

Assessment of the efficiency of traditional and Nano-reinforcement materials in the conservation of archaeological building materials

بدوي محمد إسماعيل، محمود عبد الحافظ محمد آدم، حجاجي خميس مصطفى^{1*}

باحث دكتوراة – قسم الترميم – كلية الآثار – جامعة الأقصر

hagagharam517@gmail.com

المخلص

قد يتعرض السطح الخارجي لمواد البناء الأثرية لتأثير العوامل المناخية المختلفة مما يؤدي إلى ظهور كثير من مظاهر التلف مثل تزهو الأملاح علي أسطح مواد البناء، والشروخ السطحية، بالإضافة إلي الفشور السطحية، وكثير من علامات التفتك والتدهور والتي تمثل تهديداً لتراثنا الثقافي، لذا كان الهدف من هذا البحث هو الحفاظ على المعالم الأثرية عن طريق تقوية مواد البناء بمواد ومركبات التقوية المختلفة لتقييم كفاءة عملية المعالجة، ففي هذا البحث تم استخدام مادة الفاكر Wacker oH100 وهو منتج جاهز للإستخدام بدون تخفيف من سيليكات الإيثيل (TEOS) رباعي إيثوكسي سيلان، وهذا المركب له قدرة عالية على التغلغل داخل المسام الحجرية بعمق كبير، مادة البليكسي سول Plexisol P550 وهو محلول من راتنجات الأكريلك أساسه البيوتيل ميثاكريلات [n- butyl meth acrylate (NBMAM) في البنزين ذات البلمرة المتجانسة النقية، و يتميز بمقاومته للتقادم والتدهور والإضاءة، الفطريات، ويذوب بشكل جيد في التولوين والأسيتون، والبارالويد ب72 (Paraloid B72) وهو ذو بلمرة مشتركة يتكون من الإيثيل ميثا أكريلات وميثيل أكريلات بنسبة 30:70%، تنتجه شركة Rhom & Haas وتنتجه تجارياً شركة C T S الإيطالية وبلوراته شفافة، ويذوب في المذيبات العضوية، ويتميز هذا النوع من البوليمرات بالوزن الجزيئي العالي والمقاومة للإحتكاك والمرونة والمقاومة للإصفرار، وقد تم استخدام مادة البارالويد ب 72 في تقوية العينات التجريبية المماثلة لمواد البناء الأثرية بنسبة تركيز 3% ومدعمة بمادة نانو هيدروكسيد الكالسيوم مرة ومرة أخرى بمادة نانو السيليكا. (تم إذابة ال Paraloid B-72 في الأسيتون بنسبة 3%)، وقد تم تقييم المعالجات عن طريق الميكروسكوب الإلكتروني الماسح، خاصة الطرد المياه، التغير اللوني، إجهاد الضغط، امتصاص الماء، المسامية والكثافة.

الكلمات الدالة: مواد البناء، التقوية، مواد التقوية التقليدية، المواد النانوية.

Abstract

The external surface of archaeological building materials may be exposed to the influence of various climatic factors, causing many deterioration manifestations, such as salt efflorescence on the surfaces of building materials, surface cracks, surface crusts, and many manifestations of disintegration and deterioration, which threaten our cultural heritage. Therefore, the present research paper aims to conserve archaeological monuments by reinforcing building materials with various reinforcing materials and compounds to evaluate the efficiency of the treatment process. It used Wacker OH100, which is a ready-to-use product without dilution by Tetraethyl orthosilicate (TEOS) capable of penetrating deep into stone pores. It used Plexisol P550, a solution of acrylic resin based on butyl methacrylate [n-butyl methacrylate (NBMAM)] in

homopolymer pure gasoline and characterized by resistance to aging, deterioration, lighting, fungi, and dissolves well in toluene and acetone. It also used Paraloid B72, which is a copolymer consisting of ethyl methacrylate and methyl acrylate (70:30) produced by Rhom & Haas Co. and commercially produced by the Italian CTS. It has transparent crystals and dissolves in organic solvents. This polymer has high molecular weight, abrasion resistance, flexibility, and resistance to yellowing. Paraloid B 72 was used to reinforce experimental samples similar to archaeological building materials with a concentration of 3% and reinforced with calcium nano-hydroxide and nano-silica. (Paraloid B-72 was dissolved in 3% acetone). The treatments were evaluated by the scanning electron microscope, water repellency, general appearance, stress of pressure, water absorption, porosity, and density.

Keywords: Building materials – consolidation - traditional reinforcement materials – Nanomaterials.

مقدمة Introduction

تعتبر مواد البناء من العوامل المهمة التي أعطت المباني الأثرية ميزة خاصة وميزتها عن المباني الحديثة الأخرى، وهي تعد من العناصر المهمة في تشكيل العمارة عبر العصور، ومن أشهر مواد البناء التي استخدمها المصريون القدماء في تشييد منشآتهم:-

1- الطوب اللبن Mud brick

مادة بناء طبيعية، وهي نوع من أنواع المواد المستخدمة في البناء والتشييد، وعادة لها شكل متوازي السطوح ومصنوعة من الطين والرمل والماء مع إضافة نسبة قليلة من التبن (القش المكسر الناعم) لخلطه مع الطين ويقطع ويجفف تحت أشعة الشمس¹، وهناك نوعان من الطوب اللبن شاع استخدامها في المباني المصرية القديمة ، النوع الأول وهو عبارة عن الطوب اللبن ذي الحجم الكبير الذي استخدم علي نطاق واسع في تشييد المباني العامة مثل اسوار المعابد والأهرامات (هرم سيزوستريس) بدهشور والقصور ومنازل الأمراء والنبلاء وعلية القوم ، أما النوع الثاني فيتمثل في كتل الطوب اللبن صغيرة الحجم التي استخدمت في بناء منازل العامة من الشعب وبناء المقابر².

2- الحجر الجيري Limestone

يعتبر الحجر الجيري من المواد الهامة التي استخدمت في البناء قديماً، وكان من أسبق أنواع الأحجار في الاستخدام . حيث تعددت طرق استعمالات الحجر الجيري في مجال البناء، فقد استخدم بطرق شتى ومن هذه الإستعمالات:-

¹ (قادة لبتنر: خصائص مواد العمارة الترابية بجنوب الجزائر- دراسة مادة الطوب من قصر موغل بالجنوب الغربي، مجلة جيل العلوم الانسانية والاجتماعية العدد 53، 2019، ص63.

² (محمد عبد الهادي : علاج وصيانة أطلال المباني الطينية القبطية، مجلة كلية الآثار، العدد التاسع، جامعة القاهرة، مركز جامعة القاهرة للطبع والنشر 1996، ص159

تقييم كفاءة مواد التقوية والنانوية في الحفاظ على مواد البناء الأثرية

- تشيد الحوائط: ويعتبر هذا الاستعمال الأكثر شيوعاً. كما يأخذ البناء بالأحجار أنماطاً وأشكالاً متعددة منها البناء بالأحجار المنحوتة حيث تهذب الأحجار على شكل ((بلوكات)) مكعبة الشكل إلى حد ما ليتم البناء بها، والبناء بالحجر غير المهذب بإستعمال قطع من الأحجار على شكلها الأول دون تعديلها وفي هذا الصنف يدخل البناء بالدبش.
- إنجاز عناصر معمارية متنوعة: ومنها العقود والأقواس والقباب، الأعمدة.
- تخطيط الأرضيات: إستخدام الحجر الجيري منذ القدم وبأشكال مختلفة فى تخطيط أرضيات المباني ، ورص الأرضيات والمساحات وذلك لمنايتها وتحملها للأحمال والصدمات³.

3- الجرانيت Granite

الجرانيت عبارة عن صخر نارى جوفى واسع الانتشار⁴، وهو أحد الأحجار التى ارتبطت ارتباطاً وثيقاً بتاريخ المصريين القدماء، إذ بدأ استخدامه كمادة بناء منذ بداية عصر الأسرات . ثم استمر استخدامه فى كافة العصور، فقد صنعت منه الأواني وموائد القرابين والتماثيل والمسلات، وبنيت به بعض حوائط المعابد والأعمدة وكذلك استخدم فى عمل التوابيت وفى تغطية الحوائط الداخلية والخارجية للأهرامات إلى غير ذلك من الاستخدامات الأخرى العديدة، وقد إستخدم الجرانيت، خاصة الأحمر منه، منذ الدولة القديمة فى هضبة الجيزة فى تدعيم وتغطية بعض الممرات والحجرات والسطح الخارجى أحياناً للأهرامات، ولعل أفضل الأمثلة على ذلك هو تغطية الجزء الأكبر من هرم منكاورع، وحوائط وسقف غرفة الدفن بهرم خوفو، وكذلك معبد الوادى الخاص بالملك خعفرع⁵ .

وركز هذا البحث في الدراسة التجريبية على مواد بناء مقابر العمال بالجيزة والتي ترجع الي الأسرة الرابعة (2649-2513 ق.م) وتقع جنوب شرق تمثال (أبو الهول) وخلف الحائط الحجري المعروف باسم ((حيط الغراب)) wall of the crow ، وهي خاصة بالعمال الذين بنوا الهرم الأكبر، وتحتوى على مواد بناء متنوعة من (الطوب اللبن والحجر الجيري والجرانيت) .

وقد لعبت عوامل التلف deterioration factors دورا كبيرا فى تلف مواد بناء مقابر العمال بالجيزة، ومن أهم هذه العوامل تأثير الرطوبة، حيث يتسبب زيادة محتوى الرطوبة النسبية فى الجو المحيط في إذابة وإعادة تبلور بعض الأملاح وذلك في حالة ارتفاع وانخفاض معدلات الرطوبة والحرارة فى الوسط المحيط. وكذلك تساعد بشكل كبير في زيادة نشاط الكائنات الحية الدقيقة وما ينشأ عنها من أحماض مدمرة لمواد البناء الأثرية⁶. وكلما كانت مادة البناء أكثر مسامية كلما كانت لها القدرة العالية على امتصاص الرطوبة من الوسط الجوى المحيط⁷. وتعتبر الرطوبة أيضا من

³) قابلية مبارك: تطور مواد وأساليب البناء فى العمارة الصحراوية ، رسالة ماجستير، كلية العلوم الإنسانية والإجتماعية، جامعة محمد خضير، بسكرة، 2010 ، ص28.

⁴) محمد مجدى تراب: الموسوعة الجيومورفولوجية، الجمعية المصرية للتغيرات البيئية، 2011، ص83

⁵) سيم حسن: مصر القديمة فى مدينة مصر وثقافتها فى الدولة القديمة والعصر الإهناسى، الجزء الثانى، الهيئه المصرية العامة للكتاب، 1992، ص48.

⁶) Kimbro, et al., Deterioration and Preservation of Porous Stone Royal Presidio Chapel, Monterey, National Center for Preservation Technology and Training Publication California, 1996 .

⁷) Santos., et al., Porosity characterization of old Portuguese ceramic tiles, Construction and Building Materials, Vol., 28, 2012, pp. 104-110.

أهلم عوامل التلف الفيزيوكيميائية التي تسبب تلفاً ليس فقط لمواد البناء وإنما للأثار بكافة أنواعها، فالرطوبة تدخل في معظم عمليات التلف والأملاح القابلة للذوبان لن يحدث لها تبلور داخل أو خارج الأثر بدون الماء⁸.

وتسبب الرطوبة العالية في بعض الأحيان حدوث تشقق السطح الخارجي لمواد البناء أو تفتتها أو سقوط أجزاء منها، حيث يؤدي تشقق السطح الخارجي إلى زيادة مسامية هذه الأسطح وكذلك زيادة السطح الخارجي المعرض للجو مما يؤدي إلى ارتفاع نسبة الماء الممتص واختراقه بفعل الخاصية الشعرية⁹.

ويعد التغير في درجات الحرارة مصدراً مهماً للضغوط الداخلية نتيجة عملية التمدد والانكماش الذي يحدثه هذا التغير¹⁰، وبفعل التغير والتباين المستمر في درجات الحرارة تتجزأ المعادن المكونة لبنية هذه الأحجار بانهيار مستويات الضعف الموجودة في المعادن كمستويات التشقق أو الروابط القوية المتداخلة بين الحبيبات، مما يؤدي إلى انفصال هذه الحبيبات عن بعضها وأيضاً عن مثيلاتها أسفلها أو فوقها، في صورة قشور Scales أو طبقات Layer سطحية¹¹.

كما تعد الأملاح من أكثر العوامل خطورة في تلف مواد البناء الأثرية، وخاصة الأملاح القابلة للذوبان في الماء، والتي تتسبب في تدهور مواد البناء الأثرية وذلك من خلال نمو بلورات الأملاح داخل مسام مواد البناء، مما يؤدي في النهاية إلى إحداث ضغوط كافية داخل مسام مواد البناء الأثرية وتفككها وتحولها بمرور الوقت إلى مسحوق¹². كما أن نمو البلورات الملحية داخل مواد البناء المسامية سبب رئيسي للتلف حيث يمكن أن يسبب فقد كبير بالأسطح أو إنهيار تركيب المواد¹³. وأيضاً من المشاكل الرئيسية التي يسببها تواجد البلورات الملحية بداخل مواد البناء ويكون نتيجة نمو البلورات الملحية على السطح حدوث تغطية للأسطح الخارجية بترسيبات بيضاء اللون من المركبات الملحية التي تؤدي لحدوث تشويه لأسطح مواد البناء وطمس ما عليها من زخارف ونقوش¹⁴، كما في اللوحة رقم (1).

ويعد تطوير المواد والطرق الحديثة لتقوية المواد الأثرية من المواضيع المهمة في عملية الترميم، لذلك يعد تحسين المواد أو المنهجيات الجديدة لتقوية وحماية مواد البناء الأثرية من عوامل التلف المختلفة أمراً غاية في الأهمية. وتستخدم مواد التقوية الكيميائية، سواء التقليدية أو النانوية لتحسين الخواص الميكانيكية لمواد البناء الأثرية،

⁸) Ibrahim, M. and Mohamed, H., Analytical methods of archaeological pottery sarcophagus excavated from Saqqara, Egypt, Scientific culture, Vol. 5, No. 1, 2019, pp. 49-59.

⁹) Wilson, F., Building materials evaluation, Van Nostrand Reinhold Company. Inc. U.S.A. 1984.

¹⁰) Hemedat, et al., The effectiveness of nano materials and nano-modified polymers for preservation of historic brick masonry in Rashid, Egypt, International Journal of Conservation Science, Vol. 9, No. 4, 2018, pp. 835-846.

¹¹) بدوى محمد إسماعيل: التأثيرات المدمرة للبيئة على الأحجار الأثرية المتنوعة المصادر، بحث ترقى، 1999، ص 11، 12.

¹²) Yafuz, A. and Topal, T., Effects of different drying Temperatures on the Physical and Mechanical Properties of Some marbles during Salt Crystallization tests, Environmental Earth Sciences, 2017, pp. 1-11.

¹³) El- gohary, M., the environmental factors affecting the archaeological buildings in Egypt, Interdisciplinary research on the works of art, 2012, pp. 151-165.

¹⁴) Rossi-Manaresi, R., & Tucci, A., Pore Structure and the Disruptive or Cementing Effect of Salt Crystallization in Various Types of Stone, Studies in Conservation, Vol. 36, No. 1, 1991, pp. 53-58.

تقييم كفاءة مواد التقوية والنانوية في الحفاظ على مواد البناء الأثرية

ويرتبط استخدام الراتنجيات الاصطناعية في الحفاظ على المعالم الأثرية بخصائص المتانة والمرونة والشفافية، ويجب ألا تغيب مواد التقوية من المظهر العام للمادة الأثرية¹⁵. ويهدف هذا البحث إلى تقييم فعالية المواد التقليدية والنانوية في تقوية مواد البناء الأثرية (الطوب اللبن والحجر الجيري - الجرانيت) موضوع الدراسة، من خلال تقييم فعالية مواد التقوية التقليدية والنانوية في تحسين الخواص الفيزيائية والميكانيكية لعينات مواد البناء، ومقارنة نتائج تطبيق مادة البارالويد ب 72 والمدعمة بمادة نانوهيدروكسيد الكالسيوم مرة ومرة أخرى بمادة نانو السيليكا ونتائج تطبيق مواد التقوية التقليدية (الفاكر Wacker oH100 ، مادة البليكسي سول Plexisol P550) بشكل منفرد على مواد البناء ، مع دراسة النتائج وتقييمها بطرق الفحص والاختبار العلمية.



لوحة (أ) مواد بناء مقابر العمال بالجيزة، (أ) صورة عامة للموقع، (ب) ضعف وتقشر أسطح الوحدات الزخرفية، (ج) تدهور وتقشر السطح الخارجي لمواد البناء الطينية.

2- مواد وطرق الدراسة

2-1 مواد الدراسة

2-1-1 إعداد مواد التقوية التقليدية والنانوية

اعتمد المنهج العلمي المتبع في هذا البحث على المقارنة بين مواد التقوية التقليدية ومواد التقوية النانوية، للتعرف على أفضل المواد ثباتاً ومقاومة لعوامل التلف المختلفة التي تتعرض لها مواد البناء الأثرية. ومواد التقوية التقليدية التي تم استخدامها في البحث هي مادة الفاكر Wacker oH100 وهو منتج جاهز للاستخدام مباشرة بدون تخفيف ويعرف أيضاً باسم Wacker stone Strengthener OH100 حيث أنها تحتوى على سليكات الإيثيل Ethyl Silicate وميثيل إيثيل كيتون والأسيتون، وتستخدم هذه المادة بشكل واسع في تقوية الأحجار ، وهذا المركب مشتق من خليط من المونمر والإوليغومر للإيثيل سليكات $Si(OC_2H_5)_4$ هو سائل عديم اللون، وهذا المركب له قدرة عالية على التغلغل داخل المسام الحجرية بعمق كبير¹⁶. مادة البليكسي سول Plexisol P550 هو عبارة عن راتنجيات الأكريليك أساسية البيوتيل ميثاكريلات [n-butyl meth acrylate (NBMAM)] في البنزين ذات البلمرة المتجانسة النقية، ويتكون من بيوتيل ميثاكريلات [n-butyl meth acrylate NBMAM]. يتميز

¹⁵) Adam, et al., Durability of decorative stones and other construction materials of Al-Tanbogha Al-Mardany mosque (1340 A.D) 14TH century in Cairo. Egyptian. Journal of Archaeological and Restoration Studies, vol. 5, No. 1, 2015, pp. 21-29.

¹⁶) Graziani, et al., Consolidation of porous carbonate stones by an innovative phosphate treatment: mechanical strengthening and physical-microstructural compatibility in comparison with TEOS-based treatments, Heritage Science.2015, P.1.

بمقاومته للتقادم والتدهور والإضاءة، الفطريات¹⁷، وقد تم استخدام مادة البليكسي سول Plexisol P550 فى تقوية العينات التجريبية بشكل منفرد، بنسبة تركيز 3% ، مادة البارالويد ب 72 والتي تعد من أكثر مواد التقوية التقليدية شيوعاً واستخداماً في مجال علاج وصيانة المواد الأثرية، ويتركب من بوليمر مشترك Co- polymer من الميثيل أكريلات والأيثيل ميثا أكريلات بنسبة [70:30] بالترتيب، يوجد فى صورة بلورات شفافة عديمة اللون تذوب فى بعض المذيبات مثل الكحولات Alcohols. وقد تم تحضير محلول البارالويد ب72 فى هذا البحث بتركيز 3% فى الأسيتون، أما بالنسبة للمواد النانوية المستخدمة فى البحث فتتمثل فى مادة نانوهيدروكسيد الكالسيوم Nano calcium hydroxide وتعد من أهم المواد التى استخدمت للتقوية فى الحقل الأثرى، وقد تم استخدام مادة نانو هيدروكسيد الكالسيوم Nano calcium hydroxide مع البارالويد ب 72 (Paraloid B-72) بنسبة تركيز 3% وزن / حجم، ومادة نانو السليكا Nano- silica وهى عبارة عن الجسيمات أو الجزيئات النانوية لثاني أكسيد السيليكون (Sio2)، وقد تم استخدام مادة نانو السليكا Nano Silica مع البارالويد ب72 (Paraloid B-72) بنسبة تركيز 3% وزن / حجم.

2- 1 - 2 تجهيز عينات مواد البناء

تم تجميع العينات التجريبية المماثلة لمواد بناء مقابر العمال من الأحجار الجيرية والجرانيت والطوب اللبن المفككة من الجدران فى الموقع ثم بعد ذلك تم تقطيع العينات الحجرية بواسطة منشار كهربائى إلى مكعبات بمقاس (3×3×3سم) ومنشار يدوى لتقطيع عينات الطوب اللبن إلى مكعبات بمقاس (3×3×3سم) بعد ذلك تم تطبيق مواد التقوية السابق ذكرها على عينات مواد البناء باتباع أسلوب التسقية Quenching وباستخدام الفرشاة brush، وذلك فى صورة دورتين متتاليتين تفصلهما 48 ساعة وذلك للحصول على درجة التشبع الكامل بمواد التقوية، ثم تم تغطية العينات المعالجة بالبولى إيثيلين المثقوب وتركها فى جو الغرفة لمدة أربع أسابيع لتجف تماماً ولإتاحة الفرصة لإتمام عملية البلمرة.

2 - 2 طرق الدراسة

2 - 2 - 1 التحليل بطريقة حيود الأشعة السينية X-Ray Diffraction Analysis

تعتبر طريقة التحليل باستخدام حيود الأشعة السينية من الطرق المهمة والتي تتميز بالكفاءة فى إعطاء النتائج ، حيث يمكن من خلال هذا النوع من التحليل التعرف على مكونات العينات المتبلورة فى صورة مركبات ومعادن¹⁸، وقد تمت دراسة عينات مواد البناء باستخدام جهاز التحليل بحيود الأشعة السينية المستخدم فى معمل المتحف المصرى الكبير – وزارة الآثار – والجهاز المستعمل من نوع Panalytical X,pert pro PW 3040/60.

2 - 2 - 2 الميكروسكوب الإلكتروني النافذ (TEM)

استخدم الميكروسكوب الإلكتروني النافذ للتأكد من نجاح عملية الخلط والتفاعل بين حبيبات المادة الداعمة، وهى حبيبات نانو هيدروكسيد الكالسيوم، ونانو السليكا وبين مادة القالب وهو بوليمر البولى ميثيل أكريلات / إيثيل ميثا أكريلات (70:30) والحصول على مترابطة متجانسة تتوزع بداخلها جسيمات المواد الداعمة توزيعاً مثاليًا، والتعرف

¹⁷ (جيهان مصطفى محمد حسن القميشاوى: دراسة ترميم العناصر المعمارية المتهدمة بمقبرة الأمير تتى عنخ كم بسفارة، رسالة ماجستير، قسم ترميم الآثار، كلية الآثار، جامعة القاهرة، 2021، ص93.

¹⁸ Lavina, et al., Modern X-ray Diffraction Methods in Mineralogy and Geosciences, Mineralogical Society of America, Vol., 2014, pp. 1-31.

على شكل وسلوك المركب بعد عملية الخلط والتفاعل، إضافة إلى تحديد حجم الحبيبات النانوية بعد عملية الخلط¹⁹، والجهاز المستخدم في الفحص من نوع Jeol, Transmission electron Microscopy High Resolution, 2100 بمعمل المركز القومي للبحوث - الدقى- مصر.

2- 2- 3 الفحص بالميكروسكوب الإلكتروني الماسح (SEM)

يعتبر الميكروسكوب الإلكتروني من أهم التقنيات العلمية التي طوعت لخدمة مجال الآثار حيث يستخدم في التعرف على مدى قدرة مواد التقوية على التغلغل لمسافات كبيرة والربط بين الحبيبات وبعضها²⁰. هذا وقد تم استخدام الميكروسكوب الإلكتروني الماسح Scanning Electron Microscope ماركة Quanta 250 FEG.

2- 2- 4 قياس زاوية اتصال الماء Static contact angle measurement

يتم تقييم مدى قابلية الأسطح للتأثر بالماء عن طريق قياس مايسمى بزاوية اتصال قطرات الماء مع السطح (²¹). Water contact angle (WCA) وهو من الاختبارات المهمة للتعرف على مدى قدرة مواد التقوية على تكوين طبقة حماية واقية على السطح الخارجي للمادة الأثرية المعالجة²² , وقد تم تقييم قدرة مواد التقوية النانوية المستخدمة (مادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانوهيدروكسيد الكالسيوم 3%، مادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانوسيليكا 3%) على طرد الماء في المعهد القومي للقياس والمعايرة باستخدام جهاز AATCC 20- TEXTILE EXAM . MICROSCOPES FOR AATCC 20 AND AATCC 20A METHODS .

2- 2- 5- قياس التغير اللوني Colorimetric measurement

يهدف قياس التغير اللوني للعينات التجريبية المختبرة إلى تحديد نسبة التغير في لون العينات، وتحول لونها الأصلي قبل المعالجة ومدى تأثير مادة التقوية التقليدية والواد النانوية على لون العينات بعد التقوية، ويتم التعرف على قيمة التغير اللوني للعينات التجريبية من خلال نظام يعرف ب²³ CIE L ab ويمكن حساب قيمة التغير اللوني اللوني ΔE من اللوني من خلال المعادلة الآتية:

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

¹⁹) Kannan, et al., Scanning Electron Microscope: Principle, Components, Applications, A Textbook on Fundamentals and /Applications of Nanotechnology, 2018.

²⁰) Zhang, C., and Ulery, M., Scanning Electron Microscope (SEM): Review, Proceedings of International Conference on Hydraulics, Electronic Equipment & Mechatronics, At Romania, 2019, pp. 1-12.

²¹) Darband, et al., Science and Engineering of Super hydrophobic Surfaces: Review of Corrosion Resistance, Chemical and Mechanical Stability, Arabian Journal of Chemistry, Volume, 13, 2020.

²²) Cunha, M., and Cardoso, M., A method For Weathering Contact angle and For Analysis The Surface wettability, Application of nano and micro technology in thermal process and energy conversation, 2017 pp. 1-11.

²³) Hardenberg, et al., Thymus independent class switch recombination is affected, Immunology and Cell Biology. Vol., 86, 2008, pp. 530 – 534.

وقد تم قياس التغير اللوني للعينات المعالجة في المعهد القومي للقياس والمعايرة باستخدام جهاز قياس التغير اللوني من نوع (Spectrophotometer OPTIMATCH. 3100).

2- 2 - 6- قياس الخواص الفيزيائية Physical properties measurement

تعد دراسة الخصائص الفيزيائية للعينات التجريبية المعالجة من الاختبارات المهمة، وذلك لتقييم فاعلية مواد التقوية المختلفة في تحسين خواص العينات التجريبية المعالجة، بالإضافة إلى المقارنة بين المواد المختلفة لاختيار أفضلها في عمليات التقوية لعينات مواد البناء التجريبية²⁴. وقد تم قياس الخواص الفيزيائية كالكتافة والمسامية وامتصاص الماء وفقاً للمواصفة الأمريكية (ASTM C20-00-2015).

2- 2 - 7- قياس الخواص الميكانيكية Mechanical properties measurement

الأحمال والضغوط الميكانيكية التي تتعرض لها مواد البناء الأثرية من أكثر عوامل التلف التي قد تضر بها، مما يؤدي في النهاية إلى إضعافها، بل وتدميرها²⁵، اختبار مقاومة الانضغاط من الاختبارات المهمة المستخدمة في دراسة الخصائص الميكانيكية لمواد البناء الأثرية، حيث يفيد بدرجة كبيرة في تقييم حالة البنية الداخلية لمواد البناء الخاضعة للاختبار، وقد تم تعيين قيم مقاومة الضغط لعينات (الطوب اللبن، الحجر الجيري، الجرانيت) باستخدام ماكينة ضغط من نوع:

Screen Concrete Compression Testing Machine capacity 1500KN, بمعامل مركز بحوث الإسكان والبناء، الدقى، مصر.

3- النتائج والمناقشات

3- 1 التحليل بطريقة حيود الأشعة السينية X-Ray Diffraction Analysis

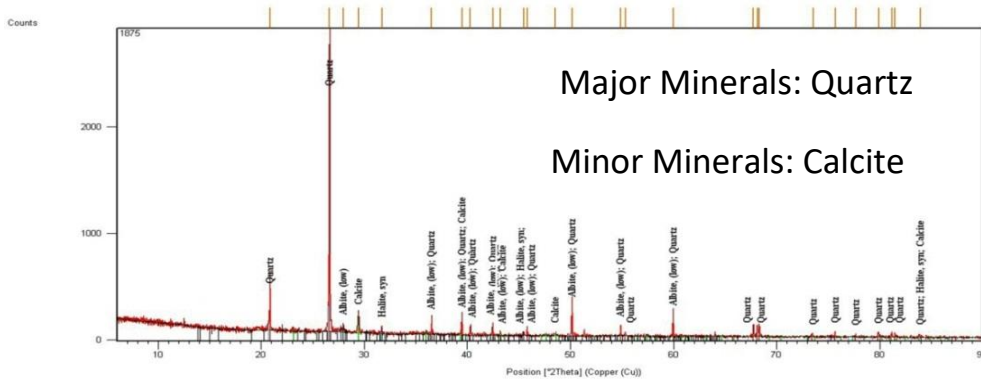
تبين من خلال نتائج التحليل بحيود الأشعة السينية لعينات مواد البناء ما يلي:-

- بالنسبة لعينة الطوب اللبن تتكون من معدن الكوارتز Quartz (SiO₂)، كمكون أساسي بنسبة 80 % بالإضافة إلى معدن الكالسيت [Calcite (Ca CO₃)]، بنسبة 5% بين مكونات العينة، وشوائب من الألبيت [Albite (Na Al Si₃ O₈) بنسبة 14%، والهاليت [Halite (Na Cl)] بنسبة 1%. كما في الشك رقم (1).

²⁴) Smith, M., Stone: Building stone, rock fill and armourstone in construction, Geological Society of London, Engineering Geology Special Publications, Vol. 16, Vol. 33, 1999, pp. 176-176.

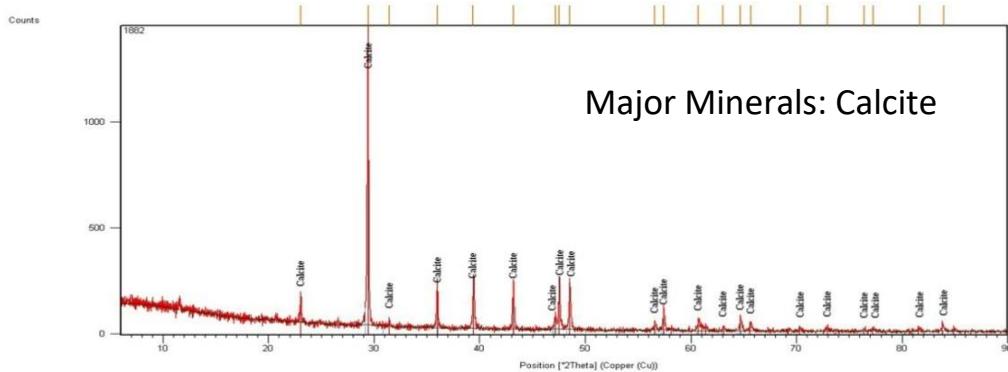
²⁵) Hansen, et al., A review of selected inorganic consolidants and protective treatments for porous calcareous materials, Studies in Conservation, Vol. 4, 2003, pp. 13–25.

تقييم كفاءة مواد التقوية والنانوية في الحفاظ على مواد البناء الأثرية



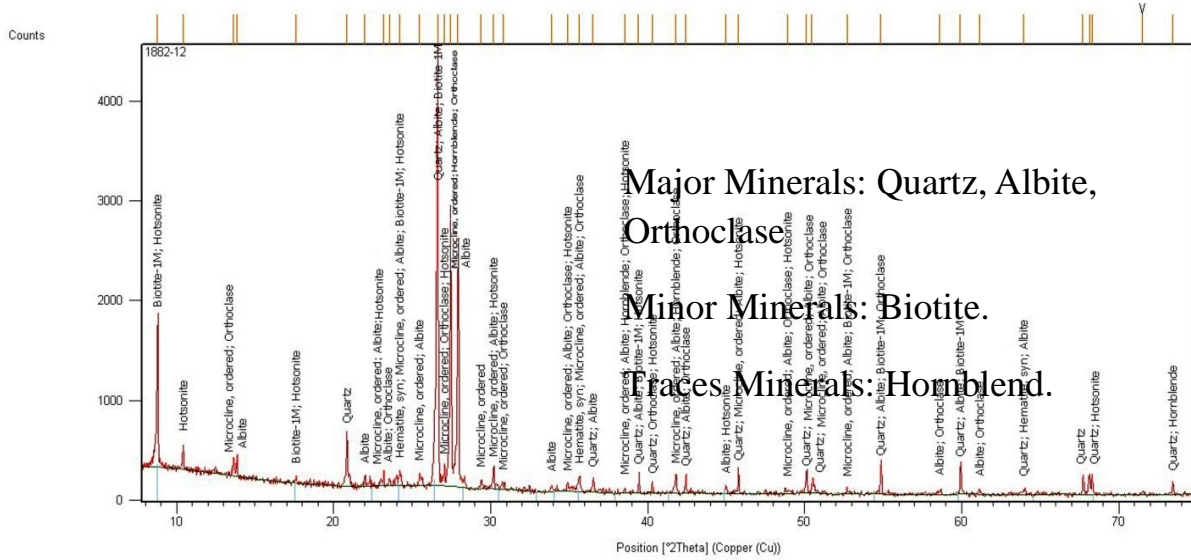
شكل رقم (1) يوضح نمط حيود الأشعة السينية لعينة الطوب اللبن التي تتكون من الكوارتز الكالسيت.

- بالنسبة لعينة الحجر الجيري تتكون من معدن الكالسيت (CaCO₃) ، كما في الشكل رقم (2) ، كما في الشكل رقم (2).



شكل رقم (2) يوضح نمط حيود الأشعة السينية لعينة الحجر الجيري اللبن التي تتكون من الكالسيت.

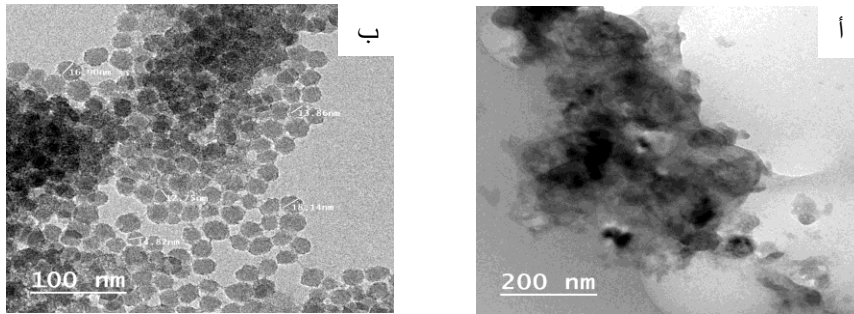
- وبخصوص عينة الجرانيت تتكون من معادن الكوارتز [Quartz (SiO₂)] ، والألبيت [Albite (NaAlSi₃O₈)] ومعدن الأرتوكليز [Orthoclase (K Al Si₃ O₈)] ، وتمثل بنسب عالية في العينة، ثم معدن البيوتيت [Biotite (K Mg Fe)₃(Al Si₃ O₁₀) OH₂] بنسب متفاوتة، وقد وجد معدن الهورنبلند Hornblende بنسبة قليلة. كما في الشكل رقم (3).



شكل رقم (3) يوضح نمط حيود الأشعة السينية لعينة الجرانيت التي تتكون من الكوارتز والألبيت و الأرتوكليز.

3 - 2- الميكروسكوب الإلكتروني النافذ (TEM)

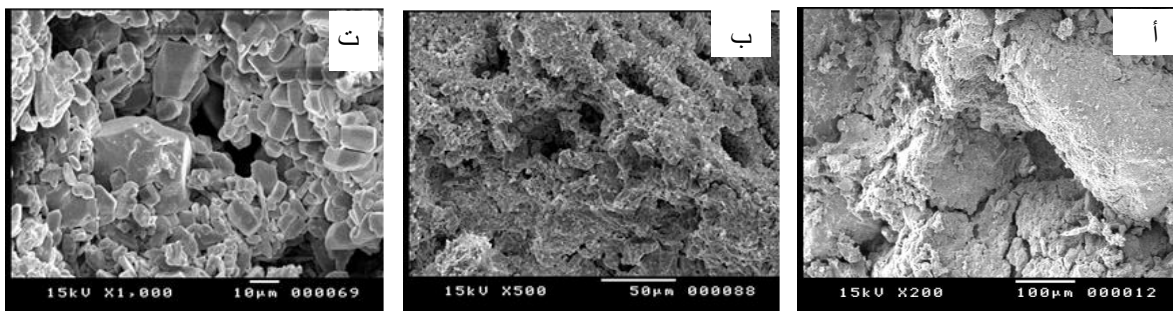
تم فحص مواد التقوية المستخدمة بعد تحضيرها بالمجهر الإلكتروني النافذ TEM للتأكد من نجاح عملية التفاعل، وخط الحبيبات النانوية بالبارالويد ب 72 ، والتعرف على شكل وسلوك المركب بعد عملية الخلط و التفاعل، بالإضافة إلى التأكد من حجم الحبيبات النانومترية كونها في الحجم النانوى بالفعل وذلك للحصول على أفضل النتائج لتحسين الخواص الميكانيكية والفيزيائية لعينات مواد البناء، واتضح من خلال الفحص لمواد التقوية (مادة البارالويد ب 72 المدعمة بحبيبات نانو الكالسيوم، مادة البارالويد ب 72 المدعمة بحبيبات نانو هيدروكسيد الكالسيوم، مادة البارالويد ب 72 المدعمة بحبيبات نانو السيليكا) باستخدام المجهر الإلكتروني النافذ مدى نجاح عملية الخلط بين الحبيبات النانوية لنانو هيدروكسيد الكالسيوم و نانو السيليكا ومادة البوليمر، حيث يظهر المتراكب بشكل متجانس تتوزع بداخله الحبيبات النانوية التي غلفت جزيئات البوليمر بشكل جيد، كما هو موضح فى اللوحة رقم (2) .



لوحة (2) توضح مدى نجاح عملية الخلط بين الحبيبات النانوية ومادة البوليمر. (أ) صورة بالميكروسكوب الإلكتروني النافذ (TEM) توضح حبيبات نانو هيدروكسيد الكالسيوم بعد عملية الخلط والتفاعل مع مادة القالب (البوليمر)، (ب) صورة بالميكروسكوب الإلكتروني النافذ (TEM) توضح حبيبات النانوسيليكا بعد عملية الخلط والتفاعل مع مادة القالب (البوليمر).

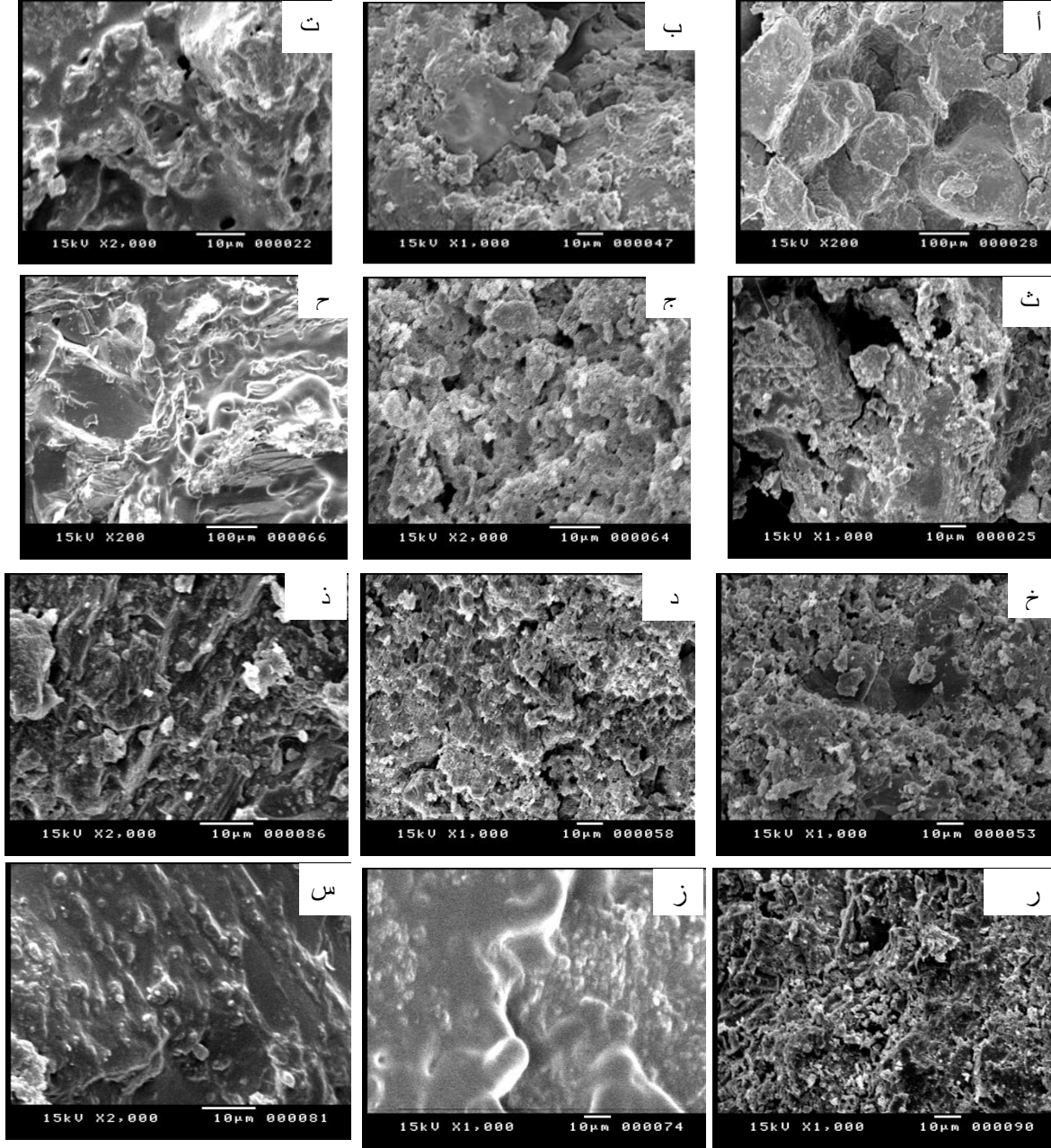
3-3 الفحص بالميكروسكوب الإلكتروني الماسح (SEM)

يمكن التعرف من خلال الميكروسكوب الإلكتروني الماسح (SEM) على مدى تأثير مواد التقوية في الحفاظ على مواد البناء الأثرية (الطوب اللبن والحجر الجيري والجرانيت) موضوع الدراسة، من أجل بقائها بحالة جيدة ولأطول فترة ممكنة²⁶. وقد تم إجراء فحص أسطح عينات مواد البناء التجريبية قبل وبعد التقوية. التقوية، باستخدام الميكروسكوب الإلكتروني الماسح (SEM) ومقارنة نتائج العينات التجريبية للتعرف على مدى انتشار وتغلغل مواد التقوية التقليدية والمواد النانوية داخل العينات ومدى التجانس والتوافق للحصول على طبقة تقوية وحماية لعينات مواد البناء الأثرية. ويتضح من نتائج الفحص بالميكروسكوب الإلكتروني الماسح، حيث تعاني العينات القياسية (لوحة رقم 3) من هشاشة وضعف شديد نتيجة التعرض لعوامل التلف المختلفة، أما بالنسبة لعينات مواد البناء التجريبية المقواه بمواد التقوية التقليدية (مادة الفاكر Wacker OH100 منفردة، مادة البليكسي سول Plexisol P550 منفردة) فقد اتضح مدى تغلغل مادة التقوية داخل مكونات العينات، كما يظهر وجود فيلم دقيق لمادة التقوية التقليدية، في حين أن العينات المعالجة بمواد التقوية النانوية (البارالويد ب-Paraloid – B7272 المدعمة بحبيبات نانو هيدروكسيد الكالسيوم، البارالويد ب-Paraloid – B7272 المدعمة بحبيبات نانو السيليكا)، فقد تبين تغلغل مواد التقوية داخل مكونات عينات مواد البناء وربطها الجيد للحبيبات المعدنية المكونة (للطوب اللبن والحجر الجيري والجرانيت) لوحة رقم (4). أما بعد إجراء عمليات التقادم الاصطناعي، نلاحظ أنه قد حدث نأثر لمواد التقوية التقليدية يتمثل في تقلص الطفيف لمادة التقوية وتأثر النسيج السطحي الخارجي للحبيبات. أما بالنسبة للعينات المقواه بمواد التقوية النانوية، فقد تبين أن مواد التقوية النانوية تتمتع بقدرة عالية على مقاومة عمليات التقادم الاصطناعي، حيث يظهر من خلال الفحص الانتشار الجيد لمادة التقوية والقدرة على تغليف الحبيبات الداخلية، وعدم تأثر سطح الحبيبات المعدنية لعينات مواد البناء. لوحة رقم (5).



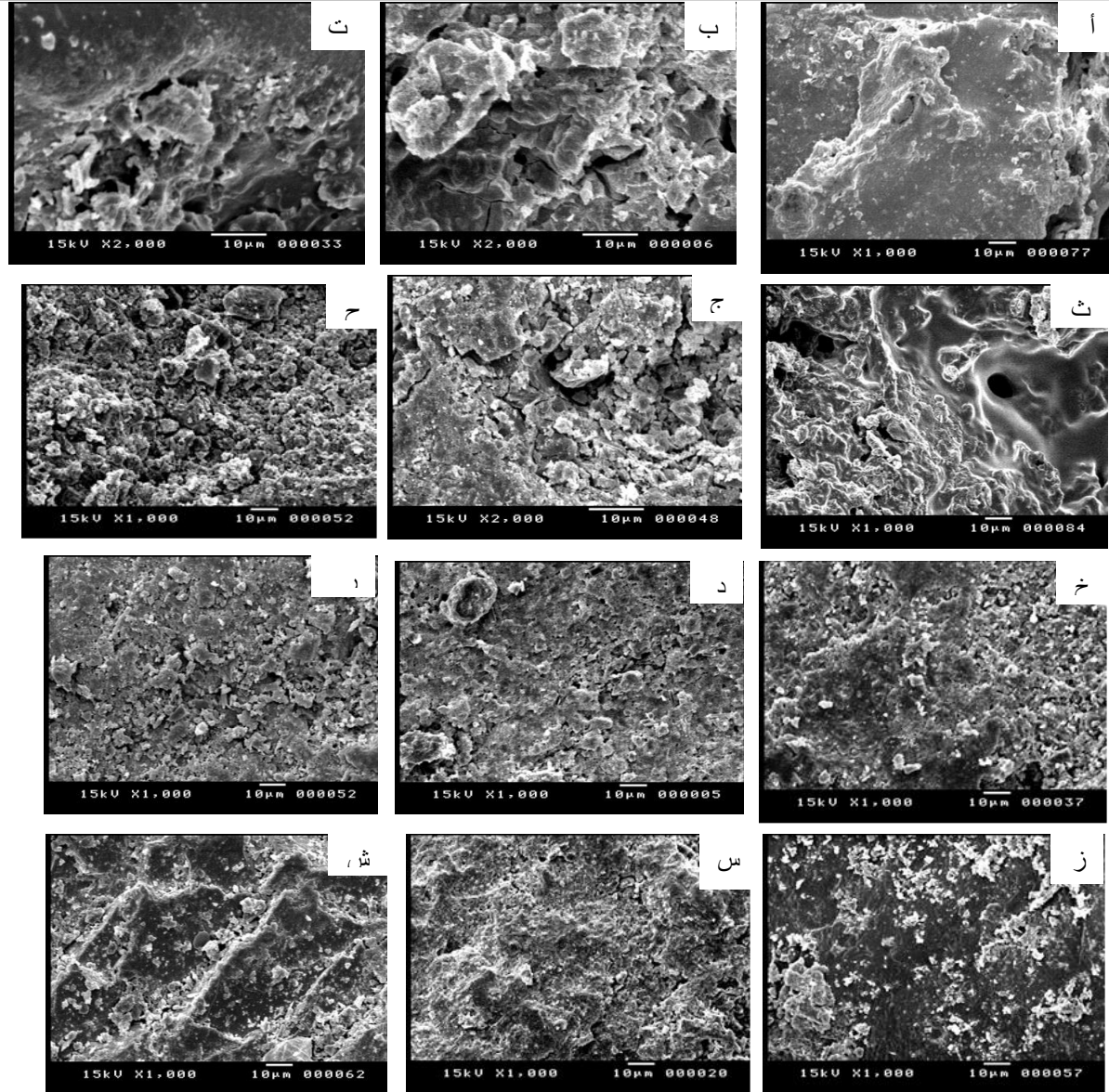
لوحة (3) توضح صورة الفحص بالميكروسكوب الإلكتروني الماسح لعينات مواد البناء التجريبية.
(أ) العينة القياسية للطوب اللبن. (ب) العينة القياسية للحجر الجيري. (ت) العينة القياسية للجرانيت.

²⁶ Kannan, et al.: (2018) Scanning Electron Microscope: Principle, Components, Applications, A Textbook on Fundamentals and Applications of Nanotechnology.



لوحة (4) توضح صورة الفحص بالميكروسكوب الإلكتروني الماسح لعينات مواد البناء التجريبية بعد التقوية، (أ) عينة الطوب اللبن المقواه بمادة الفاكر Wacker OH100، (ب) عينة الطوب اللبن المقواه بمادة البليكسي سول Plexisol P550، (ت) عينة الطوب اللبن المقواه بمادة البارالويد Paraloid – B7272 بمادة البارالويد ب Nanohydroxydicalcium، (ث) العينة المقواه بمادة البارالويد Paraloid – B7272 المدعمة بحبيبات نانو السيليكا، (ج) عينة الحجر الجيري المقواه بمادة الفاكر Wacker OH100، (ح) عينة الحجر الجيري المقواه بمادة البليكسي سول Plexisol P550، (خ) عينة الحجر الجيري المقواه بمادة البارالويد Paraloid – B7272 المدعمة بحبيبات نانو هيدروكسيد الكالسيوم، (د) عينة الحجر الجيري المقواه بمادة البارالويد Paraloid – B7272 المدعمة بحبيبات نانو السيليكا، (ذ) عينة الجرانيت المقواه بمادة الفاكر Wacker OH100، (ر) عينة الجرانيت المقواه بمادة البليكسي سول Plexisol P550، (ز) عينة الجرانيت المقواه بمادة البارالويد Paraloid – B7272 المدعمة بحبيبات نانو هيدروكسيد الكالسيوم، (س) عينة الجرانيت المقواه بمادة البارالويد Paraloid – B7272 المدعمة بحبيبات نانو السيليكا.

تقييم كفاءة مواد التقوية والنانوية في الحفاظ على مواد البناء الأثرية



لوحه (5) توضح صورة الفحص بالميكروسكوب الإلكتروني الماسح لعينات مواد البناء التجريبية بعد التقادم.

(أ) عينة الطوب اللبن المقواه بمادة الفاكر Wacker OH100 بعد التقادم، (ب) عينة الطوب اللبن المقواه بمادة البليكسي سول Plexisol P550 بعد التقادم، (ت) عينة الطوب اللبن المقواه بمادة البارالويد Paraloid - B7272 المدعمة بحبيبات نانو هيدروكسيد الكالسيوم بعد التقادم، (ث) عينة الطوب اللبن المقواه بمادة البارالويد Paraloid - B7272 المدعمة بحبيبات نانو السيليكا بعد التقادم، (ج) عينة الحجر الجيري المقواه بمادة الفاكر Wacker OH100 بعد التقادم، (ح) عينة الحجر الجيري المقواه بمادة البليكسي سول Plexisol P550 بعد التقادم، (خ) عينة عينة الحجر الجيري المقواه بمادة البارالويد Paraloid - B7272 المدعمة بحبيبات نانو هيدروكسيد الكالسيوم بعد التقادم، (د) عينة عينة الحجر الجيري المقواه بمادة البارالويد Paraloid - 72 المدعمة بحبيبات نانو السيليكا بعد التقادم، (ر) عينة الجرانيت المقواه بمادة الفاكر Wacker OH100 بعد التقادم، (ز) عينة الجرانيت المقواه بمادة البليكسي سول Plexisol P550 بعد التقادم، (س) عينة الجرانيت المقواه بمادة البارالويد Paraloid - 72 المدعمة بحبيبات نانو هيدروكسيد الكالسيوم بعد التقادم، (ش) عينة الجرانيت المقواه بمادة البارالويد Paraloid - B7272 المدعمة بحبيبات نانو السيليكا بعد التقادم.

3-4- قياس زاوية اتصال الماء Static contact angle measurement

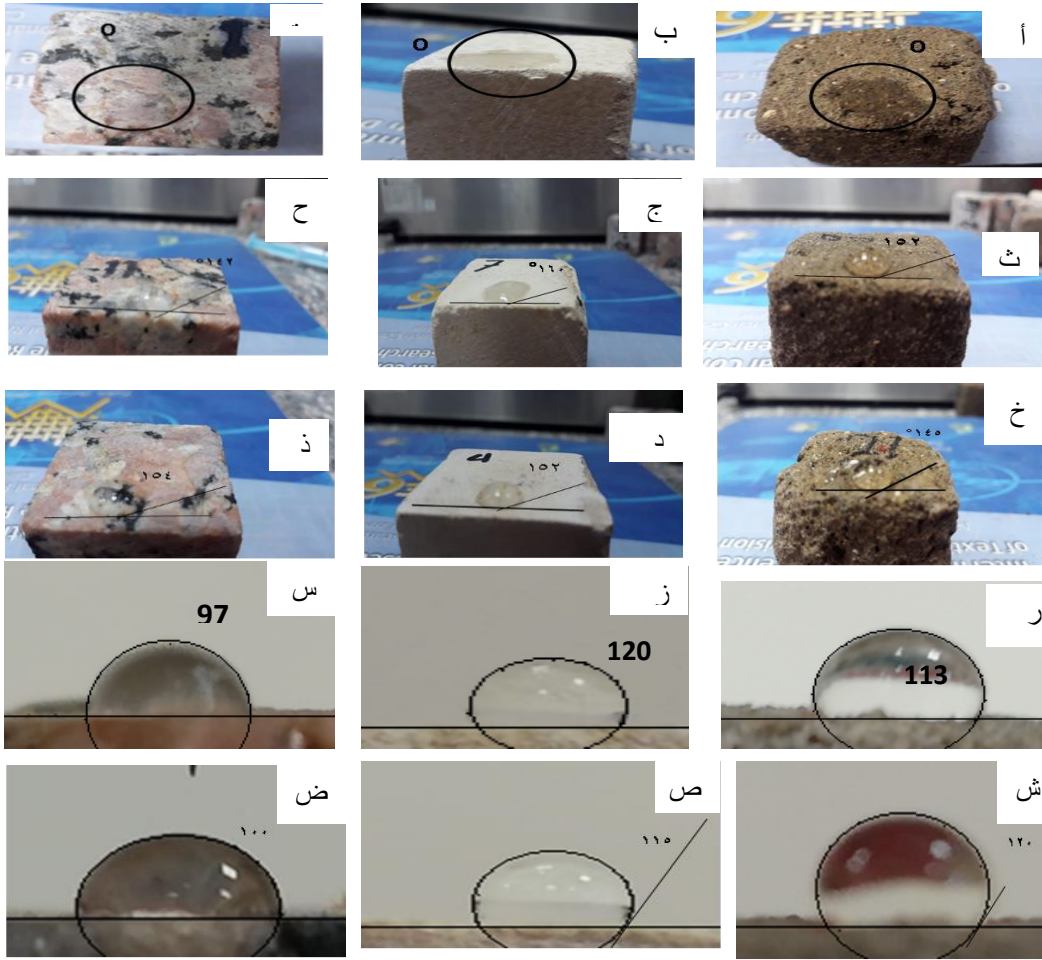
يعد الماء من أكثر عوامل التلف الفيزيوكيميائية ضرراً بمواد البناء الأثرية، لذا فإنه من المهم أن تتميز مواد التقوية بقدرة فائقة على طرد الماء، وتزويد أسطح مواد البناء بهذه الخاصية، من خلال منع تغلغل الماء داخل مواد البناء المقواة²⁷، ويتضح من الجدول رقم (1) واللوحه (6) أن مواد التقوية المدعمة بحبيبات النانو تتمتع بقدرة عالية على طرد الماء حيث حققت مادة البارالويد ب 72 (Paraloid B- 72) المدعمة بحبيبات نانو هيدروكسيد الكالسيوم زاوية اتصال قدرها 160° مع الحجر الجيري، بينما مع الطوب اللبن حققت زاوية اتصال قدرها 152°، أما مع الجرانيت فقد حققت أدنى زاوية اتصال وقدرها 142°. أما مادة البارالويد ب 72 (Paraloid B- 72) المدعمة بحبيبات نانو السيليكا فقد حققت أعلى زاوية اتصال قدرها 154° مع الجرانيت بينما مع الحجر الجيري حققت زاوية اتصال قدرها 152° أما مع الطوب اللبن فقد حققت أدنى زاوية اتصال وقدرها 145°. أما بعد التقادم فقد حدث تغير في نتائج زاوية اتصال الماء حيث سجلت مادة البارالويد ب 72 (Paraloid B- 72) المدعمة بحبيبات نانو السيليكا زاوية اتصال قدرها 120° مع عينات الطوب اللبن. بينما مع الحجر الجيري فقد سجلت 115°. أما مع لجرانيت فقد سجلت زاوية إتصال قدرها 100°. أما مادة البارالويد ب 72 (Paraloid B- 72) المدعمة بحبيبات نانو هيدروكسيد الكالسيوم فقد سجلت زاوية اتصال قدرها 120° مع الحجر الجيري. بينما سجلت مع عينات الطوب اللبن 113°. أما مع لجرانيت فقد سجلت زاوية إتصال قدرها 97°، وبشكل عام يتضح بعد التقادم إنخفاض قدرة مواد التقوية النانوية على طرد الماء، إلا إنها مازالت تتمتع بقدرة عالية على طرد الماء.

جدول رقم (1) يوضح نتائج قياس زاوية اتصال الماء بسطح العينات المعالجة بمادة بارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانو هيدروكسيد الكالسيوم وبحبيبات نانو السيليكا بعد التقوية وبعد التقادم.

م	مادة التقوية	نوع العينة	زاوية اتصال الماء بسطح العينة (°) بعد التقوية	زاوية اتصال الماء بسطح العينة (°) بعد التقادم
0	Untreated	طوب لبن	0	
		حجر جيري	0	
		جرانيت	0	
1	مادة بارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانو هيدروكسيد الكالسيوم 3%	طوب لبن	152°	113
		حجر جيري	160°	120
		جرانيت	142°	97
2	مادة بارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانو السيليكا 3%	طوب لبن	145°	120
		حجر جيري	152°	115
		جرانيت	154°	100

²⁷ ياسر كمال حفنى : تقييم استخدام المركبات النانوية متعددة الوظائف في حماية الآثار الجرانيتية مع التطبيق العملي علي نموذج مختار، رسالة دكتوراه، قسم الترميم، كلية الآثار، جامعة القاهرة، 2016، ص238.

تقييم كفاءة مواد التقوية والنانوية في الحفاظ على مواد البناء الأثرية



لوحة (6) نتائج قياس زاوية اتصال الماء بسطح العينات المقواه بمادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانوهيدروكسيد الكالسيوم وبحبيبات نانو السيليكا بعد التقوية وبعد التقادم.

(أ) عينة الطوب اللبن القياسية، (ب) عينة الحجر الجيري القياسية، (ت) عينة الجرانيت القياسية، (ث) تبين زاوية اتصال الماء على سطح عينة الطوب اللبن المقواه بمادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانوهيدروكسيد الكالسيوم، (ج) تبين زاوية اتصال الماء على سطح عينة الحجر الجيري المقواه بمادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانوهيدروكسيد الكالسيوم، (ح) تبين زاوية اتصال الماء على سطح عينة الجرانيت المعالجة بمادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانوهيدروكسيد الكالسيوم، (خ) تبين زاوية اتصال الماء على سطح عينة الطوب اللبن المقواه بمادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانوالسيليكا، (د) تبين زاوية اتصال الماء على سطح عينة الحجر الجيري المقواه بمادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانوالسيليكا، (ذ) تبين زاوية اتصال الماء على سطح عينة الجرانيت المقواه بمادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانوالسيليكا، (ر) تبين زاوية اتصال الماء على سطح عينة الطوب اللبن المقواه بمادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانوهيدروكسيد الكالسيوم بعد التقادم، (ز) تبين زاوية اتصال الماء على سطح عينة الحجر الجيري المقواه بمادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانو السيليكا بعد التقادم، (س) تبين زاوية اتصال الماء على سطح عينة الجرانيت المقواه بمادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانوهيدروكسيد الكالسيوم بعد التقادم، (ش) تبين زاوية اتصال الماء على سطح عينة الطوب اللبن المقواه بمادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانوالسيليكا بعد التقادم، (ص) تبين زاوية اتصال الماء على سطح عينة الحجر الجيري المقواه بمادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانوالسيليكا بعد التقادم، (ض) تبين زاوية اتصال الماء على سطح عينة الجرانيت المقواه بمادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانوالسيليكا بعد التقادم.

3-5- قياس التغير اللوني Colorimetric measurements

تم إجراء اختبار التغير اللوني لعينات مواد البناء التجريبية بعد إجراء عملية التقوية وكذلك بعد التقادم لمعرفة مدى تأثير مواد التقوية التقليدية والنانوية على لون عينات مواد البناء المعالجة، وتم التعرف على قيمة التغير اللوني لعينات مواد البناء من خلال القانون المعروف ب (CIE L a b) المعادة الآتية:

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

وقد أظهرت قياسات قيمة التغير اللوني الكلي لعينات مواد البناء المقواه مايلي:

- بالنسبة لعينات الطوب اللبن نجحت مادة البليكسي سول Plexisol P550 في تحقيق أقل درجة تغير لوني (0.83) تلتها مادة الفاكر OH100 حيث حققت تغير لوني قدرة (1.14). بينما مادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانو هيدروكسيد الكالسيوم 3% فقد حققت تغير لوني قدرة (2.11) . أما مادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانو السيليكا 3% فقد حققت تغير لوني قدرة (3.69).

- أما بالنسبة لعينات الحجر الجيري فقد نجحت مادة الفاكر OH100 في تحقيق أقل درجة تغير لوني (1.18) . تلتها مادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانو هيدروكسيد الكالسيوم 3% حيث حققت قيمة تغير لوني (1.98). بينما مادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانو السيليكا 3% فقد حققت تغير لوني قدره (2.69). أما مادة البليكسي سول Plexisol P550 فقد حققت أعلى قيمة للتغير اللوني قدرة (3.6).

- وبخصوص عينات الجرانيت فقد نجحت مادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانو السيليكا 3% في تحقيق أقل درجة تغير لوني (3.1) تلتها مادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانو هيدروكسيد الكالسيوم 3% حيث حققت قيمة تغير لوني (3.7). بينما البليكسي سول Plexisol P550 فقد حققت تغير لوني قدره (4.7). أما مادة الفاكر OH100 فقد سجلت قيمة تغير لوني قدرها (4.8) ، وبذلك تكون نتائج قيم التغير اللوني داخل الحدود الآمنة $\Delta E < 5$ (5) . أما بعد التقادم فقد حدث تغير ملحوظ بالنسبة لجميع عينات مواد البناء التجريبية المقواه بمواد التقوية التقليدية حيث كانت نتائج قيم التغير اللوني قد زادت عن الحدود الآمنة ($\Delta E < 5$) أما بالنسبة لعينات مواد البناء المقواه بمواد التقوية النانوية فقد أعطت تغيرا لونيا طفيفا حيث كانت نتائج قيم التغير اللوني داخل الحدود الآمنة ($\Delta E < 5$)، ويوضح الجدول رقم (2)، (3) نتائج قياس التغير اللوني للعينات التجريبية المعالجة بعد التقوية وبعد التقادم.

تقييم كفاءة مواد التقوية والنانوية في الحفاظ على مواد البناء الأثرية

جدول رقم (2) يوضح نتائج اختبار التغير اللوني لعينات مواد البناء المقواه بمواد التقوية بعد التقوية.

م	مادة التقوية	نوع العينة	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE
1	مادة بارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانوهيدروكسيد الكالسيوم 3%	طوب لبن	-1.89	-0.18	-0.92	2.11
		حجر جيرى	-0.84	-0.09	1.79	1.98
		جرانيت	-3.5	0.0	-1.4	3.7
2	مادة بارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانوالسيليكات 3%	طوب لبن	-2.68	-0.93	-0.36	3.69
		حجر جيرى	-2.64	-0.17	0.49	2.69
		جرانيت	-1.9	0.0	2.5	3.1
3	مادة الفاكر Oh100	طوب لبن	-1.13	0.05	0.13	1.14
		حجر جيرى	-0.71	-0.23	0.92	1.18
		جرانيت	-0.8	2.9	3.8	4.8
4	مادة البليكسى سول P550	طوب لبن	-0.80	0.20	0.04	0.83
		حجر جيرى	-3.5	0.7	0.7	3.6
		جرانيت	-3.6	1.7	2.2	4.2

جدول (3) يوضح نتائج قياس التغير اللوني لعينات مواد البناء المقواه بمواد التقوية بعد التقادم.

م	مادة التقوية	نوع العينة	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE
1	مادة بارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانوهيدروكسيد الكالسيوم 3%	طوب لبن	-2.6	2.8	-0.5	3.8
		حجر جيرى	-4.4	-0.4	-2.3	4.2
		جرانيت	-3.3	2.7	-1.1	4.4
2	مادة بارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانوالسيليكات 3%	طوب لبن	-4.1	2.8	-0.5	4.9
		حجر جيرى	-1.6	1.6	-2.3	3.2
		جرانيت	-2.3	3.0	-1.1	3.9
3	مادة الفاكر Oh100	طوب لبن	-2.9	4.3	-1.2	5.3
		حجر جيرى	-4.5	1.0	-2.3	5.1
		جرانيت	-4.5	4.0	-1.1	6.1
4	مادة البليكسى سول P550	طوب لبن	-1.8	2.8	-0.5	3.3
		حجر جيرى	-6.6	1.0	1.9	5.2
		جرانيت	-4.0	4.0	-1.1	5.7

3-6- قياس الخواص الفيزيائية Physical properties measurement

يتبين من الجدول رقم (4) نتائج قياس الخواص الفيزيائية للعينات التجريبية بعد التقوية، وقد لوحظ زيادة قيم الكثافة لجميع العينات المعالجة، إلا أنها أعطت قيماً متفاوتة حيث كان متوسط قيم الكثافة قبل التقوية لثلاث عينات لكل من الطوب اللبن (1.92 جرام / سم³)، الحجر الجيري (2.04 جرام / سم³)، الجرانيت (2.93 جرام / سم³) أما بعد التقوية فنجد قيم كثافة عينات مواد البناء كانت كالتالي:-

بالنسبة لعينات الطوب اللبن نجحت مادة الفاكر OH100 في تحقيق أعلى قيمة للكثافة بلغت (2.30 جرام / سم³). تلتها مادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانو السيليكا 3% حيث حققت قيمة قدرها (2.22 جرام / سم³). بينما مادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانو هيدروكسيد الكالسيوم 3% فقد بلغت الكثافة قيمة قدرها (2.17 جرام / سم³). أما مادة البليكسي سول P550 فقد جاءت في المرتبة الأخيرة حيث سجلت قيمة قدرها (2.11 جرام / سم³). أما بالنسبة لعينات الحجر الجيري فقد نجحت مادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانو هيدروكسيد الكالسيوم 3% في تحقيق أعلى قيمة للكثافة بلغت (2.61 جرام / سم³). تلتها مادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانو السيليكا 3% حيث حققت قيمة قدرها (2.57 جرام / سم³). بينما مادة البليكسي سول P550 فقد بلغت الكثافة قيمة قدرها (2.44 جرام / سم³). أما مادة الفاكر OH100 فقد جاءت في المرتبة الأخيرة حيث سجلت قيمة قدرها (2.26 جرام / سم³).

- وبخصوص عينات الجرانيت نجحت مادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانو السيليكا في تحقيق أعلى قيمة للكثافة بلغت (3.082 جرام / سم³). تلتها مادة الفاكر OH100 حيث حققت قيمة قدرها (3.076 جرام / سم³). بينما مادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانو هيدروكسيد الكالسيوم 3% فقد حققت قيمة قدرها (3.069 جرام / سم³). أما مادة البليكسي سول P550 فقد جاءت في المرتبة الأخيرة حيث سجلت قيمة قدرها (2.976 جرام / سم³). أما بعد التقدم فقد لوحظ تغيير في قيم الكثافة لجميع العينات التجريبية المعالجة بمواد التقوية التقليدية في حين سجلت مواد التقوية النانوية قيم كثافة بإنخفاض طفيف .

أما بالنسبة لامتناس الماء والمسامية تم تعيين نسب امتناس الماء والمسامية للعينات المعالجة واتضح نجاح جميع مواد التقوية في تقليل معدل امتناس الماء للعينات المعالجة وبالتالي تقليل نسب المسامية نتيجة تغلغل المواد المقوية داخل المسام وشغلها جزء من الفراغات بين الحبيبات المعدنية، وكانت النتائج كالتالي :-

- حققت مادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانو هيدروكسيد الكالسيوم 3% أعلى نسب انخفاض في معدل امتناس الماء ونسب المسامية بالنسبة لعينات الطوب اللبن حيث بلغت 0.87% لمتوسط قيم امتناس الماء، 1.88% لمتوسط قيم المسامية. تلتها مادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانو السيليكا 3% والتي حققت نسب

تقييم كفاءة مواد التقوية والنانوية في الحفاظ على مواد البناء الأثرية

انخفاض في معدل امتصاص الماء بلغت 0.99 %، 2.24% لمتوسط قيم المسامية. بينما مادة الفاكر OH100 حققت معدل انخفاض قدرة 1.09% لقيم امتصاص الماء، 2.54% لقيم المسامية. أما مادة البليكسي سول P550 فقد جاءت في المرتبة الأخيرة حيث سجلت قيمة قدرها 1.27% لقيم امتصاص الماء، 2.69% لقيم المسامية.

- أما بالنسبة لعينات الحجر الجيري فقد حققت مادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانو هيدروكسيد الكالسيوم 3% أعلى نسب انخفاض في معدل امتصاص الماء ونسب المسامية بلغت 0.62% % لقيم امتصاص الماء، 1.63% لقيم المسامية. تلتها مادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانوالسيليكات 3% والتي حققت نسب انخفاض في معدل امتصاص الماء بلغت 0.76% ، 1.96% لقيم المسامية. بينما مادة البليكسي سول 3% P550 حققت معدل انخفاض قدره 0.86% لقيم امتصاص الماء، 2.09% لقيم المسامية. أما مادة الفاكر OH100 فقد جاءت في المرتبة الأخيرة حيث سجلت قيمة قدرها 0.98% لقيم امتصاص الماء، 2.35% لقيم المسامية.

- أما عينات الجرانيت فقد حققت مادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانوالسيليكات 3% أعلى نسب انخفاض في معدل امتصاص الماء ونسب المسامية بلغت 0.038 % لقيم امتصاص الماء ، 0.134% لقيم المسامية. تلتها مادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانو هيدروكسيد الكالسيوم 3% والتي حققت نسب انخفاض في معدل امتصاص الماء بلغت 0.044 % ، 0.134% لقيم المسامية. بينما مادة الفاكر OH100 حققت معدل انخفاض قدرة 0.047% لقيم امتصاص الماء، 0.146% لقيم المسامية. أما مادة البليكسي سول (3% P550) فقد جاءت في المرتبة الأخيرة حيث سجلت نسب انخفاض قدرة 0.083% لقيم امتصاص الماء، 0.247% لقيم المسامية. أما بعد التقادم فقد تغيرت نسب المسامية وامتصاص الماء للعينات التجريبية المقواه بمواد التقوية التقليدية حيث أعطت نسب من متوسطة إلى ضعيفة في حين مواد التقوية النانوية أقل العينات تأثراً بدورات التقادم حيث تغيرت نسب المسامية وامتصاص الماء بمعدل طفيف.

جدول (4) يوضح نتائج قياس الخواص الفيزيائية للعينات التجريبية المقواه بعد التقوية وبعد التقادم .

م	مادة التقوية	نوع العينة	الكثافة		إمتصاص الماء		المسامية	
			جرام / سم ³	جرام / سم ³	%	%	%	%
			بعد التقوية	بعد التقادم	بعد التقوية	بعد التقادم	بعد التقوية	بعد التقادم
0	Untreated	طوب لبن	1.98	-	2.78	-	5.94	-
		حجر جيرى	2.04	-	1.42	-	3.24	-
		جرانيت	2.84	-	0.23	-	0.67	-
1	مادة بارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانوهيدروكسيد الكالسيوم 3%	طوب لبن	3.17	2.15	0.87	1.01	1.88	2.17
		حجر جيرى	2.61	2.51	0.61	0.74	1.63	1.95
		جرانيت	3.069	3.028	0.044	0.14	0.134	0.42
2	مادة بارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانوالسيليكات 3%	طوب لبن	2.22	2.19	0.99	1.64	2.24	3.59
		حجر جيرى	2.57	2.47	0.76	0.83	1.96	2.07
		جرانيت	3.083	3.057	0.083	0.12	0.116	0.36
3	مادة الفاكر Oh100	طوب لبن	2.30	2.26	1.09	2.17	2.54	4.90
		حجر جيرى	3.32	2.26	0.98	1.28	2.35	2.59
		جرانيت	3.076	3.056	0.047	12..0	0.146	0.15
4	مادة البليكسى سول P550	طوب لبن	2.11	2.07	1.27	2.21	2.69	4.57
		حجر جيرى	2.44	2.34	0.86	1.1	2.09	2.57
		جرانيت	2.976	2.940	0.083	0.18	0.247	0.52

7-3 - قياس الخواص الميكانيكية Mechanical properties measurements

يتبين من الجدول رقم (5) نتائج قياس الخواص الميكانيكية للعينات التجريبية بعد التقوية، وقد لوحظ تحسن وزيادة مقاومة الضغط للعينات المعالجة عن العينات غير المعالجة، وكانت النتائج كالتالي :-

- حققت مادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانو السيليكا 3% أعلى قيمة لمقاومة الضغط بالنسبة لعينات الطوب اللبن بلغت (14.12 كجم/سم²). تلتها مادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانو هيدروكسيد الكالسيوم 3% حيث حققت قيمة قدرها (13.62 كجم/سم²). بينما مادة الفاكر OH100 حققت قيمة قدرها (10.86 كجم/سم²). أما مادة البليكسي سول P550 فقد جاءت في المرتبة الأخيرة حيث سجلت قيمة قدرها (8.95 كجم/سم²).

- أما بالنسبة لعينات الحجر الجيري فقد حققت مادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانو هيدروكسيد الكالسيوم 3% أعلى قيمة لمقاومة الضغط بلغت (178.73 كجم/سم²). تلتها مادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانو السيليكا 3% حيث سجلت قيمة قدرها (176.69 كجم/سم²). بينما مادة البليكسي سول P550 حققت قيمة قدرها (151.94 كجم/سم²). أما مادة الفاكر OH100 فقد جاءت في المرتبة الأخيرة حيث سجلت قيمة قدرها (145.41 كجم/سم²).

- أما عينات الجرانيت فقد حققت مادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانو السيليكا 3% أعلى قيمة لمقاومة الضغط بلغت (424.09 كجم/سم²). تلتها مادة البارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانو هيدروكسيد الكالسيوم 3% حيث حققت قيمة قدرها (379.21 كجم/سم²). بينما مادة الفاكر OH100 سجلت قيمة قدرها (284.35 كجم/سم²). أما مادة البليكسي سول P550 فقد جاءت في المرتبة الأخيرة حيث حققت قيمة قدرها (271.7 كجم/سم²). أما بعد التقادم فقد لوحظ قلت مقاومة الضغط في العينات المقواه بمواد التقوية التقليدية. أما العينات المقواه بالمواد النانوية سجلت أعلى قيم في مقاومة الضغط.

جدول (5) يوضح نتائج قياس الخواص الميكانيكية للعينات التجريبية المقواه بعد التقوية وبعد التقادم.

م	مادة التقوية	نوع العينة	مقاومة الإنضغاط كجم/سم ² بعد التقوية	مقاومة الإنضغاط كجم/سم ² بعد التقادم
0	Untreated	طوب لبن	5.40	-
		حجر جيري	94.07	-
		جرانيت	243.29	-
1	مادة بارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانو هيدروكسيد الكالسيوم 3%	طوب لبن	14.12	12.95
		حجر جيري	178.73	173.85
		جرانيت	379.21	368.17
2	مادة بارالويد ب72 المدعمة بحبيبات نانو السيليكا 3%	طوب لبن	13.63	12.4
		حجر جيري	176.69	170.79

419.95	424.09	جرانيت	مادة الفاكر OH100	3
8.02	10.86	طوب لبن		
138.13	145.41	حجر جبرى		
279.43	284.35	جرانيت		
7.22	8.95	طوب لبن	مادة البليكسى سول P550	4
147.58	151.94	حجر جبرى		
264.77	271.7	جرانيت		

مناقشة النتائج Discuss the results:-

تتعرض مواد البناء الأثرية في البيئات المفتوحة للعديد من عوامل التلف المختلفة التي تؤثر على قوتها ومنانتها، ومن مواد البناء الأثرية التي تعرضت للتلف في موقع مقابر العمال بالجيزة (الطوب اللبن – الحجر الجبرى – الجرانيت) لذلك تم دراسة فعالية بعض مواد التقوية التقليدية والنانوية لاختيار أفضلها في تقوية تلك المواد؛ فقد تم دراسة فعالية كل من مادة الفاكر (Wacker OH100) منفرداً، ومادة البليكسى سول Plexisol P550 منفردة بنسبة تركيز 3%، مادة البارالويد ب 72 مدعمة بحبيبات نانو هيدروكسيد الكالسيوم بنسبة تركيز 3%، مادة البارالويد ب 72 مدعمة بحبيبات نانو السيليكا بنسبة 3% . وتم استخدام طرق مختلفة للفحص والدراسة، للتعرف على كفاءة تلك المواد المعالجة وثباتها بعد التطبيق وبعد مراحل التقدم الاصطناعي. وقد أظهر الفحص باستخدام الميكروسكوب الإلكتروني النافذ (TEM) نجاح عملية الترابط والتجانس بين بوليمر البارالويد ب72 التقليدي ومادة نانو هيدروكسيد الكالسيوم ومادة نانو السيليكا حيث تمكنت الحبيبات النانوية من تغليف سلاسل البوليمر بصورة جيدة، نتج عنها الحصول على مركب متجانس تتوزع بداخله الحبيبات النانوية بشكل مثالي، كما تبين من الفحص بالميكروسكوب الإلكتروني الماسح (SEM) مدى تغلغل مادة التقوية داخل مكونات مواد البناء الأثرية والانتشار الجيد داخل الفراغات والشروخ الدقيقة وتغليف الحبيبات المعدنية بطبقة من البوليمر، ونجاح مواد التقوية النانوية في ذلك بدرجة أكبر من مواد التقوية التقليدية. كما حققت العينات المعالجة بمواد التقوية النانوية خصائص مقاومة للماء جعلتها تتمتع بقدرة عالية على طرد الماء. فيما أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها من خلال قياسات التغير اللوني أن التقوية بمواد التقوية النانوية حققت أقل قيمة في التغير اللوني الكلى. كما سجلت العينات المعالجة بالمواد النانوية أفضل النتائج من حيث تحسين الخواص الفيزيائية سواء كان ذلك في تحسين خصائص امتصاص الماء أو المسامية أو الكثافة الكلية. ومن حيث نتائج الخواص الميكانيكية، فقد كانت نتائج العينات المقواه بمواد التقوية النانوية هي الأفضل مقارنة بنتائج العينات المقواه بمواد التقوية النانوية. ويتضح من نتائج المتغيرات التي تمت بالعينات المقواه أن مادة البارالويد المدعمة بحبيبات نانو هيدروكسيد الكالسيوم وحبيبات السيليكا ملائمة جداً ويمكن إستخدامها في تقوية مواد البناء الضعيفة بموقع مقابر العمال بالجيزة موضوع الدراسة،

المراجع Referenc

1- بدوى محمد إسماعيل: التأثيرات المدمرة للبيئة على الأحجار الأثرية المتنوعة المصادر، بحث ترقى، 1999.

تقييم كفاءة مواد التقوية والنانوية في الحفاظ على مواد البناء الأثرية

- 2- جيهان مصطفى محمد حسن القميشاوى: دراسة ترميم العناصر المعمارية المتهدمة بمقبرة الأمير تتي عنخ كم بسقارة، رسالة ماجستير، قسم ترميم الآثار، كلية الآثار، جامعة القاهرة، 2021.
- 3- سليم حسن: مصر القديمة فى مدينة مصر وثقافتها فى الدولة القديمة والعصر الإهناسى، الجزء الثانى، الهيئه المصرية العامة للكتاب، 1992.
- 4- قابلية مبارك: تطور مواد وأساليب البناء فى العمارة الصحراوية ، رسالة ماجستير، كلية العلوم الإنسانية والإجتماعية، جامعة محمد خضير، بسكرة، 2010.
- http://thesis.univ-biskra.dz/2244/1/M%C3%A9moire_2010.pdf
- 5- قادة لبتنر: خصائص مواد العمارة الترابية بجنوب الجزائر- دراسة مادة الطوب من قصر موغل بالجنوب الغربي، مجلة جيل العلوم الانسانية والاجتماعية العدد 53، 2019، ص 146- 162.
- <https://jilrc.com/archives/10743>.
- 6- محمد عبد الهادي : علاج وصيانة أطلال المباني الطينية القبطية، مجلة كلية الآثار، العدد التاسع، جامعة القاهرة، مركز جامعة القاهرة للطبع والنشر 1996.
- 7- محمد مجدى تراب: الموسوعة الجيومورفولوجية، الجمعية المصرية للتغيرات البيئية، 2011.
- 8- ياسر كمال حفنى : تقييم استخدام المركبات النانوية متعددة الوظائف فى حماية الاثار الجرانيتية مع التطبيق العملي علي نودج مختار، رسالة دكتوراه، قسم الترميم، كلية الآثار، جامعة القاهرة، 2016.
- 10- Adam, O., Hemada, S., and Abd El-Hady, M., Durability of decorative stones and other construction materials of Al-Tanbogha Al-Mardany mosque (1340 A.D) 14TH century in Cairo. Egyptian. Journal of Archaeological and Restoration Studies, vol. 5, No. 1, 2015.
- 11- Cunha, M., and Cardoso, M., A method For Weathering Contact angle and For Analysis the Surface wettability, Application of nano and micro technology in thermal process and energy conversation, 2017.
- 12- Darband, B., Aliofkhazraei, M., Khorsand, S., Sokhanvar S. and Kaboli, A., Science and Engineering of Super hydrophobic Surfaces: Review of Corrosion Resistance, Chemical and Mechanical Stability, Arabian Journal of Chemistry Volume 13, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2018.01.013>
- 13-El- gohary, M., the environmental factors affecting the archaeological buildings in Egypt, Interdisciplinary research on the works of art, 2012.

14-Graziani, G., Sassoni, E. and Franzoni, E. Consolidation of porous carbonate stones by an innovative phosphate treatment: mechanical strengthening and physical-microstructural compatibility in comparison with TEOS-based treatments, *Heritage Science*, 2015.

15-Hardenberg, G., Bostelen, V., Hahne, M. and Medema, J., Thymus independent class switch recombination is affected, *Immunology and Cell Biology*, Vol. 86, 2008.

16-Hansen, R., Dohene, E., Fidler, J., Larson, J., Martin, B., and Matteini, M., A review of selected inorganic consolidants and protective treatments for porous calcareous materials, *Studies in Conservation*, Vol. 4, 2003.

17- Hemeda. S., Khalil. M., Shoeb. A. and Abd El Aziz. A. The effectiveness of nano materials and nano-modified polymers for preservation of historic brick masonry in Rashid, Egypt, *International Journal of Conservation Science*, Vol. 9, No. 4, 2018, 2018.

18-Ibrahim, M. and Mohamed, H., Analytical methods of ar-chaeological pottery sarcophagus excavated from Saqqara, Egypt, *Scientific culture*, Vol. 5, No. 1, 2019. DOI:10.5281/zenodo.1482943

19-Kannan, K., Subramanian, J., Janavi, S., Marimutu, K., Raga, D. and Sharmila, J. *Scanning Electron Microscope: Principle, Components, Applications, ATextbook on Fundamentals and /Applications of Nanotechnology*, 2018.

20- Kimbro, E., Preusser, D., Twilley, J., Crosby, T., Nolan, J. and Smith, A., *Deterioration and Preservation of Porous Stone Royal Presidio Chapel, Monterey*, National Center for Preservation Technology and Training Publication, California, 1996.

21- Lavina, B., Dera, P. and Downs, R., *Modern X-ray Diffraction Methods in Mineralogy and Geosciences*, Mineralogical Society of America, Vol. 78, 2014.

22- Rossi-Manaresi, R. and Tucci, A., Pore Structure and the Disruptive or Cementing Effect of Salt Crystallization in Various Types of Stone, *Studies in Conservation*, Vol. 36, No. 1, 1991.

23-Santos, T., Vaz, M., Pinto, L., and Carvalho, P., Porosity characterization of old Portuguese ceramic tiles, *Construction and Building Materials*, Vol. 28, 2012.

24-Smith, M. *Stone: Building stone, rock fill and armourstone in construction*, Geological Society of London, *Engineering Geology Special Publications*, Vol. 16, Vol. 33, 1999.

25- Wilson, F. Building materials evaluation, Van Nostrand Reinhold Company Inc., U.S.A. 1984.

26- Yafuz, A. and Topal, T., Effects of different drying Temperatures on the Physical and Mechanical Properties of Some marbles during Salt Crystallization tests, Environmental Earth Sciences, 2017.

DOI: 10.1007/s12665-016-5806-z

27- Zhang, C., and Ulery, M., Scanning Electron Microscope (SEM): Review, Proceedings of International Conference on Hydraulics, Electronic Equipment & Mechatronics, At Romnia, 2019.