنظيف التقليدية، من خلال استخدام غاز الأرجون (Ar)، حيث استمرت معالجة وتنظيف هذه القطعة وتعريضها لبلازما الغاز لمدة زمنية قدرها ٤٥ دقيقة منفصلة. وقد تم تقييم النتائج بإجراء عدد من الفحوص والتحليل العلمية المتمثلة في الفحص البصري، والفحص بالميكروسكوب الضوئي الرقمي (USB)، والميكروسكوب الإلكتروني الماسح (SEM)، وكذلك التحليل بتقنية تفلور الأشعة السينية (XRF)، وذلك للتأكد من صحة النتائج قبل وبعد التنظيف بتقنية البلازما. ويتبين من خلال نتائج الفحص البصري، والفحص بواسطة (USB) الحصول علي نتيجة جيدة جدًا ومرضية تمامًا في إزالة وتنظيف جزء واضح من نواتج التلف الملصقة بسطح القطعة الزجاجية بواسطة تقنية البلازما هذه، كذلك أوضحت الصور الملتقطة بواسطة (SEM) فرق واضح جدًا في شكل السطح المورفولوجي للقطعة قبل وبعد عملية التنظيف، حيث أثبتت هذه النتائج كفاءة تقنية البلازما في عملية التنظيف، ويظهر ذلك بوضوح في تقليل نواتج التلف من سطح القطعة الزجاجية، كذلك أظهرت تقنية التحليل بواسطة (XRF) انتقائية وفاعلية تقنية البلازما في عملية التنظيف، فقد قامت بإزالة نواتج التلف الملصقة بسطح القطعة الزجاجية، دون المساس بالمكونات الأساسية لها، وتبين ذلك من خلال الانخفاض الواضح في نسب العناصر المرتبطة بمظاهر التلف.

الكلمات الدالة: الزجاج الأثري - التلف والتآكل - الفحص والتحليل - التنظيف - بلازما الأرجون.

Abstract:

In this study, plasma was used as a new method for cleaning the surfaces of archeological glass artifacts from adhered damage residues as an environmentally friendly technique. The study aims to clean an archaeological glass piece extracted from the excavations of the northern coast, which was suffering from damage manifested in mud, blackening, and corrosion due to the burial environment. The cleaning was done using atmospheric pressure plasma with the Corona Discharge Plasma technique as an additional method to traditional cleaning, using argon gas (Ar). The treatment and cleaning of the piece and its exposure to plasma lasted for 45 separate minutes. The results were evaluated by conducting scientific examinations and analyses represented by visual inspection, (USB), (SEM), and (XRF) analysis, to ensure the accuracy of the results before and after plasma cleaning. It is evident from the optical inspection results and (USB) that a very good and completely satisfactory result was achieved in cleaning a significant portion of the damage residues adhered to the surface of the glass piece using plasma. The (SEM) results showed a very clear difference in the morphological surface structure of the piece before and after cleaning, confirming the efficiency of plasma cleaning. The (XRF) analysis technique demonstrated the selectivity and effectiveness of plasma in cleaning by removing the damage residues adhered to the surface of the piece without affecting its essential components, as evidenced by the significant reduction in the ratios of elements associated with damage appearances.

Keywords: Archaeological Glass, Damage and Corrosion, Examination and Analysis, Cleaning, Argon Plasma.

١. المقدمة:

على مر التاريخ، لعب الزجاج الأثري دورًا مركزيًا هامًا في إنتاج السلع للإستخدام على نطاق واسع، مما جعله مادة تمت دراستها على نطاق واسع من وجهات نظر مختلفة^(١)، وتمثل المشغولات الزجاجية الأثرية دليلاً ماديًا على النشاط البشري، وهي شهادة على حقبة ماضية، كما أنها تحمل أيضًا سمات فنية وعلمية. لذلك، تحتاج هذه المشغولات للحفظ على حالتها من نواتج التلف المختلفة^(٢).

ويتمثل التركيب الكيميائي للزجاج الأثري بشكل أساسي في السيليكا (SiO_2)، حيث أنها تمثل الهيكل الرئيسي للزجاج الأثري^(٣)، ذلك بالإضافة إلى المواد القلوية، والتي من أهمها أكسيد الصوديوم (Na_2O)، وأكسيد البوتاسيوم (K_2O) والتي استخدمت كعوامل صهر لخفض درجة حرارة انصهار السيليكا (SiO_2)، وكانت تعرف باسم مساعدات الصهر Flux^(٤)، وكذلك يتكون الزجاج الأثري من المواد المثبتة والتي تتمثل في أكسيد الكالسيوم (CaO)، حيث يعتبر هو المادة المثبتة الأهم التي تساعد في زيادة معدل ثبات ومتانة الزجاج الأثري، ذلك بالإضافة إلى المواد الأخرى المتمثلة في الأكاسيد المرتبطة بالمواد الخام الأساسية كشوائب غير مقصودة الإضافية، أو مواد مضافة عمدًا للحصول على مواصفات خاصة بالزجاج^(٥).

(¹) Roberta Zanini, et al. "A review of glass corrosion: the unique contribution of studying ancient glass to validate glass alteration models." *npj Materials Degradation* 7.1 (2023): 38.

(²) Barbara Szala, et al. "Influence of environment on the corrosion of glass-metal connections." *Applied Physics A* 116 (2014): 1627-1635.

(³) Paul Bellendorf, et al. "Archaeological glass: the surface and beyond." *Glass and Ceramics Conservation 2010: Interim Meeting of the ICOM-CC Working Group, October 3-6, 2010, Corning, New York, USA.* 2010.

(⁴) Rasha Taha. "The deterioration resulting from burial environment on archaeological glass: Comparative study." *Shedet* 6.6 (2019): 225-237.

(⁵) Maria Kaparou, et al. "Investigating the Degradation of Mycenaean Glass Artifacts Using Scientific Methods." *Heritage* 7.3 (2024): 1769-1783.

وتعتبر بيئة الدفن هي بيئة مركبة ومعقدة للغاية ذات عوامل مختلفة، تؤثر على المشغولات الزجاجية الأثرية على المدى الطويل وتتسبب في تغيير المظهر والطبيعة الكيميائية للآثار الزجاجية المدفونة في التربة^(١)، وتُعرف بيئة الدفن بأنها البيئة التي بقي الأثر مدفوناً فيها لآلاف السنين، وتعتمد درجة التلف الناتج عنها على طبيعة بيئة الدفن من جهة وطبيعة المادة الأثرية من جهة أخرى^(٢)، كما تُعرف عملية التدهور في بيئة الدفن بأنها نتاج العمليات الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية التراكمية التي تغير من تركيب وخواص وهيكَل المواد الأثرية داخلها^(٣)، ويعتمد تدهور الزجاج في بيئة دفن التربة على تركيبه الكيميائي والظروف البيئية المحيطة به، لكن العامل البيئي الرئيسي هو خصائص التربة، والأهم من ذلك هو الأس الهيدروجيني (pH)، والمحتوى المائي^(٤)، كذلك يعتبر محتوى الأكسجين وسهولة انتشاره هو العامل الأهم، ويتم التحكم في معدل انتشاره في التربة من خلاله، حيث أن كمية الماء داخل التربة تتحدد حسب حجم حبيبات هذه التربة^(٥).

وتتأثر المواد المدفونة في بيئات الدفن المختلفة علي حسب ظروف التربة ونوعيتها، وفي ظل الظروف الحمضية والظروف القلوية المعتدلة في حالة أن الأس الهيدروجيني (pH) أقل من ٩ يتم ترشيح الأيونات القلوية من المواد الزجاجية، بينما في ظل الظروف الأكثر قلوية، تتفاعل أيونات الهيدروكسيل (OH⁻)، وروابط

(١) Omid Oudbashi. "A methodological approach to estimate soil corrosivity for archaeological copper alloy artefacts." *Heritage Science* 6.1 (2018): 2.

(٢) وليد كامل علي محمد الغريب: دراسة علاج وصيانة الآثار الفخارية والبرونزية المستخرجة من الحفائر - تطبيقاً على نماذج أثرية مستخرجة من منطقة آثار الرطابي بالإسماعيلية، رسالة ماجستير، قسم ترميم الآثار، كلية الآثار، جامعة القاهرة، ٢٠٠١م، ص ١٨٠.

(٣) Hind Abdeen, et al. "A study of the most important manifestations of damage to one of the skeletons preserved in the museum store in Al-Diyabat-Sohag." *International Journal of Multidisciplinary Studies in Architecture and Cultural Heritage* 4.1 (2021): 139-151.

(٤) Teresa Palomar. "Effect of soil pH on the degradation of silicate glasses." *International Journal of Applied Glass Science* 8.2 (2017): 177-187.

(٥) حمدي محمد محمد: دراسة مقارنة لتقييم المواد التقليدية والحديثة المستخدمة في تجميع واستكمال الآثار الفخارية المستخرجة من الحفائر تطبيقاً علي نماذج مختارة، رسالة ماجستير، قسم ترميم الآثار، كلية الآثار، جامعة القاهرة، ٢٠١٨م، ص ١.

السيليكون والأكسجين (Si-O) داخل بنية السيليكا (SiO₂)^(١)، وعند درجة حموضة أكثر قلوية، من المرجح أن تتشكل طبقات سطحية رقيقة والتي قد تكون متفرقة اللون^(٢).

وبشكل أوضح يرتبط التلف الناتج في بيئة دفن التربة بالتغيرات التي تحدث في التركيب الكيميائي للزجاج الأثري، والتي تطرأ على السطح، حيث تلعب بيئة الدفن دوراً هاماً في التدهور الكيميائي، ومن الممكن أن تحدث ثلاث عمليات أساسية تتمثل في التبادل الأيوني، والترطيب، والتحلل المائي، ففي بيئة الدفن المائية الحمضية، يمكن أن يحدث تبادل بين أيونات القلويات المتمثلة في أيونات الصوديوم (Na⁺) أو البوتاسيوم (K⁺) في الزجاج، وبين بروتونات المحلول المائي المتمثلة في أيونات الهيدروجين (H⁺)، حيث يمكن لهذه البروتونات أن تحل محل أيونات القلويات على السطح الخارجي للزجاج، بينما تهيمن عملية التحلل المائي في البيئات القلوية، مما يسبب ذلك تفكك في بنية الزجاج الأثري^(٣).

كما تعاني الآثار الزجاجية بشكل أساسي من عملية التدهور في بيئة الدفن والظروف البيئية المحيطة بها، حيث تؤدي تطور التفاعلات السطحية مع العوامل البيئية المختلفة إلى تغيرات مرئية بشكل ملحوظ في تلك الآثار إلى أن تصبح معتمة تماماً، مما يؤثر ذلك على شفافية الزجاج^(٤)، وكذلك من خلال الدفن في التربة لآلاف السنين، تتعرض أسطح المشغولات الزجاجية للتآكل^(٥)، مما يظهر ظواهر تتمثل في التآكل الموضعي، وتكوين طبقات رقيقة منه، وعلى الرغم من اختلاف تركيب الزجاج وظروف التعرض، تكون طبقات التغيير أو التآكل مع مرور الوقت مصدر قلق شائع جداً^(٦).

(1) Michael Melcher, et al. "Degradation of glass artifacts: application of modern surface analytical techniques." *Accounts of chemical research* 43.6 (2010): 916-926.

(2) Hannelore Roemich, et al. "Results from burial experiments with simulated medieval glasses." *Materials Research Society symposium proceedings.-Wuhan*. Vol. 757. 2003.

(3) Anna Gueli, et al. "Weathering and deterioration of archeological glasses from late Roman Sicily." *International Journal of Applied Glass Science* 11.1 (2020): 215-225.

(4) Monica De Bardi, et al. "Sol-gel silica coating for potash-lime-silica stained glass: Applicability and protective effect." *Journal of Non-Crystalline Solids* 390 (2014): 45-50.

(5) Sofia Toniolo. "Soil characterisation to investigate the role of the burial environment in archaeological glass alteration." (2022).

(6) Hannelore Römich. "Studies of ancient glass and their application to nuclear-waste management." *MRS bulletin* 28.7 (2003): 500-504.

وتعتبر بيئة الدفن نظام ديناميكي معقد، حيث أن معدل وعمق الدفن يلعب دوراً رئيسياً في تحديد معدل تلف المشغولات الزجاجية^(١)، كما تلعب العوامل التي تتمثل في حجم حبوب التربة وشكلها دوراً مهماً في ترسب وتراكم جزيئات التربة على سطح الآثار الزجاجية^(٢). هذا إلى جانب عوامل ثانوية أخرى تتمثل في محتوى المادة العضوية، والنشاط الميكروبي، وتعتبر هذه العوامل من أهم الأسباب الرئيسية التي تحدد آليات التلف الخاصة التي يتعرض لها الزجاج المدفون في التربة^(٣).

ويعتبر تنظيف المشغولات الزجاجية بمثابة مرحلة رئيسية لحفظها، حيث إن إزالة الرواسب المتكلسة والاتساخات ونواتج التلف المختلفة من أسطح المواد الأثرية هي عملية رئيسية بكل حالة، وتعتبر مظاهر تلف المواد الأثرية من الأسباب التي تقلل من القيم الجمالية للقطع الأثرية وتساهم في تسريع تدهور المواد وتقادم تلك القطع الأثرية^(٤).

كما تعتبر خطوة تنظيف أسطح الآثار الزجاجية من أهم المراحل التي تزيد من استقرار القطع الأثرية، وأنه لطالما كان تنظيف تلك الآثار يمثل تحدياً كبيراً للمرممين وصائني الآثار، نظراً لحساسيتها، اعتمدت طرق التنظيف بشكل أساسي على الطرق التقليدية المتمثلة في تقنيات التنظيف الميكانيكية والكيميائية، فمن ناحية، شملت الطرق الميكانيكية استخدام أدوات دقيقة لإزالة الاتساخات ونواتج التلف المختلفة يدوياً، وهي وإن كانت فعالة في بعض الحالات، وقابلة للتحكم وبسيطة وانتقائية، إلا أنها من الممكن أن تتسبب في حدوث خدوش أو تلف لأسطح تلك الآثار، وكذلك لا يمكن لهذه

(1) Peter Crow. "Mineral weathering in forest soils and its relevance to the preservation of the buried archaeological resource." *Journal of Archaeological Science* 35.8 (2008): 2262-2273.

(2) Burghard Flemming. "The influence of grain-size analysis methods and sediment mixing on curve shapes and textural parameters: implications for sediment trend analysis." *Sedimentary Geology* 202.3 (2007): 425-435.

(3) Teresa Palomar. Op, Cit, (2017): 177-187.

(4) Radko Tiño, et al. *Plasma technology in the preservation and cleaning of cultural heritage objects*. CRC Press, 2021.

الطرق الوصول إلى الأماكن الضيقة وفي بعض الحالات من الممكن أن تتسبب في تدمير هذا النوع من المواد الأثرية^(١)، أما من الناحية الأخرى فهي شملت استخدام الطرق الكيميائية في تنظيف الآثار الزجاجية من محاليل كيميائية ومنظفات مختلفة لإزالة الاتساخات ونواتج التلف المختلفة، وعلى الرغم من تأثيرها المتفوق في التنظيف، إلا أنها غير قابلة للتحكم، وقد تتسبب في المزيد من نواتج التلف للآثار الزجاجية^(٢).

ومع التطورات الحديثة في مجال الحفاظ على المواد الأثرية، تبرز الظروف الحالية إلى الحاجة لتطوير طرق وتقنيات حفظ مبتكرة وجديدة، وتكون فعالة وآمنة بيئياً في آن واحد، حيث ظهرت تقنيات أكثر تقدماً وأماناً، والتي من أبرزها هي تقنية البلازما، والتي تقدم إضافة واحدة تتغلب على العديد من الطرق التقليدية^(٣)، وبعد تنظيف أسطح المواد بتقنيات البلازما الباردة أحد الموضوعات التي استخدمت مؤخراً في علوم الحفاظ على المواد الأثرية وبدلاً صديقاً للبيئة عن الطرق التقليدية لأنها تتيح تنظيف وإزالة الاتساخات ونواتج التلف المختلفة دون الإضرار بالسطح الأصلي للآثر^(٤)، لذلك يعد فهم أساسيات التنظيف بواسطة تطبيقات البلازما أمراً مهماً للغاية، حيث يجب على المرمم أن يكون على دراية كاملة بآلياتها وتأثيراتها المحتملة على سطح الآثر^(٥).

(^١) Nada Hamed Jammaz, et al. "A novel plasma electrolysis cleaning technique applied on Islamic glass lamps: An experimental study." *Journal of Cultural Heritage* 73 (2025): 73-81.

(^٢) Ramadan Abd-Allah. "Chemical cleaning of soiled deposits and encrustations on archaeological glass: A diagnostic and practical study." *Journal of cultural Heritage* 14.2 (2013): 97-108.

(^٣) Radko Tiño, et al., et al. Op, Cit, 2021.

(^٤) Michael Lieberman, et al. "Principles of plasma discharges and materials processing." *MRS Bulletin* 30.12 (1994): 899-901.

(^٥) Abraham Belkind, et al. Gershman. "Plasma cleaning of surfaces." *Vacuum Coating and Technology* November (2008): 46-57.

وتُعرف البلازما علي أنها الحالة الرابعة للمادة^(١)، وهي عبارة عن غاز متأين جزئيًا أو كليًا^(٢)، يتكون من الفوتونات والإلكترونات والأيونات الموجبة والسالبة والجسيمات المحايدة^(٣)، يتم توليدها باستثارة الطاقة الحرارية أو شعاع نشط أو مجال كهربائي من خلال أحد الغازات المتمثلة في الأكسجين (O_2)، أو النيتروجين (N_2)، أو الهيدروجين (H_2) أو الأرجون (Ar)، أو خليط من الغازات الأخرى، أو استخدام الهواء الجوي مما يؤدي إلى تفكك الجزيئات الغازية وتأيين الذرات^(٤).

وقد استخدمت البلازما في عمليات علاج وصيانة الآثار، لما تتميز به من جودة ودقة متميزة وحساسية في التعامل مع المواد وذلك على عكس الكثير من التقنيات التقليدية؛ حيث إنه لا يتخلف عنها أي ملوثات وأمنة علي صحة القائمين بالترميم^(٥). وتمثل تطبيقات البلازما تاريخ طويل في علوم المواد^(٦)، حيث تتمتع بإمكانيات هائلة في العديد من مجالات البحوث، بما في ذلك عمليات تنظيف أسطح المواد الأثرية، بالإضافة إلى استخدامها كتقنية إضافية لطرق العلاج التقليدية الأخرى^(٧)، لذلك يعد تنظيف أسطح المشغولات الزجاجية بتقنية البلازما أحد أهم الموضوعات في مجال صيانة المواد الأثرية^(٨).

(1) Karel Burm. "Plasma: The fourth state of matter." *Plasma Chemistry and Plasma Processing* 32.2 (2012): 401-407.

(2) Paul Bellan. *Fundamentals of plasma physics*. Cambridge university press, 2008.

(3) Michael Lieberman, et al. Op, Cit, (1994): 899-901.

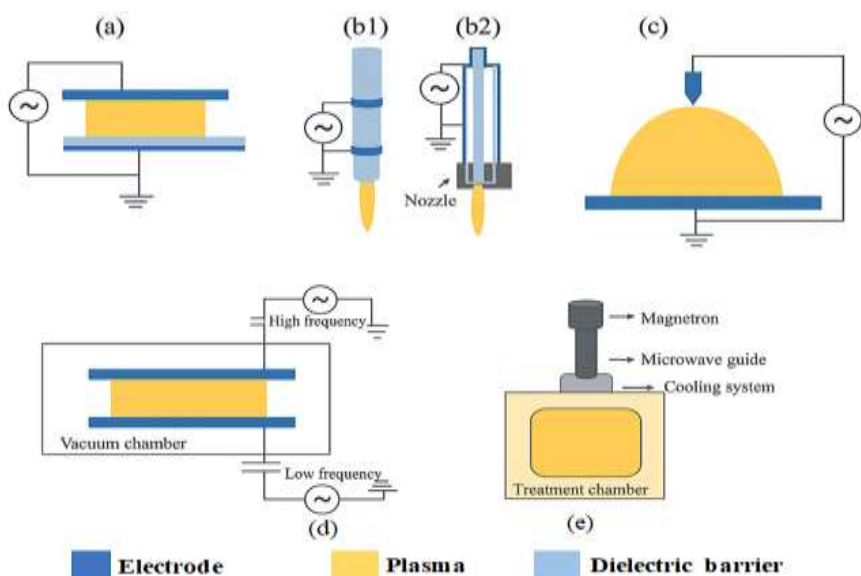
(4) Bo Zhang, et al. "Impacts of cold plasma technology on sensory, nutritional and safety quality of food: A review." *Foods* 11.18 (2022): 2818.

(٥) رشا صادق، وآخرون: تقييم تأثير استخدام البلازما في إزالة البقع من المنسوجات القطنية "دراسة تجريبية"، مجلة كلية الآثار، جامعة القاهرة، المجلد العاشر، العدد الرابع والعشرون، ٢٠٢١م، ص ٢٢٧-٢٢٧.

(6) Mária Domonkos, et al. "Applications of cold atmospheric pressure plasma technology in medicine, agriculture and food industry." *Applied Sciences* 11.11 (2021): 4809.

(7) Halim Ayan, et al. "Application of nanosecond-pulsed dielectric barrier discharge for biomedical treatment of topographically non-uniform surfaces." *Journal of Physics D: Applied Physics* 42.12 (2009): 125202.

(8) Abraham Belkind, et al. Op, Cit, (2008): 46-57.



شكل رقم (١): يوضح نماذج مختلفة لتصميمات أنظمة تقنيات البلازما الباردة المستخدمة في تنظيف المواد الأثرية. (عمل الباحث).

كما تعتبر تقنيات البلازما وسيلة فعالة وسريعة لإزالة نواتج التلف الموجودة على أسطح المقتنيات الأثرية، حيث يمكن تنظيفها من ترسب الغبار أو عمليات التآكل أو نواتج التلف الأخرى مع مراعاة درجة الحرارة حتى لا يحدث أي تغير أو تلف في سطح وتركيب بنية المواد الأثرية، ومن أهم المميزات الأكثر أهمية لعملية التنظيف بواسطة تقنيات البلازما أنها تعتبر طريقة جافة وصديقة للبيئة، والتي يمكن تطبيقها في وقت واحد على المزيد من المواد وذلك علي حسب نوعها وأبعاد الجهاز^(١).

وقد اهتمت الدراسة الحالية بتقييم فاعلية استخدام بلازما الضغط الجوي المستحثة بتقنية بلازما الكورونا (Corona Discharge Plasma) في تنظيف نواتج التلف المختلفة المتمثلة في الاتساخات، وتكلسات التربة، ونواتج التآكل والصدأ، والاسوداد، من سطح قطعة زجاجية نتيجة التعرض لبيئة دفن التربة، وذلك بواسطة بلازما غاز الأرجون (Ar)، دون التأثير علي سطح القطعة الزجاجية.

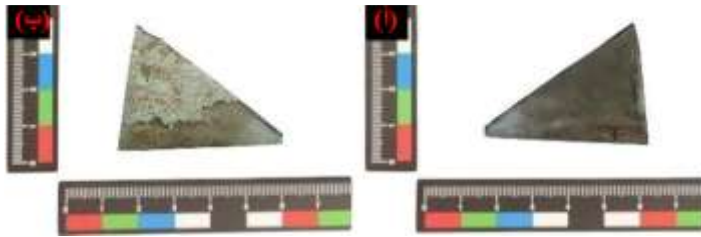
(¹) Gomaa Abdel-Maksoud, et al. "Preliminary study for the evaluation of a pulsed coaxial plasma gun for removal of iron rust stain from bone artifacts." *Journal of Cultural Heritage* 55 (2022): 128-137.

٢. مواد وطرق الدراسة:

١,٢. مواد الدراسة:

١,١,٢. تحضير القطعة الزجاجية المستخدمة في الدراسة:

في هذه الدراسة تم اختيار بعض القطع الزجاجية المنفصلة من الزجاج المستخرج من أحد حفائر الوجه البحري، والتي كانت تتمثل في قطعه زجاجية صغيرة، حيث أنه تم جمعها وتجهيزها للتنظيف باستخدام أحد تقنيات البلازما، وقد اتضح أن هذه القطعة تعاني من أعراض تلف شديدة ناجمة عن تأثيرات بيئة دفن التربة، وفي اللوحة رقم (٢) يتضح وجود التكلسات الطينية المترسبة علي السطح الخارجي للقطعة، وكذلك اسوداد سطحها، كذلك من أهم نواتج التلف المتواجدة علي سطح القطعة الزجاجية ظهور قشرة صلبة ذات تشققات متعددة متمثلة في نواتج صدأ الزجاج، مما يشير ذلك إلى تعرضها لتفاعلات كيميائية مع مواد أخرى، وذلك نتيجة دفن هذه القطعة في التربة لفترة طويلة من الزمن.



لوحة رقم (٢): صور فوتوغرافية توضح أحد القطع الزجاجية التي تم جمعها من الزجاج المستخرج من أحد حفائر الوجه البحري، حيث يوضح (أ) ظهر القطعه الزجاجية، ويوضح (ب) وجه القطعه الزجاجية. (تصوير الباحث).

٢,٢. طرق الدراسة:

١,٢,٢. تقنية البلازما المستخدمة في تنظيف القطعة الزجاجية المستخدمة في الدراسة:

استخدم لإجراء عملية تنظيف سطح القطعة الزجاجية تقنية بلازما مخصصة لعمليات تنظيف أسطح المواد الأثرية في معمل تطبيقات البلازما، قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة سوهاج، حيث استخدام جهاز بلازما الضغط الجوي المستحث بتقنية بلازما الكورونا (Corona Discharge Plasma)، موديل (NP-7500-30)، من إنتاج شركة (Hyrite Lighting)، بمقاطعة (Guangdong) في الصين، حيث يعمل هذا الجهاز علي فرق جهد كهربائي قدره ٢٥٠٠ فولت في الثانية، وتردد ٦٠/٥٠ كيلو هرتز، ومضخة طاقة بلغت قوتها ٣٠٠ واط، ومستوى تيار ٣٠٠ مللي أمبير.



لوحة رقم (٣): توضح جهاز البلازما المستخدم في الدراسة لتنظيف سطح القطعة الزجاجية، حيث يوضح (أ) جهاز البلازما بشكل كامل المتمثل في جهاز بلازما الضغط الجوي المستحث بتقنية بلازما الكورونا (Corona Discharge Plasma)، ويوضح (ب) حامل العينة، ويوضح (ج) لوحة مسطحة لوضع العينة عليها فوق الحامل، ويوضح (د) نظام مفاعل البلازما المتمثل في إمدادات الطاقة ذات مصدر الجهد العالي، ويوضح (هـ) قطب الطاقة أو تفريغ الغاز المستخدم في العلاج. (تصوير الباحث).

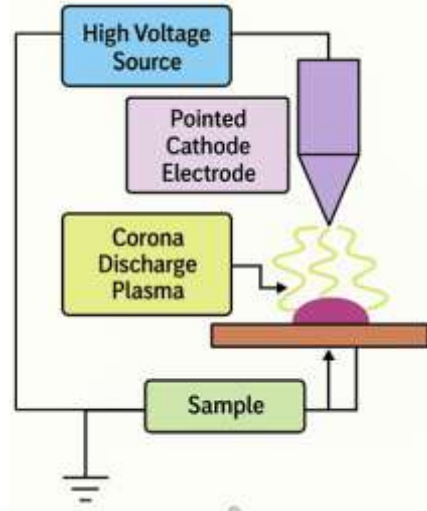
٢,٢,٢. آلية إنشاء وتوليد بلازما الضغط الجوي المستحثة بتقنية بلازما الكورونا (Corona Discharge Plasma):

يتم توليد بلازما الضغط الجوي المستحثة بتقنية بلازما الكورونا (Corona Discharge Plasma) عن طريق تطبيق جهد كهربائي عالي حول الأقطاب الكهربائية ذات الرؤوس الحادة^(١)، كما هو موضح في الشكل رقم (٢)، على سبيل المثال، النقاط الدقيقة أو الأسلاك ذات القطر الصغير، مما يؤدي ذلك إلى توليد مجال كهربائي قوي ومركّز وذو كثافة عالية بالقرب من هذه النقاط، وهنا تحدث المنطقة النشطة لتوليد البلازما^(٢)، بعد ذلك، بسبب تطبيق الجهد العالي يتطور المجال الكهربائي المحيط بالأقطاب الكهربائية بشكل غير منتظم، وفي هذا الوقت، يتم إقناع الغاز البيئي المحيط بسطح القطب الكهربائي المنحني بالتأين بسبب المجال الكهربائي المركز، وبالتالي يتم توليد وتشكيل منطقة من البلازما النشطة التي يمكن استخدامها لمعالجة أسطح المواد، وهذه التقنية لتوليد البلازما سهلة التنفيذ واقتصادية، ويمكن إنتاج هذه البلازما في الهواء أو بغازات مختلفة، مثل (غاز الأكسجين (O₂))، وغاز الهيليوم (He)، وغاز الأرجون (Ar)، وغاز النيتروجين (N₂)^(٣)، وتستخدم تقنية بلازما الكورونا (Corona Discharge Plasma) لإزالة التلوث السطحي وتنظيف نواتج التلف الملتصقة بأسطح المواد الأثرية، ولكنها تقتصر على مناطق صغيرة في العينة.

(1) Sapna Birania, et al. "Cold plasma in food processing and preservation: A review." *Journal of Food Process Engineering* 45.9 (2022): e14110.

(2) Vladimir Scholtz, et al. "Nonthermal plasma-A tool for decontamination and disinfection." *Biotechnology advances* 33.6 (2015): 1108-1119.

(3) Flora Glad, et al. "A review on recent advances in cold plasma technology for the food industry: Current applications and future trends." *Trends in food science & technology* 69 (2017): 46-58.



شكل رقم (٢): يوضح تخطيط وتصميم جهاز بلازما الضغط الجوي المستحث بتقنية بلازما الكورونا (Corona Discharge Plasma) المستخدم في الدراسة كأداة لتنظيف سطح القطعة الزجاجية، وكذلك يوضح عملية إنشاء وتوليد البلازما. (عمل الباحث).

٣،٢،٢. تطبيق عملية تنظيف سطح القطعة الزجاجية باستخدام تقنية بلازما الضغط الجوي المستحثة بتقنية بلازما الكورونا (Corona Discharge Plasma):

تعتبر تقنية البلازما هذه من التقنيات الحديثة والفعالة في تنظيف وإزالة نواتج التلف المترسبة علي أسطح الآثار الزجاجية، وقد تم تطبيق عملية التنظيف علي سطح القطعة الزجاجية بواسطة دفع أحد الغازات الخاملة المستخدمة في الدراسة والمتمثلة في غاز الأرجون (Ar) بين الأقطاب الكهربائية مما أدى ذلك إلي تأين الغاز المستخدم وتوليد بعض الالكترونات بشكل عشوائي بين تلك الأقطاب، وهنا تحدث عملية التنظيف لسطح القطعة، وقد اقتصررت هذه المعالجة بالبلازما على الطبقات العليا من السطح، وفيما يلي شرح مفصل لتجربة التنظيف التي تمت لسطح القطعة الزجاجية بواسطة تقنية البلازما هذه، مع تفسير وتوضيح أهم النتائج التي تحدث أثناء عملية التنظيف، وهي كانت كالآتي:

تم تعريض القطعة الزجاجية لغاز الأرجون (Ar) من تقنية بلازما الضغط الجوي المستحثة بتقنية الكورونا بلازما (Corona Discharge Plasma) في ظروف تشغيل تتمثل في فرق جهد كهربائي قدره ٢٠٠٠ فولت في الثانية، وتردد ١٠ كيلو هرتز، ومضخة طاقة بلغت قوتها ٥٠ وات، ومستوى تيار ٢٥ مللي أمبير، حيث استمرت معالجة كل جزئية مسلط عليها غاز البلازما في القطعة الزجاجية لمدة زمنية قدرها (٤٥ دقيقة منفصلة) بمسافة ١/٢ سم بين فوهة خروج الغاز المستخدم في الدراسة وبين سطح القطعة، وكانت فترة تعريض سطح القطعة للغاز كالتالي:

فترة التعريض التي تمت للقطعة الزجاجية = ١٠ دقيقة + ١٥ دقيقة + ٢٠ دقيقة = ٤٥ دقيقة كاملة.

ويوضح الجدول رقم (١) مدة تعريض القطعة الزجاجية لبلازما غاز الأرجون (Ar) وذلك لتنظيفها من نواتج التلف المختلفة المتمثلة في التكلسات الطينية المترسبة علي سطحها، والاسوداد، والقشرة الصلبة المتمثلة في نواتج تآكل وصدأ الزجاج نتيجة الدفن في التربة لفترة طويلة من الزمن.

جدول رقم (١) يوضح مدة تعريض القطعة الزجاجية لبلازما غاز الأرجون (Ar) الناتج من تقنية بلازما الضغط الجوي المستحثة بتقنية بلازما الكورونا (Corona Discharge Plasma).

م	كود العينة	مدة تعريض العينة	نوع الغاز المستخدم
١	A	١٠ + ١٥ + ٢٠ دقيقة	غاز الأرجون

ويعتبر غاز الأرجون (Ar) من الغازات النبيلة الخاملة، مما يعني أنه لا يتفاعل بسهولة مع المواد الأخرى في الظروف العادية، وهذه الخاصية تجعله مثاليًا للاستخدام في تقنية البلازما لعملية تنظيف القطعة الزجاجية لتنظيف وإزالة طبقات التآكل، ونواتج التلف المختلفة من السطح^(١)، وذلك لعدة أسباب والتي من أهمها الحماية من الأكسدة،

(^١) Theresa Winter, et al. "Common versus noble B acillus subtilis differentially responds to air and argon gas plasma." *Proteomics* 13.17 (2013): 2608-2621.

حيث يعمل هذا الغاز كدرع واقى يمنع الأكسجين من الوصول إلى السطح، مما يقلل ذلك من خطر حدوث المزيد من الأكسدة والتلف، كذلك تسمح تقنية البلازما المعتمدة على غاز الأرجون (Ar) بالتحكم الكامل في عمق وشدة تنظيف أسطح المواد الأثرية^(١).

كما يعمل هذا الغاز علي تنظيف وإزالة الاتساخات، وتآكل وصدا الزجاج، ونواتج التلف المختلفة تدريجيًا، حيث تقوم أيونات البلازما الناتجة عن تأين غاز الأرجون (Ar) بتفتيت جزيئات نواتج التلف هذه دون إلحاق أي تلف أو تدهور بسطح القطعة مع الحفاظ على الخصائص الفيزيائية والكيميائية لتلك القطعة الزجاجية^(٢)، وتوضح اللوحة رقم (٤) لقطات فوتوغرافية مختلفة لعملية تنظيف وإزالة نواتج التلف المختلفة من سطح القطعه الزجاجية.



لوحة رقم (٤): توضح صور فوتوغرافية مختلفة أثناء عملية تنظيف القطعة الزجاجية بواسطة غاز الأرجون (Ar) الناتج من تقنية البلازما المستخدمة في الدراسة، حيث يوضح (أ، ج) استخدام قطب الطاقة في تنظيف وجه وظهر القطعة الزجاجية، ويوضح (ب، د) عملية توليد البلازما بواسطة غاز الأرجون (Ar) من قطب الطاقة للتنظيف، ويوضح (هـ) رسم تخطيطي لتوليد البلازما في تنظيف سطح القطعة الزجاجية. (تصوير الباحث).

⁽¹⁾ Royce Cox, et al. "Premature Oxidation During Argon Plasma Cleaning of Water-Rich Radiocarbon Samples." *Radiocarbon* 64.1 (2022): 21-34.

⁽²⁾ Harish Barshilia, et al. "Ar+ H₂ plasma etching for improved adhesion of PVD coatings on steel substrates." *Vacuum* 86.8 (2012): 1165-1173.

وبشكل عام، تُعد تقنية البلازما أداة قيمة وفعالة لعملية تنظيف القطع الزجاجية الأثرية وحفظها، حيث تُقدم هذه التقنية العديد من المزايا التي تجعلها مفضلة عن الطرق التقليدية^(١)، والميزة الكبرى للتنظيف بتقنية البلازما هي أنها "طريقة جافة" يمكن تطبيقها في وقت واحد على المزيد من الأشياء اعتمادًا على نوعها وأبعاد الجهاز المستخدم، مما يجعلها خيارًا مثاليًا لمعالجة القطع الأثرية الزجاجية الهشة والقيمة^(٢). كما تُعد تقنية بلازما الكورونا (Corona Discharge Plasma)^(٣) تقنية واحدة وأداة فعالة لمعالجة المواد الأثرية^(٤)، حيث تُقدم مجموعة من المميزات التي تجعلها أداة قيمة لحفظ وصيانة وتنظيف القطع الأثرية الزجاجية^(٥)، والتي من أهمها تنظيف ومعالجة الآثار الزجاجية الملصقة بها نواتج التلف المختلفة من أجل الحفاظ على المواد ذات الأهمية الثقافية والتاريخية^(٦)، فهي تنظف وتنشط أسطح تلك الآثار بكفاءة عالية، كما تعتبر هذه التقنية آمنة وسهلة الاستخدام، مما يجعلها خيارًا مثاليًا لاستخدامها في معامل الترميم والمواقع الأثرية^(٧).

-
- (¹) Jianan Sun, et al. "Plasma Cleaning Technology: Mechanisms, Influencing Factors, and Applications." *IEEE Access* (2025).
- (²) František Krčma, et al. "Application of low temperature plasmas for restoration/conservation of archaeological objects." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 565. No. 1. IOP Publishing, 2014.
- (³) Pradeep Puligundla, et al. "Effect of corona discharge plasma jet treatment on the degradation of aflatoxin B1 on glass slides and in spiked food commodities." *Lwt* 124 (2020): 108333.
- (⁴) Klaus Dieter Weltmann, et al. "The future for plasma science and technology." *Plasma Processes and Polymers* 16.1 (2019): 1800118.
- (⁵) Milan Šimek, et al. "White paper on the future of plasma science for optics and glass." *Plasma Processes and Polymers* 16.1 (2019): 1700250.
- (⁶) Mar Villar-dePablo, et al. "Innovative approaches to accurately assess the effectiveness of biocide-based treatments to fight biodeterioration of Cultural Heritage monuments." *Science of the Total Environment* 897 (2023): 165318.
- (⁷) Galit Levitin, et al. "Plasma cleaning for electronic, photonic, biological, and archeological applications." *Ch 2* (2012): 55.

٣. طرق وأساليب تقييم الدراسة:

١,٣. تقنية الفحص البصري:

تعتبر طريقة الفحص البصري أو الفحص بالعين المجردة من أهم أساليب الفحص الأولية والمهمة للآثار الزجاجية^(١)، والذي يمكن من خلاله التعرف على الحالة العامة للآثر وعمل تقييم مبدئي لحالته ومعرفة مظاهر التلف الظاهرة، كما تعد أحد أهم التقنيات المستخدمة لتقييم فاعلية عملية تنظيف الأسطح الزجاجية، حيث يتميز هذا النوع من الفحص ببساطته وسرعته، وبالإمكان استخدامه لتحديد وجود أي شوائب ظاهرة على الأسطح الزجاجية^(٢)، ويعتبر هذا الفحص من أكثر الفحوص غير المتلفة نظراً لسهولة عمله وقلة تكلفته، ومن الضروري فحص العينات بصرياً بشكل جيد حتى لو تقرر ذلك إجراء فحوص أخرى عليها، ويمكن مساعدة الرؤية باستخدام العدسات المكبرة والإضاءة المناسبة للتعرف على التفاصيل الدقيقة التي يصعب التعرف عليها من خلال الفحص بالعين المجردة^(٣).

٢,٣. تقنية الفحص بالميكروسكوب الضوئي الرقمي (USB):

تعتبر الدراسة باستخدام هذا الميكروسكوب للآثار الزجاجية من أهم الدراسات المتعلقة بعملية الفحص، وذلك من خلال قدرته على إجراء تكبير عالي وتصوير وفحص الطبقات السطحية من الآثار، حيث يتم فحص الأثر مباشرة دون إحداث أي تلف وخاصة في مثل حالة الآثار الزجاجية والتي يصعب الحصول منها على عينات للدراسة^(٤)، وتم استخدام الميكروسكوب الضوئي الرقمي (USB) في عملية فحص

(^١) Francesca Di Turo, et al. "Chemical analysis and computed tomography of metallic inclusions in Roman glass to unveil ancient coloring methods." *Scientific Reports* 11.1 (2021): 11187.

(^٢) محمد حنفي مغازي، وآخرون: منهجية الترميم لإحدى المشكاوات الزجاجية المتضررة من تقجير محيط متحف الفن الإسلامي بالقاهرة "دراسة حالة"، مجلة كلية الآثار، جامعة القاهرة، المجلد الثالث عشر، العدد السادس والعشرون، ٢٠٢٣م، ص ١٠٤٩-١٠٧٧.

(^٣) حمدي محمد محمد: مرجع سابق، ص ٣٢١.

(^٤) محمد مصطفى إبراهيم، وآخرون: تقدير الظروف البيئية المحيطة وتأثيرها على المقتنيات الأثرية بمتحف المفرق بالأردن، مجلة العمارة والفنون والعلوم الإنسانية، المجلد السابع، العدد الخامس والثلاثون، ٢٠٢٢م، ص ٨٣٥-٨٥٢.

سطح القطعة الزجاجية لتقييم فاعلية عملية التنظيف بواسطة تقنية البلازما المستخدمة في الدراسة، وذلك بقوة تكبير تتراوح ما بين (X٥٠) إلى (X١٦٠٠)، من إنتاج شركة (Generic)، موديل (DM-1600X)، متوافق مع أنظمة تشغيل متعددة بما في ذلك (Windows 7/10, Mac 10.13 and above, Linux, Chrome OS) بمصدر ضوء (LED).

٣,٣. تقنية الفحص بالميكروسكوب الإلكتروني الماسح (SEM):

يعتبر الميكروسكوب الإلكتروني الماسح (SEM) من أهم الطرق المستخدمة علي نطاق واسع في عمليات فحص الآثار الزجاجية^(١)، وهو طريقة غير مدمرة^(٢)، وذلك لأن الدراسة به تتم على عينات صغيرة جدًا ومورفولوجيا السطح الخارجي للأثر وليس من الطبقات الداخلية^(٣)، كما يستخدم الفحص بهذا الميكروسكوب في التعرف على أهم التغيرات التي طرأت على السطح، والكشف عن الأسطح المتآكلة للزجاج، وملاحظة أهم مظاهر التلف^(٤)، كما تعتبر هذه التقنية أداة قوية لتقييم جودة تنظيف أسطح المشغولات الزجاجية، وذلك من خلال تحليل الصور التي تم الحصول عليها، حيث يمكن تحديد درجة التنظيف، وكذلك التغيرات الطبوغرافية التي حدثت على الأسطح^(٥).

(^١) Ellery Frahm. "Scanning electron microscopy (SEM): Applications in archaeology." *Encyclopedia of global archaeology* (2014): 6487-6495.

(^٢) Mark Tehranipoor, et al. "Scanning Electron Microscope Training." *Hardware Security Training, Hands-on!*. Cham: Springer International Publishing, 2023. 293-318.

(^٣) نجوي سيد عبد الرحيم: دراسة تحليل لمكونات إناء زجاجي لحفظ بقايا الموتى من العصر الروماني، منطقة تل عيون موسى، جنوب سيناء، مصر، مجلة العمارة والفنون والعلوم الإنسانية، المجلد العاشر، العدد الثالث عشر، ٢٠٢٥م، ص ٢٠٢٠-٢٠٣٠.

(^٤) كرستينا ماهر يوسف، وآخرون: فحص وتحليل الفسفساء الزجاجية لجدارية السيدة العذراء مريم بالكنيسة البطرسيّة بالقاهرة ومظاهر تلفها، مجلة كلية الآثار، جامعة القاهرة، المجلد الثالث عشر، العدد السادس والعشرون، ٢٠٢٣م.

(^٥) Anthony Sinclair, et al. "Archaeological Sciences 1995: Proceedings of a conference on the application of scientific techniques to the study of archaeology." (2017): 1-456.

وقد تم إجراء هذا الفحص لتقييم فاعلية عملية التنظيف بواسطة تقنية البلازما التي تم تطبيقها علي سطح القطعة الزجاجية، وكذلك من أجل التعرف علي مدى نجاح عملية التنظيف في إزالة الاتساخات ونواتج التلف والتآكل، وقد تم هذا الفحص بكلية العلوم، جامعة أسيوط، باستخدام الميكروسكوب الإلكتروني الماسح (SEM) موديل (JEOL GSM 5400LV EDX Link ISIS-Oxford).

٤,٣. التحليل بتقنية تفلور الأشعة السينية (XRF):

في الوقت الحاضر، يتم استخدام طرق مختلفة لعمليات تحليل القطع الأثرية إحداها هي تقنية تحليلية تعرف باسم تقنية التحليل بطريقة تفلور الأشعة السينية (XRF)^(١)، وتعتبر هذه التقنية من طرق التحليل العنصري غير المتلفة^(٢) المستخدمة والمتاحة للتعرف علي المواد المختلفة الداخلة بتركيب القطعة الزجاجية من خلال عناصرها وتركيزاتها المختلفة^(٣)، كذلك توفر معلومات حول المواد الخام والتكنولوجيا المستخدمة في صناعة الزجاج الأثري، ومن الممكن أيضاً دراسة تآكل الزجاج باستخدام هذه التقنية، وعمل تحليل عنصري للتآكل حيث يمكن أن توفر الطبقة فهماً أفضل لآلية التآكل عن طريق قياس هجرة العناصر^(٤).

وقد تم استخدام هذه التقنية لتقييم نتائج وفاعلية عملية التنظيف التي تمت للقطعة الزجاجية بواسطة تقنية البلازما، وكذلك للتعرف علي العناصر المكونة لها قبل وبعد التنظيف وإعطاء التركيب الكيميائي العنصري لها، وتقييم مدى نجاح عملية إزالة نواتج التلف المختلفة الملصقة بسطح القطعة الزجاجية. وقد تم إجراء هذا التحليل بالمعمل المركزي - جامعة جنوب الوادي - قنا، باستخدام جهاز التفلور بالأشعة السينية (XRF) من طراز (XRF X-SUPERME)، من إنتاج شركة (HITACHI).

(¹) Tomáš Trojek, et al. "Uncertainty of quantitative X-ray fluorescence micro-analysis of metallic artifacts caused by their curved shapes." *Materials* 16.3 (2023): 1133.

(²) Cassiano LS Costa, et al. "A simple method for glass analysis using total reflection X-ray fluorescence spectrometry." *Talanta* 243 (2022): 123354.

(³) Oleh Yatsuk, et al. "Data from multiple portable XRF units and their significance for ancient glass studies." *Molecules* 27.18 (2022): 6068.

(⁴) Barbara Stuart. *Analytical techniques in materials conservation*. John Wiley & Sons, 2007.

٤. نتائج ومناقشة الدراسة:

١,٤. آلية عمل التنظيف بواسطة بلازما الضغط الجوي المستحثة بتقنية بلازما الكورونا (Corona Discharge Plasma):

تمت إزالة نواتج التلف المختلفة من سطح القطعة الزجاجية وذلك دون التسبب في حدوث أي تلف لها، حيث تمكنت تقنية البلازما هذه من إزالة التكلسات الطينية، والاسوداد، والقشرة الصلبة ذات التشققات المتعددة المتمثلة في نواتج تآكل وصدا الزجاج بنجاح من سطح القطعة الزجاجية.

وتعتمد آلية عمل التنظيف بواسطة بلازما الضغط الجوي المستحثة بتقنية بلازما الكورونا (Corona Discharge Plasma) على آلية معينة تتمثل في حدوث تفاعلات كيميائية وفيزيائية دقيقة^(١)، حيث تُعد البلازما الباردة نوعًا خاصًا من البلازما التي تكون فيها درجة حرارة الغاز قريبة من درجة حرارة الغرفة^(٢)، مما يجعلها مناسبة للمواد الحساسة المتمثلة في الزجاج الأثري دون إحداث أي ضرر حراري عليها^(٣)، فبالنسبة للتفاعلات الكيميائية عندما يتم تطبيق البلازما الباردة على سطح الزجاج، تتفاعل الأنواع الكيميائية النشطة المتمثلة في الأيونات (Ions)، والجذور الحرة (Radicals) والتي تتمثل في ذرات الأكسجين (O)، وجذور الهيدروكسيل (OH[•])، وجذر الهيدروجين (H[•])، وكذلك أنواع الأكسجين التفاعلية (ROS) المتمثلة في الأوزون (O₃) والموجودة في البلازما مع نواتج التلف المختلفة المتواجدة على السطح^(٤)، حيث تعمل هذه الجزيئات النشطة على تكسير الروابط الكيميائية لنواتج

(¹) Francisco Tabares, et al. "Cold plasma systems and their application in surface treatments for medicine." *Molecules* 26.7 (2021): 1903.

(²) Jordanne-Amee, et al. "Cold plasma for enhanced water purification." *Sustainable Microbiology* 1.1 (2024): qvae032.

(³) Huixing Zhang, et al. "Superhydrophilic Antifog Glass and Quartz Induced by Plasma Treatment in Air." *Nanomaterials* 15.14 (2025): 1058.

(⁴) Jenish Patel, et al. "Study of plasma–water interactions: effect of plasma electrons and production of hydrogen peroxide." *Russian Journal of Physical Chemistry A* 95.13 (2021): 2691-2698.

التلف مثل روابط (C-H)، و (C-C)، و (C=C)، و (C-O) و (C-N) وغيرها من الروابط وتحولها إلى غازات متطايرة يتم إزالتها بواسطة تدفق الغاز المستخدم في العلاج^(١)، أما عن التفاعلات الفيزيائية فتقوم الأيونات النشطة والإلكترونات الموجودة في البلازما والنتيجة عن غاز الأرجون (Ar) بعملية تآكل فيزيائي دقيق جدًا للسطح المعالج، فتعمل هذه الجسيمات المشحونة بأيونات الأرجون الثقيلة ذات الطاقة العالية داخل البلازما على التفاعل مع سطح الزجاج المراد علاجه، مما يساهم ذلك في إزاحة وتكسير وإزالة نواتج التلف الملصقة بالسطح بشكل ميكانيكي^(٢).

وعلى عكس التقنيات التقليدية، تعمل تقنية البلازما على حدوث تدفقات هائلة من الإلكترونات، مما يؤدي ذلك إلى تركيز عالي منها في منطقة قريبة من البلازما، حيث تمكن هذه الظروف من حدوث تحولات كيميائية فريدة قد لا تتوفر في التقنيات التقليدية^(٣)، وهذا ما جعل هذه الأنواع النشطة المتمثلة في ذرات الأكسجين (O)، وجذور الهيدروكسيل (OH[•])، وجذر الهيدروجين (H[•])، وفوق أكسيد الهيدروجين (H₂O₂) قادرة على إزالة نواتج التلف الملصقة بالسطح بسهولة، وذلك دون حدوث أي تلف^(٤)، وكما ذكر، فإن أيونات الأكسجين، والهيدروكسيل تؤثر على تفاعلات الأكسدة، كما تؤثر أيونات الهيدروجين على تفاعلات الاختزال، لذلك عند استخدام جميع الأنواع من الممكن إزالة معظم نواتج التلف بفاعلية عالية^(٥).

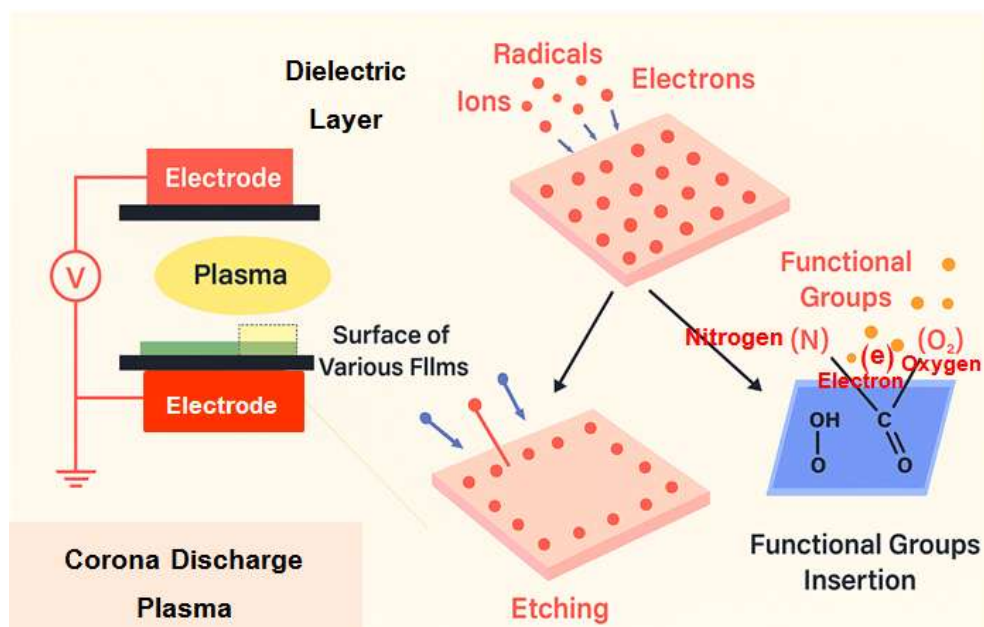
(¹) Peter Bruggeman, et al. "Plasma-liquid interactions: a review and roadmap." Plasma sources science and technology 25.5 (2016): 053002.

(²) Guus Verhaar, et al. "Investigating ion depletion in unstable historic glass samples using laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry and ion chromatography." Recent Advances in Glass and Ceramics Conservation (2019): 45-54.

(³) Peter Bruggeman, et al. Op Cit, (2016): 053002.

(⁴) Jingxiang Xu, et al. "Different etching mechanisms of diamond by oxygen and hydrogen plasma: a reactive molecular dynamics study." The Journal of Physical Chemistry C 125.30 (2021): 16711-16718.

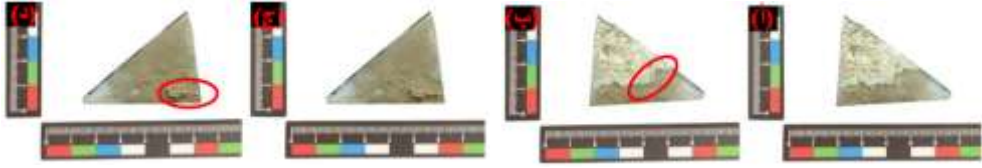
(⁵) Radko Tiño, et al., et al. Op, Cit, 2021.



شكل رقم (٣): رسم تخطيطي يوضح آلية عمل التنظيف بواسطة تقنية البلازما الباردة. (عمل الباحث).

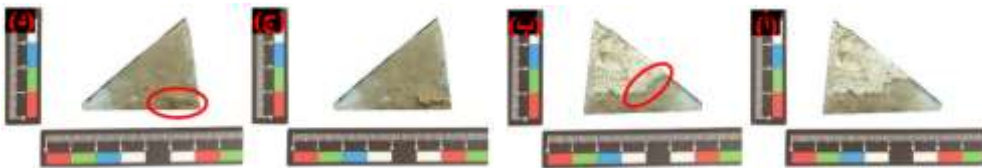
٢,٤. نتائج تقنية الفحص البصري:

في بداية الأمر تم تقييم نتائج عملية تنظيف سطح القطعة الزجاجية باستخدام غاز الأرجون (Ar) المستخدم من بلازما الضغط الجوي المستحثة بتقنية بلازما الكورونا (Corona Discharge Plasma) من خلال تقنية الفحص البصري وذلك عن طريق أخذ لقطات فوتوغرافية مختلفة للقطعة الزجاجية التي تم تنظيفها، وتظهر النتائج في اللوحات رقم (٥) و (٦) و (٧) حيث يتبين المظهر العام لسطح القطعة التي تم تنظيفها بغاز الأرجون (Ar)، وتوضح الصورة (أ) و (ج) في اللوحة رقم (٥) وجه وظهر القطعة الزجاجية قبل عملية التنظيف، بعد ذلك تم تعريضها للغاز لمدة زمنية قدرها ١٠ دقائق، وفي هذه الفترة الزمنية لم يحدث سوي تغير بسيط جدًا يري بالعين المجردة في سطح القطعة من خلال إزالة جزء بسيط من قشور الصدأ الملتصقة بسطحها، وذلك كما هو موضح في الصورة (ب) في اللوحة رقم (٥)، كذلك لوحظ علي القطعة إزالة جزء بسيط من التكلسات الطينية المترسبة علي سطحها، وذلك كما هو موضح في الصورة (د) في اللوحة رقم (٥).



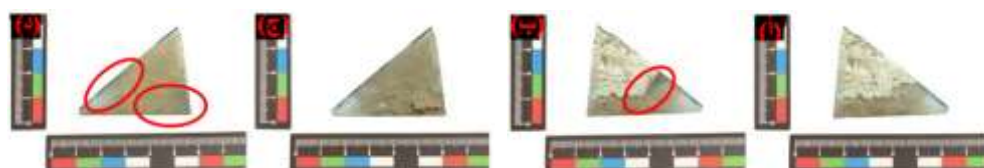
لوحة رقم (٥): توضح صور فوتوغرافية مختلفة أثناء عملية الفحص البصري للقطعة الزجاجية قبل وبعد التنظيف بغاز الأرجون (Ar) بواسطة تقنية البلازما المستخدمة في الدراسة لمدة ١٠ دقائق. (تصوير الباحث).

بعد ذلك تم تعريض القطعة الزجاجية مرة أخرى لبلازما غاز الأرجون (Ar) لمدة زمنية قدرها ١٥ دقيقة، وهنا بدأنا نلاحظ تغيير ملحوظ في سطح القطعة من خلال إزالة بعض من نواتج الصدأ الملتصقة بوجه سطحها، وذلك كما هو موضح بالصورة (أ) و (ب) في اللوحة رقم (٦) والتي توضح وجه القطعة الزجاجية قبل وبعد التنظيف، كذلك يتبين إزالة بعض من التكلسات الطينية المترسبة علي ظهر السطح الخارجي للقطعة، وذلك كما هو موضح بالصورة (ج) و (د) في اللوحة رقم (٦) والتي توضح ظهر القطعة الزجاجية قبل وبعد التنظيف، وهنا تم الحصول علي نتيجة جيدة، واعتبرت هذه النتيجة مرضية إلي حد ما.



لوحة رقم (٦): توضح صور فوتوغرافية مختلفة أثناء عملية الفحص البصري للقطعة الزجاجية قبل وبعد التنظيف بغاز الأرجون (Ar) بواسطة تقنية البلازما المستخدمة في الدراسة لمدة ١٥ دقيقة. (تصوير الباحث).

بعد ذلك تم تعريض القطعة الزجاجية من الجانبين مرة أخرى لبلازما غاز الأرجون (Ar) لمدة زمنية قدرها ٢٠ دقيقة، حيث يظهر في اللوحة رقم (٧) والتي من خلالها يتبين الحصول علي نتيجة جيدة جدًا ومرضية تمامًا، والتي تتمثل في إزالة جزء واضح جدًا من نواتج الصدأ المتواجدة علي وجه سطح القطعة، وذلك كما هو موضح بالصورة (أ) و (ب) والتي توضح وجه القطعة الزجاجية قبل وبعد التنظيف، كذلك يتبين في اللوحة رقم (٧) إزالة التكلسات الطينية المترسبة علي ظهر السطح الخارجي للقطعة بشكل كامل، وذلك كما هو موضح بالصورة (ج) و (د) والتي توضح ظهر القطعة الزجاجية قبل وبعد التنظيف، وأيضًا لوحظ إزالة جزء بسيط من الاسوداد المتواجد علي سطحها، وذلك كما هو موضح بالصورة (د) في اللوحة رقم (٧)، واعتبرت هذه النتيجة مرضية جدًا.

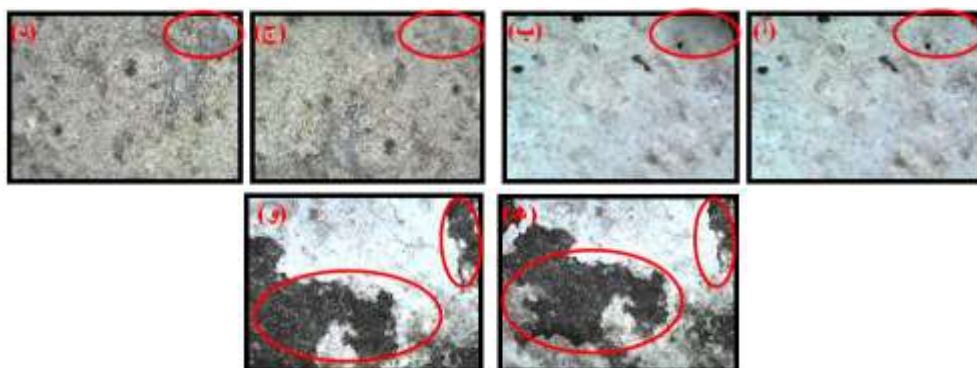


لوحة رقم (٧): توضح صور فوتوغرافية مختلفة أثناء عملية الفحص البصري للقطعة الزجاجية قبل وبعد التنظيف بغاز الأرجون (Ar) بواسطة تقنية البلازما المستخدمة في الدراسة لمدة ٢٠ دقيقة. (تصوير الباحث).

٣,٤. نتائج تقنية الفحص بالميكروسكوب الضوئي الرقمي (USB):

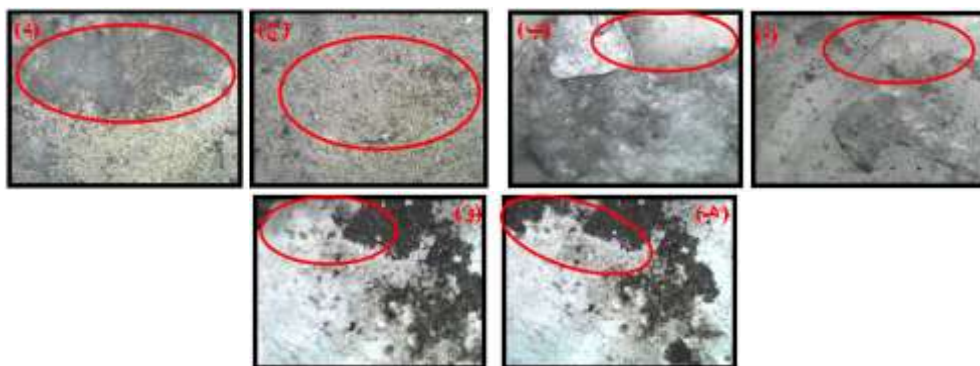
أظهرت نتائج الفحص بهذا الميكروسكوب لعملية تنظيف سطح القطعة الزجاجية تفوق واضح في تقييم جودة التنظيف بعد تطبيق تقنية البلازما، وذلك من خلال إزالة الاتساخات ونواتج التلف والصدأ الملتصقة بالسطح، ويظهر في اللوحات رقم (٨) و (٩) و (١٠) لقطات مختلفة للفحص بهذا الميكروسكوب لسطح القطعة الزجاجية، وذلك للتعرف علي التغيرات التي طرأت علي سطحها نتيجة لعملية التنظيف التي تمت لها بواسطة تقنية البلازما، ويظهر في اللوحة رقم (٨) في الصورة (أ) و (ج) و (هـ) المظهر العام لوجه وظهر سطح القطعة الزجاجية قبل عملية التنظيف، بعد ذلك، وبعد

تعرض العينة الزجاجية لبلازما غاز الأرجون (Ar) لفترة زمنية قدرها ١٠ دقائق، تبين حدوث تغيير بسيط جدًا في سطح القطعة من خلال إزالة بعض من قشور الصدأ الملتصقة بوجه سطح القطعة كما هو موضح في الصورة (ب)، كذلك حدث تغيير بسيط في إزالة التكلسات الطينية المترسبة علي ظهر السطح الخارجي للقطعة كما هو موضح في الصورة (د)، أما عن الاسوداد المتواجد علي ظهر سطحها لم يحدث له أي تغيير، وذلك كما هو موضح في الصورة (و).



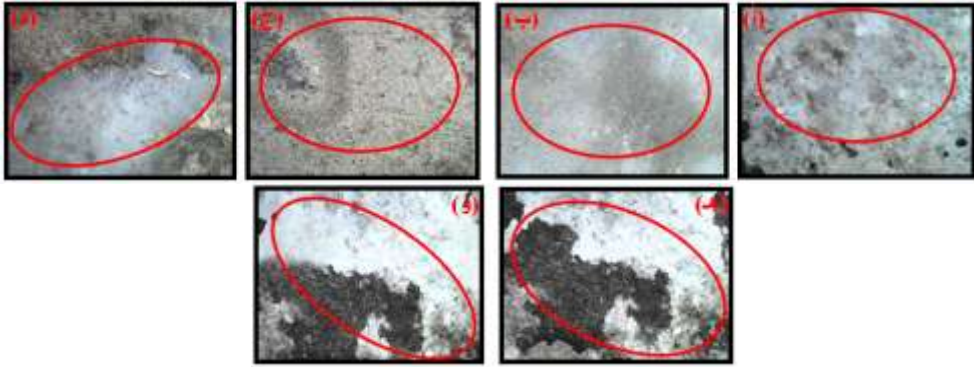
لوحة رقم (٨): توضح صور مختلفة للفحص بالميكروسكوب الضوئي الرقمي (USB) للقطعة الزجاجية قبل وبعد التنظيف بغاز الأرجون (Ar) بواسطة تقنية البلازما المستخدمة في الدراسة لمدة ١٠ دقائق.

بعد ذلك، وبعد تعرض القطعة الزجاجية مرة أخرى لبلازما غاز الأرجون (Ar) لفترة زمنية قدرها ١٥ دقيقة، أثبتت نتائج التنظيف أن هناك تغييرات ملحوظة في السطح الخارجي للقطعة في إزالة قشور الصدأ الملتصقة بوجه سطحها كما هو موضح باللوحة رقم (٩) في الصورة (أ) و (ب) والتي توضح القطعة الزجاجية قبل وبعد التنظيف، كذلك يتبين أن هناك تغيير واضح وإزالة في التكلسات الطينية المترسبة علي ظهر السطح الخارجي للقطعة، وذلك كما هو موضح باللوحة رقم (٩) في الصورة (ج) و (د) والتي توضح ظهر القطعة قبل وبعد التنظيف، أما عن الاسوداد المتواجد علي ظهر سطح القطعة فحدث فيه تغيير بسيط، وذلك كما هو موضح باللوحة رقم (٩) في الصورة (هـ) و (و) والتي توضح ظهر القطعة الزجاجية قبل وبعد التنظيف، واعتبرت هذه النتيجة مرضية إلي حد ما.



لوحة رقم (٩): توضح صور مختلفة للفحص بالميكروسكوب الضوئي الرقمي (USB) للقطعة الزجاجية قبل وبعد التنظيف بغاز الأرجون (Ar) بواسطة تقنية البلازما المستخدمة في الدراسة لمدة ١٥ دقيقة.

بعد ذلك، وبعد تعريض القطعة الزجاجية مرة أخرى لبلازما غاز الأرجون (Ar) لمدة زمنية قدرها ٢٠ دقيقة والتي من خلالها تم الحصول علي نتيجة جيدة جدًا، والتي تتمثل في إزالة جزء واضح جدًا من قشور الصدأ المتواجدة علي وجه سطح القطعة الزجاجية، وذلك كما هو موضح باللوحة رقم (١٠) في الصورة (أ) و (ب) والتي توضح وجه القطعة قبل وبعد التنظيف، وأيضًا حدث تغير واضح جدًا في إزالة التكدسات الطينية المترسبة علي ظهر السطح الخارجي للقطعة بشكل كامل، وذلك كما هو موضح باللوحة رقم (١٠) في الصورة (ج) و (د) والتي توضح ظهر القطعة قبل وبعد التنظيف من التكدسات الطينية، كذلك تبين حدوث تغير واضح في إزالة جزء واضح في الاسوداد المتواجد علي ظهر سطح القطعة، وذلك كما هو موضح باللوحة رقم (١٠) في الصورة (هـ) و (و) والتي توضح ظهر القطعة الزجاجية قبل وبعد التنظيف من الاسوداد المتواجد عليها، واعتبرت هذه النتيجة مرضية جدًا.

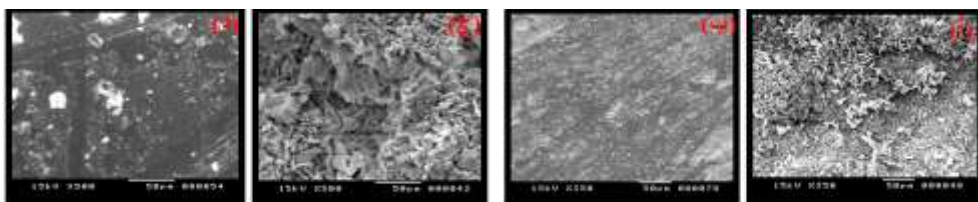


لوحة رقم (١٠): توضح صور مختلفة للفحص بالميكروسكوب الضوئي الرقمي (USB) للقطعة الزجاجية قبل وبعد التنظيف بغاز الأرجون (Ar) بواسطة تقنية البلازما المستخدمة في الدراسة لمدة ٢٠ دقيقة.

٤,٤. نتائج تقنية الفحص بالميكروسكوب الإلكتروني الماسح (SEM):

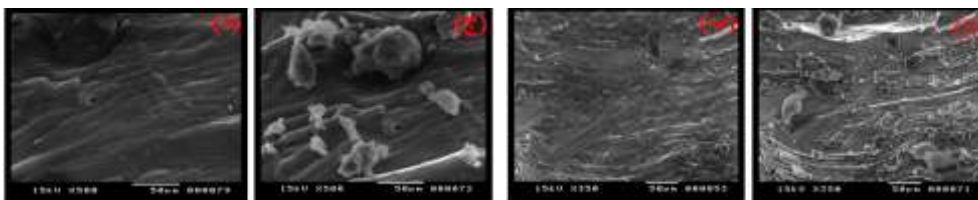
تم استخدام هذا الميكروسكوب في فحص وتقييم فاعلية عملية التنظيف بواسطة تقنية البلازما التي تم تطبيقها علي سطح القطعة الزجاجية من أجل التعرف علي مدي نجاح عملية التنظيف في إزالة الاتساخات، ونواتج التلف، والصدأ من سطح القطعة الزجاجية، وقد أظهرت نتائج الفحص بهذا الميكروسكوب فرق واضح جدًا في شكل السطح المورفولوجي للقطعة قبل وبعد عملية التنظيف، حيث أثبتت نتائج عملية الفحص كفاءة عملية التنظيف، ويظهر ذلك بوضوح في تقليل نواتج التلف من سطح القطعة الزجاجية.

ويظهر في اللوحات رقم (١١) و (١٢) لقطات مختلفة للفحص بالميكروسكوب الإلكتروني الماسح (SEM) التي تمت لفحص سطح القطعة الزجاجية والتي تم تنظيفها بغاز الأرجون (Ar) الناتج من تقنية البلازما، حيث أنه بعد تعريض القطعة للغاز لمدة زمنية قدرها ٤٥ دقيقة منفصلة، تم الحصول علي نتيجة جيدة جدًا ومرضية، والتي تتمثل في إزالة جزء واضح جدًا من تكلسات نواتج الصدأ المتواجدة علي سطح القطعة الزجاجية، وذلك كما هو موضح باللوحة رقم (١١)، والتي توضح نتائج فحص القطعة بهذا الميكروسكوب، والتي من خلالها يوضح (أ) صورة للقطعة قبل عملية التنظيف بقوة تكبير (350X)، ويوضح (ب) صورة للقطعة بعد عملية التنظيف بقوة تكبير (350X)، ويوضح (ج) صورة للقطعة قبل عملية التنظيف بقوة تكبير (500X)، ويوضح (د) صورة للقطعة بعد عملية التنظيف بقوة تكبير (500X).



لوحة رقم (١١): توضح صور مختلفة للفحص بالميكروسكوب الإلكتروني الماسح (SEM) للقطعة الزجاجية قبل وبعد التنظيف بغاز الأرجون (Ar) بواسطة تقنية البلازما المستخدمة في الدراسة لمدة ٤٥ دقيقة منفصلة.

كذلك تبين إزالة التكدسات الطينية من سطح القطعة بشكل كامل، وتبين تغير واضح في إزالة جزء من الاسوداد الملتصق بسطح القطعة، وذلك كما هو موضح باللوحة رقم (١٢)، والتي توضح نتائج الفحص بهذا الميكروسكوب، والتي من خلالها يوضح (أ) صورة للقطعة قبل عملية التنظيف بقوة تكبير (350X)، ويوضح (ب) صورة للقطعة بعد عملية التنظيف بقوة تكبير (350X)، ويوضح (ج) صورة للقطعة قبل عملية التنظيف بقوة تكبير (500X)، ويوضح (د) صورة للقطعة بعد عملية التنظيف بقوة تكبير (500X).



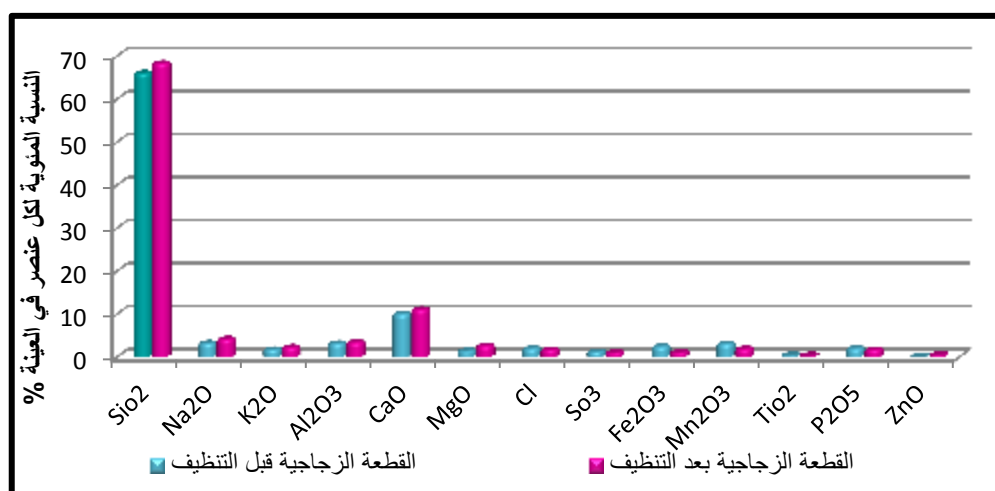
لوحة رقم (١٢): توضح صور مختلفة للفحص بالميكروسكوب الإلكتروني الماسح (SEM) للقطعة الزجاجية قبل وبعد التنظيف بغاز الأرجون (Ar) بواسطة تقنية البلازما المستخدمة في الدراسة لمدة ٤٥ دقيقة منفصلة.

٥,٤. نتائج التحليل بتقنية تفلور الأشعة السينية (XRF):

يظهر في الجدول رقم (٢) نتائج التحليل العنصري للقطعة الزجاجية قبل وبعد عملية التنظيف التي تمت لها بواسطة غاز الأرجون (Ar) الناتج من تقنية البلازما المستخدمة في الدراسة، وذلك بهدف إزالة نواتج التلف المختلفة والملتصقة بسطح القطعة الزجاجية، وتمثلت النتائج في الآتي:

جدول رقم (٢): يوضح نتائج التحليل للقطعة الزجاجية بواسطة تقنية تفلور الأشعة السينية (XRF) قبل وبعد التنظيف بغاز الأرجون (Ar) بواسطة تقنية البلازما المستخدمة في الدراسة.

النسب الوزنية للعناصر المكونة للقطعة الزجاجية قبل وبعد التنظيف بتقنية البلازما (%)													
العنصر	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	So ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Mn ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	ZnO
قبل التنظيف	3.20	1.43	3.16	66.02	2.01	1.24	1.98	1.74	10.01	0.38	3.07	2.46	0.05
العنصر	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	So ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Mn ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	ZnO
بعد التنظيف	4.17	2.63	3.41	٦٨,٣٠	1.71	1.01	١,٦٨	2.26	11.08	0.31	1.91	1.04	0.49



شكل رقم (٤): يوضح المقارنة بين تركيز العناصر في القطعة الزجاجية قبل وبعد التنظيف بواسطة تقنية البلازما المستخدمة في الدراسة.

يوضح الجدول رقم (٢) والشكل رقم (٤) نتائج التحليل العنصري بتقنية تفلور الأشعة السينية (XRF) للقطعة الزجاجية قبل وبعد التنظيف بغاز الأرجون (Ar) بواسطة تقنية البلازما المستخدمة في الدراسة، وقد أوضحت النتائج أن طريقة التنظيف هذه كانت فعالة للغاية في إزالة نواتج التلف المختلفة والملتصقة بسطح القطعة الزجاجية، حيث أظهرت نتائج إعادة في إزالة طبقات التآكل والصدأ المكونة على سطح القطعة، وبالفعل أزيلت معظم نواتج التلف والتآكل من السطح، وأكد علي فاعليتها نسب العناصر بعد التنظيف.

وفي بداية الأمر أظهرت نتائج التحليل العديد من العناصر في القطعة الزجاجية والتي تمثل تركيبها الكيميائي، وقد تبين أن العنصر المهيمن فيها هو السيليكا (SiO_2) بنسبة عالية تتمثل في (٦٦,٠٢%)، مما يشير إلى أن هذه القطعة تعتمد بشكل كبير على السيليكا (SiO_2) في بنيتها الأساسية^(١)، وبعد تنظيف سطحها من نواتج التلف والتآكل بواسطة بلازما غاز الأرجون (Ar) تبين زيادة نسبة السيليكا (SiO_2) إلى (٦٨,٣٠%) حيث يشير ذلك إلى أن طريقة التنظيف كانت ذات كفاءة وفاعلية في إزالة وتنظيف نواتج التلف والتآكل من سطح القطعة الزجاجية، واستعادة سطحها الأصلي.

كذلك تبين وجود بعض العناصر الأخرى التي تمثل التركيب الكيميائي للقطعة والتي تتمثل في أكسيد الصوديوم (Na_2O) بنسبة (٣,٢٠%)، وأكسيد البوتاسيوم (K_2O) بنسبة (١,٧٤%)، وأكسيد الألومنيوم (Al_2O_3) بنسبة (٣,١٦%)، وأكسيد الكالسيوم (CaO) بنسبة (١٠,٠١%)، وأكسيد الماغنيسيوم (MgO) بنسبة (١,٤٣%)، وهي ما تعرف بالعناصر القلوية والمثبتة، والتي من شأنها تلعب دورًا في خصائص الزجاج الأثري الفيزيائية والكيميائية^(٢). وبعد تنظيف سطح القطعة الزجاجية بواسطة بلازما غاز الأرجون (Ar)، تم ملاحظة زيادة جيدة في نسب العناصر القلوية والمثبتة، فكان أكسيد الصوديوم (Na_2O) نسبته (٤,١٧%)، وأكسيد البوتاسيوم (K_2O) نسبته (٢,٢٦%)، وأكسيد الألومنيوم (Al_2O_3) نسبته (٣,٤١%)، وأكسيد الكالسيوم (CaO) نسبته (١١,٠٨%)، وأكسيد الماغنيسيوم (MgO) نسبته (٢,٦٣%)، حيث تدل هذه الزيادة في النسب بعد التنظيف إلى أن نواتج التلف الملتصقة بـ سطح القطعة الزجاجية قد تم إزالتها بنجاح بعد عملية التنظيف، مما كشف ذلك عن الطبقات الداخلية للقطعة، والتي تحتفظ بالتركيب الأصلي لها.

(1) Mohammadamin Emami, et al. "Synchrotron micro-XRD study, the way toward a deeper characterizing the early prehistoric Iranian glass cylinders from Late Bronze Age (1280 BC)." *The European Physical Journal Plus* 135.6 (2020): 487.

(2) Tantrakarn Kriengkamol, et al. "Archaeological analysis of Roman glass excavated from Zadar, Croatia, by a newly developed portable XRF spectrometer for glass." *X- Ray Spectrometry: An International Journal* 38.2 (2009): 121-127.

كذلك تبين وجود عناصر أخرى في القطعة الزجاجية مثل أكسيد الحديد الثلاثي (Fe_2O_3) بنسبة (٢,٤٦%)، وأكسيد المنجنيز الثلاثي (Mn_2O_3) بنسبة (٣,٠٧%)، وثالث أكسيد الكبريت (SO_3) بنسبة (١,٢٤%)، والتي يشير إلى أنها قد تكون موجودة كجزء من تركيب القطعة لإضفاء خصائص معينة تتمثل في اللون أو الصلابة، أو بسبب وجودها في بيئة دفن التربة لفترة طويلة^(١)، ولكن بسبب عمليات الترطيب والتبادل الأيوني والتي حدثت بمساعدة العناصر المثبتة المتمثلة في أكسيد الكالسيوم (CaO)، وأكسيد الماغنيسيوم (MgO) والماء^(٢)، قد نتج عنها طبقة تآكل وطبقة سوداء تتشكل فوق السطح^(٣)، وقد أظهرت نتائج التحليل أن بلازما غاز الأرجون (Ar) قادرة على تنظيف طبقة الاسوداد بفاعلية عالية من القطعة الزجاجية، حيث تبين ذلك من خلال نسب تلك العناصر التي ظهرت في التحليل بعد عملية التنظيف، وذلك من خلال ملاحظة الانخفاض الواضح في نسبة عنصر أكسيد الحديد الثلاثي (Fe_2O_3) إلى (١,٠٤%)، وأكسيد المنجنيز الثلاثي (Mn_2O_3) إلى (١,٩١%)، وثالث أكسيد الكبريت (SO_3) إلى (١,٠١%)، وهذا يشير إلى أن طريقة التنظيف كانت ذات كفاءة وفاعلية في إزالة وتنظيف نواتج التلف المختلفة والتآكل والاسوداد من سطح القطعة الزجاجية، واستعادة سطحها الأصلي.

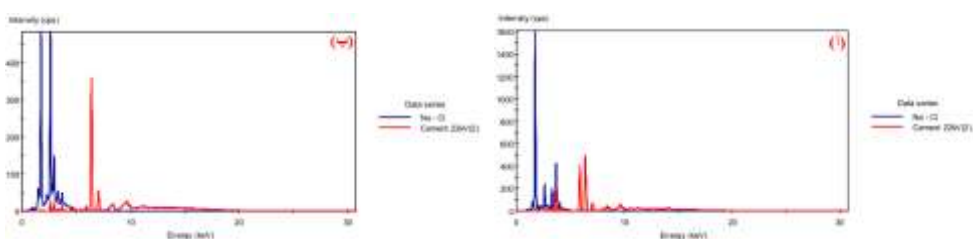
كذلك وجد أن هناك اختلافات في العناصر الأخرى بكميات أقل في تركيب القطعة، والتي تتمثل في الكلور (Cl) بنسبة (١,٩٨%)، وأكسيد الزنك (ZnO) بنسبة (٠,٠٥%)، وثاني أكسيد التيتانيوم (TiO_2) بنسبة (٠,٣٨%)، وخامس أكسيد الفوسفور

(^١) Farahnaz Koleini, et al. "Glass Finds from the Elite House of Roue, a Sasanian City Building in Western Iran: Composition and Classification Using XRF and Raman Spectroscopy." *Heritage* (2571-9408) 7.11 (2024).

(^٢) Nikolaos Zacharias, et al. "Archaeological glass corrosion studies: composition, environment and content." *Scientific Culture* 6.3 (2020): 53-67.

(^٣) Sara Fiorentino, et al. "On the Surface and Beyond. Degradation Morphologies Affecting Plant Ash-Based Archaeological Glass from Kafir Kala (Samarkand, Uzbekistan)." *Minerals* 11.12 (2021): 1364.

(P_2O_5) بنسبة (٢,٠١%)^(١)، وبشكل عام، تشير نتائج هذه العناصر بعد التنظيف ببلازما غاز الأرجون (Ar) إلى زيادة أكسيد الزنك (ZnO) إلى (٠,٤٩%)، وانخفاض نسبة الكلور (Cl) إلى (١,٦٨%)، كذلك تمت ملاحظة انخفاض في نسبة ثاني أكسيد التيتانيوم (TiO_2) إلى (٠,٣١%)، وخامس أكسيد الفوسفور (P_2O_5) إلى (١,٧١%). وعلى الرغم من الاستعادة الجيدة للعناصر بعد عملية التنظيف، لا تزال هناك فروق طفيفة بين نسب العناصر قبل وبعد عملية التنظيف، وهذا من المرجح أن يكون بسبب عدم كفاية وقت تعريض القطعة الزجاجية لبلازما غاز الأرجون (Ar) لإزالة نواتج التلف المختلفة بشكل كامل.



شكل رقم (٥): يوضح نتائج التحليل بتقنية تفلور الأشعة السينية (XRF) للقطعة الزجاجية، حيث يوضح (أ) القطعة الزجاجية قبل التنظيف، ويوضح (ب) القطعة الزجاجية بعد التنظيف بغاز الأرجون (Ar) بواسطة تقنية البلازما المستخدمة في الدراسة.

٥. الاستنتاجات:

في هذه الدراسة أثبتت النتائج بوضوح فاعلية استخدام غاز الأرجون (Ar) الناتج من تقنية بلازما الضغط الجوي المستحثة بتقنية بلازما الكورونا (Corona Discharge Plasma) في إزالة وتنظيف نواتج التلف المختلفة المتواجدة على القطعة الزجاجية من الجانبين، وهنا يتبين من خلال عملية التنظيف أن بلازما غاز الأرجون (Ar) تولد حرارة عالية، مما ساعد ذلك على كسر الروابط وتليين نواتج التلف المتكونة على سطح القطعة، وتسهيل إزالتها، مما حدث تغيير ملحوظ في سطحها، وتم الحصول على نتيجة جيدة جدًا، حيث أنه بعد تنظيف العينة بهذا الغاز لمدة ٤٥ دقيقة منفصلة أظهرت

(¹) Sinéad Middleton, et al. "The classification and characterisation of archaeological glass using multi-elemental analysis." (2015).

نتائج الفحص بالميكروسكوب الضوئي الرقمي (USB) تفوق واضح في إزالة جزء ظاهر جدًا من قشور نواتج الصدأ، وظاهرة الاسوداد، والتكلسات الطينية المترسبة من سطح القطعة، وانخفاض تشويه السطح مقارنة بالقطعة الزجاجية قبل تنظيفها.

كذلك اتضح من خلال لقطات الفحص بالميكروسكوب الإلكتروني الماسح (SEM) تحسناً ملحوظاً في نظافة سطح القطعة الزجاجية بعد عملية التنظيف بواسطة بلازما غاز الأرجون (Ar)، وأظهرت تفوقاً واضحاً من حيث الكفاءة والفاعلية، ذلك علاوة على أنها لم تحدث أي تغيرات طبوغرافية في سطح القطعة، وهذا يشير أن عملية التنظيف بالبلازما لم تحدث أي تلف بسطح القطعة الزجاجية.

كذلك أظهرت تقنية التحليل بواسطة تفلور الأشعة السينية (XRF) أن عملية التنظيف بواسطة بلازما غاز الأرجون (Ar) كانت انتقائية وفعالة، فقد قامت بإزالة نواتج التلف المختلفة والملتصقة بسطح القطعة الزجاجية، وذلك دون المساس بالمكونات الأساسية لقطعة الزجاج الأثرية، وذلك من خلال الانخفاض الواضح في نسب العناصر المرتبطة بمظاهر التلف، والمتمثلة في أكسيد الحديد الثلاثي (Fe_2O_3)، وأكسيد المنجنيز الثلاثي (Mn_2O_3)، وثالث أكسيد الكبريت (SO_3)، والكلور (Cl)، وخامس أكسيد الفوسفور (P_2O_5)، مما يدل ذلك على نجاح تقنية البلازما في إزالة التآكل، والصدأ، والتكلسات الطينية، وظاهرة الاسوداد.

وفي المقابل، ظلت نسب المكونات الأساسية للقطعة الزجاجية المتمثلة في السيليكا (SiO_2)، وأكسيد الصوديوم (Na_2O)، وأكسيد البوتاسيوم (K_2O)، وأكسيد الكالسيوم (CaO)، وأكسيد الماغنيسيوم (MgO) ثابتة، وهو ما يؤكد الحفاظ على التركيب الكيميائي الأصلي للقطعة، حيث تثبت هذه النتائج أن عملية التنظيف كانت انتقائية وناجحة في استعادة حالة القطعة الزجاجية دون إحداث أي تغيير فيها.

وفي النهاية ينبغي إجراء العديد من التجارب في الدراسات المستقبلية لتجربة العديد من الغازات المختلفة وتقييم كفاءتها في تنظيف العديد من نواتج التلف المختلفة التي تصيب الآثار الزجاجية، مع زيادة وقت المعالجة، حيث أنه من الواضح أن زيادة مدة التعريض للبلازما ستؤدي إلى تحسين كفاءة عالية للتنظيف وإزالة المزيد من نواتج التلف والصدأ والتآكل العالقة على أسطح الآثار الزجاجية.

٧. الشكر:

نتقدم بخالص الشكر والتقدير بوجه عام إلي معمل تطبيقات البلازما، قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة سوهاج، وبوجه خاص إلى كل من الأستاذ الدكتور/ فايز محمود علي الحصري، والمدرس المساعد/ محمد خلف عبد المجيد فواز، والمعيد/ أيمن أحمد صابر محمد، وذلك علي تعاونهم ومساعدتهم وتوفيرهم البيئة الداعمة والتسهيلات اللازمة لتطبيق تقنية البلازما في الجانب العملي لإنجاز هذا البحث.

قائمة المراجع

قائمة المراجع العربية:

١. حمدي محمد محمد: دراسة مقارنة لتقييم المواد التقليدية والحديثة المستخدمة في تجميع واستكمال الآثار الفخارية المستخرجة من الحفائر تطبيقاً علي نماذج مختارة، رسالة ماجستير، قسم ترميم الآثار، كلية الآثار، جامعة القاهرة، ٢٠١٨م.
٢. رشا صادق، وآخرون: تقييم تأثير استخدام البلازما في إزالة البقع من المنسوجات القطنية "دراسة تجريبية"، مجلة كلية الآثار، جامعة القاهرة، المجلد العاشر، العدد الرابع والعشرون، ٢٠٢١م.
٣. كرستينا ماهر يوسف، وآخرون: فحص وتحليل الفسيفساء الزجاجية لجدارية السيدة العذراء مريم بالكنيسة البطرسية بالقاهرة ومظاهر تلفها، مجلة كلية الآثار، جامعة القاهرة، المجلد الثالث عشر، العدد السادس والعشرون، ٢٠٢٣م.
٤. محمد حفني مغازي، وآخرون: منهجية الترميم لإحدى المشكاوات الزجاجية المتضررة من تفجير محيط متحف الفن الإسلامي بالقاهرة "دراسة حالة"، مجلة كلية الآثار، جامعة القاهرة، المجلد الثالث عشر، العدد السادس والعشرون، ٢٠٢٣م.
٥. محمد مصطفى إبراهيم، وآخرون: تقدير الظروف البيئية المحيطة وتأثيرها على المقتنيات الأثرية بمتحف المفرق بالأردن، مجلة العمارة والفنون والعلوم الإنسانية، المجلد السابع، العدد الخامس والثلاثون، ٢٠٢٢م.
٦. نجوي سيد عبد الرحيم: دراسة تحليل لمكونات إناء زجاجي لحفظ بقايا الموتى من العصر الروماني، منطقة تل عيون موسى، جنوب سيناء، مصر، مجلة العمارة والفنون والعلوم الإنسانية، المجلد العاشر، العدد الثالث عشر، ٢٠٢٥م.
٧. وليد كامل علي محمد الغريب: دراسة علاج وصيانة الآثار الفخارية والبرونزية المستخرجة من الحفائر - تطبيقاً علي نماذج أثرية مستخرجه من منطقة آثار الرطابي بالإسماعيلية، رسالة ماجستير، قسم ترميم الآثار، كلية الآثار، جامعة القاهرة، ٢٠٠١م.

قائمة المراجع الأجنبية:

8. Abraham Belkind, et al. Gershman. "Plasma cleaning of surfaces." *Vacuum Coating and Technology* November (2008): 46-57.
9. Anna Gueli, et al. "Weathering and deterioration of archeological glasses from late Roman Sicily." *International Journal of Applied Glass Science* 11.1 (2020): 215-225.
10. Anthony Sinclair, et al. "Archaeological Sciences 1995: Proceesings of a conference on the application of scientific techniques to the study of archaeology." (2017): 1-456.
11. Barbara Szala, et al. "Influence of environment on the corrosion of glass–metal connections." *Applied Physics A* 116 (2014): 1627-1635.
12. Bo Zhang, et al. "Impacts of cold plasma technology on sensory, nutritional and safety quality of food: A review." *Foods* 11.18 (2022): 2818.
13. Burghard Flemming. "The influence of grain-size analysis methods and sediment mixing on curve shapes and textural parameters: implications for sediment trend analysis." *Sedimentary Geology* 202.3 (2007): 425-435.
14. Cassiano LS Costa, et al. "A simple method for glass analysis using total reflection X-ray fluorescence spectrometry." *Talanta* 243 (2022): 123354.
15. Ellery Frahm. "Scanning electron microscopy (SEM): Applications in archaeology." *Encyclopedia of global archaeology* (2014): 6487-6495.
16. Farahnaz Koleini, et al. "Glass Finds from the Elite House of Roue, a Sasanian City Building in Western Iran: Composition and Classification Using XRF and Raman Spectroscopy." *Heritage* (2571-9408) 7.11 (2024).
17. Flora Glad, et al. "A review on recent advances in cold plasma technology for the food industry: Current applications and future trends." *Trends in food science & technology* 69 (2017): 46-58.

18. Francesca Di Turo, et al. "Chemical analysis and computed tomography of metallic inclusions in Roman glass to unveil ancient coloring methods." *Scientific Reports* 11.1 (2021): 11187.
19. Francisco Tabares, et al. "Cold plasma systems and their application in surface treatments for medicine." *Molecules* 26.7 (2021): 1903.
20. František Krčma, et al. "Application of low temperature plasmas for restoration/conservation of archaeological objects." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 565. No. 1. IOP Publishing, 2014.
21. Galit Levitin, et al. "Plasma cleaning for electronic, photonic, biological, and archeological applications." *Ch 2* (2012): 55.
22. Gomaa Abdel-Maksoud, et al. "Preliminary study for the evaluation of a pulsed coaxial plasma gun for removal of iron rust stain from bone artifacts." *Journal of Cultural Heritage* 55 (2022): 128-137.
23. Guus Verhaar, et al. "Investigating ion depletion in unstable historic glass samples using laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry and ion chromatography." *Recent Advances in Glass and Ceramics Conservation* (2019): 45-54.
24. Halim Ayan, et al. "Application of nanosecond-pulsed dielectric barrier discharge for biomedical treatment of topographically non-uniform surfaces." *Journal of Physics D: Applied Physics* 42.12 (2009): 125202.
25. Hannelore Roemich, et al. "Results from burial experiments with simulated medieval glasses." *Materials Research Society symposium proceedings.-Wuhan*. Vol. 757. 2003.
26. Hannelore Römich. "Studies of ancient glass and their application to nuclear-waste management." *MRS bulletin* 28.7 (2003): 500-504.
27. Harish Barshilia, et al. "Ar+ H₂ plasma etching for improved adhesion of PVD coatings on steel substrates." *Vacuum* 86.8 (2012): 1165-1173.

28. Hind Abdeen, et al. "A study of the most important manifestations of damage to one of the skeletons preserved in the museum store in Al-Diyabat-Sohag." *International Journal of Multidisciplinary Studies in Architecture and Cultural Heritage* 4.1 (2021): 139-151.
29. Huixing Zhang, et al. "Superhydrophilic Antifog Glass and Quartz Induced by Plasma Treatment in Air." *Nanomaterials* 15.14 (2025): 1058.
30. Jenish Patel, et al. "Study of plasma–water interactions: effect of plasma electrons and production of hydrogen peroxide." *Russian Journal of Physical Chemistry A* 95.13 (2021): 2691-2698.
31. Jianan Sun, et al. "Plasma Cleaning Technology: Mechanisms, Influencing Factors, and Applications." *IEEE Access* (2025).
32. Jingxiang Xu, et al. "Different etching mechanisms of diamond by oxygen and hydrogen plasma: a reactive molecular dynamics study." *The Journal of Physical Chemistry C* 125.30 (2021): 16711-16718.
33. Jordanne-Amee, et al. "Cold plasma for enhanced water purification." *Sustainable Microbiology* 1.1 (2024): qvae032.
34. Karel Burm. "Plasma: The fourth state of matter." *Plasma Chemistry and Plasma Processing* 32.2 (2012): 401-407.
35. Klaus Dieter Weltmann, et al. "The future for plasma science and technology." *Plasma Processes and Polymers* 16.1 (2019): 1800118.
36. Mar Villar-dePablo, et al. "Innovative approaches to accurately assess the effectiveness of biocide-based treatments to fight biodeterioration of Cultural Heritage monuments." *Science of the Total Environment* 897 (2023): 165318.
37. Mária Domonkos, et al. "Applications of cold atmospheric pressure plasma technology in medicine, agriculture and food industry." *Applied Sciences* 11.11 (2021): 4809.

38. Maria Kaparou, et al. "Investigating the Degradation of Mycenaean Glass Artifacts Using Scientific Methods." *Heritage* 7.3 (2024): 1769-1783.
39. Mark Tehranipoor, et al. "Scanning Electron Microscope Training." *Hardware Security Training, Hands-on!*. Cham: Springer International Publishing, 2023. 293-318.
40. Michael Lieberman, et al. "Principles of plasma discharges and materials processing." *MRS Bulletin* 30.12 (1994): 899-901.
41. Michael Melcher, et al. "Degradation of glass artifacts: application of modern surface analytical techniques." *Accounts of chemical research* 43.6 (2010): 916-926.
42. Milan Šimek, et al. "White paper on the future of plasma science for optics and glass." *Plasma Processes and Polymers* 16.1 (2019): 1700250.
43. Mohammadamin Emami, et al. "Synchrotron micro-XRD study, the way toward a deeper characterizing the early prehistoric Iranian glass cylinders from Late Bronze Age (1280 BC)." *The European Physical Journal Plus* 135.6 (2020): 487.
44. Monica De Bardi, et al. "Sol–gel silica coating for potash–lime–silica stained glass: Applicability and protective effect." *Journal of Non-Crystalline Solids* 390 (2014): 45-50.
45. Nada Hamed Jammaz, et al. "A novel plasma electrolysis cleaning technique applied on Islamic glass lamps: An experimental study." *Journal of Cultural Heritage* 73 (2025): 73-81.
46. Nikolaos Zacharias, et al. "Archaeological glass corrosion studies: composition, environment and content." *Scientific Culture* 6.3 (2020): 53-67.
47. Oleh Yatsuk, et al. "Data from multiple portable XRF units and their significance for ancient glass studies." *Molecules* 27.18 (2022): 6068.

48. Omid Oudbashi. "A methodological approach to estimate soil corrosivity for archaeological copper alloy artefacts." *Heritage Science* 6.1 (2018): 2.
49. Paul Bellan. *Fundamentals of plasma physics*. Cambridge university press, 2008.
50. Paul Bellendorf, et al. "Archaeological glass: the surface and beyond." *Glass and Ceramics Conservation 2010: Interim Meeting of the ICOM-CC Working Group, October 3–6, 2010, Corning, New York, USA*. 2010.
51. Peter Bruggeman, et al. "Plasma–liquid interactions: a review and roadmap." *Plasma sources science and technology* 25.5 (2016): 053002.
52. Peter Crow. "Mineral weathering in forest soils and its relevance to the preservation of the buried archaeological resource." *Journal of Archaeological Science* 35.8 (2008): 2262-2273.
53. Pradeep Puligundla, et al. "Effect of corona discharge plasma jet treatment on the degradation of aflatoxin B1 on glass slides and in spiked food commodities." *Lwt* 124 (2020): 108333.
54. Radko Tiño, et al. *Plasma technology in the preservation and cleaning of cultural heritage objects*. CRC Press, 2021.
55. Ramadan Abd-Allah. "Chemical cleaning of soiled deposits and encrustations on archaeological glass: A diagnostic and practical study." *Journal of cultural Heritage* 14.2 (2013): 97-108.
56. Rasha Taha. "The deterioration resulting from burial environment on archaeological glass: Comparative study." *Shedet* 6.6 (2019): 225-237.
57. Roberta Zanini, et al. "A review of glass corrosion: the unique contribution of studying ancient glass to validate glass alteration models." *npj Materials Degradation* 7.1 (2023): 38.
58. Royce Cox, et al. "Premature Oxidation During Argon Plasma Cleaning of Water-Rich Radiocarbon Samples." *Radiocarbon* 64.1 (2022): 21-34.

59. Sapna Birania, et al. "Cold plasma in food processing and preservation: A review." *Journal of Food Process Engineering* 45.9 (2022): e14110.
60. Sara Fiorentino, et al. "On the Surface and Beyond. Degradation Morphologies Affecting Plant Ash-Based Archaeological Glass from Kafir Kala (Samarkand, Uzbekistan)." *Minerals* 11.12 (2021): 1364.
61. Sinéad Middleton, et al. "The classification and characterisation of archaeological glass using multi-elemental analysis." (2015).
62. Sofia Toniolo. "Soil characterisation to investigate the role of the burial environment in archaeological glass alteration." (2022).
63. Tantrakarn Kriengkamol, et al. "Archaeological analysis of Roman glass excavated from Zadar, Croatia, by a newly developed portable XRF spectrometer for glass." *X- Ray Spectrometry: An International Journal* 38.2 (2009): 121-127.
64. Teresa Palomar. "Effect of soil pH on the degradation of silicate glasses." *International Journal of Applied Glass Science* 8.2 (2017): 177-187.
65. Theresa Winter, et al. "Common versus noble B acillus subtilis differentially responds to air and argon gas plasma." *Proteomics* 13.17 (2013): 2608-2621.
66. Tomáš Trojek, et al. "Uncertainty of quantitative X-ray fluorescence micro-analysis of metallic artifacts caused by their curved shapes." *Materials* 16.3 (2023): 1133.
67. Vladimir Scholtz, et al. "Nonthermal plasma-A tool for decontamination and disinfection." *Biotechnology advances* 33.6 (2015): 1108-1119.