

دراسة الخواص الميكانيكية للحجارة الكلسية المشكلة لمعالم الموقع الأثري لجميلة (كويكول) جمال موساوي

معهد الآثار، مخبر البناء الحضاري للمغرب الأوسط (الجزائر)،
جامعة الجزائر 2

djamel.moussaoui@univ-alger2.dz

تاريخ الإرسال: 2021/12/31؛ تاريخ القبول: 2022/08/05

Study the mechanical properties of limestone composing the structures of the archaeological site of Djemila (Cuicul)

Abstract :

The petrophysical study carried out on the three types of stone samples most used in the archaeological site of Djemila, C₁, C₂ and C₃ made it possible to assess their mechanical performance, The application of tests and analyzes in the laboratory and on the site, contributing to the quantitative determination of this performance, by measuring both the wave speed (V_p), the continuity index and the uniaxial mechanical resistance (R_c), and the hardness of the stones

The results of laboratory and on-site analysis showed that the mechanical properties of the stones of samples C₁ and C₂ have good mechanical properties that allow them to withstand various loads and pressures, as well as various damage factors, unlike sample C₃ which gave low mechanical properties, it is therefore considered as weakest stone and requires protection and elevation of its mechanical properties.

Keywords: Archaeological site of Djemila; Stones; Sample; Mechanical characteristics; Hardness.

المخلص:

سمحت الدراسة البتروفيزيائية التي أجريت على عينات من ثلاثة أنواع من الحجارة الكلسية الأكثر استخدامًا في الموقع الأثري لجميلة ع₁، ع₂، ع₃، من تقييم أدائها الميكانيكي، حيث ساهم تطبيق

جمال موساوي

Almawaqif

djamel.moussaoui@univ-alger2.dz

Vol. 19 N°: 01 juin 2023

فحوصات وتحاليل في المختبر وفي الموقع من التّحديد الكمي لهذا الأداء، عن طريق قياس كل من سرعة الموجة V_p ، ومؤشر الإستمرارية والمقاومة الميكانيكية للضغط أحادي المحور R_C ، وصلابة الحجارة.

وقد بيّنت نتائج التّحاليل في المختبر والموقع أنّ العينات من الحجارة ع1 وع2 تمتلك خواص ميكانيكية جيدة تسمح لها بمقاومة مختلف الأحمال والضغوط الواقعة عليها، فضلاً عن عوامل التآلف المختلفة، عكس العينة ع3 التي أعطت خواص ميكانيكية ضعيفة، لذا فهي أضعف الحجارة مقاومةً، إذ تتطلب حماية ورفع خواصها الميكانيكية.

الكلمات المفتاحية: الموقع الأثري لجميلة؛ الحجارة؛ العينة؛ الخصائص الميكانيكية؛ الصلابة.

مقدمة:

يُعد الموقع الأثري لجميلة (كويكول) من أهم المواقع القديمة التي تزخر بها الجزائر، وقد تأسس في أواخر القرن الأول ميلادي وبداية القرن الثاني في عهد الإمبراطور نيرفا. وهو مزال يحتفظ بتصميمه الأصلي السائد في المدن الرومانية آنذاك، فبالرغم من بقائه صامداً في وجه الزمن، إلا أنه شهد في السنوات الأخيرة تلف متسارع للمواد المشكلة لهياكل بناياته، من تشققات وتصدعات وتجوفات وتآكل أسطحها الأمر الذي ينعكس سلّباً على صلابتها ومقاومتها، وهذا ما يؤثر على قدرة حملها وتحملها لعبء ثقلها، فضلاً عن الضغوط الواقعة عليها، وللحد من ذلك وجب النّدخل للحفاظ عليه نظراً لما يمتلكه من قيم تاريخية وأثرية، ولا يتم ذلك إلا من خلال دراسة مواد بنائه الأساسية (الحجارة) والتي تمكننا من تحديد طبيعة خواصها الجوهرية، فضلاً عن تقييم درجة تدهورها واستخلاص العوامل المتسببة في ذلك، وتقدير سلوكها، ناهيك عن انتقاء أنجع أساليب العلاج والوقاية.

ومن هنا فرضت الحاجة إلى دراسة عينات من الحجارة المشكلة لمختلف معالم الموقع الأثري بهدف معرفة طبيعة تكوينها

المعدني، وتعيين وتقييم خواصها الميكانيكية التي منحتها مقاومة متفاوتة، ومن جهة أخرى فهي تتأثر بمختلف الظروف المحيطة بها مما يؤدي إلى فقدانها لصلابتها بشكل تدريجي، وهذا ما يؤثر على ديمومة المعالم المتشكلة منها، الأمر الذي يفرض البحث عن التدابير اللازمة لحمايتها. خاصة وأن الموقع الأثري يقع في منطقة تخضع لظروف مناخية قاسية، فضلاً على أنه من المواقع الأكثر استقبالية للزوار، لذا فإن الإهتمام الكلي ينصب حول الحفاظ على هذا التراث، وعلى ضوء هذا نطرح التساؤل التالي:

- ما طبيعة الخواص الميكانيكية لحجارة الموقع الأثري؟

وللإجابة على هذه التساؤل المطروح، إعتدنا منهجية تقوم على الجمع بين المنهج الوصفي الذي يقوم على التشخيص للتعرف أكثر على الموقع الأثري ودرجة حفظه، والمنهج التجريبي الذي يقوم على التجارب الميدانية والمخبرية للتعرف على خواص المواد المشكلة لهياكل بنايات الموقع.

تطرقنا خلال هذا البحث إلى تقديم الموقع الأثري، ثم تشخيص حالة حفظ الحجارة المشكلة لمعالمه، إلى جانب تقديم البرتوكولات التجريبية المعتمدة لتحديد الخواص الميكانيكية للحجارة سواء في المختبر أو في الموقع، ثم عرضنا نتائج الاختبارات ومناقشتها، وأنهينا البحث بخاتمة تضم أهم الاستنتاجات والتوصيات.

تقديم الموقع الأثري

يقع الموقع الأثري ببلدية جميلة على بعد 43 كلم عن عاصمة الولاية سطيف، وعلى بعد 345 كلم شرق الجزائر العاصمة، الخريطة رقم (1)، شيد هذا الموقع على ربوة منحدره بزواوية ميل أكثر من 20 % باتجاه شمال جنوب، مما تحكم في اتجاه توسع عمرانه، كما أنه ينحصر بين خطي طول "5°43'21" و "5°44'21"، شرقاً، ودائرتي عرض "36°18'54" و "36°19'30" شمالاً (قوئل إرث، 2020).



الخريطة رقم (1): تبين موقع مدينة جميلة.

تتميز منطقة جميلة بمناخ شبه قاري، حار وجاف صيفاً، بارد وممطر شتاءً، يبلغ متوسط درجة الحرارة القصوى في فصل الصيف عتبة 35°م، أما في فصل الشتاء فتتأرجح بين (-7 إلى +17°م)، وبمتوسط هطول سنوي يقدر بحوالي 500 ملم، كما تعرف المنطقة رطوبة نسبية متفاوتة موسمياً، إذ سجلت أعلى قيم لها في فصل الشتاء بنسب تتراوح من (72 إلى 85%)، بينما أدنى قيم لها سجلت صيفاً تراوح بين (31 إلى 54%)، ما أثر سلباً على صلابة وديمومة مواد بناء الموقع الأثري خاصةً الحجارة الكلسية.

تشخيص هياكل المعالم

لقد تعددت الحجارة المستعملة في بناء الموقع الأثري لجميلة، منها بغرض البناء ومنها بغرض التزيين. لقد استعنا في دراسة الصنف الأول على النتائج التي توصلت إليها الأبحاث في إطار مشروع Medistone (Dessandier, et all, 2008:70)، والتي بينت أن أغلبها عبارة عن حجارة كلسية، جلبت من محاجر محلية محيطة بالموقع الأثري، وقد صنفتها حسب نسبة استخدامها إلى تسعة أنواع، أربعة منها مستخدمة بصفة رئيسية، أما الخمسة الباقية فمستخدمة بصفة ثانوية، كما هو مبين في الجدول رقم (1)، وعليه سنركز في هذا البحث على الأنواع الثلاثة الأولى.

نسبة الاستعمال	نوع الحجارة	الرقم
رنيسي	الحجارة الجيرية أو الكلسية الصلبة ذات الحبيبات الناعمة واللون الرمادي	1
متوسط	الحجارة الجيرية البيوكلاست الرمادية ذات الحبيبات الناعمة	2
متوسط	التف أو التوف أو الطُفّ البركاني الكهفي ذو اللون البيج	3
متوسط	الحجارة الكلسية ذات اللون الرمادي-البيج الفاتح (تدرج بين الرمادي الفاتح والبني)	4
ضعيف	الترافرتين ذات شكل دودي vermiculé ولون مائل للإحمرار	5
ضعيف	الحجارة الكلسية القوقعية البيج	6
ضعيف	حجارة الدولوميت ذات اللونين الرمادي والأحمر الطيني	7
ضعيف	حجارة الترافرتين ذات الليثوكلاست الكبير المحاط بالرادبوليتك المتحجر	8
ضعيف	حجارة البريشيا الجبسية الوردية الأرجوانية اللون	9

**الجدول رقم (1): يبين أهم أنواع حجارة بناء الموقع الأثري
جميلة (70, 2008, Dessandier, et all)**

يتضح من خلال المشاهدات بالعين المجردة لمختلف هياكل بنايات هذا الموقع أنّ أغلبها في حالة تلف متقدم، إذ يمكن حصره في التلّف الداخلي الذي يتمثل في التشققات والشروخ الدقيقة الداخليّة، إلى جانب التدهور الخارجي المتمثل في التقشر السطحي، والتجزؤ والتجفيف والتصدع، اللوحة رقم (1)، وتكمن خطورة هذه التشققات في إمكانية توسعها بفعل قوى خارجية، و/أو ضغط ثقل الحجارة التي تعلوها، مما يؤدي إلى انفصال الأجزاء أو إنهيار البناء ككل.

إضافة إلى ذلك، توجد أشكال أخرى من التدهور ترتبط بنفاذية الماء في الحجارة والتي تحفز تبلور وذوبان الأملاح، فضلاً عن تجمّد وذوبان المحتوى المائي للحجارة، الأمر الذي يصاحبه تشكل ضغوط موضعية متزايدة قد تولد شقوق مجهرية أو تساهم في توسع الشقوق الموروثة مسبقاً، وقد تدمر الحجارة إذا تجاوزت درجة تحملها ومقاومتها (Rana Ezzedine, 2010: 14-15)، وبالتالي فطبيعة الخواص الميكانيكية للحجارة تتحكم في درجة صلابتها ومقاومتها فضلاً عن تلفها، كما أنّ هذه الخواص في استنزاف كلما تعرضت الحجارة لدورة تلف جديدة. فضلاً عن ذلك، يلاحظ انتشار مظاهر تلف أخرى، منها ما يرتبط بالفعل البيولوجي، كنمو النباتات والأعشاب، والكائنات

الدقيقة من أشنات و/أو طحالب و/أو بكتيريا، ومنها ما يكون ناتج عن الفعل البشري (متعمد، أو غير متعمد) نتيجة لغياب الوعي بأهمية الآثار ويشمل التخريب (السرقة، الحرائق، الكتابة على الجدران، الصعود على هياكل البنايات الأثرية لأخذ صور تذكارية،...).



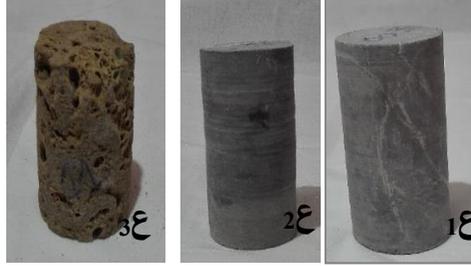
اللوحه رقم (1): بعض مظاهر تدهور حجارة الموقع الأثري لجميلة.
أ- تشققات على حجارة المداميك السفلية لجدران الحمامات الكبرى.
ب- ظهور تصدعات على سطح الحجارة (البازيليك المدنية ق IV م).

العمل المخبري:

لقد خصصنا هذا الجزء من العمل إلى تعيين الخواص البتروفيزيائية والميكانيكية الرئيسية، وتقدير متانة الحجارة المستخدمة في الموقع، ودرجة تدهورها، ولا يتم هذا إلا بعد أخذ عيّنات منها والقيام بمختلف الاختبارات والفحوصات.

ونظراً لحصولنا على ترخيص محدود الإستعمال من الهيئة المسؤولة على تسيير واستغلال الممتلكات الثقافية المحمية (Ogebc)، لا يسمح لنا بأخذ عيّنات من الموقع الأثري، لذا لجأنا إلى أخذ عيّنات الحجارة من المحاجر الأصلية، (أنظر: Dessandier, et all, 2008).
يتمثل النوع الأول في حجارة كلسية صلبة ذات لون رمادي وحببيات ناعمة ع₁ جلبت من محجر يقع جنوب الموقع الأثري بجبل جميلة، بينما النوع الثاني فيتمثل في حجارة البيوكلاست الرمادية، ذات حببيات ناعمة ع₂ جلبت من جنوب شرق الموقع الأثري بجبل سيدي سعدون، أما النوع الأخير فهو عبارة عن حجارة التوف ع₃ جلبت من

محجر يوجد غرب الموقع الأثري بالضبط في الضفة الجنوبية لواد الرّتين. اختيرت العينات وهي في حالة حفظ جيدة (اللّوحة رقم (2)).



اللّوحة رقم (2): تبيّن نماذج من عينات الحجارة المدروسة

التركيب الكيميائي:

تم القيام بتعيين التركيبة الكيميائية للعينات على مستوى مخبر المركز الوطني للبحث العلمي والتّقني للتحاليل الفيزيائية والكيميائية ببوسماعيل (ولاية تيبازة) بتقنية (Fluorescence des rayons X (FRX) فلورة الأشعة السينية، باستعمال جهاز مطياف الأشعة السينية Spectromètre fluorescence des rayons X، النتائج المتحصل عليها مبيّنة في الجدول رقم(2)).

التركيب الكيميائي (%)										العينة
TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	
0.02	0.05	0.25	0.01	0.01	0.32	0.17	0.40	1.23	54.10	1ع
0.02	0.19	0.11	0.01	0.04	0.37	1.06	0.86	18.55	42.87	2ع
0.02	0.07	0.31	0.01	0.01	0.30	0.73	0.67	9.77	49.36	3ع

الجدول رقم (2): يبين نتائج التركيبة الكيميائية للعينات

يتضح من الجدول رقم 2 أنّ أكسيد الكالسيوم (CaO) هو المكوّن الأساسي للعينات 1ع، 2ع و3ع حيث يمثل على التوالي: 54,10%، 42,87%، 49,36%، ثم يليه السيليس (SiO₂) بالنسب التّالية: 23,1%، 18,55%، 9,77%.

التركيب المعدني:

لتحديد التركيبة المعدنية للعينات إتمدنا بروتكول تجريبي يقوم على تقنية حيود الأشعة السينية (D.R.X)، بطريقة المسحوق، على مستوى مخبر مركز البحث العلمي والتقني للتحاليل الفيزيائية والكيميائية (CRAPC) ببوسماعيل باستخدام جهاز حيود الأشعة Diffractometre d8 advance A25، العلامة Bruker، النتائج المتحصل عليها ملخصة في الجدول رقم (3).

ع		ع		ع		العينة
الكوارتز	الكالسيت	الكوارتز	الكالسيت	الكوارتز	الكالسيت	التكوين المعدني
SiO ₂	CaCO ₃	SiO ₂	(Mg 0,64 Ca 93,6) (CO ₂)	SiO ₂	CaCO ₃	الصيغة الكيميائية
0,60	99,40	27,30	72,70	15,70	84,30	النسب المئوية (%)
α كوارتز	α كالسيت	α كوارتز	α كالسيت	α كوارتز	α كالسيت	النوع
Hexagonal سداسي	Rhombo axe H	Hexagonal سداسي	Rhombo axe H	Hexagonal سداسي	Rhombo Axe H	نظام البلور Crystal system

الجدول رقم (3): يبين نتائج التركيب المعدني للعينات.

تبين نتائج الجدول رقم 3 أنّ العينات ع₁، ع₂ وع₃ تتكون بصورة رئيسية من معدن الكالسيت (CaCO₃) بنسب متفاوتة تقدر بـ: 84,30 %، 72,70 %، 99,40 % على التوالي، ويحل الكوارتز كمكون ثانوي بنسب تقدر بـ 15,70 %، 27,30 %، 0,60 % على الترتيب.

تعيين الخواص الميكانيكية للعينات:

يمكن تقدير السلوك الميكانيكي للحجارة بالإعتماد على مجموعة من المعايير التي ترتبط بشكل مباشر أو غير مباشر بمقاومتها، وقد يكون إحداها كافياً لتقييم أدائها الميكانيكي المتوقع، من بينها قياس سرعة الموجة فوق الصوتية، ومقاومة الضغط.

الفحص بالأموح فوق الصوتية:

يُعد إختبار الحجارة بالموجة فوق الصوتية أحد أبرز تقنيات القياس غير الإتلافية التي استخدمت منذ سبعينيات القرن الماضي في

تشخيص حالة حجارة البناء من منظور التّجانس ودرجة التّلف، ومن زاوية أخرى يُعد مؤشراً على تدهور الحجارة، حيث إذا سجلت نقصان في سرعة الموجة فوق الصّوتية V_p يعني أنّ الحجارة فقدت جزء من خواصها (Freire Lista, 2015: 40-51).

يقوم مبدأ الفحص على قياس زمن "t" لانتقال نبضات الموجات فوق الصّوتية بين قطبي الجهاز (المرسل والمستقبل) الذين يبعدان عن بعضهما بمسافة مقدر بـ "d" (أمير عبد الرحمان هلال الدليمي، 2013: 1-13)، ويتم حساب سرعة الموجة وفق العلاقة التّالية:

$$V = d / t$$

مع V : سرعة الموجة بـ..... (سم/ثا)

d : المسافة بين محولي الطاقة بـ... (سم)

t : زمن انتقال الموجة بـ..... (الثانية)

أما القياس، فيتم وفق معيار EN12504-4 (2005)، باستخدام جهاز الفاحص الرقمي المحمول بالموجات فوق الصّوتية (PUNDIT (Potable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tests)، والذي يتكون من مولد للنبض، ومحولين للطاقة (المرسل، المستقبل).

وقد تم تعيين سرعة الموجة V_p للعيّنات في المختبر وفي الموقع بالإستعانة بفريق عمل من مخبر البناء والأشغال العمومية "حمدي" بالجزائر العاصمة، باستخدام جهاز الموجات فوق الصّوتية من نوع (B-048/P) (Proceq,Pundit Lab+)، دقة القياس $(\pm 0,1\mu s)$.



الصورة رقم (1): تبين جهاز قياس سرعة الموجة فوق الصّوتية

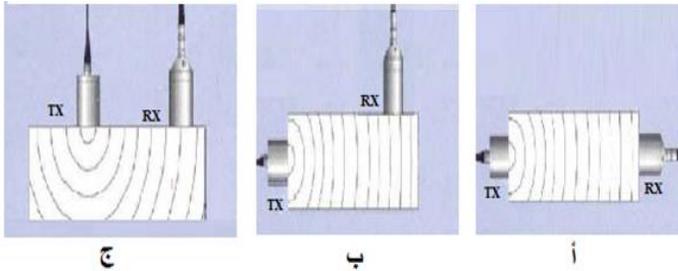
أما العيّنات فقد كانت ذات شكل أسطواناني، قطر 4,50 سم وارتفاع 9,00 سم، في حين أسلوب الفحص فيتم تبعاً لإمكانية القياس، وذلك حسب حالة حفظ الحجارة وحجمها، فضلاً عن طول كوابل محولات الطاقة (المستقل والمرسل)، وفق إحدى طرق القياس التالية: المباشرة، أو النّصف المباشرة، أو الغير المباشرة.

الطريقة المباشرة (الشكل رقم 1: أ) تتم بوضع قطبي أو محولي الطاقة (المرسل والمستقبل) على الجانبين المتقابلين للعنصر المراد فحصه أي في اتجاهين متضادين، هذه الطريقة أكثر نجاعةً نظراً لوجود طاقة قصوى للنبض الذي يتم إرساله ثم استقباله.

أما الطريقة الغير مباشرة (الشكل رقم 1: ب) فيتم تنفيذها بشكل أساسي عندما يكون الوصول إلى وجه واحد فقط متاحاً من أوجه العنصر المراد فحصه أي في نفس السطح.

في حين طريقة القياس النّصف مباشرة (الشكل رقم 1: ج) فيكون فيها المرسل والمستقبل على وجهين متعامدين أي في الجوانب المجاورة، ويتم استخدام هذه الطريقة عند استحالة الوصول إلى جسم العنصر بأكمله، ويجب أن لا تكون المسافة الفاصلة بين محولي الطاقة كبيرة جداً حتى لا تتبدد وتضعف سرعة الموجة V_p كثيراً.

النتائج المتحصل عليها من هذا الفحص في المختبرمدرجة في الجدول رقم (4).



الشكل رقم (1): يبين أسلوب قياس سرعة الموجة V_p على العيّنات أ-الطريقة المباشرة، ب-الطريقة النّصف المباشرة، ج-الطريقة الغير المباشرة (Samia Hannachi ,2015: pp 64,65)

مؤشر الإستمرارية:

يقصد بمؤشر الإستمرارية I_c النسبة بين سرعة الموجة V_p المقاسة للعينة على السرعة النظرية للمادة المحسوبة من تكوينها المعدني (42: 2015, Charlotte Walbert)، ويتم حساب هذا المؤشر بتطبيق العلاقة التالية:

$$I_c = \frac{V_{exp}}{V_{th}} \times 100$$

مع: V_{exp} : السرعة الفعلية للموجة (م/ث)

V_{th} : السرعة النظرية (م/ث) مع $V_{th} = \sum C_i \cdot V_i$

حيث: C_i : النسبة المئوية للمعادن.

و V_i سرعة الموجات V_p للمعدن i .

وتقدر سرعة الموجة النظرية V_p في معدن الكالسيت بـ 6320 م/ثا، بينما في الكوارتز تقدر بـ 6050 م/ثا، وبناء على ذلك تكون السرعة النظرية للعينة E_1 تساوي 84,30% من سرعة V_p في الكالسيت 6320 م/ثا، و 15,70% من سرعة V_p في الكوارتز التي تقدر بـ 6050 م/ثا.

أما السرعة النظرية للعينة E_2 فتساوي 72,70% من سرعة الموجة V_p في الكالسيت، و 27,30% من سرعة V_p في الكوارتز.

في حين السرعة النظرية للعينة E_3 تساوي 99,40% من سرعة الموجة V_p في الكالسيت، و 0,60% من سرعة V_p في الكوارتز.

بالإضافة إلى ذلك، فمؤشر الإستمرارية هذا يتيح لنا حساب النسبة المئوية لكل من مسامية المسام، فضلاً عن مسامية الشقوق، وذلك بتطبيق العلاقة التالية:

$$I_c = 1 - A \cdot n_p - B \cdot n_f$$

مع المسامية الكلية $n_p + n_f = N_t$

حيث: n_p : مسامية المسام

n_f : مسامية الشقوق

$$A=1,6 \text{ و } B=2,2$$

بعد تحديد سرعة الموجة فوق الصوتية للعينات في المختبر بطريقة القياس المباشرة، قمنا بحساب مؤشر الإستمرارية لها، وتقدير نسبة كل من مسامية المسام، ومسامية الشقوق التي تمتلكها كل عينة على حدة، النتائج المتحصل عليها مبينة في الجدول رقم (4).

تعيين المقاومة الميكانيكية للضغط أحادي المحور

عندما تتعرض حجارة البناء لقوى خارجية قد تؤدي إلى تشوهها نتيجة التغير في شكلها الأصلي أو حجمها أو الإثنين معاً، ويختلف نوع الإجهاد المطبق على الحجارة باختلاف نوع القوة المؤثرة وشدتها واتجاهها ومدتها، وبشكل عام يمكن تقسيمها إلى قوة ضغط، وقوة شد، وقوة قص (سالا صوفيا بشور، 2015: 29،30). وبما أن حجارة البناء معرضة أكثر للضغط، وعليه نركز على هذا النوع من الإجهاد الذي هو حاصل قوتين متضادتين تضغطان على الجسم مما يؤدي إلى انكماشه.

كما يلعب شكل النظام الإنشائي السائد في البناء دوراً هاماً في تعزيز مقاومة البناء وصلابته وطبيعة القوى المؤثرة، وبما أن النظام السائد في موقع جميلة هو نظام الجدران الحاملة، لذا فالحجارة المشكلة لها معرضة لتأثير الأحمال الواقعة عليها، فضلاً عن ثقلها.

ومما لا شك فيه أن تحديد مقاومة الحجارة لهذه القوى يُعد من الإختبارات البالغة الأهمية، حيث يتيح لنا تقدير مستوى الضغط الأقصى الذي يمكن أن تتحمله هذه الحجارة قبل أن تفقد صلابتها وتستسلم للتشقق والتصدع أو تتدمر كلياً، ويقصد بمقاومة التحمل الميكانيكي بقدرة تحمل المادة للأحمال و/أو الضغوط الواقعة عليها قبل أن تتشقق (محمد عبد الهادي، ب ت: 89)، ويمكن حساب مقاومة الحجارة للضغط بتطبيق العلاقة التالية:

$$RC = \frac{F}{A}$$

حيث RC : مقاومة الضغط (MPa)؛

F : القوة المطبقة على العينة (KN)؛

A : مساحة مقطع العينة ب (سم²).

تم تحديد مقاومة الضَّغَط على مستوى ورشة مخبر البناء والأشغال العمومية "حمدي" بالجزائر العاصمة، وقد تم تحضير عيّنات أسطوانية الشكل ذات قطر 45 ملم وارتفاع 90 ملم، واستخدام آلة إختبار الضَّغَط من نوع Controlab، النّتائج المتحصّل عليها مبينة في الجدول رقم (4).

اختبار صلابة الحجارة بجهاز السكليرومتر Scléromètre

يهدف هذا الإختبار إلى تقييم درجة صلابة الحجارة المشكّلة لهياكل مباني الموقع الأثري، لكن دون إحداث أي أضرار بها، وذلك بتطبيق تقنيات قياس غير متلفة، تمثلت في استخدام مقياس الصّلابة الذي يعرف باسم السكليرومتر، أما مبدأ الإختبار فيتم وفق المعيار EN 12504-2، بقياس إرتداد القضيب الفولاذي المسلط على سطح الحجارة، الذي نتحصّل من خلاله على مؤشر الإرتداد l'indice sclérométrique (Is)، كون هناك علاقة بين مقاومة الضَّغَط للحجارة ومؤشر الإرتداد (Samia hannachi, 2015 :75).



اللوحة رقم (2): تبين الفحص المخبري والعمل الميداني.

- أ- عملية قياس الضَّغَط أحادي المحور على عينة الحجارة
- ب- عملية قياس صلابة الحجارة على مستوى الحمامات الكبرى بجهاز السكليرومتر.

عرض النتائج ومناقشتها:

عرض النتائج:

الخصائص الميكانيكية للعينات في المختبر:

نلخص في الجدول رقم (4) أهم النتائج المتحصل عليها في المختبر، من قياس سرعة الموجة فوق الصوتية، وحساب مؤشر الإستمرارية، إلى جانب نتائج قياس المقاومة الميكانيكية للضغط أحادي المحور (R_c) وفق البرتوكولات المذكورة أعلاه.

العينَة			
نوع الاختبار			
ع ₃	ع ₂	ع ₁	
14,30	14,40	15,90	الزمن T (بالثانية)
2448,00	6125,98	5660,00	سرعة الموجة V_p (م/ثا)
37,74	98,07	90,16	مؤشر الاستمرارية
21,07	1,88	4,16	المسامية الكلية N_t (%)
19,72	1,53	4,00	مسامية المسام N_p (%)
1,35	0,05	0,16	مسامية الشقوق N_f (%)
---	55,600	88,627	القوى القصوى F (KN)
---	47,88	55,70	مقاومة الضغط Rc (Mpa)

الجدول رقم (4): يبين نتائج الاختبارات الميكانيكية في المختبر

الخصائص الميكانيكية للحجارة المحصل عليها في الموقع

نقدم فيما يلي نتائج قياس الخصائص الميكانيكية لعينات من الحجارة المشكّلة لهياكل الموقع الأثري بتطبيق إختبارات غير إتلافية عن طريق قياس سرعة الموجة فوق الصوتية، وتحديد صلابة الحجارة بمقياس الصلابة الذي يعرف بجهاز السكليرومتر، وحرصاً

على الحصول على دقة القياس وأحسن النتائج يحد أن يكون سطح العينات مستوي خالي من العيوب، فضلاً عن إختيار الحجارة يكون في مواضع مختلفة من البناء (وسط، وزوايا الجدران).

تقدير سرعة الأمواج فوق الصوتية

قمنا بقياس سرعة الانتقال للموجة فوق الصوتية على عدد من الحجارة المشكلة لأهم معالم الموقع الأثري من نفس عينات الدراسة، بإتباع البرتوكول المذكور أعلاه بطرق القياس المباشرة، وغير المباشرة، ونصف المباشرة، وذلك حسب حالة حفظ الحجارة، وحجمها، وموضعها في البناء، وإمكانية القياس، النتائج المتحصل عليها مدرجة في الجدول رقم (5).

إسم المعلم	العتبة	مقاسات العتبة (سم)	طريقة القياس	سرعة p (م/ثا)	T الزمن بالثانية
الحمامات الكبرى	ع1	45x84x70	نصف مباشرة	4320	130,20
	ع2	45x77x45	مباشرة	4675	155,00
	ع3	Lx25x10	غير مباشرة	2581	160,90
قوس مركلا	ع1	45x50x100	مباشرة	2466	150,00
	ع1	87x107x70	مباشرة	4660	150,20
	ع2	70x28x100	مباشرة	5443	128,60
معبد العائلة السيفيرية	ع1	Lx60x100	غير مباشرة	2812	56,90
	ع2	56x67x95	نصف مباشرة	4516	154,90
	ع2	70x70x100	مباشرة	4355	140,60
المسرح	ع1	60x50x90	نصف مباشرة	6025	70,30
	ع1	70x60x100	نصف مباشرة	2524	63,40
	ع2	70x70x100	نصف مباشرة	2524	063.4

الجدول رقم (5): يبين نتائج قياس سرعة الموجة V_p لعينات الحجارة

تقدير صلابة الحجارة بجهاز السكليرومتر

لقد تم إختيار الحجارة المقاسة في الموقع الأثري من نفس صنف العينات المستخدمة في التحاليل المخبرية (الحجارة الكلسية

الصّلبة، وحجارة البيوكلاست، وحجارة التّوف الكهفي)، وفي حالة حفظ نوعاً ما جيدة، متواجدة في أبرز معالم الموقع الأثري (الحمامات الكبرى، قوس كركلا، معبد العائلة السيفيرية، المسرح)، وفي مواضع مختلفة في هياكل جدران المعالم، وقد أسفر هذا القياس على النتائج المبينة في الجدول رقم (6).

متوسط الضغط MPa	الواجهة المقاسة				مقاسات العينة (سم)	العينة	المعلم
	مقاومة الضغط MPa						
	واجهة 4	واجهة 3	واجهة 2	واجهة 1			
45,00	48,67	44,33	44,67	42,33	78x50x56	ع1	الحمامات الكبرى
38,75	48,00	30,00	44,00	33,00	75x60x47	ع1	
9,00		9,00	/	10,00	28x8x25	ع3	
55,83	58,67	62	50,67	52,00	44x68x58	ع2	
56,33	64	58	53,33	50,00	60x68x59	ع2	
56,58	58,67	64	50,67	53,00	100x50x45	ع2	قوس كركلا
52,17	55	56,33	48,00	49,33	70x107x87	ع2	
46,92	48	50,33	44	45,33	100x28x70	ع1	
46,52	48,57	48,48	44,57	44,48	95x67x56	ع1	معبد العائلة السيفيرية
34,50		34	/	35,00	Lx100x60	ع1	
50,50		54	/	47,00	100x70x70	ع1	
10		10		12,00	20x10x25	ع3	
51,50		55	/	48,00	90x50x60	ع1	المسرح
51,50		55	/	048,0	Lx52x90x	ع2	
55,83	55	55	048,0	52,00	58x50x56	ع1	
45,00	48,67	44,33	48,00	48,00	57x50x42	ع1	

الجدول رقم (6): يبين نتائج قياس صلابة عينات الحجارة باستعمال جهاز السكّليرومتر

مناقشة النتائج:

يتضح من خلال نتائج التركيبة الكيميائية المبينة في الجدول رقم (2) أنّ العينات الثلاثة التي تمت دراستها تتكون بشكل أساسي من كربونات الكالسيوم في صورة أكسيد الكالسيوم (CaO) بنسب معتبرة تتراوح من (42,87% إلى 54,10%)، مع نسب متوسطة من السيليس SiO₂ من (1,23 إلى 18,55%)، أما باقي العناصر فتتواجد بنسب ضعيفة جداً تتراوح بين 0,01 إلى 0,32%، وهذا يفسر وجود الكوارتز إضافة إلى معدن الدلوميت، وبالتالي ارتفاع نسبة المعادن غير القابلة للذوبان وهذا ما يرفع من خواص صلابة للحجارة.

ومن خلال دراسة نتائج التركيبة المعدنية للعينات المبينة في الجدول رقم (3)، يتبين أنها تتألف أساساً من طورين بلوريين: الكالسيت في نظام تبلور Rhombo.Axe H، والكوارتز في نظام تبلور Hexagonal، كما يتبين أنها تتكون بصورة رئيسية من معدن الكالسيت، ونسب معتبرة من الكوارتز، فالعينة 1 تتكون من الكالسيت بنسبة 84,30%، والكوارتز بنسبة أقل تقدر 15,70%، أما العينة 2 فتتكون من الكالسيت الغني بالمغنيزيوم وفق الصيغة [Mg0.64[Ca93.6(CO₃)] بنسبة تصل إلى 72,70%، وهي نسبة كبيرة مقارنة بمعدن الكوارتز، الذي يتواجد بنسبة متوسطة قدرت بـ 27,30%، في حين العينة 3 فهي تتألف من الكالسيت CaCO₃ بنسبة كبيرة جداً تبلغ 99,40%، مع نسبة قليلة جداً من الكوارتز لا تتعدى 0,60%، لذا تعتبر حجارة كربونية نقية.

ونستخلص مما سبق أنّ الحجارة المدروسة تمتاز بمحتوى عالي من المعادن الحاملة للكالسيت (كربونات الكالسيوم والمغنسيوم)، مع نسب متفاوتة من الكوارتز، كما يلاحظ عدم وجود أي قمم للحديد أو أكاسيد أخرى، وهذا راجع لتراكمها الضعيفة، كما تلعب التركيبة المعدنية الأساسية للحجارة والمعادن الإضافية والمواد الرابطة بالإضافة للتركيب البلوري لتلك المعادن دوراً بالغ الأهمية في عمليات تجانس البنية الداخلية للحجارة (محمد عبد الهادي، ب ت: 87) وهذا بدوره ينعكس سلباً على درجة صلابتها وديمومتها وبالتالي ديمومة الآثار المتشكلة منها.

وتبين النتائج المتحصل عليها من قياس سرعة الموجة فوق الصوتية للعينات في المختبر المبينة في الجدول رقم (4) أنها متباينة، إذ تمتلك العينة ع₂ أكبر سرعة موجة V_p مقارنة مع العينات الأخرى بـ 6125,98 م/ثا، تليها العينة ع₁ بسرعة تقدر بـ 5660,00 م/سا، وفي المرتبة الأخيرة تأتي العينة ع₃ بسرعة موجة تقدر بـ 2448,00 م/ثا، وهذا يدل على أنّ هذه العينة أضعف الحجارة وأدناها مقاومةً، ويرجع ذلك لإحتوائها على نسب كبيرة من الفراغات.

في حين تشير نتائج حساب مؤشر الإستمرارية في المختبر المبينة في الجدول (4) أنّ العينتين ع₁ وع₂ تقدمان نمط مسامية مسام مختلفاً تقدر بـ (4,00، 1,53%) وهي أكبر من مسامية الشقوق المقدر بـ (0,16%، 0,05%) على الترتيب، في حين العينة ع₃ تظهر جزءاً مهماً من مسامية الشقوق قدرت بـ 1,35% ومسامية مسام قدرت نسبتها بـ 19,72%، لذا فهي تملك أكبر مسامية شقوق مقارنة مع العينات الأخرى، وهذا دليل على احتواء العينة ع₃ على شقوق أولية معتبرة، أما العينتين ع₁ وع₂، وعليه يمكن القول بأنّهما يمتلكان شقوقاً مجهرية لكن بنسبة قليلة جداً.

ومما لا شك فيه أنّ الشقوق تعد نقاط ضعف قد تنتسح لاحقاً بفعل عوامل التآلف، مما يؤثر على صلابة الحجارة وديمومتها، الأمر الذي ينعكس سلباً على ديمومة المعالم المتشكلة منها.

أما بخصوص سرعة الموجة V_p للحجارة في الموقع المدرجة في الجدول رقم (5) فهي تختلف حسب نوع الحجارة، وحالة حفظها، فقد سجلت أقصى قيمة لها في العينة ع₂ بـ 5443 م/ثا، على مستوى قوس كركلا، والمعبد السيڤيري، تليها العينة ع₁ بـ 4662 م/ثا على مستوى المعبد السيڤيري وأيضاً المسرح، أما الحجارة ع₃ فقد سجلت أدنى سرعة للموجة بـ 2551 م/ثا على مستوى جدران قاعات الحمامات الكبرى، والمعبد السيڤيري. وهذا إنّ دل على شيء إنما يدل على أنّ هذه الأخيرة تعد أضعف الحجارة وأدناها مقاومةً.

ولقد بيّنت نتائج إختبار مقاومة الضّغط أحادي المحور في المختبر أنّ العينات تتفاوت في درجة صلابتها، فقد سجلت أعلى

مقاومة للضغط في العينات ع₁ وع₂ قدرت بـ (55,73 و 47,88 MPa) على التوالي، بينما العينة ع₃ فلم تسجل أي قيمة لمقاومة الضغط بالرغم من تحطمها، وعليه يمكن القول بأن هذه الحجارة ضعيفة جداً ولا تمتلك مقاومة، وهذا يتوافق مع حالة حفظها في الموقع الأثري.

وتشير نتائج تقدير المقاومة الميكانيكية للحجارة في الموقع الأثري المبينة في الجدول رقم (6) أنّ الحجارة المشكلة لهياكل مباني الموقع على اختلاف أنواعها، وموضعها في البناء، وحالة حفظها، إلى أنها تتباين في درجة مقاومتها الميكانيكية، إذ نجد الحجارة ع₂ تتميز بمقاومة ميكانيكية جيدة تتراوح من (51,50 إلى 56,58 MPa)، تليها في المرتبة الثانية الحجارة من نوع ع₁ الحجارة الكلسية الصلبة بمقاومة متوسطة تتراوح من (34,50 إلى 51,50 MPa)، في حين حجارة ع₃ التوف الكهفي فقد سجلت أدنى مقاومة حيث لا تتعدى (9,00 MPa)، هذه النتائج تتوافق مع النتائج المتحصل عليها في المختبر، والتي أظهرت أنّ الحجارة ع₁ وع₂ ذات صلابة ومقاومة جيدة، وبالتالي هي أكثر تحملاً، عكس الحجارة ع₃ التوف الكهفي التي أخذت من الحمامات الكبرى، والتي تعد أقل صلابة.

الخاتمة:

لقد سمح هذا البحث من تصنيف ثلاثة أنواع من الحجارة الكلسية الأكثر استعمالاً في هياكل جدران بنايات الموقع الأثري لجميلة والتي قمنا باختبار ثلاث عينات منها ع₁، ع₂ وع₃. يمثل الكالسيوم المكوّن الأساسي في التركيبة المعدنية لهذه العينات ونسبها كالآتي: 84,30%، 72,70%، 99,40%، وكما جاءت نتائج المقاومة الميكانيكية للضغط للعينات ع₁، ع₂ التوالي 51,50، 56,58 MPa، في حين العينة ع₃ التوف الكهفي لم تسجل أي قيمة وبالتالي فهي تمتلك مقاومة ضعيفة جداً لا تسمح لها بمقاومة القوى المؤثرة عليها، فضلاً عن عوامل التآكل المختلفة الناتجة من البيئة المحيطة مقارنة مع العينات ع₁، ع₂، وبالتالي فهي تتطلب معالجتها ورفع جودة خواصها الميكانيكية لتجنب انهيار هياكل البنايات المتشكلة منها.

المراجع:

1. أمير عبد الرحمان هلال الدليمي، (2010). «الكشف عن عيوب الخرسانة باستخدام سرعة الموجات فوق الصوتية»، المجلة العراقية للهندسة المدنية، المجلد 6 العدد3، ص ص1-13.
2. محمد عبد الهادي، (بدون تاريخ)، دراسات علمية في ترميم وصيانة الآثار غير العضوية، مصر، مكتبة زهراء الشرق.
3. معطيات الديوان الوطني للأرصاد الجوية بالجزائر العاصمة، 2017.
4. David Freire- Lista, Rafael. Fort, Maria Jose.Varas-Muriel,(2015).«Freeze-thaw fracturing in building granites », cold regions science and technology, Elsevier, Vol N° 113, May 2015, pp 40-51.
5. Dessandier .D. et all,(2008). Atlas des pierres ornementales et de construction du site antique de Djemila, projet Medistone (programme de recherche FP6-2003,BRGM), France.
6. Rana Azzedine, (2009).Endommagement des monuments historiques en maçonnerie, Thèse de doctorat pour l'obtention du diplôme de doctorat en sciences physiques et de l'ingénieur, université de Bordeaux I, France.
7. Samia Hannachi, (2015).Evaluation de la résistance à la compression du béton sur site : application de la méthode combinée, Thèse de doctorat pour l'obtention du diplôme de doctorat en Génie Civil, Université Mentouri Constantine1.
8. Walbert Charlotte,(2015). Endommagement par le gel de pierres calcaires utilisées dans le patrimoine bâti : étude du comportement hydromécanique, Thèse de doctorat pour l'obtention du diplôme de doctorat en Génie Civil, université de Cergy-pontoise, France.

للإحالة على هذا المقال:

جمال موساوي، (2023)، «دراسة الخواص الفيزيائية والميكانيكية للحجارة الكلسية المشكلة لمعالم الموقع الأثري لجميلة»، المواقف، المجلد: 19، العدد: 01، جوان 2023، ص.ص 367-386.