

تشخيص تلف الحجارة الكلسية المشكّلة
لهياكل بنايات الموقع الأثري لجميلة (كويكول)

Diagnosis of degradation of the limestone component the structures of the
archaeological site of Djemila (Cuicul)

جمال موساوي¹ ، أرزقي بوخنوف²

¹ جامعة الجزائر-2- أبو القاسم سعد الله - معهد الآثار - (الجزائر) univ-alger2.dz@bmuoussaoui

² جامعة الجزائر-2- أبو القاسم سعد الله - معهد الآثار - (الجزائر) arezki.boukhanouf@univ-alger2.dz

تاريخ الإستلام : 2019/03/24 - تاريخ القبول : 2019/07/09 - تاريخ النشر : 2019/12/31

الملخص

يتمحور هذا البحث حول دراسة تلف الحجارة الكلسية المشكّلة لهياكل بنايات الموقع الأثري لجميلة (كويكول)، والذي قمنا خلاله بتصنيف مختلف التدهورات الملاحظة بالعين المجردة، والتي تتمثل في تدهور الباتينة وظهور تزهرات، تورق وتجوف سطح الحجارة، إلى جانب التشقق والتجزؤ والانفصام، ومن أجل التعمق في ذلك، قمنا باختبار ثلاث عينات من الحجارة (ع1، ع2، ع3) أخذت من المحاجر التي جلب منها حجارة الموقع الأثري، وقد وقع اختيار حالة حفظ هذه العينات حسب نوع التحليل المخبري المراد القيام به (التركيبية الكيميائية والمعدنية، واختبارات تحديد الخواص الفيزيائية والميكانيكية).

الكلمات المفتاحية: الموقع الأثري لجميلة، الحجر الكلسي، التلف، تحليل، مقاومة ميكانيكية.

Résumé

This work is focused on the study of the degradation of the limestone composing the structures of the archaeological site of Djemila (Cuijul), in which we have classified the different degradations presented on the surface of the stone to the naked eye (efflorescence, crack, burst, separation of parts) . To further this research, we experimented with three stone samples (C1, C2 and C3). The choice of these representative samples is dictated by the type of analysis to be performed (chemical composition, mineralogical composition, physico-mechanical tests), they are extracted from old quarries reserved for the construction of the site .

Mots clés : degradation , limestone, Cuicul, stone, experimented .

مقدمة

تعتبر المدينة الأثرية جميلة المعروفة قديما باسم "كويكول"، أحد أهم المواقع الأثرية الجزائرية التي تعود إلى الفترة القديمة، فحسب الروايات التاريخية يرجع تاريخ بنائها لنهاية القرن الأول وبداية القرن الثاني ميلادي، في عهد الإمبراطور الروماني "نيرفا"، وقد اتخذت في بداية نشأتها حامية عسكرية، ثم تحولت لاحقا لمدينة كاملة، يشبه تخطيطها نظام المدن الرومانية السائد آنذاك، حيث تضم العديد من المباني العامة

والخاصة، التي تشهد على مدى عراققتها، (الساحات العامة، والبازيليك، والكابيتول، قوس كركلا، والحمامات العامة، المعمودية، المسرح، والمنازل الخاصة،...).

وبالرغم من بقاء معالم هذه المدينة الأثرية صامدةً في وجه الزمن إلى يومنا هذا، إلا أن حالة حفصها تدل على تعرضها لمجموعة من العوامل أثرت بشكل كبير على ديمومتها، وبشكل عام يمكن حصرها في عوامل ذات صلة بطبيعة تكوين مواد بنائها الأساسية والمتمثلة في الحجارة، ومورفولوجية استعمال هذه الحجارة في البناء، وعوامل متصلة بالظروف البيئية المحيطة بها، فضلا عن ذلك، فإن هذه العوامل قد تعمل بشكل منفرد أو مشترك في تعزيز التلف البيوفيزيائي، أو البيوكيميائي أو كلاهما معا.

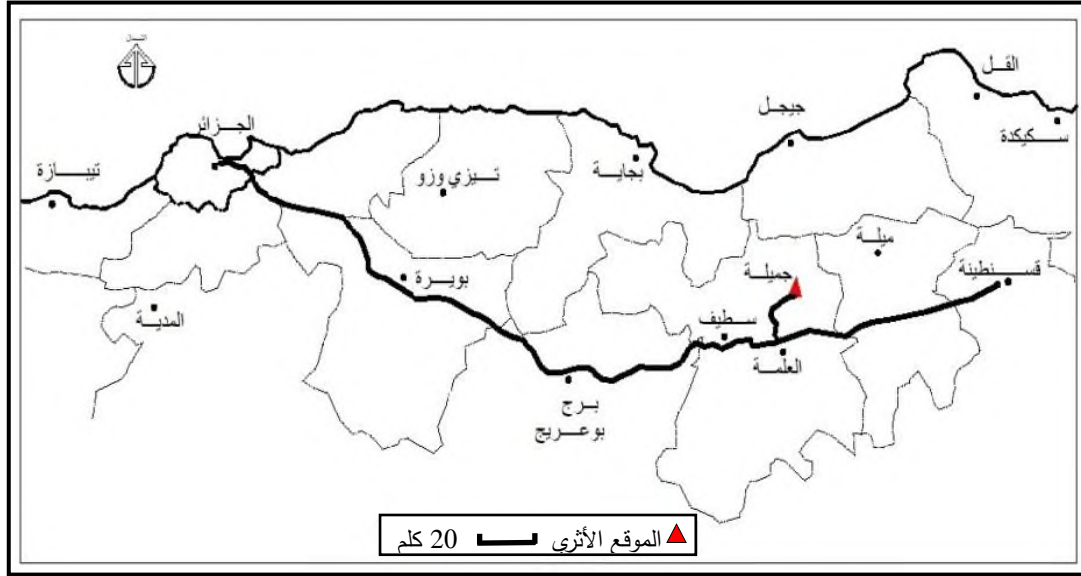
ومن أجل فهم ميكانيزمات تلف حجارة الموقع الأثري لجميلة، انتهجنا استراتيجية تقوم على دراسة وصفية لمختلف مظاهر التلف الظاهرة على الحجارة، ثم اللجوء الى دراسة مخبرية تقوم على تعيين التركيب الكيميائي والفيزيائي، والخواص الفيزيوميكانيكية لعينات مشكلة من هذه الحجارة، ولإشارة فقد اصطدنا في هذه الدراسة بمنعنا من أخذ عينات من حجارة الموقع الأثري، من طرف الهيئة المسؤولة عن تسيير الممتلكات الثقافية المحمية، لذا ارتأينا القيام بتحليل مخبرية على عينات من صنف هذه الحجارة، لكن من المحاجر التي جلبت منها حجار الموقع الأثري، اعتمادا على الدراسة التي أقيمت في إطار مشروع MEDISTONE *.

2-الموقع الجغرافي

تقع المدينة الأثرية لجميلة في الشمال الشرقي للجزائر، بالضبط في بلدية جميلة، على بعد 43 كلم عن مقر الولاية سطيف، بينما تبعد عن الجزائر العاصمة بحوالي 345 كلم¹ (الخريطة رقم 1)، إذ تحتل هذه المدينة موقع استراتيجي مميز، يتوسط ثلاثة مدن رئيسية، سطيف، قسنطينة وجيجل، فضلا عن ذلك، فهي تتواجد فوق هضبة محصورة بواد بيطان من الجهة الشرقية، واد قرقور من الجهة الغربية، هذه الوضعية منحنتها مخطط على شكل شريط مثلث، قاعدته الجنوبية محددة بالمحيط العمراني على ارتفاع حوالي 900م، أما الجانب الشرقي فمحدود بواد بيطان، في حين جانبه الغربي محدود بواد قرقور، لكن رأسه في الجزء الشمالي على ارتفاع حوالي 780م.

* - نظرا لحصولنا على ترخيص محدود الإستعمال من الهيئة المسؤولة في تسيير الممتلكات الثقافية المحمية لا يسمح لنا بأخذ العينات من الموقع الأثري، ارتئينا أخذ عينات من صنف هذه الحجارة لكن من المحاجر التي جلبت منها اعتمادا على الدراسة التي أقيمت في إطار مشروع MEDESTON، انظر Antonelli. F, et all,2008, Atlas des pierres ornementales et de construction du site antique de Djemila, projet Medistone (programme de la recherche FP6-2003, BRGM), France, pp.145- 160

1 -Centre d'étude et de réalisations en urbanisme SPA (URBAB-SETF),le plan directeur d'aménagement et d'urbanisme (PDAU),Djemila, 2009, p 12.



الخريطة رقم 1: تبين الموقع الجغرافي للموقع الأثري لجميلة²

3-دراسة تلف الحجارة المشكّلة لهياكل البنايات الموقع الأثري

لقد كشفت الزيارات الميدانية عن تعرض الحجارة المشكّلة لهياكل بنايات الموقع الأثري لجميلة، لمظاهر تدهور مختلفة، والتي ترجع في مجملها لتأثير عوامل مختلفة، والتي رصدناها في تأثير الماء بمختلف أشكاله، إلى جانب التغيرات في درجات الحرارة، بالإضافة إلى سوء تركيب الحجارة في البناء، مما نتج عنه أضرار متفاوتة الخطورة، منها سطحية، ومنها ما يقيس البنية الداخلية للحجارة. وقد بين الفحص بالعين المجردة، احتواء أغلب الحجارة على تشققات ذات أحجام واتجاهات مختلفة، منها سطحية على شكل خيوط شبكة العنكبوت، ومنها عميقة تخترق الحجارة بشكل عمودي، وهذا يبين لنا عدم احترام الوضعية الأصلية للحجارة، والتي من المفترض أن يتم وضعها في البناء على أحد أوجهها الأفقية كما كانت عليه في المحجر، إلى جانب إحترام اتجاه الطبقات التي ينبغي أن تكون بشكل متعامد مع الأحمال الواقعة عليها، للحصول على أقصى مقاومة لها، لأن المقاومة الميكانيكية تنخفض لأدنى مستوى إذا كانت الطبقات موازية للأحمال، فضلا عن ذلك، فهذه الوضعية تعزز بشكل كبير انتقال السوائل، وهذا ما يشير إليه Mélanie Denecker³ بأن اتجاه الطبقات يحفز انتقال السوائل بالخاصية الشعرية، مما ينشط عمليات الانحلال والتفكك والتتشير بفعل الأملاح أو الجليد، فعلى سبيل المثال سيلان المياه على سطح الحجارة يزيد من تشبعها لتصل للمرحلة الحرجة، وهذا يحفز انفصال الطبقات المكونة لها من جهة، ومن جهة أخرى يجعلها عرضة للفعل التدميري للجليد عند انخفاض درجة الحرارة إلى ما دون 0°م، وبشكل عام من خلال معاينة أغلب حجارة هياكل مباني الموقع الأثري، يمكن القول أن قرابة 30 إلى 60% من هذه

2 -http : //www.scribblemaps.com, adaptée et modifiée.

3- Mélanie Denecker, Le rôle des sulfates de sodium dans l'altération des pierres du patrimoine bâti, méthodes indirectes d'identification pour l'approche expérimentale, thèse doctorat en sciences de la terre petro physique expérimentale, Université de Cergy Pontoise, France, 2014, p. 37

الحجارة وضعت بهذه الطريقة، لذا نجدها بدرجات متفاوتة من التلف (التبقع، النقور، الثقوب، التقشر، التشقق، والتصدع، الانفصال)، والتي تتضاعف شدتها بمرور الزمن، مما قد يتسبب في انهيار مستقبلي لهذه المباني إذا لم يتم علاجها، وبالتالي ضياع هذا الموروث الحضاري.

كما لاحظنا احتواء العديد من الحجار على فواصل أو عروق من مادة مختلفة التركيب عن الحجار، ما شكل مستويات انقطاع لتجانس الحجار، والتي بمرور الوقت تفقد صلابتها، وتتلاشى بشكل تدريجي، خاصة عند تعرضها للفعل المشترك، لتسرب المياه على سطح الحجار، وللتغيرات في درجة الحرارة، مما تخلف ورائها فراغات باتجاهات مختلفة، قد تكون افقية أو عمودية أو مائلة، وتكمن خطورته في إمكانية توسعها تحت تأثير عوامل تلف أخرى كالرياح والجليد وثقل البنية، مما يؤدي إلى انفصال أجزاء من الحجار، وذلك يؤثر على استقرار البناء (اللوحة 1: أ).

وزيادة على ذلك، نصادف تعرض حجار بعض العناصر المعمارية، لانكسار على عدة مستويات، يتبع مواضع الضعف الموجودة مسبقا في هذه الحجار، والذي يعرف بظاهرة "الانفصام"، والتي تحدث بفعل تأثير الظروف المناخية، كالتغيرات في الرطوبة النسبية، ودراجات الحرارة، إلى جانب تأثير الأحمال الواقعة عليها، فعلى سبيل المثال، يمكن أن ينكسر العمود إلى عدة مستويات حسب سطوح الانفصام الموجودة، كما يظهر في (اللوحة 1: ب)، ومن أبرز مظاهر التلف المنتشرة أيضا على حجار الموقع الأثري، تشكل أخاديد، مختلفة الشكل والحجم والعمق، وذلك حسب صلابة الحجار، وموضعها في البناء، كما يظهر في (اللوحة 1: ج)، ويُعزى هذا التدهور إلى التآكل الفيزيوكيميائي، فالميكانكي ينجم عن مقاومة سطح الحجار لقوة تدفق مياه الأمطار الغزيرة، وشدة الرياح، وطبيعة الرمال التي تحملها، أما التآكل الكيميائي، فينتج عن انحلال المكونات الفلزية للحجار القابلة للذوبان في الماء، أو التي تحول تكوينها الفلزي الصلب إلى مواد هشة نتيجة تفاعلها مع الأحماض⁽⁴⁾.

كما سجلنا مظاهر تقشر على شكل وريقات، تبدأ من حواف الحجار وتصل إلى مركزها، إذ ترتبط هذه الظاهرة بوجه عام بوجود الأملاح، بالإضافة إلى ذلك، يلاحظ مظاهر تصدع وانقسام بشكل كلي أو جزئي لقطع ذات أحجام وأبعاد مختلفة تعرف بظاهرة التجزؤ⁵، كما يظهر في (اللوحة 1: د).

في حين نميز نوع آخر من التلف، المعروف بالتجوف السنخي أو النخروبي⁶، الذي أصاب بشكل كبير الحجار من نوع التوف الكهفي أو الحرماي، وحسب "محمد عبد الهادي" فهذا يحدث التدهور عادة نتيجة عدم تجانس الخصائص الفيزيائية والكيميائية للحجار⁷، إلى جانب تأثير عوامل التعرية و/أو التآكل

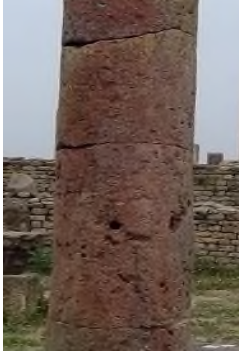
4- Kevin Beck, étude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires a forte porosité , thèse doctorat Science des Matériaux, université d'Orléans, France, 2006, p12.

5 -ICOMOS –ISCS– Illustrated glossary on stone deterioration patterns, engliche-arabe version, l'office des publications universités ,Alger 2016, p22,

6 -Ibid, p28.

7- محمد عبد الهادي، دراسات علمية في ترميم وصيانة الآثار غير العضوية، مكتبة زهراء، القاهرة، ص92.

بفعل الرياح⁸، هذا النوع من التلف يؤدي إلى الظهور التدريجي للجيوب، والأخاديد أو أنفاق متعددة الأشكال والأحجام على سطح الحجارة، والتي قد تتسع إلى عدة سنتيمترات، وقد تمتد أحيانا إلى عمق الحجارة، وتتركز هذه الظاهرة بشكل كبير على مستوى الحمامات الكبرى والمعمودية (اللوحة رقم 1: هـ، و، ز). إضافة إلى مظاهر التلف السابقة، يلاحظ تدهور يمس الطبقات السطحية للحجارة، يعرف بمرض الباتينة، والذي يعد وفق "Kevin Beck" شكل من أشكال التغيير الذي تخضع له الحجارة⁹، إذ يلاحظ في معظم حجارة الموقع الأثري بجزئها السطحي تغييراً واضحاً في ألوانها بين القاتمة والباهتة، وهذا ما شوه المظهر العام للمعالم (اللوحة رقم 1: ح)، وقد لاحظنا أيضاً تشكل مسحوق أبيض على سطح الحجارة، يعرف بالتزهر أو الطفح الملحي¹⁰، ويفسر ذلك بتحلل الأملاح المكونة للحجارة، خاصة سلفات الصوديوم والبوتاسيوم، التي تهجر أماكنها في البنية الداخلية للحجارة عبر مساماتها لتترسب على سطحها الخارجي، مما يزيد من حجم مساميتها، وبهذا تضعف قدرة تحملها للقوى الخارجية الواقعة عليها، وفي بعض الأحيان تترسب هذه الأملاح خاصة المتكونة من الحديد أو الكالسيوم على سطح الحجارة، لتكون ترسبات جديدة، ذات سمك ضعيف جداً مقارنةً بسمك الحجارة، وقد لاحظنا أيضاً تكون هذه الترسبات البيضاء على مستوى الحجارة المشكلة للجدران والأسقف الداخلية للمعمودية (اللوحة رقم 1: ط)، إلى جانب ذلك يلاحظ انتشار بقع لونية، وقشور سوداء والخضراء، والأشنيات والطحالب التي ترعف بالاستعمار البيولوجي، والذي يعمل على تغيير لون الحجارة الأصلي، كما قد يكون هذا التغيير في اللون سطحي أو متغلغل في العمق.

		
ج-تشكل أخاديد على أحد الكتل الحجرية على مستوى بيت الأسقف والكاهن الحي المسيحي	ب-انقسام العمود إلى عدة أجزاء مستوى بازيليكا كروسكنيوس بالحي المسيحي	أ-تشقق الحجارة بسبب اتجاه الطبقات على مستوى جدار الشمالي بمعبد العائلة السيفيرية

8- Frédéric Magnent, Proposition de méthodologie pour la conservation des murs anciens en Maçonnerie de pierre, «mémoire d'ingénieur construction aménagement, conservatoire national des arts et métiers CNAM, Paris, 2013, p44.

9-Kevin Beck, Op.cit, p15.

10 - ICOMOS -ISCS-Op.cit,p48.

		
و-توضح عملية تشكل أنابيب على حجارة التوف بمداخل المعمودية	ه-تبين تشكل جيوب على إحدى أعمدة البازيليكا الشمالية الحي المسيحي	د-تصدع الحجارة المشكّلة لجدار الكابتول.
		
ط-تظهر الأملاح في سقف وجدران المعمودية	ح-تدهور باتينة الحجارة المشكّلة لجدار بالمعبد السيفيري	ز- كشط وتجوف أحد الجدران على مستوى الحمامات الكبرى

اللوحة رقم 1: تمثل مختلف حالات تلف حجارة الموقع الأثري لجميلة.

4-التحاليل المخبرية

من أجل فهم ميكانيزمات التلف الذي أصاب حجارة الموقع الأثري، تم اللجوء إلى دراسة مخبرية، بهدف تعيين التركيبة الكيميائية والفيزية، والخصائص الفيزيوميكانيكية لعينات مشكّلة من ثلاثة أنواع من الحجارة، التي استخدمت بشكل كبير في هذا الموقع الأثري، وفي نفس الوقت تمتلك خصائص مختلفة، ومظاهر تدهور متعددة، ونظرا لحصولنا على ترخيص محدود الاستعمال، لا يسمح لنا بأخذ عينات من حجارة الموقع الأثري، ارتأينا أخذ عينات من صنف هذه الحجارة لكن من المحاجر الأصلية التي جلبت منها هذه الحجارة، اعتمادا على نتائج الدراسة المنجزة في إطار مشروع MEDISTONE¹¹، والتي تهدف إلى تحديد أنواع ومصدر حجارة هذا الموقع الأثري، والتي بينت أن أغلبها جلبت من محاجر محلية، بدليل آثار الإستخراج القديمة التي عثر عليها على الكتل الصخرية بهذه المحاجر، فضلا عن ذلك فهي الصخور تنتمي إلى القباب السطيفية، وهي ذات تكوين الجيولوجي السانونيان الأعلى.

11- Antonelli f. et All ,Op.cit, pp.145 – 160.

يتمثل النوع الأول (1ع) في حجارة كلسية صلبة، ذات لون رمادي، وحببيات ناعمة، جلبناها من محجر يقع بجبل جميلة على بعد 1 كم، في جنوب الغربي للموقع الأثري، أما النوع الثاني (2ع) فهي حجارة جيرية من نوع البيوكلاست الرمادي، ذات حببيات ناعمة، جلبت من المقلع الحجري يتواجد في الجنوب الشرقي بجبل سيدي سعدون، في حين النوع الثالث (3ع) هي حجارة كلسية من نوع التوف الكهفي أو الحرماي، جلبت من مقلع حجري يقع غرب الموقع الأثري، بالضبط في الضفة الجنوبية لواد الزّتين قرب حمام الدهامشة، وقد تم اختيار العينات حسب نوع التحاليل المراد القيام به، فأختيرت عينات في حالة حفظ جيدة، من أجل تعيين التركيب الكيميائي والفلزي، الكتلة الحجمية والكثافة، كما أختيرت عينات في حالة تدهور لتعيين امتصاص الماء، والمسامية، والمقاومة الميكانيكية للضغط أحادي المحور.

4-1- التركيب الكيميائي

تم تعيين التركيب الكيميائي على مستوى مخبر المركز الوطني للبحث العلمي والتقني للتحاليل الفيزيائية والكيميائية ببوسماعيل (تيزازة)، بتقنية فلورة الأشعة السينية Analyse par fluorescence X، بواسطة جهاز مطياف الأشعة السينية spectromètre de fluorescence des rayons X، من نوع « ZSX Primus II Rigaku »، فكانت نتائج التحاليل كما يلي، الجدول رقم 1.

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	المرجعية
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 1: نتائج التحليل الكيميائي لعينات من الحجارة.

4-2- التركيب الفلزية

تم تحديد التركيب الفلزية للعينات، على مستوى مخبر المركز الوطني للبحث العلمي والتقني للتحاليل الفيزيائية والكيميائية ببوسماعيل، بتقنية حيود الأشعة السينية Diffraction des rayons X (DRX)، وفق طريقة المسحوق، باستخدام جهاز من نوع Advance A 25 (Diffractomètre Bruker D8)، الذي يعمل وفق طريقة Brentano-Bragg، مع باعث للأشعة X من نوع (Cu. Kα1)، وطول موجي Å1.5406، يتم تغذية الجهاز بمولد ذو توتر قدره 40KV، وتيار شدته 30Ma، مع مجال للزاوية 2θ من (5° إلى 100°)، وحجم خطوة تقدر بـ 0,020°، ولقد مكنت هذه التقنية بتسجيل بيانات مختلفة، عولجت ببرنامج DIFFRC.EVA V4.0، وفق قاعدة البيانات PDF-2 2004، والتي سمحت لنا بترجمة التركيب الفلزية للعينات وفق النتائج مبينة في الجدول رقم 2.

العينة المرجعية	اسم التركيب	الصيغة الكيميائية	النسب المئوية (%)
ع1	Calcite	CaCO ₃	84,30
	Quartz	SiO ₂	15,70
ع2	Calcite, magnesian	(Mg.064 Ca.936) (CO ₃)	72,70
	Quartz	SiO ₂	27,30
ع3	Calcite	CaCO ₃	99,40
	Quartz	SiO ₂	0.60

الجدول رقم 2: التركيبية الفلزية بتقنية حيود الأشعة السينية.

4-3- الخصائص الفيزيائية

تُعد دراسة الخواص الفيزيائية والميكانيكية للحجارة من المواضيع الهامة، لما توفره من معلومات تفيد في تقدير درجة صلابة الحجارة، ومقاومتها لعوامل التلف المختلفة، إذ نقوم في هذه الدراسة بتحديد الخصائص الجوهرية للحجارة، من الكتلة الحجمية، والكثافة، ونسبة امتصاص الماء، والمسامية للعينات الثلاثة، واتبعت طرق التعيين التالية:

4-3-1- الكتلة الحجمية

تعد الكتلة الحجمية أحد أهم خواص الحجارة، ويقصد بها كتلتها بالنسبة إلى حجمها، وحدتها غ/سم³، ولتعينها نقوم بتجفيف العينات في درجة حرارة 80°م حتى نصل للوزن الثابت، ثم نضعها في أنبوب مدرج به حجم معين من إيثر البترول، تعين الكتلة الحجمية (M_v) بواسطة العلاقة التالية:

$$M_v(g/cm^3) = \frac{M_1 \times \rho}{M_3 - M_2}$$

حيث:

M₁: هي كتلة العينة في الحالة الجافة (غ)

M₂: هي كتلة الأنبوب مملوء بإيثر البترول (غ)

M₃: هي كتلة الأنبوب مملوء بإيثر البترول مع العينة (غ)

ρ: هي كثافة إيثر البترول، حيث ρ = 0.65 غ/سم³

4-3-2- الكثافة

تعتبر الكثافة عن وحدة كتلة المادة على وحدة الحجم، وتقدر بـ (غ/سم³)، وهي تؤثر بشكل كبير على الصفات الميكانيكية للحجارة، إذ تزداد قيم الصفات الميكانيكية مع زيادة الكثافة¹²، ويتم قياسها بتطبيق المعادلة التالية:

$$\rho_{dry} = \frac{M_{dry}}{M_{sat} - M_{sub}} \times \rho_w$$

حيث:

ρ_{dry} : تمثل الكثافة الجافة بـ (غ/سم³)

M_{dry} : كتلة العينة الجافة بـ (غ)

M_{sat} : وزن العينة المشبعة بالماء بـ (غ)

M_{sub} : وزن العينة المغمورة بالماء بـ (غ)

ρ_w : الكثافة الكتلية للماء بـ (غ/سم³)

تُعد الكثافة أحد أهم خواص الحجارة، وأبرز المعايير التي يمكن من خلالها تقدير صلابة الحجارة الأثرية، حيث يمكن اعتبار الحجارة صلبة إذا كانت تمتلك كثافة بين 2,8 و 3,5 غ/سم³، أما إذا كانت أقل من 2,5 غ/سم³، فتعد حجارة ضعيفة قليلة التماسك¹³.

4-3-3-المسامية

تعرف المسامية بشكل عام بأنها النسبة المئوية بين حجم الفراغات الموجودة على الحجم الكلي لهذه المادة، إذ تختلف هذه الخاصية في الأنواع المختلفة للحجارة، وهي تحسب انطلاقاً من تقدير حجم السائل المشبع للعينة وفق العلاقة التالية:

$$Nt(\%) = \frac{M_s - M_d}{M_s - M_h} \times 100$$

حيث :

M_s : وزن العينة وهي مشبعة بالماء بـ (غ)

M_h : الكتلة الهيدروستاتيكية بـ (غ)

M_d : كتلة العينة وهي جافة بـ (غ)

ولا شك أن المسامية تلعب دوراً هاماً في تحديد صلابة الحجارة، ومقاومتها الميكانيكية، إذ تتناقص جميع صفاتها الميكانيكية بازدياد مسامتها¹⁴، فضلاً عن ذلك، فهي تساهم في فقدان الحجارة لصلابتها من خلال تحفيز مختلف العمليات المرتبطة بدخول السوائل وخروجها، كزيادة التشبع والتبخر، وما يترتب عنه من

12- محمد راشد عبود الجبوري، أميد محمد احمد، إبراهيم حميد إبراهيم اللهيبي، (صلاحية صخور تكوين انجانة الرملية لأغراض البناء وكحجر تحكيم للسكك الحديدية في منطقة قيتول محافظة السليمانية)، مجلة تكريت للعلوم الصرفة، المجلد 20، العدد 5، 2015، ص108.

13- إبراهيم محمد عبد الله، ترميم الآثار الحجرية، دار المعرفة الجامعية، 2012، ص77

تولد ضغوط داخل المسامات نتيجة تجمد الماء، أو تشكل بلورات ملوحة داخل المسام الكبيرة نتيجة تبخر الماء الداخلي¹⁵.

4-3-4- نسبة امتصاص الماء

تعتمد خاصية امتصاص الحجارة للماء كثيرا على مساميتها، وهي تعرف بقابليتها أو قدرتها على جذب الماء بين مساماتها، إذ تلعب هذه الخاصية دوراً كبيراً في تحديد مقاومة الحجارة للتلف، فعلى سبيل المثال تكون الحجارة ذات الامتصاص الضعيف، أكثر تحملاً وأقل تأثراً بعمليات التلف المرتبطة بفعل المياه (الانحلال، والتجمد)، فضلا عن ذلك، فالخواص الميكانيكية للحجارة تقل أيضا كلما زادت نسبة الامتصاص¹⁶، أما نسبة الامتصاص فهي تمثل نسبة الماء الممتص للعينة إلى وزنها وهي جافة، ولحسابها قمنا بتجفيف عينات من الحجارة ذات شكل أسطواني قطر 45 ملم، وارتفاع 90 ملم، داخل مجفف في درجة حرارة $80 \pm 2^\circ\text{C}$ لمدة 45 دقيقة، حتى الحصول على كتلة ثابتة، بعد ذلك غمرنا هذه العينات في حمام مائي لمدة 24 ساعة حتى تتشبع بالماء، ثم أخذنا وزنها من جديد، ولتحدد كمية الماء الممتصة نطبق العلاقة التالية:

$$Ab(\%) = \frac{M_s - M_d}{M_d} \times 100$$

حيث:

Ab: نسبة الامتصاص (%)

Md: وزن العينة الجاف (غ)

Ms: وزن العينة وهي مشبعة بالماء (غ).

4-3-5- مقاومة الضغط

تتعرض الحجارة المستعملة في هياكل البنايات إلى قوى مختلفة، والتي يمكن أن نجدها في حالة ضغط، أو شد، أو انعطاف (انحناء)، أو قص، وحتى نضمن ديمومة هياكل البنايات، يفضل أن تملك هذه الحجارة خواص فيزيوكيميائية جيدة، تؤهلها لمقاومة مختلف القوى المؤثرة، ومن بين القوى الأكثر تأثيراً على الحجارة، قوى الضغط التي تلعب دوراً كبيراً في تدميرها، لذا فتعيين مقاومتها لقوة الضغط يُعد من بين

14- ضياء غاوي صالح، (صلاحية صخور الحجر الجيري من تكوين الفتحة لأغراض البناء وركام الطرق في محافظة نينوى، شمال العراق)، مجلة جامعة الأنبار للعلوم الصرفة، المجلد السادس، العدد الثالث، 2012، ص ص 147- 148.

15- إبراهيم محمد عبد الله، مرجع سابق، ص 90.

16- محمد راشد عبود الجبوري، مرجع سابق، ص 109.

الاختبارات الأكثر أهمية، لأنها تسمح لنا بتحديد درجة صلابتها، فضلا عن ذلك، تعرف القوى القصوى لتحمل الحجارة، على أنها الضغط اللازم تطبيقه لكسرها، شريطة أن تكون هذه القوة المطبقة محورية، وألا تتعرض جوانب العينة لأي نوع من الاجهاد.

ولقد تم تحديد مقاومة الضغط حسب المواصفات AFNOR، باستخدام عينات أسطوانية الشكل ذات قطر 45 ملم وارتفاع 90 ملم، تم تحضيرها بواسطة آلة Carotteuse، ثم نضع هذه العينات في جهاز الضغط، الذي يتكون من صفيحتين معدنيتين متوازيتين موصولتين بعدد إلكتروني، وبعد ادخال قياسات العينة في هذا الأخير، يتم الضغط على زر التشغيل لتبدأ الصفيحة العلوية بالضغط التدريجي على العينة حتى تظهر بها تشققات، عندها يتوقف الجهاز ويعطي قراءة معينة للضغط. ولقد تم القيام بهذا الاختبار على مستوى ورشة مخبر البناء والأشغال العمومية "حمدي" بالجزائر العاصمة، باستخدام آلة اختبار من نوع CONTROLAB، على ثلاث عينات للحصول على القيمة المتوسطة.

5- نتائج التحليل الفيزيوميكانيكية

نتطرق فيما يلي إلى أهم نتائج الخواص الفيزيوميكانيكية للعينات وفق البروتوكولات التجريبية المذكورة أعلاه، النتائج المتحصل عليها موضحة الجدول رقم 3:

نوع الاختبار			العينة		
			1ع	2ع	3ع
المسامية (%)			4,16	1,88	21,07
الامتصاص (%)			1,68	0,75	11,71
الكتلة الحجمية غ / سم ³			2,55	2,56	1,65
الكثافة (الوزن النوعي) غ / سم ³			2,65	2,61	2,09
المقاومة الميكانيكية MPa			55,7	47,9	0

الجدول رقم 3: ملخص نتائج اختبارات الخصائص الفيزيائية والميكانيكية.

6- تحليل النتائج

من خلال دراسة نتائج التحاليل التركيبية الكيميائية المبنية في الجدول رقم 1، يتبين أن العينات الحجرية الثلاثة، تتكون من أكسيد الكالسيوم CaO بنسب مرتفعة يقدر بـ (10,54، 42,87، 49,36%) على التوالي، مع نسب متفاوتة من الكوارتز SiO₂ تقدر بـ (1,23، 18,55، 9,36%) على التوالي، أما بقية العناصر (Na₂O, P₂O₅, TiO₂, SO₃, MgO, Fe₂O₃, Al₂O₃)، فتتواجد بنسب ضعيفة جدا تتراوح بين (0,01 إلى 0,32%)، وهو ما جعل العينات ذات طبيعة بلورية عالية، وهذا ما دلت عليه نتائج حيود الأشعة السينية المبينة في الجدول رقم 2، والتي يتبين منها أن التركيب الفلزي للعينات الثلاثة يتكون بصورة رئيسية من معدن الكالسيوم، مع نسب متفاوتة من الكوارتز، مما يدل على أن العينات ذات

طبيعة كربونية، حيث نجد أن العينة ع³ تتكون من 99,40 % من الكالسيت، مع نسبة قليلة جدا من الكوارتز تقدر بـ 0,6 %، وبذلك يعد حجر كربوني نقي.

أما بالنسبة للعينتين ع¹ وع² فنجد أنهما يتكونان من الكالسيت بنسبة كبيرة تقدر بـ 83,30 % و 72,70 % على التوالي، مع نسب معتبرة من الكوارتز قدرت بـ 15,7 % و 27,30 % على الترتيب، وهذا ما منح هذه الأنواع من الحجارة خصائص فيزيائية وميكانيكية جيدة مقارنة مع العينة ع³.

كما يتبين من التحليل الفلزي أن العينات التي تحتوي على نسب معتبرة من الكوارتز (ع¹، وع²) لديها درجة جيدة من الصلابة والمتانة مقارنة مع العينة ع³، التي تمتلك أدنى نسبة، لذا فهي أقل صلابة، وهذا ما يفسر بأن الكوارتز هو المادة الرابطة في هذه الحجارة، وبما أنه من المعادن الغير قابلة للذوبان في الماء، لذا كلما زادت نسبته في الحجارة كلما زادت درجة صلابتها، والعكس صحيح، وعلى خلاف ذلك فالعينات التي تحتوي على نسبة كبيرة من الكالسيت، ونسب ضعيفة من الكوارتز تكون أقل صلابة وأكثر هشاشة، وذلك لكون الكالسيت يعد من المعادن القابلة للذوبان في الماء، وهذا ما يفسر مظاهر التلف المتعددة على حجارة الموقع الأثري، خاصة الحجارة من صنف العينة ع³ (التوف الكهفي)، والتي تعرضت لعمليات الانحلال بشكل كبير، وبدرجات أكبر من الأنواع الأخرى من الحجارة (ع¹ وع²)، غير أن هذا لا يعني أن هذه الأخيرة في مأمن من التلف، إذ يلاحظ على صنف هذه الحجارة في الموقع الأثري أنها تعرضت بشكل كبير لعمليات التشقق والانفصال والتجزؤ، مع بعض مظاهر الانحلال (تشكل الأخاديد)، كما يظهر في (اللوحة 1: أ، ج، ز، ح).

وقد أعطت نتائج الخواص الفيزيوميكانيكية للعينات مؤشراً واضحاً على مدى ضعف البنية الداخلية للحجارة من صنف العينة ع³ (التوف الكهفي)، بسبب ما تعرضت له من تلف فيزيوكيميائي، إذ تمتلك أدنى كثافة قدرت بـ 2,09 غ/سم³، وأعلى نسبة امتصاص ومسامية قدرت بـ (11,71 %، و 21,07 %) على التوالي، في حين مقاومتها للضغط ضعيفة جداً، حيث لم يسجل جهاز مقاومة الضغط أي قيمة، بالرغم من تدمير العينات، وهذا ما دلت عليه نتائج التحليل بـ (DRX)، والتي بينت أنها تتكون من كربونات الكالسيوم بنسبة كبيرة قدرت بـ 99,40 %، ونسبة قليلة من الكوارتز لا تتعدى 0,6 %، هذا ما جعل هذا النوع من الحجارة ذات هشاشة كبيرة وصلابة ضعيفة، وذلك نتيجة قلة مادتها اللاصقة المتمثلة في الكوارتز، بالإضافة إلى احتوائها على العديد من التجاويف والفتحات، أما الحجارة الكلسية المتمثلة في العينتين ع¹ وع²، فتمتلكان كتلة حجمية (2,55 غ/سم³ و 2,56 غ/سم³)، وكثافة تقدر بـ (2,50 غ/سم³، 2,61 غ/سم³) على التوالي، وبالتالي هي أكبر من (2,50 غ/سم³)، وبذلك تعد حجارة صلبة وفق إبراهيم محمد عبد الله¹⁷، وهذا يتوافق مع نتائج تحديد الامتصاص التي بينت أنها ضعيفة جداً، حيث قدرت بـ (1,68 %، و 0,75 %) على

التوالي، ومسامية منخفضة قدرت نسبتها بـ (4,16%، 1,88%)، هذا ما جعلها تمتلك مقاومة ميكانيكية للضغط مرتفعة نوعاً ما، حيث قدرت (55,70 و 47,90 Mpa) .

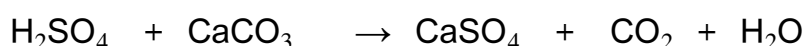
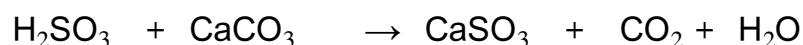
ومن خلال مقارنة خصائص الحجارة الثلاثة، يتبين أن الحجارة من صنف العينات ع1 و ع2 تمتلك خصائص فيزيائية وميكانيكية جيدة، لذا تعد حجارة صلبة، لكن رغم ذلك فقد لوحظ على صنف هذه الحجارة في الموقع الأثري مظاهر تدهور متعددة، من تشققات وتصدعات، والتي يمكن أرجاعها إلى تكوينها الفلزي غير المتجانس، إذ تتكون من نسب كبيرة من الكالسيت (84,30%، و 72,70%) مع نسب معتبرة من الكوارتز (15,70%، و 27,30%)، هذا ما منح هذه العينات صلابة معينة، لكنها غير متجانسة بسبب تكونها من معادن مختلفة الصلابة، فعلى سبيل المثال صلابة الكوارتز أكبر من الكالسيت، وهذا ما يفسر الاختلاف في درجة تآكل وانحلال أسطح الحجارة هذا من جهة، ومن جهة أخرى تباينها في معدلات تمددها وتقلصها، هذا أدى إلى ظهور العديد من التشققات والتصدعات على هذه الحجارة، بالإضافة إلى ذلك فإن عملية انحلال الكالسيت تكون أكبر من الكوارتز، وهذا ما يفسر بقاء أغلب المعالم المنجزة من الحجارة الكلسية الصلبة، وحجارة البيوكلاست بحالة نوعاً ما جيدة، مقارنة مع المعالم التي تحتوي على حجارة التوف الحرماي، والتي أصبح بعضها يتفتت كمسحوق بمجرد لمسها.

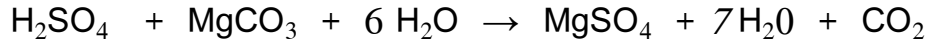
في حين الحجارة من صنف العينة ع3، التي تتكون من نسب مرتفعة من الكوارتز تصل إلى 99,40%، مع نسب ضعيفة جداً من الكوارتز قدر بـ 0,60%، هذا التكوين جعلها تصنف من الحجارة ضعيفة التماسك والصلابة، نتيجة قلة مادتها اللاصقة، مما عرضها لعملية الانحلال بشكل كبير بفعل مياه الأمطار، والتي تزداد في وجود غازات التلوث الجوي التي تتحول إلى أحماض ترفع من ذوبانية الكالسيت، ومن أبرز الغازات الضارة بالحجارة الكلسية نذكر:

- غاز CO₂: يتحول هذا الغاز في وجود الماء إلى حمض الكربونيك الضعيف، فبالرغم من ضعفه إلا أنه قادر على تحويل كربونات الكالسيوم والماغنيزيوم الصلبة إلى بيكربونات قابلة للذوبان في الماء بمائة مرة، ويتم هذا التحول وفق التفاعلات التالية:



- غاز ثاني أكسيد الكبريت: يتحول هذا الغاز عند وجود أدنى نسبة من الماء إلى حمض الكبريتوز H₂SO₃، الذي بعد أكسدته يتحول إلى حمض الكبريتيك أو الكبريت (H₂SO₄)، هذه الأحماض قوية بما يكفي ليكون لها تأثير مدمر على مكونات الحجارة، خاصة الكلسية والرميلية ذات الروابط الكلسية، إذ تتفاعل هذه الأحماض مع كربونات الكالسيوم والماغنيزيوم وتحولها لأملح جيرية قابلة للذوبان في الماء، وفق التفاعلات التالية:





هذه المركبات الجديدة عبارة عن أملاح جبسية أكثر قابلية للذوبان من كربونات الكالسيوم، فعلى سبيل المثال كبريتات الكالسيوم (CaSO_3) تذوب بحوالي ثلاثة مرات ($0,045 \text{ غ/ل}$)، في حين كبريتات الكالسيوم (CaSO_4) يذوب بحوالي 150 مرة ($2,1 \text{ غ/ل}$)¹⁸.

- **غاز ثاني أكسيد النيتروجين:** يتميز هذا الغاز بقدرته العالية على الذوبان في الماء لتكوين أحماض قوية كحمض النيتروجين (النيتريك) H_2NO_3 ، وحمض النتروز (H_2NO_2)، والتي تعمل على تحويل كربونات الكالسيوم غير القابلة للذوبان في الماء إلى نترات الكالسيوم CaNO_3 شديدة الذوبان في الماء، وهذا يعرض سطح الحجارة لعملية الاختزال نتيجة خضوعها لعمليات الغسل بفعل الأمطار، والتآكل والكشط بفعل الرياح⁽¹⁹⁾، ناهيك عن استمرار وتكرار هذه العمليات يؤدي إلى زوال الأثر الحجري نهائياً، وهذا ما نلاحظه في المعالم المشيدة بهذا الصنف من الحجارة (التوف الكهفي) في كل من الحمامات الكبرى، والمعمودية، والمعبد السيفيري، والكابيتول، والتي تبدي حجاتها مظاهر انحلال كبيرة وتدهور كبير، حيث تشكلت ثقوب، وفجوات، واختزال مساحات كبيرة من الجدار (اللوحة 1: و، ه).

7-الخلاصة

نستخلص من هذه الدراسة أن حجارة الموقع الأثري لجميلة تعرضت للعديد من عوامل التلف، فمن خلال التشخيص الميداني بالعين المجردة، فقد تم الكشف عن العديد من مظاهر التلف، والتي صنفناها في الانحلال والتشقق والتصدع والانكسارات، تدهور الباتينة والتبقع اللوني، ومن خلال الدراسات المخبرية تمكنا من معرفة التركيب الكيميائي والفلزي للحجارة، وتحديد الخصائص الفيزيوميكانيكية، والتي بينت أن الحجارة الكلسية من صنف العينة ع3 من (التوف الكهفي) تمتلك كتلة حجمية $1,65 \text{ غ/سم}^3$ ، وكثافة تقدر بـ $2,09 \text{ غ/سم}^3$ ومسامية مرتفعة $21,07\%$ ، تعد حجارة ضعيفة جداً، فهي لا تقاوم عوامل التلف نتيجة امتلاكها بنية داخلية هشة، لذا فهي في حالة تلف مستمر.

أما النوعين الآخرين من العينات ع1 وع2 من الحجارة الكلسية، التي تمتلك كثافة تقدر بـ ($2,65 \text{ غ/سم}^3$ و $2,61 \text{ غ/سم}^3$)، وكتلة حجمية ($2,65 \text{ غ/سم}^3$ و $2,55 \text{ غ/سم}^3$) على التوالي، والتي تعد مرتفعة، فضلاً عن ذلك، فهي تتميز بمقاومة ميكانيكية للضغط مقبولة و التي قدرت بـ ($55,7 \text{ Mpa}$) و ($47,90 \text{ Mpa}$) على التوالي، فبالرغم من هذه الصفات الجيدة، إلا أنه لوحظ تعرض طبقاتها السطحية لتشققات وانفصال للطبقات لكن بدرجة أقل من العينة ع3، ومن أجل تفادي هذا التدهور والإطالة من ديمومة أو عمر البناء الأثري، نقدم بعض التوصيات:

- استبدال كتل الحجارة المتدهورة أو المفقودة بكتل أخرى سليمة تمتلك نفس التركيب الكيميائي والفلزي، والخواص الفيزيوميكانيكية، بالإضافة إلى تركيبها بنفس تقنية البناء القديمة؛

18- Wieslaw Domaslawski, la conservation préventive de la pierre, Unesco, Paris, 1982, p 28.

19-Ibid, p. 28.

- سدّ جميع الثقوب والشقوق والفجوات والجيوب الظاهرة على أسطح الحجارة، مع تثبيت الأجزاء المنفصلة باستخدام مادة لاصقة، وتقوية الأجزاء الضعيفة والمتآكلة باستخدام مواد مقوية تضمن إعادة تماسها خاصة حجارة من نوع التوف الكهفي؛
- القيام بأعمال الصيانة الدورية من خلال التنظيف، والتقوية، والدعم والتشخيص، للكشف عن العيوب واصلاحها في وقتها دون أي تأخير لكن بأساليب علمية سليمة؛
- العمل على توفير حماية لمعالم الموقع الأثري من خلال تغطيتها بأسقف تحميها من الأمطار والتغيرات في درجة الحرارة، والجليد، وحتى الفعل البشري.

8-المراجع البيبليوغرافية

- إبراهيم محمد عبد الله، ترميم الآثار الحجرية، دار المعرفة الجامعية، 2012.
- ضياء غاوي صالح، (صلاحية صخور الحجر الجيري من تكوين الفتحة لأغراض البناء وركام الطرق في محافظة نينوى، شمال العراق)، مجلة جامعة الأنبار للعلوم الصرفة، المجلد 6، العدد 3، 2012.
- محمد راشد عبود الجبوري، أميد محمد احمد، إبراهيم حميد إبراهيم الهبيي، (صلاحية صخور تكوين انجانة الرملية لأغراض البناء وكحجر تحكيم للسكك الحديدية في منطقة قيتول محافظة السليمانية)، مجلة تكريت للعلوم الصرفة، المجلد 20، العدد 5، 2015.
- محمد عبد الهادي، دراسات علمية في ترميم وصيانة الآثار غير العضوية، مكتبة زهراء، القاهرة.
- Antonelli. F, et all, atlas des pierres ornementales et de construction du site antique de Djemila, projet MEDISTONE (programme de la recherche FP6-2003), BRGM France ,2008.
- Centre d'étude et de réalisations en urbanisme SPA (URBAB-SETIF)le plan directeur d'aménagement et d'urbanisme (PDAU), 2009.
- Frédéric magnent, Proposition de méthodologie pour la conservation des murs anciens en Maçonnerie de pierre ،mémoire d'ingénieur construction aménagement, conservatoire national des arts et métiers CNAM,Paris,2013
- ICOMOS –ISCS– Illustrated glossary on stone deterioration patterns. engliche-arabe version, l'office des publications universities, Alger 2016
- Kevin Beck, étude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires a forte porosité, thèse doctorat Science des Matériaux, université d'Orléans, France, 2006.

- Mélanie Denecker, Le rôle des sulfates de sodium dans l'altération des pierres du patrimoine bâti, méthodes indirectes d'identification pour l'approche expérimentale, thèse doctorat en sciences de la terre petro physique expérimentale, Université de Cergy Pontoise, France, 2014,p37
- Wieslaw Domaslowski, la conservation préventive de la pierre, Unesco, paris, 1982.
- <https://www.scribblemaps.com>