

تقييم فاعلية المركبات النانوية في تقوية اللوحات الحجرية الرملية بمعبد سي تي الأول بالقرنة

| Received April 13th 2023 | Accepted May 28th 2023 | Available online June 16th 2023 |
| DOI 10.21608/jatmust.2023.303824 |

الملخص

تحتوي مصر على العديد من المنحوتات الحجرية الرملية، والتي تحمل في طياتها قيم تاريخية وفنية وحضارية غاية في الأهمية، وبالتالي يجب الحفاظ عليها أطول فترة ممكنة. ويتعلق موضوع هذا البحث ببعض اللوحات الحجرية الرملية الموجودة بمعبد سي تي الأول بالقرنة، والتي تعاني من العديد من مظاهر التلف وتحتاج إلى عمليات تقوية وحماية لاستمرار بقائها بما تحمله من نقوش وكتابات هامة. ويقدم هذا البحث دراسة تجريبية لتقوية وحماية اللوحات الحجرية موضوع الدراسة. وقد تم دراسة الحجر الرمل في موضوع الدراسة، بالميكروسكوب المستقطب وحيود الأشعة السينية والميكروسكوب الإلكتروني الماسح المزود بوحدة تشتيت الطاقة. وقد نُفذت الدراسة التجريبية في هذا البحث على مجموعة من البوليمرات الفردية والمركبات النانوية لتقييم فاعليتها في تقوية وحماية اللوحات الحجرية الرملية. وقد تم تقييم العينات المعالجة عن طريق قياس التغير اللوني وتعيين زاويا اتصال الماء وقياس مقاومة الضغوط الميكانيكية والفحص بالميكروسكوب الإلكتروني الماسح. وقد أوضحت النتائج أن المركبات النانوية المستخدمة تمتلك خصائص متميزة عن البوليمرات الفردية المستخدمة.

الكلمات الدالة:

المركبات النانوية؛ الأحجار الرملية؛ اللوحات الحجرية، التقوية، الحماية؛ مواد النانو.

ياسر كمال حفني

أستاذ مساعد ترميم وصيانة الآثار

كلية الآثار والإرشاد السياحي

جامعة مصر للعلوم والتكنولوجيا

6 أكتوبر، مصر

Yasser.kamal@must.edu.eg

أحمد إبراهيم منسي

مدرس ترميم وصيانة الآثار

كلية الآثار والإرشاد السياحي

جامعة مصر للعلوم والتكنولوجيا

6 أكتوبر، مصر

Ahmed.ibrahim@must.edu.eg



EVALUATING THE EFFICIENCY OF NANOCOMPOSITES FOR CONSOLIDATION OF THE SANDSTONE STELAE IN THE TEMPLE OF SETI I AT QURNA

| Received April 13th 2023 | Accepted May 28th 2023 | Available online June 16th 2023 |
 | DOI 10.21608/jatmust.2023.303824 |

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

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

ABSTRACT

Stone sculptures and monuments are considered to be tangible evidence of the great progress achieved by the ancient Egyptian civilization in the fields of architecture and arts. They also represent important sources for knowledge and writing of history. Egypt contains many sandstone carvings, which carry very important historical, artistic and cultural values, and therefore must be preserved for the longest time. This research is related to some sandstone stelae located in the temple of Seti I at Qurna, which suffer from many damage aspects and need to be consolidated and protected to maintain their continuity, including important inscriptions and writings. The analytical study of the studied sandstone 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 individual polymers and nanocomposites to evaluate their efficacy in the consolidation and protection of the sandstone stelae. The experimental works were carried out including color alteration test, static water contact angle, compressive strength, and morphological examination. The results showed that the used nanocomposites possess distinct properties from the individual polymers.

KEYWORDS:

Nanocomposites; Sandstones; Stone Stelae; Consolidation; Protection; Nanomaterials.

مقدمة:

تعتبر الآثار والمنحوتات الحجرية من أهم الشواهد الأثرية والدلائل المادية على التقدم الكبير الذي وصلت إليه الحضارة المصرية القديمة في مجالات العمارة والفنون. كما أنها تمثل مصدر أساسي من مصادر دراسة وكتابة التاريخ المصري القديم. ولقد اعتبر كثير من المؤرخين والعلماء، أن الخبرة الكبيرة التي اتسم بها المصري القديم في عمليات اقتلاع الأحجار من محاجرها واستخدامها في مجالات النحت والتشييد؛ ساهمت بدرجة كبيرة في الحفاظ على معالم الحضارة المصرية القديمة حتى الآن.¹

ولا شك أن الأحجار الرملية تمثل نوعية من أهم نوعيات الأحجار التي استخدمها المصري القديم في مجالات العمارة والفنون، حيث استخدمت الأحجار الرملية جنباً إلى جنب مع الأحجار الجيرية في تشييد العمائر والمعابد والمقابر المصرية القديمة، وأيضاً في نحت التماثيل والمنحوتات المختلفة الأخرى. ومنذ عصر الأسرة الثامنة عشرة، شاع استخدام الأحجار الرملية بدلاً من الأحجار الجيرية، في نحت التماثيل المختلفة، وفي إقامة أضخم وأروع المعابد المصرية القديمة، والتي لا زالت باقية حتى الآن، ممثلة حلقة هامة من حلقات التطور الحضاري التي حققها المصري القديم في المجالات المختلفة، والتي يجب الحفاظ عليها بما تحمله من معالم وقيم تاريخية وفنية وجمالية وحضارية، بل وأيضاً قيم دينية وسياسية يمكن من خلالها استقراء ودراسة تاريخ وحضارة المصري القديم.²

هذا ويعتبر معبد سيتي الأول القائم حالياً بقرية القرنة بالبر الغربي للنيل بمدينة الأقصر، واحد من أهم معابد الأسرة التاسعة عشرة المشيدة من الحجر الرملي والمزينة بمجموعة من أجمل وأروع النقوش والصور الجدارية. وقد بدأ الملك "سيتي الأول" بناء هذا المعبد تكريماً لتالوث طيبة المقدس (آمون، موت وخونسو) وليكون معبداً جنازياً لوالده "رمسيس الأول" ولكنه لم يكتمل في عهده. وبعد وفاة الملك "سيتي الأول" قام ابنه الملك "رمسيس الثاني" باستكمال بناء المعبد تخليداً لذكرى والده.^{3,4} ويعتبر هذا المعبد أول معابد الأسرة التاسعة عشر في طيبة الغربية. هذا ويوجد بفناء المعبد، خلف بقايا الصرح مجموعة من اللوحات الحجرية الرملية المنقوشة برسومات وكتابات غاية في الروعة والجمال. وللأسف فإن هذه اللوحات الحجرية تعاني بدرجة كبيرة من تأثير عوامل التلف المختلفة (المتعلقة بالبيئة الزراعية الصحراوية التي يوجد بها المعبد).⁵ هذا وتمثل الرطوبة بمصادرها المختلفة السبب الأساسي لعمليات التلف التي تحدث لهذه اللوحات الحجرية الرملية،

1. محمد عبد الهادي، دراسات علمية في ترميم وصيانة الآثار غير العضوية، 1997.

2. Lucas, A., *Ancient Egyptian materials and industries*, Kessinger Publishing, Third Edition, 2003.

3. سليم حسن، عصر رمسيس الثاني وقيام الأباطورية الثانية، 2001، ص 115.

4. Richard H. Wilkinson, *The complete Temples of Ancient Egypt*, 2000, P.173.

5. أحمد إبراهيم أحمد، دراسة تأثير البيئة الصحراوية والزراعية في ميكانيكية تلف الصور والنقوش الجدارية، رسالة ماجستير، 2014.

حيث أنها بالإضافة إلى أدوارها المباشرة في عمليات التلف، فهي تعمل على تحفيز وتنشيط عوامل التلف الأخرى، مما أدى في النهاية إلى إصابة اللوحات الحجرية بالكثير من مظاهر التلف مثل التفتت الحبيبي والتقشر والتشريح وتبلور الأملاح ونمو الكائنات الحية الدقيقة.^{6,7,8} انظر الصورة رقم (1).



صورة رقم (1): توضح حالة اللوحات الحجرية موضوع الدراسة.

ومن هذا المنطلق، ومن أجل الحفاظ على هذه اللوحات الحجرية أطول فترة ممكنة، فلا بد من علاجها باستخدام مواد مناسبة لها القدرة على تقوية بنيتها الداخلية وربط حبيباتها المعدنية، فضلاً عن تقوية طبقاتها السطحية المفككة، وتحسين خصائصها الفيزيوكيميائية والميكانيكية، وفي نفس الوقت حمايتها وزيادة قدرتها على مقاومة عوامل التلف المختلفة وخاصة تأثير الرطوبة. هذا وقد حققت مواد النانو طفرة كبيرة وغير مسبوقة في تحسين خصائص المواد المستخدمة في عمليات التقوية والحماية للأحجار الأثرية.^{9,10,11,12}

ويهدف هذا البحث إلى تقييم فاعلية مجموعة من البوليمرات الفردية والمركبات النانوية في تقوية وحماية الأحجار الرملية التجريبية، وذلك للمقارنة فيما بينها والتعرف على أفضلها وأكثرها قدرة على تقوية وحماية اللوحات الحجرية الرملية موضوع الدراسة.

6. Amoroso, G., and Fassina, V., *Stone decay and conservation, Atmospheric Pollution, Cleaning, Consolidation and Protection*, Elsevier, New York, 1983.
7. Fitzner, B, et al., *Weathering damage on Pharaonic sandstone monuments in Luxor-Egypt, Building and Environment*, Vol. 38, 2003.
8. El-Gohary, M., Effective Roles of some deterioration agents affecting Edfu royal birth house "Mammisi", *International Journal of Conservation Science*, 6 (3), 2015.
9. D,ariento, L, et al., *New polymeric nanocomposites for improving the protective and consolidating efficiency of tuff stone*, *Journal of Cultural Heritage*, 9, 2008.
10. Manoudis, P., et al., *Surface properties of superhydrophobic coatings for stone protection*, *Journal of Nano Research*, 8, 2009.
11. Helmi, F. M, and Hefni, Y. K., *Nanocomposites for the protection of granitic obelisks at Tanis, Egypt*, *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 16 (2), 2016.
12. Helmi, F. M, and Hefni, Y. K., *Using nanocomposites in the consolidation and protection of sandstone*, *International Journal of Conservation Science*, Vol. 7, 2016.

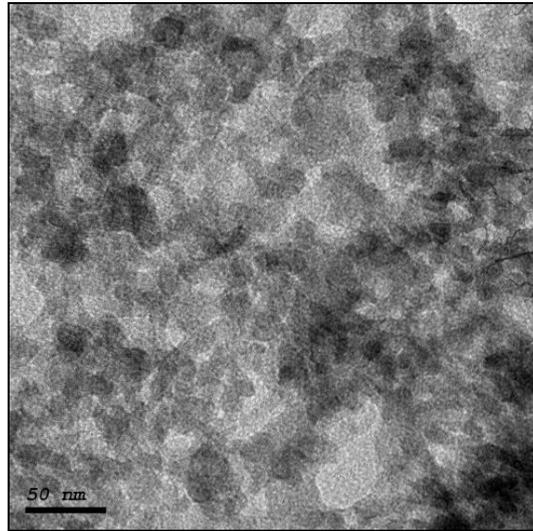
2. المواد والطرق المستخدمة في الدراسة Materials and Methods

2.1 عينات الحجر الرملي Sandstone Samples

تم تجميع بعض كسر وفتات الحجر الرملي التالفة الساقطة من اللوحات الحجرية أو المتناثرة بالقرب من موقع المعبد، وذلك لاستخدامها في تنفيذ الدراسة التحليلية الخاصة بالدراسة. كما روعي في اختيار عينات الحجر الرملي التجريبية أن تكون مماثلة بقدر الإمكان لمكونات الحجر الرملي المنحوتة منه اللوحات المختارة. واعتماداً على نتائج عمليات الفحص والتحليل التي أجريت على الحجر الرملي موضوع الدراسة، فقد تم تجميع مجموعة من الكتل الأحجار الرملية من محاجر الحجر الرملي، بحيث تتشابه في خصائصها إلى حد كبير مع خصائص الحجر الرملي المنحوتة منه اللوحات، وذلك من حيث التركيب والشكل والنسيج. وبعد اختيار وانتقاء كتل الحجر الرملي، فقد تم تقطيعها في صورة مكعبات منتظمة الشكل بأبعاد $5 \times 5 \times 5$ سم³، $3 \times 3 \times 3$ سم³، $1 \times 3 \times 3$ سم³.

2.2 مواد التقوية المستخدمة The Used Consolidants

تشتمل مواد التقوية المستخدمة في هذه الدراسة على ست مواد، منها ثلاثة بوليمرات فردية، وثلاثة مركبات نانوية. وتتمثل البوليمرات الفردية في مادة ميثيل ترائي ميثوكسي سيلان، ومادة كيم تكت ومادة بارالويد ب 72. وقد تم تحضير المركبات النانوية المستخدمة في الدراسة بتشتيت حبيبات ثاني أكسيد السليكون النانوية في البوليمرات الثلاثة السابق ذكرها بنسبة 1 % وزن/حجم. وقد تم التأكد من حبيبات السليكا النانوية بفحصها باستخدام الميكروسكوب الإلكتروني النافذ، حيث تبين أن أبعادها أقل من 50 نانومتر، كما يتضح بالصورة رقم (2). وقد تم تشتيت حبيبات السليكا النانوية في البوليمرات المذكورة باستخدام جهاز الموجات فوق الصوتية *Ultrasonicator*. ويوضح الجدول رقم (1) البوليمرات الفردية والمركبات النانوية المستخدمة في الدراسة.



صورة رقم (2): توضح حبيبات السليكا النانوية تحت الميكروسكوب الإلكتروني النافذ.

جدول رقم (1): يوضح البوليمرات الفردية والمركبات النانوية المستخدمة في الدراسة.

Polymer	Symbol
Methyltrimethoxysilane	A
Kimtekt	B
Paraloid B 72 (5%)	C
Methyltrimethoxysilane + SiO ₂ NPs	D
Kimtekt + SiO ₂ NPs	E
Paraloid B 72 (5%) + SiO ₂ NPs	F

2.3 الفحص البصري Visual Examination

تعد عملية الفحص البصري أولى مراحل الفحص وأبسطها، وأقلها تكلفة. وتستخدم هذه الطريقة في التعرف المبدئي على مادة الأثر، ومظاهر التلف الموجودة به، إلا أنها تعتمد بشكل كبير على الخبرة والمران الطويل في هذا المجال. هذا وقد تم الاستعانة أثناء تنفيذ عمليات الفحص البصري للوحات موضوع الدراسة، وكذلك نواتج التلف الموجودة بها، بمجموعة من العدسات المكبرة والتي أمكن من خلالها رؤية بعض التفاصيل والمكونات الصغيرة، مما أعطى انطباعاً مبدئياً عن نوعية الحجر الرملي المستخدم في نحت هذه اللوحات، وكذلك نواتج التلف الموجودة به.

2.4 الفحص باستخدام الميكروسكوب المستقطب Polarizing microscope

استخدم الميكروسكوب المستقطب ماركة *Nikon eclipse LV100POL*، في دراسة الخصائص البتروجرافية لعينة الحجر الرملي موضوع الدراسة.

2.5 الفحص بالميكروسكوب الإلكتروني الماسح Scanning electron microscope

استخدم الميكروسكوب الإلكتروني الماسح ماركة *Inspect S* (بالمركز القومي لبحوث الإسكان والبناء) في دراسة وفحص التركيب المورفولوجي لعينات الحجر الرملي موضوع الدراسة، وكذلك لمعرفة مدى التلف الذي يعثرها نتيجة تعرضها للضغوط الميكانيكية والتحولت المعدنية المختلفة. كما استخدم الميكروسكوب الإلكتروني الماسح في دراسة الخصائص المورفولوجية للعينات الحجرية الرملية قبل وبعد العلاج، وذلك للمقارنة بين البوليمرات والمركبات النانوية المستخدمة في الدراسة التجريبية، للتعرف على أفضلها وأكثرها قدرة على تقوية وحماية عينات الحجر الرملي موضوع الدراسة.

2.6 التحليل بطريقة حيود الأشعة السينية X-ray diffraction

تم استخدام هذه الطريقة في التعرف على المعادن المكونة للحجر الرملي موضوع الدراسة، ومظاهر التلف الموجودة به، وذلك باستخدام جهاز التسجيل الآلي الـديفراكتوميتر

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.

2.7 التحليل باستخدام وحدة تشتت الطاقة Analysis using EDS unit

يتميز الميكروسكوب الإلكتروني الماسح باحتوائه على وحدة تشتت للطاقة *Energy Dispersive X-Ray Spectrometer*، يمكن استخدامها في عمل تحليل عنصري كيميائي وكمي للعناصر الموجودة بالعينات التي يتم فحصها. ولقد تم إجراء هذا التحليل (بمركز بحوث الإسكان والبناء) للتعرف بدقة على العناصر المكونة لعينات الحجر الرملي ومظاهر التلف الموجودة بها.

2.8 تطبيق مواد التقوية Application of consolidants

تم تطبيق مواد التقوية السابق ذكرها على عينات الحجر الرملي 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 تركت العينات المعالجة في جو الغرفة لمدة أربع أسابيع لتجف تماماً ولإتاحة الفرصة لإتمام عملية البلمرة. وبعد مرور أربعة أسابيع على معالجة العينات بمواد التقوية، تم تسجيل أوزان العينات المعالجة، حيث لوحظ أنه هناك تفاوت بسيط في نسب المادة الصلبة المتبقية بالعينات المعالجة. أنظر الجدول رقم (2).

جدول رقم (2): يوضح نسب المادة الصلبة المتبقية في عينات الحجر الرملي المعالجة.

م	مادة العلاج	نسبة المادة الصلبة المتبقية
1	Methyltrimethoxysilane	3.42 %
2	Kimtekt	1.93 %
3	Paraloid B 72	0.86 %
4	Methyltrimethoxysilane + SiO ₂ NPs	4.12 %
5	Kimtekt + SiO ₂ NPs	3.55 %
6	Paraloid B 72 + SiO ₂ NPs	1.73 %

2.9 قياس التغير اللوني Colorimetric measurement

تم تحديد درجة التغير اللوني للعينات المعالجة باستخدام جهاز قياس التغير اللوني ماركة *Spectrophotometer Optimatch 3100* من شركة *SDL*، طبقاً للنظام الدولي

خلاله قياس التغير اللوني طبقاً للمعادلة التالية :-
Commission Internationale de L'eclairage والمعروف بـ *CIELAB*، والذي يتم من

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

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

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

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

حيث أن:

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

(L^*): تعبر عن درجة السطوع، وتدرج 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 -).

2.10 قياس زاوية اتصال الماء *Water contact angle*

تم تقييم مدى قابلية الأسطح للتأثر بالماء عن طريق قياس زاوية اتصال قطرات الماء مع السطح، وكلما قلت قيمة هذه الزاوية عن 90°، كلما كان سطح المادة محباً للماء وجاذباً له، وعلى النقيض فكلما زادت قيمة هذه الزاوية عن 90°، كلما كان سطح المادة كارهاً للماء وطارداً له. وقد تم تنفيذ هذا الاختبار باستخدام جهاز *Drop master DM-701*، والذي يتم من خلاله حساب زاوية اتصال الماء على الأسطح بشكل آلي باستخدام أحد البرامج الالكترونية.

2.11 تعيين مقاومة الضغوط الميكانيكية *Compressive strength*

تم إجراء اختبار مقاومة الضغوط الميكانيكية لعينات الحجر الرملي المعالجة وغير المعالجة بالمركز القومي لبحوث الإسكان والبناء، وذلك من خلال الخطوات التالية:-

* اختيار ثلاث عينات غير معالجة، وثلاث عينات لكل معالجة.

* تحميل العينة بحمل الضغط ببطء حتى حدث تشرخ أو تهشم العينة.

* 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 مقدره بالكجم / سم².

$$W = \text{الحمل المطبق على العينة عند نقطة التهشم.}$$

$$A = \text{مساحة سطح الارتكاز للعينة مقدر بـ (سم}^2\text{).}$$

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

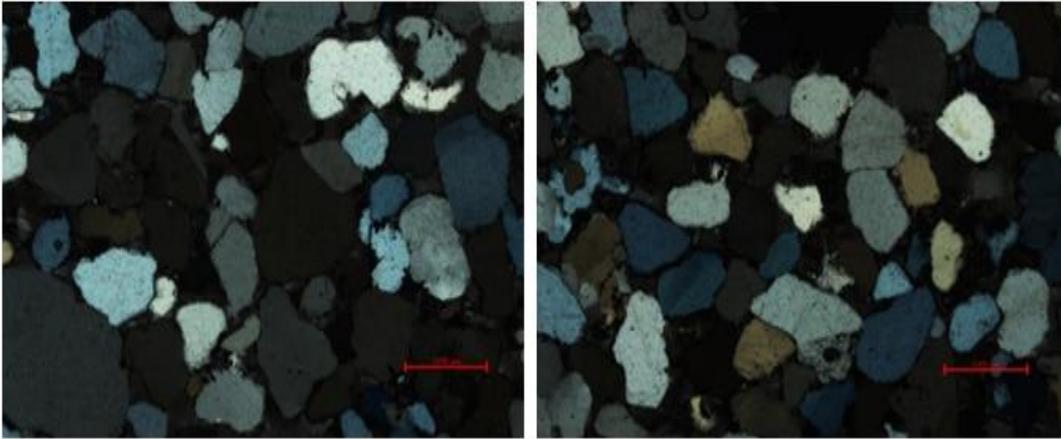
3. النتائج والمناقشة -Results and Discussion-

3.1 الملاحظة البصرية Visual observation

تبين من خلال الملاحظة والفحص البصري للوحات الحجرية الرملية موضوع الدراسة، أنها مصابة بالعديد من مظاهر التلف، والتي أهمها تفتت وتكك الحبيبات المعدنية، وتقرش وتساقت بعض الأجزاء من الأسطح الخارجية بما تحمله من نقوش وكتابات. بالإضافة إلى تزهر وتبلور الأملاح في بعض الأجزاء، وكذلك التشويه الشديد الناتج عن بقايا ومخلفات الطيور.

3.2 الدراسة البتروجرافية Petrographic study

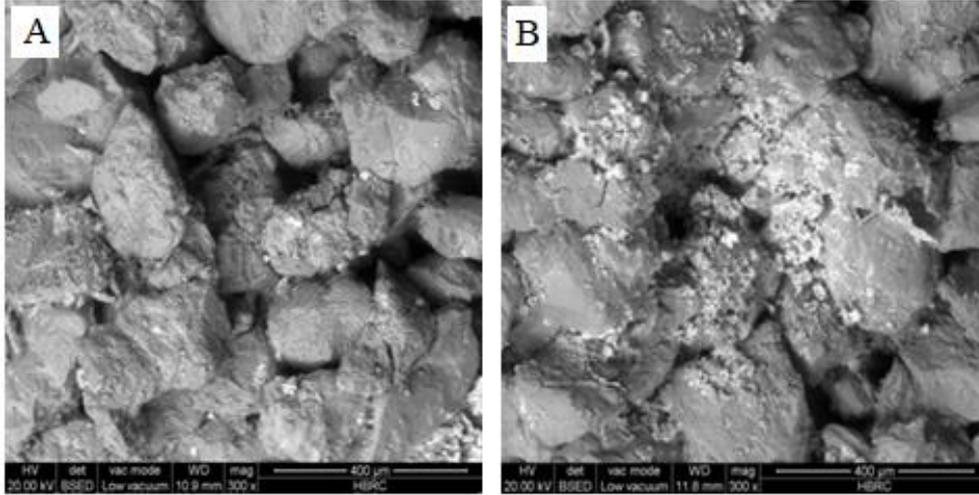
تعتبر الدراسة البتروجرافية من الخطوات الهامة والضرورية في دراسة الأحجار الأثرية، حيث يمكن من خلالها التعرف بشكل دقيق على المعادن الأساسية المكونة للحجر، وكذلك نواتج التلف الموجودة به. هذا ومن خلال الفحص البتروجرافي بالميكروسكوب المستقطب لعينات الحجر الرملي المنحوتة منه اللوحات موضوع الدراسة، تبين أنه يصنف على كونه حجر رملي نوبي، حيث يتكون بشكل أساسي من حبيبات الكوارتز، والتي ترتبط مع بعضها البعض بواسطة أكاسيد الحديد والكوارتز ونسبة قليلة من الكالسيت التي تم التأكد منها عن طريق التحليل بحيود الأشعة السينية، كما يظهر من الفحص أن حبيبات الكوارتز تتدرج من الحبيبات الدقيقة إلى الحبيبات متوسطة الخشونة، والتي تصنف معظمها على أنها ذات حواف شبه حادة إلى حادة، كما يظهر من الفحص تعرض حبيبات الكوارتز إلى التشويه الميكانيكي، والمتمثل في بعض التشققات الدقيقة جداً، والتي تعبر عن الإجهادات التي يتعرض لها الحجر. أنظر الصورة رقم (3).



صورة رقم (3): توضح عينة الحجر الرملي تحت الميكروسكوب المستقطب

3. الفحص المورفولوجي للعينات الأثرية Morphological study

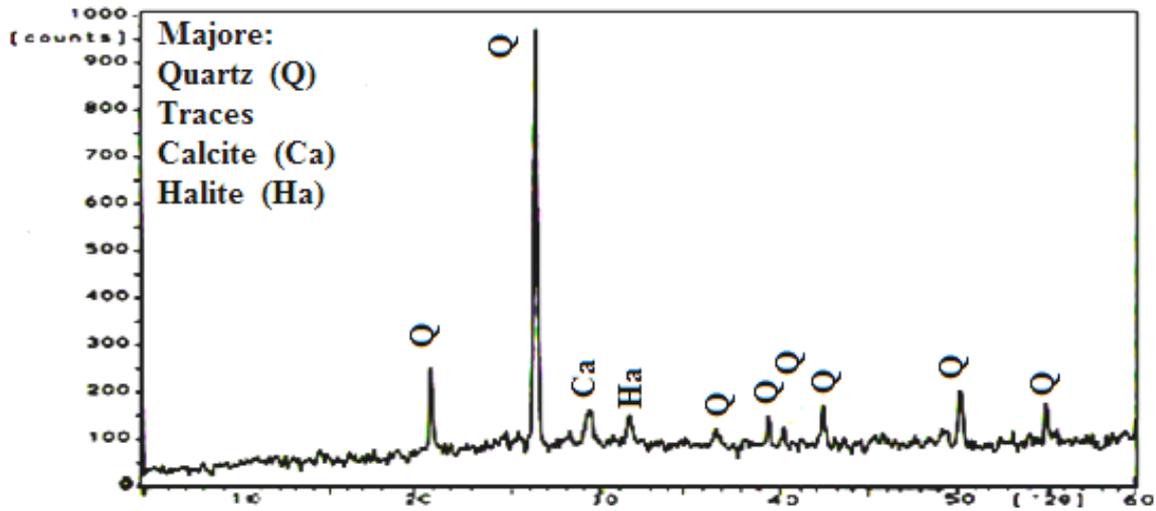
تبين من خلال فحص الحجر الرملي غير المعالج باستخدام الميكروسكوب الإلكتروني الماسح، أنه يعاني بدرجة كبيرة من التفكك الحبيبي والتآكل السطحي، بالإضافة إلى وجود بعض الحفر والفجوات والشروخ والتشققات الدقيقة، وكذلك نزح المادة الرابطة وتبلور الأملاح وتواجدها بدلاً منها مما أدى إلى خلخلة وانفصال الحبيبات عن بعضها البعض، كما توضحها الصورة رقم (4).



صورة رقم (4): توضح عينة الحجر الرملي تحت الميكروسكوب الإلكتروني الماسح.

3. 4 التحليل المعدني Mineralogical analysis

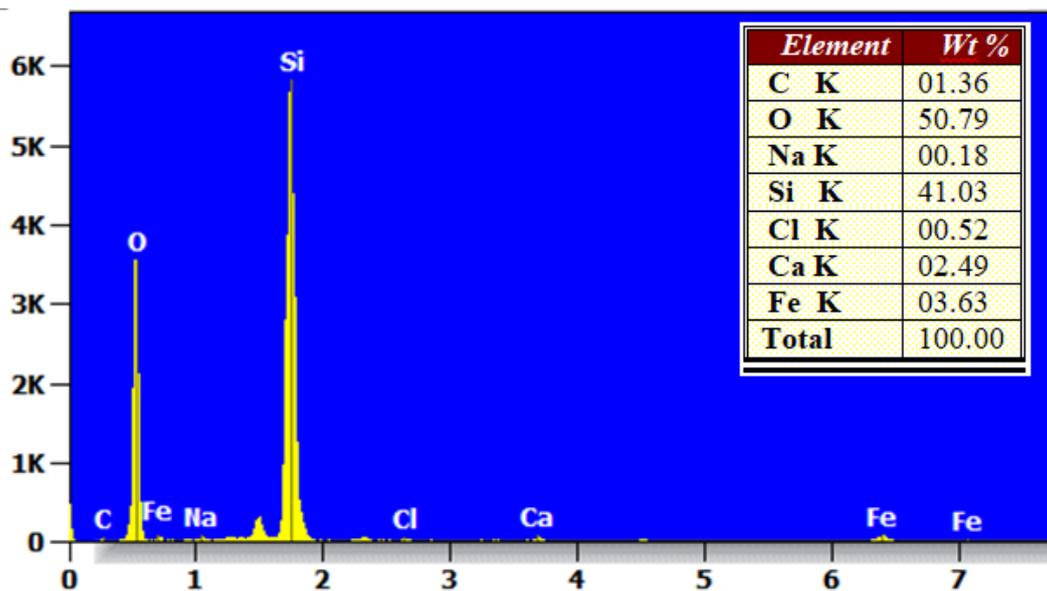
اتضح من خلال التحليل المعدني باستخدام الأشعة السينية للحجر الرملي موضوع الدراسة، أنه يتكون بشكل أساسي من معدن الكوارتز، بالإضافة إلى نسبة بسيطة من الكالسيت كمادة رابطة. كما تبين وجود ملح الهاليت كأحد نواتج التلف، كما يتضح من الشكل رقم (1).



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

3.5 التحليل العنصري Elemental analysis

تم تنفيذ التحليل العنصري لعينة الحجر الرملي باستخدام وحدة تشتيت الطاقة المتصلة بالميكروسكوب الالكتروني الماسح، وقد جاءت النتائج مؤكدة لنتائج التحليل بحيود الأشعة السينية، حيث تتكون العينة من عناصر الأكسجين O بنسبة 50.79%، والسيليكون Si بنسبة 41.03%، والحديد Fe بنسبة 3.63%، والكالسيوم Ca بنسبة 2.49%، والكربون C بنسبة 1.36%، والكلور Cl بنسبة 0.52%، والصوديوم Na بنسبة 0.18%، كما يوضحها الشكل رقم (2).



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

3.6 المظهر العام للعينات المعالجة General appearance

لا شك أن الحفاظ على المظهر العام للمواد المعالجة، يمثل أحد أهم مبادئ علم ترميم وصيانة الآثار، لذا فيعتبر عدم التأثير على المظهر العام لأسطح الأحجار المعالجة، من أهم الخصائص التي يجب أن تتوفر في كل المواد المستخدمة في عمليات التقوية. وقد تم تقييم مدى تأثير البولييمرات الفردية والمركبات النانوية على المظهر العام للعينات المعالجة، من خلال قياس التغير اللوني في الدرجات اللونية بين العينات المعالجة وغير المعالجة. وفيما يتعلق بالبولييمرات الفردية، فقد تبين أن مادتي ميثيل تراي ميثوكسي سيلان، وكيم تكت لم تؤثر على لون العينات المعالجة بشكل ملحوظ حيث حققت درجات تغير لوني أقل من 5، بينما حققت مادة البارالويد ب 72 تغير لوني ملحوظ أعلى من 5. أما عن المركبات النانوية، فقد تبين أن إضافة حبيبات النانو للبولييمرات لم يتسبب في تقليل درجة شفافيتها، وبالتالي لم يؤثر على لون العينات المعالجة، ويرجع ذلك للصغر المتناهي في أحجام حبيبات السليكا النانوية المستخدمة، مما يجعلها غير مرئية. وبالنسبة للتغير اللوني الذي أحدثه مركب البارالويد ب 72 المضاف إليه حبيبات النانو سليكا،

فيرجع السبب في ذلك إلى بوليمر البارالويد، وليس لحبيبات النانو أي دور في ذلك التغير اللوني. ويوضح الجدول رقم (3) درجات التغير اللوني التي أحدثتها البوليمرات الفردية والمركبات النانوية المستخدمة في الدراسة.

جدول رقم (3): يوضح درجات التغير اللوني للعينات المعالجة.

م	مادة العلاج	درجة التغير اللوني ΔE
1	Methyltrimethoxysilane	2.32
2	Kimtekt	3.65
3	Paraloid B 72 (5%)	9.42
4	Methyltrimethoxysilane + SiO ₂ NPs	2.68
5	Kimtekt + SiO ₂ NPs	3.70
6	Paraloid B 72 + SiO ₂ NPs	9.55

3.7 خاصية طرد الماء Hydrophobicity

يُعد الماء العامل الأساسي والمشارك في معظم عمليات تلف الأحجار الأثرية، وخاصة الموجودة في البيئات المفتوحة. لذلك فإنه من الضروري أن تتمتع مواد التقوية المستخدمة في تقوية الأحجار الأثرية بقدرة عالية على طرد الماء وعدم السماح له بالتسرب والتغلغل بشكل كبير داخل مسام الحجر.¹³ وقد تم تقييم قدرة المواد المعالجة على طرد الماء بتنفيذ اختبار زاوية اتصال الماء على العينات المعالجة وغير المعالجة. وبالنسبة للبوليمرات الفردية، فقد حقق بوليمر تزاوي ميثيل ميثوكسي سيلان أعلى زاوية اتصال للماء، ويرجع ذلك إلى احتواء هذا البوليمر على مجموعة الألكيل غير القطبية، والتي تكسبه خصائص طرد الماء العالية.¹⁴ وبالنسبة للمركبات النانوية فقد حققت قدرة عالية على طرد الماء، حيث أدت إضافة الحبيبات النانوية إلى البوليمرات إلى زيادة قدرتها على طرد الماء. ويوضح الجدول رقم (4) زوايا اتصال الماء للعينات المعالجة بالبوليمرات الفردية والمركبات النانوية المستخدمة في الدراسة.

جدول رقم (4): يوضح زوايا اتصال الماء على أسطح العينات الحجرية المعالجة.

م	مادة التقوية	زاوية اتصال الماء (°)
1	Methyltrimethoxysilane	109
2	Kimtekt	99
3	Paraloid B 72 (5%)	68
4	Methyltrimethoxysilane + SiO ₂ NPs	135
5	Kimtekt + SiO ₂ NPs	123
6	Paraloid B 72 (5%) + SiO ₂ NPs	90

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

14. Torraca, G., *Lectures on materials science for architectural conservation*, Los Angeles, The Getty Conservation Institute, 2009.

3. 8 الخصائص الميكانيكية Mechanical properties

تم تقييم الخصائص الميكانيكية للعينات الحجرية الرملية المعالجة وغير المعالجة بتعيين مقاومتها للضغوط الميكانيكية. وفيما يتعلق بالبوليمرات الفردية، فقد حقق بوليمر ميثيل ميثوكسي سيلان أعلى قيمة في مقاومة الضغوط الميكانيكية، ويرجع ذلك إلى احتواء هذا البوليمر على شق غير عضوي وله 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. كما يتمتع هذا البوليمر بقدرة عالية على التغلغل مما يسمح بتقوية أكبر جزء من الحجر. وبالنسبة للمركبات النانوية، فقد تبين أن إضافة الحبيبات النانوية للبوليمرات المستخدمة أدت إلى تحسين قدرتها على مقاومة الضغوط الميكانيكية، ويرجع السبب في ذلك إلى عملية التدعيم التي تحدث للبوليمرات بواسطة الحبيبات النانوية.^{15، 16} ويوضح الجدول رقم (5) نتائج مقاومة الضغط الميكانيكي للعينات غير المعالجة والعينات المعالجة بالبوليمرات الفردية والمركبات النانوية المستخدمة في الدراسة.

جدول رقم (5): يوضح نتائج مقاومة الضغط الميكانيكي للعينات المعالجة وغير المعالجة.

م	مادة التقوية	مقاومة الضغط الميكانيكي كجم/سم ²
*	Untreated sample	107
1	Methyltrimethoxysilane	198
2	Kimtekt	187
3	Paraloid B 72 (5%)	190
4	Methyltrimethoxysilane + SiO ₂ NPs	218
5	Kimtekt + SiO ₂ NPs	201
6	Paraloid B 72 + SiO ₂ NPs	200

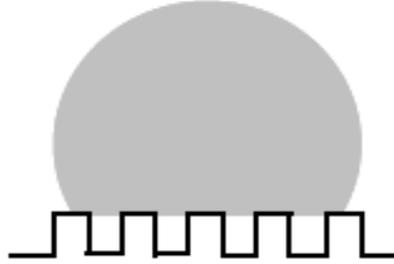
3. 9 التقييم المورفولوجي للعينات المعالجة Morphological assessment

اتضح من خلال الفحص باستخدام الميكروسكوب الإلكتروني الماسح للعينات المعالجة بالبوليمرات الفردية والمركبات النانوية، نجاح معظم البوليمرات الفردية في التخلل بشكل جيد داخل المسام الدقيقة والقنوات الشعرية، فضلاً عن تغليف الحبيبات المعدنية بطبقة على شكل شبكة شبه متجانسة من البوليمر، كما أنه لم يحدث غلق كامل للمسام حيث تظهر بعض المسام الدقيقة. كما تبين أن إضافة الحبيبات النانوية للبوليمرات يساهم في زيادة قدرتها على ملء الفجوات والمسام

15. De Ferri, L., et al., *Study of silica nanoparticles-polysiloxane hydrophobic treatments for stone-based monument protection*, Journal of Cultural Heritage, Vol. 12, 2011.

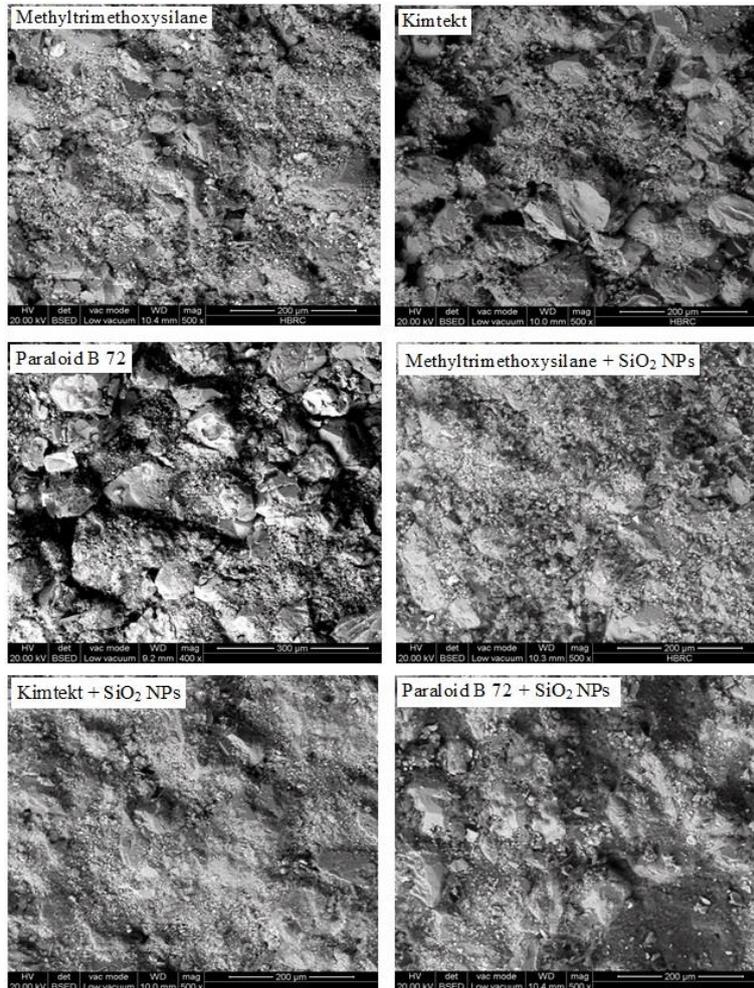
16. ياسر كمال حفني، دراسة تقوية الآثار الحجرية الرملية باستخدام تكنولوجيا النانو تطبيقاً على نموذج مختار، رسالة ماجستير، قسم الترميم، كلية الآثار، جامعة القاهرة، 2013.

الكبيرة. كما ينتج عن تشتيت حبيبات النانو في وسط البوليمرات تكوين أسطح ذو خشونة أو نتوءات نانوية، الأمر الذي يفسر قدرتها العالية على طرد الماء، نتيجة احتباس الهواء بين هذه النتوءات، مما يحول دون اتصال قطرات الماء مع السطح، وبالتالي يقلل مساحة الاتصال وقوى الارتباط، مما يجعل هذه الأسطح فوق طاردة للماء،¹⁷ كما يوضحها الشكل رقم (3). وتوضح الصورة رقم (5) نتائج الفحص بالميكروسكوب الإلكتروني الماسح للعينات المعالجة.



شكل رقم (3): يوضح احتباس الهواء بين سطح المادة وبين قطرات الماء.

(After: Manoudis, P. et al., 2008)¹⁸



صورة رقم (5): يوضح نتائج فحص العينات المعالجة باستخدام الميكروسكوب الإلكتروني الماسح للعينات المعالجة.

17. Cassie, A, B, D, And Baxter, S., *Wettability of porous surfaces*, 1944.

18 Manoudis, P. et al., *Superhydrophobic Polymer/Nanoparticle Composites for the Protection of Marble Monuments*, 2008, p.5.

4. الخلاصة Conclusion

أثبتت الدراسة اللوحات الحجرية الرملية موضوع الدراسة مصابة بالعديد من مظاهر التلف، مثل التفتت الحبيبي والتآكل السطحي وضعف البنية الداخلية، وتبلور الأملاح، مما يساهم في استمرار عمليات التلف. وقد أجريت الدراسة التجريبية بهذا البحث من أجل التعرف على مدى فاعلية المركبات النانوية في تقوية وحماية اللوحات الحجرية موضوع الدراسة. وقد تبين من نتائج الدراسة التجريبية أن إضافة حبيبات السليكا النانوية إلى بوليمرات الميثيل تري ميثوكسي سيلان، كيم تكت، والبارالويد ب 72، يؤدي إلى تحسين خصائصها بدرجة كبيرة، ويجعلها أكثر قدرة على تقوية وحماية الأحجار الرملية. وأوضحت الدراسة أن المركب النانوي ميثيل تري ميثوكسي سيلان المدعم بحبيبات ثاني أكسيد السليكون النانوية يمثل أفضل المركبات المستخدمة في الدراسة لتقوية وحماية الحجر الرملي موضوع الدراسة.

قائمة المراجع

1. أحمد إبراهيم أحمد، دراسة تأثير البيئة الصحراوية والزراعية في ميكانيكية تلف الصور والنقوش الجدارية مع العلاج والصيانة تطبيقاً على أحد النماذج المختارة، رسالة ماجستير، قسم الترميم، كلية الآثار، جامعة القاهرة، 2014.
2. سليم حسن، عصر رعمسيس الثاني وقيام الإمبراطورية الثانية، موسوعة مصر القديمة، الجزء السادس، مكتبة الأسرة، القاهرة، 2001.
3. محمد عبد الهادي، دراسات علمية في ترميم وصيانة الآثار غير العضوية، مكتبة زهراء الشرق، القاهرة، 1997.
4. ياسر كمال حفني، دراسة تقوية الآثار الحجرية الرملية باستخدام تكنولوجيا النانو تطبيقاً على نموذج مختار، رسالة ماجستير، قسم الترميم، كلية الآثار، جامعة القاهرة، 2013.
5. Amoroso, G., and Fassina, V., *Stone decay and conservation, Atmospheric Pollution, Cleaning, Consolidation and Protection*, Elsevier, New York, 1983.
6. Cassie, A, B, D, And Baxter, S., *Wettability of porous surfaces*, Transactions of the Faraday Society, 1944.
7. D'ariento, L., Scarfato, P., Incarnato, L., *New polymeric nanocomposites for improving the protective and consolidating efficiency of tuff stone*, Journal of Cultural Heritage, 9, 2008.
8. De Ferri, L., Lottici, P., Lorenzi, A., Montenero, A., Salvioli-Mariani, E., *Study of silica nanoparticles-polysiloxane hydrophobic treatments for stone-based monument protection*, Journal of Cultural Heritage, 12, 2011.

9. El-Gohary, M., *Effective Roles of some deterioration agents affecting Edfu royal birth house "Mammisi"*, International Journal of Conservation Science, 6 (3), 2015.
10. Fitzner, B., Heinrichs, K., La Bouchardiere, D., *Weathering damage on Pharaonic sandstone monuments in Luxor-Egypt*, Building and Environment, Vol. 38, 2003.
11. Helmi, F. M, and Hefni, Y. K., *Nanocomposites for the protection of granitic obelisks at Tanis*, Egypt, Mediterranean Archaeology and Archaeometry, 16 (2), 2016.
12. Helmi, F. M, and Hefni, Y. K., *Using nanocomposites in the consolidation and protection of sandstone*, International Journal of Conservation Science, Vol. 7, 2016.
13. Hefni, Y., *Hydrophobic zinc oxide nanocomposites for consolidation and protection of quartzite sculptures: a case study.*" Journal of Nano Research 63, 2020.
14. Lucas, A., *Ancient Egyptian materials and industries*, Kessinger Publishing, Third Edition, 2003.
15. Manoudis, P. et al., *Superhydrophobic Polymer/Nanoparticle Composites for the Protection of Marble Monuments*, 9th International Conference on NDT of Art, 2008.
16. Manoudis, P., Karapanagiotis, I., Tsakalof, A., Zuburtikudis, I., Kolinkeová, B., and Panayiotou, C., *Surface properties of superhydrophobic coatings for stone protection*, Journal of Nano Research, 8, 2009.
17. Richard H. Wilkinson, *The complete Temples of Ancient Egypt*, Thames & Hudson, N.Y, 2000.
18. Torraca, G., *Lectures on materials science for architectural conservation*, Los Angeles, The Getty Conservation Institute, 2009.