

دراسة تجريبية لتقوية النقوش الجدارية بالجدار الخارجى لمقبرة ميرروكا بسقارة

| Received April 13th 2023 | Accepted May 30th 2023 | Available online June 16th 2023 |
| DOI 10.21608/jatmust.2023.303827 |

الملخص

تعد النقوش الجدارية المنفذة على جدران المقابر والمعابد فى مصر القديمة تراث حضارى عالمى بما تحمله من معلومات تاريخية وفنية وتقنية وعقائدية غاية فى الأهمية، يتوجب علينا الحفاظ عليها كي تصل للأجيال القادمة للإستفادة منها. ويتعلق موضوع هذا البحث بنقوش الجدار الخارجى لمقبرة ميرروكا بسقارة، والمشيد من الحجر الجيرى، حيث تعانى من العديد من مظاهر التلف نتيجة التأثيرات الحادة لعوامل التلف فى بيئتها المفتوحة، ولاستمرار بقاء هذه النقوش يجب أن تُجرى لها عمليات تقوية وحماية. ويتناول هذا البحث دراسة تجريبية لتقوية وحماية النقوش الجدارية موضوع الدراسة. وقد تم دراسة الحجر الجيرى الأثرى بالميكروسكوب المستقطب وحيود الأشعة السينية والميكروسكوب الالكتروني الماسح المزود بوحدة تشتيت الطاقة. وقد نُفذت الدراسة التجريبية على مجموعة من البوليمرات لتقييم فاعليتها فى تقوية وحماية النقوش الجدارية موضوع الدراسة. وقد تم تقييم العينات المعالجة عن طريق قياس التغير اللوني وتعيين زاويا اتصال الماء وقياس مقاومة الضغوط الميكانيكية ومقاومة البرى وتعيين الخصائص الفيزيائية، والفحص بالميكروسكوب الالكتروني الماسح. وقد أوضحت النتائج أن بوليمر Dow Corning أظهر قدرة فائقة فى تقوية وحماية النقوش الجدارية موضوع الدراسة مقارنة بالبوليمرات فى هذه الدراسة.

الكلمات الدالة:

الأحجار الجيرية؛ نقوش جدارية؛ التقوية؛ الحماية؛ سليكونات.

أحمد إبراهيم منسي

مدرس ترميم وصيانة الآثار

كلية الآثار والإرشاد السياحي

جامعة مصر للعلوم والتكنولوجيا

6 أكتوبر، مصر

Ahmed.ibrahim@must.edu.eg

ياسر كمال حفني

أستاذ مساعد ترميم وصيانة الآثار

كلية الآثار والإرشاد السياحي

جامعة مصر للعلوم والتكنولوجيا

6 أكتوبر، مصر

Yasser.kamal@must.edu.eg



EXPERIMENTAL STUDY FOR CONSOLIDATION OF THE INSCRIPTIONS ON THE EXTERNAL WALL OF THE MERRUKA TOMB AT SAQQARA

| Received April 13th 2023 | Accepted May 30th 2023 | Available online June 16th 2023 |
| DOI 10.21608/jatmust.2023.303827 |

Ahmed Ibrahim Manci
Faculty of Archaeology and
Tourism Guidance - Misr
University for Science and
Technology
Ahmed.ibrahim@must.edu.eg

Yasser Kamal Hefni
Faculty of Archaeology and
Tourism Guidance - Misr
University for Science and
Technology
Yasser.kamal@must.edu.eg

ABSTRACT

The wall inscriptions on the walls of tombs and temples in ancient Egypt are considered a global cultural heritage, as they carry extremely important historical, artistic, technical and ideological information. The wall inscriptions have to be preserved as long as possible to reach the future generations. This study focuses on the inscriptions of the external wall of the Merruca tomb at Saqqara, which is built of limestone. These inscriptions have suffered from many aspects of damage as a result of the hard effects of deterioration factors in open environment, and need to consolidation and protection to maintain their continuity. The analytical study of the studied limestone was performed using polarizing light microscope, X-ray diffraction, scanning electron microscope attached with EDS unit. The experimental study was carried out on a group of polymers to evaluate their effectiveness in the consolidation and protection of the wall inscriptions under study. The treated samples were evaluated by measuring the colour alteration test, static water contact angle, compressive strength, abrasion resistance, determination of physical properties and morphological examination by scanning electron microscope. The results showed that the polymer of Dow Corning showed a superior ability to consolidate and protect the inscriptions on the wall under study compared to the other polymers used in this study.

KEYWORDS:

Limestone; wall inscriptions; Consolidation; Protection; Silicones.

1. مقدمة

إتفق الكثير من الباحثين على أن الحجر الجيري كان أسبق أنواع الأحجار فى الاستخدام، نظراً لما يتمتع به من خصائص فيزيائية وكيميائية متباينة، وبتعدد ألوانه وسهولة قطعه وتشكيله وبنائه وكثرة محاجره.¹ حيث بدأ استخدامه منذ عصر الأسرة الأولى، وذلك فى تبطين عدد من الحجرات الصغيرة بمقبرة من ذلك العصر فى سقارة، ويُعد هرم "زوسر" أقدم بناء حجرى على وجه الأرض استُخدم فى بنائه الحجر الجيري، وقد ظل الحجر الجيري مُستخدمًا كمادة بناء فى المقابر الفرعونية حتى عصر الأسرة الثامنة عشرة والتاسعة عشر.² حيث تدل آثار محاجر الحجر الجيري تحت الهضبة الممتدة شرق القاهرة حتى حلوان على دراية عالية بأصول علم التعدين، كما تدل عشرات الأهرامات الرابضة على الهضبة الغربية للنيل فيما بين أبو رواش وهوارة على معرفة المصرى القديم بهندسة قطع الأحجار الجيرية المناسبة ونقلها وبنائها.³ فقد عرفت الدولة القديمة كيفية استخراج الأحجار الجيرية بمواصفات طبيعية تُناسب الأغراض المُقتطعة لأجلها، فكانوا يقطعون الأحجار اللازمة لبناء جسم الأهرامات من مواقع قريبة من أماكن تشييدها، أما الأحجار الجيرية والتي استخدمت للكسوة الداخلية لحوائط بعض الممرات والدهاليز فكانت من محاجر على الضفة الغربية للنيل، ولكن الأحجار الجيرية التي استخدمت فى أعمال التكسية الخارجية فكانت دائماً تُجلب من محاجر البر الشرقى عند طرة، حيث كانوا يجلبون كتل الأحجار بوضعها فوق زحافات تجرها الثيران.⁴ ويذكر "سليم حسن"⁵ أن محاجر الحجر الجيري بطره ظلت وفقاً على الملوك وأسرههم ومن هم فى ركبهم، ولم يكن فى مقدور الأفراد أن يقوموا بالإقتطاع منها، إلا أن الفرعون كان يعطف على كبار موظفيه فيمنح الفرد منهم تابوتاً أو لوحة أو يأمر بأن يُقطع له من المحاجر الكمية الكافية من الأحجار لبناء مقبرته، ويتكفل الفرعون كذلك بنقلها من المحاجر إلى الجبابة.

هذا وتعد مقبرة "ميرروكا" وعائلته من أهم مقابر الدولة القديمة التى شُيدت من الأحجار الجيرية الجيدة ويحتمل أنها مُقتطعة من محاجر طرة. تحتل هذه موقعاً ذا إعتبار خاص، حيث تقع بجبابة "تتى" شمال "سقارة"، على بعد عشرين متراً شمال غرب هرم الملك "تتى" فى الشارع الرئيسى الأول الذى يمتد من الشرق للغرب، وتوجد فى النهاية الشمالية الغربية لهذا الشارع، شمال السور المحيط بهرم

1 عماد عجوة، الحلول المعمارية المعالجة للظواهر المناخية بعمارة القاهرة منذ نشأتها وحتى نهاية العصر العثمانى، رسالة دكتوراة، كلية الآثار، جامعة القاهرة، 2009، ص 144.

2 أحمد عطية، مبادئ الجيولوجيا للأثريين، الدار العالمية للنشر والتوزيع، 2004، ص 93:92.

3 محمد سميح عافية، التعدين فى مصر قديماً وحديثاً، الهيئة المصرية العامة للكتاب، 1985، ص 8، 9.

4 عبد الحميد عبد الحميد السيد الكفافي، "دراسات علمية تجريبية وتطبيقية فى علاج وصيانة الأحجار الجيرية فى بعض المباني الأثرية من التلف الميكروبيولوجى، رسالة ماجستير، قسم الترميم، كلية الآثار، جامعة القاهرة، 2006، ص 3.

5 سليم حسن، مصر القديمة، الجزء الثانى، الهيئة المصرية العامة للكتاب، 2001، ص 37.

"تتي" وغرب مقبرة "كاجمني"⁶. تم الكشف عنها في شهر يوليو عام 1893م بواسطة "De Morgan"⁷. وتعتبر من أكبر المقابر التي كُشف عنها بمنطقة "سقارة"، حيث تأخذ الشكل المستطيل أبعادها 44,50 م طوياً و23,50 م عرضاً، وتتكون من جزئين: الجزء العلوي - الجزء السفلي. وتشتمل على (32) حجرة و تُشكل جميع حجرات المقبرة ثلاث أجزاء مختلفة، هي (A,B,C)⁸. الجزء الأول: (Chambers A) يخص "مرى روكا"، و يتكون من 21 حجرة، ويُعد أول الأجزاء المُشيّدة بالمقبرة، يوجد المدخل الرئيسي لهذا الجزء في الواجهة الجنوبية. الجزء الثاني: (Chambers B) يخص زوجته "وكتت غت حور"، يتكون من (6) حجرات، ويُعد ثاني الأجزاء المشيّد بالمقبرة، والجزء الثالث: (Chambers C) يخص الابن "مرى تتي"^{9,10}. زُخرفت جدران المقبرة من الداخل بنقوش بارزة، بينما نُفذت النقوش والزخارف على الجدار الخارجي للمقبرة بالنقش الغائر. وقد إختار الفنان هذا الأسلوب لكونه أبقى على مر الزمن ويكون تأثير التجوية عليه ضعيف، كما أن تلك الحوائط الخارجية مُعرضة لضوء الشمس القوي لذلك تنكسر عليها الأضواء وتُعطى ظلالاً فتكون ذات وقع جميل على المُشاهد¹¹. هذا ومن المؤسف فإن هذه النقوش الجدارية تعاني بدرجة كبيرة من تأثير عوامل التلف المختلفة المتعلقة بالبيئة الصحراوية ذات المناخ القاري التي تتميز بها منطقة سقارة، حيث يكون التغير في معدلات درجات الحرارة كبيراً بين الليل والنهار وكذلك بين الشتاء والصيف. فضلاً عن تأثير الرياح المحملة بالرمال، وتأثير مياه الأمطار، وغيرها من عوامل التلف البشرية والبيولوجية والميكروبيولوجية، مما أدى إلى حدوث العديد من مظاهر التلف للنقوش الجدارية ممثلة في ضعف وتفتك الحبيبات المعدنية المكونة للحجر الجيري (نزيق الحجر)، وتبلور وتزهق الأملاح على السطح وبين المسام، وتفتت وانفصال الطبقات السحية في بعض الأماكن من الجدار الخارجي، و انتشار الشروخ الدقيقة الأفقية والرأسية.^{12, 13} أنظر الصورة رقم (1).

6 Essam. A., The Treasure of Saqqara, Djoser Pyramid, pyramids, Tombs and The Extremely rare and most important scenes of The Daily life in Ancient Egypt, 2011, p. 29.

7 Daressy, G., Le Mastaba de Mera in Mémoires présentés à l'Institut Égyptien, vol. 3, Cairo, 1898.

8 Porter B. and Moss R. L. B., Topographical Bibliography of Ancient Egyptian Hieroglyphic Texts, Reliefs, and Paintings, III2. Memphis, Griffith Institute Ashmolean Museum, Oxford, 1978, 36-52.

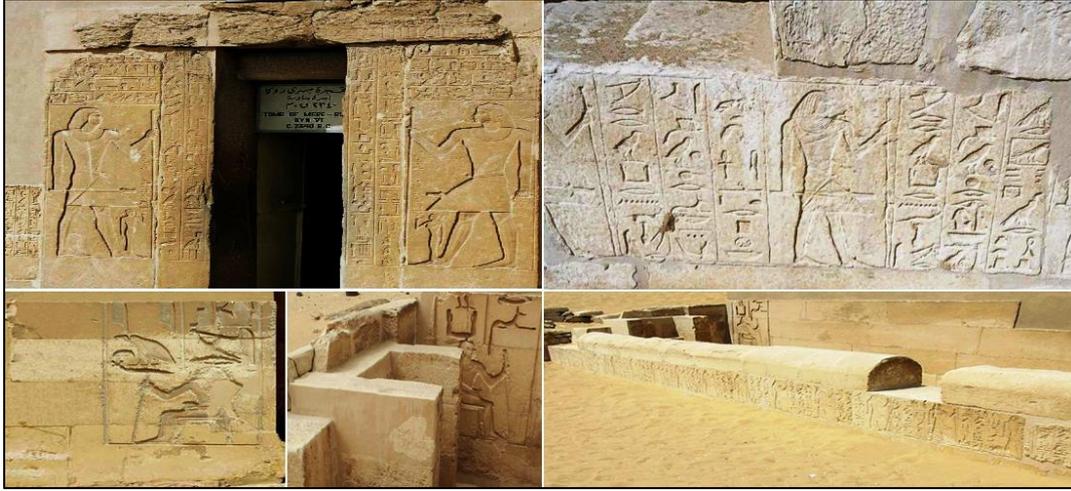
9 Lauer. J., The Royal Cemetery of Memphis, Excavation and discovers since 1830, London, 1976, p57.

10 Kanawate. N., Report on the archaeological fieldwork of the Australian Egyptian expedition in the Tomb of Mereruka in the Teti Cemetery at Saqqara, 2008.

11 كريستيان ديروش نوبلور، ترجمة: محمود خليل النحاس، أحمد محمد رضا، الفن المصري القديم، 1990، ص 279.

12 حاتم جميل محمود قناوى، رسالة ماجستير، مرجع سابق، 2003، ص 142.

13 أحمد إبراهيم أحمد إبراهيم منسي، دراسة علمية لعلاج وصيانة الصور الجدارية المنفذة بتقنية الرسم على الحامل والتلوين على الشيد، مع التطبيق العملي على نموذج مختار، رسالة دكتوراه، قسم الترميم، كلية الآثار، جامعة القاهرة، 2017، ص 211 - 271.



صورة رقم (1): توضح حالة النقوش الجدارية بالجدار الخارجى لمقبرة "ميرروكا" موضوع الدراسة

ومن أجل الحفاظ على هذه النقوش الجدارية الهامة أطول فترة ممكنة، فلا بد من استخدام مواد تقوية تتناسب مع التركيب المعدنى لمادة الأثر، وتتمتع بقدرة فائقة على التغلغل المسام لتقوية وربط الحبيبات المعدنية والطبقات المفككة، وتحسين خصائصها الفيزيوكيميائية والميكانيكية، وفي نفس الوقت حمايتها وزيادة قدرتها على مقاومة عوامل التلف المختلفة وخاصة تأثير الرطوبة، والرياح المحملة بالرمال.^{14، 15، 16، 17} هذا وقد حققت البوليمرات السليكونية والإكريليكية والمواد المركبة من خلط كلا النوعين، العديد من النجاحات فى عملية تقوية وحماية الأحجار الأثرية كون كل منهم يتمتع بخصائص مرتبطة بالتركيب الكيميائى للبوليمر ونوع المذيب المستخدم فى إنتاجه.^{18، 19، 20} ويهدف هذا البحث إلى تقييم فاعلية مجموعة من البوليمرات فى تقوية وحماية الأحجار الجيرية التجريبية، وذلك للمقارنة فيما بينها والتعرف على أفضلها وأكثرها قدرة على تقوية وحماية النقوش الجدارية المنفذة على الحجر الجيرى موضوع الدراسة.

14 Tabasso. M. L., conservation treatments of stone, notes from international Venetian courses on stone restoration, 1988, p. 280.

15 Striegel. M. F., Guin. E. B., Hallett .K., Sandoval. D., Swingle. R., Knox. K., Best. F., Fornea. S., Air pollution, coatings and cultural resources, progress in organic coatings 48, 2003, p. 281-288.

16 Manoudis, P., et al., Surface properties of superhydrophobic coatings for stone protection, Journal of Nano Research, 8, 2009.

17 Yong, M., Robert, G., Sandstone Consolidates and Water Repellents, The building Researches Establishment, Scotland. (<http://www.rgu.ac.uk>), 1992.

18 P. Maravelaki-Kalaitzaki., N. Kallithrakas-Kontos., Z. Agioutantis., S. Maurigiannakis., D. Korakaki., Comparative study of porous limestones treated with silicon-based strengthening agents, Progress in Organic Coatings, Vol. 62, Issue 1, 2008, pp. 49-60.

19 Allen N.S., Edge. M., Horie. C.V., Polymers in conservation, Cambridge, The Royal Society of Chemistry, 1992. p. 14.

20 Constanio, C., Franco, L., Russo, A., Anjinho, C., Pires, J., Fatima, M., Carvalho, P. A., Studies on Polymeric Conservation Treatments of Ceramic tiles with Paraloid B-72 and two Alkoxysilanes, Journal of Applied Polymer Science, Vol.116, 2010, pp. 2833-2839.

2. المواد والطرق المستخدمة في الدراسة Materials and Methods

2.1 عينات الحجر الجيري Limestone samples

تم بعناية شديدة تجميع بعض عينات الحجر الجيري الصغيرة جداً من الأجزاء التالفة والمنفصلة من جدار مدخل مقبرة "مرى روكا" بسقارة، وذلك لدراستها بطرق الفحص والتحليل. وطبقاً للدراسات التاريخية، ونتائج الفحوص والتحليل التي أُجريت على عينات الحجر الجيري الأثرية موضوع الدراسة، ثبت أنها من الحجر الجيري الجيد المجلوب من محاجر طره، نظراً للتماثل الكبير في خواصها التي تمت دراستها مع خواص الحجر الجيري بمحاجر طره. لذا فقد تم جلب مجموعة من كتل الحجر الجيري من محاجر طره، ثم هُذبت وقُطعت على هيئة مكعبات منتظمة الشكل أبعادها 3 سم³ لاستخدامها في اختبارات الخصائص الفيزيائية (الكثافة والمسامية وامتصاص الماء). كما تم إعداد عينات مُنتظمة الشكل أبعادها 6 سم³، لاستخدامها في اختبار مقاومة الضغط الميكانيكي. وكذلك أيضاً تم إعداد مجموعة من البلاطات الحجرية بأبعاد 15 سم × 10 سم × 2 سم، لاستخدامها في اختبار مقاومة البري.

2.2 مواد التقوية المستخدمة The used consolidants

تشتمل مواد التقوية المستخدمة في هذه الدراسة على ست مواد، منها مادة إكريليكية، وأربعة مواد سليكاتية، وأخرى خليط من بوليمر سليكاتي مع بوليمر إكريليكي، كما هو موضح الجدول رقم (1).

جدول رقم (1): يوضح مواد التقوية المستخدمة في الدراسة.

Polymer	Composition	Solvent	Company	Symbol
Acrisil 201/0.n	Mixture of acrylic and silicone compounds	Thinner AC 204	CTS- Italian company	A
Paraloid B 72 (3%)	Ethyl methacrylate 70% and Methyl acrylate 30%	Toluene	Rohm& Hass	B
Aqua mix penetrating sealer	Potassium methyl silicate	Water	Aqua mix- American company	C
Estel 1000	Ethyl silicate	White spirit	CTS Italian company	D
Dow Corning	Methyl Tri Methoxy Silane	Acetone	Sigma-Aldrich, Germany	E
Wacker OH 100	Ethyl silicate & methyl ethyl ketone	Acetone	Wacker Chemie- Germany	F

2. 3 الفحص البصري Visual Examination

استُخدم الفحص البصرى في التعرف المبدئي على مادة الأثر، ومظاهر التلف الموجودة به. ويعتمد هذا الفحص بشكل كبير على الخبرة في مجال تحديد نوع التلف وتفسير مسبباته المختلفة. وقد تم الإستعانة في هذا الفحص بالعدسات المكبرة التى أمكن من خلالها رؤية بعض التفاصيل الصغيرة غير الواضحة للعين المجردة.

2. 4 الفحص باستخدام الميكروسكوب المستقطب Polarizing microscope

استخدم الميكروسكوب المستقطب ماركة *Nikon eclipse LV100POL* بقسم الجيولوجيا بكلية العلوم- جامعة القاهرة، في الدراسة البتروجرافية لعينات الحجر الجيرى الأثرية موضوع الدراسة، بعد تحضيرها على هيئة شرائح رقيقة *Thin sections*.

2. 5 الفحص بالميكروسكوب الالكتروني الماسح Scanning electron microscope

استخدم الميكروسكوب الالكتروني الماسح ماركة *Quanta 250 FEG* (بمعامل الهيئة المصرية للثروة المعدنية بالدقى) في دراسة التركيب المورفولوجي لعينات الحجر الجيرى الأثرية موضوع الدراسة، وكذلك لدراسة مظاهر التلف الذي تصيبها نتيجة تأثرها بالعديد من عوامل وقوى التلف فى البيئة المحيطة. كما استخدم أيضاً في دراسة الخصائص المورفولوجية لعينات الحجر الجيرى التجريبية قبل وبعد العلاج، وذلك للمقارنة بين مواد التقوية المستخدمة في الدراسة التجريبية، للتعرف على أفضلها وأكثرها قدرة على تقوية وحماية عينات الحجر الجيرى موضوع الدراسة.

2. 6 الفحص بالميكروسكوب الديجيتال Examination by USB Digital Microscope

استُخدم الميكروسكوب الديجيتال المحمول *USB Digital Microscope Product Specifications china, 500x* الذى يُعطى صورة مُكبرة بقوة تكبير 500x فى فحص مكونات الصور الجدارية بحجرة دفن "مرروكا" حيث لا يحتاج إلى أخذ عينة بل يتم توصيله بجهاز لاب توب ويُستخدم مباشرةً بالموقع، ويفيد هذا الفحص فى التعرف على مظاهر التلف بدقة متناهية مثل الشروخ الدقيقة التى لاترى بالعين المجردة، كما يفيد فى التعرف على الأشكال البلورية للأملاح المتبلورة على السطح أو فى الشروخ والشقوق أو أسفل الطبقات المنفصلة، كما يفيد فى التعرف على شكل الحبيبات وحجمها ومدى إندماجها من عدمة، ومورفولوجية السطح.

2. 7 التحليل بطريقة حيود الأشعة السينية X-ray diffraction

تم استخدام هذه الطريقة فى التعرف على المعادن المكونة للحجر الجيرى الأثرى موضوع الدراسة، ومظاهر التلف التى تصيبه، وذلك باستخدام جهاز التسجيل الآلي الديرراكتوميتر

Philips Diffractometer (بمعامل قسم الترميم - كلية الآثار - جامعة القاهرة) ماركة فيليبس *Analytical X-Ray B.V.* تحت ظروف التشغيل الآتية:-

Diffractometer Type: PW1840, Tube anode: Cu, Generator tension (KV): 40, Generator Current (mA): 25, Wavelength Alpha1(Å): 1.54056, Wavelength Alpha2(Å): 1.54439, Intensity ratio (Alpha2 / Alpha1): 0.500, Receiving slit: 0.2, Monochromator used: NO.

2. 8 التحليل باستخدام وحدة تشتت الطاقة Analysis using EDS unit

استُخدمت وحدة الـ *EDX (Energy Dispersive X-ray Analyses)* المتصلة بالميكروسكوب الإلكتروني الماسح ماركة *Quanta 250 FEG* (بمعامل الهيئة المصرية للثروة المعدنية بالدقى)، في التحليل العنصرى لعينات الحجر الجيرى الأثرية موضوع الدراسة ومظاهر التلف التى تصيبه.

2. 9 تعيين الخصائص الفيزيائية Determination of Physical Properties

تُجرى دراسة وتعيين الخصائص الفيزيائية (الكثافة *Density*، والمسامية الظاهرية *Apparent Porosity*، وامتصاص الماء *Water absorption*)، للحجر الجيرى الأثرى موضوع الدراسة وذلك لمطابقة تلك الخصائص التى تم تعيينها مع مثيلتها لنفس النوعية من الأحجار، وهذا من شأنه الحصول على عينات تجريبية مُطابقة قدر الإمكان لمادة الأثر، مما يضمن سلامة النتائج التى ستُسفر عنها الدراسات التجريبية لمواد العلاج قبل تطبيقها على الأثر. وقد أُجريت تلك الدراسة على النحو التالى:-

- تجفيف المكعبات الحجرية التجريبية داخل فرن عند درجة حرارة 105°م، لمدة 24 ساعة.
- وزن المكعبات الحجرية بعد التجفيف لتعيين الوزن الجاف لها، ويرمز له بالرمز (W).
- غمر المكعبات الحجرية فى الماء لمدة 48 ساعة، ثم وزنها بعد الغمر لتعيين الوزن الرطب ويرمز له بالرمز (W2) .
- حساب الحجم الخارجى لها، ويرمز له بالرمز (V).
- **تعيين الكثافة Density:** تُعبر الكثافة عن العلاقة بين وزن العينة وحجمها الخارجى، وتقدر بالجرام/سم³، ويتم تعيينها لثلاث عينات، ثم تدوين متوسط هذه القراءات كمعدل لكثافة العينات من خلال التعويض فى المعادلة الآتية:-

$$D = \frac{W}{V} \text{ g/cm}^3$$

- **تعيين المسامية الظاهرية Apparent Porosity:** يتم تعيينها لثلاث عينات، ثم تدوين متوسط هذه القراءات كمعدل للمسامية الظاهرية للعينات، من خلال التعويض في المعادلة التالية:-

$$\text{Porosity} = \frac{W_2 - W_1}{V} \times 100 = \dots\%$$

- **تعيين إمتصاص الماء Water Absorption:** يتم تعيينها لثلاث عينات، ثم تدوين متوسط هذه القراءات كمعدل لنسبة امتصاص الماء للعينات، من خلال التعويض في المعادلة التالية:-

$$\text{Water Absorption} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 = \dots\%$$

2. 10 تعيين مقاومة الضغوط الميكانيكية Determination of Compressive strength

تم إجراء اختبار مقاومة الضغوط الميكانيكية لعينات الحجر الجيرى المعالجة وغير المعالجة طبقاً للمواصفة القياسية الأمريكية *A. S. T. M. C170* بالمركز القومى لبحوث الإسكان والبناء وذلك من خلال الخطوات التالية:-

- اختيار ثلاث عينات غير معالجة، وثلاث عينات معالجة بكل مادة من مواد التقوية.
- ثم تحميل العينة بحمل الضغط ببطء، ذلك الحمل الذى يجب ألا يزيد عن 7 كجم قوة/ث حتى يحدث تشرخ وتهشم للعينة.
- تسجيل القراءات، وتعيين مقاومة الضغط للعينات بالتعويض في المعادلة الآتية :-

$$C = \frac{W}{A} = \text{Kg} / \text{Cm}^2$$

حيث أن : C = مقاومة الضغط للعينات مقدرة بالكجم / سم².
W = الحمل المطبق على العينة عند نقطة التهشم مقدراً بالنيوتن ولتحويله لكيلو جرام نضرب في 120.

A = مساحة سطح الارتكاز للعينة مقدرة بـ (سم²).

وبعد حساب مقاومة الضغط للعينات المعالجة وغير المعالجة، تم تدوين متوسط هذه القراءات كمعدل لمقاومة الضغط.

2. 11 تعيين مقاومة البرى Determination of abrasion resistance

لا شك أن النقوش الجدارية بالجدار الخارجى لمقبرة "مرى روكا" تتعرض للعديد من القوى التى تعمل على برى ونحر طبقاتها السطحية مثل الرياح المحملة بالرمال، لاثيما الخدوش المتعمده من الزائرين

بغرض كتابة عبارات للذكرى على الأثر، وبالتالي فإن خاصية مقاومة البرى تُعتبر من الخصائص الهامة التي يجب أن تُحسنها المواد المستخدمة في تقوية النقوش الجدارية، ولذلك يتم قياس مقاومة البرى للعينات التجريبية قبل التقوية وبعدها لتقييم مدى فاعلية مواد التقوية في تحسين الخصائص الميكانيكية للسطح، وتم إجراء اختبار مقاومة البرى بالمركز القومي لبحوث الإسكان والبناء وفقاً للمواصفات الأوروبية لاختبار الأحجار، باستخدام ماكينة البرى ماركة *BS EN 14157. وقد تم هذا الاختبار من خلال إتباع الخطوات الآتية:-

- تجهيز العينات الحجرية التجريبية (حجر جيرى) بطول 15سم، وعرض 10سم، وإرتفاع 2سم، مع مراعاة أن يكون سطح العينات متساوى تماماً.
 - وضع العينات فى المكان المخصص لها بالجهاز، ثم يوضع البودر (الكربورانوم) المستخدم فى عملية البرى بالموزع الخاص به، ويتم ضبطه بحيث يتساقط البودر بين العينة وعجلة البرى *Wide wheel abrasion* التى تسمى (*capon*).
 - تشغيل عجلة البرى وفتح الموزع المحتوى على بودرة الكربورانوم، وتدور العجلة بمعدل 75 دورة فى الدقيقة مع مراعاة عدم توقف البودر أثناء دوران العجلة، والتأكد من عملية الإحتكاك بين العجلة والبودر وسطح العينة.
- يتم حساب نسبة البرى لسطح العينات من خلال نسبة الفاقد من الطبقة السطحية وذلك عن طريق حساب طول وعرض منطقة الفقد التى تعرضت للإحتكاك بواسطة العجلة، والتى تُسمى بالطبقة *Groove* وهذه المنطقة تكون مستطيلة الشكل، ويتم قياس عرضها من الجزء الأوسط، ويتم حسابها بالملم وتُعتبر القيمة التى يتم الحصول عليها عن نسبة البرى التى حدثت لسطح العينة وكلما قلت النسبة، كلما زادت مقاومة سطح الحجر للبرى.

2. 12 قياس التغير اللوني Colorimetric measurement

القياسات اللونية *Colormeasurements* هى تسجيل للأطياف المنعكسة *Reflectance spectra (R%)* من المادة المدروسة فى نطاق الضوء المرئى (400:700 nm) وهى تُعتبر بصمة مميزة لألوان هذه المادة. هذا وقد تم قياس التغير اللوني لعينات الحجر الجيرى المعالجة باستخدام جهاز قياس التغير اللوني ماركة Spectrophotometer Optimatch 3100 من شركة SDL طبقاً للنظام الدولي Commission International de L'eclairage، والذي يتم من خلاله قياس التغير اللوني طبقاً للمعادلة التالية :-

* EN 14157 (2004) Natural stones Determination of abrasion resistance, European Standard- Wide wheel Abrasion Resistance BS EN14157.

$$\Delta E = \sqrt{[(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]}$$

$$\Delta L^* = L^*_{\text{sample}} - L^*_{\text{standard}}$$

$$\Delta a^* = a^*_{\text{sample}} - a^*_{\text{standard}}$$

$$\Delta b^* = b^*_{\text{sample}} - b^*_{\text{standard}}$$

حيث أن: (ΔE) : قيمة التغير اللوني الكلي *Total chromatic change*.

(L^*) : تعبر عن درجة السطوع، وتندرج من اللون الأبيض الناصع (عندما تساوي قيمتها 100) إلى اللون الأسود الداكن (عندما تساوي قيمتها صفر).

(a^*) : تعبر عن اللون الأحمر (عندما تكون قيمة اللون موجبة +) واللون الأخضر (عندما تكون قيمة اللون سالبة -).

(b^*) : تعبر عن اللون الأصفر (عندما تكون قيمة اللون موجبة +) واللون الأزرق (عندما تكون قيمة اللون سالبة -).

ومن الجدير بالذكر أن الحد المسموح به للتغير اللوني للعينات الأثرية المُعالجة هو $\Delta E \leq 5.00$ وفقاً للمعايير القياسية العالمية، وفي حالة تخطى هذا الحد يكون التغير ظاهراً للعين المجردة.^{21، 22}

2. 13 قياس زاوية اتصال الماء *Water contact angle*

ولمعرفة وتقييم مدى قابلية أسطح المواد للتأثر بالماء من عدمه، يتم ذلك عن طريق قياس زاوية إتصال أو تلامس قطره من الماء مع سطح المادة. هذا وتُصنف المواد من حيث قدرتها على طرد الماء إلى مايلي:-

- المواد ذات درجة الجذب القصوى للماء *Super hydrophilic Materials*: وهي تلك المواد التي تتمتع بأسطحها بقدرة كبيرة جداً على جذب الماء، وتكون زاوية إتصال الماء مع أسطح هذه المواد $> 5^\circ$ ، ويكون للماء في هذه الحالة مساحة إتصال كبيرة جداً مع السطح.
- المواد الجاذبة للماء *Hydrophilic Materials*: وهي تلك المواد التي تتمتع بأسطحها بقدرة كبيرة على جذب الماء، وتكون زاوية إتصال الماء مع أسطح هذه المواد $> 90^\circ$.
- المواد الطاردة للماء *Hydrophobic Materials*: وهي تلك المواد التي تتمتع بأسطحها بقدرة كبيرة على طرد الماء، وتكون زاوية إتصال الماء مع أسطح هذه المواد $< 90^\circ$ ، ويكون الماء في هذه الحالة مساحة إتصال صغيرة مع السطح.

21 CIE Standard S014- 4/E: 2007, Colorimetry, part 4: CIE1976 L* a* b* Color space, 2007, pp. 1-8.

22 Francesca, P., Antonella, P., Alessandra, T., Mariateresa, L., Maurizio, M., Angela, C., Lucia, M. C & Roberto, C., TiO₂ Nanocrystal Based Coatings for the Protection of Architectural Stone: The Effect of Solvents in the Spray- Coating Application for a Self-Cleaning Surfaces, Coatings, 8/10: 356, 2018, 1- 23.

- المواد ذات القدرة العالية على طرد الماء *Ultra hydrophobic Materials*: وهي تلك المواد التي تتمتع أسطحها بقدرة كبيرة جداً على طرد الماء، وتكون زاوية إتصال الماء مع أسطح هذه المواد $< 120^\circ$.

- المواد ذات درجة الطرد القصوى للماء *Superhydrophobic Materials*: وهي تلك المواد التي تتمتع أسطحها بقدرة كبيرة جداً على طرد الماء، وتكون زاوية إتصال الماء مع أسطحها $< 150^\circ$ ، وتتميز أسطح هذه المواد بـ *Contact angel hystresis* $> 10^\circ$.^{24,23}

وقد تم تقييم قدرة مواد التقوية على طرد الماء من عدمه باستخدام جهاز *Drop master DM-701*، والذي يتم من خلاله حساب زاوية إتصال الماء على الأسطح بشكل الكتروني.

2. 14 تطبيق مواد التقوية *Application of consolidants*

تم تطبيق مواد التقوية السابق ذكرها على عينات الحجر الجيري التجريبية باستخدام الفرشاة، وذلك في صورة ثلاث دورات متتالية، على أن تطبق كل دورة قبل تمام جفاف العينات، وذلك للحصول على درجة التشبع الكامل بمواد التقوية، ثم تُركت العينات المعالجة في جو الغرفة لمدة شهر كامل لتجف تماماً وذلك وتكتمل عملية البلمره.

3. النتائج والمناقشة *Results and Discussion*

3. 1 تعيين خصائص الحجر الجيري الأثرى

Determination Properties of Limestone

تم تعيين خصائص الحجر الجيري الأثرى (الكثافة، و المسامية، وإمتصاص الماء، والضغط الميكانيكي)، من خلال تقييم هذه الخصائص لثلاث عينات من ثم حساب متوسط النتائج ليمثل النتيجة النهائية، كما هو موضح بالجدول رقم (2).

جدول رقم (2): يوضح خصائص الحجر الجيري الأثرى موضوع الدراسة.

متوسط النسب	الخصائص
2,61	الكثافة جم/سم ³
16,07	المسامية %
6,17	إمتصاص الماء %
167,23	الضغط الميكانيكي كجم/سم ²

23 حسن أحمد شحاتة، أساسيات الكيمياء العامة، الدار العربية للكتاب، 2006، ص 93 - 98.

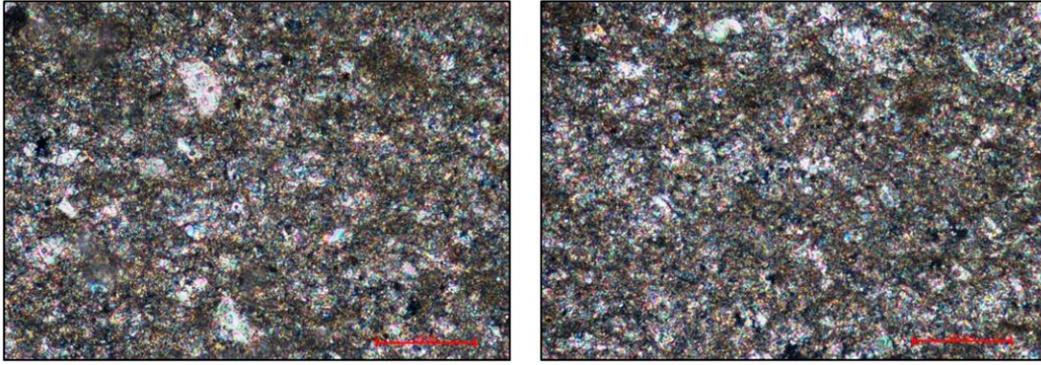
24 Torraca, G., Lectures on Materials Science for Architectural Conservation, the Getty Trust Conservation Institute, Paul Getty Trust, Los angeles, United States, 2009.

3. 2 الملاحظة البصرية Visual observation

تبين من خلال الفحص البصري للنقوش الجدارية موضوع الدراسة، أنها تعاني من تأثير العديد من مظاهر التلف، والتي أهمها تفكك الحبيبات المعدنية للحجر الجيري بما يعرف بظاهرة نزيف الحجر، وانتشار التشققات الدقيقة، والخدوش والرسم الجرافيتي نتيجة الأنشطة البشرية السلبية، وتقرش وانفصال وتساقط بعض الأجزاء السطحية من النقوش. فضلاً عن تزهق وتبلور الأملاح في بعض الأجزاء، وكذلك ترسيب طبقات داكنة من الرواسب والأترية نتيجة سقوط مياه الأمطار.

3. 3 الدراسة البتروجرافية Petrographic study

تفيد الدراسة البتروجرافية فى التعرف على التركيب المعدنى للعينات الحجرية من خلال دراسة بعض الخصائص البصرية للمعادن المكونة لها مثل التوأمية والانطفاء ومُعامل الإنكسار، وكذلك للتعرف على نسيج وحجم الحبيبات وعلى الحفريات إن وُجدت، وللكشف عن التلف الميكانيكى بالحبيبات المعدنية والمادة اللاحمة، مثل التآكل والفجوات والنقر الدقيقة والشروخ التى تحدث نتيجة الإجهادات الواقعة عليها.^{25، 26} هذا ومن خلال الفحص البتروجرافي بالميكروسكوب المستقطب لقطاعات الحجر الجيري المنفذ عليها النقوش الجدارية موضوع الدراسة، إتضح أنه حجر جيري يتكون من حبيبات متجانسة من الكالسيت دقيق التبلور (الميكريت) Micrite، وبعض هذا الميكريت تحول إلى micro sprite (5- 15 um) و sprite (>15um)، و تنتشر به جزيئات السليكا غير المتبلورة Amorphous Silica وأكاسيد الحديد بنسبة ضئيلة والعديد من المستحجرات البحرية (الأصداف) المليئة بالسليكا والميكريت. أنظر الصورة رقم (2).



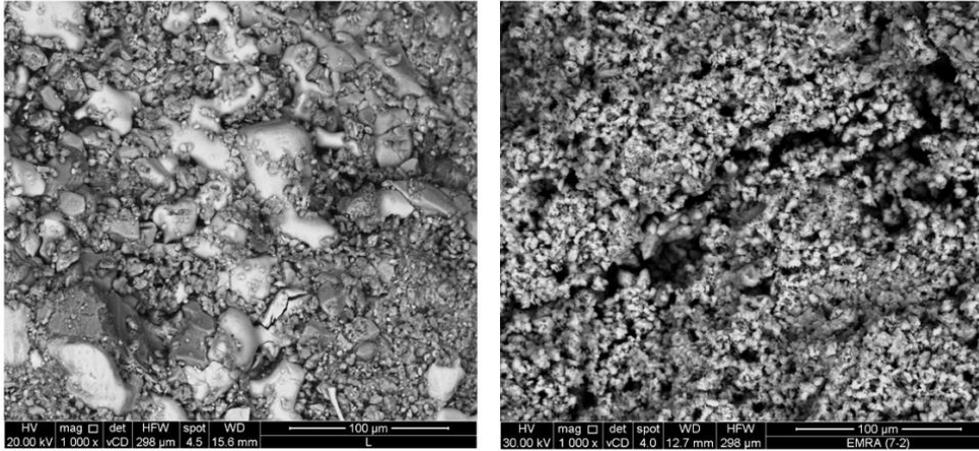
صورة رقم (2): توضح عينة الحجر الجيري تحت الميكروسكوب المستقطب.

25 Henderson. J., The Science and Archaeology of Materials, Rout lendge, London, Britian, 2000,p.11.

26 Helmi. F. M., Methodologies and Scientific investigation techniques for study treatment and conservation stone monuments, in collaboration with commission of European communities National research council of Italy Science and Technology committee for Cultural properties National techniques, University of Athenes, Second Course, Heraklion, Creat, Greec, 24-30 May, 1993, p. 133.

3. 4 الفحص المورفولوجي للعينات الأثرية Morphological study

تبين من خلال فحص عينات الحجر الجيري الأثرى موضوع الدراسة باستخدام الميكروسكوب الإلكتروني الماسح، أنه يتكون من حبيبات دقيقة ومتجانسة تعرضت بعضها للتشوه نتيجة الإجهادات المختلفة، مع ظهور الفجوات وإتساع المسام نتيجة فقد المادة الرابطة للحبيبات السطحية، و ظهور الأملاح المتبلورة بين الحبيبات، كما توضحها الصورة رقم (3).



صورة رقم (3): توضح عينة الحجر الجيري تحت الميكروسكوب الإلكتروني الماسح.

3. 5 الفحص بالميكروسكوب الرقمي Examination by USB Digital Microscope

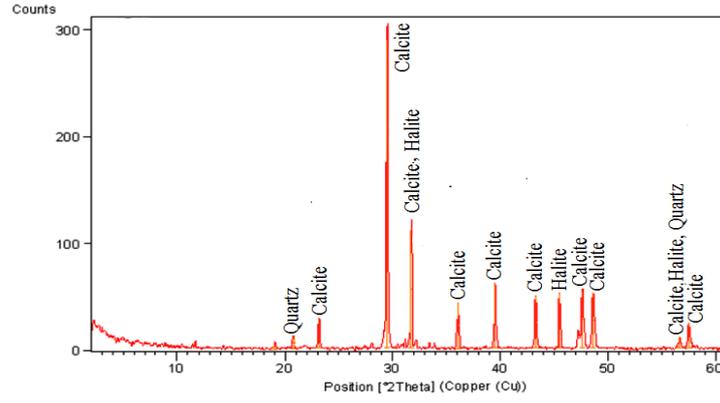
أظهر الفحص للجدار الخارجي لمقبرة "ميرروكا" أن الحجر الجيري المستخدم في بناءه به بقايا ترسيبات لكائنات بحرية (أصداف) كما يُعاني من تبلور الأملاح على هيئة طبقة كثيفة Hard crust، كما أنه تم رصد العديد من الأشكال البلورية لهذه الأملاح فمنها تأخذ الشكل الإبري والزغبي والقنبيطي أو في صورة تدهر ملحي. أنظر الصورة رقم (4).



صورة رقم (4): توضح أشكالاً بلورية مختلفة للأملاح المتبلورة على الأحجار الجيرية موضوع الدراسة.

3. 6 التحليل المعدني Mineralogical analysis

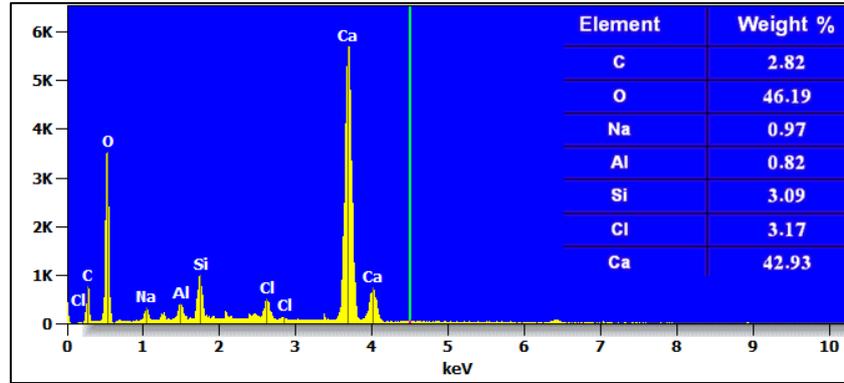
اتضح من خلال التحليل المعدني باستخدام الأشعة السينية للحجر الجيري موضوع الدراسة، أنه يتكون بشكل أساسي من كربونات الكالسيوم CaCO_3 (الكالسيت)، بالإضافة وجود ملح كلوريد الصوديوم (الهاليت) NaCl كأحد نواتج التلف، كما يتضح من الشكل رقم (1).



شكل رقم (1): يوضح نمط حيود الأشعة السينية للحجر الجيري موضوع الدراسة.

7.3 التحليل العنصري Elemental analysis

يتضح من نتائج التحليل العنصرى لعينة الحجر الجيري باستخدام وحدة تشتيت الطاقة المتصلة بالميكروسكوب الالكتروني الماسح كما هو موضح بالشكل (2)، أن العينة تتكون من عنصر الكربون C بنسبة 2.82%، والأكسجين O بنسبة 46.19%، والصوديوم Na بنسبة 0.97%، والألمنيوم Al بنسبة 0.82%، والسيليكون Si بنسبة 3.09%، والكلور Cl بنسبة 3.17%، والكالسيوم Ca بنسبة 42.93%. وهذا يؤكد نتائج التحليل بالأشعة السينية ويُدعم نتائج عمليات الفحص بالميكروسكوب المستقطب والميكروسكوب الإلكتروني الماسح والميكروسكوب الضوئى.

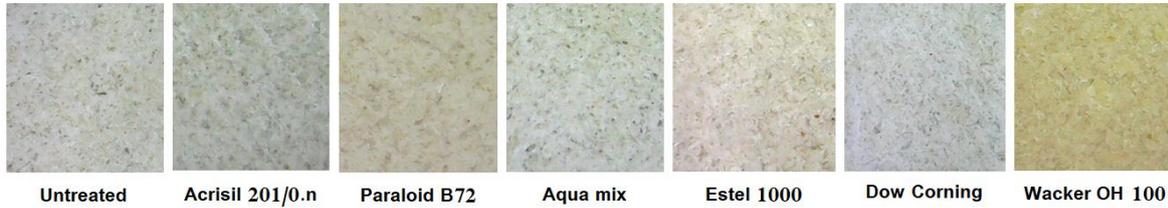


شكل رقم (2): يوضح نمط التحليل العنصرى بوحدة EDS للحجر الرملي موضوع الدراسة.

8.3 المظهر العام للعينات المعالجة General appearance

يجب أن تتوفر في مواد تقوية الآثار الحجرية خاصية هامة تُعد من أهم مبادئ علم ترميم وصيانة الآثار التي أقرتها المواثيق الدولية، وهي عدم تأثير مواد التقوية على المظهر العام للأسطح المُعالجة بها. هذا وقد تم تقييم تأثير مواد التقوية على المظهر العام للعينات التجريبية المُعالجة من خلال ملاحظة الفروق في الدرجات اللونية بين العينات المُعالجة وغير المُعالجة عن طريق الفحص البصرى *Visual examination*، وقياس التغير اللونى *Color alteration* للعينات المُعالجة.

هذا ومن خلال الفحص البصري لعينات الحجر الجيري المُعالجة في الدراسة التجريبية، تبين أن مواد التقوية قد أظهرت درجات مُتباينة في الحفاظ على المظهر العام للعينات المُعالجة بها، كما هو موضح بالصورة رقم (5)، والجدول رقم (3).



صور (5) توضح تأثير مواد التقوية على المظهر العام لعينات الحجر الجيري المُعالجة بها.

جدول رقم (3): يوضح تأثير مواد التقوية على المظهر العام لعينات الحجر الجيري المُعالجة.

م	مادة العلاج	التأثير على المظهر العام
1	Acrisil 201/0.n	تسببت في حدوث دكانة شديدة ولمعان للعينات المُعالجة.
2	Paraloid B 72 (3%)	تسببت في حدوث دكانة خفيفة للعينات المُعالجة.
3	Aqua mix	تميزت بعدم تأثيرها على لون العينات المُعالجة.
4	Estel 1000	تسببت في حدوث إصفرار خفيف للعينات المُعالجة.
5	Dow Corning	تميزت بعدم تأثيرها على لون العينات المُعالجة.
6	Wacker OH 100	تسببت في حدوث إصفرار شديد ودكانة للعينات المُعالجة.

وبقياس التغير اللوني للعينات الحجرية المُعالجة، تبين أن مادة *Aqua mix* قد أعطت أفضل النتائج، يليها مادة *Dow Corning*، ثم مادة *Estel 1000* حيث حققوا درجات تغير لوني < 5 . بينما تخطت مادة *Paraloid B72*، يليها مادة *Acrisil 201/0.n*، ثم مادة *Wacker OH 100* القيم الحدية لأعمال الحفظ والصيانة. تعد هذه النتائج متوافقة تماماً مع نتائج الفحص البصري. ويوضح الجدول رقم (4) درجات التغير اللوني للعينات المُعالجة.

جدول رقم (4): يوضح درجات التغير اللوني للعينات المُعالجة.

م	مادة العلاج	درجة التغير اللوني ΔE
1	Acrisil 201/0.n	9.47
2	Paraloid B 72 (3%)	8.49
3	Aqua mix penetrating sealer	1.95
4	Estel 1000	3.13
5	Dow Corning	2.25
6	Wacker OH 100	11.29

3.9 خاصية طرد الماء Hydrophobicity

يجب أن تتمتع المواد المُستخدمة فى تقوية المباني الأثرية خاصة المعرضة لبيئة خارجية بقدر عالية على مُقاومة التلف بالماء أو الرطوبة، فضلاً عن تمتعها بخاصية طرد الماء *Water repellent* ومنع نفاذه فى حالته السائلة، مع السماح بنفاذه فى حالته الغازية (بخار ماء). حيث يُعد الماء من مصادره المختلفة العامل الأساسى والمشارك فى معظم عمليات التلف التى تُصيب تلك النوعية الهامة من الآثار التى توصف بكونها مُحبة للماء.^{27، 28} وقد تم تقييم قدرة المواد المعالجة على طرد الماء بتنفيذ اختبار زاوية اتصال الماء على العينات المعالجة وغير المعالجة. وقد تبين أن المواد التى توصف بأنها *Ultrahydrophobic Materials* هى مادة *Dow Corning* حيث حققت زاوية إتصال قدرها ($139,5^\circ$)، ويرجع ذلك إلى احتواء هذا البوليمر على مجموعة الألكيل غير القطبية، والتي تكسبه خصائص طرد عالية للماء.²⁹ ثم مادة *Aqua mix* حيث حققت زاوية إتصال قدرها ($136,4^\circ$). بينما مادة *Acrisil 201/0*. تُعتبر من المواد *Hydrophobic Materials* حيث حققت زاوية إتصال قدرها ($112,4^\circ$). بينما المواد التى توصف بأنها *Hydrophilic Materials* هى مادة *Paraloid B7* والتي أعطت زاوية إتصال قدرها ($74,6^\circ$)، ثم مادة *Wacker OH 100* حققت زاوية إتصال قدرها ($29,6^\circ$)، ثم مادة *Estel 1000* حققت زاوية إتصال قدرها ($25,8^\circ$). كما هو موضح بالجدول رقم (5).

جدول رقم (5): يوضح زوايا اتصال الماء على أسطح العينات الحجرية المعالجة.

م	مادة العلاج	زاوية اتصال الماء (°)
1	Acrisil 201/0.n	112.4
2	Paraloid B 72 (3%)	74.6
3	Aqua mix penetrating sealer	136.4
4	Estel 1000	25.8
5	Dow Corning	139.5
6	Wacker OH 100	29.6

27 Maravelaki.P., Evaluation of silicon-based strengthening agents on porous limestone's Progress in Organic Coatings, Vol. 57, No. 2, , Oct. 2006, p. 140–148.

28 Hefni, Y., Hydrophobic zinc oxide nanocomposites for consolidation and protection of quartzite sculptures: a case study, Journal of Nano Research, 63, 2020.

29 Torraca, G., Lectures on materials science for architectural conservation, op.cit, 2009.

3. 10 تعيين الكثافة للعينات المعالجة Determination of Density

بقياس نسبة الكثافة للعينات التجريبية بعد التقوية، نجد أن جميع مواد التقوية المستخدمة في الدراسة التجريبية قد أحدثت زيادة في مُعدلات الكثافة للعينات الحجرية المُعالجة بها بنسب مُتفاوتة حسب نوع كل مادة. فقد حققت مادة *Paraloid B72* أفضل النتائج حيث بلغ متوسط نسبة الزيادة في كثافة العينات التجريبية المُعالجة بها (4,85%)، يليها مادة *M.T.M.O.S* حيث بلغ متوسط نسبة الزيادة في كثافة العينات التجريبية المُعالجة بها (4,27%)، تليها مادة *Estel 1100* حيث بلغ متوسط نسبة الزيادة في كثافة العينات التجريبية المُعالجة بها (1,80%)، تليها مادة *Acrisil 201/0.n* حيث بلغ متوسط نسبة الزيادة في كثافة العينات التجريبية المُعالجة بها (1,17%)، تليها مادة *Wacker OH 100* حيث بلغ متوسط نسبة الزيادة في كثافة العينات المُعالجة بها (1,11%)، تليها مادة *Aqua mix* حيث بلغ متوسط نسبة الزيادة في كثافة العينات التجريبية المُعالجة بها (0,39%). والجدول رقم (6) يوضح الكثافة ومتوسط نسب التغير في الكثافة للعينات التجريبية بعد عملية التقوية.

جدول (6) يوضح كثافة العينات التجريبية المعالجة ومتوسط مُعدلات التغير في نسبة الكثافة.

م	مادة العلاج	الكثافة جم/سم ³	متوسط التغير في نسبة الكثافة %
1	Acrisil 201/0.n	2,61	1,17
2	Paraloid B 72 (3%)	2,81	4,85
3	Aqua mix	2,57	0,39
4	Estel 1000	2,77	2,21
5	Dow Corning	2,68	4,27
6	Wacker OH 100	2,73	1,11

3. 11 تعيين نسبة المسامية وامتصاص الماء للعينات المعالجة

Determination of Porosity and Water absorption

بقياس نسبة المسامية وامتصاص الماء للعينات التجريبية بعد التقوية، نجد أن جميع مواد التقوية قد أدت إلى انخفاض نسبة المسامية وامتصاص الماء لعينات الحجر الجيري المُعالجة بنسب ودرجات متفاوتة حسب نوع مادة التقوية. فقد حققت مادة *Acrisil 201/0.n* أفضل النتائج حيث بلغ متوسط انخفاض نسبة المسامية للعينات المُعالجة بها (77,17%)، ومتوسط انخفاض نسبة امتصاص الماء (78,15%)، تليها مادة *M.T.M.O.S* حيث بلغ متوسط انخفاض نسبة المسامية للعينات المُعالجة بها (76,39%)، ومتوسط انخفاض نسبة امتصاص الماء (74,06%)، تليها مادة *Paraloid B72* حيث بلغ متوسط انخفاض نسبة المسامية للعينات المُعالجة بها (72,03%)، ومتوسط انخفاض نسبة امتصاص الماء (73,42%)، تليها مادة *Aqua mix* حيث

بلغت متوسط انخفاض نسبة المسامية للعينات المُعالَجة بها (29,76%)، ومتوسط انخفاض نسبة امتصاص الماء (29,29%)، تليها مادة *Estel 1000* حيث بلغ متوسط انخفاض نسبة المسامية للعينات المُعالَجة بها (17,85%)، ومتوسط انخفاض نسبة امتصاص الماء (19,61%)، تليها مادة *Wacker OH 100* حيث بلغ متوسط انخفاض نسبة المسامية للعينات المُعالَجة بها (14,49%)، ومتوسط انخفاض نسبة امتصاص الماء (15,62%). الجدول رقم (7) يوضح متوسط نسب التغيير فى مسامية وامتصاص العينات التجريبية بعد عملية التقوية.

جدول (7) يوضح نتائج متوسط معدل الانخفاض فى المسامية وامتصاص الماء للعينات المُعالَجة

م	مادة العلاج	متوسط تغير نسبة المسامية %	متوسط تغير نسبة امتصاص الماء %
1	Acrisil 201/0.n	77,17	78,15
2	Paraloid B 72 (3%)	72,03	73,42
3	Aqua mix	29,76	29,93
4	Estel 1000	17,85	19,61
5	Dow Corning	76,39	74,06
6	Wacker OH 100	14,49	15,62

3. 12 تعيين مقاومة الضغط الميكانيكى *Determination of Compressive Strength*

تم تعيين مقاومة الضغوط الميكانيكية لعينات الحجر الجيرى المعالجة وغير المعالجة، واتضح أن جميع مواد التقوية قد حسنت خاصية مقاومة الضغط الميكانيكى للعينات الحجرية المُعالَجة بنسب متفاوتة. حيث حقق بوليمر *Dow Corning* أعلى متوسط نسبة زيادة فى مقاومة الضغط الميكانيكى للعينات المُعالَجة به، ويرجع ذلك إلى أن هذا البوليمر يتمتع بدرجة لزوجة منخفضة *Low Viscosity* (أقل من لزوجة الماء) مما يجعله ذات قدرة على التغلغل *Penetration* بعمق داخل مسام الحجر، مما يسمح بتقوية أكبر جزء منه أمتداداً من اللب الداخلى للحجر حتى سطحه. فضلاً عن احتواء هذا البوليمر على شق غير عضوي له خصائص قطبية (جزئ السليكون -Si-O)، والذي يتحد مع مكونات الحجر الحاملة لمجموعات الهيدروكسيل مكوناً معها الروابط الهيدروجينية، وبالتالي يعمل على ربط الحبيبات ببعضها البعض.^{30، 31، 32، 33، 34، 35} يليها فى ذلك

30 Ferreira, A. Pinto, Delgado, J. Rodrigues., Stone Conservation, 2008.

31 George, W & Elizabeth, S. Goins., Alkoxysilanes and the Consolidation of Stone, 2005.

32 Marco, L. Marques & Carlos, C., Consolidation works on sandstone monuments, 2018.

33 Remzova, M, Zouzalka, R., Lukes, J & Rathousky, J., Potential of Advanced Consolidants for the Application on Sandstone, Applied Science, 2019, 9, 5252, 1-16.

34 ياسر كمال حفني، دراسة تقوية الآثار الحجرية الرملية باستخدام تكنولوجيا النانو، 2013.

35 أحمد إبراهيم أحمد، دراسة تأثير البيئة الصحراوية والزراعية فى ميكانيكية تلف الصور والنقوش، 2014.

مادة *Wacker OH 100* ثم مادة *Estel 1000*، ثم مادة *Acrisil 201/0.n* ، يليها مادة *Paraloid B 72 (3%)*. بينما حققت مادة *Aqua mix* أقل معدل لتحسين خاصية مقاومة الضغوط الميكانيكية للعينات المعالجة بها، لعل ذلك يرجع إلى أن هذه المادة ذات وسيط مائي. ويوضح الجدول رقم (8) نتائج مقاومة الضغط الميكانيكي للعينات غير المعالجة والعينات المعالجة بمواد التقوية المستخدمة في الدراسة.

جدول رقم (8): يوضح نتائج مقاومة الضغط الميكانيكي للعينات المعالجة وغير المعالجة.

م	مادة التقوية	مقاومة الضغط الميكانيكي كجم/سم ²	معدل الزيادة في نسبة الضغط الميكانيكي %
*	Untreated sample	170	-
1	Acrisil 201/0.n	187,16	10,09
2	Paraloid B 72 (3%)	182,29	7,23
3	Aqua mix penetrating sealer	172,73	1,61
4	Estel 1000	213,14	25,38
5	Dow Corning	234,33	37,84
6	Wacker OH 100	228,48	34,4

3. 13 تعيين مقاومة البرى Determination of abrasion resistance

بقياس مقاومة البرى للعينات المُعالجة نجد أن مواد التقوية قد حسنت هذه الخاصية بنسب مختلفة حيث نجد أن مادة *Dow Corning* قد حققت أعلى زيادة في نسبة مقاومة البرى للعينات التجريبية بلغ 18,18%، بينما جاء بالمرتبة الثانية مادة *Estel 1000*، *Wacker OH 100* حيث بلغ نسبة الزيادة في مقاومة البرى للعينات التجريبية المُعالجة بهذه المواد 13,64%، وبلغ متوسط نسبة زيادة مقاومة البرى للعينات المُعالجة بمادة *Acrisil 201/0.n* ، *Paraloid B72* ، 9,09%، بينما بلغ نسبة زيادة مقاومة البرى للعينات المُعالجة بمادة *Nano Estel* ، *Aqua mix* ، 4,55%، كما هو موضح بالجدول رقم (9).

جدول رقم (9): يوضح نتائج مقاومة البرى للعينات المعالجة وغير المعالجة.

م	مادة التقوية	مقاومة البرى مم	نسبة التغير فى مقاومة البرى %
*	Untreated sample	22	-
1	Acrisil 201/0.n	20	9,09
2	Paraloid B 72 (3%)	20	9,09
3	Aqua mix penetrating sealer	21	4,55
4	Estel 1000	19	13,64
5	Dow Corning	18	18,18
6	Wacker OH 100	19	13,64

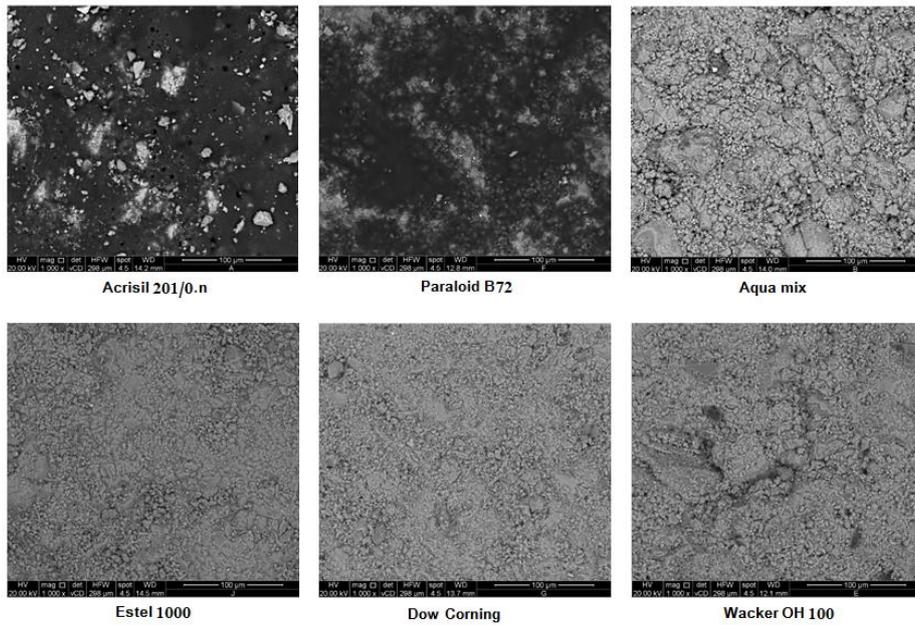
3. 14 التقييم المورفولوجي للعينات المعالجة Morphological assessment

من خلال الفحص باستخدام (S.E.M) لعينات الحجر الجيرى المُعالجة بمواد التقوية المختلفة، إتضح أن مادتي *Dow Corning* و *Estel 1000*، حققا أفضل النتائج، حيث أظهر الفحص الانتشار الجيد لهذه المواد وتغليف الحبيبات والربط الجيد بينها خاصةً الحبيبات الصغيرة بينما الربط بين الحبيبات الكبيرة بصورة متوسطة، وملئها للمسام دون غلقها. وجاء فى المرتبة الثانية مادتي *Aqua mix* و *Wacker OH 100*، حيث أظهر الفحص عدم قدرة المادتين على تغليف الحبيبات الكبيرة وملئ المسام غير الدقيقة. وفى المرتبة الثالثة مادة *Paraloid B72*، حيث أظهر الفحص الانتشار غير المتجانس لمادة التقوية وتجمعها بصورة كثيفة فى بعض الأجزاء وغلقها للمسام فى أماكن تجمعها. وفى المرتبة الأخيرة مادة *Acrisil 201/0*، حيث تظهر المادة منتشرة فى صورة فلم كثيف يغلق المسام ولعل ذلك راجع لاستخدام مادة التقوية بدون تخفيف. هذا وقد تكون النسب المنخفضة من المسامية وامتصاص الماء للعينات التجريبية المعالجة بمادتي *Paraloid B72* و *Acrisil 201/0* يرجع إلى أن هذه البوليمرات تسببت فى غلق مسام العينات المعالجة، وتعد هذه الخاصية من أخطر خصائص المواد الإكريليكية حتى مع التركيزات المنخفضة.^{36، 37}

وتوضح الصورة رقم (6) نتائج الفحص بالميكروسكوب الالكتروني الماسح للعينات المعالجة.

36 Jiří Brus and Petr Kotlík., Consolidation of Stone by Mixtures of Alkoxysilane and Acrylic Polymer, Studies in Conservation, Vol. 41, No. 2, 1996, pp. 109-119.

37 Saleh. A. S, Helmi. F. M, Kamal. M. M and El-Banna. A., Study and Consolidation of Sandstone: Temple of Karnak, Luxor, Egypt, Studies in Conservation, Vol. 37, No. 2, 1992, pp. 93-104.



صورة رقم (6): توضح نتائج فحص العينات المعالجة باستخدام الميكروسكوب الإلكتروني الماسح.

4. الخلاصة Conclusion

أثبتت الدراسة بطرق الفحص والتحليل المختلفة أن النقوش الجدارية المنفذة على الحجر الجيري بجدار مدخل مقبرة "ميرروكا" مصابة بالعديد من مظاهر التلف، مثل ضعف البنية الداخلية، والتفتت الحبيبي وإنفصال الطبقات السحية، وتبلور الأملاح، و انتشار الشروخ الدقيقة، مما يساهم في استمرار تدهور حالة الأثر. وقد أجريت الدراسة التجريبية بهذا البحث من أجل التعرف على مدى فاعلية بعض البوليمرات في تقوية وحماية النقوش الجدارية موضوع الدراسة. وقد تبين من نتائج الدراسة التجريبية أن بوليمر *Dow Corning* المكون من الميثيل تري ميثوكسي سيلان، حقق أفضل النتائج من حيث الحفاظ على المظهر العام للعينات المعالجة، وتحسين الخصائص الميكانيكية (مقاومة الضغط الميكانيكي، ومقاومة البرى)، فضلاً عن تحسين الخصائص الفيزيائية كالمسامية وامتصاص الماء، مما يجعلها أكثر مواد التقوية المستخدمة في هذه الدراسة على قادرة على تقوية وحماية الأحجار الجيرية. وأوضحت الدراسة أن بوليمرات *Paraloid B72* و *Acrisil 201/0* فشلت في الحفاظ على المظهر العام للعينات التجريبية، فضلاً عن إخفاقها في الانتشار الجيد بين الحبيبات تاركة فلم سطحى أدى إلى غلق المسام. بينما بوليمر *Wacker OH 100* و *Estel 1000* حسن كل منها الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للعينات التجريبية إلا أنها مواد لا تتمتع بخاصية طرد الماء، كما أن *Wacker OH 100* أخفق في الحفاظ على المظهر العام للعينات المعالجة. هذا وقد احتل بوليمر *Aqua mix* المرتبة الأولى من حيث الحفاظ على المظهر العام للعينات المعالجة، والمرتبة الأخيرة من حيث تحسين الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للعينات المعالجة.

قائمة المراجع

1. أحمد إبراهيم أحمد إبراهيم منسى ، دراسة تأثير البيئة الصحراوية والزراعية فى ميكانيكية تلف الصور والنقوش الجدارية مع العلاج والصيانة تطبيقاً على أحد النماذج المختارة، رسالة ماجستير، قسم الترميم، كلية الآثار، جامعة القاهرة، 2014.
2. أحمد إبراهيم أحمد إبراهيم منسى، دراسة علمية لعلاج وصيانة الصور الجدارية المنفذة بتقنية الرسم على الحامل والتلوين على الشيد، مع التطبيق العملى على نموذج مختار، رسالة دكتوراه، قسم الترميم، كلية الآثار، جامعة القاهرة، 2017.
3. أحمد عطية، مبادئ الجيولوجيا للأثاريين، الدار العالمية للنشر والتوزيع، 2004.
4. حاتم جميل قناوى، الترميم المعماري والدقيق للأسوار الحجرية الأثرية تطبيقاً على سور مجموعة الهرم المدرج بسقارة، رسالة ماجستير، قسم الترميم، كلية الآثار، جامعة القاهرة، 2003.
5. حسن أحمد شحاتة، أساسيات الكيمياء العامة، الدار العربية للكتاب، 2006.
6. سليم حسن، مصر القديمة، الجزء الثانى، الهيئة المصرية العامة للكتاب، 2001.
7. عبد الحميد عبد الحميد السيد الكفافي، دراسات علمية تجريبية وتطبيقية فى علاج وصيانة الأحجار الجيرية فى بعض المباني الأثرية من التلف الميكروبيولوجى، رسالة ماجستير، قسم الترميم، كلية الآثار، جامعة القاهرة، 2006.
8. عماد عوجة، الحلول المعمارية المعالجة للظواهر المناخية بعمارة القاهرة منذ نشأتها وحتى نهاية العصر العثمانى، رسالة دكتوراه، كلية الآثار، جامعة القاهرة، 2009.
9. كريستيان ديروش نوبلكور، ترجمة: محمود خليل النحاس، أحمد محمد رضا، الفن المصرى القديم، 1990.
10. محمد سميح عافية، التعدين فى مصر قديماً وحديثاً، الهيئة المصرية العامة للكتاب، 1985.
11. ياسر كمال حفني، دراسة تقوية الآثار الحجرية الرملية باستخدام تكنولوجيا النانو تطبيقاً على نموذج مختار، رسالة ماجستير، قسم الترميم، كلية الآثار، جامعة القاهرة، 2013.

المراجع الأجنبية:

12. Allen N.S., Edge. M, Horie. C.V., Polymers in conservation, Cambridge, The Royal Society of Chemistry, 1992.
13. CIE Standard S014- 4/E: 2007, Colorimetry, part 4: CIE1976 L* a* b* Color space, 2007.
14. Constanio, C., Franco, L., Russo, A., Anjinho, C., Pires, J., Fatima, M., Carvalho, P. A., Studies on Polymeric Conservation Treatments of Ceramic tiles with Paraloid B-72 and two Alkoxysilanes, Journal of Applied Polymer Science, Vol.116, 2010.
15. Daressy, G., Le Mastaba de Mera in Mémoires présentés à l'Institut Égyptien, vol. 3, Cairo, 1898.
16. Essam. A., The Treasure of Saqqara, Djoser Pyramid, pyramids, Tombs and The Extremely rare and most important scenes of The Daily life in Ancient Egypt, 2011.
17. Ferreira, A. Pinto, Delgado, J. Rodrigues., Stone Conservation: The Role of Treatment Procedures, Journal of Cultural Heritage 9, 2008.
18. Francesca, P., Antonella, P., Alessandra, T., Mariateresa, L., Maurizio, M., Angela, C., Lucia, M. C & Roberto, C., TiO₂ Nanocrystal Based Coatings for the Protection of Architectural Stone: The Effect of Solvents in the Spray- Coating Application for a Self-Cleaning Surfaces, Coatings, 8/10: 356, 2018.
19. George, W & Elizabeth, S. Goins.: «Alkoxysilanes and the Consolidation of Stone», Research in Conservation, The Getty Conservation Institute, 2005.

20. Hefni, Y., Hydrophobic zinc oxide nanocomposites for consolidation and protection of quartzite sculptures: a case study, *Journal of Nano Research*, 63, 2020.
21. Helmi. F. M., Methodologies and Scientific investigation techniques for study treatment and conservation stone monuments, in collaboration with commission of European communities National research council of Italy Science and Technology committee for Cultural properties National techniques, University of Athenes, Second Course, Heraklion, Creat, Greec, 24-30 May, 1993.
22. Henderson. J., *The Science and Archaeology of Materials*, Rout lendge, London, Britian, 2000.
23. Jiří Brus and Petr Kotlík., Consolidation of Stone by Mixtures of Alkoxysilane and Acrylic Polymer, *Studies in Conservation*, Vol. 41, No. 2, 1996.
24. Kanawate. N., Report on the archaeological fieldwork of the Australian Egyptian expedition in the Tomb of Mereruka in the Teti Cemetery at Saqqara, 2008.
25. Lauer. J., *The Royal Cemetery of Memphis, Excavation and discovers since 1830*, London, 1976.
26. Manoudis, P., et al., Surface properties of superhydrophobic coatings for stone protection, *Journal of Nano Research*, 8, 2009.
27. Maravelaki.P., Evaluation of silicon-based strengthening agents on porous limestone's *Progress in Organic Coatings*, Vol. 57, No. 2, , Oct. 2006.
28. Marco, L. Marques & Carlos, C., Consolidation works on sandstone monuments: A new approach, *Handbook of Materials Failure Analysis*, 2018.
29. P. Maravelaki-Kalaitzaki., N. Kallithrakas-Kontos., Z. Agioutantis., S. Maurigiannakis., D. Korakaki., Comparative study of porous limestones treated with silicon-based strengthening agents, *Progress in Organic Coatings*, Vol. 62, Issue 1, 2008.
30. Porter B. and Moss R. L. B., *Topographical Bibliography of Ancient Egyptian Hieroglyphic Texts, Reliefs, and Paintings, III2. Memphis*, Griffith Institute Ashmolean Museum, Oxford, 1978.
31. Remzova, M, Zouzelka, R., Lukes, J & Rathousky, J., Potential of Advanced Consolidants for the Application on Sandstone, *Applied Science*, 2019, 9.
32. Saleh. A. S, Helmi. F. M, Kamal. M. M and El-Banna. A., Study and Consolidation of Sandstone: Temple of Karnak, Luxor, Egypt, *Studies in Conservation*, Vol. 37, No. 2, 1992.
33. Striegel. M. F., Guin. E. B., Hallett .K., Sandoval. D., Swingle. R., Knox. K., Best. F., Fornea. S., "Air pollution, coatings, and cultural resources" progress in organic coatings 48, 2003.
34. Tabasso. M. L., conservation treatments of stone, notes from international Venetian courses on stone restoration, 1988.
35. Torraca, G., *Lectures on materials science for architectural conservation*, Los Angeles, The Getty Conservation Institute, 2009.
36. Yong, M., Robert, G., *Sandstone consolidates and water repellents*, The building Researches Establishment, Scotland. ([http/ www.rgu.ac.uk](http://www.rgu.ac.uk)), 1992.