

تأثير الجليد على الخصائص الفيزيوميكانيكية للحجارة الكلسية المشكّلة لمعالم الموقع الأثري لجميلة بسطيف

The Effect of ice on the physico-mechanical properties of limestones forming the archaeological site of Djemila-Sétif

L'effet du gel sur les propriétés physico-mécaniques du calcaire formant les traits du site archéologique de Djemila-Sétif

طالب الدكتوراه جمال موساوي

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

البروفيسور أرزقي بوخنوف

معهد الآثار، جامعة الجزائر 2

تاريخ الإرسال: 2020-04-16 - تاريخ القبول: 2021-01-16 - تاريخ النشر: 2023-02-27

ملخص

يعد الجليد من العوامل التي تسرع تلف الحجارة المشكّلة للمعالم الأثرية، ولدراسته برمجنّا تجارب مخبرية على ثلاث عيّّنات من الحجارة الكلسية ع¹، ع² وع³ أخذت من المحاجر الأصلية¹ لحجارة بناء الموقع الأثري لجميلة، وإخضاعها لـ 14 دورة تجمد وذوبان مسرعة تحت درجة حرارة (20+ إلى -7,50°م). وقد بيّنت نتائج التحاليل قبل وبعد اختبار التجمّد والذوبان أن العيّنتين ع¹ وع² سجلتا زيادة ضعيفة في المسامية والامتصاص بنسبة تتراوح من (18,36% إلى 23,40%)، وانخفاضاً في المقاومة الميكانيكية للضغط بنسبة 16,90%، وفقداناً في سرعة الموجة فوق الصوتية V_p بنسبة 3,43%، على خلاف ذلك، فقد أظهرت العيّنة ع³ تغيراً أكثر وضوحاً، حيث سجلت زيادة معتبرة في المسامية والامتصاص بنسبة تبلغ 52,37%، مع فقدان في سرعة الموجة بنسبة 8,13%، ولم تسجل أي قيمة للمقاومة الميكانيكية للضغط نظراً لعدم تحمل العيّنة الإجهاد المطبق عليها.

1- نظراً لحصولنا على ترخيص محدود الاستعمال من الهيئة المسؤولة على تسيير الممتلكات الثقافية المحمية لا يسمح لنا بأخذ العيّّنات من الموقع الأثري، لذا لجأنا لأخذ عيّّنات من صنف هذه الحجارة لكن من المحاجر التي جلبت منها اعتماداً على الدراسة التي أقيمت في إطار مشروع MEDESTON، انظر المرجع: Dessandier.F, Hamiane. M, khalafallah. C, et all, 2008. pp.145 – 160

الكلمات الدالة: الموقع الأثري جميلة؛ الحجارة الكلسية؛ التجمد والذوبان؛ الخواص الفيزيوميكانيكية؛ سرعة الأمواج فوق الصوتية.

Abstract

Ice is a factor which accelerates the degradation process of the stones composing the archaeological monuments. To study it, we proceeded to laboratory experiments on three samples C₁, C₂ and C₃, taken from the original quarries of the building stones of the archaeological site of Djemila, and subjected them to the 14 accelerated freezing and thawing at a temperature variation between (+ 20 ° C) and (-17.50 ° C). The results of laboratory analyze before and after the freezing and thawing tests on samples C₁ and C₂ showed a slight increase in porosity and water absorption by a percentage ranging from (18.36% to 23.40%), and a decrease in mechanical resistance to pressure of 16,90%, and a decrease in the ultrasonic speed of 3,43%. On the other hand, we noticed a significant loss in the properties of sample C₃, an increase in porosity and water absorption to 52,37%, with a decrease in the wave speed of 8,13%, and we did not record any mechanical resistance since the sample did not support the minimum load applied to it.

Keywords: Djemila archaeological site; limestones; physico-mechanical properties; freeze/thaw; ultrasonic velocity.

Résumé

Le gel est un facteur qui accélère le processus de dégradation des pierres composant les monuments archéologiques, Pour l'étudier, nous avons procédé à l'expérimentation de trois échantillons C₁, C₂ et C₃, prélevés de la carrière d'origine des pierres de la construction du site archéologique de Djemila, et soumis aux 14 cycles du gel/dégel à une variation de température entre (+20°C et -17,50°C). Les résultats des analyses de laboratoire avant et après les tests de gel/dégel sur les échantillons C₁ et C₂ ont montré une légère augmentation dans la porosité et de l'absorption d'eau d'un pourcentage allant de (18,36% à 23,40), et une diminution de la résistance mécanique à la compression de 16,90%, et une diminution de la vitesse ultrason V_p de 3,43%. Par contre nous avons remarqué une perte significative dans les propriétés de l'échantillon C₃ ; une augmentation de la porosité et d'absorption d'eau à 52,37% et une diminution de la vitesse de l'ultrason de 8,13%, et nous n'avons pas enregistré aucune valeur de résistance mécanique puisque l'échantillon n'a pas supporté la charge minimale qui lui est appliqué.

Mots-clés: site archéologiques Djemila; pierres calcaires; gel/dégel; caractéristique physico-mécanique; vitesse des ultrasons.



مقدمة

يُعد الموقع الأثري لجميلة من أهم المواقع القديمة التي تزخر بها الجزائر، إذ يعود تأسيسه لأواخر القرن الأول الميلادي، كان يعرف قديماً بكويكول، وهو يضم مجموعة هامة من المعالم والشوارع الرئيسية، فضلاً عن ذلك، فهو مدرج ضمن قائمة مواقع التراث الإنساني منذ 1982. ويرجع بقاءه صامداً في وجه الزمن والظروف القاسية إلى يومنا هذا إلى صلابته الحجارة المستخدمة في بنائه، فبالرغم من ذلك، فإن حالة حفظه تبرز مظاهر تدهور متعددة تدلّ على تعرّضه للعديد من عوامل التلف، من بينها الجليد الذي يُعد من أخطر عوامل التلف المناخية، وبما أن منطقة جميلة تتميز بمناخ يُعرف انخفاضاً شديداً في درجات الحرارة خاصةً في فصل الشتاء، هذا ما يجعل حجارة هذا الموقع الأثري عرضة لخطر دورات تجمد وذوبان محتواها المائي والذي يؤثر بشكل كبير على درجة صلابتها وديمومتها.

فدراسة فعل الجليد على الحجارة الأثرية يُعد من المواضيع الهامة في مجال المحافظة على الآثار لأنها تسمح بتقدير مدى فقدان الحجارة لصلابتها ومقاومتها وبالتالي ديمومة المعالم المتشكّلة منها، مما يمكّننا من أخذ الاحتياطات اللازمة لتفاديها، ومن هنا تبرز أهمية دراستنا في كونها تساعد على اختيار أفضل أساليب العلاج والطرق الوقائية.

وتنبثق إشكالية البحث في كون المعالم الأثرية في الموقع الأثري لجميلة المشيدة بالحجارة تتعرض كغيرها من المباني التي تقع في مناطق تعرف ظروفاً مناخية قاسية، ذات برودة شديدة، إذ يترتب عنها تجمّد وذوبان محتواها المائي نتيجة تعرضها لما يعرف بدورات التجمّد والذوبان، والتي ينتج عنها تولد ضغوط هيدروليكية وأسموزية متزايدة، تؤدي إلى اجهاد هذه الحجارة، ما يفقدها خواصها الجوهريّة بشكل تدريجي بما ينعكس سلباً على صلابتها، وبالتالي على استقرار هذه المعالم وديمومتها، وهذا ما يفرض التدخل لإيجاد حلول لهذه الإشكالية، لأنّه في حالة فقدان هذه الآثار لا يمكن أن تعوض، وقد فرضت هذه الاشكالية تساؤلات عديدة منها:

- ما التأثير الذي يحدثه الجليد على خواص حجارة المعالم الأثرية؟
- وما العوامل المتحكمّة في تلف ومقاومة الحجارة الجليد؟
- وما أهم مظاهر تلف حجارة الموقع الأثري التي تُعزى للجليد؟



-وما أنواع الحجارة الأكثر حساسية للجليد؟

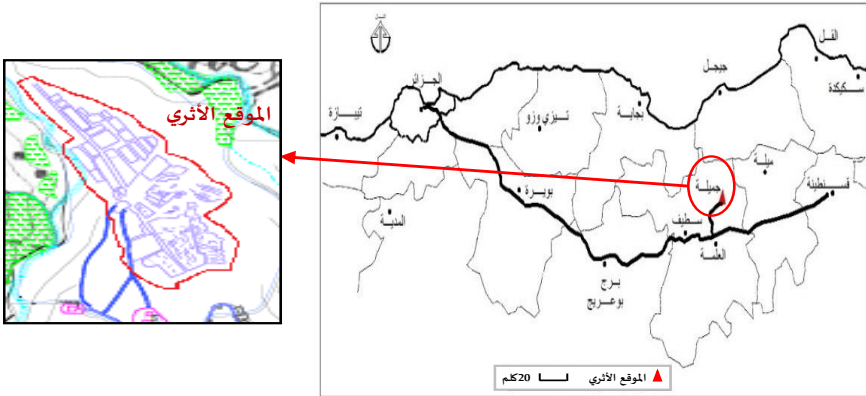
-وما الاستراتيجيات التي يمكن إتباعها للحفاظ على حجارة هذا الموقع الأثري؟

وللإجابة عن التساؤلات المطروحة، اعتمدنا منهجية تقوم على الجمع بين المنهج الوصفي الذي يقوم على التشخيص للتعرف أكثر على الموقع الأثري ودرجة حفظه، والمنهج التجريبي الذي يقوم على التجارب المخبرية للتعرف على التغير الذي يحدث لمادة بناء الموقع، ولقد قمنا في هذا البحث بتقديم الموقع الجغرافي للموقع الأثري، والمعطيات المناخية، ثم تشخيص أهم مظاهر تلف الحجارة التي تُعزى للجليد وأبرز العوامل المتحكممة فيه، ثم تطرقنا إلى التحاليل المخبرية، وبرتوكولات اختبار التجمد والذوبان وتعيين الخواص الفيزيوميكانيكية، ثم عرض ومناقشة نتائج التحاليل قبل وبعد دورات التجمد والذوبان، وختمناه بأهم الاستنتاجات والتوصيات.

1. الموقع الجغرافي لموقع جميلة

جميلة من المواقع الأثرية التي تعود إلى الفترة القديمة، هي دائرة تابعة حالياً لولاية سطيف، وتقع في الشمال الشرقي منها، حيث تبعد عنها بحوالي 43 كلم، بينما تبعد عن الجزائر العاصمة بحوالي 345 كلم (Duval, 1995)، شيد هذا الموقع فوق هضبة على ارتفاع 900م فوق سطح البحر، محصورة بين ضفتي واد بيطام من الشرق وواد قرقور من الغرب (الخريطة رقم 01)، وهو يتواجد في مفترق طرق يربط كل من قسنطينة وسطيف وجيجل.

الخريطة رقم 01: تبين الموقع الجغرافي للموقع الأثري لجميلة



المصدر: <https://www.scribblemaps.com>, adaptée et modifiée



2. عرض البيانات الأثرية

1.2 تلف حجارة الموقع الأثري بفعل الجليد

عرف الجليد منذ فترة طويلة بأنه من أبرز العوامل المناخية المتسببة في فقدان الحجارة لديمومتها²، إذ يُعزى معظم التلف الذي يلحق بها في فصل الشتاء إلى تعاقب دورات التجمد والذوبان، فضلاً عن ذلك، تجمد الحجارة يحدث باشتراك عدة عوامل، أبرزها التغيرات في درجة الحرارة، وإمدادات المياه، فالتغيرات في درجة الحرارة تلعب دوراً كبيراً في تسريع أو إبطاء عملية التجمد والذوبان وآليات التلف المصاحبة لها، إذ أن التجمد الفوري يحول دون تشبع الحجارة ويحفز تشكّل الضغوط السريعة على الحجارة المليئة بالفراغات الداخلية، مما يؤدي إلى انفجارها خاصةً ضعيفة المقاومة، أما التجمد المطول فيطيل من مدة المرحلة مما يزيد من العمق الذي يصل إليه الجليد (Badosa, 2012)، وهذا بدوره يساهم في إضعاف البنية الداخلية للحجارة نتيجة تشكّل الشقوق وتوسعها في عمق الحجارة.

أما وجود الماء في الوسط المسامي للحجارة فيلعب دوراً مهماً في تشكيل بلورات الجليد، فضلاً على أنّ الفعل التدميري للجليد يرتبط بتوفر الماء في شبكة المسام خاصةً أثناء تشكّله، وقد أشار (Bost, 2008) إلى أنّ المحتوى المائي للحجارة يتغير أثناء دورات التجمد والذوبان، مما يؤدي إلى زيادة تشبعها وهذا ما يضاعف من الفعل التدميري للجليد نتيجة زيادة كثافته والضغط المتولدة، وهذا ما أكدّه (Thomachot, 2002) بأن التأثير السلبي للجليد على الحجارة يعتمد بشكل أساسي على درجة تشبعها، وعليه يمكن القول بأن الحجارة لا تتدهور بشكل كبير إلا إذا كانت مشبعة بالكامل أو في حالة قريبة من التشبع الكلي، وقد بين (Walbert, 2015) أن درجة تشبع الحجارة، وظروف التجمّد، وتشكّل وتوسع الجليد، ترتبط بطبيعة ومورفولوجية شبكة المسامية، أما العمل المدمر للماء فوفق (Domaslowski, 1989) فإنه يعتمد على حجم وشكل المسام وعلى درجة ملئها بالماء والاحتفاظ به، وعلى شدة وتكرار دورات التجمد والذوبان.

² يقصد بديمومة الحجارة قدرتها على مقاومة التغيرات في خواصها تحت تأثير عوامل التلف المختلفة عبر الزمن انظر المرجع: الشلحوط عماد، راتب سطاس محمد، وميرو أسامة، 2007. "تأثير تعاقب التجمد والذوبان في ديمومة الخلطات البيتومينية"، مجلة جامعة دمشق للعلوم والهندسة، المجلد الثالث والعشرون، العدد الأول، ص 11-47.



أما مقاومة الحجارة للفعل المتلف والمدمر للجليد فترتبط بجودة خواصها الجوهرية، فطبيعة التركيبة المعدنية والمواد الرابطة تتحكم في درجة صلابتها، فضلاً عن النسيج الذي يتحكم بدوره في عملية هجرة وتوزيع المياه في الشبكة المسامية ناهيك عن استعادت هذه المياه أثناء أو بين فترات التجمّد (Bost, 2008)، بالإضافة إلى طبيعة المسامية السائدة في الحجارة، فالمخفضة تمنحها مقاومة جيدة، أما المرتفعة فتعطي مقاومة منخفضة، وزيادة على ذلك، فالبيئة التي تقع فيها الحجارة تتحكم تشبعها، وفي شدة ومدة وعدد دورات التجمّد والدوّبان.

في حين ترجع آلية تدهور الحجارة بفعل الجليد لعدة ظواهر فيزيائية، أبرزها الإجهاد الحراري، والتوسع في الحجم المرتبط بتحول الماء إلى جليد، والذي يرافقه زيادة في الحجم تصل إلى 9,1%، هذه الزيادة هي المسؤولة عن الإجهاد المؤدي إلى توسع حجم المسام وتولّد شقوق جديدة أو توسّع تلك الموجودة سابقاً، بالإضافة إلى تأثير هجرة المياه السائلة من المسام الأصغر نحو المسام الأكبر منها، لكونها لا تتجمد في نفس الوقت بسبب اختلاف في درجة الحرارة وظروف الضغط في المسام، إذ يبدأ نمو الجليد في المسام الكبيرة، بينما في الأصغر تبقى المياه سائلة تتدفق في الشبكة المسامية، ما يؤدي إلى اختلال في التركيز، ونتيجة لذلك تهاجر هذه المياه السائلة نحو المسام الكبيرة لإعادة التوازن، ما يؤدي إلى تشكّل جليد إضافي يولد بدوره ضغوطاً هيدروليكية وأسموزية متزايدة قد تدمر البنية الداخلية للحجارة إذا تجاوزت مقاومة تحملها للضغط (Walbert, 2015).

أما بخصوص مظاهر تلف حجارة هياكل مباني الموقع الأثري لجميلة التي تعزى لفعل الجليد، فمن خلال الفحص البصري لهذه المباني نميز أنماط تدهور مختلفة بالرغم من أنها تخضع لنفس الظروف المناخية، وبشكل عام يمكن إجمالها في نوعين من الأضرار: الداخلية والخارجية.

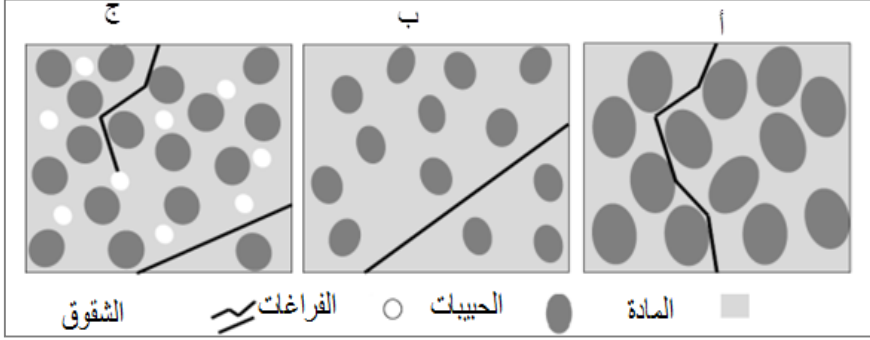
الداخلية تتمثل في التشققات الدقيقة التي تتشكّل في مواضع مختلفة من البنية الداخلية للحجارة كما هو موضح في الشكل رقم 01، والتي قد تكون على حدود الحبيبات المتشكّلة منها أو بين أو داخل الحبيبات نفسها (Bost, 2008)، ويكمن خطرها في امكانيتها أن تتوسع وتنتشر لتمس كامل الحجارة، وبذلك تحد بشكل تدريجي من جودة خواصها الفيزيوميكانيكية، مما يفقدها تماسكها وصلابتها ويقلص من ديموميتها. (Bouteille, 2013)



الشكل رقم 01: يبين انتشار الشقوق داخل البنية المجهرية للحجارة

أ- انتشار التشققات بين الحبيبات،

ب- تشققات على مستوى مصفوفة الحجارة، ج- تشققات على مستوى الحبيبات



Source : Charlotte Walbert, 2015, Endommagement par le gel de pierres calcaires utilisées dans le patrimoine bâti : étude du comportement hydromécanique, thèse de doctorat, université de Cergy-pontoise, France p17.

أما الأضرار الخارجية فتجلى في التقشر الخارجي والتمزق التدريجي للحجارة والانفصال على مستوى مناطق الضعف، والتي غالباً ما تكون على شكل شظايا صغيرة (Ifsttar, 2017)، حيث يلاحظ على الحجارة التّوف الكهفي نمط تدهور عبارة عن تجاويف وثقوب بأحجام مختلفة، ويرجع ذلك لتحلل وانفصال حبيباتها نتيجة فقدانها لمادتها الرابطة، مما أثر سلباً على تماسكها وصلابتها، ويظهر ذلك جلياً في الحجارة المشكّلة لكل من الحمامات الكبرى والكابيتول والمعمودية (اللوحة رقم 01: أ).

أما الحجارة الكلسية ذات اللون الرمادي وحجارة البيوكلاست فتظهر عليها أنماط تدهور تختلف عن تلك الموجودة في حجارة التّوف الكهفي، إذ يحتوي العديد منها على تشققات بأشكال وأحجام واتجاهات وأعماق مختلفة، وفي بعضها الآخر يلاحظ تصدعات وانقسامات بشكل كلي أو جزئي لقطع ذات أبعاد مختلفة بما يعرف بالتجزؤ (ICOMOS – ISCS, 2016)، ويرجع ذلك إلى الضغوط المتولدة بفعل التقلص والارتخاء نتيجة تجمّد وذوبان المحتوي المائي للحجارة بفعل دورات التجمّد والذوبان، حيث يتناسب فتح هذه الشقوق طردياً مع كثافة الجليد، وقد لوحظ ذلك على مستوى كل من قاعدة قوس النصر كركلا، وجدران المعبد السيفيري والمسرح، والنافورة والكابيتول وغيرها من المعالم، غير أن درجة تدهورها متفاوتة حسب حالة حفظ الحجارة وموضعها في البناء (القاعدة، وسط



الجدار، قمة الجدار) كما يظهر في (اللوحة رقم 01: ب)، بالإضافة إلى ذلك، يلاحظ في بعض العناصر المعمارية وكتل الحجارة وجود تشققات أدت إلى انفصالها على شكل انكسار يتبع مواضع الضعف الموروثة سابقاً من فواصل وشقوق وتصدعات (اللوحة 01: ج)، وهذا ما يعزّز تجمع مياه الأمطار والثلوج وتسربها لداخل الحجارة، والتي تتجمد لاحقاً عند انخفاض درجة الحرارة، حيث وفق بيانات مصالح الأرصاد الجوية فإن متوسط درجة الحرارة في فصل الشتاء يتراوح من -7 إلى +17°م، (الديوان الوطني للأرصاد الجوية، 2017).



ج- تصدع الحجارة على مستوى جدار
بالحمامات الكبرى



ب- تشقق الحجارة الكلسية المشكلة لقاعدة
قوس كركلا



أ- تفتت حجارة التّوف لكهفي على مستوى
جدار بالحمامات الكبرى

موساوي، اللوحة رقم 01: تبين مختلف حالات تلف حجارة الموقع الأثري لجميلة

2.2 التحاليل المخبرية

بغرض التحقق من تأثير الجليد على خواص الحجارة المكوّنة لمعالم الموقع الأثري لجميلة، والتنبؤ بمدى صلابتها، قمنا باختبار عينات من ثلاث أنواع من الحجارة الأكثر استخداماً في هذا الموقع، والتي تمتلك خواص مختلفة، ونظراً لحصولنا على ترخيص محدود الاستعمال من الهيئة المسؤولة على تسيير الممتلكات الثقافية المحمية لا يسمح لنا بأخذ العينات من الموقع الأثري، فقد لجأنا إلى أخذ عينات من نفس صنف هذه الحجارة لكن من المحاجر التي جلبت منها اعتماداً على الدّراسة التي انجزت لتحديد أنواع

ومصدر حجارة الموقع الأثري في إطار مشروع MEDISTONE (Dessandier, Hamiane, Khalafallah, et al, 2008).

إذ يتمثل النوع الأول في حجارة كلسية صلبة ذات لون رمادي وحبيبات ناعمة (ع1) جلبت من محجر يقع جنوب الموقع الأثري بجبل جميلة، أما النوع الثاني فيتمثل في حجارة البيوكلاست الرمادية، ذات الحبيبات الناعمة (ع2)، جلبت من محجر يقع جنوب شرق



الموقع الأثري بجبل سيدي سعدون، أما النوع الأخير فهو عبارة عن حجارة من نوع التوف الكهفي أو الحرماي (ع3)، جلبت من مقلع حجري يتواجد غرب الموقع الأثري، وبالضبط في الضفة الجنوبية لواد الرّتين، بالقرب من منبع مائي حار مستغل حاليا كحمام معدني، ولقد اختيرت العينات في حالة حفظ جيدة.

1.2.2 التركيبة الكيميائية

تم تعيين التركيبة الكيميائية للعينات بمخبر المركز الوطني للبحث العلمي والتقني للتحاليل الفيزيائية والكيميائية بوسماعيل بتيبازة، بواسطة جهاز التحليل المعروف باسم «Spectromètre de fluorescence des rayons x، من نوع ZSX Primus II» Rigaku، النتائج المتحصل عليها موضحة في الجدول رقم 01.

الجدول رقم 01: نتائج التحليل التركيبة الكيميائية لعينات من الحجارة

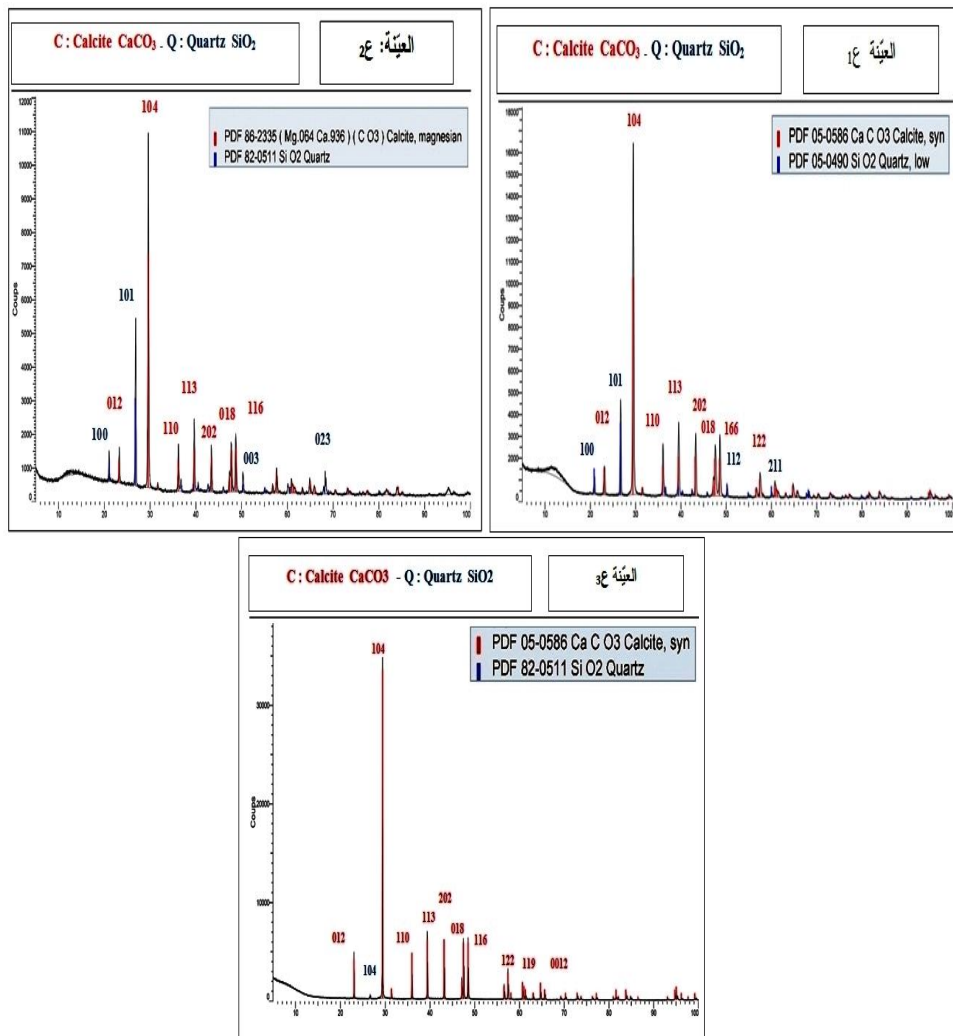
TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	FeO ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	التركيب الكيميائي العينّة المرجعية
0,02	0,05	0,25	0,01	0,01	0,32	0,17	0,40	1,23	54,10	ع 1
0,02	0,19	0,11	0,01	0,04	0,37	1,06	0,86	18,55	42,87	ع 2
0,02	0,07	0,31	0,01	0,01	0,30	0,73	0,67	9,77	49,36	ع 3

2.2.2 التركيبة المعدنية

أجرينا تحليل تحديد التركيبة المعدنية على مستوى مخبر المركز الوطني للبحث العلمي والتقني للتحاليل الفيزيائية والكيميائية بوسماعيل، باستخدام جهاز حيود الأشعة السينية (Diffractomètre Bruker D8 Advance A 25)، الذي يعمل وفق طريقة Brentano-Bragg، البرنامج المعالج DIFFRC.EVA V4.0، النتائج المتحصل عليها ممثلة في الشكل رقم 02.



الشكل رقم 02: رايدوغرام للعينات الحجرية المدروسة

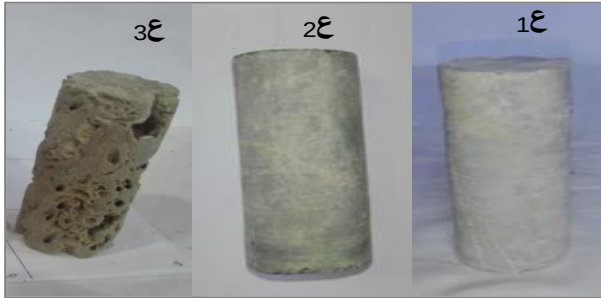


3.2.2 اختبار التجمد والذوبان

يكمُن الغرض الأساسي من اختبار الشيخوخة الاصطناعية عن طريق دورات التجمد والذوبان المُسرَّعة في تقدير نسب التغيّرات التي تطرأ على الخواص الفيزيوميكانكية للحجارة، وذلك وفق شروط تجريبية تأخذ بعين الاعتبار الظروف المناخية للمنطقة، بالإضافة إلى تكييف شروط المعيار الأوروبي الخاص بتحديد مقاومة الحجارة الطبيعية



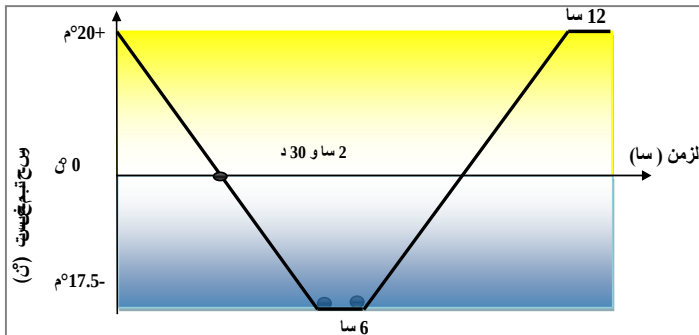
للجليد (NF EN 12371(2010). ولقد تم تحضير عيّينات الاختبار بإعطائها شكلاً أسطوانياً يبلغ قطرها 4,50 سم وارتفاعها 9,00 سم (الصورة رقم 01)، بعدها تم غمر العينات في الماء العادي في الظروف الطبيعية في درجة حرارة المخبر ($24 \pm 2^\circ\text{C}$)، وفي الضغَط الجوي لمدة 48 ساعة، في حين عملية التجمّد والذوبان تتم في الهواء في غرفة تبريد مجهزة بوحدة تحكم في درجة الحرارة.



موساوي، الصور رقم 01: تبين نماذج من عيّينات الحجارة المدروسة

وقد استغرقت مدة عملية التجمّد والذوبان 12 ساعة، بمعنى ستة (6) ساعات لكل مرحلة، بدرجة حرارة بين ($+20^\circ\text{C}$ إلى $-17,5^\circ\text{C}$) ثم العكس، ويتم الاحتفاظ فيها بدرجة حرارة ثابتة لمدة ساعة واحدة عند العتبة ($-17,50^\circ\text{C}$ ، و $+20^\circ\text{C}$) كما هو مبين في مخطط الدورة النظرية الممثلة في الشكل رقم 03، وقد تم تطبيق 14 دورة تجمد وذوبان للعينات، وفي نهاية الاختبار يتم اخضاع العينات للفحوصات اللازمة لتقدير المسامية، الامتصاص، الكثافة، واختبار المقاومة الميكانيكية عن طريق الضغَط أحادي المحور (RC)، وسرعة انتشار الموجة فوق الصوتية (V_p).

الشكل رقم 03: يوضح مخطط الدورة النظرية للتجمد والذوبان



4.2.2 بروتوكولات تعيين الخواص الفيزيوميكانيكية للعينات

تُعد دراسة الخصائص الفيزيائية³ (الكثافة، المسامية وامتصاص الماء)، والميكانيكية (سرعة الموجة فوق الصوتية، والمقاومة الميكانيكية للضغط (Rc)) للحجارة، قبل وبعد إخضاعها للتلف المخبري من العمليات الهامة التي تعطي مؤشرات حول التغيرات التي تحدث لها، وقد اتبعنا طرق التعيين الآتية:

1.4.2.2 الكثافة الجافة (ρ_{dry})

يعبر عنها بوحدة كتلة المادة على وحدة الحجم، وهي تقدر بـ (غ/سم³)، فضلاً عن أنها تعتمد بشكل أساسي على تركيبها الكيميائي والبلوري، والمسامية، والشقوق، وفي نفس الوقت تؤثر بشكل كبير على الصفات الميكانيكية للحجارة، حيث تزداد هذه الصفات مع زيادة الكثافة (عبود الجبوري، محمد احمد، وإبراهيم اللهيبي، 2015)، وتعتبر الحجارة صلبة إذا كانت كثافتها بين 2,8 و 3,5 غ/سم³، أما إذا كانت أقل من 2,5 غ/سم³، فتعد عندئذ هشة ضعيفة التماسك (محمد عبد الله، 2012)، ولتقدير كثافة العينات نطبق العلاقة التالية:

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

حيث: M_{dry} : كتلة العينة الجافة بـ (غ)، M_{sat} : وزن العينة المشبعة بالماء (غ)،

M_{sub} : وزن العينة المغمورة بالماء (غ)، ρ_w : الكثافة الكتلية للماء بـ (غ/سم³).

2.4.2.2 نسبة امتصاص الماء (Ab)

تتعلق شدة التدهور بفعل الجليد على كمية الماء الموجود داخل العينات قبل التجمّد أو أثناء عملية تشكل الجليد، لذا فتحدد نسبة امتصاص الماء لهذه العينات قبل وبعد إخضاعها لدورات التجمد والذوبان يعد أمراً بالغ الأهمية، وتُعرف خاصية امتصاص الحجارة بقدرتها على جذب السوائل بين مساماتها، وهي تلعب دوراً كبيراً في زيادة تشبع الحجارة، مما يؤثر على درجة صلابتها ومقاومتها، إذ تقل الخواص الميكانيكية بازدياد

³- يتم تعيين الخواص الفيزيائية لعينات الدراسة بطريقة الأوزان الثلاثة (الجافة، والمشبعة والمغمورة).



نسبة الامتصاص (عبود الجبوري، محمد احمد، وإبراهيم اللهيبي، 2015)، وتعطى هذه النسبة بالعلاقة التالية:

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

حيث: M_d : وزن العينة الجاف (غ)،

M_s : وزن العينة وهي مشبعة بالماء (غ).

3.4.2.2 المسامية الكلية (Nt)

تعرف المسامية بشكل عام بأنها النسبة المئوية بين حجم الفراغات الموجودة على الحجم الكلي للمادة، ويتم تعيينها بتطبيق العلاقة التالية:

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

حيث: M_s : وزن العينة مشبعة (غ)،

M_h : الكتلة الهيدروستاتيكية (غ)،

M_d : الكتلة الجافة (غ).

4.4.2.2 المقاومة الميكانيكية للضغط

بعد تحضير العينات بإعطائها شكلاً اسطوانياً (قطر 45 ملم وارتفاع 90 ملم)، ووضعها في جهاز الضغط من نوع CONTROLAB المكون من صفيحتين معدنيتين متوازيتين موصولتين بعدد إلكتروني، ثم نقوم بالضغط على زر التشغيل لتبدأ الصفيحة العليا بالضغط على العينات والتي تتوقف بشكل أوتوماتيكي عندما تنشق العينات، وعندئذ يعطي العداد قيمة معينة.

5.4.2.2 سرعة الموجة فوق الصوتية (Vp)

يعتبر هذا الفحص أحد أبرز تقنيات القياس غير المتلفة التي استخدمت في عملية تشخيص حالة الصخور الطبيعية والحجارة المستخدمة في البناء من منظور التجانس ودرجة التلف (Azzedine, 2005)، ولقد قمنا بتعيين سرعة الموجة Vp للعينات وفق معيار EN12504-4 (2005)، باستخدام جهاز قياس الموجة من نوع (B-PROCEQ, PUNDIT LAB+) (048/P) الدقة $(\pm 0.1 \mu s)$.



3.2 نتائج التحاليل

نلخص فيما يلي أهم النتائج المحصل عليها من التحاليل المخبرية المنجزة:

1.3.2 نتائج الخصائص الفيزيائية والميكانيكية قبل دورات التجمد والذوبان

يلخص الجدول رقم 02 أهم النتائج المتحصل عليها.

الجدول رقم 02: أهم نتائج الاختبارات الفيزيوميكانيكية قبل دورات التجمد والذوبان

نوع الاختبار	العينة		
	1ع	2ع	3ع
وزن العينات (غ)	381,70	350,65	374,50
الكثافة الجافة (غ/سم ³)	2,65	2,61	2,09
المسامية الكلية (%)	4,16	1,88	21,07
امتصاص الماء (%)	1,68	0,75	13,28
سرعة الموجة الصوتية vp (م/ثا)	5660	6125,98	2448,00
المقاومة الميكانيكية (Mpa)	55,70	47,88	0

2.3.2 نتائج الخصائص الفيزيوميكانيكية للحجارة بعد دورات التجمد

والذوبان

لقد أفضت تجارب تحديد الخواص الفيزيوميكانيكية للعينات بعد اخضاعها لدورات التجمد والذوبان إلى النتائج المخصصة في الجدول رقم 03.

الجدول رقم 03: أهم نتائج الخصائص الفيزيوميكانيكية للعينات بعد اخضاعها

لدورات التجمد والذوبان

نوع الاختبار	العينة		
	1ع	2ع	3ع
وزن العينات (غ)	374,50	349,55	120,55
الكثافة الجافة (غ/سم ³)	2,65	2,67	2,11
المسامية الكلية (%)	4,98	2,32	29,66
امتصاص الماء (%)	1,99	0,89	20,24
سرعة الموجة الصوتية vp (م/ثا)	5241,67	5916,00	2249,00
المقاومة الميكانيكية (Mpa)	47,36	39,18	0



3. المناقشة

يتبين من دراسة نتائج التركيبة الكيميائية للعينات المدروسة (الجدول رقم 01) أنها تحتوي على نسب كبيرة من أكسيد الكالسيوم تتراوح بين 42,87 إلى 54,10%، مع نسب متوسطة من الكوارتز من 1,23 إلى 18,55%، وأكسيد الألومين Al_2O_3 من 0,40 إلى 0,86%، وأكسيد الحديد Fe_2O_3 من 0,17 إلى 1,06%، أما بقية العناصر فتوجد بنسب ضعيفة تتراوح بين 0,01 إلى 0,32%، وهو ما جعل العينات ذات طبيعة بلورية عالية جداً. وقد بينت نتائج التركيبة المعدنية المبينة في الشكل رقم 01 أن العينة (ع₁) تتكون بشكل أساسي من معدن الكالسيت بنسبة 84,30%، وهذا ما تدل عليه ذروات عند الزاوية (122، 104، 110، 113، 20، 116، 018، 018) بشدة وسعة كبيرتين، كما يتبين أن المعدن الوحيد المصاحب للكالسيت هو الكوارتز، لكنه يوجد بنسبة قليلة تقدر بـ 15,70%، وهذا ما تؤكد منحنيات الانعكاس عند الزاوية θ_2 (101، 112، 211، 100)، أما بالنسبة للعينة (ع₂) فتتكون من كربونات المغنسيوم $Mg_0.64$ (CO_3) (Ca.936) بنسبة تصل إلى 72,70%، ويدل على ذلك الذروات عند الزاوية θ_2 (110، 113، 202، 116، 018، 104، 012) بشدة وسعة كبيرتين، في حين الكوارتز يوجد بنسب قليلة تقدر بـ 27,30% وفق ما يظهر من منحنيات الانعكاس عند الزاوية θ_2 (100، 101، 003، 023)، في حين العينة (ع₃) تحتوي على معدن الكالسيت بنسبة مرتفعة جداً تصل إلى 99,40%، مع نسبة قليلة جداً من الكوارتز 0,60%، حيث يلاحظ عدة ذروات تخص $CaCO_3$ عند الزاوية θ_2 (113، 202، 110، 012، 119، 012، 199، 012، 211، 122، 116، 018، 110) شدة وسعة كبيرتين، مع وجود ذروة وحيدة لمعدن SiO_2 أقل حدة عند الزاوية θ_2 (104)، كما يلاحظ عدم وجود أي قمم للحديد أو عناصر أخرى وهذا راجع لتراكيزها الضعيفة.

وتبرز نتائج الكثافة الجافة للعينات قبل وبعد إخضاعها لدورات التجمد والذوبان بأنها تزداد مع ازدياد دورات التجمد والذوبان، وهذه الزيادة تختلف حسب نوع الحجارة، إذ يلاحظ في العينة (ع₁) أن الكثافة لم تتغير، بينما للعينة (ع₂) سجلت زيادة متوسطة نسبة 2,32%، أما العينة (ع₃) فسجلت زيادة طفيفة جداً تقدر بنسبة 0,96%، وهذا راجع لطبيعة تكوينها المعدني ودرجة تبلور حبيباتها المعدنية فضلاً عن ماتها الرابطة.



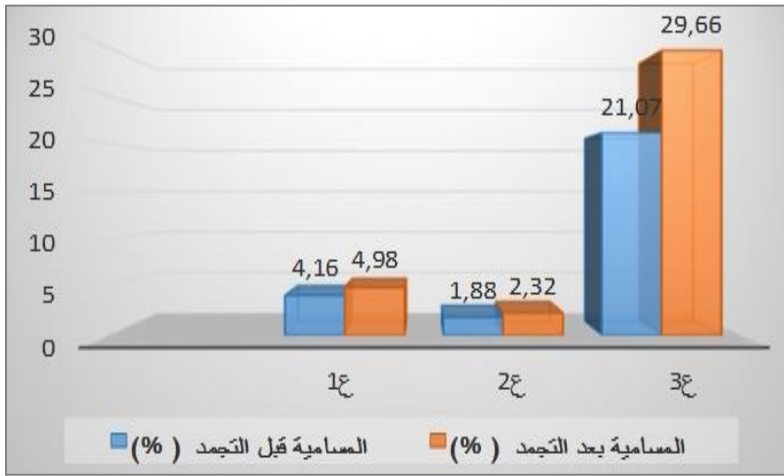
ويُعتبر فقدان الوزن من المؤشرات الدالة على تدهور الحجارة، إذ يتم حسابه عن طريق تقدير فرق الوزن للعينات قبل وبعد دورات التجمّد والذوبان، النتائج المبينة في الجدولين رقم 2 و3، إذ يتبيّن منهما أن العيّنة (ع₃) سجلت أكبر فقدان للوزن بنسبة تقدر بـ 5,86%، تليها العيّنة (ع₁) بنسبة فقدان تقدر بـ 1,89%، وفي المرتبة الأخيرة تأتي العيّنة (ع₂) بنسبة فقدان تقدر بـ 0,31%.

ولا شك أن طبيعة الوسط المسامي تساهم بدرجة كبيرة في تحديد درجة صلابة الحجارة ومتمانتها، حيث تظهر هذه النتائج امتلاك كل من العيّنة (ع₁) و(ع₂) مسامية إجمالية منخفضة قدرت بـ 4,16%، و 1,88% على التوالي، وهذا ما يجعل شبكة مساميتها لا تسمح بملء جميع المسام تقريبا، أما بالنسبة للعيّنة (ع₃) فلديها أعلى مسامية كلية مقارنة مع جميع الحجارة المدروسة، والتي قدرت بـ 21,07%، ويرجع ذلك نتيجة امتلاكها شبكة مسامية وتجاويف تسمح لها بملء جميع المسام تقريبا وبالتالي يكون تشبعها مرتفع جدا.

في حين تظهر نتائج المسامية للعينات بعد إخضاعها لدورات التجمّد والذوبان الممثلة في الشكل رقم 03 إلى زيادة متباينة بعد كل دورة تجمد وذوبان، فبالنسبة للعيّنة (ع₁) كانت في بداية الاختبار 4,16% ثم بدأت بالارتفاع لتصل إلى أعلى قيمة لها 4,98% في الدورة 14 أي بنسبة زيادة تقدر بـ 19,71%، في حين العيّنة (ع₂) كانت 1,88% والتي بدأت بالارتفاع لتصل أعلى مستوى لها بـ 2,32%، أي بنسبة زيادة قدرت بـ 23,40%، أما العيّنة (ع₃) فقد كانت 21,07% لترتفع إلى أعلى مستوى لها في الدورة 14 بـ 29,66% بأكبر نسبة بـ 40,78%، ومن خلال ذلك نستخلص أن المسامية ارتفعت بعد دورات التجمد والذوبان لجميع الحجارة المدروسة على اختلاف خواصها، وترجع ذلك لزيادة إلى ازدياد حجم المسامات والتشققات.



الشكل رقم 03: يبين تطور المسامية قبل وبعد دورات التجمد والذوبان



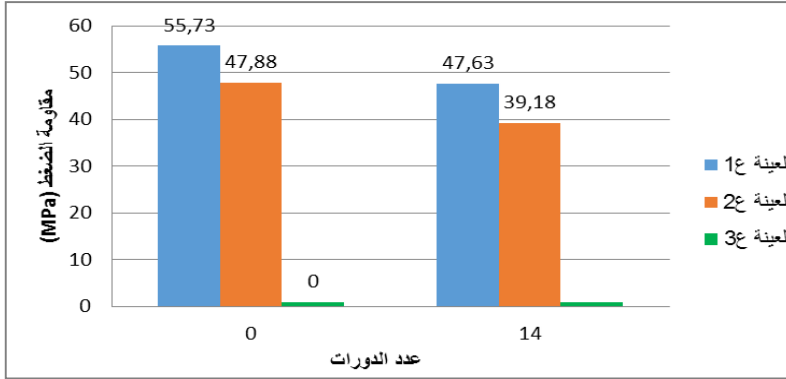
ويلاحظ من الجدولين رقم (2و3) أن العينتين 1ع و2ع لديهما نسبة امتصاص منخفضة تتراوح بين 0,75 إلى 2 % عكس العينة 3ع التي تمتلك أكبر نسبة امتصاص تقدر بـ 13,28 %، كما يتبين أن نسبة الامتصاص ازدادت بعد دورات التجمد، حيث سجلت أعلى قيمة لها في العينة (3ع)، والتي ارتفعت من 13,28 إلى 20,24 %، أي بزيادة تقدر بنسبة 52,37 %، تليها العينة (2ع) بزيادة بنسبة 19,44 %، بينما تأتي في المرتبة الأخيرة العينة (1ع) التي ارتفعت من 1,68 % إلى 1,99 % أي بنسبة تقدر بـ 18,36 %، ومن خلال هذه النتائج يمكن القول أن دورات التجمد والذوبان أثرت بشكل كبير على خاصية امتصاص الماء للعينات، ويمكن تفسير هذا الارتفاع نتيجة زيادة حجم المسام، وتولد الشقوق و/أو اتساع تلك الموجودة، فضلاً عن تحلل مكونات الحجرة القابلة للذوبان (الكالسيوم)، وهذا يتوافق مع حالة تدهور العينات بعد دورات التجمد والذوبان.

أما بخصوص تأثير دورات التجمد والذوبان على المقاومة الميكانيكية للحجارة فتشير نتائج قياس مقاومة الضغط أحادي المحور للعينات قبل وبعد دورات التجمد والذوبان كما هو مبين في الشكل رقم 04، أن الحجرة من نوع (1ع) سجلت انخفاضاً للمقاومة من 55,76 إلى 47,63 Mpa، أي بخسارة تقدر بنسبة بـ 14,52 %، أما الحجرة من نوع (2ع) فعرفت أكبر نسب فقدان للمقاومة من العينة (1ع) حيث انخفضت من 47,88 إلى 47,63 Mpa بخسارة تقدر بنسبة 16,90 %، كما يجدر الإشارة إلى أنه لم يتمكن من الحصول على نتيجة للعينات (3ع) التوف الكهفي، فبالرغم من تدمير العينات إلا أن جهاز قياس



الضغط لم يسجل أي قيمة، ويرجع ذلك لهشاشة وضعف هذه العينات، ونستخلص من هذه النتائج أن المقاومة تناقصت بعد دورات التجمد والذوبان في جميع عينات الحجارة، وهذا راجع لزيادة المسامية وتشكل الشقوق و/أو توسع تلك الموجودة، مما أفقد العينات صلابتها وتماسكها.

الشكل رقم 04: نتائج اختبارات مقاومة الضغط أحادي المحور قبل وبعد دورات التجمد



وتتبن نتائج قياس سرعة الأمواج فوق الصوتية للعينات بعد دورات التجمد والذوبان في الجدول رقم 03 أن جميع العينات أظهرت خسارة في سرعة الموجة v_p مقارنة بسرعتها الأولية المبينة في الجدول رقم 02، حيث فقدت العينة (ع3) أكبر خسارة من (2448,00 إلى 2249,00 م/ثا)، أي بنسبة تقدر بـ 8,13 %، تليها العينة (ع2) بنسبة فقدان 3,43 % من (6612,98 إلى 5916,00 م/ثا)، وفي المرتبة الأخيرة العينة (ع1) بأقل خسارة تقدر بـ 3,19 % من (5414,25 إلى 5241,67 م/ثا)، ومن خلال هذه النتائج يمكن القول بشكل عام أن العينات (ع1) و (ع2) تعتبر حجارة صلبة ومقاومة مقارنة مع العينة (ع3) التي سجلت أعلى نسبة فقدان للسرعة الامواج الصوتية، غير أن عدد دورات التجمد والذوبان المطلوبة للوصول إلى هذه القيم يختلف من عينة إلى أخرى، ويرجع هذا الانخفاض نتيجة زيادة حجم الفراغات وتكوين شقوق مجهرية و/أو توسع تلك الموجودة.



خاتمة

أظهرت هذه الدراسة أن الجليد يُعد من أخطر عوامل التلف المناخية، حيث يعمل على إتلاف الحجارة أو خفض خواصها لتهيئتها لمراحل متقدمة من الضعف، ويزداد تأثيره حسب صلابة الحجارة ودرجة تشبعها بالماء ومدة وعدد دورات التجمد والذوبان. فبالرغم من أن عيّنات الحجارة الكلسية التي تمت دراستها متماثلة تقريبا من ناحية التركيبة المعدنية، وخضوعها لنفس عدد دورات التجمد والذوبان إلا أن حجم وحركية ومعدل تدهورها كان مختلفًا، وبشكل عام يمكن اجمال أهم التلف الذي يلحق بالحجارة بفعل الجليد فيما يلي:

- فقدان الحجارة لصلابتها والذي يترجم بفقدانها لحجمها وانخفاض وزنها وأحيانا تناقص أبعادها؛
- التغير في مورفولوجية شبكة المسامية من خلال زيادة المسامية ونسبة الامتصاص بنسب مختلفة حسب نوع الحجارة نتيجة زيادة حجم المسام؛
- فقدان الخواص الميكانيكية المترجم بانخفاض مقاومة الضغط وسرعة الموجة فوق الصوتية نتيجة زيادة حجم المسام وتوسع الشقوق الموجودة وتشكل شقوق جديدة؛
- تتعرض الحجارة المستخدمة في الموقع للتلف في إحدى أوجهها، نتيجة تشكّل جبهة تلف واحدة، أما في الاختبارات المعملية فتتعرض جميع أوجه العيّنات للتلف، والانخفاض الطفيف للخواص الفيزيوميكانيكية المسجل في عيّنة الحجارة الكلسية (١٤)، وحجارة البيوكلاست (٢٤)، فهو مؤشّر على مقاومتها الميكانيكية الجيدة، وهذا ما يفسر بقاء المعالم الأثرية المشيّدة من هذه الحجارة في حالة جيدة نوعاً ما، في حين الحجارة الكلسية من نوع التّوف الكهفي (٣٤) فتعد أضعف أنواع الحجارة وأكثرها تأثراً بالجليد، وهذا ما يفسر تدهور المعالم المشيّدة بهذه النوعية من الحجارة في الموقع الأثري، وعليه يمكن القول أن حجارة التوف الكهفي تفقد صلابتها بشكل أسرع مما يجعلها مهددةً بالزوال، لذا فهي تتطلب حماية خاصة، وعليه نوصي بإتباع استراتيجية تقوم على الوقاية من خلال علاج الشروخ والشقوق والثقوب والتجوفات بسدّها بملاط مدعم بالراتنجات الصناعية، إلى جانب تثبيت الأجزاء المنفصلة باستخدام مواد لاصقة، وتدعيم وتقوية الأجزاء الهشة والضعيفة والمتآكلة، واستبدال الحجارة المتدهورة.



المراجع

1. محمد عبد الله إبراهيم، 2012. ترميم الآثار الحجرية، دار المعرفة الجامعية، مصر.
2. الشلحوط عماد، راتب سطاس محمد، وميرو أسامة، 2007. " تأثير تعاقب التجمد والذوبان في ديمومة الخلطات البتومينية"، مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية، المجلد الثالث والعشرون، العدد الأول، دمشق، ص 11-47.
3. راشد عبود الجبوري محمد، محمد احمد أميد، وحميد إبراهيم اللهيبي إبراهيم، 2015. "صلاحية صخور تكوين انجانة الرملية لأغراض البناء وكحجر تحكيم للسكك الحديدية في منطقة فيتول محافظة السليمانية"، مجلة تكريت للعلوم الصرفة، المجلد 20، العدد 5، العراق، ص 106-116.
4. أرشيف الديوان الوطني للأرصاد الجوية بالجزائر العاصمة، 2017.
5. Azzedine Rana, 2009. *Endommagement des monuments historiques en maçonnerie*, thèse de doctorat, université Bordeaux I, France.
6. Badosa Sarah janvier, 2012. *Le carnet de santé d'un monument, application au château de Chambord*, thèse de doctorat, université d'Orléans, France.
7. Bost Marion, 2008. *Altération par le gel des massifs rocheux: étude expérimentale et modélisation des mécanismes de génération des contraintes dans les fissures*, thèse de doctorat, école nationale des ponts et chaussées, France.
8. Bouteille Sébastien, 2013. *Outils de caractérisation et analyse du comportement des matériaux cimentaires soumis à des cycles de gel-dégel en présence des sels*, thèses de doctorat, université Paris-est, France.
9. Dessandier F.; Hamiane M.; Khalafallah C.; et all, 2008. *Atlas des pierres ornementales et de construction du site antique de Djemila, projet Medistone (programme de recherche FP6-2003, BRGM)*, France.
10. Domaslawski Wieslaw, 1982. *Conservation préventive de la Pierre*, UNESCO, Paris.
11. Duval N., 1995. Djemila, Encyclopédie berbère, Djalut – Dougga, Volumes 16, pp2442-2449.
12. ICOMOS –ISCS, 2016. *Illustrated glossary on stone détérioration patterns, engliche-arabe version*، L'office des publications universitaires, Alger .
13. Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar), 2017. *Diagnostic de la gélivité d'un béton*, France.
14. Norme NBN EN 12371, 201. *Méthodes d'essai pour les pierres naturelles, détermination de la résistance au gel*, comité européen de normalisation (CEN), Bruxelles.



15. Thomachot Céline, 2002. *Modifications des propriétés pétrophysiques des grès soumis au gel ou recouverts "d'encroûtements noirs vernissés"*, thèse de doctorat, université Louis pasteur de Strasbourg, France.
16. Walbert Charlotte, 2015. *Endommagement par le gel de pierres calcaires utilisées dans le patrimoine bâti : étude du comportement hydromécanique*, thèse de doctorat, université de Cergy-pontoise, France.
17. <https://www.scribblemaps.com/create/#/lat=36.63757009&lng=4.61975098&z=8&t=hybrid> (Consulté le 10/10/2019).

